

표면파기법을 이용한 지반강성평가시 수평성분파의 적용성 평가

Assessment for Application of Horizontal Component Wave applied to Surface Wave Method for Ground stiffness Investigation

이일화¹⁾, Il-Wha Lee, 조성호²⁾, Sung-Ho Joh

1) 한국철도기술연구원 주임연구원, Researcher, Korea Railroad Research Institute

2) 중앙대학교 토목공학과 조교수, Assistant Professor, Dept. of Civil Engineering, Chungang University

SYNOPSIS : The SASW method is a promising and effective way of profiling ground stiffness nondestructively. This method has been successfully applied to many geotechnical sites, but significant lateral variability, embedded obstacles, and pavement lead to the low reliability. To improve these problems, the horizontal wave component has been introduced to improve the reliability of the stiffness profile determined by the SASW method. To understand dispersion character of the horizontal component wave propagation in artificial profiles, FEM analysis had been performed. Used models are homogeneous half-space and two layered half-spaced layers.

Key words : Love wave, Rayleigh wave, dispersion, wave propagation, SASW, FEM

1. 서론

토목분야에서 지반조사를 위한 표면파탐사는 레일리파 즉, 전파방향의 수직운동에 대한 파동특성을 주로 이용하여 왔다. 그러나 지층구조가 복잡하고 층간 강성차가 큰 경우, 포장구조체 등에서는 그 해상도가 낮아 역산해석시에 많은 어려움이 있었다. 해상도가 낮아지는 이유로서 레일리파의 일차모드만을 사용하는 일반적인 표면파기법에서 고차모드가 저차모드에 영향을 미치는 모드점프현상과 지반조사분야에서 사용되는 가진원의 에너지가 작고 가진원과 감진기와의 간격이 좁기 때문에 감쇠되지 않은 체적파에 의해 분산곡선에 오차를 유발하게 된다.

본 논문에서는 이러한 문제점을 보완하기 위하여 표면파탐사에 수평성분파의 파동특성을 이용한 분산특성을 연구하였다. 이층반무한 층상지반에서의 수평성분파(Sh파) 즉, 러브파의 가장 큰 특징은 압축체적파 및 레일리모드에 대한 영향이 없다는 것이다. 이러한 특징을 표면파탐사에 도입하여 수평성분파의 스펙트럼해석에 의한 동적지반물성치의 결정에 있어 그 적용성과 정확도를 평가하였다.

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 전파시키는 수직파(Sv파)와 수평으로 매질을 전달시키는 수평파(Sh파) 두가지파로 구성된다. 표면파는 지표면을 따라 전파되는 S파로 이중 러브파는 특별한 지층구조에서만 존재하며 레일리파는 자유지표면이 있을 경우 항상 발생하는 파로 탄성파탐사에서 표면파는 통상 레일리파를 말한다. 이러한 이유때문에 지반강성평가시에는 주로 표면파성분이 사용된다.

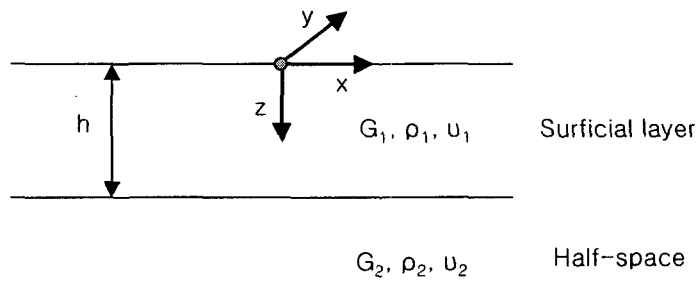


그림 1. 러브파가 발생하는 지반조건($G_1/\rho_1 < G_2/\rho_2$)

러브파가 발생하게 되는 지반조건은 그림 1과 같다. 러브파는 상부층내에 입사된 S_h 파의 다중반사(Multiple Reflections)에 의해 발생한다. 그림과 같이 반무한체 상부에 강성이 상대적으로 약한 지반이 놓여있을 때, x 방향으로 전파되는 러브파는 y 방향으로만 입자변위가 발생한다. 그림 1과 같은 조건에서 각 층에서의 러브파의 파동방정식은 경계조건의 차이로 인하여 상부이질층과 반무한체로 구분되며 반무한체에서는 반사에너지가 없고 깊이 h의 경계면에서 변위가 동일하다고 가정하면, 각 층에서의 y방향 변위를 다음 식으로 나타낼 수 있다.

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

$$v(x, z, t) = 2A_1 \cos \left[\omega \left(\frac{1}{v_{s1}^2} - \frac{1}{v_L^2} \right)^{\frac{1}{2}} z \right] \exp \left[-\omega \left(\frac{1}{v_L^2} - \frac{1}{v_2^2} \right)^{\frac{1}{2}} (z - h) \right] e^{i(k_L x - \omega t)} \quad (z \geq h) \quad (2)$$

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 S_h 파로 표현되기도 한다.

3. 유한요소해석에 의한 표면파의 분산특성

3.1 해석 모델 및 조건

해석에 적용된 모델의 2차원 축대칭 모델로서, 단면은 $30 \times 20m$ 의 영역이 사용되었으며 외부영역은 반무한체로 가정하였다. 해석에 사용된 물성값은 단위중량 $1.7t/m^3$, 포아슨비 0.333이며 전단파속도는 지반의 해석조건에 따라 55, 110, 220, 440m/sec를 사용하였다. 해석조건은 그림 2와 같이 지반이 균질한 반무한체인 경우(Case I), 상부층의 두께가 1m이고 각 지층의 강성이 220, 440m/sec인 경우(Case II), 강성 조건은 Case II와 동일하고 상부층의 두께가 0.5m인 경우(Case III), 상부층의 두께가 1m이고 상부층의 강성이 반무한체의 1/4인 경우(Case IV)의 4가지 조건을 이용하여 해석하였다. 밀도와 포아슨비, 감쇠비는 3가지 조건에서 동일하고 해석조건별 지반의 강성 및 상부층의 두께만 변화시켰다.

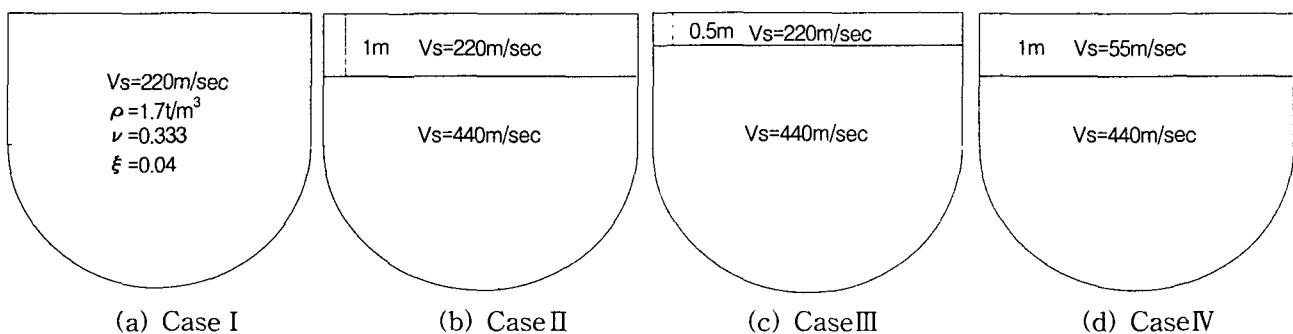


그림 2. 해석 조건

입력하중은 수직방향 및 수평방향으로 가진되었으며 측정데이터는 수직방향에 대하여 수직, 수평성분, 수평방향에 대하여 수평성분을 측정하여 각각 비교, 분석하였다. 사용된 입력하중은 half-sine형태의 충격하중이 사용되었다.

3.2 수직 및 수평 성분파의 유한요소해석

수평성분 표면파의 적용성을 검토하기 위하여 각 해석조건을 이용하여 수직성분파의 특성을 각 해석 조건별로 검토하였다. 해석에 적용된 모델은 2차원 축대칭모델로서 지반내 Sh성분의 전파특성을 모사할 수 없기 때문에 해석에서는 2차원해석에서 얻을 수 있는 수평성분 즉 압축체적파의 진행방향으로 발생하는 횡파를 검토하였다. 이 파는 압축체적파의 에너지 진행방향과 일치하지만 레일리파의 수평성분이 라고 볼 수 있다. 이러한 표면파 에너지들은 유사한 분산특성을 가지며, 지반의 특성에 따라 적용성이 다르게 평가될 수 있다. 본 해석에서는 기존 SASW기법에서 적용되었던 레일리파의 수직성분의 분산특성을 바탕으로 수평성분파의 분산특성을 검토하였다. 분산곡선은 전달함수를 이용하여 각 조건의 주파수별 위상속도로 계산되었다.

그림 3의 (a)는 해석모델의 정확도를 확인하기 위하여 지반의 강성이 균질한 경우를 해석하였다. 감진기의 위치는 가진원에서 2m, 4m에서 획득된 자료를 사용하여 속도응답 자료를 얻었다. 해석결과는 약 500Hz이상의 고주파(단파장)성분을 제외한 영역에서는 입력값과 일치하는 것을 나타내고 있다.

그림 3의 (b)는 지표면에서 1m까지의 전단파속도가 하부지반의 1/2인 경우 즉, 깊이에 따라 강성이 증가하는 경우로서 자연지반을 대표한다. 표면파의 파장이 약 1.5m까지는 200m/sec의 일정한 위상각속도를 보이고 있지만 그 이후에서는 위상각속도가 400m/sec까지 증가한다. 분산곡선상에서는 각 가진방향 및 감진기의 위치에 따른 큰 차이는 없다고 할 수 있다. 주파수별 위상각속도는 감진기위치가 다른 경우에도 동일한 경향을 보이지만 주파수응답스펙트럼은 각 경우별로 감진기의 방향에 따라 주파수별로 다른 기여도를 나타내고 있다. 수평감진인 경우, 수직감진에 비하여 응답분포의 크기가 저주파대역이 상대적으로 큰 것으로 나타났다. 이는 가진력 및 감진방향에 따른 차이이며, 충분한 수평전단력을 발휘할 수 있는 가진기를 사용한다면 비슷한 패턴을 나타낼 것으로 판단된다.

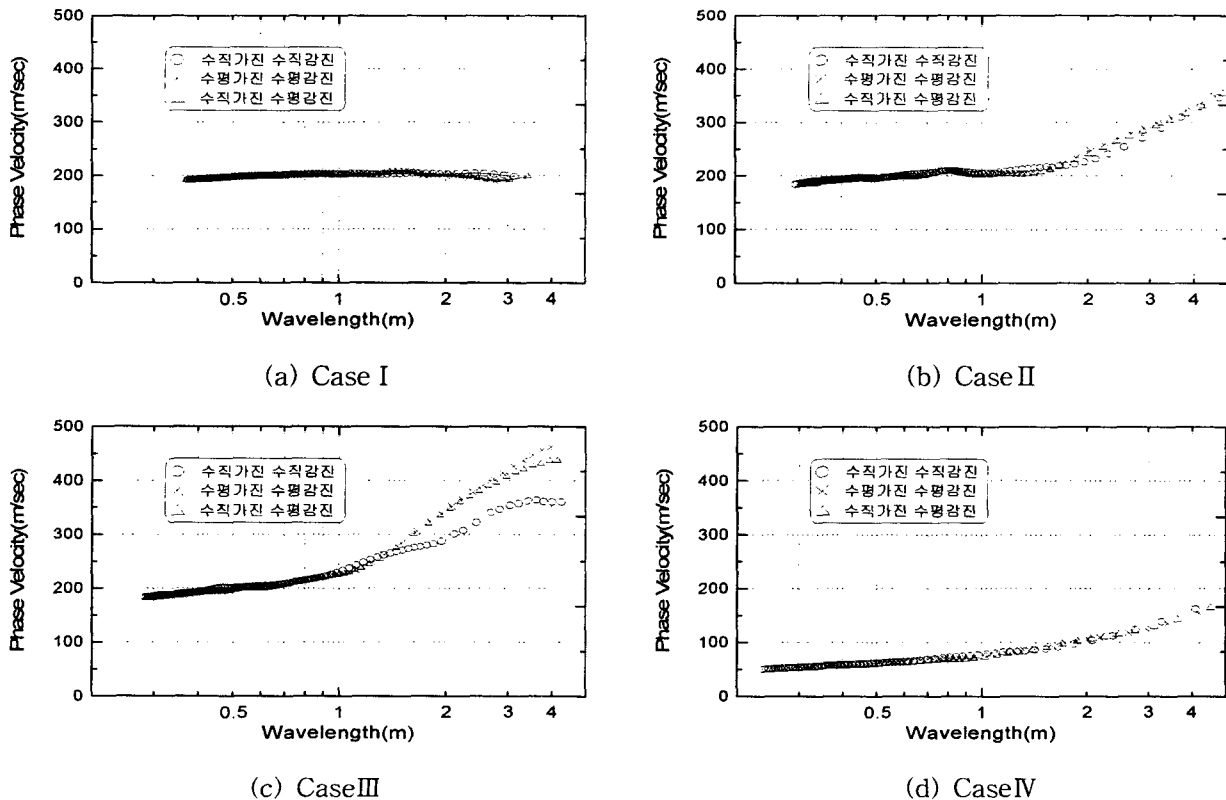
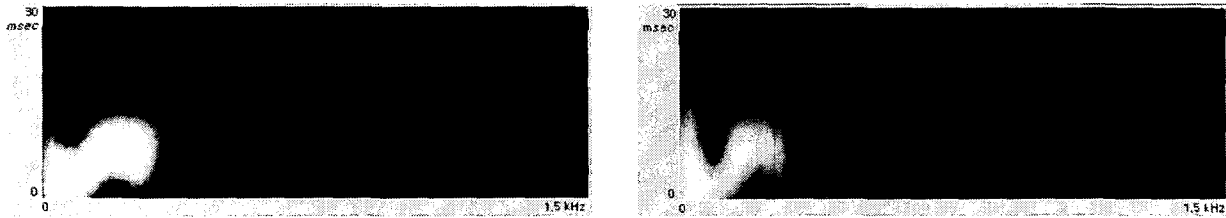


그림 3. 각 해석조건별 분산곡선

그림 3의 (c)에서는 수직가진 수직감진의 경우, 분산곡선이 반사와 굴절에 의한 해상도저하로 해석단면을 충분히 표현하지 못하지만, 수평감진의 경우는 해석조건을 충분히 표현하고 있다. 또한 약 1.5m까지는 다른 감진기조건에서도 동일한 위상속도를 나타내고 있으며, 장주기파장으로 갈수록 수평성분파의 위상속도가 크게 나타났다. 감진기의 위치에 따라서 모드점프가 발생하는 경우도 있으나 그림 3의 (b)와 마찬가지로 분산특성은 수평성분파가 지층의 구조를 보다 정확히 나타내고 있다.

그림 3의 (d)는 (a)조건에서 상부층의 전단파속도를 55m/sec로 줄였을 경우의 분산곡선이다. 그림 3의 (a), (b) 마찬가지로 3가지 해석조건이 같은 분산특성을 가진다. 층간 강성차가 클 경우에도 수직성분파와 수평성분파의 분산특성은 유사한 결과를 나타낸다.

CaseⅢ과 같은 경우에는 이론상 수평성분의 위상속도가 수직성분보다 상대적으로 크지만 본 해석에서는 수직성분과 과대한 차이를 보이고 있다. 이는 압축체적파를 포함한 수평성분파의 반사 및 굴절과에 의한 영향인 것으로 판단되며 이를 검토하기 위하여 각 측정에서의 시간이력곡선과 거보스펙트럼, 벡터 크기 및 속도컨투어를 검토하였다. 수직성분의 경우, 대부분의 파에너지가 경계부를 통과해서 전파하는 것으로 나타나지만, 수평성분의 경우는 근접지반에서 대부분의 에너지가 상부층에 집중되는 것으로 나타났다. 그림 4는 2m, 4m지점에서의 획득한 전달함수의 거보스펙트럼이다. 수직성분파보다 수평성분파의 거보스펙트럼의 해상도가 높게 나타났다.



(a) 수평성분파의 거보스펙트럼

(b) 수직성분파의 거보스펙트럼

그림 4. 2m지점에서 획득한 거보스펙트럼(그림 2의 (c))

5. 결론

- 이층반무한지반에서의 수평성분파를 이용한 지반의 분산특성을 연구하기 위하여 2차원 축대칭유한요소를 이용한 해석연구를 수행하였다. 4가지 해석조건중 균질한 반무한체인 경우와 상부층의 두께가 1m인 경우, 분산곡선상에서 가진방향(수직, 수평) 및 감진방향(수직, 수평)에 따라 동일한 위상속도를 나타내었다.

- 유한요소해석결과, 상부층의 두께가 1m인 경우에는 가진 및 감진 방향에 따른 차이가 없는 것으로 나타났으나 그림 3의 (c)와 같이 상부층의 두께가 얇은 경우에는 다른 결과를 나타내었다. 상부층이 얇은 경우 층간경계부를 지나는 주파수에서 모드점프가 발생되었으며, 장주기성분에서의 위상속도가 과대하게 평가되었다. 이러한 영향은 시간이력곡선, 거보스펙트럼, 응력컨투어 등을 통하여 상부층에서 다중 반사된 압축체적파의 영향임을 알 수 있었다.

향후 수치해석 결과에서 압축체적파의 영향을 정량적으로 평가할 수 있고, 신호처리방법이 향상된다면, 수평성분파(러브파)를 이용하는 것이 기존 SASW기법의 정확도를 향상시킬 뿐만 아니라 기반암의 깊이 조사, 사면의 활동면 조사 등 층 구분을 목적으로 하는 지반조사 분야에 효과적으로 적용할 수 있을 것이다.

참 고 문 헌

1. ABAQUS User Manual Ver. 5.7, Finite element software package, Hibbitt Karlsson & Sorenson, Inc.
2. Kramer, S.L.(1996), "Geotechnical earthquake engineering", Prentice-Hall, Upper Saddle River, NJ.
3. N. M. Shapiro etc(2000), "Average shear-wave velocity structure of the Kamchatka peninsula from the dispersion of surface waves", Earth Planets Space, 52, 573~577