

# 振動遮斷構造物에 의한 地盤振動遮斷 研究

## A Study on the Vibration Isolation by Wave Barriers

허 영\*  
Huh, Young

.....  
요 약

2차원과 3차원모델에 대해 진동전파공간에 설치된 방진구(防振溝)의 진동차단효과가 주파수영역의 경계요소법에 의해 반무한영역지반과 층진지반에서 검토되었다. 연구결과, 방진구의 효율이 진동원과 관련된 방진구의 위치 및 깊이에 큰 영향을 받으며, 그들의 최적크기는 진동주파수에 대해 민감한 것을 나타낸다.

Abstract

For two- and three-dimensional problems, the vibration isolation effect of barriers in the travel path of waves has been studied using a boundary element method in the frequency domain. The soil is modelled as a half-space or a layered medium. The results indicate that the effectiveness of a wave barrier is strongly dependent on its location and depth with respect to the vibration source and that the optimum values of these two parameters are sensitive to vibration frequencies.

.....  
1. 서 론

지반과 접촉되어 있는 모든 구조물에서는 지반을 통해 주위에서 전달되어 오는 진동에 의해 구조물내의 사람이나 구조물 자체의 안정성 문제가 야기될 수 있다. 사회의 경제적 발전에 따라 이러한 진동전파문제의 발생 가능성과 발생 빈도는 증가할 수 밖에 없으나, 구조물이 설치된 후에 발생한 문제의 해결방법은 막대한 비용이 들어 구조물 설치 이전에 문제발생 가능성을 판단할 수 있는 수단이 필요하다.

진동전파문제로 정의되는 이러한 문제의 해결

을 위해서는 구조물의 동적해석 뿐 아니라 지반의 동적 거동도 고려되어야 한다. 이러한 진동들은 그 발생의 원인이 되는 진동원의 제거가 불가능한 경우가 대부분으로, 이 경우 피해의 예방을 위해서는 진동전파를 억제 또는 차단하는 방법을 택할 수 밖에 없다.

본 논문에서 사용한 방법은 이를 위한 여러 방법들중, 진동전파 매개체인 지반에서 행해지는 전파경로상의 대책으로, 이는 다시 진동전파의 방향에 따라 진동원인 구조물로부터 퍼져나가는 진동을 막는 직접차단방법(active isolation methods)과 진동이 수진부인 구조물로 들어 오는 것을 차

\* 수원대학교 토목공학과 조교수

이 논문에 대한 토론을 1995년 6월 30일까지 본 학회에 보내 주시면 1995년 12월호에 그 결과를 게재하겠습니다.

단하는 간접차단방법(passive isolation method-s)으로 구별되며, 본 논문에서는 이 두가지 모두를 다룬다.

진동전파에 의한 주위 영향의 판단은 우선적으로 지반진동전파 매개체인 지반의 동적특성 파악이 요구된다. 지반의 동적특성 중 재료적 특성인 지반의 동적탄성계수, 동적포아슨비, 진동전파속도 등은 실험실 또는 현장에서의 실험에 의해 결정되나, 지반의 또 다른 주요 동적 특성인 지반의 구성형태에 따른 진동전달함수는 토질주상도로 구해지는 지반의 구성형태에 의해 좌우되며 이 전달함수의 결정을 위해서는 컴퓨터시뮬레이션에 의한 수치해석방법이 사용된다.

본 논문은 컴퓨터시뮬레이션에 의한 수치해석적 방법을 통해 진동전파문제 발생가능성의 판단 방법과 함께 진동전파차단구조물의 최적 위치 또는 크기의 결정을 통한 진동차단방법의 제고를 위한 연구의 결과이다.

본 논문에서의 계산은 모두 486급 개인컴퓨터에서 수행되었고, 요소내의 처짐 및 응력은 균등한 것으로 가정하였다.

## 2. 수치해석방법

### (1) 전산모델 구성 방법

본 연구에서는 방진구를 포함한 진동원과 수진부 사이의 지반을 경계요소로 전산모델화하였다. 방진벽의 경우 강체 또는 탄성체로 취급되며 탄성체의 경우는 유한요소 또는 경계요소 강체의 경우는 강체자유도만을 고려한 모델로 이상화 할 수 있다.

### (2) 수치해석알고리즘

본 논문에서 사용된 경계요소법 전산프로그램 SSI2D/3D에서 지반의 변위계산을 위해 사용된 알고리즘은 다음과 같다. 먼저 경계요소법<sup>1)</sup>에 의한 전체 경계에서의 변위  $u$ 와 힘  $t$ 와의 관계는 각각의 영향계수행렬  $T$ 와  $U$ 에 의해

$$T \cdot u = U \cdot t \quad (1)$$

로 표현된다.

여기에는 구조물 바깥부분의 요소도 포함되며,

이 요소들은 진동원과 수진부를 포함한 구조물을 나타내는 내부요소(Inner element)와 구별해 외부요소(Outer element)로 부른다. 식 (1)은 내부요소와 (윗첨자 e)와 외부요소 (윗첨자 a)로 나뉘어진다 :

$$\begin{bmatrix} T^{ee} & T^{ea} \\ T^{ae} & T^{aa} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u^e \\ u^a \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} U^{ee} & U^{ea} \\ U^{ae} & U^{aa} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} t^e \\ t^a \end{bmatrix} \quad (2)$$

지표면 상의 힘  $t^a=0$ 의 경계조건과  $Q=U^{-1}T$ 에 의해 식(2)를 고친 후, 지반의 변위벡터  $u^a$ 를 소거하면  $u^e$ 와  $t^e$ 만의 식으로 변한다 :

$$\hat{Q} u^e = t^e \quad (3)$$

식 (3)의  $u^e$ 와  $t^e$ 를 주어진 경계조건에 의해 풀면 진동차단 효과를 고려한 진동원과 수진부의 변위를 구할 수 있으며, 다른 부분에서의 결과가 필요한 경우, 해당되는 자유도를 식(2)의 내부요소에 포함시켜 구할 수 있다.

## 3. 예 제

### 3.1 지반의 동적 강성도 계산

사용된 프로그램의 정확성을 입증하기 위해 지반 그림 1의 동적 강성도를 구해, 이의 익행렬로 구해지는 동적 연성도(flexibility)를 무차원주파수인  $a_0(=\omega b/Cs)$ 상에 실수부(RE)와 허수부(IM)로 표시하여 참고문헌[2]에서의 결과와 비교하였다. 참고문헌에서는 수평성분(그림 2)과 회전성분(그림 4)의 값만 있으나, 여기에는 수직성분(그림 3) 및 회전과 수평성분의 연결성분(그림

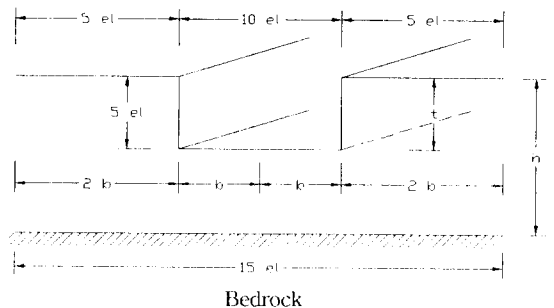
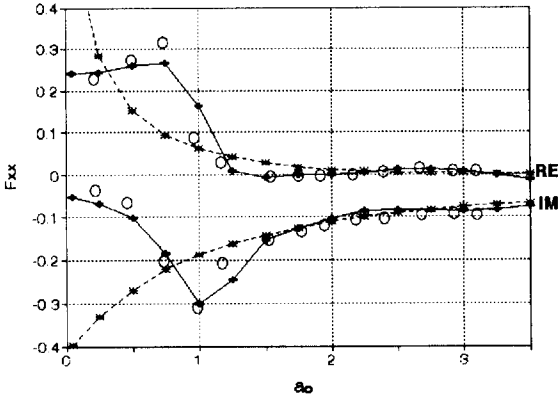
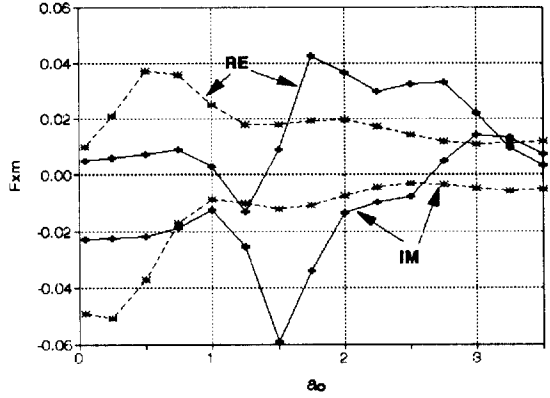


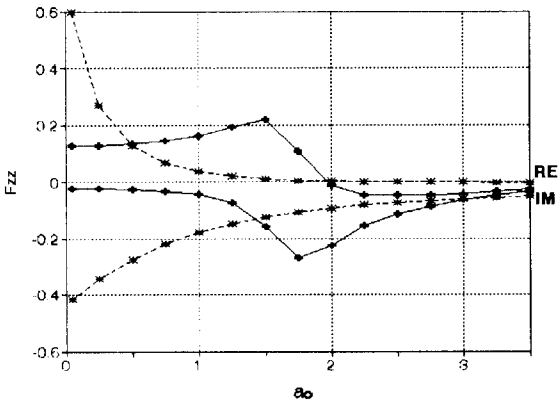
그림 1. Embedded foundation



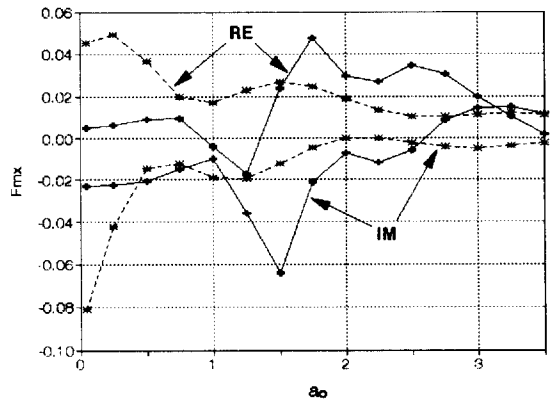
\* : Halfspace + : Layered Soil ○ : Chang Liang  
 그림 2. Foundation flexibility coefficient( $F_{xx}$ ) : 수평성분 ( $a_0 = \omega b / C_s$ )



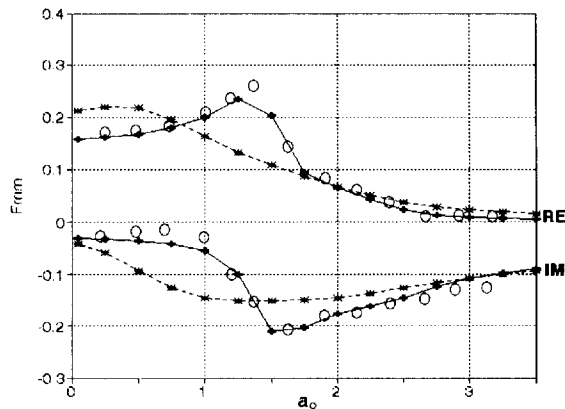
\* : Halfspace + : Layered Soil  
 그림 5. Foundation flexibility coefficient ( $F_{xm}$ ) : 수평-회전 연결성분 ( $a_0 = \omega b / C_s$ )



\* : Halfspace + : Layered Soil  
 그림 3. Foundation flexibility coefficient ( $F_{zz}$ ) : 수직성분 ( $a_0 = \omega b / C_s$ )



\* : Halfspace + : Layered Soil  
 그림 6. Foundation flexibility coefficient ( $F_{mx}$ ) : 회전-수평 연결성분 ( $a_0 = \omega b / C_s$ )



\* : Halfspace + : Layered Soil ○ : Chang Liang  
 그림 4. Foundation flexibility coefficient ( $F_{mm}$ ) : 회전성분 ( $a_0 = \omega b / C_s$ )

5, 6)도 함께 나타내었다. 해석모델에서 사용된 경계요소의 수가 그림 1에 나타나 있으며, 해석은 무차원으로 수행되었고, 사용된 요소의 크기는 균일하다.

### 3.2 진동차단층에 의한 진동차단

여기에서는 그림 7에서 매질2로 표시된 진동차단층의 효과를 진동전달율로 표시하여, 본 논문에서의 결과와 진동전파이론에 의해 계산된 참고문헌[3]의 값과 비교하였다. 여기에서의 진동전달율은 매질2가 반무한 영역인 매질1의 사이에 존재하는 경우의 진폭과 매질1로만 이루어진 경우의 진폭과의 비를 나타낸다.

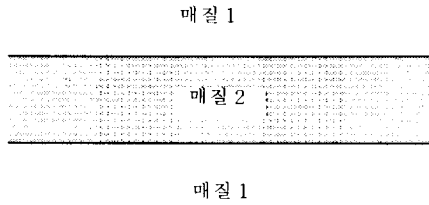


그림 7. 매질이 다른 진동차단층

3.2.1 콘크리트-모래-콘크리트

콘크리트사이 모래층의 진동차단효과를 보기 위해 표 1의 값들에 대한 진동전달율의 계산결과 는 그림 8~11과 같다. 그림 10에서 차단층 두께 80cm이후를 제외하고는 모두 유사한 값을 나타낸다.

표 1. Concrete-Soil-Concrete

그림번호	f	Cs <sub>1</sub>	ρ <sub>1</sub>	Cs <sub>2</sub>	ρ <sub>2</sub>
8	10	1940	2.4	150	1.6
9	25	1940	2.4	150	1.6
10	50	1940	2.4	150	1.6
11	100	1940	2.4	150	1.6

f : 진동수 [Hz]

Cs<sub>1</sub>, Cs<sub>2</sub> : 매질 1, 2의 전단파속도 [m/sec]

ρ<sub>1</sub>, ρ<sub>2</sub> : 매질 1, 2의 밀도

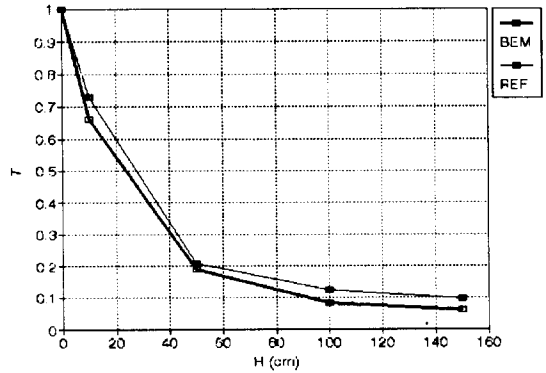


그림 9. Concrete-Soil-Concrete : f=25Hz  
H : 차단층 두께, T : 전달율

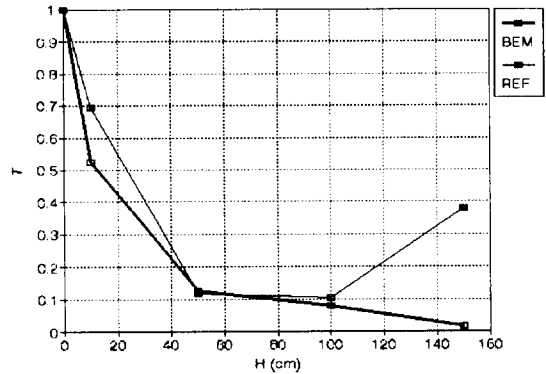


그림 10. Concrete-Soil-Concrete : f=50Hz  
H : 차단층 두께, T : 전달율

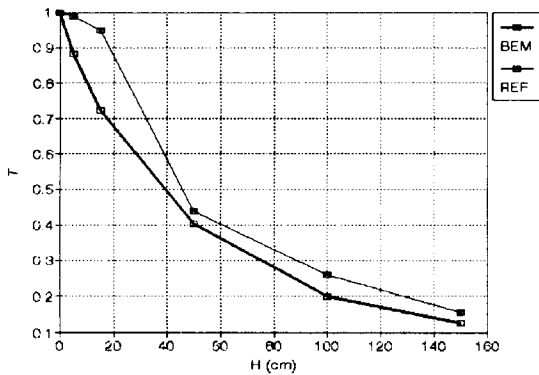


그림 8. Concrete-Soil-Concrete. : f=10Hz  
H : 차단층 두께, T : 전달율

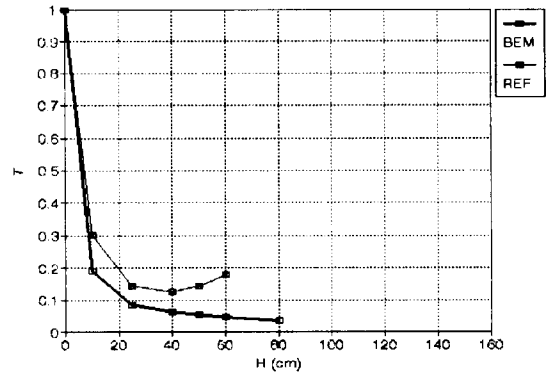


그림 11. Concrete-Soil-Concrete : f=100Hz  
H : 차단층 두께, T : 전달율

### 3.2.2 흙-콘크리트-흙

흙사이 콘크리트층의 진동차단효과를 보기 위해 표 2의 값들에 대한 진동전달율의 계산결과가 그림 12~15에 표시되어, 유사한 값을 나타낸다.

표 2. Soil-Concrete-Soil

그림번호	f	CS <sub>1</sub>	ρ <sub>1</sub>	CS <sub>2</sub>	ρ <sub>2</sub>
12	10	100	1.6	1940	2.4
13	25	100	1.6	1940	2.4
14	50	100	1.6	1940	2.4
15	100	100	1.6	1940	2.4

f : 진동수 [Hz]

CS<sub>1</sub>, CS<sub>2</sub> : 매질 1, 2의 전달파속도 [m/sec]

ρ<sub>1</sub>, ρ<sub>2</sub> : 매질 1, 2의 밀도

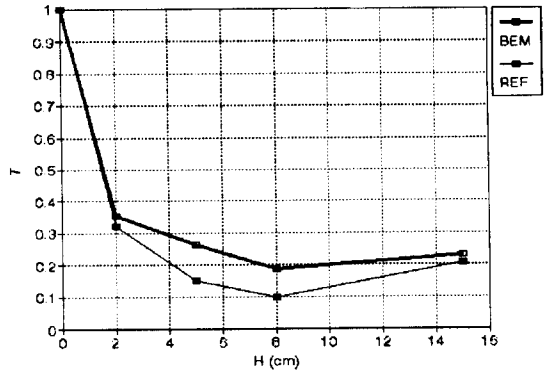


그림 14. Soil-Concrete-Soil : f=50Hz

H : 차단층 두께, T : 전달율

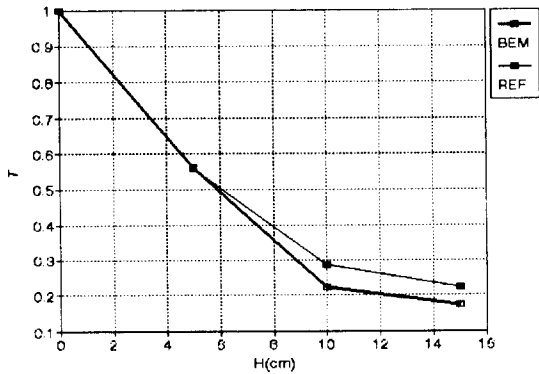


그림 12. Soil-Concrete-Soil : f=10Hz

H : 차단층 두께, T : 전달율

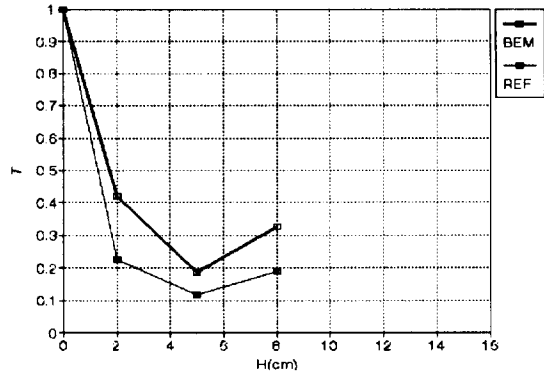


그림 15. Soil-Concrete-Soil : f=100Hz

H : 차단층 두께, T : 전달율

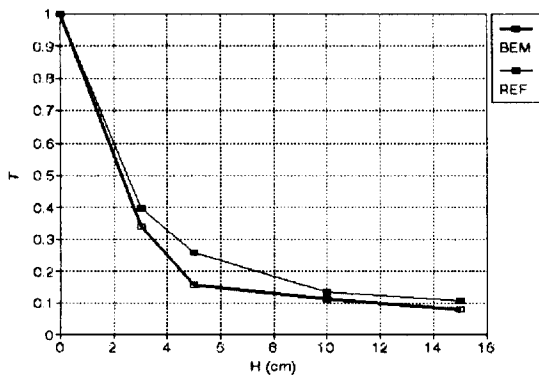


그림 13. Soil-Concrete-Soil : f=25Hz

H : 차단층 두께, T : 전달율

### 3.3 2차원 능동차단

그림 28의 상부층으로 이루어진 반무한영역의 지반에서 방진구의 최적위치 및 깊이를 구하기 위한 해석을 실시하였다. 사용된 요소의 크기는 5Hz와 50Hz의 경우 각기 2m와 0.2m이며, 기초의 전체 폭 W는 6.0m로 6개의 요소로 분할되었다. 방진구 바닥은 지표면의 수평부분에서와 같은 크기의 요소 두개(4m의 경우) 및 4개(8m의 경우)로 이루어져 있다.

#### 3.3.1 방진구설치거리에 따른 진동차단효과 비교

그림 16의 반무한영역 지반에서 진동수 5Hz와 50Hz에 대해, 진동기초의 중심으로 부터 방진구

중심까지의 거리  $L$ 을 변화시켜 가며 방진구위치에 따른 차단효과를 검토하였다.

5Hz 진동의 경우(그림 17, 18),  $L=8\text{m}$ 보다  $L=15\text{m}$ 에서 더 좋은 차단효과를 나타낸다. 이는 방진구를 무조건 진동원에 가깝게 설치하는 것이 효과적이지 않음을 의미한다. 50Hz의 경우(그림 19,

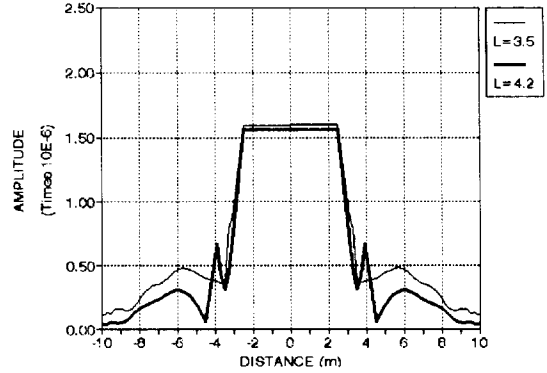
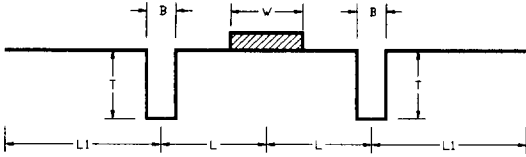


그림 19. 방진구 거리에 따른 Amplitude  
 $f=50\text{Hz}$ ,  $T=1\text{m}$ ,  $B=0.4\text{m}$

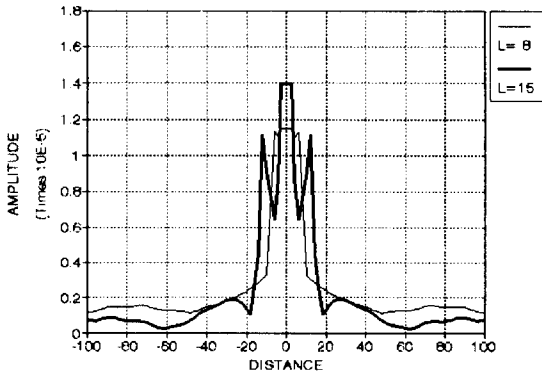


그림 17. 방진구 거리에 따른 Amplitude  
 $f=5\text{Hz}$ ,  $T=10\text{m}$ ,  $B=4\text{m}$

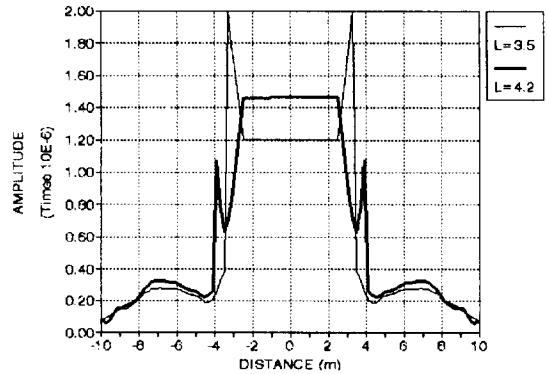


그림 20. 방진구 거리에 따른 Amplitude  
 $f=50\text{Hz}$ ,  $T=2\text{m}$ ,  $B=0.4\text{m}$

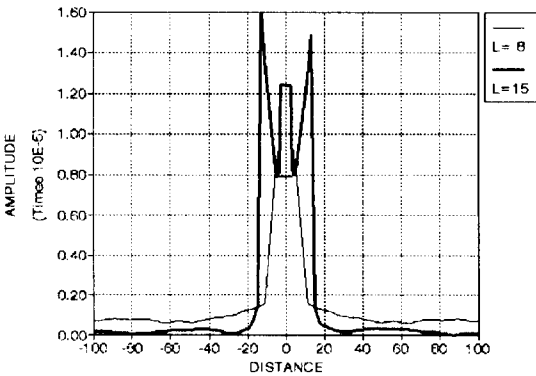


그림 18. 방진구 거리에 따른 Amplitude  
 $f=5\text{Hz}$ ,  $T=20\text{m}$ ,  $B=4\text{m}$

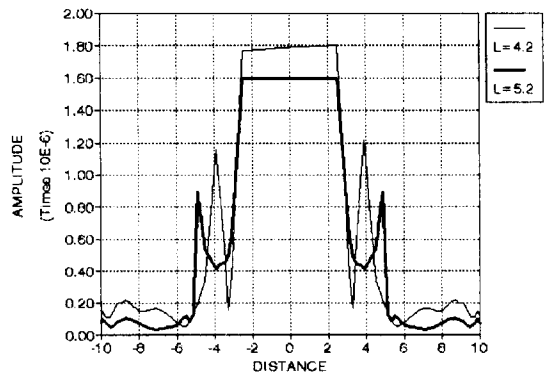


그림 21. 방진구 거리에 따른 Amplitude  
 $f=50\text{Hz}$ ,  $T=3\text{m}$ ,  $B=0.4\text{m}$

20, 21)도  $L=3.5, 4.2\text{m}$ 의 경우보다  $L=5.2\text{m}$ 의 경우가 최적의 차진효과를 나타내었다.(그림 21)

3.3.2 방진구 깊이에 따른 진동차단효과 비교  
동일한 지반에 대한 방진구의 깊이  $T$ 에 따른 진

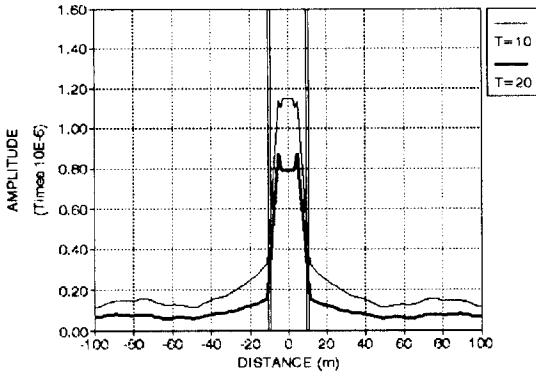


그림 22. 방진구 깊이에 따른 Amplitude  
 $f=5\text{Hz}, L=8.00\text{m}, B=4\text{m}$

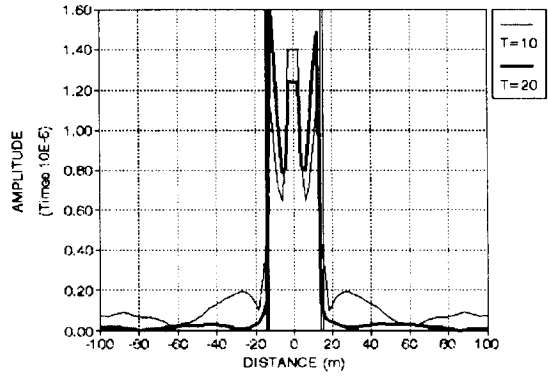


그림 25. 방진구 깊이에 따른 Amplitude  
 $f=50\text{Hz}, L=5.2\text{m}, B=0.4\text{m}$

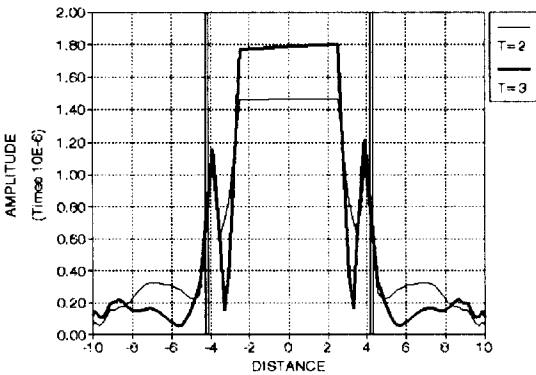


그림 23. 방진구 깊이에 따른 Amplitude  
 $f=5\text{Hz}, L=15.00\text{m}, B=4\text{m}$

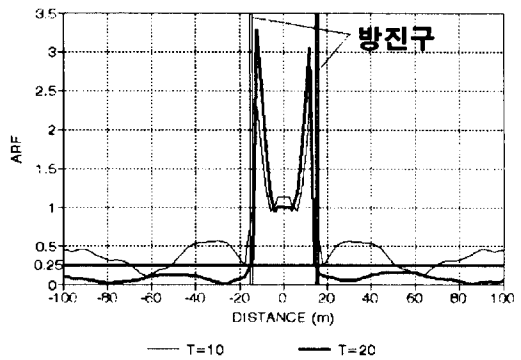


그림 26. ARF :  $f=5\text{Hz}, L=15\text{m}, B=4\text{m}$

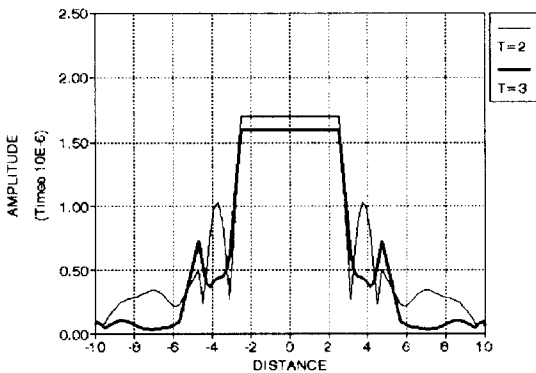


그림 24. 방진구 깊이에 따른 Amplitude  
 $f=50\text{Hz}, L=4.2\text{m}, B=0.4\text{m}$

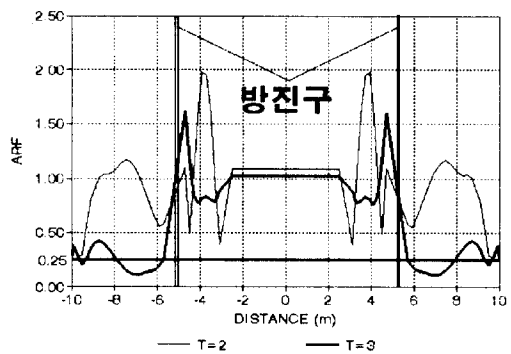


그림 27. ARF :  $f=50\text{Hz}, L=5.2\text{m}, B=0.4\text{m}$

동차단효과를 검토하였다. 5Hz진동의 경우(그림 22, 23) 표면과 파장의 약 0.6배에 해당하는 20m의 깊이가 충분한 차단효과를 보였으나, 50Hz진동의 경우(그림 24, 25)에는 0.87배에 해당하는 0m에서야 충분한 효과를 보였다.(그림25)

3.3.3 진폭감소계수(ARF)에 의한 진동감쇠효과 표시

여기서는 방진구의 진폭감소효과를 다음과 같이 정의되는 진폭감소계수(ARF)값으로 표시하였다.

$$ARF = \frac{\text{방진구가 있는 경우의 진폭}}{\text{방진구가 없는 경우의 진폭}}$$

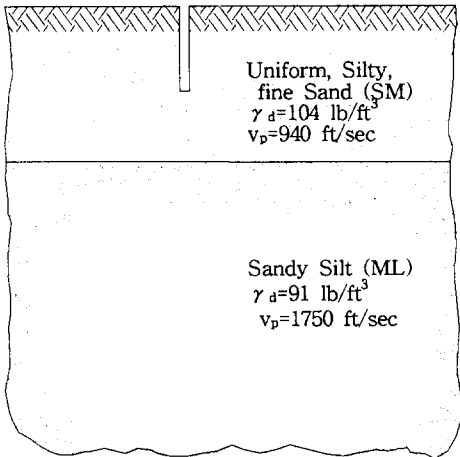


그림 28. 3차원 모델의 지반 조건 및 실험 모델

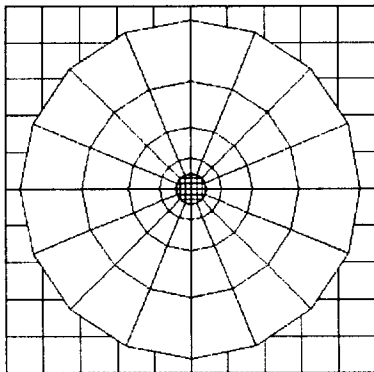


그림 29. 3차원 능동차단 모델

앞에서 구해진 최적위치(5Hz : 15m, 50Hz : 5.2m)에서 방진구의 깊이 T에 따른 ARF값을 비교하여, 각각 그림 26과 그림 27에 나타내었다. 참고 문헌[4]에 따르면  $ARF=0.25$ 이하가 충분한 차단효과를 의미한다.

3.4 3차원 예제

3차원의 문제로 그림 28의 층진 지반에 대해 검토하였고, 전산모델이 그림 29에 나타나 있다. 지표면은 원상의 모양으로 분할되었으며, 지층의 경계는 사각형요소로 의해 분할되었고, 2차원문제의 경우처럼 균등요소로 계산되었다.

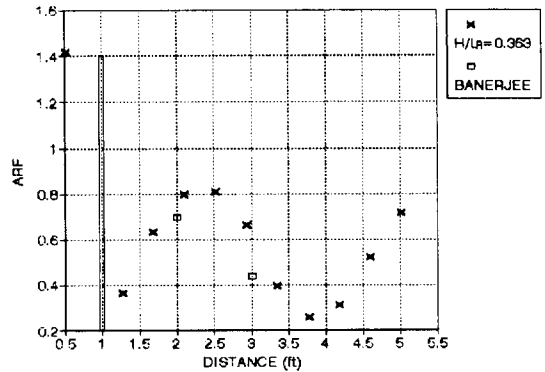


그림 30. 방진구의 깊이가 0.5ft에서의 결과

$$H / L_R = 0.363, f = 250\text{Hz}$$

H : 방진구깊이,  $L_R$  : R과 파장, f : 진동수

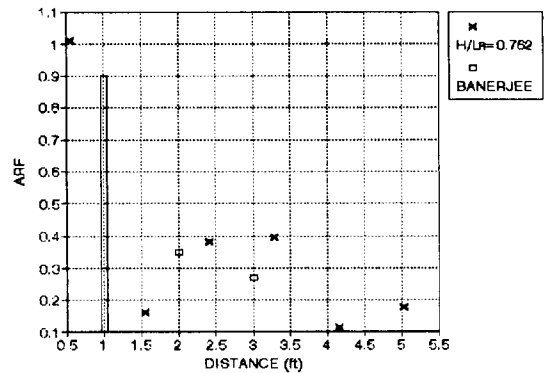


그림 31. 방진구의 깊이가 1.0ft에서의 결과 :

$$H / L_R = 0.762, f = 250\text{Hz}$$

H : 방진구깊이,  $L_R$  : R과 파장, f : 진동수



3.4.1 능동차단

3차원문제로의 방진구의 차단효과가 주파수 30Hz에 대해 참고문헌[5]의 값과 함께 ARF값으로 그림 30과 그림 31에서 좋은 비교를 보인다.

3.4.2 수동차단

250Hz의 진동에 대한 길이 6ft 방진구의 수동차단효과가 그림 32에 참고문헌[4, 5]의 값들과 함께 표시되어, 충분한 차진효과를 보이나, 그림 33의 3ft 길이의 방진구는 방진구의 바로 뒤에서만 ARF=0.25이하이며, 멀어질수록 급격히 증가하는 경향을 보이고 있다.

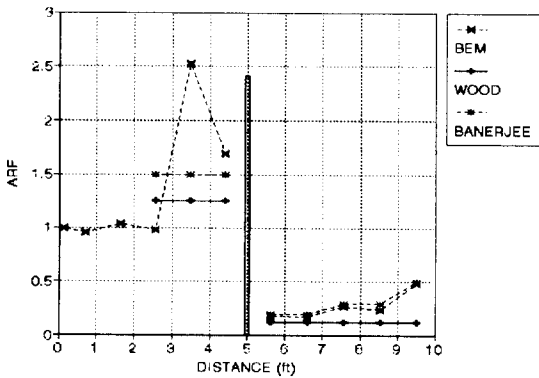


그림 32. Passive isolation (L=6ft)

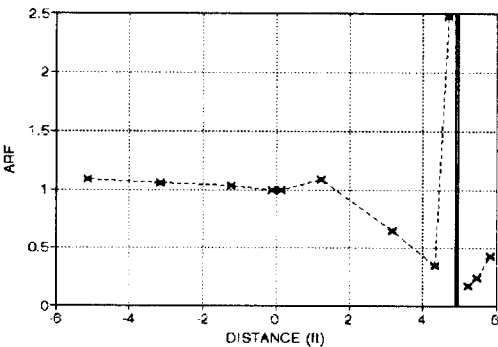


그림 33. Passive isolation (L=3ft)

3.5 강제방진구의 차단효과

방진구벽의 강성이 진동차단효과에 미치는 영향을 알아 보기 위해, 강체로 가정된 방진벽에 의한 차단효과를 구하였다. 그림 34의 계산결과는 방진구와 거의 같은 정도의 효과를 보여, 이는 검토된 주파수에 대해 방진구벽의 자립이 어려운 경우 방진벽의 사용이 가능한 것을 보인다.

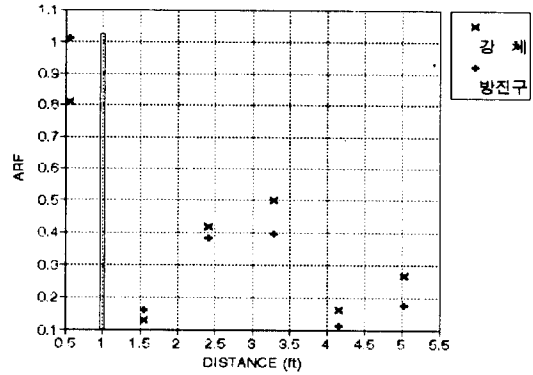


그림 34. 방진구와 방진벽의 진동차단효과 비교  
f=300Hz, T=1ft, B=0.25ft, R<sub>0</sub>=1ft

4. 결 론

앞에서의 계산결과들에 의해 다음과 같은 결론을 얻었다.

-효율적인 진동차단을 위한 진동원으로 부터 방진구까지의 거리는 진동주파수에 따라 달리 결정되어야 한다.

-방진구의 최적 깊이도 진동주파수와 연관성이 없어, 각 주파수에 대해 따로 검토되어야 한다.

이외에 방진구폭에 따른 진동차단효과도 검토하였으나, 일반적으로 알려져 있듯이 방진구의 폭은 진동차단효과에 미치는 영향은 적었다.

감사의 글

본 연구는 1993년도 한국학술진흥재단의 자유공모과제 연구비에 의하여 지원되었으며 이에 감사의 뜻을 표합니다.

參 考 文 獻

1. P. K. Banerjee and R. Bufferfield(1981),

- Boundary Element Method in Engineering Science*, McGraw-hill Book Co.
2. V. Chang Lang(1974), *Dynamic Response of Structures in Layered Soil*, Research Report R74-10, M.I.T.
  3. “소음·진동 대책핸드북”(1983), 일본음향 재료 협회.
  4. F. E. Richart, R. D. Woods and J. R. Hall (1970), *Vibrations of Soils and Foundations*, Prentice-Hall.
  5. P. K. Banerjee, S. Ahmad and K. Chen(1988), “Advanced Application of BEM to Wave Barrier in Multi-layered Three-dimensional Soil Media”, *Earthquake Engng. & Struct. Dyn.*, Vol. 16, 1041-1060.

(접수일자 1994. 10. 21)