

시속 180 km 고속열차 하중전달시 차단벽의 진동저감율 연구

Study on Vibration Reduction Rates of Barrier Walls under Load
Transmission of High-Speed Trains at 180 km/h김영민¹ · 최성욱² · 이강일^{3*}Young-Min Kim¹, Sung-Wook Choi², Kang-Il Lee^{3*}¹Graduate Student, Department of Civil Engineering, Daejin University, Pocheon, Republic of Korea²Ph.D. Candidate, Department of Civil Engineering and Environment Engineering, Daejin University, Pocheon, Republic of Korea³Professor, Department of Smart Construction and Environment Engineering, Daejin University, Pocheon, Republic of Korea

*Corresponding author: Kang-Il Lee, kilee@daejin.ac.kr

ABSTRACT

Purpose: In this study, numerical analysis was conducted to verify the vibration reduction effect of installing vibration barriers under various installation conditions to mitigate train-induced vibrations from the GTX. **Method:** To identify the factors influencing vibration reduction among the installation conditions, the stiffness ratio of the filling material and the installation depth of the barrier were varied. **Result:** The study results indicated that using ductile filling materials provided superior vibration reduction compared to hard filling materials. The vibration reduction effect was found to be more significant when the stiffness ratio between the ground and the filling material was closer to zero. Additionally, the deeper the installation depth of the barrier, the better the vibration reduction effect. Conversely, if the barrier was installed too shallowly, vibration at the measurement point was amplified. **Conclusion:** The optimal installation condition for vibration reduction was found to be a stiffness ratio of 0.08 and an installation depth of 15 meters, resulting in a vibration reduction rate of 60.34% at a measurement point 10 meters away from the vibration source.

Keywords: Vibration Barrier, Vibration Reduction Rate, GTX, Stiffness Ratio, Depth of the Vibration Barrier

요약

연구목적: 본 연구는 수도권 광역급행열차 운행에 따른 열차진동을 진동차단벽을 설치하여 저감시키는 경우 차단벽의 설계조건에 따른 진동저감효과를 확인하였다. **연구방법:** 설계조건 중 진동저감에 영향을 끼치는 인자를 파악하기 위해 설계조건 중 채움재의 강성비와 차단벽의 설치심도만을 달리하여 결과를 확인하였다. **연구결과:** 채움재는 강성채움재보단 연성채움재를 사용한 경우 진동저감효과가 더 뛰어났으며 연성채움재의 경우 지반과 채움재간의 강성비가 0에 가까울수록 진동저감효과가 뛰어난 것으로 나타났다. 또한 차단벽의 설치심도가 깊을수록 진동차단효과가 대체적으로 뛰어난 것으로 나타났으며 차단벽의 심도가 너무 얇은 경우 오히려 수진점에서 진동이 증폭하는 현상이 발생하였다. **결론:** 진동저감효과가 가장 뛰어난 설계조건은 강성비 0.08, 설치심도 15 m인 경우로 이 때 진동원과 10 m 떨어진 수진점에서의 진동저감율은 60.34%로 나타났다.

핵심용어: 진동차단벽, 감쇠비, 수도권광역급행열차, 강성비, 진동차단벽 심도

Received | 25 June, 2024

Revised | 1 August, 2024

Accepted | 5 August, 2024

OPEN ACCESS



This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0>) which permits unrestricted noncommercial use, distribution, and reproduction in anymedium, provided the original work is properly cited.

서론

연구배경

도심지를 관통하는 고속열차는 운행이 시작함에 따라 인접구조물에 지속적으로 열차진동을 전달한다. 도심에 건설되는 철도 역사나 교량 등의 철도 구조물은 열차의 진동이 직접 구조물로 전달되어 증폭될 수 있으며(Lee et al., 2015), 특히 주택가 사이를 관통하는 철도는 주위 건물 기초로 전파하여 건물의 진동을 유발하며 건물벽체 갈라짐의 원인이 될 수 있다(Lee, 1987). 진동은 파동의 형태로 철도구조물 하부 지반을 통해 인접구조물로 전달되며 진동문제를 야기하는 파동은 대부분 표면파인 레일리파이다. 표면파를 저감시키는 방법으로는 지반과 다른 매질을 진동경로에 설치하여 진동을 통과, 회절시켜 저감시키는 방법이 있다. 열차진동의 경우 열차가 운행함에 따라 고정된 위치에서 진동이 반영구적으로 작용하므로 진동방진벽을 이용하여 진동을 저감시키는 방법이 효율적이다.

문헌 및 사례조사

최근 수도권광역급행열차의 설계사례가 증가함에 따라 상봉-마석, 도봉산-덕정, 의정부-한대앞 등 수도권광역급행열차 지상구간에 대해 열차진동 문제가 거론되며 연구가 진행되고 있다. 그러나 대부분 열차진동의 영향에 대한 연구들이 중점적으로 진행되어 열차진동을 저감시키는 방진 대책에 대한 연구는 미흡한 실정이다. Yang(2015)은 수치해석을 통해 저심도 터널 측벽부와 인접하게 진동차단벽을 설치할 때 지반진동 저감효과를 연구한 바 있으며, 진동차단벽이 터널 측벽부와 가깝게 설치될수록 진동저감효과가 큰 것으로 나타났다. Han(2020)은 철도구조물과 인접한 신축구조물 지하벽에 탄성매트를 설치하였을 때 열차운행으로 발생하는 진동이 신축구조물에 미치는 영향을 경험식, 지반진동 예측 프로그램, 현장실험을 통해 평가하였으며, 지하연속벽에 방진매트를 설치하였을 때 약 9dB의 진동저감효과를 나타내었다.

국외의 경우 국내에서 잘 알려지지 않은 다중 진동차단벽과 개방형 진동차단벽에 대한 연구가 진행되었다. Hoorickx et al.(2017)은 수치해석을 통해 단일 진동차단벽과 이중 진동차단벽의 진동저감효과를 비교한 바 있으며 연구결과 레일리 파장의 1/2의 두께와 1/4의 이격거리를 가지는 이중 진동차단벽이 단일 진동차단벽에 비해 약간 더 나은 성능을 나타내었다. Çelebi et al.(2008)은 현장실험을 통해 개방형 및 채움형 진동차단벽의 채움재, 심도, 두께, 이격거리, 설치형태에 따른 진동차단벽의 진동저감효과를 연구하였으며, 그 결과 채움재를 연성채움재로 사용한 수동 설치형태 진동차단벽의 진동저감효과가 가장 뛰어난 것으로 나타났다. 그러나 Çelebi et al.(2008)은 채움재를 물, 벤토나이트, 콘크리트로 선정하여 실제 현장에 적용할 수 있는 채움재는 벤토나이트와 콘크리트라는 한계가 존재한다. 또한 진동 발생에 따라 발생하는 지반변위결과를 수진점에서만 추출하여 진동차단벽을 통해 저감된 진동이 수진점에 도달하며 감소되는 경향을 볼 수 없다는 한계점이 있다.

Lee et al.(2003)은 수치해석을 통해 진동차단벽을 설치하는 경우 진동저감효과에 영향을 미치는 매개변수에 대해 연구하였으며 차단벽의 타설심도, 지반과 차단벽과의 강성비, 차단벽의 두께, 차단벽의 감쇠비 및 차단벽의 밀도 등 여러 매개변수 중 차단벽의 두께와 지반과 차단벽과의 강성비가 진동저감효과에 큰 영향을 미치는 것으로 나타났다. 진동차단벽의 경우 이러한 매개변수에 따른 설계조건, 설치형태에 따라 진동저감효과가 달라진다. 그러나 현재 다양한 상황에서 일률적으로 적용할 수 있는 진동차단벽의 설계조건에 대한 연구는 전무한 실정이다.

연구목적

본 연구에서는 고속열차 운행에 따라 야기되는 열차진동을 진동차단벽 설치를 통해 저감시킬 때, 영향인자인 차단벽의 타설심도(H), 지반과 채움재간의 전단탄성계수비(강성비, β), 진동원과 수신점간 이격거리(D)에 따라 발생하는 진동저감효과를 확인하기 위해 유한요소해석을 진행하였다. 그리고 강성비, 차단벽의 타설심도, 진동원과 수신점간 이격거리에 따라 진동차단벽을 거쳐 지반을 통해 전달되는 진동의 경향과 저감율을 평가하였다.

연구의 방법

연구방법

Lee et al.(2003)의 해석결과에 따르면 진동차단벽의 주요 영향인자는 강성비, 차단벽의 타설심도, 진동원과 수신점간 이격거리, 차단벽의 두께이다. 그러나 차단벽의 두께가 일정수준 이상 두꺼워지면 진동저감효과는 미미한 것으로 나타났다. 따라서 본 연구에서는 차단벽의 두께를 제외한 영향인자를 달리하여 케이스별 수치해석을 진행하였다. 수치해석 결과 진동가속도를 추출하고 각 영향인자에 따른 진동저감 효과를 확인하였다.

열차하중조건

Kim(2023)은 열차운행으로 인한 지반진동의 수평영향범위를 연구하기 위해 수도권광역급행열차의 열차속도 $v_T=180$ km/h를 조건으로 3차원 수치해석을 실시하였다. 본 연구에서는 그 중 지상철도 조건일 때 도출된 열차진동속도를 2차원 수치해석의 열차하중으로 사용하였다. Kim(2023)의 연구에서 산정한 운행시간에 따른 열차진동속도는 Fig. 1(a)와 같으며 본 연구에서는 열차진동속도의 최대치 전후 1초, 총 2초의 열차진동속도 데이터를 열차하중으로 적용하였다.

레일리파장

지반진동에서 진동의 규모를 파악할 수 있는 요인들은 다양하다. 그 중 레일리파장(λ_R)은 진동의 규모를 파악하는데 널리 사용되고 있으며 진동의 주파수(f)와 표면파 속도(V_r)를 이용해 식(1)과 같이 구할 수 있다. 열차진동의 주파수를 파악하기 위해서는 고속푸리에변환(Fast Fourier Transform, FFT)을 통해 탁월 주파수를 산정하여야 하며 Fig. 1.(b)와 같이 FFT 처리 결과 본 연구에서 사용된 열차진동의 탁월주파수는 약 5.86 Hz이다. 식(2)는 Knopoff(1952)가 제안한 표면파 속도 산정식이다. 열차진동속도를 구하기 위한 3차원 수치해석에 사용된 지반조건을 식(2)에 대입한 결과 표면파 속도는 $V_r=87.45$ m/s로 나타났다. 탁월주파수와 표면파속도를 식(1)에 대입한 결과 열차속도데이터의 레일리파장은 $\lambda_R \approx 15.00$ m로 나타났다.

$$\lambda_R = \frac{V_r}{f} \quad (1)$$

$$V_r = 0.54 \sqrt{\frac{(1-\nu)Eg}{(1+\nu)(1-2\nu)\gamma}} \quad (2)$$

여기서, λ_R : 레일리파장(m)

f : 진동주파수(Hz)

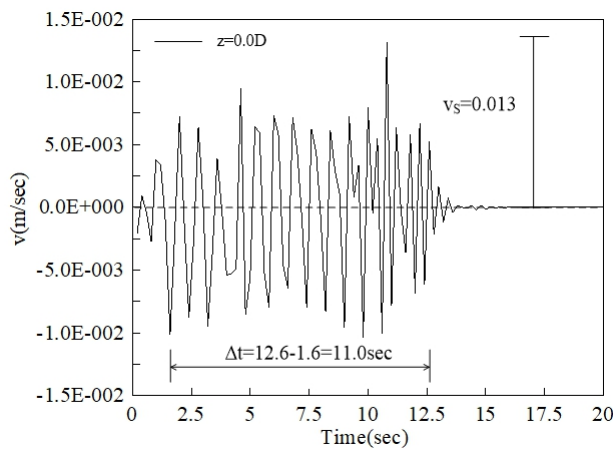
V_r : 표면파 속도(m/s)

ν : 포아송비

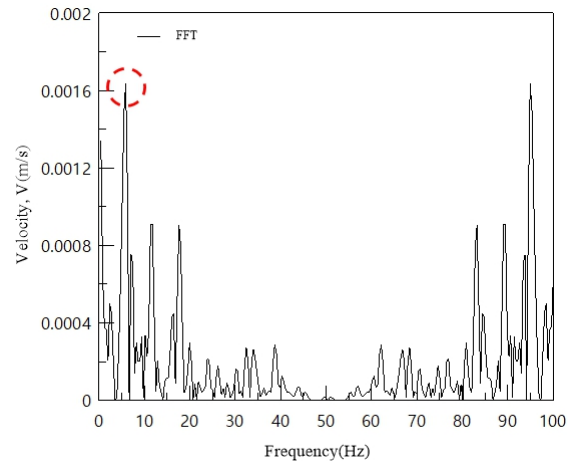
E : 탄성계수(MPa)

g : 중력가속도(9.81m/s^2)

γ : 단위중량(kN/m^3)



(a) The ground vibration velocity of a train over time (Kim, 2023)



(b) Fast fourier transform result

Fig. 1. Train vibration speed and FFT result

수치해석

해석 및 평가방법

본 연구에서는 철도구조물에 인접하여 진동차단벽을 설치하였을 때 차단벽의 타설심도, 지반과 차단벽의 강성비, 진동원과 수진점간 이격거리를 달리한 경우 수진점에 전달되는 열차진동의 진동저감율을 평가하기 위해 MIDAS GTS NX를 이용하여 2차원 동적 해석을 수행하였다. 동적 해석은 지반의 고유진동수를 산정하기 위한 고유치해석을 진행하고 그 후 시간이력해석 중 모드중첩법을 적용하여 지반에 진동이 가해졌을 때 시간에 따른 지반의 변위, 속도, 가속도결과를 추출하였다.

동적 해석을 통해 진동 피해수준을 나타낼 때 사용되는 기준 중 하나는 진동가속도레벨(Vibration Acceleration Level, VAL)로 식 (3)과 같이 산정할 수 있다. 그러나 Woods et al.(1974)은 2차원 수치해석에서의 진동은 3차원적으로 확대되지 않고 실제 현장에서 사용하는 VAL보다 감쇠성이 나쁘기 때문에 VAL을 사용하여 진동의 저감효과를 비교하는 것은 오독을 부를 가능성이 있다고 언급하였다. 따라서 본 연구에서는 식 (4)와 같이 진동저감대책을 적용하지 않은 원지반에 진동을 가하는 경우 수진점에 도달하는 진동의 최대 가속도와 진동저감대책을 적용한 지반에 진동을 가하는 경우 수진점에 도달하는 진동의 최대 가속도의 비인 진폭비(Amplitude ratio, R_a)를 통해 진동저감 효과를 비교하였다.

$$VAL = 20\log\left(\frac{A}{A_0}\right) \tag{3}$$

$$R_a = \frac{a_{max}}{a_{0max}} \tag{4}$$

- 여기서, A : 진동가속도의 실효치(m/s^2)
- A_0 : 진동가속도의 기준치($10^{-5}m/s^2$)
- a_{max} : 진동대책을 적용하였을 때 최대진동가속도(m/s^2)
- a_{0max} : 원지반에서의 최대진동가속도(m/s^2)

수치해석 조건

재료물성값 및 해석케이스

본 연구에서 적용한 지반조건은 토사 단일 지층으로 열차진동속도를 활용하기 위해 Kim(2023)이 3차원 수치해석 시 적용한 사질토 물성치를 사용하였다. 진동차단벽의 채움재는 강성 채움재와 연성 채움재로 구분하여 선정하였다. 여기서, 강성 채움재는 β 가 1보다 큰 경우이며 연성 채움재는 β 가 1보다 작은 경우이다. 진동차단벽으로 연구가 이루어진 강성 채움재는 Lee(2006)의 연구에서 활용된 철과 콘크리트이다. 그러나 현장적용성, 경제성 등을 고려하였을 때 철을 진동차단벽의 채움재로 사용하는 것은 한계가 있다. 따라서 본 연구에서는 강성 채움재로 콘크리트를 선정하였으며 Ruiz et al.(2020) 연구에서 활용된 콘크리트의 전단탄성계수를 참고하여 최소전단탄성계수와 지반과의 강성비 50을 만족하는 물성치를 사용하였다. 진동차단벽으로 연구가 이루어진 연성 채움재는 EPS와 고무칩이 있으며(Lee, 2006, Hwang, 1999). 연성 채움재의 물성치는 기존 연구와 동일하게 적용하였다. Table 1은 본 연구에서 적용한 지반과 채움재의 물성치를 나타낸 것이다.

본 연구에서는 진동차단벽의 심도를 $\frac{\lambda_R}{3}$, $\frac{2\lambda_R}{3}$, λ_R 로 구분하여 수치해석을 진행하였다. 또한 연성채움재의 강성비는 0.08과 0.42, 강성채움재의 강성비는 4.12와 50으로 구분하였다. Kim(2023)의 연구결과에 따르면 열차진동의 도달거리는 3D로 여기서 D는 터널폭 $D=10m$ 를 나타낸다. 따라서 열차진동의 영향범위는 30m로 진동원과 수진점간 이격거리는 Kim(2023)이 제안한 진동영향거리를 고려하여 5m, 10m, 20m로 구분하여 수치해석을 진행하였다. 본 연구에서 실시한 수치해석 케이스는 Table 2와 같다.

Table 1. Input data in numerical analysis

Material	SPT, N	Stiffness ratio, β	G (MPa)	ν	γ' (kN/m ³)	c (kPa)	ϕ (°)
Sand	40	1	10.50	0.35	17.0	0	25°
Con'c	-	4.12	43.30	0.15	22.0	-	-
	-	50	525.0	0.15	22.0	-	-
EPS	-	0.42	4.41	0.12	0.18	-	-
Rubber	-	0.08	0.80	0.24	5.29	-	-

Table 2. Conditions of numerical analysis

Influence factor	Variable
Stiffness ratio, β	0.08, 0.42, 4.12, 50
Lateral distance between the vibration source and the measurement point, D (m)	5, 10, 20
Depth of the vibration barrier, H (m)	5, 10, 15

수치해석 모델링

본 연구에서는 열차진동이 모델 경계면에 도달하여 반사된 진동이 결과에 오류를 불러 일으키는 것을 방지하고자 모델 크기를 충분히 크게 적용하였으며 Fig. 2와 같이 진동하중을 모델 중앙부에 위치시켜 진동원으로부터 측면 경계부까지 거리를 충분히 멀리 하였다. 또한 모델 측면 경계부에 점성경계를 설정하여 진동이 경계면에 도달할 경우 소산되도록 모델링하였다. 토사 하부는 구속조건을 고정으로 설정하여 기반암을 모사하였으며 하중조건은 2.1절과 같이 적용하였다. 진동차단벽의 두께는 1m로 적용하였으며 진동원으로부터 1m 떨어진 곳에 설치하였다. 사각형 면 요소로 모델링한 요소들은 진동차단벽 중앙부에 절점을 형성하기 위해 0.5m크기로 형성시켰다.

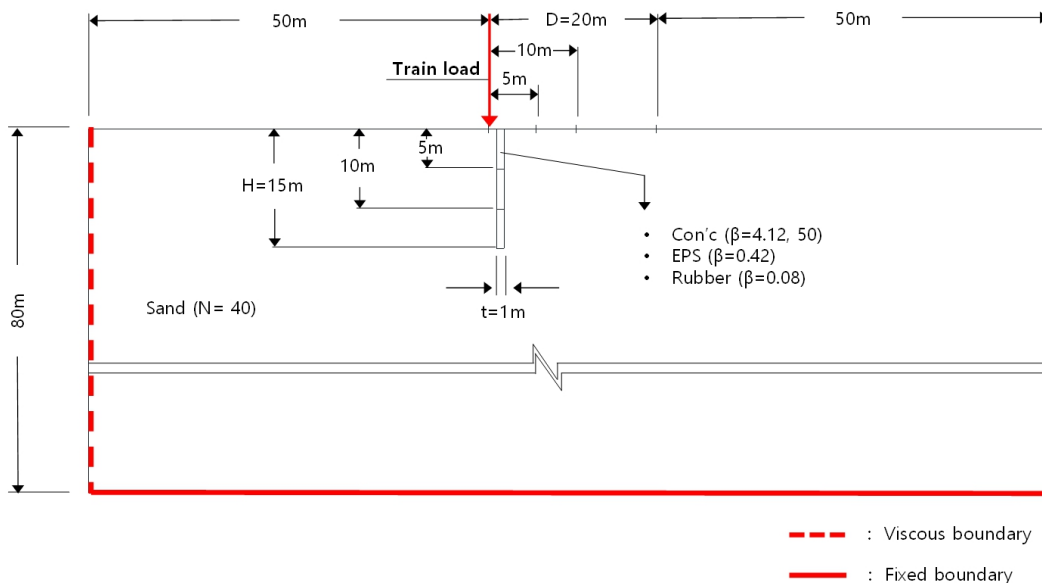
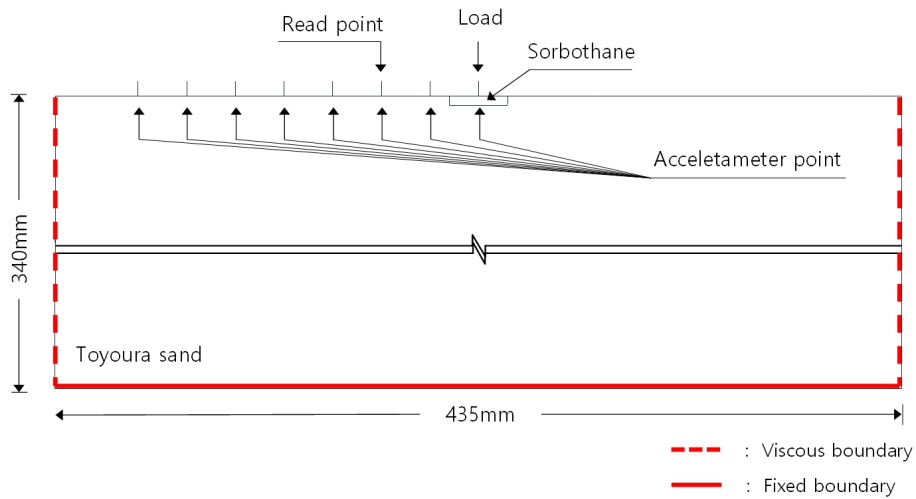


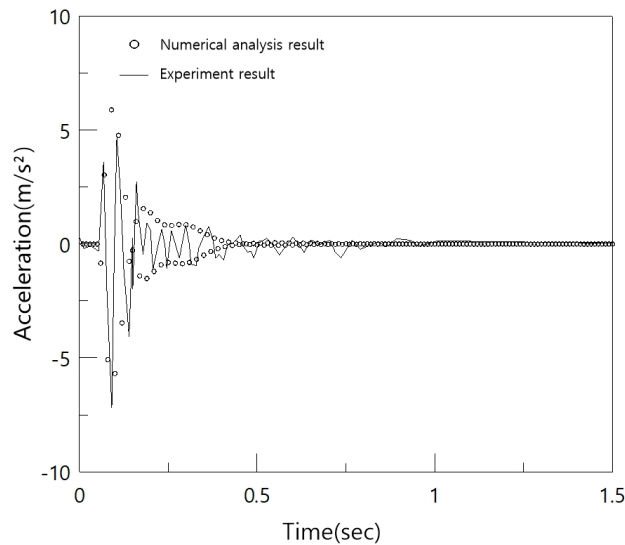
Fig. 2. 2D numerical model

수치해석 모델 검증

수치해석 모델을 검증하기 위해 Lee(2006)의 실험을 수치해석으로 모사하였으며 실험을 모사하기 위해 사용된 수치해석 모델링은 Fig. 3(a)와 같다. 여기서 소르보탄은 진동원으로 사용된 쇠구슬이 중복으로 튀어오르는 것을 방지하기 위해 설치한 것으로 고무칩 물성치를 기입하였다. Fig. 3(b)는 수치해석 결과와 기존 실험결과를 비교한 것으로 경향이 유사한 것을 확인할 수 있다. 본 연구는 수치해석 모델을 검증하기 위해 기존 실험을 모사한 수치해석과 동일한 방법으로 수치해석을 진행하였으며 그 결과는 적절한 것으로 사료된다.



(a) 2D numeral model of experiment simulation



(b) Acceleration result of experiment simulation

Fig. 3. Numerical analysis of experiment simulation

해석결과 및 분석

원지반상태의 진동가속도

Fig. 4는 진동차단벽을 설치하지 않은 원지반상태에서 진동하중을 가하였을 때 전파되는 최대진동가속도 결과를 보인 것이다. Fig. 5는 Fig. 4의 결과를 그래프로 나타낸 것이며, 그래프를 통해 확인할 수 있듯 진동가속도는 표면파의 특성상 진동원에서 일정거리가 멀어지면 큰 폭으로 감소하게된다. Table 3에서 보인 바와 같이 열차하중이 가해진 절점에서 추출한 최대진동가속도는 1.23m/s^2 이며 진동원으로부터 5m 떨어진 수진점에서 추출한 최대진동가속도는 $4.12 \times 10^{-2}\text{m/s}^2$, 진동원으로부터 10m 떨어진 수진점에서 추출한 최대진동가속도는 $2.29 \times 10^{-2}\text{m/s}^2$ 이고 진동원으로부터 20m 떨어진 수진점에서 추출한 최대진동가속도는 $1.09 \times 10^{-2}\text{m/s}^2$ 이다.

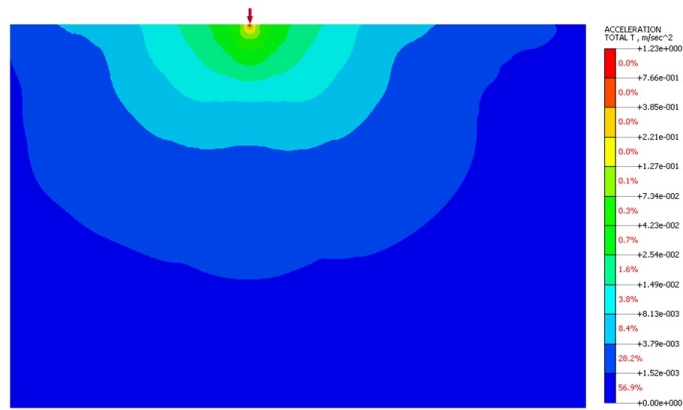


Fig. 4. Maximum vibration acceleration contour of original ground

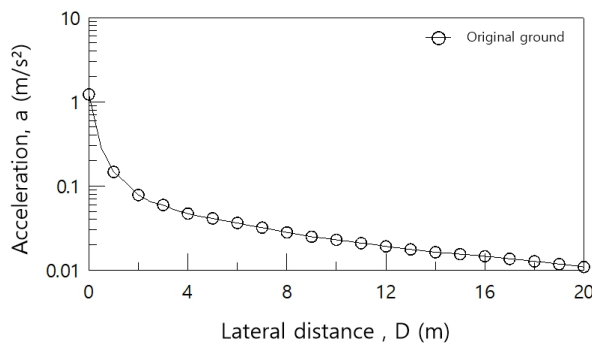


Fig. 5. Maximum vibration acceleration result of original ground

Table 3. Maximum ground acceleration results at measurement point

Lateral distance between the vibration source and the measurement point, D (m)	Acceleration, a (m/s ²)
0	1.23
5	4.12×10^{-2}
10	2.29×10^{-2}
20	1.09×10^{-2}

강성비에 따른 진폭비

진동차단벽을 설치하지 않은 원지반상태에서 열차진동이 발생하는 경우와 진동차단벽을 설치한 지반에 열차진동이 발생하는 경우를 비교하기 위해 진동차단벽의 설계조건에 따라 수치해석을 진행하였다. 그 중 진동차단벽에 채움재를 달리하였을 때 진동저감효과를 확인하기 위해 차단벽 설치심도를 10m로 고정하고 채움재의 강성비를 달리하여 수치해석을 실시하였으며 Fig. 6은 채움재 강성비에 따른 최대진동가속도 결과를 보인 것이다. Fig. 7은 Fig. 6의 결과를 포함하여 각 케이스별 결과를 4.1절의 원지반결과로 나눈 진폭비를 통해 진동저감효과를 확인한 것이다. 강성채움재의 경우 진동을 회절 및 투과시켜 진동차단벽 너머의 수진점에 진동가속도가 전달되는 것을 확인할 수 있으며 연성채움재의 경우 진동을 반사 및 흡수하

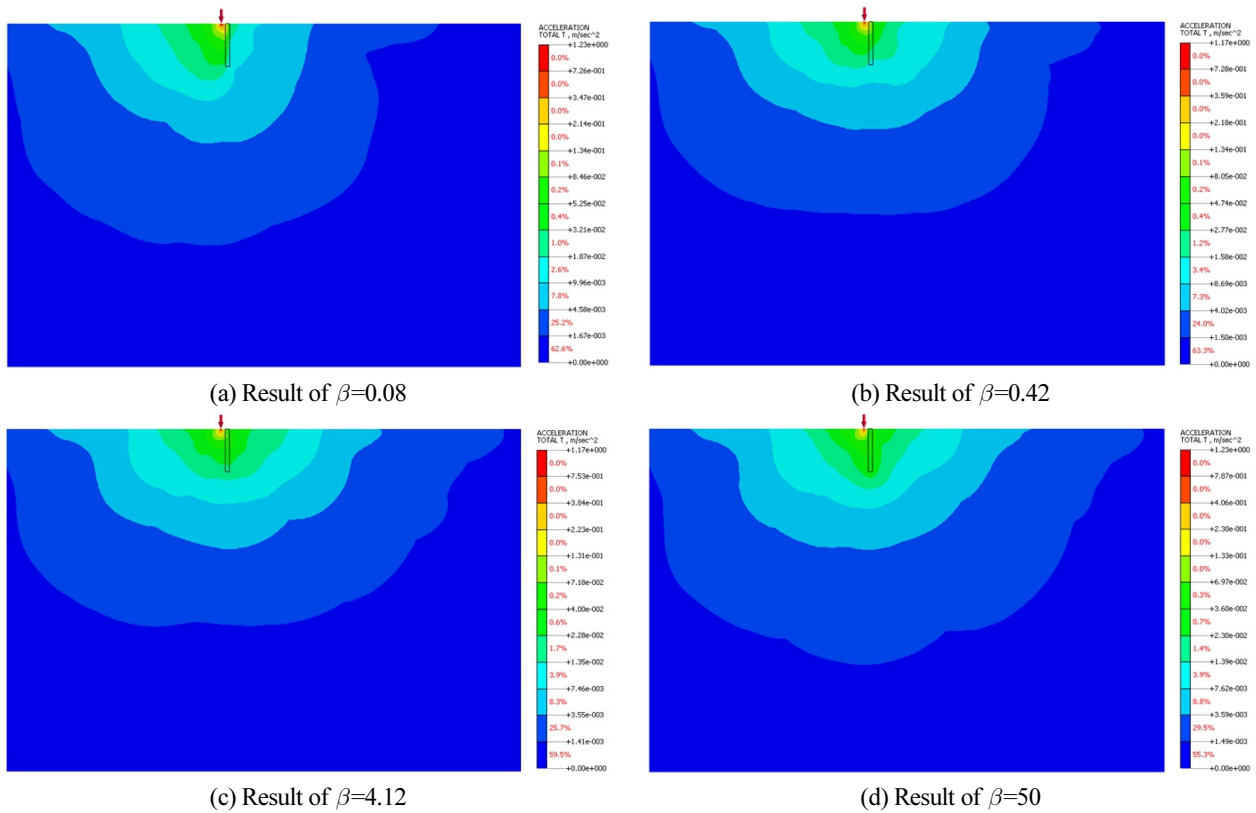


Fig. 6. Maximum vibration acceleration contour according to stiffness ratio, $H=10\text{m}$

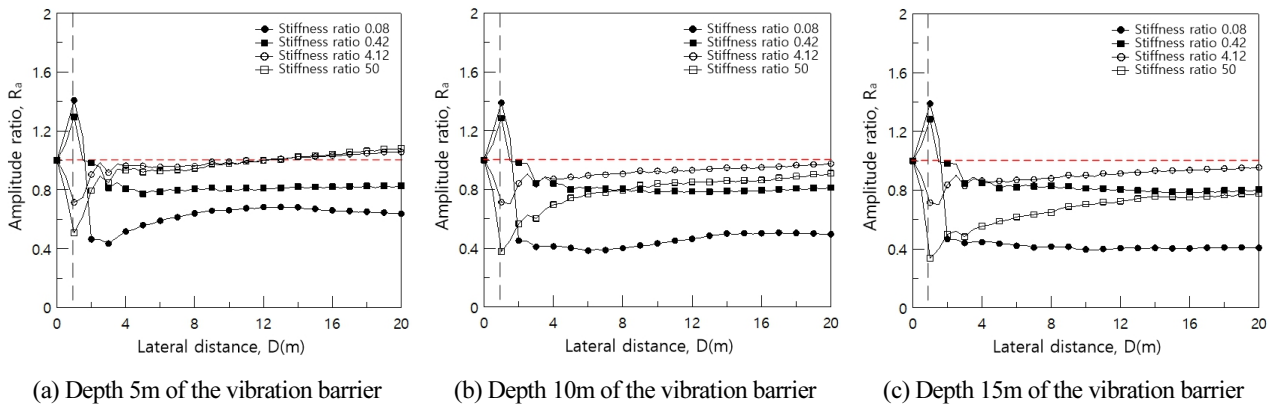


Fig. 7. Amplitude ratio according to stiffness ratio

여 진동차단벽 너머의 수신점에 진동가속도가 전달되는 것을 확인할 수 있다. 연성채움재의 경우 점선으로 표시된 진동차단벽 설치위치에서 진폭비가 1을 초과하는 것을 확인할 수 있다. 이는 연성채움재로 인해 반사, 회절된 열차진동이 진행되는 열차진동과 만나 증폭하여 발생된 것으로 사료된다. 이런 현상은 강성비가 0에 가까울수록 더 크게 발생한다. 강성채움재의 경우 진동이 진동차단벽을 통과하면서 진폭비가 크게 감소한다. 또한 강성비가 클수록 최대진동가속도의 감소폭이 큰 것으로 나타났으며 진동저감율이 가장 작은 강성비($\beta=4.12$)와 진동저감율이 가장 큰 강성비($\beta=0.08$)의 진동저감율 차이는 약

48%인 것으로 나타났다.

차단벽 설치심도에 따른 진폭비

진동차단벽의 설치심도에 따른 진동저감효과를 확인하기 위해 차단벽 설치심도를 달리하여 수치해석을 실시하였으며 Fig. 8은 채움재 조건은 연성채움재와 강성채움재를 고려하기 위해 $\beta=0.08$, 50 두가지 강성비에 따른 설치심도별 최대진동

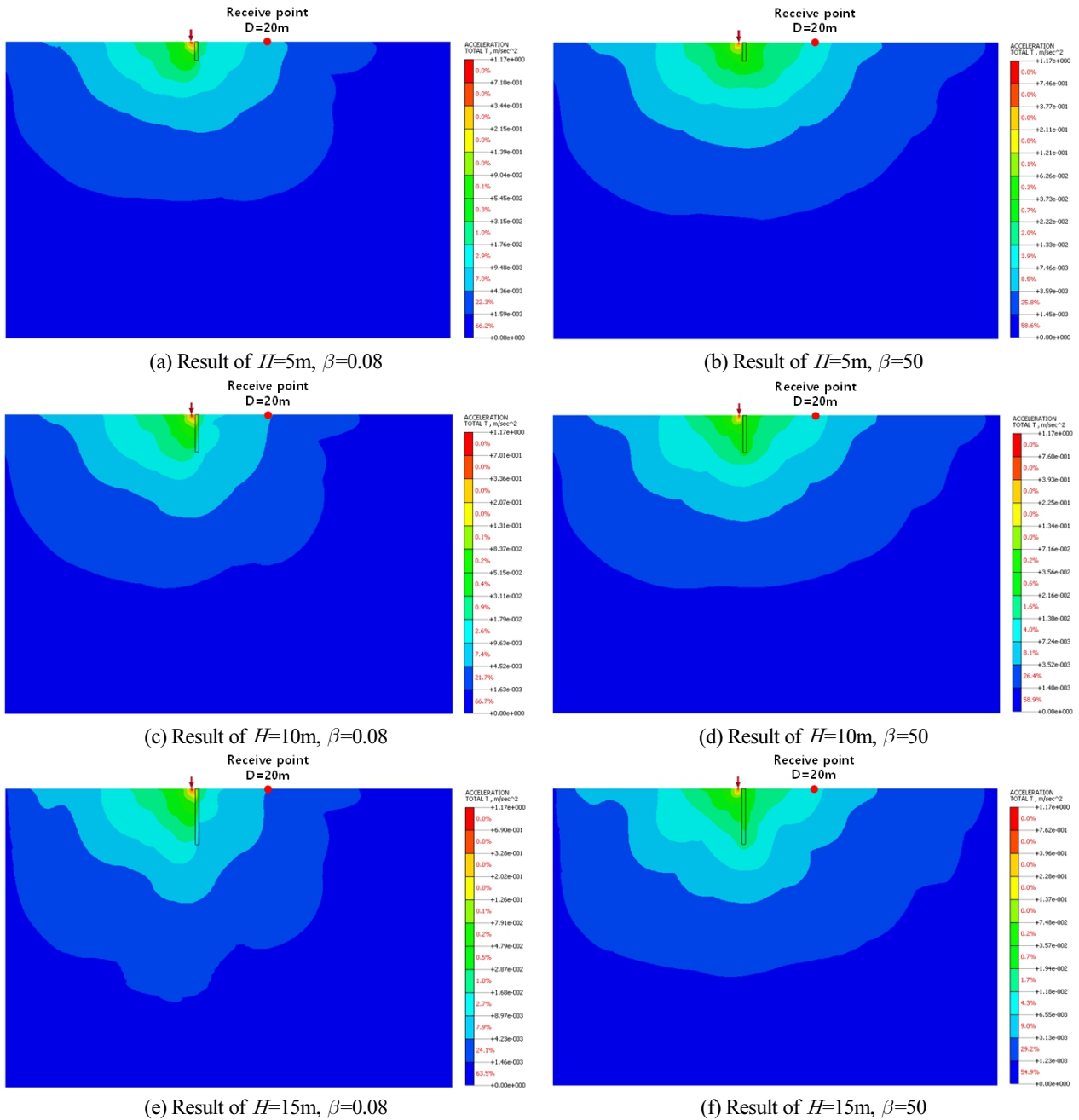


Fig. 8. Maximum vibration acceleration contour according to depth of the vibration barrier

가속도 결과를 나타낸 것이다. 채움재 조건에 관계없이 심도가 깊어질수록 Fig. 8에 표시한 20m 이격된 수진점에 도달하는 진동가속도가 감소하는 것을 확인할 수 있다. 특히 심도가 λ_R 와 유사한 경우 진동 저감효과가 크게 나타났다. Fig. 9는 Fig. 8의 결과를 포함하여 케이스별 결과를 4.1절의 원지반결과로 나눈 진폭비를 통해 진동저감효과를 확인한 것이다. Fig. 9(c), (d)의 $H=5m$, 강성채움재를 사용한 케이스를 살펴보면 수진점으로부터 12m 떨어진 지점부터 진폭비가 1을 초과하는 것을 확인할 수 있다. 이는 진동차단벽이 진동을 차단하기에 심도가 충분하지 않아 회절되어 수진점에 도달한 진동과 진동차단벽을 통과하여 수진점에 도달한 진동이 만나 증폭된 것이 원인으로 사료된다. 또한 Fig. 9(b)의 $\beta=0.42$ 케이스와 Fig. 8(c)의 $\beta=4.12$ 케이스를 살펴보면 연성, 강성에 관계 없이 강성비가 원지반($\beta=1$)과 근접한 채움재는 진동저감율이 심도에 큰 영향을 받지 않는 것으로 나타났다. 강성채움재의 경우 심도에 따라 최대 약 31%의 진동저감율 차이를 보였으며, 연성채움재의 경우 심도에 따라 최대 약 23%의 진동저감율 차이를 보였다.

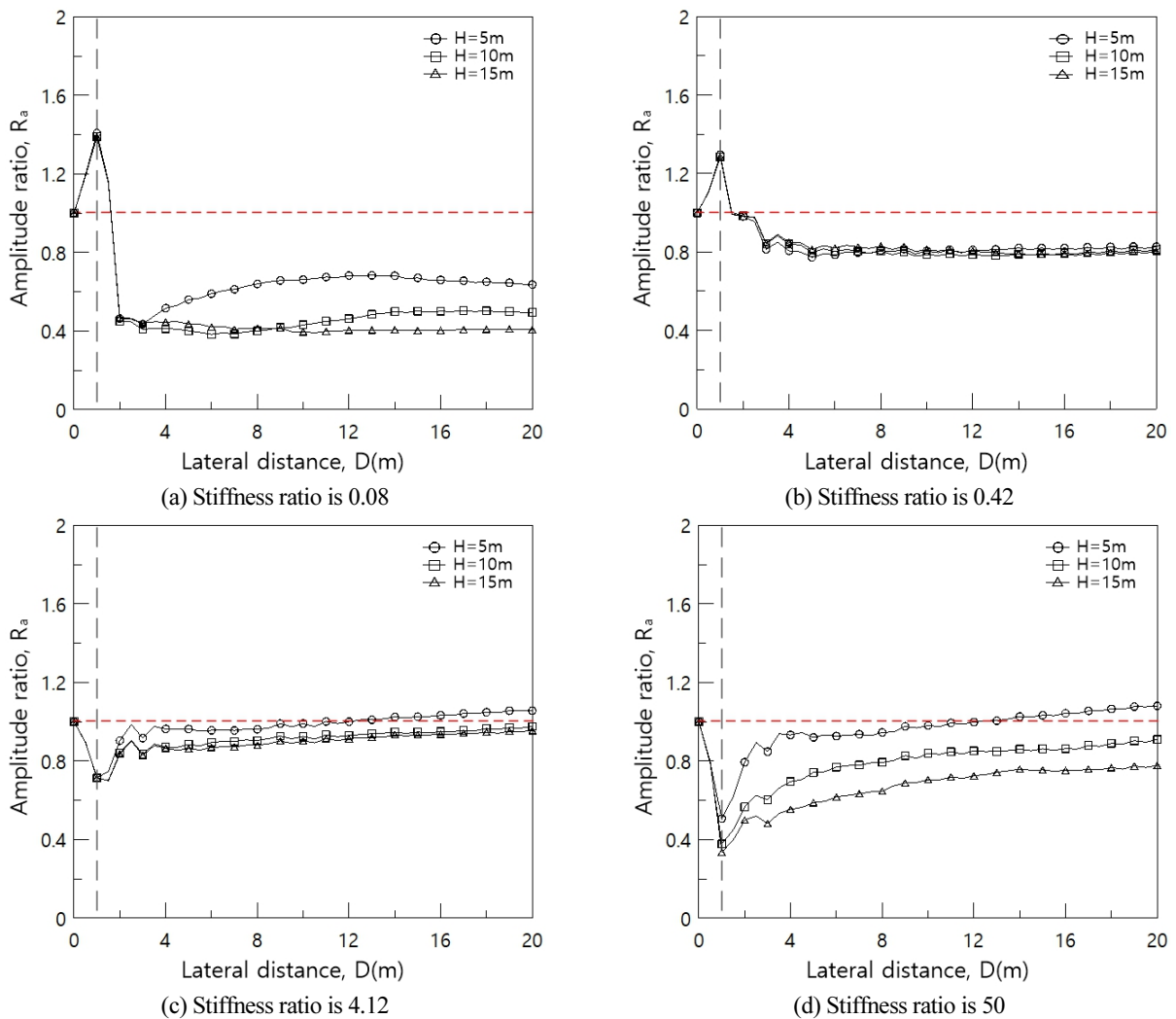


Fig. 9. Amplitude ratio according to depth of the vibration barrier at stiffness ratio is 0.08 to 50

차단벽 설계조건에 따른 진동저감율 평가

진동차단벽은 열차운행으로 인해 발생하는 진동을 반영구적으로 저감시켜 인접구조물에 발생할 수 있는 진동으로부터의 피해를 방지하는 목적으로 활용될 수 있다. 인접구조물이 진동에 취약하다면 진동저감율이 뛰어난 차단벽의 설계조건을 통해 열차진동을 저감시키는 것이 바람직하며 인접구조물에 예측되는 피해규모를 파악하여 진동차단벽을 설치하는 경우 설계 조건에 따른 진동저감율 결과를 바탕으로 경제적인 시공이 가능할 것이다. Table 4는 Table 2와 Fig. 2에서 보인 차단벽의 설계조건에 따른 진동저감율을 보인 것이다.

Fig. 6에서 대체적으로 연성채움재의 경우 강성비가 0에 가까울수록 진동차단벽을 통과하는 진동량이 적은 것을 확인할 수 있으며 강성채움재의 경우 강성비가 클수록 수진점에 도달하는 최대진동가속도가 작은 것을 확인할 수 있다. 연성채움재와 강성채움재를 비교하는 경우 진동저감효과는 연성채움재가 더 우세한 것으로 나타났다. 또한 차단벽의 설치심도가 λ_R 에 비해 너무 얇다면($H \approx \frac{\lambda_R}{3}$) 진동을 충분히 저감시키지 못할 뿐 아니라 회절되어 수진점에 도달하는 진동과 차단벽을 거쳐 수진점에 도달하는 진동이 증폭되어 인접구조물에 피해가 커질 우려가 있다. 따라서 이러한 현상을 방지하고 효과적인 진동저감을 위해선 최소 $\frac{2\lambda_R}{3}$ 이상 진동차단벽을 설치해야한다.

Table 4. Vibration reduction rate according to numerical analysis result

In-filled material	Stiffness ratio, β	Depth of the vibration barrier, H (m)	Vibration reduction rate at D=5m (%)	Vibration reduction rate at D=10m (%)	Vibration reduction rate at D=20m (%)
Ductility	0.08	5	43.96	33.81	36.31
		10	59.89	56.84	50.51
		15	56.4	60.34	59.26
	0.42	5	22.73	19.45	17.21
		10	20.27	21.36	18.76
		15	18.69	18.82	19.56
Hardness	4.12	5	3.69	0.94	-5.63
		10	11.54	7.45	2.4
		15	13.71	9.74	4.54
	50	5	7.97	1.92	-8.1
		10	25.75	16.03	9.04
		15	41.17	29.46	22.23

결론

본 연구는 수도권광역급행열차 운행에 따른 열차진동으로 인한 인접구조물에 피해가 예상되는 경우 진동차단벽을 설치하여 진동을 저감시킬 때 차단벽 설계조건에 따른 진동저감효과를 확인하였다. 수치해석 결과를 이용하여 산정한 진폭비를 통해 효과적으로 진동을 저감시키는 설계조건을 제시하였다.

- (1) 연성채움재를 사용한 진동차단벽의 경우 진폭비가 진동차단벽 직전에 급격하게 상승하는 것을 확인할 수 있다. 이는 연성채움재를 사용한 진동차단벽에 반사된 진동가속도가 진동원으로부터 진행중인 진동가속도와 만나 증폭된 것으로 판단된다.
- (2) 진동차단벽의 채움재는 강성채움재와 연성채움재 중 연성채움재를 사용하는 것이 진동저감효과가 뛰어난 것으로 나타났다. 연성채움재의 경우 채움재와 지반간의 강성비가 0에 가까울수록 진동저감효과가 큰 것으로 나타났으며 강성채움재의 경우 채움재와 지반간의 강성비가 클수록 진동저감효과가 큰 것으로 나타났다.
- (3) 진동차단벽의 설치심도는 깊을수록 진동저감효과가 뛰어난 것으로 나타났다. 설치심도가 얇은 경우 진동원에서 12m 떨어진 지점부터 진폭비가 1을 초과하는 것으로 나타났다. 이는 회절되어 수진점에 도달한 진동으로 인해 진동원으로부터 먼 수진점의 경우 오히려 원지반에서 발생한 진동보다 더 큰 진동이 발생하는 것으로 판단된다.
- (4) 진동저감효과가 가장 뛰어난 설계조건은 $\beta=0.08$, $H=15\text{m}$ 이며 진동저감율은 60.34%로 진동원과 수진점간 거리는 10m였다. 따라서 진동에 취약한 구조물이 수도권광역급행열차 철도구조물과 인접하다면 설치심도는 λ_R 이상, 채움재는 강성비가 0에 가까운 연성채움재를 사용하는 것이 적절할 것으로 판단된다.

본 연구에서는 철도구조물에 인접하여 설치된 진동차단벽을 대상으로 36가지의 수치해석 결과를 통해 결론을 도출하였으나 추가적인 지반조건 및 설계조건에 대한 수치해석결과를 활용한 보완 연구가 요구된다.

References

- [1] Çelebi, E., Firat, S., Beyhan, G., Çankaya, İ., Vural, İ., Kirtel, O. (2009). "Field experiments on wave propagation and vibration isolation by using wave barriers." *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, Vol. 29, No. 5, pp. 824-833.
- [2] Fernández-Ruiz, J., Medina Rodriguez, L. (2020). "Concrete wave barriers to mitigate ground vibrations induced by railway traffic: A three-dimensional numerical study." *Revista de la Construcción*, Vol. 19, No. 3, pp. 395-406.
- [3] Han, W.J. (2021). Mitigation of Vibration and Ground-borne Noise Induced by Passing Train Using Elastomeric Mat Attached to Underground Wall in the Building near Subway. Master's Thesis, Graduate School of Korea National University of Transportation.
- [4] Hwang, K.I. (1999). A Study for Isolation Effects of External Vibration in Flexible Rubber Chip Barriers. Ph.D. Dissertation, Graduate School of Yonsei University.
- [5] Kim, J.C. (2023). Evaluation of the Effects of Train Vibration Response Results Transmitted from Railway Tunnels on Temporary Structures. Ph.D. Dissertation, Graduate School of Deajin University.
- [6] Knopoff, L. (1952). "On rayleigh wave velocities." *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 42, No. 4, pp. 307-308.
- [7] Lee, C.Y., Choi, S.H., Lee, Y.I., Kwon, S.G., Koh, Y.S., Ji, Y.S. (2015). "A behavior test on a Frictional-Wedge-type vibration isolation device for vibration reduction of a railway track." *Journal of the Korean society of Disaster Information*, Vol. 11, No. 1, pp. 45-54.
- [8] Lee, J.S. (1987). "Impact of Vibration and Noise on Structures and Work Environments." *Journal of the Korean Society of Mechanical Engineers*, Vol. 27. No. 2, pp. 109-112.
- [9] Lee, K.I., Kusakabe, O., Lee, J.S., Kim, C.K., Jung, J.B. (2003). "A study on the parameters having and effect on

reducing ground environmental vibration.” *KSCE Journal of Civil Engineering*, Vol. 23, No. 5C, pp. 299-307.

- [10] Lee, K.I. (2006). “Analytical study on the isolation effects of bore holes by materials.” *Journal of the Korean Geosynthetics Society*, Vol. 5, No. 2, pp. 23-30.
- [11] Lee, K.I. (2006). “A study on the vibration protection efficiency of EPS wall barrier with centrifuge model tests.” *Journal of the Korean Geotechnical Society*, Vol. 22, No. 10, pp. 101-110.
- [12] Van hoorickx, C., Schevenels, M., Lomvaert, G. (2017). “Double wall barriers as mitigation measures for ground vibration transmission.” *Procedia Engineering*, Vol. 199, pp. 2735-2740.
- [13] Woods, R.D., Barnett, N.E., Sagesser, R. (1974). “Holography-A new tool for soil dynamics.” *Journal of the Geotechnical Engineering Division*, Vol. 100, No. GT11, pp. 1231-1247.
- [14] Yang, S.C. (2015). “Vibration isolation of wave barriers constructed near a shallow tunnel.” *Journal of the Korean Society for Railway*, Vol. 18, No. 6, pp. 567-577.