

## 반무한체와 다층구조 지반에서 러브파 및 레일레이파의 위상속도 분산특성

### The Phase-velocity Dispersion Characteristics of Love Wave and Rayleigh Wave in the Half Space and Multi-layered System

이 일 화<sup>1</sup> Lee, Il-Wha

조 성 호<sup>2</sup> Joh, Sung-Ho

#### Abstract

Rayleigh wave and Love wave are the major elastic waves belonging to the category of the surface wave. The fact that Love wave is not contaminated by P-wave makes Love wave superior to Rayleigh wave and other body waves. Therefore, the information that Love wave carries is more distinct and clearer than the information of Rayleigh wave. In this study, for the purpose of employing Love wave in the SASW method, the dispersion characteristics of the Love wave were extensively investigated by the theoretical, numerical and experimental approaches. The 2-D and 3-D finite element analyses for the half space and two-layer systems were performed to determine the phase velocities from Love wave as well as from both the vertical and the horizontal components of Rayleigh wave. Also, the SASW measurements were performed at the geotechnical sites to verify the results obtained by the numerical analysis. The results of the numerical analysis and the field testing indicated that the dispersion characteristics of Love wave can be an extended information to make better evaluation of the subsurface stiffness structure by SASW method.

#### 요 지

레일레이파와 러브파는 탄성파 중에서 표면파에 속하는 것으로, 매우 중요한 표면파로 인식되고 있다. 러브파의 파동 전파시 매질내에 발생하는 변형은 SH파와 같은 전단형태이므로, 러브파는 P-파에 의해 교란되지 않는 특성이 있다. 이러한 특성으로 인하여 러브파가 레일레이파나 다른 체적파보다 더 유용한 탄성파로 인식되고 있다. 본 연구에서는 표면파를 활용하는 대표적 시험기법인 SASW 기법에서 러브파를 도입하고자 하는 목적으로, 이론적, 수치해석적, 실험적 방법으로 러브파의 위상속도 분산 특성을 연구하였다. 특히, 러브파의 수평성분과 레일레이파의 수직·수평 성분의 특성을 연구하기 위하여, 반무한 지반, 2층 구조의 지반에 대하여 2차원, 3차원 유한요소 해석을 수행하였다. 또한, 수치해석으로 획득한 러브파와 레일레이파에 대한 결과를 확인하기 위하여 일반 지반에서 현장실험을 수행하였다. 이와 같은 수치해석과 현장실험을 통하여 러브파의 위상속도 분산특성이 SASW 기법의 정확성과 신뢰성을 더욱 향상시키기 위한 추가 자료로 매우 유용할 것이라는 것을 확인하였다.

**Keywords :** Dispersion, Love wave, Rayleigh wave, SASW method, Surface wave

1 정회원, 한국철도기술연구원 궤도토목연구본부 선임연구원 (Member, Senior Researcher, Track Geotechnology Research Group, KRRI, iwlee@krri.re.kr)

2 정회원, 중앙대학교 건설대학 토목공학과 부교수 (Member, Associate Prof., Dept. of Civil Engrg., Chungang Univ.)

## 1. 서론

지구물리학 분야에서 지각 구조의 규명과 석유 탐사를 위하여 사용해오던 표면파기법(SASW Method, Spectral-Analysis-of-Surface-Waves Method)은 1980년대초 Stokoe에 의해 최초로 토목분야에 도입되었다(Heisey, Stokoe and *et al*, 1982). 원래 표면파 기법이란 지진파와 같이 장주기의 응력파가 장거리를 전파하면서 체적파(Body wave)와 분리되었을 때, 표면파만 분리하여 낸 후 표면파의 전파 특성을 분석하여 지각 구조나 석유 매장지역을 조사하는 기법이었으나, 근래 토목분야에서는 지반 조사의 비파괴 지반조사기법으로 활용되고 있다. SASW 기법은 많은 실험과 경험을 통하여 정립되어 왔으며, Roesset(1991), Gucunski(1991), Al-Hunaidi(1994), Joh(1996) 등에 의해 더욱 발전되어 왔다. 최근에는 디지털 신호처리장치의 발달과 함께, 더욱 정확해진 자료분석 알고리즘을 통하여 표면파탐사 관련 기술이 향상되어 2차원의 공간연속적인 시험이 가능해졌다.

현재까지 토목분야에서 지반조사를 위한 표면파탐사는 레일레이파의 수직성분 즉, 전파방향의 수직운동에 대한 파동특성을 주로 이용하여 왔는데, 이는 표면파중 레일레이파의 수직성분에너지가 가장 크기 때문이었다. 그러나 지층구조가 복잡하고 층간 강성차가 큰 경우, 포장구조체 등에서는 그 해상도가 낮아 역산해석이 난해한 경우가 있는데, 이는 표면파 고차모드의 영향과 체적파의 간섭으로 인한 근접장 효과때문으로 알려져 있다.

본 논문에서는 이러한 문제점을 보완하기 위하여 기존의 SASW 기법에 러브파를 도입하고자 하였고, 이를 위한 기초연구로서 러브파와 레일레이파 수평성분의 분산특성을 연구하였다. 또한, 일반적으로 충분한 에너지를 가지는 러브파의 발생이 어려운 문제점을 해결하기 위하여, 레일레이파의 발생을 위하여 사용하는 수직가진원의 활용가능성을 연구하였다.

수평표면파의 분산특성연구를 위하여 이론적 해, 유한요소해석 및 현장시험을 통하여 파 전파특성을 검토하였다. 유한요소해석에서는 대표적 지반모델을 이용하여 가진방향 및 감진방향별로 러브파와 레일레이파의 분산특성을 평가하였다. 또한, 일반 지반에서 수행하는 SASW 현장 실험을 통하여 유한요소해석에서 획득한 결과를 확인하였다. SASW 현장시험으로는 중앙대학교의 표면파 시험부지와 경기도 일반 지반을 활용하였고, 수직가진, 수평가진에 대한 수직방향(vertical) 진동과

방사방향(radial) 진동, 횡단방향(transverse) 진동을 측정하여, 수직가진, 수평 거리별, 가진방향별, 감진방향별 표면파의 분산특성을 검토하였다.

## 2. 층상구조에서의 탄성파 전파특성

지반 내 매질을 전파하는 탄성파는 체적파로서 크게 P파와 S파 두가지 종류가 있다. 탄성파가 지반내에서 전파될 때 다른 층과의 경계면에 이르게 되면, 입사파의 일부에너지는 반사층에서 반사, 굴절되며 나머지는 입사층으로 전파되어 들어간다. 특히, S파의 경우는 전파되는 면을 기준으로 보았을 때, 수직으로 매질을 전달시키는 SV파(수직파)와 수평으로 매질을 전달시키는 SH파(수평파)로 구성된다. 따라서 지반에서 전파되는 체적파는 P파, SV파, SH파 세가지 종류가 있고 할 수 있다.

표면파는 경계면의 조건에 따라 다르게 발생되며, 레일레이파, 러브파, 램브파 및 스톤리파로 구분된다. 이중 지반강성평가의 목적으로 적용할 수 있는 표면파는 지표면(자유장)을 따라 전파되는 러브파와 레일레이파이다. 이중 러브파는 상부층의 강성이 약한 경우에만 존재하며 레일레이파는 자유지표면이 있을 경우 항상 발생하는 파이다. 일반적으로 탄성파탐사에서 표면파는 통상 레일레이파를 말한다. 탄성파의 에너지비율을 보면 체적파가 33%, 표면파가 67%로 표면파가 차지하는 비중이 크다. 표면파의 에너지는 지표면 부근에 집중되며 지표면 하부 심도로 갈수록 지수함수적인 감쇠를 나타내어 대략 한파장 정도의 심도이상에서는 거의 소멸되는 특성을 갖고 있다. 이는 표면파의 전파속도가 한 파장 이내의 심도구간 지층상태에 따라 영향을 받게 됨을 의미한다. 또한 표면파는 주파수에 따라 그 전파속도가 변화하는데, 이를 표면파의 분산(dispersion)특성이라고 한다. 이러한 이유 때문에 지반강성 평가시에는 주로 표면파성분이 사용된다.

탄성파는 지반내에서 경계면을 만나게 되면, 반사와 굴절이 발생하게 되는데, 두 매질사이의 경계면으로 전파된 파는 입사파(incident wave)라고 하며, 경계면에서 다시 원래 매질로 반사되어 온 파를 반사파(reflected wave), 다른 매질로 투과되는 파를 굴절파(refracted wave)라고 한다. 탄성파의 종류에 따라서 반사, 투과되는 결과가 다르게 되는데, 그림 1에 도시되어 있는 것처럼, S파 중 SV파의 경우는 P파에 대한 반사파와 굴절파가 생긴다. 즉, SV파가 입사되어도 SV파 성분 이외에 P파의 성분이 반사와 굴절시 추가로 발생하게 된다. 이러

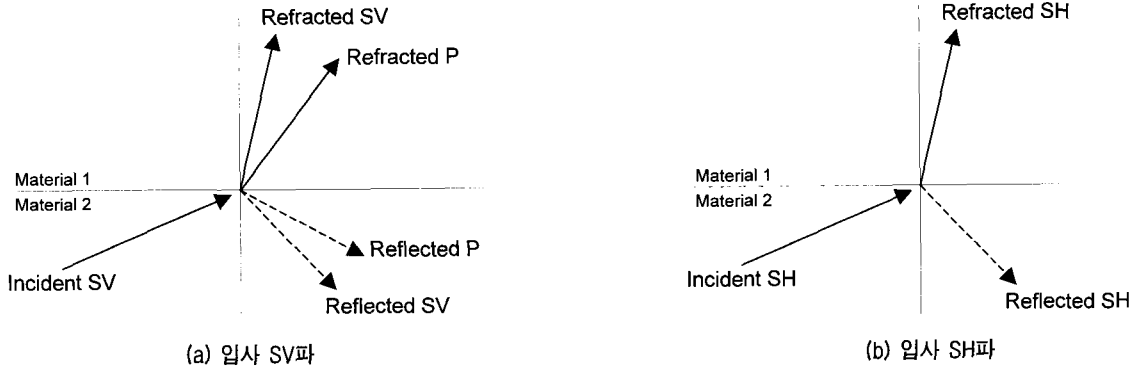


그림 1. 입사파의 종류에 따른 굴절파와 반사파

한 현상은 P파가 입사되었을 때도 동일하게 나타난다. 그러나 SH파의 경우는 굴절파와 반사파가 SH파뿐이며 생성된 굴절 및 반사파가 러브파를 생성하게 된다. 즉, P파의 성분이 발생하지 않기 때문에 근접지반에서 P파에 의한 신호가 교란되지 않는다.

### 2.1 레일리파 (Rayleigh Wave)

레일리파는 John Strutt Lord(1885)에 의해 탄성반무한체에서의 자유진동문제의 해로서 처음으로 밝혀졌다. 그 이후 지반의 거동특성연구 등에 중요하게 적용되었다. 3차원의 균질한 무한체에서는 압축파와 전단파 두가지의 해만 존재하지만 자유장을 가지고 있는 반무한체의 지표면에서는 또 다른 형태의 파가 존재한다. 이 파는 반무한체의 경계부근에 국한되어 존재하며 레일리파라 한다. 레일리파는 반무한체 표면에 국한되어 전파되며, 깊이가 깊어질수록 표면파의 크기는 급속히 감쇠

된다. 레일리파는 수평성분과 수직성분이 모두 존재하는 파이며, 수직성분의 크기가 수평성분의 크기보다 크다(그림 2). 두 성분의 파는 지표면에서는 같은 크기의 에너지를 가지지만 깊이에 따라 각기 다른 감쇠율로 에너지의 감쇠가 발생한다. 레일리파는 깊이에 따른 에너지 감쇠율의 차이로 인하여 두 성분의 중첩된 파는 전파방향의 반대방향으로 타원궤적을 따라 전파한다.

레일리파는 실제 3차원 반무한체에서 원통형으로 전파해 가지만 균질한 반무한체에서는 단순화하여 2차원적인 평면파로 전파한다고 할 수 있다. 포아슨비가 0.5에 가까워질수록 P파의 속도는 급격히 증가하나 레일리파의 속도는 S파의 속도에 접근하게 된다(그림 3).

### 2.2 러브파(Love Wave)

등방성의 탄성반무한체에서는 P파, S파, 레일리파만 발생하지만, 반무한체위에 상대적으로 약한 강성을 가진

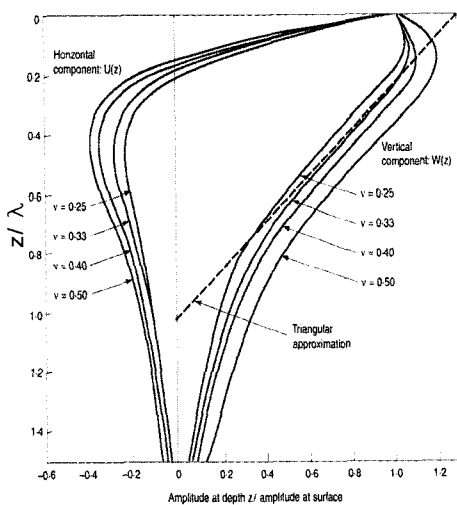


그림 2. 균질한 반무한체에서 지반깊이에 따른 레일리파의 크기비 (Richart et AL. 1970)

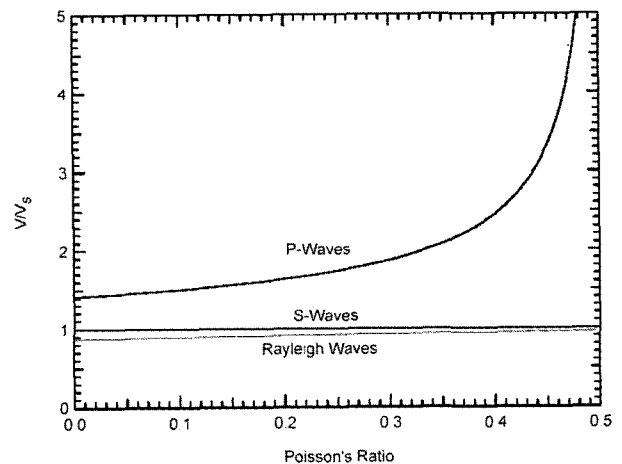


그림 3. 포아슨비에 따른 탄성파속도의 변화

이질층이 존재하는 경우, 즉 그림 4의 조건에서 러브파가 발생된다. 러브파는 상부층내에 입사된 SH파의 다중반사(multiple reflections)에 의해 발생한다. 그림과 같이 반무한체 상부에 강성이 상대적으로 약한 지반이 놓여있을 때, x 방향으로 전파되는 러브파는 y 방향으로만 입자변위가 발생하고 다음방정식으로 표현될 수 있다.

$$v(x, z, t) = V(z)e^{i(k_L x - \omega t)} \quad (1)$$

여기서  $v$ 는 y방향의 입자변위,  $\omega$ 는 각주파수,  $t$ 는 시간,  $V(z)$ 는 깊이 방향으로 변위크기의 변화를 나타내고  $k_L$ 은 러브파의 파수를 나타낸다. 러브파는 반무한체와 상부이질층에서 반드시 S파에 대한 파동방정식을 만족하여야만 한다. 그림 4와 같은 조건에서 각 층에서의 러브파의 파동방정식은 경계조건의 차이로 인하여 상부이질층과 반무한체로 구분되며 반무한체에서는 반사에너지가 없고 깊이  $h$ 의 경계면에서 변위가 동일하다고 가정하면, 각 층에서의 y방향 변위를 다음 식 (2), (3)과 같이 나타낼 수 있다.

$$v(x, z, t) = 2A_1 \cos\left(\omega z \sqrt{\frac{1}{v_{s1}^2} - \frac{1}{v_L^2}}\right) \cdot e^{i(k_L x - \omega t)} \quad (0 \leq z \leq h) \quad (2)$$

$$v(x, z, t) = 2A_1 \cos\left(\omega z \sqrt{\frac{1}{v_{s1}^2} - \frac{1}{v_L^2}}\right) \cdot e^{i(k_L x - \omega t) - \omega(z-h)\sqrt{\frac{1}{v_L^2} - \frac{1}{v_{s2}^2}}} \quad (z \geq h) \quad (3)$$

여기서  $v_{s1}$ 과  $v_{s2}$ 는 각층의 전단파속도,  $v_L$ 은 러브파의 속도이며 계수  $A_1$ 은 상부이질층에서의 파의 크기를 나타낸다. 러브파의 감쇠는 상부층에서는 정현파의 형태를 나타내고 반무한체에서는 지수함수적으로 감소한다. 그림 4와 같이 단순화된 지반모델에서 깊이별 러브파의 속도는 다음 식 (4)와 같다.

러브파는 이론적으로 밀도의 변화가 없기 때문에 포아손비의 영향이 없으며 러브파의 속도가 전단파의 속도와 같다고 할 수 있다.

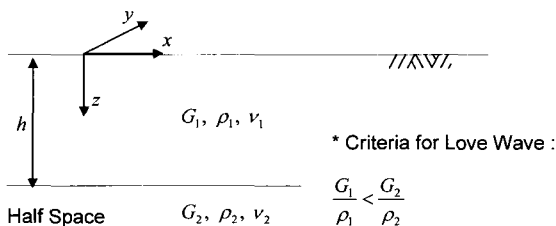


그림 4. 러브파가 발생하는 지반조건

$$\tan\left(\omega h \sqrt{\frac{1}{v_{s1}^2} - \frac{1}{v_L^2}}\right) = \frac{G_2}{G_1} \sqrt{\frac{\frac{1}{v_L^2} - \frac{1}{v_{s2}^2}}{\frac{1}{v_{s1}^2} - \frac{1}{v_L^2}}} \quad (4)$$

### 2.3 레일레이파와 러브파의 분산특성

지구물리탐사분야에서 러브파를 활용한 경우 입력가진원은 주로 광대역지진기록 등이 이용되었으며, 지구물리탐사의 특성상 장주기성분만이 사용되었다. 분산곡선은 일반적으로 군속도(Group velocity)에서 결정된 값을 사용하였다. 다음 그림 5는 Shapiro(2000) 등이 광대역지진기록을 이용한 지구내부구조의 조사를 위하여 사용된 모델의 분산특성곡선이다.

이론적으로 러브파가 발생할 수 있는 동일한 지반조건일 때 러브파는 밀도의 변화가 없으며 등방균질의 층상구조인 경우, SV파와 P파의 영향을 받는 레일레이파에 비하여 SH 성분으로만 구성되는 러브파의 전파속도가 빠르다. 러브파의 분산특성 평가를 위한 해석과 관련된 연구는 다음과 같다. Haskell(1953)은 다층구조를 이용하여 러브파와 레일레이파의 주파수방정식을 결정하는 일반적인 방법을 적용하였으며, Knopoff(1964)은 Haskell 방법을 개선한 Knopoff방법을 제안하였다. Schwab등(1984)은 Knopoff방법과 Thomson-Haskell공식이 사용되는 델타행렬을 이용하여 분산특성을 평가, 검증하였다. Saastamoine(1969)는 연직으로 비균질한 층의 다층구조체에 대한 러브파의 분산특성을 평가하기 위하여 Thomson-Haskell방법을 적용하였다.

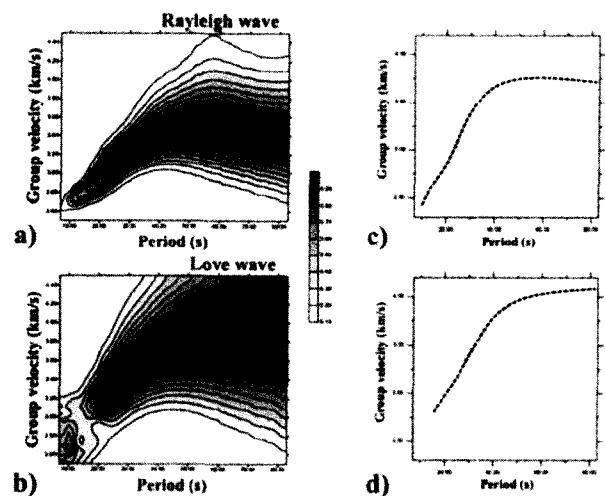


그림 5. 레일레이파와 러브파에 대한 주기와 군속도의 관계(Shapiro, 2000)

### 3. 유한요소해석에 의한 표면파의 분산특성

표면파의 파동전파 특성은 주로 수치해석에 의해서 해석되어지며, 주로 활용되는 수치해석 기법으로는 전달행렬법(Haskell, 1953), 동강성행렬법(Kausel, 1981), 유한차분법(Das, 1998), 수치적분, 경계요소법(McGarr and Alsop, 1967), 스펙트럴요소법(Knopoff, 1964) 등이 있다. 복잡한 층상구조를 전파하는 표면파의 해석에 있어서는 요소를 사용하는 스펙트럴요소법, 유한차분법, 유한요소법 등이 유리한 기법으로 인식되고 있다. 이 중 유한요소법은 제한적이지만 2, 3차원모델링을 통한 파 전파해석이 가능하고, 다양한 지반모델이 가능하다. 그래서 본 절에서는 레일레이파의 수직, 수평성분과 러브파의 분산특성을 분석하기 위해서 유한요소해석법을 도입하였다. 3.1절에서는 2차원 유한요소해석을 통하여 축대칭 조건에서 레일레이파의 방사방향(radial) 성분과 수직방향(vertical) 성분의 분산특성에 대하여 해석하였고, 3.2절에서는 2차원 해석결과를 바탕으로 러브파 성분인 횡단방향(transverse) 성분이 추가된 3차원 유한요소해석을 수행하였다. 유한요소해석에 사용한 좌표계는 그림 6에 도시한 바와 같다.

### 3.1 2차원 유한요소해석

2차원 유한요소해석에서는 3차원 효과를 모사할 수 있는 축대칭 모델을 사용하였고, 해석단면 크기로는 30m×20m의 영역을 설정하였다. 내부 측정지점에서는 5cm×5cm의 정방형의 4절점 축대칭요소를 사용하였고, 그 이외의 부분에서는 요소 수를 줄이기 위하여 바이어스(Bias) 요소를 적용하였다. 본 해석에 사용한 요소크기인 5cm는 해석에서 계산하는 최소파장의 0.1배 이하가 되도록 설정하였다. 경계요소는 점성감쇠기(viscous damper)를 수평 및 수직 방향으로 연결하여 파의 반사를 감소시켰다. 해석에 사용된 물성값은 단위중량 1.7t/m<sup>3</sup>, 포아슨비 0.333이며 전단파속도는 지반의 해석조건에 따라 55, 110, 220, 440m/sec를 사용하였다.

해석에 사용된 모델 지반은 그림 7과 같이 균질한 반무한체(Case 1), 상부층의 두께가 1m이고 각 지층의 강성이 220, 440m/sec인 지반(Case 2), 강성조건은 Case 2와 동일하고 상부층의 두께가 0.5m인 지반(Case 3)의 세 가지 경우이다. 밀도와 포아슨비, 감쇠비는 모든 해석지반에서 동일하고 해석조건별 지반의 강성 및 상부층의 두께만 변화시켰다.

해석은 시간영역에서의 해석법 중 안정성이 높은 Newmark-β법을 사용하였으며 계산에 사용된 총 해석

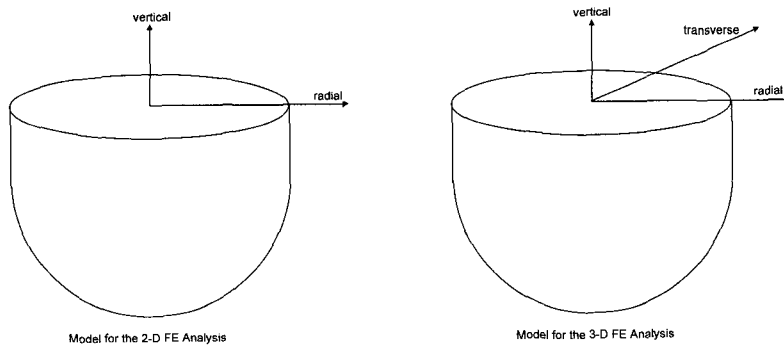


그림 6. 2차원, 3차원 유한요소해석에 사용된 좌표계

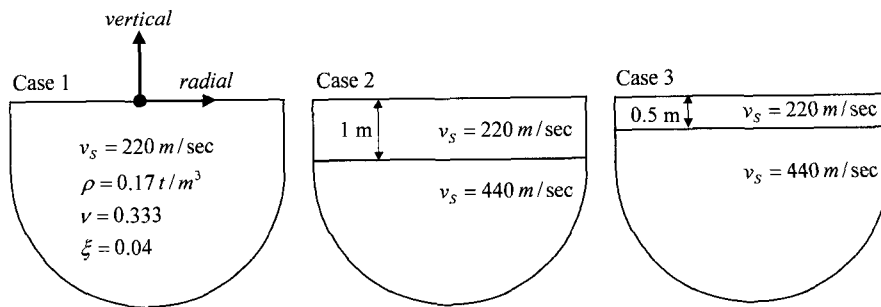


그림 7. 2차원 유한요소 해석에 사용된 지반의 종류

시간은 0.189초이다. 적분시간간격은 지표면의 전단파 속도가 220m/sec인 경우에는 0.185msec, 440m/sec인 경우에는 0.125msec를 사용하여 적분시간간격에 의한 오차를 최소화하였다. 적분시간간격은 해석에서 최소 주기를 가진 파동이 요소를 통과하는 시간의 0.1배 보다 작도록 하였다. 입력하중은 수직방향 및 방사방향으로 가진 되었으며, 측정데이터는 수직방향에 대하여 수직, 방사성분, 방사방향에 대하여 방사성분을 측정하여 각각 비교, 분석하였다. 사용된 입력하중으로는 half-sine 형태의 충격하중을 사용하였다.

본 해석에서는 레일레이파 수직성분의 분산특성과 레일레이파의 수평성분의 분산특성 검토에 주안점을 두었다. 이는 실제적으로 현장에서 수평방향의 가진이 용이하지 않기 때문에, 수직방향의 가진으로 수평방향의 가진과 유사한 표면파의 수평진동 특성을 측정할 수 있을지를 확인하고자 함이었다.

• Case 1

표면파 수평성분의 위상속도에 대한 기본적인 특성을 파악하기 위하여 균질한 반무한 지반(그림 7의 Case 1)에 대한 유한요소해석을 수행하였다. 감진기의 위치는 가진원에서 2m, 4m 떨어진 곳에 설치하였고, 시간에 따른 변위를 계산하였다. 계산된 변위시계열 곡선에 대

해 WinSASW 2(Joh, 2003)을 이용하여 위상속도를 구한 결과는 그림 8에 도시된 바와 같다. 전반적으로는 가진방향이나 감진기의 진동측정 방향에 관계없이 거의 동일한 위상속도를 구할 수 있었다. 그러나, 파장이 약 1.3m 이상인 표면파의 경우, 방사방향(radial)의 진동성분은 가진 방향과 관계없이 유사한 결과를 제시하였으며, 수직 방향의 진동성분과 다소 차이를 보임을 알 수 있다. 즉, 방사방향의 가진에 대한 방사방향의 진동성분을 측정하기 위해서는 수직방향의 가진에 대한 방사방향의 진동성분을 측정하면 된다는 것을 확인할 수 있다. 이는 레일레이파의 수평성분 위상속도가 수직방향 가진시 획득되는 방사방향 진동의 위상속도와 일치함을 의미하는 것이다.

또한, 매우 흥미로운 사실은 수직진동에 대한 위상속도는 파장이 증가하여도 비교적 평탄한 경향을 보이는 반면, 수평진동에 대한 위상속도는 파장이 1.2m를 초과하는 경우 다소의 기복을 보이고 있다. 균질한 반무한 지반에 있어서 파장에 따라 위상속도의 변동이 나타나는 것은 체적파의 간섭으로 인한 것으로 알려져 있다. 특히, 그림 8(c)의 전달함수 진폭스펙트럼의 요철같은 변동을 참고하여 볼 때, 방사방향 진동에 대한 위상속도 분산곡선이 수직진동에 대한 위상속도 분산곡선보다 더 큰 체적파 간섭효과가 나타나는 것을 확인할 수 있다.

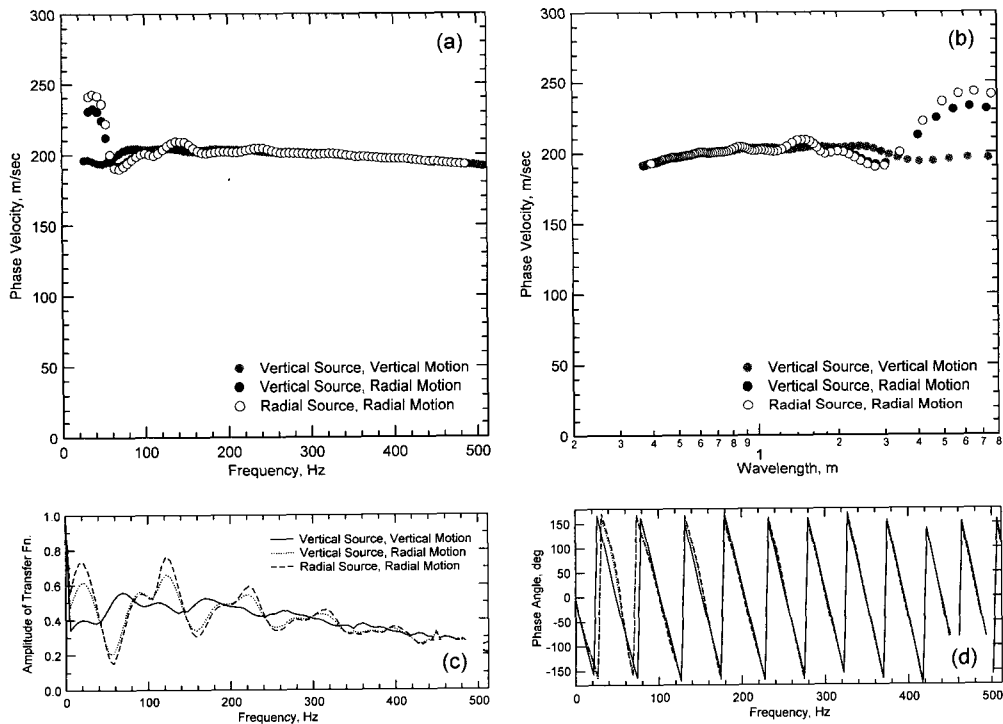


그림 8. Case 1에 대하여 유한요소해석으로 결정한 위상속도 분산곡선과 전달함수

• Case 2

Case 2는 강성이 큰 반무한 층 위에 연약한 층이 존재하는 경우이다. 연약한 층의 두께는 1m, 전단파 속도는 220m/sec이고, 하부 반무한 층은 440m/sec의 전단파 속도를 갖는 것으로, Case 2의 지반은 심도가 증가할수록 강성이 증가하는 지반을 모사한 것이다. 표면파 해석을 위한 감진기는 가진원에서 2m, 4m에 위치하도록 하였고, 수직방향의 가진에 대하여 수직, 방사방향 변위 시계열을, 방사방향 가진에 대하여 방사방향 변위 시계열을 계산하였다. 유한 요소해석으로 구한 변위 시계열에 대하여 WinSASW 2로 분석한 위상속도는 그림 9와 같이 결정되었다.

Case 2의 경우도 Case 1의 경우와 유사한 경향을 살펴볼 수 있다. 전반적인 추세로는 가진방향에 관계없이 감진방향에 따라 위상속도 분산곡선은 거의 유사하게 결정되었다. 그러나, 보다 자세하게 살펴보면, 약 1.6m까지의 파장에 대해서는 위상속도가 거의 동일하지만, 파장 1.6m 이상의 파장에 대해서는 방사방향의 위상속도가 수직방향의 속도보다 더 크게 결정되었다. 하부지층의 전단파 속도가 440m/sec이고 이에 해당되는 레일레이파의 위상속도가 약 400m/sec인 것을 참고하여 볼 때, 수직방향보다 방사방향의 표면파가 하부지층의 강성을 더 과다하게 감지하는 것을 알 수 있다. 이는 주파수 120Hz 이하의 영역에서 공진현상이 발생하여 다중

반사된 파동에 체적파의 성분이 더 많이 반영되었기 때문이라고 판단된다.

• Case 3

Case 3은 Case 2의 경우와 동일한 지층간 강성대비를 가지고 있지만 첫 번째 층의 두께가 Case 2에 비해 0.5배로 축소된 지반모델이다. 그림 10의 유한요소해석 결과를 살펴보면, 180Hz 이상의 주파수 대역 또는, 1.4m 이하 파장의 대역에 대해서는 가진 방향 및 감진방향에 관계없이 위상속도가 거의 동일하게 나타나고 있으며, 전달함수의 진폭 스펙트럼과 위상 스펙트럼에서도 상대적으로 차이가 작음을 알 수 있다. 그러나, 180Hz 이하의 주파수 대역 또는 1.4m 이상 파장의 대역에서는 감진 방향에 따라 큰 차이가 나타나고 있다. Case 1, 2의 경우와 동일하게 수직가진 · 방사가진에 관계없이 감진방향이 방사방향이면 거의 동일한 위상속도를 보이고 있지만, 수직방향의 감진에 대한 위상속도는 방사방향 감진의 위상속도보다 작게 나타나고 있다. 이와 같은 감진 성분 따른 위상속도 차이는 Case 1, 2 모두 공히 관찰되는 현상으로서 체적파의 간섭효과로 인한 것으로 판단된다. 특히, Case 3에 나타나는 체적파 간섭효과는 Case 1, 2의 경우에 비해 매우 크게 나타나고 있는데, 이는 넓은 주파수 대역(0~160Hz)에서 가진원의 크기보다 더 큰 진폭

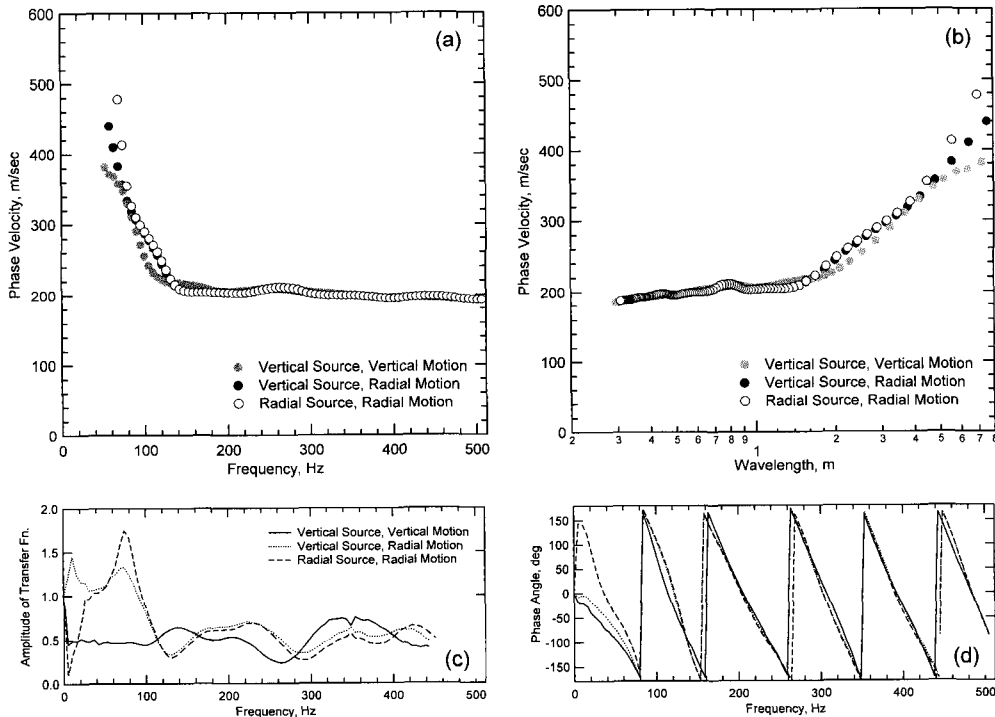


그림 9. Case 2에 대하여 유한요소해석으로 결정한 위상속도 분산곡선과 전달함수

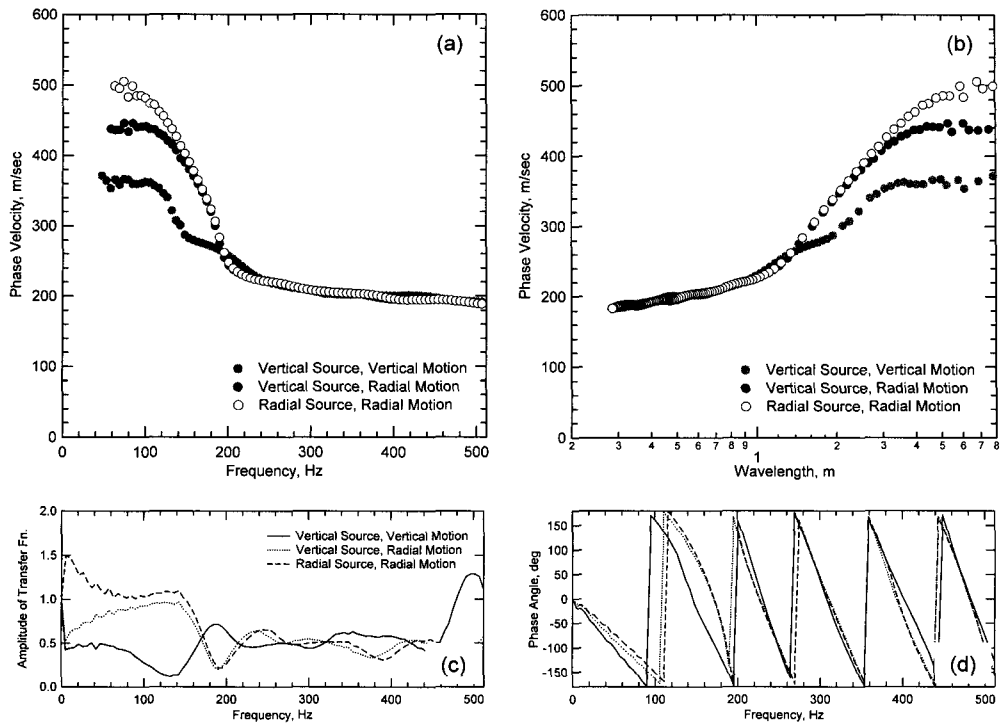


그림 10. Case 3에 대하여 유한요소해석으로 결정한 위상속도 분산곡선과 진폭스펙트럼

의 증폭을 보이고 있는 사실로 미루어 보아, 체적파의 공진현상으로 인한 지반변위의 증폭을 추론해 볼 수 있다.

한편, 충분히 큰 파장에 대한 위상속도를 살펴보면, 수직가진-수직감진의 경우는 380m/sec, 수직가진-방사방향 감진의 경우는 440m/sec, 방사방향가진-방사방향 감진의 경우는 500m/sec의 위상속도를 나타내었다. 하부지반의 전단파 속도가 440m/sec, 이에 대한 레일레이 파 위상속도가 약 400m/sec인 것을 고려하여 볼 때, 수직가진-수직감진의 경우가 가장 근사하게 하부지반의 강성을 평가하였고, 방사방향 가진-방사방향 감진의 경우는 다소 과다하게 평가하였다. 이 또한, 체적파의 공진 현상과 체적파의 간섭효과로 인하여 위상속도가 과다하게 평가된 것으로 이해할 수 있다.

또한, 그림 11에서와 같이 감진기 1, 2의 변위신호로부터 결정된 순간응답 (impulse response)에 대하여 거보스펙트럼 (Gabor spectrum)을 구하여 보았다. 거보스펙트럼은 신호의 시간-주파수 영역에서 에너지 분포를 보여주기 때문에, 파동의 전파특성을 평가하는데 매우 유용한 도구로 사용된다. 그림 11에 나타난 바와 같이, 거보스펙트럼의 에너지 분포는 가진방향, 감진성분에 관계없이 크게 두 개의 파 그룹(wave group)으로 분리되고 있음을 보여주고 있다. 약 100Hz 이하의 주파수 대역에서 도착시간이 약 5msec인 그룹과 100Hz 이상의 주파

수 대역에서 도착시간이 약 12msec인 그룹이다. 수직가진에 대한 수직 성분의 경우는 100Hz 이상의 파 그룹이 지배 파 그룹인 반면, 수직 가진-방사성분, 방사가진-방사성분은 동일하게 100Hz 이하의 파 그룹이 지배 파 그룹이다. 도착시간 5msec는 전파거리를 2m로 설정하였을 때, 400m/sec의 속도에 해당되고, 도착시간 12msec

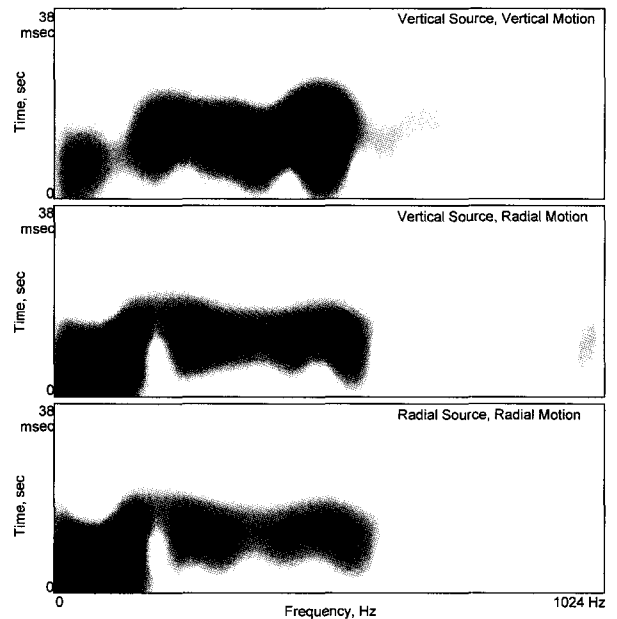


그림 11. Case 3의 감진기 신호 1, 2에 대한 순간응답 거보 스펙트럼



는 167m/sec의 속도에 해당된다. 따라서, 가진 방향과 관계없이 방사방향 진동은 하부 지층의 영향을 주로 받는 파 그룹이 지배적이고, 수직방향 진동은 상부 지층의 영향을 주로 나타내는 파 그룹이 지배적임을 알 수 있다. 따라서, 이렇게 거보스펙트럼의 에너지 분포를 통하여 살펴 본 지배 파 그룹의 분포에서도 가진 방향에 관계없이, 수평 방향의 진동은 동일한 특성을 가지고, 수직 성분과는 차이가 있음을 보여주고 있다.

### 3.2 3차원 유한요소해석

전 절에서 수행한 2차원 유한요소해석에서는 표면파의 수직방향(vertical) 성분과 방사방향(radial) 성분의 분산특성을 살펴보고, 본 절에서는 3차원 유한요소해석을 통하여 표면파의 횡단방향(transverse) 성분의 분산특성을 살펴보고자 한다. 3차원 유한요소해석에서 사용한 모델은 그림 12의 균질한 반무한 지반인 Case 4와 2층 구조로 되어있는 Case 5이다. Case 4와 5의 유한요소 모델 단면은 4m(H)×4m(W)×5m(L)이고, 요소의 크기는 10cm×10cm로서 2차원 유한요소해석에 사용된 것보다 두 배로 설정하였다. 지반모델의 경계는 반사파에 의한 파의 교란을 배제하기 위하여 무한요소로 적용하였다. 유한요소해석에 사용된 기본물성은 2차원 해석의 경우

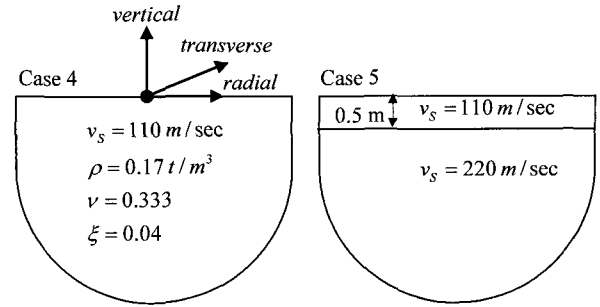


그림 12. 3차원 유한요소해석에 사용된 지반모델

와 동일하지만, 전단파 속도는 2차원 모델의 0.5배로 설정하였다. 표면파의 진동을 측정하기 위한 감진기는 감진기에서 1m, 2m 떨어진 곳에 위치하도록 설정하였다.

#### • Case 4

Case 4는 Case 1의 경우와 거의 동일하고 단지 전단파 속도만 반으로 감소된 경우로서, 균질한 반무한 지반에서 수평 표면파의 전단특성을 살펴보고자 하였다. Case 4에 대해서 수행한 유한요소해석은 모두 두 가지 경우이며, 수직방향 가진에 대한 수직방향의 분산특성과 횡단방향 가진에 대한 횡단방향 분산특성을 비교하기 위한 해석을 수행하였다. Case 4에 대한 유한요소해석결과는 그림 13에 도시한 바와 같다.

그림 13(a)의 결과와 같이, 전체 주파수 대역에서 횡단

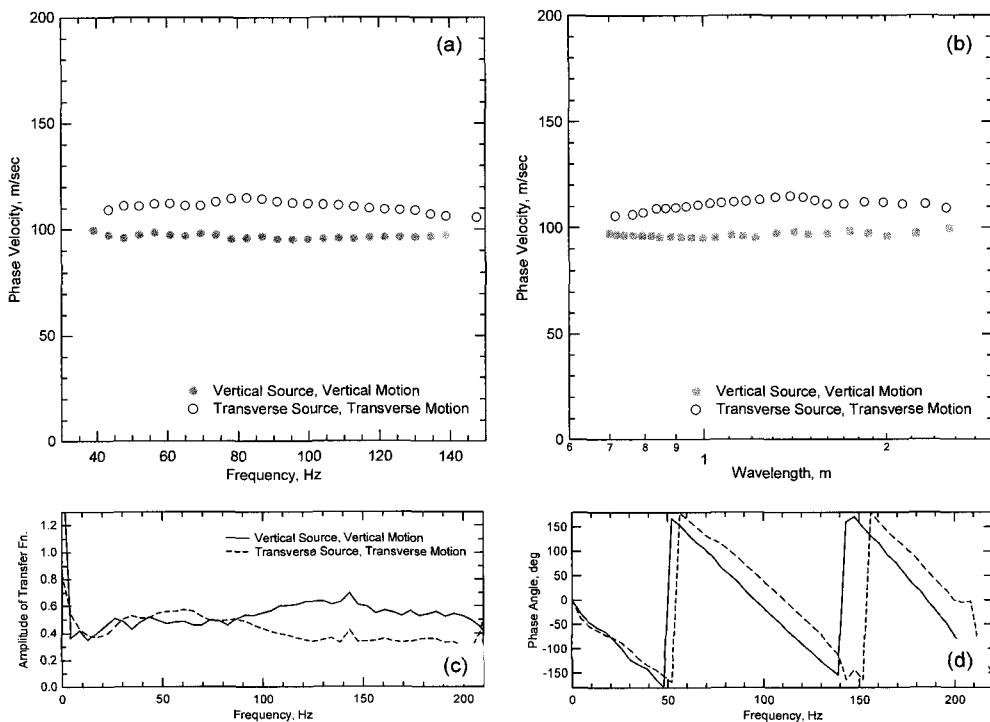


그림 13. Case 4에 대한 3차원 유한요소해석 결과

방향 성분의 위상속도가 수직방향 성분의 위상속도보다 큰 것으로 해석되었다. 전단파 속도가 깊이에 따라 증가하는 지층구조에서만 러브 파가 발생하기 때문에, Case 4에서 확인된 횡단방향 성분의 파에는 러브파보다는 SH 성분의 전단파가 지배적이라고 이해하는 것이 타당할 것으로 판단된다. 또한, 그림 13에서 횡단방향 성분의 위상속도가 수직방향 성분의 위상속도보다 대체적으로 10% 정도 더 크게 결정되었다는 것과 일반적으로 전단파 속도가 레일레이 파보다 10%정도 더 크다는 사실을 참고할 때, 그림 13의 횡단방향 성분의 파에는 SH 성분의 체적파가 지배적이라는 추정이 합리적이라고 할 수 있다.

전달함수 진폭스펙트럼의 경우 수직방향 성분의 파나 횡단방향 성분의 파 모두 특정한 공진 현상 없이 평탄한 추세를 보이고 있다. 단, 100Hz 이상의 주파수 대역에서는 횡단방향 성분의 파에서 다소 진폭이 감소하는 추세를 확인할 수 있다. 이는 SH 성분의 파동의 에너지 감쇠가 표면파의 경우보다 더 빨리 일어난다는 사실을 염두에 둘 때 합리적인 현상이라고 판단된다. 한편, 전달함수의 위상각 스펙트럼의 경우도 특별한 기복이 없이 전형적인 톱니모양의 경향을 보여주고 있다.

• Case 5

Case 5는 단단한 층 위에 연약한 지층이 존재하는 2층

구조 지반으로서, 깊이에 따라 증가하는 지반을 묘사한 것이다. Case 5의 지반에 대해서 유한요소해석을 수행하였고, 이로부터 수직방향 가진에 대한 수직방향 진동성분, 방사방향 진동성분, 횡단방향 가진에 대한 횡단방향 진동성분을 구하였다. 수직방향 가진에 대한 수직방향 진동성분은 레일레이파의 수직성분을, 횡단방향 가진에 대한 횡단방향 진동성분은 러브파의 성분을 계산하고자 하였다. 한편, 레일레이파의 수평성분이 어떻게 나타나지도 확인하기 위하여 수직방향 가진에 대한 방사방향 진동성분을 계산해 보았다. Case 5에 대한 유한 요소해석 결과는 그림 14에 도시한 바와 같다. 그림 14(b)의 분산곡선에 나타나 있는 표면파의 파장은 0.4m~2.5m의 범위에 있다. 유한요소해석에 사용된 요소의 크기가 10cm이기 때문에 1.0m보다 작은 파장에 대해서는 신뢰성이 떨어지는 하지만, 0.4m 파장에 대한 위상속도가 이론적으로 추정되는 90m/sec인 것으로 미루어 볼 때 0.4m 이상의 파장에 대한 위상속도는 신뢰 가능한 결과라고 판단된다.

그림 14의 위상속도 분산곡선에서 확인할 수 있듯이, 레일레이파 수직성분은 레일레이파 수평성분의 경향과 거의 일치하지만, 러브파의 성분과는 차이가 있게 나타났다. 레일레이파 수직 및 수평성분 위상속도 분산곡선은 약 0.8m의 파장을 경계로 하여 90m/sec에서 180m/sec 까지 두 단계로 증가하고 있고, 러브파 위상속도는 약

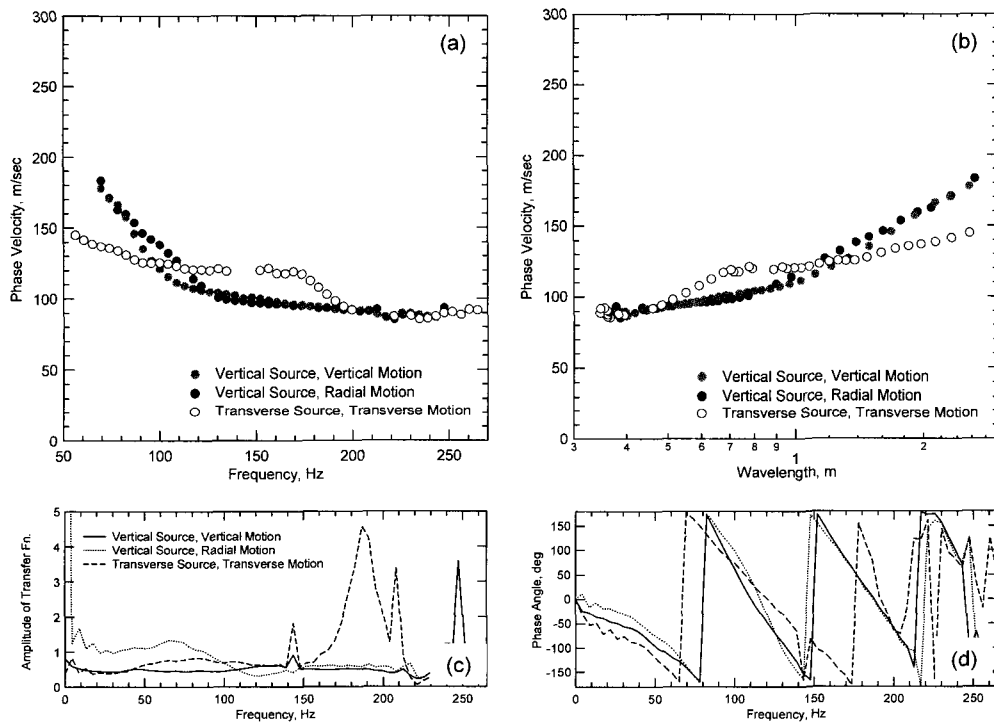


그림 14. Case 5에 대한 3차원 유한요소해석 결과

0.7m의 파장을 경계로 하여 90m/sec에서 145m/sec까지 두 단계로 증가하고 있다. 한편, 주파수영역의 분산곡선을 살펴보면, 분산곡선의 특성을 더욱 분명하게 알 수 있다. 러브파의 경우는 레일레이파의 경우와는 달리, 90~170Hz(파장영역에서는 0.7~1.4m) 구간에서는 120m/sec, 210~270Hz(파장영역에서는 0.35~0.4m) 구간에서는 90m/sec로 비교적 일정한 위상속도를 보이고, 그 전이 구간에서는 급격한 증가를 보이고 있다. 반면, 레일레이파에서는 약 130Hz(파장 0.8m)를 경계로 위상속도 분산곡선의 기울기가 급격히 달라지고 있다. 한편, 레일레이파의 경우 하부지층의 영향이 비교적 작은 파장(약 0.8m)에서부터 나타나기 시작하지만, 러브파의 경우는 큰 파장(약 1.4m)에서부터 반영되기 시작하고 있다. 즉, 러브파의 경우는 표층의 두께인 0.5m의 약 3배에 해당되는 파장에 이르러야 하부지층의 존재를 느끼기 시작하는 것이다. 또한, 표층두께의 5배에 해당되는 2.5m의 파장에 이르러서도 위상속도는 145m/sec밖에 되지 않는 반면, 레일레이파의 경우는 180m/sec에 이르고 있어, 하부지층의 전단파 속도인 220m/sec를 기준으로 판단하였을 때, 러브파의 위상속도는 하부지층에 대해 민감하지 못한 것을 알 수 있다. 따라서, 하부지층의 영향이 분산곡선에 미치는 영향의 크기 측면에서는 레일레이파가 러브파보다 더욱 민감하였고, 상부지층의

강성과 두께 측면에서는 러브파가 레일레이파보다 더욱 민감하게 나타났다.

#### 4. 현장실험에 의한 수평 표면파의 분산특성

본 절에서는 수평방향 표면파의 분산특성에 관한 유한요소해석의 결과를 실제 현장 실험을 통하여 확인하고자 하였다. 중앙대학교에 층다짐으로 구성되어 있는 표면파 시험부지와, 깊이에 따라 강성이 증가하는 일반 자연지반 두 현장에서 수직가진과 수평가진을 이용하는 SASW 실험을 수행하였다.

##### 4.1 표면파 시험부지

중앙대학교에 구성되어 있는 표면파 시험부지는 5m×20m의 면적과 깊이 2.5m 규모를 가지고 있으며, 일정한 두께로 층다짐을 수행하여 조성되었다. 표층 0.6m 두께의 층에 대해서는 30cm의 층두께로 층다짐을 하였으며, 표층 하부 1.4m 두께에 대해서는 10cm 두께로 1ton 소형진동다짐기를 사용하여 10회 왕복하는 층다짐을 하였다. 표면파 시험을 하기 위하여 감진기는 가진원 위치에서 1m, 2m 떨어진 곳에 설치하였고, 수직가진에 대한 수직방향 진동 성분, 방사방향 진동 성분 및 횡단방향 진동 성분을 측정하

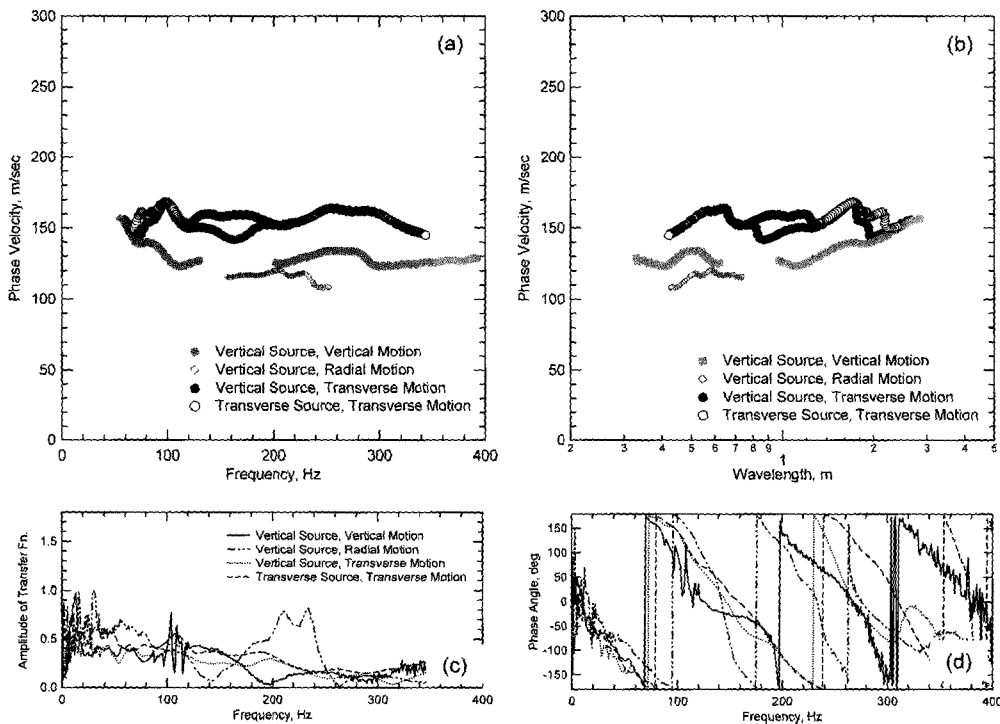


그림 15. 중앙대학교 표면파 시험부지에서 수행한 표면파 시험결과

였고, 또한 횡단방향 가진에 대한 횡단방향 진동성분을 측정하였다. 수직가진을 위해서는 1.3kg 해머를 지반에 타격하는 것으로 하였으며, 횡단방향 가진을 위해서는 슬래지 해머를 횡단방향으로 지반 위에 놓고 중량을 가하여 밀착시키고, 측면을 1.3kg 해머로 타격하는 것으로 하였다.

모두 4가지의 표면파 측정을 수행하였고, 그 결과는 그림 15에 도시한 바와 같다. 가진방향과 감진방향을 고려하여 볼 때, 수직가진에 대한 수직성분파는 레일레이파에 상응하는 것이고, 횡단방향 가진에 대한 횡단성분파는 러브파에 상응하는 것이라고 할 수 있다. 충다짐 지반에서 수행된 표면파 시험에 의해서 표면파 시험 부지의 분산특성은 그림 15(a), (b)와 같이 조사되었다. 위상속도 분산곡선의 대체적인 경향을 살펴보면, 레일레이파의 수직성분과 수평성분에 대한 위상속도가 서로 유사하게 측정되었고, 가진방향에 관계없이 횡단방향 성분의 위상속도도 유사한 값으로 측정되었다. 그리고, 횡단방향 성분의 위상속도인 러브파의 속도가 레일레이파의 위상속도보다 더 크게 측정되었다. 이와같은 레일레이파와 러브파의 경향은 본 연구에서 수행한 유한요소해석 결과와 일치하는 것으로 판단된다. 한편, 측정된 위상속도 분산곡선의 경향을 좀더 자세히 살펴보면, 러브파의 위상속도는 0.4m~2.0m 파장 대역에서 약 155m/sec의 속도로 비교적 평탄하게 측정되었으나,

레일레이파의 위상속도는 0.3m~1.3m 파장 대역에서 약 125m/sec의 속도를 보이다가 파장 1.3m에서 점차적으로 증가하는 추세를 보였다. Case 5 지반에 대한 3차원 유한요소해석 결과에서처럼 러브파의 위상속도는 균질한 지반에서 지층의 두께에 해당되는 파장의 대역에서 평탄한 경향을 보이고 있다. 한편, 측정된 러브파의 위상속도는 레일레이파의 위상속도보다 약 24% 정도 크게 측정되었는데, 이는 레일레이파의 위상속도를 기준으로 하였을 때 전단파 속도보다 훨씬 큰 것으로 현장의 비등방성 특징을 나타내는 것으로 판단된다.

#### 4.2 자연지반

본 연구에서 표면파 시험을 수행한 자연지반은 경기도 김포지역의 논으로서, 봄철 해빙기가 지난 직후인 시점에 실험을 수행하였다. 실험을 수행한 지역의 지반은 얇은 심도에서는 거의 일정한 전단강성을 유지하다가 심도가 깊어지면서 전단강성이 증가하는 지반으로, 전형적인 자연 지반이다. 표면파의 측정을 위해서 두 개의 수직방향 감진기와 두 개의 횡단방향 감진기를 발진 위치에서 16m, 32m 떨어진 위치에 설치하였다. 가진원으로는 무한궤도가 장착되어 있는 볼도저를 전후로 움직이면서 지속적인 하중을 가하는 것으로 하였고, 수직 성분과 횡단 성분을

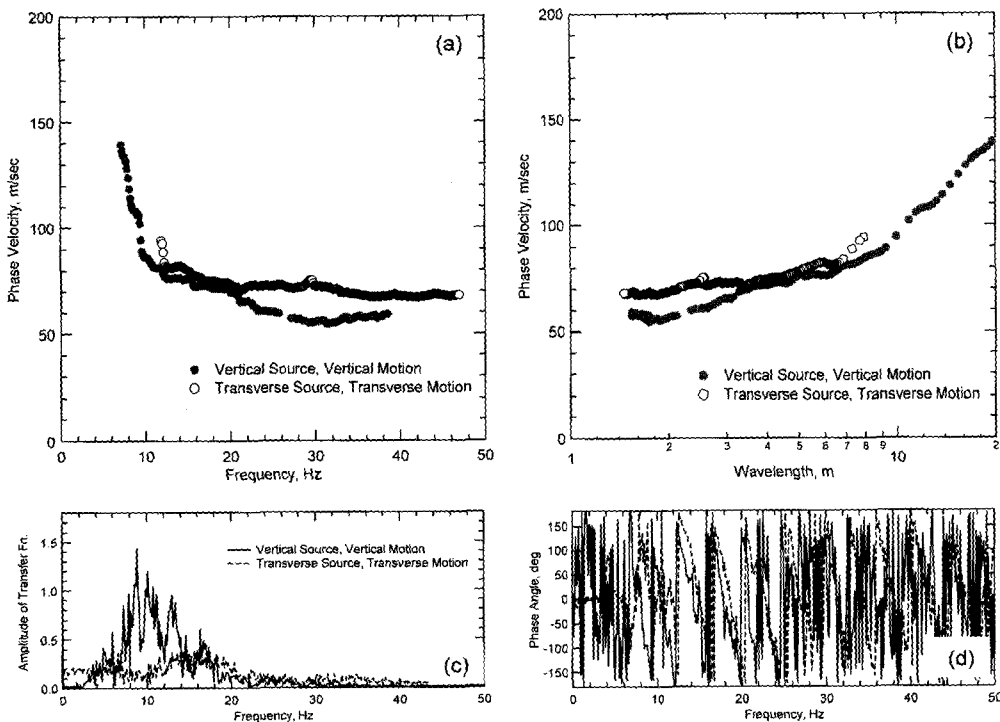


그림 16. 경기도 김포지역의 자연지반에서 수행한 표면파 시험결과

동시에 측정하였다. 가진방향과 감진방향을 고려하여 볼 때, 수직성분파는 레일레이파에 상응하는 것이고, 횡단성분파는 러브파에 상응하는 것이라고 할 수 있다.

수직성분과 횡단성분의 표면파 측정결과는 그림 16에 도시한 바와 같다. Case 5 지반의 유한요소해석 결과와 중앙대학교 표면파 시험부지의 경우처럼, 측정된 주파수 대역 또는 파장 대역에서 러브파의 위상속도가 레일레이파의 위상속도보다 전반적으로 더 크게 측정된 것을 확인할 수 있다. 그리고, 러브파의 분산곡선은 표층에 해당되는 파장의 대역에서 비교적 평탄하게 측정되었으나, 레일레이파의 분산곡선은 러브파의 분산곡선보다 더 급한 기울기를 가지고 증가하는 것으로 측정되었다. 이는 레일레이파의 경우 하부지층의 영향이 위상속도 분산곡선에 러브파의 경우보다 더 예민하게 나타나고 있음을 의미한다고 할 수 있다. 또한, 러브파의 분산곡선에서는 약 6m의 파장에서 급하게 기울기가 달라지고 있으나, 레일레이파의 분산곡선에서는 9m의 파장에 이르러서야 분산곡선의 경사가 급변하고 있다. 이러한 관찰도 Case 5 지반의 유한요소해석에서 관찰되는 것으로, 지층변화에 대한 영향이 파장의 영역에서 러브파에서 더 확연하게 나타남을 보여주는 것이다.

## 5. 결 론

SASW기법을 이용하여 지반강성 평가시 신뢰도와 해상도를 높이기 위하여 유한요소해석과 현장시험을 통하여 수평표면파의 분산특성을 연구하였다. 유한요소해석에서는 균질한 반무한체 지반모델과 이층구조 지반모델에 대한 레일레이파와 러브파의 분산특성을 검토하였고, 현장 시험에서는 실제 지반에서의 가진 및 감진 방향별 분산특성을 검토하였다. 본 연구의 결론을 요약하면 다음과 같다.

- (1) 레일레이파의 수직성분과 수평성분은 거의 동일한 분산특성을 가지고 있으나, 체적파의 간섭효과가 발생할 수 있는 영역에서는 레일레이파의 수평성분에 대한 위상속도가 수직성분에 대한 위상속도보다 과다하게 평가되는 경향이 있다.
- (2) 체적파의 간섭효과는 레일레이파의 수직성분보다 수평성분에서 크게 나타난다.
- (3) 균질한 지층의 경우 러브파의 분산곡선은 레일레이파의 분산곡선보다 더 평탄한 경향을 가지며, 러브파의 위상속도가 레일레이파의 위상속도보다 더 크

게 평가된다.

- (4) 다층구조의 지반의 경우, 지층의 강성변화로 인한 분산곡선의 영향이 러브파의 분산곡선에서 레일레이파의 분산곡선보다 명확하게 나타난다.

## 참 고 문 헌

1. Al-Hunaidi, M.O. (1994), "Analysis of dispersed multi-mode signals of the SASW method using multiple filter/cross-correlation technique", *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 13, pp.13-24.
2. Das, S.P., and Mitra, M (1998), "Hybrid method for Love wave dispersion in vertically Inhomogeneous media", *Pure and applied Geophysics*, 152, pp.523-538.
3. Gucunski, N., Woods, R.D. (1991), "Inversion of Rayleigh Wave Dispersion Curve for SASW Test", *Proceeding of the 5th International Conference on Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, pp.127-138.
4. Haskell, N.A. (1953), "The distribution of surface waves on multilayered media", *Bull. Seismol. Soc. Am.* 43, pp.17-34.
5. Heisey, J.S., Stokoe, K.H. II, Hudson, W. R., and Meyer, A. H. (1982), Determination of in situ shear wave velocities from Spectral-Analysis-of-Surface-Waves, Research Report No.256-2 Center for Transportation Research, The University of Texas at Austin.
6. Joh, S.-H. (1996), Advancement in the Data Interpretation and Analysis in the Spectral-Analysis-of-Surface-Waves Method, Ph.D. Dissertation, The University of Texas at Austin.
7. Kausel, E. and Roesset, J.M. (1981), "Stiffness matrices for layered soils", *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol.71, No.6, pp.1743-1761.
8. Knopoff, L. (1964), "A Matrix method for elastic wave problems", *Bull. Seismol. Soc. Am.* 54, pp.431-438.
9. Kramer, S.L. (1996), "Geotechnical earthquake engineering", Prentice-Hall, Upper Saddle River, NJ.
10. McGarr, A., and L.E. Alsop (1967), "Transmission and Reflection of Rayleigh waves at vertical boundaries", *J. Geophys. Res.* 72, pp.2169-2180.
11. Richart, F.E., J.R.Hall,Jr., and R.D.Woods (1970), "Vibrations of Soils and Foundations, Englewood Cliffs", New Jersey, Prentice Hall.
12. Roesset, J.M., Chang, D.,-M., and Stokes, K.H.,II (1991), "Comparison of 2-D and 3-D Models for Analysis of Surface Wave Tests", *Proceedings of the 5th International Conference on Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, pp.111-126.
13. Saastamoine, P. (1969), "On a generalisation of the Thomson-Haskell matrix for determining Love wave dispersion", *Geophysics*, 10, pp.35-43.
14. Schwab, F., Nakanishi, K., Cuscito, M., Panza, et al.,(1984) "Surface wave computations and the synthesis of theoretical seismograms at high frequencies", *Bull. Seismol. Soc. Am.* 74, pp.1555-1578.
15. Shapiro, N.M. (2000), "Average shear-wave velocity structure of the Kamchatka peninsula from the dispersion of surface waves", *Earth Planets Space*, 52, pp.573-577.

(접수일자 2003. 9. 19, 심사완료일 2004. 1. 26)