JESK J Ergon Soc Korea 2026; 45(4): 447-459
https://dx.doi.org/10.5143/JESK.2026.45.4.447
https://jesk.or.kr eISSN:2093-8462

A Comparative Study on Visual Warning Interfaces for AR-Based Collision Avoidance Systems

Taeyong Kim[1], Yushin Lee[2]

[1]Department of Systems Management and Safety Engineering, Pukyong National University, Busan, 48513
[2]Major in Industrial Data Science & Engineering, Department of Industrial and Data Engineering, Pukyong National University, Busan, 48513

AR 기반 충돌 경고 시스템의 정보 표시 방식 비교 연구

김태용[1], 이유신[2]

[1]국립부경대학교 시스템경영·안전공학부
[2]국립부경대학교 산업및데이터공학과 산업데이터공학융합전공

Corresponding Author
Yushin Lee
Major in Industrial Data Science & Engineering, Department of Industrial and Data Engineering, Pukyong National University, Busan, 48513
Email : ysl@pknu.ac.kr

Received : August 09, 2026
Revised : August 10, 2026
Accepted : August 21, 2026

Copyright@2026 by The Human Factors & Ergonomics Society of Korea. All right reserved.

Objective: This study aims to propose an AR-based warning system for workers to prevent collision accidents occurring at construction sites, and to derive an optimal information display method.

Background: In recent years, the proportion of collision accidents among all construction site accidents has continued to increase. Warning systems for collision hazards originating from worker blind spots can serve as an effective means of accident prevention. Considering the smartification of construction sites and advances in wearable AR technology, visual AR warning systems can be regarded as a suitable alternative for application in high-noise construction environments.

Method: In this study, four types of interfaces (fixed camera view, directional camera view, radar, and direction indicator) were developed and evaluated in a VR environment. All interfaces appeared when a potentially colliding object entered a predetermined zone around the user, with the color of the displayed information changing as the object came closer to the user. To compare usability across the interfaces, a within-subject experiment was conducted with 21 adults. They were asked to perform a primary block-stacking task and a vehicle collision-avoidance task simultaneously in a virtual construction site. Four objective measures (task performance, avoidance success rate, avoidance completion time, number of head rotations) and two subjective questionnaires (workload, affordance) were measured.

Results: Task performance and avoidance success rates showed no significant differences among interface types, confirming that all conditions secured the baseline performance necessary for hazard avoidance. In contrast, significant differences were observed in avoidance completion time and number of head rotations, indicating that the efficiency of hazard perception and response varied depending on the display method. Although the fixed camera view received relatively positive ratings in subjective measures, it did not differ significantly from the other display methods except for the radar. Furthermore, its trend toward fewer head rotations accompanied by delayed responses suggested potential safety complacency with diminished attention to hazards. The camera view methods also received multiple negative comments regarding work view occlusion.

Conclusion: The direction indicator method was derived as the safest and most

practical display method for actual industrial environments. Using simple information, it effectively induced rapid and explicit hazard perception and response while minimizing work view occlusion, without incurring technical burdens such as real-time image processing or securing field-of-view requirements associated with fixed camera views.

Application: The findings of this study can serve as design guidelines for AR-based collision warning systems. The proposed system is expected to be applicable not only to construction sites but also to various industrial environments.

Keywords: AR interface, Wearable device, Collision warning system, Blind-spot, Collision prevention

1. Introduction

건설업은 노동집약적이며 작업 환경이 수시로 변화하는 등 다양한 위험 요소를 내포하고 있어 타 산업 대비 높은 사고 발생률을 보이는 대표적인 고위험 산업 분야이다. 국내 산업재해 사망사고의 약 50%가 건설업에서 발생하고 있으며, 그 중에서도 건설기계 및 차량과 작업자 간 충돌사고는 전체 기계 관련 사고의 60% 이상을 차지하는 것으로 보고된다(MOEL, 2025). 최근 스마트시티 패러다임과 함께 건설 현장에도 IoT 센서, 실시간 위치추적 시스템(RTLS), V2X (Vehicle-to-Everything) 통신 등 스마트 인프라가 도입되고 있다. 주요 건설사들은 HIoS, 대우 스마트건설 시스템(DSC)과 같은 스마트 안전관리체계를 구축하여 IoT 센서와 실시간 위치추적 기반의 원격 안전관제 및 디지털 가상현장 공유를 구현함으로써 관리 사각지대 해소와 협업 효율 제고를 동시에 달성하고 있다(Hyundai E&C, 2018; KFPA, 2019). 이러한 연결형 인프라(connected infrastructure)는 단순 모니터링을 넘어 작업자, 장비, 관제센터가 실시간으로 소통하는 통합 안전 생태계로 확장되는 추세이며, 향후 건설 현장의 표준으로 자리잡을 것으로 전망된다.

그러나 이와 같은 스마트 인프라의 구축에도 불구하고, 현장 작업자에게 위험 정보를 효과적으로 전달하는 인터페이스 설계 지침은 여전히 부재하다. 기존의 위험 알림 시스템 관련 연구는 센서의 정확도와 통신 기술 고도화에 초점이 맞춰져 있었을 뿐, 작업자의 위험 인지 및 대응 과정에 대한 인간공학적 검증은 상대적으로 미흡하였다(Yadav et al., 2022).

경고 정보를 전달하는 감각 채널의 관점에서 볼 때, 건설 현장의 환경적 특성은 청각과 촉각 경고 모두에 제약으로 작용한다. 건설 현장은 85dB 이상의 소음이 상시적으로 발생하고 보호구 착용이 일상적으로 이루어지는 공간으로, 이러한 조건에서는 경고음이 배경 소음에 묻히거나 차폐되어 청각 경고의 신뢰도가 낮아진다. 나아가 소음은 경고음의 전달을 방해하는 데 그치지 않고 작업자의 인지 기능 자체를 저하시킨다. 소음 노출은 주의와 작업기억을 방해하여 정신적 작업 부하를 높이고, 이로 인해 위험 인지 정확도가 저하되고 반응 시간이 지연되는 것으로 보고된 바 있다(Klatte et al., 2013; Ke et al., 2021). 한편 촉각 피드백은 소음의 영향을 받지 않는다는 점에서 대안으로 고려될 수 있으나, 장비의 착용 위치, 압력, 피부 상태 등에 따라 인지 민감도가 크게 달라질 수 있으며(Yang and Roofigari-Esfahan, 2023), 작업자의 손 사용 특성과 현장의 진동으로 인해 그 효과 또한 제한적이다.

이러한 한계로 인해 AR 웨어러블 글래스를 통한 시각적 위험 알림 인터페이스가 현재 가장 현실적이고 효과적인 대안으로 부상하고 있다. 그러나 시각 인터페이스는 표시 위치, 색 대비, 점멸 주기 등의 설계 요소에 따라 탐지 확률과 반응 시간이 최대 3배 이상 차이가 발생할 수 있고, 작업자가 수행 중인 주 과업을 방해할 가능성이 있으므로(Wu et al., 2025), 어떠한 표시 유형이 건설 현장의 동적 위험 상황에 적합한지를 실증적으로 검증하고 규명하는 과정이 반드시 필요하다.

이러한 점에 착안하여 본 연구는 스마트 건설 현장에서 AR 웨어러블 글래스를 활용한 차량 충돌 위험 경고 인터페이스를 설계하고, 이를 인간공학적으로 평가하고자 한다. 구체적으로는 4가지 인터페이스 유형(고정형 카메라 뷰, 방향별 카메라 뷰, 레이더, 위험 방향 지시)과 거리 기반 시각 피드백(색상 변화)을 설계하고, 이를 VR 시뮬레이션 환경에서 평가하여 작업 성과와 인지 부하를 동시에 고려한 최적의 설계 원칙을 규명하고자 한다. 이를 통해 향후 스마트 건설 현장에서 웨어러블 안전 시스템이 실질적인 사고 예방 효과를 발휘할 수 있는 인간공학적 기반을 마련하고자 한다.

2. Related Work

2.1 Proximity warning systems at construction sites

현재 건설 현장에서는 UWB (Ultra-Wideband), RFID, GPS 등 위치 기반 실시간 거리 감지 기술을 활용하여 지게차 및 이동 장비와 인력 간의 충돌을 방지하기 위한 근접 감지 기반 경고 시스템이 마련되어 있다. 이러한 시스템은 작업자나 장비에 태그(tag) 또는 센서를 부착하고, 차량에 설치된 수신기가 거리를 계산하여 위험 거리 진입 시 시각 또는 청각 경고를 발생시키는 방식으로 작동한다 (Mastrolembo Ventura et al., 2023). 또한 건설 장비에 탑재되는 360° 카메라와 AI 기반 안전 시스템도 활용되고 있으나, 이는 운전자가 경고를 수동으로 해석해야 하므로 반응 시간이 지연될 가능성이 있으며, 장비 중심의 모니터링에 머물러 있어 작업자 주도의 능동적 회피 행동을 유도하는 데에는 한계가 있다.

건설 현장 위험 알림 시스템의 기술적 발전 흐름을 살펴보면, 경광등과 사이렌 같은 단순하고 직관적인 방식(OSHA, 2020)에서 모바일 GPS 기반 경고(Jo et al., 2019)를 거쳐, 양손이 자유로운 웨어러블 진동 알림 방식(Yang and Roofigari-Esfahan, 2023)으로 발전해 왔다. 그러나 경광등과 사이렌은 소음 환경에서 인지가 어렵고, 모바일 기반 경고는 별도의 시각 확인이 필요하며, 진동 알림은 방향과 거리에 대한 정보 전달이 어렵다는 한계를 각각 가진다. 스마트 헬멧의 LED를 통한 근접 경고(Aliyev et al., 2020), 혼합현실(MR) 디스플레이에 위험 아이콘과 텍스트 경고를 오버레이 하는 시스템(Wu et al., 2022), BLE 비콘 기반의 스마트 글래스 근접 정보 제공(Baek and Choi, 2020) 등 시각 기반 웨어러블 경고에 대한 시도들도 이루어져 왔다.

2.2 AR-based safety research

건설 현장을 대상으로 한 AR 기반 안전 연구는 주로 시스템의 구현 가능성을 입증하는 데 초점이 맞춰져 왔다. Baek and Choi (2020)는 BLE 비콘의 신호 강도를 이용해 접근 장비를 식별하고 스마트 글래스에 시각 경고를 제시하는 시스템을 개발하여, 현장 실험을 통해 탐지 거리와 경고 발생률을 검증하였다. Wu et al. (2022)은 디지털 트윈과 딥러닝 기반 객체 인식을 결합하여 MR 디스플레이에 위험 정보를 실시간으로 표출하는 시스템을 구축하고 준현장 시나리오에서 그 작동을 확인하였다. 이러한 연구들은 웨어러블 시각 경고의 기술적 실현 가능성을 보여주었으나, 단일한 경고 설계안을 전제로 시스템의 작동 여부를 확인하는 데 그쳐 어떠한 표시 방식이 작업자에게 효과적인지는 다루지 않았다.

한편 AR 경고에 대한 인간공학적 평가는 도로 작업 구간(roadway work zone)을 중심으로 이루어져 왔다. Sabeti et al. (2024)은 시각, 청각, 촉각 경고의 조합이 작업자의 반응 시간에 미치는 영향을 비교하여 다중 감각 경고의 효과를 규명하였으며, Ardecani et al. (2025)은 EEG를 활용하여 AR 경고가 상황 인식과 인지 부하에 미치는 신경생리학적 영향을 분석하였다. 또한 Ardecani and Shoghli (2025)는 작업 강도에 따른 AR 경고 사용 시의 스트레스 반응을 측정하였다. 이들 연구는 AR 경고의 효과를 정량적으로 검증하였다는 점에서 의의가 있으나, 비교의 단위가 감각 채널(modality)에 있거나 단일 경고 설계에 대한 생리적 반응 측정에 초점이 맞춰져 있어, 시각 채널 내부에서 위험 정보를 어떻게 배치하고 표현할 것인지에 대한 설계 지침은 제공하지 못한다. AR을 활용한 안전 교육 연구 역시 지식 습득과 훈련 전이 효과에 초점을 두고 있어(Gong et al., 2024), 실제 작업 수행 중 제공되는 경고 인터페이스의 성능 평가와는 구분된다.

종합하면, 기존 AR 안전 연구는 시스템 구현 가능성 검증, 감각 채널 간 비교, 교육 효과 검증의 세 갈래로 이루어져 왔으며, 시각 경고 내부의 표시 방식 유형을 인간공학적으로 비교한 연구는 찾아보기 어렵다. 본 연구는 이러한 공백을 다음 세 가지 측면에서 다룬다.

첫째, 비교의 단위를 감각 채널이 아닌 시각 표시 방식으로 설정하였다. 본 연구는 위험 정보 제공의 직접성(카메라 뷰 대 아이콘)과 표시 위치의 고정성(고정 대 이동)이라는 두 가지 설계 축을 기준으로 4가지 인터페이스를 도출하고, 동일한 거리 기반 색상 피드백을 모든 유형에 공통 적용함으로써 표시 방식 이외의 요인을 통제한 상태에서 이들을 비교하였다. 이는 어떤 감각으로 알릴 것인가를 다룬 기존 연구와 달리, 시각 경고를 채택한다는 전제 하에 위험 정보를 어떻게 보여줄 것인가에 대한 설계 지침을 도출하기 위함이다.

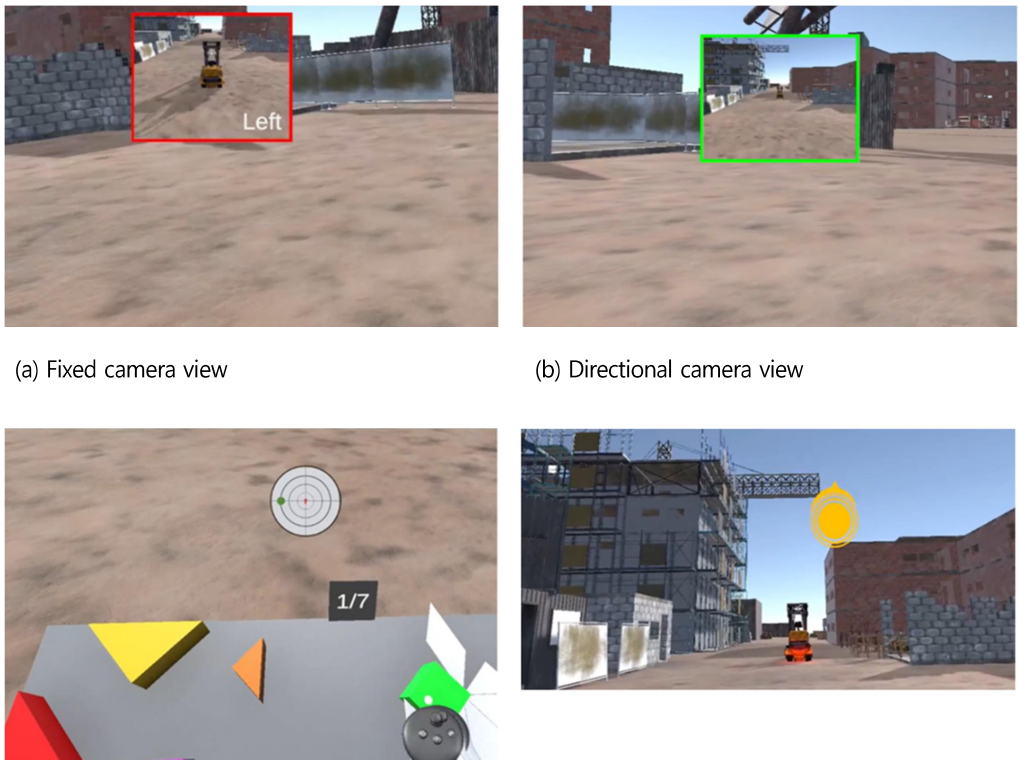
둘째, 주 과업과 위험 회피 과업을 동시에 수행하는 이중 과업(dual-task) 상황에서 인터페이스를 평가하였다. 고립된 자극에 대한 반응 시간을 측정한 기존 연구와 달리, 본 연구는 작업자가 실제 작업에 몰입한 상태에서 경고가 과업 수행을 얼마나 방해하는 지와 위험을 얼마나 신속히 인지하는지를 동시에 관찰함으로써, 안전성과 생산성 간의 상충 관계를 함께 확인하고자 하였다.

셋째, 위험 인지에 수반되는 신체적 행위를 행동지표로 측정하였다. 회피 완료 시간과 회피 성공률에 더하여 고개 회전 횟수를 측정함으로써, 작업자가 경고를 확인하기 위해 시선을 이탈시키고 고개를 돌려야 하는 부담의 크기를 정량화하였다. 아울러 NASA-TLX와 Affordance Rating을 통한 주관적 평가와 인터뷰를 통한 질적 분석을 병행하여, 인터페이스의 성능과 사용자 수용성을 함께 검증하였다.

3. Method

3.1 AR warning interface design

필드 및 데스크 리서치를 통해 위험 정보 제공의 직접성(카메라 뷰 대 아이콘)과 표시 위치의 고정성(고정 대 이동)이라는 두 가지 설계 축을 기준으로 4가지 인터페이스 유형을 도출하였다(Figure 1, Table 1). 고정형 카메라 뷰(FC)는 차량 접근 방향의 카메라 뷰를 방향 표시 텍스트와 함께 화면 좌측 상단의 고정된 위치에 제공한다(Figure 1(a)). 방향별 카메라 뷰(DC)는 사용자 시야를 기준으로 차량 접근 방향에 맞춰 카메라 뷰가 HUD 외곽 영역에서 동적으로 표시된다(Figure 1(b)). 레이더(R)는 사용자를 원점으로 하는 2차원 극좌표 기반의 원형 UI에 차량의 상대 위치를 점으로 표시하며 좌측 상단에 고정된다(Figure 1(c)). 위험 방향 지시(DI)는 차량 접근 방향에 맞춰 HUD 외곽 영역에 방향 화살표 아이콘을 동적으로 표시한다(Figure 1(d)).



(a) Fixed camera view (b) Directional camera view

(c) Radar (d) Direction indicator

Figure 1. Four types of AR warning interfaces: (a) fixed camera view, (b) directional camera view, (c) radar, and (d) direction indicator

Table 1. Types of AR warning interfaces

Interface type	Position	Description	Expected benefit
Fixed camera view (FC)	Top left	Provides camera view at the fixed position	Delivers stable and predictable information
Directional camera view (DC)	Closest position to the hazard along the front view periphery	Provides a dynamic camera view linked to the hazard location	Supports intuitive direction perception
Radar (R)	Top left	Displays omnidirectional hazard objects based on polar coordinates	Enhances spatial perceptual ability
Direction indicator (DI)	Closest position to the hazard along the front view periphery	Indicating hazard direction via an arrow within the icon	Minimizes visual interference

모든 인터페이스에는 사용자와 위험 객체 간 거리에 따라 색상이 변화하는 시각 피드백을 공통으로 적용하였다. 객체가 사용자를 중심으로 한 안전 반경 내에 진입하면 인터페이스가 표시되며, 거리가 가까워질수록 초록(20~30m)에서 노랑(10~20m), 빨강(~10m) 순으로 표시 정보의 색상이 변화하도록 설계하였다.

3.2 Participants

정상 시력을 가진 20대 성인 남녀 21명(남 7명, 여 14명)이 실험에 참여하였다. 참가자의 평균 연령은 22.3세(SD=1.50)였으며, 성별로는 남성 23.57세(SD=0.98), 여성 21.80세(SD=1.37)였다. 모든 참가자는 근골격계 관련 질환이 없고 교정 시력 0.7 이상의 시력을 보유하였으며, VR 기기 사용 경험이 있는 참가자는 16명, 없는 참가자는 5명이었다. 모집 단계에서 인구통계학적 정보 및 VR 기기 사용 경험 여부에 대한 설문을 실시하였다.

3.3 Apparatus and virtual environment

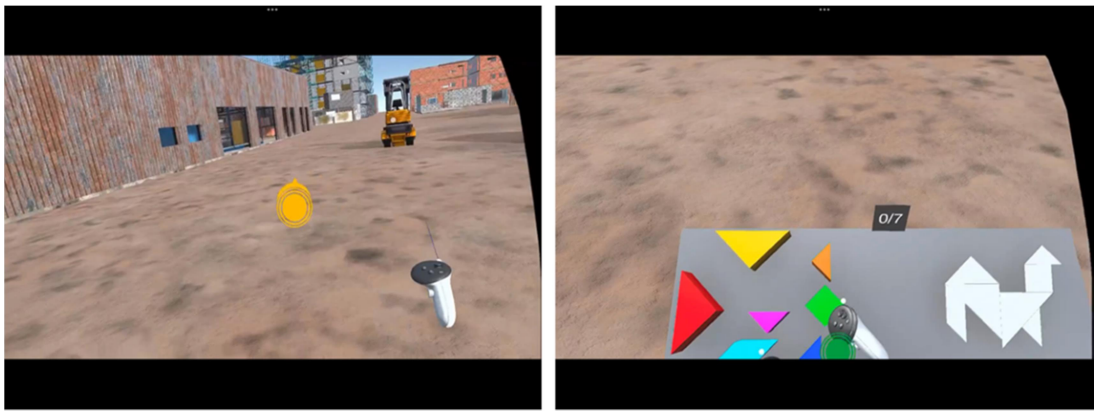
실제 건설 현장과 유사한 환경을 구현하기 위해 Meta Quest 3 HMD (Head-Mounted Display)와 VR 컨트롤러를 활용하였다(Figure 2(a), (b)). AR 경고 인터페이스의 인간공학적 평가에 VR 시뮬레이션을 활용하는 접근은 선행 연구에서도 채택된 바 있으며(Sabeti et al., 2024), 작업자를 실제 위험에 노출시키지 않고 통제된 조건에서 다양한 충돌 시나리오를 반복적으로 제시할 수 있다는 이점이 있다. Unity 3D 엔진과 Asset Store 소스를 활용하여 몰입형 VR 건설 현장 시뮬레이션 환경을 구축하였으며(Figure 2(c)), 참가자의 회피 완료 시간, 위험 회피 행동, 작업 성공률 등 행동 데이터를 자동으로 수집하는 로깅 시스템을 함께 구축하였다.

(a) Meta Quest 3 HMD (b) VR controllers (c) Virtual construction site testbed

Figure 2. Experimental apparatus and VR testbed: (a) Meta Quest 3 HMD, (b) VR controllers, (c) virtual construction site testbed

3.4 Tasks and scenario

참가자는 칠교놀이 형태로 구성된 블록 쌓기 과업을 주 과업으로 수행하였으며, 이를 통해 집중도와 인지 부하가 측정되었다(Figure 3(b)). 블록 오브젝트와 컨트롤러 간의 위치 및 회전 연동을 통해 블록을 집고 놓는 동작이 가능하도록 구현하였으며, 블록 이동 시점, 위치, 회전 등의 행동 로그가 기록되었다. 이와 동시에 위험 회피 과업이 부과되었으며(Figure 3(a)), 참가자는 VR 컨트롤러의 레이저 포인터(line renderer)를 이용해 화면에 표시된 위험 차량을 가리키고 클릭함으로써 회피 행동을 수행하였다. 포인팅 위치는 컨트롤러 방향 벡터(raycast hit)를 기반으로 UI 상의 좌표와 매칭되었다.



(a) Collision avoidance task (b) Block stacking task

Figure 3. Experimental tasks: (a) collision avoidance task, (b) block stacking task

차량 조건으로는 국내 건설 현장의 작업자와 차량 간 충돌사고 분석 결과를 반영하여, 가장 빈번한 충돌사고 유발 차량인 지게차가 시속 10km로 이동하도록 설정하였다(Jo et al., 2019). 차량은 상, 하, 좌, 우 4방향에서 무작위로 등장하였다. 위험 구역은 성인의 평균 걷기 속도(1.5m/s), 지게차의 차폭(3m, 현대 FOLEX 300D-9 기준), KOSHA 지침상의 60cm 이상 여유 공간을 고려하여 Table 2와 같이 산출하였다(KOSHA, n.d.).

Table 2. Risk zones based on distance

Zone	Distance	Visual feedback	Meaning	Consequence
Caution	20~30 m	Green	Possible hazard perception	Unnecessary avoidance (Error)
Warning	10~20 m	Yellow	Avoidance execution	Successful avoidance (Success)
Emergency	~10 m	Red	Immediate avoidance	Accident (Fail)

시나리오는 차량의 브레이크등 점등 여부에 따라 분기되었다. 차량이 주의 구역에 진입했을 때 브레이크등이 점등되어 있으면 운전자의 정지 의사가 확인된 것으로 간주하여 참가자는 블록 쌓기 과업을 지속하였다. 이 경우 인터페이스는 3.6초간 표시되며 차량은 9초 후 정지하였다. 반대로 브레이크등이 점등되지 않은 경우에는 위험 상황으로 인식하여 위험 구역(10~20m)에서 위험 회피 과업을 수행하도록 하였으며, 이 경우 인터페이스는 위험 인식 구간에서 3.6초, 위험 회피 과업 구간에서 7.2초간 표시되고 차량은 11초 후 정지하였다. 긴급 구역(~10m)까지 차량이 진입하면 회피 실패로, 주의 구역에서 회피 행동을 수행한 경우에는 오류로 처리하였다.

3.5 Dependent variables

본 연구에서는 과업 수행 로그를 바탕으로 한 4개의 객관적 지표(과업 수행도(Task performance), 회피 성공률(Avoidance success rate), 회피 완료 시간(Avoidance completion time), 고개 회전 횟수(Number of head rotations))가 측정되었으며, 수행 과업에 대한 작업 부담(Workload)과 각 인터페이스 유형에 대해 느낀 행동유도성(Affordance) 정도를 주관적 설문을 통해 평가하도록 하였다(Table 3). 작업 부담은 NASA-TLX를 통해 6개의 하위 차원으로, 행동유도성은 Affordance Rating (Ronchi and Nilsson, 2015)을 통해 3개의 하위 차원으로 구분되어 평가되었다.

Table 3. Dependent variables and evaluation metrics

Category	Measure	Definition
Objective measures	Task performance	Block placement accuracy and number of completed patterns
	Avoidance success rate	Ratio of correctly handled trials (successful avoidance when required, and correct task continuation when the vehicle stopped)
	Avoidance completion time	Time from entering the warning zone to pressing the avoidance button (ms)
	Number of head rotations	Number of head rotations toward the hazard during the task
Subjective measures	Workload (6 dimensions)	Measure of workload according to NASA-TLX (mental demand, physical demand, temporal demand, performance, effort, frustration)
	Affordance (3 dimensions)	Measure of affordance according to Affordance Rating (sensory, cognitive, physical affordance)

3.6 Procedure

실험은 실험 안내, 사전 준비, 기초 훈련, 본 실험, 사후 설문의 순서로 진행되었다. 연구자는 실험 목적과 기기 사용 방법을 설명하고 동의서를 받은 후, 참가자에게 HMD 착용 및 VR 컨트롤러 사용법을 교육하였다. 참가자는 본 실험과 동일한 가상 환경에서 인터페이스 유형과 과업을 분리하여 개별적으로 경험하는 튜토리얼을 수행하였다. 본 실험에서 참가자는 각 인터페이스 유형에 대해 방향(4) × 브레이크등 점등 여부(2) × 반복(2)의 총 16회 시행을 수행하였으며, 인터페이스 유형 전환 시 2분간의 휴식 시간이 제공되었다. 학습 효과를 최소화하기 위해 라틴 스퀘어(Latin square) 설계에 따라 인터페이스 제시 순서를 참가자 간에 상이하게 배정하였다. 모든 유형의 실험 종료 후 참가자는 설문지를 통해 사용자 경험을 평가하였고, 가장 선호하는 유형과 그 이유에 관한 인터뷰를 진행하였다.

3.7 Data analysis

인터페이스 유형에 따른 각 평가지표의 차이를 검증하기 위해 R 소프트웨어를 이용하여 반복측정 일원분산분석(one-way repeated measures ANOVA)을 실시하였다. 이때, 측정 오류로 인해 회피 완료 시간에 대해서는 한 개 샘플이 분석에서 제외되었다. 구형성 가정은 Mauchly 검정으로 확인하였으며, 가정이 위배된 경우 Greenhouse-Geisser epsilon 보정을 적용하였다. 유형 간 유의한 차이가 발견된 평가지표에 대해 Bonferroni 방법으로 사후 검정을 실시하였다. 아울러 실험 종료 후 진행한 인터뷰를 기반으로 사용자 경험 및 인지적 부담에 대한 질적 분석을 병행하였다.

4. Results

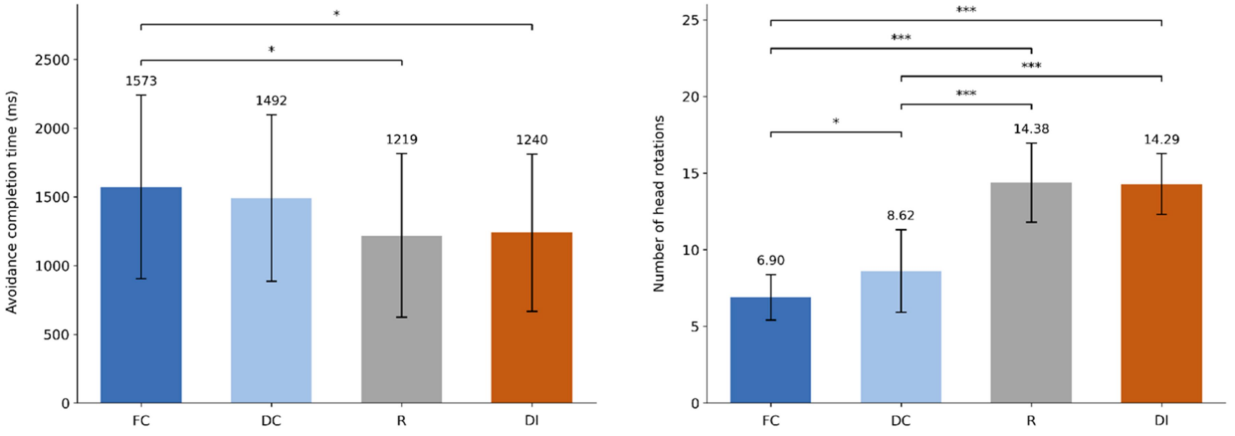
4.1 Objective measures

인터페이스 유형에 따른 객관적 지표의 분석 결과는 Table 4 및 Figure 4와 같다. 회피 완료 시간은 인터페이스 유형에 따라 유의한

차이를 보이는 것으로 확인되었다(F2.82, 53.62)=3.44, p=.025). 사후 검정 결과, 고정형 카메라 뷰에 비해 레이더(p=.019) 및 위험 방향 지시(p=.033)에서 회피 완료 시간이 유의하게 짧은 것으로 나타났다(Figure 4(a)). 고개 회전 횟수 또한 인터페이스 유형 간 유의한 차이를 보였다(F1.82, 36.31)=61.96, p<.001). 사후 검정 결과 Figure 4(b)와 같이, 방향별 카메라 뷰에 비해 레이더와 위험 방향 지시 유형에서 고개 회전 횟수가 유의미하게 많았으며(p<.001), 고정형 카메라 뷰에 비해 방향별 카메라 뷰 유형에서 유의미하게 많은 것으로 확인되었다(p=.027). 반면, 과업 수행도와 회피 성공률에서는 인터페이스 유형 간 유의한 차이가 확인되지 않았다(F2.39, 47.83)=0.22, p=.841; F(1.36, 27.16)=0.26, p=.683).

Table 4. Results of objective measures (mean (SD))

Measure	FC	DC	R	DI	p-value
Task performance	116.8 (29.0)	113.8 (30.5)	112.5 (28.0)	112.6 (25.8)	.841
Avoidance success rate	0.979 (0.041)	0.964 (0.061)	0.953 (0.174)	0.958 (0.054)	.683
Avoidance completion time (ms)	1573 (668)^{A}	1492 (605)^{AB}	1219 (595)^{B}	1240 (571)^{B}	.025
Number of head rotations	6.90 (1.48)^{A}	8.62 (2.69)^{B}	14.38 (2.58)^{C}	14.29 (1.98)^{C}	<.001



(a) Avoidance completion time (b) Number of head rotations

Figure 4. Results of objective measures: (a) avoidance completion time, (b) number of head rotations (error bars indicate SD; *p<.05, **p<.01, ***p<.001)

4.2 Subjective measures

NASA-TLX를 통한 작업 부담 분석 결과는 Table 5 및 Figure 5(a)와 같다. 여섯 개 하위 항목 중 시간적 요구(F2.16, 43.19)=3.56, p=.034), 노력(F2.48, 49.56)=3.22, p=.039), 불만(F2.32, 46.50)=4.08, p=.019)에서 인터페이스 유형 간 유의한 차이가 나타났다. 사후 검정 결과, 세 항목 모두에서 고정형 카메라 뷰가 레이더에 비해 유의하게 낮은 작업 부담을 보였다(p=.031; p=.015, p=.039).

Table 5. Results of NASA-TLX (mean (SD)). Superscripts denote homogeneous groups

Measure	FC	DC	R	DI	p-value
Mental demand	21.19 (19.29)	24.76 (17.21)	32.86 (22.34)	25.71 (20.02)	.095

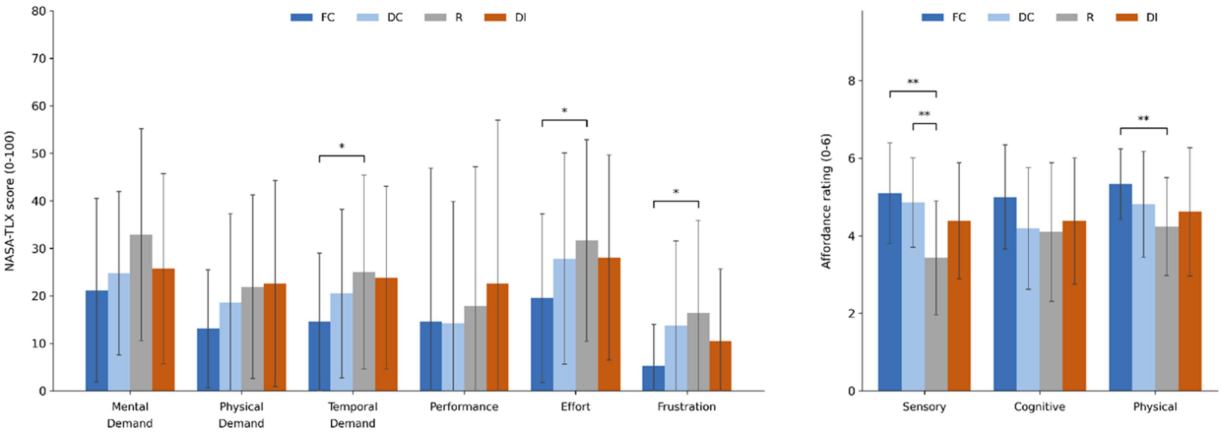
Table 5. Results of NASA-TLX (mean (SD)). Superscripts denote homogeneous groups (Continued)

Measure	FC	DC	R	DI	*p*-value
Physical demand	13.10 (12.40)	18.57 (18.72)	21.90 (19.33)	22.62 (21.72)	.085
Temporal demand	14.52 (14.48)^{A}	20.48 (17.74)^{AB}	25.00 (20.43)^{B}	23.81 (19.23)^{AB}	.034
Performance	14.52 (32.36)	14.29 (25.56)	17.86 (29.31)	22.62 (34.34)	.167
Effort	19.52 (17.74)^{A}	27.86 (22.22)^{AB}	31.67 (21.23)^{B}	28.10 (21.59)^{AB}	.039
Frustration	5.24 (8.73)^{A}	13.81 (17.74)^{AB}	16.43 (19.44)^{B}	10.48 (15.24)^{AB}	.019

Affordance Rating 분석 결과는 Table 6 및 Figure 5(b)와 같다. 세 개 하위 항목 중 감각적 식별성(F2.67, 53.36)=9.06, p<.001)과 행동 유도성(F2.42, 48.44)=4.08, p=.017)에서 인터페이스 유형 간 유의한 차이가 확인되었다. 사후 검정 결과, 두 항목 모두에서 레이더가 고정형 카메라 뷰에 비해 유의하게 낮은 점수를 보였으며(p=.003; p=.003), 방향별 카메라 뷰 또한 감각적 식별성에서 레이더보다 유의하게 높은 점수를 보였다(p=.004).

Table 6. Results of affordance rating (mean (SD)). Superscripts denote homogeneous groups

Measure	FC	DC	R	DI	*p*-value
Sensory affordance	5.10 (1.300)^{A}	4.86 (1.153)^{A}	3.43 (1.469)^{B}	4.38 (1.499)^{AB}	<.001
Cognitive affordance	5.00 (1.342)	4.19 (1.569)	4.10 (1.786)	4.38 (1.627)	.189
Physical affordance	5.33 (0.913)^{A}	4.81 (1.365)^{AB}	4.24 (1.261)^{B}	4.62 (1.658)^{AB}	.017



(a) NASA-TLX (b) Affordance rating

Figure 5. Results of subjective measures: (a) NASA-TLX, (b) Affordance rating (error bars indicate SD; *p<.05, **p<.01, ***p<.001)

4.3 Interview

인터페이스 유형에 대한 선호도는 고정형 카메라 뷰(13명), 위험 방향 지시(5명), 방향별 카메라 뷰(3명), 레이더(없음) 순으로 높은 것으로 확인되었다(Figure 6).

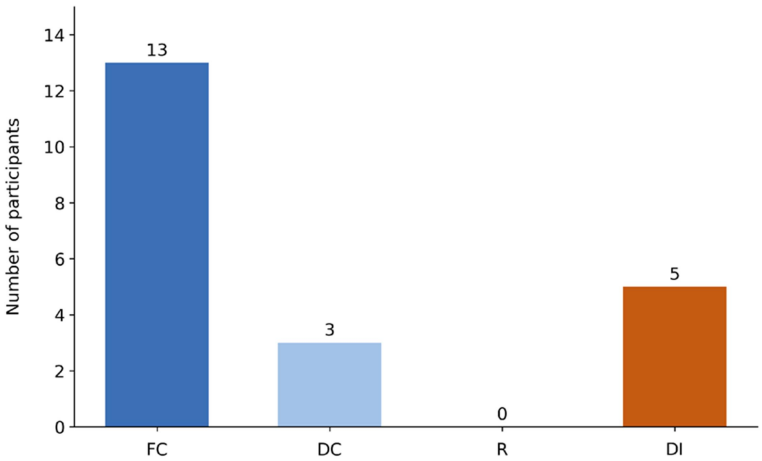


Figure 6. The most preferred interface type

고정형 카메라 뷰에 대해서는 카메라 뷰가 한 위치에 고정되어 과업 중 확인이 쉽고, 색상과 방향 문구로 위험 구간을 한눈에 식별할 수 있으며, 고개를 돌리지 않아도 브레이크등 점등 여부를 확인할 수 있어 과업 집중도가 올라간다는 긍정적 평가가 다수였다. 다만 작업대와 카메라 뷰 위치가 겹치는 경우의 시야 방해와, 시선 이동에 따라 위험 방향 지시 문구가 바뀌는 것에 대해 혼란스러워, 위험 방향 지시를 화살표로 하는 것이 더 직관적일 것 같다는 의견이 확인되었다. 방향별 카메라 뷰는 카메라 뷰가 차량 위치에 따라 표시되어 위험 방향 파악이 직관적이라는 긍정 평가가 있었으나, 카메라 뷰가 과업 시야를 가리고 시선을 따라오는 점이 불편과 피로감을 유발하며 방향 구분에 혼란이 발생해 위험 회피가 지연되는 경우가 있었다는 부정적 평가가 다수를 이루었다. 레이더는 거리와 위험 정도를 동시에 파악할 수 있고 시야 좌측에 고정되어 과업 흐름에 큰 방해가 되지 않는다는 긍정 평가가 있었으나, 위험 객체를 나타내는 점 아이콘의 가시성이 부족하여 과업 집중 시 위험 접근을 놓치기 쉽고, 브레이크등 점등 여부를 매번 직접 확인해야 하며, 위험 확인을 위해 인터페이스를 지속적으로 주시해야 해 피로가 증가한다는 부정적 의견이 많았다. 위험 방향 지시는 화살표를 통한 방향 표시가 레이더보다 직관적이고 시야를 가리지 않아 과업 방해가 적다는 긍정 평가가 있었으나, 브레이크등 확인의 번거로움과 과업 몰입 시 알림을 놓칠 수 있다는 점, 가시성 문제가 지적되었다.

5. Discussion

5.1 Comparison of AR interfaces

실험 결과, 인터페이스 유형은 과업 수행도와 회피 성공률에 유의한 차이를 유발하지 않았다. 이는 작업을 수행하다 위험 발생 시 회피를 지원해야 하는 충돌경보 시스템의 기본 성능에 있어 인터페이스 간 차이가 유의미하지는 않음을 의미한다. 반면, 작업 수행 및 위험 회피의 효율성과 관련된 회피 완료 시간과 고개 회전 횟수에서는 인터페이스 유형 간 유의한 차이가 있음이 확인되었다. 회피 완료 시간이 상대적으로 긴 인터페이스 유형(고정형 카메라 뷰, 방향별 카메라 뷰)은 상대적으로 고개 회전 횟수가 적은 것으로 분석되었다. 이는 카메라 뷰의 제공으로 인해 직접 관찰 요구가 저감되며, 시야 밖의 위험 대상에 대한 회피 긴급성 인식 기준이 낮아졌기 때문으로 해석된다. 위험에 대한 주의가 낮아지는 안전 불감(safety complacency) 상태 유발로 인한 회피 반응을 지연시킬 수 있다는 점을 감안할 때(Parasuraman et al., 1993; Wilde, 1982), 카메라 뷰의 제공은 작업 수행에는 이점이 있을 수 있으나, 적극적 안전 행동 유도 측면에서는 부정적일 수 있을 것으로 판단된다.

한편, 레이더는 작업 부담, 행동유도성, 선호도 측면에서 상대적으로 낮은 평가를 받았다. 이는 타 인터페이스 유형과는 달리, 1인칭 시점의 정보가 아니기 때문에 위험 대상의 위치 정보를 즉각적으로 인식하는 것이 어려우며, 인터페이스 특성 상 위험 대상이 점으로 표시되어 가시성이 떨어지기 때문인 것으로 판단된다.

본 연구 결과를 종합하면 모든 인터페이스 유형은 충돌경보 시스템에 적용될 수 있으나, 주 과업 수행 및 선호도 측면에서는 고정형 카메라 뷰가, 안전 측면에서는 위험 방향 지시가 권장될 수 있다. 그러나, 현실 작업 환경에서의 적용을 고려할 때 위험 방향 지시를 활용하는 것이 보다 바람직할 것으로 예상된다. 본 실험은 하나의 위험 대상이 근접해 오는 상황을 가정하여 이루어졌으나, 실제 현장에서는 복수의 위험 대상이 동시에 근접할 수 있다. 이에 따라 표시 정보가 단순하고 크기가 상대적으로 작은 위험 방향 지시 유형이 시야 확보 및 복수 정보 처리에 유리할 것으로 판단된다. 또한 고정형 카메라 뷰는 시스템 개발 난도가 보다 높다. 작업자를 중심으로 사각을 비출 수 있는 카메라의 부착이 추가적으로 요구되며, 동일한 위치 조건에서도 작업자의 자세에 따라 카메라 뷰가 달라지는 문제가 존재하며, 실시간 영상 처리 등의 기술적 부담 또한 클 것으로 예상된다. 이에 비해 위험 방향 지시는 화살표라는 단순한 정보만으로 위험 방향을 명확히 전달하면서 작업 시야를 거의 가리지 않아, 다수의 위험이 동시에 존재하고 시야가 계속 변화하는 실제 건설 현장에 보다 적합한 것으로 판단된다. 정리하면, 시야 방해가 적고 구현 부담이 낮으면서도 빠르고 명확한 반응을 유도하는 위험 방향 지시가 AR 기반 충돌경보 시스템에 적절한 인터페이스 유형으로 권장된다.

5.2 Limitations and future works

본 연구는 다음과 같은 한계를 가진다. 첫째, 참가자 구성의 한계이다. 참가자가 모두 20대 대학생으로 구성되어 연령별·숙련도별 차이를 반영하지 못하였으므로, 실제 건설 현장 작업자에게 결과를 일반화하는 데에는 제약이 있다. 실제 작업자는 주 과업에 대한 숙련도, 장비에 대한 이해, 현장 특유의 인지 패턴 등에서 차이를 보일 수 있다.

둘째, 실험 환경의 한계이다. 실제 현장에서의 실증이 아닌 실험실 환경에서 수행되어 현장의 복잡성과 소음, 진동 등 환경적 요인이 반영되지 않았다. 또한 실제 작업 대신 블록 쌓기 과업을 부여하였다는 점에서도 실제 환경과의 괴리가 다소 존재한다. 뿐만 아니라, AR 웨어러블 글래스는 투명 렌즈를 통해 실제 환경 위에 정보를 오버레이 하는 방식인 데 반해, 본 연구에서 사용한 VR HMD는 완전 몰입형 환경이라는 점에서 빛, 먼지, 복잡한 배경 등 현실의 간섭 요소를 온전히 반영하지 못하며, 이로 인해 시각적 간섭 및 가독성 측면에서 실제 AR 환경과 결과가 달라질 수 있다.

셋째, 위험 구조의 한계이다. 본 실험은 단일 위험이 순차적으로 제시되는 단순화된 구조로 진행되어, 다중 위험이 동시에 존재하는 실제 현장과는 차이가 있다. 향후 연구에서는 실제 건설 현장에서 작업 경력자를 대상으로 실증을 수행하여 직무 숙련도와 위험 인지 패턴이 AR 경고 시스템의 성능에 미치는 영향을 분석하고, 이를 기반으로 시스템을 고도화할 필요가 있다. 아울러 다중 위험 상황과 다양한 작업 유형에서 AR 경고 시스템의 방해 효과와 안전 효과를 측정함으로써 인터페이스의 범용성을 확보할 필요가 있다.

6. Conclusion

본 연구에서는 건설 현장 차량 충돌 사고 예방을 위한 AR 웨어러블 경고 인터페이스 4가지 유형을 설계하고, VR 환경에서의 반복측정 실험을 통해 인간공학적 비교 평가 실험을 수행하였다. 평가 결과, 네 가지 인터페이스 유형은 과업 수행도와 회피 성공률 측면에서는 유의한 차이가 없었으나, 회피 완료 시간, 고개 회전 횟수, 주관적 평가에서는 유의한 차이가 있는 것으로 분석되었다. 이를 통해 고정 카메라 뷰와 위험 방향 지시 유형에 서로 다른 측면에서 나머지 인터페이스 유형에 대비한 우월성이 존재함을 확인하였다. 최종적으로는 구현성, 현실성 등을 고려할 때 위험 방향 지시 유형이 권장됨을 설명하였다. 본 연구의 결과는 건설 현장뿐 아니라 다양한 작업 현장 내 장비 및 기계와의 충돌을 방지하는 작업자용 웨어러블 안전 장비를 개발하는데 활용됨으로써, 산업 안전을 증진시키는 데 기여할 수 있을 것으로 기대된다.

Acknowledgement

이 논문은 국립부경대학교 자율창의학술연구비(2024년)에 의하여 연구되었음.

References

Aliyev, A., Zhou, B., Hevesi, P., Hirsch, M. and Lukowicz, P., HeadgearX: A connected smart helmet for construction sites. *Adjunct*

Proceedings of the 2020 ACM International Joint Conference on Pervasive and Ubiquitous Computing and the 2020 ACM International Symposium on Wearable Computers (pp. 184-187), 2020.

Ardecani, F.B., Kumar, A., Sabeti, S. and Shoghli, O., Neural correlates of augmented reality safety warnings: EEG analysis of situational awareness and cognitive performance in roadway work zones. *Safety Science*, 185, 106802, 2025.

Ardecani, F.B. and Shoghli, O., Assessing workers' neuro-physiological stress responses to augmented reality safety warnings in immersive virtual roadway work zones. *arXiv preprint arXiv:2506.03113*, 2025.

Baek, J. and Choi, Y., Smart glasses-based personnel proximity warning system for improving pedestrian safety in construction and mining sites. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 17(4), 1422, 2020.

Gong, P., Lu, Y., Lovreglio, R., Yang, X. and Deng, Y., Comparing the effectiveness of AR training and slide-based training: The case study of metro construction safety. *Safety Science*, 176, 106561, 2024.

Hyundai Engineering & Construction, *Hyundai E&C introduces IoT-based smart safety management system 'HIoS'*. Hyundai E&C Press Release, 2018.

Jo, B.W., Lee, Y.S., Khan, R.M.A., Kim, J.H. and Kim, D.K., Robust Construction Safety System (RCSS) for collision accidents prevention on construction sites. *Sensors*, 19(4), 932, 2019.

Ke, J., Du, J. and Luo, X., The effect of noise content and level on cognitive performance measured by electroencephalography (EEG). *Automation in Construction*, 130, 103836, 2021.

Klatte, M., Bergström, K. and Lachmann, T., Does noise affect learning? A short review on noise effects on cognitive performance in children. *Frontiers in Psychology*, 4, 578, 2013.

Korea Fire Protection Association (KFPA), *Introduction cases of smart construction safety systems*. Disaster Focus Webzine, 2019.

Korea Occupational Safety and Health Agency (KOSHA), *Ergonomics reference room*. KOSHA, n.d.

Mastrolembo Ventura, S., Bellagente, P., Rinaldi, S., Flammini, A. and Ciribini, A.L., Enhancing safety on construction sites: A UWB-based proximity warning system ensuring GDPR compliance to prevent collision hazards. *Sensors*, 23(24), 9770, 2023.

Ministry of Employment and Labor (MOEL), *Standard work plan for hazardous machinery and equipment for the prevention of serious accidents at construction sites* (revised). MOEL, 2025.

Occupational Safety and Health Administration (OSHA), *Visual and audible alarm guidelines*. OSHA, 2020.

Parasuraman, R., Molloy, R. and Singh, I.L., Performance consequences of automation-induced 'complacency'. *The International Journal of Aviation Psychology*, 3(1), 1-23, 1993.

Ronchi, E. and Nilsson, D., *A virtual reality experiment on the design of flashing lights at emergency exit portals for road tunnel evacuations*. Department of Fire Safety Engineering and Systems Safety, Lund University, 2015.

Sabeti, S., Ardecani, F.B. and Shoghli, O., Augmented reality safety warnings in roadway work zones: Evaluating the effect of modality on worker reaction times. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 169, 104867, 2024.

Wilde, G.J.S., The theory of risk homeostasis: Implications for safety and health. *Risk Analysis*, 2(4), 209-225, 1982.

Wu, S., Hou, L., Zhang, G.K. and Chen, H., Real-time mixed reality-based visual warning for construction workforce safety. *Automation in Construction*, 139, 104252, 2022.

Wu, Z., Duan, W., Liu, G. and Ai, X., Evaluating the effects of brake light flicker frequency on cognitive conspicuity during visual dark adaptation: A 360-degree simulated driving study. *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*, 110, 247-259, 2025.

Yadav, N., Sadeghi, N. and Kang, J., On-body placement of wearable safety promotion devices based on wireless communication for construction workers-on-foot: State-of-the-art review. *Sensors*, 22(9), 3134, 2022.

Yang, X. and Roofigari-Esfahan, N., Vibrotactile alerting to prevent accidents in highway construction work zones: An exploratory study. *Sensors*, 23(12), 5651, 2023.

Author listings

Taeyong Kim: comfine@pukyong.ac.kr
Highest degree: Undergraduate student, Department of Systems Management and Safety Engineering, Pukyong National University
Position title: Undergrad. Student, Department of Systems Management and Safety Engineering, Pukyong National University
Areas of interest: Augmented Reality, Human-AI Interaction

Yushin Lee: ysl@pknu.ac.kr
Highest degree: PhD, Department of Industrial Engineering, Seoul National University
Position title: Associate Professor, Major in Industrial Data Science & Engineering, Department of Industrial and Data Engineering, Pukyong National University
Areas of interest: Human-computer Interaction, Usability Evaluation, Interaction Design