

2019년도 제59회 추계학술대회

# 59<sup>th</sup> KOSCO SYMPOSIUM

초록집

2019. 11. 14(목) ~ 16(토)

제주 KAL호텔

주관.  사단법인 한국연소학회  
The Korean Society of Combustion

후원.  KOMIPO 한국중부발전  Hanwha Aerospace  DOOSAN

 CATech  (주) 한백교역 HANBEK CORPORATION  FEP 융합연구단



◀ 웹 프로시딩 보기  
<http://symposium.jkosco.org>



사단법인 한국연소학회  
The Korean Society of Combustion



## I 진행 일정

일 시 \_ 2019년 11월 14일(목)~16일(토)

장 소 \_ 제주 KAL호텔 2층 강연장

11월 14일(목)						
12:00~13:00	2019년 4차 이사회 (호텔19층 심향)					
Room	제 1 발표장 (그랜드볼룸A)	제 2 발표장 (무궁화)	제 3 발표장 (로즈룸)	제 4 발표장 (동백룸)	제 5 발표장 (그랜드볼룸B)	
13:00~14:20 (80분)	SESSION 1 연소불안정 I 좌장: 신동혁	SESSION 2 석탄연소 I 좌장: 양 원	SESSION 3 화재 좌장: 이상민	SESSION 4 연소응용 I 좌장: 윤성환	2019 산업미세먼지 기술정책 포럼 주최/주관: 산업부/ 한국생산기술연구원 산업미세먼지 저감기술센터	
14:30~15:50 (80분)	SESSION 5 연소불안정 II 좌장: 김대식	SESSION 6 석탄연소 II 좌장: 임 호	SPECIAL SESSION 김석준 박사님 퇴임기념 좌장: 송영훈	SESSION 7 연소응용 II 좌장: 이중성		
16:10~16:40	[초청 강연 1] Fire safety standard in space environments -flame spread in micro/reduced gravity - Prof. Shuhei Takahashi (Gifu University) 좌장: 박 정					
16:40~17:10	[초청 강연 2] Recent advances in plasma-assisted combustion for gas turbine applications - Prof. Deanna Lacoste (KAUST) 좌장: 도형록					
17:10~17:40	[초청 강연 3] 한국기계연구원과 나의 연소 연구 - 김석준 연구위원 (한국기계연구원) 좌장: 이상민					
18:30~20:30	정기총회 및 만찬 (호텔2층 그랜드볼룸) 진행: 이민철					

**11월 15일(금)**

08:30~09:00	2019년 제4회 편집위원회 개최 (1층 한라 레스토랑)				
Room	제 1 발표장 (그랜드볼룸)	제 2 발표장 (무궁화)	제 3 발표장 (로즈룸)	제 4 발표장 (동백룸)	리셉션 홀
09:00~10:40 (100분)	SESSION 8 총류화염 I 좌장: 김남일	SESSION 9 버너/연소기 좌장: 최병철	SESSION 10 내연기관 좌장: 박성욱	SESSION 11 기초화염 좌장: 이기웅	<b>견학프로그램:</b> 한국중부발전 제주발전본부
10:50~12:00 (80분)	SESSION 12 총류화염 II 좌장: 윤성환	SESSION 13 고체연료연소/ 점화 및 화학반응 I 좌장: 이대근	SPECIAL SESSION IEA COMBUSTION TCP 특별세션 - 대체연료 좌장: 배종식	SESSION 14 산업 미세먼지 좌장: 이창엽	홈페이지 사전신청 ( <a href="https://kosco.or.kr/">https://kosco.or.kr/</a> ) [중부발전투어신청] 사무국 사전신청 ~11월 1일까지 (25명 이내)
12:00~12:50	중 식 (호텔2층 한정식 사라)				
12:50~13:20	[초청 강연 4] 친환경 발전소로 전환을 통한 청정제주 구현 - 이호태 발전환경처장 (한국중부발전) 좌장: 류창국				
13:20~13:50	[초청 강연 5] 산업용 보일러 저NOx 연소 기술 현황 - 박재언 대표이사 (수국) 좌장: 이기만				
14:00~15:20 (80분)		SESSION 15 고체연료연소/ 점화 및 화학반응 II 좌장: 손채훈	SESSION 16 공해물질/산업로 좌장: 박설현	SESSION 17 가스터빈/ 연소시스템 좌장: 유춘상	<b>포스터 / 가시화사진전</b> 좌장: 이병준, 차동진

**11월 16일(토)**

산학연 패널토론 좌장: 이기만

## Special Session

일시 \_ 2019년 11월 14일(목)

장소 \_ 제 3 발표장 (로즈룸)

### S-Session 1

김석준 박사님 퇴임기념 14:30~15:50 좌장: 송영훈(한국기계연구원)

SS1-01	플라즈마 연료개질을 활용한 대기오염 저감연구 - 송영훈, 이대훈, 김석준(한국기계연구원)
SS1-02	폐자원에너지 기술의 미래 방향 - 윤용승(고등기술연구원)
SS1-03	파일럿 스케일 버너에서 커피찌꺼기 바이오원유의 연소 특성에 관한 연구 - 최상규(한국기계연구원)
SS1-04	가정용 가스보일러의 친환경 기술개발 동향 - 장기현(귀뚜라미)

## Special Session

일시 \_ 2019년 11월 15일(금)

장소 \_ 제 3 발표장 (로즈룸)

### S-Session 2

IEA COMBUSTION TCP 특별세션 - 대체연료 10:50~12:00 좌장: 배충식(KAIST)

SS2-01	대체연료 엔진 연소 기술 동향 - 배충식(한국과학기술원)
SS2-02	합성가스이용 엔진발전 기술 - 오승묵, 김창업, 이용규, 박현욱(한국기계연구원), 이준순(과학기술연합대학원)
SS2-03	예혼합가스 스파크 점화와 화염전파에 관한 연소공학적 이해 - 김남일(한국과학기술원)
SS2-04	단일연료체계를 위한 대형 압축착화엔진에서의 JP-8 연소 특성 - 나용현, 김우영, 배충식(한국과학기술원)

## 2019 산업미세먼지 기술정책 포럼

일시 \_ 2019년 11월 14일(목)  
 장소 \_ 제 5 발표장 (그랜드볼룸B)  
 주최 \_ 산업통상자원부  
 주관 \_ 한국생산기술연구원 산업미세먼지저감기술센터  
 만찬장소 \_ 무궁화

구분	시간	행사내용	비고
1부 Prologue (60분)	13:30~14:00	등록	행사장 로비
	14:00~14:05	개회선언, 개회사	산업미세먼지저감기술센터 (산업통상자원부)
	14:05~14:10	센터소개 및 운영현황	산업미세먼지저감기술센터
	14:10~14:30	<b>[초청강연 1]</b> - 대기 미세먼지 라이프 사이클 및 예측 모델링에 대한 고찰	이창언 교수 (인하대학교)
	14:30~14:50	<b>[초청강연 2]</b> - 통합환경관리제도에서 미세먼지 저감을 위한 업종별 BAT-AEL 산정기준	배연정 박사 (서울대학교)
	-	포토타임	-
2부 산업계 현황 (80분)	15:00~15:20	<b>[총괄발표]</b> - 제조산업 미세먼지 저감 기술개발 현황(사업총괄)	김홍대 센터장 (산업미세먼지저감기술센터)
	15:20~15:40	<b>[기술발표 1]</b> - 철강분야 미세먼지 저감기술 적용현황	차광서 책임 (현대제철)
	15:40~16:00	<b>[기술발표 2]</b> - 발전분야 미세먼지 저감기술 적용현황	서주식 차장 (한국남부발전(주))
	16:00~16:20	<b>[기술발표 3]</b> - 조선분야 미세먼지 저감기술 적용현황	김도윤 책임 (한국조선해양)
3부 패널토의 (60분)	16:20~16:30	Coffee Break & 네트워킹	-
	16:30~17:30	<b>[패널토론]</b> - 주제: 미세먼지 정부정책방향과 산업계 대응기술 전략 - 좌장: 김종민 박사(한국생산기술연구원) - 패널: 이창언 교수(인하대) 배연정 박사(서울대) 차광서 책임(현대제철) 김도윤 책임(조선해양) 김홍대 센터장(산업미세먼지저감기술센터)	총 6명
	17:30~	폐회	-

## Oral Session

일시 \_ 2019년 11월 14일(목)

장소 \_ 제 1 발표장 (그랜드볼룸A)

Session 1	
연소불안정 I 13:00~14:20 좌장: 신동혁(KAIST)	
S1-01	음향적 커플링이 연소특성에 미치는 영향 - 황동현, 박수진, 안규복(충북대)
S1-02	환형연소기에서의 음향적 불안정성에 관하여 당량비 변화를 통한 대칭성 파괴의 효과 - 김재현, 이희도, 이기만(순천대)
S1-03	마이크로믹서 타입 모형 가스터빈 연소기의 화염 응답 특성 - 이태송, 진욱화, 강혜빈, 김규태(한국과학기술원)
S1-04	모델 가스터빈 연소기에서 크로스톡을 통한 음향 소산이 연소기 상호작용에 미치는 영향 - 문기훈, 김규태(한국과학기술원)

Session 5	
연소불안정 II 14:30~15:50 좌장: 김대식(강릉원주대학교)	
S5-01	연소기의 저주파 공진에 관한 분석 - 김선영, 윤명곤, 김대식(강릉원주대)
S5-02	LDI 가스터빈 연소기에서 연료와 공기의 혼합에 따른 연소불안정 특성에 관한 연구 - 광상혁(서울대), 주성필(인천대), 안명근, 최재홍(서울대), 이민철(인천대), 윤영빈(서울대)
S5-03	FilterBank를 이용한 연소 불안정 평가 기법에 관한 연구 - 최종운, 주성필, 이민철, 김남근(인천대)
S5-04	모사 가스터빈 연소기내에서 음압 가진 실험을 통한연소동압 계측 적정성 연구 - 동압 측정위치에 따른 신호 계측 특성 - 장대진, 전병철, 주성필, 이민철(인천대)



## Oral Session

일시 \_ 2019년 11월 14일(목)

장소 \_ 제 2 발표장 (무궁화)

Session 2	
석탄연소 I 13:00~14:20 좌장: 양 원(한국생산기술연구원)	
S2-01	석탄가스화기 내 버너 이상거동에 따른 유동 및 반응특성에 대한 전산해석 연구 - 남준영, 김무경, 손근, 류창국(성균관대), 김봉근(두산중공업)
S2-02	595MWe급 대향류 석탄화력 보일러의 공기다단공급에 따른 연소 및 NOx 발생 특성 해석 - 이지석, 조현빈, 류창국(성균관대), 장계환(BHI)
S2-03	Numerical Assessment on Blended Pulverized Coal Combustion by Large Eddy Simulation - Seongyool Ahn, Hiroaki Watanabe, Toshiaki Kitagawa(Kyushu University)
S2-04	Two-Stage DTF에서 메탄가스 재연소를 이용한 NOx 저감에 관한 연구 - 김민우, 김강민, 김규보, 전충환(부산대)

Session 6	
석탄연소 II 14:30~15:50 좌장: 임 호(한국생산기술연구원)	
S6-01	초분계 바이오매스 혼소시 첨가제 투입 영향에 관한 실험적 연구 - 임호, 이재욱, 채태영, 이용운, 양원(한국생산기술연구원)
S6-02	0.1 MW 급 순산소 순환유동층 연소시스템에서 이산화탄소 포집 및 고효율 연소에 관한 연구 - 문지훈, 조성호, 문태영, 박성진, 김재영, 백건욱, Nguyen Hoang Khoi, 이재구(한국에너지기술연구원)
S6-03	석탄화력 기존 SCR 계통 촉매층 회분 퇴적 및 마모에 관한 유동특성에 관한 연구 - 김태형, 박병철, 김태형(한국남동발전)
S6-04	Effects of air staging on Exhaust Tube Vortex structure in a swirl-stabilized pulverized coal flame - Kaiwen Deng, Xinzhou Li(Pusan National University), Minsung Choi(Korea Institute of Machinery & Materials), Gyungmin Choi(Pusan National University)

## Oral Session

일시 \_ 2019년 11월 14일(목)

장소 \_ 제 3 발표장 (로즈룸)

Session 3		화재 13:00~14:20 좌장: 이상민(한국기계연구원)
S3-01	구리전선을 전파하는 화염에 대해 전기장 인가에 따라 발생하는 현상에 대한 연구 - 강민성(부경대), 박순호(부경대), 임인권(명지대), 이대근(한국에너지기술연구원), 김승곤(한국에너지기술연구원), 광영태(한국에너지기술연구원), 권오봉, 박정(부경대), 정석호(KAUST)	
S3-02	원자력발전소용 케이블의 열화에 따른 연소생성물 독성특성에 관한 실험적 연구 - 장은희, 김민호, 이석희, 이민철(인천대), 이상규, 문영섭(한국원자력안전기술원)	
S3-03	원자력발전소용 안전등급 케이블의 열화기간에 따른 화재안전성 분석 - 김민호, 장은희, 이석희, 이민철(인천대)이상규, 문영섭(한국원자력안전기술원)	
S3-04	비압축성 난류 예혼합 화염의 전파 특성에 대한 조건평균 연구 - 권재성, 김범수, 양정현(경상대), 허강열(포항공과대)	

## Oral Session

일시 \_ 2019년 11월 14일(목)

장소 \_ 제 4 발표장 (등백룸)

Session 4 연소응용 I 13:00~14:20 좌장: 윤성환(한국해양대학교)	
S4-01	예혼합 연소합성법을 적용한 TiO <sub>2</sub> nanoparticle 생성에 관한 연구 - 이호연, 차천륜, 유창현, 황상순(인천대)
S4-02	PNG 연료의 가스렌지 연료 호환성 - 리신취, 박예슬, 덩카이원(부산대), 이종성, 김동민(한국가스공사연구원), 최경민(부산대)
S4-03	예혼합 분진화염의 정점열림 현상에서 동축류 속도 효과 - 주용우(한국해양대), 박대근(한국생산기술연구원), 이창엽(한국생산기술연구원), 윤성환, 최재혁, 김종수(한국해양대)
S4-04	화염 동적 거동에 대한 방사형 전기장의 영향 - 김영민, 김희재(한국해양대), 박대근, 이창엽(한국생산기술연구원), 윤성환, 최재혁, 김종수(한국해양대)

Session 7 연소응용 II 14:30~15:50 좌장: 이종성(한국가스공사)	
S7-01	천연가스 열량저하에 따른 국내 기존 가스터빈 연소기 연료호환성 및 외국사례 검토 - 이종성, 김동민(한국가스공사)
S7-02	500MW급 석탄 보일러 Digital Twin 구축을 위한 ROM 인자의 영향 연구 - 이우진, 장권우, 한우주, 허강열(포항공과대)
S7-03	난류 제트에서 Scalar Dissipation Rate 의 통계학적 특성 - Vlad Aparece-Scutariu(School of Engineering, the University of Edinburgh), Edward S Richardson(Faculty of Engineering and Physical Sciences, University of Southampton), 신동혁(한국과학기술원)
S7-04	TDLAS를 이용한 MILD 연소기 축 방향 온도 측정 - 봉철우, 이준권, 선호중, 정진규, 박문수(성균관대)

## Oral Session

일시 \_ 2019년 11월 15일(금)

장소 \_ 제 1 발표장 (그랜드볼룸)

Session 8	
총류화염 I 09:00~10:40 좌장: 김남일(KAIST)	
S8-01	헬륨이 희석된 총류 동축류 제트에서의 진동화염 - 오수현(울산과학기술원), 반규호(부경대), 정기성, 유춘상(울산과학기술원), 권오봉(부경대), 차민석, 정석호(KAUST), 박정(부경대)
S8-02	총류 비예혼합 부상 화염에서의 희석제에 따른 부상 높이 변화 - 오수현(울산과학기술원), 반규호(부경대), 유춘상(울산과학기술원), 권오봉(부경대), 정석호(KAUST), 박정(부경대)
S8-03	압력 및 이산화탄소 희석에 따른 메탄-순산소 비예혼합 동축류 화염의 특성 - 이지섭, 황규진, 김남일(한국과학기술원)
S8-04	소화거동 내 SNG/Air 희박 예혼합 비대칭 이중 화염의 상호작용 현상 - 강연세, 안지환, 이기만(순천대)
S8-05	가열된 동축류내 정상-헤파탄 총류 부상화염의 특성에 관한 수치해석적 연구 - 정기성, 김승욱(울산과학기술원), 정석호(KAUST), 유춘상(울산과학기술원)

Session 12	
총류화염 II 10:50~12:00 좌장: 윤성환(한국해양대학교)	
S12-01	가열된 동축류의 희석 효과가 메탄/수소 자발화 총류 부상화염에 미치는 영향에 대한 수치해석적 연구 - 신혜빈, 정기성, 김경택(울산과학기술원), 박정(부경대), 정석호(KAUST), 유춘상(울산과학기술원)
S12-02	합성가스(H <sub>2</sub> /CO) 조성비에 따른 총돌 제트 화염의 열음향 불안정성에 관한 연구 - 김주한, 이기만(순천대)
S12-03	대향류 예혼합화염에서 FGR과 FIR 효과에 대한 수치해석 - 조서희, 이기만(순천대)
S12-04	직접연소식 초임계 CO <sub>2</sub> 순산소 연소조건내 메탄 대향류 화염의 질소산화물 발생특성에 관한 수치해석적 연구 - 정기성, 박현수, Nam Danh Nguyen(울산과학기술원), 이복직(서울대), 유춘상(울산과학기술원)

## Oral Session

일시 \_ 2019년 11월 15일(금)

장소 \_ 제 2 발표장 (무궁화)

Session 9	
버너/연소기 09:00~10:40 좌장: 최병철(전남대학교)	
S9-01	다공성 매체 버너에서 수관 존재의 따른 화염 거동 및 연소 특성 비교 - 이희도, 김재현, 이기만(순천대)
S9-02	연소가스 내부재순환 연소기술 - 권민준, 김세원(한국생산기술연구원)
S9-03	FERPM을 적용한 석탄 바이오매스 혼소시 점선연소 보일러의 최적 운전조건에 대한 연구 - 오현석, 김강민, 전충환(부산대)
S9-04	초임계 이산화탄소 발전용 연소기의 수치모사: 산화제 온도에 따른 화염 형상 변화를 중심으로 - 김남수, 이대근, 노동순, 고창복, 이은경, 광영태, 김승곤, 이민정, 정우남, 이후경, 서동명(한국에너지기술연구원)
S9-05	마이크로믹서 가스 터빈 모델 연소기에서의 메탄/수소/공기 연소에 대한 배기 특성 연구 - 최재홍, 안명근, 광상혁(서울대), 이종근(University of Cincinnati), 윤영빈(서울대)
Session 13	
고체연료연소/점화 및 화학반응 I 10:50~12:00 좌장: 이대근(한국에너지기술연구원)	
S13-01	Zr계 에너지 물질 노화로 인한 반응 인자 변화 및 연소 성능 저하 - 한병현, 박윤식, 여재익(서울대)
S13-02	낙화놀이용 바이오매스 숲의 연소특성 연구 - 김철호, 최병철, 이세진, 양성수(전남대)
S13-03	폭발적 연소특성을 가진 바이오매스 숲의 물질특성 분석 - 최병철, 김문용, 정경갑, 변성천(전남대)
S13-04	개별 입자가 고려된 단일 및 복합 조성 화약에서의 수치해석적 충격파 전달 폭굉 연구 - 최상훈(서울대), 김보훈(Graduate Aerospace Laboratory, California Institute of Technology), 여재익(서울대)
Session 15	
고체연료연소/점화 및 화학반응 II 14:00~15:20 좌장: 손재훈(세종대학교)	
S15-01	표준 연료의 조성변화에 따른 점화지연시간 연구 - 한희선, 손재훈(세종대)
S15-02	Biomass Application for Ironmaking process:A Study on Biomass blended PCI Combustion - Gyeong-Min Kim, Jong-Won Jeong(부산대), Jin-Ho Kim(Hyundai Steel), Chung-Hwan Jeon(부산대)
S15-03	단입자 바이오매스 열분해 수치해석 모델 및 열분해 영향 인자 평가 - 김희윤(성균관대), 김민수(한국기계연구원), 류창국(성균관대)
S15-04	DMD, CEM 을 이용한 수직연료분사 초음속 연소기의 연소특성 진단 - 정승민, 최정열(부산대)

## Oral Session

일시 \_ 2019년 11월 15일(금)

장소 \_ 제 3 발표장 (로즈룸)

### Session 10 내연기관 09:00~10:40 좌장: 박성욱(한양대학교)

S10-01	소형 디젤엔진에서 분무 간섭과 화염 중첩이 배기에 미치는 영향 - 홍동우, 강승우, 배충식(한국과학기술원)
S10-02	CONVERGE 수치해석을 통한 소형 GP 로터리 엔진의 유동 및 성능분석 - 유호현, 김도현, 박영준, 이창연(인하대)
S10-03	엔진 효율 향상을 위한 부분 예혼합 및 난류 공급에 따른 엔진 연소특성 분석 - 이지영, 강재원, 박성욱(한양대)
S10-04	포트분사방식 기술된 엔진에서의 에탄올 함유량에 따른 연소특성 및 미세입자 배출특성 - 장지환, 이호승, 박성욱(한양대)
S10-05	최신 Toluene Reference Fuel 메커니즘들의 열방출특성에 대한 비교연구 - 김두현(홍익대)

### Session 16 공해물질/산업로 14:00~15:20 좌장: 박설현(조선대학교)

S16-01	미세먼지 후처리장치 필터의 lab-scale 산화 반응성 실험장치 개발 - 이상인, 임상철, 이승훈, 박선호, 조구영(단국대)
S16-02	OpenFOAM을 활용한 용융환원로 내 입자 거동 및 반응 해석 - 김진영, 장권우, 허강열(포항공과대)
S16-03	미분탄의 연소과정에서 발생한 미세먼지 입자의 광학특성 - 이수한, 강별, 박설현(조선대)
S16-04	초임계 순환 유동층 보일러 시스템의 주 증기 온도 동적 모사 및 제어 - 김성일(한국생산기술연구원), 최상민(한국과학기술원)

## Oral Session

일시 \_ 2019년 11월 15일(금)

장소 \_ 제 4 발표장 (등백룸)

Session 11 기초화염 09:00~10:40 좌장: 이기용(안동대학교)	
S11-01	좁은 간격의 원반형 버너의 길이 스케일에 따른 루이스수 효과 - 장혜진, 이상민, 김남일(한국과학기술원)
S11-02	Monomethyl Hydrazine/Nitrogen Tetroxide에 대한 축소 반응 메커니즘 - 이기용(안동대)
S11-03	충돌판 예혼합 연소기를 이용한 저 발열량 연료의 화염특성 연구 - 남현택, 전유선, 오영택(전북대), 김종현(한국승강기대), 이승로(전북대)
S11-04	비에혼합화염에서 외부가진 시 발생하는 Pinch-off 현상 분석 - 안명근, 곽상혁, 최재홍, 윤영빈(서울대)
S11-05	1/4 파장 공명기에서 하향 전파하는 예혼합 화염의 열음향장에 관한 실험적 고찰 - 손광호, 석지원, 이원주, 윤성환(한국해양대)

Session 14 산업 미세먼지 10:50~12:00 좌장: 이창엽(한국생산기술연구원)	
S14-01	Catalytic property of vanadium-based composite material on NH <sub>3</sub> -SCR for wide temperature window - 김태욱, 정보라, 예보라, 이명진, 김진우, 전승엽, 김선이, 김태효, 이덕현, 김홍대(한국생산기술연구원)
S14-02	황산화물의 제거를 위한 중공시막의 유동해석 - 윤영식, 김병환, 최창식, 조성수(고등기술연구원)
S14-03	시차주사열량측정법에 의한 석회석 및 시멘트 조합원료의 열분해 특성 - 문기연, 최문관, 백철승, 조진상, 조계홍(한국석회석신소재연구소)
S14-04	연료 농후조건 연소 배기가스 내 O <sub>2</sub> 및 CO 농도 실시간 측정에 관한 연구 - 소성현, 박지연, 정낙원, 송아란, 배성우, 김대해, 유미연, 박대근, 이창엽(한국생산기술연구원)

Session 17 가스터빈/연소시스템 14:00~15:20 좌장: 유춘상(UNIST)	
S17-01	저선회 선회기에서 난류생성판 직경변화에 따른 실험적 연구 - 한민석, 손찬호, 이기만(순천대)
S17-02	기체 에틸렌/산소 Tr-arc 회전 데토네이션 엔진 작동 특성 실험 - 이은성, 한형석, 최정열(부산대)

## Poster Session

일시 \_ 2019년 11월 15일(금) 14:00~15:20

장소 \_ 리셉션 홀

포스터 / 가시화사진전	
좌장 : 이병준(영남대학교), 차동진(한밭대학교)	
P-01	비대칭 화염 응답이 캔-캔 음향 상호작용에 미치는 영향 - 제갈현욱, 문기훈, 구자현, 김규태(KAIST)
P-02	합성천연가스 화염의 연소기 형상 변화에 따른 연소불안정 해석 - 윤규성(한밭대), 송원준(동신대), 차동진(한밭대)
P-03	ISO 5658-2 화염전파시험 장치를 이용한 Douglas-fir 화염전파시험의 FDS 전산모사 - 홍타기(조선대), 이종원(한국항공우주연구원), 박설현(조선대)
P-04	바이오가스용 가스터빈의 점화 특성에 대한 연구 - 강길모, 김시영, 이병준(영남대), 홍성철, 이동엽, 이충재, 박무진, 이동원(STX중공업)
P-05	층류화염편모델을 이용한 GH2-LOx 단일인젝터연소기 실제기체 연소해석 - 황원섭(부산대), 한우주, 허강열(포항공과대), 구성열, 이복직(서울대), 최정열(부산대)
P-06	북미향 프리미엄 가스 프로레인지 개발 - 이국형, 이종호, 위재혁, 박현우, 석준호, 김승윤, 김양호, 양대봉, 김영수(LG전자)
P-07	순환유동층 연소시스템에서의 국내 미이용 바이오매스 연소 특성 - 백건욱, 문지홍, 조성호, 박성진, 김재영, (한국에너지기술연구원), Nguyen Hoang Khoi(군산대), 문태영(한국에너지기술연구원)
P-08	가압 순산소 연소 조건에서의 배기가스 응축기 내 압력과 체류시간에 따른 NO의 거동 특성 연구 - 이호수(연세대), 목진성, 최석천, 양원(한국생산기술연구원)
P-09	내부 배가스 재순환 방식을 활용한 가스 MILD 연소 특성과 NOx 배출 특성 연구 - 김동희(포항공과대학교, 한국생산기술연구원), 함재식(한국생산기술연구원), 허강열(포항공과대), 이영재(한국생산기술연구원)
P-10	기체 중심 스월 동축 분사기 간 거리에 따른 화염 형상 변화 - 조천현, 왕위엔강, 손채훈(세종대), 윤영빈(서울대)
P-11	방사형 전기장을 인가한 확산 화염 내에 이온풍 가시화 - 김영민, 김희재, 윤성환, 최재혁, 김종수(한국해양대)
P-12	전기방사 표면여과체의 제조와 미세먼지 여과특성 분석 - 권기범(전남대), 이우진(연세대), 허기준, 김연상, 엄현진(한국생산기술연구원)
P-13	내열성 고분자 섬유가 부착된 PTFE/Glass 3중층 폼코팅 여과체 제조기술 개발 - 김성훈, 정중호, 이현재, 조상준(창명산업)



Fire safety standard in space environments -flame spread in micro/reduced gravity-

Shuhei Takahashi\*, Kaoru Terashima and Yoshinari Kobayashi, Gifu University, Japan

**Abstract:** The flammability characteristics of materials in microgravity or reduced gravity are some of the most important factors for fire safety in space environments. It has been reported that the flammability limit obtained in ground-based test is different from that in microgravity environments, but it is difficult to conduct flammability tests for various materials in micro/reduced gravity environments. In FLARE, the orbital experiment project in ISS, we developed new method for evaluation of materials flammability in space environments only with data which can be obtained on ground. In this article, we introduce our method and recent results by ground-based and parabolic flight experiments.

**Keywords:** Flame spread, Flammability limit, Limiting oxygen concentration, Microgravity

1. Introduction

In manned space missions, one of the most important tasks is to guarantee fire safety in space environments; in micro- or reduced gravity. The feature of micro/reduced gravity environments is low flow velocity around the flame. NASA STD-6001 is a typical flammability test, which has long history, but a pass/fail test is not suitable for screening materials. An important measure to discuss the flammability of a material is its limiting oxygen concentration (LOC). The LOC is defined as the oxygen concentration below which the material cannot sustain a flame under the conditions considered. In ISO 4589-2, the minimum LOC for downward spread condition is defined as the oxygen index (OI) for the material considered, and OI is used as a popular measure to discuss the flammability of a material. However, it has been reported that the flammability limit in microgravity experiment is different from that obtained by ground-based flammability test [1]. For example, the LOC of poly-methyl methacrylate (PMMA) flat sample for downward flame spread is 17% whereas it reduces to less than 15% under a mild flow condition in microgravity [2].

Currently, the Japan Aerospace Exploration Agency (JAXA) is conducting the Flammability Limits at Reduced-g Experiment (FLARE) project, an orbital flight experiment in the International Space Station, in collaboration with the National Aeronautics and Space Administration (NASA), the European Space Agency (ESA), and several universities. One of the objectives of the FLARE project is to develop a simplified model for evaluating the LOC of a thin solid material, and expressing it as an index, in microgravity environments for fire safety. If we can predict the flammability limit of a material with experimental data which can be obtained on ground using the model, it reduces the cost of screening of materials for space missions. In this article, we first introduce the simplified model for flame spread over a thin flat sample, then show the predicted flammability limits for several materials by the model, and compare them with parabolic flight experimental results.

2. Flame spread model

The typical flammability map of a thin solid material in opposed flow is shown in Fig. 1 [3]. The flammability limit is a U-shaped curve, which is expressed by coupling the radiative extinction and blow-off limits. The LOC for downward spread tests in buoyant flow,  $LOC_{1g}$ , is a typical index for discussing the flammability of materials on the ground, but there exists a minimum LOC (MLOC) that is lower than the  $LOC_{1g}$ . It should be emphasized that the opposed flow velocity,  $V_{cr}$ , at which the MLOC is achieved, can be higher or lower than the buoyant flow velocity. If the MLOC is achieved in low velocity condition, the material is expected to be more flammable in microgravity.

Figure 2 shows the schematic of two-dimensional flame spreading over a thin flat material in an opposed flow. To obtain the expressions for the radiation extinction and the blow-off extinction, we built a heat balance around the two-dimensional

flame using a scale analysis technique. In our simplified model [4], the non-dimensional flame spread rate is expressed as Eq. 1, and the limiting curve is calculated with the two non-dimensional parameters  $R_{rad}$  and  $Da$ , which represent the radiative heat loss factor and the Damkohler number, respectively.

$$\eta + R_{rad} + \frac{1}{Da} = 1 \tag{1}$$

$$R_{rad} = B_2 \frac{\varepsilon(1 - \alpha_{abs})\sigma(T_v^4 - T_\infty^4)}{\rho_g c_g V_g (T_f - T_v)} \tag{2}$$

$$Da = Pr \frac{x_d}{V_g} \rho_g Y_O A^* \exp(-E^* / RT_f) \tag{3}$$

The limiting curve lies on the points where the sum of  $R_{rad}$  and  $Da$  is unity. From Eq. 2, it is found that  $R_{rad}$  is strongly affected by the pyrolysis temperature of the material,  $T_v$ . To calculate  $R_{rad}$ , we must know the  $T_v$  of the material, which can be measured by TG/DTA. To evaluate  $Da$  in Eq. 3, we must know the values of the activation energy,  $E$ , and the pre-exponential factor,  $A$ ; however, these values are difficult to measure directly or to estimate. Hence, we introduced the blow-off tests to derive the empirical  $E^*$  and  $A^*$ , instead of actual  $E$  and  $A$ , in order to obtain the material's blow-off extinction limit accurately. The  $E^*$  and  $A^*$  obtained by the blow-off tests are empirical values and have no physical meaning, although they are helpful to understand the trend of the blow-off limit once there are specified.

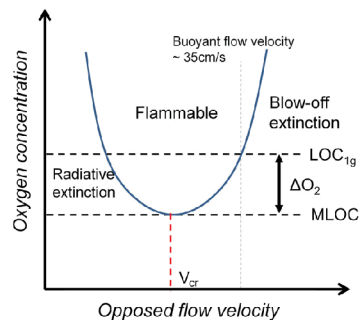


Fig. 1 Typical flammability map of solid material in opposed flow.

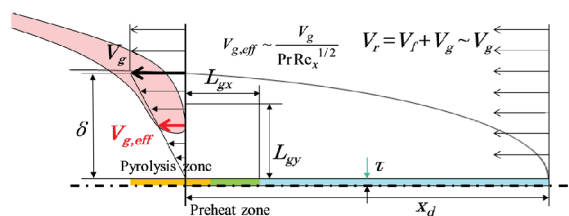


Fig. 2 Schematic of two-dimensional flame spreading over a thin flat sample.

3. Results and discussion

3.1 Results of blow-off test

The flat samples used in this study and their properties are listed in Table 1. The pyrolysis behavior of each material was investigated by TG/DTA. The TG/DTA tests were conducted in air atmosphere at the temperature increase rate of 100 K/min to simulate a relatively quick heating by the flame front. In our developed model, to capture the characteristic of decomposition in the preheat zone, the pyrolysis temperature,  $T_v$ , was defined using the following equation:  $T_v = (T_{v,10} + T_{v,50}) / 2$ , where  $T_{v,10}$  and  $T_{v,50}$  are the temperature at which 10% and 50% mass losses were observed, respectively.

Table 1 Properties of the materials used in this study [5].

Sample	Thickness (mm)	$\Delta h_c$ (kJ/g)	$T_v$ (K)	$LOC_{1g}$ (%)
PMMA	0.125	25.9	670	17
Polycarbonate	0.25	30.32	812	22
PEEK	0.2	30.16	863	28.5
PPSU	0.03	Unknown	867	24
Kapton	0.125	25.45	906	45.5
NOMEX HT90-40	0.3	25.53	761	31.5
CONEX	0.3	25.53	819	32.5
Kevlar KE5847	0.3	26.00	854	33

The blow-off experimental apparatus was conducted with a wind tunnel in 1 m<sup>3</sup>-volume glovebox. The cross-section of the test section was 14 cm × 14 cm. The sample was 2 cm in width and 8 cm in length, which was set at the center of the wind tunnel by a sample holder. (See Fig. 3) The pressure inside the glovebox was 101.3 kPa (atmospheric pressure). We ignited the top end of the sample with a small butane burner, and observed the flame spread in a forced flow with a CCD camera. If the flame propagated beyond the marked line, which was 4 cm away from the bottom sample edge (2<sup>nd</sup> line in Fig. 3), we considered the condition as flammable; otherwise, we considered it extinct. We repeated the blow-off test with decreasing the oxygen concentration to specify the LOC of the material in the given flow velocity condition. This test method conforms to the concept of the ISO/CD 4589-4 standards, which is currently proceeded in the ISO meeting. We also conducted downward flame spread tests in buoyant flow only

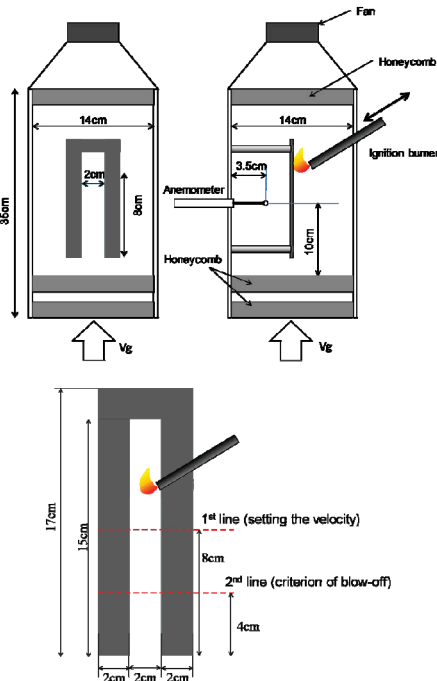


Fig. 3 Schematic of the wind tunnel and the sample holder for blow-off test.

(no suction fan). This method conforms to existing ISO 4589-2 test. The results of downward spread tests in buoyant flow were equivalent to the results where the opposed flow velocity was 35 cm/s.

Table 2 shows the results of the blow-off tests for the samples listed in Table 1. It is found that the sensitivity of the LOC on the flow velocity is different for different samples; some materials have monotonically increasing LOC trend when the flow velocity increases, whereas some materials have almost flat or concave LOC trend. This difference significantly affects the LOC in microgravity environments as explained later.

Table 2 Limiting oxygen concentration at different flown velocity.

Sample	$LOC_{1g}$ (%) Buoyant flow	$LOC_{60}$ (%) 60 cm/s	$LOC_{80}$ (%) 80 cm/s	$LOC_{100}$ (%) 100 cm/s	LOC trend
PMMA	17	19.5	20	21	Increasing
PC	22	23.5	24	24.5	Increasing
PEEK	28.5	28	28.5	28.5	Flat
PPSU	24	24.5	25	25.5	Increasing
Kapton	45.5	45	45	45.5	Flat
NOMEX	31.5	33	33.5	34	Increasing
CONEX	32.5	32.5	32	32.5	Flat
Kevlar	33	32	32	32	Flat

3.2 Results of parabolic flight experiments

Figures 4 show the flammability map of each materials obtained by blow-off tests and 20s parabolic flight experiments [5]. As shown in Fig. 1, most materials exhibit a U-shaped limiting curve, but their critical opposed flow velocities are very different. Some materials have a lower critical opposed flow velocities and, consequently, LOCs lower than  $LOC_{1g}$  in microgravity environments. PMMA, PC, PPSU, and NOMEX were found to have lower critical opposed flow velocities and LOCs lower than  $LOC_{1g}$  in microgravity environments. The difference between  $LOC_{1g}$  and  $MLOC$ ,  $\Delta O_2$ , was large for PMMA and NOMEX (more than 2.0%) and small for PC and PPSU (less than 0.5%). The minimum of the U-shaped limiting curve was determined by the locations of the radiative and blow-off extinction curves. For materials with low pyrolysis temperature, such as PMMA and NOMEX, the radiative extinction curve was located in the low opposed flow region (left side in the flammability map). In such a case, the LOC decrease with decreasing with  $V_g$ , switches to an increase at lower opposed flow conditions, which yields a lower critical opposed velocity and larger  $\Delta O_2$ . On the other hand, the pyrolysis temperature of PC and PPSU is high (812 K and 867 K, respectively), which shifts the radiative extinction curve to the right of the flammability map. In such a case, the critical opposed velocity moves toward high opposed flow conditions, resulting in a small  $\Delta O_2$ . For the other materials, the limiting curve in the high opposed flow region was almost flat. Such materials, PEEK, Kapton, CONEX, Kevlar, the LOC in microgravity was larger than the  $LOC_{1g}$ . Table 3 shows the summary of the flammability of the materials studied.

4. Conclusion

In the FLARE project, we developed new evaluation method for estimating flammability of a solid material in space environments. We clarified that the dependence of the blow-off extinction on the flow velocity and the pyrolysis temperature of the material were the most significant factors in discussing its flammability in low/mild flow conditions. Materials which have monotonically increasing LOC trend and low pyrolysis temperature have a potential that the flammability in microgravity environments extend. The developed method can be a useful tool for screening materials to ensure fire safety in space.

**Acknowledgement:** This study was conducted as a part of the FLARE project supported by JAXA. We are also thankful to the staff of Diamond Air Service for their excellent technical support in the parabolic flight experiments.

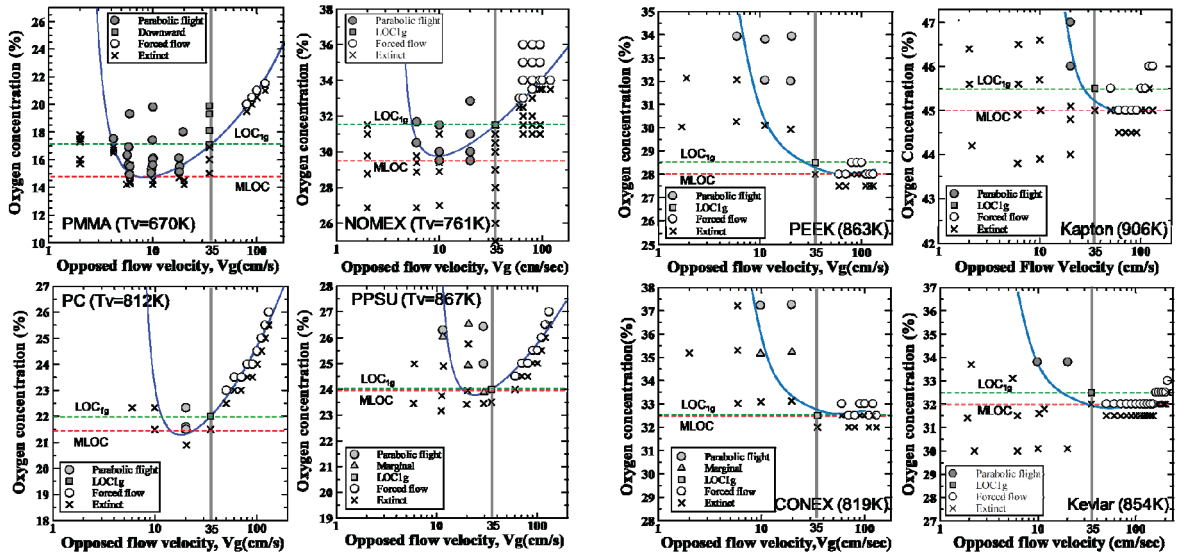


Fig. 4 Flammability maps of materials listed in table 1. PMMA, NOMEX and PC have lower LOC than  $LOC_{1g}$  when the flow velocity becomes slow. It means such materials become more flammable in microgravity environments.

Table 3 Flammability characteristics in microgravity environments.

Sample	$LOC_{1g}$ (%)	LOC trend	$T_v$ (K)	MLOC in microgravity (%)	$\Delta O_2$ in microgravity (%)
Poly-methyl methacrylate (PMMA) ACRYLEN HBS006: Mitsubishi Chemical	17.0	Increasing	670	14.9	2.1
Polycarbonate (PC) CARBOGLASS C110C: Asahi Glass	22.0	Increasing	812	21.5	0.5
Polyether ether ketone (PEEK) PEEK4000: TORAY	28.5	Flat	863	> 28.5	< 0
Poly-phenyl sulfone (PPSU) PPSU U1-1: Denka	24.0	Increasing	867	24	0.0
Polyimide Kapton 500H: DuPont	45.5	Flat	906	> 45.5	< 0
Meta-aramid fiber NOMEX HT90-40: DuPont	31.5	Increasing	761	29.5	2.0
Meta-aramid fiber CONEX: TEIJIN	32.5	Flat	819	> 32.5	< 0
Para-aramid fiber Kevlar KE5847: DuPont	33.0	Flat	854	> 33	< 0

### 5. References

- O. Fujita, Proc. Combust. Inst. 35 (2015) 2487–2502.
- S. Takahashi, T. Ebisawa, S. Bhattacharjee, T. Ihara, Proc. Combust. Inst. 35 (2015) 2535–2543.
- H. Shih and J. S. Tien, Proc. Combust. Inst. 28 (2000) 2777–2784.
- S. Takahashi, M. A. F. bin Borhan, K. Terashima, A. Hosogai, Y. Kobayashi, Proc. Combust. Inst. 37 (2019) 4257–4265.
- S. Takahashi, K. Terashima, M. A. F. bin Borhan, Y. Kobayashi, Fire Technology, 2019, <https://doi.org/10.1007/s10694-019-00880-2>

### Nomenclatures

- $A^*$  : Empirical pre-exponential factor by blow-off test
- $B_2$  : Empirical constant for  $R_{rad}$ ,  $B_2 = 2.67$
- $a_{abs}$  : Absorption coefficient of gas
- $c_g$  : Specific heat of gas
- $c_s$  : Specific heat of solid
- $Da$  : Damkohler number
- $E^*$  : Empirical activation energy by blow-off test
- $Pr$  : Prandtl number

- $R$  : Gas constant
- $R_{rad}$  : Radiation loss number
- $T_f$  : Characteristic flame temperature
- $T_v$  : Pyrolysis temperature
- $T_\infty$  : Ambient temperature
- $t$  : Sample thickness
- $V_g$  : Opposed flow velocity
- $V_{cr}$  : Critical opposed flow velocity
- $V_f$  : Flame spread rate
- $V_{f,th}$  : Flame spread rate in thermal regime
- $x_d$  : Location for blow-off,  $x_d = 0.04$  [m]
- $Y_0$  : Oxygen mass fraction
- $\alpha_g$  : Thermal diffusivity of gas, evaluated at  $T_v$
- $\varepsilon$  : Surface emissivity
- $\eta$  : Non-dimensional spread rate,  $\eta = V_f/V_{f,th}$
- $\rho_g$  : Gas density evaluated at  $T_v$
- $\rho_s$  : Solid density
- $\sigma$  : Stefan-Boltzmann constant

## Recent Advances in Plasma-Assisted Combustion for Gas Turbine Applications

Deanna Lacoste, *King Abdullah University of Science and Technology, Clean Combustion Research Center, Saudi Arabia*

**Abstract:** Over the last decade, non-equilibrium plasma discharges for enhancement of combustion systems have been increasingly investigated. The idea is to enhance flames with electrical discharges, by applying an electrical power negligible compared to the thermal power released by the combustion mechanisms. For applications to gas turbines, non-thermal plasmas were successfully used to control thermo-acoustic instabilities in several configurations at atmospheric pressure. However, in real combustion systems, the pressure is usually in the range from 5 to 40 bar. Thus, are they a realistic option for real gas turbine applications? What else is needed to evaluate these plasma actuators? (98 words)

**Keywords:** Combustion instabilities, non-thermal plasma discharges, flame dynamics

### 1. Introduction

With more than 80% of the today world's energy production involving combustion, the reduction of pollutant emissions and fuel consumption of combustion-based systems is becoming crucial. Strategies such as burning lean mixtures or increasing the combustion pressure are becoming common, especially for gas turbines [1]. However the technical challenges implied by the adaptation of the current technologies to the large variety of future fuels (from hydrogen carriers to low quality fossil fuels), the fuel versatility, as well as the problems of combustion stability will require further effort.

Over the last two decades, applications of non-thermal plasmas produced by electric discharges to new combustion strategies have attracted increasing interest [2-4]. Figure 1 summarizes the five broad domains of investigations that constitute the research effort in plasma-assisted combustion (PAC). Note that, even though the results in research laboratories have been extremely promising and some plasma-assisted combustion concepts reached the prototyping stage (TRL 6), so far, no large scale commercialization of any non-thermal plasma actuator for combustion systems can be reported.

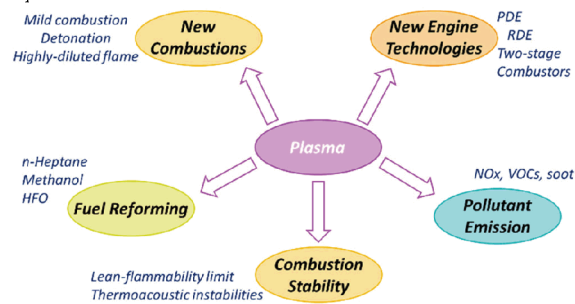


Fig. 1 Summary of the current fields of research in plasma applications relevant for gas turbines.

In order to have a technological impact, the next steps in PAC research will be to demonstrate that non-thermal plasma actuators can (i) be efficient in conditions relevant for industrial applications (elevated pressure, large scale systems, complex fuels...), (ii) be robust and have a lifetime compatible with their combustion-system hosts, and (iii) be cost effective compared to their competitors.

In the specific context of enhancement of the combustion stability by non-thermal plasma, several strategies have shown promising results [5-7]. However, the fine understanding of the coupling between plasma, combustion and acoustics of the system is still missing. This understanding is a prerequisite to propose successful strategies for combustion conditions relevant for gas turbines.

### 2. Objectives

The objectives of this paper are (i) to give a brief overview of

the proof-of-concepts that have been reported for the control of combustion instabilities by non-equilibrium plasma actuators, and (ii) to present recent progress in the evaluation of PAC strategies.

### 3. Principle of Plasma-Assisted Combustion

There are three main ways by which a flame can be actuated with an electric field [4]. If the applied electric field is below the breakdown threshold, then no plasma is produced and the charged particles naturally present in the flame front are responsible for the flame actuation. If DC or AC electric fields are applied, then the main effect is through ionic wind, while in the case of radio frequency or microwave electric field, then a thermal and/or chemical impact on the flame are dominant.

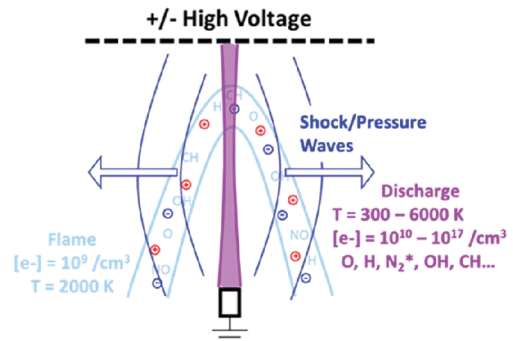


Fig. 2 Schematic of the properties of non-equilibrium plasma discharges relevant for plasma-assisted combustion studies.

For an applied electric field above the breakdown threshold, electrical discharges occur. In this case, depending on the electric field properties, thermal, chemical and/or transport effects can be promoted. Figure 2 summarizes these effects for a discharge generated across a premixed laminar flame. The numerical values correspond to ambient initial conditions.

### 4. Proof-of-concepts

For plasma-assisted control of combustion instabilities, several electrical strategies have been reported, from DC electric field without discharges, to gliding arcs or microwave discharges, for which the energy deposition by the discharges is quite high, compared to the thermal power of the flame. Among them, nanosecond repetitively pulsed (NRP) plasma discharges have demonstrated promising results for the largest flames.

In 2013, Moeck et al. [5] reported that thermoacoustic instabilities of a 65-kW lean premixed swirl flame could be actively controlled by NRP discharges, with an electrical power deposited by the discharge of about 1% of the thermal power of the flame. In 2015, Kim et al. [8] extended these results to a larger range of equivalence ratios. In both studies, the spark regime of the NRP discharges, with the largest thermal impact, were used. However, in 2017, Lacoste et al. [7] shown that even the NRP glow

discharges, for which the chemical effect is dominant, can have a strong effect on the dynamic of lean premixed flames.

All the proof-of-concepts of actuation of flame dynamics by plasma have been obtained at atmospheric pressure. However, for gas turbine applications, these plasma actuators should be efficient at pressures from 5 to 25 bar. In order to identify which of the electrical actuation strategy could be the most efficient at elevated pressure, it is necessary to better understand the plasma-flame coupling.

### 5 Evaluation of the chemical impact of NRP discharges

Atomic oxygen (O) and atomic hydrogen (H) have been identified as crucial for the chemical effect of plasma [4]. These species can be produced by direct electron impact or by more complex chemistry. In order to assess if these species are responsible for the control of flame dynamics, 2-D fields of H and O have been obtained by femto-second two-photon absorption laser induced fluorescence. The H and O fields of the flame, and the flame enhanced by NRP glow discharges, in a configuration similar to the one used in [7] have been compared. A detailed description of these measurements and the complete set of results can be found in [9]. Figure 3 compares the H fields of a lean methane air flame, and of the same flame enhanced by NRP glow discharges. The plasma actuation generate a significant amount of H in the discharge channel, upstream of the flame, and increase by about 40% the H intensity at the tip of the flame. This confirms that H is one of the key species of the chemical impact of NRP glow discharges for control of flame dynamics. Similar results are obtained for O.

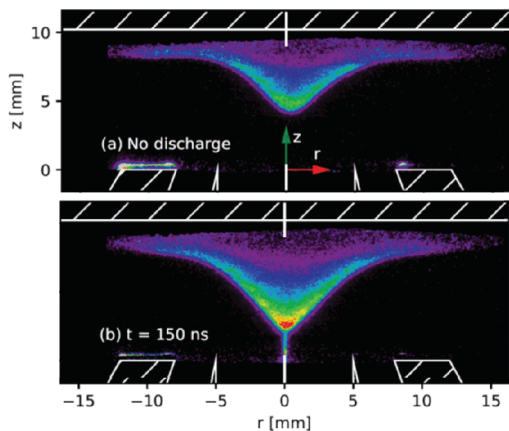


Fig. 3 Atomic hydrogen (H) fields of (a) a lean methane-air flame, and (b) a lean methane air flame enhanced by NRP glow discharges.

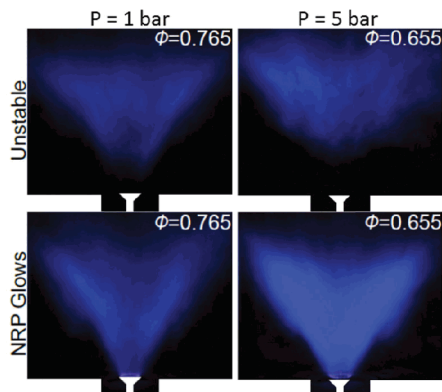


Fig. 4 Stabilization of a lean methane-air swirl flame by NRP glow discharges, at 1 and 5 bar.

Finally, in order to assess if this chemical actuation could be efficient enough for the control of combustion instabilities at elevated pressure, a preliminary study on the impact of NRP glow discharges on the stabilization and lean blow-off limits of methane-air swirl flames, at pressures up to 5 bar has been carried out. The detailed description of the methodology, as well as the complete set of results can be found in [10]. Figure 4 presents the effect of NRP glow discharges on lean flames, at 1 and 5 bar. The flame are fully stabilized by a plasma actuation with an electrical power about 0.32% of the thermal power of the flame. The gain in equivalence ratio for stability and blow-off is about 7%, for any pressure between 1 and 5 bar.

### 6. Conclusion

At atmospheric pressure, the control of combustion dynamics by plasma discharges has been demonstrated for a large variety of electrical strategies. However, for gas turbine applications, plasma actuators should be efficient for pressures between 5 and 25 bar. As high-pressure experiments are expensive and challenging, it is necessary to identify the key mechanisms of plasma action. For NRP glow discharges, it is shown that the production of atomic hydrogen and atomic oxygen could be responsible for the chemical effect on combustion. Finally, preliminary results showing that NRP glow discharges can decrease the lean stability limit of swirl premixed flames at pressures up to 5 bar, suggest that this non-thermal plasma actuation strategy could be efficient for the control of combustion instabilities at elevated pressure.

**Acknowledgement:** This study has been supported by the King Abdullah University of Science and Technology through the baseline fund BAS/1/1396-01-01

### 7. References

- Lefebvre, A.H. and Ballal, D.R., Gas Turbine Combustion, 3<sup>rd</sup> Ed., CRC Press, Taylor & Francis Group, Boca Raton (2010).
- Starikovskaia, S.M., Plasma Assisted Ignition and Combustion, J. Phys. D: Appl. Phys. 39 (2006) 265-299.
- Starikovskiy, A. and Aleksandrov, N., Plasma-Assisted Ignition and Combustion, Progress in Energy and Combustion Science 39 (2013) 61-110.
- Ju, Y. and Sun, W., Plasma Assisted Combustion: Dynamics and Chemistry, Progress in Energy and Combustion Science 48 (2015) 21-83.
- Moeck, J.P., Lacoste, D.A., Laux, C.O. and Paschereit, C.O., Control of combustion dynamics in a swirl-stabilized combustor with nanosecond repetitively pulsed discharges, 51<sup>st</sup> AIAA ASM, AIAA 2013-0565, Jan. 7-10 (2013) Grapevine, TX, USA.
- Volkov, E.N., Kornilov, V.N. and de Goey, L.P.H., Experimental Evaluation of DC Electric Field Effect on the thermoacoustic behaviour of flat premixed flames, Proc. Combust. Inst. 34 (2013) 955-962.
- Lacoste, D.A., Moeck, J.P., Roberts, W.L., Chung, S.H. and Cha M.S., Analysis of the step responses of laminar premixed flames to forcing by non-thermal plasma, Proc. Combust. Inst. 36 (2017) 4145-4153.
- Kim, W., Snyder, J. and Cohen, J., Plasma assisted combustor dynamics control, Proc. Combust. Inst. 35 (2015) 3479-3486.
- Del Cont-Bernard, D., Ruchkina, M., Ding, P., Bood, J., Ehn, A. and Lacoste, D.A., Femtosecond Two-Photon Laser-Induced Fluorescence Imaging of H and O in a Laminar Methane/Air Flame Stimulated by Nanosecond Repetitively Pulsed Discharges, Submitted to J. Phys. D: Appl. Phys.
- Di Sabatino, F., Roberts, W.L. and Lacoste, D.A., Decrease of the lean blow-off limit of methane-air swirl flames by nanosecond repetitively pulsed plasma discharges at elevated pressures, Submitted to the 38<sup>th</sup> Int. Symp. Combust.

## 한국기계연구원과 나의 연소 연구

김석준\*†

### My R&D Activities on Combustion in KIMM

Seock Joon Kim\*†

1980년, 기계연에 입사하면서 바로 연소 관련 연구를 하게 된 것은 우연이었을까? ‘유리 용해용 Pot로’에 대한 기술조사 과제 참여로 기계연에서의 연소 연구를 시작하게 되었다.

1981년 1월, 출연연들은 통폐합이라는 큰 태풍을 겪었다. 창원에 본소를 두고 있던 한국기계급속시험연구소도 대덕연구단지의 선박연구소를 부설로 흡수하면서 한국기계연구소란 이름을 가지게 되었다.

실험 시설이나 장비가 없어 조사 연구만 주로하다가 국산화 개발 연구가 본격적으로 시작된 것이 이 때쯤부터이다. 나는 연구 초년병으로 순간은수기를 비롯, 산업용 가스/오일 버너, 맥동연소기, 소형 가스보일러, 온풍난방기 등 다양한 연소기기와 버너의 개발에 참여하였다.

차관으로 들여 온 열전대로 화염 온도를 측정하고 애플이나 IBM의 초기 PC를 이용하여 실험 데이터를 수집하고 계산하기 시작한 것을 스스로도 대단한 것으로 여겼다.

1982년 과학기술처의 특정연구개발사업이란 제도가 생기면서 정부의 본격적인 연구개발 정책과 지원이 시작되었다. 때를 같이하여 양질의 연구원을 다수 공급하기 위하여 한국과학기술원에 연구원 석박사 과정이 만들어졌다. 이 제도를 통한 학위 취득은 나에게 큰 행운이었다.

80년대 후반에 새로운 연소 연구 분야로서 폐기물 소각을 시작하였다. 마침 환경 기술개발이 국가적인 이슈로 대두되었다. 선도기술개발(G7) 사업이 시작되었고 환경부에서도 처음으로 연구개발사업을 주관하게 되었다.

1991년부터 시작된 ‘대도시형 저공해 소각기술 개발’ 사업에 참여하면서 폐기물 소각기술 개발에 앞장서게 되었다. 소각에 의한 다이옥신 발생이 사회 문제로 등장하면서 2001년부터 ‘열분해가스화용융 시스템’ 개발을 주관하였다. 그 결과 각각 진해 50톤/일, 양양 30톤/일의 상용 플랜트를 참여기업이 건설하여, 지금도 운영되고 있다.

1992년 한국기계연구원은 명칭 변경과 함께

창원에서 대전으로 본원 이전하게 되었다. 연소 연구 인력도 통합되면서 만들어진 ‘연소환경연구실’ 실장을 맡았다. 이 때부터 부장, 본부장 등 보직을 맡으면서 소위 연구 행정에도 많은 시간을 보내게 되었다.

PBS 제도의 도입과 IMF 위기를 넘어서며 기계연도 인력 구조 조정이라는 격랑을 겪었다. 어려움 속에서도 연소를 포함한 환경 기술 분야는 오히려 강화되어 조직은 실에서 부 급으로 팽창하였다. 기관고유사업(현재의 주요사업)의 대과제 책임자로 다양한 소각기술과 집진 기술 등의 환경기술 개발도 수행하였다.

90년대 중반에 한국중공업(현 두산중공업)과 협력 과제로 발굴된 ‘플라즈마 탈황탈질 기술 개발’은 연구비 10억 원의 대형 순수 민간 수탁 과제로 당시 큰 주목을 받았다. 새로운 기술을 단기간에 상용화한다는 목표는 여러 가지 사유로 결국 달성하지 못했다.

그러나, 이를 기반으로 과기부의 국가연구실사업(NRL)에 도전하여 ‘플라즈마 대기환경연구실’로 지정을 받았다. 기초원천기술개발을 안정적으로 지원해 주는 혁신적인 국가 연구개발 사업이었다. 기계연 최우수 연구실의 하나로 발전하게 해준 사업일 것이다.

2010년을 전후하여 ‘가정용 가스보일러의 개발’ 과제 책임자를 맡게 되었다. 정부의 요청으로 당시 6개 가스보일러 제조사가 모두 참여하였다. 고효율 콘덴싱 보일러 개발로 치열한 국내 경쟁을 수출 시장으로 돌리는 것을 목표로 하였다. 업무 분장과 조정에 많은 시간과 노력이 소요되었다. 상용 제품의 개발까지는 이르지 못했으나 각 사의 추가적인 기술개발 노력으로 얻은 최근 수출 호황은 마음을 가볍게 해 준다.

연구원 생활을 시작하면서부터 출연연 연구의 성과는 상용화라는 생각을 놓은 적이 없다. 같이 일해 온 연구원들의 뛰어난 능력과 부단한 노력으로 많은 것을 이루었다. 그럼에도 선도형 보다는 추격형 연구가 중심이었고 눈에 띄는 큰 성과는 보이지 않는다. 숙제를 남기고 떠나려니 안타까움과 숙연함이 가슴을 저민다.

미친한 일들을 정리하여 발표할 기회를 주신 한국연소학회에 감사드린다.

\* 한국기계연구원 환경시스템연구본부

† 연락처, sjkim@kimm.re.kr

TEL : (042)868-7347 FAX : (042)868-7284

## 산업용보일러 저NOx 연소 기술 현황

수국 박재연

2016년 중국 북경의 저NOx 버너 개조 시장이 열리면서 미국, 유럽, 한국의 버너 회사들이 독자적으로 발전시켜온 저NOx연소기술이 서로 혼합되는 현상이 벌어졌다.

각국이 완성한 단독 기술로는 2017년 4월 1일부터 신설되는 보일러에 적용되는 30mg/Nm<sup>3</sup> (15ppm) NOx 배출기준을 만족할 수 없었기 때문인데, 기술 발전보다 앞선 엄격한 배출기준 때문에 주로 외부 FGR 기술에 의존했던 미국의 저NOx기술이 콤팩트한 보일러에 성능을 발휘하는 내부FGR기술을 발전시켜온 유럽의 저NOx 연소기술에 혼합된 기술이 유일하게 NOx<15ppm을 만족할 수 있는 대세 기술이 되었다.

Internal FGR 기술이 없던 미국은 콤팩트 보일러가 주종인 해외시장용으로 표면 연소식 메탈 화이버 예혼합 버너로 대응하다가 운전공기비 조건을 만족할 수 없게 되자 suspension type 예혼합 방식의 새로운 기술을 내놓았으나 너무 높은 송풍 동력 증가로 인해서 시장에 안착하기에는 또 다른 걸림돌이 되고 있다.

이러한 두 선진국 기술이 완벽하게 고객이 만족하는 저NOx 연소기술을 내놓지 못하고 있을 때 한국에서 독자적으로 개발된 FIR(Forced Induced Recirculation) 방식의 저NOx 연소기술이 접목된 연소기를 출시하였다. 이 기술은 가장 바람직한 저NOx 연소기술로 여러 매체에 인정받고 있다.

## 플라즈마 연료개질을 활용한 대기오염 저감연구

송 영훈\*, 이 대훈, 김 석준

### Technologies of emission reduction using plasma fuel reforming

Young-Hoon Song\*, Dae Hoon Lee, Seock Joon Kim

**Key Words** : plasma fuel reforming, NO<sub>x</sub>, PM, SCR

일반적으로 길이가 수 mm에 불과한 아크 플라즈마를 강한 선회류(swirl flow)를 통해 아크의 길이를 수 cm에서 수 십 cm로 늘려서 발생시키는 회전 글라이딩 아크 플라즈마(rotating gliding arc plasma)는 고온의 반응공간을 비교적 넓은 공간에서 얻을 수 있는 특성을 갖고 있다. Fig. 1은 회전 글라이딩 아크를 보여주는 것으로, 아크의 회전 속도가 빠르기 때문에 반응공간을 선(line)에서 부피(volume)으로 확장시킨 효과를 얻고 있음을 알 수 있다. 그림과 같이 아크의 길이가 늘어나면서 회전 글라이딩 아크 플라즈마의 온도는 일반적인 아크 플라즈마에 비해 낮은 2,000 K 수준인 것으로 측정되고 있고, 진동 및 전자 온도는 이보다는 높은 것으로 알려져 있다. 이에 따라 회전 글라이딩 아크 플라즈마는 비평형(non-equilibrium) 플라즈마로 분류될 수 있으나, 비평형의 정도(degree of non-equilibrium)는 대표적인 저온 플라즈마인 DBD(Dielectric Barrier Discharge) 또는 코로나 방전보다 월등하게 낮다. 이처럼 높지 않은 비평형 정도의 특성 때문에 회전 글라이딩 아크를 통해 얻은 화학반응의 특성은 열화학 반응과 유사하게 나타나며, 높은 에너지를 갖는 전자에 의해 유도되는 플라즈마 화학반응(Plasma chemistry)의 특성은 크게 나타나지 않는다.

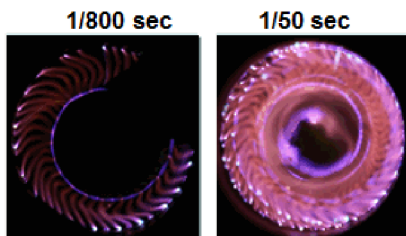


Fig. 1 rotating gliding arc plasma

회전 글라이딩 아크 플라즈마에서 플라즈마 화학반응의 효과는 상당히 억제되어 나타나지만, 2,000 K에 이르는 고온조건이기 때문에 일반적인 열화학 반응기에서는 얻을 수 없는 여러 반응을 달성할 수 있다. 예를 들면 2,000 K의 고온 반응이기 때문에 난분해성 가스를 손쉽게 분해할 수 있으며, 중대형 크기의 반응기를 통해 얻는 열화학반응을 초소형 반응기를 통해서도 얻을 수 있다. Fig. 2는 디젤연료를 사용한 부분산화(Partial Oxidation) 반응을 일으킨 회전 글라이딩 아크 플라즈마 반응을 보여주는 사진으로, 그림에서 보듯이 연료개질 화염과 원통형 석영관 출구 부근부터 공기를 만나 발생된 합성가스 화염을 볼 수 있다.

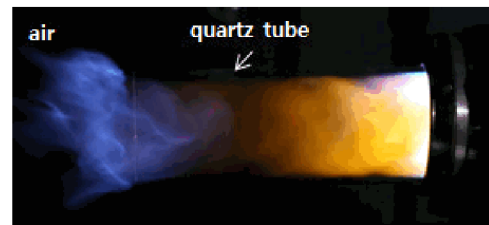


Fig. 2 plasma diesel fuel reforming & flame  
dia. of reactor : 45 mm

그림과 같이 소형의 반응기에서 연료개질 반응을 달성할 수 있으면, 해당 기술의 산업적인 응용은 매우 다양해질 수 있다. 예컨대 수소를 탄화수소 연료로부터 발생시키고, 1) 발생된 수소를 활용하여 화염이 불안정한 연소기의 가연한계를 확장시키거나 [1, 2, 3], 2) 자동차 또는 선박과 같은 수송용 기계에서 질소산화물(NO<sub>x</sub>)을 환원시키는 선택적 촉매공정의 환원제로서 수소를 이용할 수 있다 [4]. 또한 천연가스의 주성분인 메탄을 보다 고부가 가치가 있는 에틸렌으로 전환시키는 공정도 가능하다 [5].

플라즈마를 활용한 화염 안정화 기술을 실제 현장에 적용시킨 대표적인 기술로 매연저감장치 제

\* 한국기계연구원 환경시스템 연구본부  
연락처, yhsong@kimm.re.kr  
TEL : (042)868-7302 FAX : (042)-868-7284



생기술을 들 수 있다. 디젤 매연저감장치는 세라믹 필터에 산화촉매가 코팅되어 있어 250 °C 이상의 온도에서 배기가스로부터 포집된 매연을 산화시키는 장치이다. 고속 주행이 빈번하여 배기가스 온도가 높은 일반 차량과는 달리 저속운전을 주로하게 되는 건설기계와 같은 특수차량은 소형 버너를 활용하여 배기온도를 강제로 승온시킬 수밖에 없는데, 디젤 배기관 내에서 일반 디젤 버너를 통해 안정적인 화염을 얻기 위해서는 화학적 당량비의 조절 등을 비롯한 다양한 조치가 필요한 것으로 알려져 있다. 이에 반해 플라즈마 반응기를 통해 화염을 안정화시킬 경우 연소기의 구조가 단순해지고 외부에서 공급하는 공기량이 줄어드는 등의 장점이 있다.

최근 기계연구원에서는 기존 매연저감장치 장치가 어려웠던 군 특수차량에 플라즈마 버너 기술을 장착하여 1년 이상 안정적인 운행을 수행할 수 있었다. 플라즈마 버너가 개발되었던 초기에는 전원장치 가격 및 EMI (Electro Magnetic Interference) 문제가 있었으나, 이러한 문제들이 해결되면서 다수의 특수차량에 해당 기술이 적용될 수 있는 길이 열리게 되었다. Fig. 3은 군 특수차량에 장착된 매연저감장치 사진이며, Fig. 4는 해당 기술의 적용을 통한 매연저감 성능을 나타내는 그래프이다. 그리고 Fig.5는 장치간에 걸처 성능을 향상시켜온 전원장치를 보여주고 있다.

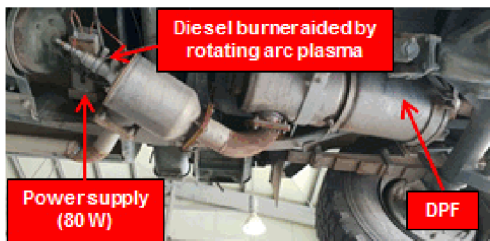


Fig. 3 plasma burner & DPF



Fig. 4 reduction of soot with DPF regenerated by plasma burner

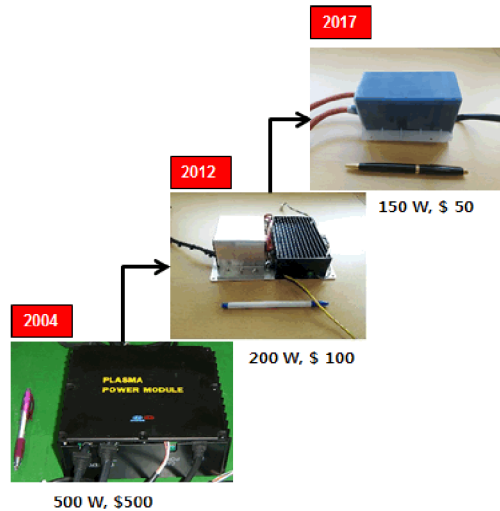


Fig. 5 evolution of power supply for on-board type rotating arc plasma generation

### 참고 문헌

- [1] S. H. Pyun, D. H. Lee, K.-T. Kim, and Y.-H. Song, " Application of plasma fuel reformer to an on-board diesel burner", Plasma Chem Plasma Process 36, 329-340, 2016
- [2] N.K. Hwang, J. Lee, D. H. Lee, Y.-H. Song, "Interactive Phenomena of a Rotating Arc and a Premixed CH<sub>4</sub> Flame ", Plasma Chem Plasma Process (2012) 32:187-200
- [3] D. H. Lee, K.-T. Kim, H. S. Kang, Y.-H. Song, and J. E. Park, "Plasma-Assisted Combustion Technology for NO<sub>x</sub> Reduction in Industrial Burners ", Environ. Sci. Technol. 2013, 47, 10964-10970
- [4] D. H. Lee, J.-O. Lee, K.-T. Kim, Y.-H. Song, E. Kim, H.-S. Han, "Hydrogen in plasma-assisted hydrocarbon selective catalytic reduction", Int. J. Hydrogen Energy 37, 3225-3233, 2012
- [5] H.-S. Kang,, D. H. Lee, K.-T. Kim, S. Jo, S. Pyun, Y.-H. Song, S. Yu, "Methane to acetylene conversion by employing cost-effective low-temperature arc, Fuel Processing Technology 148, 209-216, 2016

## 폐자원에너지 기술의 미래 방향

윤용승\*

### Future Direction of Waste-to-Energy Technologies

Yongseung Yun\*

#### ABSTRACT

Using wastes for clean energy source has getting more attention after several NIMBY cases of utilizing SRF occur in Korea. Until now, incineration and reclamation were the major methods in treating wastes, but it's becoming an unacceptable option. Recent issues of hydrogen-society, CO<sub>2</sub>-reduction, zero-emission, NIMBY clearly guide the future direction for waste-to-energy technologies. Fundamentally solution for NIMBY dictates all other issues. For overcoming NIMBY, revolutionary investment should follow, and simultaneously should find a way in technologies that can reduce the cost.

**Key Words** : Waste, WTE, NIMBY, SRF

폐자원은 가정에서 발생하는 생활폐기물, 산업계에서 발생하는 산업폐기물, 하폐수 슬러지, 폐목재, 폐플라스틱, 가축분뇨 등 사회에서 발생하는 폐기물을 통칭하는 표현이다. 기본적으로 모든 물질은 유기질과 무기질 성분으로 구성되어 있으므로, 가치가 있는 형태로 분리 변환이 가능하면 유용하게 활용할 수 있다. 이 경우 폐기물을 폐자원으로 명칭을 달리 표현할 수 있다. 유기질 물질은 기본적으로 열량을 함유하고 있으므로 에너지로 활용이 대표적이고, 무기질 물질은 분리 및 정제 등을 통해서 가치 있는 형태로 재활용하는 방식이 적용된다.

유기질 폐기물은 가연성과 유기성 폐기물로 구분하여 대부분 에너지 형태로 이용하고 소각, 열분해, 합성가스화, 바이오가스화와 같은 기술이 적용되어 왔다. 한국도 80년대 들어 생활폐기물의 소각시설이 본격 사용되어 40여년의 역사를 가지고 있다. 2000년대 들어 환경과 기후변화에 대한 인식이 높아지면서 폐기물을 3R(Reduction, Re-use, Recycle) 개념에서 가능한 재활용하는 세계적인 추세이다. 하지만 폐기물 특성상 잔재물은 항상 발생하게 되고 이를 처리하는 데는 열적처리가 가장 현실적이다. 하지만, 이 과정에서 발생하는 오염물질에 대한 거부감으로 NIMBY가 확대되어 이제는 거의 모든 에너지시설

을 기피하는 단계까지 다다르고 있다.

모두가 꺼리는 폐기물을 유용한 폐자원으로 활용하여야 한다는 점은 분명하다. 모두가 싫어하므로 이를 해결하는 방법은 나름 간단할 수 있다. 비용을 들여 완벽한 처리를 하거나 폐기물 시설로 인해 피해를 주장하는 이슈들에 대해 충분한 보상이 되면 된다. 하지만, 사회적으로 비용을 적정수준에서 정할 수밖에 없는 현실이므로 기술과 비용 측면에서 해결방안을 찾아야 한다.

대응방안으로는 설비의 지하화를 통한 주변 주민들의 재산가격 하락을 역전시키고 환경오염물질 배출 zero화를 달성하고 폐기물에서 발생하는 에너지와 부산물의 경제적 가치를 극대화시켜야 한다. 지금의 기술로는 지금보다 대략 2.5배의 비용 투자가 요구되는데, 이를 저감시키기 위한 기술개발의 여지는 아직 많다. 기존설비의 compact화, 모듈화, 표준화, ICT를 통한 유지보수 체계화 및 여러 공해물질의 동시저감/고효율화 기술 등 개발 이슈는 다양하다.

한국 및 일본, 유럽연합, 호주, 뉴질랜드 등 OECD 여러 나라들이 지금까지 화석연료로 인한 공해문제, 대도시지역 내 미세먼지 문제, 범지구적 CO<sub>2</sub> 문제들에 동시에 대응이 가능한 수소를 1차 에너지의 기반으로 하는 사회를 구현하고자 노력을 시작하였다. 폐자원은 특성상 대도시에서 많이 발생하고 이동을 최소화할 수 있으면 여러 편익이 발생하므로, 발생지역 내에서 그 지역에서

\* 고등기술연구원 플랜트엔지니어링 담당 부원장  
† 연락처, [ysyun@iae.re.kr](mailto:ysyun@iae.re.kr)  
TEL : (031)330-7486 FAX : (031)330-7118

필요로 하는 가스나 수소를 청정하게 생산할 수 있다면 매우 이상적이다. 중앙집중식이 아닌 분산형태로서 미래 에너지사회가 가고자 하는 방향이기도 하다.

요약하면, 폐자원을 활용하는데 기술적 측면에서 할 역할이 매우 많으며, 미래 수소사회에 대응하고 실비지하화를 통한 사회환경적 영향을 최소화시키고 환경오염물질의 zero emission을 추구하면서 NIMBY를 극복하는 방향이 설정될 수 있다. 처음에는 뜬구름 잡는 것과 같은 허황된 개념으로 치부될 수 있겠지만, 이미 이런 노력이 없으면 안 되는 시점으로 한국은 가고 있다.

최근 한국에서 발생한 가연성폐자원인 SRF(Solid Refuse Fuel)을 열병합발전소에 원료로 사용하려는 프로젝트들이 좌절된 사례가 이러한 추세를 극명하게 증언해주고 있다. Table 1과 2에서 보듯이 고체연료를 사용하지만 천연가스 발전소의 환경배출허용기준 이하로 설비를 구축하겠다고 해도 주민들이 반대를 하므로, 이미 한국은 폐기물설비를 건설 운영하고자 할 때는 천연가스를 사용하는 경우보다 더 엄격한 배출허용기준을 만족해야 하는 상황이다. 일부 사례는 천연가스 발전소도 반대하므로 위에 언급한 기술방향이 결국은 필수적이 될 가능성이 높아지고 있다.

### 참고 문헌

- [1] Y. Yun, "Recent Trend in Environmental Regulation Level for Energy Plants Using Solid Fuels ", Aspects in Mining and Mineral Science, Vol. 3, Issue 5, 2019, pp. 434-437.
- [2] 윤용승, " SRF 열병합발전의 경제적/환경적 특성과 주민 수용성 ", 2018, 폐자원에너지기술협의회 2018 춘계기술워크숍 자료집.

Table 1 Comparison of environmental permit values for different energy plants with actual plant cases in Korea

Item	Korean Legal Environmental Permit Values						Special Permit Limit for Naepo new city (SRF-LNG cogeneration)	Najoo SRF Power Plant (design values)
	LNG Power Plant			Large MSW Incinerator (Energy Recovery Plant)	SRF Power Plant			
	operational before 2015	new permit from 2015	new permit from 2020		Current	new permit from 2020		
SOx (ppm)	35	20	10	30	30	20	8	10
NOx (ppm)	50	20	10	70	70	50	20	25
Dust (mg/Nm <sup>3</sup> )	15	10	10	20	20	10	3	5
CO (ppm)	50	50	50	50	50	50	30	40
Dioxin (ng-TEQ/Sm <sup>3</sup> )	-	-	-	0.1	0.1	0.1	0.01	0.05

Table 2 Emission values from existing coal-fired power plants in Korea (April, 2017)

Item	Korean Legal Environmental Permit Values (>100 MW)		Existing Coal-fired Power Plant (500 MW-class)	Newly Installed USC Coal Power Plant (1,000 MW-class)	Newly Installed IGCC Coal Power Plant (300 MW-class)
	New Plant	Old Plant			
SOx (ppm)	50	80-100	13-36	34	1
NOx (ppm)	50	70-90	41-67	34	28* (< 10)
Dust (mg/Nm <sup>3</sup> )	10	20-25	0-5	1	0

\*: plans to install SCR for reducing NOx to < 10 ppm

## 대체연료 엔진 연소 기술 동향

배충식\*†

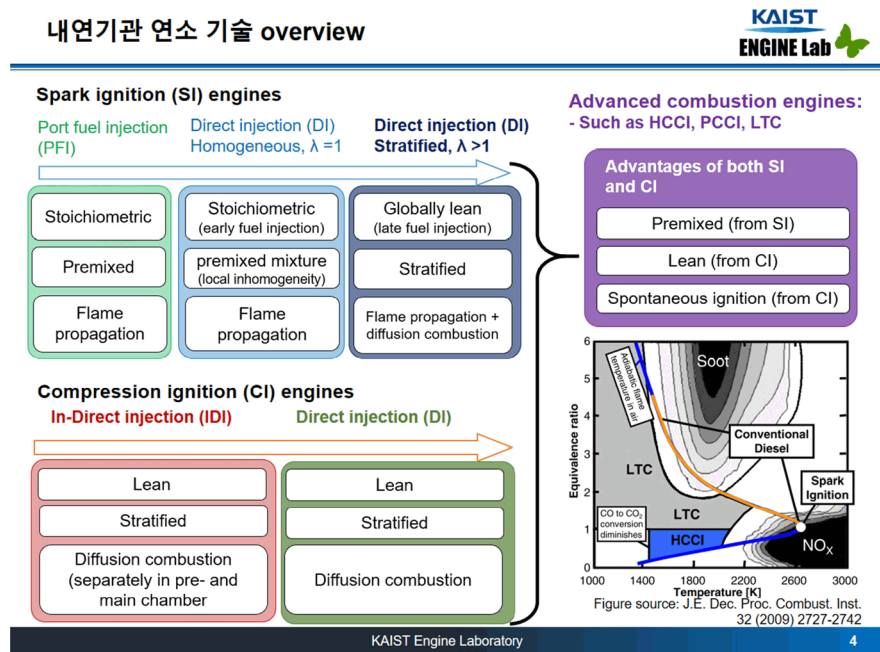
## Engine Combustion Technology Trends of Alternative Fuel

Choongsik Bae\*†

## ABSTRACT

The industry and technology of the internal combustion (IC) engine have been continuously developed since its invention. Although the thermal efficiency of the internal combustion unceasingly improved, the IC engine has many encountered problems, especially for environmental issues: Global warming, and atmospheric issues. Adopting alternative fuels may reduce harmful emissions because of the different combustion characteristics and chemical formulas in fuel. Furthermore, combustion with lower carbon contents fuel may cause the reduction of carbon dioxide (CO<sub>2</sub>) emission from the engine emissions. Not only for the emission characteristics, but thermal efficiency could be improved depending on the type of fuel. Moreover, the usage of alternative fuels could contribute to energy sustainability, which mainly expected with the development of biofuels. Overview of the applicable alternative fuels for the IC engine was deeply discussed by comparing each alternative fuels. In conclusion, the combustion and emission characteristics of each alternative fuel were summarized.

**Key Words:** IC engine, Alternative fuel, Combustion Efficiency, Global warming, Particulate matter



\* 카이스트 기계공학과

† 연락처자, [csbae@kaist.ac.kr](mailto:csbae@kaist.ac.kr)

TEL : (042)-350-3044 FAX : (042)-350-5044

## 대체연료의 필요성



### 대체연료 사용시 잠재적 기여도

**엔진 효율에 대한  
대체연료 특성**

Clean combustion with alternative fuels

↓

Emission control

Efficiency improvement

지속 가능한 에너지 / 지구온난화 둔화 기여

**Concerns**

- 제한된 화석연료
- 공해
- 지구 온난화

**Solutions**

- Alternative biofuels (CO2 lifecycle)

**Biofuel**

**에너지 사용 균형**

연료별 에너지 소비 전망

Shares in energy consumption by cars (%)

Year	Diesel	Gasoline	Biofuels	Electricity	LPG and CNG	H2
2010	39	53	4	4	8	4
2020	46	39	6	8	1	0
2030	50	32	7	9	1	1
2050	52	29	7	9	1	1

EU energy, Transport and GHG Emission trends 2050, 2013

**Possible solutions**

- 개선된 연소로 균형된 연료 사용
- Waste gas의 균형된 사용 (natural gas, LPG)

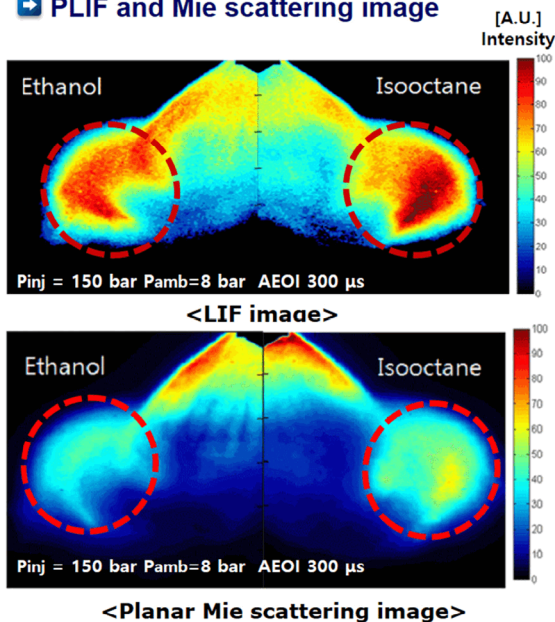
KAIST Engine Laboratory

5

## Ethanol – DI spray characteristics



### PLIF and Mie scattering image



### Ethanol spray shows enhanced local homogeneity

- ✓ Isooctane spray shows richer area on the tip of spray
- ✓ Ethanol spray shows smoother gradient of concentration distribution

### Ethanol spray showed faster evaporation

- ✓ Mie scattered signal can be considered as liquid phase (droplet) distribution [Sankar, 1999]
- ✓ Image of isooctane spray shows wider area with stronger signal on the spray tip vortex
- ✓ Due to the **enhanced evaporation characteristics (higher vapor pressure)** of ethanol at high temperature condition than gasoline

Source: KAIST

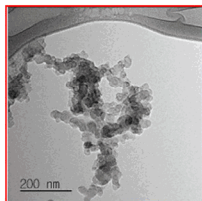
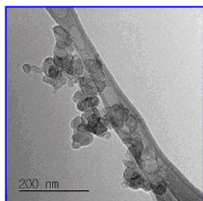
KAIST Engine Laboratory

20

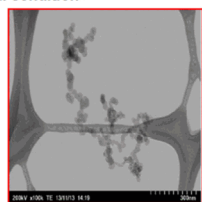
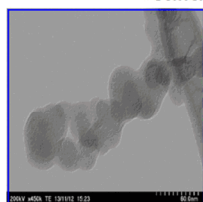
## Biodiesel – PM emission

■ Transmission microscopy images

❖ WCO biodiesel ❖ Commercial diesel

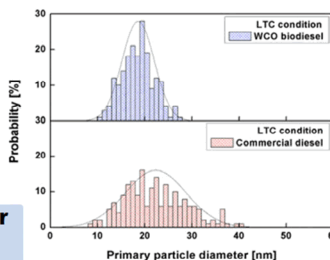
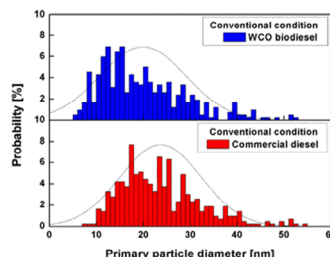


<Conventional condition>



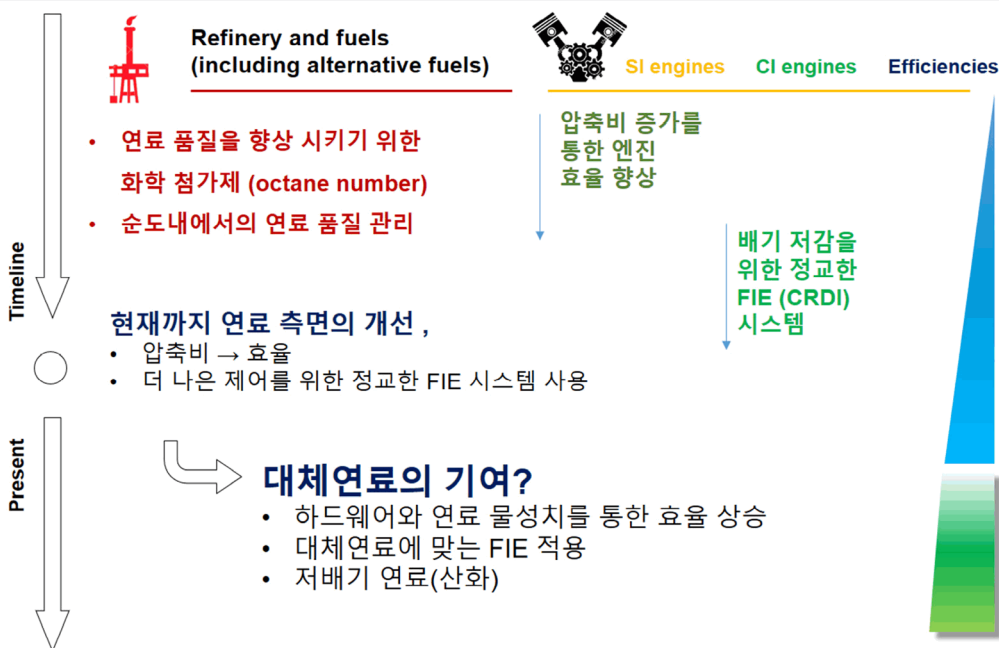
<LTC condition>

• **WCO biodiesel soot showed smaller primary particles than diesel soot**



## 정유 & 자동차 산업

\*FIE: fuel injection equipment  
\*\*CRDI: common rail direct injection



## 합성가스이용 엔진발전 기술

오승묵<sup>\*\*\*†</sup>, 김창업<sup>\*</sup>, 이용규<sup>\*\*</sup>, 박현욱<sup>\*</sup>, 이준순<sup>\*\*</sup>

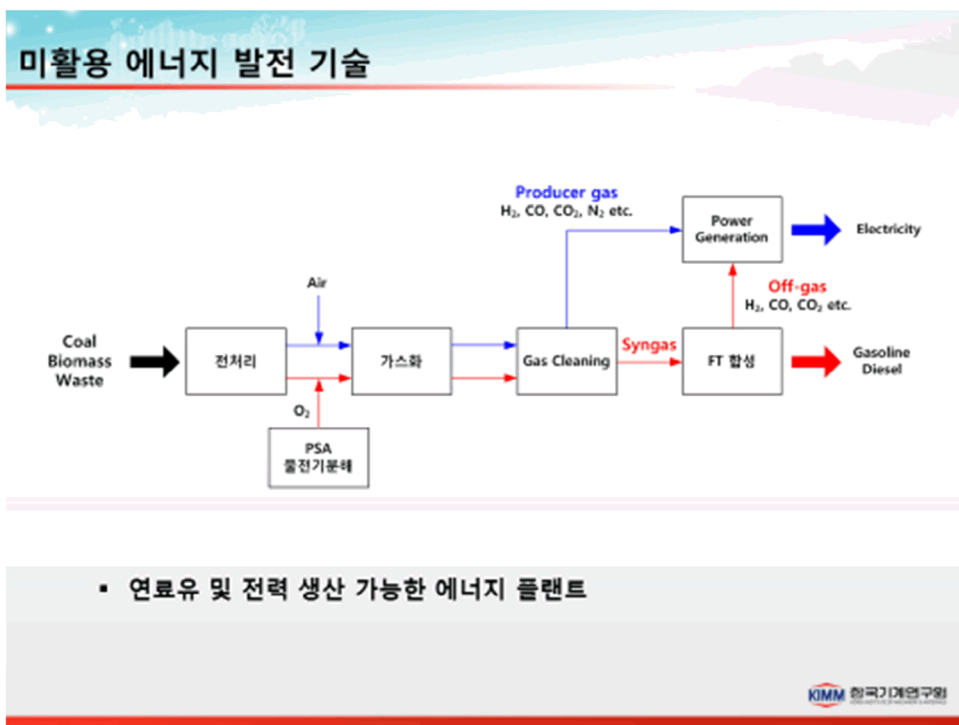
# The Development of an Internal Combustion Engine Fuelled with Synthetic Gas for Electric Power Generation

Seungmook Oh<sup>†</sup>, Changup Kim<sup>\*</sup>, Yonggyu Lee<sup>\*\*</sup>, Hyunwook Park<sup>\*</sup>, Junsoon Lee<sup>\*\*</sup>

### ABSTRACT

Recently syngas from various resources is widely used for energy and power generation as gasification technologies are improved to a large extent. Syngas combustion in an internal combustion engine have normally many technical challenges with the reason that its heating value is too low to obtain stable combustion. Even though hydrogen is one of main component gases in syngas, another non-combustible or inert gas like CO<sub>2</sub> and N<sub>2</sub> which deteriorate flame propagation speed occupy a large volume in the gas. In this study engine performance and emission characteristics with syngas were investigated and evaluated for real applications. Successful operations in stoichiometric and lean region were made with high compression ratios and emissions were also reduced with optimized operating parameters.

**Key Words** : Syngas, Lean burn, Compression ratio, Performance, Emissions,



\* 한국기계연구원 그린동력연구실

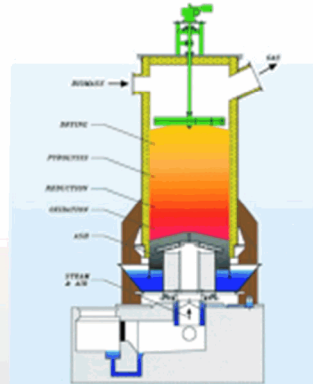
\*\* 과학기술연합대학원 대학교 환경에너지기계공학과

† 연락처, [mook@kimm.re.kr](mailto:mook@kimm.re.kr)

TEL : (042)-868-7382 FAX : (042)-868-7305

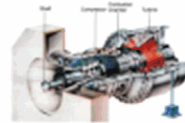
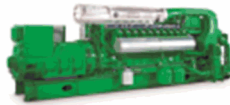
## 합성가스(Syngas)

- Syngas(Synthesis Gas, 합성가스)
  - **Gas mixture(carbon monoxide, carbon dioxide and hydrogen)** due to gasification of coal, biomass(municipal waste) to energy gasification, steam reforming of natural gas to generate hydrogen
  - Coal, biomass gasification
    - $C + H_2O \rightarrow CO + H_2$
    - $C + O_2 \rightarrow CO_2$
    - $CO_2 + C \rightarrow 2CO$
  - NG steam reforming
    - $CH_4 + H_2O \rightarrow CO + 3H_2$
    - $CO + H_2O \rightarrow CO_2 + H_2$



- Cf.  $H_2$  rich gas(수소농후가스)

## 내연기관 vs. 가스터빈



	Internal Combustion Engine	Gas Turbine
Heat and Power Ratio	1:1	2:1
Type of Heat Needed	Hot water, Some steam	Mostly Steam
Load	More variable	More constant
Market Driver	Electricity cost	Heat/Cooling cost

From Caterpillar KIMM 한국기계연구원



## 단기통엔진(Single cylinder engine)

Engine type	4-stroke, 1-cylinder
Bore X Stroke [mm]	123 X 155
Displacement [cm <sup>3</sup> ]	1,842
Ignition	Spark ignition
Fuel	Simulated Off-gas (H <sub>2</sub> , CO, CO <sub>2</sub> )
Compression ratio	11, 13, 15, 17
Air system	Natural aspiration
Fuel supply system	Mixer

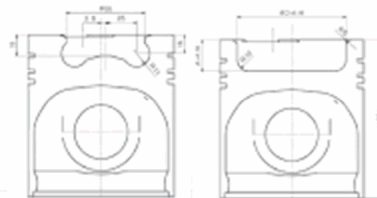


KIMM 한국기계연구원

## 실험 조건

- 모사 Off-gas 조성비:  
H<sub>2</sub> 30%, CO 25%, CO<sub>2</sub> 45% (1,662 kcal/Nm<sup>3</sup>)
- 엔진 압축비 : 13, 15, 17
- 엔진 운전 조건 :  
IMEP 3 bar @ 1,800 rpm
- 이론공연비 및 희박 조건
- MBT(Maximum Brake Torque) timing

압축비	13	15	17
A(mm)	23.60	18.00	18.00
D(mm)	84.80	79.60	66.00

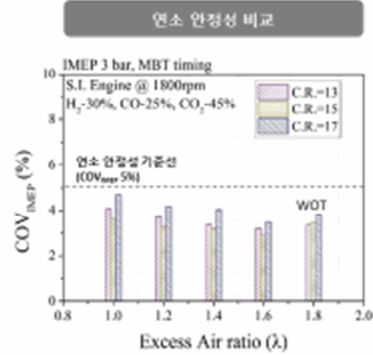
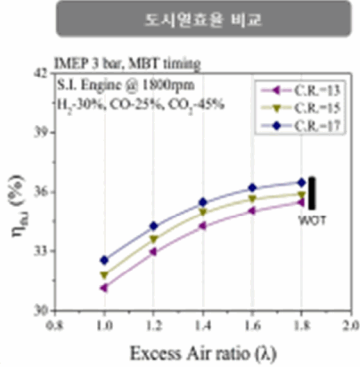


기본 디젤 CR=17 형상

CR=13, 15 형상

KIMM 한국기계연구원

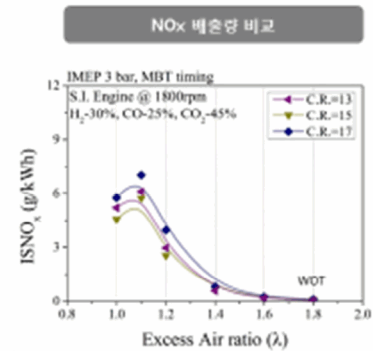
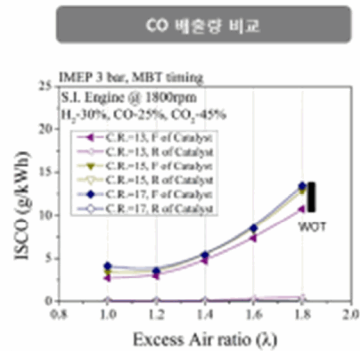
## IMEP 3 bar – 연소성능



- 압축비/공기과잉을 증가에 따라 도시열효율 증가
- 모든 조건에서 연소안정성 COV<sub>IMEP</sub> < 5%

KIMM 한국기계연구원

## IMEP 3 bar – 배기특성



- 일산화탄소(CO); 북미 Tier 4 규제(5 g/kwh 이하) 만족
- 질소산화물(NOx);
  - ✦ 이온공연비 조건 -> 공연비 제어를 통한 촉매활성화로 저감 가능
  - ✦ 희박연소 조건 -> 공기과잉률(λ) 2.0이상 Tier4 규제(0.4 g/kwh) 만족 가능

KIMM 한국기계연구원

# 예혼합가스 스파크 점화와 화염전파에 관한 연소공학적 이해

김남일\*†

## Academic Understanding of Spark Ignition and Flame Propagation of Premixed Flames

Nam Il Kim\*†

### ABSTRACT

Premixed flame propagation and its ignition have been important issues in combustion engineering. Spark ignition starts from a narrow space and flame propagation is affected by the configuration of the combustion space. In this lecture, some important knowledge for understanding of unsteady flame propagation were introduced. Flame stretch, shear stress, heat loss, and pressure fluctuation play important roles.

**Key Words** : Ignition, Flame Propagation, Heat loss, cellular flame

금번 추계연소학회의 IEA 특별세션은 주로 엔진 연소 기술에 관한 주제들로 구성되었다. 본 연구자는 그간 기초적인 연소현상과 해석 방법을 연구하여 왔는데, 이번 기회를 통해 가스연료를 사용하는 엔진의 연소 현상의 이해를 위해 고려해 볼 수 있는 몇 가지 기본적인 현상을 제시하고, 그에 관한 이해를 도울 수 있는 몇 가지 오래된 연구 결과들을 소개하고자 한다.

예혼합화염은 다양한 연소시스템에서 활용되고 있다. 가장 대표적인 시스템으로 스파크 점화 엔진을 예로 들 수 있다. 엔진의 경우 예혼합가스의 흡입 이후 압축과정을 통해 고온, 고압의 조건에서 점화와 화염전파가 이루어지게 된다. 일반적인 경우라면 화염의 특성길이 스케일에 비해 충분히 큰 공간에서 연소가 발생한다고 볼 수 있지만, 점화 현상이 실질적으로 중요한 조건에서는 연소공학적 관점에서 어떤 원인에 의해서든 가연한계 근처의 연소조건이 조성되었다고 볼 수도 있다. 따라서 본 발표에서는 가연한계 근처의 예혼합화염의 스파크 점화 및 그 이후의 화염의 전파특성에 대해 주로 다루기로 한다.

우선, 점화와 화염 전파가 발생하는 조건에서의 연소시스템의 형상적 특성을 고려할 필요가 있다. 스파크점화 엔진의 경우 주로 상사점 근처의 최소 연소체적 조건에서 짧은 시간 동안 연소과정이 종료되므로 연소공간의 변화는 상대적으로 적어서 기초적인 열역학적 해석에서는 정적과정으로 모사하기도 한다. 이처럼 좁은 공간에서 갑작스런 연소의 시작은 연소 공간의 압력의 증가와 함께 상대적으로 큰 유동의 변화를 유발한다. 따

라서 본 발표에서는 좁은 공간에서 스파크점화의 발달과 비교적 큰 유속의 변동이 유발되는 조건에서의 화염의 비정상 거동에 대한 몇 가지 연구 결과를 소개하고, 이와 관련한 핵심 이론을 소개하고자 한다.

저자는 최근에 Fig. 1과 같이 좁은 간격의 디스크 버너(NGDB, narrow gap disk burner)를 이용하여 소염한계와 점화 이후의 화염의 전파 특성을 연구하고 있다[1]. 기존에도 다수의 연구자들에 의해 유사한 연구가 진행된 바 있지만 본 연구 그룹의 가장 특징적인 차이는 디스크간격을 연속적으로 변화할 수 있다는 점이다. 이러한 특징을 활용하여 각각의 당량비 조건에서 소염거리를 직접 측정하고, 채널길이를 변경하면서 연소현상의 일정한 규칙을 발견할 수 있었다.

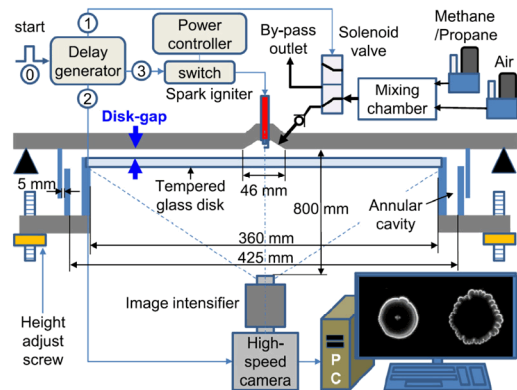


Fig. 1. An experimental setup for ignition and unsteady flame propagation [1]

대표적인 조건에서 메탄과 프로판의 화염전파 특성 실험 결과를 Fig.2에 제시하였다. 일정 시간 간격의 화염형상을 중복하여 표시한 결과이며, 디스크의 간격(d)을 각 당량비의 소염거리(dq)로 무차원화 하였다. 디스크의 간격이 작을 때에는 대체로 셀 구조의 화염을 연료와 당량비에 무관하게 관찰할 수 있었다. 루이스 수가 연료의 희박 및 과농 영역에서 1보다 크거나 작은 값으로 반전된다는 점을 고려할 때, 셀 구조의 발달 자체를 루이스 수의 효과로 설명하는 것은 타당하지 않다. 다만, 생성된 셀 구조의 추가적인 발달 여부는 루이스 수의 효과로 설명 가능하다. 드린데, 디스크 간격이 커짐에 따라 셀구조의 화염은 사라지고 화염의 전파 속도가 상승하는 것을 알 수 있으며, 이후의 연구를 통해 밀도차를 고려한 등가 전파속도는 기존의 층류연소속도에 근접하는 것으로 판단되었다.

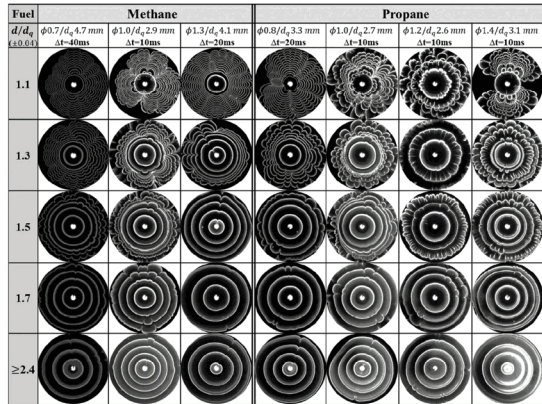


Fig. 2. Variation of flame shapes during propagation [1]

이처럼 좁은 디스크 간격에서 발생하는 복잡한 셀 구조의 특성은 채널 내부의 열 및 유동 경계층의 발달과 연계하여 설명할 수 있다. 이와 관련하여, Fig. 3에 제시된 비정상 유속 변동에 의한 화염의 소화에 관한 연구를 음미해 볼 가치가 있다[2,3]. 초기에 화염의 전파속도에 해당하는 유속을 유도하면 화염이 관 내에 정지상태로 존재할 수 있다. 이 경우 화염의 위쪽(하류)에서는 관의 온도가 높고, 화염의 아래쪽(상류)에서는 관의 온도가 상대적으로 낮다. 이러한 조건에서 화염에 추가적인 속도 변동을 인위적으로 유도하게 되는데, 화염의 연소속도보다 충분히 큰 변동속도를 부과하였다. 그 결과, 화염이 뜨거운 관 내부로 움직일 때 오히려 소화가 쉽게 발생하고, 차가운 관 내부의 상류로 움직일 때 화염의 강화가 발생하였다. 이러한 현상은 벽면근처 화염의 스트레치 변화로 설명되었는데, 그 개념이 Fig. 4

에 제시되었다. 초기의 화염은 평면의 모양을 유지하고 있지만, 벽면 근처에서는 열손실을 겪고 있으며, 벽면근처의 온도 감소에 따라 연소속도의 감소를 예상할 수 있다. 이러한 조건에서 인위적으로 급격한 속도 변동이 발생하면, 벽 근처에서 점성경계층이 성장하면서 급격한 속도 변동이 발생하게 된다. 만일 이 영역에 화염이 존재한다면, 그 화염은 유속의 발달 방향에 따라 화염이 하류로 움직일 때는 그림 4(b)와 같은 위치 변동을 겪게 될 것이다. 반면에 연소가스 쪽에서 미연가스쪽으로 급격한 속도 변동이 발생하면 화염이 상류로 움직이게 되고 속도 경계층 내에서는 4(c)와 같은 화염 구조를 가지게 된다.

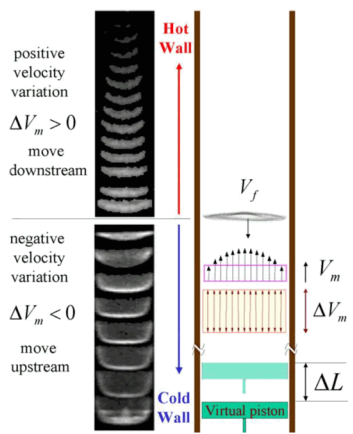


Fig. 3 Schematic diagram of unsteady flame extinction within a narrow tube [2,3]

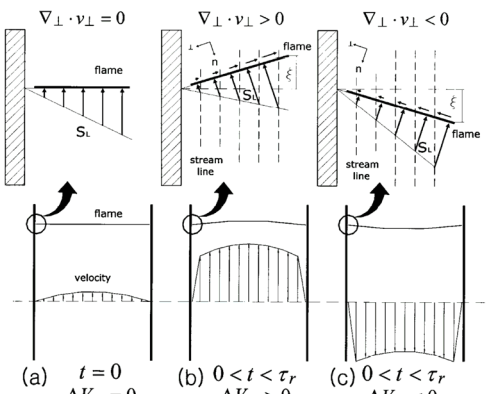


Fig. 4. Flame stretch with sudden velocity change [2,3]

일반적으로 화염의 스트레치 효과를 논의할 때 다음의 식을 사용할 수 있다[4].

$$K = \frac{1}{S_L} \frac{dS_L}{dt} = \frac{1}{S_L} (\mathbf{v}_r \cdot \mathbf{g}_n) \quad (1)$$

우변의 두 번째 항은 곡률을 가진 화염의 이동에 의한 추가적인 스트레치를 의미하는데, 본 연구에서는 화염면 방향 속도 발산에 비해 상대적으로 작다. 화염면의 임의의 위치에서 연소속도와 유동속도의 변화를 고려하면 화염이 하류로 움직이는 4(b)의 경우 양의 스트레치를 겪고, 화염이 상류로 움직이는 4(c)의 경우 음의 스트레치를 겪게 됨을 알 수 있다. 따라서 열손실이 존재하는 벽면 근처에서는 화염이 미연가스 방향으로 이동할 때 기본적으로 열 및 물질의 발산이 억제되며, 루이스수가 1보다 작은 희박 프로판 화염의 경우 화염의 강도가 추가적으로 증진되는 효과를 기대할 수 있다.

이처럼 제한된 연소공간에서 속도의 변화가 있을 때, 화염전파속도의 변화에 대해 수치해석을 수행한 연구 결과가 있다[5]. 관내에 전파하는 화염에 대해 다양한 경계조건과 초기 조건에 대해 해석을 수행하였으며, 그 내용을 Fig. 5에 제시하였다. 평균 유속이 같으면서 속도 분포가 다른 세 가지를 비교하였으며, 계산 초기의 화염의 형상을 세 가지로 다르게 설정하고 결과르 비교하였다.

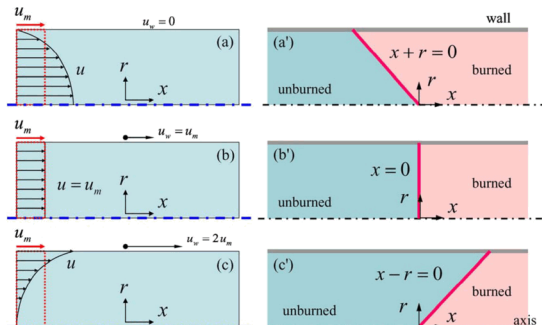


Fig. 5. Velocity profiles having the same propagation velocity and initial flame shapes: (a) positive velocity profile, (b) uniform velocity profile, (c) negative velocity profile, (a') positive flame, (b') flat flame, (c') negative flame [5]

해석결과 화염의 전파속도를 구하였으며, 관의 내부 표면을 단열로 가정한 경우(A)와 300 K 상온으로 가정한 경우(T)에 대해 각각 Fig. 6과 Fig. 7에 제시하였다. 그리고 각각의 그림에 대해 화염 상류의 유속 분포를 세 가지로 구분하였다. 상류에서 하류로 완전발달된 속도분포를 가지는 경우(P), 균일한 유속분포를 가지는 경우(U), 하류에서 상류방향으로 음의 방향으로 완전발달된 경우(N)이다. 하첨자로 표시된 slip은 벽면에 마찰이 없는 경우이며, 그 외의 조건들은 모두 벽면의 마찰을 고려하였다. 하첨자 p와 n은 각각 수치해석의 초기에 화염의 형상이 하류로 뾰족한

분젠화염의 모양을 가진 경우와 그 반대의 모양을 가진 경우를 의미한다. 따라서 Fig. 6의 'AUslip'은 단열관 내부에 균일 속도분포의 유동장을 가지고 벽면의 마찰을 무시한 경우에 대한 화염의 전파속도 계산 결과를 의미한다.

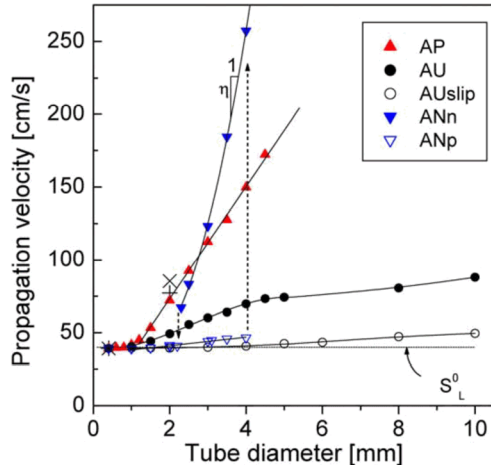


Fig. 6. Effects of velocity profiles on propagation velocities of the flames in adiabatic tubes ( $\times$ , AP with uniform grid of  $50 \mu\text{m}$ ;  $+$ , AP with uniform grid of  $25 \mu\text{m}$ ) [5]

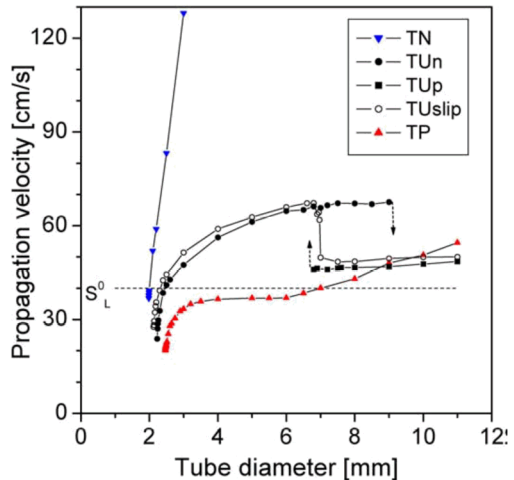


Fig. 7. Effects of velocity profiles on propagation velocities of the flames in isothermal tubes [5]

Fig. 6의 결과를 살펴보면 단열관 내부에서의 화염의 전파속도는 작은 직경의 관 내에서는 층류 연소속도와 동일한 값을 가진다. 하지만 관의 직경이 조금만 커지면 벽면 마찰이 없는 조건(AUslip)을 제외하고는 모두 큰 전파 속도로 변화하게 된다. 특히 화염 상류에서 관 근처의 속도가 큰 음의 유속분포를 가지는 경우(ANn)에는

전파속도가 급격히 커지는 것을 알 수 있다. 반대의 유속분포를 가지는 경우(AP)조건과 비교할 때 특정 길이 스케일을 기준으로 전파속도의 역전이 발생하는 것을 알 수 있다. 이는 화염 불안정성의 근본적인 원인이 될 수 있다.

마찬가지로 차가운 관 내의 화염 전파에 대한 해석 결과인 Fig. 7에서도 화염 전파의 유속 분포의 형태에 따른 급격한 화염전파속도의 차이와 벽면 마찰로 인한 이중 해의 존재를 확인할 수 있다. 이러한 결과들을 유심히 들여다 보면 지금까지 실험적으로 보고된 비정상 화염 거동의 다양한 현상들을 상당부분 이해할 수 있을 것으로 판단된다. 하지만, 이 분야의 연구자들의 이해는 정제되고 있으며, 서로 복잡하게 얽힌 다양한 화염불안정성 메커니즘을 명확히 규명하기 위한 노력이 필요하다. 이러한 기본적인 화염 거동에 대한 이해가 완성될 때 보다 복잡한 실제 엔진에서의 연소 현상에 대한 이해에 진전이 이루어질 것으로 판단된다.

## 후 기

본 연구의 일부는 한국연구재단의 지원(NRF-2018R1A2B600917)으로 수행되었습니다.

## 참고 문헌

- [1] H.J. Jang, G.M. Jang, N.I. Kim, "Unsteady propagation of premixed methane/propane flames in a mesoscale disk burner of variable-gaps," *Proceedings of the Combustion Institute* 37 (2019) 1861-1868.
- [2] N.I. Kim, U.D. Lee, H.D. Shin, "Laminar Premixed Flame Propagation Using Large Axial Velocity Variation," *Proceedings of the Combustion Institute* 28 (2000) 1867-1874
- [3] N.I. Kim, U.D. Lee, H.D. Shin, "Extinction of a premixed flame by a large variation in axial velocity," *Combustion and Flame* 136 (4) (2004) 467-480.
- [4] S.H. Chung, C.K. Law, "An Invariant Derivation of Flame Stretch," *Combust. Flame*, 55 (1985) 123-125.
- [5] N.I. Kim, K. Maruta, "A numerical study on propagation of premixed flames in small tubes," *Combustion and Flame* 146(1-2) (2006) 283-301.

# 단일연료체계를 위한 대형 압축착화엔진에서의 JP-8 연소 특성

나용현\*, 김우영\*, 배충식†

## Combustion Characteristics of JP-8 in a Heavy-duty Compression Ignition Engine for Single Fuel Concept

Yonghyun Na\*, Wooyeong Kim\*, Choongsik Bae\*†

### ABSTRACT

Presented as a single fuel concept(SFC) in NATO since the 1980s, the JP-8 has been studied for fuel supply of various maneuver vehicles, mainly in the United States. JP-8 can promote oxidation of soot due to higher vaporization than diesel, so it can be expected to reduce fine particles in compression ignition engine. Therefore, JP-8 is necessary for energy security of the joint operation with the United States and particulate matter reduction needed nationally. JP-8 requires a separate combustion environment due to different chemical properties with diesel. In this study, JP-8 and diesel combustion characteristics such as thermal efficiency, emission and particle size distribution were compared. In conclusion, the comparison of combustion characteristic between JP-8 and diesel could have better combustion environment with injection strategy for applications in military vehicles.

**Key Words** : JP-8, Diesel(디젤), Particle Number(입자개수), Single Fuel Concept(단일연료체계), Injection strategy(분사전략)

#### 1. 서론

단일연료체계(Single Fuel Concept, SFC)는 북대서양조약기구 NATO에서 국가간의 다양한 군용 기동장비에 대한 작전지속지원 소요를 줄이기 위한 방법으로 제시되어왔다. 1980년대부터는 등유계 군목적 항공유인 JP-8(Jet Propellant 8)이 디젤을 대신할 수 있는 연료로 선정되어 압축착화엔진을 중심으로 연구가 진행되었다[1][3]. 특히 미군에서는 JP-8을 실 기동장비에 활발히 적용하고 있어, 유사시 미국과의 연합작전의 비중이 크고 연료 수급을 해외에 의존하게되는 우리군의 입장에서 JP-8 적용은 에너지 안보 측면을 강화하는데 용이하다. 또한 최근 미세먼지 저감을 위한 범국가적인 노력이 군에서도 요구됨에 따라 군 목적 연료의 배기저감에 대한 노력이 요구된다. 기존연구에서는 JP-8의 높은 기화성은 연소간 높은 산화율로 Particulate Matter(PM)저감에 효과가 있어 군용차량에서의 미세먼지 저감을 기대할 수 있다. 하지만 디젤의 대체연료로서 JP-8은 디젤과 동일한 환경에서의 실험이 주로 진행되었으며 별도의 연소 환경 구성 및 Particle Number(PN)의 배출 특성에 대한 연구는 미비하다. 최근 자동차제어기술은 연료의 특성별로 전자식제어장치(ECU)를 통해 연료의 탐지[2] 및

연소환경 제어가 용이하여 이를 바탕으로 연료별 최적의 연소 환경을 구성 할 수 있다.

본 연구는 대형압축착화엔진에서의 JP-8과 디젤의 분사전략에 따른 성능 및 배기 특성을 통해 단일연료체계로서 JP-8을 군용차량에 활용할 뿐만 아니라 미세먼지 저감 가능성을 나타내고자 하였다.

#### 2. 실험 장치 및 실험 조건

##### 2.1 실험 장치

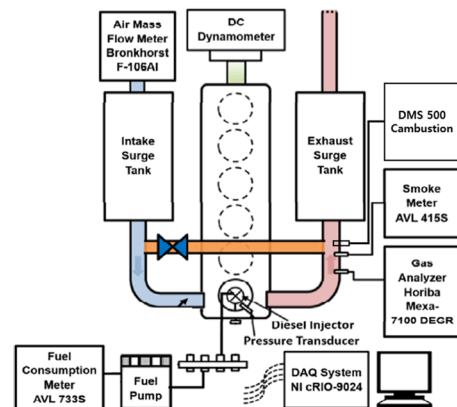


Fig.1 엔진실험 구성도

Table 1. 엔진 사양

Engine type	단기통 압축착화 엔진
-------------	-------------

\* 한국과학기술원 기계공학과  
† 연락처, [csbae@kaist.ac.kr](mailto:csbae@kaist.ac.kr)  
TEL : (042)350-3063

Bore x Stroke [mm]	100 x 125
배기량 [cc]	981
압축비	17.4 : 1
연료 분사계	커먼레일

Figure 1과 Table 1은 실험에 사용한 엔진과 주변 장치에 대한 구성도를 나타낸 것이다. 실험 엔진은 현재 사용중인 군용차량 엔진과 유사한 대형 압축착화엔진을 단기통으로 개조하여 사용하였다.

2.2 실험 조건

Table 2. 엔진 실험 조건

Speed [RPM]	1400
Load [net bar IMEP]	3

JP-8의 낮은 윤활성으로 연료 고압 펌프의 손상을 막기위하여 JP-8사용시 윤활 향상제 Infineum R655 1000ppm(0.1%)를 희석하여[1] 지속적인 실험이 되도록 하였다. 또한 분사 압력별 연소 특성 실험 시 총 열방출의 50%가 발생하는 Crank angle degree(CAD)를 나타내는CA50은 JP-8이 최적의 연비를 나타내는 크랭크 각도의 상사점 이후 2CAD에서 고정하여 실험하였다[3].

3. 실험 결과

3.1 디젤과 JP-8의 연소 비교

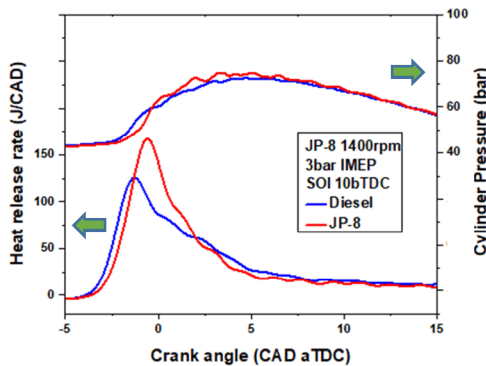


Fig 2. 디젤과 JP-8 열방출율, 연소실 압력 비교

Figure 2는 저부하 영역인 3bar IMEP에서 디젤과 JP-8의 열방출과 연소실내 압력을 각각 나타내었다. JP-8은 디젤 대비 낮은 세탄가로 인하여 자발화 성질이 낮아 긴 점화지연을 가지고, 높은 기화 특성은 연료와 공기의 혼합을 원활히 하여 예혼합연소의 비중을 크게하게 됨에 따라 높은 열방출율을 각각 나타내었다. 열효율은 디젤이 41.2% JP-8은 39.2%로 디젤이 1%가 높게 나타내었다. 배기특성은 JP-8이 디젤대비 연소간 높

은 고온 고압의 연소환경으로 질소산화물을 증가시켰으나 기화 특성과 더불어 soot의 산화를 촉진시켜 낮은 PM 및 PN배출을 나타내었다. 이러한 연소의 특성은 JP-8이 대형 압축착화엔진에서 미세먼지의 저감의 가능성을 나타내었다.

3.2 분사압력에 따른 디젤과 JP-8 PN분포

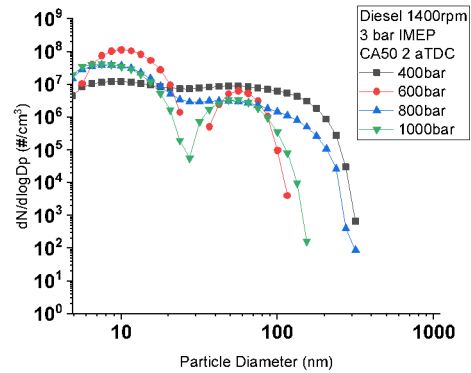


Fig 3. 분사압력별 디젤 연소간 PN 분포

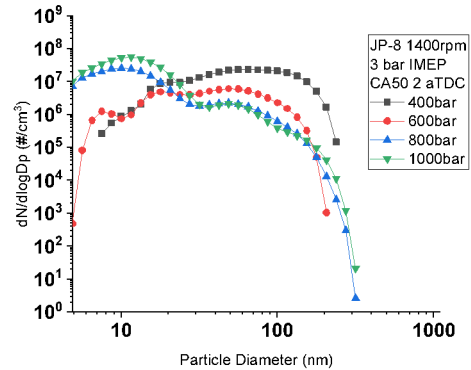


Fig 4. 분사압력별 JP-8 연소간 PN 분포

Figure 3과 Figure 4는 분사압력에 따른 디젤과 JP-8의 PN분포를 나타낸 것이다. 디젤은 연료의 분사압력이 증가 할수록 크기가 작은 Nucleation mode는 600bar에서 증가하다가 압력이 증가할수록 감소 하고 Accumulation mode는 지속적으로 감소하였다. 반면, JP-8은 연료의 분사압력이 증가할수록 Accumulation mode는 동일하게 감소하나 Nucleation mode는 디젤보다증가하는 경향을 나타낸다. 이는 JP-8연료가 가지는 기화특성과 긴 점화지연 기간이 국소적으로 당량비가 낮은 구간을 형성하게 되어 연료의 열분해 이후 형성된 Precursor들이 완전히 산화되지 못하고 배출된 것으로 예상된다.

4. 결론



본 연구에서는 대형 압축착화 엔진에서 디젤과 JP-8의 연소 특성을 비교하였다. JP-8은 디젤대비 열효율이 감소하였으나 고온 고압의 연소환경을 통하여 soot의 산화 촉진을 통해 입자상 물질이 저감하는 결과를 나타내었다. 하지만 JP-8은 높은 기화특성과 긴 점화지연으로 분사전략에 따라서 공기와 연료의 과도한 혼합을 야기하게 되어 오히려 Nucleation mode에서의 PN배출은 디젤보다 증가 할 수도 있음을 나타내었다. 이를 통하여 JP-8의 연소특성이 향후 단일연료체계로서 군용차량에 적용에 활용되고자 하였다.

## 후 기

본 연구는 환경부 Global-Top Project(글로벌탑 저배기/저탄소 자동차 신연소 원천기술 개발, 20160020001) 친환경자동차기술개발사업단의 지원에 의해 수행 되었으며 이에 감사드립니다.

## 참고 문헌

- [1] G.Anastopoulos, E. Lois, F. Zannikos, S. Kalligeros, C. Teas, "HFRR lubricity response of an additized aviation kerosene for use in CI engines," Tribology International, Vol. 35(9), 2002, pp.599-604
- [2] M.D. Smooke, I.K. Puri, K. Seshadri, "A comparison Between Numerical Calculations and Experimental Measurements of the Structure of a Counterflow Diffusion Flame Burning Diluted Methane in Diluted Air", Combust. Inst. 1986, pp. 1783-1792. Florin Mocanu, "On-Board Fuel Identification using Artificial Neural Networks Florin," SAE International Journal of Engines, Vol. 7, No. 2, 2014, pp. 937-946
- [3] 나용현, 김우영, 배충식, "AI기반 압축착화엔진개발을 위한 JP-8 연소 특성," 2019 한국군사과학기술학회 종합학술대회, 2019

## 음향적 커플링이 연소특성에 미치는 영향

황동현\*, 박수진\*, 안규복\*†

## Effect of Acoustic Coupling on Combustion Characteristics

Donghyun Hwang\*, Sujin Bak\*, Kyubok Ahn\*†

## ABSTRACT

An experimental study was conducted to investigate the effects of swirler geometry and flow condition on self-excited thermo-acoustic instability and bifurcation of flame structure. The combustion chamber length was manufactured in two types to simulate acoustically coupled/uncoupled conditions. Dynamic pressure, heat release, inlet velocity fluctuation, and CH\* chemiluminescence image were measured to analyze the mechanism for combustion instability. Bifurcation of the flame structure was not necessarily coincide with the onset of thermo-acoustic instability, but occurred at nearly same condition regardless of the combustor length. The results showed that the combustion instability occurred based on the principle of the limit cycle in the case of coupled long combustor. In the uncoupled short combustor, however, only stable combustion was observed under the same flow conditions.

**Key Words** : Flame bifurcation, Thermo-acoustic instability, Limit cycle, Swirl-stabilized combustor

질소산화물과 일산화탄소 배출 감소를 위해 가스터빈 엔진은 희박 예혼합 조건이나 부분 예혼합 조건에서 주로 작동된다. 가스터빈 엔진은 주로 스월러를 설치하여 운용되는데 이는 혼합 증대, 화염 안정화, 그리고 질소산화물 감축 등의 결과를 보여준다. 그러나 스월러는 종종 희박 예혼합 조건에서 자발 열-음향 불안정을 유도하는 것으로 알려져 있다[1]. 연소불안정은 열방출과 압력진동의 커플링에 의해 발생하며 시스템 결합의 원인이 되기 때문에, 이에 대한 이해는 필수적이며 많은 연구가 진행되고 있다[2,3].

본 연구는 모델 가스터빈 연소기에서 음향적으로 커플된 또는 커플되지 않은 조건을 모사하여 유동조건과 스월러 형상 조건이 열-음향 불안정 특성에 미치는 영향을 알아보았다. 또한 더 나아가 연소불안정과 연관된 화염구조 변이 현상에 대해 연구하였다.

Fig. 1은 본 연구에 사용한 모델 스월-안정화 연소기이다. 에틸렌과 공기로 구성된 예혼합된 기체는 혼합기에서 허니컴과 축방향 스월러를 통해 연소실로 공급된다. 압력섭동은 연소실과 혼합기에 설치된 각각의 동압센서를 통해 측정된다. Hot-wire anemometer는 혼합기 내 속도섭동을

측정하며 연소실에 5개의 열전대는 평균 온도를 계측하기 위해 사용되었다.  $431.5 \pm 5$  nm band pass filter가 장착된 photomultiplier tube와 ICCD 카메라를 사용하여 연소실 내 CH\* 자발광 섭동과 CH\* 자발광 이미지를 촬영하였다. 압력섭동, 속도섭동, 열방출 섭동은 NI-cDAQ에 의해 10 kHz의 샘플속도로 수집되었다. 화염구조 측정을 위한 시간 평균된 CH\* 자발광 이미지는 20 ms의 노출시간과 3 fps에서 측정되었다.

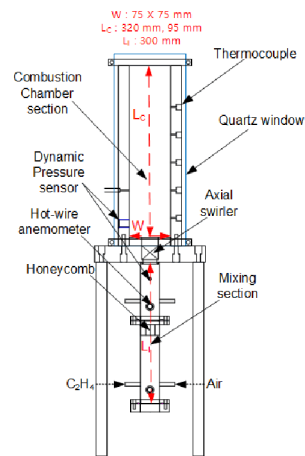


Fig. 1 Schematic of a swirl-stabilized combustor.

\* 충북대학교 기계공학부

† 연락저자, kbahn@cbnu.ac.kr

TEL : (043)261-3596 FAX : (043)263-2441

Table 1 Experimental conditions

Fuel, Oxidizer	C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> , Air
$u$ [m/s]	10, 15, 20
$\phi$	0.55 ~ 0.80, $\Delta 0.05$

스월러는 0.42, 0.73, 1.26의 스월 수(SN)를 갖는다. 연소실 길이(L<sub>c</sub>)는 320 mm에서 음향적으로 커플되며 대략 330 ~ 350 Hz의 1차 종방향 모드를 지배 주파수로 갖는다. 동일한 유동조건에서 95 mm의 연소실 길이는 음향적으로 디커플되고 모든 조건에서 안정한 연소를 나타낸다. 그 외 형상정보는 Fig. 1에 제시되었다. 유동조건은 Table 1에 요약되었다.

Fig. 2는 모든 실험조건에서 주파수에 대한 최대 PSD를 보여준다. Fig. 2(a)에 제시된 커플된 연소실은 특정 주파수에서 강하게 peak이 형성된 것을 알 수 있다. 대부분 15 m/s 이상의 입구 속도를 나타내며 그래프에 제시되어 있지 않지만 보통 당량비 0.70 이상에서 연소불안정이 발생한다. 특히 스월 수가 높을수록 높은 PSD를 보여 주지만 연소불안정이 발생한 영역은 반대로 더 좁은 것을 확인할 수 있다. 이는 스월러가 하나의 음향경계를 만들게 되는데, 스월 수가 높아지면 연소에 의해 생성된 음압이 혼합기까지 전달되기 힘든 것으로 판단된다. 즉, 상대적으로 약한

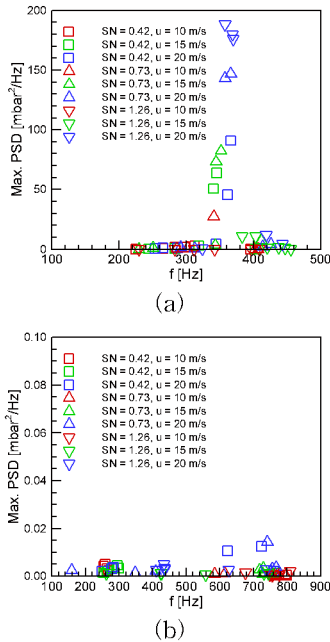


Fig. 2 Maximum power spectral densities as a function of the frequencies: (a) Long combustor, (b) Short combustor.

음압은 혼합기로 전달되지 못해 입구평균속도를 진동시키지 못하는 것으로 생각된다. 반면 매우 강한 음압은 혼합기에 전달되고 입구평균속도를 진동시켜 limit cycle의 원리에 따라 불안정성이 발생하는 것으로 예측된다. 반면 커플되지 않는 짧은 연소실의 결과인 Fig. 2(b)는 유동조건에 관계없이 매우 안정적인 연소이며, 주파수가 더 넓게 분포되어 있는 것이 확인된다.

Fig. 3은 긴 연소실과 짧은 연소실에서 나타난 화염구조 변이현상을 보여준다. 왼쪽 절반의 이미지는 정규화된 이미지이며 오른쪽 절반은 아벨 역변환 이미지를 보여준다. 당량비 0.65는 강한 열방출이 전단층에 집중되어 있고 속이 빈 hollow cone 형태의 화염구조를 보여준다. 그러나 당량비 0.70은 열방출이 연소실 중심부분으로 분배되어 있으며 중심부분에 반응이 일어나는 것을 알 수 있다. 이는 각각 0.55 ~ 0.65의 낮은 당량비 구간과 0.70 ~ 0.80의 높은 당량비 구간에서 주로 나타나는 화염구조이다. 다른 연구자들에 의해 수행된 이전 연구들은 화염구조가 변화하는 지점과 열-음향 불안정성의 시작이 일치하는 것을 확인하였다. 본 연구에서도 연소불안정은 일반적으로 변이 이후 화염구조와 함께 나타나지만

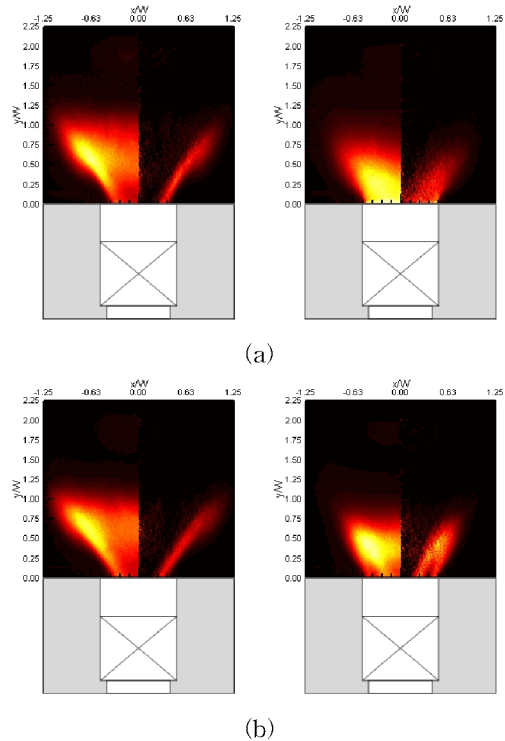


Fig. 3 Flame structures in the case of SN = 0.73,  $u = 10$  m/s,  $\phi = 0.65, 0.70$ : (a) Long combustor, (b) Short combustor.

Table 2 Bifurcation point of flame structure

Swirl num.	$u$ [m/s]	$\phi$ (320 mm)	$\phi$ (95 mm)
0.42	10	0.65	0.65
	15	0.65	0.70
	20	0.75	0.75
0.73	10	0.70	0.70
	15	0.75	0.75
	20	0.75	0.80
1.26	10	×	0.75
	15	×	×
	20	0.75	×

반드시 연소불안정의 시작과 연관되지 않았다. Table 2는 본 연구에서 측정된 화염구조 변이 현상이 시작되는 지점이다. 특히 스월 수가 1.26인 경우 연소불안정이 발생하여도 화염구조 변이가 발생하지 않는 지역이 존재하는 것을 보여주었다. 이는 화염구조 변이 현상이 반드시 연소불안정을 야기하는 것이 아님을 보여준다.

본 연구에선 자발 열-음향 불안정성의 시작은 연소실과 혼합기의 유동이 동일한 주파수로 진동하는 것으로부터 시작하는 것을 확인하였다. 이는 limit cycle의 원리에 해당된다[4]. 이는 Fig. 4에 제시된 결과로 확인 가능하다. Fig. 4는 연소실에서 측정된 압력섭동과 열방출 섭동 혼합기에서 측정된 압력섭동과 속도섭동의 주파수를 보여준다. 긴 연소실의 경우 낮은 당량비 일부구간을 제외하면 대부분 측정된 지배 주파수가 연소기의

위치에 관계없이 동일한 것을 보여준다. 즉, 안정적인 연소구간에선 압력섭동, 열방출, 속도섭동이 위치에 따라 다르게 측정되는 경향을 보이지만, 연소불안정이 발생한 경우 위치나 종류에 관계없이 동일한 주파수를 나타낸다. 반면에 음향적으로 커플되지 않은 짧은 연소실은 각 센서에서 측정된 주파수가 매우 다른 경향을 보여준다. 이는 연소에 의해 생성된 음압이 혼합기 내로 전파되지 못해 발생한 결과로 limit cycle을 형성하지 못하고 열-음향 불안정을 유도하지 못한 것으로 판단된다.

본 연구는 스월-안정화 연소기에서 연소기 형상, 유동조건 변화에 따라 연소불안정 특성을 확인하고 화염구조 변이 현상과 상관관계를 연구하였다. 음향적으로 커플된 긴 연소실의 경우 1차 종방향 모드에서 강하게 진동하는 연소불안정 현상을 확인하였고 커플되지 않은 짧은 연소실에선 안정한 연소만을 보였다. 일반적으로 알려진 바와 달리 화염구조 변이현상과 연소불안정의 시작 지점은 반드시 일치하지 않았다. 하지만 연소실의 길이와 관계없이 거의 동일한 유동조건에서 변이 현상이 발생하였다. 자발 열-음향 불안정은 limit cycle의 원리에 따라 발생하였고 이는 연소실과 입구영역에 설치된 다양한 센서들을 활용하여 확인할 수 있었다. 커플된 연소실은 낮은 당량비의 몇 구간을 제외하면 모든 센서에서 측정된 지배 주파수가 동일하였다. 이는 연소기 전체에서 동일한 진동이 나타남을 의미하며 연소불안정의 전제조건으로 판단된다. 반면 짧은 연소실

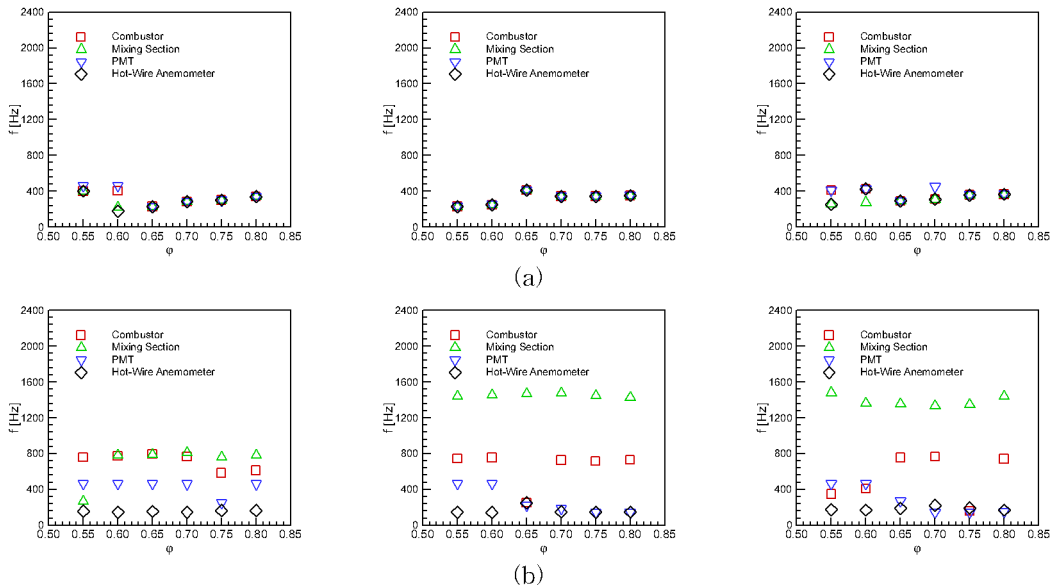


Fig. 4 Dominant frequencies of the filtered dynamic pressure, heat release rate, and inlet mean velocity at  $SN = 0.73$ ,  $u = 10, 15, 20$  m/s: (a) Long combustor, (b) Short combustor.

은 스웰러와 허니컴을 기준으로 각 파트에서 다른 주파수로 진동하며 이는 limit cycle을 유도하지 못하는 것으로 예측된다.

### 참고 문헌

- [1] T. Lieuwen, K. Mcmanus, “Introduction: Combustion Dynamics in lean-premixed Prevaporized (LPP) Gas Turbines” , J. Propul. Power., Vol. 19, 2003, pp. 721.
- [2] S. Taamallah, Z.A. LaBry, S.J. Shanbhogue, A.F. Ghoniem, “Thermo-Acoustic Instabilieis in Lean Premixed Swirl-Stabilized Combustion and Their Link to Acoustically Couple and Flame Macrostructure” , Proc. Combust. Inst., Vol. 35, 2015, pp. 3273-3282.
- [3] D. Fritche, M. Furi, K. Boulouchos, “An Experimental Investigation of Thermo-Acoustic Instabilities in a Premixed Swirl-Stabilized Flame” , Combust. Flame., Vol. 151, 2007, pp. 29-36.
- [4] M. Ditaranto, J. Hals, “Combustion Instabilities in Sudden Expansion Oxy-Fuel Flames” , Combust. Flame., Vol. 146, 2006, pp. 493-512.

# 환형연소기에서의 음향적 불안정성에 관하여

## 당량비 변화를 통한 대칭성 파괴의 효과

김재현\*, 이희도\*\*, 이기만\*\*†

### Effect of symmetry breaking by variation of equivalence ratio on acoustic instability in an annular combustor

Jaehyeon Kim\*, Huido Lee\*\*, Keeman Lee\*\*†

#### ABSTRACT

The annular combustor, which is used in this study, is consisted of eight nozzles and can supply mixture of different conditions through chambers of first stage and second stage. For the combustor length of 150 mm, spinning mode is observed in condition of all equivalence ratio of 0.65(first stage = 0.65, second stage = 0.65). However, in condition of changed equivalence ratio(first stage = 0.6, second stage = 0.7), instability mode is longitudinal mode approximately.

**Key Words** : Annular combustor, Symmetry breaking, Acoustic instability, Pressure fluctuation, Equivalence ratio

가스터빈 시스템에서 열음향 불안정성(Thermo-acoustic instability)이 발생한다는 사실은 충분히 알려졌으며 이에 관한 연구가 활발히 진행되고 있다[1-3]. 열음향 불안정성은 화염의 열방출 섭동(Heat release fluctuation)으로 대표되는 열적 불안정성(Thermo instability)과 압력 혹은 속도의 섭동(Pressure or velocity fluctuation)으로 대표되는 음향적 불안정성(Acoustic instability)의 피드백 메커니즘(Feedback Mechanism)에 의해 발생하는 불안정성으로 소음과 진동을 동반한다[4-7]. 그 중 환형연소기에서는 연소실 길이에 비해 연소기 원주의 길이가 크기 때문에 종적인 모드(Longitudinal mode)를 비롯하여 방위각 모드(Azimuthal mode)의 불안정성이 주되게 관측된다[8-10]. 또한 이러한 방위각 모드의 불안정성은 회전 모드(Spinning mode)와 서있는 모드(Standing mode)로 구분되며 S. Candel 등은 압력 섭동의 위상을 통하여 방위각 모드와 종적인 모드로 구분하고 방위각 모드 내에서 회전 모드와 서있는 모드를 구분하였다[11]. 또한 J. R. Dawson 등은 회전율(Spin ratio)을 이용하여 방위각 모드 내의 불안정성을 회전 모드와 서있는 모드로 특성화하였다[12]. 여기서 회전율은 식 (1)

과 같이 나타내며  $A_+$ 는 반시계 방향(Anti clock wise)으로의 압력 파동의 진폭을 의미하며  $A_-$ 는 시계 방향(Clockwise)으로의 압력 파동의 진폭을 의미한다.

$$SR = \frac{A_+ - A_-}{A_+ + A_-} \quad (1)$$

열음향 불안정성을 감쇠하고 제어하기 위하여 Stow와 Dowling이 제안한 방위각 대칭을 파괴할 수 있는 헬름홀츠 공진기(Helmholtz resonators)가 가스 터빈에서 자주 사용되고 있다[13]. 또한 대칭성 파괴(Symmetry breaking)를 위하여 기하학적인 대칭성 파괴(Geometric symmetry breaking)와 유동적인 대칭성 파괴(Flow symmetry breaking) 등 다양한 방법으로 연구가 진행되고 있다[14-16]. 본 연구에서는 환형연소기에서 음향적 불안정성에 관하여 실험적인 연구를 진행하였으며 당량비의 변화를 통하여 대칭성 파괴의 효과를 분석하고자 하였다. 본 연구에 사용된 환형연소기와 혼합 가스의 공급 시스템의 개략도를 Fig. 1에 나타내었으며 Fig. 2에는 당량비의 변화를 통한 대칭성 파괴를 그림으로 나타내었다. 연구에 사용된 환형연소기는 8 개의 노즐로 구성되어 있으며 각 노즐에 설치된 선회기는 반시계 방향으로 회전을 주며 식 (2)를 통하여 계산된 스월 강도(Swirl number)는 0.83이다.

\* 순천대학교 우주항공공학과

\*\* 순천대학교 기계우주항공공학부

† 연락처, kmlee@snu.ac.kr

TEL : (061)750-3828 FAX : (061)-750-3820

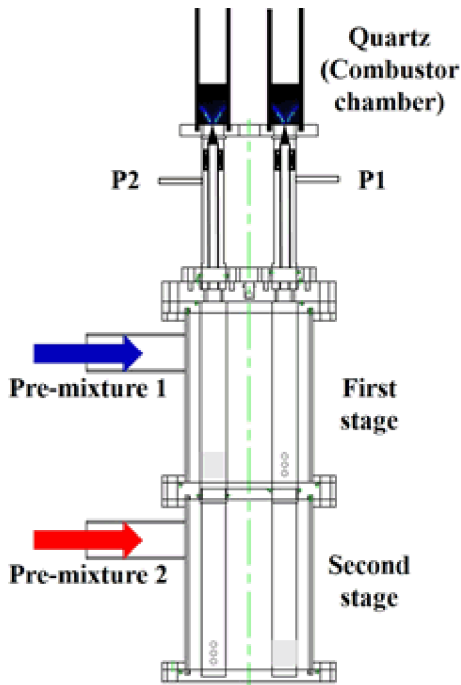


Fig. 1 Schematic diagram of annular combustor and flow supply systems.

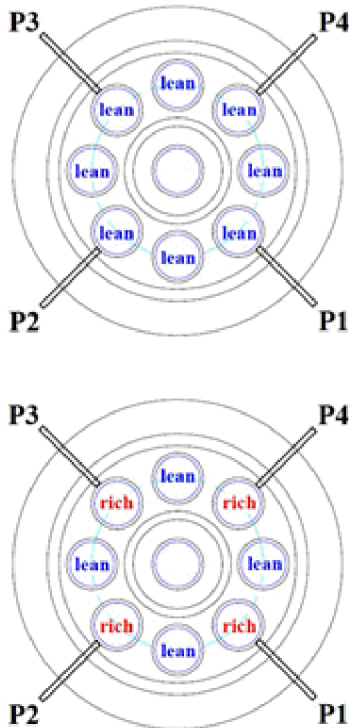
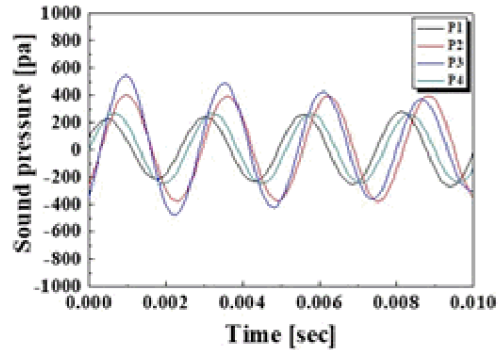


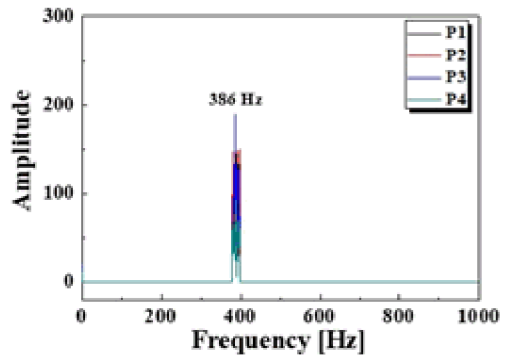
Fig. 2 Method of symmetry breaking by variation of equivalence ratio.

$$S_N = \frac{2}{3} \left[ \frac{1 - (R_1/R_2)^3}{1 - (R_1/R_2)^2} \right] \tan \theta \quad (2)$$

두 개의 챔버(Chamber)를 통하여 각각 다른 조건의 혼합가스(Pre-mixture 1, 2)가 공급되며 석영 유리관을 통하여 화염을 가시화하고 연소실을 모사하였다. 또한 PCB 센서(P1-4)를 혼합기가 공급되는 노즐 캔(Can)에 90° 간격으로 네 군데 설치하여 압력 섭동을 측정하였다. 당량비 변화를 통한 대칭성 파괴의 효과를 분석하기 위하여 첫 번째 공급 챔버(First stage)와 두 번째 공급 챔버(Second stage)에 동일한 당량비의 혼합가스를 공급하였을 때 발생하는 음향적 불안정성과 당량비를 상대적으로 과농한 조건과 희박한 조건으로 달리하여 혼합가스를 공급하였을 때 발생하는 음향적 불안정성을 비교하였다. 이 경우 연소기의 전체적인 당량비는 동일하게 공급하였다.

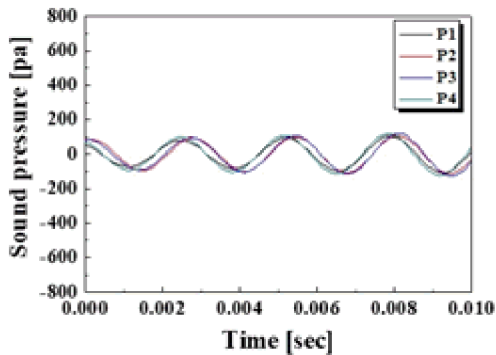


(a) Time signal of sound pressure fluctuations

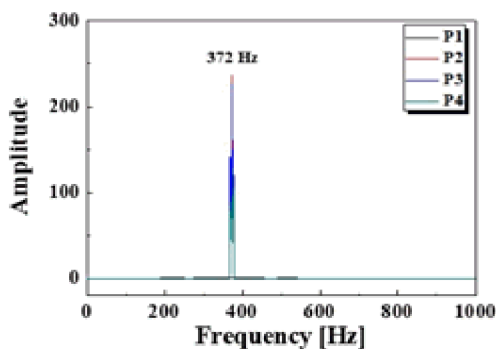


(b) Results of fast Fourier transform(FFT) analysis of sound pressure fluctuations

Fig. 3 Measurement of sound pressure fluctuations in equivalence ratio 0.65 (First stage = 0.65 and Second stage = 0.65) and combustor length of 150 mm



(a) Time signal of sound pressure fluctuations



(b) Results of fast Fourier transform(FFT) analysis of sound pressure fluctuations

**Fig. 4** Measurement of sound pressure fluctuations in equivalence ratio 0.65 (First stage = 0.6 and Second stage = 0.7) and combustor length of 150 mm

실험 결과는 연소실 길이 150 mm에서 모든 노즐의 당량비가 0.65인 경우와 예혼합기 1과 예혼합기 2의 당량비가 각각 0.6/0.7인 경우를 나타내었다. 모든 노즐의 당량비가 0.65인 경우의 압력 섭동 측정 결과를 Fig. 3에 나타내었으며 시간에 따른 섭동 최고점이 P1-P4-P3-P2 순으로 나타나며 200-600 Pa의 진폭으로 회전 모드를 나타내는 것을 확인할 수 있으며 이 경우 386 Hz의 주기를 갖는 것을 확인하였다. 예혼합기 1, 2의 당량비를 달리하여 대칭성 파괴를 하였을 때의 결과를 Fig. 4에 나타내었으며 이 경우 모든 섭동이 200 Pa 이하의 진폭을 가지고 종적인 모드에 가까운 거동을 372 Hz의 주기를 가지고 거동하는 것을 확인할 수 있다.

## 후 기

본 연구는 2019년 한국산업기술평가관리원 산업소재 핵심기술개발사업(20005788)의 지원을 받아 수행되었고 이에 감사드립니다.

## 참고 문헌

- [1] N. A. Worth, J. R. Dawson, "Cinematographic OH-PLIF measurements of two interacting turbulent premixed flames with and without acoustic forcing", *Combust. Flame*, Vol. 159, 2012, pp. 1109-1126.
- [2] J. J. Keller, "Thermoacoustic oscillations in combustion chambers of gas turbines", *AIAA*, Vol. 33, 1995, pp. 2280-2287.
- [3] J. Kim, M. Jang, K. Lee, A. R. Masri, "Experimental study of the beating behavior of thermoacoustic self-excite instabilities in dual swirl combustors", *Exp. Therm. Fluid Sci.*, Vol. 105, 2019, pp. 1-10.
- [4] K. R. McManus, T. Poinso, S. M. Candel. "A review of active control of combustion instabilities, *Prog. Energy Combust. Sci.*, Vol. 19, 1993, pp. 1-29.
- [5] M. Hoeijmakers, V. Kornilov, I.L. Arteaga, P. Goey, H. Nijmeijer, "Flame dominated thermoacoustic instabilities in a system with high acoustic losses, *Combust. Flame*, Vol. 169, 2016, pp. 209-215.
- [6] O. Schulz, U. Doll, D. Ebi, J. Droujko, C. Bourquard, N. Noiray, "Thermoacoustic instability in a sequential combustor: Large eddy simulation and experiments", *Proc. Combust. Inst.*, Vol. 37, 2019, pp. 5325- 5332.
- [7] J. O' Connor, V. Acharya, T. Lieuwen, "Transverse combustion instabilities: Acoustic, fluid mechanic, and processes", *Prog. Energy Combust. Sci.*, Vol. 49, 2015, pp. 1-39.
- [8] A. Saurabh, C. O. Paschereit, "Dynamics of premixed swirl flames under the influence of transverse acoustic fluctuations", *Combust. Flame*, Vol. 182, 2017, pp. 298-312.
- [9] T. Poinso, "Prediction and control of combustion instabilities in real engines", *Proc. Combust. Inst.*, Vol. 36, 2017, pp. 1-28.
- [10] C. Li, D. Yang, S. Li, M. Zhu, "An analytical study of the effect of flame response to simultaneous axial and transverse perturbations on azimuthal thermoacoustic modes in annular combustors", *Prog. Energy Combust. Sci.*, Vol. 37, 2019, pp. 5279-5287.
- [11] K. Prieur, D. Durox, T. Schuller, S. Candel, "A hysteresis phenomenon leading to spinning or standing azimuthal instabilities in an annular combustor", *Combust. Flame*, Vol. 175, 2017, pp. 283-291.



- [12] N. A. Worth, J. R. Dawson, “Effect of equivalence ratio on the modal dynamics of azimuthal combustion instabilities”, Proc Combust. Inst., Vol. 36, 2017, pp. 3743-3751.
- [13] S. R. Stow, A. P. Dowling, “Modelling of circumferential modal coupling due to helmholtz resonators”, ASME Conference Proc. GT2003-38168, 2003, pp. 129-137.
- [14] N. A. Worth, J. R. Dawson, “Modal dynamics of self-excited azimuthal instabilities in an annular combustor chamber”, Combust. Flame, Vol. 160, 2013, pp. 2476-2489.
- [15] J. R. Dawson, N. A. Worth, “The effect of baffles on self-excited azimuthal modes in an annular combustor”, Proc. Combust. Inst., Vol. 35, 2015, pp. 3283-3290.
- [16] M. Bauerheim, M. Cazalens, T. Poinsot, “A theoretical study of mean azimuthal flow and asymmetry effects on thermo-acoustic modes in annular combustors”, Proc. Combust. Inst. Vol. 35, 2015, pp. 3219-3227.

# 마이크로믹서 타입 모형 가스터빈 연소기의 화염 응답 특성

이태송\*, 진옥화\*, 강혜빈\*, 김규태\*†

## Flame Response Characteristics of a Micromixer-Type Model Gas Turbine Combustor

Taesong Lee\*, Ukhwa Jin\*, Hyebin Kang\*, Kyu Tae Kim\*†

### ABSTRACT

Self-excited combustion instabilities of a micromixer-type nozzle assembly was experimentally investigated in a model lean-premixed gas turbine combustor over a range of equivalence ratio between 0.57 and 0.73. Here, we show that the unstable motion of sixty-injector mesoscale flames is characterized by flame detachment/attachment behavior, generating large-amplitude acoustic oscillations. In comparison with the measurements of conventional swirl-stabilized flames, we highlight the major differences in terms of flame structures, combustion instabilities, and lean blowoff behavior.

**Key Words** : Flame interaction, Lean-premixed, Micromixer, Phase-synchronized, Self-excited instability

화염 안정화와 배기 배출물 국제 기준은 가스터빈 업계의 개발 방향을 결정하는 가장 중요한 요소이다. 화염 안정화를 위한 전통적인 방법은 강한 스윙 유동을 이용한 거대 재순환 영역을 형성하는 것이며, 이와 관련하여 다양한 연구 및 논의가 이루어져왔다[1,2]. 하지만 역 압력구배로 인해 생성되는 재순환 영역은 연소 생성물의 체류 시간을 증가시켜 질소 산화물 (NOx)의 증가로 이어질 수 있다. 이러한 문제를 해결하기 위해, GE, MHI 등의 주요 가스터빈 제조사들은 다수의 작은 화염을 사용하는 연소 시스템을 개발하여 재순환 영역을 줄임으로써 질소 산화물의 생성을 줄이고자 노력하고 있다[3,4]. 이 방법론은 화염전파속도가 매우 빠른 수소 및 수소-메탄 혼합 연료에 매우 적합한 설계기법이다.

현재까지 마이크로믹서 타입 노즐의 연소불안정 특성에 대해서는 거의 알려진 바가 없다[5,6]. 이에 본 연구에서는 Fig. 1에 도시된 마이크로믹서 타입 노즐의 연소불안정 특성과 화염 거동을 계측하였으며, 기존의 연구[7-10]에서 사용되었던 이중 스윙 안정화 화염 데이터와 비교 분석을 수행한다.

실험에 사용된 노즐 어셈블리는 총 60개의 작은 노즐로 이루어져 있으며, 덤프면의 중심으로부터

가까운 순서대로 A, B, C, D 층으로 구분하였다 (Fig. 2). 여기서 A와 B 층의 16개 노즐을 내부 유로(inner stage), C와 D 층의 44개 노즐을 외부 유로(outer stage)으로 분류하였고, 두 유로 층의 당량비를 독립적으로 조절할 수 있도록 설계했다. 내부 층과 외부 층으로 각각 공급된 메탄/공기 혼합물은 초크 오리피스와 스윙러를 통과하여 석영관 영역에서 점화되어 반응장을 형성한다.

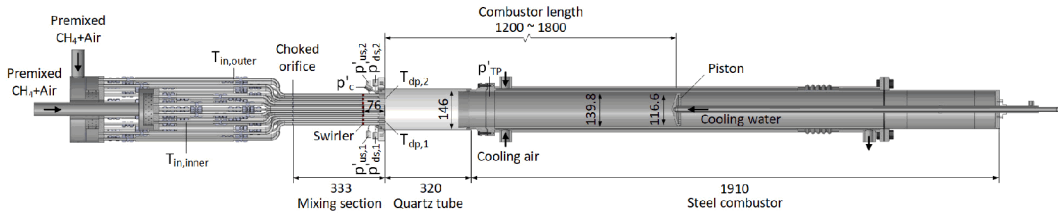
화염의 열 방출 섭동( $q'$ )은 PMT (Hamamatsu model H7732-02)에 CH\*/OH\* 필터를 부착하여 계측하였다. 연소기 내부의 압력 섭동( $p'$ )은 PCB사의 동압 센서(PCB piezotronics model 112A22)를 이용해 계측하였으며, 노즐의 속도 섭동( $u'$ )은 가장 바깥에 위치한 D층의 노즐 튜브 두 개에 각각 위치한 동압 센서를 이용하여 이중 마이크로폰 계측(Two microphone method)을 통해 계산하였다.

화염의 위상 동기화 이미지는, 화염이 자발 불안정 응답을 보이도록 연소기 길이를 조절한 상태에서 CH\* 밴드 패스 필터를 부착한 ICCD 카메라 (Princeton Instruments model PI-MAX4)를 이용해 촬영하였다.

\* 한국과학기술원 항공우주공학과

† 연락처, kt\_kim@kaist.ac.kr

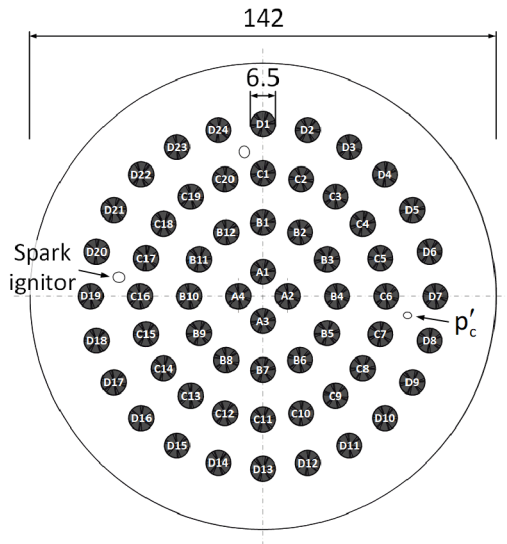
TEL : (042)350-3729



**Fig. 1** Cross-section of the micromixer-type model gas turbine combustor. Dimensions in mm.

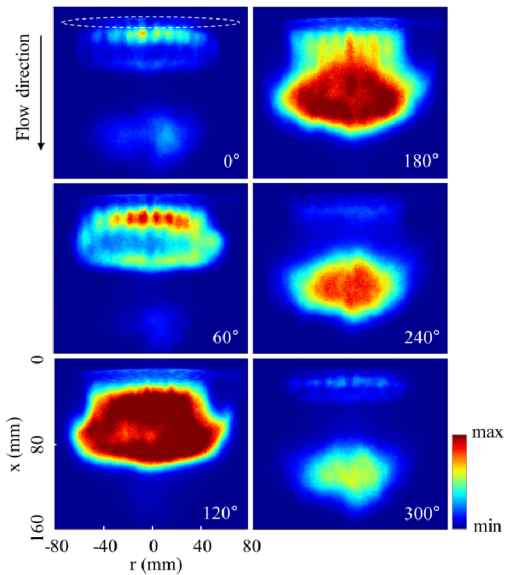
실험에 적용된 입구 조건은 다음과 같다:

$T_{inner} = T_{outer} = 200 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $\bar{u} = 25 \text{ m/s}$ . 연소기 길이는 1200 mm 부터 1800 mm까지 25 mm 간격으로 변화시켜가며 화염 응답을 계측하였다. 스월러의 베인 각도는 모든 노즐이  $44^\circ$  로 동일하며, 모두 반시계 방향으로 회전한다. 본 실험에서는 전체 당량비( $\phi_{global}$ )를 0.57에서 0.73까지 변화시키며 마이크로믹서 타입 연소기의 특성을 확인하였다.



**Fig. 2** Micromixer-type nozzle configuration. Dimensions in mm.

Fig. 3의 위상 동기화 이미지는 마이크로믹서 연소기의 대표적인 특징을 잘 보여준다. 화염은 위상  $0^\circ$  에서부터 화염 면이 서서히 확장되며,  $180^\circ$  에서 최대 강도를 갖는다. 이후 화염이 덩프면으로부터 완전히 분리되어 하류로 대류하면서 소산된다. 이러한 화염의 분리 거동으로 인해 마이크로믹서 연소기의 연소진동 진폭이 매우 크게 발생하는 것으로 확인하였다.



**Fig. 3** Phase-resolved  $\text{CH}^*$  chemiluminescence images for  $\phi=0.73$ .

## 후 기

이 성과는 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임 (No. 2019R1A2C1003208).

## 참고 문헌

- [1] Y. Huang, V. Yang, "Effect of Swirl on Combustion Dynamics in a Lean-Premixed Swirl-Stabilized Combustor", Proc. Combust. Inst., Vol. 30, 2005, pp. 1775-1782.
- [2] N. A. Worth, J. R. Dawson, "Cinematographic OH-PLIF Measurements of Two Interacting Turbulent Premixed Flames with and without Acoustic Forcing", Combust. Flame, Vol. 159, 2012, pp. 1109-1126.

- [3] W.D. York, W.S. Ziminsky, E. Yilmaz, "Development and Testing of a Low NO<sub>x</sub> Hydrogen Combustion System for Heavy-Duty Gas Turbines", *J. Eng. Gas Turb. Power*, Vol. 135, 2013, 022001.
- [4] T. Asai, S. Dodo, M. Karishuku, N. Yagi, Y. Akiyama, A. Hayashi, "Performance of Multiple-Injection Dry Low-NO<sub>x</sub> Combustors on Hydrogen-Rich Syngas Fuel in an IGCC Pilot Plant", *J. Eng. Gas Turb. Power*, Vol. 137, 2015, 091504.
- [5] R. Rajasegar, J. Choi, B. McGann, A. Oldani, T. Lee, S.D. Hammack, C.D. Carter, J. Yoo, "Mesoscale Burner Array Performance Analysis", *Combust. Flame*, Vol. 199, 2019, pp. 324-337.
- [6] R. Bhagwan, A. Schwagerus, C. Weis, P. Habisreuther, N. Zarzalis, M. Huth, B. Koestlin, S. Dedrichs, "Combustion Characteristics of Natural Gas Fueled, Premixed Turbulent Jet Flame Arrays Confined in a Hexagonal Combustor", in: *ASME Conference Proceedings*, GT2019-90286.
- [7] D. Kim, J. Park, D. Han, K.T. Kim, "Symmetry-Breaking for the Control of Swirl-Stabilized Flames", *Combust. Flame*, Vol. 194, 2018, pp. 180-194.
- [8] T. Lee, J. Lee, J. Park, D. Han, K.T. Kim, "Staggered Swirler Arrangement in Two Self-Excited Interacting Swirl Flames", *Combust. Flame*, Vol. 198, 2018, pp. 363-375.
- [9] T. Lee, J. Park, D. Han, K.T. Kim, "The Dynamics of Multiple Interacting Swirl-Stabilized Flames in a Lean-Premixed Gas Turbine Combustor", *Proc. Combust. Inst.*, Vol. 37, 2019, pp. 5137-5145.
- [10] 이지호, 박준형, 한동식, 김규태, "상호작용하는 두 스월 안정 화염에서 발생하는 준입계 분기 현상", *한국연소학회지*, 제 24호, 2019, pp. 17-24.

## 모델 가스터빈 연소기에서 크로스톡을 통한 음향 소산이 연소기 상호작용에 미치는 영향

문기훈\*, 김규태†

### Acoustic dissipation effect on combustor interactions through cross-talk area in model gas turbine combustors

Kihun Moon\*, Kyu Tae Kim\*†

#### ABSTRACT

The strong dissipative effect on acoustic wave propagation was experimentally investigated by varying the diameter of a cross-talk section. Under a symmetric equivalence ratio condition, the coupling strength between two interacting combustors was found to be related to the evolution of the instability to either a push-push or a push-pull mode. When the diameter of the cross-talk section is reduced below a certain limit, the two combustors begin to be acoustically decoupled due to acoustic dissipation effects. As a result, the behavior of the two combustors becomes very similar to that of the single isolated combustor.

**Key Words** : Combustion instabilities, Cross-talk area, Can-to-can interaction, Acoustic dissipation.

캔-환형 구조의 연소 시스템을 주로 택하는 발전용 가스터빈 엔진에서는 인접 연소기 간에 음향 상호작용이 발생한다[1, 2]. 이러한 음향 상호작용은 터빈 1단 노즐 상류에 존재하는 크로스톡 영역(cross-talk area)을 통해 이루어진다[3, 4]. 짝수의 다중 캔 연소기를 연결하는 크로스톡 영역의 존재로 균일한 터빈입구온도를 조성하여 국부적인 열응력을 피할 수 있게 된다. 하지만 연소기-연소기 간의 음향 상호작용의 영향으로 발생하는 연소 불안정성에 대한 연구는 아직까지 부족한 실정이다. Moon 등은 독립적으로 유량 제어가 가능한 두 연소기를 크로스톡 영역으로 연결하여, 대칭 및 비대칭 당량비 조합에 따라 발생하는 푸시-푸시(push-push) 및 푸시-풀(push-pull) 모드의 존재를 확인하였다[5]. 이를 이어 Jegal 등은 다양한 운전 조건과 대칭 및 비대칭 음향 경계조건에서 예측된 모든 데이터를

무차원 도메인에서 분석하여, 길이 방향의 상호작용 모드가 열 방출을 간의 위상차로 정의되는 것이 아니라 음향학적 성질과 관련된 압력 섭동 간의 위상 차로 판별됨을 밝혔다[6].

이번 연구에서는 특히 크로스톡 영역에서의 음향 소산(acoustic dissipation)에 따른 다중 연소기 내의 동적 거동 변화를 실험적으로 측정하고자 한다. 이와 관련하여, Farisco와 Panek 등은 두 연소기를 연결하는 벽과 터빈 베인간의 간격을 다양하게 조절하여, 연소기 간의 음향 전파 강도를 수치적인 기법으로 해석하였다[3, 4]. 또한 Biwa 등은 동일 형상을 갖는 두 개의 열-음향 진동자를 조절 가능한 밸브 및 관으로 연결하여, 음향 소산 및 시간 지연 효과로 인해 시스템의 진동이 억제될 수 있음을 확인하였다[7].

본 연구에서는 크로스톡 파이프의 직경 크기를 달리함으로써 음향 소산에 따른 두 연소기 간 음향 상호작용의 강도를 조절하였다. 이때 크로스톡 직경의 크기는 기준이 되는 직경( $D_{XT,0} = 38.4$  mm)으로 나누어 무차원화( $\varepsilon = D_{XT}/D_{XT,0}$ ) 하였고,

\* 한국과학기술원 항공우주공학과

† 연락처, [kt\\_kim@kaist.ac.kr](mailto:kt_kim@kaist.ac.kr)

TEL : (042)350-3729

$\varepsilon=1.0, 0.5$  그리고  $0.25$ 를 갖는 세 가지 경우에 대해서 계측하였다. 이외의 모든 조건들은 Table. 1에 기술하였으며, 실험 장비에 관한 것은 이전 연구에서 자세히 기술하였다[5, 6].

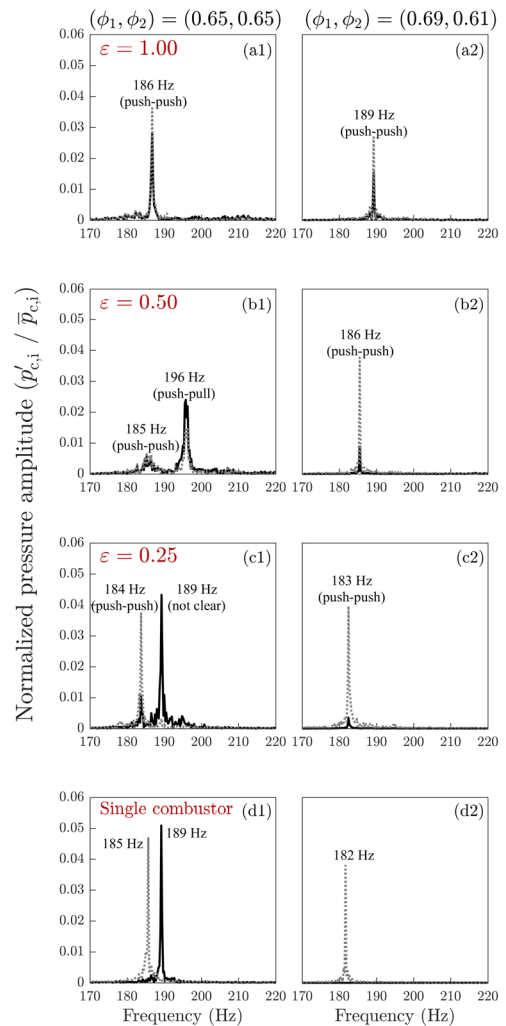
**Table 1** Operating conditions

Inlet temperature	200 °C
Bulk velocity	40 m/s
Equivalence ratio ( $\phi_1, \phi_2$ )	(0.65, 0.65), (0.69, 0.61)
Combustor length	1620 mm
Length of cross-talk area	320 mm

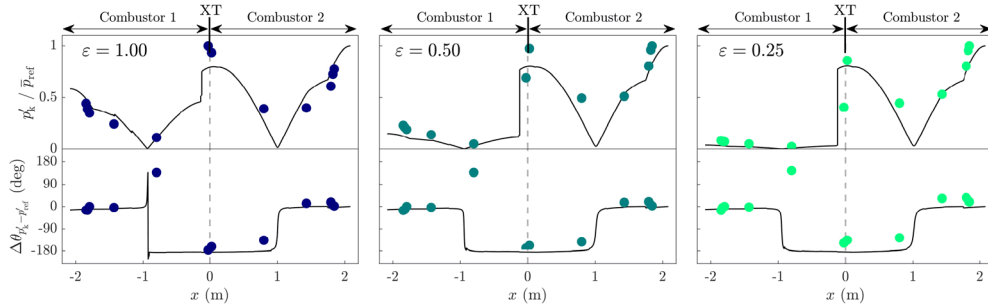
Figure. 1은 크로스톡 직경의 무차원 변수 ( $\varepsilon$ )에 대해 연소기의 압력 섭동 크기를 정규화한 결과이다. 이때 대칭 당량비 조건 ( $\phi_1, \phi_2$ )=(0.65, 0.65)와 비대칭 당량비 조건 ( $\phi_1, \phi_2$ )=(0.69, 0.61)의 결과를 각 열에 도시하였다. 또한 동일한 당량비 조건에서 다중 연소기의 결과와 단일 연소기의 결과를 비교하기 위해, 마지막 행(Fig. 1d)에  $l_c=1620$  mm에서의 단일 연소기 결과를 함께 도시하였다.

우선 대칭 당량비 조건에 대한 결과를 살펴보면[Fig. 1(a1)-(d1)],  $\varepsilon=1.00$ 에서 두 연소기는 동일한 주파수 186 Hz에서 강하게 진동한다. 선행 연구와 동일한 기준으로 해당 불안정 모드의 본질을 파악하면[5, 6], 정위상(in-phase) 관계의 푸시-푸시 모드임을 알 수 있다. 하지만 동일한 당량비 조건의 단일 연소기 결과를 보면[Fig. 1(d1)], 실험적인 불확실성으로 인해 두 연소기의 불안정 주파수가 미소한 차이가(약 4 Hz) 존재함을 보여준다. 즉, 두 연소기 간의 음향 상호작용이 가장 강한  $\varepsilon=1.00$ 에서, 시스템은 하나의 주파수로 진동하는 상호 동조(mutual synchronization) 현상을 보임을 알 수 있다.  $\varepsilon=0.50$ 의 경우, 앞선 경우와 다르게 인접한 두 주파수에서 불안정하다. 같은 방법으로 불안정

모드를 판별해보면, 185 Hz는 푸시-푸시 모드이며, 반대로 196 Hz는 푸시-풀 모드임을 알 수 있다. 주목할 점은 크로스톡의 직경을 작게 하여 두 연소기의 결합 강도를 줄였을 때, 두 연소기 간의 역위상(out-of-phase) 상호작용이 지배적으로 나타날 수 있다는 점이다.



**Fig. 1** Normalized pressure amplitude spectra for different cross-talk diameter ( $\varepsilon$ ) under symmetric (left) and asymmetric (right) equivalence ratio conditions: black solid line - combustor 1, gray dotted line - combustor 2.



**Fig. 2** Mode shapes in terms of relative pressure amplitude and phase angles for three different  $\varepsilon$  cases, corresponding to Fig. 1(a2) - (c2). Symbols - experimental data, solid lines - low order modeling results.

크로스톡의 직경을 더욱 줄인  $\varepsilon = 0.25$ 의 결과를 보면 [Fig. 1(c1)], 크로스톡 파이프에서의 강한 음향파 소산으로 인해 다중 연소기의 결과가 단일 연소기의 결과와 매우 유사해짐을 보이며, 상호 동조 현상에서 벗어나는 거동을 보인다.

다음으로 비대칭 당량비 조건의 결과는 Fig. 1(a2)-(d2)에 제시하였다. 이전과 동일한 조건에서, 오직 각 연소기의 당량비만을 비대칭적으로 조절하게 될 경우 두 화염의 전달함수가 다르게 되어 연소기 길이에 따른 분기 현상에 큰 영향을 미치게 된다. 우선, 비대칭 당량비 조건에서의 단일 연소기 결과를 보면 [Fig. 1(d2)], 1번 연소기에서는 모든 주파수에서 안정된 상태를 보였으나 2번 연소기는 182 Hz에서 압력 섭동의 진폭이 최대 4%로 강한 불안정이 나타났음을 알 수 있다. 이를 크로스톡으로 연결된 다중 연소기의 결과와 비교해보면, 음향파 소산의 효과가 확연히 드러난다. 가장 작은 크로스톡의 직경( $\varepsilon = 0.25$ )으로 연결된 다중 연소기의 결과를 보면 [Fig. 1(c2)], 앞선 대칭 당량비 조건의 경향과 동일하게 강한 음향 소산 효과로 인하여 다중 연소기와 단일 연소기의 결과가 매우 유사하다. 하지만 음향파가 완전히 소산되지 못하였기 때문에 동일한 주파수 183 Hz에서 1번 연소기가 매우 약하게 진동하고 있음을 알 수 있다. 연소기 간의 음향 상호작용 강도가 조금 더 큰  $\varepsilon = 0.50$ 의 경우 [Fig. 1(b2)], 2번 연소기에서 유발된 186

Hz의 음향파가 소산되지 못하여 크로스톡 영역을 통해 1번 연소기의 화염에 전달됨에 따라 두 연소기가 같은 주파수에서 푸시-푸시 모드로 진동함을 알 수 있다. 하지만 1번 연소기의 불안정 크기는 2번 연소기에서 비롯되었기 때문에 강도가 상대적으로 약하다. 마지막으로 Fig. 1(a2)를 보면, 2번 연소기에서 유발된 음향파가 더욱 소산되지 못하였기 때문에 1번 연소기는 보다 강한 진폭의 푸시-푸시 모드로 진동하게 된다. 즉, 비대칭 당량비 조건의 경우 음향파 소산의 정도에 따라 두 연소기의 위치 별 진폭 양상이 다르다. 이를 분석하고자 세 가지의 경우 [Fig. 1(a2)-(c2)]에 대해 모드 분석을 진행하였다.

Figure. 2에 비대칭 당량비 조건인  $(\phi_1, \phi_2) = (0.69, 0.61)$ 에서  $\varepsilon$ 에 따른 모드 형상의 결과를 도시하였다. 각 그래프에서 심볼은 총 12개 동압 센서에서 측정한 압력 섭동의 진폭이며, 실선은 헬름홀츠 방정식(Helmholtz equation)에 기반한 1차원 음향 네트워크 모델링의 결과이다. 이때 크로스톡 영역의 중심( $x=0$ )을 기준으로,  $x$ 가 0보다 작은 영역은 1번 연소기의 결과이며 이의 반대 영역에 2번 연소기의 결과를 각각 나타냈다. 크로스톡 직경의 크기에 따라( $\varepsilon$ 에 따라) 음향파가 소산되는 정도가 달라지게 되어, 1번 연소기( $x < 0$ )의 상대적인 압력 섭동 진폭 크기가 확연히 다름을 알 수 있다. 하지만 상대적인 위상 차의 경우, 크로스톡 영역에서 음향 소산의 정도와

관계없이 모든 조건에서 동일한 양상을 보인다. 중요한 점은, 세 가지 조건 모두 크로스톡 위치에서 안티노드가 나타나며, 정위상의 상호작용이 존재한다는 점이다. 이는 2번 연소기에서 유발된 음향파의 간섭작용으로 형상이 동일한 다중 연소기 시스템 내에 정상파를 만들기 때문에 모든 조건에서 두 연소기가 정위상 상호작용이 존재하는 푸시-푸시 모드가 나타나게 되는 것이다.

## 후 기

본 연구는 산업통상자원부(MOTIE)와 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다. (No. 20181110100290)

## 참고 문헌

- [1] T. Lieuwen, V. Yang, "Operational Experience, Fundamental Mechanisms, and Modeling", American Institute of Aeronautics and Astronautics, 2006, pp. 89-112.
- [2] P. Kaufmann, W. Krebs, R. Valdes, U. Wever, "3D Thermoacoustic Properties of Single Can and Multi Can Combustor Configurations", in: ASME conference Proceedings, 2008, pp. 527-538.
- [3] F. Farisco, L. Panek, J. B. W. Kok, J. Pent, R. Rajaram, "Thermo-Acoustic Coupling in Can-Annular Combustors - a Numerical Investigation", in: The 22nd International Congress on Sound and Vibration, 2015.
- [4] L. Panek, F. Farisco, M. Huth, "Thermo-Acoustic Characterization of Can-Can Interaction of a Can-Annular Combustion System Based on Unsteady CFD LES Simulation", in: First Global Power and Propulsion Forum, 2017.
- [5] K. Moon, H. Jegal, J. Gu, K. T. Kim, "Combustion-Acoustic Interactions Through Cross-Talk Area Between Adjacent Model Gas Turbine Combustors", Combust. Flame, Vol. 202, 2019, pp. 405-416.
- [6] H. Jegal, K. Moon, J. Gu, L. K. B. Li, K. T. Kim, "Mutual Synchronization of Two Lean-Premixed Gas Turbine Combustors: Phase Locking and Amplitude Death", Combust. Flame, Vol. 206, 2019, pp. 424-437.
- [7] T. Biwa, S. Tozuka, T. Yazaki, "Amplitude Death in Coupled Thermoacoustic Oscillators", Phys. Rev. Appl., Vol. 3, 2015, 034006.



# 석탄가스화기 내 버너 이상거동에 따른 유동 및 반응특성에 대한 전산해석 연구

남준영\*, 김무경\*, 손근\*, 류창국\*, 김봉근\*\*

## Numerical Analysis on Flow and Reaction Characteristics by Abnormal Burner Operation in a Entrained Flow Coal Gasifier

Joonyeong Nam\*, Mukyeong Kim\*, Geun Sohn\*, Changkook Ryu\*<sup>†</sup>, Bonggeun Kim\*\*

### ABSTRACT

In a Shell coal gasifier, four horizontally biased coal burners located in the middle of a cylindrical reactor creates a swirling flow at the center that governs the flow and particle behaviors. If the coal burners do not have the identical fuel and oxidant throughput by operational issues or during startup and shutdown, this breaks the axisymmetry of the swirling flow. In this study, the influence of abnormal burner operation was investigated using computational fluid dynamics (CFD) for the coal gasifier employed at Taean 300 MWe plant. It was found that the changes in the fuel or oxidant throughput in one burner by 30% can significantly shift the how swirling flow to the wall, creating a region of excessive heat flux to the wall (hot spot). Maintaining the axisymmetry by adjusting one burner pair to the same condition can alleviate this issue. If burners are inevitably to be turned off, the three-burner operation was better than two-burner operation in terms of the peak heat flux in the hot spots.

**Key Words** : Shell coal gasifier, Abnormal burner operation, CFD, hot spot

석유, 천연가스의 가격상승으로 주목받는 석탄 가스화 기술은 다양한 생성물, 높은 에너지 변환 효율, NO<sub>x</sub>, Sox와 같은 공해물질 제거가 용이하다 장점 덕에 설치용량이 지속적으로 증가되고 있으며[1] 국내에선 태안 IGCC[2], 광양 SNG[3]가 실증단계에 있고 에너지 기술 연구원의 GTL(gas-to-liquid)[4] 개발 또한 이뤄지고 있다.

가스화기는 운전방식, 연료투입 방식에 의해 세분화되는데 운전방식으로는 이동층, 유동층, 분류층으로 나뉘며 연료투입 방식으로는 습식/건식으로 나뉜다. 대부분의 가스화기는 건식 분류층을 채택했는데 연료, 이송가스의 혼합 제트와 산화제 제트를 고온/고압 조건에 동축 분사해 짧은 체류시간임에도 높은 탄소 전환율과 냉가스 효율을 가진다. 내부에 투입된 연료는 탈휘발 반응과 화학 가스화 반응을 거친 후 합성가스와 회분으로 남게 되며 회분들은 용융점보다 높은 온도에 용융되어 벽면에 부착 시 슬래그를 형성한다.

이처럼 가스화기의 증가현황과 운영특성에 나

타나듯이 반응특성과 열유동의 파악은 장기운영 및 성능향상에 필수적이거나 고온/고압 조건에 인한 관측 제한과 예측 불가능한 비정상 운전은 이를 방해하는 요소이다. 이 때문에 본 연구에서는 CFD를 통해서 태안 IGCC를 대상으로 정상운전과 버너 오작동 시 5가지 상황을 해석하여 내부 유동과 반응특성을 확인하였다.

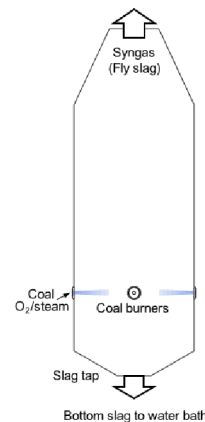


Fig. 1 Schematic diagram and mesh of Taean coal gasifier.

\* 성균관대학교 기계공학과

\*\* 두산 중공업

† 연락처, cryu@skku.edu

TEL : (031)299-4694

Fig 1에 나타난 해석대상 가스화기는 대안 가스화기로 300MWe급 건식 분류층 가스화기다. 4개의 버너가 같은 높이 선상에서 편향되어 있으며 중심 노즐에서 미분탄을 N<sub>2</sub> 이송가스로 분사하며 주위의 2차 노즐에선 산소 농도 90%의 산화제가 분사된다.

Table 1 Fuel properties of design coal.

Coal Properties		Value
Proximate Analysis (%wt)	IM	2.0
	VM	28.9
	FC	53.7
	Ash	15.5
Ultimate Analysis (%wt)	C	67.6
	H	4.2
	O	8.5
	N	1.4
	S	0.8
HHV (MJ/kg)		27.5

Table 2 Input parameter of simulation cases

Case	One burner (kg/s)			Other burners (kg/s)			O <sub>2</sub> /coal ratio
	O <sub>2</sub>	Coal	steam	O <sub>2</sub>	Coal	steam	
A	5.27	6.69	0.29	5.27	6.69	0.29	0.79
B	3.69	6.69	0.29	5.79	6.69	0.31	0.79
C	3.69	4.69	0.2	5.27	6.69	0.29	0.79
D	0	0	0	5.27	6.69	0.29	0.79
	One burner pair (kg/s)			The other burner pair (kg/s)			
E	3.69	4.69	0.2	5.27	6.69	0.29	0.79
F	0	0	0	5.69	6.69	0.3	0.84

Table 1과 Table 2는 해석 대상 가스화기에 투입되는 미분탄, 산화제의 유량과 미분탄의 물성치를 나타낸다. 투입 석탄의 고위 발열량은 27.5 MJ/kg이며 수분함량이 2%로 건조되어 투입된다. Case A는 90%의 부하로 정상 가동한 case이며 O<sub>2</sub>/coal ratio는 0.79이며 case 6을 제외한 다른 case들과 동일하다. Case B, C, D는 버너 하나에 비정상 상태를 주고자 하였다. Case B는 비정상 버너의 산화제 30%를 다른 버너에 10%씩 분배하여 산화제 노즐에 문제가 생겨 다른 버너들로 제어시 운전 상태를 확인하고자 하였다. Case C와 D는 각각 비정상 버너에 부하 30% 감소 혹은 정지한 상황이며 다른 조작은 가하지 않았다. Case E, F는 마주보는 버너 한 쌍에 비정상 조건을 건 상태이며, 각각 부하를 30% 줄이거나 정지하였다. 추가적으로 F case에는 부하 감소 시 내부 온도가 슬래그 용융 온도에 도달하지 못할 수 있기에 O<sub>2</sub>/coal ratio가

0.79에서 0.84가 되도록 산화제 투입량을 증가하였다.

CFD는 Ansys Fluent v17.2를 사용하였다. 석탄 입자 추적은 Lagrangian tracking method를 통해 미분탄(4.3-125 μm 범위 10구간, 총 92,160개), 및 flux (총 27648개)의 개별입자를 추적하였다. 석탄의 탈휘발 특성은 Flashchain을 사용해 탈휘발 속도와 휘발분 조성을 결정하여 입력조건으로 사용했다.[5] 화 연소 및 가스화는 고온 분위기에서 탄소 코어의 수축, 표면 회분층 증가 및 확산 속도 저하가 고려된 Unreacted core shrinking model[6]을 UDF로 개발하여 사용하였다. 가스 반응은 Jones-Lindstedt mechanism[7]을 기반으로 구성하고, Finite rate/eddy dissipation model[8]을 사용하여 반응속도를 해석하였다. 난류는 제트와 선회류 같은 복잡한 유동을 표현하는데 적합한 Realizable k-ε model[9]을 사용하였다. 복사와 가스 흡수계수는 각각 Discrete ordinate model[10]과 회색기체가중합법[11]으로 계산하였다. 벽면온도는 회분 및 flux 조성에 대해 Kalmanovitch and Frank correlation을 사용해 슬래그 점성이 250 poise가 되는 1524 K을 온도로 설정하였다.

Fig 2와 3은 각각 주요 단면에서의 온도 분포와 벽면에서의 열유속을 나타낸 것이다. 정상가동 중인 case A는 편향된 버너의 제트가 충돌하여 버너단 위아래로 수직유동이 발생한다. 하강유동은 슬래그 포트 부근으로 하강하는데 산화제에 비해 입자가 많아 가스화 반응을 하고 저온영역을 형성한다. 이 후 하강유동은 벽면을 따라 상승하는데 산화제 제트 주변에서 합성가스가 일부 연소되어 고온이 된다. 유동들은 버너단 위에서 선회류의 원심력으로 반경이 증가하며 출구로 이동하는데 이 때문에 버너단 상부의 전열량이 다른 부분보다 높음을 확인할 수 있다. Case B, C, D는 한 개의 이상버너가 존재하는데 이 때문

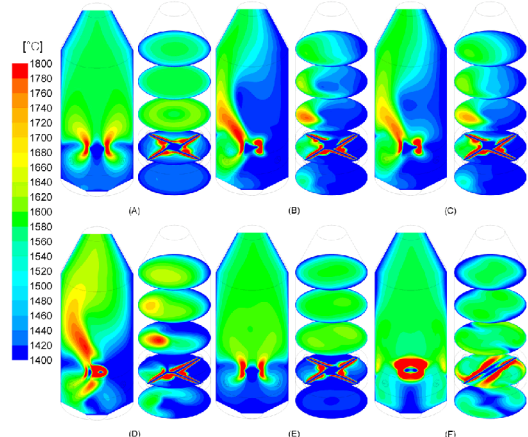


Fig. 2 Contours of gas temperature

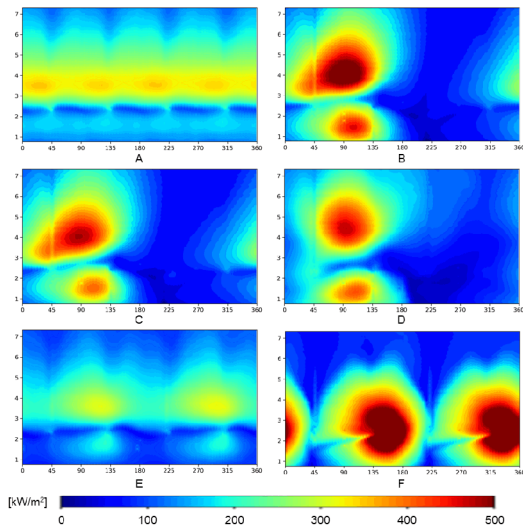


Fig. 3 Heat flux on the gasifier sidewall.

에 제트가 선회류와 상하 유동을 만들어내지 못하고 이상버너 방향 벽면과 유동이 충돌하게 된다. 높이별 온도 contour와 전열량에서도 분리된 고온/저온 영역과 열점, 냉점을 볼 수 있다. 이상버너 한 쌍이 존재하는 case E와 F중 E는 A와 유사한데 버너가 모두 가동되 상/하유동과 선회류를 형성하기 때문으로 보인다. 다만 버너 부하별로 제트 세기가 달라 버너단에서 멀어질수록 선회류가 약해져 불균일한 전열량 분포를 볼 수 있다. F에서는 낮은 부하로 O<sub>2</sub>/Coal 비를 증가시켰는데 전체 온도는 높지 않으나 버너 제트가 그대로 반대쪽 벽면을 향해 버너단에 800 kW/m<sup>2</sup>에 달하는 열점을 볼 수 있다.

Table 3 Summary of performance parameters.

Case	A	B	C	D	E	F	
CGE	81.3	81.7	81.6	77.1	81.4	78.5	
C conversion [%]	98.7	99.2	99.1	94.9	98.9	99.9	
Syngas [vol.%]	CO	64.2	64.4	64.3	64.1	64.2	64.1
	H <sub>2</sub>	26.4	26.4	26.4	24.4	26.4	22.5
	CO <sub>2</sub>	1.3	1.1	1.2	1.2	1.2	1.3
	H <sub>2</sub> O	2.1	2.0	2.1	4.0	2.0	5.9
Exit temp. [° C]	1502	1514	1519	1564	1515	1496	
Heat duty[MW <sub>th</sub> ]	18.1	15.8	14.7	15.4	13.8	19.5	

Table 3은 각 case별로 성능지표를 나타내었다. 정상 case인 A에 비해 B, C, E가 탄소전환율과 냉가스 효율이 모두 높는데 편향된 버너들이 선회류와 하강유동을 만들어내지 못해 slag tap으로 하락하는 입자들이 적어서 탄소 전환율이 높

고 냉가스 효율은 환원 분위기에서 탄소 전환율에 비례하기 때문으로 보인다. D는 탄소 전환율과 냉가스 효율 모두 낮고 F는 탄소 전환율에 비해 냉가스 효율이 낮았는데 D는 입자들이 비정상 버너의 벽면으로 밀집되어 벽면을 따라 slag tap으로 향하기 때문으로 보이고 F는 탄소는 버너단에서 대부분 탈휘발과 최 연소가 이뤄졌지만 높은 O<sub>2</sub>/Coal ratio로 인해 CO<sub>2</sub> 농도가 높아 버너단에서 water gas shift reaction의 역반응이 발생해 수소가 물로 전환되어 낮음을 확인할 수 있다.

본 연구에서는 90%의 부하로 정상가동된 case의 비정상 버너 하나가 존재하는 3개의 case와 한 쌍의 비정상 버너가 존재하는 2개의 case를 CFD로 해석하여 내부 열유동 및 반응특성을 파악하였다. 가스화기 성능 파라미터로 확인 시 합성가스 조성의 차이가 크지 않고 탄소 전환율, 냉가스 효율이 증가해 개선됐다고 생각할 수 있었으나 전열량을 확인 시 case B, C, D, F는 고온 제트가 벽면과 접촉해 열점이 발생하였고 다른 벽면은 냉점이 발생하였다. 열점에서는 얇아진 슬래그 층 아래 내화재 벽면과 수냉벽에 손상을 주고 냉점에서는 슬래그가 침화되어 슬래그 포트를 막는 문제가 생길 수 있다. 추가적으로 D와 F case의 이상버너는 가동이 중단되어 산화제와 이송가스 제트가 존재하지 않기 때문에 버너가 고온 가스에 노출되어 추가 손상 가능성이 있고 낮은 부하로 인해 슬래그 양이 적어 외벽 손상도 생길 수 있다.

결론적으로, 4개 버너의 불균형으로 인한 편향 유동의 발생은 벽면의 열유속 집중을 통한 내화벽 손실을 유발하므로 최소화하는 것이 바람직하다. 또한, 운전상의 필요에 의해 버너의 부분 운전이 불가피한 경우 2개 버너만을 가동하는 경우보다 3개 버너를 가동하는 조건이 벽면 내화벽의 손상을 최소화할 수 있다.

## 후 기

본 연구는 2018년 두산중공업의 “가스화기 DCS 연계 CFD-ROM 개발” 과제의 지원을 받아 수행 되었습니다.

## 참고 문헌

- [1] Higman C, Van Der Burgt M. “Gasification”, 2<sup>nd</sup> ed, Oxford, UK:Gulf professional Publishing; 2008
- [2] D.S. Kim, Construction and operation status of 300MW IGCC Plant in Korea western power CO., J. Of Electrical World, 11 (2013) 42-47.
- [3] S.H. Kim, D.J. Go, Synthetic natural

- gas(SNG) manufacturing technology, News & Information for Chemical Engineers, 31(1) (2013) 65-68
- [4] H.J. Kim, H. Jung, H.T. Lee, D.H. Cheon, C.G.Lee, J.G. Lee, The Status and Prospect of Technical Development of CTL(Coal-to-Liquid) in Korea, The Korean Society for New and Renewable Energy, 2007, 461.
- [5] Niksa S. PC Coal lab version 4.1: user guide and tutorial, Niksa Energy Associates LLC, Belmont, CA, United States 1997
- [6] W. P. Jones, R. P. Lindstedt, "Global Reaction Schemes for Hydrocarbon Combustion" , Combustion Flame, Vol.73, 1988, pp.233-249
- [7] B. F. Magnussen, B. H. Hjertager, "On Mathematical Models of Turbulent Combustion with Special Emphasis on Soot Formation and Combustion" , 16<sup>th</sup> Internal Symposium on Combustion. The Combustion Institute, Vol. 16, 1976, pp 719~729
- [8] C. Y. Wen, T. Z. Chaung, "Entrainment Coal Gasification Modeling. Industrial and Engineering Chemistry Process Design and Development" , Vol. 10, pp. 684-695
- [9] T. H. Shih, W. W. Liou, A. Shabbir, Z. Yang, J. Zhu, "A new  $k-\epsilon$  eddy-viscosity model for high Reynolds number turbulent flows- model development and validation." Computers & Fluids, Vol.24, 1995, pp. 227-238
- [10] E. H. Chui, G. D. Raithby, "Computation of radiant heat transfer on a non-orthogonal mesh using the finite-volume method." Numerical Heat Transfer, 1993, 23 (3), pp.269-288
- [11] T. F. Smith, Z. F. Shen, J. N. Friedman. "Evaluation of coefficients for the weighted sum of gray gases model" . J. Heat Transfer Vol.104, 1982, pp. 602-608

# 595MWe급 대향류 석탄화력 보일러의 공기다단공급에 따른 연소 및 NO<sub>x</sub> 발생 특성 해석

이지석\*, 조현빈\*, 류창국\*<sup>†</sup>, 장계환\*\*

## Characteristics study on the influence of air staging on combustion and NO<sub>x</sub> in a 595 MWe opposed wall-firing coal boiler.

Jiseok Lee\*, Hyunbin Jo\*, Changkook Ryu\*<sup>†</sup>, KyeHwan Jang\*\*

### ABSTRACT

This study analyzed the characteristics of combustion and NO<sub>x</sub> emission in an opposed wall-firing boiler at a 595 MWe capacity. Computational fluid dynamics (CFD) simulations incorporating advanced coal combustion models were performed for the stoichiometric ratio (SR) of the burner zone varying between 0.84 and 0.94 while fixing the total SR at 1.15. For the reference case, the CFD results showed reasonable agreement in terms of heat distribution and NO<sub>x</sub> emission with the design data. The NO<sub>x</sub> emission at the furnace exit was reduced by about 8% when the burner zone SR was reduced to 0.84. However, the unburned carbon in the bottom ash and fly ash were increased by two and three times, respectively, which is not favorable for the boiler efficiency. In contrast, the NO<sub>x</sub> emission was increased by 11% when the burner zone SR was increased to 0.94, but the unburned carbon in bottom and fly ash were decreased by 50% and 17%, respectively. Based on the analysis of detail flow pattern and char particle behaviors, the design and operation of the burner zone and over fire air can be improved in the future development to achieve low NO<sub>x</sub> emission and unburned carbon release at the same time.

**Key Words** : CFD, Pulverized coal, NO<sub>x</sub> emission, air staging, SCR.

석탄 화력 발전은 수 년 간 오염물질 배출 감소와 효율적인 스티프 사이클, 연소 기술을 결합한 중요한 전력 공급원이었다. 그러나 석탄 연소 후 발생하는 부산물인 질소산화물(NO<sub>x</sub>)은 광화학 스모그와 미세먼지의 전구물질로 저감 기술의 향상이 필수적이다. [1] 일반적으로 보일러에 적용되고 있는 NO<sub>x</sub> 저감 기술은 연소 중 생성 억제 기술인 저 NO<sub>x</sub> 버너, 공기 다단연소(Air staging), 연료 다단연소(Reburning), 배가스 재순환 등이 있으며 연소 후 제거 기술은 SCR (Selective catalytic reduction)과 SNCR (Selective non-catalytic reduction)이 있다.

본 연구는 국내 595MWe급 대향류식 미분탄 보일러를 대상으로 추가적인 연소 중 NO<sub>x</sub> 생성 억제 기술을 도입을 위해 당량비 조절을 전산유동해석(CFD)를 통해 평가하기 위한 것이다. 이를 위해 설계 및 운전계측자료를 바탕으로 해석을

위한 모델을 수립하고, NO<sub>x</sub> 및 탄소전환율과 열 전달특성을 분석하였다.

해당 보일러는 우리나라 대부분의 석탄 화력 보일러처럼 저 NO<sub>x</sub> 버너 채용과 함께 주 연소 영역인 버너영역에 연소용 공기의 89%만을 공급하여 당량비(Equivalence ratio)가 1보다 작은 Fuel-rich 분위기가 되도록 하고 그 상단의 OFA(Over-fire air)로 나머지 공기를 투입하여 연소시키는 공기 다단연소를 채용하였다.

Fig. 1은 대상 보일러의 형상과 해석에 사용된 격자를 나타낸 것이다. 전벽에는 18개의 버너가 3단으로, 후벽에는 12개의 버너가 2단으로 배치되어 있다. 전후벽의 BN2 양 측에는 LFA (Lower furnace air)포트가 총 4개 설치되어 있으며, 최상단에는 16개의 OFA포트가 각각 설치되어 있다. 격자는 총 4,823,840개의 육면체로 구성하였고, 중요한 반응이 주로 일어나는 버너 영역에서 더 조밀하게 구성하여 해석의 신뢰성을 높이고자 하였다. Table. 1은 사용되는 연료의 조성을 정리하였다. 석탄 열량 1358.58MWth의 미분탄이 운전 대기상태인 전벽 BN3을 제외한 나머지 24

\* 성균관대학교 기계공학과

\*\* BHI

<sup>†</sup> 연락처자, cryu@me.skku.ac.kr

TEL : (031)299-4841 FAX : (031)-290-5889

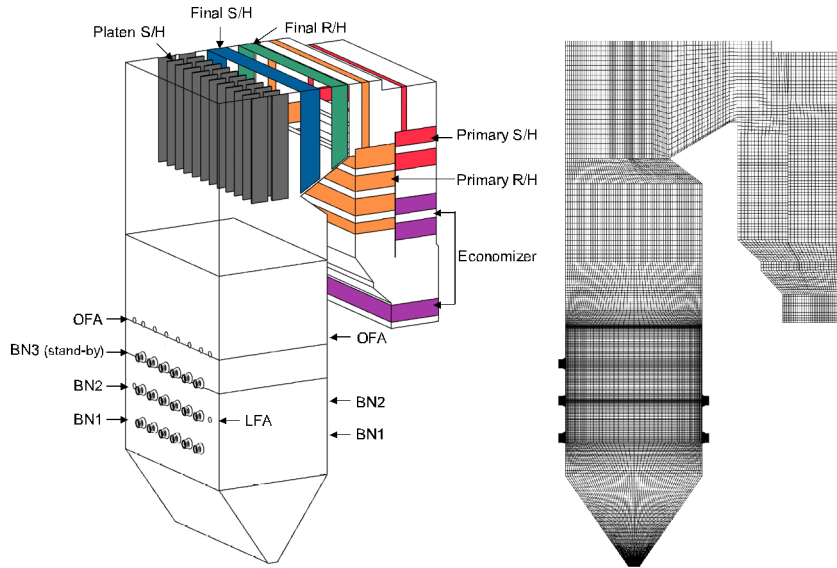


Fig. 1 Furnace configuration of target boiler and mesh constructed.

개의 버너로 균일하게 투입된다.

Table. 1 Fuel properties of design coal

HHV [as-fired, kcal/kg]		5,295
Proximate analysis [wt. %]	Total moisture	20.00
	Inherent moisture	7.30
	Volatile matter	35.44
	Fixed carbon	43.99
Ultimate analysis [wt. %daf]	Ash	13.3
	C	77.36
	H	5.42
	O	14.30
	N	1.78
	S	1.14

Table. 2는 버너 영역 당량비 조절에 따른 공급 공기의 유량을 비율로 요약하였다. Case 1(Ref)은 설계자료와 동일하며, Case 2와 3은 버너 영역의 당량비가 기존 0.89에서  $\pm 0.05$ 만큼 조절되어 그에 따라 OFA의 유량이 변경된다.

CFD는 ANSYS FLUENT v17.2를 사용하여 수행하였다. 석탄 입자는 DPM (Discrete phase method)를 적용하여 개별입자(5.9-204 $\mu$ m 범위의 10구간, 총 입자 수 161,280개)의 반응을 계산한 뒤 기체상에 대한 생성항으로 고려하였다. 입자의 탈휘발 속도와 휘발분 조성은 PCCoalLab의 Flashchain[2]를 이용하여 설정하였다. 좌 연소반응은 고온 분위기에서 입자내부 중심부 탄소의 기 감소 및 표면의 회분층 형성과 그에 따른 가스 확산속도의 저하를 고려할 수 있는 Unreacted Core Shrinking Model[3]을

Table. 2 Summary of simulated cases : Air flow rate in percentage compared to total air.

Case	1(Ref)	2	3
OFA (%)	22.2	26.6	18.0
Burner SA (%)	47.7	43.3	51.8
버너영역 당량비	0.89	0.84	0.94
총 당량비	1.15	1.15	1.15

User-defined function (UDF)으로 적용하였다. 가스의 연소 반응은 휘발분과 좌를 대상으로 Jones-Lindstedt mechanism[4] 기반으로 구성하고, 반응속도는 난류 유동에 의한 영향을 고려하기 위하여 Kinetic rate/eddy-dissipation rate model[5]를 적용하였다. 난류는 가스유동의 제트와 선회류 등 복잡한 유동을 표현하는데 높은 신뢰성과 수렴성을 갖는 Realizable k- $\epsilon$  model[6]을 적용하였다. 복사 모델은 이산중좌법(Discrete ordinates method)을 사용하였으며, 이때 가스의 흡수 계수는 회색기체가중좌법(Weighted sum of gray gases model)으로 계산하였다. 보일러의 관군은 복잡한 형상에 대해 개별적으로 격자를 구성하는 대신, 해당영역에서 관군의 형상 및 배치에 따른 유동저하와 압력강하, 대류 및 복사열 전달을 계산하는 UDF를 적용하였다. NOx 반응 해석은 연소해석 결과를 기반으로 Fuel NOx와 Thermal NOx만을 고려하여 분석하였다. 이때,

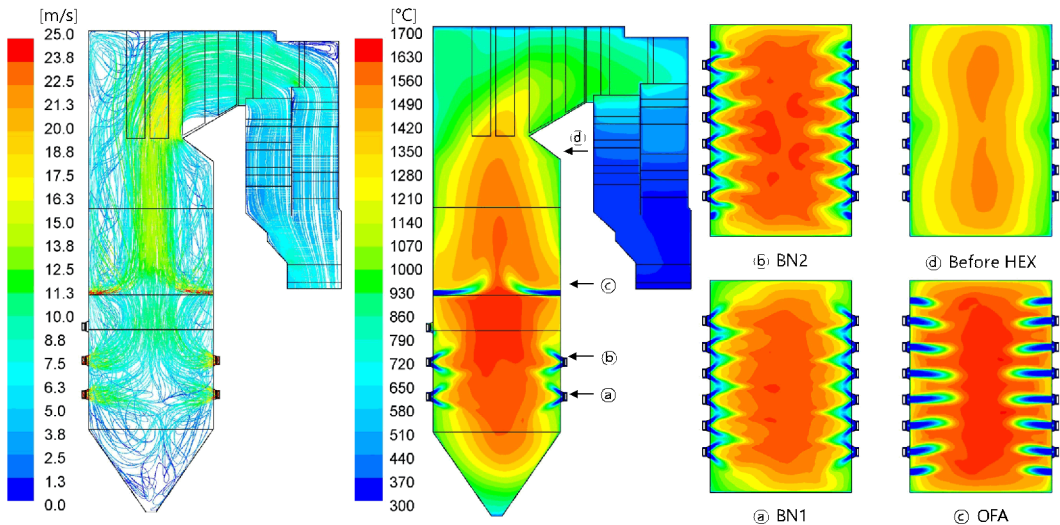


Fig. 2 Pathlines of velocity magnitude and contour of temperature for the reference case.

휘발분에 포함된 N이 HCN과  $\text{NH}_3$ 로 전환되는 비율은 석탄 5:1로 가정하였고, 최악의 경우 모두 NO로 산화되는 것으로 보았다.

Fig. 2는 Case 1(Ref)인 버너영역 당량비 0.84 일 때 속도 유선과 온도 분포를 나타낸 것이다. BN1로부터의 유동이 하단 콘영역을 채우고 측벽을 타고 상승하며, BN2로부터의 가스가 OFA와 합류하여 빠른 속도로 상승하는 전형적인 대향류식 보일러의 모습을 나타낸다. 또한, 강한 상승유동의 주위에는 비교적 저속의 순환영역이 생성된 것을 확인할 수 있다. OFA단에서의 온도분포는

BN1로부터의 강한 상승유동으로 인해 측벽의 OFA가 비교적 깊게 침투하지 못하는 것을 보여준다. 그 결과 Before HEX에서의 온도분포는 측벽의 온도가 더 높게 나타난다. 그 이후 약 130  $^{\circ}\text{C}$ 의 고온 가스가 열교환기에 진입한다.

Fig. 3은 Case 1의 단면과 BN1 양끝의 버너에서의 탄소농도를 나타낸 유선과 분포이다. 대부분의 연료가 고온의 버너영역에서 빠르게 소모되는 것을 확인할 수 있으나 보일러의 Nose에서 소량의 탄소가 확인된다. 그 이유는 앞서 언급했듯이 하단버너로부터의 유량이 측벽을 타고 상승하여 저속의 재순환영역으로 향하기 때문이다. 당량비를 조절한 경우에 그 영향이 더 명확하다. 당량비가 0.84인 Case 2는 강한 OFA로 인해 산소 농도가 재순환영역에서 더욱 결핍되어 있어 해당 영역에서의 미연탄소가 많이 침체되어 있다. 반면, Case 3의 경우 산소가 넓게 분포되어 있고

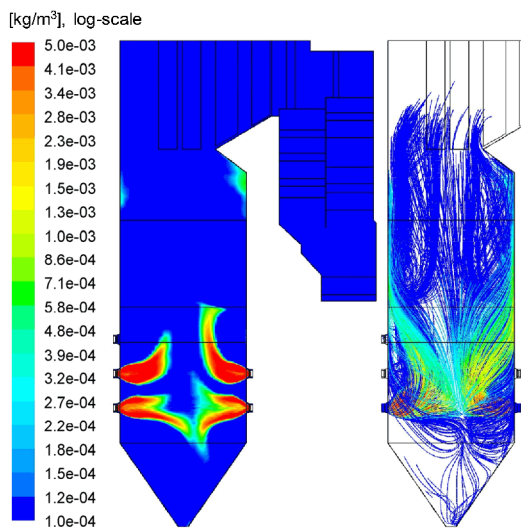


Fig. 3 Contour of carbon concentration for the reference case.

Table. 3 Comparison of key performance parameters

Case		2	1(Ref)	3
Bruner zone SR		0.84	0.89	0.94
Carbon conversion (%)		99.85	99.94	99.95
Unburned carbon in ash (%)	Bottom	5.94	2.66	1.37
	Fly	0.32	0.12	0.10
NOx (ppm, 6% $\text{O}_2$ )		103.5	112.5	124.8
Boiler efficiency (%)		89.96	89.99	90.04

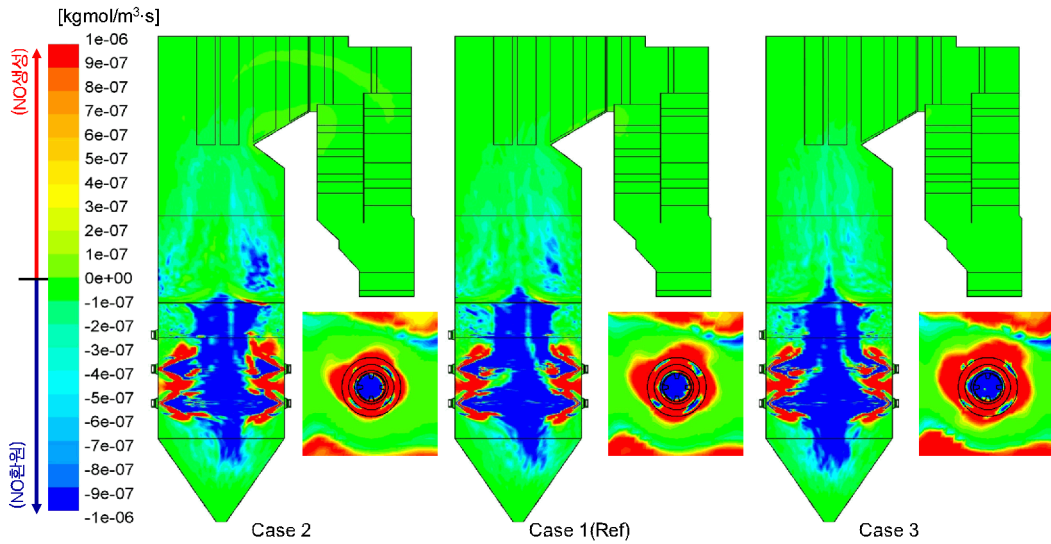


Fig. 4 Comparison of NO<sub>x</sub> reaction rates for different burner zone SRs.

그에 따라 미연탄소의 양도 매우 적다.

Fig. 4는 각 Case들의 NO 반응속도를 전체와 버너 앞에서 나타낸 것이다. 버너 영역 당량비가 작을수록 화염 중심부에서 환원되는 영역이 더 넓고 OFA단 이후로도 추가적으로 환원이 일어난다. 이러한 변화가 출구에서의 NO농도를 각각 103.5, 112.5, 124.8(ppm, 6% O<sub>2</sub>)로 다르게 한다.

Table. 3은 주요 성능지표를 표로 정리한 것이다. Case 2에서 OFA가 산소를 중심부로 밀어내어 낮은 탄소전환율이 나타났으며 그에 따라 바닥재와 비산재 내의 미연탄소 비율이 늘어났다. 다만, 이렇게 미연탄소가 침체되는 영역은 연료 다단연소를 도입하는 위치를 고려할 때 참고할 수 있다. 또한 환원영역의 증가로 case 2의 출구에서의 질소산화물 농도가 기존대비 약 9ppm 감소하였으며 case 3의 경우 12.3ppm 증가하였다. 결과적으로, 당량비를 조절하여 NO의 농도를 조절할 수 있으며 그에 따라 반비례적으로 증가하는 미연탄소의 양을 제어하고 추가적인 SCR을 도입하기 위한 지표를, CFD를 통하여 평가할 수 있다.

## 후 기

본 연구는 산업통상자원부(MOTIE)와 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다. (No. 20181110200190)

## 참고 문헌

[1] C. K. Man, J. R. Gibbins, J. G. Witkamp, J.

Zhang, "Coal Characterization for NO<sub>x</sub> Prediction in Air-Staged Combustion of Pulverized Coals", *Fuel*, Vol. 84, 2005, pp. 1290-1295.

[2] Niksa S. PC Coal Lab version 4.1: user guide and tutorial, Niksa Energy Associates LLC, Belmont, CA, United States, 1997

[3] W. P. Jones, R. P. Lindstedt, "Global Reaction Schemes for Hydrocarbon Combustion", *Combustion Flame*, Vol. 73, 1988, pp.233-249

[4] B. F. Magnussen, B. H. Hjertager, "On Mathematical Models of Turbulent Combustion with Special Emphasis on Soot Formation and Combustion", 16th Internal Symposium on Combustion. The Combustion Institute, Vol. 16, 1976, pp.719-729

[5] C. Y. Wen, T. Z. Chaung, "Entrainment Coal Gasification Modeling. Industrial and Engineering Chemistry Process Design and Development", Vol. 10, pp. 684-695

[6] T. H. Shih, W. W. Liou, A. Shabbir, Z. Yang, J. Zhu, "A new k- $\epsilon$  eddy-viscosity model for high Reynolds number turbulent flows - model development and validation." *Computers & Fluids*, Vol.24, 1995, pp. 227-238.



# Numerical Assessment on Blended Pulverized Coal Combustion by Large Eddy Simulation

Seongyool Ahn<sup>†</sup>, Hiroaki Watanabe, Toshiaki Kitagawa

Pulverized coal is one of major energy resources for last centuries, and the range of coal quality is getting wide which involves higher volatile matter and humidity, and lower fixed carbon. These differences have potential possibility giving a damage on a furnace. So, it is crucial to understand the effect of fuel composition on combustion characteristics to prevent physical damages and improve combustion efficiency.

Many researches have been performed to improve understanding of the effect of fuel composition on pulverized coal combustion. Lisandy et al. [1] investigated unburned carbon and NO formation characteristics from low-rank coal combustion in a drop-tube furnace experimentally and numerically. They revealed that higher thermal NO is formed at peak temperature whereas NO formation is suppressed during low-stoichiometric-combustion. Mätzing et al. [2] modeled grate combustion of biomass and low rank fuels with numerical approach. The new model captured key quantities such as ignition delay time, ignition rate, reaction front velocity and mass conversion rate properly comparing to experiment. Although many researches have been performed and are performing, much of it is still disclosed.

The purpose of this study is, therefore, to investigate the effect of fuel composition on combustion characteristics of different rank of coals by numerical analysis. Two coals were employed for this study which have different fuel ratios as 1 and 2. Simulations were carried out for a pilot-scale turbulent pulverized coal combustion furnace, and validated by comparison with experiment. The combustion characteristics of each coal are

discussed based on simulation results in terms of gaseous temperature, velocity and composition.

To solve the LES equations, the FFR-Comb. package is employed which is extended by NuFD, Central Research Institute of Electric Power Industry, Kyoto University and Kyushu University [3]. The governing equations for gaseous phase are given by

$$\frac{\partial \bar{\rho}_f}{\partial t} + \frac{\partial \bar{\rho}_f \tilde{u}_i}{\partial x_i} = S_m, \quad (1)$$

$$\frac{\partial \bar{\rho}_f \tilde{u}_i}{\partial t} + \frac{\partial \bar{\rho}_f \tilde{u}_i \tilde{u}_j}{\partial x_j} = -\frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \frac{\partial \bar{\sigma}_{ij}}{\partial x_j} - \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} + S_{mom,i}, \quad (2)$$

$$\frac{\partial \bar{\rho}_f \tilde{h}}{\partial t} + \frac{\partial \bar{\rho}_f \tilde{u}_i \tilde{h}}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left( \bar{\rho}_f \alpha \frac{\partial \tilde{h}}{\partial x_i} \right) + S_h, \quad (3)$$

$$\frac{\partial \bar{\rho}_f \tilde{Y}_k}{\partial t} + \frac{\partial \bar{\rho}_f \tilde{Y}_k \tilde{u}_j}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \bar{\rho}_f D_k \frac{\partial \tilde{Y}_k}{\partial x_j} \right) + S_{Y_k}, \quad (4)$$

where  $\rho_f$ ,  $p$ ,  $u_i$ ,  $u_j$  and  $\sigma_{ij}$  are density, pressure, velocity and viscous stress tensor of the gas phase, respectively while  $\tau_{ij}$  denotes the SGS effect.  $\alpha$  represents the thermal diffusivity.  $Y_k$  is the  $k$ th species and  $D_k$  is the diffusivity.  $\bar{\cdot}$  and  $\tilde{\cdot}$  denote the spatial averaging and Favre-filtering, respectively.  $S_m$ ,  $S_{mom}$  and  $S_h$  are source terms attributable to interactions between gaseous phase and particles.

The governing equations for particles are written as below in the order of position, velocity, and temperature.

$$\frac{dx_{i,p}}{dt} = u_{i,p}, \quad (5)$$

$$\frac{du_{i,p}}{dt} = \frac{f_d}{\tau_p} (\tilde{u}_i - u_{i,p}), \quad (6)$$

$$\frac{dT_p}{dt} = \frac{Q_p + (dm_p/dt)/L_v}{m_p c_{p,p}}, \quad (7)$$

where  $x_{i,p}$  and  $u_{i,p}$  denote the location and the velocity of the particle, respectively,  $f_d$  is the drag force term, and  $\tau_p$  is the response time of the particle.  $T_p$  and  $C_{p,p}$  are the particle temperature and the specific heat of the particle, respectively.  $L_v$  is the latent heat of vaporization at  $T_p$ . Interactions between the

Department of Mechanical Engineering, Kyushu University

<sup>†</sup> 연락저자, syahn@mech.kyushu-u.ac.jp

TEL : +81 92-802-3151

two phases are solved by the Particle-Source-In Cell (PSI-CELL) model [4,5].

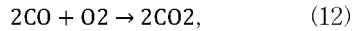
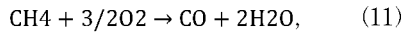
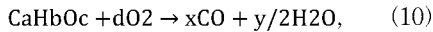
A single postulated species, CaHbOc, is introduced to explain released gases during devolatilization process.

$$dV/dt = K_v (V^* - V), \quad (8)$$

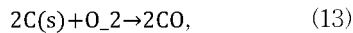
$$K_v = A_v \exp(E_v / (RT_p)), \quad (9)$$

where  $V^*$  and  $V$  are the volatile matter content of the proximate analysis and total amount of released volatile gases from a particle respectively.  $R$  is the universal gas constant and  $A_v$  and  $E_v$  indicate pre-exponential factor and activation energy, respectively. The values of  $A_v$  and  $E_v$  are determined by the FLASHCHAIN software [6] and set to  $2021 \text{ s}^{-1}$  and  $31.1 \text{ kJ/mole}$ , respectively, in this study.

Combustion of gaseous phase is explained by a simple global kinetic mechanism consists of three steps, as below;



where  $d$ ,  $x$  and  $y$ , are determined by the species conservation of the oxygen component. Particle combustion is calculated by a single step reaction, as presented in the following equation.

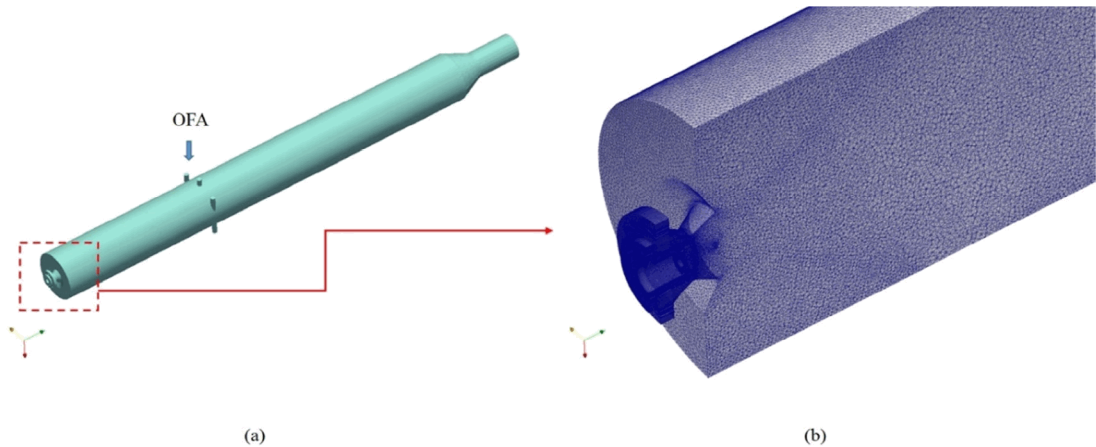


where  $C(s)$  denotes the carbon component in the char. The combustion rate of (13) is determined by Field's model [7]. The reaction rate of the kinetics is built by the scale similarity filtered reaction rate model (SSFRRM) for turbulent flow field [8].

Fig. 1 indicates the numerical domain which is unstructured, and has 8 m length. Fig. 1 (b) shows the burner and inlets consists of 1st inflow, 2nd inflow and 3rd inflow. There is one more inlet at middle of the reactor named OFA. Pulverized coal particles are issued through 1st inflow with carrier gas of air, while additional air is provided by 2nd and 3rd inflows to generate turbulent flow. Staging air is issued at middle of the furnace, which is corresponding to over-fire-air (OFA).

**Table 1** Fuel property

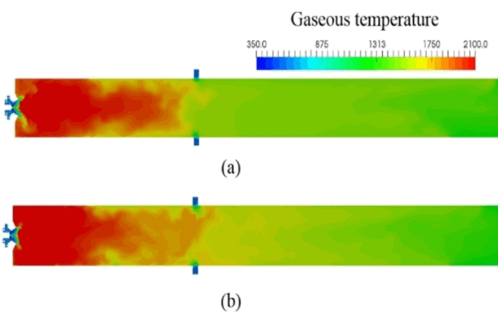
	Newlands coal	Tanitohalum coal
Proximate analysis [wt%]		
Moisture	2.6	10.9
Volatile matter	28.5	45.6
Fixed carbon	57.2	45.7
Ash	14.3	8.7
Ultimate analysis [wt %]		
Carbon	73.3	68.7
Hydrogen	4.4	4.78
Oxygen	6.2	15.4
Nitrogen	1.51	1.53
Sulfur	0.29	0.74



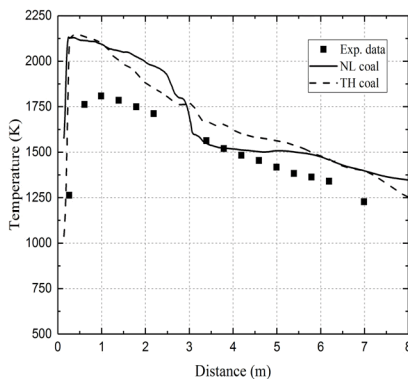
**Fig. 1** (a) Whole numerical domain and (b) enlarged image of burner inlets

Two coals are employed in this study to make comparison, and the examined fuel property is presented in Table 1. As shown in the table, the fuel ratios of New lands (NL) coal and Tanitohalum (TH) coal are different as 2 and 1, respectively. The size of particles is assumed as  $45\ \mu\text{m}$  of diameter. The inlet conditions of the simulations are corresponding to experiments for each case, and the values are summarized in Table 2.

The maximum Courant number is below unity during calculation with time difference of  $5\ \mu\text{s}$ . A case consumes approximately 166 h of wall-time with 576 cores in the supercomputing facilities at Research Institute for Information Technology, Kyushu University. The calculation is performed for 300 thousand steps, and time-averaged values are estimated for last 50 thousand steps.



**Fig. 2** Gas temperature of (a) NL coal and (b) TH coal



**Fig. 3** Gas temperature of single cases along central position of the furnace

**Table 2** Inlet conditions

	1 <sup>st</sup> inflow	2 <sup>nd</sup> inflow	3 <sup>rd</sup> inflow	OFA
T <sup>a</sup> [K]	353	598	598	523
NL [m/s]	16.76	2.34	5.69	4.90
TH [m/s]	16.93	2.12	5.27	4.65

a: temperature

Fig. 2 exhibits gaseous temperature distribution of two coals. As presented in the figure, distributions of the gaseous temperature seem similar over the region. The high temperature gas becomes lower when the OFA is injected in the both cases.

For more detail comparison, time-averaged gaseous temperature is plotted according to central position of the furnace as well as comparison with experiment of NL coal in Fig. 3. The peak gaseous temperature is higher than that of experiment for the both cases, but it becomes similar after the OFA is injected. The both cases have similar temperature distribution, as presented in the plot.

Fig. 4 presents contoured distributions of time-averaged axial velocity for the both simulations. As presented, there are two large recirculating flows at upstream in inside and outside of the flame. There is one more recirculated flow at middle and downstream after OFA injection. The recirculating flow is faster in the case of NL coal at the inside of flame and middle stream than that of TH coal, even though general distribution characteristic is similar in the both cases.

Fig. 5 shows contoured images of mole fraction distributions for oxygen, volatile matters and  $\text{CO}_2$  of the cases of NL and TH coals. As expected, more oxygen has been consumed in the case of TH coal due to the lower fuel ratio. Moreover, devolatilized gas and  $\text{CO}_2$  are higher in the case of TH coal than that of NL coal. All oxygen remains at upstream is completely consumed when OFA is injected in the case of TH coal.

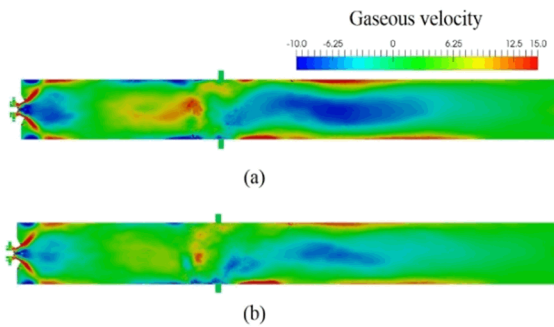


Fig. 4 Gas velocity of (a) NL coal and (b) TH

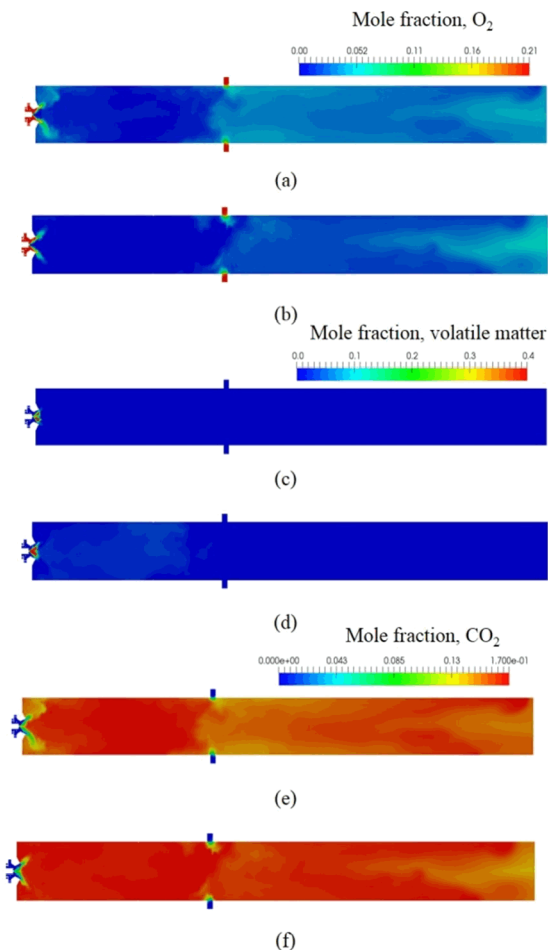


Fig. 5 Mole fractions of major species for the single coal cases

### Acknowledgements

This study is supported by MEXT (Ministry

of Education, Culture, Sports, Science and Technology Japan) as "Priority issue on Post-K computer" (Accelerated Development of Innovative Clean Energy Systems), Project ID: hp160220, hp170273 and hp180203.

### References

- [1] K.E. Lisandy, J. Kim, H. Lim, S. Kim, C. Jeon, "Prediction of unburned carbon and NO formation from low-rank coal during pulverized coal combustion: Experiments and numerical simulation", *Fuel*, Vol. 185, 2016, pp. 478-490.
- [2] H. Mätzing, H. Gehrman, H. Seifert, D. Stapf, "Modelling grate combustion of biomass and low rank fuels with CFD application", *Waste Manage.*, Vol. 78, 2018, pp. 686-697.
- [3] S. Ahn, K. Tanno, H. Watanabe, "Numerical analysis of particle dispersion and combustion characteristics on a piloted coaxial pulverized coal jet flame", *Appl. Therm. Eng.*, Vol. 124, 2017, pp. 1194-1202.
- [4] C. Crowe, M. Sharma, D. Stock, "The Particle-Source-In Cell (PSI-CELL) Model for Gas-Droplet Flows", *J. Fluids Eng.*, Vol. 99 Issue 2, 1977, pp. 325-332.
- [5] H. Watanabe, D. Uesugi, M. Muto, "Effects of parcel modeling on particle dispersion and interphase transfers in a turbulent mixing layer", *Adv. Powder Technol.*, Vol. 26 Issue 6, 2015, pp. 1719-1728.
- [6] S. Niksa, L. Heyd, W. Russel, D. Saville, "the role of heating rate in rapid coal devolatilization", *Proc. Combust. Inst.*, Vol. 20, 1985, pp. 1445-1453.
- [7] M. Field, "Rate of combustion of size-graded fractions of char from a low-rank coal between 1 200°K and 2 000°K", *Combust. Flame*, Vol. 13 Issue 3, 1969, pp. 237-252.
- [8] P. DesJardin, S. Frankel, "Large eddy simulation of a nonpremixed reacting jet: Application and assessment of subgrid-scale combustion models", *Phys. Fluids*, Vol. 10 Issue 9, 1998, pp. 2298-2314.

## Two-Stage DTF에서 메탄가스 재연소를 이용한 NOx 저감에 관한 연구

김민우\*·김강민\*·김규보\*·전충환\*†

### An Experimental study of NOx Reducing by Methane Gas Reburning in Two-Stage DTF

Min-Woo Kim\*, Kang-Min Kim\*, Gyu-Bo Kim\*, Chung-Hwan Jeon\*†

최근 엄격해지는 환경규제에 맞게 배기배출물을 줄이고자 하는 기술을 지속적으로 개발하고 있다. 한국의 경우, 더욱 엄격한 기준으로 강화하고 있으며 이는 아래 그래프에 나타내었다.

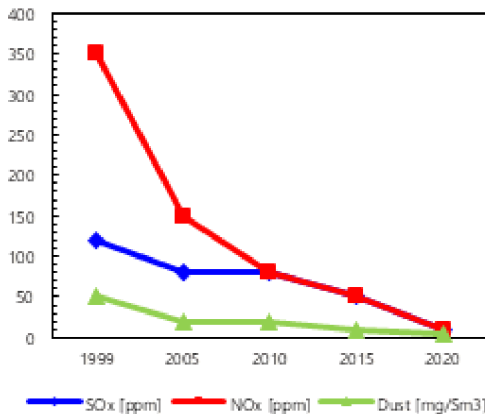
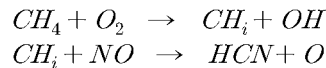


Fig. 1 Emission standards of coal power plants in Korea

특히 NOx 저감에 있어서 SCR 및 SNCR 등의 배기가스 후처리를 통해 환경규제를 맞추고 있지만, 연소시 발생하는 NOx의 양을 줄이기 어렵다. 연소 중 NOx 발생량을 감소시키기 위한 기술은 여러 가지가 있지만 메탄가스 등의 탄화수소 계열의 가스연료를 이용하여 NOx를 저감할 수 있다. 이를 재연소 (Reburning)라고 한다. 재연소 기술은 주 연료의 일부를 탄화수소계열의 연료로 대체하여 주연소영역 이후에 열분해를 통

해 생성된 CH<sub>i</sub> 기를 NO와 반응시켜 저감시키는 기술이다. 이 과정은 다음 과정과 같다.<sup>[1]</sup>



그러나 재연소 기술은 얼마나 가스연료를 대체하는지, 어떻게 가스를 공급하는지에 따라 큰 차이의 효과를 나타내고 있다. 특히, 온도나 산소농도 등의 연소 조건에도 크게 변화가 있다.<sup>[2]</sup>

본 연구에서는 Two-Stage DTF(Drop-Tube Furnace)에서 실험을 통해 가스 재연소에 의한 효과와 최적화를 위한 기초 연구이다.

실험장치는 아래 그림에 나타내었다.

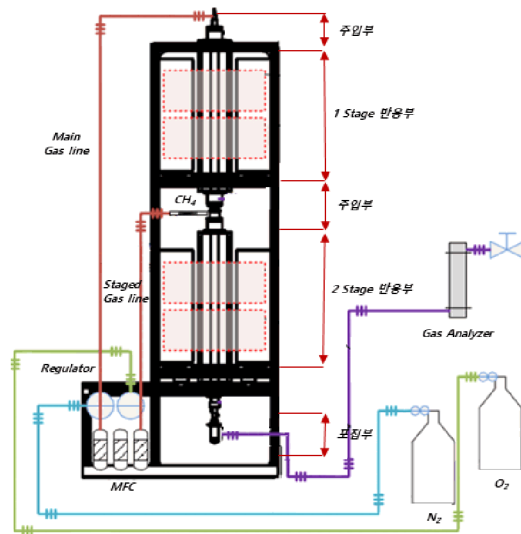


Fig. 2 A schematic of two-stage DTF

석탄이 이송가스와 함께 실험장치 상부에 공급되고, 연소를 위한 공기도 공급된다. 이후 첫 번

\* 부산대학교 기계공학부

† 연락처자, chjeon@pusan.ac.kr

TEL : (051)510-3501

제 stage에서 주 연소가 일어나고, 이후 중앙의 노즐에서 메탄가스가 공급되어 두 번째 stage에서 재연소가 일어나게 된다. 실험장치 후반에는 gas analyzer와 cyclone을 통해 미연탄소분과 가스 농도를 측정하였다.

재연소를 하지 않을 때, 석탄의 연소를 위해 각 단은 1300℃로 설정하고 석탄의 공급량은 열량기준 5.6kcal/min으로 설정되었다. 이때, 석탄의 이송 가스로 2L/min의 질소를 공급하였다. 연소를 위한 가스는 석탄의 완전연소를 가정하여 배기가스에서 산소 농도가 2%가 되도록 계산하여 산소와 질소를 혼합 및 공급하였다. 이때 가스 총량은 10L/min이다. 재연소를 적용할 때, 가스연료는 열량기준 10%, 20%으로 공급하였고 정열공급을 위해 석탄의 공급량도 줄였다. 이때 사용한 석탄은 NCA와 Cloud Peak 이며 성상은 아래 표에 나타내었다.

Table 1 Propertis of coals

NCA			
Proximate Analysis [%] (air dry basis)		Ultimate Analysis [%] (dry ash free basis)	
VM	31.0	C	83.5
FC	46.9	H	4.9
Ash	15.3	O	9.0
Moist.	6.6	N	1.9
		S	0.7
Heating Value [kcal/kg]		6,182	
Cloud Peak			
Proximate Analysis [%] (air dry basis)		Ultimate Analysis [%] (dry ash free basis)	
VM	35.1	C	74.8
FC	41.1	H	5.4
Ash	4.9	O	18.3
Moist.	18.9	N	1.0
		S	0.5
Heating Value [kcal/kg]		5,325	

단탄 연소의 경우, 전체적으로 500ppm 이상의 NO를 나타냈다. 일반적인 실험조건에 비해 높은 수치를 나타내는데, 이는 일반적인 실험 조건은 SR 1.16이지만 이번 실험의 경우, 과잉 산소가

2%가 되도록 설정되어 활발한 연소로 인해 더 많은 NO를 생성시킨 것이다. 재연소율이 높아질수록 NO의 농도는 기하급수적으로 낮아지는 것을 확인할 수 있다. 20% 재연소율에서는 90% 이상의 저감율을 보이고 있다. 자세한 수치는 아래 그림에 표기되어 있다.

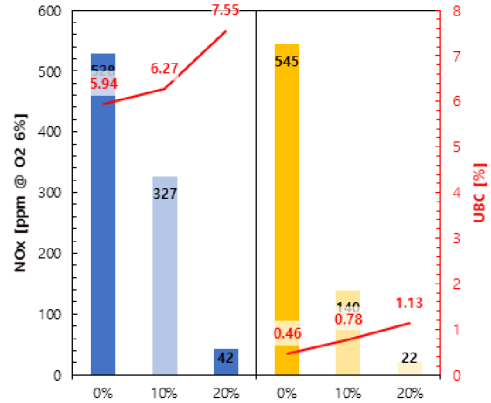


Fig. 2 A graph of gas reburning results for NCA and Glencore coals; left side is NCA cases and right side is Cloud Peak cases

미연탄소분은 재연소율이 높아질수록 함께 높아지는 경향을 보이고 있다. 따라서 NO 저감과 미연탄소분의 경향을 비교하며 최적의 재연소율을 선택해야만 한다.

### 참고 문헌

- [1] L. D. Smoot, S. C. Hill, and H. Xu, "NOx control through reburning," Prog. Energy Combust. Sci., Vol. 24, pp.385-408.
- [2] R. Bilbao, A. Millera, and M. U. Alzueta, "Influence of the temperature and oxygen concentration on NOx reduction in the natural gas reburning process," Ind. Eng. Chem. Res., Vol. 33, pp. 2846-2852.

# 구리전선을 전파하는 화염에 대해 전기장 인가에 따라 발생하는 현상에 대한 연구

강민성\*, 박순호\*, 임인권\*\*, 이대근\*\*\*, 김승곤\*\*\*, 박영태\*\*\*, 권오봉\*, 박정†, 정석호\*\*\*\*

## An Experimental Study on the Phenomena of Flame Spreading on Electrical Wires by Applying AC Electric Fields

M. S. Kang\*, S. H. Park\*, L.I. Kwon\*\*, D. K. Lee\*\*\*, S. G. Kim\*\*\*, Y. T. Guahk\*\*\*,  
O. B. Kwon\*, J. Park\*†, S. H. Chung\*\*\*\*

### ABSTRACT

An Experimental study on effect of AC electric fields on flame spread over electrical wire with a copper (Cu) metal insulated by Polyethylene (PE) was conducted with applying AC electric fields in a single-electrode configuration. The size, inclination, and shape of spreading flame as well as the dynamic behavior of molten PE were influenced appreciably by ionic wind effect when AC electric field is applied to wire, there by modifying FSR.

**Key Words** : Wire fire, Electric field. Ionic wind effect.

전선으로부터 발생하는 화재는 일상생활을 포함한 산업현장, 우주에서의 상황 등 여러 상황에서 생길 수 있는 화재의 원인으로 지목되며, 이는 전선의 과열이나 전기적 영향에 의한 단락, 아크 등 예상하기 힘든 상황에서 주로 발생하게 된다. 그 예로 아폴로 1호의 화재사고, 스위스 항공기 추락사고, 그리고 얼마전 발생한 세종시 아파트 화재사고 등을 예로 들 수 있다. 이러한 점들을 고려하여 전선 화재가 발생할 수 있는 외부 조건 전선과 피복재의 종류, 등 다양한 조건에서 연구

가 진행되어 왔다. [1-8]

본 실험실에서 진행되는 전기장이 인가된 전선 화염에 대한 연구들은 대개 니켈-크롬(NiCr)으로 이루어진 전선을 사용되었고[10-14], 현재 진행중인 구리(Cu)로 이루어진 연구들은 현재 진행중에 있다.

Fig. 1 은 본 실험에 대한 개략도 이고 선행연구 [13] 에서 참고하였으며, 실험 조건은 전압 1 - 7kV, 주파수 10 - 1000Hz까지 이며, 실험 장치에 사용된 고속화염 거동 실시간 분석기(Olympus, i-speed 3), DSLR camera (Nikon D7500)이 사용된 점을 제외하고 동일한 장비들을 사용하였다.

전선을 통해 전파하는 화염은 도선에 전기장이 인가됨에 따라 화염 내부에 있는 이온들이 대전되고 전기장에 의해 발생하는 로렌츠 힘에 의한 벌크 유동이 발생하게 되는데 이로 인해 화염의 형상에 상당한 영향을 주게 된다. 다양한 분야에서 이러한 효과를 이를 이온풍 효과라고 정의한 바 있다. 뿐만 아니라 전기장에 의해 녹은 폴리에틸렌 또한 전기장 인가 효과에 대한 영향을 받게 되며 이 또한 화염 거동에 상당한 영향을 미친다는 것을 알 수 있었다. 선행연구들을 포함한 본 연구에서 발생하는 현상들이 전반적으로 어떻게 화염 전파 속도에 영향을 미치는지, 그리고 이러한 현상들이 어떤 이유에 의해 발생하게 되는지에 대해 연구가 진행되었고 이중 일부는 추후 추가 연구를 통해 밝혀낼 계획이며 몇몇

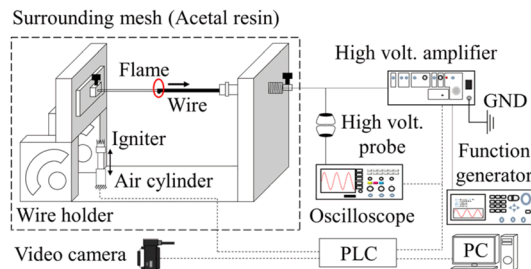


Fig. 1 Schematic of experimental setup

\* 부경대학교 기계공학과

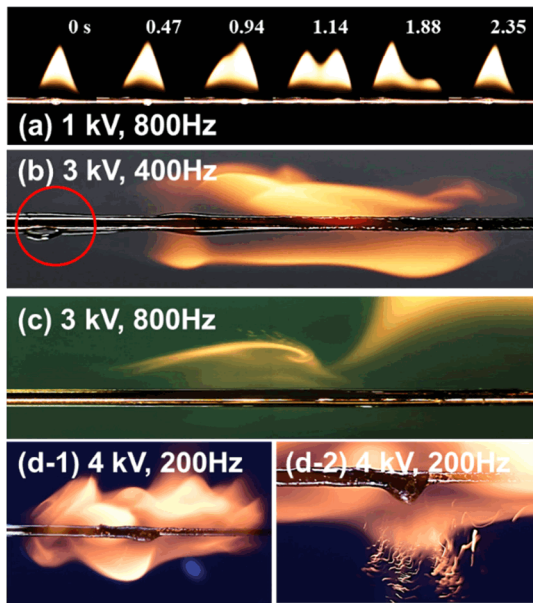
\*\* 명지대학교 기계공학과

\*\*\* 한국에너지기술연구원

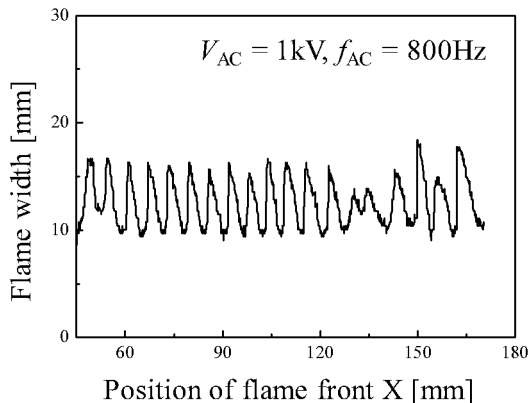
\*\*\*\* KAUST, Clean Combustion Research Center

† 연락처자, [jeongpark@pknu.ac.kr](mailto:jeongpark@pknu.ac.kr)

TEL : (051)629-6141 FAX : (051)629-6126



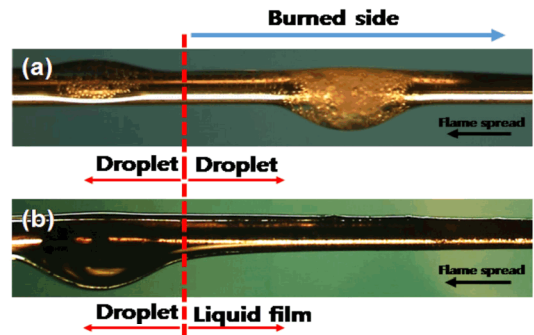
**Fig. 2** Various phenomenon when AC electric fields are applied, (a) Di-electrophoresis, (b) Globular molten PE, (c) Vortex at flame edge, (d) electro spray



**Fig. 3** Flame width variation according to position of flame front

현상들은 선행연구와 다른 결과를 초래하는 것을 보였다.

Fig. 2는 본 실험에서 나타난 다양한 현상들을 캠코더, 초고속 카메라, DSLR 카메라를 통해 얻어진 사진이다. Fig. 2 - (a)와 같은 경우 di-electrophoresis에 의한 현상으로 이는 극성이 없는 녹은 폴리에틸렌이 가지는 유전율의 차이에 의해 burned side와 unburned side에서 만들어지는 전기장의 세기는 burned side측이 더 강해진다. 이러한 전기장 세기의 차이로 인해 유도되는 힘이 녹은 폴리에틸렌을 burned side측으로



**Fig. 4** Effect of AC electric fields on molten PE, (a) Di-electrophoresis, (b) Liquid film on burned side

밀어낸다는 사실을 선행연구를 통해 밝혀진 바 있다. [13] 이 현상은 Fig. 3 에서 보이는 바와 같이 상당히 주기적인 양상을 보이고 0s 에서 보이는 기본적인 화염보다 평균적으로 더 넓은 화염을 가지게 되면서 전반적인 화염전파속도가 증가하는 경향을 띄게 된다.

Fig. 2 - (b)와 같은 경우 화염 앞부분 외부에 녹은 폴리에틸렌이 맺히게 되는데 이는 화염 내부의 녹은 폴리에틸렌의 연소에 필요한 열을 빼앗아 원활한 연소를 방해하는 역할을 하며 이는 기울어진 전선 화염에 대한 연구에서도 나타난 바 있는 현상이다. [12] 이 현상은 burned side측으로 화염이 기울어지면서 도선에서의 열전달량이 많아져 도선을 타고 열이 전도의 방식으로 고체상태의 폴리에틸렌에 전달하여 화염 밖 선단 방향에 생기는 것을 알 수 있다. 또한 이러한 화염의 경우 녹은 폴리에틸렌이 Droplet 형태를 보이긴 하지만 그 뒤로 얇은 Film 형태로 burned side 측을 덮고 있는 것을 확인 할 수 있는데 이는 화염이 도선으로 주는 열전달 양에 영향을 미칠 수 있으며 이 현상 또한 앞서 말한 di-electrophoresis 현상에 의해 droplet 이후 burned side에 녹은 폴리에틸렌이 얇게 펼쳐지는 것을 확인 하였다. Fig. 4 (a), (b) 는 각각 Fig. 2 (a), (b)와 동일한 상황이며 (a)에서의 droplet이 달구어진 도선 쪽으로 이동하면서 좀더 효과적인 vaporization이 발생하는 반면 (b)에서는 도선을 덮어버리며 상대적으로 vaporization에 좋지 않은 효과를 낼 것이라는 것을 확인할 수 있다.

Fig. 2 - (c) 와 같은 경우는 전선 화재를 다른 연구들에서 밝혀진 바 없는 경우로써 전선 위를 전파하는 화염 양 끝단에 와류가 생기는 현상이다. 이 현상은 고 주파수 영역에서 발생하고 현재로써 자기장의 영향에 의해 생기는 것으로 판단하고 있으며 전류, 주파수 등 다양한 영역에



대한 자료를 수집해 추후 연구에서 발휘 예정이다.

Fig. 2의 (d-1)와 (d-2) 같은 경우 비교적 고전압 고주파수 영역에서 나타나는 화염 구조이며 이전 화염구조들과는 다르게 매우 불규칙적인 화염 구조를 갖는다. 이 때 화염 내부 녹은 폴리머 테일렌이 전기장의 영향을 받아 화염 외부로 다발의 형태를 가지며 튀겨져 나가는 것을 볼 수 있다. 이는 선행연구에서 이온성 액체 주위의 전극이 생기면 반발력에 의해 임계전압 보다 높은 조건에서 Tylor Corn의 형태로 분출되는 현상인 Electrospray 현상을 전선 화염에서 정의한 바 있다. [12] 하지만 본 연구에서는 니켈-크롬 전선과는 다르게 여러 다발로 분출되는 것을 확인 하였으며 이러한 현상들이 미세하게 발생하며 Fig. 2 - (d-1) 과 같이 매우 불규칙적이고 복잡한 형태의 화염구조를 갖는다는 것을 알 수 있었고, 또한 선행연구와 차이점은 이전 연구에서는 이 현상이 Mass loss를 야기하기 때문에 전반적인 화염 전파속도의 감소에 영향을 미치지만, 본 연구에서는 오히려 화염의 너비와 더불어 전파속도 또한 증가하는 경향을 보였다. 이에 대한 자세한 연구도 추후 추가적인 연구를 통해 증명해 나갈 것이다.

## 후 기

본 연구는 2019년 한국에너지기술연구원 위탁연구과제(B9-2431)에 의해 지원을 받아 수행되었습니다.

## 참고 문헌

[1] O. Fujita, K. Nishizawa and K. Ito, Effect of low external flow on flame spread over polyethylene-insulated wire in microgravity, Proc. Combust. Inst., 29 (2002) 2545-2552  
 [2] M. Kikuchi, O. Fujita, K. Ito, A. Sato and T. Sakuraya, Experimental study on flame spread over wire insulation in microgravity, Proc. Combust. Inst., 26 (1998) 2507-2514  
 [3] Y. Nakamura, N. Yoshimura, H. Ito, K. Azumaya and O. Fujita, Flame spread over electrical in sub-atmospheric pressure, Proc Combust. Inst., 32 (2009) 2559-2566  
 [4] Y. Nakamura, N. Yoshimura, T. Matsumura, H. Ito and O.

Fujita, Opposed-wind effect on flame spread of electric wire in sub-atmospheric pressure, Journal of thermal science and technology, 3(2008) 430-441  
 [5] A. Umemura, M. Uchida, T. Hirata and J. Sato, Physical model analysis of flame spreading along an electrical wire in microgravity, Proc. Combust. Inst., 29 (2002) 2535-2543  
 [6] S. Takahashi, H. Takeuchi, H. Ito, Y. Nakamura and O. Fujita, Study on unsteady molten insulation volume change during flamespreading over wire insulation, Proc. Combust. Inst., 34 (2013) 2657-2664  
 [7] Y. Nakamura, N. Yoshimura, T. Matsumura, H. Ito and O. Fujita, Flame spread over polymer-insulated wire in sub-atmospheric pressure : Similarity to microgravity phenomena, Progress in scale modeling, (2008) 17-27  
 [8] X. Huang, Y. Nakamura, F. A. Williams, Ignition-to-spread transition of externally heated electrical wire, Proc. Combust. Inst., 34(2013) 2505-2512  
 [9] W. W. Youngblood, M. Vedha-Nayagam (1989), NASA Contractor Report 185147.  
 [10] M.K. Kim, S.H. Chung and O. Fujita, Effect of AC electric fields on spread rate over electrical wire, Proc. Combust. Inst., 33 (2011) 1145-115  
 [11] S.J. Lim, M.K. Kim, J. Park, O. Fujita, S.H. Chung, Flame spread over electrical wire with AC electric fields: Internal circulation, fuel vapor-jet, spread rate acceleration, and molten insulator dripping, Combustion and Flame 162(4) (2015) 1167-1175.  
 [12] S.J. Lim, J. Park, M.K. Kim, S.H. Chung, O. Fujita, Experimental Study on Downwardly Spreading Flame over Inclined Polyethylene-insulated Electrical Wire with Applied AC Electric Fields, J. Korean Soc. Combust. 19(4) (2014) 1-7  
 [13] S.H. Park, S.J. Lim, O.B. Kwon, J. Park, S. H. Chung, Effect of Diameter on

SpreadingFlame over Electrical Wire with  
Applied ACElectric fields, J. Korean Soc.  
Combust. 22(3)(2017) 1-7

[14] S.J. Lim, S.H. Park, J. Park, O. Fujita,  
S.I. Keel, S. H. Chung, Flame spread Over  
inclined electrical wires with AC electric  
fields,Combustion and Flame 185 (2017)  
82-92.

# 원자력발전소용 케이블의 열화에 따른 연소생성물 독성특성에 관한 실험적 연구

장은희\*, 김민호\*, 이석희\*, 이민철\*<sup>†</sup>, 이상규\*\*, 문영섭\*\*

## Experimental study on toxicity characteristics of combustion products of non-class 1E cables for a nuclear power plant according to the deterioration

Eunhui Jang\*, Minho Kim\*, Seokhui Lee\*, Min Chul Lee\*<sup>†</sup>, Sangkyu Lee\*\*, Youngseob Moon\*\*

### ABSTRACT

This study investigates toxicity characteristics of non-class 1E cables in combustion product gas with respect to deterioration period. Tests are conducted for insulation and sheath of cables of A company and B company in accordance with the standard code of Naval Engineering Standard (NES) 713. The results of 20, 40 years accelerated aging cables are compared with that of non-aged cable. The toxicity varied a lot with the aging period, especially, the sum of toxicity of sheath and insulation for 20 years accelerated aging cable showed highest value. It is also notable that toxicity of all insulation and 20 year-aged sheath considerably exceed the allowable limit, defined in US Department of Defense standard (MIL-DTL).

**Key Words** : Non-Class 1E Cable, NES 713, Toxicity Index

### 1. 서 론

원자력 발전소에서는 방사성물질의 위험성에 대한 안정적 운용 및 설계를 위하여 심층방어(Defense-in-depth) 및 다중방호를 사용하고 있다. 심층방어란 5단계의 사고에 따라 적절한 체계를 갖추어 방사성유출을 억제하여 환경 및 사람에게 도달하지 않게 방어하는 시스템이며 2006년 국제 원자력 기구 (IAEA)에서는 심층방어를 원자력 발전소 사고 예방 및 완화를 위한 가장 중요한 수단으로 정의하였다 [1]. 원자력발전소 화재방호 계통 또한 심층방어를 활용하여 설계, 설치 및 운영되며 방어체계의 첫 단계인 화재예방을 위하여 원자력발전소에서 사용되는 모든 것들을 비가연성 또는 내화 내열재료로 사용한다.

현재 원자력 발전소 내 설치되어 있는 가연성 물질 중 가장 많은 양을 차지하고 있는 것은 케이블 피복재 및 절연재이며 이는 내화 및 난연성이 입증되어야 한다 [2]. 원자력 발전소에서 화

재가 발생할 경우 유기고분자 소재로 구성된 케이블의 연소로 인해 다량의 독성가스가 발생한다. 이러한 유독성 가스는 운전원의 수동조치 및 피난자들의 시야를 방해하여 피난 시간을 지연시키고, 화재 진압을 어렵게 할 수 있으며 독성가스의 흡입으로 인한 사망사고가 발생할 수 있다 [3, 4].

본 연구에서는 원자력 발전소에서 사용되는 비 안전등급 케이블의 가속열화 기간별 연소특성을 NES(Naval Engineering Standard)713 규격[5] 및 장비를 이용하여 분석 하고자한다.

### 2. 본 론

비 안전등급 케이블은 국내제작사에서 제조된 2종(A, B company)을 선정하였다. 케이블의 가속열화 기간에 따라 발생하는 연소생성물의 종류 및 방출량, 독성지수 변화에 관한 연구를 수행하기 위해 각각 0년, 20년, 40년으로 가속열화하였다. 경년수준별 A, B company 케이블을 NES713 기술기준에 의하여 실험하였다.

Fig 1, 2는 케이블의 피복재 및 절연재의 일부 (약 1.0g)를 완전연소 시켰을 때 방출되는 유독가스의 종류 및 방출량을 경년 기간별 산출식을

\* 인천대학교 안전공학과/소방방재연구센터

\*\* 한국원자력안전기술원 계통평가실

† 연락처, LMC@inu.ac.kr

TEL : (032)835-4515 FAX : (032)835-0779

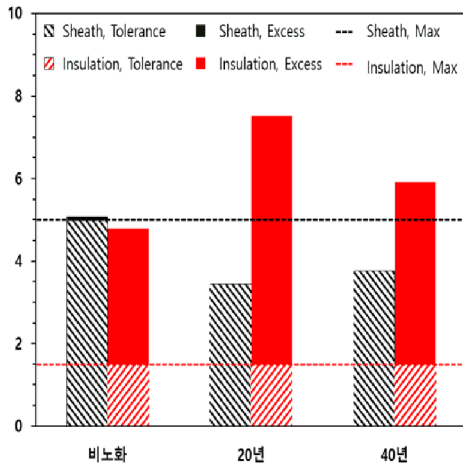


Fig. 1 Toxicity index of A company cable

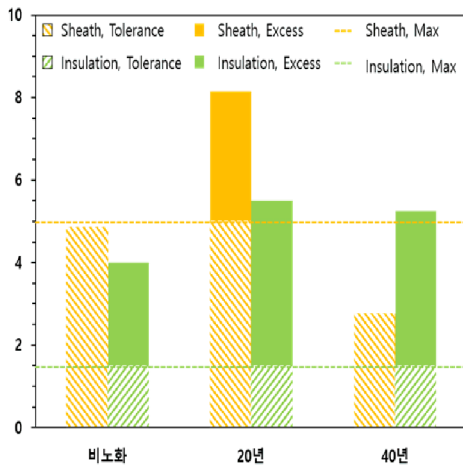


Fig. 2 Toxicity index of B company cable

통해 독성지수(Toxicity Index)로 나타내었다. 또한 구체적인 분석을 위하여 미국국방성규격인 MIL-DTL-24640/15D[6]에 의거한 기준치 초과여부를 결정하였다. 초과 기준치는 케이블 피복재의 경우 '5', 절연재의 경우 '1.5'이다.

실험결과 A company 케이블의 피복재에서는 20년, 40년 가속열화 케이블과 달리 비노화 케이블에서만 기준치인 5를 초과하였다. 이는 A company 비노화 케이블의 CO<sub>2</sub>의 독성지수가 높게 산출되었기 때문이다. 10~20년 가속열화 케이블의 경우에는 케이블 자체에 존재하고 있던 휘발성 유기화합물(VOC, Volatile Organic Compounds)이 가속열화 과정에서 150℃의 지속적인 열의 영향으로 분해반응을 일으켜[7] 완전 연소되는 가연성 물질의 양이 줄어들었기 때문에 판단된다. 20년, 40년 가속열화 시편은 독성지수 값에

큰 차이를 보이지 않았으며 기준치를 초과하지 않았다. A사 케이블의 절연재의 경우 비노화, 20년, 40년 시편 모두 기준치인 1.5를 초과하였으며 특히 20년 시편에서 독성지수가 크게 측정되었다. 이는 20년 시편 연소 시 EPR(Ethylene Propylene Rubber)로 구성된 절연재 시편의 불균질성으로 인해 상대적으로 불완전 연소될 수 있는 케이블의 밀도가 높아져 독성지수가 높게 나타난다.

B사 케이블의 피복재의 경우 비노화, 40년 케이블에서는 MIL-DTL 기준치를 초과하지 않았으나 20년 가속열화케이블에서는 상당히 높은 독성지수 값을 보였다. 이는 20년 가속열화케이블의 피복재 연소 시 할로젠화수소(HCl, HBr)가 다량 방출되었기 때문이다. B사 절연재의 경우 A사 절연재와 마찬가지로 모든 가속열화에 대해서 기준치인 1.5를 초과하였으며 20년, 40년 가속열화케이블의 독성지수가 비노화 시편 독성지수보다 높았다. 이는 시간이 지남에 따라 절연재의 난연성능이 저하되었기 때문이다.

### 3. 결론

본 연구에서는 원자력발전소의 수명을 고려하여 케이블을 가속열화 하였다. 가속열화 기간에 따라 케이블에서 방출되는 연소생성물 및 그에 따른 독성지수를 분석하였다. A, B company 케이블의 피복재의 경우 일관된 경향을 보이지 않았다.

A, B company 절연재의 경우에는 가속열화케이블에서의 독성지수가 비노화 케이블에서의 독성지수보다 높게 측정되었다. 그러나 비노화, 20년, 40년 케이블의 절연재는 모두 MIL-DTL 기준치를 초과하였다. NES 713장비 및 규격을 적용하여 연소 시 방출되는 가스의 경향성을 데이터베이스화 하여 운전원 수동조치 및 화재진압대책에 대한 신뢰성을 증진시키는데 기여될 수 있다고 사료된다.

### 후 기

본 연구는 원자력안전위원회의 재원으로 한국원자력 안전재단의 지원을 받아 수행한 원자력안전 연구사업의 연구결과입니다(No. 1705002).

### 참고 문헌

[1] J. H. Lim, H. J. Kim, Y. W. Park Review of the regulatory periodic inspection system from the viewpoint of defense-in-depth in nuclear safety, Nuclear Engineering and

Technology 50 (2018) 997-1005

[2] S.K. Lee, Y. S. Moon, S. Y. Yoo, A Study on Validation Methodology of Fire Retardant Performance for Cables in Nuclear Power Plants, Journal of the Korean Society of Safety, Vol. 32, No. 1, pp. 140-144,

[3] T. Richard Hull et al. Comparison of toxic product yields of burning cables in bench and large-scale experiments, Fire Safety Journal 43 (2008) 140-150

[4] H. J. Seo et al, An Experimental Study on the Combustion Characteristics of Non Class 1E Cables, J. Korean Soc. Combust. 24(1) (2019) 15-24

[5] NES 713 “Determination of the Toxicity Index of the Products of Combustion from Small Specimens of Materials” , (2012)

[6] MIL-DTL-24640/15D, “CABLE, ELECTRIC, -20 TO +105 DEGREES C, 600 VOLTS, LIGHTWEIGHT, MULTI-PAIR, 22 AWG, TYPE 2XSAW (INCLUDING VARIATION TYPES 2XSAOW AND 2XSAWA)” , (1995)

[7] S. H. Patel, M. Xantos, (2001), “Environmental issues in polymer processing: A review on volatile emissions and material/energy recovery options” , Advances in Polymer Technology, 20(1), p.p 22-41

# 원자력발전소용 안전등급 케이블의 열화기간에 따른 화재안전성 분석

김민호\*, 장은희\*, 이석희\*, 이민철\*†, 이상규\*\*, 문영섭\*\*

## Analysis on the Fire Safety of a Class 1E Cable for a Nuclear Power Plant with respect to Deterioration Period

Min Ho Kim\*, Eun Hui Jang\*, Seok Hui Lee\*, Min Chul Lee\*†, Sang Kyu Lee\*\*, Young Seob Moon\*\*

### ABSTRACT

In this study, fire safety was evaluated by analyzing combustion characteristics of accelerated deterioration Class 1E cables used in a nuclear power plant. Cone calorimetry experiments were conducted according to the accelerated deterioration period of Class 1E cables for a nuclear power plant. Cone calorimeter test was conducted according to the KS F ISO 5660-1 to investigate combustion characteristics such as time series heat release rate(HRR), total heat release(THR), time to ignition and first peak heat release(PHR<sub>1</sub>). In a view of fire performance index, which identifies the risk of initial fire, the non-aged cables show higher risks than the accelerated deterioration cables. On the other hands, in a view of HRR and THR, which represents the risk of mid- to late-fire, the accelerated deterioration cables have relatively higher values than the non-aged cables. These results might attributed from the burning of volatile material in the early period of deterioration and the degradation of flame retardant performance as deterioration period increases.

**Key Words** : Class 1E Cable, Cone Calorimeter, Deterioration Period, Heat Release Rate

국내 원자력발전소가 증가함에 따라 에너지를 만들어 내는 과정에서 발생하는 방사선과 방사성 물질에 대한 안전시스템도 발전하고 있다. 원자로 시설 등의 기술기준에 관한 규칙에 의하면 원자력발전소의 안전에 중요한 구조물, 계통 및 기기에 관해서는 화재 가능성과 그로 인한 영향이 최소화될 수 있도록 가능한 비가연성 또는 내화, 내열재료를 사용하도록 하며 화재감지 및 진압설비 등을 고려하여 화재위험도 분석을 수행하여 화재방호에 대한 설계기준을 설립하고 있다. 원자력발전소의 특정구역에서 화재 발생 시 안전 계통 설비 및 기기 그와 연결된 케이블 등의 대량의 가연성 물질로 인하여 화염 확산이 발생 할 수 있다.

원자력발전소에서 가연성물질 중 가장 높은 비율을 차지하고 있는 것은 내부에 설치된 케이블이며, 특히 케이블의 피복재와 절연재는 화재 발생 시 케이블의 손상으로 인하여 기능상실을 일

으킬 수 있다[1-4]. 원자력발전소에서 사용되는 케이블의 경우 케이블을 통한 다른 지역의 화염 확산을 방지하기 위하여 케이블의 피복재와 절연재에 난연제를 첨가하여 일정수준 이상의 화재능력시험을 만족하고 있다. 하지만 열화가 진행됨에 따라 케이블의 난연성능에 따른 화재안전성에 대한 연구는 초기단계의 실정이다.

본 연구에서는 원자력발전소에서 사용되는 안전 등급 케이블 1종을 선정하여 가속열화에 따른 화재안전성 분석을 진행하였다. 가속열화는 열중량 분석(TGA)을 통하여 활성화에너지를 산출하여 2년단위로 10년까지 가속열화하였다. KS F ISO 5660-1 규격에 의거하여 콘 칼로리미터 시험을 통한 연소특성을 통해서 케이블의 화재안전성을 분석하였다.

콘 칼로리미터 시험법은 연소 시 산소 1kg이 연소되면 약 13.1MJ의 열이 방출된다는 원리를 기초에 두고 있다[5]. 점화장치가 부착된 수평방향의 콘 히터 복사열에 노출된 시험편에 대해서 열방출률(HRR), 총 방출열량(THR), 질량감소율(MLR), 착화시간(TTI) 등의 연소특성을 분석하였다. 콘 칼로리미터 시험장치의 개략도를 Fig. 1에 제시하였다.

\* 인천대학교 안전공학과

\*\* 한국원자력안전기술연구원 계통평가실

† 연락처자, LMC@inu.ac.kr

TEL : (032)835-8295 FAX : (032)835-0779

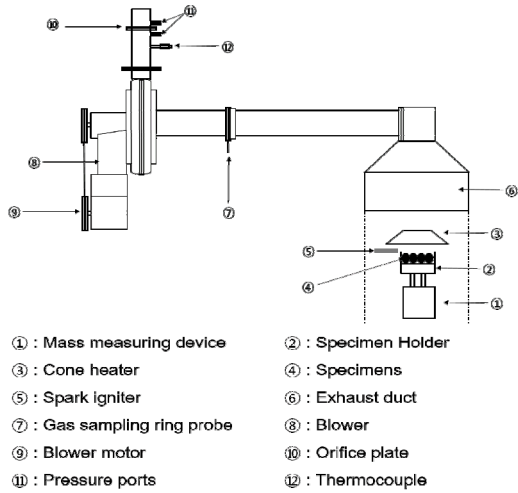


Fig. 1 Schematic of cone calorimeter test

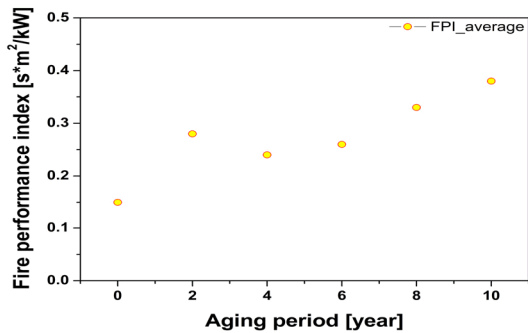


Fig. 2 Fire performance index for cables according to aging

본 연구에서는 초기 화재에 대한 위험성 분석을 위해 각 가속열화 케이블의 화재성능지수(Fire Performance Index ; FPI)를 산출하였다. FPI는 착화시간과 초기 열방출률 피크값의 비로 계산한다. FPI값이 클수록 화재위험성은 낮다고 판단된다.[6-7]. 해당지수의 산출식은 eq. (1)과 같이 표현된다.

$$FPI = \frac{TTI}{HRR_{peak}} (s \cdot m^2/kW) \quad (1)$$

비노화 케이블에 비해 가속열화가 진행된 케이블들의 FPI지수가 크게 측정되었다. 이는 가속열화하는 과정에서 케이블에 있는 휘발성분이 증발하여 착화시간과 초기 열방출률 피크값에 영향을 주었다고 사료된다. Fig. 2에 가속열화 케이블별

FPI를 제시하였다.

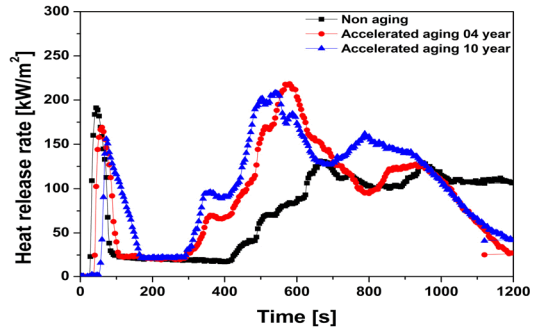


Fig. 3 time series heat release rate for cables

본 연구에서는 중·후기 화재에 대한 위험성 분석은 각 가속열화 케이블들의 열방출률(Heat release rate ; HRR)과 총 방출열량(Total heat release ; THR)의 연소특성을 통하여 분석하였다. HRR의 경우 가속열화 케이블들은 비노화 케이블과는 다르게 500초 이후로의 피크값이 초기 열방출률 피크값보다 크게 측정되었다. 이는 char층의 불안정한 형성으로 인하여 지속적인 열분해와 연소가 진행되었으며, 그로 인하여 지속적인 열방출이 발생한 것으로 사료된다. Fig. 3에 시간에 따른 열방출률 그래프를 제시하였다.

본 연구에서는 원자력발전소에서 사용되는 안전등급 케이블 1종을 선정하여 2년 단위로 가속열화 시킨 시험편에 대해서 열화기간에 따른 연소특성을 확인하기 위하여 KS F ISO 5660-1 규격에 의거하여 콘 칼로리미터 시험을 진행하였으며 아래와 같은 결론을 도출하였다.

1) 초기화재의 위험성에 대해서 화재성능지수를 산출하여 비교하였으며, 열화기간이 길어짐에 따라 화재성능지수는 크게 산출되었으며, 이는 케이블의 휘발성분이 열화가 진행됨에 따라 증발하여 착화시간과 초기 열방출률에 영향을 주었다고 판단되었다.

2) 중·후기화재의 위험성에 대해서는 열방출률과 총 방출열량을 비교하였으며, 가속열화된 케이블의 경우 초기 열방출률 피크값보다 500초 이후의 피크값이 더 크게 측정되었다. 이는 100초 전후로 형성된 char층이 불안정하게 형성되어 지속적인 열침투로 인하여 열분해와 연소가 진행되어 지속적인 열방출로 인하여 500초 이후의 피크값이 초기 피크값보다 크게 측정된 길로 판단된다.

따라서 가속열화가 진행된 케이블들은 비노화 케이블에 비해서 초기 화재에 대한 위험성은 낮지만 화재 발생 후 시간이 지남에 따라 화재위험성은 높다고 판단된다. 향후 연구에서는 원자력발전소의 설계수명을 고려하여 10년 단위로 40년

까지 열화를 진행하여 열화에 따른 연소특성 변화에 대해서 연구할 예정이다.

## 후 기

본 연구는 원자력안전위원회의 재원으로 한국원자력안전재단의 지원을 받아 수행한 원자력안전 연구사업의 연구결과입니다. (No. 1705002)

## 참고 문헌

- [1] D. I. Kang, K. Y. Kim, S. C. I. Jang, "Risk Assessment on the Fire-induced Spurious Operations of High Pressure Safety Injection System for Domestic Nuclear Power Plant", Proceedings of 2012 Fall Annual Conference, Korean Institute of Fire Science & Engineering, pp. 303-306 (2012).
- [2] D. I. Kang et al, "Safety Assessment on Multiple Spurious Operations of Fire-induced Cable Failures and Their Effects on Pilot System", KAERI/CR-404/2010, KAERI. (2011)
- [3] EGM 09-002, "Enforcement Guidance Memorandum-Enforcement Discretion for Fire Induced Circuit Faults", May 14, 2019. ADAMS Accession NO. ML090300446
- [4] H. S. Lim, D. H. Kim, "Mechanical Safety : A Study on Heat-Flux Evaluation for Cable Fire Including Diagnostic for Degradation in Nuclear Power Plants", Journal of the Korean Society of Safety, Vol. 26, NO. 2, pp. 20-15 (2011)
- [5] KS F KS F ISO 5660-1, "Reaction to Fire Tests - Heat release, Smoke Production and Mass Loss Rate - part 1 : Heat Release Rate(Cone Calorimeter Method) and Smoke Production Rate(Dynamic Measurement)" (2015)
- [6] C. Jiao, X. Chen, J. Zhang, "Synergistic Effects of Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> with Layered Double Hydroxides in EVA/LDH Composites", Journal of Fire Sciences, Vol. 27, Issue. 5, pp. 465-479 (2009)
- [7] B. Wang, Q. Tang, N. Hong, L. Song, Y. Shi, Y. Hu, "Effect of Cellulose Acetate Butyrate Microencapsulated Ammonium Polyphosphate on the Flame Retardancy, Mechanical, Electrical, and Thermal Properties of Intumescent Flame-Retardant EthyleneVinyl Acetate Copolymer / Microencapsulated Ammonium Polyphosphate / Polyamide-6 Blends", ACS Appl. Mater. Interfaces 2011, 3, 9, pp. 3754-3761.



## 비압축성 난류 예혼합 화염의 전파 특성에 대한 조건평균 연구

권재성<sup>†</sup>, 김범수<sup>\*</sup>, 양정현<sup>\*</sup>, 허강열<sup>\*\*</sup>

### Conditional Analysis on the Propagation Characteristics of Incompressible Turbulent Premixed Flames

Jaesung Kwon<sup>†</sup>, Beomsoo Kim<sup>\*</sup>, Jeonghyeon Yang<sup>\*</sup>, Kang Y. Huh<sup>\*\*</sup>

#### ABSTRACT

Flame surface is stretched by the transient effects of tangential strain rate and curvature.

Consistent description can be provided for the independent mechanisms of tangential strain rate and curvature on the flamelet properties. In this work, incompressible DNS is performed for one dimensional freely propagating flames. Displacement speed and flamelet thickness show strong correlations with curvature due to the significant influence of tangential flux, while they show weak correlations with tangential strain rate depending on the location in a flamelet.

**Key Words:** Tangential strain rate, Curvature, Stretch, Displacement speed

스파크 점화 엔진은 난류 예혼합 화염 현상이 관찰되는 대표적인 내연기관으로 연료와 산화제의 균일한 혼합기에 점화가 일어나면 화염브러시가 전파하는 특성을 가지는데 난류 예혼합 화염의 내부구조와 난류화염전파속도( $S_T$ )로 대변되는 전파 특성에 대해서는 여전히 불확실한 부분이 존재한다. 동일한 연소 속도를 가진 아주 작은 화염편 가정에 근거한 층류화염편모델[1-3]은 대표적인 연소모델이지만 다양한 연소 영역에 적용하는 데에는 한계가 있다. 따라서, 조건 평균은 새로운 접근법으로서 중요한 의미를 가진다고 할 수 있으며, 본 연구에서는 비압축성 자유 전파 화염에 대한 직접수치해법을 이용하여 화염 선단에서의 통계적 거동을 조건 평균에 기초하여 분석하고, 접선 변형률과 평균 곡률이 화염 두께( $\delta_f$ ) 및 연소 속도( $S_d$ )에 미치는 영향에 대해 연구하였다.

반응진행변수  $c$  에 대한 수송식은 식 (1) 또는 식 (2)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{\partial c}{\partial t} + \mathbf{v} \cdot \nabla c = D_m \nabla^2 c + \dot{w}_c \quad (1)$$

$$\frac{\partial c}{\partial t} - (v_n + S_d) \Sigma_f = 0 \quad (2)$$

상기의 수송식으로부터 연소 속도  $S_d$  는 아래의 식 (3)-(5)와 같이 접선방향 성분( $S_{dt}$ )과 법선방향 성분( $S_{dn}$ )으로 구분할 수 있다.

$$S_d = S_{dn} + S_{dt} \quad (3)$$

$$S_{dn} = \frac{1}{\Sigma_f} \left( D_m \frac{\partial^2 c}{\partial n^2} + \dot{w}_c \right) \quad (4)$$

$$S_{dt} = -D_m \nabla \cdot \mathbf{n} \quad (5)$$

화염의 접선 변형률( $\nabla_T \cdot \mathbf{v}$ )은 식 (6)과 같이 정의된다.

$$\nabla_T \cdot \mathbf{v} = \nabla \cdot \mathbf{v} - \mathbf{nn} : \nabla \mathbf{v} \quad (6)$$

Table 1은 본 연구에서 구현한 두 가지 난류 예혼합 화염의 물리적 조건들을 보여준다. 난류 조건이 다른 두 가지 화염에 대해 층류화염 조건은 동일하게 설정하였고 비압축성 직접수치해석(DNS)을 이용하기 위해 난류장은 스펙트럴 기법에 강제난류를 부여하여 일정시간 동안 난류장을 유지시켜 주었으며 스칼라는 유한차분법을 이용하여 계산을 수행하였다.

\* 경상대학교 해양과학대학 기계시스템공학과

\*\* 포항공과대학교 기계공학과

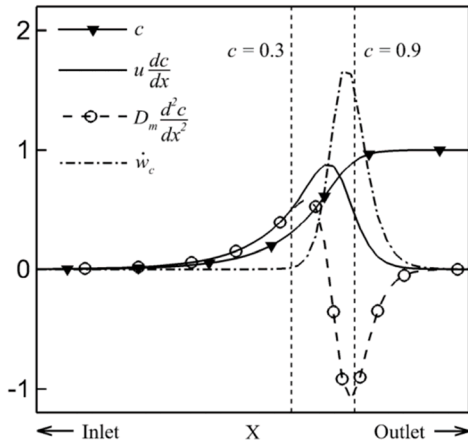
† 연락처, jkwon@gnu.ac.kr

TEL : (055)772-9102 FAX : (055)-772-9109

**Table 1** Specifications for the test flames.

	IC1	IC2
Turbulence intensity (cm/s)	0.16	0.9
Integral length scale (cm)	0.68	0.65
Kolmogorov length scale (cm)	0.134	0.050
Turbulent Reynolds number	5.44	27.64
Damköhler number	7.03	1.13
Karlovitz number	0.67	4.88
Unstretched laminar flame speed (cm/s)	0.21	0.21
Laminar flamelet thickness(cm)	0.24	0.24

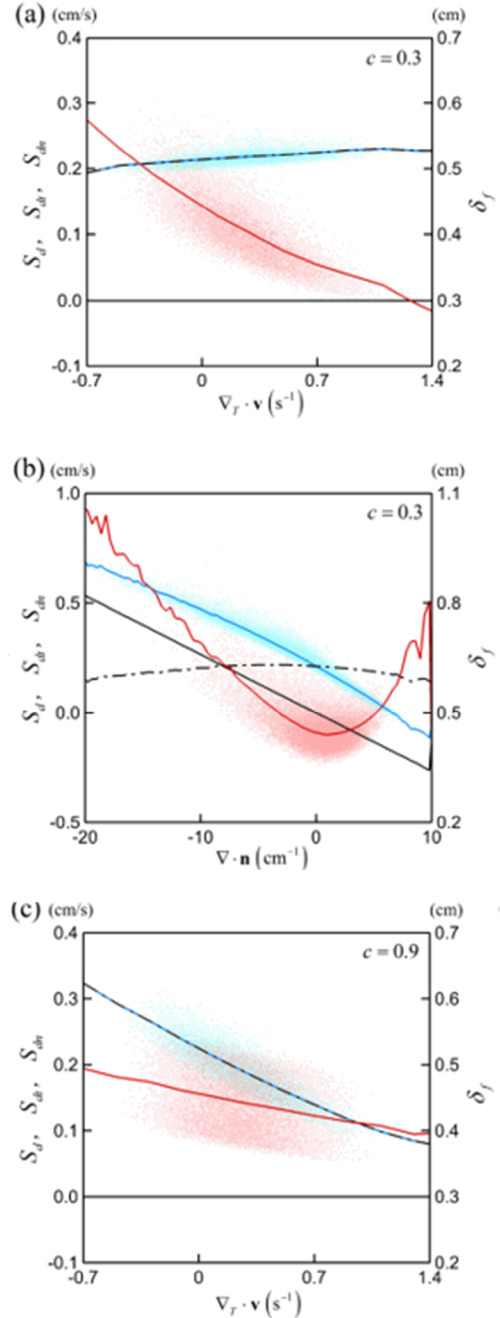
Figure 1은 본 연구에서 사용된 층류화염의 내부구조를 보여준다. 화염브러시 내부에서 위치에 따른 화염 물리량의 통계 변화를 비교하기 위해 난류 화염 선단은  $c = 0.3$ , 난류 화염 후단은  $c = 0.9$  에서 데이터를 추출하였다. 조건 평균을 위해 추출되는 데이터는 계산을 시작하여 화염이 안정화되기까지 초기 일정시간의 값들은 무시하였으며,  $c = 0.001$  이하에서는 냉경계문제(cold boundary difficulty)를 회피하기 위하여 반응속도를 0으로 처리하였다.

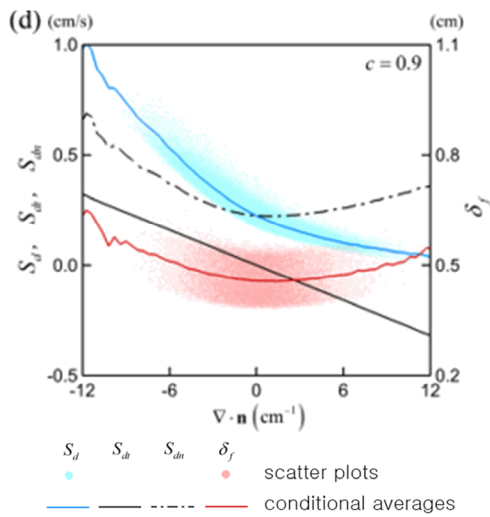


**Fig. 1** Profiles of convection, diffusion and reaction terms in the steady  $c$  transport equation for the unstretched laminar flamelet.

Figure 2는 IC1에 대한 후처리 결과를 보여준다.  $S_d$ 와  $S_r$ 를 결정하는 중요한 변수인 화염 두께는 점선 변형률이 증가하면 얇아지고, 평균 곡률이 증가하면 두꺼워지는 경향을 보인다. 평균 곡률이 양이냐 음이냐에 따라 연소 속도의 점선 성분( $S_d$ )과 법선 성분( $S_{dn}$ )의 구배가 달라지는데,

어떠한 경우에서든 평균 곡률의 절대값이 증가하면 화염 두께는 두꺼워진다. 연소 속도는 점선 변형률과는 약한 상관 관계를 보이지만 곡률과는 음의 상관관계를 보이며, 곡률의 부호에 따라 연소 속도의 구배가 달라짐을 알 수 있다.





**Fig. 2** Variation of  $S_d$ ,  $S_{da}$ ,  $S_{dn}$  and  $\delta_f$  ((a), (c)) with respect to  $\nabla_T \cdot \mathbf{v}$  for flamelets of  $\nabla \cdot \mathbf{n} = 0$  and ((b), (d)) with respect to  $\nabla \cdot \mathbf{n}$  for flamelets of  $\nabla_T \cdot \mathbf{v} = 0$  respectively at  $c = 0.3$  and  $0.9$  in IC1.

## 후 기

본 연구는 미래창조과학부 생애 첫 연구사업의 일환(NRF-2017R1C1B5017704)으로 수행되었습니다.

## 참고 문헌

- [1] N. Peters, "Laminar flamelet concepts in turbulent combustion," Symp. (Int.) Combust. 21, 1988, pp. 1231-1250.
- [2] M. Matalon, B.J. Matkowsky, Flames as gasdynamic discontinuities, J. Fluid Mech. 124 (1982) 239-259.
- [3] P. Clavin, F. A. Williams, Effects of molecular diffusion and of thermal expansion on the structure and dynamics of premixed flames in turbulent flows of large scale and low intensity, J. Fluid Mech. 116 (1982) 251-282.

# 예혼합 연소합성법을 적용한 TiO<sub>2</sub> nanoparticle 생성에 관한 연구

이호연\*, 차천륜\*, 유창현\*, 황상순\*<sup>†</sup>

인천대학교 기계공학과

## Study on the formation of the TiO<sub>2</sub> nanoparticle using the flame synthesis method

Ho Yeon Lee\*, Chun Loon Cha\*, Chang Hyun You\*, Sang Soon Hwang\*<sup>†</sup>

Division of Mechanical System Engineering, Incheon National University

### ABSTRACT

Recently, to substitute fossil fuels, producing hydrogen as an energy source has been researched widely. By the many research of renewable energy, the process of producing H<sub>2</sub> has been shifting from conventional reforming by fossil fuels to environment-friendly methods such as water splitting. In the method of producing hydrogen through electrolysis of water, high-quality TiO<sub>2</sub> nanoparticles can electrolyze only with a light source without any applying electricity. And flame synthesis method is one of the promising technologies for generation superiority TiO<sub>2</sub> nanoparticles. It is significant to study characteristics such as morphology and aggregation when the reaction condition in the synthesis region is different. In this study, the two types of premixed burners are applied to find out the effects on the synthesis flame and the TiO<sub>2</sub> nanoparticle, and the morphology and crystalline characteristics of nanoparticles were confirmed by TEM and XRD.

**Key Words** : Hydrogen producing, TiO<sub>2</sub> nanoparticle, Flame synthesis, Premixed combustion

### 1. 서 론

최근, 신·재생 에너지의 활발한 연구에도 불구하고 아직도 전 세계 에너지 소비량의 90%가 화석연료에 의존하고 있다[1]. 화석연료의 사용은 지구온난화의 원인인 환경 오염물질의 배출문제와 매장량 고갈에 직면해있다. 이러한 문제를 해결하기 위해 탄화수소를 포함하고 있지 않아 이산화탄소 배출량이 없고, 생산량에 한계가 없는 것으로 잘 알려진 수소가 친환경적 연료로 대두되어 수소생산을 위한 활발한 연구가 진행되고 있다[2]. 수소는 연료전지와 수소발전과 같은 방법을 통해 전기로의 에너지 변환이 용이하고 에너지저장 밀도가 높기 때문에 미래의 대체 에너지원으로 적합하다. 이러한 수소의 생산방식은 보통 화석연료를 개질 및 부분산화 하는 방식이 주로 사용되지만 최근에는 열화학적방법과 광촉

매를 활용하여 물의 전기분해를 통해 수소를 생산하는 친환경적 방식이 활발히 연구되고 있다. Fujishima의 연구팀에 의해 전력을 사용하지 않은 채로 TiO<sub>2</sub> 나노입자의 광전기화학반응에 의해 빛의 조사만으로 수소를 생산할 수 있다는 것이 밝혀졌다[3]. 광촉매로써의 질 좋은 TiO<sub>2</sub> 나노입자를 생성하기 위한 연구가 많은 연구팀에 의해 수행되었는데, 그 중 flame aerosol synthesis는 연속적이고 효과적인 나노입자의 생산이 가능하다고 알려져 있다[4-8].

본 연구에서는 고품질의 TiO<sub>2</sub> 나노입자를 합성하기 위해 premixed burner를 적용하여 flame synthesis의 실험적 연구를 통해 예혼합 연소조건에 따른 TiO<sub>2</sub> 나노입자의 합성특성에 대한 분석을 수행하였다. TiO<sub>2</sub>의 나노입자의 형태특성은 TEM (Transmission Electron Microscope) 이미지를 통해 분석하였고, 결정특성은 XRD (X Ray Diffraction) 분석을 통해 조사하였다.

<sup>†</sup>Corresponding Author, hwang@inu.ac.kr  
© 2014 The Korean Society of Combustion

## 2. 실험방법

### 2.1 Precursor and supply system

예혼합 연소기를 적용하여  $TiO_2$ 의 합성특성을 분석하기 위해 TTIP (Titaniumtetraisopropoxide)를 전구체로 적용하여 bubbler를 통해 포화증기조건으로 승온하여 캐리어가스인 질소를 통해 반응영역으로 공급하였다. Fig.1과 같이 Flat premixed burner와 Inward type premixed burner에 각각 설치하여 나노입자의 합성특성 분석을 위한 연소실험을 수행하였다.

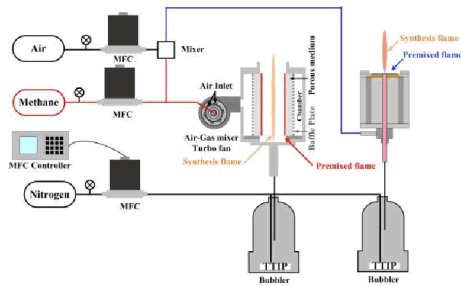
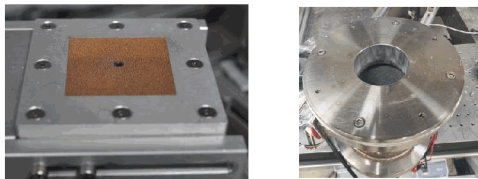


Fig. 1 Schematic of experimental apparatus

### 2.2 Premixed combustion system

$TiO_2$  나노입자의 합성을 위해 Fig. 2와 같이 평판형 버너와 inward 방식의 버너를 적용하여 예혼합 연소시스템을 구성하였다. 평판형 예혼합 연소시스템은 공급되는 당량비를 조절하여 합성 반응이 일어나는 영역의 산화제농도가 공급되는 전구체의 화염에 미치는 영향과 생성되는 나노입자에 미치는 영향을 분석하기 위해 적용하였다. Inward 방식의 예혼합 연소시스템을 적용하여 나노입자의 합성특성을 분석하여 연소합성법을 통해 고품질의  $TiO_2$  나노입자의 대량생산의 가능성을 확인하였다.



(a) Flat type (b) Inward type

Fig. 2 Photograph of the premixed burners

## 3. 결과 및 고찰

### 3.1 당량비 변화에 따른 합성화염의 연소특성

Flat premixed burner를 적용하여 예혼합 연소시스템의 당량비 변화에 의한 전구체의 고온산화 반응 영역의 산화제 조건이 나노입자 합성화염에 미치는 영향을 Fig.3을 통해 확인하였다. 그림을 통해 나노 입자를 형성하는 전구체의 연소화염의 반응영역에서 산화제 농도가 높을수록 연소화염의 길이가 증가하고 밝기가 강해지는 것을 확인할 수 있다.

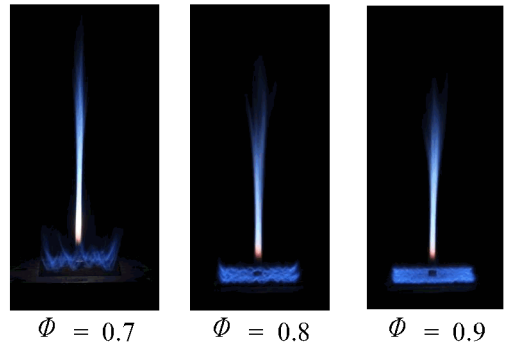


Fig. 3 Images of the synthesis flame at different equivalence ratio

### 3.2 내부 발열량 변화에 따른 합성화염의 연소특성

Inward type 예혼합 연소기를 적용하여 표면화염을 형성하는 각각의 발열량 영역에서의 연소화염의 특성을 Fig. 4에 나타내었다. Inward 방식의 경우에는 예혼합기의 공기를 turbo fan을 통해 공급하기 때문에 당량비 조건이 발열량 조건에 따라 다소 차이가 발생한다.

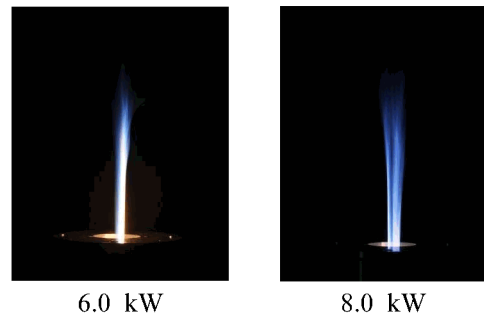


Fig. 4 Images of the synthesis flame at different heating value

6.0 kW의 경우 반응영역 내부의 산화제 농도가 8.0 kW에 비해 다소 높아 전구체의 연소화염의 밝기가 더욱 밝고 화염폭이 다소 얇게 나타나는 것을 확인할 수 있다.

#### 4. 결 론

평판형과 inward 방식의 2가지 형태의 예혼합 연소기를 적용하여 TiO<sub>2</sub> 나노입자 합성영역에서의 산화제 및 내부 온도조건이 미치는 영향을 분석하기 위해 연소실험을 수행하였다. 반응영역의 예혼합 연소 생성물 및 온도조건이 전구체 화염에 미치는 영향을 통해 내부 온도조건에 비해 당량비 변화에 의해 더욱 지배적으로 전구체 화염의 형태가 변화하는 것을 확인할 수 있다. 또한 TEM image와 XRD 분석을 통해 나노입자의 형성영역에서의 온도 및 분위기 산화제 농도에 따른 형성특성을 분석할 수 있다.

- [8] S. Margaret, Wooldridge, A.D. Stephen, W. Jianfan, DEMONSTRATION OF GAS-PHASE COMBUSTION SYNTHESIS OF NANOSIZED PARTICLES USING A HYBRID BURNER, NanoStructured Materials 11 (1999) 955-964.

#### 후 기

본 연구는 2018년도 과학기술정보통신부(MSIT)의 재원으로 한국연구재단(NRF)의 지원을 받아 수행한 연구과제입니다(201601970003).

#### 참고문헌

- [1] International Energy Agency, World Energy Outlook 2017, available from <<https://www.iea.org/weo2017/>>, 2017
- [2] P.P. Edwards, V.L. Kuznetsov, W.I.F. David, Hydrogen energy, The Royal Society, 365, 2007.
- [3] A. Fujishima, K. Honda, Electrochemical Photolysis of Water at a Semiconductor Electrode, Nature, 238, 1972, 37-38.
- [4] S.E. Pratsinis, Aerosol-based Technologies in Nanoscale Manufacturing: from Functional Materials to Devices through Core Chemical Engineering, AIChE 566 (2010) 3028-3035.
- [5] S.E. Pratsinis, FLAME AEROSOL SYNTHESIS OF CERAMIC POWDERS, Progress in Energy and Combustion Science 24 (1998) 197-219.
- [6] C. Adrian, R.C. Walter, S.E. Pratsinis, Flame-made nanoparticles for nanocomposites, Nano Today 5 (2010) 48-65.
- [7] J. Wang, S. Li, W. Yan, S.D. Tse, Q. Yao, Synthesis of TiO<sub>2</sub> nanoparticles by premixed stagnation swirl flames, Proceedings of the Combustion Institute 33 (2011) 1925-1932.

## PNG 연료의 가스렌지 연료 호환성

리진취\*, 박예슬\*, 덩카이윈\*, 이중성\*\*, 김동민\*\*, 최경민\*†

### Fuel Interchangeability of PNG in the Domestic Gas Stove

Xinzhuo Li\*, Yeseul Park\*, Kaiwen Deng\*, Joongsung Lee\*\*, Dongmin Kim\*\*, Gyungmin Choi\*†

대기오염물질과 온실가스 배출을 저감하기 위해 세계적으로 천연가스 사용을 확대하고 있는 추세이다. 미국 에너지 정보국(US EIA)에 따르면 2009년부터 천연가스 사용량이 급격히 증가하기 시작했으며 2050년까지 지속적으로 증가할 예정이다.

현재 한국에서 공급되는 도시가스는 LNG(Liquefied Natural Gas)를 사용하고 있고 유럽, 미국, 중국 지역에서는 PNG(Pipeline Natural Gas)를 많이 사용하고 있다. LNG와 PNG는 연료 조성은 탄화수소계 및 불활성 기체 함유량 등의 조성 차이가 있고 가스렌지의 경우, 사용하는 연료에 따라 요구되는 운전조건이 다르다. 한국 기준 도시가스 압력은 2.5 kpa이고 이

Table 1. Fuel compositions of LNG, PNG and equivalent gas.

연료조성	LNG	PNG1	PNG2	PNG3
	농도 (mol %)			
CH <sub>4</sub>	93.08	91.42	85.48	91.92
C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	4.49	4.59	4.57	4.91
C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	1.53	1.78	1.58	1.07
i-C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	0.33	0.3	0.45	0.25
n-C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	0.36	0.43	0.45	0.25
i-C <sub>5</sub> H <sub>12</sub>	0.02	0.18	0.05	0.03
n-C <sub>5</sub> H <sub>12</sub>	0	0.12	0.05	0.03
nC <sub>6</sub> H <sub>14</sub>	0	0.02	0	0
N <sub>2</sub>	0.2	0.47	6.44	1.52
CO <sub>2</sub>	0	0.69	0.43	0
He	0	0.22	0.5	0
등가가스	LNG	PNG1	PNG2	PNG3
CH <sub>4</sub>	94.95	93.02	87.72	94.09
C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	4.85	5.82	5.41	4.39
N <sub>2</sub>	0.2	0.47	6.44	1.52
CO <sub>2</sub>	0	0.69	0.43	0

\* 부산대학교 기계공학부

\*\* 한국가스공사 가스연구원

† 연락처자, [choigm@pusan.ac.kr](mailto:choigm@pusan.ac.kr)

TEL : (051)510-2476 FAX : (051)-512-5236

$$C_nH_{2n+2} = \left[ \frac{1}{2} - \frac{1}{2}(n-2) \right] CH_4 + \frac{1}{2}(n-1) C_3H_8 \quad (1)$$

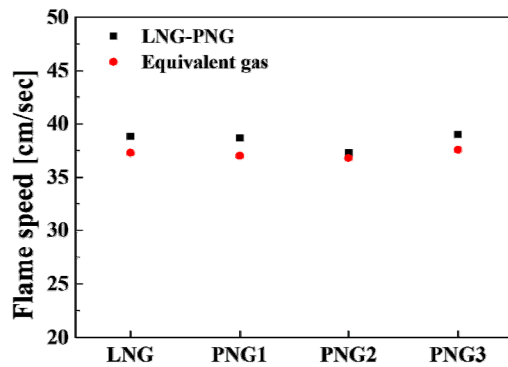


Fig 1. Flame speed of LNG, PNG and equivalent gas.

탈리아 Bertazzoni 사의 경우, 천연가스를 사용하기 위한 작동압력이 1.0 kpa이다. 미국 Hoover사는 G20 천연가스를 사용할 경우 운전압력이 2.0 kpa이다. 2016년 중국에서 Zhang 등은 과농(R)/회박(P) 상태의 PNG와 순수 메탄 등 3종류의 천연가스(PNG-R, PNG-P, CH<sub>4</sub>)를 동일한 가스 레인지를 활용하여 각기 다른 온도 조건에서 천연가스를 연소시켜 1차 공기비의 변화와 가스 호환성 인자의 정확성에 대한 실험적 연구를 통해 중국의 천연가스 호환성 예측에 관한 인자 방정식을 수정한바 있다[1].

최근 러시아로부터 한국으로의 PNG 공급 관련 논의가 대두됨에 따라, 기존 가정용 및 산업용 연소기기의 LNG와 PNG 연료 사용의 호환성에 대한 문제가 제기되고 있다. 따라서 본 연구는 한국 사용되고 있는 LNG와 GPP(Amur Gas Processing Plant) PNG 연료 연소특성 및 화염 구조 분석을 통한 연료 호환 가능성을 연구하였다.

한국에서 사용되고 있는 LNG 연료와 GPP PNG 연료 조성을 표 1와 같이 나타내었다. 다

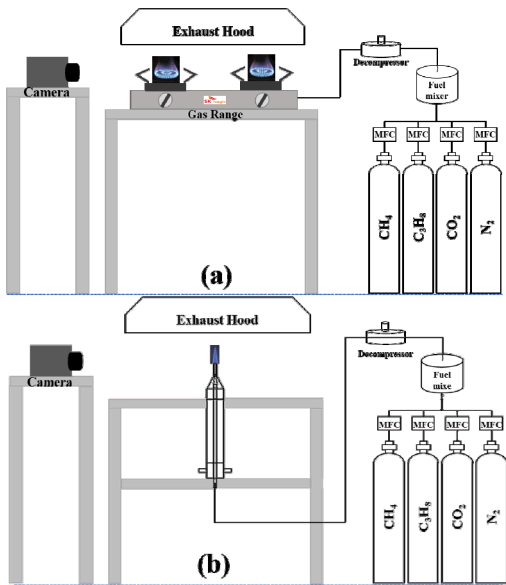


Fig 2. Schematic diagram of experimental equipment for (a) household gas stove and (b) laminar diffusion burner.

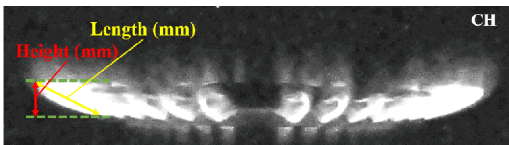


Fig 3. CH\* radical flame of gas stove.

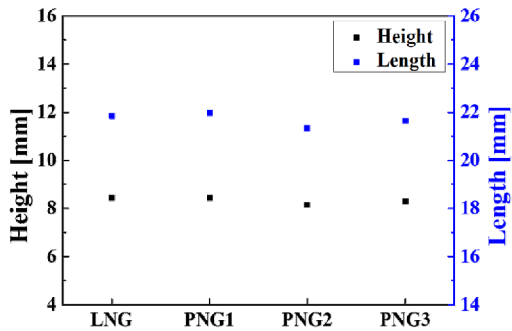


Fig 4 Flame height and length distribution of LNG and PNG in household gas stove.

양한 천연가스 조성에 대한 연구를 간략화하여 진행하기 위해 연소특성을 고려한 등가가스 치환 방법을 사용하였다[2]. 계산식은 식 (1)과 같이 나타낸다.

먼저, 등가가스로 치환된 연료 조성이 실제 연료 조성을 대체할 수 있는지 검증하기 위해 CHEMKIN 19.0로 화염속도를 비교하였다. 그림

Table 2. Test fuel conditions in the household gas stove.

mol %	case1	case2	case3
CH <sub>4</sub>	100	85(99)	70(98)
C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	0	15	30
C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	0	15	30
C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	0	15	30
C <sub>5</sub> H <sub>12</sub>	0	15	30
C <sub>6</sub> H <sub>14</sub>	0	15	30
N <sub>2</sub>	0	15	30
CO <sub>2</sub>	0	15(1)	30(2)

1은 실제 연료조성과 등가가스 연료의 화염속도 분포를 나타냈다. LNG와 PNG1, PNG2, PNG3의 차이가 각각 3.9%, 4.3%, 1.3%, 3.7%이다. 등가가스로 연료를 치환할 때 탄화수소계 연료조성만 치환이 되는데, PNG2는 N<sub>2</sub> 성분이 많기 때문에 치환되는 탄화수소계 연료의 비율이 적기 때문에 치환오차가 제일 적다.

그림 2는 가정용가스렌지와 증류확산버너 실험 장비를 나타낸다. 본 실험은 감압기를 이용하여 공급 압력을 2.5 kpa로 고정하고, 연료공급량이 5 LPM으로 일정하게 유지하였다. 디지털 카메라

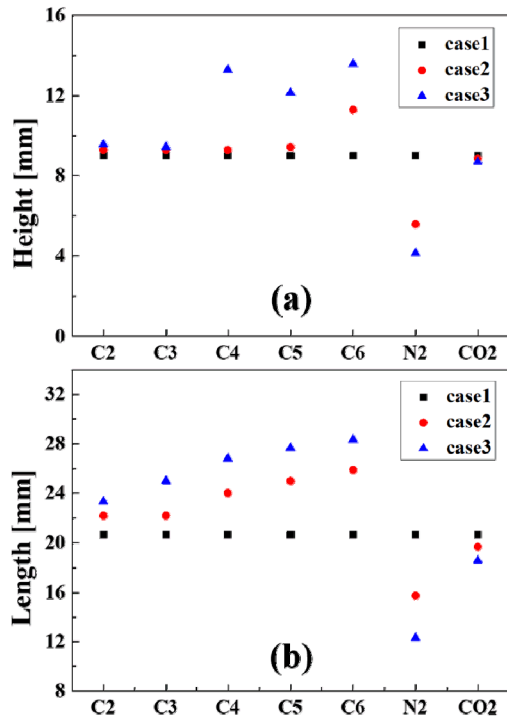


Fig 5. (a) Flame height and (b) length distribution of each test fuel composition in the domestic gas stove.



(Nikon D90)와 CH\* 필터를 사용하여 화염구조를 계측하였다. 그림 3은 CH\* 필터로 찍은 화염 사진이며, 화염높이와 길이가 그림3에 표시되었다.

그림 4은 가정용 가스렌지 실험을 통하여 LNG와 PNG1, PNG2, PNG3 연료를 사용하였을 때 화염높이와 길이 분포를 나타낸다. LNG와 PNG 연료의 화염높이와 길이의 최대 차이는 3.4% (PNG2)와 2.3% (PNG2)이다.

각 연료 조성이 화염 구조에 미치는 영향을 관찰하기 위해 각 연료의 조성을 15%, 30% 변화시켜 가스렌지에서 화염 구조를 계측하였다. 본 실험에서 CO<sub>2</sub> 유량계의 조절 범위가 0에서 100 SCCM이기 때문에 CO<sub>2</sub> 조성 조건은 0%, 1%와 2%를 실험하였다. 표 2는 각 연료 조성 변화 조건을 나타낸다. 실험 각 조건에서 화염높이와 길이 분포는 그림 5에 나타낸다. 고탄화수소계의 분자수가 증가할수록 화염높이와 길이가 증가되는 것을 관찰하였다. 이는 프로판의 확산계수가 메탄의 확산계수보다 작기 때문이다[3]. 또한, N<sub>2</sub>와 CO<sub>2</sub>는 연소에 관여하지 않는 성분이며, 연소반응을 지연시키기 때문에 불활성 성분이 증가할수록 화염높이와 길이가 감소되는 것을 관찰하였다.

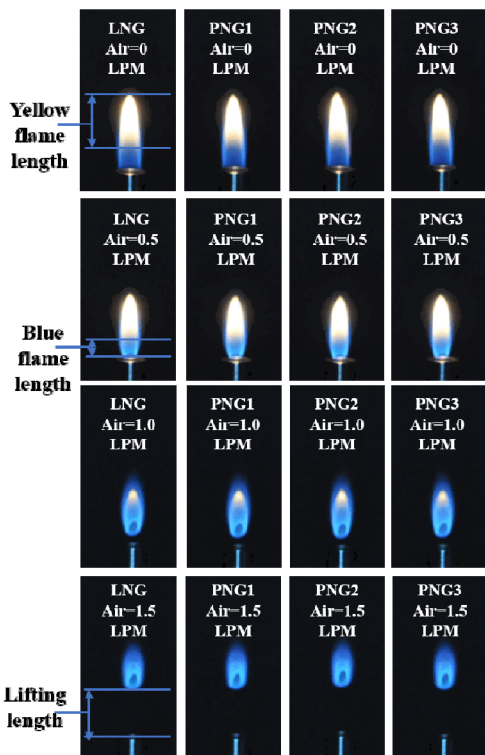


Fig 6. LNG and PNG flame structure of various air supply conditions in a laminar diffusion flame.

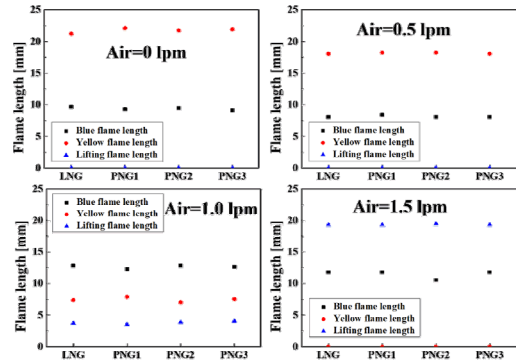


Fig 7. LNG and PNG flame height distribution of various air supply conditions in a laminar diffusion flame.

그림 6은 증류화산 버너에서 LNG와 ,PNG1, PNG2, PNG3를 사용했을 때 연료 유량은 0.15 LPM으로 일정하게 유지하였고, 공기 유량은 0 LPM, 0.5 LPM, 1.0 LPM, 1.5 LPM로 변화시킨 화염의 구조를 나타냈다. 공기가 증가할수록 청염의 화염길이가 증가하고 황염의 화염길이가 감소되는 것을 관찰하였다. 이는 공기가 증가할수록 연료와 공기가 충분히 반응하기 때문이다. 동시에 화염의 부상길이가 증가되는 것을 관찰하였다. 그림 7은 증류화산 버너에서 LNG와 ,PNG1, PNG2, PNG3를 사용했을 때 연료 유량은 0.15 LPM으로 일정하게 유지하였고, 공기 유량은 0 LPM, 0.5 LPM, 1.0 LPM, 1.5 LPM로 변화시킨 화염길이 분포를 나타냈다. 결론적으로 LNG와 PNG 연료를 사용하였을 때 화염구조의 큰 변화가 없었다. (화염길이차이 5.5% 이하)

본 연구 결과로 LNG와 PNG 연료를 사용하였을 때 가정용 가스렌지화염과 증류화산화염에서 화염 구조 차이가 허용오차범위 내로 유사한 현상임을 확인하였다.

## 후 기

본 연구는 2018년도 산업통상자원부의 재원으로 한국에너지기술연구원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제(No. 20184030202060 )입니다.

## 참고 문헌

- [1] Y. Zhang, W. Gao, Y. Yu, M. Wang, C. Chen, "Primary air ratio change and gas interchangeability index correct for domestic gas cooker burning multi-source natural gases", J. Nat. Gas Sci. Eng. 2016, pp. 276-282.

- [2] J. M. Kim, S. Lee, Y. C. Ha, S. M. Lee, C. E. Lee, "Estimation Method of the Interchangeability Using Equivalent Gases in a Partial Premixed Gas Appliance", 대한기계학회 논문집 B권, 제34권 제8호, 2010, pp. 761-766.
- [3] M. Nakahara, F. Abe, K. Tokunaga, A. Ishihara, "Fundamental burning velocities of meso-scale propagating spherical flames with H<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> and C<sub>3</sub>H<sub>8</sub> mixtures", Proc. Combust. Inst. 2013, pp. 703-710.

## 예혼합 분제화염의 정점열림 현상에서 동축류 속도 효과

주용우\*, 박대근\*\*, 이창엽\*\*, 윤성환\*\*\*†, 최재혁\*\*\*, 김종수\*\*\*

### Effects of Co-Flow Velocities on Flame Tip-Opening Phenomenon in Premixed Bunsen Flame

Yong Woo Ju\*, Dae Geun Park\*\*, Changyeop Lee\*\*, Sung Hwan Yoon\*\*\*†, Jae-Hyuk Choi\*\*\*, Jongsu Kim\*\*\*

#### ABSTRACT

Tip-opening phenomenon are generally known to depending on Lewis Number and Karlovitz Number. Present study investigated effects of variation of co-flow velocities on tip-opening phenomenon in premixed Bunsen flames. As the results, tip-opening may highly depend on Lewis number and preferential diffusion effect, and Karlovitz Number needs to be re-evaluated after modification.

**Key Words** : Bunsen flame, Co-flow velocity, Preferential diffusion, Tip-opening

본 연구는 분제 예혼합 화염에서 일어나는 화염 정점열림 현상에서 동축류 속도를 변수로 설정하여, 동축류 속도 변화에 따른 화염 정점의 개폐 여부를 확인하고자 실험적 연구를 수행하였다. 일반적으로 화염 정점열림 현상은 열·물질 확산계수의 비로 정의되는 루이스 수(Lewis number)에 의존한다고 알려져 있으나 최근 연구 [1]에 따르면 화학반응시간 및 특성유동시간의 비로 정의되는 칼로비치 수(Karlovitz number)에도 크게 영향을 받는다고 알려져 있다. 특히 임계 칼로비치 수 이하에서 화염 정점열림 현상이 관찰되며, 노즐출구속도에는 영향을 받지 않는 것으로 나타났다.

따라서 본 연구에서는 화염 정점열림 현상이 발생하는 특정 루이스 수를 고정한 후, 동축류 속도를 변화시켜 화염 정점의 곡률 크기에 따른 변화를 실험적으로 관측하였다. 관측 기법으로는  $CH^*$ ,  $OH^*$ , 미 산란기법(Mie Scattering Method)을 채택하였으며 PIV(Particle Image Velocimetry) 해석을 위해 고속 카메라(1024\*1024 resolution, 1500 fps)를 사용하여 화염 거동을 관찰하였다.

Fig. 1은 동축류 속도에 따른 화염 거동을 다양한 관측 기법으로 가시화하였다. 화염정점 열림 현상은 알려진 바와 같이 루이스 수에 의해

영향을 받는 것으로 나타났다. 동축류 속도가 증가함에 따라 화염 길이가 감소하는 것으로 미루

어 보아 동축류에서 공급된 산화제가 화염전파 속도를 증진시키는 것으로 판단되었고, 이는  $OH$ ,  $CH$  자발광 이미지로도 확인할 수 있었다. 또한 동축류 속도의 변화는 화염 정점열림 현상에 크게 영향을 주지 않는 것으로 판단되었다. 따라서 이전 연구[1]에 제안된 국부 칼로비치 수는 화염 곡률 크기에 영향을 받기 때문에, 본 연구 결과와 종합하여 고려했을 때 임계 칼로비치 수에 수정이 필요할 것으로 사료된다.

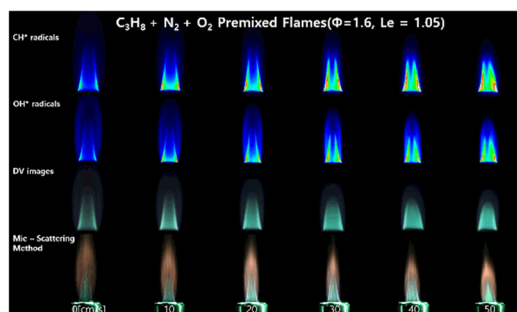


Fig. 1 Tip-opening phenomenon with various visualization method.

#### 후 기

본 연구는 2019년도 산업통상자원부 및 산업기술평가관리원(KIET) 연구비 지원에 의한 연구임. (No. 20005750)

\* 한국해양대학교 기계공학부  
\*\* 한국생산기술연구원 고온에너지시스템그룹  
\*\*\* 한국해양대학교 기관시스템공학부  
† 연락처자, [shy@kmou.ac.kr](mailto:shy@kmou.ac.kr)  
TEL : (051)-410-4261 FAX : (051)-404-3985

## 참고 문헌

- [1] Tran Manh Vu et al., "Tip opening of premixed bunsen flames: Extinction with negative stretch and local Karlovitz number", *Combust. Flame*, Vol. 162, 2015, pp. 1614-1621.

## 화염 동적 거동에 대한 방사형 전기장의 영향

김영민\*, 김희재\*\*, 박대근\*\*\*, 이창엽\*\*\*, 윤성환\*\*†, 최재혁\*\*, 김종수\*\*

### Effect of Electric Fields Applied to Radial Direction on Flame Dynamic Behaviors

Young Min Kim\*, Heejae Kim\*\*, Dae Geun Park\*\*\*, Changyeop Lee\*\*\*, Sung Hwan Yoon\*\*†, Jae-Hyuk Choi\*\*, Jongsu Kim\*\*

#### ABSTRACT

Radial direction of electric fields causes unstable flame behavior because of ionic wind that a bulk flow motion occurs due to molecular collision between ions and neutral molecules. To estimate effects of ionic wind on radial direction of electric fields, we investigated dynamic flame behaviors at Bunsen burner with co-flow under direct and alternative currents.

**Key Words** : Bunsen Flame, Electric Field, Flame extinction, Mie-scattering method

탄화수소 화염은 화학 이온화로 인해 양전하( $\text{CHO}^+$ ,  $\text{H}_3\text{O}^+$  등)와 음전하(electron,  $\text{O}_2^-$  등)가 발생한다. 전기장을 인가하게 되면 로렌츠 힘에 의해 전극으로 이동하게 되며, 대부분의 수밀도(number density)를 차지하고 있는 중성자들에게 운동량을 전달하게 되어 체적 유동(bulk flow)이 발생이 발생하게 된다. 이를 "이온풍(ionic wind)"이라고 한다.[1]

기존 연구[2,3]에 의하면, 이온풍은 한 방향이 아닌 양방향으로 분다. 양방향의 이온풍을 활용하여 화염전파방향의 방사형으로 전기장을 인가하게 되면 화염 내에 발생하는 전하들이 전극으로 이동하게 되며 화염은 스크래치를 받게 됨으로써 소화 거동이 이루어 질 것이라고 추측이 된다. 추측을 증명하기 본 연구는 화염전파방향의 방사형으로 전기장을 인가하여 화염 거동을 살펴 보았다. Fig. 1은 연구에 사용된 실험장비의 측면을 도식화한 것이다. 동축류 관 주위에 원통형 메탈 메쉬(내경 15cm, 길이 30cm, 격자 1cm×1cm)를 설치하여, 접지점을 연결하고, 노즐에 고전압을 연결하였다. 고전압으로 교류(AC : Alternating current) 2, 5, 7kV(RMS value), 1, 10,

100, 500, 1000Hz와 직류(DC : Direct current)

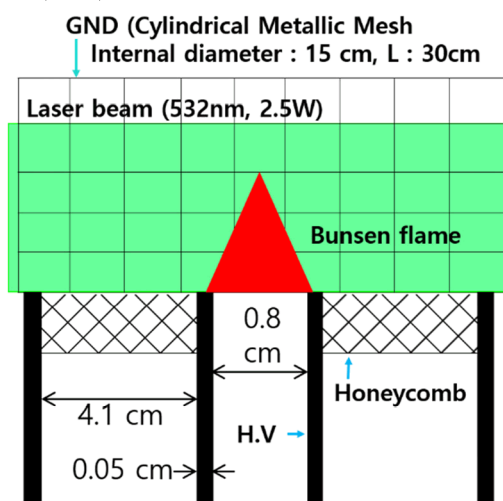


Fig. 1 Schematic diagram of experiment apparatus at side view

2, 5, 10kV를 인가하였다. 그리고 내부의 유동장을 확인하기 위하여 미산란 기법(mie-scattering method)을 채택하였으며 레이저 광원으로는 다이오드 레이저(532nm, 2.5W)를 활용하였다. Fig. 2는 그 중에서 10kV 전기장을 인가한 기본 화염을 시간에 따라 나타난 사진이며 소화가 일어났다. 0sec는 전기장이 인가되기 시작했으며 소화 거동은 0.048sec후에 일어났다. 실험 결과는, 전압이 높아야 소화 거동이 발생하였으며, 소화 거

\* 한국해양대학교 기관공학과

\*\* 한국해양대학교 기관시스템공학과

\*\*\* 한국생산기술연구원 고에너지시스템그룹

† 연락처자, [shy@kmou.ac.kr](mailto:shy@kmou.ac.kr)

TEL : (051)-410-4261 FAX : (051)-404-3985

동이 일어날 조건 내에 선, 전압이 올라갈수록

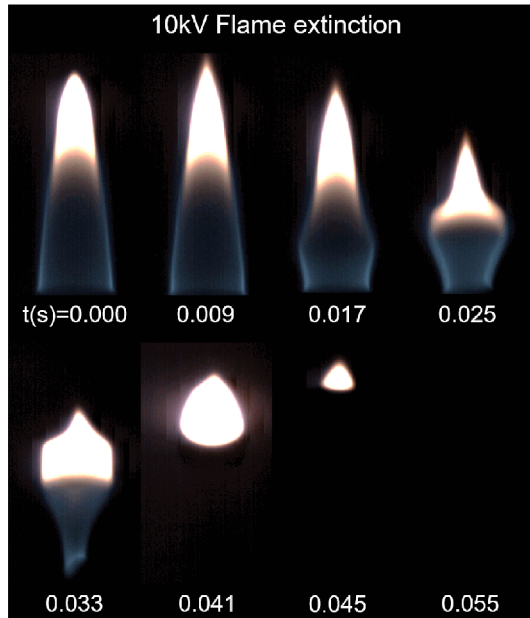


Fig. 2 Transient image of normal flame applied 10kV electric fields.

더 빠르게 현상이 발생했다.

## 후 기

본 연구는 2019년도 산업통상자원부 및 산업기술평가관리원(KIET) 연구비 지원에 의한 연구임.  
(No. 20005750)

## 참고 문헌

- [1] F. Carleton, F. Weinberg,, "Electric fields-induced flame convection in the absence of gravity", *Nature*, Vol. 330, 1987, pp. 635-636.
- [2] D.G. Park, S.H. Chung, M.S. Cha, "Bidirectional ionic wind in nonpremixed counterflow flames with DC electric fields", *Combust. Flame.*, Vol. 168, 2016, pp. 246-248.
- [3] D.G. Park, S.H. Chung, M.S. Cha, "Visualization of ionic wind in laminar jet flames", *Combust. Flame.*, Vol. 184, 2017, pp. 246-248.

## 연소기의 저주파 공진에 관한 분석

김선영\*, 윤명곤\*†, 김대식\*

## Analysis of Low Frequency Resonances of Combustors

Seonyeong Kim\*, Myunggon Yoon\*†, Daesik Kim\*

연소기의 공진에서 축 방향 고유모드와는 다른 Helmholtz 저주파가 관측된 경우가 있다. [1,2] 현재까지 이 저주파 공진에 대한 해석적인 결과가 충분치 않으므로 본 연구를 통해 Helmholtz 저주파 공진의 발생 조건을 규명하고 주파수를 예측하고자 하였다.

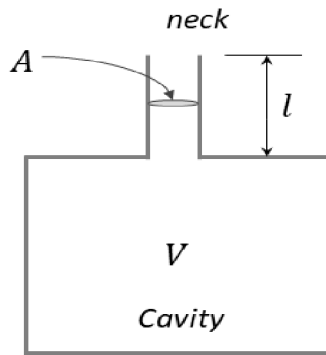


Fig. 1 Helmholtz resonator

$$f = \frac{c}{2\pi} \sqrt{\frac{A}{Vl}} \quad (1)$$

Fig. 1은 Helmholtz 공명기를 나타낸 그림으로, 목(neck)과 공동(cavity)으로 구성되어 있다. 목을 통한 유체의 출입은 질량의 역할, 공동은 스프링의 역할을 하고, 고유주파수 공식에 의해 식 (1)의 Helmholtz 공진식이 유도된다.  $c$ 는 목의 음속,  $A$ 는 목(neck)의 단면적,  $l$ 은 목의 길이,  $V$ 는 공동(cavity)의 부피이다.

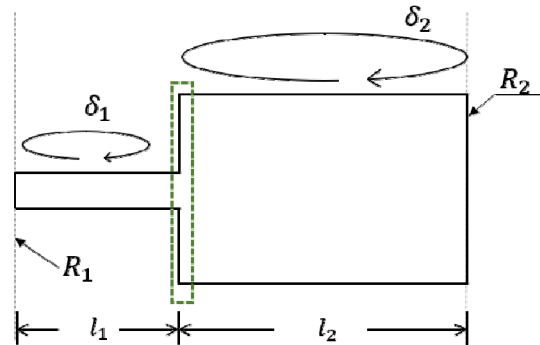


Fig. 2 Simplified two-duct combustor

Fig. 2는 노즐과 연소실로 구성된 2단 연소기의 형상을 네트워크 모델로 단순화한 것이다. [3] 밀 첨자 1은 노즐의 물성치, 밀 첨자 2는 연소실의 물성치를 나타낸다. 그리고  $\alpha$ 는 목과 공동의 음속 비,  $\beta$ 는 전단과 후단의 면적 비,  $\delta_k$ 는 파동의 왕복도달 시간으로 정의하였다.

$$\alpha = \frac{c_2}{c_1}, \beta = \frac{A_2}{A_1}, \delta_k = \frac{2l_k}{c} \quad (2)$$

저주파를 분석할 것이기 때문에, 입구 및 출구 조건은 닫힌 조건 혹은 열린 조건만을 고려하였다. 경우의 수를 조합하면 총 4 가지 경우로 나눌 수 있고, 이를 Table 1에 나타냈다. Table 2는 각 Case 별 연소기의 형상을 나타내었다.

Table 1 Boundary conditions


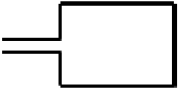


	Inlet	Outlet
Case 1	Open	Open
Case 2	Open	Closed
Case 3	Closed	Open
Case 4	Closed	Closed

\* 강릉원주대학교 정밀기계공학과

† 연락처, mgyoon@gwnu.ac.kr

TEL : (033)760-8727

Table 2 Shape of two-ducts combustor

	Combustor shape
Case 1	
Case 2	
Case 3	
Case 4	

식 (3)은 2단 연소기의 공진주파수 공식으로, 선형 섭동식과 지배방정식을 통해 유도되었다.  $R_1$ 과  $R_2$ 는 입구 경계조건, 출구 경계조건을 의미한다.

$$(1+R_1e^{-\delta_1s})(1-R_2e^{-\delta_2s}) + \frac{1}{\alpha\beta}(1-R_1e^{-\delta_1s})(1+R_2e^{-\delta_2s}) = 0 \quad (3)$$

식 (3)에서  $\alpha\beta \gg 1$  이라는 가정을 통해 식을 간추리면 축 방향 모드 주파수를 예측할 수 있다. 하지만 근사식이기 때문에 Helmholtz 주파수는 예측하지 못한다. 따라서 항을 소거하지 않고,  $s = j\omega$ 와 경계조건을 대입하여 식 (3)을 계산하면 Table 3과 같이 나타낼 수 있다.  $\delta\omega \ll 1$ 이므로 선형화를 통해 최종적으로 Table 4의 결과를 얻을 수 있다.

Table 4의 모든 Case의 수식을 풀면, Case 2(inlet : open, outlet : closed)의 식에서만 해가 존재한다는 것을 알 수 있다. 이는 Case 2 이외에 나머지는 Helmholtz 저주파가 발생하지 않는다는 것을 의미한다. 식 (5)는 Case 2의 식을  $\omega$ 에 관한 식으로 정리한 것이다. 그리고 이를 조금 수정하면 우리가 알고 있는 Helmholtz 공진 주파수 공식을 도출할 수 있다. 이는 입구 열립 조건, 출구 닫힘 조건을 가진 2단 연소기가 Helmholtz 공진기의 형상과 일치하기 때문에 나타나는 현상이다. 열린 노즐 부분은 공진기의 목에 해당하고, 닫힌 연소실은 공진기의 공동으로 볼 수 있다.

Table 3 Resonance frequency of two -ducts combustor

	Resonant Frequency
Case 1	$\tan\left(\frac{\delta_1\omega}{2}\right)\cot\left(\frac{\delta_2\omega}{2}\right) = -\frac{1}{\alpha\beta}$
Case 2	$\tan\left(\frac{\delta_1\omega}{2}\right)\tan\left(\frac{\delta_2\omega}{2}\right) = \frac{1}{\alpha\beta}$
Case 3	$\cot\left(\frac{\delta_1\omega}{2}\right)\cot\left(\frac{\delta_2\omega}{2}\right) = \frac{1}{\alpha\beta}$
Case 4	$\cot\left(\frac{\delta_1\omega}{2}\right)\tan\left(\frac{\delta_2\omega}{2}\right) = -\frac{1}{\alpha\beta}$

Table 4 Linearized resonance frequency equation of two -ducts combustor

	low resonance frequency	Helmholtz mode
Case 1	$\frac{\delta_1}{\delta_2} + \frac{1}{\alpha\beta} = 0$	X
Case 2	$\frac{\delta_1\delta_2}{4}\omega^2 - \frac{1}{\alpha\beta} = 0$	O
Case 3	$\frac{\delta_1\delta_2}{4}\omega^2 - \alpha\beta = 0$	X
Case 4	$\frac{\delta_2}{\delta_1} + \frac{1}{\alpha\beta} = 0$	X

$$f_H = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{1}{\alpha\beta l_1 l_2}} = \frac{c}{2\pi} \sqrt{\frac{A}{Vl}} \quad (5)$$

지금까지 2단 연소기에서 Helmholtz 주파수가 발생하는 조건을 분석해보았다. 추후 연구에서는 같은 접근 방법으로 3단 연소기의 Helmholtz 주파수를 예측해보고 이를 바탕으로, 기존 논문의 실제 저주파 실험 데이터 비교할 것이다.

## 후 기

본 연구는 2018년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업(NRF-2018R1D1A3B07044440) 및 산업통상자원부 항공우주부품기술개발사업(10067074)의 지원을 받아 수행된 결과입니다.

## 참고 문헌

- [1] J.E. Temme, P.M. Allison, J.F. Driscoll, Combustion instability of a lean premixed prevaporized gas turbine combustor studied using phase-averaged PIV, Combust. Flame,



Vol. 161, 2014, pp 958-970 .

[2] B. Ahn, J. Lee, S. Jung, K.T Kim,  
“Low-frequency Combustion Instabilities of an  
Airblast Swirl Injector in a Liquid-Fuel  
Combustor” , Combust. Flame, Vol. 160, 2018 pp  
424-438.

[3] J. Park, M. Yoon, D. Kim, “Development of  
Thermoacoustic Network Model Using  
Transfer Matrix Method” , J. Korean Soc.  
Combust, Vol. 24, 2019, pp 9-16.

## LDI 가스터빈 연소기에서 연료와 공기의 혼합에 따른 연소불안정 특성에 관한 연구

곽상혁\*, 주성필\*\*, 안명근\*, 최재홍\*, 이민철\*\*, 윤영빈\*\*\*\*†

### Analysis of effect of fuel-air mixing on combustion instability in LDI model gas turbine combustor

Sanghyeok Kwak\*, Seongpil Joo\*\*, Myungguen Anh\*, Jahong Choi\*, Min Chul Lee\*\*,  
Younbin Yoon\*\*\*\*†

#### ABSTRACT

Effect of fuel-air mixing on combustion instability was investigated experimentally in lean direct injection (LDI) gas turbine combustor. Partially premixed flame and fully premixed flame were implemented for investigating effect of fuel-air mixing. In constant air flow rate, instability frequency of both partially and fully premixed flame increased to higher instability frequency as equivalence ratio increases. However, partially premixed flame was shifted to higher instability frequency at higher equivalence ratio than fully premixed flame, so partially premixed flame had relatively lower instability frequency. To investigate this phenomenon, specific equivalence ratio condition, where partially and fully premixed have different frequency and considerable intensity was selected. Using OH-PLIF images, length of the unburned region and convection time were measured. As a result, it can be confirmed partially premixed flame have longer length of the unburned region and convection time that fully premixed flame in spite of same flow rate condition due to fuel-air mixing.

**Key Words** : Fuel-air mixing, Convection time, Lean direct injection, Laser diagnostics

Low-NOx 가스터빈 개발을 위해 회박에 혼합 방식의 연소 방식이 널리 사용되고 있다. 회박에 혼합방식의 경우, 이론 혼합비 보다 많은 공기를 사용하여 연료를 연소시키기 때문에, 연소 온도를 낮춰주기 때문에 NOx 저감에 효과적이다. 하지만 연소불안정 현상이 발생하기 쉽다는 단점을 가지고 있다. 연소불안정 현상이란, 연소실 내부의 음향학적 섭동과 화염에서의 열방출량섭동이 서로가 서로를 증가시키는 방향으로 상호작용하게 되어 발생하는 연소실 내부의 큰 크기의 섭동을 의미하고 일반적으로 큰 음향학적 섭동을 동반하게 되어 터빈 블레이드에 손상을 주거나 출력 저하 등 가스터빈의 신뢰성에 악영향을 주게 된다. 따라서 연소불안정 현상을 정확하게 이해하고 예측하기 위해 많은 연구들이 진행되고 있다. 그 중 연소불안정이 발생했을 때, 화염의 구조 및 유동장의 특성을 파악하기 위해 OH-PLIF, PIV와 같은 레이저 계측기법을 활용한 연구들이

많이 진행되고 있다[1-4]. M.Stohr 등은 OH-PLIF과 PIV 계측기법을 통해 화염에서의 횡단면과 가로단면을 가시화하여 연소불안정 현상이 발생했을 때 화염의 구조적 특징을 분석하였다 [1]. 또한 M.A.Christoph 등은 OH-PLIF, PIV 동시계측을 통하여 불안정한 화염과 안정한 화염이 서로 transition 되는 구간에서의 구조적 차이를 유동장의 변화와 연관지어 규명한바 있다 [2].

화염구조와 관련된 연구와 더불어 연소불안정 메커니즘에 관한 연구들도 많이 진행되고 있다. T.Lieuwen 등은 연소불안정 메커니즘 규명을 위해 압력섭동이 열방출량 섭동으로 전달되는 과정을 각 단계별로 Characteristic delay time을 도입하여 분석하였고 [3], Yoon 등은 여러 delay time중에서 convection time을 도입하여, 연료의 수소의 비율이 convection time에 주는 영향을 분석하여 연소불안정 주파수가 달라지는 현상을 분석한 바 있다 [4].

따라서 이번연구에서는 부분예혼합화염과 예혼합화염을 비교하여 연료와 공기의 혼합과정이 연소불안정 현상에 어떠한 영향을 미치는지 확인하고 convection time의 변화와 연관지어 분석하였다.

\* 서울대학교 기계항공공학부

\*\* 인천대학교 안전공학과

\*\*\* 서울대학교 항공우주신기술연구소

† 연락처자, ybyoon@snu.ac.kr

TEL : (02)880-1904

본 연구에 사용된 연소기는 fig. 1과 같다. 연료로는 메탄을 산화제로는 200도로 예열된 공기를 사용하였으며, 기본적으로 연료가 dump plane 2.7mm 안쪽에서 연소실에 직접 분사되는 Lean direct injection 방식의 연료 노즐을 사용하여 부분예혼합 화염을 구현하였다. 노즐 후단에는 130mm 직경의 퀴츠를 설치하여 화염을 가시화할 수 있도록 구성하였고, 연소기 가장 뒤쪽에는 플러그 노즐을 장착하여 음향학적으로 닫힌 경계를 모사하였다. 또한 길이방향으로 동압센서를 설치하여 동압을 측정할 수 있도록 장치를 구성하였다.

추가로 완전예혼합 화염을 구현하기위해 노즐 1m 앞쪽의 공기 라인에 연료를 직접 혼합하여 사용하였고, 이는 Fig. 1(b)와 같다.

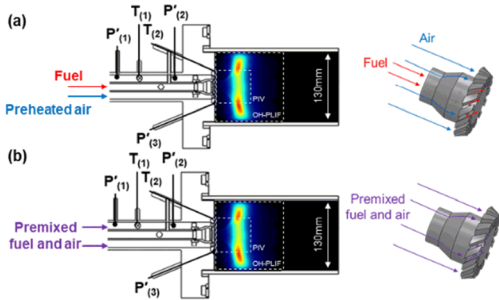


Fig. 1 Schematic of model gas turbine combustor  
(a) Partially premixed (b) Fully premixed

부분예혼합, 예혼합화염에서 공기 유량을 1100 slpm으로 고정하고 당량비를 0.58에서 0.9까지 바꾸어 줄 때 연소불안정 주파수는 Fig. 2와 같다. 이때 동압은 덤프면에 위치한 동압센서의 데이터를 사용하였다.

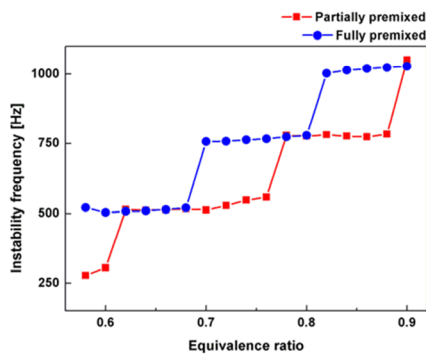


Fig. 2 Instability frequency under several equivalence ratio (0.58~0.9) in partially and fully premixed flame

Fig. 2와 같이 부분예혼합, 예혼합화염 모두에서 당량비 증가에 따라 연소불안정 주파수가 증가하는 현상을 확인할 수 있다. 하지만 부분예혼합화염이 예혼합화염에 비해 상대적으로 높은 주파수에서 연소불안정 주파수가 일어나기 때문에 상대적으로 낮은 연소불안정 주파수를 가지는 것을 확인할 수 있었다. 따라서 이 현상을 좀더 자세히 분석하기 위해 예혼합과 부분예혼합화염에서 다른 주파수를 가지는 당량비 0.75 조건을 선택하여 OH\* 자발광, OH-PLIF, PIV 계측을 통해 연료와 공기의 혼합 과정이 어떻게 화염에 영향을 주는지 확인해 보았다.

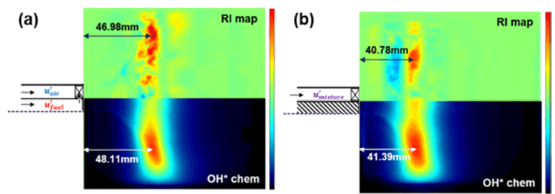


Fig. 3 OH\* chemiluminescence image and 2D Rayleigh index distribution at  $\phi = 0.75$  (a) Partially premixed, (b) Fully premixed

우선 자발광 이미지와 이를 통해 2D Rayleigh Index를 계산해보았다. 열방출량의 경우, OH\* 자발광 이미지의 intensity로 간주하였고, 동압의 경우, dump plane에 위치한 동압센서의 계측값을 기준으로, 연소실 내부의 동압이 정상과 형태를 띠기 때문에 이를 바탕으로 재구성하여 계산하였다. 그 결과는 Fig. 3과 같다. RI의 경우, (+) 영역이 불안정이 driving되는 영역, (-) 영역이 불안정이 damping 되는 영역을 의미한다.

2D RI와 평균 자발광이미지에서 모두 부분예혼합 화염이 예혼합화염에 비해 불안정이 driving되는 영역, 화염의 위치가 dump plane에서 멀리 떨어져 있는 것을 확인할 수 있었다. 따라서 위와 같은 화염의 위치 차이가 convection time에 어떠한 영향을 줄 수 있는지 확인해 보기 위해 convection time을 정의하였고, 부분예혼합, 예혼합화염에서 convection time의 차이가 얼마나 나는지 OH-PLIF 및 PIV 계측을 통해 확인해 보았다.

Convection time은 노즐에서의 당량비 섭동이 화염까지 전달되는데 걸리는 시간으로, 화염까지의 거리를 노즐 출구에서의 속도로 나눈 값으로 정의 하였다. 이때 화염까지의 거리는 OH-PLIF 이미지에서 확인할 수 있는 OH radical의 신호가 강한 화염 영역 앞쪽의 신호가 약한 unburned region이 존재하게 되고 이 영역의 길이를 화염까지의 거리로 간주하고 convection time을 계산

하였다.

Convection time 계산을 위해, 부분예혼합, 예혼합화염에서 unburned region의 길이의 변화를 관찰하고 평균 길이를 측정하였다. 길이의 경우, OH-PLIF 이미지에서 노즐부터 unburned region 영역 가장자리까지의 거리를 Matlab을 통해 측정하였다. 500장의 OH-PLIF 이미지를 측정하여

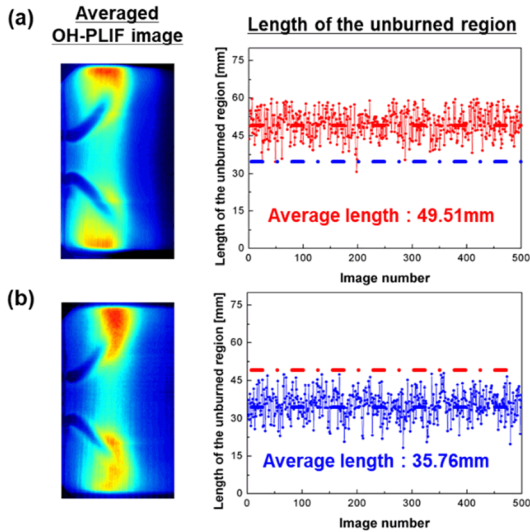


Fig. 4 Averaged OH-PLIF image and length of the unburned region (a) partially premixed (b) fully premixed

평균값을 계산하였고 그 결과는 Fig. 4와 같다.

Fig. 4(a)는 부분예혼합의 결과, 4(b)는 예혼합화염의 결과이다. 그림에서 볼 수 있는 것처럼, 부분예혼합화염이 예혼합화염에 비해 더 긴 unburned region의 길이를 가지고 있는 것을 확인할 수 있었다.

부분예혼합화염과 예혼합화염의 분사속도는 PIV 계측을 이용하여 노즐 앞 5mm 지점에서 측정된 결과, 각각 47.16m/s, 48.57m/s 로 측정되었다. 이는 같은 연소조건이지만 Fig. (1)과 같이 부분예혼합화염에서는 연료가 공기와 별개로 노즐 직전에서 분사되지만, 예혼합화염의 경우, 공기와 연료가 연소기 전단에서 예혼합되어 공급되기 때문에 연료의 유량만큼 더 많은 유량을 가지게 되어 분사 속도도 빠른 것을 확인할 수 있었다.

따라서 속도는 거의 유사한 반면 unburned region의 길이가 부분예혼합화염이 더 길기 때문에 convection time이 더 길다. 더 긴 convection time이 Fig. 2와 같이 부분예혼합화염이 상대적으로 더 높은 당량비 조건에서 연소불안정 주파

수 변화가 일어나는 현상을 만들었을 것으로 판단하였다.

결과적으로, 같은 연료와 공기 유량 조건에서 연료와 공기의 예혼합 여부의 차이가 있는 부분예혼합과 예혼합화염을 비교하였다. 부분예혼합화염이 상대적으로 unburned region이 더 긴 것을 확인할 수 있었고, 이는 유량조건이 같은 두 화염을 비교하였기 때문에 연료와 공기의 혼합과정에 의한 영향으로 판단된다.

이 연구를 통해 연료와 공기의 혼합과정 또한 convection time에 영향을 주는 요인임을 확인할 수 있었고, 작은 변화이지만 연소불안정 현상에 영향을 줄 수 있다는 것을 확인해 볼 수 있었다.

## 후 기

이 논문은 2019도 산업통상자원부 항공우주부품 기술개발사업(과제번호 : 10067074), 한국연구재단의 지원을 받아 수행한 선도연구센터지원사업(NRF-2013R1A5A1073861), 신진연구자지원사업(NRF-2019R1C1C1009739), 글로벌 박사 펠로우십사업(NRF-2017H1A2A1043206)의 지원을 받아 수행한 연구입니다.

## 참고 문헌

- [1] M. Stohr, R. Sadanandan, and W. Meier, "Experimental study of unsteady flame structures of an oscillating swirl flame in a gas turbine model combustor", Proceedings of the Combustion Institute, 32(3) 2009 2925-2932"
- [2] M. A. Christoph, A. M. Steinberg, I. G. Boxx, W. Meier, M. Aigner, and C. D. Carter, "Flow-field and flame dynamics of a gas turbine model combustor during transition between thermos-acoustically stable and unstable flames", Proceedings of ASME Turbo Expo 2010: Power for Land, Sea and Air, GT2010-22380
- [3] T. Lieuwen, H. Torres, C. Johnson, B. T. Zinn, "A mechanism of combustion instability in lean premixed gas turbine combustors", ASME 1999 International Gas Turbine and Aeroengine Congress and Exhibition. American Society of Mechanical Engineers, 1999.
- [4] J. Yoon, S. Joo, J Kim, M.C. Lee, J. G. Lee, Y. Yoon, "Effects of convection time on the high harmonic combustion instability in a partially premixed combustor", Proceedings of the Combustion Institute 36.3 (2017): 3753-3761.

# FilterBank를 이용한 연소 불안정 평가 기법에 관한 연구

최중운\*, 주성필\*\*, 이민철\*\*\*, 김남근\*†

## A Study on the Assessment Methodology of Combustion Instability using Filter Bank

Jongwun Choi\*, Seongpil Joo \*\*, Min Chul Lee \*\*, Namkeun Kim\*†

### ABSTRACT

This paper proposes a new methodology using the Filter Bank(FB) for the assessment of combustion instability to accurately judge the occurrence and extinction of combustion instability and to detect the occurrence of instability earlier than the conventional methods. Distinguished from the conventional combustion instability assessment method which the parameter calculated for a frame represents a single values, the newly proposed method can represent multi-values to evaluate combustion instability. The performance of this proposed method has been verified by applying it to the measurement data obtained from a model gas turbine combustion experiment.

**Key Words** : Combustion Instability, Gas turbine combustor, Filter Bank

환경 문제에 대한 관심이 높아지면서, 내연기관 및 가스터빈 연소 시스템에 대한 효율적이고 친환경적인 기술의 요구가 증가 하고 있다. 그 중, 예혼합 연소기는 낮은 당량비로 운전되어 연료의 효율을 높이고, 질소산화물(NOx) 배출을 줄일 수 있기 때문에 다양한 연소시스템에 활용되고 있다. 연소불안정은 연소시 발생하는 압력 섭동과 열방출량섭동의 커플링현상에 의해 발생하는 현상으로 연료노즐 및 연소기 라이너에 막대한 손상을 주게 되어, 발생원인 및 제어기법 등 다양한 분야에서 연구가 이루어지고 있다[1 - 3].

본 연구에서는 이러한 연소불안정이 발생하기 이전에 미리 감지하여 연소상태를 판별할 수 있는 필터뱅크(FilterBank)기법[4]을 활용하여 연소불안정을 사전에 감지하는 방법을 제안하고자 한다. 필터뱅크는 단일인자를 이용하여 연소 상태를 판단하는 기존의 기법과는 다르게 동압신호를 여러 대역의 요소로 분리하여 시간에 따른 주파수별 인자를 계산하게 되며, 그림 1의 흐름도에 따라 계산이 되게 된다. 연소불안정 발생의 빠른 예측을 비교하기 위하여 RMS, 쿼터시스(Temporal Kurtosis), 필터뱅크를 시간의 흐름에 따라 값을

비교하였고, 그 결과 그림2와 같이 안정적인 연소로부터 불안정한 연소의 전이과정에서 각각 변수에 따른 연소불안정 감지 시간을 파악할 수 있었다.

쿼터시스와 필터뱅크의 경우 안정적인 조건과 불안정한 조건에서의 수치를 각각 계산하여 안정적인 조건으로부터 불안정한 조건까지 도달하는 시간을 컷오프시간(cut-off time)으로 정의하여 연소 불안정 발생 시간을 계산하였다. 그 결과 본 논문에서 제시한 필터뱅크 기법을 이용한 연소불안정 상태판별시간이 상대적으로 빠르게 감지가 되었다.

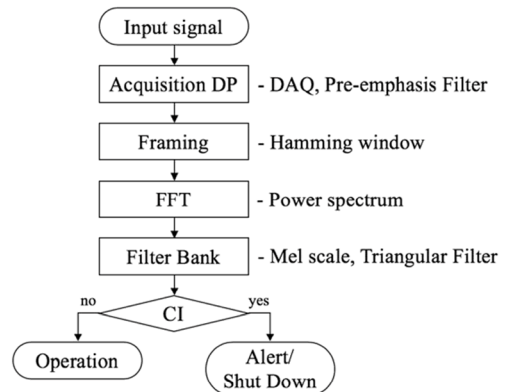


Fig. 1 Proposed methodology of Filter Bank

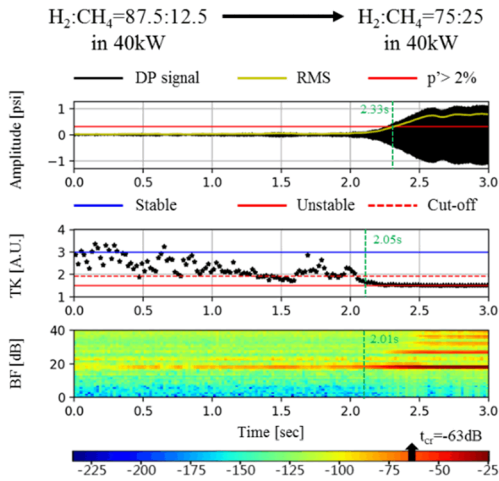
\* 인천대학교 기계공학과

\*\* 인천대학교 안전공학과

\*\*\* 인천대학교 소방방재연구소

† 연락처자, [nkim@inu.ac.kr](mailto:nkim@inu.ac.kr)

TEL : (032)835-8868



**Fig. 2** Comparison of combustion instability criterion between RMS, Temporal Kurtosis and Filter Bank

필터뱅크는 연소불안정 판별시간 뿐만아니라 쿼터시스가 할 수 없는 다양한 모드로부터 발생하는 연소불안정 현상에 대한 판별이 가능하다. 또한 쿼터시스의 경우 단일 프레임의 앞과 뒤의 데이터가 없을 경우 잔차(residual)가 매우 커지기 때문에 단일값으로 연소상태를 판별하지 못하여 4개 혹은 5개의 단일값을 선형회귀(linear regression)한 값으로 연소상태를 판별한다. 그렇기 때문에 연소기 운용에 있어 실시간으로 변화하는 동압신호에 대해서 효과적으로 연소불안정을 판별하기 어렵다. 하지만 필터뱅크의 잔차가 매우 작기 때문에 실시간 모니터링이 가능한 결과값으로 활용이 가능하다.

또한 위에서 언급한 것 처럼 쿼터시스는 FFT의 크기가 제일 큰 값을 기준으로 동압신호의 분포를 통하여 계산이 되기 때문에 멀티모드의 연소불안정이 발생할 경우 안정으로 판별할 수도 있다. 하지만 필터뱅크는 주파수를 밴드패스필터를 이용하여 주파수별 서브밴드의 값을 계산하기 때문에 저주파부터 고주파까지의 다양한 영역대의 주파수분석이 가능하여 멀티모드 연소불안정을 효과적으로 감지가 가능할 뿐만 아니라, 연소기 튜닝 시 연소기의 상태를 분석하는 기법으로 활용할 수 있다.

## 후 기

본 연구는 인천대학교 융합과학&기술원(Incheon National University Institute of Convergence Science & Technology Research Grant) 그리고 국가연구 바이오.의료기술개발사업(Bio & Medical Technology Development

program of the NRF)의 연구 지원으로 수행되었다.

## 참고 문헌

- [1] Timothy C.Lieuwen, "Investigation of combustion instability mechanisms in premixed gas turbines", Georgia Institute of Technology, 1999, pp. 1-52.
- [2] J.W.S Rayleigh, "The Theory of Sound", Vol. II, Dover Publication, New York, 1945, pp. 225-235.
- [3] K. Zhang, A. Ghobadian, J.M. Nouri, "Comparative study of non-premixed and partially-premixed combustion simulations in a realistic Tay model combustor", Appl. Therm. Eng., Vol.110, 2017, pp.910-920.
- [3] L.Angello, "Tuning Approaches for DLN Combustor Performance and Reliability", EPRI, Palo Alto, CA, 2005, pp.1-118.
- [4] A. Biem, S. Katagiri, E. Mcdermott, B. Juang, "An Application of Discriminative Feature Extraction to Filter-Bank-Based Speech Recognition", IEEE Trans. SPEECH AUDIO Process., Vol. 9, 2001, pp. 96-110.

# 모사 가스터빈 연소기내에서 음압 가진 실험을 통한 연소동압 계측 적정성 연구 - 동압 측정위치에 따른 신호 계측 특성

장대진\*, 전병철\*, 주성필\*, 이민철\*†

## A Compatibility Study on the Measurement of Combustion Dynamic Pressure by Experiments with Sound Pressure Excitation in a Gas Turbine Model Combustor - Signal Measurement Characteristics according to the Measurement Location of Dynamic Pressure

Dae Jin Jang\*, Byung Chul Jun\*, Seong Pil Joo\*, Min Chul Lee\*†

### ABSTRACT

In this study, compatibility test on the gas turbine dynamic pressure measurement which can be used for dynamic pressure monitoring and combustion tuning have been conducted. dynamic sensors were installed in each height to measure dynamic pressure in each location. This computer program was designed to display the correct dynamic pressure for each sensor by translated it to the Data Acquisition System. However, program showed a different result than expected. If sound was heard by amplifier in a closed space, it was believed that the reflective waves of the preceding vibrations met with the vibrations that followed, resulting in a standing wave that is reinforced or offset in measurement. It has also been found that some frequencies were measured at the node where sound signal was not detected. Therefore, it was considered that measuring the inside of the gas turbine by the dynamic pressure signal was able to verify the effects of interference factors, and the assignment of the calibration formula may result in a relatively accurate pressure measurement in the combustion chamber.

**Key Words** : Gas Turbine, Unstable Combustion, Dynamic Pressure, Standing Wave, Node

가스터빈 발전설비는 2019년 현재 탈원전·탈석탄 발전을 지향하는 근래의 정부 정책으로 인해 그 연구가치가 높아지고 있다. 이들 중 연소기는 가스터빈의 핵심적인 부품이며, 연소 시 고온·고압 상태이므로 가스터빈 연소기 관리는 항상 열·음향 불안정성과 사고 위험성을 동반한다[1]. 따라서, 안전성 향상을 위해 계속해서 연구가 진행 중이다.

종래 가스터빈의 온도 측정 기술인 접촉식 열전대를 사용하여 터빈의 출구 온도를 대략적으로 측정하는 방법은 센서의 내구성·정확성 등의 문제점이 있었다[2,3]. 이러한 문제와 더불어, 국내 가스터빈 온도 측정 기술 대부분이 해외 제작사에 의존하는 형태이며 국내의 자체적인 기술 개발 부족

으로 인해 이에 따른 연소 불안정 및 사고위험의 부담은 온전히 가스터빈을 운영하는 국내시설로 돌아가고 있는 실정이다[4].

본 연구에서는 동압 센서를 터빈의 내·외부에 장착, 센서로 동압을 측정하여 온도를 확인하는 가스터빈 동압 측정법의 적합성을 확인하고자 Fig. 1과 같이 모사 가스터빈 모형에 높이별로 동압 센서를 장착하여 이에 따른 동압을 측정하였다[5].

위 실험은 Fig. 2의 모식도에 나타난 것과 같이, 동압 측정 컴퓨터 프로그램을 직접 제작하여 실험에 도입하였다. 먼저 프로그램에 원하는 주파수를 입력하여 발생된 신호를 증폭기로 증폭하였고, 증폭된 신호를 스피커로 보내어 가스터빈 모형 측면부에 수직 방향 높이별로 장착된 동압 센서로 해당 신호를 받아들였다. 이를 Data Acquisition System으로 전달하여 컴퓨터 프로그램에 센서별로 정확한 동압이 나타나도록 제작하였다. 이러한 측정 방법을 통해 측정된 동압은 센서의 위치와 중

\* 인천대학교 안전공학과

† 연락처, LMC@inu.ac.kr

TEL : (032)835-8295 FAX : (032)835-0779

류에 따라 차이를 보였고, 그 결과는 다음과 같았다.

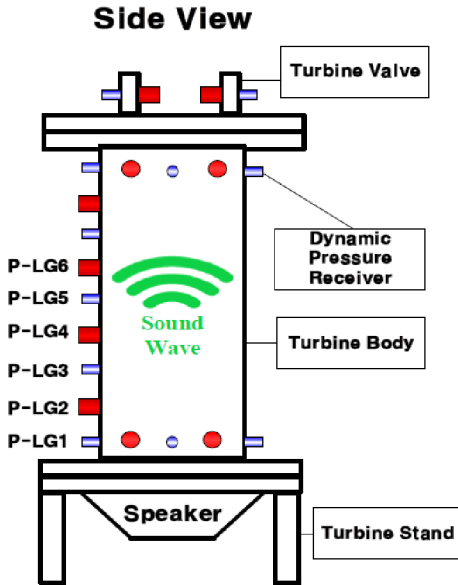


Fig. 1 Schematic of Dynamic Pressure Measurement Test Rig for a Model Gas Turbine Combustor

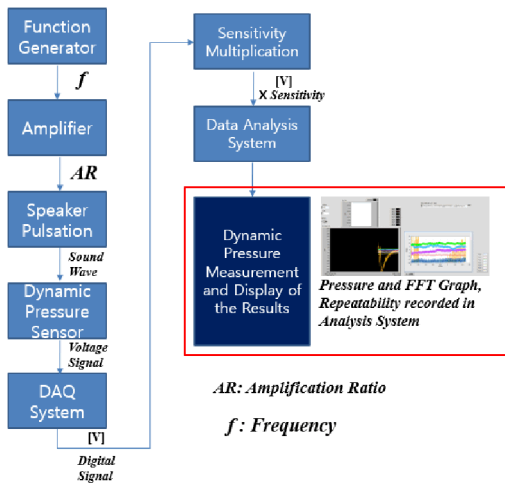


Fig. 2 Process Diagram of the Experiment

1) 동압 실험을 통해 측정된 주파수는 설치된 스피커와 동압 센서의 거리가 멀어질수록 측정된 진동값이 약해지는 일반적인 형태가 아닌 특정 주파수 영역 내에서 진폭이 감소하거나 프로그램에 입력한 파장의 진폭이 기록되지 않는 현상을 보였고, 이후 5번의 반복 실험을 통해서도 이와 같은 현상이 나타남을 확인하였다.

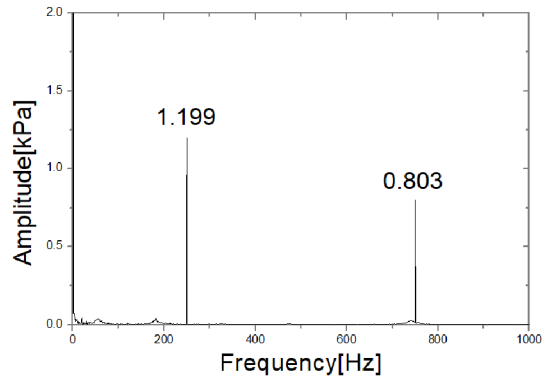


Fig. 3 Irregular Amplitude Signal by P-LG2 Sensor

2) 입력한 파장의 진폭이 아예 측정되지 않는 부분에 대해서, 거리에 따른 주파수의 측정값 식에 해당 음원으로부터의 설치된 센서의 거리를 대입할 경우 해당 측정값은 파동의 마디인 위치에서 측정되어 진폭이 기록되지 않는 것으로 확인되었다.

3) Fig. 3와 같이, 해당 주파수에서 입력한 주파수값이 아닌 다른 주파수에서도 진폭 값이 측정되었다. 이는 Fig. 1에서 볼 수 있듯이 밀폐된 공간에서 스피커로 음향을 가진시킨 경우 앞서 발생한 반사파가 이후에 발생한 진동과 만나 보강 혹은 상쇄되는 Standing Wave가 발생된 것으로 사료된다.

따라서 동압 신호로 가스터빈의 내부를 측정할 때 다양한 방해 요소들이 존재한다는 것을 확인할 수 있었으며, 이러한 요인들을 보정할 계수값 등의 도입을 통해서 비교적 정확한 연소실 내 압력 측정이 이뤄질 수 있다고 판단된다.

## 후 기

이 성과는 2019년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. NRF-2019R1C1C1009739)

## 참고 문헌

[1] J. S. Oh, Y. B. Yoon, "Combustion Instability in Gas Turbine Engines", Journal of the Korean Society of Propulsion Engineers, KSPE, (2008) 63-77.  
 [2] W. Hwang, H. J. Seo, M. C. Lee, "Experimental Study on a Temperature Measurement Method Using Ultrasonic Wave for the Safe Operation of Gas Turbines", Transactions of the Korean Society of Mechanical Engineers B 43(2), KSME, (2019) 93-98.  
 [3] J. S. Yoon et al., "Experimental Study on



Combustion Instability Characteristics of Model Gas Turbine Combustor at Various  $H_2/CH_4/CO$  Composition” , Journal of the Korean Society of Propulsion Engineers, 17(6) (2013) 67-74.

[4] J. S. Oh, Y. B. Yoon., “Combustion Instability in Gas Turbine Engines” , The Korean Society of Propulsion Engineers, 12(4) (2008) 63-77.

[5] G. Li, E. J. Gutmark., “Effects of Installation on Dynamic Pressure Measurements” , AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit, AIAA (2006).

## 초본계 바이오매스 혼소시 첨가제 투입 영향에 관한 실험적 연구

임호\*, 이재욱\*, 채태영\*, 이용운\*, 양원†

### Experimental study for the effect of additive in co-firing of the herbaceous biomass

Ho Lim\*, Jaewook Lee\*, Taeyoung Chae\*, Yongwoon Lee\*\*, Won Yang†

#### ABSTRACT

The purpose of this study is to investigate the effect of additive while the deposition of residue ash is formatted on the surfaces inside boiler of fire plant. The present work was carried out through experiment. Some additives were selected for present work, which are normally used in the industrial sector : kaolin, ammonium sulfate, calcium oxide, aluminum oxide and calcium hydrogen phosphate. In order to demonstrate the ash deposition in boiler, coal and herbaceous biomass(straw pellet) were selected as fuel. The test was performed at 80kw(thermal input) pilot combustor and ash deposition was measured in real time detection system. Two fuels were fed from top of combustor and blended at a ratio of 30% biomass to 70% coal before injection. All additive was fed 1 and 4 wt. % of total fuel mass with fuel. In conclusion, the total deposition from experiment did not decrease in all additive case. The present result was very interested. As reported in most researches, used additives reduced the deposition. Especially, 1% of CaO decreased the deposition like ammonium sulfate case while 4% of CaO increase.

**Key Words** : Additive, Ash deposition, Combustion, Straw pellet

현재 전력 생산에 석탄 등 화석 연료가 사용되는 화력 발전이 큰 비중을 차지하고 있다. 이로 인해 온실 가스가 지속적으로 발생하게 되어 지구 온난화 등과 같은 기후 문제로 큰 어려움을 겪고 있다. 이를 위해 화력발전소에서는 석탄 연료를 일부 대체하여 바이오매스를 사용하고 있다. 국내에서도 바이오매스 혼소가 이루어지고 있다. 바이오매스 혼소는 설비의 최소 변경이라는 장점이 있기에 매력적인 연소 기술이다. 최근 국내 에너지 정책 변화로 인해 바이오매스 산지에 따른 활용도 측면도 변하고 있다. 석탄화력 혼소용인 수입산 목질계 바이오매스 보다는 국내산 초본계 바이오매스의 활용 가능성 판단하고 있다. 이는 국내 미활용 바이오매스에 대한 관심이 높아지고 있음을 반증하고 있다. 그러나 초본계 바이오매스는 석탄에 비해 높은 질소, 황, 염소, 칼륨, 실리콘 등을 보인다[1,2]. 이러한 구성 성분은

화력 발전에 적용하였을 경우, 슬래깅, 파울링의 형성을 촉진시킨다. 이 현상은 보일러의 효율을 저하시키고 심한 경우 운전 정지를 일으킬 수도 있다. 따라서 본 연구는 초본계 바이오매스 혼소에 의해 발생할 수 있는 슬래깅/파울링 생성과 관련된 회 점착 형성과 회 점착을 줄이기 위한 방안으로 첨가제에 따른 영향을 살펴보았다[3, 4].

본 연구에서는 다양한 첨가제 중 황산암모늄((NH<sub>4</sub>)<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>)과 카올린(Al<sub>2</sub>Si<sub>2</sub>O<sub>5</sub>(OH)<sub>4</sub>), 인산수소칼슘(CaHPO<sub>4</sub>), 산화알루미늄(Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>), 산화칼슘(CaO)을 첨가제로 사용하였다[5]. 첨가제 선정은 현재 다양한 연소 설비에 적용되고 있는 첨가제 중 각 종류를 대표하는 것으로 하였다. 그리고 연료 특성을 파악하기 위해 원소분석, 공업분석, ICP 분석이 수행되었다. 분석된 연료 결과를 바탕으로 혼소 실험을 진행하였으며, 석탄과 바이오매스의 각각 공급이 가능한 80kWth 연소 시스템을 활용하였다. 실험 중 배기가스의 실시간 측정이 가능하며, 사이클론에서 미연분 샘플을 통해 탄소 전환율을 측정하였다. 또한, 실시간 회 점착량 측정 장치를 설치하여 회분 증가량을

\* 한국생산기술연구원 고온에너지시스템그룹

† 연락처, [yangwon@kitech.re.kr](mailto:yangwon@kitech.re.kr)

TEL : (041)589-8265 FAX : (041)-589-8323

측정하고, 생성된 회 점착층은 후처리를 통해 SEM/EDS, XRD 분석을 수행하였다.

사용된 연료는 아역청탄과 밀짚 펠릿(straw pellet)이며, 혼소시 7:3의 기준으로 진행하였다. 물성 분석 결과를 통해 회분의 함유량이 석탄보다 밀짚 펠릿이 높은 것을 알 수 있고 이를 비교하면, 석탄 전소에 비해 혼소시 더 많은 회 점착이 생길 것으로 예상할 수 있다. 그리고 회분의 구성성분을 보았을 때 밀짚 펠릿은 석탄에 비해 K과 Si가 많이 함유되어 있는 것을 알 수 있으며, 이러한 성분이 회 점착 형성에 영향을 미칠 것으로 예상된다.

Fig. 1은 첨가제 투입에 따른 배기가스( $\text{NO}_x$ ,  $\text{SO}_x$ ) 측정 결과를 나타낸 그래프이다. 이 가운데 황산암모늄 투입시  $\text{NO}_x$ 와  $\text{SO}_x$ 의 급격한 변화를 보이고 있다. 이는 황산암모늄 투입 직후 고온에 노출됨으로 인해 열분해(decomposition)이 발생,  $\text{NH}_3$ 와  $\text{SO}_2$ 가 생성된다. 이 때  $\text{NH}_3$ 는 연소에 의해 발생한  $\text{NO}$ 를  $\text{NO}_2$ 로 전환시켜주는 환원제의 역할을 수행, 전체적으로  $\text{NO}_x$ 를 저감시켜주며, 반대로  $\text{SO}_2$ 가 추가적으로 생성되었기에  $\text{SO}_x$ 가 증가하였다. 이와 달리  $\text{CaO}$  투입시 탈황 작용으로 인해  $\text{SO}_x$ 가 감소하게 된 것을 확인할 수 있다.

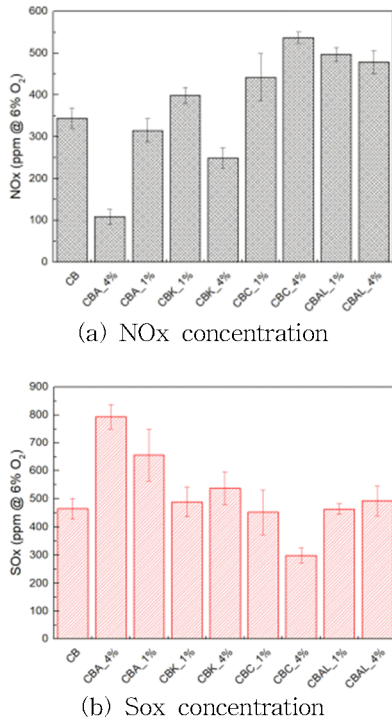


Fig. 1 Gas concentration with additives.

Fig 2은 실험 후 프로브에 점착된 회의 사진을 나타낸 것이다. 첨가제는 투입 연료의 무게 대비 1, 4 wt. %로 실험을 진행하였으며, 약 3시간동안 probe에 점착된 회분량을 측정하였다. 프로브에 점착된 deposit을 관찰하였을 경우 바이오매스 혼소가 석탄 전소보다 확연히 많은 deposit이 쌓인 것을 확인 할 수 있었고 다양한 첨가제를 사용할 때 deposit이 증가한 경우도 있었고 감소한 경우도 있었다. 이를 정량적으로 확인하기 위해 실시간으로 점착된 deposit의 무게를 측정하였다.

Table 1은 전소 및 혼소, 첨가제 투입에 따른 최종적인 회 점착 무게를 나타낸 것이다. 결과에서 볼 수 있듯이 석탄 전소에 비해 밀짚 펠릿을 혼소하였을 때 약 1.4배의 회 점착이 증가한 것을 확인할 수 있다. 그리고 혼소시 첨가제 종류에 따라 점착량 변화를 확인할 수 있다. 이 가운데  $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$  4wt. %과  $\text{CaHPO}_4$  1wt. %를 첨가하였을 때 약 36%의 deposit 감소가

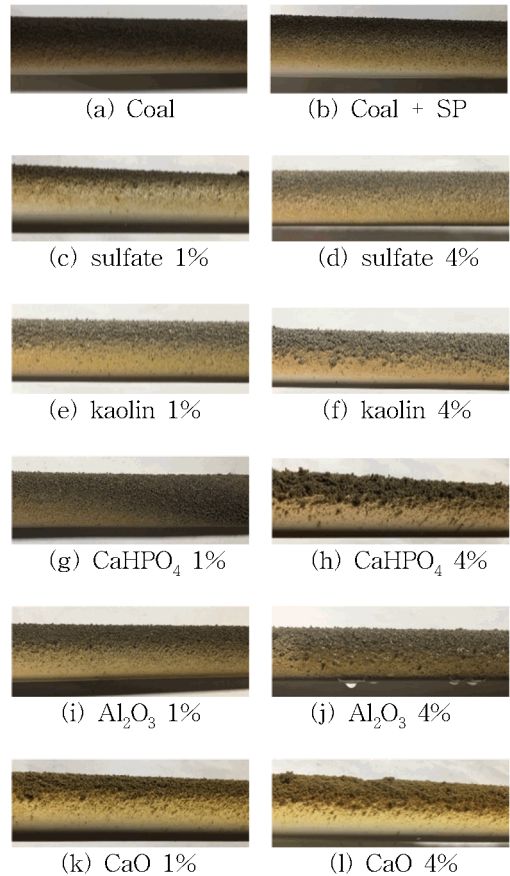


Fig. 2 Pictures of the ash deposit

**Table 1** Results of ash deposition weight

	Weight (g)	
	1 wt. %	4 wt. %
Coal	5.0	
Coal +SP	7.2	
Sulfate	5.6	4.6
Kaolin	8.4	8.6
CaHPO <sub>4</sub>	4.6	5.8
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	6.0	6.4
CaO	6.0	10.8

되었고 이와 달리 CaO 4wt. %를 첨가하였을 때는 약 50 %의 deposit이 증가하였다. 이는 각각의 원소 기반의 첨가제들이 연료의 회분 성분과 화학반응을 하여 고온용융점 또는 저온용융점 화합물을 만들면서 deposit이 증가 또는 감소하는 결과가 초래된 것이다. 이처럼 같은 연료를 사용하더라도 첨가제에 따라 다양한 결과가 나올 수 있음을 알 수 있었다.

	SEM	Si	K	Ca
Coal+SP				
ammonium sulfate				
kaolin				
CaHPO <sub>4</sub>				
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>				
CaO				

**Fig.3** Elements distribution by SEM/EDS analysis

위의 결과를 설명하기 위해서 SEM/EDS, XRD 분석을 진행하였다. 이 중 점착량의 급격한 차이를 보이는 첨가제 4 wt%의 SEM/EDS결과를 Fig. 3에 나타내었다. 첨가제 종류에 따라 회 점착층 구조가 다르게 나타남을 보이고, 카올린과 산화칼슘의 경우 입자들 간의 결합이 뚜렷함을 확인할 수 있다. 이는 회 점착층이 형성되는 동안 K-silicate or Ca-silicate의 화합물이 많이 생성되었기 때문이다.

본 결과를 통해 첨가제 투입이 연소에 미치는 영향을 확인하였으며, 아울러 첨가제 종류에 따른 회 점착 형성이 달라짐을 확인하였다. 이를 바탕으로 보다 심도 있는 분석을 통해 회 점착 증가 및 저감 메커니즘을 규명하고자 한다.

### 참고 문헌

- [1] I. Pisa and G. Lazaroiu, "Influence of co-combustion of coal/biomass on the corrosion," *Fuel Process. Technol.*, vol. 104, 2012, pp. 356–364.
- [2] K. A. Christensen and H. Livbjerg, "A plug flow model for chemical reactions and aerosol nucleation and growth in an alkali-containing flue gas," *Aerosol Sci. Technol.*, vol. 33, 2000, pp. 470–489.
- [3] T. Valmari, E. I. Kauppinen, J. Kurkela, J. K. Jokiniemi, G. Sfiris, and H. Revitzer, "Fly ash formation and deposition during fluidized bed combustion of willow," *J. Aerosol Sci.*, vol. 29, 1998, pp. 445–459.
- [4] K. A. Christensen, M. Stenholm, and H. Livbjerg, "The formation of submicron aerosol particles, HCl and SO<sub>2</sub> in straw-fired boilers," *J. Aerosol Sci.*, vol. 29, 1998, pp. 421–444.
- [5] L. Wang, J. E. Hustad, Ø. Skreiberg, G. Skjeverak, and M. Grønli, "A critical review on additives to reduce ash related operation problems in biomass combustion applications," *Energy Procedia*, vol. 20, 2012, pp. 20–29.

## 0.1 MW 급 순산소 순환유동층 연소시스템에서 이산화탄소 포집 및 고효율 연소에 관한 연구

문지홍\*, 조성호\*, 문태영\*<sup>†</sup>, 박성진\*, 김재영\*, 백건욱\*, Nguyen Hoang Khoi\*, 이재구\*<sup>†</sup>

### Experimental Study for Carbon Capture and High Efficiency in 0.1 MW Oxy-CFBC

Ji-Hong Moon\*, Sung-Ho Jo\*, Tae-Young Mun\*<sup>†</sup>, Sung-Jin Park\*, Jae-Young Kim\*, Nguyen Hoang Khoi\*, Jae-Goo Lee\*<sup>†</sup>

#### ABSTRACT

Oxy-fuel circulating fluidized bed combustion (Oxy-CFBC) has increasingly focused on a promising power generation technology for carbon capture. The challenge in this research is to optimize the Oxy-CFBC process for zero-emission. Through the pilot test, the CO<sub>2</sub> purity was above 96 vol.% and the air pollutant removal efficiencies were 100% of deSO<sub>x</sub>, 90% of deNO<sub>x</sub>, and 99% of dust removal. The plant thermal efficiency was above 99%, which was 2% more than the air combustion.

**Key Words** : Oxy-fuel, CFBC, Emission, Carbon capture, Efficiency

순산소 연소 기술은 CCS(carbon capture and storage) 기술 중, 경제성과 효율이 가장 높은 기술이면서 기존 발전설비에 적용이 가장 쉬운 기술로 평가받고 있다[1]. 순산소 연소 기술은 공기에서 질소가 분리된 산소와 재순환된 배기가스(대부분 CO<sub>2</sub>)를 혼합하여 산화제로 이용한다. 이로 인해 약 80%의 질소가 포함되는 공기 연소 배기가스와 달리 순산소 연소 공정에서는 질소가 사전에 분리되어 배출량이 1/5 수준으로 고순도의 CO<sub>2</sub>로 이루어진 배기가스가 배출되어 CO<sub>2</sub> 저장 및 이용이 용이해진다[2]. 또한 산화제로 O<sub>2</sub>/N<sub>2</sub> 대신 O<sub>2</sub>/CO<sub>2</sub>가 투입되는 조건이기 때문에 thermal NO<sub>x</sub> 및 prompt NO<sub>x</sub> 생성 반응이 억제되고, NO는 fuel-N으로부터만 생성된다[3]. 이와 같은 특성으로, 순산소 연소 기술은 온실가스 및 대기오염물질 및 미세먼지를 감소시킬 수 있는 청정화력 기술로 평가받고 있다[4].

순산소 연소 공정은 미분탄 보일러를 개조하는 목적으로 시작되었지만, 최근 연료다변화가 가능한 순환유동층 보일러의 장점이 부각되면서 Oxy-CFBC 공정에 대한 관심도 높아지고 있다[5]. Oxy-CFBC는 순환유동층 보일러의 장점과 더불어, 배기가스 재순환 비율 감소 및 순산소 함량을 증가시켜 배기가스 재순환 팬의 동력 및 보일러의 크기를 줄일 수 있다는 장점이 있다. Oxy-PCC 등 다른 순산소 연소 공정에서는 화염 온도의 상승 때문에 순산소 함량을 30% 이상 높

이기 어렵지만, Oxy-CFBC 공정은 외부열교환기 등을 이용하여 열전달 역할을 하는 유동매체의 온도제어가 가능하기 때문에 순산소 함량을 이론상 70%까지 높일 수 있다[6]. Oxy-CFBC 연구는 주로 pilot scale에서 기술개발이 국외에서 진행되고 있으나 국내에서는 기초연구 단계에 머물러 있다. 본 연구는 0.1 MW<sub>th</sub> 급 순산소 순환유동층 연소시스템에서 연소로 내 온도, 압력 분포 및 배기가스 내 SO<sub>2</sub>, NO, CO, 연소효율 등을 확인하고 CO<sub>2</sub> 원천분리가 안정적으로 유지되는지 확인하였다. 본 연구로부터 얻어진 운전결과들은 기후변화 대응 및 대기오염 물질 배출 저감을 위한 Oxy-CFBC 개발에 중요한 자료로 활용이 가능할 것이다.

본 연구의 Oxy-CFBC 시스템 개략도는 Fig. 1에 나타내었다. 연료 및 유동사는 각 스크류 피더들에 의해 순환유동층 연소로 하부로 정량 공급되었다. 순환유동층 연소로 즉 연소 반응이 일어나는 riser의 직경과 높이는 각각 0.15m와 10m이며 hot solid가 순환되는 영역인 riser, 기 고분리기의 cyclones(1차, 2차), 고체순환설비인 loop-seal은 열팽창에 의한 설비 손상을 방지하기 위해 각 내부에 0.1 m 두께로 내화재 처리를 하였다. 생성되는 배기가스 내 미세입자를 포집하기 위해서 백필터(bag-filter)를 사용하였으며 백필터 운전 온도(250 °C 이하)를 위해 1차 열교환기(Shell and tube type)가 설치되어 있다. 미

세입자 집진 후 2차 열교환기를 통과한 배기가스는 응축설비(FGC; flue gas condenser)를 통해 배기가스 내 수분이 회수되었다. 공기 연소에서 순산소 연소로 전환은 단시간 내 안정적으로 이루어져야 한다. 본 설비에서는 배기가스 재순환(FGR; flue gas recirculation) 팬에 의해 배기가스가 mixing tank로 유입되고 이 때 순산소는 MFC(mass flow controller)에 의해 mixing tank로 정량 공급하여 배기가스와 순산소가 혼합된 산화제가 riser(primary oxidant), feeding line(secondary oxidant), loop-seal로 각각 공급되어 Oxy-CFBC 운전을 실시하였다. 즉 하나의 재순환 팬으로 각 산화제들을 공급하기 때문에 공기에서 순산소연소로 전환이 수 초 내에 이루어진다. Mixing tank 내 산화제 조성과 연소가스 내 O<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub>, NO, CO 농도들을 실시간 분석하기 위해 IR(AO2020, ABB, Germany)과 GC-TCD(GC 7890, Agilent, USA, thermal conductivity detector)를 이용하여 분석하였다.

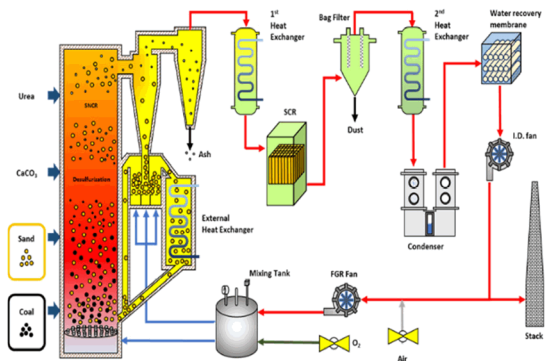


Fig. 1 Schematic diagram of 0.1 MW<sub>th</sub> oxy-CFBC system.

순산소 연소 공정에서 배기가스 중 CO<sub>2</sub> 순도는 연소 후단 공정인 CO<sub>2</sub> 고순도화, 포집 및 이용 공정 성능에 밀접한 영향을 미치는 주요 인자이다. CO<sub>2</sub> 순도를 증가시키기 위해서는 공정 내 공기 유입과 연소가스 내 산소농도를 최소화시켜야 한다. FGC 후단에서 IR과 GC로 측정된 연소가스 실시간 조성을 Fig. 2에 나타내었다. 순산소 연소 1차 운전에서는 순차적으로 각각의 fan들의 유입가스를 공기에서 산소/재순환가스로 전환시켰으며, 전환이 완료되는데 9시간 정도 소요되었으나, 순산소 연소 4차 운전에서는 다수의 FD Fan들을 사용하지 않고, FGR Fan에서 유동화 가스들을 분기하는 방식을 사용하여 전환 완료시간을 40분 이내로 단축시켰다. CO<sub>2</sub> 순도는 96 vol.% 이상을 달성하였다.

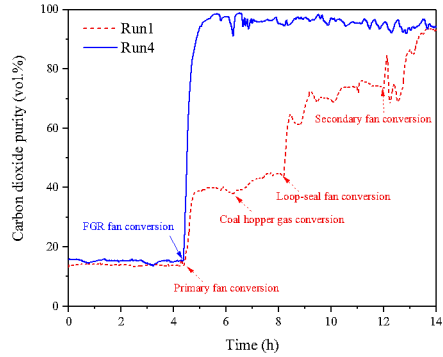


Fig. 2 CO<sub>2</sub> purity in terms of operation methods

순산소연소 공정에서는 배기가스 재순환 기술을 이용하기 때문에 연소가스의 조성 변화가 직접적으로 산화제의 조성에 영향을 미친다. 따라서 과잉산소를 일정하게 유지할 수 있도록 연소가스 조성을 일정하게 유지시키며 운전하는 기술이 중요하다. 본 연구에서는 연소가스의 조성 변화 정도를 알아보기 위해 표준편차 분석기법을 이용하였다. 공기연소 시 연소가스 CO<sub>2</sub> 표준편차는 0.45 vol.%, 순산소 연소 시 0.96 vol.%로 분석되었다.

Fig. 3은 운전 방식에 따른 대기오염물질 배출량을 보여주고 있다. 공기 연소 대비 순산소 연소 공정만 적용시켜도 배기가스 재순환 공정에 의해 대기오염물질들이 80% 가량 감소되었다. 최종적으로 1차 제거 (로내 정제) 및 2차 제거 (SCR, FGC)를 통해 탈황 효율은 100%, 탈질 효율은 90%, 미세먼지 제거 효율은 99% 이상을 달성하였다.

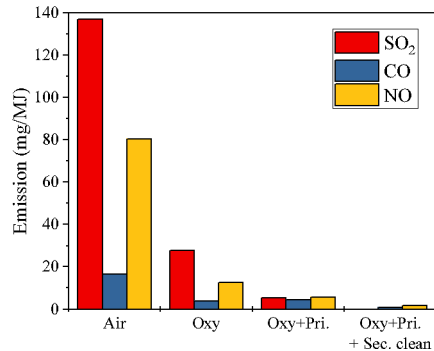


Fig. 3 Emissions amounts in terms of operation modes

## 후 기

본 연구는 국가과학기술연구회의 “초정정·고효율 연료다변화형 미래에너지 생산기술 개발” 과제로 수행되었음(No. CRC-15-07-KIER).

## 참고 문헌

- [1] M.A. Gonzalez-Salazar, “Recent developments in carbon dioxide capture technologies for gas turbine power generation”, *Int. J. Greenh. Gas Con.*, Vol. 34, 2015, pp. 106-116.
- [2] M. Weng, C. Gunther, A. Kather, “Flue gas concentrations and efficiencies of a coal-fired oxy fuel power plant with circulating fluidised bed combustion”, *Energy Procedia*, Vol. 37, 2013, pp. 1480-1489.
- [3] Y.Q. Hu, N. Kobayashi, M. Hasatani, “The reduction of recycled-NO<sub>x</sub> in coal combustion with O<sub>2</sub>/recycled flue gas under low recycling ratio”, *Fuel*, Vol. 80(13), 2001, pp. 1851-1855.
- [4] L. Duan, C. Zhao, W. Zhou, C. Qu, X. Chen, “O<sub>2</sub>/CO<sub>2</sub> coal combustion characteristics in a 50 kWth circulating fluidized bed”, *Int. J. Greenh. Gas Con.*, Vol. 5(4), 2011, pp. 770-776.
- [5] V.M. Supranov, G.A. Ryabov, D.A. Mel’Nikov, “Studying the possibility and advisability of using a circulating fluidized-bed boiler in the oxyfuel combustion mode”, *Therm. Eng. (English translation of Teploenergetika)*, Vol. 58, 2011, pp. 593-601.
- [6] H. Li, S. Li, Q. Ren, W. Li, M. Xu, J.Z. Liu, Q. Lu, “Experimental results for oxy-fuel combustion with high oxygen concentration in a 1 MWth pilot-scale circulating fluidized bed”, *Energy Procedia*, Vol. 63, 2014, pp. 362-371.

# 석탄화력 기존 SCR 계통 촉매층 회분 퇴적 및 마모에 관한 유동특성에 관한 연구

김태형\*†, 박병철\*, 김태형\*

## Flow Characteristics Analysis of Ash Deposition and Erosion Catalytic Layer at Conventional SCR system of Coal Fired Power Plant

Taehyung Kim\*†, Byungchul Park\*, Kwangsoo Kim\*

### ABSTRACT

This study made a model through a design data of SCR, and then analyzed on particle behaviors characteristics and on-site issues using actual condition and CFD. Velocity and mass flow is higher than central area in-ward and out-ward boarder just under rectifier in case of design condition, but the change of velocity and mass flow is lower at the catalytic layer. and deposition rate increased because particle distribution was higher at in-ward and out-ward catalytic layer. For particle deposition, it was hard to find out the tendency under 1 micron. So, ash plugging was assumed for additional analysis. Particle flow went though unplugging section and velocity and mass flow was higher than unplugging case. and particle impact angle was analyzed.

**Key Words** : Coal Fired Power Plant, SCR, Erosion, Deposition, Particle Impact

### 1. 서론

870MW급 석탄화력 보일러 계통 질소산화물(NOx) 저감을 위해 선택적 촉매 환원장치(SCR, Selective Catalytic Reduction)를 사용 중에 있다. 가스 유동을 개선하기 위해 가스 유입 곡관부와 촉매 반응기로의 유입부에 Guide Vane설치되어 있고, 이 가스 유동은 정류기(Rectifier)를 통해 흐름이 개선된 후 유입부에서 함께 분사된 암모니아가 이 가스가 3개의 촉매 층에서 반응 후 질소산화물을 환원시켜 농도를 배출 기준치로 제어하는 장치이다.

현재 국내 보일러 계통과 SCR은 비용절감을 위해 870MW급은 분리발주를 하고 있으며, 기존 석탄화력의 경우 환경 규제치 강화에 따라 SCR을 추가로 설치 운영하기 때문에 분리발주와 같은 상황이다.

그러나, 환경설비를 일괄계약을 통해 설치 할 경우 실전 운영 정보를 활용한 유동해석을 통해 안정적인 운영을 위한 조치를 취할 수 있으나, 분

리발주의 영향으로 협업여건에 따라 Duct 및 촉매층의 마모로 인해 NOx 제거 효율 저하로 환경 배출 기준 준수를 위해 과도한 암모니아 사용량 증대로 보일러 통풍계통 운영 신뢰성을 떨어뜨리고 있다.

### 2. 본론

본 연구에서는 SCR계통의 설계 데이터를 활용하여 모델링을 한 후 실제 운전 데이터를 활용하여 입자 유동의 특성을 연구를 통해 현장 문제점을 분석하였다.

추가적으로 마모의 경우 입자의 강도, 입자량, 충돌 각도 및 속도가 영향을 미치게 되는데, 이를 위해 입자 0.1, 1, 50, 100, 200, 500  $\mu\text{m}$ 를 유동 평가를 통해 퇴적 원인과 이에 따른 마모를 평가하였고, 개선을 위해 촉매 반응기 상부에 Guide를 추가 설치하여 입자 유동이 균일하게 분포하는지를 평가하였다.

연구결과는 다음과 같다. 첫째, 설계조건의 경우에 정류기 바로 아래 영역에서는 안쪽 및 바깥쪽 가장자리 영역에서 가스 유량 및 유속에서 증가함을 보이고 있으나, 촉매 층 가까이에 이르러서는 그 차이가 거의 없어지기 때문에 초기 입자 분포에 의해 안쪽 및 바깥쪽 가

\* 한국남동발전(주) 인제기술개발원

† 연락처자, [hyung122@koenergy.krr](mailto:hyung122@koenergy.krr)

TEL : (070)8898-5780 FAX : (050)-5027-1243



장자리에 퇴적속도가 증가함을 확인하였다.  
 둘째, 실제 조건에서 평가한 결과 정류기 바

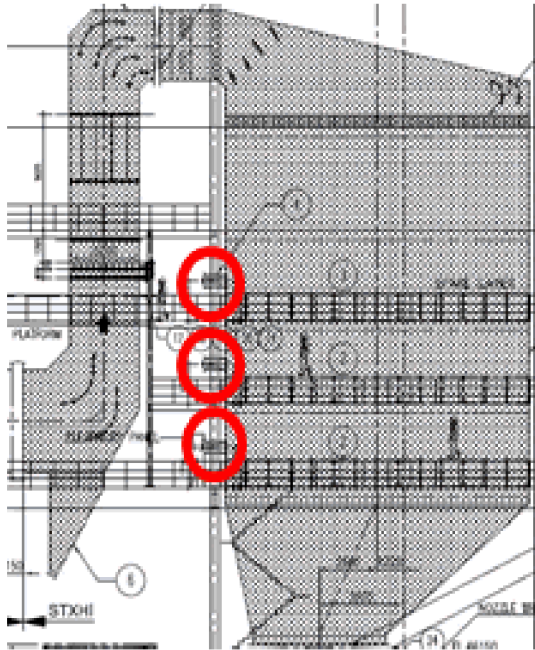


Fig. 1 SCR system & Sonic horn overview

로 아래 영역의 유속 및 유량 분포, 촉매 층 상부의 입자분포가 설계조건보다 더욱 경향성이 짙어짐을 확인하였다.

셋째, 입자의 퇴적은 입자크기가 1 micron보다 작을 경우 경향성이 나타나지 않으나, 입자가 50 micron 이상일 경우 편류가 나타나 퇴적에 영향을 미칠을 알 수 있었다.

넷째, 그러나, 안쪽 가장자리의 경우 Sonic horn이라는 Soot Blowing 설비가 운영 중에 있어, 바깥쪽 가장자리 퇴적 현상만이 현장 점검을 통해 확인 할 수 있었고, 이를 가정하여 바깥쪽 가장자리 촉매 층의 퇴적과 막힘을 가정하여 해석하였다.

다섯째, 그 결과 유동이 막힌 부분이 아닌 안쪽으로 쏠려 유속 및 유량이 설계 및 실제 조건에 비해 증가하였고, 입자의 충돌각도도 58° 정도로 설계 및 실제조건에서의 입자충돌 각도인 85° 에 비해 마모속도가 증가함을 판단할 수 있었다.

여섯째, 이러한 입자 유동의 편류를 개선하기 위해 촉매 층 상부에 1,500 mm, 90°, 80°, 70° Guide를 설치하여 해석한 결과 70° 와 같이 수직보다는 약간은 경사가 있는 Guide가 입자 분포를 균일하게 할 수 있어서 퇴적 및 마모 개선에 유효할 것으로 판단하였다.

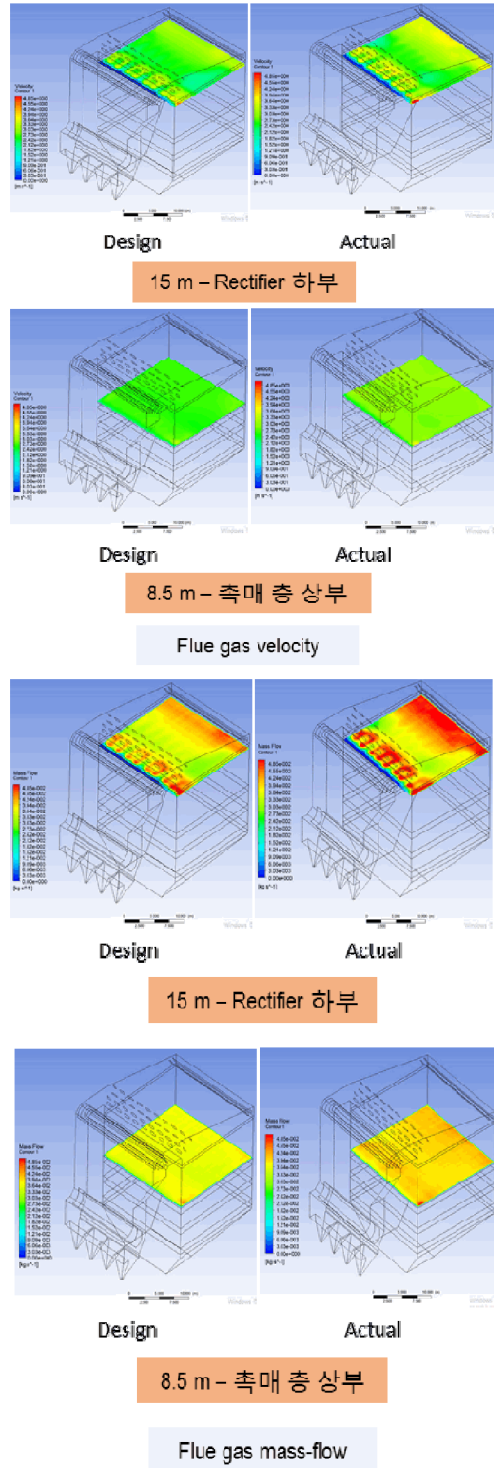


Fig. 2 Gas velocity, mass flow as elevation change

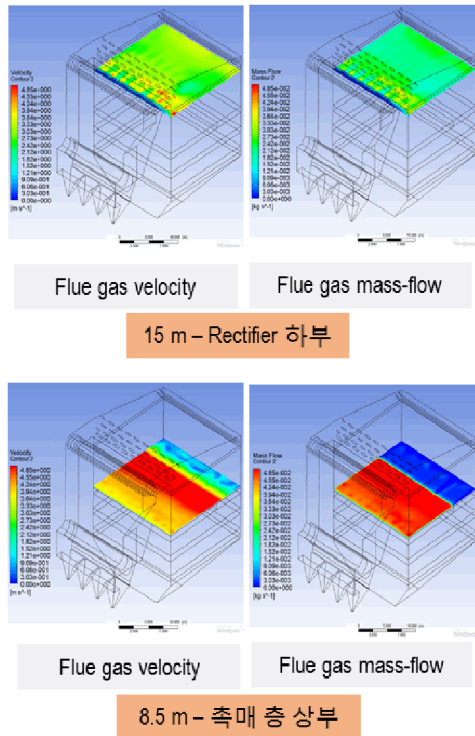


Fig. 3 Gas velocity, mass flow at plugging

### 3. 결론

전체적인 촉매반응기 내에서 촉매 층에 가까울수록 유속 및 유량의 분포가 균일해 지므로 입자 거동 측면에서 입자 분포에 따라 안쪽 및 바깥쪽 가장자리로 Ash가 퇴적이 되고 이를 제거하기 위해 설치한 Soot Blowing시스템은 안쪽에 위치해 있으므로 바깥쪽에 퇴적되는 현상만 관찰되고 있는 것으로 평가되며, 이러한 퇴적현상에 의해 촉매 층 막힘에 의해 유동이 촉매 층 안쪽으로 꺾여 유속, 유량이 증가하고 입자의 충돌 각도가 마모에 유의한 각도로 충돌함에 따라 안쪽 부분에서 마모가 가속화 된 것으로 평가된다.

### 후 기

본 연구는 남동발전 영흥발전본부에서 설비신뢰성 확보를 위한 분석의 일환으로 으로 수행되었습니다.

### 참고 문헌

[1] Kim, J.S, Lee, J.M, KEPRI, “A study on particle and erosion characteristics at CFBC

boiler”, 2001, pp 51~68

[2] Park, B.C, Park, S.J, Cho, H.H, Yonsei University, “Design optimization of guide vane at 870 MW SCR inlet Duct”, 2015

[3] Ming Dong, Sufen Li, Jun Xie and Jian Han, ‘Experimental Studies on the Normal Impact of Fly Ash Particles with Planar Surfaces’, Energies 2013, 6

[4] EPRI, 2007, “Boiler and Heat Recovery Steam Generator Tube Failures: Theory and Practice”, Volume 2, pp 21-1 - 21-27

## Effects of air staging on Exhaust Tube Vortex structure in a swirl-stabilized pulverized coal flame

Kaiwen Deng\*, Xinzhou Li\*, Minsung Choi\*\*, Gyungmin Choi\*†

### ABSTRACT

This paper presents the experimental investigations of the effect of the exhaust tube vortex (ETV) on  $\text{NO}_x$  emission and CO emission. Both exhaust gas and measured by in-furnace gas concentration to understand the shape of ETV in a swirl-stabilized pulverized coal-fired furnace. In order to better understand the shape of ETV, this experiment picked two completely different conditions which generates swirling coal flame derived from co-swirl and counter-swirl through five staging air injection positions. ETV structure can be roughly estimated from the concentration of various gases in the furnace and the burnout ratio of the central axis sample.

Key Words: Exhaust tube vortex, In-furnace gas, Air staged combustion

In the previous studies, the effects of the swirl intensity, coal particle size, burner type, and flame shape on the flow fields, turbulence, flame stability, and combustion efficiency were studied using various laboratory/pilot-scale experimental apparatuses. Although several researchers have observed the ETV structure in swirling flames, studies involving the detailed measurement of the ETV structure and effect using a pulverized coal swirling flame are very scarce. The ETV is a phenomenon that is occasionally occurred at the end of the IRZ along the centerline with a high radial turbulent intensity and forms a hollow-tube structure. In other studies, the ETV is also defined as a central vortex core (CVC). Even the ETV is observed in the gas swirling flame [1], only the structure of the ETV in the open system, its certain conditions of generation mechanisms and expectations to combustion performance were reported. However, no studies have shown the specific effects of ETV on closed systems.

So, the purpose of this study was to directly identify the effect of the ETV in the swirling

flame using a laboratory-scale furnace through detailed measurements such as in-furnace temperature and in-furnace gas concentrations ( $\text{NO}$ ,  $\text{CO}$ ,  $\text{O}_2$  and  $\text{CO}_2$ ). The effects of various air staging position in regard to ETV structure were certified. Describes the flow structure of different air staging injection position in the furnace, such as changes in ETV and IRZ. In addition, the effect of ETV on the combustion characteristics in the furnace and the effect on  $\text{NO}$  emission were investigated. Finally, speculation on the change of ETV structure with different air staging positions to determine the best conditions for the ETV structure.

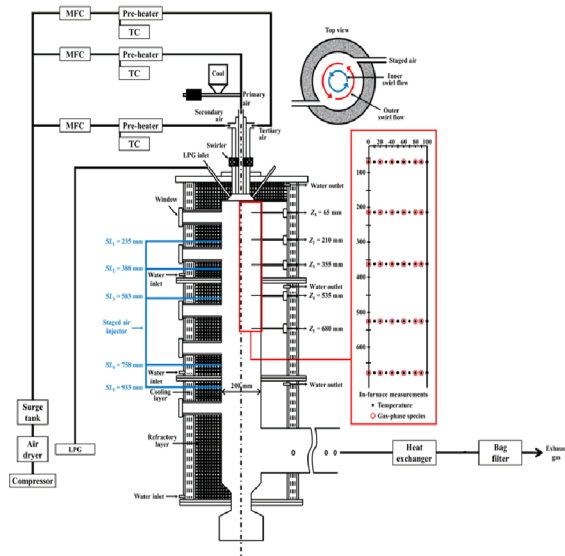
The experimental set-up consists of a 16-kW<sub>th</sub> down-fired swirl burner, a screw-type coal feeder, air- and gas-supply systems, gas measuring equipment, three different air pre-heaters, water-cooled gas-sampling probes, a particle sample collection quenching system, thermocouples, a data logger, and a PC. Further furnace system details have been described in a previous publication [1]. Fig. 1 is the schematic diagram of the pulverized coal fired furnace and the distribution of temperature measurement points.

In this research we used an Australian bituminous coal (GC, glencore), and 60° -60° co-swirl and 60° -60° counter-swirl to finish this research. The other operating parameters under conditions of air staging and unstaging

\* School of Mechanical Engineering, Pusan National University, Busan 46241, Republic of Korea

\*\* Department of Clean Fuel and Power Generation, Korea Institute of Machinery & Materials (KIMM), Daejeon 34103, Republic of Korea

E-mail address:chiogm@pusan.ac.kr(G.Choi).



LPG flow rate (kg/h)	0.626	
Total air mass flow rate (kg/h)b	21.417	
Primary air mass flow rate (kg/h)b	0.723	
Secondary air mass flow rate (kg/h)b	8.924 (unstaging), 8.028 (staging)	
Tertiary air mass flow rate (kg/h)b	12.493 (unstaging), 11.240 (staging)	
Staging air mass flow rate (kg/h)b	0 (unstaging), 2.149 (staging)	
Temperature of primary air (K)	338	
Temperature of secondary air (K)	573	
Temperature of tertiary air (K)	573	
Temperature of staging air (K)	323	
Secondary air swirl number (vane angle, °)	1.37 (60)	1.37 (60)
Tertiary air swirl number (vane angle, °)	1.50 (60)	1.50 (60)

Fig. 1. (a) schematic of the laboratory pulverized coal-fired furnace and in-furnace sampling points

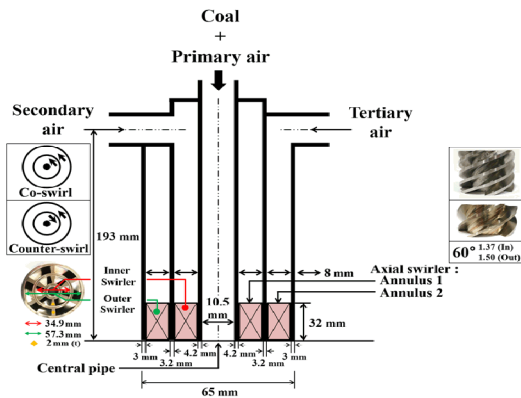


Fig. 2.(B) The concrete structure of swirl burner

are summarized in Table 1

Table 1

The operating conditions of the pulverized coal-fired furnace

Parameter	Sco, 1.37/ 1.50	Sct, 1.37/1.5 0
Thermal input for solid fuel (kW)	8	
Thermal input for LPG (kW)	8	
Total thermal input (kW)	16	
Overall stoichiometric ratio, SRO	1.15	
Primary zone stoichiometric ratio, SRI	1.15 (unstaging), 0.9 (staging)	
Coal feeding rate (kg/h)	1.096	

As we can see, the Fig. 3 shows the effect of with strong ETV (left-hand side) and without ETV (right hand side) combustions. According to Fig. 3, the peak temperature is similar, but co-swirl unstaging case has bigger high-temperature field than counter-swirl. The reason is because they has different IRZ structures. According to the previous work [2,3], the co-swirling combination has a heart-shaped IRZ and the counter-swirling combination has an elongate-shaped IRZ, As in other studies, the co-swirl combustion is changed the burner aerodynamics, the flame moves to the upstream region. on the other hand counter-swirl and co-swirl are the opposite. there is almost no burning of coal particle near the burner outlet. As mentioned in [4], the ETV forms a hollow-tube structure controlled by the swirl intensity. So co-swirling combustion has the most concentrated partial high-temperature zone along the centerline in the swirling flame. However, under a counter-swirling combination ETV does not form, because counter-rotating forces destroy the co-rotating flows.

Fig. 4 shows the in-furnace temperature contours of the  $SL_1$ ,  $SL_2$ ,  $SL_3$  and  $SL_4$  combustion for co-swirl burner. We can clearly observe that the temperature distribution of  $SL_3$ ,  $SL_4$  is wider than  $SL_1$ ,  $SL_2$ . Because the airflow from air staging injection port 1 and 2 changed the flame structure,

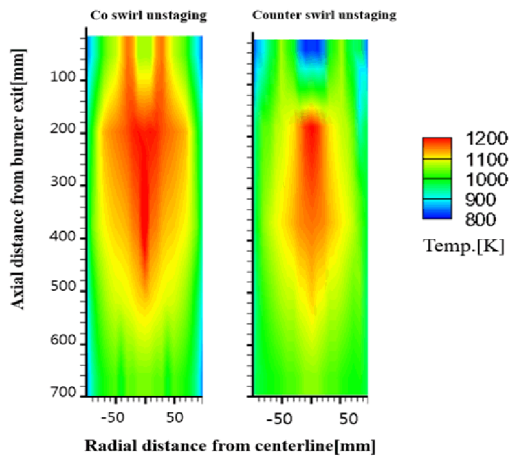


Fig. 3 In-furnace temperature contours of co swirl and counter swirl coal flames for unstaging combustions

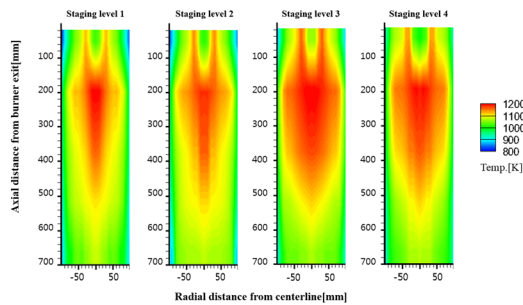


Fig. 4 In-furnace temperature contours of co-swirl coal flames for air staging at  $SL_1$ ,  $SL_2$ ,  $SL_3$  and  $SL_4$  combustions.

breaks or weakens ETV structures. However,  $SL_3$  and  $SL_4$  increases the residence time of the coal particle without changing the flame structure. So, if air staging port position is inappropriate, too far away from the primary combustion zone, the shortage of  $O_2$  supply causes a greater increase in burnout time. Extending the residence time of pulverized coal in the furnace cannot compensate for the increase of burnout time, so the burnout rate will decrease in air-staged combustion [5] too close to the primary combustion zone, the flame structure will be changed.

As shown in Fig. 5. It shows 2-D maps of the in-furnace NO concentration of all the case, from this it can be inferred that the effect of air staging on the flame structure in the furnace. When counter swirl unstaging combustion is applied, the region of vary low NO concentrations near the burner exit. And

the primary combustion zone is slightly downstream relative to the co swirl unstaged combustion. In addition, co-swirl staging  $SL_1$  and staging  $SL_2$  produced high concentrations of NO on the centerline from  $Z_1 = 65$  mm to  $Z_3 = 355$  mm, as shown in Fig. 5(c) (d). On the other hand co-swirl unstaging, air staging  $SL_3$  and air staging  $SL_4$  produces a relatively low concentration of NO on the centerline. In this three cases, the concentration of NO at the central axis from  $Z_2 = 210$  mm to  $Z_3 = 355$  mm was lower than that outside the central axis. Because the ETV could also be favorable for  $NO_x$  reduction based on the oxygen deficient, fuel-rich concept as a result of the coal particles being concentrated at the peripheral region of the ETV because of its hollow-tube structure [6]. So there was no ETV structure or weak ETV structure in the counter swirl unstaging, co-swirl staging  $SL_1$  and staging  $SL_2$  combustion. For the counter swirling combustion, the ETV does not form because counter-rotating forces destroy the co-rotating flows. For the co-swirl air staging combustion, air staging injection position too close to the burner exit changes the flame structure and destroys the ETV structure. In order to confirm the position of ETV, co-swirling unstaging combustion is the best condition. It can be observed that the position of the ETV is 140 mm to 400 mm by the range of the in-furnace NO concentration of the reduced portion. For the co-swirl air staging  $SL_3$  condition, ETV positions are approximately 0 mm to 580 mm. For the co-swirl air staging  $SL_4$  condition, ETV positions are approximately 160 mm to 500 mm. Since there is no means for directly observing the flame structure in the furnace, it is currently only possible to speculate through the concentration of the in-furnace gas, And because of the instability of the flame, the ETV position is just a range.

Fig. 6 shows the NO and CO concentrations of different swirl combinations with various staging air injection positions. For all the co-swirling combinations the role of the ETV that generated from increase UBC and reduces CO concentration. Co-swirl air staging  $SL_3$  condition has the strongest ETV structure, so comprehensive NO and CO concentration

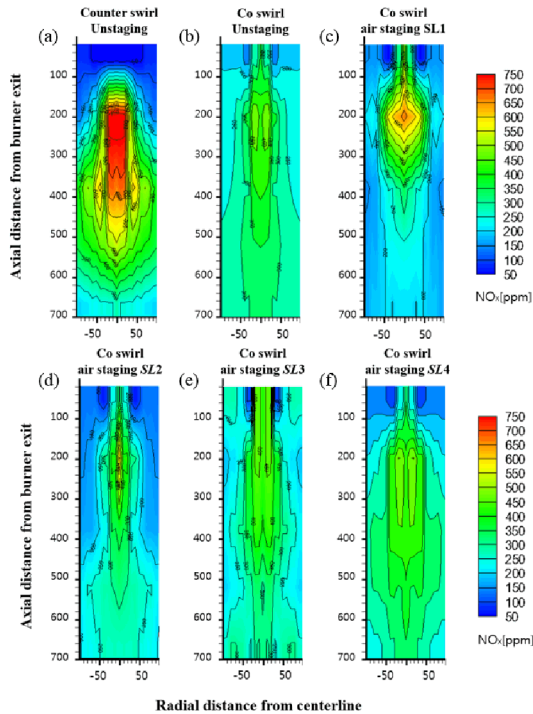


Fig. 5. In-furnace NO concentrations of co swirl and counter swirl coal flames for unstaged and staged combustion.

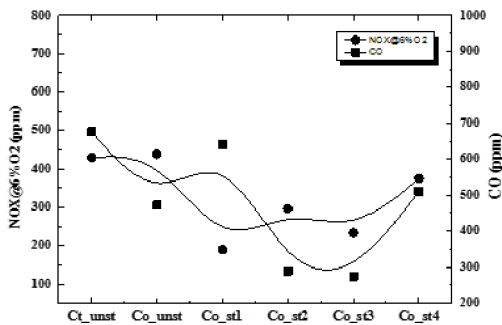


Fig. 6. NO and CO concentrations at furnace outlet

performance from all swirl combinations show that co-swirl air staging  $SL_3$  condition is the most favorable condition for reduction efficiency at whole air staging. The CO and NO gas concentration increase in air staging  $SL_4$  position, because the position of port 4 is too far from the primary combustion area, resulting in insufficient oxygen supply and incomplete combustion.

## ACKNOWLEDGMENT

This work was supported by the Human Resources Development program (No. 20184030202060) of the Korea Institute of Energy Technology Evaluation and Planning (KETEP) grant funded by the Korea government Ministry of Trade, Industry and Energy.

## Reference

- [1]St hr M, Boxx I, Carter CD, Meier W. Experimental study of vortex-flame interaction in a gas turbine model combustor. *Combust Flame* 2012;159:2636-49.
- [2]Sung Y, Choi G. Non-intrusive optical diagnostics of co- and counter-swirling flames in a dual swirl pulverized coal combustion burner, *Fuel* 2016;174:76-88.
- [3]Choi M, Li X, Kim K, Park Y, Sung Y, Choi G. Analysis of impact factors for exhaust tube vortex flame generation in methane-assisted pulverized coal swirling flames. *Appl Therm Eng* 2019;157:113550.
- [4]Sung Y, Choi M, Lee S, Lee G, Shin M, Choi G, Kim D. Generation mechanisms of tube vortex in methane-assisted pulverized coal swirl flames. *Fuel Process Technol* 2017;156:228-34.
- [5]Fan w, Lin z, Kuang j, Li y. Impact of air staging along furnace height on NOx emissions from pulverized coal combustion. *Fuel Processing Technology* Volume 91, 2010, Pages 625-634
- [6]Y Sung, M Choi, S Lee, G Lee, M Shin, G Choi. Generation mechanisms of tube vortex in methane-assisted pulverized coal swirling flames. *Fuel Processing Technology* Volume 156, 2017, Pages 228-234.

# 천연가스 열량저하에 따른 국내 기존 가스터빈 연소기 연료호환성 및 외국사례 검토

이중성\*,김동민\*

## Review of Fuel Interchangeability of Domestic Gas Turbine Combustor and Foreign Case Study due to Lower Natural Gas Heating Value

Joongsung Lee\*, Dongmin Kim\*

### ABSTRACT

천연가스시장은 고열량의 천연가스가 줄어들고 비전통가스, PNG 등 저열량의 천연가스가 늘어나고 있다. 과거 국내 표준열량을 유지하기 위한 고열량 천연가스만을 선별수입 해야 하는 비용가중과 표준열량을 맞추기 위한 LPG 증열에 의한 추가비용들이 소비자에게 부담 되고 있어 이러한 비용을 줄이기 위해 국내 천연가스 열량제도를 현행 표준열량제 43.543MJ/Nm<sup>3</sup>(10,400kcal/Nm<sup>3</sup>)에서 2012. 7.1 부터 준비기간을 거쳐 2015년 이후는 41.031MJ/Nm<sup>3</sup>~44.380MJ/Nm<sup>3</sup>(9,800~10,600kcal/Nm<sup>3</sup>)열량범위제도로 변경 추진하였다.

공급 천연가스의 저열량화와 열량범위제도의 변경 추진에 따라 기존 발전사에 공급하는 최저열량기준[42.136MJ/Nm<sup>3</sup>(10,064kcal/Nm<sup>3</sup>)]이 41.031MJ/Nm<sup>3</sup>(9,800kcal/Nm<sup>3</sup>)로 낮아져 기존 최저열량보다 낮게 공급할 수 있게 되었다. 열량변화에 민감한 발전분야의 기존 가스터빈 연소기 운전안전성 확보 측면에서 42.136MJ/Nm<sup>3</sup>이하 저열량을 공급하기 전에 가스터빈제작사별 터빈연소기의 연료호환성 및 저열량 영향을 제작사, 발전사 및 가스공급사가 중심이 되어 검토하였다.

본 연구에서는 가스터빈제작사별로 열량제도 변경에 따른 문제점 및 기기조정방안에 대한 질의와 제작사별 답변서 검토를 통해 제작사의 터빈연소기 모델별로 열량변화에 대한 민감성 즉 호환성 및 영향을 발전사와 협의를 통해 발전용 가스기기의 기기조정 세부 방안을 마련하여 제도변경 이전에 설치 운행되고 있는 국내가스터빈의 연료의 저열량화에 따른 대응 방안을 제시하고자 하며, 이와 비슷한 외국사례의 경우를 통해 향후 대응 및 개선방안을 제안하고자 한다.

**Key Words** : Interchangeability, Gas turbine combustor, Lower natural gas heating value

\* 한국가스공사 가스연구원

† 연락처자, [jslee@kogas.or.kr](mailto:jslee@kogas.or.kr)

TEL : (032)810-0321 FAX : (032)-810-0330

## 500MW급 석탄 보일러 Digital Twin 구축을 위한 ROM 인자의 영향 연구

이우진\*, 장권우\*, 한우주\*, 허강열†

### Analysis of the Effect of ROM Parameters for Construction of a Digital Twin for a 500MW Coal Boiler

Woojin Lee\*, Kwonoo Jang\*, Woojoo Han\* and Kang Y. Huh\*†

#### ABSTRACT

To construct a simulation based digital twin, a reduced order model (ROM) with CFD was built in a 500MW coal boiler. The effects on the number of snapshots and the number of modes to build a ROM were evaluated. In addition, the accuracy of the regression model for obtaining the amplitude coefficient was calculated and compared between the regression models. The built ROM model shows good agreement with the result of conventional CFD for a 500MW coal boiler in a short working time.

**Key Words** : Coal Combustion, Reduced Order Model, Coal Boiler, Regression

Reduced Order Model (ROM)은 해석 대상이 복잡하고 계산 시간이 오래 소요되는 진산 해석을 단순화 하기 위해 사용된 이론이다. 수치해석 및 다양한 역학에 대한 지식이 필요한 Computational Fluid Dynamics (CFD) 및 Computational Solid Dynamics (CSD) 등에 활용될 수 있으며, 최근 4차 산업혁명에 따른 산업의 요구와 함께 Digital twin의 개발에도 ROM을 적용한 Simulation 기술을 기반으로 진행되고 있다. ROM을 이용하여 Digital Twin을 구축할 경우, 빠른 시간 내에 적은 오차로 CFD를 계산한 것과 같은 필드를 구현할 수 있다.

ROM을 구축하는 이론 중 하나인 Proper Orthogonal Decomposition (POD)는 데이터 분석에 많이 사용되고 있으며 분야에 따라 Principal Component Analysis (PCA), Singular Value Decomposition (SVD), Karhunen-Loeve Decomposition의 명칭으로 사용되고 있다 [1]. POD는 아래와 같이  $S$  개의 변수 공간의 조합 ( $\mathbf{p}_i, i = 1, 2, \dots, M$ ) 에서 Latin Hypercube Sampling (LHS)에 의해 Sampling 된 임의의 변수 조합  $K$  개에 의해 계산된 해들의 행렬  $\mathbf{T}$

(Snapshot Matrix)의 주성분 분석 (PCA)을 통해 얻을 수 있다. Snapshot 행렬  $\mathbf{T}$ 를 특이값 분해 (SVD) 할 경우, 이의 주성분 vector의 행렬  $\Phi = [\phi_1, \dots, \phi_N]$  과 Amplitude Coefficient 행렬  $\mathbf{A}$  ( $N \times M$  matrix) 은 다음과 같은 관계를 갖는다 [2].

$$\mathbf{T} = \Phi \cdot \mathbf{A}$$

여기서, Amplitude Coefficient 행렬  $\mathbf{A}$  는 특이값 분해로 얻은 주성분 vector 행렬  $\Phi$  의 전치 (transpose) 행렬과 Snapshot 행렬  $\mathbf{T}$  의 곱으로 나타낼 수 있다.

$$\mathbf{A} = \Phi^T \cdot \mathbf{T}$$

$K$ 개의 임의의 변수 조합  $\mathbf{p}_i$  ( $i = 1, 2, \dots, K$ ) 에 대한 Amplitude Coefficient를 이용하여 회귀 분석 (Regression Analysis) 을 통해 모든 변수 조합  $\mathbf{p}_j$  ( $j = 1, 2, \dots, M$ ) 의 Amplitude Coefficient를 구한다. 회귀 분석은 Kriging, Neural Network 등을 이용할 수 있다. 회귀 분석을 통해 특정 변수 조합의 Amplitude Coefficient를 주성분 vector와 곱하여 해당 변수에서의 해석 결과  $\mathbf{u}_i$  (Snapshot) 를 얻을 수 있다.

\* 포항공과대학교 기계공학과

† 연락처, [huh@postech.ac.kr](mailto:huh@postech.ac.kr)

TEL : (054)279-2841 FAX : (054)-279-3199



이번 연구에서는 위의 방법론을 활용하여 발전소에서 운용 중인 500MW급 미분탄 보일러의 CFD 계산에 적용하였다. Fig. 1은 계산에 사용된 500MW급 미분탄 보일러의 형상과 단면 1의 격자를 나타낸다. Table 1은 CFD 계산에 사용된 model의 정보를 나타낸다. 차수 축소 모델(ROM)을 구축하기 위해 적용된 변수는 Total secondary air flow rate와 Burner zone Stoichiometric ratio의 두가지 변수를 조작하여 온도장을 계산하였고, 각각 21등분 하여 총 441개의 변수 조합  $p_i$ 이 고려되었다. Fig. 2는 이번 연구에서 사용할 변수 조합  $p_1, \dots, p_{20}$ 과 3가지의 임의의 검증 조합을 그래프로 나타내었다. Snapshot의 개수를 결정하기 위해 모든 주성분 vector를 활용하여 Snapshot 개수에 대한 민감도를 계산하여 Fig. 3에 나타내었다. 대개 많은 격자 수에 의해 Snapshot 행렬의 고유값(Eigenvalue,  $\lambda_i$ )을 구하는 과정은 계산 복잡도가 높기 때문에 원본 데이터로부터 에너지가 일정 수준에 도달할 때까지의 주성분 vector만을 활용한다. 이때,  $K$ 번째까지 vector의 에너지가 축적되는 정도를 Relative Information Content (RIC) index로 나타낼 수 있다. [3]

$$RIC(K) = \frac{\sum_{i=1}^K \sigma_i^2}{\sum_{i=1}^M \sigma_i^2} \times 100 (\%)$$

본 연구에서는  $RIC(K) \geq 99\%$ 를 만족하는 가장 작은  $K$ 를 구하여 기존의 Snapshot을 다음과 같이 절단된 Snapshot 행렬  $\hat{T}$ 과 절단 오차  $\epsilon_M^j$  (Truncation error)의 합으로 나타낼 수 있다.

$$T = \sum_{j=1}^K \sigma_j u_j v_j^T + \sum_{j=K+1}^M \sigma_j u_j v_j^T = \hat{T} + \epsilon_M^j$$

Fig. 4는 각 주성분 벡터의 고유값과 각 단면에서의  $RIC(K)$ 를 나타낸다. 위에서 구한  $K$ 를 이용하여 절단된 Snapshot 행렬을 계산하고, Regression-Kriging을 이용하여 ROM을 구축하였다. 같은 조건에서의 CFD 결과를 검증 케이스 3가지와 비교하여 결과를 Fig. 5에 나타내었다. 단면 1에서의 ROM 결과와 CFD 결과를 온도 및 산소의 질량 분율에 대해 Fig. 6에 나타내었다.

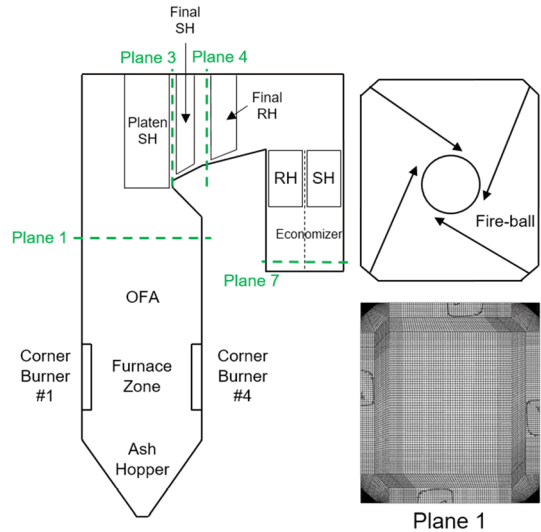


Fig. 1 Schematic configuration and computational mesh of a 500MW pulverized tangentially fired boiler

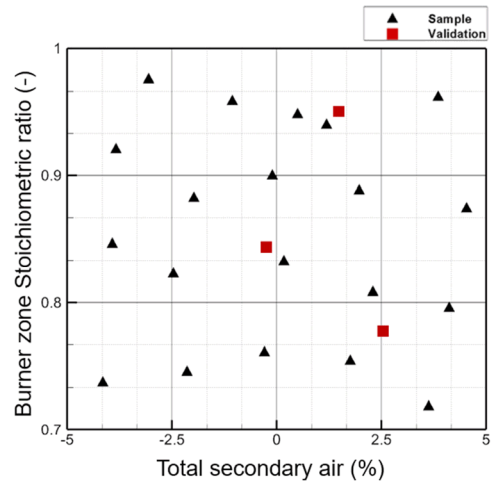


Fig. 2 20 Snapshot points and 3 validation points for construction ROM

Table 1 Sub-models in modeling

Simulation code	OpenFOAM
Radiation	P-1 with WSGGM
Turbulence	Realizable k-ε
Gas reaction	1-step EDM
Char	Kinetic / Diffusion limited

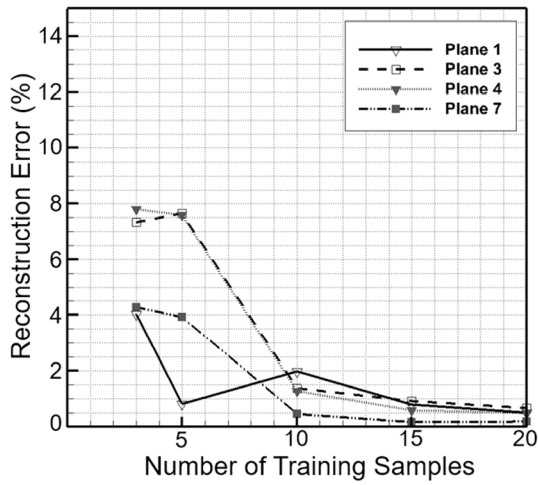


Fig. 3 Sample number independency test about 4 different planes

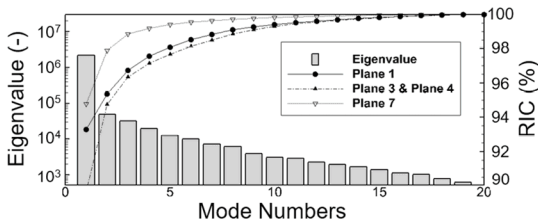


Fig. 4 Eigenvalues per mode (Plane 1, bar) and RIC per Plane (line)

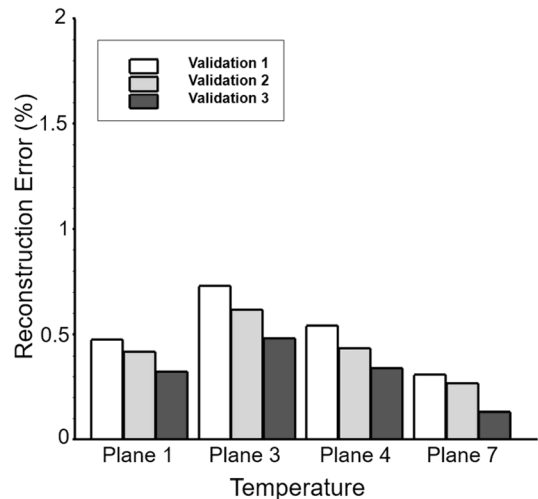


Fig. 5 Reconstruction error for each plane about temperature

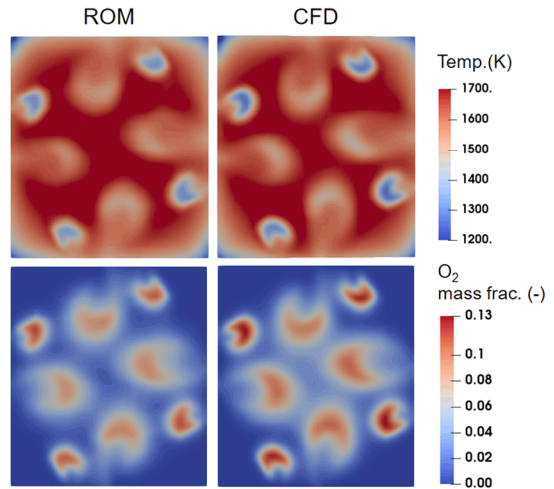


Fig. 6 Contour of temperature and O<sub>2</sub> mass fraction for ROM (left column) and CFD (right column)

## 후 기

본 연구는 산업통상자원부 에너지국제공동연구사업의 일환(20188500000470)으로 수행되었습니다.

## 참고 문헌

- [1] S. Freitag, B.T. Cao, J. Ninic and G. Meschke, "Recurrent neural networks and proper orthogonal decomposition with interval data for real-time predictions of mechanized tunneling processes", Computers and Structures, Vol. 207, 2018, pp. 258-273.
- [2] V. Buljak and G. Maier, "Proper Orthogonal Decomposition and Radial Basis Functions in material characterization based on instrumented indentation", Engineering Structures, Vol. 33, 2011, pp. 492-501.
- [3] M.D. Gunzburger, "Flow control", Springer, Berlin, 2012 .

## 난류 제트에서 Scalar Dissipation Rate 의 통계학적 특성

Vlad Aparece-Scutariu\*, Edward S Richardson\*\*, 신동혁†

### Scalar Dissipation Rate Characteristics in Steady and Unsteady Turbulent Round Jets

Vlad Aparece-Scutariu\*, Edward S Richardson\*\*, Dong-hyuk Shin†

#### ABSTRACT

The scalar dissipation rate (SDR) quantifies the mixing-rate between a turbulent jet and ambient fluids and is essential for modeling turbulent non-reacting/reacting flows. This study investigates SDR characteristics using Direct Numerical Simulation (DNS). For the steady-state jet, radial profiles of ensemble-averaged SDRs exhibit self-similar behaviours. The SDR is highest at the centreline, remains plateau at small radii, decreasing gradually at larger radii. The starting jet shows increased SDR values near the leading vortices, while recovering to steady-state jet values afterwards.

**Key Words** : Scalar dissipation rate, Direct Numerical Simulations, Turbulent jets

Characterisation of scalars mixing in turbulent jets remains a complex problem, yet fundamentally important for understanding the basic processes occurring in many applications such as combustion, pollutant emissions from industrial smokestacks or volcanic eruptions. In combustion applications, two streams of fluids, fuel and oxidizer, are introduced in a combustion chamber. Then, the two fluids need to be mixed at a right ratio for desired engine performances.

Mixing processes in combustion are represented by two scalar variables, mixture fraction and scalar dissipation rates (SDR). Mixture fraction, denoted as  $\xi$ , is a conserved scalar defined as the fraction of the fluid mass originating from the fuel stream. Scalar dissipation rate, denoted by  $\chi$ , represents the rate of mixing, related by the gradient of the mixture fraction. For a mixture with equal diffusivities  $D$  for all chemical species, SDR is defined as:

$$\chi = 2D(\nabla\xi)^2 \quad (1)$$

In non-premixed combustion systems, where the rate of chemical reaction is limited by the rate of mixing of fuel and oxidiser, the

ensemble-average SDR is directly related to the mean reaction rate [1]. SDR also characterises how the turbulent straining of the fluid affects chemical processes within the flame [2-3] and thereby has a critical influence on extinction and ignition phenomena [4]. SDR-based turbulent combustion models typically requires additional submodels such as conditionally-averaged SDR by mixture fraction and presumed probability density function of SDR.

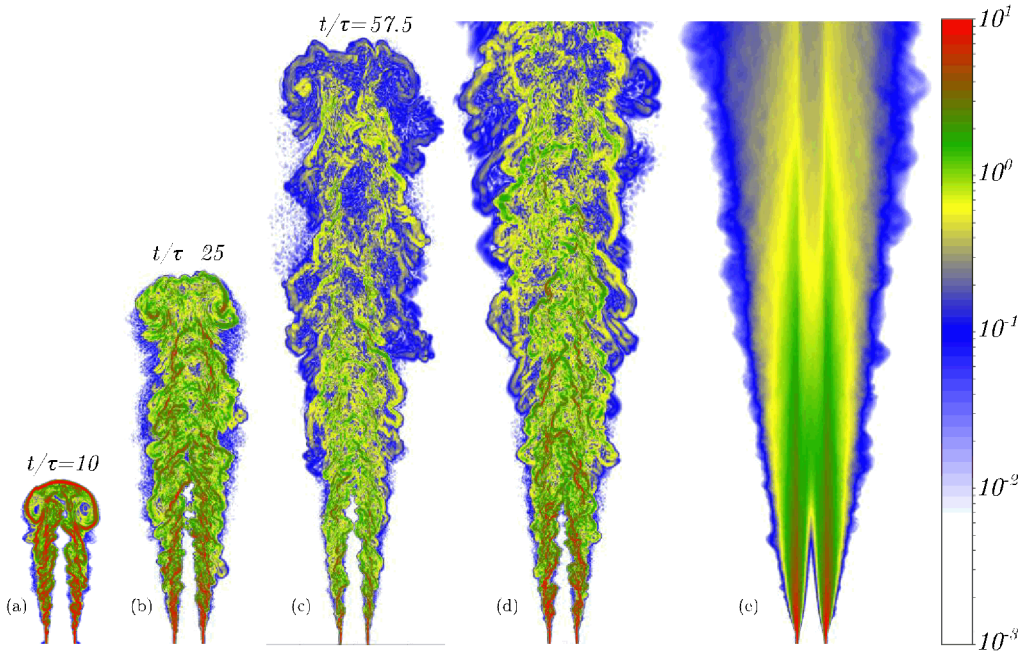
Turbulence between different fluid streams acts to fold and stretch the diffusive interface, producing thin structures with relatively high scalar dissipation rate. Repeated folding and stretching of the scalar interface would act to increase scalar gradients exponentially, until the scalar length scale reduces to a viscous limit such as the Batchelor or Kolmogorov scale, resulting in a log-normal distribution of SDR [5-6]. The probability density function (PDF) of SDR for passive scalars has been found to be approximately log-normal in round turbulent jets, with deviations attributed to anisotropy [7]. Additional deviations from the log-normal distribution scalar dissipation rate arise in the case of chemically-reacting scalars for which reaction generate steep gradients at small scales [8].

Measuring SDR experimentally in turbulent flows are challenging because it requires three components of the scalar gradient within structures that are in the size of Kolmogorov or

\* School of Engineering, the University of Edinburgh, UK

\*\* Faculty of Engineering and Physical Sciences, University of Southampton, UK

† Korean Advanced Institute of Science and Technology (KAIST), donghyuk.shin@kaist.ac.kr  
TEL : +82-42-350-3732 FAX : +82-42-350-3732



**Figure 1:** Non-dimensionalised scalar dissipation rate: (a) – (c) starting jet time instances, (d) steady state instantaneous snapshot, (e) steady state time-averaged.

Batchelor scales. Furthermore, such measurements are prone to experimental noise [9]. Notwithstanding these difficulties, numerous diagnostic developments have contributed to the measurements of passive and reactive scalar gradients in one [10], [11] or two dimensions [12]. However, for a complete description of scalar mixing, measurements in three dimensions are necessary, yet these remain a difficult task to carry out experimentally.

On the theoretical side, Peters & Williams [13] proposed a model for the ensemble-averaged SDR assuming that it can be related to the gradient of the ensemble-averaged mixture fraction. The key features of the model are: (i) employing a turbulent diffusivity ( $\nu_t/Sc_t$ ) and (ii) assuming the derivatives in the streamwise and azimuthal directions are negligible, leading to

$$\bar{\chi} = (2\nu_t / Sc_t) \left( \partial \bar{\xi} / \partial r \right)^2, \quad (2)$$

where  $Sc_t$  is the turbulent Schmidt number and  $\nu_t$  is the turbulent kinematic viscosity.

With ever increasing computational capabilities, nowadays, DNS has become able to resolve flows at higher Reynolds numbers. As such, it is possible to obtain the instantaneous scalar field

in three-dimensions at a wide range of locations, allowing for experimental assumptions and theoretical models to be assessed.

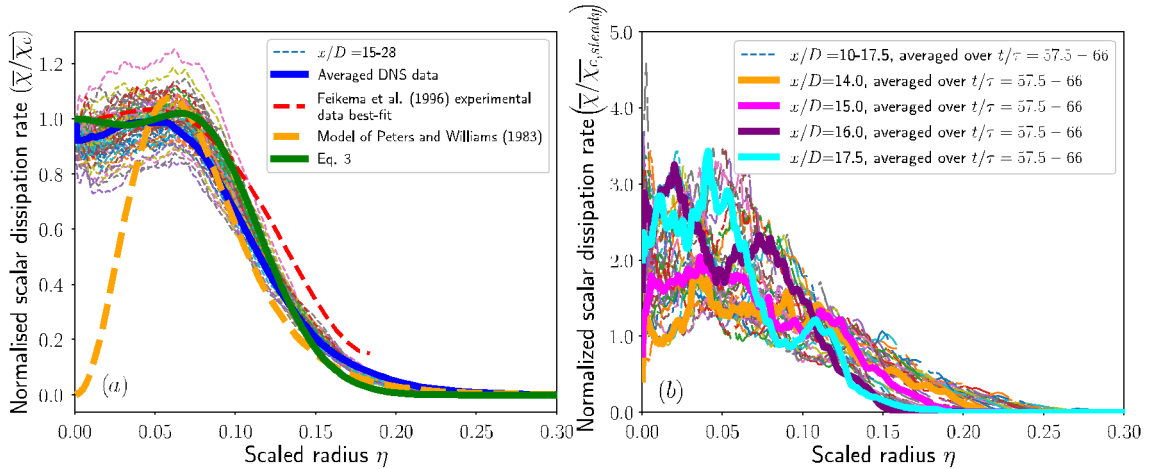
The simulations are conducted using a compressible DNS code, HIPSTAR [14]. The flow domain uses a structured grid stretched in the downstream direction with a cylindrical configuration. A 4<sup>th</sup> order central finite difference scheme is used for the stream-wise and radial directions, and a spectral decomposition is used in the azimuthal direction. The fluid is treated as a perfect gas, having the same temperature and density as the ambient fluid. The Reynolds number is 7 300 and the initial Mach number of the jet fluid is 0.304. Figure 1 shows a snapshot of SDR for the steady-state jet and three instances of the starting jet. The steady-state jet is established after 540 characteristic jet times ( $\tau$ ) where  $\tau = D/U_0$  with  $D$  as the jet inlet diameter and  $U_0$  the inlet jet velocity. In addition to the steady-state jet, three realisations of a starting jet were simulated. For the latter, a step change in the inlet velocity occurs at time  $t/\tau = 0$  from 0 to  $U_0$ . The jet is allowed to evolve for  $66\tau$  when the leading vortices reach at around  $26D$  downstream. Along with the fluid flow equations,

the transport equation for mixture fraction is solved and used to evaluate SDR. A more detailed description about the code and setup can be found in Shin *et al.* [15].

As shown in Figure 1, SDR decreases with downstream distance. Near the inlet region, strong gradients are present, indicating intense mixing between the jet and ambient fluids. Further downstream, mixing becomes less

from the inlet and  $X_0$  being the virtual origin with the value of  $2.39D$  for this simulation. As such, the scaled radius is defined as  $\eta=r/x$ .

SDR profiles for the steady-state jet (Figure 2a) at different  $x$ -locations show a scatter among the dashed lines, however the scatter is narrow, indicating that self-similarity exists. There are two main possible reasons for the scatter: (i) noise in the centreline values which is used to



**Figure 2** Radial profiles of the mean scalar dissipation normalised by centreline values for (a) steady-state jet and (b) starting jet.

intense, and SDR values are much decreased – note that SDR is coloured in log-scale. Moreover, the inlet region contains temporally and spatially coherent turbulent structures aligned at angles of  $45^\circ$  to  $75^\circ$  across where intense scalar mixing occurs. The angles are consistent with the observation by Feikema *et al.* [7] who explained that the counter-clockwise rotation of vortices at the interface between the jet and ambient fluids causes this. The rotation engulfs the ambient fluid radially inward in a location that is immediately upstream of each vortex and then convects the fluid downstream. As such, strong mixing occurs at the boundary of these regions, highlighted by dark red colour in Figure 1.

Radial profiles of SDRs for steady-state and starting jets are shown in Figure 2 a-b. In the Figures, the ensemble-averaged SDRs are scaled by their respective centreline values, denoted by  $\overline{X_c}$ . The radius is scaled by the downstream distance  $x$ , where  $x=X-X_0$ ,  $X$  being the distance

normalise the radial profiles and (ii) the gradual development of self-similarity along the axial direction. Therefore, SDR profiles start to become self-similar at around  $x/D=15$ . Experimental investigations of Feikema *et al.* [7] on a gaseous propane jet, suitable for comparison with present simulation data, indicate the same general profiles behaviour with a decrease in dissipation in vicinity of the centreline, at small radii, followed by an increase and a peak in the shear layer region and a gradual decrease closer to the interface with ambient fluid. Figure 2b shows the short time-averaged SDR of the starting jet. The band of time average is chosen close toward the end of the simulation, in order to make sure SDR profiles upstream of the leading vortices region tend towards a quasi-steady-state. The averaged SDR is then normalised by their respective centreline values from the steady-state jet. As estimated in Figure 1c, the leading vortices are at around  $x/D=16.5-17.5$  at  $57.5\tau$ . Increased SDR values for the

leading vortices region of the jet (at  $x/D=16$  or  $17.5$ ) are followed by a slow decay towards steady-state jet SDR profiles (at  $x/D=14$  or  $15$ ). The overall shape of profiles show a steeper decay with increasing radius compared to the steady-state jet. This is confirmed by observing the strong gradients in the starting jet at the leading vortices (Figure 1a-c).

For the self-similar region of the steady-state jet, an improved model for the ensemble-averaged SDR is developed. This extends from the analysis of Peters & Williams [13] for species production in turbulent diffusion flames and makes use of the available three-dimensional SDR data.

Analysis of the three SDR components indicates that axial and radial mixing occurs at similar intensity while the azimuthal mixing is twice as intense when compared to the first two. This allows Eq. (1) to be rewritten as:

$$\chi = (8v_t / Sc_t) \cdot (\partial \bar{\xi} / \partial x)^2 \quad (3)$$

The axial derivative in Eq. 3 can be expressed based on an existent analytical relation for the mean mixture fraction profile as:

$$\partial \bar{\xi} / \partial x = (\bar{\xi}_c / x) \cdot f(\eta, \alpha, \beta) \quad (4)$$

where  $\bar{\xi}_c = c_1 D/x$  and  $f(\eta, \alpha, \beta)$  is:

$$f(\eta, \alpha, \beta) = \exp(-\gamma_t Sc_t \eta^2) \cdot [-\alpha + \beta(\gamma_t Sc_t \eta^2)] \quad (5)$$

From the existing DNS data,  $\gamma_t$  is 90, while the non-dimensionalised fluid kinematic viscosity and turbulent Schmidt number are given as  $\nu_t=1.37 \times 10^{-4}$  and  $Sc_t=0.72$ . Figure 2a, Eq. 3 agrees better with the mean SDR radial profile for the steady-state jet, especially in the vicinity of the centreline, while the model by Peters & Williams [13] approaches zero.

## Review

This work has been carried out with the support of the Engineering and Physical Sciences Research Council in the United Kingdom, grants EP/N509644/1, EP/R029369/1 and EP/L002698/1, EP/K024876/1, and KAIST.

## References

- [1] R. W. Bilger, "The structure of diffusion flames.", *Combust. Sci Technol*, Vol. 13, 1976.
- [2] F. A. Williams, "Recent advances in

theoretical descriptions of turbulent diffusion flames.", *Turbulent mixing in nonreactive and reactive flows*, 1975.

[3] N. Peters, "Laminar diffusion flamelet models in nonpremixed turbulent combustion." *Progress in energy and combustion science*, Vol. 10, 1984.

[4] E. B. Mastorakos, T. A. Baritaud, T. J. Poinot, "Numerical simulations of autoignition in turbulent mixing flows.", *Combust. Flame*, Vol. 109, 1997.

[5] A. M. Oboukhov, "Some specific features of atmospheric turbulence.", *J Fluid Mech*, 1962.

[6] A. N. Kolmogorov, "A refinement of previous hypotheses concerning the local structure of turbulence in a viscous incompressible fluid at high reynolds number" *J Fluid Mech*, Vol. 13, 1962.

[7] D. A. Feikema, D. Everest, J. F. Driscoll, "Images of dissipation layers to quantify mixing within a turbulent jet," *AIAA journal*, Vol. 34, 1996.

[8] E. S. Richardson, R. Sankaran, R. W. Grout, J. H. Chen, "Numerical analysis of reaction-diffusion effects on species mixing rates in turbulent premixed methane-air combustion." *Combust. Flame*, Vol. 157, 2010, pp. 506-515.

[9] N. Soulopoulos, Y. Hardalupas, A. M. K. P. Taylor, "Scalar dissipation rate measurements in a starting jet.", *Exp. fluids*, Vol. 55, 2014, pp. 1685.

[10] R. A. Antonia, J. Mi, "Temperature dissipation in a turbulent round jet", *J Fluid Mech*, 1993.

[11] R. S. Barlow, A. N. Karpetis, J. H. Frank, J. Y. Chen, "Scalar profiles and no formation in laminar opposed-flow partially premixed methane/air flames", *Combust. Flame*, Vol. 127, 2001.

[12] S. A. Kaiser, J. H. Frank, "Imaging of dissipative structures in the near field of a turbulent non-premixed jet flame." *Proc. Combust. Inst.*, Vol. 31, 2007.

[13] N. Peters, F. A. Williams, "Liftoff characteristics of turbulent jet diffusion flames." *AIAA journal*, Vol. 21, 1983.

[14] R. D. Sandberg, B. J. Tester, "Mach-number scaling of individual azimuthal modes of subsonic co-flowing jets." *J Fluid Mech*, Vol. 793, 2016.

[15] D. Shin, R. D. Sandberg, E. S. Richardson, "Self-similarity of fluid residence time statistics in a turbulent round jet.", *J Fluid Mech*, Vol. 823, 2017a, pp. 1-25.

# TDLAS를 이용한 MILD 연소기 축 방향 온도 측정

봉철우\*, 이준권\*, 선호중\*, 정진규\*, 박문수\*†

## TDLAS-based measurements of the axial temperature distribution in a MILD combustor

Cheolwoo Bong\*, Jungwun Lee\*, Sun Hojoong\*, Jeong Jinkyu\*, Moon Soo Bak\*†

기존의 확산 화염은 높은 국부 연소 온도로 인해 상당한 질소 산화물 발생을 야기한다. 이에 질소 산화물 저감 대안으로 Moderate or Intense Low oxygen Dilution (MILD) 연소가 연구되고 있다. MILD 연소는 연소 후 가스를 재순환시켜 연소 전 가스와 혼합 후 전체 가스의 온도를 자발화 온도 이상으로 높여, 연소기 공간 내 균일한 온도 분포로 연소 반응을 유지하는 연소다. MILD 연소기 내부 온도 분포는 주로 연소기 출구 또는 내부 공간을 K-TYPE 열전대를 사용해 측정되었다. 하지만, 고온 환경에서 열전대를 사용한 온도 측정은 벽면으로부터의 열복사, 열전대 와이어를 통한 열전도 등으로 인해 오차를 내포하게 된다. 이전의 실험적인 연구 내용들에 따르면, MILD 연소기 내부에 온도는 일정하다고 보고되지만 CFD를 이용한 연구에서는 연소 반응이 활발한 고온 영역이 있다고 보고되고 있다. 따라서, 본 연구에서는 광학 측정법을 이용하여 MILD 연소기 축 방향 온도 분포를 측정하고자 한다.

MILD 연소기 축 방향 온도 측정을 위해 사용한 광학 측정방법은 파장가변형 다이오드 레이저 흡수 분광법(Tunable Diode Laser Absorption Spectroscopy, TDLAS)이다. TDLAS는 측정하고자 하는 가스의 물분율과 온도를 계측하는데 많이 사용되었다. TDLAS의 기본 원리는 Beer-Lambert 방정식으로 식 (1) 과 같이 표현이 된다.

$$T_v = \left( \frac{I}{I_0} \right)_v = \exp(-k_v L) \quad (1)$$

Beer-Lambert 방정식에서  $I$  는 측정 영역을 투과한 레이저 세기,  $I_0$  는 초기 레이저 세기,  $-k_v$

는 흡수계수,  $L$  은 측정길이이다. 여기서 흡수계수는 아래 식 (2) 와 같이 정리 할 수 있다.

$$k_v = P \sum_{j=1}^K X_j \sum_{i=1}^{N_j} S_{i,j}(i) \Phi_{i,j}(v-v_{0,j}) \quad (2)$$

식 (2)에서  $P$  는 전체압력,  $X_j$  는 측정 가스의 물분율,  $S_{i,j}$  는 측정 가스  $j$  의 주파수  $i$  에서의 선강도,  $\Phi_{i,j}$  는 선모양 함수이다. 여기서 선강도는 온도의 함수이다. 식 (1) 과 식 (2)에서 투과 레이저 세기와 초기 레이저 세기의 비는 측정대상의 압력, 물분율, 선강도, 온도와 지수관계에 있다는 것을 알 수 있다. 연구에서는 파장이 다른 두 개의 흡수선을 활용한 TDLAS 측정을 진행하였다. 두 개의 서로 다른 파장을 같은 측정 길이, 압력, 물분율을 가진 측정 영역을 지나게 하여 흡광도를 측정한다. 같은 조건을 지나는 영

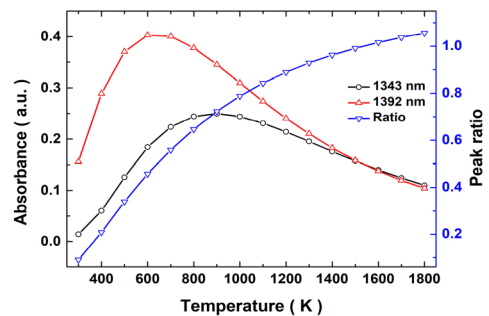


그림. 1 온도에 따라 변하는 중심 파장 1343 nm, 1392 nm 흡광도와 두 파장의 흡광도 비 그래프.

역을 지나게 함으로써 흡광도의 변화는 오직 온도의 파라미터이며, 서로 다른 파장의 흡광도 비를 이용하여 온도를 측정할 수 있다. 수증기 흡수선으로 1343 nm 와 1392 nm 두 파장을 선택하였다.

\* 성균관대학교 기계공학부

† 연락저자, moonsoo@skku.edu

TEL : (031)290-4874



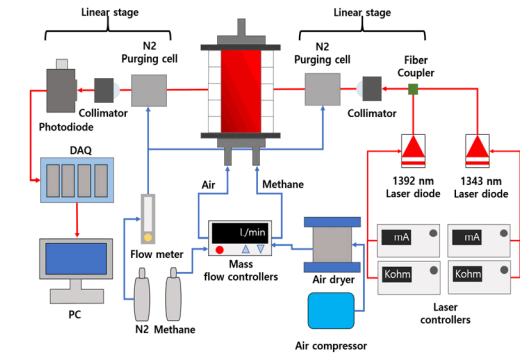


그림. 2 TDLAS를 이용한 마일드 연소기 축 방향 온도 측정 실험 셋업.

그림 1은 몰농도 0.1에 측정길이 14 cm에서 이론에 근거한 온도에 따라 변하는 두 파장대의 흡광도 그리고 흡광도 비를 보여준다. 온도 변화에 따라 흡광도 변화가 보이며 두 파장의 흡광도 비 역시 변화가 있음을 확인할 수 있다.

그림 2는 본 연구의 실험 셋업을 보여준다. 합수발생기에서 LDC 컨트롤러로 전압값을 전달하고, LDC 컨트롤러는 전압값을 전류값으로 환산하여 다이오드 레이저의 파워와 파장을 조절한다. 그리고 두 개의 다이오드의 출력 부분을 2x1 Fiber coupler의 입력 부분에 연결하고 Fiber coupler의 출력 부분에는 collimator를 연결하여 빛을 조사하였다. 빛의 세기는 포토다이오드를 이용하여 측정하였고, 이를 다시 DAQ 장비에 연결하여 PC로 데이터를 수집하였다. 양 쪽의 collimator 앞에는 질소 퍼징 셀을 설치하여 room vapor 영향을 최소화하였다. 측정 장비 셋업은 연소기 옆에 모터라이즈드 리니어 스테이지에 연결되어 연소기 축 방향으로 측정 장비들이 이동 가능하도록 하였다. 마일드 연소기의 연소 조건은 당량비 0.8 고정하고 유량을 60 slpm, 80 slpm, 100 slpm 으로 바꾸어가며 실험을 진행하였다. 측정은 마일드 연소기 아래쪽에서 포토다이오드에 입력 신호가 측정되지 않는 곳 10mm 위부터 시작하였으며 시작점부터 높이를 10 mm 씩 이동해가며 총 230 mm 지점까지 온도 측정을 진행하였다.

그림 3의 공기 유량 80 slpm 실험 조건에서 받은 TDLAS 신호이다. 1343 nm, 1392 nm 다이오드에서 Ramp 모양으로 출력한 빛이 입력한 초기 신호와 다르게 흡수선 위치에서 가스가 빛 에너지를 흡수하여 빛 세기가 감소한 것을 확인할 수 있고 흡수선 주변의 데이터를 이용하여 Baseline을 만들어 주었다. 그림 3의 b는 Beer-Lambert 방정식을 기반으로 계산한 흡광도를 보여준다. 이러한 흡광도들의 절대 높이 값을 이론값과 비

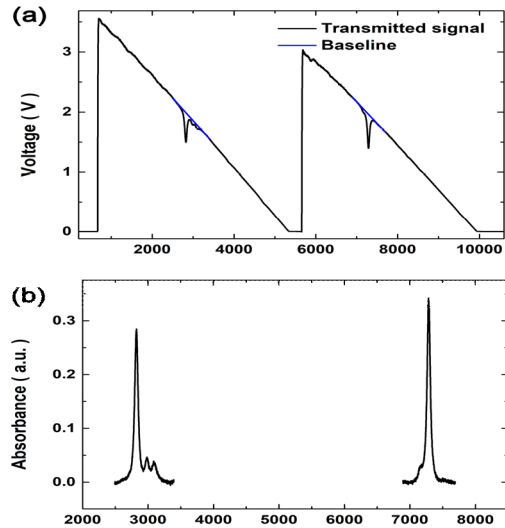


그림.3 (a) 실험 조건 80 slpm에서 측정된 레이저 신호와 주변 값들을 이용하여 계산한 기준신호, (b) Beer-Lambert 방정식을 이용하여 계산한 흡광도.

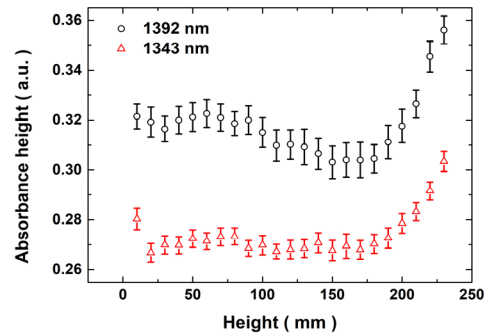


그림. 4 TDLAS를 이용한 마일드 연소기 축 방향 온도 측정 실험 결과

교하여 온도를 측정하였다.

그림 4는 각 유량별 높이에 따라 얻은 흡광도 세기 데이터를 보여준다. 흡광도가 높이에 따라 변화하는 것을 볼 수 있다. 약 높이 150mm부터 180 mm까지 흡광도가 낮아지는데, 그림 4에서 보여주었듯이 700 K 이후에는 온도가 증가하면서 흡광도가 감소하므로, 높이 150mm부터 180 mm 지점에서 온도가 높다고 예측된다. 결과를 통해 온도구배가 축 방향으로 온전히 동일하지 않고, 마일드 연소기 내부 해당 위치에서 연소가 활발하게 진행됨을 확인하였다.

## 후 기

본 연구는 환경부 글로벌탑 환경기술개발사업 중 Non-CO2 온실가스 저감기술개발 사업단 (과제번호 : 2017002430007)에서 지원받았습니다.

본 연구는 2018년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. 2018R1C1B6005217).

## 참고 문헌

- [1] Jonathan T.C. Liu, Gregory B. Rieker, Jay B. Jeffries, Mark R. Grubber, Campbell D. Carter, Tarun Mathur, and Ronald K. Hanson, "Near-infrared diode laser absorption diagnostic for temperature and water vapor in a scramjet combustor", *Applied Optics.*, Vol. 44, 2005, pp. 6701-6711.
- [2] E.R. Furlong, D.S. Baer, R.K. Hanson, "Combustion control using a multiplexed diode-laser sensor system", *Symposium on Combustion.*, Vol. 26, 1996, pp. 2851-2858.
- [3] Scott T. Snders, Jeffrey A. Baldwin, "Diode-laser sensor for monitoring multiple combustion parameters in pulse detonation engines", *Proceedings of the Combustion Institute*, Vol. 28, 2000, pp 587-594.

## 헬륨이 희석된 층류 동축류 제트에서의 진동화염

오수현\*, 반규호\*\*, 정기성\*, 유춘상<sup>†</sup>, 권오봉\*\*, 차민석\*\*\*, 정석호\*\*\*, 박정\*\*<sup>†</sup>

### Oscillating flame in laminar helium-diluted coflow jets

Suhyeon Oh\*, Kyu Ho Van\*\*, Ki Sung Jung\*, Chun Sang Yoo<sup>†</sup>, Oh Boong Kwon\*\*, Min Suk Cha\*\*\*, Suk Ho Chung\*\*\*, Jeong Park\*\*<sup>†</sup>

#### ABSTRACT

The unreported oscillation flame was discovered in helium-diluted coflow jet. It had a premixed-like structure when propagating toward upstream, and then again came back to be tribrachial flame in downstream. By the previous work [9], it was identified that it is under the augmented negative buoyancy, ( $\rho_f - \rho_{co}$ ) by heavier fuel density than ambient coflow. But it was unable to be explained by buoyancy in that the generally known oscillating flame with a tribrachial structure also is influenced by the negative buoyancy. Thus, we focused on the characteristics of propagation as well as buoyancy to investigate the mechanism of the unreported oscillation flame.

**Key Words** : Negative buoyancy, flame propagation speed, stabilization mechanism

Lifted flames in laminar jets have been explained with tribrachial structure, which consists of lean and rich premixed wings and trailing diffusion flame. By these premixed wings, tribrachial flame has a nature of propagation. In tribrachial point, flame propagation speed is balanced by local flow speed, where flame stably lifts off [1-2]. The propagation speed of the tribrachial flame is affected by the mixture strength, fuel fraction gradient, Lewis number, and flame curvature, but the local flow speed is dependent on flow redirection and buoyancy [1-7]. Especially, buoyancy has been related to liftoff height and oscillation mechanism. Won et al. [8] confirmed that oscillating flame is influenced by buoyancy through experiments of the normal- and microgravity condition. Meanwhile, Van et al. [9] found that oscillating lifted flames are caused by competition between the positive buoyancy of the flame and the negative buoyancy of the fuel stream, which is heavier than the surrounding air. Van et al. [9]

experimentally showed the significant negative buoyancy on cold and reacting flow field. In this process, the unusual flame structure was observed, which is different from generally known tribrachial structure. Therefore, we focused on the investigation of the unusual flame.

Figure 1 is a schematic of the experimental apparatus, which consists of a coflow burner, a flow control system, and a measuring system. A fully developed flow was secured by using a fuel nozzle of 4 mm i.d. and 40 mm length. A quartz cylinder with an inner diameter of 100 mm, a length of 60 cm was used for the coflow jet. The coflow rate  $V_{co}$  was fixed at 8 cm/s. Honeycomb was installed on the coflow burner to ensure uniform flow. propane of 99.95% purity was highly diluted in nitrogen and air, nitrogen, and helium were added to coflow using a mixing chamber. Experiments were performed in the range of  $0 \leq U_0 \leq 12$  cm/s to confirm a flame oscillation, where  $U_0$  represents the initial fuel jet velocity. The flame was measured using a digital camera with 300 fps and analyzed using Matlab-based software.

\* Department of Mechanical Engineering, Ulsan National Institute of Science and Technology

\*\* Department of Mechanical Engineering, Pukyong National University

\*\*\* Clean Combustion Research Center, King Abdullah University of Science and Technology

<sup>†</sup> 연락저자: Chun Sang Yoo ([csyoo@unist.ac.kr](mailto:csyoo@unist.ac.kr))

Jeong Park ([jeongpark@pknu.ac.kr](mailto:jeongpark@pknu.ac.kr))

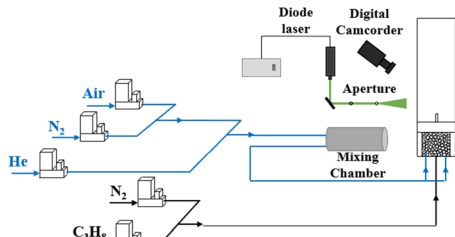


Fig. 1 Schematic of the experimental setup.

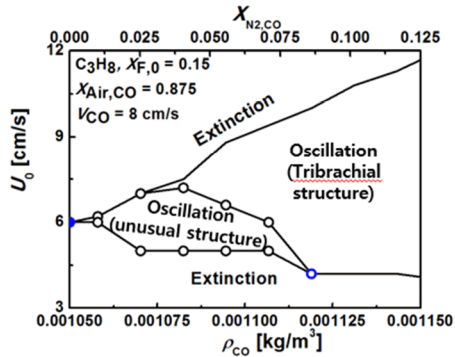


Fig. 2 The regime of oscillating flames.

Figure 2 shows the regime as function of the coflow density,  $\rho_{co}$  and the initial jet velocity,  $U_0$  at fuel mole fraction,  $X_F = 0.15$ . Oscillating flame with unusual structure observed near extinction limit. The unusual oscillating flame is convex to the nozzle exit, which looks like premixed flame. The unusual flame also radially propagates near nozzle exit.

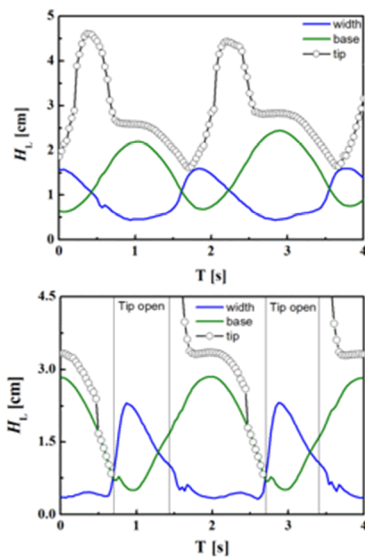


Fig. 3 The oscillation dimensions; tribrachial (top) and unusual (down) structure.

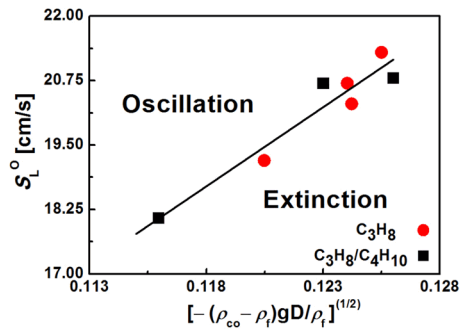


Fig. 4 The relationship between negative buoyancy and flame propagation speed.

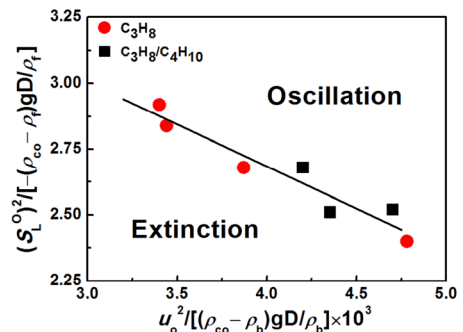


Fig. 5 The relationship between negative, positive buoyancy, flame propagation speed and initial jet velocity.

It is because the counter flow of cold fuel jet made by the negative buoyancy. The negative buoyancy has an effect pulling down heavy fuel jet, thereby decreasing the velocity of upstream in front of leading edge.

As shown in Fig. 3, cycle of flame dimensions has different dependency on flamebase in case of the unusual and the tribrachial structure. Oscillating flame of tribrachial structure has a sinusoidal dimension, whereas that of unusual structure has the w-shaped dimension. As such, two oscillating flames are expected to have each other characteristics about the velocity, based on the balance mechanism.

As previously discussed, the unusual flame was observed when the negative buoyancy extremely increased [9]. Thus, Figure 4. Represents the relationship between the negative buoyancy and flame propagation speed assumed by laminar burning velocity,

$S_{T_0}^0$  in that the flame moves along the stoichiometric contours.

Figure. 5 represents the positive buoyancy as well as the negative buoyancy influence on reacting flow field. When the flame exist in flow field, the positive buoyancy,  $(\rho_{co} - \rho_b)$  occurs. Thus, it should be considered with two counteracting buoyancy.

As the positive buoyancy increases, the flame is stabilized [9]. But, it can blow out together with further increasing nozzle exit velocity,  $U_0$ . Thus, the unusual flame finitely occurs near the extinction limit.

At a given fuel mole fraction,  $X_F$ , flame propagation speed increases with increasing helium mole fraction (increasing the negative buoyancy by decreasing the coflow density). Thus, the laminar burning velocity of the unusual flame in the critical coflow density has a quite large value.

O. Fujita, T. Mori, J.H. Choi, K. Ito, Proc. Combust. Int, Vol. 29, 2002, pp. 37-44.

[9] K.H. Van, J. Park, S.H. Yoon, S.H. Chung, M.S. Cha, Proc. Combust. Int, Vol. 000, 2018, 1-8.

## Acknowledgements

This research was supported by Basic Science Research Program through the National Research Foundation of Korea (NRF) funded by the Ministry of Science and ICT (NRF-2018R1A2A2A05018901). SHC was supported by KAUST. JP was supported by the Research and Development Program of the Korea Institute of Energy Research (B9-2431).

## References

- [1] S.H. Chung, B.J. Lee, Combust. Flame, Vol. 86, 1991, pp. 62-72.
- [2] B.J. Lee, S.H. Chung, Combust. Flame, Vol. 109, 1991, pp. 62-72.
- [3] T. Echekki, J.H. Chen, Combust. Flame, Vol. 114, 1998, pp.231-245.
- [4] J. Buckmaster, M. Matalon, Proc. Combust. Inst., Vol. 22, 1988, pp.1527-1535.
- [5] L. J. Hartley, J. W. Dold, Combust. Sci. Tech, Vol. 80, 1991, pp. 23-46.
- [6] G. R. Reutsch, L. Vervisch, A. Liñán, Phys. Fluids, Vol. 7, 1995, pp. 1447-1454.
- [7] P. N. Kioni, B. Rogg, K. N. C. Bray, A. Liñán, Combust. Flame, Vol. 95, 1993, pp. 276-290.
- [8] S.H. Won, J. Kim, M. K. Shin, S.H. Chung,

## 충류 비예혼합 부상 화염에서의 희석제에 따른 부상 높이 변화

오수현\*, 반규호\*\*, 유춘상\*†, 권오봉\*\*, 정석호\*\*\*, 박정\*\*†

### Variation of Liftoff height with diluents in Laminar Non-premixed Lifted Flame

Suhyeon Oh\*, Kyu Ho Van\*\*, Chun Sang Yoo\*†, Oh boong Kwon\*\*, Suk Ho Chung\*\*\*, Jeong Park\*\*†

#### ABSTRACT

With diluents (CO<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>, and He) added to fuel or oxidizer stream, stationary lifted flame in non-premixed laminar coflow-jet has been studied. For CO<sub>2</sub> and N<sub>2</sub> diluted in oxidizer stream, liftoff height significantly increased with diluent mole fraction, while in He-diluted case liftoff height slightly increased. In fuel-diluted stream, liftoff height as adding He and N<sub>2</sub> slightly increased, but CO<sub>2</sub>-diluted flame oscillated. To investigate change of liftoff height with diluent mole fraction, laminar burning velocity, effects of diluents, and buoyancy were considered.

**Key Words** : Liftoff height, negative buoyancy, diluent effects, stabilization mechanism

Lifted flames in laminar jets have been extensively studied to identify stabilization and oscillation mechanisms. In particular, the flamebase of the laminar lifted flame has the tribrachial structure with coexistence of lean, premixed and diffusion flames, and is located at the point where the flame propagation speed and the local flow speed are balanced [1-2]. The propagation speed of the tribrachial flame is affected by the mix strength, fuel fraction gradient, Lewis number, and flame curvature, but the local flow speed is dependent on flow redirection and buoyancy [3]. These factors can cause the lifted flame to manipulate the position of the flame base and lead to flame oscillation or U-shaped behavior [3-4]. Especially, Van et al. [4] found that oscillating lifted flames are caused by competition between the positive buoyancy of the flame and the negative buoyancy of the fuel stream, which is heavier than the

surrounding air. Therefore, the reduction of local flow speed due to negative buoyancy may play an important role in adjusting the position of the lifted flame.

Figure 1 is a schematic of the experimental apparatus, which consists of a coflow burner, a flow control system, and a measuring system. A fully developed flow was secured by using a fuel nozzle having a diameter of 4 mm and a length of 40 cm. A quartz cylinder with an inner diameter of 100 mm, a length of 60 cm was used for the coflow jet. The coflow rate  $V_{co}$  was fixed at 5 cm/s. Honeycomb was installed on the coflow burner to ensure uniform flow. High purity (99.95%) propane and oxygen were used as fuels and oxidants, respectively. Carbon dioxide, nitrogen and helium were used as diluents. The flow rate was controlled by mass flow controller and flow software. Experiments were performed in the range of  $18 \leq U_0 \leq 60$  cm/s to ensure laminar fuel jets, where  $U_0$  represents the initial fuel jet velocity. Lifted height was measured using a digital VCR camera and analyzed using Matlab-based software. Figure 2 shows the change in lift height,  $H_L$ , depending on the mole fraction of the diluent injected into the fuel or coflow jet at  $U_0 = 18$  cm/s.

\* Department of Mechanical Engineering, Ulsan National Institute of Science and Technology

\*\* Department of Mechanical Engineering, Pukyong National University

\*\*\* Clean Combustion Research Center, King Abdullah University of Science and Technology

† 연락처: Chun Sang Yoo ([csyoo@unist.ac.kr](mailto:csyoo@unist.ac.kr))

Jeong Park ([jeongpark@pknu.ac.kr](mailto:jeongpark@pknu.ac.kr))

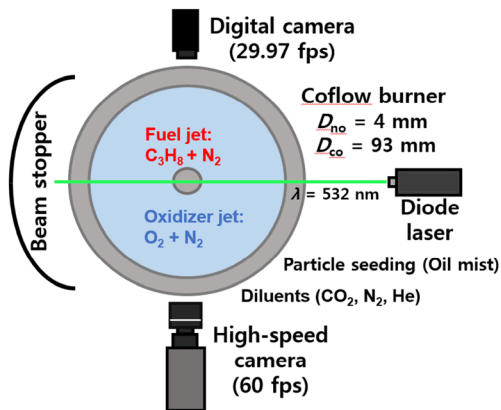


Fig. 1 Schematic of the experimental setup.

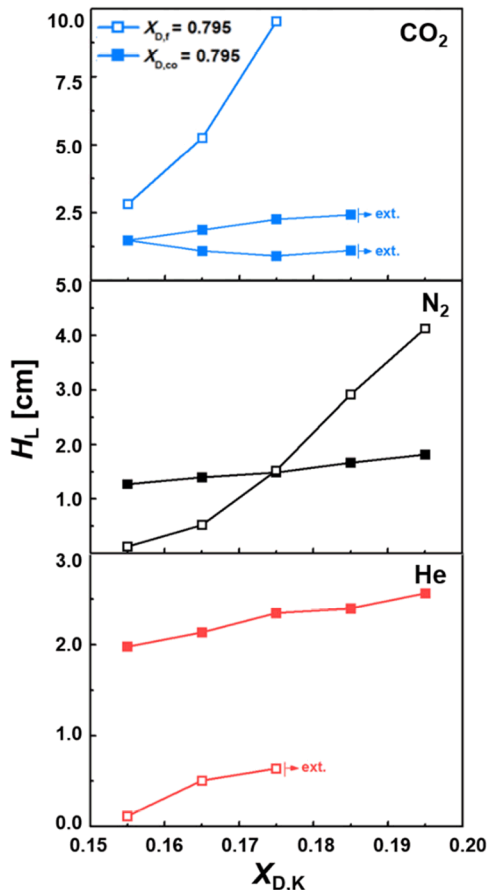


Fig. 2 Lift-off heights versus diluent mole fraction in various diluents added to fuel (block) or oxidizer (hollow) at  $U_0 = 18$  and  $V_{co} = 5$  cm/s.

At this time, the mole fraction of the diluent is defined as  $X_{D,K} = X_i / (X_K + X_{N_2} + X_i)$ ,  $K$

denotes fuel or oxidant jet,  $i$  denotes carbon dioxide, nitrogen and helium, and  $X_{N_2}$  is fixed at 0.62. In contrast to the liftoff height when injected into the fuel jet, for  $CO_2$  and  $N_2$  diluted in the oxidant jet,  $H_L$  increases significantly with the diluent mole fraction due to the decrease in oxygen concentration. In particular, lifted flames with  $CO_2$  diluted in the fuel jet will oscillate as the diluent mole fraction increases, due to the density of the fuel jet being heavier than the coflow jet. However, helium diluted in the oxidant jet is considered to be nearly constant, increasing slightly with increasing diluent mole fraction. Since the stabilization mechanism of the laminar flat flame must be accounted for by the balance between the propagation speed of the trident flame and the local flow speed, the laminar combustion velocity,  $S_L$ , was calculated to reveal the relationship between the  $H_L$  and the diluent controlled flame velocity. Although the velocity of tribrachial flames differs from  $S_L$  due to flow redirection effects, concentration gradients, and flame curvature, it can be described qualitatively as tribrachial flame velocity in that lifted flames travel along stoichiometric line. Figure 3 shows the laminar flow rate for the coflow with diluent mole fraction calculated using USC 2.0.  $S_L$  of the helium-diluted flame is the largest, which indicates that the lifted flame shows an increase in  $H_L$  as the flame propagation rate decreases with decreasing molar fraction of coflow diluent. However, these results are comparable in the quantity of  $H_L$  with diluent. The  $S_L$  difference of Fig. 3 can be explained by three diluent effects: thermal, chemical and dilution effects [5–8]. Thermal diffusion and chemical effects indicate differences in thermal diffusivity or specific heat with diluent and chemical dissipation of carbon dioxide, respectively. Also, the dilution effect only shows a decrease in oxygen concentration. In order to calculate the chemical effects, a false species was used that did not react with the thermal, radioactive and transport properties of the true species. In order to consider the thermal diffusion effect, the specific heat according to the mole

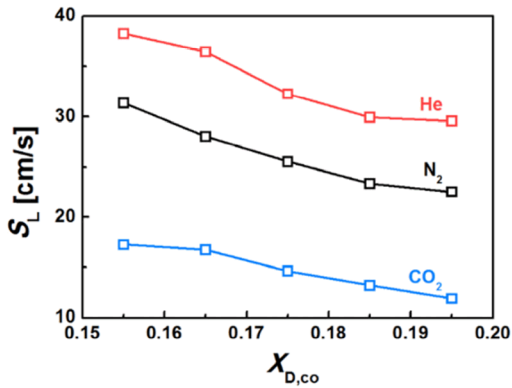


Fig. 3 Predicted laminar burning velocities in diluted with He, N<sub>2</sub>, and CO<sub>2</sub>

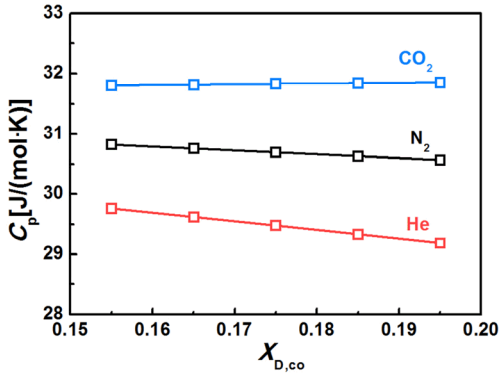


Fig. 4 Heat capacity at constant pressure as a functional dependency of diluent mole fraction.

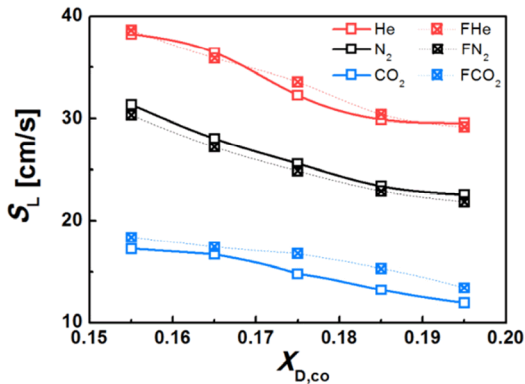


Fig. 5 Computed laminar burning velocities with true (solid) and false (dotted line) species.

fraction of diluent at 298 K, 0.1 MPa is shown in Fig. 4. As the mole fraction of oxygen decreases as the mole fraction of the diluent on the coflow side increases, the specific heat of helium ( $C_{p, He} = 20.79$  J/mol·K) less than the specific heat of oxygen ( $C_{p, O_2} = 29.38$  J/mol·K).

The specific heat of the helium-infused flame decreases as the mole fraction of the diluent increases. On the other hand, the specific heat of carbon dioxide ( $C_{p, CO_2} = 36.94$  J/mol·K) is greater than that of oxygen, so the specific heat of the flame injected with carbon dioxide increases. The specific heat of a nitrogen-injected flame is almost constant because the specific heat of nitrogen ( $C_{p, N_2} = 29.12$  J/mol·K) is similar to that of oxygen. Figure 5 shows the  $S_L$  according to the diluent to show the chemical effects analyzed by comparing the actual species with the fake species. The difference between the  $S_L$  of the actual species and the fake species is caused by the chemical effect of the diluent, which means that the distinct  $S_L$  difference in carbon dioxide means that the chemical effect plays an important role in changing the height of injury. However, for helium and nitrogen, the chemical effects are minimal. To compare the effects of the three diluents, the results of Fig. 4 and 5 are shown using the contribution factor in Figure 6. The contribution factor for each diluent effect is defined as follows [8]:

$$\text{Dilution effect: } \frac{S_L[0] - S_L[FN_2]}{S_L[0] - S_L[i]}, \quad (1)$$

$$\text{Thermal effect: } \frac{S_L[FN_2] - S_L[Fi]}{S_L[0] - S_L[i]}, \quad (2)$$

$$\text{Chemical effect: } \frac{S_L[Fi] - S_L[i]}{S_L[0] - S_L[i]}, \quad (3)$$

where 0 means no dilution and i means carbon dioxide, nitrogen, and helium. In the case of carbon dioxide, the relatively high contribution factor of the dilution effect shows that the dilution effect plays an important role in reducing the  $S_L$ , but the thermal and chemical effects are relatively insignificant. In the case of nitrogen, the contribution factor of thermal and chemical effects is close to zero, but the dilution effect is 1. This means that the reduction of  $S_L$  with diluent mole fraction is under the influence of the dilution effect. The contribution factor for the chemical effect of helium is almost equal to zero, and the dilution effect is the dominant factor in the reduction of  $S_L$ . On the other hand, the contribution factor of the thermal effect has a



negative value, indicating that the thermal effect increases the  $S_L$ . However, as mentioned previously, the question of whether the  $H_L$  of the helium dilution flame does not change significantly with increasing mole fraction of the coflow diluent in Fig. 2 is no longer explained by the reduction of the  $S_L$  and the diluent effects. In this regard, we must consider the buoyancy forces acting on the laminar flotation flames. The negative buoyancy caused by the difference between the heavy fuel jet and the coflow jet must reduce the local flow velocity affecting the change in  $H_L$ . It is future work that to quantitatively compare the effect of buoyancy on the local flow rate with diluent, the flow field will be visualized using the Mie-scattering technique.

[8] E. Hu, X. Jiang, Z. Huang, N. Iida, *Energy Fuels*, Vol. 26, 2012, pp. 4242–4252.

### Acknowledgements

This research was supported by Basic Science Research Program through the National Research Foundation of Korea (NRF) funded by the Ministry of Science and ICT (NRF-2018R1A2A2A05018901). SHC was supported by KAUST. JP was supported by the Research and Development Program of the Korea Institute of Energy Research (B9-2431).

### References

- [1] S.H. Chung, B.J. Lee, *Combust. Flame*, Vol. 86, 1991, pp. 62–72.
- [2] B.J. Lee, S.H. Chung, *Combust. Flame*, Vol. 109, 1991, pp. 62–72.
- [3] S.H. Won, S.H. Chung, M.S. Cha, B.J. Lee, *Proc. Combust. Int.*, Vol. 28, 2000, pp. 2093–2099.
- [4] K.H. Van, J. Park, S.H. Yoon, S.H. Chung, M.S. Cha, *Proc. Combust. Int.*, Vol. 000, 2018, 1–8.
- [5] J. Min, F. Baillet, H. Guo, E. Dominues, M. Talbaut, B. Patte-Rouland, *Proc. Combust. Int.*, Vol. 33, 2011, pp. 1071–1078.
- [6] F. Halter, F. Foucher, L. Landery, C. Mounaim-Rousselle, *Combust. Sci. and Tech.*, Vol. 181, 2009, pp. 813–827.
- [7] B. Galmiche, F. Halter, F. Foucher, P. Dahaut, *Energy Fuels*, Vol. 25, 2011, 948–854.

# 압력 및 이산화탄소 희석에 따른 메탄-순산소 비예혼합 동축류 화염의 특성

이지섭\*, 황규진, 김남일†

## Characteristic of non-premixed methane-oxygen coaxial flame under elevated pressures with CO<sub>2</sub> dilution

Jiseop Lee\*, Gyu Jin Hwang, Nam Il Kim†

### ABSTRACT

Prediction of the flame stabilization at high pressures is the key in the design of the oxy-combustion burner that will be used for a super critical CO<sub>2</sub> (s-CO<sub>2</sub>) power generation system. Therefore, in this study, we analyzed the effects of pressure on the flame stability of a non-premixed coaxial flame, and the flame stabilization conditions were assessed. In addition, practical blowoff conditions were measured by changing the dilution fraction of the coaxial flow and the surrounding flow outside the coaxial tube.

**Key Words** : Non-premixed flame, Flame stability, Blowoff, Coaxial flame, Pressure

비예혼합 화염은 예혼합 화염에 비하여 화염 안정화 및 안전성의 장점을 가지고 있어 현재 많은 버너에서 사용되고 있다. 이러한 화염 안정화는 버너를 설계하는 데 있어서 가장 기초적이고 중요한 실험 결과이기 때문에 많은 연구자들이 연구를 진행해왔다. 대부분의 연구의 경우 단일 연료관 주변에 산화제가 공급되는 경우에 대하여 실험을 진행하였다. 대표적으로 Wu[1]는 수소 화염에서 이산화탄소의 희석 분율이 높아질수록 블로우아웃과 블로우오프 속도가 감소하는 경향성을 확인하였다. Guiberti[2]의 경우 메탄 화염에서 압력과 연료관 두께가 화염 탈착에 미치는 영향을 연구하였으며 특정 조건에서 압력에 따라 탈착 속도가 감소하는 현상을 설명하였다. 동축류 화염에 대한 연구로 Kim[3]은 수소화염에서 연료와 동축류의 속도비에 따른 블로우아웃 영역을 연구하였고 동축류 속도가 증가할수록 화염 길이가 감소하는 것을 확인하였다.

최근에는 고효율, 연소가스 배출과 관련된 문제를 해결하기 위해서 고압 및 희석 연소의 중요성이 높아지고 있다. 특히 최근 주목을 받고 있는 순산소연소 초임계 CO<sub>2</sub> 발전 사이클(예를 들

어 Allam 사이클)에서는 순산소연소기의 작동 조건이 대략 300기압, 1000K 조건이며 대부분의 작동 유체가 이산화탄소인 상태로 작동한다[4]. 이러한 고압 조건에서 연소기를 설계하기 위해서는 고압에서의 화염 안정화 특성이 필수적이다.

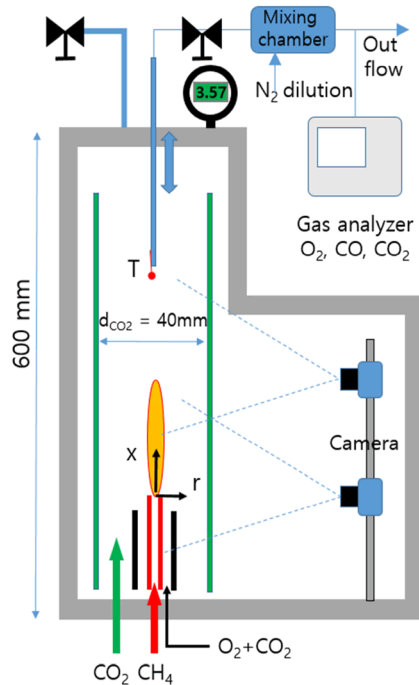


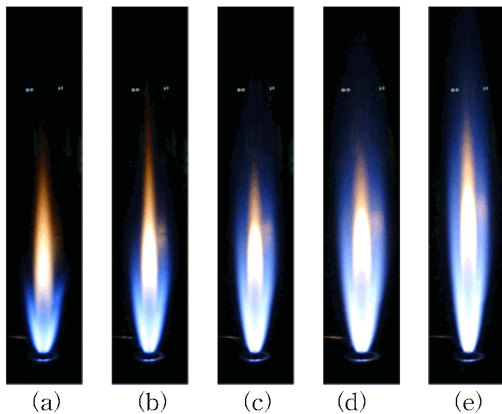
Fig. 1 Schematic diagram of high pressure burner.

\* 한국과학기술원 기계공학과  
† 연락처, [nikim@kaist.ac.kr](mailto:nikim@kaist.ac.kr)  
TEL : (042)350-3211

본 연구에서는 압력에 따른 메탄-순산소 동축류 화염의 안정화 선도를 얻기 위하여 Fig. 1과 같은 연소기를 사용하였다.

연소기는 연료관, 동축관과 석영관으로 구성되어 있다. 각각 연료관으로는 연료가 공급되며, 동축관으로는 산소, 이산화탄소가 공급된다. 석영관으로는 주위류로서 이산화탄소가 공급되는 구조이다. 연료관의 내경은 0.64mm이며, 동축관의 내경은 4.38mm 이고 석영관의 내경은 40mm이다. 초기 점화의 경우 글로우 점화기를 이용하였다. 고압에서의 안전성을 확보하기 위하여 카메라와 연소기는 모두 압력 챔버 내부에 설치되었다. 카메라를 압력 챔버 내부에 설치함으로써 압력 챔버 외부에 가시창이 존재하지 않아 고압에서의 안정성이 확보되었다.

연료는 메탄, 동축류로는 산소-이산화탄소 혼합 기체, 주위류로는 이산화탄소가 사용되었으며 질량 유량 조절기로 각각의 유량이 조절되었다. 메탄 유량은 800 cc/min, 동축류와 주위류 유량은 35 L/min 이하가 사용되었다. 이산화탄소 희석은 이산화탄소와 산소를 혼합한 산화제의 부피 기준으로 30~70% 범위까지 실험하였으며, 압력 범위는 1~5 bar 에서 실험하였다.



**Fig. 2** Images of non-premixed methane/oxygen flames with 50% CO<sub>2</sub> dilution

주위류 유량은 3L/min으로 고정되었으며, 메탄 유량과 동축류 산화제의 유량비는 50%로 고정된 상태에서 메탄 유량을 증가시키며 실험을 진행하였다. 메탄 유량에 따른 메탄-순산소 비예혼합 화염의 이미지가 Fig. 2에 보여진다. 메탄 유량이 증가함에 따라서 화염 길이는 증가하며 고유량에서는 블로우아웃이 발생하였다. 특히 메탄 유량이 작은 구간에서는 (a)와 (b)처럼 화염의 열림

이 발생하였다. 이러한 이유는 화염에서 이산화탄소 농도가 가연 한계 이상으로 넘어갔기 때문이라고 보여진다. 연료 유속이 느려질수록 산화제의 유속도 연료 유량비와 고정되어 있기 때문에 같은 비율로 느려지게 된다. 이 때 주위류의 유량은 항상 동일하고 이로 인해서 동축류 산화제와 주위류 이산화탄소의 유속의 차이가 줄어들게 된다. 이로 인해서 산화제가 확산에 의해 주위류 이산화탄소로 희석되게 되고 결과적으로 화염 근처에서 이산화탄소 희석 비율이 높아져 화염의 일부분이 열려 연소가스가 유출되는 것으로 여겨진다.

## 후 기

본 연구는 Saudi Aramco - KAIST CO<sub>2</sub> Management Center의 지원으로 수행되었습니다.

## 참고 문헌

- [1] Y. Wua, Y. Lua, I.S. Al-Rahbia, G.T. Kalghatgi, "Prediction of the liftoff, blowout and blowoff stability limits of pure hydrogen and hydrogen/hydrocarbon mixture jet flames", *International Journal of Hydrogen Energy.*, vol. 5, 2009, pp. 5940-5945.
- [2] T. F. Guiberti, W. R. Boyette, A. R. Masri, W. L. Roberts, "Detachment mechanisms of turbulent non-premixed jet flames at atmospheric and elevated pressures", *Combust. Flame.*, vol. 202, 2019, pp. 219-227.
- [3] M. Kim, J. Oh, Y. Yoon, "Flame length scaling in a non-premixed turbulent diluted hydrogen jet with coaxial air", *Fuel.*, vol. 90, 2011, pp. 2624-2629.
- [4] R. Allam, S. Martin, B. Forrest, J. Fetvedt, X. Lu, D. Freed, G. W. Brown Jr.a, T. Sasaki, M. Itohb, J. Manning, "Demonstration of the Allam Cycle: an update on the development status of a high efficiency supercritical carbon dioxide power process employing full carbon capture", *Energy Procedia.*, vol. 114, 2017, pp. 5948 - 5966.

# 소화거동 내 SNG/Air 희박 예혼합 비대칭 이중 화염의 상호작용 현상

강연세\*, 안지환\*, 이기만†

## Interaction phenomena in Extinction behavior with Lean premixed SNG/Air Asymmetric twin flames

Yeon Se Kang\*, Ji Hwan Ahn\*, Kee Man Lee\*†

### ABSTRACT

Synthetic natural gas(SNG) is generated by gasification, purification, methanation process. It is consisting of  $\text{CH}_4$ ,  $\text{C}_3\text{H}_8$ ,  $\text{H}_2$  compositions which have the same heating value as LNG. In this study, for high preferential diffusion effects and interaction phenomenon, SNG C-11 having 11% of  $\text{H}_2$  contents was used to figure out characteristic of lean extinction behavior. Various fuel composition has different characteristics rather than single fuel, Effective lewis number was calculated to suggest good agreement tendency with SNG C-11. Twin flames in counterflow make interaction phenomenon at downstream. The downstream with the stagnation plane has strong or weak physical sharing with fuel concentration of each flame. For observing specific structure of flame to find factor of interaction in counterflow flames, OPPDIF code was used for numerical analysis. Thermal and chemical diffusion effects downstream and those effects extend flammability area and slope of extinction boundary. In condition of Lean premixed flames with different strain rate show two different flame propagating speeds and extinction mechanism.

**Key Words:** SNG/Air Premixed Flame, Extinction Mechanism, Effective Lewis number, Flame speed, Chemical sharing.

합성천연가스(synthetic natural gas, 이하 SNG)는 석탄의 풍부한 매장량으로 인하여 에너지 발전 정책의 효과적인 대체연료로 주목받고 있다. 하지만 다양한 연료의 조합은 화염의 기초 특성을 급격하게 변화시키므로 기존의 단일 연료와 동일하게 산업에 적용하기 위해서는 체계적인 연구를 통해 화염의 거동을 확인할 필요가 있다. SNG는 석탄의 가스화공정을 거쳐 추출된 수소( $\text{H}_2$ )에 메탄화(methanation) 공정을 통하여 생성된다. 기존의 LNG와 호환성을 위해서 프로판( $\text{C}_3\text{H}_8$ )을 이용하여 발열량을 맞춘 후 수소 함량에 따라 C3( $\text{H}_2$ : 3%), C7( $\text{H}_2$ : 7%), C11( $\text{H}_2$ : 11%)으로 나누어 연구를 진행하고 있으며[1,2], 본 연구에서는 화염 간의 활발한 화학적 상호작용을 유도하기 위해 질량확산도가 높은 수소의 체적 함량이 11%인 SNG-C11을 이용하였다.

대향류 버너에서 합성 연료를 이용한 예혼합 화염의 기본적인 연소 특성과 소화 메커니즘을

규명하기 위해 많은 연구가 진행되어왔다. 루이스 수에 대한 효과[3],  $\text{H}_2$ 의 선호확산 효과[4], 점화 과정[5]에 대해 연구를 진행하며 합성가스의 근본적인 연소 특성을 관찰하였다. 하지만 합성가스의 기초화염특성을 나타내는 화염 전파속도의 방향이 상호작용의 영향을 받아 다양한 형태를 보여줄 수 있다는 연구는 미흡한 실정이다.

대향류 예혼합 화염의 상호작용은 크게 상류와 하류를 향한 상호작용으로 분류 할 수 있다. 여기서 하류 상호작용은 두 예혼합 화염에서 발생한 연소가스(burned gas)의 비대칭적 강도를 통해서 발생한다. 다른 당량비의 연소 혼합가스의 후류에서 충돌을 모사하는 대향류에서 유동장은 다양한 위치에서 정체점을 가지며 정적 연소 구조를 만들고, 안정화된 화염을 형성한다. 이때 충돌하는 화염은 정체점을 기준으로 이동하는 화염 면을 통해 화학적, 열적 상호작용을 일으키며 연소기 내에서 예측할 수 없는 거동을 나타낸다. Kim등은 희박(과농)-희박(과농)조건외의 비대칭 화염의 후류에서 핵심 활성기(key radical)를 통한 화학적 상호작용을 보고하였고, 이러한 현상은 화염의 소화 경계의 기울기를 통하여 보여진다고 설명하였다[6]. Sohrab등은 실험과 이론

\* 순천대학교 우주항공공학과

† 연락처, [kmllee@scnu.ac.kr](mailto:kmllee@scnu.ac.kr)

TEL : 010-2112-0912 FAX : +82-61-750-3820

적 모델을 통하여 대칭, 비대칭 화염에서 열 적, 화학적 상호작용이 강하게 이루어지는 화염의 생존 구간은 그렇지 않은 화염에 비해 확장되는 것을 보고하였다. 하지만 화학적 상호작용은 후류에서 질량확산을 통한 활성기반응이 복잡하게 이루어지며 만들어지기 때문에 정성적 예측이 연구의 한계점으로 부각되었다. 또한 해당 연구에서 이중 화염에서 양측 화염이 정체점을 기준으로 노즐 방향 전파속도를 가지는 경우 양의 전파속도(positive flame speed, P.F)를 나타내는 반면, 약한 화염이 유동의 정체점 넘어가 강한 화염의 영역으로 이동하였을 때, 음의 전파속도(negative flame speed, 이하 N.F)를 가진다는 것을 보고하였다[7]. 하지만, 이 두가지의 종류의 전파속도에서 어떤 요인이 상호작용을 통한 가연한계확장에 긍정적인 영향을 유도하지 상세히 보고되지 않았다.

OPPDIF code를 이용하여 대향류에서 발생하는 이중 화염의 구조 및 후류에서 발생하는 상호작용을 분석하였다. 정체점을 기준으로 1차원 상사성 모델을 적용하여 만들어진 OPPDIF code는 Kee[8]에 의해 개발되고, Lutz[9]에 의하여 확장되었다. OPPDIF code의 개념적 도식은 Fig. 1에 나타내었다. 해석 방법은 에너지, 질량, 화학종, 모멘텀 보존식이 사용되었다. Plug-flow 속도 경계 조건이 사용되었고, 양측 노즐의 출구 속도는 동일하게 설정하였다. 사용된 분위기 조건은 1atm, 298K 으로 두었으며, Gradient와 Curvature는 각각 0.06, 0.1로 설정하였다. 노즐 간격인 15mm를 해석하기 위해서 사용된 격자는 최대 1300개를 이용하였다. 연소 반응에 사용된 지배방정식은 Transport-based [10] 와 CEHMKIN-Based codes[11]를 이용해 풀었다.

$$\dot{q} = -4\sigma K_p(T^4 - T_\infty^4) \quad (1)$$

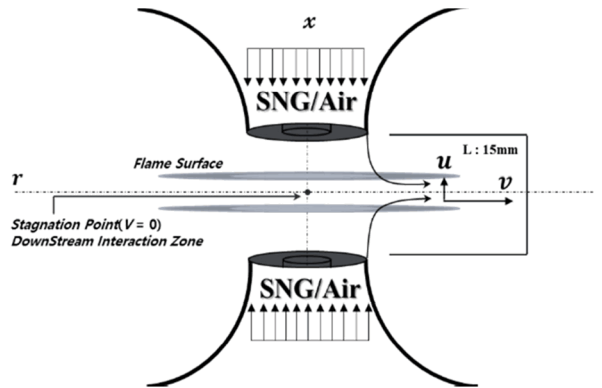
$$K_p = \sum_{i=1}^4 P_i K_i \quad i = \text{CH}_4, \text{CO}_2, \text{CO}, \text{H}_2\text{O}$$

$$a_g = \frac{V_U + V_L}{2L} \quad (2)$$

$$\Omega_i = \frac{Y_i}{\sum_{i=1}^5 Y_i}, \quad i = \text{CH}_4, \text{C}_3\text{H}_8, \text{H}_2, \text{N}_2, \text{O}_2 \quad (3)$$

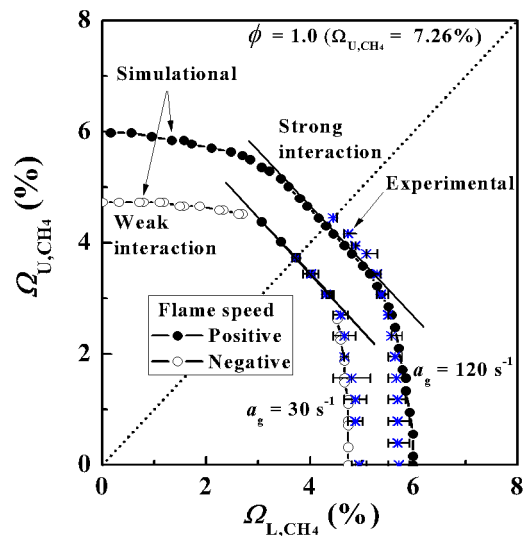
**Table 1** Experimental and numerical condition.

Fuel (SNG-C11)	CH <sub>4</sub> : C <sub>3</sub> H <sub>8</sub> : H <sub>2</sub>
Composition ratio (%)	80 : 9 : 11
Distance with nozzle(mm)	15
Global strain rate (s <sup>-1</sup> )	30, 120



**Fig. 1** Schematic diagram of OPPDIF code.

실제 화염의 복사열손실을 모사하기 위하여 광학 박 모델[12] 적용하였으며, CH<sub>4</sub>, CO, CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O에 특성 값을 부여하여 모사하였다. 사용된 식은 Eq. 1에 나타내었다. 여기서 Eq. 1의  $\sigma$ 는 스테판 볼츠만 상수를,  $K_p$ 는 화학종  $i$ 의 플랑크 흡수 계수를 나타낸다.  $K_i$ 는 화학종의 평균 플랑크 흡수계수를 이고 온도에 이차 함수 형태를 보인다.  $P_i$ 는 초기압력값이다. 사용된 변수로는 신장률과 정확한 연료분율을 계산하기 위해 복합 연료내 CH<sub>4</sub>의 체적비를 이용하여 연구에 이용되었으며 각각 Eq. 2, 3에 설명 하였다. 실험과 수치해석에 사용된 변수 조건들은 표 1에 정리하였다. 사용된 상세 화학반응기구는 UC San Diego(이하 UCSD Mech)[13]를 이용하였으며, 해당 반응기구는 SNG C-11에 대하여 다른 논문에서 검증되었다[2].



**Fig. 2.** Lean extinction boundary at  $a_g = 30, 120 \text{ s}^{-1}$ .

검증된 화학반응기구를 이용하여  $a_g = 30, 120 \text{ s}^{-1}$  에서 희박가연한계의 경계선을 Fig. 2에 나타내었다. 점선은 대칭 예혼합 조건을 나타내며, 이론당량비( $\phi = 1$ )는  $\Omega_{L,U,CH_4} = 7.259\%$  에 해당한다. 원형 심볼은 수치해석으로 얻은 소화지점을 나타내며, 채움의 유무는 양과 음의 전파속도를 각각 나타낸다. 성형 심볼은 실험적 소화지점을 나타내며 총 7번의 실험을 통해 취득하였다.

증가하는 신장률에 따라 대칭 화염의 소화경계는  $\Omega_{L,U,CH_4} = 3.73\%$  에서  $4.3\%$ 으로 늘어나는 것을 확인 할 수 있다. 강한 신장률은 상류로의 열손실을 증가시키며, 보다 이른 연료조건에서 소화경계를 형성하는 것으로 이해 할 수 있다. 기존의 문헌에 따르면 증가하는 연료의 비대칭성은 화염 간의 상호작용을 약화시키며, 약한 화염의 강한 화염의 영역에 대한 전파로 N.F조건을 나타낸다고 보고하였다[7]. 마찬가지로  $a_g = 30 \text{ s}^{-1}$  에서 연료의 비대칭이 증가하면서 같은 경향을 나타내었다. 주목할 점은 신장률이  $120 \text{ s}^{-1}$ 으로 증가하면서 P.F조건은 P.F조건으로 변화하는 것이다. 이러한 현상은 열 적, 화학적 상호작용이 화염 간의 거리와 밀접한 관계를 가지기 때문인데, 신장률의 증가는 화염 간격과  $1/\sqrt{a_g}$  관계를 잘 보여준다. 좁아진 거리를 통해 약한 화염은 강한 화염과 강한 화학적 상호작용을 보여주며, 생존하기 위한 조건을 정체점 이전에서 형성한다. 이러한 내용을 설명하기 위해서 강한화염에서 약한화염으로의 영향을 열 적 그리고 화학적 측면으로 분리하여 연구를 진행하였고, 주요 화학종과 핵심 활성기를 이용한 화염의 구조와 상호작용의 거동은 추가적인 연구를 통해 보고하겠다.

## 후 기

본 연구는 한국연구재단(NRF)의 기본연구지원사업의 일환(2019059256)으로 수행되었습니다. 이에 감사드립니다.

## 참고 문헌

[1] K. S. Sim and K. M. Lee, "Downstream Interaction between SNG/Air Premixed Flames", *Fuel*, Vol. 210, 2017, pp. 545-556.  
 [2] Y. Kang, K. Lee, "Chemical Interaction in Downstream Flows of SNG/Air Symmetric Premixed Counterflow Flame", *K. Hydrogen and New energy Society*, Vol.29, No. 6, pp. 668-679.  
 [3] J. Park, D. H. Lee, S. H. Yoon, T. M. Vu, J. H. Yun, S. I. Keel. "Effects of Lewis

Number and Preferential Diffusion on Flame Characteristics in H<sub>2</sub>/CO Syngas Flames Diluted with Ar and He". *Int. J Hydrogen Energy* 2009;34:1578-84.

[4] J. Park, O. B. Kwon, J. H. Yun, S. I. Keel, H. C. Cho, S. C. Kim. "Preferential diffusion effects on flame characteristics in H<sub>2</sub>/CO syngas diffusion flames diluted with CO<sub>2</sub>". *Int. J. Hydrogen Energy* 2008; 33:7286-94.

[5] C. G. Fotache, Y. Tan, C. J. Sun, C. K. Law "Ignition of CO/H<sub>2</sub>/N<sub>2</sub> versus heated air in counterflow : experimental and modeling results". *Combust Flame* 2000;120:417-26.

[6] J. S. Kim, J. Park, O. B. Kwon, D. S. Bae, J. H. Yun, S. I. Keel. "A study on flame structure and extinction in downstream interaction between lean premixed CH<sub>4</sub>-air and (50%H<sub>2</sub> + 50%CO) syngas-air flames". *Int. J Hydrogen Energy* 2011;36:5717-28.

[7] S. H. Sohrab, Z. Y. Ye, and C. K. Law, "Theory of Interactive Combustion of Counterflow Premixed Flames", *Combust. Sci. Tech*, Vol. 45, No. 1-2, 2007, pp. 27-45.

[8] R. J. Kee, J. A. Miller, G. H. Evans, and G. Dixon-Lewis, "A computational model of the structure and extinction of strained, opposed flow, premixed methane-air flame", *Proc. Combust Inst.*, Vol. 22, 1988, pp. 1479-94. 9.

[9] A. E. Lutz, R. J. Kee, J. F. Grcar, and F. M. Rupley, "A Fortran program for computing opposed-flow diffusion flames", *Sandia National Laboratories Report*, 1997, SAND 96-8243.

[10] R.J. Kee, F.M. Rupley, J.A. Miller, "Chemkin II: a fortran chemical kinetics package for analysis of gas phase chemical kinetics". *Sandia National Laboratories Report*, 1989, SAND 89-8009B.

[11] R.J. Kee, G. Dixon-Lewis, J. Warnatz, M.E. Coltrin, J.A. Miller, "A fortran computer code package for the evaluation of gas phase multicomponent transport". *Sandia National Laboratories Report*, 1994, SAND 86-8246.

[12] Y. Ju, H. Guo, K. Maruta, F. Liu, "On the

extinction limit and flammability limit of non-adiabatic stretched methane-air premixed flames". J. Fluid Mech., 342 (1997) 315.

[13] "Chemical-Kinetic Mechanisms for Combustion Applications", Mechanical and Aerospace Engineering (Combustion Research), University of California at San Diego, <http://combustion.ucsd.edu/>, 2014.15.

## 가열된 동축류내 정상-헵탄 층류 부상화염의 특성에 관한 수치해석적 연구

정기성\*, 김승욱\*, 정석호\*\*, 유춘상\*†

### A numerical study of the characteristics of laminar lifted *n*-heptane jet flames in heated coflow air

Ki Sung Jung\*, Seung Ook Kim\*, Suk Ho Chung\*\*, Chun Sang Yoo\*†

Autoignited non-premixed jet flames have drawn great attentions because they are observed in various combustion applications such as gas turbine combustors and diesel engines. Studies of laminar lifted flames under autoignitive condition are also actively carried out due to the importance of understanding the fundamental flame characteristics of autoignited lifted flames [1,2].

Recently, Noman et al. [3] performed an experimental study of the autoignition characteristics of laminar lifted iso-octane and *n*-heptane jet flames in heated coflow air, and they found the unusual liftoff height,  $H_L$ , variations with the change of fuel jet velocity,  $U_0$ . To be specific, there exists the regime where the liftoff height shows the appreciable increase with the increase of  $U_0$  when the flame mode of the autoignited lifted flames is changed from the conventional tribrachial edge flame to the Moderate or Intense Low-oxygen Dilution (MILD) combustion. Therefore, the main purpose of the present study is to numerically elucidate the unusual liftoff characteristics of laminar lifted *n*-heptane jet flames in heated coflow air.

The detailed numerical simulations are carried out in a two-dimensional axisymmetric coordinate in the radial,  $r$ -, and the axial,  $z$ -, directions with adopting laminarSMOKE code [4,5], which is an OpenFOAM based laminar reacting flow solver.

Figure 1 shows the schematic of the present computational domain. The configuration of the computational domain is identical to that of previous experimental study [3], and the main domain size is 4.25 cm × 50 cm in the  $r$ - and

$z$ - directions, respectively. The inner and outer radius of the fuel tube is 0.188 cm and 0.238 cm, respectively. An 8 cm fuel tube is attached to the main domain, which protrudes 1 cm above the coflow air inlet. In the  $r$ -direction, a uniform grid space of 50  $\mu\text{m}$  is distributed for  $0 \leq r \leq 1.5$  cm, and a stretched grid is applied to the remaining domain. In the  $z$ -direction, a uniform grid of 50  $\mu\text{m}$  is applied.

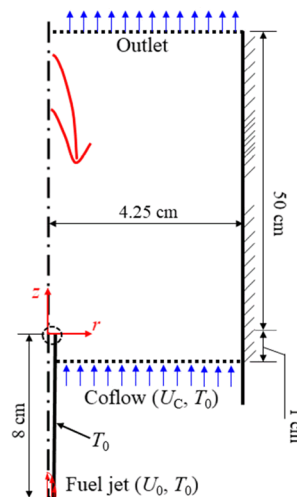


Figure 1. Schematic of the present computation domain.

For boundary conditions, fully developed pipe flow velocity profile, for which mean velocity is  $U_0$ , is applied at the fuel inlet, and the coflow inlet velocity is 1.0 m/s. Zero-gradient outflow boundary condition is applied at the outlet. Adiabatic wall boundary conditions are applied for all the wall, except for the fuel tube where fixed value of 1025 K is applied. The details of the inlet boundary conditions are summarized in Table 1.

\* 울산과학기술원 기계공학과

\*\* KAUST Clean Combustion Research Center

† 연락저자, [csyoo@unist.ac.kr](mailto:csyoo@unist.ac.kr)



**Table 1.** Inlet boundary conditions

Fuel jet velocity, $U_0$ [m/s]	3.5 ~ 10
Coflow velocity, $U_c$ [m/s]	1.0
Temperature, $T_0$ [K]	1025
Fuel mole fraction ( $X_F$ )	0.02

Figure 2 shows the  $H_L$  variation of the autoignited laminar n-heptane jet flame as a function of  $U_0$ , together with previous experimental results. It is readily observed from the figure that our simulation results qualitatively well capture the unusual  $H_L$  variations observed in previous experiment. Although not shown here, the lifted flames with relatively low  $U_0$  cases (i.e.,  $U_0 \leq 6.5$  m/s) exhibit the tribrachial edge flame structure, while the combustion mode of the lifted flames changes to MILD combustion as  $U_0$  increases equal to or higher than 6.7 m/s.

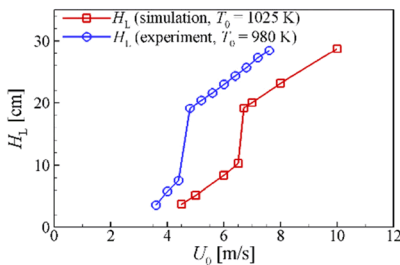


Figure 2. The variations of  $H_L$  as a function of  $U_0$  for the autoignited laminar lifted n-heptane jet flames.

To better understand this appreciable lift-off height change, the temperature and mass fraction of OH isocontours of the lifted flames for  $U_0 = 6.5$  and 6.7 m/s cases are shown Fig. 3, for which the significant lift-off height change occurs between two cases. For  $U_0 = 6.5$  m/s, the temperature profile at the upstream of the flamebase is invariable to  $T_0$ , indicating that the autoignition has nothing to do with the flame stabilization. On the other hand, for  $U_0 = 6.7$  m/s, the temperature profile at the upstream of the flamebase is notably higher than  $T_0$ , and hence, it implies that the autoignition process contributes to the flame stabilization at the relatively high  $U_0$  cases. Therefore, the unusual lift-off variations in the laminar n-heptane jet flame would be closely

related to the contribution of autoignition on the flame stabilization.

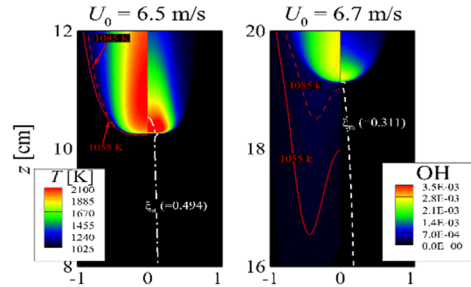


Figure 3. The temperature and mass fraction of OH isocontours for laminar autoignited n-heptane jet flames

## Conclusions

In this study, the liftoff characteristics of a laminar n-heptane jet flame are investigated by using 2-D numerical simulations by varying the fuel jet velocity. The present simulation results successfully capture the regime where liftoff height appreciably changes with the change of fuel jet velocity, which is observed in previous experiment. Based on the temperature and mass fraction of OH isocontours, the contribution of autoignition on the flame stabilization would mainly lead to the unusual liftoff height variations of the jet flame. The additional numerical simulations will be carried out as a future work.

## Acknowledgement

This research was supported by Basic Science Research Program through the National Research Foundation of Korea (NRF) funded by the Ministry of Science and ICT (NRF-2018R1A2A2A05018901).

## References

- [1] K.S. Jung, S.O. Kim, T. Lu, S.H. Chung, B.J. Lee, C.S. Yoo, *Combust. Flame* 198 (2018) 305–319.
- [2] K.S. Jung, B.R. Jung, S.H. Kang, S.H. Chung, C.S. Yoo, *Combust. Flame* 209 (2019) 225–238.
- [3] S.M. Al-Noman, S.K. Choi, S.H. Chung, *FUEL*, 162 (2015) 171–178.
- [4] A. Cuoci, A. Frassoldati, T. Faravelli, E. Ranzi, *Combust. Flame* 160 (2013) 870–886.
- [5] A. Cuoci, A. Frassoldati, T. Faravelli, E. Ranzi, *Energy. Fuel* 27 (2013) 7730–7753.

## 다공성 매체 버너에서 수관 존재의 따른 화염 거동 및 연소 특성 비교

이희도\*, 김재현\*\*, 이기만†

### Comparison of Combustion Characteristics and Flame Behavior in Existence of Water tube Porous Media Burner

Huido Lee\*, Jaehyeon Kim\*, Keeman Lee\*\*†

저공해 고효율 달성을 위하여 활발하게 연구가 진행되고 있다[1-3]. 저공해 달성 연구에서는 미세먼지와 맞물려 질소산화물의 최소화가 연구되고 있으며, 고효율 달성을 위한 연구는 저 발열량의 연료로 효과적으로 연소하여 이산화탄소 생성을 억제하는 기술이 연구되고 있다.

고온의 연소가스 체류 시간의 감소로 열적 NO<sub>x</sub> 배출을 억제하고 미연가스를 예열하여 열 재순환 기술이 접목된 다공성 연소가 주목받고 있다. 다공성 내 화염이 잠겨 있는 침전형 화염(Submerged flame)을 응용한 버너를 통하여 고효율 및 저공해 성능이 입증되었다[4-6]. 열 재순환 기술은 Weinberg에 최초로 소개되었다[7]. 이 후 Takeno와 Sato는 화염 내부에 다공체를 삽입함으로써 초과 엔탈피 화염을 형성하는 방법을 제안하였다[8]. 예열 효과로 인하여 연료의 가연 한계가 확장되어 효과적으로 연소가 가능하다. 이러한 장점으로 다공성 연소 기술은 종이 건조, 산업용 보일러, 유리 용해 및 화학 처리와 같은 다양한 방면에서 사용된다[9-10].

Vogel과 Ellze는 다공성 매체의 위치에 따라 버너 유형을 열 손실이 없는 쉴드타입(Shielded type)과 주위 대기 조건에 노출되는 엔드-마운틴 타입(End-mounted type)으로 정의하였으며, 버너 유형에 따라서 화염의 안정화 특성을 비교하였다. 엔드-마운틴 타입인 경우 특정 당량비와 유속 조건에서 매체 내 진동이 발생하는데 이러한 현상을 열 손실에 의한 불안정성으로 보고하였다[11].

이에 본 연구에서는 다공성 매체에서 수관식 보일러의 열 교환기를 모사하기 위해 다공성 매체 후류에 수관을 설치하였으며, 엔드 마운틴 타입의 경우처럼 수관에 의하여 열적 분포와 화염의 거동에 영향을 미칠 것이라고 판

단한다.

연소기 하단에는 직경 3 mm의 알루미늄 불을 사용하여 예혼합되게 하면서 균일한 유동장을 형성되도록 하였으며, 상단에는 화염의 역화를 방지하기 위하여 직경 1 mm의 홀로 구성된 세라믹 보드가 위치하고 사전 연구를 통해 화염의 안정화 영역이 넓은 10 ppi(pore per inch)의 기공률과 40 mm 두께를 갖는 SiC foam을 버너 재질로 선정하였다. 연소기를 둘러싸고 있는 단열재는 다공성 매체로부터 반경 방향의 열 손실을 최소화하기 위해 사용되었으며, 화염의 거동을 관찰할 수 있도록 너비 10 mm 정도의 최소 폭으로 가시창을 확보하였다.

연구에서 사용된 연료는 메탄을 사용하였으며, 산화제는 수분을 제거한 압축 공기를 사용하였다. 연료와 산화제의 유량은 버블 미터로 교정된 질량 유량 조절기에 의해 독립적으로 제어된다. 또한, NI 사의 DAQ 모듈과 Labview VI 기반의 소프트웨어가 질량 유량 조절기를 제어하고 열전대의 데이터를 취득하는데 사용하였다. 주요 변수는 당량비와 유속 및 수관의 높이로 설정하였으며, 당량비는 희박 연소 조건에서의 연소 특성을 관찰하기 위하여 0.7 이하로 제안하였으며, 0.025 간격으로 변경하였다. 고정된 당량비 조건에서 유속을 변화에 따라 화염은 역화, 안정 및 날림 현상이 나타나게 되며, 이러한 현상은 열전대인 T1-T5의 온도 변화와 화염의 이미지에 정의된다. 수관의 존재에 따른 화염의 안정화 선도를 그림 1, 2에 나타내었다. 유속이 증가 및 감소에 따라 화염의 날림, 역화 현상이 발생하였다. 또한, 당량비가 증가함에 따라 화염의 온도가 증가하여 안정화 영역이 넓어지는 것으로 확인하였으며, 이와 같은 경향이 수관의 존재와 유무와 관계없이 일정하게 나타나는 것을 확인하였다. 수관이 존재하는 경우 희박가연한계인 당량비 0.46 보다 낮은 조건에서 화염의 날림과 역화 현상이 비교적 높은 유속에서 발생하면서 안정화 영역이 더 넓어지는 것 확인하였다. 이를 통해 수관이 오히려 열 손실을 억제

\* 순천대학교, 우주항공공학과

\*\* 순천대학교, 기계·우주항공공학부

† 연락처, [kmlee@scnu.ac.kr](mailto:kmlee@scnu.ac.kr)

TEL : (061)750-3828 FAX : (061)-750-3820

하는 역할을 하여 화염의 온도가 증가한 것으로 판단하였다. 수관이 존재하는 경우 반응대의 온도가 증가하여 열적 NO<sub>x</sub> 배출량이

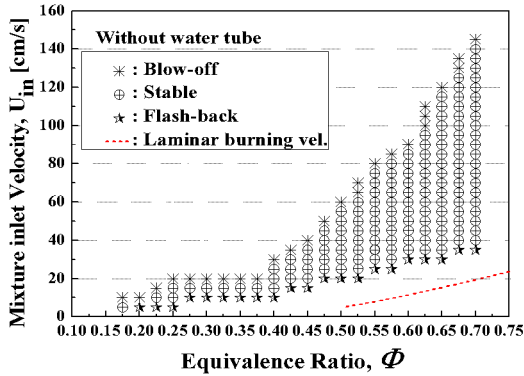


Fig. 1 Schematic diagram of porous media burner of sections for without water-tube.

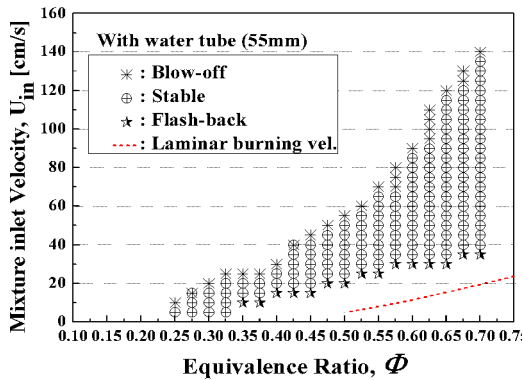


Fig. 2 Schematic diagram of porous media burner of sections for with water-tube(55mm).

증가한 것으로 판단된다. NO<sub>x</sub> 배출량은 화염의 온도가 증가함에 따라 배출량이 증가하며, 동일한 당량비에 유속이 증가함에 따라 체류시간이 감소하여 NO<sub>x</sub> 배출량이 감소하는 것을 확인하였다.

화염의 전파가 잘 이루어지는지 확인하고자 T1-T5의 온도 분포를 파악하였으며, 버너 내의 온도분포는 일정하여 화염의 전파가 비교적 잘 이루어지고 있다는 것을 확인하였다. 또한, 유속이 증가하면 화염이 후류로 전파되어 T2의 온도

가 증가하고 T3의 온도는 화염이 후류로 이동되면서 감소하는 것을 확인할 수 있다. 이러한 현상은 수관의 유무에 관계없이 동일하게 나타났는데, 수관이 없는 경우 T2-T3의 온도가 수관이 있는 경우보다 낮게 나타났다.

## 후 기

본 연구는 2019년도 한국산업기술 평가관리원 산업소재 핵심기술개발산업(20005788)의 지원을 받아 수행되었고 이에 감사드립니다.

## 참고 문헌

- [1] Y. Kotani, T. Takeno, Symposium (International) on Combustion, 19, 1503-1509, (1982)
- [2] M. Abdul. Mujeebu, M.Z. Abdullah, M.Z. Abu Bakar, A.A. Mohamad, R.M.N. Muhad, M.K. Abdullah, Symposium (International) on Combustion, 90, 2287-2312, (2008)
- [3] A.A. Mohamad, Transport Phenomena in Porous Media III, (2005)
- [4] Mujeebu MA, Abdullah MZ, Abu Bakar MZ, Mohamad AA, Abdullah MK, Appl Energy, 86, 1365-1375, (2009)
- [5] M. Abdul Mujeebu, M.Z. Abdullah, M.Z. Abu Bakar, A.A. Mohamad, M.K. Abdullah, Progress in Energy and Combustion Science, 35, 216-230, (2009)
- [6] Y.C. Park, J. Kim, Applied Thermal Engineering, 103, 1071-1076, (2016)
- [7] F. J. Weinberg, Nature, 233, 239-241, (1971)
- [8] T. Takeno, K. Sato, Combustion Science and Technology, 20, 73-84, (1979)
- [9] C. Zheng, L. Cheng. A. Saveliev, Z. Luo, K. Cen, Proceedings of the Combustion Institute, 33, 3301-3308, (2011)
- [10] S. Wood, A. T. Harris, Progress in Energy and Combustion Science, 34, 667-684, (2008)
- [11] B. J. Vogel, J. L. Ellze, Combustion Science and Technology, 177, 1323-1338, (2005)

## 연소가스 내부재순환 연소기술

권민준\*, 김세원\*†

## Flue gas Internal Recirculation Combustion Technology

Minjun Kwon\*, Sewon Kim\*†

## ABSTRACT

The object of this study is to develop ultra low NO<sub>x</sub> burner by optimizing the design factors and operating conditions of the burner in which the flue gas internal recirculation technology is applied.

The experiments are carried out in a water tube boiler and the operating variables of the burner are air flow velocity and excess air ratios of primary flame. the flue gas internal recirculation(FIR) technologies are applied using the momentums of both air and fuel. The results show that the NO<sub>x</sub> concentrations of the burner are near below 8ppm and improved burner stability.

**Key Words** : NO<sub>x</sub>, Industrial boiler, Low emission, Burner, Internal Recirculation

보일러 등 연소설비에 대한 강화된 NO<sub>x</sub> 규제와 미세먼지 발생 저감에 관한 관심이 고조됨에 따라 최근 화석연료를 사용하는 보일러 등 연소시스템의 고 효율화 및 NO<sub>x</sub> 저감에 대한 연구개발이 활발히 진행되고 있다.

특히 고효율화를 위한 보일러 적용 연소기의 저공해 연소기술은 저과잉공기비 운전이 필수적이다. 그러나 저공해와 고효율의 동시 달성은 최적화가 필수적이다.<sup>[1-4]</sup>

가스연료를 적용한 기존의 저공해 연소기술은 공기 다단 기술, 연료 다단 기술, 배기가스 재순환 기술, 재연소 기술, 예혼합 연소기술등 매우 다양하다.<sup>[4-5]</sup> 또한 본 연구에 적용된 연료인 상용 LNG에는 연료 중 질소성분이 함유되어 있지 않기 때문에 Fuel NO<sub>x</sub>를 제외한 Thermal NO<sub>x</sub> 및 Prompt NO<sub>x</sub>의 저감을 중심으로 저감 기술을 적용한다.<sup>[7-8]</sup>

본 연구에 적용된 연소기는 수관식 보일러에 적용되는 연소기로서 Fig. 1에 나타낸 바와 같이 연료다단기술, 부분 예혼합 기술, 공기-FIR기술, 연료-FIR기술을 동시에 적용한 연소기이다. 연구에 사용한 연료는 상용 LNG로서 연소기의 최대 부하는 15MW이다. 특히 FIR(Flue gas Internal Recirculation)기술은 버너로 공급되는 유체의 유동을 이용하여 재순환 유동을 형성하여 연소실의

연소가스를 버너로 재순환하는 기술로서 공기-FIR기술은 공기가 공급되는 유동을 이용하여 연소실 내부의 연소가스를 버너로 재순환시켜 공기와 연소가스를 혼합시켜 화염에 공급하는 저공해 연소기법이고, 연료-FIR기술은 연료의 공급압력을 이용하여 연료와 연소가스를 혼합하여 화염으로 공급하는 방식을 말한다.

본 연소기는 선행 연구를 통해<sup>[7-8]</sup> 단계적으로 성능향상을 진행해왔고, 본 연구에서는 공기 설계 유속에 따른 NO<sub>x</sub> 발생 특성 및 다단 공기 공급 형태를 개선을 통해 1차 공기의 과잉공기비가 화염 안정성에 미치는 영향에 대하여 연구를 진행하였다.

본 연구에 적용된 연소기의 공기 유속은 매우 중요한 조건이며, 이는 버너의 NO<sub>x</sub> 배출 성능과 RDL(Register Draft Loss)과 밀접한 관련이 있는 것으로 사료된다. 연소기의 실제 공기유속에 따른 버너 성능을 확인하기 위해 설계 공기 유속은 30m/s에서 80m/s사이의 조건을 적용하여 연구를 수행하였다. 그 결과 설계 유속이 증가할수록 배출되는 NO<sub>x</sub>는 감소하지만 유속이 높을수록 증가하는 RDL(Register Draft Loss)로 인해 공기부족으로 운전 가능한 최대부하가 감소한다. 그 결과(Fig. 3) 45m/s와 50m/s를 비교하면 NO<sub>x</sub> 배출 농도가 낮아짐을 관찰 할 수 있지만 50m/s와 60m/s를 비교하면 큰 성능 향상을 기대할 수 없다. 또한 60m/s의 경우 최대 공급 가능 부하가 약 80%로 나타났고, 75m/s의 경우 75%로 나타났다.

\* 한국생산기술연구원 고온에너지시스템그룹

† 연락처, swkim@kitech.re.kr

TEL : (041)589-8535 FAX : (041)-589-8331

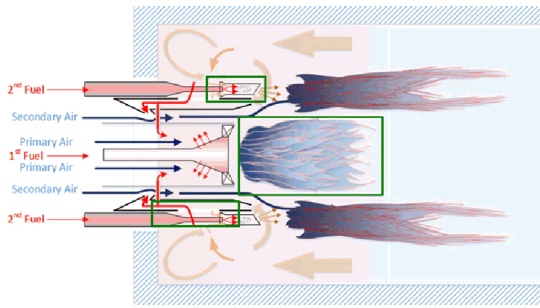


Fig. 1 Schematic diagram of burner

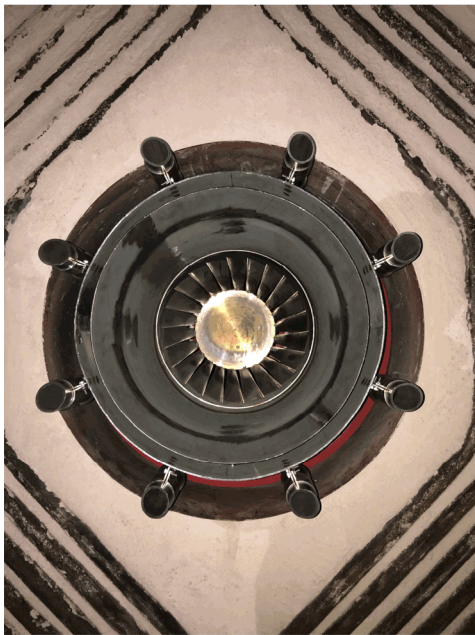


Fig. 2 Picture of burner exit

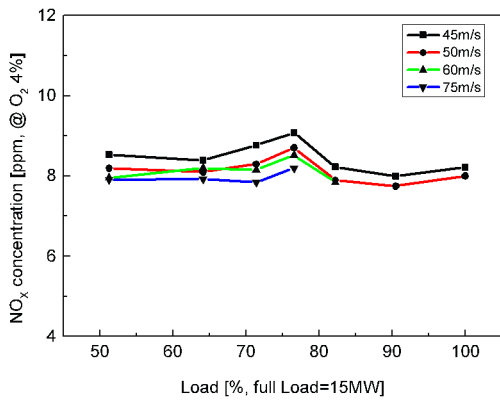


Fig. 3 Effect of air velocity on NO<sub>x</sub> concentration

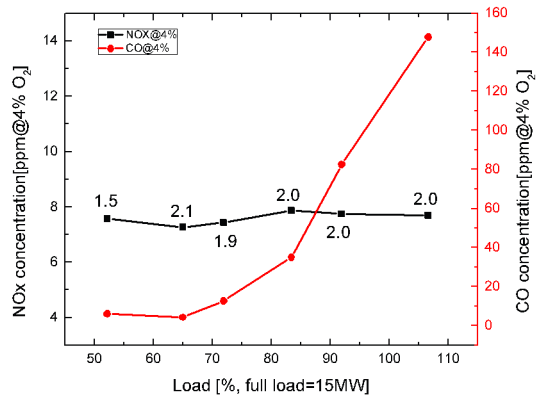


Fig. 4 Effect of thermal load on NO<sub>x</sub> and CO concentration

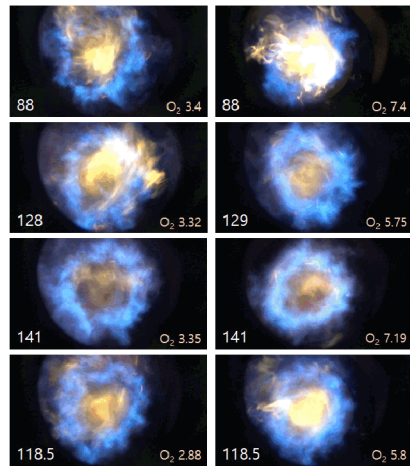


Fig. 5 Picture of primary flame on excess air ratio

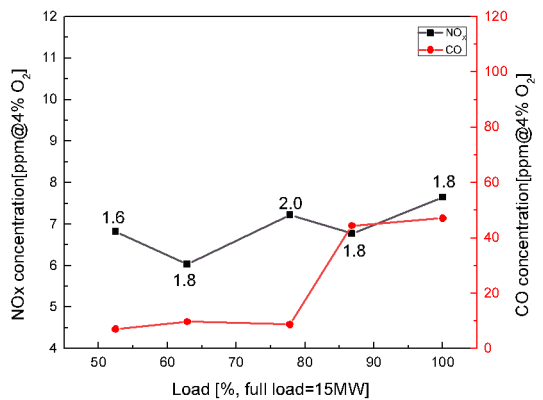


Fig. 6 NO<sub>x</sub> and CO concentration at optimized condition

따라서 본 연구에서는 50m/s의 설계유속 조건  
의 버너를 적용하여 1차 화염 안정화 실험을 수  
행하였다.

Fig. 1의 개념도와 Fig. 2의 연소기 정면사진을  
통해 나타낸 바와 같이 연소기의 화염은 1차 화  
염과 2차 화염으로 나누어 형성된다. 이 중 1차  
화염은 연소 안정성과 매우 밀접하다. 따라서 본  
연구에서는 기존 연구에 적용된 설계 개념을 유  
지하며 1차 화염의 과잉공기비를 조절할 수 있도  
록 설계하여 연구를 수행하였으며, 기존 연구와  
의 비교를 위해 1차화염의 고 공연비(excess air  
ratio 1.3이상-Fig. 4)의 결과를 나타내었다. Fig.  
4에서 NO<sub>x</sub>는 8ppm이하를 나타내지만 80% 및  
100%부하에서 CO가 높게 나타났다. 이의 개선  
을 위해 1차 화염의 과잉공기비를 따로 변경시켜  
화염을 관찰한 결과 과잉공기비가 높을수록 화염  
영역이 작아짐을 확인했다. 이러한 결과를 종합  
하여 1차 화염의 과잉공기비(배기가스 O<sub>2</sub>농도)를  
약 3%로 설정하고 버너 성능 실험을 수행한 결  
과(Fig. 6) NO<sub>x</sub>농도와 배기가스 O<sub>2</sub>의 농도가  
10%정도 감소하고, CO 농도가 50ppm이하로 나  
타났다.

본 연구를 통해 NO<sub>x</sub> 농도 8ppm이하급 저공해  
연소기의 주요 설계 요소와 화염안정성을 확보하  
기 위한 설계변수 및 설계 요소를 도출하였다.

## 후 기

본 연구는 2017년도 산업통상자원부의 재원으로  
한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아  
수행한 연구 과제입니다. (No.2018201010635B)

## 참고 문헌

- [1] S.W. Kim., "Study on combustion  
characteristics of Air/Fuel staged liquid fuel  
burner," KSME, pp. 2757-2760.
- [2] Industrial Burners handbook, C. E. Baukal,  
CRC Press.
- [3] Boilers and Burners Design and Theory,  
Frederick F. Ling, Springer
- [4] Correa, S. M., "A review of NO<sub>x</sub> formation  
under gas-turbine combustion conditions,"  
Combustion Science and Technology, Vol. 87,  
1992, pp. 329-362.
- [5] M.U. Mun, S.W. Kim., "An experimental  
studies on flame and NO<sub>x</sub> emission  
characteristics of rapid mix combustor,"  
KOSCO, pp. 122-127.
- [6] M.C. Shin, S.W. Kim., "An experimental  
studies on flame and NO<sub>x</sub> emission

characteristics of front mixing premix  
combustor," KOSCO, pp. 22-27.

[7] 권민준, 김대해, 김세원, 김용모, "내부재순환  
기술을 적용한 초저 NO<sub>x</sub> 연소기 운전특성에 관  
한 실험적 연구," 54<sup>th</sup> KOSCO proceeding

[8] 권민준, 김대해, 김세원, 김용모, "내부재순환  
기술을 적용한 초저 NO<sub>x</sub> 연소기 운전특성에 관  
한 실험적 연구-part II," 55<sup>th</sup> KOSCO  
proceeding

# FERPM을 적용한 석탄 바이오매스 혼소시 접선연소 보일러의 최적 운전조건에 대한 연구

오현석\*, 김강민\*\*, 전충환\*\*†

## Applying FERPM to Coal and Biomass Co-firing in Tangentially Fired Boiler for Optimal Fuel Injection Position

Hyunsuk Oh\*, Kangmin Kim\*\*, Chunghwan Jeon\*†

### ABSTRACT

To reduce emissions from coal-fired power plants, researchers focus on coal and biomass co-firing technology. Many studies on solid fuel have been conducted, but research on the combustion characteristics of biomass char is limited. FERPM predicts char combustion with high accuracy by introducing experimental data-based parameters of biomass char and has not yet been applied in numerical simulation. In this study, FERPM is numerically applied to char combustion of biomass fuel.

**Key Words** : Biomass, CFD, Co-firing, FERPM, Tangentially Fired Boiler

전 세계 에너지 생산에서 석탄 화력발전은 약 30% 이상의 상당한 비중을 차지한다<sup>1)</sup>. 기술이 점차 발전되면서 대기오염물질인 질소산화물과 황산화물 배출은 대폭 줄어들었지만 이산화탄소 배출은 아직 문제가 되고 있다<sup>2)</sup>. 이를 해결하기 위한 여러 방안 중 기존 화력발전엔 안정적인 전력을 제공할 수 있는 실제 재생 가능한 에너지원을 이용하여 석탄 일부를 바이오매스로 대체함으로써 해결할 수 있다<sup>3)</sup>. 바이오매스 화는 석탄 화보다 입자 구조가 불규칙하며, 화 내의 무기물 구성으로 인해 석탄 화와 다른 연소 거동을 나타낸다. 따라서 정확도 높은 예측을 위하여 바이오매스 화 연소 모델이 필요하다<sup>4)</sup>. Kevin 등은 석탄과 바이오매스 화의 열 중량분석을 통해 얻은 데이터를 통해 RPM(Random Pore Model)<sup>5)</sup>을 변형시킨 FERPM(Flexibility-Enhanced Random Pore Model)을 제안하였다<sup>6)</sup>. FERPM은 RPM의 다공성 입자의 반응도에 따라 내부 기공 구조가 변화한다는 기본 이론에 더하여, 연료 종류에 따른 반응속도의 차이를 피팅할 수 있는 실험 데이터 기반의 파라미터를 도입하여 연소성을 효과적으로 예측한다. 특히 바이오매스의 화 연소에 있어 기존의 연소 모델에 비하여 우수한 정확도를 보이나 아직 전산해석에 적용한 사례는 없다. 본 연구에서는 바이오매스 연료 화 연소모델에 FER

PM을 적용하고 ANSYS Fluent를 사용하여 석탄 바이오매스 혼소시 500MW급 보일러에서의 최적 운전조건을 도출한다.

Fig. 1은 수치해석에 사용된 500MW급 보일러 형상이다.

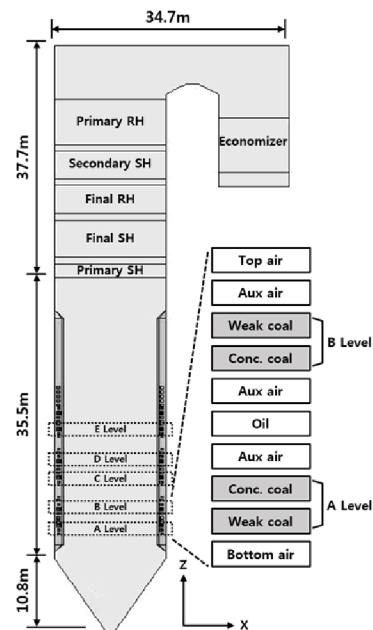


Fig. 1 Schematic configurations of the tangentially fired boiler

\* 부산대학교 기계공학부  
 \*\* 부산대학교 화력발전에너지분석기술센터  
 † 연락처자, chjeon@pusan.ac.kr  
 TEL : (051)510-3035

**Table 1** Properties of biomass fuel and coal

Analysis		Value	
		Glencore	Wood Pellet
Proximate analysis (ADB, wt%)	Moi.	9.60	2.76
	Vol.	34.00	75.65
	Ash.	9.30	2.18
	F.C.	47.10	19.41
Ultimate analysis (DAF, wt%)	C	72.14	48.10
	H	4.63	6.20
	O	11.06	45.10
	N	2.20	0.60
	S	0.67	0
HHV(MJ/kg)		25.309	18.741

연료 주입구의 위치를 5단계(A, B, C, D, E)로 구분하며 위치에 따른 최적 운전조건을 도출한다.

본 연구에서 사용된 석탄은 Glencore(RUS)와 목질계 바이오매스 Wood Pellet이며 각 시료의 물성은 Table 1과 같다. 바이오매스 화에 적용되는 연소 모델은 FERPM으로 FLUENT의 User define function으로 적용하며 아래와 같이 표현된다.

$$\frac{dm_p}{dt} = m_{p,c} - m_{p,c0} k_{FERPM} [(1-X)^a \sqrt{1 - \Psi_{FERPM} \ln(1-X) \tanh(cX)} + (1-X)^b] \quad (1)$$

하첨자  $p, c$ 는 각각 입자와 화를 나타내고  $\Psi_{FERPM}$ 은 바이오매스 입자의 구조 파라미터이다.

**Table 2** Numerical analysis conditions and models used in the simulation

Input Parameter	
Particle track	Discrete Phase Model(DPM)
Turbulence	Realizable k-epsilon
Radiation	Discrete Ordinates
Gas phase reaction	Finite rate/Eddy dissipation
Absorption coeff./ Emissivity	WSGGM
Devolatilization	Single rate model/ Two-competing reaction model
Char combustion	FERPM

며  $a, b, c$ 는 바이오매스 연료인 Wood Pellet을 TGA 실험으로부터 도출해낸 FERPM 상관계수이다.

석탄 바이오매스 혼소시 보일러 전산해석에 사용된 Sub-model은 Table 2에 나타내었다.

## 후 기

본 연구는 2018년도 지식경제부의 재원으로 한국 에너지 기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다.

## 참고 문헌

- [1] Pawel Madejski, "Thermal Power Plants : New Trends and Recent Developments", IntechOpen, Poland, 2018, pp. 1-11.
- [2] S.R. Gubba et al., "Numerical modelling of the co-firing of pulverized coal and straw in a 300MWe tangentially fired boiler", Fuel Processing Technology, Vol. 104, 2012, pp. 181-188.
- [3] Ehsan Houshfar et al., "NOx emission reduction by staged combustion in grate combustion of biomass fuels and fuel mixtures", Fuel, 2012, Vol.98, pp.29-40;
- [4] Mary J. Wornat et al., "Single-particle combustion of two biomass chars", Symposium (International) on Combustion, Vol. 26, Issue. 2, 1996, pp. 3075-3083.
- [5] Bhatia S. K., D. D. Perlmutter, "A random pore model for fluid-solid reactions : I. Isothermal, kinetic control", AlChE, Vol. 26, Issue 3, 1980, pp. 379-386.
- [6] Kevin Yohanes Lisandy et al., "Enhanced accuracy of the reaction rate prediction model for carbonaceous solid fuel combustion", Energy & Fuel, Vol. 31, Issue 5, 2017, pp. 5135-5144.



## 초임계 이산화탄소 발전용 연소기의 수치모사: 산화제 온도에 따른 화염 형상 변화를 중심으로

김남수\*, 이대근\*†, 노동순\*, 고창복\*, 이은경\*, 광영태\*, 김승곤\*, 이민정\*, 정우남\*, 이후경\*, 서동명\*

### Numerical Simulation of a sCO<sub>2</sub> Combustor with an Emphasis on Oxidizer Temperature Dependence of Flame Shape

Namsu Kim\*, Dae Keun Lee\*†, Dong Soon Noh\*, Chang Bog Ko\*, Eun Kyung Lee\*, Young Tae Guahk\*, Seung Gon Kim\*, Min Jung Lee\*, Woo Nam Jung\*, Hookyung Lee\*, Dong Myung Seo\*

본 연구는 한국에너지기술연구원(KIER)에서 개발중인 직접 가열식 초임계 이산화탄소 발전용 순산소 연소기를 수치모사한 것이다[1]. 초임계 이산화탄소 발전사이클은 높은 효율(59%), 청정 연소, 그리고 편리한 이산화탄소 포집 특성을 가지고 있어 차세대 발전시스템으로 주목받고 있다. 사이클이 59%의 높은 효율로 발전하기 위해서는 연소기 압력 300 bar 그리고 연소기 출구온도 1150 °C의 조건을 만족해야 한다. 현재 KIER에는 100 bar 이상의 압력에서 작동하도록 설계된 200 kW급의 연소기와 고압실험용 시설이 설치되어 있으며 지속적으로 압력과 발전용량을 늘려가며 실험을 진행할 예정이다.

고압 유체를 사용하는 실험을 설계할 때는 압력강하 및 부피팽창에 의한 온도변화, 줄-톰슨 효과(Joule-Thomson effect)를 고려해야 한다. 특히 이산화탄소는 줄-톰슨 효과가 두드러지는 유체이다. KIER의 이산화탄소 탱크 압력이 300 bar 이상이며 연소기 압력은 상대적으로 낮기 때문에(1~100 bar), 줄-톰슨 효과를 고려할 경우 유체의 상변화로 인해 유량제어 및 화염안정성에 영향을 줄 수 있을 것으로 예상된다.

Fig. 1은 이산화탄소의 등엔탈피 커브로 이를 통해 줄-톰슨 효과를 정량적으로 파악할 수 있다. 예를 들어 Fig. 1과 같이 이산화탄소가 300 bar 25 °C에서 저장되어 있고 이를 10 bar의 연소기로 분사할 경우 연소기 입구에서 유체의 온도는 -40 °C이다. 압력 50 bar 부근에서 압력에 따라 밀도와 온도가 가파르게 변한다. 이처럼 밀도와 온도가 압력에 의해 크게 변하여 상변화를 수반하는 경우 유로에서 압력 섭동과 공극이 발생할 수 있다. 또한 낮은 온도의 이산화탄소가 연소기 내부로 유입되는 경우 화학반응속도 감소

에 의해 화염이 불안정해질 것으로 예상된다.

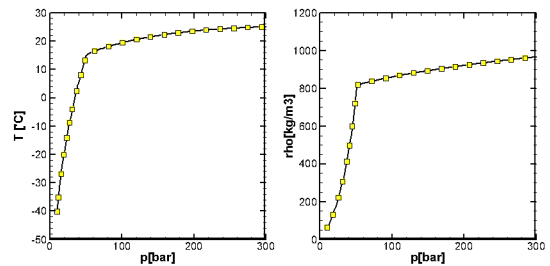


Fig. 1. Isentropic curve of CO<sub>2</sub>; Temperature(left); Density(right).

이에 저자는 KIER에서 수행된 실험과 유사한 조건에서 줄-톰슨 효과에 의해 낮은 온도의 산화제가 순산소 연소기 내부로 유입될 때 산화제의 온도에 따른 화염 안정성의 변화를 파악하기 위해 LES를 사용하여 연소과정의 수치모사를 수행하였다. 초임계 및 천이임계 유체들의 혼합 및 반응을 모사하기 위해서는 상태방정식의 비선형성에 의한 비정상적 압력 섭동을 억제하는 수치 해석기법이 필요하다. 대부분의 상용 CFD 코드들이 이러한 수치기법을 포함하고 있지 않기 때문에 연소해석을 위한 수치해석 코드는 OpenFOAM[2]을 기반으로 하여 KIER 신연소 그룹에서 직접 개발하였다. 초임계 및 천이임계 영역의 비정상 유체거동을 안정적으로 모사하기 위해 압력기반 SLAU2기법[3]을 도입하였으며 Flamlet Progress Variable 모델[4]을 사용하여 비예혼합화염의 온도 및 화학종을 효율적으로 근사하였다. 열역학적 물성치는 넓은 범위의 압력과 온도에서 그 정확도와 효율성이 검증된 RK-PR 상태방정식[5]을 사용하였다.

Fig. 2는 연소기 압력 100 bar에서 연료와 산화제가 25 °C의 온도로 분사될 때 연소기 내부의 온도를 나타낸 것이다. 이 계산 조건은 연료와 산화제가 연소기에 분사되기 전에 충분히 가열된 상태를 나타낸 것으로 상대적으로 저압조건(43

\* 한국에너지기술연구원

† 연락저자, [dklee@kier.re.kr](mailto:dklee@kier.re.kr)

TEL : (042)860-3341 FAX : (042)-860-3133

bar)의 수치해석 결과[1]에서 나타난 화염의 형상과 유사하였다. 그러나 산화제에 충분한 열원이 공급되지 않는 경우 열역학적 불성치 차이로 인해 전혀 다른 유동장과 온도분포를 보일 것으로 예상된다. 본 연소기는 스웰을 통해 비예혼합 화염을 안정적으로 제어하기 때문에 중앙의 재순환 영역이 화염의 안정화에 필수적이다. 이 재순환 영역을 생성하기 위해서는 산화제의 분사속도가 특정 값 이상이 되어야 하는 것으로 확인되었는데, 온도에 따라 밀도가 민감하게 변하는 고압 이산화탄소의 특성상 고정된 부하조건에서 산화제를 가열하는 열량이 충분하지 않은 경우, 즉 산화제의 온도가 낮은 경우 이산화탄소는 액체와 같은 높은 밀도를 나타내어 재순환 영역의 부재로 인한 소화가 발생할 수 있다.

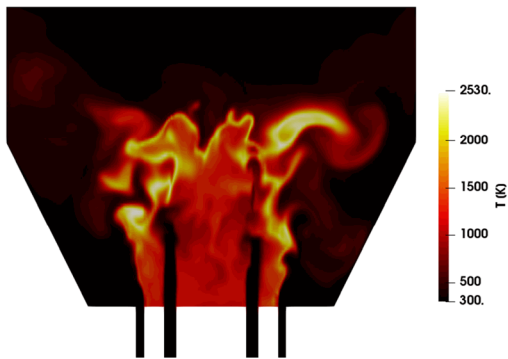


Fig. 2. Instantaneous temperature distribution inside the sCO<sub>2</sub> combustor.

## 후 기

본 연구는 한국에너지기술연구원 주요사업(B9-2431)을 재원으로 수행한 연구과제의 결과입니다.

## 참고 문헌

- [1] 김남수, 고창복, 광영태, 김승곤, 노동순, 이민정, 이은경, 정우남, 심근선, 이대근, "초임계 이산화탄소 발전용 고압 순산소 연소기의 수치모사: Allam Cycle용 10MWth급 연소기의 전산 모델링", 제 57회 KOSCO SYMPOSIUM 초록집 (2018년도 추계학술대회)
- [2] OpenFOAM, <https://openfoam.org/>
- [3] K. Kitamura, E. Shima, "Pressure-equation-based SLAU2 for oscillation-free,

supercritical flow simulations", *Comput. Fluids*, Vol. 163, 2018, pp. 86-96.

[4] C.D. Pierce, P. Moin, "Progress-variable approach for large-eddy simulation of non-premixed turbulent combustion", *J. Fluid Mech.*, Vol. 504, 2004, pp.73-97.

[5] M. Cismondi, J. Mollerup, "Development and application of a three-parameter RK-PR equation of state", *Fluid Ph. Equilibria*, Vol.232, 2005, pp.74-89.

# 마이크로믹서 가스 터빈 모델 연소기에서의 메탄/수소/공기 연소에 대한 배기 특성 연구

최재홍\*, 안명근\*, 광상혁\*, 이종근\*\*\*, 윤영빈\*\*\*,†

## Experimental Analysis of Methane/Hydrogen/Air combustion in the Micro-mixer gas turbine model combustor.

Jaehong Choi\*, Myunggeun Ahn\*, Sanghyeok Kwak\*,

Jonggeun Lee\*\*\*, Youngbin Yoon\*\*\*,†

### ABSTRACT

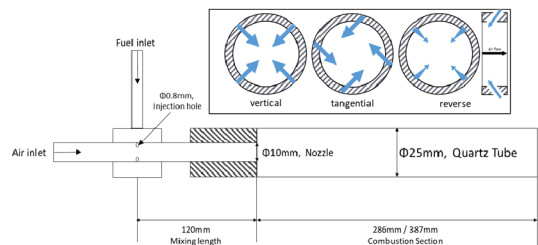
Interest in Hydrogen Gas turbines increases as a concern in environmental issue grows. But the Hydrogen Gas turbine has a critical drawback in flashback problem. Micro-mixer combustor has been studied for solution of this problem. This research examine the combustion emission characteristic of micro-mixer combustor. The experiment was performed on a single nozzle micro-mixer combustor with three different mixing type, including vertical, tangential, and reverse injection type. Fuel injected 0.12m before combustion, which gives partially premixed flame. Air and Fuel temperature and pressure were set ambient condition at combustion section. The combustion emission gas particle were measured at 2m after combustion section with Testo-350 gas detector. OH\*-chemiluminescence with pressure perturbation were measured simultaneously. Hydrogen fraction in fuel gives critical impact on combustion instability. It reduces the convection time of fuel/air mixture and increases pressure perturbation intensity. This can be seen on every mixing type. The tangential mixing shows more intense perturbation than the others. this pressure perturbation effect influences the NO<sub>x</sub> emission characteristic. As the perturbation intensity increases, the NO<sub>x</sub> creation after the flame increases and also CO creation.

**Key Words** : Micro mixer, Combustion, Dynamic characteristics, Experimental study

세계적으로 환경 문제에 관한 관심이 증가하면서, 에너지 부문에 대한 환경 규제 또한 증가하고 있다. 그중 가장 중심이 되는 것이 바로 CO, CO<sub>2</sub>, 그리고 NO<sub>x</sub> 등의 배기가스의 배출 제한이다. 수소 연료는 연소 생성물로서 CO와 CO<sub>2</sub>를 생성하지 않기 때문에, 기존의 천연가스 등의 탄화수소 연료가 가지지 못하는 장점이 있다. 하지만, 수소 연료 가스터빈은 수소 자체의 높은 화염 전달 속도로 인해, 역화의 위험이 크다는 점에서 지금까지 널리 사용되지 못하고 있다. [1]

마이크로믹서 연소기는 이러한 문제의 해결책으로서 새롭게 연구되고 있는 연소기이다. 마이크로믹서는 다수의 소형 노즐을 배치하여, 화염의 크기를 감소시키고, 유속을 증가시키며, 공기와 연료의 혼합 강도를 최대로 증가시켜, 역화의 위

험을 최소화하고, 더불어 연소 후 발생하는 NO<sub>x</sub> 생성을 최소화하는 장점이 있다. [2]



**Fig. 1** Schematic of Micromixer combustor apparatus.

본 연구는 그림 1과 모델 마이크로믹서 연소기에서 진행되었다. 혼합 방식에 따른 연소 특성을 파악하기 위해, 수직 분사, 접선 분사, 역 분사 방식의 3가지 연료-공기 혼합 방식이 도입되었다. 연료는 메탄과 수소의 혼합 기체를 이용하였다. 혼합 비율에 따른 연소 특성을 보기 위해 메탄/수소 비율 100/0, 75/25, 50/50, 25/75, 0/100, 5가지 혼합 비율의 기체가 사용되었다. 또한, 연

\* 서울대학교 우주항공공학과

\*\* 서울대학교 항공신기술연구소

\*\*\* University of Cincinnati Dept. of Aerospace Eng & Eng Mechanics

† 연락저자, ybyoon@snu.ac.kr

TEL : (02)880-1904

소 불안정 측면에서 배기 특성과의 상관관계를 파악하기 위해, 연소실 길이를 12in 와 16in로 변화시키며 측정하였는데, 12in에서는 안정적인 화염이 발생하였고, 16in에서는 높은 진동의 불안정한 화염이 발생하였다.

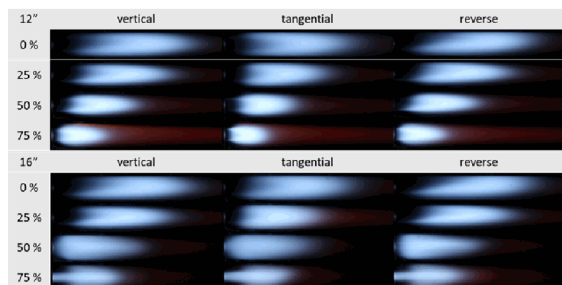


Fig. 2 Averaged Flame Image of micromixer combustor at 12" and 16" combustor. (Pictured by Canon Eos-7D, F4.5, iso250, 1")

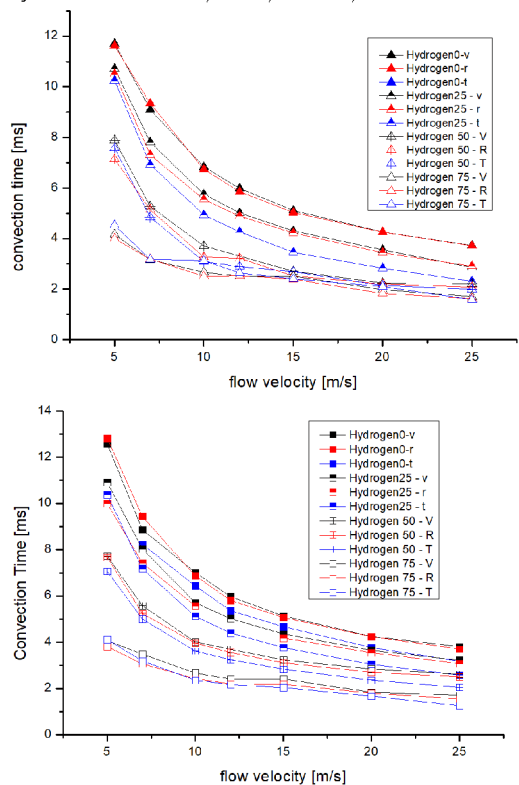


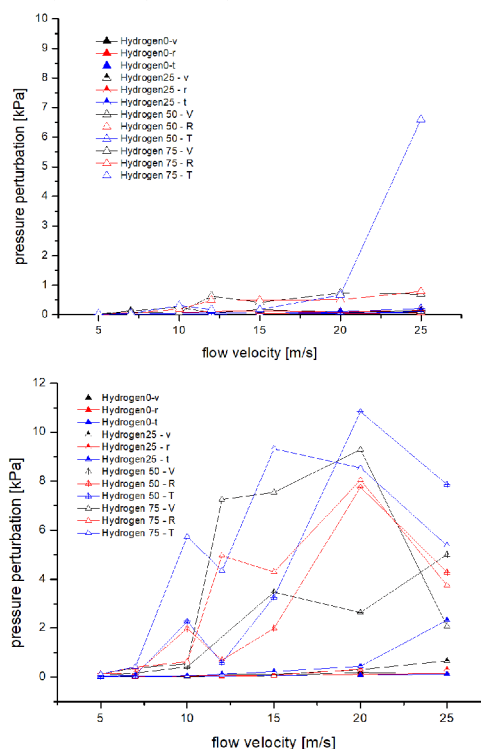
Fig. 3 Convection Time vs Fuel/Air mixture flow velocity at 12 "(up) and 16" (down) combustor with equivalent ratio of 0.8 (Black-v:vertical, Red-r:reverse, Blue-t:tangential)

그림2는 12in와 16in 연소기에서 각각 수소 비율에 따른 화염의 형상을 나타낸 것이다. 당량비

는 0.8이며, 유속은 모두 15m/s로 동일하다. 모든 화염은 공통으로 제트 화염의 형상을 보인다. 수소의 비율이 증가할수록 화염 중심의 위치가 짧아지는 것을 확인할 수 있다. 이는 12in와 16in 연소기 모두에서 보인다. 이러한 경향은 연료의 대류 시간을 감소시키고 동압 섭동의 세기를 증가시키는 결과를 보여준다. 그림3에서는 다양한 혼합 방식과 유속에서의 연료 대류 시간을 나타내었다. 연료 대류 시간은 화염 중심위치를 노즐 입구에서의 연료/공기 혼합 기체의 속도로 나누어 계산하였다. 그림3을 살펴보면, 유량이 증가할수록, 연료의 대류 시간이 감소하는 것을 알 수 있다. 하지만, 대류 시간을 결정하는 가장 주요인은 수소 비율임을 알 수 있다.

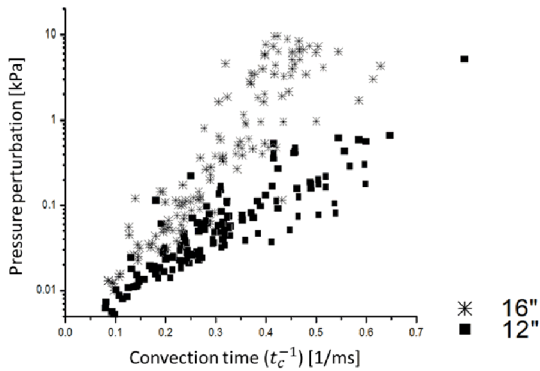
그림4는 동압 세기를 유속에 따라 나타내었다. 수소 비율이 증가할수록 동압의 세기가 증가하는 것은 두 연소기 모두 동일하게 보였다. 하지만 12in 연소기에서는 한 경우를 제외하고 1kPa를 넘는 섭동이 발생하지 않았다. 반면 16in 연소기의 경우 수소 50%, 75% 이상에서 강한 연소 불안정 현상이 발생하였다. 이는 수소 비율의 증가로 인해 감소한 대류 시간과 연소기의 음향특성과 관계된 것으로 보인다.

연소기 내 동압 섭동과 -대류 시간 관계를 살펴보면, 12in와 16in 연소기 모두 대류 시간과 동압의 세기가 반비례함을 알 수 있다. 이는 그림5에서 확인할 수 있다. 그림5에서는 동압의 세기( $p'$ )와 대류 시간의 역수로 그래프를 나타내었다.



**Fig. 4** Pressure perturbation intensity vs Fuel/Air mixture flow velocity at 12 “(up) and 16” (down) combustor with equivalent ration of 0.8(Black-v:vertical, Red-r:reverse, Blue-t:tangential)

Technology.  
 [2] Medhat A. Menitallah, et al., 2018, “Review of Novel Combustion Techniques for Clean Power Production in Gas Turbines.”, Energy&Fuels.



**Fig. 5** Pressure perturbation intensity(log scale) vs reciprocal of convection time at 12 “(up) and 16” (down) combustor (Black square:12 in, Asterisk:16 in)

대류 시간과 압력 섭동 간의 관계를 살펴보기 위해 압력 섭동과 대류 시간의 역수 간의 그래프를 그려보면 그림5 같이 나타낼 수 있다.

보이는 것처럼, 압력 섭동은 대류 시간의 역수에 지수적으로 비례한다. 이는 12in, 16in 모두에서 발생하는 현상으로, 대류 시간이 감소할수록 연소기 내 동압 섭동이 증가하는 것을 볼 수 있다. 연소 불안정을 연소실 내 압력의 1%라 했을 때, 1kPa를 초과하는 임계 대류 시간은 12 “에는 대략 1.5ms, 16” 에서는 2.9ms이다.

### 후 기

본 연구는 서울대학교 차세대 우주추진 연구센터와 연계된 미래창조과학부의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행한 선도연구센터지원사업(NRF-2013R1A5A1073861)의 연구 결과입니다. 또한 산업통상자원부의 산업기술혁신사업(No.10067074) 및 한국연구재단-글로벌 박사 펠로우십사업 (NRF-2017H1A2A1043206)의 지원을 받은 사업입니다. 이에 감사의 말씀을 올립니다.

### 참고 문헌

[1] Tim Lieuwen, et. al. 2008, “Burner Development and Operability Issues Associated with Steady Flowing Syngas Fired Combustors.”, Combustion Science and

## 소형 디젤엔진에서 분무 간섭과 화염 중첩이 배기에 미치는 영향

홍동우\*, 강승우\*, 배충식\*†

### Effects of Spray Interference and Flame-overlap on Emissions in a Diesel Engine

Dongwoo Hong\*, Seungwoo Kang\*, Choongsik Bae\*†

#### ABSTRACT

Injector nozzle parameters are involved in a formation of air-fuel mixture, so improvement of nozzle parameters can make the combustion and emissions better. In this study, among injector nozzle parameters, effects of orifice diameter and nozzle number on emissions were investigated. As the results of diesel engine experiment, there were different exhaust characteristics with different nozzle parameters. In order to identify the result of the engine experiment, the flame visualization was conducted in CVCC.

**Key Words** : Diesel, Flame visualization, Injector nozzle parameters,

디젤 엔진은 가솔린 엔진과 함께 차량 엔진으로서 가장 대중적으로 이용되는 엔진이다. 높은 열효율과 토크를 바탕으로 승용차, 상용차, 건설기계 등에서 적용되고 있다. 그러나 디젤 엔진은 균질 혼합기 상태에서 점화원을 통해 연소되기 때문에 상대적으로 연료 농후 영역에서의 연소가 주를 이루게 된다. 그리고 이 과정에서 국부적으로 농후한 영역에서 입자상 물질(PM)이, 고온의 이론 공연비 영역에서 질소산화물(NOx)이 다량 발생하는 단점을 갖는다.

최근 세계적으로 환경 문제가 대두되면 배기배출물에 대한 규제가 점차 강화되며 입자상 물질과 질소산화물에 대한 감축 요구가 증가하고 있다. 이러한 강화되는 규제를 만족하기 위해 연소 개선을 통한 배기배출물 저감이 필요하다. 따라서 본 연구에서는 소형 디젤엔진에서 분공 특성에 따른 입자상 물질과 질소산화물 배출량을 비교하고, 배출량의 원인을 분석하였다.

본 논문에서는 여러 분공 인자들 중 분공직경과 분공수의 영향에 대해 연구하였다. 분공직경을 키우면 연료 공급 속도를 확보할 수 있지만, 분무 미립화가 악화되어 배기 특성이 악화된다.[1] 따라서 분공직경을 감소하되, 분공수를 증가하여 연료 공급 속도를 확보하는 방안, 즉 분

사기 다공화를 통한 연료 공급 속도를 확보하는 방안이 바람직하다. 그러나 분공수가 일정 수준 이상 많아지게 되면 분무 간섭을 초래할 수 있고, 분공직경 감소는 공기 이용률 저감을 초래할 수 있어, 이 또한 배기 특성에 영향을 주므로 이에 대한 연구가 필요하다.[2]

본 연구에서 상용 4기통 2.0L 직접 분사 디젤 엔진을 499cc 단기통 엔진으로 개조하여 실험을 진행하였다. 흡기 밸브 상단과 배기 밸브 후단을 연결하여 EGR 적용률을 조절하여 동일 NOx 기준 PM 배출량을 비교하였다. PM을 제외한 배기가스(NOx, CO<sub>2</sub>, CO, HC)의 경우 배기 가스 분석 장치를 통해 분석하였고, PM은 배기농도계를 통해 FSN 단위로 취득후 g/kWh로 환산하여 표기하였다. 엔진 실험을 통해 분공직경과 분공수가 서로 다른 5개의 인젝터의 배기 특성을 비교하였다.

먼저 분공수가 동일하고 분공직경이 서로 다른 인젝터를 비교한 결과, 분공직경이 감소함에 따라 배기 특성이 향상되는 결과를 보였다. 분공직경이 감소하게 되면 분무 미립화가 개선되기 때문에 배기 특성이 개선되었다.

다음으로 분공직경이 동일하고 분공수가 서로 다른 인젝터의 배기 특성을 비교하였다. 실험 결과, 분공직경 117μm에서는 분공수가 늘어남에 따라 배기 특성이 향상되었으나, 분공직경 110μm에서는 분공수가 늘어남에 따라 배기가 오히려 악화되는 특성을 보였다. 분공직경 117μm, 110μm에서 분공수 증가에 따라 상반된 결과가 나타

\* 한국과학기술원 기계공학과

† 연락처자, [csbae@kaist.ac.kr](mailto:csbae@kaist.ac.kr)

TEL : (042) 350-3063 FAX : (042) 350-5023

난 원인을 규명하기 위해 정적 챔버 내 가시화 실험을 진행하였다.

분무 간섭의 영향을 크게 두가지로 나누어 확인하였다. 화염 초기 부분에서 분무 간섭의 영향과 화염 후단에서 연소실에 의한 화염 증첩의 영향을 따로 분석하였다.

먼저 화염 초기 부분의 분무 간섭의 영향을 확인하기 위해서 정적 챔버에서 휘염 발생 위치와 부상 화염 발생 위치를 비교하였다. 직접 화염 가시화를 통해 휘염 발생 위치를 확인하였고, OH 화학발광 실험을 통해 부상 화염 발생 위치, 즉 화염 lift-off length를 측정하였다.

다음으로 화염 증첩에 의한 영향을 확인하기 위해 정적 챔버 내부에 연소실 내벽의 영향을 모사한 곡면의 구조물을 설치하여 실험을 진행하였다. 동일 온도 및 압력 조건에서 휘염 발생량이 많은 것은 soot 산화 과정이 많이 일어나는 것을 의미하므로, 두 분무 줄기 사이의 휘염 발생량을 비교하여 soot 발생량을 간접적으로 비교하였다.[3][4]

상기 가시화 실험의 결과, 엔진 실험의 배기 결과와 상관된 결과를 얻었다.

Two-Color Method”, SAE paper 790491, 1979.

## 참고 문헌

- [1] Pengbo Dong, Jun Yamauchi, Keiya Nishida, and Youichi Ogata, "Hole Geometrical Effect on Internal Flow, Fuel Atomization and Spray Evaporation of Multi-Hole Nozzle for Diesel Engine", SAE Technical Paper 2017-01-0860, 2017
- [2] J. Benajes, S. Molina, K. De Rudder, D. Maroteaux, and H. Ben Hadj Hamouda, "The Use of Micro-orifice Nozzles and Swirl in a Small HSDI Engine Operating at a Late Split-injection LTC Regime", Proc. IMechE Vol. 220 Part D: J. Automobile Engineering, pp. 1807-1817, 2006
- [3] John E. Dec, "Soot Distribution in a D.I. Diesel Engine Using 2-D Imaging of Laser-induced Incandescence, Elastic Scattering, and Flame Luminosity", International Congress & Exposition Detroit, Michigan February 24-28, 1992
- [4] Matsui, Y., Kamimoto, T., and Matsuoka, S., "A Study of the Time and Space Resolve measurement of Flame Temperature and Soot Concentration in a D.I. Diesel Engine by the

# CONVERGE 수치해석을 통한 신형 GP 로터리 엔진의 유동 및 성능 분석

유호현\*, 김도현\*, 박영준\*, 이창언†

## Analysis of Flow and Performance of New Type GP Rotary Engines Using CONVERGE Numerical Analysis

HoHyun Yu\*, DoHyun Kim\*, YoungJoon Park\*, ChangEon Lee†

### 1. 서론

로터리 엔진과 일반적인 왕복동 엔진을 구별하는 것에는 다양한 기준점이 있다. 그 중 엔진을 구성하는 부품들을 살펴보면, 왕복동 엔진의 경우 피스톤, 커넥팅 로드, 캠축, 밸브, 밸브 스프링, 타이밍벨트, 타이밍 기어, 크랭크 축 등으로 최소 40여개의 움직이는 부품이 있다. 그에 반해 로터리 엔진은 동력 축을 포함하여 움직이는 부품이 로터, 축, 기어 등으로 왕복동 엔진에 비해 부품의 개수가 현저히 적어 중량대비 출력이 좋고, 소음이 적다는 등의 장점이 있다[1]. 또한 로터리 엔진은 왕복동 엔진과 달리 심한 방향 전환 없이 한 방향으로 끊임없이 회전하기 때문에 동력전달 시스템에도 유리한 측면이 있다[2].

이러한 로터리 엔진은 각 챔버에서 흡입, 압축, 폭발, 배기 순으로 4개의 행정을 갖는 오토 사이클을 수행한다. GP 엔진의 경우 로터의 회전에 의해 각 3개의 챔버에서 팽창과 수축을 반복하며 행정을 갖는다. 먼저, 로터의 흡기 포트가 한 챔버를 통과하는 순간에 챔버의 부피가 증가하며 공기 연료 혼합물을 챔버로 흡입하는 흡기 행정이 시작된다. 이후 흡기포트가 챔버를 통과하면 챔버는 밀폐되어 부피가 작아지고 혼합물이 압축되어 압축 행정이 시작된다. 챔버의 부피가 최소치에 근접하면 스파크 플러그에서 점화하여 폭발 행정이 시작된다. 이때 연소 압력은 챔버의 체적을 팽창시키며 로터를 회전시킨다. 이후 로터의 배기포트가 챔버를 통과하는 순간부터 고압의 연소가스가 배출되어 배기 행정이 시작된다. 배기 행정에서는 로터가 계속 회전하면서 챔버 체적이 작아지고 이를 통해 잔류 가스가 배기된다. 다시 챔버 체적이 최소가 되면서 로터의 흡기포트가 챔버에 통과되면 위의 사이클이 반복된다.

왕복동 엔진의 경우 수많은 연구 및 실험을 통

해 다양한 데이터를 보유하고 있어 실린더 내부의 유동을 예측하여 최적화된 설계를 할 수 있다. 하지만 GP 엔진의 형상에서는 각 행정 별로 로터와 챔버 내부의 유동 변화가 쉽게 예측되지 않아 최적화된 형상을 설계하기에 다소 어려움이 있는 실정이다.

본 연구에서는 RANS 난류 모델[3]과 SAGE 연소모델[4]을 사용하여 GP3 엔진 내부의 유동 흐름과 성능을 수치적으로 조사한다. 신형 로터리 엔진은 방켈 엔진, 왕복동 엔진과 형상이 매우 상이하여 수치해석을 통한 유동-연소 특성 파악은 중요하다고 판단된다. 따라서 이번 연구에서는 GP3엔진에서 연소가 발생할 때 나타나는 특성과 현상을 분석하여 개선점을 찾는데 초점을 맞춘다.

### 2. 해석 방법

Fig. 1은 신형 로터리 엔진의 core 부품의 형상을 간략히 나타낸 그림이다. 신형 로터리 엔진은 크게 Epitrochoid 곡선으로 설계된 rotor, 로터

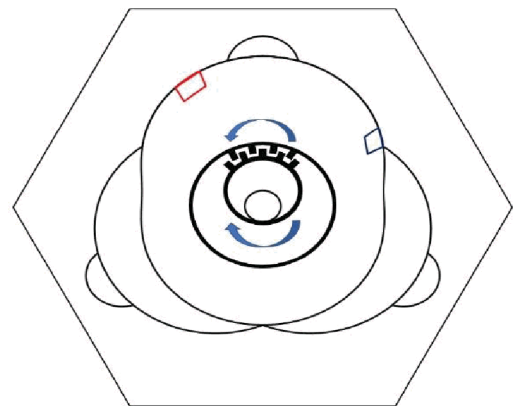


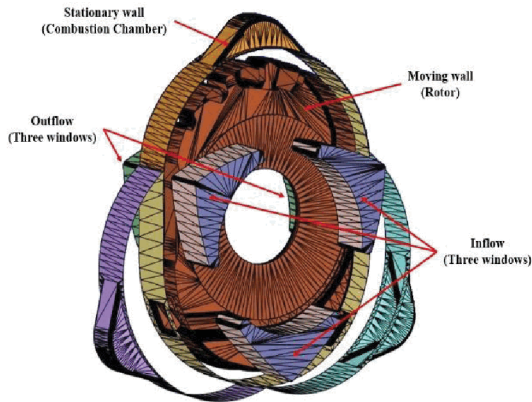
Fig. 1 Internal shape and structure of new type rotary engine.

\* 인하대학교 기계공학과

† 연락처, [chelee@inha.ac.kr](mailto:chelee@inha.ac.kr)

TEL : (032)860-7323 FAX : (032)-813-7838





**Fig. 2** Computational domain and boundary conditions.

가 편심되어 회전하며 그리는 궤적을 나타낸 housing 그리고 동력 축으로 분류할 수 있다. 동력 축에 설치된 기어에 의해 로터가 1바퀴 회전 시 동력 축은 2바퀴 회전하며 동력을 전달한다. 또한 각각 연소실의 체적은 11 cc 를 가지며, 과 팽창 효과를 구현하기 위해 압축비는 11, 팽창비는 14가 되도록 흡기, 배기포트의 위치를 설계했다.

Fig. 2는 GP3 엔진의 수치해석 연산 영역과 경계조건을 나타낸 것으로 벽 조건에는 GruMo-UniMORE 열전달 모델[5]을 사용했으며, Temperature Boundary condition은 Law of wall을 입력했다. 움직이는 벽인 로터의 온도는 300K, 고정된 벽인 연소실의 온도는 600K를 설정했다 다음으로 Inflow 조건은 대기압과 동일한 101,325 Pa과 300 K을 각각 입력했고, 연소는 CH<sub>4</sub>, 당량비는 1을 기준으로 설정했다. 역류의 가능성이 있어 Outflow 조건도 Inflow 조건과

마찬가지로 대기압과 300K의 온도를 입력했으며, 연료를 제외한 공기의 성분(O<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>)만을 입력했다.

### 3. 결과 및 결론

Table 1은 신형 로터리 엔진을 점화 시기별로 그리고 회전 속도 별로 각 해석 결과를 나타낸 것이다. 먼저 압력을 살펴보면, 점화시기에 관계없이 엔진 속도가 낮을수록 압력이 높게 나타나는 것을 알 수 있다. 그 중 낮은 회전속도에서는 축 각도 기준 BTDC 30에서 점화할 때, 높은 회전속도에서는 BTDC 50에서 점화할 때 압력이 높은 것을 알 수 있다. 온도의 경우 대체로 2~3000 rpm에서 가장 높은 온도가 발생했다. 도시 일은 점화시기에 관계없이 1000 rpm에서 가장 높은 값을 보였으며, 그 중 BTDC 30에서 가장 높은 수치를 보였다. 그러나 일률은 대체로 비교적 회전 속도가 빠른 3000 rpm에서 가장 높은 값을 보였으며, 그 중 BTDC 50에서 가장 높은 값을 나타냈다. EGR rate의 경우 대체로 엔진 회전속도에 따라 경향이 변화되었으며, 저속과 고속 회전에서 그 비율이 증가했다. 마지막으로 연소율을 살펴보면, 엔진 회전속도가 빨라짐에 따라 비율이 눈에 띄게 감소하는 것으로 나타났다.

Fig. 3은 1000 rpm으로 회전하는 신형 로터리 엔진의 압력을 점화시기에 따라 나타낸 것이다. 점화가 시작되기 직전까지는 Motored의 압력 선도와 동일하게 출발하지만, 각 점화시기에 따라 압력이 다르게 변화하는 것을 확인할 수 있다. 그 중 BTDC 30의 압력선도가 ATDC 5에서 가장 높은 압력을 나타냄을 알 수 있다. 가장 높은 압력에 도달한 후 점화시기에 관계없이 거의 동일한 압력으로 낮아지는 것을 확인할 수 있다.

**Table 1** Output value according to engine rotational speed and ignition timing of GP3 engine

		Pressure (Pa)	Temperature (K)	Indicated work (J)	Power (kW)	EGR rate (%)	Volume fraction burned (%)
BTDC 10	1000 rpm	28.23	2027.52	50.92	1.27	27.04	64.03
	2000 rpm	22.83	2131.03	37.76	1.89	25.02	40.85
	3000 rpm	22.35	2152.78	24.42	1.83	25.33	24.92
	5000 rpm	22.28	1691.51	14.50	1.81	28.92	15.66
BTDC 30	1000 rpm	36.07	1989.85	54.73	1.37	24.07	73.79
	2000 rpm	28.56	2255.27	49.01	2.45	23.72	58.76
	3000 rpm	26.23	2125.95	37.21	2.79	21.75	38.71
	5000 rpm	24.34	1390.04	18.80	2.35	26.80	21.45
BTDC 50	1000 rpm	35.40	1969.74	50.47	1.26	24.33	71.68
	2000 rpm	31.85	1966.94	48.26	2.41	23.65	61.38
	3000 rpm	29.03	2016.31	46.11	3.46	19.31	49.55
	5000 rpm	25.12	1422.93	19.65	2.46	26.99	23.00

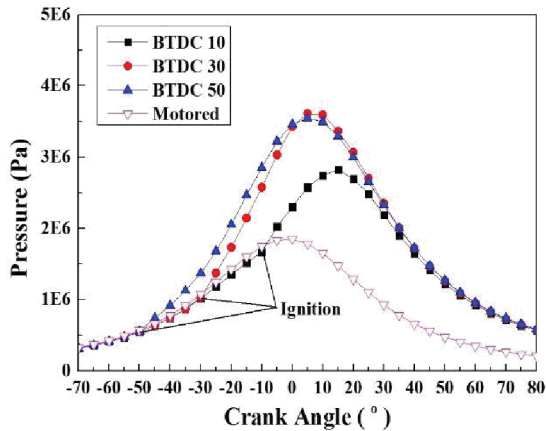


Fig. 3 Pressure diagram according to ignition timing of rotary engine rotating at 1000 rpm.

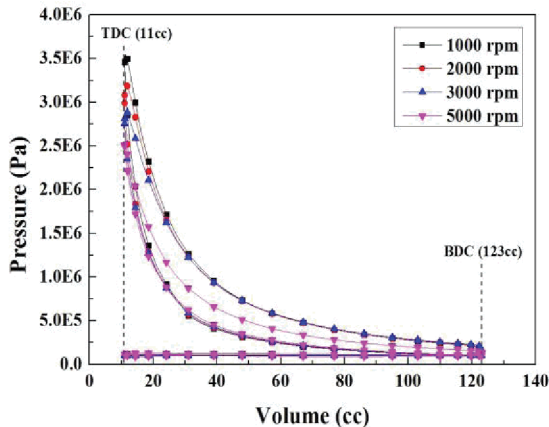


Fig. 4 P-V diagram according to engine speed of rotary engine ignited at BTDC 50.

Fig. 4는 BTDC 50에서 점화된 신형로터리의 P-V선도를 엔진 속도 별로 나타낸 것이다. 신형로터리 엔진의 P-V선도는 일반 왕복동 엔진의 P-V 선도와 거의 동일하며, 앞서 Table 1에서 확인한 바와 같이 TDC에서의 압력은 엔진 회전속도가 낮을수록 더 높았고, 면적인 일 역시 더 높게 나타났다. 엔진 회전속도가 빠를수록 최고 압력점과 일이 낮게 나타나지만, 펌핑 손실이 거의 없는 것은 특징적이다. 따라서 엔진의 연소 효율을 개선하면 높은 엔진 회전속도에서도 충분한 압력과 일을 얻을 수 있을 것으로 기대된다.

## 후 기

본 연구는 한국연구재단 중견연구 과제 “Mini-CHP용 고비출력 고효율 신형 로터리 엔진의 개발 및 적용성 검증 연구”(2016R1A2B3014500)의 지원을 받아 수행한 연구의 일환입니다.

## 참고 문헌

- [1] J. P. NORBYE, “Test Drive of U.S. Car with a rotating combustion engine,” vol. 188, pp. 102–107, 1966.
- [2] Controller Technical Department, *Air Board Technical Notes*. Aircraft Engines, 1997.
- [3] O. Reynolds, “On the Dynamical Theory of Incompressible Viscous Fluids and the Determination of the Criterion,” *Philos. Trans. R. Soc. A Math. Phys. Eng. Sci.*, vol. 186, pp. 123–164, 1895.
- [4] P. K. Senecal *et al.*, “Multi-dimensional modeling of direct-injection diesel spray liquid length and flame lift-off length using cfd and parallel detailed chemistry,” *SAE Tech. Pap.*, no. 724, 2003.
- [5] F. Berni, G. Cicalese, and S. Fontanesi, “A modified thermal wall function for the estimation of gas-to-wall heat fluxes in CFD in-cylinder simulations of high performance spark-ignition engines,” *Appl. Therm. Eng.*, vol. 115, pp. 1045–1062, 2017.

## 엔진 효율 향상을 위한 부분 예혼합 및 난류 공급에 따른 엔진 연소 특성 분석

이지영\*, 강재원\*, 박성욱\*\*†

### Analysis of combustion characteristics with partially premixed mixture and supplying turbulence for engine efficiency

Ziyoung Lee\*, Jaewon Kang\*, Sungwook Park\*\*†

#### ABSTRACT

In the present study, effect of partial premixed fuel and retarded fuel injection on the combustion characteristics was investigated in the gasoline direct injection engine. A single cylinder with direct injection system was used and fuel was pressurized up to 50MPa. Some portion of fuel was injected during intake process and formed the homogeneous fuel/air mixture. Retarded fuel injection between end of intake process and spark timing supplied turbulence and accelerated combustion.

**Key Words** : Partial premixed combustion, Gasoline direct injection engine, High pressure injection, Spark ignition

엔진의 효율을 향상시키기 위해서 실린더 내로 연료를 직접분사 하거나 흡기를 과급하는 등의 다양한 전략을 적용해 오고 있다[1, 2]. 특히 가솔린 엔진의 경우 가솔린 연료의 직접분사는 기존 포트분사보다 체적효율 향상을 통해 출력을 향상시킨다[3]. 또한, 직접분사의 경우 연료의 공급과 함께 분사압력에 의한 난류공급이 동시에 이루어진다. 난류는 실린더 내부 유동에 의해서 점점 소멸하기 때문에 연료 분사시기가 빠른 경우, 점화시기에서 연료에 의해 공급된 난류는 소멸하여 연소에는 영향이 거의 없다. 반면, 분사시기가 점화시기와 가까운 경우, 연료의 분사와 함께 공급된 난류가 점화시기까지 잔류해 있기 때문에 연소속도 증가 및 엔진 출력 향상에 도움을 준다[4]. 하지만 분사시기가 늦어지면 점화시기까지 연료와 공기가 혼합할 시간이 줄어들기 때문에, 혼합기 균질도가 떨어지기 때문에 연소의 불안정성이 증가한다. 따라서 본 연구에서는 부분적으로 연료를 조기에 분사하여 균질한 혼합기를 형성 후 늦은 분사를 통한 난류 공급으로 연소를 촉진시키는 연구를 수행하였다.

본 연구에서는 Fig. 1과 같은 실험 장치를 이용하여 이루어 졌으며, 단기통 엔진에 가솔린을 실린더 내로 직접 분사하였다. 압축공기를 흡기 전단에 공급하고, 유량 제어기를 이용하여 흡기 유량을 일정하게 유지하였다. 연료는 공기로 구동하는 유체 펌프를 이용하여 최대 50MPa까지 가압하여 연료 레일에 공급하였고, 연료 공급압력을 안정화하기 위하여 연료 펌프와 연료 레일 사이에 고압 연료 저장 챔버를 설치하였다. 연료의 분사시기, 분사량, 점화시기 등의 엔진 제어는 CompactRIO를 이용하여 구동되고, Labview 프로그램을 이용하여 제어하였다. 실린더 내부 압력은 점화플러그와 압력센서 일체형 센서를 이용하여 측정하였고, 측정된 실린더 압력을 이용하여 연소 속도, 엔진 출력 등을 계산하였다.

\* 한양대학교 융합기계공학과

\*\* 한양대학교 기계공학부

† 연락처자, [parks@hanyang.ac.kr](mailto:parks@hanyang.ac.kr)

TEL : (02) 2220-0430 FAX : (02) 2220-4588

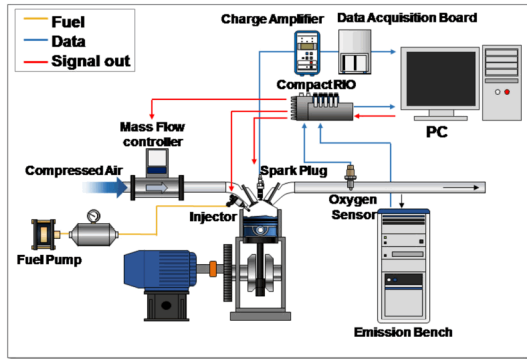


Fig. 1 Schematic of engine experiment.

엔진 제원은 Table 1에 나타난 것과 같다.

Table 1 Single cylinder direct injection engine specification.

Item	Specification
Bore/stroke	75 mm/ 85mm
Displacement Volume	398 ml
Compression Ratio	10.5 : 1
Intake Valve open	ATDC 15 deg
Intake Valve close	ABDC 80 deg
Exhaust Valve open	BBDC 55 deg
Exhaust Valve close	BTDC 10 deg

흡기 중에 분사되는 연료는 일정하게 유지하고 점화시기 직전에 분사되는 연료는 당량비를 목표 당량비로 유지할 수 있게 Labview를 이용하여 분사시간을 제어하였다.

Table 2 Engine operating conditions.

제어변수	시험 조건
엔진 회전속도	1500 rpm
연료 분사압력	10-50 MPa
분사 시기 1	BTDC 330° 270°
분사 시기 2	BTDC 240° 150°
점화 시기	MBT timing
당량비	0.9-1.0
흡기 유량	130 LPM
냉각수 온도	80℃

엔진 실험은 엔진 Table 2에 나타난 조건들에서 진행되었다. 분사시기1에서 분사된 연료들은 흡기 행정 중에 분사되기 때문에 상대적으로 균질한 혼합기를 형성하며, 분사시기2에서 분사된

연료는 공기와 혼합할 시간이 상대적으로 적지만 연료 분사와 함께 공급된 난류가 점화시기까지 잔류해 있어서 연소 속도를 증가시킨다. 단분사에서 늦은 분사시기에서 연료 공급에 의한 난류 공급으로 연소속도가 짧아져 연소기간이 감소하는 것을 확인할 수 있다(Fig. 2).

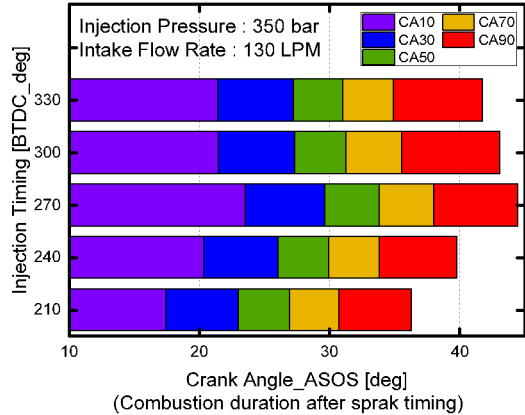


Fig. 2 Combustion duration with various injection timing.

## 후 기

본 연구는 환경부 Global-Top Project 친환경자동차기술개발사업단의 지원에 의해 수행되었으며 이에 감사드립니다. (No. 2019002070001)

## 참고 문헌

[1] Luján JM, Climent H, Novella R, Rivas-Perea ME. Influence of a low pressure EGR loop on a gasoline turbocharged direct injection engine. Applied Thermal Engineering. 2015;89:432-43.

[2] Sadakane S, Sugiyama M, Kishi H, Abe S, Harada J, Sonoda Y. Development of a New V-6 High Performance Stoichiometric Gasoline Direct Injection Engine. SAE Technical paper. 2005;No. 2005-01-1152.

[3] Knop V, Essayem E. Comparison of PFI and DI Operation in a Downsized Gasoline Engine. SAE International Journal of Engines. 2013;6:941-52.

[4] Oh H, Bae C. Effects of the injection timing on spray and combustion characteristics in a spray-guided DISI engine under lean-stratified operation. Fuel. 2013;107:225-35.

# 포트분사방식 가솔린 엔진에서의 에탄올 함유량에 따른 연소특성 및 미세입자 배출특성

장지환\*, 이호승\*\*, 박성욱†

## Characteristics of Combustion and Particulate Emissions from a Port Fuel Injection Engine Fueled Gasoline Blended with Ethanol

Jihwan Jang\*, Hoseung Yi \*\*, Sungwook Park †

### ABSTRACT

The purpose of this study is to analyze the combustion characteristics of the PFI engine by mixing ratio of fuel and gaseous and particle emissions. The fuel used in the experiment was a mixture of pure gasoline and ethanol. The engine was operated at 5000 rpm and full load of wide open throttle. The high oxygen content of ethanol has the characteristic of decreasing soot formation and increasing the oxidation of particles.

**Key Words** : Port fuel injection, Particle number, IMEP, Heat release rate

이번 연구의 목적은 PFI 엔진에서의 연료의 혼합비에 의한 연소특성 분석 및 가스상 물질과 입자상 물질에 대한 배출을 분석하는 것으로서, 125cc 배기량의 소형 단기통 PFI 엔진에서의 실험 수행하였다. 엔진 실험에 사용된 연료로는 순수 가솔린부터 에탄올을 혼합한 혼합연료를 사용하였으며 부피비 20%부터 20% 간격으로 에탄올 60% 연료까지 혼합하여 사용하였으며, 엔진 속도 5000rpm과 Wide open throttle의 full load에서의 실험 수행하였다. 연소실 내부의 연소압력을 측정하여 IMEP 및 열발생률을 분석하였으며 이를 통해 연소속도를 계산하였다. 가스상 물질의 경우 Horiba MEXA 시리즈 배기가스 측정장비를 이용하였으며 입자상물질의 경우, PPS-M 장비를 통하여 Particle number를 측정하였으며 나아가 EEPS 장비를 통해 5.6nm 부터 560nm 까지의 크기 별 입자 분포를 측정하였다. Fig.1 및 Table 1에서는 실험 장치도에 대한 개략도 및 엔진실험 조건을 나타내었다.

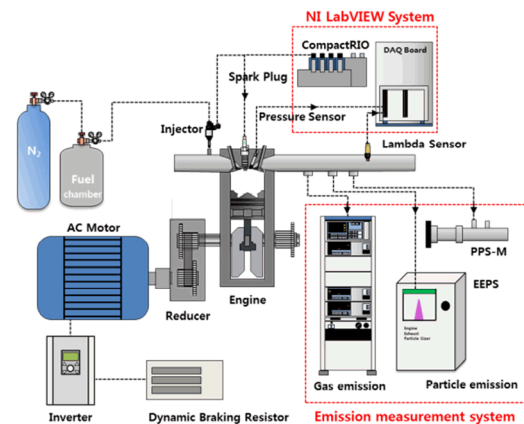


Fig.1 Schematic diagram of engine experiment.

Table 1 Engine specification and test condition

Displacement volume	125 cc
Compression ratio	11.0
Engine speed	5000 rpm
Lambda	1
Fuel (Gasoline + Ethanol)	E0, E20, E40, E60

\* 한양대학교 기계공학과

\*\* 한양대학교 융합기계공학과

† 연락처, [parks@hanyang.ac.kr](mailto:parks@hanyang.ac.kr)

TEL : (02)2220-0430 FAX : (02)-2220-4588

Fig.2 에서는 엔진속도 5000rpm, WOT, Lambda 1의 엔진 조건에서의 에탄올 함유량에 따른 압력곡선 및 열발생률 결과를 나타내었다. 에탄올이 가솔린에 비해 연소속도가 빠르기 때문에 에탄올 함유량이 증가할수록 빠른 연소속도를 확인할 수 있다[1]. 하지만 연소속도의 차이는 크게 나지 않는데, 이는 층류 화염전파속도가 에탄올이 가솔린에 비해 빠르지만 전체적인 연소속도는 난류화염전파속도에 영향이 크기 때문이라고 판단된다. 또한 에탄올의 경우, 가솔린에 비해 상대적으로 낮은 발열량으로 인해 Lambda 1의 연소를 하기 위해서는 더 많은 연료량 소모된다[2]. Fig.3 에서 확인할 수 있듯이 에탄올 함유량이 증가할수록 연료소비량이 증가한다.

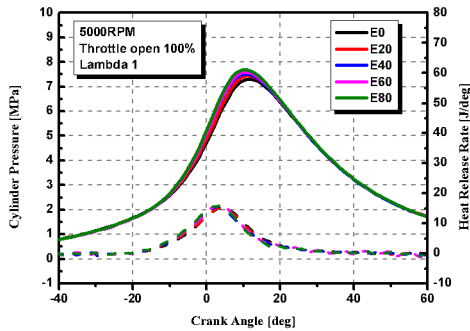


Fig. 2 에탄올 함유량에 따른 연소압력 곡선 및 열발생률

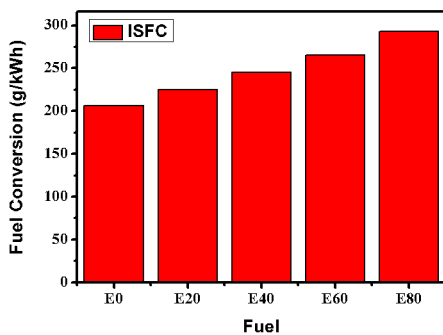


Fig. 3 에탄올 함유량에 따른 연료소모량

입자상 물질의 경우, 일반적으로 산소공급의 부족과 이론공연비 보다 농후한 영역에서의 불완전연소로 인해 배출되는데 에탄올 함유량이 증가로 인해 연료의 함산소량이 증가하여 Fig. 4 에서의 결과와 같이 Particle number가 감소하는 결과를 나타내고 있다.

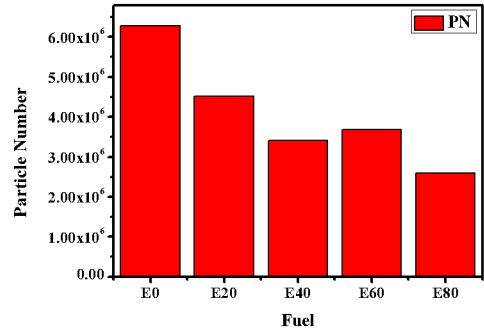


Fig. 4 에탄올 함유량에 따른 PN 배출 결과

가스상 물질인 NOx의 경우에는 일반적으로 높은 온도에서의 많은 배출이 발생한다. 에탄올 연료의 경우 가솔린에 비해 증발잠열이 크기 때문에 연소실 냉각효과를 가지게 되며 이로 인하여 NOx 배출이 저감되는 효과가 나타난다[3]. Fig.4 에서 역시 에탄올의 함유량이 증가할수록 NOx 배출이 저감되는 것을 확인할 수 있다.

## 후 기

본 연구는 환경부 Global-Top Project 친환경자동차기술개발사업단의 지원에 의해 수행되었으며 이에 감사드립니다. (2016002070010)

## 참고 문헌

- [1] R. A. Stein, J. E. Anderson and T. J. Wallington, "An Overview of the Effects of Ethanol-Gasoline Blends on SI Engine Performance, Fuel Efficiency and emissions", SAE 2013-01-1635
- [2] B. Q. He, J. X. Wang, J. M. Hao, X. G. Yan and J. H. Xiao, "A study on emission characteristics of and EFI engine with ethanol blended gasoline fuels", Atmospheric Environment 37 (2003) 949-957
- [3] Catapano, F., Di Iorio, S., Sementa, P., and Vaglieco, B., "Characterization of Ethanol-Gasoline Blends Combustion processes and Particle Emissions in a GDI/PFI Small Engine", SAE Technical Paper 2014-01-1382, 2014.

## 최신 Toluene Reference Fuel 메커니즘들의 열방출특성에 대한 비교연구

김두현\*

### Comparison of heat release predictions from the current generation chemical mechanisms for Toluene Reference Fuels

Doohyun Kim\*

#### ABSTRACT

Toluene Reference Fuels (TRFs) are ternary mixtures of n-heptane/iso-octane/toluene, often used as gasoline surrogate fuel. In this study, we compare heat release predictions from the current generation chemical mechanisms for TRFs. We selected four detailed TRF mechanisms published after 2016 and compared heat release characteristics focusing on their two-stage behavior in low/intermediate temperature regime. Although the TRF mechanisms tested in this study are considered well-validated and matured, the comparisons show that the predicted heat release and ignition characteristics are considerably different for these mechanisms. While the trends in total ignition delay times are similar, there are noticeable discrepancy for the overall shapes of the heat release rate, the strength of NTC and two-stage behavior, and the blending effect of n-heptane/toluene. This study indicates that the uncertainty in detailed kinetic modeling is still significant and should be taken account when interpreting simulation results.

**Key Words** : toluene reference fuel, chemical kinetics, ignition characteristics, heat release rate

현재 개솔린의 대리연료로는 TRF (Toluene Reference Fuel) 가 폭넓게 사용되고 있다. TRF 는 n-heptane, iso-octane, toluene 세가지 탄화수소의 혼합물로, 목표로 하는 개솔린의 점화특성과 방향족 조성을 대략적으로 모사하도록 그 혼합비율을 정하여 사용한다. TRF 의 연소모델링을 위해 n-heptane, iso-octane, toluene 의 자세한 연소 과정을 담고 있는 chemical mechanisms 들이 사용되고 있다. TRF 를 구성하는 세가지 탄화수소의 mechanisms 들은 모두 상당히 오랜 기간동안 개발되고 수정되어 왔고, 검증에 필요한 실험테

이터가 풍부하기 때문에, 일반적으로는 신뢰성이 높으며 충분히 검증이 되었다고 말한다. 이번 연구에서는 2016년 이후에 발표된 최신 TRF 메커니즘들의 열방출 특성을 비교분석하여 각각의 특성을 파악하고, 예측결과 사이의 차이가 확연하여 불확도가 높은 측면을 찾아, TRF 모델링 결과 분석에 도움을 주고자 한다.

비교를 위해 네개의 최신 TRF 메커니즘을 선정하였다. 첫번째는 Ansys Model Fuel Library (MFL) 에서 발표한 메커니즘으로 2631개의 화학종, 11057 개의 반응식으로 구성되어있다 [1]. 두번째는 KAUST 에서 발표한 TRF 메커니즘으로 2406개의 화학종, 9633개의 반응식을 포함하고 있다 [2]. 세번째는 Westbrook et al. [3] 에 발표된 메커니즘으로 2678개의 화학종, 11565개의 반응식으로 되어있다. 마지막으로

\* 홍익대학교, 기계시스템디자인공학과

† 연락처, 김두현 [doohyun@hongik.ac.kr](mailto:doohyun@hongik.ac.kr)

TEL : (02)320-3058

CoOptima 프로그램에서 발표한 메커니즘 [4] (2108개의 화학종, 9046개의 반응식) 을 선정하였다. 이 메커니즘들은 모두 2016년 이후에 발표된 최신 TRF 메커니즘이며, 실험데이터를 이용하여 포괄적으로 검증되었다. 또한 네가지 메커니즘 모두 유사한 구조를 가지고 있으나 각각 반응식의 반응속도상수들이 상이하다.

TRF의 점화과정은 Chemkin의 0-D 모델과 선정된 메커니즘들을 이용하여 시뮬레이션하였다. 연료로는 Foong et al. [5]에서 제시한 24개의 TRF/ethanol blend를 사용하였다.

점화특성과 열방출특성에 관련하여 두가지 parameter를 비교하였다. 먼저 2단계 점화 특성의 세기를 나타내는 지표로서 초기조건 775K, 25 atm에서의 LTHR% (Low Temperature Heat Release percentage)를 계산하여 비교하였다. LTHR%는 다음과 같이 정의된다.

$$LTHR\% = \frac{HeatRelease_{first}}{HeatRelease_{total}} \times 100$$

또한 온도/압력 변화에 따른 점화지연시간 변화의 관계를 알아보기 위해 초기압력 25 atm 때 온도가 775K에서 875K로 바뀔 때 따라 전체 점화지연시간이 변화하는 정도를 수치화하여 비교하였다. 점화지연시간 민감도 ( $S_{id}$ ) 다음과 같이 정의된다.

$$S_{id}(\%) = \frac{ID_{775K} - ID_{875K}}{ID_{775K}} \times 100 \quad (1)$$

$S_{id}$  값이 작거나 음수이면 온도가 775K에서 875K로 증가함에 따라 점화지연시간이 매우 작게 줄어들거나 오히려 늘어났다는 뜻이며, 이는 주어진 연료가 저온영역에서 NTC 효과가 큼을 의미한다.

그림 1과 2에는 24개의 TRF/ethanol 연료들의 옥탄민감도와 LTHR% 그리고  $S_{id}$  간의 상관관계를 비교하였다. 네가지 메커니즘 모두 옥탄민감도가 증가함에 따라 LTHR%로 표현되는 2단계 점화특성의 세기가 약해짐을 일관되게 보였다. 또한 옥탄민감도가 증가할수록  $S_{id}$ 는

일관되게 증가하였고, 이는 NTC 효과가 작아짐을 의미한다. 이러한 전반적 추세는 네 메커니즘이 매우 유사하나, 베이스 TRF가 다른 경우의 추세는 서로 상이함을 보였다. 이는 베이스 TRF의 RON은 같으나 세가지 탄화수소의 조성이다를 때의 열방출특성 예측값이 서로 차이가 크기 때문으로 분석되었다. 특히 n-heptane과 toluene이 섞였을 때의 상호작용을 예측함에 있어 네 메커니즘의 차이가 큼을 알 수 있었다.

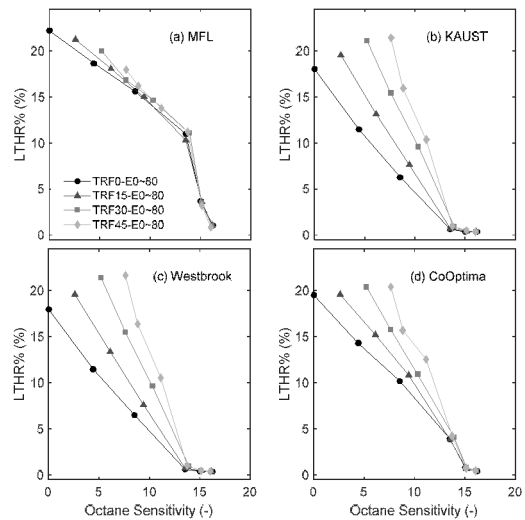


그림 1. TRF/ethanol blend의 LTHR% 비교

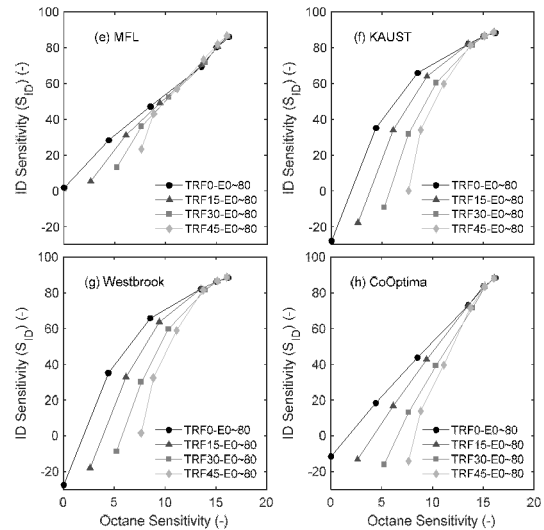


그림 2. TRF/ethanol blend의  $S_{id}$  비교



Toluene 과 나머지 탄화수소들 (n-heptane, iso-octane) 와의 상호작용을 좀더 상세히 비교하기 위해 n-heptane/toluene 그리고 iso-octane/toluene 의 두개의 binary blends 를 시뮬레이션 하고 비교하였다. 그림 3 에서 보이듯이 toluene 의 비율이 증가함에 따라 LTHR% 가 줄어드는 경향과 그 절대값들은 네가지 메커니즘에서 매우 유사하게 나왔다. 하지만 그림 4 가 나타내는  $S_{id}$ , 특히 n-heptane/toluene 의  $S_{id}$  특성은 네 메커니즘이 예측하는 추세가 매우 상이하다. 순수 n-heptane 은 물론이고 toluene 을 추가함에 따라 NTC 효과가 약해지는 추세도 네 메커니즘이 매우 다르다. 이는 순수 n-heptane 과 toluene 의 메커니즘, 그리고 이 둘의 상호작용을 나타내는 화학식들이 네가지 메커니즘 사이에 큰 차이가 있다는 것을 의미한다. 이를 통해, 매우 오랜 시간동안 개선되어온 TRF 메커니즘 이지만 아직도 개발자에 따라서 불확정성이 매우 크다는 것을 알수 있다. 또한 이러한 TRF 메커니즘을 이용한 시뮬레이션 결과를 해석함에 있어 이러한 불확정성을 반드시 인지해야한다는 것을 나타낸다.

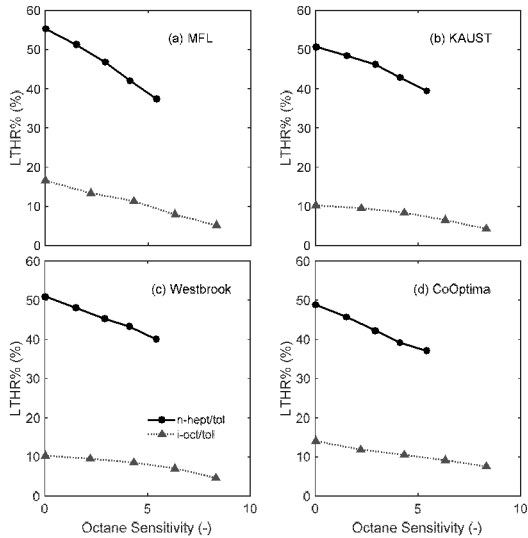


그림 3. Toluene binary blend 의 LTHR% 비교

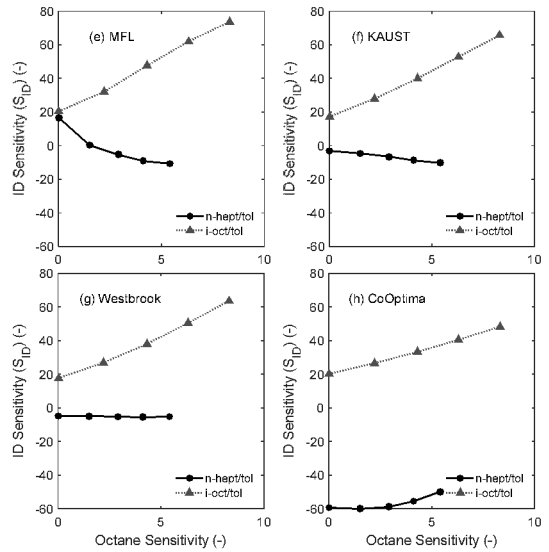


그림 4. Toluene binary blend 의  $S_{id}$  비교

### 참고 문헌

- [1] Model Fuel Library, ANSYS, 2016.
- [2] S.M. Sarathy, G. Kukkadapu, M. Mehl, T. Javed, A. Ahmed, N. Naser, A. Tekawade, G. Kosiba, M. AlAbbad, E. Singh, S. Park, M.A. Rashidi, S.H. Chung, W.L. Roberts, M.A. Oehlschlaeger, C.-J. Sung, A. Farooq, Compositional effects on the ignition of FACE gasolines, *Combust. Flame* 169 (2016) 171–193.
- [3] C.K. Westbrook, M. Mehl, W.J. Pitz, M. Sjöberg, Chemical kinetics of octane sensitivity in a spark-ignition engine, *Combust. Flame* 175 (2017) 2–15.
- [4] M. Mehl, S. Wagnon, K. Tsang, G. Kukkadapu, W.J. Pitz, C.K. Westbrook, Y. Tsang, H.J. Curran, N. Atef, M.A. Rachidi, S.M. Sarathy, A. Ahmed, A comprehensive detailed kinetic mechanism for the simulation of transportation fuels, 10th US National Combustion Meeting, 2017.
- [5] T.M. Foong, K.J. Morganti, M.J. Brear, G. da Silva, Y. Yang, F.L. Dryer, The octane numbers of ethanol blended with gasoline and its surrogates, *Fuel* 115 (2014) 727–739.

## 좁은 간격의 원반형 버너의 길이 스케일에 따른 루이스수 효과

장혜진\*, 이상민\*, 김남일\*†

### Le effect depending on the length scale of Narrow-Gap-Disk-Burner(NGDB)

Hye Jin Jang\*, Sang Min Lee\*, Nam Il Kim\*†

작은 크기의 연소공간에서의 화염 거동은 일반적인 버너에서의 화염 거동과는 다르기 때문에, 좁은 간격을 가진 채널에서의 예혼합 화염 전파 실험은 꾸준히 진행되었다[1,2]. 좁은 간격의 튜브 혹은 채널부터 일반적인 크기의 버너까지 다양한 크기의 연소기가 존재했지만, 연속적으로 연소 공간의 크기를 조절하면서 화염 변화를 관찰한 경우는 드물었다. 본 연구 그룹에서는 메소스케일 영역에서의 예혼합 화염 전파를 관찰하기 위해 Fig. 1과 같은 원반형의 실험 장치를 개발하였다. 윗판과 아랫판 사이의 간격을 조절하여, 소염거리부터 메소스케일 영역을 거쳐 일반적인 버너 크기까지 화염 전파 양상을 관찰하였다[3].

이전 연구에서는 메탄과 프로판의 당량비를 조절하면서 간격에 따른 화염 전파 양상을 분석하였다. 기존 실험결과에서는 소염거리( $d_q$ ) 1.5배 이하에 해당하는 간격( $d$ )에서 전파한 화염에서 대체로 셀구조(cellular structure)가 관찰되었다. 해당 범위 내 일정한 간격 비율 조건( $d/d_q$ )에 해당하는 화염끼리 비교했을 때, 루이스수( $Le$ )가 1보다 클수록 열확산적 불안정성이 증가하여 셀구조를 이루는 주름들의 개수가 증가하였다. 따라서 이번 실험에서는 기존 연구와 비교하기 쉽도록 루이스수가 비교적 차이 나는 프로판을 기본 연료로 선정하고, 전체 연료 내 프로판, 수소 부피 비율을 조절하면서 루이스수를 변화시키며 화염 전파를 관찰하였다. 루이스수 효과를 관찰하는 것이 목적이므로, 점화부는 최소 부피로 설정하여 초기 속도의 영향을 최소화하여 실험을 진행하였다.

실험 조건으로는 기존 연구와 비교하기 위해 당량비( $\phi$ ) 0.8 조건과, 셀구조가 쉽게 관찰되는 간격 비율 조건( $d/d_q$ ) 1.0, 1.5를 선정하였다. 순수 프로판 예혼합 화염에 비해 프로판, 수소 혼합 화염의 소염거리는 소량 감소한다. 소염거리 변화를 반영하여, 각 실험 조건에 해당하는 간격

( $d$ )을 Table 1에 나타내었다.

연료 희박조건( $\phi = 0.8$ )에서 관찰된 화염 전파 양상은 Fig. 2에서 확인할 수 있다. 전파 과정을 5 ms 간격으로 화염 이미지를 중첩하여 나타내었다. 이를 통해 화염 사진만으로도 속도와 셀구조의 변화를 관찰할 수 있었다.

기존 실험결과와 같이 본 장치에서도 순수 프로판 화염( $C_3H_8:H_2 = 1:0$ ) 중 프로판 희박 조건( $Le > 1$ )에서는 과다 조건( $Le < 1$ )보다 셀구조가 미약하고, 화염이 안정적으로 전파하는 것이 관찰되었다.

연료 내 수소 비율을 증가시킨 결과( $C_3H_8:H_2 = 1:2$ ) 화염 전파속도가 증가하였다. 또한, 순수 프로판 희박조건( $\phi = 0.8$ )에서 미약했던 셀구조가 더욱 발달하였다. 수소 비율 증가로 소염거리 근처( $d/d_q = 1.0$ )에서의 화염은 초반에 화염면이 끊기면서 셀구조가 증가하였다. 소염거리의 1.5배 간격( $d/d_q = 1.5$ )에서의 화염은 소염거리 근처 간격( $d/d_q = 1.0$ )에서의 화염에 비해 셀구조 주름 개수가 크게 증가하였다.

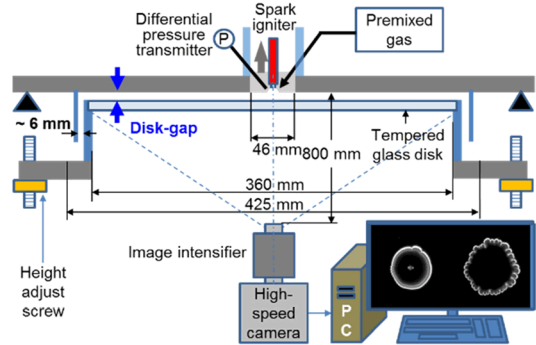
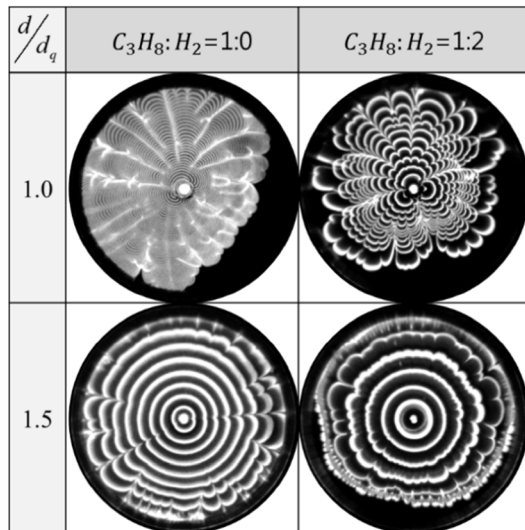


Fig. 1 Schematic diagram of constant-pressure Narrow-Gap-Disk-Burner(NGDB).

\* 한국과학기술원 기계공학과  
† 연락저자, [nikim@kaist.ac.kr](mailto:nikim@kaist.ac.kr)  
TEL : (042)350-3211

**Table 1** Experimental conditions

당량비( $\phi$ )	0.8	
연료 비율 (프로판:수소)	1:0	1:2
$d/d_q = 1.0$	$d = 2.9$	$d = 2.4$
$d/d_q = 1.5$	$d = 4.2$	$d = 3.5$

**Fig. 2** Flame propagation images in NGDB at the fuel-lean condition w/ and w/o hydrogen addition ( $\Delta t=5$  ms).

셀구조의 변화는 연료 내 수소 비율 증가로 예혼합 기체의 루이스수가 변화하기 때문으로 생각된다. 프로판 회박 조건에서 수소 비율 증가로 1보다 컸던 루이스수가 1보다 작아지면서 불안정한 화염으로 변화하였다. 또한 수소의 연소 속도는 프로판의 연소속도보다 빠르다[4]. 따라서 당량비와 그에 따른 간격 비율 조건이 같더라도, 연료 내 수소 비율이 증가할수록 화염 전파 속도가 빨라지고 당량비에 따른 셀구조 경향성이 반전된 것이 설명된다.

본 실험결과를 통하여 루이스수에 따라 화염의 셀구조가 확연하게 변화하는 것을 관찰할 수 있었다. 또한 그 변화 정도는 간격 비율 조건에 따라 달라졌다. 후속 연구에서는 초기 전파 속도가 증가하는 경우, 루이스수 효과가 무시될지 혹은 증가할지 여부에 대해 알아보려 한다.

## 후 기

본 연구는 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 중견연구사업(2018009107)의 기초연구입니다.

## 참고 문헌

- [1] O.C. de C. Ellis, "Flame movement in gaseous explosive mixtures," Fuel: Sci. Practice, Vol. 7, 1928, pp. 336-344.
- [2] D. Dunn-Rankin, P.K. Barr, R.F. Sawyer, "Numerical and experimental study of "tulip" flame formation in a closed vessel," Symp. (Int.) Combust., Vol. 21, No. 1, 1986. pp. 1291-1301.
- [3] H.J. Jang, N.I. Kim, "Unsteady propagation of premixed methane/propane flames in a mesoscale disk burner of variable-gaps," Proc. Combust. Inst., Vol 37, 2018
- [4] C. Tang, Z. Huang, J. Wang, J. Zheng, "Effects of hydrogen addition on cellular instabilities of the spherically expanding propane flames," Int. J. Hydrogen Energy, Vol. 34, No. 5, 2009, pp. 2483-2487.

# Monomethyl Hydrazine/Nitrogen Tetroxide에 대한 축소 반응 메카니즘

이기용\*†

## A Short Kinetic Mechanism for Monomethyl Hydrazine and Nitrogen Tetroxide

Ki Yong Lee\*†

### ABSTRACT

A short kinetic mechanism is used in order to predict the ignition delay time in the mixture of monomethyl hydrazine and nitrogen tetroxide. The effects of ignition delay time on the initial temperature, pressure and reactant mixture ratios are investigated. Increasing initial temperature or pressure has the effect of reducing the ignition delay time and its tendency shows nonlinear characteristics. The increase in  $N_2O_4$  content in the mixture under pressure of 1 atm and initial temperature of 300K increases linearly the ignition delay time.

**Key Words** : Monomethyl Hydrazine, Nitrogen Tetroxide, Ignition Delay Time, Short Mechanism

하이드라진(hydrazine) 및 메틸 추진체는 매우 높은 에너지를 갖고 있고 또한 반응성도 커서 다양한 용도로 활용할 수 있기 때문에 많은 관심을 갖고 있다[1]. 이들은 액체 산화제와 반응할 경우 매우 짧은 시간 안에 고온 고압의 연소가스를 노즐을 통해 방출시킴으로써 추력을 발생시킨다. 따라서 이들은 우주선 발사체 엔진, 인공위성 궤도 진입 및 자세제어 추력기 등[2]을 위한 화학 추진 시스템에서 일원추진제(monopropellant) 또는 이원추진제(bipropellant) 연료로서 널리 사용되고 있다.

추진제 중에서 모노메틸하이드라진(monomethylhydrazine, MMH,  $CH_3NHNH_2$ )은 휘발성 하이드라진 화학 물질로서 사산화이질소( $N_2O_4$ ) 및 질산( $HNO_3$ )과 같은 다양한 산화제와 함께 자동 점화가 가능하여 이원추진제 로켓 엔진에 사용되고 있다[3]. 이것은 소량에서 유독성이 있고 발암물질이지만 비추력이 높아 매우 적은 연료 탱크 용량으로도 중간 성능을 제공하는

궤도에 쉽게 저장된다[3].

Catoire 등[4]은 MMH에 아르곤 97-99%를 포함한 혼합기에 대한 shock tube 실험 결과에 근거하여 MMH 분해에 대한 상세 반응 메카니즘을 개발하였다. 반응 메카니즘을 갖고 100% 기체 조건에서 MMH의 폭발 감도를 평가하였고, 그 결과 MMH는 하이드라진 보다 폭발에 덜 민감한 것으로 판정되었다. Catoire 등[5]은 MMH/ $O_2$ /Ar 가스 혼합기에 대한 상세 반응 메카니즘을 제안하였고, 수치해석 및 실험에서 얻어진 점화 지연 시간을 비교하였다. 열분해에서  $CH_3NNH_2$ 와  $H_2O_2$ 가 OH 생성에서 중요한 역할을 하였다. Catoire 등[6]은 MMH와 NTO( $N_2O_4$ )에 대한 상세 반응 메카니즘을 개발하였고, 900K 이하 온도에서 점화 및 900K 이상 온도에서 연소에서 중요한 기초 반응식을 제시하였다. Sun과 Law [1]는 대기압에서 MMH의 열분해에 대한 기초반응식을 제시하였고, MMH 열분해를 모델링하는데 있어서 N-N 및 C-N bond 분리 반응이 매우 중요한 역할을 하였다.

Anderson 등[7]은 MMH/RFNA(red fuming nitric acid)에 대한 상세 반응 메카니즘 및 열역학 데이터를 제공하고 있지만 실험 결과와 비교 검증되

\* 국립안동대학교 기계공학과

† 연락처자, [kylee@anu.ac.kr](mailto:kylee@anu.ac.kr)

TEL : (054)820-5899 FAX : (054)820-6127

지는 못했다. Wei와 Liang[8]은 Anderson 등[7]이 개발한 반응 메카니즘으로부터 축소 반응 메카니즘을 개발하여 MMH/NTO 추진기에 대한 CFD를 수행하였다. Hayashi 등[9]은 MMH 플레 가스 NTO를 분사하는 방법으로 대향류 화염을 형성하였고, 2개의 오렌지 및 1개의 청색/백색 화염이 생성됨을 관찰하였다. 또한 상세 반응 메카니즘을 사용한 수치해석 결과, 화염에서 NH<sub>3</sub> 분해 및 NO<sub>2</sub> 결합이 오렌지 화염의 생성과 연관 있음을 제시하였다.

수치해석 방법을 통해 MMH/NTO 추진기 내의 연소현상을 예상하기 위해서는 반응 메카니즘이 필요하다. CFD에 상세 반응 메카니즘을 적용하는 경우 계산 시간, 수렴 등의 어려움이 있다. 따라서 현재 컴퓨터 성능을 고려하면 상세 반응 메카니즘 대신 축소 반응 메카니즘을 이용하는 것이 도움이 된다.

본 연구에서는 MMH/NTO 축소 반응 메카니즘에 대한 비교 및 분석을 수행하였다. MMH와 NTO의 반응은 매우 빠르기 때문에 MMH/NTO 축소 반응 메카니즘을 이용하여 점화지연 시간을 계산하였고, 화학종의 농도 분포를 조사하였다.

Wei와 Liang[8]가 제안한 축소 반응 메카니즘은 29개 화학종 및 72개 기초반응식으로 구성되어 있다. Chemkin-Pro[10]의 Aurora 코드를 사용하여 화학종에 대한 민감도 분석 및 반응율을 계산하였다. 반응율과 화학종의 생성 및 소비 경로에 근거하여 3개 화학종(CH<sub>3</sub>NO<sub>2</sub>, HCO 및 CH<sub>2</sub>)을 제외시켰고, 26개 화학종 및 60개 기초반응식으로 구성된 축소 반응 메카니즘을 얻었다.

언급한 2가지 축소 반응 메카니즘을 사용하여 초기 온도, 압력 및 반응물 혼합비 변화에 따른 점화지연 시간 결과를 Figs. 1~3에 각각 나타냈다. 반응물 혼합비는 MMH 1에 대한 NTO 비이다. 즉 반응물 혼합비 1.5는 MMH:NTO=1:1.5를 의미한다.

Fig. 1에서 보는 것처럼 초기온도의 증가는 점화지연 시간을 짧아지게 하며, 비선형적으로 감소함을 보여준다. 초기온도가 300K 이하에서 점화지연 시간은 급격히 증가하는 반면 300K 이상에서는 완만한 감소를 가져온다.

초기온도의 경향과 마찬가지로 압력의 증가는 점화지연 시간을 줄이는 효과가 있다. 1기압 보다 낮은 조건에서 점화지연 시간은 급격하게 변하지만 1기압 보다 높은 조건에서 점화지연 시간

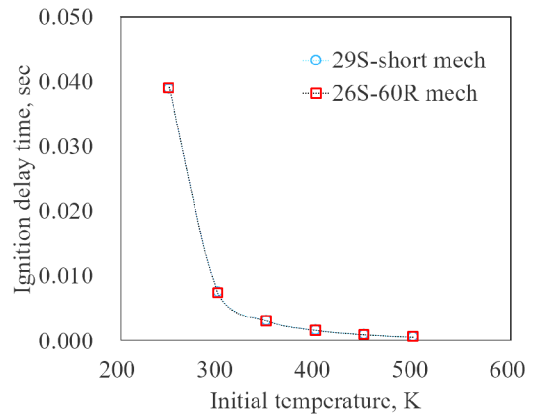


Fig. 1. Ignition delay time with respect to initial temperature at P=1 atm and mixture ratio=1.5.

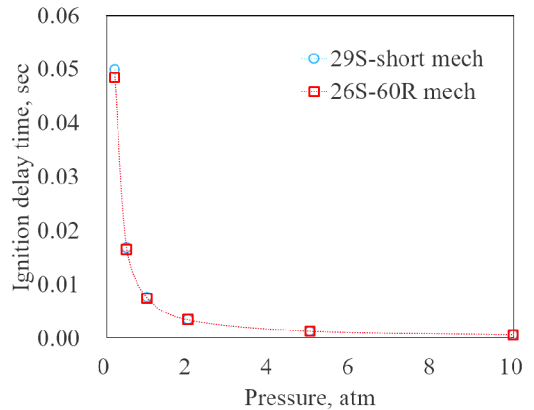


Fig. 2. Ignition delay time with respect to pressure at T<sub>i</sub>=300K and mixture ratio=1.5.

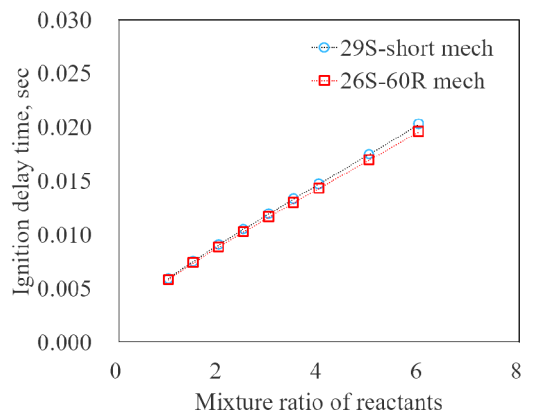


Fig. 3 Ignition delay time with respect to mixture ratio of reactants at P=1 atm and T<sub>i</sub>=300K.

은 완만한 변화를 보여준다.

Fig. 3에서 보는 것처럼 압력 1기압 및 초기 온도 300K 조건에서 NTO 첨가량의 증가는 점화 지연 시간을 선형적으로 증가시킨다.

MMH/NTO 축소 반응 메커니즘을 CFD에 사용하고 있지만 추후 계산시간을 줄이기 위해 좀 더 화학종의 수를 줄인 준총괄 반응 메커니즘(reduced reaction mechanism)의 개발이 필요하다.

### 참고 문헌

- [1] H. Sun and C.K. Law, "Thermochemical and kinetic analysis of the thermal decomposition of Monomethylhydrazine: an elementary reaction mechanism," *J. Phys. Chem. A*, Vol. 111, 2007, 3748-3760.
- [2] Y. Jang and K.H. Lee, "A Review on Major Foreign Research Trend of Monomethylhydrazine Reaction for Space Propulsion Part II : Chemical Reaction of Monomethylhydrazine-Dinitrogen Tetroxide," *Journal of The Society for Aerospace System Engineering*, Vol. 10, 2016, 74-81.
- [3] <https://en.wikipedia.org/wiki/Monomethylhydrazine>
- [4] L. Catoire, X. Bassin, G. Dupre, C. Paillard, "Experimental study and kinetic modeling of the thermal decomposition of gaseous monomethylhydrazine. Application to detonation sensitivity," *Shock Waves*, Vol. 6, 1996, 139-146.
- [5] L. Catoire, T. Ludwig, X. Bassin, G. Dupre, and C. Paillard, "Kinetic modeling of the ignition delays in monomethylhydrazine/oxygen/argon mixtures," *Symposium (International) on Combustion*, Vol. 27, 1998, 2359-2365.
- [6] L. Catoire, N. Chaumeix and C. Paillard, "Chemical Kinetic Model for Monomethylhydrazine/Nitrogen Tetroxide Gas Phase Combustion and Hypergolic Ignition," *Journal of Propulsion and Power*, Vol. 20, 2004, 87-92.
- [7] W.R. Anderson, M.J. McQuaid, M.J. Nusca, and A.J. Kotlar, "A Detailed, Finite-Rate, Chemical Kinetics Mechanism for Monomethylhydrazine-Red Fuming Nitric Acid Systems," *Army Research Lab., ARL-TR-5088*, Aberdeen Proving Ground, MD, 2010.
- [8] Q. Wei and G. Liang, Numerical Simulation of Ignition Process for the Monomethyl

Hydrazine-Nitrogen Tetroxide Thrusters, " *Journal of Propulsion and Power*, Vol. 35, 2019, 704-719.

[9] J. Hayashi, H. Tani, N. Kanno, D. Sato, Y. Daimon, F. Akamatsu, J. Gabl, A. Black, T. Pourpoint, "Multilayer reaction zones of a counterflow flame of gaseous Nitrogen Tetroxide and a liquid Monomethylhydrazine pool," *Combustion and Flame*, Vol. 201, 2019, 244-251.

[10] CHEMKIN-PRO, Reaction Design Inc., San Diego, CA 92121, USA. <http://www.reactiondesign.com>.

## 충돌판 예혼합 연소기를 이용한 저 발열량 연료의 화염특성 연구

남현택\*, 진유선\*, 오영택\*, 김종현\*\*, 이승로\*†

### Flame characteristics for low calorific fuels with premixed combustor and impingement plate

Hyeontaek Nam\*, Yuseon Jeon\*, Youngtaig Oh\*, Jonghyun Kim\*\*, Seungro Lee\*†

#### ABSTRACT

This study evaluates the combustion characteristics of impinging premixed flame for low calorific gas fuels(LCG). To simulate LCG, the equivalent gas method was used based on the specific gravity and Wobbe Index by mixing the methane, propane, nitrogen. LCGs have a calorific value of 8000kcal/Nm<sup>3</sup> and 6000kcal/Nm<sup>3</sup>, respectively, and the flame characteristics of methane were evaluated first to review the flame characteristics of LCGs. Through the experiment, the lower the calorific value, the lower the flame stability.

**Key Words** : Low calorific gas fuel, Impinging premixed flame, Flame stability

최근 산업혁명 이후 전 세계적으로 사용되고 있는 화석연료의 과소비로 인한 고갈 및 에너지 위기에 대한 심각한 문제가 대두되고 있다. 따라서 에너지원의 수입에 의존하는 국가들의 위기를 해결하기 위해 기존의 화석연료의 의존도를 낮추기 위한 연구가 활발히 진행되고 있다. 특히, 천연가스와 같은 대체에너지의 사용이 전 세계적으로 증가하였다. 또한, PNG(Pipeline Natural Gas)를 주로 사용하는 국가들의 LNG(Liquefied Natural Gas)의 수요가 급증하였으며, PNG의 낮은 발열량 수준을 맞추기 위해 세계적으로 LNG 공급량이 점차 낮아지고 있다. 이에 따라 우리나라에 수입되는 LNG의 열량이 계속 감소하고 있는 실정이다.[1] 따라서 저 발열량 가스에 대한 연소 특성을 규명할 필요가 있다. 또한 본 연구에서 진행한 충돌 예혼합화염 시스템의 충돌 제트화염은 피가열물이나 열교환 시스템 등에서 화염을 직접 가하여 가열하는 방식으로 전열성능이 우수하여 산업 전반적으로 사용되어 왔다. 이러한 충돌화염공정은 균일가열을 위해 단일연료를 사용한 공정이 대부분이었으며, 메탄, 부탄 등 기존의 가스연료 화염에 대한 연구가 주로 시행되었다.[2] 하지만 에너지 고갈에 대한 위기극복을 위하

여 단일연료 대신 혼합연료를 사용하는 실정이며, 그 중 합성가스의 구성비에 따른 연구가 활발히 진행되었다. 하지만 발열량에 대해 정확히 명시하여 발열량에 따른 연소특성을 규명하는 연구는 활발하지 않은 실정이다. 따라서 본 연구팀은 특정 웨버지수와 상대밀도를 이용한 등가가스법[3]을 통해 메탄, 프로판, 질소를 혼합하여 8,000kcal/Nm<sup>3</sup>(LCG 8000), 6,000kcal/Nm<sup>3</sup>(LCG 6000)의 발열량을 갖는 저급가스를 모사하였다. 본 연구팀은 이 저급가스를 이용하여 예혼합/비예혼합화염의 특성을 규명한 연구를 수행한 바 있으며, 본 연구는 기존 연구들에 이어서 충돌 예혼합 화염을 대상으로 LCG의 기초적인 연소특성을 검토하였다.

Fig. 1은 본 연구에 사용된 충돌예혼합 버너 시스템의 개요도이다. 노즐 출구의 내경(d)은 15mm이며 역화발생의 예방 및 균일한 유동을 위해 40mesh(1inch<sup>2</sup>격자 당 40개의 정사각형 격자망)를 사용하였다. 그리고 연료와 공기의 혼합을 위해 버너 유입 전 Mixing Chamber를 설치하여 가스들이 원활히 혼합되도록 하였다. 정확한 화염의 특성을 관찰하기 위해 공기는 수증기가 제거된 고순도 99.999% 이상의 공기를 사용하였으며, 연료는 순도 99.95% 이상의 메탄/프로판/질소 가스를 사용하였다. 그리고 이 연료 가스를 이용하여 상대밀도와 발열량 등과 같은 실험조건에 따라 혼합하여 저 발열량 가스를 모사하였다. 또한 가스들의 정확한 유량을 위해 버블 유량계

\* 전북대학교 기계공학과

\*\* 한국승강기대학교 관리전공

† 연락처, seungrol@jbnu.ac.kr

TEL : (063)270-2334 FAX : (063)-270-2315

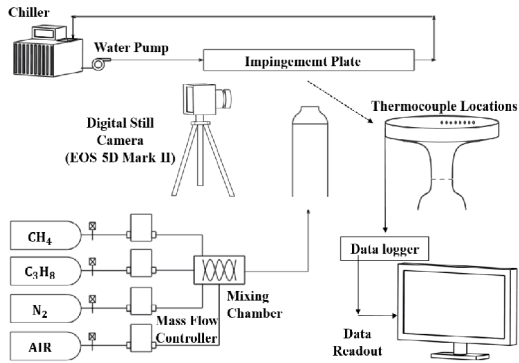


Fig. 1 Schematic diagram of impinging premixed burner system

로 보정을 시행하였고, 질량 유량계(MFC)를 이용해 유량을 조절하였다. 충돌판은 실험조건의 화염 최대크기를 고려하여 직경 400mm로 제작하였고, 충돌판과 노즐 사이의 거리(H)는 30mm로 Impinging distance(H/d)는 2로 고정하였다. 또한 충돌판 표면의 응축과 과열을 예방하기 위해 충돌판 내부에 냉각수를 순환시켰으며, 냉각수는 칠러를 이용하여 온도 333.15K으로 고정시켰다.

본 연구에서 발열량에 따른 연소특성 중 화염 안정성 영역을 확인하기 위해 그 영역을 역화영역, 노즐부착 영역, 부상화염 영역, 날림영역으로 총 4가지 영역으로 나뉘었으며, 당량비는 0.8에서 1.3 사이의 범위를 선정하여 Re 수를 점차적으로 증가시켜 실험을 진행하였다. Fig. 2는 메탄, LCG 8000, LCG 6000의 실험조건에 따른 Digital Still Image들을 맵핑한 것이다. 메탄과 LCG 8000의 경우 큰 차이는 없으나  $Re = 1600$ ,  $\phi = 1.0$ 의 경우 메탄연료에서 노즐부착화염이 생성됐지만 LCG 8000에서 부상화염이 나타났다. LCG 6000에서는 확연한 차이를 확인할 수 있었으며, 다른 연료에서는  $\phi = 1.2$ 에서  $Re 2000$ 의 범위까지 노즐 부착화염을 나타내었지만 LCG 6000의 경우  $Re 2000$ 에서 부상화염이 나타났다.

역화영역은 당량비가 1인 지점 근처에서 제일 컸으며, 당량비가 커질수록 역화 발생하는 영역은 감소하였다. 하지만 부상화염이 되는 영역과 날림영역은 당량비가 커질수록 증가하는 경향을 보였다. 또한 저급가스의 화염 안정성 영역은 전체적으로 메탄과 비슷한 경향을 보였지만, 발열량이 낮아짐에 따라 화염안정성 영역은 감소하였다. 특히 LCG 8000에서 lean 한 영역일수록 메탄과 비슷한 실험조건에서 영역 경계선이 형성되었지만, rich 한 영역일수록 화염안정성은 낮았으며, LCG 6000에서는 눈에 띄게 화염안정성 영역이 작음을 확인하였다.

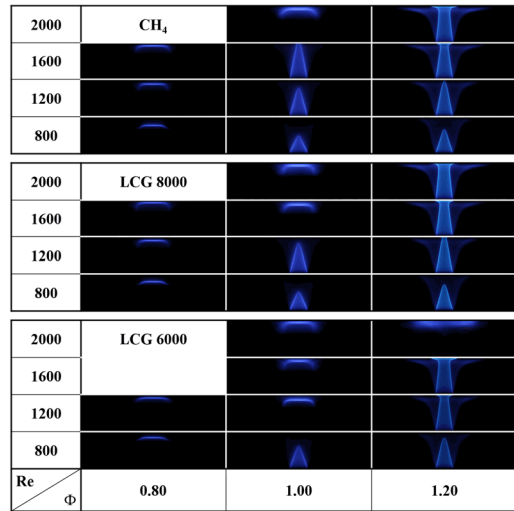


Fig. 2 Mapping images of the flame shapes for different calorific gases

본 연구에서 확인한 저급가스의 화염 특성의 검토를 통해 천연가스의 저 발열량화의 대처로 새로운 연소기 시스템설계에 필요한 기초적인 데이터베이스로 이용될 것으로 사료된다.

## 후 기

본 연구는 2019년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임(No. NRF-2018R1D1A1A09083076).

## 참고 문헌

- [1] 도시가스 열량 제도 설명자료, 한국가스공사
- [2] Zhao, Z., T. T. Wong, and C. W. Leung. "Impinging premixed butane/air circular laminar flame jet-influence of impingement plate on heat transfer characteristics." *International journal of heat and mass transfer* 47.23 (2004): 5021-5031.
- [3] Jong-Min Kim, Seungro Lee, Chang-Eon Lee. "Examination of validation for equivalent gas to replace natural gas." *Journal of Energy Engineering* 22.2 (2013): 128-135.



## 비에혼합화염에서 외부가진 시 발생하는 Pinch-off 현상 분석

안명근\*,곽상혁\*,최재홍\*,윤영빈\*,\*\*†

### An Analysis of Pinch-off Phenomenons under External excitation in Nonpremixed Flame

Myunggeun Ahn\*, Sanghyeok Kwak\*, Jaehong Choi\*, Youngbin Yoon\*\*,†

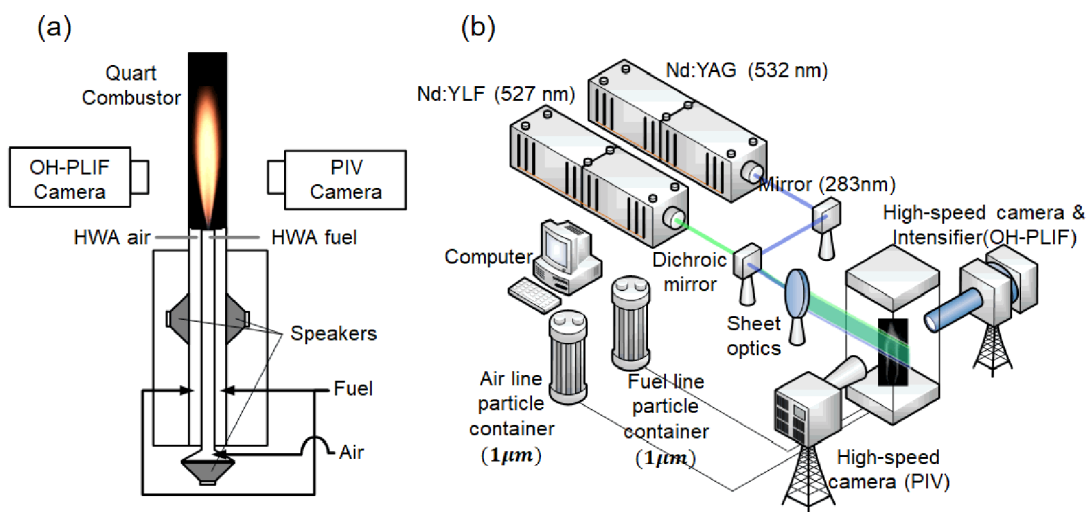


Figure 1 The schematic diagram of experimental equipment:  
(a) nonpremixed flame combustor, (b) OH-PLIF & PIV laser system

비에혼합화염의 한가지 모델인 Burke-Schumann(B-S)화염 [1-2]은 비에혼합화염의 기초현상을 연구하는데 사용되어 왔다. B-S화염 연소기는 연구실 크기의 사이즈로 실험 연구[3] 뿐 아니라 수치해석[4-6] 연구까지 다양한 분야에서 연구되고 있다. 본 연구 B-S 화염에 대한 실험적 연구를 수행하였다.

Figure 1은 실험장치 개략도이다. Figure 1 (a)는 B-S 화염을 모사한 비에혼합화염 연소기이며, 유동 섭동(flow perturbation)을 위한 스피커는 연료공급라인과 공기공급라인에 각각 설치되어 있으며, 스피커 신호는 열선유속계(Hot Wire Anemometer)로 획득하였다. 열선유속계로 획득

한 스피커 신호의 위상(phase) 차이가 존재하며 그 차이를 극복하고자 같은 높이에 열선유속계를 장착하여 위치적 차이를 제거하였으며, 스피커 앰프를 통해서 위상을 미세조절 하여 위상 차이를  $\pm 5$ 도일 때 실험을 수행하였다. 실험에 사용된 연료는 수소( $H_2$ )와 메탄( $CH_4$ )을 75/25%로 혼합한 혼합연료를 사용하였으며, 연료와 공기의 속도는 1 m/s로 동일하게 공급하였다. 진폭(amplitude)은 평균속도의 30%로 공급하였으며, 섭동 주파수는 0 - 220 Hz이다. Figure (b)는 레이저 시스템을 나타낸 개략도이다. OH PLIF 계측을 통해서 화염면을 계측하였으며, PIV 계측을 통해서 속도장(velocity field) 계측했다. OH PLIF는  $250\mu/pulse$  @10kHz로 최대해상도 1024x1024에서 7 kHz로 촬영이 가능한 intensifier & CMOS 카메라를 이용하였으며, PIV는  $2.7mj/pulse$  @3.5kHz로 최대해상도 1024x1024에서 1.5 kHz로 촬영이 가능한 CMOS

\* 서울대학교 기계항공공학부

\*\* 서울대학교 항공우주신기술연구소

† 연락처자, [ybyoob@snu.ac.kr](mailto:ybyoob@snu.ac.kr)

TEL : (02) 880-7396

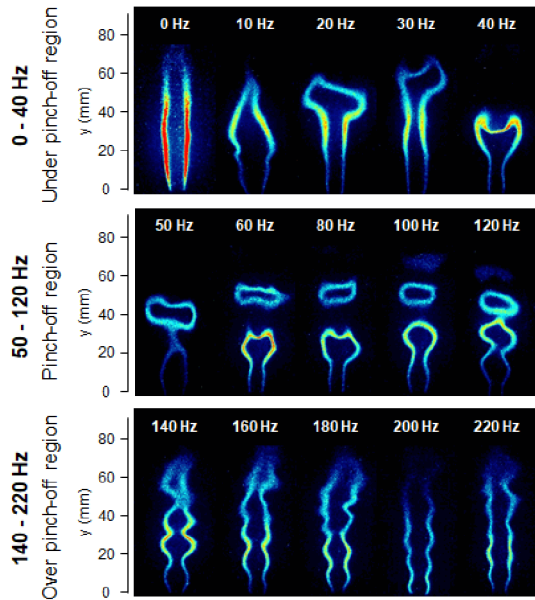


Figure 2. Instantaneous OH PLIF image according to frequency; Indicates under pinch-off, pinch-off, and over pinch regions.

카메라를 이용하였다. PIV에 사용된 입자 (particle)은 알루미늄 옥사이드 (Aluminum oxide,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $d=1\mu\text{m}$ )를 사용하였다. 후처리 (post-processing)은 multi-pass로 첫 번째는 window size 32x32, overlap 75%, passes 5이며, 두 번째는 window size 24x24, overlap 75%, passes 4이다.

Figure 2는 OH PLIF로 획득한 이미지들이다. Pinch-off란 두 유동이 분리되는 현상을 말하며 Pinch-off가 나타나는 주파수를 중심으로 Pinch-off region, under Pinch-off region, Over Pinch-off region으로 구별하였다. 0-40Hz와 140-220Hz에서는 Pinch-off가 나타나지 않지만 50-120Hz에서는 Pinch-off가 나타난다. Under Pinch-off region 중 0Hz의 화염 모양은 화염 끝이 닫히지 않은 B-S 화염 모양이며 10-40Hz는 유동 섭동에 의해서 화염의 동적움직임이 활발하지만, Pinch-off는 나타나지 않는다. 반대로 over Pinch-off region에서는 유동 섭동에 의해서 주름진 화염(the wrinkled flame)이 나타난다. 유동 섭동을 했을 때 나타나는 가장 일반적인 화염 모양이다. Pinch-off region에서는 주 화염(the main flame)과 보조화염(the subflame)으로 구분되는 것을 확인할 수 있다. OH PLIF를 이용하여 Pinch-off가 나타나는 주파수영역에 대해서 분석을 하였다.

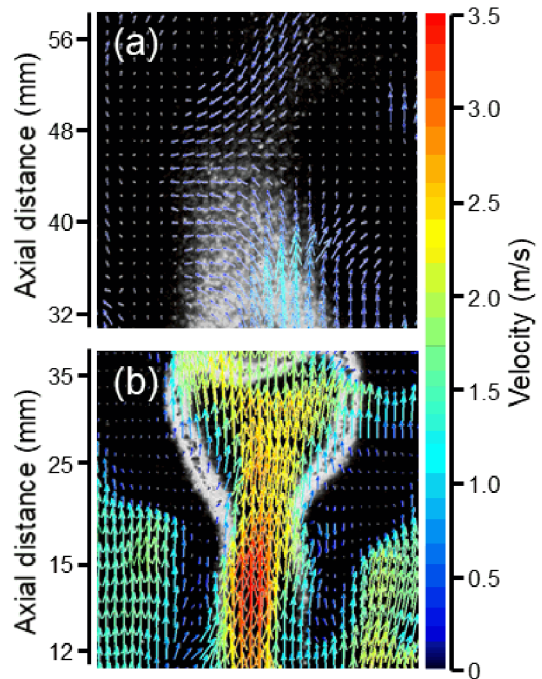


Figure 3. OH PLIF and velocity vector distribution overlap instantaneous images; (a) 40Hz, (b) 80Hz.

Figure 3은 OH PLIF와 속도벡터를 겹친 이미지이다. 속도벡터 화살의 색분포는 속도로 나타내었다. 빨간색일수록 빠른 속도, 파란색일수록 0 m/s에 가까운 속도를 나타낸다. Figure 3 (a)는 40Hz의 하류(downstream)를 Fig. 3 (b)는 80Hz의 상류(upstream)를 나타내었다. Figure 3 (a)에서 상류방향으로, 즉 아래쪽 방향으로 향하는 벡터들을 볼 수 있다. 유동 섭동에 의해서 유동이 진행방향의 반대로 흐르는 현상을 sucked back 이라고 하며 이 현상에 의해서 화염 중심이 압축(squeeze)되어 하트모양의 화염이 생기게 된다. Figure 3 (b)는 80Hz의 주 화염(main flame)을 나타내었다. 주 화염에서 화염 목(the flame throat)가 얇아지며 Pinch-off가 나타나는데, 화염 목에서 빠른 속도가 관찰되었다. 빠른 속도로 인하여 국소적으로 압력이 낮아지고, 화염 목이 얇아지고 결국에는 국소소멸현상(local extinction)이 발생한다.

본 연구에서는 Burke-Schumann flame가 기반인 비예혼합화염에서 유동 섭동에서 나타나는 현상을 분석하였다. OH PLIF를 이용하여 화염 면(flame surface)를 관찰하였으며, PIV를 이용하여 속도장(velocity field)를 관찰하였다. 주파수에 따른 화염면 분석을 통해서 Pinch-off가 나타나는

영역을 구별하였으며, 이 중 40 Hz와 80Hz를 선택하여 PIV를 수행하였다. PIV 결과로 sucked back이 관찰되었으며, 속도증가에 따른 화염 면 변화를 관찰하였다.

## 후 기

본 연구는 한국연구재단의 지원을 받아 수행한 선도연구센터지원사업(NRF-2013R1A5A1073861), 산업통상자원부의 산업기술혁신사업(No.10067074), 한국연구재단-글로벌 박사 펠로우십사업(NRF-2017H1A2A1043206)의 지원을 받은 연구임

## 참고 문헌

- [1] S. Burke, T. Schumann, “Diffusion Flames” , Vol. 20, 1928, pp.998-1004
- [2] C. Chung, C. Law, “Burke–Schumann Flame with Streamwise and Preferential Diffusion” , Vol 37, 1984, pp. 21-46.
- [3] T. Kim, M. Ahn, J. Hwang, Y Yoon, “The experimental investigation on the response of the Burke–Schumann flame to acoustic excitation” , Vol. 36, 2017, pp.1629-1636.
- [4] N. Magina, V. Acharya, T. Lieuwen, “Response of non-premixed flames to bulk flow perturbations” , Vol. 34, 2011, pp.229-240.
- [5] N. Magina, V. Acharya, T. Sun, T. Lieuwen, “Propagation, dissipation, and dispersion of disturbances on harmonically forced, non-premixed flames” , Vol. 35, 2015, pp.1097-1105.
- [6] K. Kuwana, N. Tagami, S. Mizuno, I. Tamio, “Extinction of laminar jet diffusion microflames” , Vol 32 II, 2009, pp.3115-3121.

# 1/4 파장 공명기에서 하향 전파하는 예혼합 화염의 열음향장에 관한 실험적 고찰

손광호\* · 석지원\*\* · 이원주\* · 윤성환\*\*†

## Experimental Analysis of Thermo-Acoustic Field of Downwardly Propagating Flames in a Quarter Wavelength Resonator

Kwangho Son\*, Jiwon Seok\*\*, Won-Ju Lee\*, Sung Hwan Yoon\*\*†

### ABSTRACT

In the combustion chamber consisted of a quarter wavelength resonator, the naturally generated thermo-acoustic field due to the difference of thermal boundary between unburned and burned sides causes changes of flame shape and flow field. In this study, the thermo-acoustic field was visualized by PIV(Particle Image velocimetry). As the results, The Particle Image Velocimetry of unburned gas prove experimentally the proposed equation which calculates unburned gas velocities and laminar burning velocities.

**Key Words** : Primary acoustic instability, Quarter wavelength resonator, Thermo-acoustic instability, Visualization of thermo-acoustic field

산업용 연소기나 가스터빈에서 발생하는 열음향 불안정은 시스템 제어의 어려움을 야기하고 심할 경우 연소기의 손상 혹은 폭발로 이어지는 사고를 유발할 수 있다. 이를 방지하기 위해 연소기 설계 단계에서 음향 방지기(acoustic damper)를 이용한 구조적 변경을 시도하거나 연소 상태량을 임의적으로 조절하여 열방출률 및 압력장의 파장을 이상(out of phase)으로 제어하는 방안을 주로 사용한다. 이를 위한 기초 연구로서 구조를 단순화한 1/4 파장을 가진 공명기에서 하향 전파하는 예혼합 화염의 주변 열음향장에 대해 제안된 이론적 내용을 본 연구에서 실험적으로 증명하고자 하였다.

Fig. 1은 본 연구에서 사용된 실험장치 개략도이다. 일반적으로 1/4 파장 공명기에서 하향 전파하는 예혼합 화염은 열음향 불안정성으로 인해 곡률을 가진 화염 형상에서 평평한 형상의 화염으로 변하며 진동하는 일차 열음향 불안정(primary acoustic instability)이 나타나게 된다.[1] 제안된 연구 결과에 따르면, 1/4 파장 공명기 바닥에서 측정된 압력과 일차 열음향 불안

정이 나타나는 화염의 공명기 내 특성거리를 알 때, 이론적 수식에 따라 미연소 가스의 속도 분포를 계산할 수 있다.[2]

일반적으로 화염 전파 속도(flame propagation velocity)는 화염의 변위속도(displacement flame velocity)와 미연소 가스 속도(unburned gas velocity)의 합으로 정의된다. 따라서 본 연구에서는 일차 열음향 불안정이 발생하는 1/4 파장 공명기에서 화염 전파 속도를 도출하기 위하여 미연소 가스 속도장을 가시화하였다.

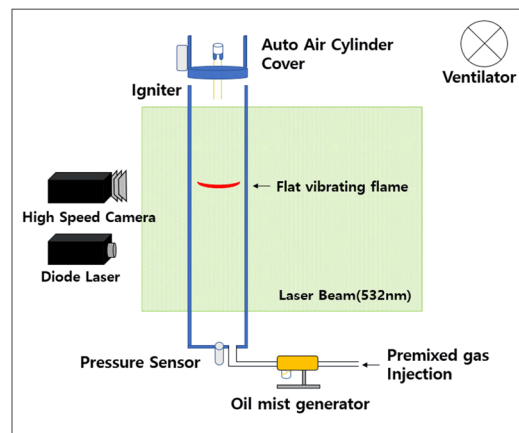


Fig. 1 Schematic drawing of the experimental setup.

\* 한국해양대학교 기관공학부

\*\* 한국해양대학교 기관시스템공학부

† 연락처, shy@kmou.ac.kr

TEL : (051)410-4261 FAX : (051)-404-3985

실험을 위해 내부 직경 3cm, 관 길이 100cm의 1/4 파장 공명기를 준비하여 공명기 바닥부분에 압력 계측센서(Piezotronics, 106b52)를 설치하였고 화염이 하향 전파할 때 바닥에서의 압력 변동을 오실로스코프(Teledyne Lecroy)를 통해 5000000(1/s)로 분해능으로 샘플링하였다. 예혼합 가스는 오일 미스트 생성장치(Lavision)를 통해 미립화 된 오일 입자와 함께 관에 채워진 후, 다이오드 레이저(532nm)를 투과하여 미산란기법(Mie-scattering method)을 이용하여 유동장을 가시화하였다. 관 상부에서 점화하면 화염이 하향 전파하며 일차 열음향 불안정이 발생하였고, 고속카메라를 이용하여 화염의 전파와 주변 열음향장의 변화를 3000 fps로 촬영하였다.

일차 열음향 불안정이 나타나는 화염 주변 미연소 가스의 Particle Image Velocimetry 분석을 수행하였고 자세한 실험 결과는 학술대회 발표로 대체하고자 한다.

## 후 기

본 연구는 2019년도 산업통상자원부 및 산업기술평가관리원(KIET) 연구비 지원에 의한 연구임. (No.20005750)

## 참고 문헌

- [1] S.H. Yoon, T.J. Noh, O. Fujita, "Onset Mechanism of Primary Acoustic Instability in Downward-Propagating Flames", *Combust. Flame*, 170 (2016) 1-11
- [2] W.E Kaskan, "An investigation of vibrating flames", *Symp (Int.) Combust.* 4 (1953) 575-591
- [3] S.H Yoon, T.J. Noh, O. Fujita, Effect of Lewis number on acoustic instability of freely propagating flames in a tube, *Proceedings of combustion Institute*, (2017), 36(1), 1603-1611

# 가열된 동축류의 희석 효과가 메탄/수소 자발화 층류 부상화염에 미치는 영향에 대한 수치해석적 연구

신혜빈\*, 정기성\*, 김정택\*, 박정\*\*, 정석호\*\*\*, 유춘상\*†

## A numerical study of the coflow dilution effect on the flame characteristics of autoignited laminar lifted methane/jet flames

Hye Bin Shin\*, Ki Sung Jung\*, Gyeong Taek Kim\*, Jeong Park\*\*, Suk Ho Chung\*\*\*, Chun Sang Yoo\*†

The emissions of air pollutants generated in the processes of combustion have caused many environmental problems. Therefore, Moderate or Intense Low-oxygen Dilution (MILD) combustion is recently highlighted as a novel combustion technology because of its advantages in reducing pollutant emission [1]. MILD combustion is generally achieved by flue gas recirculation, which leads to the increase of inlet temperature and decrease the concentration of oxygen. It allows the reactant to autoignite itself because temperature is above the autoignitive temperature, while the excessive amount of flue gas leads to retard the autoignition delay time. This induces distributed reaction zones in the combustion chamber, and consequently, the maximum flame temperature can be decreased under the MILD combustion condition.

However, due to the low concentration of oxygen, the flame stabilization of the MILD combustion is one of the most challenging issues. Therefore, the purpose of the present study is to gain a fundamental understanding of the relation between the dilution level on the coflow and the liftoff height for the laminar methane/hydrogen jet flames.

The numerical simulations are performed in an axisymmetric coflow burner configuration using laminarSMOKE code [4,5], which is an openFOAM based laminar reacting flow solver.

Figure 1 shows the schematic of the computational domain for the simulations. The domain size is  $6.65 \text{ cm} \times 50 \text{ cm}$  in the radial  $r$ - and the axial  $z$ - directions. The inner and outer diameter of the fuel nozzle are  $3.76 \text{ mm}$  and  $4.76 \text{ mm}$ , respectively, and this configuration is identical to that of the previous experiment and numerical simulation [2,3]. The inlet boundary conditions for the simulations are summarized in Table 1. For comparison purposes, we also perform additional numerical simulations of methane jet flames in heated coflow. The boundary conditions for the additional simulations are summarized in Table 2.

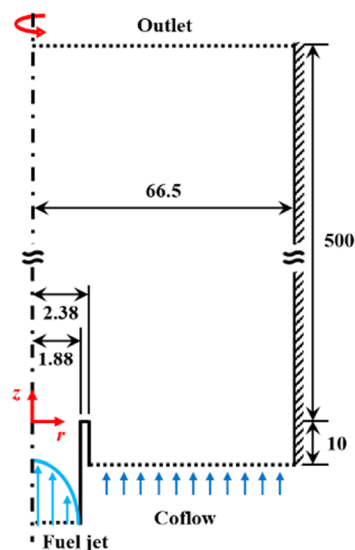


Fig. 1. Schematic of the computational domain

\* 울산과학기술원 기계공학과

\*\* 부경대학교 기계공학과

\*\*\* KAUST Clean Combustion Research Center

† 연락처: [csyoo@unist.ac.kr](mailto:csyoo@unist.ac.kr)

for simulations

Table. 1. Boundary conditions for methane /hydrogen jet flames

Fuel velocity, $U_0$ [m/s]	4~30
Coflow velocity, $U_{CO}$ [m/s]	1.1
Temperature, $T_0$ [K]	940
Fuel mole fraction, $X_F$	0.2
Hydrogen ratio in fuel, $R_H$	0.35
Oxidizer mole fraction in coflow, $X_{O_2}$	0.10~0.21

Table. 2. Boundary conditions for methane jet flames

Fuel velocity, $U_0$ [m/s]	10~30
Coflow velocity, $U_{CO}$ [m/s]	1.1
Temperature, $T_0$ [K]	1160
Fuel mole fraction, $X_F$	0.2
Oxidizer mole fraction in coflow, $X_{O_2}$	0.10~0.21

Figure 2 shows the variation of liftoff height,  $H_L$ , for methane/hydrogen and methane jet flames as a function of  $U_0$ . For methane jet flame (see Fig. 2b), the  $H_L$  increases with the increase of  $U_0$ , and the overall  $H_L$  further increases as  $X_{O_2}$  decreases. This is because the increase of  $N_2$  in the mixture increases/decreases the ignition delay time/laminar flame speed.

For methane/hydrogen jet flames (see Fig. 2a),  $H_L$  generally decreases with the increase of  $U_0$ , which is mainly attributed to the differential diffusion effect between  $CH_4$  and  $H_2$  molecule [3]. An interesting point in the present study is that the  $H_L$  variation is almost invariable, or even slightly decreases with the decrease of  $X_{O_2}$  when  $U_0$  is higher than 20 m/s. Since the flame temperature continuously decreases with the decrease of  $X_{O_2}$ , it indicates that the methane/hydrogen jet flame is more favorable to exhibit the stationary lifted flames with MILD combustion mode.

We conjecture that the unusual  $H_L$  behavior of the methane/hydrogen flames at relatively-high  $U_0$  regime is caused by the high diffusive nature of hydrogen molecule, as in the previous study [3]. The detailed simulations to identify the effect of diffusivity of hydrogen on the flame stabilization will be carried out in a future work.

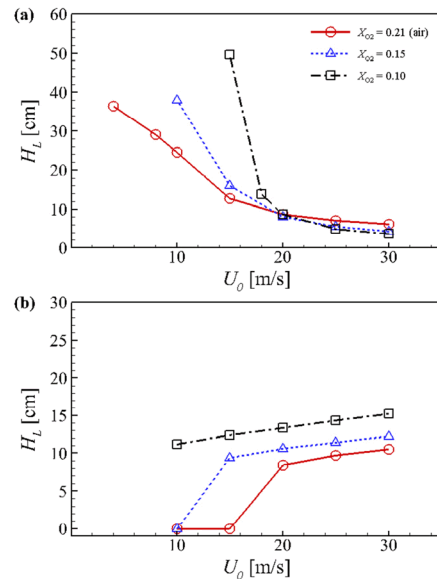


Fig. 2. Variations of liftoff height for auto-ignited laminar lifted (a) methane/hydrogen and (b) methane jet flames

## Conclusions

In this study, we investigate the liftoff characteristics of laminar methane/hydrogen jet flames by varying the mole fraction of oxygen in the oxidizer coflow. Unlike typical autoignited laminar lifted jet flames such as methane jet flame, the liftoff height of the methane/hydrogen jet flame remains nearly the same with the decrease of the oxygen levels. It suggests that the hydrogen addition in the fuel jet can play a critical role in stabilizing lifted flames in the MILD combustion. Additional numerical/experimental studies will be carried out to elucidate the effect of hydrogen addition on the flame stabilization.

## Acknowledgement

This research was supported by Basic Science Research Program through the National Research Foundation of Korea (NRF) funded by the Ministry of Science and ICT (NRF-2018R1A2A2A05018901).

## Reference

- [1] A. Cavaliere, M. de Joannon, Prog. Energy Combust. Sci. 30 (2004) 329–366
- [2] B.C. Choi, S.H. Chung, Combust. Flame, 159,

- 2012, pp 1481–1488.
- [3] K.S. Jung, S.O. Kim, T. Lu, S.H. Chung, B.J. Lee, C.S. Yoo, *Combust. Flame* 198 (2018) 305–319
  - [4] A. Cuoci, A. Frassoldati, T. Faravelli, E. Ranzi, *Combust. Flame* 160 (2013) 870–886.
  - [5] A. Cuoci, A. Frassoldati, T. Faravelli, E. Ranzi, *Energy. Fuel* 27 (2013) 7730–7753.



# 합성가스(H<sub>2</sub>/CO) 조성비에 따른 충돌 제트 화염의 열음향 불안정성에 관한 연구

김주한\*, 이기만\*†

## A Study on Thermoacoustic Instability of Impinging Jet Flames with Composition Ratio of Syngas (H<sub>2</sub>/CO)

Juhan Kim\*, Keeman Lee\*†

### ABSTRACT

The purpose of this study was to investigate the characteristics of flame oscillation in impinging jet flame with composition ratio. The distance between the nozzle and the impingement plate was fixed at  $H/d = 2$ , and the experiment was conducted with the Re and the equivalence ratio. As fuel, syngas composed of hydrogen and carbon monoxide was used, and H<sub>2</sub>:CO ratio was selected as 10:90, 70:30, 50:50 to confirm the behavior of flame oscillation with the composition ratio of syngas. First, the section where the disc flames exist was shown through the stability map of the flame. Noisy flame was divided into Regime II-1 and Regime II-2 even if the syngas ratio was different. After that, the representative conditions of each fuel were visualized to confirm that they had similar shapes in the same Regime.

**Key Words** : Syngas, Impinging jet flame, disc flame, Thermoacoustic instability, Flame oscillation

평판에 충돌하는 제트 화염은 높은 대류 열전달로 인해 산업용 보일러부터 가정용 버너까지 여러 분야에서 사용됩니다. 이로 인해 충돌 제트 화염은 다양한 연소 조건에서 화염 구조 및 안정화 특성에 관한 많은 연구가 진행되었습니다[1-5]. 최근에는 충돌 연소 시스템에서 나타나는 소음을 동반한 열음향 불안정성(Thermoacoustic)에 대한 연구가 활발히 진행되고 있지만, 합성가스(Syngas)를 적용한 연소기의 불안정성 연구는 아직 부족한 실정이다. 따라서 본 연구팀에서는 합성가스를 이용하여 낮은 당량비에서 주로 발생하는 부상된 충돌 제트 화염의 열음향 불안정성에 대해 연구를 진행하였다.

H<sub>2</sub>와 CO를 주성분으로 하는 합성가스는 가스, 석유, 석탄, 바이오매스 및 기타 자원에서 생성됩니다. 합성가스는 연료 특성상 친환경적인 자원

으로 잘 알려져 있지만, 낮은 당량비에서는 열음향 불안정성이 나타나는 것으로 이전연구에서 확인을 하였다. 합성가스에서 나타나는 열음향 불안정성을 좀 더 면밀히 조사하고자 본 연구에서

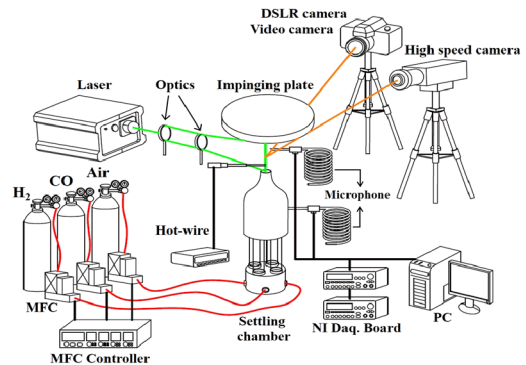


Fig. 1 Schematic diagram of impinging jet burner and flow systems.

\* 순천대학교 기계·우주항공공학부

† 연락저자, kmllee@snu.ac.kr

TEL : (061)750-3828 FAX : (061)-750-3820

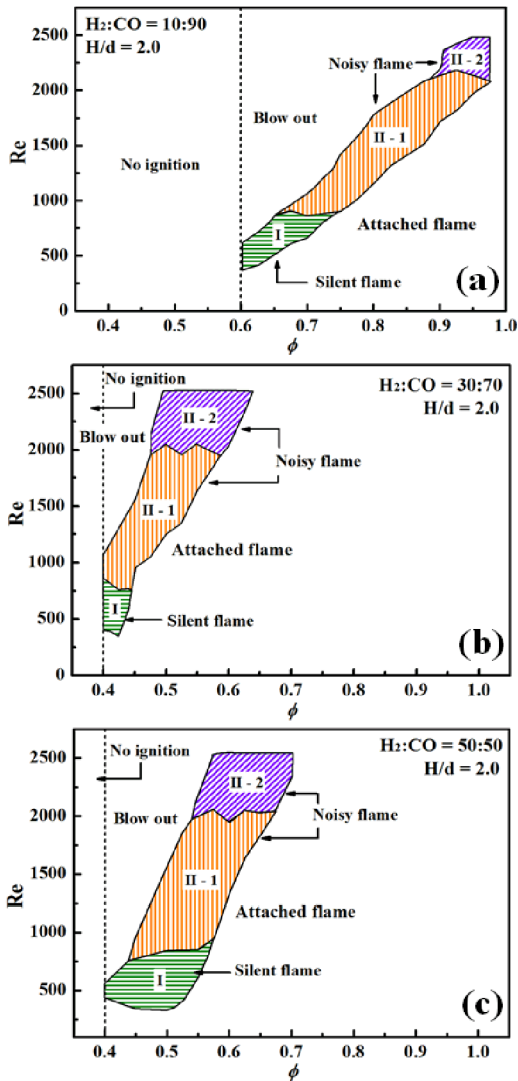


Fig. 2 Mapping of the flame mode for noisy regime, silent regime and extinction limit as function of Re and  $\Phi$ .

는 합성가스의 성분비인  $H_2:CO = 10:90, 30:70, 50:50$ 에 따른 부상화염이 발생하는 구간을 나타내었고 화염의 진동에 따른 노즐 출구에서의 유동장을 시각화 하였다.

본 연구에서 사용한 실험장치는 이전에 보고된 연구와 유사한 실험 장치로 Fig. 1에 나타내었다 [6-8]. 우선 합성가스의 성분비에 따라 나타날 수 있는 화염의 형태를 파악하기 위해 노즐과 촛돌판 사이의 거리( $H/d$ )를 2로 고정시키고 레이놀즈 수(Reynolds number, 이하 Re)와 당량비(equivalence ratio, 이하  $\Phi$ )에 변화를 주었고, 그 결과를

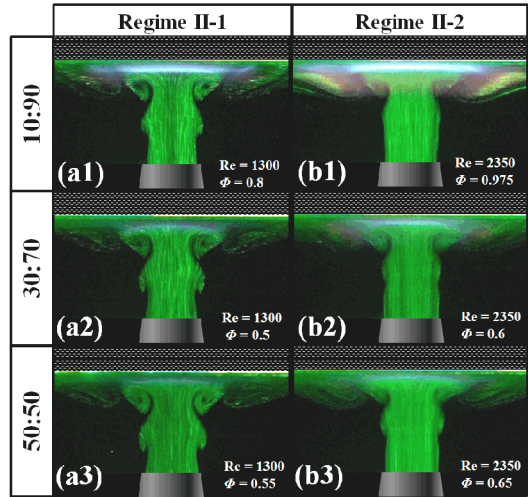


Fig. 3 Flow Field Visualization of Noisy Flame Using Mie-scattering Method

Fig. 2에 나타내었다. 부상화염은 크게 2가지로 구분할 수 있는데, 소음이 없고 화염의 형태가 일정한 Silent flame(Regime I)과 화염이 진동하고 소음이 나타나는 Noisy flame(Regime II)로 구분할 수 있다. 이 Noisy flame은 다시 두 가지 영역으로 구분할 수 있는데 화염의 섭동이 일정한 주기를 가지고 소리가 비교적 큰 Regime II-1과 비교적 소리가 작고 화염의 섭동이 불균일한 Regime II-2로 구분할 수 있다. 합성가스 성분이 변화하더라도  $H_2$  비율이 증가함에 따라 연소속도 증가로 인해 부상된 촛돌 제트 화염은 좀 더 낮은 당량비에서 존재하게 되는 것을 확인할 수 있다. 하지만 합성가스 성분비가 변하더라도 Regime II에서 현상이 동일하게 구분되는 것을 확인하였다.

Fig. 3은 각 합성가스의 조성비 별 Regime II-1과 Regime II-2의 대표조건들을 Mie-scattering 방식을 이용하여 노즐출구에서의 유동장을 시각화 하였다. 합성가스의 조성비 별 와류의 형태들은 Regime II-1, Regime II-2 모두 동일한 형태를 띄고 있는 것을 확인할 수 있다. 이전에 보고된 합성가스 10:90 조건에서 Regime II-1과 Regime II-2로 나뉘는 현상이 합성가스 조성비를 바꿔주어도 Regime이 나뉜다는 것을 알 수 있다[6-8]. 추 후 화염과 와류간의 상호작용을 면밀히 보고자 압력섭동과 화염의 열방출을 측정하여 근본적인 화염진동 원인을 찾을 예정이다.

## 후 기

본 연구는 한국연구재단(NRF)의 기본연구지원 사업의 일환(2019059256)으로 수행되었습니다. 이에 감사드립니다.

## 참고 문헌

- [1] D. Rockwell, E. Naudacher, Self Sustained Oscillations of Impinging Free Shear Layers, *Annu. Rev. Fluid Mech.*, 11 (1979) 67-94.
- [2] A. Powell, On the Edgetone, *J. Acoust. Soc. Am.*, 33 (1961) 395-409.
- [3] H.S. Ribner, Reflection, Transmission and Amplification of Sound by a Moving Medium, *J. Acoust. Soc. Am.*, 29(4) (1956) 435-441.
- [4] W. Wei, J. Wang, D.H. Li, M. Zhu, H.J. Tang, F.L. Wang, Dynamic Compensation Based Adaptive Control of Thermo-Acoustic Instabilities in Rijke Tube: An Experimental Validation, *ISA T.*, 52 (2013) 450-460.
- [5] S. Sivasegaram, J.H. Whitelaw, Oscillation in Confined Disk Stabilized Flames, *Combust. Flame*, 68 (1987) 121-129.
- [6] S.G. Kim, K.M. Lee, A study on Flame Oscillation in Premixed Syngas(H<sub>2</sub>/CO) Impingement Jet Flames Part I : Disc Lifted Flame characteristics, *J. Korean Soc. Combust*, 23(3), 2018, 1-9.
- [7] S.G. Kim, K.J. Kim, K.M. Lee, A study on Flame Oscillation in Premixed Syngas(H<sub>2</sub>/CO) Impingement Jet Flames Part II : Characteristic of Oscillating Lifted Disc Flame, *Korean Soc. Combust*. 23(3), 2018, 50-57.
- [8] J. H. Kim, S. G. Kim, K. M. Lee, J. Park, An experimental study on thermoacoustic instabilities in syngas-air premixed impinging jet flames, *Fuel* 257 (2019) 115921

# 대향류 예혼합화염에서 FGR과 FIR 효과에 대한 수치해석

조서희\*, 이기만\*\*†

## A Numerical Study on Effect of Flue Gas Recirculation and Fuel induced Recirculation in Counterflow Premixed Flames

Seohee Cho\*, Keeman Lee\*\*†

### ABSTRACT

This paper is studied on a comparison of flue gas recirculation(FGR) and fuel injected recirculation(FIR) in methane/air counterflow premixed flames to control the NO<sub>x</sub> emission. The recirculation rate was defined based on the mole fractions of the products calculated through numerical analysis. As a main result, the maximum flame temperature decreased as strain rate increased, and it was noticeable in the FIR. The effect of the recirculation rate on the flame was significant in areas with low strain rates.

**Key Words** : Flue Gas Recirculation(FGR), Fuel Induced Recirculation(FIR), Counterflow, NO emission

2015년 유엔기후변화협약(UNFCCC)에서 채택된 파리협정에 따라 2020년부터는 온실가스 감축 목표와 이행기준 등이 더욱 강화된다. 특히 연소 시스템에서 질소산화물을 제어하기 위해 배출가스 외부 재순환(flue gas recirculation, FGR)을 폭넓게 적용하고 있다. 실제로 디젤엔진에서는 높은 연료효율과 출력 성능을 보이지만, 연소실 내 높은 화염 온도로 인하여 많은 양의 NO<sub>x</sub>를 생성한다[1]. 이러한 문제를 해결하기 위해 엔진의 공기 흡입구에 배기가스 재순환 기술을 접목하는 연구들이 진행되어왔고, NO<sub>x</sub> 및 주요 배기 배출물을 획기적으로 줄이는 결과를 보였다.

국내 산업용 보일러 시장에서도 10ppm 이하의 강화된 규제를 맞추기 위하여 배기가스의 외부 재순환 기술을 적용하여 NO<sub>x</sub> 규제를 맞추고 이에 내부재순환 기법을 적용하는 시도의 필요성을 제안하였다[2]. 실제 연소기에 외부 및 내부 재순환을 접목하기 위해서는 먼저 배기가스 유무에 따른 연소특성을 규명하는 것이 요구된다. 주요 생성물들을 재순환하는 경우 나타나는 화학적 효과들과 NO<sub>x</sub> 감소 경향을 파악하여 실제 연소기 제작에 가이드라인 역할을 수행할 수 있을 것이다.

본 연구에서는 CH<sub>4</sub>/공기 대향류 화염에 FGR 기법과 더불어 연료 측에 배기가스를 적용하는

방식(fuel injection recirculation, FIR)을 비교하여 수치해석을 진행하였다. 실제 산업용 보일러에서는 NO<sub>x</sub> 저감을 위해 회박조건에서 가동이 되는 점을 고려하여 당량비 0.9 조건으로 설정하였다. 실제 배기가스를 모사하기 위하여 메탄/공기 혼합물에서 주요 생성물인 CO<sub>2</sub>와 H<sub>2</sub>O를 혼합하여 화염대에 도입하였으며, 이때의 화학적 효과를 보기 위해 OPPDIF code를 적용하였으며[2], 상세 화학반응 기구는 UC San Diego Mech.을 사용하여 수행되었다[3].

FGR과 FIR를 적용하기에 앞서, 이를 명확히 할 CO<sub>2</sub>와 H<sub>2</sub>O의 재순환율을 정의하였다. 실제 연소 시스템을 모사하기 위하여 당량비 0.9 조건에서의 신장률에 따른 실제 배출되는 CO<sub>2</sub>와 H<sub>2</sub>O를 각각 계산하였고 그 식은 다음과 같다.

$$\int_0^L \text{mole fraction } dx = \text{mole of emission } (CO_2 + H_2O) \quad (1)$$

노즐 사이에서 생성된 CO<sub>2</sub>와 H<sub>2</sub>O의 총생성량을 계산하였고, 이를 기준으로 재순환율을 정의하였다. 기존의 재순환율은 혼합물의 유량 혹은 재순환되는 가스를 포함한 흡입공기량 등을 기준으로 정의되었지만[4-6], 이번 연구에서는 실제 연소의 생성물을 고려하여 재순환율(recirculation rate, RR)을 정의하였다. 이때 재순환율은 FIR과 FGR에 동일하게 적용된다.

\* 순천대학교 우주항공공학과

\*\* 순천대학교 기계·우주항공공학부

† 연락처, kmlee@scnu.ac.kr

TEL : (061)750-3114

$$RR(\%) = \frac{\text{mole of diluent } (CO_2 + H_2O)}{\text{mole of emission } (CO_2 + H_2O)} \times 100 \quad (2)$$

따라서 (1)과 (2)식을 이용하여 재순환되는 희석제 물질의 경계조건을 정의하였다. Fig. 1은 메탄/공기 예혼합 화염에서 RR = 10 %인 경우 (a) FIR과 (b) FGR의 온도와 주요 화학종들의 몰분율을 나타내었다. 노즐의 간격은 15 mm으로 연료 측 노즐을 시작점으로 계산되었다. 신장률 30 s<sup>-1</sup>에서의 조건으로, FGR와 비교할 때, FIR에서의 NO 저감이 효과적으로 작용함을 알 수 있으며, 이는 최대 화염 온도의 영향이 크게 작용한 것으로 판단된다.

온도에 따라 화염 거동이 크게 변화했으므로 신장률에 따른 최대화염 온도의 변화를 Fig. 2에 나타내었다. FGR의 경우 신장률이 증가함에 따라 당량혼합비로 예혼합 한 기준 화염의 경우와 유사한 화염 온도를 보인다. 반면에 FIR인 경우는 오히려 a<sub>g</sub> = 60 s<sup>-1</sup>을 기준으로 증가하였다 감소하는 경향을 보인다. 이는 이전의 화염 거동이 신장률과 더불어 복사 열손실에 의한 영향을 크게 받았기 때문이다. 또한, FGR과 FGR 모두 RR이 증가할수록 최대화염 온도는 감소하는 경향을 보이며, 특히 FIR의 경우 온도가 급격히 감소함을 알 수 있다.

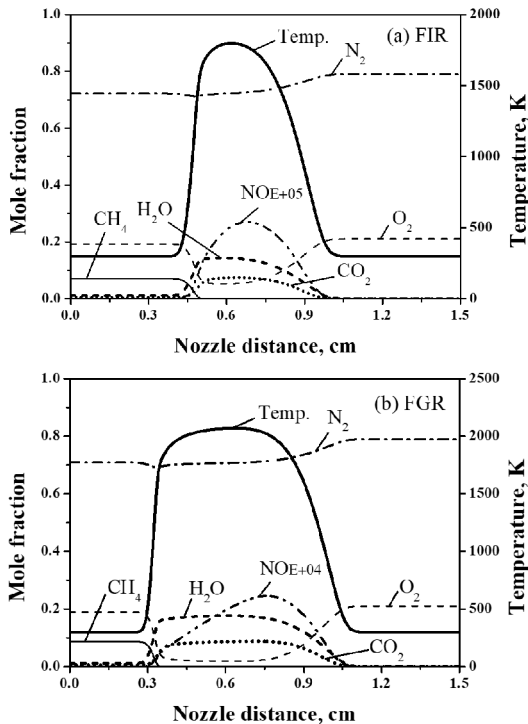


Fig. 1 Mole fraction of major species and temperature in (a) FIR and (b) FGR at a<sub>g</sub> = 30. (The recirculation rate of CO<sub>2</sub> + H<sub>2</sub>O = 10%)

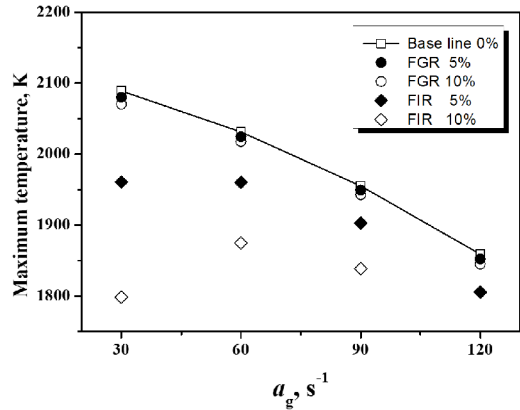


Fig. 2 Maximum flame temperature versus strain rate with FGR and FIR at various recirculation rates of CO<sub>2</sub> and H<sub>2</sub>O.

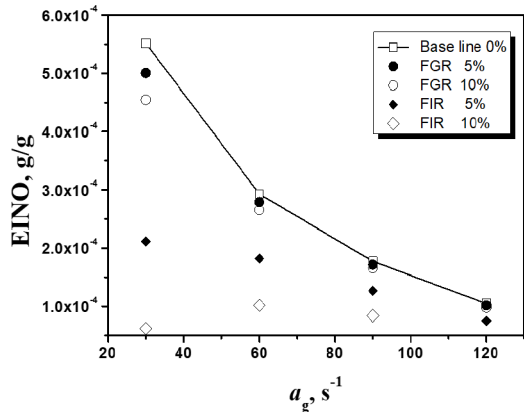


Fig. 3 NO emission index versus strain rate with FGR and FIR at various recirculation rates of CO<sub>2</sub> and H<sub>2</sub>O.

이렇듯 FGR과 FIR을 연소시스템에 도입함에 따라 화염온도에 직접적으로 영향을 끼치게 되는데, 이러한 영향은 NO<sub>x</sub> 배출 저감에 큰 효과를 보이게 된다. Takeno와 Nishioka에 따르면[7], NO 생성의 특성은 NO 배출 지수(emission index of NO, EINO)로 나타낼 수 있고 다음과 같이 정의하였다.

$$EINO = \frac{\int_0^L W_{NO} w_{NO} dx}{-\int_0^L W_F w_F dx} \quad (3)$$

이때, w<sub>NO</sub>와 -w<sub>F</sub>는 NO의 생성률과 CH<sub>4</sub>의 소모율을 나타내며, W는 각 화학종의 분자량을 나타낸다. Fig. 3에서는 Fig. 2에서 보인 바와 같이 신장률에 따라 최대화염 온도가 감소하며 이에

따라 NO 생성률이 급격하게 감소함을 볼 수 있다. 또한, RR이 증가함에 따라 NO 배출 저감에 영향을 미치는데, 특히  $a_g = 30 \text{ s}^{-1}$ 에서의 변화폭이 가장 크다. 이는 신장률이 점차 증가함에 따라 생성되는  $\text{CO}_2$ 와  $\text{H}_2\text{O}$ 의 물분율이 현저하게 감소하기 때문이다. 화염은  $a_g = 130 \text{ s}^{-1}$  부근에서 소화하게 되는데, 이때 연소에 사용되는  $\text{O}_2$ 의 소모율 또한 빠르게 줄어들게 된다. 이로써 높은 신장률 부근에서는 화염이 생존하기 어렵기 때문에 RR에 따른 영향이 줄어들었다고 판단된다.

## 후 기

본 연구는 2019년 한국산업기술평가관리원 산업소재 핵심기술개발사업(20005788)의 지원을 받아 수행되었고 이에 감사드립니다.

## 참고 문헌

- [1] M. Zheng, G.T. Reader, J.G. Hawley, "Diesel engine exhaust gas recirculation—a review on advanced and novel concepts", *Energy Conversion and Management*, Vol. 45, 2004, pp. 883–900.
- [2] R. J. Kee, J. A. Miller, G. H. Evans, and G. Dixon-Lewis, "A computational model of the structure and extinction of strained, opposed flow, premixed methane-air flame", *Proc. Combust Inst.*, Vol. 22, 1988, pp. 1479–94.
- [3] "Chemical-Kinetic Mechanisms for Combustion Applications", *Mechanical and Aerospace Engineering (Combustion Research)*, University of California at San Diego, <http://combustion.ucsd.edu/>, 2014.15.
- [4] Jeong Park, Oh Boong Kwon, Sewon Kim, Changyeop Lee, Sang-In Keel, Jin-Han Yun and In Gweon Lim, "A Study on Flame Structure and NO Emission in FIR- and FGR-applied Methane-air Counterflow Diffusion Flames", *J. Korean Soc. Combust. Inst.*, Vol. 21(1), 2016, pp. 38–45.
- [5] C.H. Kim, *Automobile - Electronic control fuel injection system*, GoldenBell, 2007
- [6] Eun Seong Cho, Suk Ho Chung, "Numerical Study on NO Emission with Flue Gas Dilution in Air and Fuel Sides", *KSME Int. J.*, Vol. 19, No. 6, pp. 1358–1365, 2005
- [7] M. Nishioka, S. Nakagawa, T. Takeno. NO emission characteristics of methane-air double flame. *Combust Flame*, Vol. 98(1-2), 1994, pp. 127–138.

## 직접연소식 초임계 CO<sub>2</sub> 순산소 연소조건내 메탄 대항류 화염의 질소산화물 발생특성에 관한 수치해석적 연구

정기성\*, 박현수\*, Nam Danh Nguyen\*, 이복직\*, 유춘상\*†

### A numerical study of the NO<sub>x</sub> emission characteristics of methane counterflow flame under direct-fired supercritical oxyfuel combustion condition

Ki Sung Jung\*, Hyun Su Bak\*, Nam Danh Nguyen\*, Bok Jik Lee\*\*, Chun Sang Yoo\*†

The direct fired supercritical carbon dioxide (sCO<sub>2</sub>) power cycle using CO<sub>2</sub> as a working fluid is recently highlighted not only because it has a high thermal efficiency with small machinery footprints but also because it can ideally capture CO<sub>2</sub> up to 99 %. Since N<sub>2</sub> can infiltrate the combustor of the cycle mainly because natural gas has impurity in its chemical composition, this paper investigates the effects of N<sub>2</sub> amount in the fuel stream on the NO<sub>x</sub> emissions characteristics at supercritical conditions of the sCO<sub>2</sub> power cycle.

In this study, 1-D numerical simulations of nonpremixed counterflow methane flame are performed using OPPDIF code [1] with real gas effects [2]. San Diego mechanism [3] with NO<sub>x</sub> sub mechanism [4] is adopted because its validation range covers the relatively high pressure condition. All simulations are conducted with the boundary condition that inlet temperature of fuel and oxidizer side are fixed to 300 and 100 K, respectively. The mole fraction of O<sub>2</sub> at the oxidizer side and that of CH<sub>4</sub> at the fuel side range from 0.15 to 0.30 and from 0.9 to 1.0, respectively. We defined the global strain rate,  $\mathbf{a}$ , as  $\mathbf{a} = (|U_F| + |U_O|)/H$ , where  $U$  is the axial velocity, and  $H$  is the distance between two inlets. The subscripts F and O represent the fuel and oxidizer inlets, respectively.

The flame structures for counterflow nonpremixed CH<sub>4</sub>/O<sub>2</sub>/CO<sub>2</sub> flames at 300 atm for various global strain rates are shown in Fig. 1a, while Fig. 1b indicates the overall flame

structures for various pressure with  $\mathbf{a}=100$  s<sup>-1</sup>.

As shown in Fig. 1a, both the maximum flame temperature and reaction zone thickness decrease with the increase of  $\mathbf{a}$  due to the shortened residence time. As  $\mathbf{a}$  further increase to the upper-limit extinction strain rate, an extinction occurs due to the insufficient residence time for the mixture to sustain the flame structure (not shown here). In addition, the flame temperature increases with the increase of pressure up to 20 atm, but the maximum flame temperature does not change much as pressure further increases.

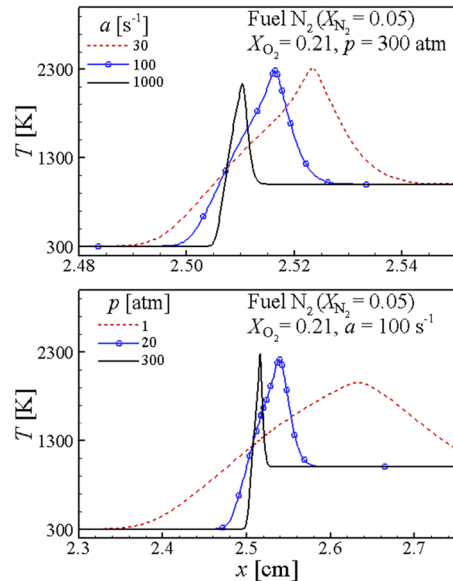


Figure 1. The temperature profiles of counterflow nonpremixed CH<sub>4</sub>/O<sub>2</sub>/CO<sub>2</sub> flames for (a) various strain rates at 300 atm and (b) various pressures at with  $\mathbf{a} = 100$  s<sup>-1</sup>.

\* 울산과학기술원 기계공학과

\*\* 서울대학교 기계항공공학부

† 연락처, [csvoo@unist.ac.kr](mailto:csvoo@unist.ac.kr)

The flame temperature effect on the  $\text{NO}_x$  emission at the direct-fired  $\text{sCO}_2$  relevant condition (i.e.  $p = 300$  atm and  $a = 100$   $\text{s}^{-1}$ ) is investigated. To remove the dilution effect and properly compare the amount of  $\text{NO}_x$  formation, the emission index of  $\text{NO}_x$ ,  $\text{EINO}_x$  [ $\text{g}\text{-NO}_x/\text{kg}\text{-CH}_4$ ], is defined as [5],

$$\text{EINO}_x = \frac{\int_0^H (\dot{\omega}_{\text{NO}}W_{\text{NO}} + \dot{\omega}_{\text{NO}_2}W_{\text{NO}_2}) dx}{-\int_0^H \dot{\omega}_{\text{CH}_4}W_{\text{CH}_4} dx} \times 1000$$

where  $x$  is the axial distance in 1-D counterflow configuration,  $\dot{\omega}_k$  the production or consumption rate of species  $k$  at each grid point of the domain, and  $W_k$  the molecular weight of species  $k$ .

The mole fractions of  $\text{N}_2$  in the fuel inlet are ranged from 0.0 to 0.1 and that of  $\text{O}_2$  in the oxidizer inlet are also varied from 0.15 to 0.30. The maximum flame temperature,  $T_f$ , difference between undiluted  $\text{CH}_4$  fuel jet and diluted  $\text{CH}_4$  with  $X_{\text{N}_2}$  of 0.1 is negligible (i.e.,  $< 20$  K). Therefore,  $T_f$  in Fig. 2 is mainly varied as  $\text{O}_2$  dilution level changes. It can be found that the production of  $\text{NO}_x$  is more sensitive to the oxidant dilution level rather than the amount of  $\text{N}_2$  in the fuel inlet. In addition, the  $\text{EINO}_x$  generally very low when  $T_f$  equals to or lower than 2300 K. On the other hand, as  $T_f$  increases to be higher than 2500 K, an even small amount of  $\text{N}_2$  ingress can no longer to be negligible. Considering that the maximum flame temperature of the previous  $\text{sCO}_2$  combustor reaches up to 2750 K, the formation of  $\text{NO}_x$  should be taken into account for the practical  $\text{sCO}_2$  combustor design.

The relative  $\text{NO}_x$  formation/consumption characteristics, the effect of pressure on the relative contribution of each  $\text{NO}_x$  formation, and the effect of fuel concentration at the fuel inlet or overall  $\text{NO}_x$  concentration levels will be further studied in a future study.

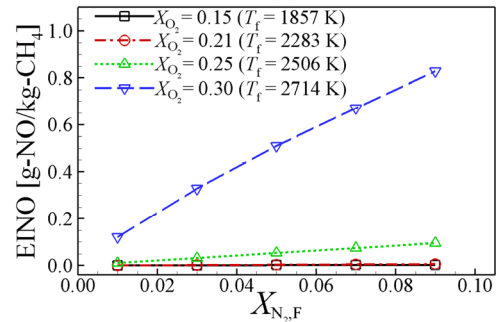


Figure 2. The flame temperature effect on the  $\text{NO}_x$  emissions ( $p = 300$  atm,  $a = 100\text{s}^{-1}$ )

## Acknowledgements

This research was supported by Basic Science Research Program through the National Research Foundation of Korea (NRF) funded by the Ministry of Science and ICT (NRF-2018R1A2A2A05018901) and Korea Electric Power Corporation (Grant number: R19XO01-25).

## References

- [1] A. E. Lutz, R. J. Kee, J. F. Grcar, F. M. Rupley, OPPDIF: A Fortran program for computing opposed-flow diffusion flames, United States.
- [2] P. Linstrom, W. Mallard, NIST Chemistry WebBook, NIST Standard Reference database, vol. 69, National Institute of Standards and Technology (NIST), USA.
- [3] San Diego Mechanism web page, Mechanical and Aerospace Engineering (Combustion Research), University of California at San Diego, Chemical-kinetic mechanisms for combustion applications, <http://combustion.ucsd.edu>.
- [4] J. C. Hewson, M. Bollig, Reduced mechanisms for  $\text{NO}_x$  emissions from hydrocarbon diffusion flames, Symp. (Int.) Combust. 26 (1996) 2171-2179.
- [5] T. Takeno, M. Nishioka, Species conservation and emission indices for flames described by similarity solutions, Combust. Flame 92 (1993) 465-468.



# Zr계 에너지 물질 노화로 인한 반응 인자 변화 및 연소 성능 저하

한병현\*, 박윤식\* 여재익\*†

## Combustion Failure and Kinetics Parameter Degradation of Zr-based Energetic Material Caused by Aging

Byung Heon Han\*, YoonSik Park\* and Jack J. Yoh\*†

### ABSTRACT

In this study, the aging effects of heat and moisture in the pyrotechnic delay composed of zirconium-nickel alloy(ZrNi alloy) as fuel and potassium perchlorate(KClO<sub>4</sub>) and barium chromate(BaCrO<sub>4</sub>) as oxidants was studied. Thermal effect was analyzed using Differential Scanning Calorimetry(DSC) and Thermogravimetric Analysis(TGA). Chemical analysis using X-ray photoelectron Spectroscopy(XPS) and surface analysis using Scanning Electron Microscopy(SEM) were performed. In addition, through the combustion experiments, the initial burn time delay was determined, and it was confirmed that the aging progress caused ignition failure. Through the simulation, we found that the initial decomposition of the oxidizer, KClO<sub>4</sub> by moisture was fatal for the ignition failure.

**Key Words** : Pyrotechnic delay, Pyrotechnics, Propellant, Ignition failure, Aging

고 에너지 물질은, 짧은 시간 안에 많은 에너지를 방출 할 수 있는 물질로, 피로테크닉, 추진제, 폭약 등에 널리 활용 된다 [1]. 이러한 물질은 상온에서 높은 보관 기간을 보장해야 하지만, 높은 온/습도 등 가혹한 조건에서는 노화가 진행되어 신뢰성과 성능이 저하되는 문제를 야기한다. 고 에너지 물질의 노화는 상온 조건에서도 일어난다고 알려져 있으며, 산화제와 함께 보관 시에 더 가속화 될 수 있다 [2]. 노화로 인한 에너지 물질의 성능 저감은 발열량 감소, 초기 연 시간 지연(initial burn time delay), 전체 연소 시간(burning rate) 지연, 최대 발열량 감소, 연소 중 발산하는 빛의 세기 감소 등으로 나타나며, 이는 결국 절심 상을 야기하게 된다 [3]. 따라서, 에너지 물질의 노화의 원인과 노화에 따른 특성을 파악하는 것은 아주 중요한 문제이다.

따라서, 기존 연구들은 실제 보관 기간(shelf life), 서비스 가능 기간(service life) 등에 대한 연구를 수행해 왔었다. Sucasca et al. 35년간 상온에서 자연 노화된 샘플에 대하여 service

life가 감소함을 보였으며 [4], Sinapour et al.은 등은 가속 화를 시킨 추진제를 통해 storage capabilities 측정하는 연구를 수행하였다 [5].

Zr-Ni alloy와 KClO<sub>4</sub> 그리고 BaCrO<sub>4</sub>로 구성된 물질은 피로테크닉에서 주로 사용되는 물질로, 주로 긴 연소 시간을 이용하여 점화를 지연시키는 역할을 한다. KClO<sub>4</sub>는 초기 온도 범위가 낮은 영역에서 산화제와 반응을 하고, 상대적으로 온도가 높은 범위에서 BaCrO<sub>4</sub>가 반응을 시작하는 구조로 혼합되어 있다.

본 연구에서는, Zr<sub>7</sub>Ni<sub>3</sub>(8%)과 Zr<sub>3</sub>Ni<sub>7</sub>(25%), KClO<sub>4</sub>(15%), 그리고 BaCrO<sub>4</sub>(52%)로 구성된 지연제에 대하여, 3가지 조건(9년 자연 노화, 열 가속 노화, 수분 가속 노화)에 대해 노화를 시켰으며, 각 노화 인자에 대한 열적, 물리적, 화학적, 성능적 영향을 확인하였다. 특히 성능적인 영향에서는 초기 점화 지연(Initial burn time delay)와, 빛 방출량(Illumination)을 분석하여 성능적인 측면에 대한 연구를 진행하였다. 또한 Modeling and Simulation을 통하여 오랜 기간 노화된 샘플의 초기 반응 지연이 상당함을 통해 KClO<sub>4</sub>의 수분에 의한 노화가 지연제 절심(ignition failure)에 치명적으로 영향 끼침을 증명하였다. 실험에 사용된, 노화 종류별 실험 대상 지연제 샘플은 아래 표1과 같으며, 모두 75um의 체(sieve)로 거른 고체 파우더 형태의 샘플을 사용했다.

\* 서울대학교 우주항공공학과  
† 연락처, [jjyoh@snu.ac.kr](mailto:jjyoh@snu.ac.kr)  
TEL : (02)880-1507

**Table 1** 3 aging conditions for pyrotechnic delay.

지연제 샘플			
조건	열, °C	수분, %	기간
노화 없음	-	-	-
자연 노화	계절 변화		9 년
열 노화	-5	-	8 주
수분 노화	95	98	8 주

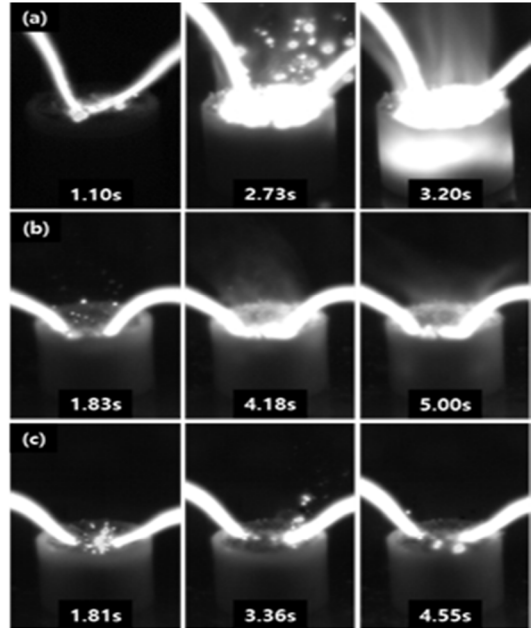
동일 샘플에 대한 DSC(Differential Scanning Calorimetry)를 통한 복합적인 열 분석 실험과 TGA(Thermogravimetry Analysis)와의 상호 보완적인 분석 방법을 통해 reaction kinetics가 저온 범위에서 ZrNi alloy가 KClO<sub>4</sub>와 먼저 반응함을 규명하였고, 이후 높은 온도 범위에서 BaCrO<sub>4</sub>와 반응에 참여하지 않은 ZrNi alloy가 반응함을 확인 하였다.

XPS(X-ray Photoelectron Spectroscopy) 기법을 통한 화학 종 분석 방법은, 열 노화 샘플에서는 Zr의 산화가 일방적으로 진행된 반면, 수분 노화와 자연 노화 샘플에서는 Zr과 Ni 모두 산화가 진행되었음을 확인하였다. 또한 자연 노화 샘플과 수분 노화 샘플에서 KClO<sub>4</sub>의 분해가 상당히 진행되었음을 확인하였다. 이를 통해 수분에 의한 노화는 KClO<sub>4</sub>의 분해를 촉진시키고 이를 통해 Zr과 Ni의 산화에 영향을 끼친다는 것을 규명하였고, 반면 열에 의한 노화는 산화제 분해를 진행시키지 못하기 때문에 Zr만 선별적으로 산화 시킴도 함께 규명하였다.

SEM-EDS(Scanning Electron Microscope - Energy Dispersion Spectroscopy)를 통해 ZrNi alloy의 표면을 확인하였다. 노화 되지 않은 샘플에서 매끈한 표면을 보인 반면, 열 노화 샘플에서는 일부 crack이 발생하였고, 자연 노화 샘플과 수분 노화 샘플에서는 crack의 propagation이 상당함을 확인하였다. 이는 KClO<sub>4</sub>와 수분의 작용으로 인하여 산-염기 반응에 의한 표면 crack발생으로 확인 하였다.

지연제의 성능적인 측면의 변화를 확인하기 위하여 니크롬 와이어(nichrome wire)를 통해 40ml의 crucible에서 지연제의 연소 실험을 수행하였다. 아래 그림1은 crucible에서 지연제의 연소 거동을 보여주는 그림으로, 수분 가속 노화 샘플의 경우 연소가 일어나지 않았다. 초기 연소 시작 시간은 빛이 발산하기 시작하는 시간으로 측정하였다. 노화 되지 않은 샘플의 경우 1.10초가 걸린 반면, 9년간 자연 노화된

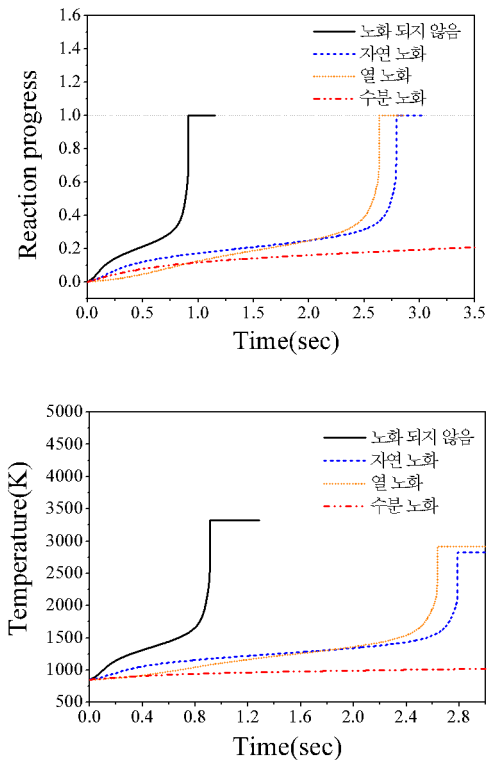
샘플에서는 1.81초가 걸렸다. 또한 가속 노화된 샘플에서는 점화가 일어나지 않았다. 결과적으로 KClO<sub>4</sub>의 수분에 의한 분해는, 낮은 온도영역에서 반응을 불가하게 만들어, 점화까지 이르지 못하게 하는 것으로 나타났다. 또한 빛의 발산 정도도 노화 되지 않은 샘플에서 가장 강하게 일어났던 반면, 9년간 자연 노화된 샘플에서는 약한 빛을 방출 하였는데, 이를 통해 연소의 세기가 약해졌음을 추론 할 수 있었다.



**Fig. 1** Combustion behavior of pyrotechnic delay in the crucible. (a)Pristine, (b)Thermally aged, and (c)Naturally aged samples.

0-D Simulation을 통해 지연제의 반응 경과 모사를 수행하였다. Simulation에 사용된 식은 (1) 에너지 보존식과, (2)반응 경과(reaction progress) 식이며, 사용된 kinetics는 DSC에서 추출된 데이터를 사용하였다.

계산된 결과는 아래 그림2와 같은데, 노화 되지 않은 샘플의 경우 반응이 1초 이내에 빠르게 끝나는 반면 수분 노화된 샘플의 경우 반응이 진행 되지 않는 것을 확인 할 수 있다. 또한 반응 종료 순서는 열 노화, 자연 노화, 그리고 수분 노화 순서로 수분에 의해 노화된 샘플의 경우 반응 종료까지 지연 시간이 길어 짐을 확인할 수 있었다. 한편, 반응 종료 시 최종 온도에서도 같은 경향성을 확인 할 수 있었는데, 수분 노화 샘플의 경우 반응이 진행되지 않고, 온도가 약 850K에 머물러 있는 것을 확인 할 수 있었다. 이는 연소 실험 결과와 상당히 동일한 결과를 보여준다.



**Fig. 2** Simulation results for each aged samples. time vs. reaction progress(upper), time vs. temperature(down).

결과적으로, 자연제의 노화에는 수분의 영향이 지대하며, 수분은 주요 산화제인  $\text{KClO}_4$ 의 분해에 크게 관여를 한다. 주로 낮은 온도영역에서 초기에 반응을 도와주는 역할을 하는  $\text{KClO}_4$ 의 분해는, 높은 온도범위까지 반응을 억제하기 때문에 질십이 발생하는 원인으로 작용을 한다. Simulation 결과 또한 노화된 샘플의 경우 초기에 반응을 시작하지 못한다는 것을 보여주어 수분에 의한 ZrNi alloy의 직접적인 영향보다 수분에 의한 산화제의 분해가 자연제의 노화에 치명적인 영향을 끼친다는 것을 증명하였다.

## 후 기

본 연구는 미래창조과학부의 National Space Lab(2014 M1A2A2A02034903)의 지원과 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업(NRF-2016R1D1A1A02937421)입니다. 추가적으로, Hanwha Yeosu Grant(2018)의 추가 지원이 이루어졌습니다.

## 참고 문헌

- [1] J.P. Agrawal, High Energy Materials: Propellants, explosives and pyrotechnics; John Wiley & Sons, New York, 2010.
- [2] G.B. Manelis, Thermal decomposition and combustion of explosives and propellants, Taylor & Francis Group, London and Berlin, 2003.
- [3] A.M. Brian, R.R. Jeremy, W.K. Mark, Humidity induced burning rate degradation of an iron oxide catalyzed ammonium perchlorate/HTPB composite propellant, Combust. Flame, 161 ,2014, 363–369.
- [4] M. Suceska, S.M. Musanic, I. Fiamengo, Study of mechanical properties of naturally aged double base rocket propellants, Cent. Eur. J. Energ. Mater 7, ,2010, 47–60.
- [5] H. Sinapour, S. Damiri, H.R. Pouredal, The study of RDX impurity and wax effects on the thermal decomposition kinetics of HMX explosive using DSC/TG and accelerated aging methods, J. Therm. Anal. Calorim 129, 2017, 271–279.

## 낙화놀이용 바이오매스 숯의 연소특성 연구

김철호\*\*, 최병철\*, 이세진\*\*, 양성수\*\*

### Combustion characteristics of biomass charcoals for Naghwa festival

Cheolho Kim\*, Byungchul Choi†, Sejin Lee\*, Seongsu Yang\*

#### ABSTRACT

The objective of this study is to investigate the combustion characteristics of biomass charcoals used in Korean traditional fireworks (Naghwa (sparkling flame) rods). The charcoal used in the study was prepared directly using wood mulberry bark (MB), mulberry lignum (ML), and pine tree lignum (PL). Lowest O<sub>2</sub> concentration for ML and MB charcoal was 0.1% and 0.46% at 355°C, respectively. O<sub>2</sub> concentration of PL charcoal is 23°C higher than that of MB and ML charcoals. This means that the reaction rate of PL charcoal is slow compared with MB and ML charcoals. NO conversion by combustion of MB charcoal was approximately 17.6%. NO<sub>2</sub>, or NO<sub>3</sub> contained in highly explosive fuels produced NO, NO<sub>2</sub>, and N<sub>2</sub>O as intermediates in explosive combustion reactions.

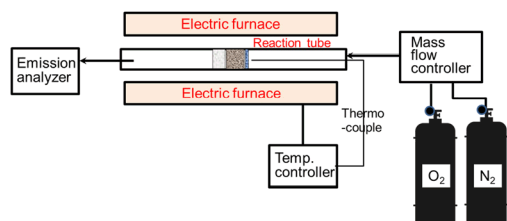
**Key Words** : Combustion, Charcoal; Explosive combustion; Mulberry;

낙화놀이는 숯을 이용하여 만든 낙화봉을 하천 위에 매달아 폭발적으로 훑날리는 불씨를 감상하는 우리나라 전통적인 민속놀이이다. 낙화놀이를 보전하고 발전시키기 위해서는 낙화봉에 대한 정량적인 분석과 연구가 필요하나 현재 제작과 개량의 많은 부분이 장인의 경험에 의존하고 있다 [1]. 이 연구에서는 낙화봉에 적합한 바이오매스 숯의 연소특성을 파악하기 위해 세 가지 숯에 대하여 온도에 따른 연소특성을 분석하였다. 사용한 바이오매스 숯으로 뽕나무 수피(MB)와 뽕나무 목질(ML), 그리고 비교 대상 숯으로 소나무 목질(PL)을 선정하여 연소특성을 검토했다.

반응온도 50–500°C (5°C/min)에서 시료 1g 을 연소시켰다. 공기는 MFC 로 제어하여 O<sub>2</sub> 농도 5%이고 전체 공급유량은 2.0L/min 이다. 반응관 출구에 연결된 분석장비(MRU Air fair, Vario Plus Industrial, Germany)를 이용해 연소가스에 포함된 O<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub>, CO, THC, NO<sub>x</sub> 를 측정하였다. 세 시료의 원소분석 결과 MB(C : 62.1%, H: 3.5%, O: 21.7%, N: 1.29%, S:0.55%), ML (C : 75.03%, H: 3.6%, O: 16.9%, N: 0.28%, S:0.37%), PL (C : 80%, H: 3.4%, O: 12.49%, N: 0.11%, S:0.26%)였다.

Fig. 2는 세 바이오 매스 숯 시료의 반응온도에 따른 연소 배출가스 특성이다. O<sub>2</sub>의 시간에 대한 소모율은 시료의 연소속도를 대변한다. MB와 ML의 경우 최저 O<sub>2</sub>농도가 355°C에서 0.46%, 0.1%로 각각 측정되었고, PL은 378°C에서 0.57%로 측정되었다. 또한 PL의 경우 다른 두 시료보다 O<sub>2</sub>소모가 오래 지속되고 있다. MB와 ML 시료가 PL에 비해 연소속도가 빠르며 비교적 저온에서 착화하는 특성을 볼 수 있다.

CO<sub>2</sub>와 CO발생량을 관찰해보면, CO<sub>2</sub>는 시료의 완전연소의 비율을, CO는 불완전 연소로 인해 발생한 중간 생성물의 양을 나타낸다. 최대 CO<sub>2</sub>농도는 MB와 ML이 352°C에서 각각 3.2%, 3.3%로 나타났고, PL은 397°C에서 3.7%로 나타났다.



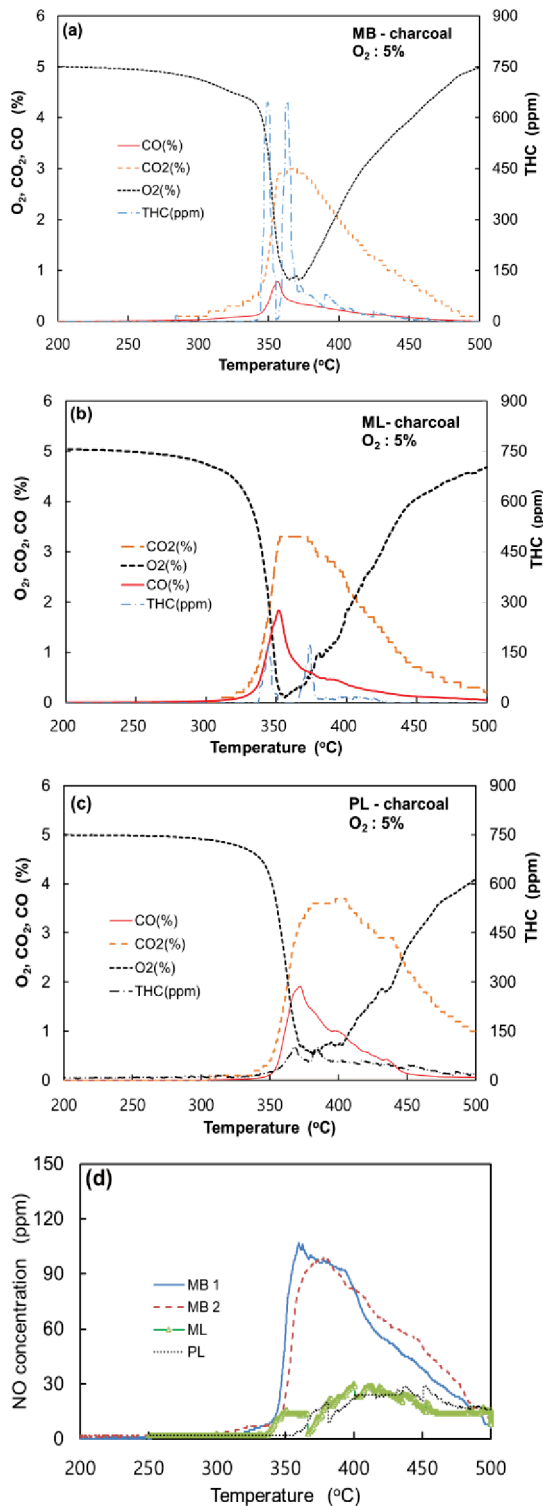
**Fig. 1.** Experimental apparatus of charcoal combustion reaction test.

Fig.1 은 연소가스 분석을 위한 실험장치의 개념도이다. 전기로 내부에 반응관을 설치하였고

\* 전남대학교 공과대학 기계공학부

† 연락처, bchoi@jnu.ac.kr

TEL: (062)530-1681, Fax: (062) 530-1689



**Fig. 2.** Emission characteristics of 3 charcoals from combustion reaction, (a) MB, (b) ML, (c) PL, (d) NO emission of 3 charcoals.

PL이 다른 두 시료에 비해 CO<sub>2</sub>농도가 높은 것은 PL의 탄소비율이 가장 높기 때문이다. CO의 배출량은 MB가 가장 적고, 다음 ML, PL 순을 나타내고 있다. PL이 가장 오랫동안 타면서 CO의 배출량도 가장 많다. THC의 경우 세 시료가 두 개의 비슷한 peak를 가지며, MB와 ML의 경우 급격한 THC농도의 감소를 보인다. 이러한 감소는 최저 O<sub>2</sub>농도와 NO의 반응과 관계가 있는 것으로 보인다. MB의 경우, 탄소의 산화가 급격히 이루어지는 온도(355°C)에서 O<sub>2</sub>농도가 0.46%이하인데, 이는 삼원촉매의 이론공연비와 유사한 조건이다. 이 조건에서 HC는 NO를 환원시키면서 급속도로 소모된다. 바이오매스 연료에 포함된 질소는 volatile-N과 char-N이 있는데 이중 char-N은 1000°C이하의 연소온도에서 NO<sub>x</sub>를 생성한다 [2-4]. 또한 NO는 폭발성 물질에 포함된 질산화물의 연소과정에서 중간생성물로 형성되어 N<sub>2</sub>로 환원된다. 숲의 연소가 시작되면서 char-N도 본격적으로 연소를 시작한다. MB1의 NO발생량은 최대 106 ppm으로 이때의 온도(362°C)는 O<sub>2</sub> 소모량이 가장 많은 온도와 동일하다. MB의 fuel-N이 NO로 전환되는 율은 약 17.6%였다. MB의 NO 배출농도가 높은 것은 fuel-N 함량이 높기 때문이다. ML이나 PL은 함유 N 성분의 농도가 MB에 비교하여 1/5-1/10 수준으로 낮기 때문에 NO 배출농도도 낮다. 바이오 연료 숲의 제조과정에서 생성된 N의 산화물(NO, NO<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>O 등)이 다른 물질과 결합하여 존재하는 것은 낙화봉의 폭발적 연소과정에서 산소를 공급하는 원인으로 작용할 수도 있다.

## 후 기

본 연구는 과학기술정보통신부, 한국연구재단 기초연구실사업(NRF-2015R1A4A1041746)의 연구비로 수행되었다.

## 참고 문헌

- [1] Han YM. Festival of water and fire (ISBN 978-89-5638-848-9). Misogwon 2009:152-247.
- [2] Wang Q, Shu T, Lu F, Lu P. Cleaner Combustion and Sustainable World (ISBN 978-3-642-30444-6). Springer (2013):685-98.
- [3] Zhao B, Su Y, Liu D, Zhang H, Liu W, Cui G. Energy 2016;113:821-30.
- [4] Hupa M, Karlstrom O, Vainio E. Proceed Combust Institute 2017;36:113-34.

## 폭발적 연소특성을 가진 바이오매스 숯의 물질특성 분석

최병철\*†, 김문용\*\*, 정경갑\*\*, 변성천\*\*

### Characterization study of biomass charcoals with explosive combustion characteristics

Byungchul Choi\*†, Moonyong Kim\*\*, Sungchun Byun\*\*, Gyeong-gap Jung\*\*

#### ABSTRACT

The objective of this study is to investigate characterization of biomass charcoal, with explosive combustion, that used in Korean traditional fireworks (Naghwa (sparkling flame) festival). The charcoal used in the study was prepared directly using wood mulberry bark (MB), mulberry lignum (ML), and pine tree lignum (PL). It was found that chemical components that influence the explosive combustion of MB charcoal were calcium cyanurate ( $\text{Ca}_3\text{C}_6\text{N}_6\text{O}_6$ ), whewellite ( $\text{CaC}_2\text{H}_2\text{O}_5$ ) and potassium nitrate ( $\text{KNO}_3$ ).

**Key Words** : Charcoal; Explosive combustion; mulberry; calcium cyanurate; potassium nitrate

In Korea, the Naghwa (sparkling flame) festival features the traditional display of sparkling fireworks on the day of Buddha's birthday or the day of the first full moon of the year. The Naghwa rod is a tubular charcoal envelop made by rolling a layer of charcoal powder in Korean traditional paper (Hanji). Then, several Naghwa-rods are placed on a string wire and slowly burnt through a combination of explosive combustion and ambient wind over a river or a small lake. Accurate analysis of the explosive combustion components of biomass fuels is also important for effective energy utilization in systems that achieve heating or power generation through burning or combustion [1]. However, how these N, S, and O components directly affect explosive combustion as well as their chemical structures are unclear.

The objective of this study is to investigate characterization of biomass charcoal, with explosive combustion. Three types of charcoal made of mulberry bark (MB), mulberry lignum (ML), and pine tree lignum (PL) were prepared as biomass materials, which are widely used to make Naghwa-rods.

We analyzed the elemental components of the charcoal samples by EA (elements analyzer), surface characteristics by SEM, and chemical structure of

charcoal elements by X-ray diffraction analysis (XRD) and X-ray photoelectron spectroscopy (XPS)) to determine the factors influencing the explosive combustion. From the results of the surface analysis of wood charcoals using XRD and XPS, VESTA 3 software was used for 3-D modeling of the major chemical components of charcoals [2].

The combustion characteristics of the charcoals can be expected to be different from each other. The Naghwa-rod was prepared as shown in Table 1 to confirm the combustion characteristics of the charcoal.

Table 1 Consisting of charcoal type and particle size of Naghwa-rod.

Sample	Particle 1 (12mesh)	Particle 2 (12-6mesh)	Powder (<6mesh)
N1	PL	PL	PL
N2	ML	ML	ML
N3	MB	MB	MB
N4	PL	MB	MB
N5	ML	MB	MB

Table 2 Ultimate analysis results of 3 wood charcoals.

Wood charcoal (wt%)	C	H	O	N	S
MB	62.11	3.454	21.74	1.29	0.551
ML	75.03	3.633	16.86	0.28	0.372
PL	79.98	3.350	12.49	0.11	0.265

\*†School of Mecha. Engin., Chonnam National University

\*\*Center for Research Facilities, Chonnam Nat. University

† corresponding author, bcchoi@jnu.ac.kr

TEL : (062)530-1681

Table 2 lists the physicochemical properties based on ultimate analysis.

Fig. 1 shows the combustion photographs (aperture value= f/18, shutter speed =2.5 s) of (a) N1 – (e) N5 Naghwa-rods. The major difference in the resultant flame shape is that explosive combustion occurred as a result of mixing between charcoal grains and powder smaller than 6 mesh (N3, N4, N5); explosive burning was rarely observed in N1 and N2. In general, when MB coal powder of 6 mesh or less is mixed, the reaction speed is high, the flame maintenance state is excellent, and the explosive combustion frequency is high. In particular, when MB particles and MB charcoal powder are mixed like N4, N5, the explosive combustion frequency is the highest.

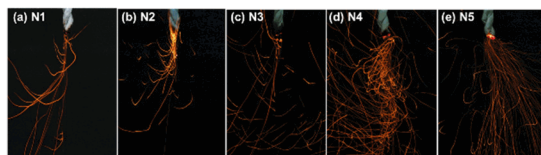


Fig. 1 Flame shape of (a) N1, (b) N2, (c) N3, (d) N4, (e) N5.

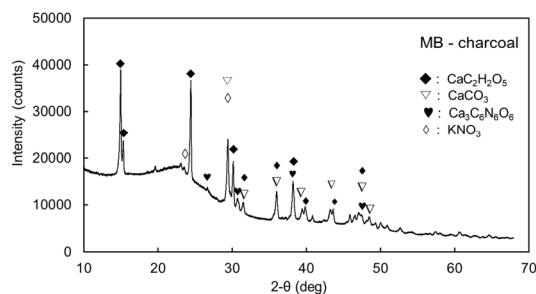


Fig. 2 XRD patterns of the mulberry bark charcoal.

Fig. 2 presents the XRD patterns of charcoals of MB, ML and PL charcoals. MB charcoal has the most complex structure. The predominant crystalline components of MB are: whewellite ( $\text{CaC}_2\text{H}_2\text{O}_5$ ) ( $2\theta = 14.98^\circ, 15.32^\circ, 24.44^\circ, 30.16^\circ$ ) calcite ( $\text{CaCO}_3$ ) ( $2\theta = 29.44^\circ, 39.44^\circ, 47.50^\circ, 48.51^\circ$ ), calcium cyanurate ( $\text{Ca}_3\text{C}_6\text{N}_6\text{O}_6$ ) ( $2\theta = 26.65^\circ, 30.68^\circ, 38.23^\circ$ ), and potassium nitrate ( $\text{KNO}_3$ ) ( $2\theta = 23.54^\circ, 29.39^\circ$ ). The peak intensities of the three major components of MB charcoal decrease in the order  $\text{CaC}_2\text{H}_2\text{O}_5 > \text{CaCO}_3 > \text{Ca}_3\text{C}_6\text{N}_6\text{O}_6 > \text{KNO}_3$ . There are low concentrations of  $\text{CaC}_2\text{H}_2\text{O}_5$ ,  $\text{KNO}_3$ , and  $\text{CaCO}_3$  in the sample ML charcoal. Mulberry charcoal contains a small amount of  $\text{KNO}_3$  ( $2\theta = 23.54^\circ, 29.39^\circ$ ).  $\text{KNO}_3$  can act as an oxidizer for the explosive combustion of the C or HC component of charcoal.  $\text{KNO}_3$  is also a catalyst in the oxidation of C that contains free nitrate ions in their composition [3].  $\text{KNO}_3$  is currently applied in black

powder rocket motors as well as fireworks such as smoke bombs [4].

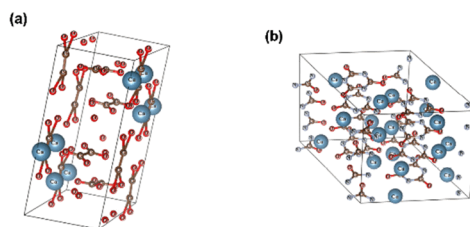


Fig. 3 3-D visualization of (a)  $\text{CaC}_2\text{H}_2\text{O}_5$ , (b)  $\text{Ca}_3\text{C}_6\text{N}_6\text{O}_6$  components crystal data of the MB charcoal [2].

Based on the chemical crystal structure of XRD and XPS results, 3-D visualization of Fig. 3 (a)  $\text{CaC}_2\text{H}_2\text{O}_5$ , (b)  $\text{Ca}_3\text{C}_6\text{N}_6\text{O}_6$ , which are the main components of MB charcoal, can be conducted using VESTA 3 software [2]. The chemical structure of C-C and C-O is clearly shown in whewellite ( $\text{CaC}_2\text{H}_2\text{O}_5$ ).  $\text{CaC}_2\text{H}_2\text{O}_5$  can be used as an oxygenated fuel, including CH for explosive combustion. It has a structure in which the cyanurate anion is symmetrically surrounded by 3 calcium cations, and C-N, C = O, and N=C-O chemical structures can be observed in  $\text{Ca}_3\text{C}_6\text{N}_6\text{O}_6$ . Cyanurates were used to improve an ignition delay [5]. Whewellite crystals are produced in a wide variety of plant species [6].

The chemical components that influence the explosive combustion of MB charcoal were calcium cyanurate ( $\text{Ca}_3\text{C}_6\text{N}_6\text{O}_6$ ), whewellite ( $\text{CaC}_2\text{H}_2\text{O}_5$ ) and potassium nitrate ( $\text{KNO}_3$ ).

## Acknowledgements

This research was supported by the Basic Science Research Program through the National Research Foundation of Korea (NRF) grant funded by the Korea Ministry of Science, ICT & Future Planning (MSIP) (Grant NRF-2015R1A4A1041746).

## References

- [1] López R, Fernández C, Fierro J, Cara J, Martínez O, Sánchez ME. *Energy* 2014;74:845-54.
- [2] Momma K, Izumi F. *J. Applied Crystallography* 2011;44:1272-76.
- [3] Grzona CB, Lick ID, Castellon ER, Ponzi MI, Ponzi EN. *Materials Chem Physics* 2010;123:557-62.
- [4] Tanda S, Ličbinský R, Hegrová J, Goessler W. *Environ Inter* 2019;128:371-78.
- [5] Tao W, Li J. *Applied Surface Science* 2018;456:751-62.
- [6] Thompson J, Schwarcz HP. *Radiation Measure* 2008;43:1219-25.

# 개별 입자가 고려된 단일 및 복합 조성 화약에서의 수치해석적 충격파 전달 폭굉 연구

최상훈\*, 김보훈\*\*, 여제익\*†

## Numerical Study of Shock Induced Detonation in Granular Single and Heterogeneous Energetics

Sanghun Choi\*, Bohoom Kim\*\*, Jai-ick Yoh\*†

### ABSTRACT

An investigation on the shock-particle interaction in condensed phase reactive flow has been carried out via the Eulerian hydrodynamic simulations. The analysis focused on the meso- to macro-scale numerical modeling of a granular metalized explosive containing randomly distributed metal particles and booster grains intended to enhance its blast effect. The reactive flow model is used for the HMX, while thermally induced deflagration kinetics describes the aerobic reaction of the metal aluminum particles. The shock-induced collapse of metal particles embedded in the condensed phase domain of a high explosive is simulated. Both aluminized and copperized RDX are shown to detonate with a shock wave followed by the burning of the metal particles.

**Key Words** : Mesoscale simulation, heterogeneous explosive, Rastestick test, Detonation

응축된 고체물질의 반응유동에서 충격 입자 상호 작용에 대한 조사가 Eulerian 유체 역학 시뮬레이션을 통해 수행되었다. 이 분석은 폭발 효과를 높이기 위해 무작위로 분포된 금속 입자와 부스터 입자를 포함하는 입상화 금속 폭발물의 중대형 규모 수치 모델링에 중점을 두었습니다. 반응성 유동 모델은 HMX에 사용되며, 열적으로 유도된 폭연 동역학은 금속 알루미늄 입자의 호기성 반응을 나타냅니다. 폭발성이 높은 응축 상도메인에 내장된 금속 입자의 충격으로 인한 붕괴가 시뮬레이션됩니다. 알루미늄 화 및 구리 화 RDX는 충격파와 함께 폭발한 후 금속 입자가 연소되는 것으로 나타났습니다.

B. Kim 등[1]의 연구에 따르면 알루미늄이 대량으로 함유된 고폭약에 대한 반응 모델을 찾고 Blast 실험을 통해 알루미늄이 포함되었을 때 효과를 나타내고 있다. Mehta 등[2]은 미리 설정한 복잡한 화약의 초기형상을 해석하여 공극과 화약간의 상호작용 분석을 진행하였으며 Hot spot 모델을 활용하여 초기 점화에 대한 정밀한 수치해석을 진행하였다. 김창기 등[3]은 TNT내에서의 알루미늄의 후 연소 반응을 모델링을 연구하였

다. 하지만 개별 입자의 반응 모델 및 유체-고체 상호작용을 통한 분석이 아닌 알루미늄의 정밀한 연소모델을 바탕으로 수치 해석적 연구를 진행하였다. 알루미늄 입자의 군집 효과를 고려한 연구는 Zhang, Fan 등[4]에 의해 수행되었다.

선행연구를 종합하여 보면 기존까지의 연구는 금속 첨가물 개별의 특징을 고려하지 않고 연속체가정을 통해 하나의 물질로 생각하여 반응 모델 및 반응 계수를 찾는 연구가 진행되어 왔다. 따라서 화약의 초기 특성인 폭굉 속도 및 폭압은 정밀하게 예측이 가능하나 금속입자의 후 연소 효과에 대한 구체적인 분석은 어려움이 있다. 본 연구에서는 금속입자, HMX같은 폭발물의 정밀 구조 및 반응 모델링 수행을 통해 복합화약에서의 충격파 전달에 의한 폭굉 시뮬레이션이 수행되었다.

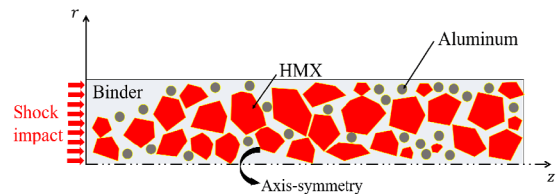


Fig. 1. 복합화약의 수치해석 도메인

Fig. 1은 본 연구에서 수행된 복합화약의 도메인을 보여준다. 왼쪽면에서 외부 충격에 의한 점화

\* 서울대학교 기계항공공학부

\*\* California Institute of Technology

† 연락처, jjyoh@snu.ac.kr

TEL : (02)880-1507 FAX : (02)882-1507



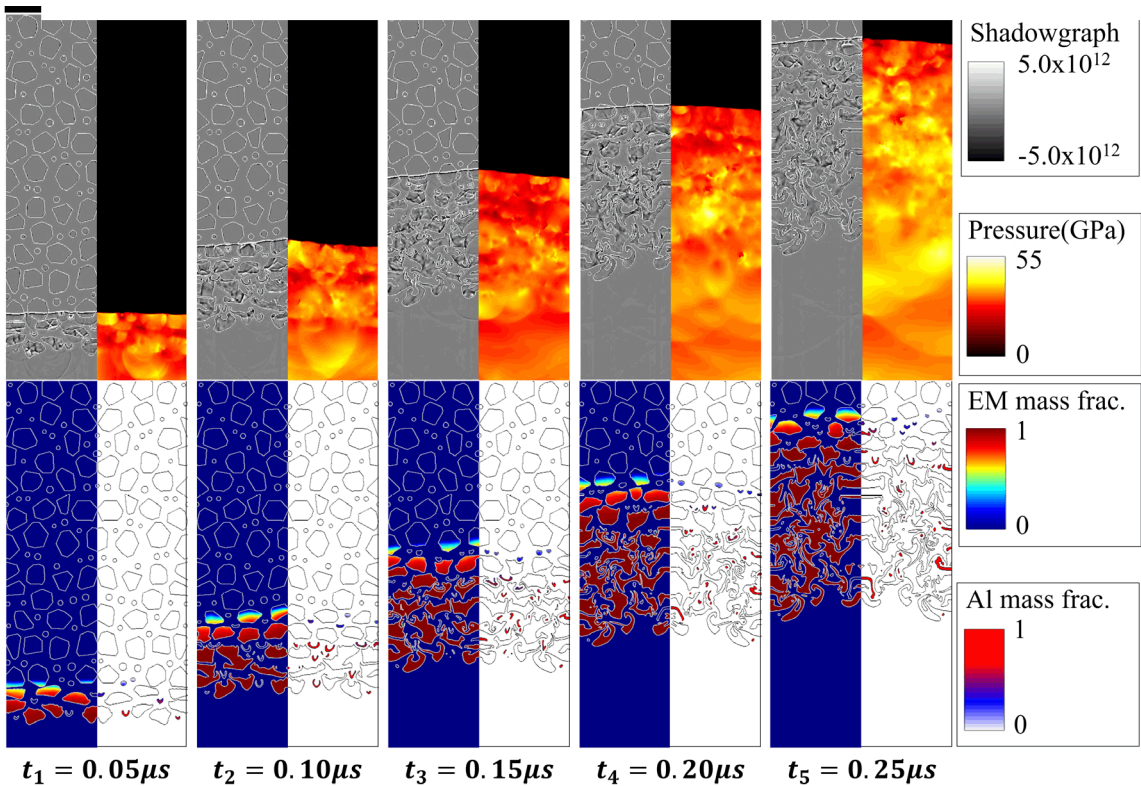


Fig. 2. 충격파 전달 폭평에 의한 복합화약의 반응성 유동 해석

가 시작되며 시작된 점화는 연쇄된 HMX와 알루미늄의 반응을 이끌어 낸다.

Fig. 2는 해석결과 컨투어를 보여주며 약 3000m/s로 외부의 충격파가 전달되었을 때 결과를 보여준다. 입자 속도에 의한 shock의 전파를 확인할 수 있으며 HMX Grain과 알루미늄 입자의 이동과 압축을 확인할 수 있다. 이때 매우 복잡한 형상으로 인해 반사파와 굴절파가 복잡하게 중첩되어 후류가 형성된다. 폭평으로 빠르게 반응하는 HMX와 비교적 천천히 열에 의한 반응식으로 반응하는 알루미늄을 확인할 수 있다.

## 후 기

본 연구는 서울대학교 차세대 우주추진 연구센터와 연계된 미래창조과학부의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행한 선도연구센터지원사업(NRF-2013R1A5A1073861)의 연구 결과입니다.

## 참고 문헌

[1] B. Kim, J. Park, K. Lee and J.J. Yoh, "A reactive flow model for heavily aluminized

cyclotrimethylene-trinitramine", Journal of Applied Physics, Vol. 116, No. 2, 023512, 2014, 023512.

[2] Mehta, Y., Jackson, T.L., Zhang, J. and Balachandar, S., "Numerical investigation of shock interaction with one-dimensional transverse array of particles in air", Journal of Applied Physics, Vol. 119, No. 10, 104901, 2016.

[3] Chang-Kee Kim, James G Moon, Jun-Sik Hwang, Ming-Chia Lai, Kyung-Su Im, "Afterburning of TNT explosive products in air with aluminium particles", 46th AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit, AIAA 2008-1029, Reno, 2018.

[4] Zhang F., Gerrard K., Ripley R., Tanguay V., "Unconfined aluminum particles-air detonation.", 26th International Symposium on Shock Waves, Berlin, 2007.

## Catalytic property of vanadium-based composite material on NH<sub>3</sub>-SCR for wide temperature window

김태욱<sup>1</sup>, 정보라<sup>1</sup>, 예보라<sup>1</sup>, 이명진<sup>1,2</sup>, 김진우<sup>1,2</sup>, 전승엽<sup>1,2</sup>, 김선이<sup>1</sup>, 김태효<sup>1</sup>, 이덕현<sup>1</sup>, 김홍대<sup>1,\*</sup>

(hdkim@kitech.re.kr)

<sup>1</sup>한국생산기술연구원

<sup>2</sup> 부산대학교

<sup>1</sup>Green Materials and Processes Group, Korea Institute of Industrial Technology

<sup>2</sup> Pusan National University

(hdkim@kitech.re.kr)

고정원(발전소, 제철소 등) 및 이동원(선박, 자동차 등)에서 발생하는 대기오염물질 중 가장 많은 양을 차지하는 질소산화물(NOx : NO<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>O, NO 등)은 그 자체로도 인체에 유해하고 각종 환경 문제를 유발하지만 초미세먼지(Particulate Matter, PM2.5) 발생의 주범으로 지목됨에 따라, NOx 저감에 대한 이목이 집중되고 있다. 또한 2020년 이후, 대기오염물질 배출사업장에 대한 대기배출부과금 제도가 도입되는 등 보다 강화된 대기오염물질 배출 허용 기준 및 규제에 의해 질소산화물 저감 기술개발의 필요성이 강조되고 있다. 현재 NH<sub>3</sub>-SCR(Selective Catalytic Reduction) 촉매 기술은 NOx를 인체에 무해한 N<sub>2</sub>와 H<sub>2</sub>O로 환원시키고, 높은 질소산화물 저감 효율을 나타내고 있어 가장 대표적으로 활용되고 있다. 하지만 배기가스내에 존재하는 입자상 물질 및 알킬리(트)금속에 의한 피독현상과 촉매 열화로 인한 수명 저하 및 파손과 더불어, 좁은 활성온도범위(300~350℃)에 따른 배기가스 재가열로 경제적 손실 등의 문제가 지속적으로 대두되고 있다.

본 연구에서는 저온 및 고온영역에서도 높은 활성을 나타내는 질소산화물 제거용 SCR 촉매의 개발을 진행하였다. 이에, 조촉매로써 각광받는 각각의 활성 물질인 Zr, Fe, Ce, Mo 등을 바나듐 기반 촉매에 첨가하여 촉매 제조를 진행하였으며, 촉매의 고질적 문제인 SO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O 에 대한 저항성 증진을 위한 물성 및 성능 증진 연구를 수행하였다. 본 이유로, 보다 다양한 조촉매를 활용하여 높은 NOx 저감 특성을 보유한 촉매 개발에 연구 중점을 맞추었으며, 그 결과, 넓은 온도범위(250~420℃)에서 70% 이상의 높은 활성을 나타내는 촉매를 제조하였다.

## 황산화물의 제거를 위한 중공사막의 유동해석

윤영식\*, 김병환\*, 최창식\*, 조성수\*†

### CFD Simulation of a Hollow Fiber for Desulfurization

Youngsik Yoon\*, Byounghwan Kim\*, Changsik Choi\*, Sungsu Cho\*†

미세먼지는 인체의 건강, 농작물과 생태계, 산업 활동 등에 미치는 영향으로 최근 많은 관심을 받고 있다. 환경부에서는 [미세먼지 저감 및 관리에 관한 특별법]을 제정하여 2019년 3월부터 시행하고 있으며 다른 정부부처와 산업계에서도 미세먼지 저감을 위한 연구개발과 공정개선에 노력을 기울이고 있다. 특히 황산화물과 질소산화물은 대기중에서 암모니아와 반응하여 암모늄염을 발생시키며 이때 생성된 암모늄염은 초미세먼지( $PM_{2.5}$ )의 전구물질로 알려져 있다.

본 연구에서 미세먼지의 전구물질인 황산화물의 제거를 위해 개발 중인 중공사막의 유동해석을 수행하였다. 중공사막은 미세기공에서의 물질 확산을 이용한 기-액 접촉을 이용하는 기술로서 미세기공에서의 기체에 대한 물질전달계수는 낮지만 높은 비표면적에 의해 고효율의 탈황 성능을 달성할 수 있다.

모델링의 주요 변수는 처리대상 가스의 조성, 공급압력, 압력손실( $\Delta P$ ), 모듈에 장입되는 중공사막의 수에 있다. 본 연구의 수행으로 중공사막에 공급되는 공정가스의 손실, 압력손실, 흡수액의 유동에 대한 사각지대(Dead Zone)를 평가하였다. 2D를 이용한 단일 중공사막 모델링에서 공급압력에 대한 중공사막 외부로의 공정가스 누출에 대한 예측을 수행하였으며 Fig. 1에 나타내었다.

### 후 기

이 연구는 2019년도 산업통상자원부 및 산업기술평가관리원(KEIT) 연구비 지원에 의한 연구임(20005884)

### 참고 문헌

- [1] Recep Kaya, Gokhan Deveci, Turker Turken, Reyhan Sengur, Serkan Guclu, Derya Y. Koseoglu-Imer, Ismail Koyuncu, "Analysis of wall shear stress on the outside-in type hollow fiber membrane modules by CFD simulation", *Desalination*, Vol. 351, 2014, pp. 109-119
- [2] Arash Fakharneshad, Sara Masoumi, Peyman Keshavarz, "Analysis of design parameter effects on gas dehumidification in hollow fiber membrane contactor: Theoretical and experimental study", *Separation and Purification Technology*, Vol. 226, 2019, pp. 22-30
- [3] Jiacheng Wang, Xuechao Gao, Guozhao Ji, Xuehong Gu, "CFD simulation of hollow fiber supported NaA zeolite membrane modules", *Separation and Purification Technology*, Vol. 213, 2019, pp. 1-10

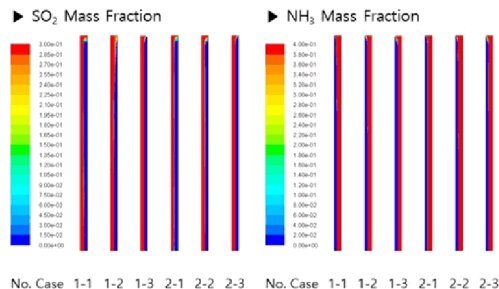


Fig. 1 Schematic diagram of counterflow burner and flow systems.

\* 고등기술연구원 에너지환경연구팀

† 연락처자, sungsu@iae.re.kr

TEL : (031)330-7688 FAX : (031)-330-7118

# 시차주사열량측정법에 의한 석회석 및 시멘트 조합원료의 열분해 특성

문기연\*, 최문관\*, 백철승\*, 조진상\*†, 조계홍\*

## Thermal analysis of limestone and cement raw meal by differential scanning calorimetry

Kiyeon Moon\*, Moonkwan Choi\*, Chulseoung Beak\*, Jinsang Cho\*†, Kyeong Cho\*

시멘트는 1450℃ 이상의 고온에서 제조되는데, 소성로 내부 온도상승 및 적정온도 유지를 위해 다량의 화석연료가 소비된다. 현재는 화석연료의 고갈 및 자원활용의 목적으로 하수슬러지, 폐타이어, 플라스틱 등의 폐기물이 연료로서 활용되는데, 연료가 다양화됨에 따라 대기오염물질 발생률이 높아지며 환경적인 문제가 대두되고 있다. 대기오염물질로는 이산화탄소(CO<sub>2</sub>), 황산화물(SO<sub>x</sub>), 질소산화물(NO<sub>x</sub>), 일산화탄소(CO) 등이 있다. 이 중 질소산화물의 경우 대부분 NO와 N O<sub>2</sub>이며, 95%가 NO의 형태로 배출되고 이후 대기중에 확산되어 공기중의 산소와 결합하여 NO<sub>2</sub>가 된다. 질소산화물은 광화학 스모그의 원인으로 인체에 악영향을 미치며 산성비의 원인이 되는 등 환경적으로 심각한 문제를 야기하고 있기 때문에 실용 연소기 활용에 있어 질소산화물 배출의 환경적 규제를 충족시킬 수 있는 방법이 모색되고 있다.

시멘트 소성로에서 발생하는 질소산화물 배출저감을 위해 pre-heater 및 pre-calciner 공정에 다단연소 및 재연소 공정을 적용할 수 있으며, 공정 적용에 따라 산화/환원 구간이 발생하게 된다. pre-heater 및 pre-calciner는 시멘트 원료물질이 kiln에 투입되기 전 탈탄산이 진행되는 구간으로 산화/환원 구간설정에 따라 원료물질의 소성특성에 변화가 발생할 수 있다. 이는 생산되는 시멘트 클링커의 품질과 직결될 수 있기 때문에 실적용에 앞서 소성분위기 변화에 따른 원료물질의 열적특성 검토가 필요하다. 이에 본 연구에서는 TG/DSC 열분석기기를 활용해 연소로 부분에 산화/환원 분위기에서의 원료물질의 탈탄산 특성에 대해 실험적으로 조사하고자 하였다. 소성온도는 pre-heater 및 pre-calciner의 온도구배를 감안하여 750~950℃로 하였으며, N<sub>2</sub> 및 O<sub>2</sub> 가스를 활용해 산화/환원 분위기를 임의로 조정하였다. 원료물질로는 석회석 및 시멘트 조합원료

를 이용하였으며, Table 1에 상세한 실험조건을 나타내었다.

**Table 1** TG/DSC analysis condition of cement raw meal and medium grade limestone with O<sub>2</sub> level

Sample	cement raw meal, medium grade limestone
Heating rate	20℃/min
Temperature	(750, 800, 850, 900, 950)℃
Holding time	2h
Gas flow rate	50sccm
O <sub>2</sub> Level	(0, 20, 50, 80)%

### 후 기

이 연구는 2019년도 산업통상자원부 및 산업기술평가관리원(KEIT) 연구비 지원에 의한 연구임 ('20005750')

### 참고 문헌

- [1] Y. Sun, W. Fan, T. Zhu, X. Hong, "Effect of CaO on NO<sub>x</sub> Reduction by Selective Non-Catalytic Reduction under Variable Gas Compositions in a Simulated Cement Precalciner Atmosphere", Int. J. Environ. Res. Public Health., Vol. 14, 2017, p.p. 1-12.
- [2] S. Laux, B. Damstedt, "Oxygen Injection for Emission Reduction in Cement Kilns", IEEE Industry Applications Magazine, 2019, p.p. 52-56
- [3] A. Naqi, J. G. Jang, "Recent Progress in Green Cement Technology Utilizing Low-Carbon Emission Fuels and Raw Materials: A Review", Sustainability, Vol. 11, 2019, p.p. 1-18

\* 한국석회석신소재연구소

† 연락처, chsang@kilam.re.kr

TEL : (043)422-2094 FAX : (043)-422-5581

## 연료 농후조건 연소 배기가스 내 O<sub>2</sub> 및 CO 농도 실시간 측정에 관한 연구

소성현<sup>\*\*</sup>, 박지연<sup>\*\*\*</sup>, 정낙원<sup>\*\*</sup>, 송아란<sup>\*\*</sup>, 배성우<sup>\*\*\*\*\*</sup>, 김대해<sup>\*</sup>, 유미연<sup>\*\*\*\*</sup>, 박대근<sup>\*</sup>, 이창엽<sup>†</sup>

### Study on Real-Time Measurement of O<sub>2</sub>/CO Concentration in Exhaust Gas under Fuel Rich Condition

Sunghyun So<sup>\*\*</sup>, JiyeonPark<sup>\*\*\*</sup>, Nakwon Jeong<sup>\*\*</sup>, Aran Song<sup>\*\*</sup>  
Sungwoo Bae<sup>\*\*\*\*\*</sup>, Daehae Kim<sup>\*</sup>, Miyeon Yoo<sup>\*\*\*\*</sup>, Daegeun Park<sup>\*</sup>, Changyeop Lee<sup>†</sup>

#### ABSTRACT

In the Combustion of hydrocarbon fuels, Oxygen(O<sub>2</sub>) and carbon monoxide(CO) play an important role in combustion efficiency and air pollutant formation. Oxygen is a factor that can cause loss of sensible heat during the combustion reaction. In other word, When the oxygen concentration in the combustion system is high. the energy efficiency of the system is lowered. Also, oxygen is also a major gas species that reacts with nitrogen to produce thermal nitrogen oxide(NOx).

A large amount of carbon monoxide is generated during incomplete combustion. Carbon monoxide has a trade-off relationship with nitrogen oxides and is a gas species that is as important as oxygen for fuel efficiency and the production of air pollutants.

Especially, in case of steel annealing system, the combustion environment is maintained in a deoxidation atmosphere to prevent the formation of an oxide layer on the steel sheet surface. However, it is difficult to measure the O<sub>2</sub> & CO concentration in a combustion furnace in real time, because of its harsh environment. In this study, oxygen and carbon monoxide were measured in the fuel rich conditions such as the steel annealing system by TDLAS(Tunable Diode Laser Absorption Spectroscopy) which is an optical measurement method.

**Key Words** : Oxygen, Carbon monoxide, Annealing, TDLAS, Combustion efficiency

국내외적으로 탄화수소계열 연료 연소 시 발생하는 유해물질이 대기질을 악화시킴에 따라 대기 유해물질 저감과 동시에 연소 효율을 증대시킬 수 있는 연구들이 활발히 진행되고 있다.

최근 탄화수소계열 연소에서 발생하는 유해물질 중 질소산화물(Nitrogen oxide, NOx)이 미세먼지 전구물질로 지목됨에 따라서 청정연소기술과 고효율 연소기법의 중요성이 더욱 커지고 있다[1].

연소 후 발생하는 생성물 중 산소는 시스템 효율 증가뿐만 아니라 대기유해물질 생성에도 중요한 역할을 한다. 에너지 효율 측면에서 산소 농도는 연료와 산화제의 연소 반응 중 현열손실을

야기 시킬 수 있는 중요한 요소이며 고온 환경에서 질소와 반응하여 생성되는 NOx의 주성분이다. 또한 산소와 마찬가지로 연소 생성물 중 일산화탄소는 불완전 연소에서 미연분으로 대량 발생하고 질소산화물과 Trade-off 관계로 완전 연소 시 일산화탄소는 줄어들지만 화염 온도가 상승할 때 Thermal NOx가 증가하는 것으로 알려져 있다[2].

이러한 연소 반응 메카니즘에서 산소와 일산화탄소가 정밀하게 측정되어야 하는 대표적인 환경은 강판 열처리로 시스템이다. 열처리로 내 무산화로는 강판 표면 위 산화층 형성을 억제하기 위해 연료 농후 조건으로 연소 환경을 유지한다.

그에 따라 미연분의 일산화탄소가 대량 배출된다. 이러한 이유로 시스템 효율 증가와 대기유해물질 저감을 위해서는 실시간 O<sub>2</sub>, CO 농도 측정을 통한 연소 제어가 필수적으로 요구된다.

\* 한국생산기술연구원 고온에너지시스템그룹

\*\* 연세대학교 기계공학과

\*\*\* 성균관대학교 기계공학과

\*\*\*\* 충북대학교 물리학과

\*\*\*\*\*전북대학교 기계설계공학과

† 연락처, [cylee@kitech.re.kr](mailto:cylee@kitech.re.kr)

TEL : (041)5898-414 FAX : (041)5898-323

일반적으로 연소 가스 농도 측정 장치로는 전기화학 방식이 대부분 차지하고 있지만 샘플링 타입으로 점계측을 진행하므로 대형 연소 시스템 내 전체적인 내부 가스 농도를 분석하기엔 부족함을 가지고 있으며, 낮은 내구성과 응답성으로 문제가 발생하고 있다. 최근, 광학식 측정 방법인 파장 가변형 다이오드 레이저 흡수 분광법(Tunable Diode Laser Absorption Spectroscopy, TDLAS)은 열악한 연소 환경 내 측정에 널리 사용되고 있다[3-5]. TDLAS 방법은 다양한 연소 생성물들이 존재하더라도 좁은 선폭을 통한 높은 선택성과 빠른 응답성의 장점으로 주목받고 있다.

본 연구에서는 부분 예혼합 화염에서  $O_2$ 와  $CO$  농도 특성을 알아보기 위해, Swirl이 장착된 동축류 버너를 이용하여 실험을 수행하였다.

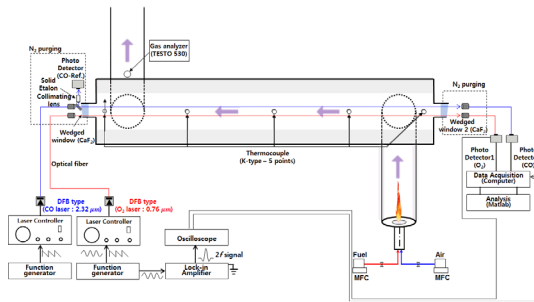


Fig. 1 Experimental setup for  $O_2$  and  $CO$  concentration measurement in combustion system

Fig.1은 전체 실험 개략도를 보여준다. 실험 구성은 크게 2가지로 나눌 수 있다. 첫 번째로 연료 농후조건으로 부분 예혼합 화염을 형성하기 위한 연소 시스템과 두 번째는 연소 생성물을 측정하기 위한 TDLAS 시스템으로 구성된다. TDLAS 시스템은 직접 흡수 분광법(Direct Absorption Spectroscopy, DAS)과 파장 변조 분광법(Wavelength Modulation Spectroscopy)을 혼합하여 사용할 수 있도록 구성되었다.

당량비는 다양한 연료 희박, 농후조건을 형성하기 위해 0.8-1.4의 범위로 선정하였다. 모든 실험은 시스템이 정상 상태에 도달한 후 진행하였다. 또한, 보정된 전기화학식 가스 분석기를 통해 측정값을 비교하였다.

## 후 기

본 연구는 산업통상자원부(MOTOE)와 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구과제입니다. (No.20161110100230)

## 참고 문헌

- [1] J.H. Seinfeld, S.N. Pandis, "Atmospheric Chemistry and Physics: From Air Pollution to Climate Change(Wiley, New York)", 1998 pp. 1033.
- [2] A.P. Christopher, L.B. Andre, "Comparison of  $CO$  and  $NO$  Emissions from Propane, n-Butane, and Dimethyl Ether Premixed Flames", Energy Fuels. Vol. 13, 1999, pp. 650
- [3] X. Chao, J.B. Jeffries, R.K. Hanson, "Absorption sensors for  $CO$  in combustion gases using 2.3  $\mu m$  tunable diode lasers", Meas. Sci. Technol. Vol. 20, 2009, pp. 115201
- [4] V. Nagali, S.I. Chou, D.S. Bear, R.K. Hanson, "Tunable Diode Laser Absorption Measurement of Methane at Elevated Temperature," App. Opt. 35, 1996, pp. 4026
- [5] G. Wang, B. Mei, X. Liu, G. Zhang, Y. Li, F. Qi, "Investigation on spherically expanding flame temperature of n-butane/air mixtures with tunable diode laser absorption spectroscopy," P. Combust. Inst. 37, 2019, pp. 1589

## 표준 연료의 조성변화에 따른 점화지연시간 연구

한희선\*, 손채훈\*†

## A Study on Ignition Delay Time with Various TPRF Compositions

Hee Sun Han\*, Chae Hoon Sohn\*†

## ABSTRACT

In the present study, fuel properties were identified and the surrogate fuel was constructed in order to identify the combustion characteristics of a fuel with hundreds of chemical components. The ignition delay time of n-heptane, iso-octane, and toluene(TPRF), which are mainly used in the surrogate fuel of gasoline, diesel, and jet fuel, were calculated. Numerical simulations were performed under the temperature range of 650-1250 K for various pressure conditions and unity equivalence ratio. Sensitivity analysis was performed to determine the effect of fuel composition on ignition delay time, and it was found that n-heptane has significant effect on ignition delay time of the TPRF fuel.

**Key Words** : Ignition delay Time, Toluene Primary Reference Fuels(TPRF)

현재 온실가스 배출 감소와 높은 효율의 엔진에 대한 요구사항 중 새로운 접근법으로 연료와 엔진의 최적화 연구를 진행하는 것이다[1]. 이와 관련하여 엔진 요구 사항 및 작동 조건에 연료의 설계가 중요하며, 다양한 고효율 개념에서 각 연소 모드에 맞게 연료의 화학적 및 물리적 특성을 조정하면 엔진 성능 이점을 극대화할 수 있다[2]. 가솔린, 디젤, 제트 연료 등은 수백 가지 화학 성분으로 구성된 복잡한 혼합물로서 연소 특성을 파악하는 것은 현실적으로 불가능하다. 따라서 위 연료들에 대한 모사연료를 구성하고, 상세 화학 반응 모델을 개발해야 한다. 모사연료를 구성하기 위해서는 연료의 물성치를 파악해야 한다[3]. 또한 개발된 상세 화학반응 모델은 화학종 농도 및 반응률, 점화지연시간, 화염전파속도 등의 실험을 수행하여 평가 및 검증작업이 필요하다.

본 연구에서 가솔린, 디젤, 제트연료에서 모사연료로 주로 사용되는 n-heptane/iso-octane/toluene(Toluene Primary Reference Fuels, TPRF)의 3가지 연료의 점화지연시간을 계산하였다[2,3]. 또한 각 연료의 조성에 따라 점화지연시간에 미치는 영향을 파악하기 위해 민감도 분석을 수행하였다.

민감도 분석으로부터 n-heptane 함량이 TPRF 연료의 점화지연시간을 제어하는 것으로 확인되었다.

## 후 기

본 연구는 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단 우주핵심기술개발사업(2018M1A3A3A03051917)의 지원을 받아 수행되었습니다.

## 참고 문헌

- [1] H.S. Han, C.J. Kim, C.H. Cho, C.H. Sohn, J. Han. Ignition delay time and sooting propensity of a kerosene aviation jet fuel and its derivative blended with a bio-jet fuel. Fuel Vol. 232, 2018, pp. 724-728.
- [2] Y. Li , A. Alfazazi , B. Mohan , E.A. Tingas , J. Badra , H.G. Im , S.M. Sarathy , Development of a reduced four-component (toluene/n-heptane/iso-octane/ethanol) gasoline surrogate model, Fuel, Vol. 247, 2019, pp. 164-178.
- [3] S.Dooley, S.H. Won, M. Chaos, J. Heyne, Y. Ju, F.L. Dryer, K. Kumar, C.J. Sung, H. Wang, M.A. Oehlschlaeger, R.J. Santoro, T.A. Litzinger, A jet fuel surrogate formulated by real properties, Combust. Flame., Vol. 157, 2010, pp. 2333-2339.

\* 세종대학교 기계공학과

† 연락처, [chsohn@sejong.ac.kr](mailto:chsohn@sejong.ac.kr)

TEL : (02)3408-3788 FAX : (02)-3408-4333

## Biomass Application for Ironmaking process: A Study on Biomass blended PCI Combustion

Gyeong-Min Kim\*, Jong-Won Jeong\*, Jin-Ho Kim\*\*, Chung-Hwan Jeon<sup>†</sup>

### ABSTRACT

Biomass is used as a partial and fully substitute for coal in thermal power plants or with blast furnaces (BFs) because it is a carbon-neutral fuel and is therefore advantageous, in reducing CO<sub>2</sub> emissions. To investigate the effect of co-firing on pulverized coal injection (PCI) in BFs, two coals of different ranks were blended with biomass in different proportions, respectively, and their combustion behaviors were studied using a laminar flow reactor (LFR). To create an environment similar to that of PCI combustion, the LFR burner generates a diffusion flat flame with 26% oxygen concentration and a flame temperature of approximately 2000–2250 K at a heating rate of 105 K/s. The combustion characteristics, including the flame structure, burning-coal-particle temperature, unburned carbon (UBC) and CO, and the CO<sub>2</sub> emissions were measured for evaluating the effect of the biomass ratio and coal rank on PCI combustion.

**Key Words** : Laminar Flow Reactor (LFR), Blast Furnace (BF), Pulverized Coal Injection (PCI), Co-firing, Fragmentation

The purpose of this study is to examine the effect of coal and biomass blends, and the char-CO<sub>2</sub> gasification reactivity in PCI-system environments. In this study, the pulverized coal combustion environment within a BF was simulated in terms of the reaction temperature and oxygen concentration. The coal-particle combustion characteristics, with respect to the change in residence time, were analyzed in LFR (Fig. 1). The experimental conditions for this study included 26% oxygen and a flame temp. of 2000–2250 K. Coal and biomass particles with sizes ranging from 75–90 μm were injected, and the changes in the residence time, particle temperature, and CO and CO<sub>2</sub> gas production were measured. Cases, where two different ranks of coal were blended with biomass, were examined, along with the effect of co-firing in a BF.

The fuel samples used in this experiment consisted of two different types of coals, coal

A and coal B, and biomass. A vibrator was attached to the urethane rubber cap to exert vibrations on the syringe. The particles floating in N<sub>2</sub> gas were then entrained through the feeding tube by the carrier gas. The coal feed mass flow rate was checked by weighing the mass. With the same fuel-particle sizes (75–90 μm) and flow rates, all the fuel were supplied within an equivalent supply time. The feed rate of the fuel particles, according to the plunger in the syringe pump, was set to be equivalent to a supply rate of 7 mg/min. The total fuel feed was approximately 140 mg. Even when the biomass blending ratio was increased, the total supplied fuel weight was maintained constantly. The structure of the burning fuel-particle flame image, the burning coal-particle surface temperature, and the CO and CO<sub>2</sub> emission gases were analyzed.

The coal and biomass blend fuel-particle flame images were captured by a Canon 600D digital camera during combustion and are depicted in Fig. 2. Volatile matter was released after burning, in the initial stage; a large volume of volatile material was emitted with the rapid heating of the fuel particles. In the volatile combustion region, it is assumed

\* School of Mechanical Engineering,  
Pusan National University

\*\* Ironmaking Production Engineering Team,  
Hyundai Steel Co., Ltd.

† Corresponding author, [chjeon@pusan.ac.kr](mailto:chjeon@pusan.ac.kr)  
TEL : (051)510-3051 FAX : (051)-512-5236



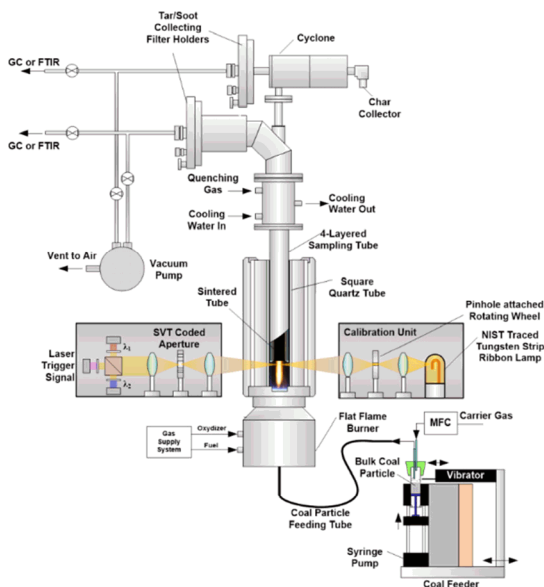


Fig. 1 Schematic of the laminar flow reactor

that the combustion of volatile matter begins at the burner surface and is completed, when the volatile matter cloud is at its widest. The volatile-matter content determines the length, thickness, and brightness of the volatile-matter cloud. Coal-A exhibited an ordinary coal flame structure, and had high volatile-matter content, forming a wide and long volatile-matter cloud. However, when coal-B particles were injected onto the burner, the coal broke into small particles, resulting in fragmentation phenomenon. Coal-A had sufficient volatile-matter content; however, it was difficult to observe a volatile matter cloud for coal-B due to the fragmentation phenomenon. Although coal-B had low volatility and high fixed-carbon content, it had a similar flame length

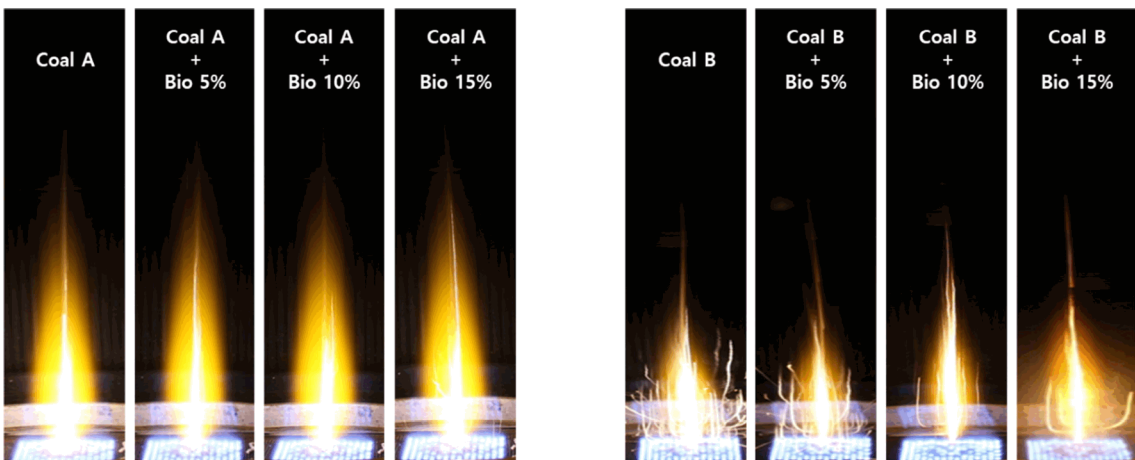


Fig. 2 Flame structures of the burning coal particles ( $O_2=26\%$ )

as that of coal-A due to the effect of fragmentation. The fragmentation phenomenon produced small particles and affected the combustion rate.

Radiocarbon dating results were obtained through AMS (Acceleration Mass Spectrometry) analysis from UBCs. to understand the way biomass actually affects coal combustion. As a result, the biomass blending ratio could be properly considered when using coal that has fragmentation phenomenon as a PCI fuel.

## Acknowledgments

This work was supported by the Korea Institute of Energy Technology Evaluation and Planning (KETEP) and the Ministry of Trade, Industry & Energy (MOTIE) of the Republic of Korea [No. 20173010092550].

## References

- [1] H. Suopajarvi, "Use of biomass in integrated steelmaking - Status quo, future needs and comparison to other low- $CO_2$  steel production technologies", *Appl. Energ.*, Vol. 213, 2018, pp. 384-407.
- [2] J. H. Kim, "Effect of Coal Fragmentation on PCI Combustion Zone in Blast Furnace", *Exp. Therm. Fluid. Sci.*, Vol. 79, 2016, pp. 266-274.
- [3] S. W. Du, "Pretreatment of Biomass by Torrefaction and Carbonization for Coal Blend used in Pulverized Coal Injection", *Bioresour. Technol.*, Vol. 161, 2014, pp. 333-339.

# 단입자 바이오매스 열분해 수치해석 모델 및 열분해 영향 인자 평가

김희윤\*, 김민수\*\*, 류창국\*†

## Numerical model of pyrolysis and evaluation of influence factors for single biomass particle

Heeyoon Kim\*, Minsu Kim\*\*, Changkook Ryu\*†

### ABSTRACT

During thermochemical conversion of biomass, particles exposed to heat transfer develop temperature gradients inside, which leads to different drying, pyrolysis, and char conversion rates depending on the particle size. In this study, a new numerical model for single biomass particle was developed and validated by experiments. Drying of particle was modeled with an assumption that the intra-particle conduction is proportional to the ratio of moisture content between the inner and outer parts. It was also assumed that the volatiles released from pyrolysis reaches thermal equilibrium with the solid phase before escaping the particle surface. Pyrolysis kinetics were solved for the individual lignocellulosic components. The predicted mass loss rate and temperature histories on the surface and core showed a good agreement with measured data for different particle sizes and heating conditions. This particle-scale model can be applied to reactor-scale models for various reactor types employed in thermochemical conversion.

**Key Words** : Biomass, drying, pyrolysis, single particle, lignocellulose

바이오매스는 신재생에너지로서 연소 및 가스화 등 다양한 열화학적 전환을 통해 활용 가능한 에너지원이다. 그러나 석탄에 비해 많은 수분량과 섬유질의 특성으로 기존의 석탄 화력 발전 방식에 비해 불리한 점이 많다. 이러한 바이오매스의 연료적 가치를 향상시키기 위해 반탄화 또는 바이오화(biochar) 생산 등 저속 열분해를 통한 열화학적 전환에 관한 연구가 많이 진행되고 있다. 반응기에 투입되는 바이오매스는 수 mm~cm의 입자로서 승은 과정에서 입자 표면과 내부의 열 및 물질전달 특성이 상이하며 이에 따라 입자 내 온도구배와 열분해 특성의 차이가 발생하게 된다. 따라서 반응기에 투입되는 입자 스케일의 바이오매스에 대해 입자 표면과 내부의 건조 및 열분해의 해석이 합리적으로 이루어져야 생산물의 품질을 제어할 수 있다. 본 연구는 단입자 바이오매스에 대해 건조 및 열분해의 수치해석 모델을 제시하고자 하였다.

본 연구에서는 입경 3cm의 자작나무 구형 샘플을

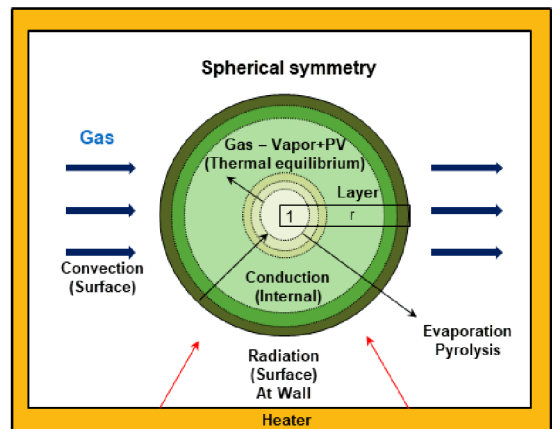


Fig. 1 Conceptual schematic of numerical model for single biomass particle

사용하였으며, 단입자 열분해 모델링은 Fig. 1과 같이 반경 방향의 1차원 모델로 구성하였다. 기존의 단입자 바이오매스의 건조 및 열분해에 대한 연구는 입자의 표면과 내부에서 발생하는 가스를 모두 고려하여 입자의 내·외부 가스 및 입자 고체상에 대해 지배방정식을 세워 해석하였다.

\* 성균관대학교 기계공학과

\*\* 한국기계연구원

† 연락저자, cryu@skku.edu

TEL : (031)299-4841 FAX : (031)-290-5889

이는 실제 열분해의 물리적 현상을 고려하여 합리적이거나 많은 계산 횟수를 요구하므로 반응기 스케일에서 사용되기에 실용성이 떨어진다. 본 연구는 내부에서 발생하는 가스는 입자와 열적 평형상태에 있는 것으로 가정하여 입자 표면에서 발생하는 가스와 고체상만 고려하여 계산횟수를 줄이고 다양한 반응기의 모델로서 활용될 수 있도록 하였다. 다음의 Table 1은 고체상과 외부가스 및 수분과 열분해 간 발생하는 가스의 지배방정식을 나타낸 것이다.

Table 1 Governing equations for single particle model

Gas phase	
Mass	$\frac{\partial \rho_g \epsilon}{\partial t} + \frac{\partial \rho_g v_g}{\partial x} = \dot{M}_{s \rightarrow g}$
Energy	$\frac{\partial h_g \epsilon}{\partial t} + \frac{\partial h_g v_g}{\partial x} = h_{conv} A_p (T_s - T_g) + q_{s \rightarrow g}$
Species	$\frac{\partial \rho_{g,j} \epsilon M_{g,j}}{\partial t} + \frac{\partial \rho_{g,j} v_g M_{g,j}}{\partial x} = \dot{M}_{s \rightarrow g,j}$
Solid phase	
Energy (surface)	$\frac{\partial h_s (1-\epsilon)}{\partial t} = \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left( (1-\epsilon) k_s r^2 \frac{\partial T_s}{\partial r} \right) + h_{conv} A_p (T_s - T_g) + q_{rad} + q_{T,E} + q_{s \rightarrow g} + q_{source}$
Energy (internal)	$\frac{\partial h_s}{\partial t} = \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left( k_s r^2 \frac{\partial T_{s,p}}{\partial r} \right) + q_{T,E} + q_{s \rightarrow g}$
Species	$\frac{\partial \rho_s (1-\epsilon) M_{s,j}}{\partial t} = \dot{M}_{s \rightarrow g,p}$

위 식에서  $\epsilon$ 은 기공율(porosity)로 입자의 열분해 간 기공의 발달로 인한 가스와 고체상의 비율을 표현한 것이다. 기체상에서 가스의 속도는 입자의 승온 간 발생하는 수분 및 열분해 가스를 고려하여 질량보존식을 통해 계산되며, 가스의 온도는 대류열전달 및 생성된 가스의 현열을 포함하여 에너지 보존식을 통해 계산된다. 고체상의 경우, 속도가 0이므로 질량 보존식은 계산되지 않는다. 입자 표면 및 내부에서는 수분 증발 및 열분해에 따른 반응열 및 현열이 고려되었다. 입자의 표면에서는 외부가스와 대류열전달, 입자내부로의 전도열전달, 벽면으로부터의 복사열전달이 수반되는 반면 입자 내부는 표면으로부터의 전도열전달만 이루어진다. 입자 내부에서 발생된 가스는 입자와 열적평형을 이루고 있다는 가정을 위해 입자내부에서 낮은 온도로 빠져나오는 가스와 입자 외부와의 엔탈피 차이를 나타내는  $q_{T,E}$  항을 포함하였다.

바이오매스의 수분 건조는 상압에서 상변화되는 100 ° C를 기준으로 나누어 모델링하였다. 100 ° C 미만의 경우 입자표면에서는 수분 농도 차에 따

른 확산에 의해 물질전달되며 식 (1)에 따라 확산 속도가 계산된다. 확산 속도 식에 포함된 수분 농도( $\rho_v$ )와 확산 계수( $k_m$ )은 식 (2)-(3)에 따라 결정된다.

$$\dot{M}_{M,surf} = k_m A_s (\rho_v - \rho_{H_2O}) \quad (1)$$

$$\rho_v / \rho_{vs} = \exp[(17.884 - 0.1423 T_s + 23.63 \times 10^{-5} T_s^2) (1.0327 - 62.41 \times 10^{-5} T_s)^{92 U_{max}}] \quad (2)$$

$$Sh = 2 + 0.6 Re^{0.5} Sc^{0.83} \quad (3)$$

입자의 온도가 100 ° C 이상이 되면 상변화에 의해 수분이 건조된다. 입자 표면은 외기와 접촉하여 대류 및 복사 열전달에 의해 전열되며 다음의 식에 따라 증발 속도가 계산된다.

$$\dot{M}_M = q_{surf} / h_{fg} \quad (4)$$

$$q_{surf} = h A_s (T_g - T_s) + \epsilon_{emit} \sigma_b (T_w^4 - T_s^4) \quad (5)$$

입자 내부의 경우 100 ° C에 도달하더라도 입자 외부가 수분 증발이 제한하여 표면에 비해 훨씬 더 많은 시간이 소요된다. 본 모델에서는 내부로의 열전달에  $f_{disturb}$ 를 도입하여 입자 내부의 열전달을 계산하도록 하였다.  $f_{disturb}$ 는 입자 내부 수분 함량에 비례하며, 외부의 잔여량에 반비례한다는 가정에 따라 다음과 같이 계산된다.

$$q_{internal} = f_{disturb} \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left( k_s r^2 \frac{\partial T_{s,p}}{\partial r} \right) \quad (6)$$

$$f_{disturb} = (M_{moist,p} / M_{residue,p+1})^{1.2} \quad (7)$$

바이오매스의 열분해 반응은 바이오매스를 이루는 헤미셀룰로오스, 셀룰로오스, 리그닌의 독립적인 반응을 고려하여 모델링하였다. 각 성분대에 대해 휘발분의 조성과 가휘발 비율을 적용하였으며 TGA 분석을 통해 얻은 자작나무의 DTG 데이터를 바탕으로 Table 2와 같은 열분해 메커니즘을 따르도록 하였다.

Table 2 Pyrolysis mechanism for three components of the biomass sample

Biomass Pyrolysis			
$\dot{M}_{vol} = \sum_{i=1}^3 \rho_b M_i A_i \exp(E_i / RT) \alpha_i, i = \text{hemicellulose, cellulose, lignin}$			
Three component $\rightarrow \alpha$ Volatile + (1 - $\alpha$ ) Char			
Volatile $\rightarrow 0.2467 H_2O + 0.1569 CO + 0.0737 CO_2$			
$+ 0.003 H_2 + 0.0317 CH_4 + 0.483 Tar + 0.005 C_2 H_2$			
Material	Pre-exponential factor [1/s]	Activation energy [J/kmol]	Heat of reaction [kJ/kg]
Hemi cellulose	$5.64 \times 10^5$	$1.00 \times 10^8$	420
Cellulose	$2.50 \times 10^{19}$	$2.60 \times 10^8$	410
Lignin	$1.00 \times 10^5$	$1.03 \times 10^8$	460

Fig. 2는 단입자 모델을 400° C의 온도조건에서 실험을 통해 검증한 결과를 나타낸 것이다. 입자 표면의 경우 강한 외부의 열원과 열분해 반응열(발열반응)로 빠른 승온 속도를 나타내며 수분증발에 따른 온도 정체 구간은 확인되지 않는다. 이에 반해 입자 내부에서는 표면으로부터 전도되는 열전달만 존재하므로 승온속도가 느리며, 입자 구조 상 수분 증발이 지체되어 온도가 정체되는 구간이 확인된다. 수분 증발 이후 입자의 승온이 이루어짐에 따라 각 성분들의 열분해가 점차적으로 시작되며, 헤미셀룰로오스 및 셀룰로오스의 열분해 종료 후 잔여한 리그닌의 발열반응에 의해 중심부가 표면의 온도보다 높은 온도에 도달하게 된다.

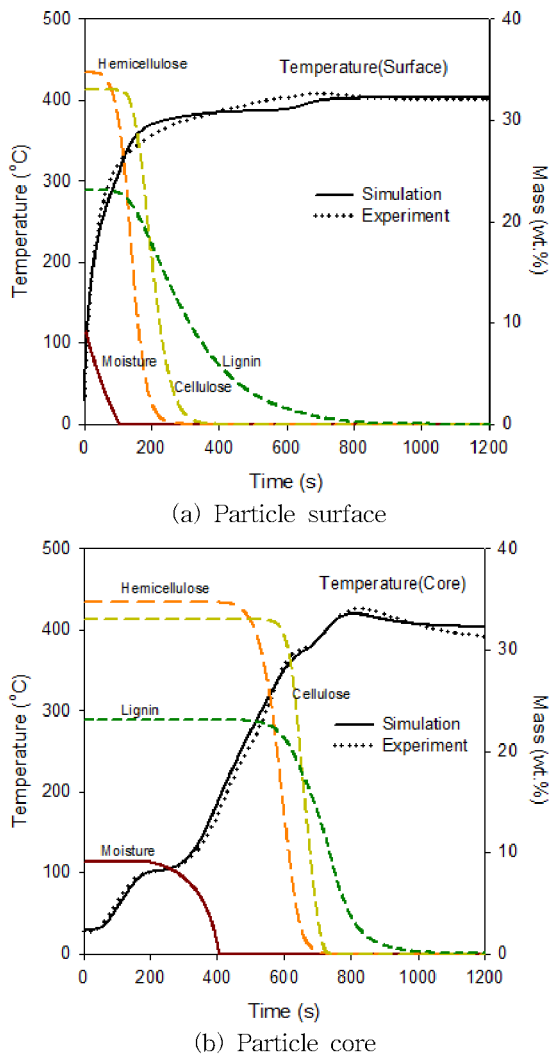


Fig. 2 Temperature histories on surface and core of biomass particle

Fig. 3은 서로 다른 온도조건에서 체류시간동안 바이오매스 입자의 질량 변화율을 예측한 결과이다. 200 ° C 온도조건인 경우 외부 열원의 크기가 작아 입자가 승온되는 시간이 길며 낮은 온도인해 열분해가 거의 일어나지 않는다. 이에 반해 300 ° C 이상의 온도조건인 경우 충분한 열원으로 입자 내·외부에서 열분해가 일어나게 되며 각각 65%, 32%의 최종수율을 얻었다.

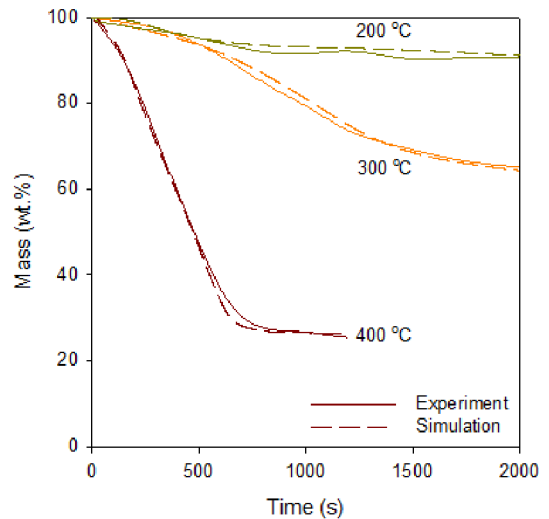


Fig. 3 Mass loss history of particle exposed to different external gas temperature

입자의 온도 구배는 열분해 공정 생산물의 특성 차이와 연료 품질 저감의 원인이 되므로 온도 구배에 영향을 끼치는 인자를 파악하는 것이 중요하다. 이에 따라 수분 함량, 입자 크기, 밀도를 달리 하여 각각의 실험조건에 따른 바이오매스 입자 내 온도 구배의 차이를 확인하였다. 다음의 식에 따라 나타나는  $HR_{particle}$ 는 입자의 표면으로부터 중심부까지 열이 전달되는데 걸리는 속도로 입자 온도 구배를 평가하기 위해 도입하였다.

$$HR_{particle} = \frac{r_{biomass}}{t_{T_{core}, 250^{\circ}\text{C}} - t_{T_{surface}, 250^{\circ}\text{C}}}$$

Table 2는 각 인자의 수치를 변화시켜 가며  $HR_{particle}$ 를 분석한 결과이다. 표에 따르면 입자의 수분함량 증가에 따라  $HR_{particle}$ 는 다소 느리게 감소한 반면 입자 크기 및 밀도가 증가에 따른  $HR_{particle}$ 는 급격하게 낮아지는 경향을 나타내었다. 그러나 입자의 크기 및 밀도의 증가는 곧 수분 함량의 증가와 직결된다. 이에 따라 세 가지 영향 인자의 변화에 대해 Fig. 4과 같이

Table 2  $HR_{particle}$  values depending on parameters at temperature of 400°C

Parameters		HTS (cm/min)
Moisture content (wt.%)	9.4	0.22
	20	0.18
	30	0.16
	40	0.14
Particle diameter (cm)	2	0.34
	3	0.22
	4	0.19
	5	0.14
Density (kg/m <sup>3</sup> )	500	0.33
	761	0.22
	900	0.16
	1200	0.13

수분함량과  $HR_{particle}$ 의 관계를 그래프로 나타내었으며, 그 결과  $HR_{particle}$ 는 입자의 수분함량과 반비례하는 관계를 확인할 수 있었다.

본 연구에서 단입자 스케일 바이오매스의 건조 및 열분해 과정에서 온도 및 질량 감소를 예측하는 수치해석 모델을 개발하였다. 반경 방향의 1차원 가정과 입자 내부에서 발생하는 열분해 가스는 입자 내에서 접촉하는 고체와 열적 평형 상태에 있다는 가정을 통해 단입자 스케일의 열 및 물질 전달을 해석하였다. 새로운 수분 건조 모델과 더불어 바이오매스를 구성하는 각 성분들의 독립적인 열분해 반응을 고려하여 입자 표면과 중심부의 수분 건조 및 열분해 간 온도 상승 경향을 성공적으로 예측하였다. 또한 서로 다른 외기 온도 조건(200°C, 300°C, 400°C)에서 승온 및 무게 변화를 예측을 통해 본 모델의 타당성을 검증하였으며 입자 스케일의 바이오매스 열분해에 끼치는 영향인자로 수분함량이 열분해 속도와 반비례함을 확인하였다. 본 모델은 탄화, 열분해, 가스화 등 바이오매스 입자의 열화학적 변환을 위한 반응기 스케일 모델의 단위 모델로서 적용할 수 있다.

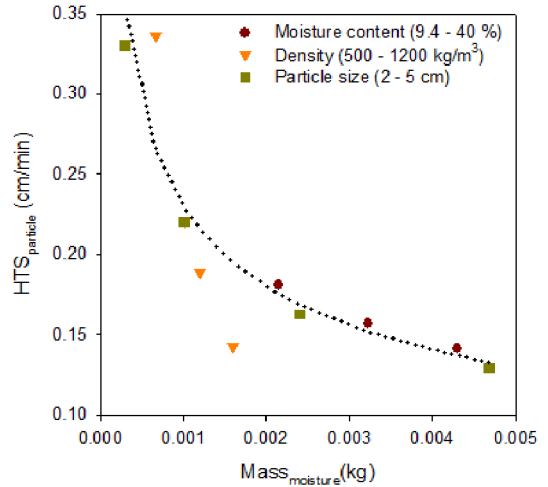


Fig. 4 Comparison between  $HTS_{particle}$  and the content of moisture

## 후 기

본 연구는 산업통산자원부(MOTIE)와 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다. (No. 20173010092550)

## 참고 문헌

- [1] Andersson B, Andersson R, Hakansson L, Mortensen M, Sudiyo R, Wachem B. Computational fluid dynamics for engineers. Cambridge 2011
- [2] Park WC, Atreya A, Baum HR. Experimental and theoretical investigation of heat and mass transfer processes during wood pyrolysis. Combustion and Flame 2010;157: 481-494
- [3] Blasi CD. Multi-phase moisture transfer in the high-temperature drying of wood particles. Chemical Engineering Science 1998; 53:353-366
- [5] Chan WCR, Kelbon M, Krieger BB. Modeling and experimental verification of physical and chemical processes during pyrolysis of a large biomass particle. Fuel 1985; 64:1505-1513
- [6] Haseli Y, Van Oijen JA, De Goey LPH. Modeling biomass particle pyrolysis with temperature-dependent heat of reactions. Journal of Analytical and Applied Pyrolysis 2011b; 90:140-154

# DMD, CEM을 이용한 수직연료분사 초음속 연소기의 연소특성 진단

정승민\*, 최정열\*†

## Diagnosis on the Combustion Characteristics of Supersonic Combustor with Transverse Fuel Injection using DMD and CEM

Seung-Min Jeong\*, Jeong-Yeol Choi\*†

비에혼합 난류연소가 지배적인 초음속 연소기는 빠른 유속으로 인해 유동이 연소기 내에 체류하는 시간이 매우 짧으며, 본질적으로 비정상 연소의 특징을 가지고 있다. 이러한 이유로 인하여 화염안정화 및 연료/공기 혼합은 초음속 연소의 중요한 이슈로 꼽힌다. 또한 초음속 연소기는 형상, 확장각 및 화염유지-혼합증진에 목적이 있는 공동(cavity)의 형상 등과 같은 연소기의 형상조건, 연료의 당량비, 압력 등과 같은 작동유체의 조건에 따라 상이한 연소특성을 나타낸다.

이렇게 조건에 따라 도출되는 특징을 확인하기 위하여 연료분사 및 연소실의 형상조건(확장각 및 공동의 유무)에 따른 연소특성을 파악하기 위한 수치해석 연구가 수행되었다[1-2]. Hyshot test 모델에 기반한 형태로서, divergence nozzle, s straight channel 형태의 연소실 형상 및 공동의 유무, 4가지의 연료분사압 조합에 따른 수치해석이 수행되었다. 비교적 초기에 수행된 이 연구를 통해, 스크램제트에서의 shear layer instability, combustion oscillation, 공동의 영향 및 열 질식 등의 현상을 확인 할 수 있었다.

이후 많은 연구자들에 의해 난류연소 해석 기법들의 개발이 이루어지고 있고, 이와 함께 수치해석에서 얻어진 온도/압력/화학종의 질량분율/S DR(Scalar Dissipation Rate)/FI(Flame Index) 등의 인자를 넘어서 일종의 후처리를 통해 본질적으로 비정상 유동의 특징을 띠는 로켓 및 초음속 연소기 내 유동의 특성을 파악하기 위한 노력이 이루어지고 있다[3-10].

대표적으로 모드 분해 기법인 DMD(Dynamic Mode Decomposition)를 꼽을 수 있다. Schmid에 의해 제시된 기법[3]으로서 비정상 유동장의 공간 정보에 대한 시간 데이터(snapshot)를 이용, 일종의 선형관계를 도출하여 모드를 분해하고, 이 모드의 주파수 및 감쇠계수, 상대적 에너지

순위를 파악 할 수 있다[4-7].

반응유동에 대한 보다 면밀한 파악을 위한 기법으로는 CEMA(Chemical Explosive Mode Analysis)가 있다[8-10]. CEMA는 화염구조의 면밀한 파악을 위해 제시된 기법으로 전체 시스템의 시간에 대한 데이터 분석과는 다르게, 화학 생성항의 자코비안의 고유값 분해에 기반하여 분석을 진행한다. 본 연구에서는 DMD를 이용, 공동의 유무에 따른 연소기 내 연료-공기 혼합에 대한 분석과, CEMA를 이용, 연소실의 확장각 유무에 따른 지배적인 화학종-화학반응의 국부적 분포를 살펴 볼 것이다.

본 연구의 해석대상은 공동을 제외하고, Hyshot test 모델과 유사한 형상이다. 해석 영역은 흡입구 하부의 카울, 주 연소실 및 공동으로 구성되어 있으며, 격자 해상도는 각각  $50 \times 50$ ,  $800 \times 160$ ,  $159 \times 161$  으로 설정하였다. 흡입공기는 마하수 3, 온도 600 K 및 압력 1.0 MPa 이며, inlet 으로부터 14 cm 떨어진 위치에 0.1 cm 폭의 질식된 분사구로부터 연료인 기체수소( $\text{GH}_2$ )가 수직으로 분사된다. 연료분사는 0.5, 0.75, 1.0 및 1.5 MPa의 4가지 조건의 압력으로 분사가 이루어진다. 이전 연구에서는 연소실 확장각 및 공동의 유무, 4가지의 연료분사압의 조합을 통해 총 16 가지 조건에서 수치실험이 수행되었다.

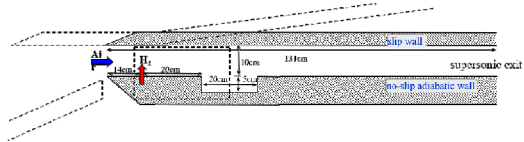


Fig. 1 Configuration of scramjet combustor

Table 1. Sub-models in modeling

	With cavity	Without cavity
# of snapshot	298	298
Physical time of 1 iteration	$6.1 \times 10^{-5}$ ms	$5.9 \times 10^{-5}$ ms
Physical time of snapshots	21.4-30.6 ms	20.7-29.5 ms

\* 부산대학교 항공우주공학과

† 연락처자, aerochoi@pusan.ac.kr  
TEL : (051)510-3284

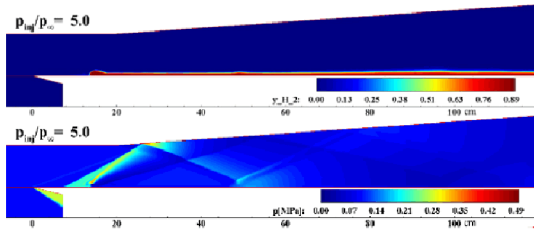


Fig. 2 Time averaged results of  $H_2$  mass fraction and pressure at the without cavity case

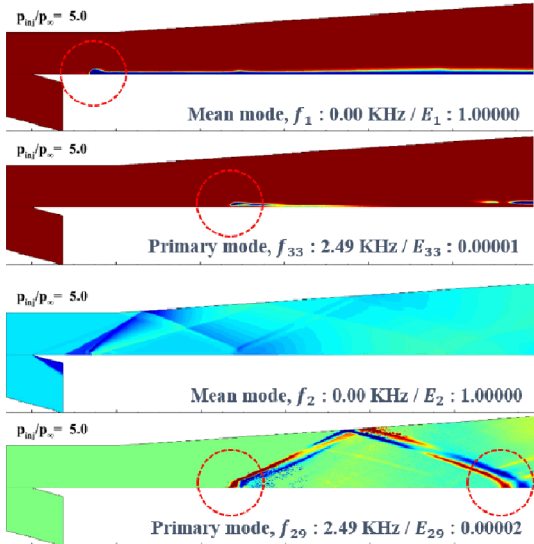


Fig. 3 Top 3 DMD modes by coherence value : (upper)  $H_2$  mass fraction / (lower) pressure at the without cavity case

본 발표논문에는 분석조건 중 DMD의 경우 0.5 MPa 연료분사/확장각 존재 조건에서 연료-공기 혼합에 대한 공동의 영향 및 CEMA의 경우에는 1.5 MPa 연료분사/공동 존재 조건에서 확장각에 의한 연소특성 진단결과만 언급하겠다.

DMD 및 CEMA를 이용한 연소특성 진단의 효과를 확인하기 위해 수치적 접근법은 이전 연구와 동일하게 설정하였다. 2차원 좌표계에서 유동과 화학반응이 완전히 결합된 형태의 지배방정식이 사용되었다. 각 화학종 밀도의 합 및 이상기체 상태방정식으로 밀도와 압력을 처리하였으며, 운동에너지 및 내부에너지의 합으로 단위 체적 당 전체 에너지를 계산하였다. 대류항은 Reo's FDS(Flux Difference Splitting)으로 이산화하였으며, 2차 정확도의 fully implicit 방법으로 시간 적분을 수행하였다. 난류모델로는 Mentor의 2-방정식 SST 모델을 사용하였으며, 연소모델로는 H,  $H_2$ , O,  $O_2$ ,  $H_2O_2$ , OH,  $H_2O$ ,  $HO_2$  의 8개 화학종과 25개의 반응식으로 구성된 수소-공기 GRI-Mech 2.11 모델을 적용하였다. DMD 분석

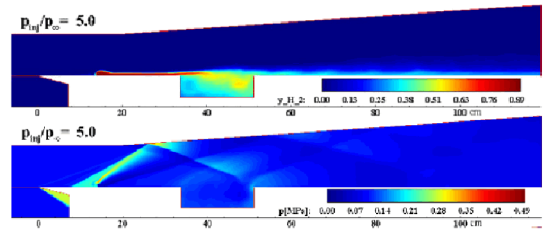


Fig. 4 Time averaged results of  $H_2$  mass fraction and pressure at the with cavity case

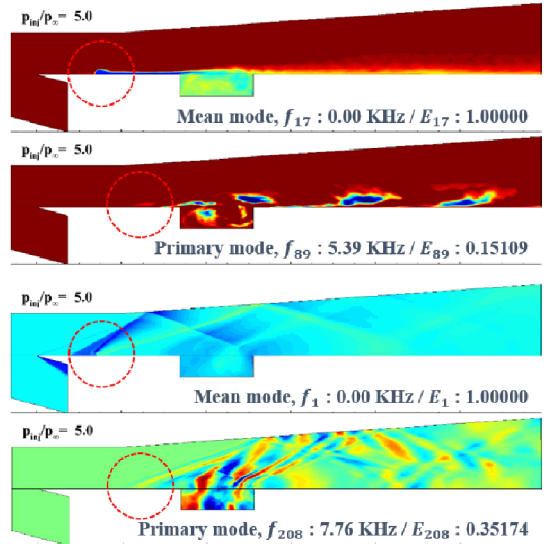


Fig. 5 Top 3 DMD modes by coherence value : (upper)  $H_2$  mass fraction / (lower) pressure at the with cavity case

Table 2. Comparison of the coherence value

Mode	Without cav.		With cav.	
	$H_2$	Pres.	$H_2$	Pres.
Mean	1.00000	1.00000	1.00000	1.00000
Primary	0.00001	0.00002	0.15109	0.35174
Second.	0.00001	0.00002	0.15076	0.33492
3 <sup>rd</sup> mode	0.00000	0.00001	0.10644	0.30014

에 사용된 데이터는 Table. 3에 명시하였으며, CEMA는 약 12 ms 데이터를 이용하였다.

Fig. 2-3 과 4-5 는 각각 공동이 존재하지 않은 경우와 존재하는 경우에서  $H_2$  질량분율 및 압력에 대해 시간평균된 수치실험 결과와 DMD 분석 결과이다. Fig. 3, 4의 가장 위쪽에 도시된 모드는 mean mode로서 가장 지배적인 거동을 나타낸다. 두 번째 contour는 에너지 순위를 나타내는 coherence 값이 mean mode 제의 가장 높은 값을 나타내는 primary mode를 도시한 것이다. Mean mode는 모든 조건에서 시간평균 결과와 유사한 거동을 나타낸다. Fig. 3과 5의 primary mode를 살펴보면, 공동이 존재하지 않을

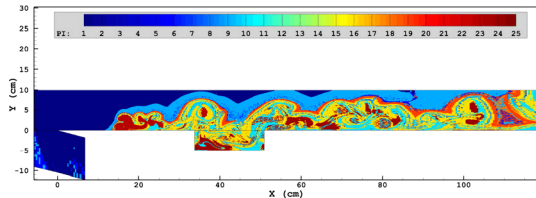


Fig. 6 Dominant Pls in the straight channel type combustor at 12 ms

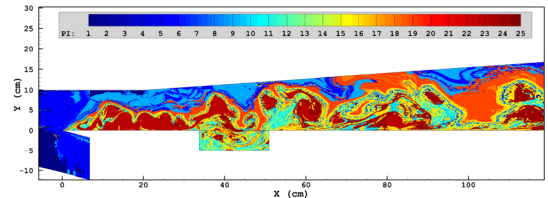


Fig. 9 Dominant Pls in the divergence nozzle type combustor at 12 ms

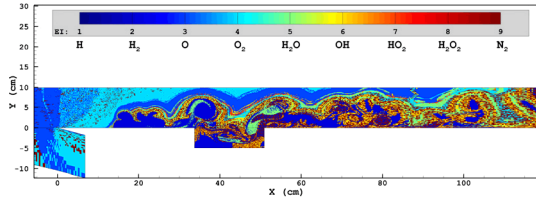


Fig. 7 Dominant Els in the straight channel type combustor at 12 ms

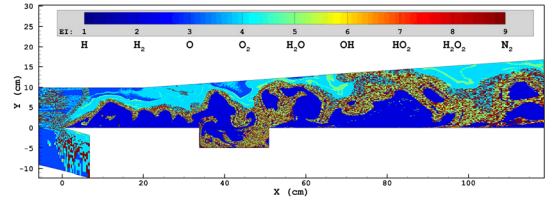


Fig. 10 Dominant Els in the divergence nozzle type combustor at 12 ms

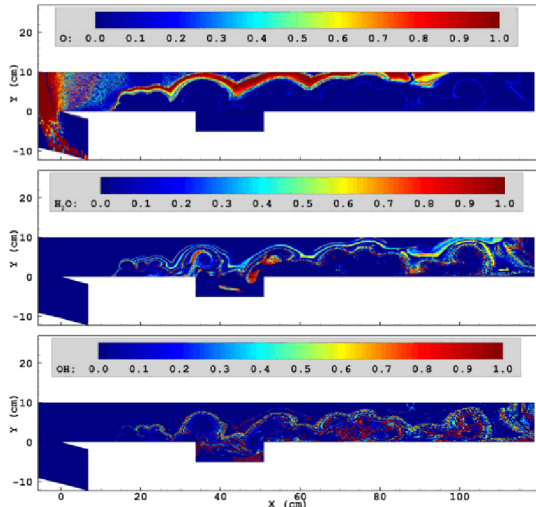


Fig. 8 EI of each species : H<sub>2</sub>, O, H<sub>2</sub>O, OH

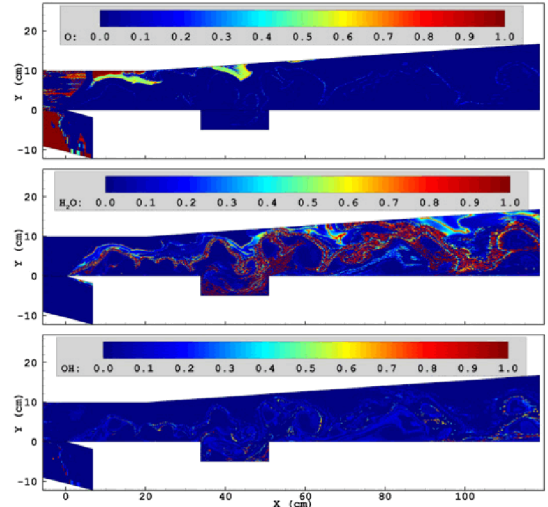


Fig. 11 EI of each species : H<sub>2</sub>, O, H<sub>2</sub>O, OH

경우, 분사 지점으로부터 약 31 cm 떨어진 지점에서 연료혼합이 시작되는 것을 알 수 있다. 그러나 공동이 존재하는 경우에는 약 11 cm 로 해당 지점이 연료분사 지점으로 상당히 인접해졌음을 확인 할 수 있다. Fig. 3의 압력에 대한 DMD 결과를 살펴보면, inlet-연소기의 확장각 시작 지점으로 이어지는 경사충격파가 반사되어 연소기 하부 벽면으로 전파됨을 확인 할 수 있다. 이 지점은 Fig. 3의 H<sub>2</sub> 질량분율에 대한 DMD 결과의 혼합 시작지점과 일치한다. 이를 통해, 연소실 inlet에서 형성된 압력 요란이 연소실 하부 벽면에 밀착된 형태를 유지하며 연소실 하류로 흘러가던 연료를 혼합시키게 하는 주 요인이라 판단 할 수 있다. Fig. 5에서는 공동 내부에서의 압력요란으로 인해 연소실 상류로 압력 변동을 유발한다.

이러한 압력변동이 분사 후 연료가 혼합되게 하는 주 요인이라 판단된다. Table 2 는 상대적 에너지 순위를 나타낸 coherence 값을 나타낸 것이다. 상대적 에너지를 나타내는 값임에도, mean mode와 하위 모드들간의 값 차이가 공동이 없는 조건이 상당히 크게 도출되는 것을 알 수 있다.

Fig. 6-11에 조건별로, CEMA에서 도출된 dominant EI(Explosion Index), 각 화학종에 대한 EI 값, 마지막으로 PI(Participation Index)를 도시하였다. 우선 Fig. 6과 9을 살펴보면, 공기-연료 혼합층의 최외곽, 각각 공기와 연료분포와 맞닿아 있는 양단에 [O+O+M $\leftrightarrow$ O<sub>2</sub>+M](M : third body relative to N<sub>2</sub>) 및 [H+H+H<sub>2</sub> $\leftrightarrow$ H<sub>2</sub>+H<sub>2</sub>]반응이



지배적임을 확인 할 수 있다. 이후 혼합층 내부의 양단으로 O, H, OH 활성기를 포함한  $[H+O_2 \leftrightarrow O+OH]$  및  $[OH+H_2 \leftrightarrow H+H_2O]$  연쇄반응이 지배적으로 형성되어 있다. 몇몇 국소적인 영역(격자)에서 다른 지배적인 반응들이 포착되긴 하나, 과산화수소가 포함된  $[H+O_2+M \leftrightarrow HO_2+M]$  반응과 이를 감싸는 형태의  $[OH+HO_2 \leftrightarrow O_2+H_2O]$  반응이 혼합층의 최내부에 존재하고 있다.

Straight channel 형상의 연소실은 divergence nozzle 연소실과는 다르게 연소실 전체에 열 질식(thermal choking)이 일어난다. 이로 인해 inlet 을 통해 제대로 공기가 흡입되지 않는 일종의 불시동(unstart)현상이 나타나며, 저 마하수-고온-고압 분포가 연소실 전체를 지배하게 된다. Straight channel에서는 inlet에서 형성된 경사충격파 구조가 무너지며 연료분사 지점에서부터, 앞서 언급한 반응이 수반된다. 그러나 divergence nozzle에서는 경사-수직충격파의 구조가 유지되며 inlet 카울 부분부터 연료와 공기의 혼합, 화학반응이 일어나는 것을 Fig. 6-10을 통해 알 수 있다. Fig. 6 과 9에도 열 질식으로 인한 차이를 확인 할 수 있다. 우선, 낮은 마하수 분포로 인해 앞서 언급한 혼합층 구조가 연소기 하류까지 형태를 유지하며 이어진다. 그러나 반대의 경우, 공동을 지나는 영역부터 극대화된 공동의 효과로 인하여 연료-공기 혼합이 강하게 일어나고, 화염면에서의 국부적인 현상은 유지하나, 이전 영역에서 일정 형태를 띠던 혼합층은 뒤섞이게 된다. 또한 straight channel의 inlet 영역에서는  $[O+O+M \leftrightarrow O_2+M]$  반응이 지배적인 반면, divergence nozzle에서는  $[H+O_2+M \leftrightarrow HO_2+M]$ 이 지배적인 것으로 도출된다. 이는 각 화학종에 대한 EI 분포를 나타낸 Fig. 8, 11에서 연소실 inlet 영역에서의 O 분포의 차이로도 확인 할 수 있다. Dominant EI를 나타낸 Fig. 7, 10에서는 straight channel의 경우에서 OH의 분포가 연소실 전 영역에 걸쳐, 매우 강하게 도출된다. Fig. 8과 11의 OH에 대한 EI 분포에서도 straight channel에서의 결과가 divergence nozzle 대비 상당히 강한 값으로 도출함을 알 수 있다.

## 후 기

본 연구는 방위사업청의 재원으로 국방과학연구소 일반기초연구(No.08-201-501-014), 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단 글로벌박사양성사업(연구재단-2019-글로벌박사양성사업)으로 수행되었습니다.

## 참고 문헌

[1] Choi, J.-Y., Ma, F., and Yang, V.

"Dynamic Combustion Characteristics in Scramjet Combustors with Transverse Fuel Injection," 41st AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit. American Institute of Aeronautics and Astronautics, 2005.

[2] Choi, J.-Y., Ma, F., and Yang, V. "Combustion oscillations in a scramjet engine combustor with transverse fuel injection," *Combust. Inst.* 2005, pp. 2851-2858.

[3] Schmid, P. J. "Dynamic mode decomposition of numerical and experimental data," *Journal of fluid mechanics* Vol. 656, 2010, pp. 5-28.

[4] Jourdain, G., Eriksson, L.-E., Kim, S. H., and Sohn, C. H. "Application of dynamic mode decomposition to acoustic-modes identification and damping in a 3-dimensional chamber with baffled injectors," *Journal of Sound and Vibration* Vol. 332, No. 18, 2013, pp. 4308-4323.

[5] Kumar, P. P., Jeong-Yeol, C., Jinwoo, S., and Chae Hoon, S. "Applications of Dynamic Mode Decomposition to Unstable Shock-Induced Combustion," *한국추진공학회지* Vol. 21, No. 2, 2017, pp. 9-17.

[6] Taira, K., Brunton, S. L., Dawson, S. T., Rowley, C. W., Colonius, T., McKeon, B. J., Schmidt, O. T., Gordeyev, S., Theofilis, V., and Ukeiley, L. S. "Modal analysis of fluid flows: An overview," *AIAA Journal*, 2017, pp. 1-29.

[7] Pavalavanni, P. K., Sohn, C. H., Lee, J., and Choi, J.-Y. "Revisiting unsteady shock-induced combustion with modern analysis techniques," *Combust. Inst.* Vol. 37, No. 3, 2019, pp. 3637-3644.

[8] Lu, T., Yoo, C. S., Chen, J., and Law, C. K. "Three-dimensional direct numerical simulation of a turbulent lifted hydrogen jet flame in heated coflow: a chemical explosive mode analysis," *Journal of Fluid Mechanics* Vol. 652, 2010, pp. 45-64.

[9] Luo, Z., Yoo, C. S., Richardson, E. S., Chen, J. H., Law, C. K., and Lu, T. "Chemical explosive mode analysis for a turbulent lifted ethylene jet flame in highly-heated coflow," *Combust. and Flame.*, Vol. 159, No. 1, 2012, pp. 265-274.

[10] Shan, R., Yoo, C. S., Chen, J. H., and Lu, T. "Computational diagnostics for n-heptane flames with chemical explosive mode analysis," *Combust. and Flame.*, Vol. 159, No. 10, 2012, pp. 3119-3127.

## 미세먼지 후처리장치 필터의 lab-scale 산화 반응성 실험장치 개발

우상인\*,임상철\*,이승훈\*,박선호\*,조구영\*†

## A lab-scale experiment of PM oxidation reactivity in after-treatment filters toward design parametric studies of DPF and SCR-F

Sangin Woo\*, Sangchul Lim\*, Seunghoon Lee\*, Sunho Park\*, Guyoung Cho\*†

## ABSTRACT

This study aimed to develop a lab-scale experimental apparatus of the soot oxidation reactivity in a filter segment of DPF. The size-controlled PM was generated with our patented soot generator. The transient pressure difference and filtration efficiency were measured while PM was being loaded on the filter. The results showed that the filtration efficiency and the rate of pressure difference increase were higher when the PM was larger. The developed lab-scale experimental set-up can be utilized for a variety of parametric studies on PM loading and oxidation in DPFs or SCR-Fs.

**Key Words** : PM, oxidation, DPF, SCR-F, Regeneration

연소과정을 통해 생성되는 PM 및 NO<sub>x</sub>는 인체와 환경에 유해한 것으로 알려져 있다. 특히 PM은 인체의 피부, 심혈관, 뇌, 혈액 및 호흡기 문제와 직간접적으로 관련되어 있어, 이의 배출을 저감하기 위한 기술의 개발이 요구된다. PM과 NO<sub>x</sub> 저감 장치로는 DPF(diesel particulate filter)와 SCR(selective catalytic reduction)이 주로 사용되고 있다. DPF는 담체에 미세한 기공형태의 셀을 갖게 하되 각 셀의 앞뒤가 번갈아 막혀 있는 구조로, 벽면유동(wall-flow)을 발생시켜 필터의 벽(wall)이 PM을 여과시키는 장치이다. 반면 SCR은 촉매가 코팅된 담체에 요소수를 분사하고 배기가스가 셀을 따라 흐르며 NO<sub>x</sub>를 환원시키는 장치이다.

DPF 설계를 위해 기공의 크기, 기공률(porosity), 셀 입구와 출구의 형상 등을 변수로 하여 높은 여과 성능과 낮은 배압, 그리고 담체의 수명을 개선하는 연구가 진행되어왔다[1]. SCR에서는 NO<sub>x</sub>의 환원 반응을 위해 분사되는 암모니아의 양과 분사 방법의 제어를 통해 NO<sub>x</sub>를 최대한 환원하면서 암모니아의 누설이 발생하지 않게 하기 위한 최적화 작업이 필요하다. DPF와 SCR이 결합된 형태인 SCR-F(selective catalytic reduction on filter)는 DPF에 SCR 촉매가 코팅된 형태로 PM을 여과시킴과 동시에 NO<sub>x</sub>를 환원시키는 역할을 하는 장치이다. 이를 사용하면 DPF와 S

CR을 독립적으로 설치할 때보다 공간적 이득을 확보할 수 있으며 다양한 후처리장치 시스템에 활용될 수 있을 것으로 예상된다. 그러나 SCR-F에서 발생하는 PM 여과와 재생, NO<sub>x</sub>의 환원 등은 매우 복잡한 화학반응에 의해 그 성능이 결정되며 이를 확인하기 위한 다양한 기초연구가 선행되어야 한다[2].

본 연구에서는 lab-scale의 산화 반응성 실험장치를 구축하고 DPF 담체를 이용하여 PM을 로딩하였다. 사용된 PM은 질소에 분산된 프로필렌(C<sub>3</sub>H<sub>6</sub>) 연료를 열분해하여 합성하였다. Fig. 1은 PM 합성장치 및 담체에 PM을 로딩하는 실험장치의 개략도를 나타낸다. 고온 로(furnace)에 carrier 질소와 연료를 질량유량계(Bronkhorst, F-20 1CB)를 이용하여 연료 몰 분율, 열분해 시간을 고려하여 로에 공급하였다. 합성된 매연은 로

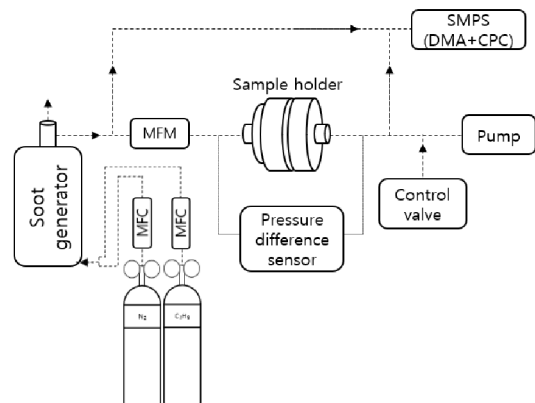


Fig. 1 A schematic of the PM loading system.

\* 단국대학교 기계공학과

† 연락처자: guyoungcho@dankook.ac.kr

TEL : (031)8005-3520 FAX : (031)-8021-7215

후단에서 회석질소와 함께 배출되며, 일부를 진공펌프로 샘플링하여 DPF 담체에 로딩하였다. 로딩 중 증가하는 차압으로 인해 줄어드는 유량은 제어밸브(MF KOREA, MEV-10-DC24V)를 이용하여 담체에 일정한 공간속도(space velocity)를 유지하도록 하였으며, Neutralizer(gramm, 4530 series)와 DMA(gramm, Vienna/Reischl type), 그리고 CPC(gramm, 5400 series)를 이용하여 필터 전단과 후단에서 입자의 수 밀도 분포를 확인하였다.

Table 1 Pyrolysis conditions for PM synthesis

Pyrolysis temperature (°C)	1300
Mole fraction of propylene (%)	0.25, 0.5, 1

Table 1은 열분해 PM을 생성하는 조건을 나타낸다. 고온 로에서는 carrier 질소의 유량을 4 slp m(standard liter per minute) 이하로 사용하며, 이는 기계와 로 사이에 충분한 열전달 시간을 갖게 하는 임계 유량이다. 연료의 양이 많을 때 물 분율을 작게 하려면 carrier 질소의 유량이 임계 유량에 가까워지고 충분한 열분해 시간을 갖지 못하기 때문에 연료의 유량을 조절하였으며, 평균 입자크기가 작은 조건을 찾기 위해 낮은 물 분율을 선정하였다[3]. Fig. 2는 실험조건에 대한 PM 입자크기 분포와 평균 입자크기를 나타낸다. 일반적인 디젤엔진에서 배출되는 PM의 크기를 고려하여, 평균 입자크기가 각각 102, 151.3, 197.8 nm가 되는 조건을 선정하였다[4].

입자크기 분포가 서로 다른 종류의 매연을 로딩했을 때 차압의 변화는 Fig. 3과 같이 확인할 수 있었다. 평균 입자크기가 큰 매연일수록 차압이 더 빨리 증가하는 것을 확인하였다. 이는 입자크기가 클수록 더 DPF 벽에 soot cake을 형성하여 추가적으로 유입되는 PM을 더 잘 여과시키기 때문이다[1].

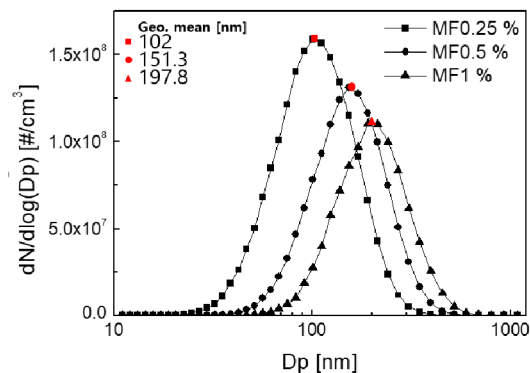


Fig. 2 Size distribution of the PM. (MF:mole fraction)

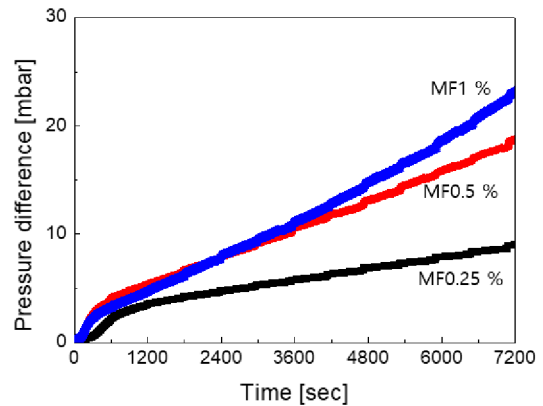


Fig. 3 Pressure difference according to the loading time.

CPC를 이용하여 DPF 전 후단에서 입자 수를 측정하였고 이를 통해 Eq.1과 같이 시간에 따른 여과효율(FE; filtration efficiency)을 계산하여 Fig. 4에 나타내었다.

$$FE = \frac{N_{before} - N_{after}}{N_{before}} \quad (1)$$

평균 입자크기가 클수록 더 짧은 시간 내에 여과효율이 1에 가까워지는 것을 확인할 수 있다. 여과효율이 1에 도달함은 Eq.1에서 확인할 수 있듯이 DPF 전단의 입자 수에 비해 후단의 입자 수가 매우 적음을 의미하며, 충분히 여과되고 있음을 나타낸다.

이 연구의 실험장치는 Fig. 2에서와 같이 크기 및 수 농도가 잘 제어된 PM을 활용하므로 입자크기 및 PM 수 농도에 따른 여과효율의 변화를 확인할 수 있을 것으로 예상된다.

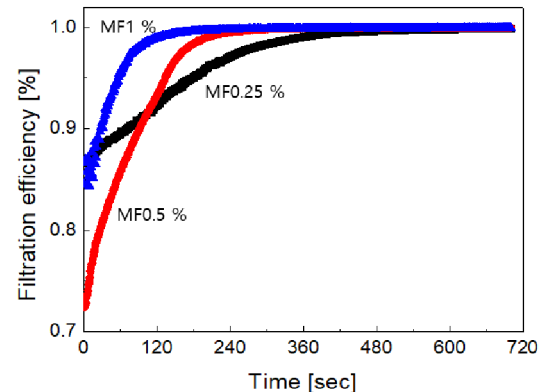


Fig. 4 Filtration efficiency according to the fuel mole fraction during PM synthesis

프로필렌 연료를 이용하여 열분해 PM을 합성하고 이를 DPF segment에 로딩시키며 차압의 증가 경향과 여과성능을 확인하는 실험을 수행하였다. 열분해 타입의 PM 발생장치에서 합성되는 PM은 연료의 물 분율이 증가할수록 평균 입자크기는 커지지만 입자 수 농도는 감소하였다. PM을 이용한 필터 로딩 실험에서는 평균 입자크기가 클수록 차압의 증가율이 커짐을 확인하였으며, 이는 큰 입자일수록 DPF wall에 더 잘 침착되어 이후 유입되는 PM의 여과에 도움을 주기 때문으로 생각된다. 본 실험장치를 이용하여 DPF와 SCR-F 개발에 필요한 lab-scale의 로딩, 재생 실험을 포함한 다양한 기초연구가 가능할 것으로 보인다.

## 후 기

이 논문은 2019년 해양수산부 재원으로 해양수산과학기술진흥원의 “1,500 kW급 중소형 선박엔진용 미세먼지 저감장치 개발 및 실증” 지원으로 수행되었으며 이에 감사드립니다.

## 참고 문헌

- [1] B. Guan, R. Zhan, H. Lin, Z. Huang, “Review of the state-of-the-art of exhaust particulate filter technology in internal combustion engines”, J. Environ. Manage., Vol. 154, 2015, pp. 225-228.
- [2] E. Tronconi, I. Nova, F. Marchitti, G. Koltsakis, D. Karamitros, B. Maletic, “Interaction of NOx Reduction and Soot Oxidation in a DPF with Cu-Zeolite SCR Coating”, Emiss. Control Sci. Technol., 2015, pp. 134-151.
- [3] Sanghwan Cho, Seunghoon Lee, Wonnam Lee, Sunho Park, “Synthesis of primary-particle-size-tuned soot particles by controlled pyrolysis of hydrocarbon fuels”, Energy Fuels, 2016, pp. 6614-6619.
- [4] Jesus Benajes, Ricardo Novella, Simon Arthozoul and Christopher Kolodziej, “Particle Size Distribution Measurements from Early to Late Injection Timing Low Temperature Combustion in a Heavy Duty Diesel Engine”, SAE Int. J. Fuels Lubr., 2010, pp. 567-581.

# OpenFOAM을 활용한 용융환원로 내 입자 거동 및 반응 해석

김진영\*, 장권우\*, 허강열\*†

## Analysis of particle behavior and reaction in Melter-Gasifier using OpenFOAM

Jinyeong Kim\*, Kwonwoo Jang\*, Kang Y. Huh\*†

### ABSTRACT

Melter-Gasifier is generally used in alternative iron making process to produce liquid iron. To simulate Melter-Gasifier, we should consider not only complex motion of particles but also chemical reactions between coke, pulverized coal and oxygen. In addition, due to the high injection speed of oxygen, a cavity called raceway is created from the end of the oxygen lance. In this work, we conducted simulation of Melter-Gasifier using OpenFOAM with Discrete Element Method (DEM).

**Key Words** : Melter-Gasifier, Chemical reactions, Raceway, OpenFOAM, Discrete Element Method (DEM)

제철 공정은 제선 공정, 제강 공정, 연주 공정, 압연 공정으로 이루어져 있으며, 용융환원로는 철광석으로부터 선철을 생산하는 제선 공정에서 사용된다. 용융환원로 내부에서는 코크스와 미분탄이 동시에 화학 반응을 일으킴으로써 철광석을 환원시키며, 코크스는 용융환원로 상부에서 장입되고, 미분탄은 풍구에서 PCI (Pulverized Coal Injection)를 통해 장입이 이루어진다. 동시에 풍구에서는 고속의 산소가 주입되며, 산소 주입구의 끝에서부터 raceway라 불리는 장입 입자 내 공동이 형성된다 [1]. Raceway 내에서는 가스 및 입자가 순환하는 거동을 보이며, 미분탄의 연소 반응을 통해 발생된 열과 환원 가스가 주변 코크스 입자의 환원 반응을 유발한다. 용융환원로를 통해 획득한 선철의 품질은 전체 철강의 품질을 결정하므로 매우 중요한 공정 과정으로 여겨진다. 용융환원로 내부의 수많은 입자 충돌과 화학 반응을 모두 모사하기에는 어려움이 많아, 선행연구 [2]에서는 주변 코크스 입자들의 거동을 다공성 물질(Porous media)로 가정하여 연구를 수행하였다. 본 연구에서는 OpenFOAM을 활용하여 주변 코크스 입자들의 거동을 모사하는 동시에 PCI를 통해 유입되는 미분탄의 연소 반응을 모사할 수 있는 새로운 라이브러리 및 솔버를 개발하였으며, 이를 용융환원로에 적용하여 해석을 수행하였다.

입자와 가스의 거동은 Eulerian-Lagrangian 방법을 통해 구현되었으며, 가스 상의 보존 방정식은 유체의 부피 분율( $\theta_f$ )을 활용하여 아래와 같이 나타내어진다 [3].

$$\frac{\partial(\theta_f \rho_f)}{\partial t} + \nabla \cdot (\theta_f \rho_f u_f) = \delta \dot{m}_{pf} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} & \frac{\partial(\theta_f \rho_f u_f)}{\partial t} + \nabla \cdot (\theta_f \rho_f u_f u_f) \\ &= -\theta_f \nabla p + \theta_f \rho_f g + \nabla \cdot (\theta_f \tau_f) + F \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} & \frac{\partial(\theta_f \rho_f Y_{f,i})}{\partial t} + \nabla \cdot (\theta_f \rho_f Y_{f,i} u_f) \\ &= \nabla \cdot (\rho_f D \theta_f \nabla Y_{f,i}) + \delta \dot{m}_{i,chem} \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} & \frac{\partial(\theta_f \rho_f h_f)}{\partial t} + \nabla \cdot (\theta_f \rho_f h_f u_f) \\ &= \theta_f \frac{Dp}{Dt} - \nabla q + \dot{Q} + S_h \end{aligned} \quad (4)$$

코크스 입자들의 충돌을 모사하기 위해 본 연구에서는 Discrete Element Method (DEM) 방법을 적용하였으며, 입자의 운동 방정식은 다음과 같다 [4].

$$m_p \frac{du_p}{dt} = \frac{V_p \beta}{1 - \theta_f} (u_f - u_p) + m_p g (1 - \frac{\rho_f}{\rho_p}) + F_C \quad (5)$$

\* 포항공과대학교 기계공학과

† 연락처자, [huh@postech.ac.kr](mailto:huh@postech.ac.kr)

TEL : (054)279-2841 FAX : (054)-279-3199

$$I_p \frac{dw_p}{dt} = T_p \quad (6)$$

입자의 contact force( $F_C$ )는 soft-sphere 모델을 사용하여 계산되며, Hertzian spring-dashpot (HSD) 모델을 사용하여 contact force를 normal 방향과 tangential 방향으로 분리하여 나타내면 다음과 같다.

$$F_C = F_{Cn} + F_{Ct} \quad (7)$$

$$F_{Cnij} = (-k_n \delta_{nij}^{3/2} - \eta_n u_{ij} \cdot n_{ij}) n_{ij} \quad (8)$$

$$F_{Ctij} = -k_t \delta_{tij} - \eta_t u_{sij} \quad (9)$$

용융환원로 해석을 위한 코드는 OpenFOAM 4.x version을 사용하였으며, 개발 과정은 다음과 같다.

첫째, OpenFOAM에서는 DPMCloud 라이브러리를 활용하여 DEM 입자 거동을 해석할 수 있으며, ReactingMultiphaseCloud 라이브러리를 활용하여 화학 반응을 해석할 수 있다. 두 라이브러리를 기반으로, ReactingMultiphaseDPMCloud 라는 이름의 새로운 라이브러리를 개발하였다.

둘째, DPMFoam은 DPMCloud 라이브러리를 활용하는 비압축성 솔버이며, ReactingParcelFoam은 ReactingMultiphaseCloud 라이브러리를 활용하는 압축성 솔버이다. 두 솔버를 기반으로, 앞서 개발한 ReactingMultiphaseDPMCloud 라이브러리와 OpenFOAM에서 기본으로 제공하는 미분탄 입자 거동 해석용 CoalCloud 라이브러리, 미분탄 연소 모델을 표현하는 CoalCombustionModel 라이브러리를 추가하여 PCIReactingDPMFoam이라는 이름의 새로운 솔버를 최종적으로 개발하였다.

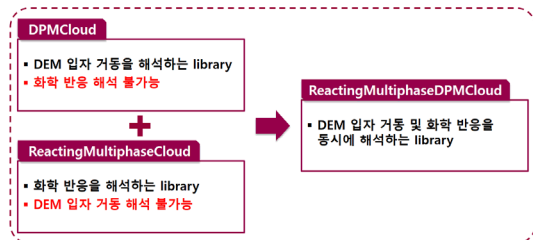


Fig. 1 Schematic diagram of ReactingMultiphaseDPMCloud library

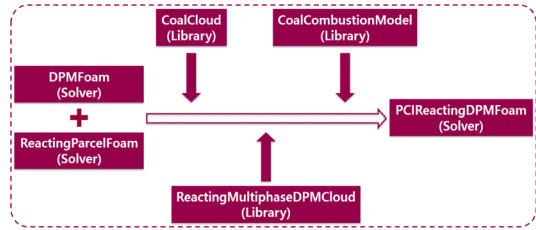


Fig. 2 Schematic diagram of PCIReactingDPMFoam solver

본 연구진이 개발한 PCIReactingDPMFoam을 용융환원로에 적용하기 전, 입자 계산에 영향을 미치는 요인과 raceway 크기를 확인하기 위하여 검증 케이스를 선정하였다 [5]. 검증 케이스는 화학 반응이 없는 계산이므로, DPMFoam을 사용하여 해석하였다. 형상은  $\theta = 0.1571\text{rad}$ 의 sector로, 계산 부담을 낮추고 격자 quality를 높이기 위하여 tuyere를 정사각형으로 단순화한 후 해석을 진행하였다. 입자 및 가스의 물성치와 수치해석 조건은 Table 1과 같이 설정하였으며, Fig. 4와 Fig. 5는 각각 시간에 따른 raceway depth 및 height의 변화를 참조한 논문의 계산 결과와 같이 나타난 것이다. 또한, Fig. 6은  $t = 4\text{s}$ 에서의 void fraction 계산 결과로, tuyere의 끝부분에서 순환하는 유동으로 인해 raceway가 형성되는 것을 확인할 수 있다.

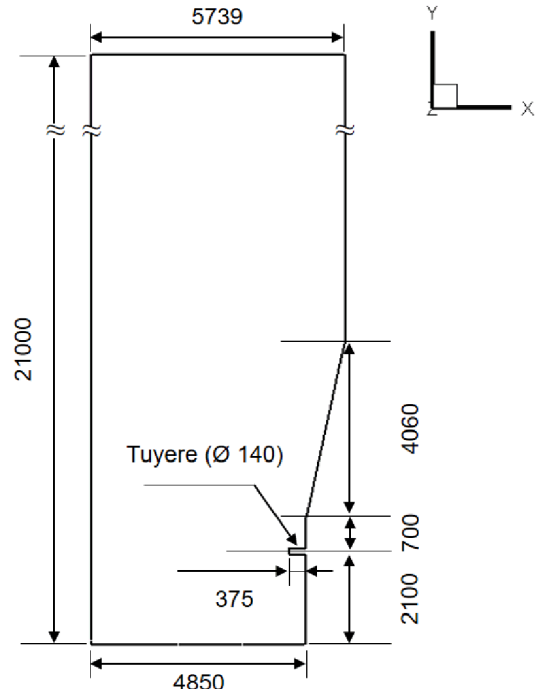
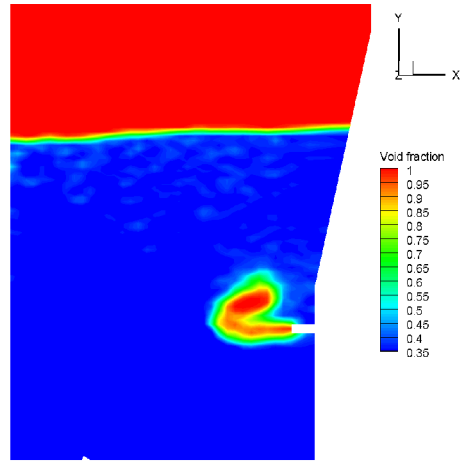


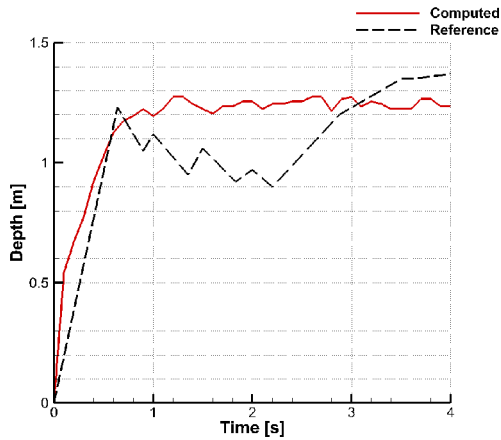
Fig. 3 Simplified geometry of validation case

**Table 1** Material properties and computational conditions

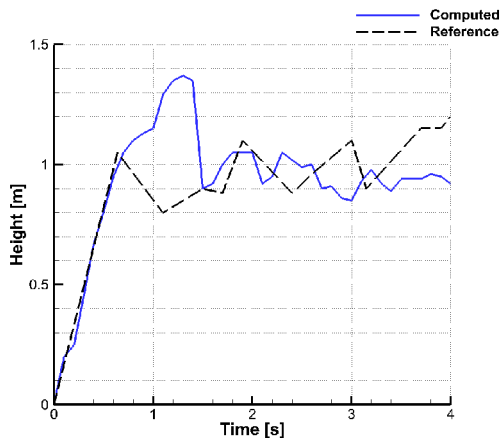
Particle diameter ( $D_p$ )	37.5mm
Particle density ( $\rho_p$ )	1200kg/m <sup>3</sup>
Stiffness coeff. ( $E$ )	$1.0 \times 10^6$ N/m <sup>2</sup>
Poisson's ratio ( $\nu$ )	0.25
Friction coeff. ( $\mu$ )	0.25
Coeff. of restitution ( $e$ )	0.2
Gas density ( $\rho_g$ )	7kg/m <sup>3</sup>
Gas velocity ( $U$ )	200m/s
Max. solid volume fraction	0.7
Time step ( $\Delta t$ )	$5.0 \times 10^{-5}$ s



**Fig. 6** Computed instantaneous void fraction in validation case at  $z = 0$  plane ( $t = 4$ s)



**Fig. 4** Raceway depth comparison between computed result and reference



**Fig. 5** Raceway height comparison between computed result and reference

본 연구진은 DPMFoam을 사용한 계산 결과와 참조한 논문의 계산 결과를 위와 같이 비교함으로써, raceway의 크기 및 시간에 따른 변화 양상과 입자 계산에 영향을 미치는 요인들을 정성적으로 검증 완료하였다.

앞서 검증 케이스에서 파악한 내용을 바탕으로 새로 개발한 PCIRectingDPMFoam을 용융환원로에 적용하여 해석을 진행하였으며, 용융환원로 내부 입자 및 가스들의 반응 모델들을 Table 2와 같이 설정하였다 [6, 7]. Fig. 7은  $t = 5.6$ s에서의 void fraction 계산 결과이며, 검증 케이스와 유사한 형상의 raceway가 형성되는 것을 확인할 수 있다.

**Table 2** Reacting models in Melter-Gasifier case

Gas phase	EDM model (Global 2step)
Coal	Single rate model (Devolatilization)
	Kinetic / Diffusion limited model (Char reaction)
Coke	Un-reacted shrinking core model

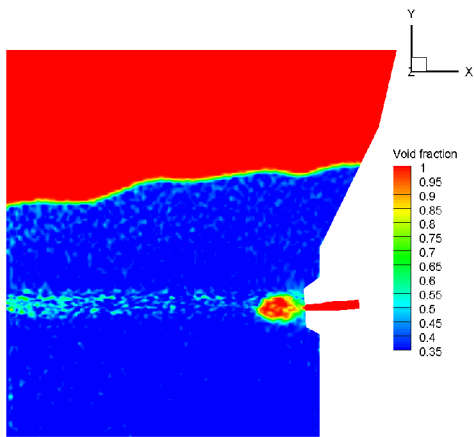


Fig. 7 Computed instantaneous void fraction in Melter-Gasifier at  $z = 0$  plane ( $t = 5.6s$ )

## 후 기

이 성과는 2019 년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. NRF-2017R1A2B3009756)

## 참고 문헌

- [1] B.H. Xu, A.B. Yu, S.J. Chew, P. Zulli, "Numerical simulation of the gas-solid flow in a bed with lateral gas blasting", *Powder Technol.*, Vol. 109, 2000, pp. 13-26.
- [2] Y.S. Shen, B.Y. Guo, A.B. Yu, P.R. Austin, P. Zulli, "Three-dimensional modelling of in-furnace coal/coke combustion in a blast furnace", *Fuel*, Vol. 90, 2011, pp. 728-738.
- [3] K. Jang, W. Han, Kang Y. Huh, "Simulation of a Moving-Bed Reactor and a Fluidized-Bed Reactor by DPM and MPPIC in OpenFOAM<sup>□</sup>", *OpenFOAM<sup>□</sup>*, 2019, pp. 419-435.
- [4] L. Li, B. Li, Z. Liu, "Modeling of spout-fluidized beds and investigation of drag closures using OpenFOAM", *Powder Technol.*, Vol. 305, 2017, pp. 364-376.
- [5] T. Umekage, S. Yuu, M. Kadowaki, "Numerical Simulation of Blast Furnace Raceway Depth and Height, and Effect of Wall Cohesive Matter on Gas and Coke Particle Flows", *ISIJ Int.*, Vol. 45, 2005, pp. 1416-1425.
- [6] C. Zhou, G. Tang, J. Wang, D. Fu, T. Okosun, A. Silaen, B. Wu, "Comprehensive

Numerical Modeling of the Blast Furnace Ironmaking Process", *JOM*, Vol. 68, 2016, pp. 1353-1362.

[7] H. Nogami, H. Yamaoka, K. Takatani, "Raceway Design for the Innovative Blast Furnace", *ISIJ Int.*, Vol. 44, 2004, pp. 2150-2158.



## 미분탄의 연소과정에서 발생한 미세먼지 입자의 광학특성

이수한\*, 강별\*\*, 박설현\*†

### Optical Properties of Particulate Matter Generated From Combustion of Pulverized Coal

SooHan Lee\*, Byeol Kang\*\*, SeulHyun Park\*†

인체에 대한 미세먼지의 노출은 눈, 코, 기관지, 폐 등에 각종 질병을 발생시키는 것으로 알려져 있다. 이러한 미세먼지의 인과관계를 파악하기 위해 국내 업종별 대기오염물질 배출량을 분석한 결과 발전업이 51.8%로 가장 많은 비중을 차지하였으며, 그 중 화력발전소에서 발생되어지는 미세먼지가 수도권 미세먼지에 최대 28% 기여하는 것으로 조사된 바 있다. 따라서 화력발전소에서 연료로 주로 사용되어지는 미분탄의 연소 시 발생하는 미세먼지의 정량적 농도 측정을 실시하고자 하였다. 미세먼지의 농도 측정 방법에는 중량 농도법과 광학법이 있다. 중량 농도법은 광학법에 비해 정확도가 높지만 실시간 측정에 적합하지 않고, 광학법은 실시간 측정에 적합하지만 채집되는 입자의 광학 특성에 따라 오차가 발생한다. 따라서 광학법의 농도측정의 오차를 줄이기 위해서는 미세먼지 입자의 물리/화학적 광학 특성에 대한 분석이 필요하다. 본 연구에서는 미분탄의 연소과정에서 발생하는 미세먼지 입자의 광학 특성을 분석하였다.

미분탄 미세먼지 입자의 광학특성을 분석하기 위해 Fig. 1과 같이 미분탄 연소를 위한 전기로와, 파장 635nm의 레이저, 광도 측정을 위한 포토 디텍터, 미세먼지 입자의 포집을 위한 Transmission Cell과 입자 질량 측정을 위한 필터, TC 내부의 일정한 유량 조절을 위한 MFC와 차압계, 진공펌프로 구성하였다.

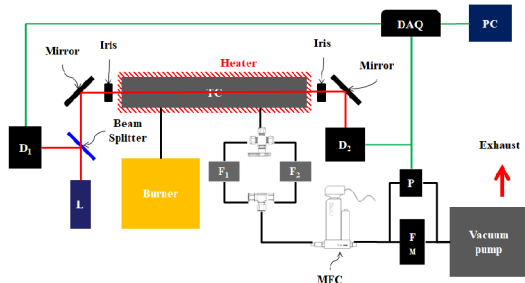


Fig. 1 Schematic diagram of experimental apparatus for measuring the extinction coefficient

미세먼지 입자가 TC에 유입되기 전후의 광원의 강도를 측정하여 계산한 광투과율은 Bouguer 법칙에 따라 식(1)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{I}{I_0} = \exp\left(-K_e \frac{f_v}{\lambda} L\right) \quad (1)$$

식(1)에서  $K_e$ 는 광소멸계수,  $f_v$ 는 광학적으로 측정된 미세먼지 농도,  $\lambda$ 는 광원의 파장 길이,  $L$ 은 레이저의 경로의 길이를 의미한다. 한편 필터로 측정된 입자상물질의 Volume Fraction,  $f_{vg}$ 는 식(2)을 이용하여 계산할 수 있다.

$$f_{vg} = \frac{m}{Vt\rho} \quad (2)$$

식(2)에서  $m$ 은 Sampling 구간에서 필터에 채집된 미세먼지 입자의 질량,  $V$ 는 Sampling 구간에서 TC내부에 유입된 공기의 유량,  $t$ 는 Sampling 시간,  $\rho$ 는 미세먼지 입자의 밀도이다. 식(1)과 식(2)의  $f_v$ 와  $f_{vg}$ 는 같은 Sampling 구간에서 계산하였기 때문에 같다고 가정하여 두 식의 상관관계로부터 식(3)과 같이 무차원 광소멸계수를 역산하였다.

$$K_e = -\frac{Vt\rho\lambda\ln\left(\frac{I}{I_0}\right)}{Lm} \quad (3)$$

\* 조선대학교 기계시스템미래자동차공학과

\*\* 조선대학교 기계시스템미래자동차공학과

† 연락처자, isaac@chosun.ac.kr

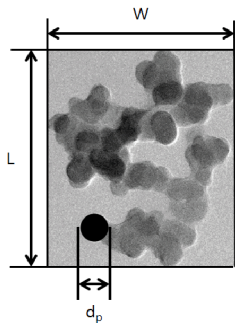
TEL : (062)230-7949 FAX : (062)-230-7171

미분탄의 광투과율과 채집된 질량, 식(3)에서 계산되어진 무차원 광소멸계수를 Table 1에 정리하였고, 미분탄의 무차원 광소멸계수의 평균값은 9.34였다.

**Table 1** Measurement and calculation results of light transmittance, mass and light extinction coefficient of pulverized coal

$-\ln(I/I_0)$	Mass [g]	$K_e$
0.6888	0.00116	8.17
0.625	0.00102	8.77
0.484	0.00091	8.81
0.6586	0.0017	9.30
0.9583	0.00228	9.12
0.8395	0.00191	9.91
0.615	0.00122	10.86
0.75	0.00199	10.68
0.634	0.00098	9.06
1.025	0.00214	10.30
		9.34±0.8

미세먼지의 대표적인 광학 특성인 광소멸율은 입자의 형상과 크기 등에 의해 영향을 받을 수 있기 때문에 물리적 광학 특성을 분석하기 위해서 TEM 이미지 분석을 하였고, 화학적 광학 특성을 분석하기 위해서 EC/OC 분석을 수행하였다. TEM 이미지 분석을 위해 Matrox Inspector를 이용하여 Fig. 2와 같이 이미지 처리를 실시하였다. 여기서  $d_p$ 는 1차 입자의 직경을,  $L$ 은 응집체의 최대 길이를 나타낸다. 이미지 처리를 통해 Table 2의 물리적 파라미터를 얻었다. 2D 투영에서 3D 프랙털 특성을 계산하는 절차는 참고문헌 [1]에 자세히 설명되어 있다.



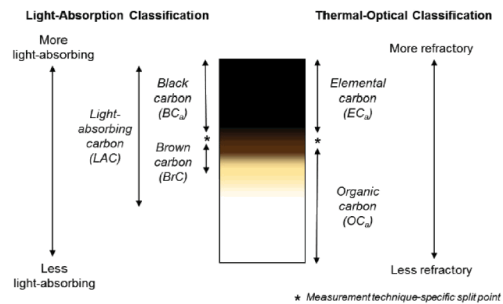
**Fig. 2** Parameters of PM for TEM analysis

**Table 2** Shape Information of Particulate Matter

$d_p$ [nm]	95.9
$A_a$ [nm]	209474.5
$d_{eff}$ [nm]	448.3
$LW$ [nm <sup>2</sup> ]	464999.2
$D_f$	1.9
$k_L$	7.3
$k_f$	14.5
$x_p(\pi d_p/\lambda)$	0.46
$x_{p,e}(\pi d_{eff}/\lambda)$	2.2
$R_g$ [nm]	1039.4

여기서  $x_p$ 는  $d_p$ 와 파장 사이의 관계( $\pi d_p/\lambda$ )를 정의한 광학 직경이며,  $d_{eff}$ 는 입자의 투영면적을 원의 넓이라고 하였을 때 원의 직경을 나타낸 것이고,  $k_f$ 와  $D_f$ 는 각각 프랙털 프리팩터, 프랙털 차원을 의미한다.  $R_g$ 는 응집체의 회전 반경으로 TEM 이미지에서 직접 측정할 수 없으며,  $R_g$ 와  $x_{p,e}$ 값이 크고  $D_f$  값이 작은 미분탄은 광산란 특성이 강할 것으로 판단된다.

물리적 광학특성을 뒷받침하기 위해 화학적 특성 분석을 위해서 EC/OC 분석을 실시하였다. 연소과정에서 발생하는 미세먼지 입자는 주로 탄소 성분으로 이루어져 있고, 탄소성분은 Figure. 3과 같이 원소탄소(Elemental Carbon)과 유기탄소(Organic Carbon)로 구분될 수 있다. EC는 검은 탄소(Black Carbon) 또는 흑연화 탄소라고 불리고 불순한 흑연과 비슷한 화학적 구조로 되어있다. EC가 광흡수성이 강하다는 특성과 탄소성분의 휘발온도 차이를 이용하여 EC와 OC의 함량을 분석하였다.



**Fig. 3** Comparison of Elemental Carbon and Organic Carbon

EC/OC 함량 측정을 위해 NIOSH5040 분석법을 기초로 한 실시간 탄소측정기(Thermal Optical EC/OC Analyser, Sunset Laboratory Inc, USA)를 이용해 열광학 조건을 다르게 하여 EC/OC 함량을 측정하였다.

Table 4 EC/OC Content of Pulverized Coal

EC/TC [%]	0.07
OC/TC [%]	92.93

Table 4는 총탄소(TC=EC+OC)에 함유된 EC와 OC의 함량을 나타낸 것이다. 미분탄은 OC 함유량이 높기 때문에 광산란 특성이 강할 것으로 예측되며, TEM분석 결과와 일치함을 알 수 있다.

## 후 기

본 연구는 한국전력공사의 2018년 착수 사외공모 기초연구(개별)에 의해 지원 (과제번호 : R18XA06-64)되었으며, 2017년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초 연구 사업입니다. (no.2017R1A2B4006194)

## 참고 문헌

- [1] . . K yl , G.M. Faeth, T.L. Farias, M.G. Carvalho, "Fractal and Projected Structure Properties of Soot Aggregates." *Combustion and Flame* 100.4 (1995): 621-633

# 초임계 순환 유동층 보일러 시스템의 주 증기 온도 동적 모사 및 제어

김성일\*, 최상민\*\*†

## Dynamic simulation and control of the main steam temperature of a USC-CFB boiler system

Seongil Kim\*, Sangmin Choi\*\*†

전력 생산용 플랜트 시스템에서 높은 연소 효율 및 플랜트 효율, 배출물질의 저감, 낮은 등급의 석탄을 연소 할 수 있는 장점이 있는 초임계 압 순환 유동층 보일러 시스템의 적용이 점차 확대 되고 있다. 초임계 순환 유동층 보일러 시스템은 연소실 내 고체가 순환하여 연소실 온도가 800~900°C로 유지되는 순환 유동층 연소 시스템이 적용된다. 또한, 증기 발생기로써, 드럼 순환 부처럼 물-증기가 순환하지 않고 관 벽을 따라 흐르면서 증기를 생산하는 관류 증기 발생기 시스템이 적용된다. 이 시스템에서 증기의 운전 압력은 초임계압으로써, 상 (phase) 변화가 없는 초임계 증기로 운전된다.

오늘날, 재생 에너지와 같은 전력생산 환경 변화로 인해 보일러 시스템은 빠르고 빈번한 부하 변동을 요구 받는다 [1]. 초임계 순환 유동층 보일러 시스템은 연소실 내 고체의 높은 열 용량으로 인해 연소실 온도의 응답속도가 미분탄 보일러보다 느리다. 한편, 관류 증기 발생기의 증기 온도는 열용량이 작기 때문에 드럼 보일러 시스템보다 빠른 응답속도를 보인다. 특히, 공급수 공급 조건이 바로 주 증기 상태에 영향을 주기 때문에 공급수 유량 및 주 증기 온도 제어의 어려움이 있다 [2]. 이러한 시스템의 동적 응답 특징에 따라, 초임계 순환 유동층 보일러 시스템의 주 증기 온도는 부하 변동 조건에 따라 설계값에서 벗어나는 오버슈트 (overshoot) 또는 언더슈트 (undershoot) 의 동적 거동을 보이게 된다. 따라서, 안정적이고 효율적인 보일러의 운전을 위해서는 보일러 시스템의 주 성능 변수인 주 증기 온도가 적절한 설계 범위에서 제어 되어야 한다.

일반적으로, 보일러 시스템에서 요구되는 부하 변동을 달성하기 위해 보일러로 투입되는 수연비 (공급수/연료 투입량 비율)가 변동된다. 공급수는 부하 별 필요한 증기 생산량에 의해서 공급되며,

연료 투입량은 공급수에서부터 주 증기 온도를 달성하기 위한 필요 열 부하를 만족하는 유량이 투입된다. 공기 주입량은 연소가스 후단의 산소 농도를 일정하게 유지하도록 제어 된다. 이러한 운전조건들이 변동 될 시, 주 증기의 온도는 과열저감기로 설계 범위 내에서 제어된다. 또한, 순환 유동층 순환부(CFB loop)를 순환하는 고체의 거동이 증기 시스템에 밀접한 영향을 준다. 특히, 외부 열교환기가 있는 시스템에서, 외부 열교환기로 유입되는 고체 유량 변동에 따라 연소실 및 증기 온도가 조절 될 수 있다 [3]. 이러한 주 증기 온도에 대한 제어 시스템의 개략도를 그림 1에 나타냈다. 따라서, 안정적인 운전과 과열저감기 제어부 설계의 최적화를 위해서, 주 증기 온도의 동적 거동에 대한 수연비와 순환고체의 영향이 평가 되어야 한다.

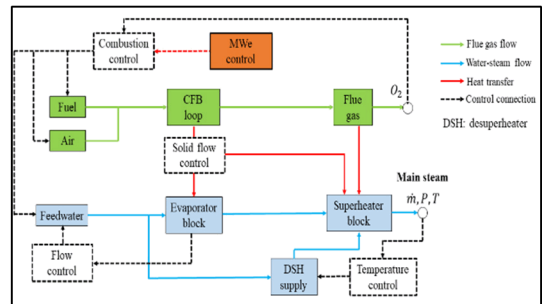


Fig. 1 Schematic diagram of a control system of the main steam temperature, fuel/air flow ratio, and feedwater flow rate

본 연구에서는, 초임계 순환 유동층 보일러 시스템의 동적 거동을 모사하기 위해, 물리적 현상 기반의 동적 모델을 제시 하였다. 전체 보일러 시스템을 유한 개수의 열교환기의 집합체로 표현한 계산 모형을 바탕으로, 유동층 베드와 초임계 유체의 복잡한 물리적 현상을 표현하기 위해 가스-고체 측과 증기 측 유동은 이산화 하였다. 특히, 순환 유동층 순환부의 연소실은 고체의 상승 및 하강 흐름을 표현하기 위해 1.5 차원 모델이 (core-annulus model) 이 적용 되었고, 고체 순환부는 계산의 효율성을 위해 단순혼합모델이 적

\* 한국생산기술연구원

\*\* 한국과학기술원 기계공학과

† 연락처, [smchoi@kaist.ac.kr](mailto:smchoi@kaist.ac.kr)

TEL : (042)350-3030 FAX : (042)-350-3210

용 되었다 [4]. 각 물질 층의 질량 및 에너지 보존 방정식들이 적용 되었으며, 순환 유동층의 고체 수력학적 특성, 연소 반응, 열전달 메커니즘의 물리적 현상들이 모델링 되어 있다. 또한, 초임계 증기의 거동을 표현하기 위해 초임계 압력에서 적용 가능한 관 내부 열전달 상관식을 적용 하였고, 초임계 증기의 상태량은 IAPWS-IF 97의 상관식들을 적용 하였다 [5]. 대상 보일러 시스템은 550MWe 초임계압 순환 유동층 보일러 시스템으로 선정하였고, 그림 2에 모델 개략도를 나타냈다.

본 연구에서는 개발된 물리적 모델을 이용하여, 다양한 수연비와 외부열교환기로 유입되는 고체 유량에 따른 주 증기 온도 거동과 모사한다. 또한, 과열 저감기의 제어 시스템이 적용된 폐루프(Closed loop)의 동적 모사 결과를 제시한다.

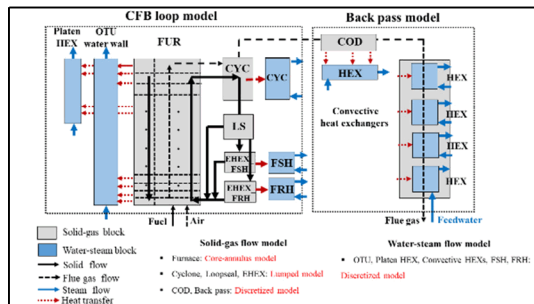


Fig. 2 Model outline for representing the arrangement of the discretized heat exchanger blocks in the USC-CFB boiler (the connection between solid-gas flow and steam flow)

## 참고 문헌

- [1] M. Hultgren, E. Ikonen, and J. Koács, "Integrated Control and Process Design for Improved Load Changes in Fluidized Bed Boiler Steam Path". Chemical Engineering Science, Vol. 199, 2019, pp. 164-178.
- [2] M. Gao et. al., "Investigation on the energy conversion and load control of supercritical circulating fluidized bed boiler unit", Journal of Process Control, Vol 68, 2018, pp. 14-22.
- [3] R. Cai et. al., Operation characteristics of external heat exchangers in the 600 MW supercritical CFB boiler, Fuel Processing Technology, Vol. 172, 2018, pp. 65-71.
- [4] S. Kim, S. Choi, J. Lappalainen, and Tae-Ho Song, "Dynamic simulation of the circulating fluidized bed loop performance

under the various operating conditions", Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part A: Journal of Power and Energy, Vol. 233, 2019, pp. 901-913.

- [5] S. Kim and S. Choi, "Dynamic simulation of the water-steam flow in a supercritical once-through boiler", Journal of Mechanical Science and Technology, Vol. 31, 2017, pp. 4965-4975.

## 저선회 선회기에서 난류생성판 직경변화에 따른 실험적 연구

한민석\*, 손찬호\*\*, 이기만\*\*†

## Experimental Study on the Turbulence Generator Diameter Variation in Low-Swirl Combustor

Minseok Han\*, Chanho son\*\*, Keeman Lee\*\*†

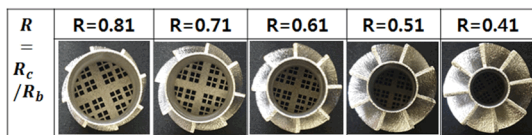
## ABSTRACT

In this study, the turbulence generator was experimentally studied in a low swirl combustor by varying the area to the swirler. The turbulence generator occupied five areas of swirler area and experimentally studied. The hot wire anemometer and the direct flame image were investigated by the contact measuring instrument. We want to see how the shape of the flow field appears.

**Key Words** : Low swirl combustion, turbulence generator

최근 저선회 연소에 대한 관심이 국내에서 높아지고 있으며, 다양한 방면으로 실험적[1], 수치적[2] 연구가 진행 되어지고 있다. 본 연구는 저선회 선회기의 형상에서 난류생성판과 선회기의 반지름의 비인 R을 변수로 하여 0.41, 0.51, 0.61, 0.71, 0.81 인 총 5가지 경우에서 어떤 화염의 형상이 나타나며, 비반응장의 형태를 조사하여 화염의 기저부분의 위치와 형태에 대해 설명하고자 한다. 다음은 본 연구에서 조사한 저선회 선회기의 형상을 Table 1 에 나타내었다.

Table 1 Swirler direct images



본 이미지는 난류생성판의 반경과 선회기의 반경의 비인 R에 따른 형상을 나타내었으며, 난류생성판은 막힘률 0.7 RRBT=0.4로 고정하여 수행하였다. 난류생성판은 총 3번의 너비의 변화를 가지고 있으며, 가장 넓은 너비를 가진  $t_0$ 를 기준으로  $t_1$ 은  $t_0$ 에 비해 0.4의 비율로 감소한다. 또한 선회기의 각도는 37°로 고정하여 연구를 수행하였다. 실험 조건은 비반응장 6m/s로 고정하

였으며, 2ch 프로브를 장착한 접촉식 포인트 측정방식을 가진 hot wire anemometer를 사용하여 난류생성판에서 일정거리 떨어진 위치에서 축방향으로 측정을 진행하였다. 또한 직접화염은 DSLR카메라를 이용하여 당량비 0.77 화염의 형상을 취득 하였다.

## 후 기

본 연구는 산업통상자원부(MOTIE)와 한국에너지기술연구원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구과제입니다. (No. 20181110100290)

## 참고 문헌

- [1] H. Jeong, K. Lee, "Effect of Swirl Angle and Combustion Characteristics of Low Swirl Model Combustor", The Korea Soc. Of Prop. Eng., Vol. 20, 2016, pp. 40-49.
- [2] H. Jeong, B. J. Lee, K. Lee, "A Study on the Flame Liftoff Height in a Lean-Premixed Low Swirl Combustor ", J. Korean Soc. Combust., Vol.23(3), 2018, pp. 36-42.

\* 순천대학교 우주항공공학과

\*\* 순천대학교 기계우주항공공학전공

† 연락처, [kmlee@scnu.ac.kr](mailto:kmlee@scnu.ac.kr)

TEL : (054)279-2841 FAX : (054)-279-3199

# 기체 에틸렌/산소 Tri-arc 회전 데토네이션 엔진 작동 특성 실험

이은성\*, 한형석\*, 최정열\*†

## Experiment on Operating Characteristics of Gaseous Ethylene/Oxygen Tri-arc Rotating Detonation Engine

Eun Sung Lee\*, Hyung-Seok Han\*, Jeong Yeol Choi\*†

회전 데토네이션 엔진 (Rotating Detonation Engine)은 일정한 폭의 채널을 가지며, 원주 방향으로 선회하는 데토네이션 파 후방에 형성되는 고온, 고압 가스에 의해 추력을 얻게 된다. 데토네이션의 특성으로 연소가 일어나는 채널이 특정 곡률 이상이면 데토네이션 파는 단면의 모양과 관계없이 발생하여 회전한다. 이러한 특성은 기존의 가스터빈 엔진과 달리 엔진의 단면이 원형이 아니어도 추력을 발생시킬 수 있다는 것을 의미한다. 이번 연구는 이와 같은 특성을 이용한 tri-arc 형태의 단면을 가지는 RDE의 작동 특성 실험 및 동압 센서와 고속 카메라 촬영을 통한 데토네이션 전파 특성 실험적으로 알아보았다.

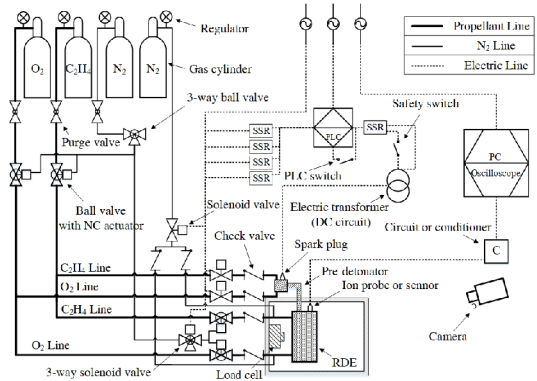


Fig. 2. Schematic of tri-arc RDE system.

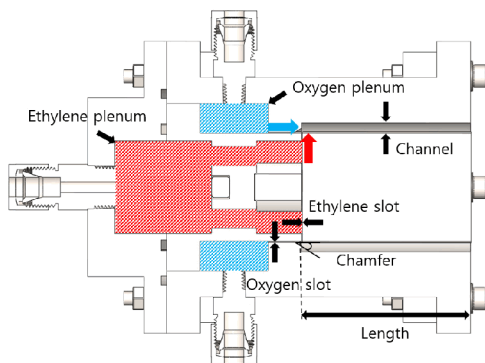


Fig. 1. Cross section of tri-arc RDE.

Fig. 1.에 tri-arc RDE의 내부 단면 구성을 나타내었다. Tri-arc RDE의 점화기로 약 150 mm 길이의 펄스 데토네이션 엔진(Pulse Detonation Engine)을 사용하였다[1]. Tri-arc RDE의 연소실 길이는 75 mm, 채널 폭은 4.5 mm, 슬롯 인젝터의 너비는 산소 및 에틸렌 각각 0.4 mm, 0.34 mm이다. 이전 annular RDE에서 발생한 삭마 현상에 대한 해결책으로 연소실에 PDE 및 센서가 연결되는 부분들의 직경을 1 mm로 감소시켰다.

이번 연구에서 사용한 tri-arc RDE의 실험 장치 개략도를 Fig. 2.에 나타내었다. 실험 장치는 기존 annular RDE 실험에서 구성하였던 것을 이용하였다[2].

Tri-arc RDE의 실험 장치에 대한 의존도를 알아보기 위한 실험을 진행하였다. 실험 시작 후, 공압 밸브가 열린 후 플레넘에서 압력 상승이 일어나기까지 걸리는 시간은 약 0.13초 이내이며, 종료 후, 공압 밸브가 닫힌 후 플레넘에서 압력 하강이 일어나는 시간은 약 0.31초 이내이다.

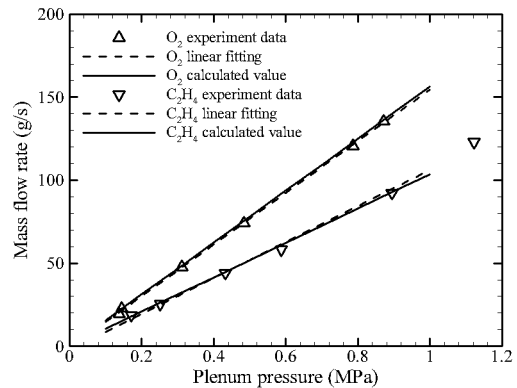


Fig. 3. Relationship between plenum pressure and mass flow rate.

\* 부산대학교 항공우주공학과  
† 연락처, aechoi@pusan.ac.kr  
TEL : (051)510-2373

Fig. 3은 tri-arc RDE의 각 플래넘에서의 압력과 질량 유량 간의 관계를 나타낸다. 산소의 경우 이론값과 1.1 ~ 1.7 g/s (6.8 ~ 1.1%), 에틸렌의 경우 0.1 ~ 1.9 g/s (0.2 ~ 18%)의 차이를 보였다.

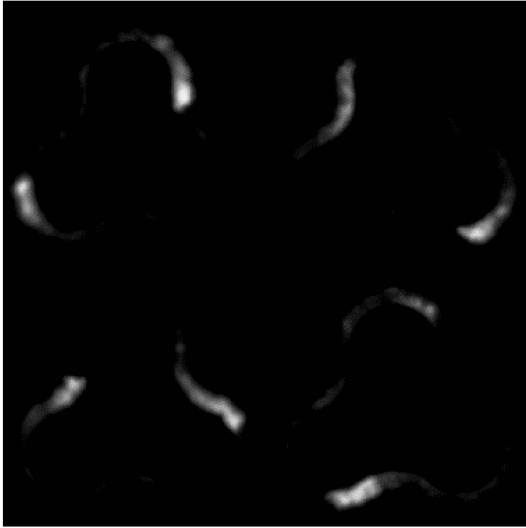


Fig. 4. Snapshots of tri-arc RDE combustion test.

Fig. 4은 Phantom v2512 mono type으로 tri-arc RDE 후방 촬영 결과의 스냅샷이다. 촬영 조건은 384x384 resolution, 80,000 fps이며, 스냅샷을  $25\mu\text{s}$  간격, 시계 방향으로 나열하였다. 실험 조건은 공급 질량 유량 80.7 g/s, 당량비 1.003이다. 촬영한 결과를 통해 2개의 데토네이션 파가 시계 방향으로 회전하고 있음을 확인할 수 있으며, 한 개의 파가 채널을 한 바퀴 회전하는데 약 10장이 촬영되었다.

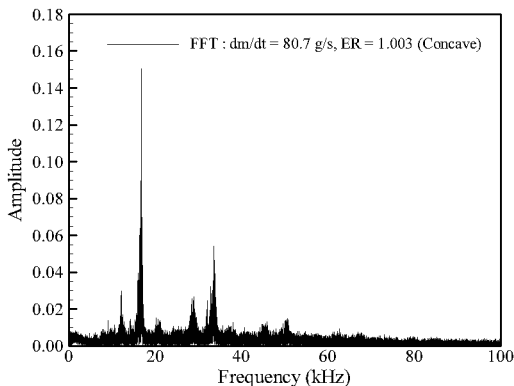


Fig. 5. Concave side FFT result.

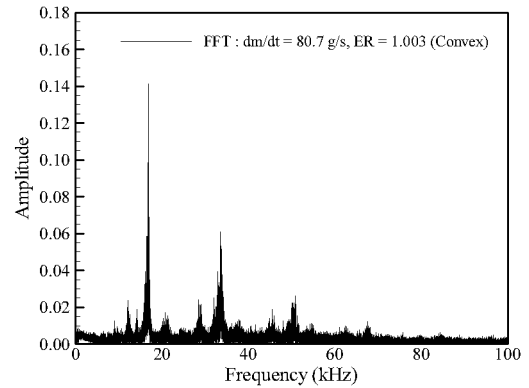


Fig. 6. Convex side FFT result.

Fig. 5. 및 fig. 6은 각각 연소실의 2시 방향의 오목한 부분, 연소실 4시 방향의 볼록한 부분에 설치된 동압 센서로 측정된 압력 데이터의 FFT 결과이다. 약 16,000 ~ 17,000 Hz로 회전하는 데토네이션 파가 있음을 확인할 수 있다. 고속카메라의 초당 프레임 수와 tri-arc RDE의 채널 둘레 길이를 고려하였을 때, 하나의 데토네이션 파는 약 8,000 Hz로 회전하고 있으며, 이는 동압 센서의 결과와 비슷한 결과이다. 이미지 분석을 통한 곡률에 따른 데토네이션 파의 세기 및 데토네이션 파의 각도 등을 알아보기 위하여 초당 프레임 수를 더 올려 촬영을 진행할 예정이다.



Fig. 7. Tri-arc RDE combustion test.

## 후 기

본 논문은 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단 중견연구자지원사업 (NRF-2019R1A2C1004505) 및 한국연구재단 우주핵심기술개발사업 (NRF-2018M1A3A3A02065563)의 지원으로 작성되었습니다.

## 참고 문헌

[1] Han, H.-S., Kim, J.-M., Oh, S.J. and Choi, J.-Y., "Small-scale Detonation Initiator for Igni



tion of Rotating Detonation Engine (RDE)," KSAS 2017 Spring Conference, 2017, pp.637-638.

[2] Han, H.-S., Kim, J.-M., Oh, S.J. and Choi, J.-Y., "An Experiment Study on Operating Characteristics of Ethylene.Oxygen RDE," KSPE 2018 Spring Conference, 2018, pp.875-877.

[2] Kim, T.-Y, Choi J.-Y., "Numerical Study of Detonation Wave Propagation in 2-D Channels of Arbitrary Radius of Curvature, " AIAA 2014-3903, 50th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference, July 28-30, 2014, Cleveland, OH

## 비대칭 화염 응답이 캔-캔 음향 상호작용에 미치는 영향

제갈현욱\*, 문기훈\*, 구자현\*, 김규태\*†

## Influence of Asymmetric Flame Transfer Functions on Can-to-Can Acoustic Interactions Between Two Lean-Premixed Combustors

Hyunwook Jegal\*, Kihun Moon\*, Jaheon Gu\*, Kyu Tae Kim\*†

## 가시화 내용

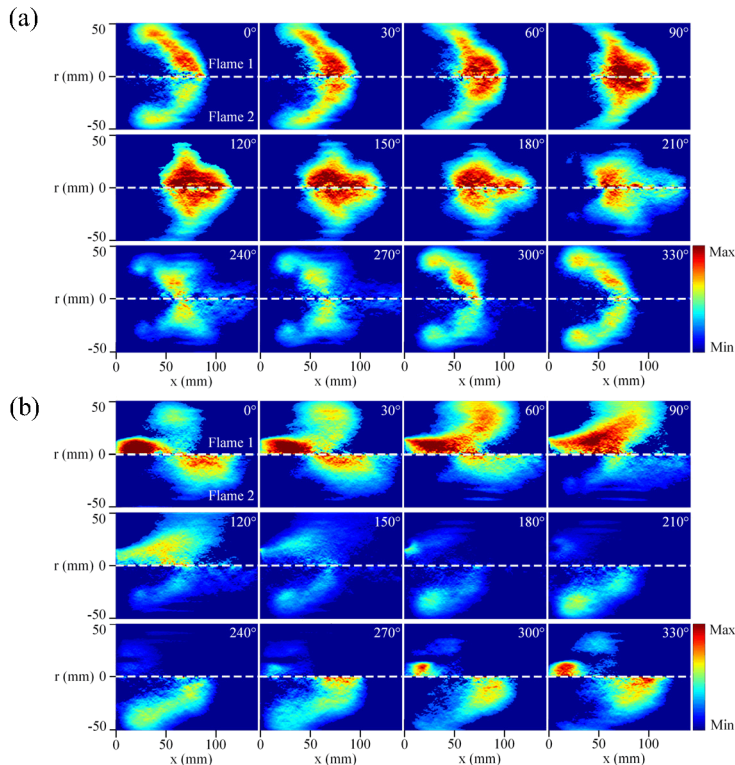


Fig. 1 Phase-resolved, Abel-deconvoluted  $\text{CH}^*$  chemiluminescence images for (a) symmetric LS03 + LS03 and (b) asymmetric HS + LS03 combinations. The upper half of each image shows Flame 1, and the lower half shows Flame 2, for a given phase angle. The flow direction is from left to right. The left edge of each image is the combustor dump plane.

\* 한국과학기술원 항공우주공학과

† 연락처자, [kt\\_kim@kaist.ac.kr](mailto:kt_kim@kaist.ac.kr)

TEL : (042)350-5769 FAX : (042)350-3710

캔-환형 연소 시스템에서 발생하는 저주파 불안정은 크로스톡(cross-talk) 영역으로 인해 발생하는 인접 연소기간 음향 상호작용과 밀접한 연

관이 있다. 이러한 상호작용 모드에는 두 연소기가 서로 정위상(in-phase)으로 진동하는 푸쉬-푸쉬 모드와 역위상(out-of-phase)으로 진동하는 푸쉬-풀 모드가 있다[1,2]. Fig. 1은 불안정이 발생할 때 진동하는 두 연소기 화염의 자발광을 위상에 따라 나타낸 것이다. 각 이미지에서 상부에는 1번 연소기의 화염을, 그리고 하부에는 2번 연소기의 화염을 나타내었으며, 유동은 왼쪽에서 오른쪽으로 흐르고 있다. 서로 다른 스윙 노즐을 조합해서 사용하여 두 연소기 화염 응답의 대칭/비대칭이 불안정 모드에 미치는 영향을 볼 수 있다. Fig. 1a는 화염 응답이 동일한 두 연소기가 서로 정위상으로 진동할 때 화염 역시 같은 위상으로 진동하는 것을 나타낸다. Fig. 1b는 화염 응답이 비대칭일 때 두 연소기의 화염이 서로 반대 위상으로 진동하는 것을 보여준다.

#### 후 기

본 연구는 산업통상자원부(MOTIE)와 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다. (No. 20181110100290)

#### 참고 문헌

- [1] K. Moon, H. Jegal, J. Gu, K.T. Kim, "Combustion-Acoustic Interactions Through Cross-talk Area Between Adjacent Model Gas Turbine Combustors", *Combust. Flame*, Vol. 202, 2019, pp. 405-416.
- [2] H. Jegal, K. Moon, J. Gu, L.K.B. Li, K.T. Kim, "Mutual Synchronization of Two Lean-Premixed Gas Turbine Combustors: Phase Locking and Amplitude Death", *Combust. Flame*, Vol. 206, 2019, pp. 424-437.

# 합성천연가스 화염의 연소기 형상 변화에 따른 연소불안정 해석

윤규성\*, 송원준\*\*, 차동진\*†

## Combustion Instability Analysis of Synthetic Natural Gas Flame with Different Combustor Geometries

Gyu Seong Youn\*, Won Joon Song\*\*, Dong Jin Cha\*†

### ABSTRACT

Combustion instability of synthetic natural gas flame in a partially-premixed combustor has been numerically investigated by varying the length of the combustor. During predictions with utilization of a lumped network code, the effect of the combustor length on its combustion instability characteristics including the dominant frequency & the growth rate were investigated. It turned out that the predicted results for a fuel composition case quite agree well with the corresponding experimental ones. Additional prediction work with the different fuel compositions were then conducted.

**Key Words** : Synthetic natural gas (SNG), Combustion instability, Combustor length, 1D lumped network model, Frequency analysis

최근 연료다변화의 일환으로 합성천연가스(SNG)도 복합화력 가스터빈의 연료로 사용되고 있다. 이 가스는 H<sub>2</sub> 및 CO가 주성분으로 포함되고 생산과정에서 연료조성의 변동 가능성이 높아, 천연가스 연료의 회박 예혼합 방식의 연소불안정 메카니즘 이외에 연소불안정을 촉발시킬 수 있는 또 다른 요인으로 작용한다. 따라서 SNG 가스터빈(예를 들면 GE사 7FB 등)들은, 회박 예혼합 방식이 아닌, 보다 안전한 부분 예혼합 방식을 채택하는 것으로 알려져 있다.

가스터빈의 연소불안정에 관한 많은 선행연구가 있어 왔다. 특히 천연가스 연료의 회박 예혼합 방식은 NO<sub>x</sub> 저감의 관점에서 광범위하게 연구되어 왔다. 최근에는 SNG를 연료로 사용하는 부분 예혼합 방식을 대상으로 한 연구도 활발하게 수행되었다.<sup>(1)</sup> 최근 본 연구 그룹은 석탄가스를 연료로 사용한 부분 예혼합 모델 가스터빈 연소기에서 측정된 화염전달함수(FTF) 데이터와<sup>(1)</sup> 추가 계산된 음향반사계수를 활용하여 해당 부분 예혼합 모델 연소기의 연소불안정을 예측한 바 있다.<sup>(2)</sup>

본 연구에서는 선행 연구에<sup>(2)</sup> 이어서 부분 예혼합 연소기의 형상(특히 연소기 길이)이 화염의 연소불안정에 미치는 영향에 대해 보고한다.

FTF 데이터 등의 실험 데이터<sup>(1)</sup> 차용하여, SNG(H<sub>2</sub> 25% + CH<sub>4</sub> 75%)를 연료로 사용한 부분 예혼합 모델 가스터빈 연소기에서 연소기의 길이를 1,110 mm부터 1,510 mm까지 50 mm 간격으로 변화시키며 해당 SNG 부분 예혼합 화염의 연소불안정을 예측하였다. 실험 결과에 기반한 음향경계조건을 사용하는 등으로 기 보고된 예측 결과와 비교하여 다소 개선된 연소불안정 주파수 값을 예측하였다. 여타 SNG 연료 조성에 대해서도 연소불안정에 대한 연소기 형상(길이) 효과를 조사하였다.

### 후 기

본 연구는 2019학년도 한밭대학교 교내학술연구비의 지원을 받았습니다. 실험 데이터를 제공해주신 서울대학교 운영빈 교수님께 감사드립니다.

### 참고 문헌

- [1] J. Yoon, S. Joo, J. Kim, M.C. Lee, Y. Yoon, Effects of Convection Time on the High Harmonic Combustion Instability in a Partially Premixed Combustor, Proc. Combust. Instit., 36(3) (2017) 3753-3761.
- [2] W.J. Song, D.J. Cha, B.G. In, Combustion Instability Characteristics on Fuel Composition of a Partially-Premixed Flame, J. Korean Soc. Combust., 23(4) (2018) 15-22.

\* 한밭대학교 설비공학과

\*\* 동신대학교 에너지기계설비전공

† 연락처, [djcha@hanbat.ac.kr](mailto:djcha@hanbat.ac.kr)

TEL : (042) 821-1182 FAX : (042) 821-1175

# ISO 5658-2 화염전파시험 장치를 이용한 Douglas-fir 화염전파실험의 FDS 전산모사

홍터기\*, 이종원\*\*, 박설현\*\*\*†

## FDS Simulation of Douglas-fir Flame Spread Experiment Performed Using ISO 5658-2 Equipment

Ter-Ki Hong\*, Jong Won Lee\*\*, Seul-Hyun Park\*\*\*†

최근 UNFCCC (United Nations Framework Convention on Climate Change)에서 탄소 저장 능력을 인정받으면서 친환경 소재로 각광 받고 있는 목재는 재생 가능한 천연 자원으로서 다시금 친환경 소재로 각광받으면서 많은 목재 건축물과 목재 조형물들이 건축 될 것으로 전망<sup>[1]</sup> 됨에 따라 목재 화재 안전에 대한 우려 또한 클 것으로 사료된다. 목재의 연소는 오랫동안 화재 연구에서 중요한 부분으로 인식되어왔으며 목재의 연소 시 고체 중합체로부터 가연성 증기의 생성 과정에 대한 이해는 화재 성장 모델을 파악하는 중요한 요소이다. 목재 가연물에 열이 가해지게 되면 고체 중합체를 통하여 가연성 증기 및 Char로 열분해 되며 가해진 열에 의해 고체 중합체가 반응하여 내부 목재 가연물의 온도가 상승함으로써 목재 가연물 내부로의 열분해를 촉진 시킨다. 발생한 가연성 증기는 공기와 적절하게 혼합되어 일정 온도 조건을 충족하게 되면 연소할 수 있다. 열분해 반응으로부터 연소 반응이 시작되면 화염이 발생하여 가연물의 열을 재공급함으로써 가연성 증기의 발생을 촉진 시킨다. 하지만 목재 가연물의 경우, Char의 생성으로 인해 Char 단열층을 생성함으로써 내부로의 열전달 및 중합체와 외기 사이의 Char 단열층에 의한 가연성 증기의 생성을 방해한다. 즉, 목재 가연물의 연소 시에 발생 되는 Char의 영향은 목재 가연물의 연소 특성 및 화염 전파를 결정짓는 중요한 인자이다. 따라서 목재 가연물의 열분해 과정에 관여되어 있는 Char의 영향은 각종 열물성치의 상호작용을 통해 변화하는 열분해 특성에 대한 이해가 화재의 성장을 해석하고 분석하는데 있어 반드시 선행되어야한다. Char가 생성되는 연료는 열적 두께에 따라 Char가 생성되지 않는

연료와 연소 특성이 상반되는 결과를 초래한다. 이는 Char 단열층이 가연성 증기의 생성을 방해<sup>[2]</sup>하는 것으로 알려져 있다.

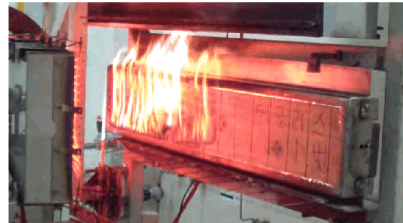


Fig. 1 Douglas-fir sample of ISO 5658-2 flame spread experiment

따라서 본 연구에서는 목재 가연물의 연소 시 발생하는 Char 단열층의 비율이 화염 전파에 어떤 영향을 주는지 체계적으로 이해하고 열적 두께에 따라 열 특성의 영향을 고찰해보고자 한다. 본 연구에서 사용된 가연물로는 건축자재, 가구재, 계단 등의 사용되는 대표적인 목재이며 Char가 생성되는 연료인 Douglas-fir를 선정하였고 열적 두께 (Thermally Thin and Thick)에 따라 열 특성을 비교해보고자 Fig. 1에서 보는 바와 같이 ISO 5658-2 화염전파시험을 수행하고 이에 따른 화염전파시험 결과를 NIST (National Institute of Standards and Technology)에서 개발하여 무상으로 배포하고 있는 화재 시뮬레이션 코드인 FDS (Fire Dynamics Simulator)를 사용하여 열적 두께(Thermally Thin and Thick)에 따라 Fig. 2에서 보는 바와 같이 화염 전파를 모사하여 비교하였다.

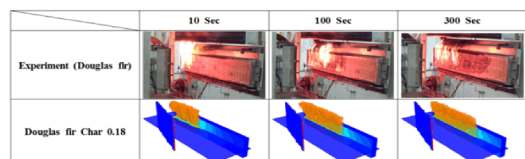


Fig. 2 Comparison of ISO 5658-2 flame spread

\* 조선대학교 대학원 기계시스템·미래자동차공학파  
\*\* 한국항공우주연구원 항공우주응용재료팀  
\*\*\* 조선대학교 기계시스템·미래자동차공학부  
† 연락처, [isaac@chosun.ac.kr](mailto:isaac@chosun.ac.kr)

TEL : (062)230-7174 FAX : (062)-230-7171

experiment and FDS

또한 더 나아가 열적 두께 별 Char 비율에 따른 해석 결과를 비교·분석한 결과를 Fig.3에 도시하였다. 그림에서 볼 수 있는 바와 같이 Douglas-fir 10mm와 30mm는 ISO 5658-2 화염 전파시험결과의 화염 전파 속도 결과와 잘 일치함을 볼 수 있다. 또한 열적 두께가 얇은 Thermally Thin인 Douglas-fir 두께 10mm는 Char 비율에 따라 화염 전파 속도가 크게 영향을 받지 않음을 확인 할 수 있었다. 반면 열적 두께가 큰 Thermally Thick인 Douglas-fir 두께 30mm는의 경우에는 Char 비율에 따라 화염전파 시험결과와 큰 차이를 보이는 것을 알 수 있다. 이는 Char의 비율이 내부로 전도되는 열을 방해하는 것으로 사료되며 Char에 따라 가연물의 화염전파에 큰 영향을 줄 것으로 예상된다. 즉, Thermally Thin의 경우에는 Char의 비율에 따라 시간에 따른 화염전파 거리의 영향을 거의 주지 않지만 Thermally Thick의 경우에는 Char의 비율이 시간에 따른 화염전파 거리의 영향을 주기 때문에 올바른 Char 비율을 입력되어야 한다.

와 2019년도 산업통상자원부의 재원으로 한국에너지기술평가원(KETEP)의 에너지인력양성사업(No. 20194030202410)으로 지원받아 수행한 인력양성 성과입니다.

## 참고 문헌

- [1] United Nations Framework Convention on Climate Change, "Measurements for Estimation of Carbon Stocks in Afforestation and Reforestation Project Activities under the Clean Development Mechanism", UNFCCC A Field Manual, 2015.
- [2] H. C. Kung, "Mathematical Model of Wood Pyrolysis", Combustion And Flame. 1972, pp. 185-195.

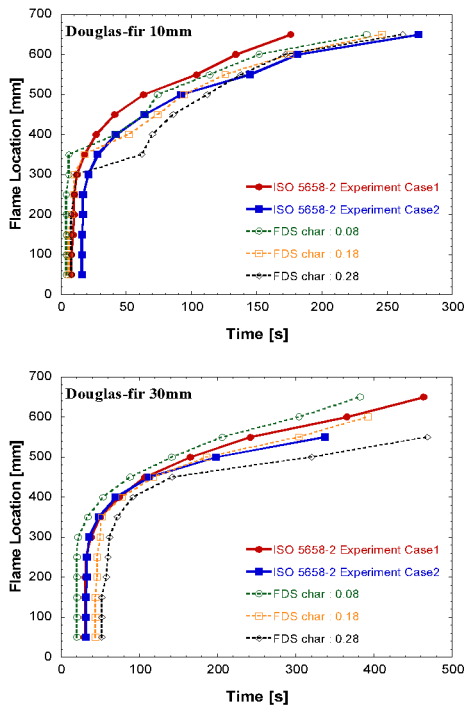


Fig. 3 Effects of char ratio on flame spread rate

## 후 기

본 연구는 소방청 현장중심형 소방활동지원 기술개발사업(MPSS-소방안전-2015-66)의 연구비

## 바이오가스용 모사 가스터빈의 점화특성에 대한 연구

장길모\*, 김시영\*, 이병준\*†, 홍성철\*\*, 이동엽\*\*, 이충재\*\*, 박무진\*\*, 이동원\*\*

### Ignition process for the biogas micro gas turbine combustor

Gil Mo Kang\*, Si Young Kim\*, Byeong Jun Lee\*†, Sungchul Hong\*\*, Dongyeop Lee\*\*, Choongjae Lee\*\*, Mujin Park\*\*, Dongwon Lee\*\*

가스터빈은 높은 효율, 낮은 자본비용, 짧은 설치기간, 우수한 배기특성 등의 장점 뿐만 아니라, 점점 강화되고 있는 배기가스 규제와 세일가스의 개발로 인한 LNG가격의 인하 등의 요인으로 인하여 그 수요가 점차 증가하고 있다.

가스터빈의 효율은 기술의 발전과 함께 향상되었다. 2018년 일본의 Chubu Electric Nishi-Nagoya 발전소는 GE' s 7HA gas turbine를 사용한 복합사이클로 63.08%의 효율을 달성하였다.

이러한 특성을 살림과 동시에 온실가스 저감을 위하여 재생에너지의 발전 비중이 높아질 것이 예측되므로 바이오 가스 가스터빈은 수요가 늘어날 전망이다.

본 연구는 바이오 가스를 사용한 가스터빈을 개발하기 위하여 축소 가스터빈 연소실에서의 점화특성을 살펴보고자 한다.

실험을 위하여 Fig 1에 나타낸 것과 같이 메탄용 가스터빈을 1/2로 축소한 연소실을 제작하였다. 편의를 위하여 확대칭으로 장착된 8개의 노즐 중에 하나의 연소기만을 대상으로 하였다. 2,200 SLM의 공기를 4기압, 640°C까지 가열하기 위하여 22kW의 스크류 컴프레서(동화뉴텍, Nex-22ABs)와 30kW의 히터(Sylvania heater, Sureheat MAX HT)를 사용하였다.

화염의 가시화를 위하여 연소기 한쪽 면에는 석영창을 장착하고, 다른 쪽면에는 온도 측정용 열전대를 장착하였다. 배기가스중의 O<sub>2</sub>, CO, NO, NO<sub>x</sub>의 성분 분석을 위하여 Eurotron사의 Greenline 9000을 사용하였다.

Fig. 2는 연소기 출구를 개방하고 점화시킨 경우에 화염 내부의 온도 및 압력 변화를 나타낸다. 점화가 안정적으로 되어 화염의 온도가 급격한 변화 없이 올라감을 볼 수 있다.

연소기 출구의 일부 막아서 초기 압력이 116

kPa인 경우에, 점화되는 과정 중의 화염 형상의 변화를 Fig 3에 나타내었다. 본 그림은 약 90초에 걸친 과정 중에 시간 경과에 따라 특징적인 화염을 나타낸 것이다. 초기에는 8Hz의 외부 스파크에 의해 화염이 형성되었다가 소멸되는 것을 반복하며 압력 진동이 있다. 점화와 소멸이 진행됨에 따라 연소실 온도가 상승하면 화염의 소멸이 국부적으로 이루어지고 압력진동도 감소하게 되어 그림2의 하단 두 번째 혹은 세번째 모양으로 변화하며 연소기 내부에서 연속적으로 유지됨을 볼 수 있다.

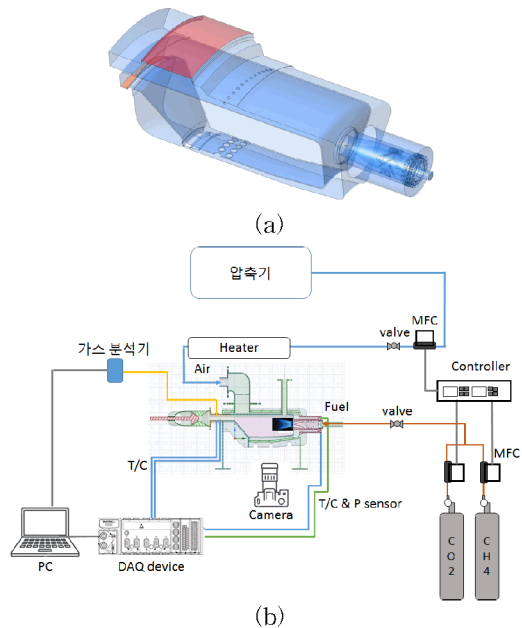


Fig. 1 Schematic diagrams of (a) combustor and (b) experimental setup.

\* 영남대학교 기계공학부

\*\* STX중공업 신사업센터

† 연락처자, bjlee@yu.ac.kr

TEL : (053)810-3526 FAX : (053)-810-4627

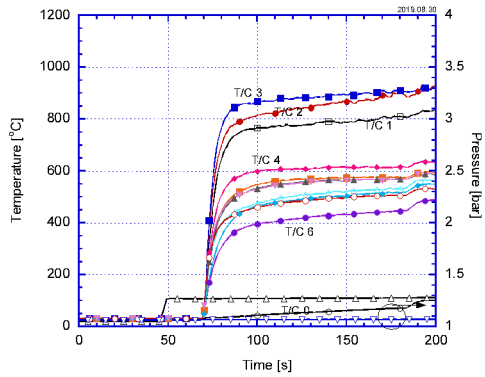


Fig. 2 Temperature and pressure changes within the combustor when combustor exit was fully open.

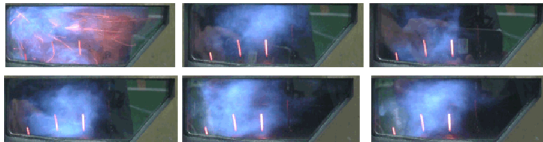


Fig. 3 Change of flame shape during ignition procedure when combustor exit was partially blocked.

## 후 기

본 연구는 중소벤처기업부 ‘2018년도 구매조건부 신제품 개발사업(국내수요처) 2차 지정공모 과제’로 수행되었습니다.



# 충류화염편모델을 이용한 GH<sub>2</sub>-LO<sub>x</sub> 단일인젝터연소기 실제기체 연소해석

황원섭\*, 한우주\*\*, 허강열\*\*, 구성열\*\*, 이복직\*\*\*, 최정열\*†

## Numerical Simulation of a GH<sub>2</sub>-LO<sub>x</sub> Single Injector Combustor using Steady Laminar Flamelet Model

Won-Sub Hwang\*, Woojoo Han\*\*, Kang Y. Huh\*\*, Seong-Yeol Goo\*\*\*, Bok Jik Lee\*\*\*  
Jeong-Yeol Choi\*†

### ABSTRACT

A numerical simulation for the single injector combustor called RCM-3 of ONERA is performed in this study. The numerical simulation is conducted based on the reacting flow solver, SLFMFoam\_LES, which combines the flow solver, rhoPimpleFoam of OpenFOAM, with the steady laminar flamelet model. Through the detailed investigation on the several scalar and species concentration fields obtained from the simulation, flow field characteristics and flame structure of RCM-3 are determined.

**Key Words** : Large-Eddy Simulation, RCM3 Combustor, RK-PR Equation of State, Steady Laminar Flamelet Model

본 연구의 해석모델은 프랑스국립항공우주연구원(ONERA)에서 보유한 실험용의 소형 수소-산소 단일인젝터 RCM-3이다. 이 연소기의 인젝터 및 챔버의 직경 그리고 연소기 길이 등 대한 자세한 치수는 기존문헌[1]에서 찾을 수 있다.

연료인 수소와 산화제인 산소는 모두 6 MPa의 압력으로 주입되며 각각 초임계상태, 압축성 액체상태로 인젝터 파이프를 공급이 된다. 당량비는 3.2이고 이 외 자세한 주입조건은 Table 1에 나와있다.

격자는 총 1천 백만개 수준으로 설계가 되었고 연소유동솔버는 SLFMFoam\_LES, 실제기체방정식은 RK-PR방정식[2], 연소모델은 정상상태 충류화염편모델, 난류모델은 Smagorinsky 그리고 반응기구는 Conaire의 기구[3]을 사용하였다.

시간차분법은 1차정확도의 Euler 음해법이고 공간차분법은 2차정확도의 limitedLinear 스킴을 사용하였다.

유동시간은 0.5 s으로 이는 유동이 출구를 4~5번 통과하는 시간이다. 해석에 사용된 계산자원은 Intel Xeon Gold 6154 CPU로 1,224개 즉 117.5 TFlops에 상당하는 자원이 사용되었다. 이를

CPU-hour로 변환하면 1,523 CPU-hour/ms이다.

Table 1 Propellant supply condition

	GH <sub>2</sub>	LO <sub>x</sub>
Pressure[MPa]	6	
Temperature[K]	275	83
Mass flow rate[g/s]	42	105
Density[kg/m <sup>3</sup> ]	5.25	1181.1

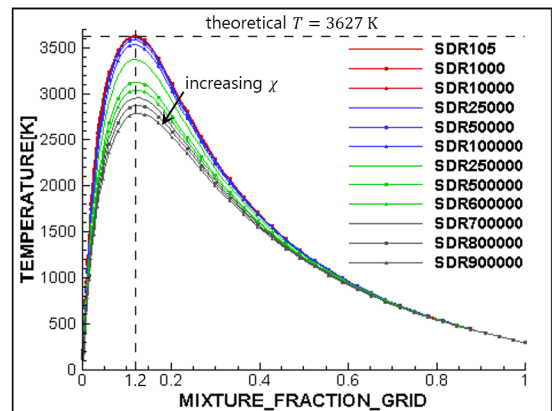


Fig. 1 A set of temperature verses mixture fraction curves according to SDR variation from 105 to 9,000,000.

\* 부산대학교 항공우주공학과  
\*\* 포항공과대학교 기계공학과  
\*\*\* 서울대학교 우주항공공학과  
† 연락처, [aerochoi@pusan.ac.kr](mailto:aerochoi@pusan.ac.kr)  
TEL : (051)-510-2373

Figure 2는 본 시뮬레이션해석으로 부터 나온 시간평균된 속도장, 온도장 그리고 속도벡터를 동시에 보여준다. 환형의 인젝터출구에서 분사된 수소제트는 분사되자마자 반경방향으로 휘어진다. 이 휘어짐은 유동장의 대략 1/3지점에서부터 시작되는 화염의 급격한 팽창때문이고, 이 팽창은 연소의 의한 열의 대부분이 화염의 온도보다는 부피팽창으로 기여되기 때문이다. 팽창이 발생하는 혼합분율값 구간은 0~0.004이고 이구간에서 정압비열값은 특이점을 가진다. 팽창이 완료된 화염은 대략 1/2지점에서부터 그 형태를 유지하면서 하류로 흐르는 것을 확인할 수 있다. 이러한 수소제트의 유동과 화염의 팽창이 고압의 수소-산소를 연료로 하는 실제기체 단일인젝터 연소기의 일반적인 연소유동특징이다.

Figure 3는 순간속도분포를 보여준다. 검정색의 고속의 수소제트와 회색의 저속의 산소제트간의 속도 및 밀도차이로 인해 두 유체간 경계면에 불안정이 명확하게 나타난다. 이 불안정은 두 유체간의 혼합을 증대시킨다. 강한 수소제트는 화염이 팽창하는 지점, 즉 재회전류의 재부착점에서 그 세기가 약해지면서 일부는 재회전류속으로 그리고 일부는 화염속으로 들어가게 된다.

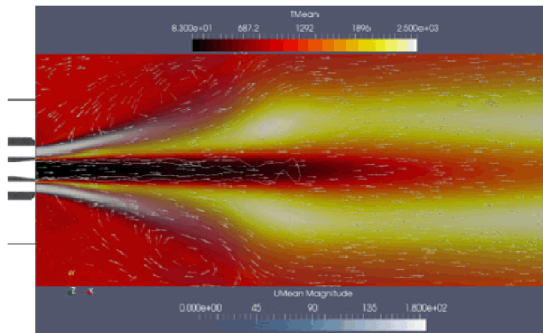


Fig. 2 Time-averaged flow field and flame shape of RCM-3 combustor.

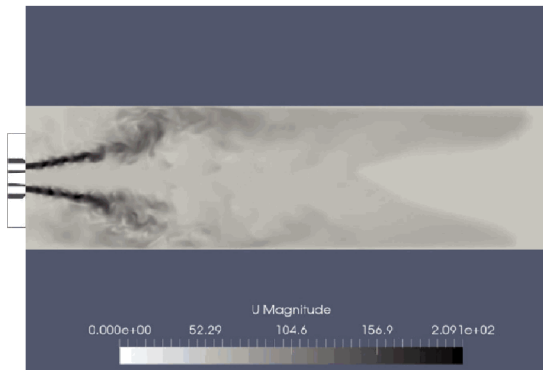


Fig. 3 Instantaneous velocity field of RCM-3.

그리고 시뮬레이션해석으로부터 OH분포에 대한 그림을 얻을 수 있었고 이를 기존 실험결과 [4]의 OH활성기분포 그림과 비교를 하였다. 비교를 통해 본 해석과 실험간의 화염확산각, 화염팽창각, 화염내 고온영역의 위치 그리고 산소제트의 크기가 상당히 유사함을 알 수 있었다. 따라서 본 해석에서 사용된 연소유동솔버 SLFMFoam\_LES와 RK-PR방정식기반의 수소-산소실제기체라이브리리가 단일인젝터 연소기에 대한 실제기체 연소유동을 잘 모사하는 것으로 판단된다.

## 후 기

본 논문은 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단 우주핵심기술개발사업(2017M1A3A3A03015993)의 지원으로 작성되었습니다.

## 참고 문헌

- [1] T.H. Kim, Y.M. Kim, S.K. Kim, "Real-fluid flamelet modeling for gaseous hydrogen/cryogenic liquid oxygen jet flames at supercritical pressure", *The Journal of Supercritical Fluids*, Vol. 58, No. 2, 2011, pp. 254-262.
- [2] M. Cismondi, J. Mollerup, "Development and Application of a Three-Parameter RK-PR Equation of State", *Fluid Phase Equilibria*, Vol. 232, No. 1-2, 2005, pp. 74-89.
- [3] M.O. Conaire, H.J. Curran, J.M. Simmie, W.J. Pitz, C.K. Westbrook, "A Comprehensive Modeling Study of Hydrogen Oxidation", *International Journal of Chemical Kinetics*, Vol. 36, No. 11, 2004, pp. 603-622.
- [4] M. Juniper, A. Tripathi, P. Scoufflaire, JC Rolon, S. Candel, "Structure of cryogenic flames at elevated pressures", *Proceedings of the Combustion Institute*, Vol. 28, No. 1, 2000, pp. 1103-1110.

## 북미향 프리미엄 가스 프로레인지 개발

이국행\*, 이종호<sup>†</sup>, 위재혁\*, 박현우\*, 식준호\*, 김승윤\*, 김양호\*, 양대봉\*, 김영수\*

### Developments of North-American style premium gas pro-range

K. H. Lee\*, J. H. Lee<sup>†</sup>, J. H. Wie\*, H. W. Park\*, J. H. Seok\*, S. Y. Kim\*, Y. H. Kim\*, D. B. Yang\*,  
Y. S. Kim\*

북미에서 많이 사용되는 오븐레인지의 열원에 따라 전기레인지와 가스레인지로 대별되며, 크기와 가격에 따라 보급형 프리스탠딩과 프리미엄 프로레인지로 대별할 수 있다. 프리미엄 프로레인지는 동시에 많은 요리를 하기 위해 2개의 레인지(48인치)를 채택하거나, 스테이크 육류의 시어링(Searing) 성능 향상을 위해 파이프(pipe) 버너 대신 세라믹 버너를 사용하는 브로일러(Broiler)를 채택하고 있다.

본 연구의 목적은 가스를 이용한 36인치, 48인치 프리미엄 프로레인지를 개발하는 것이다.

브로일 버너의 요리성능 확보를 위한 세라믹 막음을 계산 및 실험 결과를 Fig. 2에 나타내었으며, 레인지 내부의 온도 균일화를 통한 베이킹 요리성능을 확보하기 위해 수행한 유동장 해석 결과를 Fig. 3에 나타내었다.

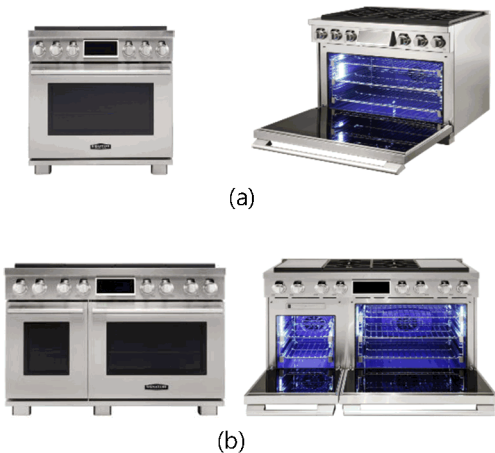


Fig. 1 Photos of (a) 36 inch and (b) 48inch premium gas pro-ranges

\* LG전자 HA본부 어플라이언스연구소 선행기술3팀

<sup>†</sup> 연락처자, [jongho1.lee@lge.com](mailto:jongho1.lee@lge.com)

TEL : (055)260-3833 FAX : (055)-260-4694

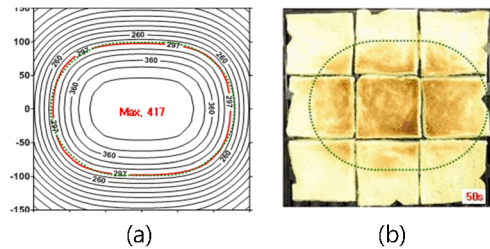


Fig. 2 (a) Calculation of expected toast searing area and (b) test result

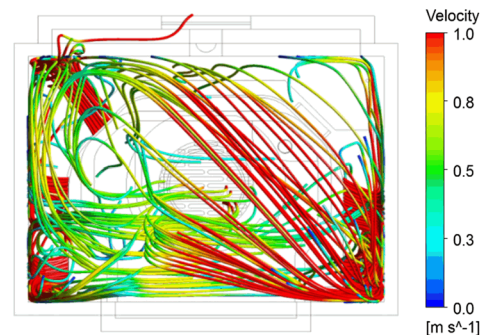


Fig. 3 Simulation of velocity field in 36" cavity

### 후 기

본 연구의 일부는 산학과제로 수행되었으며, 이에 도움을 주신 모든 분들께 감사 드립니다.

## 순환유동층 연소시스템에서의 국내 미이용 바이오매스 연소 특성

백건욱<sup>\*\*</sup>, 문지홍<sup>\*</sup>, 조성호<sup>\*</sup>, 박성진<sup>\*</sup>, 김재영<sup>\*</sup>, Nguyen Hoang Khoi<sup>†\*\*\*</sup>, 문태영<sup>\*†</sup>

## Combustion characteristics of the domestic unused biomass in a circulating fluidized bed combustion system

Geonuk Baek<sup>\*\*\*</sup>, Jihong Moon<sup>\*</sup>, Sungho Jo<sup>\*</sup>, Sungjin Park<sup>\*</sup>, Jaeyoung Kim<sup>\*</sup>, Nguyen Hoang Khoi<sup>\*</sup>, TaeYoung Mun<sup>\*†</sup>

## ABSTRACT

This research was conducted at a pilot-scale CFBC to identify the combustion characteristics of the domestic unused biomass. To achieve them, the effect of the air-staging process was carried out under three conditions and the component were measured in the exhausted flue gas. At the air-staging process, the three conditions were established by altering the ratio of primary air and secondary air. Also, as the ratio of secondary air increased, CO were decreased by 23 ppm.

**Key Words** : Unused biomass, Air-staging, Circulating fluidized bed combustion

재생에너지원 중 하나인 국내 미이용 바이오매스는 수확, 수송갱신 및 산지개발, 숲가꾸기, 산림병해충 방제 과정, 가로수의 조성·관리 및 가지치기, 산불 피해목 등 여러 방면에서 발생하는 데 원목 규격에 못 미치거나 수집이 어려워 이용이 원활하지 않은 산물을 총칭한다. 국내 화력발전소에서는 그 동안 해외 목재펠릿을 수입하여 국부 유출 논란의 문제가 있었으나 최근 REC 개정으로 인해 국내 미이용 바이오매스의 사용량이 증가되고 있어 해외 목재펠릿의 대체제로 평가받고 있다. 산림 미이용 바이오매스는 병충해 피해목(80~90%)과 줄기·가지(10~20%)가 혼합되어 펠릿으로 제조 및 사용되고 있는데 계절별 및 수종별로 연료성상이 바뀌게 되어 이에 대한 연소이력들이 필요한 실정이다. 이에, 본 연구에서는 연료다변화의 일환으로써 순환유동층 연소시스템에서 국내 미이용 바이오매스의 연소 특성을 파악하고자 하였다. Fig. 1은 본 연구에서 사용한 순환유동층 연소(CFBC) 설비의 개략도를 나타내었으며 Table 1은 8월에 샘플링하여 연소 실험에 사용된 국내 미이용 바이오매스에 대한 연료특성을 나타내었다. 바이오매스 펠릿의 길이와 직경은 각각 30 mm, 9 mm 내외이다.

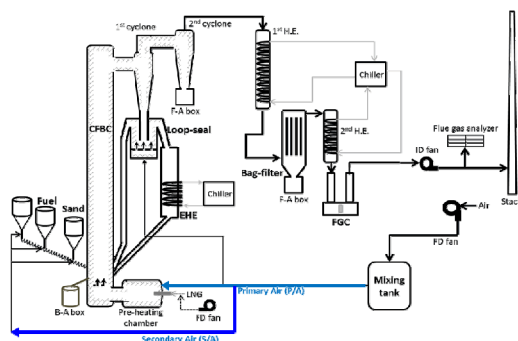


Fig. 1 Schematic diagram of 0.1 MW<sub>th</sub> circulating fluidized bed combustor facility.

Table 2에는 본 연구의 실험 조건을 나타내었다. 바이오매스 펠릿 연소 시 연소료로 공급되는 1차 공기량(Primary air)과 연료와 함께 공급되는 2차 공기량(Secondary air)의 air-staging의 비율에 따른 영향을 확인하기 위해 2차 공기량을 6 Nm<sup>3</sup>/h 씩 증가시키고 1차 공기량을 감소시키며 실험을 수행하였으며 동일한 공기비를 위해 총 공기량은 71.6 Nm<sup>3</sup>/h로 유지하였다.

\* 한국에너지기술연구원(KIER)

\*\* 충남대학교(CNU)

\*\*\* 군산대학교(KNU)

† 연락처, mty1980@kier.re.kr

TEL : (042)860-3062 FAX : (042)879-3904

Table 1 Properties of fuel

Category	Unused biomass
Proximate Analysis <sup>a</sup> (wt.%)	
Ash	4.81
Volatile+Fixed carbon	86.59
Moisture	8.6
Ultimate Analysis <sup>b</sup> (wt.%)	
Carbon	48.96
Hydrogen	5.78
Nitrogen	0.46
Sulfur	0.02
Oxygen	39.52
LHV (kcal/kg) <sup>c</sup>	3870

a:As received, b:Dried basis

Table 2 Operating conditions

Operating condition	Case 1	Case 2	Case 3
Fuel feeding rate (kg/h)	12.9	13.2	13.4
ER	1.2	1.2	1.2
Primary air (Nm <sup>3</sup> /h)	65	59	53
Secondary air (Nm <sup>3</sup> /h)	6.6	12.6	18.6
Air-staging ratio (%)	10.15	21.36	35.09
Superficial velocity (m/s)	5.0	5.0	5.0

ER: Equivalence ratio

Fig. 2, 3에서 알 수 있듯이, 총 산화제량은 비슷하게 투입되었고, air-staging 비율이 달라지는 실험 조건 변경 구간에서 연소로 내 온도가 일정하게 유지되었다. 더불어, 발생되는 배기가스량 역시 90 Nm<sup>3</sup>/h 수준이었다.

Fig. 4의 압력분포 결과에서는 연소로 상부(9.9m)에서 ID fan 제어를 통해 50 mmAq 정도로 유지하며 양압 운전을 진행하였다. 1차 사이클론 전후단 차압은 연소로 상부 압력과 비슷한 패턴을 나타내는데 이는 유동사인 고체가 정상적으로 순환되는 있는 현상이며 2차 사이클론 전후단 차압은 유동사와 같은 고체가 거의 없기 때문에 10 mmAq로 유지되는 것을 확인할 수 있었다. 더불어, bag-filter 전후단의 차압은 25 mmAq 수준으로 유지됨을 확인하였는데 이는 미이용 바이오매스 내 회분함량이 적어 안정적으로 유지되는 것으로 사료된다.

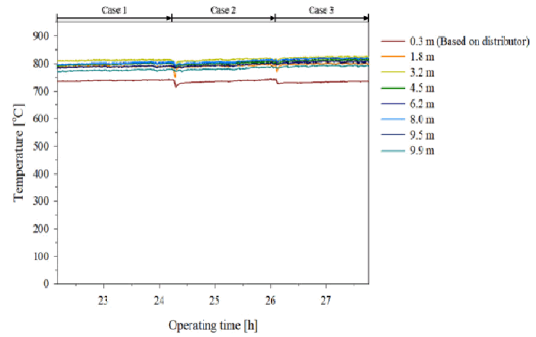


Fig. 2 Temperature profile in accordance with operating time

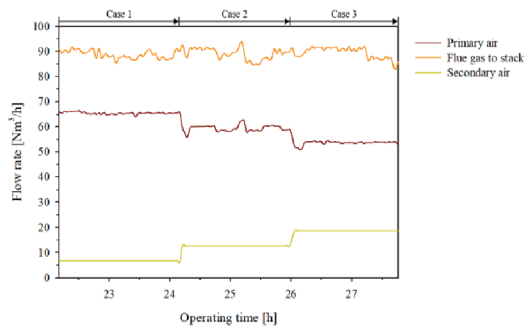


Fig. 3 Flowrate in accordance with operating time

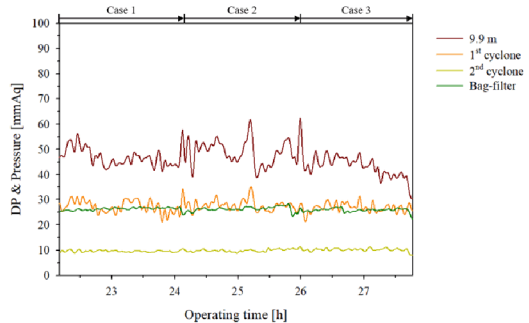


Fig. 4 Pressure profile in accordance with operating time

Fig 5는 배기가스 내 오염물질(SO<sub>2</sub>, NO, CO)의 농도를 나타내고 있다. 2차 공기량이 증가 시 SO<sub>2</sub>, NO 배출량은 각각 약 27 ppm, 50 ppm으로 거의 변함이 없었지만 CO는 109 ppm에서 86 ppm으로 감소함을 알 수 있었다. 이는 연료와 함께 투입되는 2차 공기량이 증가하게 되면 연료와 더 잘 혼합되어 CO가 감소하는 것으로 사료된다[1]. CO의 농도가 감소하면 연소 효율이 증가하므로 연소 공정에 유리하다.

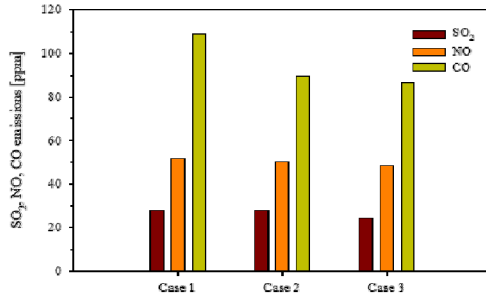


Fig. 5 Emissions concentration in flue gas

결론적으로 연료다변화의 일환으로 국내 미이용 산림 바이오매스 펠릿의 연소 특성을 살펴보았다. 상기 운전결과들로 미루어 볼 때, 각 조건별 안정적인 운전이 가능함을 확인하였으며 2차 공기량이 증가할 때 SO<sub>2</sub>, NO는 증가하지 않고 CO 농도는 더욱 감소되어 연소효율이 증가될 것으로 예측되었다.

## 후 기

이 연구는 2019년도 산업통장자원부 및 산업기술평가관리원(KEIT) 연구비 지원에 의한 연구임 (‘20005788’)

## 참고 문헌

[1] Li Tan, Shiyuan Li, Wei Li, Enguang Shou, Qinggang Lu, “Effect of oxygen staging and excess oxygen on O<sub>2</sub>/CO<sub>2</sub> combustion with a high oxygen concentration in a circulating fluidized bed”, Energy&fuels, 28, 2069–2076 (2014)

# 가압 순산소 연소 조건에서의 배기가스 응축기 내 압력과 체류시간에 따른 NO의 거동 특성 연구

이호수<sup>\*,\*\*</sup>, 목진성<sup>\*</sup>, 최석천<sup>\*</sup>, 양원<sup>\*†</sup>

## A Study on the effect of Pressure and Residence Time on Behavior of NO in a Lab-scale Pressurized Flue Gas Condenser

Hosoo Lee<sup>\*,\*\*</sup>, Chinsung Mock<sup>\*</sup>, Seukcheun Choi<sup>\*</sup>, Won Yang<sup>\*†</sup>

석탄 화력발전에서 발생하는 질소산화물과 황산화물은 산성비와 같은 문제를 일으킬 뿐만 아니라 미세먼지의 전구물질로 지목되며 배출 규제가 강화되고 있다. 따라서 현재의 화력발전소는 공정 후단에 선택적 촉매 환원 장치(SCR)와 배기가스 탈황장치(FGD)와 같은 배기가스 후처리 설비가 장착되어 대기오염물질을 제거하고 있다. 하지만 기존의 SCR의 경우 고비용의 촉매를 필요로 하며 촉매 손상 등의 문제가 있고 FGD의 경우 후단으로 탄산칼슘 슬러리가 섞여 들어가는 문제 및 열효율이 저하된다는 문제가 발생하고 있다. 이러한 문제를 보완하기 위한 연구가 다방면으로 진행되고 있는 가운데, 가압 순산소 연소 공정의 배기가스 응축기는 하나의 대안이 될 수 있다.

가압 순산소 연소는 산화제로 공기 대신 고순도의 산소를 사용하여 연료를 연소하는 순산소 연소를 가압 상태에서 운전하는 기술이다. 이 기술은 연소 전 공기분리장치에서 질소가 제거되고 순산소만으로 연소하기 때문에 배기가스의 Thermal NO<sub>x</sub>를 상당 부분 줄일 수 있다. 하지만 산화제에 포함되어 있는 미량의 질소와 연료 내의 질소 성분(Fuel NO<sub>x</sub>)으로 인해 여전히 NO<sub>x</sub>는 발생되며 이를 제거해 주어야 할 필요가 있다. 가압 순산소 연소에서 이러한 질소산화물을 제거하는 장치로 배기가스 응축기가 사용되는데, 이는 배기가스 내의 잠열을 회수함과 동시에 대기오염물질을 제거하는 장치이다. 특히 NO<sub>x</sub>와 SO<sub>x</sub>의 동시 제거가 가능한데, SO<sub>x</sub>는 물에 대한 용해도가 높아 제거가 용이한 반면 NO는 용해도가 낮아 제거가 어렵다. 하지만 가압을 통해 NO를 NO<sub>2</sub>로 산화시킨다면[1] 물에 대한 용해도가 증가하여[2] 촉매 없이 물만을 이용하여 제거하기 용이하다. 이러한 NO의 산화를 촉진하기 위해

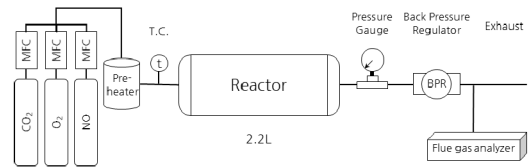


Fig. 1 Schematic diagram of the experimental system of NO to NO<sub>2</sub> conversion

추가적인 연구가 필요하며 배기가스 응축기의 크기 및 작동 조건에 대한 지표를 제공하기 위해 압력 및 체류시간에 따른 NO의 거동 특성을 파악하는 것이 매우 중요하다.

따라서 본 연구에서는 그림 1과 같은 실험실 규모의 건식 반응기를 이용하여 압력과 체류시간의 변화에 따른 NO의 NO<sub>2</sub>로의 전환율을 측정하였으며 관련된 kinetics에 대해 논의하였다. 본 실험에서 배기가스는 CO<sub>2</sub>와 NO, O<sub>2</sub> 분배 가스에 의해 모사되었으며 압력과 체류시간을 실험 변수로 설정하였다. 압력은 역압 레귤레이터(Back Pressure regulator)를 이용하여 제어하였으며 체류시간은 질량유량 제어기(Mass Flow Controller)를 이용하여 유량 조절을 통해 제어하였다.

결과적으로 압력이 증가할수록 NO에서의 NO<sub>2</sub> 전환율은 크게 증가하였고 마찬가지로 체류시간이 증가할수록 NO에서 NO<sub>2</sub>로의 전환율은 증가하였다.

### 참고 문헌

- [1] H. Tsukahara et. al., "Gas-Phase Oxidation of Nitric Oxide: Chemical Kinetics and Rate Constant", Nitric Oxide 3, 1999, 191 - 198
- [2] J. Park, Y. Lee, "Solubility and Decomposition Kinetics of Nitrous Acid in Aqueous Solution", J. Phys. Chem. 1988, 92, 6294 - 6302

\* 한국생산기술연구원 고온에너지시스템그룹

\*\* 연세대학교 기계공학부

† 연락처, yangwon@kitech.re.kr

TEL : (041)598-9265 FAX : (041)-589-8323

# 내부 배가스 재순환 방식을 활용한 가스 MILD 연소 특성과 NO<sub>x</sub> 배출 특성 연구

김동희\*\*\*, 함재식\*\*, 허강열\*, 이영재\*\*†

## Study on Combustion and NO<sub>x</sub> Emission Characteristics of Gaseous MILD Combustion under Internal Flue Gas Recirculation

Donghee Kim\*, Jaesik Ham\*\*, Kang Y. Huh\*, Youngjae Lee\*\*†

전 세계적으로 화력 발전에서 배출되는 연소 가스 내 온실 가스 및 질소 산화물로 인한 지구 온난화와 미세 먼지로 인한 대기 오염에 대한 관심이 높아지고 있다. 화력 발전은 국내 발전원 중 가장 큰 비중을 차지하고 있으며, 상대적으로 낮은 발전 단가를 가지고 있다[1]. 따라서 화력 발전에서 배출되는 온실 가스를 포집하는 기술과 질소 산화물을 저감할 수 있는 연소 기술들이 연구되고 있다.

가스 연소에서 배출되는 NO<sub>x</sub> 중 대부분은 1300°C 이상에서 생성되는 thermal NO<sub>x</sub>이며, NO가 지배적인 비율을 차지하고 있다[2]. 따라서 NO<sub>x</sub>를 저감하기 위해서는 높은 화염 온도를 제어하는 것이 핵심이며, 이와 관련하여 MILD (Moderate or Intense Low-oxygen Dilution) 연소 기술이 연구되고 있다[3-5]. 일반적인 화염은 반응물들의 혼합을 촉진시켜 국부적인 연소 반응 영역을 형성하지만, MILD 연소 기술은 희석제를 이용하여 연소 반응을 의도적으로 방해하여 반응 영역을 넓힌다. 따라서 일반적으로 관측할 수 있는 화염의 형태가 보이지 않고, 연소로 내부 전체가 일정한 온도 분포를 보이는 연소 특성을 가지고 있다[6]. MILD 연소의 넓은 연소 반응 영역으로 인한 낮은 화염 온도가 가스 연소에서 지배적인 thermal NO<sub>x</sub>를 감소시킨다.

MILD 연소 기술 구현을 위하여 산화제의 투입 온도를 증가시켜 자발화(auto-ignition) 현상을 유도하는 방법이 일반적으로 매우 널리 사용되고 있다. MILD 연소 환경의 필요조건으로 반응 영역에서 반응물의 온도가 연료의 자발화 온도보다 높아야 하고, 연소 온도와 반응물의 온도 차이가 자발화 온도보다 낮아야 한다. 따라서 반응물을 예열하여 MILD 연소 환경을 만드는 것

은 상당히 핵심적인 구현 방법이라고 볼 수 있다.

본 연구에서는 대표적인 가스 연료인 CH<sub>4</sub>를 대상으로 하여, 내부 배가스 재순환 방식을 활용한 실험실 규모의 MILD 연소기를 활용하여 내부 온도 분포와 CO 및 NO 배출 특성을 확인하였다.

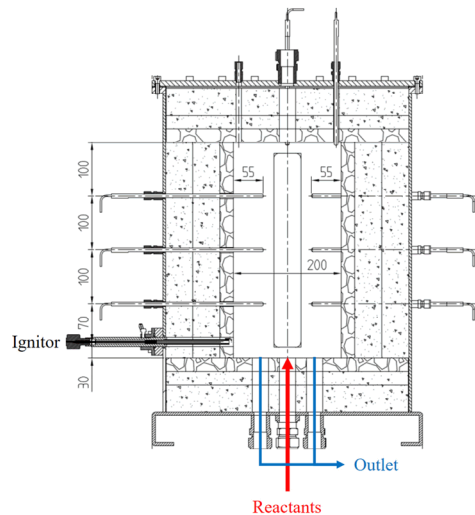


Fig. 1 Detailed view of Lab-scale gaseous MILD combustor

Fig. 1은 MILD 연소를 구현하기 위해 설계된 연소기를 나타내었다. 연소기는 W200×D200×H400(mm) 크기인 정육면체 모양으로 제작되었으며, 내화재를 적용하여 연소실을 구성하였다. 또한 배가스 내부 재순환 방식을 구현하기 위하여 연소기 밑면에 버너와 출구가 모두 설치하였다. 밑면의 중앙에는 MILD 연소를 위해 설계된 bluff-body 버너를 설치하였고, 주변으로 4개의 출구가 설치되어 있다. 연소기 측면에 초기 점화를 위한 ignitor가 설치되어 있고, 15개의 K-type 열전대를 활용하여 연소기 내부 온도를

\* 포항공과대학교 기계공학과

\*\* 한국생산기술연구원 고온에너지시스템그룹

† 연락처, [leeyj@kitech.re.kr](mailto:leeyj@kitech.re.kr)

TEL : (041)589-8464 FAX : (041)-589-8323



측정하였다. 9개의 열전대는 연소기 내부 가스 온도를 측정하고 있고, 나머지 6개의 열전대는 연소기 측면과 상단의 벽 온도를 측정하였다. 연소 가스 분석은 NDIR 방식을 이용한 가스 분석기 (Advance Optima, ABB)를 이용하였다.

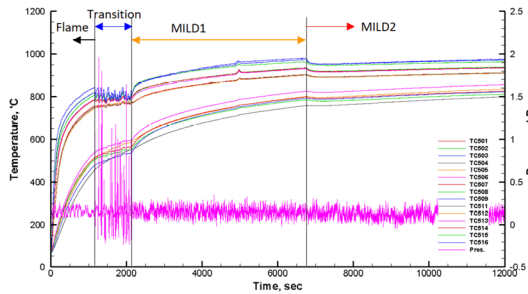


Fig. 2 Temperature distribution and pressure of MILD combustor

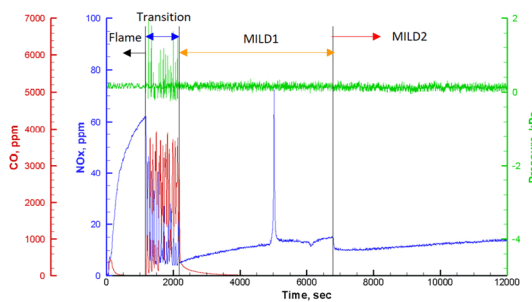


Fig. 2 Analysis result of CO, NO and pressure of MILD combustor

Fig. 2는 연소로 내부의 가스 온도와 벽면 온도의 측정 결과, 그리고 Fig. 3은 연소 가스 내 CO와 NO 분석 결과를 나타내었다. 실험 조건은 초기 점화 시점인 Flame 모드부터 Transition 구간, 그리고 MILD1 조건까지 연료 노즐에 CH<sub>4</sub> 5 slpm, 산화제 노즐에는 O<sub>2</sub> 11 slpm, N<sub>2</sub> 34.1 slpm를 주입하였다. 본 실험에서는 MILD 연소 구현을 위해서 반응물을 예열하지 않고 버너에서 형성되는 화염으로 연소로 내부 예열을 진행하였다. 해당 조건은 입열량 약 3.3 kW<sub>th</sub> 이며, 산화제는 산소 부하 연소 조건에 해당한다. 점화 시점부터 초기에는 일반적인 Flame 모드를 유지하며 연소로의 온도가 지속적으로 증가하는 것을 확인할 수 있다. 그 후 연소로 벽면 온도가 약 550°C에 도달하면 transition 구간에 진입하게 된다. Transition 구간에서는 flame 모드와 MILD 모드를 번갈아 가며 불안정한 연소 현상이 발생하기 때문에 순간적으로 높은 CO 수치와 연소기 내부 온도와 압력 불안정성을 확인할 수 있다. 그 후 MILD 모드인 MILD1에서는 안정적

인 MILD 연소 현상을 볼 수 있다. MILD 연소 환경에서는 연소기 내부의 가스 온도와 벽면 온도의 차이가 점차 줄어드는 것을 볼 수 있으며, NO 배출량 또한 약 10 ppm 수준으로 매우 낮아진 것을 확인하였다.

MILD2에서는 CH<sub>4</sub>와 O<sub>2</sub>의 유량을 고정하고 N<sub>2</sub>의 유량을 41.5 slpm 으로 증가시켜, 산화제를 산소 부하 연소 조건에서 공기 연소 조건으로 변화시킨 후 연소 특성 및 배출 특성을 파악하였다. MILD1 조건과 비교하여 연소기 내부의 가스 온도와 벽면 온도의 차이가 더욱 줄어든 것을 확인할 수 있었으며, 전체적인 온도는 희석제인 N<sub>2</sub> 유량 증가로 인하여 감소하였다.

실험실 규모의 내부 배가스 재순환 방식을 활용한 MILD 연소 실험에서 연소로 내부 온도 분포를 확인한 결과, 넓은 연소 반응 영역을 가지는 MILD 연소 환경에서 높은 온도 분포 균일성을 보이는 것을 확인하였다. 또한 일반적인 flame 모드와 비교하여 MILD 모드에서 CO가 검출되지 않았고, NO가 약 80% 저감된 것을 확인하였다.

## 후 기

이 논문은 2019년도 정부(산업통상자원부)의 재원으로 한국에너지기술평가원의 지원을 받아 수행된 연구임(20181110200190, 미세먼지 배출저감을 위한 석탄화력 발전소 초 저NO<sub>x</sub> 연소기술 개발)

## 참고 문헌

- [1] 산업통상자원부, 제 8차 전력수급기본계획 (2017~2031), 2017.
- [2] United States Environmental Protection Agency, Nitrogen Oxides (NO<sub>x</sub>): Why and How They Are Controlled, 1999.
- [3] M. Saha, B.B. Dally, P.R. Medwell, A. Chinnici, "Effect of Particle Size on the MILD Combustion Characteristics of Pulverised Brown Coal", Fuel Processing Technology, Vol. 155, 2017, pp. 74-87.
- [4] P. Li, B.B. Dally, J. Mi, F. Wang, "MILD Oxy-combustion of Gaseous Fuels in a Laboratory-scale Furnace", Combust. Flame., Vol. 160, 2013, pp. 933-946.
- [5] G.G. Szego, B.B. Dally, G.J. Nathan, "Operational Characteristics of a Parallel Jet MILD Combustion Burner System", Combust.

Flame., Vol. 156, 2009, pp. 429-438.

[6] J.G. Wunning, FLOX-Flameless  
Combustion, Thermprocess Symposium  
Dusseldorf, Germany, 2003.

# 기체 중심 스윙 동축 분사기 간 거리에 따른 화염 형상 변화

조천현\*, 왕위엔강\*, 손채훈†, 윤영빈\*\*

## Flame structure variation for injector gaps in gas centered swirl coaxial injector

Cheon Hyeon Cho\*, Yuangang Wang\*, Chae Hoon Sohn†, Youngbin Yoon\*\*

지금까지 로켓 엔진 분사기의 화염형태 및 연소조건에 따른 화염거동 그리고 연소불안정에 대한 많은 연구들이 수행되어졌다. 하지만 대부분 단일 분사기에 대한 연구들이며, 로켓 엔진에서 사용되는 배열을 가지고 있는 분사기의 연구는 실험실 환경에서 수행하기 어렵기 때문에 상대적으로 연구가 적게 이루어졌다[1-3]. 본 연구에서는 이전연구 결과[1,2,4-6]를 바탕으로 단일 분사기에 분사기를 추가시킨 이중 분사기에 대해 기초적인 연구를 수행하였다.

이중 분사기의 화염의 형태를 관찰하기 위한 실험장치의 개략도를 Fig. 1에 나타내었다. 여기에서, 이중분사기는 분사기 간 상호작용을 관찰하기 위해서 다양한 사이거리를 가지도록 제작하였다. 즉, 상대적으로 분사기 간 거리가 가까워 상호작용이 강한 경우를 대표하는 15mm, 반대로 분사기 간 거리가 멀어 상호 상호작용이 거의 없는 경우를 대표하는 45mm 마지막으로 중간 거리인 30mm를 분사기 간 거리로 결정하였다.

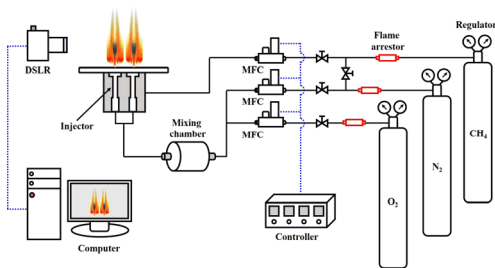


Fig. 1 Schematic diagram of two injector device.

이중 분사기의 실험은 3가지 거리에 대해 연료를 고정하고 산화제의 유량을 증가시키면서 수행하였다. 이때 산화제 증가에 따라 당량비는 0.72 ~ 1.47까지 변경된다. 즉, 회박 조건에서부터 과농 조건까지 실험을 수행하였다.

분사기 간 거리 변화에 따른 실험 결과는 Fig. 2에 나타내었다. 여기에서, 분사기 간 상호작용이 가장 큰 15mm에서는 상대적으로 불안정한 화염 형태가 빨리 발생되었다. 또한 가까운 거리로 인해 중심의 jet flame이 하나의 화염처럼 형성되고 다른 거리에 비해 화염이 길게 형성된다. 또한 산화제의 유량이 증가할수록 swirl flame의 길이가 점점 짧아지는 결과를 보인다.

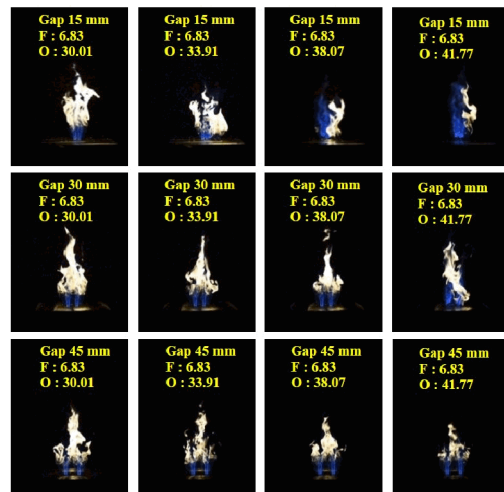


Fig. 2 Flame structure variation for various two injector on fixed fuel cases

\* 세종대학교 기계공학과  
 \*\* 서울대학교 기계항공공학부  
 † 연락처, chsohn@sejong.ac.kr  
 TEL : (02)3408-3788 FAX : (02)-3408-4333

분사기 간 사이거리 30 mm의 경우, 15mm 보다 좀 더 낮은 당량비까지 안정한 화염의 형태를 보이다가 불안정한 화염의 형태로 변한다. 하지

만 분사기 중심의 jet flame이 각각 형성되고 그 길이가 상대적으로 짧다는 것을 관찰할 수 있다.

Swirl flame의 경우 본 연구에 추가하지 못하였지만 15 mm와 동일하게 산화제가 증가할수록 화염의 길이가 점점 짧아지다가 사라지는 현상이 관찰된다. 마지막으로 사이거리가 가장 먼 45mm의 경우 매우 낮은 당량비까지 안정한 화염형태를 유지한다. 하지만 swirl flame은 점점 짧아지며 이에 따라 전체적인 화염의 크기가 작아지는 것을 관찰할 수 있다. 또한 불안정한 화염의 형태로 변경될 때, 분사기의 화염은 동시에 불안정한 형태를 보이는 것이 아닌 어느 한쪽이 불안정해진 다음 유량이 증가하면 양쪽 모두 불안정해지는 형태로 진행된다. 이 결과로부터 분사기 거리가 45mm 일 경우에 두 분사기는 각각 작동하는 단일 분사기라고 판단할 수 있다.

결론적으로 연료 유량이 고정되고 산화제가 변경되는 실험조건에서 전체 유량이 증가할수록 그리고 분사기 간 거리가 가까울수록 불안정한 화염의 형태는 빨리 발생된다. 또한 분사기 간 거리가 가까울수록 중심의 jet flame이 크고 길게 형성된다. 거리가 가까울수록 jet flame이 길고 크게 형성되는 이유는 분사기 사이에 연료가 상대적으로 많이 분포하는 동시에 확산이 상대적으로 적고 연료가 중심 유동을 따라가기 때문이며 분사기 간 사이거리가 멀어져 상호작용이 약해지면 연료의 확산 및 유동의 형태가 단일 분사기에 가까워져 좀 더 낮은 당량비까지 안정한 화염 형태를 유지한다.

## 후 기

본 연구는 서울대학교 차세대 우주추진 연구센터와 연계된 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행한 선도연구센터 지원사업(NRF-2013R1A5A1073861)의 지원을 받아 수행된 연구결과이며, 이에 감사드립니다.

## 참고 문헌

- [1] Y.G. Wang, J.W. Son, C.H. Sohn, "A Study on Factors Affecting Combustion Characteristics of GCSC Injector", J. Korean Soc. Combust., Vol 24(1), 2019, pp. 32-38.
- [2] J.W. Son, Y.H. Min, C.H. Sohn, "An Experimental Study On Characteristics of Flame and Combustion Stability of Coaxial Jet Injectors", J. Korean Soc. Combust., Vol. 21(1), 2016, pp. 15-21.

- [3] J.H. Park, H.J. Kim, "An Experimental Assessment of Combustion Stability of Coaxial Swirl Injectors and an Impinging Injector through Simulating Combustion Test", J. Korean Soc. Combust., Vol. 22(1), 2017, pp. 46-52.

- [4] Y.J. Kim, C.H. Sohn, M.G. Hong, S.Y. Lee, "An Analysis of Fuel-Oxidizer Mixing and Combustion Induced by Swirl Coaxial Jet Injector with a Model of Gas-Gas Injection", Aerosp. Sci. Technol., Vol. 37, 2014, pp. 37-47.

- [5] J.W. Son, C.H. Sohn, G.J. Park, Y.B. Yoon, "Spray Patterns and Injection Characteristics of Gas-Centered Swirl Coaxial Injectors", J. Aerosp. Eng., Vol. 30, 2017, pp. 04017035

- [6] Y.G. Wang, J.W. Son, C.H. Sohn, J.S. Yoon, J.H. Bae, Y.B. Yoon, "Combustion Instability Analysis of a Model Gas Turbine by Application of Dynamic Mode Decomposition", J. Korean Soc. Combust., Vol. 24(1), 2019, pp. 51-56.

## 방사형 전기장을 인가한 확산 화염 내에 이온풍 가시화

김영민\*, 김희재\*\*, 윤성환\*\*†, 최재혁\*\*, 김종수\*\*

Visualization of Ionic Wind in Laminar Diffusion Flame  
under Radial Direction of Electric Fields

Youngmin Kim\*, Heejae Kim\*\*, Sung Hwan Yoon\*\*†, Jae-Hyuk Choi\*\*, Jongsu Kim\*\*

탄화수소 화염은 양전하와 음전하를 발생시킨다. 전기장을 인가하게 되면 전하들이 각 극성으로 이동하며 중성자들에게 운동량을 전달하며 체적 유량이 발생하게 되는데 이를 “이온풍”이라고 한다[1]

본 연구는 발생된 이온풍이 화염에 어떻게 작용하는지 조사하려고 한다. 현재까지 진행된 연구 [2,3] 따르면 이온풍은 양방향으로 불기 때문에 화염전파방향의 방사형으로 전기장이 인가되면 질량보존법칙에 의해 강한 스크래치를 받게 되고 소화가 될 거라 판단된다. 따라서 본 연구는 추측을 증명하기 위해 분젠 프로판 예혼합 화염에 방사형으로 전기장이 인가하여 화염의 거동을 살펴보았다. 전기장은 노즐에 고전압을 설치하고 동축류 버너 주변에 메탈 메쉬(내경 15cm, 길이 30cm, 격자 1cm×1cm)에 접지점 설치하였다. 고전압으로 교류(AC : Alternating current) 2, 5, 7kV, 1, 10, 100, 500, 1000Hz와 직류(DC : Direct current) ±2, ±5, ±10 kV로 변화해가며 인가하였다. 유동장 가시화를 위해 미산란 기법(mie-scattering method)를 사용하였으며, 레이저 광원으로는 다이오드 레이저(532nm, 2.5W)를 통해 화염 내부를 조사하였다. 화염 거동은 초고속카메라를 통하여 이미지를 획득하였다. Fig. 1은 그 중에서 직류 10kV를 인가하였을 때 화염을 시간에 따라 미산란 이미지를 나타냈다. 실험 결과, 저전압보다 고전압을 인가하였을 때, 소화 거동이 발생했다.

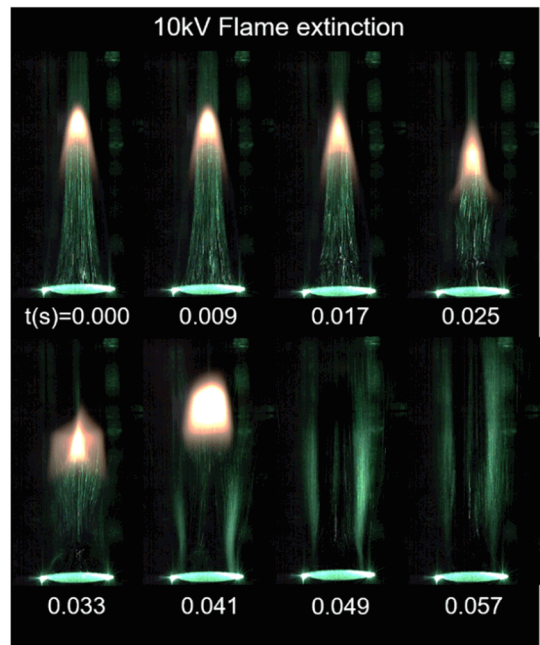


Fig. 1 Mie-scattering images of dynamic flame behavior under DC electric field with 10kV.

## 후 기

본 연구는 2018년도 과학기술정보통신부의 재원으로 한국연구재단 생애 첫 연구 사업의 지원을 받아 수행된 연구임(No. 2018R1C1B508643 2).

## 참고 문헌

- [1] F. Carleton, F. Weinberg,, "Electric fields-induced flame convection in the absence of gravity", *Nature*, Vol. 330, 1987, pp. 635-636.
- [2] D.G. Park, S.H. Chung, M.S. Cha, "Bidirectional ionic wind in nonpremixed

\* 한국해양대학교 기관공학과

\*\* 한국해양대학교 기관시스템공학과

† 연락저자, [shy@kmou.ac.kr](mailto:shy@kmou.ac.kr)

TEL : (051)-410-4261 FAX : (051)-404-3985

counterflow flames with DC electric fields", *Combust. Flame.*, Vol. 168, 2016, pp. 246-248.

[3] D.G. Park, S.H. Chung, M.S. Cha, "Visualization of ionic wind in laminar jet flames", *Combust. Flame.*, Vol. 184, 2017, pp. 246-248.

## 전기방사 표면여과체의 제조와 미세먼지 여과특성 분석

권기범<sup>\*\*</sup>, 이우진<sup>\*\*\*</sup>, 허기준<sup>\*</sup>, 김연상<sup>\*</sup>, 엄현진<sup>†</sup>

### Fabrication of Electrospun Surface Filter Media and Analysis on Its Filtration Property for Find Dust

Kibeom Kwon<sup>\*\*</sup>, Woo Jin Lee<sup>\*\*\*</sup>, Ki Joon Heo<sup>\*</sup>, Yeonsang Kim<sup>\*</sup>, Hyeonjin Eom<sup>†</sup>

최근 전세계적으로 대기오염 문제에 대한 심각성이 부각되면서 대기오염물질의 발생 메커니즘 및 저감 기술에 대한 연구가 활발히 진행되고 있으며, 이에 따라 대기오염물질 배출에 대한 규제 또한 강화되고 있다. 그 중에서도 10 $\mu\text{m}$  이하 직경의 미세먼지 입자상 물질 (Particulate matter 10, PM10)과 2.5  $\mu\text{m}$  이하 직경의 초 미세먼지 입자상 물질 (Particulate matter 2.5, PM2.5)에 대한 위험성이 크게 대두되면서<sup>[1]</sup> 배출가스에 대한 규제가 강화되었다.

폴리테트라플루오로에틸렌 (Polytetrafluoroethylene, PTFE) 필터는 PTFE의 우수한 열적 안정성을 이용해 200 $^{\circ}\text{C}$  이상의 고온 환경에서 미세먼지 배출량을 저감하기 위해 연구되어 산업 현장에서 사용되고 있다.<sup>[2,3]</sup> 하지만, 현재 일반적으로 산업체에서 사용하는 PTFE 필터는 기존의 총 부유 분진 (Total suspended particles, TSP)에 대한 배출기준을 충족하지만 미세먼지에 대한 필터 성능은 검증되지 않았다.

본 연구에서는, PTFE 나노섬유를 PTFE 폼코팅 필터 위에 코팅하여 PTFE 폼의 기공크기를 줄임으로써, 200 $^{\circ}\text{C}$ 이상의 고온 환경 내에서 열적 안정성을 유지하면서도 미세먼지에 대해 우수한 필터 성능의 표면여과체를 고안하였다. PTFE는 무극성이므로 전기방사방식을 이용하여 섬유상으로 성형하기 어렵기 때문에, 이전 문헌에서는 물에 용해되면서도 극성을 가지므로 전기방사방식

을 통해 섬유상으로 성형이 가능한 폴리비닐알코올 (Polyvinylalcohol, PVA)과 PTFE를 혼합하여 섬유를 제조하였다.<sup>[4,5]</sup> 해당 문헌에서 공개된 방법들을 참고하여 PTFE와 PVA가 혼합된 폴리머 용액을 제조하였고, PTFE/PVA 섬유를 PTFE 폼코팅 여과체(㈜창명산업) 표면 위에 도포한 후, 열처리과정을 통해 PVA를 제거하여 순수 PTFE 섬유가 도포된 표면여과체를 제조하였다. 그리고 제조된 PTFE 섬유-폼코팅 여과체의 표면특성과 미세먼지 여과특성을 분석하였다.

이전에 본 연구팀에서 진행한 연구는 표면여과체 형성기술에 초점을 맞추었다면,<sup>[6]</sup> 본 연구에서 진행한 연구는 표면특성과 특히 여과특성 분석에 주로 초점을 두었다.

제조된 여과체의 표면 형상은 광학현미경, 주사전자현미경 (Scanning electron microscope, SEM)을 이용하여 분석하였다. 여과체의 흡진·탈진에서 필요로 하는 소수성 특성은 접촉각 측정기(Contact angle analyzer)를 이용하여 분석하였다. 미세먼지에 대한 여과효율을 측정하기 위해 입자 발생기(Atomizer)와 이동성 입자 주사 정립기(Scanning mobility particle sizer, SMPS)를 이용하였다. 제조된 여과체는 초소수성 특성을 보였으며, 미세먼지에 대한 높은 여과효율 특성을 나타내었다.

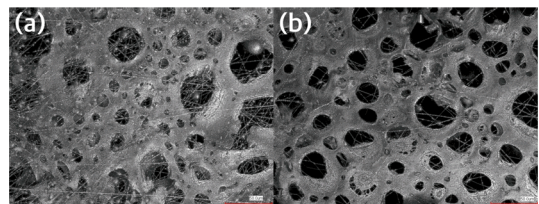


Fig. 1 Surface images of (a) as-spun and (b)

\* 한국생산기술연구원

\*\* 전남대학교 기계공학과

\*\*\* 연세대학교 기계공학과

† 연락처, [hyeonjin@kitech.re.kr](mailto:hyeonjin@kitech.re.kr)

TEL : (047)5898-572 FAX : (041)-5898-323

annealed PTFE nanofibers on PTFE foam

No. 590

## 후 기

본 연구는 산업통상자원부의 산업통상자원부 및 산업기술평가관리원(KEIT)의 제조분야 미세먼지 감축을 위한 공정맞춤형 실용화 기술 개발사업 지원으로 수행되었음. (No. 20005842)

[6] 엄현진, 김연상, 허기준, 권기범, 2019, "초내열 에어필터 표면여과체 형성기술 개발" 한국청정기술학회 추계총회 및 학술발표회 자료집, p52

## 참고 문헌

- [1] J. I. Choe, Y. S. Lee, 2015, "A Study on the Impact of PM2.5 Emissions on Respiratory Diseases", Journal of Environmental Policy and Administration Vol. 23, No. 1, pp. 155-172.
- [2] B. H. Park, S. B. Kim, Y. M. Jo and M. H. Lee, 2012, "Filtration Characteristics of Fine Particulate Matters in a PTFE/Glass Composite Bag Filter", Aerosol and Air Quality Research, Vol.12, pp.1030-1036.
- [3] B. H. Park, M. H. Lee, Y. M. Jo, and S. B. Kim, 2012, "Influence of pleat geometry on filter cleaning in PTFE/glass composite filter" Journal of the Air & Waste Management Association, Vol. 62, No. 11, pp. 1257-1263.
- [4] Y. Huang, Q. L. Huang, H. Liu, C. X. Zhang, Y. W. You, N. N. Li, and C. F. Xiao, 2017, "Preparation, characterization, and applications of electrospun ultrafine fibrous PTFE porous membranes", Journal of Membrane Science, Vol. 523, pp. 317-326
- [5] X. Li, X. X. Wang, T. T. Yue, Y. Xu, M. L. Zhao, M. Yu, S. Ramakrishna, and Y. Z. Long, 2019, "Waterproof-breathable PTFE nano- and Microfiber Membrane as High Efficiency PM2.5 Filter", POLYMERS, Vol. 11,



# 내열성 고분자 섬유가 부착된 PTFE/Glass 3중층 폼코팅 여과체 제조기술 개발

김성훈, 정종호, 이현재, 조상준<sup>†</sup>

## Development of Manufacturing Technology for PTFE/Glass Triple-layer Foam Coating Filter Media with Thermal-resistant Polymer Fiber.

Sung Hoon Kim, Jong Ho Chung, Hyeon Jae Lee, Sang-Joon Cho<sup>†</sup>

**Key Words** : 여과백, 고분자, 내열성, 폼코팅, 전기분무

최근 심화되어가고 있는 미세먼지에 대한 대책으로 2019년 1월부터 미세먼지 다량배출사업장을 대상으로 현재보다 2배 이상 강화된 기준으로 배출허용기준을 적용하고 있다. 이들 사업장으로부터의 미세먼지는 고온의 배기가스 중에 포함되어 있어 이를 제거하기 위해서는 260~280℃의 온도에 견디는 초고온용 여과체를 제작하여야 한다.

본 연구는 기존의 PTFE/Glass 폼코팅 여과체는 고온에서는 견디나 미세먼지 제거 효율이 낮아 별도의 추가 공정을 통해 미세먼지 제거 효율을 향상시키기 위한 제조기술 개발에 관한 연구이다. 이를 위해 추가공정에서는 효과적인 미세먼지 제거효율 향상을 위해 전기방사(Electrospinning)를 이용하여 내열성 고분자 nano Fiber를 제조하였으며, 또한 260~280℃의 온도에 장시간 사용 가능하게 하였다. Fig. 1은 PTFE/Glass 폼코팅 여과체에 내열섬유를 전기방사로 부착하는 제조 공정을 나타내고 있다.

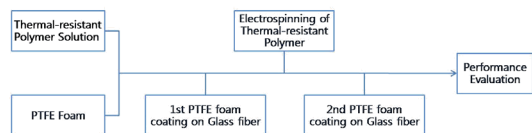


Fig. 1 Electrospinning of thermal-resistant polymer and the manufacturing process of filter media

Fig. 2는 Fig. 1의 제조 공정으로 제작된 내열성 여과체의 모식도를 나타내고 있다.

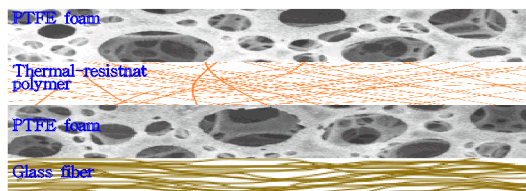


Fig. 2 Schematic diagram of PTFE/Glass triple-layer foam coating filter media with thermal-resistant polymer.

전기 방사로 제조한 내열섬유의 내열성을 검토하기 위하여 열분해 분석(TGA)을 하였으며 그 결과를 Fig. 3에 나타내었다. 초반 질량 감소는 내열섬유 용액의 용매에 의한 감소로 판단되며, 443℃에서의 질량 감소는 내열섬유의 분해로 인한 감소로 판단된다. 따라서 본 연구에서 제조한 내열섬유는 260~280℃의 온도에서도 내열성을 유지하는 섬유임을 확인하였다.

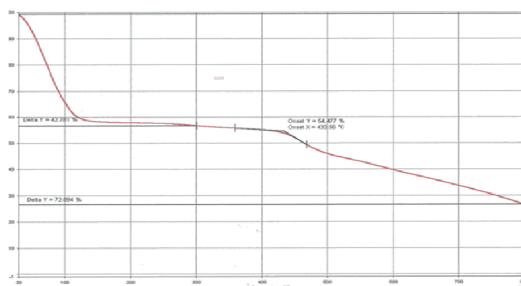


Fig. 3 Thermogravimetric analysis of thermal-resistant polymer.

㈜창명산업

<sup>†</sup> 연락처, chosj1953@naver.com  
TEL : (031)861-9318 FAX : (031)-858-9319

제조된 내열성 여과체에 대해서 PM2.5 표준 분진에 대한 투과율을 측정하였으며, 그 결과를

Fig. 4에 나타냈다. 내열성 nano 섬유를 방사하였음에도 여과체의 기공 크기가 불균일하고 커 대부분의 미세 분진들이 투과됨을 확인하였다. 최소 입자경에서 분진 제거효율이 15%, 1.0  $\mu\text{m}$ 에서는 40%와 3.0  $\mu\text{m}$ 에서는 90%로 분진의 입자경이 클수록 더 효과적으로 작용한다는 것을 알 수 있다.

향후 연구에서는 nano 섬유의 불균일성 개선과 방사량을 변화시켜 성능향상 연구를 수행하고자 한다.

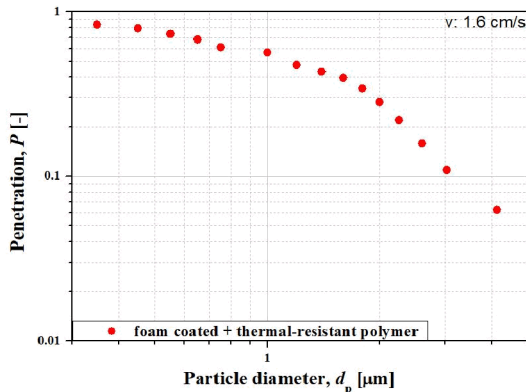


Fig. 4 PM2.5 standard dust in thermal-resistant filter media(nano fiber electrospinning time(16.6cm/s)).

## 후 기

본 연구는 경기도경제과학진흥원 기업주도연구(D161670)와 산업통상자원부 제조분야미세먼지 감축을위한공정맞춤형실용화기술개발(20005842)의 일환으로 수행되었습니다.

## 참고 문헌

- [1] L. Yao, C. Lee, J. Kim, "Fabrication of Electrospun Meta-aramid Nanofibers in Different Solvent Systems", *Fibers and Polymers*, Vol. 11, 2010, pp. 1032-1040.
- [2] X. M. Mo, Z. G. Chen, H. J. Weber, "Electrospun nanofibers of collagen-chitosan and P(LLA-CL)for tissue engineering", *Frontiers of Materials Science in China*, Vol, 1, 2007, pp. 20-23.
- [3] A. Podgorski, A. Balazy, and L. Gradon, "Application of nanofibers to improve the filtration efficiency of the most penetrating aerosol particles in fibrous filters", *Chem. Eng. Sci.*, Vol. 61, 2006, pp. 6804-6815.

- [4] C. Nah, S. Han, M. Lee, J. Kim, D. Lee, "Characteristics of polyimide ultrafine fibers prepared through electrospinning", *Polym. Int.*, Vol. 52, 2003, pp.429-432.

- [5] B. Morgenstern, H. Kammer, "Solvation in Cellulose-LiCl-DMAc Solutions", *Trends Polym. Sci.*, Vol. 4, 1996, pp.87-91.



2019년도 제59회 추계학술대회

# 59<sup>th</sup> KOSCO SYMPOSIUM

초록집



사단법인 한국연소학회  
The Korean Society of Combustion