

임의 형상의 퇴적층을 갖는 균일 반무한 영역내에서 SH파 응답 해석

The Analysis of SH-Wave Response in the Homogeneous Half-Space Having Alluvial Deposit of Arbitrary Shape

권영록* 손영호**
Kwon, Young Rok Son, Young Ho

국문요약

본 논문은 임의형상의 퇴적층을 갖는 반무한 영역내에서 SH파가 경사지게 입사할 때의 지진응답을 연구하였다. 그리고 비균질 퇴적층인 반무한 영역에서 파의 증폭을 다루었다. 사용한 수치해석 방법으로는 유한요소법과 경계요소법을 결합하여 수치해석하였다. 반무한 영역에서 자유장 응답과 정해를 비교 분석한 결과 잘 일치하여 검증되었다. 불규칙한 형상의 비균질 퇴적층을 갖는 부지에서의 지진응답 해석은 본 연구에서 개발한 수치해석 방법으로 가능하다. 따라서 임의 층상 구조를 갖는 연약층에서의 SH파 증폭과 임의 각도로 입사하는 SH파에 대한 지진응답을 해석하였다.

주요어 : SH파, 파의 증폭, 유한요소법, 경계요소법, 지진응답

ABSTRACT

This study investigated the seismic response from inclined SH-wave in the half space having alluvial deposit and the amplification of waves in a semi-infinite soil which have nonhomogeneous alluvial deposits. This study is used the combined method of finite element method and boundary element method as the numerical method. The results obtained are compared with that of the free field response of the half space and that of the exact solution and proved to be satisfactory. The analysis of seismic response in the site having nonhomogeneous alluvial deposits of irregular geological configuration is possible by the numerical procedure in this paper. So, we analyzed seismic response about SH-wave of arbitrary angle and amplification SH-wave in soft valley having arbitrary layered structure.

Key words : SH-wave, amplification of wave, finite element method, boundary element method, seismic response

1. 서 론

이론상으로 견고한 지반 위에 위치하는 구조물 지반에서의 지진응답은 구조물이 놓이기 이전 지반에서의 자유장 응답과 동일하나, 유연한 지반 위에 구조물이 위치하는 경우는 지반과 구조물의 연계효과로 인하여 그 응답이 달라지게 된다. 이는 구조물의 기초로 인한 지진파의 산란과 구조물 진동으로 인한 에너지의 반무한체 지반으로의 발산이라는 지반-구조물 상호작용에 기인한다.⁽¹⁾ 이러한 기초-지반 상호작용 해석을 수행하기 위해서는 부지 응답이 우선적으로 해석되어야 하고, 또한 지반의 동적 특성 파악과 지반 및 구조물의 모델링이 이루어져야 한다. 연약층 분지위에 위치한 대도시에서의 지진피해^{(2),(3)}를 살펴보면, 반무한 영역 위에 놓인 수평방향으로 무한 평면인 층상구조로 구성되는 1차원 모델만으로는 관측자료의 모든 양상을 파악하기가 충분하지 못하다. 따라서 강지진에 대한 지역적 부지특성의 영향^{(4),(5)}을 잘 파악하여야 한다. 부지 특성중 주요 관심대상은 불규칙한 형상을 갖는 지표면과 연약층을 갖는 지반이다. 이러한 경우에 연약층으로 이루어진 분지에서의 지진응답을 구하는 것은 매우 중요하다. 따라서 임의의 층상구조를 갖는 연약층에

서의 지진응답 증폭 현상과 임의의 각도로 입사하는 지진파에 대한 연약층에서의 지진응답에 대한 연구가 필요하게 되었다.

지진응답에 대한 연구사례를 살펴보면, Trifunac⁽⁶⁾은 반무한 지반내에 묻혀있는 반원형 퇴적층으로 전달되는 SH파의 문제를 최초로 연구하였다. 그의 연구는 퇴적층내에서 지진파가 증폭되고, 그 증폭되는 추세는 입사파의 입사각도에 따라 변하는 것을 파악하였다. 그리고 반타원 모양의 퇴적층으로 인한 SH파의 증폭문제에 대한 정해는 Wong과 Trifunac^{(7),(8)}이 구하였다.

임의의 비균질 연약층을 갖는 반무한체 지반은 형상의 불규칙성과 재료의 비균질성 등으로 인하여 해석해를 구하는 것은 불가능하므로 수치해석 방법을 사용한다. 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 경계로부터 불필요한 파의 반사를 일으키는 단점이 있다. 반면에 경계요소법은 유한요소법의 제약과 단점을 극복 할 수 있는 수치해석 방법으로서, 특히 무한영역을 모델링하는데 가장 적합하다.⁽⁹⁾ 이 방법은 기본 특이해를 사용하기 때문에 방사조건이 자동적으로 만족된다. 이러한 이유로 인하여 본 연구에서는 반무한체 영역에 대해서는 경계요소법을 이용하여 외부영역을 모델링하고, 복잡한 기하형상과 재료의 불균질성을 갖는 내부영역인 비균질 연약층

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

** 경희대학 · 경북전문대학 토목과 전임강사

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

은 유한요소법을 사용하여 모델링한다. 이 때 외부영역과 내부영역의 접촉면에서 표면력의 평형조건과 변위의 연속조건을 사용하여 두 방법을 결합한 이론식을 바탕으로 체적과인 SH파가 입사할 때의 지진응답을 구하였다.

2. 경계요소법에 의한 반무한체 지반의 이산화 과정

외부영역인 지반은 등방, 균질인 선형탄성체라고 가정하면, 시간의존 $\exp(i\omega t)$ 인 정상상태 문제에 대한 면외거동 동탄성론 지배방정식은 다음과 같다.

$$\Delta + k_T^2 v = -f \tag{1}$$

여기서 ω 는 원 진동수, Δ 은 Laplacian, v 는 면외변위, f 는 물체력이고 k_T 는 파수(wave number)이고 $k_T = \frac{\omega}{c_v}$ 이다. c_v 는 전단파 속도이다. 외부문제에는 적분 방정식을 사용하고, 적분 방정식을 정식화하기 전에 먼저 기본해를 구한다. 기본해는 하중점 \bar{x} 에 단위 집중하중을 작용한 경우에 관측점 \bar{y} 의 변위를 구함으로써 얻어진다. 즉 다음 방정식을 풀면 된다.

$$(\Delta + k_T^2)v = -\delta(\bar{y} - \bar{x}) \tag{2}$$

여기서 δ 는 dirac delta 함수이다. 그리고 식 (2)의 해를 구하면 다음과 같다⁽¹⁰⁾

$$v = \frac{i}{4} H_0^{(1)}(k_T r) \tag{3}$$

여기서 $H_0^{(1)}$ 는 제 1 종 0차 Hankel 함수이고, r 은 하중점과 관측점 사이의 거리로서 $|\bar{y} - \bar{x}|$ 이다. 식 (3)은 무한 영역에서의 기본해이나, 여기서는 반무한 지반을 대상으로 하기 때문에 다음과 같은 반무한 영역에 있어서의 기본해⁽¹¹⁾를 사용한다.

$$Y(\bar{x}, \bar{y}) = \frac{i}{4} H_0^{(1)}(k_T r) + \frac{i}{4} H_0^{(1)}(k_T r') \tag{4}$$

이고, 여기서 $r' = |\bar{y}' - \bar{x}|$, \bar{y}' 는 \bar{y} 의 반무한체 지반에 대한 대칭좌표이다.

Green 공식에 의하여 영역 $(\Omega + \Gamma)$ 에서 다음 식이 성립한다.

$$\int_{\Omega} [v(\Delta + k_T^2)u - u(\Delta + k_T^2)v] d\Omega = \int_{\Gamma} (v \frac{\partial u}{\partial n} - u \frac{\partial v}{\partial n}) d\Gamma \tag{5}$$

식 (1)에서 물체력 f 를 0이라 가정하고, 식 (5)의 v 에 기본해 Y 를 대입한다.

$$\int_{\Omega} [-u(\Delta + k_T^2)Y(\bar{x}, \bar{y})] d\Omega = \int_{\Gamma} [\frac{1}{\mu} Y(\bar{x}, \bar{y})t(\bar{y}) - u(\bar{y})Y_I(\bar{x}, \bar{y})] d\Gamma \tag{6}$$

$Y(\bar{x}, \bar{y})$ 는 $\bar{x} = \bar{y}$ 에서 \log 의 특이성을 갖기 때문에 \bar{x} 의 위치에 따라서, 식 (6)을 다음의 세 형태로 구분한다.

$$\Omega(\bar{x})u(\bar{x}) = \int_{\Gamma} [\frac{1}{\mu} Y(\bar{x}, \bar{y})t(\bar{y}) - u(\bar{y})Y_I(\bar{x}, \bar{y})] d\Gamma \tag{7}$$

$$\Omega(\bar{x}) = 1, \quad \bar{x} \in \Omega(\text{영역내 일 때})$$

$$\Omega(\bar{x}) = \frac{1}{2}, \quad \bar{x} \in \Gamma(\text{매끈한 경계상 일 때})$$

$$\Omega(\bar{x}) = 0, \quad \bar{x} \notin (\Omega + \Gamma)$$

만약 하중점 \bar{x} 와 관측점 \bar{y} 가 모두 경계상에 있는 것으로 하면, 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 SH파의 적분 방정식은 식 (7)에 의해 다음과 같다.

$$\frac{1}{2} u(\bar{x}) = \int_{\Gamma} [\frac{1}{\mu} Y(\bar{x}, \bar{y})t(\bar{y}) - u(\bar{y})Y_I(\bar{x}, \bar{y})] d\Gamma \tag{8}$$

여기서는 2차 등매개변수요소를 이용하여 이산화하고, Fig. 1과 같이 경계 Γ 를 n 개의 요소로 분할한다. 절점 i 의 좌표와 변위 및 표면력을 각각 \bar{x}_i, u_i, t_i 로 놓으면, 절점 L 에 대한 K 요소 상의 적분은

$$\int_{\xi_i=-1}^{\xi_k=1} [\frac{1}{\mu} Y(\bar{x}_L, \bar{y}(\xi)) \sum_{i=1}^3 N_i(\xi)t_i - Y_I(\bar{x}_L, \bar{y}(\xi)) \sum_{i=1}^3 N_i(\xi)u_i] d\Gamma \tag{9}$$

이고, 결국 절점 L 에 관해서 다음의 방정식을 얻을 수 있다.

$$\frac{1}{2} u_L = \sum_{k=1}^{2n+1} G_{LK}^1 t_k - \sum_{k=1}^{2n+1} G_{LK}^2 u_k \tag{10}$$

$(L = 1, 2, \dots, 2n+1)$

여기서,

$$G_{LK}^1 = \int_{\xi_k=-1}^{\xi_k=1} \frac{1}{\mu} Y(\bar{x}_L, \bar{y}(\xi)) N_2(\xi) |J| d\xi \tag{11}$$

$(k \text{가 짝수인 경우})$

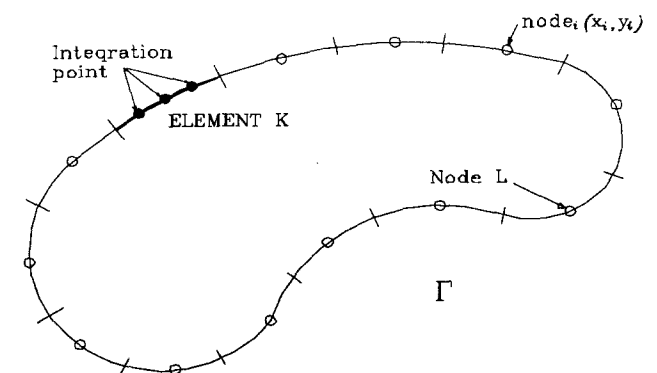


Fig. 1 Discretization of the boundary Γ

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

(k가 홀수인 경우) (12)

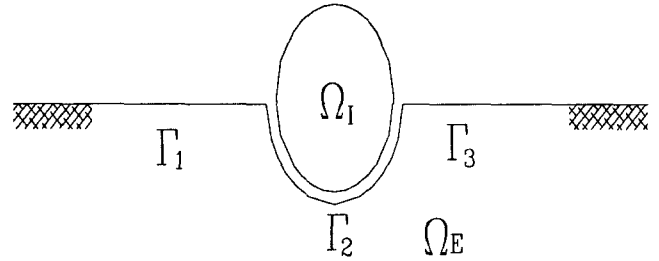


Fig. 2 Nomenclature of half space

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) (13)

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

(k가 홀수인 경우) (14)

{u(Gamma_2)}, 그리고 표면력 벡터 {t(Gamma_2)}는 다음으로 표현된다.

$$\{u(\Omega)\} = \begin{pmatrix} u_1 \\ \dots \\ u_M \end{pmatrix}, \{u(\Gamma_2)\} = \begin{pmatrix} u_1 \\ \dots \\ u_{2n+1} \end{pmatrix}, \{t(\Gamma_2)\} = \begin{pmatrix} t_1 \\ \dots \\ t_{2n+1} \end{pmatrix}$$

(20)

따라서 결론식은 다음과 같다.

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

(21)

3. 유한요소법에 의한 퇴적층의 이산화 과정

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

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

(15)

혹은,

$$[K]\{u\} = [F]\{t\}$$

(16)

여기서,

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

(17)

그리고,

$$F = \frac{1}{\mu} \left[\int_{\Gamma} N^T Nd\Gamma \right]$$

(18)

4. 경계요소법과 유한요소법의 결합

Fig. 2에서와 같이 영역 (Omega_I + Gamma_2)에 있어서의 내부 문제와 영역 (Omega_E + Gamma_1 + Gamma_2 + Gamma_3)에 있어서의 외부 문제로 나누어 각각에 대해서 정식화를 한다. 경계 Gamma_2를 n 개의 2차 등매개 변수요소로 분할(절점수는 2n+1)하면 Gamma_2 상에서의 변위 벡터, 표면력 벡터는 다음으로 표시된다.

$$\{u(\Gamma_2)\} = \begin{pmatrix} u_1 \\ \dots \\ u_{2n+1} \end{pmatrix}, \{t(\Gamma_2)\} = \begin{pmatrix} t_1 \\ \dots \\ t_{2n+1} \end{pmatrix}$$

(19)

영역내 Omega와 경계상 Gamma_2의 절점에 관한 식을 세우고, 각각의 절점 수를 M, 2n+1이라 하면, 변위 벡터 {u(Omega)}와

그리고 변위의 연속조건과 표면력의 평형 조건에서

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

(22)

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

(23)

으로 표현되며, 식 (22), (23)를 고려하여 식 (21)을 정리하면 다음과 같다.

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

(24)

여기서 u_{IR}(Gamma_2) = u_I(Gamma_2) + u_R(Gamma_2)이고 u_I(Gamma_2)와 u_R(Gamma_2)은 각각 Gamma_2에서의 입사파와 반사파에 의한 변위이다. 그리고 t_{IR}(Gamma_2) = t_I(Gamma_2) + t_R(Gamma_2)이고 t_I(Gamma_2)와 t_R(Gamma_2)은 각각 Gamma_2에서의 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

앞에서 유도한 기본이론과 수치해석과정을 바탕으로 작성한 프로그램의 타당성을 검증한다. 내부 영역과 외부 영역에서 물리 정수가 전부 동일하게 Fig. 3에서와 같이 비균질 연약층을 518개의 8절점 등매개 변수 유한요소로, 그 연약층을 둘러싸고 있는 반무한체 지반을 50개의 3절점 등매개변수

경계요소로 모델링하였다.

그리고 지표면($x_2=0$)에서의 응답을 고려해 보면 어느 경우에도 2.0 혹은 0.0 이다. Table 1에서는 SH파가 연직하방으

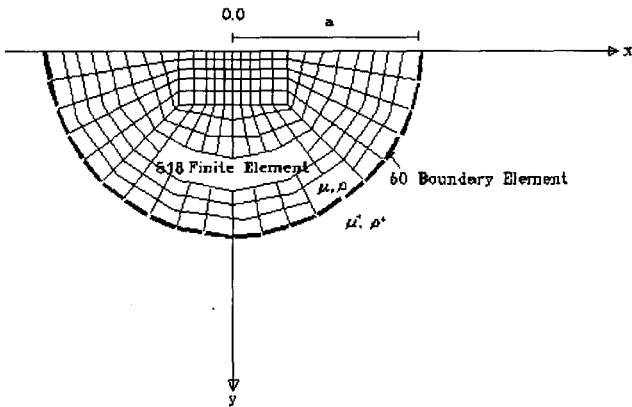


Fig. 3 Finite element and boundary element mesh for semicircular valley

Table 1 Exact solution and numerical solution at the free surface in SH-wave ($x_2=0$) (exact solution=2.0000)

Coordinate	Displacement	Error
(-2.00, 0.0)	2.001300	0.065%
(-1.75, 0.0)	2.004390	0.022%
(-1.50, 0.0)	2.000011	0.001%
(-1.25, 0.0)	2.000106	0.005%
(-1.00, 0.0)	1.999942	0.003%
(-0.75, 0.0)	2.000037	0.002%
(-0.50, 0.0)	2.000324	0.016%
(-0.25, 0.0)	2.000455	0.023%
(0.0, 0.0)	2.000505	0.025%
(0.25, 0.0)	2.000455	0.023%
(0.50, 0.0)	2.000324	0.016%
(0.75, 0.0)	2.000037	0.002%
(1.00, 0.0)	1.999942	0.003%
(1.25, 0.0)	2.000106	0.005%
(1.50, 0.0)	2.000011	0.001%
(1.75, 0.0)	2.000439	0.022%
(2.00, 0.0)	2.001300	0.065%

로부터 입사할 때 층상의 깊이에 따른 응답의 결과를 나타내었다. 수치해석 결과와 정해를 비교하여 보면, 고려하는 점에 대하여 계산 결과의 정해에 대한 오차는 1%에도 도달하지 않으므로 프로그램의 타당성은 검증된다.

반원형상의 연약층에 SH파가 경사지게 입사하는 경우 ($\psi_{sh0}=30^\circ$)와 수직 입사하는 경우($\psi_{sh0}=90^\circ$)에 대한 응답의 크기를 Table 2에 나타내었다. 각각의 경우에 대한 요소의 수는 22요소, 88요소, 202요소를 사용하였고, 지표면 중앙에서의 변위값에 대한 자유장 응답의 비가 Trifunac⁽⁶⁾ 이 구한 정해와 함께 나타나있다. 예견했듯이 주어진 요소의 개수에 대해서 진동수가 증가할수록 절대오차는 증가함을 알 수 있다. 그러나 어느 경우도 오차는 0.1% 정도이므로 본 프로그램의 타당성을 검증할 수 있다.

반원형상의 연약층을 갖는 반무한 지반에 경사지게 SH파가 입사할 때의 자유표면에서의 변위응답을 Trifunac이 급수해를 이용하여 구하였다.⁽⁶⁾ SH파의 입사각이 $\psi_{sh0}=60^\circ$ 로 입사할 때 자유표면에서의 변위증폭을 정해와 비교하여 나타낸 것이 Fig. 4이다. 이 때 그림에서 x축은 반경 a로 무차원시킨 반원형상의 길이 비이고, y축은 변위응답을 나타내었다. 그림에서 실선은 정해를 나타낸 것이고 둥근점은 본 연구의 수치해석의 결과인데, 정해와 수치해석의 결과가 잘 일치함을 알 수 있다.

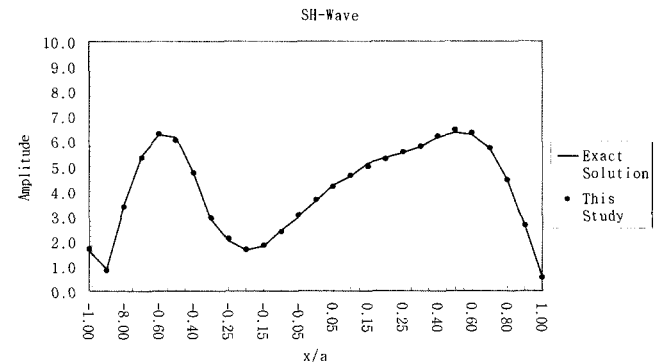


Fig. 4 Amplification of displacement for oblique incidence ($\psi_{sh0}=60^\circ$) of SH-wave

Table 2. Normalized surface displacement at center of homogeneous valley

Angle of incidence	Number of element	Dimensionless frequency, $\eta = \frac{\omega a}{\beta^+}$					
		0.25π		0.50π		1.00π	
		Real	Imaginary	Real	Imaginary	Real	Imaginary
Vertical incidence ($\psi_{sh0}=90^\circ$)	22	1.79816	-0.04209	-0.56089	1.68831	-1.72139	-0.68660
	88	1.79830	-0.04198	-0.56066	1.68271	-1.70196	-0.68569
	202	1.79834	-0.04197	-0.56066	1.68129	-1.70273	-0.68570
	Exact	1.79833	-0.04199	-0.56095	1.67989	-1.70392	-0.68645
	Error	0.01%	0.05%	0.05%	0.08%	0.07%	0.11%
Oblique incidence ($\psi_{sh0}=30^\circ$)	22	1.80218	-0.02665	-0.59225	1.63143	-1.70538	-0.63833
	88	1.80031	-0.02769	-0.57691	1.65467	-1.69516	-0.66691
	202	1.79967	-0.03246	-0.57151	1.66270	-1.69748	-0.67360
	Exact	1.79896	-0.03244	0.56186	1.66423	-1.69884	-0.67441
	Error	0.04%	0.06%	0.06%	0.09%	0.08%	0.12%

5.2 영향인자에 대한 고찰

균질 또는 비균질 점탄성 반원형 연약층에 SH파가 경사 지게 입사할 때의 지진응답을 구하여 나타낸 것이 Fig. 5 이다. 연약층과 반무한 영역 사이의 단위밀도비 $\frac{\rho}{\rho^+} = \frac{2}{3}$ 로 하고, SH파의 입사각이 $\psi_{sH} = 90^\circ, 60^\circ, 30^\circ$ 로 입사할 때이다. 각 각의 그림에서 x축은 반경 a로 무차원시킨 반원 형상의 길이 비이고, y축은 무차원 진동수, z축은 반무한 영역 자유 표면에서의 정해 값인 2.0으로 나누어 무차원 시킨 지진응답의 크기를 나타내었다.

Fig. 5는 균질 층상으로 연약층과 반무한 영역 사이의 전 단탄성계수비가 $\mu/\mu^+ = \frac{1}{6}$ 인 경우의 연약층에 SH파가 변화하면서 입사하는 지진파에 대한 응답을 나타낸 것이다. 연약층 표면의 중앙점을 살펴보면 무차원 진동수가 $\eta=0.0\sim 3.0$ 일 때 입사각도에 상관없이 응답의 크기는 거의 동일한 값을 갖는다. 특히 무차원 진동수가 $\eta=1.0$ 일 때 표면의 중앙에

서는 최대값을 갖고 표면의 가장자리는 오히려 응답의 크기가 작음을 알 수 있다.

6. 요약 및 결론

임의의 형상을 갖는 퇴적층에 지진파가 입사할 때, 임의의 진동수에서 입사파의 입사각도와 무차원 진동수, 반무한 영역과 퇴적층 사이의 전단파 속도비 및 단위 밀도비가 임의의 값을 가질 때 지진의 응답을 구하기 위하여 수치해석 프로그램을 개발하였다. 외부영역과 내부영역의 접촉면에서 표면력의 평형조건과 변위의 연속조건을 사용하여 두 방법을 결합하였고, 이와같이 결합된 이론식을 바탕으로 체적파인 SH파가 입사될 때에 따른 프로그램을 작성하여 지진응답을 수치해석하였다.

면외파인 SH파가 경사지게 입사할 때의 응답을 고려한 위의 그림들을 고찰한 결과를 정리하면 다음과 같다.

- (1) 저진동수 영역에서는 SH파 응답의 증폭 변화가 입사각에 따라 영향이 거의 없었고, 고진동수 영역에서는 입사각이 경사질수록 SH파 응답의 증폭 변화가 크게 일어났다. 이 때 표면의 중앙에서의 응답의 증폭이 제일 크고, 표면의 가장자리는 증폭이 작았다.
- (2) 지하 공간의 비균질 정도가 심할수록 지표면의 응답 증폭은 매우 크게 일어났다.
- (3) 파장이 짧은 경우는 지반의 비균질성에 대하여 아주 민감한 반면, 파장이 긴 경우는 그러하지 않았다.
- (4) 무차원 진동수가 증가할수록, 즉 파장이 감소할수록 자유표면의 변위 증폭은 증가하였다.
- (5) 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.
- (6) 수평방향으로 유한한 길이의 연약층을 갖는 반무한 영역의 구조계에 대한 지진파 응답의 공진 현상을 파악할 수 있다.

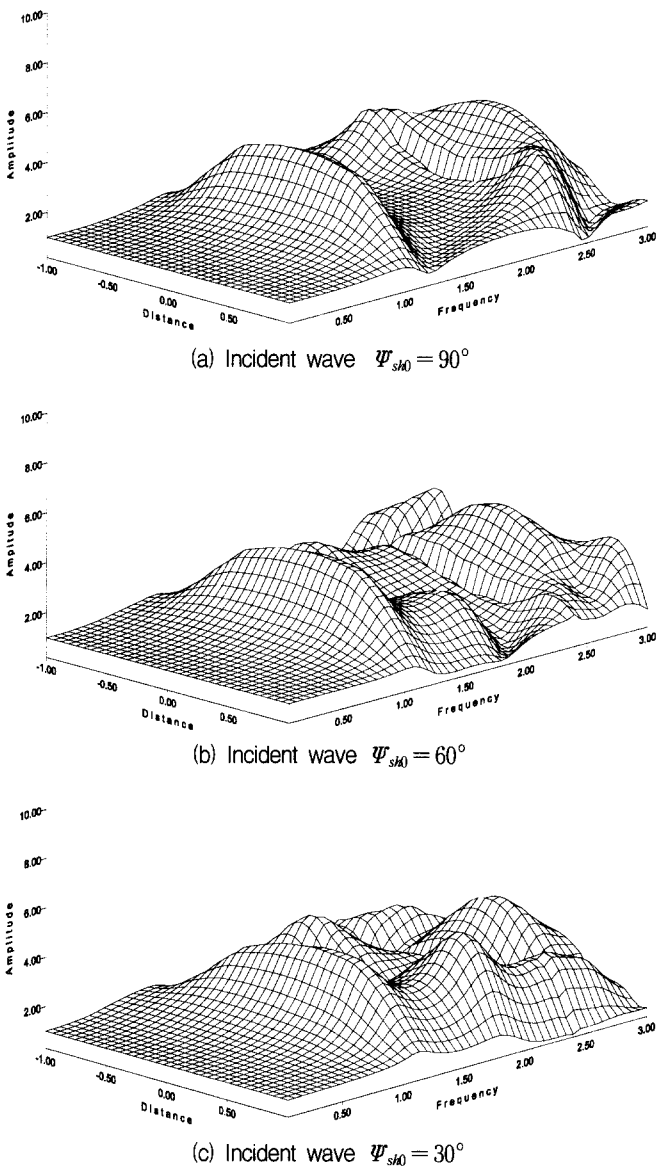


Fig. 5 Normalized amplitude of free-surface displacement $|u|/2$ ($\mu/\mu^+ = 1/6, \rho/\rho^+ = 2/3, D = 0.02, D^+ = 0.01$)

참고 문헌

1. Wolf, J. P., *Dynamic Soil-Structure Interaction*, Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, N.J., 1985, pp. 1-11, 114-272.
2. Anderson, J. G., Bodin, P., Brune, J. N., Prince, J., Singh, S. K., Quass, R., and Onate, M., "Strong ground motion from Michoacan, Mexico, earthquake," *Science*, Vol. 233, 1986, pp. 1043-1049.
3. Kagami, H., Duke, C. M., Liang, G. C., and Ohta, Y., "Observation of 1-to 5-second microtremors and their

- application to earthquake engineering," *Bull. Seism. Soc. Am.*, Vol. 77, 1982, pp. 987-998.
4. Aki, K., "Local site effects on strong ground motion," *Proc. Earthquake eng. soil dyn. II*, ASCE, Park City, Utah, 1988.
 5. King, J. L. and Tucker, B. E., "Observed variations of earthquake motion across a sediment-filled valley," *Bull. Seism. Soc. Am.*, Vol. 74, 1984, pp. 137-151.
 6. Trifunac, M. D., "Surface motion of a semicylindrical alluvial valley for incident plane SH waves," *Bull. of Seis. Soc. of America*, Vol. 61, 1971, pp. 1755-1770.
 7. Wong, H. L. and Trifunac, M. D., "Scattering of plane SH waves by a semi-elliptical canyon," *Earthquake Eng. and Struct. Dyna.*, Vol. 3, 1974, pp. 157-169.
 8. Wong, H. L. and Trifunac, M. D., "Surface motion of a semi-elliptical alluvial valley for incident plane SH waves," *Bull. of Seis. Soc. of America*, Vol. 64, 1974, pp. 1389-1408.
 9. Banerjee, P. K. and Butterfield, R., *Boundary Element Methods in Engineering Science*, McGraw Hill, London and New York, 1981.
 10. Eringen, A. C. and Suhubi, E. S., *Elastodynamic - Vol II, Linear Theory*, Academic Press, New York, 1975, pp. 435.
 11. 境界要素法 研究會編, "境界要素法の 理論と 應用", コロナ社, 1986, pp. 103-104.