

가상현실 기반 발파진동 시뮬레이터 개발

이동윤¹, 박형진², 서명배^{2*}

¹한국건설기술연구원 스마트건설지원센터, ²한국건설기술연구원 미래스마트건설연구본부

Development of a Virtual Reality-Based Blasting Vibration Simulator

Dongyoun Lee¹, Hyung-Jin Park², Myoung-Bae Seo^{2*}

¹Smart Construction Promotion Center, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology

²Department of Future and Smart Construction Research, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology

요약 최근 국가적으로 수도권광역급행철도 공사가 진행되고 있다. 도심 내의 터널 굴착공사 시 진동, 소음이 발생하며 이로 인한 인근 거주자에 불편한 영향을 미칠 수 있다. 이와 같은 상황을 대비하고자 건설사는 공사계획단계에서부터 인근지역의 주민들과의 협의, 제기된 민원에 대한 대응방안 수립 등으로 현장 내 소음 및 진동 관리계획을 수립한다. 그러나 소음 및 진동 관리계획 수립에도 불구하고, 공사기간 동안 산발적으로 발생하는 소음과 진동으로 인해 민원이 근본적으로 해결되지 못하고 있다. 이와 같은 문제점을 해결하기 위해서 프로젝트 계획단계에서부터 인근지역 주민들 대상으로 현실과 몰입감이 높은 소음 및 진동 시뮬레이션 기술을 제공하는 것이 하나의 해결책일 수 있다. 따라서 본 연구는 현실감과 몰입감을 높일 수 있는 가상현실을 기반으로 발파진동을 직접 체험할 수 있는 발파진동 시뮬레이터를 개발하였다. 본 연구 결과는 향후 도심 내의 터널 굴착공사계획 수립 및 민원대응에 효과적일 것으로 예상된다.

Abstract The new subway project called "Great Train Express" is in progress. The vibration and noise generated during the tunnel excavation in the city center are uncomfortable for nearby residents. The construction company prepares for this situation by establishing a noise and vibration management plan at the site from the construction planning stage through consultation with the residents of nearby areas and establishing countermeasures for complaints raised. On the other hand, despite establishing a noise and vibration management plan, civil complaints have not been fundamentally resolved due to the noise and vibration occurring during construction. One of the best solutions is to provide noise and vibration simulation technology with a high sense of reality and immersion for residents of nearby areas. Therefore, this study developed a blast vibration simulator that can directly experience blast vibration based on virtual reality, increasing the sense of reality and immersion. These results are expected to be effective in establishing a tunnel excavation plan in the city center and responding to civil complaints in the future.

Keywords : Virtual Reality, Blasting Vibration, Simulator, Great Train Express, Construction

1. 서론

최근 국내에서는 수도권광역급행철도 공사가 다수 진행되고 있으며, 이로 인한 도심 내 터널 굴착공사 시 발생하는 진동으로 인해 인근 거주자들에게 불편한 영향을

1.1 연구의 배경 및 목적

본 논문은 국토교통과학기술진흥원의 연구과제로 수행되었음(20UUTI-B157786-03).

*Corresponding Author : Myoung-Bae Seo(Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology)

email: smb@kict.re.kr

Received February 27, 2024

Revised April 4, 2024

Accepted April 5, 2024

Published April 30, 2024

미치고 있다. 현재 건설현장에서 발생하는 진동은 현장 인근 주거생활 환경에 영향을 미치고 있다. 환경부 소관인 중앙환경분쟁위원회의 자료에 따르면, 1991년부터 2020년까지 환경분쟁신청사건에 대한 피해 처리 건수는 총 4,557건인데, 그 중 소음 및 진동에 대한 피해처리 건수가 3,840 건으로 약 84%를 차지하고 있다. 특히, 전체의 90% 이상은 건설 공사장 내에서 발생하는 것으로 나타났다[1].

특히 발파진동은 주변의 건물, 도로 그리고 기타 인프라에 영향을 미칠 수 있으며, 이로 인한 싱크홀, 무너짐 등 파괴적인 결과가 초래될 수 있다. 이러한 피해로 인해 건설사는 사전에 소음 및 진동 대책 매뉴얼을 기반으로 시공 기획초기 단계에 사전조사와 기초평가를 통해 보다 적합한 공법을 선정한다. 그리고, 피해가 발생할 수 있는 공사 인근지역의 주민들과 협의를 통해 소음 및 진동 관리계획을 수립하고 있다. 그러나 공사기간 동안 지속적이고 산발적으로 발생하는 진동으로 인해 고통 받고 있는 인근 주민들의 민원은 근본적으로 해결될 수 없다.

이와 같은 어려움과 리스크를 최소화하기 위해 관련된 다양한 연구들이 수행되고 있다[2-4]. 이와 같은 연구들은 관련 전문가들이 판단할 수 있는 수치해석 등으로 결과물이 나오기 때문에 현장 인근 거주자 및 민원인들에게 설명하기에는 어려운 부분이 있다.

따라서 현장의 인근 거주자와 민원인은 이해하기 쉽고 시공 전 단계에서 미리 체험할 수 있는 방안이 필요하다. 그리고 건설사에서도 동시적으로 계획단계 시 용이하게 사용할 수 있는 시뮬레이션 방법이 필요할 수 있다. 이를 다 만족할 수 있는 방안이 최근 건설업에서 많이 시도하고 사용하고 있는 가상현실(Virtual Reality, 이하 VR), 증강현실(Augmented Reality, 이하 AR) 등 기술을 활용하는 것이다.

최근, VR 기술의 발달로 인해, 실제 환경을 표현하고 이해하는 데 있어 다양한 방법이 가능해졌다. 가상현실은 사용자에게 가상의 환경을 체험하도록 하는 기술로, 사용자가 직접적으로 경험하고 참여하는 체감형 경험을 제공한다. 특히, 건설업에서는 BIM 기반으로 프로젝트 계획단계에서부터 실제와 유사한 환경을 만들어 관리, 확인, 점검 등이 가능하기 때문에 본 연구의 대상인 발파진동과 같은 민원에 대하여 선제적으로 대응할 수 있는 해결방안이 될 수 있다.

따라서 본 연구에서는 VR을 활용하여 현실감과 몰입도를 높여 발파공사에서 발생하는 진동을 사전에 예측하고 사용자가 현장과 유사한 환경을 가상공간과 현실공간

에서 직접 체험할 수 있는 VR 기반 발파진동 시뮬레이터를 개발하고자 한다.

1.2 연구의 범위 및 방법

본 연구는 발파공사에서 발생하는 발파진동을 VR을 활용하여 가상공간에서 실제 현장과 유사한 공간을 체험하고 시뮬레이션을 통해 사전 예측가능한 VR 기반 발파진동 시뮬레이터를 개발하는 것이다. 본 연구에서는 최근 수도권에서 진행되고 있는 GTX-A노선의 일부 구간의 공사를 대상으로 이 곳 현장에서 발생하는 발파진동의 데이터를 활용하였다.

본 시뮬레이터 개발을 위한 연구과정 및 방법은 다음과 같다.

1. 발파진동을 예측하는 대표적인 연구들을 고찰하고, VR을 기반으로 한 시뮬레이션 연구 사례를 살펴본다.
2. 발파소음 및 진동을 체험 및 예측할 수 있는 VR 환경에서의 UI 설계를 진행한다.
3. 발파진동을 체험하고 시뮬레이션 값을 얻을 수 있는 진동 시뮬레이터를 개발한다.
4. 시뮬레이터를 검증하기 위해 실제 데이터를 기반으로 한 테스트를 진행하고, 시뮬레이터의 체험도를 검증하기 위해 일부 체험자를 모집하여 실험을 진행한다.
5. 테스트를 통한 개선사항을 도출한다.

2. 이론적 고찰

2.1 발파 진동 예측에 관한 사전연구

터널 발파공사로 인한 진동 예측과 관리는 지하 구조물 건설의 중요한 측면입니다. 이를 위해 과거에는 경험적인 방법과 간단한 해석 모델이 주로 사용되었습니다. 그러나 이러한 방법은 정확성과 신뢰성 측면에서 제한적이었습니다. 최근에는 컴퓨터 기반의 수치 시뮬레이션 기술의 발전으로 인해 더 정확하고 신뢰성 있는 진동 예측이 가능해지고 있습니다.

Guo와 연구는 지진 역학 모델과 수치 시뮬레이션을 활용하여 터널 발파로 인한 진동 예측에 대한 연구를 수행했다[5]. 이 연구에서는 실제 발파 공사 상황에서 예측된 진동을 모의 실험하여 진동 영향을 정량적으로 평가하고 주변 환경 보호를 위한 최적의 대응책을 제시하였다.

Gao의 연구는 터널 발파 진동 예측을 위해 유한요소법을 활용한 수치 모델을 개발하였다[6]. 이 연구에서는 터널 지반의 동적 응답을 모델링하고 터널 발파로 인한 진동을 예측하여 진동 영향을 평가하는데 성공하였다.

Rajabi의 연구에서는 터널 발파로 인한 진동 예측을 위해 현장 시험 및 모델링을 조합한 방법을 제안했다[7]. 이들은 실제 발파 공사를 대상으로 현장 시험 데이터를 수집하고, 이를 기반으로 수치 모델을 구축하여 진동 예측을 수행하였다. 이 방법은 정확한 진동 예측에 대해 유용한 결과를 도출하였다.

Hossenini의 연구에서는 기계학습 기반의 예측 모델을 활용하여 터널 발파로 인한 진동 예측을 시도했다[8]. 이 연구에서는 다양한 입력 변수를 활용하여 터널 발파 진동을 예측하고, 예측 모델의 정확성과 신뢰성을 검증하는데 성공하였다.

이외에도 다른 연구들이 진행되었다. 간단한 예로, Khandelwal의 연구에서는 터널 발파로 인한 진동 예측을 위해 해석 모델과 현장 시험 데이터를 통합하여 종합적인 평가를 수행하는 방법을 제안했다[9]. 이들은 수치 모델과 현장 데이터를 조합하여 진동 예측의 정확성을 높였으며, 주변 환경 보호를 위한 대응책 개발에 활용되었다.

2.2 가상현실 기반 예측에 관한 사전연구

가상현실 기술이 산업과 과학 분야에서 점차 중요한 도구로 인식되고 있는 가운데, 다양한 분야에서 그 활용 가능성이 탐색되고 있다. VR을 활용한 시뮬레이션은 컴퓨터를 이용한 3차원 형태로 현실과 동일한 환경을 구현하여 공간 및 물리 한계에 의해 경험하지 못한 환경을 체험하고, 시뮬레이션을 수행할 수 있는 특징이 있다[10,11]. 그리고 VR을 통한 시뮬레이션은 동적 모델을 활용하여 현실 세계의 물리적 모델을 디지털 환경에서 구현하여 해당 모델의 성능 예측을 기반으로 최적의 의사결정을 이끌어 낼 수 있다[12].

현재, VR 기반 시뮬레이션 연구들은 Unity3D를 활용하여 VR 시뮬레이션을 통해 치과 임플란트 수술교육을 수행하는 연구[13], 최근 코로나19로 인한 보건실습 중단에 따라 재가방문을 통한 간호 역량을 습득하기에 어려운 상황에서 해당 VR 시뮬레이션을 활용하여 자신감 및 임상수행능력 등을 향상시키는데 효과를 검증한 연구[14] 등과 같이 전반적인 산업에서 주로 교육 중심의 플랫폼 기술개발 연구가 이뤄지고 있다. 그리고 Unreal Engine을 기반으로 가로 경관 시뮬레이션을 통해 가로

경관에 대한 유형, 무형 요소의 변화를 예측 및 체험 가능한 연구[15]와 같이 건축산업 분야에서도 경관검토, 프로젝트 사전 검토 등의 업무에서도 사용되고 있다.

이들 연구는 본 연구의 기반이 되었으며, 그 결과를 토대로 본 연구는 지하 발파의 진동을 예측하고 체험하는 VR기반 발파진동 시뮬레이터 개발을 진행하였다.

3. 발파진동 VR 환경 UI 설계

VR 환경에서 UI 설계를 하기 위해 사용자의 요구사항을 먼저 조사하였으며, 이를 통해 주요 UI 설계 항목과 기능을 도출하였다. 도출된 설계 항목과 기능을 기반으로 시스템 프로세스 단계별 UI 설계를 진행하였다[16].

3.1 요구사항 도출

요구사항은 사용자별 활용 시나리오 구성한 후 해당 시나리오와 비교하여 정리하였다. 사용자별 활용시나리오 오는 Fig. 1과 같으며, 본 시뮬레이션을 이용하는 사용자의 유형을 구분하여 발생하는 상황에 관하여 시뮬레이션 시스템에서의 흐름을 구성한 것이다.

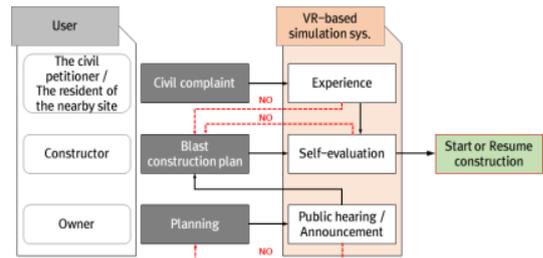


Fig. 1. User-specific simulation system utilization scenario

예를 들어 시공사의 경우, 민원인 대응뿐만 아닌 공사를 실시하기 전에 공사계획보고서를 확인할 수 있는 기능이 요구될 수 있으며, 이때 효과적인 시공관리가 가능한 모니터링 기능이 요구되는 것이다.

해당 시나리오를 활용하여 주요 요구사항을 정리하였으며, 주요 요구사항은 발파공사 현장관리자 및 발주처 등 예비 사용자와 VR 기능을 구현하는 엔지니어로 구분하여 조사하였다. 조사 참여 인원은 총 8명이며, 예비 사용자 그룹은 터널공사 현장에 근무 중인 현장관리자 3명, 지자체 및 공공기관에서 근무 중인 발주처 2명, 국책연구기관에서 근무 중인 사용자 1명으로 구성되었으며, 엔

지니어 그룹은 VR 전문업체에 종사하는 전문가 2명으로 구성되었다.

조사 대상자별 제안한 주요 요구사항은 다음과 같다 (Table 1). 예비 사용자 그룹 중 현장관리자는 발파의 방식 선택, 발파 지점의 암반 특성 반영, 발파 깊이에 따른 결과값 도출, 발파 이후의 결과값 정리 등 발파 전 관리적 측면에서 설정할 수 있는 기능과 발파 이후의 결과값을 그래프와 같은 도식화가 가능한 기능 구현을 주된 요구사항으로 제안하였다. 다음으로 발주자는 현장 주변의 모델링 구성 설정이 필요하며, 측정 지점에 따라 시점 이동과 소음 및 진동의 구현이 자유롭게 이뤄질 수 있는 기능이 요구되는 것으로 도출되었다. 마지막으로 VR 구현 엔지니어 그룹에서는 기술의 사용성 및 접근성이 용이할 수 있도록 설계 프로세스가 최적화되는 것이 필요하다고 제안하였다.

Table 1. Key Requirements

No	Key Requirements	The Subject of investigation
Re.1	Check the contents of the complaint	Constructor, Owner
Re.2	Implement simulations for experience scenarios	Constructor, Owner
Re.3	Monitoring function that enables construction management	Constructor
Re.4	Convenience and ease of functionality	Constructor, User
Re.5	Ability to experience depending on blasting point	Constructor, User
Re.6	Setting feature to select on-site attributes	Constructor
Re.7	Capability to analyze results in a variety of ways	Constructor
Re.8	Ground 3D modeling configuration setting function around blasting	Constructor, Engineer
Re.9	Experience based on measurement point and viewpoint	User, Engineer
Re.10	Optimized UI design process for ease of usability and accessibility	Constructor, Engineer, User

3.2 UI 설계 항목 도출

주요 요구사항을 바탕으로 예비 사용자 및 시스템 설계 전문가들과 FGI 수행하여 주요 UI 설계 항목 및 기능을 도출하였다. 본 연구에서는 FGI를 2회 실시하였으며, 참여자는 예비 사용자 4명, 시스템 설계 전문가가 3명 등 총 7명이 참여하였다.

주요 UI 설계 항목으로는 체험시작 단계에서 환경과 설정을 할 수 있는 메인 UI, 소음 및 진동 시뮬레이션의

상세설정을 체험자 입장에서 조건설정 가능한 체험자 UI, 발파지점을 3차원 모델로 확인 가능한 발파지점확인 UI, 발파 진행 및 완료시점까지 3차원 모델로 확인가능한 발파확인 UI, 발파 후 진동 및 소음의 데이터를 수치 및 그래프 등으로 유의미하게 확인 가능한 결과 UI로 도출되었다.

Table 2. UI by key requirements

No	Key Requirements
Re.1	Main UI
Re.2	User UI
Re.3	Blasting confirmation UI
Re.4	main UI
Re.5	User UI
Re.6	User UI
Re.7	Result UI
Re.8	Blast point confirmation UI, blast confirmation UI
Re.9	User UI
Re.10	UI design process

3.3 VR 기반 발파진동 시뮬레이션 UI 설계

VR 기반 발파진동 시뮬레이션 UI의 구성 프로세스는 다음 Fig. 2와 같다.

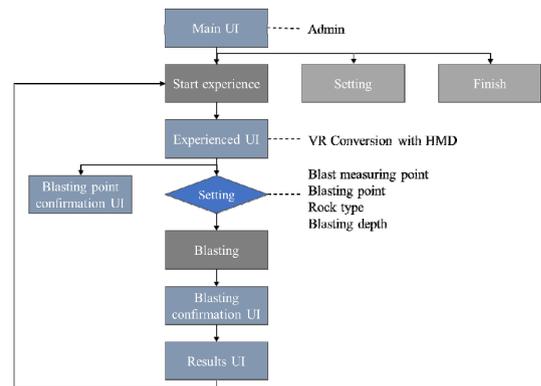


Fig. 2. UI design process

VR 기반 시뮬레이션 콘텐츠를 실행 시 메인화면이 시스템 관리자 데스크탑 모니터에 실행된다. 이후 체험자는 설정 아이콘을 선택하여 체험을 진행한다. 이때 체험자는 HMD(Head Mount Display)를 사용하게 되고, 이로써 VR 기반 발파진동 시뮬레이션 체험준비 설정을 마친다. 이후, 체험자는 컨트롤러를 이용하여 VR HMD 화면에서 보이는 체험자 UI를 이용하여 장약량, 발파지점,

발파 패턴종류 등의 발파 설정을 진행한다. 설정이 완료 되면, 체험자는 발파 아이콘을 선택하여 시뮬레이션이 구동된다. 시뮬레이션 완료 후, 체험자는 결과 UI를 통해 결과를 확인가능하게 되며, 이후 초기화면으로 돌아가 재 체험이 가능하게 된다.

설계된 각 UI는 다음과 같다.



Fig. 3. Blast Vibration Simulation UI
(a) Main UI (b) User option selection UI (d) UI in VR

4. 발파진동 시뮬레이터 개발

4.1 시뮬레이터의 요구사항 및 요소기술

발파진동 시뮬레이터는 체험자가 현장에서 일어나는 발파 시 진동의 느낌을 체감할 수 있도록 구성하며 장소나 깊이에 따른 가상의 상황에서의 진동 또한 구현이 가능하도록 설계하였다. 이를 위해 다음과 같이 각 요

구사항을 반영한 요소기술을 개발 및 시뮬레이터에 반영하였다.

- (1) 실제 현장과 같이 장비 내부의 발파진동을 재현할 수 있는 진동판을 장착하고 상부에는 지반에서 있는 효과를 낼 수 있는 매질을 사용하여 체험자가 현장에 서 있는 것 같은 효과를 낼 수 있도록 한다.
- (2) 진동판의 진동의 효과는 다양하게 재현을 할 수 있도록 음의 제어를 정밀하게 구성하며 최대한 왜곡을 보정할 수 있도록 구성하였다.
- (3) 체험 장비는 체험자의 안전을 고려하여 체험자의 움직임을 최소한으로 줄였으며 이동이 용이하게 장비에 바퀴를 장착 했다. 체험자의 동선을 인식하는 베이스 스테이션은 이동 시에 장비와의 세팅을 손쉽게 할 수 있도록 고정형으로 장착되어 있어 운영의 편리성을 높였다.
- (4) 발파 진동을 계측하는 장비를 사용하여 획득된 데이터를 저장, 분석하며 실제의 현장과 동일한 조건을 구성할 수 있도록 하여 체험자 상호작용이 원활하게 될 수 있도록 구성하였다.
- (5) HMD 등 VR 장비와 헤드셋 등을 활용하여 자체적으로 개발 되어 있는 시뮬레이션과 체험자 간의 인터랙션 시스템을 적용하여 진동의 데이터를 직관적으로 조작이 쉬운 제어 시스템으로 개발하였다.
- (6) 진동 시뮬레이션 결과 모니터링 기능 개발 시뮬레이션 테스트 결과를 가상현실 내에서 모니터링 할 수 있으며 이때 획득된 데이터는 엑셀 형식으로 저장이 될 수 있도록 구성하였다.
- (7) 체험자가 직접 그 현상을 느끼며 체험 할 수 있도록 구성된 느낌의 전달과 값의 적용을 동시에 할 수 있으며 플레이트의 내부에 다양한 재료를 교체하며 체험이 가능한 형태로 되어 있으며 탈부착 또한 용이하도록 구성하였다.

4.2 시뮬레이터의 구성

발파진동 시뮬레이터는 장비본체, 진동전달 매질플레이트, 서버 케이스, 모니터, HMD, VR 컨트롤러, 베이스 스테이션으로 구성된다.



Fig. 4. Virtual Reality-Based Blasting Vibration Simulator

- (1) Main equipment (2) Vibration transmission medium plate (3) Server case (4) Monitor (5) HMD (6) VR controller (7) Base station

4.2.1 장비본체

장비본체에는 진동판으로 구성되어 있으며, 해당 진동판에서 진동을 형성하여 저주파의 진동을 체험자가 서있는 발판에 전달시킴으로써 물리적으로 발판을 두드리는 방식이 아닌 진동판에서 나오는 진동의 간접적인 전달 방식을 적용하였다. 이를 통해 인체에 느끼는 체감의 효과를 높일 수 있다. 진동판 높이를 조절 하는 방식으로 초기 강도를 조절 할 수 있다. 진동 조절은 스테핑 모터를 사용하여 VR에 프로그램으로 미세조절하며, 적정 값을 재현해 낼 수 있도록 한다. 이때 나온 값들을 실제 데

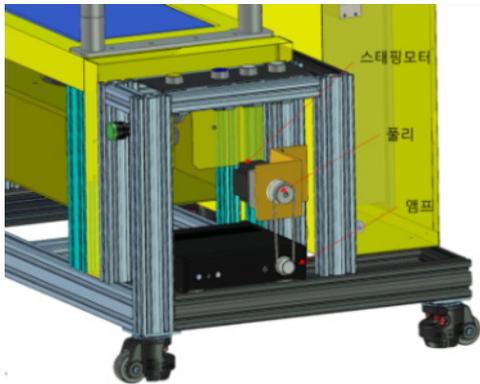


Fig. 5. Vibration control configuration plot

이터에 접목 시켜 발파 현장과 같은 효과를 낼 수 있다. 각종 전기 부품은 진동판 내부에 노이즈가 발생하는 점을 고려하여 장비의 구동부의 반대 방향에 설치하였다.

4.2.2 진동전달 매질플레이트

발파 시 지반진동 영향의 대표적인 특성인 진폭 특성과 주파수 특성을 결정하는 요소의 첫 번째는 폭원 특성이다. 이는 지반진동을 일으키는 요인에 해당하는 소스와 관련된 성질을 말한다. 두 번째는 암반 특성이며, 이는 폭원이 일으킨 지반진동을 전달하는 매질, 즉, 암반과 관련된 성질을 말한다. 폭원의 특성을 결정짓는 중요한 요소는 폭약의 종류, 장약의 위치, 지발시간 및 순서 등이 있다. 암반의 특성을 결정짓는 중요한 요소는 암반의 종류 및 상태, 전파경로 상의 불연속면의 상태 및 조건 등이 있다. 이와 같이 지반진동의 특성은 폭원과 암반, 즉 소스와 매질이라는 두 가지 요소의 특성에 의해 결정되며, 어느 한 가지에 의해 결정되는 성질이 아니다. 이와 마찬가지로 지하에서의 폭발의 진동은 매질을 통과하며 변화를 한다. 그에 따라 값이 달라진다.

이처럼 발파 시에 매질의 성질에 따라 지반진동의 효과가 달라진다. 이러한 점을 적용하여 지반의 진동의 영향을 직접 체감할 수 있도록 발파의 현장과 같은 내부 구조를 소형 장비에 접목시켜 진동을 전달 할 수 있는 적정 매질을 찾아서 구성할 수 있도록 설계하며, 진동판에서 전달되는 소리와 진동이 매질을 통과할 때의 값을 찾아내고, 그 값의 적용과 테스트를 통하여 현장에서의 느낌의 전달 뿐 아니라 실제 계측된 값의 적용할 수 있는 방안을 기획하고 설계했다. 지속적인 테스트를 통하여 수치 접근법의 정확성과 안정성을 검증하며, 소음과 진동의 상호작용 해석의 활용 가능성을 검토하여 적용할 수 있도록 되어 있다.



Fig. 6. Vibration transmission medium plate

4.3 가상현실 발파진동 설정

대심도 발파진동의 시뮬레이션에서 설정하는 요소는 진동 소음 추정식을 기반으로 하여 결정 및 설정하였다

(Eq 1).

$$V = K(D(\frac{D}{W^b})^{-n}) \quad (1)$$

Where, V denotes ground vibration velocity (mm/sec, cm/sec, Kine), D denotes distance from the radiation source to the station object(m), W denotes power factor(kg/Delays), K and -n denote position constant determined by ground conditions and b denotes poer factor index(1/2 or 1/3 Square or Cube Root Scaled).

위 식의 변수 중 상수 값인 K, -n은 편마암과 화강암으로만 설정되어 있으며, b인 장약 지수도 상수값으로 고정되어 있다. 이 외 지반 진동 속도에 의해 진동의 크기를 가늠할 수 있도록 D, W의 값으로만 사용자가 구간을 설정하여 체험할 수 있도록 구성되었다.

폭원에서부터 대상물과의 거리는 최대 100m까지 10m 간격으로 설정이 가능하고 장약량은 공사현장에 사용하는 0.3, 0.5, 1의 값으로 설정이 가능하도록 구현하였다.

5. 시뮬레이터 검증

5.1 개요

개발된 진동 시뮬레이터는 시뮬레이션을 위한 목적과 함께 가상현실 기반으로 체험하여 현장과 현장 인근에서 체험했을 때의 실제와의 유사성도 또한 높아야 할 것이다. 따라서 시뮬레이터 검증은 현장에서 발파 시 측정된 데이터와 시뮬레이터의 결과값을 비교하는 정량적인 검증방법과 함께 체험자를 모집하여 실제 현장에서 체험했던 진동과 시뮬레이터에 체험했던 유사성을 설문을 통해 정성적인 검증방법을 채택하여 진행하였다.

5.1.1 정량적 검증 개요

정량적인 검증을 위해 비교 가능한 데이터 수집을 진행하였다. 대상 현장은 부산 만덕-센텀 지하 고속화도로 현장이며, 진동 데이터 측정위치는 해당 현장 대심도 구간 중 부산광역시 연제구 내 다세대주택 1곳과 유통마트 1곳을 선정하였다(Table. 3).

수집된 데이터를 기반으로 개발된 시뮬레이터에 거리, 깊이, 진동속도 값을 입력하였고, 이를 통해 출력된 진동 값 및 체험 진동계 상단에 진동계측 측정 장비를 설치하

여 시뮬레이터의 결과값을 측정하였다. 이들의 데이터를 비교하여 검증을 진행하였다.

Table 3. Overview of Blasting Data Measurement Test

		Contents	
Site	Mandeok-Centum underground highway		
Measurement site	1	Multiplex housing(J Village)	
	2	Mart(S Mart)	
Date	2022.9.9. ~ 2022.9.30.		
Measuring equipment	HLS-01		
Number of measurements	6		

시뮬레이터에서 측정된 진동계측 측정은 각 측정 장소당 6번씩 시뮬레이터를 가동하여 측정하였고, 그 결과값은 평균값으로 판단하였다.

5.1.2 정성적 검증 개요

정량적인 검증 대비 정성적 검증은 본 연구에서 개발한 진동 시뮬레이터를 직접 사용자가 체험하여 실제 경험을 통해 체험한 느낌과 시뮬레이터를 통해 체험한 느낌을 상대적 비교하여 평가하는 것이다. 평가하는 대상자는 정량적인 검증의 대상 현장의 관리자 및 인근 거주민 등 총 8인을 대상으로 실시하였으며, 발파진동 체험의 유사성, 가상현실 공간의 유사성, 전반적인 체험효과성 등 3가지 평가항목으로 설문평가를 실시하였다.

Table 4. Overview of Qualitative Verification

		Contents				
Evaluator	Site Manager	3				
	Resident	5				
Evaluation Items	(1) Similarity of Blasting Vibration Experience (2) Similarities in Virtual Reality Space (3) Overall evaluation					
Scale	5	1	2	3	4	5
		Bad ↔ Good				

5.2 검증결과

5.2.1 정량적 검증 결과

정략적 검증 결과, 현장에서 측정된 값과 시뮬레이터에서 측정된 값의 일치도가 91% 이상으로 시뮬레이터의

결과값의 신뢰도가 높다고 판단할 수 있다(Table 5). 다만, 발파진동판에 전달되는 진동의 패턴에 따라 도출되는 결과값의 변할 수 있다는 변수가 있어 추후 장비의 캘리브레이션을 통해 정밀도를 높일 필요성이 있는 것으로 나타났다.

Table 5. Result of Blasting Data Measurement Test

Site of measurement	Distance (m)	Depth (m)	Value (mm/sec)		degree of agreement (%)
			Site	Simulator	
J Village	60	40	1.71	1.83	92.98
	80		1.25	1.35	92.00
	100		0.77	0.74	96.10
S Mart	60		1.43	1.50	95.10
	80		1.30	1.41	91.54
	100		0.70	0.68	97.14

5.2.2 정성적 검증 결과

정성적 검증 결과는 다음과 같다(Table 6).

Table 6. Result of Qualitative Verification

Items	Values
Similarity of Blasting Vibration Experience	2.4
Similarities in Virtual Reality Space	4.1
Overall evaluation	3.5

평가 항목별 점수는 8명의 데이터의 평균값이다. 결과값을 살펴보면, 가상현실의 구성은 현실공간과 유사한 것으로 나타났으며, 전반적으로 시뮬레이터를 사용하는 것에 만족하는 것으로 나타났다. 다만, 진동 시뮬레이터에서 체험하는 것은 유사성이 그리 높지 않은 것으로 나타났다. 체험을 통해 평가한 사람들에게 의견을 청취한 결과, 진동 플레이트에서 전달되는 진동의 패턴은 상당히 유사하나, 진동 크기의 변화와 발로 전달되는 두드리는 느낌이 상당히 인위적이어서 유사성이 떨어지는 것으로 나타났다. 이는 본 장비가 시뮬레이션의 예측 결과로 써도 중요하지만, 가상현실을 기반으로 체험 기반의 시뮬레이터이기 때문에 실제 체험자의 체감성이 높아야 한다는 의견이다. 이를 위해 진동 플레이트와 진동의 전달 방식을 변경하는 필요하며, 향후 연구를 통해 개선된 시뮬레이터의 개발이 필요하다는 것으로 도출되었다.

6. 결론

본 연구는 최근 수도권에서 많이 수행되고 있는 수도권광역급행철도 공사로 인해 발생하는 발파진동으로 인한 인근 거주에서의 민원 등을 해결할 수 있도록 가상현실 기반 발파진동 시뮬레이터를 개발하였다.

가상현실 기반 발파진동 시뮬레이터를 개발하기 앞서 본 연구와 관련된 기존 연구들을 고찰하였으며, 이를 바탕으로 가상현실 환경에서 발파 진동 시뮬레이션이 구현될 수 있도록 UI를 설계하고 개발하였다. 이후 시뮬레이터의 요구사항과 요소기술을 도출하여 시뮬레이션 및 체험 중심의 발파진동 시뮬레이터를 개발하였다. 개발한 시뮬레이터를 검증하기 위해 실제 측정된 데이터 값과 동일한 조건에서 실행된 시뮬레이터 결과값을 비교 검증하였으며, 체험형 중심인 시뮬레이터의 체험 검증도 필요하다 판단하여 체험자를 모집하여 실제 체험을 통해 시뮬레이터의 정성적 검증 및 개선사항을 도출하였다.

개발한 시뮬레이터를 검증한 결과, 실제 데이터의 값과 시뮬레이터의 결과값을 동일한 조건에서 유사성을 살펴본 바로는 검증한 환경에서의 유사성이 91%이상으로 시뮬레이터에서 구현된 진동 데이터가 상당히 유의미하다고 판단할 수 있다. 다만, 발파의 패턴과 종류에 따라 발파진동 값이 변화되는 것은 시뮬레이터에서 어떻게 변하는 것인가에 대한 판단의 어려운 부분이 있어, 이 부분은 향후 개선사항에 반영하여 시뮬레이터의 캘리브레이션 등을 통해 개선할 필요성이 있는 것으로 나타났다. 또한 현재 개발된 시뮬레이터의 진동 체험 방식이 체험자가 진동을 느낄 수 진동판을 두드리는 방식으로 인하여 체험하는 것에 있어 상당히 인위적으로 느껴지는 정성적인 검증 결과가 다소 드러났다. 이 부분도 체험 중심형인 시뮬레이터의 주요 특성에 맞게 진동을 구현하는 방식을 음파를 이용하여 구현하는 방식 등으로 변경할 필요성이 있는 것으로 도출되었다. 그럼에도 불구하고 본 연구는 발파진동을 예측하는 것으로 단순히 해당 분야 전문가의 수치적 해석으로 판단으로 끝나는 것이 아닌 가상현실이란 공간에서 미리 체험 할 수 있을 수 있도록 구현하고 시도한 것에 의미가 있는 연구라고 할 수 있다. 또한 본 연구의 결과는 향후 도심 지하 터널의 공사현장에서 발생하는 민원에 관해 대응이 가능할 수 있을 것이며, 그로 인해 건설관리의 효과적인 도구로써 활용도 가능할 것으로 사료된다. 또한 수도권에서 지속적으로 증가할 도심도 터널공사의 타당성을 판단하는 것에도 큰 역할을 할 수 있을 것으로 기대된다.

향후 연구에서는 보다 더 현실성 있고, 실제 데이터와의 오차가 상당히 줄어들 수 있는 시뮬레이터를 개발하기 위해 본 연구에서 도출된 개선사항과 방안들을 반영하여 개선된 발파진동 시뮬레이터를 개발이 필요하다.

References

- [1] Ministry of Environment(Republic of Korea), Central Environmental Dispute Mediation Committee(2020), <https://ecc.me.go.kr/> (accessed Oct., 06, 2023)
- [2] J. Lee, S. Ahn, and M. Sagong, "Attenuation of blast vibration in tunneling using a pre-cut discontinuity", *Tunnelling and Underground Space Technology*, Vol.52, pp.30-37, Feb. 2016.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tust.2015.11.010>
- [3] D. Park, and S. Jeon, "Reduction of blast-induced vibration in the direction of tunneling using an air-deck at the bottom of a basthoe", *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, Vol.47, No.5, pp.752-761, Jul. 2010.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2010.04.011>
- [4] C. H. Ryu, S. Chun, H. S. Shin, S. K. Chung and B. H. Choi, "Blast design of hilly rock excavation adjacent to structures and facilities", *Tunnel and Underground Space*, Vol.4, Issue 1, pp.38-46, Apr. 1994.
- [5] D. Guo, W. Xiao, D. Guo and Y. Lu, "Data analysis and intelligent decision technology in the energy industry", *Mathematica problems in engineering*, Vol.20, pp.1-10, Jul. 2022.
DOI: <https://doi.org/10.1155/2022/3748802>
- [6] G. Y. Gao, Q. S. Chen, J. F. He and F. Liu, "Investigation of ground vibration due to trains moving on saturated multi-layered ground by 2.5D finite element method", *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, Vol.40, pp. 87-98, Sep. 2012.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2011.12.003>
- [7] A. M Rajabi and Vafae, "Prediction of blast-induced ground vibration using empirical models and artificial neural network (Bakhtiari Dam access tunnel, as a case study)", *Journal of Vibration and Control*, Vol. 26, Issue 7-8, pp.520-531, Dec. 2019.
DOI: <https://doi.org/10.1177/1077546319889844>
- [8] S. Hosseini, R. Pourmirzaee, D. J. Armaghani and M. M. S. Sabri, "Prediction of ground vibration due to mine blasting in a surface lead-zinc mine using machine learning ensemble techniques". *Scientific Reports*, Vol.13, Article number 6591, Apr. 2023.
DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-023-33796-7>
- [9] M. Khandelwal and T. N. Singh, "Prediction of blast-induced ground vibration using artificial neural network", *International journal of rock mechanics and mining sciences*, Vol.46, Issue7, Oct. 2009.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2009.03.004>
- [10] W. Jennifer, "Virtual Reality and the Built Environment," Architectural Press, pp. 1-160, 2002.
- [11] J. Zheng, K. Chan, and I. Gibson, "Virtual reality," *IEEE Potentials: the magazine for engineering students*, Vol.17, No.2, pp.20-23, May 1998.
DOI: <https://doi.org/10.1109/45.666641>
- [12] C. Antonya, and D. Talaba, "Design evaluation and modification of mechanical systems in virtual environments," *Virtual Reality*, Vol.11, No.4, pp. 275-285, May 2007.
DOI: <https://doi.org/10.1007/s10055-007-0074-6c>
- [13] S. Y. Moon, B. D. Choi and Y. L. Moon, "Virtual reality for dental implant surgical education," *Journal of The Institute of Electronics and Information Engineers* Vol.53, No.12, pp. 169-174, Dec. 2016.
DOI: <https://doi.org/10.5573/ieie.2016.53.12.169>
- [14] Q. Xie, Y. J Jang, T. S. Yun, "The Manufacturing of Integration Training VR Simulation Platform for Disaster Response," *The Journal of the Korea Contents Association*, pp. 47-48, May 2018.
- [15] P. Zaixian, "A Study on the Virtual Reality Simulation of Tangible and Intangible Elements in the Streetscape : Focused on the Evaluation Using Analytic Hierarchy Process(AHP) Method", Seoul national university Master's thesis, Feb. 2020.
- [16] D. Lee, S. G. Lee, M. B. Seo, "Design of Simulation Prototype UI for Virtual Reality-based Air Blast and Vibration", *Smart Media Journal*, Vol. 10 No. 4, pp.35-44, Dec. 2021.
DOI: Design of Simulation Prototype UI for Virtual Reality-based Air Blast and Vibration
DOI: <https://dx.doi.org/10.30693/SMJ.2021.10.4.35>

이 동 윤(Dongyoun Lee)

[정회원]



- 2015년 2월 : 고려대학교 건축사 회환경공학과 (공학석사)
- 2020년 2월 : 고려대학교 건축사 회환경공학과 (공학박사)
- 2020년 1월 ~ 2022년 12월 : 한국건설기술연구소 미래스마트건설연구본부 박사후연구원
- 2022년 12월 ~ 현재 : 한국건설기술연구소 스마트건설지원센터 수석연구원

<관심분야>

스마트건설, 건설관리, 건설 3D 프린팅, 메타버스

박 형 진(Hyung-Jin Park)

[정회원]



- 2015년 8월 : 서울시립대학교
건축공학과 (공학박사)
- 2016년 2월 ~ 현재 : 한국건설기
술연구원 미래스마트건설연구본부
수석연구원
- 2021년 12월 ~ 현재 : OpenXR
플랫폼융합연구단

<관심분야>

XR, 스마트건설, 건설관리, 건설 3D 프린팅, BIM

서 명 배(Myoung-Bae Seo)

[정회원]



- 2001년 2월 : 조선대학교 전자계
산학과 (공학석사)
- 2019년 8월 : 세종대학교 컴퓨터
공학과 (박사수료)
- 2003년 2월 ~ 현재 : 한국건설기
술연구원 미래스마트건설연구본부
연구위원

- 2021년 12월 ~ 현재 : OpenXR플랫폼융합연구단

<관심분야>

건설정보, BIM, 가상현실, 건설 3D 프린팅, 스마트건설