

BIM 기반 교량 유지관리 기술

글 이종한 / 인하대학교 사회인프라공학과 교수
 전화 032-860-7564 E-mail jh.lee@inha.ac.kr
 글 정현진 / 인하대학교 스마트시티공학과 박사과정
 전화 032-860-7560 E-mail con_hj311@naver.com
 글 마수빈 / 인하대학교 스마트시티공학과 석사과정
 전화 032-860-7560 E-mail soup_ih@naver.com



01 시작하며

최근 건설산업은 4차 산업혁명의 첨단기술과 융합되면서 디지털 전환이 가속화되고 있다. 교량, 터널, 도로를 비롯한 인프라 시설물의 유지관리 분야에서도 스마트 건설기술의 도입이 활발하게 이루어지고 있다. 이에 따라, 건설정보모델링(Building Information Modeling, BIM)은 시설물의 생애주기 전반에 걸쳐 데이터를 통합·관리할 수 있는 핵심기술로 주목받고 있다.

BIM은 단순한 3D 모델링을 넘어 설계, 시공, 유지관리 데이터를 통합하는 디지털 플랫폼으로 발전하고 있으며, 디지털트윈(Digital Twin), 인공지능(AI), 사물인터넷(IoT) 등과의 연계를 통해 유지관리 체계를 혁신적으로 변화시키고 있다. 국토교통부는 2020년 「2020년 건설산업 BIM 기본지침」을 통해 BIM의 전면 도입과 활용을 적극 추진하고 있으며, 이를 기반으로 시설물의 생애주기 동안 발생하는 모든 정보를 디지털화하여 체계적인 유지관리를 가능하게 하고자 한다.^①

이러한 변화 속에서 교량의 유지관리는 보다 정밀하고 효율적인 접근이 요구되는 분야 중 하나다. 기존의 2차원 도면 기반 유지관리 방식은 정보의 단절과 비효율성으로 인해 시설물의 상태를 종합적으로 분석하는 데 한계가 있으며, 도면 유실 및 유지관리 데이터의 분산으로 인해 의사결정 과정에서도 비효율성이 발생할 가능성이 크다. 반면, BIM 기반 유지관리 시스템은 구조물의 상태를 실시간으로 모니터링하고, 성능평가 및 보수·보강 계획을 데이터 기반으로 수립하는 것을 가능하게 한다.

특히, 디지털트윈과 AI 기반 예측 유지보수(Predictive Maintenance) 기술이 발전하면서, 유지보수의 의사결정이 사후 대응에서 선제적 대응으로 전환되고 있다. 또한, Scan-to-BIM 기술을 적용하여 기존 도면이 유실된 교량을 정밀하게 3D 모델로 복원하고, LiDAR 및 UAV 기반의 데이터 취득 기술과 연계하여 보다 정밀한 상태 분석이 가능해지고 있다. 이를 통해 유지관리자는 정확한 데이터를 바탕으로 최적의 보수 전략을 수립하고, FEM(유한요소해석, Finite Element Method)과의 연계를 통해 구조물의 안전성을 정량적으로 평가할 수 있는 체계를 마련할 수 있다.

이에 따라 본 기사에서는 BIM 기반 교량 유지관리 기술의 발전과 적용 가능성을 분석하고, BIM과 최신 디지털 기술을 활용한 교량 유지관리 핵심 요소와 기대효과에 대해 저자가 수행중인 연구 중심으로 기술하고자 한다. BIM의 개념과 역할, 교량 유지관리에서의 적용 사례, FEM 기반의 성능평가 및 유지관리 활용 방안, 나아가 BIM 기반 스마트 유지관리 전략까지 종합적으로 다룰 예정이다. 이를 통해 교량 유지관리의 방향성을 제시하고, BIM 기반 유지관리 시스템이 제공할 수 있는 효율성과 가치를 분석하고자 한다.

① 국토교통부, 2020년 12월, 건설산업 BIM 기본지침

02 BIM 기반 교량 유지관리 현황

사회기반시설(SOC)의 노후화가 가속화되면서 유지관리 패러다임이 사후 보수 중심에서 데이터 기반의 선제적 유지관리 체계로 전환되고 있다. 이에 따라 BIM과 BMS(Bridge Management System)의 결합이 유지관리의 새로운 대안으로 떠오르고 있다. BIM은 3D 모델을 기반으로 형상 정보뿐만 아니라 재료 특성, 시공 이력, 유지보수 기록 등 다양한 데이터를 통합 관리하며, IoT 센서 및 구조해석 기법과 연계해 정밀한 유지관리 의사결정을 지원한다.

이에 본 절에서는 국내외 BIM 기반 교량 유지관리 사례를 분석하고, BIM을 활용한 유지관리 기술의 도입 현황과 주요 연구 동향을 살펴본다.

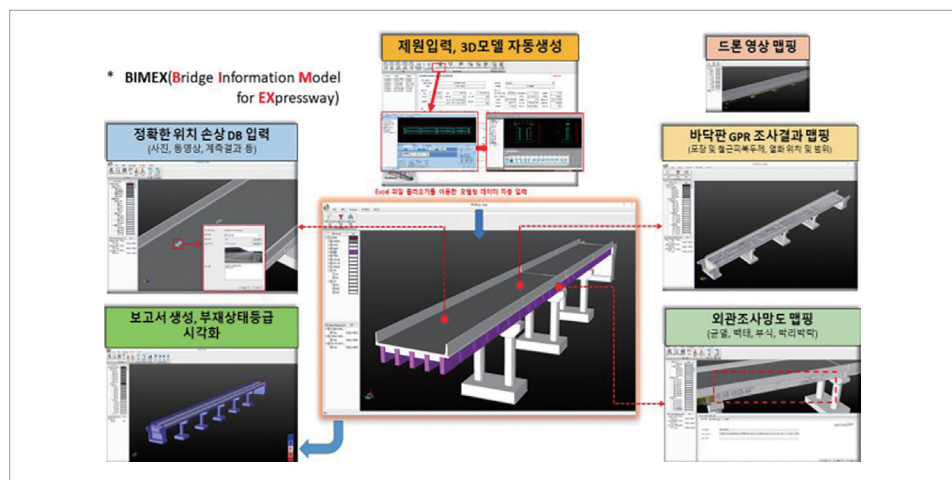
2.1 국내 BIM 기반 유지관리 사례

국내에서는 2010년대부터 사회기반시설 분야에서 BIM 도입이 설계 및 시공 단계에서 활발히 이루어졌으며, 최근에는 유지관리로 확대되고 있다. 국토교통부와 한국도로공사는 BIM 기반 유지관리 시스템 구축을 추진하고 있으며, 데이터 기반 예측 유지관리 기술 개발이 주요 연구 분야로 떠오르고 있다.

국토교통부는 기존 교량관리시스템(BMS)의 고도화를 위해 BIM을 활용한 유지관리 방식을 연구하고 있으며, 시범사업을 통해 유지관리 데이터를 디지털화하고 생애주기 기반 유지보수 전략을 마련하고 있다.^② 한국도로공사는 BIMEX 시스템을 활용하여 3D 모델과 유지관리 이력을 통합 관리하고 있으며, 정밀 안전점검이 필요한 교량을 대상으로 BIM 기반 유지관리 시범사업을 수행 중이다.^③

BIM 기반 유지관리 기술의 실무 적용 연구도 활발하다. 저자의 인하대학교 연구팀은 Scan-to-BIM 기술을 활용해 스캐닝을 통해 교량의 공간정보를 취득하고 3D 모델을 생성하는 연구를 수행하였다. 이를 통해 도면이 유실된 교량을 복원하고, BIM과 연계하여 구조적 속성과 유지관리 이력을 통합하는 방안을 제시하였다. 또한, LiDAR 및 UAV 기반 데이터를 활용한 손상 자동 식별 및 맵핑 기술을 구현하였으며, 미래 상태와 성능평가 예측 연계를 통한 스마트 유지관리 체계 기술을 개발하고 있다.

[그림 1] 한국도로공사 BIMEX 개요도



② 시사매거진 2016년 3월 7일, 『도·국토부, 지자체 최초 첨단기술 접목한 과학적 교량관리 추진』

③ 대한경제 2023년 7월 13일, 『도공, 노후교량 BIM으로 잡는다... 국내 발주기관 최초 유지관리 분야 확장 도입』

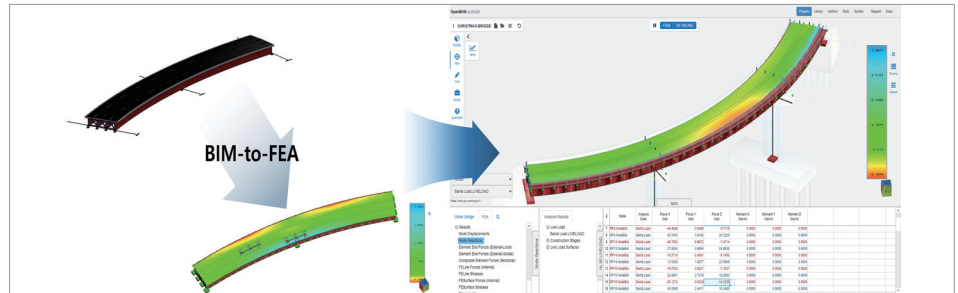
2.2 국외 BIM 기반 유지관리 사례

국외에서도 미국과 중국을 중심으로 BIM을 활용한 교량 유지관리 기술이 활발히 연구·도입되고 있으며, 디지털 기술과의 융합을 통해 기존 정기 점검 방식의 한계를 극복하는 방향으로 발전하고 있다. BIM 기반 유지관리는 유지보수 이력 관리, 구조 분석, IoT 센서 데이터 연계 등을 통해 정량적인 상태 평가와 예측 유지보수를 가능하게 한다.

미국 연방도로청(FHWA)은 BIM 기반 유지관리 시스템인 OpenBrIM을 개발하여 유지보수 데이터 통합 체계를 구축하고 있다.^④ OpenBrIM은 유한요소해석을 내장하여 교량 부재의 열화 진행과 하중 조건을 반영한 구조해석을 수행할 수 있으며, 이를 통해 손상 예측 및 유지보수 전략 최적화가 가능하다.

중국에서는 BIM과 국제 표준 데이터 프레임워크(IFD)를 활용하여 유지보수 데이터를 표준화하고, IoT 센서 및 실시간 모니터링 기술과 결합한 유지관리 자동화 연구가 진행 중이다.^⑤ 특히, 머신러닝 기법을 활용하여 손상 진행 속도를 예측하고 최적의 유지보수 시점을 도출하는 연구가 활발히 진행되고 있다.

[그림 2] OpenBrIM의 FEA 기능



2.3 교량 BIM 기반 유지관리 사례연구의 시사점

국내외 사례 분석을 통해 BIM 기반 유지관리는 기존 방식보다 데이터의 연속성과 정량성을 확보하여 유지관리의 효율성과 신뢰성을 높일 수 있음을 확인하였다. 특히, 구조해석과의 연계, 실시간 모니터링, 생애주기비용 분석, 디지털트윈을 활용한 예측 유지보수 등에서 보다 정교한 접근이 가능하다.

BIM은 설계부터 유지보수까지 데이터를 통합 관리하여 정보 단절을 방지하고, 기존의 2D 도면 기반 관리 방식이 가진 한계를 극복할 수 있다. IFC 등의 개방형 데이터 표준을 활용하면 BIM과 BMS 간의 연계를 강화하여 유지보수 이력을 효과적으로 관리할 수 있다. 또한, FEM 해석과 연계하여 하중 조건, 재료 열화 특성 등을 반영한 정량적 평가가 가능하며,^⑥ OpenBrIM과 같은 플랫폼을 통해 손상 발생 시 구조적 영향을 분석하고 최적의 보수·보강 전략을 도출할 수 있다.

BIM과 IoT 센서를 결합한 실시간 모니터링은 유지보수의 사전 예방적 접근을 가능하게 한다. 기존의 정

④ Bartholomew, M., Blasen, B., & Koc, A. (2015). Bridge information modeling (BrIM) using open parametric objects (No. FHWA-HIF-16-010). United States. Federal Highway Administration. Office of Infrastructure.

⑤ Li, S., Zhang, Z., Lin, D., Zhang, T., & Han, L. (2023). Development of a BIM-based bridge maintenance system (BMS) for managing defect data. Scientific reports, 13(1), 846.

⑥ Ninic, J., Alsahly, A., Vonthron, A., Bui, H. G., Koch, C., König, M., & Meschke, G. (2021).

From digital models to numerical analysis for mechanised tunnelling: A fully automated design-through-analysis workflow. Tunnelling and Underground Space Technology, 107, 103622.

기 점검 방식은 실시간 변화 반영이 어려웠으나, IoT 센서를 이용하면 변형률, 온도 등 데이터를 수집하고 BIM과 연계하여 손상 진행 속도를 예측할 수 있다. 또한, AI 기반 알고리즘을 활용하여 특정 부재의 이상 변형을 자동 탐지하여 유지보수 계획을 최적화할 수 있다.

BIM 기반 유지관리는 생애주기비용 분석을 통해 유지보수 비용 절감과 최적의 전략 수립을 지원하며, 디지털트윈과 결합하면 실시간 상태 반영 및 시뮬레이션을 통한 유지관리 자동화가 가능해진다. 향후 BIM 기술이 IoT, AI, 디지털트윈과 결합하면서 유지보수 방식이 사후 대응에서 선제적 유지관리로 전환될 것으로 기대된다. 이를 위해 BIM 기반 유지관리 기술의 표준화, 데이터 연계성 강화, 유지보수 프로세스의 디지털화가 필수적으로 요구된다.

BIM 기반 유지관리 시스템의 핵심 요소 중 하나는 정확한 3D 모델 구축이며, 이를 통해 교량의 상태를 실시간으로 반영하고, 손상 데이터와 해석 모델을 연계할 수 있다. BIM 모델은 단순한 3D 형상 표현을 넘어 재료 특성, 환경 영향, 유지관리 이력, 열화 모델 등의 속성 데이터를 포함하여 시설물의 전 생애주기 데이터를 통합적으로 관리하는 역할을 한다.

3.1 교량 구조물의 BIM 모델링 기술

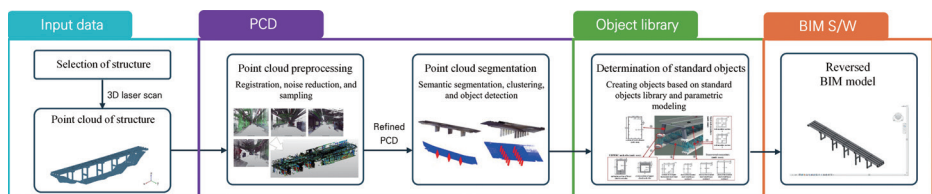
BIM 기반 교량 유지관리는 기존 2D 도면 기반 설계 및 유지관리 방식의 한계를 극복하고 보다 효율적인 데이터 관리 및 협업이 가능하도록 지원한다. BIM 모델 구축은 다음과 같은 단계를 거친다.

1) 기초 데이터 확보

기존 설계 도면, 시공 기록, 유지관리 데이터 등의 기초 자료를 확보하는 과정이 선행되어야 한다. 하지만 노후 교량이나 설계 도면이 유실된 경우, Scan-to-BIM 기술 등을 활용하여 3D 모델을 구축하는 것이 필수적이다.

Scan-to-BIM은 LiDAR, TLS, 드론 기반 사진 측량 등의 3D 스캐닝 및 영상 기술을 활용하여 교량 형상을 점군(Point Cloud) 데이터로 획득한 후, 좌표 정합 및 정제 과정을 거쳐 정확한 디지털 모델을 생성하는 방식이다. ① 이를 통해 실측 데이터를 기반으로 높은 정확도를 확보할 수 있으며, 기존 도면이 없는 경우에도 신속하게 BIM 모델을 구축할 수 있다.

[그림 3] Scan-to-BIM 프로세스^②



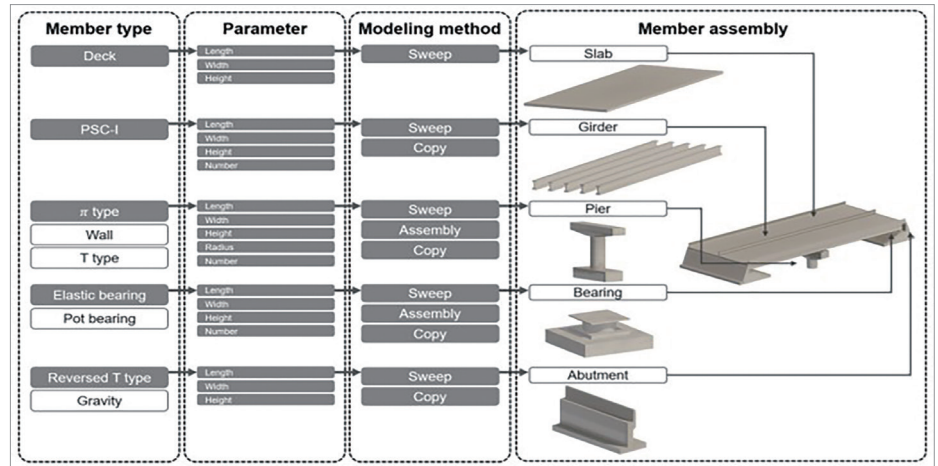
2) 3D 형상 모델링

기초 데이터를 기반으로 파라메트릭 모델링(Parametric Modeling) 기법을 활용하여 3D 형상을 생성한다. 파라메트릭 모델링은 부재의 치수, 형상, 연결 관계를 변수로 정의하여 구조 변경이 발생할 경우 신속하게 수정할 수 있는 장점이 있다.

특히, Scan-to-BIM을 활용하면 AI 기반 부재 인식(Object Recognition) 기술을 적용하여 거더, 교각,

슬래브 등의 주요 부재를 자동으로 추출할 수 있으며, 의미적 분할(Semantic Segmentation) 기법을 적용하여 구조적 요소를 자동으로 분류하는 연구도 진행되고 있다.

[그림 4] 파라메트릭 모델링 기반 BIM 생성^⑦



3) 속성 정보 추가 및 데이터 연계

BIM 모델은 단순한 3D 형상 정보뿐만 아니라 유지관리 및 성능평가를 위한 속성 정보와의 연계가 필수적이다. 각 부재별로 재료 특성, 설계 정보, 유지관리 이력, 손상 기록 등의 데이터를 부여함으로써 유지보수 이력 관리가 가능해진다.

이력 관리를 위해 COBie(Construction Operation Building Information Exchange)를 활용하면 BIM 모델과 유지관리 시스템 간 데이터 연계성이 강화된다. COBie는 시설물의 유지보수 일정, 성능 이력, 교체 주기 등의 정보를 표준화하여 BIM 환경 내에서 유지보수 이력을 체계적으로 관리할 수 있도록 한다. 또한, COBie는 IFC 데이터 구조와 호환되므로 BIM 모델과 유지관리 시스템 간의 원활한 데이터 교환이 가능하다.

[표 1] COBie 기반 주요 속성정보 데이터 입력 체계^⑧

시트명	데이터 형식
Facility	교량명, 교량 ID, 작성자, 작성일자, 교량 유형, 프로젝트 명, 부지 명, 길이 측정 단위, 교량 연장, 교폭, 교고, 경간 수, 외부 연결 시스템, 프로젝트 ID
Space	공간 명, 작성자, 작성일자, 공간 유형, 외부 연결 시스템
Type	부재 명, 작성자, 작성일자, 부재 분류, 부재 상세정보, 외부 연결 시스템, 객체종류, 객체 ID, 부재 길이, 부재 폭, 부재 높이, 단면 형상, 부재 재료
Component	부재 객체명, 작성자, 작성일자, 부재종류 명, 공간 명, 외부 연결 시스템, 객체 종류, 객체 ID, 부재 길이, 부재 폭, 부재 높이 부재 재료
Attribute	속성정보 명(손상정보, 물성치, 부재별 자원 정보 등), 작성자, 작성일자, 속성유형(손상, 재료, 손상 종류별 상태등급, 부재별 상태등급, 정보 등), 연계시트 명, 연계시트 행 명, 값(손상 크기, 강도 크기 등), 단위, 외부 연결 시스템 속성 종류, 추가 값(손상인 경우 좌표 입력)

⑦ 마수빈, 이민진, 양다현, 정현진, & 이종한(2024), 유지관리용 PCD 및 파라메트릭 기반 웅벽 BIM 모델 생성 기술 개발, 한국구조물진단유지관리공학회 논문집, 28(6), 88-94

⑧ 안효준, 정현진, 이민진, 양다현, & 이종한(2022), 토목시설물의 Scan-to-BIM 기술 적용을 위한 연구동향 분석, 전산구조공학회 학회지

⑨ Lee, M. J., Yang, D. H., & Lee, J. H. (2024), Development of Parametric Bridge BIM and PCD Generation Algorithms and PCD-based Member Segmentation, Advance in Engineering Software, 194, 103673.

⑩ 양다현(2025), 교량 유지관리를 위한 손상맵핑 BIM 생성 및 상태평가 시스템 개발

3.2 BIM 기반 손상 데이터 통합 및 반영 기법

BIM 기반 유지관리에서는 교량 구조물의 손상 정보를 효과적으로 수집하고 이를 BIM 모델에 반영하는 과정이 필수적이다. 기존 유지관리 방식은 손상 정보를 문서, 도면, 개별 보고서 형태로 관리해 데이터의 연계성이 부족하고 장기적 추적이 어렵다는 한계를 가진다. 이러한 한계를 극복하기 위해 BIM을 활용한 3D 모델과 속성 데이터를 통합하여 손상 이력을 체계적으로 관리하고, 환경적 요인을 반영한 유지보수 전략을 수립할 수 있다.

BIM 기반 손상 데이터 통합 및 반영 과정은 손상 데이터 수집, 정제 및 분석, BIM 모델 반영, 유지관리 연계의 단계로 진행된다.

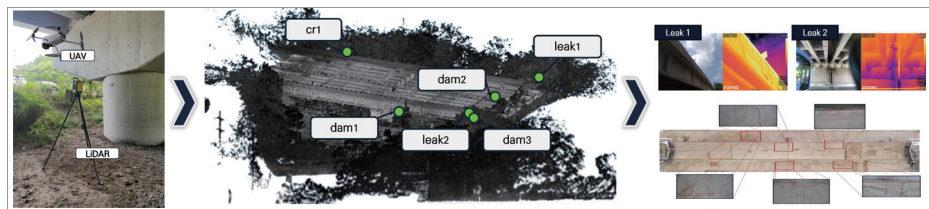
1) 손상 데이터 수집 및 취득 방법

손상 데이터의 신뢰성을 확보하고 교량 상태를 정량적으로 평가하기 위해, 일반적으로 육안 점검 방식이 활용된다. 점검자는 균열, 박리, 철근노출, 부식 등의 손상을 기록하며, 이를 기반으로 외관조사망도 및 안전진단 보고서가 작성된다.

하지만 시각 점검은 주관적 판단에 의존하며, 점검자의 숙련도에 따라 데이터 편차가 발생할 가능성이 있다. 또한, 접근성이 제한된 구간에서는 정확한 조사가 어려운 한계가 있다. 이를 보완하기 위해 드론 및 AI 기반 이미지 분석 기술이 도입되고 있으며, 이를 활용하면 접근하기 어려운 곳에 위치한 부재 및 대형 교량의 손상 정보를 자동 분석하고 보다 객관적인 데이터를 연계할 수 있다.

또한, LiDAR 및 3D 스캐닝(Scan-to-BIM 연계) 기술을 활용하면 정밀한 손상 데이터를 획득할 수 있다. 이를 통해 점군 데이터로 손상 부위를 정확히 분석하고, 기존 BIM 모델과의 정합 과정을 거쳐 오차를 최소화할 수 있다.

[그림 5] LiDAR 및 UAV 기반 손상 데이터 취득 예시



2) 손상 데이터의 정제 및 분석

수집된 손상 데이터를 BIM 모델에 반영하기 전, 데이터 정합/정제 및 분석 과정이 필요하다. 다양한 데이터 취득 방법 간의 정합성을 확보하기 위해 좌표계를 통합하고 오차를 최소화하는 과정이 수행된다.

손상 데이터 정합 과정에서는 LiDAR 점군 데이터, 드론 기반 3D 영상 데이터, 비파괴 검사 결과, 시각 점검 결과 등을 동일한 BIM 모델과 기준 좌표계로 변환하는 작업이 필요하다. 예를 들어, LiDAR 점군 데이터는 기존 BIM 모델과 비교하여 좌표 정합을 수행하고, 드론 촬영 영상은 기하학적 변환을 거쳐 BIM 모델과 일치하도록 정렬된다. 외관조사망도는 2D 도면 기반으로 작성되므로, 이를 3D BIM 환경에 적절히 매핑하여 활용할 수 있도록 한다.

손상 유형 및 속성 정의 과정에서는 균열, 박리, 부식 등의 손상 유형을 자동 또는 수동으로 분류하고, 크기, 심각도, 발생 원인 등의 속성을 정의한다. 이를 통해 유지관리자가 손상 데이터를 직관적으로 이해하고, 유지보수의 우선순위를 결정할 수 있다. 또한, 머신러닝 및 데이터 마이닝 기법을 활용하여 손상 유형을 자동 분류하고 데이터베이스화하여 축적하는 방식도 적용될 수 있다.

3) BIM 모델에서의 손상 데이터 통합

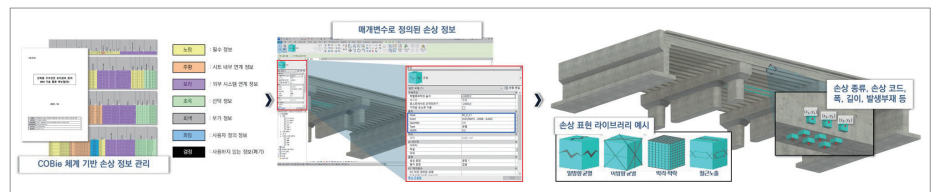
손상 데이터가 정합/정제 및 분석된 후에는 이를 BIM 모델에 반영하여 유지관리의 정확성을 높이고 실질적인 활용이 가능하도록 해야 한다. 손상 데이터를 BIM 모델에 반영하는 방식은 속성 데이터 반영, 시각적 모델링 반영, COBie 연계로 구분할 수 있다.

속성 데이터 반영 방식은 BIM 모델 내 개별 부재의 속성 데이터를 수정하여 손상의 유형, 심각도, 발생 일자 등의 정보를 포함하도록 한다. 이를 통해 특정 부재의 손상 이력을 체계적으로 관리할 수 있다.

시각적 모델링 반영 방식은 손상 부위를 파라메트릭 모델링과 연계하여 색상 변화, 투명도 조정 등의 기법을 활용해 3D 모델에서 시각적으로 표현함으로써 유지보수 필요성을 직관적으로 파악할 수 있도록 한다.

또한, COBie 데이터를 BIM과 연계하면 유지보수 일정, 점검 이력, 보수·보강 내역을 체계적으로 저장하고, 유지관리 효율성을 극대화할 수 있다.

[그림 6] COBie 체계 기반 손상 정보 BIM 맵핑 예시



04 BIM 연계 FEM 기반 교량 상태 및 성능평가 기술

BIM과 구조해석의 연계는 교량의 상태를 정밀하게 평가하고 유지관리 전략을 최적화하는 데 중요한 역할을 한다. 기존 점검 방식은 구조적 성능을 정량적으로 분석하는 데 한계가 있었으며, BIM과 해석 모델 간 데이터 연계가 부족했다.

최근 BIM에서 직접 해석 데이터를 추출하여 FEM과 연계하는 방식이 도입되면서 열화 메커니즘 분석과 성능 예측이 가능해졌으며, 이를 통해 손상 확산 및 보수·보강 시뮬레이션을 수행하여 효율적인 유지관리 전략을 수립할 수 있다.

4.1 구조해석과 BIM 연계 방식

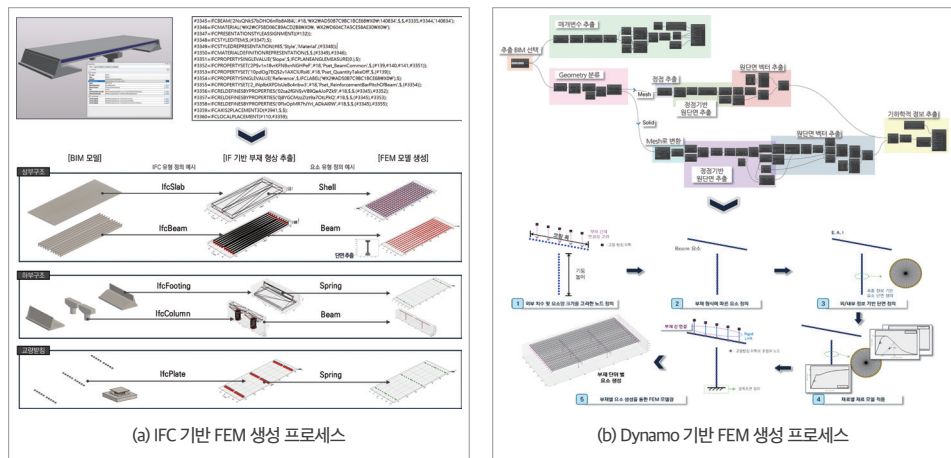
BIM과 구조해석 연계 방식은 크게 IFC 기반 데이터 변환 방식과 API(Application Programming Interface) 기반 자동화 방식으로 구분된다.

IFC 기반 방식은 BIM 모델의 구조 데이터를 IFC 파일로 변환하여 FEM 소프트웨어에서 활용하는 방식이다. ANSYS, ABAQUS, SAP2000 등 다양한 해석 소프트웨어와 연계할 수 있지만, 일부 속성 정보가 변환 과정에서 손실될 수 있어 추가적인 보정이 필요하다.

API 및 스크립트 기반 방식은 Dynamo, Python, Grasshopper 등을 활용하여 BIM 모델에서 직접 FEM 해석에 필요한 데이터를 자동으로 추출하는 방식이다. 이 방식은 데이터 변환 과정에서의 정보 손실을 최소화하고, 보다 신속한 해석 수행이 가능하다.

최근에는 BIM과 구조해석의 연계를 디지털트윈과 결합하여 실시간 상태평가가 가능하도록 발전하고 있다. 실시간 계측 데이터를 활용해 BIM 모델을 업데이트하고, FEM 해석을 통해 구조적 성능을 지속적으로 평가함으로써 예측 유지보수 기법과 연계된 최적의 유지관리 계획을 수립할 수 있다.

[그림 7] BIM 연계 FEM 모델 생성 자동화 예시



4.2 BIM-FEM 연계 교량 상태·성능평가 및 유지관리 활용

BIM과 FEM 기반 상태·성능평가는 단순한 구조해석을 넘어 장기적인 열화과정과 환경적 영향을 반영하여 보다 정밀한 유지관리 체계를 구축하는 것을 목표로 한다.

1) 환경적 요인을 반영한 BIM-FEM 기반 열화 분석

교량의 열화는 해안거리 비래염분, 제설제 염해, 동결융해 등 다양한 환경적 요인에 영향을 받는다.^① BIM 모델에 이러한 데이터를 속성 정보로 반영하면 체계적인 유지관리가 가능하다.

해안지역 교량은 염해 진행 속도가 빠르므로, BIM 속성 데이터에 해안과의 거리, 풍속, 염분 농도 등을 입력하여 염해 위험도를 평가할 수 있다. 또한 GIS 연계를 통해 염해 취약 교량을 자동 분류하고, 장기적인 유지보수 계획을 수립할 수 있다. 제설제 사용 지역은 철근 부식이 빠르게 진행될 가능성이 높기 때문에, 이를 고려하여 BIM 모델에 제설제 사용 이력 및 강설량 데이터를 반영하고 부재별 속성 정보와 결합함으로써 유지보수 우선순위를 설정할 수 있다. 동결융해 영향을 받는 지역은 반복되는 온도 변화

① 국토교통부(2023), 시설물의 안전 및 유지관리 실시 세부지침(성능평가 편)-교량 편

로 인해 콘크리트 균열이 발생할 가능성이 크다. 이에 따라 BIM과 기후 데이터베이스를 연계하여 동결 융해 위험도를 평가하고, 보강이 필요한 교량을 선별할 수 있다.

이러한 BIM 기반 열화 정보는 FEM 해석과 연계하여 손상의 확산이나 구조적 성능 저하를 정량적으로 평가하는 데 활용될 수 있다. 예를 들어, 특정 부재가 염해, 동결융해, 반복 하중 등의 영향을 받을 경우, FEM 해석을 통해 장기적인 성능 변화를 예측하고 최적의 유지보수 시점을 도출할 수 있다.

2) BIM-FEM 해석 연계를 활용한 상태 및 성능평가

BIM 모델에서 구축된 열화 데이터와 환경 정보를 기반으로 FEM 해석을 수행하면, 교량의 현재 상태를 정량적으로 평가하고 미래 성능을 예측할 수 있다.

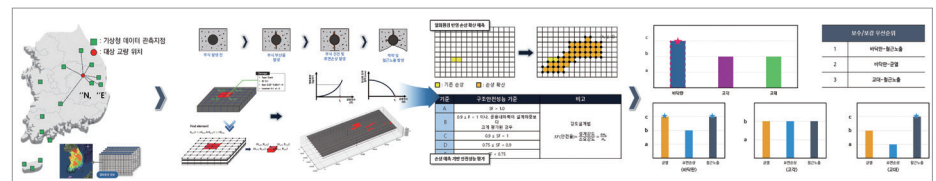
FEM 해석을 활용하면 차량 하중 및 환경적 요인이 손상 확산에 미치는 영향을 예측할 수 있으며, 이를 통해 손상의 진행 속도를 평가하고 최적의 보수 시점을 결정할 수 있다.^⑫ 또한, 손상된 부재의 좌굴 위험성과 반복적인 교통 하중으로 인한 피로 손상 누적 여부를 분석하여 취약 부재를 도출하고 보수 전략을 수립할 수 있다. 더불어, BIM 속성 데이터에 저장된 제설제 염해, 동결융해, 온도 변화 등의 환경 데이터를 FEM 해석과 연계하면 보다 현실적인 상태 평가가 가능하여 유지보수의 정확성과 효율성을 높일 수 있다.

BIM-FEM 연계를 활용하면 단순한 현재 상태 평가를 넘어 손상의 진행 과정을 예측하고, 유지보수 시나리오를 시뮬레이션 할 수 있다.^⑬ 예를 들어, 초기 균열이 발생한 이후 하중 및 환경적 요인의 영향을 받아 균열이 확장되는 과정을 FEM 모델을 통해 분석하면, 철근 부식과 강성 저하가 교량 전체의 하중 저항력에 미치는 영향을 정량적으로 평가할 수 있다.

또한, 가속도나 변형률 센서 등의 실측 데이터를 BIM-FEM 모델과 연계하면, 손상이 진행될 경우 어느 시점에서 구조적 안정성이 급격히 저하될지를 사전에 예측할 수 있다. 이를 통해 유지보수 시점을 최적화하고, 보강이 필요한 부재를 조기에 선정하여 유지보수 비용을 절감할 수 있다.

나아가, AI 기반 유지보수 의사결정 시스템 도입도 BIM-FEM 모델의 중요한 요소이다. AI는 손상 유형을 자동으로 분류하고, 유지보수 우선순위를 설정하며, 과거 데이터와 해석 데이터를 기반으로 학습하여 열화 진행 속도를 분석하고 유지보수 시점을 예측할 수 있다. 이를 통해 BIM-FEM 해석 결과를 보다 정밀하게 해석하고 유지보수 전략을 최적화할 수 있다. AI 기술을 활용하면 예산과 인력을 효율적으로 배분하고, 유지보수 계획을 데이터 기반으로 수립하여 장기적인 유지관리 비용을 절감할 수 있다.

[그림 8] BIM-FEM 연계 열화환경 반영 상태 및 성능평가 예시



⑫ 한국건설기술연구원(2023), DNA 기반 노후 교량 구조물 스마트 유지관리 플랫폼 및 활용기술 개발 보고서

⑬ 양다현, 이민진, 안효준, 정현진, & 이종한(2023), 교량 바닥판의 균열 BIM 생성 및 BIM-FEM 상호 연계 알고리즘 개발 및 상태등급 예측, 대한토목학회논문집, 43(6), 689-693

05 BIM 기반 스마트 유지관리 전략

BIM 기반 스마트 유지관리는 기존의 경험적 유지관리 방식에서 벗어나, 데이터 중심의 정량적 유지관리 체계를 구축하는 방향으로 발전하고 있다. 기존 유지관리는 주기적인 점검과 육안 검사에 의존하여 시설물의 상태 변화를 즉각 반영하기 어려웠지만, BIM 기반 유지관리는 3D 모델과 속성 정보, 실시간 모니터링 데이터, 해석 결과를 통합하여 보다 정밀한 유지보수 전략을 수립할 수 있도록 한다.

BIM 유지관리의 핵심은 다양한 데이터를 연계한 디지털 플랫폼에서 통합 운영하는 것이다. 이를 위해 IFC 기반 BIM 모델 표준화 및 기존 BMS와의 호환성이 확보되어야 하며, IoT 센서를 기반으로 데이터를 실시간으로 수집하면 유지관리 자동화를 향상시킬 수 있다. 또한, BIM-FEM 연계를 활용함으로써 구조적 응력 분석과 부재 안전성 평가를 수행하고, 유지보수 시나리오를 시뮬레이션 하여 최적의 보수·보강 방법을 도출할 수 있다.

AI 기반 유지보수 의사결정 시스템 도입 또한 중요하다. AI는 손상 유형을 자동으로 분류하고, 유지보수 우선순위를 설정하며, 과거 데이터를 학습해 열화 진행 속도를 분석하고 유지보수 시점을 예측할 수 있다. 이를 통해 예산과 인력을 효율적으로 배분하고 최적의 유지보수 계획을 수립하는 것이 가능해진다.

향후 BIM 기반 유지관리는 디지털트윈과 결합하여 더욱 정밀한 유지관리 시스템으로 발전할 전망이다. 디지털트윈은 BIM, IoT 센서, 구조해석 데이터를 실시간으로 연계하여 시설물의 상태를 예측하고 유지보수 효과를 시뮬레이션하는 기술이다. 디지털트윈의 적용을 통해 균열 진행속도를 AI가 예측하고, FEM 해석을 통해 보강 시점을 결정하며, BIM 모델에서 보수 작업을 시뮬레이션 하는 방식으로 유지관리 프로세스가 자동화될 수 있다.

결론적으로, BIM 기반 스마트 유지관리는 AI 및 IoT 기술을 활용하여 유지관리의 정밀도와 효율성을 극대화하는 방향으로 발전하고 있다. 기존 유지관리 방식이 경험적 판단과 주기적 점검에 의존했다면, BIM 기반 유지관리는 실시간 데이터와 해석 결과를 기반으로 최적의 유지보수 전략을 자동으로 수립하는 시스템으로 자리 잡고 있다. 향후 기술 발전을 통해 유지보수의 자동화 수준이 높아지고, 보다 경제적이고 신뢰성 높은 유지관리 체계가 구축될 것으로 기대된다.

