

02  
chapter디지털 트윈의 개념과 기술 및  
산업 분야별 활용 사례

김용운 || 한국전자통신연구원 책임연구원

## I. 서론

최근에 디지털 트윈 용어가 일상생활과 항만, 교통, 건물, 에너지, 조선 등 다양한 산업 분야에서 쓰이고 있다. 스마트시티 구축과 운영의 과정에 디지털 트윈이 쓰이면서 일상생활의 시민들에게도 노출되어 지하철이나 고속도로 광고판에도 등장하여 사람들에게 다가가고 있다.

디지털 트윈의 표면적 형태는 현실 세계의 실물 객체를 가상 세계의 쌍둥이 가상 객체로 만들고, 실물 객체의 동작과 행동을 쌍둥이 가상 객체의 수행 역할 모델로 만들어 현실 세계를 가상 사계에서 모사 및 모의할 수 있도록 하는 것으로 나타난다.

디지털 트윈은 2002년에 최초로 개념이 소개된 이후에 제조 분야에서 부분적으로 사용되어 온 것인데, 최근 여러 산업 분야에서 각광을 받고 있는 데는 몇 가지 이유가 있을 것으로 본다.

첫째는 새로운 분야에서도 디지털 트윈 개념을 구체화하고 적용할 수 있을 정도로 기반 기술이 축적됐다는 점이다. 디지털 트윈 모델을 만들고자 하는 물리적 실체 대상에 대해 3D 형상을 만들고, 증강현실, 가상현실 등을 통해 가시화할 수 있고, 대상물의 기능과 동작 등을 가상 모델화 할 수 있다. 대상물의 실제 동작 현황을 실시간 모니터링하면서 데이터를 수집하고, 빅데이터, 인공지능 등을 통해 분석할 수 있다는

점이다. 각 응용 분야에서 쌍둥이처럼 만들어져 있는 디지털 트윈 시스템을 통해 계획 수립부터 운영, 관리, 유지 보수 및 조기 대응 등에 대해 사전에 시뮬레이션 검증, 시스템 운영 동안에 최적화 수행, 미래 상황 예측, 사후 문제분석 등이 가능해지게 되어 널리 도입되기 시작하고 있는 것이다 [1].

두 번째 이유는 누구나 빠르게 이해할 수 있는 직관적 이름 덕분이라고 할 수 있다. 어떤 낯선 개념이 비즈니스 생태계에서 생존 및 확산되려면 받아들이고 투자를 유발하는 선순환 관계가 만들어져야 하는데, 디지털 트윈은 인문학 배경의 투자자를 비롯해 누구에게나 쉽게 이해시킬 수 있는 이름인 것이다 [1].

디지털 트윈은 거울을 마주하는 쌍둥이의 이미지를 사람들에게 제공하기 때문에 내가 다루고자 하는 것이 사이버 상에서 그대로 나타나서 마음대로 다룰 수 있게 하는, 실세계의 자동차 운전은 하지 못해도 똑같은 것이 사이버에 있어서 운전해볼 수 있는 경험을 제공하고 있고, 쌍둥이라고 하는 친숙하고, 가깝고, 이쁘기도 한 감각적 이름, 이런 것들이 복합적으로 작용해서 사람들의 눈길을 끌기 시작한 것으로 이해할 수 있다.

본 고에서는 디지털 트윈의 개념과 개념을 실현시키기 위해 필요한 기술적 고려사항들을 다루도록 한다. 이어서 활용 사례들을 통해 디지털 트윈이 어떻게 시장에서 확산되고 있는지 소개를 하고자 한다.

## II. 디지털 트윈의 개념

### 1. 기술 개념의 유래

디지털 트윈의 기본 개념은 2002년에 미국 마이클 그리브스 박사가 제품생애주기 관리(PLM)의 이상적 모델로 설명하면서 등장했다. 이 개념에 대해 NASA의 존 비커스 박사가 디지털 트윈으로 이름을 붙였고, 2010년 NASA가 우주 탐사 기술 개발 로드맵에 디지털 트윈을 반영하면서 우주산업에서 계속 쓰여 왔다.

우주 탐사에서는 쌍둥이 개념이 오래 전부터 쓰였는데, 그때는 가상 세계에 가상적 쌍둥이 모델을 만들 수 있을 만한 기술이 없었기 때문에 실제로 물리적 쌍둥이를 만들어서 사용하였다.

2017년 12월에 러시아에서 개봉한 스테이션 7 영화는 살류트 7호 우주선이 우주에

서 사고를 당한 후에 돌아오기까지의 과정을 그린 것인데, 지상에 있는 살류트 7호 실물 쌍둥이를 활용하여 문제를 파악하고 대처 방법을 찾는 장면이 나온다. 미국에서도 1970년 4월에 발사된 아폴로 13호에서 발생한 문제를 해결하기 위해 지상의 실물 쌍둥이를 활용하여 문제 해결책을 찾았다. 이처럼 같은 모습과 같은 동작과 기능을 하는 쌍둥이의 존재는 과거로부터 지금까지 필요성이 인정되어 왔던 것이다. 지금은 컴퓨팅 기술들의 발전으로 가상 모델을 만들고 가상 시뮬레이션을 할 수 있게 되었기 때문에 실물 쌍둥이는 더 이상 필요가 없게 된 상황이다. 비행기와 같은 매우 예민하고 복잡한 제품을 설계할 때도 실물 모형을 만들 필요도 없이 가상적 모형으로 설계물의 형상을 시뮬레이션할 수 있게 되었다.

디지털 트윈이란 이름이 NASA에서 만들어진 것은 과거의 경험으로부터 자연스럽게 귀결이라고 볼 수 있겠다. 이렇게 이름이 지어진 배경에도 불구하고, 디지털 트윈의 기본 개념을 성립시킨 주체는 마이클 그리브스 박사로 인정되어 있다.

이후 GE가 자사의 엔진, 터빈 등 제품에 디지털 트윈 모델을 적용하면서 널리 알려져 GE가 디지털 트윈의 원조로 혼동하는 상황이 벌어지기도 했다. 또한, 가트너가 2017년과 2018년 유망 기술의 평판 주기(Hype cycle for emerging technologies)에서 디지털 트윈을 명시하면서 더욱 시장에서 더욱 힘을 받았고, 2020년에는 도시민 디지털 트윈(Citizen Twin)과 사람 디지털 트윈 (Digital Twin of the person)을 포함하면서 사람이 실물 세계와 가상 세계에서 유기적 역할을 하는 개념으로 확장되고 있다.

## 2. 디지털 트윈 기술 개념

마이클 그리브스 박사가 제시한 디지털 트윈의 기본 개념은 [그림 1] (a)와 같았다. 실세계와 가상세계가 연결되어 상호 작용하는 구성이다. 이것을 좀 더 구체화 하여 [그림 1] (b)와 같이 표현되었다 [2]. (b)의 그림과 같이 실물 대상을 물리 트윈이라 부르고, 가상세계에 가상 객체의 쌍둥이 모델이 디지털 트윈이며, 이들 간에 통신 연결을 통해 각자의 상태 정보를 공유하여 상호 작용하는 구성이다.

이와 같은 구성도에서 혼동을 유발하는 요소는 물리 트윈과 디지털 트윈, 그리고 이들 간의 데이터 통신을 포함하는 전체 구성에 대해 불리는 이름이 없다는 것이다. 그래서 디지털 트윈이라고 하면, 전체를 아우르는 총칭의 이름이기도 하면서 가상 세계에 쌍둥이 존재로 만들어진 가상 객체의 이름이기도 하는 중의적 뜻이 혼용되고 있다. 대화 표현 또는 서술 설명 속에서 맥락에 의해 큰 혼동이 없이 이해되고는 있으

나 총체적 명칭과 개별 요소를 구분하고자 하는 경우에는 해결 수단이 없는 것이 사실이다. 이에 따라 디지털 트윈은 가상 세계의 쌍둥이 가상 객체에 대해 부르는 명칭으로 한정하고, 물리 트윈을 포함해서 전체를 아우르는 총체적 명칭을 디지털 트윈 시스템으로 부르는 사례가 있다.

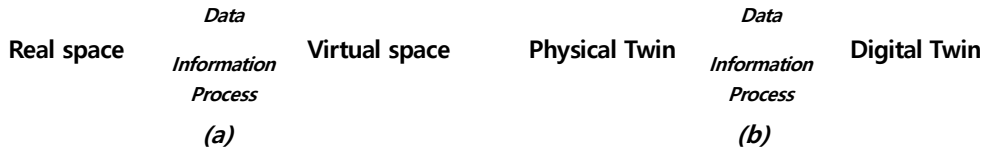
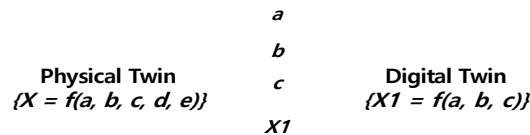


그림 1. 디지털 트윈 개념도

디지털 트윈은 현실 세계에 존재하는 사물, 시스템, 환경 등을 S/W 시스템의 가상 공간에 동일하게 모사(virtualization)하고, 실물 객체와 시스템의 동적 운동 특성 및 결과 변화를 S/W 시스템에서 모의(simulation)할 수 있도록 하고, 모의 결과에 따른 최적 상태를 실물 시스템에 적용하고, 실물 시스템의 변화가 다시 가상 시스템으로 전달되도록 함으로써 끊임없는 순환 적응 및 최적화 체계를 구현하는 기술이다.

[그림 2]는 디지털 트윈의 개념을 좀 더 구체화 된 형태로 표현한 것이다. 물리 트윈에 대한 수학적 표현식의 의미는 물리 객체의 동작은 X라고 불리는 모델로 표현이 되는데, a, b, c, d, e라고 하는 매개변수에 의해 동작이 좌우된다는 뜻이다. 어느 하나의 매개변수가 변화되면 그에 따라 결과에 대한 종속변수 X도 변화가 뒤따르게 된다. 디지털 트윈에 대한 X1은 X 전체 가운데 일부만 모델링하여 부분적 동작을 디지털 트윈으로 만들었다는 뜻이다. 예를 들어, 사람의 경우에 성격, 골격, 혈관, 근육 등 다양한 구성으로 되어 있는데, 이 가운데 일부인 근육만 형상 및 동작 모델로 만들었다는 의미이다 [3].



The Interface

그림 2. 디지털 트윈 개념도

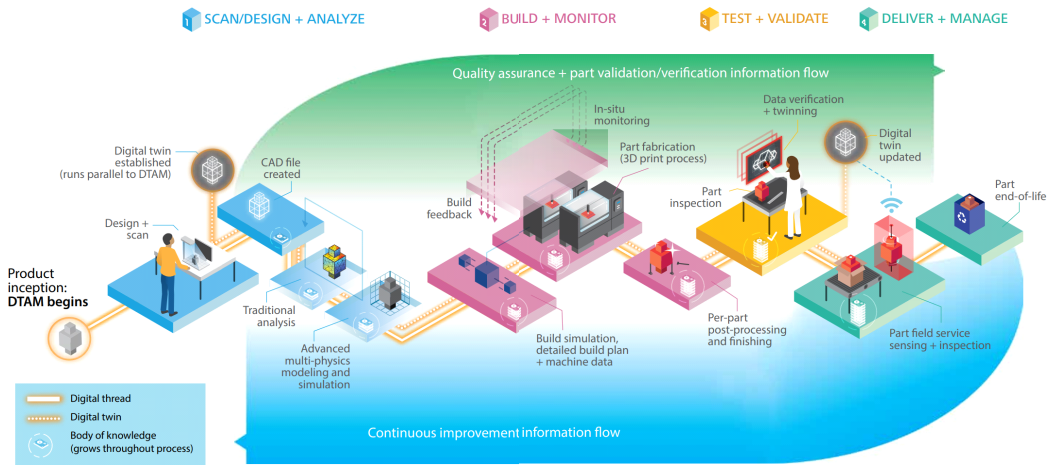


그림 3. 디지털 쓰레드 (Digital thread) 개념도[4]

[그림 1]과 [그림 2]는 현실 세계와 가상 세계 사이의 단일 객체 간의 쌍둥이 동작으로 한정되어 있는 것처럼 보이지만, 물리 객체의 생애주기 동안 흘러가는 모든 경로에 대해 가상 세계에서도 쌍둥이 가상 객체가 서로 연결되어 상호 작용을 하게 된다. [그림 3]은 이러한 형상을 표현하고 있으며, 디지털 쓰레드를 통해 전체 연결이 이루어지고 물리 객체와 가상 객체 사이뿐만 아니라 전체 과정에 대한 상호 작용도 이루어지게 된다.

### 3. 디지털 트윈 기대 효과

#### 가. 전략적 기대효과[3]

- 디지털 전환 가시화 : 디지털 전환(Digital Transformation)은 사업/업무의 관행, 수행체계, 정보화, 지능화, 자율동작 등을 통해 모든 것을 변화시킬 수 있는, 사고체계 전환을 유발하는 것으로서 디지털 트윈은 이러한 변화와 전환을 사용자들에게 표출하는 수단으로서 기능할 수 있음
- 프로세스 변혁의 영감(Inspiration) : 디지털 트윈의 거울상 쌍둥이 모델은 업무 절차, 수행체계, 동작 모델, 개인화 서비스 등에 대해 혁신적 변화를 만드는 데에 영감을 줄 수 있음

### 나. 사업적 기대효과[3]

- 제품/서비스 가시화 : 고객에게 제품과 서비스를 공급할 때 거울상 쌍둥이 모델 형태로 가시화 하여 고객들에게 사용상의 편리함과 친숙함을 제공
- 공급 및 배송 연결 효율화 : 공급망의 운영체계를 거울상 쌍둥이 모델로 가시화 함으로써 현황 파악과 대응을 직관적으로 빠르게 처리할 수 있도록 효율화 지원
- 제품 추적성 향상 : 제품과 서비스가 소비자들에게서 어떻게 사용되고, 관리되는 지 추적함으로써 제품과 서비스 품질 향상을 도모하는 데에 거울상 쌍둥이 모델이 직관화 시키고, 시뮬레이션을 통해 대안을 찾을 수 있도록 지원
- 시스템 통합 효율화 : 상호 대응 관계를 효과적으로 관리해야 하는 시스템 통합에서 거울상 쌍둥이 모델을 통해 구성 설계, 통합 운영 등을 효율화 지원

### 다. 운영관리 기대효과[3]

- 제품 설계 효율화 : 실제 환경의 데이터를 활용하여 제품 설계 시뮬레이션을 수행할 수 있게 하여, 제품 설계를 효율화 시킬 수 있음
- 예지보전 (Predictive maintenance) : 물리 시스템의 운영 상태를 지속적으로 파악하는 과정에 정상적 동작 모델을 벗어나는 상태를 파악함으로써 문제가 발생하기 전에 대응 조치를 할 수 있게 함
- 실시간 모니터링과 사전 대응 (Proactive control) : 예지보전은 점진적 변화에 대한 사전 대응 조치를 지원하는 것인데 비해 실시간 모니터링 및 사전 대응은 돌발적인 상태 변화에 따른 긴급 대응 조치를 동작 모델과 시뮬레이션 기능을 통해 지원
- 유지보수 효율성 개선 : 복잡한 시스템을 대상으로 유지보수를 수행할 때 작업자에게 디지털 트윈을 통해 정보를 제공함으로써 직관적 이해를 돕고, 보수 정보, 조치 방법 등 제반 정보 서비스를 제공
- 프로세스 최적화 : 시스템의 동작 모델이 디지털 트윈으로서 만들어져 있기 때문에 조건에 따른 시뮬레이션이 가능하며, 실제 동작 상태와 비교하면서 최적화 운영 지원
- 원인 분석 : 시스템의 동작 상태에 대한 데이터를 이용하여 이미 발생한 문제에 대해 재현 시뮬레이션을 함으로써 원인 분석을 가능하게 함
- 다자간 의사결정 : 디지털 트윈의 연합적 연동을 통해 공동 문제 또는 복합 문제

에 대한 원인을 보다 쉽게 파악하고, 산업 영역 간에 발생하는 상호 관계 및 부작용을 분석하며, 산업 생태계 전반에 걸쳐 이해관계자 간에 협업을 지원

#### 4. 디지털 트윈과 CPS의 비교

디지털 트윈과 CPS에 관련되어 있는 모든 사람들을 골치 아프게 하는 것이 두 가지 기술의 비교이다. 같은 것인지, 다른 것인지, 다르다면 어떻게 다른지 설명하는 것이 매우 곤혹스러운 것이다. 응답하는 것에 곤혹스러운 이유는 두 가지 기술이 다른 영역에서 오랜 세월 활용되어온 역사가 있기 때문에 기본적으로 서로 다른 것이라는 인식 아래 그 차이점을 설명하려고 하기 때문이다.

진화론에 따르면 똑같은 진화의 결과가 독립적인 다른 집단에서 독립적 진화의 결과로 나타날 수 있는데, 이것을 수렴진화라고 한다. IT 시스템에서도 물리 객체의 존재와 대응하는 쌍둥이 가상 객체의 존재를 만들고, 시뮬레이션, 예측, 제어 등을 수행해서 운영 최적화를 하려는 노력이 있었고, 이것은 자연스런 IT 시스템의 진화 과정일 것이다. 디지털 트윈은 제조 분야에서 CPS는 임베디드 시스템 분야에서 각기 독립적으로 진화된 결과이다.

2002년에 디지털 트윈의 기본 개념이 제시되었고, 2006년 경에 임베디드 시스템에서 디지털 트윈과 같은 개념으로 사이버물리시스템(CPS) 단어가 등장했고, 2007년에 미국 대통령과학기술자문위원회(PCAST)가 CPS를 국가적 우선순위로 선언한 이래 임베디드 시스템이 쓰이는 여러 분야에서 CPS가 활용되어 왔다. 제조업 혁신을 도모하기 위해 독일에서 출발한 4차 산업혁명의 비전에는 CPS를 핵심 기반 기술 가운데 하나로 두고 있을 정도이다.

디지털 트윈과 CPS는 둘 다 기술 규격을 갖고 있는 고유한 독자 기술이 아니고, 개념적 기술이며, 이 개념을 여러 가지 종류의 기술들을 결합시켜 만든 솔루션 기술이라고 할 수 있다. Wi-Fi나 Bluetooth는 구현을 위한 기술 규격이 존재하고, 개발 제품에 대해 이 규격대로 만들어졌는지 시험을 하는 기관도 존재하여 단 한 가지 오류에 대해서도 부적합 판정을 내릴 수 있다. 그러나, 디지털 트윈과 CPS는 기술 규격이 없기 때문에 옳고 그름을 판정할 수가 없다 [3].

디지털 트윈과 CPS가 개념적 기술이라는 것은 사람들마다 조금씩 다른 이해와 생각으로 설명할 수가 있다는 것이다. 개발자들의 상상과 고객의 요구와 관련 구현 기술을 바탕으로 조금씩 다른 형태를 보이거나 설명하고 있다. 이것이 디지털 트윈과

CPS에 대해 설명해 놓은 많은 것들이 조금씩 다른 이유이다. 그러나, 본질적으로는 같은 목적, 같은 내용, 같은 결과를 만들어내고자 하는 같은 종류의 기술이라고 할 수 있다. 또한, 그 누구도 이 설명들이 틀렸다고 판정할 수가 없다. 이 때문에 똑 같은 기본 개념을 갖고 있는 디지털 트윈과 CPS는 같은 개념의 다른 이름이라고 설명하는 것이 가장 합리적이라고 할 수 있다.

### Ⅲ. 디지털 트윈 기술 요소

#### 1. 디지털 트윈의 규모와 종류[3]

디지털 트윈에 대한 토론 과정에서 각자의 머리에서 생각하는 디지털 트윈의 대상과 규모가 제각각이어서 사전에 설정하지 않으면 불필요한 논쟁이 진행되곤 한다.

개념적으로 디지털 트윈은 현실에 존재하는 모든 것을 대상으로 적용할 수 있다. 예를 들어, 어떤 기계를 구성하는 부품에 대해 부품 단위의 디지털 트윈, 부품들이 조립되어 동작기계가 되었을 때 이 기계에 대한 디지털 트윈, 동작기계 몇 가지가 결합하여 제조 시스템을 구성할 때 시스템 단위의 디지털 트윈, 여러 가지 제조 시스템들이 결합하여 생산 라인을 구성하여 단계별 제조 흐름을 통해 완성품을 만들어내는 제조 공정 디지털 트윈이 있을 수 있다. 이것을 다시 확장시켜 공장 단위, 여러 공장들을 엮어서 회사 단위로까지 확장시킬 수 있다.

디지털 트윈의 규모는 운영, 유지보수 및 성능을 관리하게 되는 도시 또는 국가까지 더 높은 수준으로 확장할 수도 있으며, 디지털 트윈 도시가 추진 목표에 포함될 수 있다.

따라서, 개별적 부품 수준, 다수 부품들이 결합된 설비 수준, 다수 설비들이 결합된 시스템 수준, 다수의 시스템들이 결합된 프로세스 수준, 다수의 프로세스가 결합된 건물과 공장 수준, 이어서 회사, 도시, 국가 등 단계적 결합이 가능하기 때문에 통합적 디지털 트윈의 범위를 결정해야 한다.

디지털 트윈 규모의 문제는 사람들이 대상을 분석하고 설계할 때 고려해야 하는 한계를 의미하는 경계 문제에 해당하기 때문에 대상에 대한 모델링 목적과 활용 계획을 명확히 하고, 이에 부합하는 설계상의 경계 범위를 설정해야 한다. 예를 들어, 동작기계 조립에 사용하는 볼트는 느슨해졌을 때 제조 과정에 품질 문제와 고장을 야기

할 수 있기 때문에 관리 대상에 포함되어야 할 수도 있지만, 수년에 걸쳐 장기간에 변화가 일어나는 대상은 모델링의 필요성이 낮으므로 배제할 수 있다. 따라서, 달성하고자 하는 목적에 따라 경계 범위를 잘 설정해야 한다.

## 2. 디지털 트윈 모델링[3]

모델링은 물리적 개체로부터 구조와 행동에 대한 표현 양식을 생성하는 행위로서, 구조 표현은 2D 또는 3D 모양으로 나타낼 수 있고, 행동 표현은 수학적 공식, 절차 단계, 선택적 옵션, 알고리즘 규칙 등과 같이 컴퓨터가 처리할 수 있는 방식으로 나타낼 수 있다. 복잡한 동작 행위는 실측 데이터를 바탕으로 인공지능을 통해 동작 모델을 만들어 내는 방법도 사용하고 있다.

물리적 개체나 시스템에 대한 모델링은 어떤 목적으로 하느냐에 따라 달려 있으며, 모든 것을 모델링하기 위해 불필요한 비용과 시간을 들일 필요는 없다. 즉, 모델링은 필요한 만큼만 하는 것이다. 따라서, 모델링의 목적을 먼저 정의한 다음에 구조 및 동작을 모델링해야 적절하다.

모델링 작업을 수행하기 위한 여러 가지 방법들이 제시되어 있으며, FBS (Function - Behavior-Structure) 프레임워크도 그 중의 한 가지 방법으로 쓰이고 있다.

## 3. 디지털 트윈 모델링 차원[3]

물리적 개체의 행동은 시간, 비용, 성능, 지속가능성, 안전성 등과 같은 다양한 관점으로 분석할 수 있으며, 어떤 관점을 선택하느냐는 목표와 목적에 달려 있다.

모델링 차원은 디지털 트윈을 최종적으로 데이터로 표현할 때 어떤 구조적 틀로 구성할 것이냐의 문제로서, 디지털 트윈을 위한 모델링 과정에 적용할 수 있다. 예를 들어, BIM (Building Information Modeling) 제품들은 5D, 6D, 7D, 8D, 9D, 10D 등과 같이 다양한 데이터 축을 지원한다고 하고 있다. 최초 2D, 3D 기하구조에서 출발하여 시간을 포함하고 있는데, 생애주기, 안전성, 지속가능성, 비용 경제성 등 다양한 항목들이 부분적으로 속성 정보에 포함되어 있다가, 마케팅과 상품화 과정에 데이터 구성 축으로 뽑아 올려져 5D, 6D, 7D, 8D, 9D, 10D로 확장된 것처럼, 데이터 모델링 차원은 무엇을 구성 축으로 두고, 무엇을 데이터 속성으로 간주할 것이냐의 선택과 데이터 구조 모델에 대한 문제이다.

디지털 트윈에서는 다음과 같이, 3D, 시간, 역할, 속성을 기반으로 데이터 모델링

차원을 활용할 수 있다.

○ 3D

- 점, 표면, 형태, 공간의 형태로 나타내는 3D 데이터 차원은 이미 널리 사용되어 왔고, 디지털 트윈에서도 물리적 개체가 3D 모델로 만들어져야 하기 때문에 해석, 설계, 또는 데이터 모델 구조로 필수적이고 명확한 모델링 차원임
- 복잡한 물리적 시스템을 디지털 트윈 시스템으로 모델링해야 하는 경우에, BIM 데이터 모델의 일부를 데이터 차원으로 활용할 수도 있음
- 3D 표현의 충실도는 모양, 표면, 공간의 세분화를 통해 정의할 수 있음

○ 시간

- 과거와 미래의 상태를 구분할 수 있고, 저장된 데이터를 활용하여 현상과 결과 재현 시뮬레이션을 통한 원인 분석이 가능하기 때문에 3D 외에 또 다른 필수적이고 명확한 데이터 차원임
- 시간의 충실도는 시간 범위의 세분화로 정의할 수 있음

○ 역할

- 역할은 수행되어야 하는 물리적 개체의 동작, 행동, 행위 등을 의미하며, 이를 수행하기 위해 서로 결합되어 있는 일련의 요소 행동으로 구성될 수 있음
- 물리적 개체는 수행 목적에 맞춰 여러 가지 역할을 수행할 수 있으며, 어떤 도메인 내에서 수행하던 역할이 다른 도메인에서는 같은 물리적 개체가 다른 정체성으로 다른 역할을 수행할 수 있음
- 따라서, 물리적 개체의 디지털 트윈 모델은 같은 도메인에서 여러 가지 역할, 다른 도메인에서는 다른 정체성의 다른 역할을 수행할 수 있으므로 디지털 트윈에 대한 데이터 모델은 역할이라고 하는 해석과 설계의 관점이 적용되어야 함

○ 속성

- 속성은 물리적 개체의 특정 행동에 영향을 미치는 요소를 의미하며, 영향력 요소가 더 많이 식별되고 모델링될 수록 디지털 트윈의 동작이 물리적 개체와 더 정확하게 부합할 수 있음
- 즉, 물리적 개체의 특성을 식별해낸다는 것은 물리적 개체의 기능적 행동에 대한 입력 매개변수를 찾는 행위라고 할 수 있음

#### 4. 디지털 트윈 연합[3]

현실 세계의 특정한 문제는 하나의 원인으로 인해 발생하는 것이 아니라, 종종 다양한 원인이 서로 섞여서 발생하곤 한다. 특히, 복잡계 시스템은 서로 관련되어 있는 여러 원인들이 종속적으로 결합하여 일으키는 문제를 겪어 왔는데, 예를 들어, 제조 공장, 운송, 에너지 생산, 도시와 같은 여러 영역에 걸쳐 미세 먼지, 폐수 등 환경 문제가 발생할 수 있다.

이러한 문제를 해결하기 위해서는 각각의 디지털 트윈 도메인이 상호 작용할 수 있도록 연합적 협업을 위한 연동이 이루어져야 한다. [그림 4]는 디지털 트윈 연합에 대한 개념적 구성도를 보여주고 있다.

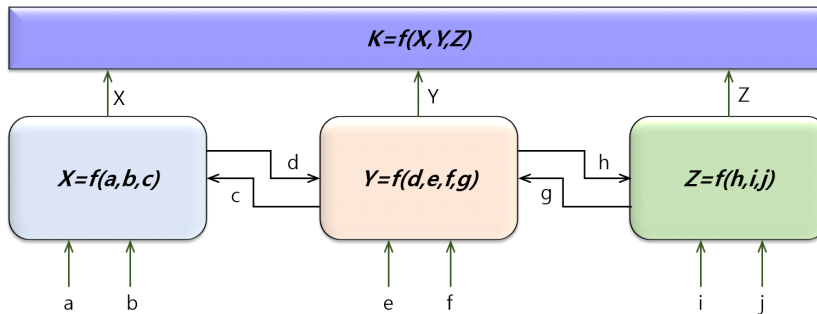


그림 4. 디지털 트윈 연합(federation) 개념도

따라서, 디지털 트윈이 다른 디지털 트윈 시스템과 상호 작용하여 여러 도메인 간의 연계 문제를 처리하기 위해 연합적 디지털 트윈 연동이 필요하다.

## 5. 디지털 트윈 충실도[3]

### 가. 충실도 차원

충실도는 디지털 트윈 모델로 표현된 가상 객체가 원래의 물리적 객체와 얼마나 잘 부합하느냐로 정의될 수 있으며, 충실도는 특성화 충실도와 시각화 충실도로 구성된다. 충실도는 동작, 시간, 세분화/해상도의 세 가지 직교 차원으로 분석하고 설계할 수 있다.

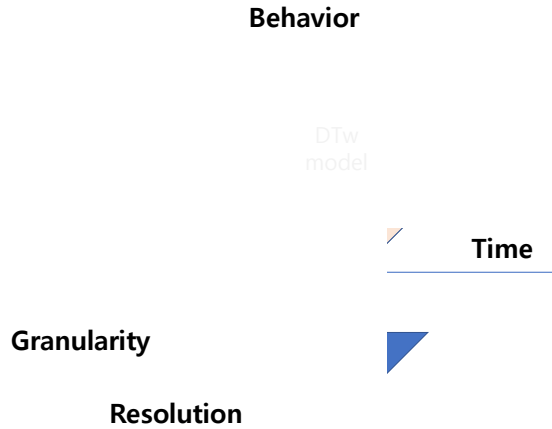


그림 5. 디지털 트윈 충실도 차원

세분화/해상도는 세밀함에 대한 공통 속성을 기반으로 하고 있기 때문에 같은 축으로 놓고, 나머지 두 축(차원)과 각각 결합하여 해석과 설계 기준으로 활용하는데, 동작-세분화, 동작-시간, 해상도-시간 측면에서 디지털 트윈을 설계하고 해석할 수 있다.

특성화 충실도는 동작-세분화 및 동작-시간이라는 두 평면에 의해 구체화 될 수 있고, 시각화 충실도는 해상도-시간 평면에 의해 구체화 될 수 있다.

## 나. 디지털 트윈 가시화 충실도

디지털 트윈의 최종 사용자는 사람이기 때문에 디지털 트윈이 사람들에게 어떻게 보이도록 할 것인지가 해결해야 할 문제 가운데 하나이다. 가시화 충실도는 디지털 트윈이 물리적 개체와 얼마나 가깝게 보이는지를 의미한다. 충실도가 높을수록 디지털 트윈은 외관상 물리적 개체와 시각적으로 구조적으로 더 비슷하게 된다.

물리적 개체에 대해 디지털 트윈의 시각적 부합성을 측정하기 위한 충실도 측정 지표가 필요한데, 공간 분해능에 대한 해상도와 시간 분해능에 대한 지연 시간의 두 가지로 평가 가능하다.

공간 분해능의 충실도는 DPI (Dot Per Inch)라는 해상도로 정의되고, 시간 분해능의 충실도는 화면에 시각화될 때까지 누적되는 다양한 지연 시간을 통해 시간 범위의 세분화로 정의(예 : 분, 초, 밀리 초, 마이크로 초 등)된다.

## 다. 디지털 트윈 특성화 충실도

디지털 트윈 특성화 충실도는 물리적 개체의 행위 동작에 정확히 부합시키기 위해 디지털 트윈의 가상적 동작 모델을 가능한 한 정교하고, 구체적이며 정확하게 표현한 정도를 나타낸다.

특성화 충실도는 데이터를 통해 처리할 수 있는 논리 구조에서 데이터 매개 변수로 표현될 수 있다. 물리적 개체의 특성을 표현하기 위한 가상 모델을 개발하는 것은 행동과 성격을 컴퓨터로 처리 가능한 형태, 즉 동작 매개 변수와 데이터 처리 기능으로 구조화 하는 행위이며, 디지털 트윈 모델링의 충실도가 높을수록 디지털 트윈이 다루어야 하는 동작 매개 변수와 처리 기능이 많아지고 복잡해지게 된다.

예를 들어, 포도주의 품질은 13가지 화학물질의 함량과 화학적 결합에 의해 좌우되는데, 다음과 같은 수식으로 표현을 할 수 있다.

Wine(X) = f(Alcohol, Malic acid, Ash, Alkalinity of ash, Magnesium, Total phenols, Flavonoids, Nonflavonoid phenols, Proanthocyanidins, Colour intensity, Hue, OD280/OD315 of diluted wines, Proline)

포도주의 품질을 결정하는 모델을 알콜 한 가지 모델로만 만든 것에 비해 세 가지 물질에 따른 평가 모델, 또는 13가지 전체 물질에 따른 평가 모델은 특성화 충실도가 더 높다고 할 수 있다. 위 수식에는 시간의 변화에 따른 품질은 반영되어 있지 않은데, 똑같은 종류의 포도주이더라도 한 달 된 포도주와 10년 된 포도주가 같은 품질 평가를 받는다는 뜻이다.

## IV. 디지털 트윈 활용 사례

### 1. 가상 싱가포르[5]

스마트시티 구축과 운영에 디지털 트윈을 적용한 대표적 사례로 싱가포르가 언급되고 있다. 싱가포르의 빌딩, 도로망, 수목, 강 등 도시 전체를 구조적 3D 가상 모델로 만들었고, 교통체계, 건축 등에 대한 시뮬레이션, 군중 분산, 교통 흐름, 보행자 이동 패턴 등과 같은 다양한 목적의 시뮬레이션이 가능하다.



그림 6. Virtual Singapore

Virtual Singapore는 주변 온도와 햇빛이 하루 동안 어떻게 변하는지에 대한 통찰력을 제공할 수 있고, 도시 설계자는 새로운 건물이나 설치물을 건설하는 것이 부동산의 온도와 광도에 미치는 영향을 시각화 할 수 있습니다. 가상 싱가포르에서 열 및 소음지도를 오버레이할 수도 있다.

그런데, 디지털 트윈의 기본 개념은 실물 객체와 가상 객체 간에 실시간의 데이터 통신을 통한 상호 작용을 전제로 하고 있는데, Virtual Singapore는 도시 규모이기 때문에 이러한 실시간 데이터 연동은 없이 가시적 및 동작 모델로 구성된 구조이다.

## 2. 새만금 디지털 트윈

새만금개발청은 국정과제로 추진 중인 '새만금 스마트 수변도시' 조성 시 수변도시 경쟁력 강화와 도시민 삶의 질 향상을 위해 디지털 트윈 플랫폼 구축 계획을 갖고 있다. 수변도시 조성으로 만들어지는 새로운 도시에 매립 단계, 토목공사 단계, 건설·운영 단계 등 단계별 맞춤 방식으로 디지털 트윈을 적용할 계획이다 [6].

- (매립 단계) 지하 인프라 디지털화, 지하시설물 관리, 하수역류방지, 우수관리 등
- (토목공사 단계) 5G Communication based Vehicle Test-City 구축 등
- (건설 및 운영단계) 소방/안전, 생활/환경, 물관리, 에너지, 건강/의료, 공유/이동, 참여 및 커뮤니티, 도시경제 등



그림 7. 새만금 스마트 수변도시 조감도[6][7]

전라북도는 새만금 산업단지에 친환경 교통망을 주요 수요처로 전력-수소 부문 간 연계시스템 구현으로 그린수소 생산-수송-저장 및 충전 인프라를 구축하고, 구축된 설비로부터 데이터 수집과 분석을 통해 가상공간에서 에너지 통합 시스템을 구축한 재생에너지 디지털 트윈 시스템을 완성할 계획이다 [7].

## V. 결론 및 시사점

디지털 트윈은 제조업에서 개념이 출발하여 제조 현장의 설비와 공정을 직관적으로 똑같이 들여다 볼 수 있게 만드는 쌍둥이 모형을 제공하기 때문에 점점 확산되어 왔다. 쌍둥이 모형은 상황을 편하고, 쉽게 이해할 수 있게 해주기 때문에 사용자들의 호감을 살 수 있는 방식이다. 또한, 제조 현장은 여러 가지 조건에 의해 품질과 생산성이 달라지는데, 디지털 트윈을 통해 제조 공정에 대한 동작 모델을 운영할 수가 있어서 온도, 습도, 작업자, 운전조건 변경 등 다양한 변경에 대해 원인 분석과 최적화를 수행할 수 있기 때문에 유용성이 산업 현장에서 확인되어 왔다.

디지털 트윈의 본질적 개념은 사람, 자동차, 제조설비 등 현실 세계의 실제 대상을 가상세계에 쌍둥이로 만들고, 현실 객체의 동작과 행위를 가상세계에서도 실현시켜서, 현실 세계와 가상 세계의 쌍둥이 개체가 서로의 변화를 동기화 시키는 데에 있다. 어느 하나의 변화는 상대 쌍둥이에게 변화를 유발시키고, 변화의 폭과 깊이를 얼마나 다양하게 변주할 것이냐에 따라, 사람들의 상상력에 의해 변화의 모습이 달라질 것이다. 이러한 개념과 효과는 제조업뿐만 아니라 교통, 의료, 환경, 안전 등 여러 산업 분야에서도 필요하기 때문에 점점 도입 사례가 증가하고 확산되어 왔고, 현재 연구개

발 및 시장 도입 현황에서도 관찰과 예측이 필요로 하는 모든 곳에서 활용 사례가 나타날 것이다.

CPS와 디지털 트윈은 같은 개념을 실현하는 기술이고, 디지털 트윈이 사람들에게 개념 전달력이 더 높기 때문에 향후에는 CPS가 디지털 트윈과 결합하여 디지털 트윈 기술로 더욱 발전해갈 것이다.

최근에 메타버스(Metaverse) 개념과 활용 사례들이 널리 알려지고 있다. 15년 전에도 알려져서 사람들의 입길에 오르내렸던 개념이었지만, 최근의 가상현실, 증강현실, 혼합현실, 디지털 트윈 기술이 결합하면서 재탄생하고 있는 상황이다. 메타버스에서 사람은 아바타의 형태로 가상공간에 존재하여 실생활 같은 가상현실 속에서 사회적, 경제적 역할을 수행할 수 있도록 하고 있는데, 디지털 트윈은 여기에 접목되어 현실의 게임장이 메타버스의 게임장으로 존재하고, 메타버스 게임장의 게임 상태와 결과가 현실의 게임장에도 나타나서 사람들이 현실 공간의 게임장에서 메타버스 세계의 경험을 그대로 이어갈 수 있게도 할 수 있다. 현실세계와 가상세계의 결합은 혼합의 정도(degree of mix)에 따라 다양한 모습으로 나타날 수 있고, 필요한 기술이 달라질 수 있다.

메타버스의 경험은 가상현실, 증강현실, 디지털 트윈, 혼합현실 등의 기술적 개념들이 결합하여 현실세계와 가상세계가 서로 결합하여 유기적인 동기화의 형태로 표출될 것으로 전망된다.

## [ 참고문헌 ]

- [1] 최동학, “디지털 트윈의 미래”, 정보통신신문, 2018. 10. 23., <https://www.koit.co.kr/news/articleView.html?idxno=74056>
- [2] Michael W. Grieves, “Digital Twin: Manufacturing Excellence through Virtual Factory Replication,” ResearchGate, March 2015, <https://www.researchgate.net/publication/275211047>
- [3] 김용운, 유상근, 이현정, 한순흥, “디지털 트윈의 꿈 (Characterization of Digital Twin)”, ResearchGate, 2021-02-28, <https://www.researchgate.net/publication/348356334>
- [4] Mark J. Cottleer, Stuart Trouton, and Ed Dobner, “3D opportunity and the digital thread - Additive manufacturing ties it all together”, Deloitte University Press, 2016, [https://www2.deloitte.com/content/dam/insights/us/articles/3d-printing-digital-thread-in-manufacturing/ER\\_3060-3D-opp-Digital-Thread\\_MASTER-1.pdf](https://www2.deloitte.com/content/dam/insights/us/articles/3d-printing-digital-thread-in-manufacturing/ER_3060-3D-opp-Digital-Thread_MASTER-1.pdf)
- [5] National Research Foundation of Singapore, “Virtual Singapore”, 2020, <https://www.nrf.gov.sg/programmes/virtual-singapore>
- [6] 새만금개발청, “새만금개발청, 디지털 트윈 플랫폼 구축 추진”, 2020. 1., <https://www.korea.kr/news/pressReleaseView.do?newsId=156371779>
- [7] 전라북도, “재생에너지 디지털트윈 실증연구기반 구축 본격 추진”, 2020. 12., [https://www.jeonbuk.go.kr/board/view.jeonbuk?menuCd=DOM\\_000000103003001000&boardId=BBS\\_0000020&dataSid=514575](https://www.jeonbuk.go.kr/board/view.jeonbuk?menuCd=DOM_000000103003001000&boardId=BBS_0000020&dataSid=514575)