

러브파의 위상속도 분산정보에 관한 해석적 연구

Analytical Study for dispersed Phase Velocity Information of Love Waves

이일화

Il-Wha Lee

Abstract

This paper investigated the dispersion characteristics of horizontal surface waves as means to apply conversional SASW techniques. To verify this proposal, 3D finite element analysis and Transfer matrix solution were performed. SH wave(Love waves) has the some advantages in comparison with Rayleigh wave. Representatively, Love wave has a characteristics not affected by compression wave. These characteristics have the robust applicability for the surface wave investigation techniques. In this study, for the purpose of employing Love wave in the SASW method, the dispersion characteristics of the Love wave was extensively investigated by the theoretical and numerical approaches. The 3-D finite element and transfer matrix 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. Preliminary, numerical simulations and theoretical solutions indicated that the dispersion characteristics of horizontal surface wave(Love waves) can be sufficiently sensitive and applicable to SASW techniques.

Keywords : Love wave(러브파), Rayleigh wave(레이리파), Roadbed stiffness(노반강성), Dispersion(분산), SASW(Spectral Analysis of Surface wave)

1. 서론

현재까지 토목분야에서 지반조사를 위한 대표적 표면 파탐사에는 SASW(Spectral Analysis of Surface wave)기법, 정상표면파기법(Steady state Rayleigh Wave Method) 그리고 MASW(Multichannel Analysis of Surface Wave)기법 등이 있다. 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 비파괴 지반조사기법으로 활용되고 있다. 최근에는 디지털 신호처리기술의 발달과 함께, 더욱 정확해진 자료분석 알고리즘을 통하여 표면파탐사 관련 기술이 향상되어 3차원의 공간연속적인 시험이 가능해졌다.

이러한 표면파 기법에서는 레일리파의 수직성분 즉, 전파 방향의 수직운동에 대한 위상분산정보가 주로 이용되었는데,

이는 표면파중 레일리파의 수직성분에너지가 가장 크기 때문이다. 그러나 지층구조가 복잡하고 층 사이에 강성차가 큰 자연지반이나, 포장구조체 등에서는 그 해상도가 낮아 역산(Inversion)해석에 많은 어려움이 있었다. 해상도가 낮아지는 이유로는 고차모드가 저차모드에 영향을 미치는 모드점프현상과 현장시험 가진원(source)의 에너지가 작고 가진원과 감진기와의 간격이 좁기 때문에 상당량의 체적파 성분에 의해 분산곡선상에서 발생하는 오차 때문이다. 또한 레일리파를 이용한 이론역산해석에서는 수직 및 수평방향 성분이 동시에 고려되기 때문에 정확한 이론 역산해를 구하는 것도 어려웠다.

본 논문에서는 이러한 문제점을 보완하기 위하여 SASW 기법을 바탕으로 수평표면파의 적용성을 검토하였다. 수평표면파의 대표적인 종류로는 레일리파의 수평성분과 러브파가 있다. 이 중 러브파의 가장 큰 특징은 이론적으로 압축체적파 및 레일리모드에 의한 영향이 없고 한 방향에 대한 파동방정식만 만족하면 되기 때문에 이론해를 구하는 것이 유리하다. 이러한 장점을 표면파탐사에 도입하여 수평표면파의 주파수영역해석에 의한 동적지반물성치의 결정에 있어

그 신뢰도와 해상도 향상을 검토하였다. 수평표면파의 분산특성연구를 위하여 본 논문에서는 3차원 유한요소해석과 이론적 해를 통하여 파 전파특성을 검토하였다. 대표 해석단면을 이용하여 3차원 유한요소해석에서는 가진방향 및 감진방향별로 표면파의 적용성을 검토하였고 수정전달행렬법[Tzong, 1983]을 이용한 이론해에서는 각 파의 모드별 분산특성을 검토하였다.

2. SASW기법

SASW(Spectral-Analysis-Of-Surface-Waves; 주파수 영역 표면파 해석) 기법은 충격으로 발생된 응력파의 전파를 이용하여 지반의 강성을 평가하는 탄성파해석기법이다. SASW시험은 기본적으로 지표면이나 구조물의 표면에서 물리적인 충격이나 진동을 가하여 응력파를 발생시키는 것으로 시작된다. 충격이나 진동에 의해서 발생한 응력파는 지반이나 구조물 매체를 통하여 사방으로 전파되어 나가는데, 진동원에서 일정 거리만큼 떨어진 위치에 설치된 감진기에 의해 지반이나 구조물의 진동을 측정하게 된다. 충격 또는 진동에 의해 발생된 응력파의 측정은 가진원과 일직선 상에 위치한 두 지점에서 이루어지는데, 이는 충격 지점에서 출발하여 전파되어 나가는 응력파가 첫 번째 감진기에서 두 번째 감진기까지 도달하는데 소요되는 시간을 측정하여 응력파 전파 속도를 측정한다. 이러한 응력파 전파 속도의 결정은 FFT를 이용하여 여러 가지 주파수 성분의 정현파에 대해 동시에 이루어지게 되는데 일반적으로 약 400~800개 주파수의 정현파에 대한 전파 속도를 단 한 번의 실험으로 구할 수 있다.

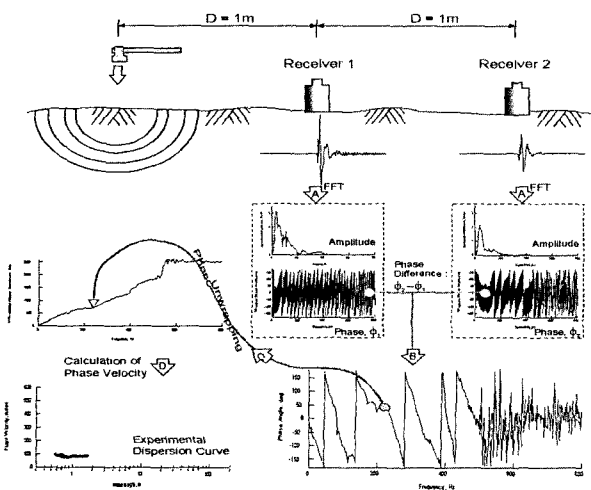


Fig 1. SASW(Spectral Analysis of Surface wave) test scheme [Joh, 2000]

각 시험조건 및 주파수별로 복합실험분산곡선을 결정한 후, S-파 속도 주상도의 도출을 위한 역산해석(inversion analysis)이나 반복적 정모델링해석(iterative forward modeling analysis)을 수행하게 된다. 이는 근본적으로 S파 속도주상도를 가정하고 그에 대하여 이론적으로 계산된 분산곡선, 즉, 이론분산곡선(theoretical dispersion curve)과 실험분산곡선이 일치될 때까지 반복적으로 전단파 속도 주상도의 가정을 변화시켜나가는 것이다. 이러한 전단파 속도 주상도의 가정에 대한 수정이 최적화 이론에 의해서 수행이 되면 이를 역산해석이라고 한다.

3. 층상구조에서의 탄성파 전파특성

지반 내 매질을 전파하는 탄성파는 체적파로서 크게 P파와 S파 두가지 종류가 있다. S파는 전파되는 면을 기준으로 보았을 때, 수직으로 매질을 전단시키는 SV파(수직파)와 수평으로 매질을 전달시키는 SH파(수평파)로 구성된다. 따라서 지반에서 전파되는 체적파는 P파, SV파, SH파 세가지 종류가 있고 할 수 있다. 표면파는 지표면을 따라 전파되는 탄성파로 이중 러브파는 상부층의 강성이 약한 경우에만 존재하며 레일리파는 자유지표면이 있을 경우 항상 발생하는 파이다. 일반적으로 탄성파탐사에서 표면파는 통상 레일리

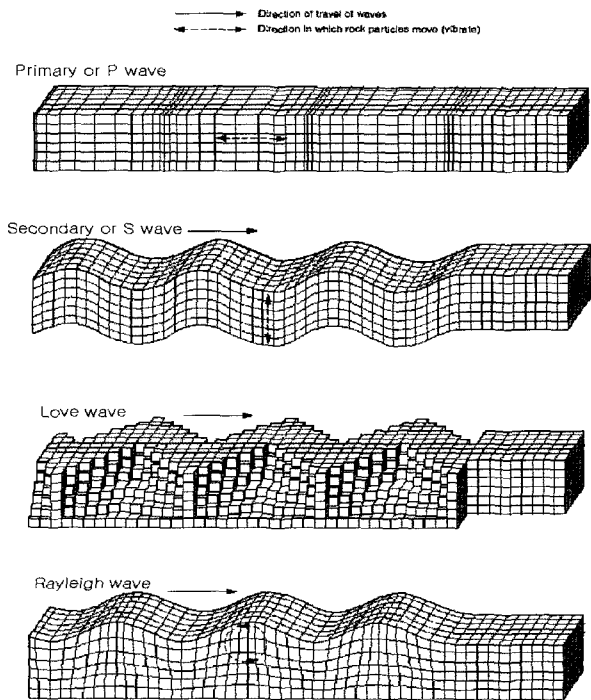


Fig. 2. Particle motions of the ground by the each elastic wave [Bolt, 1976]

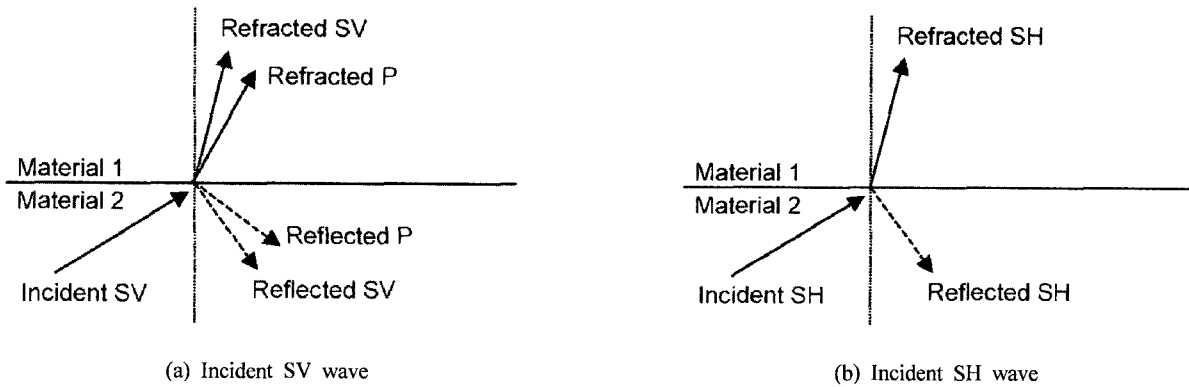


Fig. 3. Refracted and reflected waves by incident waves

파를 말한다. 탄성파의 에너지비율을 보면 체적파가 33%, 표면파가 67%로 표면파가 차지하는 비중이 크다. 표면파의 에너지는 지표면 부근에 집중되며 지표면 하부심도로 갈수록 지수함수적인 감쇠를 나타내어 대략 한 파장 정도의 심도 이상에서는 거의 소멸되는 특성을 갖고 있다. 이는 표면파의 전파속도가 한파장 이내의 심도구간 지층상태에 따라 영향을 받게 됨을 의미한다. 또한 표면파는 주파수에 따라 그 전파속도가 변화하는데, 이를 표면파의 분산(Dispersion)이라고 한다. 이러한 이유때문에 지반강성평가시에는 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 3에 도시되어 있는 것처럼, S파중 SV파의 경우는 P파에 대한 반사파와 굴절파가 생긴다. 즉, SV파가 입사되어도 SV파 성분외에 P파의 성분이 반사와 굴절시 추가로 발생하게 된다. 이러한 P파와 SV파 성분이 레일리파를 생성하게 된다. 이러한 현상은 P파가 입사되었을 때도 동일하게 나타난다. 그러나 SH파의 경우는 굴절파와 반사파가 SH파뿐이며 이 반사파가 러브파를 생성하게 된다. 즉, P파 성분이 발생하지 않기 때문에 근접지반에서 P파에 의한 상호교란도 발생하지 않는다.

3.1 레일리파(Rayleigh Waves)

3차원의 균질한 무한체에서는 압축파와 전단파 두가지의 해만 존재하지만 자유장을 가지고 있는 반무한체의 지표면에서는 또 다른 형태의 파인 레일리파가 존재한다. 이파는 반무한체의 자유장 부근에 국한되어 존재하며 깊이가 깊어

질수록 크기는 급속히 감쇠된다. 레일리파는 수평성분과 수직성분이 중첩된 파이며, 수직성분의 크기가 수평성분의 크기보다 크다. 두성분의 파는 지표면에서는 같은 크기의 에너지를 가지지만 깊이에 따라서는 다른 감쇠비를 가진다. 깊이에 따라 에너지감쇠율의 차이로 인하여 90°의 위상차를 가지는 두 성분의 중첩된 파는 전파방향의 반대방향으로 타원궤적을 따라 전파한다.

3.2 러브파(Love Waves)

등방성의 탄성반무한체에서는 P파, S파, 레일리파만 발생하지만, 반무한체위에 상대적으로 약한 강성을 가진 이질층이 존재하는 경우에는 러브파가 발생된다(그림 4). 러브파는 상부층내에 입사된 SH파의 다중반사(Multiple Reflections)에 의해 발생한다. 그림과 같이 반무한체 상부에 강성이 상대적으로 약한 지반이 놓여있을 때, x방향으로 전파되는 러브파는 y방향으로만 입자변위가 발생하고 다음방정식으로 표현될 수 있다.

$$v(x, z, t) = V(z)e^{i(k_1x - \omega t)} \quad (식 1)$$

여기서 v 는 y방향의 입자변위, ω 는 각주파수, t 는 시간, $V(z)$

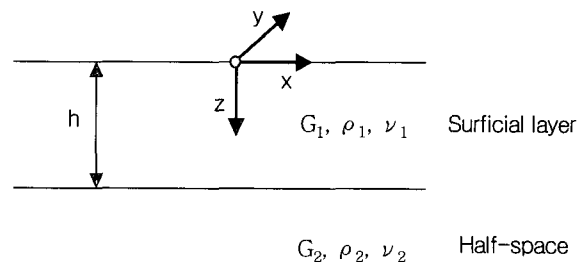


Fig. 4. Ground condition for which Love waves can exist

$$\left(\frac{G_1}{\rho_1} < \frac{G_2}{\rho_2} \right)$$

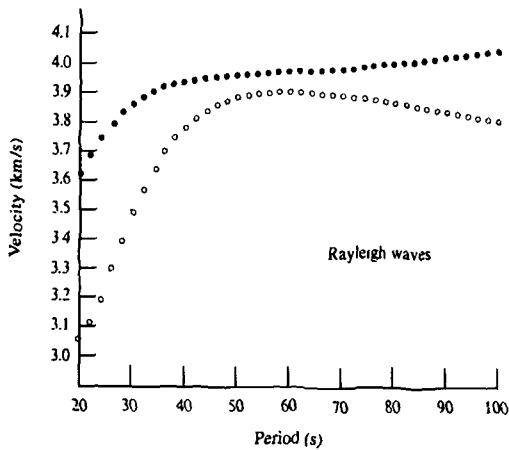
는 깊이의 변화를 나타내고 k_L 은 러브파의 파수를 나타낸다. 러브파는 반무한체와 상부이질층에서 반드시 S파에 대한 파동방정식을 만족하여야만 한다. 그림 4와 같은 조건에서 각 층에서의 러브파의 파동방정식은 경계조건에 차이로 인하여 상부이질층과 반무한체로 구분되며 반무한체에서는 반사에너지가 없고 깊이 h 의 경계면에서 변위가 동일하다고 가정하면, 각 층에서의 y 방향 변위를 다음 식 2,3과 같이 나타낼 수 있다.

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

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

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. 때문에 러브파는 상부층에만 존재하는 SH파로 표현되기도 한다. 그림 4와 같이 단순화된 지반모델에서 반무한체(저주파영역)에서 상부층(고주파영역)까지 러브파의 속도는 다음 식 4와 같다.

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



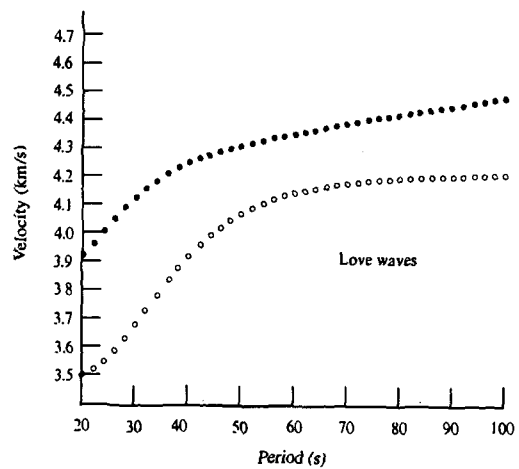
(a) In case of the Rayleigh wave

3.3 러브파의 분산특성

다층구조에서 러브파는 파장에 따라 속도가 변화하는데, 이는 주파수에 따라 위상이 달라짐을 뜻하며 레일리파와 마찬가지로 분산특성을 가진다. 이론적으로 러브파가 발생할 수 있는 지반조건일 때 러브파는 밀도의 변화가 없으며 등방균질의 층상구조인 경우, SV파와 P파의 영향을 받는 레일리파에 비하여 SH파로만 구성되는 러브파의 전파속도가 빠르다.

지구물리탐사분야에서 러브파의 분산특성을 활용할 경우, 입력가진원은 주로 광대역지진기록이 이용되었으며, 특성상 장주기성분만 사용되었다. 분산곡선은 일반적으로 군속도(group velocity)에서 결정된 값을 사용하였다. 그림 5는 표면파의 분산특성을 비교하기 위하여 Gutenberg모델에 대한 레일리파와 러브파의 위상속도와 군속도의 상관관계를 나타낸 그림이다. Gutenberg모델은 24개의 층으로 구성되어 있으며 각 층은 각각의 밀도와 압축파 및 전단파 값을 가지고 있으며 깊이에 따라 강성이 증가하는 전형적인 자연 지반이라 할 수 있다. 해석은 유한차분방정식을 이용하여 고유치해석을 수행하였다. 그림 5에서 c 는 위상속도를 나타내고 U 는 군속도를 나타내며 탁월모드만 비교한 경우이다. 그림에서 알 수 있듯이 위상속도와 군속도 모두 레일리파가 크게 계산되며 위상속도보다 군속도가 민감한 것으로 나타났다. [Aki, 2002]

그림 6은 A. M. Dziewonski와 A. L. Hales[1972]가 밴드패스필터의 오차율을 검토하기 위하여 수행한 수치해석결과에 대한 그림이다. 사용된 밴드패스필터는 Gaussian필터가 적용되었다. 맨틀에서 발생시킨 인공지진파를 가진원으로 사용하였고 해석모델은 Gutenberg-Bullen A' 모델을 사



(b) In case of the Love wave

Fig. 5. Phase and group velocity of the fundamental mode for Gutenberg model[Aki, 2002]

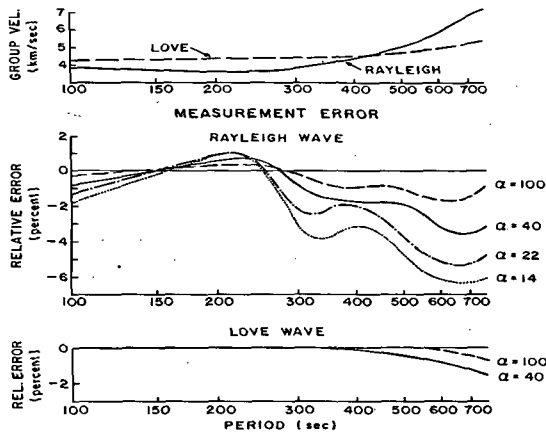


Fig. 6. Relative error of the Love and Rayleigh wave's filter coefficients[Dziewonski & Hales, 1972]

용하여 레일리파와 러브파의 군속도의 분산특성을 계산하였다. 그림에서 주기별 각 파의 상대오차를 보면 필터계수 (a)에 상관없이 레일리파보다 러브파의 상대오차가 매우 작음을 알 수 있다. 이는 레일리파에 비하여 러브파 신호가 유리함을 나타내며, 군속도 사용시 그 만큼 신호처리 및 필터의 적용이 용이하다는 것을 나타낸다.

4. 유한요소해석에 의한 표면파의 분산특성

표면파의 전파해석에는 다양한 수치해석적 기법들이 적용되고 있는데, 전달행렬법, 동강성행렬법, 유한차분법, 수치적분, 경계요소법, 스펙트럴요소법 등이 있다. 각 해석법 별로 장단점이 있으며, 요소를 사용하는 스펙트럴요소법, 유한차분법, 유한요소법 등이 복잡한 층상구조해석에 유리하다. 본 절에서는 3차원 유한요소해석을 통하여 레일리파의 수직, 수평성분과 러브파성분의 분산 특성을 검토하였다.

4.1 3차원 유한요소해석

유한요소해석 단면은 4(H)×4(W)×5(L)m의 1/4모델이며 외부영역은 Abaqus에서 제공되는 무한요소를 사용하였다. 해석에 사용된 물성값은 단위중량 1.7t/m³, 포아슨비 0.333이며 전단파속도는 지반의 해석조건에 따라 110, 220m/sec를 사용하였다. 해석은 시간영역에서의 해석법 중 안정성이 높은 Newmark-β법을 사용하였으며 계산에 사용된 총 해석 시간은 0.115초이다. 적분시간간격은 최소 주기를 가진 파장이 요소를 통과하는 시간의 0.1배 보다 작도록 하였다. 본 해석에서는 적분시간간격은 0.45msec를 사용하여 오차를 최소화하였다. 입력하중은 수직방향 및 방사방향으로 가진

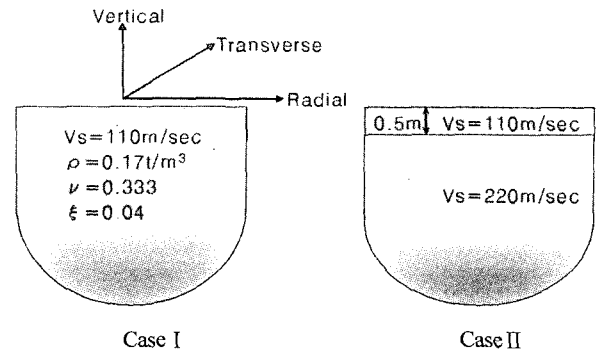


Fig. 7. Analysis models and parameters

되었으며, 측정데이터는 수직방향에 대하여 수직, 방사성분과 방사방향에 대하여 방사성분을 측정하여 각각 비교, 분석하였다. 사용된 입력하중으로는 half-sine 형태의 충격하중을 사용하였다.

해석조건은 그림 7과 같이 지반이 균질한 반무한체인 경우(Case I)와, 상부층의 두께가 0.5m이고 각 층의 강성이 110, 220m/sec인 경우(Case II)의 2가지 조건을 이용하여 해석하였다. 레일리모드의 경우에는 수직하중에 대한 수직(P, SV)성분(Vertical component), 러브모드의 경우에는 횡단하중에 대한 횡단(SH)성분(Transverse component)에 대한 분산특성을 평가하였다. 분산곡선은 전달함수를 이용하여 각 조건의 파장별 위상속도로 계산되었다.

4.2 반무한탄성지반에서의 분산특성

반무한탄성지반(Case I)에 대해서 수행한 3차원 유한요소해석은 두 가지 경우이다. 수직방향 가진에 대한 수직방향의 분산특성과 횡단방향 가진에 대한 횡단방향 분산특성을 비교하기 위한 해석을 수행하였다. Case I에 대한 유한요소해석 결과를 그림 8과 그림 9에 도시하였다.

해석결과 각 파장별로 수직성분은 약 100m/sec의 평균위상속도를 나타내고 횡단성분은 약 110m/sec의 평균위상속도를 나타내었다. 수직성분은 포아슨비가 고려된 레일리파의 위상속도라 할 수 있으며, 횡단성분은 입력값과 동일한 전단파(SH)속도라 할 수 있다. 분산곡선상에서 각 측정조건간의 큰 차이는 없는 것으로 나타났으며 약 0.6~4m파장의 범위에서의 위상속도가 입력값과 일치하는 것으로 나타났다.

전단파 속도가 깊이에 따라 증가하는 지층구조에서만 러브파가 발생하기 때문에, Case I에서 확인된 횡단방향성분파는 SH성분의 전단파라고 할 수 있다. 또한, 그림 9에서 횡단방향 성분의 위상속도가 수직방향 성분의 위상속도보다 대체적으로 10% 정도 더 크게 결정되었다는 것과 일반적으로 전단파속도가 레일리파보다 10%정도 더 크다는 사

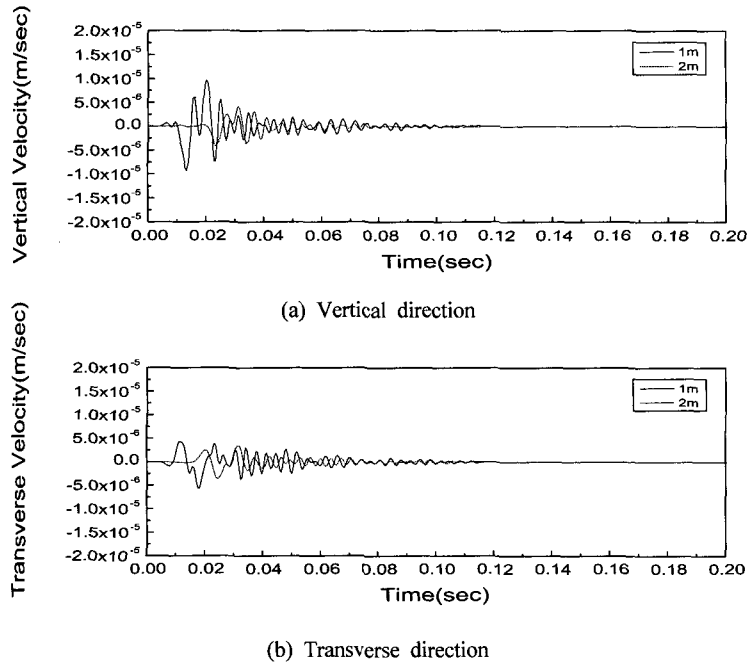


Fig. 8. Velocity time histories for the direction (Case I)

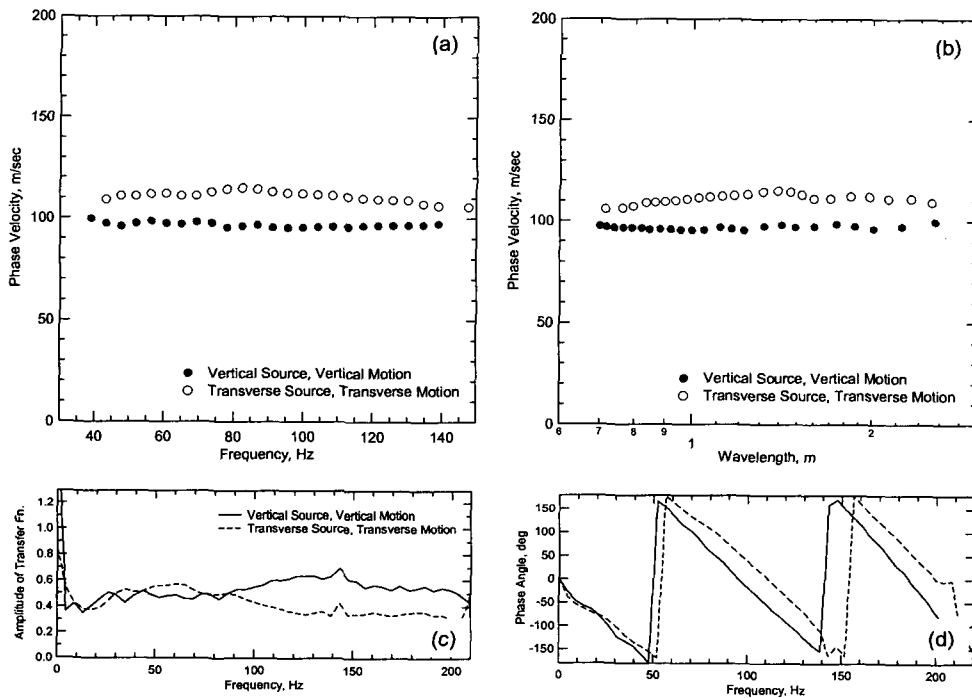


Fig. 9. Phase velocity dispersion curves and transfer functions (Case I)

실을 참고할 때, 그림 9의 횡단방향 성분의 파에는 SH성분의 전단파가 지배적이라 할 수 있다.

전달함수 진폭스펙트럼(그림 9의 c)의 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 SH성분의 파동의 에너지 감쇠가 표면파의 경우보다 더 빨리 일어난다는 사실을 염두에 둘

때 합리적인 현상이라고 판단된다. 한편, 전달함수의 위상각 스펙트럼(그림 9의 d)의 경우도 특별한 기록이 없이 전형적인 톱니모양의 경향을 보여주고 있다.

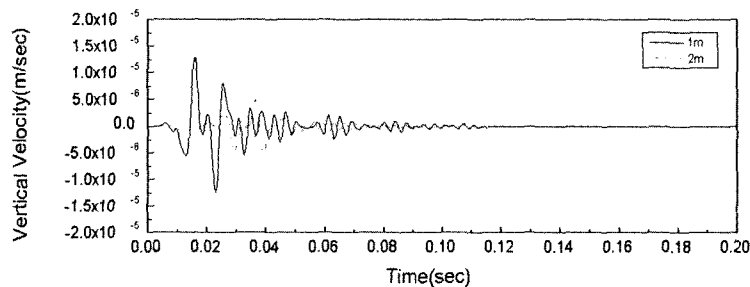
4.3 2층 반무한지반에서의 분산 특성

Case II는 단단한 층 위에 연약한 지층이 존재하는 2층 구조 지반으로서, 깊이에 따라 강성이 증가하는 지반을 모사한 것이다. Case II의 지반에 대해서 수직방향 가진에 대한 수직방향 진동성분, 방사방향 진동성분, 횡단방향 가진에 대한 횡단방향 진동성분을 구하였다. 수직방향 가진에 대한 수직방향 진동성분은 레일리파의 수직성분을, 횡단방향 가진에 대한 횡단방향 진동성분은 러브파의 성분을 계산하고자 하였다. 한편, 레일리파의 수평성분이 어떻게 나타나는지도 확인하기 위하여 수직방향 가진에 대한 방사방향 진동성분을 계산해 보았다. 그림 10은 각 진동성분별 시간이력곡선으로서 그림 8과 달리 횡단성분 속도의 크기가 크게 나타나는데, 상부층에서 다중반사된 SH파(러브파)에 의한 것으로 판단된다.

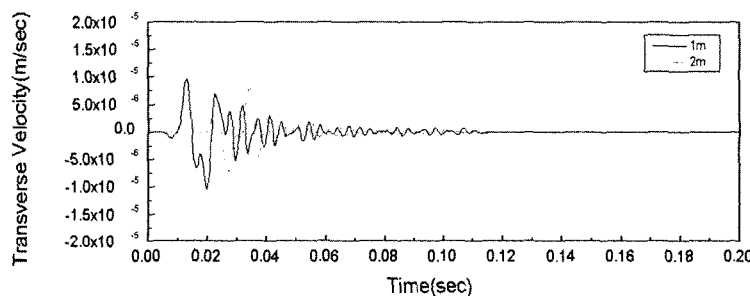
Case II에 대한 유한 요소해석 결과는 그림 11에 도시한 바와 같다. 그림 11의 (b)의 분산곡선에 나타나 있는 표면파의 파장은 0.4m~2.5m의 범위에 있다. 3차원 유한요소해석에 사용된 요소의 크기가 10cm 이기 때문에 1.0m보다 작은 파장에 대해서는 신뢰성이 떨어지기는 하지만, 0.4m 파장에 대한 위상속도가 이론적으로 추정되는 90m/sec인 것으로 미

루어 볼 때 0.4m이상의 파장에 대한 위상속도는 신뢰 가능한 결과라고 판단된다.

그림 11의 위상속도 분산곡선에서 확인할 수 있듯이, 레일리파 수직성분은 레일리파 수평성분의 경향과 거의 일치하지만, 러브파의 성분과는 차이가 있는 것으로 나타났다. 레일리파 수직 및 수평성분 위상속도 분산곡선은 약 0.8m의 파장을 경계로 하여 90m/sec에서 180m/sec까지 두 단계로 증가하고 있고, 러브파 위상속도는 약 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 레일리파의 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 전이구간에서는 급격한 증가를 보이고 있다. 반면, 레일리파에서는 약 130Hz(파장 0.8m)를 경계로 위상속도 분산곡선의 기울기가 급격히 달라지고 있다. 한편, 레일리파의 경우 하부지층의 영향이 비교적 작은 파장(약 0.8m)에서부터 나타나기 시작하지만, 러브파의 경우는 큰 파장(약 1.4m)에서부터 반영되고 있다. 즉, 러브파의 경우는 표층두께의 0.5m의 약 3배에 해당되는 파장에 이르러서야 하부지층의 존재를 감지하는 것이다. 또한, 표층두께의 5배에 해당되는 2.5m의 파장에 이르러서도 위상속도는 145m/sec밖에 되지 않는 반면, 레일리파의 경우는 180m/sec에 이르고 있어,



(a) Vertical direction



(b) Transverse direction

Fig. 10. Velocity time histories for the direction (Case II)

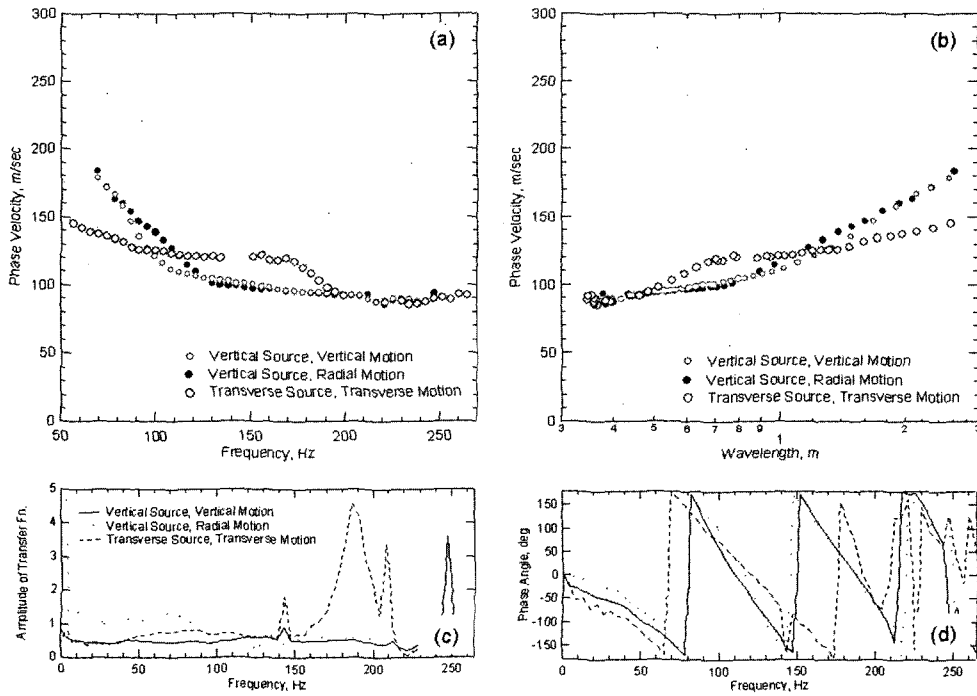


Fig. 11. Phase velocity dispersion curves and transfer functions (Case II)

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 레일리파가 러브파보다 더욱 민감하였고, 상부지층의 강성과 두께 측면에서는 러브파가 레일리파보다 더욱 민감하게 나타났다.

5. 전달행렬법에 의한 표면파의 분산

레일리파와 러브파의 이론분산특성을 검토하기 위하여 그림 7의 Case II와 같은 지반조건인 경우에 대하여 각 파의 분산특성을 전달행렬법[Tzong, 1983]을 이용하여 계산하였다. 전달행렬법에서는 주어진 주파수와 파수에 대한 변위-응력 벡터가 구해지며, 주파수영역에서 변위-응력 벡터를 구하기 위하여 Hankel transform 형태의 파수적분을 수행한다.

각 파의 모드는 3차 모드까지 계산되었으며, 각 모드별 위상속도를 그림 12, 13에 표시하였다. 위상속도가 증가할수록 모드의 차수도 증가하면서 cut-off주파수를 기준으로 고차모드가 형성이 된다. 주어진 주파수별 최소 위상속도를 가지는 모드가 탁월모드(fundamental mode)이다. SASW 해석시에는 보편적으로 탁월모드만 사용하여 역산해석을 수행하는데, 자연지반인 경우, 분산특성은 저차모드에 가장 탁월하며 지반의 특성을 가장 잘 대표한다고 할 수 있다.

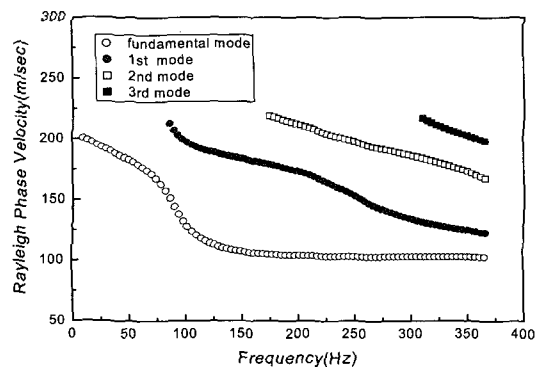


Fig. 12. Dispersion characteristics of the Rayleigh wave modes

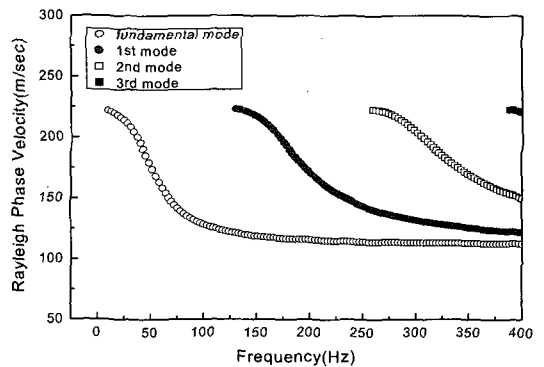


Fig. 13. Dispersion characteristics of the Love wave modes

그림 12, 13은 레일리파와 러브파의 분산특성을 비교한 그림으로서 탁월모드에서는 층별 강성차를 충분히 표현할

수 있으나 고차모드로 갈수록 레일리파의 민감도는 떨어지는 반면 러브파의 민감도는 동일한 형태를 유지한다. 전달행렬법을 이용한 이론해에서도 러브파의 위상속도가 약 10% 정도 더 크게 계산된다.

6. 결론

SASW기법을 이용한 지반강성 평가의 신뢰도 및 해상도를 높이기 위하여 러브파의 분산특성을 연구하였다. 이 연구에서는 이론해와 3차원 유한요소해석을 이용하여 각 표면파의 분산특성을 연구하였다. 유한요소해석에서는 균질한 반무한체와 이층반무한체모형을 이용하여 상부층을 통하여 전파되는 전단파의 분산특성을 검토하였으며, 이론해에서도 동일한 해석모형을 이용하여 각 파의 모드별 분산특성을 검토하였다. 연구를 통하여 도출한 결론은 다음과 같다.

- (1) 유한요소해석 결과, 균질한 지반의 경우 러브파의 분산곡선은 레일리파의 분산곡선보다 더 평탄한 경향을 가진다. 다층구조 지반의 경우, 레일리파의 분산곡선은 하부지층의 영향이 잘 반영된 반면, 러브파의 분산곡선은 상부지층의 강성과 두께에 더 민감하였다. 즉, 각 파의 분산특성은 해석지반조건에 따라 다르게 반영되며 러브파의 경우, 충분한 가진원과 감진기간의 거리가 확보된다면 지반강성평가에 효과적으로 적용할 수 있다.
- (2) 전달행렬법으로 계산된 각 파의 분산은 모드별로 유사한 특성을 가지는 것을 확인하였으며, 고차모드로 갈수록 레일리파 분산곡선의 민감도는 떨어지는 반면 러브파 분산곡선의 민감도는 동일한 형태를 유지하였다. 균

질한 반무한체의 경우, 주파수별 위상각속도의 값이 러브파는 입력된 전단파속도와 같은 값을 가지며 레일리파는 약 10%정도 작은 값을 가진다.

- (3) 상기의 러브파 분산특성을, 기존 SASW기법에 적용하면 지반강성 평가의 신뢰성과 해상도를 향상시킬 수 있는 것으로 사료된다. 특히 저심도 지반특성이 중요한 지반조사 분야에(노반, 기반암 깊이, 사면 활동면 조사 등) 효과적인 것으로 사료된다.

참고 문헌

1. 조성호, 강태호 (2000), "지반의 전단파속도 토모그래피 영상을 구하기 위한 Multi-Channel Tomographic SASW (MTSASW) 기법", 대한토목학회 가을학술발표회논문집, pp.387-390
2. ABAQUS User Manual Ver. 5.7, Finite element software package, Hibbit Karlsson & Sorenson, Inc.
3. Bojan, B. Guzina(2000), "Dynamic soil sensing via horizontally-polarized shear waves", Proceeding of sessions of Geo-Denver 2000, ASCE Geotechnical special publication No. 108, 95~108
4. Dziewonski, A. M., and Hales, A. L. (1972), "Numerical Analysis of Dispersed Seismic Waves," Geosciences Division, University of Texas at Dallas, pp.39-85.
5. Kramer, S. L.(1996), "Geotechnical earthquake engineering", Prentice-Hall, Upper Saddle River, NJ.
6. Sung-Ho Joh(1996), "Advances in the data interpretation technique for spectral-analysis-of-surface-waves(SASW) measurements", Ph.D Dissertation, Univ. of Texas at Austin.
7. Tzong, T. J. and Penzien, J. (1983), "Hybrid modelling of soil-structure interaction in layered media", Rep. No. UCB/EERC-83/22, Earthquake Engineering Research Center, Univ. of California, Berkeley, Calif.