

교통하중에 의한 지반진동의 차단에 관한 연구

○이필규*

김문겸**

권형오***

Isolation of the Open and Infilled Trenches for the Surface-Waves Induced by the Traffic Loads

○Phil Kyu Lee* Moon Kyum Kim** Hyung-oh Kwon***

ABSTRACT

In this study, the vibration screening effectiveness of barriers which can isolate structures from ground-transmitted vibration generated by harmonic forces is performed. For high frequencies, the vibration screening effectiveness of barriers is analyzed from field tests, and compared with the results from numerical analyses using a commercial program, ANSYS. Using these numerical analysis procedures, the effectiveness for vibration with various low frequencies is predicted. The frequency analysis tests of surface waves are performed in order to estimate the dynamic material properties of soil for 100 Hz, 150 Hz, 200 Hz, and 250 Hz. Three-dimensional solid elements are used in order to consider the diffraction of waves in all directions. Spring-damper combination elements are used in order to avoid the reflection of waves on the boundary. The results of numerical analysis agree with those of field tests. From the results of this numerical analyses, the reduction of vibration for low frequencies induced by the traffic loads can be predicted.

1. 서 론

급속한 산업화에 따른 고속도로 또는 도심을 통과하는 고속철도차량 등에 의해 발생하는 진동문제는 인구밀집지역이나 첨단정밀시설이 설치되어 있는 건물 등에 문제를 발생시키고 있다. 이러한 지반진동문제는 전파에너지의 67%를 차지하는 표

면파 (Rayleigh)의 영향이 가장 큰 것으로 알려져 있다. 표면파는 파에너지의 90% 정도가 지표로부터 한파장 깊이에 분포되므로, 이러한 파의 전파를 차단하는 구조물로 방진구 및 방진벽이 많이 사용되고 있다^{[1]~[3]}. 방진구, 콘크리트 방진벽에 의한 진동차단에 대한 연구 뿐만 아니라 파일이나 다른 재료를 사용한 방진벽을 이용한 연구도 진행되고 있다^{[4][5]}. 또한 방진구조물에 의한 진동차단효과를 분석하기 위해 실험적인 방법과 수치해석적인 방

* 연세대학교 토목공학과
** 연세대학교 토목공학과
*** 유니슨산업(주)

법에 대한 연구가 진행되었다^{[6]~[8]}.

본 연구에서는 고주파 진동차단실험과 상용프로그램을 이용한 수치해석기법을 이용하여, 교통하중에 의한 저주파 진동차단효과를 예측하였다. 현장 실험을 통해 고주파에 대한 방진벽의 진동차단효과를 분석하고, 이를 상용프로그램의 해석결과와 비교하였다. 수치해석은 동적 해석을 할 수 있는 유한요소해석 상용프로그램인 ANSYS 를 사용하였다. 수치해석요소는 방진벽 길이에 대한 효과와 방진벽측면으로의 파 회절효과를 고려할 수 있도록 3 차원 요소를 사용하였으며, 지반 반무한 경계에서 파의 반사, 투과 및 굴절등의 영향을 억제시키기 위하여 스프링-댐퍼 조합을 통한 흡수경계요소를 사용하였다. 연구결과 고주파대역의 가진하중에 대한 차단구조물의 진동차단효과에 대한 수치해석결과가 모형실험결과와 잘 일치하였고, 저주파 수치해석결과와 교통하중에 의한 차단실험을 통해 저주파 진동차단효과를 예측할 수 있었다.

2. 본론

2.1 수치해석기법

본 연구에서는 지반 내의 진동 전파 및 차단에 대한 수치해석을 위하여 유한요소해석 상용프로그램인 ANSYS 를 사용하였다. 조화응답해석은 진폭과 주파수만 갖는 정현파형의 주기적인 조화함수에 대한 구조물의 응답을 알고자 할 때 사용된다. 운동방정식은 주파수의 함수로서 변위를 얻음으로서 계산된다. 모든 하중은 정현파형으로 시간에 따라 변하는 함수로 주어지고, 구조물이 선형거동을 할 경우 변위 역시 정현파형의 응답을 나타낼 것이다. 기본적인 운동방정식은 식 (1) 과 같이 표현할 수 있다.

$$[M]\ddot{u} + [C]\dot{u} + [K]u = \{F_{\max} e^{i\phi}\}e^{i\omega t} \quad (1)$$

여기서, F_{\max} 는 가진력의 진폭이고, $i = \sqrt{-1}$, t 는 시간, ϕ 는 가진 함수의 위상각 (rad),

$\omega = 2\pi f$, f 는 가해진 주파수 (cycle/t) 이다. 가진력 F 의 복소 형태는 식 (2) 와 같이 확장될 수 있다.

$$\begin{aligned} \{F\} &= \{F_{\max} e^{i\phi}\}e^{i\omega t} \\ &= \{F_{\max} (\cos \phi + i \sin \phi)\}e^{i\omega t} \\ &= (\{F_1\} + i\{F_2\})e^{i\omega t} \end{aligned} \quad (2)$$

여기서, $\{F_1\}$ 는 $\{F_{\max} \cos \phi\}$ 으로서 실수부 힘벡터이고, $\{F_2\}$ 는 $\{F_{\max} \sin \phi\}$ 으로서 허수부 힘벡터이다. 앞에서 언급한 바와 같이, 구조물의 모든 절점은 가진력과 같은 주파수로 정현파형을 그리며 운동한다. 따라서, 변위벡터 u 는 식 (3) 과 같이 표현할 수 있다.

$$\begin{aligned} \{u\} &= \{u_{\max} e^{i\phi}\}e^{i\omega t} \\ &= (\{u_1\} + i\{u_2\})e^{i\omega t} \end{aligned} \quad (3)$$

2.2 대상지반의 수치모형

지반진동의 전파문제를 해석함에 있어 파의 거동을 정확히 묘사하기 위해서는, 요소의 크기에 대한 고려가 필수적이다. 파의 파장에 비해 상대적으로 요소의 크기가 크게 되면, 파의 전파특성을 제대로 묘사하지 못하기 때문이다. 본 연구에서는 조화응답해석기법을 이용하여 각 주파수에 대한 응답을 산정함으로, 동하중이 작용할 때 지반 전파수치해석이 신뢰성을 갖도록 하기 위해 요소 크기는 ANSYS 에서 제안하는 $\lambda_R/20 \sim \lambda_R/10$ 을 사용하였다. 여기서 λ_R 는 가진주파수에 따른 지반에서 산정된 표면파 한파장을 의미한다. 본 연구에 사용된 유한 요소는 방진벽의 길이, 깊이 등을 다양화하고 동적해석의 정확도를 높이기 위해 3 차원 Solid 요소를 사용하였다. 2 차원 해석을 수행했을 경우 차단구조물의 측면 가장자리를 타고 회절하여 전파하는 파의 특성을 고려할 수 없

기 때문에 3 차원 해석을 수행하여 이러한 문제점을 해결하였다. 주파수가 이 요소는 8 절점을 가지며, 각 절점은 3 자유도를 지닌다. 수치해석에 사용된 정현파 하중은 수직방향으로 $2kN$ 의 힘과 100 Hz , 150 Hz , 200 Hz , 250 Hz 의 가진주파수를 갖는 정현파하중을 사용하였다.

파가 전달되는 지반을 모형화하는데 가장 중요한 부분은 지반경계에서 파의 반사를 억제시키는 것이다. 동적 유한요소해석에 있어서 경계에서 발생하는 반사파의 영향을 제거하지 못하면, 해석결과의 정확도 뿐만 아니라 신뢰도를 저하시키는 문제를 야기할 수 있다. 동적 해석시 경계면에서 파의 반사를 막고 방사조건을 만족시키기 위해 본 연구에서는 지반 반무한 경계마다 스프링-댐퍼 조합요소를 사용한 흡수경계기법을 사용하였다.

그림 1은 경계면에서의 3 차원 요소의 절점에 연결된 x, y, z 방향의 스프링 - 댐퍼 조합요소를 나타내고 있고, 각각의 요소들은 다시 각각 x, y, z 방향으로 변위가 구속되어 있다. 이 요소를 사용함으로써 그림의 빗금친 부분에 해당하는 영역을 무한영역으로 이상화하여 파의 반사억제 및 방사조건에 대한 모형화가 가능하다. 지반표면을 제외한 지반의 경계면에 있는 모든 절점에 이러한 요소를 사용하였다. 즉, 하나의 절점 위치에 또 하나의 절점을 위치시킴으로써 같은 위치에 있는 절점들 사이에 스프링 - 댐퍼 요소를 x, y, z 방향으로 연결시켰다.

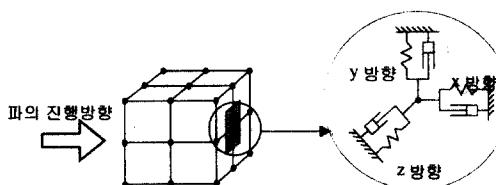


그림 1. 3차원 댐퍼요소의 개념도

스프링의 지반반력계수는 $30MN/m^3$ 으로 설정하여 지반의 침하를 효과적으로 막고, 댐퍼의 감쇠비는 1.0 으로 설정하여 파를 흡수할 수 있도록 하였다. 해석에 사용된 지반 및 방진벽의 물성치는 표 1에 나타난 바와 같다.

표 1. 해석에 사용된 지반 및 방진벽의 물성치

구분	지반물성치	방진벽물성치
탄성계수 (N/m^2)	171×10^6	2.42×10^6
전단탄성계수 (N/m^2)	68.2×10^6	0.8×10^6
포아송비	0.25	0.24
밀도 (kg/m^3)	1900	540
감쇠비 (%)	5	6.5

2.3 수치해석 및 모형실험과의 결과 분석

3 차원 수치해석을 이용하여 고정된 규격에서 주파수 100 , 150 , 200 , 250 Hz 에 대한 규격이 가로 $1.14m \times$ 세로 $1.14m$ 이고 높이 $0.3m$ 인 방진벽의 진동차단효과를 그림 3 ~ 6 에 실험과 비교하여 나타내었다. 그림 3 ~ 그림 6 은 가진 주파수가 커짐에 따라 수치해석결과 및 모형실험 결과가 진동차단구조물이후에서 전체적으로 진폭감쇠비가 작게 나타남을 알 수 있다. 특히, 방진벽 이후의 진폭감쇠비 역시 수치해석과 실험 모두 주파수가 커짐에 따라 낮아짐을 보임으로써 방진벽 후면전체의 감쇠 성향을 대표할 수 있는 값이라 판단된다. 이는 고정된 실험규격에서 주파수가 작아짐에 따라 차단구조물의 진동차단효과가 작아지는 것을 보이고 있다. 또한 수치해석결과와 모형실험의 결과를 진폭감쇠비를 통해 비교해 볼 때 각각의 경향이 서로 잘 일치하고 있음을 알 수 있다. 진동차단효과를 산정하기 위해 차단구조물후면의 진폭감쇠비 추이를 비교해 보면, 최소 진폭비의 경우 수치해석과 실험이 잘 일치함을 보이고

있고, 그 이후의 감쇠비 역시 수치해석과 실험의 값에는 다소 차이가 있으나, 주파수가 높아짐에 따라 회절에 의한 진폭감쇠비의 상승이 둔화되는 경향이 실험과 수치해석 모두 좋은 일치를 보이고 있다. 이는 본 연구의 수치해석모델이 100 ~ 250 Hz에 대하여 모형실험결과와 일치함으로 이 해석 기법을 이용하여 상대적으로 큰 규모가 요구되는 저주파진동의 차단 예측에 사용할 수 있음을 알 수 있다.

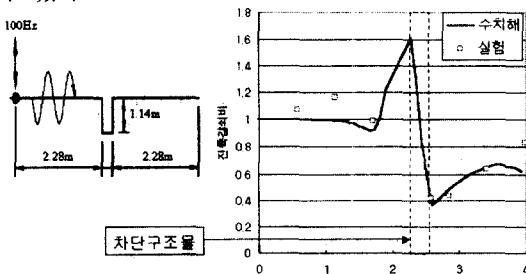


그림 3 고주파 모형실험과 수치해석의 비교
(가진주파수 : 100Hz)

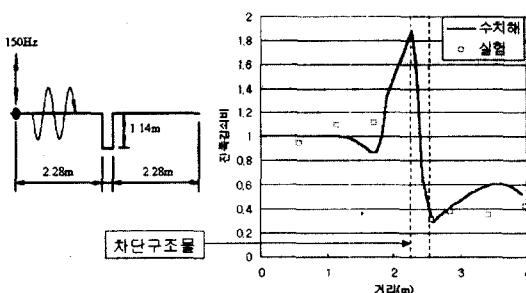


그림 4 고주파 모형실험과 수치해석의 비교
(가진주파수 : 150Hz)

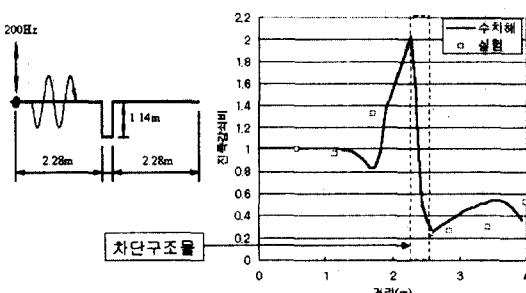


그림 5 고주파 모형실험과 수치해석의 비교
(가진주파수 : 200Hz)

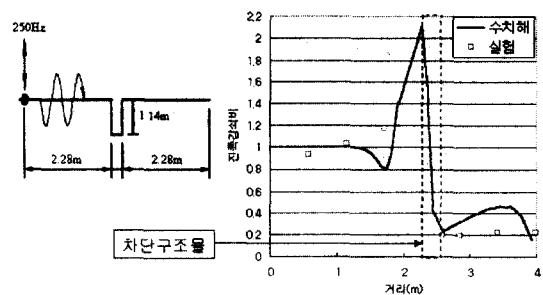


그림 6 고주파 모형실험과 수치해석의 비교
(가진주파수 : 250Hz)

3. 저주파 진동차단

100Hz ~ 250Hz의 고주파 모형실험결과와 상용프로그램을 이용한 수치해석 결과를 비교한 결과 차단구조물 후면에서의 진동차단효과는 일치하고 있음을 알 수 있었다. 본 절에서는 수치해석을 이용하여 규모상 실험이 어려운 저주파 영역의 진동차단효과를 예측하였다.

3.1 진동차단효과의 예측

그림 7은 그림 3 ~ 그림 6과 동일한 규격의 차단구조물을 설치하였을 경우, 저주파 영역인 1 Hz ~ 100 Hz에 대한 방진벽 후면의 최소진폭감쇠비를 앞에서 해석한 고주파 대역의 감쇠비와 함께 나타낸 것이다. 그림에서 저주파로 감에 따른 진폭감쇠비의 변화 역시 고주파에서의 경향을 지속하고 있음을 볼 수 있다. 즉, 저주파 영역에서도 주파수가 감소함에 따라 최소진폭감쇠비는 지수함수 형태로 증가한다. 그러나, 40 Hz 이하에서는 곡선의 변곡점이 생긴 후, 감쇠비의 급격한 증가추세가 완만한 증가추세로 바뀌는 것을 볼 수 있다. 이는 40 Hz 이상의 주파수에서는 주파수가 높아짐에 따라 표면파의 파장이 작아져 차단구조물에 의해 파에너지가 약화되는 반면, 40 Hz 이하의 주파수에서는 주파수가 낮아짐에 따라 표면파의 파장 또한 증가하여 파에너지의 감소에 차단구

조물로서의 효율이 작게됨을 의미한다. 완만한 증가추세를 보이던 곡선은 더 저주파로 내려감에 따라 결국 일정한 값에 수렴하는 것을 볼 수 있다. 결과적으로, 방진벽의 진동차단효과는 주파수가 낮아짐에 따라 지수함수의 형태로 급격히 감소하다가, 위로 불룩한 포물선형태로 완만히 증가하는 양상을 보인 후, 결국 일정한 값으로 수렴하고 있는 경향을 보이고 있다.

는 주파수에 대해 차단구조물의 깊이가 표면파의 한파장 길이 보다 작게되어 차단구조물로서의 기능을 하지 못했기 때문이다. 또한, 차단구조물의 깊이가 알아진다는 것은 상대적으로 파의 파장이 커지는 것을 의미한다. 100 Hz에서의 진폭감쇠비가 차단구조물의 깊이에 따라 크게 차이가 나는 데 반해, 10 Hz에서는 별 차이가 나지 않는 것 역시 차단구조물의 깊이가 10 Hz에 해당하는 표면파의 파장에 비해 작기 때문이다.

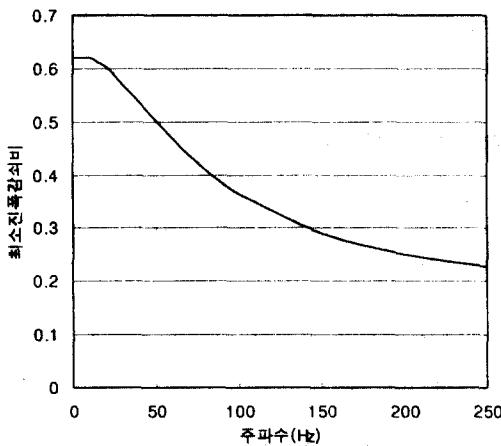


그림 7 주파수에 따른 진폭감쇠비

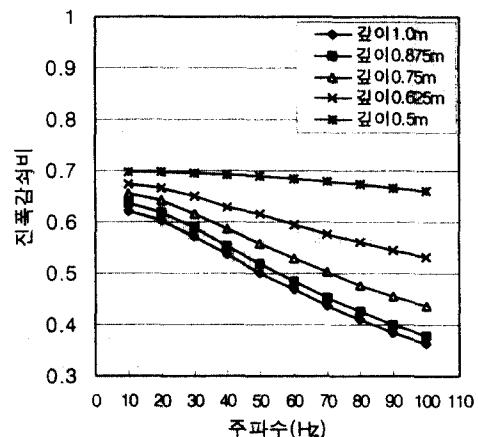


그림 8 차단구조물의 깊이에 따른 진폭감쇠비

그림 8 은 차단구조물의 깊이가 1 m, 0.875 m, 0.75 m, 0.625 m, 0.5 m 로 변화할 때, 후면의 진폭감쇠비를 저주파 영역에서 나타낸 것이고, 표 2 는 그림 8 에서 보여진 진폭감쇠비곡선을 수치로 나타낸 것이다. 그림에서 나타나는 전체적인 곡선의 경향을 보면, 방진벽 깊이가 알아질수록 진동차단효과가 크게 줄어드는 것을 알 수 있다. 또한, 깊이가 알아질수록 주파수에 따른 방진효과의 차이가 점차 줄어드는 것도 볼 수 있다. 깊이가 0.5 m 인 경우를 보면, 주파수에 따른 차단효과의 차이가 최대 0.04 로 산정되었다. 그리고, 깊이 0.5 m 인 경우, 주파수가 낮아질수록 진폭감쇠비가 0.7 에 수렴함을 볼 수 있는데, 이는 0 ~ 100 Hz 의 모

표 2 차단구조물의 깊이에 따른 진폭감쇠비

주파수	깊이 1.0m	깊이 0.875m	깊이 0.75m	깊이 0.625m	깊이 0.5m
10 Hz	0.620	0.636	0.656	0.672	0.696
20 Hz	0.601	0.618	0.642	0.665	0.697
30 Hz	0.571	0.588	0.617	0.651	0.696
40 Hz	0.536	0.554	0.588	0.629	0.693
50 Hz	0.500	0.518	0.557	0.615	0.689
60 Hz	0.467	0.484	0.528	0.594	0.685
70 Hz	0.437	0.453	0.501	0.577	0.680
80 Hz	0.409	0.425	0.477	0.561	0.673
90 Hz	0.385	0.401	0.455	0.544	0.667
100Hz	0.363	0.379	0.436	0.531	0.659

그림 9 는 방진벽의 길이가 1m, 0.875m, 0.75m, 0.625m, 0.5m 로 변화할 때, 방진벽 후면의 진폭감쇠비를 저주파 영역에서 나타낸 것이고, 표 3 은 그림 9 에서 보여진 진폭감쇠비곡선을 수치로 나타낸 것이다. 방진벽 길이가 짧아질수록 진동차단 효과가 줄어들고, 길이가 짧아질수록 주파수에 따른 방진효과의 차이가 점차 줄어드는 것을 알 수 있다.

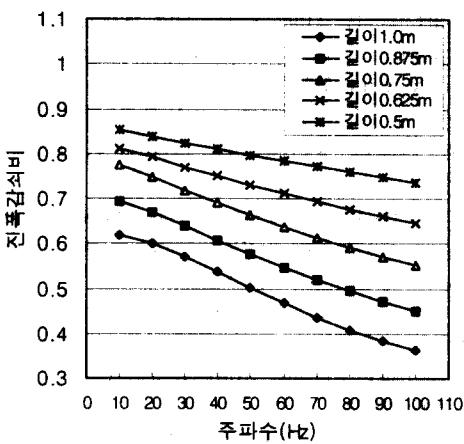


그림 9 차단구조물의 길이에 따른 진폭감쇠비

표 3 차단구조물의 길이에 따른 진폭감쇠비

주파수	길이 1.0m	길이 0.875m	길이 0.75m	길이 0.625m	길이 0.5m
10 Hz	0.620	0.694	0.774	0.811	0.854
20 Hz	0.601	0.670	0.748	0.792	0.839
30 Hz	0.571	0.639	0.718	0.770	0.824
40 Hz	0.536	0.607	0.689	0.749	0.810
50 Hz	0.500	0.575	0.662	0.730	0.797
60 Hz	0.467	0.546	0.637	0.711	0.784
70 Hz	0.437	0.519	0.613	0.694	0.772
80 Hz	0.409	0.494	0.591	0.676	0.760
90 Hz	0.385	0.471	0.570	0.660	0.748
100Hz	0.363	0.451	0.551	0.644	0.736

3.2 열차하중에 의한 진동 차단

교통하중에 의해 발생되는 저주파 진동 차단효과를 수치해석결과와 비교하기하기 위해 그림 10에 나타난 바와 같은 진동차단실험을 실시하였다. 진행하는 각각의 열차로부터 발생되는 가진력과 주파수는 열차의 속도 및 중량에 따라 달라지므로 하나의 진동원에 대한 비교 분석을 실시하기 위해 총 6개의 수신점에서 동시에 가속도 응답을 실시하였다. 실험은 진동차단구조물이 없는 경우의 수신점 ①과 ②에서 얻은 가속도 응답과 진동 차단구조물이 있는 경우의 수신점 ③~⑥에서의 가속도 응답을 비교 분석하였다. 또한 진동차단구조물의 규격은 2절에서 실시한 모형실험 결과로부터 결정된 $H=1.2m$, $L=1.6m$, $w= 0.3m$ 으로 결정하여 설치하였다.

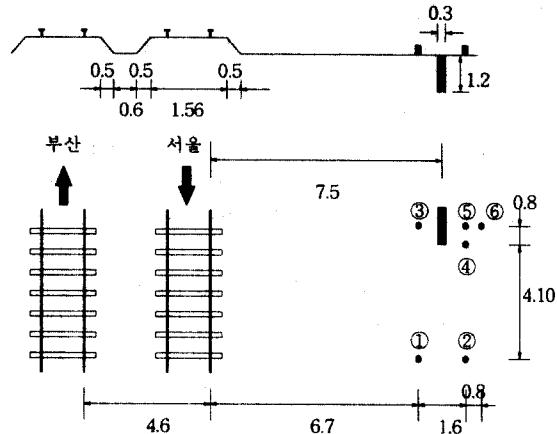


그림 10 열차하중에 대한 저반진동차단실험
(단위:m)

그림 11 은 수신점 ③ 과 ⑥ 에서의 가속도 응답을 이용하여 주파수 대역 0 ~ 400Hz 까지의 진폭감쇠비를 나타낸 그림이다. 열차하중에 의해 발생된 저주파 진동차단 효과는 3.1 절에서의 수치해석결과와 유사한 경향을 나타낼 수 있다.

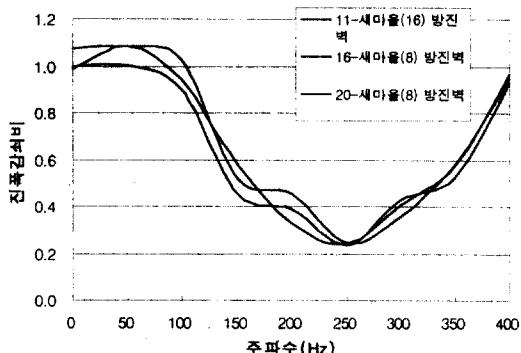


그림 11 열차하중에 의한 진폭감쇄비

4. 결론

고주파 대역에서 실시한 모형실험결과와 저주파 진동차단실험 및 상용프로그램을 이용한 수치해석 결과로부터 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- (1) 차단구조물 후면의 진폭감쇄비를 비교해 볼 때, 수치해석과 모형실험결과는 오차가 평균 10 % 이내임을 알 수 있었다. 수치해석과 실험 모두 지수함수의 형태로 상승하는 경향을 보이고 있는데, 이는 주파수가 낮아짐에 따라 파장이 급격하게 커짐으로써 상대적으로 방진 벽의 규격이 급격히 작아지는 효과를 보였기 때문이라 사료된다.
- (2) 저주파수 영역인 1 Hz ~ 100 Hz에 대한 진폭감쇄비의 변화양상을 수치해석적으로 조사한 결과, 주파수가 높아질수록 지수함수 형태로 급격히 하강함을 알 수 있었다. 이는 주파수가 낮아지면 일정주파수 이하에서는 파장이 증가하여 파를 차단할 수 있는 진동차단구조물의 기능이 약화되고 있음을 의미한다.
- (3) 수치해석결과와 열차하중에 의한 진동차단실험 결과를 비교해 볼 때, 본 연구와 같은 해석기법은 진동차단구조물에 의한 저주파 진동차단 효과를 적절하게 예측할 수 있음을 알 수 있었다. 본 연구에서는 동일한 차단구조물의 규격에 대한 주파수별 분석을 실시하였으나 저주파 하중에 의한 표면파의 파장을 산정할 수 있다

면, 본 연구의 기법을 이용하여 차단구조물의 설계에 활용될 수 있으리라 판단된다.

5. 감사의 글

본 연구는 96년도 건설기술연구개발사업의 연구비로 지원을 받아 수행되었으므로 본 연구를 가능케 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. Its, E. N. and Lee, J. S., "Screening of surface waves by composite wave barriers," *Earthquake Engng.*, 10th World Conf., 1992, pp.1987-1992.
5. 이필규, 김문겸, 임윤묵, 황기익, "열차진행에 의한 표면파의 진동차단", 한국소음진동공학회 추계학술대회논문집, 1999, pp.142-148.
6. Hayakawa, K., Kani Y., Matsubara N., Matsui T., Wood, R., "Ground Vibrations Isolation By PC Wall-Piles," *Proceedings of Forth International Conference on Case Histories in Geotechnical Engineering*, St. Louis, Missouri, 1998, pp.672-677.
7. 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.
8. 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.