

BIM 기반 위험요소 도출을 통한 정량적 위험성 평가 모델 개발 - 떨어짐 사고를 중심으로 -

고휘재¹ · 현지훈² · 이주희³ · 안요섭^{4*}

¹호서대학교 재난안전시스템학과 석사과정 · ²호서대학교 재난안전시스템학과 석사과정 · ³호서대학교 재난안전시스템학과 석사과정 ·
⁴호서대학교 건축토목공학부 조교수

Development of A Quantitative Risk Assessment Model by BIM-based Risk Factor Extraction - Focusing on Falling Accidents -

Go, Huijea¹, Hyun, Jihun², Lee, Juhee³, Ahn, Joseph^{4*}

¹Graduate Student, Department of Disaster Safety Systems, Hoseo University

²Graduate Student, Department of Disaster Safety Systems, Hoseo University

³Graduate Student, Department of Disaster Safety Systems, Hoseo University

⁴Assistant Professor, Department of Architectural and Civil Engineering, Hoseo University

Abstract : As the incidence and mortality of serious disasters in the construction industry are the highest, various efforts are being made in Korea to reduce them. Among them, risk assessment is used as data for disaster reduction measures and evaluation of risk factors at the construction stage. However, the existing risk assessment involves the subjectivity of the performer and is vulnerable to the domestic construction site. This study established a DB classification system for risk assessment with the aim of early identification and pre-removal of risks by quantitatively deriving risk factors using BIM in the risk assessment field and presents a methodology for risk assessment using BIM. Through this, prior removal of risks increases the safety of construction workers and reduces additional costs in the field of safety management. In addition, since it can be applied to new construction methods, it improves the understanding of project participants and becomes a tool for communication. This study proposes a framework for deriving quantitative risks based on BIM, and will be used as a base technology in the field of risk assessment using BIM in the future.

Keywords : BIM, Risk Assessment, Risk Factor DB, Visualization

1. 서론

1.1 연구의 배경 및 목적

건설산업은 복잡한 생산구조와 현장 생산에 따른 가변적이면서도 열악한 작업환경(Choi et al., 2000), 하도급으로 인한 관리의 어려움(Son et al., 2004) 등으로 인해 중대 재해가 빈번하게 발생하고 있다. 2020년을 기준으로 국내 건설산업의 재해율은 24.7%(26,799명)로 단일 업종으로는 가장

높으며, 사망률도 27.5%(567명)로 산업 전체 중 가장 높다(Korea Occupational Safety and Health Agency, 2022). 국내 정부에서도 이를 인지하고 관련 법령 및 제도의 정비, 스마트 건설기술 도입 등의 안전강화 대책을 발표함으로써 건설산업 재해 예방을 위하여 다양한 노력을 기울이고 있다. 그중 위험성 평가는 시공단계에서 발생 가능한 위험요소를 사전에 파악하고 위험성을 평가하여 재해 감소대책을 수립하기 위한 기초자료로 활용되며, 위험성 평가가 신속하고 정확하게 진행될수록 작업자의 안전성을 증가시키는 등 건설안전관리의 효과가 증가하게 된다.

기존의 위험성 평가는 설계단계에서 이루어지는 유해위험방지계획서, 현장 작업 직전에 이루어지는 DRI (D-1 Risk Inspection) 방식 등이 있다. 그러나 안전관리 담당자의 지식과 경험에 의존하여 주관적인 평가가 주로 이루어지므로

* **Corresponding author:** Ahn, Joseph, Department of Architectural and Civil Engineering, Hoseo University, 20, Hoseo-ro79beon-gil, Asan, 31499, Republic of Korea

E-mail: josephahn@hoseo.edu

Received February 10, 2022; **revised** June 9, 2022

accepted June 13, 2022

일관적인 검토가 어려우며(Kim & Lee, 2019), 지속적으로 신기술 및 신규 공법이 도입되는 현재의 국내 건설현장에서 안전 담당자가 직·간접적으로 경험해보지 못한 신규 공법에 대한 위험요인을 조기에 파악하기 어렵다. 특히, 공사 규모가 큰 건설현장의 경우 안전조치의 정확도 등에 대한 휴먼에러의 발생 가능성이 높으며(Goh & Lee, 2016), 위험요소의 분석을 위한 정량적인 데이터 자료가 부족하여 현재의 위험성 평가방식은 신규 공법에 대해 취약한 측면이 있다.

반면, 최근 그 활용도가 증가하고 있는 BIM (Building Information Modeling)을 건설안전관리에 적용하여 4D 가상시공 시뮬레이션으로 공정의 시각화를 통해 안전관리 자료로 활용하거나(Kim et al., 2017), BIM을 적용한 안전관리 프로세스를 제안하고(Kim et al., 2013), BIM 기반의 떨어짐 사고 예방 시스템을 개발하는(Lee, 2020) 등의 다양한 연구들이 진행되고 있다. 그러나 기존의 연구들은 위험성 평가보다는 위험요소를 BIM으로 모델링 및 가시화하여 사용자의 의사결정을 지원하거나, 안전법규 등의 자동검토를 지원해 주는데 한정되어 있으며, BIM으로 위험성 평가 자체를 진행하는 연구는 상대적으로 미흡한 실정이다. BIM을 위험성 평가 분야에 적용하기 위해서는 BIM 속성정보와 위험성 평가를 위한 데이터와의 연계, BIM 기반의 위험요소 도출, 정량적 위험도 산정 및 저감 대책의 적용이 필요하지만, 현재 안전관리 분야에서의 BIM 활용은 저조하며 사고 데이터들이 체계적으로 관리되지 못하고 있으므로 어려운 실정이다.

따라서 본 연구는 정량적으로 위험요소를 도출하여 리스크를 조기에 식별하고 사전제거하기 위한 방법론으로 위험성 평가 분야에 BIM을 활용하여 수행자의 판단을 객관적으로

로 보조하는 모델을 제안하고자 한다. 이는 미경험 작업에 대한 시공 작업자의 안전성을 증대시키며, 향후 BIM을 활용한 위험성 평가 분야의 기반 기술이 될 것을 기대한다.

1.2 연구의 범위 및 방법

2020년 건설산업재해 사고사망자는 떨어짐(37.2%, 328명) 사고의 비율이 가장 높으며, 본 연구에서는 제안하는 모델의 정확도와 활용 가능성을 검증하기 위해 떨어짐 사고로 범위를 한정하여 위험요소를 분석한다. 본 연구의 수행 프로세스는 다음과 같다(Fig. 1).

위험성 평가 DB(Data Base)의 체계를 구축하기 위해 국토교통부와 국토안전관리원이 함께 구축한 건설공사 안전관리 종합정보망(Construction Safety Management Integrated Information; CSI)의 위험요소 프로파일 DB를 참고하였으며, 이 DB와 BIM을 자동으로 연계하는 방안과 BIM 형상정보를 기반으로 위험 공간을 자동으로 추출하는 알고리즘 및 위험도 저감 대책을 적용하는 모델을 제안한다. 이러한 모델의 현장 적용성을 검증하기 위해 전문가 및 실무진을 대상으로 설문 조사를 진행하였으며, 설문 결과를 IPA, GAP 기법을 통해 분석하였다.

1.3 IPA, GAP 분석기법

IPA 분석기법은 Importance - Performance Analysis의 약자로 특정 요소에 대하여 Likert 척도를 기반으로 작성된 설문조사의 결과를 분석하고, 중요도(Importance)와 현행수준(Performance)을 도출하며 Y-X축으로 2차 평면상에 그래프로 각 항목을 표현하는 방법이다. IPA 분석기법은 각 항목에 대한 필요성의 평가가 가능하므로 그 차이를 쉽게 판단할 수 있다. 이렇게 작성된 IPA 그래프에 항목별 평균값을 도출하여 그 값을 기준으로 그래프를 사 등분 한다. 각각의 사분면에 대한 의미는 <Fig. 2>와 같다.

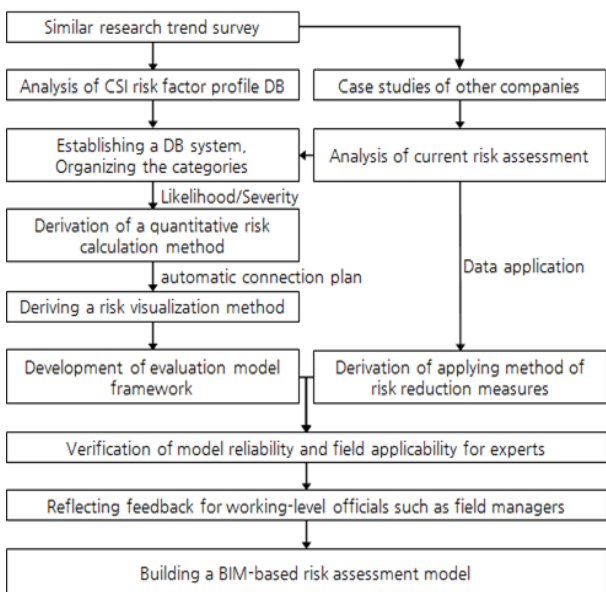


Fig. 1. BIM-based assessment model construction process

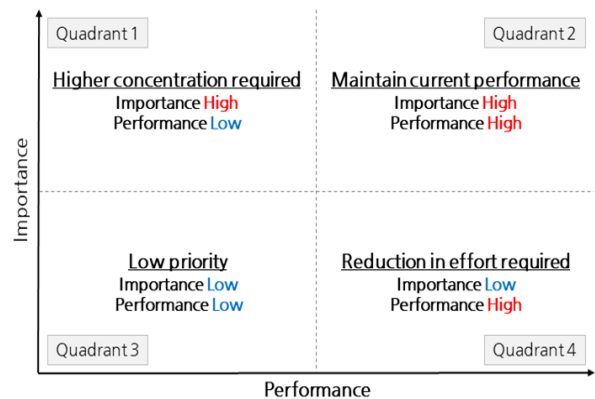


Fig. 2. Interpretation of IPA quadrants

- 1) 1 사분면 (우선 고려 필요) : 중요도는 높으나 현행수준이 낮은 영역으로 가장 우선으로 고려해야 한다.
- 2) 2 사분면 (현행 유지 필요) : 중요도와 현행수준이 모두 높은 영역이며 현행수준을 유지해야 한다.
- 3) 3 사분면 (노력 불필요) : 중요도와 현행수준이 모두 낮으므로 별도의 노력을 기울일 필요가 없다.
- 4) 4 사분면 (노력 저감 필요) : 중요도에 비해 큰 노력이 투입되었으므로 이 영역에 해당하는 항목에 대한 노력은 저감하고 다른 항목에 투입하는 것이 효율적이다.

GAP 분석기법은 현재 위치(As is)와 미래 목표(To be) 사이의 차이(Gap)를 파악하여 그 원인을 분석하고 목표의 달성 및 차이를 줄이기 위해 해결방안을 도출하는 기법이다.

2. 예비적 고찰

2.1 위험성 평가 정의

위험요소(Hazard)와 위험성(Risk), 위험성 평가(Risk Assessment)에 관하여 많은 정의가 있다. CSI (2022)에 의하면 위험성을 사고의 발생빈도와 심각성이라고 정의하였으며, 저감 대책(Alternative)을 위험요소와 위험성을 낮출 수 있는 방지대책이라고 정의했다. 그리고 대부분의 안전관리 지침에 의하면 위험은 재해의 발생 가능성과 강도를 조합하는 것이며(Go & Kim, 2004), 위험에 내포된 발생 가능성과 강도를 도출하여 위험의 크기를 예측하는 것으로 정의한다(Lee et al., 2009).

본 연구에서는 사고의 발생빈도(Likelihood)와 사고의 심각성(Severity)을 산정 및 조합하여 종합적인 위험성(Risk)을 도출하고 저감 대책(Alternative)을 적용하여 위험도를 저감 하는 것을 위험성 평가(Risk Assessment)로 정의한다.

2.2 선행연구 고찰

기존의 BIM 기반의 안전관리 및 위험성 평가 연구들은 BIM을 활용하여 위험을 사전에 식별하고, 위험요소를 가시화하는 방안을 제시하였으며, 위험성 평가 과정에서 위험도를 정량적으로 산정하는 방안을 제시하였다. 이러한 선행연구들을 분석하여 각 연구의 공통점과 차이점을 기준으로 비교하였다(Table 1).

그러나 BIM을 활용하여 위험요소의 식별을 자동화한 연구들은 위험도 도출 및 저감 과정에서 수행자의 주관이 개입될 수 있는 문제점을 해결하지 못했고, 반대로 위험성 평가를 정량화한 연구들은 위험을 사전에 파악하지 못해 위험 제거 비용이 상승하는 문제를 해결하지 못했다.

본 연구는 위험성 평가 분야에 BIM을 활용하여 자동화와 정량화를 모두 확보함으로써 위험을 사전에 제거하고 수행

Table 1. Literature review of BIM-based risk assessment

(*●: specifically reflected, ▲: partially reflected, X: not reflected)

Classification	Category	Automation			Risk Quantification	Author
	Detail	Using BIM	Risk pre-action	Visible risk factors		
Risk assessment	Safety management on site	●	X	▲	X	Kim et al. (2013)
	Risk assessment	●	▲	X	▲	Kim & Lee (2019)
	Risk calculation	X	▲	X	●	Lee et al. (2009)
	Risk assessment index	X	▲	X	●	Park & Han (2018)
	Safety management system	●	X	●	X	Ju (2017)
	Risk management	●	●	X	▲	Yang Zou et al. (2017)
	Risk factors for construction safety	●	▲	X	▲	Hassan, M. et al. (2016)
Hazard management	Design for safety review	●	●	▲	X	Cho & Jo (2013)
	Automatic review of construction laws	●	X	X	●	Goh & Lee (2016)
	Safety railing design guide	●	▲	▲	X	Lee (2020)
	4D BIM Safety Management	●	X	●	X	Kim et al. (2017)
	fall hazard prevention	●	▲	●	X	Sijie et al. (2015)
	Methodologies of safety risk control	●	●	▲	X	Meng et al. (2018)

자를 객관적으로 보조하는 모델을 제안한다.

2.3 현행 위험성 평가 기법 분석

본 연구에서 제안하는 모델의 차별성인 위험성 평가의 자동화와 정량화를 확보하기 위해 현재 위험성 평가에 활용되고 있는 다양한 기법들을 분석하여 비교하였다(Table 2).

비교 분석은 '위험 식별의 자동화 시 활용 가능' 여부와 '위험의 정량적인 평가'를 기준으로 진행하였다.

비교 결과 두 기준을 모두 충족하는 기법은 없었으며, 정량적인 위험도의 산정이 가능한 기법이 적음을 알 수 있다. 이는 위험도의 산정 시 수행자의 주관이 개입됨으로써 위험요소의 중복 및 누락 등의 휴먼 에러가 발생 가능하며, 수행자의 지식과 경험에 의존하기 때문에 신기술 및 신공법 등의 경험해보지 못한 공사에 대한 위험성 평가의 효용성이 떨어지게 된다.

Table 2. Comparing current risk assessment techniques (revised from Song (2019))

(*●: specifically reflected, ▲: partially reflected, X: not reflected)

Analysis technique	Full name	Risk pre-action	Risk Quantification
	Overview		
HAZOP	Hazard and Operability Studies	●	X
	Using Guide Word, use Brain Storming method		
JSA	Job Safety Analysis	X	X
	Identify and prevent potential accidents step by step		
HEA	Human Error Analysis	●	▲
	The operator evaluates the factors that will affect the work (design changes, etc.)		
K-PSR	KOSHA-Process Safety Review	X	X
	Review or analyze process safety after risk assessment		
Checklist	Coordinate and verify projects using the reference sheet (Checklist)	●	X
What-if	Predicting and responding to results assuming that an event occurs	●	X
PHA	Preliminary Hazard Analysis	●	X
	Prior to other risk analyses, estimating possible potential risks		
CCA	Cause-Consequence Analysis	●	▲
	Predicting the outcome and causal relationship of potential accidents		
FMECA	Failure Modes Effects and Criticality Analysis	▲	▲
	Identify systems and facilities that directly cause serious accidents		
FTA	Fault Tree Analysis	▲	●
	Identify the cause of an accident for a specific accident to occur		
ETA	Event Tree Analysis	●	▲
DMI	Dow and Mond Indices	●	X
	Provide a simple and direct relative risk ranking for chemical plant risks		
LOPA	Layer of Protection Analysis	●	▲
	Recurring risk assessment for a specific accident scenario		
CA	Consequence Analysis	X	●
	Calculation of the extent of damage impact in the event of an accident		

3. BIM 기반 위험성 평가 모델 프레임워크

본 연구는 BIM을 활용한 위험성 평가 모델의 방법론을 제안하는 것을 목적으로 한다(Fig. 3).

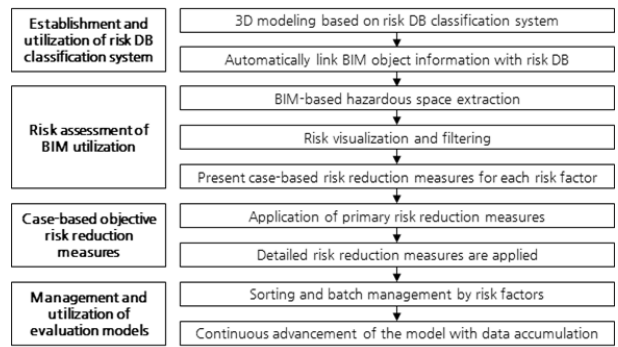


Fig. 3. BIM-based Risk Assessment Model Framework

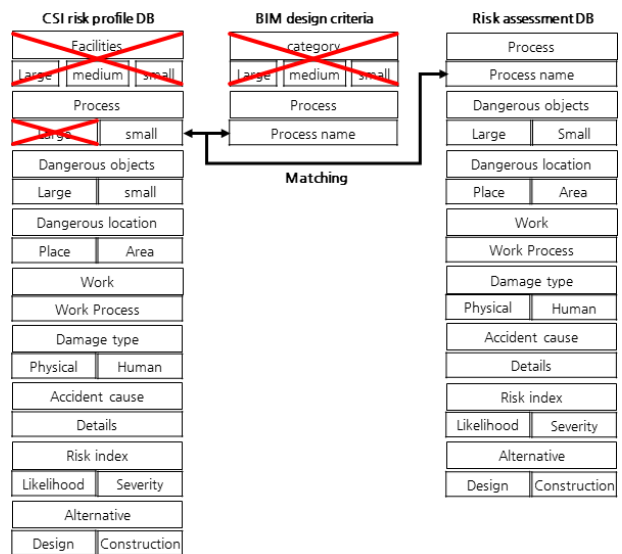


Fig. 4. Automatic connection between BIM and DB

3.1 위험요소 DB 분류체계 구축

본 연구에서 제안하는 위험요소 DB 분류체계는 실제 사고사례 데이터를 기반으로 구축되지만, 현재 사고사례 관련 데이터가 축적되어있지 않기 때문에, CSI에서 구축한 위험요소 프로파일 데이터를 활용하여 위험요소 DB의 분류체계를 구축한다(Fig. 4).

CSI는 2020년부터 중앙정부 기관을 통해 수집된 건설사고 사례를 분석하고 재발방지대책을 수립하여 현재까지 총 62,577건의 DB를 축적하였으며, 이를 공유함으로써 사고를 방지하는 시스템을 구축하고 있다. 이렇게 구축된 위험요소 데이터와 위험성 평가 대상의 BIM 설계기준을 분석하고 위험성 평가에 불필요한 시설물 항목 등의 카테고리를 변경 및 제거한다. 이후 카테고리의 변경 및 제거에 따라 불필요해진 데이터들과 중복 및 유사 항목들을 제거한다. 마지막으로 기존 공종명을 매칭하여 위험성 평가 DB의 공종명으로 개선한다. 이렇게 구축된 위험요소 DB는 BIM 속성정보에 사고 및 조치사례가 연계되어 BIM 객체에 해당하는 위험요

Table 3. Example of BIM to risk information matching

Example 1			
BIM	Process name		
	Steel structure	BH-Beam	
	Object height		
	8.5m		
Risk	Dangerous object		
	Steel object		
	Dangerous location		
	Place	Area	
	Internal	Upper	
	Work process		
	Installation operations		
	Damage type		
	Physical damage	Personal damage	
	Collapse	Falling (5m~10m)	
	Accident cause		
	Failure to prevent falls		
	Risk index		
	Likelihood	Severity	Risk
	M(2)	H(4)	H(8)
Alternative			
Design phase	Construction phase		
Reflections on design of safety belt attachment equipment	Installation of safety railing, securing movement line		
Example 2			
BIM	Process name		
	Reinforced concrete	RC-Slab	
	Object height		
	12m		
Risk	Dangerous object		
	Slab		
	Dangerous location		
	Place	Area	
	Internal	Floor	
	Work process		
	Placing		
	Damage type		
	Physical damage	Personal damage	
	Rupture	Falling (More than 10m)	
	Accident cause		
	Openings cover and fall protection facility not taken		
	Risk index		
	Likelihood	Severity	Risk
	M(3)	H(4)	H(12)
Alternative			
Design phase	Construction phase		
Reflect cover connection joint to the design drawing	Confirmation of safety measures at dangerous places for falls		

소와 위험도 및 저감 대책 데이터를 연결한다(Table 3).

BIM 설계 시 작성되는 객체의 속성정보와 바닥으로부터의 고도를 바탕으로 DB의 유사 사례 데이터 위험정보와 연결한다. 또한, 해당 부재의 위험도를 산정하며 적절한 위험 저감 대책을 도출한다. 산정된 위험도에 대한 허용 여부 및 저감 대책 수립 여부는 건설 안전 전문가 등에게 자문을 얻어야 하며 발주자와 협의하여 결정해야 하므로 현장의 규모와 건물의 용도 등에 따라 다양하게 설정된다. 그러나 본 연구는 CSI의 사고사례 데이터를 활용하여 위험성 평가 모델을 제안하고 있으므로 CSI에서 활용한 위험성 평가 방법을 기반으로 수정 및 보완된 위험성 평가 매트릭스를 구성하여 활용한다(Table 4).

Table 4. Risk assessment matrix

Risk assessment matrix (4x4 matrix)				
Likelihood \ Severity	L(1)	M(2)	M(3)	H(4)
L(1)	1 (Acceptable)	2 (Acceptable)	3 (Acceptable)	4 (Minor hazard)
M(2)	2 (Acceptable)	4 (Minor hazard)	6 (Minor hazard)	8 (Critical risk)
M(3)	3 (Acceptable)	6 (Minor hazard)	9 (Critical risk)	12 (Unacceptable)
H(4)	4 (Minor hazard)	8 (Critical risk)	12 (Unacceptable)	16 (Unacceptable)

사고의 발생빈도와 심각성은 4단계로 각각 1(낮음), 2(중간), 3(중간), 4(높음)로 구성되며 위험도에 따라 관리기준을 다르게 하여 감소대책의 기준으로 삼는다.

- 1) 허용 가능 (1~3) : 무시할 수 있는 위험이며 안전대책이 전혀 필요 없는 위험이다.
- 2) 경미한 위험 (4~6) : 교육 및 관리대책이 필요하지만, 위험작업을 수용하며 현 상태로 작업이 가능하다.
- 3) 중대 위험 (8~9) : 현재 위험이 없으면 작업 수행이 가능하지만, 긴급 안전대책을 수립 등의 안전활동 실시 후에 작업이 가능하다.
- 4) 허용 불가능 (12~16) : 위험작업을 허용하지 않으며 작업을 즉시 중단한다.

3.2 BIM - DB 자동연계

앞서 구축한 위험성 평가 DB는 BIM 모델의 속성정보와 자동으로 연계되어 그 과정에서 발생하는 추가작업을 감소시킬 수 있다. Autodesk에서 무료로 배포하는 애드온인 Sheet Link를 활용하면 BIM과 Excel 간의 내보내기(Export)/가져오기(Import)가 가능하다. 이 기능을 활용하여 BIM 속성정보를 Excel로 내보내고 여기에 해당하는 위험성

평가 DB의 위험 데이터를 입력한 뒤 다시 BIM에서 Excel을 가져오면 BIM 속성정보에 위험정보가 삽입된다. 이러한 과정을 Plug-In 및 Add-on 등을 통하여 자동화시키면 BIM을 활용한 위험성 평가의 업무를 효과적으로 단축할 수 있다 <Fig. 5>.

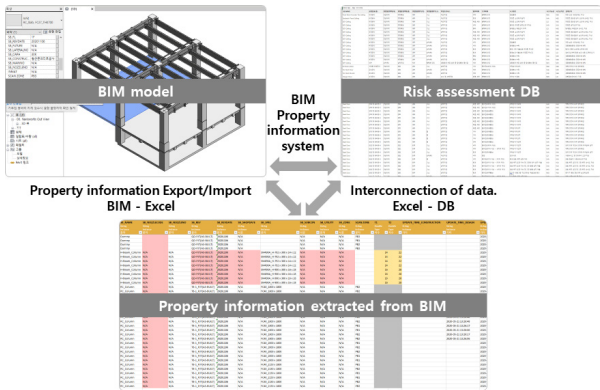


Fig. 5. Automatic connection between BIM and DB

3.3 BIM 기반 위험 공간 추출 및 가시화

건설 프로젝트의 모든 위험을 식별하기 위해 지나친 비용을 투입하는 것은 비효율적이므로 자동화된 시스템을 통해 위험을 식별하는 방법의 도입이 필요하다(Kim et al., 2010).

Lee (2020)는 BIM의 형상정보를 이용하여 떨어짐 위험 공간을 추출하고 안전난간 설계 가이드를 제시하는 시스템을 제안하였다. 해당 연구에서는 ‘산업안전보건기준에 관한 규칙’을 기준으로 하였으나, 본 연구에서는 앞서 제시한 위험성 평가 매트릭스의 위험 강도를 기준으로 활용하여 설계한 떨어짐 위험 공간 추출 알고리즘을 제안한다(Fig. 6).

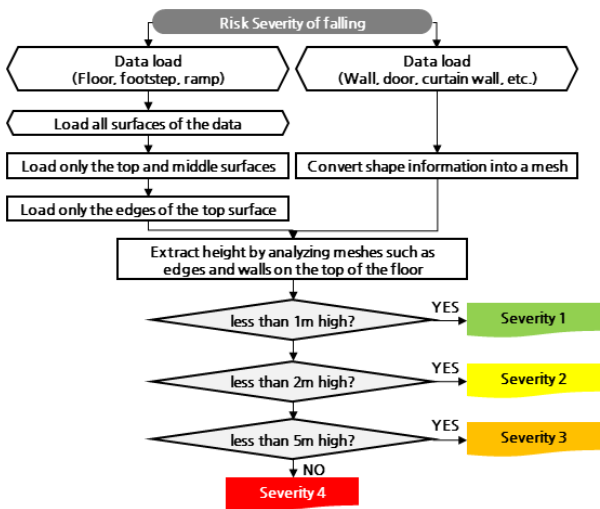


Fig. 6. Hazardous space extraction algorithm (revised from Lee (2020))

앞서 산정한 위험 강도 기준인 떨어짐 고도를 추출하기 위해 BIM의 형상정보 중 상단부 바닥 부재의 상단 표면 모서리만 가져와 벽 등의 Mesh를 분석하여 고도를 도출한다. 이 고도를 앞서 산정한 떨어짐 위험 강도 기준으로 위험 강도 및 위험 공간을 자동으로 추출할 수 있다(Fig. 7).

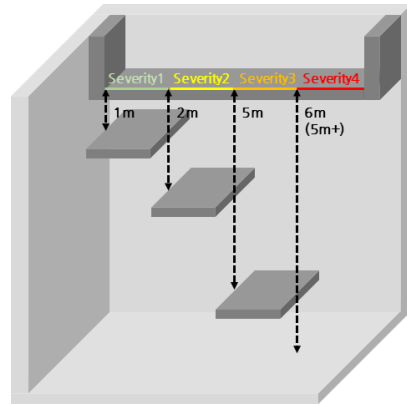


Fig. 7. Example model of hazardous space extraction

강도 1은 녹색, 강도 2는 노란색, 강도 3은 주황색, 강도 4는 빨간색으로 해당 부재 위에 표현된다. 추출된 위험 공간은 <Fig. 8>과 같이 위험 강도별로 필터링이 가능하며, 필요에 따라 선택적으로 가시화하여 활용할 수 있다.

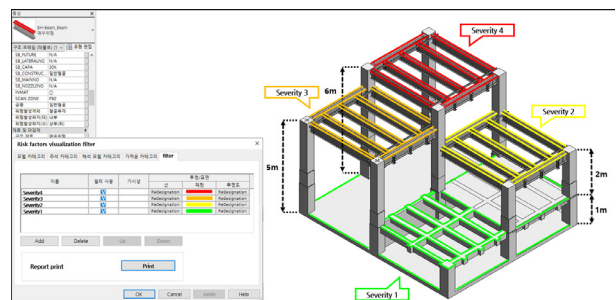


Fig. 8. Example of hazardous space extraction

3.4 위험요소별 위험도 저감 대책 제시 및 적용

위험요소 DB와 연계되어 자동으로 입력된 정보에 해당하는 위험 강도 및 위험정보 데이터가 출력된다. <Fig. 9>는 6m 고도의 철골에 대한 위험정보 제시의 예시이고 위험 강

Work process	Damaged	Injured	Cause	Likelihood	Severity	Risk	Alternative (Design)	Alternative (Construction)
Installation work	None	Falling (5m-)	No action to prevent falls	H(4)	H(4)	16	Apply	More
Connection work	Falling	Falling (5m-)	Without a life line	M(3)	H(4)	12	Apply	More

Fig. 9. Example of suggesting measures to reduce risk

도가 4(높음)이며 이에 따라 위험빈도가 적용된 종합 위험도 지수가 각각 16(수용 불가능), 12(중대 위험) 이다.

수행자는 이렇게 출력된 정보를 기반으로 현장의 위험도 및 특성을 반영하여 도출된 위험요소에 따라 설계단계 및 시공단계 위험도 저감 대책을 선택함으로써 적용할 수 있다.

(Fig. 10)은 철골 부재 설치작업에 대한 위험도 저감 대책의 적용 예시로 떨어짐 위험의 사고 원인인 '추락방지 미조치'의 시공단계 저감 대책인 '안전대사용에 관한 기술지침 준수'를 적용하고, 연결작업에 대한 낙하 위험의 사고 원인인 '구멍줄 미설치'의 시공단계 저감 대책인 '안전대 부착설비 사전설치'를 적용한다. 위험도 저감 대책 적용 이후 위험도는 12(중대 위험), 8(중대 위험) 으로 감소한다.

그러나 위험 발생 강도가 4(높음)인 위험요소에 대한 위험도였으므로 1차 위험도 저감 대책을 적용하였음에도 여전히 높은 위험도를 유지하고 있다. 이에 대한 추가적인 위험도 저감 대책의 적용이 필요하다.

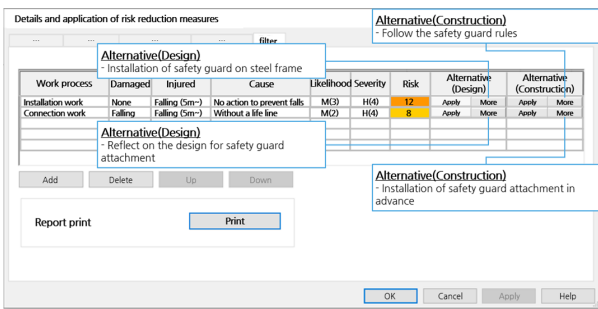


Fig. 10. Example of applying risk reduction measures

3.5 세부 위험도 저감 대책 적용

앞서 적용한 저감 대책을 포함하여 해당 위험요소에 대한 모든 위험도 저감 대책을 제시하며 선택된 현재의 조치에 현장의 특성 및 여건 등을 고려하여 추가적인 저감 대책을 선택해 적용하여 위험도를 저감 할 수 있다.

(Fig. 11)은 위험요소에 대한 모든 저감 대책을 적용하여 위험도를 모두 4(경미한 위험) 까지 저감하는 예시이며, 일반적으로 추가적인 안전대책을 실시하지 않고 허용되는 작업의 수준으로 저감되었다.

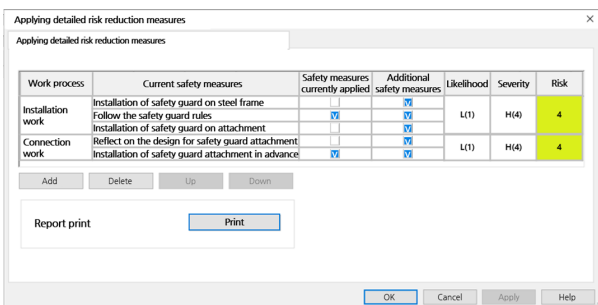


Fig. 11. Example of applying detailed risk reduction measures

3.6 위험요소별 정렬 및 일괄 관리

저감이 완료되었거나 저감이 필요한 위험요소들은 위험도 및 분류 항목에 따라 정렬할 수 있고 필요한 정보만 필터링하여 열람하거나 일괄적으로 관리할 수 있어 안전관리 측면에서도 유용하게 사용할 수 있다.

4. 평가 모델 활용성 검증

4.1 설문 개요

본 연구에서 제안하는 위험성 평가 모델을 적용하였을 때

Table 5. Model evaluation items and contents

Evaluation items	Code	Content
Establishing a risk assessment DB classification system (A)	A-1	Adaptability of data All incidents can be categorized by risk
	A-2	Presenting standards for business performance Increase the understanding of workers and safety management
	A-3	Scalability of the classification system Facilitate operations when adding new incident case data
	A-4	Minimize omission of work Clear item classification reduces omission of critical tasks
	A-5	Continuous advancement Improve the usability of DB with continuous data accumulation
Quantitative risk calculation and reduction measures are applied (B)	B-1	BIM - DB Automatic Connection Automatically link BIM to DB to simplify tasks
	B-2	Dangerous space extraction Extracting hazardous space based on BIM shape information
	B-3	Visualizing risk factors Increase worker accessibility through visualization of extracted risk
	B-4	Quantitative risk Quantity of BIM-based risk calculation
	B-5	Objectivity of reduction measures Objectivity of presenting case-based risk reduction measures
	B-6	Reduction measures are applied Convenience and efficiency of risk reduction measures
Performance of risk assessment model (C)	C-1	Increase work safety Quantitative and objective risk reduction
	C-2	Reduce the cost of safety measures Eliminate risk from the earliest stages of cost
	C-3	The applicability of the model Can be applied to new construction methods
	C-4	Semi-permanent model Complemented by constantly accumulating data
	C-5	Smooth communication Improve participants' on-site understanding and ability to review
C-6	Proof of safety activities Report risk reduction processes and records	

기대되는 효과들을 평가하여 모델의 활용성을 검증하기 위해 현장 안전관리 담당자, BIM 관련 업무 수행자, 설계 및 시공 감리, 안전 공사기술 개발 분야 등의 실무진 총 22명을 대상으로 설문조사를 진행하였다<Table 5>.

설문 내용은 총 17개 항목으로, 모델의 장점 및 차별성, 성능 등의 관련된 내용으로 구성하였다.

4.2 설문 결과 분석

앞서 구성한 모델의 활용성 평가 17개 항목의 중요도와 현행수준을 Likert 7점 척도를 활용하여 파악한 후 IPA 분포도를 도출하였다<Fig. 12>.

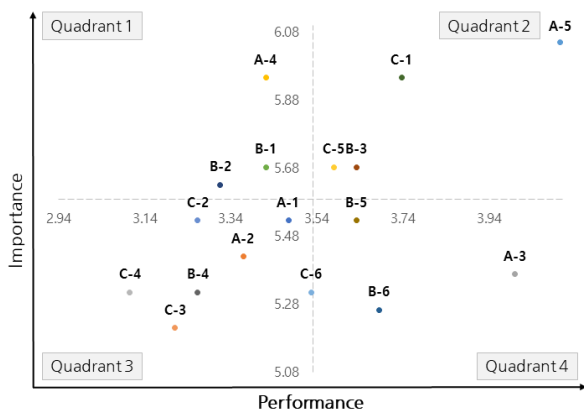


Fig. 12. IPA distribution chart

전체 설문 결과의 중요도 평균값인 5.55와 현행수준 평균값인 3.51을 기준으로 분포도를 사 등분 한다. 항목의 필요성에 대한 우선 고려 순위를 도출하기 전에 중요도 대비 현행수준을 파악하기 위해 중요도와 현행수준의 차를 구하여 그 값을 기준으로 GAP 그래프를 작성하였다<Fig. 13>.

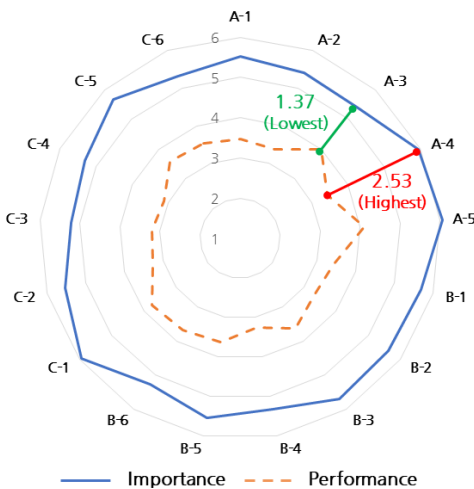


Fig. 13. GAP analysis graph

Table 6. Model evaluation items and contents

Ranking	Content	Importance	Performance	GAP
1	A-4	5.95	3.42	2.53
2	B-2	5.63	3.32	2.32
3	B-1	5.68	3.42	2.26
4	C-2	5.53	3.26	2.26
5	C-1	5.95	3.74	2.21
6	C-4	5.32	3.11	2.21
7	C-5	5.68	3.58	2.11
8	A-2	5.42	3.37	2.05
9	B-4	5.32	3.26	2.05
10	A-1	5.53	3.47	2.05
11	B-3	5.68	3.63	2.05
12	C-3	5.21	3.21	2.00
13	A-5	6.05	4.11	1.95
14	B-5	5.53	3.63	1.89
15	C-6	5.32	3.53	1.79
16	B-6	5.26	3.68	1.58
17	A-3	5.37	4.00	1.37

<Table 6>과 같이 [A-4: 업무 누락 최소화] 항목의 GAP이 2.53으로 가장 높았다. 이는 중요도 대비 현행수준이 매우 낮음을 의미하며 모델의 특징 중 가장 필요성이 높은 항목임을 의미한다. 반면에, [A-3: 분류체계의 확장성] 항목의 GAP이 1.37로 가장 낮았다. 이는 중요도와 현행수준의 차이가 비교적 작으며 해당 분야에 대해 모델을 보완하는 노력이 필요치 않음을 의미한다. 또한, 앞서 IPA 분포도를 통해 각 항목의 우선 고려가 필요한 항목과 노력의 저감이 필요한 항목 등 고려의 우선순위를 도출하였으나, 이는 본 모델의 항목 간 상대적인 순위일 뿐 GAP 분석 결과에서 알 수 있듯이 모든 항목의 현행수준이 중요도보다 부족하므로 실질적으로는 모든 항목에 고려가 필요함을 알 수 있다.

GAP 분석 결과를 IPA 분석 결과에 적용하여 고려 우선순위를 중심으로 설문 분석 결과를 도출하였다<Table 7>.

모델의 평가 항목 중 1 사분면에 위치하며 현행수준이 비해 중요도가 높아 우선으로 고려되는 항목은 3가지로 [A-4: 업무 누락 최소화], [B-2: 위험 공간 추출], [B-1: BIM-DB 자동연계]이다. 항목을 명확하게 분류함으로써 같은 항목의 다른 이름, 혹은 다른 항목의 같은 이름 등의 이유로 누락되는 중요 업무를 저감하고, BIM 형상정보와 DB 위험정보의 자동연계를 통한 작업의 간소화 방안 항목이 고려 우선순위가 가장 높으며 이는 위험성 평가의 정확도 향상과 추가작업의 간소화가 실무진들의 핵심 가치임을 알 수 있다. 반면에 4 사분면에 위치하며 중요도에 비해 현행수준이 낮아 노

Table 7. Questionnaire analysis results

Category	Ranking	Code	Content	GAP
First of all, considerations	1	A-4	Minimize omission of work	2.53
	2	B-2	Dangerous space extraction	2.32
	3	B-1	BIM - DB Automatic Connection	2.26
Current maintenance	4	C-1	Increase work safety	2.21
	5	C-5	Smooth communication	2.11
	6	B-3	Visualizing risk factors	2.05
	7	A-5	Continuous advancement	1.95
No effort needed	8	C-2	Reduce the cost of safety measures	2.26
	9	C-4	Semi-permanent model	2.21
	10	A-2	Presenting standards for business performance	2.05
	11	B-4	Quantitative risk	2.05
	12	A-1	Adaptability of data	2.05
	13	C-3	The applicability of the model	2.00
	14	C-6	Proof of safety activities	1.79
Reduction in effort	15	B-5	Objectivity of reduction measures	1.89
	16	B-6	Reduction measures are applied	1.58
	17	A-3	Scalability of the classification system	1.37

력의 저감이 필요한 항목은 [B-5: 저감 대책 객관성], [B-6: 저감 대책 적용], [A-3: 분류체계의 확장성]이다. 이는 즉각적인 활용에 유용하지 않거나 평가자의 주관이 완전히 배제되는 항목에 비교적 노력이 덜 필요하다는 의미이다. 이는 앞서 제시한 사례기반의 위험도 저감 대책 제시 방안이 수행자가 경험해보지 못한 작업에 대해 객관적으로 보조하는 것이 목적이었으나, 경험 작업에 대한 요령과 노하우 등의 주관 또한 배제될 수 있다는 결론을 도출하였다. 따라서 추가적으로 위험성 평가 수행자의 의견을 입력하는 등의 방식으로 주관적인 내용을 적용할 수 있는 방안의 고려가 필요하다라는 결론을 도출하였다. 또한, 실제 사례를 기반으로 저감 대책을 제시하는 모델로 현재 데이터를 축적하고 있지 않기 때문에 저감 대책에 대한 객관성이 부족한 것으로 평가되었으나, 데이터가 축적되며 최적화될수록 정확도 및 객관성이 보완될 것으로 기대된다.

5. 결론

본 연구는 기존 위험성 평가의 한계점인 작업 직전 리스크 식별과 수행자의 주관 개입 등을 개선하기 위해 위험성 평가 분야에 BIM을 적용하여 정량적으로 위험요소를 도출함으로써 리스크를 조기에 식별하고 사전제거할 수 있는 모델을 제안하였다.

기존 평가방식의 문제점을 도출하기 위해 국내·외 BIM

을 활용한 안전관리 및 위험성 평가 관련 연구를 분석 및 비교하였으며, 현행 위험성 평가 기법들을 분석 및 비교한 결과 BIM을 활용한 위험성 평가의 자동화와 위험도 산정의 정량화 등의 요소들을 모두 확보한 방안은 없었다. 본 연구에서는 이러한 요소들을 모두 확보하기 위해 CSI의 공신력 있는 데이터를 활용하여 위험요소 DB 분류체계를 구축하였으며, BIM과 DB와의 자동연계 방안과 BIM 기반 위험 공간 추출 알고리즘 및 가시화 방안을 제시하여 불필요한 추가작업을 최소화하였다. 또한, 사례기반 위험도 저감 대책 제시 및 적용방안을 제안하고, 이렇게 저감된 위험요소 데이터를 필터링하여 일괄 관리가 가능한 방안으로 리스크를 사전 제거하여 안전관리 분야의 추가비용을 절감할 수 있으며, 프로젝트 참여자들의 이해도를 높이고 의사소통의 도구로서 활용될 수 있다. 이러한 BIM 기반 정량적 위험성 평가 모델의 프레임워크를 실무진을 대상으로 활용성을 평가한 결과 본 모델을 활용한다면 가장 높은 필요성을 보인 기능 3가지인 [A-4: 업무 누락 최소화], [B-2: 위험 공간 추출], [B-1: BIM-DB 자동연계] 항목을 총 7점 중 현행수준의 평균인 3.39(48%)점에서 평균 5.75(82%)점으로 약 2.37(34%)점 정도를 증가시킬 수 있다. 또한, 작업의 이해도를 높이고 경험해보지 못한 공법에 적용되는 기능 3가지인 [B-3: 위험요소 시각화], [C-3: 모델의 적용성], [C-5: 의사소통 원활화] 항목을 현행수준 평균 3.47(50%)점에서 평균 5.52(79%)점으로 약 2.05(29%)점 정도를 증가시킬 수 있어 신기술 및 신공법에도 유효할 것으로 기대된다. 마지막으로 이러한 위험성 평가 모델은 수행자의 판단을 객관적으로 보조할 수 있으며, 이는 시공 작업자의 안전성을 증대시키고 신기술 및 신공법의 도입에 대한 부담을 덜어 건설기술 발전에 기초 연구로서 활용될 것으로 기대한다.

본 연구에서는 위험성 평가 분야에 BIM 활용을 위해 위험요소 DB 분류체계를 제안하였으나, 자체적으로 사고사례 데이터를 축적하고 있지 않았기 때문에 CSI의 위험요소 프로파일 DB를 기반 데이터로 활용하였다. 그러나 CSI의 DB는 전반적인 건설공사의 재해에 초점이 맞추어져 있으며, 본 모델을 최적화하여 활용하려면 자체적으로 사고 및 조치사례를 축적하여 DB를 구축하고 이를 기반으로 평가하여야 충분한 객관성을 확보할 수 있다. 또한, 본 연구에서는 전체 산업재해의 약 40%로 상당히 높은 비율을 차지하는 떨어짐 사고만을 한정하여 위험 공간 추출 방안을 제안하였으므로 향후 모델의 고도화를 위해서는 끼임, 흡입/접촉, 화재/폭발, 질식, 감전 등 다른 리스크들에 대한 BIM 활용 위험성 평가 방안을 도출해야 한다. 마지막으로 본 연구는 현행 분석 및 현장 적용성 확보를 위해 대상을 선정하고 분석하여 최적화된 모델을 제안하였고 실무진의 설문을 통해 평가 모델의

신뢰도를 검증하였으나, 다양한 특징을 가진 업체들을 대상으로 테스트하거나 실제 현장에 적용하여 위험성 평가를 진행하고 그 결과와 피드백을 통해 모델을 보완한다면 모델의 고도화와 현장 적용성을 확보할 수 있을 것이다.

감사의 글

이 논문은 삼성디스플레이(주) 지원을 받아 수행된 연구 결과입니다.

References

- Choi, J.W., Mun, J.S., Kim, J.A., Won, J.I., and Park, H.C. (2000). "Health Hazardous Substances in Construction Work in Korea." *Journal of Korean Society of Occupational and Environmental Hygiene*, 10(1), pp. 74-92.
- Construction Safety Management Integrated Information (2022). Hazard Profile.
- Go, S.S., Kim, J.U., and Lee, J.B. (2004). "A Study on the Improvement Counterplan of Construction Safety Management According to the Construction Magnitude." *Journal of the Korean Institute of Industrial Safety*, 19(1), pp. 108-116.
- Goh, J.H., Lee, D.Y., and Park, C.S. (2016). "A study on BIM aided automated code checking for construction safety management." *Proceedings of KICEM Annual Conference*, KICEM, pp. 145-146.
- Hassan, M., Abdollah, A., Mohammad, H.S., and Rudi, S. (2016). "Construction safety risk drivers: A BIM approach." *Safety Science*, 82, pp. 445-455.
- Ju, H.W. (2017). "BIM safety management system using risk assesment." MS thesis, Sungkyunkwan University, Seoul.
- Kim, H.S., Lee, H.S., Park, M.S., Lee, K.P., and Pyeon, J.H. (2010). "Hazardous Area Identification Model using Automated Data Collection(ADC) based on BIM." *Korean Journal of Construction Engineering and Management*, KICEM, 11(6), pp. 14-23.
- Kim, I.H., Lee, Y.H., and Choi, J.S. (2019). "BIM-based Risk Assessment of Structural Occurrence Disaster for Construction Site Safety Management." *Korean Journal of Computational Design and Engineering*, 24(2), pp. 144-151.
- Kim, T.H., Lee, D.H., Bae, S.I., Hong, Y.K., and Park, Z.S. (2013) "Proposal of field applied safety control process using BIM." *Journal of the Regional Association of Architectural Institute of Korea*, 15(5), pp. 243-249.
- Kim, Y.J., Kim, B.J., Kim, I.C., Lee, M.C., Choi, J.K., and Chin, S.Y. (2017). "Construction Safety Management using 4D BIM Tool." *KIBIM Annual Conference*, 7(1), pp. 101-102
- Korea Occupational Safety and Health Agency (2022). 2020 Industrial accident status analysis.
- Kwon, O.C., Cho, J.W., and Jo, C.W. (2013). "BIM Quality Assurance for DFS in Design Phase." *Transactions of the Society of CAD/CAM Engineers*, 18(5), pp. 348-358.
- Lee, C.J., and Ham, S.I. (2020). "Design Guide Systems of Safety Handrail based on Dfs and BIM for Preventing of Fall Accidents." *Journal of the Architectural Institute of Korea*, 36(10), pp. 235-241.
- Lee, H.S., Kim, H.S., Lee, K.P., Lee, S.B., and Park, M.S. (2009). "Construction Risk Assessment Methodology Using Site Risk Influence Factors." *Korean Journal of Construction Engineering and Management*, KICEM, 10(6), pp. 117-126.
- Meng, L., Hongliang, Y., Hongyu, J., and Ping, L. (2018). "Methodologies of safety risk control for China's metro construction based on BIM." *Safety Science*, 110(A), pp. 418-426.
- Park, H.P., and Han, J.G. (2018). "Development of Safety Risk Assessment Index and Risk Prediction System based on process in Construction Sites." *Korea Institute of Construction Technology*, KICT 2018-076.
- Sijie, Z., Kristiina, S., Markku, K., Ilkka, R., Charles, M.E., and Jochen, T. (2015). "BIM-based fall hazard identification and prevention in construction safety planning." *Safety Science*, 72, pp. 31-45.
- Son, C.B., Lee, D.C., and An, T.S. (2004). "A Study on the Subcontract Status and Its Development Directions of Domestic Construction Project." *Journal of the Architectural Institute of Korea*, 20(6), pp. 115-124.
- Song, J.T., and Lee, J.W. (2019). Risk Assessment and Analysis Techniques. *SUNG AN DANG*, INC. pp. 131-382.
- Yang, Z., Stephen, W.J., and Arto, K. (2017). "A review of risk management through BIM and BIM-related technologies." *Safety Science*, 97, pp. 88-98.

요약 : 건설산업의 중대재해 발생률 및 사망률이 가장 높아짐에 따라 이를 감축하기 위해 국내에서도 다양한 노력을 기울이고 있다. 그 중 위험성 평가는 시공단계 위험요소를 평가하고 재해 감소대책을 위한 자료로 활용되고 있다. 그러나 기존의 위험성 평가는 수행자의 주관에 개입되며 국내 건설현장에 취약한 측면이 있다. 본 연구는 위험성 평가 분야에 BIM을 활용하여 정량적으로 위험요소를 도출함으로써 리스크를 조기 식별하고 사전제거하는 것을 목표로 위험성 평가를 위한 DB 분류체계를 구축하였으며 BIM을 활용한 위험성 평가의 방법론을 제시한다. 이를 통해 리스크의 사전 제거로 시공 작업자의 안전성을 증대시키고 안전관리 분야의 추가비용을 절감한다. 또한, 신규 공법에도 적용 가능하므로 프로젝트 참여자들의 이해도를 높이며 의사소통의 도구가 된다. 본 연구는 BIM을 기반으로 정량적인 위험도를 도출하는 프레임워크를 제안하는 연구로써, 향후 BIM을 활용한 위험성 평가 분야에 기반 기술로 활용될 것이다.

키워드 : BIM, 위험성 평가, 위험요소 DB, 가시화
