

## HWAW 기법의 비수평 층상구조지반 적용에 대한 고찰

### A Study on Application of HWAW Method to the Non-horizontally Layered Soil Structure

방 은 석<sup>1</sup> Bang, Eun-Seok                      박 헌 준<sup>2</sup> Park, Heon-Joon  
박 형 춘<sup>3</sup> Park, Hyung-Choon                      김 동 수<sup>4</sup> Kim, Dong-Soo

#### Abstract

In HWAW method, experimental dispersion curve is obtained through time-frequency analysis, and inversion procedure is based on the forward modeling which considers full wavefield. Therefore, it enables us to use relatively short testing setup and has advantage for two dimensional subsurface imaging compared with another surface wave methods. Numerical study was performed to verify that the HWAW method can be applied to non-horizontally layered soil structure. The experimental dispersion curves obtained from HWAW method agreed with the theoretical dispersion curves based on full wavefield. Experimental dispersion curves are mainly more affected by the region between two receivers than by the region from source to the first receiver. Fluctuation phenomena of dispersion curve can be reduced by adequate receiver spacing setup. From numerical study, it was thought that reliable Vs distribution map can be constructed by HWAW method and finally subsurface imaging was tried in the real field.

#### 요 지

HWAW 기법은 시간-주파수 해석을 통해 신호/잡음비가 최대가 되는 부분을 이용하여 실험 분산곡선을 획득하고 full wavefield를 고려하는 정모델링 기법을 통해 역산을 수행한다. 따라서 다른 표면파 기법에 비해 짧은 측선 설정이 가능하며 2차원 전단파 속도 분포를 도출하기에 유리하다. 수평층 가정이 성립되지 않는 지반에서의 HWAW 기법 적용성을 평가하기 위해서 수치해석 검증 연구를 수행하였다. HWAW 기법을 통해 각 거리별로 획득한 실험 분산곡선들은 전반적으로 full wavefield를 고려한 이론 분산곡선과 유사한 형태를 보이는 것을 확인할 수 있었다. 경사면 반사파에 의한 분산곡선의 왜곡현상은 적절한 감지기 간격 조절을 통해 줄여줄 수 있음을 확인할 수 있었다. 도출된 실험 분산곡선은 가진원으로부터 감지기까지의 영역보다는 감지기 사이 영역에 주되게 영향을 받는 것으로 나타났다. 이로써 HWAW 기법으로 합리적인 전단파 속도 분포의 도출이 가능한 것으로 판단되었으며 고찰한 결과를 바탕으로 실제 현장에서 지반 영상화를 시도하였다.

**Keywords :** HWAW, Numerical simulation, Shear wave velocity, Surface wave methods

1 정회원, 한국지질자원연구원 지반안전연구부 선임연구원 (Member, Senior Researcher, Geotechnical Engrg. Division, KIGAM)

2 정회원, 한국과학기술원 건설 및 환경공학과 박사 과정 (Member, Ph. D. Candidate, Dept. of Civil and Environmental Engrg., KAIST)

3 정회원, 충남대학교 토목공학과 조교수 (Member, Assistant Prof., Dept. of Civil and Engrg., Chungnam Univ., civilman@cnu.ac.kr, 교신저자)

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

\* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2009년 10월 31일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

## 1. 서론

지반의 전단파 속도( $V_s$ )로 대변되는 저변형율( $<10^{-3}\%$ ) 영역에서의 전단탄성계수는 전통적으로 적용되어 왔던 지반 증폭 현상 평가 등의 동적인 문제뿐만 아니라 정적인 지반공학 문제 해결에 있어서도 중요한 변수로 사용되고 있으며 그 적용성이 점차 증대되고 있다(Stokoe 등, 2004). 지반의 전단파 속도를 도출하기 위해 다양한 시추공 탄성과 탐사(borehole seismic survey), 지표면 탄성과 탐사(surface seismic survey)가 적용되고 있다. 국내 지반은 지층 구성이 불규칙적이고 횡적인 변화가 존재하므로 2차원 혹은 3차원적인 지반조사가 요구되고 있는데 토목 적용에 있어서는 주로 P파를 이용한 굴절법(refraction seismic method), 반사법(reflection seismic method), 시추공 토모그래피(crosshole tomography) 등을 통해 압선을 파악하거나 연약대를 찾는 데 그 초점을 두고 수행되어 왔다(고광범과 이두성, 2003; 조창수 등, 2002).

표면파 기법(surface wave method)은 별도의 시추공이 요구되지 않는 지표면 탄성과 탐사로 지표면 근처에서의 자세한 전단파 속도 주상도 도출이 가능하다. 현재 지반공학 분야에 적용되고 있는 표면파 기법에는 SASW(Spectral Analysis of Surface Waves) 기법, MASW(Multi-channel Analysis of Surface Waves) 기법, HWAW(Harmonic Wavelet Analysis of Waves) 기법 등이 있다. 기본적으로 표면파 기법은 지층 구조가 수평하다는 가정하에 수행되는 기법이지만 실제 대부분의 현장 지반은 수평적인 층상 구조의 변화가 있음에도 널리 적용되고 있다. 더나가 다차원적인 지반조사를 위해서 해당 측선에 대한 반복 이동 실험을 통해 2차원적인 결과를 얻기도 한다. 지구물리학 연구자에 의해 기존의 다채널 기법을 개선하고 사용자 편의의 해석 프로그램으로 구성된 MASW 기법(Park 등, 1999)이 소개되면서 현재 현장에서 지반의 2차원 전단파 속도 분포를 도출하는데 가장 널리 사용되고 있다. SASW 기법을 이용하여 지반의 전단 강성에 대한 2차원적 영상을 얻고자 조성호와 강태호(2000)는 MT(Multi channel Tomography)-SASW 기법을 소개하였으며 최근에는 감지기 간격을 일정하게 유지한 채 가진원 거리만 달리해 주는 CAP(Common Array Point)-SASW 기법(조성호 등, 2005)을 소개한 바 있다.

HWAW 기법은 초기에 SASW 기법과 같은 2채널 기법(two-point method)의 잡음 영향을 개선해 주기 위해 고안되었다(Park과 Kim, 2001). 하지만 이후 발전하여 현

재의 모습에 이르렀으며 좁은 감지기 간격 및 짧은 가진원 거리의 현장 실험 방식의 적용이 가능하여 현장에서 다른 표면파 기법에 비해 유리한 상황에서 전단파 속도 주상도를 도출할 수 있다. 또한 2차원 전단파 속도 분포를 도출하는데 있어서도 적극적으로 시도되고 있다. 본 논문에서는 HWAW 기법이 비수평 층상구조 지반에서 2차원 전단파 속도 분포의 도출에 유리한 특징을 다른 표면파 기법들과 비교하여 고찰하였다. 수치해석을 통해 HWAW 기법의 비수평 층상구조 지반에 대한 적용성을 고찰하였으며 이를 바탕으로 현장 지반에서 2차원 전단파 속도 분포 도출을 HWAW 기법을 통해 시도하였다.

## 2. 전단파 속도 분포 도출에 있어 HWAW 기법의 장점

표면파 기법을 통해 시험 측선에 대해서 2차원 전단파 속도 분포를 도출하는 방법 및 순서는 다음과 같다. [1] 가진원 및 감지기 이동을 통한 반복적인 현장 시험의 수행(신호 획득), [2] 분산곡선의 도출(신호 처리), [3] 전단파 속도 주상도의 획득(역산), 그리고 [4] 지반 영상화(선형 보간)라고 할 수 있다. 즉, 1차원 기법을 반복적으로 수행하고 각 지점에서의 결과를 보간하는 형식으로 정확한 의미에서는 2차원이라고 보기 어렵기 때문에 1.5차원이라고 불리기도 한다. 표면파 기법으로 영상화를 효율적이며 신뢰성 있게 수행하기 위해서는 표면파 기법이 기본적으로 1차원 수평지반을 가정하고 있으므로 한 지점의 결과를 얻기 위한 측선의 길이가 짧을수록 유리하며 간편한 가진원의 사용 및 신속한 실험 수행 여부도 중요하다. 이러한 측면에서 HWAW 기법은 2개의 감지기와 슬러지 해머와 같은 간편한 가진원만으로도 좁은 감지기 간격 및 짧은 가진원 거리의 현장 실험 방식의 적용이 가능하므로 다른 표면파 기법에 비해 국부적인 전단파 속도 주상도의 도출에 유리하다고 할 수 있다. HWAW 기법의 전반적인 특징에 대해서는 HWAW 기법을 소개한 연속 논문(박형춘과 김동수, 2004a; 박형춘과 김동수, 2004b)에 상세하게 기술되어 있으며 본 논문에서는 HWAW 기법이 비수평 층상구조 지반 적용에 유리한 특징에 대해 정리하여 고찰하고자 하였다.

### 2.1 하모닉 웨이블릿을 이용한 시간-주파수 해석의 도입

일반적인 SASW 기법의 경우 고주파 성분을 위해서

가진원과 감지기 간격을 좁게 하고 저주파 성분을 위해서는 가진원과 감지기 간격을 넓혀주는 다간격 반복 실험 구성을 채택하고 있다(Stokoe 등, 1994). 따라서 가진원과 감지기 간격이 넓을 경우 큰 에너지를 가지는 저주파 가진원이 필요하게 된다. 또한 다간격 실험 구성은 그림 1과 같이 복합 분산곡선의 도출 및 대표 분산곡선을 결정하는 과정이 필요하게 되며 축선의 길이가 길기 때문에 국부적인 지반의 전단파 속도 주상도의 도출이 어렵게 된다. 또한 주변으로부터의 잡음 영향을 최소화하기 위해서 다회에 걸친 반복적인 가진으로 획득 신호에 대한 평균(average) 작업을 수행하여야 한다.

MASW 기법에서는 그림 2와 같이 다채널 실험 구성

을 채택하여 주변으로부터의 잡음 영향을 줄여주고자 하였으며 하나의 실험 구성으로 실험분산곡선을 획득하고 있다(Park 등, 1999). 하지만 여러 개의 감지기 사용은 현장 실험 수행을 번거롭게 하며 일반적인 실험 구성으로는 중간 영역의 분산곡선은 도출이 가능하나 고주파 영역과 저주파 영역에서의 분산곡선의 도출은 쉽지가 않다. 전체 영역에서의 분산곡선을 획득하기 위해서는 더욱 많은 감지기를 좁은 간격으로 길게 설치하여야 한다. 가진원으로부터 가까운 영역은 촘촘하게 먼 영역에서는 감지기 간격을 넓게 설치하는 방식으로 이러한 점을 보완하기도 하였다(Foti, 2000). 하지만 SASW 기법에서와 마찬가지로 축선의 길이가 길기 때문에 국부

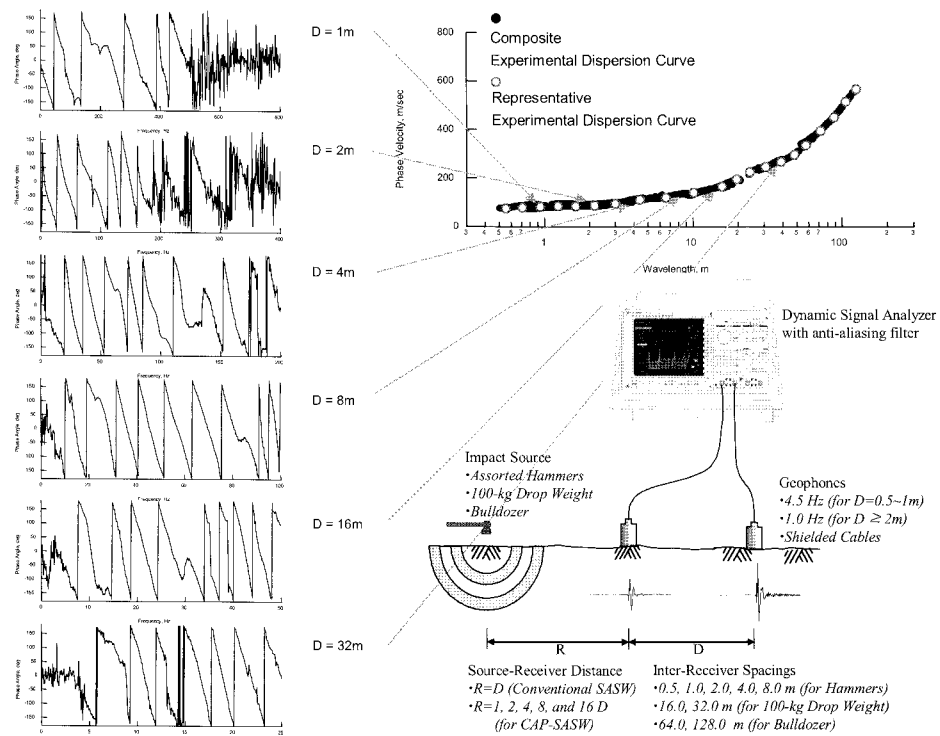


그림 1. SASW 기법의 현장 실험 구성 및 복합 분산곡선, 대표 분산 곡선의 도출(조성호 등, 2005)

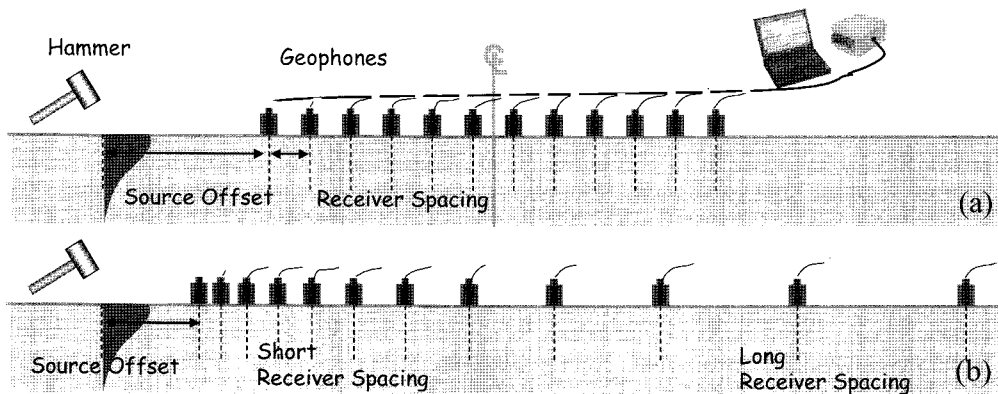


그림 2. MASW 기법의 현장 실험 구성: (a) 정간격 감지기 배열(Constant receiver spacing), (b) 변간격 감지기 배열(Variable receiver spacing)

적인 지반의 전단파 속도 주상도의 도출이 어렵게 된다.

HWAW 기법은 실험 분산곡선을 도출하는 단계에서 획득한 신호에 대해 시간-주파수 해석을 수행한다. 시간-주파수 해석은 하모닉 웨이블릿을 이용하고 있으며 하모닉 웨이블릿 계수의 크기 및 위상 정보를 활용하게 된다. 시간-주파수 해석의 장점은 각 주파수당 에너지가 최대인 지점을 이용하므로 주변 잡음에 대한 영향이 적게 받는다는 점이다. 따라서 감지기로부터 적정거리에서 해머 같은 단순한 가진원을 이용하여 가진하여도 감쇠가 빠르게 일어나는 고주파 영역과 상대적으로 에너지가 적은 저주파 영역에 이르기까지 전체적인 실험 분산곡선의 도출이 가능하다. 그림 3에 획득한 신호에 대해서 하모닉 웨이블릿(harmonic wavelet)을 이용한 시간-주파수 해석 일례를 도시하였으며 일반적인 주파수 분석에 비해 더욱 신뢰성 있는 분산곡선을 획득할 수 있음을 보여 준다. 일반적인 SASW 기법에서는 크로스파워 스펙트럼(Cross Power Spectrum)을 이용하게 되는데 잡음이 첨가된 신호일 경우 크로스파워 스펙트럼은 심한 위상차 정보의 왜곡을 볼 수 있으며 이는 양호하지 않은 분산곡선의 도출을 초래한다(그림 3(c)). 하지만 HWAW 기법에서는 시간-주파수 해석을 수행하고 그 중에 에너지가 최대인 지점을 이용함으로써 주변 잡음이 포함된 주파수 대역이나 미약한 에너지를 가지는 주파수 대역까지의 정보를 포함하여 넓은 주파수 영역으로의 실험 분산곡선을 도출하게 된다. 그림 3(d)에서 보면 크로스파워 스펙트럼으로는 그림 3(c)의 잡음이 있는 상태(with noise)에서와 같이 주파수별 위상 정보가 해석 불가능할 정도로 상당히 안 좋음에도 불구하고 HWAW 기법으로 획득한 실험 분산곡선(범례에서 HWAW)은 이론분산곡선(범례에서 theoretical value)과 거의 유사한 것을 볼 수 있다.

2채널 기법임에도 불구하고 주변으로부터 잡음의 영향이 적어 SASW 기법에서와 같은 평균 작업이 필요하지 않으며 SASW 기법에서와 같은 다간격 반복 실험 구성이나 MASW 기법에서와 같은 다채널 실험 구성이 요구되지 않는다. HWAW 기법에서는 이와 같이 단순한 가진원 및 2개의 감지기만을 이용하여 현장 실험 수행이 가능하며 하나의 가진원 및 감지기 조합으로부터 전체 영역에서의 실험 분산곡선을 결정할 수 있으므로 측선의 길이를 상대적으로 줄여 줄 수 있으며 반복적인 현장 실험 수행이 매우 용이하다.

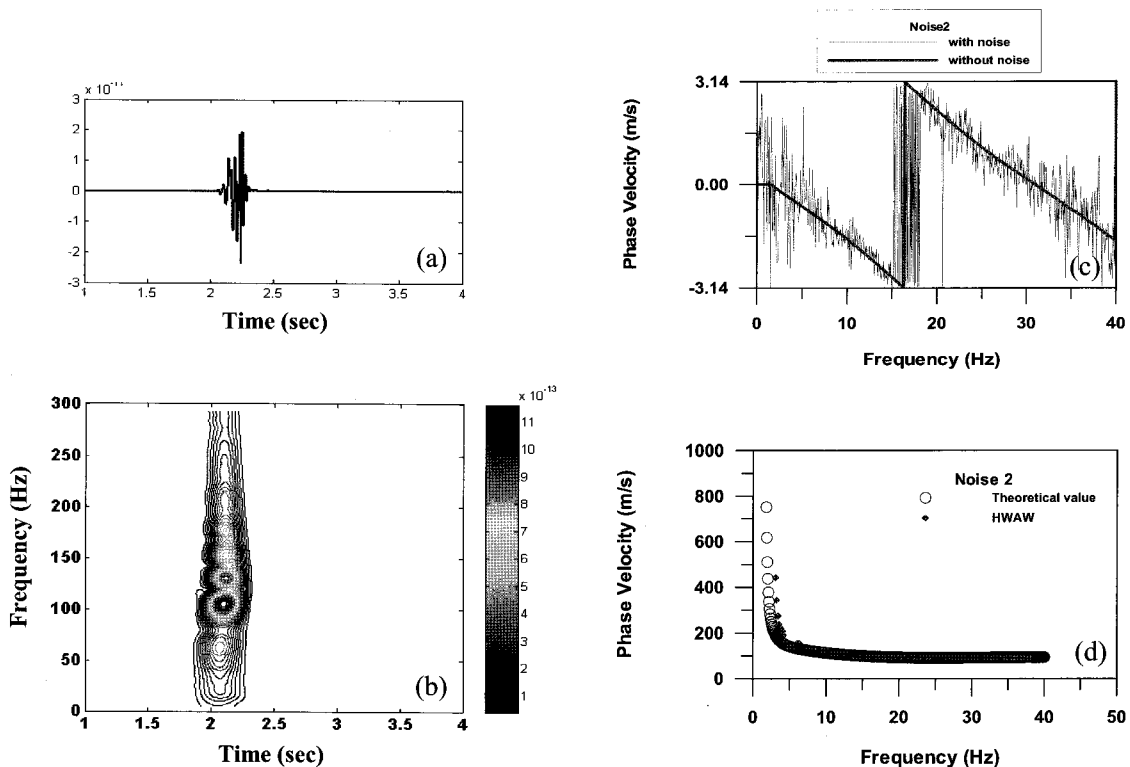


그림 3. HWAW 기법에서 시간-주파수 해석 및 잡음 제거 효과: (a) 시간 영역 신호, (b) 시간-주파수 해석 결과, (c) 잡음 유무 상태에서 상호파워 스펙트럼의 비교, (d) 잡음 존재시 HWAW 기법으로 도출한 실험 분산곡선과 이론 분산곡선과의 비교

## 2.2 Full wavefield를 고려한 정모델링 기법의 적용

SASW 기법에서는 표 1과 같이 근접장 효과를 제거하기 위한 필터 조건을 제안하고 있다. 이러한 필터 기준은 SASW 기법의 역산과정에서 평면파 형태의 레일리파를 가정하는 정모델링 기법을 사용하기 때문이다. 반무한체에 지표면 수직하중이 가해졌을 때 레일리파 외에도 체적파가 발생하게 되므로 가진원으로부터 일정 영역 내에서는 체적파와 레일리파가 공존하게 된다. 점점 체적파가 감쇠되어 없어지며 레일리파도 원통형태가 아닌 평면 형태로 가정이 가능하게 된다(그림 4).

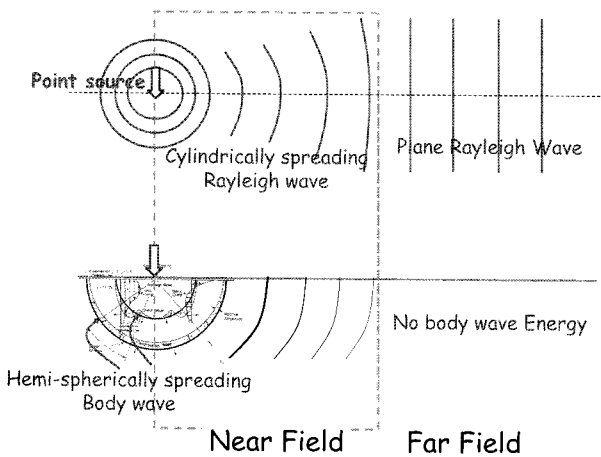


그림 4. 지표면 수직하중에 의한 탄성파의 전파 형태: 가진원으로부터 일정 영역 내에서는 지표면에서 체적파와 레일리파가 공존하게 되며 일정 영역 외에서는 체적파가 모두 감쇠되어 없어지며 레일리파가 평면형태로 가정이 가능하게 된다.

실제 가정사항이 다른 정모델링 기법에 따라 동일 지반 모델에 대해서도 이론 분산곡선의 형태가 다르게 되므로 역산시 적용되는 정모델링 기법에 따라 현장 실험 방식이 구성되어야 한다. SASW 기법에서는 이러한 특성으로 인해 깊은 깊이의 탐사를 위해서는 가진원 및 감지기간 거리를 늘여주어야 하며 따라서 측선의 길이가 길어지게 되는 것이다. 표 2에 여러가지 정모델링 기법의 특징을 요약하여 정리하였으며 그림 5에 대표적인 정규 모델(regular model) 및 비정규 모델(irregular model)에서의 여러 가지 정모델링 기법을 통해 도출된 이론 분산곡선을 동시에 도시하였다. 여기서 정규 모델은 심도에 따라 속도가 증가하는 형태를 말하며 비정규 모델은 심도에 따라 속도의 증감이 있는 형태를 말한다. 모델에서 밀도는  $1.8t/m^3$ 이고 포아슨비는 0.3이며 층 두께 및 속도는 각 그림 내 좌측 하단에 도시한 바와 같다.

정규모델에서 각 이론 분산곡선은 레일리 모드 분산곡선의 기본모드와 유사한 형태를 보인다. 반면 비정규 모델에서는 모드 중첩을 통해 생성되는 이론 분산곡선들이 레일리 모드 분산곡선의 기본 모드에서 고차모드로 이동하는 것을 볼 수 있다. 정규 모델에서는 전체 주파수 영역에 걸쳐 기본 모드가 주되게 되며 비정규 모델에서는 주파수 영역에 따라 주된 모드가 달라지기 때문에 나타나는 현상이다(Strobbia, 2004). SASW 및 HAW와 같은 2채널 기법에서는 일반적으로 모드 중첩에 의한 이론 분산곡선 형태를 사용한다. MASW 기법과 같은 다채널 기법에서는 주로 레일리 모드 분산곡선을 사용하는데

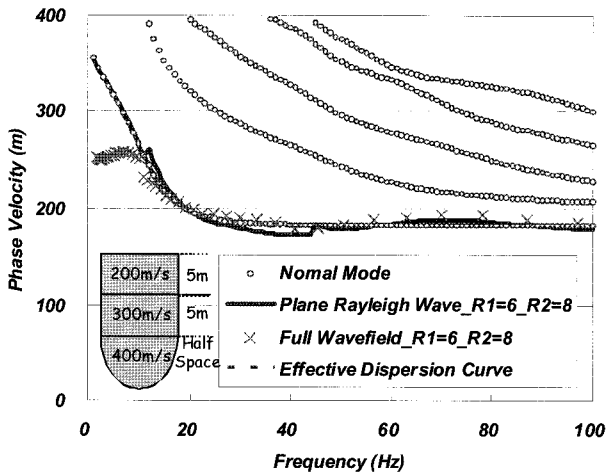
표 1. SASW 기법에서 근접장 효과를 제거하기 위한 필터 조건(Yoon, 2005)

Reference	Filtering Criterion	Receiver Configuration	Method of study
Heisey 등 (1982)	$\lambda_R < 3d_1$	$\Delta d/d_1=1$	Numerical
Sanchez-Salinerо 등 (1987)	$\lambda_R < 0.5d_1^*$	$\Delta d/d_1=1$	Numerical
Roesset 등 (1990)	$\lambda_R < 2d_1$	$\Delta d/d_1=0.2, 0.5, 1, 2$	Numerical
Hiltunen과 Woods (1990)	$\lambda_R < 2\Delta d$ and $d_1/\Delta d \leq 2$	$\Delta d/d_1=0.33 - 2$	Experimental
Gucunski와 Woods (1992)	$\lambda_R < d_1$	$\Delta d/d_1=1$	Numerical

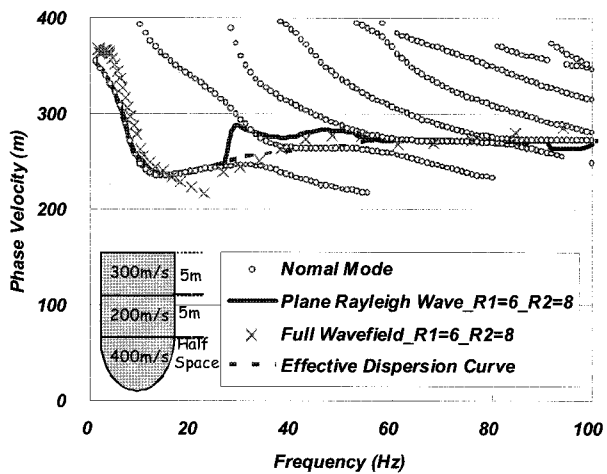
\* 저주파 영역에서 더욱 많은 데이터가 필요하다면  $\lambda_R < d_1$  적용해도 됨

표 2. 표면파 기법에서 사용되는 정모델링 기법에 대한 개요

통칭	표면파 형태	체적파 조건	가진원 위치	대표적 참고문헌
Normal Mode (Rayleigh mode dispersion curve)	평면파, 모드 분리	에너지 없음	상관 없음	Haskell (1953)
Effective Dispersion Curve (2D forward modeling)	평면파, 모드 중첩	에너지 없음	상관 없음	Foti (2000)
Full Wavefield (3D forward modeling)	원통형파, 모드 중첩	존재	상관 있음	Kausel (1981)
Plane Rayleigh Wave	평면파, 모드 중첩	에너지 없음	상관 있음	Lai (1998)



(a) 정규 모델



(b) 비정규 모델

그림 5. 정모델링 기법에 따른 이론 분산곡선의 차이(방은석 등, 2007)  
 : Normal Mode=레이리 모드 분산곡선(Haskell, 1953), Plane Rayleigh Wave=Lai의 방법(Lai, 1998), Full Wavefield=Kausel의 방법(Kausel, 1981), Effective Dispersion Curve=유효이론 분산곡선(Foti, 2000)

획득하는 실험 분산곡선이 기본모드인지 고차모드인지 불분명한 경우가 많아 역산시 오류가 발생하기도 한다. 그러므로 최근에는 가진원 거리, 감지기 위치를 고려하고 모드 중첩 혹은 모드 변환의 이론 분산곡선 형태를 사용하는 방식이 제안되고 있다(Lai, 1998; Adam, 2003).

HWAW 기법에서는 full wavefield를 고려한 정모델링 기법(Kausel 방법, Kausel, 1981)을 적극적으로 사용함으로써 가진원 및 감지기 간격을 획기적으로 개선하였다. SASW 기법에서도 이미 이러한 Kausel 방법을 역산에 도입하여 배열 역산(array inversion) 방식으로 적용하고 있다(조성호, 1997). 하지만 HWAW 기법은 앞 절에서 언급한 바와 같이 시간-주파수 해석으로 전체 관심 영역에 대한 실험 분산곡선을 하나의 실험 구성으로

획득이 가능하기 때문에 이는 SASW 기법에 비해 큰 장점을 가진다. 실험 분산곡선 획득을 위한 실험 구성과 동일한 구성으로 이론 분산곡선을 획득하여 두 분산곡선 간 일대일 비교가 가능하므로 더욱 신뢰성 있고 신속한 역산 수행이 가능하게 된다. 이러한 과정을 기존의 배열 역산과 구분하여 단일 배열 역산(single array inversion)이라 일컫는 바 있다(박형준과 김동수, 2004b). 이러한 HWAW 기법 역산과정의 특징으로 인하여 짧은 가진원 및 좁은 감지기 간격의 실험 구성의 적용이 가능하며 따라서 2차원 전단파 속도 분포 도출에 HWAW 기법이 다른 표면파 기법에 비해 매우 유리한 특징을 가지게 된다.

### 3. 수치 해석 검증 연구

HWAW 기법에 대한 수치해석적 검증은 이미 다양한 방법을 통해 이루어진 바 있다. FIT7(Joh, 1996)을 이용하여 생성한 합성 신호를 이용한 검증 연구가 박형준과 김동수(2004a)에 의해 HWAW 기법을 확립하는 과정에서 이루어졌으며 이후 방은석 등(2007)에 의해 대표적 유한요소 상용 프로그램인 ABAQUS를 이용하여 다양한 지반 모델에 대해 수행된 바 있다. 이러한 연구들은 HWAW 기법 자체의 검증을 위해 표면파 기법의 필수적 가정사항인 수평한 형태의 지반 모델에서 이루어졌다. 실제 지반은 수평하지 않은 경우가 대부분이며 부분적인 불균질 특성을 보이는 경우가 많은데 이러한 지반에서 표면파 기법의 수행은 표면파 기법의 기본적 가정 사항에 위배되므로 잘못된 결과를 도출할 수 있다. 축선이 길어질수록 수평적인 층상 구조의 변화에 영향을 더욱 받게 되며 1차원 가정에 어긋날 확률이 커지게 된다. 축선이 상대적으로 짧은 HWAW 기법에 있어서도 수평층 가정 사항을 완벽하게 만족하지는 않으므로 수평하지 않은 지반에 대한 HWAW 기법의 적용하기 위해서는 이에 대한 평가가 요구된다. 따라서 수치해석 지반 모델을 이용하여 비수평 지반에서 HWAW 기법에 대한 수치 모의 실험을 수행하였으며 그 결과를 통해 적용 가능성을 고찰하였다.

본 연구에서 사용한 수치해석 모델의 기본적 형상은 그림 6과 같다. 상부층의 두께가 10m에서 5m로 변화하는 2층 모델이다. 실제 점가진 형태에서 체적파와 표면파가 반구형 및 원통형으로 전파되는 것을 모델링을 하기 위해서는 3차원 모델을 사용하는 것이 바람직하다.

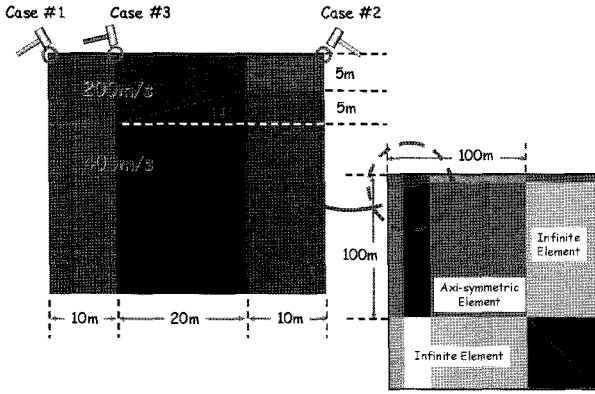


그림 6. 비수평 지반 수치해석 모델의 매쉬 형상 및 각 Case별 가진원의 위치

기존 수평층 모델을 이용한 수치해석 연구에서는 이를 위해 축대칭 요소를 사용한 바 있다. 본 연구와 같은 비수평층에 대한 수치해석을 위해서는 3차원 모델을 사용하는 것이 바람직하나 계산 시간 등을 고려하여 축대칭 모델을 사용하였다. 모델에서 상부층의 전단파 속도는 200m/s, 하부층의 전단파 속도는 400m/s로 설정하였으며 밀도와 포아슨비는 각각  $1.8t/m^3$ ,  $\nu=0.3$  이다. 약 14°의 경사도를 보이는 20m 길이의 상향 경사면을 10m 수평층 이후에 첨부하였다. 탄성파의 전파 특성을 모델링하는 유한요소 해석에서는 모델 내 요소의 크기와 계산 간격이 결과의 정확성을 보장해 주는 중요한 요소이다. Zerwer 등(2002)의 연구 결과를 참고하여 요소 크기는 0.2m로 충분히 작게 결정하였으며 계산 간격은 0.0005 초로 설정하였다. 전체 모델의 크기는 획득하고자 하는 최대파장을 고려하여 수직 100m, 수평 100m로 설정하였으며 모델 경계에서의 반사파를 줄여주기 위해서 무한 요소를 모델 경계에 적용하였다. 축 상에 수직방향 하중을 가해줌으로써 가진을 하였으며 실험 분산곡선 획득을 위한 시간 이력곡선으로 수직 방향에 대한 입자 속도(particle velocity) 성분을 가진 지점으로부터 거리 별로 획득하였다.

Case #1은 경사지반 하단으로부터 10m 떨어진 지점에서 Case #2는 경사지반 상단으로부터 10m 떨어진 지점에서 Case #3는 경사지반 하단 바로 상부에서 가진하여 수치해석을 수행한 것이다. 축대칭 요소를 사용하였으므로 각 경우는 동일한 모델에 대해서 가진원 위치만을 바꾼 상태는 아니며 가진원 위치에 따라 수치 모델을 재구성하였다. 가진 지점으로부터 2m 간격으로 40m까지(Case #3의 경우 30m까지) 지표면에서 탄성파 신호를 획득하였다. HAWW 기법의 신호처리 과정을 통해 거

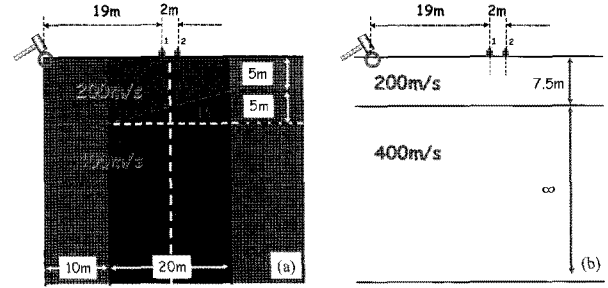


그림 7. 실제 수치해석 지반 모델과 이론 분산곡선 획득을 위한 모델과의 차이; (a) 실제 지반 모델, (b) 이론 분산곡선 획득을 위한 수평층 모델

리별로 실험분산곡선을 획득하였으며 각각에 해당되는 이론분산곡선과 비교하였다. 이론 분산곡선을 계산하는 정모델링 기법에서 가정되는 지반 형상은 수평층 가정의 1차원 형태이므로 그림 7에 도시한 바와 같이 두 감지기가 위치한 중간 지점에서의 수치해석 모델 형상을 기준으로 하였다. 이론 분산곡선은 Kausel 방법(범례에서 Theoretical\_3D)을 통해 획득하였으며 비교를 위해 유효분산곡선(범례에서 Theoretical\_2D)을 동시에 도시하였다. Kausel 방법은 원통형의 레일리와 및 체적파를 모두 고려하여 정모델링하는 것이라 3D 정모델링이라고 불리우며 유효 분산곡선은 평면파의 레일리와만을 고려하여 정모델링하는 것으로 2D 정모델링이라 한다. 그리하여 범례에 각각 Theoretical\_3D, Theoretical\_2D로 구분하여 명기하였다.

### 3.1 수치해석 결과 비교

그림 8은 Case #1의 결과로 감지기 거리 2m-4m에서 감지기 거리 38m-40m까지 2m 간격으로 비교한 20개의 결과 중 일부를 도시한 것이다. 감지기 거리 6m-8m까지는 수평층 구간으로 각 위치에서의 실험 분산곡선(범례에서 Experimental\_HAWW)과 Kausel 방법에 의한 이론 분산곡선(범례에서 Theoretical\_3D)이 거의 동일한 형상을 보인다. 하지만 유효 분산곡선(범례에서 Theoretical\_2D)와는 다른 형태를 보인다. 이는 기존 1차원 수평 지반 모델을 통한 선행 연구(방은석 등, 2007)에서와 같은 결과로 HAWW 기법은 Kausel 방법에 의한 이론 분산곡선, 즉 3D 정모델링을 통해 역산을 수행해야 하는 것을 다시 한번 보여 주는 것이다. 지금부터는 Kausel 방법에 의한 이론 분산곡선을 중심으로 HAWW 기법으로 획득한 실험 분산곡선을 비교 평가하고자 한다. 경사 지반 모델에서는 경사면으로 인해 반사되는 에너지가 존재

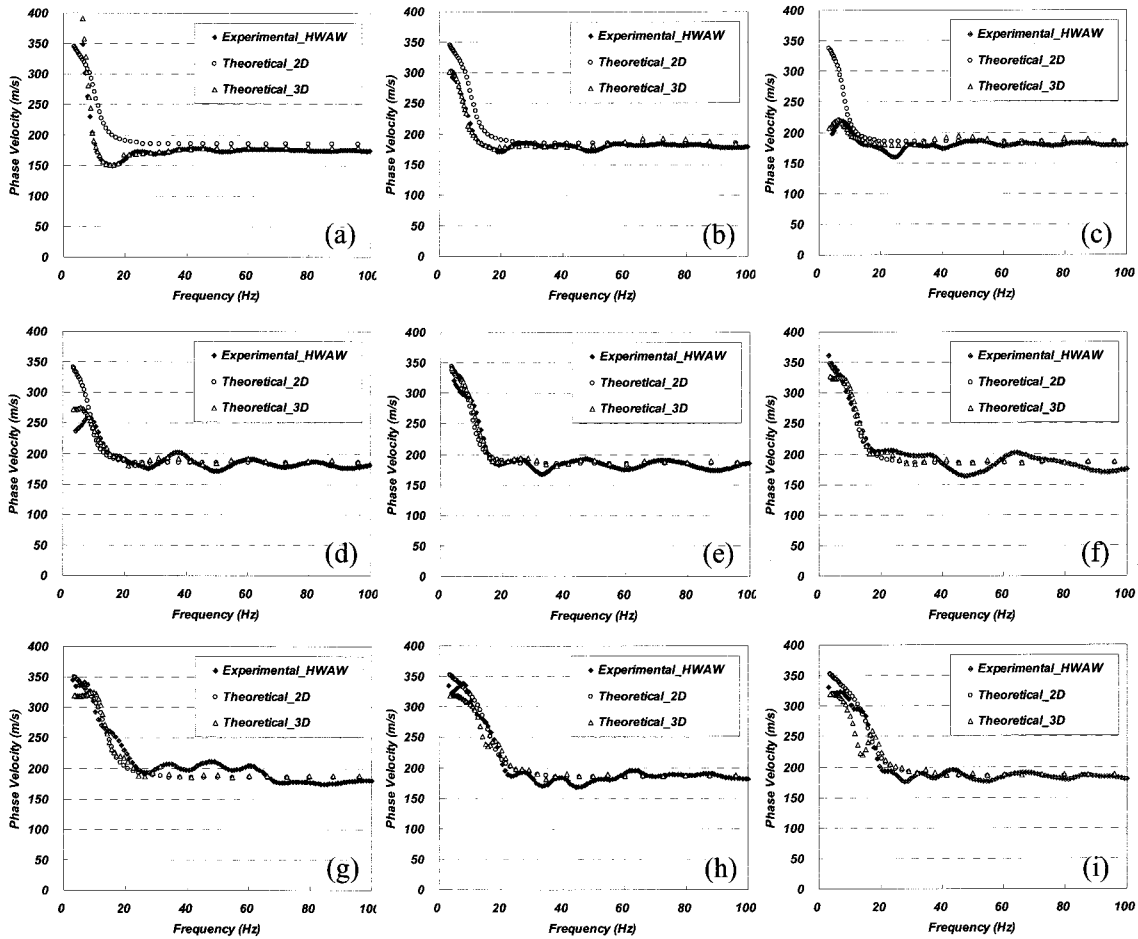


그림 8. 감지기 위치에 따른 실험 분산곡선 및 이론분산곡선의 비교(수치 해석 모델 Case#1); (a) 감지기 거리 2m-4m, (b) 감지기 거리 6m-8m, (c) 감지기 거리 10m-12m, (d) 감지기 거리 14m-16m, (e) 감지기 거리 18m-20m, (f) 감지기 거리 22m-24m, (g) 감지기 거리 26m-28m, (h) 감지기 거리 30m-32m, (i) 감지기 거리 34m-36m

하게 되는데 이러한 반사파는 일반적인 잡음과는 다르기 때문에 시간-주파수 해석을 수행하는 HAWW 기법에서도 이러한 영향이 제거되지 않는다. 따라서 경사진 영역에 가까워질수록 주파수에 따른 실험 분산곡선의 형상이 이론 분산곡선의 형태와는 다르게 굴곡이 생기기 시작하며 경사 지반(감지기 거리 10m 이상)에서는 더욱 두드러지는 것을 볼 수 있다. 하지만 이러한 오류 속에서도 경사진 지반에 따라 첫째 층의 두께가 작아짐을 반영하여 실험 분산곡선이 획득되는 것을 볼 수 있다. 첫째 층의 두께가 10m인 지점에서는 분산곡선이 증가하는 시점이 20Hz보다 작은 지점인데 반하여 두께가 작아짐에 따라 점점 고주파대역으로 움직이며 첫째 층의 두께가 5m인 지점에서는 20Hz 보다 큰 것을 볼 수 있다. 하지만 이러한 상황에서도 Kausel 방법에 의한 이론 분산곡선과 전반적인 형태는 유사한 것을 볼 수 있다. 따라서 비수평 지반에 있어서 표면파 기법의 기본 가정과 위배되기 때문에 기존의 1차원 기반 정모델링 기법으로

는 정확한 역산이 불가능하겠지만 본 수치해석의 결과로 미루어 볼 때 HAWW 기법을 통해 획득한 실험 분산곡선을 3D 정모델링을 통해서 역산할 경우 수평적인 층상구조의 변화를 추정할 수 있는 결과의 획득은 가능하리라 본다.

경사 지반을 중심으로 가진원 위치에 따른 영향을 보기 위해 가진원 위치를 경사지반 상단으로부터 역방향으로 10m 떨어진 곳에 위치하여 동일한 작업을 수행하였다. Case #2에 해당하며 이 경우에 있어서도 Case #1의 경우와 유사한 결과가 도출되는 것을 볼 수 있다(그림 9). 경사진 지반에 따라 첫째 층의 두께가 점점 커짐을 반영하여 실험 분산곡선이 획득되며 Kausel 방법에 의한 이론 분산곡선과도 형태가 유사하다. 가진원 위치를 경사 구간 하단 끝 지점으로 정한 Case #3의 경우에도 마찬가지로 결과를 보여주고 있음을 확인할 수 있다(그림 10). 즉, 도출되는 실험 분산곡선의 형태는 가진원로부터 첫 번째 감지기까지의 지반 구조보다는 감지기



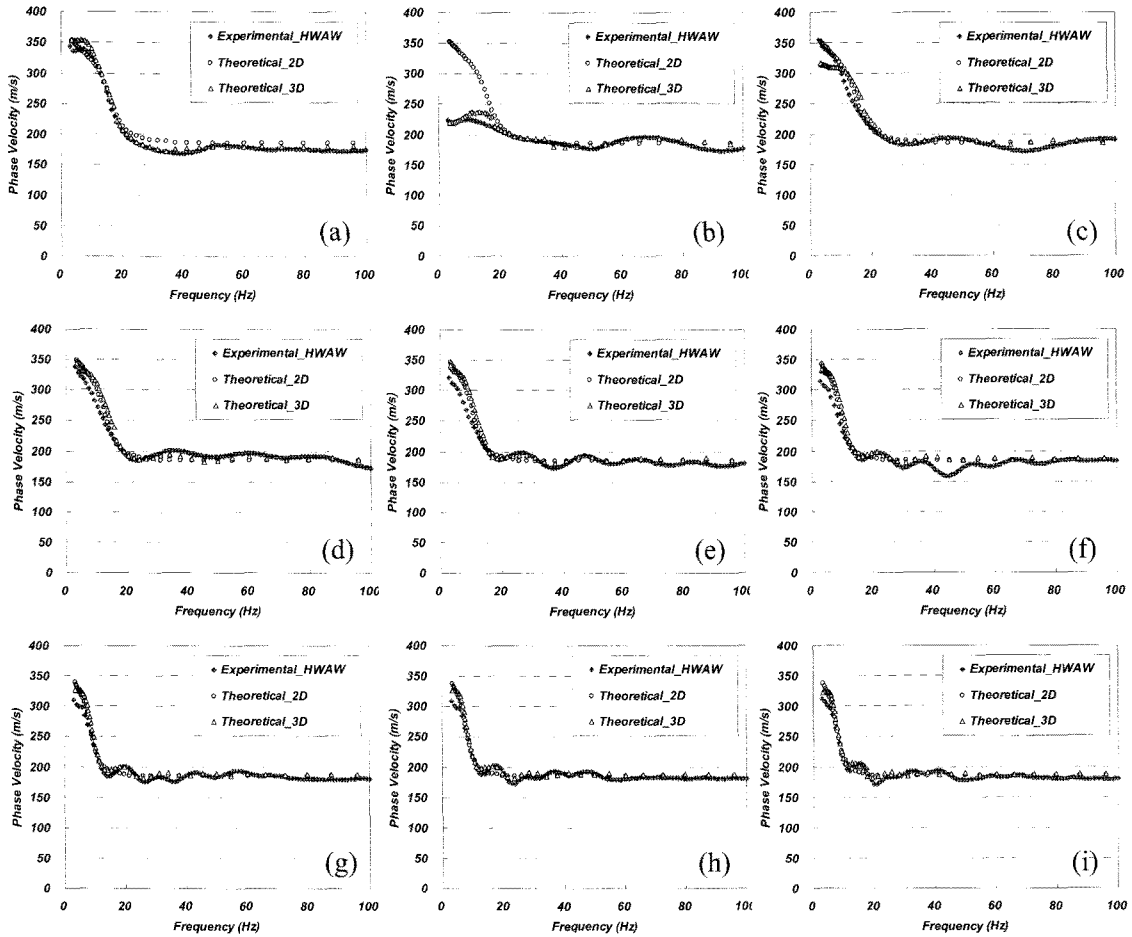


그림 9. 감지기 위치에 따른 실험 분산곡선 및 이론분산곡선과의 비교(수치 해석 모델 Case#2): (a) 감지기 거리 2m-4m, (b) 감지기 거리 6m-8m, (c) 감지기 거리 10m-12m, (d) 감지기 거리 14m-16m, (e) 감지기 거리 18m-20m, (f) 감지기 거리 22m-24m, (g) 감지기 거리 26m-28m, (h) 감지기 거리 30m-32m, (i) 감지기 거리 34m-36m

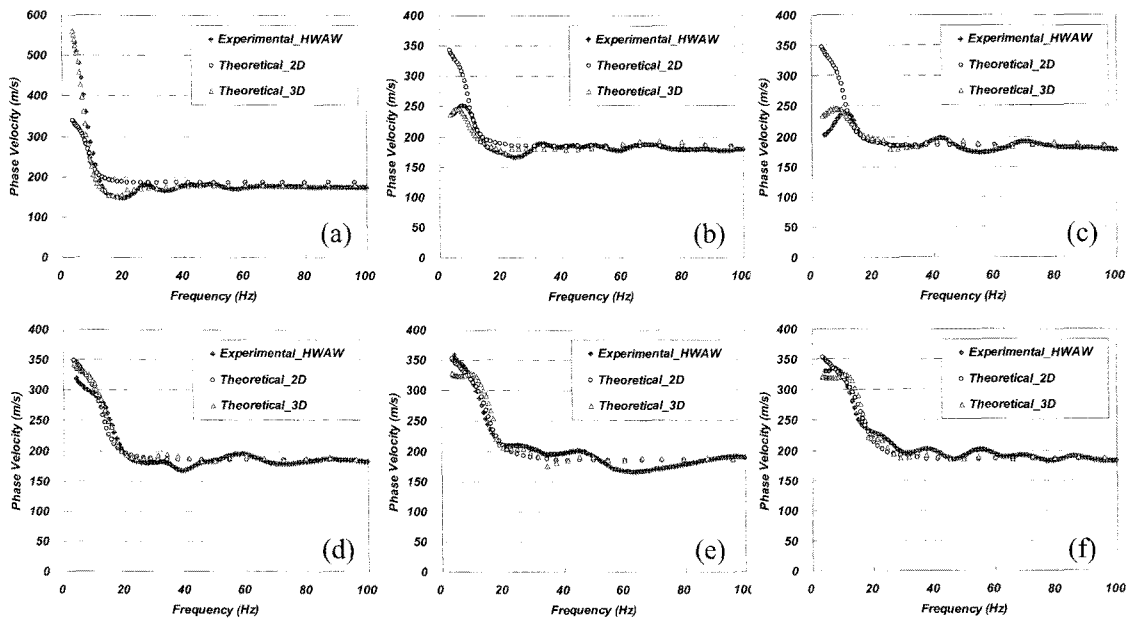


그림 10. 감지기 위치에 따른 실험 분산곡선 및 이론분산곡선과의 비교(수치 해석 모델 Case#3): (a) 감지기 거리 2m-4m, (b) 감지기 거리 6m-8m, (c) 감지기 거리 10m-12m, (d) 감지기 거리 14m-16m, (e) 감지기 거리 18m-20m, (f) 감지기 거리 22m-24m

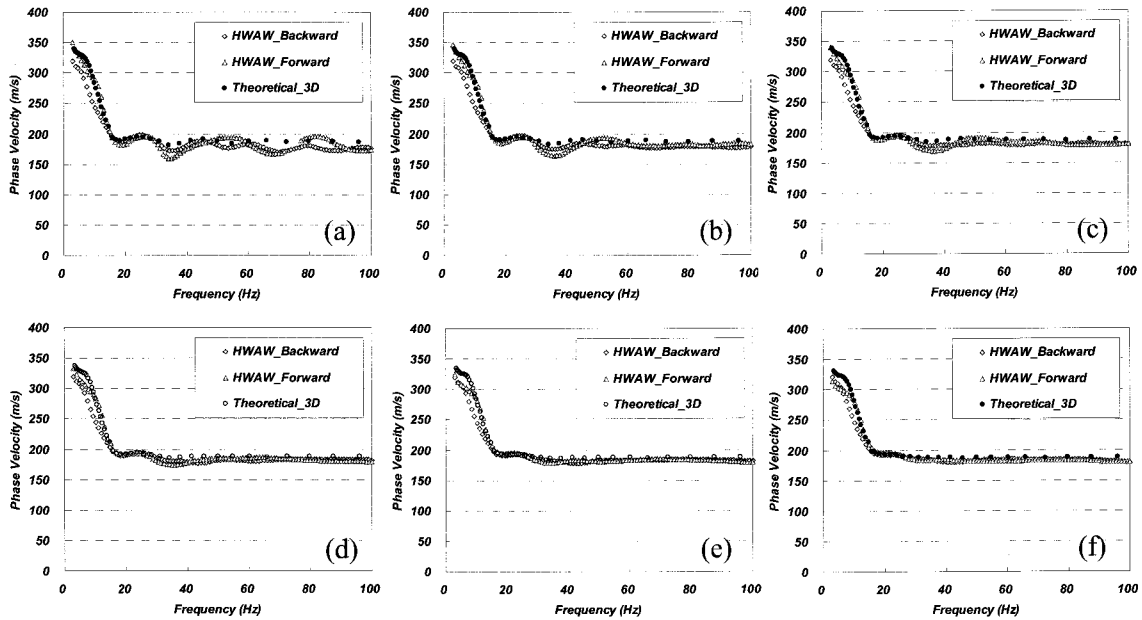


그림 11. 경사 영역 중간 지점에서 감지기 간격에 따른 실험 분산곡선 및 이론분산곡선과의 비교(HWAW\_Forward는 수치 해석 모델 Case#1, HWAW\_Backward는 수치 해석 모델 Case#2): (a) 감지기 간격 2m, (b) 감지기 간격 4m, (c) 감지기 간격 6m, (d) 감지기 간격 8m, (e) 감지기 간격 10m, (f) 감지기 간격 12m

사이 지반의 지반 구조의 영향을 많이 받는 것을 알 수 있다.

가진 방향에 의한 실험 분산곡선의 특성을 비교 정리하기 위하여 경사 지반의 중간 지점을 기준으로 하여 감지기 간격을 달리하여 획득한 실험 분산곡선을 Kausel 방법에 의한 이론 분산곡선과 동시에 도시하였다(그림 11). 각각의 그림에서 정방향 가진(HWAW\_forward, Case #1)과 역방향 가진(HWAW\_backward, Case #2)에 있어 가진원 및 감지기 거리와 감지기 중간 지점이 동일하므로 이론 분산곡선은 동일하다. 가진 방향에 따라 이러한 두 실험 분산곡선 형태가 약간은 차이나는 것을 볼 수 있으나 이론 분산곡선 비교하여 볼 때 전반적으로 일치하는 것을 볼 수 있다.

### 3.2 수치해석 결과 고찰

수치해석 결과로부터 특정 경사 지반에 있어서 가진 방향 및 가진 위치에 크게 영향을 받지 않고 두 감지기 지점 사이 영역을 반영하는 실험 분산곡선이 도출되며 Kausel 방법에 기반한 역산을 통해 해당 구간의 전단파 속도 주상도를 도출할 수 있음을 확인하였다. 특히 HWAW 기법으로 도출된 실험 분산곡선이 가진원으로부터 첫 번째 감지기까지의 지반보다는 감지기 사이 영역의 지반을 주로 반영한다는 사실은 좁은 감지기 간격의 실험

적 구성이 가능한 HWAW 기법이 비수평 지반에 있어서 2차원 전단파 속도 분포 도출시에 유리하다는 것을 확인 시켜 주고 있다.

가진원 거리에 따라 분산곡선이 급격히 속도가 증가하거나(Case #1 2m-4m) 일반적인 강성의 증가 경향과 맞지 않게 저주파 영역에서 이상한 분산곡선 형태가 도출되는 경우(Case #1 10m-12m, Case #2 6m-8m, Case #3 10m-12m)가 있다. 실험분산곡선과 이론분산곡선이 일치성 측면에서는 이러한 분산곡선이 문제가 없지만 반복적 정모델링 뿐만 아니라 자동 역산에서도 이러한 형태의 분산곡선은 역산을 어렵게 한다. 따라서 가진원 거리를 적절하게 설정하여 역산이 보다 용이한 실험 분산곡선을 현장에서 획득하고자 노력하는 것이 매우 중요하다.

본 연구에서는 노트북 기반의 신호 획득 장비(Data Acquisition System)와 MATLAB GUI(Graphic User Interface)를 이용한 운영 프로그램을 이용하여 HWAW 기법 수행 시스템을 구성하였다. 이러한 개선된 시스템은 현장 실험 수행과 동시에 실험 분산곡선을 확인할 수 있도록 하여 적절한 감지기 간격 및 가진원 거리를 신속하게 결정할 수 있도록 해 주며 결국 지반 영상화를 위한 기법 수행을 보다 신뢰성 있고 원활하게 수행할 수 있도록 해 줄 것이다.

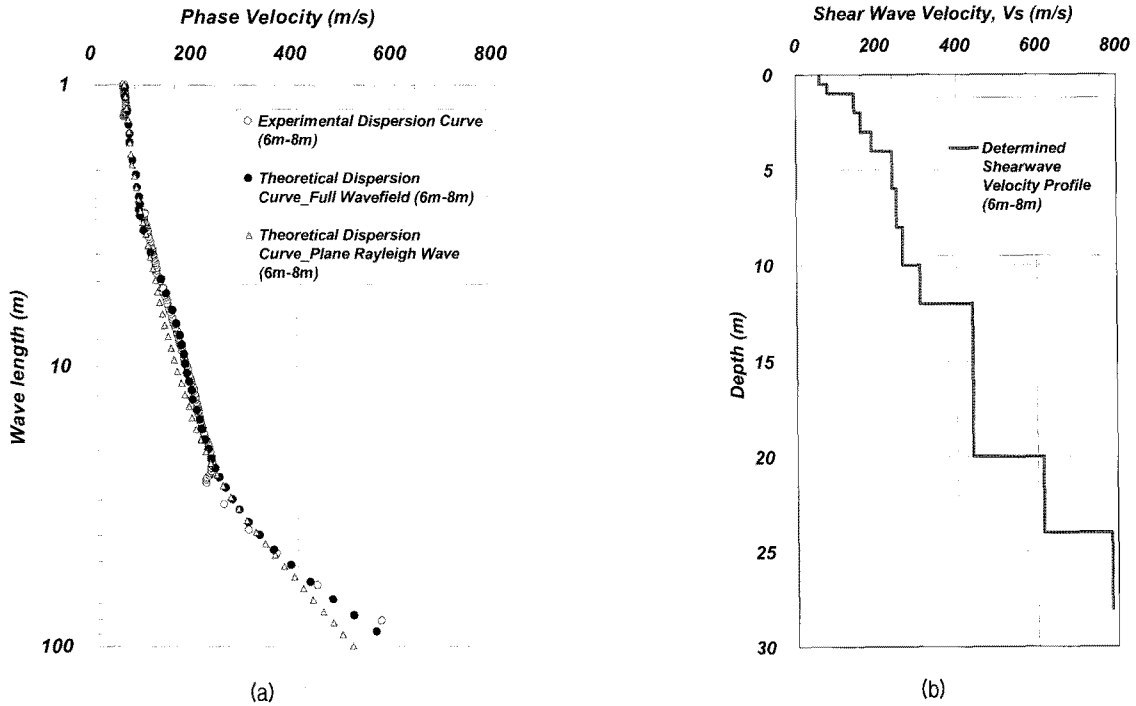


그림 12. 전라도 OO부지에서 HAWW 기법 수행 결과 일례; (a) 축선 내 6m-8m 지점에서 획득한 실험 분산곡선과 이론분산곡선들과의 비교, (b) 결정된 전단파 속도 주상도

#### 4. 현장 적용 사례

수치해석을 통해 고찰한 내용을 바탕으로 전라도 OO 부지에서 2차원 전단파 속도 분포를 도출하기 위해 HAWW 기법을 수행하였다. 본 부지는 석탑 문화재가 위치한 곳으로 구조물의 붕괴 원인 고찰 및 지반 안정성 평가를 목적으로 다차원적인 지반조사가 요구되었으며 그 중 한 가지 방법으로 HAWW 기법을 수행하였다. 수치해석에서 고찰한 바와 같이 가진원 거리 및 감지기 간격을 설정하는 과정을 선행하였으며 노트북 기반 신호 획득 장비 및 GUI를 이용한 운영 프로그램은 이러한 과정을 용이하게 해주었다. 이러한 과정을 통해 가진원 거리 6m, 감지기 간격 2m가 가장 적합한 것으로 결정을 하고 전체 30m 길이의 축선에 대해서 2m 간격으로 총 15지점에 대해 HAWW 기법을 수행하였다. 획득한 실험분산곡선은 반복적 정모델링 방법으로 역산을 수행 전단파 속도 주상도를 도출하였다. 이론분산곡선은 winSASW 1.23(Joh, 1992)을 통해 full wavefield를 고려한 Kausel 방법(3D 정모델링)으로 획득하였다. 축선 중 6m-8m의 역산 과정 일례를 그림 12에 도시하였다. 그림 12(a)과 같이 실험분산곡선과 이론 분산곡선이 거의 일치시켰으며 그에 따른 전단파 속도 주상도는 그림 12(b)와 같다. 결정된 전단파 속도 주상도를 이용하여 평면파 형태

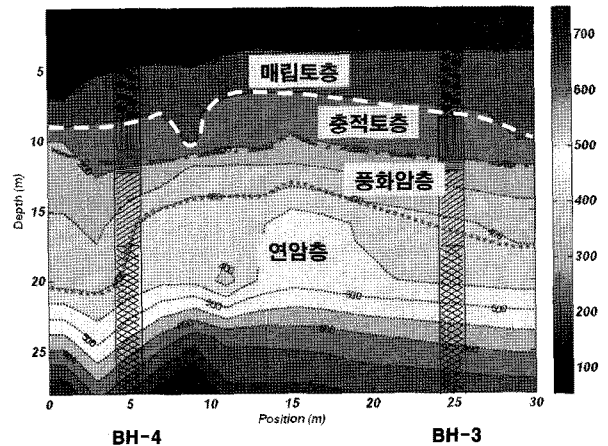


그림 13. HAWW 기법 적용을 통한 전단파 속도의 2차원 단면 획득 결과(전라도 OO부지)

의 레일리파를 가정한 정모델링으로 도출한 이론분산곡선은 파장 10m 부근과 파장 50m 이상 영역에서 실험 분산곡선과는 많은 차이를 보이는 것을 볼 수 있는데 이는 HAWW 기법을 통해 획득한 실험분산곡선을 일반적인 SASW 기법에서 사용되는 평면파 형태의 레일리파를 가정한 정모델링으로 역산할 경우 전혀 다른 결과를 도출하게 될 것임을 짐작할 수 있게 한다. 이와 같은 방식으로 도출된 각 측정에서의 전단파 속도 주상도를 선형 보간을 통해 2차원 전단파 속도 분포를 도출하였으며 그 결과는 그림 13과 같다. 기존 시추 주상도 자료

와 비교하여 매립토, 충적토, 풍화암 및 연암층의 경계를 2차원적으로 규명할 수 있었다. 실제로 기존 2지점에서 시추 주상도 결과만으로 추정하여 볼 때 본 지반은 거의 수평지반이라고 생각될 수 있으나 HWAW 기법 결과로부터 상부 매립토층은 상향 경사이며 연암선은 매우 복잡한 형태임을 추정할 수 있었다.

## 5. 요약 및 결론

HWAW 기법으로 비수평 지반에서 신뢰성 있는 전단파 속도 분포의 도출 가능성을 검증하기 위해 비수평 지반 모델에 대해 수치해석을 수행하고 여기서 고찰한 내용을 바탕으로 현장 적용을 시도하였으며 다음과 같이 요약하여 정리하였다.

- (1) HWAW 기법은 시간-주파수 해석 기법의 적용과 full wavefield를 고려한 역산 기법의 적용으로 인하여 다른 표면파 기법에 비해 짧은 축선으로 지반의 전단파 속도 주상도를 도출할 수 있으며 따라서 신뢰성 있는 2차원 전단파 속도 분포 도출에 유리하다.
- (2) 비수평 지반에서의 수치해석을 통해 HWAW 기법으로 획득한 실험 분산곡선이 Kausel의 방법으로 획득한 이론 분산곡선과 유사한 것을 확인할 수 있었다. 이는 비수평 지반에서도 Kausel의 방법을 기초로 한 역산 기법을 통해 수평적 층상 구조의 변화를 확인할 수 있는 결과의 도출이 가능하다는 것을 의미한다.
- (3) 수치해석 결과로부터 HWAW 기법으로 획득한 실험 분산곡선은 가진원으로부터 감지기까지의 지반 형태보다는 감지기 사이 지반 형태의 영향을 많이 받는 것으로 나타났다. 그러므로 HWAW 기법으로 도출된 결과의 기준 위치를 감지기 중간 지점으로 설정하는 것이 바람직하다.
- (4) 수치해석 연구를 통해 고찰한 내용을 바탕으로 층상 구조가 수평하지 않은 현장 지반에서 HWAW 기법을 수행하여 2차원 전단파 속도 분포를 도출하였으며 그 적용성을 확인하였다.

## 감사의 글

본 연구는 한국지질자원연구원 기본 사업인 “광상 맞춤형 자원탐사·채광 최적기술개발”에 의해 수행된 것

이며 이에 감사드립니다.

## 참고 문헌

1. 고헌범, 이두성 (2003), “지반교란 영역 규명을 위한 고분해능 천부 탄성파 반사법 탐사”, *물리탐사*, Vol.6, pp.28-34.
2. 조창수, 이희일, 서정희 (2002), “탄성과 굴절법 토모그래피를 이용한 지반의 속도 분포 해석”, *물리탐사*, Vol.5, pp.6-17.
3. 박형춘, 김동수 (2004a), “HWAW 방법을 이용한 새로운 탄성파 지반조사기법의 개발(I) : 분산곡선의 결정”, *대한토목학회 논문집*, Vol.24, No.2C, pp.105-115.
4. 박형춘, 김동수 (2004b), “HWAW 방법을 이용한 새로운 탄성파 지반조사기법의 개발(II) : 실험 구성 및 역산과정”, *대한토목학회 논문집*, Vol.24, No.2C, pp.117-124.
5. 박형춘, 김동수, 이병식 (2004), “HWAW(Harmonic Wavelet Analysis of Wave) 방법을 이용한 새로운 탄성파 지반조사기법의 현장 적용”, *한국지반공학학회 논문집*, Vol.20, No.6, pp.51-59.
6. 방은석, 박형춘, 김동수 (2007), “근거리장 영역에서의 HWAW 기법의 수치해석적 검증”, *한국지반공학학회 논문집*, Vol.23, No.2, pp.5-17.
7. 조성호 (1997), “SASW 실험으로부터 강성 주상도를 구하기 위한 역산 기법”, *대한토목공학학회논문집*, 제17권, 제3-4호, pp.443-451.
8. 조성호, 강태호 (2000), “지반의 전단파속도 토모그래피 영상을 구하기 위한 Multi-Channel Tomographic SASW(MTSASW) 기법”, *2000년도 학술발표회 논문집*, 대한토목학회, pp.387-390.
9. 조성호, 장대우, 강태호, 이일화 (2005), “CAP SASW 기법에 의한 지반단면의 전단강성구조 평가”, *한국지반공학학회 논문집*, 제21권, 4호, pp.71-81.
10. Adam, O. (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.
11. Foti, S. (2000), *Multistation methods for geotechnical characterization using surface waves*, PhD dissertation, Politecnico di Tirino, 229p.
12. Gucunski, N. and Wools, R.D. (1992), “Numerical simulation of the SASW test”, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, Vol.11, pp.213-227.
13. Haskell, N.A. (1953), “The dispersion of surface waves in multi-layered media”, *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol.43, pp.17-34.
14. 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, 277p.
15. Hiltunen, D.R., and Woods, R.D. (1990), “Influence of source and receiver geometry on the testing of pavements by the surface wave method”, *a paper prepared for presentation at the 69th Annual Meeting of the Transportation Research Board*, Washington, D.C., January.
16. Joh, S.H. (1992), *User's guide to WinSASW, a Program for data reduction and analysis of SASW Measurement*, The University of Texas at Austin.
17. Joh, S.H. (1996), *FIT7, a Computer Program for Forward Modeling, Inversion, and Time History Generation for SASW Method*, The University of Texas at Austin.
18. Kausel, E. (1981), “An explicit solution for the Green functions

- for dynamic loads in layered media”, *Research Report R81-13*, MIT, Cambridge, 79p.
19. Lai, C.G. (1998), *Simultaneous inversion of Rayleigh phase velocity and attenuation for near-surface site characterization*, PhD dissertation, Georgia Institute of Technology, 370p.
  20. Park, C. B., Miller, R. D., and Xia, J. (1999), “Multichannel analysis of surface waves (MASW)”, *Geophysics*, Vol.64, pp.800-808.
  21. Park, H. C., Kim, D. S. (2001), “Evaluation of the dispersive phase and group velocities using harmonic wavelet transform”, *NDT&E Int*, Vol.34, pp.457-467.
  22. Roesset, J.M., Chang, W., Stokoe, K.H., and Aouad, M. (1990), “Modulus and thickness of the pavement surface layer from SASW tests”, *Transportation Research Record 1260*, TRB, National Research Council, pp.53-63.
  23. Sanchez-Salinerio, I. (1987), *Analytical investigation of seismic methods used for engineering applications*, PhD dissertation, Univ. of Texas of Austin, 401p.
  24. Stokoe, K. H., II, Wright, G. W., James, A. B., and Roesset, J. M. (1994), “Characterization of geotechnical sites by SASW method in geophysical characterization of sites”, *ISSMFE, Technical Committee #10*, Edited by R. D. Woods, Oxford Publishers, New Delhi.
  25. Stokoe K.H., Joh S.H., Woods R.D. (2004), “Some Contributions of In Situ Geophysical Measurements to Solving Geotechnical Engineering Problems”, *International Site Characterization ISC’2*, Porto, Portugal, pp.19-42.
  26. Strobbia, C. (2004), *Surface Wave Methods : Acquisition, processing and inversion*, PhD dissertation, Politecnico di Tirino.
  27. Yoon, S.S. (2005), *Array-Based Measurements of Surface Wave Dispersion and Attenuation Using Frequency-Wavenumber Analysis*, Ph. D. Dissertation, Georgia Institute of Technology.
  28. 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, March 1.

(접수일자 2007. 12. 11, 심사완료일 2009. 4. 20)