

동결지반 내 방진벽의 차진성능에 관한 연구

허 영¹⁾

A Study on the Vibration Isolation Effect of Wave Barrier in Frozen Soils

Huh, Young

Abstract. The stiff top layer in a soil profile, which can happen in winter, may change the isolation effect of the wave barrier. The research scope of this paper is the investigation of the propagation of surface waves in layered soil with a stiff layer on its top, and the isolation effect of the solid stiff wave barrier. The investigations have been performed numerically by the Boundary-Element Method as a two-dimensional problem. A strip foundation vibrated harmonically in vertical direction was considered as the vibration source. Three soil profiles, a homogeneous half-space, two profiles with different thickness of stiff top layer, with two different types of wave barriers were investigated. The profiles with a stiff top layer show considerable reductions of the amplitude of the vibration in comparison to the homogeneous soil profile. The layered soil profiles with a stiff top layer do not show wave propagation velocities as high as they are expected from the material properties. Furthermore the vibration amplitudes in a frozen soil are much smaller with distance than in a non-frozen soil.

Keywords : Wave propagation problem, Wave barrier, Boundary-Element Method, Frozen soil

초 록. 지반에서 겨울에 발생할 수 있는 단단한 상부층은 방진벽의 진동차단성능을 변화시킬 수 있다. 본 논문은 상부에 단단한 층이 존재하는 층진 지반(layered soil)에서 표면파의 진동전파와 강성 방진벽의 진동차단 성능에 관한 것이다. 연구는 이차원문제로서, 경계요소법을 이용한 수치해석적 방법에 의해 수행되었으며, 진동원은 수직방향으로 조화가 진을 받는 줄기초이다. 검토된 지반은 세 가지로, 균질의 반무한 지반과, 단단한 상부층의 두께를 달리하는 두 개의 지반이다. 단단한 상부층을 갖는 지반에서는 균질의 지반과 비교하여 아주 커다란 진폭의 감소가 나타났으며, 진동전파 속도의 경우, 물성치에 의해 계산으로 구해지는 진동전파 속도만큼의 크기가 나타나지 않았다. 더욱이 동결지반에서의 진폭은 비동결지반에서 보다 거리에 따라 아주 작은 값이 구해졌다.

핵심어 : 진동전파 문제, 방진벽, 경계요소법, 동결지반

1. 서 론

건설현장에서의 발파진동, 열차 운행시에 발생하는 교통진동 등 여러 진동원으로부터 전파되어오는 진동으로 인해 수진점에서 야기되는 진동 문제를 해결하기 위하여는, 일반적으로 진동원에서 발생하는 진동을 감소시키는 방법이 가장 효율적이며 경제적이다. 그러나 진동원이 크거나, 발생진동을 줄이기 위한 진동원의 개선이 불가능한 경우에는 어쩔 수 없이 수진점 또는 진동전파 경로에서의 진동감쇠 방법을 선택할 수밖에 없으며, 이 중 본 논문의 대상인 방진벽은 진동전파 경로 대책에 속하는 것으로, 방진벽의 진동차단 성능은 지반의 물성치 뿐 아니라 지층의 구성과 밀접한 관계를 갖는다.

지반은 일반적으로 아래로 내려갈수록 단단해지지만, 동결기의 경우, 지표가 얼게 되어 오히려 지표가 더 큰 강성을 갖게 된다. 따라서 따뜻한 계절에 설계된 방진벽은, 동절기에는 설계시와는 다른 물성치 및 지층구성의 지반 내에 위치하게 되어, 방진벽은 설계시와는 상이한 진동차단 성능을 나타내게 된다. 본 논문은 동절기에 지반의 일정깊이까지 동결된 지반에 위치하는 방진벽의 진동차단 성능의 변화 파악에 관한 것이다.

방진벽은 방진벽 내부의 채움재의 유무에 따라 방진구와 방진벽으로 구분되며, 채움재의 강성에 따라 연성 또는 강성 방진벽으로 구분된다. 본 논문에서는 강성 방진벽을 대상으로 하였다.

2. 본 론

2.1 해석프로그램

본 논문에서 사용된 직접법(direct formulation)에 의

¹⁾정회원 수원대학교 토목공학과 부교수
접수일 : 2001년 12월 5일
심사 완료일 : 2001년 12월 19일

한 경계요소법에 의해 지표 변위를 구하는 해석단계를 설명하면 간단히 아래와 같다.

전체 경계를 주어진 경계조건에 따라 Γ_1 와 Γ_2 으로 구분하여 경계조건이 식 (1),(2)와 같이 주어진 경우, 경계 적분식의 유도를 위해 베타의 정리(Betti's principle)를 이용하면, Γ_1 와 Γ_2 에서의 두 가지 경계조건에 대해 각각의 영향계수 T^* 과 U^* 에 의해 식(3)의 적분식의 작성 가능하다.^{3,5)}

$$\Gamma_1 \text{에서 } u_i = \bar{u}_i$$

$$\Gamma_2 \text{에서 } t_i = \bar{t}_i \tag{1}$$

$$\Gamma = \Gamma_1 \cup \Gamma_2 \tag{2}$$

식 (1)에서 u 와 t 는 각각 변위와 응력(traction)이며, " $\bar{\quad}$ "는 알고 있는 값을 의미한다.

$$Cu_i(x^\alpha) = -\int_{\Gamma_1} T^{*ij} \bar{u}_j d\Gamma - \int_{\Gamma_2} T^{*ij} u_j d\Gamma + \int_{\Gamma_1} t_i U^{*ij} d\Gamma + \int_{\Gamma_2} \bar{t}_i U^{*ij} d\Gamma + \int_B p_i U^{*ij} dB \tag{3}$$

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.

$$Cu_i(x^\alpha) = \int_{\Gamma_1} (t_i U^{*ij} - T^{*ij} \bar{u}_j) d\Gamma + \int_{\Gamma_2} (\bar{t}_i U^{*ij} - T^{*ij} u_j) d\Gamma \tag{4}$$

식 (4)의 대수화에 의해 행렬식의 형태로 간략화하면 식 (5)와 같으며, 식 (5)에서 T 와 U 는 식 (3)의 영향계수 T^* 과 U^* 에 의해 만들어지는 영향행렬이다.

$$Tu = Ut \tag{5}$$

본 논문에서 사용된 경계요소법에 의한 해석결과는 Huh et. al.(1984, 1988)에서 그 정확성이 검증되었으며, 진동전파 문제의 해석을 위한 경계요소법의 적용에 관한 세부 내용은 여러 문헌^{3,5)}에 기술되어 있다.

2.2 해석 모델

2.2.1 물성치

동결된 지반에 설치된 방진벽의 진동차단 성능의 변화를 구하기 위해, 지반을 이층 구조로 가정하여 지표에서 일정 깊이까지 얼어서 단단해진 동결층의 하부에 균질의 반무한영역인 비동결지반이 존재하는 것으로 이

상화하였다. 동결층의 경우 포화된 정도, 동결된 정도 및 온도 등의 변화에 따라 물성치가 다양하게 변하나, 진동전파 속도로 두 층의 물성치 차이를 고려하였다.

먼저 하부에 존재하는 비동결지반의 경우, R-파(Rayleigh wave)의 전파속도를 일반적인 토사지반의 경우인 $v_R=240$ m/s로 가정하고, 동결층은 이보다 5배 큰 진동전파 속도를 갖는 것으로 가정하였다.

이외에 밀도, 포아송비, 감쇠비의 변화가 결과에 미치는 영향을 배제하기 위해, 이 들 세 가지 물성치는 동결층과 비동결층에 대해 동일한 것으로 가정하여 해석하였다. 줄기초로 가정된 진동원은 강체로 가정하였다.

Table 1에는 해석에 사용된 물성치들이 제시되어 있다.

2.2.2 해석 모델

일반적으로 지표의 동결층은 지표에 얇은 두께로 분포되어 있다. 따라서 동결층의 깊이를 실질적으로 발생할 수 있는 크기로 가정하고, 진동원의 가진주파수 f 도 일반적으로 크지 않은 동결층의 두께와 파장 사이의 적절한 비율을 만들어 내는 크기로 판단되는 40 Hz로 가정하였다. 이 주파수에서 비동결지반에서의 표면파의 파장 λ_R 은 아래와 같다.

$$\lambda_R = v_R/f = 240/40 = 6 \text{ m}$$

동결층의 두께는, 균질의 반무한지반에서는 표면파가 가지고 있는 에너지의 36%가 파장의 20% 두께의 지표층을 통해 전달되는 것을 고려하여, 이에 해당하는 두께인 1.2 m와 그의 반인 0.6 m의 두 경우로 이상화하였다.

따라서 지반모델은 동결층의 두께에 따라 아래 Table 2에 제시된 세 가지의 경우이며, 지반 I은 균질의 반무한 영역(half-space)의 지반이며, 지반 II와 III의 동결층의 하부에는 균질의 반무한영역의 지반이 존재한다.

Table 1. Material properties for the analysis

	Non-frozen soil	Frozen soil
R-wave propagation velocity v_R [m/sec]	240	1200
Poisson's ratio ν	0.25	0.25
Damping ratio D [%]	2.5	2.5

Table 2. Thickness of a stiff top layer

Soil type	Depth of frozen layer[m]
I	0.0
II	0.6
III	1.2

Table 3. Wave barrier

Wave barrier type	Width B [m]	Depth T [m]	$\bar{\alpha}$
①	2.4	7.2	0.48
②	0.6	9.0	0.15

또한 폭 B , 깊이 T 로 표현되는 방진벽의 크기에 따른 진동차단 성능의 변화를 구하기 위해, 두 가지 상이한 규모의 방진벽을 가정하였다. 표면파의 파장인 λ_R 에 의해 식 (6)과 같이 정규화된 방진벽 단면의 크기의 무차원값 $\bar{\alpha}$ 는 Table 3과 같다.

$$\bar{\alpha} = \frac{BT}{\lambda_R^2} \quad (6)$$

Table 4에는 해석된 경우들이 제시되어 있다.

경계요소는 진동전파를 표현하기 위해 R-과 하나의 파장을 10개의 요소로 분할하였으며, 해석모델을 나타낸 Fig. 1에서의 다른 변수들은 Table 5와 같다. 여기서 d 는 진동원으로부터 방진벽까지의 중심거리이며, L_l 은 진동원 왼쪽의 요소분할 거리이며 L_r 은 진동원 오른쪽의 요소분할 거리이다.

진동원과 방진벽 사이의 중심거리는 λ_R 의 약 3배인 약 19 m로, 이 정도의 이격거리는 원거리 R-파를 만들어내기에 충분하며, 방진벽의 진동차단 성능은 무한 거리에 있는 방진벽의 차단성능으로 가정할 수 있다. 즉 방진벽은 이론적으로 정확한 R-파를 차단하는 성능을

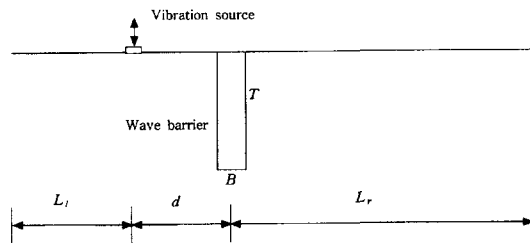


Fig. 1. Numerical model.

Table 5. Numerical model data [m]

Wave barrier	d	L_l	L_r
①	19.5	12.9	47.5
②	19.2		47.5

Table 4. Analysis cases

Analysis Case	Soil	Wave barrier	Analysis Case	Soil	Wave barrier	Analysis Case	Soil	Wave barrier
1	I	non	4	II	non	7	III	non
2	I	①	5	II	①	8	III	①
3	I	②	6	II	②	9	III	②

가지고 있다. 따라서 방진벽 후방에서 충분히 큰 부분이 평균적인 진폭감소가 나타나도록 방진벽의 위치를 선정하였다.

2.3 해석결과

2.3.1 방진벽이 없는 지반에서의 진동전파 특성

먼저 방진벽이 없는 지반에서의 진동 전파 특성을 구하기 위해, Table 4에서 균질한 반무한 영역의 지반인 해석경우 1과 상부에 동결층을 갖는 이층구조의 지반인 해석경우 4와 7에 대한 해석을 수행하여, 그 결과를 Fig. 2에 나타내었다.

비교를 보다 명확히 하기 위해, Fig. 2의 모든 진폭은 균질의 반무한 영역 지반인 해석경우 1에서의 최대진폭으로 정규화되어 있다.

해석결과로부터 다음과 같은 결론을 얻을 수 있다.

1) 기초진폭

동결층이 있는 경우, 기초의 진폭은 아주 작아진다. 비동결지반에 대해 동결깊이 0.6 m인 동결지반 I에서는 약 33% 이상, 동결깊이 1.2 m인 동결지반 II에서는 약 55% 정도 최대진폭이 감소하였다. 이는 충분히 예상되는 것으로, 강한 지표층의 하중 분산 효과에 기인하는 것으로 판단된다.

2) 파장

각 해석에서 아래의 식(7)로 구해진 위상차 경사로부터 표면파의 파장 λ_R 을 구하면, 동결지반 II의 경우 약 8 m, 동결지반 III의 경우 약 9 m이다. 동결지반의 경우, 수계산으로 구해진 파장의 크기는 30 m로, 표면의 동결

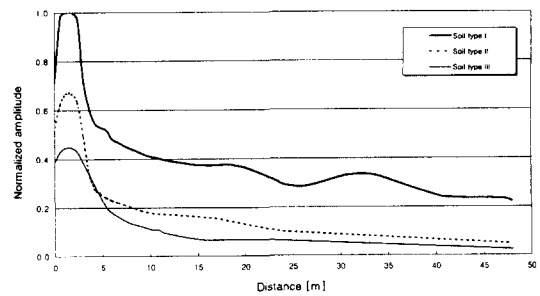


Fig. 2. Wave propagation property of homogeneous soil without wave barrier (Analysis case 1, 4, & 7).

Table 6. Coefficient of attenuation

Soil	Soil I	Soil II	Soil III
α_r	0.026	0.020	0.017

층 하부에 존재하는 지반에 의해 표면파의 전달특성이 큰 영향을 받는 것으로 판단된다. 비동결지반의 표면파의 파장 λ_r 은 6.0 m이다. 식 (7)의 $Re(u)$ 와 $Im(u)$ 는 각각 복소수로 표시된 변위 u 의 실수부와 허수부이다.

$$\Phi = \tan^{-1} \frac{Im(u)}{Re(u)} \quad (7)$$

동결지반 II에서 파장은 비동결지반의 1.54배로 아주 작은 증가를 보였다. 동결지반 II에 대해 주어진 물성치로부터 수계산으로 구해진 파장의 크기는 30 m이다.

3) 감쇠성능

동일한 감쇠비에서는 파장이 커지면 감쇠계수는 작아진다. 감쇠계수 α , 파장 λ , 감쇠비 D 의 관계를 나타내는 식 (8)을 이용하여, 앞에서 구한 파장으로부터 얻어진 감쇠계수(coefficient of attenuation)들을 Table 6에 나타내었다. 참고로 감쇠계수 $\alpha[m^{-1}]$ 는 진동전파속도 또는 파장에 반비례한다. 즉 진동전파속도가 높거나 파장이 긴 경우 동일한 감쇠비에서 진동전파속도가 작거나 파장이 짧은 경우보다 거리에 따른 진폭의 감쇠가 작다.

$$\alpha = \frac{2\pi}{\lambda} D [m^{-1}] \quad (8)$$

위의 결과는 진동전파 문제를 위해 중요한 의미를 갖는다. 즉, 만약 동절기에 진동전파 경향을 구하는 일이 수행된다면 사람들은 비동절기에 해당하는 계절에 발생하는 진동크기와 아주 다른 값을 얻게 된다. 이러한 감쇠계수의 영향은 진동원의 근거리장에서는 무시할만하나, 재료감쇠가 중요한 역할을 하는 원거리장 전파에서는 무시할 수 없는 결과를 만들어내게 된다.

2.3.2 방진벽에 의한 진동 차단

1) 균질 지반(비동결지반)에서의 진동 차단효과

균질의 반무한(half-space) 지반에서, 두 가지 방진구조의 진동차단효과를 구하기 위한 해석 결과를 Fig. 3에 나타내었다. 이는 허영(2000)에서의 결과와 거의 동일하며, 이 해석은 비교 경우를 만들기 위해 수행되었다. 진동원과 방진벽의 전면 사이에서 발생하는 복잡한 진동 형태는 방진벽으로 반사되는 진동과 진동원으로부터 전파되는 진동의 상호 간섭에 의한 것으로 판단되며, 이러한 현상은 방진벽이 있는 모든 해석 경우에서

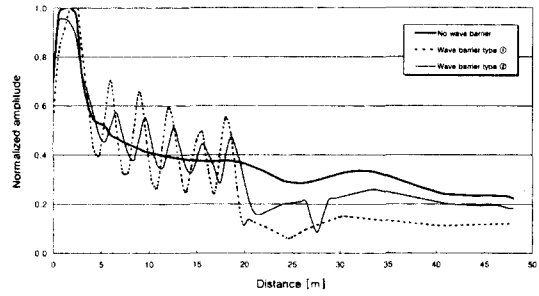


Fig. 3. Vibration isolation effect of wave barrier type ① and ② in a non-frozen soil.

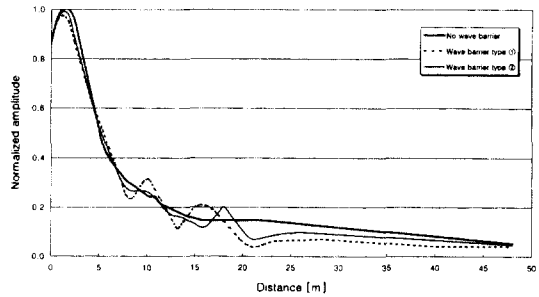


Fig. 4. Vibration isolation effect of wave barrier type ① and ② in a frozen soil II (Reference case: frozen soil II without wave barrier).

동일하게 나타난다.

2) 동결지반(동결깊이 : 0.6 m, 1.2 m)에서의 진동 차단효과

동결지반인 지반 II와 III에서의 진폭을 각각 Fig. 4와 Fig. 5에 나타내었다. 각 그림은 방진벽이 없는 해당 동결지반에서의 최대값으로 정규화하였다.

해석결과는 비동결지반에 설치된 방진벽의 진동차단과 유사한 경향을 보이나, 차이점을 기술하면 아래와 같다.

- 진동원과 방진벽 사이의 진동형태가 비동결지반과 비교하여 두드러지게 단순하여졌다. 이는 방진벽에서의 파의 반사가 차단성능에 비교적 작은 기여를 하기 때문으로 판단된다.

- 동결지반 I에서 최대값 사이의 간격은 평균 $0.47\lambda_r$ 정도이며, 동결지반 II에서는 평균 $0.50\lambda_r$ 정도이다. 여기서는 방진벽이 없는 해당지반에서의 파장을 기준으로 구하였다.

동결지반에서 방진벽의 규모에 따른 진동차단 성능의 변화를 명확히 보기 위해 Fig. 4와 Fig. 5에서의 실제진폭을 방진벽이 없는 비동결지반에서의 최대진폭으로

로 정규화하여 Fig. 6과 Fig. 7에 나타내었다.

3) 진동저감계수

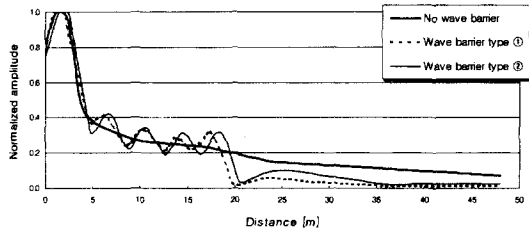


Fig. 5. Vibration isolation effect of wave barrier type ① and ② in a frozen soil III (Reference case: frozen soil III without wave barrier).

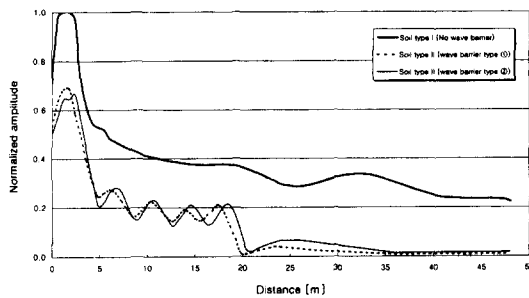


Fig. 6. Vibration isolation effect of wave barrier type ① and ② in a frozen soil II (Reference case: non-frozen soil without wave barrier).

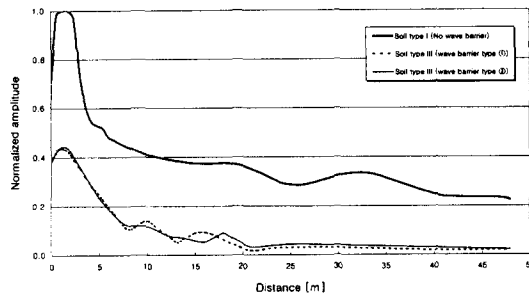


Fig. 7. Vibration isolation effect of wave barrier type ① and ② in a frozen soil III (Reference case: non-frozen soil without wave barrier).

진동저감계수는 방진시설 설치 후의 진폭을 방진시설 설치 전의 진폭으로 나누어 구한 값으로, 일정 구역 내의 진동환경의 개선을 위해서는 특정점에서의 진동저감계수가 아닌 해당 구역 전체의 진동저감량을 대표하는 진동저감계수를 알아야 한다. 식 (9)를 사용하면 일정 구역에서 평균적 의미를 갖는 진동저감계수를 구할 수 있다.

여기에서는 진동원 중심으로부터의 이격거리 22.5 m 와 46.5 m 사이에서 아래의 식 (9)를 사용하여 이 구간에서의 진동저감계수 α_s 를 구하였다. 이격거리 22.5 m 는 $3\lambda_R$ 보다 크므로 표면파가 지배적이기 위한 충분한 거리이다.

$$\alpha_s = \frac{1}{24} \int_{22.5}^{46.5} \frac{A_s(x)}{A_0} dx \quad (9)$$

위의 식에서 A_s 는 방진벽이 있는 경우의 진폭이고, A_0 는 방진벽이 없는 경우의 진폭이다.

먼저 방진벽이 여러 종류의 지반에 설치된 경우의 진폭저감계수를 구하여 Table 7에 나타내었다. 진폭저감계수를 구하기 위한 기준치는 각 지반에서 방진벽이 설치되지 않은 경우의 진폭이다. 모든 경우에서 단면적이 큰 방진벽이 큰 진폭저감계수를 나타내었으며, 0.6 m 두께의 동결지반에서는 비동결지반에서 보다 더 우수한 진폭저감계수를 나타내었으나, 1.2 m 두께의 동결지반에서는 비동결지반에서 보다 불량한 진폭저감계수를 나타내었다. 그러나 이것은 각각의 지반에서의 방진벽이 없는 경우의 진폭을 기준값으로 하여 구한 것이므로, 지반 III에서의 차진성능이 지반 I에서의 차진성능보다 불량한 것을 의미하지 않는다.

각 해석경우들의 진폭저감계수를 명확히 비교하기 위해, 동일한 기준값을 사용하여 구한 진동저감계수들을 Table 8에 제시하였다. 이 표를 보면 동결깊이가 크고, 방진벽의 단면적이 클수록 우수한 진동저감 효과가 나타나는 일반적인 결과를 명확히 볼 수 있으나, 동일한 단면적의 방진벽이 오히려 동결깊이가 작은 지반에 설치된 경우 더 우수한 차진효과를 보이는 특수한 결과가 나타났다. 이는 예측되지 않았던 결과로, 이를 일반

Table 7. Amplitude reduction factor

Wave barrier	Soil I	Wave barrier	Soil II	Wave barrier	Soil III
①	0.442	①	0.199	①	0.569
②	0.779	②	0.397	②	0.805
reference case	Soil I (without wave barrier)	reference case	Soil I (without wave barrier)	reference case	Soil I (without wave barrier)
	a)		b)		c)

Table 8. Coefficient of attenuation

Soil	Case		Reference case
	Wave barrier	Coefficient of attenuation	
II	non	0.267	Non-frozen soil without wave barrier
III		0.156	
II	①	0.059	
	②	0.119	
III	①	0.093	
	②	0.133	

화하기 위한 보다 상세한 추가연구가 필요하다.

3. 결 론

해석결과를 종합하여 아래의 결론을 얻었다.

- 동결된 단단한 지표층은 하중의 분배를 하게 되어 우수한 진동차단 성능을 나타낸다.
- 동결층이 두꺼울수록 기초에서의 진폭감소량은 두드러지게 커지나, 원거리에서는 그 차이가 작아진다.
- 단단한 상부층에 의해 파장이 약간 증가(약 30-

50%) 하나, 진동전파 특성에 미치는 단단한 동결층의 영향은 아주 크다.

- 균일 반무한 영역인 비동결지반에서 방진벽의 진동 차단효과는 방진벽의 무차원 단면크기에 큰 영향을 받는다.

참고문헌

1. Huh, Y. and G. Schmid, 1984, Application of Boundary Elements to Soil-Structure Interaction Problems, Engineering Analysis, 1(3), 170-173.
2. Huh, Y. and G. Schmid, 1988. Dynamische Bauwerk-Baugrund-Wechselwirkung im Frequenzbereich mit der Randelementmethode, Bauingenieur 63, 25-131.
3. Manolis and Beskos, 1988, Boundary Element Methods in Elastodynamics, Unwin Hyman, London, 282p.
4. Hartmann, F., 1987, Methode der Randelements, Springer-Verlag, Berlin, 378p.
5. Dominguez, J., 1993, Boundary Elements in Dynamics, CMP, Southampton Boston, 707p.
6. 허 영, 2000, 단지 진동환경 개선 연구, 한국지진공학 회지, 4(4), 63-71.



허 영

1976년 연세대학교 토목공학과 공학사
 1981년 독일 Bochum 대학교 Dipl.-Ing
 1986년 독일 Bochum 대학교 Dr.-Ing

Tel : 031-220-2317
 E-mail : huhyoung@mail.suwon.ac.kr
 현재 수원대학교 토목공학과 부교수