

CAP SASW 기법에 의한 지반단면의 전단강성구조 평가

Evaluation of Stiffness Profile for a Subgrade Cross-Section by the CAP (Common-Array-Profiling)-SASW Technique

조 성 호¹ Joh, Sung-Ho

장 대 우² Jang, Dae-Woo

강 태 호³ Kang, Tae-Ho

이 일 화⁴ Lee, Il-Wha

Abstract

Surface wave techniques were initially based on 2-D plane waves and were later improved to the techniques based the 3-D based cylindrical waves. However, body-wave interference, near-field effect and limited technology in surface wave measurements restricted the use of 3-D cylindrical waves to the 1-D evaluation of subgrade stiffness. In this study, by the numerical simulation of SASW measurements, the dispersion properties of surface waves including vertical, horizontal Rayleigh waves and Love waves were thoroughly investigated in the 3-D domain, and a new filter criteria to minimize the near-field effect was established, which led to CAP (common-array-profiling)-SASW technique. The CAP-SASW technique enabled the evaluation of subgrade stiffness for a specific subgrade segment, not for a whole section of measurement array. Therefore, a contour plot of subgrade stiffness with a ground-truth quality can be obtained by the CAP-SASW technique. The procedure proposed in this study was verified by comparing the shear-wave velocity profiles with the shear-wave velocity profiles of downhole testing at two geotechnical sites.

요 지

지반의 표면에서 비파괴적으로 지반의 구조나 하부강성을 구하는 표면파 기법의 초기형태는 2차원 평면파의 측정과 해석에 기반을 두었으나, 이후 3차원 입체파에 기반을 두는 형태로 발전하였다. 그러나 체적파의 간섭, 근접장 효과, 표면파 측정해상도의 한계 등으로 인하여 3차원 입체파의 활용은 제한적이었고, 측정 지반을 대표하는 1차원 평가에 국한되었다. 본 연구에서는 SASW 시험의 수치모델링을 통하여 수직 레일레이파, 수평 레일레이파, 러브파 등의 표면파 전파 특성을 3차원 영역에서 심도있게 고찰하였으며, 표면파의 근접장 효과를 최소화하기 위한 새로운 필터조건을 정립하였고, 결과적으로 CAP(common-array-profiling)-SASW라는 기법이라고 하는 개선된 표면파 기법을 제안하게 되었다. CAP-SASW 기법의 적용으로 인하여 좁은 폭의 지반단면에 대한 전단파 속도 주상도 평가가 가능하게 되었고, 지반 단면에 대한 2차원 지반강성 평가도 가능하게 되었다. 본 연구에서 제안한 기법의 검증은 위하여 자연 지반을 대상으로 하여 CAP-SASW 시험, 기존 SASW 시험, 다운홀 시험 등을 수행하여 획득된 전단파 주상도를 비교하였다.

Keywords : Joint inversion, Love wave, Rayleigh wave, SASW method, Shear-wave velocity

1 정희원, 중앙대학교 토목공학과 부교수 (Member, Assoc. Prof., Dept. of Civil Engrg. Chung-Ang Univ.)

2 정희원, 중앙대학교 토목환경공학과 석사 (Member, Grad. Student, Dept. of Civil and Environmental Engrg., Chung-Ang Univ.)

3 정희원, 중앙대학교 토목공학과 박사수료 (Member, Ph. D. Candidate, Dept. of Civil Engrg., Chung-Ang Univ.)

4 정희원, 철도기술연구원 선임연구원 (Member, Senior Researcher, Korea Railroad Research Institute)

1. 서론

표면파 기법이란 지진파와 같은 응력파가 장거리를 전파하면서 체적파와 분리되었을 때, 표면파만 분리하여 난 후 표면파의 전파 특성을 분석함으로써 지각 구조나 원유가 매장되어 있을 만한 지층을 조사하는 기법이다. 이러한 표면파 기법은 측정된 응력파에는 표면파만 잔류하며 또한 측정된 표면파는 기본모드가 지배적이라는 두 가지 사항을 대전제로 하고 있다. 그러나 지반공학적 목적으로 사용되는 표면파 기법은 국한된 지역에서 사용되기 때문에, 표면파 시험으로 측정하게 되는 응력파에는 표면파뿐만 아니라 체적파의 성분도 상당히 포함되어 있다. 또한, 측정된 표면파에는 기본모드뿐만 아니라 다양한 모드가 중첩되어 있기 때문에, 지구물리학에서 사용하던 표면파 기법에 관한 이론이나 시험기법을 공학 분야에서 적용하는 데는 여러 가지 불합리한 요소가 많이 있었다. 따라서 이러한 기존 표면파 기법의 대전제들을 해결하려고 하는 노력이 초기 Spectral-Analysis-of-Surface-Waves(SASW) 기법의 정립에 있어서 주안점이 되었다. SASW 기법은 많은 시험과 경험을 통하여 체계화되어 왔으며 Kausel and Roesset(1991), Gucunski(1991), Al-Hunaidi(1994) 등은 SASW 기법에 대한 이해를 새롭게 하였다. 현재 토목공학 여러 분야에서 SASW 기법에 대하여 새롭고 긍정적인 시각으로 넓은 적용 분야에 사용되어지고 있다.

현재까지 토목공학 분야에서 사용되어지는 SASW 기법에서는 레일레이파의 수직 변위만 활용하였다. 그러나 지층 구조가 복잡하고 지층간 강성 차가 큰 경우에는 표면파의 고차 모드의 영향, 체적파의 간섭 그리고 근접장 효과 때문에 층간 경계를 명확하게 찾아내는데 나름대로의 한계가 있었다. 또한 SASW 기법에서는 근본적으로 시험대상 지반 또는 구조물이 횡방향으로 균일한 지층구조를 가지고 있으며 각 층의 물성은 균질하다고 가정하고 있다. 그러나 실제 모든 자연 지반의 경우 이러한 가정이 성립되는 것은 아니며 경우에 따라서 횡방향 변이성이 매우 심하여 SASW 기법의 가정이 성립될 수 없는 경우가 존재한다. 이와 같은 해석의 문제점을 해결하고자, 본 연구에서는 감진기를 고정한 상태에서 첫 번째 감진기와 발진원 거리를 넓혀가며 측정하는 Common-Array-Profiling SASW(CAP-SASW) 기법을 도입하였다. CAP-SASW 기법은 발진원을 감진기에서 멀리 이격시킴으로써 측정가능한 최대 파장을 증가시켜 전단강성 측정심도를 증가하는 방법으로서, 고정

된 감진기간 지반매질에 대해서 지반특성을 평가하기 때문에 복잡한 지층구조에서 존재하는 지반의 횡방향 변이성과 같은 난이한 문제점을 경감시킬 수 있다. 또한, 역산해석의 신뢰성 향상을 위해서 기존의 SASW 기법에서 활용하던 수직 레일레이파 뿐만 아니라, 수평 레일레이파 또는 러브파의 분산특성을 동시에 활용하고자 하였다. 수평 레일레이파와 러브파는 수직 레일레이파와 다른 독특한 분산특성을 가지고 있기 때문에, 전단파 주상도를 구하기 위한 역산해석에 활용할 경우 보다 정확한 전단파 주상도를 도출할 수 있다(이일화, 2004; 장대우, 2005). 본 연구에서 제안한 CAP-SASW 기법의 활용, 역산해석시 수평-레일레이파와 러브파의 동시활용 등의 개념을 적용한 SASW 시험기법의 적용성을 확인하기 위하여, 평택 서해대교 기초지반과 중앙대학교 표면파 시험부지에서 본 연구에서 제안한 SASW 시험을 수행하였다. 그리고, 동일한 부지에서 다운홀 시험, SASW 시험 등을 동시에 수행하여 본 연구에서 제안한 기법의 신뢰성을 검증하였다.

2. 탄성과 파동전파의 수치 모델링

2.1 동강성 행렬법에 의한 파동전파 해석

여러 개의 지층으로 구성되어 있는 다층구조 지반에서, 층간 경계면에 작용한 외력은 각 층간 경계면에서의 변위의 관계로 표현되는데, 외력과 변위의 관계를 정의하는 관계를 동강성행렬(dynamic stiffness matrix method)이라고 한다. 이 동강성행렬은 주파수와 파장의 함수로서 일반적인 구조해석에서 언급되는 강성행렬과 같은 형태로 이해할 수 있다. Kausel과 Roesset(1981)는 동강성행렬을 제안하였고, 임의 하중으로 인해 발생하는 지층구조의 응답에 대한 관계를 공식으로 제안하였으며, 표면파는 평면파로 표현되었다. 평면파가 감진기로부터 아주 멀리 떨어진 곳에서 발생되어 전파되는 경우 감진기에 도착되는 표면파는 평면의 파선(wavefront)을 보인다고 가정할 수 있다. 이렇게 평면 표면파를 가정하여 동강성행렬로부터 구하는 해를 2D 해석해(Kausel과 Roesset, 1981)라고 불린다.

그 후, Kausel과 Peek(1982)는 원형 하중에 대한 다층구조의 응답을 강성행렬의 방법으로 구하는 방법을 제시하였다. 이 방법에서는 원통형 파선을 가지는 표면파로 가정하여 해석하였다. 평면 파선을 가지는 2D 해석

에 대하여, 원통형 파선을 가지는 Kausel과 Peck의 해석해를 3D 해석해라고 한다. 3D 해석은 표면파의 특별한 모드를 대표하지 않고, 표면파와 체적파의 고차모드들이 조합된 해를 구해주기 때문에, 3D 해석하는 실제 표면파의 전파특성을 해석하는 가장 적합한 해라고 할 수 있다.

동강성행렬법은 다른 연구자들(Gucunski and Woods, 1992; Al-Hunaid, 1994)에 의해서도 SASW 시험을 모사하기 위해 다각도로 적용되어 왔다. SASW 시험의 모사를 위한 기본적인 방법은 수직 점하중이나 수직 원형하중 발진원에 대해 시간 영역에서 지표면에서의 변위를 구하거나 주파수 영역에서 위상 스펙트럼을 구하는 것이다. 동강성행렬법으로부터 결정되는 레일레이파의 수직 변위와 러브파의 수평변위는 각각 식 (1)과 식 (2)의 형태로 정리된다(Kausel and Peck, 1982).

$$w(r) = qR \sum_{l=1}^{2N} (\phi_z^l)^2 I_{ll}^R \quad (1)$$

$$u(r) = qR \left[\frac{1}{r} \sum_{l=1}^{2N} (\phi_x^l)^2 I_{3l}^R + \sum_{l=1}^N (\phi_y^l) \left(I_{ll}^L - \frac{1}{r} I_{3l}^L \right) \right] \quad (2)$$

여기서,

$$I_{ll} = \frac{\pi}{2ik_l} J_l(k_l R) H_0^{(2)}(k_l r), \quad I_{3l} = \frac{\pi}{2ik_l^2} J_l(k_l R) H_1^{(2)}(k_l r) - \frac{R}{2rk_l^2}$$

$w(r), u(r)$ 은 발진원에서 r 만큼 떨어진 곳에서의 수직변위, 수평변위이고, q 는 디스크 하중, R 은 디스크의 반경이다. $\phi_x^l, \phi_y^l, \phi_z^l$ 은 표층에서 l 번째 모드의 x, y, z 성분 모드변위이고, k_l 은 l 번째 고유해이다. J_l 는 첫 번째 차수의 첫 번째 Bessel 함수이고, $H_l^{(2)}$ 는 첫 번째 차수의 두 번째 Hankel 함수이다. I_{ll}, I_{3l} 의 첨자로 표시되어 있는 R, L 은 각각 레일레이파와 러브파의 해를 의미한다.

동강성 행렬법의 3D 해석해에 의하면, 발진원의 위치에 따라서 위상속도가 변한다. 이는 3D 해석해가 수직 발진원에 의해 발생되어지는 파들의 모든 모드들을 합친 것으로 구해지기 때문이다. 실제로 SASW 시험은 표면파의 고차 모드와 체적파가 중첩된 복합모드를 측정하는 것이기 때문에, 전단파 속도를 구하는 역산해석에서 복합모드인 동강성 행렬법의 3D 해석해를 활용하는 것은 매우 중요하다고 할 수 있다. 특히, 좁은 지역에서 탄성파의 발진과 측정이 이루어지는 SASW 시험에 있어서는 고차모드의 분리가 용이하지 않기 때문에, 복합모드의 측정과 이론적 모사는 더욱 의미있다고 할 수 있다.

2.2 동강성 행렬법에 의한 SASW 시험의 수치모사

SASW 시험으로 측정되는 위상속도는 식 (1)을 사용하여 구한 수직변위로부터 결정된다. 그림 1에 설명되어 있는 것처럼, 위상속도의 결정을 위해서 지표면 임의의 두 지점에서 측정한 수직변위의 위상각 정보를 활용한다. 즉, 식 (1)에 의해 구한 변위는 복소수로서 위상각 정보를 가지고 있으며, 다른 위치에서의 변위는 별개의 위상각을 가지게 되기 때문에, 두 위치에서의 위상각 차이를 파동의 도달시간 차이로 이해하여, 위상속도를 계산할 수 있다. 균질한 반무한체에 대한 위상속도의 계산 예를 그림 1에 제시하였다. SASW 시험 수치모사에 사용된 반무한체의 전단파 속도는 210m/sec, 포아송비는 0.333, 재료감쇠비는 2%이다. 감진기는 발진원으로부터 각각 10m, 20m 떨어진 곳에 위치하고 있고, 가진 주파수는 10Hz이었다. 이와 같은 조건에 대해 수치모사로 지표면 위에서의 수직변위를 구하였다. 복소수 수직변위로부터 위상각을 구하고, 그 위상각을 전개(unwrapping)하였다. 지표면의 두 감진기 위치에 대하여 전개위상각 곡선으로부터 위상각 차이를 구하면, 위상각 차이가 189°가 된다. 결과적으로 위상속도는 식 (3)에 의해서 결정

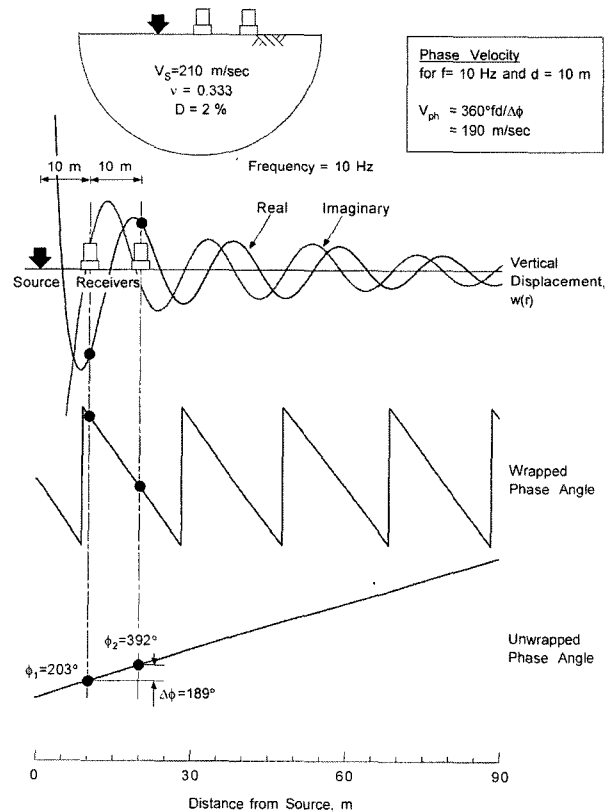


그림 1. 동강성 행렬법의 개념도(Joh,1996)

된다.

$$V_{ph} = f \cdot \lambda = f \cdot \frac{d}{\Delta\phi/360^\circ} = 190 \text{ m/sec} \quad (3)$$

여기서, f 는 주파수, λ 는 파장, d 는 감지기간 거리, $\Delta\phi$ 는 위상각 차이이다.

그림 1은 발진원이 첫번째 감지기에서 10m 떨어진 경우에 대한 결과이지만, 발진원이 30, 50, 70, 90, 200, 300, 400m 떨어져 있는 경우 위상속도를 계산해 보면, 그림 2에 나타난 바와 같이 일정하지 않고 발진원의 위치에 따라 위상속도가 변하게 된다. 특히, 발진원이 멀리 떨어질수록 일정한 값으로 수렴하는 것을 알 수 있는데, 이는 감진기가 근접장효과(near-field effect)의 영향을 받지 않는 원거리로 벗어났기 때문이다. 즉, 감진기가 근접장(near field)에 위치해 있을 때에는 체적파의 영향으로 인하여 안정되지 않은 표면파 속도를 보이다가, 감진기가 근접장에서 벗어나게 될 때는 체적파의 영향에서 벗어나서 안정된 표면파의 속도를 보이게 되는 것이다.

한편, 발진원을 감지기에서 멀리 이격해서 위치시킬수록, 측정되는 위상속도는 더 안정된 표면파의 특성을 보일 뿐만 아니라, 동일한 감지기간 간격으로 측정할 수 있는 최대 레일레이파의 파장도 증가시킬 수 있는 효과를 얻을 수 있다. SASW 시험시 근접장효과를 최소화하기 위해 Heisey(1982)가 제안한 필터조건에 의하면, 신

뢰할 수 있는 최대 레일레이파의 파장은 발진원과 첫번째 감지기간 거리의 3배라고 한다. 따라서 발진원이 멀리 위치하면 할수록 측정할 수 있는 최대 파장의 크기가 증가하기 때문에, 결과적으로 주어진 감지기간 간격으로 측정할 수 있는 전단파 속도 주상도의 심도도 증가하는 효과를 얻을 수 있다.

3. CAP-SASW 기법에 의한 표면파 분산곡선

3.1 CAP-SASW 기법

본 연구에서는 기존 SASW 시험, 즉, Common-Mid-Point (CMP) SASW 시험구성에서와 같이 발진원의 위치를 감지기간 간격과 등간격으로 설정하지 않고 감지기간 간격의 1, 2, 4, 8, 12, 16배 등으로 변화시켜 신뢰할 수 있는 최대 파장을 증가시킴으로써, 두 감지기간 지반매질에 대한 전단강성 조사 심도를 증가시키는 새로운 개념의 SASW 기법, 즉, CAP-SASW 기법을 제안하였다. 즉, CMP-SASW 시험에서와 같이 감진기 간격을 확장하는 방법을 따르지 않고, 두 감진기는 고정시키고 발진원을 이격시킴으로써 고정 지반절편에 대해 조사하는 것을 가능하게 하고자 하였다. 본 연구에서는 비정규 발진원-감진기 구성을 활용하는 CAP-SASW 시험을 이론적으로 모사하여, 획득된 레일레이파의 분산특성에 대한 연구를 수행하였고, 또한 근접장 효과를 제거하기 위한 필터조건에 대해서도 집중적으로 연구하였다.

3.2 CAP-SASW 수치시험

CMP-SASW 시험에서는 발진원의 위치를 두 감지기간 거리와 동일한 거리만큼 첫 번째 감지기에서 이격시켜 설정하는 반면, CAP-SASW 시험에서는 발진원의 위치를 첫 번째 감지기에서 두 감지기간 거리의 2, 4, 6, 8배 등을 이격시켜 시험을 수행한다. 본 절에서는 CAP-SASW 시험으로 측정되는 분산특성이 CMP-SASW 시험으로 측정되는 분산특성과 어떻게 비교되는지 살펴보고, CAP-SASW 시험의 적용방법을 정립하고자 한다.

CAP-SASW 기법으로 결정되는 표면파의 분산특성을 살펴보기 위해서 그림 3의 세 가지 다층지반을 선정하였다. Case 1은 연약한 토층 하부에 기반암이 존재하는 경우이고, Case 2는 심도 20m 위치에 기반암 위치까지 전단강성이 깊이에 따라 점진적으로 증가하는 경우

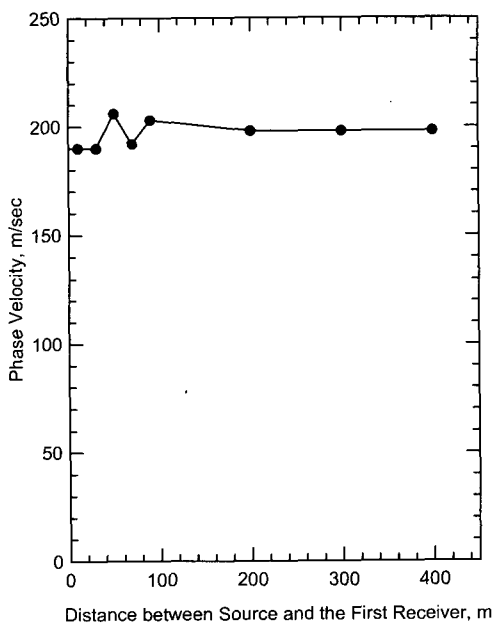


그림 2. 발진원 위치에 따른 위상속도

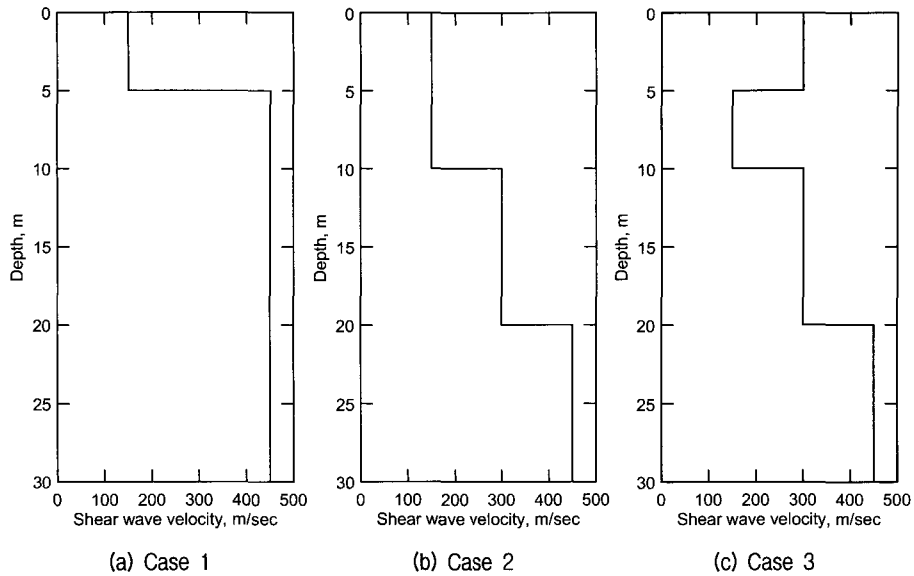


그림 3. 표면파의 분산특성 평가를 위한 전단강성 추상도

이다. 그리고 Case 3은 Case 2의 지반에 지표면에 다짐 에너지가 가해져서 단단해진 형태의 지반이다. 이 세 가지 다층지반에 대해 CAP-SASW 시험을 수치적으로 수행하였다. SASW 수치 시험에서는 동강성 행렬법에 기초한 정모델링(forward modeling)을 이용하여 수직 레일레이파, 수평 레일레이파, 러브파의 위상속도를 측정하였다.

본 연구에서 수행한 CAP-SASW 수치시험은 감진기 간 간격을 2m로 고정시켰고, 발진원은 첫 번째 감진기에서 2, 4, 8, 16, 32, 64, 128m 떨어진 곳에 설정하여 총 7번의 단위 SASW 시험을 수행하는 것으로 하였다.

3.3 근접장 효과 최소화를 위한 필터링

수직 레일레이파를 사용하는 CMP-SASW 시험의 경우 근접장 효과(near-field effect)를 감소시키기 위하여 필터 조건을 사용하고 있다. 이는 발진원 지점에서 생성된 표면파가 충분한 거리를 전파하여 체적파가 감쇠되고 표면파의 특성을 지배적으로 갖게 된 표면파를 측정하도록 하기 위한 것이다. 일반적으로 표면파 형성에 필요한 거리는 표면파의 파장에 비례한다. 발진기 위치, 감진기간 거리가 정해져 있는 상황에서 근접장 효과를 피할 수 있는 표면파의 최대 파장 조건은 발진기-감진기 간 거리의 배수로 정해지게 된다. 대체적으로 근접장 효과를 완전히 배제하기 위해서는 첫 번째 감진기의 위치가 발진원에서부터 표면파 파장의 10배 이상 떨어져 있

어야 하기 때문에, SASW 시험에서는 실제적으로 근접장 효과를 완전히 피할 수 없다. 따라서 SASW 시험 해석에 사용되는 탄성과 모델링 기법에 따라 최대 허용파장에 대한 기준은 다르게 되는데, 일반적으로 발진원-첫 번째 감진기 간 거리의 2~4배로 설정된다. 근접장 효과의 최소화를 위한 최대파장의 기준 적용은 수평 레일레이파와 러브파의 경우도 예외가 아니다. SASW 시험에서 수평 레일레이파와 러브파를 사용하기 위해서는 수평 레일레이파와 러브파에 대한 최대허용파장에 대한 기준이 설정되어야 한다.

그림 4(a), (c)는 Case 1 지반에 대하여 수치 SASW 시험으로 결정한 수직 레일레이파와 러브파에 대한 분산곡선이다. 회색으로 표시된 곡선은 일반 CMP-SASW 시험으로 결정한 분산곡선이고, 열린 기호로 표시된 곡선은 CAP-SASW 시험으로 결정한 분산곡선이다. 수직 레일레이파와 러브파의 분산곡선에서 공히 관찰되는 것은 발진원-감진기간 거리에 비해 매우 큰 파장의 위상속도는 불합리하다는 것이다. 즉, 예를 들어 발진원-감진기간 거리가 4m인 경우, 파장의 크기가 약 15m를 초과하면 위상속도가 CMP-SASW의 위상속도와 크게 다르게 계산된다. 이러한 특징은 다른 발진원-감진기간 거리를 사용하는 SASW 시험 결과에서도 동일하게 나타난다. 다행히도 각 발진원-감진기간 거리에 대하여 허용되는 최대 파장은 대체적으로 일정한 법칙을 보여주고 있다. 즉, 수직 레일레이파, 수평 레일레이파의 경우 발진원-감진기간 거리의 약 4배 이상일 경우 위상속도는

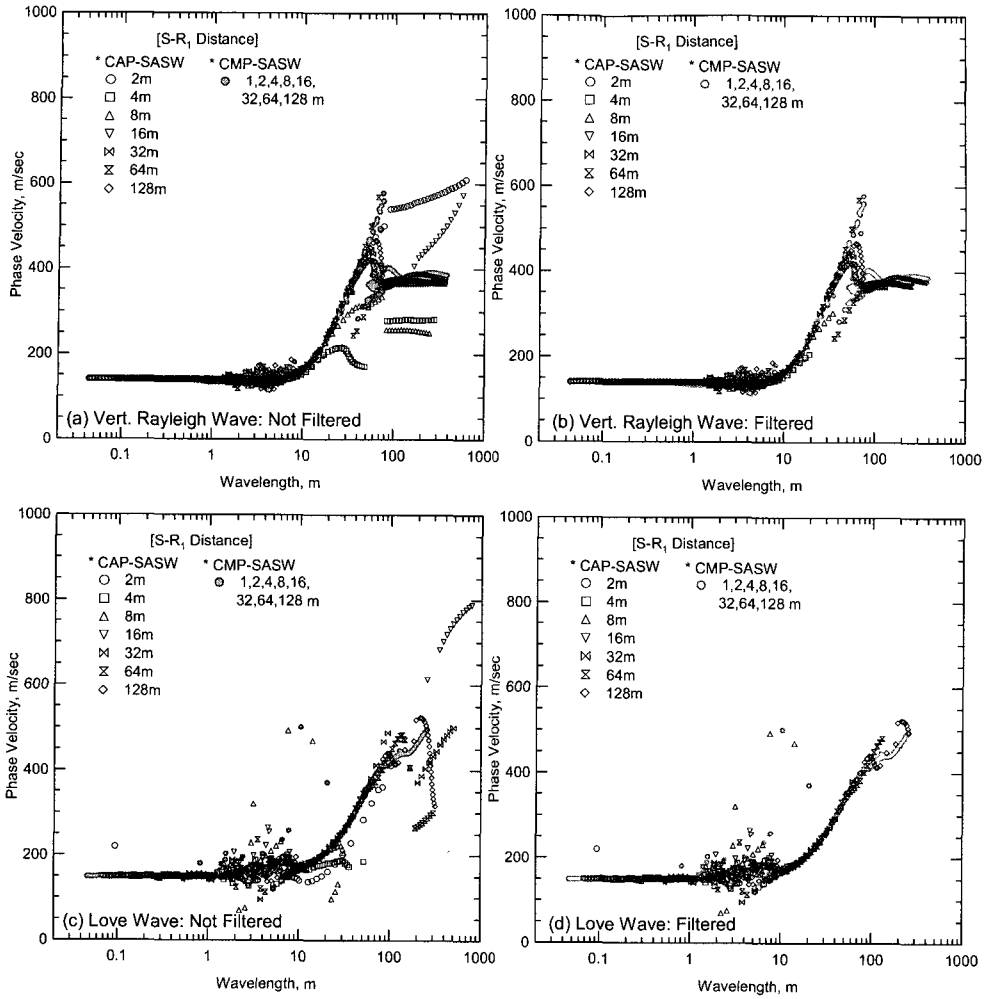


그림 4. Case 1 지반에서 발진원 위치에 따른 표면파의 분산특성

표 1. CAP-SASW 기법의 근접장효과 최소화를 위한 필터 조건

표면파의 종류	발진원과 첫 번째 감진기까지의 거리	파장 영역
수직, 수평 레일레이파	R	$\lambda_{\max} < 4R$
러브파	R	$\lambda_{\max} < 2R$

합리적이지 않고, 러브파의 경우는 약 2배 이상일 경우 계산되는 위상속도는 합리적이지 않다. 그림 4(b), (d)에 이와 같은 필터기준을 적용하여 계산한 CAP-SASW 위상속도와 CMP-SASW 위상속도를 비교하고 있는데, 두 위상속도 분산곡선은 매우 잘 일치하고 있음을 확인할 수 있다. Case 1 지반이외에도 본 연구에서 고려한 Case 2 지반, Case 3 지반의 경우에 있어서도 본 연구에서 제안하는 최대허용 파장에 대한 기준, 즉 근접장 효과 최소화를 위한 필터링 조건이 합리적으로 적용되었다. 그림 5에 Case 1 지반, Case 2 지반, Case 3 지반에 대하여 CAP-SASW 시험으로 구한 위상속도에 대해 필터링을 적용한 이후의 위상속도를 CAP-SASW 위상속도와 비교하였다. 그림 5의 CMP-SASW 분산곡선과 CAP-SASW

분산곡선은 체적파의 간섭효과를 고려하여 볼 때, 서로 매우 잘 일치하는 경향을 보여주고 있다. 이는 본 연구에서 제시한 CAP-SASW 기법의 필터조건이 효과적임을 입증하는 사례라고 할 수 있다.

따라서 표 1에 정리한 것처럼, 본 연구에서는 표면파의 측정에서 최대허용파장의 크기를 수직 레일레이파와 수평 레일레이파는 발진원-감진기간 거리의 4배, 러브파는 발진원-감진기간 거리의 2배로 설정하여 표면파의 분산특성을 이해하는데 활용하였다.

3.4 CAP-SASW 시험구성에 대한 표면파의 분산특성

그림 3에 제시된 세 가지 지반에 대하여 수치적으로

수행한 CMP-SASW 분산곡선과 CAP-SASW 분산곡선을 그림 5에 비교하였다. 그림 5의 분산곡선은 표 1에 제시된 바와 같은 근접장효과 최소화 필터조건을 적용하여 정리된 결과이다. CAP-SASW 분산곡선은 전체적으로 CMP-SASW 분산곡선과 잘 일치하고 있지만, 층간 경계부에 해당되는 파장에서 복잡한 추이를 보여주고 있다. Case 1 지반의 경우는 파장 5m, Case 2 지반의 경우는 파장 10m, Case 3 지반의 경우는 5m에서 단파장의 위상속도 추세와는 달리 CAP-SASW 위상속도가 어지럽게 산란되는 경향을 보이고 있다. 이는 층간 전단파속도가 급격하게 변하기 때문에 표면파의 고차모드가 서로 혼재하기 때문이라고 판단된다. 즉, 지배적으로 에너지를 갖게 되는 모드가 존재하지 않고 인접한 모드

에너지가 서로 유사하기 때문에, 탄성파의 전파특성을 일관성있게 나타내지 못하는 것이다. 한편, 러브파의 경우는 이러한 고차모드 혼재 현상이 매우 특이하게 나타난다. 층간 경계에 해당되는 파장 1~10m 영역을 살펴보면, 복잡하게 퍼져있는 위상속도 경향 가운데 두드러지게 나타나는 경향이 있다. 즉, 장파장 영역에서 증가하는 분산곡선의 기울기와 유사하게 서로 평행한 곡선의 형태가 여러 개의 빗살무늬 형태로 두드러지는 것이다. 이는 확연하게 러브파의 고차모드와 일치하는 것으로(장대우, 2005) 러브파의 특이한 현상이라고 할 수 있다. 반면 수직 레일레이파, 수평 레일레이파의 경우는 특별한 모드를 쫓아가는 경향보다는 규칙없이 퍼져있는 형태를 보여줄 뿐이다.

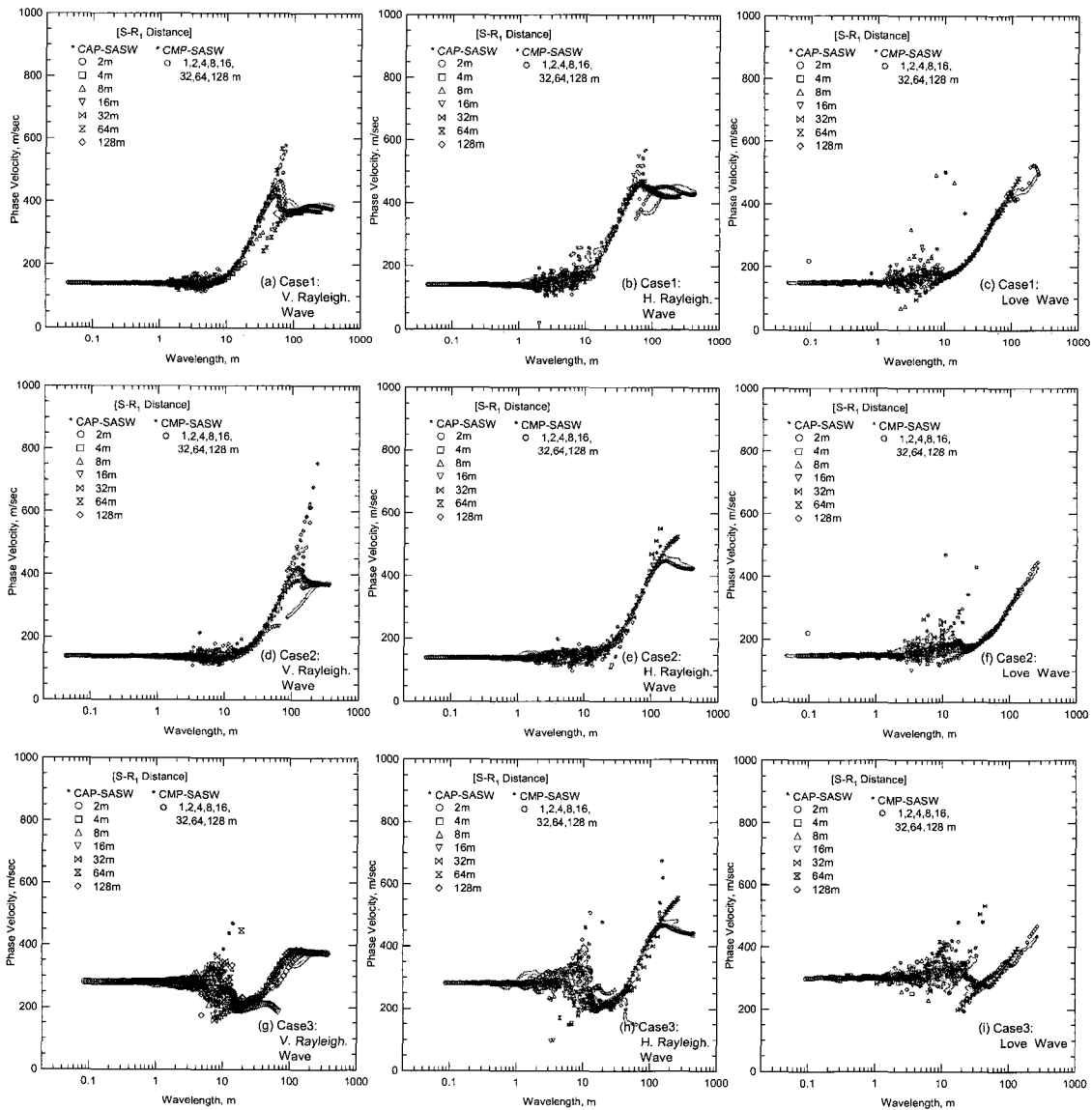


그림 5. 수직 레일레이파, 수평 레일레이파, 러브파의 분산특성

한편, 수직 레일레이파와 수평 레일레이파는 전체적으로 매우 유사한 경향을 보여주고 있다. 단파장의 위상속도가 표층 전단파 속도의 약 0.9배인 것과 전체 분산곡선의 경향 등과 같은 특징을 서로 공유하고 있다. 그러나 지반의 최하부 지층에 해당되는 장파장 영역에서는 수직 레일레이파의 위상속도와 수평 레일레이파의 위상속도의 차이는 뚜렷하다. 수직 레일레이파의 위상속도는 여전히 지층 전단파 속도의 0.9배 정도이지만, 수평 레일레이파의 위상속도는 지층 전단파 속도와 거의 일치하는 것을 확인할 수 있다. 이러한 수평 레일레이파의 특징은 SASW 시험자료의 역산해석시 하부 지층의 해상도를 향상시키는데 크기 기여하리라고 판단된다.

러브파의 경우는 2-D 해석해와 동일하게, 즉 러브파의 기본모드 해의 특징과 동일하게 단파장의 위상속도가 표층 전단파 속도와 일치함을 확인할 수 있다. 특히 Case 3 지반의 경우는 일반적으로 러브파가 발생되지 않는다고 알려져 있는 형태의 지반인데, 동강성 행렬법에 의한 3차원 해석으로는 표면파의 속도가 계산될 수 있었다. 이는 단파장의 경우 탄성파의 진동에너지 대부분이 표층에 국한되어 전파되어간 전단파가 측정된 것이라고 판단된다. 그리고 장파장의 경우 수직 레일레이파나 수평 레일레이파의 경우와는 다르게 일정한 위상속도로 접근하는 경향은 보이지 않고 있다. 따라서 SASW 시험에서 역산해석에 기여할 수 있는 러브파의 분산곡선의 특징은 단파장의 위상속도와 층간경계부분에서 나타나는 고차모드의 분리 등이라고 할 수 있다.

4. CAP-SASW 기법으로 측정된 표면파 분산곡선의 역산해석

레일레이파, 러브파 등의 표면파 위상속도 분산곡선으로부터 전단파 속도 추상도를 결정하기 위해서는 역산해석을 수행하여야 한다. 역산해석은 기본적으로 표면파의 전파를 수치적으로 모델링하는 정모델링 해석(forward modeling analysis)과 다변수 방정식의 해를 구하기 위한 최적화 기법(optimization technique)으로 구성된다.

본 연구에서는 표면파의 전파를 모델링하는 정모델링 기법으로는 2장에서 언급한 동강성행렬법을 사용하였으며, 이로부터 수직 레일레이파, 수평 레일레이파, 러브파 등의 이론해를 계산할 수 있었다. 또한 다변수

방정식의 해를 구하기 위한 최적화 기법으로는 최대공산법(maximum likelihood method)을 적용하여, 전단파 속도, 지층 두께, 위상속도 등에 대한 가변 범위를 설정할 수 있도록 하였다.

CAP-SASW 기법을 위한 역산해석은 Joh(1996)가 제안한 배열역산해석(array inversion analysis)의 기본 알고리즘에 근거하였으며, 단지 여러 가지 표면파의 분산곡선을 동시에 역산할 수 있도록 한 동시역산해석의 알고리즘(이일화, 2004)만 추가하여 완성되었다.

5. 현장 적용에 의한 CAP-SASW 기법의 검증

앞에서는 CAP-SASW 기법을 이론적으로 CMP-SASW 기법과 비교하여 CAP-SASW 기법의 신뢰성을 확인하였다. 본 장에서는 CAP-SASW 기법의 현장 적용성을 평가하기 위해서 평택 서해대교와 중앙대학교 야외시험장 두 곳에서 현장 시험을 실시하여 비교하였다. 또한, CAP-SASW 기법의 신뢰성을 검증하기 위하여 다운홀 시험과 CMP-SASW 시험을 병행하여 수행하였다.

5.1 평택 서해대교에서의 현장 시험

평택 서해대교 27번과 28번 교각 사이의 지반에서 CAP-SASW 시험을 수행하였다. CAP-SASW 시험은 감진기의 간격을 2m로 고정하고, 발진원의 위치를 1m부터 32m까지 확장하며 수행하였다 또한, CAP-SASW 시험의 신뢰성 확인을 위해서 다운홀 시험을 병행하여 수행하였다

그림 6(a)에서는 CAP-SASW 시험에 의한 레일레이파와 러브파의 분산곡선을 나타내고 있는데, 수치 모델링에서 나타나는 것과 같이 러브파의 위상속도가 레일레이파의 위상속도보다 크게 나타나는 것을 알 수 있으며, 러브파의 분산곡선에 빗살무늬 패턴이 나타나는 것을 확인할 수 있었다. 그림 6(b)에 도시된 여러 가지 역산해석 결과를 살펴보면, 전체적으로 수직 레일레이파만을 활용하는 CAP-SASW 시험, 러브파와 레일레이파를 동시에 활용하는 CAP-SASW 시험, 다운홀 시험의 일반적인 경향은 서로 잘 일치하는 것을 알 수 있다. 그러나 심도 약 4.5m의 매립토 하단 경계는 러브파와 레일레이파를 동시에 활용하는 CAP-SASW 시험이 다운홀 시험, 수직 레일레이파만을 이용한 CAP-SASW 시험보다 더욱 명확하게 찾아내고 있다. 그리고 심도 5~8m

풍화토의 상부에서 SPT 저항치가 증가하는 경향은 다운홀 시험을 제외한 모든 CAP-SASW 시험 모두가 잘 찾아내고 있다. 한편 심도 10~11m 부근에서 SPT 저항치가 감소하는 경향은 러브파와 레일리파를 동시에 활용하는 CAP-SASW 시험만이 찾아내고 있다.

5.2 표면파 시험부지에서의 현장 시험

중앙대학교 야외시험장에 설치된 표면파 시험부지에서 감진기의 간격을 2m로 고정하고, 첫 번째 감진기로부터

발진원의 위치를 1m에서 32m까지 확장하며 CAP-SASW 시험을 수행하였다. CAP-SASW 시험의 신뢰성을 확인하기 위해서 다운홀 시험과 CMP-SASW 시험을 병행하여 수행하였다.

그림 7(a)의 비교를 살펴보면, CAP-SASW 시험에 의한 수직 레일리파의 분산곡선과 CMP-SASW 시법에 의한 수직 레일리파의 분산곡선이 전반적으로 유사한 경향을 보이고 있으며, 특히 장파장 영역에서는 매우 잘 일치하는 것으로 CAP-SASW 시험으로 결정된 분산곡선은 신뢰성이 높다고 판단된다. 또한 러브파의 분산곡선

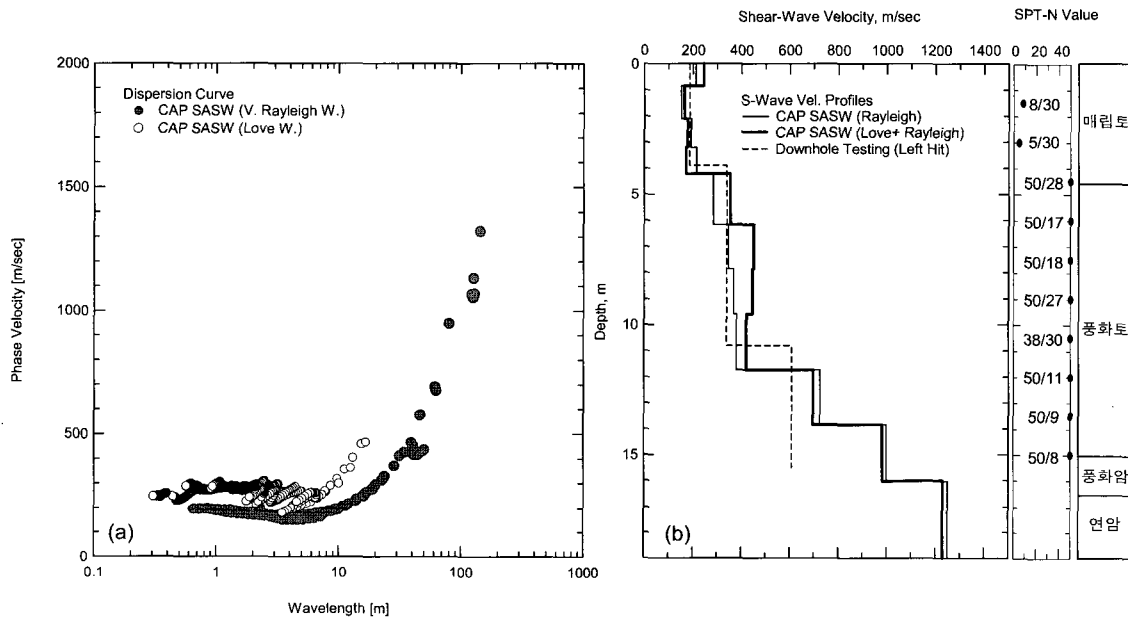


그림 6. 평택 서해대학교에서의 현장 시험 결과

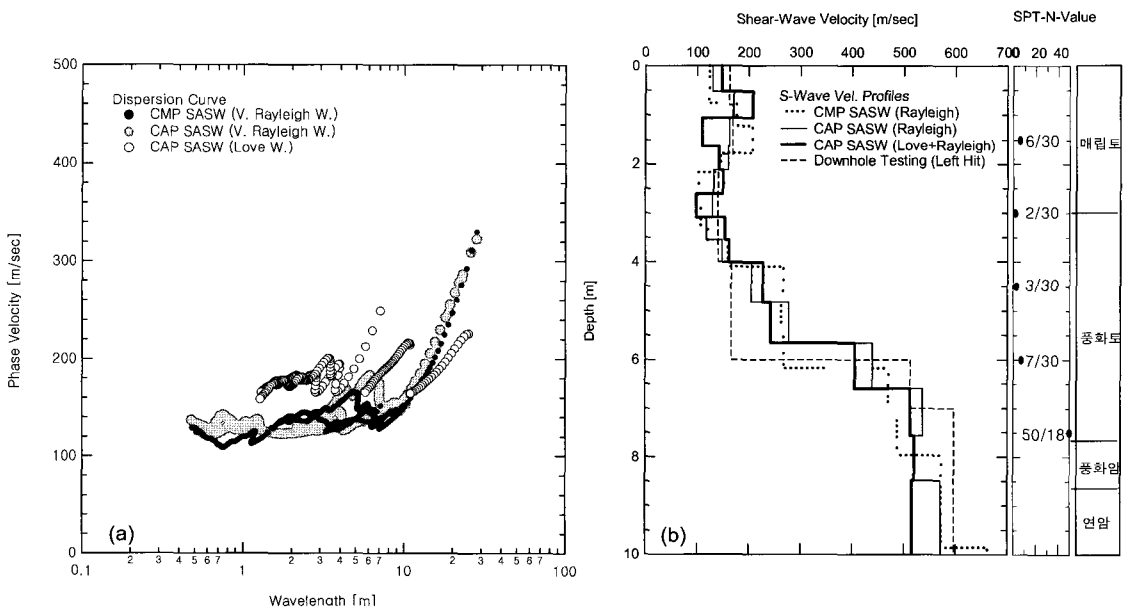


그림 7. 중앙대학교 표면파 시험부지에서의 현장 시험 결과

에서는 빗살무늬 패턴이 나타나는 것을 확인할 수 있는데, 이로부터 층간 강성이 큰 층 경계가 4~10m 심도에 존재함을 추정할 수 있었다. 그림 7(b)에서는 레일레이파만을 이용한 CMP-SASW와 CAP-SASW의 전단강성 주상도, 레일레이파와 러브파를 같이 이용한 CAP-SASW의 전단강성 주상도 그리고 다운홀의 전단강성 주상도를 비교하여 보여주고 있다. 흥미롭게도 레일레이파와 러브파의 동시역산해석 결과만이 심도 3m에 존재하는 매립토층과 풍화토층의 경계를 찾아내고 있다. 또한, 본 시험 부지는 중차량의 운행으로 심도 1m의 매립토층이 다짐되어 있는 상태인데, CAP-SASW 시험의 동시역산해석 결과만이 다짐층의 존재를 보여주고 있다. 한편, 그림 7(b) 우측에 도시된 시추 주상도는 SASW 시험 측선에서 10m 정도 떨어진 시추공의 주상도인데 풍화암층 심도를 7.7m로 표시하고 있는 반면, 러브파와 레일레이파를 동시에 활용한 CAP-SASW 시험은 약 6.5m에서 풍화암층을 찾고 있다. 이는 본 시험 부지의 지층이 경사를 이루고 있는 것을 참고하여 볼 때 타당한 것으로 판단되며 CAP-SASW 시험 결과의 신뢰성을 뒷받침하고 있다.

6. 요약 및 결론

본 연구에서는 SASW 기법의 신뢰성과 현장 적용성을 개선하기 위하여 러브파와 레일레이파의 동시활용, SASW 시험구성의 변경 등 새로운 개선책을 제안하였다. 이를 위하여 이론적, 시험적 연구를 수행하였으며, 그 결과는 다음과 같다.

- (1) 여러 가지 가상 지반을 설정하여 수직 레일레이파, 수평 레일레이파, 러브파의 분산특성을 살펴본 결과, 단파장 영역에서는 수직 레일레이파와 수평 레일레이파의 위상속도가 거의 유사하지만, 장파장 영역에서는 수평 레일레이파의 위상속도가 수직 레일레이파의 위상속도보다 크고 매우 큰 파장의 경우 하부 지층의 전단파 속도와 유사한 속도에까지 이르게 된다. 한편, 러브파의 경우는 단파장의 위상속도는 표층의 전단파 속도와 일치하고 지층의 급변이 발생하는 경우에 고차모드가 복잡하게 발생하는 것을 확인할 수 있다.
- (2) 수직 레일레이파만 사용하는 역산해석과 수직 레일레이파와 러브파를 동시에 사용하는 역산해석의 성

능해석을 비교한 결과, 역산해석의 수렴속도, 층간 강성변화의 정확한 평가 등의 측면에서 레일레이파와 러브파의 동시활용이 우월한 것으로 평가되었다.

- (3) 표면파의 분산특성에 대한 감진기와 발전기 위치의 영향을 평가한 결과, 기존 SASW 시험과 유사한 결과를 도출할 수 있는 CAP-SASW 시험기법을 제안하게 되었다. CAP-SASW 시험기법은 감진기를 고정하고 발전기를 변화시켜 장파장의 위상속도까지 측정할 수 있는 것으로, 지반의 횡방향 변이성을 정확하게 평가할 수 있는 기법으로 판단된다.
- (4) 본 연구에서 획득한 연구결과를 확인하기 위하여, 현장에서 CAP-SASW 시험을 활용하여 수직, 수평 레일레이파와 러브파의 분산곡선을 측정하였다. 적용된 CAP-SASW 기법으로 광대역 파장의 영역을 측정할 수 있었으며, 특히 CAP-SASW 동시역산해석의 결과는 기존 SASW(CMP-SASW) 시험과 다운홀 시험 결과와 합리적으로 일치하였다. 특히 CAP-SASW 동시역산해석 결과는 다른 시험 기법들에 비해서 시추 주상도에서 도시되어진 지층 구조를 가장 근사하게 평가하는 것을 확인할 수 있었다.

감사의 글

이 논문은 2003년도 한국학술진흥재단의 지원(KRF-2003-013-N00815)에 의하여 연구되었으며, 이에 깊은 감사를 드립니다.

참고 문헌

1. 이일화, 조성호 (2003), "Multi-channel SASW 기법의 특성에 관한 수치해석 연구", 대한토목학회 논문집, 제 23권, 제6C호, pp.407-415.
2. 이일화 (2004), 러브파와 레일레이파의 분산특성을 이용한 동시역산해석, 중앙대학교 박사학위 논문.
3. 이일화, 조성호 (2004), 반무한체와 다층구조 자반에서 러브파와 레일레이파의 위상속도 분산특성, 한국지반 공학회 논문집, 제 20권, 1호, pp.61-73.
4. 장대우 (2005), SASW 시험의 수치모델링에 의한 Rayleigh 파와 Love 파의 분산특성 평가, 중앙대학교 석사학위 논문.
5. Al-Hunaidi M.O. (1994) "Analysis of dispersed multi-mode signals of the SASW method using the multiple filter/crosscorrelation technique", Soil Dynamics and Earthquake Eng., Vol.13, Elsevier, pp.13-24.
6. Foti, Sebastiano (2000), Multistation Methods for Geotechnical Characterization using Surface Waves, Ph. D. Dissertation Georgia Institute of Technology.
7. Ganji, Vahid (1997), An Automated Inversion Procedure for Surface Wave Testing, Ph. D. Dissertation, University of New Jersey at

New Brunswick.

8. Gucunski , N. and Woods. R. D. (1992), "Numerical simulation of the SASW test", *Soil dynamics and Earthquake Engineering*, Vol.11, pp.213-227.
9. 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.
10. Joh, S. H. (1996), *Advanced in Interpretation and Analysis Techniques for Spectral-Analysis-of-Surface-Waves (SASW) Measurements*, Ph. D. Dissertation, The University of Texas at Austin.
11. Kausel, E. and Roesset, J. M. (1981), "Stiffness Matrices for Layered Soils", *Bull. Seismol. Soc. Am.* 71, pp.1743-1761.
12. Kausel, E. and Peek, R. (1982), "Dynamic Loads in the Interior of a Layered Stratum: An Explicit Solution", *Bull. Seismol. Soc. Am.* 75/5, pp.1459-1508.

(접수일자 2005. 2. 15, 심사완료일 2005. 6. 1)