

# 건축 환경설비 분야 디지털 트윈 연구 동향 문헌 연구

## Current Research Trends in Digital Twin Technology for Building Environmental Engineering: A Literature Review

노 상 태\*\*  
No, Sang-Tae

### Abstract

Digital twin (DT) technology is a key enabler in the architecture industry, vital for smart city development. It allows real-time monitoring, predictive maintenance, and energy optimization throughout the building lifecycle. This study systematically compares domestic and international research trends in architectural digital twins to identify research gaps and suggest future directions. A total of 70 papers from domestic databases and Google Scholar were analyzed using quantitative methods, network analysis, and a four-level technology integration framework. The analysis revealed that international studies, rapidly growing since 2019, focus on practical operation and maintenance O&M and energy management, showing a stepwise maturity with a standardized BIM-IoT-AI integration. In contrast, domestic research remains in an early stage, emphasizing literature reviews and theoretical foundations, with a notable lack of empirical integration (Level 2). Domestic studies often bypass this practical data-integration stage, concentrating on theoretical (Level 1) and simulation (Level 3) methodologies. The most critical research gap, therefore, lies at the empirical implementation level. This finding provides foundational insights to enhance domestic research maturity, and the proposed four-level framework offers a useful tool to evaluate future integration depth.

키워드 : 디지털 트윈, 체계적 문헌고찰, 키워드 네트워크 분석  
Keywords : Digital Twin, Systematic Literature Review, Keyword Network Analysis,

### 1. 서 론

#### 1.1 연구의 배경

디지털 트윈(Digital Twin)이란 현실 공간의 물리적 자산을 가상 공간에 동일하게 구축하고 실시간 데이터와 동기화하여 그 상태와 동작을 모니터링·분석·예측·최적화하는 기술이다. 최근 도시화 및 스마트시티 구축이 가속화되면서 건축산업 전 과정에 걸친 데이터 기반의 통합 관리가 필수 요소로 주목받고 있다. 기존의 BIM(Building Information Modeling), IoT(Internet of Things), CIM(Computer Integrated Manufacturing) 등은 건축물의 정보화와 협업을 향상했으나, 여전히 실시간 운영 데이터의 통합과 이를 통한 예측·최적화 기능에는 한계를 보인다. 이러한 맥락에서 디지털 트윈은 물리적 건축물과 가상 모델 간의 실시간 연계를 통해 건물 운영·유지관리 효율 향상, 에너지 최적화, 사용자

경험 개선 등을 가능하게 하는 핵심 기술로 주목받고 있다.

이러한 디지털 트윈 개념은 2002년 미국 미시간대학교의 마이클 그리브스(Michael Grieves) 박사가 제품수명주기관리와 관련하여 처음 개념화하였으며, 현실과 가상 공간 사이의 정보 흐름을 통합하는 기능을 강조했다. 1960년대 NASA의 지상 시뮬레이션 시스템에서 원형을 찾아볼 수 있으며, 1970년 아폴로 13호 사고를 계기로 지상에서 우주선을 정밀하게 시험·분석하기 위한 모델이 개발되었다. 이후 NASA는 2010년 기술 로드맵을 통해 공식적으로 '디지털 트윈'이라는 용어를 사용하며 그 정의를 구체화했다. 이처럼 제조업과 우주항공 분야에서 발전한 디지털 트윈은 이제 건물 생애주기 전반을 관리하는 동적이고 지능적인 플랫폼으로 건설 분야에 새로운 패러다임을 제시하고 있다.

#### 1.2 연구의 목적

본 연구의 목적은 최근 미래 기술로 주목받고 있는 디지털 트윈 개념이 국내외 건설·건축 분야 연구에 어떠한 방식과 내용으로 적용되고 있는지 분석한다. 향후 디지털 트윈이 건축 산업에 어떠한 형태로 영향을 미치는가에 대한 예측을 진행하고 향후 연구를 위한 기초 자료를 마련한다.

건설 분야에서 디지털 트윈 기술이 어떻게 연구·적용되고 있는지 파악하기 위해 국내·외 문헌 조사를 수행

\* 국립한국교통대 건축공학과 교수, 공학박사  
(Corresponding author : Department of Architectural Engineering, Korea National University of Transportation, stno@ut.ac.kr)  
This was supported by Korea National University of Transportation in 2025

하였다. 본 조사의 목적은 현재 디지털 트윈 연구의 전반적인 흐름을 파악한다. 또한 정량적·정성적 분석 결과를 종합하여 현재 연구가 집중된 분야와 상대적으로 부족한 분야, 즉 연구 공백(Research Gap)을 식별하고, 이를 바탕으로 건설·건축 분야 디지털 트윈 기술이 나아가야 할 향후 연구 방향 설정을 위한 기초 자료를 마련하는 데 있다.

## 2. 문헌 조사

### 2.1 디지털 트윈의 개념 및 구성요소

디지털 트윈은 현실 세계의 물리적인 대상, 프로세스, 시스템을 가상 모델로 동일하게 구현한 시스템이다. Omany(2023)에서 디지털 트윈 기술이 건설 산업 전반에 걸쳐 혁신과 효율성 향상에 기여가 가능하다고 제시한다<sup>1)</sup>. IoT 장치, 데이터 로거, 3D 스캐너, 열화상 카메라, 환경 센서와 같은 다양한 장치와 디지털 트윈을 통합하여 물리적 자산과 관련된 직접적인 경험적 데이터를 수집할 수 있다. 디지털 트윈을 적용하면 가능한 실패를 예측·시스템 피드백·자극 정보에 따른 대응이 가능하고, 연결된 모든 프로세스의 지속적인 모니터링이 용이하여 건물 전체 수명 주기 동안 물리적 자산과 관련된 정보를 수집할 수 있다. 이러한 디지털 트윈의 개념적 구성은 Figure 1과 같다.

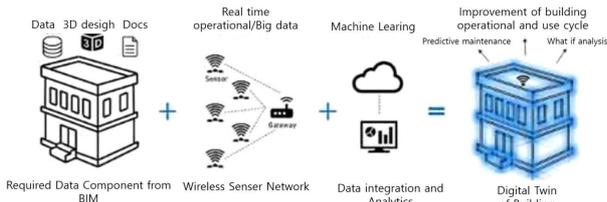


Figure 1. Structure of a Digital Twin Showing Data Linkage between Physical and Virtual Worlds

### 2.2 문헌 조사 방법

본 연구는 건설 분야 디지털 트윈의 연구 동향을 파악하기 위해 체계적 문헌 고찰(Systematic Literature Review) 방법을 적용하였다. 구체적인 자료 수집을 위해, 먼저 조사 범위를 2018년부터 2025년까지 발표된 학술 논문 및 정부 정책 자료로 한정하였다.

국내외 연구 동향과 정책 자료를 조사하고 기존 디지털 기술과 디지털 트윈의 연계 가능성을 살펴본다. 국내 문헌은 DBpia, RISS 학술 데이터베이스와 NTIS에 등록된 국가 R&D 과제, 국토교통부 관련 정책 보도자료를 대상으로 '건설 디지털 트윈', '스마트빌딩' 등의 핵심 검색어를 활용하여 수집했다. 국외 문헌은 구글 스콜라(Google Scholar)를 이용하여 최근 5년간 발표된 논문 중 인용수가 높은 문헌 순서로 선별하여 최신 기술 동향을 파악하였다. 이렇게 수집된 문헌 중 주제 관련성이 낮은 자료를

제외하여 최종적으로 총 70건의 문헌을 분석 대상으로 확정하였다. 선정된 문헌들은 분석의 객관성을 확보하기 위해 연구 분야(Research Area), 적용 기술(Applied Technology), 연구 방법론(Research Methodology)의 세 가지 기준을 체계적으로 분류하였다.

### 2.3 분석 대상 문헌

앞서 정의한 문헌 검색 전략 및 선정 기준에 따라 수집된 문헌을 대상으로 체계적인 스크리닝 절차를 수행했다. 1차 스크리닝 단계에선 수집된 문헌의 제목과 초록을 검토하여, 본 연구의 핵심 주제인 건설·건축 분야 디지털 트윈과 직접적인 관련성이 낮은 문헌 및 중복으로 게재된 문헌을 우선으로 배제하였다. 2차 스크리닝 단계에선 1차 선별된 문헌의 전문을 자세히 검토하였다. 이 과정에서 구체적인 연구 내용이나 방법론이 기술되지 않아 정성적 분석이 불가능한 문헌, 또는 학술적 검증이 이루어지지 않은 단순 기술 보고서나 잡지 기사 등을 추가로 제외하여 최종 분석 데이터의 신뢰도와 타당성을 확보하였다. 조사된 문헌의 정량적 현황은 Table 1과 Table 2에 제시하였고, Table 1은 해외 문헌을, Table 2는 국내 문헌을 대상으로 분석한 결과이다.

Table 1. Quantitative Analysis of International Literature

Category	Application Area	Count
Research Area	Building Energy Management	11
	Facility Management (O&M)	12
	Smart City / Urban Scale	6
Applied Technology	BIM-based	19
	IoT-based	11
	AI / Machine Learning-based	13
	Computer Vision	4
Research Methodology	Review	12
	Framework / Model Proposal	11
	Experiment / Simulation	11
	Case Study	2
Total		54

Table 2. Quantitative Analysis of Domestic Literature

Category	Application Area	Count
Research Area	Building Energy Management	3
	Facility Management (O&M)	7
	Smart City / Urban Scale	4
Applied Technology	BIM-based	3
	IoT-based	2
	AI / Machine Learning-based	3
	Computer Vision	1
Research Methodology	Review	7
	Framework / Model Proposal	5
	Experiment / Simulation	4
	Case Study	3
Total		16

이러한 과정을 거쳐 본 연구의 분석 기준으로 부합하지 않는 문헌을 모두 제외한 결과, 최종적으로 총 70편(해외 54편, 국내 16편)의 학술 문헌이 본 연구의 분석 대

상으로 확정되었다. 이어지는 3장에서는 70편의 문헌을 대상으로 문헌 관계도 분석, 연도와 키워드별 연구 동향 그리고 본 연구에서 제안하는 4단계 기술 통합 수준 프레임워크를 적용한 다각적인 분석을 수행한다.

### 3. 문헌 분석

#### 3.1 문헌 관계도

본 장에서는 건설 분야 디지털 트윈의 연구 동향을 분석하기 위해 선정된 학술 문헌을 대상으로 분야별 정량적 분석과 핵심 키워드 분석을 통한 정성적 분석을 수행하였다. Table 1, Table 2는 분석 대상 문헌의 전반적인 현황을 보여준다. 최근 연구는 운영·유지보수(O&M)와 에너지 관리 분야에 집중되어 디지털 트윈의 실용적 가치를 보여준다. 기술적으로는 BIM을 기반으로 IoT 센서 데이터를 수집하고 AI로 분석하는 흐름이 뚜렷했으며 이는 정적인 3D 모델을 넘어 현실과 동기화되는 동적 모델로 기술이 발전하고 있음을 나타낸다.

이러한 정량적 흐름의 이면에 있는 연구 주제 간의 구조적 관계와 지적 연결성을 심층적으로 파악하기 위해, 본 연구에서는 시각적 문헌 분석 도구인 리서치 래빗(Research Rabbit)을 활용하였다. 리서치 래빗은 특정 시드 논문을 기반으로 인용 관계를 추적하여 관련 연구를 추천하고, 논문 간의 연결망을 네트워크 그래프 형태로 시각화하는 연구 지원 플랫폼이다. 사용자가 추가한 문헌 컬렉션을 바탕으로 Earlier Work와 Later Work 선택 기능을 통해 탐색할 수 있으며, 저자 네트워크 분석을 통해 해당 분야의 핵심 연구자를 식별하는 기능도 제공한다. 본 연구에서는 이 도구를 사용하여 분석 대상 문헌 간의 상호 인용 관계를 시각화함으로써, 주요 연구 그룹을 도출하고 연구 동향의 핵심적인 흐름을 객관적으로 분석하였다. 이를 통해 연구 주제 간 연결 구조를 파악한 결과는 Figure 2와 같으며, 네트워크는 몇 개의 주요 연구 그룹으로 군집화되는 특징을 보인다.

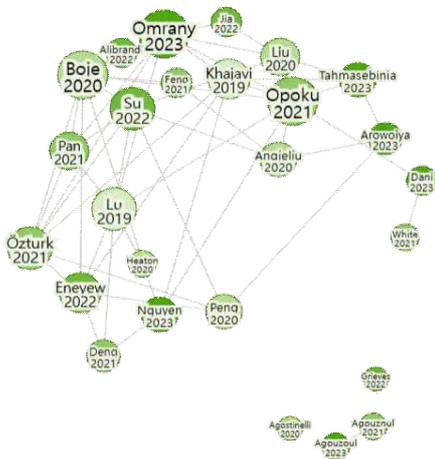


Figure 2. Results of the Literature Network Analysis via Research Rabbit

Figure 2는 리서치 래빗을 통해 분석 대상인 해외 논문 54편의 상호 인용 관계를 시각화한 것이다. 분석 도구인 리서치 래빗은 해외 학술 데이터베이스를 기반으로 하므로, 국내 문헌은 시각화 분석에서 제외되었다. 각 원(노드)은 개별 논문을, 연결선은 인용 관계를 의미하며, 가까이 군집을 이룰수록 주제적 연관성이 높다는 것을 나타낸다. 전체 네트워크는 주제적 연관성에 따라 크게 3개의 주요 연구 그룹으로 군집화되는 특징을 보였다.

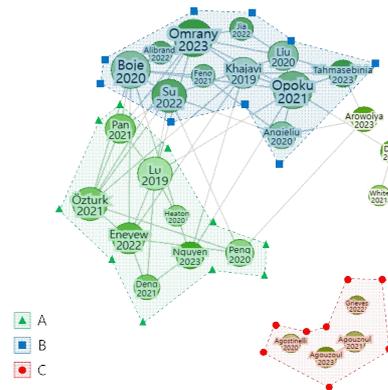


Figure 3. Visualization of Major Research Groups based on Citation Relationships

A그룹은 BIM 기반 건설 디지털 트윈연구 그룹이다. 이 클러스터는 BIM, Construction, Framework 키워드를 중심으로 형성되었으며, BIM을 데이터 통합 플랫폼으로 활용하여 건설 프로세스를 관리하고 가시화하는 연구들이 주를 이룬다. 이는 BIM 기술이 건설 분야 디지털 트윈 연구의 가장 핵심적인 기반임을 시각적으로 증명한다.

B그룹은 건물 에너지 및 운영 최적화 연구 그룹이다. Building Energy, O&M, IoT 키워드를 중심으로 밀집해 있다. 이 그룹의 연구들은 주로 IoT 센서로 수집한 실시간 데이터를 디지털 트윈 모델에 연동하여 건물의 에너지 소비를 예측하고, 운영 효율을 최적화하는 데 집중한다.

C그룹은 AI 기반 지능형 시스템 연구 그룹이다. 다른 그룹들과 다소 독립적으로 형성된 이 클러스터는 AI, Machine Learning, Smart System 키워드를 특징으로 한다. 이는 AI와 머신러닝 기술이 아직 BIM이나 IoT처럼 보편적으로 활용되기보다는, 특정 분야의 예측 및 자동화 등 고도화된 기능을 구현하기 위한 전문 기술로 연구되고 있음을 시사한다.

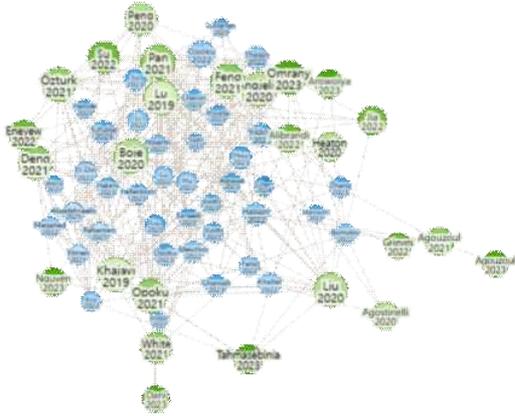


Figure 4. Results of the latest research literature network analysis with Research Rabbit

Figure 4은 리서치 래빗의 최신 연구 문헌 탐색 기능을 활용하여 분석 대상 논문 54편과 현재까지 발표된 주요 문헌 간의 연관도를 나타내는 그림이다. 디지털 트윈의 전체적인 최신 동향을 보여주는 비교 자료로서 기존 문헌의 분석 범위를 넘어 현재 디지털 트윈의 연구의 동향을 확인할 수 있고 연구의 확장성과 미래 방향성을 제시한다. 기존 분석 시각화 연관도와 비교 시 새로운 연구 그룹이 등장하였다. Sadri(2023)는 블록체인 기술을 통합하여 데이터의 위변조를 방지하고, 스마트 계약을 통해 이해 관계자 간의 무결성이 확보된 신뢰성 높은 프로세스를 제시하는 연구를 제안했다.<sup>2)</sup>

Chen(2024)은 딥러닝과 다중목표 최적화 기법을 활용하여 기존의 주관적 평가 방식의 한계를 극복하고, 공정성·효율성 등 상충 목표들을 수학적으로 만족시키는 의사결정 지원 방법론이 제안되었다.<sup>3)</sup>

Liu(2023)는 디지털 트윈을 메타버스와 연계하고 VR/AR 등 몰입형 기술을 활용하여, 단순 분석 모델을 넘어 시공간 제약 없는 원격 협업 및 시뮬레이션 플랫폼으로 진화시키는 연구를 제안했다.<sup>4)</sup> 이를 통해 최근 디지털 트윈은 블록체인, 딥러닝, 메타버스 등 최신 기술과 융합하여 한계를 극복하고 고도화되고 있다. 이는 디지털 트윈이 단순한 분석 모델을 넘어 신뢰할 수 있고 몰입형 협업이 가능한 지능형 플랫폼으로 진화하고 있음을 시사한다.

3.2 연도별 연구 동향

건설 분야 디지털 트윈에 대한 연구는 시간이 지남에 따라 꾸준히 증가하는 추세를 보였다. Figure 5는 이러한 연도별 문헌 수의 변화 추이를 보여준다.

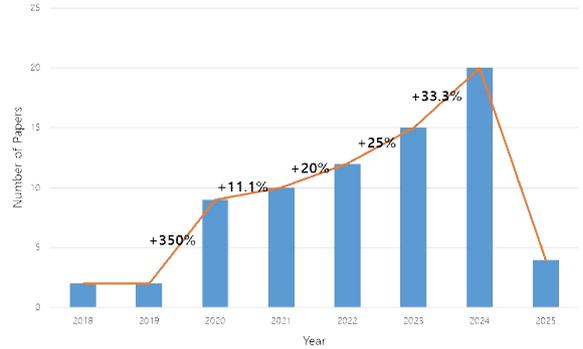


Figure 5. Trends in the Number of Publications by Year

그래프에서 볼 수 있듯이, 2019년까지는 전년 대비 증가율 0.0%로 초기 탐색 단계에 머물렀으나, 2020년 전년 대비 +350%라는 증가를 기점으로 학계의 관심이 본격화되었음을 확인할 수 있다. 이후 2021년(+11.1%) 증가율이 다소 둔화했으나, 2022년(+20%)부터 2024년(+33.3%)까지 다시 꾸준한 성장세를 이어가고 있으며, 이는 BIM, IoT 등 관련 기반 기술의 발전과 수요가 맞물리며 디지털 트윈 기술이 본격적인 확장기, 성숙기로 진입하고 있음을 시사한다. 이러한 연도별 연구 동향을 시각화한 그래프의 기반이 된 정확한 문헌 수는 Table 3과 같다.

Table 3. Annual Status of All Literature

Category	Item	Count
By Year	2018	2
	2019	2
	2020	9
	2021	10
	2022	12
	2023	15
	2024	20
	2025	4
Total		70

두 자료를 종합하면, 건설 분야 디지털 트윈 연구는 초기 개념 정립 단계를 지나서 2020년부터 본격적인 확장기에 접어들었으며, 특히 2023년 이후 가장 많은 연구가 발표되며 기술이 성숙기에 접어들고 있음을 시사한다.

앞서 살펴본 연구의 양적 팽창과 더불어, 연구 주제 또한 시간의 흐름에 따라 질적으로 성숙하는 뚜렷한 발전 단계를 보였다. 단순히 문헌의 수가 증가하는 것을 넘어, 연도별로 집중되는 주요 연구 과제가 어떻게 변화했는지 파악하는 것은 기술의 성숙도를 검토하는 근거가 된다. 연구 초기 단계에는 디지털 트윈의 개념 정의나 기반 기술 탐색과 같은 이론적 주제가 주를 이루었을 것이다. 반면, 연구가 활성화되는 확장기와 성숙기에는 운영 및 유지보수, 에너지 관리, 안전관리 등 실제 현안을 해결하기 위한 구체적인 적용 분야로 주제가 심화하고, 나아가 데이터 분석, 최적화 같은 고도화된 주제로 발전하는 경향을 예측할 수 있다. Table 4는 연도별 주요 키워드의 분

포를 교차 분석하여 이러한 연구 주제의 질적 변화를 나타낸다.

Table 4. Yearly Progression of Key Research Areas

연도	연도별 주요 연구 주제 동향
2018	개념적 기반을 다지고, 타 산업의 사례를 통해 핵심 요소 기술과 발전 가능성을 탐색하는 연구 제시
2019	기술의 실용 가능성을 검증하는 특정 문제 해결 중심의 적용 사례 연구 등장
2020	스마트시티, 교량 유지보수 등 거시적 관점의 프레임워크 제시 및 기술의 기본 개념 정립
2021	프레임워크 구체화, 안전 관리 및 에너지 분야로 주제 확장. MEP, PC 생산 등 특정 공종 적용 시작
2022	실내 조명, 배수 시스템, 공정 모니터링 등 특정 문제 해결을 위한 구체적인 기술 적용 사례 등장
2023	지속가능성, 사용자 안전, 문화유산 보존 등 실용적, 사회적 가치를 창출하는 목표의 연구 심화
2024	기존 연구들을 종합하는 통합 프레임워크 제안과 LiDAR 등 최신기술을 현장 적용하는 실증 연구 등장

초기 탐색기(2018년~2020년)에는 디지털 트윈의 개념적 기반을 다지는 연구가 주를 이루었다. 이 시기의 연구들은 주로 디지털 트윈의 정의를 명확히 하고, 스마트시티나 대규모 인프라와 같은 거시적 관점의 기술 적용 가능성을 탐색하는 통합 프레임워크를 제안하는 데 집중했다. 이는 기술 도입 초기에 필요한 개념적 기틀을 마련하는 탐색적 단계의 특징을 보여준다.

확장기(2021년~2022년)에 접어들며 연구 패러다임은 구체적인 문제 해결 중심으로 전환되었다. 연구 주제는 건물 에너지 관리, 시설 유지보수, 현장 안전 관리 등 건설 산업이 직면한 실질적인 문제들로 확장 및 세분화되었다. 이 시기에는 특정 분야에 기술을 직접 적용하여 그 실용성과 효용성을 검증하려는 시도가 활발히 이루어졌으며, 이는 디지털 트윈 기술이 개념적 단계를 넘어 실용적 단계로 진입했음을 의미한다.

최근 성숙기(2023년~2025년)에는 연구의 목표가 한 단계 더 나아가 지능형 융합 및 가치 창출로 고도화되고 있다. 지속가능성, 사용자 안전, 문화유산 보존과 같이 복합적인 사회·기술적 가치를 추구하는 연구가 등장했으며, 특히 블록체인, 인공지능, 메타버스와 같은 파괴적 기술과 디지털 트윈을 융합하려는 시도가 새로운 연구 전선을 형성하고 있다.

건설 분야 디지털 트윈은 개념 정립, 기술 적용, 지능형 융합이라는 체계적인 성숙 단계를 거치며 발전해왔다. 이는 기술이 단순히 현실을 모방하는 것을 넘어, 다른 기술과 적극적으로 결합하여 새로운 가치를 창출하는 고차원적인 플랫폼으로 진화하고 있음을 명확히 보여준다.

3.3 키워드별 연구 동향

본 절에서는 연구의 구체적인 내용을 파악하기 위해 핵심 키워드 분석을 수행한다. 이는 문헌 70편을 연구 분야, 적용 기술, 연구 방법론의 세 가지 핵심 범주로 분류하여, 현재 연구가 집중되고 있는 분야와 기술적 접근 방식을 규명하는 것을 목적으로 한다. 특히, 건설 분야 디지털 트윈 연구는 국가별 산업 환경과 기술 수준에 따라

다른 발전 양상을 보일 수 있다. 이에 분석 대상 문헌을 국내외로 구분하여 정량적 특징을 비교·분석하였으며, 그 결과는 Figure 6과 같다. 본 절에서는 자료를 바탕으로 해외 연구 동향의 특징을 살펴본 후, 이와 대비되는 국내 연구를 비교·분석한다.

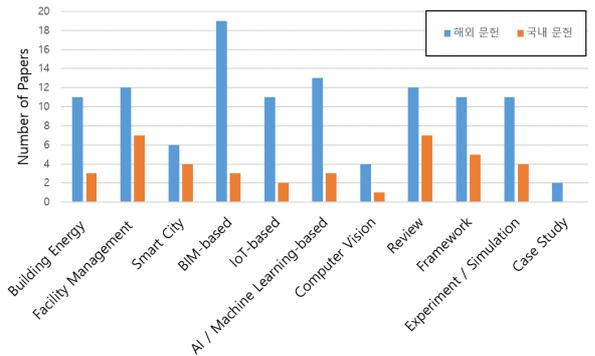


Figure 6. Distribution of Studies by Research Keyword

조사된 문헌 총 70건 중, 해외 연구 54편을 분석한 결과, 연구 분야는 유지보수가 12건, 건물 에너지가 11건으로 운영 단계에 연구가 집중되는 경향을 보였다. 이는 디지털 트윈 기술을 건물의 장기적인 자산 가치 향상과 운영 효율화에 직접적으로 활용하려는 실용적인 접근이 해외 연구의 주를 이루고 있음을 시사한다.

적용 기술 측면에서는 BIM-based가 19건으로 압도적인 핵심 기반 기술로 나타났으며, AI / Machine Learning 13건과 IoT-based 11건이 그 뒤를 이었다. 이는 BIM으로 구축된 가상 모델에 IoT 센서로 현실 데이터를 실시간으로 연결하고, AI로 분석하여 예측 및 최적화를 수행하는 기술적 흐름이 해외 연구의 표준적인 방법론으로 자리 잡았음을 보여준다.

연구 방법론은 기존 연구를 종합하는 Review가 12건으로 가장 많았고, 기술의 효용성을 실험으로 검증하는 Experiment / Simulation이 11건, 새로운 모델을 제안하는 Framework가 11건으로 나타났다. 이는 해외에서 디지털 트윈 연구가 활발히 진행되면서, 새로운 기술을 제안하고 검증하는 연구와 함께 학문적 동향을 정리하는 연구가 균형 있게 이루어지고 있음을 의미한다.

국내 연구 16편은 해외 연구와는 다소 다른 양상을 보였다. 연구 분야의 경우, 유지보수가 7건으로 가장 많았고, 스마트시티가 4건, 건물 에너지가 3건으로 나타났다. 이는 국내 연구가 해외 연구와 동일하게 건물의 운영, 유지 단계에 연구를 집중하는 것을 나타낸다. 또한, 스마트시티, 건물 에너지에 관한 연구도 진행 중이며 해당 분야 문제 해결에도 높은 관심이 있음을 보여준다.

적용 기술 측면에서는 특정 기술에 집중되기보다는 다양한 기술을 탐색하는 경향을 보였다. BIM-based와 AI / Machine Learning이 3건, IoT-based가 2건 및 Computer Vision이 1건에 그쳤다. 국내 연구의 적용 기술은 BIM을 중심으로 기술을 통합하는 흐름을 확인 할 수 있고, 다양한

적용 기술 또한 연구가 진행되는 것으로 분석된다.

연구 방법론은 Review가 7건으로 가장 많아 국내에서도 최신 기술 동향을 파악하고 정리하려는 노력이 활발함을 알 수 있었다. 반면, 실제 시스템을 구현하고 검증하는 Experiment / Simulation 연구와 기술을 현장에 적용하여 분석하는 Case Study 연구는 해외 연구에 비교 시 상대적으로 매우 부족하였다. 이는 향후 기술 동향 파악을 넘어, 개발된 기술을 실제 시스템으로 구현하고 현장에 적용하여 효과를 검증하는 실증적 연구가 더 활성화될 필요가 있음을 시사한다.

3.4 기술 통합 수준별 분석

3.3절의 항목별 분석이 BIM, IoT, AI 등 개별 기술의 연구 빈도를 파악하는 것이었다면, 본 절에서는 이 기술들이 어떻게 유기적으로 융합되어 디지털 트윈의 본질적 기능인 모니터링, 분석, 예측, 최적화를 구현하는지 현재까지 연구의 깊이와 성숙도를 분석하고자 한다. 이를 위해 본 연구에서 제안하는 4단계 기술 통합 수준 프레임워크를 기준으로, 분석 대상 문헌 70편을 분류하였다. Level 1(기반 구축 및 단일 기술 활용), Level 2(데이터 연동 및 모니터링), Level 3(분석, 예측, 시뮬레이션) 그리고 Level 4(최적화 및 자동 제어)이다. 각 레벨에 대한 세부적인 정의와 특징, 주요 키워드는 Table 5와 같다.

Table 5. Classification Criteria for Technology Integration Levels

Level	주요 정의 및 특징
Level 1	디지털 트윈 구현을 위한 데이터 모델, 플랫폼 아키텍처, 정보 표준 등을 제안하는 이론적/기반적 연구 단계이다. 혹은 BIM 단독(시각화), IoT 단독(단순 데이터 수집) 등 특정 기술 하나만을 독립적으로 활용하는 연구 단계
Level 2	현실의 물리적 자산과 가상 모델을 연동하여 실시간 데이터를 수집하고, '현재 상태'를 가시화하거나 모니터링 및 디지털 트윈의 실시간 동기화가 시작되는 첫 단계의 연구 단계
Level 3	Level 2에서 연동된 데이터를 기반으로 AI, 머신러닝, 시뮬레이션 기법 등을 활용하여 '미래 상태'를 예측하거나 특정 시나리오를 분석하는 연구 단계
Level 4	Level 3의 예측/분석 결과를 바탕으로 시스템이 최적의 의사결정을 제안하거나, 나아가 물리적 자산을 자동 제어하여 가상 세계의 결정을 현실 세계에 반영하는 연구 단계

Table 5의 분류 기준을 바탕으로 전체 문헌(70편)을 먼저 해외 연구(54편)와 국내 연구(16편)로 나누어 비교·분석하였다. Figure 7은 국내외 분석 대상 문헌의 기술 통합 수준 분포를 별도로 시각화하여 비교한 것이다.

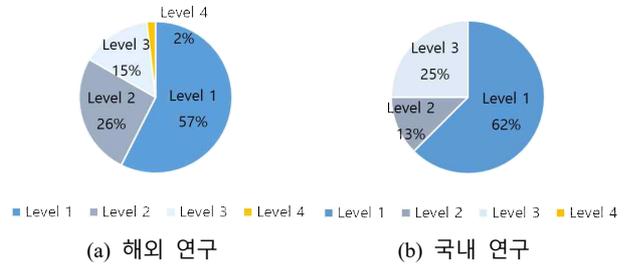


Figure 7. Comparison of Technology Integration Level Distribution between Domestic and International Research

Figure 7의 분석 결과, 국내외 연구는 기술 통합 수준에서 차이를 보였다. (a) 해외 연구(54편)의 경우 Level 1이 57%로 과반을 차지했으나, Level 2가 26%, Level 3가 15%로 비교적 고른 분포를 보였다. 또한, Level 4 연구도 2%로 나타나, 기반 기술에서 출발하여 점진적으로 기술을 고도화하는 성숙 단계의 양상을 나타낸다. 반면, (b) 국내 연구(16편)는 Level 1이 62%로 해외보다 비중이 높았으며, Level 4 연구는 전무 (0%)하여 아직 초기 단계에 머물러 있음을 보여주었다.

주목할 점은 국내 연구의 Level 3의 비중이 25%로 해외보다 높게 나타났지만, Level 2의 비중은 13%로 해외 연구의 절반 수준에 불과했다는 것이다. 이는 국내 연구가 실제 BIM-IoT 등을 연동하는 Level 2의 실증적 구현 단계에 집중하기보다 Level 1의 기반 연구를 바탕으로 Level 3의 AI 시뮬레이션을 수행하는 등 이론적·방법론적 연구에 집중하고 있음을 시사한다. 결론적으로 해외 연구는 Level 2의 실증적 연구를 바탕으로 Level 3의 분석 단계로 나아가지만, 국내 연구는 실제 시스템을 연동하는 Level 2단계가 취약한 것으로 분석된다.

이러한 국내의 연구 결과를 종합한 전체 문헌의 분포는 Figure 8과 같다. 이는 전체 연구 동향에서 각 레벨이 차지하는 비중을 보여준다.

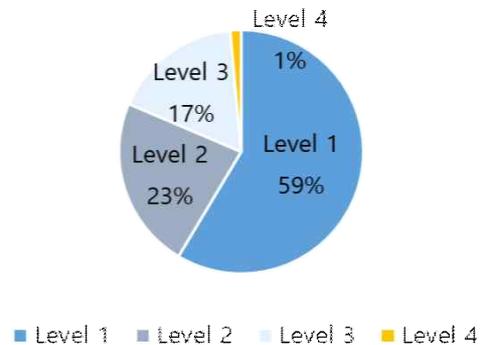


Figure 8. Distribution of All Research Literature by Technology Integration Level

분석 결과, 전체 연구 중 Level 1이 59%로 과반수를 차지하는 것으로 나타났다. 이는 건축 분야 디지털 트윈 연구가 아직은 데이터 모델, 플랫폼 정의, 정보 표준, 프레임워크 제시 등 기반 기술을 구축하거나 단일 기술을 활

용하는 초기 단계에 크게 집중되어 있음을 시사한다. 다음으로 Level 2는 23%, Level 3는 17% 순으로 분포하였다. 이를 통해 현실과 가상 모델을 연동(Level 2)하고, 나아가 AI 등을 활용해 예측하는(Level 3) 연구가 점진적으로 수행되고 있음을 확인할 수 있다. 반면 디지털 트윈의 궁극적인 목적인 Level 4단계에 도달한 연구는 1%에 불과하였다. 이는 분석 및 예측 결과를 바탕으로 실제 시스템을 자동 제어하거나 최적의 의사결정을 지원하는 고도화 단계의 연구가 아직 활성화되지 않았음을 보여준다.

### 3.6 문헌 분석 결과

본 장에서는 건축 분야 디지털 트윈 연구 동향을 파악하기 위해 총 70편의 국내외 문헌을 대상으로 연도별, 항목별, 관계도, 기술 통합 수준별 등 다각도 분석을 수행하였다. 이 분석 결과는 디지털 트윈 기술이 당면한 주요 해결과제와 밀접하게 연관되어 있다.

첫째, 해외 연구는 기술의 실용적 통합 및 검증이라는 해결과제에 집중하고 있다. 2019년 이후 연구가 폭발적으로 증가하며 시설 유지보수 및 건물 에너지 분야에 집중하는 것은, 디지털 트윈을 이론이 아닌 실제 현장의 운영 효율화에 적용하여 가치 창출 등의 실용적 목적이 뚜렷함을 보여준다. 이는 기술 통합 수준에서 Level 1(57%)에서 Level 2(26%), Level 3(15%)로 이어지는 단계적 성숙 모델과, Review·Experiment·Framework가 균형을 이룬 연구 방법론(3.3절)에서도 증명된다. 즉, 해외 연구는 BIM 기반, IoT 연동, AI 분석으로 이어지는 표준화된 통합 흐름을 바탕으로, 데이터의 실증적 연동(Level 2)이라는 기술적 과제를 해결하고 이를 예측 및 분석(Level 3)을 통해 검증하는 단계로 나아가고 있다.

둘째, 국내 연구는 데이터 표준화 및 기반 이론이라는 해결과제에 집중되어 있다. 국내 연구는 연구 방법론의 약 절반가량 Review에 집중되어 있어 기술을 탐색하는 초기 단계의 특징을 보인다. 특히 기술 통합 수준에서 나타난 Level 2(13%)의 공백과 Level 3(25%)의 상대적인 과대 측정은 국내 연구의 핵심적인 특징을 보여준다. 이는 3.3절에서 IoT(2편) 및 Experiment/Case Study(4편)가 절대적으로 부족했던 분석 결과와 정확히 일치한다. 즉, 국내 연구는 데이터 모델, 플랫폼, 프레임워크 등 상호운용성 확보(Level 1)라는 기반 기술 과제에 집중하고 있으나, 이를 실제 시스템과 연동하여 검증하는 실증적 구현(Level 2) 과제는 미흡한 경향을 보인다.

결론적으로, 본 문헌 분석을 통해 해외 연구는 실용적 검증 단계로 나아가지만, 국내 연구는 이론적 기반 탐색 단계에 머물러 있음을 확인하였다. 디지털 트윈의 본질적인 과제인 현실-가상 간의 실시간 동기화를 해결하기 위해서는, 현재 국내 연구에서 가장 부족한 Level 2(데이터 연동 및 모니터링) 단계의 실증 연구가 시급히 요구되며, 이것이 본 연구에서 도출한 가장 핵심적인 연구 격차이다.

## 4. 결론

본 연구는 건축 분야 디지털 트윈의 국내외 연구 동향을 체계적으로 비교·분석하였다. 이를 위해 구글 스칼라와 국내 학술 데이터베이스에서 총 70편의 문헌을 수집하여 연도별, 항목별, 관계도, 그리고 본 연구에서 정의한 4단계 기술 통합 수준에 따라 다각적인 정량·정성 분석을 수행하였다. 또한, 문헌 분석을 통해 국내의 건축 분야 디지털 트윈 연구 동향에서 뚜렷한 격차를 확인하였다. 문헌 분석 결과, 최근 해외 기술 동향은 디지털 트윈이 단일 기술을 넘어 이종 기술과 융합하는 방향으로 나아가고 있음을 확인하였다. 이는 디지털 트윈이 단순한 분석 모델을 넘어, 신뢰할 수 있고 협업이 가능한 지능형 플랫폼으로 진화하고 있음을 시사한다. 본 연구의 핵심적인 발견은 국내 연구의 기술 통합 수준은 실증적 연동 분석/시뮬레이션보다 낮은 분포를 보인다는 점이다. 이는 국내 연구가 디지털 트윈의 본질적 기능인 실증적 구현 단계를 건너 이론과 시뮬레이션 중심의 방법론적 연구에 편중되어 있음을 나타낸다, 학술적 의의는, 기존 키워드 빈도 분석을 넘어 기술 통합 수준이라는 새로운 분석 프레임워크를 제시하였다는 점이다. 이 4단계 분류 기준은 향후 디지털 트윈 연구의 성숙도를 측정하고 연구 분야를 분류하는 도구로 활용될 수 있다. 또한, 이 프레임워크를 통해 국내외 연구 동향을 비교·분석함으로써 국내 연구는 실증적 데이터 연동 연구가 부족하다는 구체적이고 정량적인 연구 격차를 객관적으로 도출하였다. 실무적으로는, 향후 국내 건축 분야 디지털 트윈 정책 및 연구 방향에 대한 방향을 제공한다는 시사점이 있다. 본 연구 결과는 국내 연구가 이론과 시뮬레이션 중심의 편중된 발전을 지양하고, 디지털 트윈의 본질적인 기능인 실시간 동기화를 위한 구현 연구에 집중해야 할 필요성을 제기한다. 본 연구는 몇 가지 한계점을 가지며, 이는 후속 연구를 통해 보완될 필요가 있다. 먼저 표본 수집의 한계로 국내 학술 데이터베이스와 구글 스칼라로 한정하였으며 국내 문헌 표본 수가 다소 적어 통계적 일반화에 한계가 있을 수 있다. 특히 국내 연구의 Level 3 비중이 높게 나타난 것은 이 적은 표본 수에 기인한 통계적 편향일 가능성이 있다. 또한, 검색어의 한계로 Cyber-Physical System, Virtual Twin 등 유사 용어 및 특허 등 회색 문헌을 포함하지 못하였다. 마지막으로, 본 연구는 정량적 분석을 중심으로 수행되어, 연구비 부족, 현장 데이터 접근성 문제 등 국내 연구가 Level 2를 건너뛰는 이유에 대한 심층적인 원인 분석까지는 다루지 못하였다. 따라서 향후 연구에서는 더 광범위한 데이터베이스와 검색어를 포함하여 표본 수를 확대할 필요가 있다. 또한 본 연구가 제안한 연구 격차의 원인을 규명하기 위한 심층적인 사례 연구나 전문가 인터뷰 등 질적 연구가 후속으로 수행되어야 할 것이다.

REFERENCES

1. Omrany, H., Al-Obaidi, K. M., Husain, A., & Ghaffarian hoseini, A. (2023). *Digital Twins in the Construction Industry: A Comprehensive Review of Current Implementations, Enabling Technologies, and Future Directions*. Sustainability, 15(14), 10908.
2. Sadri, H., Yitmen, I., Tagliabue, L. C., Westphal, F., Tezel, A., Taheri, A., & Sibenik, G. (2023). *Integration of Blockchain and Digital Twins in the Smart Built Environment Adopting Disruptive Technologies—A Systematic Review*. Sustainability, 15(4), 3713.
3. Zhen-Song Chen, Kou-Dan Chen, Ya-Qiang Xu, Witold Pedrycz, Mirosław J. Skibniewski, *Multiobjective optimization-based decision support for building digital twin maturity measurement*, *Advanced Engineering Informatics*, Volume 59, 2024.
4. Liu, Z., Gong, S., Tan, Z., & Demian, P. (2023). *Immersive Technologies-Driven Building Information Modeling (BIM) in the Context of Metaverse*. Buildings, 13(6), 1559. <https://doi.org/10.3390/buildings13061559>
5. Gozde Basak Ozturk, *Digital Twin Research in the AEC O-FM Industry*, *Journal of Building Engineering*, Volume 40, 2021.
6. Jie Lu, Chaobo Zhang, Bozheng Li, Yang Zhao, Ruchi Choudhary, Max Langtry, *Self-attention variational autoencoder-based method for incomplete model parameter imputation of digital twin building energy systems*, *Energy and Buildings*, Volume 328, 2025
7. Victor Adetunji Arowoia, Robert Christian Moehler, Yihai Fang, *Digital twin technology for thermal comfort and energy efficiency in buildings: A state-of-the-art and future directions*, *Energy and Built Environment*, Volume 5, Issue 5, 2024, Pages 641-656
8. Xiaoping Zhou, Xiang Li, Yingying Zhu, Chengxi Ma, *Towards building digital twin: A computer vision enabled approach jointly using multi-camera and building information model*, *Energy and Buildings*, Volume 335, 2025.
9. Wassim AlBalkhy, Dorra Karmaoui, Laure Ducoulombier, Zoubeir Lafhaj, Thomas Linner, *Digital twins in the built environment: Definition, applications, and challenges*, *Automation in Construction*, Volume 162, 2024.
10. A. Agouzoul, E. Simeu and M. Tabaa, "Enhancement of Building Energy Consumption Using a Digital Twin based Neural Network Model Predictive Control," 2023 International Conference on Control, Automation and Diagnosis (ICCAD), Rome, Italy, 2023, pp. 1-6
11. Mengnan Liu, Shuiliang Fang, Huiyue Dong, Cunzhi Xu, *Review of digital twin about concepts, technologies, and industrial applications*, *Journal of Manufacturing Systems*, Volume 58, Part B, 2021, Pages 346-361
12. Abdelali Agouzoul, Mohamed Tabaa, Badr Chegari, Emmanuel Simeu, Abbas Dandache, Karim Alami, *Towards a Digital Twin model for Building Energy Management: Case of Morocco*, *Procedia Computer Science*, Volume 184, 2021, Pages 404-410
13. Feng Jiang, Ling Ma, Tim Broyd, Ke Chen, *Digital twin and its implementations in the civil engineering sector*, *Automation in Construction*, Volume 130, 2021.
14. Arsecularatne, B., Rodrigo, N., & Chang, R. (2024). *Digital Twins for Reducing Energy Consumption in Buildings: A Review*. Sustainability, 16(21), 9275.
15. Calin Boje, Annie Guerriero, Sylvain Kubicki, Yacine Rezgui, *Towards a semantic Construction Digital Twin: Directions for future research*, *Automation in Construction*, Volume 114, 2020.
16. Deng M, Menassa C C, Kamat V R (2021). *From BIM to digital twins: a systematic review of the evolution of intelligent building representations in the AEC-FM industry*, *ITcon Vol. 26*, pg. 58-83
17. Peng, Yang, Zhang, Ming, Yu, Fangqiang, Xu, Jinglin, Gao, Shang, *Digital Twin Hospital Buildings: An Exemplary Case Study through Continuous Lifecycle Integration*, *Advances in Civil Engineering*, 2020, 8846667, 13 pages, 2020
18. D. D. Eneyew, M. A. M. Capretz and G. T. Bitsuamlak, "Toward Smart-Building Digital Twins: BIM and IoT Data Integration," in *IEEE Access*, vol. 10, pp. 130487-130506, 2022
19. De-Graft Joe Opoku, Srinath Perera, Robert Osei-Kyei, Maria Rashidi, *Digital twin application in the construction industry: A literature review*, *Journal of Building Engineering*, Volume 40, 2021.
20. Qiuchen. L, Ajith. K. P, Philip. W, Gishan D. R, Xiang. X, Zhenglin. L, Eirini. K, James H, Jennifer. *Developing a Digital Twin at Building and City Levels: Case Study of West Cambridge Campus*, *Journal of Management in Engineering*, Vol. 36, No. 3, 2020
21. James Heaton, Ajith K. Parlikad, *Asset Information Model to support the adoption of a Digital Twin: West Cambridge case study\*\*This research is supported by the Engineering and Physical Sciences Research Council and Costain plc through an Industrial CASE studentship*, *IFAC-PapersOnLine*, Volume 53, Issue 3, 2020, Pages 366-371.
22. S. H. Khajavi, N. H. Motlagh, A. Jaribion, L. C. Werner and J. Holmström, "Digital Twin: Vision, Benefits, Boundaries, and Creation for Buildings," in *IEEE Access*, vol. 7, pp. 147406-147419, 2019
23. Wenjie Jia, Wei Wang, Zhenzu Zhang, *From simple digital twin to complex digital twin Part I: A novel modeling method for multi-scale and multi-scenario digital twin*, *Advanced Engineering Informatics*, Volume 53, 2022.

24. S. Agostinelli, F. Cumo, G. Guidi and C. Tomazzoli, "The Potential of Digital Twin Model Integrated With Artificial Intelligence Systems," 2020 IEEE International Conference on Environment and Electrical Engineering and 2020 IEEE Industrial and Commercial Power Systems Europe (EEEIC / I&CPS Europe), Madrid, Spain, 2020, pp. 1-6
25. Fei Tao, Bin Xiao, Qinglin Qi, Jiangfeng Cheng, Ping Ji, *Digital twin modeling*, Journal of Manufacturing Systems, Volume 64, 2022, Pages 372-389
26. Gary White, Anna Zink, Lara Codecá, Siobhán Clarke, *A digital twin smart city for citizen feedback*, Cities, Volume 110, 2021
27. Ruoming Zhai, Jinguai Zou, Vincent J.L. Gan, Xianquan Han, Yushuo Wang, Yinzi Zhao, *Semantic enrichment of BIM with IndoorGML for quadruped robot navigation and automated 3D scanning*, Automation in Construction, Volume 166, 2024.
28. Lee, Y., Choi, M. H., Song, Y.-S., Lee, J.-G., Park, J. Y., & Li, K.-J. (2024). *Building an Indoor Digital Twin—A Use-Case for a Hospital Digital Twin to Analyze COVID-19 Transmission*. ISPRS International Journal of Geo-Information, 13(12), 460.
29. Umberto A, (2022), *Risk-Informed Digital Twin of Buildings and Infrastructures for Sustainable and Resilient Urban Communities*, ASCE-ASME Journal of Risk and Uncertainty in Engineering Systems, Part A: Civil Engineering Volume 8, Issue 3
30. Grigor Angjeliu, Dario Coronelli, Giuliana Cardani, *Development of the simulation model for Digital Twin applications in historical masonry buildings: The integration between numerical and experimental reality*, Computers & Structures, Volume 238, 2020.
31. Liu, Z., Zhang, A., & Wang, W. (2020). *A Framework for an Indoor Safety Management System Based on Digital Twin*. Sensors, 20(20), 5771.
32. A. El Saddik, "Digital Twins: The Convergence of Multimedia Technologies," in IEEE MultiMedia, vol. 25, no. 2, pp. 87-92, Apr.-Jun. 2018, doi: 10.1109/MMUL.2018.023121167.
33. Tagliabue, L. C., Ceconi, F. R., Maltese, S., Rinaldi, S., Ciribini, A. L. C., & Flammini, A. (2021). *Leveraging Digital Twin for Sustainability Assessment of an Educational Building*. Sustainability, 13(2), 480.
34. Meža, Sebastjan, Mauko Pranjić, Alenka, Vežočanik, Rok, Osmokrović, Igor, Lenart, Stanislav, *Digital Twins and Road Construction Using Secondary Raw Materials*, Journal of Advanced Transportation, 2021, 8833058, 12 pages, 2021.
35. Tahmasebinia, F., Lin, L., Wu, S., Kang, Y., & Sepasgozar, S. (2023). *Exploring the Benefits and Limitations of Digital Twin Technology in Building Energy*. Applied Sciences, 13(15), 8814.
36. Rashidi A, Sarvari H, Chan DW, Olawumi TO, Edwards DJ (2024;), "A systematic taxonomic review of the application of BIM and digital twins technologies in the construction industry". Engineering, Construction and Architectural Management, Vol. ahead-of-print No. ahead-of-print.
37. Eric VanDerHorn, Sankaran Mahadevan, *Digital Twin: Generalization, characterization and implementation*, Decision Support Systems, Volume 145, 2021.
38. Grieves, M. (2022). *Intelligent digital twins and the development and management of complex systems: [version 1; peer review: 4 approved]*. Digital Twin, 1(1).
39. Revolti, A., Gualtieri, L., Pauwels, P., & Dallasega, P. (2024). *From building information modeling to construction digital twin: a conceptual framework*. Production & Manufacturing Research, 12(1).
40. Bandara, D.W.J.W., Ranadewa, K.A.T.O., Parameswaran, A., Eranga, B.A.I. and Nawarathna, A., 2023. *Lean iceberg model to minimise barriers for digital twin implementation: Sri Lankan construction industry perspective*. In: Sandanayake, Y.G., Waidyasekara, K.G.A.S., Ramachandra, T. and Ranadewa, K.A.T.O. (eds). Proceedings of the 11th World Construction Symposium, 21-22 July 2023, Sri Lanka. [Online]. pp. 671-685
41. Nguyen, T. D., & Adhikari, S. (2023). *The Role of BIM in Integrating Digital Twin in Building Construction: A Literature Review*. Sustainability, 15(13), 10462.
42. Radzi AR, Azmi NF, Kamaruzzaman SN, Rahman RA, Papadonikolaki E (2024), "Relationship between digital twin and building information modeling: a systematic review and future directions". Construction Innovation: Information Process Management, Vol. 24 No. 3 pp. 811-829, doi: <https://doi.org/10.1108/CI-07-2022-0183>
43. Baghalzadeh Shishehgarkhaneh, M., Keivani, A., Mochler, R. C., Jelodari, N., & Roshdi Laleh, S. (2022). *Internet of Things (IoT), Building Information Modeling (BIM), and Digital Twin (DT) in Construction Industry: A Review, Bibliometric, and Network Analysis*. Buildings, 12(10), 1503.
44. X. Zhou et al., "Computer Vision Enabled Building Digital Twin Using Building Information Model," in IEEE Transactions on Industrial Informatics, vol. 19, no. 3, pp. 2684-2692, March 2023, doi: 10.1109/TII.2022.3190366.
45. Grieves, M. (2023). *Digital Twin Certified: Employing Virtual Testing of Digital Twins in Manufacturing to Ensure Quality Products*. Machines, 11(8), 808.
46. Hosamo, Haidar Hosamo, Imran, Aksa, Cardenas - Cartagena, Juan, Svennevig, Paul Ragnar, Svidt, Kjeld, Nielsen, Henrik Kofoed, *A Review of the Digital Twin Technology in the AEC-FM Industry*, Advances in Civil Engineering, 2022, 2185170, 17 pages, 2022.

47. Yi Tan, Penglu Chen, Wenchi Shou, Abdul-Manan Sadi ck, *Digital Twin-driven approach to improving energy efficiency of indoor lighting based on computer vision and dynamic BIM*, Energy and Buildings, Volume 270, 2022.
48. Jianyong Shi, Zeyu Pan, Liu Jiang, Xiaohui Zhai, *An ontology-based methodology to establish city information model of digital twin city by merging BIM, GIS and IoT, Advanced Engineering Informatics*, Volume 57, 2023
49. Salem, T., & Dragomir, M. (2022). *Options for and Challenges of Employing Digital Twins in Construction Management*. Applied Sciences, 12(6), 2928.
50. Dani, A. A. H., Supangkat, S. H., Lubis, F. F., Nugraha, I. G. B. B., Kinanda, R., & Rizkia, I. (2023). *Development of a Smart City Platform Based on Digital Twin Technology for Monitoring and Supporting Decision-Making*. Sustainability, 15(18), 14002.
51. Yue Pan, Limao Zhang, *A BIM-data mining integrated digital twin framework for advanced project management, Automation in Construction*, Volume 124, 2021.
52. Ziad ElArwady, Ahmed Kandil, Mohanad Afiffy, Mohamed Marzouk, *Modeling indoor thermal comfort in buildings using digital twin and machine learning*, Developments in the Built Environment, Volume 19, 2024.
53. Zhansheng Liu, Mingming Li, Weiyu Ji, *Development and application of a digital twin model for Net zero energy building operation and maintenance utilizing BIM-IoT integration*, Energy and Buildings, Volume 328, 2025.
54. Liu, Z., Gong, S., Tan, Z., & Demian, P. (2023). *Immersive Technologies - Driven Building Information Modeling (BIM) in the Context of Metaverse*. Buildings, 13(6), 1559.
55. Su, S., Zhong, R. Y., & Jiang, Y. (2025). *Digital twin and its applications in the construction industry: A state-of-art systematic review*. Digital Twin, 2(1).17664.3
56. Wuyan Long, Zhikang Bao, Ke Chen, S. Thomas Ng, Ibrahim Yahaya Wuni, *Developing an integrative framework for digital twin applications in the building construction industry: A systematic literature review*, Advanced Engineering Informatics, Volume 59, 2024, 102346
57. Chung T, Ji H, Bok J, *Study on the Digital Construction Information Structure for the Implementing Digital Twin of Road Construction Sites*, The Journal of The Korea Institute of Intelligent Transport Systems Vol.23 No.1 pp.153-166
58. 이병선, 2024, LiDAR를 활용한 디지털트윈 구축과 건축산업에의 실용화연구 : 건축현장 디지털트윈 적용 실용성 연구, 동신대학교 일반대학원 박사학위 논문
59. 여성수, 2025, 디지털트윈의 기술요인이 재난·안전관리 역량에 미치는 영향 : 사용자 수용의도의 매개효과, 경기대학교 대학원 박사학위 논문
60. 최정, 2023, BIM 기반 디지털 트윈을 활용한 건축물 에너지 해석 서비스 프레임워크, 서울시립대학교 일반대학원 석사학위 논문
61. 조병성, 2023, 디지털 트윈에서 BIM설계 데이터를 이용한 건축물 구축 프로세스, 숭실대학교 정보과학대학원 석사학위 논문
62. 구자범(2022), '건물에너지시스템의 디지털 트윈을 위한 실물센서와 가상센서의 동시적이고 지속적인 현장보정 방법', 대한설비공학회 2022년도 동계학술발표대회 논문집. 17-20.
63. 방준성(2020), '스마트시티 실현을 위한 디지털트윈 기술 동향', 한국통신학회지 제37권 제5호, 11-19.
64. 강효은(2018), '제조 산업 기반 디지털 트윈 요소 기술 및 동향', 한국통신학회지 제35권 제8호, 24-28.
65. 김정수(2022), '탄소 중립을 위한 스마트 빌딩과 디지털 트윈 기술 동향', 전기의 세계 제71권 제11호, 16-25.
66. 박소현(2019), '디지털트윈 구현을 위한 BIM 프레임워크 활용 방안', 한국CDE학회 논문집 제24권 제4호, 361-372 (12page)
67. 장대철(2021), '디지털 트윈기술을 활용한 스마트 건설현장 관리', 한국강구조학회지 제33권 제3호, 33-38
68. 장환영, 박정호, 정다운(2024), '공공 분야 디지털 트윈국토 정책의 성과와 개선 과제', 한국지적정보학회지 제26권 제1호, 15-31.
69. 이승주, 최현준, 문건혁, 김영석(2024), '하이퍼트브 핵심설비 대상 디지털 트윈 플랫폼 설계', 한국산학기술학회논문지 제25권 제6호, 10-18.
70. 이재현, 서효원(2024), '디지털 트윈 가상플랜트 플랫폼 리포지터리 설계와 구현', 한국CDE학회 논문집 제29권 제2호, 153-163.
71. 나유경, 김지영(2024), '디지털 국토정보 상호운용을 위한 메타데이터 설계', 한국지적정보학회지 제26권 제3호, 133-145.
72. 구자범, 윤성민(2024), '건물 분야에서 디지털 트윈 동기화의 개념 정립에 관한 연구', 대한설비공학회 2024년도 동계학술발표대회 논문집, 523-526.