

방진벽에 의한 진동 환경 개선 연구

A Study on the Improvement of Vibration Environment by Wave Barrier

허 영*
Huh, Young

국문요약

대부분의 경우 지반을 통해 전달되는 진동을 줄이기 위해 사용되는 방진벽의 차진효율은 지반 위 한 점에서의 진폭저감계수로 표현되고 있다. 그러나 한 점에서의 진동차단 효율은 일정 지역의 평균값과 많은 차이를 보이고 있어, 일정 단지의 진동환경 개선이 요구되는 경우, 한 점에서의 값만으로 차진효율을 표현하는 것은 적합하지 않다. 이를 위해 본 논문에서는 단지 내 진동환경 개선의 판단방법을 제시하고, 방진벽의 기하학적 규모가 방진벽의 진동차단 효율에 미치는 영향을 경계요소법을 이용하여 구하였다. 해석결과에 의하면 강성 방진벽의 경우, 단면적이 방진벽의 차진성능에 큰 영향을 미치는 것으로 나타났다.

주요어 : 경계요소법, 진동환경 개선, 방진벽, 평균진폭감소계수

ABSTRACT

The vibration isolation effect of a wave barrier, which is used to reduce the vibration propagated through the ground, is usually expressed in terms of an amplitude reduction factor at one point of the ground surface. The vibration isolation effects at selected points show a large variation depending on the location. This means that it is improper to express the vibration isolation effect with the value at some points only, if it is required to improve the vibration environment in a certain area. For this purpose, this thesis presented how to evaluate and judge the improvement of vibration isolation of a wave barrier in a certain area, and calculated the effect of a geometric size of a wave barrier on the vibration isolation, using the boundary element method. The results of this analysis showed that in the case of a stiff barrier the sectional area has a large influence on its vibration isolation effect in short distances as well as in long distances.

Key words : boundary element method, improvement of vibration environment, wave barrier, mean vibration reduction factor

1. 서 론

외부로부터 전달되어 오는 진동의 크기를 감소시켜, 일정 지역 내의 진동환경을 개선하기 위해서는, 일반적으로 진동원에서 발생하는 진동을 감소시키는 방법이 가장 효율적이며 경제적이다. 그러나 진동원의 크기가 크거나, 발생 진동을 줄이기 위한 진동원의 개선이 불가능한 경우에는 어쩔 수 없이 수진점 또는 진동전파

경로에서의 진동감쇠 방법을 선택할 수밖에 없다. 본 논문은 이 중 진동전파 경로에서의 진동차단 방법인 방진벽의 사용에 관한 것으로, 방진벽은 방진벽 내부의 채움재의 유무에 따라 방진구와 방진벽으로 구분되며, 채움재의 강성에 따라 연성 또는 강성방진벽으로 구분된다. 본 논문에서는 강성 및 연성 방진벽에 의한 진동차단성능을 구하였다.

방진벽에 의한 진동환경 개선 효과의 정도를 나타내기 위해서는 특정 점에서의 개선 효과를 사용하거나, 일정 지역에서의 평균개념에 의한 진동차단성능의 표현이 가능하다. 전자의 경우

* 정회원 · 수원대학교 토목공학과 부교수
본 논문에 대한 토의를 2001년 2월 28일까지 학회로 보내 주시면 그 결과를 게재하겠습니다.

인, 한 점에서의 표현은 지역 내 어느 위치의 점을 선택하는가에 따라 개선효과의 차이가 많아^{(1),(2)}, 해당 지역의 환경개선 효과를 대변 할 수 없는 경우가 많다. 본 논문에서는 이차원 지반모델에서, 일정 구간에서의 평균개념의 표현을 사용한 단지 내 진동환경의 개선효과를 구하였다.

2. 경계요소법에 의한 지반 내부점의 변위 해석

본 논문에서 사용된 경계요소법 이론은 여러 참고문헌⁽³⁾⁻⁽⁵⁾에 나와 있으므로, 여기에서는 직접법(direct formulation)에 의한 경계요소법의 간단한 정리와 함께, 이로부터 지반 내부 점의 변위를 구하는 해석단계를 설명하면 아래와 같다.

혼합 경계조건이 주어진 경우, 경계조건은 식 (2)에서와 같이 해석구간 영역의 전체 경계면 Γ 를 구성하는 부분 구역 $\Gamma_1, \Gamma_2, \Gamma_3$ 에 대해 아래와 같이 표현할 수 있다.

$$\begin{aligned} \Gamma_1 \text{에서 } u_i &= \bar{u}_i, \Gamma_2 \text{에서 } t_i = \bar{t}_i, \\ \Gamma_3 \text{에서 } u_i &= t_i = \bar{0} \end{aligned} \quad (1)$$

$$\Gamma = \Gamma_1 \cup \Gamma_2 \cup \Gamma_3 \quad (2)$$

여기서 u 와 t 는 각각 변위와 응력(traction)이며, “ $\bar{\quad}$ ”는 기지의 값을 의미한다.

경계적분식의 유도를 위해 베타의 정리를 이용하면, Γ_1 와 Γ_2 에서의 두 가지 경계조건에 대해 각각의 영향계수 T^* 과 U^* 에 의해 다음과 같은 적분식의 작성이 가능하다.

$$\begin{aligned} u_j(x^\alpha) &= - \int_{\Gamma_1} T_{jk}^* \bar{u}_i d\Gamma - \int_{\Gamma_2} T_{jk}^* u_i d\Gamma \\ &+ \int_{\Gamma_1} t_i U_{jk}^* d\Gamma + \int_{\Gamma_1} \bar{t}_i U_{jk}^* d\Gamma + \int_B p_i U_{jk}^* dB \end{aligned} \quad (3)$$

식 (3)에서 p 는 체적력으로, 체적력을 고려하지 않는 경우 $p_i = 0$ 이 되고, 식 (3)에서 Γ_1 와 Γ_2 구간의 적분항을 각각 정리하면, 식 (4)와 같이 쓸 수 있다.

$$\begin{aligned} u_j(x^\alpha) &= \int_{\Gamma_1} (t_i U_{jk}^* - T_{jk}^* \bar{u}_i) d\Gamma \\ &+ \int_{\Gamma_2} (\bar{t}_i U_{jk}^* - T_{jk}^* u_i) d\Gamma \end{aligned} \quad (4)$$

식 (4)의 대수화에 의해 행렬식의 형태로 간략화된 표현⁽⁶⁾은 아래의 식 (5)와 같으며, T 와 U 는 식 (3)의 영향계수 T^* 과 U^* 에 의해 만들어지는 영향행렬이다.

$$Tu = Ut \quad (5)$$

지반 내부점 x^α 의 변위를 구하기 위해, 먼저 지표상의 점들에 대해 식 (5)로부터, 미지의 변위 및 응력을 각각 구한 후, 이 결과를 이용하여 지반 내부점 x^α 의 변위를 구할 수 있는 식은 아래와 같다.

$$u_j(x^\alpha) = U_{jk}^* t_k - T_{jk}^* u_k \quad (6)$$

식 (6)에서 u_k 와 t_k 는 지반의 경계면인 지표면에 존재하는 절점 k 에서의 값들로, 이 절점들과 지반 내부에 존재하는 점인 $u_j(x^\alpha)$ 점 간의 영향행렬인 U_{jk}^* 와 T_{jk}^* 를 구하여, 전 단계로 구해진 u_k 와 t_k 의 값을 사용하면, 구하고자 하는 지반 내부에 존재하는 점인, 지표로부터 거리 x^α 에 위치하는 점의 변위 $u_j(x^\alpha)$ 를 구할 수 있다.

본 논문에서 사용된 경계요소법에 의한 해석 결과는 참고문헌 7과 8에서 그 정확성이 검증되어 있다.

3. 진동 차단 성능 판정을 위한 표현 방법

지반 진동의 차단이란 방진벽에 의해 지반을 통해 전달되는 진동의 진폭을 감소시키는 것으로, 방진벽의 진동 차단성능을 나타내기 위하여는 다음과 같은 여러 가지 방법이 사용될 수 있다.

3.1 진폭감소계수 $D^{(1)-(3)}$

전달율이라고도 표현되는 진폭감소계수는 해당 지역내의 한 점 p 에서, 진동 차단구조가 있

는 경우의 진폭 A^s 와 없는 경우의 진폭 A^o 의 비로, 식 (7)로 정의된다.

$$D(p) = A^s(p) / A^o(p) \quad (7)$$

전달되어온 진동의 완전 차단으로 인해, 방진벽 후면에 존재하는 점의 진폭이 0이 되는 경우, 전달율도 역시 0이 되며, 방진벽이 점 p 의 변위 변화에 전혀 영향을 미치지 못하면 전달율은 1이 된다. 참고로 진동원과 방진벽 사이에서는 진폭감소계수가 1보다 큰 경우도 발생한다.

3.2 차진효율 $W^{(1)-(3)}$

차진효율은 점 p 에서 진폭 감소량의 방진벽이 없는 경우의 진폭에 대한 비율을 의미하며 식 (8)과 같이 쓸 수 있다.

$$W(p) = [1 - D(p)] \quad (8)$$

3.3 평균진폭감소계수 D_M 또는 평균차진효율 W_M

방진벽의 진동차단 성능을 나타내기 위해 진폭감소계수 D 또는 차진효율 W 를 사용하는 경우, 두 식은 모두 한 점에서의 진동차단 성능을 나타내는 것으로, 한 점에서의 진동차단 효율은 단지 내 진동환경 개선을 나타내기 위한 대표값이 되지 못하는 경우가 많다. 따라서 아래의 식과 같이 단지 내 여러 점에서의 진폭감소계수 또는 차진효율의 평균값을 구해 방진벽의 단지 내 차진성능을 평균진폭감소계수 D_M 또는 평균차진효율 W_M 로 표현할 수 있다.

$$D_M = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m D_i \quad (9a)$$

$$W_M = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m W_i \quad (9b)$$

여기서 m 은 편균차진성능 또는 평균차진효율 산정에 사용된 점들의 수이다.

3.4 진동의 지반 내 분포를 고려한 평균 차단효율 D_r

지반진동의 크기는 지표면에서 뿐 아니라 지반의 깊이 증가에 따라서도 변화한다. 진동원이 지표면 상 또는 지표에 가깝게 존재하고, 암반층과 같은 지반 내부에서의 진동의 굴절, 반사 등의 영향이 적은 경우, 깊이에 따른 진폭의 변화를 고려하여 방진구조의 진동차단 성능을 표현하는 것이 적합할 수 있으며, 특히 표면과가 우세한 경우가 이에 해당된다.

이를 위해, 앞에서 언급된 평균 진폭감소계수 D_M 과 동일한 개념의 값인 식 (10)에 의한 D_r 값을 사용할 수 있으며, D_r 은 방진구조의 뒤, 일정 영역에서의 진폭감소계수의 지표 및 깊이에서의 진동크기의 평균값을 나타내는 것으로, 수직방향으로도 평균을 구한 이유는 진동의 수직방향으로의 변화를 고려하기 위해서이다.

$$D_r = \frac{1}{(j-i) \cdot k} \sum_{m=i}^j \sum_{n=1}^k D_{mn}(\xi) d\xi \quad (10)$$

식 (10)에서의 n 은 깊이에 따른 진폭감소의 평균값을 구하기 위한 지반내에 분포된 점들로, 어느 깊이의 점들을 택하는가 하는 것은, 구조물 기초의 깊이 즉, 구조물의 진동에 영향을 미치는 깊이가 어디인가에 따라 달라지는 것으로, 현장 여건에 따라 달라질 수 있다. 또한 m 은 진동원으로부터 거리에 따른 진폭의 변화를 구하기 위한 점들로, 식 (10)을 사용하여 진동의 해당 지역 내, 거리 및 깊이에 따른 진폭감소계수의 평균적 크기를 구할 수 있다.

차진효율도 동일한 개념에 의해 진폭의 지반 내 변화를 고려한 차진효율 W_r 를 구할 수 있으며, 본 논문에서는 D_r 을 사용하여 방진벽의 차진성능을 나타내었다.

4. 수치해석

4.1 근거리에서의 방진성능 해석

4.1.1 지반해석 모델

본 논문에서는 반무한영역으로 가정된 지반에서 방진벽의 진동차단 성능 변화를 구하였다.

반무한영역 지반이란 물성치가 깊이에 따라 변하지 않는 지반을 의미하는 것으로, 이는 실제에는 존재하지 않는 경우이다. 그러나 지반의 실제 구성형태와 똑같은 해석모델을 만드는 것은 불가능하며, 많은 경우 지반을 반무한 영역으로 가정하여 구한 지반진동의 전파 형태가 실제의 경우에 비해 공학적으로 사용 가능한 오차범위 내에 들기 때문에, 이러한 가정을 사용한 해석 결과는 중요한 의미를 갖는다. 그러나 지반의 물성치 변화가 심하여, 반무한 영역의 가정에 의한 지반 해석모델의 사용이 불가능한 경우, 지반을 층진 구조로 이상화하여 해석한다.

방진구조의 차진 성능에 영향을 미치는 기하학적 인자들은 방진벽의 폭과 깊이, 방진구조의 설치 깊이, 방진구조 벽의 경사 정도, 방진벽 단면의 형상(폭과 높이의 관계), 방진벽의 배치 및 진동원으로부터의 거리 등으로, 이러한 여러 영향인자 중, 방진구조 설치 깊이의 경우, 대부분 지표와 방진구조 상부의 높이가 같게 설치되며, 시공 상의 간편성으로 인해 사각형 단면의 방진구조가 사용된다. 따라서 본 논문에서는 실무적으로 보다 중요한 영향인자인 방진구조의 폭과 깊이가 차진성능의 변화에 미치는 영향을 알기 위해 사각형 단면의 방진벽에 의한 진동 차단 성능을 구하기 위한 해석을 수행하였다.

방진벽의 폭 B 와 깊이 T 는 식 (11a)에서와 같이 표면파의 파장인 λ_R 에 의해 무차원의 비례 값 b 와 t 로 표시하였으며, 해석 주파수 식 (11b)에 표현된 방법으로 구해진 무차원 주파수 $a_0 = 0.25$ 에 대해 수행되었다. 여기서 w 는 진동기초의 1/2 폭이며 v_s 는 지반의 전단파 전파속도이고, f 는 진동주파수이다. 또한 해석결과와 효율적인 표현을 위해, 해석에 사용된 값들은 동일한 방법에 의해 무차원 값으로 표현되었다.

$$b = B/\lambda_R, \quad t = T/\lambda_R \quad (11a)$$

$$a_0 = \frac{v_s}{2\pi f w} \quad (11b)$$

그림 1의 해석모델에서 b 와 t 는 각각 방진벽의 폭과 깊이이며, 해석에 수행된 b 와 t 의 범위는 $b = 0.1 \sim 1.2$, $t = 0.1 \sim 2.0$ 로, 실무에서 나타나는 대부분 방진벽의 규모는 이 범위 내에 들 것으로 판단된다. 또한 진동원의 왼쪽의 모델 길이를 L_l , 진동원과 방진벽 중심까지의 길이를 d , 방진벽 이후의 모델 길이를 L_r 로 각각 표시하였으며, L_l 과 L_r 의 길이는 해석에 의한 사전조사에 의해 지반변위의 변화를 나타내지 않는 최소길이인 $2\lambda_R$ 로 정하였으며, d 의 경우, 각각의 해석 목적을 위해 그 범위를 정하였다. 또한 요소의 길이가 해석결과에 미치는 영향을 최소화하고, 모델의 크기를 가능한데로 크게 하기 위해, 해석시 사전 해석을 수행하여 해석결과에 영향을 미치지 않는 요소의 크기를 구해, 하나의 파장을 6 내지 10개의 요소로 분할하였다.

또한 해석에 사용된 지반은 사질토에 해당하는 것으로, 해석에 사용된 물성치는 밀도 $\gamma_s = 17.2 \text{ kN/m}^3$, 포아손비 $\nu_s = 0.25$, 탄성계수 $E_s = 46.12 \text{ MN/m}^2$ 이다.

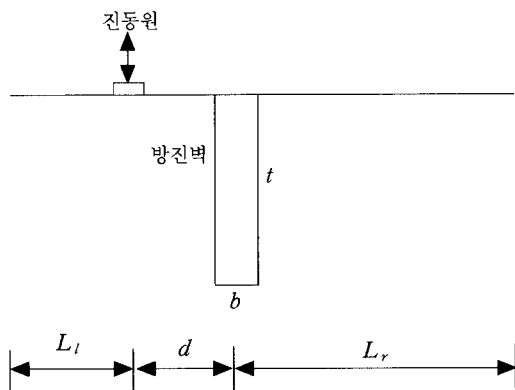


그림 1 해석모델

4.1.2 해석결과

진동원인 진동기초의 근거리 영역에서는 기초로부터 주위로 퍼져나가는 실체파가 지배적이다. 그러므로 진동의 위상차는 깊이에 따라 차이가 나고 경우에 따라서는 역위상이 된다. 이에 따라 방진벽의 강도가 큰 경우, 깊이에 관

계없이 동일한 위상의 거동을 하는 방진벽에 의해 진동은 서로 상쇄되며 이의 결과로 진폭의 감소 현상이 나타난다. 따라서 진동기초로부터 근거리에서 설치된 방진벽에서는 방진벽의 강도가 방진벽의 차진성능에 큰 영향을 미칠 것으로 예측할 수 있다. 이를 증명하기 위해, 강도가 큰 강성 채움재가 사용된 방진벽과 강도가 작은 연성 채움재로 만들어진 방진벽에 대한 차진성능을 알아보기 위한 해석을 수행하였다.

이를 위해 진동원인 기초의 중심으로부터 방진구조의 기초 쪽 앞면까지의 거리를 앞에서와 같이 파장 λ_R 로 나누어 얻어지는 무차원 이격거리 d 를 $d=0.2\sim 3.8$ 의 범위에서 방진벽의 무차원 폭 $b=0.1, 0.2$ 의 두 경우에 대해 무차원 깊이 $t=0.5, 1.0, 1.5, 1.83$ 에서의 방진벽의 차진성능을 구하기 위한 해석을 수행하였다.

1) 강성 방진벽

강성 방진벽은 콘크리트 정도의 강성을 갖는 것으로 가정하였으며, 해석을 위해 직접 입력값으로 사용되는 전단파의 전파속도는 지반과 방진벽에 대해 각기 지반의 전단파 전파속도 v_s 는 $v_s \approx 250 \text{ m/sec}$, 방진벽의 전단파 전파속도 v_k 는 $v_k \approx 1,250 \text{ m/sec}$ 의 크기를 갖는다. 여기서 아래첨자 k 는 방진벽을 의미하고 s 는 지반의 값을 나타내며, 지반 및 방진벽의 전단파 전파속도의 비 v_k/v_s 는 5.0이 된다.

방진벽의 차진성능을 표현하기 위해, 깊이에 따른 진폭의 변화를 고려할 수 있는 표현방법인 식 (10)의 D_r 을 사용하였으며, 지반 내의 값으로는 지표, 지표에서 $0.1 \lambda_R$ 깊이, 지표에서 $0.2 \lambda_R$ 깊이에서의 진폭감소계수를 구하였고, 방진구조 뒤 $0.2 \lambda_R$ 로부터 $3.8 \lambda_R$ 의 범위에서 해석을 수행하여 그 결과를 깊이 t 별로 이격거리 d 에 대해, 폭 $b=0.1$ 에서의 결과는 그림 2에, 폭 $b=0.2$ 에서의 결과는 그림 3에 나타내었다.

이 결과에 의하면 D_r 은 방진벽이 진동기초로부터 가장 가깝게 설치된 경우인 $d=0.2$ 에서 가장 작은 값을 나타내었으며, t 가 커짐에 따라

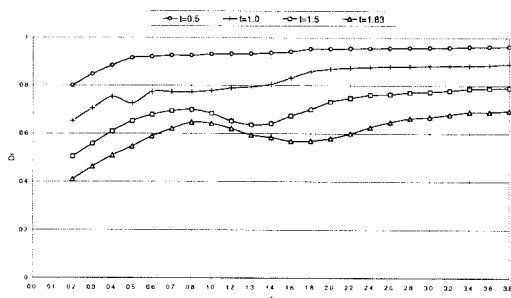


그림 2 방진벽 이격거리에 따른 차진성능 변화 ($v_k/v_s=5.0$) $b=0.1 : t = 0.5, 1.0, 1.5, 1.83$

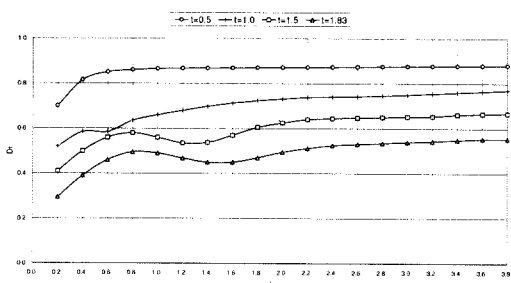


그림 3 방진벽 이격거리에 따른 차진성능 변화 ($v_k/v_s=5.0$) $b=0.2 : t = 0.5, 1.0, 1.5, 1.83$

서는 더 큰 차이로 감소하였다. 그림 2와 그림 3을 비교하면, 비교적 넓은 폭의 방진벽인 그림 3의 경우가 비교적 좁은 폭의 방진벽인 그림 2의 경우보다 우수한 차진성능을 나타내고 있다. 또한 d 가 증가하는 경우, 해석결과인 차단성능 D_r 은 원거리 영역에서의 값으로 판단할 수 있는 일정한 크기의 값에 접근하고 있다. 진동원 인근에서는 실제파가 우세하던 것이 일정거리 이후에는 표면파가 우세하고, 표면파는 지표면을 따라 전파되어, 실제파에 비해 거리감쇠량이 작은 것을 감안하여, 본 논문에서는 이러한 차단성능이 일정값에 수렴되는 크기를 방진벽의 원거리에서의 진동 차단성능으로 정의하고, 다음 절에서 보다 상세한 검토를 수행하였다.

깊이가 가장 작은 경우의 방진벽인 $t=0.5$ 에서는 진동기초 인근에서 바로 원거리 진동차단성능에 접근하고 있다. 즉, 진동기초로 조금만 떨어져도 거리에 관계없이 거의 동일한 차진성능이 나타나고 있다.

또한 D_r 은 d 가 커짐에 따라 연속적으로 원거리 차단성능에 접근하는 것이 아니라, 중간에서 극소값을 나타내는 점이 존재하며, 이 점은 t 가 커질수록 방진벽으로부터 먼 지점에서 나타났다. $b=0.1$ 인 방진벽에서 이러한 현상은 더 두드러지게 나타났으며, 이는 b 가 큰 경우보다 b 가 작은 경우가 자유장에서의 변위장과 더 유사하기 때문으로, 이러한 현상은 파의 간섭에 의한 것으로 판단된다.

그림 4에는 방진벽의 깊이별로 기초의 중심으로부터 극소값이 나타나는 지점까지의 거리를 나타낸 것으로, 대략 직선의 관계를 얻는다. 이러한 관계는 물론 본 논문에서 검토된 지반 및 방진벽 규모에 대한 결과이나, 다른 지반의 경우에도 이러한 해석을 통해 방진벽의 최적 설치 위치와 규모를 결정할 수 있을 것이다.

다음으로 방진벽의 폭과 깊이의 영향을 동시에 고려하기 위해, 방진벽의 단면적에 따른 차진성능의 변화를 구하였다. 이를 위해 해석결과를 아래와 같이 b 와 t 의 곱으로 만들어지는 새로운 변수 a 를 사용하였다.

$$a = b \cdot t = \frac{B \cdot T}{\lambda_R^2} \quad (12)$$

위의 식 (12)에서 알 수 있듯이 a 는 방진벽 단면적의 무차원 표현으로, 이와 같이 구해진 차진성능 D_r 을 무차원 단면적의 방진벽 설치 거리에 대한 비례값인 a/d 에 대해 그림 5에 나타내었다. 그림 5를 보면 모든 결과는 일정한

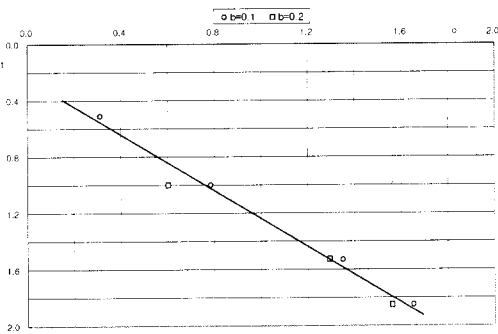


그림 4 방진벽 깊이 t 에 따른 극소변위 위치

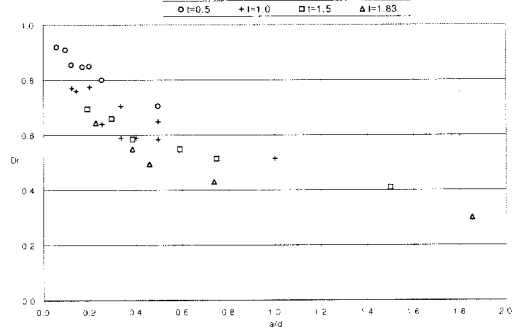


그림 5 방진벽의 차진성능과 비례단면적 a/d 의 관계 ($v_k/v_s=5.0$)

피 안에 포함되어 있다. 이 결과에 따르면 방진벽의 폭과 깊이가 달라도 단면적이 같으면 유사한 방진성능을 나타내는 것을 알 수 있다.

2) 연성 방진벽

여기에서는 지반보다 강성이 작은 재료로 만들어진 연성 방진벽의 차진성능과, 진동원으로부터 방진벽 설치거리까지의 거리 d 와의 관계를 알아보기 위해, 전단파 전파속도비 $v_k/v_s=0.5$ 에 대한 해석을 수행하였다.

b 와 t 는 앞에서의 강성 방진벽과 같은 값을 사용하였으며, 검토된 d 의 범위는 1.8까지로, 연성 방진벽의 차진성능이 충분하지 못하여 더 이상의 해석을 수행하지 아니하였다.

$b=0.1$ 과 0.2 인 경우의 해석결과를 각각 나타낸 그림 6과 그림 7을 보면 그림 2에서와는 달리 D_r 은 중간 부분에서 높게 분포되어있고 방진 구조가 기초에 접근할 때, 앞에서와는 달리 D_r 이 증가했다. 이는 반무한영역으로 경사지게 퍼져나가는 실체파가 약한 재료를 만나 일부가 다시 지표로 전달되어 이에 의해 표면파가 증가되는데 기인하는 현상일 것으로 판단된다. 따라서 진동 차단의 목적을 위해 지반의 강성보다 작은 강성을 갖는 방진벽의 사용은 적절하지 못한 것으로 판단된다. 그러나 연성재료의 감쇠성능과 같은 다른 동적 특성을 변화시켜 채움재로 사용하는 것에 관한 연구는 필요할 것이며, 연성의 극한치인, 강성이 0인 경우에 해

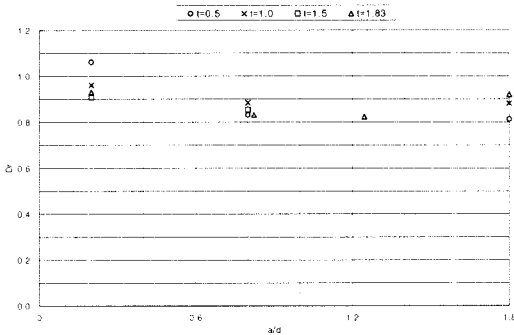


그림 6 방진벽 깊이에 따른 차진성능 변화 ($v_k/v_s=0.5$) : $b=0.1$

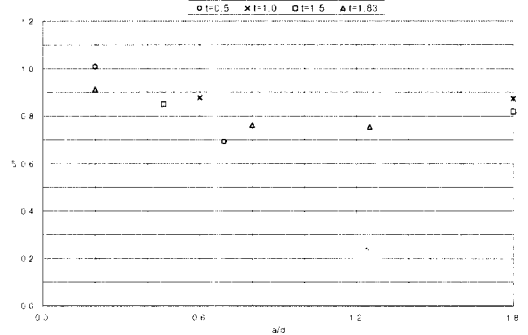


그림 7 방진벽 깊이에 따른 차진성능 변화 ($v_k/v_s=0.5$) : $b=0.2$

당되는 방진구는 방진구를 통한 진동 에너지의 전달이 완전 차단되는, 전혀 다른 진동에너지 전달 현상에 해당되는 것임으로 별도의 문제로 취급되어야 할 것이다.

4.2 원거리에서의 방진성능 해석

진동원으로부터 방진벽까지의 거리를 변화시켜 가면서 구한 4.1절의 해석결과로부터, 진동원으로부터 방진벽 설치위치까지의 거리가 어느 정도 이상 증가하면 방진벽의 차진성능은 더 이상 변하지 않는 것으로 밝혀졌다. 여기에서는 이러한 거리를 원거리라고 정의하고, 원거리에 설치된 방진벽의 차진성능의 경향을 구하기 위한 해석을 수행하였다.

4.2.1 강성방진벽

여기에서는 근거리에서의 차진성능을 구하기 위해 사용된 강성방진벽과 같은 채움재를 사용

한 방진벽이 원거리에 설치된 경우의 차진성능을 구하였다. 지표 상의 거리 및 깊이에 따른 진폭의 변화를 구하는 식 (10)을 이용하여 평균 차단효율 D_r 을 나타내었다. 먼저 방진벽의 무차원 폭 b 의 변화에 따른 차진성능 D_r 을 방진벽의 깊이 변수 t 상에 나타낸 그림 8을 보면 다음과 같은 결론을 얻을 수 있다.

b 또는 t 의 증가에 따라 D_r 은 대부분 감소한다. b 가 큰 경우, t 의 증가에 따라 D_r 의 감소량은 커지나 일정 깊이 이하에서는 더 이상 증가하지 않는다. D_r 가 더 이상 증가하지 않는 깊이는 $b \geq 0.8$ 에 대해 $t \approx 1.0$ 이다. 더욱이 $b \geq 0.8$ 의 경우, $t \approx 1.5$ 이상에서는 D_r 이 더 이상 감소하지 않고 오히려 약간 증가하는 경향이 나타났다. 폭이 좁은 방진벽의 경우($b=0.1 \sim 0.4$), 방진벽의 깊이 $1.5 \lambda_R$ 에서도 충분한 방진효과가 나타나지 않았다.

그림 9에는 동일한 해석결과를 깊이 t 별로 폭 b 에 대해 나타내었다. $t \geq 0.8$ 인 경우를 깊은 방

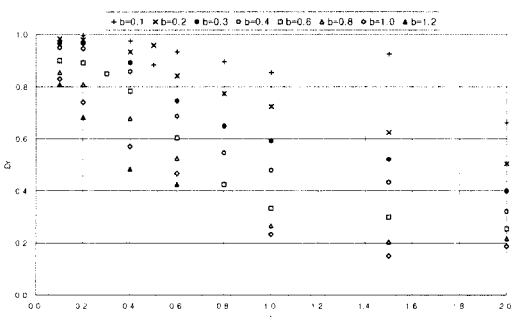


그림 8 방진벽 깊이에 따른 차진성능 변화 ($v_k/v_s=5.0$)

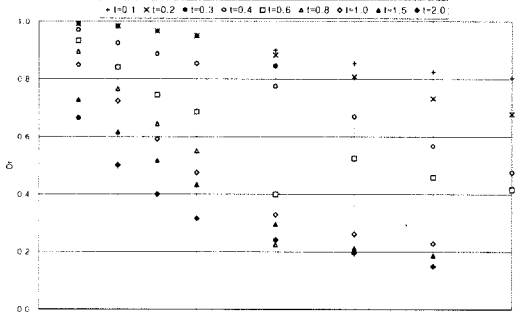


그림 9 방진벽 폭에 따른 차진성능 변화 ($v_k/v_s=5.0$)

진벽으로 본다면, 이때의 차진성능은 b 가 증가할 때와 유사한 경향을 나타냈다. 즉, b 의 증가에 따라 뚜렷한 방진성능의 증가를 보인다. 얇은 방진벽인 $t=0.1\sim 0.2$ 인 경우, 차진효과는 충분하지 않았다.

다음으로 방진벽의 폭과 깊이의 영향을 동시에 고려하기 위해, 근거리에서와 같이 방진벽의 단면적에 따른 차진성능을 알아 보았다. 여기에서는 앞에서와 같이 이격거리 d 로 나누어진 비례단면적 a/d 가 아닌 단면적 a 와만의 관계를 구하였다. 결과를 나타낸 그림 10을 보면 모든 결과는 근거리에 설치된 방진벽에서와 같이 일정한 d 안에 포함되어 있다. 이 결과에 따르면 방진벽의 폭과 깊이가 달라도 단면적이 같으면 유사한 차진성능을 나타내는 것을 알 수 있다. 결론적으로 반무한지반에서 원거리에 설치된 콘크리트 방진벽의 차진성능은 λ_R^2 으로 나누어져 무차원으로 표시된 단면적의 크기에 주로 관계되는 것을 알 수 있다.

그러나 이 결과는 해석에 사용된 방진벽의 규모 범위 내에서 적용되는 것으로, 슈트파일과 같은 아주 얇은 방진벽과 같은 특수한 경우에는 별도의 연구가 수행되어야 할 것이다.

4.2.2 연성방진벽

여기에서는 지반보다 강성이 작은 채움재로 만들어진 방진벽의 차진성능을 구하였다. 이때의 방진벽과 지반의 전단파 전파속도비 v_k/v_s 는

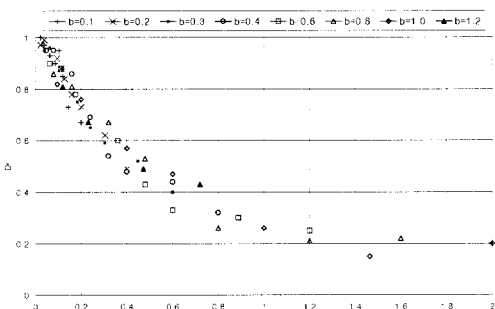


그림 10 방진벽의 차진성능과 무차원 단면적 a 의 관계 ($v_k/v_s=5.0$)

0.5로, 지반보다 작은 강성을 갖는 방진벽에서는 지반보다 작은 강성으로 인해 지반보다 큰 강성을 갖는 방진벽과는 상이한 차진기능을 갖는다. 이 때의 차진기능은 방진벽 전·후에서의 파의 반사에 의해서 주로 발생되어 방진벽의 폭은 방진벽의 차진성능에 큰 영향을 미치지 못할 것으로 예측할 수 있다. 이러한 연성이 작은 방진벽의 차진성능을 나타낸 그림 11에는 그러한 이유로 인해 차진성능 D_r 의 분포가 상당히 불량하게 나타나 있어, 강성이 지반의 것보다 작은 방진벽은 근거리에서와 같이 원거리에서도 역시 사용할 수 없을 것으로 판단된다.

4.2.3 초강성방진벽

강성이 극단적으로 큰 방진벽의 차진성능을 구하기 위해, 방진벽과 지반의 전단파 전파속도의 비 v_k/v_s 가 20.0인 경우의 해석을 수행하여 그 결과를 그림 12에 나타내었다. 이 결과를 보면, $v_k/v_s=5.0$ 에서의 차진성능을 나타낸 그림 10과 비교해 차진성능의 무차원 단면적에 대한 변화 경향이 서로 유사한 특징을 나타내는 것을 알 수 있다. 즉, $v_k/v_s=20.0$ 에서의 차진성능은 $v_k/v_s=5.0$ 의 경우에 비해 약간 낮은 범위에 분포되어 있으나, 전반적으로 유사한 크기의 차진성능을 나타내고 있다. 이로부터 $v_k/v_s=5.0$ 보다 더 강한 채움재를 사용하여도 방진성능의 증가는 크게 변하지 않는 것으로 판단할 수 있어, $v_k/v_s=5.0$ 에 해당하는 채움재인 콘크리트 이상의 강도를

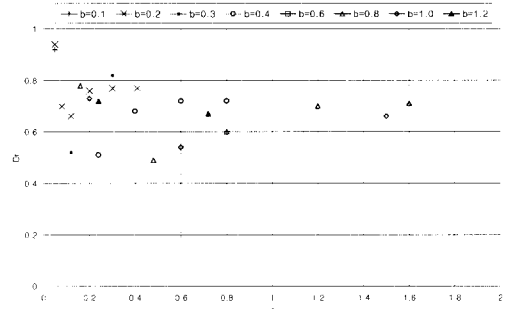


그림 11 방진벽의 차진성능과 무차원 단면적 a 의 관계 ($v_k/v_s=5.0$)

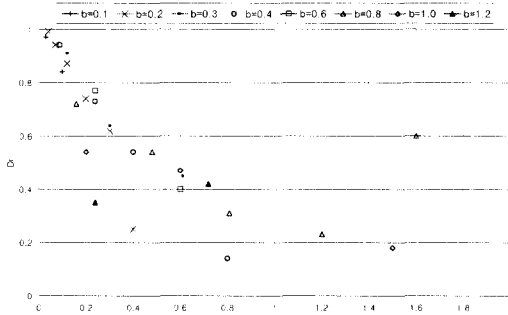


그림 12 방진벽의 차진성능과 무차원 단면적 a 의 관계($v_k/v_g=20.0$)

갖는 방진벽의 설치는 큰 의미가 없음을 알 수 있다.

5. 결 론

본 논문에서는 경계요소법을 사용하여, 방진벽의 차진성능을 구하고, 이를 이용하여 일정 지역내의 진동환경 개선을 위한 표현법을 제시하였다. 수행된 해석 결과의 분석을 통해 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 방진벽의 진동 차단성능은 방진벽의 깊이 뿐 아니라 폭에도 영향을 받으며, 방진벽의 단면적을 사용하면 더 정확한 진동차단 경향을 얻을 수 있다.
- 2) 방진벽 재료의 파전파속도가 지반의 파전파속도보다 5배 이상에서는 방진벽의 차진성능의 증가는 미미했다. 이것은 해석에 사용된 대개 사질토에 해당하는 지반의 경우, 콘크리트 이상의 강도를 갖는 방진벽을 사용할 필요가 없는 것을 의미한다.
- 3) 해석된 결과 중, 방진벽이 진동원에 가장 가깝게 설치된 경우가, 가장 우수한 차진성능을 보였으나, 이 보다 먼거리에서도 차진성능의 극소값을 나타내는 위치가 존재하며, 이 위치는 방진벽의 깊이에 따라 진동원으로부터 먼 거리에서 나타났다. 따라서 현장의 여건을 고려하여 방진벽 설치의 최적 위치를

구할 필요가 있는 것으로 판단된다.

또한 본 논문에서 사용된 선형 가정에 의해, 여기에서의 결과는 반무한영역의 가정이 가능한 지반에서는 다른 주파수 범위에 대해서도 대체로 유사한 경향을 보일 것으로 판단되나, 지반의 층 구성이 보다 복잡한 경우와 함께 다른 주파수 범위에 대해서도 계속적인 연구가 수행되어야 할 것이다.

참 고 문 헌

1. Richart, F. E., Hall, J. R., and Woods, R. D., *Vibrations of Soils and Foundations*, Prentice-Hall, 1970, p. 414.
2. Banerjee, P. K., Ahmad, S., and Chen, K., "Advanced application of bem to wave barrier in multi-layered three-dimensional soil media," *Earthquake Eng. and Struct. Dyn.*, Vol. 16, 1988, pp. 1041-1060.
3. Manolis and Beskos, *Boundary Element Methods in Elastodynamics*, Unwin Hyman, London, 1988, p. 282.
4. Hartmann, F., *Methode der Randelements*, Springer-Verlag, Berlin, 1987, p. 378.
5. Dominguez, J., *Boundary Elements in Dynamics*, CMP, Southampton Boston, 1993, p. 707.
6. Becker, A. A., *The Boundary Element Method in Engineering*, McGraw-Hill Book Co, 1992, p. 335.
7. Huh, Y. and Schmid, G., "Application of boundary elements to soil-structure interaction problems," *Engineering Analysis*, Vol. 1, No. 3, 1984, pp. 170-173.
8. Huh, Y. and Schmid, G., "Dynamische bauwerk-baugrund-wechselwirkung im frequenzbereich mit der randelementmethode," *Bauingenieur*, Vol. 63, 1988, pp. 125-131.