

V. 진동방지시설의 원리 및 설계

자동차공해연구소

소장 정 일 록

제 1 장 진동설계의 목표 및 고려사항

진동 방지를 위해서는 근원적으로 진동 발생원의 가진력 억제 등을 기계 설계단계에서부터 고려하는 原因除去 기술을 생각할 수 있으나, 여기서는 이미 존재하는 진동 발생원에 대한 대책과 전파경로인 지반 등에 대한 대책을 중심으로 기술하고자 한다.

1. 防振設計의 目標

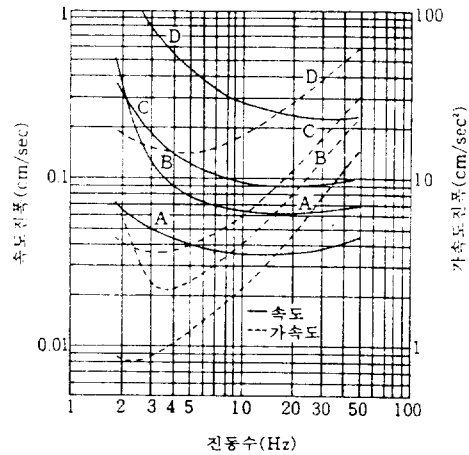
방진설계는 능동적 목적과 수동적 목적으로 구분된다. 능동적 목적은 어떤 특정 진동원에서 진동이 발생될 때, 그 진동원을 방진하여 진동장해가 외부에 미치지 않도록 하는 것이다. 수동적 목적은 외부에서 전달되어 오는 진동으로부터 精密機器나 건축물을 보호하기 위해, 그 보호대상에 대해 방진하는 것을 말한다. 따라서 전자는 진동을 발생시키는 각종 기계류가 진동원이 되나, 후자는 진동원이 불특정인 경우가 많다.

가. 능동적 목적의 목표치

방진설계시에는 먼저 방진의 목표치를 설정하지 않으면 안 되는데, 일반적으로 각각의 用途에 따라 실용상 지장이 없는 수준으로 방진설계의 목표치를 정하여야 한다. 즉, 공해진동 방지를 목표로 할 경우는 부지경계선에서의 規制基準値가 방진설계의 1차 목표치가 된다. 일반 건축물에 대해서는 한 예로써 일본 건축학회에서 제안한 “건축물의 振動障害 방지에 관한 설계기준”인 <그림 1>의 B곡선(서독의 $0.5\text{km/s} = 0.5\text{cm/s}$ 에 상당함) 등을 목표로 삼을 수 있다.

이 그림에서 진동수준이 B곡선에 상당할 때는 감각적으로 약간 느낄 수

있을 정도이지만 육체적으로나 심리적으로 전혀 영향이 없는 영역으로 일부분에서는 機械基礎의 설계 및 공장내 방진계획을 전적으로 이 곡선 이하로 하고 있다. 정온한 공장에 대해서는 B곡선을 목표로 하지만 비교적 시끄러운 공장에 대해서는 C곡선을 방진설계의 상한치로 설정하여도 인체 감각에 대한 지장은 거의 일어나지않는 것으로 보고 있다. 그러나 D곡선에 가깝게 되면 여러가지 진동장해에 대한 진정이 일어난다고 한다.



<그림 1> 인체의 진동 등감각곡선

나. 수동적 목적의 목표치

외부의 진동원에 의한 진동으로부터 정밀 공작기계, 전자현미경, 광학측정기, 전전자 교환기, 컴퓨터 등과 같은 정밀기기의 기능장해를 방지하기 위한 진동 허용한도는 그것들을 제작한 회사에서 제시한 값을 방진설계의 목표치로 삼아야 한다.

2. 防振時의 고려사항

가. 기계의 共振防止

감쇠가 있는 스프링으로 기계를 彈性支持할 때의 질량의 동적진폭을 x_o , 정적진폭을 $F_o/k (= \delta_{st})$, F_o 는 가진력 진폭, k 는 스프링상수, 감쇠비를 ξ , 진동수비를 $\eta (= \text{강제진동수 } f / \text{고유진동수 } f_n = \text{강제각진동수 } \omega / \text{고유각진동수 } \omega_n)$

동수 ω_n)라 하면 정적진폭배율 M 은 다음 식과 같다.

$$M = \frac{x_o}{F_o/k} = \frac{1}{\sqrt{[1-\eta^2]^2 + [2\xi\eta]^2}} \quad (1)$$

이 식에서 강제진동수가 고유진동수에 비해 아주 작을 때, 즉 $\eta \ll 1$ 일 때의 계의 응답은 (2)식과 같이 스프링정수에 의해 지배되므로 스프링정수를 크게 하여야 하고,

$$x_o / (F_o/k) = x_o k / F_o = 1 \quad (2)$$

강제진동수가 고유진동수와 거의 같을 때, 즉 $\eta \approx 1$ 일 때의 계의 응답은 (3)식과 같이 減衰에 의해 지배되므로 감쇠가 큰 방진재나 dash pot 등을 삽입하여야 하며,

$$x_o / (F_o/k) = 1/2\xi \quad (3)$$

강제진동수가 고유진동수에 비해 아주 클 때, 즉 $\eta \gg 1$ 일 때의 계의 응답은 (4)식과 같이 계의 質量에 의해 지배되므로 기계의 질량을 키워야 한다.

$$x_o / (F_o/k) = 1/\eta^2 = k/m\omega^2 \quad (4)$$

나. 중량의 부가 및 경감

기계가 그 성능을 유지하기 위해서는 일정 진폭 이하의 진동으로 유지되어야 한다. 특히 기계를 탄성지지할 경우에는 이 점을 확인할 필요가 있다. 감쇠가 있는 경우의 기계의 변위진폭은

$$x_o = \frac{F_o}{m} \frac{1}{\sqrt{[\omega_n^2 - \omega^2]^2 + [2\xi\omega_n\omega]^2}} \quad (5)$$

이 되고, 감쇠가 무시될 경우는 다음 식과 같이 된다.

$$x_o = \frac{F_o}{m} \frac{1}{\sqrt{[\omega_n^2 - \omega^2]^2}} \quad (6)$$

위 식의 x_o 를 허용 변위진폭(allowable displacement) x_a 보다 작게 설계하지 않으면 안 되므로

$$m > \frac{1}{\chi_a} \frac{F_0}{\sqrt{[\omega_n^2 - \omega^2]^2}} \quad (7)$$

기계의 중량을 W라 하면

$$W > \frac{g}{\chi_a} \frac{F_0}{\sqrt{[\omega_n^2 - \omega^2]^2}} \quad (8)$$

가 된다. 따라서 기계의 중량이 부족한 경우에는 콘크리트 架臺를 기계에 부착시켜 중량을 증가시키는 대책이 필요하다.

제 2 장 防振材料의 특성

1. 개요

탄성지지에 사용되는 방진재는 방진고무, 금속스프링(코일스프링, 重版스프링, 皿形스프링 등), 공기스프링, 코르크, 펠트, 탄성블럭 등이 있으며, 이들 재료의 특징은 <표 1>과 같다. 따라서 이 표를 참고하여 방진재를 선택하는 것이 바람직하다.

또한, 탄성지지시에는 될 수 있는 한 非連成支持 상태가 되게 하여야 하는데, 비연성 조건은 다음과 같다.

- ① 剛體중심과 탄성중심을 일치시키고, 관성주축과 탄성주축을 일치시킨다.
- ② 주축에 대해 대칭적으로 방진재를 설치한다.

방진재로 탄성지지된 기계는 靜荷重을 받은 상태로 진동하므로 탄성지지에 의한 진동 전달을 저감과 더불어 기계의 진폭이 커지지 않도록 배려할 필요가 있다.

<표 1> 방진재의 선택기준

항 목	코일 스프링	방진 고무	공기 스프링	foam- 라바	펠 트 (felt)	코르크 (cork)
고유진동수(Hz) 범위	2~10	5~100	0~5	2~5	25~50	20~30
減衰比	<0.005	5~100	0.05~1	--	--	--
多軸方向 공 용 성	△	◎	○	○	△	○
간 결 성	○	◎	△	○	○	○
감 쇄 성 능	×	○	○	×	△	○
고주파진동절연성.방음	×	○	◎	○	○	○
하중 특성의 직선성	◎	○	○	×	×	×
내 고 온.내 저 온 성	◎	△	△	△	○	○
耐 油 性	◎	△	△	×	○	○
耐 老 化 性	◎	△	△	×	○	○
製 品 의 균 일 성	◎	△	○	×	△	△
耐 變 形 性	◎	○	○	△	△	○
耐 熱 膨 脹 性	◎	△	○	○	○	○
가 격	안정	중	고	중	안정	중
중 량	重	中	重	輕	輕	輕
특성 계산치와의 일치	◎	○	○	×	×	×
설 계 의 용 이 성	◎	○	×	○	○	△
취 부 의 용 이 성	△	△	×	◎	◎	◎
壽 命	◎	○	○	×	△	○

* ◎ : 우수, ○ : 양호, △ : 가능, × : 약간 문제가 있음

2. 방진재료별 특징

가. 방진고무

방진고무류로 탄성지지할 때는 동적 스프링정수가 요구되는데, 이 값은 정적 스프링정수에 動倍率(= 동적 스프링정수/정적 스프링정수)을 곱한 값으로 정의된다.

<장점>

- ① 내부 감쇠저항이 크기 때문에 damper가 필요하지 않다.

- ② 진동수비가 1이상인 방진영역에서도 진동 전달율이 크게 증대하지 않는다.
- ③ 3방향 스프링정수를 자유스럽게 선정할 수 있다.
- ④ 설계 및 취부가 비교적 간편하고, 금속과 잘 접착되므로 소형·경량으로 된다.
- ⑤ 역학적 성능은 천연고무가 가장 우수하지만 용도에 따라 합성고무로도 제조가 가능하다.
- ⑥ surging이 일어나지 않거나 매우 작다.
- ⑦ 고주파 영역에서 고체음의 絶緣性能이 우수하다.

<단점>

- ① 내열성, 내노화성, 내유성, 내열팽창성 등이 금속스프링보다 못하다.
- ② 저온에서는 고무가 硬化되므로 방진성능이 나빠진다.
- ③ 변형(creep)이 있으며, 그 변형은 천연고무에 비해 합성고무쪽이 크다.
- ④ 내부마찰에 의한 발열로 열화되고, 공기중의 O₃에 의해 산화된다.

나. 금속스프링

코일스프링을 사용하여 탄성지지할 때 주의할 점은 surging문제이다. 이것은 스프링 자체의 고유진동수와 외력의 강제진동수가 같을 때 일어나는 일종의 공진현상으로, 이 진동수에서는 遮振率이 현저히 저하된다.

<장점>

- ① 가격이 비교적 안정되어 있다.
- ② 설계계산식이 확립되어 있다.
- ③ 내유성, 내노화성, 내약품성, 내열성, 제품의 균일성, 하중특성의 직선성 등이 우수하다.
- ④ 하중의 大小에 불구하고 사용할 수 있다.

<단점>

- ① 판형 혹은 皿形 스프링은 감쇠가 한 방향으로만 존재한다.
- ② 코일스프링은 감쇠가 없기 때문에 damper가 필요하다.
- ③ 고주파 영역에서 surging현상이 발생될 뿐만 아니라 damper의 감쇠비가 커질 경우 진동전달율이 커진다.
- ④ rocking이 일어나지 않도록 주의하여야 한다.

※ rocking을 방지하기 위해서는 정적 수축량이 같은 스프링을 사용하여야 하며, 기계무게의 수 배 혹은 수 십배에 상당하는 架臺를 기계에 부착시켜 계의 重心을 낮게 하고 하중이 균등 분포되도록 하여야 한다. 또한, surging을 완화시키기 위해서는 코일스프링과 직렬로 방진고무를 끼울 필요가 있다.

다. 공기스프링

공기스프링은 空氣의 스프링작용을 이용한 것이다.

<장점>

- ① 방진고무, 금속스프링에 비해 고유진동수가 낮기 때문에 저주파진동의 방진에 유리하다.
- ② 고주파진동의 절연특성이 가장 우수하고 방음효과도 크다.
- ③ 설계시에 비교적 자유스럽게 스프링높이, 스프링정수, 하중 등을 선택할 수 있다.
- ④ 하중이 변화할 경우에도 기계의 레벨 및 고유진동수를 일정하게 유지시킬 수 있다.

<단점>

- ① 구조가 복잡하고 대형으로 된다.
- ② 압축공기가 필요하다.

- ③ damper를 함께 사용하는 경우가 많다.
- ④ 내열성, 내노화성, 내유성 등이 금속에 비해 나쁘다.
- ⑤ 상하방향의 가이드(guide)가 필요한 경우가 많다.

제 3 장 진동방지 대책

1. 振動系 防振(彈性支持)

각종 기계에서 발생된 진동이 주위로 전파되는 것을 絶緣할 목적과 외부에서 전파되어 온 진동으로부터 각종 기기를 절연할 목적으로 기계와 기초 사이에 방진재를 설치하는 浮基礎 방식 등을 진동계 방진이라 한다.

가. 진동 전달을 곡선

탄성지지는 가장 대표적인 防振技術로 기계와 기초 사이에 방진고무, 금속스프링, 공기스프링 등의 防振材를 설치하여 기계의 가진력을 기초로 작게 전달되게 하거나, 지반의 진동변위가 기계로 작게 전달되게 하는 방법을 말하며, 소음의 차음대책에 상응한다. 진동 전달률 τ 는 식 (9)와 같고, 이를 도시하면 <그림 2>와 같다.

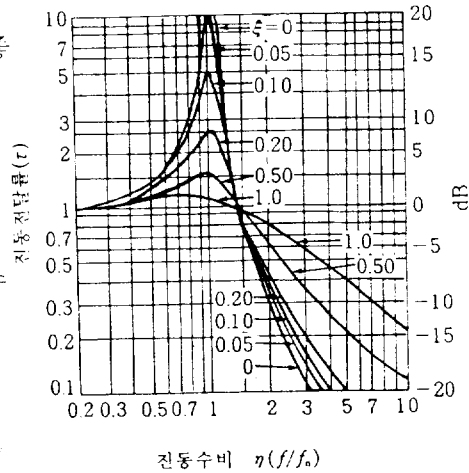
$$\tau = \frac{\sqrt{1 + [2\xi\eta]^2}}{\sqrt{[1 - \eta^2]^2 + [2\xi\eta]^2}} \quad (9)$$

<그림 2>의 전달율 곡선에서 알 수 있듯이 $\eta = 1$ (공진상태)일 때는 전달율은 최대가 되고($\tau \gg 1$), $\eta < \sqrt{2}$ 일 때는 전달력이 항상 가진력보다 크고($\tau > 1$), $\eta = \sqrt{2}$ 일 때는 전달력과 가진력은 같으며($\tau = 1$), $\eta > \sqrt{2}$ 일 때는 전달력이 가진력보다 항상 작아($\tau < 1$) 때문에 방진효과가 있는 영역이 된다. 또한 $\eta < \sqrt{2}$ 인 범위에서는 감쇠비 ξ 가 커질수록 전달율 τ 가 작아지므로

방진대책상 ξ 가 클수록 좋고, $\eta > \sqrt{2}$ 인 범위에서는 ξ 가 작을수록 전달율이 작아지므로 방진대책상 ξ 값이 작을수록 좋다.

나. 탄성지지를 위한 設計因子

① 강제진동수(f) : 기계의 가진력 주파수로서 회전기계 경우는 매초 회전수 (rpm/60), 송풍기의 경우는 매초 회전수 $\times$ 날개수, 齒車의 경우는 매초 회전수 $\times$ 톱니수, 4행정 내연기관의 경우는 (rpm/60 $\times$ 2) $\times$ 실린더수, 기타 기기는 초당 관성력의 주기적 변화횟수이다.



<그림 2> 1자유도계의 η 와 ξ 를

함수로 한 진동전달을 곡선
② 고유진동수(f_n) : 목표로 한 진동전달율을 얻을 수 있도록 그 계의 고유진동수를 적절히 설정하여야 한다. 진동전달율과 방진재의 감쇠비가 설정되면 <그림 2>로부터 진동수비 η 를 구할 수 있다. 이때 고유진동수는

$$f_n = f / \eta \quad \text{Hz} \quad (10)$$

로 된다. 그리고 이 고유진동수 영역에 부합하는 방진재를 <표 1>로부터 선정한다.

③ 진폭 : 기계가 非連成 지지되어 있고, 그 계의 감쇠비를 무시할 경우에 가진력 F_0 에 의한 기초의 편진폭 x_0 는 다음 식으로 주어진다.

$$x_0 = \frac{F_0 g}{(2\pi f_n)^2 W} \left| \frac{1}{1 - (f/f_n)^2} \right|$$

진폭의 크기는 허용치 이내로 되지 않으면 안 되므로 기계에 중량을 부가 (架臺 부착)하여 탄성지지하여야 함을 위 식에서 알 수 있다.

④ 스프링정수(k) : 계의 고유진동수는 방진재의 스프링정수에 따라 변화한다. 즉

$$k = (W/n)/\delta_{st} = (2\pi f_n)^2(W/g) \quad \text{N/cm} \quad (11)$$

여기서 n은 방진재의 지지점 수이다.

⑤ 방진재의 收縮量(δ_{st}) : 기계의 중량에 의한 방진재의 수축량은 다음 식으로 주어지며, 이 또한 허용치 이내가 되어야 한다.

$$\delta_{st} = \alpha kg/(2\pi f_n)^2 \quad \text{cm} \quad (12)$$

여기서 α 는 방진재의 동배율, k는 기계의 사용조건에 따른 계수(육상용 기계는 1.5, 자동차 등은 2~3 정도)이다.

다. 탄성지지 요소 산정절차

탄성지지의 요체는 기계와 기초 사이에 충진할 적정 방진재를 선택하는 것이다. 공해진동 측면에서 1자유도계의 탄성지지를 위한 계산절차를 간단히 정리하면 다음과 같다.

① 대상기기의 제원 파악 : 강제진동수(rpm/60) f 및 무게 W 등 조사

② 실태조사 : 대책지점에서 진동레벨 VL 및 주요 최저진동수(= 강제진동수) 측정

③ 차진레벨 ΔV 산출

$$\Delta V = VL - \text{규제기준치} \quad \text{dB} \quad (12)$$

④ 진동 전달율 산출

$$\tau = \log^{-1}(-\Delta V/20) \quad (13)$$

⑤ 고유진동수 산정 : (13)식으로 구한 진동 전달율을 <그림 2>의 좌측 종축에 표시하고, 거기서 수평선을 그어 각 전달율 곡선과 만나는 교점에서 수직선을 그어 만나는 횡축으로부터 진동수비 η 를 구한다. 이 때 감쇠비는 계의 운전에 적당한 값이 되도록 설정한다.

$$f_n = f/\eta \quad \text{Hz} \quad (14)$$

위 식으로 구한 고유진동수를 만족하는 방진재를 <표 1>에서 선정한다.

⑥ 등가 스프링정수 k_e 산정

$$k_e = W \cdot f_n^2 / 24.8 \quad \text{N/cm} \quad (15)$$

⑦ 지지점당 스프링정수 k 산출 : 기계의 하중이 각 스프링 지지점에 균등분포되도록 지지점수 n 을 설정한 후, 스프링 1개의 k 를 구한다.

$$k = k_e/n \quad \text{N/cm} \quad (16)$$

이 스프링정수에 부합하는 스프링을 제작사의 catalogue로부터 선정한다.

[예제] 회전속도가 1,000rpm인 원심팬이 있다. 방진고무로 탄성지지시켜 진동전달율을 0.2로 하고자 할 때, 이系の 고유진동수 및 방진고무의 정적수축량을 구하라.

(풀이) 고유진동수 $f_n = f\sqrt{T/(1+T)} = (1000/60)\sqrt{0.2/(1+0.2)} = 6.8\text{Hz}$.

방진고무의 정적수축량 $\delta_{st} = (4.98/f_n)^2 = (4.98/6.8)^2 = 0.54\text{cm}$

[예제] 중량 1,710N, 회전수 1,170rpm의 공기압축기가 있다. 방진고무로 균등하게 6개소 지지시켜 진동수비를 2.9로 할 때, 지지점당의 하중, 고유진동수, 스프링정수, 방진고무의 정적수축량 및 진동전달율을 계산하라. 단, 감쇠비는 무시한다.

(풀이) 지지점당의 하중 $W_n = W/n = 1,710/6 = 285\text{N}$, 고유진동수 $f_n =$

$f/\eta = (1,170/60)/2.9 = 6.7\text{Hz}$, 스프링정수 $k = (2\pi f_n)^2 \times m = (2\pi \times 6.7)^2 \times (285/980) = 515.4\text{N/cm}$, 방진고무의 정적수축량 $\delta_{st} = W_n/k = 285/515.4 = 0.55\text{cm}$, 진동 전달율 $\tau = |1/(1-\eta^2)| = |1/(1-2.9^2)| = 0.135$

2. 波動系の 방진

진동의 파동이 전파되는 經路, 즉 진동이 전파되는 지반에 대한 대책을 강구하여 파동의 전파를 억제하는 방법을 파동계 방진이라 한다.

가. 防振溝(방진도랑)

공해진동의 원인이 되는 지면의 파동은 주로 Rayleigh파이다. Rayleigh 파는 지표로부터 0.2~0.4 파장의 깊이까지의 지표의 변위진폭과 큰 차이가 없지만, 한 파장의 깊이에 이르면 지표 진폭의 0.2~0.4배로 되는 것으로 알려져 있다. 따라서 진동이 전파하는 경로 중에 한 파장 정도의 깊이로 도랑을 파면 방진효과를 기대할 수 있다.

그러나 진동의 파장은 10~30m에 이르는 것이 보통이므로 이 깊이로 도랑을 판다는 것은 불가능한 일이다. 하지만 얇은 암반이 진동원에서 受振點까지의 지표 위에 덮여 있는 地層이라면 도랑의 효과를 무시할 수 없을 것이다. 방진구 외의 대책을 고려할 수 없는 경우에는 될 수 있는 한 受振點 근처에 깊은 도랑을 파는 것이 바람직하다.

한 실험 사례로서 방진구에 의해 <표 2>와 같은 방진효과를 얻었다는 보고도 있다. 여기서 h 는 도랑의 깊이, λ 는 진동의 파장이고, 振幅比는 도랑의 유무에 따른 변위진폭의 比이다. 한편, 파동의 전파속도는 軟弱 지반에서 80~150m/s로 간주한다.

<표 2> 방진구에 의한 변위진폭 감소 예

h/λ	0.2	0.3	0.4
진폭비	0.6	0.5	0.4

나. 距離減衰

진동원으로부터의 거리에 따른 진동파의 감쇠는 파의 종류 및 지반의 상태 등에 따라 다르며 단순하지도 않다. 그러나 실용적으로는 일정한 지반에 대해서 진동원으로부터 진동파가 확산됨에 따른 에너지 分散과 지반 중의 흙의 마찰에 따른 감쇠를 고려하여 다음의 감쇠식이 제안되고 있다.

$$VL_r = VL_o - 8.7\lambda(r - r_o) - 20\log(r/r_o)^n \quad \text{dB} \quad (17)$$

위 식중 우변의 두번째 항은 지반의 종류에 따라 정해지는 内部減衰이고, 세번째 항은 幾何減衰(에너지 분산에 따른 감쇠)이다. VL_r 은 진동원에서 $r(m)$ 떨어진 지점의 진동레벨이며, VL_o 는 진동원에서 $r_o(r > r_o)$ 떨어진 지점의 진동레벨이다. λ 는 지반의 내부 감쇠정수로 loam, 점토, silt 등은 대략 0.01~0.05 정도이다. 또한 λ 는 지반의 특성에 따라 다음 식으로 주어진다.

$$\lambda = 2\pi hf/U_s \quad (18)$$

여기서 h 는 지반의 손실계수로 압반은 0.01, 모래·silt는 0.1, 점토·점토질 토양은 0.5 정도이며, f 는 진동파의 주파수, U_s 는 진동파의 횡파속도이다. 한편, n 은 진동파의 종류에 따라 결정되는 정수로 表面波의 경우는 1/2, 반무한의 自由表面을 전파하는 실체파의 경우는 2, 무한 탄성체를 전파하는 실체파의 경우는 1로 가정한다.

(17)식에서 내부감쇠 $8.7\lambda(r - r_o)$ 는 주파수가 높을수록, 또 전파속도가 작을수록 크게 됨을 알 수 있다. 기하감쇠 $20\log(r/r_o)^n$ 은 거리가 2배로 될 때마다 $n = 1$ 인 경우는 6dB, $n = 2$ 인 경우는 12dB, $n = 1/2$ 인 경우는 3dB씩 감쇠되므로, 實體波는 거리와 함께 급격히 감쇠됨을 엿볼 수 있다. 거리감쇠를 정확히 예측하는 것은 일반적으로 어렵기 때문에 실제로는 문제가 있는 곳의 지반을 대상으로 시험적으로 진동을 주어 전파상황을 추정하여야 한다.