

## 천부 속도이상층이 레일리파 위상속도 및 수직변위 스펙트럼 진폭에 미치는 영향

김기영\* · 정진훈

강원대학교 지구물리학과

### Rayleigh-wave Phase Velocities and Spectral Amplitudes Affected by Insertion of an Anomalous Velocity Layer in the Overburden

Ki Young Kim\* and Jinhoon Jung

Department of Geophysics, Kangwon National University, Chuncheon 200-701, Korea

**요약:** 기반암의 상부 토양층에 협재하는 속도이상층이 레일리파 위상속도와 수직변위의 스펙트럼 진폭에 미치는 영향을 분석하기 위하여 Thomsen-Haskell 방법을 사용하였다. 기본모델은 횡파속도( $v_s$ ) 300 m/s의 토양층이 9 m 두께로  $v_s$ 가 1000 m/s인 반무한 기반암 위에 쌓여 있다. 토양층 내에 두께 1, 2, 3 m, S파속도 150, 225, 375, 450 m/s인 삽입층은 지표부터 깊이 1 m 간격으로 놓여있다. 레일리파 위상속도( $C_R$ )는 4~30 Hz 주파수 구간에서 계산하였다. 삽입층 모델은 두께가 1 m일 때, 기본모델과 삽입모델의 위상속도 차이인  $\Delta C_R$ 에 민감하게 반응하는 주파수 대역은 8~20 Hz이며, 이 주파수 대역은 삽입층의 두께가 증가할수록 넓어진다. 1차 고차모드의 저주파 차단주파수 바로 위의 주파수 구간을 제외하면, 모든 모델에서 기본모델의 스펙트럼 진폭이 1차 고차모드보다 크다.

**주요어:** 레일리파 위상속도, 스펙트럼 진폭, S파속도, 속도이상층, 모드

**Abstract:** The Thomsen-Haskell method was used to determine sensitivities of the Rayleigh-wave phase velocities and spectral amplitude of vertical ground motion to insertion of a single velocity-anomaly layer into overburden underlain by a basement. The reference model comprised a 9-m thick overburden with shear-wave velocity ( $v_s$ ) of 300 m/s above a half-space with  $v_s = 1000$  m/s. The inserted layer, with a velocity of 150, 225, 375, or 450 m/s and a thickness of 1, 2, or 3 m, was placed at depths increasing from the surface in increments of 1 m. Phase velocities were computed for frequencies of 4 to 30 Hz. For inserted layer models, we placed an anomalous layer with thickness of 1~3 m, shear-wave velocity of 150~450 m/s, and at depths of 0~8 m in the overburden. The frequency range of 8~20 Hz were the most sensitive to the difference of  $C_R$  between the inserted and reference models ( $\Delta C_R$ ) for  $h = 1$  m and the frequency range got wide as  $h$  increased. For all of the models, the spectral amplitudes of the fundamental mode exceeded those of the 1<sup>st</sup>-higher mode except at frequencies just above the low-frequency cutoff of the 1<sup>st</sup>-higher mode.

**Keywords:** rayleigh-wave phase velocities, spectral amplitude, shear-wave velocity, velocity anomaly layer, mode

## 서 론

천부 S파속도( $v_s$ )는 지표 부근 물질의 탄성특성에 관한 정보를 제공하므로 지반공학 및 환경공학 분야에 널리 사용되고 있다.  $v_s$ 를 시추공에서 직접 측정하여 천부 탄성특성을 파악하기 위해서는 조사지역 안에 여러 시추공이 필요하며, 비파괴적인 S파 굴절법이나 반사법 등 지표 물리탐사 방법을 적용하는 데는 S파 신호를 효과적으로 발생시키기 어려운 기술적 문제점이 수반된다. 따라서 최근에는 천부 구조를 파악하기 위해서

레일리파 위상속도( $C_R$ ) 분산곡선을 역산하는 방법이 널리 활용된다. 1차원적  $v_s$  구조를 표면파 스펙트럼 분석법(SASW, Spectral Analysis of Surface Wave; Stoke and Nazarian, 1983)으로 구하는 방법이 지반공학 분야에서 사용되어 오다가, 다중 채널 표면파 분석법(MASW, Multichannel Analysis of Surface Waves; Gabriels *et al.*, 1987; Park *et al.*, 1999; Kanli *et al.*, 2006)이 개발된 이후에는 MASW 분석법이 2차원  $v_s$  단면을 얻는 방법으로 확장되었다.

최근에는 레일리파 분산곡선을 역산하여 구한  $v_s$ 의 신뢰도 및 분해능에 관한 연구가 꾸준히 진행되고 있다.  $v_s$ 가 깊이에 따라 증가하는 일반적인 모델의 경우, MASW 방법의 역산 결과는 실제  $v_s$ 와 오차가 15% 이내로 비교적 잘 일치하는 것으로 알려져 있다(Xia *et al.*, 2002). 그러나 기반암 상부 지층 내에 저속도층(Addo and Robertson, 1992; Yuan, D. and Nazarian,

2012년 10월 08일 접수; 2012년 11월 06일 수정; 2012년 11월 15일 채택;  
\*Corresponding author

E-mail: kykim@kangwon.ac.kr

Address: Department of Geophysics, Kangwon National University,  
Chuncheon, 200-701, Korea

S., 1993; Lu *et al.*, 2007; Liang *et al.*, 2008)이나 고속도층 (Caldern-Macas and Luke, 2007) 등의 속도이상층(anomalous velocity layer)이 협재되어 있는 경우에, 이러한 속도이상층이 제한조건으로 초기모델에 반영되어야만 역산의 오류를 최소화할 수 있다(Caldern-Macas and Luke, 2007).

또한 깊이에 따라  $v_s$ 가 변하는 일반적인 상황에서  $C_R$ 은 주파수에 예민하게 반응하므로,  $C_R$ 을 역산할 때는 모드별로 민감하게 반응하는 특정 주파수 범위의 자료만을 사용하여야 한다(Xia *et al.*, 2008). 따라서 흔히 사용하는 기본모드 뿐만 아니라, 지표 변위의 수직성분 진폭( $A_{vd}$ )이 크게 감지되는 주파수 범위가 기본모드와는 차이가 나는 고차모드를 사용할 경우에 더 우수한 역산결과를 도출할 수도 있다(Gucunski and Woods, 1992; Tokimatsu *et al.*, 1992). 주파수에 따라 레일리 파의 우세 모드가 변하므로 분산곡선이 끊어져 나타나며 (Zhang and Lu, 2003), 이는 종종 모드 구분의 오류를 범하는 원인이 된다(Zhang and Chan, 2003). 따라서 자료분해능 행렬 (data resolution matrix)을 분석하고, 역산에 적합한 모드와 그에 따른 주파수 범위를 결정함으로써 역산의 정확성을 높이는 방법이 제안된 바 있다(Xia *et al.*, 2008).

이 연구에서는 기반암 상부 토양층 내에 속도이상층이 협재할 경우에  $C_R$  분산곡선을 역산하여  $v_s$ 를 구할 경우, 속도이상층과 주변 토양층의  $v_s$  차이, 속도이상층의 깊이와 두께 등이  $C_R$  분산곡선에 미치는 영향을 분석하고, 지표 변위의 수직성분 진폭( $A_{vd}$ )이 크게 감지되는 주파수 영역을 수치모델을 통하여 구함으로써  $C_R$  역산결과의 신뢰도를 높이고자 한다.

### 순차모델 및 역산

층상모델에 대한  $C_R$  분산곡선 및  $A_{vd}$ 는 Thomson-Haskell 방법으로(Thomson, 1950; Haskell, 1953)으로 구할 수 있다. 각 주파수( $\omega$ )의 함수인 위상속도( $c_j$ )는 각 층의 S파속도 ( $v_s$ ) 뿐만 아니라, 층 개수( $N$ ), 각 층의 P파속도( $v_{pi}$ ), 밀도( $\rho_i$ ), 두께( $h_i$ )의 내재함수로

$$c_j = c(\omega; v_{p1}, v_{s1}, \rho_1, h_1, \dots, v_{pN}, v_{sN}, \rho_N, h_N) \quad (1)$$

와 같이 표시될 수 있다. 여기서  $j$ 는 위상속도가 계산되는 주파수를 뜻한다.

역산을 위하여, 식 (1)을 Taylor 급수로 전개하고 2차항 이상을 무시하면, 관찰된 위상속도  $c_j^o$ 와 계산된 위상속도  $c_j^c$ 의 차이인  $\Delta c_j$ 는 1차 편미분방정식의 근사식으로 표시될 수 있다. 역산을 수행하기 전에 식 (1)의 미지수 개수를 (4N-1)개에서 N개로 줄이기 위해서 각 층의 두께를 일정하게 고정한다. 또한  $v_{pi}$ 와  $\rho_i$ 는  $c_j$ 에 미치는 영향이  $v_{si}$ 에 비하여 훨씬 작으므로,  $v_{pi}$ 와  $\rho_i$ 를  $v_{si}$  함수로 가정하고 대체한다(Xia *et al.*, 1999). 따라서  $c_j^c$ 와  $c_j^o$ 의 차이인  $\Delta c_j$ 는

$$\Delta c_j = \sum_{i=1}^N \left[ \left( \frac{\partial c_j}{\partial v_{pi}} \right) \frac{dv_{pi}}{dv_{si}} + \left( \frac{\partial c_j}{\partial \rho_i} \right) + \left( \frac{\partial c_j}{\partial v_{si}} \right) \frac{dv_{si}}{dv_{si}} \right] \Delta v_{si}, j = 1, 2, \dots, M. \quad (2)$$

로 표현된다. 이 연구에서는 식 (2)를 감쇠최소자승법(Marquardt, 1963)으로 풀었다.

### 수치모델

$v_s = 1000$  m/s인 반무한(half-space) 기반암 위에  $v_s = 300$  m/s인 균질한 토양이 9 m 두께로 놓여 있는 기본 모델의 토양층 내에 두께  $h$  m, 깊이  $D$  m인 속도이상층을 1 m 간격으로 삽입된 3층 모델을 각각 설정하였다(Fig. 1). 이 삽입된 층의  $v_s$ 는 150, 225, 375, 450 m/s인 경우를 각각 모델링하였으며, P파속도  $v_p$ (m/s)는 Kitsunzaki *et al.* (1990)의 경험식

$$v_p = 1,290 + 1.11v_s, \quad (3)$$

밀도  $\rho$ 는 Ludwig *et al.*(1970)의 경험식

$$\rho = 1.2475 + 0.399v_p - 0.026v_p^2 \quad (4)$$

을 각각 이용하여 변환하였다. 여기서  $\rho$ 와  $v_p$ 의 단위는 각각  $g/cm^3$ 과  $km/s$ 이다.

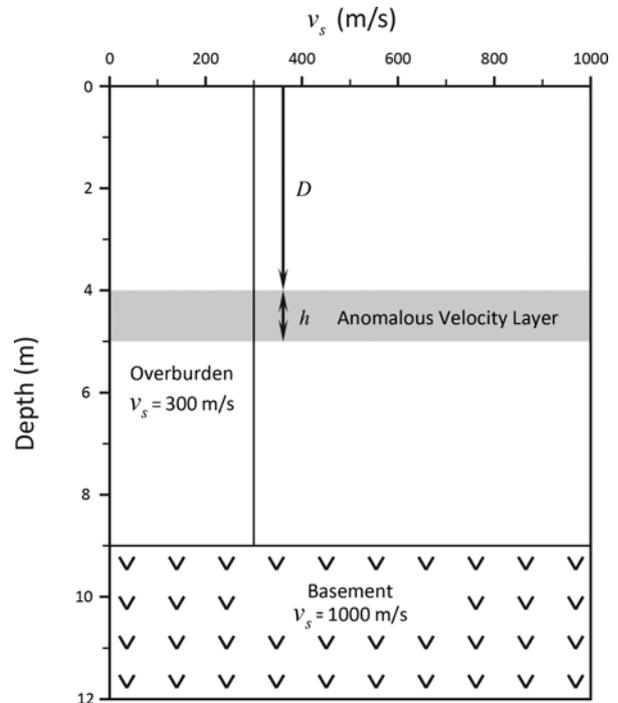
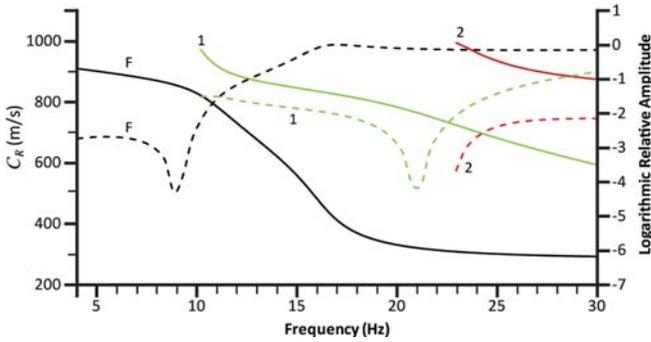


Fig. 1. Basic shear-wave velocity model comprising the overburden soil layer ( $v_s = 300$  m/s) and the half-space basement ( $v_s = 1000$  m/s). Inserted  $v_s$  model with an anomalous velocity layer of  $h$  m thickness in the overburden is superimposed on the basic  $v_s$  model.

### 위상속도 특징 및 민감도

#### 기본 모델 (수평 2층 구조)

기반암과 균질한 토양층으로만 구성된 수평2층 모델의 경우, 4.0 ~ 30.0 Hz까지 나타낸 분산곡선(Fig. 2)은 기본모델의 경우, 4.0 Hz에서 909.9 m/s인  $C_R$ 이 30.0 Hz에서 292.2 m/s까지 단조 감소하는 양상을 보이며, 주파수에 따른 최대 변화는 15.9 Hz에 나타난다. 첫 번째 고차모드의  $C_R$ 은 10.2 Hz에서 971.8 m/s부터 30.0 Hz에서 592.6 m/s까지, 2번째 고차모드의  $C_R$ 은 22.9 Hz에서 994.8 m/s 부터 30.0 Hz에서 875.3 m/s까지 역시 단조감소한다.

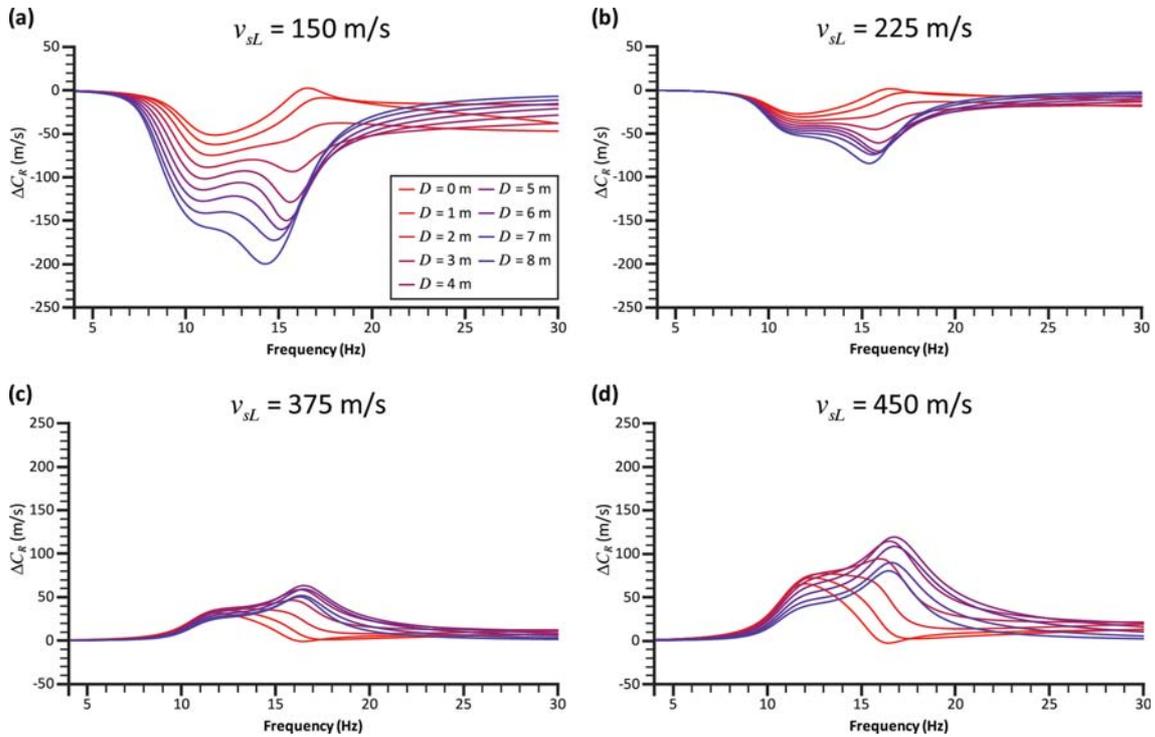


**Fig. 2.** Dispersion curves of Rayleigh-wave phase velocity (solid lines) and spectral amplitude of ground response (dashed lines) for the basic model in Figure 1. Fundamental, 1<sup>st</sup>-higher mode, and 2<sup>nd</sup> higher mode are indicated with letters ‘F’, ‘1’, and ‘2’, respectively.

#### 삽입 모델(수평 3층 구조)

기반암 상부 토양층 내에 존재하는 속도이상층이  $C_R$  분산곡선에 미치는 영향을 분석하기 위하여,  $v_{ss} = 300$  m/s인 토양층 내 삽입층의 깊이( $D$ ), S파속도( $v_{sL}$ ), 두께( $h$ )를 각각 변화시키며(Fig. 1) 모드별  $C_R$ 의 변화양상을 관찰하였다(Fig. 3).  $D$ 는 0 ~ 8 m 범위에서 1 m 간격으로,  $v_{sL}$ 은 150 ~ 450 m/s 범위에서 75 m/s 간격으로, 두께( $h$ )는 1 ~ 3 m 범위에서 1 m 간격으로 각각 변화시켰다.

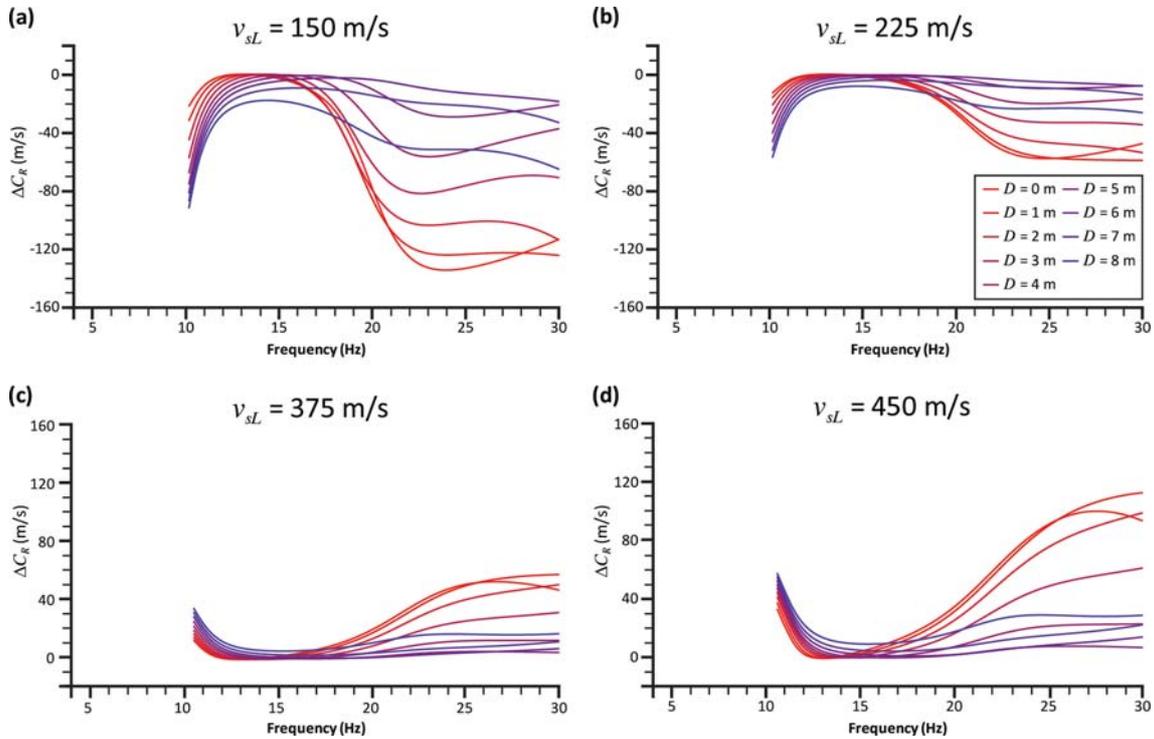
$h = 1$  m 인 속도이상층을 갖는 삽입모델과 기본모델의 기본 모드  $C_R$ 의 차이( $\Delta C_R$ )는  $D$ 가 증가함에 따라  $v_{sL} < v_{ss}$  일 때는 거의 모든 경우에 음의 값을 가지며(Fig. 3a & 3b),  $v_{sL} > v_{ss}$  인 경우는 거의 모든 경우에 양의 값을 갖는데, 이는 기반암 상부 토양층의 평균  $v_s$ 가 감소하거나 증가한 데 기인한다.  $v_{sL} < v_{ss}$  일 때  $\Delta C_R$ 이 최소(절대값이 최대치)인 주파수까지는 단조감소하며,  $v_{sL}$ 이 375 m/s인 경우와 450 m/s인 경우 공히  $D = 5$  m일 때 최대치를 갖는다(Table 1). 전반적으로 기본모델의 경우,  $\Delta C_R$  절대값이 큰 8 ~ 20 Hz 구간이 삽입된 속도이상층에 민감하게 반응하는 것으로 분석된다. 최대치는,  $D$ 에 따라 변하나,  $v_{sL}$ 이 150, 225, 375, 450 m/s의 경우에 각각 14.1, 15.5, 16.3, 16.8 Hz에서 200, 84, 63, 119 m/s로 나타난다. 가장 높은 분석주파수인 30 Hz에서,  $v_{sL} = 150$  m/s,  $D = 2$  m인 경우에  $\Delta C_R$ 은  $-47.1$  m/s로 나타나고(Fig. 3a),  $v_{sL} = 450$  m/s,  $D = 3$  m인 경우에 21.4 m/s로 나타나서 (Fig. 3d), 속도이상층이 얇게 분포할 경우에 고주파 영역에 영향을 많이



**Fig. 3.** Difference in phase velocity of the fundamental mode Rayleigh waves between the inserted model and the basic model for the shear-wave velocity of the inserted layer ( $v_{sL}$ ) of (a) 150, (b) 225, (c) 375, and (d) 450 m/s, respectively.

**Table 1.** Phase velocity differences, ( $\Delta C_R$ ), between the 3- and 2-layer models at frequencies where the absolute difference is greatest. The units for  $\Delta C_R$ , thickness ( $h$ ) and depth ( $D$ ) of the anomalous layer, and shear-wave velocity ( $v_{sL}$ ) are m/s, m, m, and m/s, respectively.

Mode	$h$	$v_{sL}\lambda/D$	0	1	2	3	4	5	6	7	8
Fundamental	1	150	-51.4	-62.5	-75.0	-92.8	-128.1	-150.0	-159.7	-171.9	-199.6
		225	-27.3	-31.1	-34.7	-44.7	-60.7	-70.2	-72.3	-73.8	-84.0
		375	31.4	34.6	37.2	46.7	58.5	62.8	59.3	52.2	50.7
		450	65.5	72.5	77.4	94.5	114.0	119.4	108.5	89.3	80.3
1 <sup>st</sup> Higher	1	150	-134.1	-124.0	-113.5	-81.6	-67.2	-75.0	-81.2	-86.6	-91.6
		225	-57.5	-58.7	-53.5	-34.3	-33.3	-39.9	-46.1	-51.6	-56.6
		375	53.0	58.0	51.1	32.0	22.6	25.7	28.9	32.0	34.7
		450	100.6	113.4	99.3	61.2	47.4	50.2	52.8	55.4	57.9
Fundamental	2	150	-143.0		-187.8		-295.4		-297.7	-301.9	
		225	-62.6		-79.0		-138.1		-142.1	-146.1	
		375	62.6		75.9		112.8		105.9	99.7	
		450	125.5		149.8		204.1		175.9	157.8	
1 <sup>st</sup> Higher	2	150	-352.7		-220.4		-83.2		-92.3	-124.5	
		225	-131.5		-93.3		-56.5		-69.8	-75.5	
		375	99.4		80.1		55.5		54.4	60.9	
		450	176.5		148.6		70.7		83.7	90.5	
Fundamental	3	150	-276.2			-411.7			-414.9		
		225	-105.7			-190.9			-208.6		
		375	94.1			149.0			150.6		
		450	182.8			265.4			232.8		
1 <sup>st</sup> Higher	3	150	-425.4			-128.6			-155.4		
		225	-188.9			-63.9			-82.1		
		375	139.0			66.5			80.6		
		450	220.2			103.2			113.0		



**Fig. 4.** Difference in phase velocity of the 1<sup>st</sup> higher model Rayleigh waves between the inserted model and the basic model for the shear-wave velocity of the inserted layer ( $v_{sL}$ ) of (a) 150, (b) 225, (c) 375, and (d) 450 m/s, respectively.

미치는 것으로 분석된다. 그러나 7.0 Hz 이하의 저주파 구간에서는  $D$ 에 상관없이  $\Delta C_R$  절대값에 미치는 영향이 15.0 m/s 이하로 삽입층에 의한 효과가 거의 무시될 수 있음을 보인다.

1차 고차모드의  $\Delta C_R$ 도 기본모드와 마찬가지로  $v_{SL} < v_{SS}$ 인 경우는 음수(Fig. 4a & 4b),  $v_{SL} > v_{SS}$ 인 경우는 양의 값(Fig. 4c & 4d)을 갖는다. 즉  $v_{SL}$ 에 따라 단조증가하는 양상을 보인다.  $D = 8$  m인 경우를 제외하면, 14 Hz 부근을 중심으로 폭 2 ~ 3 Hz 주파수 구간(‘둔감구간’)에서  $\Delta C_R$  절대값이 10.0 m/s 이하로 최소가 되어, 이 주파수 구간에서는 삽입층에 의한 효과가 거의 반영되지 않음을 나타낸다. ‘둔감구간’ 보다 저주파의 대역에서는  $D$ 의 증가에 따라  $\Delta C_R$  절대값이 커지며,  $D = 5$  m 혹은 6 m인 경우에는 ‘둔감구간’ 보다 고주파 대역에서는  $\Delta C_R$ 이 12 m/s 이내로 작아진다. 특히  $D$ 가 작은 경우, 고주파 수 영역에서  $\Delta C_R$  절대값이 크게 나타나, 삽입층에 의한 효과가 뚜렷해진다.  $h = 1$  m인 시험대상 모델 중에서는  $v_{SL} = 150$  m/s,  $D = 0$  m인 경우 23.8 Hz에서  $C_R$ 이 기본모델보다 134 m/s 더 느리게 나타나고(Fig. 4a),  $v_{SL} = 450$  m/s,  $D = 1$  m인 경우 30 Hz에서  $C_R$ 이 기본모델보다 113 m/s 더 빠르게 나타난다(Fig. 4d).

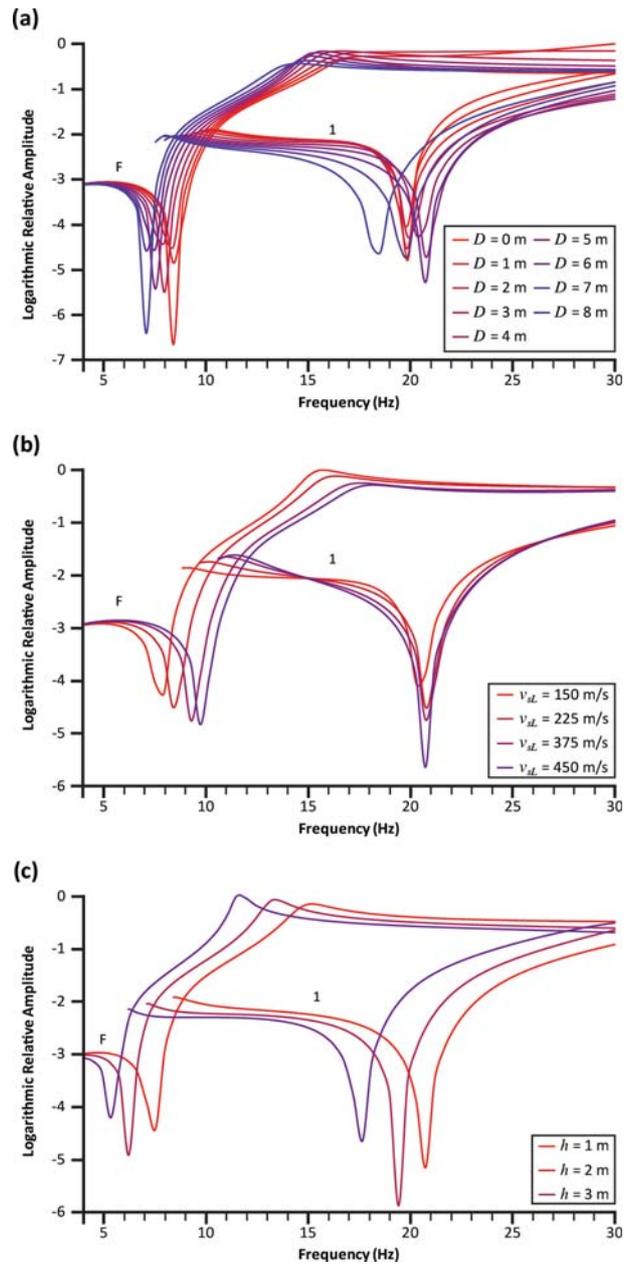
$h$ 를 증가시켜도  $v_{SL}$  및  $D$ 에 따른  $\Delta C_R$ 의 변화는 유사한 양상을 보인다. 즉,  $v_{SL}$ 에 따라 단조증가하며,  $D$ 가 증가함에 따라  $v_{SL} > v_{SS}$  일 때는 양의 값을 갖고,  $v_{SL} < v_{SS}$  일 때 음의 값을 갖는다(Table 1).  $h = 2$  m일 때, 16 Hz 이하에서는 단조감소하며,  $v_{SL}$ 이 375 m/s와 450 m/s인 경우 공히  $D = 4$  m 일 때 최대치를 갖는다.  $D$ 에 따라 변하지만  $h = 2$  m 이고  $v_{SL}$ 이 150, 225, 375, 450 m/s의 경우에, 13.3, 15.0, 16.8, 16.8 Hz에서  $\Delta C_R$  절대값의 최대치가 각각 302, 146, 113, 204 m/s로 나타난다. 이는 삽입된 속도이상층에 가장 민감하게 반응하는 구간이  $h$ 의 증가에 따라 더 넓어지며  $\Delta C_R$  절대값이 증가하여, 삽입층에 의한 효과가 증가함을 나타낸다. 고차모드의 경우에도,  $h$ 의 변화가  $\Delta C_R$ 에 미치는 영향이 기본모드의 경우와 같은 양상을 보인다.

### 수직변위 스펙트럼 진폭

#### 기본 모델(수평 2층 구조)

기본모델의 경우 지표에서의 레일리파 수직변위( $A_{vd}$ )는 16.8 Hz에서 최대가 되며, 첫 번째 고차모드 수직변위가 가장 크게 계산되는 10.2 ~ 11.1 Hz 구간을 제외한 모든 구간에서 기본모드가 가장 크게 계산된다(Fig. 2). 기본모델의  $A_{vd}$ 는 30 Hz에서는 최대진폭의 70.8%, 10 Hz 이하 저주파 구간에서는 0.6% 이하로 줄어들며, 8.9 Hz에 노치가 나타난다. 1차 및 2차 고차모드의 차단주파수(cut-off frequency;  $f_c$ )는 각각 10.2 Hz와 22.9 Hz이고, 1차 고차모드의 진폭곡선 노치는 21.2 Hz에 각각 나타나며, 이 노치 주파수 이상에서 진폭이 크게 증가하는 양상을 보인다.

이 모델의 경우는,  $A_{vd}$ 가 가장 큰 분산곡선을 따라  $C_R$ 을 기본모드로 역산할 경우에 신뢰성 있는 결과를 얻을 수 있음을 지시한다. 단, 1차 고차모드  $f_c$ 인 10.2 Hz부터 0.9 Hz 주파수 폭 구간(10.2 ~ 11.1 Hz)에서는 최대진폭을 따라  $C_R$ 을 선택하지 않고, 이 주파수 구간을 제외한 나머지 구간이 부드럽게 연결되는 분산곡선을 선택하여야 함을 보인다. 이 경우, 정확한 초기 속도모델을 사용하여 분산곡선은, 이를 역산하여 구한  $v_s$ 을 순차모델하여 구한  $C_R$  분산곡선과의 평균제곱근 오차는



**Fig. 5.** Ground responses of the fundamental and the 1<sup>st</sup> higher modes of Rayleigh waves for the inserted models where (a)  $v_{SL} = 150$  m/s and  $h = 1$  m, (b)  $D = 4$  m and  $h = 1$  m, and (c)  $D = 6$  m and  $v_{SL} = 150$  m/s. The fundamental and 1<sup>st</sup> higher modes are indicated with letters ‘F’ and ‘1’, respectively,

$3.3 \times 10^{-5}$  m/s 이하로, 육안으로 구분되지 않을 정도로 잘 일치한다.

**삽입모델(수평 3층 구조)**

속도이상층이  $C_R$ 에 미치는 영향을 분석한 모델과 동일한 삽입모델을 사용하여 지표 수직변위 진폭( $A_{vd}$ )에 미치는 영향을 분석하였다. Fig. 5는  $D$ ,  $v_{sL}$ ,  $h$ 의 변화에 따른  $A_{vd}$ 의 변화를 보여주는 예이다. 삽입모델의  $A_{vd}$ 는 기본모델의 경우와 마찬가지로 일부 주파수 구간을 제외하면, 속도이상층의  $D$ ,  $v_{sL}$ ,  $h$ 에 상관없이 기본모드가 가장 큰 진폭을 보인다(Table 2).

$h = 1$  m의 경우,  $A_{vd}$ 가 최대인 주파수( $f_p$ )는 기본모드일 때 14.6 ~ 19.0 Hz 범위에 놓이며,  $v_{sL} < v_{ss}$  일 때  $D$ 의 증가에 따라 감소하고(Fig. 5a),  $v_{sL} > v_{ss}$  일 때는 5 ~ 6 m 부근에서 최대치를 갖는 특징을 보인다. 7.1 ~ 9.7 Hz 범위의 노치 주파수

( $f_n$ )는  $v_{sL}$ 의 증가에 따라 증가하며(Fig. 5b),  $D$ 의 증가에 따라  $v_{sL} < v_{ss}$  일 때 감소하는 경향을 보이거나  $v_{sL} > v_{ss}$  일 때는 거의 변화가 없다. 1차 고차모드의 차단주파수  $f_c$ 는 7.5 ~ 10.6 Hz 대역(대역폭 = 3.1 Hz)에 분포하며(Table 2),  $f_c$ 부터 폭 0.9 ~ 1.3 Hz의 좁은 주파수 구간에서는 1차 고차모드에 의한 진폭이 기본모드보다도 더 크게 나타난다. 1차 고차모드의  $f_n$ 는 18.5 ~ 22.5 Hz 범위에 나타나며,  $f_n$ 보다 높은 대역에서는 주파수에 따라 단조증가, 낮은 대역에서는  $f_c$  부근을 제외하면 단조감소한다.

$h$ 의 증가에 따라,  $A_{vd}$  변화양상은  $h = 1$  m일 때 흡사하나 기본모드의  $f_p$ 나  $f_n$ 이 모두 저주파 쪽으로 이동한다(Fig. 5c). 1차 고차모드의 경우는  $f_c$ 의 변화폭이 증가하며,  $f_n$ 의 범위는 17.7 ~ 24.3 Hz로 다소 넓어진다(Table 2).  $A_{vd}$ 이 기본모드보다도 더 크게 나타나는 대역폭은 0.0 ~ 0.9 Hz 이내로 감소

**Table 2.** Frequencies at which peak amplitudes ( $f_p$ ), notches ( $f_n$ ) and cut-off ( $f_c$ ) of the vertical component of ground response occur for the Rayleigh wave. The units for  $\Delta C_R$ , thickness ( $h$ ) and depth ( $D$ ) of the anomalous layer, and shear-wave velocity ( $v_{sL}$ ) are m/s, m, m, and m/s, respectively.

Mode	$h$	$v_{sL}/D$	0		1		2		3		4		5		6		7		8		
			$f_p$	$f_n$																	
Fundamental	1	150	17.2	8.41	N/A	8.41	N/A	8.41	16.8	7.97	15.9	7.97	15.5	7.53	15.0	7.53	15.0	7.08	14.6	7.08	
		225	17.2	8.85	17.2	8.85	17.2	8.85	16.8	8.41	16.3	8.41	16.3	8.41	15.9	8.41	15.9	8.41	15.9	8.41	
		375	16.8	9.29	16.8	9.29	16.8	9.29	17.2	9.29	17.7	9.29	18.1	9.29	18.1	9.29	17.7	9.29	17.7	9.29	
		450	16.8	9.73	16.8	9.73	16.8	9.73	17.7	9.73	18.1	9.73	19.0	9.73	19.0	9.73	18.5	9.73	18.1	9.73	
1 <sup>st</sup> Higher	1	150	$f_c$	$f_n$																	
		225	9.7	19.9	9.7	19.9	9.3	19.9	8.8	19.9	8.84	20.3	8.40	20.7	7.96	20.7	7.96	19.9	7.52	18.5	
		375	9.72	20.3	9.72	20.7	9.72	20.7	9.72	20.7	9.72	20.7	9.72	20.7	9.72	20.7	9.28	20.7	9.28	20.3	9.28
		450	10.2	21.6	10.2	21.2	10.2	21.2	10.2	20.7	10.6	20.7	10.6	21.2	10.6	21.2	10.6	21.2	10.6	21.2	10.6
Fundamental	2	150	$f_p$	$f_n$		$f_p$	$f_n$	$f_p$	$f_n$												
		225	N/A	8.0		16.3	7.5		13.7	6.6		13.3	6.2	13.3	6.20						
		375	17.2	8.4		17.2	8.4		15.5	8.0		15.5	8.0	15.0	8.0						
		450	16.8	9.7		17.2	9.7		18.5	9.7		19.0	9.7	18.5	9.7						
1 <sup>st</sup> Higher	2	150	$f_c$	$f_n$		$f_c$	$f_n$	$f_c$	$f_n$												
		225	9.3	18.1		8.4	19.4		7.5	19.4		6.6	19.4	6.6	18.1						
		375	9.7	19.9		9.3	20.3		9.3	20.7		8.8	20.3	8.8	19.4						
		450	10.6	21.6		10.6	20.7		10.6	20.7		11.1	21.6	11.1	22.5						
Fundamental	3	150	$f_p$	$f_n$																	
		225	N/A	7.1		11.9	6.2		11.5	5.3		11.5	5.3								
		375	N/A	8.0		15.0	8.0		14.6	7.5		14.6	7.5								
		450	16.8	10.2		N/A	11.1		19.4	10.2		19.4	10.2								
1 <sup>st</sup> Higher	3	150	$f_c$	$f_n$																	
		225	8.4	18.5		7.1	19.0		5.8	17.7		5.8	17.7								
		375	9.3	19.4		8.8	20.7		8.4	19.4		8.4	19.4								
		450	10.6	21.6		11.1	20.7		11.5	22.5		11.5	22.5								

한다.

## 결 론

두께 9 m,  $v_s = 300$  m/s의 토양층이  $v_s = 1,000$  m/s의 기반암 상부를 덮고 있는 기본모델에  $v_s \neq 300$  m/s인 속도이상층이 삽입된 수치모델을 대상으로 속도이상층의 S파속도( $v_{sL}$ ), 깊이(D)와 두께(h) 등이 분산곡선과 지표 수직변위( $A_{vd}$ )에 미치는 영향을 분석하였다. 그 결과 다음과 같은 주요 결론을 얻었다.

1. 삽입모델의  $C_R$ 은 삽입층의  $v_s(v_{sL})$ 가 주변 토양층의  $v_s(v_{ss})$ 보다 작을 때는 기본모델보다 작으며, 클 때는 기본모델보다 크고, 이 두  $v_s$  차이가 클수록  $C_R$  차이도 커진다. D가 증가함에 따라  $v_{sL} < v_{ss}$ 인 경우는  $\Delta C_R$ 이 최소인 14 ~ 16 Hz까지는 단조감소하며,  $v_{sL} > v_{ss}$ 인 경우는 토양층 중간 깊이에서 최대치를 갖는다. h의 증가에 따라서  $|\Delta C_R|$ 이 증가하여, 삽입층에 의한 효과가 증가한다.

2. 기본모델의 경우에,  $h = 1$  m일 때 전반적으로  $|\Delta C_R|$ 이 큰 8 ~ 20 Hz 구간이 삽입된 속도이상층에 민감하게 반응하는 것으로 분석되며, h의 증가에 따라 민감 주파수 대역은 더 넓어져서 삽입층에 의한 효과가 증가한다.

3. 1차 고차모델의 경우에는 대체로 14 Hz 부근을 중심으로 폭 2 ~ 3 Hz의 '둔감구간'에서  $|\Delta C_R|$ 이 매우 작아서 삽입층에 의한 효과가 거의 반영되지 않으며, 고주파수 영역에서 삽입층에 의한 효과가 커진다.

4. h의 증가에 따라 삽입된 속도이상층에 가장 민감하게 반응하는 구간이 더 넓어지며  $\Delta C_R$  절대값도 증가하여, 삽입층에 의한 효과가 증가한다.

5. 삽입모델의  $A_{vd}$ 는 기본모델의 경우와 마찬가지로 일부 주파수 구간을 제외하면, 속도이상층의 D,  $v_{sL}$ , h에 상관없이 기본모델이 가장 큰 진폭을 보인다. 1차 고차모델의 차단주파수는  $9 \pm 1.5$  Hz 대역에 분포하며,  $A_{vd}$ 는 이 차단주파수에서 최대치를 나타내고 이 주파수부터 0.9 ~ 1.3 Hz의 좁은 주파수 구간에서는 기본모델보다도 더 크게 나타난다.

6.  $h = 1$  m의 경우,  $v_{sD}$ 가 최대인 주파수( $f_p$ )는 기본모델일 때 14.6 ~ 19.0 Hz 범위에 놓이며,  $v_{sL} < v_{ss}$  일 때 D의 증가에 따라 감소하고,  $v_{sL} > v_{ss}$  일 때는 5 ~ 6 m 부근에서 최대치를 갖는 특징을 보인다.

7. 이상의 연구결과는 속도이상층의 S파 속도, 깊이, 두께의 변화에 따른 모드별 위상속도 차이 및 민감 주파수 구간을 정량적으로 밝힘으로써, 레일리와 분산곡선 역산을 통해 구한 S파 속도의 신뢰도 판단에 도움이 될 것이다.

## 감사의 글

이 연구는 기상청 기상지진기술개발사업(CATER 2012-8040)의 지원으로 수행되었음을 밝히며, 자료분석 과정에 여러

모로 도움을 주신 Geometrics사의 Koichi Hayashi 박사님과 René Geophysics사의 Raymond René 박사님께 감사를 표합니다.

## 참고문헌

Addo, K. O. and Robertson, P. K., 1992, Shear-wave velocity measurement of soils using Rayleigh waves, *Can. Geotech. J.*, **29**, 558-568.

Caldern-Macas, C. and Luke, B., 2007, Improved parameterization to invert Rayleigh-wave data for shallow profiles containing stiff inclusions, *Geophysics*, **72**(1), U1-U10.

Gabriels, P., Sneider, R., and Nolet, G., 1987, In situ measurements of shear-wave velocity in sediments with higher-mode Rayleigh waves, *Geophys. Prospect.*, **35**, 187-196.

Gucunski, N. and Woods, R. D., 1992, Numerical simulation of the SASW test, *Soil Dyn. Earthq. Engin.*, **11**, 213-227.

Haskell, N. A., 1953, The dispersion of surface waves in multilayered media, *Bulletin of the Seismological Society of America*, **43**, 17-34.

Kanli, A. I., Tildy, P., Pınar, Z., Pinar, A., and Hermann, L., 2006,  $V_s^{30}$  mapping and soil classification for seismic site effect evaluation in Dinar region, SW Turkey, *Geophys. J. Int.*, **165**, 223-235.

Kitsunezaki, C., Goto, N., Kobayashi, Y., Ikawa, T., Horike, M., Saito, T., Kurota, T., Yamane, K., and Okuzumi, K., 1990, Estimation of P- and S- wave velocities in Deep Soil Deposits for Evaluating Ground Vibrations in Earthquake, SIZEN-SAIGAI-KAGAKU,9-3,1-17 (in Japanese).

Liang, Q., Chen, C., Zeng, C., Luo, Y., and Xu, Y., 2008, Inversion stability analysis of multimode Rayleigh-wave dispersion curves using low-velocity-layer models, *Near Surface Geophysics*, **6**(3), 157-165.

Lu, L., Wang, C., and Zhang, B., 2007, Inversion of multimode Rayleigh waves in the presence of a low velocity layer: numerical and laboratory study, *Geophys. J. Int.*, **168**, 1235-1246.

Ludwig, W. J., Nafe, J. E., and Drake, C. L., 1970, Seismic Refraction, in *A.E. Maxwell edited The Sea*, Wiley-Interscience, New York, New York, 53-84.

Park, C. B., Miller, R. D., and Xia, J., 1999, Multi-channel analysis of surface waves, *Geophysics*, **64**(3), 800-808.

Stoke, K. H., II and Nazarian, S., 1983, Effectiveness of ground improvement from spectral analysis of surface waves, Proc. 8<sup>th</sup> European Conf. Soil Mech. Foundation Engin. Helsinki, Finland, 91-95.

Thomson, W. T., 1950, Transmission of elastic waves through a stratified solid. Analytical results, *Journal of Applied Physics*, **21**, 89-93.

Tokimatsu, K., Tamura, S., and Kojima, H., 1992, Effects of multimodes on Rayleigh wave dispersion characteristics, *J. Geotech. Eng.*, **118**, 1529-1543.

Xia, J., Miller, R., Park, C. B., Hunter, J. A., Harris, J. B., and Ivanov, J., 2002, Comparison shear-wave velocity profiles

- from multichannel analysis of surface wave with borehole measurements, *Soil Dyn. Earthq. Engin.*, **22**(3), 181-190.
- Xia, J., Miller, R., and Xu, Y., 2008, Data-resolution matrix and model-resolution matrix for Rayleigh-wave inversion using damped least-squares method, *Pure and Applied Geophysics*, **165**, 1277-1248.
- Yuan, D. and Nazarian, S., 1993, Automated surface wave method: inversion technique, *J. Geotech. Eng.*, **119**, 1112-1127.
- Zhang, S. X. and Chan, L. S., 2003, Possible effects of misidentified mode number on Rayleigh wave inversion, *J. Appl. Geophys.*, **53**, 17-29.