

## 근거리장에서 HAWW 기법의 수치해석적 검증

### Numerical Verification of HAWW Method in the Near Field

방 은 석<sup>1</sup>      Bang, Eun-Seok  
박 형 춘<sup>2</sup>      Park, Hyung-Choon  
김 동 수<sup>3</sup>      Kim, Dong-Soo

#### Abstract

Various field setup and filtering criteria have been suggested to avoid the near field effects in surface wave methods. Unlike other surface wave methods HAWW method uses the near field component positively. It is possible by using maximum energy point based on time-frequency map and inversion method to consider receiver locations from the source point and body wave component. To verify the HAWW method in the near field numerical study was performed and the wave propagation in the stratified soil media was simulated due to a surface point load. All of five representative soil models were used. The experimental dispersion curves, determined by HAWW method at the various receiver distances in the region of near field, all coincided well with the theoretical dispersion curves determined by 3D forward modeling (Kausel's method). Consequently, it was considered that the HAWW method can provide reliable  $V_s$  profiles effectively in the near field.

#### 요 지

기존의 표면파 기법들은 근거리장 효과를 피하기 위하여 적절한 실험 방법 및 필터 기준을 제시하고 있다. HAWW 기법은 다른 표면파와는 다르게 이러한 근거리장 영역에서의 파의 거동을 적극적으로 활용하여 지반의 전단파 속도 주상도를 도출한다. 에너지가 작은 저주파 신호를 시간-주파수 해석을 통해 획득하며 체적파의 영향을 고려한 단일 배열 역산을 통해 가능하다. 이러한 사항을 검증하기 위해서 근거리장에서의 탄성파의 전파 형상을 수치해석을 통하여 모사하였으며 다양한 지반 형태를 대표하기 위해 5개의 지반모델을 구성하였다. 수치모델링을 통해 획득한 시간 영역 신호를 이용하여 HAWW 기법으로 실험분산곡선을 도출하였다. 도출된 실험 분산곡선과 3차원 정모델링(Kausel의 방법)을 통해 계산된 이론 분산곡선의 형상이 각 위치에서 거의 일치하였다. 그러므로 HAWW 기법을 수행하는데 있어 근거리장 영역이 포함된 실험 분산곡선을 획득하여도 Kausel의 방법을 이용하여 역산을 수행할 경우 신뢰성 있는 지반의 전단파 속도를 도출하는 것이 가능하다는 것을 확인할 수 있었다.

**Keywords :** HAWW, 전단파 속도, 지반 조사, 수치해석, 분산곡선

#### 1. 서 론

현장 탄성파 탐사 중 표면파 기법(surface wave method)은

지표면에서 비파괴적으로 수행이 가능하므로 시추공 탄성파 탐사에 비하여 실험 수행의 편의성 측면에서나 경제적 측면 등에서 매우 큰 장점을 가진다. 표면파

1 정희원, 한국지질자원연구원 지반안전연구부 선임연구원 (Member, Senior Researcher, Geotechnical Engineering Division, KIGAM, esbang@kigam.re.kr, 교신저자)

2 정희원, 충남대학교 토목공학과 조교수 (Member, Assistant Prof., Dept. of Civil Engrg., ChungNam Univ.)

3 정희원, 한국과학기술원 건설 및 환경공학과 교수 (Member, Prof., Dept. of Civil and Environmental Engrg., KAIST)

\* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2007년 8월 31일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

기법의 수행과정은 크게 3단계로 구분되며 현장 실험 (field test)을 통한 신호 획득, 신호처리(signal processing)를 통한 실험 분산곡선의 도출 그리고 역산(inversion)을 통한 전단파 속도 주상도의 결정 등을 포함한다. 표면파 기법으로써 토목 분야에 최초로 소개되어 적용된 것이 SASW(spectral analysis of surface waves) 기법이다(Heisey 등, 1982). SASW 기법은 충격 가진원(impact source)이나 연속가진원(continuous source)에 의해 발생한 표면파를 지표면에 위치한 한 쌍의 감지기로부터 측정하여 스펙트럼 분석(spectral analysis)으로 실험분산곡선을 획득한다. 하지만 이러한 스펙트럼 분석은 전문가적인 판단이 요구되고 주변 잡음(noise)에 의해 많은 영향을 받으므로 해석시 상당한 주의가 필요하다. 또한 여러 감지기 배열(multiple array)을 사용하여 실험을 수행하여야 하므로 많은 시간과 노동력이 요구되며 대표 분산곡선(representative dispersion curve)의 결정과정에서 모호함이 존재한다. 이러한 문제점을 해결하기 위해 국내외에서 많은 연구가 수행되어 왔으나(Al-Hunaidi, 1994; Joh, 1996a, 조성호 등, 2003) 일반적인 적용에 제한적인 경우가 많아 SASW 기법이 현업에 널리 적용되기에는 어려움이 있었다. 한편, 지구물리학(geophysics) 연구자들에 의해 연구된 MASW (multi-channel analysis of surface waves) 기법(Park 등, 1999)이 국내에 도입되었으며 현장 실험 방법 및 해석 과정이 간단명료하고 결과 해석 프로그램이 사용자 편의를 고려하여 잘 구성되어 있어 현재 국내 지반조사 업체에서 활발하게 사용하고 있다. MASW 기법은 탐사 깊이 등을 고려하여 12개 이상의 다수의 감지기를 적합한 간격으로 배열하고 가진원으로부터 발생한 탄성파 시간 이력곡선을 다중 채널 기록 형태로 획득하게 된다. 이러한 다중 채널 기록으로부터 파장(혹은 주파수) 별로 경사 중첩(slant stack) 등의 일관성 패턴과 도착 시간 분석을 통해 실험 분산곡선을 획득하게 된다(Xia 등, 2005). 다채널 기법은 여러 개의 감지기를 사용하여 여분의 자료를 획득함으로써 주변 잡음에 강하며 한 번의 실험을 통해 넓은 주파수 대역에서 실험분산곡선을 도출할 수 있다는 장점이 있다. 따라서 최근 표면파 기법의 국제적 연구 동향은 두 개의 감지기를 사용하는 방법(two station method)에서 MASW 기법과 같이 여러 개의 감지기를 사용하는 다채널 기법(multi station method)으로 옮겨가고 있는 추세이다(O'Neill, 2003; Foti, 2000; Rix, 2001; Yoon, 2005).

최근에 두 개의 감지기를 사용하는 방법으로 HWAW

(harmonic wavelet analysis of waves) 기법(Park과 Kim, 2001)이 소개되었다. HWAW 기법에서는 하모닉 웨이블릿(harmonic wavelet)을 이용한 시간-주파수 해석(time-frequency analysis)을 통해 실험 분산곡선을 자동적으로 도출할 수 있으며, 각 주파수별로 에너지가 최대인 점을 이용하므로 주변 잡음(noise)에 대한 영향이 적다는 장점이 있다. 좁은 간격을 가지는 하나의 감지기 조합과 짧은 가진원 거리를 이용하므로 실험 시간 및 노동력 측면에서 개선되었으며 한 번의 실험으로 전체 파장(혹은 주파수) 영역에서 실험 분산곡선을 획득할 수 있다(박형춘 등, 2004a). 하지만 HWAW 기법으로 획득되는 실험 분산곡선은 획득하고자 하는 파장의 길이에 비하여 가진원 거리가 짧기 때문에 대부분 평면파 형태의 레일리파에 의한 것이 아니며, 또한 압축파( $V_p$ , primary wave) 및 전단파( $V_s$ , secondary wave) 등의 체적파(body wave)의 영향이 더해진 것이다. 즉, 근거리장 효과(near field effects)가 가미된 것으로 일반적인 표면파 기법의 원리상 이러한 성분은 결과의 신뢰성을 저하시키는 요인으로 작용하므로 적절한 실험방법 및 해석과정에서의 필터링을 통해 이러한 영향을 최소화하고 있다. 하지만 HWAW 기법에서 이러한 근거리장 효과에 대한 극복은 역산(inversion) 방법의 차별성을 통해 이루어진다. 실제 실험 조건과 동일하게 하여 도출된 이론 분산곡선(theoretical dispersion curve)을 이용하는 단일 배열 역산(single array inversion)을 통해 근거리장 효과가 가미된 실험 분산곡선으로부터 지반의 전단파 속도 주상도를 도출할 수 있다(박형춘 등, 2004b).

HWAW 기법의 이러한 특성은 기존 논문(박형춘 등, 2004a; 박형춘 등, 2004b)에 상세하게 기술이 되어 있다. 기존 논문에서 HWAW 기법을 통해 감지기 거리에 따라 도출된 실험 분산곡선에 대한 수치해석적 검증은 동적강성행렬법(dynamic stiffness matrix method)을 기반으로 하여 가진원으로부터 거리별 시간 영역 신호를 생성해 주는 프로그램 FIT7(Joh, 1996b)을 이용한 것이다. 본 논문에서는 이에 대한 후속 연구의 일환으로 보다 확실한 수치해석적 검증을 위해 유한요소법을 이용하여 탄성파의 전파 형상을 모델링하고 시간 영역 신호를 획득하였다. 그리고 특별히 근거리장에 초점을 맞추어 HWAW 기법을 검증하고자 하였다. 반무한층에 5m 두께의 수평층이 2개 쌓여 있는 형태로 지반 모델을 구성하였으며 반무한층 및 상부 수평층의 전단파 속도를 달리하여 총 5개의 모델을 제작하였다. 지표면 수직 하중

에 의해 체적파 및 표면파가 모델 내에 전파되는 형상을 모사하였으며 가진원으로부터 일정 간격의 여러 지점에서 탄성파 시간 이력 곡선을 획득하여 HWAW 기법으로 실험 분산곡선을 도출하였다. 이렇게 도출된 실험 분산곡선과 반사·통과계수법(reflection transmission coefficient method)을 기반으로한 정모델링 기법과 동적강성행렬법(dynamic stiffness matrix method)을 기반으로한 3차원 정모델링을 통해 도출된 이론 분산곡선과 비교하였다. 이를 통해 HWAW 기법의 실험 분산곡선 도출 방법을 다시 검증하고자 하였으며, 근거리장 효과를 고려하여 지반의 전단파 속도 주상도를 도출하는데 있어 배열 역산의 타당성에 대해 고찰해 보고자 하였다.

## 2. 근거리장 및 근거리장 효과

지반 구조체와 같은 3차원 매질 내에서는 어느 하나의 탄성과 성분을 주되게 발생시킬 수는 있어도 어느 하나의 성분만 유일하게 발생되지는 않는다. 주되게 발생된 탄성과 외에 다른 탄성파에 의해 주된 탄성파가 영향을 받는 영역을 근거리장(near field)이라 일컫으며 이러한 근거리장에서 발생하는 모든 역효과를 근거리장 효과(near field effects)라고 한다. 표면파는 체적파가 특정 경계조건으로 인해 변종된 형태로 레일리파는 P파와 SV파, 러브파는 P파와 SH파가 조합된 형태이다. 일반적으로 이러한 레일리파에 있어서 원거리장의 의미는 가진원으로부터 충분히 멀어서 원통 형태로 전파되던 레일리파의 형상이 평면 형태로 전파되는 것과 동일하다고 가정할 수 있는 영역이며 또한 수직하중에 의해 발생한 압축파와 전단파의 영향이 존재하지 않는 영역을 의미한다. 실질적으로 수직하중이 가해졌을 시에 전체 에너지 중 약 67%는 레일리파이고 전파 형상의 특성상 체적파는 레일리파에 비해 그 기하학적 감쇠 정도가 크므로 가진원으로부터 특정 거리 이상에서는 레일리파만 존재한다고 가정할 수 있다. 일반적으로 레일리파의 원거리장은 파장에 따라 그 영역이 다르게 되며, 가진원으로부터 해당 파장의 10배가 되는 거리의 바깥 영역에 해당된다(Sanchez-Saliner, 1987).

표면파 기법에서 체적파의 영향이 없고 평면파 형태로 가정이 가능한 순수한 레일리파를 획득하기 위해 이러한 엄격한 조건을 만족시키면서 현장 실험을 수행하기는 거의 불가능하다. 측선의 길이가 길수록 현장 실험 수행이 힘들어지며 표면파 기법의 필수 가정 사항이라 할 수 있는 수평층 가정(stratified model)에 위배될 확률

이 높아지기 때문이다. SASW 기법에서는 가진원으로부터 첫 번째 감지기 거리에 따라 사용 가능한 파장 영역을 규정한 필터 조건을 이용하여 근거리장 효과를 피하고자 하였으나 여러 연구자에 의해 제시된 필터 조건이 동일하지 않으며 엄격한 필터 조건을 적용할 경우 장주기 성분을 획득하기 위한 측선의 길이가 너무 길어지게 되는 문제점이 있다. MASW 기법과 같은 다채널 기법에서도 이러한 근거리장 효과에 대한 연구가 수행된 바 있다(Foti, 2000; Yoon, 2005). 다채널 기법에서는 다중 신호(multi station seismogram)의 획득을 통해 근거리장 효과를 줄여 줄 수 있다고 보고 있으며, 또한 SASW기법에서와 같이 가진원으로부터 첫 번째 감지기까지의 거리를 어느 정도 떨어뜨려 실험을 수행한다. MASW 기법에서 근거리장 효과를 줄여주기 위해 획득하고자 하는 최대 파장의 1/2배 이상에서 가진하는 것을 권장하고 있으나 이럴 경우 장파장 성분의 측정을 위해서는 가진원의 거리가 너무 멀어지게 되며 고주파 대역의 자료를 획득하기 어렵게 된다(Park 등, 1999). 이렇듯 이러한 근거리장 효과는 표면파 기법을 신뢰성 있게 수행하는데 있어 큰 장애 요인이 되고 있다.

## 3. 다층구조에서 레일리 분산 방정식 및 이론 분산곡선의 도출

균질한 반무한층일 경우 레일리파의 위상 속도를 도출하기 위한 레일리 방정식과 변위에 대한 수식이 비교적 간단하게 유도된다. 3차원상에서 지표면에 점하중(point source)을 가했을 경우에도 모든 탄성파 성분(complete or full wavefield)을 포함한 특정 위치에서의 변위가 Lamb(1904)에 의해 분석적으로 유도된 바 있다. 하지만 일반적인 지반은 균질한 반무한층인 경우가 아니며 매우 복잡한 형상을 가지게 된다. 일반적으로 지반은 압반 등의 반무한층 위에 수평한 지반층이 차례대로 쌓여 있는 형상(stratified shape)으로 가정할 수 있다. 이러한 지반에서 표면파 기법을 수행하기 위해서는 다층구조에서의 레일리파의 거동을 이해하여야 한다. 다층구조에서 레일리파의 위상속도와 주파수 그리고 각 층들의 밀도, 전단파 속도 등은 식 (1)과 같은 관계를 가지게 되며 이를 레일리 분산 방정식 (Rayleigh dispersion equation)이라 일컫는다(Lai, 1998).

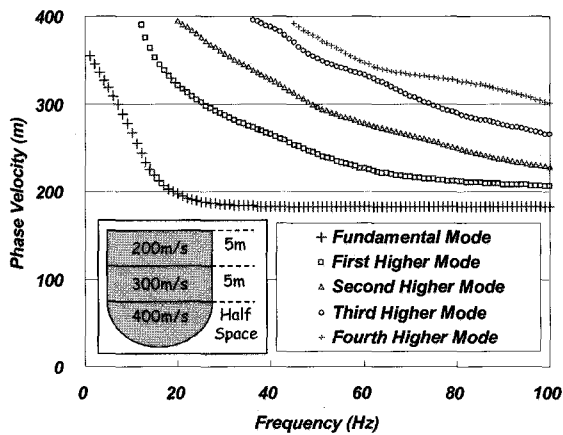
$$F_R[\lambda(y), \mu(y), \rho(y), k_p, w] = 0 \quad (1)$$

여기서,  $\lambda$ =파장,  $\mu$ =전단파 속도,  $\rho$ =밀도,  $k$ =파수,  $\omega$ =각주파수이다. 이러한 레일리 분산 방정식의 해를 구하기 위해서는 수치적 계산(numerical calculation)이 요구된다. 대표적인 방법으로는 Thomson(1950)과 Haskell(1953)의 전이행렬법(transfer matrix method), Kausel과 Roesset(1981)의 동적강성행렬법(dynamic stiffness matrix method)과 Kennett(1974)에 의해 개발된 반사·전달계수법(reflection and transmission coefficients method) 등이 있다. 이러한 방법들은 각 층의 정보를 담고 있는 각각의 행렬(matrix)이 합쳐진 형태로 레일리 분산 방정식을 구성하게 되며, 이러한 전체 행렬(global matrix)에 대한 고유치 문제(eigenvalue problem)의 해를 찾는 방식으로 각 주파수별로 레일리 분산 방정식의 해인 파수( $k$ )를 찾을 수 있다. 이 때 정확하게 해를 찾을 수 있는 기술(root searching technique)의 적용이 매우 중요하다. 이렇게 구한 주파수별 파수를  $V_R=f/k$ 의 관계식을 이용하여 주파수별 위상속도로 변환할 수 있으며 이러한 주파수별 위상속도 분포 상에서 유사한 형상을 가지는 값끼리 연결하게 되면 층상구조에서의 레일리파의 분산곡선(rayleigh wave dispersion curve)을 획득하게 되며 이를 레일리 고유 모드(free rayleigh modes, normal modes)라고 일컫기도 한다.

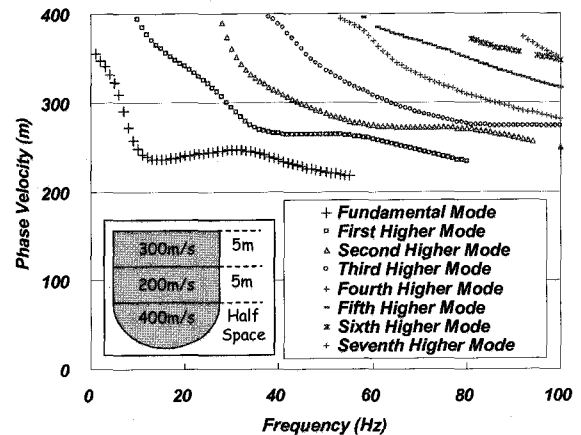
그림 1에 반무한 층 위에 5m 두께를 가지는 2개 층으로 구성된 다층구조에서의 레일리 분산 곡선을 도시하였다. 레일리 분산곡선을 획득은 Hisada에 의해 개발되고 Lai(1998)에 의해 개선된 프로그램을 사용하였으며 이는 반사·전달계수법에 기초로 하고 있다. 그림 1(a)는 깊이에 따라 전단파 속도가 증가하는 형태(정규 모델)이며 그림 1(b)는 깊이에 따라 전단파 속도의 증감이 존

재하는 형태(비정규 모델)이다. 정확한 지반 모델 형상은 그림 1(a)와 (b)에 각각 도시한 바와 같다. 주파수별 레일리파의 위상 속도는 1개가 아니며 즉, 여러 모드가 존재하는 것을 볼 수 있다. 정규 모델일 경우 레일리 고유 모드가 모든 모드에 있어서 주파수가 증가함에 따라 서서히 감소하는 것을 볼 수 있다. 비정규 모델에 있어서는 고유 모드의 형상이 정규 모델에 비해 주파수에 따라 증감이 존재하는 것을 볼 수 있다. 이는 표면파의 주파수가 고주파일 경우 얇은 깊이를 저주파일 경우 깊은 깊이까지 대변한다는 표면파의 기본원리를 잘 보여주고 있으며 고차모드일수록 동일 주파수상에서 깊은 깊이의 물성치를 대변하고 있다는 사실도 확인할 수 있다. 각 모드에 있어서 그 위상속도는 해당 지반의 최대 속도층의 전단파 속도를 초과할 수 없기 때문에 각 모드로 별로 차단 주파수(cutoff frequency)가 존재하게 된다. 또한 기본 모드에 있어 주파수가 0으로 갈수록 반무한층의 고유의  $V_R$ 으로 수렴하게 되며 각 모드의 위상속도는 해당 지반의 최소 속도를 가지는 지반의  $V_R$ 보다 작지 않게 된다.

층의 형상이 복잡할수록 지반에 존재하는 모드의 수는 많게 되며 이러한 여러 모드의 복합적인 영향에 의해 지반은 거동하게 된다. 이러한 모드는 서로 다른 속도를 가지므로 가진원으로부터 멀어질수록 이러한 모드는 서로 분리되어 거동하게 되며 다수의 감지기를 이용한 표면파 기법을 수행할 경우 그림 1과 같은 레일리 고유 모드로 분리된 분산 곡선의 획득이 가능하다. 하지만 실제 현장에서는 주로 12개에서 24개 정도의 감지기를 사용하게 되는데, 이 경우 여러 모드로 분리된 형태의 분



(a) 정규 모델



(b) 비정규 모델

그림 1. 레일리파의 분산 곡선 일례  
(각 모델의 층 두께 및 속도는 그림 내 좌측 하단에 도시,  $\rho=1.8t/m^3$ ,  $\nu=0.3$ )

산곡선을 정확하게 획득하는 것이 때로는 불가능하며 여러 모드가 복합적으로 작용한 형태의 분산곡선을 획득하게 된다. 다층구조상에서 표면파의 여러 모드가 동시에 변위에 관여할 경우 가진원에서의 거리에 따라 각 모드의 기여도가 다르게 되므로 지표면에서의 표면파에 의한 거동 특성 또한 감지기 위치에 따라 달라지게 된다. 표면파 기법의 역산 과정에서 보다 더 정확한 이론분산곡선을 도출하기 위해서는 실제 표면파 기법을 최대한 모사할 수 있는 방법이 필요하다. 이를 위해 가진원으로부터 거리에 따른 변위의 도출이 요구 되었으며 이는 그린 함수(Green's functions)를 통해 구현될 수 있다. 변위 그린 함수(displacement Green's function)는 조화 단위 하중이 탄성체에 가해졌을 경우 거리에 따른 변위를 나타내게 된다.

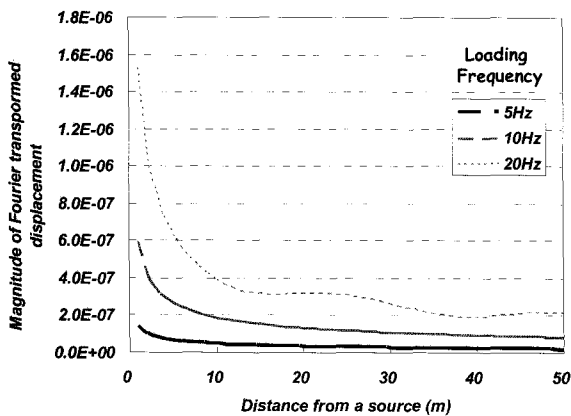
### 3.1 평면파 형태의 레일리파에 대한 변위 그린 함수

조화단위 하중에 의한 다층구조에서의 변위를 도출

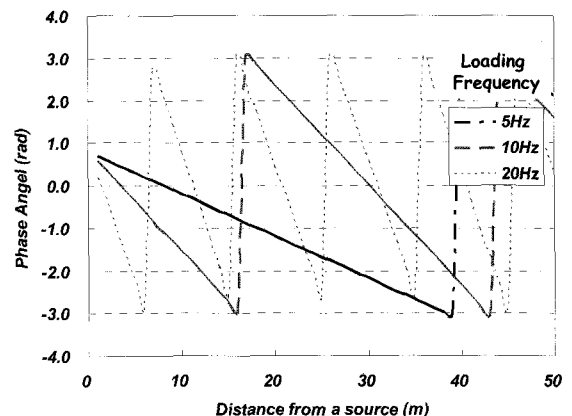
하기 위하여 평면파 형태의 레일리파에 대한 그린 함수 (Green's functions for plane Rayleigh waves)가 Lai(1998)에 의해 사용되었다. 일반적으로 가진원으로부터 거리가 멀 경우 체적파의 영향은 줄어들고 레일리파는 평면파 형태로 가정이 가능하게 된다. 단위 조화하중에 의한 특정 위치에서 수직 변위는 식 (2)와 같이 여러 모드의 중첩된 형태로 계산되어 진다. 즉, 계산되는 수직 변위는 체적파 영향이 없이 레일리파의 여러 모드의 기여도에 따른 복합된 거동의 결과이다.

$$u_z(x, w) = |u_z(x, w)| e^{i[w \cdot t - \Psi_z(x, w)]} \quad (2)$$

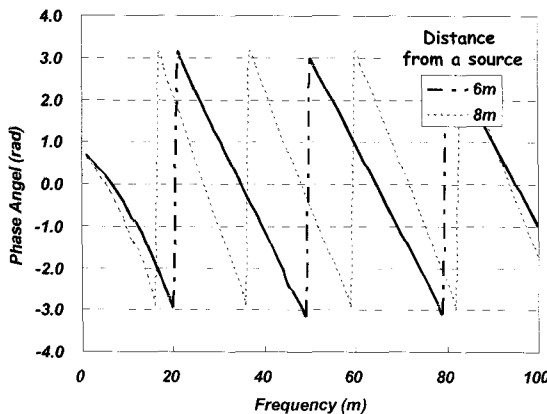
여기서  $|u_z(x, w)|$ 는 특정 주파수에서 거리에 따른 수직 변위의 크기를 나타내며  $\Psi_z$ 는 위상각을 나타낸다. 이러한 변위 그린 함수를 이용하여 그림 2(a)와 (b)와 같이 주파수별 가진원으로부터 거리에 따른 변위의 크기 및 위상 정보를 획득하게 된다. 이러한 정보를 이용하여 그림 2(c)와 같이 가진원으로부터 특정 위치에서 주파수에 따른 위상 정보를 획득할 수 있으며 그림 2(d)와 같이



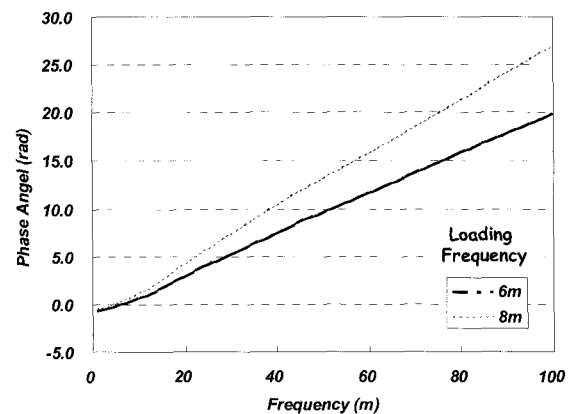
(a) 거리별 변위 크기



(b) 거리별 위상



(c) 주파수별 위상각



(d) 위상각 전개 후

그림 2. 평면파 가정을 통한 그린 함수로부터의 위상 정보 획득 과정

위상 전개 과정을 거쳐 두 위치간의 실질적인 위상차를 획득할 수 있게 된다. 이러한 위상차 ( $\phi_{rad}$ ) 정보와 두 위치간의 거리(d) 등을 알면 식 (3)을 이용하여 주파수별 위상속도를 도출할 수 있으며 이는 곧 평면 레일리파 가정에 대한 이론 분산곡선이 된다.

$$V_{ph,f} = \frac{2\pi d}{\phi_{rad,f}} \quad (3)$$

그림 2(c)와 그림 2(d)에서는 가진원으로부터 거리 6m와 거리 8m의 정보를 이용하였다. 이렇게 각 위치에서의 실제 변위를 이용하여 속도를 도출하게 되면 이러한 속도는 레일리의 고유 모드의 어느 하나의 값을 대표하는 것이 아니라 여러 모드의 중첩으로 인해 결정되게 되며 이러한 겹보기 속도에 대한 분산곡선을 겹보기 분산곡선(apparent dispersion curve)이라고 한다. 그림 3에 그림 2와 같은 과정을 거쳐 도출한 겹보기 분산 곡선을 도시하였다(범례에서 Plane Rayleigh Wave). 이러한 과정을 본 논문에서는 Lai의 방법이라 일컫기로 한다. 또한 평면파 형태로 레일리파를 가정한 것이므로 범례에 Plane Rayleigh Wave로 표기하였다. 정규 모델의 경우(그림 2(a))에는 레일리 고유 모드의 기본 모드와 유사한 형태를 보이지만 비정규 모델(그림 2(b))일 경우에는 주파수가 증가할수록 고차모드가 지배적으로 겹보기 분산곡선을 결정하는 것을 볼 수 있다. 이러한 겹보기 분산곡선은 각 모드의 속도가 다르므로 가진원으로부터 거리에 따라 각 고유모드의 기여도가 다르게 되므로 감지기 위치에 따라 약간씩 다른 형태를 가지게 된다.

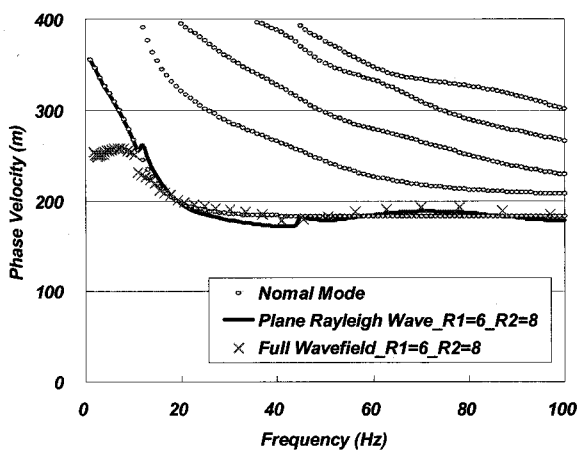
### 3.2 체적파를 포함한 레일리파에 대한 변위 그린 함수

지표면에 수직 하중이 가해졌을 경우 실제 지반에서는 구형으로 전파되는 체적파와 원통형으로 전파되는 레일리파가 합쳐진 형태로 발생하게 된다. 그러므로 가장 합리적으로 실제와 동일한 상황으로 표면파 기법을 모사하기 위해서는 이러한 사항들을 고려하는 것이 바람직하다. 다층구조 상에 임의의 동적 하중이 가해졌을 경우 체적파를 포함한 레일리파에 의해 발생하는 변위를 모사하고자 Kausel(1981)에 의해 동적강성행렬법을 기초로 한 변위 그린 함수(Green's functions for full wavefield)가 개발되었다. 크기 p를 가지는 수직 방향의 조화 점하중에 대하여 수직방향 입자 운동은 그린 함수로부터 수식 (4)와 같이 계산되어진다. 이러한 적분식은 식 (5)와 같이 각 모드별 변위를 가중하여 산정하는 식으로 유도된다. 이에 근거하여 가진원으로부터 거리별 변위 산정을 할 수 있게 된다.

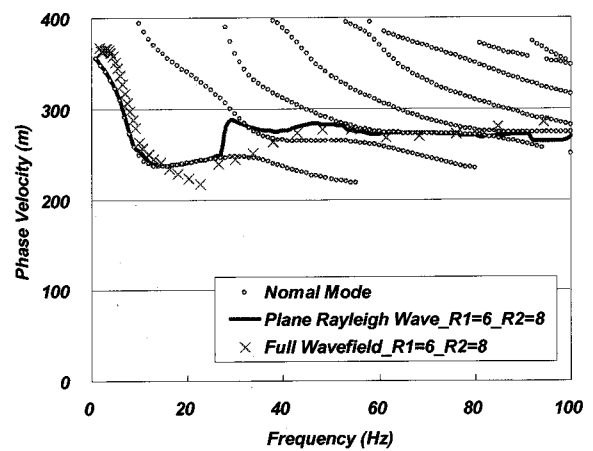
$$u_z(x,w) = \int_0^\infty u(k,w) \cdot J_n(kr) \cdot k \cdot dk \quad (4)$$

$$u_z(x,w) = \frac{p}{4i} \sum_{l=1}^{2N} \phi_z^{ml} \phi_z^{nl} H_0^{(2)}(k_l x) \quad (5)$$

여기서  $u(k,w)$ 는 단위 하중이 가해졌을 시 주파수파수 영역에서의 변위 특성,  $J_n$ 은 n차의 베셀 함수(Bessel function)이며  $\phi_z$ =표층에서 1 번째 모드의 z성분 모드 변위,  $H_0^{(2)}$ 는 첫 번째 차수의 두 번째 Hankel 함수,  $k_l$ 은 1 번째 고유해이다. 이러한 Kausel의 변위 그린 함수를



(a) 정규 모델



(b) 비정규 모델

그림 3. 가진원 거리를 고려한 겹보기 분산 곡선의 도출 (Plane Rayleigh Wave=Lai의 방법, Full Wavefield=Kausel의 방법)

이용하여 Lai의 방법과 동일하게 겹보기 분산곡선을 도출할 수 있게 된다. 이와 같은 방법을 본 논문에서는 Kausel의 방법이라 일컫기로 한다. 또한 체적파와 원통형 형태의 레일리파를 고려하였으므로 범례에서 Full Wavefield로 표기하였다. 그림 3에 가진원으로부터 6m와 8m 거리에서의 변위 정보를 이용하여 도출한 이론 분산곡선을 도시하였다. 이는 Lai의 방법에서 적용한 감지기 위치와 동일하다. 전반적으로 Lai의 방법을 통한 평면파 가정을 통한 레일리파의 겹보기 분산곡선과 유사하지만 저주파대역으로 갈수록 차이가 발생하는 것을 볼 수 있다. 이는 Kausel의 그린 함수에서는 레일리파를 원통형으로 전파되는 것으로 모사하고 반구형으로 전파되는 체적파를 동시에 고려하기 때문이다. 이렇듯 레일리파에 있어서 근거리장 효과는 레일리파가 평면파 형태가 아닌 원통형으로 전파 된다는 것과 체적파가 전체 변위에 영향을 주는데 기인한다. 만약 가진원으로부터 충분히 거리가 멀다면 레일리파는 평면파 형태로 가정할 수 있고 체적파가 레일리파에 비해 생성된 에너지가 작고 감쇠가 빠르므로 이러한 근거리장 효과는 사라지게 된다. 즉, Lai의 평면파 가정의 그린함수에 의한 결과와 Kausel의 Full Wavefield 가정의 그린 함수에 의한 변위는 같아지게 될 것이다.

#### 4. HWAW 기법

HWAW 기법에서는 주파수별 위상속도를 구하기 위해 하모닉 웨이블릿 변환(harmonic wavelet transform)을 이용한 시간-주파수 해석(time frequency analysis)을 수행한다. 시간-주파수 해석 결과에서 신호 대 잡음비(S/N)가 최대인 점을 이용하여 두 지점간의 각 주파수별 도달시간 차를 산출하며 감지기간 거리를 이용하여 각 주파수 성분에 대한 위상속도, 즉 실험 분산곡선을 도출하게 된다(박형춘 등, 2004a). 동일한 실험 조건으로 현장 실험의 수행하였을 경우 SASW 기법에서의 스펙트럼 분석 및 위상전개법을 통해서도 실험 분산곡선 도출이 가능하나 HWAW 기법에서는 분산곡선 도출 과정이 반자동화 되어 있어 해석자의 주관 및 전문성이 크게 요구되지 않게 된다. 또한 신호/잡음비가 최대인 점을 사용하므로 주변 잡음에 대한 영향이 SASW 기법에 비해 매우 적다. 기존의 SASW 기법에 비해 비교적 간단한 형태의 가진원으로도 고주파에서부터 저주파까지 분산곡선을 한 번의 실험으로 획득이 가능하다는 장점을 가진다.

이러한 HWAW 기법을 이용하여 획득한 실험분산곡선으로 전단파 속도를 도출하기 위해 단일 배열 역산(single array inversion)을 적용한다(박형춘 등, 2004b). 단일 배열 역산은 하나의 시험 수행 자료에 대해 실험 수행시의 가진원 거리 및 감지기 간격을 고려하여 역산을 수행하는 것으로 실제 실험 조건과 동일한 상태에서 정모델링(forward modeling)을 통해 획득한 이론 분산곡선을 역산 과정에서 이용한다. 이러한 단일 배열 역산은 실험 분산곡선과 이론분산곡선의 일대일 비교가 가능하므로 역산과정이 간단명료하게 된다. 단일 배열 역산을 적용할 경우 근거리장 효과는 극복할 수 있지만 실제 지반의 횡방향 불균일성 문제까지는 해결할 수 없다. 하지만 HWAW 기법은 감지기 간격 및 가진원 거리가 다른 표면파 기법에 비하여 충분히 짧기 때문에 지반의 횡방향 불균일성에 의한 오류를 최소화할 수 있다는 장점이 있다. HWAW 기법의 특징은 우선 실험 분산곡선을 구하는 과정에 있어 하모닉 웨이블릿을 이용한 시간주파수 해석을 수행하여 주변 잡음에 영향을 덜 받는 상태에서 자동적으로 실험 분산곡선을 획득하는데 있지만, 또 하나 중요한 특징은 근거리장 영역에서 획득한 자료들을 다른 표면파 기법에서처럼 필터링 조건 등을 통해 제거하는 것이 아니라 해석에 적극적으로 활용하는데 있다고 할 수 있다.

#### 5. 유한요소 해석 결과를 이용한 근거리장에서의 HWAW 기법의 검증

근거리장에서의 탄성파의 전파특성을 파악하고 HWAW 기법을 검증하기 위해서 유한요소 해석을 수행하였다. HWAW 기법 관련한 수치해석적 검증은 기존 논문(박형춘 등, 2004a)에서 Kausel의 동적강성행렬법에 기인하여 시간 영역에서의 파형을 생성해 주는 프로그램 FIT7을 통해 수행된 바 있다. 이 프로그램은 식 (4)와 같이 주파수 영역의 신호를 역후리에 변환(Inverse Fourier Transform)을 통해 시간영역 신호를 도출하는 것으로 다층구조에서의 매우 이상적인 신호를 획득할 수 있다. 본 연구에서는 이러한 기존의 검증 방식과 다르게 유한요소 해석을 통해 시간영역 신호를 획득하고자 하였다. 시간영역에서의 유한요소 해석은 실제 지반에서 실험 수행하는 것과 동일하게 가진이 가능하고 탄성파의 전파 형상을 모델링할 수 있으므로 실제와 동일한 조건으로 수치해석적 검증이 가능하다는 장점이 있다. 수치해석 연구에

서는 대표적 유한요소 상용 프로그램인 ABAQUS Standard를 사용하여 검증 과정 및 결과의 객관성을 확보하고자 하였다. 근거리장에서의 거동 특성을 보기 위하여 가진 원으로부터 2m부터 14m까지 2m간격으로 수직 방향에 대한 입자 속도(particle velocity) 성분을 획득하였다. 가진 원으로부터 거리별로 획득한 시간 이력 곡선을 통해 HWAW 기법으로 실험 분산곡선을 획득하였으며 이러한 실험 분산곡선들과 앞서 소개한 바 있는 레일리 모드 분산곡선(normal modes), 반사·통과계수법을 기반으로한 정모델링 기법(Lai의 방법, plane Rayleigh wave)과 동적강성행렬법을 기반으로 한 3차원 정모델링(Kausel의 방법, full wavefield)을 통해 도출된 이론 분산곡선과 비교하였다. 이를 통해 HWAW 기법의 실험 분산곡선 도출 과정을 다시 검증하고자 하였으며 근거리장 효과를 고려하여 지반의 전단파 속도 주상도 도출하는데 있어 적합한 역산 기법에 대해 고찰해 보았다.

본 수치해석에 사용된 지반 모델을 그림 4에 도시하였다. Case 1은 균질한 반무한층 지반이며 Case 2와 Case 3은 정규 모델, Case 4와 Case 5는 비정규 모델이다. Case 1에서는 기하학적 분산(geometric dispersion) 특성을 제외한 순수한 근거리장에 의한 영향을 알아보려고 하였으며 일반적인 지반을 대표하고자 토층의 두께가 두꺼운 2층 모델(Case 2), 깊이에 따라 서서히 증가하는 모델(Case 3), 표층에 다짐등으로 인해 속도가 큰 지반(Case 4), 중간에 주변보다 속도가 큰 층이 있는 지반(Case 5)을 단순하게 모사하였다. 탄성파의 전파 특성을 모델링하는 유한요소 해석에서는 모델 내 요소의 크기와 계산 간격이 결과의 정확성을 보장해 주는 중요한 요소이다. Zerwer 등(2002)이 추천한 조건에 근거하여 최소 파장의 크기는 2m 정도이므로 요소 크기를 0.2m로 충분히

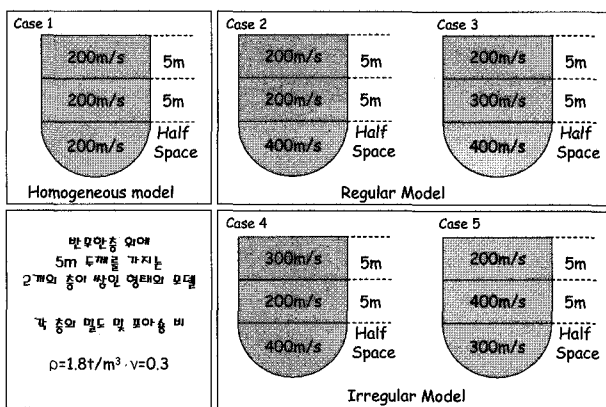


그림 4. 수치해석을 위해 제작된 지반 모델 형태

작게 결정하였으며 계산 간격은 한 요소를 이동하면서 1번 이상의 계산이 수행될 수 있도록 0.0005초로 설정하였다. 전체 모델의 크기는 획득하고자 하는 최대파장을 고려하여 수직 100m, 수평 100m로 설정하였다. 대칭축 상에서 지표면에서 수직방향으로 해머 타격과 유사한 방식으로 가진을 하였으며 가진 지점에서부터 2m간격으로 14m까지 총 7개 지점에서 가상의 감지기 위치를 설정하여 지표면에서의 입자 운동을 기록하였다. 그림 5에 가진 뒤 0.02초, 0.04초 및 0.06초에서 모델 내에서 가진 원으로부터 탄성파가 전파되어 나가는 형상을 도시하였다. 수직방향 가진에 의하여 가진 지점을 중심으로 반구형태의 체적파와 뒤이어 레일리파가 전파되는 형상을 관찰할 수 있다. 이러한 수치해석을 통해 지표면 가상의 감지기 위치에서 획득한 파형 일례를 동시에 도시하였다.

Case 1, 즉 균일한 반무한층에서의 유한요소 해석 결과를 Lai의 방법 및 Kausel의 방법을 이용한 이론 분산곡선 도출 결과와 비교하여 그림 6에 도시하였다. 유한요소 해석 결과(ABAQUS\_HWAW)는 가진 원으로부터 2m에서 14m까지 2m간격으로 측정한 시간 이력곡선을 이용하여 HWAW 기법으로 분산곡선을 도출한 것이며 (이하 실험분산곡선) Lai의 방법(Plane Rayleigh Wave)과 Kausel의 방법(Full Wavefield) 결과는 동일한 가상의 감지기 위치에서의 해당 방법을 통해 획득한 주파수별 위상 정보를 이용하여 분산곡선을 도출한 것이다. 이러한 균질한 반무한층에서는 레일리파가 완전 평면파로 가정되었을 경우 결정되는 위상속도는 주파수별로 동일하며 하나의 모드만이 존재한다. 그러므로 가진 원로부터 거리가 달라진다 할지라도 Lai의 방법에 의해 도출한 서로 다른 감지기 위치에서의 분산곡선은 모두 동일한 것을 볼 수 있다. 이에 반하여 Kausel의 방법의 결과는 주파수별로 다른 위상속도를 가지며 가진 원로부터 거리가 달라짐에 따라 분산곡선의 형태 또한 달

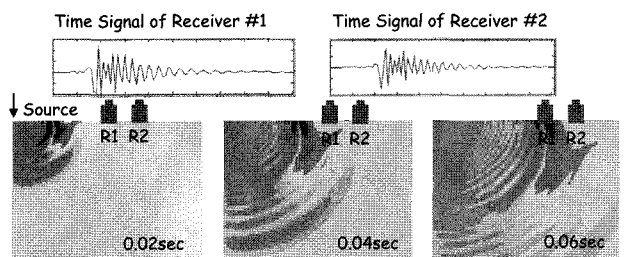


그림 5. 모델 내에서 가진 원으로부터 탄성파가 전파되어 나가는 형상 및 획득 파형 일례



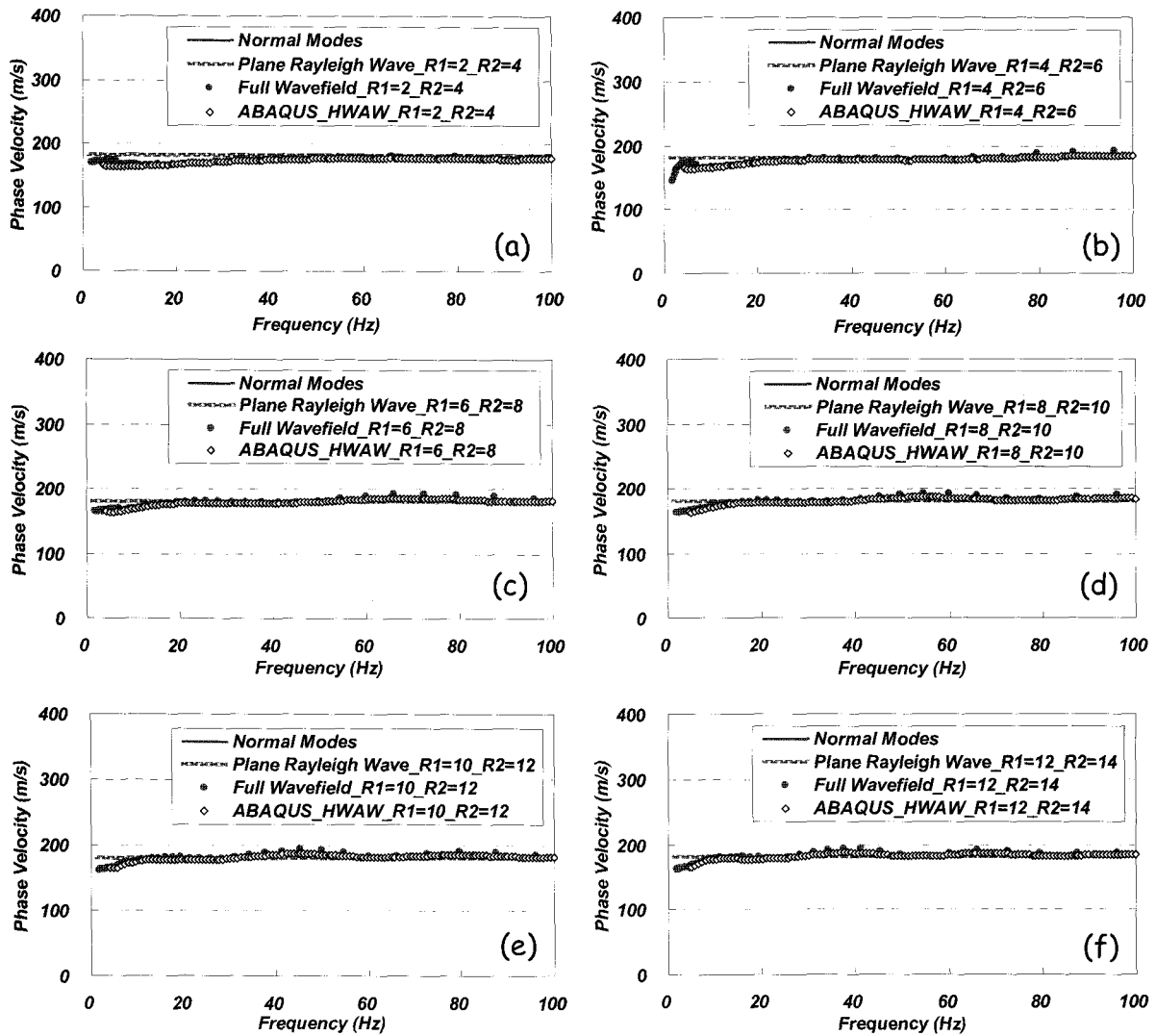


그림 6. 균일 반무한층(Case1)에서의 수치해석 결과 비교

라지는 것을 볼 수 있다. 이는 아직 감소되지 않은 체적 파와 아직 평면파로 가정하기 힘든 상태로 원통형 전파 특성을 보이는 레일리파에 의한 결과이다. 다시 말하면 근거리장 효과에 따른 결과이다. ABAQUS 수치해석을 통해 획득한 파형으로 HAWW 기법을 적용하여 도출한 실험 분산곡선은 Lai의 방법 결과보다는 Kausel의 방법 결과와 경향이 일치하는 것을 볼 수 있으며 약간의 수치적 오류를 감안한다면 거의 동일한 값을 주고 있다고 판단할 수 있다. Lai의 방법으로 역산을 수행한다면 올바른 전단파 속도 주상도를 도출할 수 없게 됨을 짐작할 수 있다. 굴곡이 있는 실험분산곡선을 Lai의 방법을 통한 이론 분산곡선과 일치시키기 위해서는 단일층이 아닌 복잡한 형상의 전단파 속도 주상도를 가정해야 할 것이다. 하지만 Kausel의 방법을 이용할 경우 보다 정확한 전단파 속도 주상도를 도출할 수 있음을 알 수 있다.

Case 2는 2층 모델로 Case 1과는 다르게 깊이에 따라 속도가 증가하는 모델이다. 이 경우 분산곡선의 형태는 Case 1의 균질한 층과는 다르게 주파수에 따라 크게 변화하게 된다. 또한 가진원으로부터 거리에 따라 실험분산곡선의 형태가 달라지는 것을 확인할 수 있다. Lai의 방법 결과는 가진원으로부터 거리에 따라 그 형태가 거의 동일하며 레일리 모드 분산곡선 중 기본 모드와 거의 일치하는 것을 볼 수 있으나 실험분산곡선과 상당한 차이를 보인다. 반면에 Kausel의 방법 결과는 모든 감지기 위치에서의 실험분산곡선과 그 형태가 매우 유사한 것을 볼 수 있다. 거리에 따라 근거리장 효과가 다르므로 실험 분산곡선의 형태 또한 달라지지만 감지기 위치를 고려하는 단일 배열 역산을 통해서 이러한 영향을 극복할 수 있음을 확인할 수 있다. 다른 정규 모델인 Case 3은 3층 모델로써 이 경우에도 Case 2에서의 동일한 결

과를 보여주고 있다.

Case 4는 깊이에 따라 속도가 감소했다 다시 증가하는 즉, 과압밀 지반 혹은 상부 다짐지반의 형태를 모사한 것이다. 표층이 주변에 비해 강성이 큰 모델의 특성으로 인해 30Hz 대역에서 공진 현상이 발생하고 수치 해석적 오류가 존재하여 실험 분산곡선 형태가 다른 모델의 경우에 비해 약간의 왜곡이 존재한다. 그림 3(b)와 관련하여 언급한 바와 같이 겉보기 분산곡선인 실험 분산곡선은 레일리 모드 분산곡선을 교차하면서 지나가는 것을 볼 수 있다. Case 4에서도 Kausel의 방법을 통한 결과와 실험 분산곡선이 유사한 형태를 나타내는 것을 볼 수 있으며 Lai의 방법 결과와는 상당한 차이를 보인다. 즉, 상부층의 속도가 하부지반보다 클 경우 근접장

효과 및 겉보기 분산 특성이 더욱 두드러지는 것을 알 수 있다. Case 5는 중간층에 주변보다 단단한 층이 존재하는 것으로 비정규 모델이지만 Case 4와는 다르게 기본 모드가 주되게 작용하는 것을 볼 수 있다. 이 모델에 있어서도 앞의 모든 모델과 마찬가지로 결과를 보여 주고 있다.

본 유한요소 수치해석을 이용한 검증 연구를 통해 근접장 효과가 가미된 실험 분산곡선이라고 할지라도 Kausel의 방법을 통해 역산이 가능하다는 것을 확인할 수 있었다. 이와 동시에 본 논문의 연구 결과는 Kausel의 방법이 실제 현상을 잘 모사할 수 있도록 신뢰성 있게 유도되었음을 확인시켜 주었다. 또한 가진원으로부터 감지기 위치를 고려하는 배열 역산이 표면파 기법에서 필수적임을 알 수 있었다.

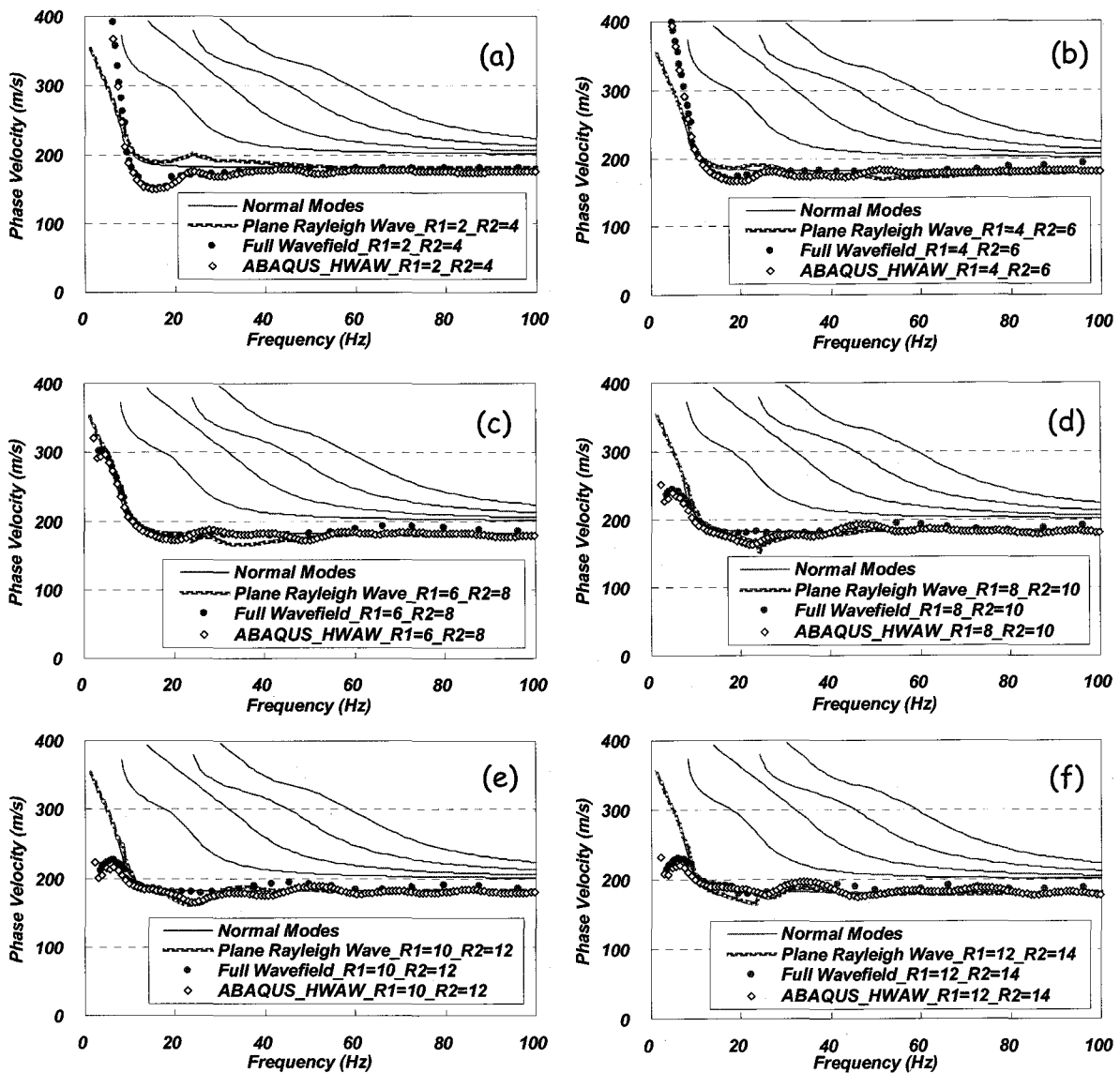


그림 7. Case 2에서의 수치해석 결과 비교

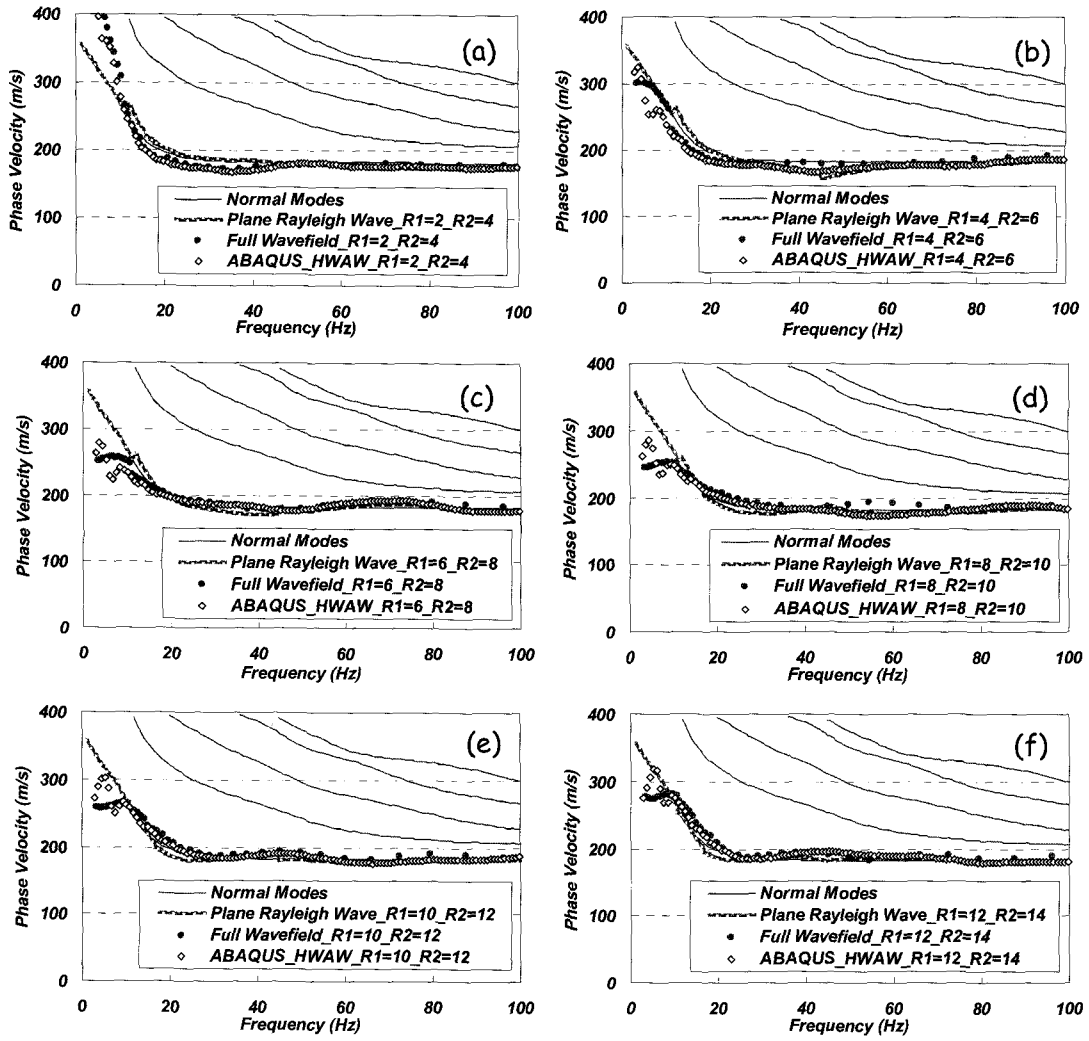


그림 8. Case 30에서의 수치해석 결과 비교

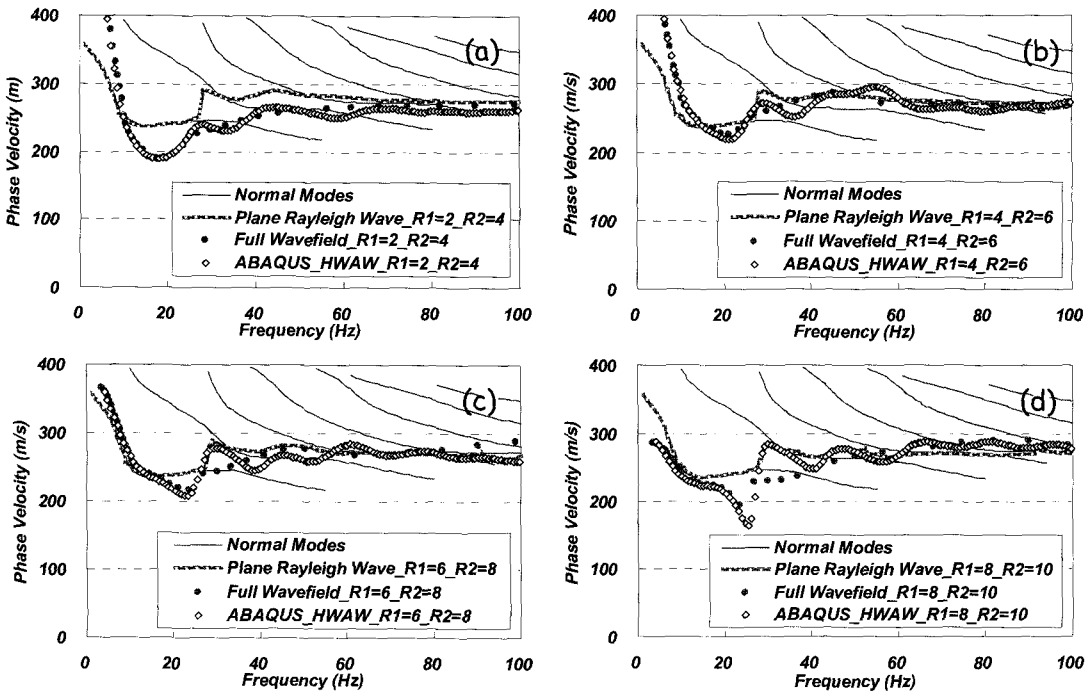


그림 9. Case 40에서의 수치해석 결과 비교(계속)

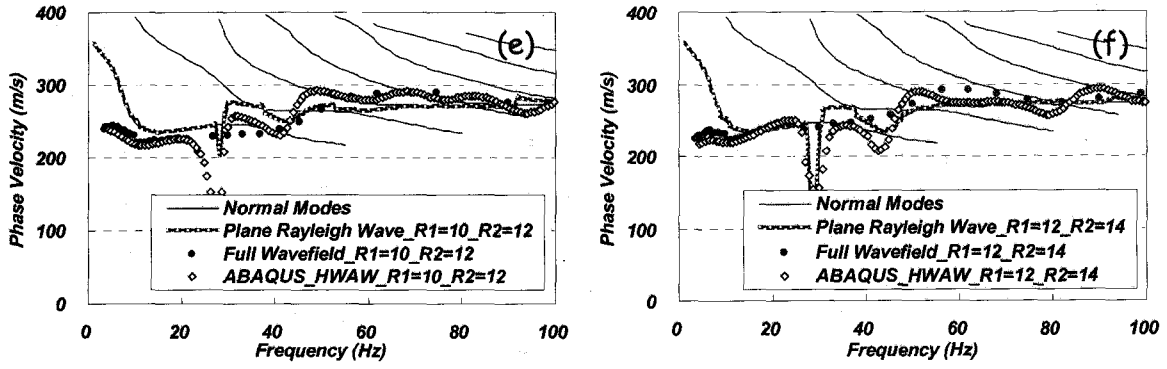


그림 9. Case 40에서의 수치해석 결과 비교

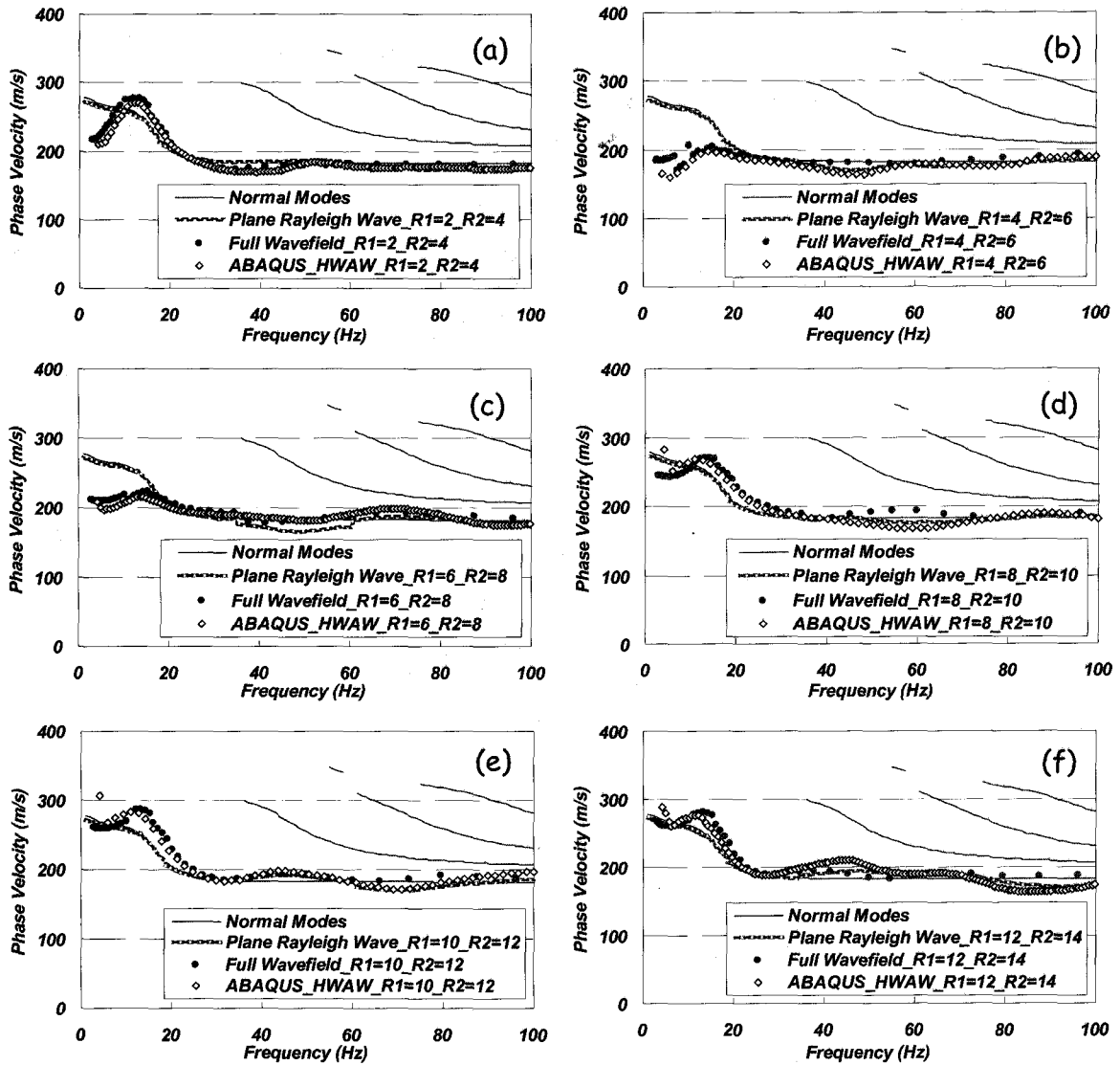


그림 10. Case 50에서의 수치해석 결과 비교

## 6. 요약 및 결론

본 논문에서는 HWAW 기법으로 근거리장 영역을 적극적으로 활용하여 지반의 전단파 속도 주상도를 도출

할 수 있음을 보여 주기 위해 수치해석을 수행하여 검증 연구를 수행하였으며 다음과 같은 결론을 도출하였다.

(1) HWAW 기법은 시간-주파수 해석을 통해 주변잡음

에 강하고 하나의 가진원, 감지기 조합으로 실험 수행이 가능하므로 다른 표면파 기법에 비해 근거리장 영역의 자료를 적극적으로 활용하는데 있어 유리하다.

- (2) 이론 분산곡선 도출 과정은 기본적 가정 사항에 따라 여러 가지 방법이 존재하며 표면파 기법의 특성에 맞는 적합한 방법을 사용하여야 한다. HWAW 기법은 근거리장 영역을 적극적으로 활용하기 위해 full wavefield를 고려하는 Kausel의 방법을 사용한다.
- (3) 대부분의 모델의 경우 기본 모드가 우세하므로 전체적으로 겹보기 분산곡선 형태인 실험 분산곡선이 기본 모드와 유사하지만 저주파 대역에서는 근접장 영향으로 인하여 다른 형상을 보였다. 또한 상부층이 단단한 지반의 경우에는 고차 모드의 영향이 심해 겹보기 분산 특성 및 근접장 영향이 두드러진다.
- (4) 수치해석을 통해 HWAW 기법으로 도출한 실험 분산곡선이 Lai 방법 결과와는 상당한 차이를 보였으나 Kausel의 방법 결과와는 거의 동일한 것을 확인하였다. 따라서 Kausel의 방법을 적용할 경우 HWAW 기법은 근거리장에서 신뢰성 있는 결과를 제공하는 것이 가능하다는 것을 알 수 있었다. 또한 감지기 위치를 고려하는 배열 역산이 필수적임을 확인할 수 있었다.

## 감사의 글

본 연구는 건설교통부가 출연하고 한국건설교통기술평가원에서 위탁시행한 2004년도 건설핵심기술연구개발사업(04핵심기술B01-04)에 의해 수행된 것이며 이에 감사드립니다.

## 참고 문헌

1. 박형준, 김동수 (2004a), "HWAW 방법을 이용한 새로운 탄성과 지반조사기법의 개발(I) : 분산곡선의 결정", *대한토목학회논문집*, Vol.24, No.2C, pp.105-115.
2. 박형준, 김동수 (2004b), "HWAW 방법을 이용한 새로운 탄성과 지반조사기법의 개발(II) : 실험 구성 및 역산과정", *대한토목학회논문집*, Vol.24, No.2C, pp.117-124.
3. Al-Hunaidi, M.O. (1994), "Analysis of dispersed multi-mode signals of the SASW method using multiple filter/crosscorrelation technique", *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, Vol.13, pp.13-24.

4. Foti, S. (2000), *Multistation methods for geotechnical characterization using surface waves*, Ph. D. dissertation, Politecnico di Tirino, pp.229.
5. Haskell, N.A. (1953), "The dispersion of surface waves in multilayered media", *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol.43, pp.17-34.
6. Heisey, J.S., Stokoe, II, K. H., Hudson, W. R. and Meyer, A.H. (1982), *Determination of in-situ shear wave velocities from spectral analysis of surface waves*, Research Report N. 256-2, Center for Transportation Research, University of Texas of Austin, pp.277.
7. Joh, S.H. (1996a), *Advanced in Interpretation and Analysis Techniques for Spectral-Analysis-of-Surface-Waves (SASW) Measurement*, Ph. D. Dissertation, The University of Texas at Austin.
8. Joh, S.H. (1996b), *FIT7, a Computer Program for Forward Modeling, Inversion, and Time History Generation for SASW Method*, The University of Texas at Austin.
9. Kausel, E. (1981), *An explicit solution for the Green functions for dynamic loads in layered media*, Research Report R81-13, MIT, Cambridge, pp.79.
10. 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.
11. Kennet, B.L.N. (1974), "Reflections, rays, and reverberations", *Bulletin of the Seismological Society and America*, Vol.64, pp. 1685-1696.
12. Lai, C.G. (1998), *Simultaneous inversion of Rayleigh phase velocity and attenuation for near-surface site characterization*, Ph. D. dissertation, Georgia Institute of Technology, pp.370.
13. Lamb, H. (1904), "On the propagation of tremors over the surface of an elastic solid", *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, A203, pp.1-42.
14. O'Neill, Adam (2003), *Full-waveform Reflectivity for modelling, inversion and Appraisal of seismic surface wave dispersion in shallow site investigations*, Ph. D. Dissertation, The University of Western Australia.
15. Park, C.B., Miller, R.D. and Xia, J. (1999), "Multichannel analysis of surface waves (MASW)", *Geophysics*, Vol.64, pp.800-808.
16. Rix, G.J., Lai, C.G. and Foti, S. (2001), "Simultaneous measurement of surface wave dispersion and attenuation curve", *Geotechnical Testing Journal*, Vol.24, No.4, pp.350-358.
17. Sanchez-Salinero, I. (1987), *Analytical investigation of seismic methods used for engineering applications*, Ph. D. dissertation, Univ. of Texas of Austin. pp.401.
18. Thomson, W.T. (1950), "Transmission of elastic waves through a stratified solid", *J. of Applied Physics*, Vol.21, pp.89-93.
19. Xia, J., Miller, R.D. (2005), "Imaging dispersive energy by slant stacking", *SEG/Houston annual Meeting*, pp.1061-1064.
20. Yoon, S.S. (2005), *Array-Based Measurement of Surface Wave Dispersion and Attenuation Using Frequency-Wavenumber Analysis*, Ph. D. dissertation, Georgia Institute of Technology, pp.235.
21. Zerwer, A., Cascante, G. and Hutchinson, J. (2002), "Parameter Estimation in Finite Element Simulations of Rayleigh Waves", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol. 128, No.3, pp.250-261.

(접수일자 2006. 4. 6, 심사완료일 2007. 2. 9)