

BIM 기반 설계안전성검토의 업무 절차와 활용 방안에 관한 연구*

Workflow Procedures and Applications in BIM-based Design for Safety (DfS)

황재웅**, 윤희택***, 배준현****, 박영곤*****

Jaewoong Hwang**, Heetaek Yoon***, Junhyun Bae****, Youngkon Park*****

Abstract

A conventional Design for Safety (DfS), introduced to eliminate potential hazards in the design phase proactively, has encountered persistent challenges, such as perfunctory risk assessments and hazard identifications based on 2D drawings and inefficient workflow processes. This study proposes a BIM-based approach to Design for Safety (DfS) to address the limitations of conventional methods, aiming to enhance efficiency and achieve practical safety management benefits. The proposed workflow process for BIM-based DfS has been refined and validated for on-site applicability through various case studies, including risk assessments during the design phase and field applications for safety management activities during the construction phase. Specifically, the critical process of risk assessment within the DfS methodology has also been transitioned to a BIM-based approach. This BIM-based risk assessment process has been evaluated through case studies, encompassing safety reviews for structural design, construction equipment operation, and construction methodology with sequence in design projects. Additionally, the proposed BIM-based DfS has demonstrated exceptional on-site applicability and efficiency, as validated by the application of a BIM deliverable embedded in DfS information for CDE-based daily activity briefing, VR-based safety training, AR-based mitigation measures inspections, and other safety management activities in the construction phase.

Keywords: BIM (Building Information Modeling), Design for Safety (DfS), Risk Assessment, VR/AR (Virtual Reality/Augmented Reality), Safety Training

1. 서론

1.1 연구의 배경 및 목적

건설산업 현장의 재해 감소를 목적으로 정부가 2017년에 도입한 설계안전성검토(DfS, Design for Safety)는 설계단계에서 위험요소를 발굴하여 위험

성 평가와 저감대책 수립을 시행하고 설계에 반영함으로써 사전에 위험요소를 제거·저감하는 활동을 말한다. 「건설기술 진흥법 시행령」에 근거하여, 실시설계 단계에서 발주자의 주관하에 설계안전검토팀을 구성하고 설계 성과물에 대한 위험성 평가를 포함한 설계안전성검토를 수행한다. 이후, 설계안

*본 연구는 국토교통부가 주관하고 국토교통과학기술진흥원에서 시행한 2024년도 철도인프라 생애주기 관리를 위한 BIM 기반 통합플랫폼 개발사업(22RBIM-C158185-03)의 연구비 지원에 의한 결과임.

**현대건설 토목사업본부 책임매니저(주저자: jwhwang@hdec.co.kr)

***한국철도기술연구원 첨단궤도토목본부 책임연구원

****한국철도기술연구원 철도시험인증센터 선임기술원

*****한국철도기술연구원 첨단궤도토목본부 수석연구원(교신저자: ykpark@krri.re.kr)

전검토 보고서를 국토안전관리원에 제출하여 검토를 받고 국토교통부 장관에게 제출하는 절차로 진행된다.

그러나 설계에 잠재된 위험요소를 제거한다는 취지로 도입된 본 제도는 건설안전에 대한 설계자의 전문성 부족과 함께, 설계단계에서 안전전문가 및 시공자와의 협업이 어렵다는 한계로 인해 실효성이 부족하다는 지적이 지속적으로 제기되고 있다(한국시설안전공단, 2017). 또한 많은 양의 설계정보를 종합적으로 검토하여 위험요소를 도출해야하는 위험성 평가 활동이 문서 형태의 2차원 설계도서를 기반으로 수행됨에 따라, 경험이 부족한 검토자는 위험 요소 발굴에 많은 노력과 시간이 소요되고, 일관성이 결여된 평가 결과가 도출되는 등 전반적인 신뢰성이 저하되는 문제가 발생하고 있다(Zhang et al., 2015).

즉, 실제 현장 상황을 경험하지 못한 설계자는 텍스트 형태의 문서나 2차원 도면으로부터 설계에 잠재되어있는 위험성을 파악하기 어렵고, 이를 인지하더라도 그 위험성을 상대적으로 과소평가하는 경향이 있다. 특히, 다양한 공종이 포함된 대규모 복합 프로젝트의 설계안전성 평가를 착공이 임박한 단계에서 제한된 시간에 완수하기에는 비용 및 기술적인 한계가 존재한다. 이러한 한계로 인해, 보고서 작성에만 치중한 피상적이고 형식적인 업무가 관행처럼 굳어지고 있으며, 유명무실한 설계안전성검토를 개선해야 한다는 요구가 증가하고 있다.

이에 본 연구에서는 설계/시공 정보를 통합하는 플랫폼으로 각광받고 있는 BIM(Building Information Modeling)을 활용하여, 설계안전성검토의 업무 효율을 향상시키고, 실질적인 안전관리 효과를 거둘 수 있는 BIM 기반 설계안전성검토 방법론을 제시한다. 특히, 설계안전성검토의 핵심인 위험성 평가를 BIM 기반으로 전환한 BIM 기반 위험성 평가 프로세스를 수립하여 설계 실무에 적용한 사례 분석을 통

해 이를 검증한다.

또한, 「설계안전성 검토 업무 매뉴얼(국토교통부, 2017)」에 따르면, 시공자가 설계안전검토보고서의 내용을 반영하여 안전관리계획을 수립하고 시공단계에서 이를 이행하도록 하고 있는데, BIM 기반 설계안전성검토의 업무 절차에도 현장에서의 안전관리 활동에 BIM을 활용할 수 있는 절차를 반영하고, 현장 실증을 통해 현장 적용성과 활용 효과를 검증한다.

1.2 연구의 범위 및 방법

본 연구에서는 문서화된 형태의 2차원 설계도면과 설계정보에 근거하여 수행되었던 기존의 설계안전성검토 업무를 BIM 기반으로 전환하여, BIM 기반 위험성 평가 프로세스와 BIM 기반 설계안전성검토 성과물의 활용 절차를 반영한 BIM 기반 설계안전성검토 업무 절차를 수립한다. 제안된 BIM 기반 위험성 평가 프로세스와 BIM 기반 설계안전성검토 성과물의 활용 방안은 설계 실무와 현장의 안전관리 활동에 적용한 사례 연구를 통해 활용 효과와 현장 적용성을 검증하고자 한다.

이를 위해, 국내외 선행연구들을 조사하여 설계안전성검토에 대한 BIM 적용 가능성과 효과에 대해 살펴본다. 이후, 2차원 설계도서와 대비되는 BIM의 특장점을 효과적으로 활용하여 위험 요소 발굴을 비롯한 저감대책 수립을 효과적으로 수행할 수 있는 BIM 기반 위험성 평가 프로세스를 제시한다. 아울러, 승인된 BIM 성과물을 현장의 안전관리 활동에 활용하는 업무 절차를 반영하여 기존의 설계안전성검토 업무를 BIM 기반으로 수행하는 업무 절차를 제시하고자 한다. 제안된 BIM 기반 위험성 평가 프로세스는 설계 실무에 적용하여 위험 요소 발굴 효과를 정량적으로 검증하며, BIM 기반 설계안전성검토 업무 절차는 시공 현장의 안전관리 활동에 적용하여 전문가의 피드백을 반영하고 현장 적용성을 검증한다.

2. 선행연구 검토

DfS의 모태라고 할 수 있는 CDM(Construction and Design Management) 제도를 1994년부터 도입한 영국은 BIM이 태동한 국가답게 BIM과 CDM의 상호 운용에 관한 다양한 연구와 시도가 이루어졌다. Zou et al.(2015)은 경험과 지식에 의존하여 수행되던 기존의 위험성 관리 기법이 BIM 및 연관 기술과 접목하여 체계화되고 있는 새로운 경향에 대해 고찰하였으며, Mzyece et al.(2019)은 BIM 기반의 CDM 수행을 위해, BIM과 CDM의 상호운용성을 고려한 프레임워크를 제안하고, CDE(Common Data Environment, 공동데이터환경)를 활용한 CDM 수행 방안을 제시하였다. 또한, Zhang et al.(2015)은 떨어짐 사고에 관련된 BIM 기반의 룰-검토 프레임워크(Rule-checking Framework)를 연구하여, BIM 속성 정보를 활용한 위험성 평가의 가능성을 확인하였다.

국내에서도 관련 연구가 다수 진행되었는데, 이치주(2020)는 설계안전성검토 제도가 활성화되지 못하는 한계를 극복하기 위해 BIM을 적용할 필요가 있음을 피력하였다. 또한, 이치주·함성일(2020)은 DfS와 BIM을 결합한 설계가이드 시스템을 개발하여 떨어짐 사고에 대한 저감대책 수립에 적용하였다.

이동건 외(2019)는 BIM 기반의 모듈러 양중 계획 수립 및 검토 사례를 제시하였으며, 권오철 외(2013)는 BIM의 품질 검증 기술을 활용하여 안전 체크리스트 항목에 대해 자동화된 검토를 수행하고 BIM 기반의 DfS의 실현 가능성을 확인하였다. Kim et al.(2020)은 BIM의 속성 정보를 기반으로 위험요소를 인식하고 심각도와 빈도 평가를 자동화하는 방법론을 제시하였다.

설계안전성검토의 마지막 단계인 현장의 안전관리 활동에 BIM을 활용하는 연구도 다수 진행되었다. 신민호 외(2023)는 CDE를 활용하여 위험성 평가 데이터를 추적하고 공유하는 방안을 제시하였으며, 강

인석 외(2007)는 개념설계단계에서의 VR(Virtual Reality) 활용에 관한 연구를 수행하여, VR 기반으로 공정별 위험도 예측이 가능한 시각화된 시공관리 시스템의 개발 가능성을 제시하였다. Park and Kim (2012)은 BIM 기반의 시각화 시스템을 활용한 건설 안전관리 기법을 제안하면서, BIM을 비롯하여 AR(Augmented Reality) 기술이 안전관리에 효과적으로 활용될 수 있음을 제시하였으며, 김현승·강인석(2020)도 건설공사에서 증강현실기술의 활용성이 증대될 것임을 시사하였다.

이상과 같이 선행 연구를 고찰한 결과, BIM 기반의 위험성 평가 프로세스를 비롯한 설계안전성검토의 업무 절차를 도출하고자 하는 시도가 없었다는 것을 알 수 있었다. 또한, BIM 기반의 설계안전성검토 성과물을 현장의 안전관리 활동에 적용하고 이에 대한 피드백을 반영한 연구도 없었다는 점에서 본 연구는 선행연구와의 차별성을 가지고 있다고 사료된다.

3. BIM 기반 위험성 평가

3.1 BIM 기반 위험성 평가 프로세스

「2022년 산업재해현황분석(고용노동부, 2023)」의 업무상사고 재해현황에 따르면, 건설산업은 떨어짐(추락), 넘어짐(전도), 물체에 맞음(낙하·비래) 등의 순으로 안전사고가 빈번하게 발생하였다. 이러한 재해는 사전에 위험요소를 제거하고, 안전한 작업환경을 조성함으로써 상당 부분 예방이 가능하다. 그러나 종이 출력용으로 작성된 2D 형태의 설계도서(Paper-based 2D Design Deliverable)를 활용하여 시공 순서에 따라 작업환경이 변화하는 건설 현장의 위험요소를 선제적으로 발굴하고, 이에 대한 저감대책을 수립하는 데에는 기술적인 한계가 있다. 또한, 상당 수준의 경험과 안전 지식을 갖춘 전문가도 제한된 시간 내에 방대한 양의 설계 성과물을 신속하게 검토하여 설계상의 위험성을 평가하기에는 현실

적인 어려움이 있다.

이에 설계 과정에서 생성된 설계 정보를 3차원 객체에 내포하여 설계 및 시공단계에 활용할 수 있는 BIM을 기존의 위험성 평가에 접목하여 안전 관련 전문성이 부족한 설계자도 설계안전성검토 업무를 효과적으로 수행할 수 있도록 BIM 기반 위험성 평가 프로세스를 Fig. 1과 같이 제안한다.

설계자는 설계 초기의 BIM 구축 단계부터 잠재적 위험요소가 내포된 BIM 객체를 파악하여 위험성 평가 관련 지표(물적피해, 인적피해, 발생빈도, 심각성, 위험등급 등)를 반영한다. 이를 통해, 위험요소를 시각적으로 발굴하는 동시에 BIM 객체의 속성 정보를 검색하여 위험등급이 높은 객체에 내포된 위험요소를 체계적으로 파악할 수 있도록 하였다.

파악된 위험요소에 대해서는 위험요소가 유발하는 재해의 특성을 고려하여, VR을 비롯한 실시간 렌더링 기술, 4D 시뮬레이션 등을 활용한 위험성 검토를 수행한다. 이 과정에서 BIM 톨 기반의 워크샵이나 CDE를 활용하여 Dfs에 참여하는 주체들과 협업 형태로 BIM 기반 위험성 평가를 실시한다. 이를 통해, 수치화된 위험 등급에만 의존하지 않고, BIM의 다양한 정보를 종합적으로 고려하여 위험요소의 허

용 가능 여부를 판정할 수 있도록 절차를 마련하였다.

저감대책 수립 업무도 기존의 설계도서 기반에서 BIM 기반으로 전환하여, 현장의 시공 상황과 주변 환경을 고려한 저감대책이 도출되도록 하였다. 이를 통해, 현장 적용성이 우수한 저감대책과 안전시설물이 설계 BIM 모델에 반영되어, 시공단계에서의 활용도가 높아질 것으로 기대된다.

끝으로 위험성 평가 업무의 문서화를 BIM 기반으로 전환하여, 향후의 유사 프로젝트에서 디지털 데이터를 효과적으로 활용할 수 있도록 절차를 수립하였다. 이를 통해, BIM 구축 단계에서 타 프로젝트의 위험성 평가 정보가 효과적으로 활용되고, BIM 기반의 위험성 평가 업무가 선순환적으로 발전하도록 유도하였다.

3.2 BIM 기반 위험성 평가 실증

3.2.1 사례 분석 1: 구조물 설계

제안된 BIM 기반 위험성 평가 프로세스를 설계 실무에 적용하여 위험요소 발굴의 효과를 실증하였다.

Fig. 2는 도시철도 정거장 승강장의 하부로 신설 역사의 환승 통로를 설치하는 공사에서 기존의 위험성 평가를 BIM 기반으로 전환한 사례이다. 설계도를 기반으로 여러 장의 도면들을 검토하여 위험요소를 발굴하였던 종래의 업무 방식을 BIM 기반으로 전환하여 해당 공종의 안전 관리 경험이 부족한 검토자들도 위험요소를 신속하게 발굴할 수 있었다. 또한, 주변 상황을 입체적으로 고려하여 위험요소의 발생빈도와 심각성을 보다 효과적으로 판정하였으며, 발주자를 비롯한 Dfs관리자, 시공전문가의 저감대책 검토 및 위험성 재평가 업무 시간을 크게 단축시켰다.

특히, 통합 BIM 모델기반으로 위험요소 주변의 구조물 설계 현황을 종합적으로 평가하여, 시공성을 고려한 최적의 저감대책을 발굴할 수 있었다. 또한, 저감대책을 BIM 객체로 모델링하여 3차원 공간상

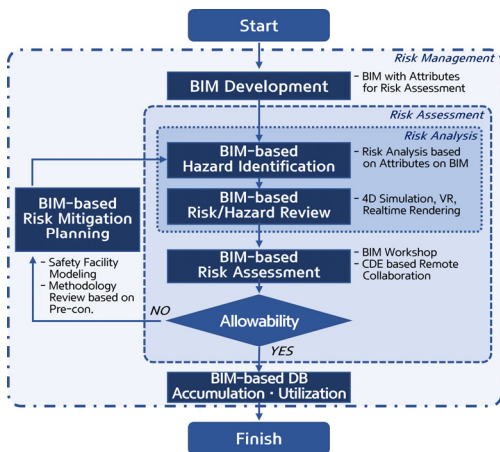


Fig. 1. BIM-based Risk Assessment Process

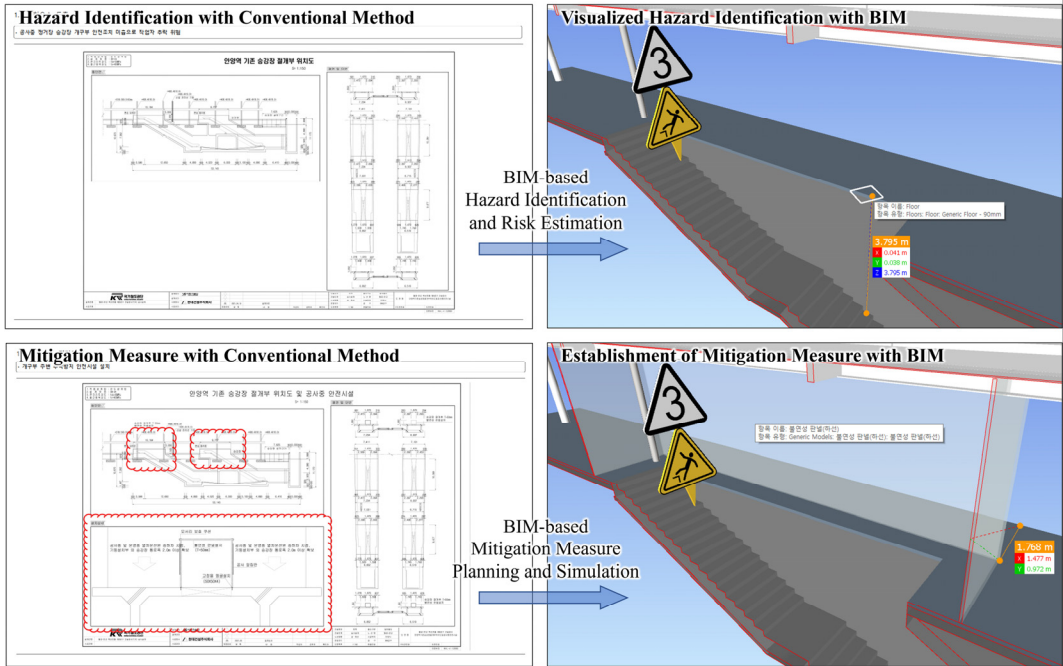


Fig. 2. An Example of Work Process Transition from Conventional Method to BIM: Hazard Identification and Establishment of Mitigation Measures

Source: Hyundai E&C (2021) (in Korean)

에서 다양한 대안을 검토하고, 즉각적으로 저감대책의 효과를 평가할 수 있었다.

BIM 기반 위험성 검토 프로세스의 DB 축적 및 활용 기능을 실증하기 위해, 위험성 평가표와 저감대책 평가표의 각종 데이터를 BIM 객체에 사용자 지정 속성(User-defined Attributes)으로 입력하여 위험성 평가 업무에 활용하였다. Fig. 3은 위험요소가 발굴된 구조물 모델에 해당 위험요소의 일련번호와 안전 표식을 BIM 객체로 추가하여 위험요소를 시각적으로 인식되게 함과 동시에 위험성 평가 데이터를 BIM 객체의 속성 정보로 반영한 사례이다. 이를 통해, BIM으로 모델링된 안전시설물 객체에 저감대책의 평가 등급을 기록하고 이를 과업 참여자들과 공유하는 등의 DB 축적 및 공유의 용도로 BIM이 효과적임을 확인하였다.

상기 실증 연구를 통해, BIM의 특징점인 설계 정

보의 통합 및 입체적 시각화가 안전관리에 대한 지식이나 경험이 부족한 설계자들에게 설계단계에서부터 위험요소를 배제하고 안전성이 확보된 설계를 하는 데에 기여하는 것으로 나타났다. 또한 기존의 2D 설계도 기반의 설계안전성검토 업무가 BIM 기반으로 전환되면서, 발주자와 설계자, 시공사, DfS 관리자가 참여하는 설계안전성 검토 조직의 협업 효율이 향상되는 효과를 확인하였으며, 워크샵이나 저감대책 검토 업무가 간소화되는 것으로 나타났다.

아울러 객체 기반으로 다양한 속성 정보를 디지털 형태로 축적하고 공유할 수 있는 BIM의 특징을 활용하여, 설계도서와 독립적으로 기록·관리되던 설계안전성검토 데이터를 BIM으로 일원화하여 통합 관리가 가능함을 확인하였다. 이를 통해 설계상에서 발굴된 위험요소와 저감대책을 BIM 기반의 디지털 환경으로 공유하여, 모든 과업 참여자들의 안전 정

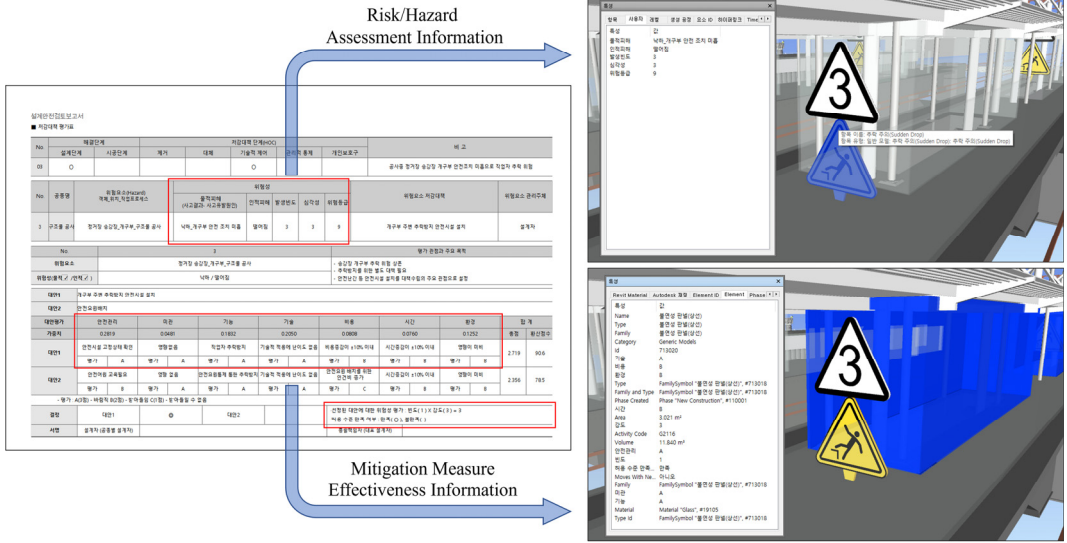


Fig. 3. Data Integration and Management of Risk/Hazard Assessment and Mitigation Measure Effectiveness Information on Design for Safety (DfS) with BIM Object's User-defined Attributes

Source: Hyundai E&C (2021) (in Korean)

보에 대한 접근성을 향상시키고 관련 업무에 효과적으로 활용할 수 있음을 확인하였다.

3.2.2 사례 분석 2: 건설장비 운용

특수한 형태의 대형건설장비가 사용되는 토목 공사에서 흔히 발견되는 위험요소가 작업 공간 부족으로 인한 부딪힘·끼임 사고이다. 그러나 기존의 설계도면을 기반으로 현장의 장비 운용 계획을 입체적으로 검토하기에는 기술적인 한계가 있어, 설계단계에서 건설장비 운용에 대한 안전성 검토가 소극적으로 수행되어 왔다. 이로 인해, 시공단계에서 장비 운용 계획을 새로 수립하고 재검토해야 하는 비효율성이 지속적으로 발생하고 있다.

그러나 최근에는 건설 장비 제조사가 3차원 설계를 수행하므로, 이를 구조물 BIM 모델과 결합하여 건설장비의 운용 단계별 위험요소를 시각적으로 검토하고, 시뮬레이션을 활용하여 저감대책을 효과적으로 도출할 수 있다. 이에 착안하여 건설장비 운용에 따른 안전성 검토가 중요한 현장에서 본 기술을

적용하여, BIM 기반 위험성 평가 프로세스를 검증하였다.

Fig. 4는 도심의 MRT(Mass Rapid Transit) 상부를 통과하는 고가교 건설공사에서 프리캐스트 세그먼트 공법(Precast Segmental Method)에 사용되는 런칭 거더(Launching Girder) 장비의 위험성 평가를 수행한 사례이다. BIM 기반 실시간 렌더링 솔루션인 Twinmotion으로 런칭 거더의 구동 과정을 시각화하고, 이를 VR로 시뮬레이션하여 도심지의 다양한 장애물을 고려한 건설장비 운용 단계별 위험요소 발굴을 신속하게 수행할 수 있었다.

또한 Fig. 5와 같이 시공단계별로 변화하는 구조물의 형상과 건설장비의 동작을 실시간으로 시뮬레이션하여, 주변 장애물과의 이격 거리를 측정하는 등의 정량적 위험성 분석에 효과적으로 활용하였다.

이를 통해 설계단계에서 구체적으로 검토하기 어려웠던 건설장비의 운용 단계별 위험성 평가를 BIM 기반의 시각화 도구들을 활용하여 효과적으로 수행할 수 있었다. 즉, VR이나 실시간 렌더링 기술이 건설

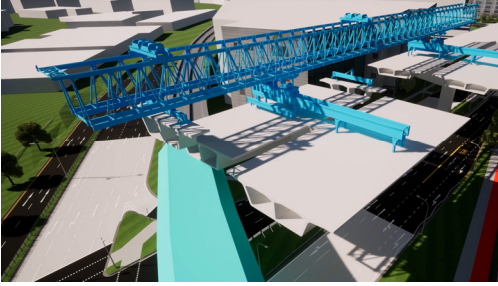


Fig. 4. Safety Assessment of Construction Equipment Installation and Operation Phases with BIM-based VR Simulation

Source: Hyundai E&C (2022) (in Korean)



Fig. 5. Quantitative Assessment of Minimum Clearance with Adjacent Facilities during Equipment Operation through VR Simulation

Source: Hyundai E&C (2022) (in Korean)

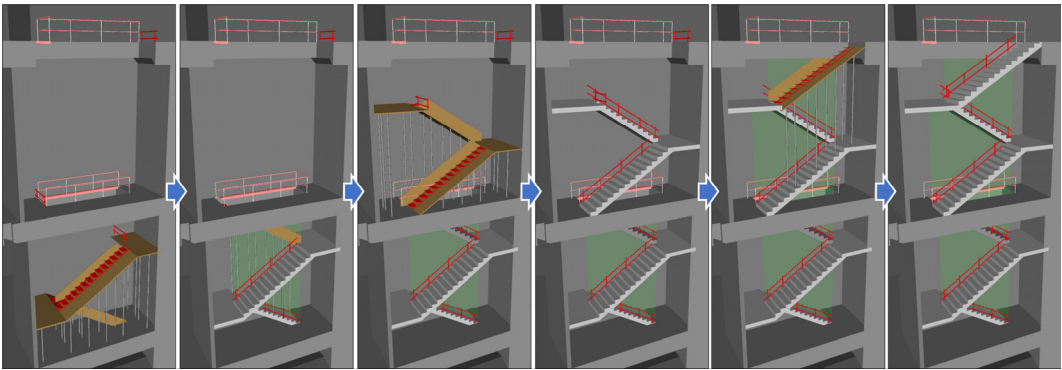


Fig. 6. An Example of Design for Safety for Staircases in the Subway Station: Hazard Identification and Mitigation Measure Planning for Construction Phases based on 4D Simulation

장비에 대한 지식이나 경험이 부족한 검토자들에게 건설장비의 운용 단계별 위험상황을 직관적으로 평가할 수 있게 도와주는 것을 확인하였다.

3.2.3 사례 분석 3: 건설 공법 및 공정 순서

시공단계가 복잡한 건설 공사에서 건설 공법과 공정 순서를 고려한 설계안전성검토는 매우 중요하다. 그러나 일반적인 형태의 설계도서를 기반으로 공법 및 공정 정보를 파악하여 가설 단계별 위험요인을 발굴하고 분석하기에는 기술적 한계가 있다. 특히, 가설 단계가 개념적으로 표현되는 경우가 많아 위험요소를 파악하기 어렵고, 위험성을 실제보다 과소평가하는 경향이 있다. 따라서 BIM 객체에 공정 정보

를 연계하여 가설 단계를 시각적으로 검토할 수 있는 4D 시뮬레이션을 활용하여, 공정 단계별 위험요소를 직관적으로 발굴하고 이에 대한 저감대책 수립에 활용할 필요가 있다.

Fig. 6은 지하철 역사의 계단실 설계에 대해 4D 시뮬레이션을 활용하여 위험성 평가를 수행한 사례이다. 가설 단계별 작업 공종에 따라, 구조물의 시공 현황과 가설 장비 및 안전 시설물의 배치를 시각적으로 검토함으로써, 시공 단계별 위험요소 발굴과 저감대책 수립에 효과적임을 확인하였다. 또한 발주자를 비롯한 DFS관리자, 시공전문가 등과의 저감대책 공유에 활용하여, 공법이나 공정이 복잡한 공사에 대한 저감대책 다면 평가(안전관리, 미관, 기능, 기

술, 비용, 시간, 환경)를 비롯하여, 대안 선정 및 위험성 재평가 업무에 소요되는 시간을 크게 단축시켰다.

특히, 시공자는 설계안전성검토 결과를 안전관리 계획서에 반영하여 안전관리업무를 수행하도록 규정되어 있는데, 시공 단계별로 안전관리계획이 반영된 4D 시물레이션을 안전관리계획서 작성에 활용하여 관련 업무가 간소화됨을 확인하였다.

3.2.4 정량적 분석 결과

제안된 방법의 위험요소 발굴에 대한 효율성을 정량적으로 분석하기 위해, BIM 기반 위험성 평가 프로세스로 발굴한 위험요소를 기존의 위험성 평가 결과와 비교하여 Table 1에 나타내었다. 3차원 모델을 활용한 위험성 검토를 통해, 5건의 위험요소(기존 시설물 해체, 계단실 시공 등)를 추가적으로 발굴할 수 있었으며, 3차원 시물레이션을 활용해서 2건의 위험요소를 추가 발굴하였다. 이를 통해, 기존 방법 대비 BIM 기반 위험성 평가 프로세스가 위험요소 발굴에 효율적인 것으로 나타났다.

다만, 감전이나 화재와 같은 위험요소는 BIM 상에서 인지하기 어려운 것으로 나타났다. 따라서, 이러한 종류의 위험요소는 공정 계획이나 작업 환경에 대한 정보를 BIM 객체에 반영하거나, 기존의 설계도서 기반의 위험성 평가를 병행할 필요가 있음을 확인하였다.

4. BIM 기반 설계안전성검토(Dfs)

4.1 BIM 기반 Dfs의 업무 절차

앞서 제시한 BIM 기반 위험성 평가 프로세스를 중심으로 기존의 설계안전성검토를 개선하고 BIM 기반 안전관리 활동에 대한 활용 절차를 보강하여 Fig. 7과 같이 개선된 BIM 기반 Dfs 업무 절차를 수립하였다.

제안된 업무 절차를 활용하면, 발주자는 유사 공종에서 구축된 BIM 기반 Dfs 성과물을 체계적으로 수집하여 설계자와 공유할 수 있으며, 설계자가 작성한 BIM 기반 Dfs를 신속하게 검수하고 피드백을 제공할 수 있다. 또한 심의를 통과한 BIM 기반 Dfs 성과물을 건설공사안전관리종합정보망에 등록하는 절차를 마련하여, 시공단계의 안전관리 업무에 효과적으로 활용하고 향후의 유사 프로젝트에 재활용될 수 있도록 하였다.

제안된 Dfs 업무 절차에 따라, 설계자는 설계안전 검토팀에 BIM 매니저와 BIM 코디네이터를 포함시켜 Dfs 업무가 BIM 기반으로 진행될 수 있는 업무 환경을 구축할 수 있는 근거를 마련하였다. 또한, 협업이 중요한 Dfs 워크숍을 BIM 기반으로 수행하고, 각종 BIM 기반 시물레이션 및 시각화 기술을 활용하여 실질적인 위험성 평가가 가능한 업무 절차를 수립하였다.

아울러 시공자가 BIM 기반 Dfs 성과물을 활용하여 안전관리계획을 수립하는 업무에 더하여, 월간

Table 1. Efficiency Comparison of Hazard Identification

Accident Types	Conventional Method	Proposed Method	Remarks
Traffic Accident	6	6	-
Overturning Accident	11	13	2 additional identifications (Demolition, etc.)
Fall Accident	4	7	3 additional identifications (Staircase, etc.)
Fire, Electrocution	3	2	A hazard does not identified (Electrocution)
Caught-between Incident	3	5	2 additional identifications (Heavy Equip., etc.)
Total	27	33	Efficiency of Identification: 122.2%

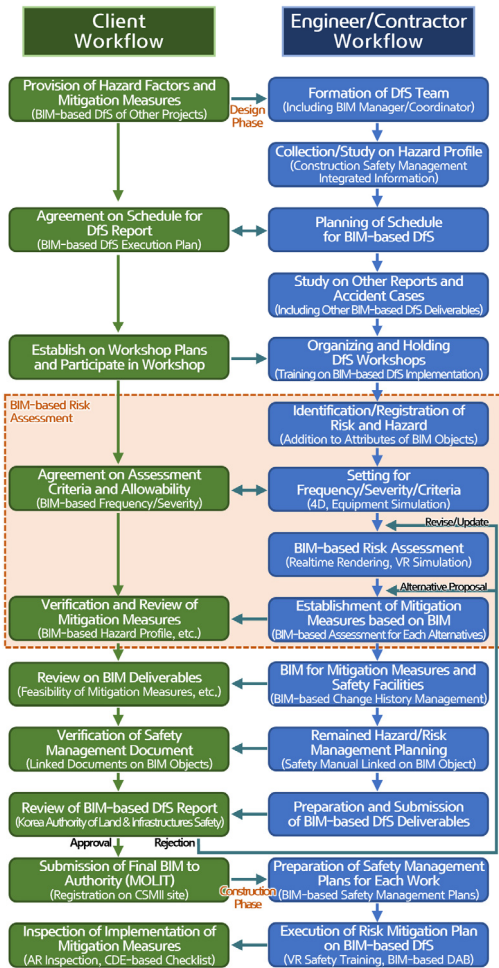


Fig. 7. Enhanced Workflow Process for BIM-based Design for Safety

안전교육, VR 기반 체험형 안전교육, BIM 기반 DAB (Daily Activity Briefings) 활동과 같은 안전관리 활동에 BIM 성과물을 활용할 수 있도록 업무 절차를 보강하였다. 끝으로 AR이나 CDE를 활용하여 발주자와 함께 현장의 저감대책 이행 현황을 모니터링하는 활용 절차도 반영하였다.

이렇게 수립된 업무 절차를 현장의 안전관리 업무에 적용하여 안전 담당자를 비롯한 안전 전문가의 의견을 청취하고 피드백을 반영하여 적정성이 확보 되도록 하였다.

4.2 BIM 기반 DfS의 활용 방안 실증

4.2.1 CDE 기반의 안전관리 업무 간소화

DfS 정보를 내포한 BIM 모델은 현장의 안전관리 업무 효율을 향상시키는 것으로 나타났다. 특히, CDE를 활용하면 안전관리 활동에 참여하는 다수의 과업 참여자들과 원활한 협업이 가능하여 디지털 기반의 업무 간소화에 도움이 되는 것으로 나타났다.

Fig. 8은 지하철 역사의 계단실 시공을 준비하는 단계에서 DfS에서 발굴된 위험요소와 저감대책을 CDE 기반으로 공유하고 안전관리 업무에 활용한 사례이다. CDE에 등록된 안전 이슈사항을 열람하여, 링크로 연결된 안전점검 대상 시설물을 BIM으로 검토하면서 DfS 상의 위험성 평가 데이터를 조회할 수 있다. 또한 현장에서 모바일 디바이스로 CDE에 접속하여, 해당 공종에 대한 안전점검리스트(Safety Checklist)를 그 자리에서 즉시 작성하고 실시간으로 안전관리 담당자들과 공유하여 조치할 수 있다.

이처럼 BIM 기반 DfS 성과물을 클라우드 기반의 CDE로 공유하여 안전관리에 활용함으로써, 현장의 안전 담당자를 비롯하여 공사 감독자, 시공 관리자, 그리고 작업자들이 협업 솔루션에서 안전관리 업무를 효과적으로 수행할 수 있음을 확인하였다. 아울러 기존의 종이 서류 중심의 안전관리 업무를 페이퍼리스(Paperless) 기반의 비대면 업무로 전환하여, 서류 작성 업무가 간소화되고 디지털 정보 활용 효율이 향상되는 효과를 확인하였다.

4.2.2 실시간 렌더링 솔루션 기반 안전시설물 검토

BIM의 특징점인 시각화 및 시뮬레이션 기능을 실제 건설 현장과 유사한 수준으로 구현하는 기술이 실시간 렌더링이다. 이를 활용하면, 건설 현장에서 안전시설물의 배치 계획을 사전에 검토하고 안전 저감대책의 효과를 시각적으로 시뮬레이션할 수 있다.

Fig. 9는 도심지 야간 작업에 필요한 안전시설물의

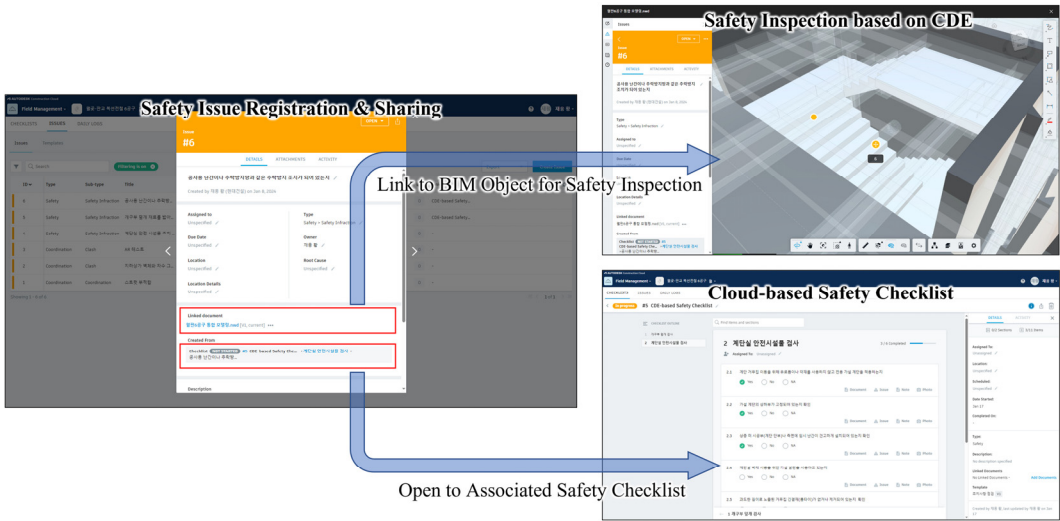


Fig. 8. An Practical Implementation of CDE-based Safety Inspection for Staircase Work in the Railway Station: Safety Issue Sharing, Visual Review for Inspection Items and Checklist for Field Inspection based on CDE

배치 계획을 실시간 렌더링 솔루션으로 검토하고 적정성을 평가한 사례이다. 앞서 살펴본 건설장비의 BIM 기반 위험성 평가에서 활용된 BIM 모델을 기반으로 야간 작업에 대한 안전관리 계획을 검토하였다. 특히, 주변 민가에 빛 공해를 유발하지 않는 수준에서 작업 안전이 확보되는 충분한 조도를 제공하기 위해, 가설 조명의 위치와 조도를 BIM 환경에서 조정하면서 실시간으로 시설물 배치 계획을 수립하였다.

이처럼 BIM 기반 DFS 성과물과 VR 시뮬레이션을

현장의 안전관리 계획 수립에 활용함으로써, 저감대책의 현장 적용성을 가상 환경에서 신속하게 검토하고, 작업성을 비롯한 민원 요소까지 선제적으로 고려할 수 있었다. 또한 저감대책을 구체적으로 수립하고 이를 시각화하여, 안전시설물을 설치하고 관리하는 담당자들의 이해를 돕고, 작업자들의 안전교육에 활용하는 등 현장의 안전 향상에 실질적인 도움을 주는 것으로 나타났다.

4.2.3 BIM 기반 안전교육

현장에서 진행되는 다양한 형태의 안전교육에 BIM 기반 DFS 성과물을 활용하면 교육 효과가 향상되는 것으로 나타났다. 특히, 외국인 노동자가 많은 현장에서 기존의 텍스트 문서 위주로 진행되던 안전교육을 BIM 기반으로 전환한 결과, 양방향(interactive) 교육을 통한 교육 참여도 향상과 학습 효과 증대를 확인하였다.

Fig. 10은 현장에서 정기적으로 수행하는 월간 안전교육을 BIM 기반으로 진행한 사례이다. 텍스트 형태의 위험성 평가표를 기반으로 진행하던 기존의 일



Fig. 9. Mitigation Measure Simulation based on Real-time Rendering Solution: A Case Study on Temporary Lights for Night Work

Source: Hyundai E&C (2022) (in Korean)



Fig. 10. BIM-based Monthly Safety Training for Foreign Workers

방향 교육에서 탈피하여, BIM을 기반으로 위험요소를 입체적으로 살펴보고 저감 대책 및 사고 예방 계획을 시각적으로 전달하는 양방향 참여형 교육을 진행하여 교육 효과를 높일 수 있었다.

또한 공종별 협력업체 직원들과 시공사의 관리자들이 일일 작업 계획을 협의하고 위험 공종에 대한 안전 조치 사항을 점검하는 DAB 활동에 BIM을 활용하여 위험 요소 인식 및 저감대책 수립과 같은 의사결정 속도가 빨라진 것으로 나타났다.

아울러 BIM 기반 DFS 과정에서 구축된 건설장비 시물레이션이나 4D 시물레이션을 활용하여 현장 맞춤형 VR 안전교육 콘텐츠를 제작하고, 체험형 안전 교육에 활용하였다. 특히, VR 환경에서 BIM 모델을 수정할 수 있는 The Wild나 Prospect를 활용하여, 위험 작업을 체험해보거나 안전시설물을 재배치해보는 등 저감대책 수행 방법을 가상 환경에서 검토할 수 있었다.

Fig. 11은 Prospect를 활용하여 VR 기반의 체험형 안전교육을 수행한 사례이다. 의사소통이 어렵고 시공 경험이 부족한 외국인 근로자나 특수공법에 참여하는 작업자를 대상으로 안전 조치 및 비상시 대응 방법에 대한 체험형 교육을 시행하여, 예상되는 위험요소를 명확하게 인지시키고 현장에서의 안전 조치 및 작업 준비에 소요되는 시간을 크게 단축시킬 수 있었다.

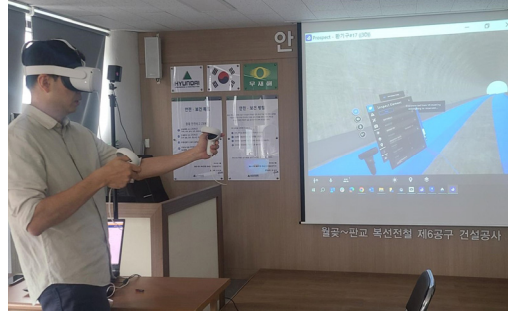


Fig. 11. Immersive VR-based Experiential Safety Training by Leveraging BIM Integrated with DFS Information

또한, VR 환경에서 DFS 정보를 조회하거나 시설물의 치수를 측정하는 등 위험성 평가를 효과적으로 수행할 수 있었으며, 가상 환경에서 안전 시설물을 배치하고 최적화해보는 등의 위험 지역의 안전관리 계획 수립에도 유용하게 활용하였다.

4.2.4 AR 기반 안전점검

HoloLens나 SiteVision과 같은 AR 디바이스를 활용하면, 현실 세계의 영상에 BIM과 같은 가상의 객체 및 디지털 정보를 투영하고 시각화할 수 있다. 이를 통해, 위험요소에 대한 저감대책의 현장 적용성을 비롯하여, 안전시설물의 설치 규정 준수 여부 등을 시각적으로 검토할 수 있다.

Fig. 12는 AR 기술을 활용하여 도시철도 승강장의

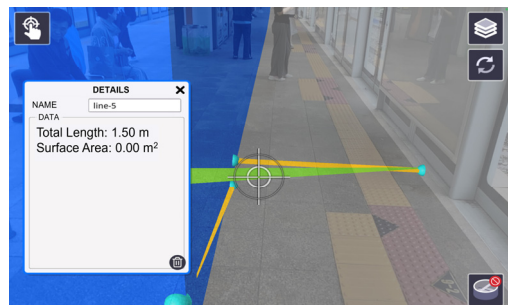


Fig. 12. AR-based Safety Facility and Risk Mitigation Plan Inspection on Site

환승 통로 설치 공사에 대한 BIM 기반 Dfs의 활용 방안을 실증한 사례이다. Dfs 정보가 내포된 BIM 모델을 AR 디바이스로 표출하여, 승객들이 이용 중인 승강장에서 안전시설물 설치 계획을 시각적으로 검토하였다. 특히, 저감대책에서 요구하는 통행로 폭원이 충분한지 정량적으로 평가할 수 있었으며, 공사로 인한 안전사고 요인이나 민원 요소 등을 시각적으로 검토하였다.

이를 통해, 승강장을 이용하는 승객들에 대한 별도의 통제 없이 공사로 인한 위험 상황이나 불편함을 현장에서 시각적으로 검토할 수 있었다. 또한, 발주자가 시민들의 시설물 이용 편의성과 안전 확보의 관점에서 안전관리 계획을 시각적으로 검토할 수 있었으며, 안전시설물이 규정에 맞게 설치되었는지를 점검하고 검증하는 업무에도 활용성이 우수한 것으로 나타났다.

5. 결 론

본 연구는 BIM을 활용하여 기존의 유명무실하다는 지적을 받아 온 설계안전성검토의 업무 효율을 향상시키고, 실질적인 안전관리 효과를 거둘 수 있는 방안을 제시하였다.

우선, 설계안전성검토의 핵심 절차인 위험성 평가를 BIM 기반 수행하는 방법론을 제시하였다. 아울러 이를 설계 실무에 적용한 사례 분석을 통해, BIM 기반 위험성 평가 프로세스의 현장 적용성과 효과를 검증하였다. 특히, 위험요소 발굴 건수를 기준으로 기존 방식과 제안된 방법론을 정량적으로 비교하여, 제안된 방식이 효율적임을 확인하였다.

제안된 BIM 기반 위험성 평가 프로세스에 BIM 기반 Dfs 성과물을 시공단계에 활용하는 절차를 추가하여 개선된 BIM 기반 Dfs 업무 절차를 수립하였다. 이를 통해, 설계 초기 단계부터 BIM 기반의 위험성 평가와 저감대책 수립 업무를 내재화하고, 과업 참

여자들과의 BIM 기반 정보 공유를 통해 안전성이 확보된 설계가 도출될 수 있도록 하였다.

아울러 설계단계에서 생성된 BIM 기반 Dfs 성과물을 시공단계의 안전관리 활동에 활용하는 업무 절차를 현장에서 실증하였다. 이를 통해, CDE를 기반으로 정보 공유와 협업이 증진되어 안전관리 업무의 효율이 향상되고, 페이퍼리스 기반의 업무 간소화가 가능함을 확인하였다. 또한, 실시간 렌더링 솔루션을 활용한 안전시설물 배치 계획 수립 및 검토를 비롯하여, BIM 기반의 체험형 안전교육, AR 기반의 안전점검 등의 안전관리 활동에 BIM 기반 Dfs 성과물이 효과적으로 활용될 수 있음을 실증하였다.

제안된 BIM 기반 Dfs 방법론은 발주자와 설계자, 시공자 간의 협업 증진을 비롯하여, 안전관리 업무의 효율 향상과 디지털 기반의 안전 DB 구축에 기여할 것으로 기대된다. 본 연구를 시작으로 건설 안전과 관련된 BIM 기술이 지속적으로 개발되고 후속 연구가 활발히 진행되어, BIM이 선제적 안전관리를 실현하는 최적의 도구로 자리매김하기를 바란다.

참고문헌

- 강인석·문진석·권중희(2007), “토목공사 개념설계 단계의 가상현실(VR) 기능 구축방안 연구”, 「대한토목학회논문집」, 27(6D): 759~765.
- 국토교통부(2017), 「설계 안전성 검토 업무 매뉴얼」, 세종.
- 고용노동부(2023), 「2022년 산업재해현황분석」, 세종.
- 권오철·조주원·조찬원(2013), “설계단계에서의 BIM 안전설계 품질검토”, 「한국CAD/CAM학회논문집」, 18(5): 348~358.
- 김현승·강인석(2020), “도면증강 객체기반의 건설공사 사전 시공검증시스템 개발 연구”, 「LHI Journal」, 11(3): 93~101.
- 신민호·안기성·정지현·박사랑(2023), “철도 인프라 BIM과 CDE기반 안전 리스크 관리 방안”, 「한국철도학회 논문집」, 26(1): 23~32

7. 이동건·김진원·손정락(2019), “모듈러주택 품질관리를 위한 BIM 적용 방안”, 『LHI Journal』, 10(2): 59~67.
8. 이치주(2020), 「건설산업재해 감소를 위한 설계안전성검토(DfS)와 건설정보모델링(BIM)의 적용방안」, 세종: 국토연구원.
9. 이치주·함성일(2020), “떨어짐 사고 예방을 위한 DfS와 BIM 기반의 안전난간 설계가이드 시스템”, 『대한건축학회논문집』, 36(10): 235~241.
10. 한국시설안전공단(2017), 「설계안전성검토(Design for Safety) 적용 매뉴얼 개선방안 연구」, 진주.
11. 현대건설(2021), 「설계안전검토 보고서: 월곶~판교 복선전철 제6공구 건설공사(T/K) 실시설계」, 경기. Hyundai E&C (2021), “Design for Safety Report: Detailed Design for the Contract 6 of the Wolgot~Pangyo Double-Track Railway Project”, Kyunggi. (in Korean)
12. 현대건설(2022), 「토목 프로젝트에서의 BIM 적용 우수사례」, 서울. Hyundai E&C (2022), “Best Practices of BIM Implementation for Infrastructure Projects”, Seoul. (in Korean)
13. Kim, I., Y. Lee and J. Choi (2020), “BIM-based Hazard Recognition and Evaluation Methodology for Automating Construction Site Risk Assessment”, *Applied Sciences*, 10: 2335.
14. Mzyece, D., I. E. Ndekugri and N. A. Ankrah (2019), “Building Information Modelling (BIM) and the CDM Regulations Interoperability Framework”, *Engineering, Construction and Architectural Management*, 26(11): 2682~2704.
15. Park, C. S. and H. J. Kim (2012), “A Framework for Construction Safety Management and Visualization System”, *Automation in Construction*, 33: 95~103.
16. Zhang, S., K. Sulankivi, M. Kiviniemi, I. Romo, C. M. Eastman and J. Teizer (2015), “BIM-based Fall Hazard Identification and Prevention in Construction Safety Planning”, *Safety Science*, 72: 31~45.
17. Zou, Y., A. Kiviniemi and S. Jones (2015), “BIM-based Risk Management: Challenges and Opportunities”, *Proceedings of the 32nd CIB W78 Conference*, Eindhoven, The Netherlands.

요 약

설계안전성검토(DfS)는 설계상의 잠재적인 위험요소를 선제적으로 제거하기 위해 도입되었으나, 위험성 평가 및 위험요소 발굴이 2D 설계를 기반으로 수행되어 피상적이고, 업무 절차가 비효율적이라는 한계가 지속적으로 제기되고 있다. 본 연구는 기존 설계안전성검토의 한계를 극복하고자 Building Information Modeling(BIM)을 활용하여 업무 효율을 향상시키고 실질적인 안전관리 효과를 얻을 수 있는 BIM 기반 설계안전성검토 방법론을 제시한다. 제안된 BIM 기반 설계안전성검토의 업무 절차는 설계 단계에서의 위험성 평가와 시공 단계에서의 안전관리 활동과 같은 사례 연구를 통해 실무 적용성을 보완하고 검증하였다. 특히, 설계안전성검토 업무 절차의 핵심 과정인 위험성 평가 프로세스를 BIM 기반으로 전환하여 제시하였으며, 구조물 설계를 비롯하여 건설장비 운영이나 공법 및 공정 순서에 대한 설계안전성검토에 BIM 기반 위험성 평가 프로세스를 적용한 사례 분석을 통해 설계 실무의 적용성을 검증하였다. 또한, Common Data Environment (CDE) 기반의 일일 안전 브리핑을 비롯하여 가상현실(VR) 기반 안전교육, 증강현실(AR) 기반의 위험요소 저감대책 점검과 같은 현장의 안전 관리 활동에 BIM 기반 설계안전성검토 기법을 적용하여 현장 적용성과 업무 효율성이 우수함을 확인하였다.

주제어: 건설정보모델링(BIM), 설계안전성검토(DfS), 위험성 평가, 가상현실(VR)/증강현실(AR), 안전교육