

임의 형상의 퇴적층을 갖는 균일 반무한 영역내에서 P파와 SV파 응답 해석

The Analysis of P-, and SV-Wave Response in the Homogeneous Half-Space Having Alluvial Deposit of Arbitrary Shape

권 영 록* 손 영 호**
Kwon, Young Rok Son, Young Ho

국문요약

P파와 SV파가 입사할 때 비균질 퇴적층에서의 지진응답을 유한요소법과 경계요소법을 조합하여 해석하였다. 유한요소법을 사용하여 불규칙한 기하형상과 비균질 재료 특성을 모델링하였고, 경계요소법을 사용하여 인위적인 경계로부터 불필요한 파의 반사를 없앨 수 있게 반무한 영역을 모델링하였다. 경계요소의 기본해는 반무한 영역 문제에서 반드시 고려해야 하는 방사조건을 자동적으로 만족시킨다. 따라서 외부영역과 내부 영역의 접촉면에서 표면력의 평형조건과 변위의 연속조건을 사용하여 P파와 SV파에 의한 지진응답을 해석하였다.

주요어 : 지진응답, P파, SV파, 유한요소법, 경계요소법, 방사감쇠

ABSTRACT

The seismic responses in the nonhomogeneous alluvial deposits subjected to P-wave and SV-wave are analyzed by coupling finite element method and boundary element method. It is modeled that the irregular geological configuration and the nonhomogeneous material property by using the finite element method and the semi-infinite soil to remove the wave reflection from the artificial boundary by using the boundary element method. The radiation damping is taken into account automatically by using the fundamental solution satisfying radiation condition which must be considered in the infinite domain problem. Therefore, we analyzed seismic response by P-wave and SV-wave using the equilibrium condition of tractions and continuous condition of displacements at interface with exterior area and interior area.

Key words : seismic response, P-wave, SV-wave, finite element method, boundary element method, radiation damping

1. 서 론

지진은 지각운동이 진행함과 동시에 지각 내에 축적된 에너지가 방출됨에 따라 암반층에서부터 연약한 지표층까지 지진파가 전달되면서 발생하는 것으로, 이 지진파가 지층을 통하여 전파되어 부지에 도달하게 되면서 일어나는 지반운동이다. 부지에 발생한 지반운동은 구조물에 외력으로 작용하고 이로 인해 응력을 초래함으로써 구조물의 내진설계가 필요하게 된다. 내진설계를 수행하기 위해서는 먼저 지반-구조물의 상호작용⁽¹⁾을 해석해야 하며, 이것을 수행하기 위해서는 부지 응답이 우선적으로 해석되어야 하고, 또한 지반의 동적 특성 파악과 지반 및 구조물의 모델링이 이루어져야 한다.

부지 응답해석은 진원을 포함하는 거대 모델에 대한 해석을 통해서 수행되어야 하지만, 실질적으로 이러한 해석에 필요한 진원 및 광범위한 지역에 대한 지질특성의 결정 및 거대모델의 작성이 불가능하다. 따라서 부지 내에 위치하는 일정한 지점 즉, 통제점에서 정의된 통제운동을 기준으로 한 부지응답 해석을 수행하며, 이러한 경우도 특수한 형태로 가정된 지반의 특성 및 전달파형에 대해서만 가능하다. 일반적

으로 공학적인 목적을 위해서 지반의 형태는 대부분 층상의 반무한 탄성체로 가정하며, 전달 파형도 주로 수직방향으로 입사하는 체적파로 가정한다. 이와같이 수직방향으로 입사하는 체적파만을 고려하는 방법은 대부분의 경우 수평거동에 대해서는 안전측의 결과를 주지만, 회전거동(rocking)에 대해서는 안전측의 결과를 주지 못할 수도 있으므로 각종 다른 파형의 영향을 검토해 볼 필요가 있다.

연구사례를 살펴보면, P파와 SV파의 산란문제(scattering problem)를 불규칙한 형상의 지표면에 대하여 연구한 것⁽²⁾과, Trefftz 방법을 적용하여 불규칙한 경계로 인한 P파와 SV파의 회절을 구한 것⁽³⁾이 있다. 또한 탄성매체의 P파, SV파로 인한 지표면 변위를 조사하기 위해 고유치 함수로 전개된 유한요소법을 사용한 논문⁽⁴⁾도 있다. 현재 가장 널리 사용되는 수치해석 방법에는 유한요소법과 경계요소법이 있는데, 이들 수치해석 방법 중 가장 많이 사용되는 것은 유한요소법이다.

유한요소법은 용도가 비교적 넓은 기법으로 복잡한 구조의 지반형상, 비균질 층상과 복잡한 재료 거동을 다룰 수 있는 장점이 있는 반면에, 지반과 같은 반무한체를 유한 크기로 모델링함으로써 인공적인 경계로 부터 불필요한 파의 반사를 일으키는 단점이 있다. 이 단점을 없애기 위해서 유한요소 모델은 그 저면에서 강체 암반으로 경계되어야 한다. 그러나 연약층을 갖는 유연한 지반인 경우는 암반의 깊이가

* 일본 NICHIZOTECH Ltd. 과장(대표저자 : youngrog@nichizotech.co.jp)

** 경희원 · 경북전문대학 토목과 전임강사

본 논문에 대한 토의를 2001년 4월 30일까지 학회로 보내 주시면 그 결과를 게재하겠습니다.

상당히 깊을 수 있다. 그래서 전달경계⁽⁵⁾, 무한요소⁽⁶⁾ 등을 사용하여 이 단점을 극복할 수 있으나, 이 경우에도 모델링 되는 지반은 수평으로 층상 구조이어야 하는 제약이 있다. 반면에 경계요소법은 유한요소법의 제약과 단점을 극복할 수 있는 수치해석 방법으로서, 특히 무한영역을 모델링하는데 가장 적합하다.⁽⁷⁾ 이 방법은 기본 특이해를 사용하기 때문에 방사조건이 자동적으로 만족되며, 또한 무한영역의 경계만을 이산화하기 때문에 차원을 한 차원 줄이는 결과로 되어 내부 영역까지 이산화시키는 유한요소법에 비해 미지수의 숫자를 상당히 줄일 수 있다.

이러한 이유로 인하여 반무한체 영역에 대해서는 경계요소법을 이용하여 외부영역을 모델링하고, 복잡한 기하형상과 재료의 불균질성을 갖는 내부영역인 비균질 연약층은 유한요소법을 사용하여 모델링하였다. 이 때 외부영역과 내부영역의 접촉면에서 표면력의 평형조건과 변위의 연속조건을 사용하여 두 방법을 결합하였다. 그리고 이와같이 결합한 이론식을 바탕으로 체적파인 P파 및 SV파가 입사할 때의 지진 응답을 구하였다.

2. 경계요소법에 의한 반무한체 지반의 이산화 과정

외부영역인 지반은 등방, 균질인 선형탄성체라고 가정하면, 시간의존 $\exp(i\omega t)$ 인 정상상태 문제에 대한 2-D 면내거동 동탄성론 지배 방정식은 다음과 같다.⁽⁸⁾

$$\mu u_{i,kk} + (\lambda + \mu) u_{j,ij} + \rho \omega^2 u_i = -f_i \quad (1)$$

$(i, j, k=1, 2)$

여기서 ω 는 원 진동수, λ, μ 는 Lamé상수, ρ 는 단위질량, f_i 는 물체력이고 u_i 는 면내 변위 벡터이다. 지배방정식 (1)에 대한 기본해를 구하기 위해 다음식을 고려한다.

$$\mu Y_{i,kk}^{(k)} + (\lambda + \mu) Y_{j,ij}^{(k)} + \rho \omega^2 Y_i^{(k)} = -\delta(\bar{x}, \bar{y}) \delta_{ik} \quad (2)$$

여기서 δ_{ik} 는 Kronecker델타이고, 다음과 같이 정의되는 연산자 Δ_{ij}^* 를 도입하면

$$\Delta_{ij}^* = \mu \delta_{ij} \partial_k \partial_k + (\lambda + \mu) \partial_i \partial_j + \rho \omega^2 \delta_{ij} \quad (3)$$

기본해는 하중점 \bar{x} 에서 k 방향의 단위 집중하중을 작용한 경우, 관측점 \bar{y} 에서 i 방향의 변위를 구함으로 얻어진다. 즉 다음의 해와 같다.

$$\Delta_{ij}^* Y_j^{(k)} = -\delta(\bar{y} - \bar{x}) \delta_{ik} \quad (4)$$

여기서 $\delta(\bar{y} - \bar{x})$ 는 dirac delta 함수이고, 위 식의 해 $Y_i^{(k)}(\bar{x}, \bar{y})$ 는 다음과 같다.⁽⁸⁾

$$Y_i^{(k)}(\bar{x}, \bar{y}) = \frac{i}{4\mu} [H_0^{(1)}(\xi_2 r) \delta_{ik} - \frac{1}{\xi_2^2} \frac{\partial^2}{\partial y_i \partial y_k} \{H_0^{(1)}(\xi_1 r) - H_0^{(2)}(\xi_2 r)\}] \quad (5)$$

여기서 $H_0^{(1)}$ 는 제1종 0차 Hankel 함수이고, $r = |\bar{y} - \bar{x}|$, $\xi_1 = \frac{\omega}{c_b}$, $\xi_2 = \frac{\omega}{c_s}$ 이다.

변위 기본해와 표면력 기본해 사이의 관계를 구하기 위하여 다음과 같이 정의되는 연산자

$$T_{ik} = \lambda n_i \partial_k + \mu n_j \delta_{ki} \partial_j + \mu n_j \delta_{jk} \partial_i \quad (6)$$

를 사용하면 변위와 표면력 사이의 관계는 다음과 같다.

$$Y_i^{(k)}(\bar{x}, \bar{y}) = T_{ij} Y_j^{(k)}(\bar{x}, \bar{y}) \quad (7)$$

이제 Betti의 상반정리에 의하면 영역 Ω 와 경계 Γ 에서 다음식이 성립한다.

$$\int_{\Omega} [v_i(\bar{y}) \Delta_{ij}^* u_j(\bar{y}) - u_i \Delta_{ij}^* v_j(\bar{y})] d\Omega = \int_{\Gamma} [v_i(\bar{y}) T_{ij} u_j(\bar{y}) - u_i T_{ij} v_j(\bar{y})] d\Gamma \quad (8)$$

식 (1)에서 물체력 f_i 를 0이라 두고, 식 (8)의 v 에 위에서 구한 기본해를 대입한다.

$$\int_{\Omega} [-u_i(\bar{y}) \Delta_{ij}^* Y_j^{(k)}(\bar{x}, \bar{y})] d\Omega = \int_{\Gamma} [Y_i^{(k)}(\bar{x}, \bar{y}) T_{ij} u_j(\bar{y}) - u_i(\bar{y}) T_{ij} Y_j^{(k)}(\bar{x}, \bar{y})] d\Gamma \quad (9)$$

$Y_i^{(k)}(\bar{x}, \bar{y})$ 는 $\bar{x} = \bar{y}$ 일때 log의 특이성을 가지므로 \bar{x} 의 위치에 따라, 식 (9)는 다음과 같은 적분 방정식의 세 형태로 나타낼 수 있다.

$$\Omega(\bar{x}) u_k(\bar{x}) = \int_{\Gamma} [Y_i^{(k)}(\bar{x}, \bar{y}) t_i(\bar{y}) - u_i(\bar{y}) Y_{ii}^{(k)}(\bar{x}, \bar{y})] d\Gamma \quad (10)$$

만약 하중점 \bar{x} 와 관측점 \bar{y} 가 모두 경계상에 있는 것으로 하다면, 미지수는 경계상의 값만이 되고 주어진 경계 조건에 의해 풀 수 있다. 따라서, 계수 $\Omega(\bar{x})$ 는 하중점이 매끈한 경계상에 놓이게 되면 $\frac{1}{2}$ 이 되므로(그렇지 않은 경우에는 그 첨각의 함수), P파와 SV파의 적분 방정식은 식 (10)에 의해 다음과 같다.

$$\frac{1}{2} u_k(\bar{x}) = \int_{\Gamma} [Y_i^{(k)}(\bar{x}, \bar{y}) t_i(\bar{y}) - u_i(\bar{y}) Y_{ii}^{(k)}(\bar{x}, \bar{y})] d\Gamma \quad (11)$$

경계 Γ 를 n 개의 2차 등매개변수 요소를 이용하여 분할하면, 절점 L 에 관한 요소 K 상의 적분은 다음과 같고,

$$\int_{\xi_k=-1}^{\xi_k=1} [\overline{Y}(\bar{x}_L, \bar{y}(\xi)) \sum_{i=1}^3 N_i(\xi) t_i - \overline{Y}_I(\bar{x}_L, \bar{y}(\xi)) \sum_{i=1}^3 N_i(\xi) u_i] |J| d\Gamma \quad (12)$$

여기서 행렬 \overline{Y} 와 \overline{Y}_I 는 기본해 $Y_i^{(k)}$ 와 $Y_{ii}^{(k)}$ 에 하중점의 좌표와 대상요소의 적분점의 좌표를 대입한 값이고 따라서 절점

L에 관해서 다음의 방정식을 얻을 수 있다.

$$\frac{1}{2} u_L = \sum_{k=1}^{2n+1} G_{LK}^1 t_k - \sum_{k=1}^{2n+1} G_{LK}^2 u_k \quad (13)$$

(K = 1, 2, \dots, 2n+1)

여기서,

$$G_{LK}^1 = \int_{\xi_k=-1}^{\xi_k=1} \frac{1}{\mu} Y(\bar{x}_L, \bar{y}(\xi)) N_2(\xi) |J| d\xi$$

(k가 짝수인 경우)

$$G_{LK}^1 = \int_{\xi_k=-1}^{\xi_k=1} \frac{1}{\mu} Y(\bar{x}_L, \bar{y}(\xi)) N_1(\xi) |J| d\xi + \int_{\xi_k=-1}^{\xi_k=1} \frac{1}{\mu} Y(\bar{x}_L, \bar{y}(\xi)) N_3(\xi) |J| d\xi$$

(k가 홀수인 경우)

그리고,

$$G_{LK}^2 = \int_{\xi_k=-1}^{\xi_k=1} Y_I(\bar{x}_L, \bar{y}(\xi)) N_2(\xi) |J| d\xi$$

(k가 짝수인 경우)

$$G_{LK}^2 = \int_{\xi_k=-1}^{\xi_k=1} Y_I(\bar{x}_L, \bar{y}(\xi)) N_1(\xi) |J| d\xi + \int_{\xi_k=-1}^{\xi_k=1} Y_I(\bar{x}_L, \bar{y}(\xi)) N_3(\xi) |J| d\xi$$

(k가 홀수인 경우)

3. 유한요소법에 의한 퇴적층의 이산화 과정

내부영역인 퇴적층은 유한요소법을 사용하여 이산화하고 그 과정에서 나오는 강성도 행렬, 질량 행렬, 그리고 하중벡터는 다음으로 나타낼 수 있다.

$$\left[\int_{\Omega} (B^T DB - k_T^2 N^T N) d\Omega \right] u = \frac{1}{\mu} \left[\int_{\Gamma} N^T N d\Gamma \right] t \quad (14)$$

혹은,

$$[K]\{u\} = [F]\{t\} \quad (15)$$

여기서,

$$K = \int_{\Omega} (B^T DB - k_T^2 N^T N) d\Omega \quad (16)$$

그리고,

$$F = \frac{1}{\mu} \left[\int_{\Gamma} N^T N d\Gamma \right] \quad (17)$$

4. 경계요소법과 유한요소법의 결합

Fig. 1과 같이 영역 ($\Omega_I + \Gamma_2$)에 있어서의 내부 문제와

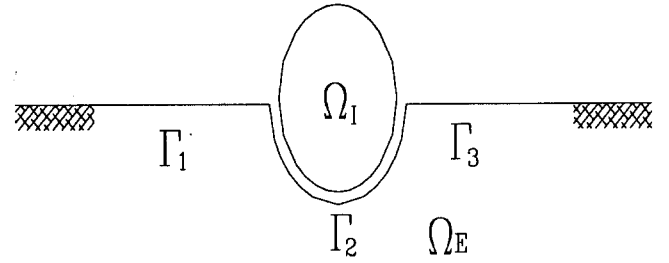


Fig. 1 Nomenclature of half space

영역 ($\Omega_E + \Gamma_1 + \Gamma_2 + \Gamma_3$)에 있어서의 외부 문제로 나누어 각각에 대해서 정식화를 한다. 그 후 경계 Γ_2 에 있어서 표면력에 대한 평형 조건식과 변위에 대한 적합조건식을 이용하여 두 문제를 조합한다. 내부 문제에 있어서 경계상의 변위와 표면력 벡터 및 내부절점에서의 변위 벡터는 내부 절점수를 M 으로 할 때 다음의 형태로 표현된다.

$$u(\Gamma_2) = \begin{pmatrix} u_1 \\ \dots \\ u_{n_2} \end{pmatrix}, \quad t(\Gamma_2) = \begin{pmatrix} t_1 \\ \dots \\ t_{n_2} \end{pmatrix}, \quad u(\Omega) = \begin{pmatrix} u_1 \\ \dots \\ u_M \end{pmatrix} \quad (18)$$

그리고 계수 행렬은 다음과 같고,

$$[K(\Gamma_2)] = \sum_{i=1}^n \int_{\Omega_i} (B^T DB - \rho \omega^2 N^T N) d\Omega$$

$$[K(\Omega)] = \sum_{i=1}^M \int_{\Omega_i} (B^T DB - \rho \omega^2 N^T N) d\Omega$$

$$[F(\Gamma_2)] = \sum_{i=1}^n \int_{\Omega_i} N^T N d\Omega \quad (19)$$

내부 문제의 방정식은 다음과 같이 형태로 표현된다.

$$[K(\Gamma_2) \quad K(\Omega)] \begin{pmatrix} u(\Gamma_2) \\ u(\Omega) \end{pmatrix} = [F(\Gamma_2)] \{t(\Gamma_2)\} \quad (20)$$

그리고 내부 영역과 외부 영역의 접촉면에서 표면력의 평형 조건과 변위의 연속 조건은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$t(\Gamma_2) = t(\Gamma_{2i}) = -t(\Gamma_{2e}) \quad (21)$$

$$u(\Gamma_2) = u(\Gamma_{2i}) = u(\Gamma_{2e}) \quad (22)$$

그리고 자유표면에서의 표면력은 다음과 같다.

$$t(\Gamma_1) = t(\Gamma_3) = 0 \quad (23)$$

식 (21), (22), (23)을 식 (20)에 대입하여 정리하면 다음과 같다.

$$\begin{pmatrix} T(\Gamma_1) & T(\Gamma_2) & T(\Gamma_3) & -U(\Gamma_2) & 0 \\ 0 & K(\Gamma_2) & 0 & F(\Gamma_2) & K(\Omega) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} u(\Gamma_1) \\ u(\Gamma_2) \\ u(\Gamma_3) \\ t(\Gamma_2) \\ u(\Omega) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} T(\Gamma_1)u_{IR}(\Gamma_1) + T(\Gamma_2)u_{IR}(\Gamma_2) + T(\Gamma_3)u_{IR}(\Gamma_3) \\ -U(\Gamma_1)t_{IR}(\Gamma_1) - U(\Gamma_2)u_{IR}(\Gamma_2) - U(\Gamma_3)t_{IR}(\Gamma_3) \\ 0 \end{pmatrix} \quad (24)$$

여기서 $u_{IR} = u_I + u_R$ 이고 u_I 와 u_R 은 각각 입사파와 반사파에 의한 변위이다. 그리고 $t_{IR} = t_I + t_R$ 이고 t_I 와 t_R 은 각각 입사파와 반사파에 의한 표면력이다. 이 값들은 통상의 반무한 공간인 자유장(free field)에서의 응답을 구하는 방법⁽¹⁾으로 구할 수 있다. 식 (24)를 풀면 경계상의 변위와 표면력 그리고 내부변위가 구해진다.

5. 프로그램 검증 및 영향인자에 대한 고찰

5.1 프로그램의 검증

균질 반무한 영역에서의 정해를 구하기 위해 먼저 수직으로 입사하는 파를 고려한다. 연직 하방으로부터 진폭 1.0의 P파가 수직으로 입사 ($\psi_{p_0} = 90^\circ$)하는 경우의 지반 응답은 입사파와 반사파의 합으로 나타나는데, 지표면 ($x_2 = 0$)에서의 응답을 고려해 보면 어느 경우에도 2.0 혹은 0.0이다. 이 문제를 해석하기 위한 해석모형 및 유한요소-경계요소 모델링은 Fig. 2와 같다. 지표면을 모델링하기 위해서 반원형의 중심에서 반경의 5배까지 경계요소를 사용하여 모델링하였다. 여기서 P파와 SV파에 대해서 수치해석 결과와 정해를 비교한 것이 Table 1이다. 자유표면에서의 응답을 정해와 비교해 보면 오차가 1%미만으로 정해와 잘 일치함을 알 수 있다. 이 때의 파장은 3.14로 하였다. 그리고 간접경계요소법을 사용하여 SV파가 $\psi_{s0} = 60^\circ$ 로 입사할 때 자유표면에서의 변위응답을 Sanchez-Sesma⁽⁹⁾가 구하였다. 무차원 양들은 위에서와 같은 값을 사용하여 변위응답을 구한 것이 Fig. 3이다. 그림에서 x축은 반경 a로 무차원시킨 반원형의 길이 비이고, y축은 변위응답을 나타내었다. 그림에서 실선과 점선은 수평변위와 수직변위의 정해를 나타낸 것이고, 등근점과 삼각점은 수치해석의 결과이다. 그림 3에서와 같이 본 연구의 결과와 Sanchez-Sesma의 논문에서 구한 결과는 두 논문이 모두 근사법을 사용하였음에도 불구하고 비교적 잘 일치함을 보여준다

5.2 영향인자에 대한 고찰

Fig. 2와 같은 반원형의 균질 연약층에 경사지게 입사하는 P파와 SV파에 대한 응답을 구한 것이 Fig. 4~Fig. 5

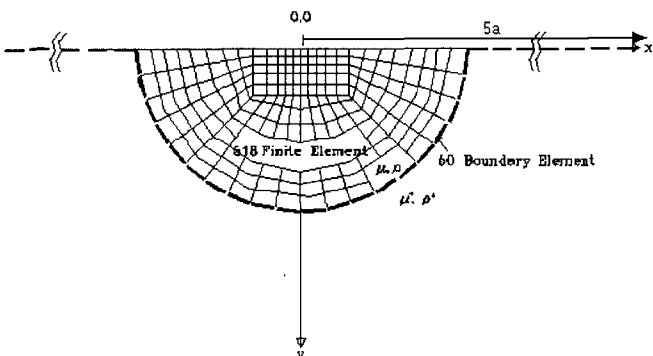


Fig. 2 Finite element and boundary element mesh for semicircular valley

Table 1 Response on the free surface by incident P-wave and SV-wave (exact solution=2.00000)

Coordinate	P-wave		SV-wave	
	Displacement	Error	Displacement	Error
(-3.00, 0.0)	2.01166	0.58%	2.00247	0.13%
(-2.50, 0.0)	2.01742	0.87%	2.00387	0.19%
(-2.00, 0.0)	2.01297	0.65%	2.00332	0.17%
(-1.75, 0.0)	2.00795	0.40%	1.99441	0.28%
(-1.50, 0.0)	2.00332	0.17%	1.99683	0.16%
(-1.25, 0.0)	1.99905	0.05%	1.99389	0.31%
(-1.00, 0.0)	1.99915	0.04%	1.99901	0.05%
(-0.75, 0.0)	1.99899	0.05%	1.99914	0.04%
(-0.50, 0.0)	1.99916	0.04%	1.99749	0.13%
(-0.25, 0.0)	1.99952	0.02%	1.99741	0.13%
(0.00, 0.0)	1.99974	0.01%	1.99768	0.12%
(0.25, 0.0)	1.99952	0.02%	1.99741	0.13%
(0.50, 0.0)	1.99916	0.04%	1.99749	0.13%
(0.75, 0.0)	1.99899	0.05%	1.99914	0.04%
(1.00, 0.0)	1.99915	0.04%	1.99901	0.05%
(1.25, 0.0)	1.99905	0.05%	1.99389	0.31%
(1.50, 0.0)	2.00332	0.17%	1.99683	0.16%
(1.75, 0.0)	2.00795	0.40%	1.99441	0.28%
(2.00, 0.0)	2.01297	0.65%	2.00332	0.17%
(2.50, 0.0)	2.01724	0.87%	2.00387	0.19%
(3.00, 0.0)	2.01166	0.58%	2.00247	0.13%

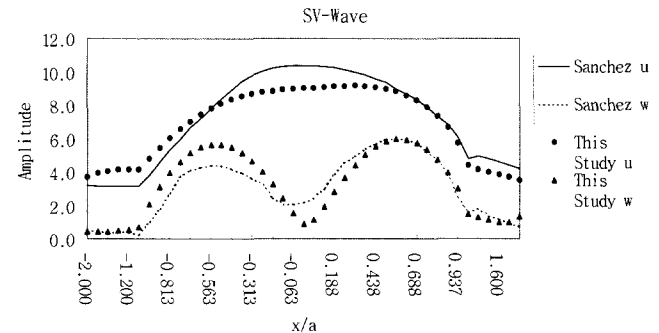


Fig. 3 Amplification of displacement for oblique incidence ($\psi_{s0} = 60^\circ$) of SV-wave

이다. 여기서 연약층과 반무한 영역 사이에서의 전단파 속도비는 $\frac{\beta}{\beta^+} = \frac{1}{2}$ 로 하였고, 연약층에서의 전단 탄성계수 $\mu = \frac{1}{6}$, 반무한 영역에서의 전단 탄성계수 $\mu^+ = 1.0$, 무차원 진동수 $\eta = \frac{\omega a}{\pi \beta^+} = \frac{1}{2}$, 그리고 포아송 비는 연약층과 반무한 영역에서 모두 동일하게 $\nu = \frac{1}{3}$ 로 하였다. 이때 입사각은 $\psi_0 = 90^\circ, 60^\circ, 30^\circ$ 를 사용하였다. 각 그림의 x축은 반경 a로 무차원시킨 반원형의 길이 비이고, y축은 지진응답의 크기를 나타내고 있다. 수치해석의 결과인 수평변위와 수직변위를 그림에서 u와 w로 표시하였다.

Fig. 4는 P파가 반원형 연약층에 경사지게 입사할 때의 응답을 나타낸 것인데, 수직 입사인 경우는 표면의 중앙점을 기준하여 좌우 대칭되는 결과를 보여준다. 그러나 입사각이 경사질수록 한쪽으로 치우치는 경향이 있다. 예전한대로 수직입사인 경우 표면의 중앙점에서 수평변위 u는 0이지만, 수직변위 w은 최대가 됨을 알 수 있다.

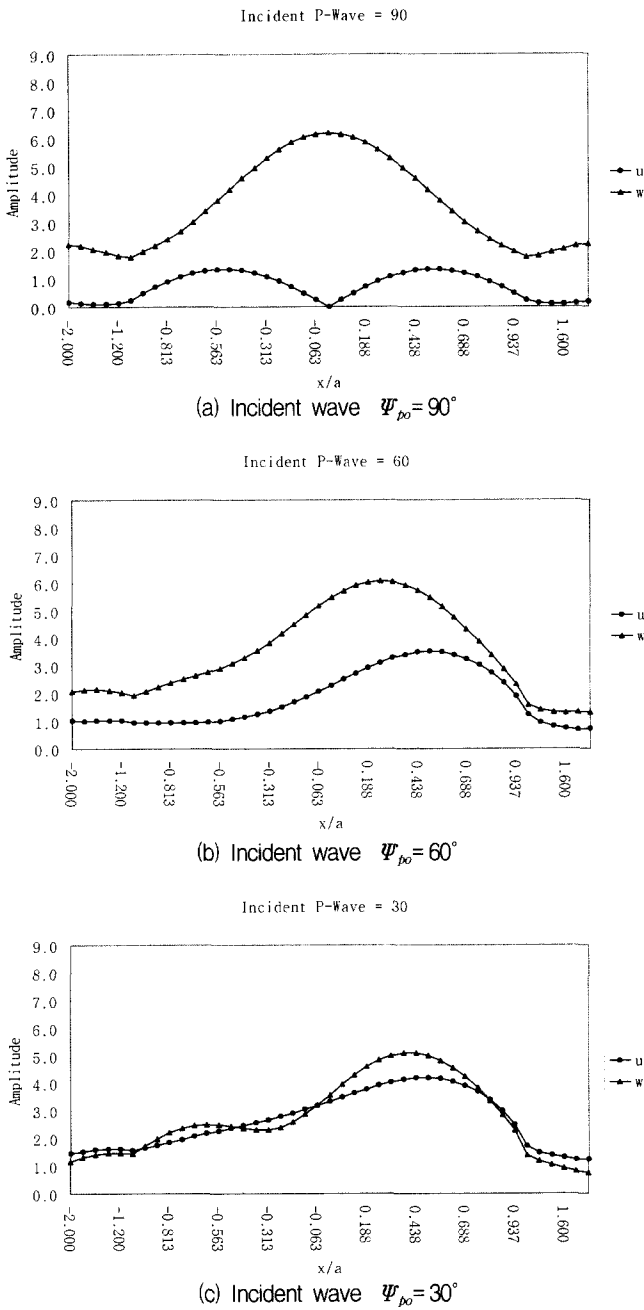


Fig. 4 Amplitude of surface displacement spectra for P-wave ($\eta = \frac{1}{2}$: homogeneous valley, $\frac{\mu_-}{\mu_+} = \frac{1}{6}$)

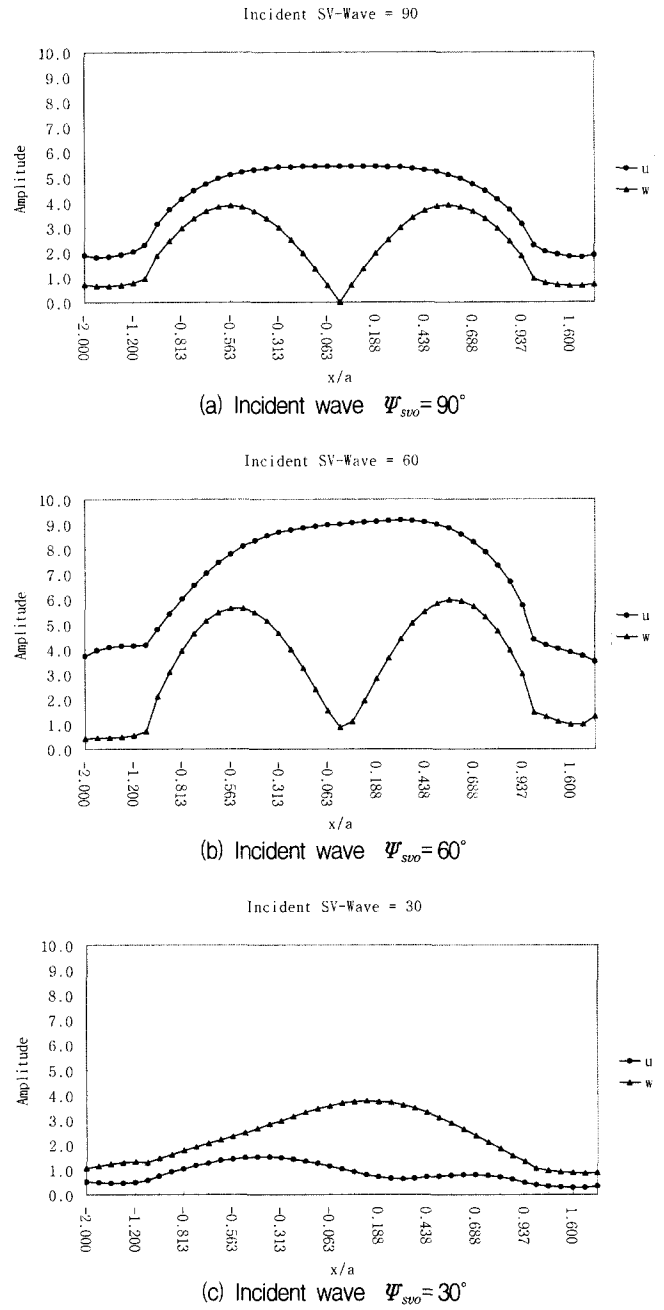


Fig. 5 Amplitude of surface displacement spectra for SV-wave ($\eta = \frac{1}{2}$: homogeneous valley, $\frac{\mu_-}{\mu_+} = \frac{1}{6}$)

Fig. 5는 SV파가 반원형 연약층에 경사지계입사할 때의 응답을 나타낸 것인데, 역시 수직 입사인 경우는 표면의 중앙점을 기준하여 좌우 대칭되는 결과를 보여준다. 예컨한대로 수직입사인 경우 표면의 중앙점에서 수직변위 w 은 0이지만, 수평변위 u 는 최대가 됨을 알 수 있다.

6. 요약 및 결론

임의의 형상을 갖는 퇴적층에 지진파가 입사할 때, 임의의 진동수에서 입사파의 종류, 입사파의 입사각도와 무차원 진동수, 반무한 영역과 퇴적층 사이의 전단파 속도비 및 단위 밀도비가 임의의 값을 가질 때 지진의 응답을 구

하기 위하여 수치해석 프로그램을 개발하였다. 여기에서 반무한체 영역에 대해서는 3절점 등매개 변수 경계요소를 사용한 경계요소법을 이용하여 외부영역을 모델링하고, 복잡한 기하형상과 재료의 불균질성을 갖는 내부영역인 비균질 연약층은 8절점 등매개 변수 유한요소를 사용한 유한요소법을 이용하여 모델링하였다. 이 때 외부영역과 내부영역의 접측면에서 표면력의 평형조건과 변위의 연속조건을 사용하여 두 방법을 결합하였다. 그리고 이와같이 결합된 이론식을 바탕으로 체적파인 P파와 SV파가 입사될 때에 따른 프로그램을 작성하여 지진응답을 수치해석하여 고려한 위의 그림들을 고찰한 결과를 정리하면 다음과 같다.

- (1) 저진동수 영역에서는 P파 및 SV파 응답의 증폭 변화가 입사각에 따라 영향이 거의 없었고, 고진동수 영역에서는 입사각이 경사질수록 P파 및 SV파 응답의 증폭 변화가 크게 일어났다.
- (2) 파장이 짧은 경우는 지반의 비균질성에 대하여 아주 민감한 반면, 파장이 긴 경우는 그러하지 않았다.
- (3) 지표면의 응답 증폭은 진동수에 따라서 민감함을 파악할 수 있었다. 구조계가 유사하고 인접한 지역에 위치한 두 구조물일지라도 진동수의 변화에 따라, 어떤 진동수에서는 퇴적층 지표면 중앙 부분의 응답 증폭이 가장 크게 나타날 수 있고, 어떤 진동수에서는 퇴적층 지표면의 가장자리에서 응답의 증폭이 가장 크게 나타날 수도 있다.
- (4) 수평방향으로 유한한 길이의 연약층을 갖는 반무한 영역의 구조계에 대한 지진파 응답의 공진 현상을 파악할 수 있었다.
- (5) 전단 탄성계수비가 깊이에 따라서 점차 선형적으로 증가하는 경우, 반무한 영역과 연약층 사이의 전단 탄성계수비가 증가할수록 연약층에서의 변위 응답은 증가하였다.

참 고 문 헌

1. Wolf, J. P., *Dynamic Soil-Structure Interaction*, Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, N.J., 1985, pp. 1-11, 114-272.
2. Wong, H. L., "Effect of surface topography on the diffraction of P, SV, and Rayleigh waves," *Bull. of Seis. Soc. of America*, Vol. 72, No. 4, 1982, pp. 1167-1183.
3. Sanchez-Sesma, F. J., "Diffraction of elastic waves by wedges," *Bull. of Seis. Soc. of America*, Vol. 75, No. 5, 1985, pp. 1435-1446.
4. Wong, K. C., Shah, A. H., and Datta, S. K., "Diffraction of elastic waves in a half-space II ; analytical and numerical solutions," *Bull. of Seis. Soc. of America*, Vol. 75, No. 1, 1985, pp. 69-92.
5. Kausel, E., Roesset, J. M., and Wass, G., "Dynamic analysis footings on layered media," *J. of Eng. Mech., ASCE*, Vol. 101, 1975, pp. 679-693.
6. Bettess, P. and Zienkiewicz, O. C., "Diffraction and refraction of surface wave using finite and infinite elements," *Int. J. Num. Meth. Eng.*, Vol. 11, 1977, pp. 1271-1290.
7. Banerjee, P. K. and Butterfield, R., *Boundary Element Methods in Engineering Science*, McGraw Hill, London and New York, 1981.
8. Eringen, A. C. and Suhubi, E. S., *Elastodynamic - Vol II, Linear Theory*, Academic Press, New York, 1975, pp. 435.
9. Sanchez-Sesma, F. J., Ramos-Martinez, J., and Campillo, M., "An indirect boundary element method applied to simulate the seismic response of alluvial valleys for incident P, S, and Rayleigh waves," *Earthquake Eng. and Struct. Dyn.*, Vol. 22, 1993, pp. 279-295.