

다층반무한 기본해를 이용한 지진응답해석

Earthquake Response Analysis through a Fundamental Solution to Multilayered Half-Planes

김문겸* 이종우** 박준상*** 조성용**
Kim Moon Kyum Rhee, Jong Woo Park, Joon Sang Cho, Seung Yong

ABSTRACT

The indirect boundary integral equation is formulated to analyze the behavior of a cavity in a multilayered half-plane subjected to earthquake waves. This formulation uses the fundamental solutions that are numerically calculated by the generalized transmission and reflection coefficient method. The free surface of the cavity without external excitation influences the behavior of the half-plane. Consequently this analysis adds the consideration of scattering-field into the analysis and the total motion field of the cavity is decomposed into the free-field and scattering-field motions. The free-field motion is obtained from the modification of the transmission and reflection coefficient method. The scattering-field motion is calculated by the indirect boundary value problem which has the fictitious boundaries and sources. In this study, P wave, SV wave, SH wave, and Rayleigh wave are analyzed respectively.

1. 서 론

다층 반무한평면내 지진파 문제의 수치해석에 있어서 유한요소법을 사용한 해석에는 경계에서의 파반사 등의 문제로 인하여 응답이 왜곡되는⁽¹⁾ 반면에 반무한 기본해를 이용한 경계요소법은 경계에서의 이산화만 필요하고 무한경계에 대한 방사조건은 실제 문제와 같이 고려된다.⁽²⁾ 그러므로 지반과 같은 반무한체에 대한 수치해석에는 경계요소법을 사용하는 것이 합리적이다.

다층반무한 평면내에서 터널 등과 같은 공동의 존재는 지진응답에 영향을 준다. 공동이 없을 경우에는 지진파에 의한 자유장성분만 존재하지만, 공동이 존재하게 되면 해석시 공동주변에서 자유장(free-field)성분과 분산장(scattering-field)성분을 고려해야 한다. 본 연구에서는 공동주변에서의 자유장성분은 다층반무한 기본해를 계산하는 알고리즘에 입사되는 지진파의 특성을 고려하여 계산하였다. 또한 분산장에 의한 성분은 주어진 경계조건으로부터 직접적으로 산출할 수 없으므로 분산장변위성분에 대한 간접경계적분 방정식을 형성하여, 공동주변에서의 분산장의 변위 및 응력 성분을 도출하였다. 간접경계적분 방정식의 해석에 필요한 kernel은 다층반무한 기본해를 계산하는 Green 함수를 이용하여 계산하였다. 이러한 과정을 통해 다층 반무한 평면내에 존재하는 공동 및 임의의 위치에 대한 지진응답 해석방법을 제시하였다. 이 때 각 층에서의 연속조건을 만족시키기 위해 일반화된 투과 및 반사계수를 이용하였다.⁽³⁾

* 연세대학교 토목공학과 교수, 정회원

** 연세대학교 토목공학과 박사과정

*** 연세대학교 산업기술연구소 연구원

2. 다층반무한 기본해

2.1. 기본방정식

그림 1은 반무한영역내에 n 개의 평행한 층을 이루고 있는 지하구조계를 나타낸다. 각 층 접합면에서의 연속조건을 만족시키기 위해 접합면은 완전 부착되어 있는 것으로 한다. 또한 각 층은 균질체이며 탄성 또는 점탄성으로 가정한다. 이러한 다층반무한 구조계의 지배방정식은 임의의 층 ℓ 에서의 변위를 시간의 조화함수로 표현하여 각 층별로 형성될 수 있다. 각 층의 재료가 균질하고 물체력이 없을 경우에 대한 Navier 방정식으로부터 ℓ 층에서의 변위는 포텐셜함수 Φ , Ψ 그리고 χ 를 사용하여⁽⁴⁾ 식 (1)과 같이 나타낼 수 있으며, 응력성분들은 Hooke 의 법칙을 이용하여 구할 수 있다.

$$u_r^\ell(r, \theta, z) = a \left(\frac{\partial \Phi^\ell}{\partial r} + \frac{\partial^2 \Psi^\ell}{\partial r \partial z} + \frac{1}{r} \frac{\partial \chi^\ell}{\partial r} \right) \quad (1a)$$

$$u_\theta^\ell(r, \theta, z) = a \left(\frac{1}{r} \frac{\partial \Phi^\ell}{\partial \theta} + \frac{1}{r} \frac{\partial^2 \Psi^\ell}{\partial z \partial \theta} - \frac{\partial \chi^\ell}{\partial r} \right) \quad (1b)$$

$$u_z^\ell(r, \theta, z) = a \left(\frac{\partial \Phi^\ell}{\partial z} - \nabla^2 \Psi^\ell + \frac{\partial^2 \Psi^\ell}{\partial z^2} \right) \quad (1c)$$

여기서, $\eta_p^\ell = a \frac{\omega}{c_p^\ell}$, $\eta_s^\ell = a \frac{\omega}{c_s^\ell}$ 이며, a 는 길이에 대한 무차원 상수이며 c_p^ℓ 와 c_s^ℓ 는 각각 ℓ 층에서의 P파와 S파의 속도이다. σ_{rz} , $\sigma_{\theta z}$, 그리고 σ_{zz} 는 각각 z 축에 수직인 평면에 대한 r 방향 응력, θ 방향 응력 그리고 z 방향 응력이다. 이들 식의 포텐셜함수를 방위각 θ 에 대한 Fourier 변환과 방사방향 Hankel 변환을 수행하면 상미분 방정식을 얻을 수 있으며 이로부터 다음과 같은 일반해를 구할 수 있다.

$$\Phi = A_\phi e^{-a_r z} + B_\phi e^{-a_s z} \quad (2a)$$

$$\Psi = A_\psi e^{-a_r z} + B_\psi e^{-a_s z} \quad (2b)$$

$$\chi = A_\chi e^{-a_r z} + B_\chi e^{-a_s z} \quad (2c)$$

여기서, $A_\phi, B_\phi, A_\psi, B_\psi, A_\chi, B_\chi$ 는 연속조건, 경계조건, 방사조건으로부터 구해지는 상수이다.

$\theta = 0$ 일 경우 수진점에서의 r 축은 x 축이 되며, 식 (2)를 포텐셜 함수에 대입하고, 이를 다시 ℓ 층에서의 변위식에 대입하면 변위에 대한 기본해를 구할 수 있다.

2 차원 평면상에서의 변형률 문제는 y 방향으로의 무한체를 다루는 문제이므로 본 연구에서 유도된 축대칭 점하중을 y 방향으로의 무한한 선하중으로 변환시켜야 한다.⁽⁵⁾⁽⁶⁾ 그림 2는 점하중과 선하중을 나타낸다. 선하중을 고려하기 위해서는 θ 에 대해 무한적분을 수행하여야 한다. 이런 조건으로 구한 r 방향 변위와 응력에 $\cos \theta$ 를 곱하므로써 2 차원 문제에서의 x 방향 변위와 응력을 구할 수 있다. 이러한 과정을 식으로 표현하면 식 (3)과 같은 2차원 평면에서의 변위에 대한 동적 Green 함수를 구할 수 있다.

$$u_{xx}^{\ell}(\omega, x, z, h) = 2 \int_0^{\frac{\pi}{2}} \int_0^{\infty} \left[PD_x^{\ell} \frac{dJ_1(\eta x / \cos \theta)}{d(\eta x / \cos \theta)} + HD_x^{\ell} \frac{dJ_1(\eta x / \cos \theta)}{d(\eta x / \cos \theta)} \right] \cos^2 \theta d\eta d\theta \quad (3a)$$

$$u_{xz}^{\ell}(\omega, x, z, h) = -2 \int_0^{\frac{\pi}{2}} \int_0^{\infty} [PD_z^{\ell} J_1(\eta x / \cos \theta)] \cos \theta d\eta d\theta \quad (3b)$$

$$u_{zx}^{\ell}(\omega, x, z, h) = -2 \int_0^{\frac{\pi}{2}} \int_0^{\infty} [VD_x^{\ell} J_1(\eta x / \cos \theta)] \cos \theta d\eta d\theta \quad (3c)$$

$$u_{zz}^{\ell}(\omega, x, z, h) = -2 \int_0^{\frac{\pi}{2}} \int_0^{\infty} [VD_z^{\ell} J_0(\eta x / \cos \theta)] d\eta d\theta \quad (3d)$$

여기서, 여기서, J_m 는 Bessel 의 m 차 1종 함수이다. 또한 PD 는 P 파에 대한 변위벡터이고, VD 는 SV 파에 대한 변위벡터이며, HD 는 $-SH$ 파에 대한 변위벡터이다.

$\theta = 0$ 일 경우 x, z 평면에 대한 식 (3)의 변위벡터들은 각각 P 파에 대한 식 (4)와 SV 파에 대한 식 (5)와 SH 파에 대한 식 (6)과 같이 행렬의 형태로 분리하여 표현할 수 있다.

$$\begin{bmatrix} PD_x^{\ell} & PD_y^{\ell} \\ VD_x^{\ell} & VD_y^{\ell} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -1 & -1 \\ \gamma_p^{\ell} & \gamma_p^{\ell} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e^{-\nu_p^{\ell}(z-z^{(t-1)})} & 0 \\ 0 & e^{-\nu_p^{\ell}(z^{(t)}-z)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} CD_{px}^{\ell} & CD_{py}^{\ell} \\ CU_{px}^{\ell} & CU_{py}^{\ell} \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$\begin{bmatrix} PD_x^{\ell} & PD_y^{\ell} \\ VD_x^{\ell} & VD_y^{\ell} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \gamma_s^{\ell} & \gamma_s^{\ell} \\ 1 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e^{-\nu_s^{\ell}(z-z^{(t-1)})} & 0 \\ 0 & e^{-\nu_s^{\ell}(z^{(t)}-z)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} CD_{sx}^{\ell} & CD_{sy}^{\ell} \\ CU_{sx}^{\ell} & CU_{sy}^{\ell} \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$\begin{bmatrix} HD_x^{\ell} & HD_y^{\ell} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e^{-\nu_s^{\ell}(z-z^{(t-1)})} & 0 \\ 0 & e^{-\nu_s^{\ell}(z^{(t)}-z)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} CD_{hx}^{\ell} & CD_{hy}^{\ell} \\ CU_{hx}^{\ell} & CU_{hy}^{\ell} \end{bmatrix} \quad (6)$$

여기서, $\nu_p^{\ell} = \sqrt{\eta^2 - k_p^{\ell 2}}$, $k_p^{\ell} = \omega / c_p$, $\gamma_p^{\ell} = \nu_p^{\ell} / \eta$, $k_s^{\ell} = \omega / c_s$, $\nu_s^{\ell} = \sqrt{\eta^2 - k_s^{\ell 2}}$, $k_s^{\ell} = \omega / c_s$, $\gamma_s^{\ell} = \nu_s^{\ell} / \eta$ 이다. CD , CU 는 각각 연속조건, 경계조건, 방사조건으로부터 구해지는 하향방향, 상향방향 포텐셜 상수이다.

응력에 대한 함수는 식 (3)에 표현된 변위의 함수를 이용하여 응력-변위 관계로부터 유도된다.

$$\sigma_{xxx}^{\ell}(\omega, x, z, h) = \lambda^{\ell} \left(\frac{\partial u_{xx}^{\ell}}{\partial x} + \frac{\partial u_{zx}^{\ell}}{\partial z} \right) + 2\mu^{\ell} \left(\frac{\partial u_{xx}^{\ell}}{\partial x} \right) \quad (7a)$$

$$\sigma_{xxz}^{\ell}(\omega, x, z, h) = \lambda^{\ell} \left(\frac{\partial u_{xz}^{\ell}}{\partial x} + \frac{\partial u_{zz}^{\ell}}{\partial z} \right) + 2\mu^{\ell} \left(\frac{\partial u_{xz}^{\ell}}{\partial x} \right) \quad (7b)$$

$$\sigma_{zzx}^{\ell}(\omega, x, z, h) = \lambda^{\ell} \left(\frac{\partial u_{zx}^{\ell}}{\partial z} + \frac{\partial u_{xx}^{\ell}}{\partial x} \right) + 2\mu^{\ell} \left(\frac{\partial u_{zx}^{\ell}}{\partial z} \right) \quad (7c)$$

$$\sigma_{zzz}^{\ell}(\omega, x, z, h) = \lambda^{\ell} \left(\frac{\partial u_{zz}^{\ell}}{\partial z} + \frac{\partial u_{xz}^{\ell}}{\partial x} \right) + 2\mu^{\ell} \left(\frac{\partial u_{xx}^{\ell}}{\partial x} \right) \quad (7d)$$

$$\sigma_{xzx}^{\ell}(\omega, x, z, h) = \mu^{\ell} \left(\frac{\partial u_{xx}^{\ell}}{\partial z} + \frac{\partial u_{zx}^{\ell}}{\partial z} \right) \quad (7e)$$

$$\sigma_{xzz}^{\ell}(\omega, x, z, h) = \mu^{\ell} \left(\frac{\partial u_{xz}^{\ell}}{\partial z} + \frac{\partial u_{zz}^{\ell}}{\partial x} \right) \quad (7f)$$

여기서 응력의 아래첨자중 첫 번째 첨자는 응력방향을 나타내고 두 번째는 응력작용면을, 세 번째

침자는 하층의 작용방향을 나타낸다. 이 경우 각 변위벡터는 ω, z, h 에 대한 함수로서 x 에 대해 독립적이고 Bessel 함수는 x 및 wavenumber k 에 대한 함수로서 z 에 대해 독립적이므로 각 변위성분의 미분은 쉽게 계산된다.

2.2 다층구조계의 연속방정식

2.2.1 경계면에서의 조건식

식 (3)에 나타낸 변위장의 적분형태는 각 층당 $PD_q^\ell, VD_q^\ell, HD_q^\ell, PS_q^\ell, VS_q^\ell$, 그리고 HS_q^ℓ 로 표현되는 6개의 미지값을 포함한다. 이 미지값들을 구하기 위하여 연속조건, 자유면에서의 경계조건, 반무한면에서의 방사조건을 이용하여야 한다. 먼저 다층 반무한체의 경우에 대한 경계조건으로써 자유면에서의 응력이 0 이라는 조건을 사용하고, 각 층의 경계면내에서 변위와 표면력의 연속조건을 만족시킴으로써 3 개의 방정식을 이용할 수 있다. 또한 가장 밑에 놓인 반무한체 ($\ell = N+1$)에서의 방사조건으로 3 개의 추가적인 방정식을 이용할 수 있다. 그러므로 식 (3) 및 식 (7)을 구성하는 각 파의 변위벡터 및 응력벡터들은 다음 조건들을 만족시켜야 한다.

$$\begin{pmatrix} PD_q^\ell(z, h) \\ VD_q^\ell(z, h) \\ HD_q^\ell(z, h) \\ PS_q^\ell(z, h) \\ VS_q^\ell(z, h) \\ HS_q^\ell(z, h) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} PD_q^{\ell-1}(z, h) \\ VD_q^{\ell-1}(z, h) \\ HD_q^\ell(z, h) \\ PS_q^{\ell-1}(z, h) \\ VS_q^{\ell-1}(z, h) \\ HS_q^{\ell-1}(z, h) \end{pmatrix} \quad (8)$$

반사계수 및 투과계수는 Luco 와 Apsel⁽³⁾ 에 의해 제안되어진 일반적인 반사, 투과계수 결정방법을 사용한다. 반무한면 $\ell = N+1$ 에서는 파의 반사가 존재하지 않고 단지 하향의 파만 존재하므로 상향 포텐셜이 0 이라는 조건을 성립시킬 수 있으며 자유면의 경우에는 반사만 존재하고 투과는 존재하지 않으므로, 자유면에서의 하향포텐셜은 제 1 층에서의 상향포텐셜에 대한 반사로만 표현되어진다. 또한 임의의 층 ℓ 와 층 $\ell + 1$ 사이에 존재하는 경계 ℓ 에서 상향 포텐셜은 ℓ 층에서의 하향 포텐셜에 대한 반사와 $\ell + 1$ 층에서의 상향 포텐셜에 대한 투과의 합으로 구해질 수 있다. 이와 같이 반사계수 및 투과계수를 이용한 상향 및 하향포텐셜로서 각 층에서의 연속조건을 만족시킬 수 있다.

2.2.2 하중조건 형성

하중이 가해지는 S 층에서의 응력 불연속성을 고려하기 위해, Harkrider⁽⁴⁾에 의해 제안되어진 방법을 사용한다. 그림 1 과 같이 하중작용점을 사이에 두고 S^- 과 S^+ 의 층으로 나누고 식 (9)와 같은 응력불연속 조건식을 사용한다.

$$\begin{pmatrix} DP_q^{S^+}(z, h) \\ DV_q^{S^+}(z, h) \\ DH_q^{S^+}(z, h) \\ SP_q^{S^+}(z, h) \\ SV_q^{S^+}(z, h) \\ SH_q^{S^+}(z, h) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} DP_q^{S^-}(z, h) \\ DV_q^{S^-}(z, h) \\ DH_q^{S^-}(z, h) \\ SP_q^{S^-}(z, h) \\ SV_q^{S^-}(z, h) \\ SH_q^{S^-}(z, h) \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ -\eta/2\pi \\ \eta/2\pi \\ -\eta/2\pi \end{pmatrix} \quad (9)$$

식 (8)과 식 (9)의 조건을 적용하여 임의의 하중이 작용하는 층에서의 포텐셜 값을 구할 수 있다. 이러한 상향포텐셜과 하향 포텐셜값으로 변위벡터와 응력벡터를 형성할 수 있으며 이로부터 다층반무한체에 대한 동적기본해를 구할 수 있다.

3. 지진파에 의한 자유장해석

3.1 다층구조계의 연속방정식

하단층 경계면을 향해 θ 의 입사각을 갖고 전파되는 지진파중은 그림 4와 같이 모형화될 수 있다. 이때 표면에서 발생하는 기지의 변위는 P 파, SV 파 및 SH 파에 대하여 각각 수평 및 수직변위로 표현될 수 있다. 이와 같은 경계조건을 이용하여 전술한 다층구조계의 연속방정식을 수정할 수 있다. 먼저 입사각 θ 에 의해 임의의 wavenumber k 로부터 수직방향 wavenumber와 수평방향 wavenumber가 결정된다. 이로부터 식 (3) ~ 식 (7)이 수정된다. 기지의 표면 변위와 0인 표면 응력 조건을 이용하여 다음 식 (10) 및 식 (11)과 같이 표면에서의 경계조건을 성립시킬 수 있다.

$$u_x^1(\omega, x, z, h) = U_x \quad (10a)$$

$$u_z^1(\omega, x, z, h) = U_z \quad (10b)$$

$$\sigma_x^1(\omega, x, z, h) = \sigma_x^1(\omega, x, z, h) = 0 \quad (11)$$

식 (10) 및 식 (11)로서 제 1 층에서의 미지 변위벡터 및 응력벡터를 구할 수 있다. 이를 이용하여 식 (8)과 같이 각 층의 경계면내에서 변위와 표면력의 연속조건을 만족시킨다. 또한 최하단층 반무한체에서의 방사조건을 이용한다. 이 때에는 하중항이 포함되지 않으므로 식 (9)는 포함시키지 않는다. 이와 같은 방법으로 모든 층에서의 미지 변위벡터 및 응력벡터를 구할 수 있고 이로서 θ 의 입사각으로 전파되는 지진파에 대한 임의의 층에서의 자유장 응답을 구할 수 있다.

4. 지진응답해석을 위한 간접경계적분방정식

그림 4는 P 파, SV 파, 또는 SH 파가 입사되는 다층반무한 평면에 존재하는 공동을 나타낸다. 다층반무한 평면의 지표면 ($z=0$)과 평면내에 존재하는 공동으로 인하여 표면력 성분이 0인 두 개의 자유표면이 존재한다. 두 자유표면의 존재는 다층반무한 평면의 거동에 영향을 주고, 이 영향은 분산장에 의한 변위성분과 표면력성분으로 나타난다. 따라서 공동주변에서의 변위성분 $\{u(\vec{x})\}$ 와 표면력성분 $\{\tau(\vec{x})\}$ 는 식 (12)와 식 (13)과 같이 자유장 성분과 분산장 성분으로 분리된다⁽⁷⁾.

$$\{u(\vec{x})\} = \{u_{ff}(\vec{x})\} + \{u_s(\vec{x})\} \quad (12)$$

$$\{\tau(\vec{x})\} = \{\tau_{ff}(\vec{x})\} + \{\tau_s(\vec{x})\} \quad (13)$$

여기서, 아래첨자 ff 는 자유장 성분을 나타내고, 아래첨자 s 는 분산장 성분을 나타낸다. 표면력성분 $\{\tau(\vec{x})\}$ 은 공동의 자유표면 경계조건으로부터 0이 되어야 하고, 이 경계조건에 의해서 자유장 표면력 성분과 분산장 표면력 성분 사이에 다음의 관계식이 성립된다.

$$\{\tau_s(\vec{x})\} = -\{\tau_{ff}(\vec{x})\}, \quad x \in S_0 \quad (14)$$

식 (14)는 그림 4의 공동에 대한 지진응답해석을 위한 경계적분방정식의 경계조건이 된다.

식 (12)와 식 (13)의 지진응답을 구성하는 자유장성분인 $\{u_{ff}(\vec{x})\}$, $\{\tau_{ff}(\vec{x})\}$ 는 3 절의 자유장 해석에 의해서 계산된다. 그러나 분산장 성분인 $\{u_s(\vec{x})\}$, $\{\tau_s(\vec{x})\}$ 은 직접적으로 계산이 불가능하다. 그러므로 식 (14)의 경계조건을 이용하여 간접경계적분방정식을 형성하여 해석할 수 있다. 그림 3은 간접경계적분방정식 형성에 필요한 미지값의 가상하중 $\{F(\vec{y}_0)\}$ 과 이 가상하중이 존재하는 가상경계면 L_1 을 도시한다. 분산장 변위성분 $\{u_s(\vec{x})\}$ 에 관한 간접경계적분방정식을 형성하면 식 (15)로 표현된다.

$$\{u_s(\vec{x}_0)\} = \int_{L_1} [G(\vec{x}_0, \vec{y}_0)] \{F(\vec{y}_0)\} dl_1(\vec{y}_0), \quad \vec{x}_0 \in L_0 \quad \vec{y}_0 \in L_1 \quad (15)$$

여기서, $[G(\vec{x}_0, \vec{y}_0)]$ 는 다층반무한 기본해를 이용하여 계산되는 단위하중에 의한 변위행렬이다. 각각의 기본해에 사용되는 단위하중의 작용점은 가상경계인 L_1 에 위치하고, 응답점은 실제경계인 L_0 에 위치한다. 식 (15)은 양변에 각각 미지항인 $\{u_s(\vec{x})\}$ 와 $\{F(\vec{y}_0)\}$ 를 가지고 있다. 주어진 경계조건 식 (14)를 적용하여 식 (15)의 미지의 가상하중을 계산하기 위한 간접경계적분방정식은 식 (16)과 같이 형성된다.

$$\{\tau_s(\vec{x}_0)\} = \int_{L_1} [H(\vec{x}_0, \vec{y}_0)] \{F(\vec{y}_0)\} dl_1(\vec{y}_0) \quad (16)$$

여기서, $[H(\vec{x}_0, \vec{y}_0)]$ 는 다층반무한 기본해를 이용하여 계산되는 표면력행렬이다. 식 (16)의 경계조건으로부터 $\{\tau_s(\vec{x})\}$ 을 계산하고 식 (16)에 대입하여, 이 표면력을 발생시키는 가상하중 $\{F(\vec{y}_0)\}$ 을 계산한다. 계산된 가상하중 $\{F(\vec{y}_0)\}$ 을 식 (15)에 대입하면 $\{u_s(\vec{x})\}$ 을 계산할 수 있다. $\{u_{ff}(\vec{x})\}$, $\{u_s(\vec{x})\}$, $\{\tau_{ff}(\vec{x})\}$ 와 $\{\tau_s(\vec{x})\}$ 가 모두 계산되므로 식 (12)와 식 (13)에 의해서, 공동주변에서의 P파, SV파, SH파에 의한 지진응답 변위와 표면력을 계산할 수 있다.

5. 결 론

본 연구에서는 층의 경계에서 파의 반사와 투과를 고려하여 동하중에 대한 다층반무한 기본해를 수치적으로 계산하고, 산출된 동적 수치기본해를 이용하여 주파수 영역에서의 다층반무한 구조계에 대한 지진파 응답해석기법을 고찰하였다. 본 연구를 통하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 반사파와 투과파를 고려하여 표면에서의 경계조건과 각 층 경계에서의 연속조건을 만족시키고, 단위 동하중이 작용하는 하중점에서 가상경계면을 도입함으로써 다층반무한 구조계에서의 동적 수치기본해를 구할 수 있었다.
2. 동적 수치기본해에 사용된 일반화된 투과/반사 계수법을 수정하여 해석대상 영역내 가진점이 없이 입사하는 P파, SV파, SH파 및 Rayleigh파에 대한 자유장내 응답 산출식을 유도하였다.
3. 입사되는 지진파에 의한 공동주변에서의 분산장 변위 및 표면력 성분을 산출하기 위해 다층반무한 기본해와 자유장 표면력성분을 이용하여 간접경계적분방정식을 유도하였다.
4. 이러한 과정을 통해 다층 반무한 평면내에 존재하는 공동주변 및 임의의 위치에서의 지진응답 해석방법을 제시하였다.

6. 참고문헌

1. Wolf, J.P. and Song, C.(1996), *Finite-Element Modelling of Unbounded Media*, John-Wiley & Sons, New York.
2. Dominguez, J. and Meise, T.(1991), "On the Use of BEM for Wave Propagation in Infinite Domains," *Engineering Analysis with Boundary Elements* 8, pp132-138.
3. Luco, J.E. and Apsel, R.J.(1983), "On the Green's Functions for a Layered Half-Space, Part I," *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 73, pp. 909-929.
4. Harkrider, D.G.(1964), "Surface Waves in Multilayered Elastic Media, Part I. Rayleigh and Love Waves from Buried Sources in a Multilayered Elastic Half-Space," *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 54, pp. 627-680.
5. Manolis, G.D. and Beskos, D.E.(1988), *Boundary Element Methods in Elastodynamics*, Uwin Hyman, London.
6. Achenbach, J.D.(1984), *Wave Propagation in Elastic Solids*, North-Holland.
7. Luco, J.E. and De Barros, F.C.P.(1994), "Dynamic Displacements and Stresses in the Vicinity of a cylindrical Cavity Embedded in a Half-Space," *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol.23, pp. 321-340.
8. Estorff, O.V. and Antes, H.(1990), "Dynamic Response of Tunnel Structures," *Structural Dynamics*, Krätzig et al (eds), pp.803-810.
9. 박준상(1996), "다층반무한 기본해를 이용한 경계요소 해석," 석사학위논문, 연세대학교.
10. 조성용(1997), "다층반무한체에 대한 동적경계요소," 석사학위논문, 연세대학교.
11. 김문겸, 이종우, 조성용, 이승원(1996), "동하중에 대한 2차원 다층 반무한기본해에 관한 연구," 대한토목학회 학술발표회 논문집(I), pp.147-150.

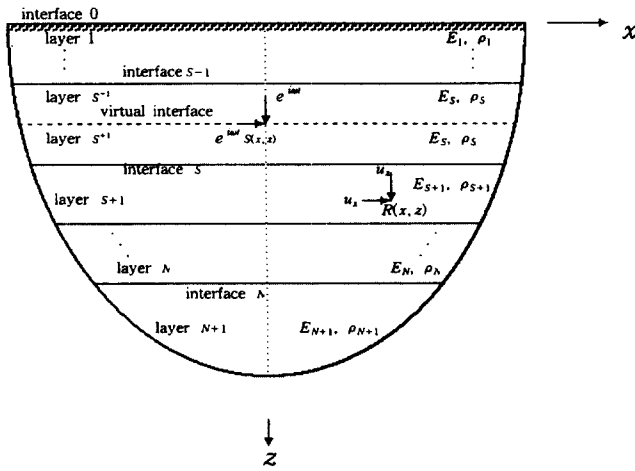


그림 1 단위하중이 작용하는 다층반무한 평면

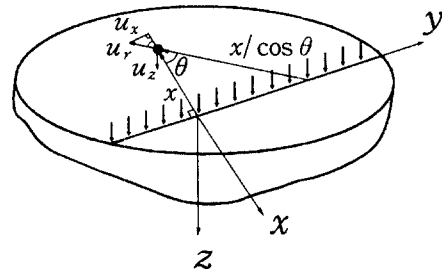


그림 2 선하중으로의 변환

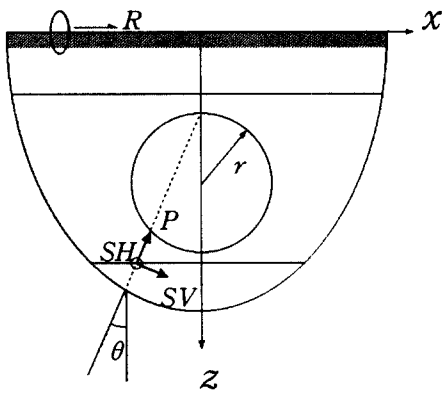


그림 3 다층 반무한체 내의 터널

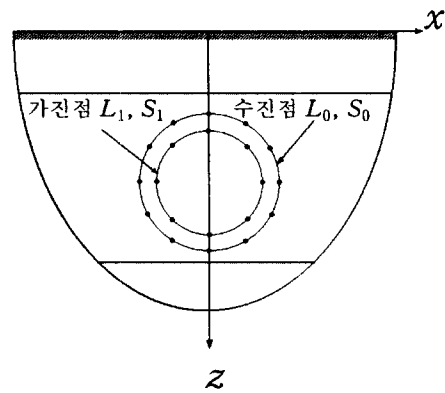


그림 4 가진점 수신점의 위치