

진동차단공의 재료별 방진효과에 관한 해석적 연구

Analytical Study on the Isolation Effects of Bore Holes by Materials

이 강 일^{1*} Lee, Kang-Il

ABSTRACT

This paper aims at investigating the material and dimensions of a wall barrier such as installation depth, thickness, and distance from vibration source by means of finite element method (FEM). In this study, various materials such as concrete, EPS, and steel were adopted. The results showed that the efficiency of a wall barrier appears to be more dependent on installation depth than thickness. In addition, a concrete wall barrier is less efficient than any other wall barrier. In contrast, EPS wall barriers seem to be much sensitive to the wall thickness than the depth.

요 지

본 연구는 환경진동으로 유발되는 진동 대책 중 전파 경로상에 방진구나 방진벽 등과 같은 진동차단벽을 설치했을 경우 차단벽의 재료를 방진구, 콘크리트, EPS, 철판 변화시켜 유한요소해석을 수행하여 진동을 가장 효율적으로 저감시킬 수 있는 재료 및 차단벽의 규모(타설심도, 차단벽두께, 진원으로부터의 거리)에 대하여 연구하였다. 본 연구 결과 방진구의 경우는 차단벽의 두께의 영향보다는 차단벽의 타설심도에 영향이 크고, 콘크리트의 경우에는 다른 방진벽의 방진효과에 비해 방진효과가 떨어진다. 또한 EPS의 경우는 타설심도 보다는 차단벽두께의 영향이 진동차단에 더 효과적임을 알 수 있었다.

Keywords : Wall barrier, FEM, Concrete, EPS, Steel, Principal stresses

1. 서 론

현재 소음문제는 어느 정도 그 저감 평가방법이나 공법 등이 확립되어 오고 있지만 소음문제 만큼 문제가 제기되지 않았던 진동문제는 근년의 교통망의 확충, 고속철도의 개통, 지방노선 확충, 열차의 운전속도 증가 등으로 문제가 발생될 가능성이 점점 증가하고 있기 때문에 진동전달 예측 및 진동저감 대책을 효율적으로 차단할 수 있는 방법을 연구할 필요성이 대두되고 있다(이강일 등, 2004).

방진대책 방법은 대책을 실시한 장소에 따라서 ① 진동원, ② 전파경로, ③ 수신부의 3종류가 있다. ①이나 ③의 경우에는 방진장치 등을 설치하여 대책을 수립할 수 있지만 ②의 전파경로에서는 전파의 방식이 각 지반 등에 의존하고 또한 이에 대한 연구가 초기 단계에 있어 아직까지

해명되지 못한 부분이 많다. 이 때문에 진동의 전파경로를 차단하는 주된 공법인 진동차단벽공법, Wave Impeding Block(WIB)공법 등이 현장에서 실제로 다수 시공되고 있지만 어느 정도 효과가 있는지 정량적인 판단을 정확히 하지 못하고 있다(竹宮宏和, 2002).

이 등(2003, 2004)은 진동차단벽의 방진효과에 가장 적합한 재료를 연구하기 위해 점가진 방식 원심모형실험을 통해 EPS(Expanded Poly-Styrol)재료가 가장효과가 있음을 밝혔고, 또한 열차진동으로 인해 유발된 진동을 억제하기 위해 진동차단벽을 설치하고 그 차단벽과 지반과의 상호작용으로 인해 발생하는 지반진동을 줄일 수 있는 매개 변수를 수치해석을 통해 연구하였다. 早川清(1996)은 교통진동의 발생원 및 전달경로 대책으로서 EPS블록의 방진재료를 이용한 상용화를 검토하였다. 小林芳正(1975)은

^{1*} 정회원, 대전대학교 공과대학 건설시스템공학과 부교수 (Member, Associate Professor, Dept. of Civil Eng., Daejin University, E-mail: kilee@daejin.ac.kr)

진동원에 대해 주기와 진동의 크기로 정리하였고, 花里和一(1996)는 기존건물의 증축 공사시 실시한 시험 항타공사에서 지반 및 건물의 진동을 측정하였다. 또한 진동원으로 부터 충격하중을 입력시킨 사례로는 Semblat and Loung(1998), Siemer and Jessberger(1994)등의 연구가 있다.

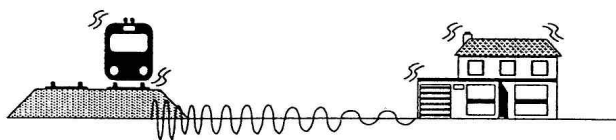
본 연구는 상기와 같은 연구를 분석하여 가장 효율적으로 전파경로를 차단할 수 있는 재료 및 그 규모를 연구하기 위하여 전파경로 상에 철, 콘크리트, EPS, 방진구와 같은 재료를 사용했을 경우의 재료를 연구대상으로 하였다. 이때 대상지반은 일반적인 사질토 지반을 대상으로 하였으며, 해석프로그램은 지진응답해석이 가능한 AFIMAX에 내장된 SAMBA프로그램을 이용하였다. 또한 진동저감효과와 관련된 차단벽의 규모를 알아보기 위하여 각 재료별로 타설심도(D), 차단벽 두께(W), 진원으로 부터의 거리(L)를 매개변수로 하여 각 재료별로 가장 방진효과에 영향이 큰 변수를 연구하였다.

2. 진동방지 대책

2.1 일반적인 진동대책

일반적으로 환경진동(교통진동 등)은 그림 1과 같이 진동원에서 전달경로를 통해 수신부로 진동이 전달한다. 진동방지 대책 중 가장 적극적인 대책은 진동원 및 수신부에서 대책을 시공당시부터 수립하는 것이다. 그러나 진동원과 수신부가 시공된 후에 발생하는 진동은 전파경로 상에 진동방지대책을 세울 수밖에 없다(김태섭 등, 2002).

진동이 지반을 전파하여 가는 과정에서 다른 지층의 경계면이나 구조물과의 경계부에서 반사, 굴절, 간섭 등이 생겨 파형이 복잡하게 되는 것은 잘 발견할 수 있는 현상이므로, 이 현상을 이용하여 흙 중에 방진구나 방진벽 등과 같은 차단벽을 설계하여 진동을 감소시킬 수 있다.



- | | | |
|-----------|--------|----------|
| ① 진동원 | ② 전파경로 | ③ 수신부 |
| · 공장, 사업소 | · 지반 | · 정밀기계공장 |
| · 건설공사 | | · 주거, 주민 |
| · 철도교통 | | |
| · 도로교통 | | |

그림 1. 환경진동문제의 발생경로

2.2 진동원 및 수신부에서의 대책

진동원 대책은 본질적으로 진동을 일으키는 기진체 자체의 기계적 특성을 개선하거나, 기진체 자체 또는 접지 구조체와 지반의 동적 상호작용 특성을 개선하여 지반에 최종 전달되는 동적 하중의 강도를 낮추고 주파수 특성을 개선시키는 데 있다. 기진체 바닥에 방진 패드를 사용하거나, 지반굴착 및 말뚝 박기 작업시에 이른바 저진동 및 무진동 공법의 사용, 그리고 지하철의 경우 터널 및 박스 구조체의 질량 및 강성도를 크게 하는 방법 등이 이러한 진동원 대책에 속한다.

한편, 수신부 구조물 대책으로는 구조물 기초 시스템을 보강하여 기초의 임피던스를 증가시킴으로써 입력 지반진동 에너지 자체를 경감 시키는 방법, 기초 및 지하벽체 등과 상부구조의 접속부에 고무패드, 스프링-댐퍼 등의 면진 시스템을 두는 방법 등이 있다.

2.3 전파경로상에서의 대책

지중 전파경로 대책은 진동원과 수신 구조물 사이에 놓인 지반내부에 방진구, 방진벽, 방진슬래브, 방진 블록 등과 같이 지반진동의 전파 자체를 억제 또는 차단하는 각종 지중 방진 구조물을 설치하여 수신부 구조물로 전달되는 지반진동의 강도를 저감시키는 대책을 말한다.

이와 같은 방진 대책은 수신 구조물에 가까운 지반영역에 실시하는 방법을 수동방진(그림 2), 진동원에 가까운 지반영역에 방진대책을 실시하여 진동을 주변지반으로 확산시켜 진동을 저감시키는 방법을 능동방진(그림 3)이라고 한다. 보다 정확하게 말하면, 수동방진은 가진원의 특성에 영향을 받지 않는 원격지반 영역에서의 지중 방진대책이지만, 능동방진은 지반진동 특성이 진동원의 가진 특성에 의해 크게 영향을 받는 근접지반 영역에서의 지중 방진대책으로 진정한 의미에서 전파경로상의 방진대책은 수동방진이다.

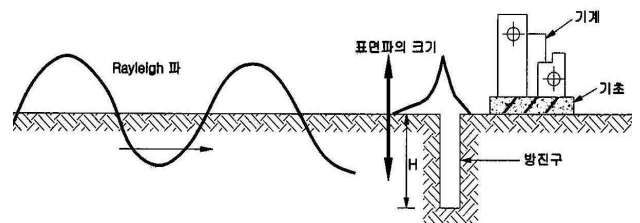


그림 2. 수동방진 개념

방진구는 가장 대표적인 지반진동 방진구조물로서 지반 내에 공기라는 이질적인 매질 층을 수직으로 설치하여 지반진동과의 수평적 전달을 차단한다. 지반진동은 주로 지표면을 따라 전달되므로 전파경로에 일정 깊이의 방진구를 파두면 상당한 양의 진동이 더 이상 전파되지 못하고 감쇠하게 된다(그림 2).

개방식 방진구는 다른 어느 지중 방진벽 시스템보다 방진효율이 높으나 현실적으로 굴착벽의 함몰 문제로 시공 가능 깊이가 제한되는 치명적인 제약이 있다. 아울러 굴착부에 사람이 빠지지 않도록 안전조치를 취해야하고, 강우시 빗물이 유입되어 굴착부가 함몰하거나 주변지반이 연약화를 초래하는 문제가 발생하는 등, 유지관리 문제 또한 커다란 단점이다.

차단벽은 개방식 방진구의 문제점을 해결하고자 설계 및 시공적 측면에서 개방식 방진구 공법의 방지 원리를 준용한 여러 가지 유사 방진구 공법이 제안되어 있다(그림 4). 차단벽에는 ① 슬러리액 충전 방진벽, ② 연성·경량재 충전 방진벽, ③ 주열식 방진벽, ④ 공기튜브 매트 방진벽, ⑤ 고체 방진벽 등이 있으므로 그 특징을 잘 판단하여 적용해야 한다.

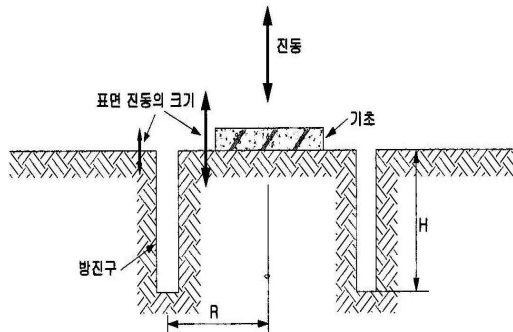


그림 3. 능동방진개념

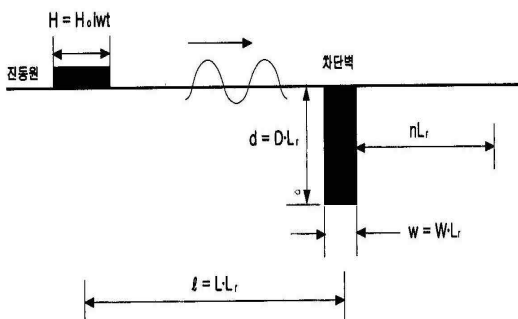


그림 4. 차단벽의 진동전달 형상

3. 수치해석 방법

3.1 개요

본 해석에서의 주안점은 각 재료 및 진동차단벽의 제원에 따라서 가진점에 일정한 충격파를 가하여 무처리 지반과 차단벽을 일정거리별로 설치하여 거리별 가속도의 변화특성을 연구하였다. 이와 함께 무처리 지반과 처리지반의 가속도의 비인 진폭비의 개념을 이용하여 각 재료에 따른 방진효과의 특성을 조사 분석하였다.

3.2 지반조건 및 해석방법

본 해석의 대상지반은 일반적인 토사지반이며 심도에 관계없이 지반의 토질특성은 동일하다. 가정한 지반의 토질상수는 표 1과 같은 특성을 가지고 있다. 그리고 대상이 되는 지반의 해석 주파수는 10Hz이다.

본 해석에서 사용한 유한요소 매쉬는 그림 5와 같으며 지반모델의 크기는 가로 30m, 깊이 20m로 하고 매쉬 분할은 0.5m 등 간격이다. 그리고 입력하중과형은 충격파를 사용했으며 최대하중은 10t/m로 가정했다. 경계조건은 우측 자연지반을 에너지 전달 경계로 가정하고, 저면은 고정으로 하였다.

그리고 각 재료별 진동차단벽 방진효과를 해석하기 위하여 실시한 매개변수는 그림 6과 같이 진원으로부터의 거리(L), 타설심도(D), 차단벽의 두께(W)이며 해석시 진

표 1. 지반조건

	단위체적중량 γ_t (t/m ³)	포아손비 (ν)	전단탄성계수 G(t/m ²)	감쇠비 (D)
지반	1.80	0.333	1850	0.05

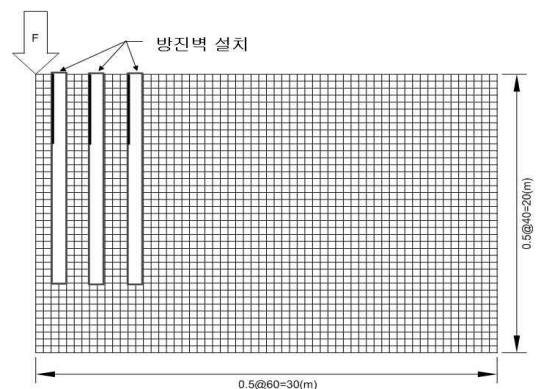


그림 5. 해석모델

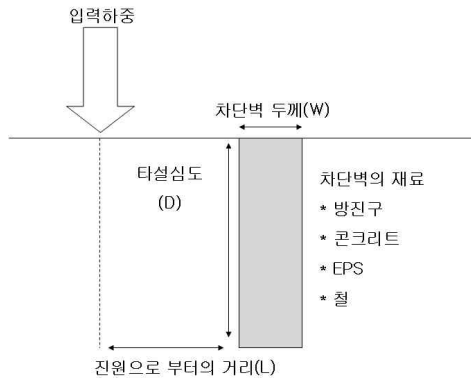


그림 6. 진동저감과 관련된 매개변수

표 2. 해석시 적용한 차단벽 재료의 토질상수

	방진구	콘크리트	EPS	철
단위체적중량(γ_t , t/m ³)	-	2.30	0.018	7.80
포아손비(ν)	-	0.167	0.12	0.289
전단탄성계수 (G, t/m ²)	-	8800	450	82500

진원으로부터의 거리는 1.0, 3.0, 5.0m을 기준으로 했으며, 타설심도는 진동원의 파장(λ)을 고려하여 5.0, 10.0, 15.0m로 하였고, 차단벽의 두께는 0.1, 0.5, 1.0m을 기준으로 했다.

본 해석에 적용한 재료는 현장에 가장 쉽게 얻을 수 있는 재료를 대상으로 하였으며 재료간의 방진효과 특성을 살리기 위해서 방진구, 콘크리트, EPS, 철을 적용하였다. 이때 콘크리트는 대상토질의 강성과 비슷한 재료이며, EPS는 대상토질에 비해 강성이 매우 적고 철의 경우는 대상토질에 비해 강성이 매우 큰 재료에 해당한다. 진동차단벽 각 재료의 토질상수는 표 2와 같다.

3.3 해석결과 정리방법

본 연구의 해석결과에 대한 정리방법으로는 다음과 같은 2가지 방법을 이용하였다. ① 각 지점에서 얻어진 최대 가속도치를 대수표기한 것을 종축에 거리를 횡축으로 한 최대가속도-거리관계와 ② 최대가속도 응답치를 Woods 등(1974)이 현장 실험시 진동저감효과의 지표로서 사용한 진폭비(amplitude ratio, Ra)를 종축에 횡축에 진원으로부터의 거리를 취한 진폭비-거리관계를 사용해서 정리하였다. 일반적으로 dB값-거리관계를 사용해서 그 저감효과 등을 정리하는 것이 타당하지만 본 해석에서는 ①의 최대 가속도-거리관계를 사용했다. 이것은 본 해석 모델이 2차

원 FEM해석이기에 때문에 진동의 감쇠가 3차원적으로 확대되지 않고 실제 시공시에 사용하고 있는 dB치보다 감쇠성이 나쁘기 때문에 dB치로 표기할 경우 오독을 부를 위험이 있다고 판단한 것이다.

4. 수치해석결과 및 고찰

4.1 재료별 방진효과

그림 7은 방진구 및 차단벽의 타설심도를 10m, 차단벽 두께를 0.5m로 고정하고 방진구 및 차단벽을 진원으로부터 1m, 3m, 5m인 지점에 설치했을 경우 거리에 따른 가속도의 크기 변화를 나타낸 그림이다.

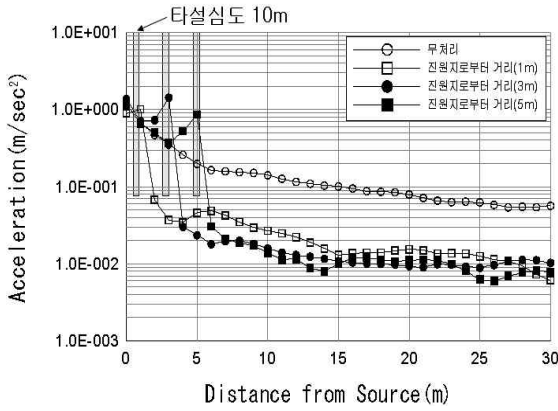
방진구의 경우는 무처리지반에 비해 방진구를 설치한 경우의 가속도가 크게 감소하고 있다. 또한 진원으로부터 방진구 설치 위치가 멀어질수록 가속도 크기가 감소하고 있지만 그 차이는 크지 않았다. 또한 방진구 설치 위치와 관계없이 가속도의 크기는 방진구를 설치한 지점에서 가속도가 크게 증폭한 후 진원지로부터 멀어질수록 가속도가 점점 감소하여 15m을 지난 이후부터는 거의 일정한 상태로 수렴하고 있다.

콘크리트의 경우는 차단벽의 설치위치에 따른 가속도의 차이가 거의 없어 콘크리트 차단벽의 경우 진동원으로부터 거리에 따른 가속도의 영향은 거의 없는 것으로 판단되며 무처리 지반과의 차이도 거의 나타나지 않았다. 이는 대상지반 및 콘크리트 차단벽의 강성비가 비슷하기 때문으로 사료된다.

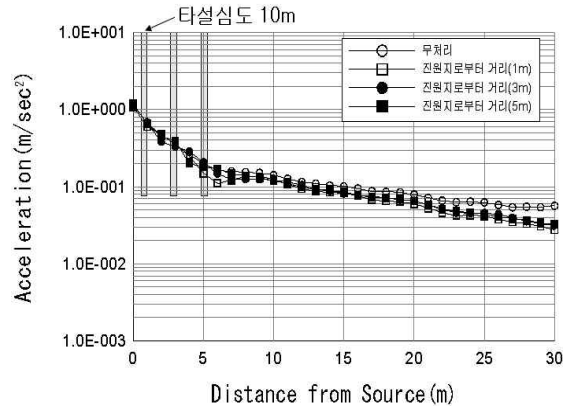
EPS의 경우는 타설심도와 차단벽 두께가 일정할 경우 무처리지반에 비해 가속도의 저감효과는 보이지만 차단벽의 설치위치에 따른 저감효과는 거의 나타나지 않아 EPS의 경우도 진동원으로부터의 차단벽의 타설위치는 별 영향이 없음을 알 수 있다.

철의 경우는 무처리 상태에 비하여 차단벽을 설치했을 경우의 가속도 감소경향은 명확히 나타나지만 차단벽 설치위치에 따른 효과는 매우 적게 나타났다.

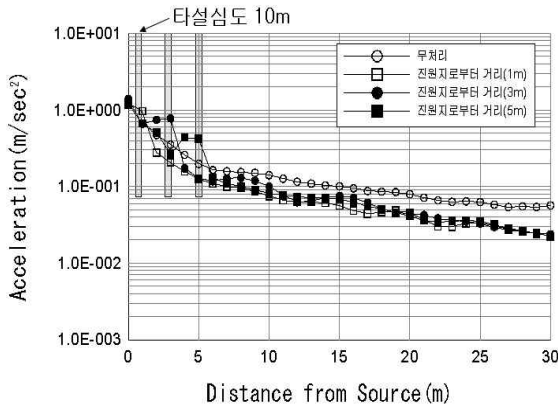
또한 상기의 결과로부터 차단벽의 강성이 지반에 비해 부드러운 경우(방진구, EPS)에는 차단벽에서 가속도의 증폭이 크게 발생한 반면 차단벽의 강성이 지반과 비슷한 거나 클 경우(콘크리트, 철)에는 전자와 같은 특징이 나타나지 않았다.



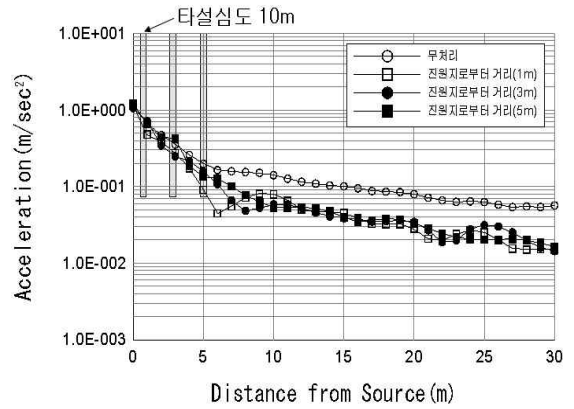
(a) 방진구인 경우



(b) 콘크리트인 경우

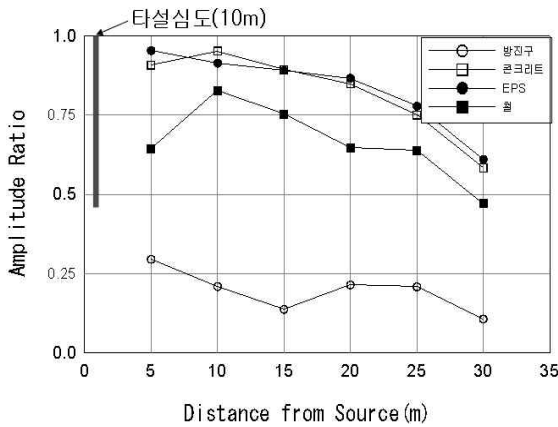


(c) EPS인 경우

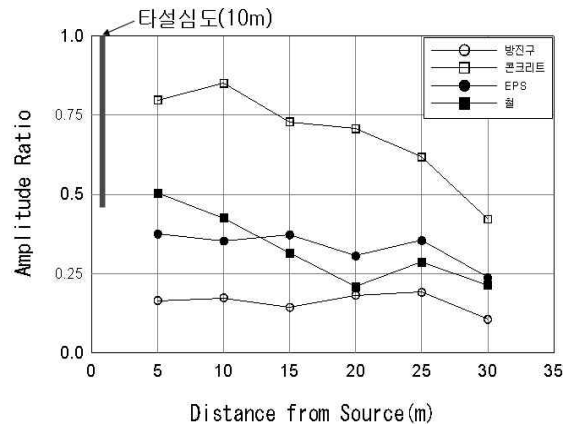


(d) 철인 경우

그림 7. 진동원으로부터 차단벽 설치 위치별 가속도 변화(D=10m인 경우)



(a) 차단벽 두께가 0.1m인 경우



(b) 차단벽 두께가 1.0m인 경우

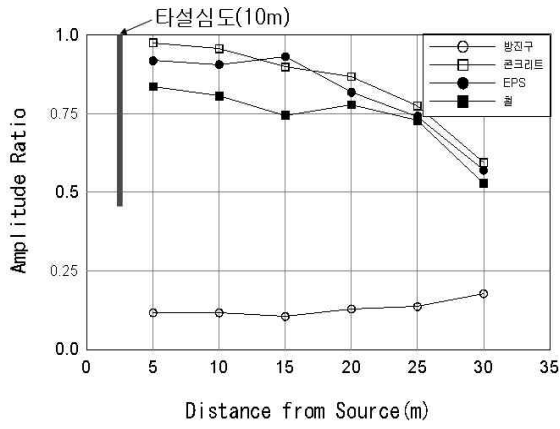
그림 8. 진동원으로부터 차단벽이 1m에 위치할 경우 방진효과

4.2 진동원으로부터 거리에 따른 재료별 방진효과

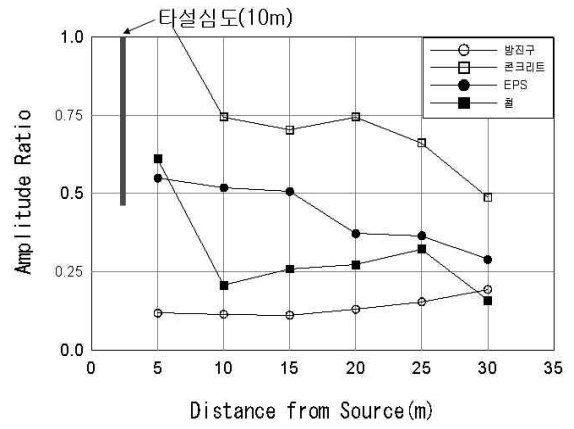
그림 8~그림 10은 진동원으로부터 1m, 3m, 5m 떨어진 위치에 차단벽의 타설심도를 10m로 고정한 후 차단벽의 두께를 0.1m, 1.0m로 변화시킨 결과를 재료별(방진구, 콘크리트, EPS, 철)로 진동의 방진효과를 분석한 것이다. 해석결과

에 의하면 진동원의 거리별 방진효과는 차단벽 두께 및 재료별로 그 경향이 유사하기 때문에 그림 10과 같이 진동원의 거리가 5m지점인 경우에 대하여 설명하면 다음과 같다.

본 그림의 해석결과에 의하면 차단벽의 두께에 의한 재료별 방진효과는 방진구의 경우는 차단벽의 두께와 거의 무관하게 감쇠비가 Woods 등(1974)가 제시한 감쇠비가

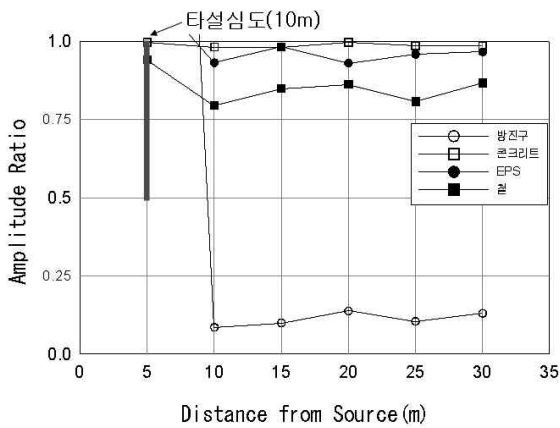


(a) 차단벽 두께가 0.1m인 경우

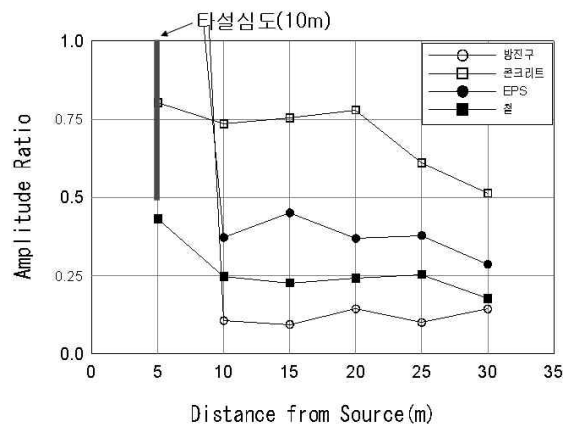


(b) 차단벽 두께가 1.0m인 경우

그림 9. 진동원으로부터 차단벽이 3m에 위치할 경우 방진효과



(a) 차단벽 두께가 0.1m인 경우



(b) 차단벽 두께가 1.0m인 경우

그림 10. 진동원으로부터 차단벽이 5m에 위치할 경우 방진효과

0.25이하로 나타나 진동저감효과가 매우 탁월한 것으로 평가되었다. 콘크리트의 경우는 차단벽의 두께가 증가함에 따라서 감쇠비가 감소하는 경향을 보이지만 차단벽 두께가 0.1m인 경우는 거의 효과가 없는 것으로 나타났다. EPS의 경우도 차단벽의 두께가 0.1m인 경우는 거의 효과가 없지만 차단벽의 두께가 1.0m인 경우는 감쇠비가 0.35 정도로 현격하게 줄어들어 EPS는 차단벽의 두께에 의한 저감효과가 큰 것으로 나타났다. 철의 경우도 EPS와 그 경향이 유사하게 나타났지만 Woods 등(1974)가 제시한 감쇠비 <0.25 를 만족하는 차단벽 두께는 1.0m에 해당된다.

4.3 타설심도에 따른 재료별 방진효과

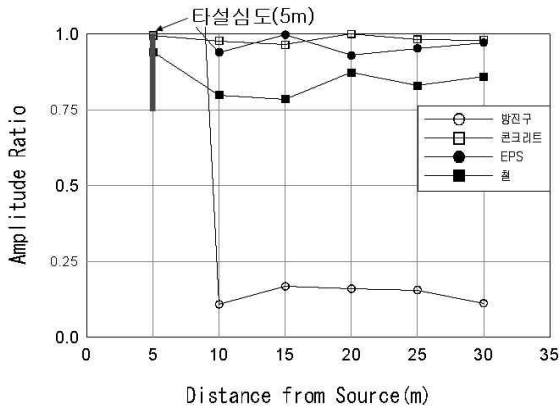
그림 11~그림 13은 진동원으로부터 5m 떨어진 위치에 차단벽의 타설심도를 5m, 10m, 15m로 고정된 후 차단벽의 두께를 0.1m, 1.0m로 변화시킨 결과를 재료별(방진구,

콘크리트, EPS, 철)로 진동의 방진효과를 분석한 것이다.

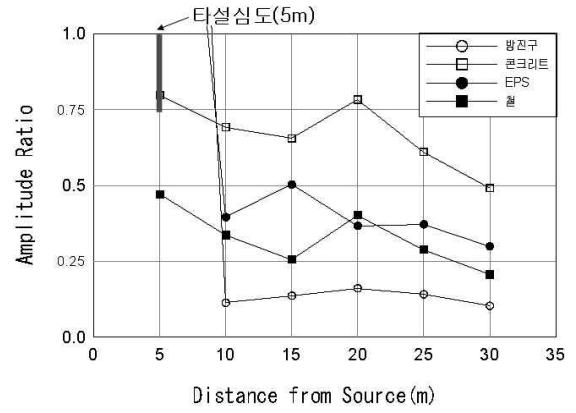
본 그림의 해석결과에 의하면 차단벽의 타설심도별 방진효과는 방진구의 경우는 차단벽의 두께와 거의 무관하게 감쇠비가 Woods 등(1974)이 제시한 감쇠비가 0.25이하로 나타나 진동저감효과가 매우 탁월한 것으로 평가되었다. 콘크리트의 경우는 타설심도가 증가함에도 불구하고 진동저감효과가 거의 없는 것으로 나타났다.

EPS의 경우도 타설심도가 증가함에 따라서 거리에 따른 감쇠비의 감소현상은 나타나지만 그 크기는 크지 않았다. 그러나 차단벽 두께에 따른 방진효과는 크게 나타나고 있음을 알 수 있다.

결국 타설심도별 재료별 방진효과는 방진구, 철, EPS, 콘크리트 순으로 방진효과가 탁월하게 나타나고 있다. 또한 타설심도와 무관하게 차단벽 두께가 0.1m인 경우는 방진구를 제외하고는 감쇠비가 0.75이상으로 나타나 방진효과가 거의 나타나지 않았지만 차단벽 두께가 1.0m로 증가

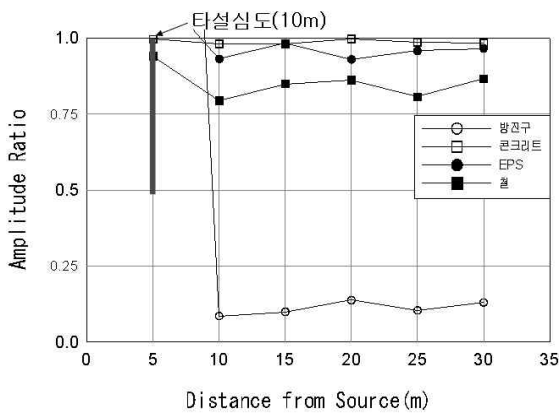


(a) 차단벽 두께가 0.1m인 경우

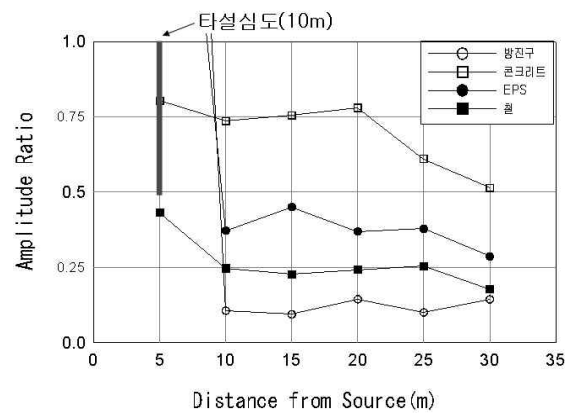


(b) 차단벽 두께가 1.0m인 경우

그림 11. 타설심도가 5m인 경우 방진효과

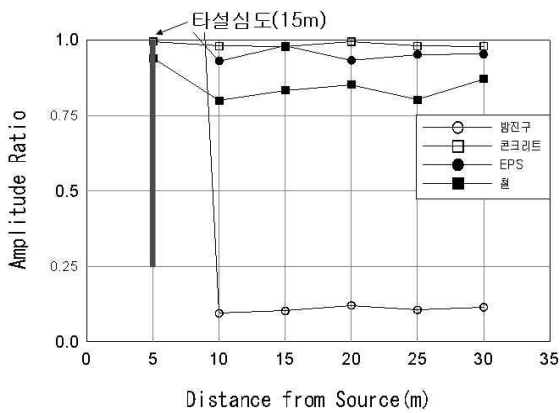


(a) 차단벽 두께가 0.1m인 경우

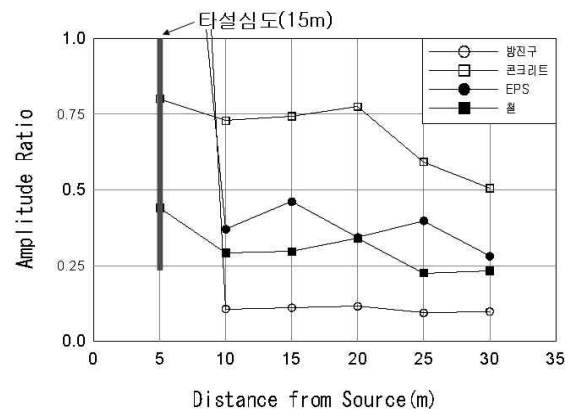


(b) 차단벽 두께가 1.0m인 경우

그림 12. 타설심도가 10m인 경우 방진효과



(a) 차단벽 두께가 0.1m인 경우



(b) 차단벽 두께가 1.0m인 경우

그림 13. 타설심도가 15m인 경우 방진효과

할 경우에는 EPS와 철의 경우는 타설심도가 5m이상일 경우 감쇄비가 0.35이하로 나타나 방진효과가 크게 나타났다.

5. 결론

본 연구는 지반에 방진대책공법인 방진구나 방진재를

전파경로 상에 설치하고 이를 수치해석을 통하여 차단벽의 매개변수 별 방진효과에 대하여 연구하였으며 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 차단벽의 설치위치에 따른 진동저감효과는 방진벽을 제외하고 콘크리트, EPS 및 철의 경우에는 거의 영향

이 없었다.

2. 차단벽의 강성이 지반에 비해 부드러운 경우(방진구, EPS)에는 차단벽에서 가속도의 증폭이 크게 발생한 후 저감하는 현상이 나타났지만 차단벽의 강성이 지반과 비슷하거나(콘크리트) 클 경우(철)에는 진동이 차단벽을 지난 후 저감하였다.
3. 방진구의 진동차단효과는 차단벽의 두께와는 큰 차이가 없었지만, 타설심도와는 밀접한 연관성을 갖고 있었다.
4. EPS 및 철의 경우는 타설심도 보다는 차단벽두께의 영향이 진동차단에 더 효과적임을 알 수 있었다.
5. 진동저감에 가장 큰 영향을 미치는 재료는 방진구, 철, EPS, 콘크리트 순으로 나타났으며 그 중에서도 콘크리트는 진동저감에 별 영향이 없었다.

참고문헌

1. 김태섭, 정형화 (2002), “진동으로 인한 건축물 피해 평가에 관한 연구보고서”, 환경부, 중앙환경분쟁 조정위원회.
2. 이강일, 日下部 治, 이진수, 김찬기, 정종범 (2003), “지반

진동의 저감효과에 영향을 미치는 매개변수연구”, *대한토목학회논문집*, 제23권, 제5C호, pp.299-307.

3. 이강일, 김태훈 (2004), “진동 차단벽재료 및 타설심도가 방진효과에 미치는 영향”, *한국지반공학학회논문집*, 제20권, 제6호, pp.41-49.
4. 小林芳正 (1975), “建設における地盤振動の影響と防止”, 鹿島出版會, pp.65-68.
5. 早川 清 (1996), “EPSブロックを用いた交通振動の軽減対策”, *土の基礎*, Vol.44, No.9, pp.24-26.
6. 花里和一 (1996), “試験抗打ち工事における地盤と建物1階床の振動測定”, *土の基礎*, Vol.44, No.9, pp.27-29.
7. 竹宮宏和 (2002), “環境振動における地盤内の波動傳播と振動対策”, *基礎工*, Vol.30, No.1, pp.8-11.
8. Semblat, J. F. and Loung, M. P. (1998), “Wave propagation through soils in centrifuge testing”, *Journal of earthquake engineering*, Vol.2, No.1, pp.147-171.
9. Siemer, Th. and Jessberger, H. L. (1994), “Wave propagation and active vibration control in sand”, *Proceeding of international conference on centrifuge modeling-centrifuge modeling-centrifuge94*, Balkema, Singapore, pp.307-312.
10. Woods, R. D., Barnett, N. E. and Sagesser, R. (1974), “Holography-A new tool for soil dynamics”, *Journal of the geotechnical engineering*. ASCE, Vol.100, No.GT11, pp.1231-1247.

(논문접수일 2006. 3. 31, 심사완료일 2006. 6. 7)