

실대형 모형부지를 이용한 HAWW(Harmonic Wavelet Analysis of Waves) 기법의 검증

Verification of the HAWW (Harmonic Wavelet Analysis of Waves) Method Using Multi Layered Model Testing Site

김 종 태¹ Kim, Jong-Tae 방 은 석² Bang, Eun-Seok
박 형 춘³ Park, Hyong-Choon 김 동 수⁴ Kim, Dong-Soo

Abstract

HAWW (Harmonic Wavelet Analysis of Wave) method, which is non-destructive method using body and surface waves, has the advantages of obtaining 2D subsurface imaging because it uses a short receiver spacing to obtain the V_s profile of whole depth. Even though the reliability of HAWW method has already been verified by using the numerical simulation in the various layered models, it is very difficult to evaluate the reliability of HAWW in the field because the exact V_s values of the experimental site are unknown. In this study, a model testing site where the material properties and layer information could be controlled was constructed to verify the reliability of HAWW method. The detailed geometry of the testing site was strictly measured by surveying, and 140 vertical and horizontal geophones were established at the boundary of each layer to evaluate the dynamic material properties. Using the interval travel times between the upper and lower geophones, the body wave velocities of each layer were 2 dimensionally obtained as reference data, and comparative study using HAWW method was performed. By comparing 2D V_s profile obtained by HAWW method to the reference data, the reliability of HAWW method was verified.

요 지

HAWW 기법은 체적파 영향이 포함된 표면파를 이용하는 지표면 지반조사 기법이다. 짧은 감지기 간격을 이용하여 지반의 전단파 속도 주상도를 도출할 수 있으므로 지반 강성의 2차원 영상을 도출하는데 장점이 있다. 경사지반에 대한 HAWW 기법의 신뢰성을 수치해석을 통해 검증한 바 있으나 실제 현장에서는 지반의 정확한 전단파 속도 분포를 알 수 없으므로 기법의 실제 현장에서의 신뢰성은 검증하기가 매우 어렵다. 따라서 본 연구에서는 HAWW 기법의 현장 검증을 효율적으로 수행하고자 대상지반 지층의 구조적 형상 및 전단파 속도 분포를 알 수 있는 실대형 모형부지를 조성하였다. 모형부지의 구조적 형상은 모형부지 조성 과정 중에 측량을 통하여 확인하였으며 동적물성치는 성토 과정 중 모형부지 내에 매설된 다수의 속도계를 이용하여 획득하였다. 이렇게 획득한 모형부지의 층상구조 및 전단파 속도 분포를 바탕으로 부지의 2차원 기준 값을 결정하였으며 HAWW기법 검증 및 기타 탄성과 탐사들의 비교연구를 수행하였다. 이를 통해 HAWW 기법이 다른 탄성파 탐사 기법에 비하여 현장 지반의 2차원 전단파 속도 분포를 신뢰성 있게 도출함을 확인하였다.

Keywords : Comparative study, HAWW, Model testing site, S-wave velocity, 2D Imaging

1 정회원, 한국과학기술원 건설 및 환경공학과 박사과정 (Member, Graduate student, Dept. of Civil and Environmental Engrg., KAIST)

2 정회원, 교신저자, 한국지질자원연구원 지반안전연구부 선임연구원 (Member, Senior Researcher, Geotechnical Engrg. Division, KIGAM, esbang@kigam.re.kr, 교신저자)

3 정회원, 충남대학교 토목공학과 조교수 (Member, Assistant Prof., Dept. of Civil Engrg., Chungnam Univ.)

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

* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2007년 10월 31일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

1. 서론

지반의 전단파 속도는 지진하중에 대한 지반응답해석, 지반 진동 등의 동적인 문제 뿐만 아니라 지반의 정적 침하, 굴착시 변형, 지반 개량 등 정적인 문제에 있어서도 사용되고 있으며 지반공학적 정수로서 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 지반 상태 평가에 초점이 맞추어 수행되던 것으로 현업에서는 산악지역 등에서 암반 파쇄대 등의 연약대를 파악하거나 토사 지반에서는 기반암선을 추정하는데 주로 사용되고 있다. 최근 횡방향 가진 및 측선 배열법의 개선 등을 통해 천부지반을 고해상도로 도출하고자 하는 연구가 수행된 바 있다(김중열, 2000; 고광범 등, 2000; 조창수 등, 2002). 하지만 이러한 기법들은 토사층 경계에서는 암반 경계에서와 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 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(Park 등, 1999). 측선을 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 측선의 길이가 길어 수평층 가정에 위배될 확률이 높다. 또한 해당지반의 평균적인 물성치를

도출하게 되므로 수평적인 변화가 심한 지반에서는 결과의 신뢰성이 떨어지게 된다. 현재 현업에서 적용하는 일반적인 현장실험구성으로는 획득되는 분산곡선의 주파수 영역이 좁으며 위상속도가 타 표면파 기법에 비해 작은 경향이 나타나 가탐 심도가 깊지 않고 전단파 속도 주상도가 공내 탄성과 탐사 결과에 비해 작게 결정된 사례도 보고되었다(조성호 등, 2005a).

SASW(Spectral Analysis of Surface Waves) 기법(Nazarian과 Stokoe, 1984)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(2005b)은 2차원 전단파 속도 분포 도출에 유리하도록 감지기 위치는 고정시킨 상태에서 탐사 심도에 따라 가진원 거리만 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 Waves) 기법은 타 기법에 비해 짧은 가진원 거리 및 좁은 감지기 간격으로 실험 수행이 가능하여 총 측선의 길이가 짧아 지반의 국부적인 특성을 신뢰성 있게 평가할 수 있다(박형춘과 김동수, 2004b). 하나의 감지기 배열에 대한 한 번의 가진원 타격으로 결과를 도출할 수 있어 반복적인 현장 시험의 수행이 다른 표면파 기법에 비해 간편하여 지반의 2차원 전단파 속도 분포를 효율적으로 도출하는데 매우 유리하다.

HWAW 기법의 경사진 지반에 대한 적용성은 유한요소해석을 통해 수치적으로 검증된 바 있으며 다양한 현장 적용을 통해서도 그 효율성을 확인한 바 있다(Kim 등, 2004). 실제 현장에서의 검증은 타 탄성과 탐사 기법으로 획득한 전단파 속도 주상도나 시추 주상도를 통한 층상구조와의 비교를 통해 이루어져 왔으나 지반의 정확한 2차원적인 전단파 속도 분포를 알기 힘들기 때문에 실질적인 검증이 용이하지 않았다. 본 연구에서는 이러한 문제점을 인식하고 지층의 구조적 형상 및 전단파 속도 분포를 정확히 알 수 있는 실대형 모형부지를 조성하였다. 모형부지는 4 개의 서로 다른 강성을 가지는 층을 가진 형태로 계획되었으며 조성 단계에서 지중에 많은 수의 감지기를 매설함으로써 모형 부지의 탄성과 속도 분포를 신뢰성 있게 도출할 수 있도록 하였다. 이렇게 획득한 모형 부지의 탄성과 속도 분포와 HWAW 기법 결과와의 비교를 통해 HWAW 기법의 현장 적용성

을 평가할 수 있었다. 모형 부지 내에 경사진 층을 포함하여 조성함으로써 2차원 전단파 속도 분포 도출 여부에 주안점을 두고 검증 연구를 수행하였다. 또한 SASW 기법, MASW 기법 및 다운홀 기법을 동시에 수행함으로써 타 기법과의 비교 연구도 수행하였다.

2. HAWW 기법

HAWW 기법은 SASW 기법의 분산곡선 도출과정의 문제점을 해결하고자 Park과 Kim(2001)에 의해 위상속도 결정법과 관련된 내용을 중심으로 개발 되었으며 차츰 발전하여 현재의 모습으로 구체화되었다(박형춘과 김동수, 2004a; 박형춘과 김동수, 2004b). HAWW 기법에서는 시간-주파수 해석(time-frequency analysis)을 통해 실험 분산곡선을 자동적으로 도출할 수 있으며 각 주파수별 에너지가 최대인 점을 이용하므로 주변 잡음(noise)에 대한 영향이 적다는 장점이 있다. 또한 HAWW 기법은 평면파 형태의 레일리파 성분만을 해석에 사용하고 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.

그림 1에 HAWW 기법을 통해 분산곡선을 도출하는 과정은 도시하였다. 현장 실험으로부터 신호를 획득하

고[1] 하모닉 웨이블릿(harmonic wavelet)을 이용한 시간-주파수 해석 결과[2]에서 신호 대 잡음비(S/N)가 최대인 점을 이용하여 두 지점간의 각 주파수별 도달시간차를 산출하며[3, 4] 감지기간 거리를 이용하여 각 주파수 성분에 대한 위상속도, 즉 실험 분산곡선을 도출하게 된다[4](박형춘과 김동수, 2004a). HAWW 기법에서는 분산곡선 도출 과정이 반자동화 되어 있어 SASW 기법에서 문제시되었던 해석자의 주관 및 전문성이 요구되지 않게 된다. 또한 신호/잡음비가 최대인 점을 사용하므로 2채널 기법(two station method)의 가장 취약점으로 지목되었던 주변 잡음에 영향이 매우 적다(박형춘과 김동수, 2004a). 따라서 저주파 영역의 분산곡선 자료를 획득하기 위해 상당한 무게의 중추 등을 사용했던 기존의 SASW 기법에 비해 비교적 간단한 형태의 가진원으로도 고주파에서부터 저주파까지 분산곡선을 한번의 실험으로 획득이 가능하다는 장점을 가진다.

HAWW기법으로 도출된 분산곡선은 체적파 성분과 표면파 성분이 공존하며 표면파 중에서도 기본모드뿐만 아니라 고차모드까지 포함된 걸보기 위상속도를 나타내게 된다. 따라서 동적 강성 행렬법에 기초한 파 전파 문제 해석 및 하나의 시험 수행 자료에 대해 가진원 거리, 감지기 간격을 고려하여 역산을 수행하는 단일 어레이 역산(single array inversion)을 사용하여야 한다(박형춘과 김동수, 2004b). 일반적으로 표면파 기법에서는

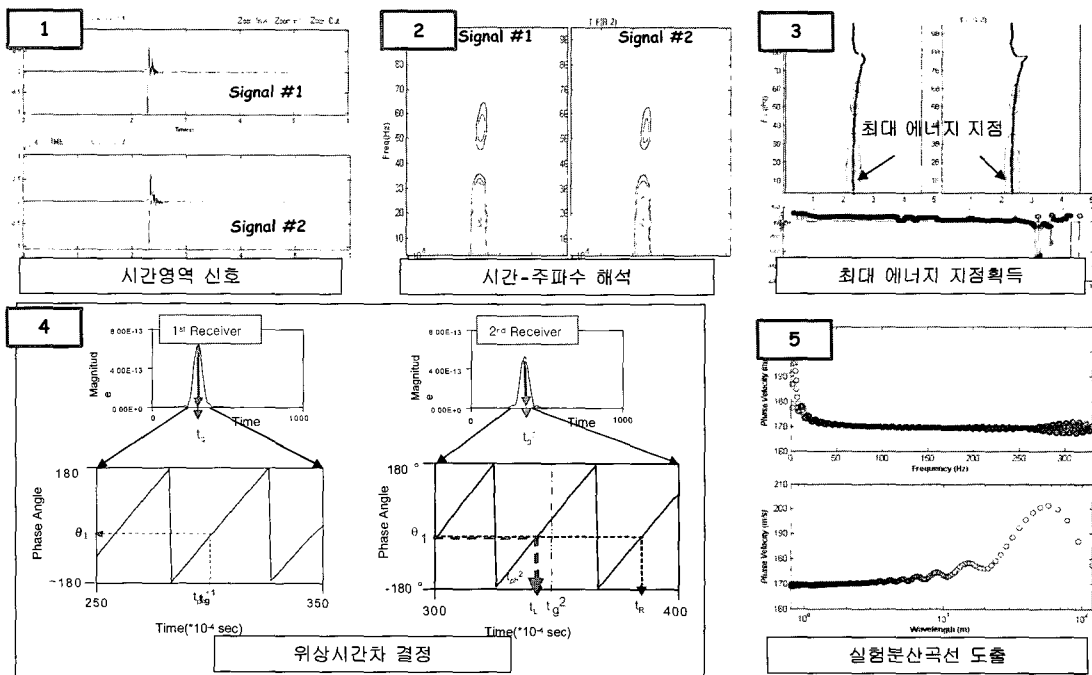


그림 1. HAWW 기법에서의 위상속도 분산곡선 도출과정(박형춘과 김동수, 2004a)

깊은 심도의 물성치를 획득하기 위해서는 측선의 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 측선의 길이가 길어질수록 신뢰성 있는 기법 수행이 어려워진다. 반면에 HAWW 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 HAWW 기법의 수행을 통해 2차원 전단파 속도 분포를 도출할 수 있다. HAWW 기법은 분산곡선 도출 과정이 반자동화 되어 있어 해석자의 주관 및 전문성이 요구되지 않으므로 기존의 SASW 기법에 비해 실험 수행 및 해석에 있어 유리하다. 또한 한번의 가진원 타격으로 한 측선의 전체깊이에 대한 탐사를 수행하기 때문에 SASW 및 MASW 기법에 비해 시험 수행이 간단하고 경제적이다. 그림 2에 HAWW 기법과 SASW 및 MASW 기법의 현장 실험 개

요도를 비교하여 도시하였으며 표 1에 각 기법의 특징을 요약하여 정리하였다. 측선 길이의 기준은 탐사 목표 심도를 약 20m 정도를 기준으로 하여 산정한 것이다. 앞서 언급한 바와 같이 HAWW 기법은 다른 표면파 기법에 비해 짧은 측선을 사용하는 것을 볼 수 있다.

3. 모형부지의 조성 및 기준값의 획득

HAWW 기법의 현장 적용성 검증은 위해서는 HAWW 기법으로 도출된 결과를 검증할 수 있는 비교 값이 요구된다. 일반적으로 이러한 검증용 비교 값은 다른 탄성과 탐사 결과를 활용해 왔으며 그 중에서 크로스홀 기법(crosshole seismic method)이 결과의 신뢰도가 높아 가장 선호하여 왔다. 하지만 이러한 크로스홀 기법도 현장 상황에 따라 정확한 결과를 도출하기 힘들며 2차원 전단파 속도 분포를 도출하기에는 부적합하다. 이렇듯 일반적인 현장 부지에서는 해당 정확한 물성치를 알기 힘들기 때문에 신뢰성 높은 검증 연구를 수행하기 어렵다. 따라서 본 연구에서는 성토 방식으로 실대형 부지를 조

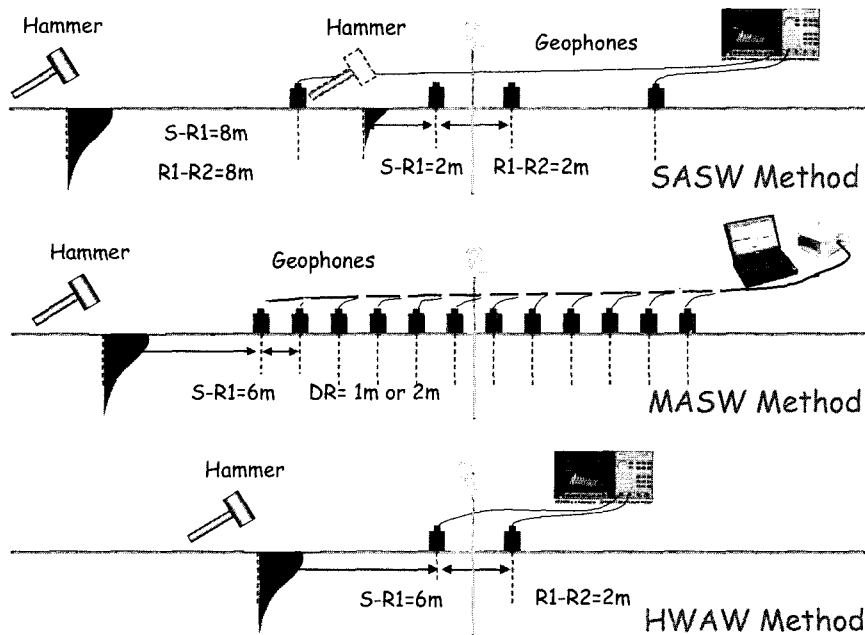


그림 2. HAWW 기법 및 기존 표면파 기법(SASW, MASW 기법)의 현장 시험 개요도(방은석, 2006)

표 1. 표면파 기법의 특징 비교

기법 종류	가진원	감지기	측선의 길이	분산곡선 특징
HAWW	슬러지 해머	4.5 Hz, 1Hz 2개	약 8m	겉보기 분산곡선
SASW	슬러지 해머 중추	4.5 Hz, 1Hz 2개	약 40m	겉보기 분산곡선 또는 유효 분산곡선
MASW	슬러지 해머	4.5Hz 12개-24개	약 30m	모드 분산곡선

성하여 HWAW 기법을 검증하고자 하였다.

일반적으로 표면파 시험 수행에서 시험 부지의 높이가 너비에 비해 너무 크면 성토체의 측면 경계에 의한 파의 반사 등으로 인하여 성토체 상단에서 수행된 표면파 탐사 기법의 결과는 신뢰성이 떨어지게 된다. 표면파 기법을 신뢰성 있게 수행하기 위해서는 이러한 경계조건의 영향을 최대한 줄여 주어야 한다. 모형 부지를 넓은 영역에 대해서 건설할수록 유리하지만 비용 문제가 있으므로 계획된 모형부지는 8.5m 높이의 성토 지반으로써 성토체 상단 기준으로 너비가 20m, 길이가 25m의 시험 부지 영역을 가지도록 계획되었다. 또한 기존 사면을 이용하고 반대쪽 경사면은 추가 성토를 실시하여 측면 반사파로 인하여 표면파 기법 결과에 영향을 주는 것을 최대한 방지하고자 하였다. 성토재료의 종류와 다짐정도를 달리하여 각기 다른 강성을 가지는 네 개 층을 포함할 수 있도록 하였다. 2차원 전단파 속도 분포 도출 여부에 대한 검증을 위해 모형 부지 내에 경사진 층을 포함하도록 설계 되었다. 또한 모형부지의 압축과 및 전단파 속도 분포를 신뢰성 있게 측정하기 위하여 층 경계에 속도계를 수평 및 수직 방향을 한 쌍으로 하여 총 56 지점에 매설하였다. 측선은 총 2개(A, B)로 설정하였으며 4m 떨어진 길이 15m의 평행한 각 측선에 대해서 감지기를 2.5m간격으로 수평, 수직 성분 7쌍을 설치하도록 하였다. 모형부지의 자세한 구조적 형상과 각 매설감지기의 위치는 각 건설단계에서 측량을 통해 정확하게 측정하도록 하였다.

3.1 모형부지의 건설

모형부지 각 층의 목표 물성치 및 이를 위한 성토 재료 및 방식 등을 표 2에 나타내었다. 모형부지의 깊이별 강성 분포는 감소 및 증가가 반복되는 형태이며 경사면으로 계획된 둘째층과 셋째층의 경계 파악을 주된 목표로 하기 위해 둘째층과 셋째층의 강성차이를 극대화시켜 조성하였다. 토취장으로부터 운반되는 토량을 줄이

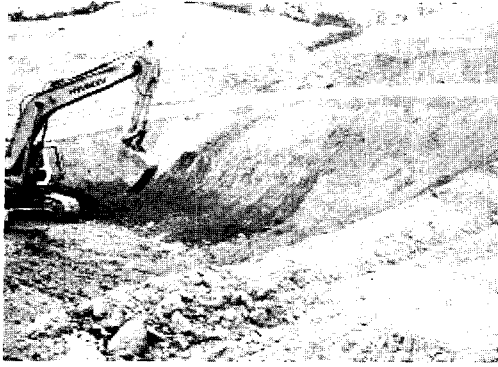
기 위해 기존사면을 굴착한 후 모형부지 바닥면을 정리하였다. 계획된 위치에 감지기를 설치한 뒤 각 설치지점의 좌표를 측량하였다. 감지기는 10Hz 감지기로써 하우징이 되어 있어 지중에 설치하여도 손상이 가지 않도록 하였으며 연결된 라인은 적당히 길게 하여 건설 영역 밖으로 정리함으로써 지속적인 모형부지 조성에 방해가 가지 않도록 하였다.

첫 층은 두께 약 4m이며 큰 강성을 가지는 토사층으로 계획되었다. 토취장으로부터 산토를 운반하여 쌓은 뒤 불도저를 이용하여 정리하고 진동롤러로 다짐을 수행하였다. 50cm 성토 후 10회 정도 다짐으로써 토층의 물성을 조정하였으며 레벨 측량기)를 이용하여 토층의 최종고를 확인하였다. 바닥면에서 측정된 각 감지기 설치 지점의 좌표를 이용하여 바닥면과 동일한 위치에 감지기를 다시 설치하였다. 둘째 층은 경사진 형태를 가지는 강성이 큰 층으로 계획되었다. 따라서 발파암을 이용해 매립하고 양측롤러와 진동롤러를 이용하여 충분한 다짐을 수행하였다. 다짐 기준은 30cm 성토 후 15회 다짐으로 첫 층보다 엄격하다. 셋째 층은 둘째 층과의 확실한 구분을 위해 강성이 작은 토사층으로 계획되었다. 양질의 토사를 성토한 후 최소한의 다짐을 수행하였다. 다짐 기준은 50cm 성토 후 2회 다짐으로 토공 차량의 운행을 위한 정도이었다. 마지막 넷째 층은 중간정도의 강성을 지닌 토사층으로 다짐 기준은 50cm 성토 후 진동롤러로 5회 다짐 정도이다. 부지 건설이 끝난 후 경계조건의 영향을 줄이고 부지의 안정성을 위하여 사면 반대편 측면에 성토를 실시하였다. 모형부지 건설 과정에서의 재료의 매립 및 다짐에 대한 장면을 그림 3에 도시하였다. 각 층의 경계에는 마찬가지로 바닥면에서 측정된 각 감지기 설치 지점의 좌표를 이용하여 바닥면과 동일한 위치에 감지기를 모두 설치하였다. 경계면에서의 감지기 설치 및 측량 장면을 그림 4에 나타내었다.

모형부지는 높이 약 8.5m이며 상단 기준으로 너비 16m, 길이 26m로 완성되었다. 현장 사정으로 인해 모형부지는 그림 5와 같이 처음 계획했던 형상보다 너비가

표 2. 각 층의 목표 물성 및 조성방법

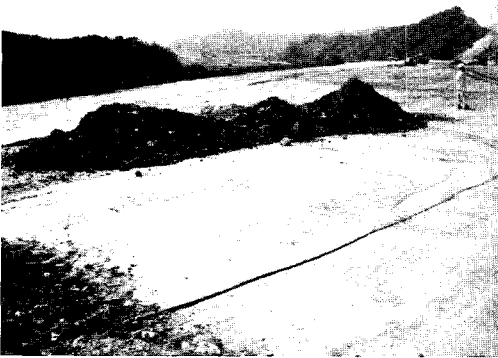
층	목표 물성	다짐 방식 (성토두께당 롤러의 통과 회수)	성토재료
1층	큰 강성의 토사층	10 회/ 50cm	산토
2층	큰 강성의 발파암층	15 회/ 30cm	발파암
3층	매우 연약한 토사층	2 회/ 50cm	양질의 토사
4층	중간 강성의 토사층	5 회/ 50cm	산토



(a) 원지반 사면 굴착



(b) 감지기 설치 후 매립

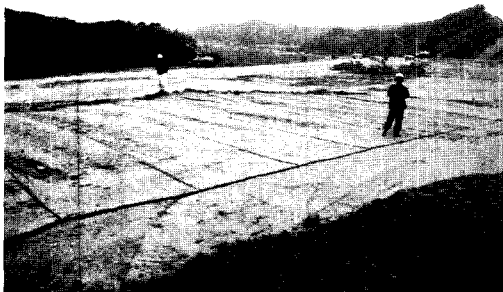


(c) 발파암 매립



(d) 양쪽 롤러와 진동 롤러를 이용한 다짐

그림 3. 모형부지 건설과정



(a) 감지기 설치



(b) 레벨 측량

그림 4. 감지기 설치 및 측량

줄어든 상태로 완성되었다. 본 연구에서는 보다 확실한 검증을 위해 2개의 측선을 계획하였으나 계획 너비보다 작게 건설됨에 따라 측선 A가 부지의 모서리 가까이에 위치하게 되었으며 이 측선에서는 경계 영향으로 인해 표면파 기법을 올바르게 수행하지 못할 가능성이 있어 본 연구에서는 측선 B만을 이용하여 검증 비교 연구를 수행하였다. 그림 6은 부지의 종단면도와 측선 B상에 매설된 감지기의 좌표를 나타낸다. 본 연구에서 시험 결과의 편리한 도시를 위하여 2축의 좌표계를 사용하였다. x축은 부지의 수평좌표로 매설감지기의 배열을 기

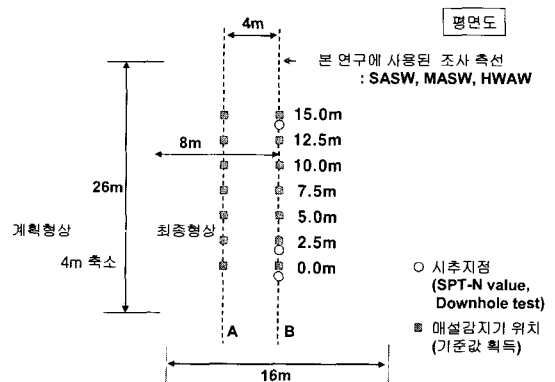


그림 5. 부지의 최종 형상 및 시험 수행 측선

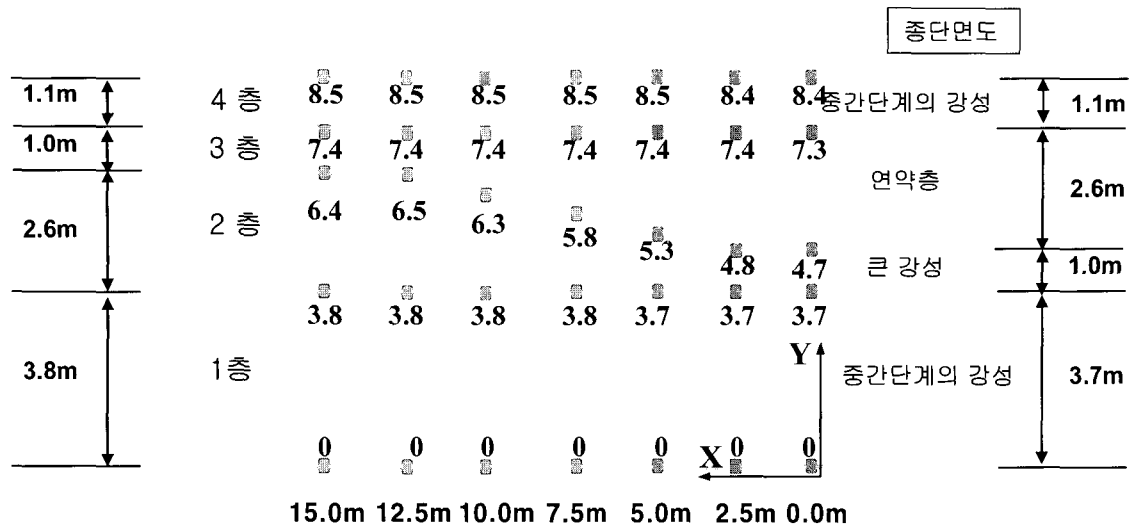


그림 6. 완성된 부지의 종단면도와 매설 감지기의 위치

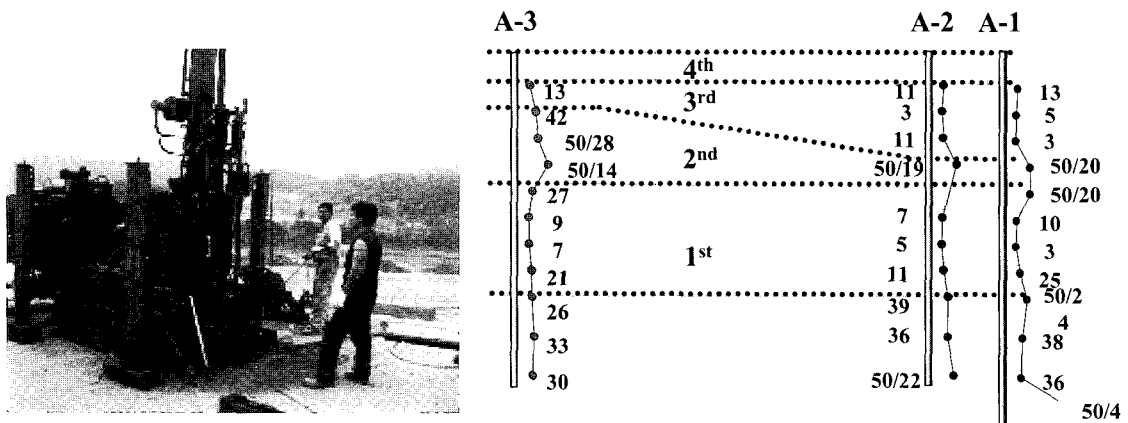
반으로 하여 매설감지기의 오른쪽 끝을 0m, 왼쪽 끝을 15m로 설정하였다. y축은 수직좌표로 1층의 바닥면을 0m, 부지의 표면을 8.5m로 하여 설정하였다.

3.2 모형부지의 물성 정보

모형 부지 조성이 완료된 뒤 시추를 수행하고 표준관입시험(Standard Penetration Test, SPT)을 수행하였다. 총 3개 지점에서 수행하였으며 시추 장면 및 각 지점에서 획득한 SPT-N 값을 그림 7에 나타내었다. 시추공 A-1은 -0.5m 수평좌표 위치에서 깊이 15m까지 수행되었으며 시추공 A-2와 A-3는 각각 수평좌표 2.0m 및 14.5m 지점에서 깊이 12m까지 설치되었다. 모든 시추공은 시추 뒤 PVC 케이싱으로 시험공을 제작하여 다운홀 기법의 수행이 가능하도록 하였다. 모형 부지 각 위

치에서 획득한 SPT-N치의 분포로 보아 조성된 모형부지는 계획된 바와 같이 이상적으로는 조성되지 않은 것으로 보여 졌다. 깊이에 따라 SPT-N치의 증감이 존재하는 것으로 보아 동일층에서도 부분적으로 강성이 다르게 조성된 것으로 보여지며 경사진 지역을 제외하고도 같은 깊이에서 각 시추공에서의 SPT-N치가 약간씩 다른 것을 확인 할 수 있다. 하지만 전반적으로 각 토층의 강성이 둘째 층에서 감소하고 셋째층에서 증가, 넷째층에서 다시 감소하는 형태를 보이며 수평 좌표 0.5m, 2.0m에서는 연약층의 두께가 두껍고 좌표 14.5m에서는 연약층이 두께가 얇은 것으로 확인되어 경사지반 형태의 조성은 어느 정도 계획된 대로 되었다고 판단되었다.

지중에 매설된 감지기를 이용하여 모형 부지의 압축파(P파) 및 전단파(S파) 속도분포를 구하였다. 지표면에서 압축파와 전단파를 가진시키고 지중에서 감지기로



(a) 확인 시추 장면

(b) 부지의 SPT-N 치

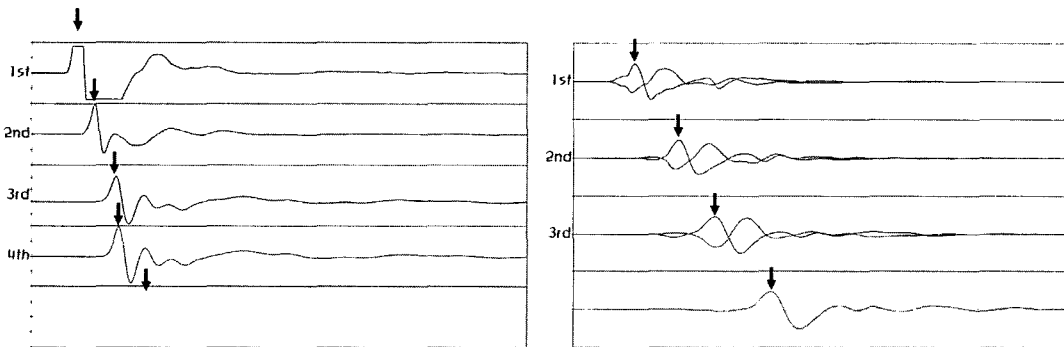
그림 7. 시추 및 표준관입시험을 통한 모형부지 조성 상태 확인

획득하는 방식으로 다운홀 시험과 유사한 원리를 이용하였다. 하지만 가진원의 위치가 감지기가 매설된 위치의 연직방향이므로 가진원 거리 영향을 제거한 상태이며 지중에 매설된 상태의 감지기를 이용하기 때문에 다운홀 시험에서 가장 문제시되었던 시험공 문제를 방지할 수 있으므로 더욱 신뢰성 있는 결과 도출에 유리하다. 그림 8에 이러한 방식으로 획득한 압축파 및 전단파 성분의 신호 일례를 도시하였다. 신호 상태가 매우 양호하며 전단파 성분의 경우 좌우 타격 신호가 거의 대칭인 것을 볼 수 있다. 이러한 파형으로부터 각 감지기간의 도달시간차를 획득하였다. 정확한 초동 지점의 추정이 어려웠으므로 각 성분의 첫 극대점을 활용하였다. 감지기 사이의 거리를 이용하여 각 위치에서의 압축파 및 전단파 속도 주상도를 획득하였으며 그 결과를 그림 9에 도시하였다. 각 지점별로 속도 주상도의 형상이 다른 것을 볼 수 있으며 특히 둘째 층과 셋째 층에서의 속도 차이가 나는 것을 볼 수 있다.

모형부지의 형상과 효율적으로 비교하기 위하여 이러한 1차원적인 속도 주상도를 선형 보간을 통해 2차원

분포로 도출하였다. 그림 10(a)와 그림 10(b)에 압축파 및 전단파 성분에 대해 각각 도시하였으며 모형부지의 경사면을 따라 속도 분포의 수평적 변화가 나타나는 것을 볼 수 있다. 지중에 매설된 감지기는 설정된 층들의 경계에만 존재하기 때문에 층내의 속도의 변화를 감지할 수 없으며 각 층들의 평균적인 값들을 도출하게 된다. SPT-N치의 분포 평가에서 모형부지 조성 과정에서 각 층별로 균질한 강성을 가지지 않은 것으로 확인되었으며 이는 전단파 속도 분포에도 동일하게 나타나리라 판단되었다. 따라서 전단파 성분의 전체적인 분포에 대해서 SPT-N치 형태를 참고로 하여 그림 10(c)에서와 같이 수정하였다. 이렇게 획득한 속도 분포가 모형부지의 정해에 가깝다고 할 수 있기 때문에 본 연구에서 수행하고자 하는 HWAW 기법의 검증 및 다른 탄성파 기법과의 비교 연구에 유용하게 사용이 가능하리라 판단이 되며 본 논문에서는 이 값을 모형부지 기준값으로 사용되었다.

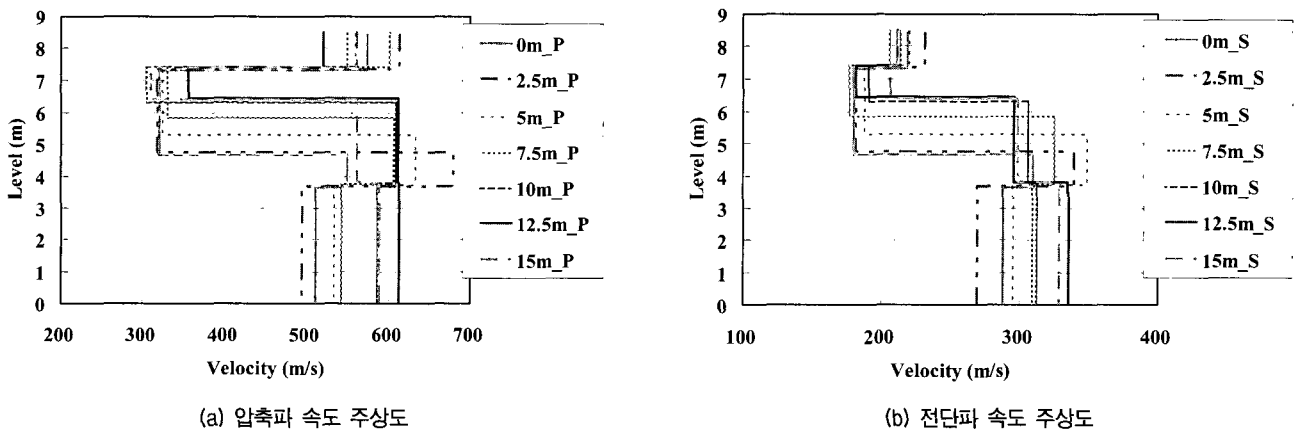
실제 시공 과정 중에 사용된 성토 재료가 부분적으로 양호하지 않아 균일하게 성토하고 다짐하는데 많은 애



(a) 수직 성분 감지기에서 획득된 P파

(b) 수평 성분 감지기에서 획득된 S파

그림 8. 지중 감지기에서 획득한 탄성파 신호 일례



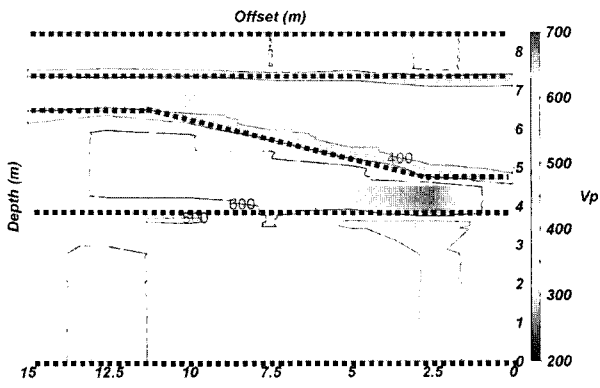
(a) 압축파 속도 주상도

(b) 전단파 속도 주상도

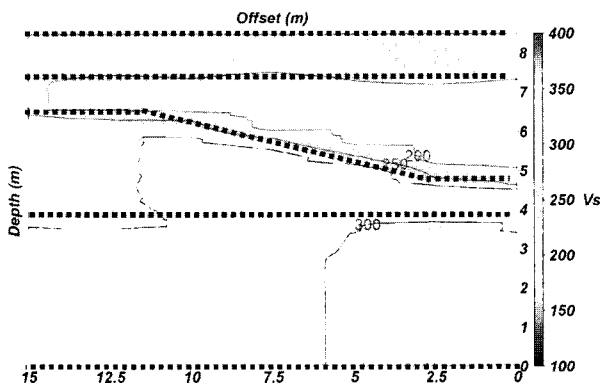
그림 9. 축선 B의 각 축점에서의 압축파 및 전단파 속도 주상도

로사항이 있었다. 실제 이상적인 모형부지 조성을 위해서는 더욱 엄격한 재료 및 다짐 관리가 이루어져야 한다

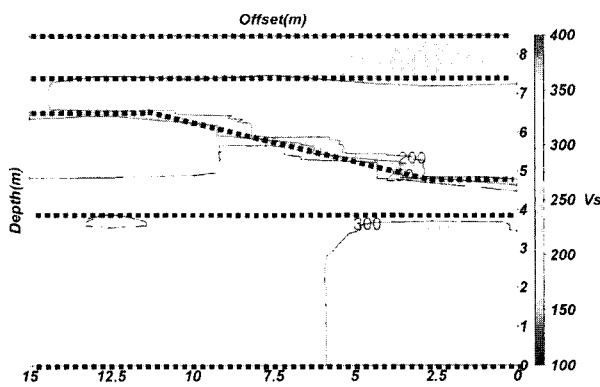
고 생각되었다. 본 연구에서는 현장 사정상 이러한 엄격한 관리가 이루어지기가 힘들었다. 탄성파 탐사 등의 지반조사 기술의 발전을 위해서는 국가적 차원에서 지속적인 활용이 가능한 고품질의 모형 부지 건설이 필요하다고 판단되었다.



(a) 2차원 입축파 속도 분포



(b) 2차원 전단파 속도 분포



(c) 수정된 2차원 전단파 속도 분포 (검증용 기준값)

그림 10. 모형부지 2차원 속도 분포 기준값의 도출

4. HWAW 기법 및 타 탄성파 탐사기법의 수행

모형부지에서 HWAW 기법을 포함하여 여러 가지 탄성파 탐사 기법을 수행하였다. 공내 탄성파 탐사 기법으로는 다운홀 기법을 표면파 기법으로는 SASW, MASW, HWAW 기법을 수행하였다. 다운홀 기법은 시험공 종료 심도까지 수행하였으며 표면파 기법은 목표 심도를 모형부지 높이인 8.5m에 맞추어 현장 실험을 수행하였다. 수행된 기법의 현장 시험 구성 및 해석방법을 표 3에 요약하여 정리하였다.

4.1 다운홀 기법

다운홀 기법은 시추를 통해 제작된 총 3개의 시험공에서 모두 수행되었다. 시험부지의 층의 경계를 확실히 파악하고 자세한 전단파 속도 주상도를 도출하기 위해 0.5m 간격으로 시험을 수행하였다. 가진원 거리는 1.5m로 설정하여 최대한 전파 경로의 오류를 줄이도록 하였다. 사용된 감지기는 Geostuff사의 BHG-3 장비로 방향로드가 필요 없으며 공벽 접촉장치가 모터로 조절되어 현장 시험이 매우 용이하다. 시험공 A-1에서 현장 시험을 통해 획득한 파형을 그림 11에 그 일례로 도시하였다. 획득한 파형에서 전단파 성분의 초동 지점을 추정하여 도달 시간 정보를 산정하였으며 평균굴절경로법(방은석 등, 2006)을 이용하여 전단파속도 주상도를 도출하였다. 평균굴절경로법은 도달시간 정보 측정 오류를 적절히 보정하여 합리적인 전단파 속도 주상도를 도출해 주는 기법이다.

표 3. 모형부지에서 수행된 각 탄성파탐사 기법의 시험 구성 및 해석 방법

탐사기법	가진원	감지기	자료획득 시스템	역산 방식	해석프로그램
SASW	5kg 슬러지 해머, 중추	1 Hz (Mark Products)	HP 35670A (Agilent)	동강성행렬법을 이용한 반복 정모델링해석	WinSASW 1.23
MASW	5kg 슬러지 해머	4.5 Hz (Geospace)	Geode (Geometrics)	전파행렬법을 이용한 자동역산	Surfseis 1.8
HWAW	5kg 슬러지 해머	1 Hz (Mark Products)	HP 35670A (Agilent)	동강성행렬법을 이용한 반복 정모델링해석	HWAW Analyzer v1.2 WinSASW 1.23
다운홀	Wood Plank, 해머	BHG-3 (Geostuff)	Geode (Geometrics)	평균굴절경로법	Analysis_DH v1.0

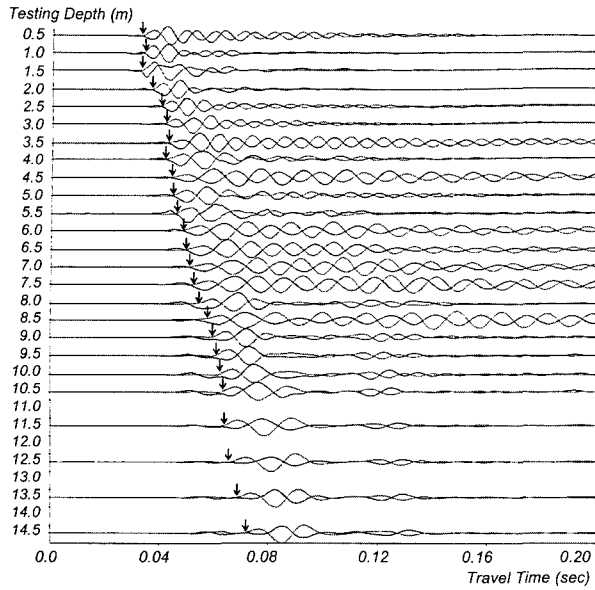


그림 11. 다운홀 기법을 통해 획득한 깊이별 신호 일레(A-1 시험공)

4.2 SASW 기법

SASW 기법을 통해 목표 심도까지의 전단파 속도 주상도를 도출하기 위해서는 최대 감지기 간격을 목표 심도 이상으로 설정하여야 한다. 따라서 수평방향 좌표 10m 지점을 중점으로 삼고 감지기 간격을 3, 5, 10m로 넓혀가며 시험을 수행하였다. 가진원 거리 3m, 5m의 경우에는 슬러지 해머를 가진원 거리 10m인 경우에는 중추를 가진원으로 사용하였다. 동적 신호 분석기를 통해 현장에서 상호파워스펙트럼(cross power spectrum)을 획득하였으며 분산곡선의 도출 및 역산은 WinSASW v1.23 프로그램(Joh, 1992)을 이용하였다. 전통적인 SASW 기법으로 토모그래피 영상을 도출하는 방식과 CAP-SASW 기법으로 2차원 전단파 속도 분포를 도출이 가능하다. 하지만 가진원 거리를 포함한 최대 축선의 길이가 긴 편이므로 본 모형부지에서와 같이 제한된 영역에서는 적용이 어려워 좌표 10m 한 지점에서만 SASW 기법을 수행하였다.

여러 감지기 간격으로부터 복합 실험분산곡선을 획득하였으며 역산을 위해 설정된 대표 실험분산곡선은 그림 12와 같다. 근접장 영향 제거를 위한 필터 조건은 가진원 거리의 3배(상호파워스펙트럼에서 120° 이상 정보 이용)로 하였으며 따라서 파장 약 25m 정도까지의 분산곡선을 획득할 수 있었다. 이러한 분산곡선으로부터 모형 부지 심도인 8.5m까지의 전단파 속도 주상도를 신뢰성 있게 획득하기에는 충분하다.

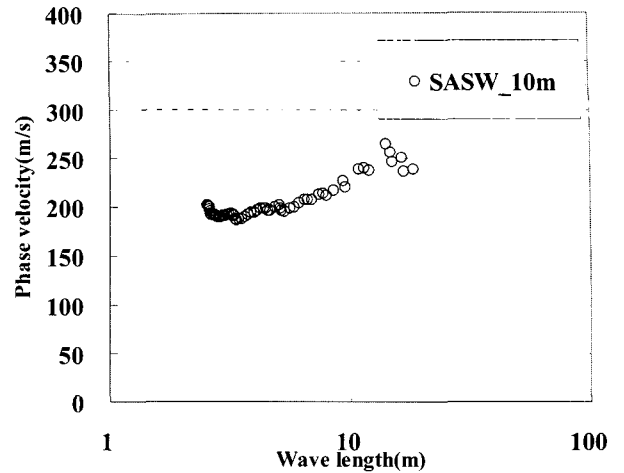


그림 12. SASW 기법으로 획득한 10m 위치에서의 대표 실험분산곡선

4.3 MASW 기법

본 시험 부지에서 MASW 기법은 24개의 감지기를 이용하였다. 목표 심도가 8.5m이므로 감지기 간격 0.5m, 가진원 거리(source offset)는 4m로 총 축선의 길이가 15.5m로 설정하여 현장 시험을 수행하였다. 가진원은 슬러지 해머를 이용하였다. 2차원적인 전단파 속도 주상도를 획득하기 위하여 감지기들의 중점 좌표를 0.25m부터 12.25m까지 0.5m 간격으로 평행하게 이동하며 반복 수행하였다. 탄성과 탐사용 다채널 신호 획득기인 Geometrix사의 Geode를 이용하여 현장에서 탄성과 신호를 획득하였으며 실험분산곡선의 도출 및 역산은 자동화프로그램인 Surfseis 1.8(Park, 2003)을 이용하여 수행하였다.

MASW 기법으로 구한 각 위치에서 획득한 실험분산곡선을 그림 13에 동시에 도시하였다. 각 위치에서의 분

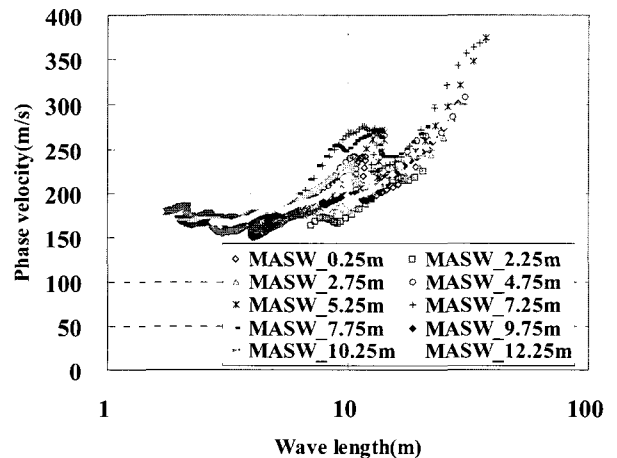


그림 13. MASW 기법을 통해 획득한 각 위치에서의 실험 분산곡선

산곡선은 단파장 영역에서 크게 차이를 보이지 않다가 파장이 10m인 지점에서 큰 차이를 보이는 것을 볼 수 있다. 분산곡선이 지반의 전단파 속도 값을 직접적으로 나타내지는 않지만 그 형태는 유사하므로 분산곡선으로부터 전단파 속도 주상도의 형태를 어느 정도 추정할 수 있다. 모형부지에는 지표면에서 1m-4m 근방에 경사층이 포함되어 있으므로 각 위치에서의 실험 분산곡선은 파장 4m 이내의 영역에서 다른 위상속도를 가져야 바람직하나 MASW 기법을 통해 구한 분산곡선에서는 거의 유사한 위상속도를 가지는 것을 볼 수 있다. 따라서 MASW 기법으로부터 획득되는 전단파 속도 주상도는 수평적으로 그리 큰 차이가 없을 것으로 추정된다.

4.4 HAWW 기법

HAWW 기법은 근접장 효과를 적극적으로 이용하는 기법으로 가진원 거리 및 감지기 간격에 대한 특별한 설정이 존재하지 않는다. 단, 가진원 거리가 너무 가까울 경우 직접적인 지반 떨림 현상 등으로 양질의 신호 획득이 어려우며 가진원 거리가 멀 경우 고주파 대역을 획득하지 못하므로 적절한 가진원 거리로 6m-10m를 권장하고 있다. 감지기 간격은 좁을수록 국부적 특성 파악에 유리하나 도달시간 정보 산출시 오류가 발생할 가능성이 높다. 본 연구에서는 가진원 거리는 6m, 감지기 간격은 2m로 설정하여 현장 실험을 수행하였다. 가진원은 슬러지 해머를 이용하였다. 측선 B를 따라 0m부터 15m까지 매설감지기 위치와 동일 지점을 감지기의 중점으로 하여 반복적으로 현장 시험을 수행하였다. 각 지점에서 획득한 탄성과 신호는 프로그램 HAWW Analyzer v1.2(박형춘과 김동수, 2004a)를 이용하여 분산곡선을 도출하였으며 프로그램 WinSASW v1.23(Joh, 1992)을 이용하여 역산을 수행 전단파속도 주상도를 획득하였다.

HAWW 기법으로 획득한 각 지점에서의 실험분산곡선을 그림 14에 도시하였다. MASW 기법에서와 다르게 단파장 영역에서 각 지점에서 획득한 실험분산곡선이 서로 다른 위상속도를 가지는 것을 볼 수 있다. 이는 HAWW 기법이 MASW 기법에 비해 짧은 감지기 간격을 이용하여 현장 시험을 수행하기 때문에 국부적인 지반 물성을 대변하는 분산곡선이 도출된 것이라 생각할 수 있으며 이러한 분산곡선을 이용해 역산할 경우 각 지점의 국부적인 특성을 잘 나타내는 전단파 속도 주상도를 도출할 수 있을 것이다.

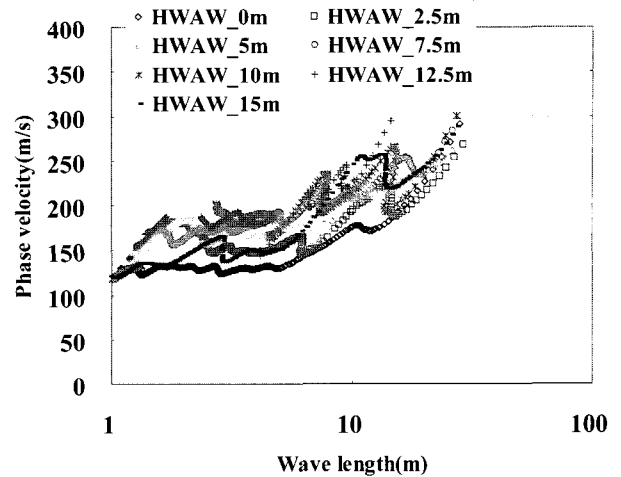


그림 14. HAWW 기법으로 획득한 각 위치에서의 실험 분산곡선

5. 전단파 속도 주상도의 비교 및 고찰

HAWW 기법을 포함한 각 기법을 통해 획득한 전단파 속도 주상도를 비교 검증하기 위해 모형부지 각 지점에서의 1차원 전단파 속도 주상도와 모형 부지 전체 영역에 대한 2차원 전단파 속도 주상도를 도출하였으며 이를 모형부지 기준값과 비교하였다.

5.1 1차원 결과의 비교

각 탄성과 탐사기법으로 도출된 전단파 속도 주상도를 감지기가 매설된 위치를 기준으로 모형부지의 기준값과 비교하여 보았으며 그림 15에 각각 나타내었다. MASW 기법과 다운홀 기법의 경우 그 측점이 정확하게 감지기 설치 지점과 일치하지 않아 감지기 설치 지점에서 가장 가까운 지점의 결과를 이용하여 비교하였다. 각 기법별로 경향은 어느 정도 유사하나 부분적으로 많은 차이를 보이는 것을 볼 수 있다.

다운홀 기법의 결과는 그림 15(a), (b) 그리고 (g)에 동일 지점에서 실시된 타 탄성과 탐사 기법 결과 및 기준값과 동시에 도시되었다. 상세한 전단파 속도 주상도를 도출할 수 있었으며 그 결과는 각각의 위치에서의 모형 부지 기준 값과 유사하였다. 다운홀 기법은 공내 탄성과 탐사로써 시험공 설치 문제 등이 없다면 비교적 신뢰성 있는 결과를 획득할 수 있다. 부분적으로 모형부지 기준 값과 차이를 보이는 것은 모형부지 기준 값은 앞서 언급한 바와 같이 각 층간에만 감지기를 설치하였으므로 각 층의 평균값을 의미하게 된다. 그리고 시험공을 감지기 매설 지점에서 0.5m 이격시킨 곳에 제작하였

으며 가진원 거리를 1.5m로 하고 다운홀 시험을 수행하였으므로 이러한 결과 값의 차이가 발생하였다고 판단된다.

모형 부지 좌표 10m을 중점으로 하여 수행된 SASW 기법의 결과는 그림 15(e)에 도시된 바와 같다. 좌표 10m 지점에서의 국부적인 결과가 아닌 평균적인 전단파 속도 주상도로서 강성이 증가하는 깊이, 즉 둘째 층과 셋째 층과의 경계를 정확히 찾아내지 못하는 것을 볼 수 있으며 기준 값과도 잘 맞지 않는다. 이는 SASW 기법 특성상 측선 길이에 따른 넓은 영역에서의 평균값을 제공하는 문제도 있지만 표면파 기법에서는 전체 측선 상에서 지층의 구조가 수평하다고 가정된 상태로 해석이 이루어지기 때문에 본 시험 부지와 같은 경사 지반에서는 도출된 결과의 신뢰성이 떨어질 수밖에 없다.

MASW 기법은 0.5m 간격으로 측선을 이동하면서 실험을 수행하였으므로 기준점 수보다 많은 결과가 도출

되었으며 기준점 근처의 결과들을 그림 15에 각각 도시하였다. 대부분의 결과에서 지표면 근처에서 전단파 속도가 감소하다가 다시 증가하는 경향을 보이는 것을 볼 수 있으며 이는 모형부지의 형상과 유사한 것이다. 그러나 MASW 기법 또한 SASW 기법과 같이 긴 측선의 평균치를 도출하게 되며 지반이 수평층이라는 가정을 바탕으로 기법을 수행하기 때문에 모형 부지 같은 경사 지반에서는 결과에 오류가 존재할 것으로 판단된다. 상부 속도는 기준 값과 유사한 경향을 보이나 5m 이하 하부 층의 속도는 기준값에 비해 약간 작은 값을 도출하고 있는 것을 볼 수 있다. MASW 기법에서는 신호 처리 과정에서 레일리 모드 분산곡선(Rayleigh mode dispersion curve)을 도출하도록 되어 있으며 역산과정도 당연히 이러한 모드 분산곡선을 구현하는 정모델링(forward modeling) 기법을 이용한다. 따라서 분산곡선 도출시에 이러한 모드 분산곡선을 제대로 분리해 내어 획득하는 것이 매우

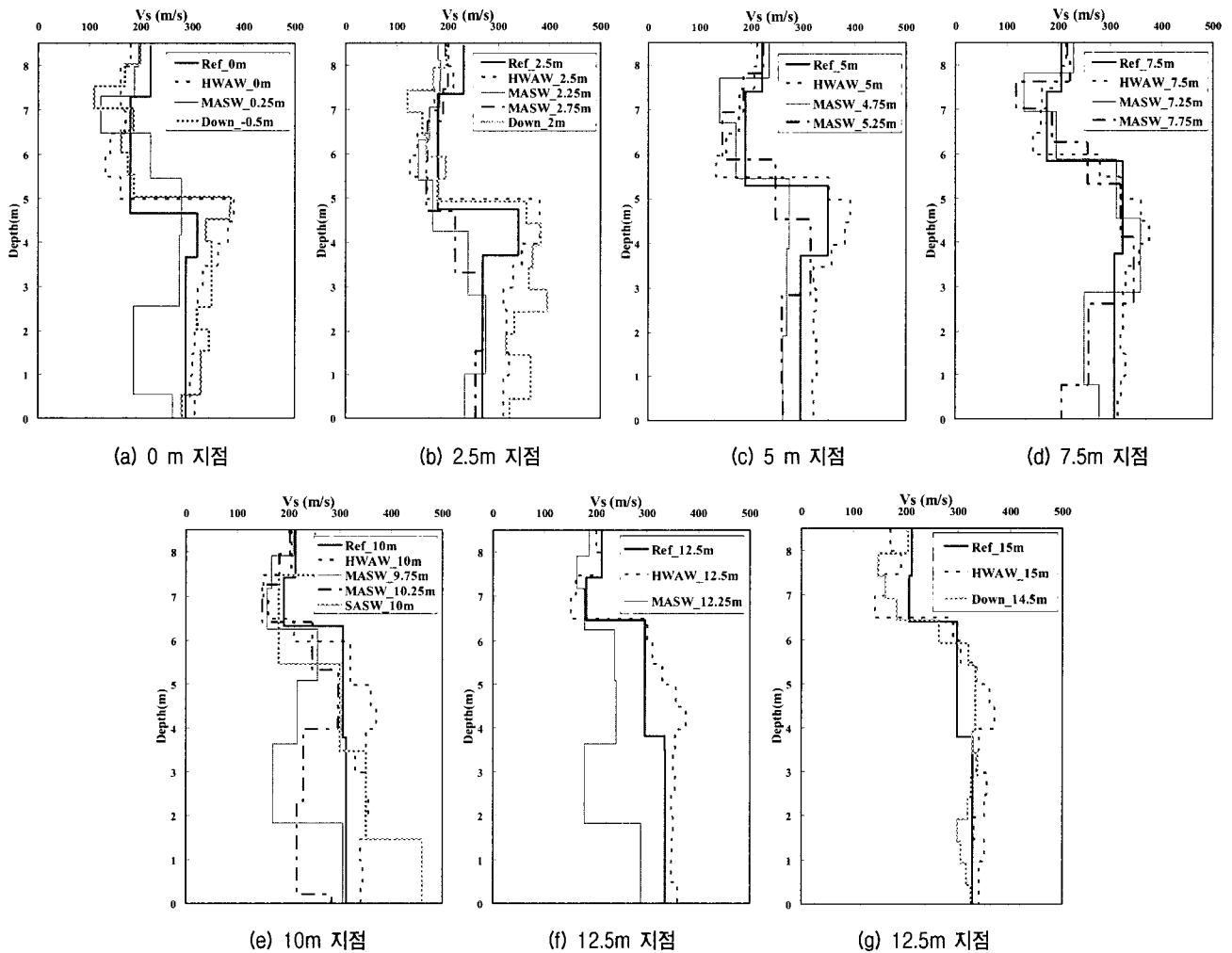


그림 15. 모형부지 각 측정에서의 1차원 전단파 속도 주상도 비교

중요하다. 층의 구조가 단순할 경우, 즉 전단파 속도가 심도에 따라 서서히 증가하거나 변화가 심하지 않을 경우 모드 분산곡선 중 기본 모드가 우세하기 때문에 제한된 공간에서 제한된 감지기 개수로도 신뢰성 있는 모드 분산곡선의 획득이 가능하다. 하지만 층의 구조가 단순하지 않은 경우, 즉 심도에 따른 전단파 속도의 증감이 심할 경우에는 기본 모드뿐만 아니라 고차 모드가 주파수 대역에 따라 우세해지기 때문에 제한된 공간에서 제한된 감지기 개수로도 신뢰성 있는 모드 분산곡선의 획득이 어렵다. 즉 조성된 모형부지는 후자에 속하므로 MASW 기법을 통해 신뢰성 있는 전단파 속도 주상도의 도출이 어려운 것으로 판단된다.

HWAW 기법의 결과는 상부에서는 모형부지의 기준값보다 약간 작고 하부에서는 약간 큰 경향을 보이나 전반적으로 모형부지 기준값과 경향이 일치하며 둘째 층과 셋째 층의 경계를 비교적 정확하게 유추하고 있는 것을 볼 수 있다. HWAW 기법은 다른 표면파 기법인 SASW 기법이나 MASW 기법에 비해 짧은 감지기 간격을 사용하기 때문에 국부적 지반 상태를 신뢰성 있게 평가하는데 더욱 유리하다. HWAW 기법에서는 감지기 간격이 좁아짐에 따라 문제시 되는 도달시간 차이 정보의 정확한 획득의 어려움을 개선하였으며 가진원 거리가 가까움에 따라 문제시 되는 근접장 영향은 역산 과정에서의 적합한 정모델링 기법의 적용을 통해 해결하고 있다(박형춘과 김동수, 2004a; 박형춘과 김동수, 2004b). 또한 겉보기 분산곡선(apparent dispersion curve)을 이용하므로 MASW 기법에서와 같이 레일리 모드 분산곡선을 정확하게 획득할 필요가 없다. 따라서 모형부지에서와 같이 시험을 수행할 수 있는 공간이 협소하고 지층이 경사진 형태를 가질 경우 HWAW 기법은 다른 기법들보다 더욱 신뢰성 있는 결과를 제공할 수 있다고 판단된다.

5.2 2차원 결과의 비교

경사지반에 있어서 HWAW 기법에 대한 검증은 더욱 효율적으로 하기 위해 MASW 기법 및 HWAW 기법의 1차원 결과를 선형 보간을 통해 2차원 결과로 제시하였으며 그 결과는 각각 그림 16 및 그림 17과 같다. 시험부지의 구조적 형상과 효과적으로 비교하기 위하여 각 층의 경계를 점선으로 도시하였다. 두 결과 모두 둘째 층과 셋째 층의 속도 차이를 나타내어 좌표 0m 방향으로 셋째 층의 두께가 깊어지고 좌표 15m 방향으로 알아

지는 것을 확인 할 수 있다. 수평 7.5m, 깊이 4m 부근에 존재하는 큰 강성층의 존재 역시 확인 할 수 있다. MASW 기법은 부지의 경사진 형태는 파악이 가능하였으나 앞서 분산곡선 형태에서 파악했던 바와 같이 연약층이 두꺼운 곳과 얇은 곳의 전단파 속도 주상도 상의 속도 차이가 크지 않은 것을 볼 수 있다. 또한 첫 층과 둘째 층의 속도를 정확하게 산정하지 못하여 그 부분이 약간 모호한 것을 볼 수 있다. 이는 측선의 길이가 길어 도출된 전단파 속도 주상도는 측선 길이에 대한 평균적인 값을 도출한 것이며 또한 수평층 가정에 위배될 확률이 높아 잘못된 결과가 도출되기 때문이다. MASW 기법은 감지기 배열 11.5m의 지반절편에 대한 평균값을 이용하고 0.5m 간격으로 이동하여 시험을 수행하므로 전 단계 시험 수행 시와 비교해 11m의 지반을 겹친 채로 시험을 수행하게 된다. 따라서 지반의 정확한 형상을 표현하지 못할 수 있다. 또한 MASW 기법에서는 탐사 측선 길이가 길어 모형부지 양 끝단에서 현장 실험을 실시할 수가 없었으며 이에 따라 모형부지 바깥쪽 영역에 대한 속도 분포를 도출하지 못하였다.

HWAW 기법은 감지기 간격 2m의 대한 1차원 전단

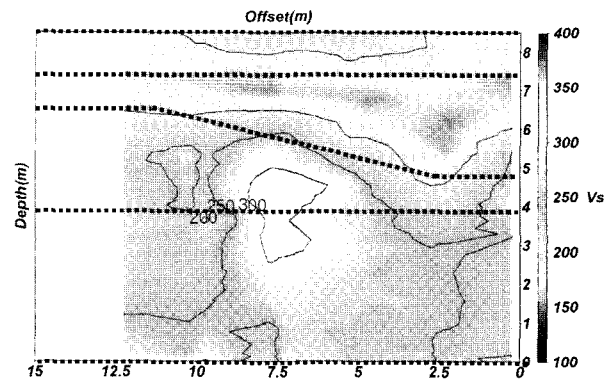


그림 16. MASW 기법으로 획득한 2차원 전단파 속도 분포

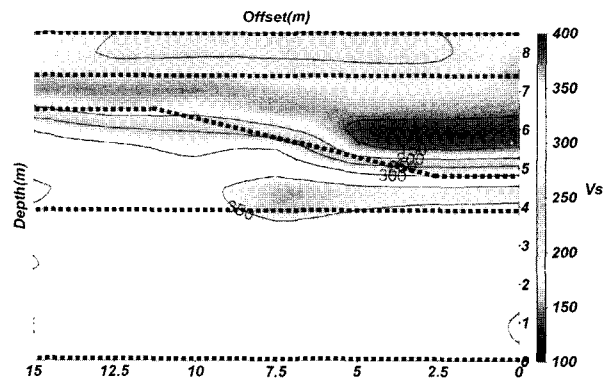


그림 17. HWAW 기법으로 획득한 2차원 전단파 속도 분포

파 속도 주상도를 이용해서 2차원 분포를 도출한 것이므로 모형 부지의 국부적 특징을 잘 나타내는 것을 볼 수 있다. 그림 9(c)에 도시된 모형부지의 2차원 기준값과 비교해 보면 HWAW 기법의 결과가 MASW 기법의 결과에 비해 좀 더 상세하고 기준값에 유사한 분포를 가짐을 확인할 수 있다. 즉, 모형부지와 같이 층의 구조가 단순하지 않고 측선 전개에 불리한 제한된 시험 부지를 가진 경우, HWAW 기법이 2차원 전단파속도 분포 도출에 더욱 유리한 것을 확인할 수 있다.

6. 요약 및 결론

본 연구에서는 HWAW 기법의 신뢰성과 현장 적용성을 검증하기 위하여 모형부지를 건설하였다. 조성된 모형부지에서 여러가지 탄성과 탐사를 수행하여 HWAW 기법의 검증 및 타 탄성파 탐사 기법과의 비교 연구를 수행하였으며 그 요약 및 결론은 다음과 같다.

- (1) 매설된 다수의 감지기로부터 조성된 실대형 모형부지의 2차원적인 속도 분포를 도출이 가능하였으며 이 값을 모형부지의 기준 값으로 설정, 탄성과 탐사 기법 결과를 검증하는 기준 값으로 사용하였다.
- (2) 다운홀 기법의 경우 국부적이고 상세한 전단파 속도를 도출이 가능하며 기준 값과 유사한 경향을 나타내었다.
- (3) SASW 기법은 경사진 지반에 대한 평균적인 속도를 도출하여 시험 지점에서의 기준 값과 일치하지 않았으며 협소한 부지에서 2차원 전단파 속도 분포 도출에 어려움이 있었다.
- (4) MASW 기법을 통해 획득한 2차원 전단파 속도 분포는 경사진 지반의 형태는 모사하고 있으나 측선의 길이가 길어 전단파 속도 값은 부지의 국부적인 특성을 정확하게 모사하지 못하고 있는 것으로 보여 졌다.
- (5) 본 모형부지와 같이 부지가 협소하고 경사진 형태의 지반에서는 타 기법에 비해 HWAW 기법이 신뢰성 있는 전단파 속도를 도출하는데 유리한 것을 확인하였다.

감사의 글

본 연구는 건설교통부가 출연하고 한국건설교통기술평가원에서 위탁 시행한 2004년도 건설핵심기술연구개발사업(04핵심기술B01-04)에 의한 연구비 지원 및 GS 건설의 대전-당진간 고속도로 제 7공구 현장 지원으로 이루어진 연구 성과의 일부로 이에 감사를 표합니다.

참고 문헌

1. 고광범, 지준, 이두성 (2000), “천부탄성과 탐사 자료 획득을 위한 3차원 측선 배열 설계”, *한국자원공학회지*, Vol.37, pp.232-239.
2. 김중열 (2000), “임해매립층/해성점토 경계면 규명을 위한 탄성과 이용 기술”, *2000년 공동특별강연 논문집*, 한국지구물리탐사학회·한국지반공학회 지반조사위원회, pp.48-86.
3. 조창수, 이희일, 서정희 (2002), “탄성과 굴절법 토모그래피를 이용한 지반의 속도 분포 해석”, *물리탐사*, Vol.5, pp.6-17.
4. 박형춘, 김동수 (2004a), “HWAW 방법을 이용한 새로운 탄성과 지반조사기법의 개발(I) : 분산곡선의 결정”, *대한토목학회 논문집*, Vol.24, No.2C, pp.105-115.
5. 박형춘, 김동수 (2004b), “HWAW 방법을 이용한 새로운 탄성과 지반조사기법의 개발(II) : 실험 구성 및 역산과정”, *대한토목학회 논문집*, Vol.24, No.2C, pp.117-124.
6. 방은석, 김동수, 윤종구 (2006) “다운홀 시험에서 신뢰성 있는 전단파 속도 주상도 도출을 위한 해석 기법의 개선”, *대한 토목학회 논문집*, Vol.26, No.3C, pp.157-170.
7. 방은석 (2006), *신뢰성있는 지반의 전단파 속도 주상도 결정을 위한 현장 탄성과 탐사기법 연구*, 박사학위 논문, 한국과학기술원, pp.201-218.
8. 조성호, 하의상, 박권규, 강태호, 김종태, 김봉찬, 최재화, 안희윤 (2005a), “지반 하부강성구조 평가를 위한 표면파 기법 비교 연구”, *한국지반공학회 봄 학술발표회 RRT 특별 Session*, pp.35-56.
9. 조성호, 장대우, 강태호, 이일화 (2005b), “CAP SASW 기법에 의한 지반단면의 전단강성구조 평가”, *한국지반공학회 논문집*, 지반공학회, Vol.22, pp.71-82.
10. 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.
11. Kim, Dong-Soo, Park, Hyung-Choon, and Kim, Seung-Hee (2004), “Seismic Site Characterization using Harmonic Wavelet Analysis of Wave (HWAW) Method”, *US-Korea Joint Workshop, Seoul, Korea*, pp.335-346.
12. Nazarian, S. and Stokoe, KH (1984), “In situ shear wave velocities from spectral analysis of surface wave”, *Proc., 8th Conf On Earthquake Eng*, S.Francisco, pp.31-38.
13. Park, C.B., R.D. Miller, and J. Xia (1999), “Multi-channel analysis of surface waves”, *Geophysics*, Vol.64, No.3, pp.800-808.
14. Park, C.B. (2003), *Surfseis User's Manual*, Kansas Geological Survey.
15. Park, H.C.. and Kim, D.S. (2001), “Evaluation of the Dispersive Phase and Group Velocities using Harmonic Wavelet Transform”, *NDT&E International*, Vol.34, No.7, pp.457-467.

(접수일자 2006. 8. 7, 심사완료일 2007. 4. 27)