

# 진동차단 구조물에 의한 표면파의 진동차단효과에 관한 연구

## A Study of Isolation-Effect of Surface Wave Using Open or In-filled Trenches

김문겸\*  
Kim, Moon Kyum

이필규\*\*  
Lee, Phil Kyu

김두훈\*\*\*  
Kim, Doo-Hoon

권형오\*\*\*\*  
Kwon, Hyung Oh

### Abstract

Rectangular open or in-filled trenches(concrete and rubber) are often used to reduce the ground vibrations caused by propagating surface(Rayleigh) waves. This paper presents the experimental data for estimating the vibration screening effectiveness of open or in-filled trenches. Field dynamic tests using the exciter which can generate the 100kN vertical cyclic load in the range of 100-250 Hz were performed. One hundred and twenty accelerometers to measure the ground response are used in 6 radial direction. To compare the effectiveness of the vibration isolation, the contours of the amplitude ratio with the dimensionless parameters dividing by Rayleigh wave lengths were presented.

### 1. 서 론

도로 및 철로변에서 차량 또는 열차에 의해 발생하는 지반진동문제는 인근 구조물의 피해뿐 만 아니라 생활수준의 향상에 따라 주변생활환경을 악화시키는 주요한 요인으로 인식되고 있는 추세이다. 이러한 지반진동문제는 전파에너지의 2/3 이상을 차지하는 Rayleigh 파의 영향이 가장 큰 것으로 알려져 있으며, 이러한 파의 전파를 차단하는 구조물로 방진구 및 방진벽이 많이 사용되어지고 있다.

본 연구는 현장진동실험을 통해 진동전파경로상에서 방진구 및 방진벽에 의한 진동차단효과를 분석하는데 그 목적이 있다. 인위적으로 발생하는 다양한 진동원을 모형화 하기 위해 주파수 범위는 100~350 Hz이고 350Hz 에서 최대 2.5kN 의 힘을 발생시킬 수 있는 정현파진동발생기를 제작하여 사용하였고, 진동차단구조물에 의한 진동의 반사, 투과 및 회절현상을 파악하기 위해 진동원으로부터 진동차단구조물의 중앙을 기준으로 중심각 50° 까지의 진동을 총 120개 수신점에서 가속도 응답을 측정하였다. 다양한 가진주파수실험을 위해 정현파진동가속기의 가진주파수를 100Hz, 150Hz, 200Hz, 250Hz로 고정하여 수신점에서의 가속도 응답을 측정하였고, 방진구 및 방진벽의 규격을 측정된 Rayleigh 파의 파장으로 무차원화하여 가진주파수별 진동차단효과를 검토하였다. 진동차단구조물의 재료에 따라 발생하는 파의 반사, 투과, 회절현상 및 지반진동 차단 효과는 동일한 수신점에서 진동차단구조물을 설치하기 이전과 이후의 가속도응답비를 contour 로 작성하여 비교하였고, Rayleigh 파의 파장으로 무차원화한 진동차단구조물의 규격에 따른 차단효과는 각각의 주파수별로 분석하였다.

\* 연세대학교 토목공학과 교수, 정회원

\*\* 연세대학교 토목공학과 박사과정

\*\*\* 유니슨기술연구소 소장

\*\*\*\* 유니슨기술연구소 선임연구원

## 2. 대상지반의 동적특성

지반진파 실험은 그림 1 에 나타난 바와 같이 충청남도 천안에 위치한 유니슨기술연구소 부지에서 수행하였으며, 대상 지반물성은 표 1 에 나타난 바와 같다.

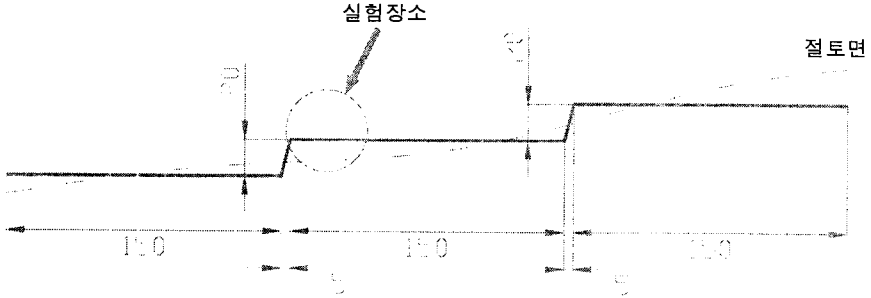


그림 1 실험대상지반 (단위:m)

표 1. 대상지반의 물성치

지반물성	물성치
습윤단위중량( $\gamma_t$ )	2.09 tonf/m <sup>3</sup>
건조단위중량( $\gamma_d$ )	1.99 tonf/m <sup>3</sup>
함수비( $w$ )	4.73 %
탄성계수( $E$ )	1.52×10 <sup>2</sup> MPa
전단탄성계수( $G$ )	6.08×10 MPa

### 2.1 Rayleigh 파의 파장측정

Rayleigh 파의 파장은 두 수신점에서 측정된 가속도응답의 위상차로부터 산정된다. 시간영역에서의 신호로부터 크로스 스펙트럼( $G_{XY}$ )을 구하고, 두 측정위치사이의 파 도달시간은 식(1)에 의해 얻어지는 주파수별 위상차  $\Phi(f)$  를 이용하여 식 (2)와 같이 각주파수별로 구할 수 있다.

$$\Phi(f) = \arctan \left[ \frac{\text{Im}(G_{XY})}{\text{Re}(G_{XY})} \right] \quad (1)$$

$$t(f) = \frac{\Phi(f)}{2\pi f} \quad (2)$$

따라서 주파수가  $f$  인 파의 파속( $V_R$ )및 파장( $\lambda_R$ )은 다음 식(3), 식(4)으로부터 산정된다.

$$V_R = \frac{\text{측정위치 사이의 거리}}{t(f)} \quad (3)$$

$$\lambda_R = \frac{V_R}{f} \quad (4)$$

식(1) ~ 식(4)를 이용하여 산정된 대상지반에서의 Rayleigh 파의 파장은 100Hz, 150Hz, 200Hz 및 250Hz 의 가진주파수에서 대해 각각 1.63m, 1.14m, 0.90m, 및 0.71m 으로 계산되었다.

## 2.2 대상지반의 감쇠특성

그림 2 는 다양한 가진주파수에 따른 실험결과들 중, 가진주파수 150Hz 에 대한 대상지반의 감쇠특성을 나타낸 그림이다. 그림에서 가로축은 진동원으로부터의 거리를 나타내며, 세로축은 각 거리별 위치의 수신점에서 측정된 RMS 지반 진동 가속도값을 나타낸다. 거리에 따른 실제 지반 진동 감쇠량은 이론적인 감쇠량보다 크게 나타났으며, 이는 지반의 재료감쇠와 파의 간섭에 기인한 것으로 판단된다.

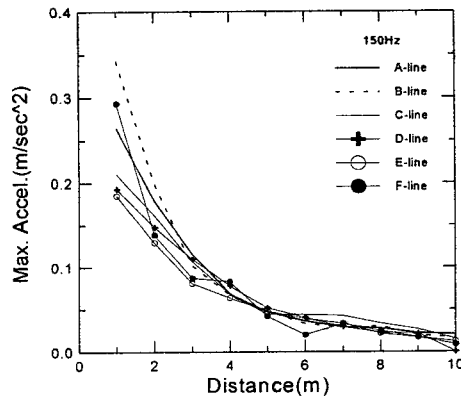


그림 2 대상지반의 감쇠특성(가진주파수 150Hz)

## 3. 진동전파 및 진동차단실험

본 실험은 가진주파수 100Hz, 150Hz, 200Hz, 250Hz에 따라 동일한 지반에서 site100, site150, site200, site250 로 나누어 실시하였다. 각각의 site 별 수신점간의 거리는 가진주파수에 대해 산정된 Rayleigh파의 파장값의  $0.5 \times \lambda_{Rayleigh}$  인 0.815m, 0.57m, 0.45m, 0.355m 로서, 각각의 site 에 대해 가진원으로부터  $10 \times \lambda_{Rayleigh}$  의 위치까지 총 20개 수신점에서 측정하였다. 진동차단구조물의 중심을 기준으로 10° 씩 시계반대방향 50° 까지의 각도에 대해 120개의 수신점의 진동을 측정하여, 중심선과 대칭인 총 100° 까지 실험으로 확장하였다. 그림 3 은 이들 실험 중 가진주파수 150Hz 에서의 실험 개요를 나타낸 그림으로서 가진원과 진동차단구조물 및 수신점의 위치를 나타낸 그림이다. 진동차단구조물이 없는 경우, 방진구를 설치한 경우, 강성방진벽을 설치한 경우, 연성방진벽을 설치한 경우인 4 가지경우에 대해 동일한 수신점에서의 가속도 응답을 측정하여 진동차단효과를 비교·분석하였다.

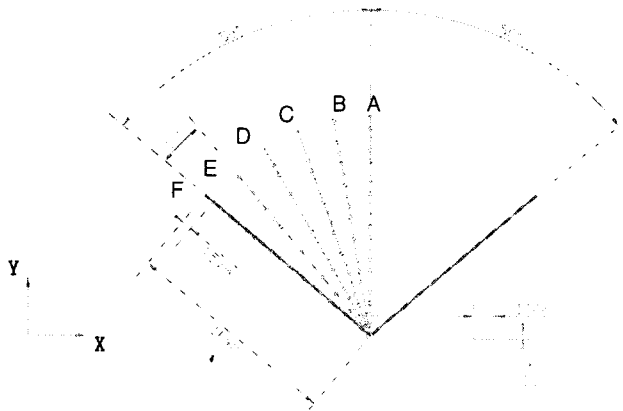


그림 3 실험 개요도(site150)

### 3.1 정현파 진동발생기를 이용한 진동전파실험

본 실험의 목적은 진동차단구조물이 없는 경우 대상지반의 진동특성과 감쇠특성을 측정하기 위한 실험이다. 이는 진동차단구조물이 설치됨으로써 발생하게 되는 가속도 응답의 변화를 산정하기 위한 기본적인 자료로 사용된다. 그림 4 는 이러한 진동실험들 중 site150 에서 가진주파수 150Hz 인 경우에 대한 가속도응답 contour 를 나타낸 것으로, 가진원으로부터 멀어질수록 진동원으로부터 발생된 지반진동이 방사방향으로 일정하게 감쇠되는 것을 알 수 있다. 이는 대상지반의 균질함과, 기반암에서 발생하는 반사파에 의한 영향이 없어 지반물성이 표 1 로 대표될 수 있음을 나타낸다.

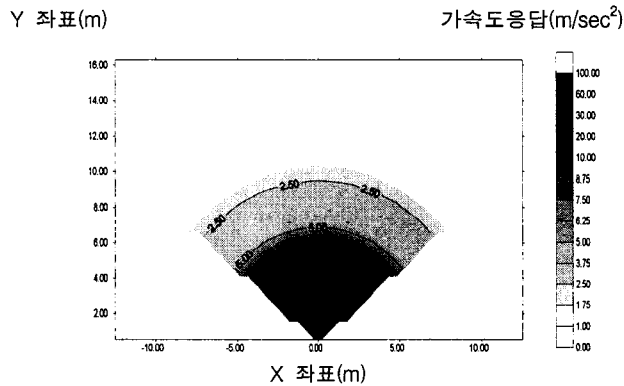


그림 4 지반진동실험

### 3.2 정현파진동발생기를 이용한 진동차단실험

본 실험은 진동차단구조물에 의한 차단효과분석을 위한 실험으로서, 3.1 절의 동일수신점에서 진동차단구조물 설치후의 가속도응답을 측정하였다. 진동차단구조물의 규격은 2.1 절에서 언급한 바와 같이 주파수별 Rayleigh 파장에 따라 결정하였는데 각 주파수별 별 진동차단구조물의 규

격은 표 2 와 같다.

표 2 진동차단구조물의 규격

가진원으로부터 떨어진 거리(m)	깊이(m)	길이(m)	폭(m)
3.26	1.63	1.63	0.3
2.28	1.14	1.14	0.3
1.80	0.90	0.90	0.3
1.42	0.71	0.71	0.3

채움재의 종류별 진동차단효과 분석을 위해, 표 2 와 동일한 규격의 방진구, 강성방진벽 및 연성방진벽의 경우로 나뉘어 실시하였다. 강성방진벽은 미리 제작한 concrete 패널을 사용하였고, 연성방진벽은 페타이어 고무칩을 압착한 고무패드를 각각 같은 크기로 제작하여 사용하였다. 본 실험에서 이용한 채움재의 물성은 표 3 에 나타난 바와 같다.

표 3 채움재의 물성

	E [MPa]	G [MPa]	Poison's ratio	Density [tonf/m <sup>3</sup> ]	S파 속도 [m/sec]
강성채움재	84,596	36,781	0.15	23.54	1,250
연성채움재	2.42	0.8	0.24	0.54	38.49

그림 5 ~ 8 은 site150 에서 가진주파수 150Hz 의 지반진동실험 및 진동차단실험에 대한 결과를 나타낸 그림이다. 방진구의 규격은 깊이와 길이 및 폭을 각각 1.14m, 1.14m 및 0.3m 로 설치하였으며, 연성방진벽 및 강성방진벽의 규격은 동일한 깊이와 길이에 0.10m의 폭으로 제작하여 설치하였다. 이 그림들은 가진주파수 150Hz 에 대한 가속도응답 contour 로서 색상이 짙어질수록 수신점에서 측정된 가속도 응답이 높은값을 나타낸다. 그림에 나타난 바와 같이 가진원으로부터 발생한 지반진동이 진동차단구조물에 의해 회절, 투과 그리고 반사되며 전파되는 특성을 반영하고 있음을 알 수 있다.

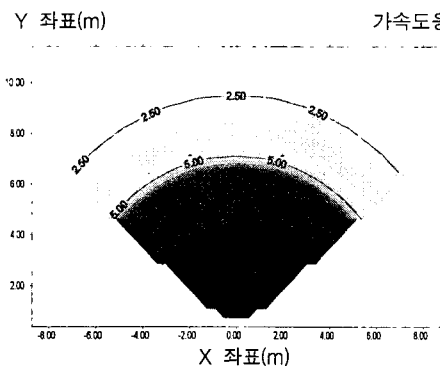


그림 5 지반진동실험  
(가진주파수:150Hz, site150)

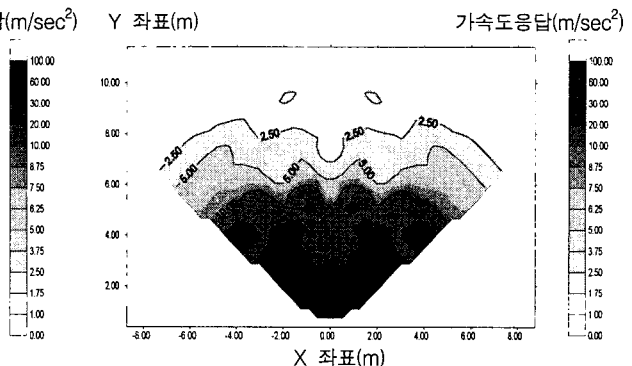


그림 6 방진구에 의한 진동차단실험  
(가진주파수:150Hz, site150)

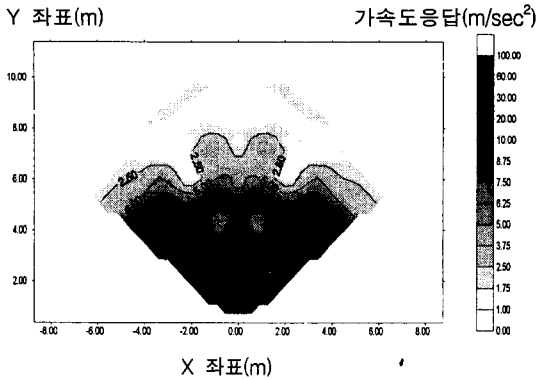


그림 7 강성방진벽에 의한 진동차단실험  
(가진주파수:150Hz, site150)

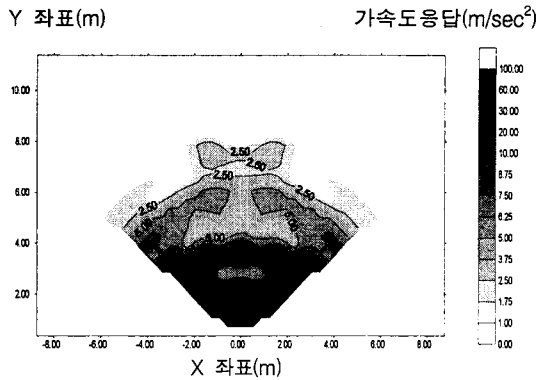


그림 8 연성방진벽에 의한 진동차단실험  
(가진주파수:150Hz, site150)

강성방진벽의 경우 방진구 및 연성방진벽에 비해 파의 투과현상이 많이 발생하여 방진벽 후면에서 진동차단효과가 작게 나타나고, 연성방진벽의 경우 방진벽 후면에서는 방진구에서와 같이 효과적으로 지반진동을 차단하고 있음을 판단할 수 있었다.

그림 9 와 그림 10 은 연성방진벽을 설치한 후 측정된 가속도 응답과 방진구 및 강성방진벽 설치 후 동일한 수신점에서의 응답비를 각각 산정하여 도시한 그림이다. 그림에서 진한 영역은 동일한 수신점에서의 방진구 혹은 강성방진벽보다 연성방진벽에서 진동차단을 효과가 높은 부분을 나타내고 있다. 그림 9 는 방진구와 연성방진벽의 가속도응답비를 나타낸 것으로서 연성방진벽의 경우, 원거리의 진동차단효과는 방진구보다 효과적으로 나타났지만 방진벽에 인접한 후면에서는 방진구에서보다 가속도응답이 50% 수준으로 작아짐을 알 수 있다. 반면 연성방진벽의 진동차단효과를 강성방진벽의 방진효과와 비교하여 볼 때, 그림 10 에 나타난 바와 같이 방진벽 후면부에서 보다 효과적으로 지반진동을 차단하고 있음을 알 수 있다. 이는 연성방진벽의 경우 강성방진벽에 비해 진동을 차단하는 임피던스차이로 인해 진동에너지의 투과현상을 연성방진벽의 경우 강성방진벽에 비해 효과적으로 차단하고 있음을 나타내는 것으로 판단된다.

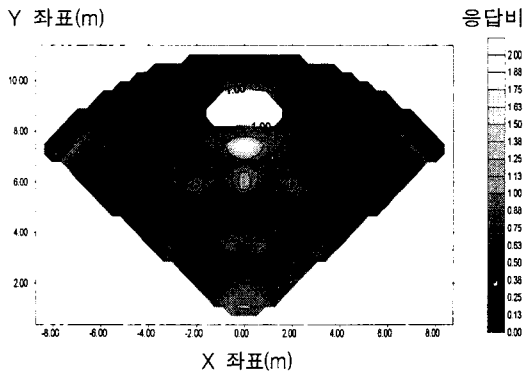


그림 9 응답비 (  $\frac{\text{연성방진벽의가속도응답}}{\text{방진구의가속도응답}}$  )  
(가진주파수:150Hz, site150)

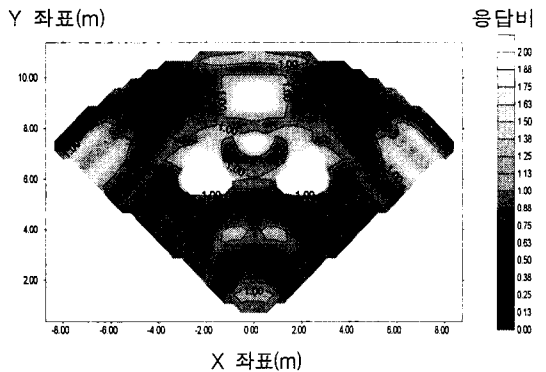
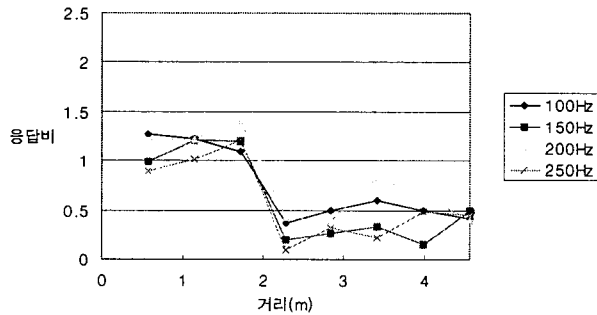


그림 10 응답비 (  $\frac{\text{연성방진벽의가속도응답}}{\text{강성방진벽의가속도응답}}$  )  
(가진주파수:150Hz, site150)

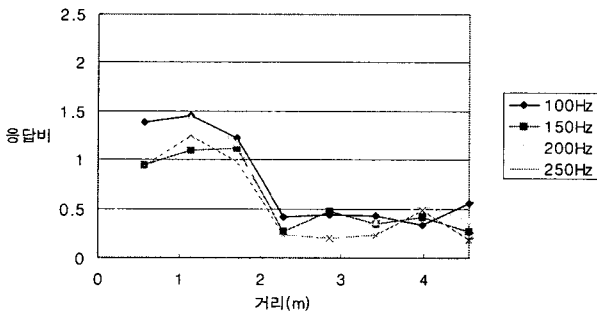
### 3.3 진동차단실험 분석

본 절에서는 총 48 개의 실험결과를 가진주파수 및 진동차단구조물의 규격에 따른 효과분석을 실시하였다. 총 3가지 방법에 따라 분석을 실시하였는데 동일한 장소에서 동일규격의 진동차단 구조물에 대한 가진주파수별 분석과, 하나의 가진주파수에 대한 진동차단구조물의 규격에 따른 분석 및 Rayleigh 파장에 의해 무차원화된 진동차단구조물의 주파수별 분석을 실시하였다.

그림 11 은 동일규격의 진동차단구조물에 대한 가진주파수별 분석으로서, 방진구를 설치한 경우의 가속도 응답 및 개발채움재인 연성방진벽을 설치한 경우의 가속도 응답을 각각 지반진동가속도응답값으로 나눈 응답비를 각각 나타낸 것이다. 동일규격의 진동차단구조물에 대한 진동차단 효과는 주파수가 높아짐에 따라 증가되었는데, 이는 Rayleigh 파의 지반전파특성과 밀접한 관계가 있다. Rayleigh 파의 파에너지는 깊이방향으로 약 한 파장 정도에서 에너지의 80%가 전파되기 때문에 Rayleigh 파의 파장이 커질수록 동일규격의 진동차단구조물에 의해 차단되는 에너지 양이 작게 됨을 알 수 있다.



(a)  $\frac{\text{가속도 응답 (방진구 설치)}}{\text{가속도 응답 (지반 진동)}}$

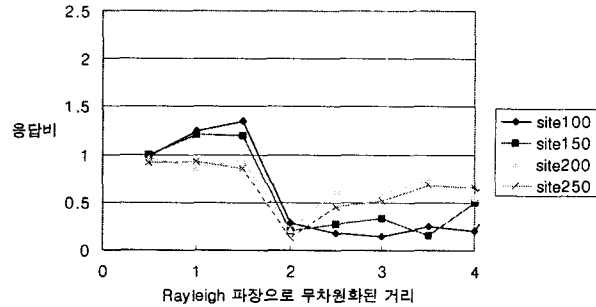


(b)  $\frac{\text{가속도 응답 (연성방진벽 설치)}}{\text{가속도 응답 (지반 진동)}}$

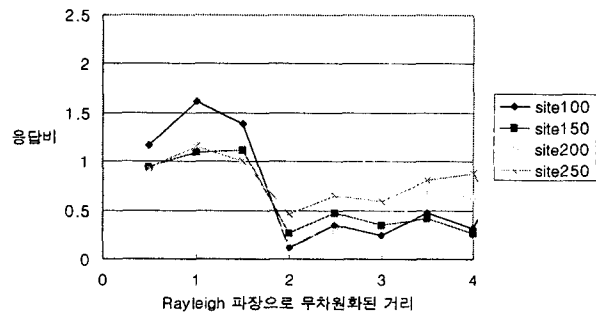
그림 11 거리별 응답비 (site150:  $H=1.0\lambda_R$ ,  $L=1.0\lambda_R$ ,  $R=2.0\lambda_R$ ,  $w=0.3m$ )

그림 12 는 동일 주파수에 대한 진동차단구조물의 규격에 따른 실험결과로서, 가진원으로부터의 거리를 Rayleigh 파장으로 무차원화하여 도시한 그림이다. 방진구를 설치한 경우의 가속도 응답 및 개발채움재인 연성방진벽을 설치한 경우의 가속도 응답을 각각 지반진동가속도값으로 나눈 진폭비를 각각 나타낸 것이다. 여기에서도 진동차단효과는 방진구에 비해 연성방진벽의 경우

작게 나타났으나, 주파수별 방진성능은 유사함을 알 수 있다.



(a)  $\frac{\text{가속도 응답 (방진구 설치)}}{\text{가속도 응답 (지반 진동)}}$



(b)  $\frac{\text{가속도 응답 (연성방진벽 설치)}}{\text{가속도 응답 (지반 진동)}}$

그림 12 거리별 응답비(150Hz)

그림 13 과 그림 14 는 가진원으로부터의 거리 및 가진주파수에 따라 진동차단구조물의 규격을 Rayleigh 파장으로 무차원하여 나타낸 그림이다. 방진구 및 연성방진벽의 경우 Rayleigh 파장으로 무차원화된 진동차단구조물의 방진효과는 주파수별로 유사한 양상을 보임을 알 수 있었다.

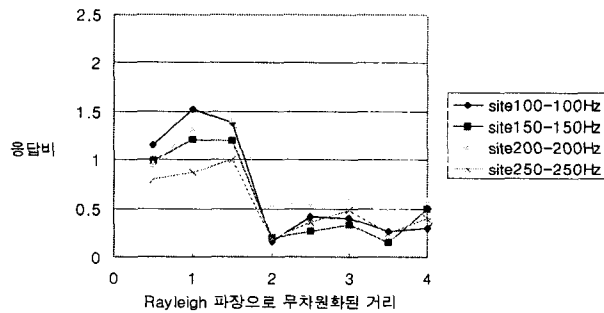


그림 13 방진구 규격에 따른 응답비(  $\frac{\text{가속도 응답 (방진구 설치)}}{\text{가속도 응답 (지반 진동)}}$  )



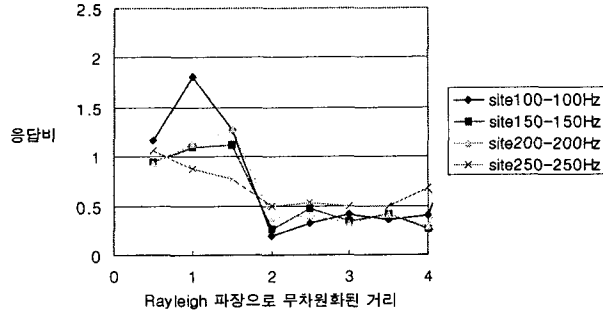


그림 14 연성방진벽 규격에 따른 응답비(  $\frac{\text{가속도 응답 (연성방진벽 설치)}}{\text{가속도 응답 (지반 진동)}}$  )

#### 4. 결론

본 연구를 통해 얻은 결과는 다음과 같다.

- (1) 각각의 진동차단구조물의 규격을 가진주파수에 따른 Rayleigh 파장으로 무차원화 하였을 때, 동일한 무차원값에 대한 진동차단효과는 서로 유사하게 나타났다.
- (2) 규격이 동일한 진동차단구조물에 대한 가진주파수별 실험과, 동일 주파수에 대한 진동차단구조물의 규격에 따른 실험 및 Rayleigh 파장에 의해 무차원화된 진동차단구조물의 주파수별 실험을 수행한 결과, 진동차단구조물의 후면  $2 \times \lambda_{Rayleigh}$  까지의 진동차단 효과는 방진구 연성방진벽 강성방진벽의 순으로 나타났다.
- (3) 연성방진벽의 진동차단효과는 강성방진벽의 경우보다 약 50% 이상 진동을 차단하였는데, 재료의 임피던스가 크게 됨으로서 지반진동차단효과는 증가하게 됨을 알 수 있었다.

#### 5. 감사의 글

본 연구는 96년도 건설기술연구개발사업의 연구비로 지원을 받아 수행되었으므로 본 연구를 가늌케 한 관계 당국에 깊은 감사를 드립니다.

#### 6. 참고문헌

1. Richart, F. E., Hall, J. R., and Woods, R. D., Vibrations of Soils and Foundations, Prentice-Hall, 1970.
2. Das, B. M., Principles of Soil Dynamics, PWS-KENT Publishing Company, Boston, 1993.
3. Woods, R. D. and Luco, J. E., "Screening of surface waves in soils," J. soil mech. found. div., ASCE 94, 1968, pp.951-979.
4. Ciesielski, R. and Zieba, A., "Experimental investigation on reduction of impact vibrations through ground by means of shallow vertical trenches," Proceedings: Structural Dynamics, Kratzig et al. (Eds), Vol. 2, 1990, pp.717-722.
5. McNeill, R. L., Margason, B. E., and Babcock, F. M., "The Role of Soil Dynamics in the Design of Stable Test Pads," Guidance and Control Conf., Minneapolis, Minn., 1965, pp.16-18.
6. Its, E. N. and Lee, J. S., "Screening of surface waves by composite wave barriers," Earthquake Engng., 10th World Conf., 1992, pp.1987-1992.
7. Massarch, K. R., "Ground Vibration Isolation using Gas Cushions," Proceedings, Second Int. Conf. on Recent Advances in Geotechnical Earthquake Engineering and Soil Dynamics, St. Louis, Missouri, Paper No. 11.6., 1991.