

# 지반주기를 고려한 다층지반의 평균전단파속도 추정 방법 평가

## Evaluation of Average Shear-wave Velocity Estimation Methods of Multi-layered Strata Considering Site Period

김동관<sup>1)\*</sup>

Kim, Dong-Kwan<sup>1)\*</sup>

<sup>1)</sup>청주대학교 건축공학과 조교수

<sup>1)</sup>Assistant Professor, Department of Architectural Engineering, Cheongju University

### / A B S T R A C T /

To calculate proper seismic design load and seismic design category, the exact site class for construction site is required. At present, the average shear-wave velocity for multi-layer soil deposits is calculated by the sum of shear-wave velocities without considering of vertical relationship of the strata. In this study, the transfer function for the multi-layered soil deposits was reviewed on the basis of the wave propagation theory. Also, the transfer function was accurately verified by the finite element model and the eigenvalue analysis. Three methods for site period estimation were evaluated. The sum of shear-wave velocities underestimated the average shear-wave velocities of 526 strata with large deviations. The equation of Mexican code overestimated the average shear-wave velocities. The equation of Japanese code well estimated the average shear-wave velocities with small deviation.

**Key words:** Seismic design, Site period, Shear-wave velocity, Site amplification

## 1. 서론

지진 시, 지반운동은 건물의 관성력으로 지진하중을 유발하여 건물에 손상을 야기한다. 이러한 지반운동은 해당 건물이 위치한 지반조건에 의하여 증폭되며, 국내 내진설계기준인 KDS 17 10 00 내진설계 일반[1]에서는 Table 1과 같이 암반까지의 깊이 및 평균전단파속도(Average Shear wave velocity)에 따라 지반종류를 S<sub>1</sub>~S<sub>6</sub>로 분류한다. 구조물의 지진하중을 결정하는 설계응답스펙트럼 작성 시, 지반분류에 따라서 단주기 지반증폭계수(F<sub>v</sub>)를 1.3~1.8, 1초주기 지반증폭계수(F<sub>1</sub>)를 1.3~3.0를 적용하여 설계하중을 증가하여 내진설계를 수행하게 된다.

건축물의 경우, 설계응답스펙트럼 작성 시 구해지는 단주기 설계스펙트럼가속도(S<sub>D5</sub>)와 1초주기 설계스펙트럼가속도(S<sub>D1</sub>), 그리고 구조물의 내진등급에 따라서 내진설계범주(Seismic Design Category)를 정한다. A~D로 분류되는 내진설계범주에 따라 구조물에 허용되는 지진력저항시

스템, 높이와 비정형성에 대한 제한, 내진설계 대상 부재, 구조해석방법, 연성상세 등을 규정하여 구조물의 내진안전성을 확보하도록 하고 있다[2].

따라서, 구조물에 대한 안전하고 합리적인 내진설계를 위해서는 해당 구조물이 위치한 지반종류에 대한 정확한 평가가 요구된다. 그러나 일반적으로 지반을 구성하는 다층지반에 대하여 식(1)과 같이 단층지반조건에 대한 전단파속도를 산술평균하여 평균전단파속도( $\bar{V}_s$ )를 구하고 있다[3].

$$\bar{V}_s = \frac{\sum_{i=1}^n d_i}{\sum_{i=1}^n \frac{d_i}{V_{si}}} \quad (1)$$

여기서,  $d_i$ 는  $i$ 번째 토층의 두께,  $V_{si}$ 는  $i$ 번째 토층의 전단파속도이다. 그러나, 식(1)로 구해지는 다층지반에 대한 평균전단파속도는 파동전달이론으로부터 도출되는 정해에 포함되지 않는 평균전단파속도가 산출되고, 이를 바탕으로 하는 지반분류 및 지진하중의 산정은 해당 구조물에 대하여 불안전하고, 비합리적인 내진설계를 초래할 수 있다.

따라서, 본 연구에서는 파동전달이론으로부터 구해지는 전달함수에 대

\*Corresponding author: Kim, Dong Kwan

E-mail: dkkim17@cju.ac.kr

(Received January 14, 2019; Revised February 15, 2019; Accepted April 10, 2019)

**Table 1.** Site Classification [1]

Site class	Description	Parameters for classification	
		Depth to bedrock*, $H$ (m)	Average shear wave velocity, $V_{S, Soil}$ (m/s)
S <sub>1</sub>	Rock	Less than 1	
S <sub>2</sub>	Shallow deposits of dense soils	1~20	260 or more
S <sub>3</sub>	Shallow deposits of medium-dense to loose-medium soil		Less than 260
S <sub>4</sub>	Deep deposits of medium-dense to loose-medium soil	more than 20	180 or more
S <sub>5</sub>	Deep deposits of loose soil		Less than 180
S <sub>6</sub>	100% damage of transformer or insulator		

\* Soil layer with shear wave velocity of 760 m/s or more

\*\* Soil sites with  $V_{S, Soil} \leq 120$  m/s are classified as S5 regardless of depth to bedrock

**Table 2.** Site Classification from ASCE 7-16 [3]

Site class	Soil profile name	Shear wave velocity (m/s)	Standard penetration resistance, $\bar{N}$	Soil undrained shear strength, $\bar{S}_u$ ( $\times 10^{-3}$ MPa)
S <sub>A</sub>	Hard Rock	> 1500	-	-
S <sub>B</sub>	Rock	760 to 1500		
S <sub>C</sub>	Very dense soil and soft rock	360 to 760	> 50	> 100
S <sub>D</sub>	Stiff soil	180 to 360	15 to 50	50 to 100
S <sub>E</sub>	Soft clay soil	< 180	< 15	< 50

하여 유한요소해석을 통하여 교차검증하고, 다층지반에 대한 주기의 정해를 구한다. 이를 바탕으로 해외기준들에서 적용되는 지반주기 산정식들을 평가하여 다층지반조건에 대한 평균전단파속도를 추정하는 방법을 제안하고자 한다.

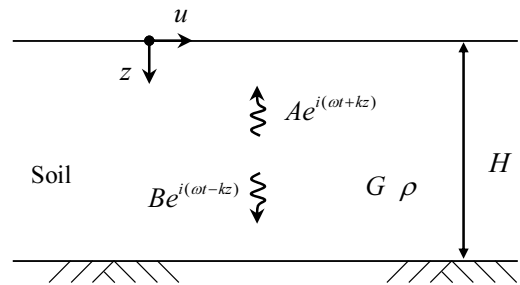
## 2. 지반분류 기준

전술한 바와 같이 KDS 17 10 00 내진설계 일반에서는 Table 1과 같이 암반까지의 깊이 및 평균전단파속도로 지반을 분류한다. 또한, ASCE 7-16 [3]에서도 지표면으로부터 상부 30 m 토층의 평균전단파속도( $V_{S,30}$ )로 지반을 분류하며, 그 기준은 Table 2와 같다. EU의 기준인 EUROCODE 8 [4]도 ASCE 7-16과 동일하게 상부 30 m 토층의 평균전단파속도로 지반을 분류한다.

그러나, 일본, 멕시코 등에서는 지반분류의 방법으로 Table 3과 같이 지반주기를 적용하고 있다[5, 6]. 3장에서 기술할 배경이론에서 도출되는 바와 같이 지반에 의한 지진동의 증폭은 지반주기에 발생하고, 지반주기와 유사한 구조물의 지진하중을 증가시키기 때문이다. 이러한 공학적 배경으로 바탕으로 호주, 뉴질랜드, 중국의 기준에서도 상부 30 m 토층의 평균전단

**Table 3.** Site Classification criteria

Country	CODE name	Site classification criteria
Korea	KDS 17 10 00	shear wave velocity
U.S.A.	ASCE 7-16	shear wave velocity
EU	EUROCODE 8	shear wave velocity
Japan	BCJ 1997	Site period
Mexico	MOC-2008	Site period
Australia	AS 1170.4 : 2007	Shear wave velocity & Site period
New Zealand	NZS 1170.5 : 2004	Shear wave velocity & Site period
China	GB50011-2010	Shear wave velocity & Site period



**Fig. 1.** Uniform soil deposit on rigid rock

파속도와 지반주기를 혼용하고 있다[7, 8].

## 3. 배경이론 및 해석검증

### 3.1 고정단 위에 감쇠가 없는 다층지반조건에 대한 파동전달이론

고정단 위에 감쇠가 없는 다층지반조건에 대한 파동전달이론은 다음과 같다[9].

Fig. 1에서 지표면으로부터 깊이가  $z$ 인 경우, 수평변위( $u$ )는 파동전달이론으로부터 다음 식 (2)가 유도된다.

$$u(z, t) = Ae^{i(\omega t + kz)} + Be^{i(\omega t - kz)} \quad (2)$$

여기서,  $A$ 는 상향파의 진폭,  $B$ 는 하향파의 진폭이고  $\omega$ 는 각속도이다. 이 때, 지표면에서 전단응력은 0이므로, 식 (3)이 유도된다.

$$\tau(0, t) = G\gamma(0, t) = G \frac{\partial u(0, t)}{\partial z} = 0 \quad (3)$$

여기서,  $G$ 는 다층지반의 전단탄성계수,  $\gamma$ 는 다층지반의 전단변형률이고, 지반의 전단탄성계수와 전단파속도는 다음의 관계가 있다.

$$G = V_s^2 \rho \quad (4)$$

여기서,  $\rho$ 는 지반의 질량밀도이다.

식(2)와 식(3)의 조합으로 다음 식(5)가 유도되며, 상향파의 진폭(A)과 하향파의 진폭(B)이 동일한 조건과, 오일러 공식에 따라 지표면으로부터 깊이에 따른 지반의 수평변위는 식(6)과 같이 표현할 수 있다.

$$Gik(Ae^{ik(0)} - Be^{-ik(0)})e^{i\omega t} = Gik(A - B)e^{i\omega t} = 0 \quad (5)$$

$$u(z,t) = 2A \frac{e^{ikz} + e^{-ikz}}{2} e^{i\omega t} = 2A \cos kz e^{i\omega t} \quad (6)$$

식(6)으로부터 지표면으로부터 깊이가 암반과 지표면 사이의 변위의 비를 나타내는 전달함수(Transfer Function)을 다음과 같이 구할 수 있다.

$$F_1(\omega) = \frac{u_{max}(0,t)}{u_{max}(H,t)} = \frac{2Ae^{i\omega t}}{2A \cos kH e^{i\omega t}} = \frac{1}{\cos kH} \quad (7)$$

$$= \frac{1}{\cos(\omega H / V_s)}$$

여기서, H는 지표면으로부터 깊이이다.

전달함수의 절대값으로 토층에 의한 지진동의 증폭함수(Amplification Function)를 식(8)과 같이 나타낼 수 있으며, 이는 주파수 별로 암반의 진동이 토층에 의해 증폭되는 것을 나타낸다.

$$|F_1(\omega)| = \sqrt{\{Re[F_1(\omega)]\}^2 + \{Im[F_1(\omega)]\}^2} \quad (8)$$

$$= \frac{1}{|\cos(\omega H / V_s)|}$$

식(8)에서 지진동을 증폭시키는 경우는 분모가 0이 됨에 따라 증폭함수가 증가하는 것이다. 따라서, 다음 식(9)와 같이 지진동의 증폭을 유발하는 각속도를 유도할 수 있다

$$\omega_n \approx \left( n\pi - \frac{\pi}{2} \right) \frac{V_s}{H}, \quad n = 1, 2, 3, \dots, \infty \quad (9)$$

각속도와 주기의 관계식에 따라 식(10)이 유도되며, 여기서 T<sub>n</sub>은 해당 단층지반의 n차 진동주기를 나타낸다.

$$T_n = \frac{2\pi}{\omega_n} = \frac{2\pi \times H}{V_s} \times \frac{2}{(2n-1)\pi} = \frac{4H}{V_s} \times \frac{1}{2n-1} \quad (10)$$

단층지반의 1차 진동주기(T<sub>1</sub>)는 식(11)과 같이 암반까지의 깊이와 전단파속도를 구할 수 있다. 또한, 단층지반의 1차 진동주기와 전단파속도는 식(12)와 같이 역수 관계이다.

$$T_1 = \frac{4H}{V_s} \quad (11)$$

$$V_s = \frac{4H}{T_1} \quad (12)$$

전술한 식(1)의 다층지반에 대한 평균전단파속도 추정방법은 단층지반

에 대한 주기와 전단파속도의 관계인 식(12)를 산술평균하여 구하는 값으로 다층지반 내 토층의 상하관계가 고려되지 않은 방법이다.

### 3.2 다층지반조건에 대한 파동전달이론

탄성체로 가정되는 기반암 위에 있는 다층지반에 대한 파동전달이론은 다음과 같다[9]. Fig. 2는 다층지반을 구성하는 각 층의 전단탄성계수, 감쇠비, 질량밀도, 층두께를 나타낸다.

감쇠가 있는 지반변위의 해는 식(13)과 같이 표현되며, 이로부터 전달응력은 식(14)와 같다.

$$u(z,t) = Ae^{i(\omega t + k^*z)} + Be^{i(\omega t - k^*z)} \quad (13)$$

$$\tau(z,t) = G^* \frac{\partial u}{\partial z} = (G + i\omega\eta) \frac{\partial u}{\partial z} = G(1 + 2i\zeta) \frac{\partial u}{\partial z} \quad (14)$$

Fig. 2의 m번째 층에서 Z<sub>m</sub> = 0 인 경우와 Z<sub>m</sub> = h<sub>m</sub> 인 경우, 변위의 해는 다음 식(15)와 식(16)으로 표현된다.

$$u_m(Z_m = 0, t) = (A_m + B_m)e^{i\omega t} \quad (15)$$

$$u_m(Z_m = h_m, t) = (A_m e^{ik_m^* h_m} + B_m e^{-ik_m^* h_m})e^{i\omega t} \quad (16)$$

m번째 층에서 Z<sub>m</sub> = h<sub>m</sub> 인 경우 변위(u<sub>m</sub>(Z<sub>m</sub> = h<sub>m</sub>, t))는 m+1 번째 층에서 Z<sub>m+1</sub> = 0의 변위(u<sub>m+1</sub>(Z<sub>m+1</sub> = 0, t))와 같아야 하므로 다음 식(17)과 식(18)이 유도된다.

$$u_m(Z_m = h_m, t) = u_{m+1}(Z_m = 0, t) \quad (17)$$

$$A_{m+1} + B_{m+1} = A_m e^{ik_m^* h_m} + B_m e^{-ik_m^* h_m} \quad (18)$$

m번째 층에서 Z<sub>m</sub> = 0인 경우와 Z<sub>m</sub> = h<sub>m</sub> 인 경우 전달응력의 해는 다음

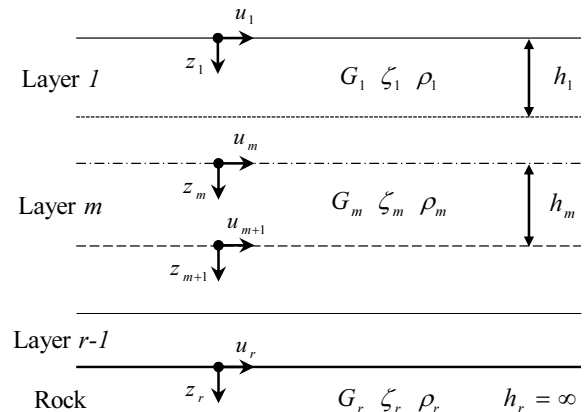


Fig. 2. Multi-layered soil deposits on elastic bedrock

식 (19)와 식 (20)으로 표현된다.

$$\tau_m(Z_m = 0, t) = ik_m^* G_m^* (A_m - B_m) e^{i\omega t} \tag{19}$$

$$\begin{aligned} \tau_m(Z_m = h_m, t) \\ = ik_m^* G_m^* (A_m e^{ik_m^* h_m} - B_m e^{-ik_m^* h_m}) e^{i\omega t} \end{aligned} \tag{20}$$

Fig. 2의  $m$ 번째 층에서  $Z_m = h_m$  인 경우 전단응력 ( $\tau_m(Z_m = h_m, t)$ )은  $m+1$ 번째 층에서  $Z_{m+1} = 0$ 의 전단응력 ( $\tau_{m+1}(Z_{m+1} = 0, t)$ )과 같아야 하므로 다음 식 (21)과 식 (22)가 유도된다.

$$\tau_m(Z_m = h_m, t) = \tau_{m+1}(Z_{m+1} = 0, t) \tag{21}$$

$$A_{m+1} - B_{m+1} = \frac{k_m^* G_m^*}{k_{m+1}^* G_{m+1}^*} (A_m e^{ik_m^* h_m} - B_m e^{-ik_m^* h_m}) \tag{22}$$

다층지반에서 층사이의 변위와 전단응력이 같아야 하는 조건에 따라 식 (18)과 식 (22)가 유도된다. 이를 연립하면  $m+1$ 층의 상향파와 하향파 진폭 ( $A_{m+1}, B_{m+1}$ )이 다음 식 (23)과 식 (24)와 같이 유도된다.

$$A_{m+1} = \frac{1}{2} A_m (1 + \alpha_m^*) e^{ik_m^* h_m} + \frac{1}{2} B_m (1 - \alpha_m^*) e^{-ik_m^* h_m} \tag{23}$$

$$B_{m+1} = \frac{1}{2} A_m (1 - \alpha_m^*) e^{ik_m^* h_m} + \frac{1}{2} B_m (1 + \alpha_m^*) e^{-ik_m^* h_m} \tag{24}$$

여기서,  $A_m, B_m$ 은  $m$ 번째 층의 상향파와 하향파의 진폭이고,  $\alpha_m^*$ 는  $m$ 층과  $m+1$ 층 사이의 복소임피던스 비로서 식 (25)와 같다.

$$\alpha_m^* = \frac{k_m^* G_m^*}{k_{m+1}^* G_{m+1}^*} = \frac{\rho_m V_{s,m}^*}{\rho_{m+1} V_{s,m+1}^*} \tag{25}$$

지표면으로부터 첫 번째 지층의 상향파와 하향파의 진폭( $A_1, B_1$ )을 기 준으로 각 층에 대하여 반복작업을 수행하면,  $m$ 번째 층의 상향파와 하향파 의 진폭은 다음 식 (26)과 식 (27)과 같이 첫 번째 지층의 상향파와 하향파의 진폭으로 표현될 수 있다.

$$A_m = a_m(\omega) A_1 \tag{26}$$

$$B_m = b_m(\omega) B_1 \tag{27}$$

이와 같이 첫 번째 지층의 상향파와 하향파 진폭으로 표현된 식을 바탕 으로 다음과 같이  $i$ 번째 층과  $j$ 번째 층 사이의 증폭함수를 계산할 수 있다.

$$F_{ij}(\omega) = \frac{|u_i|}{|u_j|} = \frac{a_i(\omega) + b(\omega)}{a_j(\omega) + b_j(\omega)} \tag{28}$$

본 절에서는 다층지반의 증폭하는 배경이론을 설명하였으며, 다층지반 의 증폭함수에 의한 지반주기는 단층지반에 대한 식 (11)과 같이 단일값을 제안되기 어렵다. 따라서, 이 배경이론을 적용하여 도출한 전달함수의 결과 는 3.4절에서 유한요소해석을 통하여 검증하였다.

### 3.3 국외기준의 지반주기 추정식

Table 3에 정리된 바와 같이 일본, 중국, 멕시코 등의 국가에서는 지반주 기로 지반을 분류하고 있다. 따라서, 일본과 멕시코에서는 다음과 같이 다 층지반에 대한 주기를 추정하는 식을 제안하고 있다. 식 (29)는 일본의 기준 BCJ-1997[5]에서 적용하는 다층지반의 주기 추정식이고, 식 (30)은 멕시 코의 기준 MOC-2008[6]에서 적용하는 다층지반의 주기 추정식이다.

$$T_g = \sqrt{32 \sum_{i=1}^n \frac{d_i \left( \frac{H_{i-1} + H_i}{2} \right)}{V_{si}^2}} \tag{29}$$

여기서,  $H_i$ 는  $i$ 번째 지층의 지표면으로부터 깊이이다.

$$T_g = 4 \sqrt{\left( \sum_{i=1}^n \frac{d_i}{G_i} \right) \left( \sum_{i=1}^n \rho_i d_i (w_i^2 + w_i w_{i-1} + w_{i-1}^2) \right)} \tag{30}$$

$$w_n = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{d_i}{G_i}}{\sum_{i=1}^N \frac{d_i}{G_i}}, w_0 = 0$$

식 (29)와 식 (30)은 3.2절의 절차에서 소개된 다층지반에 대하여 토층 의 관계를 고려하여 지반주기를 추정하는 약산식이다. 따라서, 본 과업에서 는 3.2절을 바탕으로 구해지는 다층지반주기의 정해(exact solution)와 식 (29)과 식 (30)에 의한 다층지반주기를 비교하여 적용성을 평가한다.

### 3.4 유한요소해석을 이용한 전달함수 검증

#### 3.4.1 단층지반에 대한 검증

3.2절에서 소개된 다층지반의 전달함수 도출방법을 단층지반조건에 적 용하여 검증할 수 있다. 또한, 3.1절과 3.2절에서 소개된 지반의 거동특성은 전단변형을 가정하고 있기 때문에, 전단변형의 경계조건을 갖는 유한요소 해석모델로 전달함수 도출결과를 검증할 수 있다.

단층지반에 대한 검증으로 가정된 지반조건은 다음과 같다. 암반까지의 깊이는 30 m, 전단파속도는 300 m/s 이고, 지반의 질량밀도는 1.8 ton/m<sup>3</sup> 감쇠비는 5%를 적용하였다. 식 (26)을 적용하여 구해진 증폭함수는 Fig. 3 과 같다. 지반의 1-4차 진동주기에 대응하는 진동수에서 증폭이 되는 ‘산’ 이 형성되며, 감쇠비의 영향에 의하여 고차모드에 의한 증폭비가 감쇠되는 것을 파악할 수 있다.

전술한 단층지반조건에 대하여 식 (31)의 지층의 전단탄성계수, 프아송 비, 탄성계수 관계를 적용하여 유한요소해석모델을 구성할 수 있다.

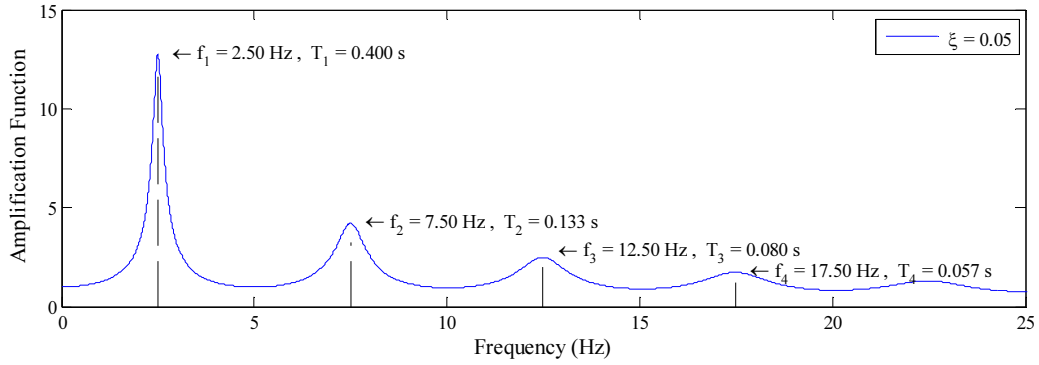


Fig. 3. Amplification function for uniform soil (Depth to bedrock = 30 m,  $V_s = 300$  m/s)

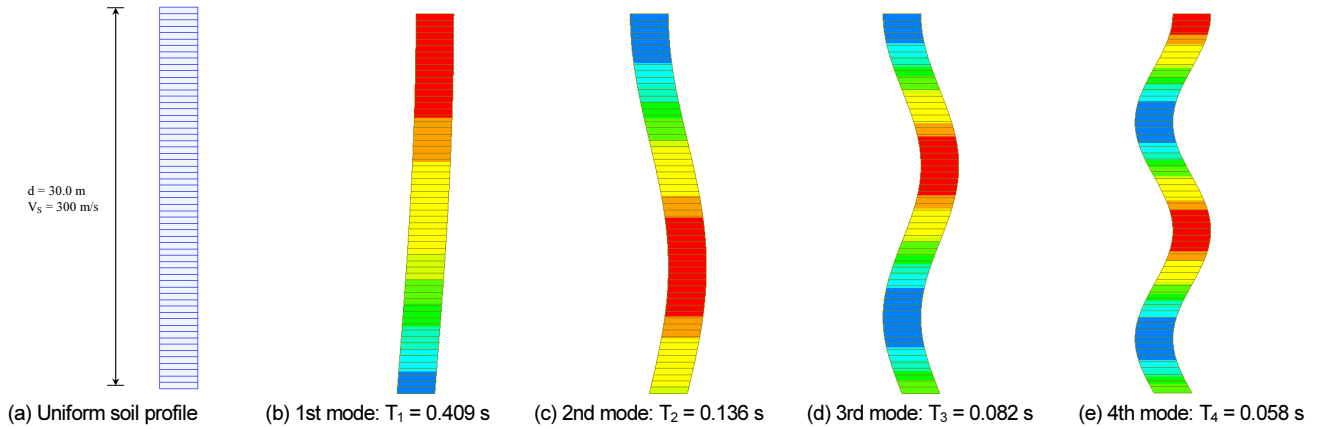


Fig. 4. Eigenvalue analysis result for uniform soil (Depth to bedrock = 30 m,  $V_s = 300$  m/s)

Table 4. Site period results for uniform soil

Mode	Frequency (Hz)		Period (s)		Error (%)
	Transfer Function	FEM	Transfer Function	FEM	
1st	2.50	2.45	0.400	0.409	2.1
2nd	7.50	7.27	0.133	0.138	3.5
3rd	12.50	12.27	0.080	0.082	1.9
4th	17.50	17.39	0.057	0.058	0.9

$$E_i = 2G_i(1 + \nu_i) \quad (31)$$

여기서,  $E_i, \nu_i$ 는 각각  $i$ 번째 지층의 탄성계수, 프아송 비이다.

유한요소해석모델에 대한 고유치해석결과로부터 지반의 1~4차 진동모드형상과 진동주기를 산정할 수 있으며, 그 결과는 Fig. 4 및 Table 4와 같다. Fig. 4의 모드형상은 균질한 지반조건에서의 1~4차 진동모드형상의 특성을 잘 나타내고 있으며, 전달함수로부터 구해진 지반주기와 고유치해석으로부터 구해진 지반주기는 0.9~3.5%의 오차로 그 결과가 정합하다고 판단된다.

### 3.4.2 다층지반에 대한 검증

Fig. 5와 같은 다층지반조건에 대하여 전달함수를 사용한 지반주기의 산정과 유한요소해석모델에 대한 고유치해석결과를 비교하여 검증한 결과는 다음과 같다. 해석대상 지반조건은 다음과 같이 지표면으로부터 전단파

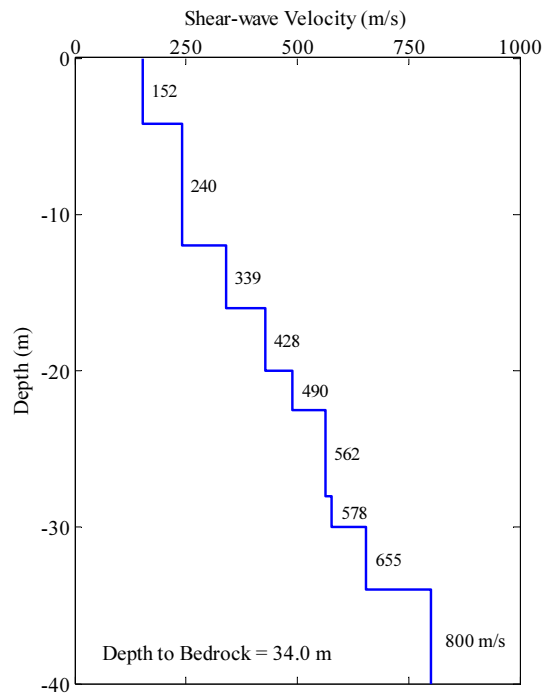


Fig. 5. Multi-layered soil deposits for verification

속도가 점차 증가하여 암반까지의 깊이가 34 m이며, 암반의 전단파속도는 800 m/s였다. 각 지층의 두께는 Fig. 7(a)에 표기되어 있다.

전달함수로 구해진 해당 지반의 1차 진동주기는 0.303 초였고, 유한요소

해석모델에 대한 고유치해석으로 구해진 1차 진동주기는 0.307초로 1.1%의 오차였다. 2~4차 모드에 대한 오차도 Table 5와 같이 0.9~1.1%로 배경이론으로부터 구해진 전달함수가 해당 지반의 주기를 정확히 산정하는 것으로 판단된다.

Fig. 7은 다층지반의 진동모드형상을 나타낸다. Fig. 4와 같이 균질한 지반조건에서는 2~4차 모드에서 상하대칭의 형태이지만, 다층지반의 경우, 2~4차 모드에서 연약한 토사지반이 있는 상부의 변형형상이 큰 것을 확인할 수 있다. 그러나, Fig. 6의 증폭함수에서 나타난 바와 같이 2~4차 모드에 의한 지진동의 증폭은 크지 않았다.

지반주기를 활용하여 다층지반의 평균전단파속도를 구하는 방법은 식 (12)와 같이 지반주기와 평균전단파속도의 역수관계를 적용하여 식 (32)와 같이 표현할 수 있다. 또한, 이러한 방법은 지반주기로 지반을 분류하는 맥시코의 기준(MOC-2008)과 동일하다[6].

$$\overline{V}_s = \frac{\sum_{i=1}^n d_i}{T_G} \tag{32}$$

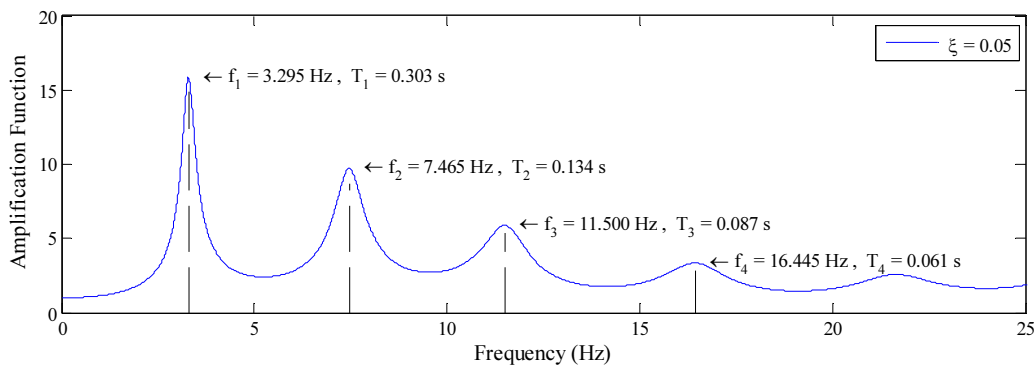
따라서, Fig. 5의 다층지반조건에 대하여 전달함수와 유한요소해석을 구한 지반주기의 정해(exaction solution)와 식 (1)과 같이 단순합(SUM)으로 구해지는 평균전단파속도, BCJ-1997과 MOC-2008에 의해서 구해진 지반주기에 식 (32)을 적용하여 구해진 평균전단파속도를 비교한 결과는 Table 6과 같다. 전술한 바와 같이 Fig. 5의 다층지반조건에 대하여 전달함수로 구해진 지반의 1차 진동주기는 0.303 초이며, 이를 식 (32)에 적용하여 구한 평균전단파속도는 448.1 m/s 이다. 식 (1)로 구한 평균전단파속도는 321.6 m/s이고, BCJ-1997에 의한 평균전단파속도는 406.8 m/s, MOC-2008에 의한 평균전단파속도는 482.9 m/s였다. 식 (1)에 의해 구해진 평균전단파속도는 지반주기의 정해로부터 구한 평균전단파속도의 약 72%로 현저히 저평가하였다. 따라서, 다양한 다층지반조건에 대하여 각

**Table 5.** Site period results for multi-layered soil

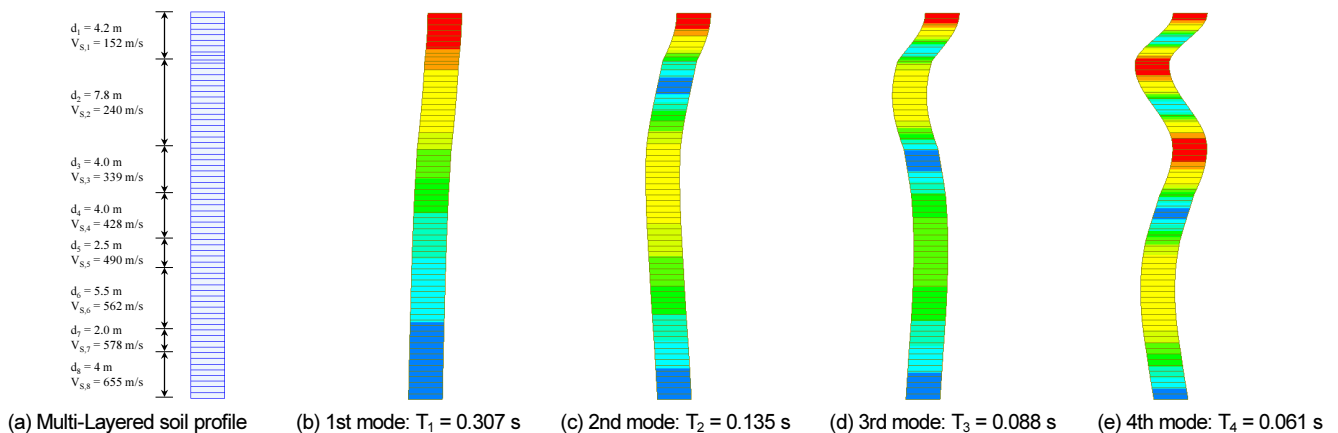
Mode	Frequency (Hz)		Period (s)		Error (%)
	Transfer Function	FEM	Transfer Function	FEM	
1st	3.30	3.30	0.303	0.307	1.1
2nd	7.47	7.47	0.134	0.135	1.1
3rd	11.50	11.50	0.087	0.088	0.9
4th	16.44	16.44	0.061	0.061	0.9

**Table 6.** Average shear-wave velocity estimation results for multi-layered soil

	Transfer Function	SUM	BCJ-1997	MOC-2008
Site Period (s)	0.303	0.423	0.334	0.281
Average shear-wave velocity (m/s)	448.1	321.6	406.8	482.9



**Fig. 6.** Amplification function for multi-layered soil deposits



**Fig. 7.** Eigenvalue analysis result for multi-layered soil deposits



지반주기 산정식을 적용하고, 평균전단파속도를 추정하는 것이 요구된다.

## 4. 526가지 다층지반조건에 대한 평균전단파속도 추정

### 4.1 대상지반조건

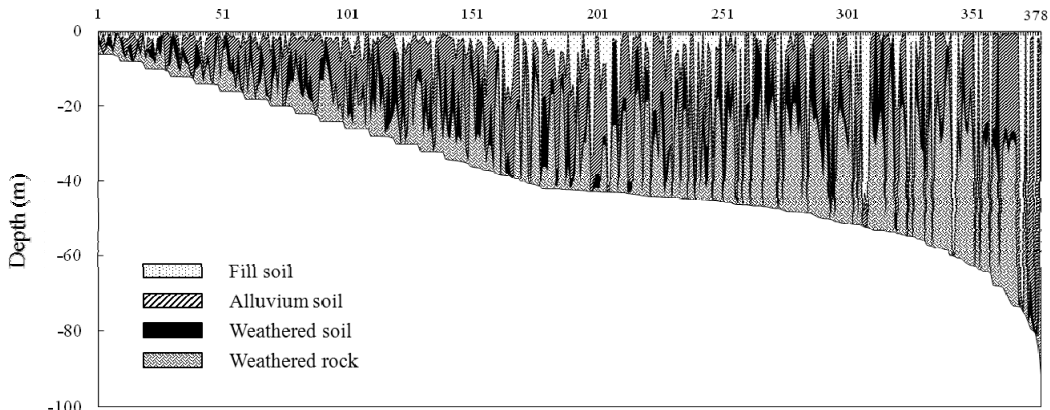
본 연구에서는 다양한 다층지반조건에 대하여 지반주기 산정식 및 평균 전단파속도 추정방법을 비교 평가하기 위하여 526가지 다층지반조건을 적용하였다. 서울시 지역에 대하여 GTIS(Geotechnical Information System, GTIS)로 구축되어 선정된 대상지반이 378가지이며, 전단파속도 주상도를 획득하여 해석에 적용한 대상지반은 148가지이다.

Sun et al.[10]은 일반적인 시추조사자료와 지표면 상 분포 형태의 시설물, 그리고 지형속성과 같은 DB로부터 서울특별시 행정영역에 대하여 동서방향으로 39.0 km, 남북방향으로 34.0 km의 대상영역을 설정하여 100 m × 100 m 격자의 단위로 133,331가지 지역에 대한 GTIS를 구축하였다. 본 연구에서는 구축된 GTIS에서 지반의 깊이를 최소 6 m부터 2 m 단위로

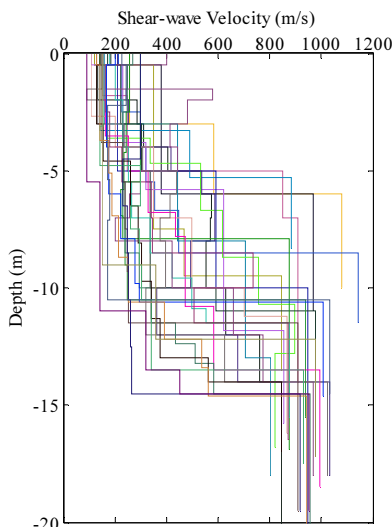
하여 동일한 지반깊이 내에 지반주기가 다른 10개의 토층을 선정하였고, 40 m 이상 깊이의 토층은 모두 해석에 반영하여 서울지역에 대하여 총 378가지의 토층을 선정하였으며, 토층의 분포는 Fig. 8(a)와 같다. 기반암 상부 4개 지층(매립토, 퇴적토, 풍화토, 풍화암)에 대한 두께 정보를 획득하고, 기존 국내지역의 전단파속도 획득 결과로부터, 매립토, 퇴적토, 풍화토 및 풍화암의 전단파속도를 각각 190 m/s, 280 m/s, 350 m/s와 650 m/s로 적용하였다[10]. 148가지의 실제 지반의 전단파속도 주상도는 국내 여러 지역 측정된 전단파속도 주상도를 활용하였으며, 토층의 분포는 Fig. 8(b)-(d)와 같다. 기반암까지 심도가 15 m 미만인 주상도는 31가지, 기반암까지 심도가 15 m 이상 30 m 미만인 주상도는 68가지, 기반암까지 심도가 30 m 이상인 주상도는 49가지였다.

### 4.2 평균전단파속도 추정 결과 및 비교

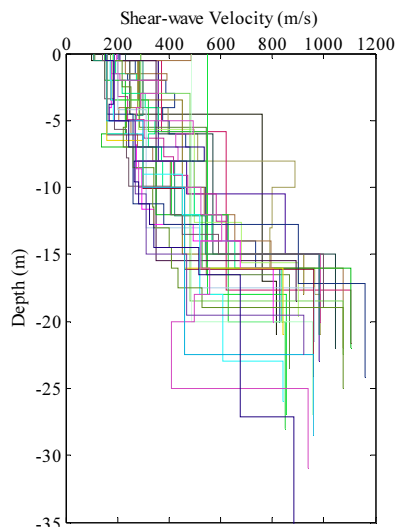
526가지 다층지반조건에 대하여 지반주기의 정해를 구하고, 이로부터 평균전단파속도를 계산한 결과와 단층지반물성에 대한 합산(SUM), 일본



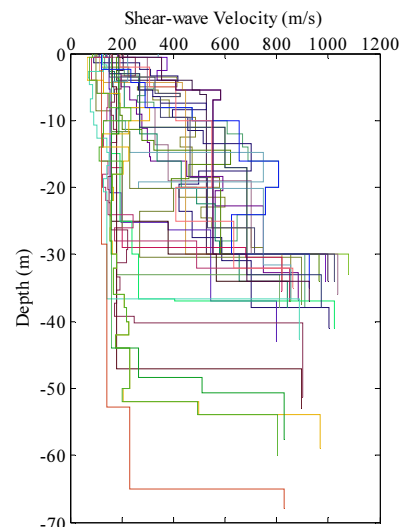
(a) 378 soil strata from GTIS



(b) Depth to bedrock < 15 m  
Number of sites = 31



(c) 15 m ≤ Depth to bedrock < 30 m  
Number of sites = 68



(d) 30 m ≤ Depth to bedrock  
Number of sites = 49

Fig. 8. 526 multi-layered soil profiles

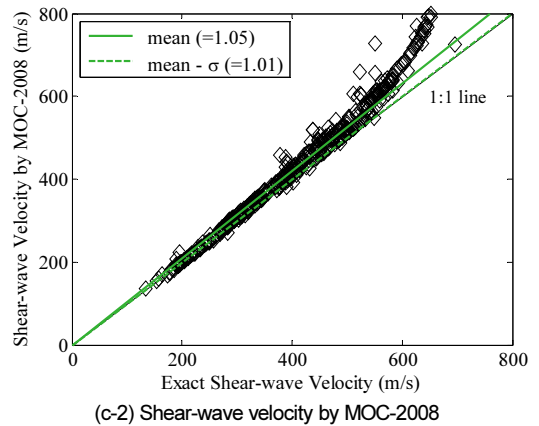
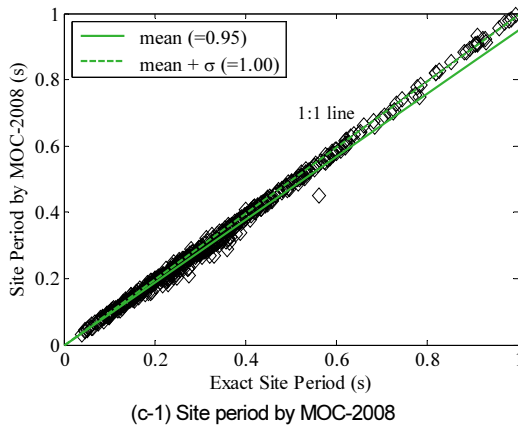
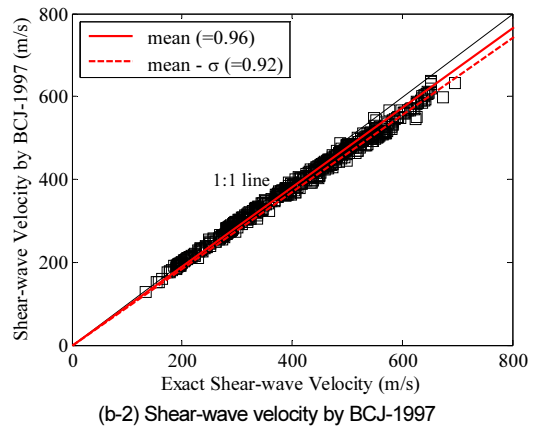
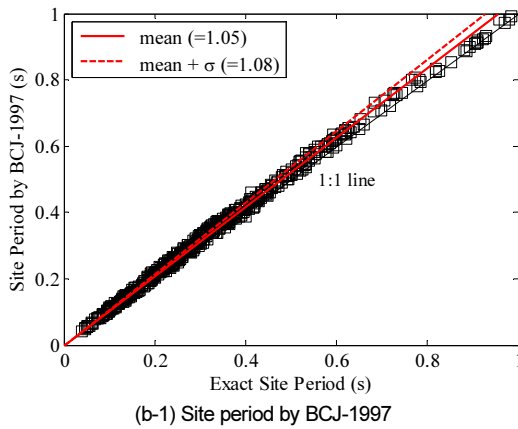
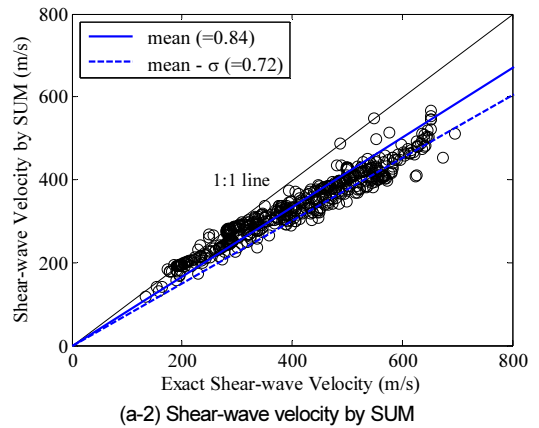
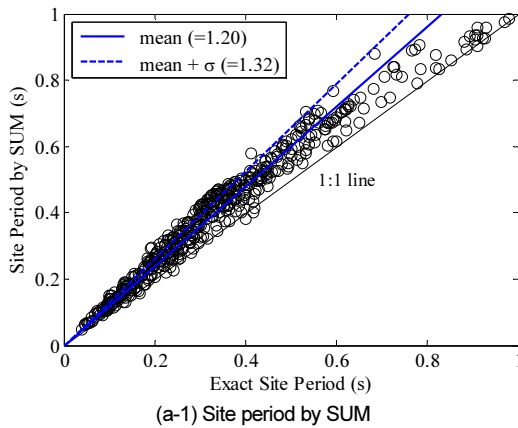
**Table 7.** Average shear-wave velocity estimation results for 526 soil deposits

	<i>sum</i>		<i>BCJ</i>		<i>MOC</i>	
	<i>Exact solution</i>	<i>Exact solution</i>	<i>Exact solution</i>	<i>Exact solution</i>	<i>Exact solution</i>	<i>Exact solution</i>
	mean	$\sigma^*$	mean	$\sigma$	mean	$\sigma$
Site Period Ratio	1.203	0.117	1.048	0.032	0.951	0.044
Average shear-wave velocity Ratio	0.839	0.117	0.956	0.032	1.053	0.044

\* Standard deviation

의 지반주기 산정식(BCJ-1997), 멕시코의 지반주기 산정식(MOC-2008)에 의하여 평균전단파속도를 추정한 결과의 비교는 Fig. 9 및 Table 7과 같다.

Fig. 9의 X축은 배경이론 및 유한요소해석으로 검증된 지반주기의 정해 (exact solution)와 이로부터 구해진 평균전단파속도를 나타낸다. 이를 기준으로 Fig. 9(a-1)는 식(1)로부터 구해진 지반주기와 Fig. 9(a-2)는 식(1)을 적용하여 구해진 평균전단파속도를 비교하였다. 식(1)에 의한 지반주기는 정해보다 평균적으로 20% 크게 산정되었고, 이에 따라서 평균전단파속도는 지반주기의 정해에 의한 평균전단파속도보다 약 16% 작게 추정되었다. 이에 대한 표준편차는 0.117이었다. 지반분류를 보수적으로 평가하기 위하여 (평균-표준편차)를 적용하면, 식(1)에 의한 평균전단파속도 추정은 정해의 약 72%로 지반주기를 과소평가하게 된다. 또한, Fig. 9(a-2)의 경향



**Fig. 9.** Average shear-wave velocity estimation results for 526 soil deposits



에서 정해에 의한 평균전단파속도가 400 m/s 이상인 경우는 식(1)에 의한 평균전단파속도가 0.84의 평균비율보다도 작게 추정되고 있다.

일본의 지반주기 산정식(BCJ-1997)과 지반주기의 정해를 비교한 결과는 Fig. 9(b-1)과 같으며, 이를 바탕으로 평균전단파속도를 추정한 결과는 Fig. 9(b-2)와 같다. BCJ-1997에 의한 지반주기는 정해보다 평균적으로 5% 크게 산정되었고, 이에 따라서 평균전단파속도는 지반주기의 정해에 의한 평균전단파속도보다 약 4% 작게 추정되었다. 이에 대한 표준편차는 0.032였다. (평균-표준편차)는 정해의 약 92%로서 보수적인 측면에서 비교적 정확히 지반의 평균전단파속도를 추정하고 있다.

멕시코의 지반주기 산정식(MOC-2008)과 지반주기의 정해를 비교한 결과는 Fig. 9(c-1)과 같으며, 이를 바탕으로 평균전단파속도를 추정한 결과는 Fig. 9(c-2)와 같다. MOC-2008에 의한 지반주기는 정해보다 평균적으로 5% 작게 산정되었고, 이에 따라서 평균전단파속도는 지반주기의 정해에 의한 평균전단파속도보다 약 5% 크게 추정되었다. 이에 대한 표준편차는 0.044였다. MOC-2008를 적용하는 경우, 평균전단파속도가 정해에 비하여 다소 크게 추정될 수 있으며, Fig. 9(c-2)와 같이 600 m/s 이상에 대하여 정해에 비하여 평균전단파속도를 더욱 과대평가하는 결과가 초래될 수 있다.

526가지 다층지반조건에 대한 평균전단파속도의 추정결과의 경향은 Table 7로 정리되었고, 그 경향은 Fig. 5의 예제에 대한 Table 6의 결과와 유사하다. 합산(SUM)에 의한 추정방법은 평균전단파속도를 큰 편차로 과소평가하게 되고, MOC-2008에 의한 추정방법은 평균전단파속도를 과대평가하게 된다. 이에 비하여 BCJ-1997에 의한 추정방법은 작은 편차로 보수적인 측면에서 비교적 정확히 지반의 평균전단파속도를 추정하고 있다.

## 5. 결론

본 연구에서는 내진설계 시 구조물의 지진하중과 건축물의 내진설계범주에 큰 영향을 미치는 지반분류를 정확하게 하기 위하여 다층지반조건에 대한 지반의 평균전단파속도를 산정하는 방법을 비교 및 평가하였으며, 이를 위하여 수행된 내용은 다음과 같다.

- 1) 파동전달이론으로부터 단층지반 및 다층지반에 대한 전달함수를 도출하고, 1~4차 모드에 대한 주기산정 방법을 검토하였다.
- 2) 다층지반고전에 대하여 유한요소해석모델을 수립하고, 이에 대하여 고유치해석을 수행하여 다층지반에 대한 전달함수로부터 구해진 1~4차 모드에 대한 진동주기와 비교한 결과, 0.9~3.5%의 오차로 전달함수와 유한요소해석모델이 정합하였다.

- 3) 526 가지 다층지반조건에 대하여 지반주기의 정해(exact solution)를 구하고, 이를 바탕으로 평균전단파속도를 산정하였다.
- 4) 합산, 일본의 지반주기 산정식, 멕시코의 지반주기 산정식을 적용하여 526가지 다층지반조건에 대한 평균전단파속도 추정결과를 비교한 결과, 합산에 의한 방법은 평균전단파속도를 큰 편차로 과소평가하고, 멕시코의 지반주기 산정식을 활용한 방법은 평균전단파속도를 과대평가하였다.
- 5) 일본의 기준(BCJ-1997)에서 제시하는 지반주기 산정식을 활용하는 것이 비교적 간략히 다층지반의 평균전단파속도를 산정하는 방법이 될 수 있다. 다만, 가장 정확한 다층지반의 평균전단파속도를 산정하는 방법은 전달함수로부터 구하는 것으로 이를 통한 검증이 필요하다.

## / REFERENCES /

1. KDS 17 10 00 Seismic Design: General, 1st ed, Seoul: Earthquake Engineering Society of Korea; c2018, 21 p.
2. Korea Building Code, Seoul: Architectural Institute of Korea; c2016, 1221 p.
3. Minimum Design Loads and Associated Criteria for Buildings and Other Structures, 7-16, U. S. A: American Society of Civil Engineers; c2016, 822 p.
4. Eurocode 8: Design of structures for earthquake resistance, 1998-1:2004, European Committee for Standardization; c2004, 299 p.
5. Marino EM, Nakashima M, Mosalam KM, Comparison of European and Japanese seismic design of steel building structures, Eng. Struct., 2005 Feb;27:827-840.
6. Tena-Colunga A, Mena-Hernandez U, Perez-Rocha LE, Aviles J, Ordaz M, Vilar JI, Updated Seismic Design Guidelines for Model Building Code of Mexico, Earthquake Spectra, 2009 Nov;25(4): 869-898.
7. Kouretzis GP, Masia MJ, Allen C, Structural Design Codes of Australia and New Zealand: Seismic Actions, Encyclopedia of Earthquake Engineering, Berlin: Springer; c2013.
8. Code for Seismic Design of Buildings, GB 50011-2010, Beijing: Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China; c2010.
9. Kramer SL, Geotechnical Earthquake Engineering, NJ: Prentice Hall; c1996, 653 p.
10. Sun CG, Kim HS, C. K, Chung CK, Chi HC, Spatial Zonation for regional assessment of seismic site effects in the Seoul metropolitan area, Soil Dyn, Earthquake Eng. 2014;56:44-56.