

# 디지털 트윈 상호 운용을 위한 연합 디지털 트윈 기술

한국전자통신연구원 | 최진철·장일순·박찬원

## 1. 서 론

디지털 트윈(Digital Twin)은 컴퓨터로 현실 속 사물의 디지털 복제본을 만들고, 현실에서 발생할 수 있는 상황을 컴퓨터로 시뮬레이션함으로써 결과를 미리 예측하는 기술이다. 디지털 트윈은 산업·제조 분야 이외에도 도시, 행정, 의료, 에너지, 물류, 농수산, 식품 등 다양한 산업·사회 문제를 해결할 수 있는 기술로 주목받고 있다[1][2]. 디지털 트윈의 개념은 다음 그림 1과 같이 시각적으로 나타낼 수 있다.

디지털 트윈은 현실의 물리적 대상(사물, 공간, 시스템 등)의 형상(모양), 행위(기능), 현상(상태) 등을 정확하게 모사할 수 있는 디지털 객체로 구현되고, 지속적인 동기화를 통해 실제 세계와 디지털 세계가 실시간 데이터나 명령을 주고받으며 상호작용하는 구조로 되어 있다. 디지털 트윈의 표현(Presentation)은 동기화된 디지털 객체 정보를 기반으로 대시보드, 3D 모델, AR/VR, 상태/예측 형태로 나타낼 수 있다. 그리고 모델링 및 시뮬레이션(M&S), 제어 로직 및 비즈니스 규칙, 인공지능/머신러닝, 서비스 및 API 등의 데이터 인터렉션(Data Interaction) 기술을 활용하여 시나리오별 최적 운영 방안 도출, 예측 및 유지보수, 성능 최적화 등 다양한 기능을 제공할 수 있다.

이와 같이 디지털 트윈은 물리적 시스템의 성능을 최적화하고, 비용을 절감하며, 혁신적인 비즈니스 모델을 창출하는 중요한 도구로 활용될 수 있어, 도시, 제조, 에너지, 건설, 의료 등 다양한 산업 분야에서 활용되고 있다[3]. 예를 들어, 스마트 제조 분야에서는 디지털 트윈을 통해 생산 라인의 설비 및 공정 상태를 실시간으로 모니터링하고, 유지보수 계획을 최적화하여 생산 효율성을 높이고 있다[4]. 스마트 시티 분야에서는 교통, 에너지, 통신 등의 인프라와 건축물, 관리시스템 등의 디지털 트윈을 활용하여 교통 흐름과 에너지 사용을 효율적으로 관리하고, 도시의 운영을 최적화하고 있다[5].

일반적으로 디지털 트윈은 단일 시스템이나 특정 도메인에 집중하며, 독립적으로 데이터를 수집하고 분석하여 해당 시스템의 성능을 모니터링하고 최적화하는 데 중점을 둔다. 그러나 이러한 디지털 트윈의 특성은 다양한 시스템 간의 상호작용과 협력이 요구되는 스마트 시티나 통합 공급망 관리, 디지털 정부 등의 다중 시스템 협업 환경에서는 활용하기 어려운 한계가 있다[6]. 이에 따라, 최근 다양한 디지털 트윈 간 상호 운용과 협업을 가능하게 하는 연합 디지털 트윈(Federated Digital Twin)의 필요성이 대두되고 있

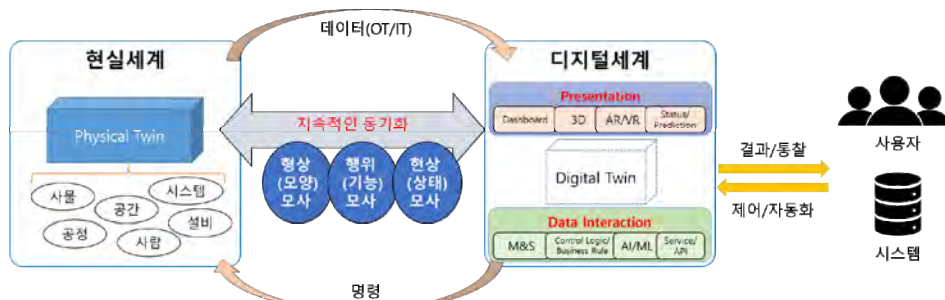


그림 1 디지털 트윈의 개념도

\* 본 연구는 2024년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 정보통신기획평가원의 지원을 받아 수행된 연구임(No. 2022-0-00438, (총괄1세부) 지능형 디지털 트윈 연합 운용 및 예측 핵심기술 개발)

다[7][8].

본 고에서는 연합 디지털 트윈의 개념과 필요성을 체계적으로 분석하고, 핵심 기술을 탐구함으로써, 연합 디지털 트윈의 개발 이슈 및 활용 방안을 제시하고, 관련 연구 및 산업 발전에 기여하고자 한다. 2장에서는 연합 디지털 트윈의 개념과 필요성을 기술하고, 3장에서는 연합 디지털 트윈의 주요 이슈를 분석한다. 4장에서는 연합 디지털 트윈 서비스 미래에 대해 분석하고, 5장에서는 향후 연구가 필요한 방향을 제시하고 결론을 맺는다.

## 2. 연합 디지털 트윈의 필요성과 개념

### 2.1 연합 디지털 트윈의 필요성

현재의 디지털 트윈은 기술 발전 측면에서 모사(Mirroring), 관제(Monitoring), 모의(Modeling & Simulation) 단계 수준에 도달하여, 하나의 현실 세계를 또 다른 디지털 세계로 변환하고 그 안에서 최적화를 수행하는 형태로 발전하고 있다[9]. 디지털 트윈은 이처럼 혁신적인 기술임에도 불구하고, 아직 다음과 같은 여러 한계로 인해 그 잠재력을 완전히 발휘하지 못하고 있다.

첫째는 데이터 통합의 어려움이다. 다양한 출처에서 발생하는 데이터를 하나의 디지털 트윈에 통합하는 과정은 복잡하며, 데이터 형식과 해석 방식, 데이터 품질, 수집/관리 주기, 시간적 지연 등의 차이로 인해 새로운 데이터 소스를 추가하거나 통합하는 작업에 많은 비용과 시간이 소요되어 어려움이 있다.

둘째는 상호운용성의 부족이다. 기술적 요인(예: 다양한 모델링 언어 및 도구, 데이터 형식 불일치, 통신 프로토콜/인터페이스 차이 등), 표준적 요인(예: 표준 부족, 데이터 시맨틱 불일치 등), 조직적 요인(예: 정보 보호 및 보안, 데이터 소유권 및 활용 분쟁 등) 등 다양한 측면에서 복합적으로 작용하는 충돌 요인들은 디지털 트윈 간 상호운용성 확보를 어렵게 만든다. 이러한 상호운용성 제한은 디지털 트윈 간 원활한 데이터 교환과 협업을 불가능하게 하여, 시스템 효율성 저하, 신뢰성 문제, 비용 증가, 최적화 및 예측 능력 제한 등의 문제를 초래한다.

셋째는 확장성의 제한이다. 단일 디지털 트윈은 특정 객체나 시스템에 최적화되어 있어, 시스템 규모가 확대되거나 네트워크 구조가 복잡해지면 효과적으로 관리하기 어렵다. 향후 시스템이 확장되거나 데이터의 양과 크기가 증가하면, 이러한 제한은 데이터 처리

와 통합에 있어서 큰 어려움을 초래할 수 있다.

최근 디지털 전환 가속화에 힘입어 폭증하는 데이터 모니터링/관리 시스템들의 통합과 상호 연동의 필요성이 점차 높아지고 있다. 이러한 측면에서 기존 디지털 트윈도 상호 연결을 허용하고, 협업과 정보 공유를 지원할 수 있는 연합 디지털 트윈의 필요성이 강조되고 있다[6][8][9].

### 2.2 연합 디지털 트윈의 개념

연합 디지털 트윈은 여러 개의 디지털 트윈이 상호 연결되고 협력하는 시스템을 의미한다. 단일 객체나 시스템의 디지털 복제에 그치지 않고, 복수의 독립적인 디지털 트윈을 연합하여 데이터 및 기능을 공유함으로써 기존 서비스를 확장하거나 신규 서비스를 제공할 수 있다. 그림 2에 연합 디지털 트윈의 논리적 구성 예시를 나타내었다[10].

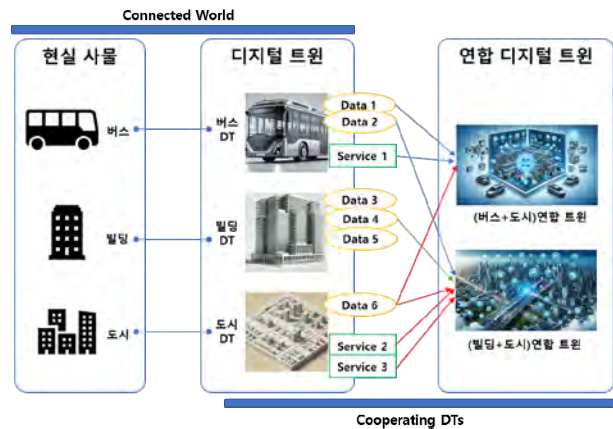


그림 2 연합 디지털 트윈의 논리적 구성 예시

디지털 트윈 간 상호 연합 가능한 구성요소는 수집/관리 데이터(2D/3D형상, 상태/상황, 운용, 특성, 설정 등)와 제공 서비스(모니터링, 제어, 시뮬레이션, 데이터 검색/처리, 분석/예측 등)으로 구분될 수 있다. 예를 들어 그림에서 (버스+도시)연합 트윈은 버스 디지털 트윈과 도시 디지털 트윈을 연합하여 버스의 경로 최적화, 배차 간격 조정, 혼잡 구간 회피 등 실시간 교통 관리 최적화 서비스를 제공할 수 있다. 그리고 두 디지털 트윈의 데이터를 통합·분석하여 교통 정책 수립, 인프라 관리, 대규모 도시 이벤트나 재난 상황에서 신속한 사건·사고 대응 지원 등 기존에는 불가능했던 전사적 도시 관리 서비스의 가능성을 엿볼 수 있다. (빌딩+도시) 연합 트윈은 개별 빌딩과 도시 전체를 통합적으로 관리하고 최적화함으로써, 에너지 효율성 향상, 자원 관리 최적화, 비상 상황 대응, 스마

표 1 연합 디지털 트윈을 위한 데이터 동기화 기술 비교

동기화 방식	설명	장점	단점	예시
데이터 스트리밍	데이터를 실시간으로 스트리밍하여 처리	- 실시간 데이터 처리 - 확장성	- 설정 및 운영 복잡성 - 대규모 데이터 처리 비용 상승	- Apache Kafka - Apache Flink - AWS Kinesis
변경 데이터 캡처	DB에서 발생하는 변경 사항을 실시간으로 감지하고 이를 동기화	- 실시간 동기화 - 데이터 일관성 유지	- 설정 복잡성 - 성능 오버헤드	- AWS DMS - Debezium
데이터 복제	DB의 데이터를 여러 장소에 복제하여 데이터의 일관성 유지	- 데이터 가용성 향상 - 읽기 성능 향상	- 데이터 일관성 문제 발생 가능 - 복제 지연	- MySQL Replication - PostgreSQL Logical Replication
파일 기반 동기화	파일 시스템의 변경 사항을 실시간으로 감지하고 동기화	- 간단한 설정 - 파일 수준의 동기화	- 대규모 파일 시스템 동기화 시 성능 저하 - 실시간 처리 어려움	- rsync - Syncthing
API 기반 동기화	RESTful API나 GraphQL을 사용하여 시스템 간 데이터를 주기적으로 또는 실시간으로 동기화	- 유연성 - 다양한 애플리케이션 통합 가능	- 네트워크 지연 - 개발 및 유지보수 비용	- RESTful API - GraphQL
분산 DB	여러 노드에 데이터를 분산 저장	- 높은 가용성, 확장성 - 강력한 일관성 보장	- 설정 및 관리 복잡성 - 운영 비용 상승	- Cassandra - CockroachDB - Google Spanner
클라우드 동기화 서비스	데이터 동기화 작업을 쉽게 관리할 수 있는 클라우드 기반 서비스 활용	- 관리형 서비스 - 손쉬운 확장 - 다양한 데이터 소스 지원	- 벤더 종속성 - 운영 비용 상승	- AWS Glue - Google Dataflow - Azure Data Factory

트 시티 구현 등의 다양한 이점을 제공할 수 있다.

### 3. 연합 디지털 트윈의 주요이슈

#### 3.1 표준화 이슈

디지털 트윈에 대한 국제 표준화는 ITU-T SG20 (스마트시티 디지털 트윈 응용별 표준화), JTC1/SC41 (일반 디지털 트윈의 특성, 구조, 성숙도 모델 표준화), ISO/TC 184(제조 분야 디지털 트윈 프레임워크 표준화) 등에서 진행되고 있다. 국내에서는 TTA PG609(CPS 및 디지털 트윈 관련 표준화)과 디지털 트윈 국토 표준(CityGML3.0을 기반으로 분야별 디지털 트윈 데이터 모델 개발)이 대표적이다.

연합 디지털 트윈에서도 디지털 트윈 간 상호운용성 확보, 확장성 및 보안 강화, 효과적 통합 관리 등을 위해 표준화가 요구된다. 활발하게 진행되고 있는 개별 디지털 트윈과는 달리 연합 디지털 트윈 관련 표준화는 아직 초기 상황이지만, CPS 및 디지털 트윈 관련 표준화를 진행중인 TTA PG 609에서 연합 디지털 트윈 관련 표준화를 활발하게 추진하고 있다.

PG 609에서는 연합 디지털 트윈의 요구사항[10], 참조구조[11], 식별체계[12], 디지털 트윈 특성정보 데이터 모델[13], 디지털 트윈 객체 식별체계[14], 디지털 트윈 객체 데이터 모델[15]등 연합 디지털 트윈에

대한 시리즈 표준이 제정되었다. 추후에는 개별 디지털 트윈의 특성 정보를 관리하는 레지스트리의 인터페이스 및 프로토콜 표준, 레지스트리 프로파일, 디지털 트윈의 통신 지원을 위한 연결 브로커 인터페이스 및 프로토콜, 모델링 및 시각화 데이터 모델, 적합성 시험/인증 등에 대한 표준화가 진행될 예정이다[16].

#### 3.2 기술 이슈

##### 3.2.1 동기화 기술 이슈

여러 디지털 트윈 간의 데이터 일관성을 유지하기 위해 데이터 동기화가 필요하다. 동기화 과정에서는 데이터의 시간적, 공간적 일관성을 유지하며, 각 디지털 트윈에서 발생하는 변경 사항이 실시간으로 반영 되도록 해야 한다. 이를 통해 연합 디지털 트윈의 모든 구성 요소들이 동적인 환경에서도 최신 데이터를 기반으로 운영될 수 있다. 표 1에 연합 디지털 트윈에 활용할 수 있는 데이터 동기화 방식들을 비교하였다.

연합 디지털 트윈의 경우 실시간 모니터링, 이상 상태에 대한 즉각적인 인지 및 대응, 고부가가치의 신규 연합 서비스 창출을 위해 빠르고 높은 정확성을 가진 동기화 기술이 요구된다. 이를 위해 고속의 처리 속도와 안정성을 제공하며, 대규모 데이터 전송이 가능한 Apache Kafka, Apache Flink 등의 데이터 스트리밍 플랫폼 사용이 우산적으로 고려될 수 있다. 그리고 네트워크 지연을 줄이고 실시간 데이터를 보다 빠르

게 처리할 수 있도록 네트워크를 최적화하고, 고성능 컴퓨팅 인프라나 클라우드 플랫폼을 사용하여 유연하고 확장 가능한 인프라를 구축해야 한다. 또한, 효율적인 데이터 아키텍처 설계, 데이터 거버넌스 프레임워크 구축 등의 다양한 전략과 기술을 종합적으로 활용해야 할 것이다.

### 3.2.2 모델링 및 시뮬레이션 기술 이슈

모델링은 실제 시스템에 대한 정의, 특성을 수학적, 물리적, 논리적, 시각적 표현으로 생성하는 프로세스이다. 모델링 과정에서는 시스템의 주요 구성요소와 각 요소 간 상호작용을 이해하고, 이를 기반으로 모델이 구축되어야 한다. 시뮬레이션은 구축된 모델을 사용하여 시스템의 동작을 가상으로 재현하는 과정이다. 시뮬레이션을 통해 다양한 조건과 환경에서 시스템이 어떻게 동작하는지 분석할 수 있다.

연합 디지털 트윈에서는 개별 디지털 트윈의 모델과 시뮬레이션 간 연합도 함께 고려될 수 있다. 그러나 각 디지털 트윈은 고유한 모델과 시뮬레이션 환경을 가지고 있기 때문에, 다른 디지털 트윈의 모델을 그대로 가져와 사용하는 방식으로는 정상 동작을 보장할 수 없다. 이는 데이터 표현 및 구조의 차이, 모델링 접근 방식의 차이, 인터페이스 및 API의 차이, 시간적/공간적 스케일 문제 등 다양한 기술적, 구조적, 운영적 차이로 인해 서로 호환되지 않기 때문이다 [17][18].

이중 디지털 트윈간 모델의 호환성을 확보하기 위해서는 다음과 같은 방법이 요구된다. 첫째, 공통 데이터 형식 사용, 공통 데이터 스키마 정의 및 단위 통일 등을 포함한 데이터의 표준화이다. 둘째, 공통의 참조 모델(예: ISO표준 모델)을 사용해서 모델링 방식의 일관성을 유지하는 방법이 있다. 셋째, 서로 다른 모델링 접근 방식을 변환할 수 있는 도구를 개발하는 것이다. 넷째, 인터페이스 및 API 호출 방식을 표준화하여 데이터 교환과 기능 호출이 일관되게 하는 것이다. 이를 위해 여러 시스템과 응용간의 상호작용을 관리하는 미들웨어[19]나 여러 API 서비스에 대한 단일 진입점을 제공하는 API 게이트웨이[20] 등이 효과적으로 활용될 수 있다.

여러 디지털 트윈의 모델들을 상호 활용할 수 있는 연합 디지털 트윈의 특성은 하이브리드 시뮬레이션(Hybrid Simulation)을 수행할 수 있는 중요한 기반을 제공한다. 하이브리드 시뮬레이션은 다양한 이중 모델을 통합하여 복잡한 시스템의 다양한 측면을 효과적으로 분석하고 시뮬레이션하는 접근법으로, 시스템

이 여러 개의 상호작용하는 구성 요소로 이루어진 경우 유용하게 활용될 수 있다[21]. 하이브리드 시뮬레이션은 다음과 같은 단독 시뮬레이션 기법들과 통합될 수 있다.

- 이산 사건 시뮬레이션 (Discrete Event Simulation): 시스템의 동작을 사건(Event)의 발생과 그에 따른 상태 변화로 모델링하는 기법
- 연속 시뮬레이션 (Continuous Simulation): 시간에 따라 지속적으로 변하는 시스템의 동작을 모델링하는 기법
- 에이전트 기반 모델링 (Agent-Based Modeling): 시스템을 개별 에이전트(독립된 행위 주체)의 행동과 상호작용을 통해 모델링하는 기법
- 시스템 다이내믹스 (System Dynamics): 시스템의 피드백 루프와 시간에 따른 동적 변화를 모델링하여 시스템의 구조와 정책이 시간에 따른 행동에 어떻게 영향을 미치는지 분석하는 기법
- 몬테카를로 시뮬레이션 (Monte Carlo Simulation): 확률 분포를 사용하여 시스템의 불확실성을 모델링하는 방법으로 여러 시나리오를 반복적으로 시뮬레이션하여 결과의 분포를 분석하는 기법

연합 디지털 트윈의 하이브리드 시뮬레이션은 개별 디지털 트윈이 처리할 수 있는 다양한 시뮬레이션 기법을 결합하여 복잡한 시스템을 보다 정확하고 포괄적으로 분석할 수 있다. 예를 들어 스마트 시티의 교통 관리 서비스의 경우 연속 시뮬레이션을 통해 도시도로 네트워크에서 차량 흐름을 모델링하고, 에이전트 기반 모델링을 사용하여 개별 운전자의 행동과 선택 경로를 분석한다. 그리고 이러한 시뮬레이션 결과를 기반으로 시스템 다이내믹스를 통해 교통 신호 시스템과 운용 방식 변화가 교통 체증에 미치는 영향을 모델링함으로써 교통 혼잡을 줄이기 위한 최적 신호 타이밍과 정책을 설계하는데 활용할 수 있다.

이와 같이 하이브리드 시뮬레이션을 수행하는 것은 강력한 분석 도구를 제공하지만, 다음과 같은 적용 이슈가 있다.

첫째, 통합 및 상호 운용성 이슈이다. 모델 간 그리고 시뮬레이션 시스템 간 통합은 쉽게 해결되기 어려운 도전적인 문제이다. 예를 들어 이산 이벤트 시뮬레이션과 연속 시뮬레이션을 결합하려면 두 모델 간의 시간 동기화와 데이터 교환을 효과적으로 관리해야 한다. 이에 추가적인 변환 도구나 미들웨어가 요구될 수 있다.

둘째, 계산 비용의 증가 이슈이다. 하이브리드 시뮬

레이션은 각 모델의 상호작용과 데이터 관리의 높은 복잡성으로 인해 개별 기법의 계산 비용을 합산한 것 이상으로 높은 계산 자원을 요구할 수 있다. 특히 대규모 시뮬레이션이나 실시간 시뮬레이션의 경우 비용 부담이 더욱 가중될 수 있다.

셋째, 검증 및 결과 해석 이슈이다. 하이브리드 시뮬레이션 모델의 타당성을 검증하는 것은 단일 기법보다 더 복잡하다. 각 기법의 모델이 정확히 작동하는지 확인해야 할 뿐만 아니라, 통합된 모델이 전체적으로 일관되게 작동하는지도 검증해야 하고, 결과가 상호작용하는 방식을 올바르게 이해하고 종합적으로 해석해야 하기 때문이다.

넷째, 전문 지식 요구 이슈이다. 하이브리드 시뮬레이션을 성공적으로 수행하려면 여러 시뮬레이션 기법에 대한 깊은 이해와 경험이 필요하다. 그리고 하이브리드 시뮬레이션 수행을 위한 환경 및 모델 간 연동 설정, 시뮬레이션 시나리오 정의, 결과 데이터 분석 등을 편리하게 서비스할 수 있는 지원 도구와 소프트웨어 등이 필요하다.

### 3.2.3 인공지능(AI) 및 머신러닝(ML) 기술 이슈

AI 및 ML 기술은 데이터 분석, 예측, 자동화, 최적화, 실시간 모니터링 등 다양한 작업에서 높은 정확성과 효율성을 제공한다. 연합 디지털 트윈에 AI 및 ML 기술을 활용·적용하기 위한 주요 이슈는 다음과 같다.

첫째, 데이터 통합 및 관리 기능 이슈이다. 연합 디지털 트윈의 정확성과 성능은 고품질 데이터에 크게 의존한다. 연합 디지털 트윈은 여러 출처의 디지털 트윈에서 수집된 이질적인 데이터를 통합하는 과정이 필요하다. 표준화된 데이터 모델 및 프로토콜을 이용하는 전통적인 방식 외에도 AI 및 ML 기술을 활용하여 표준-비표준 데이터를 자유롭게 변환하고, 이중 데이터를 자동으로 통합하는 등의 데이터 호환성 확보 기술 개발이 필요하다.

둘째, 데이터 분석 및 예측 기능 강화 이슈이다. 여러 출처에서 방대한 데이터를 수집하는 연합 디지털 트윈의 특성상, AI 및 ML 기술은 대규모 데이터의 패턴을 학습하고, 트렌드를 파악하며, 이상 징후를 감지하는 데 중요하게 활용될 것이다. 그리고 예측 모델은 시스템의 미래 상태를 예측하고, 잠재적인 운영상의 위험을 사전에 경고하며, 최적의 대응 방안 도출에 활용될 수 있다. 이러한 기술을 효과적으로 구현하기 위해서는 고품질 데이터의 확보, 실시간 데이터 처리, 지속적인 모델 업데이트 등의 이슈를 해결해야 한다.

셋째, 자동화 및 최적화 알고리즘의 확대 적용 이

슈이다. AI 및 ML 기술은 복잡한 의사결정 과정을 자동화하여 신속하고 정확한 결정을 내릴 수 있게 한다. 복잡한 최적화 문제를 해결하는 데 효과적이기 때문에 자원 배분, 생산 일정, 에너지 효율화 등 다양한 분야에서 비용을 절감하고 성과를 극대화시킬 수 있다. 이를 위해서는 고도의 계산 능력과 대규모 데이터 처리를 지원하는 인프라가 필요하며, 다양한 최적화 시나리오를 시뮬레이션하여 최적의 결정을 도출할 수 있는 알고리즘이 요구된다. 또한, 시스템 통합과 상호운용성을 강화하여 다양한 데이터 소스와 기술 간의 원활한 협력이 이루어져야 할 것이다.

넷째, 실시간 모니터링 및 대응 이슈이다. AI 기술은 다중 출처의 디지털 트윈 데이터를 통합하여 분석하기 용이하고, 새로운 디지털 트윈을 간단히 추가할 수 있는 확장성을 갖추어 신속한 모니터링 및 대응이 가능하다. 그리고 정상/비정상 동작 패턴 학습을 통해 이상 징후를 감지하여 시스템의 안정성을 유지하는 데 효과적으로 활용할 수 있다. 이를 통해 연합 디지털 트윈은 거시적인 관점에서 실시간으로 운영 데이터를 분석하고, 즉각적인 조치를 취할 수 있는 능력을 갖추게 된다.

다섯째, 사용자 경험 개선 이슈이다. 자연어 처리(NLP) 기능을 통해 사용자와 시스템 간의 상호작용을 향상시키고, AI 시각화 도구를 통해 복잡한 데이터를 직관적으로 표시하며, 중요한 인사이트를 효과적으로 사용자에게 전달할 수 있다. 최신 AI 기술인 LLM(Large Language Models)과 생성형 AI(Generative AI), RAG(Retrieval-Augmented Generation) 등을 활용하여 실시간으로 디지털 트윈들의 데이터를 통합, 검색하고 이를 기반으로 상황을 적절하게 인식하며 필요한 정보나 인사이트를 제공하는 대화형 서비스 운영이 가능해진다. 이러한 기술은 사용자에게 더 직관적이고 접근하기 쉬운 인터페이스를 제공함으로써, 복잡한 시스템과 데이터를 효율적으로 관리하고 이해하는 데 도움을 줄 수 있다. 예를 들어, 운영자는 자연어 질의를 통해 복잡한 데이터 세트를 탐색하고, 시각적 분석 도구를 사용하여 데이터를 쉽게 이해할 수 있다. 또한, 개인화된 대시보드를 통해 각 사용자의 요구에 맞춘 정보를 제공함으로써, 사용자의 만족도를 높이고 시스템 사용의 효율성을 극대화할 수 있다. 이러한 사용자 경험 개선은 연합 디지털 트윈의 활용도를 높이고, 다양한 산업 분야에서 실질적인 가치를 제공하는 데 중요한 역할을 할 것이다.



### 3.3 서비스 제공 및 활용 지원 이슈

서비스 플랫폼은 연합 디지털 트윈의 생성, 관리, 운영, 활용을 위한 중앙 허브 역할을 담당한다. 서비스 플랫폼을 통해 사용자는 연결 가능한 다양한 디지털 트윈을 선택하여 연합 디지털 트윈을 생성하거나, 플랫폼이 사용자의 서비스에 필요한 디지털 트윈들을 적절하게 선택해 연합을 자동으로 구성하는 기능을 제공해야 한다. 이를 통해 사용자는 다양한 디지털 트윈들로 구성된 연합 디지털 트윈을 한 곳에서 효율적으로 관리할 수 있으며, 통합된 뷰를 통해 데이터 모델, 속성, 데이터 수집 현황 등 전체 시스템의 상태를 실시간으로 모니터링할 수 있다.

그리고 사용자 친화적인 인터페이스를 통해 쉬운 접근이 가능하며, 대시보드, 이벤트 처리, 경고 시스템, 데이터 분석 및 예측, 시뮬레이션, 보고서 생성 기능 등을 포함하여 운영 효율성을 극대화한다. 또한, API와 표준화된 프로토콜을 통해 다른 시스템과의 원활한 협업과 상호 운용을 지원한다.

저작도구는 사용자가 디지털 트윈을 쉽게 생성하고 수정할 수 있도록 서비스 플랫폼을 통해 제공되는 소프트웨어 도구이다. 이 도구는 그래픽 인터페이스와 드래그 앤 드롭 기능을 통해 복잡한 연합 디지털 트윈의 생성 및 관리 작업을 간소화한다. 또한, 사전 정의된 템플릿과 모듈을 제공하여 사용자가 요구하는 서비스 시나리오에 적합한 디지털 트윈을 신속하게 검색해 구성할 수 있다. 이외에도 저작 도구는 서비스 로직 저작, AI 추론/예측 모델 저작, 연합 시뮬레이션 시나리오 설정 등을 직관적으로 수행할 수 있게 지원한다.

그림 3에 연합 디지털 트윈 서비스 플랫폼의 다양한 기능과 도구들을 포함한 그래픽 사용자 인터페이스(GUI) 예시를 나타내었다. 주요 기능으로는 데이터 분석 및 시각화, 사용자/운영자 관리, 디지털 트윈 검색 및 관리, 데이터 모델 및 속성 관리, 서비스 로직 및 AI 예측 모델, 시뮬레이션 저작도구 등이 포함된다. 이외에도 사용자들이 팀 단위로 작업할 수 있는 협업 기능을 제공하여 여러 사용자가 연합 디지털 트윈 모델을 공동으로 수정하고 업데이트할 수 있는 협업 도구, 연합 디지털 트윈의 버전을 관리하고 추적할 수 있는 버전 관리 기능, 실시간 모니터링과 더불어 주기적으로 생성되는 보고서 기능을 통해 시스템 상태와 성능을 종합적으로 평가할 수 있는 통합 모니터링 및 보고 기능 등이 포함되어야 할 것이다.



그림 3 연합 디지털 트윈 서비스 플랫폼 GUI 예시  
(출처: 2023 디지털 트윈 커넥트 데이)

## 4. 연합 디지털 트윈 서비스 미래

연합 디지털 트윈은 다양한 디지털 트윈을 상호 연결, 연합시켜 보다 포괄적이고 정교한 분석을 가능하게 한다. 도시 관리, 산업, 헬스케어, 에너지 관리, 물류 등 다양한 분야에서 혁신적인 변화를 이끌어낼 충분한 잠재력 또한 가지고 있다. 그러나 아직 연합 디지털 트윈 관련 기술 개발은 초기 상태이며, 국내외 현장 적용 사례는 제한적이다. 이에 앞서 살펴본 연합 디지털 트윈의 능력과 잠재력에 근거해 다음과 같은 서비스 미래를 예상해 본다.

### 4.1 통합 스마트 시티 관리

연합 디지털 트윈은 도시의 여러 요소들을 모사한 디지털 트윈들을 통합적으로 관리할 수 있다. 교통, 에너지, 상하수도, 쓰레기 관리, 공공 안전 등의 시스템이 하나의 통합된 플랫폼에서 관리되며 다음과 같은 서비스가 가능해진다.

- 스마트 교통 및 에너지 관리 서비스: 교통 디지털 트윈과 에너지 디지털 트윈이 협력하여 전기차 충전소의 충전 시간과 위치를 최적화하는 서비스로, 교통이 한산한 시간대에 충전을 유도하여 전력망 부하를 분산시키고 교통 혼잡 및 체증을 완화시킴
- 긴급 대응 및 공공 안전 서비스: 공공 안전 디지털 트윈과 교통 디지털 트윈이 협력하여 화재, 사고, 범죄 등의 긴급 상황 발생 시 신속한 대응을 지원하는 서비스로, 교통 신호를 조절하여 긴급 차량이 빠르게 현장에 도착할 수 있도록 하고, 시민들에게 실시간으로 교통 상황을 알림으로써 재난 대응의 신속성과 효율성을 높임
- 스마트 상하수도 및 쓰레기 관리 서비스: 상하수도 디지털 트윈과 쓰레기 관리 디지털 트윈이 협력하여 상수도 펌프 및 하수 처리 시설의 에너지

사용을 최적화하고, 쓰레기 수거 경로를 계획하여 자원 사용을 효율화하는 서비스로, 물과 연료의 낭비를 줄이고 환경 보호에 기여함

#### 4.2 헬스케어 및 의료

개인 건강 관리, 병원 운영, 재활 치료, 만성 질환 관리, 예방적 건강 관리 등의 시스템이 하나의 연합 디지털 트윈을 통해 관리되면 다음과 같은 서비스가 가능해진다.

- 스마트 병원 관리: 의료 장비 디지털 트윈과 병원 시설 디지털 트윈이 협력하여 의료 장비의 상태를 실시간으로 모니터링하고, 유지보수 시물레이션을 통해 장비의 고장을 사전에 예측하는 서비스로, 병원 내 시설의 에너지 사용을 최적화하고 운영 비용을 절감시킴
- 재활 치료 및 원격 모니터링 서비스: 재활 디지털 트윈과 가정 건강 디지털 트윈이 협력하여 재활 치료 중인 환자의 상태를 원격으로 모니터링하고, 맞춤형 재활 프로그램을 제공하는 서비스로, 운동 데이터와 생체 신호를 분석하여 재활 진행 상황을 평가하고, 치료의 효과를 극대화함
- 만성 질환 관리 및 예방 서비스: 개인 건강 디지털 트윈과 임상 연구 디지털 트윈이 협력하여 만성 질환자의 지속적인 건강 관리와 예방을 제공하는 서비스로, 환자의 일상 생활에서 수집된 건강 데이터를 모니터링하고, 최신 연구 결과를 기반으로 맞춤형 관리 계획을 수립하여 질병의 악화를 예방하고 삶의 질을 개선함

#### 4.3 에너지 관리

에너지 관리 분야에서 디지털 트윈 간 연합은 에너지 효율성을 높이고, 에너지 비용을 절감하며, 지속 가능한 에너지 관리에 초점을 맞출 수 있다. 이에 다음과 같은 서비스가 가능해진다.

- 하이브리드 시물레이션을 통한 태양광 및 풍력 에너지의 생산과 저장 최적화: 재생 에너지 디지털 트윈과 에너지 저장 시스템 디지털 트윈이 하이브리드 시물레이션을 통해 태양광 및 풍력 에너지의 생산량을 예측하고, 기상 데이터와 에너지 소비 패턴을 통합하여 다양한 시나리오를 분석하고, 최적의 에너지 저장 및 배분 전략을 도출하여 재생 에너지의 활용을 극대화하고, 에너지 저장 시스템의 효율성을 높임
- 스마트 빌딩 에너지 관리 서비스: 건물 에너지 디지털 트윈과 공공 안전 디지털 트윈이 협력하

여 건물의 에너지 사용을 최적화하고 보안 시스템을 강화하는 서비스로, 건물의 에너지 소비를 실시간으로 모니터링하고 제어하며, 이상 상황 발생 시 신속히 대응하여 에너지 효율성과 안전성을 동시에 높임

- 전력 수요 예측 및 관리 서비스: 전력 소비 디지털 트윈과 기상 데이터 디지털 트윈이 협력하여 전력 수요를 예측하고 관리하는 서비스로, 기상 데이터를 활용하여 에너지 수요를 예측하고, 피크 시간대에 대비한 에너지 전략을 수립하여 전력망의 부담을 줄임

#### 4.4 제조 및 산업

제조 및 산업 분야에서는 다양한 디지털 트윈들이 상호 협력함으로써 생산 공정의 효율성을 높이고, 품질 관리와 설비 유지보수를 최적화할 수 있다. 생산 공정, 설비 유지보수, 품질 관리, 재고 관리, 공급망 관리 등의 시스템이 통합될 수 있으며, 다음과 같은 서비스가 가능해진다.

- 하이브리드 시물레이션을 통한 예측 유지보수 및 품질 관리 서비스: 설비 유지보수 디지털 트윈과 품질 관리 디지털 트윈이 하이브리드 시물레이션을 통해 설비 상태와 제품 품질 데이터를 종합적으로 분석하여, 실시간 운영 데이터와 과거 기록을 바탕으로 다양한 시나리오를 시물레이션하고, 설비 고장의 잠재적 원인을 사전에 감지하며, 품질 문제를 예측하여 최적의 유지보수 일정과 품질 관리 전략을 도출함으로써 설비의 가동률과 제품의 품질을 동시에 높임
- 실시간 생산 모니터링 및 대응 서비스: 생산 라인 디지털 트윈과 공공 안전 디지털 트윈이 협력하여 실시간으로 생산 공정을 모니터링하고, 이상 상황 발생 시 신속히 대응하는 서비스로, 생산 라인의 운영 상태를 실시간으로 파악하고, 안전 사고를 예방하여 생산성을 유지함
- 올인원 제조 관리 서비스: 생산 라인 디지털 트윈, 품질 관리 디지털 트윈, 재고 관리 디지털 트윈이 협력하여 생산 공정의 모든 단계를 실시간으로 모니터링하고, 발생 가능한 문제를 사전에 감지하여 대응하며, 품질 데이터 분석을 통해 공정 개선을 제안하고, 생산 계획에 따라 재고를 효율적으로 관리하여 자재 부족이나 과잉을 방지함으로써 전체 제조 공정의 효율성을 극대화하고 제품의 품질을 향상시킴

#### 4.5 농·축·수산업

농축수산업 분야에서는 다양한 디지털 트윈들이 상호 협력하여 농축수산업의 생산성과 효율성을 높이고, 자원 사용을 최적화하며, 환경 영향을 최소화할 수 있다.

- 스마트 축산 관리 서비스: 가축 디지털 트윈과 환경 관리 디지털 트윈이 협력하여 가축의 건강 상태와 축사 환경을 실시간으로 모니터링하는 서비스로, 가축의 건강을 유지하고 질병을 예방하며, 축사 환경을 최적화하여 생산성을 높임
- 정밀 농업 관리 서비스: 농작물 관리 디지털 트윈과 토양 관리 디지털 트윈이 협력하여 농작물 생장과 토양 상태를 실시간 모니터링하고, 환경 맞춤형 농업 관리를 제공하는 서비스로, 최적의 관개와 비료 계획을 수립하여 작물의 수확량과 품질을 향상시킴
- 환경 영향 최소화 및 복원력 강화 서비스: 농업 디지털 트윈, 축산 디지털 트윈, 수산 디지털 트윈, 환경 관리 디지털 트윈이 협력하여 농축수산업의 환경 영향을 최소화하고 복원력을 강화하는 서비스로, 다양한 시나리오를 시뮬레이션하여 잠재적 환경 리스크를 식별하고, 지속 가능한 농축수산업 전략을 수립함

#### 4.6 재난 대응 및 관리

재난 대응 및 관리 분야에서는 다양한 디지털 트윈들이 상호 협력하여 재난 상황을 효율적으로 관리하고, 피해를 최소화하며, 재난에 신속히 대응할 수 있도록 지원한다.

- 실시간 재난 모니터링 및 경보 서비스: 공공 안전 디지털 트윈과 통신 네트워크 디지털 트윈이 협력하여 재난 상황을 실시간으로 모니터링하고, 신속한 경보를 발령하는 서비스로, 재난 발생 시 시민들에게 즉각적인 정보를 제공하고, 안전 대책을 안내함
- 긴급 구조 및 자원 배분 서비스: 응급 의료 디지털 트윈, 교통 디지털 트윈, 물류 디지털 트윈이 협력하여 긴급 구조 활동과 자원 배분을 최적화하는 서비스로, 긴급 차량의 이동 경로를 최적화하고, 필요한 의료 및 구호 자원을 신속하게 배분하여 구조 활동의 효율성을 높임
- 재난 재건 서비스: 도시 인프라 디지털 트윈, 건물 디지털 트윈, 환경 관리 디지털 트윈이 협력하여 재난 후 복원력 강화와 재건을 지원하는 서비스로, 피해 지역의 인프라와 건물을 신속히 복

구하고, 재해 발생에 대비한 복원력 강화 전략을 수립함

이와 같이 연합 디지털 트윈은 도시 관리, 헬스케어, 에너지 관리, 제조 및 산업, 농축수산업, 재난 대응 및 관리 등 다양한 분야에서 새로운 서비스와 개선된 관리 방안을 제공할 수 있다. 다양한 디지털 트윈들이 상호 협력하여 보다 정교하고 포괄적인 분석과 관리를 제공함으로써, 각 분야의 효율성을 극대화하고, 비용 절감, 환경 보호, 리스크 관리 등을 실현할 수 있을 것으로 기대된다.

### 5. 결 론

본 고에서는 연합 디지털 트윈의 필요성과 개념, 주요 이슈, 서비스 미래 등에 대해 소개하였다. 앞서 소개한 바와 같이 연합 디지털 트윈은 다양한 디지털 트윈 시스템과 프로세스를 통합하여 데이터 및 기능 공유, 통합 데이터 분석, 하이브리드 시뮬레이션, 예측 및 최적화 분야 확장 등을 가능하게 한다. 이를 통해 서비스 및 시스템 운영 효율성 증대, 비용 절감, 예측 및 유지보수 강화, 그리고 새로운 비즈니스 모델 창출에 중요한 역할을 담당할 것으로 기대된다.

이처럼 많은 장점을 가지고 있는 기술이지만, 표준화, 상호운용성 강화, 데이터/시스템 통합, 서비스 플랫폼 및 지원 도구 개발, 생태계 구축 및 응용 서비스 발굴 측면에서 해결해야 하는 과제들이 아직 많다. 본고를 통해 디지털 트윈의 성능과 효율성을 더욱 향상시키고, 디지털 트윈의 진화 방향성을 만족하기 위해 어떠한 도전과제에 직면해 있는지, 그리고 어떻게 극복해야 할지 이해하는데 도움이 되었기를 기대한다.

### 참고문헌

- [ 1 ] A. Fuller, Z. Fan, C. Day and C. Barlow, "Digital Twin: Enabling Technologies, Challenges and Open Research," in IEEE Access, vol. 8, pp. 108952-108971, 2020.
- [ 2 ] S. G. Jadhav and S. Sarnikar, "Digital Twin of a Digital World: Process, Data, and Experience Perspectives," in IT Professional, vol. 25, no. 3, pp. 68-73, May-June 2023
- [ 3 ] M. Dihan, A. Akash, Z. Tasneem, P. Das, S. Das, M. Islam, M. Islam, F. Badal, M. Ali, M. Ahamed, S. Abhi, S. Sarker, M. Hasan, "Digital twin: Data exploration, architecture, implementation and future," in Heliyon, vol.10, no.5, pp. e26503, 2024.
- [ 4 ] I. Onaji, D. Tiwari, P. Soulatiantork, B. Song and A.



- Tiwari, "Digital twin in manufacturing: conceptual framework and case studies," in International Journal of Computer Integrated Manufacturing, vol.35, no.8, pp. 831 - 858, 2022.
- [ 5 ] E. Faliagka, E. Christopoulou, D. Ringas, T. Politi, N. Kostis, D. Leonardos, C. Tranoris, C.P. Antonopoulos, S. Denazis and N. Voros, "Trends in Digital Twin Framework Architectures for Smart Cities: A Case Study in Smart Mobility," in Sensors, vol.24, no.5, pp.1665, 2024.
- [ 6 ] C. Vergara, R. Bahsoon, G. Theodoropoulos, W. Yanez and N. Tziritas, "Federated Digital Twin," 2023 IEEE/ACM 27th International Symposium on Distributed Simulation and Real Time Applications (DS-RT), Singapore, 2023, pp. 115-116.
- [ 7 ] M. Baek, "Digital Twin Federation and Data Validation Method," 2022 27th Asia Pacific Conference on Communications (APCC), Jeju Island, Korea, Republic of, 2022, pp. 445-446.
- [ 8 ] 정득영, 김상태, 김연배, "디지털 트윈의 기술적 정의와 세부적 발전 5단계(level) 모델," IITP 주간기술동향 1983호, 2021.
- [ 9 ] T. Yu, Z. Li, K. Sakaguchi, O. Hashash, W. Saad and M. Debbah, "Internet of Federated Digital Twins (IoFDT): Connecting Twins Beyond Borders for Society 5.0," arXiv preprint arXiv:2312.06432, 2023.
- [10] TTA, "디지털 트윈 연합 - 제1부: 요구사항," TTA.KO-11.0326-Part1, 2023.12.
- [11] TTA, "디지털 트윈 연합 - 제2부: 참조 구조," TTA.KO-11.0326-Part2, 2023.12.
- [12] TTA, "디지털 트윈 연합 - 제3부: 디지털 트윈 식별 체계," TTA.KO-11.0326-Part3, 2023.12.
- [13] TTA, "디지털 트윈 연합 - 제4부: 디지털 트윈 특성 정보 데이터 모델," TTA.KO-11.0326-Part4, 2023.12.
- [14] TTA, "디지털 트윈 연합 - 제5부: 디지털 트윈 객체 식별 체계," TTA.KO-11.0326-Part5, 2023.12.
- [15] TTA, "디지털 트윈 연합 - 제6부: 디지털 트윈 객체 데이터 모델," TTA.KO-11.0326-Part6, 2023.12.
- [16] 박찬원, "디지털 트윈 연합 핵심 기술 개발 사업," 디지털 트윈 커넥트 데이, 2023.12.15.
- [17] B. Lei, P. Janssen, J. Stoter, F. Biljecki, "Challenges of urban digital twins: A systematic review and a Delphi expert survey," Automation in Construction, vol. 147, 2023.
- [18] F. Bordeleau, B. Combemale, R. Eramo, M. Brand, M. Wimmer, "Towards Model-Driven Digital Twin Engineering: Current Opportunities and Future Challenges," in Systems Modelling and Management, ICSMM 2020, vol. 1262, pp.43 - 54, 2020.
- [19] S. Yun, J. -H. Park and W. -T. Kim, "Data-centric middleware based digital twin platform for dependable cyber-physical systems," in Proc. of IEEE ICUFN, pp. 922-926, 2017.
- [20] P. Moreira, A. Ribeiro and J. M. Silva, "AGE: Automatic Performance Evaluation of API Gateways," in Proc. of IEEE ISCC, pp. 405-410, 2023.
- [21] H. Montoya, S. Dyke, C. Silva, A. Maghareh, J. Park, D. Ziviani, "Thermomechanical Real-Time Hybrid Simulation: Conceptual Framework and Control Requirements," AIAA Journal, vol. 61, pp. 1-13, 2023.

## 약 력

### 최 진 철



2005 아주대학교 전자공학부 졸업(학사)  
2007 아주대학교 전자공학과 졸업(석사)  
2008 동원대학교 대학교 방문연구원  
2012 아주대학교 전자공학과 졸업(박사)  
2012~현재 한국전자통신연구원 선임연구원  
관심분야: 디지털 트윈, 인공지능, 강화학습, 모방학습  
Email : spiders22v@etri.re.kr

### 장 일 순



1997 충북대학교 정보통신공학과 졸업(학사)  
1999 충북대학교 정보통신공학과 졸업(석사)  
2005 충북대학교 정보통신공학과 졸업(박사)  
2000~현재 한국전자통신연구원 책임연구원  
관심분야: 디지털 트윈, 사물인터넷, 무선통신, 인공지능  
Email : isjang@etri.re.kr

### 박 찬 원



1993 광운대학교 컴퓨터공학과 졸업(학사)  
1996 광운대학교 전자계산기공학과 졸업(석사)  
2016 충남대학교 전자공학과 졸업(박사)  
1996~1999 KAIST IDEC (연구원)  
1999~현재 한국전자통신연구원(실장)  
관심분야: 무선통신, 사물인터넷, 머신러닝, 디지털 트윈  
Email : cwp@etri.re.kr