

2025년 추계학술발표대회 : 대학생부문

건설 현장 내 미끄럼 사고 방지를 위한 결빙 구간 인식 및 정보 제공 기술 개발 - 결빙 감지 히트맵 개발 -

- Development of Freezing Section Recognition and Information Provision Technology
to prevent slip accidents in the construction site -

○박승환*
Park, Seung-Hwan

최승윤*
Choi, Seungyun

남창현*
Nam, Changhyun

최민지**
Choi, Minji

Abstract

This study aims to develop a technology for recognizing icy sections and providing risk information based on CCTV footage to prevent slips and falls that frequently occur on construction sites during winter. It proposes a system that overcomes the limitations of existing temperature and humidity sensor-based technologies by using the deep-learning object detection model YOLOv5 to automatically analyze on-site images. The system specifically develops an algorithm that quantifies the risk of accidents by combining the area of ice with worker movement data and generates a visualized heatmap. This heatmap is intended to be used in on-site safety management meetings like TBM (Tool Box Meeting) and on safety boards, providing workers with timely risk information to proactively prevent slip and fall accidents.

키워드 : 결빙 감지, 히트맵, TBM(Tool Box Meeting), 안전 동선

Keywords : Ice detection, Heatmap, TBM(Tool Box Meeting), Safety Route

1. 서론

1.1 연구의 배경

최근 건축물의 대형화와 복잡화로 인해 건설 현장의 안전 관리가 더욱 중요해지고 있다. 특히 겨울철에는 얇은 얼음이나 서리로 인한 미끄러짐 및 넘어짐 사고가 빈번하게 발생하며, 이러한 사고는 건설 현장에서 발생하는 재해 중 상당한 비중을 차지한다. 고용노동부의 2024년 산업재해 현황 자료에 따르면 건설업 재해 유형 중 '넘어짐 사고'는 주로 철근콘크리트 공사(31.6%, 499건), 이동 작업(26.0%, 411건), 설치 작업(13.0%, 206건)에서 많이 발생하는 것으로 분석된다. 이러한 사고는 작업자의 안전을 위협할 뿐만 아니라, 작업 지연, 장비 손상, 유지보수 비용 증가 등 다양한 경제적 손실을 초래한다.

현재 건설 현장에서는 결빙에 대한 대처가 여전히 미흡한 실정이다. 건설 현장 내 결빙과 관련한 기존 연구를 분석한 결과 온습도 센서 기반의 결빙 예측 기술은 오차가 크고, 복잡한 건설 현장 환경에 적용하기 어렵다는 한계가 존재한다.

또한, 건설 프로젝트 관리자 인터뷰를 수행한 결과 현장 내 결빙 구간에 대한 정확하고 시의성 있는 정보가 부족하여 예방 조치가 지연이 되고 있으며, 기존의 수동적인 모니터링 방식은 인력, 시간, 비용이 많이 소요되어 넓은 현장 전체를 효과적으로 관리하기 어렵다는 한계를 도출하였다.

이러한 문제들을 해결하고자, 본 연구는 딥러닝 기반의 영상 분석 기술을 활용하여 건설 현장 내 결빙 구간을 자동으로 인식하고, 위험도를 정량화하여 실시간으로 시각화하는 기술을 개발하고자 한다. 이는 향후 Tool Box Meeting(TBM) 등에서 결빙에 대한 위험 구간의 정보를 작업자들에게 직접 전달하는데 활용 가능하며 미끄러짐 및 넘어짐 사고를 효과적으로 예방하는 데 기여할 것이다.

1.2 연구의 방법 및 목적

본 연구의 목적은 건설 현장 CCTV 영상에서 건설 현장 바닥면에 생성된 결빙을 자동으로 감지하고, 결빙의 위치와 면적, 그리고 작업자 동선 데이터를 결합하여 위험도를 정량화하는 알고리즘을 개발하고 이를 히트맵으로 시각화하는 것이다.

* 인하대학교 건축학부 건축공학전공 학부생

** 인하대학교 건축학부 건축공학전공 조교수, 공학박사

(Corresponding author : Department of Architectural Engineering, Inha University, mjchoi@inha.ac.kr)

이 연구는 2025년도 한국연구재단 연구비 지원에 의한 결과의 일부임. 과제번호: RS-2024-00337975

본 연구는 다음과 같은 주요 단계로 구성된다:

- STEP 1: 이미지 추출 및 결빙 감지 학습: YOLOv5 모델의 객체 탐지를 위한 라벨링 작업을 수행한 후, 반복 학습을 통해 신뢰도 높은 결빙 인식 탐지 알고리즘을 확보한다.
- STEP 2: 위험도 산정 파라미터 정의: 결빙 면적, 작업 구역 근접도, 작업자 동선 수 등을 계량화하여 표준화된 위험 값을 산출하는 기준을 마련한다.
- STEP 3: 통합 히트맵 생성 및 현장 적용: 결빙 위험도에 기반한 결빙 구간 히트맵을 생성하고, 작업자 동선 정보에 기반한 작업자 동선 히트맵을 결합하여 결빙으로 인한 미끄러짐 사고에 대한 통합 히트맵을 만드는 과정을 수행한다.



그림 3. YOLOv5 결빙 이미지 감지 결과

2.2 위험도 산정 및 통합 히트맵 생성

표1. 결빙 위험 값 산정표

결빙 위험 값	(결빙 크기 * 결빙위치)		
결빙 크기	0.2m ² 미만	0.2m ² 이상 1.0m ² 미만	1.0m ² 이상
위험값	0.5	0.7	1.0
결빙 위치	3m 이상	1m 이상 3.0m 미만	1m 이내
위험값	0.5	0.7	1.0

전체 위험도는 결빙 위험 값과 작업자 동선 위험 값을 곱하여 산정했다. 결빙 위험 값은 결빙의 크기와 위치에 따라 0.0~1.0의 값을 부여했다. 결빙의 크기 및 위치 계수에 대한 객관적인 위험도 산정 기준을 설정하기 위하여 결빙 크기 위험값의 경우 성인 평균 남자의 발 크기를 이용하여 위험도 기준을 분리하였고 결빙 위치 데이터의 경우 실제 현장에서 특정 공정이 이루어 질 때 작업자의 평균 이동 범위를 고려하여 기준을 설정하였다.

작업자 동선 위험 값은 작업 시간, 작업자 수, 이동 빈도 등을 이용하고, 각각의 변수들의 연계성을 고려하여 산정했다. 작업공간의 경우 (작업시간*작업자수), 동선의 경우 (이동 빈도*작업자수)를 이용하여 작업자 동선 위험 값은 $0 \leq (\text{각 결빙의 위험 값} / \text{Max of 결빙 위험 값}) \leq 1$ 의 식을 이용하여 산출하였다.

표 2. 전체 위험도 산정표

전체위험도	0.4 미만	0.4 이상 0.75 미만	0.75 이상
위험수준	안전	주의	위험

두 위험 값을 곱하여 산출된 전체 위험도 값은 0.0~1.0 사이의 값으로 정규화되었다. 이 값을 기반으로 안전(0.4 미만), 주의(0.4~0.75 미만), 위험(0.75 이상)으로 위험 수준을 구분했다. Python 코딩을 활용하여 결빙 위험 히트맵과 작업자 동선 히트맵을 각각 생성한 후, 이를 결합하여 최종적인 통합 결빙 위험 구간 히트맵을 제작했다. 위험도

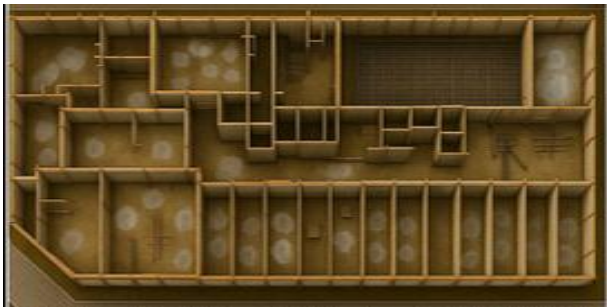


그림 1. AI 생성형 현장 이미지

실제 건설 현장 결빙 이미지 자료가 부족한 문제를 해결하기 위해, 생성형 AI를 활용하여 실제 현장과 유사도가 높은, 드론으로 내려다본 시점의 이미지를 제작하여 머신러닝 학습 자료로 활용했다. 학습은 반사광 유무, 얼룩 유무, 경계의 명확도 등 4가지 다른 조건에 따라 각각 150개의 이미지를 가진 데이터 세트로 제작하여 진행했다. 학습 초기에는 이미지 학습 표본이 적어 신뢰도가 낮고 결빙을 감지하지 못하는 현상이 발생했으나, 학습 표본이 증가함에 따라 대부분의 결빙을 감지하고 신뢰도 또한 80% 이상으로 상승하는 추세를 보였다.

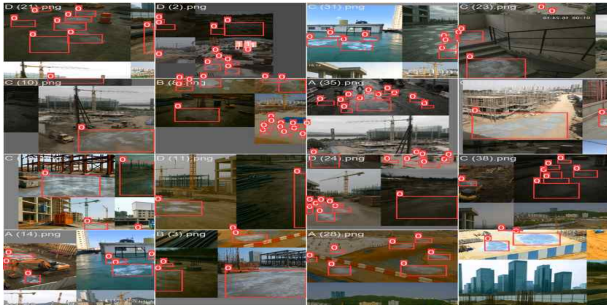


그림 2. YOLOv5 결빙 이미지 학습 과정

기준 분류를 위하여 이미지 테스트의 20장의 결과의 전체 결빙 위험도에 대하여 평균 값을 산출하였을 때 0.75의 위험도 값으로 수렴하는 결과를 이용하여 전체 위험도의 위험 기준을 0.75로 설정 하였다. 전체 위험도가 0.75를 넘는 구간을 '특별 위험 구간'으로 명시하고, 이를 전체 위험도 히트맵에 반영하여 현장 관리자와 작업자가 즉각적으로 위험을 파악할 수 있도록 했다.

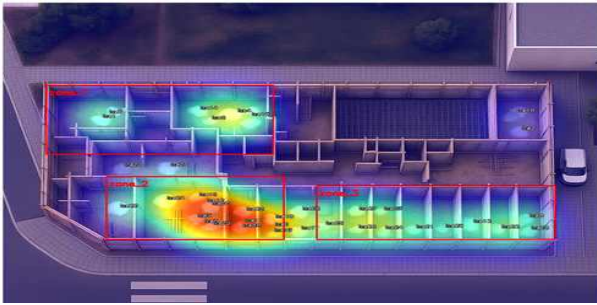


그림 4. 결빙 위험 히트맵



그림 5. 작업자 동선 히트맵



그림 6. 결빙 위험 구간 히트맵 최종 결과

3. 연구 결과 및 활용 방안

개발된 통합 결빙 위험 히트맵은 건설 현장 안전 관리의 새로운 패러다임을 제시한다. TBM 시작 전 드론을 이용해 현장 전체를 촬영하고, 이 이미지를 객체 감지 모델에 적용하여 결빙 위험 히트맵을 생성한다. 당일 작업 내용을 바탕으로 작업자 동선 모델에 입력하여 작업자 동선 위험 히트맵을 생성하고, 최종적으로 이 두 히트맵을 결합한 통합 결빙 위험 히트맵을 TBM 자료와 현장 안전 게시판에

게시한다.

이를 통해 작업자들은 작업 전에 결빙 위험 인지 교육을 받게 되며, 특히 특별 위험 구간에 대해 사전에 파악하여 결빙 제거와 같은 1차 예방 조치를 취하거나, 위험 동선을 우회하는 등의 조치를 할 수 있다.

4. 시사점 및 결론

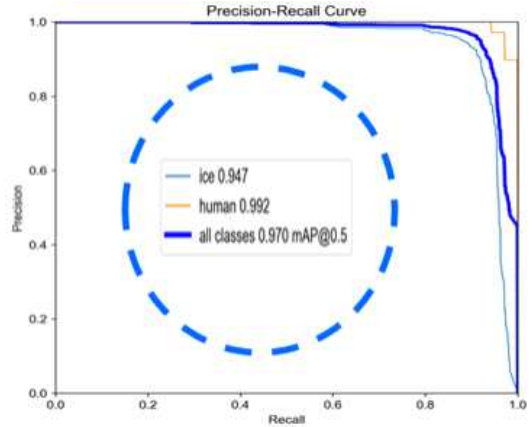


그림 7. Precision-Recall Curve 사진

본 연구는 건설 현장의 결빙 사고 예방을 위해 딥러닝 기반 영상 분석 기술을 도입하고, 정량화된 위험 정보를 시각적으로 제공하는 새로운 방법을 제시한다. 모델의 성능은 Precision-Recall Curve를 통해 검증했으며, X축은 Recall(재현율)로 결빙을 놓치지 않고 검출해낸 비율, Y축은 Precision(정밀도)로 결빙으로 예측해낸 것의 정확성을 나타내며 이 두 지표를 이용해 구해진 곡선 밑면적(AUC)인 AP(Average Precision) 값을 핵심 지표로 사용했다. 본 연구에서 개발된 모델은 **Ice 클래스에 대해 AP 0.947(94.7%)**의 높은 정확도를 기록했다. 즉, 모델이 결빙 객체를 안정적으로 탐지하고, 높은 정확도를 유지하면서도 놓치는 결빙이 거의 없음을 의미한다. 이는 결빙으로 인한 작업 지연, 장비 손상 방지, 유지보수 비용 절감 등 다양한 경제적 손실을 예방하는 데도 다음과 같이 기여할 수 있다:

- 위험 구역의 가시화로 안전사고 대응 속도 향상
- 동선별 위험도 기반 작업 우선순위 최적화:
- 안전 교육 및 TBM 보고서의 근거 데이터 강화

5. 한계점 및 향후 연구

하지만 본 연구에는 몇 가지 한계점이 존재한다. 첫째, 기술의 품질이 고품질 이미지 데이터에 크게 의존한다는 점이다. 둘째, 작업자 및 결빙 위험도 값에 대한 명확한 기준 설정이 부족했다는 점이다.

향후 연구에서는 다음과 같은 목표를 설정할 수 있다. 첫째, CCTV 영상을 자동 분석하여 이미지 추출 후 결빙을 자동으로 감지하는 기능 구현을 통해 데이터 업데이트의 효율성을 높일 수 있다. 둘째, 온도 및 습도 센서 데이터를 결합하여 현장 결빙 정보를 더욱 구체화하고, 이를 바탕으로 위험도 기준을 강화할 수 있다. 셋째, 통합

히트맵의 가시성 및 퀄리티를 향상시켜 사용 편의성을 증대시킬 수 있다. 본 연구는 건설 현장 안전 기술의 발전과 인명 피해 감소에 기여하는 중요한 시사점을 제공한다.

참고문헌

1. D. Sonntag, "Important new values of the physical constants of 1986, vapour pressure formulations based on the ITS-90, and psychrometer formulae," Z. Meteorol, Vol.40, No.5, pp.340-344, 1990.
2. Journal of the Korea Institute for Structural Maintenance and Inspection Vol. 17, No. 5, September 2013, pp.113-121.
3. K. Yang, J. Baek, S. Lee, and S. Kim, "Monitoring System for State of Road Surface Freezing using TCP/IP," Proceedings of the Korean Society for Precision Engineering Spring Conference, pp. 1077-1078, May 2010.
4. 김종우, 이장훈, 정상훈, 최현권, 허민석, 정설영, 강성범, "CCTV 영상을 이용한 YOLO v5 기반 차종 구분 모델," 한국정보기술학회 2023년도 하계종합학술대회 및 대학생논문경진대회, pp. 712-714, 2023.
5. 임태윤, 조용진, 허정석, 유재관, "보안영상 시스템에서 YOLO v5를 이용한 객체 탐지 모델 개발," 한국통신학회 2023년 한국 인공지능 학술대회 논문집, pp. 70-71, 2023.
6. MYUNGHYUN JUNG, MINJUNG GIM, SEUNGHWAN YANG. (2023). JOURNAL OF THE KOREAN SOCIETY FOR INDUSTRIAL AND APPLIED MATHEMATICS, 27(4), 311-323.
7. 송석일, 전하영. (2025-05-16). 사고사례 데이터를 이용한 딥러닝 기반 건설현장 사고 예측 방법. 한국콘텐츠학회 종합학술대회 논문집, 제주.
8. 석병민, 김상용. (2023-10-25). 건설현장 안전사고 위험도 예측 모델 개발. 대한건축학회 학술발표대회 논문집, 강원.
9. 최수영, 신진욱. (2023). 국내 건설현장 안전사고 : 현황 평가 및 의견. 건설경제,, 100-104.
10. 강현수. (2017). 서비스업 미끄럼 위험성 분석에 관한 연구 [박사학위논문, 아주대학교].