

Graph RAG 기반 IFC-Graph 및 안전 기준 통합 작업자 추락 위험 객체 탐지 시스템

Graph RAG-Based Worker Fall Hazard Object Detection System Integrating IFC-Graph and Safety Regulations

○김 묘 선* 김 도 현** 이 상 훈***
Kim, Myo-Sun Kim, Dohyun Lee, Sanghoon

Abstract

This study proposes a Graph RAG-based system that integrates an IFC-Graph with safety regulations to detect worker fall hazard objects. Users can query in natural language to identify hazardous objects and the relevant regulations. The system leverages large language models to interpret and analyze the detected instances and map them to applicable safety regulations. Evaluation showed that slab openings achieved high precision and recall, while wall openings produced many false positives and double-height spaces had low recall, indicating the need for refined rules and contextual improvements. By integrating object information with safety regulations, the system contributes to improving construction site safety management.

키워드 : 건설안전, BIM, IFC-Graph, 추락사고, 그래프 검색증강생성

Keywords : Construction safety, BIM, IFC-Graph, Fall accident, Graph RAG

1. 서론

1.1 연구의 배경 및 필요성

건설 산업에서 추락은 가장 치명적이며 반복적으로 발생하는 사고 유형이다. 국내 통계에서도 건설 산업 사망재해에서 추락의 비중이 높게 나타나며(대한전문건설협회, 2025), 이는 건설 현장에서의 추락사고 예방을 위한 시스템의 도입이 요구됨을 의미한다. 현재 많은 연구가 진행되고 있는 카메라·센서·로봇을 활용한 현장 모니터링(Pereira et al., 2024)은 즉각적인 경고에 유용하지만, 난간 미설치, 개구부 등과 같이 시공 과정에서 유동적으로 발생하는 위험요소들은 즉각적인 경고만으로 대처가 어렵다.

현재의 위험 정보 전달은 도면을 기반으로 사람이 직접 검토하는 방식에 의존하는 경우가 많아 항목 누락과 판단 편차가 발생하기 쉽다(Chong et al., 2025). 또한, 식별된 위험 객체에 대한 조치사항을 확인하기 위해서는 별도의 안전 기준들을 각각 검토하여야 한다. 따라서, 작업자가

사전에 시각 자료를 통해 추락 고위험 구간을 누락 없이 쉽게 인지하고, 효율적으로 관련된 안전 기준을 검토할 수 있도록 지원하는 도구가 필요하다.

BIM은 건물 요소의 형상 및 속성 정보를 체계적으로 관리하고, 이해관계자 간 정보를 일관되게 공유할 수 있게 함으로써, 사전 안전 계획의 효율성을 높이는 도구로 활용이 가능하다. 하지만, BIM 내 데이터의 방대한 양과 그 복잡성으로 인해 필요한 정보를 효율적으로 탐색하는 것이 제한적이다(Zheng & Fischer, 2023). 최근 이러한 한계점을 해결하기 위해 대형언어모델(Large Language Model; LLM)과 BIM을 연계한 정보검색에 관한 연구가 활발히 진행되고 있다. 그러나, 대부분 정보검색에 초점이 맞춰져 있으며, 검색된 정보를 활용하여 안전과 연계된 통합적인 분석을 지원하는 연구가 미흡하다.

1.2 연구의 목적 및 절차

본 연구에서는 작업자의 추락이 우려되는 객체의 정보와 관련 기준을 쉽게 파악할 수 있도록, Graph RAG(Retrieval Augmented Generation)를 기반으로 IFC-Graph와 안전 기준을 통합한 시스템을 제안한다. 이를 위해, BIM을 그래프 형태로 재구조화하고 JSON 형태로 추출된 안전 관련 기준을 통합하여, 자연어를 통한 질의가 가능하도록 한다. 이를 통해, 추락 위험요소를 사전에 탐지하고 관련 기준을 함께 제시함으로써, 효율적인 사전 안전성 검

* 서울시립대학교 도시과학대학 건축공학전공 학사과정

** 서울시립대학교 대학원 건축공학전공 석박사통합과정 수료

*** 서울시립대학교 도시과학대학 건축학부 교수, 공학박사

(Corresponding author : Department of Architectural Engineering, University of Seoul, sanghoon.lee@uos.ac.kr)

이 연구는 2025년도 (주)건축사사무소건원엔지니어링 연구비 지원에 의한 결과의 일부임. 과제번호: 202507302002.

토를 지원한다.

연구의 절차는 다음과 같다. 첫째, IFC 모델에서 요소와 요소 간 관계를 정리하여 IFC-Graph를 구축한다. 둘째, 안전 관련 기준을 조항 번호·핵심 문장·기준·적용 범위·예외로 요약하여 JSON 문서로 전처리한다. 셋째, 사용자의 자연어 질의에 대하여 추락 위험 객체의 정보와 관련 기준을 통합한 답변을 제공할 수 있는 시스템 프로토타입을 개발한다.

2. 선행연구 고찰

2.1 선행연구 분석

본 연구 주제에 대한 선행연구는 크게 다섯 가지로 정리할 수 있다. 첫째, IFC 파일을 그래프 구조로 변환하여 공간, 구성 요소 간 관계를 정립하고, 이 데이터 구조를 기반으로 질의하고 분석하는 연구가 진행되었다(Zhu et al., 2023). 이는 IFC 파일의 데이터를 그래프화하여 공간 간의 연결성과 query의 효율성을 강조하였다. 둘째, 기준을 온톨로지/지식그래프로 모델링하여 자동 준수 검토를 시도하는 연구가 존재하며, 조항의 조건을 컴퓨터가 읽을 수 있는 형태로 전개하는 데 초점을 둔다(Winther Johansen et al., 2022). 셋째, LLM과 RAG, 또는 Graph RAG을 접목하여 IFC 데이터를 기반으로 질의응답을 진행하는 연구가 있다(Iranmanesh et al., 2025). IfcOpenShell 라이브러리를 이용하여 IFC 엔티티(entity), 관계, 참조 정보를 정리한 후 LLM을 통해 사용자가 대상 모델에 대해 질의응답이 가능하게 했다. 넷째, 건설 현장 안전 분야에서는 다중 센서 융합이나 로봇 내비게이션을 통한 실시간 위험 감지에 초점이 맞추어져 왔으며(Rao et al., 2022), 이는 폐쇄 환경에서의 객체 탐지 성공률 향상과 같은 현장 단계에서의 정밀화를 보여준다. 마지막으로 LLM이 IFC를 직접 해석하기 어렵다는 연구가 제시되었고, JSON 등 구조화 변환과 자연어 요약의 하이브리드 형태가 LLM의 해석, 검색 일관성에 유리하다는 비교 분석을 진행한 연구가 있었다(Ibba et al., 2025).

2.2 기존 연구의 한계점 및 본 연구의 차별성

기존 연구에서도 IFC 기반 안전 검토에 대한 다양한 시도가 있었으나, 다음과 같은 한계점이 여전히 존재한다. 첫째, 국내 안전 기준을 IFC 데이터와 직접 연결해 결과를 즉시 확인할 수 있게 한 사례가 부족하다. 둘째, 구체적인 안전 기준과 건물 정보를 함께 제시하는 것이 미흡하다. 셋째, 사용자의 자연어 질의에 대해 통합적으로 정보를 제공하고 직관적인 상호작용을 지원하는 데 한계가 있다.

본 연구는 이러한 한계점을 극복하기 위해, 국내 안전 기준과 BIM을 연계하여 추락 위험 객체를 탐지, 거거를 포함한 결과 제시, 그리고 자연어 질의 기반의 설명 가능 체계를 구현한다는 점에서 차별성을 가진다. 특히, BIM을 IFC 스키마에 따라 그래프 구조로 변환함으로써, 위치·관계 기반 검색을 효율적으로 수행할 수 있다는 점에서 기존 연구와 구별된다.

3. 그래프 데이터 기반 준수 검토 시스템

3.1 시스템 개요

본 시스템은 그림1과 같이 질의-검색-응답의 흐름으로 작동한다. 사용자가 자연어로 질문을 입력하면, 검색 모듈이 이를 핵심어로 분해하여 IFC-Graph와 기준에 대하여 query를 수행한다. 안전 기준은 JSON 구조로 관리되고, 관련 조항·기준·적용 범위가 검색된다. 이와 동시에 IFC-Graph로부터 객체 정보(GlobalId, 위치 정보)를 정의된 관계를 바탕으로 검색한다. 이후 검색된 기준과 객체 정보를 결합하여 LLM이 최종 응답을 생성한다.

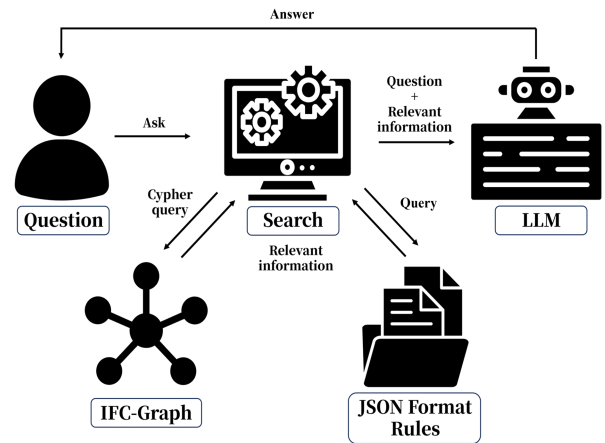


그림1. 시스템 프레임워크

3.2 IFC-Graph 구축

본 연구에서 구축한 IFC-Graph는 객체(instance)를 노드(node)로, 객체 간의 관계(relationship)를 엣지(edge)로 구성한다. 노드에는 IfcProject, IfcSite, IfcBuilding, IfcBuildingStorey와 같은 공간 위계뿐만 아니라, IfcSlab, IfcWall, IfcRailing, IfcOpeningElement, IfcDoor, IfcWindow, IfcStair 등 주요 건물요소가 포함된다. 각 노드는 GlobalId를 고유 식별자로 가지며, 층·공간 등 엔티티에 따라 각각의 형상 및 속성 정보를 함께 기록한다. 관계는 노드 간의 상호연결을 나타낸다. IfcRelVoidsElement는 IfcSlab과 IfcOpeningElement를 연결하여 개구부가 슬라브를 관통하고 있음을 나타내고, IfcRelSpaceBoundary는 벽·슬라브와 IfcSpace를 연결하여 경계 관계를 표현한다. 이러한 관계 정의를 통해 그래프 상에서 객체들이 어떻게 존재하고 있는지를 명확하게 확인할 수 있다(Zhu et al., 2023).

본 연구에서는 특히 개방부(Opening)와 오픈 스페이스(Double Height Space) 탐지를 주요 대상으로 선정했다. 따라서 슬라브에 연결된 개구부 관계(IfcRelVoidsElement), 공간 경계(IfcRelSpaceBoundary), 층 포함 관계(IfcRelContainedInSpatialStructure) 등이 시스템의 핵심 경로로 사용된다. 또한, query의 효율성을 높이기 위해 GlobalId 기반의 고유 식별 체계를 적용하고, 층 및 공간 정보를 통해 각 객체의 위치를 파악할 수 있게 하였다. 그래프 구축 후에는 중복 노드, 단절 관계, 누락된 위치 정보를 점검하여 query의 오류를 줄였다.

3.3 안전 관련 기준 전처리

IFC-Graph 와 기준을 연계한 답변 생성을 위하여, 일반적인 문서 형태의 자료를 JSON 형식으로 전처리하였다. 본 연구에서는 표준시방서 중 건축공사 일반사항(KCS 41 10 00) 제3.3(6)항 안전시설 조항과 안전보건규칙 제43조(개구부 등의 방호조치)를 기반으로 적용하였으며, 세부 항목을 난간 설치, 개구부 덮개, 안전표지 설치, 방호시설 설치 등으로 구분하였다. 이와 같이 문서를 재구조화하여 관리하면, 기준 내용이 개정되더라도 해당 항목만 수정하여 반영할 수 있다. 개정 주기가 빠른 건설 안전 기준의 특성을 고려할 때, 시스템의 유지관리를 용이하게 한다.

3.4 Graph RAG 및 응답

그림1의 검색 모듈은 추락 위험 객체 및 안전 기준 검색을 수행한다. 우선, 추락 위험 객체는 그래프DB(Neo4j)에 저장된 IFC-Graph 내에서 cypher query language를 통해 검색을 수행하며, 탐지 대상은 IfcOpeningElement뿐만 아니라 IfcDoor, IfcWindow 등 개방부로 해석될 수 있는 모든 객체로 확장하였다. 슬라브 개구부는 IfcRelVoidsElement의 VOIDS 관계를 통해 탐지하였다. 특히, 오픈 스페이스(Double Height Space)은 일반 층고 분포를 기준으로 이상치를 검출하는 방식으로 구분하였다. 평균과 표준편차를 이용한 Z-score, 사분위 범위를 이용한 통계적 기준(Song & Xia, 2024), 일반 층고 대비 배율(Multiplier rule)을 적용하였다. 이들 기준 중 두 가지 이상을 동시에 만족하는 경우를 강력 이상치(STRONG)로, 한 가지 조건만 충족하는 경우를 잠재 이상치(WEEK)로 분류한 후, 프롬프트에는 강력 이상치에 해당하는 값만 반영하였다. 또한 상부 슬라브 존재 여부를 검증하여(No Slab Above) 실제로 위층과 연속된 공간인지를 판단하였다.

안전 기준 검색은 JSON으로 정리된 안전 기준 데이터에서 각 조항의 번호와 조건을 불러와, IFC-Graph에서 탐지된 객체와 대조할 수 있는 검사 규칙으로 변환하는 것으로 시작된다. 이후, 검색된 추락 위험 객체의 속성과 위치 정보를 기준과 대조하고, 탐지된 객체의 Name을 LLM이 해석하여 관련 안전 규정을 연결한다. 최종 출력에는 대상 객체의 GlobalId, Name, 위치 정보(층·공간), 관련 규정이 포함된다.

본 시스템은 IFC-Graph 검색 결과와 이와 연관된 안전 기준을 결합하여 사용자에게 근거 기반 답변을 제시한다. 이를 위해 OpenAI의 GPT-4o를 활용하여 사전 정의된 프롬프트에 따라 일관된 형식의 답변을 생성하였다. 답변에는 벽 개구부, 슬라브 개구부, 오픈 스페이스 개수가 표시되고, 층·공간 정보와 목록화한다. 또한, 각 객체의 정보와 관련 규정이 함께 출력되도록 하였다.

4. 성능 평가 및 결과 분석

그림2는 성능 평가에 활용한 BIM 모델과 그래프DB에 저장된 IFC-Graph를 보여준다. 대상 모델에는 위험 객체 유형(hazard type; H)으로 슬라브 개구부(H1) 40개, 벽 개

구부(H2) 366개, 오픈 스페이스(H3) 12개가 포함되어 있으며, 이는 IFC Viewer를 통해 확인하였다. 해당 개수를 정답지(ground truth)로 활용하였으며, 제안한 시스템을 통해 탐지된 결과와 비교하여 평가하였다.

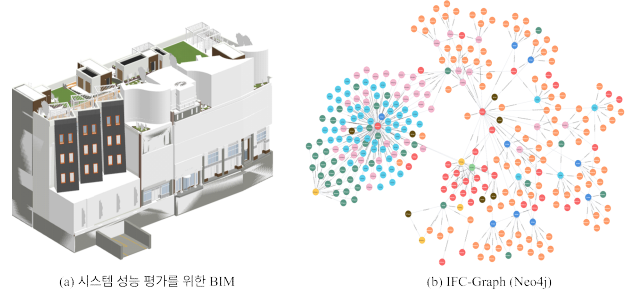


그림2. 대상 BIM 모델 및 IFC-Graph 일부분 시각화(Neo4j)

성능 평가 지표로는 Precision(정밀도), Recall(재현율), F1-score를 선정하였다. 표1은 위험 객체 탐지 성능을 보여준다. 슬라브 개구부(H1)는 정밀도 0.87, 재현율 1.00, F1-score 0.93으로 가장 높은 성능을 기록하여 제안 기법이 슬라브 상 개구부 탐지에는 효과적임을 보여주었다. 벽 개구부(H2)는 재현율 1.00으로 위험 요소를 모두 탐지하였으나, 창호나 출입구와 같은 추락 위험이 낮은 개구부가 함께 탐지되어 정밀도가 0.52로 낮게 나타났다. 이는 오탐(False Positive) 발생이 많았음을 의미하며, 벽 개구부 판정을 위한 추가 규칙의 정교화가 요구된다. 오픈 스페이스(Double-height, H3)의 경우 정밀도는 1.00으로 높았으나, 전체 12건 중 3건만 탐지되어 재현율이 0.25에 불과하였다. 탐지된 사례는 계단과 연계된 공간으로 한정되었고, 로비나 홀 같은 오픈 스페이스 공간은 탐지하지 못하였다. 이러한 결과는 공간적 맥락을 반영한 탐지 방식이 필요함을 의미한다. 종합적으로, 본 연구에서 제안한 시스템은 슬라브 개구부 탐지에서는 유의미한 성능을 보였으나, 벽 개구부 탐지에서의 오탐 문제와 오픈 스페이스 공간 탐지의 성능 감소는 향후 개선해야 할 과제로 확인되었다.

표1. 위험 객체 탐지 성능 평가

Metric	Precision	Recall	F1-score
Hazard type			
H1_OpeningOnSlab	0.87	1.00	0.93
H2_WallOpening	0.52	1.00	0.68
H3_DoubleHeight	1.00	0.25	0.40
Average	0.80	0.75	0.67

그림3은 탐지된 객체들과 이와 관련된 안전 기준을 연계한 시스템의 출력 화면을 나타낸다. 시스템 인터페이스 상단에 위치한 입력창을 통해 사용자가 자연어로 검색할 수 있도록 설계하였다. 최종적으로 출력된 결과물을 통해 탐지된 객체의 유형 및 개수, 층별·공간별 분포 현황, 각 객체 정보와 적용 기준이 체계적으로 제시되었음을 확인할 수 있다. 추후 알고리즘 개선을 통해 오탐 및 누락 객체 발생률을 저감하여 시스템의 신뢰성을 향상시킬 필요가 있다.



그림3. 시스템 출력물 구성 및 결과 예시

5. 결론

본 연구는 BIM을 그래프 구조로 변환하고 안전 기준과 연계하여, 자연어 질의로부터 작업자의 추락 위험이 높은 객체를 탐지 및 관련 기준을 제시하는 시스템을 제안하였다. 사용자가 단순한 질문만으로도 추락 위험 객체의 GlobalId, 속성명(Name), 위치(층·블록), 적용 조항을 함께 확인할 수 있도록 하였으며, 이를 통해, 추락 위험 위치 파악과 사전 안전성 검토 및 조치 계획 수립이 용이하도록 하였다.

성능 평가 결과, 슬래브 개구부(H1)는 높은 정밀도와 재현율을 보여 본 연구 방법의 효과성을 입증하였다. 그러나, 벽 개구부(H2)는 불필요한 요소까지 탐지되어 오탐 문제가 있었고, 오픈 스페이스(H3)는 탐지율이 낮아 공간 맥락을 충분히 반영하지 못하였다. 이는 규칙 정교화, 공간 의미론적 보완, 공정(4D BIM) 정보의 통합과 같은 추가 연구가 필요함을 보여준다.

그럼에도 불구하고 본 연구는 기존 연구들이 단순 준수 여부만 제시하던 방식에서 나아가, 대상 객체·관련 기준·위치 등의 정보를 동시에 제시함으로써 사용자가 위험요소를 쉽게 식별할 수 있는 시스템을 구현했다는 점에서 의의가 있다. 또한, 안전 기준을 JSON으로 분리하여 관리함으로써, 기준 개정 시 신속히 최신화할 수 있다는 장점이 있다.

향후 연구에서는 BIM 내 객체 탐지의 정밀도 향상, 오픈 스페이스 탐지 시 맥락 정보 반영, 그리고 시공 단계별 위험을 고려한 4D BIM 확장을 통해 시스템 성능을 개선할 계획이다. 또한, 시각화 도구와의 연계를 통해 사용자의 직관적 이해를 지원하고자 한다. 이를 통해, 설계 및 시공 단계에서 건설 현장 내 위험 요소에 대한 사전 검토를 보다 용이하게 하고, 실제 건설 현장의 안전성을 높이는 데 기여할 수 있을 것으로 기대된다.

참고문헌

1. 대한전문건설협회, 건설현장 추락사고 예방 대책 발표, 2025
2. Pereira, F., Gonzalez Garcia, M. d. I. N., & Pocas Martins, J. (2024). An evaluation of the technologies

used for the real-time monitoring of the risk of falling from height in construction; Systematic review. Buildings, 14(9), 2879.

3. Chong, H.-Y., Ma, Q., Lai, J., & Liao, X. (2025). Achieving sustainable construction safety management: The shift from compliance to intelligence via BIM-AI convergence. Sustainability, 17(10), Article 4454.
4. Zheng, J., & Fischer, M. (2023). Dynamic prompt-based virtual assistant framework for BIM information search. Automation in Construction, 155, 105067.
5. Zhu, J., Wu, P., & Lei, X. (2023). IFC-graph for facilitating building information access and query. Automation in Construction, 148, 104778.
6. Winther Johansen, K., Schultz, C., & Teizer, J. (2022, June 20). BIM-based fall hazard ontology and benchmark model for comparison of automated prevention through design approaches in construction safety. In Proceedings of the 29th EG-ICE International Workshop on Intelligent Computing in Engineering (pp. 408-417). Aarhus University.
7. Iranmanesh, S., Saadany, H., & Vakaj, E. (2025, July). LLM-assisted Graph-RAG information extraction from IFC data. In Proceedings of the European Conference on Computing in Construction (CIB W78 2025), Porto, Portuga
8. Rao, A. S., Radanović, M., Liu, Y., Hu, S., Fang, Y., Khoshelham, K., Palaniswami, M., & Ngo, T. (2022). Real-time monitoring of construction sites: Sensors, methods, and applications. Automation in Construction, 136, Article 104099.
9. Ibba, A., Alonso, R., & Reforgiato Recupero, D. (2025, June). Enabling natural language access to BIM models with AI and knowledge graphs. In Proceedings of the Third International Workshop on Semantic Technologies and Deep Learning Models for Scientific, Technical and Legal Data (SemTech4STLD 2025), Portorož, Slovenia. CEUR Workshop Proceedings
10. Song, Q., & Xia, S. (2024). Research on the effectiveness of different outlier detection methods in common data distribution types. Journal of Computer Technology & Applied Mathematics, 1(1).