

시선 추적 기술을 활용한 건설작업자 위험 인지 기술 동향



안창범 서울대학교 건축학과 부교수, cbahn@snu.ac.kr
김명준 서울대학교 건축학과 박사과정, allofme0@snu.ac.kr

1. 서론

건설산업은 대표적인 고위험 산업으로, 건설작업자들은 위험한 건설 현장에서 무거운 자재 운반과 같은 고강도의 노동을 수행함으로써 높은 산업재해의 위험을 경험하게 된다. 실제로 고용노동부 통계에 따르면 2021년 산업재해자 중 24.4%, 사고사망자 중 50.4%가 건설산업에서 발생했으며, 재해율과 사망만인율은 전산업 대비 2배 높은 수준을 보일 뿐만 아니라 매년 증가하고 있다. 2022년 산업 종사자의 생명을 보호하기 위한 ‘중대재해 처벌 등에 관한 법률’이 시행된 이래로, 건설회사들은 안전관리체제의 정비 및 안전기술인력 확충, 체험형 안전교육의 도입 등의 투자와 노력을 진행했지만 아직 그 효과는 아직 미흡한 실정이다.

건설현장에서 발생하는 대부분의 안전사고는 작업자의 위험 행동에 기인하는 경우가 많으며, 안전수칙 미준수와 같은 위험 행동은 주위의 위험을 관측하지 못하거나, 위험을 관측했음에도 불구하고 잠재적인 위험성을 올바르게 판단하지 못하는 위험 인지 오류에서 기인한다(Tixier, 2014). 따라서, 안전사고의 발생을 근절하기 위해서는 작업자 위험 행동의 근본적인 원인인 위험 인지 오류의 발생을 정확하게 파악하여 관리해야 한다. 하지만, 작업자의 위험 인지 오류의 발생은 표면적으로 관찰이 불가능하여, 기존 안전관리 체계에서는 교육훈련 등을 통한 안전관련 주의력 제고 등 수동적인 대책에 머물러왔다(Seo, 2018). 위험 인지 오류는 작업자 개인의 주의력 부족, 지시에 대한 이해 부족, 안전 수칙에 대한 잘못된 이해와 같은 인간적 결함과 위험에 대한 반복적인 노출에서 기인하는 위험 둔감화와 같은 심리적 현상에서 복

합적으로 기인하기에(Bamford et al., 2012), 안전교육 같은 수동적인 대책으로 예방하기에는 어려움이 있다.

이러한 문제점들을 극복하고자, 뇌파(EEG, electroencephalogram), 기능적 근적외선 분광법(fNIRS), 시선 추적(eye tracking) 등 인지심리학에 기반한 연구 방법론이 건설작업자의 위험에 대한 인지능력 변화를 관측하는데 활용되고 있다. 뇌파 측정은 두뇌를 구성하는 신경세포들의 전기적 활동을 두피에서의 전극을 통해 측정하고, 기능적 근적외선 분광법은 대뇌의 혈류량을 파악하여 활성화 상태를 측정하여 뇌의 활동에 대한 정보를 얻는 데 사용된다. 이 두가지 방법론은 뇌 활동 정보를 기반으로 인지 과정에 대한 정보를 분석할 수 있지만, 위험 인식에 있어 필수적인 시각적 주의 여부를 포착하기에는 어려움이 있다(Zhang et al., 2019).

시선 추적은 머리와 눈의 위치, 안구의 움직임을 시선추적장치(eye tracker)를 활용하여 관측하는 기법이다. 인간의 안구 움직임은 시각 자극에 대해서 관심을 어디에 두고 있는지, 시선을 끄는 요소는 어떤 것인지 등의 지각 과정과 밀접한 관련이 있으며(Noton and Stark, 1971), 개인의 시각적 주의를 포착하기 위해 다양한 분야에서 활용되었다. 건설 산업에서도 건설작업자의 시각 패턴을 다양한 상황에서 분석하고, 개인의 위험 인식 및 대응 과정에 대한 심층적인 이해를 제공할 수 있는 가능성을 보였다(Hasanzadeh et al., 2019). 특히, 개인의 인지능력을 평가할 수 있는 방법론들이 있어 헬멧과의 물리적 간섭으로 인해 현장 내에서의 착용이 어려운 뇌파와 기능적 근적외선 분광법에 비해 안경 형태의



그림 2. a) 고정형 시선추적장치 Eyelink 1000 Plus (<https://www.sr-research.com>).
 b) 휴대용 시선추적장치 Tobii Pro glasses 3 (<https://www.tobii.com>).
 c) 가상현실 기반 시선추적장치 Vive Pro Eye (<https://www.vive.com>)

센서를 사용하여 물리적인 간섭이 최소화된다는 장점을 보유하고 있다. 이러한 배경에서, 시선 추적을 활용한 건설작업자의 위험 인지능력 분석은 건설 안전 연구에서 가장 빠르게 발전하는 기술 중 하나로 평가되고 있다(Cheng et al., 2022). 이에 본고에서는 시선 추적 기술에 있어 시선추적장치와 이를 활용한 생체 정보의 수집에 대해 간략히 소개하고, 이를 활용한 건설작업자 안전 관리와 관련된 최신 연구에 대하여 간략히 소개하고자 한다.

2. 시선추적장치와 데이터 분석

독일의 심리학자 Rudolf Arnheim은 눈으로 본다는 것은 곧 무언가 시선을 끄는 것이 있었다는 것이며, 바라보는 행위를 측정하여 분석한다면 개인의 관심을 유도하는 요소를 도출할 수 있다고 하였다. 무엇을 ‘보았다’ 라고 인식하기 위해서는 자극이 시야의 중심와(fovea centralis)에 노출되어야 한다. 중심와는 동공의 중심에 위치해 있으며, 고해상도의 변별 기능을 가진 원추세포가 몰려 있어 물체의 형태, 밝기 등을 세밀하게 관찰할 수 있는 영역이다. 눈동자의 흰자위와 검은자위의 색 경계를 검출하여 중심와를 찾고, 대응되는 위치를 바라보는 지점으로 가정하여 데이터를 측정하는 원리의 시선추적장치가 주로 사용되고 있다(Kim, 2016).

건설 안전 연구에서는 고정형 시선 측정 장치, 휴대용 시선 추적장치, 가상현실 기반 시선추적장치의 세가지 유형의 시선추적장치가 주로 사용된다. 고정형 시선추적장치는 디스플레이에 부착하는 형태로, 실험실 환경에서 디스플레이 앞에 앉아 이미지나 비디오와 같은 시각적 자극에 기반한 작업을 수행하는 과정에서의 안구 움직임을 관측하는데 사용된다(Jeelani et al., 2017). 휴대용 시선추적장치에 비해 주변

환경의 영향을 최소화하여 관심 영역(AOI, Area of Interest)과 실험 환경을 설계할 수 있지만, 실제 건설 현장에서의 일상적인 시선 변화를 측정할 수 없는 한계가 존재한다(Chong et al., 2021). 휴대용 시선추적장치는 가볍고 휴대가 가능한 안경 모양의 센서이다. 고정형 시선추적장치에 비해 낮은 정확도와 샘플링 주파수를 보이지만 참가자가 자유롭게 걸으면서 시선 데이터를 기록할 수 있어 현장에서의 작업 중에 사용자의 안구 움직임을 수집할 수 있다. 하지만, 실험 환경에 대한 제어가 어렵고, 실험자의 걸음걸이와 같은 움직임에 의해 데이터가 영향을 받을 수 있는 단점이 존재한다. 가상현실 기반 시선추적장치는 가상현실 HMD (Head Mounted Display)에 포함되거나, 결합될 수 있는 시선추적장치로, 몰입된 가상환경에서의 시선 변화를 관측함으로써 제어된 환경에서 실제 건설 현장과 유사한 데이터를 얻을 수 있다(Kim et al., 2021). 시선추적장치의 샘플링 속도는 30~2,000 Hz로 다양하며(Cognolato et al. 2018), 고정형 시선추적장치가 다른 장치들에 비해 일반적으로 더 높은 샘플링 속도와 정확도를 보인다(Eyelink 1000 Plus: 0.15°, 2000Hz). 일반적으로 사용되는 휴대용 시선추적장치인 Tobii Pro Glasses 3는 0.6°의 정확도와 50-100Hz의 샘플링 속도, 가상현실 기반 시선추적장치인 HTC Vive pro eye는 0.5° - 1.1°의 정확도와 120Hz의 샘플링 속도로 시선을 추적한다.

시선 추적 데이터 분석에서 가장 우선시해야 할 단계는 관심 영역을 정의하는 것이다. 관심 영역은 장면 안에서 주목해야 할 항목과 위치를 의미하며, 건설 안전 연구에서는 주로 위험과 관련된 요소들이 관심 영역으로 설정된다(Comu et al., 2021). 다음으로는 수집한 시선 추적 데이터에서 분석에 필요한 지표를 선정해야 한다. 사람의 시선에서 나타나는

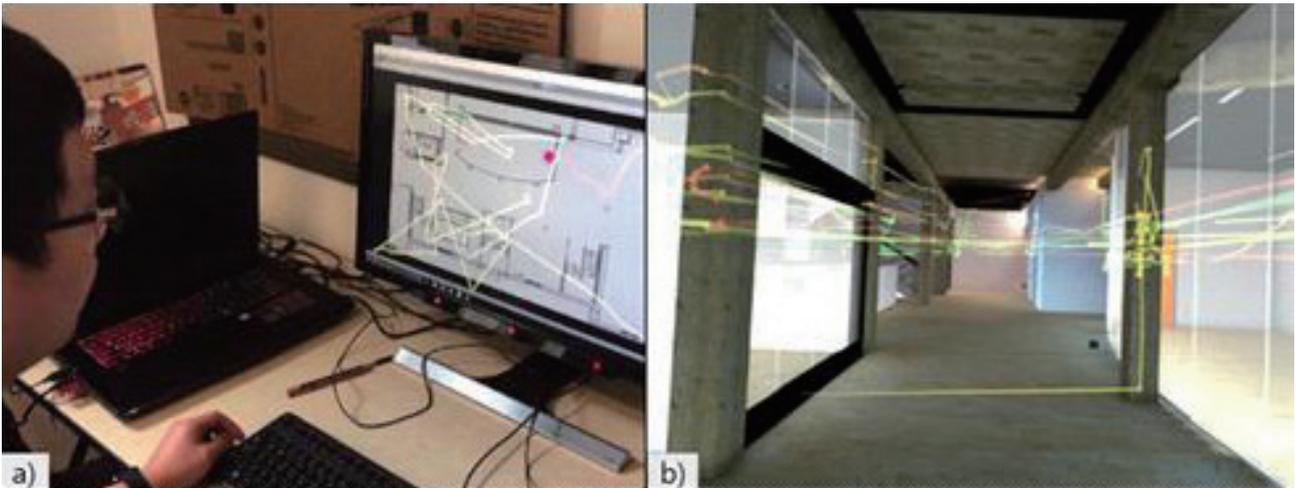


그림 3. a) 2D 이미지에 대한 시선고정과 도약. b) 3D 환경에서의 시선고정과 도약 (Shi et al., 2020)

주시특성에는 짧은 시간 동안 시선이 집중되는 시선고정 (fixations), 고정된 상태에서 눈동자가 자극을 받아 다른 위치로 이동하는 도약(saccade) 이 있다. 시선고정에 기초하여 고정된 시간, 고정 시간의 비율, 첫번째 시선 고정까지의 시간, 시선고정의 정확도, 도약과 관련된 시선 도약 속도, 그 외에도 동공의 직경, 눈 깜빡임 횟수 등이 시선 추적 데이터 분석을 위한 지표로 사용된다.

이러한 지표들은 위험에 대한 주의력 및 상황 인지력과 높은 연관성을 보유하고 있으며, 기존 건설현장 안전관리 체계에서 이해하지 못하던 영역인 건설작업자의 위험 인지능력에 직·간접적 접근이 가능하게 한다. 안전사고의 근본적 원인을 도출하는데 도움을 줄 뿐 아니라, 시각인지원리에 기초한 다양한 현장 안전관리 솔루션을 개발하는데 활용 가능하다.

3. 시선 추적과 건설작업자 위험 인지능력 평가

건설작업자의 위험 인지능력을 평가하기 위한 기존의 연구들은 위험한 건설현장의 사진 또는 3D 환경을 제시하고, 그 안에서 보이는 위험에 대해 작업자가 스스로 보고 및 응답하는 방식에 의존했다(Albert et al. 2014; Namian et al. 2016). 이러한 실험 환경은 위험에 대한 맥락적 정보가 부족하고, 실험자의 응답이 주관적이기 때문에 실제 위험에 대해 인지하는 정도를 표현하는 데 한계가 있었다. 시선추적장치를 통한 실험자의 무의식적인 안구 움직임 데이터 수집은 이러한 한계를 해결하고 정량화된 데이터를 기반으로 객관적인 결과를 도출할 수 있는 기반이 되었다.

엄밀하게 설계된 실험 시나리오에 기반한 관심 영역을 기반으로 추출한 시선 추적 지표에는 건설작업자의 안전 행동과 밀접한 관련이 있는 다양한 인지 관련 정보가 포함되어 있다. 작업자의 위험에 대한 주의 할당, 상황 인식(situational awareness), 작업 기억 부하와 같은 정보들이 시선 추적 지표를 기반으로 측정되었으며, 작업자의 위험에 대한 주의력 및 위험 인식 수준을 분석하기 위해 사용될 수 있음이 다수의 연구를 통해 검증되었다. Hasanzadeh et al. (2017) 은 작업으로 인한 기억 부하와 건설현장 이미지 내에 존재하는 추락 위험에 대한 인지능력 사이의 연관성을 도출하기 위해 시선 추적 장치를 활용한 실험을 진행했다. 이미지 내 건물 가장자리, 지붕, 개구부 및 잘못된 추락 방지 펜스의 사용 등을 관심 영역으로 정의하고, 기억 부하를 독립 변수로 선정하여 변화를 준 뒤 관심 영역에 대한 시선고정 시간, 첫번째 시선고정까지의 시간, 시선고정 횟수를 분석을 위한 지표로 사용했다. 실험 결과 인지부하가 높을 때 위험 요소에 적절히 주의를 기울이지 못하며, 특히 무주의 맹시(Inattentional Blindness)를 유발하여 사고 발생 위험을 높임과 동시에 건설작업자의 인지부하를 시선추적장치를 활용하여 측정할 수 있는 잠재성을 확인하였다. Liu et al. (2021) 은 현장 내 위험에 대한 설명이 포함된 의미적 단서(semantic cue)를 안전 관리자에게 제공하는 것이 해당 설명 내에 포함되어 있지 않은 새로운 위험의 발견에 미치는 영향을 분석하기 위해 시선 추적장치를 사용했다. 의미적 단서에 포함된 위험, 포함되지 않은 위험들을 관심 영역으로 선정하여 도약 속도, 시선 고정 유무에 따른 위험 인지능력의 변화를 시선 추적 지표를 활용하여 분석을 진행했다. 그 결과 의미적 단



서를 제공하는 것이 해당 단서 안에 포함되지 않은 위험에 대한 인지능력을 저하시키지 않으면서 의미적 단서 내 포함된 위험에 대한 인지능력을 강화할 수 있음을 확인했다. 이와 같이 고정형 시선추적장치와 디스플레이를 사용해 건설 작업자에 대한 위험 인지능력을 평가할 수 있으며, 이는 건설 작업자 개개인에 대해 위험 인지 취약점을 도출하고 적정 작업 배치 및 맞춤형 재교육의 실시 등의 선제적 대응이 가능한 안전관리 시스템의 개발 가능성을 시사한다.

현장 작업 중 시선 추적 데이터 수집을 위해, 건설 현장과 유사한 실제 보행 환경에서 휴대용 시선추적장치를 사용한 연구들도 진행되고 있다. Xu et al. (2021)은 건설 현장과 유사하게 구현된 환경에서, 사전 선정된 10가지의 위험 요소를 탐색하는 과정에서 발생하는 시선고정 패턴을 Tobii Pro Glasses 2를 활용해 수집했다. 그 결과, 위험 요소를 성공적으로 탐지한 참가자들은 특정한 위험 영역에 집중하여 세부적인 내용을 모두 확인하는 패턴을 보임을 확인하였다. 하지만, 휴대용 시선추적장치를 사용함에 있어 착용자의 위치를 파악하기 어렵기 때문에, 기존의 연구들 중 일부는 실험 참가자의 동선을 설계해 특정 위치에서의 2D 장면을 선택하여 해당 장면에 대한 시선 데이터를 수집하였다(Hasanzadeh et al., 2018). 이를 해결하기 위해 휴대용 시선추적장치 착용자의 이동 경로를 3D 포인트 클라우드 데이터로 재구성하고, 해당 경로 내에서 착용자의 위치와 그에 따른 시선 변화를 측정하는 방법을 적용하는 연구도 등장했다(Jeelani et al., 2018). 이동형 시선추적장치의 데이터 수집의 어려움으로 인해 많은 연구가 진행되고 있지는 않지만, 사용성을 높이기 위한 기술 연구들은 현장 내 작업자의 시선추적장치에

서 수집하는 데이터의 정밀함을 증가시키고, 건설 현장 내 산재해 있는 다양한 위험에 대한 인지 여부를 실시간으로 판단할 수 있는 기틀이 될 것이다.

최근에는 건설현장 내에서의 데이터 수집이 어렵다는 문제를 해결하기 위해 가상현실을 활용한 시선 추적 연구가 다수 진행되고 있으며, 특히 상대적으로 낮은 비용의 가상현실 HMD와 시선추적장치가 융합된 장비인 HTC Vive Pro Eye를 활용한 연구가 진행되고 있다. 이와 관련하여 필자가 Texas A&M University에서 수행한 연구에 대해 설명하고자 한다(Kim et al., 2021).

작업자들은 주의력 자원의 대부분을 작업에 할당하는 경향이 있어 위험에 대해 부주의한 행동을 보이는 경우가 많으며, 이는 심각한 부상과 사망으로 이어질 수 있다. 이를 위해 필자는 작업에 몰입함으로써 주변 위험에 대한 부주의한 행동을 보이는 현상을 동공 확장과 같은 시선 추적 지표를 포함한 생체 정보를 활용하여 예측할 수 있는가에 대한 연구를 진행했다. 생체정보의 수집을 위해 가상의 도로 건설 환경을 제작했으며, 실험자들이 빗자루를 사용하여 청소 작업을 진행하는 동안 반복적인 충돌 위험에 노출시킬 수 있도록 왕복 운동을 하는 건설 장비를 배치했다. 작업 환경에 배치된 다양한 건설장비들을 관심 영역으로 삼아, 시선 추적 지표로 알람 전후의 동공 확장, 도약 속도, 도약 시간을 선정하여 수집했다. 실험을 통해 수집한 시선 추적 지표는 피부 전도도, 맥박 지표와 함께 학습 데이터로 활용되었으며, 생체 정보들을 기반으로 부주의한 행동 예측을 위한 이진 분류 모델을 개발했다. 이와 같은 결과는 시선 추적 지표를 수

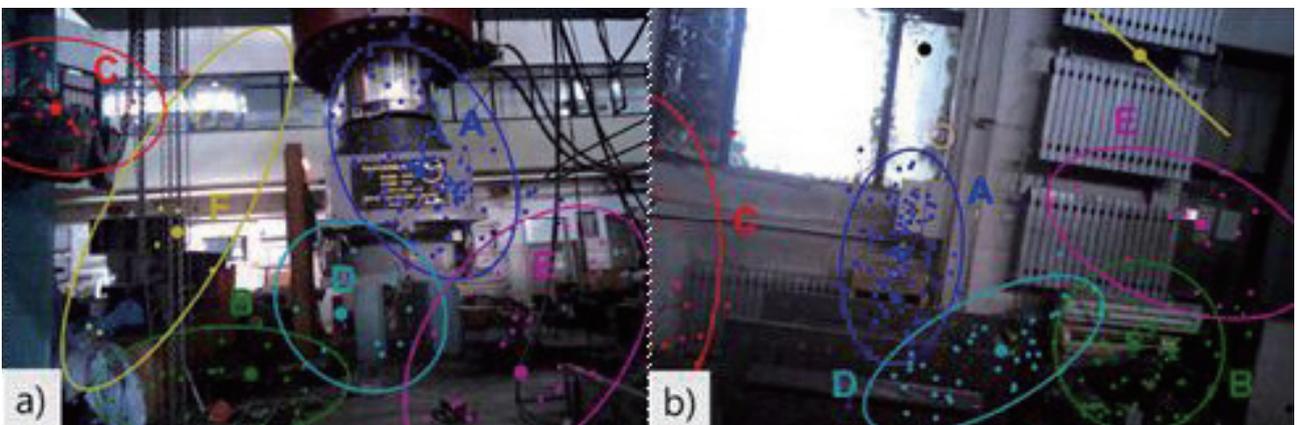


그림 4. 위험 환경에서의 주변 사물에 대한 시선고정 패턴 (Xu et al., 2021)

집하여 실시간으로 부주의한 행동을 예측할 수 있으며, 더 직접적으로 작업자의 행동을 분석할 수 있는 안전관리시스템의 개발 가능성을 의미한다.

이러한 시선 추적을 기반으로 한 건설 안전 연구들이 인정 받기 위해서는 가설 검증을 위해 엄밀하게 설계된 실험 시나리오가 필요하며, 이 과정에서 관심 영역 선정에 대한 명확성이 있어야 한다. 또한, 분석 과정에 있어서도 각각의 시선 추적 지표가 내포하고 있는 인지적 의미를 고려하여 지표들을 선정해야 한다. 실험 설계 및 환경 설정 과정에서부터 엄밀한 고려가 이루어진다면, 시선 추적 기법은 건설 현장에서 기존의 안전관리 체계에서 발견하지 못하던 문제점들을 도출하고 해결할 수 있는 방향을 제안하는 강력한 솔루션이 될 것으로 생각한다.

4. 맺음말

건설현장의 역동적이고 복잡한 특성으로 인해 현재의 안전관리 체계는 건설작업자의 위험에 대한 인지와 대응 능력에 크게 의존하고 있기에, 건설작업자 개개인에 대해 위험 인지 능력을 실시간으로 평가할 수 있는 시선 추적 기술은 건설 안전관리 시스템에 새로운 방향의 솔루션을 제공할 수 있다. 예를 들어, 본 연구진은 가상현실 안전교육 도중에 위험 인지능력을 평가하여, 낮은 주의력을 보이는 사람들에게 가상의 사고를 경험하도록 했다. 개인의 부주의한 행동으로 사고를 경험할 수 있다는 사실을 가상현실을 통해 체험함으로써, 높은 위험 인지능력 강화 효과를 보임을 확인하였다. 이처럼, 시선 추적 기술은 기존에 이해하기 어려웠던 위험인지 실패와 관련된 다양한 요소들에 대한 분석을 가능하게 하여 건설 안전에서의 문제점에 대한 해결책을 찾아내는데 있어 필수적인 역할을 할 것으로 생각된다.

참고문헌

1. Albert, A., Hallowell, M. R., & Kleiner, B. M. (2014). Enhancing construction hazard recognition and communication with energy-based cognitive mnemonics and safety meeting maturity model: Multiple baseline study. *Journal of Construction Engineering and Management*, 140(2), 04013042.
2. Bamford, A., Makin, A. M., & Winder, C. (2012). Applying the

safe place, safe person, safe systems framework to the management of biohazards. *Advances in Safety, Reliability and Risk Manag.*

3. Cheng, R., Wang, J., & Liao, P. C. (2021). Temporal visual patterns of construction hazard recognition strategies. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 18(16), 8779.
4. Chong, H. Y., Liang, M., & Liao, P. C. (2021). Normative visual patterns for hazard recognition: a crisp-set qualitative comparative analysis approach. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 25(5), 1545-1554.
5. Cognolato, M., Atzori, M., & Müller, H. (2018). Head-mounted eye gaze tracking devices: An overview of modern devices and recent advances. *Journal of rehabilitation and assistive technologies engineering*, 5, 2055668318773991.
6. Comu, S., Kazar, G., & Marwa, Z. (2021). Evaluating the attitudes of different trainee groups towards eye tracking enhanced safety training methods. *Advanced Engineering Informatics*, 49, 101353.
7. Hasanzadeh, S., Dao, B., Esmaeili, B., & Dodd, M. D. (2017). Measuring the impact of working memory load on the safety performance of construction workers. In *Computing in civil engineering 2017* (pp. 158-166).
8. Hasanzadeh, S., Dao, B., Esmaeili, B., & Dodd, M. D. (2019). Role of personality in construction safety: Investigating the relationships between personality, attentional failure, and hazard identification under fall-hazard conditions. *Journal of construction engineering and management*, 145(9), 04019052.
9. Jeelani, I., Albert, A., Azevedo, R., & Jaselskis, E. J. (2017). Development and testing of a personalized hazard-recognition training intervention. *Journal of construction engineering and management*, 143(5), 04016120.
10. Jeelani, I., Albert, A., Han, K., & Azevedo, R. (2019). Are visual search patterns predictive of hazard recognition performance? Empirical investigation using eye-tracking technology. *Journal of construction engineering and management*, 145(1), 04018115.
11. Kim, G. (2017). Visual understanding of advertising through eye-tracking methodology. *Korean J. Advert. Public Relat*, 19,



- 41-84.
12. Kim, N., Anderson, B. A., & Ahn, C. R. (2021). Reducing risk habituation to struck-by hazards in a road construction environment using virtual reality behavioral intervention. *Journal of construction engineering and management*, 147(11), 04021157.
 13. Kim, N., Kim, J., & Ahn, C. R. (2021). Predicting workers' inattentiveness to struck-by hazards by monitoring biosignals during a construction task: A virtual reality experiment. *Advanced Engineering Informatics*, 49, 101359.
 14. Kim, N., Grégoire, L., Razavi, M., Yan, N., Ahn, C. R., & Anderson, B. A. (2023). Virtual accident curb risk habituation in workers by restoring sensory responses to real-world warning. *Iscience*, 26(1).
 15. Li, J., Li, H., Wang, H., Umer, W., Fu, H., & Xing, X. (2019). Evaluating the impact of mental fatigue on construction equipment operators' ability to detect hazards using wearable eye-tracking technology. *Automation in construction*, 105, 102835.
 16. Liu, M., Liao, P. C., Wang, X. Y., Li, S., & Rau, P. L. P. (2021). Influence of semantic cues on hazard-inspection performance: a case in construction safety. *International journal of occupational safety and ergonomics*, 27(1), 14-28.
 17. Namian, M., Albert, A., Zuluaga, C. M., & Jaselskis, E. J. (2016). Improving hazard-recognition performance and safety training outcomes: Integrating strategies for training transfer. *Journal of Construction Engineering and Management*, 142(10), 04016048.
 18. Noghabaei, M., Han, K., and Albert, A. (2021). Feasibility study to identify brain activity and eye-tracking features for assessing hazard recognition using consumer-grade wearables in an immersive virtual environment. *J. Const. Eng. Manag.* 147:1104.
 19. Noton, D., and L. Stark. (1971). Eye movements and visual perception. *Sci. Am.* 224 (6): 35-43.
 20. Seo, J. (2018). Smart Wearable Technologies in Construction. *Korean Journal of Construction Engineering and Management*, 19(4), 58-63.
 21. Shi, Y., Du, J., & Ragan, E. (2020). Review visual attention and spatial memory in building inspection: Toward a cognition-driven information system. *Advanced Engineering Informatics*, 44, 101061.
 22. Tixier, A. J. P., Hallowell, M. R., Albert, A., van Boven, L., & Kleiner, B. M. (2014). Psychological antecedents of risk-taking behavior in construction. *Journal of Construction Engineering and Management*, 140(11), 04014052.
 23. Zhang, Y., Zhang, M., & Fang, Q. (2019). Scoping review of EEG studies in construction safety. *International journal of environmental research and public health*, 16(21), 4146.
 24. Xu, Q., Chong, H. Y., & Liao, P. C. (2019). Exploring eye-tracking searching strategies for construction hazard recognition in a laboratory scene. *Safety Science*, 120, 824-832.