

2025년 추계학술발표대회 : 일반부문

VR기반 건설안전교육의 사용자 체험 및 가상공간 개발 방식에 따른 EEG 분석

EEG Analysis of User Experience and Virtual Environment Development Methods in VR-based Construction Safety Education

○조 창 영*
Cho, Chang Young

김 유 경**
Kim, Yu Kyeong

이 진 강***
Lee, Jin Gang

Abstract

Experiential training using virtual reality (VR) has recently garnered attention as a solution to enhance the effectiveness of construction safety education. However, its practical application is challenging due to limitations such as technological accessibility and the quality of educational content. In particular, there is a lack of research on the user environment and quality of VR educational materials that can heighten a learner's immersion and improve safety training effectiveness. To address this, the current study aims to analyze the effects of VR-based construction safety education, specifically its experience format (VR vs. 2D) and development style (photorealistic vs. animation), on users by employing electroencephalography (EEG) indicators. The experiment was conducted with 42 student participants, and attention, immersion, and comfort levels were evaluated based on the collected EEG data. The findings of this study will provide foundational data necessary for the effective development and improvement of construction safety training materials.

키워드 : 건설안전교육, 가상현실, 뇌파 분석

Keywords : Construction Safety Training, Virtual Reality, EEG Analysis

1. 서론

안전교육은 산업재해 예방의 최전선으로, 특히 추락과 같은 중대 재해를 줄이기 위해 현장 위험을 정확히 인식하고 판단하는 능력을 길러주는 핵심 수단이다 [1]. 건설 안전교육은 대개 동영상, 책자 등에 포함된 정보를 대규모 강의와 같은 한 방향으로 전달하는 방식으로 진행되어 학습자의 능동적 참여와 현장에서의 교육효과를 충분히 끌어내지 못한다. 최근 가상현실(Virtual Reality, 이하 VR)을 활용한 체험형 교육은 현실감 있는 디스플레이와 사용자 상호작용을 통해 흥미와 몰입을 높일 수 있는 대안으로 주목받고 있다 [2]. 하지만 기술에 대한 접근성 및 기기의 활용성, 교육 내용의 품질 등의 한계로 VR을 활용한 체험형 교육이 제대로 이루어지지 못하고 있다 [3].

VR기반 교육자료의 품질에 초점을 맞추어 보면, VR 교육자료를 개발할 때, 어떤 유형의 환경이 학습자의 몰입도를 높이고, 안전 행동을 더 효과적으로 교육할 수 있는지에 대한 고려가 필요하다. 일부 교육자료는 간단하게 가상 환경을 체험하고 텍스트 또는 이미지 정보를 전달하는 방식으로 강의를 마치는 등, 체험형 교육의 의도와는 다르게 활용된다. 작업자가 체험하는 가상환경은 체험 효과를 높이는 실사 이미지 방식, 제작의 자율성이 높은 애니메이션 방식 등으로 제공된다. 실제로 어떤 유형의 교육자료가 학습에 더 효과적인지에 대한 정량적 근거는 여전히 제한적이다. 이러한 문제의식에도 불구하고 선행 연구는 주로 사

용자 만족도나 훈련 효과에 대한 설문 및 검증 등 주관적인 응답에 의존해 교육자료의 개발 방식에 따른 사용자 반응을 통합적으로 파악하는 데 한계가 있었다.

이에 본 연구는 교육 과정에서 참여자의 생리적·심리적 반응을 뇌파(EEG)를 기반으로 교육자료의 유형과 제공방식에 따른 차이와 효과를 분석하고자 한다. VR 교육자료의 유형은 실사 형식 (photorealistic)과 애니메이션 형식을 비교하고자 하며, 제공방식은 HMD 방식과 데스크탑 모니터 방식을 비교하고자 한다. 학생 참여자는 추락 사고 예방을 위한 교육자료를 그룹별로 실사 및 애니메이션 형식, HMD와 데스크탑 모니터 방식으로 체험하였다. 본 연구의 결과는 매체(실사/애니메이션)와 제공방식(HMD/모니터)에 따른 차이를 EEG로 분석함으로써 건설 안전교육 자료의 개발, 개선, 활용을 위한 자료를 제공할 것이다.

2. 문헌 고찰

2.1 가상현실(VR)을 활용한 건설안전교육

건설안전교육에서 VR은 실제 위험을 가상공간에서 학습을 제공함으로써 위험 인식과 대응 역량을 높이고, 강의 중심 교육의 한계(언어 장벽, 실제 작업 맥락 재현의 어려움)를 보완하여 현장 작업자에게 효과적으로 정보를 전달할 수 있다[4][5]. 특히 터널, 원자력 발전소 등 실제 현장 훈련이 접근성 또는 비용 문제로 제약되는 상황에서, VR은 안전한 환경에서 절차 숙달과 비상 대응 연습을 가능하게 한다[6][7]. 실증 연구에서도 VR을 활용한 안전교육

이 전통 교육 대비 특정 공중에서 위험 인식과 유지 효과에서 우수함을 보였고[1], 몰입형 HMD는 스마트폰이나 인쇄물 대비 몰입도/만족도에서 우수하여 복잡 절차와 정밀 조작이 요구되는 교육에 적합함을 확인하였다[8]. 또한 4D-BIM 기반 VR은 다언어 환경에서 위험 인지와 안전 프로토콜 이해를 개선해 현장 커뮤니케이션 도구로서의 가능성을 확장했고[4], 시나리오 기반 상호작용 모델은 강의식 교육 대비 위험식별 능력을 향상한 바 있다[9]. 종합하면, VR기반 건설안전교육은 현장 정보 전달력을 개선하여 학습자의 위험식별 능력과 절차 숙련의 향상에 효과가 있음을 보여주었다 [10].

2.2 가상현실 기술 체험 방식

HMD를 활용한 VR 설정은 훈련생이 가상환경에 둘러싸여 있는 듯한 느낌을 주어 몰입형 VR 훈련을 제공할 수 있습니다. HMD 기반의 소비자용 VR헤드셋은 훈련생의 머리와 손 컨트롤러에 대한 6 자유도(6-DOF) 추적을 통해 훈련생의 행동을 인식하여 상호작용을 제공할 수 있습니다. 한편, VR 기기의 해상도 제한이나 화면 왜곡은 멀미나 두통을 유발할 수 있고, HMD(Head Mounted Display)를 장시간 착용할 때 피로나 신체적 불편감이 나타날 수 있다. 또한 VR 기반 안전교육이 권장되고는 있으나, VR 장비의 경제적 접근성 문제, 사용의 어려움, 공간 부족 등 다양한 요인으로 인해 현장에서 효과적으로 적용하는 데 어려움이 있다 [3, 11]. 교육 현장에서는 VR 교육자료를 데스크톱 모니터 또는 스마트폰을 사용하여 체험하는 경우가 많으며, 이는 비 몰입형 VR로 분류할 수 있다.

2.3 가상공간 개발 방식

본 연구에서 가상현실 환경에서 실사 형식으로 개발된 교육자료와 애니메이션 형식으로 개발된 교육자료를 비교하고자 한다. 고해상도의 실사 표현은 존재감(presence)을 높이는 경향이 보고되었고 [12], 반대로 애니메이션 기반의 비정상성/비현실적 연출은 지각적/개념적 현실감은 낮추더라도 ‘체감된 현실감(felt realism)’을 오히려 높여 감정적 몰입을 강화할 수 있다 [13]. 교육 맥락에서 실사 기반 시뮬레이션이 상황 재현에 유리하지만, 개념 전달이나 인지 부하 관리에는 애니메이션 기반 설명이나 상호작용(예: 지능형 튜터)이 더 효과적일 수 있다 [14]. 두 방식의 절대적 우열을 일반화하기보다는 가상현실 자료의 목표(학습, 체험 등)와 사용자의 상호작용(센서, 시선 등)등을 종합적으로 고려하여 가상환경을 구축해야 바람직하다고 볼 수 있다.

3. 연구 방법

3.1 연구 대상 및 장비

본 실험에는 뇌 질환이나 시청각 장애가 없는 총 42명의 대학생이 참가하였다. VR 장비는 Oculus Quest 2, EEG 측정에는 Muse 2 무선 헤드밴드를 사용하였다(그림 1). Muse 2는 전두엽 및 측두엽 부위의 2채널(AF7, AF8 등)을

통해 뇌파를 측정하며, VR HMD와 동시 착용이 가능하다.



그림1. Oculus Quest 2 및 Muse2 무선 헤드밴드

3.2 교육자료 및 실험 절차

국내 건설 현장에서 여전히 주요 사망 원인으로 지목되는 추락 재해는 2023년에만 117건이 보고되었고, 그중 67%가 안전설비 미비와 안전교육 부족과 연관되는 등 교육의 실효성 제고가 시급하다. 이에 본 연구는 건설 현장 추락 사고 예방 교육자료를 두 가지 실험 환경(VR, 2D)으로 제공하였다. 각 환경마다 실사 형식과 애니메이션 형식으로 개발된 가상현실 교육자료를 체험하였다. 체험하는 공간의 차이는 있지만 추락 사고 예방과 관련한 주요 내용 및 장면 구성은 일관되도록 유지하고, 환경적 차이는 표시 매체의 특성(시야·현장감·입체감 등)만 발생하도록 통제하였다(그림 2 참고).

42명을 두 개의 그룹으로 나누어(VR 그룹 및 2D 모니터 그룹) 진행하였으며, 각 그룹은 실사 형식과 애니메이션 형식 순으로 체험하며, 그 사이에 10분 휴식을 두었다.(그림3 참고).

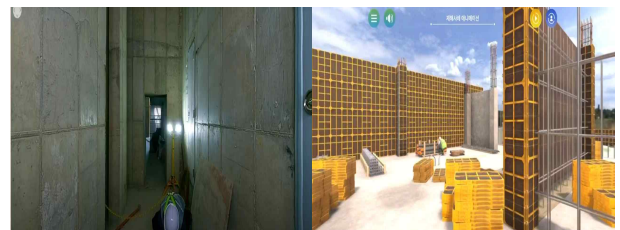


그림2. 영상 콘텐츠 및 애니메이션 콘텐츠



그림3. VR 및 2D 실험 진행

3.3 EEG 데이터 분석

EEG 데이터는 256Hz로 연속 수집하였고 자극의 시작과 종료 시각을 이벤트 마커로 기록하여 신호와 동기화했으며, AF7·AF8(전두)에서 측정된 신호는 세션 전후 노이즈를 기준으로 품질을 점검하고 기준 미달 epoch/세션을 제외한다. 전처리 과정에서 0.5-70Hz 대역통과 필터 적용 후 ICA(Independent Component Analysis, 독립성분분석)를 통

해 눈깜박임이나 근전도 등 잡음 성분을 통계적으로 분리하고 추정하여 제거한다. 신호는 1s epoch로 분할하여 품질 기준 미달 epoch를 제외하였다. 신호처리는 θ (4-8 Hz) · SMR(12-15 Hz) · 중베타(15-20 Hz) 대역 전력을 구한 다음 주의집중도, 몰입도, 편안함을 베이스라인 대비 상대값으로 정규화하였다. 주의집중도, 몰입도, 편안함 각 지표는 아래 수식과 같이 계산한다.

$$\text{주의집중도} = \frac{(SMR + middle\ \beta)}{\theta} \quad (1)$$

$$\text{몰입도} = \frac{\theta}{\alpha} \quad (2)$$

$$\text{편안함} = \frac{\alpha}{\beta} \quad (3)$$

표1. 뇌파 신호의 주파수 별 분류 및 특징

뇌파신호분류	주파수(Hz)	주요 특징
세타(Theta)	4~8Hz	- 조용한 집중상태에서 발생 - 휴식상태의 후두엽에서 발생
알파(Alpha)	8~12Hz	- 수면 상태에서는 약해짐
SMR	12~15Hz	- 몸을 움직이지 않고 차분하게 집중할 때 발생
중베타 (Middle Beta)	15~20Hz	- 적극적인 사고, 문제해결, 활동적인 집중을 할 때 발생

4. 연구 결과 및 논의

4.1 연구 결과

EEG 지표 분석 결과는 체험 방식과 자료 형식에 따라 실사 형식 VR 자료는 VR(P), 실사 형식 2D 자료는 2D(P), 애니메이션 형식 VR 자료는 VR(A), 애니메이션 형식 2D 자료는 2D(A)로 설명한다 (표2, 그림 4, 그림 5, 그림 6).

주의 집중도에서 VR(P)의 평균은 1.93, VR(A)의 평균은 2.85로 나타나 각각 2D(P)의 평균(1.74), 2D(A)의 평균(1.47)보다 높았다. 특히 VR(A)는 모든 대안 중 가장 높은 주의 집중도를 보였다.

몰입도에서 VR(P)의 평균은 1.12, VR(A)의 평균은 1.21로 2D(P)의 평균(1.29), 2D(A)의 평균(1.51)보다 낮았다. 즉, 2D 환경에서의 몰입도가 VR 환경에서의 몰입도보다 높게 관찰되었으며, 두 환경에서 모두 애니메이션 형식의 자료가 실사 형식의 자료보다 높은 몰입도를 보여주었다.

편안함에서 VR(P)의 평균은 0.28, VR(A)의 평균은 0.33으로 각각 2D(P)의 평균(0.28), 2D(A)의 평균(0.34)과 비교해 거의 같은 값을 보였다. 두 가지 환경에서 모두 애니메이션 형식이 실사 형식보다 높은 편안함을 보여주었다.

종합하면, VR기반의 교육자료는 2D 기반의 교육자료에 대비하여 높은 주의집중도를 보여주었지만, 낮은 몰입도를 보여주었다. 2D 모니터로 가상현실 교육을 체험하는 방식이 HMD보다 상대적으로 시각적/물리적 부담이 적어 안정적인 교육을 가능하게 할 수 있다. 그리고 실사 형식의 교육자료는 애니메이션 형식의 교육자료 대비 낮은 몰입도와 편안함을 주는 것으로 분석되었다. 이는 실사 형식의 교육자료가 때로는 부담감을 주는 것으로 추측할 수 있다.

표2. 지표별 세부 결과

조건	주의집중도	몰입도	편안함
VR(P)	1.93(최소0.38~ 최대2.90)	1.12(최소0.57~ 최대2.07)	0.28(최소0.16~ 최대0.62)
VR(A)	2.85(최소0.34~ 최대8.73)	1.21(최소0.27~ 최대3.07)	0.33(최소0.11~ 최대0.74)
2D(P)	1.74(최소0.76~ 최대3.19)	1.29(최소0.57~ 최대2.19)	0.28(최소0.14~ 최대0.58)
2D(A)	1.47(최소0.31~ 최대4.18)	1.51(최소0.59~ 최대4.20)	0.34(최소0.09~ 최대0.78)

그림4. 주의집중도 비교 결과

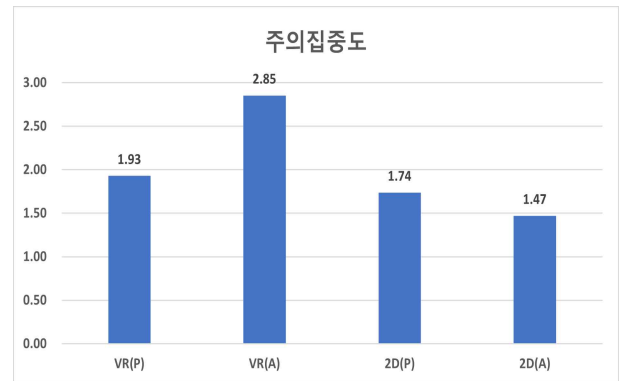


그림5. 몰입도 비교 결과

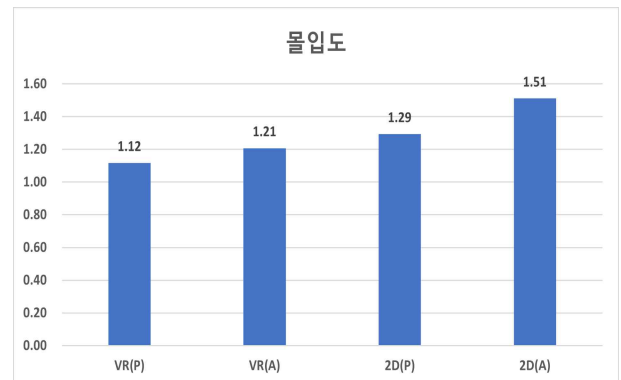
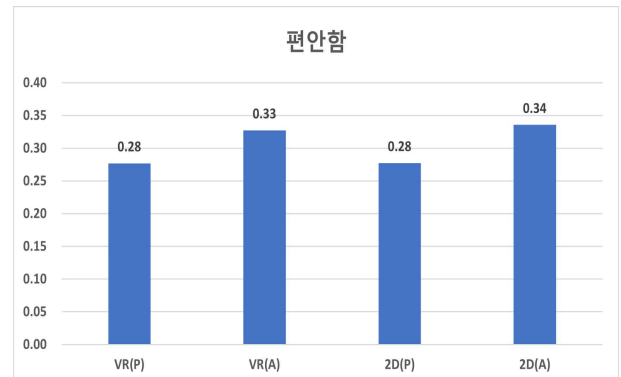


그림6. 편안함 비교 결과



5. 결론

가상공간을 활용한 체험형 교육은 건설안전교육의 효과를 높이기 위해서 권장되고 있으며, 그 활용범위는 갈수록 커질 것이다. 하지만 기존에 제공되고 있는 VR기반의 안전교육은 교육자료의 제공방식이나 개발 방식이 제각각이고 교육자료의 품질에 제검토가 필요하다. 이러한 배경에서 본 연구는 VR기반 건설안전교육의 체험 형식(VR/2D)과 개발 방식(실사/애니메이션)에 따른 체험자 반응을 EEG 지표를 활용해 분석하였다. 분석 결과, VR 형식은 집중력 강화에 도움이 되지만 편안함 측면에서는 2D 화면이 선호되는 것을 확인하였다. 동시에 애니메이션 형식이 실사 형식보다 더 높은 몰입도와 편안함을 보여주었다. 이같은 결과는 실사 형식의 VR 자료의 개발이 항상 몰입감이 좋고 더 좋은 교육효과를 가져오는 것이 아니라는 것을 말하며, 교육의 목적, 내용, 대상자에 따라 혼합형 전략이 필요함을 말한다. 다만 학생이라는 제한적인 표본을 대상으로 전두 채널(AF7·AF8) 중심의 측정으로 인해 본 연구의 결과를 일반화하기에는 한계가 있다. 따라서 실험 결과의 설득력을 높이려면 다양한 연령과 배경을 포함한 건설 작업자 표본 확대, 추가 전극 EEG 분석, 학습 성취도를 연계한 분석 등이 필요할 것이다.

6. 참고문헌

- [1] Gavish, N., Gutiérrez, T., Webel, S., Rodríguez, J., Peveri, M., Bockholt, U., & Tecchia, F. "Evaluating virtual reality and augmented reality training for industrial maintenance and assembly tasks," *Interactive Learning Environments*, Vol.23, pp.778-798, 2015.
- [2] Buttussi, F., & Chittaro, L. "A Comparison of Procedural Safety Training in Three Conditions: Virtual Reality Headset, Smartphone, and Printed Materials," *IEEE Transactions on Learning Technologies*, Vol.14, pp.1-15, 2021.
- [3] 구충완, 박현수, 김태완, 이찬식. "가상현실과 생체피드백 기술을 활용한 건설안전교육의 현재와 미래," *한국건설관리학회 논문집*, 제22권 제3호, pp.15-24, 2021.
- [4] Makransky, G., & Klingenberg, S. "Virtual reality enhances safety training in the maritime industry: An organizational training experiment with a non-WEIRD sample," *Journal of Computer Assisted Learning*, Vol.38, pp.1127-1140, 2022.
- [5] Savundranayagam, M., Norris, G., Malheiro, G., Schumann, A., Campos, J., & Orange, J. B. "Implementing EPIC-VR in health care: Aligning virtual reality training with organizational context and readiness," *Innovation in Aging*, Vol.8, p.24, 2024.
- [6] Moore, H. F., & Gheisari, M. "A Review of Virtual and Mixed Reality Applications in Construction Safety Literature," *Safety*, 2019.
- [7] Wahidi, S. I., Pribadi, T. W., Rajasa, W. S., & Arif, M. "Virtual Reality Based Application for Safety Training at Shipyards," *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, Vol.972, 2022.
- [8] Guo, Z., Wang, Q., Peng, C., Zhuang, S., & Yang, B. "Willingness to accept metaverse safety training for construction workers based on extended UTAUT," *Frontiers in Public Health*, Vol.11, 2024.
- [9] Abotaleb, I., Hosny, O., Nassar, K., Bader, S., Elrifaae, M., Ibrahim, S., Hakim, Y. E., & Sherif, M. "An interactive virtual reality model for enhancing safety training in construction education," *Computer Applications in Engineering Education*, Vol.31, pp.324-345, 2022.
- [10] Zhao, D., & Lucas, J. "Virtual reality simulation for construction safety promotion," *International Journal of Injury Control and Safety Promotion*, Vol.22, pp.57-67, 2015.
- [11] 노영훈, 장재형, 이재영. "외국인 건설근로자를 위한 VR 통합 안전교육 분석 및 향후 방향," *한국산학기술학회 논문집*, 2024; pp.1-10.
- [12] Clemente, D., Theodorou, A., Romano, L., Russo, C., Rodelli, R., Casagrande, G., & Panno, A. "The Effect of Exposure to VR vs. 2D Virtual Environments on Restorativeness: The Mediating Role of the Sense of Presence," *International Journal of Human-Computer Interaction*, Vol.41, pp.4567-4582, 2024.
- [13] Christophers, L., Mulvaney, P., & Rooney, B. "The Felt Realism of 'Unreal' Environments: Testing a Dual Awareness Model of Subjective Realism," *International Journal of Human-Computer Interaction*, Vol.40, pp.8890-8908, 2024.
- [14] Tracy, K., & Spantidi, O. "Impact of GPT-Driven Teaching Assistants in VR Learning Environments," *IEEE Transactions on Learning Technologies*, Vol.18, pp.192-205, 2025.