

Designing Modularization Method for Digital Twin: Focusing on the Noodle Manufacturing Process

Chan Woo Kwon[†] · Seok Hyun Song^{††}

ABSTRACT

There has been a recent surge of interest in the Digital Twin technology. The Digital Twin is technique for optimizing objects by simulating physical phenomena or objects through computer-based simulations. Currently, single Digital Twin is being developed to optimize processes limited to specific fields, but there is a limitation in that the independent Digital Twins cannot analyze the vast and complex processes of the real world. To overcome this, the concept of federated Digital Twin has been introduced. To date, the federated Digital Twin research has primarily focused on how to optimize macroscopic objects such as cities. However, by leveraging the interconnected nature of twins, existing implementations of the single Digital Twins can be modularized. In this study, we define the concepts and interrelationships of the single Digital Twin and the federated Digital Twin from a functional perspective related to process optimization and design a modularization technique for the single Digital Twin using the federated Digital Twin. Furthermore, this study aims to discuss the proposed methodology's efficacy by designing a model applying modularization to a real-world fabric manufacturing case.

Keywords : Federated Digital Twin, Twin Module, Process Optimization, Noodle Manufacturing Process

디지털 트윈의 모듈화 기법 설계: 면 제조 공정을 중심으로

권찬우[†] · 송석현^{††}

요약

최근에 들어 디지털 트윈 기술에 대한 관심이 급증하고 있다. 디지털 트윈은 컴퓨터 기반 시뮬레이션을 통해 물리적 현상이나 사물을 모사함으로써 대상을 최적화하는 기술이다. 현재는 특정 분야에 국한되는 프로세스를 최적화하기 위한 단일 디지털 트윈이 개발되고 있지만, 독립된 디지털 트윈만으로는 현실의 방대하고 복잡한 프로세스를 분석하기 어렵다. 이를 극복하고자 도입된 개념이 연합 디지털 트윈이다. 지금까지 연합 디지털 트윈의 연구 방향은 주로 도시와 같이 거시적인 대상을 최적화하는 방식에 중점을 두었다. 그러나 트윈이 상호 연계된다는 특성을 활용하면 기존에 구현되었던 단일 디지털 트윈의 모듈화도 가능할 것으로 보인다. 본 연구에서는 프로세스 최적화와 관련된 기능상의 관점에서 단일 디지털 트윈과 연합 디지털 트윈의 개념 및 상호 관계를 정립하고, 이를 토대로 연합 디지털 트윈을 활용한 단일 디지털 트윈의 모듈화 기법을 설계한다. 아울러, 실제 면 제조 공정 사례를 바탕으로 모듈화 기법을 적용한 모델을 설계함으로써 제안하는 방법론의 효용성을 논의하고자 한다.

키워드 : 연합 디지털 트윈, 트윈 모듈, 프로세스 최적화, 면 제조 공정

1. 서론

최근에 들어 디지털 트윈(Digital Twin, DT) 기술에 대한 관심이 급증하고 있다. 디지털 트윈은 현실의 물리적 사물이

나 현상을 컴퓨터 기반 시뮬레이션 환경에 모사(模寫)하여 대상을 최적화하는 기술이다[1]. 현재는 주로 특정한 분야의 프로세스나 현상을 시뮬레이션 및 최적화하기 위한 단일 디지털 트윈이 연구되거나 개발되고 있다[2, 3]. 그러나 이러한 단일 디지털 트윈만으로는 현실의 방대하고 복잡한 프로세스를 분석하기 어렵다. 각기 활용 분야에 정형화된 디지털 트윈은 다른 분야로의 확장이 제한된다.

상기의 맥락에서 현상 간의 상호 복합적인 영향을 분석하고 최적화할 수 있는 연합 디지털 트윈 개념이 등장하였다. 연합 디지털 트윈은 독립된 디지털 트윈들이 상호 연계하여 대상을 최적화하는 기술로, 현실의 복잡한 상호작용을 분석하

※ 이 논문은 2023학년도 안동대학교 학술연구조성비에 의하여 연구되었음.

※ 이 논문은 2023년 한국정보처리학회 ACK 2023의 우수논문으로 "연합 디지털 트윈 기반의 디지털 트윈 모듈화 기법"의 제목으로 발표된 논문을 확장한 것임.

† 준회원: 국립안동대학교 정보통신공학과 학사과정

†† 정회원: 국립안동대학교 정보통신공학과 조교수

Manuscript Received : December 19, 2023

Accepted : January 28, 2024

* Corresponding Author : Seok Hyun Song(ssh@nia.or.kr)

여 최적화를 수행하는 것이 가능하다. 지금까지 연합 디지털 트윈의 연구 방향을 살펴보면 서로 다른 분야의 독립된 디지털 트윈을 연계하여 거시적인 대상을 최적화하는 방식에 중점을 두었다는 사실을 파악할 수 있다. 일례로 스마트시티에 적용될 것으로 예상되는 연합 디지털 트윈 모델은 소방, 치안, 의료, 교통 등의 여러 분야에 특화된 디지털 트윈이 연합하여 도시 전반의 최적화를 수행하게 된다[4].

여기서 트윈이 상호 연계된다는 점을 활용하면 거시적인 대상에 대한 최적화와 더불어 단일 디지털 트윈에 대한 모듈화도 가능해질 것으로 사료된다. 이러한 모듈화는 기존의 단일 디지털 트윈을 더욱 세분화하며, 시뮬레이션 모델의 유지 보수성 및 효율성을 제고한다. 나아가 연합 디지털 트윈의 적용 범위를 미시적인 대상, 즉 단일 프로세스나 현상까지 확대할 것으로 판단된다. 본 연구는 단일 디지털 트윈과 연합 디지털 트윈의 개념과 상호 관계를 정립하고, 이를 기반으로 연합 디지털 트윈을 활용한 단일 디지털 트윈의 모듈화 기법을 설계하고자 한다.

이를 위해 다음과 같은 연구 단계를 설정하였다. 2장에서는 단일 디지털 트윈 및 연합 디지털 트윈의 개념과 관련된 선행 연구를 수행한다. 더불어, 실제 디지털 트윈이 활용되고 있는 사례를 분석하여 기존의 단일 디지털 트윈이 지닌 특성과 단일 프로세스를 최적화하는 과정에서의 한계점을 도출한다. 3장에서는 앞서 수행된 선행 연구를 기반으로 이론적 토대를 구축한다. 연합 디지털 트윈과 단일 디지털 트윈의 개념을 분리하고, 상호 관계를 재정의한다. 이를 통해 단일 디지털

트윈이 연합 디지털 트윈으로 구성될 수 있다는 점을 명확히 한다. 4장에서는 앞서 정의된 개념을 활용하여 단일 디지털 트윈의 모듈화 기법을 설계한다. 또한, 이를 실제 면 제조 공정 사례에 적용한 모델을 제시한다. 마지막 단계인 5장에서는 연구의 시사점과 결론을 도출하고, 연합 디지털 트윈의 발전 방향을 제안한다. Fig. 1을 통해 연구의 전체적인 흐름을 나타내었다.

2. 선행 연구

2.1 단일 디지털 트윈의 개념

단일 디지털 트윈은 일반적으로 알려진 디지털 트윈의 개념을 갖는다. 주로 일관된 특성을 보이는 하나의 대상이나 프로세스를 최적화하기 위해 활용되며, 다음과 같은 개념적 논의가 진행되어 왔다.

Gartner(2016)는 디지털 트윈의 전반적인 구현 단계를 다음과 같이 분류하였다. 1단계에서는 현실의 객체를 가상의 공간에 3D로 시각화한다. 2단계에서는 시각화한 대상을 실시간으로 모니터링한다. 이는 현실의 물리적 대상과 가상의 대상을 동기화하는 것이다. 3단계에서는 2단계의 모니터링을 통해 구축된 시뮬레이션 환경을 토대로 분석 및 최적화 작업을 수행한다[5].

조준혁(2010)은 디지털 트윈을 기술적인 구현 정도에 따라 3단계로 분류하였다. 1단계는 ‘기능 디지털 트윈’으로, 실세계와 연동되지 않은 가상 공간의 객체로 존재한다. 2단계는 1단계의 모델을 실세계와 연동한 ‘연결 디지털 트윈’이다. 측정치 기반의 단순 분석과 시뮬레이션 등이 가능하다. 3단계는 ‘지능 디지털 트윈’으로, 전 단계의 모든 요소를 포함한다. 아울러, 머신러닝 기술을 도입함으로써 자율적인 결정이 가능하다[6].

김원태 외(2020)는 기술적인 측면에서 디지털 트윈의 기술적 분류를 3가지의 관점에서 진행하였다. 첫째는 진화적 관점으로, 디지털 트윈의 발전 단계에 따라 1세대부터 3세대까지 정의한다. 1세대는 연결형 디지털 트윈이다. 이는 물리 센서와 데이터 관리 시스템을 통해 현실 대상의 상태 모니터링을 담당한다. 2세대는 지능형 디지털 트윈이다. 이는 데이터 처리 엔진과 인공지능 플랫폼 등을 통해 물리 트윈의 상태 판단 및 최적화를 수행한다. 3세대는 자율형 디지털 트윈으로, 상호 간 협업과 자가진화를 통해 트윈의 성능을 자동적으로 개선한다.

둘째는 구조적 관점으로, 물리 트윈이 갖는 구조적 특징을 반영하여 부품, 자산, 시스템, 프로세스를 담당하는 계층별로 분류한다. 가장 하위 트윈인 부품 트윈은 센서의 데이터나 고장 정보를 제공하며, 기계의 일부분을 제어하는 자산 트윈은 여러 부품 트윈들의 집합으로 구성된다. 마찬가지로 시스템 트윈은 자산 트윈의 집합이며, 각종 장비의 최적화 작업을 수행한다. 최상위 개념인 프로세스 트윈은 시스템 트윈을 포괄하여 전반적인 프로세스를 제어한다.

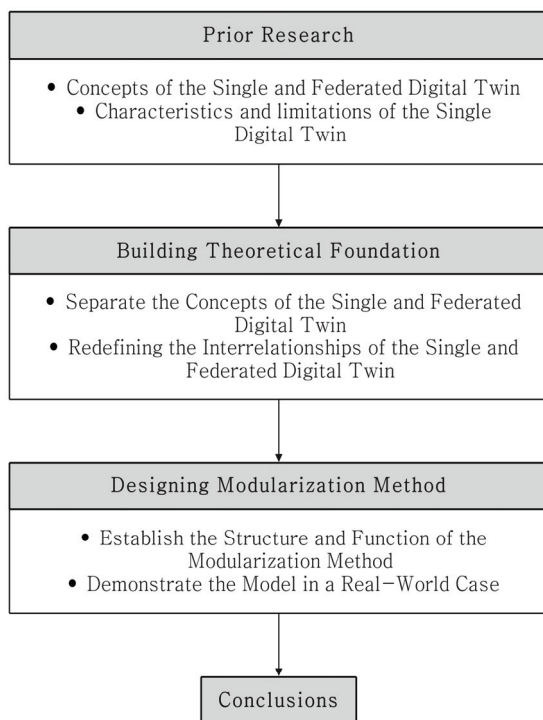


Fig. 1. Research Flowchart

셋째는 기능적 관점으로, 제조 현장의 측면에서 3가지 디지털 트윈을 정의한다. 우선, 제품을 효율적으로 설계하기 위해 활용되는 제품 디지털 트윈이 있다. 이는 가상 시뮬레이션을 통해 실세계 제품의 데이터를 추적하고, 향후 신제품 개발에 활용된다. 생산 디지털 트윈은 가상 환경에 생산 체계를 구축함으로써 실제 프로세스의 효율성과 오류율을 검증한다. 아울러, 성능 디지털 트윈은 제품 디지털 트윈과 생산 디지털 트윈에 수집된 데이터를 바탕으로 트윈의 기능 및 성능 개선 작업을 수행한다[7]. 이처럼 단일 디지털 트윈은 주로 일관된 프로세스에 활용되며, 공통적으로 실세계의 대상을 가상 공간에 복제하는 단계, 이를 연동하는 단계, 자율적인 결정이 가능한 단계로 구분된다.

2.2 연합 디지털 트윈의 개념

연합 디지털 트윈은 Table 1과 같이 디지털 트윈의 기술발전 모델을 통해 처음 제안되었다. 기술발전 모델은 본래 모사, 관제, 모의 단계의 단일 디지털 트윈으로 구성되었으나, 복합적으로 상호작용하는 실세계의 대상을 효과적으로 최적화하기 위해 독립된 디지털 트윈들이 서로 연합하는 단계인 4단계와 머신러닝 등의 기술을 활용하여 자율적인 결정이 가능한 5단계가 추가되었다[8].

각 기술 단계는 이전 단계의 수준을 포함한다. 따라서 연합 디지털 트윈은 3단계 수준의 단일 디지털 트윈이 연계된 개념임을 파악할 수 있다. 또한, 기술 요소의 측면에서 자율 디지털 트윈의 필요조건은 연합 디지털 트윈이다. 앞서 살펴본 연구에서는 단일 디지털 트윈도 자율성을 가질 수 있었으나, 해당 연구의 분류 기준에 의하면 자율 디지털 트윈은 연합 디지털 트윈의 상위 개념이 된다.

Table 1. Digital Twin Evolution Model

Evolution Level	Definition	Description
Level 5	Autonomous Digital Twin	Autonomously recognize and resolve issues across individual and composite Digital Twin to optimize physical objects
Level 4	Federated Digital Twin	Reconstruct composite Digital Twin of optimized individual physical objects and optimize physical object interoperability
Level 3	Modeling & Simulation Digital Twin	Optimize physical objects with Digital Twin simulation results
Level 2	Monitoring Digital Twin	Monitor and control physical objects based on Digital Twin with relationship analysis
Level 1	Mirroring Digital Twin	Replicate a physical object as a Digital Twin

* 디지털 트윈의 기술적 정의와 세부적 발전 5단계 모델 (정득영, 2021)의 <표 6> 저자 재구성

2.3 디지털 트윈의 적용 사례

여기서는 디지털 트윈의 적용 사례를 바탕으로 단일 프로세스를 최적화하는 과정의 특성과 한계점을 논의하고자 한다. 연합 디지털 트윈의 경우에는 지금까지 그 개념을 논의하는 단계에 머무르고 있어, 단일 디지털 트윈을 중심으로 분석을 수행한다. 아울러, 본 연구에서 제시하는 디지털 트윈의 모듈화 기법은 단일 프로세스의 최적화에 초점을 맞추고 있다. 따라서 제시하는 방법론의 필요성을 도출하기 위해서는 단일 프로세스를 최적화하는 과정의 특성과 한계점이 논의되어야 한다. 여기서 단일 프로세스는 특정한 분야나 서비스에 국한되면서 일관된 프로세스로 정의한다.

박정호 외(2023)는 핀란드 헬싱키, 싱가포르, 호주 뉴사우스웨일스의 디지털 트윈 적용 사례를 비교 분석하였다. 핀란드 헬싱키는 각 건물의 에너지 소비량, 난방으로 인한 이산화탄소 배출량 등을 가상 환경에 구현함으로써 에너지 효율을 분석 및 예측한다. 싱가포르는 물리적 공간에 자율주행차 테스트 환경을 구현하고, 다양한 기상 조건을 마련하여 운행 평가를 실시한다. 호주 뉴사우스웨일스는 해당 구역 내 다수의 3차원 데이터셋을 매핑하여 화재의 발생을 사전에 예측한다[9]. 이러한 사례는 단일 프로세스를 바탕으로 하지만, 다각도의 방대한 데이터가 요구되었다. 단일적인 대상이라 할지라도 그 안에서 주고받는 상호작용과 영향으로 인해 복잡성이 발생한다. 이를 효과적으로 최적화하기 위해서는 다양한 변수를 고려할 수 있는 데이터셋 확보가 수반되어야 한다.

노재인 외(2022)는 인천광역시의 사례를 중심으로 디지털 트윈을 활용한 재난 관리 방안을 연구하였다. 인천시는 디지털 트윈 기반 화재대응 현장지휘통합 플랫폼을 구축하기 위한 사업을 추진하고 있다. 이를 통해 출동차량의 위치를 실시간으로 확인하고, 사건 대상물과 길안내 서비스 등을 제공함으로써 최적화된 화재대응 시스템을 구현하는 것이 목표이다. 현재 구현된 디지털 트윈의 주요 기능은 출동 차량의 위치를 파악하거나 재난 주변 지역의 CCTV 영상을 지원하는 정도에 머무른다. 즉, 디지털 트윈의 구현 수준이 낮고 적용범위가 매우 한정적이다. 아울러, 디지털 트윈 기반 물리 대상의 관계 분석이나 제어 방안 등이 미흡한 실정이다[10]. 이러한 문제가 발생한 원인으로는 기술적인 한계와 더불어 화재대응 프로세스의 복잡성도 존재하였을 것으로 판단된다. 화재와 같은 재난을 대응하기 위해서는 도시와 재난의 여러 요소를 고려할 수 있는 시스템의 개발이 필요하며, 이러한 시스템은 필연적으로 방대하고 복잡한 프로세스에 기반하여 동작한다. 따라서 이를 고도화하기 위해 지자체가 감당해야 할 경제적 비용도 가중된다.

앞선 적용 사례에서 살펴본 바를 종합하면, 단일 프로세스라 할지라도 그 복잡성을 무시할 수 없다는 사실을 파악할 수 있다. Waguih ElMaraghy et al. (2012)은 제조업계가 오늘날 직면하고 있는 가장 큰 문제가 계속해서 증가하는 제조 공정과 회사 구조의 복잡성을 지적하며, 복잡성의 부정적 영향

을 완화하는 것뿐만 아니라 기존의 제품 및 시스템을 개선하기 위해 복잡성을 활용하는 접근법이 중요함을 강조하였다. 아울러, 설계에 의한 복잡성 증가는 시스템 능력과 성능을 개선하는 경우에만 정당화될 수 있으며, 그렇지 않으면 최소화되어야 한다는 점을 언급하였다[11].

이러한 관점에서 화재대응 프로세스나 제조 공정과 같은 단일 프로세스를 하나의 디지털 트윈으로 관할하는 기존의 방식은 시스템 구조적으로 단순하지만, 시뮬레이션 환경이 상대적으로 비대하고 복잡하여 유지 및 보수에 불리할 수 있다. 그러나 이러한 단일 프로세스에 연합 디지털 트윈을 적용한다면 시스템 구조상으로는 복잡성이 증대하지만, 각 트윈마다 단순한 시뮬레이션 환경이 구축되어 유지보수에 유리하다. 이는 소프트웨어 개발에서 복잡한 코드의 관리를 원활히 하기 위해 도입된 모듈화 방식과 개념적으로 동일하다. 즉, 트윈 시스템의 구조를 기존보다 복잡하게 설계하는 대신 시뮬레이션 영역의 세분화를 통해 효율성과 유지보수성을 개선하는 것이다.

3. 이론적 토대 구축

선행 연구를 통해 연합 디지털 트윈이 단일 디지털 트윈의 상위 개념임을 파악할 수 있다. 그러나 이는 기술적인 관점에서의 접근에 해당한다. 디지털 트윈의 구현도를 기준으로 분류하였을 때 연합 디지털 트윈의 기술적 수준이 상대적으로 높다고 볼 수 있는 것이다. 이와는 반대로 기능적인 관점에서 단일 디지털 트윈과 연합 디지털 트윈의 역할과 관계에 대한 논의는 충분히 이루어지지 않았다. 본 절에서는 기술적 관점에서 논의되던 단일 디지털 트윈과 연합 디지털 트윈의 개념을 프로세스 최적화와 관련된 기능상의 관점에서 재정의하고자 한다. 이를 도식적으로 나타내면 Fig. 2와 같다.

단일 디지털 트윈(SDT)과 연합 디지털 트윈(FDT)은 개별적인 기술 발전단계를 갖는다(Fig. 2). 여기서 단일 디지털 트윈과 연합 디지털 트윈의 분류 기준은 연합 네트워크 구성 여부

로 판단한다. 단일 디지털 트윈은 개별로 동작하는 디지털 트윈을 의미하며, 연합 디지털 트윈은 개별 트윈들로 구성된 연합 네트워크 집합체를 의미한다. 기술 발전단계는 트윈의 최적화 능력을 기준으로 분류된다. 각 단계에 대한 설명은 다음과 같다. 1단계는 모사 단계로, 실세계의 대상을 가상 공간에 복제하여 시뮬레이션 환경을 구축한다. 이는 단순한 복제에 해당하므로 실질적인 최적화를 수행할 수 없다. 2단계는 모의 단계로, 실세계의 대상과 가상의 대상이 연동되어 시뮬레이션 및 분석 작업을 수행한다. 이를 통해 인간의 의사결정 최적화를 돕는다. 3단계는 자율 단계로, 트윈이 자발적으로 문제를 예측하고 대비하여 스스로 최적화를 도출한다.

선행 연구에서도 확인하였듯이 단일 디지털 트윈만으로도 자율성을 구현할 수 있으며, 이는 연계가 필요하지 않은 단일 프로세스를 최적화하는 과정에 적합하다. 반면에 제조 공정에서 발생하는 돌발적 사고나 개인정보 유출 등의 소지가 있는 민감한 작동 환경을 고려하여 연합 디지털 트윈이 모의 단계에서 동작할 수도 있다[12]. 기능상의 관점에서 트윈의 자체적인 최적화 능력과 연합 여부는 그 성격이 다르기 때문에 이를 명확히 분리해야 한다. 다만, 이것이 두 디지털 트윈의 용도를 독립적으로 분리하는 것은 아니다. 연합 디지털 트윈의 일반적인 용도는 여러 개의 단일 프로세스로 구성된 복합 프로세스를 최적화하는 것이며, 그 구조를 살펴보면 다수의 단일 디지털 트윈으로 구성되어 있다. 따라서 이들도 복합 프로세스의 최적화에 관여한다고 볼 수 있다. 그 반대의 경우도 마찬가지이다. 단일 디지털 트윈은 단일 프로세스의 최적화에 특화되어 있지만, 이러한 단일 프로세스에 연합 디지털 트윈을 적용하여 프로세스의 세부 단계별로 최적화를 수행하는 것도 가능하다. 위와 같은 맥락에서 단일 디지털 트윈과 연합 디지털 트윈은 계층적인 관계가 아니라 상보적인 관계를 취해야 한다.

4. 모듈화 기법 설계

4.1 모듈화 기법의 구조 및 기능

디지털 트윈의 모듈화는 단일 현상이나 프로세스에 연합 디지털 트윈을 적용하는 기법이다. 프로세스를 단계별로 세분화하고, 각 단계를 담당하는 트윈 모듈을 할당하여 전체적인 프로세스가 최적화되는 구조이다. 트윈 모듈은 단일 디지털 트윈과 동일한 역할을 수행하지만, 시뮬레이션 환경이 소규모로 구성된다. 아울러, 디지털 트윈의 구조적 관점에서 객체의 상태를 관리하는 물리 트윈과 달리 일련의 프로세스를 관리한다. 기존에 연구되던 연합 디지털 트윈과의 차이점은 다음과 같다. 우선, 최적화하고자 하는 대상의 규모가 상이하다. 기존의 연합 디지털 트윈은 주로 도시 규모와 같이 거시적인 대상을 최적화하기 위해 연구되었다. 그러나 본 연구에서 제시하는 연합 디지털 트윈은 상대적으로 미시적인 규모의 단일 프로세스를 최적화한다. 둘째로 최적화의 성격이 다르다. 기존

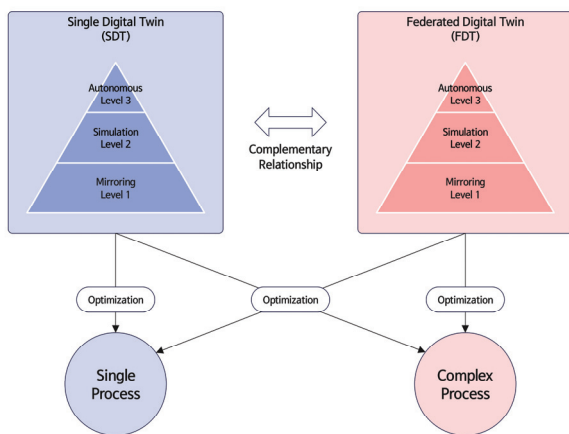


Fig. 2. Concepts of the Single and Federated Digital Twin

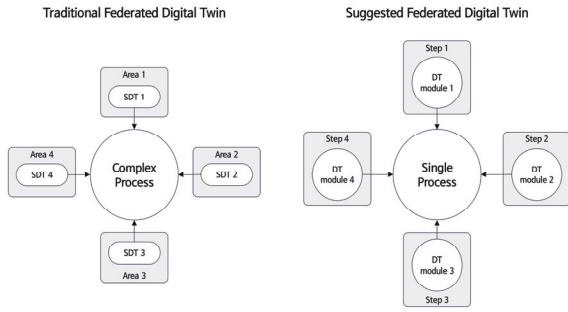


Fig. 3. Comparison the Structures of Each Federated Digital Twin

의 연합 디지털 트윈이 단일 디지털 트윈만으로 최적화하기 어려운 복잡적이고 거시적인 현상을 최적화하지만, 제시하는 연합 디지털 트윈은 기존의 프로세스를 더 효율적이고 안정적으로 최적화하는 성격을 갖는다.

현재까지 주로 연구되던 연합 디지털 트윈의 경우에는 각 단일 디지털 트윈이 복합적인 프로세스를 구성하는 분야 및 서비스별로 할당되며, 이러한 트윈들이 연합하여 프로세스의 전반을 최적화한다. 디지털 트윈의 모듈화 기법도 이와 유사하게 단일 프로세스를 구성하는 단계별로 트윈 모듈이 할당되며, 이들이 연합하여 프로세스의 종합적인 최적화를 수행한다 (Fig. 3). 프로세스 내 단계의 개수에 맞게 트윈 모듈이 배치되며, 각 모듈은 일대일로 할당된 단계를 최적화한다. 이들은 연합 네트워크를 통해 최적화 과정을 공유하므로 전체 프로세스의 동작은 병렬 연산이 가능하며 일관성을 지닌다.

Fig. 4와 같은 방식으로 기존의 단일 프로세스를 세분화하여 트윈 모델의 개별적인 시뮬레이션 환경을 간단하게 개선할 수 있다. 또한, 단일 디지털 트윈 대비 프로세스 내에서 일부 단계를 추가하거나 변경하기 수월하다. 단일 디지털 트윈 기반의 프로세스를 수정하기 위해서는 트윈의 시뮬레이션 환경

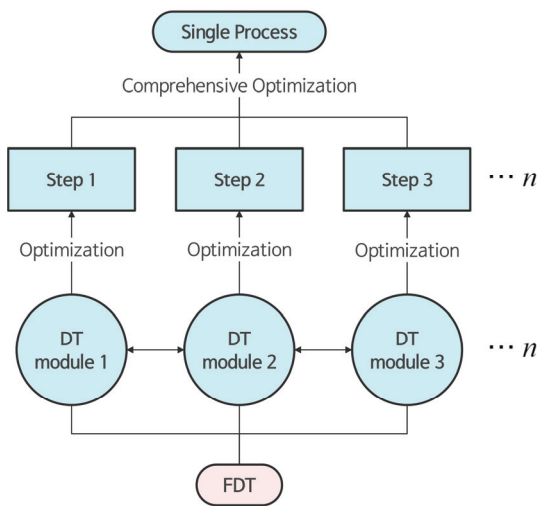


Fig. 4. Optimization Process for Twin Modules

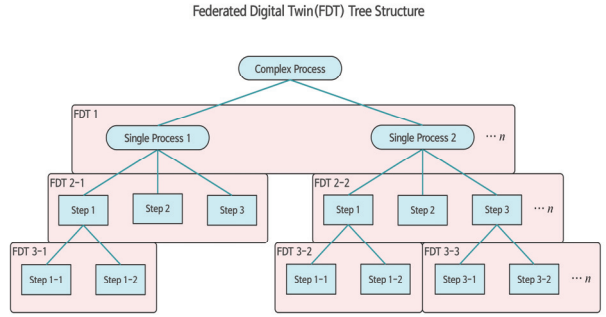


Fig. 5. Layering of the Federated Digital Twins

을 직접 변경해야 한다. 이는 모델의 유지 및 보수에 취약하고 번거롭다. 반면에 프로세스의 단계별로 모듈화된 디지털 트윈을 연합한다면, 모듈을 추가하고 제거하는 것처럼 손쉽게 프로세스를 수정할 수 있다. 특히, 기존의 제조 공정을 세분화하여 각 단계에 트윈 모듈을 도입한다면 보다 효율적인 디지털 공정의 설계가 가능해질 것이다.

나아가 모듈화 기법을 활용하여 연합 디지털 트윈의 구조를 계층화하는 작업도 고려해볼 수 있다. 매우 복잡하고 방대한 프로세스의 경우, 이를 트리 구조로 세분화하여 계층마다 연합 디지털 트윈을 적용하는 것이다. 이때 연합 디지털 트윈은 기존의 단일 디지털 트윈을 결합함과 동시에 시뮬레이션 환경을 단순화하는 도구로서 기능한다.

트리 구조에서 루트 노드(Complex Process)를 Level 0이라고 하자(Fig. 5). 트리의 Level 1에 위치한 연합 디지털 트윈(FDT 1)은 기존의 방식대로 복합 프로세스를 최적화하기 위한 트윈이다. 그 아래 레벨인 Level 2와 Level 3에 위치한 각 연합 디지털 트윈은 모듈화 기법을 활용한 트윈에 해당한다. 가장 하위 레벨의 연합 디지털 트윈이 세부 단계별로 최적화한 결과를 종합하여 상위 레벨의 연합 디지털 트윈에 제공하면, 해당 디지털 트윈이 다시 최상위 레벨의 연합 디지털 트윈에 최적화된 결과를 전송함으로써 전체 프로세스의 최적화가 이루어지게 된다. 아울러, 트윈이 자체적으로 오류를 분석하고 성능을 개선하는 과정에서는 위에서부터 신호가 하달되어 아래 계층의 연합 디지털 트윈에 입력된다.

4.2 면 공정 제조 모델

제시한 방법론을 구체적으로 논의하기 위해 면 제조 공정의 사례와 접목한 모델을 설계하고자 한다. 실제 식품 업체의 면 제조 공정을 바탕으로 진행하며, 기존의 단일 디지털 트윈 대비 연합 디지털 트윈 기반의 모듈화 기법을 통해 구축된 프로세스 구조 및 시뮬레이션 환경의 특성과 효율성을 논의한다. Fig. 6을 통해 식품 업체의 전반적인 면 제조 공정을 도식화하였다.

제조 공정의 세부적인 설명은 다음과 같다. 1단계는 반죽 시설을 통해 밀가루가 투입되며, 면 다발의 형태로 가공된다. 2단계는 가공된 면 다발을 고리에 매달아 건조한다. 면 다발

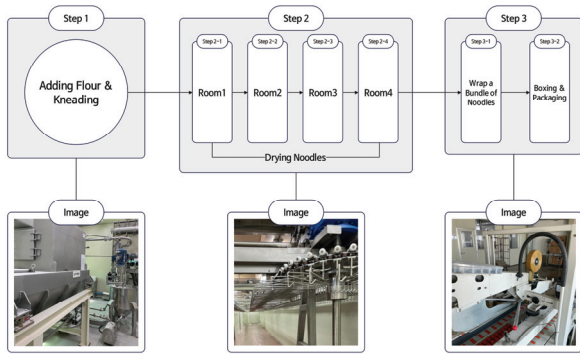


Fig. 6. Noodle Manufacturing Process

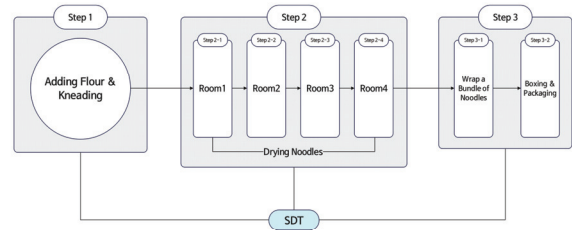
은 벨트를 통해 4개의 방을 거치며 이동한다. 고온 상태의 방을 통과하면서 면의 수분이 증발되는 구조이다. 3단계는 건조된 면 묶음을 비닐에 포장하고, 박스를 조립한다. 일련의 과정은 방의 개수와 작업 구역에 따라 세분화될 수 있다. 2단계의 건조 과정은 총 4개의 방을 거치므로 4개의 세부 단계로 분할되며, 3단계는 작업 구역에 따라 비닐 포장 단계와 박스 조립 단계로 나뉜다. 이를 토대로 단일 디지털 트윈과 연합 디지털 트윈 기반의 모듈화 기법을 활용한 각 모델을 제시하면 Fig. 7과 같다. 그림 위에서부터 기존대로 단일 디지털 트윈만을 활용한 모델, 연합 디지털 트윈 기반의 모듈화 기법을 활용한 모델, 이를 응용하여 트리 구조로 설계한 모델이 순차적으로 나열되어 있다. 각 모델의 세부적인 설명은 다음을 따른다.

단일 디지털 트윈만을 활용한 모델은 시뮬레이션 환경이 하나의 통일된 공간 내에 구축된다. 면 제조 공정의 각 단계에 해당하는 가상의 객체, 프로세스, 데이터 등을 단일 시뮬레이션 모델로 처리하는 것이다. 그림상에서는 가장 단순한 구조를 지니는 반면, 실질적인 내부 시뮬레이션 환경은 상대적으로 복잡하다.

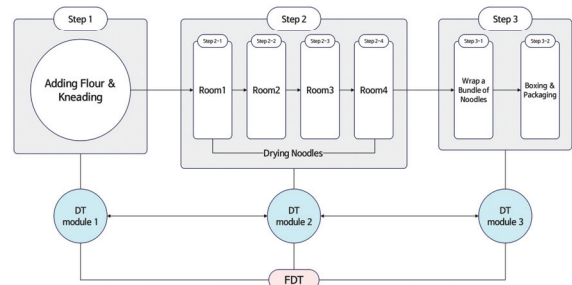
모듈화 기법을 활용한 모델은 단계별로 트윈 모듈이 할당되어 있다. 모듈 내부의 시뮬레이션 환경은 할당된 단계의 프로세스에 국한된다. 일례로 면 제조 공정의 1단계를 최적화하는 트윈 모듈은 밀가루 투입과 가공 단계만을 관할한다. 이를 통해 도출되는 소요시간, 온도, 습도 등의 데이터는 그 다음 단계의 트윈 모듈에 공유되어 일관적인 최적화를 수행한다. 이러한 방식은 구조적으로 조금 더 복잡하지만, 내부의 시뮬레이션 환경이 간소화되어 개별적인 트윈의 연산 속도가 향상된다는 이점을 갖는다.

연합 디지털 트윈의 트리 구조가 적용된 모델은 모듈화 기법이 여러 번 활용된다. 면 제조 공정의 2단계와 3단계에서 세분된 단계에 맞춰 트윈 모듈이 한 계층을 더 이루고 있다. 2단계에서는 각 방의 건조 과정마다 트윈 모듈이 할당되며, 3단계에서는 작업 구역마다 트윈 모듈이 할당된다. 그리고 이를 관할하는 상위 모듈이 존재한다. 1단계를 담당하는 트윈 모듈의 시뮬레이션 데이터가 2단계의 전반을 관할하는 트윈

1. Traditional Method Model



2. Modularization Method Model



3. Modularization Method Model - Tree Structure

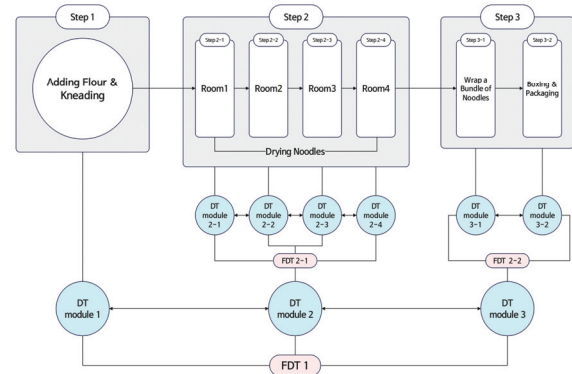


Fig. 7. Comparison Models Using Each Method

모듈에 전송되면, 데이터는 다시 해당 모듈을 통해 방 내부의 건조 프로세스를 담당하는 하위 모듈에 하달된다. 하달된 데이터를 바탕으로 하위 계층에서 시뮬레이션이 완료되면, 시뮬레이션 데이터는 상위 계층의 모듈로 전송되어 다음 단계의 트윈에 공유된다. 여기서 하위 계층의 모듈이 실제로 시뮬레이션 환경이 구현되는 모듈이며, 상위 계층의 모듈은 시뮬레이션으로부터 발생하는 데이터와 모듈의 상태를 관제한다. 이러한 트리 구조는 각 모듈의 시뮬레이션 환경을 단순화함과 동시에, 연합 디지털 트윈의 제어 구조를 일관된 프로세스에 따라 체계화한다.

기업 혹은 디지털 트윈의 운영자 입장에서 모듈화 기법은 기존의 방법 대비 많은 효용성을 지닐 것으로 사료된다. 앞서

언급하였듯이 모듈의 구조적인 특성에 기반하여 프로세스를 시범적으로 변형하기 수월하다. 기존의 단일 디지털 트윈을 활용하면 직접 시뮬레이션 환경을 수정해야 한다는 단점이 있다. 또한, 그 과정에서 전체 시뮬레이션이 잠시 중단되는 문제도 발생한다. 그러나 모듈화 기법을 활용하면 기존의 프로세스는 그대로 운영하면서, 새로운 트윈 모듈을 연결하거나 제거하기 편리하다. 면 제조 공정을 예로 들자면 2단계에서 건조 방의 개수를 6개로 늘리는 경우를 시뮬레이션할 때, 방의 건조 프로세스를 담당하는 모듈을 2개 더 연결하는 것으로 간편하게 수정 작업을 마칠 수 있다. 반대로 변형된 상태의 프로세스를 원래대로 복구하고자 할 때는 모듈의 연결을 해제하여 수정 작업을 마무리하는 것이 가능하다.

이와 더불어, 트윈 모듈은 기존의 단일 디지털 트윈보다 범용성이 크다. 트윈의 시뮬레이션 환경이 단순화되어 특정한 프로세스에 정형화되지 않고, 다방면의 프로세스에 적용된다. 일례로 모델을 적용한 식품 업체의 면 제조 공정 중에서 밀가루 반죽 단계를 담당하는 트윈 모듈은 밀가루를 활용한 기타 제조 공정에도 할당될 수 있다. 여기서 반죽 설비의 제원과 공간적인 특성을 일부 변환하는 작업이 수반되어야 하지만, 시뮬레이션 환경 전체를 설계하는 과정 대비 효율적이다. 이러한 트윈 모듈이 일반적으로 통용되기 시작하면 트윈 모듈 시장이 구축될 것으로 보인다. 공급자는 자체적으로 제작한 트윈 모듈을 판매함으로써 수익을 창출하고, 수요자는 트윈 모듈을 구매함으로써 기술적 투자 없이도 디지털 기반의 시뮬레이션 환경을 구성할 수 있게 되는 것이다.

5. 결 론

본 연구는 프로세스의 최적화와 관련된 기능상의 관점에서 단일 디지털 트윈과 연합 디지털 트윈의 개념 및 상호 관계를 재정의하고, 이를 바탕으로 연합 디지털 트윈 기반의 모듈화 기법과 면 제조 공정에서 활용될 수 있는 모델을 설계하였다. 이러한 방법론을 통해 현재 도시 서비스 통합 최적화 등의 복합적인 거시 프로세스를 관리하는 방향으로 연구되고 있는 연합 디지털 트윈의 적용 범위를 단일한 미시 프로세스까지 확대할 수 있을 것이다. 나아가 모듈화 기법을 여러 번 적용한 트리 구조를 이용하면 화재대응 프로세스나 제품 제조 공정 등 기존의 복잡한 단일 프로세스를 더욱 세분화함으로써 디지털 시뮬레이션 환경의 효율성과 유지보수성을 증대할 수 있을 것으로 기대된다. 앞으로 연합 디지털 트윈은 이종 분야 간 연계를 통해 대상을 최적화하는 용도에서 그치지 않고, 단일 프로세스의 세분화를 통해 기존의 디지털 트윈을 활용한 최적화를 개선하는 방향으로도 발전해야 한다.

다만, 본 연구의 몇 가지 한계점을 논의하자면 다음과 같다. 우선, 기술적 한계로 인해 식품 업체의 면 제조 공정에서 실제 모듈화 기법을 구축하고 검증할 수 없었다. 아직 개념적 논의 단계에 있는 연합 디지털 트윈의 특성상 트윈 사이의 네

트워크 구축 및 데이터 스케일링과 관련된 논의가 꾸준히 진행되어야 할 것으로 보인다. 또한, 기존의 단일 디지털 트윈을 토대로 일관된 프로세스를 최적화하는 경우와 비교하여 모듈화 기법에서 연합 네트워크를 통한 트윈 모듈 간의 데이터 전송에 따른 지연율을 유의미하게 축소할 수 있는지가 검증되어야 할 것이다. 아울러, 기존의 방식 대비 모듈화 기법이 어느 정도의 최적화 성능을 가지는지에 대해서도 충분히 연구되어야 할 것으로 판단된다. 이러한 한계점을 보완하기 위해 후속 연구에서는 면 제조 공정을 간소화한 시험 프로세스를 구성하고, NX MCD 등의 PLC(Programmable Logic Controller) 시뮬레이션 도구를 활용하여 단일 디지털 트윈과 연합 디지털 트윈 기반의 모듈화 기법을 각기 활용한 방법론의 최적화 성능과 지연율을 비교 분석할 예정이다.

References

- [1] Y. W. Kim, "Concept and technical issues of digital twin," *Open Standards and ICT Association, OSIA Standards & Technology Review Journal*, Vol.34, No.1, pp.4-9, 2021.
- [2] S. K. Yoo, "Digital twin manufacturing technology standardization trends," *OSIA Standards & Technology Review Journal*, Vol.34, No.1, pp.17-21, 2021.
- [3] J. Y. Yoo, J. K. Lee, and W. W. Choi, "Digital twin technology and standardization trends," *The Journal of The Korean Institute of Communication Sciences*, Vol.38, No.9, pp.40-47, 2021.
- [4] K. W. Seo, Y. J. Jeong, H. J. Sung, and S. K. Hong, "Strategies and tasks for implementing digital twin-based national land," *National Policy Brief*, pp.1-8, 2022.
- [5] Gartner, "Use the IoT platform reference model to plan your IoT business solutions," 2016.
- [6] J. H. Cho, "Urban changes in the era of the fourth industrial revolution and smart city planning model based on digital twin," *Urban Policy Research*, Vol.9, No.3, 2010.
- [7] W. T. Kim, S. J. Yoon, Y. J. Kim, and D. S. Cho, "Digital twin technology for autonomous cyber-physical systems," *The Journal of The Korean Institute of Communications and Information Sciences*, July Issue, 2020.
- [8] D. Y. Jung, "Technical definition and detailed development of digital twin: A five-level model," *OSIA Standards & Technology Review*, Vol.34, No.1, pp.10-16, 2021.
- [9] J. H. Park, W. G. Choi, D. W. Jeong, S. H. Hong, and K. J. Cho, "Comparative study of digital twin utilization cases - Helsinki, Finland; Singapore; New South Wales, Australia," *Journal of the Korean Society for Geospatial Information System*, Vol.25, No.2, pp.51-74, 2023.

- [10] J. Noh, H. S. Park, and S. H. Myeong, "Study on smart city disaster management using digital twin: A case study of incheon metropolitan city," *Journal of Korean Association for Regional Information Society*, Vol.25, No.1, pp.1-33, 2022.
- [11] W. ElMaraghy, H. ElMaraghy, T. Tomiyama, and L. Monostori, "Complexity in engineering design and manufacturing," *CIRP Annals*, Vol.61, No.2, pp. 793-814, 2012.
- [12] S. S. Choi, J. Y. Woo, J. Kim, W. H. Choi, J. S. Kim, and J. Y. Lee, "Survey and analysis of domestic digital twin research trends," *Journal of the Korean Society for Computational Design and Engineering*, Vol.26, No.1, pp.59-69, 2021.
- [13] C. W. Kwon and S. H. Song, "Digital Twin Modularization Techniques Based on Federated Digital Twins," *Proceedings of the Annual Conference of Korea Information Processing Society Conference (KIPS) 2023*, Vol.30, pp.138-139, 2023.



권 찬 우

<https://orcid.org/0009-0006-5430-5944>

e-mail : sky2793570@gmail.com

2023년 ~ 현 재 국립안동대학교

정보통신공학과 학사과정

관심분야 : Data Science, Generative AI, Digital Twin



송 석 현

<https://orcid.org/0000-0003-1455-0428>

e-mail : ssh@nia.or.kr

2018년 연세대학교 기술정책협동과정

(전기전자 전공)(박사)

2021년 감사원 감사연구원

2022년 ~ 현 재 국립안동대학교

정보통신공학과 조교수

관심분야 : Big data, Artificial Intelligence, Cloud Computing, Digital Twin