

트램 레일의 보행자 안전사고 예방을 위한 바닥 매립형 LED 인식 센서 경보 방안에 관한 연구

김찬섭*, 차승현*, 최강*, 배강민*, 송원석*, 최승규*
*건양대학교 재난안전소방학과
e-mail : skchoi@konyang.ac.kr

A Study on Floor-Embedded LED Sensor Alarm Methods for Preventing Pedestrian Safety Accidents on Tram Rails

Chan-Seop Kim*, Seung-Hyun Cha*, Kang Choi*, Kangmin Bae*, Song Wonseok*,
Seung-Kyou Choi*

*Department of Disaster Safety & Fire, Konyang University

요약

최근 도심 교통체증 완화와 대기오염 감소를 위해 친환경 교통수단인 트램의 도입이 증가하고 있다. 그러나 트램은 도심 일반 도로와 동일한 평면에서 운행되는 특성상 궤도와 보행로의 경계가 모호하며, 스마트폰을 주시하는 스몸비(Smombie)족의 급증으로 인해 치명적인 보행자 충돌 사고 위험이 높다. 특히 기존의 허공에 설치된 수직형 신호 체계는 시야가 아래로 향한 보행자나 인지 능력이 떨어지는 교통약자의 사고를 막는 데 명백한 한계를 지닌다. 이에 본 연구는 딥러닝 기반 객체 검출(YOLO) 및 추적(Deep SORT) 알고리즘과 바닥 매립형 LED 모듈을 결합한 보행자 경보 시스템 및 운용 알고리즘을 제안한다. 제안하는 시스템은 AI 비전 카메라로 보행자의 동선을 실시간 분석하여, 1차 주의 구역 진입 시 주황색 LED를 점등해 예비 경고를 제공한다. 보행자가 2차 위험 구역을 침범할 경우, 적색 LED를 강력하게 점멸함과 동시에 접근 중인 트램 운전자 및 관제 시스템에 무선 정지 신호를 송출하는 다단계 방어 체계로 설계되었다. 본 논문에서 제안한 바닥 매립형 LED 센서 경보 방안은 보행자의 시선이 머무는 발밑에서 직관적인 시각적 통제를 제공함으로써, 무의식적인 돌발 궤도 진입을 사전에 차단하고 단시간 내 대형 참사로 이어질 수 있는 트램 안전사고를 효과적으로 예방하는 데 기여할 것으로 기대한다.

1. 서론

우리나라는 국토 면적이 좁고 도심 내 인구밀도가 세계 최고 수준으로, 도시 간 광역이동성 증대와 자동차 등록 대수의 급증으로 인한 교통체증이 심각한 상황이다. 그러나 도심 내 도로 및 터널을 추가로 확장하는 것은 이미 공간적·물리적 한계에 도달하였으며, 지하철 등 중전철 중심의 신규 철도망 구축은 지자체에 막대한 경제적 부담을 안겨주고 있다. 이러한 지리적·경제적 한계를 극복하기 위해, 전기로 운행되어 대기오염을 줄이고 저상 구조로 노약자 등 교통약자의 승하차가 용이한 친환경 트램의 도입이 국내 주요 도시를 중심으로 급격히 증가하고 있다[1].

구조적인 측면에서 볼 때, 트램은 완전히 분리된 전용 선로를 달리는 일반 철도와 달리 도시의 일반 도로와 동일한 평면에서 운행된다. 이러한 지면 공유의 특성은 궤도와 보행로의 경계를 모호하게 만들어, 횡단보도 및 정거장 인근에서 보행자와의 충돌 위험을 발생시킬 수 있는 요인으로 작용한다. 또한 사회·환경적 측면에서는 스마트폰을 보며 걷는 이른바 '스몸비족(Smombie)'이 급증하면서 위험성이 더욱 극대화되고 있다.

트램은 전기 구동 방식으로 엔진 소음이 거의 없어 청각적

인지가 어려운 반면, 현대 보행자들은 시선이 모바일 기기로 분산되어 전방 주시를 소홀히 하는 경우가 많아 단시간 내 치명적인 충돌 사고로 이어질 가능성이 높다.

트램은 중량이 크고 제동거리가 길어 일단 충돌하면 대형 인명피해를 발생시킨다. 따라서, 본격적인 개통에 앞서 보행자의 노선 진입을 사전에 차단하고 주의력을 강제로 환기할 수 있는 시각적 통제 인프라 구축이 무엇보다 중요할 것이다.[2]

이에 본 논문에서는 보행자의 접근을 선제적으로 감지하고 직관적인 시각적 경고를 제공하는 바닥 매립형 LED 경보 시스템의 설계 및 운용 방안을 제안한다.

제안한 방안과 알고리즘을 적용하면 보행자가 트램 노선 인근의 위험구역에 접근할 경우 발밑에 설치된 LED 점멸을 통해 위험을 즉각 인지하게 함으로써, 기존 수직형 표지판이나 신호 체계의 한계를 보완하고 주의가 분산된 보행자의 치명적인 사고를 예방에 기여할 것으로 기대한다.

2. 트램 사고 사례 및 분석

현재 국내의 경우 트램 도입 및 시범운행 초기 단계로, 보행자 충돌과 관련된 직접적인 실증 데이터가 부족한 실정이

다.

이에 트램을 선도적으로 운영 중인 해외 주요 국가의 통계를 조사한 결과, 노선 환경의 특수성과 보행자의 인지 실패가 대형 참사로 이어짐을 확인할 수 있었다.

국내 실정상 직접적인 통계 산출이 어려워, 수십 년간 트램을 운영해 온 유럽 및 호주의 최신 실증 데이터를 집중 분석하였다. 먼저 유럽연합 집행위원회(Eurostat)가 발표한 최근 3년간의 철도 및 트램 중대 사고 현황은 [표 1]과 같다.[3]

[표 1] 최근 3년간 유럽연합(EU) 철도 및 트램 중대 사고현황

년도	2022	2023	2024
사고 건수	1,566	1,692	1,507
사망자 수	803	841	750
중상자 수	513	580	548

이처럼 매년 1,500건 이상의 중대 사고가 발생하는 가운데, 트램 충돌이 보행자에게 미치는 치명성은 매우 높은 것으로 나타났다.

스웨덴 찰머스 공대(Chalmers) 등이 주도한 유럽 및 호주 4개국 통합 연구(2024)에 따르면, 7,535건의 트램-보행자 충돌 사고를 분석한 결과 트램 충돌 시 보행자가 사망하거나 중상을 입을 확률은 [표 2]와 같이 일반 승용차 사고 대비 3.48배 높은 것으로 확인되었다.[4]

[표 2] 트램 사고 치명률 비교(유럽 및 호주 4개국)

분석 지표	통계 수치 및 결과
분석 대상	호주, 스웨덴, 스위스, 독일
분석 표본	7,535건
사망 및 중상 위험도	일반 승용차 사고 대비 3.48배 증가

특히 호주 멜버른의 10년 치 트램 사고 분석(2025 발표)에 따르면, 전체 트램 충돌 사고 중 보행자 사고의 57%가 사망 및 중상(Serious Injury)으로 직결되는 압도적인 치명률을 보였다. [5]

이는 저상 구조로 인해 트램 전면부의 에너지가 보행자의 하체와 머리로 고스란히 전달되고, 철제 바퀴 특성상 긴 제동 거리로 인해 보행자를 덮치기 전 완전한 제동이 불가능하기 때문이다.

사고가 집중되는 구역 역시 횡단보도와 교차로에 집중되어 있다. 유럽연합 집행위원회(Eurostat)가 발표한 2024년 공식 철도 안전 통계에 따르면, 한 해 동안 유럽 내에서 발생한 1,507건의 중대 사고 중 25.5%가 보행자가 얽힌 건널목 및 횡단보도(Level crossings)에서 발생한 것으로 나타났다.

이는 노선 횡단 구역의 사전 통제가 시급함을 시사하며, 관련 세부 통계는 [표 3]과 같다.[3]

[표 3] 2024년 유럽연합(EU) 철도 사고 발생 구역 비중

분석 지표	통계 수치 및 결과
분석 기관	유럽연합 집행위원회 통계청
분석 표본	2024년 사고 수 1,507건
사상자 수	1298명
횡단 구역 사고 비중	25.5%
노선 무단 진입 비중	65.6%

구체적인 해외 참사 사례를 살펴보면, 단순한 수직형 신호등이나 바닥 도색만으로는 사고를 막을 수 없음을 알 수 있다. 대표적으로 2024년 8월 홍콩 케네디타운 횡단보도 트램 참사를 들 수 있다. [6]

해당 사고는 횡단보도를 건너던 일가족이 트램에 깔려 3세 여아가 사망한 사건으로, 당시 보행자 신호등은 명확한 '적색(Red)'이었음에도 불구하고 발생했다.

이는 시야가 낮고 인지 능력이 떨어지는 노약자와 어린이가 허공에 설치된 수직형 신호등을 제대로 인지하지 못했으며, 복잡한 교차로 동선 탓에 다가오는 트램을 보지 못해 일어난 참사이다.

이에 본 논문에서는 이런 안전사고들을 예방하기 위한 바닥 매립형 LED 센서를 도입해 타 교통수단과 보행자를 감지하여 불빛 변화를 통해 경고하는 방안과 운전자에게 신호를 주는 방안을 제안하고, 사고를 방지하기 위한 알고리즘을 제시한다.

3. 트램 레일의 바닥 매립형 LED 센서 경보 방안 및 알고리즘

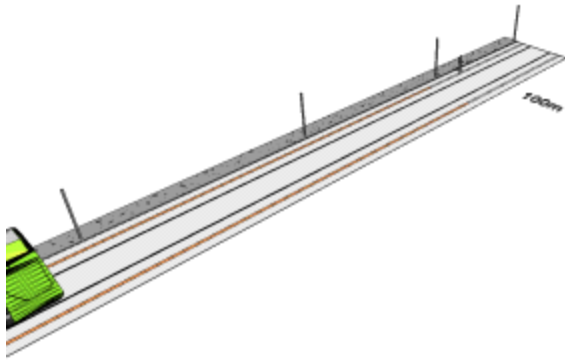
3.1 트램 레일의 바닥 매립형 LED 센서 경보 방안

본 장에서는 보행자의 트램 노선 침입을 파악하고 경고하기 위해 딥러닝 기반 객체 검출 및 추적 시스템과 LED 모듈을 결합하는 방안을 제안한다.

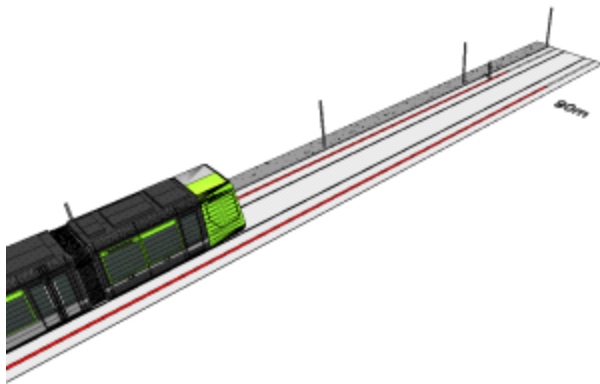
검출 및 추적 시스템은 이미지 전체를 한 번에 처리하여 객체의 위치와 종류를 동시에 인식하는 딥러닝 기반 알고리즘인 YOLO(You Only Look Once)와 검출된 객체를 지속적으로 추적하는 딥러닝 기반 알고리즘인 Deep SORT(Deep

Simple Online and Realtime Tracking) 가 결합 된 시스템이다.

객체 인식 카메라와 LED 모듈의 배치와 작동 전후의 모습은 그림 1, 그림 2와 같다.



[그림 1] 시스템 작동 전



[그림 2] 시스템 작동 후

그림 1은 트램이 정상 운행 중이며 보행자가 위험구역에 진입하지 않은 작동 전의 모습이다. 이 상태에서 객체 인식 카메라는 지정된 구역(ROI)을 지속적으로 모니터링 하며 바닥에 매립된 LED 모듈은 황색으로 점등된다.

그림 2는 보행자가 위험구역을 침범했을 때의 모습이다. 객체 인식 카메라가 보행자의 진입을 인식하면 LED 모듈이 적색으로 점등되며, 동시에 트램 운전사에게 경고 신호를 보내게 된다.

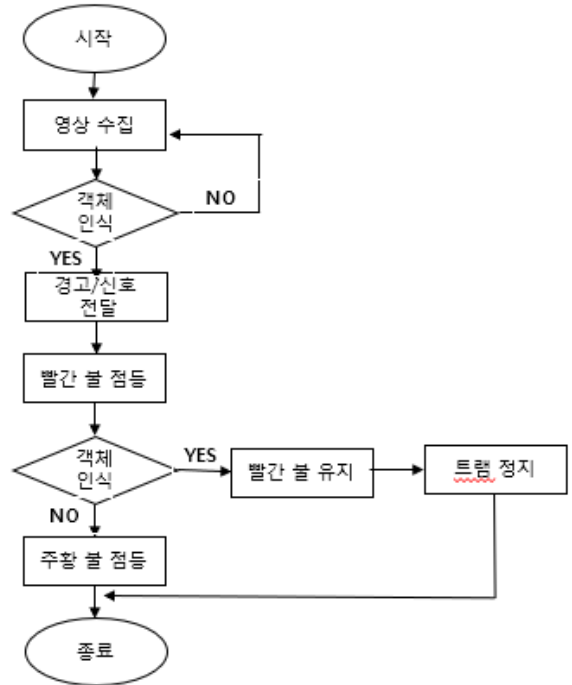
제동거리는 도로 교통법에 따라 시속 50km 이내로 운전해야 하며 국토교통부 트램 표준규격에 따르면 정지 시 80m에서 100m의 제동거리가 필요하다. [7],[8]

이러한 작동 방식은 시선이 아래를 향해 있는 스마트폰 주시 보행자나, 주변 상황 인지가 다소 느린 교통약자의 시야에 직접적이고 직관적인 시각적 경고를 제공한다

3.2 트램 레일의 바닥 매립형 LED 센서 정보

알고리즘

본 논문에서 제안하는 트램 레일의 바닥 매립형 LED 센서 정보 방안의 전체적인 작동 알고리즘은 그림 3과 같다.



[그림 3] 트램 레일의 바닥 매립형 LED 센서 정보 방안의 알고리즘

제시한 알고리즘을 구체적으로 설명하면,

[Step 1] 전원 ON 및 영상 수집

시스템에 전원이 공급(전원 ON)되면 교차로 및 트램 정거장에 설치된 AI 비전 카메라가 활성화되어, 트램 노선 주변의 사전 설정된 위험 구역을 지속적으로 촬영하고 실시간으로 영상 수집을 진행한다.

[Step 2] 1차 객체 인식 및 주황 불 점등

수집된 영상을 바탕으로 딥러닝 알고리즘(YOLO, Deep SORT)을 통해 1차 객체 인식을 수행한다. 노선 주변에 접근하는 보행자가 인식되지 않을 경우(NO) 지속적인 모니터링을 위해 다시 영상 수집 단계로 돌아가며, 객체가 주의 구역에 진입한 것으로 인식될 경우(YES) 1차 예비 경고인 주황 불 점등을 실행하여 보행자의 주의를 환기한다.

[Step 3] 2차 객체 인식 및 빨간 불 점등

주황 불이 점등된 상태에서 보행자의 동선을 추적하여 2차 객체 인식을 수행한다. 보행자가 노선을 벗어나 더 이상 객체로 인식되지 않으면(NO) 위험이 해제된 것으로 판단하여 초기 영상 수집 단계로 복귀한다. 그러나 보행자가 위험 구역을 완전히 침범한 것으로 인식될 경우(YES), 즉각적으로 경고/

신호 전달을 수행하고 바닥 LED를 빨간 불 점등 상태로 전환하여 강력한 시각적 경고를 표출한다.

[Step 4] 신호 인식 및 트램 정지 제어

빨간 불이 점등된 후, 시스템은 최종적인 위험 신호 인식을 지속한다. 보행자의 궤도 침범으로 인한 위험 신호가 계속해서 인식될 경우(YES), 바닥 LED의 빨간 불 유지 상태를 지속함과 동시에 접근 중인 트램 운전자 및 관제 시스템에 무선으로 신호를 보내 트램정지를 유도, 물리적인 충돌을 원천 차단한다.

[Step 5] 상황 해제 및 전원 OFF

반면, 보행자가 궤도를 완전히 벗어나 위험 상황이 해제되어 더 이상 경고 신호가 인식되지 않을 경우(NO), 상황 해제를 알리는 의미로 다시 주황 불 점등으로 전환하여 안전을 재확인한다. 이후 트램 운행이 모두 종료되는 심야 시간대거나 시스템 점검이 필요한 경우, 관리자의 제어에 의해 전원 OFF 단계로 진입하며 전체 알고리즘을 안전하게 종료한다.

상기에서 제안한 다단계 바닥 매립형 LED 센서 정보 시스템의 알고리즘 운용 방안은 기존 수직형 신호 체계나 주변 환경을 인지하기 어려운 교통약자 및 스몸비 보행자들에게 직관적인 시각적 통제를 제공하여, 단시간 내 대형 인명피해로 이어질 수 있는 트램 충돌 사고를 예방하는 데 유용할 것으로 기대한다.

4. 결론

최근 교통체증 완화와 대기오염 감소를 위한 친환경 교통수단인 트램의 도입이 국내 주요 도시를 중심으로 급격히 증가하고 있다. 그러나 트램은 도심의 일반 도로와 동일한 평면에서 운행되는 지면 공유의 특성상 궤도와 보행로의 경계가 모호하며, 중량이 크고 제동거리가 길어 보행자와 충돌 할 경우 대형 인명피해를 발생시킨다. 특히 스마트폰을 주시하며 걷는 '스몸비족(Smombie)'의 급증과 엔진 소음이 거의 없는 트램의 구동 방식이 맞물려, 전방 주시를 소홀히 한 보행자가 단시간 내 치명적인 충돌 사고로 이어질 가능성이 매우 높다. 실제로 해외 실증 데이터에 따르면 트램-보행자 충돌 사고는 일반 승용차 대비 사망 및 중상 확률이 3.48배나 높으며 사고의 25.5%가 횡단 구역에 집중되어 있어, 궤도 진입을 사전에 경고하는 시각적 통제 인프라 구축이 매우 중요하다. 이에 본 논문에서는 딥러닝 기반 객체 검출 알고리즘인 YOLO와 객체 추적 알고리즘인 Deep SORT를 결합하여 보행자의 트램 노선 침입을 정확히 파악하고, 위험구역 진입 시 바닥 매립형 LED 모듈을 통해 즉각적인 시각적 경고를 제공하는 정보 방안과 작동 알고리즘을 제안하였다. 제안한 바닥 매립형 LED 센서 정보 시스템은 기존 수직형 신호 체계를 인지하

기 어려운 교통약자 및 스몸비 보행자들에게 발밑에서 직관적인 시각적 경고를 제공함으로써, 돌발적인 궤도 진입을 차단하여 트램 충돌 사고를 예방하는 데 유용할 것으로 기대한다.

감사의 글

본 작품은 대학간 경계를 허무는 충청남도 지역혁신 중심 대학지원체계(RISE) 지원을 통해 나온 연구 결과입니다.

참고문헌

- [1] 안정화, 박경아. (2018). "트램 도입을 위한 제도 정비 방안". 한국교통연구원(KOTI) 정책연구보고서.
- [2] 광재호. (2020). "친환경 무가선 저상트램 상용화 기술 및 지자체 도입 방안". 한국철도기술연구원(KRRI) 연구보고서.
- [3] Eurostat. (2025). "Railway safety statistics in the EU". European Commission Official Database. (유럽연합 집행위원회 철도 안전 통계)
- [4] Wang, Y., et al. (2024). "Assessment of Pedestrians' Head and Lower Limb Injuries in Tram-Pedestrian Collisions". MDPI Bioengineering, 11(1). (스웨덴 찰머스 공대 4개국 통합 연구)
- [5] Vu, T., et al. (2025). "Tram Crashes Involving Pedestrians and Cyclists: A Severity Analysis". Journal of Road Safety. (호주 멜버른 트램 사고 실증 분석)
- [6] The Standard. (2024, Aug 15). "Fatal tram accident in Sai Wan leaves 3-year-old girl dead". Hong Kong Local News.
- [7] 도로교통법 시행규칙 제19조 1항
- [8] 국토교통부 트램 표준규격 (2021)