

## 진동기초에서의 진동전파차단

허

영\*

### 1. 서 론

진동을 하는 기계의 주위에는 항상 진동에 의한 문제가 야기된다. 이러한 문제로는 진동에 의한 진동구조물 자체에의 영향 뿐 아니라, 진동이 주변 환경에 미치는 영향도 포함되며, 이러한 문제를 통틀어 진동전파문제(vibration propagation problems)라 부른다.

경제발전에 따라 진동전파문제의 발생 가능성 및 발생 빈도는 증가할 수 밖에 없으나, 구조물이 설치된 후에 발생한 진동전파문제의 해결을 위해서는 많은 비용이 들어, 구조물 설치 이전에 진동전파문제의 발생 가능성을 판단할 수 있는 수단 및 해결 방법이 필요하다.

진동기초의 설계순서는 일반적으로 다음과 같다 :

#### 구조물 및 지반의 동적특성 파악

진동기초의 설계순서 중 첫번째로, 기계의 운전 특성 파악에 따른 구조물(진동기초)의 동적특성 결정 뿐 아니라 진동이 주위에 미치는 영향의 정도에 대한 판단을 위해서는 우선적으로 진동전파의 매개체인 지반의 동적특성 파악이 요구된다. 지반의 동적특성 중 재료적 특성인 지반의 동적탄성계수, 동적포아손비, 진동전파속도 등은 실험실 또는 현장에서의 실험에 의해 결정되나, 또 다른 지반의 주요 동적 특성인 지반의 구성형태에 따른 진동전달함수는 토질주상도로 구해지는 지반의 구성형태에 의해서도 크게 좌우되어, 이 전달함수의 결정을 위해서는 컴퓨터시뮬레이션에 의한 수치해석방법

이 사용되며, 구조물의 동적해석 뿐 아니라 지반의 동적 거동도 함께 고려되어야 한다.

#### 구조물과 지반의 동적응답해석

진동전파문제로의 주요 순서인 구조물과 지반의 동적응답해석이란 기계 작동하에서의 진동기초와 지반을 동시에 고려한 전체 시스템의 고유진동수와 진폭의 결정이다. 이를 위해 일반적으로 유한요소법에 의한 전산프로그램이 사용되며 모델내에서 지반의 고려는 일반적으로 지반의 강성과 감쇠성능이 각기 스프링과 감쇠기로 이상화되어 고려된다.

### 2. 진동전파문제의 분류

건설분야에서 나타나는 진동전파문제는 크게 나누어

- (1) 발파진동과 향타진동 등으로 대표되는 “건설진동(construction vibrations)”,
- (2) 기차주행시 또는 대형차에 의한 “교통진동(traffic vibrations)”,
- (3) 기계기초에서의 진동 문제인 “진동기초(foundation vibrations)”로 대별된다.

이들 중 여기서 다룰 진동전파문제는 진동기초분제로, 이러한 진동들은 그 발생의 원인이 되는 진동원의 제거가 불가능하므로, 이 경우 피해의 예방을 위해서는 진동발생을 억제 또는 발생한 진동의 전파를 차단하는 방법을 택할 수밖에 없다.

진동전파 억제 또는 차단 방법으로는

- ① 진동원 대책 : 진동발생원의 구조적 변경에 의한 방법과
- ② 수신부 대책 : 수신부인 구조물의 진동특성을 변경시키는 방법 및

\* 수원대학교 토목공학과 조교수

③ 전파경로 대책 : 진동전파 매개체인 지반에서의 진동전파를 차단하는 방법으로 나뉘어진다.

세번째 방법인 진동전파 매개체인 지반에서 행해지는 전파경로상의 대책은 다시 진동전파의 방향에 따라 진동원인 구조물로 부터 퍼져나가는 진동을 막는 직접차단방법(active isolation methods)과 진동이 수진부인 구조물로 들어오는 것을 차단하는 간접차단방법(passive isolation methods)으로 구별된다.

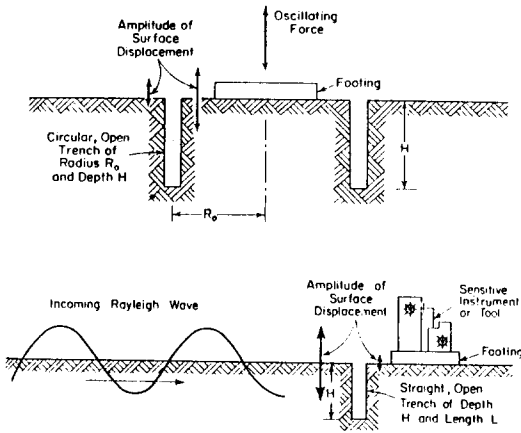


그림 1. a) Active Isolation, b) Passive Isolation / 6 /

### 3. 진동원 및 수진부 대책

진동원에서의 방법이란 진동원에서 전파매개체로 전달되는 에너지를 가능한한 많이 흡수하기 위한 방법이다. 이는 에너지의 효율적인 사용에 의한 진동에너지의 감소 또는 방출된 진동에너지의 흡수를 의미한다. 이를 위해 기계자체의 운전방법의 조정에 의한 방법외에 기초구조물의 고유진동수를 변화시켜 운전진동수와와의 증폭을 피하는 방법이 쓰이나, 이는 구조물의 고유진동수가 서로 가깝게 붙어있는 경우 상당히 먼 부분으로 변경시켜야 함으로 때로 커다란 경제적 부담을 요구한다. 또한 진동원의 종류에 따라 전파매개체로 전달되는 에너지의 양을 줄이기 위한 방법의 효율성을 해석적 방법에 의해 결정하기가 어려운 경우도 있다.

수진부에서의 방법이란 외부로부터의 진동이

구조물로 도달한 후의 대책으로 구조물로의 전달에너지를 가능한한 적게하기 위한 방법이나 또는 외부진동과 구조물의 진동수의 근접으로 인한 증폭 효과의 방지방법이다.

스프링과 감쇠기에 의해 단일자유도구조물로 이상화될 수 있는 구조물의 해석적 방법에 의한 진동전달율( $T_t$ : transmissibility)의 식은 다음과 같다.

$$T_t = \frac{[1+(2r\xi)^2]^{1/2}}{[(1-r^2)^2+(2r\xi)^2]^{1/2}}$$

$$= \begin{cases} A_T/F_0(\text{진동원문제}) \\ Y/y_0(\text{수진부문제}) \end{cases}$$

이 식은 진동원 및 수진부문제 모두에 해당하는 식으로, 진동원문제의 경우 진동력( $F_0$ )과 기초로 전달되는 힘( $A_T$ )의 비로 나타나며, 수진부문제의 경우는 기초진동의 진폭( $y_0$ )에 의한 구조물의 진폭( $Y$ )의 비로 나타난다.

식에서 나타나듯이, 이는 구조물의 고유진동수( $\omega$ )와 자극진동수( $\omega_c$ )의 비( $r=\omega_c/\omega$ ) 및 감쇠비( $\xi$ )에 의존한다. 이는 전달율의 감소를 위해서는 구조물의 고유진동수를 변경해야 하는 것을 의미하여 이는 진동기초의 구조적 변경을 의미한다.

### 4. 진동전파경로 대책

진동이 지반을 통해 전파되는 동안, 진동원에서의 진동크기는 지반의 재료적 특성과 지반의 구성형태에 의해 영향을 받아 변화되며, 변화되는 정도는 지반의 진동전달함수로 표시된다. 이 진동전달함수에 의해 진동차단구조물의 설치필요 여부가 판단될 수 있으며, 이를 위해서는 컴퓨터시뮬레이션에 의한 수치해석방법이 사용된다.

진동전파차단구조물로는 주로 직사각형단면의 방진구 또는 방진벽에 의한 지반진동 차단방법이 주로 사용된다. 방진구는 속이 빈 구조이고, 방진벽은 속을 콘크리트 또는 이외의 강성이 큰 재료로 채운 것으로, 방진구조의 차이는 방진벽의 내부재료의 진동전파 성능에 의해 나타난다.

이 방진구조의 주요 기능은 여러 파동의 종류 중 표면파인 R-파의 파단으로, 방진구조에 도달한

진동의 차단(interception), 발산(scattering)과 회절(diffraction)에 의한다.

방진구조의 효율은 진폭감소계수(ARF : amplitude-reduction-factor) 로 표시된다 :

$$ARF = \frac{\text{방진구조가 있을 때의 진폭}}{\text{방진구조가 없을 때의 진폭}}$$

방진구(Open trench)

방진구의 방진기능은 전산모델에 의한 방법/2.3/과 실험에 의한 방법/4.5/에 의해 연구되어져, 수동적 진파차단실험에 의한 연구결과가 (그림 2)에 나타나 있다. 이 연구결과에 의하면 파장이 12m인 경우(표면파 전파속도  $C_r=240\text{m/sec}$ , 진동수  $=20\text{Hz}$ ), 방진구의 깊이가 약 8m가 되면 약 60%의 진폭감소가 발생한다. 그러나 8m 길이의 방진구를 만드는 것은 기술적으로 불가능하므로 벤토나이트로 채우거나 방진벽을 설치하게 되며, 특수 방법으로 가스쿠션을 설치하기도 한다.

방진구의 기능을 결정하는 인자로는 진동원으로부터의 거리(R), 방진구의 길이(L)와 깊이(H) 및 폭(W)으로 이 중 주요 기능은 방진구의 깊이로, (그림2)에 나타난 방진구의 진동차단 성능실험에 의한 결과를 요약하면 다음과 같다 :

- 방진구의 최소 깊이는 표면파 파장( $\lambda_r$ )의 1.2 내지 1.5배이며,
- 방진구의 폭은 진동전파차단에 큰 영향이 없고,
- 동일한 차단기능을 위한 방진구의 최소면적  $A_T(=L \times H)$ 는  
 $R=2\lambda_r$ 의 경우  $A_T=2.5\lambda_r^2$ ,  
 $R=7\lambda_r$ 의 경우  $A_T=6.0\lambda_r^2$ 이다.

방진벽(Infilled trench)

방진벽의 경우, 방진벽의 기능은 벽의 깊이와 폭의 비에 따라 그 진동차단기능이 달라진다. (그림 3a)와 같이 폭이 작고 깊은 경우는 방진벽의 높은 강도로 인해 방진벽은 수직방향으로 강성체와 같이 움직인다. 즉, 방진벽 전체의 진동폭은 거의 일정해 표면에서의 경우 방진벽이 없을 때의 진동보다 작아진다. 이러한 방진벽의 방진기능은 부분적으로 파동의 반사에도 기인하나 주로 표면파에너지의 지반깊이로의 확산에 의존한다.

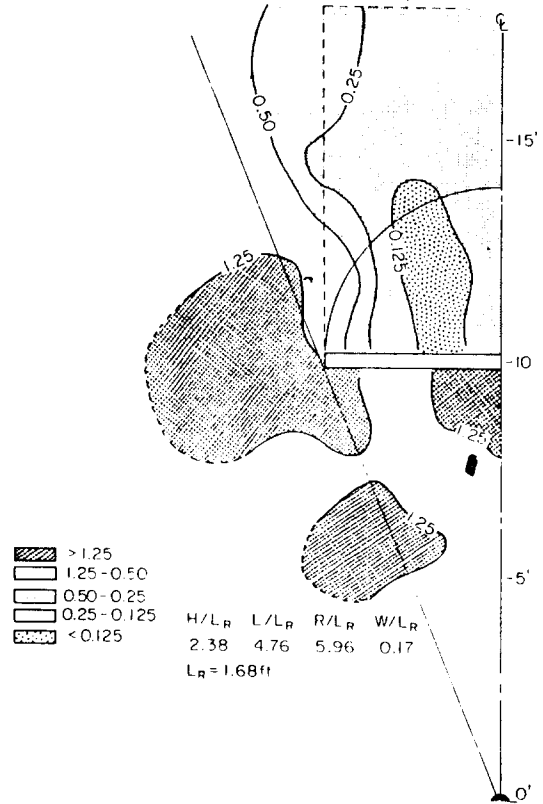
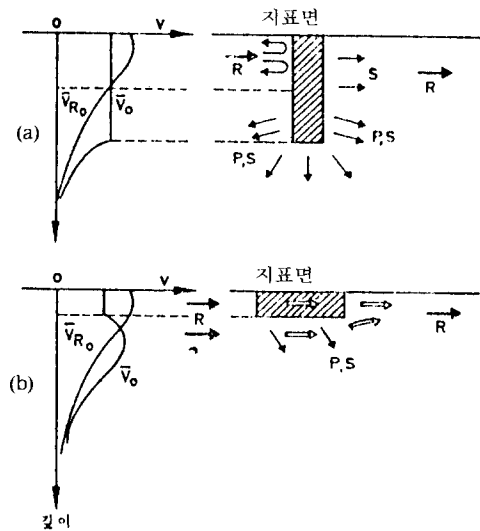


그림 2. 방진구에 의한 표면파 진동전파차단 효과 / 6 /



$V_{R0}$  : 방진벽이 없는 경우,  
 $V_0$  : 방진벽이 있는 경우

그림 3. 방진벽의 깊이와 폭의 비에 의한 진동전파차단 효과

폭이 크고 얇은 경우의 방진벽(그림3b)의 전달되는 표면파의 일부는 방진판을 통과하고 일부는 방진판의 밑을 통해 진행한다. 이 때 두 진동매개체의 진동전파속도의 차로인해 두개의 다른 물질을 통과한 파는 서로 교란작용을 일으켜 진동의 감쇄효과를 일으킨다.

방진벽은 방진구의 경우와 달리 방진벽의 폭도 진동차단효과에 큰 영향을 미쳐, 깊이와 폭의 비가 중요하다. 다른 또 하나의 영향인자는 지반과 방진벽재료의 차이를 나타내는 지반의 진동전파속도( $V_{ss}$ )와 방진벽의 진동전파속도( $V_{st}$ )의 비( $V_{st}/V_{ss}$ )로 적어도 2.5의 값이 요구된다.

### 5. 적용대상 수치해석방법의 검토

지반진동문제의 전산해석을 위해 사용되고 있는 대표적인 수치해석방법으로는 유한요소법과 경계요소법을 들 수 있다.

유한요소법의 진동전파문제에의 적용시의 장점으로는 지반의 기하학적형태 및 위치에 따른 재료적 특성변화(예 ; 깊이에 따른 전단강도의 증가)의 고려가 쉬우며, 큰 변형율로 인해 생기는 지반의 비선형적 특성 또한 유한요소법의 장점을 들어나게 하는 점이다. 그러나 순간동역학에서는 지반의 비선형성 고려는 덜 중요하다. 문제가 되는 점으로는 지반의 무한영역으로의 확대와 이에 따른 에너지의 기하학적 소산으로, 이의 해결을 위해 여러 특수유한요소가 개발되어 사용된다. 그러나 이러한 특수유한요소로는 지표면상의 구조물이나 지반구성형태의 고려가 어려우며, 특히 진동수 범위에서의 진동해석의 경우 요소의 크기가 가장 큰 진동수에 맞게 선택되던가 아니면 진동수의 크기에 따라 다시 요소분할이 이루어져야 한다.

이와 비교해 경계요소법의 경우, 에너지의 기하학적감쇠의 고려가 쉽고, 요소분할이 경계에서만

이루어지므로 진동수의 크기에 따른 어려움이 비교적 적다.

### 6. 결 언

진동전파차단효과는 방진구가 가장 좋으나, 기술적인 문제에 의해 방진벽을 설치하는 경우에 방진벽에 의한 진동전파차단효과는 여러 연구들에 의해 다음과 같이 요약된다 ;

- 방진벽은 진동원에 가깝게 설치할수록 좋다.
- 방진벽과 지반의 강성비가 클수록 방진벽의 진동차단성능은 우수하다.
- 콘크리트보다 더 높은 강도의 방진벽도 더 좋은 결과를 나타내지 않는다.

### 참 고 문 헌

- [1] Al-Hussaini, T.M. and Almad, S. ; "Simple Design Methods for Vibration Isolation by Wave Barriers", 2nd Int. Conf. on Recent Advances in Geotechnical Earthquake Engng. and Soil, Dynamics, University of Missouri-Rolla, 1991.
- [2] Beskos, D.E., Dasgupta, G., Vardoulakis, I.G. : "Vibration Isolation Using Open or Filled Trenches ; 2-D homogeneous Soil", Comput. Mech., Vol.1, 1986.
- [3] Dolling, H.J. ; "Abschirmung von Erschuetterungen durch Bodenschlitze"(방진구에 의한 진동전파방지), Die Bautechnik, H.5 und 6, 1970.
- [4] Woods, R.D. ; "Screening of Surface Waves in Soils", Proc. ASCE, No.SM4, 1978.
- [5] Haupt, W. ; "Model Tests on Screening of Surface Waves", Proc. X. Int. Conf. on Soil Mech. and Found. Engng., Stockholm, 1981.
- [6] Das, B.M. ; Principles of Soil Dynamics. PWS-KENT Publ. Co., 1993.