

무한요소를 이용한 터널의 동적해석
Dynamic Analysis of Tunnel by Using Infinite Element

양 신 추* 이 희 현** 변 재 양***
Yang, Sin-Chu Lee, Hee-Hyun Byun, Jae-Yang

ABSTRACT

The dynamic interaction between tunnel structures and their surrounding soil medium due to impulse loading is investigated by a hybrid IEM/FEM methodology. A dynamic infinite element is developed for the efficient discretization of the far-field region of the unbounded soil medium. The shape functions of the infinite element are constructed based on the far-field solutions which are obtained by solving the 2-D elastic wave problems. Also they are devised to obtain a reasonable result over all frequency range. Numerical analysis is carried out to examine the response of the tunnel subjected to simple rectangular impulse. It is indicated that the results by the present method are in good accord with those by the boundary and finite element coupling method.

1. 서론

본 연구에서는 유한 및 경계요소 병합방법[4]과 더불어 최근 연구개발되어 지고 있는 유한요소 및 무한요소(Infinite Element) 병합방법[1,2]에 의한 터널의 동적해석 방법이 제시되었다. 먼저 터널로 부터 발생한 탄성파가 외부영역(Far-Field)으로 전파해갈 때 이들 탄성파 성분중 압축파, 전단파 및 표면파 성분의 외부영역거동을 알아보고 이들을 기초로하여 각각의 파동을 나타낼 수 있는 무한요소의 형상함수(Shape Function)를 구성하였다. 또한 이들 형상함수를 조합함으로써 여러가지 탄성파들이 동시에 전파되는 문제의 해석에 적용할 수 있도록 하였다. 형상함수 구성시 Hankel함수 대신 x 값이 클 때의 점근식을 사용함으로써 저주파 영역에서 수치해석결과가 다소 해석적결과와 불일치 하였던 것을[11,12] x 값이 작을 때의 점근식과 클 때의 점근식을 적절히 조합하여 형상함수를 구성함으로써 저주파영역에서의 해석결과가 향상되도록 하였다. 예제해석으로 수직사각 충격력을 받는 반무한 지반에 설치된 사각터널의 동적해석을 수행한 후 해석결과를 경계요소와 유한요소의 병합방법으로 해석한 결과와 비교함으로써 제안된 방법의 타당성을 검토하였다.

2. 2차원 탄성파의 전파특성

2.1 압축파의 전파특성

무한공간 내에 있는 실린더형공동(Cylindrical Cavity) 벽에 수직으로 균일한 크기의 조화압력(Harmonic Pressure), $p(a_0)e^{i\omega t}$ 이 작용할 때 실린더축을 중심으로 압축파가 반경방향으로 전파한다. 이 경우 모든 장변수(Field Variables)는 반경방향좌표 r 만의 함수이므로 조화진동에 대한 운동방정식은 다음과 같이 나타내 지고

$$u_{,rr} + \frac{u_{,r}}{r} - \frac{u}{r^2} + k_p^2 u = 0 \quad (1)$$

* 한국고속철도건설공단 연구개발본부 동역학팀
** 한국고속철도건설공단 연구개발본부 동역학팀장
*** 한국고속철도건설공단 연구개발본부 궤도연구실장

식(1)의 해는 다음과 같이 구해진다.

$$u(r) = AH_1^{(1)}(k_p r) + BH_1^{(2)}(k_p r) \quad (2)$$

여기서 $H_1^{(1)}$, $H_1^{(2)}$ 는 각각 1차 1, 2종 Hankel 함수이며, A , B 는 경계조건으로부터 구해지는 상수이다. $H_1^{(1)}$ 은 내부로 향하는 파를 나타내므로 식(2)에서 $A=0$ 이어야한다. 따라서 식(2)는 다음과 같이 되고

$$u(r) = BH_1^{(2)}(k_p r) \quad (3)$$

$k_p r \gg 0$ 일 때 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$u(r) \sim B' \sqrt{\frac{2}{\pi r}} e^{-ik_p r} \quad (4)$$

식(4)으로부터 2차원 무한영역에서 압축파의 진폭은 진동원으로부터 멀어짐에 따라 거리의 제곱근에 반비례하여 작아짐을 알 수 있다.

원형터널의 반경방향운동에 대한 임피던스

원형터널의 반경방향 임피던스(Impedance), $K_u(a_o^p)$ 는 반경방향으로 단위 변위를 유발시키는데 필요한 터널벽에 작용하는 하중의 총합으로 정의된다. 터널벽에 작용하는 압력의 총합은 $2\pi r_o p(a_o^p)$ 이고 $p(a_o^p) = -\sigma_r(r_o, a_o^p)$ 이므로 임피던스는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} K_u(a_o^p) &= 2\pi r_o p_o / u_o = -2\pi r_o \sigma_r(r_o) / u_o \\ &= 4\pi G \{k_u(a_o^p) + ia_o^p c_u(a_o^p)\} \end{aligned} \quad (5)$$

여기서 $k_u(a_o^p)$, $c_u(a_o^p)$ 는 각각 무차원 반경방향 강성(Stiffness)과 감쇠(Damping)계수로서 다음과 같이 주어진다.

$$k_u(a_o^p) = \left\{ 1 - \frac{1}{2} \left(\frac{v_p}{v_s} \right)^2 a_o^p \frac{J_o J_1 + Y_o Y_1}{J_1^2 + Y_1^2} \right\} \quad (6)$$

$$c_u(a_o^p) = \frac{1}{\pi} \left(\frac{v_p}{v_s} \right)^2 \frac{1}{J_1^2 + Y_1^2} \quad (7)$$

여기서 J_o, J_1 는 제1종 0, 1차 Bessel함수이고, Y_o, Y_1 는 제2종 0, 1차 Bessel함수이며, $a_o^p (= r_o \omega / v_p)$ 는 압축파의 무차원주파수이다.

2.2 전단파의 전파특성

균질, 등방, 탄성인 무한지반 내에 있는 실린더형공동 벽에 균일한 크기의 전단 조화하중이 작용할 때 실린더축을 중심으로 전단파가 원형 파면(Wave Front)을 갖고 외부로 전파해 간다. 이때 조화진동에 대한 운동방정식은 다음과 같다.

$$v, r + \frac{v, r}{r} - \frac{v}{r^2} + k_s^2 v = 0 \quad (8)$$

$k_s r \gg 0$ 일 때 해는 근사적으로 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$u(r) = BH_1^{(2)}(k_s r) \quad (9)$$

원형터널의 원주방향 임피던스

터널주변을 따라 $r_o \tau_{r\theta}$ 를 적분하면 총 우력, M_ϕ 을 구할 수 있다. 따라서 회전방향 임피던스를 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} K_\phi(a_o^s) &= M_\phi / \phi_o \\ &= 4\pi G r_o^2 [k_\phi(a_o^s) + ia_o^s c_\phi(a_o^s)] \end{aligned} \quad (10)$$

여기서 $k_\phi(a_o^s)$, $c_\phi(a_o^s)$ 는 터널의 반경방향 무차원강성과 감쇠계수로서 다음과 같이 주어진다.

$$k_\phi(a_o^s) = \left\{ 1 - \frac{1}{2} a_o^s \frac{J_o J_1 + Y_o Y_1}{J_1^2 + Y_1^2} \right\} \quad (11)$$

$$c_\phi(a_o^s) = \frac{1}{4\pi} \frac{4}{J_1^2 + Y_1^2} \quad (12)$$

2.3 Rayleigh파의 전파특성

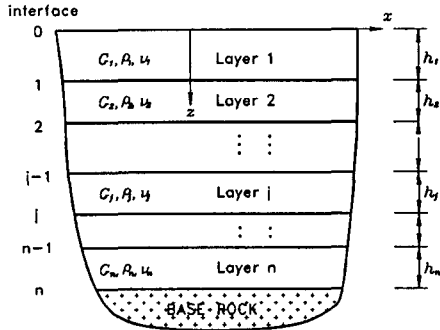


그림 1 기저암반 위의 다층지반

운동방정식

강성이 매우 큰 기저암반(Base Rock) 위에 수평적층된 지반에서 발생한 탄성파는 상부 자유표면과 기저암반 사이에 제한되어 표면파형태만으로 외부영역으로 전파한다. 또한 2차원 면내운동(In-plane Motion)을 가정하면 표면파는 Rayleigh 파 형태로만 전파한다. 그림 1과 같은 다층지반내의 각층이 균질, 등방 점탄성으로 가정될 때 층내에서 2차원 운동방정식은 직각좌표계를 사용하여 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$(\lambda + G) \frac{\partial \Delta}{\partial x} + G \nabla^2 u = \rho \ddot{u} \quad (13)$$

$$(\lambda + G) \frac{\partial \Delta}{\partial z} + G \nabla^2 w = \rho \ddot{w}$$

여기서 λ 와 G 는 Lamé 상수이고,

$\Delta = \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial w}{\partial z}$ 는 단위체적당 체적변화를 나타내며, ∇ 는 그라디언트(Gradient) 연산자이다. 식(13)의 해를 사용하여 변위와 응력은 행렬형식으로 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{Bmatrix} u \\ w \\ \tau_{xz} \\ \sigma_{zz} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} -ik & -ik & v' & -v' \\ -v & v & -ik & -ik \\ -i2kGv & -i2kGv & -G(2k^2 - k_s^2) & -G(2k^2 - k_s^2) \\ G(2k^2 - k_s^2) & G(2k^2 - k_s^2) & i2kGv' & -i2kGv' \end{bmatrix} e \begin{Bmatrix} A \\ B \\ C \\ D \end{Bmatrix} e^{i(\alpha x - k z)} = Y = E e A e^{i(\alpha x - k z)} \quad (14)$$

Rayleigh파 모드의 특성방정식

서로 다른층의 경계면에서 응력과 변위가 연속해야 한다는 조건으로부터 어떤 한층에서 응력 및 변위는 다른층의 응력 및 변위로 나타낼 수 있다[3]. 지표면에서의 변위-응력벡터는 전달행렬을 사용하여 바닥면에서의 응력변위벡터로 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$Y_0 = a_1 a_2 \dots a_{n-1} Y_n = T Y_n \quad (15)$$

여기서 a_j 는 전달행렬로서 다음과 같이 나타내 진다.

$$a = \begin{bmatrix} \frac{2k^2}{k_s^2}(CH - CH') + CH' & \frac{ik}{k_s^2}(2v'SH' - (2k^2 - k_s^2)\frac{SH}{v}) & \frac{1}{Gk_s^2}(-k^2\frac{SH}{v} + v'SH') & \frac{ik}{Gk_s^2}(CH - CH') \\ \frac{ik}{k_s^2}(-2vSH - (2k^2 - k_s^2)\frac{SH'}{v}) & CH - \frac{2k^2}{k_s^2}(CH - CH') & \frac{ik}{Gk_s^2}(CH - CH') & \frac{1}{Gk_s^2}(vSH - k^2\frac{SH'}{v}) \\ \frac{G}{k_s^2}(-4k^2vSH + (2k^2 - k_s^2)^2\frac{SH'}{v}) & \frac{2ikG}{k_s^2}(2k^2 - k_s^2)(CH - CH') & CH' + \frac{2k^2}{k_s^2}(CH - CH') & \frac{ik}{k_s^2}(-2vSH + (2k^2 - k_s^2)\frac{SH'}{v}) \\ \frac{2ikG}{k_s^2}(2k^2 - k_s^2)(CH - CH') & \frac{G}{k_s^2}((2k^2 - k_s^2)\frac{SH}{v} - 4k^2v'SH') & \frac{ik}{k_s^2}(-2v'SH' + (2k^2 - k_s^2)\frac{SH}{v}) & CH - \frac{2k^2}{k_s^2}(CH - CH') \end{bmatrix} \quad (16)$$

여기서 $SH = \sinh v h$, $SH' = \sinh v' h$, $CH = \cosh v h$ 그리고 $CH' = \cosh v' h$ 이다.

지표면에서 응력이 존재하지 않고 바닥면에서 변위가 고정되어 있는 경계 조건으로부터 다음 관계식을 얻을 수 있다.

$$\begin{Bmatrix} 0 \\ 0 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} t_{34}(k_r^i) & t_{33}(k_r^i) \\ t_{43}(k_r^i) & t_{44}(k_r^i) \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \tau_{xz}^i \\ \sigma_{zz}^i \end{Bmatrix}_n = T' \begin{Bmatrix} \tau_{xz}^i \\ \sigma_{zz}^i \end{Bmatrix}_n \quad (17)$$

식(17)로부터 T' 의 행렬식(Determinant)이 0 일 때만이 바닥면에서 응력 0이 아닌 어떤값을 가질 수 있으므로 다음과 같은 Rayleigh 모드 특성방정식을 얻을 수 있다.

$$t_{33}(k_r^i) t_{44}(k_r^i) - t_{34}(k_r^i) t_{43}(k_r^i) = 0 \quad (18)$$

식(18)의 해를 구함으로써 외부영역으로 전파해가는 Rayleigh모드를 구할 수 있다. 본 연구에서는 거리에 따른 진폭감소가 제일 작은 것을 기본모드로 정하였고 차례로 두번째, 세번째 모드로 정하였다.

3. 터널의 동적해석을 위한 무한요소

각 요소는 내부영역과 외부영역 사이의 경계면에서 3-절점만을 갖으나 절점변위 이외 무절점변수(Nodeless Variables)를 포함시켜 여러 가지 파동형상을 보다 잘 나타낼 수 있는 무한요소의 형상 함수는 문헌[1,2]와 같은 방법으로 구성할 수 있다. - 147 -

3.1 압축파 전파특성을 고려한 무한요소

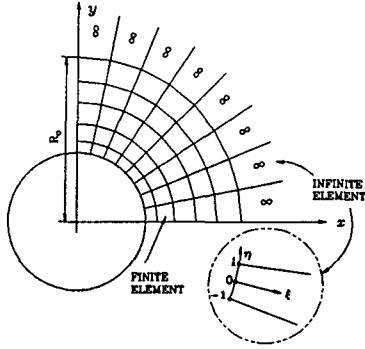


그림 2 원형터널의 동적해석 모형

그림 2는 실린더형공동 벽에 수직으로 균일한 크기의 조화하중 압축파문제를 해석하기 위한 모형을 나타낸다. 무한요소의 극부좌표 (ξ, η) 를 그림과 같이 정의할 때 외부영역함수는 식(4)를 기초로하여 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$F_p(\xi, \eta) = \sqrt{\frac{2}{\pi(1+\xi)}} e^{-ik_0 R_0 \xi} \quad (19)$$

여기서 R_0 는 실린더형공동 중심으로부터 무한요소까지의 거리이다. 반경방향 (ξ -방향)의 변위를 식(19)과 같은 외부영역함수로 나타내고 원주방향 (η -방향)의 변위를 Lagrangian 다항식으로 나타내면 압축파의 전파를 나타낼 수 있는 3-절점 무한요소의 형상함수는 다음과 같이 구성될 수 있다[1].

$$N_j^p(\xi, \eta) = L_j(\eta) F_p(\xi, \eta) \quad \text{for } j=1,2,3 \quad (20)$$

식(20)의 형상함수는 $x \rightarrow \infty$ 일때 Hankel 함수의 점근식을 기초로 구성하였기 때문에 저주파영역에서 kx 가 작은 경우 결과가 다소 떨어지게 된다. 그러나 이것은 $x \rightarrow 0$ 일 때의 점근식을 외부영역함수에 추가시킴으로서 결과를 향상시킬 수 있다.

$x \rightarrow 0$ 일 때 1차 2종 Hankel함수의 점근식은 다음과 같고

$$H_1^{(2)}(x) \approx \sqrt{x} + \frac{2i}{\pi x} \quad (21)$$

$x \rightarrow \infty$ 일 때 1차 2종 Hankel함수의 점근식은 다음과 같으므로

$$H_1^{(2)}(x) \approx \sqrt{\frac{2}{\pi x}} e^{-(x-3/4x)} \quad (22)$$

Hankel 함수의 근사값이 x 가 작을 때 식(21)과 같이 되게하고 x 가 클 때 식(23)과 같이 되게 하도록 하기 위하여 $x \rightarrow 0$ 일 때 $w_1(x) \rightarrow 1$, $w_2(x) \rightarrow 0$ 이고 $x \rightarrow \infty$ 일 때 $w_1(x) \rightarrow 0$, $w_2(x) \rightarrow 1$ 인 미분가능한 가중함수(Weighting Function) $w_1(x) = e^{-ix}/(1+x)^2$, $w_2(x) = 1 - w_1(x)$ 을 식(21)과 (22)의 우변에 곱하여 선형결합하면 다음과 같은 Hankel함수의 근사식을 얻을 수 있다.

$$H_1^{(2)}(x) \sim \left(\sqrt{x} + \frac{2i}{\pi x}\right) w_1(x) + \sqrt{\frac{2}{\pi x}} e^{-(x-3/4x)} w_2(x) \quad (23)$$

이때 $w_1(x)$ 에서 e^{-ix} 항은 수정 Gauss-Laguerre적분방법[1,2]을 적하기 용이하게 하기 위하여 추가되었다. 정확한 1차 2종 Hankel함수와 함께 식(23)의 근사식을 나타낸 그림 3으로부터 Hankel 함수

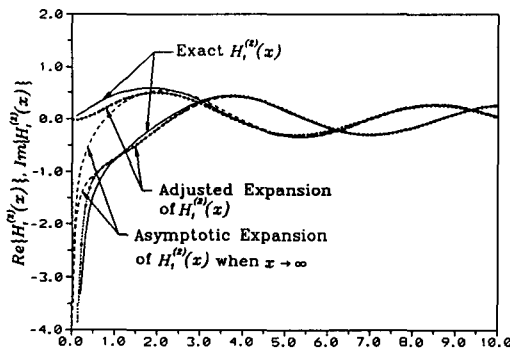


그림 3 1차 2종 Hankel 함수, $H_1^{(2)}(x)$

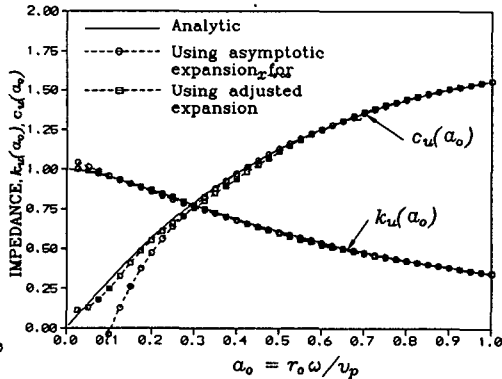


그림 4 원형터널의 반경방향 임피던스

의 근사식은 정확한 Hankel함수와 거의 비슷하게 거동함을 알 수 있다. 이제 식(23)으로부터 저주파 영역에서도 적용가능한 외부영역함수는 다음과 같이 근사적으로 나타낼수 있음을 알 수 있다.

$$F_p(kx(\xi, \eta)) \sim (\sqrt{kx} + \frac{2i}{\pi kx}) w_1(kx) + \sqrt{\frac{2}{\pi kx}} e^{-(kx-3/4\pi)} w_2(kx) \quad (24)$$

위의 두가지 외부영역함수를 사용하여 구성된 무한요소들을 사용하여 원형터널의 반경방향 임피던스를 계산한 후 그 결과를 식(6)과(7)의 해석적인 값과 함께 그림 4에 나타내었다. 그림으로부터 식(19)의 외부영역함수를 사용할 경우 무차원주파수 a_0 가 0.3 보다 클 때 해석적으로 구한 값과 매우 잘 일치하나 0.3 보다 적을 때는 무차원감쇠계수는 다소 불일치를 보인다. 그러나 저주파영역에서도 적용가능한 식(23)의 외부영역함수를 사용할 경우 모든 주파수에서 해석적인 결과와 잘 일치함을 알 수 있다.

3.2 전단파 전파특성을 고려한 무한요소

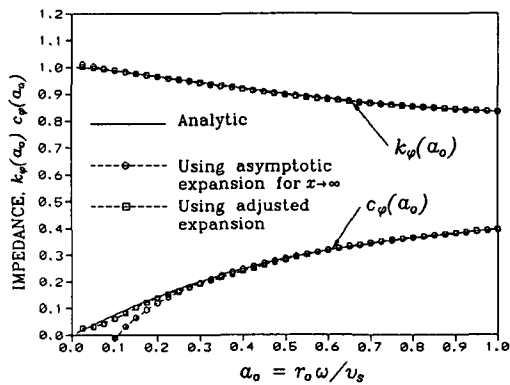


그림 5 원형터널의 회전방향 임피던스 결과와 비슷한 경향을 보여주고 있음을 알 수 있다.

균질, 등방, 탄성인 무한지반 내에 있는 실린더형 공동 벽에 균일한 크기의 전단 조화하중이 작용할 때 발생하는 전단파문제를 해석하기 위하여 압축파 문제의 해석모형과 같은 모형(그림 2)을 사용하였다. 식(9)로부터 전단파의 외부영역함수는 압축파 파동수(Wave Number), k_p 대신에 전단파 파동수, k_s 를 압축파의 외부영역함수에 대입함으로 구할 수 있음을 알 수 있다. 외부영역함수가 구해지면 무한요소의 형상함수는 다음과 같이 구성할 수 있다.

$$N_j^s(\xi, \eta) = L_j(\eta) F_s(x(\xi, \eta)) \quad \text{for } j=1,2,3 \quad (25)$$

무한요소를 사용하여 해석하여 구한 원형터널의 원주방향 임피던스를 식(11)과(12)의 해석적인 값과 함께 그림 5에 나타내었다. 해석결과는 압축파의

3.3 Rayleigh파의 전파특성을 고려한 무한요소

여러가지 모드를 포함한 무한요소의 변위형상함수는 무절점변수를 사용하여 다음과 같이 구성할 수 있다[1,2].

(a) 절점변위에 관련된 변위형상함수:

$$N_j^l(\xi, \eta) = L_j(\eta) e^{-(-\beta^l R_0 + i\alpha^l R_0)\xi} \quad \text{for } j = 1,2,3 \quad (26)$$

(b) 무절점변위에 관련된 형상함수:

$$N_m^r(\xi, \eta) = L_j(\eta) \{ e^{-(-\beta^l R_0 + i\alpha^l R_0)\xi} - e^{-(-\beta^l R_0 + i\alpha^l R_0)\xi} \} \quad \text{for } m=3(l-1)+j \quad (j=1,2,3; l=2,3,\dots,N) \quad (27)$$

여기서 l 번째 Rayleigh파 모드는 진폭감소계수가 가장작은 것부터 l 번째 큰 Rayleigh파 모드를 나타낸다.

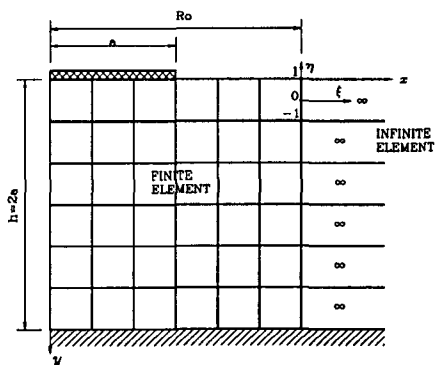
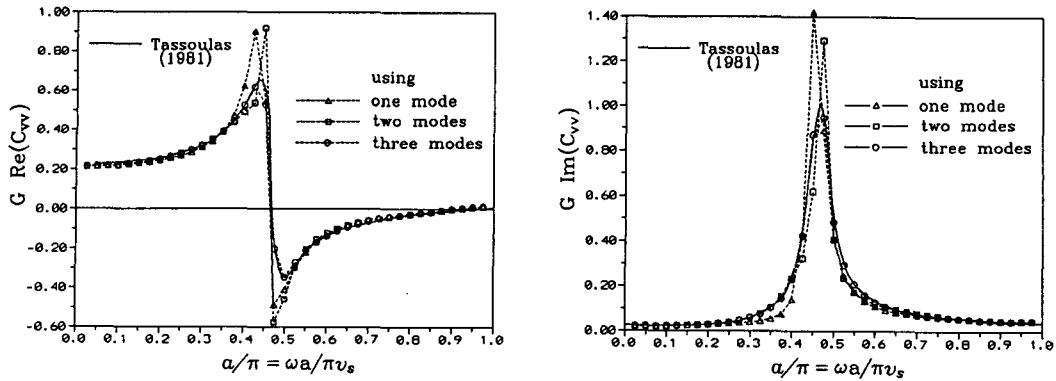


그림 6 스트립기초의 Compliance를 계산하기 위한 모형

해석한 결과를 Tassoulas의 수치해석결과[5]와 함께 그림 7에 나타내었다. 해석결과로부터 저주파



(a) 실수부 (b) 허수부
그림 7 스트립기초의 수직 Compliance

영역에서는 첫번째 모드만을 사용해도 좋은 결과를 얻을 수 있지만 공진주파수 부근에서는 큰 오차를 유발함을 알 수 있다. 그러나 첫 3개의 Rayleigh파 모드를 포함시켜 해석해도 좋은 결과를 주는 것을 알 수 있다.

4. 충격하중을 받는 터널의 등적해석

4.1 복합파동문제의 해석을 위한 무한요소

탄성파의 전파특성을 고려한 파동성분의 외부영역함수는 표 1과 같이 나타낼 수 있다. 표에서 압축파 및 전단파의 외부영역함수는 $x \rightarrow \infty$ 일 때의 1차 2종 Hankel함수의 점근식을 기초로 구성한 것이다. 이식을 사용할 경우 강성계수, $k(a_0)$ 는 전 주파수영역에서 대체적으로 해석적 값과 잘 일치하나 감쇠계수, $c(a_0)$ 는 주파수가 낮아 질수록 해석적결과와 큰 차이를 보임을 알 수 있었다. 그러나 실제로 주파수가 낮아질수록 a_0 는 작아지고 감쇠효과는 $a_0 c(a_0)$ 로 주어지기 때문에 전체 거동에 미치는 영향이 적다. 따라서 표1의 외부영역함수를 사용하여 구성한 무한요소는 큰 오차 없이 전주파수 영역에서의 해석에 사용될 수 있을 것이다. 그러나 저주파성분이 탁월한경우 식(24)의 외부영역함수를 사용하면 오차를 줄일 수 있다.

각 요소는 내부영역과 외부영역 사이의 경계면에서 3-절점만을 가지나 절점변위 이외 무절점변위를 사용하여 표 1의 여러가지 탄성파성분이 포함될 수 있는 무한요소의 변위 형상함수를 구성할 수 있다[1,2].

표 1 반무한지반 및 적층지반에 대한 외부영역함수

파의 성분	Rayleigh파	전단파	압축파
반무한 지반	$e^{-(a_r \xi + ik_r x(\xi, \eta))}$	$\sqrt{\frac{1}{1+\xi}} e^{-ik_r R_0 \xi}$	$\sqrt{\frac{1}{1+\xi}} e^{-ik_p R_0 \xi}$
기저압반 위의 지반	$e^{-(\beta_i R_0 + ia_i R_0) \xi}$ $i=1,2,\dots$	—	—
적층지반	상부 수평층 $i=1,2,\dots$	—	—
	최하부 지반	—	$\sqrt{\frac{1}{1+\xi}} e^{-ik_r R_0 \xi}$

4.2 수치해석 및 결과

그림 8과 같은 사각형 터널이 반무한 균질지반에 매립되었을 때 터널내 열차통과에 따른 지반진동 영향을 검토하기 위하여 열차충격하중(Rectangular Impulsive Loading)으로 단순 모형화하여 해석하였다. 지반은 62개의 유한요소와 17개의 무한요소로, 터널은 14개의 유한요소로

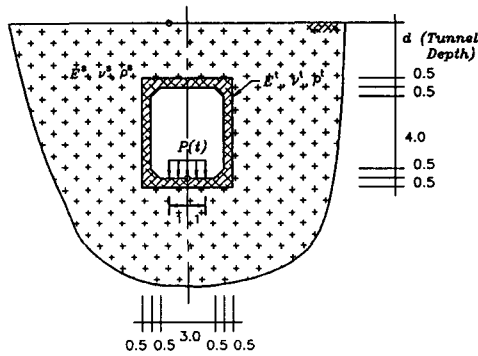


그림 8 충격하중을 받는 사각형 터널

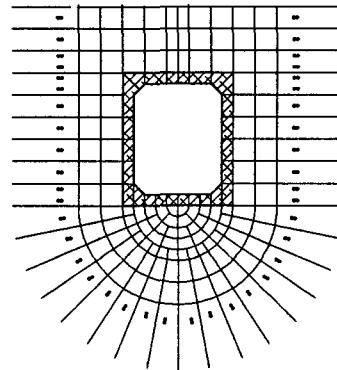
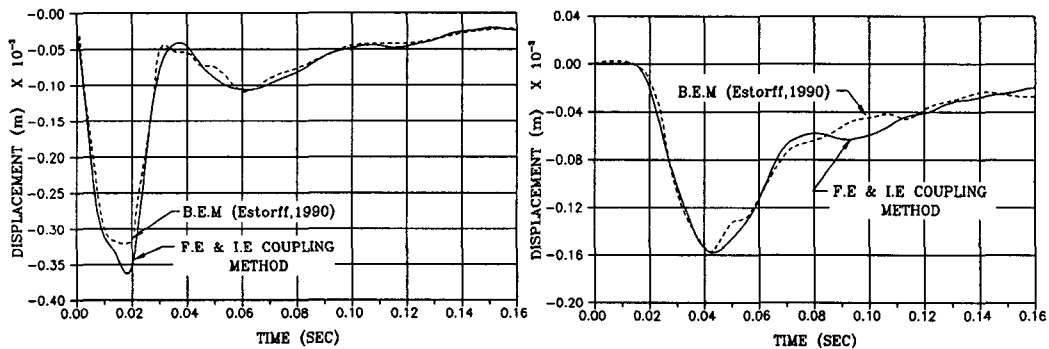


그림 9 사각터널의 해석모형

그림 9와 같이 모형화 하였다. 지반의 물성치는 탄성계수 (E^s)= 2.66×10^5 KN/m², Poisson 비 (ν^s)=0.33, 밀도(ρ^s)= 2000 kg/m³ 이고, 터널의 물성치는 탄성계수 (E^t)= 6.00×10^6 KN/m², Poisson 비 (ν^t)=0.25, 밀도(ρ^t)= 2000 kg/m³ 를 사용하였다. 열차에 의한 충격하중은 그림 8에서 보여주는 것과 같이 터널바닥면 위에 폭 2m에 걸쳐 크기(p)= 50KN의 수직하중이 0.02초 동안 재하된 후 제거되는 것으로 단순화 하였다.

먼저 터널의 동적해석에 있어서 유한요소와 무한요소의 병합방법에 대한 타당성을 검토하기 위하여 그림 8과 같은 터널이 4m 깊이로 매립된 경우에 대하여 해석한 후 그 결과를 경계요소법으로 해석한 결과[4]와 비교하였다. 지표면에서의 터널하부에서의 수직변위를 나타낸 그림 10로부터 두 해석방법에 의한 결과가 매우 잘 일치하고 있음을 알 수 있다. 또한 해석결과로부터 터널바닥면에서의 거동은 하중작용 직후 응답하지만 지표면에서의 응답은 파의 전파에 따른 시간의 소요로 인하여 반응이 늦어짐을 알 수 있다.

터널의 매립깊이가 지표면 거동에 미치는 영향을 검토하기 위하여 매립깊이를 2m, 4m, 그리고 6m로 달리하면서 해석을 수행하였다. 시간영역응답을 나타낸 그림 11로부터 터널깊이가 증가함에 따라 지표면에서의 최대변위는 작아지고 최대변위가 일어난 시간은 파의 전달경로의 증가로 늦어짐을 알 수 있다. 터널라이너 강성이 지표면거동에 미치는 영향을 검토하기 위하여 터널라이너강성 (E^t)을 $2.66E5$, $6.00E6$, 그리고 $3.00E7$ KN/m²로 달리하면서 해석을 수행하였다. 해석결과를 나타낸 그림 12로부터 지표면의 최대변위는 터널라이너강성에 크게 영향을 받지 않으나 최대변위가 일어나는 시간은 터널라이너강성이 작아짐에 따라 늦어짐을 알 수 있다.



(a) 터널하부에서의 수직변위

(b) 지표면에서의 수직변위

그림 10 경계요소법에 의한 해석결과와의 비교

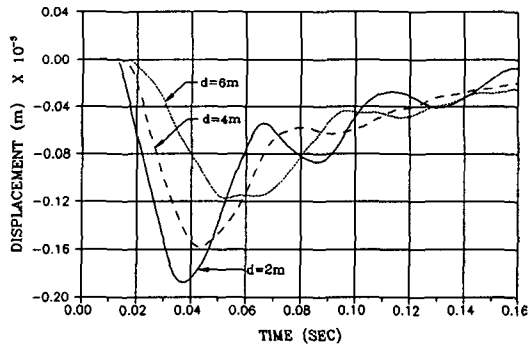


그림 11 지표면진동에 대한 터널의 매립깊이 영향(지표면에서의 시계열응답)

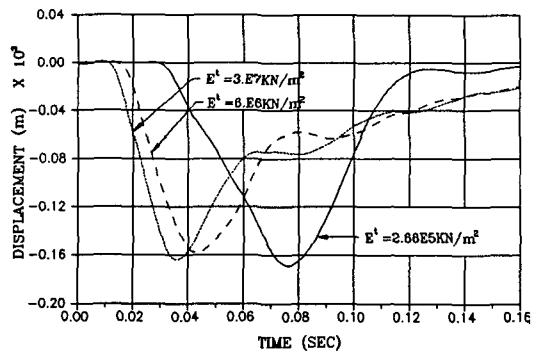


그림 12 지표면진동에 대한 터널라이너 강성의 영향

5. 결론

본 연구에서는 유한요소 및 무한요소 병합방법[2,3]에 의한 터널의 동적해석 방법이 제시되었다. 터널로부터 발생한 탄성파가 외부영역으로 전파해가는 탄성파 성분중 압축파, 전단파 및 표면파 성분의 외부영역거동을 알아보고 이들을 기초로하여 각각의 파동을 나타낼 수 있는 무한요소를 개발하였다. 형상함수 구성시 Hankel 함수 대신 x 값이 클 때의 점근식만을 사용하지 않고 x 값이 작을 때의 점근식을 클 때의 점근식과 적절히 조합하여 형상함수를 구성하면 저주파영역에서의 해석결과가 향상됨을 알 수 있었다. 연구된 방법은 적층된 반무한 지반 뿐 아니라 기저압반이 있는 지반에 건설된 터널의 동적해석에도 쉽게 적용할 수 있고 또한 좋은 결과를 주는 것을 알 수 있었다.

수치예제해석으로부터 본 연구의 해석방법에 의한 결과는 유한-경계요소 병합방법에 의한 해석결과와 잘 일치함을 알 수 있었다. 또한 예제해석으로부터 터널의 매립깊이가 증가할수록 터널상부 지표면에서의 진동은 크게 감소하나 터널라이너강성은 지표면진동에 큰 영향을 미치지 않음을 알 수 있었다.

참 고 문 헌

1. 양신추, 윤정방, "지반-구조물 상호작용 해석을 위한 동적무한요소", 대한토목학회 논문집 제11권 3호, 1991.
2. S.-C. Yang and C.-B. Yun, "Axisymmetric Infinite Elements for Soil-Structure Interaction Analysis", Engng. Struc. Vol. 14 (1992), 361-370.
3. Tzong, T. J., and Penzien, J., "Hybrid modelling of soil-structure interaction in layered media", Rep. No. UCB/EERC-83/22, Earthquake Engineering Research Center, Univ. of California, Berkeley, Calif, 1983.
4. Estorff, O.V. and Antes, H., "Dynamic Response of Tunnel Structures", Structural Dyn. Krätzig et al. (eds), 803-810, 1990.
5. Tassoulas, J. L., "Elements for numerical analysis of wave motion in layered media", MIT Research Report R81-2, Massachusetts Institute of Technology, 1981.