

Case Study

## 디지털 트윈 기반 교량 유지관리 연구 동향 분석

전치호<sup>1\*</sup> · 서동우<sup>2</sup> · 박상기<sup>3</sup> · 박기태<sup>4</sup>

<sup>1</sup>한국건설기술연구원 구조연구본부 박사후연구원, <sup>2</sup>한국건설기술연구원 구조연구본부 연구위원,  
<sup>3</sup>한국건설기술연구원 구조연구본부 수석연구원, <sup>4</sup>한국건설기술연구원 구조연구본부 선임연구위원

## Review of Digital Twin Research Trends for Bridge Maintenance

Chi-Ho Jeon<sup>1\*</sup>, Dong-Woo Seo<sup>2</sup>, Sangki Park<sup>3</sup>, and Ki-Tae Park<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Post-Doctoral Researcher, Department of Structural Engineering, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology  
<sup>2</sup>Research Fellow, Department of Structural Engineering, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology  
<sup>3</sup>Senior Researcher, Department of Structural Engineering, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology  
<sup>4</sup>Senior Research Fellow, Department of Structural Engineering, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology

### 요약

본 연구는 교량 유지관리에 디지털 트윈을 적용하기 위한 연구 동향을 파악하고 향후 발전 방향을 제시하고자 수행되었다. 이를 위해 디지털 트윈과 유지관리를 키워드로 국내외 문헌을 조사하고, 성숙도 모델, 유지관리 전략, 교량 유지관리 사례를 중심으로 문헌을 분류 및 분석하였다. 주요 결과로, 대부분의 연구는 상태기반 및 예측기반 유지관리에 초점이 맞춰져 있으며, 유한요소해석과 같은 물리 기반 모델 및 센서 데이터가 디지털 트윈의 주요 기술적 구성요소로 활용되고 있음을 확인하였다. 그러나 교량 유지관리에 처방적 유지관리 전략과 Level 5 디지털 트윈 구축을 위한 연구는 부족한 실정이다. 본 연구는 디지털 트윈 기술을 기반으로 한 교량 유지관리의 최적화 및 자동화를 위한 로드맵을 제시하며, 다학제적 접근과 서비스 중심의 연구 필요성을 강조한다.

핵심용어: 디지털 트윈, 유지관리, 교량, 성숙도 모델, 유지관리 전략

### ABSTRACT

This study aims to investigate research trends and propose future directions for applying Digital Twin technology to bridge maintenance. A comprehensive review of domestic and international literature was conducted using keywords such as "Digital Twin" and "maintenance", categorizing studies into maturity models, maintenance strategies, and bridge maintenance applications. The analysis revealed that most studies focus on condition-based and predictive maintenance, leveraging key technologies such as finite element models and sensor data. However, research on prescriptive maintenance strategies and the development of Level 5 Digital Twin systems for bridge maintenance remains insufficient. This study highlights the necessity for a multidisciplinary approach and a service-oriented perspective to advance the optimization and automation of bridge maintenance using Digital Twin technology, providing a roadmap for future development.

**Keywords:** Digital twin, Maintenance, Bridge, Maturity model, Maintenance strategy

\*Corresponding author: Chi-Ho Jeon, chihobeer@kict.re.kr ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2191-0367>

Received: 9 November 2024, Revised: 18 November 2024, Accepted: 18 November 2024



## 1. 서론

디지털 트윈(Digital Twin)은 물리적 세계와 디지털 세계를 연결하는 혁신적인 기술로, 물리적 자산, 시스템, 혹은 프로세스의 가상 복제물을 생성하여 실시간으로 데이터를 분석하고 최적화하는 데 활용된다. 이 개념은 2002년 마이클 그리브스(Michael Grieves)에 의해 처음 제안되었으며 제품 수명주기 관리에 관한 새로운 기술로 소개되었다(Grieves, 2014). 이후 이 개념은 미 항공우주국(NASA)에 의해 크게 발전하여 디지털 트윈의 모델링과 시뮬레이션에 대한 로드맵이 소개되었으며(Shafto et al., 2010), 미국 정보 기술 연구 및 자문회사인 가트너가 2017년 10대전략 기술 트렌드 중 하나로 디지털 트윈을 발표(Panetta, 2017)하면서 디지털 트윈에 대한 관심이 전세계적으로 급증하였다.

국내에서도 디지털 트윈에 대한 관심이 급증하고 이를 연구 및 도입하고자 하는 움직임이 활발히 진행되어 왔으나 그 정의 및 특징에 대해서는 뚜렷하게 제시되지 않고 있으며 해외에서도 활용하는 산업 분야 별로 조금씩 다르게 정의되어 왔다. 마이클 그리브스는 디지털 트윈을 물리적 세계의 물리적 실체, 가상 세계의 디지털 모델, 그리고 이 두 세계를 연결하는 데이터를 포함한 세 가지 구성 요소로 이루어진다고 볼 수 있다고 하였다(Grieves, 2014). 이는 사실 매우 간단하고 포괄적인 개념이었으며 항공, 의학, 건축, 제조업 등 다양한 분야에서 더 많은 개념이 포함되며 디지털 트윈의 정의가 구체화되고 고도화되었다. 그 동안의 디지털 트윈에 대한 정의 및 적용 내용을 주요 키워드로 정리해 보자면 “통합 시스템(integrated system)”과 “가상, 디지털, 미러, 복제(virtual, digital, mirror, replica)”가 디지털 트윈 정의에서 가장 자주 언급된 주요 개념이었으며 “연결, 링크, 교환(ties, links, exchange)”, “설명, 구축, 정보(description, construct, information)”, “시뮬레이션, 테스트, 예측(simulation, test, prediction)”가 디지털 트윈의 특징을 보여주는 주요 개념들이었다(Fang et al., 2022). 특히, 디지털 트윈의 특성을 정의하는 가장 중요한 개념은 물리적 객체와 디지털 모델 간의 동적인 양방향 데이터 흐름이며 이는 단순한 디지털 모델 혹은 복제본과의 차별점이다(Cimino et al., 2019; Kritzinger et al., 2018). 이러한 개념들은 대부분의 산업 섹터에서 보편적으로 활용되고 있으며 어느 정도 사회적 의견일치를 이룬 듯 보인다.

건설 분야의 디지털 트윈은 제조 및 자동차 산업에 비해 아직 초기 단계에 있다. 이 분야에서 디지털 트윈에 대한 연구는 2019년 경부터 활발히 연구가 시작되었고, 주로 설계 및 엔지니어링 단계에 집중되었다(Opoku et al., 2021). 적용 초기인 만큼 건설 분야의 디지털 트윈의 가장 큰 어려움은 명확하게 정의되고 잘 구성된 원칙과 시스템 아키텍처가 부족하다는 것이며(Lu et al., 2020), 2021년에만 하더라도 디지털 트윈에 대한 개념은 BIM(Building Information Modeling)과 명확히 구분 지을 수 없었다(Fang et al., 2022). 이러한 초기의 어려움에도 불구하고 디지털 트윈의 가능성을 고려한 많은 연구가 수행되어 왔으나, 앞서 언급한 원칙과 시스템 아키텍처의 부재로 이들의 디지털 트윈 개발 방향은 다소 다른 양상들을 보인다. 인프라 시설에 대한 디지털 트윈은 독자적인 연구개발을 통해서도 이룩할 수 없으며 다양한 이해관계자가 공통의 관점을 가지고 같은 방향으로 연구가 수행되어야 한다. 따라서 현 시점에서는 디지털 트윈의 연구 동향을 살펴보고 이를 바탕으로 향후 발전 방향을 가늠하는 것이 필요하다.

이에 이 연구에서는 국내외 유지관리 및 디지털 트윈 관련 연구들을 분석하여 연구 동향을 파악하고 교량 유지관리 분야의 디지털 트윈 적용을 위해 필요한 연구 방향을 모색해 보고자 다음의 연구 수행 절차를 거쳤다. 구글 스칼라(Google Scholar)에서 “디지털 트윈(Digital twin)”과 “유지관리(Maintenance)”를 키워드로 검색되는 국내외 저널들을 조사하였다. 이후 “리뷰(Review)”, “교량(Bridge)”, “성숙도 모델(Maturity model)”, “예측 유지관리(Predictive maintenance)”, “데이터 모델(Data model)”, “정보 체계(Information system)”, “사물인터넷(Internet of Things, IoT)”, “모델 업데이트(Model updating)” 등 세부 키워드와 함께 분류하여 조사하였다. 조사된 연구들은 디지털 트윈 성숙도 모델, 교량 유지관리 전략, 교량 유지관리를 위한 디지털 트윈의 세 관점에서 그룹화되었으며 각각의 연구 내용 분석을 통해 향후 연구 방향 수립에 관한 논의가 이뤄졌다.

## 2. 기존 연구 조사

디지털 트윈의 이전에 건설 산업에서는 수명 주기 정보를 디지털화하기 위해 빌딩 정보 모델링(BIM)을 고려했으며, 3D 디지털 모델과 정보 교환 표준이 제시되었다(BSI, 2018). BIM의 맥락에서 모델링 구성 개념은 nD BIM으로 확장되어 왔다. 4D BIM은 시간 차원이 고려된 것으로서 자원 조달 및 일정 계획 등 공사의 시간적 관리를 고려하고 있으며 5D BIM은 여기에 예산과 비용 산출 내용을 추가적으로 고려한다. 그리고 최근에는 6D BIM의 개념으로써 운영 및 유지보수 관점이 고려되고 있으며 지속 가능성, 프로젝트 수명 주기, 그리고 이와 관련된 비용 등 건설 과정의 다양한 측면을 고려하여 시설 관리(FM)에 필요한 인적 자원을 최소화하고, 정보 검색 시간을 단축하며, 통합된 지식 기반 BIM 시스템으로서 효율적인 의사 결정을 도울 것으로 기대되었다(Davtalan, 2017; Koutamanis, 2020). 그러나 6D BIM의 활용은 시설 관리 관계자가 프로젝트 초기에 참여하지 않아 그 역할이 과소평가되고 있으며 필요한 수준의 데이터 요구사항이 정의되지 않은 채 건설 프로젝트가 진행되어 정보의 전달에 큰 어려움을 겪는다(Nicał and Wodyński, 2016). 그 결과 설계 및 건설 과정에서 생성된 정보가 유지보수 단계로 넘어가면서 많은 손실이 발생하고 있으며 이는 유지관리에 대한 BIM 적용의 가장 큰 어려움이다. 또한 기존의 시설물에는 BIM 기술 없이 진행된 방대한 유지관리 자료가 존재하고 BIM 기술로는 이를 포용하는데 한계가 존재한다. 따라서 시설물의 유지관리에서 요구되는 대규모 정보와 해석 요구사항을 처리하기에는 BIM만으로는 충분하지 않다(Lu et al., 2021).

BIM 기술은 당초 빌딩 구조물에 많은 초점이 맞춰져 있기 때문에, 교량은 모델링을 위한 정보 교환 체계도 뒤늦게 정의되었고 그마저도 완전하지 않다. 즉, 교량은 BIM 기술의 적용이 상대적으로 어려우며 특히 유지관리 분야에서의 적용을 위해서는 기존 BIM 기술과는 별개의 체계가 갖춰지도록 연구가 수행되어 왔다(Byun et al., 2021; Jeon et al., 2023). 대신에 그간의 교량의 유지관리 분야에서는 구조 안전 모니터링(Structural Health monitoring, SHM) 기술이 활발히 연구되어 왔다(He et al., 2022; Seo et al., 2016; Sun et al., 2020). 이 연구들은 4차 산업혁명과 함께 IoT 기술을 교량에 적용하여 구조물의 변형, 진동, 손상의 발생 등을 실시간으로 탐지하는 것을 목적으로 하였으며 교량의 현재 상태를 실시간으로 평가할 수 있다는 점에서 예방적 유지관리를 위한 방안으로 주요 교량에 많이 적용되어 왔다. 그러나 대부분의 SHM 기술은 현재의 상태를 정확히 판별하는 것에 집중하고 있으며 교량의 미래 상태 예측에 관한 연구는 부족한 상황이다(Sonbul and Rashid, 2023). 따라서 교량 유지관리에 있어서는 높은 수준의 세부 사항과 정확성을 갖춘 데이터 및 정보와 AI와 같은 최신 기술을 통합하는 방안으로써 디지털 트윈이 제시되고 있으며(Boje et al., 2020) 이를 통한 교량 수명 예측 등의 기술이 요구되는 상황이다. 디지털 트윈(DT)의 도입은 기존의 유지보수를 고도화된 방식으로 전환할 수 있을 것으로 여겨졌으며, 예측적 또는 처방적 유지보수를 달성할 것으로 기대되었다(Errandonea et al., 2020).

### 2.1 디지털 트윈 성숙도 모델

성숙도 모델의 목적은 어떠한 기술에 대한 이해관계자들이 프로세스, 실천 방안, 성과를 체계적으로 개발하거나 개선할 수 있도록 구조화된 접근 방식을 제공하고, 지속적인 개발 또는 개선을 위한 로드맵을 수립하는 데 있다(Kim et al., 2020). 이 연구에서 디지털 트윈에 대한 성숙도 모델을 조사하는 이유는 이를 통해 기존에 구현된 디지털 트윈이 어느 수준에 도달해 있는지를 평가할 수 있는 도구가 될 수 있기 때문이며 기존 연구의 부족한 점과 보완해야 할 점을 명확히 확인할 수 있고 동일한 관점에서 기술적 논의가 이뤄질 수 있게 한다. 디지털 트윈에 대한 성숙도 모델을 제시한 연구는 다수 존재하지만 발전 과정을 볼 수 있는 대표적인 모델 들을 다음과 같이 소개한다.

영국은 국가 인프라 시설에 대한 디지털 트윈화를 목표로 CDBB(Centre for Digital Built Britain)를 설립하였으며, CDBB는 디지털 트윈을 구축하는데 필요한 정보 관리 프레임워크와 9가지 핵심 원칙인 제미니 원칙(Gemini Principles)을

제시하였다(Bolton et al., 2018). 이 9가지 원칙은 디지털 트윈이 공공의 이익을 증진하고 신뢰성을 확보하며 효과적으로 기능할 수 있도록 포괄적인 개념이 제시되었다. Gartner는 디지털 트윈의 성숙도 수준을 구체적으로 Level 1(3차원 시각화 및 시뮬레이션), Level 2(실시간 모니터링), Level 3(분석, 예측, 시각화)로 제시하였다(Velosa et al., 2016). Level 1과 2의 차이는 온라인을 통한 데이터 전송 가능 여부이며 Level 3는 입력 데이터들을 기반으로 미래를 예측하는 수준을 의미한다. Evans et al. (2019)은 건설 환경을 위한 DT 성숙도 수준을 0에서 5까지 분류하는 성숙도 스펙트럼을 제안했다. 0레벨은 대상 구조물의 현재 상태에 대한 조사 데이터만 존재하는 상태를 의미하며 각 단계 별로 점차 보유하는 정보 수준이 증가하고 5레벨은 자율형 운영 및 유지관리 수준을 의미한다.

교량은 수명 주기 동안 다양한 이해관계자로부터 매우 복잡한 데이터를 포함하기 때문에, 구체적으로 기능 요구사항이 기술되어야 하며 낮은 수준의 기능성을 포함하여 성숙도 수준이 높아질수록 기능이 더 고도화 되도록 정의되어야 한다. 이러한 측면에서 Kim et al. (2020)은 Table 1과 같은 고도화된 성숙도 모델을 제시하였다. 각 성숙도 수준을 교량 유지관리 관점에서 해석하면 다음과 같다. 1) Level 1은 초기의 BIM과 유사하게 2D 및 3D로 표현된 시각화 및 관련 정보를 의미한다. 2) Level 2는 기존 교량 유지보수 방법과 실시간 모니터링을 위한 센서 데이터 기반의 정보가 통합된 시스템을 의미하고, 의사 결정을 위한 정보 추출이 부분적으로 자동화되었으나 주로 수동으로 수행된다. 3) Level 3은 시뮬레이션을 통해 구조적 거동 데이터를 확보하고, 이를 유지관리를 위한 데이터와 통합 및 처리함으로써 사전 예방적 유지보수를 지원하는 기능을 포함한다. 4) Level 4는 다수의 디지털 트윈들이 연결되어 데이터를 주고 받으며 상호작용하는 단계를 의미하며 더 넓은 범위에서 시뮬레이션 결과를 얻거나 최적화 등을 수행할 수 있다. 5) Level 5는 자율 디지털 트윈을 의미하며 인프라 자산과 연결된 디지털 트윈을 통해 사람의 개입 없이 스스로 자산을 운영하고 문제 상황을 해결하는 수준을 의미한다. 이 성숙도 모델은 이 연구에서 이전에 제시된 디지털 트윈 모델들의 성숙도 수준을 평가하는 지표로 활용되었다.

**Table 1.** Digital twin maturity model (Kim et al., 2020)

Maturity level	Designation	Requirements and Features
Level 1	Look-alike digital twin	<ul style="list-style-type: none"> <li>• A reality visualized through 2D or 3D modeling</li> </ul>
Level 2	Static digital twin	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Installed and fixed during construction, with a virtually permanent communication connection except during reconstruction</li> <li>• Operates without behavior and role models but applies process logic</li> <li>• Real-time monitoring and partial automation control</li> </ul>
Level 3	Dynamic digital twin	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Contains an operational model of the physical object, enabling simulations by altering input variables</li> <li>• Allows for reproduction and root cause analysis of issues that have occurred in the physical object using log data</li> <li>• The physical object and digital twin interact through synchronization via data links, enabling action-reaction interactions. Human intervention and decision-making may be required, particularly when the system's stability and reliability cannot be guaranteed.</li> </ul>
Level 4	Interactive digital twin	<ul style="list-style-type: none"> <li>• A federated operational model connecting heterogeneous domains through digital twins</li> <li>• Coordination, synchronization, and interaction between digital twins, requiring human intervention for operational execution</li> <li>• Enables action-reaction interactions through synchronization with a data interface bus between digital twins, but human intervention through managerial confirmation and decision-making may be required in the final execution stage</li> <li>• The interface bus functions as a data flow channel for the integration of digital twins throughout the entire life-cycle of the physical twin</li> </ul>
Level 5	Autonomous digital twin	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Real-time, integrated, autonomous/automatic synchronization and operation between the physical twin and digital twin, as well as among multiple digital twins (without human intervention)</li> </ul>

## 2.2 유지관리 전략

디지털 트윈은 자산의 디지털 복제 역할을 넘어 다양한 솔루션을 제공하는 서비스로서의 역할이 강조되어야 하며, 적절한 서비스 기능을 정의하는 데 있어 사용자의 고려사항을 반영하는 것이 매우 중요하다(Boje et al., 2020). 이에 따라 이 절에서는 유지관리에 관한 기존 연구들을 살펴보고 디지털 트윈 기반의 유지관리 전략 수립 방안을 모색해 보고자 한다.

유지관리에 관한 연구 역시 제조업 분야에서 많은 연구가 수행되어왔다. 생산 장비들의 가동 중단은 생산성과 직결되기에 더 정확한 현재 운영 상태의 평가가 요구되었으며 시스템 단계에서는 이들 간의 복잡하고 비선형적인 상호작용이 고려되어야 했다. 이에 따라 유지관리 전략에 대해서도 구체적으로 발전되어 왔으며 현재는 반응적(Reactive) 유지관리, 예방적(Preventive) 유지관리, 상태기반(Condition-based) 유지관리, 예측적(Predictive) 유지관리, 처방적(Prescriptive) 유지관리의 5단계의 유지관리 전략이 제시되고 있다(Errandonea et al., 2020; Gordon et al., 2020).

반응적 유지관리는 자산의 사용 빈도와 중요도가 낮고, 손상이 자산 운영에 큰 영향을 미치지 않을 때 고려된다. 최소한의 노력으로 점검을 수행하며, 심각한 서비스 중단이 예상될 때만 평가와 적절한 대응 조치가 이뤄진다. 국내에서는 시설물 안전 및 유지관리 실시 세부지침의 1, 2, 3종으로 지정되지 않은 교량들에 대해 이러한 유지관리 전략이 적용되고 있다. 예방적 유지관리는 일반적으로 현재까지 많이 활용되어 온 유지관리 전략으로 서비스 중단을 방지하여 사회적, 경제적 비용을 줄이는 것을 목표로 한다. 이 전략에서는 유지관리 활동을 사전에 계획하고 정기적인 점검을 기반으로 안전성 및 사용성을 평가하며, 평가 결과에 따라 적절히 대응하는 것을 요구한다(JSCE, 2007). 상태기반 유지관리는 자산의 상태를 일정한 수준으로 유지하기 위해 지속적인 조사를 수행하는 방법이다(Kim et al., 2016). 교량에 대해서 구조안전모니터링 기술이 발전함에 따라 이 유지관리 전략이 활발하게 활용되고 있으며 이상 상태를 즉각 파악하고 신속히 대응할 수 있게 하는데 목적이 있다. 다만 현재까지 대부분의 상태기반 유지관리는 시스템 구축 및 운용 비용이 높아 현수교 및 사장교와 같은 특수교에 주로 적용되어 왔다. 예측적 유지관리는 시설물에 부착된 센서로부터 얻은 다양한 데이터와 각종 관리 데이터를 분석함으로써 대상 시설물의 상태 변화를 표현하는 모델을 도출하고 이를 통해 미래의 변화를 예측하는데 사용된다(Liu et al., 2018). 예측 모델 도출에는 단순한 통계 기법이 사용될 수도 있고, 인공지능을 통한 예측 모델을 만들 수도 있으며 물리기반 모델을 구축해 해석 데이터를 활용하기도 한다. 마지막으로 처방적 유지보수는 다양한 정보 유형을 고려하고 성능 저하를 예측함으로써 효율적인 의사결정을 지원하고 유지보수 프로세스를 최적화하는데 목적이 있다(Ansari et al., 2019; Jeon et al., 2024). 이 전략의 가장 큰 특징은 예견되는 사건들에 대해 대응 계획을 미리 구축하고 상황 발생 시 진단 결과를 즉각 제공한다는 것이다. 처방적 유지관리 전략은 하위 전략의 개념을 모두 포함하고 있는 만큼 가장 높은 수준의 유지관리 체계를 요구한다. 위 다섯 단계의 유지관리 전략의 관계는 Fig. 1과 같이 표현될 수 있다.

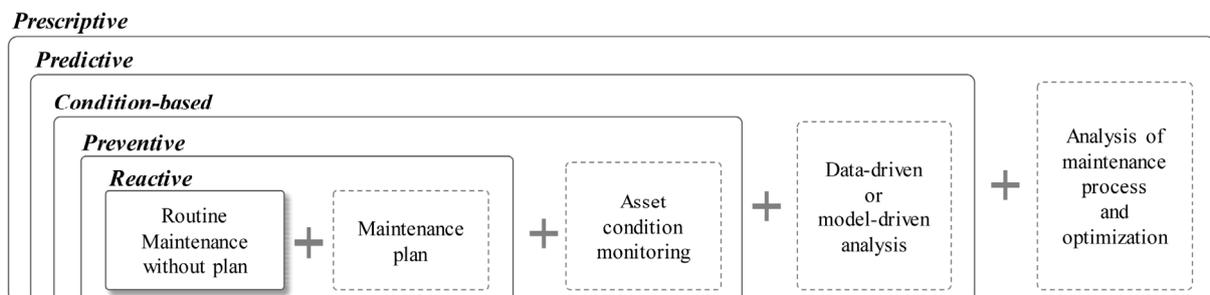


Fig. 1. Relationship between maintenance strategies

Errandonea et al. (2020)의 디지털 트윈 기반 유지관리의 적용 현황 분석을 보면 제조업 및 에너지 산업 분야에서 디지털 트윈을 활발히 활용하고 있으며 처방적 유지관리 개념을 고려한 사례도 다수 존재한다. 그러나 건설 산업 및 인프라 분야에

서는 가장 높은 수준의 유지관리 전략은 예방적 유지관리였으며 2건 정도 확인되었을 뿐이다. 디지털 트윈의 성숙도 모델과 비교하여 볼 때, 처방적 유지관리의 개념을 도입하는 것이 Level 5 디지털 트윈 구축을 달성하기 위해 필수적이라는 것을 알 수 있으며 향후 연구방향 설정에서는 이를 적극적으로 고려할 필요가 있다.

### 2.3 디지털 트윈 기반 교량 유지관리

제조업 부문의 디지털 트윈은 물리 자산에 센서를 설치하고 구조적 거동을 설명하기 위한 물리 기반 모델을 생성하는 것에서 시작되며(Aivaliotis et al., 2019), 센서 신호와 시뮬레이션 결과 간의 응답 비교를 통해 물리 기반 모델을 실제 응답에 맞게 보정할 수 있는 매개변수를 선택 및 업데이트한다(Ritto and Rochinha, 2021; Wang et al., 2019). 이렇게 구축된 물리 기반 모델은 What-if 시뮬레이션을 통해 예측 분석에 활용되며, 불확실성이 크거나 동적 거동이 복잡한 경우에는 머신러닝 알고리즘을 사용해 성능을 예측하는 방법도 고려된다(Booyse et al., 2020; Chakraborty and Adhikari, 2021). 이러한 디지털 트윈 구축 형태는 최근 교량 유지관리를 위한 디지털 트윈에 관한 많은 연구에서도 도입되고 있으며 그 형태가 다양한 관점에서 세분화되어 나타나고 있다. 수집된 문헌 중 단순 문헌분석 연구나 개념 제안에 그친 연구를 제외하면 총 16개의 디지털 트윈 기반 교량 유지관리에 관한 연구가 확인되었으며 Table 2에 그 내용이 정리되었다. 각 연구들은 핵심 방법론을 포함한 연구 내용과 그에 따른 디지털 트윈 분야에 대한 학술적 기여가 요약되어 있으며 앞서 기술된 성숙도 모델과 유지관리 전략에 따라 그 수준이 평가되었다.

**Table 2.** Literature on bridge maintenance with digital twin

Reference	Maintenance strategy	Maturity level	Key methodology	Key contribution
Shim et al. (2019)	Predictive	3	FEM with model updating and automated image processing for enhanced bridge maintenance	Developing a federated digital twin framework for real-time inspection and predictive maintenance of prestressed concrete bridges
Yu et al. (2022)	Predictive	3	FEM with hybrid monitoring techniques for fatigue evaluation of orthotropic steel bridge decks	Developing a multi-scale digital twin framework to assess and predict the fatigue life of cable-stayed bridges under dynamic loading conditions
Febrianto et al. (2021)	Condition-based	3	Utilizing statistical finite element methods with Bayesian learning for real-time monitoring and predictive strain analysis of self-sensing structures	Introducing a statistical digital twin framework for infrastructure monitoring, enabling improved strain prediction and condition assessment by combining sensor data with uncertainty-aware finite element models
Kaewunruen et al. (2021)	Predictive	3	Integrating digital twin and BIM with risk-based inspection models for vulnerability assessment and maintenance planning of bridges under extreme conditions	Developing a BIM-enhanced framework for real-time risk assessment and predictive maintenance, emphasizing sustainability and lifecycle management
Lin et al. (2021)	Predictive	3	Utilizing nonlinearly updated FEM and shake table data to assess seismic collapse fragility of long-span cable-stayed bridges	Proposing a robust digital twin framework for accurate seismic performance and collapse assessment by integrating nonlinear model updating
Kang et al. (2021)	Predictive	3	Combining digital twin technology with multimedia knowledge systems and machine learning to create real-time, adaptive models	Introducing a hybrid simulation and data-driven digital twin framework that synchronizes real-time sensor data with predictive analytics

**Table 2.** Literature on bridge maintenance with digital twin (Continued)

Reference	Maintenance strategy	Maturity level	Key methodology	Key contribution
Dang et al. (2022)	Condition-based	3	Leveraging a cloud-based digital twin framework integrated with deep learning, FEM, and IoT	Developing a hybrid cloud-fog computing system for structural damage detection, enabling accurate damage localization and severity assessment
Dan et al. (2022)	Condition-based	4	Integrating digital twin, WIM, and AI-driven machine vision for real-time traffic load monitoring and structural health assessment	Developing a regional bridge digital twin system leveraging multi-source data fusion to enable safety warnings, lifecycle analysis, and intelligent transportation infrastructure management
Gürdür Broo et al. (2022)	Condition-based	3	Implementing a cloud-based digital twin system with integrated IoT and machine vision with LRF to enable real-time data acquisition, analysis, and visualization for smart infrastructure	Introducing a service-oriented digital twin framework that enhances decision-making by integrating sensor networks, data analytics, and interoperable systems for infrastructure resilience and lifecycle management
Mahmoodian et al. (2022)	Predictive	3	FEM, IoT, and semantic modeling for intelligent maintenance and real-time performance monitoring of civil infrastructure.	Introducing an integrated digital twin system for predictive maintenance, leveraging real-time sensor data and simulation to optimize decision-making and reduce lifecycle costs
Gao et al. (2024)	Condition-based	4	GIS and BIM with graph-based algorithms and a common data environment for real-time monitoring, drone-enabled inspection	Introducing a GIS-BIM integrated digital twin framework that leverages defect modeling and roadmap graphs to optimize bridge operation, maintenance, and traffic management.
Cuong et al. (2022)	Condition-based	3	Developing a mixed reality-based digital twin model integrating BIM, 3D scanning, IoT, and real-time monitoring	Introducing an mixed reality-based digital twin system for decision-making, enabling real-time structural condition assessment and prediction
Franciosi et al. (2024)	Condition-based	3	BIM, FEM, and laser scanning for interoperable and real-time bridge maintenance, including what-if scenario simulations.	Introducing a sustainable digital twin system to enhance lifecycle management, optimize maintenance decisions, and address software obsolescence for existing bridges.
Lai et al. (2024)	Condition-based	3	Integrating digital twin, FEM and surrogate models to enable NDT for real-time structural health monitoring of suspension bridges	Proposing a digital twin-based NDT framework that utilizes virtual sensors and surrogate modeling to reduce maintenance costs
Heng et al. (2024)	Condition-based	3	Developing a digital twin framework integrating SHM data, FEM, Bayesian dynamic linear models, and deep reinforcement learning to optimize maintenance strategies for aging steel bridges	Introducing a condition-based maintenance framework that combines real-time monitoring, predictive modeling, and AI-assisted decision-making to enhance sustainability and lifecycle management of steel bridges
Hielscher et al. (2023)	Condition-based	3	Developing a digital twin framework utilizing ANN and FBG sensors to monitor strain and temperature, enabling real-time visualization and structural health assessment of post-tensioned bridges	Introducing an ANN-enhanced digital twin prototype that integrates FBG sensor data for accurate strain prediction and structural response analysis, improving maintenance planning and long-term serviceability of bridges

FEM, finite element method; GIS, geographic information system; WIM, weigh-in-motion; LRF, laser range finder; NDT, non-destructive testing; FBG, fiber Bragg grating; AI, artificial intelligence; ANN, artificial neural network

### 3. 분석 및 논의

Table 2의 주요 연구를 요약하자면 다음과 같다. Shim et al. (2019)은 교량 유지관리 분야에 디지털 트윈을 가장 처음 도입한 연구 중에 하나로서 드론이나 이미지 처리 기반 손상 검출 등의 기술을 활용해 기존 유지관리를 어떻게 개선하고 자동화할 수 있을지에 대한 방안을 제시하였다. FEM에 대한 활용 방안은 단순 제안에 그치고 있으나 스캔 이미지와 교량의 정합 등 시각화 기능에 대한 구체적인 방안을 제시하였다. 그 이후의 디지털 트윈 기반 교량 유지관리에 관한 대부분의 연구는 교량의 현재 상태를 실시간으로 파악하기 위해 다양한 센싱 기술이 적용되었다. 이는 물리 자산과 디지털 자산의 링크를 위해 필수 불가결한 요소이며 IoT 및 클라우드를 기반으로 한 데이터 연계(Dang et al., 2022)가 제시되었다. 기존에 많이 사용되던 가속도 센서, 변형률계, 변위계 외에도 FBG 센서, LRF, 기울기 센서 등 다양한 고기능 센서들이 활용(Gürdür Broo et al., 2022)되기도 하였으며 컴퓨터 비전을 이용하여 WIM 시스템이 구축되기도 하였다(Dan et al., 2022). 이렇게 취득된 다양한 교량 거동에 관한 데이터는 교량의 상태를 평가하기 위한 데이터 처리 알고리즘에 직접 활용되기도 하고 시물레이션을 위한 수학적 모델의 완결성을 높이는 데 활용되기도 했다. 시물레이션을 위해서 대부분의 연구가 FEM을 사용하였다. 이는 교량 구조의 크기와 불확실성 때문에 설치된 센서만으로는 파악할 수 없는 국부적인 거동을 평가할 수 있게 하였으며 교량의 다양한 상황에 대해 예측할 수 있게 하였다. 그리고 많은 연구가 시물레이션 모델이 가진 불확실성을 고려하여 확률적으로 실제 교량의 거동을 예측할 수 있도록 AI 알고리즘 혹은 확률론적 방법론을 고려하였다(Febrianto et al., 2021; Yu et al., 2022; Heng et al., 2024; Hielscher et al., 2023). Kang et al. (2021)의 연구는 위에서 언급한 다양한 기술들로부터 얻은 지식이 디지털 트윈에 적용될 수 있는 방안을 제시하고 있는데, 모델 업데이트를 통해 디지털 모델을 물리 자산과 일치시킨 후 다양한 입력 변수에 관한 결과를 학습하는 대안 모델을 만들고 이를 통해 미래 상태를 예측하는 방안을 제시하고 있다. 이 대안 모델을 고려하는 방법은 FEM 기술을 사용하는데 들이는 비용을 줄여 결과적으로 유지관리 비용을 줄일 수 있을 것으로 기대되고 있다(Lai et al., 2024).

교량의 유지관리 관점에서 기존 연구를 평가해 보자면 10개의 연구에서 상태 기반 유지관리가, 6개의 연구에서 예측 기반 유지관리가 고려되었다. 이들은 기존에 제시된 구조 안전 모니터링 기술이 고도화된 형태로 볼 수 있으며 드론과 이미지 스퀴닝 기술 등 4차 산업기술의 적극적인 적용을 통해 유지관리의 효율화를 고려하고 있다. 따라서 FEM도 현재 상태 평가에 적극적으로 활용되고 있으며 계산 효율을 위해 대안 모델을 도출하는 개념 등도 제시되고 있으나 미래 상태 예측에는 그 활용 방안이 제안 수준에 그치고 있다. 반면 예측 기반 유지관리를 고려한 연구들에서는 FEM을 What-if 시물레이션을 위해 사용하고 있으며 미래 상태에서 발생할 수 있는 손상을 반영하는 형태로 주로 나타난다. 다만 이들의 연구가 실제 유지관리 시스템에 적용되는 것은 거의 찾아보기 어렵다. 실제로 이 시물레이션 데이터를 어떻게 관리하고 향후 평가에 활용하는지에 대한 자세한 방법론은 거의 찾기 어렵고 시물레이션에 적용하는 방안 제시 수준에 그친다. 또한 모든 연구가 유지관리 최적화를 언급하고 있으나 이 또한 구체적인 방안이 아니라 각 연구 결과의 활용에 따른 기대효과 측면에서 언급이 되고 있다. 이 결과를 비춰볼 때, 디지털 트윈을 기반으로 한 교량의 처방적 유지관리에 관한 연구가 하나도 발견될 수 없었던 것은 당연한 것으로 보인다. 처방적 유지관리에 관한 적용 사례는 대표적으로 제조업 분야에서 찾아볼 수 있는데, Padovano et al. (2021)의 생산 계획 및 제어 시스템에 디지털 트윈과 처방적 유지관리 개념을 결합한 시스템을 예로 들 수 있다. 이 시스템은 생산 및 유지관리 일정을 시물레이션하고 과도하게 사용되는 기계를 식별하여 작업 레이아웃의 변경안을 제시하거나 자원의 병목 현상을 파악하여 최적 배치안을 제안하는 등의 기능을 제공함으로써 고객 주문 지연을 많이 감소시키는 것을 확인하였다. 이와 마찬가지로 교량 유지관리 분야에서도 구체적인 문제 상황에 대한 해결책을 시스템이 자체적으로 제안할 수 있는 방향으로 유지관리 디지털 트윈이 구축되어야 할 것으로 보인다.

교량의 성숙도 수준 측면에서 대부분의 연구가 Level 3로 나타났으며 2건의 논문이 Level 4로 평가되었다. 이는 교량 구조물에 특성에 어느 정도 기인한다고 볼 수 있는데, 구조물 유지관리의 특성상 단일 자산의 가치가 높고 자산 간 연결성은 상대

적으로 많이 떨어지기 때문이다. 따라서 Level 3의 시뮬레이션 기능에 대부분의 연구가 집중하고 있으며 Level 4를 고려한 연구들은 지역의 교통 흐름 수준에서 디지털 트윈의 활용을 고려하고 있다. 시뮬레이션의 기능에만 초점을 맞추고 Level 1이나 2의 기능은 제시되지 않은 연구들이 있는데, 이는 Table 1에서 제시된 성숙도 수준의 불완전한 형태로 볼 수 있다. 즉, 이 연구들의 결과는 디지털 트윈 기능에만 초점을 맞추고 있으며 디지털 트윈의 서비스적 측면에서는 대안을 제시하지 못하고 볼 수 있다. 마지막으로 교량에 대한 디지털 트윈 성숙도 수준이 level 5인 문헌은 찾을 수 없었다. Level 5 달성이 어려운 이유는 유지관리 자동화 기술은 로봇의 도입이 불가피하며 불확실성 및 다양성이 높은 교량의 경우 이를 도입하기 어려운 실정이다.

우리나라에서는 서해대교 유지관리 시스템(Jang et al., 2023)에 가장 고도화된 디지털 트윈 기술이 적용된 것으로 볼 수 있으며 실시간 모니터링, 해석 모델 연동 및 업데이트, 문제 상황에 대한 모의 시뮬레이션 등을 갖는 Level 3 디지털 트윈 기술이 적용되고 있으나 더 높은 성숙도 수준은 아직 고려되지 않고 있다. 이는 해외에서도 마찬가지이며 앞서 언급한대로 모든 데이터를 공유하는 것이 아니라 특정 정보만 교환하는 정도의 Level 4 성숙도 수준이 고려된다. 그 예로 Gao et al. (2024)은 GIS와 BIM을 통합한 디지털 트윈 시스템을 구축하였고 교량에 극심한 손상이 발생할 때 차량 흐름을 차단할 수 있는 관제 시스템을 탑재하였으며 교통 통제에 따른 혼잡을 피하고자 GIS 모듈을 활용하여 차량의 흐름에 대한 정보를 공유하고 대체 경로를 통해 교통을 우회시키는 기능을 구축하였다. 건설업 분야 중에서는 상대적으로 구조 형태가 단순한 포장의 유지관리에 관한 연구에서만 Level 5를 고려한 연구가 수행되었다(Xu et al., 2024). 이 연구에서는 기존의 도로포장에 대한 비파괴 검사 장비를 조사하여 디지털 트윈 기반의 자율적 유지관리가 어떻게 수립될 수 있는지에 대한 안을 제시하였으며 최적화와 같은 고도화 내용은 여전히 추후 연구 주제로 남아있다.

지금까지의 연구 내용을 분석해 보면 교량 유지관리에 관한 디지털 트윈 연구는 구조 안전 모니터링 기술과 시뮬레이션 기능에 많은 발전을 이루었으나 예측 기능과 고도화된 유지관리 전략에 대한 고려는 상대적으로 부족한 상황이다. 특히 교량 관리의 전문가가 부족한 반면 교량의 노후화는 가파르게 증가하고 있는 국내외 상황을 볼 때, 유지관리의 최적화 및 자동화에 대한 기술 수요는 크게 증가할 것으로 보이며 이에 대한 기술의 발달이 개념적 제안에서 머무르고 있는 것은 큰 아쉬움으로 남는다. 향후 연구들은 이를 고려하여 로봇 산업 등과의 다학제간 연구를 수행하고 유지관리 관점에서 디지털 트윈 기술이 어떤 서비스를 제공할 것인지를 고려한 연구가 필요할 것으로 판단된다.

## 4. 결론

본 연구는 교량 유지관리에 디지털 트윈 기술을 적용하기 위한 현재의 연구 동향과 주요 기술적 과제를 분석하였다. 연구 결과, 교량 유지관리의 디지털 트윈 기술은 센서 데이터와 FEM 기반의 물리 모델을 활용하여 상태기반 유지관리와 예측기반 유지관리의 발전을 이루었으나, 처방적 유지관리와 Level 5 디지털 트윈 구현을 위한 연구는 미비하였다. 특히, 대부분의 연구는 디지털 트윈의 시뮬레이션 및 데이터 통합 기능에 집중되어 있으며, 자동화와 서비스 제공 측면에서의 접근은 부족한 상황이다.

교량 유지관리는 노후화된 인프라와 전문가 부족이라는 글로벌 과제에 직면해 있으며, 유지관리의 효율성과 자동화를 위한 디지털 트윈 기술의 역할이 더욱 중요해질 것으로 전망된다. 이를 위해 로봇 기술 및 AI와의 융합 연구, 유지관리 자동화를 위한 새로운 성숙도 모델, 그리고 사용자 중심의 서비스 설계가 필요하다. 본 연구는 디지털 트윈 기반 교량 유지관리 연구의 방향성을 제시함으로써 학문적 및 실무적 기여를 기대한다.

## Acknowledgments

The research presented in this study was supported by the KAIA Research program on the Development of Marine Bridges Operation using Green Energy, funded by the Ministry of Land, Infrastructure and Transport [Grant number: RS-2024-00401101].

## References

- Aivaliotis, P., K. Georgoulas, Z. Arkouli, and S. Makris. (2019). Methodology for Enabling Digital Twin Using Advanced Physics-Based Modelling in Predictive Maintenance. *Procedia CIRP*. 81: 417-422.
- Ansari, F., R. Glawar, and T. Nemeth. (2019). PriMa: A Prescriptive Maintenance Model for Cyber-Physical Production Systems. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*. 32(4-5): 482-503.
- Boje, C., A. Guerriero, S. Kubicki, and Y. Rezgui. (2020). Towards a Semantic Construction Digital Twin: Directions for Future Research. *Automation in Construction*. 114: 103179.
- Bolton, A., L. Butler, I. Dabson, M. Enzer, M. Evans, T. Fenemore, and J. Whyte. (2018). *The Gemini Principles (CDBB\_REP\_006)*. Cambridge, UK.
- Booyse, W., D. N. Wilke, and S. Heyns. (2020). Deep Digital Twins for Detection, Diagnostics and Prognostics. *Mechanical Systems and Signal Processing*. 140: 106612.
- BSI (British Standards Institution). (2018). BS EN ISO 19650-1; Organization and Digitization of Information about Buildings and Civil Engineering Works, including Building Information Modelling (BIM) — Information Management Using Building Information Modelling. Part 1, Concepts and Principles. Retrieved from <https://www.iso.org/obp/ui/#iso:std:iso:19650:-1:ed-1:v1:en>
- Byun, N., W. S. Han, Y. W. Kwon, and Y. J. Kang. (2021). Development of BIM-Based Bridge Maintenance System Considering Maintenance Data Schema and Information System. *Sustainability*. 13(9): 4858.
- Chakraborty, S. and S. Adhikari. (2021). Machine Learning Based Digital Twin for Dynamical Systems with Multiple Time-Scales. *Computers and Structures*. 243: 106410.
- Cimino, C., E. Negri, and L. Fumagalli. (2019). Review of Digital Twin Applications in Manufacturing. *Computers in Industry*. 113: 103130.
- Cuong, N. D., M. Kang, D. Jang, and C. Shim. (2022). Developing Mixed Reality-Based Digital Twin Model for Bridge Maintenance System. *Proceedings of the 22nd International Conference on Construction Applications of Virtual Reality*.
- Dan, D., Y. Ying, and L. Ge. (2022). Digital Twin System of Bridges Group Based on Machine Vision Fusion Monitoring of Bridge Traffic Load. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*. 23(11): 22190-22205.
- Dang, H. V., M. Tatipamula, and H. X. Nguyen. (2022). Cloud-Based Digital Twinning for Structural Health Monitoring Using Deep Learning. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*. 18(6): 3820-3830.
- Davtalab, O. (2017). Benefits of Real-Time Data Driven BIM for FM Departments in Operations Control and Maintenance. In *Congress on Computing in Civil Engineering, Proceedings*. American Society of Civil Engineers (ASCE). 202-210.
- Errandonea, I., S. Beltrán, and S. Arrizabalaga. (2020). Digital Twin for Maintenance: A Literature Review. *Computers in Industry*. 123(11): 103316.
- Evans, S., C. Savian, A. Burns, and C. Cooper. (2019). Digital Twins for the Built Environment. Retrieved from <https://www.theiet.org/impact-society/factfiles/built-environment-factfiles/digital-twins-for-the-built-environment/>
- Fang, Z., Q. Lu, X. Xie, A. K. Parlikad, J. Schooling, and M. Pitt. (2022). Definitions and Principles of Digital Twins. In *Digital Twins in the Built Environment*. ICE Publishing. 5-27.
- Febrianto, E., L. Butler, M. Girolami, and F. Cirak. (2021). Digital Twinning of Self-Sensing Structures Using the Statistical Finite Element Method. *ArXiv*. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2103.13729>

- Franciosi, M., M. Kasser, and M. Viviani. (2024). Digital Twins in Bridge Engineering for Streamlined Maintenance and Enhanced Sustainability. *Automation in Construction*. 168(Part A): 105834.
- Gao, Y., G. Xiong, Z. Hu, and C. Chai. (2024). Bridge Digital Twin for Practical Bridge Operation and Maintenance by Integrating GIS and BIM. *Buildings*. 14(12): 3731.
- Gordon, C. A. K., B. Burnak, M. Onel, and E. N. Pistikopoulos. (2020). Data-Driven Prescriptive Maintenance: Failure Prediction Using Ensemble Support Vector Classification for Optimal Process and Maintenance Scheduling. *Industrial and Engineering Chemistry Research*. 59(44): 19607-19622.
- Grieves, M. (2014). Digital Twin: Manufacturing Excellence through Virtual Factory Replication. White Paper (March). 1-7. Retrieved from [https://www.researchgate.net/publication/275211047\\_Digital\\_Twin\\_Manufacturing\\_Excellence\\_through\\_Virtual\\_Factory\\_Replication](https://www.researchgate.net/publication/275211047_Digital_Twin_Manufacturing_Excellence_through_Virtual_Factory_Replication)
- Gürdür Broo, D., M. Bravo-Haro, and J. Schooling. (2022). Design and Implementation of a Smart Infrastructure Digital Twin. *Automation in Construction*. 136: 104171.
- He, Z., W. Li, H. Salehi, H. Zhang, H. Zhou, and P. Jiao. (2022). Integrated Structural Health Monitoring in Bridge Engineering. *Automation in Construction*. 136: 104168.
- Heng, J., L. Lai, Y. Dong, S. Kaewunruen, and C. Baniotopoulos. (2024). Digital Twin for Intelligent Maintenance Towards Sustainable Bridges. *Bridge Maintenance, Safety, Management, Digitalization and Sustainability - Proceedings of the 12th International Conference on Bridge Maintenance, Safety and Management (IABMAS 2024)*. 693-700.
- Hielscher, T., S. Khalil, N. Virgona, and S. A. Hadigheh. (2023). A Neural Network Based Digital Twin Model for the Structural Health Monitoring of Reinforced Concrete Bridges. *Structures*. 57: 105248.
- Jang, J. H., H. H. An, S. H. Lee, and J. H. Jung. (2023). Organize Real-Time Monitoring Data and Link to Digital Twins for Cable Bridge. *Proceedings of the KSCE 2023 Convention*. 93-94.
- Jeon, C. H., C. S. Shim, Y. H. Lee, and J. Schooling. (2024). Prescriptive Maintenance of Prestressed Concrete Bridges considering Digital Twin and Key Performance Indicator. *Engineering Structures*. 302: 117383.
- Jeon, C.-H., Nguyen, D.-C., Roh, G., and Shim, C.-S. (2023). Development of BrIM-Based Bridge Maintenance System for Existing Bridges. *Buildings*. 13(9): 2332.
- JSCE (Japan Society of Civil Engineers). (2007). Standard Specifications for Concrete Structures - 2007; Maintenance. Retrieved from [https://www.jsce-int.org/system/files/JGC15\\_Standard\\_Specifications\\_Design\\_1.0.pdf](https://www.jsce-int.org/system/files/JGC15_Standard_Specifications_Design_1.0.pdf)
- Kaewunruen, S., J. Sresakoolchai, W. Ma, and O. Phil-Ebosie. (2021). Digital Twin Aided Vulnerability Assessment and Risk-Based Maintenance Planning of Bridge Infrastructures Exposed to Extreme Conditions. *Sustainability*. 13(4): 1-19.
- Kang, J. S., K. Chung, and E. J. Hong. (2021). Multimedia Knowledge-Based Bridge Health Monitoring Using Digital Twin. *Multimedia Tools and Applications*. 80: 34609-34624.
- Kim, J., Y. Ahn, and H. Yeo. (2016). A Comparative Study of Time-Based Maintenance and Condition-Based Maintenance for Optimal Choice of Maintenance Policy. *Structure and Infrastructure Engineering*. 12(12): 1525-1536.
- Kim, Y.-W., S. Yoo, H. Lee, and S. H. Kim. (2020). Characterization of Digital Twin. Retrieved from [https://www.researchgate.net/publication/353930234\\_Characterization\\_of\\_Digital\\_Twin](https://www.researchgate.net/publication/353930234_Characterization_of_Digital_Twin)
- Koutamanis, A. (2020). Dimensionality in BIM: Why BIM Cannot Have More Than Four Dimensions? *Automation in Construction*. 114: 103153.
- Kritzinger, W., M. Karner, G. Traar, J. Henjes, and W. Sihn. (2018). Digital Twin in Manufacturing: A Categorical Literature Review and Classification. *IFAC-PapersOnLine*. 51(11): 1016-1022.
- Lai, X., Z. Kan, W. Sun, X. Song, B. Tian, and T. Yuan. (2024). Digital Twin-Based Non-Destructive Testing for Structural Health Monitoring of Bridges. *Nondestructive Testing and Evaluation*. 39(1): 57-74.
- Lin, K., Y. L. Xu, X. Lu, Z. Guan, and J. Li. (2021). Digital Twin-Based Collapse Fragility Assessment of a Long-Span Cable-Stayed Bridge under Strong Earthquakes. *Automation in Construction*. 123: 103547.
- Liu, Z., N. Meyendorf, and N. Mrad. (2018). The Role of Data Fusion in Predictive Maintenance Using Digital Twin. In *AIP Conference Proceedings*. American Institute of Physics Inc. 1949(1): 020023.

- Lu, Q., A. K. Parlikad, P. Woodall, G. Don Ranasinghe, X. Xie, Z. Liang, and J. Schooling. (2020). Developing a Digital Twin at Building and City Levels: Case Study of West Cambridge Campus. *Journal of Management in Engineering*. 36(3).
- Lu, Q., X. Xie, A. K. Parlikad, J. M. Schooling, and E. Konstantinou. (2021). Moving from Building Information Models to Digital Twins for Operation and Maintenance. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Smart Infrastructure and Construction*. 174(2): 46-56.
- Mahmoodian, M., F. Shahrivar, S. Setunge, and S. Mazaheri. (2022). Development of Digital Twin for Intelligent Maintenance of Civil Infrastructure. *Sustainability*. 14(14): 8664.
- Nicał, A. K. and W. Wodyński. (2016). Enhancing Facility Management through BIM 6D. *Procedia Engineering*. 164: 299-306.
- Opoku, D. G. J., S. Perera, R. Osei-Kyei, and M. Rashidi. (2021). Digital Twin Application in the Construction Industry: A Literature Review. *Journal of Building Engineering*. 40: 102726.
- Padovano, A., F. Longo, L. Nicoletti, L. Gazzaneo, A. Chiurco, and S. Talarico. (2021). A Prescriptive Maintenance System for Intelligent Production Planning and Control in a Smart Cyber-Physical Production Line. *Procedia CIRP*. 104: 1819-1824.
- Panetta, K. (2017). Gartner's Top 10 Technology Trends 2017. Retrieved from <https://www.gartner.com/smarterwithgartner/gartners-top-10-technology-trends-2017>
- Ritto, T. G. and F. A. Rochinha. (2021). Digital Twin, Physics-Based Model, and Machine Learning Applied to Damage Detection in Structures. *Mechanical Systems and Signal Processing*. 155: 107614.
- Seo, J., J. W. Hu, and J. Lee. (2016). Summary Review of Structural Health Monitoring Applications for Highway Bridges. *Journal of Performance of Constructed Facilities*. 30(4): 1-9.
- Shafto, M., M. Conroy, R. Doyle, E. Glaessgen, C. Kemp, J. LeMoigne, and L. Wang. (2010). Modeling, Simulation, Information Technology & Processing Roadmap. Technology Area 11. Washington, DC, USA: National Aeronautics and Space Administration.
- Shim, C. S., N. S. Dang, S. Lon, and C. H. Jeon. (2019). Development of a Bridge Maintenance System for Prestressed Concrete Bridges Using 3D Digital Twin Model. *Structure and Infrastructure Engineering*. 15(10): 1319-1332.
- Sonbul, O. S. and M. Rashid. (2023). Algorithms and Techniques for the Structural Health Monitoring of Bridges: Systematic Literature Review. *Sensors*. 23(9): 1-29.
- Sun, L., Z. Shang, Y. Xia, S. Bhowmick, and S. Nagarajaiah. (2020). Review of Bridge Structural Health Monitoring Aided by Big Data and Artificial Intelligence: From Condition Assessment to Damage Detection. *Journal of Structural Engineering*. 146(5).
- Velosa, A., Y. Natis, and B. Lheureux. (2016). Use the IoT Platform Reference Model to Plan Your IoT Business Solutions. Retrieved from <https://www.gartner.com/en/documents/3447218>
- Wang, J., L. Ye, R. X. Gao, C. Li, and L. Zhang. (2019). Digital Twin for Rotating Machinery Fault Diagnosis in Smart Manufacturing. *International Journal of Production Research*. 57(12): 3920-3934.
- Xu, J., N. R. Anvo, H. Taha-Abdalgadir, A. M. D'Avigneau, D. Palin, R. Wei, and I. Brilakis. (2024). Highway Digital Twin-Enabled Autonomous Maintenance Plant: A Perspective. *Data-Centric Engineering*. 5: 1-16.
- Yu, S., D. Li, and J. Ou. (2022). Digital Twin-Based Structure Health Hybrid Monitoring and Fatigue Evaluation of Orthotropic Steel Deck in Cable-Stayed Bridge. *Structural Control and Health Monitoring*. 29(8).

#### **Korean References Translated from the English**

- 장정환, 안호현, 이세호, 정종하 (2023). 실시간 모니터링 데이터 구축 및 디지털 트윈 연계에 관한 연구. 2023 대한토목학회 정기학술대회 논문집. 93-94.