

HWAW 기법을 이용한 지반의 2차원 전단파 속도 평가

Evaluation of 2D Shear Wave Velocity Imaging of Subground Using HWAW Method

김종태*, 박형춘**, 방은석***, 박헌준*, 김동수*†

Jong Tae Kim*, Hyung Choon Park**, Eun Seok Bang***, Heon Joon Park* and Dong Soo Kim*†

초 록 수평적 변화가 심한 국내 지반에서는 지반의 2차원 전단파 속도를 비관입적인 방법에 의해 도출하는 것이 중요하며 많은 연구가 수행되어 왔다. 본 연구에서는 속도 도출에 있어 기존의 표면파 탐사법의 단점을 극복한 HWAW(harmonic wavelet analysis of wave) 기법을 적용성을 평가하였다. 이 기법은 하모닉 웨이블릿 변환을 이용하여 파의 그룹(위상)속도를 결정하는 기법으로, 2개의 감지기로 구성된 단일한 실험구성을 사용한다. 주변 잡음의 영향을 효과적으로 제거하기 위해 신호 대 잡음비의 최대 부분을 이용하며 단일 어레이 역산을 사용한다. 또한 짧은 감지기 간격을 이용하여 지반의 국부적인 특성을 파악할 수 있다. 따라서 기존 방법에 비해 간단하고 빠른 현장 시험을 수행하며 신뢰성 있는 지반의 2차원 영상화를 도출할 수 있다. 제안된 기법으로 구한 2차원 영상화의 적용성을 확인하기 위하여 2곳의 부지에서 시험을 수행하였고, 시추결과 및 다른 기법들의 비교 분석을 통해 제안된 기법의 적용성을 검증하였다.

주요용어: HWAW, 표면파 탐사, 전단파 속도, 2차원 영상화

Abstract Two-dimensional imaging of V_s profile becomes more important in Korea because of the large horizontal variation of soil stiffness. To obtain a shear-wave velocity profile in geotechnical practice, various seismic nondestructive investigation methods are being frequently used. In this study, harmonic wavelet analysis of wave (HWAW) method is applied to the determination of V_s profile to overcome some of weaknesses in the existing surface wave methods. HWAW method which is based on time-frequency analysis using harmonic wavelet transform has been developed to determine phase and group velocities of waves. Field testing of this method is relatively simple and fast because one experimental setup which consists of one pair of receivers is needed to determine V_s profile of site. The proposed method uses the signal portion of the maximum local signal/noise ratio to evaluate the phase velocity to minimize the effects of noise, and uses single array inversion which considers receiver locations. Field tests were performed in 2 sites in order to evaluate accuracy of test method and estimate the applicability of 2-D imaging by HWAW method. Through field applications and comparison with other test results, the good accuracy and applicability of the proposed method were verified.

Keywords: HWAW, Seismic Surface Wave Method, Shear Wave Velocity, 2D Imaging

1. 서론

지반의 전단파 속도는 지진하중에 대한 지반응답

해석, 지반 진동 등의 동적 문제만 아니라 지반의 정적 침하, 굴착시 변형, 지반 개량 등 정적인 문제에 있어서도 사용되고 있으며 지반공학적 정수로써

(접수일: 2007. 2. 26, 심사완료일: 2007. 4. 12) * 한국과학기술원 건설 및 환경공학과, ** 충남대학교 토목공학과, *** 한국지질자원연구원 지반탐사연구실, † Corresponding author: Department of Civil and Environmental Engineering, Korea Advanced Institute of Science and Technology, Daejeon 305-701 (E-mail: dskim@kaist.ac.kr)

그 중요성이 증대되고 있다. 현장 지반의 전단파 속도를 구하기 위하여 다양한 탄성과 탐사 기법이 수행되고 있으며 대부분의 기법들은 지반의 수직적인 전단파 속도 분포만을 도출한다. 하지만 일반적으로 지반은 경사지층, 불균등 풍화, 불균등 압밀 및 다짐 등에 의하여 횡방향으로 균질하지 않은 형상을 가지게 된다. 그러므로 1차원 전단파 속도 주상도로는 지반 상태를 올바르게 평가하는데 한계가 있으며, 따라서 2차원 전단파 속도 분포를 도출하는 기법의 적용이 요구되고 있다. 굴절법 탄성과 기법(seismic refraction method), 반사법 탄성과 탐사(seismic reflection method), 크로스홀 토모그래피 기법(crosshole seismic tomography) 등은 지반의 탄성과 속도 분포를 2차원적으로 도출이 가능한 기법이다. 하지만 이러한 기법들은 주로 압축파를 이용한 압반 상태 평가에 초점이 맞추어 수행되던 것으로 현업에서는 산악지역 등에서 압반 파쇄대 등의 연약대를 파악하거나 토사 지반에서는 기반암선을 추정하는데 주로 사용되고 있다. 최근 횡방향 가진 및 축선 배열법의 개선 등을 통해 천부지반을 고해상도로 도출하고자 하는 연구가 수행된 바 있다[1-3]. 하지만 이러한 기법들은 토사층 경계에서 압반 경계와 같이 반사파나 굴절파가 획득 신호상에서 뚜렷하게 구분되지 않는 경우가 많아 결과의 신뢰성이 떨어지게 된다.

현재 국내에서는 토사 지반의 2차원 전단파 속도 분포를 도출하기 위해 표면파 기법이 주로 이용되고 있다. 표면파 기법은 지표면 상에서 가진 및 감진이 이루어지는 비관입, 비파괴 현장 탄성과 탐사기법으로 경제적이며 신속한 현장 실험이 가능한 장점이 있어 2차원 전단파 속도 분포 도출에 유리하다.

현업에서 널리 사용되고 있는 표면파 기법으로 MASW(multi-channel analysis of surface waves) 기법이 있다[4]. 축선을 일정간격 옮겨가며 반복적으로 기법을 수행함으로써 해당 지반의 2차원 전단파 속도 분포를 도출한다. 레일리 모드 분산곡선(Rayleigh mode dispersion curve)을 획득하기 위하여 다수의 감지기를 사용하므로 축선의 길이가 길어 수평층 가정에 위배될 가능성이 크다. 또한 해당 지반의 평균적인 물성치를 도출하게 되므로 수평적인 변화가 심한 지반에서는 결과의 신뢰성이 떨어지게 된다. 현재 현업에서 적용하는 일반적인 현장 실험구성으로 시험 수행시 지반에 따라 획득되는

분산곡선의 주파수 영역이 좁아 가탐 심도가 깊지 않고 위상속도가 타 표면파 기법에 비해 작은 경향이 나타나며 전단파 속도 주상도가 공내 탄성과 탐사 결과에 비해 작게 결정된 사례도 보고되었다[5].

SASW(spectral analysis of surface waves) 기법[6]은 깊은 심도의 탐사를 위해서는 가진원 및 감지기 간격이 더욱 넓어져야 하며 이러한 문제점은 MASW 기법에서와 마찬가지로 신뢰성 있는 2차원 전단파 속도 분포 도출을 어렵게 한다. 최근에 조성호 등[7]은 2차원 전단파 속도 분포 도출에 유리하도록 감지기 위치는 고정시킨 상태에서 탐사 심도에 따라 가진원 거리를 달리해주는 CAP(common array point) SASW 기법을 소개한 바 있다. 하지만 깊은 깊이의 탐사를 위해서 가진원 거리를 여전히 멀리해야 하는 문제점이 있다.

HWAW(harmonic wavelet analysis of wave) 기법은 타 기법에 비해 짧은 가진원 거리 및 좁은 감지기 간격으로 실험 수행이 가능하여 총 축선의 길이가 짧아 지반의 국부적인 특성을 신뢰성 있게 평가할 수 있다[8,9]. 하나의 감지기 배열에 대한 한번의 가진원 타격으로 결과를 도출할 수 있어 현장 시험의 수행이 다른 표면파 기법에 비해 간편하여 지반의 2차원 전단파 속도 분포를 효율적으로 도출하는데 매우 유리하다.

본 논문에서는 표면파 기법의 원리와 HWAW 기법을 통한 지반의 전단파 속도 도출과정을 간략하게 설명하고 제안된 방법을 검증하기 위하여 2곳의 부지에서 시험을 수행하였다. 각 부지에서는 시추 및 타 탄성과 탐사를 동시에 수행하여 HWAW 기법을 이용한 2차원 영상화 기법의 적용성을 검증하였다.

2. 표면파 기법의 개요

2.1. 표면파 기법의 원리

Fig. 1은 층상구조에서 깊이에 따른 표면파의 입자 운동에너지 분포를 나타낸다[10]. 지표면을 따라 전파하는 표면파의 경우 대부분의 에너지가 한 파장깊이 안에 위치하며, 따라서 표면파의 속도는 한 파장 깊이에 위치하는 지반의 물성치에 의해 결정된다. 일반적으로 지반은 층상구조를 가지며 깊이에 따라 다른 물성치를 가진다. 따라서 표면파의 속도는 파장(또는 주파수)에 따라 다른 값을 가진다. 이러한 파장(또는 주파수)에 대한 파의 속도값

의 변화를 분산곡선(dispersion curve)이라고 한다. 이러한 분산곡선은 각층의 두께, 전단탄성계수, 포아송비, 밀도등과 같은 지반의 층상구조에 따라 고유한 형태를 가진다. 따라서 분산곡선에 대한 역해석을 통하여 대상지반의 구조를 결정할 수 있다.

비파괴 표면파 지반조사 방법들은 일반적으로 현장에서 대상지반의 실험 분산곡선을 결정하고, 역산과정을 통하여 대상지반의 전단파 속도 주상도를 결정한다. 이러한 비파괴 표면파 지반조사 방법은 결정되는 분산곡선의 종류에 따라 크게 두 가지로 구분할 수 있다. 첫 번째는 겉보기 속도 분산곡선을 이용하는 방법이며, 두 번째는 모드 분해를 통해 각 모드의 분산곡선을 이용하는 방법이다. 겉보기 속도분산곡선을 사용하는 표면파 지반조사방법은 일반적으로 2개의 감지기를 사용하여 현장에서 간편하게 실험을 수행할 수 있으나 역산을 위해 체적파의 영향까지 모두 포함하는 3D 이론분산곡선을 사용해야 한다. 이러한 3D 이론분산곡선의 사용은 계산시간의 증가를 가져온다. 또한 각각의 주파수에서 결정된 하나의 속도값만을 역산에 사용하기 때문에 복잡한 지반조건에서 정확한 지반주상도를 결정하는데 약간의 어려움이 발생할 수도 있다. 표면파에 대한 모드분해를 통해 각 모드의 분산곡선을 지반조사에 사용하는 경우, 기본모드에 해당하는 모드 분산곡선에 대해 2D 이론분산곡선을 역산에 사용할 수 있기 때문에 계산효율을 증대시킬 수 있으며, 고차모드에 해당하는 모드 분산곡선은 각각의 주파수에서 여분의 정보로서 역산시 모호성을 감소시킬 수 있다. 이러한 모드 분산곡선을 결정하기 위해서는 현재까지는 다수의 감지기를 사용하는 다채널 표면파 기법을 사용해야 한다. 이러한

다채널 표면파 기법은 좋은 품질의 분산곡선을 결정하기 위해서는 다수의 감지기가 필요하며, 이러한 다수의 감지기의 필요성은 다채널 실험의 현장 적용에 있어 실용성을 떨어뜨릴 수 있다.

표면파 기법의 수행과정은 Fig. 2와 같이 크게 3 단계로 구분된다. 첫 단계는 현장 실험(field test)을 통해 지반의 정보를 담고 있는 분석 가능한 탄성과 신호를 획득하는 것이다. 얇은 심도에 대해 자세한 전단파 속도 주상도를 도출하기 위해서는 고주파 영역에 집중해서 실험 분산곡선을 획득해야 하며 깊은 심도에 대한 전단파 속도 주상도를 도출하기 위해서는 예상 심도에 맞추어 저주파 영역까지 실험 분산곡선을 획득해야 한다. 이를 위해서는 현장 시험 단계에서부터 적합한 가진원 및 감지기를 사용하고 측선을 설계하여야 한다. 두 번째 단계는 신호 처리(signal processing)를 통한 실험 분산곡선의 도출이다. 당연히 신호처리 방법에 맞추어 현장 실험을 수행하여야 하며 이와 같은 과정의 차이에 따라 여러 가지 표면파 기법이 존재한다. 마지막으로 역산(inversion)을 통해 전단파 속도 주상도를 결정하게 된다. 이어, 획득한 실험 분산곡선의 특성에 따라 적합한 정모델링 기법을 적용하여야 한다. 지금까지 소개된 표면파 기법에는 FK(frequency wavenumber), SASW(spectral analysis of surface waves), MASW(multi-channel analysis of surface waves), MSASW(multi-station spectral analysis of surface waves), HWAW(harmonic wavelet analysis of surface wave) 등이 있다.

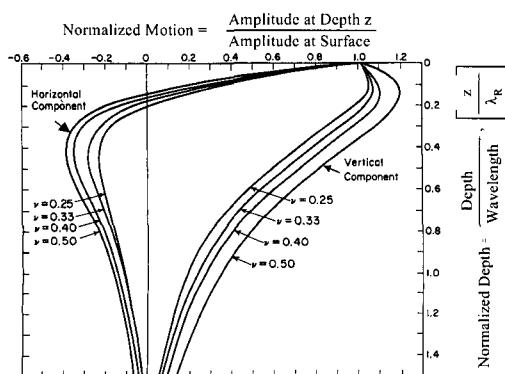


Fig. 1 Energy distribution of surface wave [10]

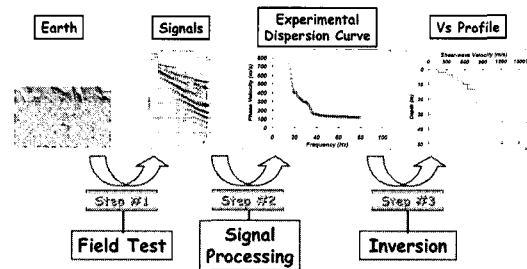


Fig. 2 Testing procedure of surface wave method

2.2. 기존 표면파 기법

앞서 언급된 표면파 기법 중 가장 널리 사용되고 있는 두 기법에 대해 소개하고자 한다. 두 개의 감지기를 이용하는 기법(two-channel method)을 대

표하는 SASW 기법과 여러 개의 감지기를 이용하는 기법(multi-channel method) 중 현재 국내에서 가장 널리 적용되고 있는 MASW 기법에 대해 간략히 기술하였다.

2.2.1. SASW 기법

표면파 탐사로서 토목 분야에 최초로 소개되어 적용된 것이 SASW 기법이다. SASW 기법은 텍사스 오스틴 대학의 Stokoe 교수 그룹에 의해 주도적으로 연구 되었으며 꾸준히 개선되어 보급되어 왔다. SASW 기법은 충격 가진원(impact source)이나 연속 가진원(continous source)에 의해 발생된 표면파를 지표면에 위치한 한 쌍의 감지기로부터 측정하고 스펙트럼 분석(spectral analysis)을 통하여 실험 분산곡선을 획득한다. 근접장 영향을 피하고 깊은 영역 탐사를 위하여 획득하고자 하는 파장에 비례하여 가진원 거리와 감지기 간격을 늘려주며 실험을 수행한다. 반복하여 구한 분산 곡선을 이용하여 복합 실험 분산곡선(composite dispersion curve)을 만들고 이를 이용하여 대표 실험 분산곡선(representative dispersion curve)을 결정한 뒤 역산(inversion)을 거쳐 전단파 속도 주상도를 도출하게 된다. 2개의 감지기를 이용하므로 획득되는 분산곡선은 겉보기 분산곡선(apparent dispersion curve)이 된다. SASW 기법은 스펙트럼 분석에 있어 전문가적인 판단이 요구되고 주변의 잡음(noise)에 의해 많은 영향을 받아 해석시 상당한 주의가 필요하다. 또한 시험 부지에 대한 넓은 주파수(혹은 파장) 영역에서의 실험 분산곡선을 도출하기 위해 다양한 감지기 배열(multiple array)을 사용하여 여러 번 실험을 수행하여야 하므로 많은 시간과 노동력이 요구되며 복합 실험 분산곡선의 형태가 양호하지 않을 경우 대표 분산곡선의 결정과정에서 모호함이 존재한다. 이러한 문제점을 해결하기 위해 국내외에서 많은 연구가 수행되어 왔다[11-13].

2.2.2. MASW 기법

최근 들어 지구 물리 탐사(geophysics) 연구자들에 의해 개발된 MASW 기법이 국내에 도입되었다. 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 발생된 탄성과 기록을 다중 채널 기록 형태로 획득하게 된다. 다중 채널 기록으로부터 파장(혹은 주파수) 별로 경사 중합(slant stack) 등의 일관성 패턴과 도착 시간 분석을 통해 주파수-속도 영역에서 실험 분산곡선을 획득하게 된다[14]. MASW 기법과 같은 다채널 기법을 통해 획득되는 실험 분산곡선은 일반적으로 표면파의 모드가 분리된 형태이다. 이러한 실험 분산곡선으로부터 역산과정을 통해 지반의 전단파 속도 주상도를 도출하게 된다. 측선을 옮겨가며 반복적인 실험 수행을 통해 2차원 전단파 속도 주상도를 획득할 수 있다. 하지만 현업에서 일반적으로 적용하고 있는 MASW 실험 방법(4.5 Hz 감지기 12개 및 슬리지 해머 사용)으로는 획득되는 분산곡선의 주파수 대역(frequency bandwidth)이 넓지 않아 가탐 심도가 깊지 않다는 단점이 있다. 가탐 심도를 늘리기 위해서는 낮은 공진 주파수를 가지는 감지기를 사용하는 것이 좋으며 48개 이상의 감지기를 사용한 긴 측선의 적용하고 중추(drop weight) 등의 저주파 발생에 유리한 가진원을 추가적으로 사용하는 것이 바람직하다[5].

3. HWAW 기법

3.1. HWAW 기법의 기본원리

HWAW 기법은 SASW 기법의 분산곡선 도출과정의 문제점을 해결하고자 Park과 Kim[15]에 의해 위상속도 결정법과 관련된 내용을 중심으로 개발되었으며 차츰 발전하여 현재의 모습으로 구체화되었다[16]. HWAW 기법에서는 시간-주파수 해석(time-frequency analysis)을 통해 실험 분산곡선을 자동적으로 도출할 수 있으며 각 주파수별로 에너지가 최대인 국부적인 정보만을 이용하므로 주변 잡음(noise)에 대한 영향을 최소화 할 수 있다. 또한 HWAW 기법은 평면파 형태의 레일리와 성분만을 해석에 사용하고자 하였던 기존의 표면파 탐사들과는 달리 체적파 성분 및 원통형 형태의 표면파 성분을 포함한 모든 탄성과 성분을 해석에 적극적으로 사용함으로써 좁은 감지기 간격 및 짧은 가진원 거리를 가지는 측선의 사용이 가능하다.

3.2. HWAW 기법을 이용한 실험분산곡선의 도출

Fig. 3에 HWAW 기법을 통해 분산곡선을 도출하는 과정을 도시하였다. 먼저 (1)현장 실험으로부터 신호를 획득하고 (2)하모닉 웨이블릿(harmonic wavelet)을 이용한 시간-주파수 해석 결과에서 (3,4) 신호 대 잡음비(S/N)가 최대인 국부적인 시간 영역신호를 이용하여 두 지점간의 각 주파수별 도달 시간 차를 산출하며 (5)감지기간 거리를 이용하여 각 주파수 성분에 대한 위상속도, 즉 실험 분산곡선을 도출하게 된다[17]. HWAW 기법에서는 분산곡선 도출 과정이 반자동화 되어 있어 SASW 기법에서 문제시 되었던 해석자의 주관 및 전문성이 요구되지 않게 된다. 또한 신호/잡음비가 최대인 국부적인 시간 영역만을 사용하므로 2채널 기법(two station method)의 가장 취약점으로 지목되었던 주변 잡음에 영향이 매우 적다[17]. 따라서 저주파 영역의 분산곡선 자료를 획득하기 위해 상당한 무게의 중추 등을 사용했던 기존의 SASW 기법에 비해 비교적 간단한 형태의 가진원으로도 고주파에서부터 저주파까지 분산곡선을 한 번의 실험으로 획득이 가능하다는 장점을 가진다.

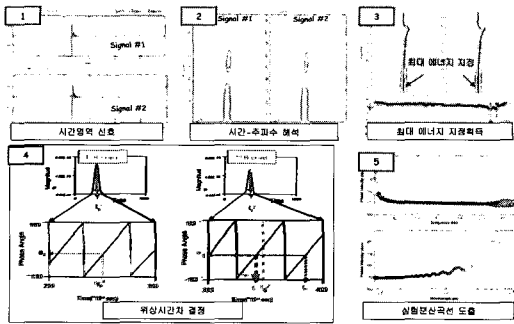


Fig. 3 The procedure of determination of experimental dispersion curve in HWAW method

3.3. 단일 어레이 역산을 통한 지반 주상도의 결정

지표면에서 계측되는 파의 분산곡선은 감지기 위치와 대상지반의 횡방향 불균일성에 의해 영향을 받는다. 또한 단일 감지기 위치에서 대상지반의 전체분산곡선을 결정하기 때문에 HWAW 기법으로 도출된 분산곡선은 체적파 성분과 표면파 성분이 공존하며 표면파 중에서도 기본모드 뿐만 아니라

고차모드까지 포함된 겹보기 위상속도를 나타내게 된다. 따라서 역산과정에서 모든 파성분의 영향을 포함한 3D 이론분산곡선을 사용하여야 하며, 동시에 감지기 위치를 고려하여 이론분산곡선을 결정하는 어레이 역산을 사용하여야 한다. HWAW 방법은 단일 어레이 역산(single array inversion)을 사용한다. HWAW 방법은 단일 감지기 위치에서 대상지반을 대표하는 전체 분산곡선의 결정이 가능하기 때문에 단일 어레이 역산을 통하여 계산시간이나 복잡성의 증가 없이 감지기의 위치에 따른 분산곡선의 변화를 고려할 수 있다. 동시에 감지기간의 간격이 다른 방법들에 비해 매우 짧기 때문에 기존 방법들의 역산과정에서 지반의 횡방향 불균일성에 의해 발생할 수 있는 오류가능성을 최소화 할 수 있다[8,9].

3.4. 현장시험방법 및 효과적인 2차원 진단파 속도 분포 도출을 위한 시험 시스템 구성

HWAW 기법의 현장 시험 구성은 짧은 실험구성과 일반적인 실험구성, 2개의 실험구성으로 나뉜다. 짧은 실험구성은 6~12 m의 가진원-감지기 간격과 1~3 m의 감지기 간격으로 이루어지며, 일반적인 실험구성은 최대 대상 파장의 1/2 혹은 1/3 배 이상 되는 가진원 감지기 간격과 동일한 감지기 간격을 사용한다. HWAW 방법은 표면에서 계측되는 파의 근접장 성분을 적극적으로 이용하며, 또한 배경잡음의 영향을 신호처리과정에서 효과적으로 제거할 수 있기 때문에 일반적인 실험구성과 짧은 실험구성 모두 단일한 실험구성을 사용하여 대상지반의 전체 분산곡선을 한 번의 실험으로 결정할 수 있다[17,8]. Fig. 4는 HWAW 기법의 짧은 실험구성 및 기존 표면파 기법(SASW, MASW 기법)의 현장 시험 개요도를 나타낸다. 일반적으로 기존 표면파 기법에서는 깊은 심도의 불성치를 획득하기 위해서는 축선의 길이가 길어져야 한다. 이럴 경우 감지기 배열의 어려움뿐만 아니라 더 큰 규모의 가진원이 필요하므로 현장 실험 수행이 매우 힘들어진다. 또한 지층 구조가 수평하지 않을 경우 축선의 길이가 길어질수록 신뢰성 있는 기법 수행이 어려워진다. 반면에 짧은 실험 구성의 HWAW 기법은 감지기 간격 및 가진원 거리가 타 기법에 비해 충분히 짧고 2개의 감지기만을 사용하기 때문에 지반의 횡방향 불균일성에 의한 오류를 최소화 할 수

있다. 그러므로 대상 부지에 대해서 2차원 단면을 위한 측선을 설정하고 가진원과 감지기 위치를 옮겨가며 연속적인 HWAHW 기법의 수행을 통해 2차원 전단파 속도 분포를 도출할 수 있다. HWAHW 기법은 분산곡선 도출 과정이 반자동화 되어 있어 기존의 SASW 기법에 비해 실험 수행 및 해석에 있어 유리하다. 또한 한 번의 가진원 타격으로 한 측선의 전체깊이에 대한 탐사를 수행하기 때문에 SASW 및 MASW 기법에 비해 2차원 영상화를 위한 시험 수행이 간단하고 경제적이다.

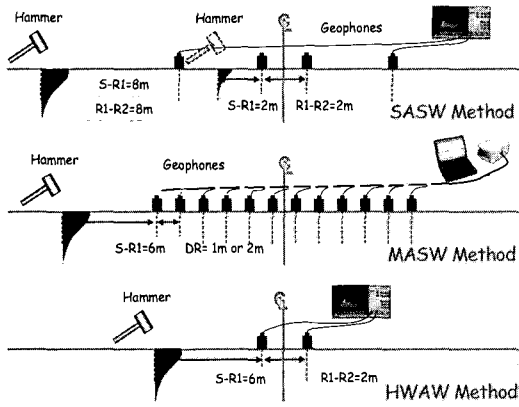


Fig. 4 Field test setup of HWAHW method and existing surface wave methods

따라서 짧은 실험 구성을 이용하여 Fig. 5와 같이 효과적인 2차원 전단파 속도분포 도출을 위한 시험 시스템을 구성하였다. 2차원 영상화를 위한 시험 시스템은 크게 자료획득 시스템, 감지기, 가진원 등 현장 시험 장비, 신호 처리 및 해석 프로그램으로 나눌 수 있다. 현장 시험에서 신호 획득과 동시에 결과 해석을 하는 것은 신뢰성 있는 지반의 전단파 속도 주상도 획득여부를 현장에서 판단하는데 있어 매우 유리하므로, 노트북 기반의 신호 획득 장비를 이용하여 획득한 신호를 바로 현장에서 관리, 후처리 과정을 신속하게 수행할 수 있도록 시스템을 구성하였다. 자료획득 시스템은 다채널 신호 획득 장비와 연결할 수 있도록 하였으며, 감지기 시스템은 간편한 시험 구성으로 신속하고 정확한 2차원 영상화를 도출하기 위하여 여러 개의 속도계를 이용하는 방식으로 구성하였다. 또한 신호 획득 및 관리 프로그램과 결과 도출 프로그램을 이용하여 현장에서 최종 결과를 도출하여 지반 상태를 실험과 동시에 평가할 수 있도록 하였다.

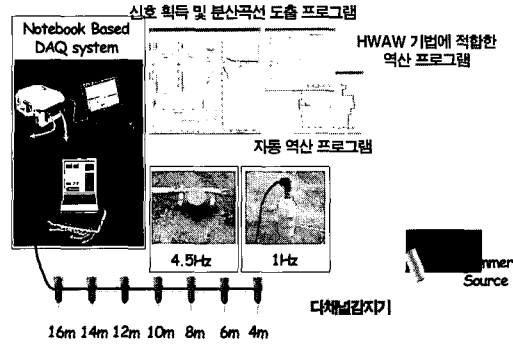


Fig. 5 Test setup for evaluation of 2D Vs imaging using HWAHW method

4. 현장 적용 사례

4.1. 평택 서해대교 부지

경기도 평택 서해대교 평택측 부지에서 HWAHW 기법으로 구한 2차원 영상화의 적용성을 검증하기 위하여 HWAHW 기법을 비롯한 SASW, MASW 등의 표면파시험과 다운홀 등의 시추공탄성과 탐사법을 수행하였다. 또한 탄성과 탐사가 수행되기 전 지반의 하부구조를 파악하기 위하여 시추를 Fig. 6과 같이 3개 지점에서 수행하였으며 각 시추공은 BH1, BH2, BH3로 나타내어 진다. 표준관입시험으로 구한 N치와 채취된 시료를 바탕으로 지반을 매립토, 풍화토, 풍화암, 연암으로 구분하였다. 그림에서 보이는 바와 같이 비교적 횡방향 변화가 큰 지반이며 풍화암의 깊이는 12 m에서 16.5 m로 다양하게 존재하며 풍화암 위로 매립층과 풍화토층이 존재한다. 풍화암 아래로 연암이 존재하며 BH2에서의 연암시작깊이는 다른 지점에 비해 훨씬 깊은 31.5 m 지점에 존재한다. 표면파 기법은 세 시추공의 연결선을 따라 수행되었다. HWAHW 기법은 가진원-감지기 간격 6 m, 감지기간 간격 2 m를 이용하는 짧은 실험구성을 이용해 실험하였으며 해머를 이용하여 가진하였다. SASW 기법은 기존의 시험 구성을 사용하여 감지기 간격을 2, 4, 8, 16, 32 m로 벌려가며 시험을 수행하였고 해머, 중추, 굴삭기의 삼 부분을 이용하여 가진하였다. 다운홀 시험은 SH파를 발생하는 지표면 가진원과 시추공용 3성분 감지기를 이용하여 각 시추공에서 30 m 깊이까지 수행하였다.

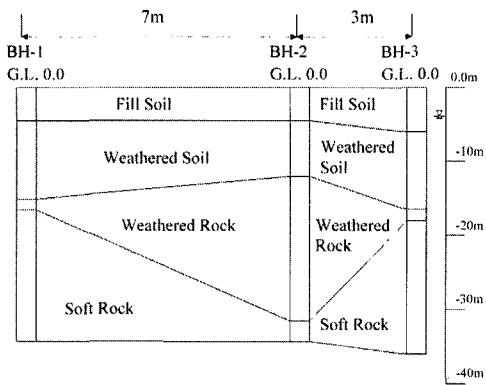


Fig. 6 The three boring logs of Seohae Grand Bridge site

Fig. 7에 시추공 BH-2에서 수행한 여러 탄성과 탐사기법의 결과를 나타내었다. 그림에서 나타나는 바와 같이 각 기법의 결과들은 약간의 차이를 보이지만 전체 깊이를 통해 비슷한 경향을 보인다고 할 수 있다. SASW 기법과 HWAW 기법의 차이는 감지기 간격 차이에 의해 발생하는 탐사영역의 차이와 그에 따른 지반의 횡방향 불균질에 기인한다. 기존의 표면파 기법과 시추공 시험법과의 상호비교 시험을 통해 새로운 기법인 HWAW 기법의 신뢰성과 적용성을 검증할 수 있었다.

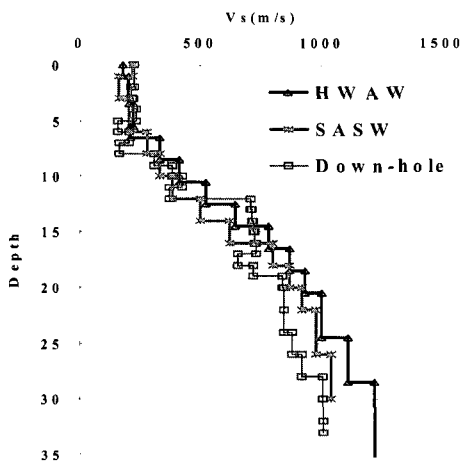


Fig. 7 Vs profiles obtained by HWAW, SASW and down-hole tests at BH-2

HWAW 기법을 시험 축선을 따라 감지기와 가진원 구성을 평행이동 시키며 14지점에서의 분산곡선을 구하고 이를 이용하여 14개의 전단파 속도 추상도를 도출하였다. HWAW 기법의 14개의 1차원

결과를 선형보간을 통해 깊이 30 m, 가로폭 26 m의 2차원 전단파 속도 영상화를 완성하여 Fig. 8에 도시하였다. 그림에서 나타난 바와 같이 횡방향 불균형을 가지는 지반에서 풍화토와 풍화암의 경계를 각 250 m/s, 600 m/s의 전단파 속도 영역을 이용하여 찾아낼 수 있었다. 또한 시추공을 이용한 추상도와 비교한 결과 이와 같은 HWAW 기법의 2차원 영상화를 이용한 지반강성 구조의 파악 가능성을 확인 할 수 있었다. 현업에서 본 부지에서와 같이 비교적 큰 횡방향 변화를 보이는 지반에서 전단파 속도를 이용하여 각 지반 재료의 층 구분을 할 수 있으면 시공시 설계자료로 유용하게 사용할 수 있을 것이다.

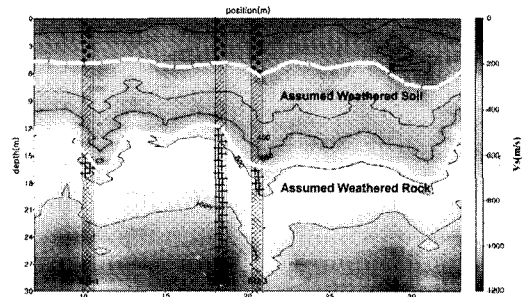


Fig. 8 2D Vs imaging of Seohae Grand Bridge site using HWAW method

4.2. 대전 000 공사 부지

대전 000 공사 부지에서는 각 표면파 기법으로 구한 지반의 2차원 전단파 속도 추상도를 비교, 검증하기 위하여 HWAW, SASW, MASW 기법을 수행하였다. 또한 탄성과 탐사가 수행되기 전 지반의 하부구조를 파악하여 비교하기 위하여 4개의 시추공을 Fig. 9와 같이 수행하였으며 각 시추공은 BH1, BH2, BH3, BH4로 나타내었다. 표준관입시험으로 구한 N치와 채취된 시료를 바탕으로 지반을 매립토, 풍화토, 풍화암, 연암으로 구분하였다. 이 부지에서는 그림에서 보이는 바와 같이 풍화암의 깊이가 8~9m로 비교적 균일하며 연암의 깊이는 다양하여 시추공 BH3과 BH4에서는 약 17 m에 존재하는 반면 BH1과 BH2에서는 확인하지 못하였다. 각 표면파 기법은 네 시추공의 연결선을 따라 수행되었다. HWAW 기법은 가진원-감지기 간격 6 m, 감지기 간격 2 m의 짧은 실험구성을 이용해 총 11지점에서 실험하였으며 해머를 이용하여 가진하였다.

SASW 기법은 기존의 시험구성을 사용하여 감지기 간격을 2, 4, 8, 16, 24 m로 벌려가며 시추공 위치 네 곳에서 시험을 수행하였고 해머, 추를 이용하여 가진하였다. MASW 기법은 1 m 간격의 24개의 감지기 구성을 이용하여 중앙 축선을 2 m 간격으로 이동하여 11지점에서 시험을 수행하였다.

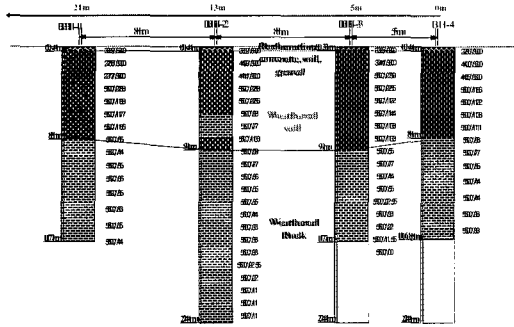


Fig. 9 The boring logs of Daejeon OOO site

Fig. 10에는 시추공 BH2 위치에서 각 기법으로 구한 실험분산곡선을 나타내었다. 세 기법 모두 유사한 실험분산곡선을 도출하였다. 단파장영역에서는 150 m/s 정도의 위상속도를 가지고 파장이 길어짐에 따라 증가하는 정규지반의 분산곡선을 나타내었다. 각 기법에 따라 분산곡선이 도출된 파장영역이 조금씩 다른데 이는 각 기법에서의 감지기 구성과 가진원의 차이 때문이라 할 수 있다. HWAW 기법은 앞서 설명한 바와 같이 한번 타격으로 전체 깊이를 탐사할 수 있기 때문에 장파장 영역까지 분산곡선을 도출할 수 있었고 SASW 기법의 경우 현장에서 추를 이용하여 양질의 신호를 획득할 수 있는 감지기 배열이 최대 24 m였기 때문에 분산곡선은 약 48 m까지 도출하였다. MASW 기법의 경우

해머를 사용하여 수행하여 타 기법에 비해 장파장에서 분산곡선을 도출하지 못하였다. 각 기법으로 구한 전단파 속도 추상도를 Fig. 11에 동시에 도시하였다. Fig. 11에 나타난 바와 같이 각 기법으로 구한 BH2에서의 1차원 전단파 속도 추상도는 유사한 결과를 도출함을 알 수 있다.

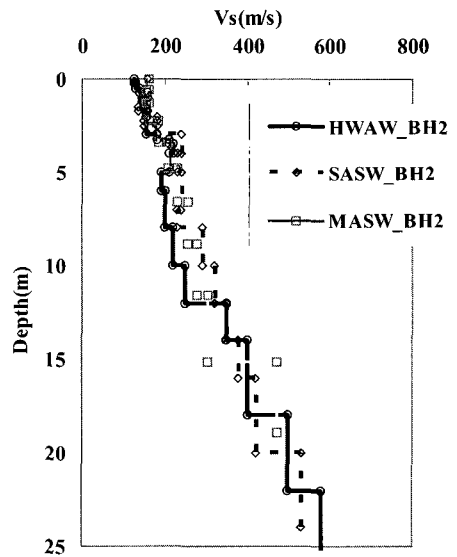
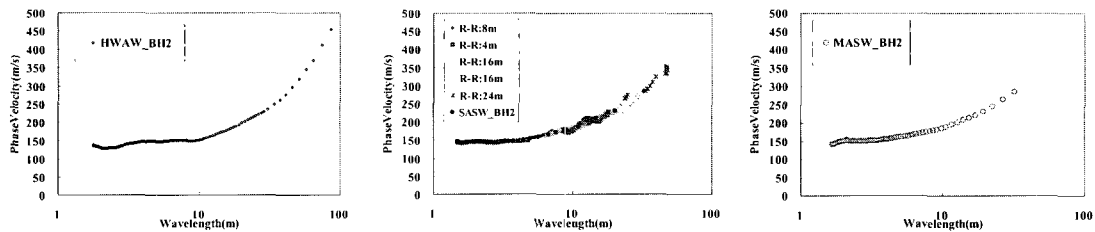


Fig. 11 Vs profiles at BH2

각 기법에서 구한 1차원 전단파 속도 추상도의 선행보간을 통해 2차원 전단파 속도 추상도를 도출하여 Fig. 12에 도시하였다. 그림에서 보이는 바와 같이 각 기법에서 유사한 속도 280~300 m/s에서 풍화암과 풍화토의 경계를 유추할 수 있었다. 즉 2차원 추상도에서 전단파 속도를 이용하여 지반의 하부 구조 파악의 가능성을 다시 한번 확인하였다. 각 기법으로 구한 추상도는 지반의 국부적인 특성



(a) Experimental dispersion curve obtained by HWAW method (b) Experimental dispersion curve obtained by SASW method (c) Experimental dispersion curve obtained by MASW method

Fig. 10 Experimental dispersion curves obtained by each method

을 나타내는데 조금씩 차이를 보이고 있다. HWAW 기법과 SASW 기법의 경우 BH3와 BH4 하부의 연암층에 해당하는 큰 전단파 속도를 도출하는 반면 MASW 기법의 경우 탐사 깊이의 한계로 인하여 20m 이하 지반의 속도를 도출하지 못하였다. 또한 각 기법의 결과가 층의 수평방향의 변화에 대한 묘사에 차이를 보이는 데 이는 시험법의 특성에 따른 것이다. HWAW 기법으로 구한 2차원 주상도는 다른 주상도에 비해 수평방향 강성변화를 좀 더 자세하게 나타낼을 알 수 있다. 이는 2m의 짧은 감지기 간격을 가지고 여러 지점에서 수행한 시험결과를 사용하였기 때문이다. SASW 기법에서 구한 1차원

전단파 속도는 최대 감지기 간격 24 m 사이의 평균적인 속도를 나타내기 때문에 이를 이용하여 2차원 영상화 속도를 구할 경우 지반의 평균적인 특성을 구하게 된다. 따라서 SASW 기법으로 구한 2차원 주상도는 수평방향 변화를 자세히 나타내지 못할 가능성이 크다. 또한 SASW 기법은 한 지점의 전단파 속도 주상도를 구하는 시험 구성이 복잡하기 때문에 2차원 전단파 속도 주상도를 도출하는데 적합하지 않다고 판단된다. MASW 기법 역시 시험 간격은 2 m 간격으로 수행한다 하더라도 감지기 간격은 23 m 이므로 각 지점의 전단파 속도는 23 m 절편의 평균값이 된다. 따라서 이를 이용한 2차원 전단파 속도 주상도 역시 지반의 평균적인 물성을 도출할 가능성이 크다. 따라서 지반 하부구조의 신뢰성 있는 2차원 전단파 속도를 구하는데 HWAW 기법을 이용한 방법이 타 기법보다 유리하다.

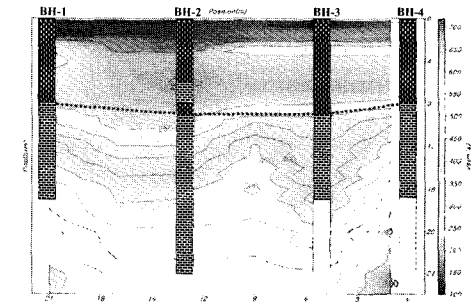
5. 결론

본 논문에서는 지반하부구조의 신뢰성 있는 2차원 전단파 속도를 도출하기 위한 새로운 표면파 탐사 기법인 HWAW 기법에 대한 원리와 시험방법에 대하여 설명하였고 2차원 영상화의 신뢰성 및 현장 적용성을 검증을 위하여 현장시험을 수행하였다.

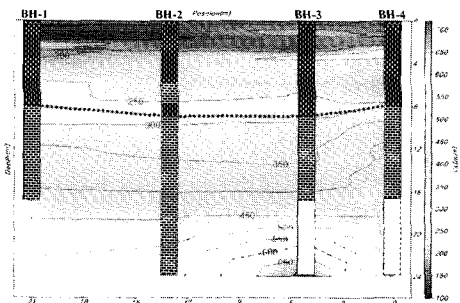
- (1) 제안된 기법은 짧은 감지기를 사용하여 한번의 가진으로 전체 깊이의 속도를 도출할 수 있어 타 기법에 비해 빠르고 간단하게 시험을 수행할 수 있다.
- (2) 기법의 적용성을 검증하기 위해 2곳의 부지에서 시추를 실시하고 타 탐사와 함께 제안된 기법을 수행하였다.
- (3) 각 현장 적용을 통해 기법을 통한 1차원 전단파 속도 주상도와 2차원 전단파 속도 영상화 도출에 대한 신뢰성과 적용성을 검증하였다.
- (4) 제안된 기법이 타 기법에 비해 2차원 영상화를 도출하는데 있어 유리함을 확인하였다.

후 기

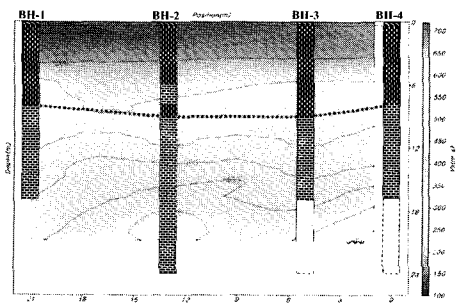
본 연구는 스마트 사회기반시설 연구센터 (SISTeC) 및 건설교통부가 출연하고 한국건설교통기술평가원에서 위탁시행한 2006년도 건설핵심기술연구개발사업(04핵심기술B01-04)에 의한 연구비 지원 지원으로 이루어진 연구 성과의 일부로 이에 감사를 표합니다.



(a) 2D Vs imaging obtained by HWAW method



(b) 2D Vs imaging obtained by SASW method



(c) 2D Vs imaging obtained by MASW method

Fig. 12 2D Vs imaging of Daejeon OOO site

참고문헌

- [1] 김종열, "임해매립층./해성점토 경계면 규명을 위한 탄성과 이용 기술", 2000년 공동특별강연 논문집, 한국지구물리탐사학회·한국지반공학회 지반조사위원회, pp. 48-86, (2000)
- [2] 고광범, 지준, 이두성, "천부탄성과 탐사 자료 획득을 위한 3차원 축선 배열 설계", 한국자원 공학회지, Vol. 37. pp. 232-239, (2000)
- [3] 조창수, 이희일, 서정희, "탄성과 굴절법 토모그 래피를 이용한 지반의 속도 분포 해석", 물리탐 사, Vol. 5, pp. 6-17, (2002)
- [4] C. B. Park, R. D. Miller and J. Xia., "Multi-channel analysis of surface waves," Geophysics, Vol. 64, No. 3, pp. 800-808, (1999)
- [5] 조성호, 하의상, 박권규, 강태호, 김종태, 김봉 찬, 최재화, 안희윤, "지반 하부강성구조 평가를 위한 표면파 기법 비교 연구", 한국지반공학회 봄 학술발표회 RRT 특별 Session, pp. 35-56, (2005)
- [6] S. Nazarian and KH Stokoe, "In situ shear wave velocities from spectral analysis of surface wave," Proc., 8th Conf on Earthquake Eng. S.Francisco, pp. 31-38, (1984)
- [7] 조성호, 장대우, 강태호, 이일화, "CAP SASW 기법에 의한 지반단면의 전단강성구조 평가" 한국지반공학회 논문집, 지반공학회, Vol. 22. pp. 71-82, (2005)
- [8] 박형춘, 김동수, "HWAW 방법을 이용한 새로운 탄성과 지반조사기법의 개발(II) : 실험 구성 및 역산과정", 대한토목학회 논문집, Vol. 24, No. 2C, pp. 117-124, (2004)
- [9] 박형춘, 김동수, 이병식, "HWAW (Harmonic Wavelet Analysis of Wave)방법을 이용한 새로운 탄성과 지반조사기법의 현장 적용", 한국지 반공학회 논문집, 제20권, 6호, pp. 1-9, (2004)
- [10] F. R. Richart, J. R. Hall and R. D. Woods, "Vibration of soil and foundations", Prentice Hall, 401pp, Englewood Cliffs, New Jersey, (1970)
- [11] M. O. Al-Hunaidi, "Analysis of disperded multi-mode signals of the SASW method using multiple filter/crosscorrelation technique," Soil Dynamics and Earthquake Engineering, Vol 13, pp. 13-24, (1994)
- [12] S. H. Joh, "Advanced in interpretation and analysis techniques for spectral-analysis-of-surface-waves(SASW) measurement," Ph. D. Dissertation, The University of Texas at Austin, (1996)
- [13] 조성호, 강태호, "SASW 실험 분산곡선의 자동화 계산을 위한 주파수-파수 기법", 한국지 반공학회지, Vol. 19, No. 4, pp. 299-310, (2003)
- [14] J. Xia. and R. D. Miller, "Imaging dispersive energy by slant stacking," SEG/Huston annual Meeting, pp. 1061-1064, (2005)
- [15] H. C. Park and D. S. Kim, "Evaluation of the dispersive phase and group velocities using harmonic wavelet transform," NDT&E International, Vol. 34, No. 7, pp. 457-467, (2001)
- [16] H. C. Park and D. S. Kim, "Development of seismic site characterization method using harmonic wavelet analysis of wave (HWAW) method," International Site Characterization, ISC-2 Porto, Portugal, pp. 767-774, (2004)
- [17] 박형춘, 김동수, "HWAW 방법을 이용한 새로운 탄성과 지반조사기법의 개발(I) : 분산곡선의 결정", 대한토목학회 논문집, Vol. 24, No. 2C, pp. 105-115, (2004)