

Human-Machine Interface Design of Construction Machinery Based on Scenario Generation and Accident Pattern Analysis

Su Jin Park¹, Taeyoung Kwak², Sangwon Lee^{3*}

¹Department of Human and Environment Design, Human life & Innovation Design, Ph.D. Candidate, Yonsei University, Seoul, Korea

²Department of Integrated Design, Human life & Innovation Design, Master Student, Yonsei University, Seoul, Korea

³Department of Integrated Design, Professor, Yonsei University, Seoul, Korea

Abstract

Background The interaction between construction machinery and operators directly impacts both work efficiency and safety, making user-centered design increasingly important in the development of Human-Machine Interfaces (HMI) for construction machinery. In recent years, the construction machinery industry has been actively advancing the development of cutting-edge equipment such as unmanned construction machines and remote-controlled machinery. However, as long as human involvement persists on-site, it is difficult to completely eliminate the limitations and potential for human error. Therefore, it is crucial to be vigilant regarding errors that may arise from human involvement and to identify patterns in construction machinery accidents. The aim of this study is to minimize human error in the operation of construction machinery by analyzing accident patterns, designing scenarios, constructing virtual simulations, and verifying the proposed accident scenarios through expert evaluation.

Methods Accident cases involving construction machinery were analyzed using a human error model to identify recurring human error factors. These factors were then visualized in graphical form to analyze the patterns and data among accident causes. Subsequently, by training a generative AI model with accident cases and contributing factors, accident scenarios specific to each type of construction machinery were generated, emphasizing the importance of deriving realistic and detailed scenarios. The generated scenarios were then filtered based on the frequency of contributing factors to select representative accident scenarios for each type of construction machinery. These scenarios were further developed into simulations that replicate situations operators may face, and were validated through user testing.

Results The results of the simulation experiments, based on representative scenarios for different types of construction machinery, revealed varying responses among participants when asked about their experiences with and utilization of icons and sounds on the windshield display. In in-depth interview questions regarding the similarity of the simulation to real-world situations, most participants reported that the simulations closely resembled actual scenarios, representing frequent situations where accidents are likely to occur. Based on the generated scenarios, a windshield display design concept was developed, and experiments were conducted to gather various opinions and reactions from participants. Throughout the experiment, participants generally provided positive feedback on the design concept, expressed significant interest, and demonstrated a high intention to use the proposed concept.

Conclusions This study confirmed that the design concept based on the generated scenarios could be practically applied to HMI design for construction machinery. Moreover, the identification of predictable accident scenarios for each type of construction machinery in the research and industrial fields suggests the potential for proposing a significant direction for future HMI design development in this domain. This study demonstrated how user-centered design methods can be applied to HMI design in the construction machinery field, a domain that has traditionally received less attention in design. Scenario-based approaches grounded in data not only contribute to the scientific rigor of the design process but also show potential for application in any field where realistic simulations are utilized.

Keywords Construction Machinery, HMI Design, Human-Machine Interface, Human Error

This paper was written based on a doctoral dissertation completed in 2024.

*Corresponding author: Sangwon Lee (sangwon.lee@yonsei.ac.kr)

Citation: Park, S. J., Kwak, T., & Lee, S. (2025). Human-Machine Interface Design of Construction Machinery Based on Scenario Generation and Accident Pattern Analysis. *Archives of Design Research*, 38(1), 143-160.

<http://dx.doi.org/10.15187/adr.2025.02.38.1.143>

Received : Aug. 16, 2024 ; **Reviewed :** Nov. 06, 2024 ; **Accepted :** Nov. 15, 2024

pISSN 1226-8046
eISSN 2288-2987

Copyright : This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/>), which permits unrestricted educational and non-commercial use, provided the original work is properly cited.

1. 서론

1. 1. 연구의 배경 및 목적

사고는 우연히 발생하지 않는다. 사고 원인은 다양하고 예측할 수 있으며 반드시 그 원인이 존재한다(Dodoo & Al-Samarraie, 2021; Moon & Kim, 2013). 따라서 사고 원인을 조기에 발견하여 대형 사고로 이어지지 않기 위해 학계와 산업현장에서는 큰 노력을 기울이고 있다(Yu et al., 2016). 2022년 중대재해처벌법의 시행은 건설 현장에서 사고 예방을 위한 연구에 새로운 전기를 마련하고 있다. 그 방안으로 디지털 기기와 컴퓨터 프로그래밍을 활용한 무인 건설 기계, 원격 조정 기계 등 첨단 장비의 개발은 산업 현장의 중대사고 발생률을 저감시키는 것에 도움을 줄 수 있다(Jang, 2013; Teizer, 2016; Ray & Teizer, 2013; Mazankova, 2015). 그러나 현장에서 인간의 역할이 완전히 사라지지 않는 이상 인간의 한계와 실수의 가능성을 완전히 제거하기는 어렵다(Reason, 1990; Larouze & Le Coze, 2020).

무인 및 원격으로 조종하는 건설기계의 작동과 과업은 유인 건설기계와 크게 다르지 않기 때문에 과업 중 발생하는 사고 패턴 또한 크게 다르지 않을 것이라 예측할 수 있다. 그렇기 때문에, 향후 무인 및 원격 조종 건설기계가 상용화되어도 여전히 건설기계를 운영하는 주체는 사람으로 이에 따른 인적 오류의 가능성은 여전히 존재한다(Lee et al., 2019; Liu, Kim, and Ham, 2023). 그러나 건설 산업에서 프로세스 및 운전자를 고려한 연구는 여전히 부족하다(Hasan et al., 2018) 때문에 사람으로 인해 발생할 수 있는 오류를 경계하고 건설기계 사고의 패턴을 파악하는 것은 매우 중요하다고 할 수 있다.

인적 오류는 요구되는 정확도, 순서, 혹은 정해진 시간 이내에 지정된 행위를 하지 못하는 것 또는 부적절한 행위를 하는 것으로 업무 중 사람의 실수로 인해 발생하는 사고를 말한다(Reason, 1990). 건설 기계를 활용한 건설 현장에서는 인적 오류를 줄이기 위한 방안으로 스스로를 보호할 수 있는 장비를 착용하거나 첨단 시스템을 장착한 기계를 사용하기도 한다(Teizer, 2015; Phade et al., 2021). 그러나 안전은 단순히 장비를 착용하는 것에서 끝나지 않는다. 운전자와 건설 기계의 연결성을 고려한 사용자 중심 디자인을 고려해야 하며(Marcher, Giusti, and Matt, 2021; Abdeen et al., 2024), 작업자의 배치, 작업 방법, 기계설비 등 전반적인 작업환경 등에서 신체적 특성이나 행동 제약조건과 같은, 다양한 환경을 고려한 디자인이 반드시 수반되어야 한다(Sanad, Ammar, and Ibrahim, 2008; Marović & Hanak, 2017). 특히 건설 현장에서 건설 기계와 운전자의 상호작용은 작업의 효율성과 안전성에 직결되기 때문에 이를 고려한 사용자 중심의 디자인은 매우 중요하다고 할 수 있다(Shariatfar, Deria, and Lee, 2022; Su, Pan, and Grinter, 2015; An, 2023; Khazen, Nik-Bakht, and Moselhi, 2024).

본 연구의 목적은 인적 오류를 최소화할 수 있는 건설 기계 운용 디자인을 위해 사건 패턴 분석과 시나리오를 설계하고 가상 시뮬레이션으로 구축한 후, 전문가 평가를 통해 제시하는 시나리오를 검증하는 것이다. 특히 우리는 실질적이고 구체적인 시나리오 도출의 중요성에 주목하여 다양한 실제 사고 데이터를 수집하고 패턴화하는 과정을 통해 대표 시나리오를 추출하는 과정을 제시한다. 이에 세부 연구 목적은 다음과 같다. 건설기계 사고 요인과 패턴을 고려한 데이터 및 그 처리 방법을 제공하고, 근거 중심의 사고 시나리오 생성 과정을 제시한다.

1. 2. 연구 방법

시나리오 생성을 위한 건설 기계 사고 발생의 원인과 패턴을 도출하기 위해 1)문헌연구 2)사고분석 3)시나리오 생성 4)시뮬레이션 제작 5)사용자 실험으로 연구를 진행하였다(Table 1). 먼저 문헌 연구 단계에서는 인적 오류, Human Machine Interface 그리고 건설 현장의 MR과 윈드실드 디스플레이, 시나리오 생성기법에 대해 알아본다. 사고 분석 단계에서는 국토안전관리원에서 제공하는 실제 건설 기계 사고사례 중, 운전자와 관련되어 발생한 사고를 수집하여 사고의 다양한 양상을 파악하고 그래프를 그려 사고 원인의 패턴을 찾는다. 다음으로 시나리오 생성 단계에서는 사고 분석 단계에서 도출한 패턴을 적용한 가상 시나리오를 대형 언어 모델인 OpenAI ChatGPT API로 생성한다. 시뮬레이션 단계에서는 생성한 시나리오를 적용한 가상 시뮬레이션을 구현하며 마지막으로 전문가 테스트, 인터뷰, 설문조사, 시각 자극물을 통해 이를 검증한다.

Table 1 Research Process

Step	Contents
1. 문헌연구	- 인적 오류 - Human Machine Interface(HMI) - 건설 현장에서 MR과 윈드실드 디스플레이 - 시나리오 생성 기법
↓	
2. 사고분석	- 건설 기계별 사고 사례 수집 - Swiss cheese model 기반 사고사례 분석 - 사고요인 패턴 그래프 도출
↓	
3. 시나리오 생성	- 사고 요인 기반 시나리오 도출 - OpenAI GPT API 활용 프롬프트 모델 제작 - 사고 시나리오 생성
↓	
4. 시뮬레이션	- 사고 시나리오 선정 - Unity3D 활용 시뮬레이션 제작
↓	
5. 실험	- 시뮬레이션 체험 - 설문조사 및 심층 인터뷰 - 실험 평가 및 분석 - 향후 실험 제언

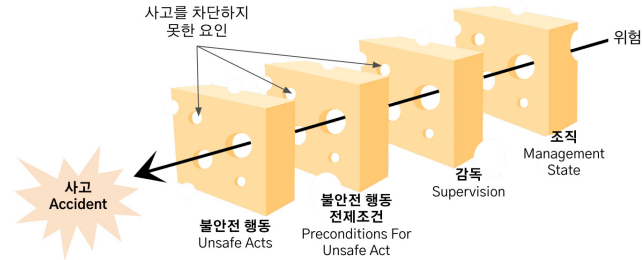
2. 이론적 배경

2. 1. 인적 오류

인적 오류란 개인의 신체적, 정신적인 조건으로 인해 발생하는 오류를 말하며(Jeong, 2012) 의도한 실수와 의도하지 않은 실수를 포함한다(Larouzee & Le Coze, 2020). 인적 오류는 그 원인이 다양하고 복잡하기 때문에 사고를 면밀히 분석하는 것이 중요하다. 이 중에서도 사후 원인 탐색이 아닌 인적 오류가 발생하기 쉬운 작업 프로세스에서 피해를 예측하고 방지하기 위한 목적으로 개발된 모델을 인적 오류 모델이라 한다(Stanton & Baber, 2005). 그 예시로 사고를 발생시키는 원인 간의 관계를 연역-하향 접근으로 분석하는 Fault Trees(Kirwan & Ainsworth, 1992), 사고 발생의 빈도가 잦고 결과의 심각성이 높은 사고에 활용되는 원인 결과 분석 기법인 Bow-tie 모델(Haddon, 1973), 그리고 안전사고의 관련된 다양한 요인들을 분석하는 접근 방식인 Swiss Cheese 모델이 있다(Reason, 1990; Reason, Hollnagel, and Paries, 2006). 이들은 이미 일어난 사고의 발생 과정과 원인을 다각적으로 접근하여 인적 오류에 따른 안전사고의 이해와 분석을 하기 위해 개발된 모델이다. 이 중에서도 Swiss Cheese 모델은 사고 발생단계를 4단계 과정으로 정리하며 Management State(조직), Supervision(감독), Preconditions For Unsafe Act(불안전 행동 전제조건), Unsafe Acts(불안전 행동)로 나눈다. Management State(조직)는 조직의 문제를 말하며 잠재 요인으로 인해 잘못된 조직의 풍토나 운영 과정 등으로 인한 사고를 말한다. Supervision(감독)은 불안정한 관리 감독을 말하며 잠재 요인인 부적절한 관리 감독, 부적절한 실행계획 등을 말한다. Preconditions For Unsafe Act(불안전 행동 전제조건)는 불안정한 행동을 야기하는 조건이며 직간접 요인으로 부적절한 실행상태나, 부족한 의사소통, 지각의 부족 등을 말한다. Unsafe Acts(불안전 행동)는 직접 요인으로 사고를 일으킨 행위자의 직접적인 행동을 말하며 잘못된 의사결정, 기술 부족 지각 부족을 말한다(Reason, 1990)(Table 2).

Table 2 Human Error Model

Swiss Cheese 모델(Reason,1990)



Management State(조직)	조직풍토, 운영과정, 자원관리
Supervision(감독)	부적절한 감독, 감독자 위반, 부적절한 실행계획의 수립
Preconditions For Unsafe Act(불안전행동 전제조건)	부적절한 실행상태(신체적, 정신적, 생리적), 부적절한 자기관리
Unsafe Acts(불안전 행동)	기술, 지각, 의사결정 등의 오류, 통상적 위반, 예외적 위반
Accident(사고)	사고

2. 2. Human Machine Interface(HMI)

HMI는 인간과 기계 사이에서 의사 및 정보 교환을 이루어지게 하는 매개체를 말한다. 또한, 기계가 가지고 있는 정보를 인간이 이해할 수 있는 형태나 형식으로 변환하여 보여주고, 인간의 명령을 기계가 인식할 수 있는 정보로 변환하여 주는 역할을 하는 시스템이기도 하다. 그러나 과도하게 복잡한 인터페이스나 적절하지 않은 정보 제공으로 인해 작업자들은 상황을 정확하게 이해하지 못하고 과업을 수행하지 못할 수 있어 사용자 중심의 HMI 디자인을 연구할 필요가 있다(Monsaingeon et al., 2021; Jang & Lee, 2024). 건설기계 HMI 디자인의 대부분 연구는 이미 디자인된 인터페이스의 조작에 대한 사용성 효과를 검증하는 경우가 많다. 예를 들어, 관리자를 위한 현장 모니터링 소프트웨어 디자인이나 (Mulyana, Ibrahim, and Abd Rahim, 2019; Alateeq, Rajeena, and Ali, 2023; Jo et al., 2019) 인지심리학과 컬러, 그리고 디스플레이를 고려한 HMI 인터페이스 디자인 연구가 있다(Zhang, He, and Ji, 2019). 최근에는 관행적인 HMI 설계의 문제점을 지적하고 개선 방안을 제안하고 있으며(Shahab, Srinivasan, and Srinivasan, 2023) 인터뷰를 통한 질적 분석으로 사고사례를 수집하고 이를 분석하는 연구도 진행되었다(Bedi, Rahman, and Din, 2021)(Table 3).

Table 3 MR and HMI at Construction Sites

Level	Research Approach	Specific Focus	Result
1	데이터 수집 및 객체 감지 알고리즘 활용 AR(Alateeq et al., 2023)	장비 및 사람인식 비전 모델	작업자, 장비, 개인 안전 보호구 추가 가능한 컴퓨터 비전 모델 구현 및 평가
2	자기장 기반 근접 경고 시스템 (Teizer, 2015)	경고 시스템 구현	접근 구역에 따라 달라지는 디스플레이와 경고 사운드
3	15명의 중장비 기사 인터뷰 및 문헌 조사 (Bedi et al., 2021)	중장비 사고 원인 규명	중장비 사고 원인을 규명하기 위한 질적 연구 분석
4	연구 동향 및 컴퓨터 비전, GPS, RFID 활용 (Jo et al., 2019)	충돌방지 시스템	충돌사고 예방을 위한 중장비 운전자에게 경고하는 근접 경고 시스템
5	디자인 시나리오, 페이지 디자인, 인터페이스 (Mulyana et al., 2019)	HMI 인터페이스	모니터링용 소프트웨어 인터페이스 디자인 제안
6	인지심리학, 인터페이스 디자인 (Zhang et al., 2019)	인터페이스 디자인	인지심리학, 컬러, 디스플레이를 고려한 HMI 디자인의 제안
7	문헌연구, 인지심리학 (Shahab et al., 2023)	HMI 설계	관행되는 HMI 설계의 문제점 지적 및 개선 방안 제안

2. 3. 건설 현장에서의 Mixed Reality(MR)와 윈드실드 디스플레이

건설 현장의 안전에 대한 관심도가 높아지면서 최신 VR/AR 기술을 적용한 스마트 건설 기계에 관한 연구도 활발하게 진행되고 있다(Bhoir & Esmaeili, 2015; Sitompul, Wallmyr, and Lindell, 2020). 그 응용 분야는 건축설계, 인공지능, 컴퓨터 지원 설계 등이며, 주로 협업을 위한 MR 연구나 현장 운영에서 위험 방지 목적으로 한 스마트 기계의 활용이 연구되고 있다(Song, Koeck, and Luo, 2021; Teizer et al., 2015). 특히, 건설기계의 전면 유리창을 디스플레이로 활용하여 운전자에게 정보를 제공하는 연구도 활발하다.

윈드실드 디스플레이(Windshield Display)란 Head-Up Display(HUD)의 일종으로 차량의 전면부 유리에 정보를 띄워서 실시간으로 운전자에게 정보를 제공하는 방법을 말한다(Yamin, Park, and Kim, 2024). 자동차 사고 방지, 광고, 정보 제공 등으로 다양하게 연구가 진행되고 있으며 스마트 건설 기계의 중요성이 점차 커지면서 건설 기계 분야에서도 윈드실드 디스플레이의 중요성이 높아지고 있다. 페레이라 외(Pereira et al., 2016)의 연구에 따르면 지게차 운전자가 창고 환경에서 적재된 짐을 신속하게 찾는 데에 HUD와 HMD를 적용하였고 지게차 운전자의 과업에 도움을 줄 수 있다는 결론을 얻었다. 시토펜, 발미르, 그리고 린델(Sitompul, Wallmyr, and Lindell, 2020)의 연구에서는 굴삭기의 윈드실드 디자인을 위해 인터뷰를 통해 운전자가 선호하는 위치, 표기 내용 등을 위한 아이콘을 제안하였다. 제이스왈 외(Jaiswal et al., 2021)의 연구에서는 트랙터의 윈드실드에 증강현실을 제공하여 운전자의 주의를 분산시키지 않고 실시간 정보를 확인할 수 있도록 가상의 시뮬레이션을 제작한 연구를 진행하였다(Table 4).

Table 4 Construction Machinery Windshield Display Design

Level	Pereira et al. (2016)	Sitompul, Wallmyr and Lindell. (2020)	Jaiswal et al. (2021)
Research Approach	창고 환경에서 파레트를 신속하게 찾을 수 있도록 돕는 지게차를 위한 AR	굴삭기 운전자가 선호하는 위치 및 아이콘 디자인	트랙터의 윈드실드에 증강현실을 제공
Specific Focus	운전자가 효율적으로 파레트를 찾아 작업할 수 있도록 의도	과업 중, 시선을 돌리지 않고 필요한 정보를 얻을 수 있도록 지원	운전자의 주의를 분산시키지 않고 필요한 정보를 얻을 수 있도록 의도
Result	실험을 통해 AR이, 지게차 운전자에게 더 좋은 결과를 냄	굴삭기 윈드실드에 디스플레이하는 시각 정보 디자인	실시간 정보를 확인할 수 있도록 가상으로 구현
images	 (a) Pallet Location  (b) Navigation  (c) Slot Location  		

2. 4. 시나리오 생성 기법

시나리오 도출을 위한 방법은 전문가 인터뷰, 설문조사, 워크숍 등의 정성적인 방법에서부터 통계 분석이나, 시뮬레이션 등의 정량적인 방법까지 다양하다(Hanington & Martin 2017; Lewrick, Link, and Leifer, 2020). 이 중에서도 가상의 시나리오 도출을 통해 위급한 상황이나 비상 상황을 대비하여야 하는 분야에서 시나리오 생성 기법에 관한 연구 가운데 한석운, 김주옥, 그리고 김영민(Han, Kim, and Kim, 2015)의 연구에서는 시스템 아키텍처 설계 기반으로 발생할 수 있는 화재 비상 상황에 대응하는 시나리오 생성에 대해 연구하였다. 날릭 외(Nalic et al., 2019)의 연구에서는 시뮬레이션 제작을 위해 실제 도로의 교통측정을 기반한 시나리오 생성 모델을 제안하였고, 무한한 양의 시나리오 생성 방법을 제안하였다. 특히 최근에는 인공지능의 발전으로 사람과 컴퓨터가 협력하여 시나리오를 도출하는 연구가 진행되고 있다. 김유근 외(Kim et al. 2024)의 연구에서는 생성형 인공지능 ChatGPT를 활용하여 사용자 경험 시나리오 설계 프로세스에 적용하여 디자인 콘셉트를 도출하는 연구를 진행하였다. 두트라, 빌렐라, 그리고 네투(Dutra, Villela, and Neto, 2025)의 연구에서는 인공지능을 활용하여 게임 디자이너의 절차적인 시나리오 생성을 돕는 프레임워크를 개발하였다.

건설기계 사고는 종종 대형사고로 이어진다. 건설 기계 HMI 디자인 연구의 중요성이 커지고 있는 상황에서 가상의 시나리오를 도출하여 건설 기계 운전자로 인한 사고 발생 예상 시나리오를 생성하는 연구는, 다른 산업제해와 관련된 연구에 비해 매우 부족하다. 이에 따라 본 연구에서의 연구 방법은 다음과 같다. 텍스트 마이닝(Text Mining) 분석과 인공지능을 활용한 시나리오 도출을 한다. 텍스트 마이닝 분석은 사고사례와 같은 비정형 데이터에서 숨겨진 패턴과 의미 있는 정보를 추출하기에 효과적이다(김하영, 이준성, 그리고 장예은, 2022). 건설기계 사고는 다양한 요인들이 복합적으로 작용하여 발생하므로(김은정, 2024; 박형진 외, 2024), 사고 데이터를 통해 사고의 요인과 패턴을 파악하여 근거를 확보하고자 하였으며 데이터 기반의 근거 중심 인공지능 시나리오를 생성하여 디자인 전략 수립에 있어 객관성과 재현성을 높이고자 하였다.

다음으로 신뢰도(C Confidence)를 계산하였다. 신뢰도는 하나의 사건이 일어났을 때, 다른 사건도 일어날 확률을 말한다. 예를 들어, 전체의 사고 사례에서 ‘안전수칙 미준수’ 사고 요인이 총 100건 발생한 그룹 A의 경우에서 그룹B인 ‘안전수칙 미준수’ 요인과 ‘추락’ 사고가 함께 발생한 경우의 신뢰도를 계산한 경우, B/A로 계산할 수 있으며 이는 10/100 = 0.1(10%)로 말할 수 있다.

향상도(Lift)는 두 사고 요인 간의 연관성의 정도를 나타내는 것으로, 특정한 사건의 발생이 다른 사건의 발생에도 미치는 영향을 의미하는데 그룹A가 발생하였을 때, 그룹B의 가능성이 얼마나 증가하는지를 말하며 신뢰도/지지도로 정의가 될 수 있다. 이 상황에서 향상도가 1보다 크면 두 사건 간의 연관성이 양의 상관관계를 가지고, 1보다 작으면 음의 상관관계를 가지는 것으로 볼 수 있다. 예를 들어, 전체 사고 사례가 200개 있고, 그룹A인 ‘안전수칙 미준수’ 사고 요인이 총 100건 발생한 상황에서, 그룹B인 ‘안전수칙 미준수’와 ‘추락’ 사고가 함께 발생한 경우가 10건이라면, 이 예시에서는 신뢰도는 0.1이며 지지도는 0.05이며 향상도는 0.5(50%)가 된다. 이는 ‘안전수칙 미준수’가 발생할 때 ‘추락’이 발생할 확률은 ‘추락’이 일어난 전체의 사고의 경우의 빈도보다는 낮음을 의미하고 음의 상관관계가 있음을 말한다.

다시 말해 지지도는 모든 사건 중 특정 사건의 발생 빈도를 말하며 신뢰도는 사건 하나가 일어나는 경우에 다른 사건도 일어날 확률을 말한다. 향상도는 두 사고 요인 간의 연관성 정도를 나타내는 것을 말한다. 이를 기반으로 지게차는 170건, 트럭은 304건, 굴삭기는 467건, 크레인 488건의 사고 사례를 데이터 프레임으로 제작하였고, 이 중에 크레인 데이터 프레임의 일부는 <Figure 2>과 같다.

index	items	support	ordered_statistics
223	frozenset({'안전수칙미준수', '작업자부주의'})	0.4036885245901639	frozenset(),frozenset({'안전수칙미준수', '작업자부주의'}),0.4036885245901639,1,frozenset({'안전수칙미준수'}),frozenset({'작업자부주의'}),0.7490494296577946,1.855513307984791,frozenset({'작업자부주의'}),frozenset({'안전수칙미준수'}),1,1.855513307984791
194	frozenset({'안전거리미확보', '안전수칙미준수'})	0.11270491803278689	frozenset(),frozenset({'안전거리미확보', '안전수칙미준수'}),0.11270491803278689,1,frozenset({'안전거리미확보'}),frozenset({'안전수칙미준수'}),0.38732394366197187,0.7186847319659403,frozenset({'안전수칙미준수'}),frozenset({'안전거리미확보'}),0.20912547528517111,0.7186847319659402
134	frozenset({'끼임', '안전수칙미준수'})	0.10860655737704918	frozenset(),frozenset({'끼임', '안전수칙미준수'}),0.10860655737704918,1,frozenset({'끼임'}),frozenset({'안전수칙미준수'}),0.7162162162162162,1.3289487205837016,frozenset({'안전수칙미준수'}),frozenset({'끼임'}),0.20152091254752852,1.3289487205837016

Figure 2 Crane Data Frame

다음으로 각 요인 간의 네트워크 그래프를 그려서 이를 시각화하여 분석하였다. 지게차의 경우 의사소통 오류, 협착, 안전거리 미확보, 주변 미인지, 작업자 부주의, 안전수칙 미준수가 서로 연관되어 있다는 것을 확인할 수 있었다. 트럭의 경우 안전수칙 미준수, 작업자 부주의, 기타, 전도, 주변 미인지, 추락, 후진, 운전석 탑승이 서로 연관되어 있다는 것을 확인할 수 있었다. 굴삭기의 경우 안전수칙 미준수, 작업자 부주의, 협착, 안전거리 미확보, 기계 장비 관리 미흡, 타격. 위험 구간 접근 주변 미인지가 서로 연관되어 있다는 것을 확인할 수 있었다. 크레인의 경우, 안전수칙 미준수, 작업자 부주의, 안전거리 미확보, 자재 인양, 추락, 타격, 끼임, 협착, 의사소통 오류가 서로 연관되어 있음을 확인할 수 있었다<Table 5>.

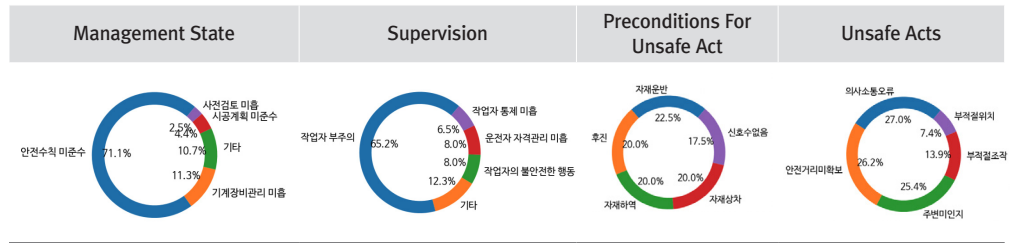
Table 5 Network Graph of Accident Factors by Construction Machinery



3. 3. 사고 요인 원형 다이어그램

도출한 사고 요인의 각 건설 기계별, 운전자를 중심으로 분석한 사고 요인 중 상위 5위를 데이터의 비율을 시각적으로 비교하기 용이한 원형 다이어그램으로 살펴보았다. 이를 통해 지게차는 안전 수칙을 미준수하고, 작업자가 부주의하고, 자재를 운반할 때, 의사소통의 오류로 인해 협착한 경우가 가장 많다는 것을 확인할 수 있었다. 트럭은 안전수칙을 미준수하여, 작업자 부주의로, 후진하는 상황에서, 의사소통 오류로 넘어진 사고 사례를 확인할 수 있었다. 굴삭기는 안전수칙을 미준수하여, 작업자 부주의로, 기타 상황에서 안전거리 미확보로 협착됨을 확인할 수 있었고, 크레인도 안전수칙 미준수로, 작업자 부주의하여, 자재 인양하는 상황에서, 안전거리 미확보로, 추락함을 확인할 수 있었다. 결과적으로 4개의 건설 기계에서 공통되는 키워드는 안전수칙 미준수, 작업자 부주의, 신호수 부재, 의사소통 오류 및 안전거리 미확보로 나타났다(Table 6).

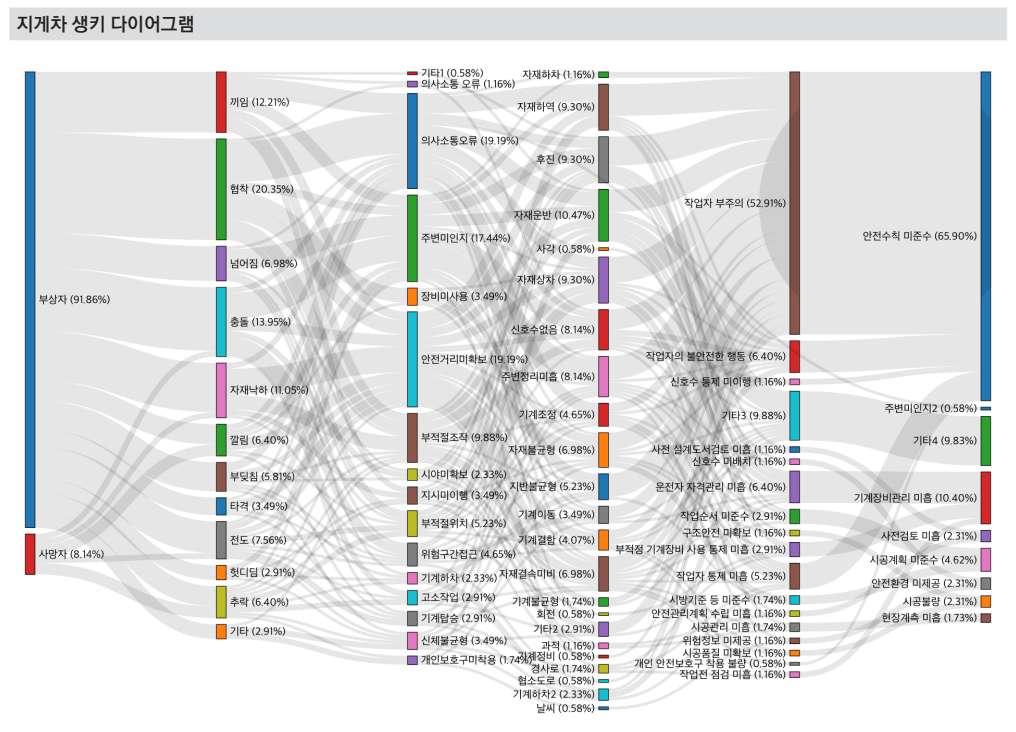
Table 6 Top 5 Deduction Factors Analyzed by the Swiss Cheese Model (Forklift)



다음으로 생키다이어그램(Sankey Diagram)을 그려 사고 결과와 추출한 사고 요인의 항목의 기여도를 시각적으로 확인하였다. 생키다이어그램의 노드는 하나의 데이터 항목을 의미하며, 링크는 노드와 노드를 연결하여 데이터의 이동 경로를 시각적인 비율로 보여준다. 시스템 내에서 요소들의 주된 이동이나 흐름을 시각적으로 파악할 수 있어 데이터 전체 구조를 파악하기 좋으며, 사건의 흐름을 보기에 용이하고, 각 노드를 비교하기에 좋다. 생키다이어그램은 앞서 도출한 사고 요인 빈도수를 기반으로 리스트업하고 이를 데이터 시트로 제작한 자바스크립트 라이브러리이며 데이터 시각화가 가능한 D3.js를 활용해 시각화하였다.

지게차의 경우, 데이터를 오른쪽에서부터 보면 상위요소를 그래프화한 것처럼 사고의 주요 요인과 그 흐름을 시각적으로 볼 수 있다(Table 7). 구체적으로는 ‘안전수칙 미준수’에는, ‘작업자 부주의’의 영향이 결정적인데, ‘자재 운반’ 도중에 발생한 ‘의사소통 오류’가 원인이 되어 ‘협착’ 사고로 이어져 부상을 초래한 시나리오를 확인할 수 있었다. 이러한 시스템 내 주요 요소들을 시각적으로 분석함으로써, 건설 기계 4종의 사고 요인 기여도를 명확하게 파악할 수 있었다.

Table 7 Forklift Sankey Diagram



사고 요인 추출과 그 빈도수에 관한 데이터, 사고 요인 간의 네트워크 그래프, 그리고 생키 다이어그램으로 얻은 시각적인 그래프를 통해 사고 발생의 주요 원인과 그 흐름을 이해함으로써, 건설 현장에서 각 건설 기계별로 빈번하게 발생하는 사고 요인을 체계적으로 분석하고 이를 바탕으로 사용자 중심의 HMI 디자인 개선 방안을 제안하는 데 중요한 기초 자료를 마련할 수 있었다.

3. 4. 시나리오 생성

시나리오 생성을 위해 국토 안전 관리원에서 제공하는 사고 사례와 인적 오류 모델인 스위스 치즈 모델로 분석한 사고 요인 결과를 OpenAI ChatGPT API를 활용하여 인공지능 모델에 학습시켰다.

구체적인 과정은 다음과 같다. Open AI의 GPT-3 모델 중 davincitext-davinci-003 모델을 활용하였으며 구글 코랩(Google Colab)환경에서 학습과 생성 과정을 수행하였다. 학습에 사용된 데이터는 실제 건설기계 사고 자료와, 각 사례를 사고 요인으로 분석한 자료로, 이를 프롬프트 컴플리션(Prompt-Completion) 형식으로 모델에 입력하였다. 프롬프트에서는 실제 사고 경위와 이에 대한 사고 요인을 설명하는 방식으로 구성하였다. 이후 이를 바탕으로 건설 기계 종류별로 사고 시나리오를 생성할 수 있도록 유도하는 질문 형식으로 구성하였다. 특히 각 건설기계의 특성을 반영하여 사고의 구체적인 상황과 맥락을 설명하고 이에 영향을 미친 사고 요인들을 명확하게 기술하여 보다 현실적이고 일관된 시나리오를 생성할 수 있도록 하였다(Figure 3).

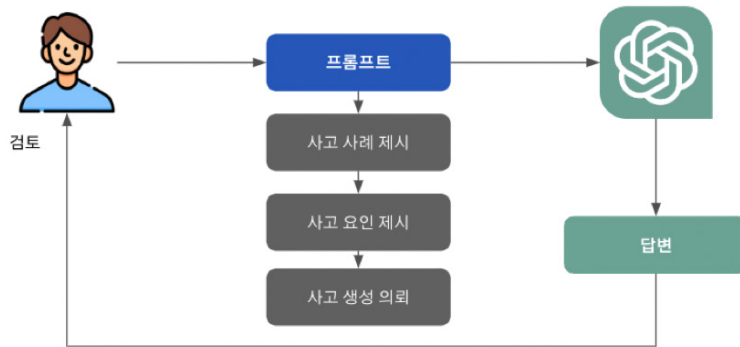


Figure 3 Process of creating a scenario using the ChatGPT API

학습을 위한 데이터 구성 및 전처리의 주요 구성 요소는 다음과 같다. 사고 사례에서는 사고가 발생한 구체적인 상황을 설명하였다. 사고 요인에서는 인적 오류 모델인 스위스 치즈 모델로 분석한 사고 요인을 작성하였다. 사고 결과는 사고가 발생한 후의 결과 및 영향으로 작성하였다. 다음은 지게차 사고 사례를 데이터로 구성한 예시이다(Table 8).

Table 8 Data Organization and Preprocessing

사고 경위(지게차)				
2022년 8월 15일 08시 20분경 103동 지하3층에서 지게차로 자재 운반 후 자재 하부에 받침목을 받쳐주던 중 지게차 운전원과의 의사소통이 맞지 않아 손이 빠져 나오기 전에 지게차 포크를 내려 자재와 받침목 사이에 우측 손이 협착 됨.				
Management State	Supervision	Preconditions For Unsafe Act	Unsafe Acts	Accident
안전수칙 미준수	작업자 부주의	자재하차	의사소통오류	협착

이를 통해 지게차, 트럭, 굴삭기, 크레인 각 기계의 사고 시나리오를 각각 30개씩 총 120개를 생성할 수 있었다. 생성된 시나리오는 다시 검토하여 사고 요인 간의 상관관계를 적절하게 반영하였는지를 확인하였다. 아래 그림은 시나리오 생성과 검토 결과로, 각 시나리오에 포함된 요인들의 분포를 보여준다(Figure 4).

전제조건	불안전행동	사고결과	사고경위						
1	자재운반	부적절조작	협착	건설 현장에서 지게차 운전자가 부적절하게 조작하여 자재를 운반하다가, 자재가 떨어져 근처에 있던 작업자의 손이 협착됨.					
2	후진	주변미인지	충돌	창고 내에서 지게차가 후진 중, 운전자가 주변을 제대로 살피지 않고 다른 지게차와 충돌함. 두 지게차 운전자 모두 가벼운 부상을 입음.					
3	자재상차	안전거리미확보	자재낙하	지게차 운전자가 상차 작업 중 안전거리를 충분히 확보하지 않아, 지게차에서 자재가 떨어져 인근에 있던 작업자에게 부상을 입힘.					
4	자재하역	부적절위치	끼임	지게차로 자재를 하역하는 동안, 한 작업자가 부적절한 위치에 서 있어 자재가 떨어지면서 그의 발을 끼임.					
5	신호수없음	주변미인지	충돌	신호수 없이 지게차가 후진하던 중, 운전자가 주변을 제대로 확인하지 않고 보행자와 충돌하여 보행자가 다리를 다짐.					
6	의사소통오류	부적절조작	자재낙하	지게차 운전자와 작업자 간의 의사소통 오류로 인해 자재가 잘못 취급되어 작업 현장에 떨어짐. 이로 인해 근처 작업자가 부상을 입음.					
7	자재운반	부적절조작	전도	지게차 운전자가 자재를 운반하던 중 부적절한 조작으로 지게차가 전도되어 운전자가 다치고 자재가 손상됨.					
8	자재하역	안전거리미확보	충돌	지게차 운전자가 자재를 하역하는 과정에서 안전거리를 충분히 확보하지 않아, 다른 지게차와 충돌하여 두 운전자가 모두 부상을 입음.					
9	후진	주변미인지	끼임	지게차가 후진하던 중, 운전자가 주변을 제대로 살피지 않고 제자리에서 작업자의 손이 끼임.					
10	자재상차	부적절위치	협착	지게차로 자재를 상차하던 중, 작업자가 부적절한 위치에 서 있어 자재가 떨어지면서 그의 손이 협착됨.					
11	자재운반	안전거리미확보	충돌	지게차 운전자가 자재를 싣고 이동 중, 안전거리를 확보하지 못해 다른 지게차와 충돌, 운전자와 주변 작업자들이 경미한 부상을 입음.					
12	후진	부적절조작	자재낙하	지게차가 후진하며 이동하는 도중 부적절한 조작으로 자재가 떨어져, 지나가던 작업자에게 부상을 입힘.					
13	자재상차	부적절위치	끼임	지게차로 상차 작업을 진행 중, 작업자가 지게차와 자재 사이에 부적절하게 위치해 발이 끼임.					
14	자재하역	주변미인지	충돌	지게차 운전자와 작업자 간 의사소통 오류로 인해, 지게차 운전자가 주변을 제대로 인지하지 못하고 작업자와 충돌함.					
15	후진	부적절위치	끼임	지게차가 후진 중, 부적절한 위치에 있던 작업자가 지게차와 벽 사이에 끼임.					
16	자재운반	부적절조작	전도	지게차 운전자가 과적된 자재를 운반하다가 부적절한 조작으로 지게차가 전도됨. 운전자가 중상을 입음.					
17	신호수없음	부적절조작	협착	신호수 없이 진행한 자재 상차 작업 중, 운전자의 부적절한 조작으로 자재가 미끄러져 작업자의 손가락이 협착됨.					
18	자재하역	안전거리미확보	자재낙하	지게차 운전자와 지상 작업자간 의사소통 오류로 자재 하역 중 안전거리가 확보되지 않아, 자재가 떨어져 작업자에게 부상을 입힘.					
19	후진	주변미인지	충돌	지게차 운전자가 후진하면서 주변을 제대로 살피지 않고 공사 자재와 충돌, 자재가 무너져 주변 작업자에게 부상을 입음.					
20	신호수없음	부적절조작	전도	신호수 없이 진행한 상차 작업 중, 지게차 운전자가 부적절하게 조작하여 지게차가 전도됨. 자재가 무너져 인근에 있던 작업자가 다짐.					
21	자재운반	주변미인지	자재낙하	지게차 운전자가 미끄러운 바닥에서 자재를 운반하다가 자재가 떨어져 근처 작업자의 발에 맞음. 작업자는 발목 부상을 입음.					
22	후진	안전거리미확보	충돌	지게차가 후진하며 작업자가 사용 중인 사다리나 충돌. 사다리에 있던 작업자가 떨어져 손목 골절.					
23	자재상차	부적절위치	끼임	지게차로 상차 작업 중, 작업자가 지게차와 적재되는 자재 사이에 있어 손가락이 끼임					
24	신호수없음	부적절조작	충돌	지게차로 자재를 하역하던 중, 운전자의 부적절한 조작으로 자재가 주변의 다른 지게차와 충돌하여 손상.					
25	부적절조작	충돌	충돌	신호수 없이 지게차가 후진하다가 다른 지게차와 충돌. 두 운전자가 모두 가벼운 부상.					
26	자재상차	안전거리미확보	자재낙하	지게차 운전자와 지상 작업자 간 의사소통 오류로 자재 상차 중 자재가 떨어져 인근에 있던 작업자에게 부상을 입힘.					
27	자재하역	부적절위치	자재낙하	지게차로 자재를 하역 중, 작업자가 부적절한 위치에 서 있어 자재가 미끄러져 그의 발에 떨어짐.					
28	후진	주변미인지	충돌	지게차가 후진 중, 운전자가 사각지대에 있던 작업자를 보지 못하고 충돌하여 작업자가 부상.					
29	자재운반	부적절조작	전도	지게차 운전자가 자재를 운반 중 부적절한 조작으로 인해 지게차가 전도되어 자재가 손상되고 운전자가 부상.					
30	신호수없음	부적절위치	협착	신호수 없이 진행한 자재 상차 작업 중, 작업자가 지게차와 적재되는 자재 사이에 부적절하게 위치해 자재와 지게차 사이에 손이 끼임.					

Figure 4 Generated Scenarios and Factor Analysis(Forklift)

생성된 시나리오 120개 중, 사고 원인과 기여도를 명확하게 파악할 수 있고 각 건설 기계 별로 가장 높은 빈도의 사고 요인을 가진 시나리오를 선정하였다.

지게차의 경우, 스위스 치즈 모델로 분석하였을 때, 사고의 전제조건 요인 1위는 ‘자재 운반’이었으며, 불안전 행동의 1위 요인은 ‘의사소통 오류’였고, 사고 결과 1위 요인은 ‘협착’이었다. 이에 맞추어 ChatGPT가 생성해 준 시나리오 중에, ‘자재 운반’, ‘의사소통 오류’, ‘협착’의 요인을 가진 ‘지게차 운전자가 자재를 싣고 이동 중, 안전거리를 확보하지 못해 다른 지게차와 충돌, 운전자와 주변 작업자들이 경미한 부상을 입음.’의 시나리오를 선택하였고 이를 바탕으로 시뮬레이션에서 피험자가 수행할 과업을 구체화하였다(Table 9).

Table 9 Representative Scenario for Each Type of Construction Machinery and Tasks

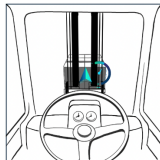
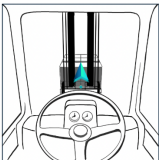
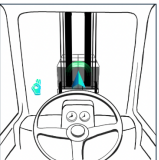
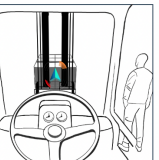
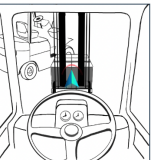
분류	시나리오	과업
지게차	지게차 운전자가 자재를 싣고 이동 중, 안전거리를 확보하지 못해 다른 지게차와 충돌하였습니다. 운전자와 주변 작업자들이 경미한 부상을 입었습니다.	전방에 위치한 팔레트를 싣고, 멈춘 사인이 보이는 곳까지 직진 후에 팔레트를 내려놓는다.
트럭	한 건설 현장에서 트럭 운전자가 자재를 적재하기 위해 조심스럽게 후진하고 있었습니다. 그러나 뒤에 있는 낮은 플랫폼을 간과하고, 트럭 뒷부분이 플랫폼 끝을 넘어가며 트럭이 기울어졌습니다. 운전자는 놀라며 트럭에서 떨어졌고, 트럭은 추락했습니다. 운전자는 등 부상을 입고 즉시 병원으로 이송되었습니다.	자재를 싣기 위해 뒤로 10미터 정도 이동한다 지반이 불안정하니, 조심하여 이동한다.
굴삭기	굴삭기가 터널 출입구에서 뒤로 후진하던 중 신호수가 없어 작업자가 굴삭기 궤도와 안전거리를 유지하지 못했습니다. 이로 인해 작업자의 발이 궤도에 협착되어 부상을 당했습니다.	터널입구 안쪽에 주차되어 있는 굴삭기를 안전한 공터가 있는 터널 밖으로 후진하여 나온다.
크레인	크레인으로 대형 콘크리트 블록을 인양 중, 제대로 된 결속이 이루어지지 않아 콘크리트 블록이 갑작스럽게 떨어져 근처 작업자의 다리를 끼여 중상을 입었습니다.	전방에 위치한 벽돌 블록을, 인양하여 화살표로 제시된 팔레트 위로 옮긴다.

3. 5. 시뮬레이션

제안하는 시나리오 생성 과정과 사고 요인으로 향후 사용자 중심의 건설 기계 HMI 디자인을 개선하고 건설 현장의 안전성과 효율성을 높이는 데 기여가 가능한지 확인하고자, 건설 기계 윈드실드 디자인 콘셉트를 시뮬레이션으로 제작하였다. 이를 위해 먼저 생성된 대표 시나리오를 토대로 스토리보드를 제작하여 시각화하였다. 실제 운전 환경에서 발생할 수 있는 상황을 보다 명확하게 이해하고, 사용자 중심의 HMI 디자인에 필요한 핵심적인 요인들을 체계적으로 확인할 수 있기 위함이었다. 다음으로, 화면 구성을 디자인하였다. 화면 구성을 위한 스토리보드에는

건설 기계 운전자를 위한 아이콘을 적용하였다(박수진 외, 2023). 아이콘은 1)과적, 2)밸런스, 3)전방, 4)주변 감지, 5)수신호 총 5개를 조합하여 화면을 구성하였다. 각 건설 기계별로 과업을 고려하였는데, 지게차는 포크(Forks)로 무거운 물건을 들어 올리거나 운반하는 기계로 전방 시야 확보가 어렵기 때문에 과적, 밸런스 전방 아이콘을 주 아이콘으로 선정하였다. 트럭은 무거운 화물이나, 기계를 실을 수 있도록 적재 공간이 탑재된 차량이기 때문에 주변 감지, 과적, 밸런스를 중점으로 디자인하였다. 굴삭기는 버킷을 가진 건설 기계로 불규칙한 지형에서도 안정적으로 회전 및 움직일 수 있도록 설계되었기 때문에 과적, 주변 감지, 밸런스를 중심으로 화면 구성을 디자인하였다. 이동식 크레인의 이동성이 매우 뛰어나고 다양한 건설 자재를 인양할 수 있도록 설계되어 복잡적이고 변칙적인 건설 현장에서 유연한 사용이 가능하기 때문에 전방, 과적을 중점으로 디자인하였다(Table 10).

Table 10 Storyboard and screen layout design based on scenario

분류	스토리보드 및 화면구성 디자인 (지게차)				
스토리보드					
화면구성					

시뮬레이션은 스토리보드와 화면구성 디자인을 토대로 제작하였다. 게임 개발 엔진인 Unity3D 프로그램을 활용하여 피험자가 직접 운전을 할 수 있는 인터랙티브 환경을 제공하였다. 시뮬레이션은 실제 건설 현장과 완벽하게 동일한 환경 조건을 갖춘 구조는 아니지만, 피험자가 체험하는 공간이 실제 환경과 유사하다는 것을 느낄 수 있도록 배경음악, 환경조건, 조작, 배경의 사람 배치와 애니메이션을 추가하여 가상의 건설 현장을 제작하였다. 또, 구성된 아이콘과 건설기계의 근접에 장애물이 나타날 시 이를 경고하는 사운드를 구현하였다. 또, 건설 기계의 사이드미러, 로지텍 스티어링 휠과 기어조작, 페달을 활용하여 피험자가 직접 운전 및 조작이 가능하도록 구현하였다. 공통으로 구현한 기능은 전진 및 후진, 핸들로 방향 조절하기이다.

3. 6. 사용자 실험

다음으로 건설 기계 운전자에게 유용한 결과를 낼 수 있는지 확인하고자 현직자를 대상으로 사용자 테스트를 진행하였다.

피험자는 건설기계 사무소가 밀집한 지역에서 추레라, 덤프트럭, 트럭, 굴삭기 운전자 6명을 모집하였다. 현업에서는 덤프트럭 운전자가 지게차 면허를 보유하거나, 굴삭기 운전자가 지게차 및 대형 1종 면허를 동시에 소지하거나, 크레인 운전자가 대형 1종 면허를 함께 보유한 경우가 많다. 건설기계 조종사 면허증의 경우 복수로 건설기계 자격을 갖춘 경우에는 면허증 1개에 복수의 건설기계가 표시된다. 이처럼 건설기계 자격증을 여러 개 보유한 운전자가 많기 때문에 현장의 특성을 고려하여 1명의 운전자가 지게차, 트럭, 굴삭기, 크레인 시나리오 4개를 체험하는 것으로 진행하였다. 실험은 사전, 사후 설문지, 심층 인터뷰 순으로 진행하였고 실험은 1인당 총 1시간 정도가 소요되었다(Table 11).

Table 11 Construction Equipment Operator Experiencing the Simulation

분류	보유자격증	실험 모습(P1)
P1(남 65)	대형 1종	
P2(남 65)	대형 1종 / 굴삭기	
P3(남 53)	대형 1종	
P4(남 50)	굴삭기 / 지게차	
P5(남 54)	기중기 / 대형 1종	
P6(남 56)	굴삭기 / 지게차 / 대형 1종	

실험 후 현직 건설 기계 운전자를 대상으로 심층 인터뷰를 실시하였다. 체험한 윈드실드 디스플레이의 아이콘 경험과 본인이 활용한 정도를 묻는 질문에서는 각기 다른 양상을 보였다. P1의 경우에는 “앞 유리에 뭐가 있는 것을 보긴 했지만 그것이 움직이거나, 상황을 알려주는 아이콘이라고 생각을 못하였다. 사실은 전혀 있는지도 몰랐다.”라고 대답하였다. 이는 아이콘을 전혀 인지하지 못함을 말한다. P6은 “아이콘은 잘 보이긴 했는데 생각보다 활용을 하지는 않았다.”라고 대답하였다. 이는 아이콘을 인지하였으나 활용하지 않았고, P2와 P4의 경우에는 아이콘을 잘 활용하였으며 조작하기에도 편했다고 답을 하였다.

사운드의 경험을 묻는 질문에서는 P3은 “사운드 경고음의 경우 건설현장의 소음이 크지만 운전자에게는 도움이 되는 것 같다. 현장감이 없는 초보자에게는 유용했을지도 모른다.”라고 대답하였으며 시뮬레이션 및 실제 현장은 소음이 큰 상황이지만 사운드 경고음은 운전자에게 유용할 것이라고 답하였다. P4의 경우, 사운드 경고음이 있는 것은 인지하였으나 활용하지는 않았다고 답하였다. P6은 “경고 사운드를 잘 들을 수 있었다. 그러나 내가 빨리 피해야 한다고 생각해서 급하게 핸들을 꺾었는데 그때 사고가 났다.”라고 사운드 경고음에 대한 언급을 하였다.

마지막으로 체험한 시뮬레이션이 실제 상황과 얼마나 유사한지를 묻는 심층 인터뷰 질문에 P5는 “체험한 시뮬레이션에서 사람들이 많았는데, 그 장면을 보고 실제 현장에서 일하는 사람들 생각이 많이 났다. 실제로 작업을 하다보면 작업자들이 기계가 있는걸 알면서도 기계 근처를 왔다 갔다 한다. 그럴 때 사고가 나는 것이다. 현장에서 크레인에 실링벨트를 제대로 묶지도 못하는 사람이 많고 반드시 사고가 나는데 시뮬레이션 하면서 그 생각이 많이 났다.”라고 대답하였다. 이외에도 피험자 대부분 실제와 유사하며 자주 발생하는 상황이고 충분히 사고가 발생할 수 있는 모습을 표현하였다고 대답하였다.

따라서, 생성된 시나리오를 기반으로 윈드실드 디스플레이 디자인 콘셉트를 제작하고 이를 활용한 실험을 통해 피험자들의 다양한 의견과 반응을 수집할 수 있었다. 실험 과정에서 피험자들은 제작한 디자인 콘셉트에 대해 전반적으로 긍정적인 평가를 했고 높은 관심을 보였으며 P1을 제외한 피험자 모두 윈드실드 디스플레이가 사용화된다면 안전을 위해 활용하겠다고 답하여 제안하는 콘셉트의 사용 의향이 높은 것으로 볼 수 있었다.

4. 결론 및 제언

건설 기계와 운전원의 상호 작용은 작업의 효율성과 안전에 직접적인 영향을 미치므로 건설 기계 HMI 제작 시 사용자 중심의 디자인이 더욱 중요시되고 있다. 본 연구에서는 기존의 건설 기계 HMI 연구들이 이미 제작된 인터페이스 디자인의 사용성 확보에 주로 연구가 진행됨에 비해, 본질적인 사고 저감을 위한 연구가 부족한 것에 주목하고, 실제 사고 데이터를 사고 요인으로 분석하고 이를 그래프로 시각화하였으며 데이터에서 나타난 사고 패턴을 기반으로 ChatGPT API를 활용한 생성 시나리오 도출 기반 HMI 디자인 프로세스를 제안하였다. 이를 위해 구체적으로는 국토안전관리원에서 제공하는 사고 사례 1429개를 분석하여 반복적으로 나타나는 사고 요인을 파악하였다. 면밀한 사고 요인의 패턴을 확인하기 위해 네트워크 그래프, 원형 다이어그램, 생키 다이어그램을 그렸다. 네트워크 그래프를 통해 도출한 사고 요인이 다른 사고 요인의 발생 가능성과 그에 미치는 영향을 시각적으로 확인할 수 있었다. 원형 다이어그램으로는 사고 요인 데이터의 비율을 확인하여 데이터의 구조를 확인할 수 있었다. 생키 다이어그램으로는 사고 요인 항목의 기여도를 시각적으로 확인할 수 있으며 사고 요인 데이터의 이동 경로를 시각적으로 확인하고 사고의 전체 흐름을 볼 수 있었다.

이후 도출한 사고 요인을 학습한 생성형 인공지능 모델을 통해 사고 시나리오를 생성하여 지게차, 트럭, 굴삭기, 크레인 종류별로 30개, 총 120개의 사고 시나리오를 생성할 수 있었다. 이들을 다시 사고 요인 빈도수를 기준으로 다시 선별한 후, 각 건설기계 종류별 대표 시나리오를 선정하였고 선택한 대표 시나리오를 토대로 스테리링휠과 Unity 3D로 사용자가 직접 체험할 수 있는 인터랙티브한 시뮬레이션으로 제작하였으며 최종적으로 사용자 테스트 및 인터뷰를 통해 검증하였다. 검증 결과 현장작자로부터 제시된 시나리오 및 시뮬레이션의 과업이 실제로 있을 수 있는 생생한 상황이라는 피드백을 들을 수 있었다. 그러나, 실험에 참여하는 피험자의 숙련도를 고려하지 못하고 단적인 시뮬레이션으로 실험을 진행하였으며 이는 연구의 한계점이라 할 수 있다. 결론적으로 본 연구에서 제안하는 사고요인을 토대로 사고 시나리오를 생성하고 이를 기반으로 구성된 디자인 콘셉트가 유용하다는 것을 확인하였고, 건설기계 연구 및 산업 분야에서 HMI 디자인을 연구할 때 실질적으로 활용될 수 있음을 확인하였다. 또 건설기계별로 발생할 수 있는 사고 시나리오를 예측할 수 있어, 향후 건설기계 HMI 디자인 개발에 중요한 방향성을 제안할 수 있는 가능성을 확인할 수 있었다.

이러한 연구의 의의는 직접적으로는 건설 기계 HMI의 디자인 시 활용할 수 있는 사고 요인 데이터의 제공과 타 분야로 확장 시 도입할 수 있는 근거 중심의 HMI 디자인 콘셉트 제작 프로세스의 제공에 있다. 향후 사고 시나리오 생성부분에 있어 개선할 수 있는 사항은, 더욱 신뢰성을 확보할 수 있도록 추가적인 성능 평가와 대량의 사용자 테스트가 있을 수 있다. 또한 구현된 인공지능 모델은 파인 튜닝을 통해 더 정확하고 배포가 가능한 형태로 제작이 될 수 있을 것이다. 이를 위해서는 사고 사례와 요인, 그리고 이에 대응하는 사고 시나리오를 질문과 답변의 쌍 (Prompt-Completion pair)으로 구조화하여 훈련하는 것이 필요하다.

본 연구는 건설 기계라는 다소 디자인이 주목하지 않았던 분야의 HMI 디자인에 사용자 중심의 디자인 방법이 어떻게 활용될 수 있는지를 확인하였다. 데이터에 기반한 근거 중심의 시나리오는 디자인 프로세스의 과학화에 기여할 뿐만 아니라 실제와 가까운 시뮬레이션이 활용되는 모든 분야에 적용 가능할 것으로 보인다. 사고로 인한 비용이 기업이나 사회에 있어 무한에 가깝게 커지는 상황 속에서, 본 연구가 안전이 담보된 효율성 향상이라는 목표에 활용될 수 있기를 희망한다.

References

1. Abdeen, F. N., Gunatilaka, R. N., Sepasgozar, S. M., & Edwards, D. J. (2024). The usability of a novel mobile augmented reality application for excavation process considering safety and productivity in construction. *Construction Innovation*, 24(4), 892–911. doi:10.1108/CI-07-2022-0168
2. Alateeq, M. M., PP, F. R., & Ali, M. A. (2023). Construction Site Hazards Identification Using Deep Learning and Computer Vision. *Sustainability*, 15(3), 2358. doi:10.3390/su15032358
3. An, S-h. (2023). Influence of Safety Awareness Levels in Construction Sites on Human Errors by Construction Workers. *Journal of the Korea Institute of Building Construction*, 23(4), 477–484. doi:10.5345/JKIBC.2023.23.4.477
4. Bedi, J. K., Rahman, R. A., & Din, Z. (2021). Heavy Machinery Operators: Necessary Competencies to Reduce Construction Accidents. In *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* (Vol. 641, No. 1, p. 012007). IOP Publishing. doi:10.1088/1755-1315/641/1/012007
5. Bhoir, S., & Esmaeili, B. (2015). State-of-the-art review of virtual reality environment applications in construction safety. *AEI 2015*, 457–468. doi:10.1061/9780784479070.040
6. Dodoo, J. E., & Al-Samarraie, H. (2021). A systematic review of factors leading to occupational injuries and fatalities. *Journal of Public Health*, 1–15. doi:10.1007/s10389-020-01427-4
7. Dutra, P. V. M., Villela, S. M., & Neto, R. F. (2025). A mixed-initiative design framework for procedural content generation using reinforcement learning. *Entertainment Computing*, 52, 100759.
8. Haddon, W. (1973). Energy Damage and the Ten Countermeasure Strategies. *Human Factors*, 15(4), 355–366. doi:10.1136/ip.1.1.40
9. Han, S-Y., Kim, J-U., & Kim, Y-M. (2015). A Study on the Fire Response Scenarios Generation of Unmanned Light Rail Transit with Systems Engineering Architecture Design Methodology. *Journal of Korea Safety Management & Science*, 17(1), 33–43. doi:10.12812/ksms.2015.17.1.33
10. Hasan, A., Baroudi, B., Elmualim, A., & Rameezdeen, R. (2018). Factors affecting construction productivity: a 30 year systematic review. *Engineering, construction and architectural management*, 25(7), 916–937. doi:10.1108/ECAM-02-2017-0035

11. Jaiswal, S., Aman, R., Sopanen, J. & Mikkola, A. (2021). Real-time multibody model-based heads-up display unit of a tractor. *IEEE Access*, 9, 57645–57657. doi:10.1109/ACCESS.2021.3072452
12. Jang, G., & Lee, Y. (2024). The Effect of Arrow Spacing and Blinking Speed Difference on Driver's Visual Perception and Cognitive Functioning in an Augmented Reality Information Delivery Method of Head-Up Display. *Archives of Design Research*, 37(1), 193–206. doi:10.15187/adr.2024.02.37.1.193
13. Jang, H-G. (2013). Digital development of construction machinery. *Mechanical Journal*, 53(1), 42–46.
14. Jeong, B-Y. (2012). *Design and Human Engineering: UI/UX Design and Human Error Prevention*. Seoul: Minyoungsa.
15. Jo, B. W., Lee, Y. S., Khan, R. M. A., Kim, J. H., & Kim, D. K. (2019). Robust Construction Safety System (RCSS) for collision accidents prevention on construction sites. *Sensors*, 19(4), 932. doi:10.3390/s19040932
16. Jung, K. H., Labriola, J. T., & Baek, H. (2023). Projecting the planned trajectory of a Level-2 automated vehicle in the windshield: Effects on human drivers' take-over response to silent failures. *Applied Ergonomics*, 111, 104047. doi:10.1016/j.apergo.2023.104047
17. Khazen, M., Nik-Bakht, M., & Moselhi, O. (2024). Monitoring workers on indoor construction sites using data fusion of real-time workers location, body orientation, and productivity state. *Automation in Construction*, 160, 105327. doi:10.1016/j.autcon.2024.105327
18. Kirwan, B., & Ainsworth, L. K. (1992). *A guide to task analysis: the task analysis working group*. Florida: CRC press.
19. Kim, E-J. (2024). A Study on Risk Management Measures for the Reduction of Construction Machinery Accidents. *Journal of the regional association of architectural institute of korea*, 26(1), 11–18.
20. Kim, H, Yi, J-S., & Jang, Y. (2022). Analyzing Patterns of Multi-cause Accidents From KOSHA's Construction Injury Case Reports Utilizing Text Mining Methodology. *Journal of the Architectural Institute of Korea*, 38(4), 237–244. doi:10.5659/JAIK.2022.38.4.237
21. Larouze, J., & Le Coze, J. C. (2020). Good and bad reasons: The Swiss cheese model and its critics. *Safety science*, 126, 104660. doi:10.1016/j.ssci.2020.104660
22. Lee, J., Kim, B., Sun, D., Han, C., & Ahn, Y. (2019). Development of unmanned excavator vehicle system for performing dangerous construction work. *Sensors*, 19(22), 4853. doi:10.3390/s19224853
23. Lewrick, M., Link, P., & Leifer, L. (2020). *The design thinking toolbox: A guide to mastering the most popular and valuable innovation methods*. New Jersey: John Wiley & Sons.
24. Liu, D., Kim, J., & Ham, Y. (2023). Multi-user immersive environment for excavator teleoperation in construction. *Automation in Construction*, 156, 105143. doi:10.1016/j.autcon.2023.105143
25. Marcher, C., Giusti, A., & Matt, D. T. (2021). On the design of a decision support system for robotic equipment adoption in construction processes. *Applied Sciences*, 11(23), 11415. doi:10.3390/app112311415
26. Marović, I., & Hanak, T. (2017). Selection of adequate site location during early stages of construction project management: A multi-criteria decision analysis approach. In *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* (Vol. 251, No. 1, p. 012044). IOP Publishing. doi:10.1088/1757-899X/251/1/012044
27. Mazankova, M. J. (2015). Risks from blind spots of trucks. In *International Conference on Military Technologies (ICMT) 2015* (pp. 1–6). IEEE. doi:10.1109/MILTECHS.2015.7153733
28. Moon, W-C., & Kim, W-Y. (2013). Establishing the Importance Institution for Prevention of Human Error. *Journal of advanced navigation technology*, 17(4), 377–385. doi:10.12673/jkoni.2013.17.4.377
29. Monsaingeon, N., Caroux, L., Mouginé, A., Langlois, S., & Lemerrier, C. (2021). Impact of interface design on drivers' behavior in partially automated cars: An on-road study. *Transportation research part F: traffic psychology and behaviour*, 81, 508–521. doi:10.1016/j.trf.2021.06.019

30. Mulyana, T., Ibrahim, R., & Abd Rahim, E. (2019). Human machine interface design analysis of defect detection prototype by wonderware InTouch software. In *Journal of Physics: Conference Series* (Vol. 1150, No. 1, p. 012034). IOP Publishing. doi:10.1088/1742-6596/1150/1/012034
31. Nalic, D., Eichberger, A., Hanzl, G., Fellendorf, M., & Rogic, B. (2019). Development of a co-simulation framework for systematic generation of scenarios for testing and validation of automated driving systems. In *2019 IEEE intelligent transportation systems conference (itsc)* (pp. 1895-1901). IEEE. doi:10.1109/ITSC.2019.8916839
32. Park, S.-J., Kim, T., Chung, D., Ahn, H., & Lee, S. (2023). HMI Icon Design for Construction Machinery Operator using Critical Incident Technique (CIT). *Journal of the HCI Society of Korea*, 18(4), 21-29, doi:10.17210/jhsk.2023.12.18.4.21
33. Park, H.-J., Lee, J.-S., Seo, M.-B., & Lee, S.-Y. (2024). Risk Analysis by Activity based on Construction Safety Accident cases. *Journal of the Architectural Institute of Korea*, 40(1), 287-295. doi:10.5659/JAIK.2024.40.1.287
34. Pereira, A., Lee, G. A., Almeida, E., & Billinghurst, M. (2016). A study in virtual navigation cues for forklift operators. In *2016 XVIII Symposium on Virtual and Augmented Reality (SVR)* (pp. 95-99). IEEE. doi:10.1109/SVR.2016.25
35. Phade, G., Tribhuvan, A., Vaidya, O., & Gandhe, S. (2021). Design and development of smart personal protective equipment vending machine using Internet of Thing. In *2021 International Conference on Emerging Smart Computing and Informatics (ESCI)* (pp. 252-257). IEEE. doi:10.1109/ESCI50559.2021.9396775
36. Ray, S. J., & Teizer, J. (2013). Computing 3D blind spots of construction equipment: Implementation and evaluation of an automated measurement and visualization method utilizing range point cloud data. *Automation in Construction*, 36, 95-107. doi:10.1016/j.autcon.2013.08.007
37. Reason, J. (1990). *Human error*. Cambridge university press.
38. Reason, J., Hollnagel, E., & Paries, J. (2006). Revisiting the Swiss cheese model of accidents. *Journal of Clinical Engineering*, 27(4), 110-115.
39. Sanad, H. M., Ammar, M. A., & Ibrahim, M. E. (2008). Optimal construction site layout considering safety and environmental aspects. *Journal of construction engineering and management*, 134(7), 536-544. doi:10.1061/ASCE0733-93642008134:7536
40. Shahab, M. A., Srinivasan, B., & Srinivasan, R. (2023). Enhancing Human Machine Interface design using cognitive metrics of process operators. In *Computer Aided Chemical Engineering* (Vol. 52, pp. 3513-3518). Elsevier. doi:10.1016/B978-0-443-15274-0.50561-8
41. Shariatfar, M., Deria, A., & Lee, Y. C. (2022). Digital twin in construction safety and its implications for automated monitoring and management. In *Construction Research Congress 2022* (pp. 591-600).
42. Sitompul, T. A., Wallmyr, M., & Lindell, R. (2020). Conceptual design and evaluation of windshield displays for excavators. *Multimodal Technologies and Interaction*, 4(4), 86. doi:10.3390/mti4040086
43. Song, Y., Koeck, R., & Luo, S. (2021). Review and analysis of augmented reality (AR) literature for digital fabrication in architecture. *Automation in Construction*, 128, 103762. doi:10.1016/j.autcon.2021.103762
44. Stanton, N. A., & Baber, C. (2005). Validating task analysis for error identification: reliability and validity of a human error prediction technique. *Ergonomics*, 48(9), 1097-1113. doi:10.1080/00140130500219726
45. Su, X., Pan, J., & Grinter, M. (2015). Improving construction equipment operation safety from a human-centered perspective. *Procedia Engineering*, 118, 290-295. doi:10.1016/j.proeng.2015.08.429
46. Teizer, J. (2015). Magnetic field proximity detection and alert technology for safe heavy construction equipment operation. In *ISARC. Proceedings of the International Symposium on Automation and Robotics in Construction* (Vol. 32, p. 1). IAARC Publications.
47. Teizer, J. (2016). Right-time vs real-time pro-active construction safety and health system architecture. *Construction Innovation*, 16(3), 253-280. doi:10.1108/CI-10-2015-0049

48. Teizer, J., Golovina, O., Wang, D., & Pradhanang, N. (2015). Automated collection, identification, localization, and analysis of worker-related proximity hazard events in heavy construction equipment operation. *Proceedings of the International Symposium on Automation and Robotics in Construction* (Vol. 32, p. 1). IAARC Publications.
49. Hanington, B., & Martin, B. (2017). *The pocket universal methods of design: 100 ways to research complex problems, develop innovative ideas and design effective solutions*. Rockport.
50. Yamin, P. A., Park, J., & Kim, H. K. (2024). In-vehicle human-machine interface guidelines for augmented reality head-up displays: A review, guideline formulation, and future research directions. *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*, 104, 266–285. doi:10.1016/j.trf.2024.06.001
51. Kim, Y., Choi, H., Oh, A., Jeon, H., & Kim, K. (2024). Exploring the Potential of Generative AI in UX Practice : A Case Study on Scenario Development for Large Indoor Facility Robots. *Design Works*, 7(1), 29–44, 10.15187/dw.2024.03.7.1.29
52. Yu, Y-J., Kim, T., Son, K., Lee, K-H., & Kim, J-M. (2016). Analysis of Primary Internal and External Risk Factors According to the Accident Causes in Construction Site. *Journal of the Korea Institute of Building Construction*, 16(6), 519–527. doi:10.5345/JKIBC.2016.16.6.519
53. Zhang, S., He, C., & Ji, Z. (2019). Study on Human-Machine Interface Design of Construction Machinery. In *Advances in Ergonomics in Design: Proceedings of the AHFE 2018 International Conference on Ergonomics in Design, July 21–25, 2018, Loews Sapphire Falls Resort at Universal Studios, Orlando, Florida, USA 9* (pp. 78–85). Springer International Publishing. doi:10.1007/978-3-319-94706-8_10

사고 패턴 분석 및 시나리오 추출에 기반한 건설 기계 HMI 디자인

박수진¹, 곽태영², 이상원^{3*}

¹연세대학교 생활디자인학과, 인간생애와 혁신적 디자인, 박사수로, 서울, 대한민국

²연세대학교 통합디자인과, 인간생애와 혁신적 디자인, 석사과정, 서울, 대한민국

³연세대학교 통합디자인과, 교수, 서울, 대한민국

초록

연구배경 건설 기계와 운전자의 상호 작용은 작업의 효율성과 안전에 직접적인 영향을 미치므로 건설 기계 HMI(Human Machine Interface) 설계 시 사용자 중심의 디자인이 더욱 중요시되고 있다. 최근 건설기계 산업은 무인건설기계와 원격 조종 기계 등 첨단 장비의 개발이 활발하다. 그러나 현장에서 인간의 역할이 완전히 사라지지 않는 이상 인간의 한계와 실수의 가능성을 완전히 제거하기는 어렵다. 때문에 사람으로 인해 발생할 수 있는 오류를 경계하고 건설기계 사고의 패턴을 파악하는 것은 매우 중요하다고 할 수 있다. 본 연구의 목적은 인적 오류를 최소화할 수 있는 건설 기계 운용 디자인을 위해 사건 패턴 분석과 시나리오를 설계하고 가상 시뮬레이션으로 구축한 후, 전문가 평가를 통해 제시하는 사고 시나리오를 검증하는 것이다.

연구방법 건설기계별 사고 사례를 휴먼에러 모델로 분석하여 반복적으로 나타나는 인적 사고 요인을 파악하고, 이를 그래프로 시각화하여 사고 요인간의 패턴과 데이터를 분석한다. 이후 생성형 인공지능 모델의 사고 사례와 사고 요인 학습을 통해 건설기계별 사고 시나리오를 생성, 실질적이고 구체적인 시나리오 도출의 중요성에 주목하였다. 이후 생성된 시나리오를 다시 사고 요인의 빈도를 기준으로 건설기계별 대표 사고 시나리오로 선별한 후, 운전자가 직면할 수 있는 상황을 시뮬레이션으로 제작하고 사용자 테스트를 통해 검증하였다.

연구결과 건설기계 종류별 대표 시나리오 기반의 시뮬레이션 실험 결과 윈드실드 디스플레이의 아이콘 및 사운드의 경험과 본인이 활용한 정도를 묻는 질문에서는 피험자 각기 다른 양상을 보였다. 또한 체험한 시뮬레이션이 실제 상황과 얼마나 유사한지를 묻는 심층 인터뷰 질문에서는 피험자 대부분 실제와 유사하며 자주 발생하는 상황이고 충분히 사고가 발생할 수 있는 모습을 표현하였다고 대답하였고 생성된 시나리오를 기반으로 윈드실드 디스플레이 디자인 콘셉트를 제작하고 이를 활용한 실험을 통해 피험자들의 다양한 의견과 반응을 수집할 수 있었다. 실험 과정에서 피험자들은 제작한 디자인 콘셉트에 대해 전반적으로 긍정적인 평가를 내렸고 높은 관심을 보였으며 제안하는 콘셉트의 사용 의향이 높은 것으로 볼 수 있었다.

결론 본 연구에서 제안하는 사고요인을 토대로 사고 시나리오를 생성하고 이를 기반으로 구성한 디자인 콘셉트가 유용하다는 것을 확인하였고, 건설기계 연구 및 산업 분야에서 HMI 디자인을 연구할 때 실질적으로 활용될 수 있음을 확인하였다. 또 건설기계별로 발생할 수 있는 사고 시나리오를 예측할 수 있어, 향후 건설기계 HMI 디자인 개발에 중요한 방향성을 제안할 수 있는 가능성을 확인할 수 있었다. 본 연구는 건설 기계라는 다소 디자인이 주목하지 않았던 분야의 HMI 디자인에 사용자 중심의 디자인 방법이 어떻게 활용될 수 있는지를 확인하였다. 데이터에 기반한 근거 중심의 시나리오는 디자인 프로세스의 과학화에 기여할 뿐만 아니라 실제와 가까운 시뮬레이션이 활용되는 모든 분야에 적용 가능할 것으로 보인다.

주제어 HMI 디자인, Human-Machine Interface, 건설기계, 인적 오류

*교신저자 : 이상원 (sangwon.lee@yonsei.ac.kr)