GOVP1200810248

건설기술혁신사업 최종보고서

T00232176

R&D / 04건설핵심 B01-04

SPT 업홀 및 HWAW기법을 이용한 지반강성의 2차원 영상화 기법 연구보고서

2007. 10. 15.

주관연구기관 / 한국과학기술원
위탁연구기관 / 한국지질자원연구원
참여연구기관 / 희송지오텍(주)

건 설 교 통 부
한국건설교통기술평가원

Construction & Transportation R&D Report

제 출 문

건설교통부장관(한국건설교통기술평가원장) 귀하

본 보고서를 건설기술연구개발사업 중 "SPT 업홀 및 HWAW기법을 이영한 지반강성의 2차원 영상화 기법"의 최종보고서로 제출합니다.

2007 . 10 . 15 .

주관연구기관 : 한국과학기술원
총 장 : 서남표
위탁연구기관 : 한국지질자원연구원
원 장 : 이태섭
참여 기업 : 희송지오텍
대표 이사 : 김기석

■ 총 괄 연 구 책 임 자	/ 책임연구원 김 동 수	총괄연구책임자
■ 주관연구기관 참여연구원	/ 선임연구원 박 형 춘	연 구 개 발
	/ 연 구 원 윤 준 웅	연 구 개 발
	/ 연 구 원 김 종 태	연 구 개 발
	/ 연 구 원 김 남 룡	연 구 개 발
	/ 연 구 원 박 헌 준	현 장 실 험
	/ 연 구 원 진 석 우	현 장 실 험
	/ 연 구 원 김 성 우	현 장 실 험
■ 위탁연구기관 참여연구원	/ 책임연구원 김 정 호	프로그램 개발
	/ 선임연구원 조 성 준	프로그램 개발
	/ 선임연구원 박 삼 규	프로그램 개발
	/ 선임연구원 방 은 석	프로그램 개발
■ 참여 기업 참여연구원	/ 책임연구원 김 기 석	현장시험 및 지원
	/ 선임연구원 이 도 섭	현장시험 및 지원
	/ 선임연구원 최 상 용	현장시험 및 지원
	/ 연 구 원 임 성 빈	현장시험 및 지원
	/ 연 구 원 우 현 구	현장시험 및 지원
	/ 연 구 원 안 희 윤	현장시험 및 지원

요 약 문

Ⅰ. 제 목

SPT 업홀 및 HWAW기법을 이용한 지반강성의 2차원 영상화 기법

Ⅱ. 연구개발의 목적 및 필요성

우리나라는 지반의 조성 상황이 유사한 지역에서도 국부적으로 특성이 상이한 경우가 많다. 이런 지반에 구조물이 시공될 때 지층 형상과 더불어 지반 물성을 2차원적으로 정확히 영상화하는 것이 중요하다. 일반적으로 현업에서는 지층의 구조를 파악하기 위하여 특정 지점에 대해서 시추를 실시하고 중간지점은 내삽법을 이용하여 추정하는 방법이 이용되고 있다. 본 연구의 대상인 전단 탄성계수는 극히 일부지점에서 현장 탄성파 탐사를 수행하여 얻어지는 1차원적인 전단파 속도 주상도 값을 바탕으로 실험이 수행되지 않은 많은 지역에 지층 구조를 고려하여 층상별로 동일하게 적용하는 실정이다. 이런 방식은 시추 지점 사이에 국부적 특성의 변화를 제대로 파악하기 힘들며 지반 물성 파악의 불확실성에 의해서 토목구조물의 설계 및 시공시 과다 설계 혹은 부실 설계로 이어지게 된다. 이를 막기 위해 신뢰성 있는 2차원적 정보를 획득하려 한다면 다량의 시추 및 탄성파 탐사를 수행해야 하므로 매우 비효율적이다. 따라서 경제적이며 신뢰성 있게 지반 강성을 2차원 혹은 3차원으로 영상화하는 작업은 매우 중요하다.

본 연구팀은 지난 십여년간 공내 탄성파 탐사 및 표면파 탐사 수행에 대한 경험을 바탕으로 2차원 영상화에 유리한 기법을 개발하고자 노력하였다. 기존의 탄성파 탐사 기법 중 공내 탄성파 탐사는 시추 후 시험공 설치라는 기술적·경제적 어려움 및 가탐 심도의 제한성 등의 문제가 있었고 표면파 탐사는 시험시간이 오래 걸리고, 넓은 지역의 평균적 물성치를 제공하며, 해석에 전문성이 요구되어 상용화가 어려운 문제가 있었다. 본 연구팀에서는 이들 문제를 해결하고자 SPT 가진원을 이용한 업홀 기법(이하 SPT업홀)과 Harmonic Wavelet Analysis of Waves(이하 HWAW)기법을 이용한 분산곡선 결정방법을 개발하였다.

본 연구팀에서 2차원 영상화를 구현하는데 적용하려고 하는 SPT업홀은 모든 지반조사에서 사용되는 표준관입시험시 발생하는 지중의 충격가진원을 사용하므로 별도의 비용 없이 시추와 동시에 시험을 수행할 수 있으며 가진원의 에너지가 커

서 가탐심도가 깊고 지표면 감지기의 수에 따라 효율적 2차원 영상화가 가능하다. 또한 HWAW기법은 시험 수행 시간이 적게 걸리고 분산곡선 도출까지의 과정이 자동화가 되어 상용화가 유리하며 좁은 지표면 감지기 간격으로 깊은 깊이의 결과를 도출하는 특징을 갖고 있어 2차원 영상화를 구현하는데 타 표면파 시험보다 유리하다. 이러한 연구 성과를 바탕으로 SPT업홀 기법과 HWAW기법을 이용한 2차원 지반강성 영상화 기법에 대한 실용화 연구를 수행하고자 한다. 수치해석 및 현장 검증을 통해 시험 규준을 확립하고 사용자 편의의 장비 및 프로그램 개발을 통해 기업으로의 상용화된 기술의 이전을 최종 목표로 한다.

Ⅲ. 연구개발의 내용 및 범위

(1) 수치해석을 통한 시험 기법의 검증 및 개선

- 수치해석을 통한 SPT 업홀의 검증 및 개선사항
- 수치해석을 통한 HWAW시험의 검증 및 개선사항

(2) 현장 실험 장비의 개선 및 데이터 획득 시스템 구축

- 감지기, 가진원 등 현장실험장비 개선
- 노트북을 이용한 데이터 획득 시스템 구축
- 상용화를 위한 시험 시스템 확립을 위한 고찰

(3) 해석 프로그램 개선 및 개발

- SPT 업홀 1차원 해석 및 토모그라피 프로그램
- HWAW기법 자동 분산곡선 도출 프로그램 도입 및 개선
- 분산곡선을 전단파 속도로 전환하는 역산 프로그램을 도입 및 개선 연구

(4) 다양한 현장 적용을 통한 검증

- 다양한 부지에서 개발된 시스템의 현장 적용성 및 결과의 신뢰도 평가

(5) 최종 상용화 시스템 제안

- SPT 업홀 기법 시스템
- HWAW 기법 시스템

- 각 기법 매뉴얼 작성

Ⅳ. 연구개발결과

(1) 수치해석을 통한 시험 기법의 검증 및 개선

- 탄성파 전파 최적 모델 구성
- SPT 업홀 기법의 현장 시험법 정립
- SPT 업홀 기법의 초동 정보 도출 방법 산정
- SPT 업홀 토모그라피 기법 적용성 확인
- HWAW 기법의 현장 시험법 정립
- HWAW 기법이 신뢰성 있는 실험 분산곡선을 도출하는 것을 확인
- 역산을 위한 정모델링 기법으로 산정

(2) 현장 실험 장비의 개선 및 데이터 획득 시스템 구축

- SPT 업홀 시 8~12 쌍의 수직, 수평 가속도계 동시 사용
- HWAW 기법 시 가진원과 감지기 안 구성
- 탄성파 전용 장비를 이용한 노트북 기반 신호 획득 장비
- NI-DAQPad 를 이용한 노트북 기반 신호 획득 장비

(3) 해석 프로그램 개선 및 개발

- SPT 업홀 현장 신호획득 및 관리 프로그램 개발 (초동 자동 산출)
- SPT 업홀 전단파 속도 주상도 도출을 위한 1차원 해석 프로그램
- SPT 업홀 2차원 영상화를 우한 자체 토모그라피 프로그램 개발
- HWAW기법 현장 신호 획득 및 분산곡선 도출 프로그램
- 분산곡선을 전단파 속도로 전환하는 역산 프로그램을 제작

(4) 다양한 현장 적용을 통한 검증

- RRT를 통한 제안된 시험법의 검증
- 모형 부지 건설을 통한 SPT-업홀 토모그라피 및 2D-HWAW 기법 검증
- 김제 부지에서의 SPT-업홀 토모그라피 기법의 검증
- 장안 부지에서의 HWAW 기법에 대한 검증 연구

- 최종 시스템을 이용한 분당 부지 및 미륵사지 부지

(5) 최종 상용화 시스템 제안

- SPT 업홀 : Geode 및 NiDAQ를 이용한 상용화 시스템 구성
- HWAW 기법 : Geode 및 NiDAQ를 이용한 상용화 시스템 구성
- 각 기법의 프로그램 및 현장 시험 매뉴얼 작성

V. 연구개발결과의 활용계획

- 현재 지반조사시 활용되고 있는 여러 지반 탄성파 탐사 기법을 대체
- 참여기업으로 기술 이전을 통하여 사업화 추진
- 개발된 기법을 국내외 다양한 지반조사에 적극활용하여 기술의 우수성을 홍보하고 기술의 활용성을 증진

S U M M A R Y

Ⅰ. Title

Development of 2-dimensional imaging method of soil stiffness using SPT - Uphole and HWAW methods

Ⅱ. Object and necessity of this study

The evaluation of reliable shear wave velocity (V_S) profile of the site has become important in the static deformation analysis as well as in the geotechnical earthquake engineering. Recently, two-dimensional (or three-dimensional) imaging of Vs profile becomes more important because of the lateral non-homogeneity of soil stiffness. Nowdays various seismic field tests are generally used for the evaluation of Vs profile. These seismic tests consist of two representative categories. One is a borehole method such as cross-hole, down-hole, PS logging and the other is a surface method such as SASW and MASW. Though many researchers provided successful results on imaging of rock stiffness variation, there are relatively poor efforts to obtain a reliable imaging on soil stiffness itself. Also, the conventional seismic field tests have a weakness to realize the reliable imaging of subsurface stiffness variation particularly in the economic view.

A new method which combines SPT based up-hole test (SPT-uphole) and surface wave based Harmonic Wavelet Analysis of Wave (HWAW) method were proposed to overcome a portion of weak point in the existing seismic methods as tools for subsurface stiffness imaging. Up-hole test is a seismic field test using receivers on the ground surface and a source in borehole. In the SPT-upholetest, SPT sampler which is common in site investigation was used as a source and several surface geophones were used as receivers. Then subsurface stiffness imaging is obtained through tomography which considers travel times of several receivers. HWAW method is based on time-frequency analysis to evaluate the phase velocity. HWAW method can not only obtain the dispersion curve of various points quickly but also sample the detailed shear

wave velocity profile of whole depth. Then subsurface stiffness imaging is completed through interpolation of individual Vs profile. Because the SPT test is essential in most site investigations and HWAW method doesn't require any borehole, the proposed method can lead the imaging of the lateral stiffness variation effectively and economically.

The investigation on 2D subsurface stiffness imaging using SPT-uphole and HWAW methods will be performed. Through numerical analysis and in-situ application, preliminary test set-up was established and convenient commercial rool for testing and data reduction will be developed. Final goal of this study is to develop and transfer commercialized techniques to an enterprise.

Ⅲ. Contents and scope

(1) Verification and improvement of test methods using numerical analysis

- Verification and improvement of SPT Uphole method
- Verification and improvement of HWAW method

(2) Improvement of in-situ testing equipment and construction of data acquisition system

- Improvement of in-situ testing equipment such as soure & receiver
- Construction of data acquisition system using laptop computer
- study about establishment of commercial testing system

(3) Development & improvement of analysis programs

- SPT uphole data logger and 1D & 2D tomography program
- Automated program of data acquisition and deduction of results
- Inversion program for HWAW method

(4) Various field application of developed testing system

- Verification of applicablilty and reliability of developed system through field tests

(5) Proposal of final commercial testing system

- SPT Uphole system
- HWAW method system
- making manuals of each method

Ⅳ. Results

(1) Verification and improvement of test methods using numerical analysis

- Construction of numerical model for wave propagation
- Establishment of field testing method of SPT uphole
- Evaluation of travel time information of SPT uphole
- Verification of tomography technique of SPT uphole
- Establishment of field testing method of HWAW method
- Evaluation of reliable dispersion curve of HWAW method
- Establishment of forward modeling for inversion

(2) Improvement of in-situ testing equipment and construction of data acquisition system

- Simultaneous use of vertical and horizontal geophones with 8~12 pairs in SPT Uphole test
- Organization of source and receivers system of HWAW method
- Laptop computer-based data acquisition system using Geode
- Laptop computer-based data acquisition system using NI-DAQPad

(3) Development & improvement of analysis programs

- Development of filed data logger and analysis program (automated evaluation of first arrival time)
- Development of SPT uphole 1D analyzer for 1D Vs profile
- Development of SPT uphole 2D tomography program for 2D Vs profiles
- Development of HWAW field data logger and automated analysis program
- Development of inversion program suitable to HWAW method

(4) Various field application of developed testing system

- Verification of suggested methods through RRT
- Verification of SPT-Uphole and HWAW methods using model testing site
- Verification of SPT-Uphole at Kimje site
- Verification of HWAW method at Jang-an site
- Field tests at Bundang and Iksan site using final testing system

(5) Proposal of final commercial testing system

- SPT Uphole system
- HWAW method system
- making manuals of each method
- Development of final commercial testing system using Geode and NI DAQPad of SPT uphole method
- Development of final commercial testing system using Geode and NI DAQPad of HWAW method
- making field test and program manuals of each method

V. Plan to make practical application of results

- Substitution of the conventional methods
- Promotion of commercialization through transfer of developed system to a participant company
- Publicity campaign of developed methods & systems and promotion of practical use through various positive applications to site characterization survey

목 차

제 1 장 서 론 ····· 1
제 1 절 연구 개발의 목적 및 필요성 ····· 1
1. 연구개발의 목적 ····· 1
2. 연구의 필요성 ····· 2
제 2 절 연구개발의 범위 ····· 10
1. 연차별 연구 목표 및 내용 ····· 10
2. 위탁사업의 연구개발 목표 및 내용 ····· 17
3. 연구개발 추진전략 및 방법 ····· 18
제 2 장 국내·외 기술개발 현황 ····· 24
제 1 절 국내·외 기술동향 ····· 24
1. 국내 기술 동향 ····· 24
2. 국외 기술동향 ····· 24
제 2 절 기술동향 분석 ····· 25
제 3 절 연구개발과제 및 대상기술의 중복성 ····· 26
1. 연구개발과제의 중복방지를 위한 조사 및 검토결과 ····· 26
2. 연구개발과제의 차별화 방안 ····· 26
제 3 장 연구개발수행 내용 및 결과 ····· 27
제 1 절 수치해석을 통한 시험 기법의 검증 및 개선 ····· 27
1. 탄성파 전파 모델의 최적 구성 ····· 27
2. 수치해석을 통한 SPT 업홀의 검증 및 개선사항 ····· 29
3. 수치해석을 통한 HWAW시험의 검증 및 개선사항 ····· 44
제 2 절 현장 실험 장비의 개선 및 데이터 획득 시스템 구축 ····· 62
1. SPT 업홀 토모그라피 기법을 위한 현장 시험 시스템 구축 ····· 62
2. 2D-HWAW 기법을 위한 현장 시험 시스템 구축 ····· 66
제 3 절 해석 프로그램 개선 및 개발 ····· 78
1. SPT 업홀 해석 프로그램 ····· 78
2. HWAW기법 자동 분산곡선 도출 프로그램 도입 및 개선 ····· 84

3. 분산곡선을 전단파 속도로 전환하는 역산 프로그램 도입 및 개선 연구 · 87
제 4 절 다양한 현장 적용을 통한 기법의 검증 ····· 96
1. 상호검증시험(Round Robin Test)를 이용한 시험기법의 검증 ····· 96
2. 모형 부지 건설을 통한 SPT-업홀 토모그라피 및 2D-HWAW 기법 검증 ·
····· 109
3. 김제 부지에서의 SPT-업홀 토모그라피 기법의 검증 ····· 138
4. 장안 부지에서의 HWAW 기법에 대한 검증 연구 ····· 146
5. 분당 OO 부지 및 익산 미륵사지 부지에서의 HWAW 기법을 이용한 2차
원 영상화 평가 ····· 159
제 5 절 최종 상용화 시스템 제안 ····· 171
1. SPT 업홀 기법 ····· 171
2. HWAW 기법 ····· 181
3. 각 기법 매뉴얼 ····· 189
제 4 장 연구개발목표 달성도 및 관련분야에의 기여도 ····· 205
제 1 절 연구목표의 달성도 ····· 205
1. 진도율 ····· 205
2. 목표 달성도 및 내용 ····· 206
제 2 절 성과의 기여도 ····· 210
제 5 장 연구개발결과의 활용계획 ····· 211
제 1 절 활용 방안 ····· 211
제 2 절 기대 효과 및 응용 ····· 212
제 3 절 관련 후속 개발 전망 ····· 213
제 4 절 기업화 추진 전략(기업으로의 기술이전) ····· 213
제 5 절 최종 상용화 제품 완성을 위한 지속적인 노력 ····· 214
제 6 장 연구개발과정에서 수집한 해외과학기술정보 ····· 215
제 7 장 참고문헌 ····· 216

그림 목차

그림 1.1.1 지반공학분야에서의 전단파 속도 활용사례 ····· 3
그림 1.1.2. 영상화의 일례 ····· 4
그림 1.1.3 SPT 업홀 시험 ····· 8
그림 1.1.4. HWAW 기법 ····· 9
그림 3.1.1 유한요소 크기에 따른 결과의 정확도 비교 ····· 29
그림 3.1.2. SPT-업홀 수치해석 모델 ····· 30
그림 3.1.3. 심도 6m 가진시 위치별 수직 방향 획득 신호 ····· 31
그림 3.1.4 심도 6m 가진시 위치별 수평 방향 획득 신호 ····· 31
그림 3.1.5 감지기 위치 16m에서 획득한 깊이별 가진 신호 ····· 32
그림 3.1.6 감지기 위치 10m에서 획득한 깊이별 가진 신호 ····· 32
그림 3.1.7 SPT 가진원에 의해 지표면까지 파의 진행 방향에 따라 예상되는 입자의 움직임 방향 ····· 33
그림 3.1.8 전단파의 직접 도달 시점을 이용한 결과 ····· 34
그림 3.1.9 전단파의 첫번째 극대점을 이용한 결과 ····· 34
그림 3.1.10 수직, 수평 성분을 동시 활용한 도달 시간 정보의 획득 ····· 35
그림 3.1.11 수직, 수평 성분을 동시 활용한 도달 시간 정보 이용 결과 ····· 36
그림 3.1.12 유한요소 수치 해석을 위한 지반 모델 ····· 37
그림 3.1.13 Snell의 법칙에 근거한 가진원으로부터 감지기까지의 이론적 도달시간의 산출 ····· 38
그림 3.1.14 수치해석을 통해 획득한 감지기 위치에서의 입자 운동 (수평모델) 39
그림 3.1.15 획득 파형으로부터 전단파 성분의 초동 정보 획득 과정(수평모델) 40
그림 3.1.12 유한요소 수치 해석을 위한 지반 모델 ····· 37
그림 3.1.13 Snell의 법칙에 근거한 가진원으로부터 감지기까지의 이론적 도달시간의 산출 ····· 38
그림 3.1.14 수치해석을 통해 획득한 감지기 위치에서의 입자 운동 (수평모델) 39
그림 3.1.15 획득 파형으로부터 전단파 성분의 초동 정보 획득 과정(수평모델) 40
그림 3.1.16 유한요소 수치해석을 통해 획득한 전단파 성분의 도달시간 정보 (수

평모델) ····· 41
그림 3.1.17 유한요소 수치해석을 통해 획득한 전단파 성분의 도달시간 정보 ··42
그림 3.1.18 제안된 SPT-업홀 토모그라피 기법을 통해 도출된 전단파 속도 분포와 수치해석 모델 값과의 비교 (그림내 점선은 모델의 형상, 굵은 숫자는 모델의 속도를 의미함) ····· 43
그림 3.1.19 ABAQUS 수치 모의 실험 수행을 위해 작성된 유한요소 모델 ····· 45
그림 3.1.20 모델 1, 3, 4에서 HWAW 기법 수치 모의 시험 수행 결과 ····· 47
그림 3.1.21 얇은 깊이 경사진 모델인 모델 2를 통해 수치모의 실험을 수행한 2D-HWAW기법 결과 ····· 48
그림 3.1.22 각 감지기 위치에서의 HWAW기법을 이용하여 도출한 실험 분산곡선 결과와 정모델링 프로그램을 이용한 감지기 거리별 이론 분산곡선의 비교 50
그림 3.1.23 수치해석을 위해 제작된 지반 모델 ····· 51
그림 3.1.24 수치해석을 통한 HWAW 기법의 검증 과정 개요도 ····· 52
그림 3.1.25 균일 반무한층(Case1)에서의 수치해석 결과 비교 ····· 54
그림 3.1.26 Case 2에서의 수치해석 결과 비교 ····· 55
그림 3.1.27 Case 3에서의 수치해석 결과 비교 ····· 57
그림 3.1.28 Case 4에서의 수치해석 결과 비교 ····· 58
그림 3.1.29 Case 5에서의 수치해석 결과 비교 ····· 59
그림 3.1.30 Case 6에서의 수치해석 결과 비교 ····· 61
그림 3.2.1 개선된 SPT-업홀 기법의 감지기 시스템의 구성 ····· 64
그림 3.2.2 SPT-업홀 현장 시험을 위해 구성된 노트북 기반의 신호 획득 장비 66
그림 3.2.3 영향요소 평가를 위한 수평 방향 균질 지반에서의 시험 수행 ····· 67
그림 3.2.4 가진원의 변화에 따른 영향 ····· 69
그림 3.2.5 풍화토 현장에서 가진원 변화에 따른 영향요소 고려 ····· 69
그림 3.2.6 부산 연약지반 부지에서 자유 낙하식 중추의 성능 비교 연구 ····· 70
그림 3.2.7 각 가진원의 주파수 대역에서의 에너지 분포 비교 ····· 71
그림 3.2.8 각 가진원으로부터 도출한 분산곡선 ····· 72
그림 3.2.9 HWAW 시험에 사용된 감지기 ····· 72
그림 3.2.10 감지기 종류에 따른 영향요소 ····· 73

그림 3.2.11 4.5H 감지기의 쐐기 탈부착 형태 ····· 74
그림 3.2.12 감지기와 지반의 커플링에 관한 영향요소 연구 ····· 74
그림 3.2.13 다채널 감지기를 이용한 2D-HWAW 기법의 수행 ····· 75
그림 3.2.14 획득 장비에 관한 영향 요소 연구 ····· 76
그림 3.2.15 HWAW 기법을 위해 구성된 노트북 기반의 신호 획득 장비 ····· 77
그림 3.3.1 신호 획득 및 관리 프로그램 Field_UH_v1.1 ····· 78
그림 3.3.2. 1차원 결과 도출 프로그램 Anal D_UH_v1.1 ····· 82
그림 3.3.3. Ana2D_UH_v1.1 주화면 및 2차원 해석 일례 ····· 84
그림 3.3.4. 상향 경사 모델 및 하향 경사 모델을 이요한 검증 결과 ····· 84
그림 3.3.5 HWAW 기법을 위한 신호획득 및 실험분산곡선 도출 프로그램 ····· 87
그림 3.3.6 HWAW 시험의 역산해석을 위한 반복적 정모델링 ····· 88
그림 3.3.7 Matlab v7.1 GUI를 이용한 정모델링 프로그램 ····· 90
그림 3.3.8 Matlab v7.3 GUI를 이용한 자동역산 프로그램 ····· 93
그림 3.3.9 자동화된 반복적 정모델링을 통한 역산 해석 결과의 예 ····· 95
그림 3.4.1 현장 시험부지 전경 ····· 97
그림 3.4.2 예비 현장 시험부지 및 물리탐사 측선 위치도 ····· 97
그림 3.4.3 시험용 시추공 모식도와 시추결과 단면도 ····· 98
그림 3.4.4. 전기비저항 시험으로 결정된 비저항 컨투어 ····· 99
그림 3.4.5. MASW 시험에 의해서 결정된 전단파 속도 컨투어 ····· 100
그림 3.4.6 다운홀 시험 수행 결과 ····· 101
그림 3.4.7 크로스홀 시험 결과 ····· 102
그림 3.4.8 인홀 시험 결과 ····· 102
그림 3.4.9 SPT업홀 시험 결과 ····· 104
그림 3.4.10 SPT업홀 시험 결과와 타 공내 탄성파 결과와의 비교 ····· 104
그림 3.4.11 예비 시험 부지에서 2D-HWAW 기법 수행 장면 ····· 106
그림 3.4.12 HWAW 시험 수행기관에 의해서 결정된 전단파 속도 컨투어 ····· 107
그림 3.4.13 시험부지 건설 위치 (대전-당진간 고속도로 예산 휴게소 예정부지) ··· 110
그림 3.4.14 모형 시험 부지의 설계 ····· 111
그림 3.4.15 지중에 매설되는 감지기 ····· 111

그림 3.4.16 모형부지의 종단면도 ····· 112
그림 3.4.17. 1층 건설과정 ····· 113
그림 3.4.18. 감지기 설치 및 측량 ····· 114
그림 3.4.19 2층 건설과정 ····· 114
그림 3.4.20 3,4층 건설과정 ····· 115
그림 3.4.21 부지의 최종 모형과 시험 수행 측선 ····· 116
그림 3.4.22 완성된 부지의 종단면도와 매설 감지기의 위치 ····· 116
그림 3.4.23 확인 시추 및 SPT-N 치 ····· 117
그림 3.4.24 가진 방법 및 감지기의 획득 신호 ····· 118
그림 3.4.25 모형부지의 물성적 특성(탄성파 속도)의 도출 ····· 119
그림 3.4.26 모형부지에서 수행된 기존 탄성파 탐사 ····· 122
그림 3.4.27 모형부지에서 수행된 기존 탄성파 탐사 수행 장면 ····· 123
그림 3.4.28 MASW 기법으로 구한 실험분산곡선 ····· 124
그림 3.4.29 MASW로 구한 전단파속도와 기준값을 이용한 전단파속도의 비교 125
그림 3.4.30 MASW 기법을 통해 도출된 지반의 전단파 속도 2차원 영상화 ··· 125
그림 3.4.31 SASW 기법으로 구한 실험분산곡선 ····· 126
그림 3.4.32 SASW로 구한 전단파속도와 기준값을 이용한 전단파속도의 비교 127
그림 3.4.33 시추공 A-1에서 구한 다운홀 시험의 획득 신호 ····· 128
그림 3.4.34 각 시추공에서 구한 전단파 속도와 기준값 비교 ····· 128
그림 3.4.35 모형 부지에서의 SPT-업홀 현장 시험의 수행 ····· 129
그림 3.4.36 모형 부지에서 SPT-업홀 현장 시험을 통해 획득한 파형 일례 ····· 130
그림 3.4.37 모형 부지에서 SPT-업홀 현장 시험을 통해 획득한 전단파 속도의 2 차원 영상화 결과 ····· 131
그림 3.4.38 HWAW 기법으로 구한 실험분산곡선 ····· 132
그림 3.4.39 HWAW로 구한 전단파속도와 기준값을 이용한 전단파속도의 비교 133
그림 3.4.40 HWAW 기법을 통해 도출된 지반의 전단파 속도 2차원 영상화 ··· 133
그림 3.4.41 매설 감지기 위치별 1차원 전단파 속도 주상도 ····· 135
그림 3.4.42 각 기법들로부터 구한 모형부지의 2차원 영상화 ····· 136
그림 3.4.43 SPT-업홀 시험이 수행된 전라북도 김제 풍화토 부지 개요 ····· 138

그림 3.4.44 시험 부지 내 총 6개 시추공에서의 SPT-N치 결과 ····· 140
그림 3.4.45 김제 풍화토 부지 SPT-N치 분포도 ····· 140
그림 3.4.46 SPT-N치와 전단파 속도 관계식을 이용하여 도출한 김제 풍화토 부지의 전단파 속도 분포도 ····· 141
그림 3.4.47 SPT-업홀 기법 감지기별 획득 신호(김제 풍화토 부지) ····· 143
그림 3.4.48 SPT-업홀 시험 감지기별 초동 정보 (김제 풍화토 부지) ····· 143
그림 3.4.49 김제 풍화토 부지 SPT-업홀 기법 1차원 해석 결과 (좌측은 깊이간 DT법, 우측은 감지기간 DT법 이용결과, 중간은 깊이별 SPT-N치) ····· 144
그림 3.4.50 김제 풍화토 부지 SPT-업홀 기법 2차원 해석 결과 ····· 145
그림 3.4.51 장안 현장 부지 개요 ····· 147
그림 3.4.52 SASW 기법을 위해 설계된 감지기 간격, 가진원 등의 실험 세팅 148
그림 3.4.53 SASW 기법을 통해 획득한 실험 분산 곡선 ····· 149
그림 3.4.54 SASW 및 MASW 기법을 통해 결정한 전단파 속도 주상도 ····· 149
그림 3.4.55 MASW 기법을 위해 설정한 감지기 간격 및 가진원 거리 ····· 150
그림 3.4.56 오버톤(overtone) 분석을 통한 실험 분산곡선의 획득 ····· 150
그림 3.4.57 HWAW 기법 현장 검증 연구 수행 장면 ····· 151
그림 3.4.58 한 번의 가진으로 모든 감지기 위치에서 동시에 실험 분산곡선을 획득하는 방식으로의 HWAW 기법의 수행 ····· 151
그림 3.6.59 그림 3.4.58 방식으로 획득한 가진원으로부터의 거리별 실험 분산곡선 (범례에서 숫자는 가진원으로부터 감지기까지의 거리) ····· 152
그림 3.4.60 동일한 가진원 위치에서 감지기 간격을 4m로 바꾸어 수행한 결과 152
그림 3.4.61 동일한 감지기 위치에서 가진원 위치를 바꾸어 가면서 실험 분산곡선을 획득하는 방식으로의 HWAW 기법의 수행 ····· 153
그림 3.4.62 감지기 위치를 고정시키고 가진원 거리를 이동시켜 수행한 결과(범례에서 숫자는 감지기 1, 감지기 2, 가진원의 좌표를 의미, 즉 감지기 간격은 2m이며 위치가 고정된 상태에서 가진원만 이동시킴) ····· 154
그림 3.3.63 HWAW 기법으로 결정된 지반의 전단파 속도 주상도 ····· 155
그림 3.4.64. SASW, MASW, HWAW 기법으로 획득한 실험 분산곡선의 비교 156
그림 3.4.65 같은 배열의 측선을 이동시켜 가며 HWAW 기법을 수행하는 방법 개요도 ····· 157

그림 3.4.66 같은 배열의 측선을 이동시켜 가며 HWAW 기법을 수행하여 획득한 실험분산곡선 (가진원 거리 6.5m, 감지기 간격 2m) ····· 158
그림 3.4.67 현장 적용성 검증을 위한 세 가지 시험 시스템 ····· 159
그림 3.4.68 현장 신호 획득 및 해석 프로그램을 이용한 시험 수행 ····· 160
그림 3.4.69 동일 신호의 동시 획득 ····· 160
그림 3.4.70 각 장비에서 측정된 신호의 비교 ····· 161
그림 3.4.71 각 장비에서 획득한 분산곡선 ····· 162
그림 3.4.72 분당 부지의 평면도 ····· 162
그림 3.4.73 분당 부지의 시추결과 ····· 163
그림 3.4.74 분당 부지에서의 현장 시험 구성 ····· 163
그림 3.4.75 BH-5 지점에서의 HWAW 결과 일례 ····· 164
그림 3.4.76 자동역산프로그램을 이용한 전단파 속도의 도출(BH-5 지점) ····· 165
그림 3.4.77 24 지점에서의 전단파 속도 주상도 ····· 165
그림 3.4.78 2차원 전단파 속도 주상도 ····· 166
그림 3.4.79 익산부지의 평면도 ····· 167
그림 3.4.80 익산부지의 시추결과 ····· 167
그림 3.4.81 익산 부지에서의 현장 시험 구성 ····· 168
그림 3.4.82 BH-4 지점에서의 HWAW 결과 일례 ····· 168
그림 3.4.83 자동역산프로그램을 이용한 전단파 속도의 도출(BH-4 지점) ····· 169
그림 3.4.84 15 지점에서의 전단파 속도 주상도 ····· 170
그림 3.4.85 2차원 전단파 속도 주상도 ····· 170
그림 3.5.1 SPT 업홀 기법의 최종상용화 시스템 ····· 172
그림 3.5.2 3방향 지표면 감지기 및 Spread Cable ····· 172
그림 3.5.3. 노트북과 연결하여 사용하는 Geode 신호 획득 장비 개요 ····· 173
그림 3.5.4. NI-USB DAQ 보드를 이용한 다기능 노트북 기반 신호 획득 장비 176
그림 3.5.5 SPT 업홀 신호획득 및 해석 프로그램 ····· 179
그림 3.5.6 HWAW 기법의 최종상용화 시스템 ····· 182
그림 3.5.7. 수직성분 4.5Hz 지표면 감지기 및 Spread Cable ····· 182
그림 3.5.8. NI-DAQPad 를 이용한 다기능 노트북 기반 신호 획득 장비 ····· 184
그림 3.5.9 HWAW기법의 현장 신호 획득 및 해석 프로그램 ····· 186

그림 3.5.10 Field_UH_v1.1 프로그램 초기 화면 ····· 190
그림 3.5.11. 획득한 신호에 대해서 도달시간 정보를 도출하는 과정 ····· 191
그림 3.5.12 SPT 업홀 실험을 통해 획득한 도달시간 정보 ····· 192
그림 3.5.13. Anal D_UH_v1.1을 실행 초기 화면. ····· 192
그림 3.5.14. Anal D_UH_v1.1을 실행 뒤 입력 파일을 읽어 드린 화면. ····· 193
그림 3.5.15. Anal D_UH_v1.1에서 도달 시간 정보 도시 실행 화면. ····· 193
그림 3.5.16 Anal D_UH_v1.1에서 직선 경로 해석 실행 뒤 화면. ····· 194
그림 3.5.17. Anal D_UH_v1.1에서 굴절 경로 해석(본 해석) 실행 뒤 화면. ····· 194
그림 3.5.18 Anal D_UH_v1.1에서 해석 뒤 파일로 저장된 해석 결과 모습 ····· 195
그림 3.5.19 Ana2D_UH_v1.1 실행 초기 화면 ····· 195
그림 3.5.20. Ana2D_UH_v1.1 직선 경로 해석 수행 뒤 결과 화면 ····· 196
그림 3.5.21. Ana2D_UH_v1.1 굴절 경로 해석 수행 뒤 결과 화면 ····· 196
그림 3.5.22. HWAW Analyzer 1.2 프로그램 초기 화면 ····· 197
그림 3.5.23. 두 개의 감지기에서의 신호 획득 ····· 198
그림 3.5.24. 두 개의 감지기에 대한 주파수영역 정보 확인 ····· 199
그림 3.5.25. 두 개의 감지기에 대한 시간-주파수 해석 결과 ····· 199
그림 3.5.26. 기본 위상속도 분산곡선의 도출 ····· 200
그림 3.5.27. 최종 실험분산곡선의 도출 ····· 201
그림 3.5.28. 실험분산곡선의 저장 ····· 201
그림 3.5.29. 자동역산해석을 위한 실험분산곡선 불러오기창 ····· 202
그림 3.5.30. 자동역산해석을 통해 구현된 지반의 전단파 속도 주상도 및 분산곡선 비교 ····· 203
그림 3.5.31. 전단파 속도 주상도 종합을 통해 구현된 2차원 전단파속도 주상도 분포 ····· 204

표목차

표 3.1.1 이론적인 표면파 속도에 대한 해석결과의 오차(파장 길이=1m) ····· 29
표 3.1.2 ABAQUS 수치 모의 실험 수행을 위해 작성된 유한요소 모델의 특징 45
표 3.2.1 SPT업홀 토모그라피 시험을 위한 감지기 비교 ····· 63
표 3.2.2 시스템 구축을 위해 사용된 시험 구성 장비의 종류 ····· 67
표 3.3.1 최적화 알고리즘의 역산해석 적용 사례 ····· 94
표 3.4.1 예비 현장 시험 부지에서 수행된 시험 목록 ····· 96
표 3.4.2. 1차 예비 시험 부지에서 사용된 SPT업홀 시험 시스템 ····· 105
표 3.4.3 1차 예비 시험 부지에서 사용된 2D-HWAW 기법 시험 시스템 ····· 108
표 3.4.4 각 층의 목표 물성 및 건설방법 ····· 113
표 3.4.5 모형 시험 부지에서 실시된 시험 목록 ····· 120
표 3.4.6 각 탄성파탐사 시험 구성 및 해석 방법 ····· 121
표 3.5.1. Geode 장비의 Specification ····· 174
표 3.5.2. NI 사 USB-6259 모델의 세부사양 ····· 177
표 3.5.3. 구축된 SPT 업홀 수행 시스템 개요 ····· 180
표 3.5.4 NI 사 DAQPad-6015 모델의 세부사양 ····· 187
표 3.5.5. 구축된 HWAW기법 수행 시스템 개요 ····· 188
표 5.1 추가 현장 시험 계획 ····· 214

C O N T E N T S

Chapter 1. Introduction ····· 1
1 The purpose and necessity of research development ····· 1
1) The purpose of research ····· 2
2) The necessity of studies ····· 2
2 The scope of research development ····· 10
1) The object and contents of annual research ····· 10
2) The object and contents of annual trust research ····· 17
3) The Strategy and method of research and development ····· 18
Chapter 2. The status of foreign and domestic research development ····· 24
1 The tendency of foreign and domestic research development ····· 24
1) Domestic research area ····· 24
2) The tendency of foreign studies ····· 24
2. The analysis of research status ····· 25
3. The overlapping of project and technique ····· 26
1) Examination about overlapping ····· 26
2) Method for prevention of overlapping ····· 26
Chapter 3. The result of research ····· 27
1. Verification and improvement of test methods using numerical analysis 27
1. Construction of numerical model for wave propagation ····· 27
2. Verification and improvement of SPT Uphole method ····· 29
3. Verification and improvement of HWAW method ····· 44
2 Improvement of in-situ testing equipment and construction of data acquisition system ····· 62
1) Construction of field testing system of SPT uphole ····· 62
2) Construction of field testing system of HWAW method ····· 66
3. Development & improvement of analysis programs ····· 78
1) SPT uphole data logger and 1D & 2D tomography program ····· 78
2) Development of HWAW field data logger and automated analysis

program ····· 84
3) Development of inversion program suitable to HWAW method ····· 87
4. Various field application of developed testing system ····· 96
1) Verification of suggested methods through RRT ····· 96
2) Verification of SPT-Uphole and HWAW methods using model testing site ····· 109
3) Verification of SPT-Uphole at Kimje site ····· 138
4) Verification of HWAW method at Jang-an site ····· 146
5) Field tests at Bundang and Iksan site using final testing system ····· 159
5. Proposal of final commercial testing system ····· 171
1) SPT Uphole system ····· 171
2) HWAW method system ····· 181
3) manuals of each method ····· 189
Chapter 4. The attainment estimation and contribution for the research area ····· 205
1. Achievement of a research object ····· 205
1) the rate of progress ····· 205
2) Achievement of object and contents ····· 206
2. Contribution of results ····· 210
Chapter 5. The application plan of research developments ····· 211
1. Plan of practical use ····· 211
2. Expectation ····· 212
3. the prospects for the following development ····· 213
4. Transfer of developed method for commercial use ····· 213
5. Continuous Effort for complete products ····· 214
Chapter 6. The foreign technical information ····· 215
Chapter 7. References ····· 216

제 1 장 서 론

제 1 절 연구 개발의 목적 및 필요성

1. 연구개발의 목적

가. 최종목적

본 연구의 최종 목적은 SPT 업홀 및 HWAW 기법을 이용한 지반 강성의 2차원 영상화 기술 개발 및 실용화를 달성하는 것이다. 본 연구의 주된 내용은 연구성과의 실용화를 위한 장비 해석프로그램 구축 및 현장 적용 및 검증연구에 있다. 연구수행을 통하여 SPT업홀 기법과 HWAW기법을 이용하여 지반강성을 2차원 영상화하는 기술이 현장에 바로 적용될 수 있도록 시험 장비 시스템 구축, 계측 및 해석 등을 관리하는 해석 프로그램의 개발, 시험 규준 및 해석 과정에 대한 현장 매뉴얼 등의 성과를 도출하였다. 본 연구의 성과는 다음과 같은 세부목표를 포함한다.

- 세부 목표

(1) SPT업홀 토모그라피 기법 구축

- SPT업홀 현장 장비의 구축
- 토모그라피 기법 적용 2차원 영상화 구현

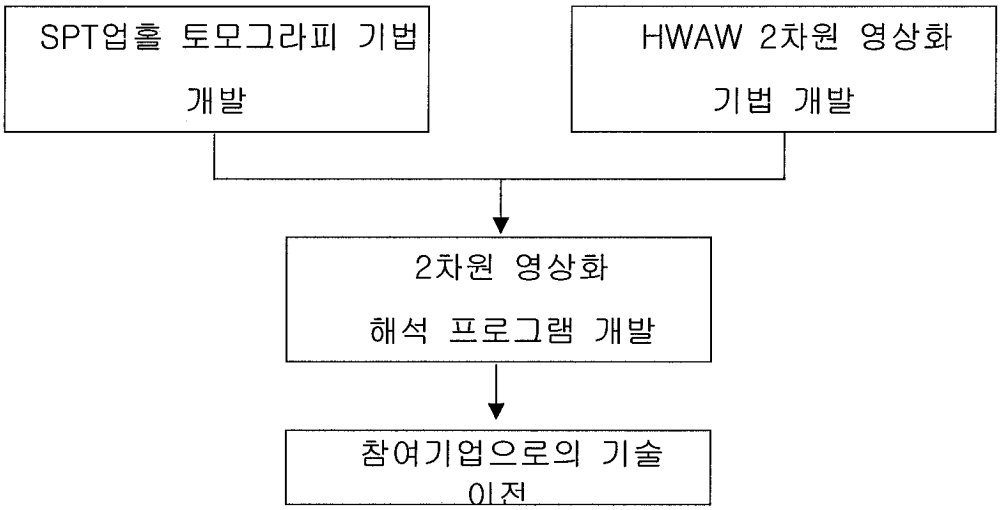
(2) HWAW 2차원 영상화 기법 구축

- HWAW 현장 장비의 구축
- HWAW 해석 프로그램의 확립
- HWAW 역산 프로그램의 도입 및 개선

(3) SPT업홀 및 HWAW기법 해석 프로그램의 개발

- SPT업홀 및 HWAW기법을 결합하여 현장 실험 수행, 실험 결과 분석, 2차원 영상화까지 일련의 과정을 수행하는 프로그램 개발

(4) 참여기업으로의 기술이전



1차년도에는 이런 최종 목표를 이루기 위한 첫 번째 단계로 수치해석을 통한 시험법 영향요소 고찰, 초기 시험 시스템 및 기존 해석 프로그램의 도입을 통해 예비 현장 시험을 수행하기 위한 1단계 시험 시스템을 구축하는 것을 목표로 하였다.

2차년도에는 이런 최종 목표를 이루기 위한 두 번째 단계로 "시험 시스템의 개선 및 모형 부지를 통한 검증"이란 당해연도 연구목표를 바탕으로 연구를 수행하였다. 1차년도의 예비시험 결과를 바탕으로 현장 실험 장비 및 해석 프로그램을 개선하고 개선된 시험 시스템을 이용하여 실대형으로 조성한 모형 부지에서 현장 검증 시험을 실시하였다. 이를 바탕으로 추가적인 시험 시스템을 개선하고 추가 현장 검증 시험을 수행하는 것을 목표로 하였다.

마지막 3차년도에는 1,2차년도의 연구결과를 바탕으로 현장실험을 위한 상용화 시험 시스템 개발, 데이터 획득 시스템 확립, 해석 프로그램의 개발, 현장 매뉴얼 작성을 수행하고, 실제 현장에서 검증 시험을 수행하였다. 최종적으로 참여업체로의 기술이전을 통하여 실용화 단계를 완성하였다.

2. 연구의 필요성

가. 연구개발개요

지반 물성 중 미소변형율 영역($\gamma<10^{-3}\%$)에서의 전단탄성계수는 지진시 설계지반 운동 결정을 위한 부지 응답해석, 구조물의 내진해석, 진동문제 등 지반의 동적 문제의 주요 입력 변수로 사용될 뿐만 아니라, 최근에는 굴착시 변형해석, 기초의 침하 등 정적 변형문제에 있어서도 주요한 지반정수로 인식되고 있다(그림 1.1.1). 이

중 최대 전단 탄성계수는 다운홀, 크로스홀과 같은 공내 탄성파 탐사나 SASW(Nazarian and Stokoe, 1984), MASW 기법(Park et al, 1999) 같은 표면파 기법 등을 수행하여 얻어지는 지반의 전단파 속도 주상도를 통하여 결정할 수 있다.

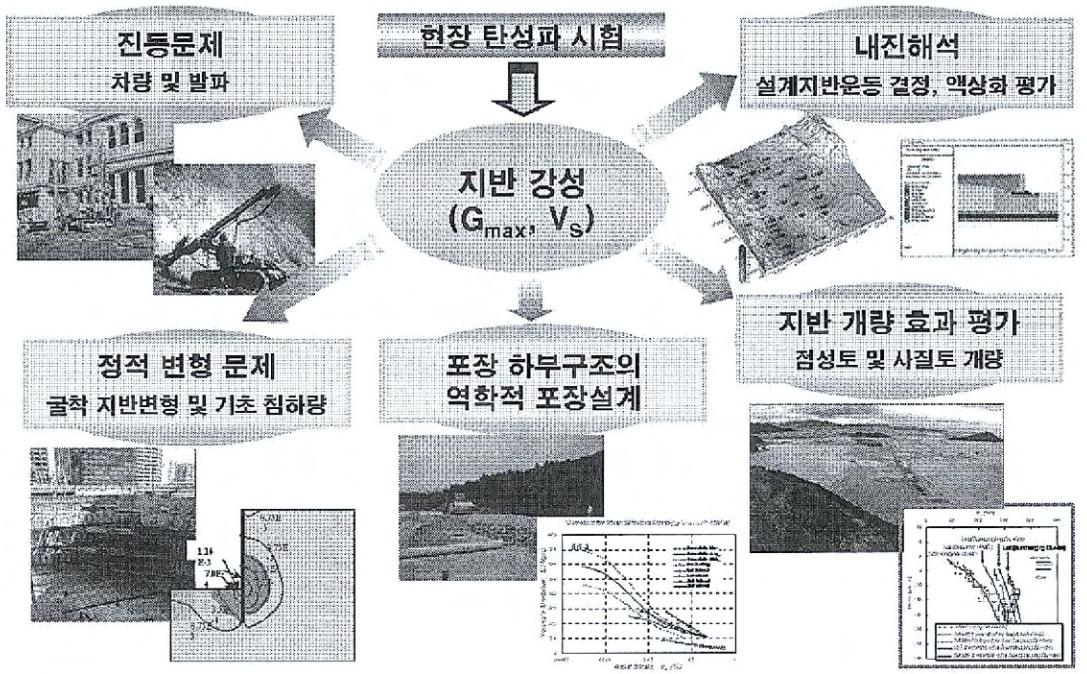


그림 1.1.1 지반공학분야에서의 전단파 속도 활용사례

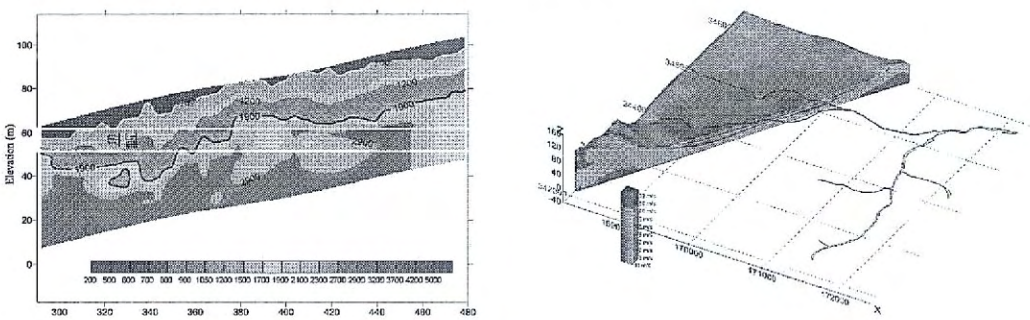
우리나라는 지반의 조성 상황이 유사한 지역에서도 국부적으로 특성이 상이한 경우가 많다. 이런 지반에 구조물이 시공될 때 지층 형상과 더불어 지반 물성을 2차원적으로 정확히 영상화하는 것이 중요하다. 일반적으로 현업에서는 지층의 구조를 파악하기 위하여 특정 지점에 대해서 시추를 실시하고 중간지점은 내삽법을 이용하여 추정하는 방법이 이용되고 있다. 본 연구의 대상인 전단 탄성계수는 극히 일부지점에서 현장 탄성파 탐사를 수행하여 얻어지는 1차원적인 전단파 속도 주상도 값을 바탕으로 실험이 수행되지 않은 많은 지역에 지층 구조를 고려하여 층상별로 동일하게 적용하는 실정이다. 이런 방식은 시추 지점 사이에 국부적 특성의 변화를 제대로 파악하기 힘들며 지반 물성 파악의 불확실성에 의해서 토목구조물의 설계 및 시공시 과다 설계 혹은 부실 설계로 이어지게 된다. 이를 막기 위해 신뢰성 있는 2차원적 정보를 획득하려 한다면 다량의 시추 및 탄성파 탐사를 수행해야 하므

로 매우 비효율적이다. 따라서 경제적이며 신뢰성 있게 지반 강성을 2차원 혹은 3차원으로 영상화하는 작업은 매우 중요하다.

본 연구팀은 지난 십여 년 간 공내 탄성파 탐사 및 표면파 탐사 수행에 대한 경험을 바탕으로 2차원 영상화에 유리한 기법을 개발하고자 노력하였다. 기존의 탄성파 탐사 기법 중 공내 탄성파 탐사는 시추 후 시험공 설치라는 기술적·경제적 어려움 및 가탐 심도의 제한성 등의 문제가 있었고 표면파 탐사는 시험시간이 오래 걸리고, 넓은 지역의 평균적 물성치를 제공하며, 해석에 전문성이 요구되어 상용화가 어려운 문제가 있었다. 본 연구팀에서는 이들 문제를 해결하고자 SPT 가진원을 이용한 업홀 기법(이하 SPT업홀)과 Harmonic Wavelet Analysis of Waves(이하 HWAW)기법을 이용한 분산곡선 결정방법을 개발하였다. 이들 기법을 국내외 학술지 및 학술회의에 여러 편의 논문으로 발표하여 결과의 우수성에 대해 검증받은 상태이다.

본 연구팀에서 2차원 영상화를 구현하는데 적용하려고 하는 SPT 업홀 기법은 대부분 지반조사에서 사용되는 표준관입시험시 발생하는 지중의 충격가진원을 사용하므로 별도의 비용 없이 시추와 동시에 시험을 수행할 수 있으며 가진원의 에너지가 커서 가탐심도가 깊고 지표면 감지기의 수에 따라 효율적 2차원 영상화가 가능하다(방은석,등, 2006). 또한 HWAW기법은 시험 수행 시간이 적게 걸리고 분산곡선 도출까지의 과정이 자동화 되어 상용화가 유리하며 좁은 지표면 감지기 간격으로 깊은 깊이의 결과를 도출하는 특징을 갖고 있어 2차원 영상화를 구현하는데 타 표면파 시험보다 유리하다(박형춘과 김동수, 2004a,b).

본 연구팀은 이러한 연구 성과를 바탕으로 SPT업홀기법과 HWAW기법을 이용한 2차원 지반강성 영상화 기법에 대한 실용화 연구를 수행하였다.



a) 2차원 영상화 (암반 물성)　　b) 3차원 영상화 (지층구조)

그림 1.1.2. 영상화의 일례

나. 연구개발의 중요성

(1) 기술적 측면

세계적으로 탄성파 탐사에 대한 연구는 장비 개발, 신호처리 및 영상화 기법 분야에 초점이 맞추어져 활발하게 수행되고 있다. 탄성파 탐사로부터 획득하고자 하는 전단파 속도는 지반의 동적해석은 물론 정적해석에서 사용되는 매우 중요한 지반정수이며 이러한 전단파 속도를 단순히 1차원으로 결정하는 것보다는 지반의 국부적 특성을 고려하여 2차원으로 영상화하는 것은 매우 중요하다.

본 연구팀에서 개발한 SPT업홀기법은 기존의 업홀시험에서 가장 큰 문제였던 지중 가진원을 대부분의 지반조사에서 동반되어 수행하는 표준관입시험(SPT)의 지중 진동 에너지를 이용함으로써 매우 간단하며 경제적이다. 또한 설치가 용이한 다수의 지표면 감지기를 이용하고 굴절 경로 가정을 통한 실질적 탄성파 전파 경로를 고려하여, 신뢰성이 매우 높은 2차원적인 지반물성치 도출이 용이하다. 현재까지 개발된 기법을 바탕으로, 사용성이 편리한 지표면 감지기의 보완·개발을 통해 현장실험을 용이하게 하며 신호처리시 2차원 굴절경로 토모그라피 기법을 적용하게 되면 경제적이고 신뢰성 있는 2차원 전단파 속도 주상도를 도출할 수 있게 된다. 또한 일반적인 공내 탄성파 탐사시 요구되는 시험공이 필요치 않아 시험공 설치에 따른 추가적인 비용 및 설치의 기술적 어려움에서 해방될 수 있다. 이 기술이 성공하여 상용화 되면 지반조사시 별도의 추가적인 탄성파 시험을 수행하지 않고 표준관입시험과 동시에 시추 지점 근방에 대한 2차원 속도 주상도를 도출할 수 있게 된다.

본 과제 수행을 위해 적용할 또 다른 기법인 HWAW기법은 기존 표면파 탐사의 문제점을 신호처리 관점에서 연구, 개선에 성공하여 신뢰성 있는 분산곡선을 도출하는 기법이다. 기존 현업에서 많이 활용되는 표면파 시험인 SASW 및 MASW기법은 HWAW기법에 비해 상대적으로 시험 수행 시간이 오래 걸리며 국부적 지반특성이 아닌 대상지반의 평균적인 물성을 도출한다. 시간-주파수 해석에 근거한 HWAW기업을 이용할 경우, 다른 표면파 탐사에 비해 실험 수행 및 해석이 용이하며 국부적 특성을 잘 나타내어 신뢰성 있는 2차원 영상화 결과도출이 수월하게 된다. 또한 본 과제에서 개발 예정인 가진원은 다른 표면파 탐사에도 적극 활용될 수 있으며 HWAW 기법에서 적용된 웨이블릿 시간-주파수 신호 처리는 건설 및 기계 분야에서의 비파괴 시험 등의 연구에 추가적으로 적용될 수 있을 것이다. 또한 본

연구에서 얻을 혁신적 신기술 개발의 성공은 다른 탄성파 시험 기법의 발전에 촉매 역할을 할 것이다.

(2) 경제·산업적 측면

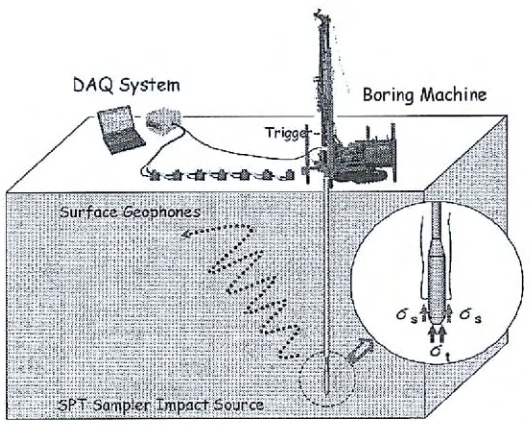
현재 국가에서 발주하는 사회 간접 시설의 건설은 턴키 제도의 도입으로 지반 조사에서부터 설계·시공까지 무한 경쟁 체제로 나서고 있으며, 이로 인해 각 업체별로 서로 경쟁적 우위를 점하기 위해 다양한 지반조사 기법을 적용할 뿐만 아니라 아직 검증되지 않은 신기술을 앞 다투어 적용하고 있다. 특히, 토사지반의 2차원 영상화의 경우에는 검증되지 않거나 경제적이지 못한 기법들을 사용하고 있는 실정이다. SPT 업홀 토모그라피 기법 및 HWAW기법을 이용하여 지반 강성을 영상화 하려는 본 과제가 성공적으로 수행되면 시추 등의 기본적 지반 조사 비용만으로 건설 현장에서 효율적이고 신뢰성 있는 2차원 전단파 주상도를 도출할 수 있다. 이를 바탕으로 지반조사 비용을 줄일 수 있으며 보다 정확한 2차원적 지반 정수 도출로 인하여 지하 및 상부 구조물 설계시 보다 경제적이며 안정적인 공사를 수행할 수 있다. 또한, 불필요한 지반조사 물량을 줄여줌으로써 전체적인 지반 조사 비용을 절감할 수 있으며 궁극적으로 사회 간접 시설의 안정적 설계 및 시공은 우리나라 산업 전반에 기여하는 바가 매우 크다고 판단된다.

다. 지금까지의 연구개발 실적 (과제 시작 시점 2004년)

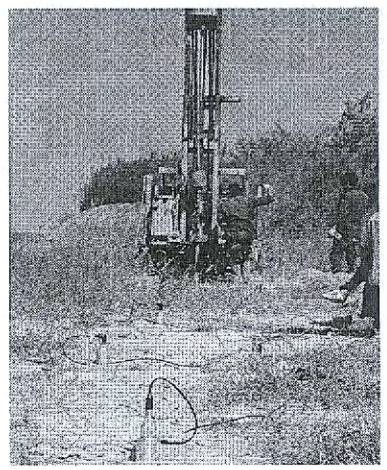
본 연구팀에서는 이들 문제를 해결하고자 연구지원기관의 지원에 힘입어 SPT 가진원을 이용한 업홀 기법(이하 SPT업홀)과 Harmonic Wavelet Analysis of Waves(이하 HWAW)기법을 개발하였다. 이들 기법을 국내외 학술지 및 학술회의에 여러 편의 논문으로 발표하여 결과의 우수성에 대해 검증받은 상태이다.

다운홀, 크로스홀, 업홀 등의 공내 탄성파 탐사는 지반의 전단파 속도 주상도 도출 과정이 명료하여 높은 신뢰도를 가지는 결과가 요구될 때 사용되는 현장 탄성파 탐사이다. 하지만 공내 탄성파 탐사 등을 수행하기 위해서는 시험공의 설치가 필수적이고 공벽과 지반사이의 그라우팅 성공여부가 시험결과에 매우 중요한 영향을 미친다. 또한 일반적인 업홀 시험은 시추공내 소량의 화약을 이용한 발파 진동을 사용하는데 발파 진동을 가진원으로 사용하였을 시에는 P파성분이 주로 생성되며 1회 폭파후 시추공 함몰로 인하여 반복 시험이 불가능하게 된다.

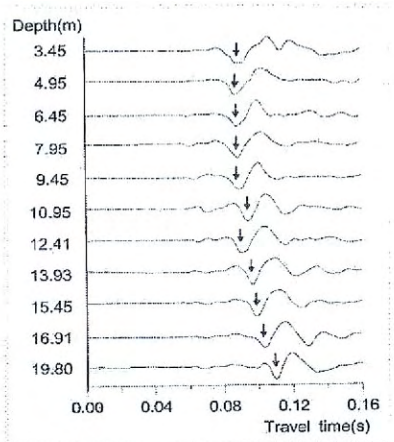
SPT업홀시험은 다운홀, 크로스홀 시험시 요구되는 시험공 설치가 필요 없으며 일반적인 업홀 시험에서 문제시되는 가진원 문제를 표준관입시험시 타격에너지를 이용함으로써 간단히 해결하였다. 일반적으로 표준관입시험은 시추와 동시에 필수적으로 수행되는 시험이고 별도의 시험공 제작이 요구되지 않으므로 본 SPT업홀은 별도의 비용과 기술적 어려움 없이 시험을 수행할 수 있다. 또한 표준관입시험시 발생하는 진동원은 전단파(SV) 성분이 풍부하여 지반의 전단파 속도 주상도를 도출하는데 용이하다. 본 연구팀에서 개발한 업홀시험의 개략도, 사진 및 시험을 통해 획득한 결과는 그림 1.1.3과 같다.

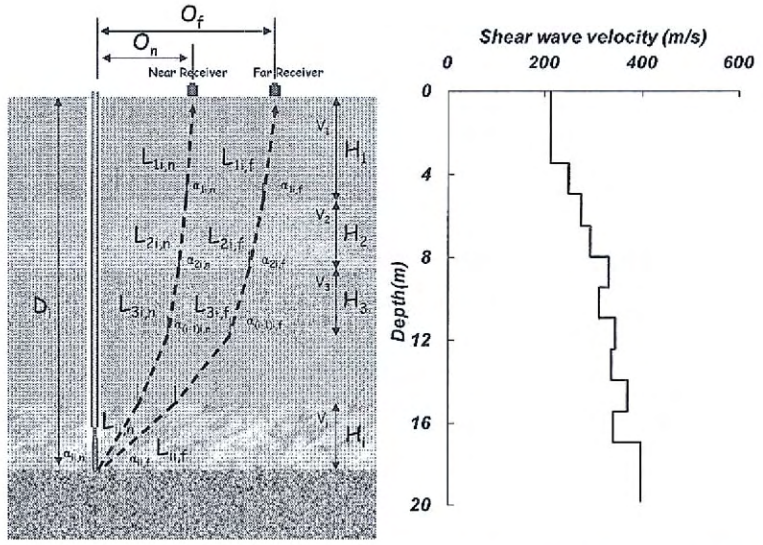


a) SPT업홀 시험 모식도



b) SPT업홀 시험 광경 사진

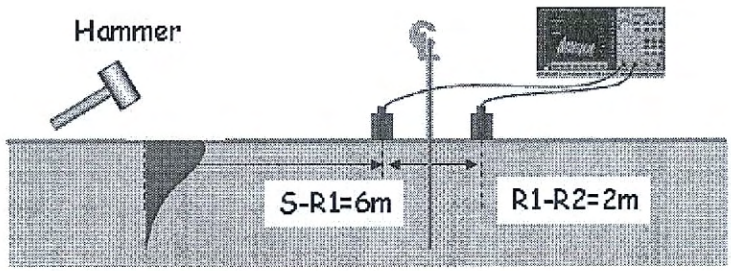




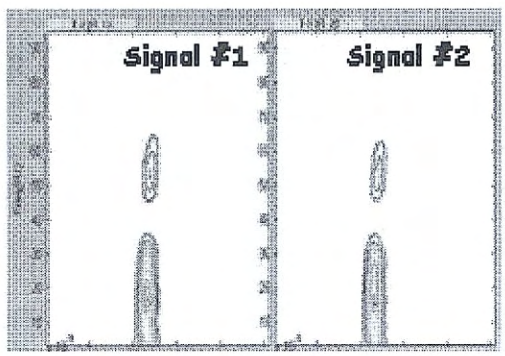
c) SPT업홀 시험 결과 (깊이별 획득 파형, 굴절경로가정, 전단파 속도 주상도)

그림 1.1.3. SPT 업홀 시험

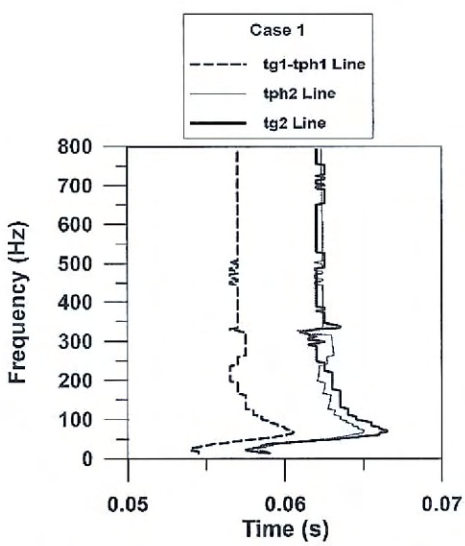
표면파 탐사는 시추를 수행하지 않고 지표면 가진원과 감지기를 통해 지반의 물성치를 도출하는 시험이다. 기존의 기법은 시험 수행시간이 오래 걸리고 결과 분석에 있어서도 전문가의 판단이 요구되어 널리 활용되지 못하는 실정이다. 또한 실험 성격상 넓은 지역에 대한 평균적인 깊이별 전단파 속도값을 도출하게 되어 있어 국부적 특성을 정확히 도출 하는데는 문제가 있다. 본 연구팀은 기존 표면파 이용 지반조사기법의 문제점을 보완하고자 지속적인 연구를 수행한 결과 HWAW(Harmonic Wavelet Analysis of Wave) 기법을 개발하게 되었다. 새로운 위상·그룹속도 결정법인 HWAW기법은 하모닉 웨이브릿 변환을 이용하는 시간-주파수 해석기법으로 기존의 방법들에 비하여 배경잡음의 영향을 최소화 할 수 있으며, 단일한 실험구성에서 신속한 실험을 통하여 근접장 영역을 포함한 전체 주파수 대역(전체 대상깊이)에서 신뢰성 있는 파의 위상속도(분산곡선)을 결정할 수 있으며 이를 통하여 대상지반의 국부적이고 세밀한 전단파 속도 주상도의 결정이 가능하다. 본 연구팀에서 개발한 HWAW 기법의 개요도 및 전단파 속도 주상도를 도출하기 위해 각 단계에서 얻어지는 결과를 그림 1.1.4에 나타내었다.



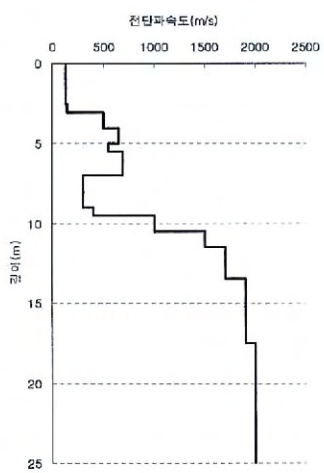
(a) HWAW 시험 개요도



(b) 시간-주파수 에너지 분포



(c) 주파수별 도달 시간의 결정



(d) 전단파 속도 주상도

그림 1.1.4. HWAW 기법

제2절 연구개발의 범위

1. 연차별 연구 목표 및 내용

가. 총괄

연 차	연구 목표	주요 내용 및 범위
1차 연도 (2004.8.20~ 2005.8.19)	시험 시스템의 구축 및 예비 현장 실험 수행	- 문헌조사 - 수치해석을 통한 고찰 - 현장 실험 장비 시작품 개발 - 데이터 획득 시스템 구축 - 해석 프로그램의 도입 및 개발 - 예비 현장 실험의 수행 - 실대형 모형 시험 부지 조성
2차 연도 (2005.8.20~ 2006.8.19)	시험 시스템의 개선 및 모형 부지를 통한 검증	- 현장 실험 장비의 개선 - 해석 프로그램의 개선 - 모형 부지를 통한 현장 검증 - 2차 시스템 구축 및 추가 현장 검증
3차 연도 (2006.8.20~ 2007.8.19)	현장 검증을 통한 최종 상용화 시스템 확립	- 현장실험 상용화 장비 개발 - 데이터 획득 시스템 확립 - 해석 프로그램의 개발 - 현장 매뉴얼 작성 - 실제 현장에서의 검증 - 현장 검증 후 필요시 보완 - 업체로의 기술 이전

나. 1차년도

- 연구목표

시험 시스템의 구축 및 예비 현장 실험 수행

- 연구내용 및 범위

문헌조사 및 수치 해석을 통해 시험법 영향요소에 대해 고찰하고 현장 실험 장비, 데이터 획득 시스템 및 해석 프로그램 등 요소기술을 구축 및 도입하여 예비 현장 실험을 수행하고 그 결과를 분석하여 차년도 연구 방향을 정립한다.

1) 2차원 영상화 관련 문헌 조사

- 토모그라피, 내삽 및 외삽 기법, GIS tool등의 영상화 관련 이론적 학습
- 국내외의 2차원 영상화를 위한 장비개발 기술 습득

2) 수치해석을 통한 시험법 영향요소 고찰

- 탄성파 전파 모델의 최적 구성
- 대표적 지반 형상 모델에 대한 분석
- 시험법 영향요소 고찰을 통해 최적 감지기배열의 정립 및 해석 기법의 개선

3) 현장 실험 장비의 개선

- 문헌조사를 바탕으로 가진원 및 감지기를 개선하여 제작

4) 데이터 획득 시스템 구축

- 노트북을 활용한 데이터 획득 시스템 구축

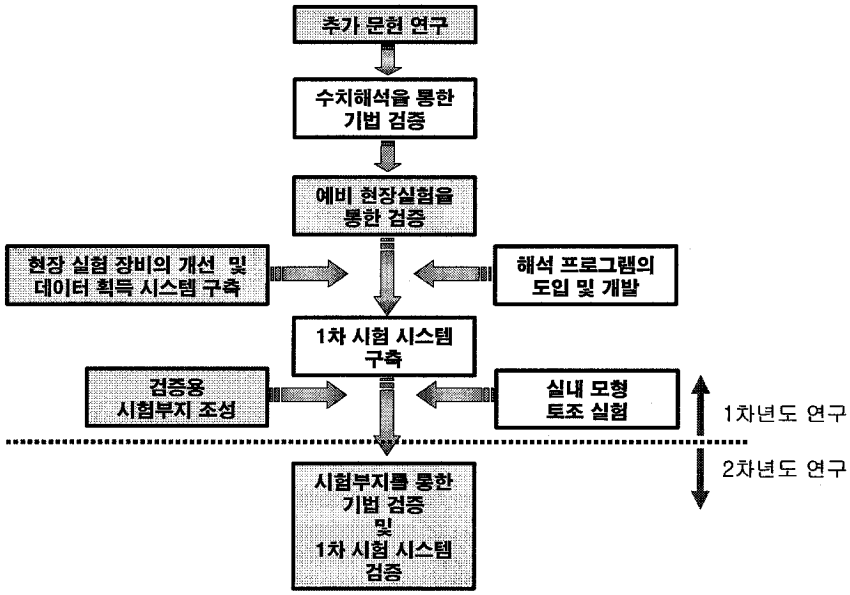
5) 해석 프로그램 도입 및 개선

- 토모그라피 프로그램 도입
- HWAW기법 자동 분산곡선 도출 프로그램 도입
- 역산 프로그램 도입

6) 예비 현장 실험 수행

- 구축된 시험 시스템을 바탕으로 예비 실험을 수행

7) 검증용 시험부지 조성



- 개발기술평가의 착안점

연도	세부연구목표	가중치	평가의 착안점 및 척도
1차 연도 (2004.8.20 ~ 2005.8.19)	ㅇ문헌조사	10%	ㅇ연구를 수행하기 위한 문헌조사는 양과 질면에서 충분하였는가?
	ㅇ수치해석을 통한 고찰	10%	ㅇ수치 해석시 실제 지반의 거동을 잘 모사하였는가? ㅇ수치 해석을 통해 획득한 성과물이 전체 과제의 방향 제시에 도움을 주었는가?
	ㅇ현장 실험 장비 시작품 개발	10%	ㅇ현장 실험 장비 시작품 개발은 과제를 수행하는데 문제가 없을 정도로 성공적인가?
	ㅇ데이터 획득 시스템 구축	10%	ㅇ데이터 획득 시스템은 예비 현장 실험을 무리 없이 수행할 수 있게 적절히 구성되었는가?
	ㅇ해석 프로그램의 도입 및 개발	10%	ㅇ획득된 데이터를 무리없이 해석할 수 있게 적절히 해석프로그램을 구성하였는가?

	ㅇ예비 현장 실험의 수행	20%	ㅇ적절한 예비 현장 실험을 통해 향후 과제 수행에 대한 비젼을 획득하였는가?
	ㅇ검증용 시험부지 조성	20%	ㅇ검증에 용이하게 조성하였는가?
	ㅇ연차 보고서 작성	10%	ㅇ1차년도의 결과를 상세하게 잘 정리하였는가? ㅇ차년도 방향제시를 올바르게 하였는가?

다. 2차년도

- 연구목표

시험 시스템의 개선 및 모형 부지를 통한 검증

- 연구내용 및 범위

1차년도의 예비시험 결과를 바탕으로 현장 실험 장비 및 해석 프로그램을 개선한다. 개선된 시스템을 바탕으로 실외에 실대형으로 조성한 모형 부지에서 현장 검증 시험을 실시한다.

(1) 현장 실험 장비의 개선

- 지표면 가진원, 지표면 감지기의 개선
- 다채널 데이터획득 시스템 구축

2) 해석 프로그램의 개선

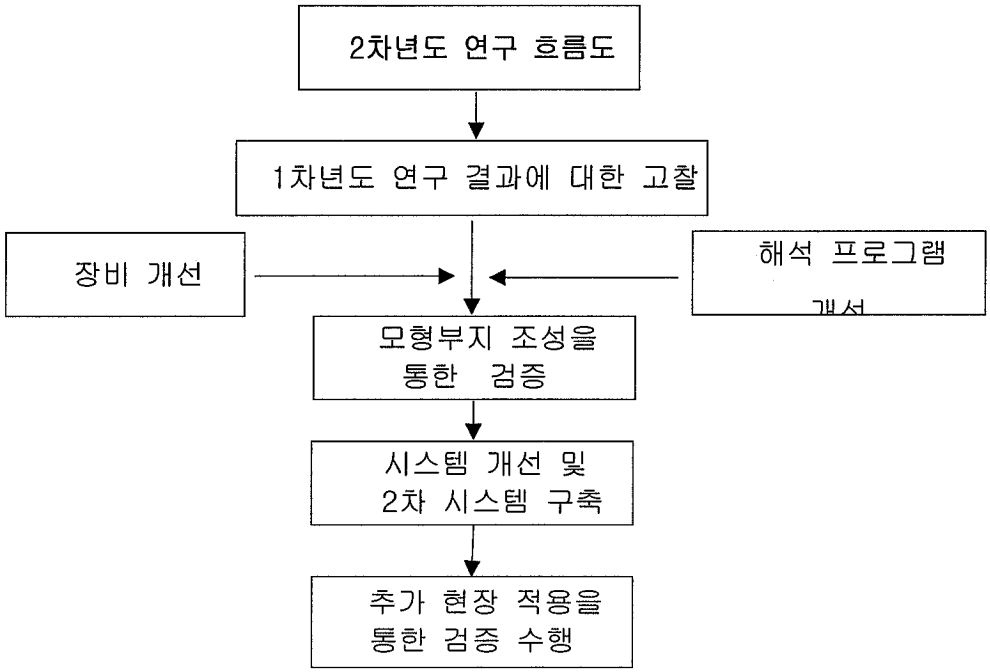
- 데이터 획득 및 결과 도출의 자동화

3) 모형부지 조성을 통한 현장 검증

- 기지의 층상구조 및 물성치를 바탕으로 시스템 검증

4) 추가 현장 검증

- 현장을 섭외하여 기법의 추가 검증



- 개발기술평가의 착안점

연도	세부연구목표	가중치	평가의 착안점 및 척도
2차년도 (2005.8.20 ~ 2006.8.19)	○현장 실험 장비의 개선	20%	○상용화 제품 제작을 위한 토대를 마련하였는가?
	○해석 프로그램의 개선	15%	○해석 프로그램을 개발할 수 있는 토대를 마련하였는가?
	○모형 부지 조성을 통한 현장 검증	40%	○모형 부지를 이용한 검증 작업이 효율적으로 잘 이루어졌는가?
	○추가 현장 검증	15%	○다양한 지반조건에 대한 검증작업이 효율적으로 이루어졌는가?
	○연차 보고서 작성	10%	○2차년도의 결과를 상세하게 잘 정리하였는가? ○차년도 방향제시를 올바르게 하였는가?

라. 3차년도

- 연구목표

현장 검증을 통한 최종 상용화 시스템 확립

- 연구내용 및 범위

1,2차년도의 연구 결과를 바탕으로 현장 실험 장비 상용화 제품 개발, 데이터 획득 시스템 확립, 해석 프로그램의 개발, 현장 매뉴얼 작성을 수행하고 실제 현장에서 검증을 실시한다. 참여업체로의 기술 이전을 통해 실용화 단계를 완성한다.

1) 실험 장비의 상용화

- SPT업홀 및 HWAW기법의 현장 시스템에 적합한 지표면 가진원 및 지표면 감지기의 완성

2) 데이터 획득 시스템 확립

- 상용화를 위한 적합한 DAQ장비의 설정

3) 해석 프로그램의 개발

- 현장 시스템을 위한 프로그램을 개발

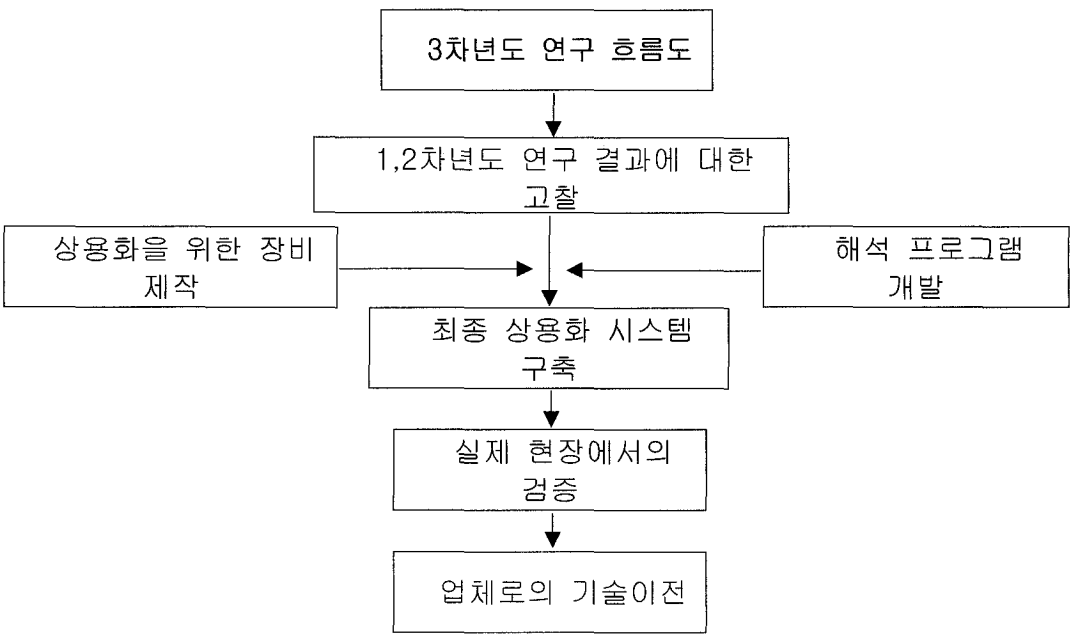
4) 현장 매뉴얼 작성

- 현장 시험 시스템 규준 작성
- 실행 프로그램 매뉴얼 작성

5) 현장 검증 작업의 수행

- 확립된 최종 상용화 시스템의 검증

6) 검증 후 필요시 보완



- 개발기술평가의 착안점

연도	세부연구목표	가중치	평가의 착안점 및 척도
3차년도 (2006.8.20 ~ 2007.8.19)	○현장 실험 장비 상용화 제품 개발	20%	○현장 실험 장비가 올바르게 개발되었는가?
	○데이터 획득 시스템 확립	20%	○데이터 획득 및 처리에 있어서 신뢰성있게 시스템을 구축하였는가?
	○해석 프로그램의 개발	20%	○사용자 편의에 중점을 두었는가? ○프로그램은 올바르게 구동되는가?
	○현장 매뉴얼 작성	10%	○초보자가 쉽게 접근할 수 있도록 잘 작성되었는가?
	○실제 현장에서의 검증	10%	○현장실험을 통해 검증작업이 잘 수행되었는가? ○개발된 장비 및 해석프로그램을 바탕으로 현장 실험을 수행하는데 문제가 없는가?
	○현장 검증 후 필요시 보완	10%	○기술 이전을 원할히 할 수 있도록 적절하게 보완 하였는가?
	○업체로의 기술 이전	10%	○기술이전으로 인해 실질적으로 참여업체에서 기술을 사용하고 있는가?

2. 위탁사업의 연구개발 목표 및 내용

3차년도에는 본 과제의 과업 중 "SPT업홀 토모그래피 기법을 위한 자동화 프로그램 제작" 부분을 한국지질자원연구원에 위탁하여 수행하였다

- 연구개발의 최종목표

본 연구의 최종 목표는 SPT 업홀 기법을 통하여 지반 강성의 2차원 영상화를 하기 위한 자동화 통합 프로그램의 제작이다. 통합 프로그램에는 신호 획득 및 관리 프로그램, 초동 산출 프로그램, 토모그래피 프로그램을 포함한다. 개발된 프로그램을 주관 연구기관에서 개발한 현장 실험 장비와 결합하여 상용화 연구를 완성하고자 한다.

- 연구목표 및 내용.

연 차	연구 목표	주요 내용 및 범위
1차 연도 (2006-2007)	SPT 업홀 기법을 통해 지반 강성을 2차원 영상화하기 위한 자동화 통합 프로그램 제작.	-신호 획득 및 관리 프로그램 제작 -초동 산출 프로그램 제작 -토모그래피 프로그램 제작 -통합 상용화 프로그램 제작 -현장 실험 장비와 결합하여 상용화 완성

- 개발기술평가의 착안점

연도	세부연구목표	가중치	평가의 착안점 및 척도
1차년도 (2006-2007)	신호 획득 및 관리 프로그램 제작	20%	- 신호 획득 장비와 연계성 - 획득 신호의 효율적 관리 가능 여부
	초동 산출 프로그램 제작	30%	- 자동적 초동 정보 산출 여부 - 산출된 초동 정보의 신뢰성 여부
	토모그래피 프로그램 제작	30%	- 사용자 편의의 프로그램 구동 여부 - 도출된 결과의 정확성 여부 - 결과의 효율적 도시 가능 여부
	통합 상용화 프로그램 제작	20%	- 각 세부 프로그램의 효율적 연계 여부 - 사용자 편의의 프로그램 구동 여부

3. 연구개발 추진전략 및 방법

가. 연구개발 추진전략

(1) 연구개발 추진체계

구 분	주관연구기관 한국과학기술원	위탁연구기관 한국지질자원연구원	참여기업 (주)희송지오텍
1차년도 (2004.8.20 - 2005.8.19)	◦ 관련 문헌조사 및 수치해석을 통한 시험법 고찰 ◦ 장비 및 프로그램 개발을 통한 시험 시스템 구축 ◦ 예비 현장 시험을 통한 시험 시스템 검증		◦ 관련 문헌조사 및 기존기술력 제공 ◦ 현업에서 사용중인 장비 및 프로그램에 대한 정보 제공 ◦ 현장 지원 (현장 제공 및 시추)
2차년도 (2005.8.20 - 2006.8.19)	◦ 시험 시스템에 대한 개선 및 해석 프로그램의 개선 ◦ 실대형 모형부지를 이용한 현장검증 ◦ 추가 현장 부지를 이용한 현장 검증		◦ 현장 지원 (시추 및 시험 수행) ◦ 현장 지원 (현장 제공 및 시추)
3차년도 (2006.8.20 - 2007.8.19)	◦ 현장 시험 시스템 구축 및 현장 메뉴얼 작성 ◦ 실제 현장에서의 검증,참여기업으로의 기술이전	◦ 한국지질자원연구원에서 자체적으로 자동화 프로그램을 제작 ◦ 한국과학기술원에 제공	◦ 매뉴얼의 사용자 편의 중점 여부에 대한 검토 ◦ 현장 지원 (현장 제공 및 시추) ◦ 현업에의 적용

(2) 1차년도 세부 추진계획 및 방법

일련번호	연구개발내용	세부추진 계획 및 방법	수행기간
1	■2차원 영상화 관련 문헌조사 -토모그라피 기법 -내삽 및 외삽 기법	- 2차원 영상화를 구현하는데 필요한 각종 기법들에 대한 문헌조사를 수행 - 서적 및 국내외저널, 전문가의 조언 등을 바탕으로 조사 수행 및 정리	2004. 9 - 2004. 10
2	■수치해석을 통한 시험법 영향요소 고찰 -파 전파 모델 정립 -대표적 지반 구성 -최적감지기배열 정립 -기존해석기법의 개선	- 대표적 지반 수치해석 프로그램인 아바쿠스(ABAQUS)를 활용 - 모델 지반 내 가진 및 신호 획득을 시도 - 파 전파 형상을 최대한 모사하는 최적 요소 모델을 구성 - 대표적 지반 형상에 대해 수치 해석을 수행하여 각 노드에서의 파형을 획득 분석 - 적절한 감지기 배열에 대한 고찰 및 기존 해석 기법에 대한 문제점을 개선	2004. 11 - 2005. 4
3	■현장 실험 장비의 개선 -가진원 개선 -감지기 개선	- HWAW기법을 수행하는데 있어 가장 중요한 지표면 가진원을 개발 - 여러 가진원의 주파수 특성을 비교하며 사용성을 고려하여 현장 실험에 용이하도록 개발 - 정확한 지반 거동을 모사하는데 중요한 지반-감지기 커플링 장치를 기획 제작	2004. 11 - 2005. 6
4	■데이터 획득 시스템 구축 -DAQ 장비 구축 -노트북 활용 시스템	- 미국 Nicolet의 Liberty 기기를 활용 - 노트북을 이용한 신호를 획득하는 시스템구축 - 신호 획득 및 저장 처리에 있어서의 관리를 수월하게 하는 프로그램 개발 및 개선	2005. 3 - 2005. 5

5	■해석 프로그램의 도입 및 개발 -신속한 결과 도출의 필요성 -데이터 획득과 해석의 연계성 확보	- SPT업홀 해석을 위해 개발한 프로그램을 토모그라피 해석에 적용 - HWAW 자동 분산곡선 도출 프로그램을 개선 - 분산곡선을 전단파 속도로 전환하는 역산 프로그램을 도입 혹은 개선 - 데이터 획득에서부터 해석에 이르기까지 연속성 및 연계성 확보	2005. 3 - 2005. 7
6	■ 예비 현장 실험 수행 -1차년도 연구 결과를 활용한 예비 실험 -향후 연구 방향 수정	- 참여 기업인 (주)희송 지오텍으로부터 현장 시험 부지 제공 및 시추기 지원 - 업홀 토모그라피 및 HWAW 2차원 영상화 시도 - 예비 현장 시험을 통해 향후 연구 방향 고찰	2005. 5 - 2005. 7
7	■현장시험부지 조성	- 실대형 모형부지 조성, 2차년도 초과달성 · 검증이 용이한 적절한 층상구조를 결정하고 이상적인 상태로 부지를 조성 · 지반내 검증용 속도계 삽입	2005. 5 - 2005. 6
8	■연차보고서 작성 -1차년도 연구결과정리 -향후 연구계획정리	- 1차년도 연구 결과를 정리하여 보고서를 작성 - 차년도 연구 계획을 수립	2005. 7 - 2005. 8

(3) 2차년도 세부 추진계획 및 방법

일련번호	연구개발내용	세부추진 계획 및 방법	수행기간
1	■모형부지 조성을 통한 현장 검증 -모형부지 조성 -현장 검증	- 연구된 SPT업홀 및 HWAW를 수행하여 2차원 영상화를 시도 - 시추를 통해 다시 한번 층상구조를 확인하고 공내 탄성파 시험인 다운홀과 표면파 시험인 SASW, MASW 등을 수행, 결과값을 비교	2005.9 - 2006. 2
2	■현장 실험 장비의 개선 -지표면 가진원 -종연결 감지기	- 1차년도 연구 결과를 바탕으로 현장 실험 장비인 지표면 가진원과 종연결 감지기 개선작업을 수행 - 다채널 신호획득 시스템 구축 - 각 시험별 감지기, 가진원 설정	2005.9 - 2006. 3
3	■해석 프로그램의 개선 -데이터 획득 및 결과 도출의 자동화	- 2차원 영상화에 필요한 해석 프로그램을 개선 - 데이터 획득에서부터 결과 도출에까지 일련의 과정을 연속적으로 자동화하는 노력을 수행 - SPT업홀 시험시 초동 자동 판단 과정을 도입 - HWAW기법에 있어서 가진과 동시에 분석 가능 여부 및 분산곡선의 도출 가능하도록 개선	2005.10 - 2006. 6
4	■2차 시스템 구축 및 추가 현장 검증	- 모형부지의 결과 및 2차 시험시스템 구축을 통해 추가 현장 부지에서 기법의 검증 - 다양한 현장지반에서 시험을 수행하여 적용성 평가	2005.12 - 2006. 8
5	■연차보고서 작성 -1차년도 연구 결과의 정리 -향후 연구 계획의 정리	- 2차년도 연구 결과를 정리하여 보고서를 작성 - 차년도 연구 계획을 수립	2006.7 - 2006. 8

(4) 3차년도 세부 추진계획 및 방법

일련번호	연구개발내용	세부추진 계획 및 방법	수행기간
1	■실험 장비의 상용화 -지표면 가진원 확립 -종연결 감지기 확립	- 1,2차년도 연구 결과를 바탕으로 현장 실험 장비인 지표면 가진원과 종연결 감지기 개선 - 상용화 작업을 수행	2006. 9 - 2006. 12
2	■데이터 획득 시스템 확립 -신호 획득 기기 -상용화 제품 도입	- 확립된 시험 시스템의 상용화를 위한 DAQ 장비 설정 및 도입	2006. 9 - 2006. 12
3	■해석 프로그램의 개발 -결과 획득 및 해석의 연계성 및 사용자 편의성에 중점	- 상용화된 장비로부터 획득된 자료를 바탕으로 2차원 영상화를 사용자 편의에 근거하여 자동으로 도출해주는 프로그램 개발	2006. 9 - 2007. 5
4	■현장 매뉴얼 작성 -현장 시험법 규준 작성 -해석 프로그램 메뉴얼 작성	- 연구결과를 바탕으로 현장 시험법 규준 작성 - 결과 획득에서부터 해석, 영상화 도출에서까지의 장비 및 프로그램 매뉴얼 작성	2007. 3 - 2007. 5
5	■현장 검증 작업의 수행 -개발된 장비의 검증 -개발된 프로그램의 검증 -검증 후 보완	- (주)희송지오택의 현장 부지 및 시추기 지원 - 개발된 장비 및 프로그램을 이용 2차원 영상화 구현 - 다수의 시추를 통해 지층구조 확인 - 기술이전에 무리가 없도록 적절히 보완 - 참여기업으로의 기술 이전	2007. 5 - 2007. 7
6	■상용화 제품 준비 -제품 등록 및 기술이전	- 제작 프로그램 등록(5건) - 참여기업과 통상실시권 계약	2007. 7 - 2007. 8
7	■최종보고서 작성 -1,2,3차년도 연구 결과의 정리	- 지난 3년의 연구 결과를 정리하여 최종 보고서 작성	2007. 7 - 2007. 8

(5) 3차년도 (위탁 1차년도) 추진계획 및 방법

일련번호	연구개발내용	세부추진 계획 및 방법	수행기간
1	■문헌 연구 및 프로그램 제작 계획 수립	- 초동 도출 방법에 대한 보완 - 토모그래피 기법에 대한 개선	2006. 10 - 2007. 11
2	■프로그램 초기 버전의 제작 -제작 후 주관연구기관에게 제공 -검증후 보완 계획 수립	- 신호 획득 및 관리 프로그램 작성 - 자동 초동 도출 프로그램 작성 - 토모그래피 기법 프로그램 작성	2006. 11 - 2007. 1
3	■프로그램 중간 버전의 제작 -제작 후 주관연구기관에게 제공 -검증 후 보완 계획 수립	- 신호 획득 및 관리 프로그램 보완 - 자동 초동 도출 프로그램 보완 (초동 도출 방식에 대한 개선) - 토모그래피 기법 프로그램 보완 - 영상화 프로그램 작성	2007. 1 - 2007. 5
4	■프로그램 최종 버전의 제작 -제작후 주관연구기관에게 제공 -검증후 보완 계획 수립	- 세부 프로그램 최종 보완 - 컴파일링을 통한 Stand alone 체제 수립	2007. 5 - 2007. 7
5	■종합보고서 작성 -최종 프로그램 보완 -보고서 및 매뉴얼 작성	- 최종적으로 세부 프로그램 보완 - 매뉴얼 작성 - 보고서 작성	2007. 7 - 2007. 8

제 2 장 국내·외 기술개발 현황

제 1 절 국내·외 기술동향

1. 국내 기술 동향

국내에서 현장 탄성파 시험은 현업에서 활발히 적용되고 있으나 대부분 국외 기술을 도입하여 사용하고 있으며 장비에서부터 해석 프로그램에 이르기까지 국외에서 생산된 제품을 수입하여 사용하고 있는 실정이다. 국내 개발 사례로는 공내 탄성파 탐사의 경우, 경희대 목영진 교수 연구팀에서 실용적인 크로스홀 가진원을 개발하였고 인홀 시스템을 개발하고 있으나 시험공 문제 등으로 인해 아직 상용화에 이르지는 못하였다. 표면파 시험의 경우는 기존의 SASW 시험을 2차원적으로 적용하고자 하는 노력을 중앙대 조성호 교수 연구팀에서 수행한 바 있다(조성호 등, 2005). 하지만 시험 수행시 요구되는 시간이 오래걸리며 앞서 언급한 SASW기법의 해석상의 근원적 문제점을 해결하지 못한 상태이다. 그 외 물리탐사 학회를 중심으로 한성대 정보공학부 연구팀 등에서 3차원 반사법 및 크로스홀 토모그래피 기법에서 P파와 S파속도 영상화 등에 대한 연구 등을 수행하고 있으며 강원대학교 지구물리학과 연구팀 등에서도 전기비저항 및 전자 탐사 등을 이용하여 3차원으로 영상화하려는 시도는 많이 이루어지고 있다. 그러나 주로 암반 물성치 도출에 초점이 맞추어져 있고 반사법, 굴절법, 크로스홀 토모그라피 등은 아직 시험 수행 및 결과 해석에 있어서 어려움 및 비용 문제로 인하여 현업에서 잘 이용되고 있지 않는 실정이다.

2. 국외 기술동향

세계적으로 탄성파 탐사에 대한 연구는 장비 개발, 신호처리 및 영상화 기법 분야에 초점이 맞추어져 활발하게 수행되고 있다. 국외 탄성파 탐사 전문 업체를 중심으로 장비 개발 부분에 있어서는 지표면 감지기의 경우 설치에서부터 회수에 이르기까지 편리하게 시험을 할 수 있도록 잘 개발되어 있는 상태이며 지표면 가진원 또한 Drop Hammer, Shot Gun 등의 형태로 많이 개발되어 있다. 또한 소프트웨어 분야에 있어서도 2차원 및 3차원 영상화 구현에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 미국의 유명 대학 등의 학계에서도 효율적 탄성파 탐사 수행을 위해 공내 가진원, 지표면 가진원 개발에 힘쓰고 있다. 또한 2차원, 3차원적인 지반의 형상 및

물성치 도출을 위해 시험법을 개발하고 있으며 결과의 효율적 처리 및 영상화에 대한 연구를 수행중에 있다.

제 2 절 기술동향 분석

국내보다는 국외에서 장비 개발, 신호처리 및 영상화 기법 분야에 초점이 맞추어져 활발하게 수행되고 있으며 우리나라에서 대부분 이러한 기술들을 도입하여 사용하고 있다. 또한 구조적 영상화(정성적)에서 물성적 영상화(정량적)로 초점이 이동하고 있다. 이러한 장비 개발 기술력 및 영상화 프로그램 개발 등의 기술들은 본 과제를 수행하는 연구팀의 핵심 기술 분야는 아니지만 독자적인 장비 및 프로그램 개발을 하고자 하는 노력에 많은 참고가 될 것으로 판단되며 과제 수행시 충분한 문헌조사를 바탕으로 과제 수행에 어려움이 없도록 할 것이다. 반면에 본 연구팀에서 최근 연구하여 본 과제에 적용하려고 하는 SPT업홀 및 HWAW기법은 국내외 어느 연구팀에서도 유사한 연구를 수행하고 있지 않는 것으로 나타났다. 과제를 수행하는데 있어 본 연구팀이 개발한 기술에다가 국외에서 활발히 진행되고 있는 하드웨어 및 소프트웨어 기술 등을 도입, 개선하게 되면 세계적으로도 독자적이고 훌륭한 성과물을 낼 수 있으리라 판단된다.

본 연구에서 일부분을 차지하고 있는 탄성파 토모그래피에 대한 역산 프로그램은 국내 여러 연구팀에 의해 개발되어 사용되고 있다. 반사법, 굴절법, 크로스홀 토모그래피에 있어서 기법 적용과 더불어 해석 프로그램을 개발하고 있다. 획득 신호에 대한 신호처리에서부터 최종 결과 도출까지 일련화 시키는 연구가 일반화 되고 있지만 아직 미흡한 상태이다. 상용화된 사례는 거의 없으며 현재 국내의 현업에서 널리 사용되고 있는 탄성파 토모그래피 프로그램은 국외에서 도입하여 적용하고 있다. 현재 국내에 널리 보급되어 사용하고 있는 토모그래피 프로그램으로는 GEOTOMO에서 개발한 GeoTomCG, OYO에서 개발한 SeisImager 등이 있다. 이러한 프로그램은 획득 신호에 대한 신호처리에서부터 최종 결과 도출까지의 작업을 일련화 시키고 있지만 아직 미흡한 상태이다. 국내외 적으로 탄성타 토모그래피 기법에 대한 프로그램의 개발 사례는 다수 있으며 상용화 프로그램으로 제작되어 보급되고 있다. 하지만 SPT 업홀 기법에 적합한, 현장 실험과 연계하여 자동적으로 결과를 도출하는 프로그램 제작 사례는 없다. SPT 업홀 기법의 상용화를 위해서 신호 획득에서부터 최종 결과 도출까지 반자동화하는 목적으로 하고 있으며 이

러한 관점에서 본 연구를 통해 SPT 업홀 기법에 적합한 자동화 프로그램 제작이 필요하다고 판단된다. 본 연구팀에서 개발할 SPT 업홀 자동화 프로그램에 있어서 토모그래피 기법 부분은 기존에 기 개발된 프로그램보다 더욱 개선된 형태가 될 것이며 SPT 업홀 기법에 초점을 맞추어 독자적으로 개발될 신호 획득 및 관리 프로그램, 초동 자동 도출 프로그램과 연계하여 SPT 업홀 기법의 실용화 가능성을 더욱 높게 할 것이다.

제 3 절 연구개발과제 및 대상기술의 중복성

1. 연구개발과제의 중복방지를 위한 조사 및 검토결과

지반조사결과의 영상화를 위한 시도는 국내외적으로 활발히 이루어지고 있으며, 영상화를 위한 지반 조사 방법으로는 다양한 물리 탐사 및 현장 실험 결과가 이용되고 있다. 그러나 본 연구팀에서 개발에 성공한 SPT업홀 및 HWAW기법은 국내외 어느 연구팀에서도 영상화 구현을 위한 연구를 수행하고 있지 않다. 그러므로 본 연구는 국내외 다른 연구팀의 연구 내용과 중복되지 않고 독자성을 가지고 있다고 판단된다. 이는 2004년 지반공학회가 주관하고 지반공학회 지반진동위원회의 주최로 이루어진 동적물성치 획득을 위한 현장 및 실내 Round Robin Test의 참여기업 및 결과 발표를 통해서도 알 수 있다. 또한 연구개발과제의 중복방지 및 실용화 단계를 위해 프로그램 등록작업을 수행하였다.

2. 연구개발과제의 차별화 방안

타 표면파 기법에 비하여 본 과제의 HWAW 방법은 짧은 감지기 간격을 이용하므로 2차원 영상화에서 결과의 신뢰도가 좋으며 1회 타격으로 인해 시험 수행의 효율이 매우 뛰어나다고 판단된다. 2차년도 연구에서는 다채널을 이용하여 1회 시험으로 긴 측선의 지반강성의 2차원 영상을 구하는 방법에 대해 연구하고 시험장비를 개선할 예정이다. 타 시추공 시험들이 시추공과 지반의 접촉 문제로 인해 시험 수행이 어려운 경우가 생기는 일이 종종 발생하는데 반해 SPT-Uphole 시험의 경우 시추와 동시에 수행되기 때문에 다양한 상황에서도 경제적 시험이 가능하다는 장점이 있다. 따라서 SPT-Uphole 시험의 현장 적용성을 더욱 높여 현장 적용 및 실용화에 더욱 유리하게 만들 예정이다. 최종적으로 지중내 시험과 지표면 시험의 시험시스템을 구축하여 각 시험 방법의 장점과 단점을 이용, 상호 보완하여 타 시험법에 비해 합리적인 결과를 도출 할 수 있다.

제 3 장 연구개발수행 내용 및 결과

제 1 절 수치해석을 통한 시험 기법의 검증 및 개선

본 연구에서는 2차원 영상화를 위해 제안된 두 기법의 검증과 신호 분석, 역산, 다채널의 적용성등을 검증하기 위하여 ABAQUS를 이용한 수치해석을 수행하였다. 본 절에서는 수치해석을 위한 탄성파 전파 모델의 구성과 이를 이용한 SPT 업홀 및 HWAW 기법의 검증 및 개선에 대한 수치해석 결과를 나타내었다.

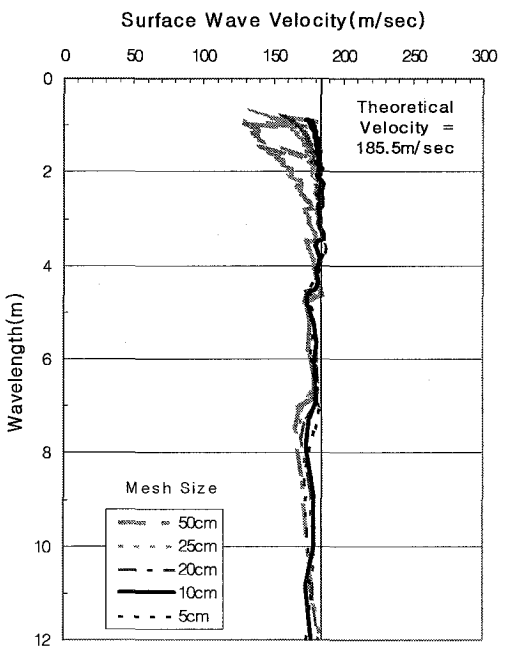
1. 탄성파 전파 모델의 최적 구성

시간영역에서 동적해석을 수행할 경우 해석에 소요되는 시간 및 비용을 최소화하고 파의 전파형상을 효과적으로 묘사하기 위하여 유한요소의 최적화는 반드시 필요하다. 현장 지반에서 SPT업홀 및 HWAW기법을 수행할 경우 지반을 통하여 전파되는 파장의 길이는 극히 짧은 것부터 매우 긴 것까지 다양하게 존재한다. 그러나, 지반에서 파가 전파 될 경우 감쇠현상에 의해 에너지가 소산되기 때문에 짧은 파장의 경우 곧 소멸되어 버린다. 따라서, 유한요소법으로 SPT업홀 및 HWAW기법을 시뮬레이션 할 경우 모든 파장을 고려할 필요는 없다. 일반적으로 SPT업홀 시험 수행시 주된 주파수 대역이 30-100Hz이고 HWAW기법에서는 파장 1m에서부터 100m까지가 관심 파장이므로 대략 최소 파장을 1m로 규정할 수 있다. 신호 분석시 초동 획득이 목표인 SPT 업홀 시험에 비해 표면파의 분산특성을 도출하고자 하는 HWAW가 수치해석 모델 구성에 따라 결과가 민감하게 변화하므로 탄성파 전파 모델 최적 구성의 평가는 실험분산곡선 및 위상각 도출의 정확도에 그 기준을 두었다.

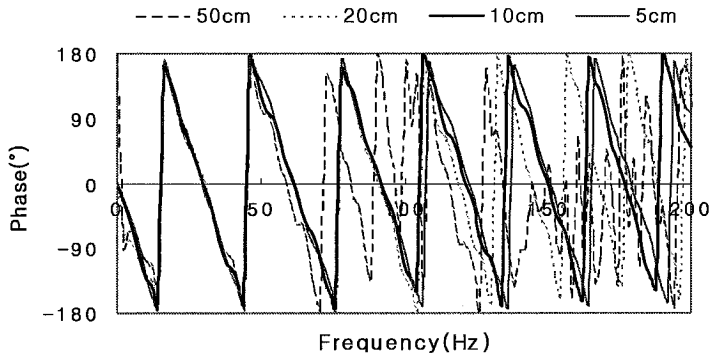
탄성파 전파 모델의 최적 구성을 위하여 유한요소의 크기와 관심 있는 최소 파장의 길이의 비를 1:2(50cm), 1:4(25cm), 1:5(20cm), 1:10(10cm), 1:20(5cm) 등 다섯 종류의 모델에 대한 해석을 수행하였다. 또, 측정시간간격의 영향을 조사하기 위하여 각 모델마다 1000Hz(Δt=1msec), 2000Hz(Δt=0.5msec), 4000Hz(Δt=0.25msec)의 세 가지 해석을 수행하였다. 수치해석은 ABAQUS/Standard 를 이용하여 수행하였다. 내부의 요소는 유한요소로 설정하였고, 모델 경계 바깥의 요소는 반사파가 생성되지 않게 하기 위하여 무한요소로 설정하였다

그림 3.1.1에 측정시간 간격을 2000Hz로 유지한 상태에서 유한요소 크기에 따른 실험분산곡선의 변화 및 위상각의 변화를 도시하였다. 동일한 측정시간 간격에서는

노드의 간격이 작을수록 더욱 정확한 실험분산곡선 및 위상각 정보를 도출하는 것을 알 수 있다. 여러 가지 변수에 대한 이론적인 표면파 속도에 대한 해석결과의 오차(파장 길이=1m)를 표 3.1.1에 정리하였다. 여러 가지 비교 해석 결과를 종합해 보면, 관심 있는 최소 파장 길이를 1m라고 할때 유한요소의 크기가 10cm 보다 작아야 하고 측정 시간 간격을 2000Hz 이상으로 하여야지만 5%의 오차 내에서 파의 전파특성을 효율적으로 묘사할 수 있음을 알 수 있다. 그러므로 본 과제를 수행하기 위한 수치 해석 모델의 구성은 요소 크기는 10cm로 결정하였으며 측정 시간 간격은 HWAW기법의 경우 2000Hz로 SPT업홀 시험의 경우 초동을 더욱 정확히 획득하여야 하므로 20,000Hz로 결정하여 해석을 수행하였다.



a) 유한요소 크기에 따른 실험분산곡선의 변화(2000Hz)



b) 유한요소 크기에 따른 위상각의 변화(2000Hz)

그림 3.1.1 유한요소 크기에 따른 결과의 정확도 비교

표 3.1.1 이론적인 표면파 속도에 대한 해석결과의 오차(파장 길이=1m)

요소크기	이론적인 속도(m/sec)	유한요소 해석결과 (m/sec)			오차(%)		
		1000Hz	2000Hz	4000Hz	1000Hz	2000Hz	4000Hz
50cm	185.5	127.2	130.5	135.2	31.4	29.6	27.1
25cm		150.0	159.7	162.4	19.1	13.9	12.4
20cm		156.1	166.9	170.4	15.8	10	8.1
10cm		163.9	177.1	181.2	11.6	4.5	2.3
5cm		165.8	179.9	184.2	10.6	3	0.7

2. 수치해석을 통한 SPT 업홀의 검증 및 개선사항

SPT 업홀 기법 수치해석을 통해 검토하고자 하는 바는 다음과 같다.

- SPT업홀 기법의 현장 시험법 정립 (감지기 배열 방식)
- 상용화를 위한 도달시간 도출 방법으로 극대점 기준 도달시간 정보를 자동으로 도출한 뒤 초동 정보로 변환하는 방법 채택
- 확립된 SPT-업홀 토모그래피 기법으로 신뢰성 있는 지반 강성을 도출함을 확인

가. SPT 업홀 기법의 현장 시험법 정립

위와 같은 내용을 검토하기 위해서 그림 3.1.2와 같은 수치해석 모델에서 SPT 업홀 수치 모의 시험을 수행 하였다. 15m 두께의 200m/s 속도 층, 15m 두께의 400m/s 속도 층, 30m 두께의 400m/s 속도 층으로 구성되어 있으며 축대칭 요소를 사용하였다. 요소의 크기는 0.1m, 계산은 0.00001sec 간격으로 수행하였다. 유한요소 경계에는 무한요소를 접합하여 경계에서의 반사파 영향을 최소화하였다. 3m부터 30m까지는 3.0m 간격으로 마지막엔 39m 지점을 수직방향으로 가진 하였으며 가진 지점으로부터 수평거리 0m부터 16m까지 2m 간격으로 수직 및 수평방향에 대해 신호를 획득하였다. 그 예로 6m 깊이 가진시 획득한 신호를 수직 및 수평 방향에 대해서 그림 3.1.3과 그림 3.1.4에 각각 도시하였다. 수직 및 수평 방향에 대해서 압축파와 전단파가 분리되어 도달되는 것을 볼 수 있다. 또한 감기기 위치가 멀수록 압축파보다는 전단파 성분이 주되게 들어오는 것을 볼 수 있다.

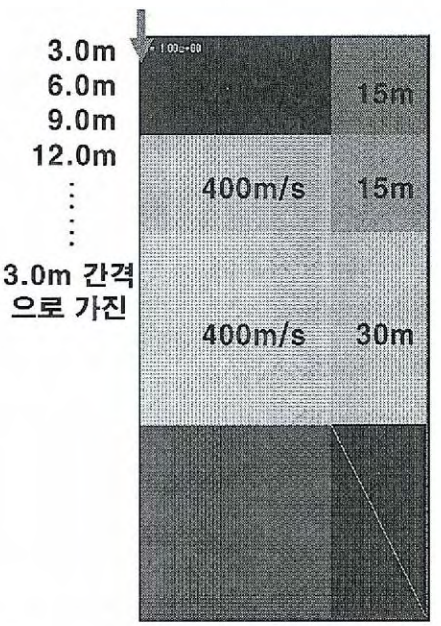


그림 3.1.2. SPT-업홀 수치해석 모델

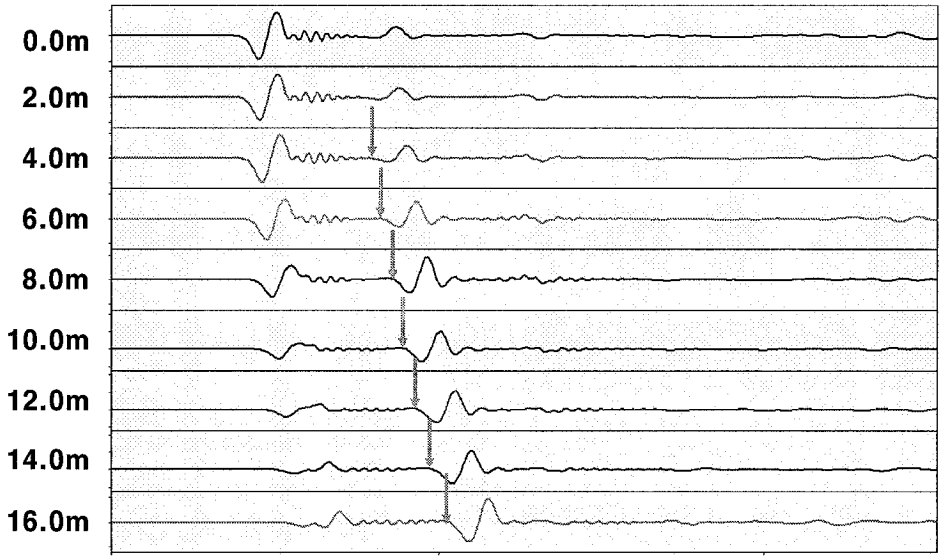


그림 3.1.3. 심도 6m 가진시 위치별 수직 방향 획득 신호

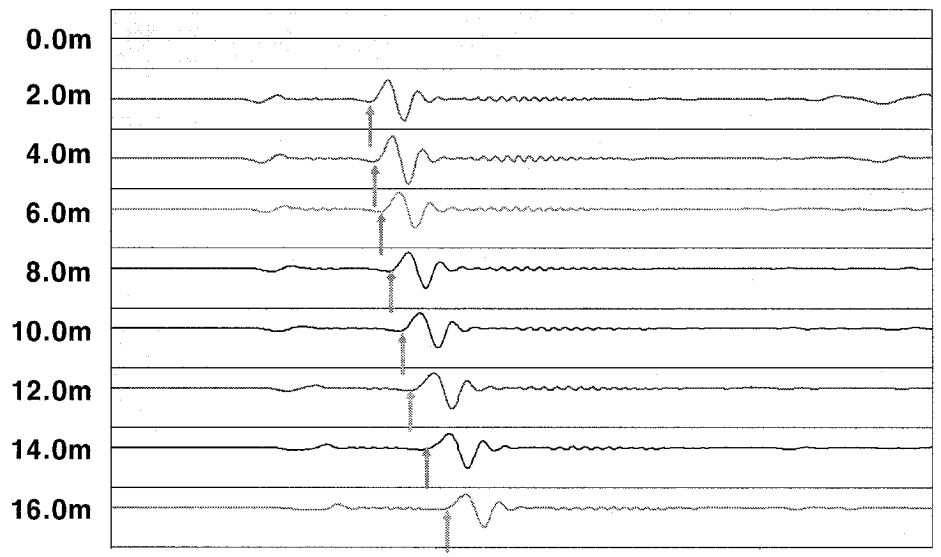
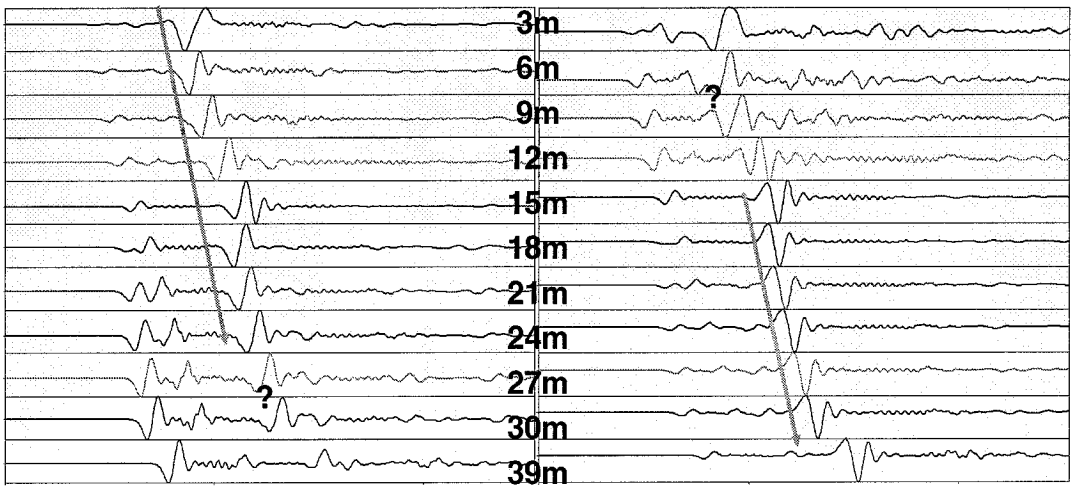


그림 3.1.4 심도 6m 가진시 위치별 수평 방향 획득 신호

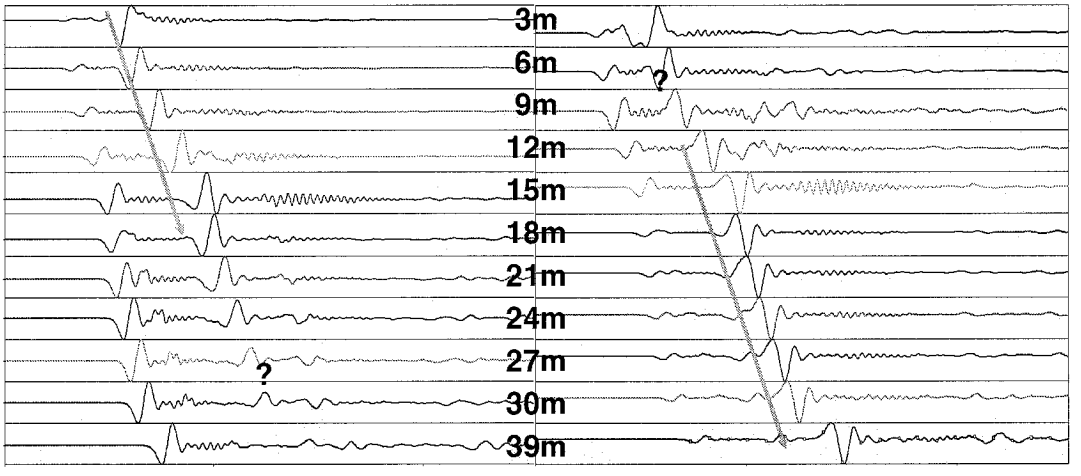
모든 가진 깊이에서의 수치해석을 수행한 결과를 동일 감지기별로 정리한 결과 또한 그림 3.1.5와 그림 3.1.6에 도시하였다. 감지기 위치 16m에서 획득한 깊이별 가진 신호를 보면 수직 방향 성분은 가진 심도가 깊어질수록 압축파의 영향이 심하여 전단파 도달 시점이 불분명 해지는 것을 관찰할 수 있으며 이런 현상은 감지기 위치 10m에서 더욱 얕은 가진 심도에서 나타나기 시작한다. 수평 방향 성분은 가진 심도가 얕은 경우 대부분의 전단파가 수직방향 움직임이므로 전단파 도달 시점이 불분명한 것을 볼 수 있다. 감지기 위치가 가까울수록 이러한 현상은 줄어드

는 것을 볼 수 있다. 이러한 현상은 SPT업홀 가진원의 특성에 의한 것으로 가진원의 깊이에 따라 압축파와 전단파의 영역이 달라지며 전단파에 의한 주된 지반 입자의 움직임이 수직 방향에서 수평방향으로 바뀌기 때문이다(그림 3.1.7).



a) 수직방향 신호 b) 수평방향 신호

그림 3.1.5 감지기 위치 16m에서 획득한 깊이별 가진 신호



a) 수직방향 신호 b) 수평방향 신호

그림 3.1.6 감지기 위치 10m에서 획득한 깊이별 가진 신호

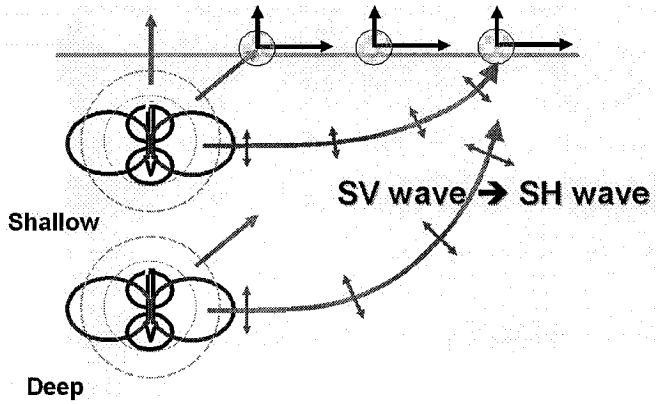
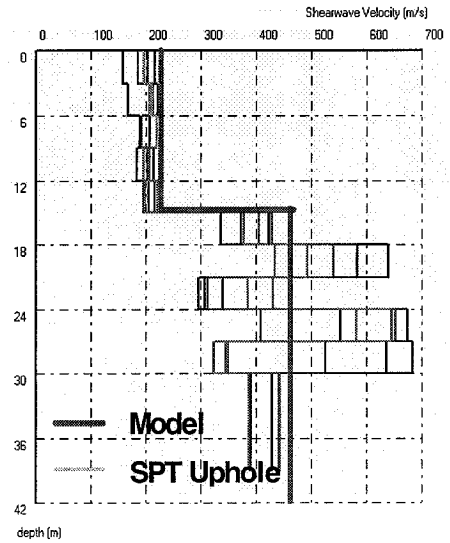


그림 3.1.7 SPT 가진원에 의해 지표면까지 파의 진행 방향에 따라 예상되는 입자의 움직임 방향

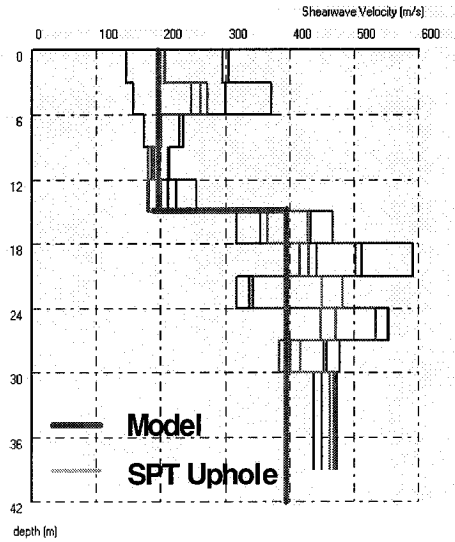
수치해석을 통하여 획득한 감지기별 도달시간 정보를 활용하여 전단파 속도 주상도를 도출하여 보았다. 도달시간 정보를 활용한 전단파 속도 주상도 도출은 3절에서 소개될 1차원 SPT 업홀 기법 결과 도출 프로그램을 제작하여 활용하였다. SPT 업홀의 결과 분석은 신호들간의 도달시간 차이에 의해 수행되므로 직접도달시간이 아니고 다른 기준점(첫 극대점 등)에 의해 산출된 도달시간을 이용이 가능하다. 전단파의 직접 도달 시점을 기준으로 하여 산정된 도달시간 정보를 이용하여 감지기 위치별 전단파 속도 주상도를 도출하여 보았다. SPT 가진원은 역방향 타격을 할 수 없으므로 전단파의 극성 특성을 이용할 수 없으며 다운홀 시험 신호에 비하여 압축파의 영향이 심하다. 그러므로 전단파의 직접 도달 시점을 파악하기가 용이하지 않다. 이러한 이유로 도달시간 정보가 정확하지 않을 확률이 높으며 최종 전단파 속도 주상도 또한 전반적으로 모델 입력치와 큰 차이가 나는 것을 볼 수 있다 (그림 3.1.8).

전단파 성분의 첫 극대점을 이용한 결과를 그림 3.1.9에 도시하였다. 첫 극대점은 기준점이 명확하여 사람의 주관에 좌우되지 않으며 압축파의 영향으로부터 벗어나 있어 전단파 도달 시점의 기준으로 정하는데 있어 더 유리하다. 그리하여 전단파의 직접 도달 시점을 이용한 결과에 비해서는 오차가 적은 것을 볼 수 있다. 하지만 수직성분을 이용한 결과는 상부 결과에 비해 하부 결과가 오차가 크고 수평성분을 이용한 결과는 하부 결과에 비해 상부 결과가 오차가 큰 것으로 확인된다. 이것은 앞에서 언급한 깊이별 획득 신호의 수직, 수평 성분의 양호도와 무관치

않다. 깊이별 획득 신호를 관찰하였을 때 얕은 가진원 깊이에서는 수직 성분의 신호가 양호하며 깊은 가진원 깊이에서는 수평 성분의 신호가 양호한 것을 알 수 있었다. 이런 현상들이 도달시간 정보 산출에 신뢰성을 저하시켰으며 최종 전단파 속도 도출에까지 영향을 끼친 것으로 판단된다.

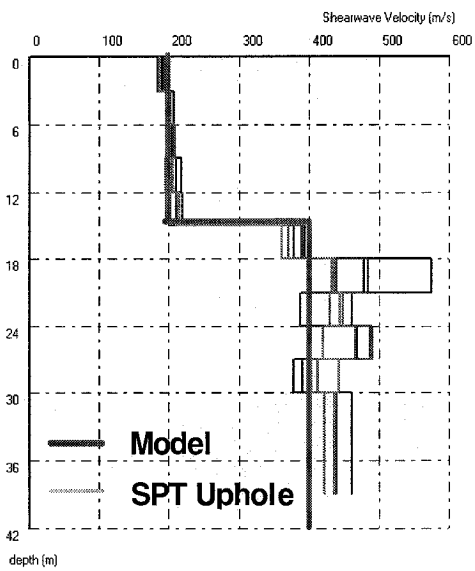


a) 수직 성분 결과의 활용

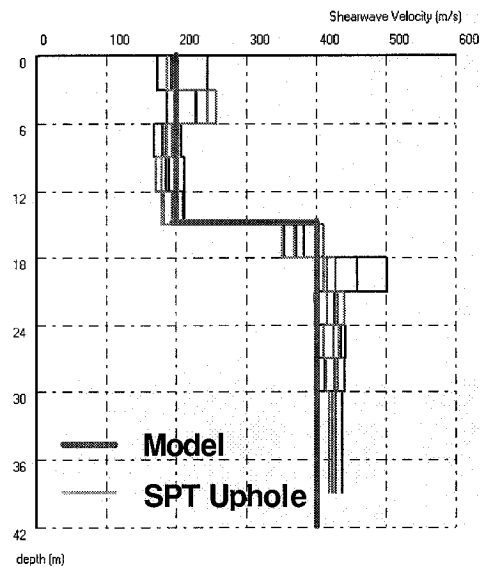


b) 수평성분 결과의 활용

그림 3.1.8 전단파의 직접 도달 시점을 이용한 결과



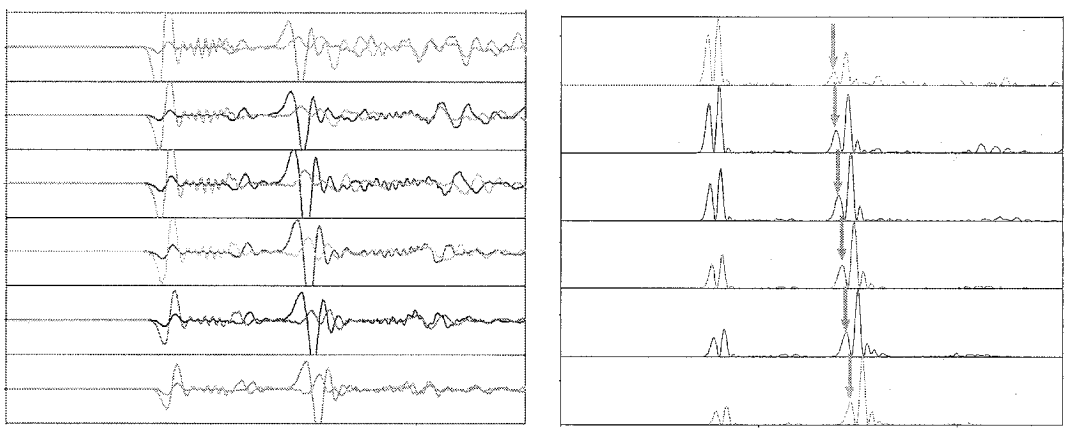
a) 수직성분 신호를 이용한 결과



b) 수평성분 신호를 이용한 결과

그림 3.1.9 전단파의 첫번째 극대점을 이용한 결과

그리하여 수직, 수평 성분의 신호를 동시 활용하여 도달시간 정보를 획득, 이런 오차를 줄이는 방안에 대해 시도하여 보았다. 그림 3.1.10a는 수평 수직 성분의 신호를 단순히 동시 도시한 그림이다. 전단파 도달 시점은 유사하지만 기준점을 정하기가 용이하지 않다. 그러므로 그림 3.1.10b와 같이 두 신호의 절대 크기의 합을 통해 전단파 도달 시점을 파악하고자 하였다. 전단파의 직접 도달시점 파악이 마찬가지로 어려워 첫 극대점을 이용하여 전체적인 도달시간 정보를 획득하였으며 이 정보를 활용하여 최종 전단파 속도 주상도를 도출하여 보았다. 그림 3.1.11의 전단파 속도 주상도를 살펴보면 수직, 수평 성분 어느 하나를 이용한 결과에 비해서 전 깊이에 걸쳐 오차가 줄어든 것을 볼 수 있다. 그러므로 SPT 업홀 시험의 토모그라피 적용을 위한 개선에 있어서 감지기를 수평방향과 수직방향을 동시에 활용하는 방안을 적용하기로 하였다. 이럴 경우 기존의 SPT 업홀에서 수직 성분 신호가 깊은 깊이에서 양호하지 않아 신뢰성이 저하되었던 문제를 해결할 수 있을 것이라 판단이 된다.



a) 수직, 수평 성분의 동시 도시　　b) 수직, 수평 성분의 절대 크기합

그림 3.1.10 수직, 수평 성분을 동시 활용한 도달 시간 정보의 획득

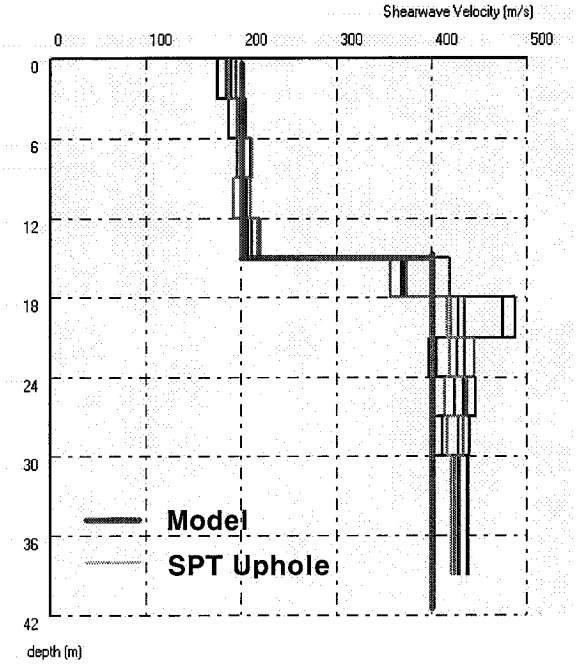
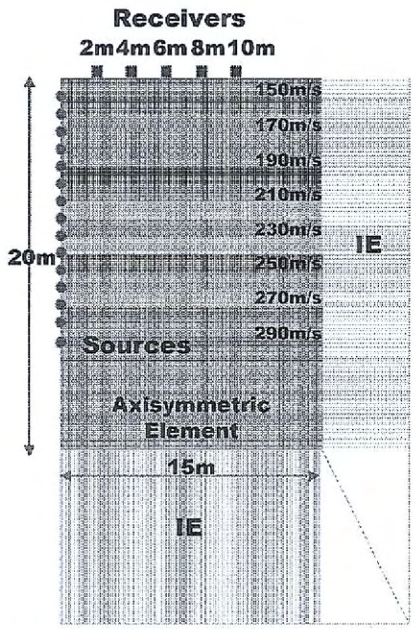


그림 3.1.11 수직, 수평 성분을 동시 활용한 도달 시간 정보 이용 결과

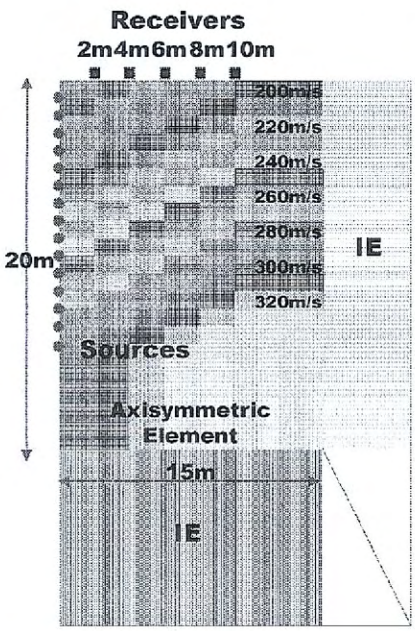
나. 신뢰성 있는 초동 정보 획득 자동화 방안과 토모그래피 기법을 통한 신뢰성 있는 지반 강성을 도출

앞에서 언급한 바와 같이 SPT-업홀 토모그라피 기법에서는 모든 가진원 감지기 조합에서의 도달시간 정보가 요구된다. 하지만 SPT-업홀 현장 시험에서 가진원의 특성상 전단파 성분의 초동 지점을 신뢰성 있게 추정하기 어려운 것을 2차년도 모형부지 검증 시험으로부터 확인한 바 있다. SPT-업홀 토모그래피 기법의 상용화를 위해서는 신뢰성 있는 초동 정보 획득 방안이 마련되어야 하며 이러한 과정이 자동화 되는 것이 바람직하다. 따라서 전단파 성분의 첫 극대점 기준 도달시간 정보를 산출한 뒤 초동 정보를 정확히 확인할 수 있는 지점을 기준으로 하여 보정하는 과정을 제안하였으며 수치해석을 통해 이와 같은 과정을 확립하고자 하였다. 전단파 성분의 첫 극대점을 기준으로 도달시간 정보를 도출할 경우 자동화에 유리하기 때문에 기법의 상용화를 하는데 있어 제안된 방안이 적합하다. 수치해석을 수행하여 이러한 방식으로 획득한 도달시간 정보를 동일한 모델에 대해 파선 추적을 통해 이론적으로 계산된 도달시간 정보와 비교하여 봄으로써 검증하고자 하였다.

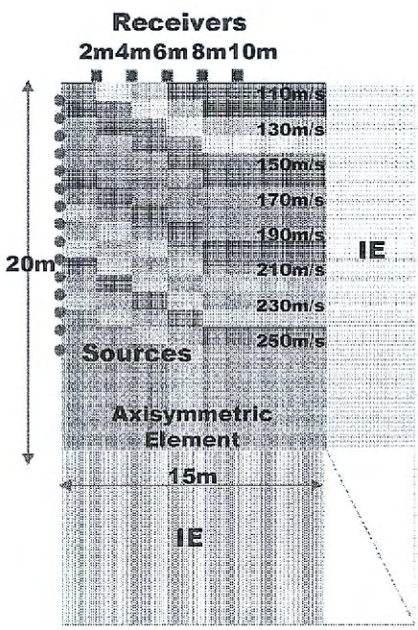
SPT-업홀 토모그래피 기법에 대해 도달시간 정보 획득 방법에 대한 개선 연구를 위해 수평층 및 상향, 하향 경사 모델을 그림 3.1.12와 같이 구성하여 SPT-업홀 토모그라피 기법의 수치해석을 수행하였다.



(a) 수평 지반 모델



(b) 상향 경사 모델



(c) 하향 경사 모델

그림 3.1.12 유한요소 수치 해석을 위한 지반 모델

수치해석은 ABAQUS를 이용한 유한요소해석을 수행하였다. 탄성파의 전파 특성을 모델링하는 유한요소 해석에서는 모델 내 요소의 크기와 계산 간격이 결과의 정확성을 보장해 주는 중요한 요소이다. Zerwer 등(2002)에 의해 제안된 조건을 고려하여 요소 크기를 0.1m로 충분히 작게 결정하였으며 계산 간격은 0.00005초로 설정하였다. 지표면으로부터 1m 간격으로 심도 15m까지 지중에서 가진을 하고 가상 감지기 위치는 가상의 시추공으로부터 2m, 4m, 6m, 8m, 10m로 거리로 설정하였다.

이론적 도달시간 정보는 각 모델에 있어 그림 3.1.13와 같이 지중의 가진원으로부터 지표면 감지기 위치까지 전파 경로를 추정하여 산출하였다. 요소 경계에서 각 요소의 전단파 속도에 근거하여 Snell의 법칙에 의해 굴절되어 전파되도록 한 것으로 각각의 가진원, 감지기 조합에 대하여 전파 경로를 추정할 수 있다. 도달시간 정보는 각 요소 내 통과거리를 고려하고 각 요소의 전단파 속도 값을 이용하여 산출이 가능하다. 이러한 파선 추적 과정은 Matlab으로 자체 코딩한 프로그램을 이용하였다. 주어진 지반 모델에서 설정된 가진원과 감지기 위치 조합에 대한 모든 전파 경로가 산정되며 그에 따른 이론적 도달시간 정보가 계산되어진다.

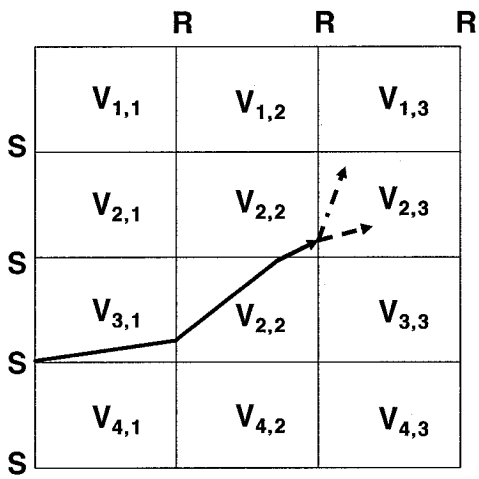
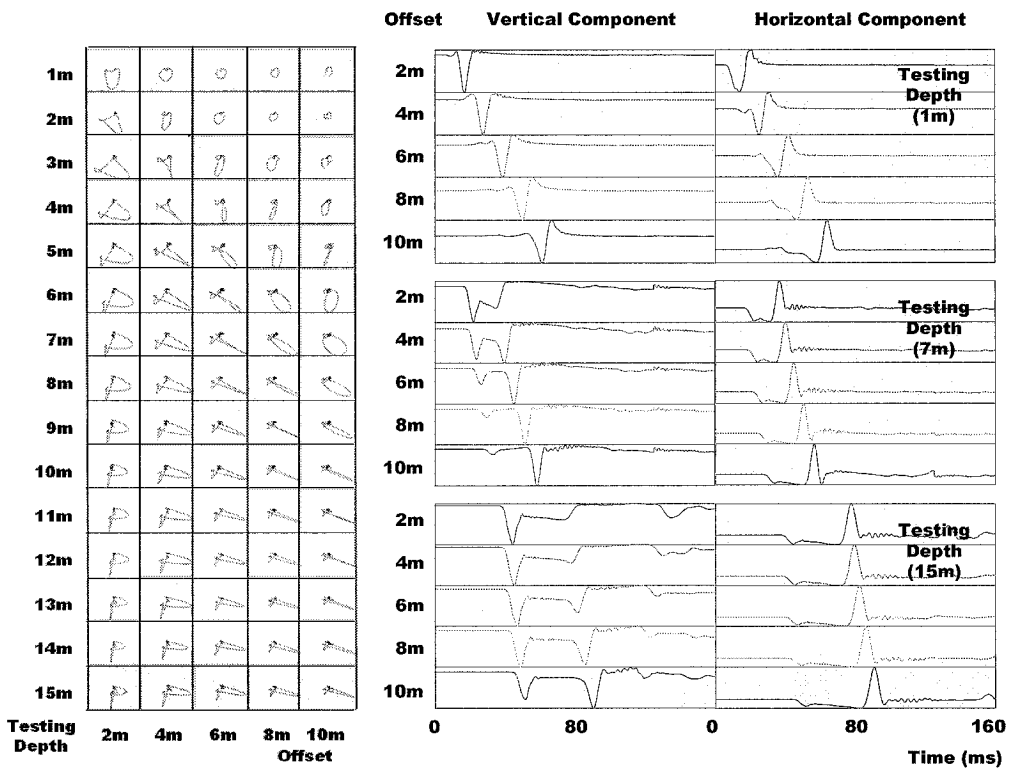


그림 3.1.13 Snell의 법칙에 근거한 가진원으로부터 감지기까지의
이론적 도달시간의 산출

본 수치해석에서는 지표면 입자 운동으로 변위 성분을 이용하였으며 수평 모델의 수치 해석을 통해 획득한 가상 감지기 위치에서의 파형 일례를 그림 3.1.14에 도시하였다. 그림 3.1.14(a)는 모든 가진원 감지기 조합의 지표면 입자 운동 형상을 모

사한 것이며 그림 3.1.14(b)는 가진 깊이 1m, 7m, 15m에서의 각 감지기 위치에서의 입자 변위 시간 이력 곡선을 도시한 것이다. 공간상에서의 입자 운동 형상을 살펴보면 전단파 성분의 입자 운동 방향이 가진원으로부터 감지기까지의 전파 경로 방향에 수직한 방향임을 확인할 수 있으며 두 방향 성분을 동시에 사용함으로써 모든 측정 지점에서 전단파 성분의 도달을 더욱 명확하게 측정할 수 있게 된다. 그림 3.1.15(a)의 깊이 1m 가진 신호를 감지기 위치 10m에서 획득한 파형에서 수평 및 수직 성분 각각에 있어서는 전단파 성분의 첫 극대점은 명확하나 그 위치는 서로 약간 다른 것을 볼 수 있다. 또한 그림 3.1.15(c)의 깊이 15m 가진의 감지기 위치 2m에서 획득한 파형에서도 유사한 것을 볼 수 있다. 그러나 수평, 수직 성분의 크기합을 이용하게 되면 두 극대점 중 어느 것을 선택해야 하는 고민할 필요가 없게 되며 모든 가진원 감지기 조합에 있어 수평, 수직 방향 성분의 크기합에 있어서 첫 번째 극대점이 매우 명확하여 객관적인 도달시간 정보의 획득이 가능하였다.



(a) 공간상에서의 입자 운동 (b) 시간영역에서의 입자 변위 이력 곡선 일례

그림 3.1.14 수치해석을 통해 획득한 감지기 위치에서의 입자 운동 (수평모델)

극대점을 기준으로 획득한 도달시간 정보를 주시 토모그래피 기법에 적용하기 위

해서는 초동 정보로의 보정이 필요하다. 그러므로 본 연구에서는 초동 정보를 산출을 위한 합리적 방안을 다음과 같이 제시하였다. 그림 3.1.15(b)의 깊이 8m 가진의 감지기 위치 8m에서 획득한 파형을 보면 수평 및 수직 성분 각각에 있어 첫 극대점이 일치하며 따라서 수평성분과 수직성분을 동시에 활용한 신호에 있어서도 첫 극대점은 같게 된다. 또한 해당 신호에서 초동 지점이 각각의 성분에 있어 매우 확실하며 일치하는 것을 볼 수 있다. 그러므로 여기서 계산된 극대점과 초동 지점과의 시간차를 전체 도달시간 정보에 대해 보정을 해 주는 방식을 취하면 그림 3.1.16(a)와 같이 전체적인 도달시간 정보를 토모그래피 기법 적용을 위한 초동정보로 변환이 가능하다. 이런 방식은 모든 가진원, 감지기 조합의 획득 신호상에서 전단파 성분의 주파수 특성이 유사할 경우에만 적용이 가능하나 수치해석에서는 전단파 성분의 주파수 특성이 거의 같으며 실제 현장에서도 가진 깊이별로 토질이 차이가 크지 않을 경우에는 획득신호의 주파수 특성이 유사하므로 적용이 가능하리라 판단된다. 하지만 이러한 일반적인 경우 이외의 경우에 있어서도 신뢰성 있는 전단파 성분의 초동 정보를 획득하기 위한 추가적인 연구가 필요하다고 판단된다.

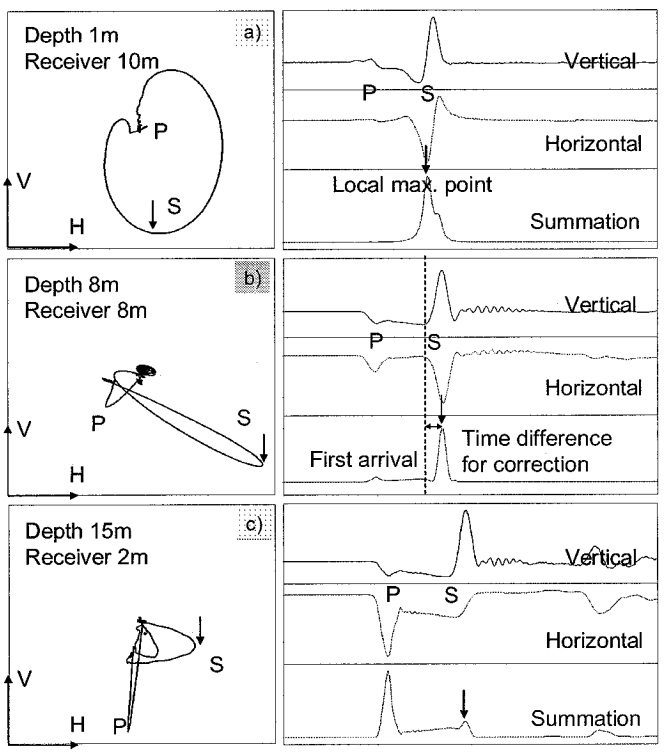
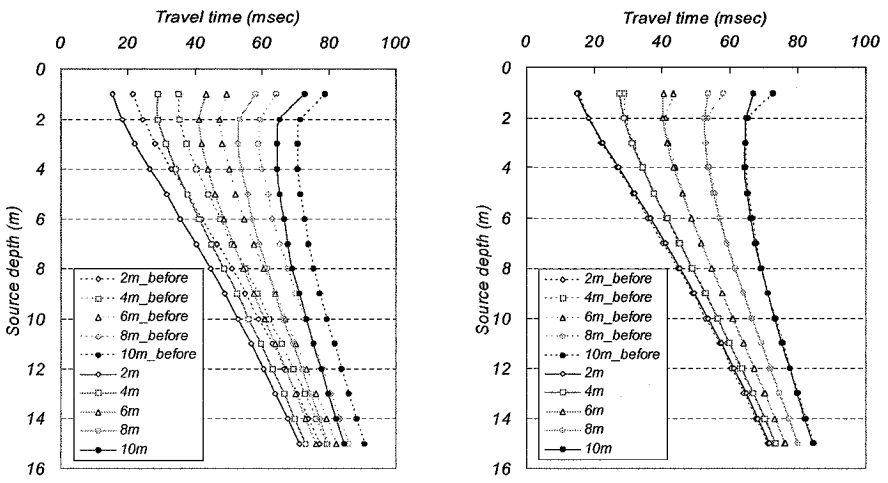
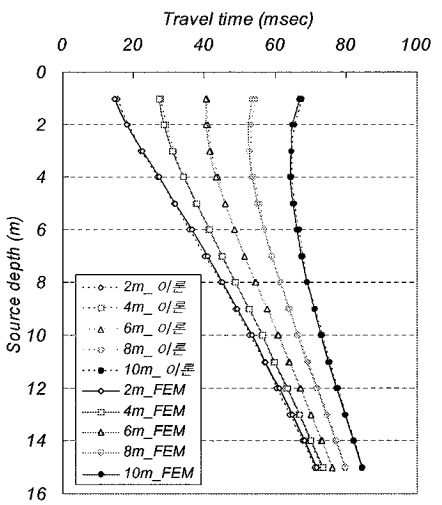


그림 3.1.15 획득 파형으로부터 전단파 성분의 초동 정보 획득 과정(수평모델)

보정된 초동 정보에서 1m 깊이의 정보는 이론해에 비해 상대적으로 큰 값이 도출된 것으로 판단되었으며 이는 1m 깊이의 가진에 의한 각 감지기에서의 획득 파형이 얕은 가진 깊이로 인해 전단파에 비해 표면파 성분이 주되게 되며 여기서 극대점을 이용하여 획득한 도달시간 정보는 표면파의 도달시간 정보이기 때문으로 판단된다. 일반적으로 표면파 성분의 속도는 전단파 성분의 속도의 0.91배 정도이므로 도달시간 정보에서는 표면파 도달시간 정보에 0.91을 곱해주는 방식으로 표면파 효과에 대해 보정하였다(그림 3.1.16(b)).

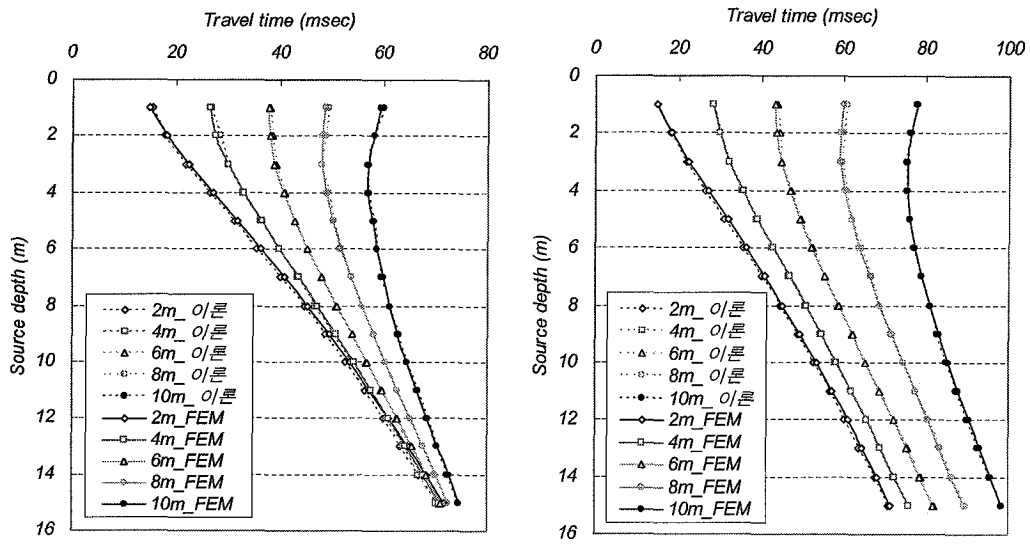


(a) 초동 정보로의 변환 (b) 표면파 효과 보정



(c) 이론 해와의 비교를 통한 검증

그림 3.1.16 유한요소 수치해석을 통해 획득한 전단파 성분의 도달시간 정보 (수평모델)

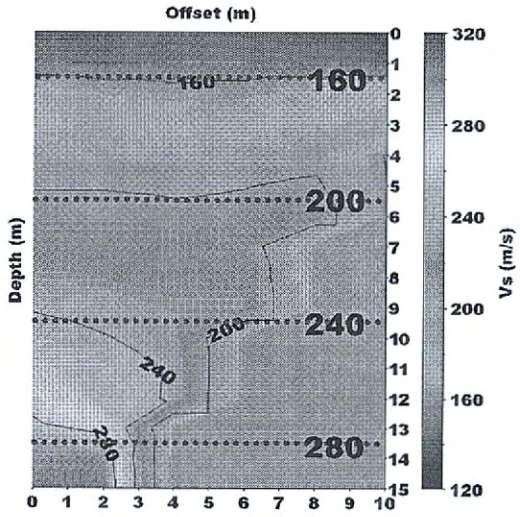


(a) 상향 경사 모델 (b) 하향 경사 모델

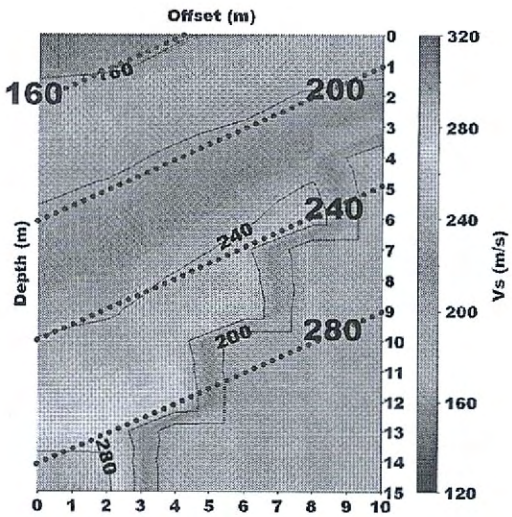
그림 3.1.17 유한요소 수치해석을 통해 획득한 전단파 성분의 도달시간 정보

이렇게 보정된 도달시간 정보는 앞에서 동일한 모델에서 Snell의 법칙에 근거하여 이론식에 의해 계산된 도달시간 정보와 거의 동일한 결과를 보여주고 있다(그림 3.1.16(c)). 그 외 상향 경사 모델 및 하향 경사 모델에 있어서도 그림 3.1.17에서와 같이 거의 동일한 결과를 보여주고 있다. 그러므로 제안된 도달시간 정보 획득 방법이 SPT-업홀 토모그래피 기법 적용을 위한 전단파 성분의 초동 정보 획득 방식으로 적합하다고 판단되었다.

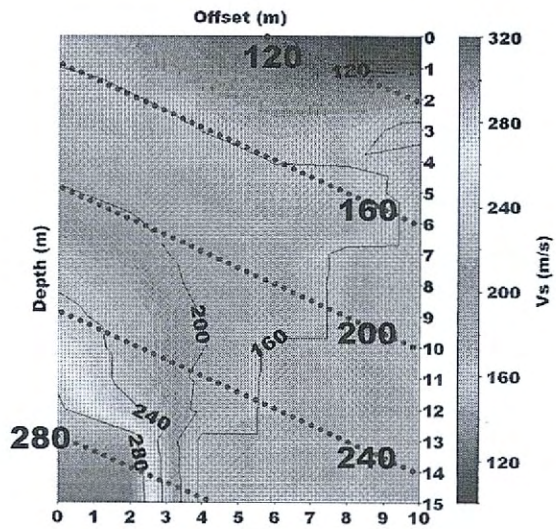
획득한 초동 정보를 이용하여 도입한 토모그래피 프로그램인 GeoTomCG을 통해 2차원적인 전단파 속도 분포를 획득하였으며 그림 3.1.18에 각 모델에 대해 도시하였다. 전단파 속도 분포는 수평 모델, 상향 경사 모델 및 하향 경사 모델에 대해서 모두 모델 형상을 잘 모사하고 있는 것으로 보여 진다. 이는 확립된 SPT-업홀 토모그래피 기법을 통해 지반의 2차원적 구조 영상을 신뢰성 있게 도출이 가능하다는 것을 말해 준다.



(a) 수평모델



(b) 상향경사모델



(c) 하향경사모델

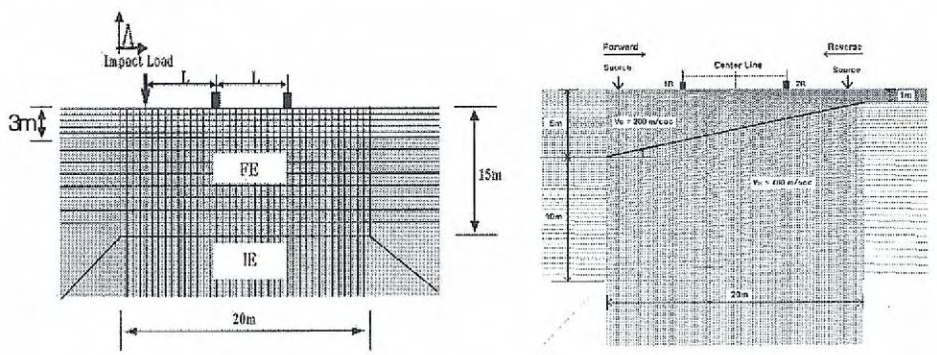
그림 3.1.18 제안된 SPT-업홀 토모그라피 기법을 통해 도출된 전단파 속도 분포와 수치해석 모델 값과의 비교 (그림내 점선은 모델의 형상, 굵은 숫자는 모델의 속도를 의미함)

3. 수치해석을 통한 HWAW시험의 검증 및 개선사항

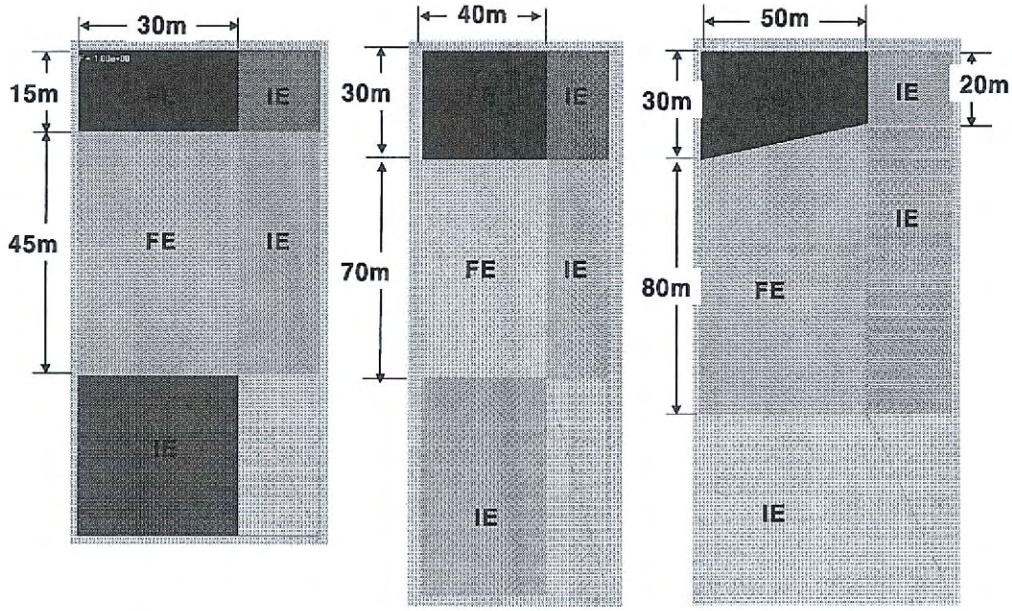
본 과제를 수행하는데 있어 HWAW 기법의 ABAQUS를 이용한 수치모의 실험을 통해 검토하고자 하는 바는 다음과 같다.

- HWAW 기법을 통해 정확한 지반 물성을 획득 가능한 지에 대한 여부
- 경사진 지반 등의 복잡한 지반형상에서 2D-HWAW기법을 통해 2차원 영상화가 가능한지에 대한 여부
- HWAW 기법의 현장 시험법 정립 (감지기 개수, 가진원 거리 등)
- 근접장 영역에서의 분산곡선 도출 및 HWAW 기법에 적합한 정모델링 기법 연구

1차년도 연구에 첫 3개의 내용을 검토하기 위해서 그림 3.1.19와 같이 총 5개의 유한요소 모델을 구성하였으며 모델에 대한 물성치 정보는 표 3.1.2와 같다. 특정 지점에 충격 하중을 가하는 방식으로 가진을 하였으며 수치해석 모델의 가상 감지기 위치에 해당하는 노드에서 획득한 속도 시간 이력곡선을 이용, HWAW기법을 수행, 결과를 도출하였다.



(a) 모델1 (b) 모델 2



(c) 모델 3 (d) 모델 4 (e) 모델 5

그림 3.1.19 ABAQUS 수치 모의 실험 수행을 위해 작성된 유한요소 모델

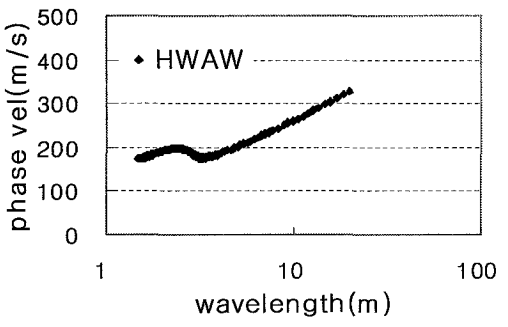
표 3.1.2 ABAQUS 수치 모의 실험 수행을 위해 작성된 유한요소 모델의 특징

모델명	Description	전단파 속도(m/s)		밀도(kg/m^3)	포아송비
		첫층	둘째층		
모델 1	첫층의 두께가 3m인 수평 모델	200	400	1800	0.3
모델 2	첫층의 두께가 5m에서 3m로 줄어드는 기울어진 모델	200	400		
모델 3	첫층의 두께가 15m인 수평 모델	200	400		
모델 4	첫층의 두께가 30m인 수평 모델	200	600		
모델 5	첫층의 두께가 30m에서 20m로 줄어드는 기울어진 모델	200	600		

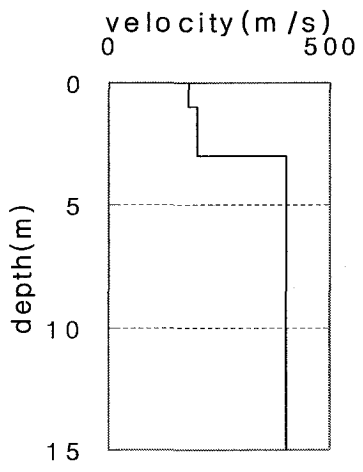
가. HWAW 기법을 통한 신뢰성 있는 지반 강성 도출 가능성 여부 평가

HWAW 기법 수행을 통해 지반의 강성 변화를 신뢰성 있게 획득 할 수 있는지 여부를 평가하기 위하여 다음과 같은 수치모의 실험 연구를 수행하였다. 첫 층의 두께가 각각 3m, 15m, 30m로 서로 다른 모델 1, 3, 4를 이용하여 HWAW 수치 모의 시험을 수행하였으며 가상 감지기 위치를 가진원으로부터 6m, 8m로 설정하고

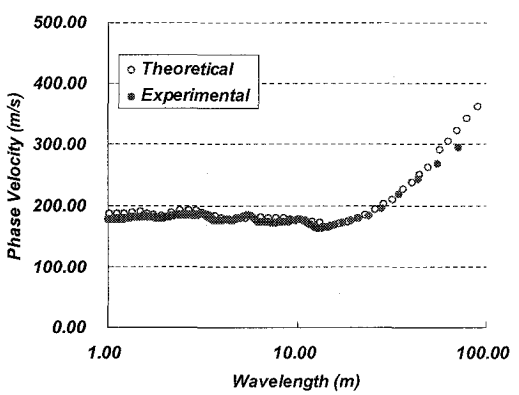
각 위치에서의 파형을 획득하였다. 획득한 파형을 이용, HWAW기법을 수행하여 실험 분산곡선을 도출하였고 역산 프로그램을 이용하여 전단파 속도 주상도를 도출하여 보았다. 실험 분산곡선 도출은 3절에서 소개될 HWAW Anayzer를 사용하였다. 그림 3.1.20에 수치모의 실험을 수행한 각 모델에 대해서 HWAW기법을 이용하여 획득한 실험분산곡선, 역산을 위한 이론분산곡선 및 최종 전단파 속도 주상도를 도시하였다. 결과를 살펴보면 각 모델에서 HWAW수치 모의 실험을 통해 획득한 전단파 속도 주상도가 각 모델의 입력치와 거의 동일한 결과를 도출하는 것을 알 수 있다. 따라서 HWAW기법은 얇은 심도에서부터 깊은 심도에까지의 강성 변화정도를 간단한 실험 방법 및 해석과정을 통해 신뢰성 있게 도출할 수 있다는 것이 검증되었다고 판단된다.



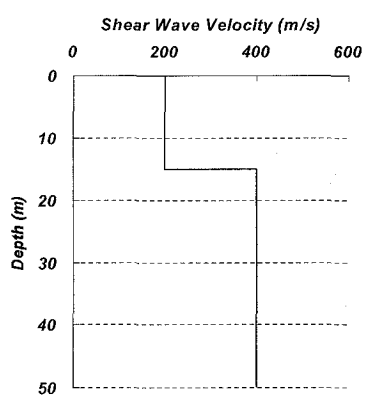
(a) 실험분산곡선(모델1)



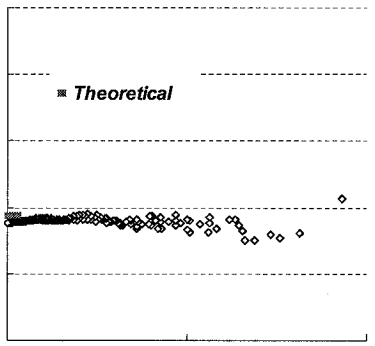
(b) 전단파 속도 주상도 (모델1)

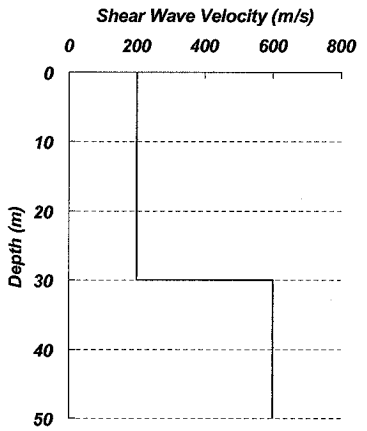


(c) 실험분산곡선 및 이론분산곡선(모델3)



(d) 전단파 속도 주상도(모델3)



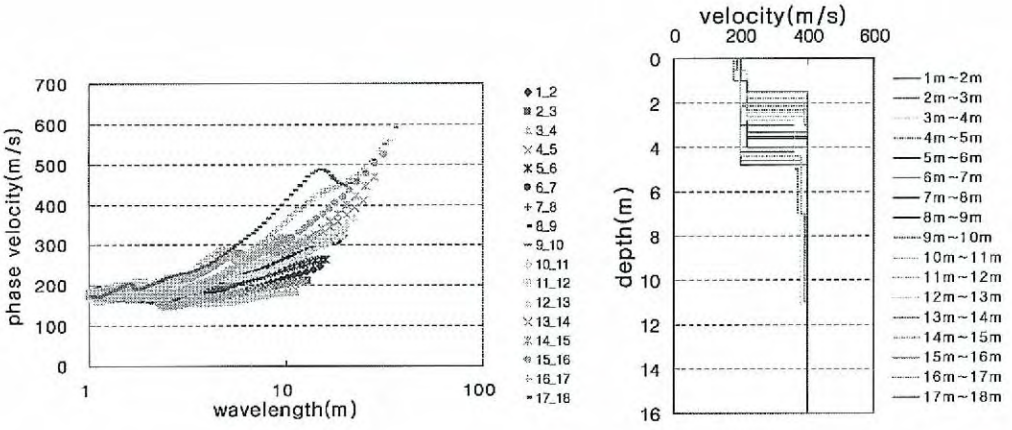


(e) 실험분산곡선 및 이론분산곡선(모델4)　　(f) 전단파 속도 주상도(모델4)

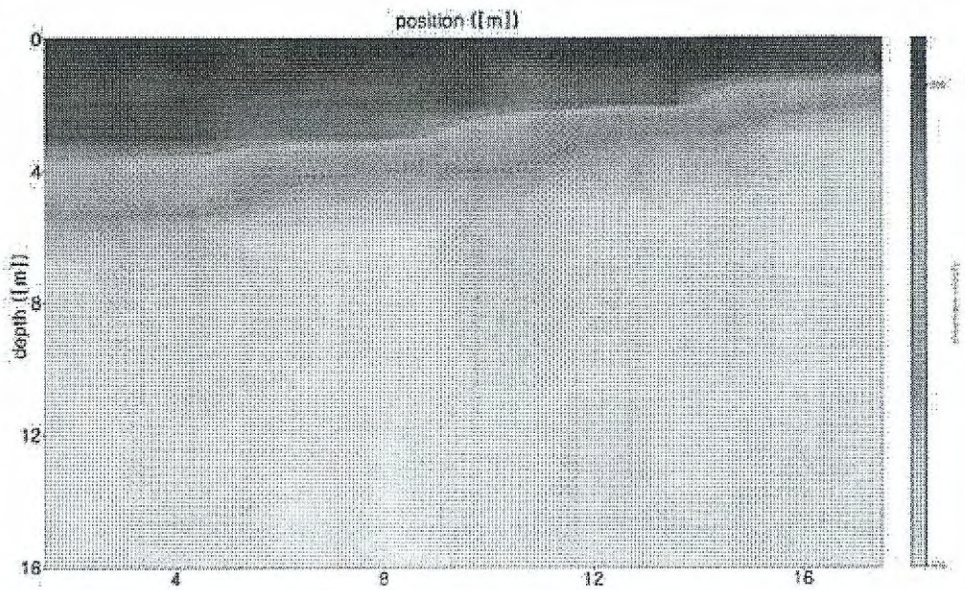
그림 3.1.20 모델 1, 3, 4에서 HWAW 기법 수치 모의 시험 수행 결과

나. HWAW 기법을 이용한 지반 강성의 2차원 영상화 가능 여부 평가

모델 2를 이용하여 2D-HWAW기법을 이용한 지반 강성의 2차원 영상화 가능 여부 검증을 시도하였다. 가진원 지점으로부터 1m씩 이동해가며 해당하는 모든 1m 간격의 신호들 (감지기1, 감지기2 = 1m, 2m ; 감지기1, 감지기2 = 2m, 3m ; … ; 감지기1, 감지기2=17m, 18m)에 대하여 HWAW 기법을 적용하였다. 이러한 방식으로 HWAW기법을 연속적으로 수행하여 2차원 강성 평가를 시도하는 것을 2D-HWAW라 부르기로 하겠다. 모델 3에서 2D-HWAW 수치모의 실험을 통해 획득한 분산곡선은 총 17개(그림 3.1.21a)이며, 역산을 통해 17개의 전단파 속도 주상도(그림 3.1.21b)를 획득하였다. 최종적으로, 각 위치에서의 전단파 속도 주상도들을 선형보간함으로써 경사 모델에 대한 2차원 전단파 속도 영상을 획득하였다(그림 3.1.21c). 2D-HWAW 기법을 통해 획득한 2차원적인 전단파 속도 영상은 모델 2의 형상과 잘 일치함을 확인할 수 있다. 따라서 2.가의 결과와 더불어 종합적으로 분석해 볼 때 유한요소 모델에서 수행한 수치모의 시험과 동일한 방법으로 현장에서 HWAW기법의 수행한다면 수직 및 수평적 강성 변화가 있는 지반에서 2D-HWAW기법을 통해 효율적이고 신뢰성 있는 지반의 2차원 강성평가가 가능하리라 판단된다.



a) 17개의 분산 곡선 b) 17개의 전단파 속도 주상도



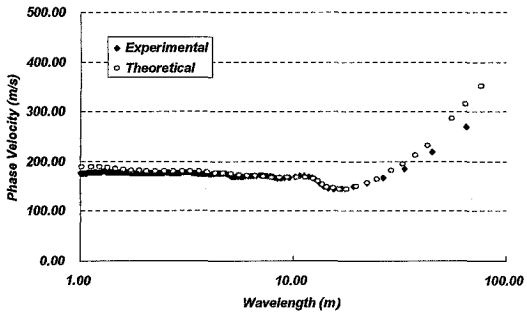
c) 2차원 영상화 결과

그림 3.1.21 얇은 깊이 경사진 모델인 모델 2를 통해
수치모의 실험을 수행한 2D-HWAW기법 결과

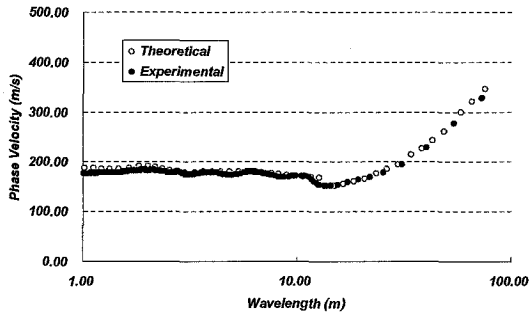
다. HWAW 기법의 현장 시험법 정립 (감지기 개수, 가진원 거리)

기존의 HWAW기법은 1차원적인 지반강성을 평가하기 위해 2개의 감지기를 이용하는 시험 시스템이다. 이러한 시험 구성을 바탕으로 2차원 지반 강성을 평가하기 위해서는 시험 측점만큼 2개의 감지기를 옮겨가며 반복적으로 가진을 시켜 시험을 수행하여야 하는 번거로움이 생기게 된다. 그러므로 본 과제에서는 현장에서

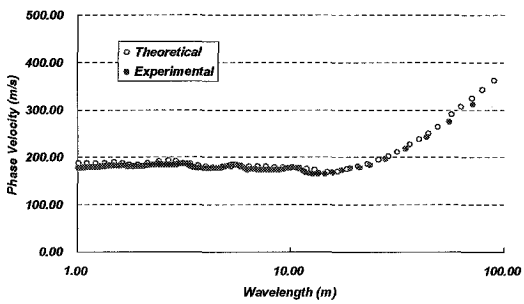
2차원 강성 평가를 위한 HWAW 실험을 더욱 손쉽고 빠르게 완료할 수 있도록 여러 개의 감지기를 이용하여 현장 실험을 수행, 여러 측점에서의 HWAW 기법 수행 결과를 동시에 획득할 수 있는 시험 시스템을 구축하고자 한다. 이를 위해 가진원으로부터 가장 가까운 감지기 위치 및 총 감지기 개수를 설정하고자 첫층의 두께가 15m이고 각 층의 속도가 각각 200m/s, 400m/s인 모델 3을 이용하여 수치 모의 시험을 수행하여 보았다. HWAW기법을 통해 획득한 실험 분산곡선과 정모델링 프로그램인 WinSASW1.23(조성호, 1996)을 이용하여 획득한 감지기 위치별 이론분산곡선을 비교하는 방식을 통해 결과의 신뢰성을 검증하는 방식을 취하였다. 그림 3.1.22에 각 감지기 위치별 실험 분산곡선과 이론분산곡선을 비교한 결과를 도시하였다. 그림에서 보듯이 수평 모델임에도 불구하고 표면파의 특성 때문에 감지기 위치에 따라 이론분산곡선을 다르게 되며 HWAW기법을 통해 획득한 실험분산곡선 또한 감지기 위치별 이론분산곡선의 변화 양상을 잘 따르는 것을 볼 수 있다. 기본적으로 수치해석 오차가 5%정도 나는 것을 감안할 때 감지기 4m&6m, 6m&8m, 8m&10m의 결과는 그 오차 범위 정도의 차이가 나는 것을 볼 수 있다. 하지만 감지기 2m&4m를 이용한 결과와 감지기 10m&12m 이용한 결과에서 파장 20m이상의 장주기부분에서 HWAW 기법을 통해 도출한 실험 분산곡선과 정모델링을 통해 획득한 이론분산곡선과의 차이가 수치해석에 의한 오차에 비해 크게 발생하는 것을 알 수 있다. 이것은 가진원으로부터 너무 가까운 경우 근접장을 이용하는 HWAW기법도 장파장 대역에서는 오류가 생길 수 있기 때문이며 가진원으로부터 멀어지는 경우는 표면파가 지반을 따라 이동하면서 왜곡정도가 점점 심하게 발생하기 때문에 나타나는 현상이라고 판단된다. 그러므로 2차원 강성 평가를 위한 HWAW기법 수행을 위한 현장 시험법으로 감지기는 총 4개를 사용하며 각각 가진원으로부터 4m, 6m, 8m, 10m에 위치하는 방식을 사용하는 것이 바람직하다고 판단되었다. 이러한 현장 시험법은 실제 현장에서 추가적인 검증을 실시하여 최종적으로 확립할 예정에 있다.



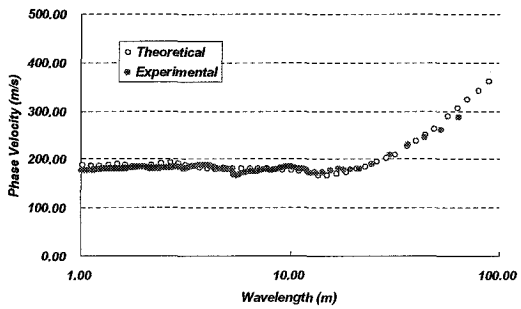
a) 감지기 거리 2m, 4m 결과



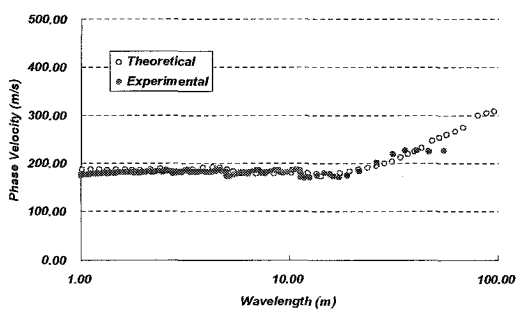
b) 감지기 거리 4m, 6m 결과



c) 감지기 거리 6m, 8m 결과



d) 감지기 거리 8m, 10m 결과



e) 감지기 거리 10m, 12m 결과

그림 3.1.22 각 감지기 위치에서의 HWAW기법을 이용하여 도출한 실험 분산곡선 결과와 정모델링 프로그램을 이용한 감지기 거리별 이론 분산곡선의 비교

라. 근접장영역에서의 분산곡선 도출 및 HWAW 기법에 적합한 정모델링 기법 연구

본 연구에서는 여러가지 지반 모델을 통하여 근접장 영역에서 HWAW 기법의

실험 분산곡선 도출 방법에 대한 검증과 HWAW 기법에 적합한 정모델링 기법에 대해 초점을 맞추었다. 유한요소 해석 모델링으로 생성된 시간 영역 신호에 대해 HWAW 기법을 통해 분산곡선을 도출하고 여러 가지 정모델링 기법으로 계산된 이론 분산곡선과 비교해 봄으로써 HWAW 기법의 역산과정에 적합한 정모델링 기법에 대해 고찰하였다.

본 수치해석에 사용된 지반 모델의 형상은 그림 3.1.23과 같다. Case 1은 균질한 반무한층 지반이며 Case 2와 Case 3은 정규 분산(normally dispersive) 모델, Case 4는 역분산(inverse dispersive) 모델, Case 5와 Case 6는 비정규(irregular dispersive) 모델이다.

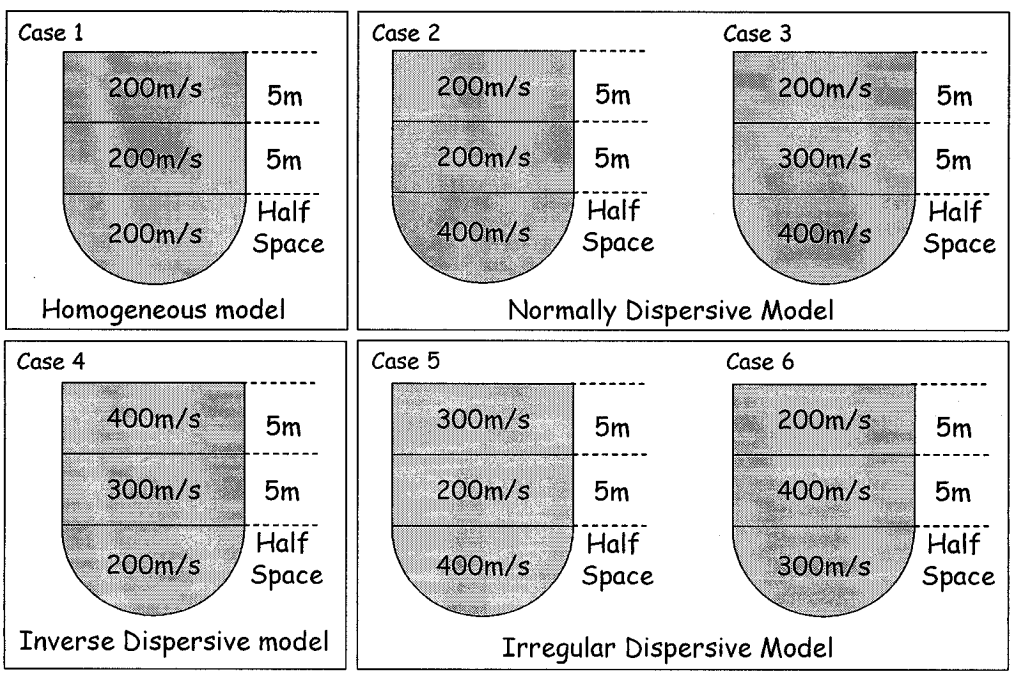


그림 3.1.23 수치해석을 위해 제작된 지반 모델

Case 1의 균질층에서는 기하하적 분산(geometric dispersion) 특성을 제외한 순수한 근접장에 의한 영향을 알아보고자 하였으며 일반적인 지반을 대표하고자 토층의 두께가 두꺼운 2층 모델(Case 2), 깊이에 따라 강성이 서서히 증가하는 모델(Case 3), 깊이에 따라 강성이 서서히 감소하는 모델 (Case 4), 표층에 다짐등으로 인해 강성이 큰 지반(Case 4), 중간에 주변보다 강성이 큰 층이 있는 지반(Case 5)을 단순하게 모사하였다. 각 층 전단파 속도는 그림 내에 표기한 바와 같으며 밀도

와 포아송비는 각각 1.8t/m^3, v=0.3 이다.

그림 3.1.24에 수치해석 모델의 메쉬 형상 및 본 연구에서의 수치해석 검증 과정에 대해 도시하였다. 우선 유한요소법을 통해 3차원 상에서 수직하중에 의한 탄성파 전파를 모사하게 된다. 지표면 가진에 의한 탄성파의 전파는 가진점을 기준으로 축대칭 형태이므로 축대칭 요소를 사용하여 수치해석을 수행하였다. 각 가상 감지기 위치에서 기록된 시간 이력 곡선을 이용하여 HWAW 기법으로 실험 분산곡선을 획득하며 이 실험 분산곡선을 앞 장에서 비교하여 소개한 바 있는 레일리 모드 분산곡선(normal modes), Lai의 방법(레일리파를 평면파로 가정)과 Kausel의 방법(체적파와 원통형 레일리파 고려)을 통해 도출한 이론분산곡선과 비교하는 작업을 수행하였다.

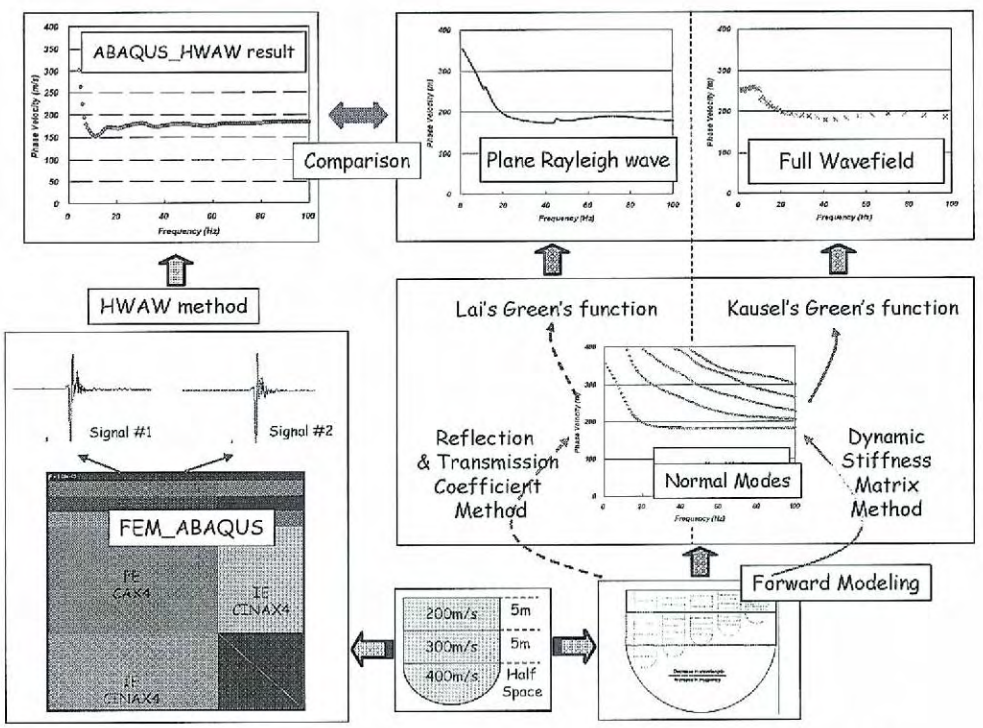


그림 3.1.24 수치해석을 통한 HWAW 기법의 검증 과정 개요도

탄성파의 전파 특성을 모델링하는 유한요소 해석에서는 모델 내 요소의 크기와 계산 간격이 결과의 정확성을 보장해 주는 중요한 요소이다. Zerwer 등(2002)에 의하면 탄성파 전파 특성을 모델링할 경우 적합한 요소의 크기는 최소 파장의 0.2배 이하이어야 하며 계산 간격은 요소내 통과 시간의 1/10에서 1배 사이가 적합한 것

으로 추천하였다. 따라서, 모델의 입력 최소 속도가 200m/s, 최대 관심 주파수를 100Hz 정도로 고려할 때 최소 파장의 크기는 2m 정도이므로 요소 크기를 0.2m로 충분히 작게 결정하였으며 계산 간격은 한 요소를 이동하면서 1번 이상의 계산이 수행될 수 있도록 0.0005초로 설정하였다. 계산 간격은 더욱 짧게 설정할수록 더욱 정확한 결과가 도출되겠지만 총 해석 소요 시간을 고려하여 0.0005초로 설정하였다. 전체 모델의 크기는 획득하고자 하는 최대파장을 고려하여 수직 100m, 수평 100m로 설정하였다. 대칭축 상에서 지표면에서 수직방향으로 해머 타격과 유사한 방식으로 가진을 하였다. 1차원 모델에서는 특히 근접장에서의 거동 특성을 보기 위하여 가진원으로부터 2m부터 14m까지 2m간격으로 시간 이력곡선을 획득하였다. 시간 이력곡선은 실제 현장에서 주로 수직 방향 성분의 속도계를 사용하므로 수직 방향에 대한 입자 속도(particle velocity) 성분을 획득하였다.

가정한 지반 모델의 수치해석 결과, 그림 3.1.25의 Case 1, 즉 균일한 반무한층에서의 유한요소 해석 결과를 Lai의 방법 및 Kausel의 방법을 이용한 이론 분산곡선 도출 결과와 비교하였다. 유한요소 해석 결과(ABAQUS_HWAW)는 가진원으로부터 2m에서 14m까지 2m간격으로 측정한 시간 이력곡선을 이용하여 HWAW 기법으로 분산곡선을 도출한 것이며 Lai의 방법(Plane Rayleigh Wave)와 Kausel의 방법(Full Wavefield) 결과는 유한요소 해석 결과에서와 동일한 가상의 감지기 위치에서의 주파수별 위상 정보를 이용하여 분산곡선을 도출한 것이다. 이러한 균질한 반무한층에서는 레일리파가 완전 평면파로 가정되었을 경우 결정되는 위상속도는 같이 주파수별로 동일하며 하나의 모드만이 존재한다. 그러므로 가진원으로부터 거리가 달라진다 할지라도 Lai의 방법에 의해 도출한 서로 다른 감지기 위치에서의 분산곡선은 모두 동일한 것을 볼 수 있으며 레일리 모드 분산곡선(normal modes)과 완벽히 일치하고 있다. 이에 반하여 Kausel의 방법의 결과는 주파수별로 다른 위상속도를 가지며 가진원으로부터 거리가 달라짐에 따라 분산곡선의 형태 또한 달라지는 것을 볼 수 있다. 이는 아직 감쇠되지 않은 체적파와 원통형 전파 특성을 보이는 레일리파에 의한 결과이며 근접장 효과에 따른 결과이다.

ABAQUS 수치해석을 통해 획득한 파형으로 HWAW 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. ABAQUS 수치해석은 시간 영역에서 계산을 수행하게 되며 실

제 지반과 동일한 상황으로 탄성파가 전파되는 것을 모사하고 있다. 실제 지반에서도 가진원으로부터 가까운 거리에서는 근접장 효과에 의해 분산곡선이 영향을 받게 될 것이며 이 경우 레일리파를 평면파로 가정하고 이론 분산곡선을 도출하여 역산을 수행하는 방식을 취할 경우 올바른 전단파 속도 주상도를 도출할 수 없게 된다. Case 1의 경우 단일층임에도 불구하고 굴곡이 있는 실험분산곡선을 평면파 가정을 통한 이론 분산곡선을 이용하여 일치시켜 주기 위해서는 단일층이 아닌 복잡한 형상의 전단파 속도 주상도를 가정해야 한다.

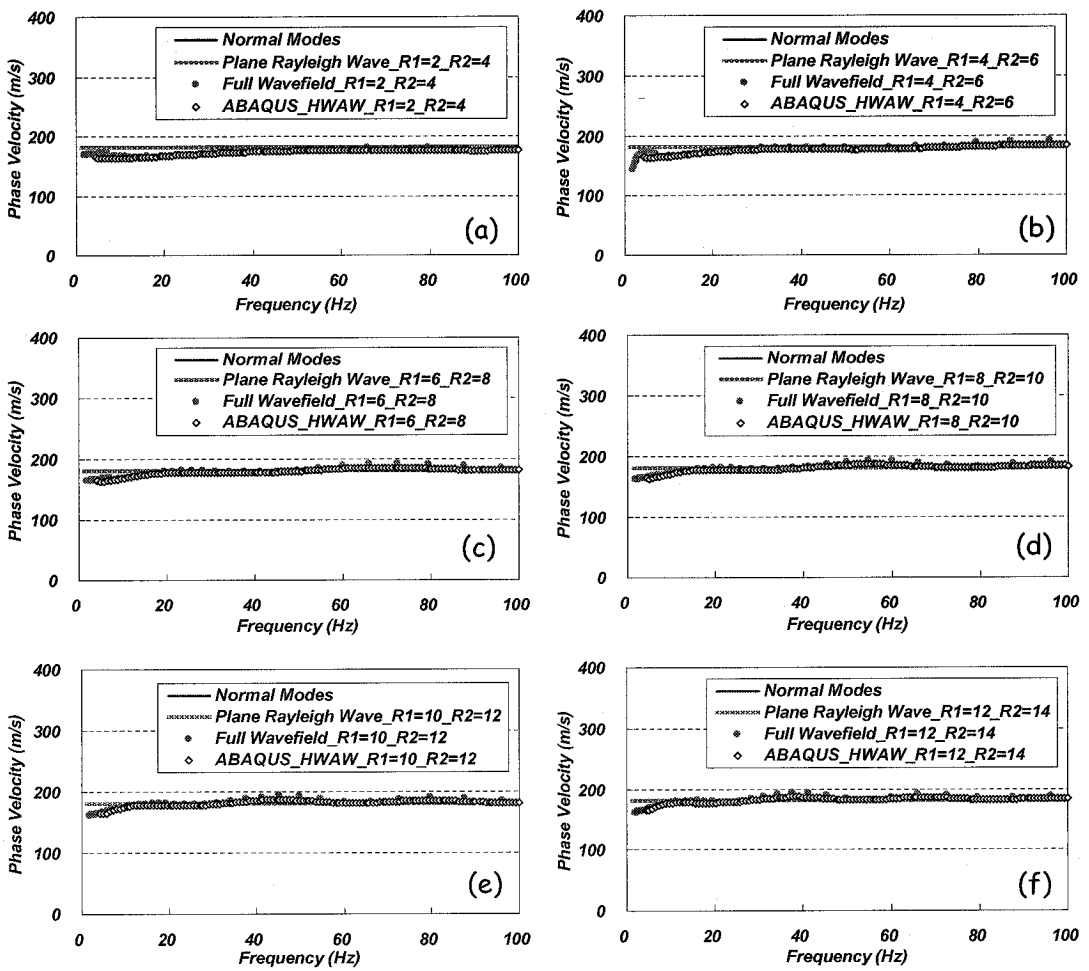


그림 3.1.25 균일 반무한층(Case1)에서의 수치해석 결과 비교

일반적인 표면파 기법에서는 이러한 근접장 효과를 현장 실험 수행 단계에서 최대한 피하거나 필터 조건을 통해 제거한 뒤 평면파 가정을 통한 역산을 수행하고 있다. 이럴 경우 장주기 성분을 획득하기 위해서는 그만큼 더 긴 가진원 거리가 요구되게 되며 실제 현장에 적용시 비실용적이게 된다. HWAW 기법에서는 이러한

근접장 효과를 적극적으로 이용하고자 하는 것이며 역산 과정에서 이러한 근접장 효과를 고려하게 된다면 신뢰성 있는 전단파 속도 주상도의 도출이 가능하게 된다. 위의 그림(Case1)에서 볼 수 있듯이 체적파와 원통형 레일리파를 고려하는 Kausel의 방법을 이용한 이론 분산곡선이 HWAW 기법을 통한 실험분산곡선과 일치하는 것을 볼 수 있으며 이는 곧 역산 과정에서 Kausel의 방법을 적용하여 이론 분산곡선을 획득하게 된다면 올바른 전단파 속도 주상도를 도출할 수 있다고 결론지을 수 있게 된다. 물론 SASW기법으로도 동일한 감지기 위치에서 실험 분산곡선을 도출할 수 있지만 SASW기법은 해석 과정상 주변 잡음(noise)에 매우 취약하여 작은 에너지로 위상 속도를 결정지어야 하는 저주파 대역에서 올바르지 못한 결과를 도출할 수 있다. 그러므로 HWAW 기법이 SASW 기법보다 근접장 영역을 적극적으로 이용하는데 있어 유리하다고 할 수 있다.

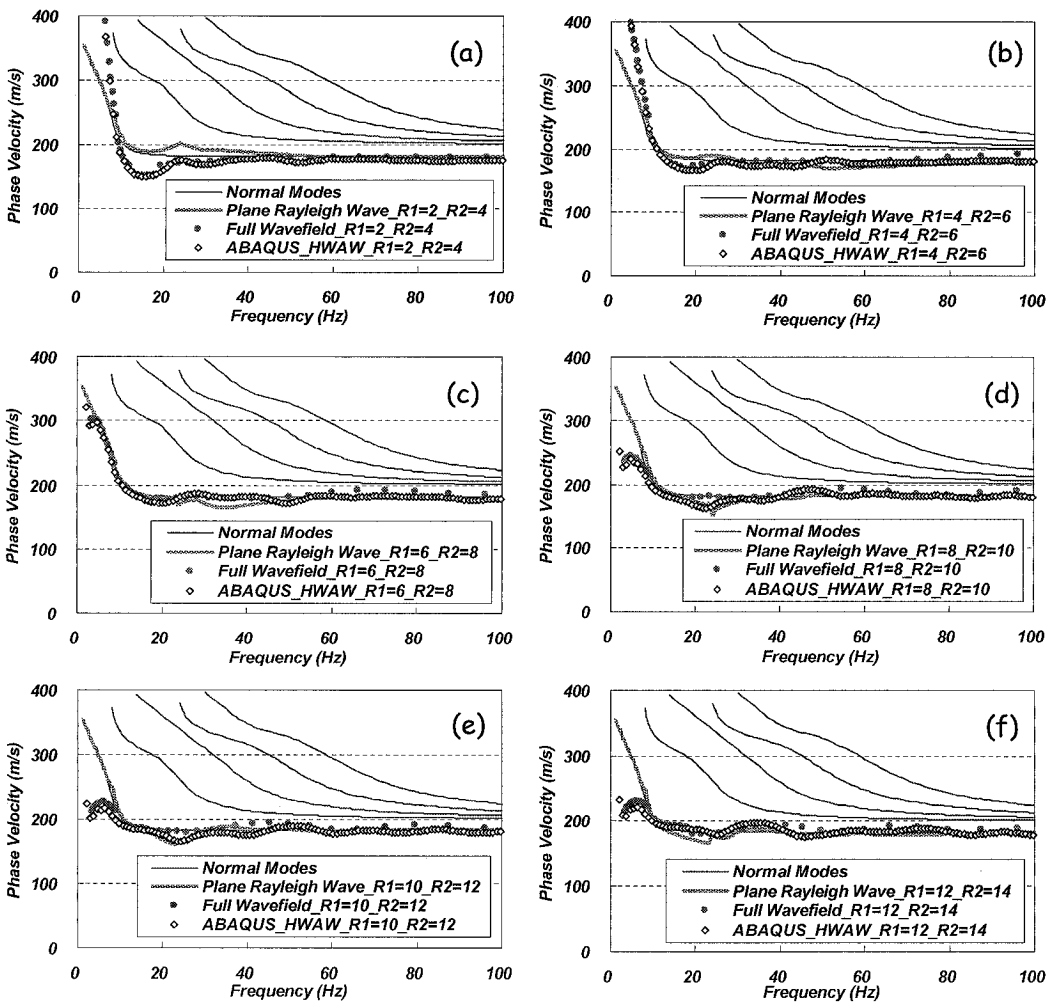


그림 3.1.26 Case 2에서의 수치해석 결과 비교

Case 2는 2층 모델로 Case 1과는 다르게 깊이에 따라 속도가 증가하는 모델이다. 이 경우 분산곡선의 형태는 Case 1의 균질한 층과는 다르게 주파수에 따라 변화가 크게 존재하게 된다. Case 2의 수치해석 연구 결과를 비교하여 도시하면, 레일리 모드 분산곡선의 경우 여러 모드가 존재하는 것을 볼 수 있으며 Lai의 방법 결과는 레일리 모드 분산곡선 중 기본 모드(fundamental mode)와 거의 동일한 형태를 보이고 있다. 하지만 이 경우에 있어서도 Kausel의 방법 결과와 ABAQUS 수치해석을 통한 HWAW 기법 결과가 매우 유사한 것을 볼 수 있다. 반면 Lai의 방법 결과는 HWAW 기법 결과와 상당한 차이를 보이는 것을 볼 수 있다. 만약 Lai의 그린 함수 방식을 이용하여 역산을 수행하게 된다면 Case 2의 모델 속도를 올바르게 도출하는 것은 불가능할 것이다. 또 다른 정규 모델인 Case 3은 강성이 서서히 증가하는 3층 모델로 이 경우에도 Case 2에서와 유사한 결과를 보여주고 있다.

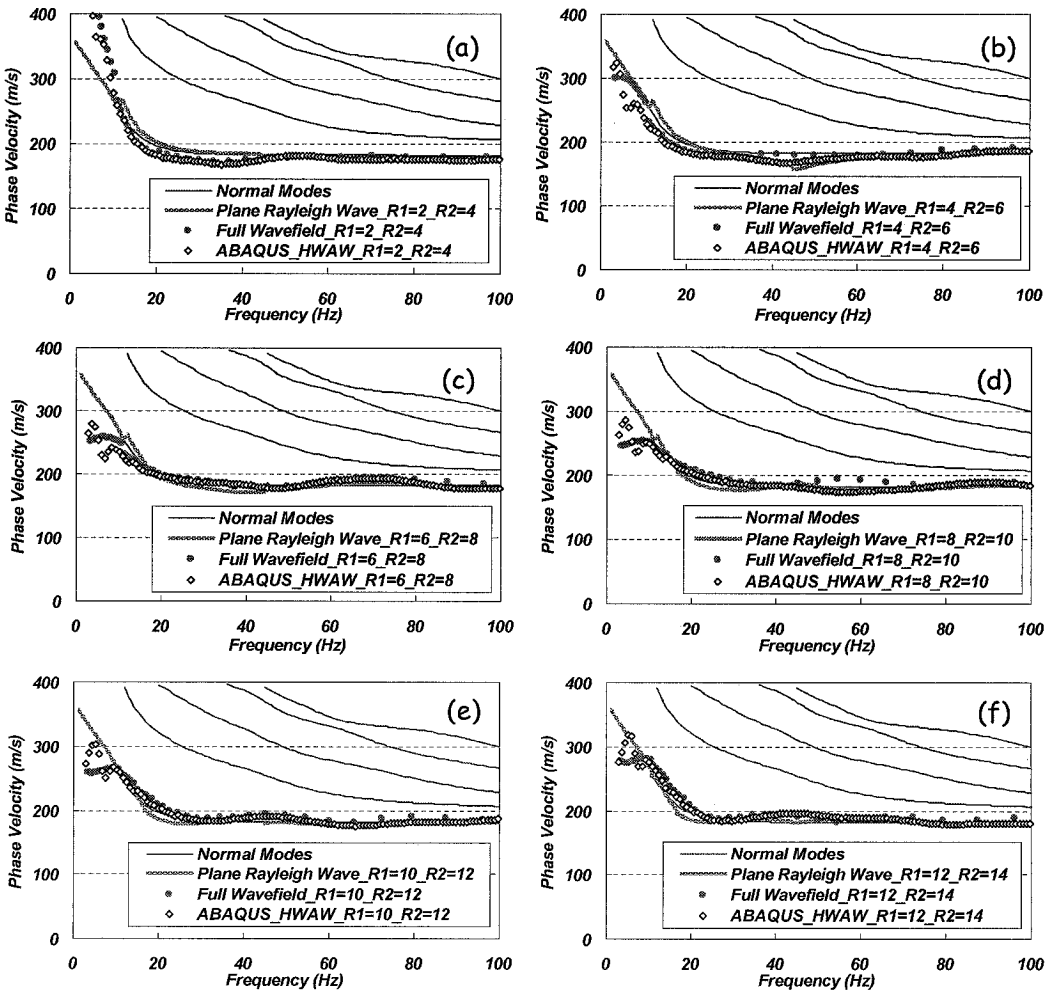


그림 3.1.27 Case 3에서의 수치해석 결과 비교

Case 4는 깊이에 따라 속도가 서서히 감소하는 지반의 형태를 나타내는 3층 모델이다. 실제 지반에서 이러한 지반은 극히 드물지만 성토된 깊은 연약지반과 유사한 경우를 모사한 것이다. 일반적으로 반무한층의 압축파 속도가 상부층의 전단파 속도보다 작을 경우 2차원 정모델링을 통해 레일리 모드 분산곡선을 획득하기 힘들다(Sanchez-Salinero, 1987, Strobbia, 2004). 본 연구에서는 반사,투과계수법을 기반으로 한 Lai(1998) 프로그램에서 모델에서의 반무한층을 200m 깊이로 가정하고 이후 400m/s의 반무한층을 가상으로 첨가하여 레일리 모드 분산곡선을 구하였다. 이러한 경우에도 레일리 분산곡선의 모드 구분이 어려운 형태로 분산되어 도출된 것을 볼 수 있다. 이러한 이유는 역분산 모델에 있어서는 표면파의 형성이 제대로 되지 않으며 수직으로 전파되는 SV파 만이 주되게 형성되기 때문이다

(Sanchez-Salinero, 1987). 하지만 Kausel의 방법은 모든 탄성파를 동시에 실제 현상과 동일하게 고려하기 때문에 정상적인 형태의 이론 분산곡선을 제시하고 있는 것을 볼 수 있다. 또한 Case 4의 경우에 있어서도 HWAW 기법으로 획득한 실험 분산곡선이 Kausel의 방법 결과와 유사한 것을 알 수 있다.

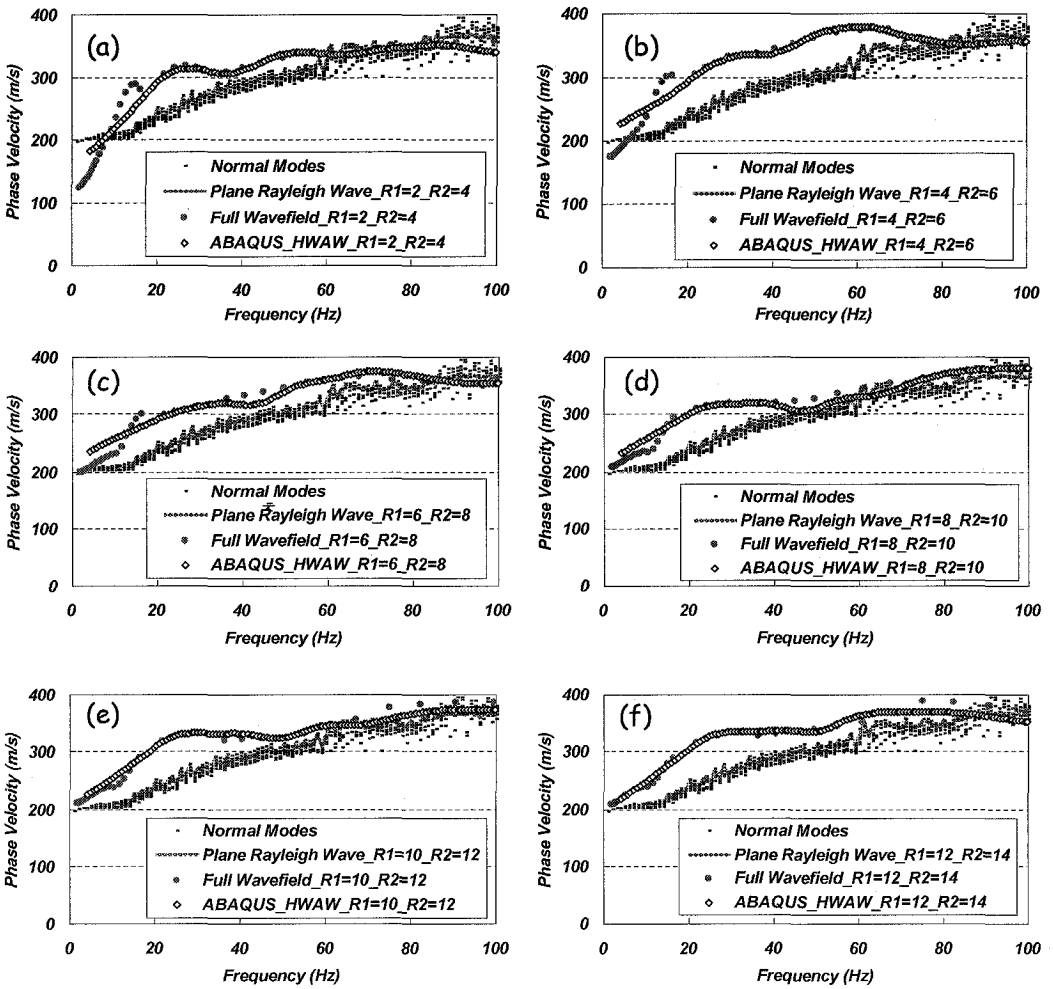


그림 3.1.28 Case 4에서의 수치해석 결과 비교

Case 5는 지반의 강성이 감소했다 다시 증가하는 즉, 과압밀 지반 혹은 상부 다짐지반의 형태를 나타내는 3층 모델이다. Lai의 방법에 의한 이론 분산곡선은 지금까지의 경우와 다르게 레일리 모드 분산곡선의 기본 모드와 유사하지 않고 주파수가 증가할 수록 레일리 모드 분산곡선의 고차모드로 옮겨 가는 것을 볼 수 있다. 이는 Lai의 방법은 체적파를 고려하지는 않지만 거리에 따른 레일리 모드의 중첩

된 형태를 모사하기 때문이다. 이러한 상부층이 단단한 지반에 있어서는 고주파 대역에서는 기본 모드보다는 고차 모드가 더욱 우세하므로 전체적인 지표면에서의 변위 형상은 고차모드에 지배적이게 된다. Case 5의 경우에서도 앞의 모델의 경우와 마찬가지로 Lai의 방법에 의한 이론 분산곡선에 비해 Kausel의 방법을 이용한 이론 분산곡선과 ABAQUS 수치해석을 통한 HWAW 기법 결과가 매우 유사한 것을 볼 수 있다. Case 6은 Case 5와 마찬가지인 비정규 모델로 이 모델은 중간에 주변보다 단단한 층이 존재하는 지반을 나타내고 있다. Case 6에서도 마찬가지로 ABAQUS 수치해석을 통한 HWAW 기법 결과가 Kausel의 방법을 이용한 이론 분산곡선과 매우 유사한 것을 볼 수 있다.

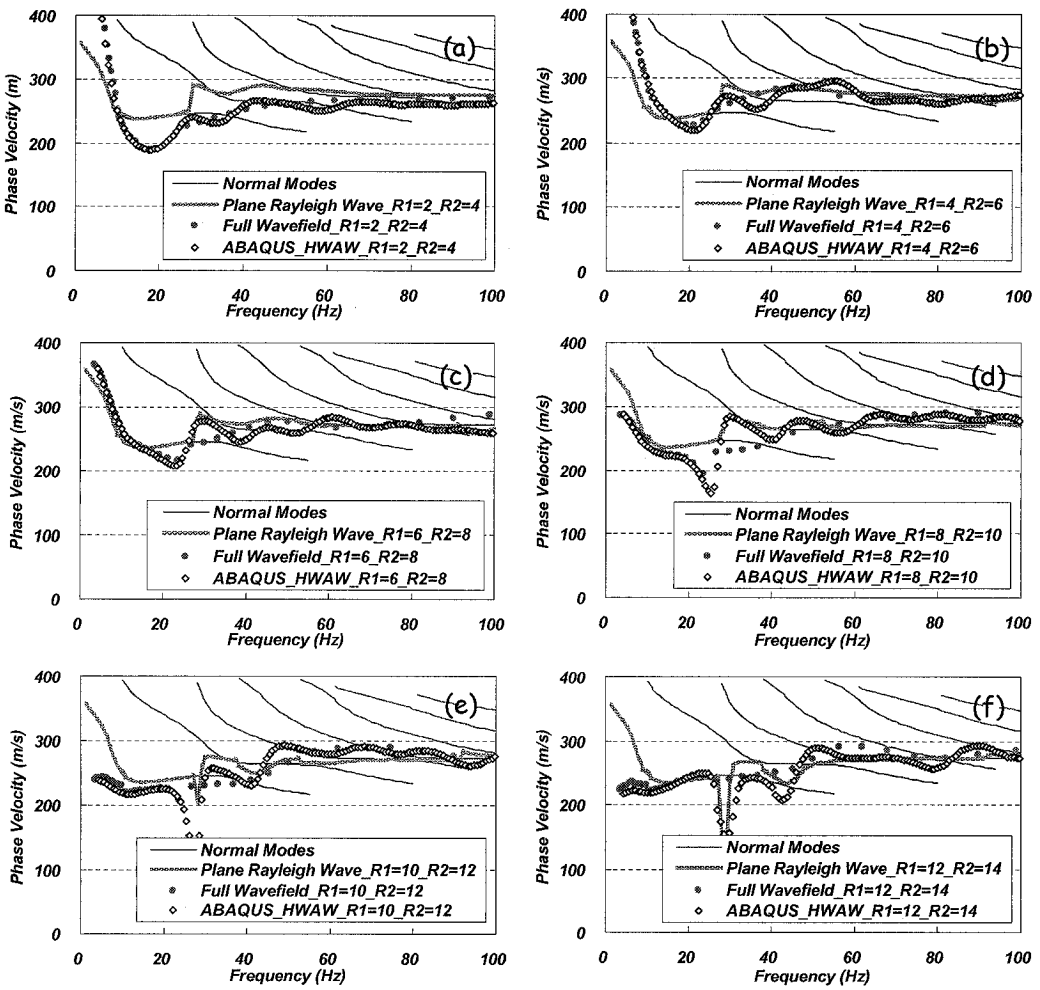


그림 3.1.29 Case 5에서의 수치해석 결과 비교

가정한 지반모델의 유한요소 해석를 통한 근접장에서의 HWAW 기법 검증 연구에 있어서 수치해석 결과와 Kausel의 방법이 대부분의 경우에 있어 유사한 결과를 도출하였다. 따라서 HWAW 기법으로 획득한 근접장 성분이 가미된 실험 분산곡선을 전단파 속도 주상도로 역산하는데 있어 Kausel의 방법의 정모델링 기법이 적합하며 이를 통해 신뢰성 있는 전단파 속도 주상도의 도출이 가능하다는 것을 확인할 수 있었다. 그러므로 다른 표면파 기법과는 달리 HWAW 기법은 근접장 성분의 적극적인 이용에 유리하므로 짧은 거리의 측선을 이용하여도 깊은 깊이의 물성치를 신뢰성 있게 획득하는 것이 가능함을 확인 할 수 있었다. 이와 동시에 본 연구의 연구 결과로 Kausel의 방법이 실제 지반에서 체적파를 포함한 표면파의 전달현상을 잘 모사할 수 있도록 신뢰성 있게 유도되었음을 확인 할 수 있었으며 사용된 프로그램 또한 Kausel의 방법을 기반으로 하여 정확하게 코딩되었음을 확인 할 수 있었다. 현재 HWAW 기법의 상용화를 위하여 자체적으로 Kausel의 방법을 기반으로한 정모델링 프로그램과 자동 역산 프로그램을 제작하고 있으며 이를 통해 HWAW 기법을 통해 두 개의 감지기와 짧은 측선을 이용한 간단한 현장 실험으로 신뢰성 있는 전단파 속도 주상도의 도출이 가능하리라 기대된다.

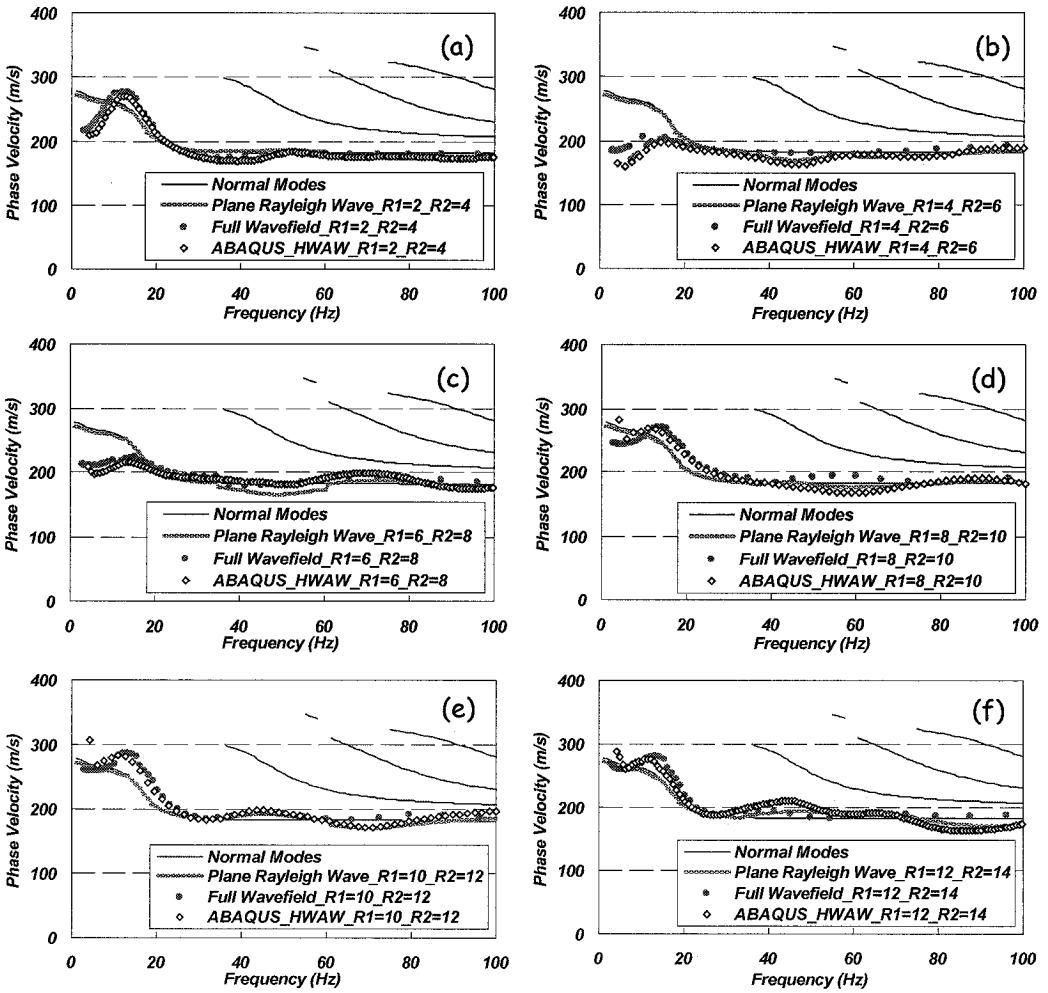


그림 3.1.30 Case 6에서의 수치해석 결과 비교

제 2 절 현장 실험 장비의 개선 및 데이터 획득 시스템 구축

본 절에서는 각 기법에 필요한 감지기, 가진원 등의 현장 시험 장비 및 현장 신호획득 시스템을 본 연구실 기존의 장비 구성에서부터 현업에서 널리 이용되는 장비, 새롭게 제안된 경제적인 장비 등을 비교.검증하여 상용화에 걸맞는 최종적인 현장 시험시스템 구성을 위한 연구를 나타내었으며 이 결과를 바탕으로 5절에서 최종적인 현장 시스템을 구성하였다.

1. SPT 업홀 토모그라피 기법을 위한 현장 시험 시스템 구축

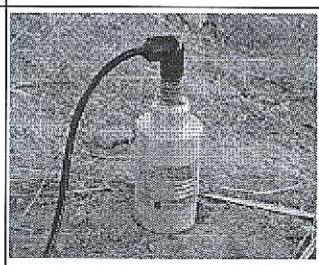
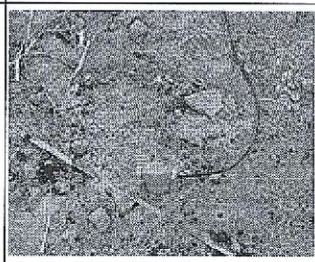
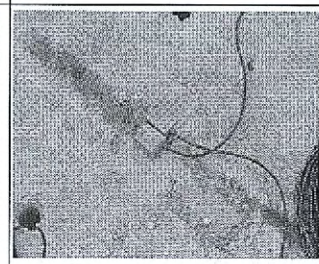
SPT 업홀 토모그라피 기법은 크게 현장 실험을 통해 초동정보를 신뢰성 있게 획득하는 부분과 획득한 초동정보를 적합한 토모그라피 기법을 이용하여 2차원 강성 결과를 도출하는 부분으로 나뉘어진다. SPT 업홀 시험용 현장 시험 시스템 구축하기 위해서 크게 감지기 종류(Receiver Spec) 선택에 대한 연구와 신호 획득 장비 구성에 대한 연구를 수행하였다.수치해석을 통해 2방향 감지기를 사용할 경우 신뢰성있는 SPT 업홀 해석을 수행하는 것을 확인하였다. 따라서 본 연구에서는 상용화에 적합한 다채널의 수직, 수평 감지기 구성을기존 상용 제품을 구매하여 감지기 구성을 확립하였다. 또한 다양한 신호획득 장비를 비교하여 향후 상용화에 적합한 고사양의 동적신호 획득기와 보급형 DAQPad를 이용한 신호획득 장비를 구성하였다.

가. 감지기

SPT 업홀시험에 적합한 감지기 선택을 위해 표3.2.1과 같은 여러 가지 감지기를 이용, 예비 시험을 수행하였다. 고유주파수가 1Hz인 감지기 Set 1은 본 연구기관에서 기존에 소유하고 있던 장비로 감지기의 민감도가 뛰어나고 저주파 대역까지 획득 가능하다는 장점이 있으나 감지기 크기가 크고 고가인 단점이 있다. SPT-업홀 기법에서 SPT 가진원의 에너지가 매우 크고 가진원으로부터 감지기 위치가 멀지 않기 때문에 그다지 높은 민감도의 감지기가 요구되지 않는다. 또한 토모그라피 기법 적용 시 충분한 데이터 획득을 위해 실험 수행시 요구되는 측점 개수가 10개 이상이며 정확한 초동 정보 획득을 위해 수평성분과 수직성분을 동시에 획득하기 위해서는 20개 이상의 감지기가 필요하게 된다. 그러므로 감지기의 단가 또한 기법의 상용화을 구현하는데 고려해야할 요건 중 하나이다. 실질적으로 현장에서 여러 종류의 감지기로 비교 실험을 수행한 결과 모든 감지기Set에서 초동 정보는 유사

하게 획득되는 것으로 보여 졌다. 실제 정확한 초동 획득만을 목표로 하는 탄성파 탐사에서는 저주파용 감지기가 요구되어지지 않는다. 그리하여 크기가 작아 현장 관리가 용이하며 값이 저렴한 감지기가 SPT업홀 토모그라피 기법 상용화에 적합한 감지기라고 판단되어 4.5Hz나 10Hz 감지기를 사용하는 것으로 시험 시스템을 구성하였다.

표 3.2.1 SPT업홀 토모그라피 시험을 위한 감지기 비교

	감지기 set1 (1Hz)	감지기 set2 (4.5Hz)	감지기 set3 (10Hz)
사진			
Frequency range	1Hz-100Hz	4.5Hz-1000Hz	10Hz-1500Hz
Sensitivity	3-15 V/in/sec	0.81-2.54 V/in/sec	0.385-0.500V/in/sec
특징	민감도가 뛰어나고 저주파 대역까지 획득 가능 크기가 크고 고가임	적절한 저주파 대역까지 신호 획득이 가능하며 값이 저렴한 편임.	민감도는 떨어지나 감지기 크기가 작고 저렴함. 다채널 사용시 유리. 장비 관리가 용이함

본 연구팀에서 1차년도에 미국 Geospace LP사의 10Hz 수직 및 수평 감지기를 구매하였고 2차년도에는 HWAW 기법과 동시에 사용하기 위하여 동회사의 4.5Hz 수직 및 수평 감지기를 구매하였으며 일반적인 상업용 탄성파 탐사 장비와 연결하여 다채널 신호를 획득하기 위한 12 채널 Spread take out cable 4개를 같은 회사에서 구매하였다. Cable은 SPT-업홀 및 2D-HWAW, 기타 표면파 탐사 수행을 위하여 감지기 연결 부분의 간격을 2.5m와 4.5m로 나누어 각 2개씩 구매하였으므로 시험 수행시 목표 탐사 심도 및 측선 길이에 따라 감지기수와 감지기 간격을 변화시키며 시험을 수행할 수 있도록 하였다. 연구결과를 바탕으로 SPT-업홀 기법을

효율적으로 수행할 수 있는 시험장비의 감지기 구성을 그림 3.2.1에 나타내었다.

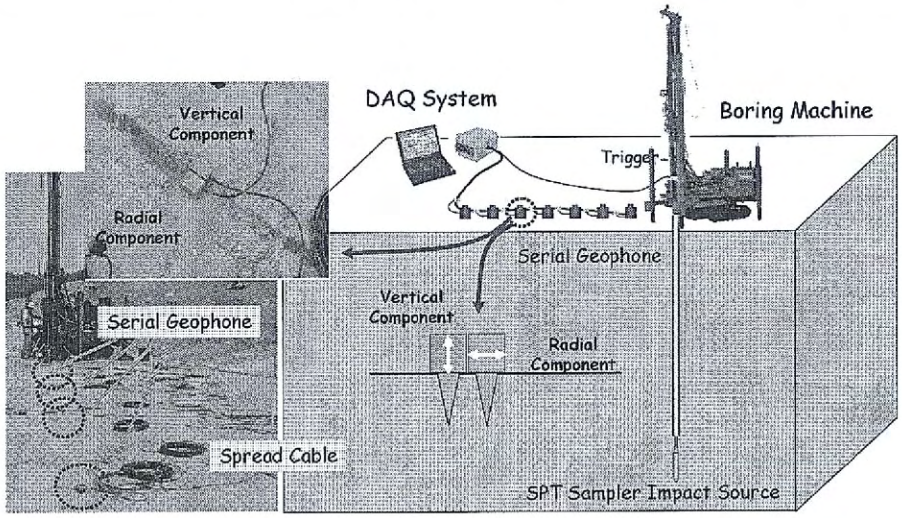


그림 3.2.1 개선된 SPT-업홀 기법의 감지기 시스템의 구성

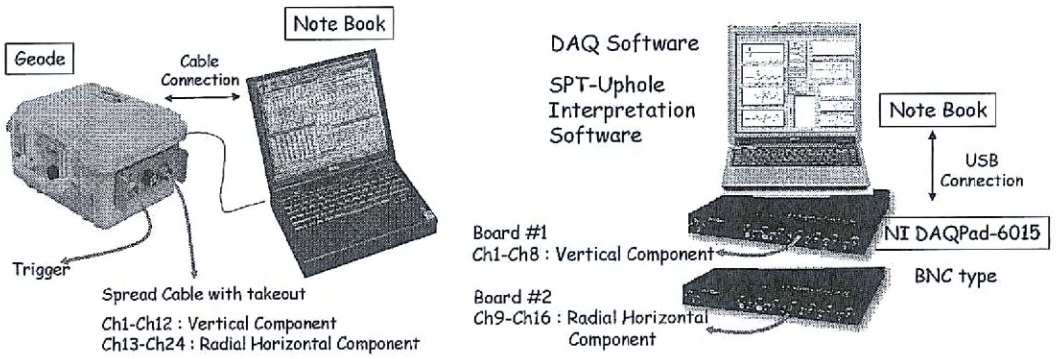
나. 다채널 신호 획득 장비

일반적으로 다운홀 및 업홀 시험에서는 0.02ms 정도의 정확성을 가지고 초동을 결정해야지만 신뢰성 있는 전단파 속도 주상도를 도출할 수 있다. Record Length는 최종 시험 심도, 가장 멀리 위치한 감지기 거리, 지반의 평균 속도 등에 따라 다르겠지만 대략적으로 최대 전파 경로의 길이가 100m, 지반의 평균 속도가 200m/s일 경우 초동은 0.5sec가 된다. 그러므로 SPT 업홀 시험을 위한 데이터 획득 장비는 sampling rate가 50kHz이상이며 Record Length는 1sec 정도 이상이면 충분하다. 1차년도에는 SPT업홀 시험을 수행하기에 충분한 기능을 가지고 있는 장비 중 데이터 획득 방식이 크게 다른 두 가지 시스템을 사용하여 비교연구를 수행하여 보았다. 미국 Nicolet사에서 최근 개발 출시한 Liberty는 BNC케이블을 사용하는 방식이며 노트북에서 DAQ장비를 제어하고 데이터를 획득, 저장을 할 수 있는 시스템이다. 미국 Geometrics사에서 출시한 StratavisorNZ은 내장된 컴퓨터에서 DAQ장비를 제어하며 데이터를 획득, 저장할 수 있게 되어 있다. 이런 방식의 장비는 현재 탄성파 탐사를 수행하는 지반조사에서 대부분 소유하고 있는 것으로 조사되었다. Liberty의 경우 일반 노트북을 사용하기 때문에 향후 자동화 프로그램 도입에 유리하였으나 가격이 비싸 보급형의 DAQPad가 필요하다고 판단되었고, BNC 단자로 각각의 감지기들을 연결하게 되어 있어 현장 사용성에 있어 불편함이 있었

다. Stratavisor NZ은 Spread take out cable 을 사용하므로 다채널을 사용하는데 매우 편리하게 되어 있으나 내장된 컴퓨터를 이용한 자료 해석 및 신호처리에 한계가 있었고 가격이 매우 고가였다.

여러 시험을 통해 현장에서 신호 획득과 동시에 결과 해석을 하는 것은 신뢰성 있는 지반의 전단파 속도 주상도를 도출하는데 있어 매우 유리함이 판명되었으며, 노트북 기반의 신호 획득 장비를 이용할 경우 획득한 신호를 바로 현장에서 관리, 후처리 과정을 신속하게 수행할 수 있다. 따라서 본 연구팀은 1차년도 연구를 바탕으로 최종적으로 그림 3.2.2와 노트북 기반의 신호 획득 장비를 구성하였다. 미국 Geometric사의 Stratavisor Nz의 대안으로 같은 성능을 가지면서 노트북에 연결하여 사용할 수 있는 같은 회사의 Geode를 구매하였으며, DAQPad를 이용하는 보급형 장비를 위하여 Nicolet사의 Liberty를 대신하여 비교적 저가의 미국 National Instrument 사의 NI DAQ보드를 구매하여 노트북 기반 데이터 획득 시스템을 구축하였다. 기존의 탄성파 탐사업체에서 많이 사용하는 Geode는 가격은 약 3000만원 정도이며 24채널에서 sampling rate 50k로 신호획득이 가능하며 24비트의 수직해상도를 가지는 고사양 장비이다. Geode는 노트북과 연결하여 사용하는 제품이므로 획득한 신호의 저장 및 관리 등의 후처리가 용이하다. 이 장비는 기존 업체 장비와 호환성이 좋아 SPT-업홀등 다른 탄성파 탐사의 수행에도 적합하므로 다양한 탄성파 탐사가 가능한 장비와 더불어 SPT-업홀 및 2D-HWAW 시험 장비를 원하는 기관을 대상으로 한 판매에 초점을 맞춘 시스템 구성이다. 약 200만원 정도의 저가형 모델인 NI-DAQPad 6259는 노트북과 USB를 이용한 연결방식을 사용하며 32채널에서 최대 1.25M의 sampling rate를 가지고 수직 해상도는 16비트이다. 이 장비는 노트북을 통해 작성된 신호 획득 프로그램과 신호 관리 및 결과 도출 프로그램을 연계하여 효율적으로 SPT-업홀 기법을 수행할 수 있다. 실제 SPT-업홀 시험에 적용하기 위한 DAQPad 방식은 16채널 기준으로 채널당 50k(0.02ms)의 신호 획득이 가능하다. 따라서 DAQPad를 추가로 연결시켜 이용하게 되면 20채널이상을 활용할 수 있으므로 탐사 길이에 적합한 개수의 2방향 감지기를 설치하여 SPT-업홀 기법을 수행할 수 있다. 또한 기존의 BNC단자와 다채널 Pin 단자를 모두 사용할 수 있는 컨트롤 박스를 제작하여 현장 적용성을 높였다. 이러한 보급형 DAQPad의 경우는 SPT-업홀 시험 및 2D-HWAW 시험을 주로 수행하기를 원하여 저렴한 가격으로 장비를 구매하기를 원하는 기관을 대상으로 한 판매에 초점이

맞춰져 있다.



(a) 고사양 Geode + 노트북 (b) 보급형 DAQPad+노트북

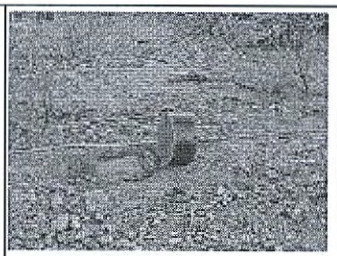
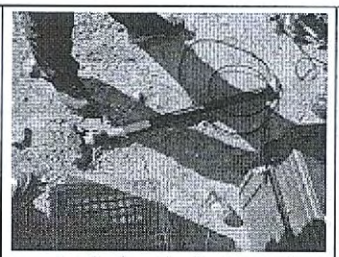
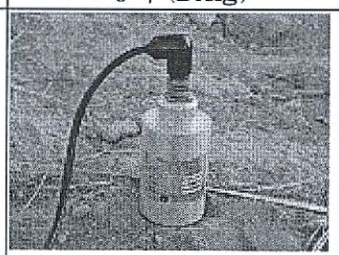
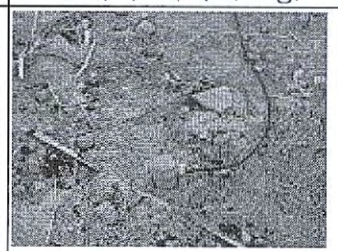
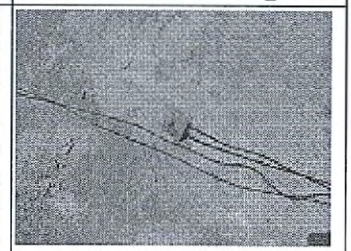
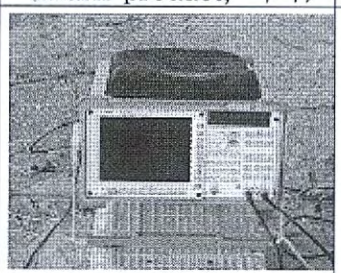
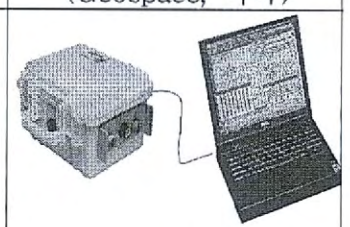
그림 3.2.2 SPT-업홀 현장 시험을 위해 구성된 노트북 기반의 신호 획득 장비

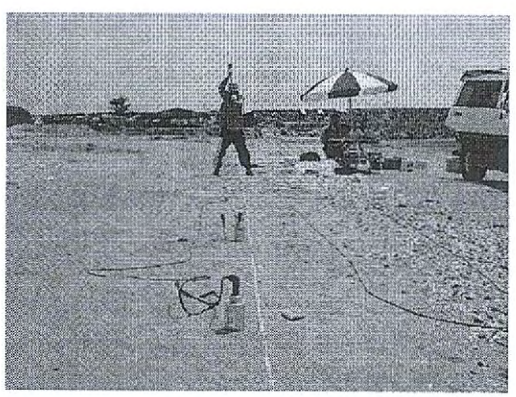
2. 2D-HWAW 기법을 위한 현장 시험 시스템 구축

현장 지반의 세밀하고 신뢰성있는 분산곡선 도출을 위하여 본 연구팀에서는 HWAW 현장 시스템 구축을 위한 연구를 지속적으로 수행하고 있다. 현장 시험 시스템 구축 요소 중 실험에 영향을 미치는 요인으로는 가진원, 감지기, 신호획득장비 등이 있다. 단일한 실험구성에서 신뢰성 있는 시험 결과를 도출하기 위하여 가진원의 종류, 감지기의 종류 및 지반 커플링 장치, 신호획득 장비의 종류에 대한 영향 평가를 수행하였다. 일반적으로 시험은 가진원과 첫 번째 감지기 간의 거리가 6m, 감지기간 거리 2m를 기본 설정으로 하여 수행되고 있다. 표 3.2.2에 본 장에서 수행된 현장 시스템 구축을 위한 영향 요소 평가를 위해 사용된 장비들에 대하여 도시하였다.

영향요소 평가를 위해 주위에 잡음이 적고 수평 방향으로 균질한 지반을 찾아 그러한 지반이라 판단되는 충청남도 보령시의 장안 해수욕장의 모래 사장과 경상남도 하동군 섬진강변 모래퇴적층에서 시험을 수행하였다.

표 3.2.2 시스템 구축을 위해 사용된 시험 구성 장비의 종류

가진원	 중추(20kg)	 슬래지 해머 (5Kg)	 저주파용(100kg)
감지기	 1Hz geophone (Mark product, 미국)	 4.5 Hz geophone (Geospace, 미국)	 10 Hz geophone (Geospace, 미국)
신호획득장비	 HP35670A (Agilent,미국) 2채널	 DAQPad-6015 (NI 미국) 4채널	 Geode (Geomatrics,미국)24채널



(a) 장안 해수욕장

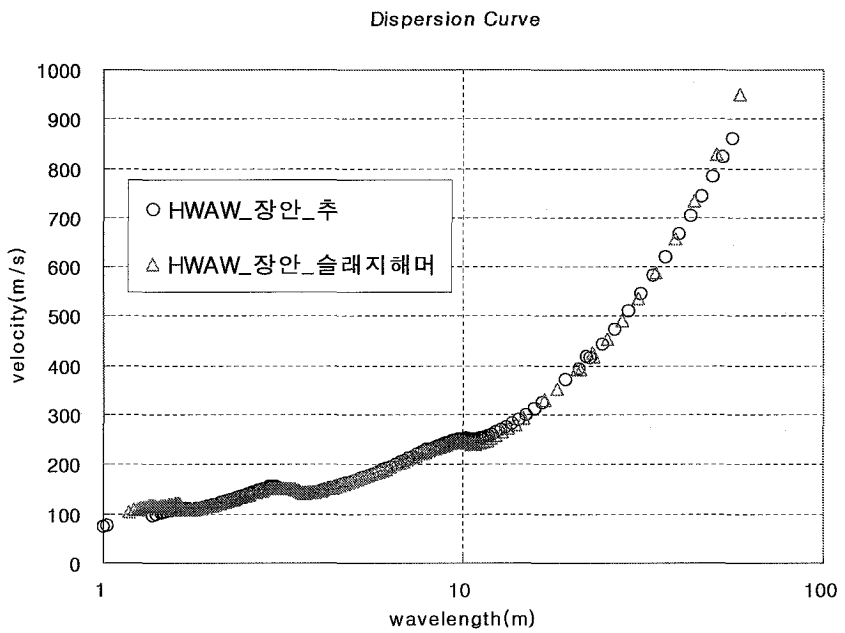


(b) 하동 섬진강변

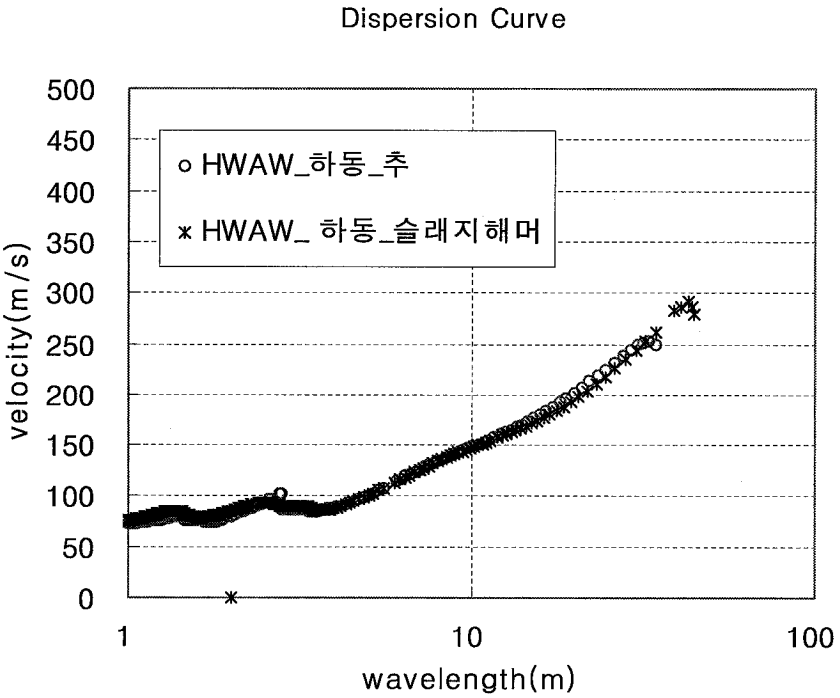
그림 3.2.3 영향요소 평가를 위한 수평 방향 균질 지반에서의 시험 수행

가. 가진원

표면파 시험에서 가진 방법으로 일반적으로 5kg의 슬래지해머를 이용해 땅을 가격해 파를 발생시키는 방법과 20kg정도의 중추를 낙하시켜 파를 발생시키는 방법이 사용된다. 기존의 SASW시험에서는 짧은 감지기 간격, 즉 상대적으로 고주파수 영역을 구할 때는 슬래지 해머를, 저주파수 영역을 구할 때는 중추를 같이 사용하였다. 그러나 HWAW 시험은 1회 타격으로 근접장 영역을 포함한 전제 주파수 대역 (전체 대상깊이)에서 파의 위상 속도를 구하므로 가진원 역시 단일화 시키는 것이 필요하다. 본 연구에서는 가진원이 미치는 영향을 알아보기 위해 같은 시험 구성에서 가진원만을 바꿔 가며 분산곡선을 도출하여 그 결과를 그림 3.2.4에 나타내었다.



(a) 보령 장안해수욕장 현장



(b) 하동 섬진강변 현장

그림 3.2.4 가진원의 변화에 따른 영향

그림3.2.4 에서 보여지는 바와 같이 20kg의 중추와 5kg 정도의 슬래지 해머로 가격한 시험에서 구한 유사한 분산곡선이 도출됨을 알 수 있다. 이와 같은 모래 균질 지반의 경우 뿐만 아니라 지반의 조건(지층 구조나 강성, 흙의 종류)에 따라 가진원이 발생하는 파의 성분에 대하여 연구를 수행하기 위하여 풍화토 지반에서 같은 방법으로 시험을 수행하였다(그림 3.2.5)

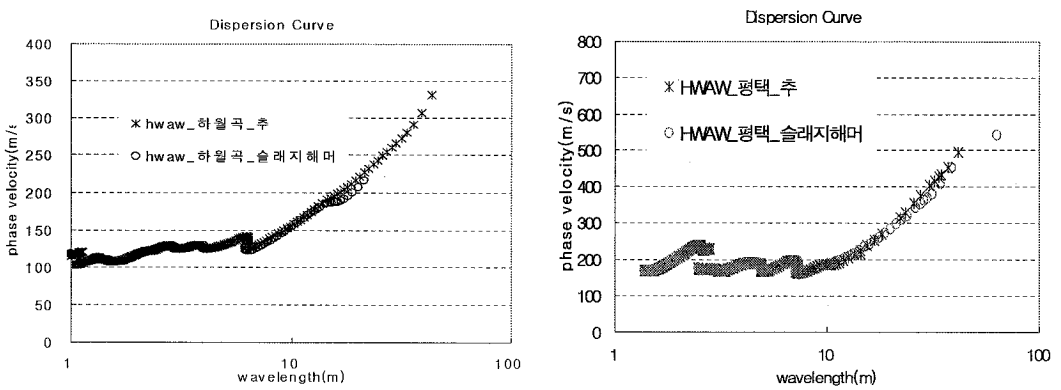
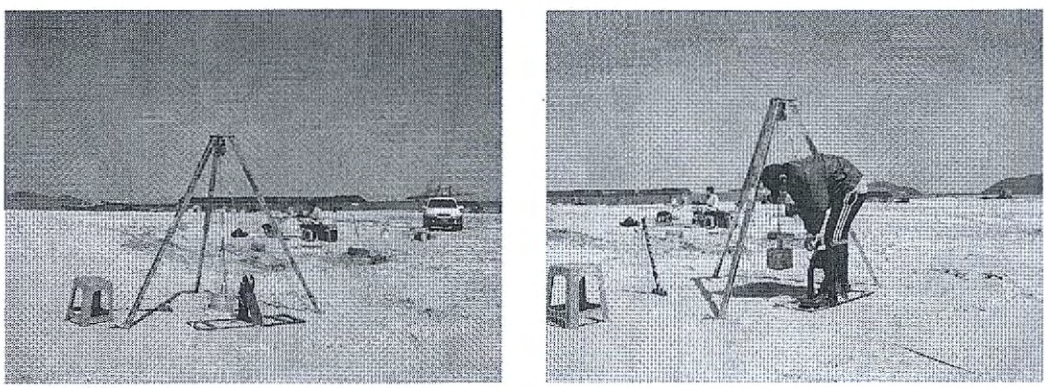


그림 3.2.5 풍화토 현장에서 가진원 변화에 따른 영향요소 고려

그림 3.2.5에서 보여지는 바와 같이 지반의 상태에 따라 분산곡선 도출에 가진원이 미치는 영향이 지반의 상태에 따라 변하지 않음을 알 수 있다. 따라서 두 가지 종류의 가진원 중에 휴대가 편하고 시험자가 수행하기 편한 슬레지 해머를 가진원으로 사용하는 것을 권장하며 추후 실용화를 위한 시험 시스템 구축에서도 슬레지 해머를 가진원으로 사용할 예정이다. 작은 중량의 슬레지 해머를 사용하여 모든 주파수 영역의 파의 위상속도를 구하는 것은 가진원의 종류를 바꿔가며 수행하는 다른 시험들에 비해 큰 장점을 가진다 할 수 있다.

장파장 성분이 많이 요구되는 초연약 지반에서의 기법 적용을 위한 자유 낙하 방식의 중추에 대한 비교 연구가 필요하다고 판단되어 자유낙하식 중추(그림 3.2.6)와 기존 중추 및 슬레지 해머에 대한 비교 연구를 준설 매립 후 압밀단계에 있는 초연약지반인 부산 연약지반에서 수행하였다. 자유낙하식 중추는 삼발이 형태의 지지대를 설치하고 도르래를 이용하여 추를 올린 후 자유낙하로 지표면에 가진하는 형태이다. 이러한 형태의 가진원은 반복성이 좋고 저주파의 파를 전파할 수 있으나 가진절차가 다른 방법에 비해 시간이 걸리고 상대적으로 많은 인력이 필요하다는 단점이 있다.

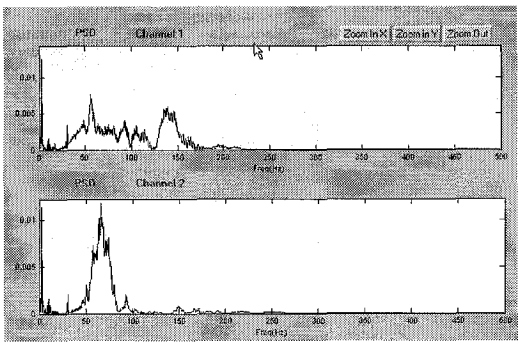


(a) 자유낙하식 중추 (b) 자유낙하식 중추 사용 장면

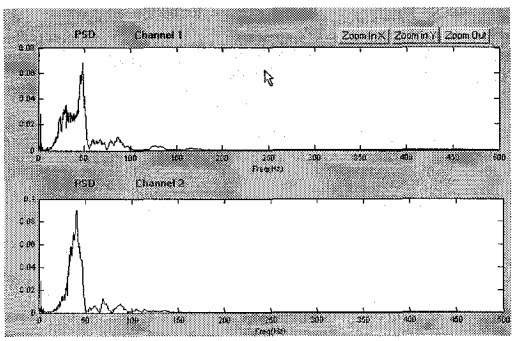
그림 3.2.6 부산 연약지반 부지에서 자유 낙하식 중추의 성능 비교 연구

슬러지 해머와 중추 및 자유낙하식 중추의 가진 특성을 그림 3.2.7에 비교하였다. 주파수 대역에서의 에너지 분포를 비교한 것으로 상부 신호는 가진원으로부터 6m, 하부 신호는 8m 떨어진 위치에서 획득한 감지기 신호를 이용한 것이다. 중추와 자유낙하식 중추가 슬러지 해머에 비해서 저주파 에너지를 다량 발생시키는 것을 볼

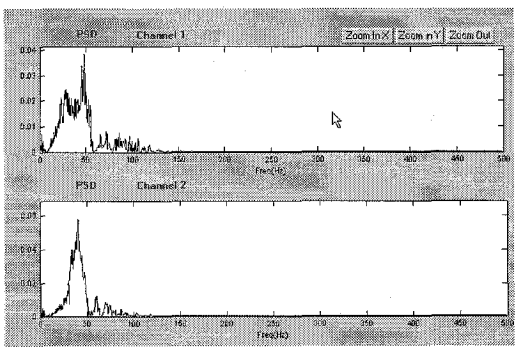
수 있다. 그러나 기존 중추나 자유낙하식 중추의 경우 주파수 대역에서의 에너지 분포가 유사함을 알 수 있다. 각 가진원으로부터 도출한 분산곡선을 그림 3.2.8에 도시하였다. 상대적으로 저주파수 신호를 발생하는 중추와 자유낙하식 중추의 경우 분산곡선이 거의 일치함을 확인할 수 있고 슬래지 해머를 이용한 결과는 어느 정도 차이를 나타냄을 알 수 있다. 따라서 초연약 지반같이 저주파 신호가 필요한 부지에서는 저주파 성분을 포함하는 가진원을 사용하는 것이 바람직하다고 판단된다. 저주파 성분을 발현하는 가진원을 현장 휴대성 및 시험의 간편성을 위해 인력으로 가진시키는 경우 타격의 절차가 간편하고 휴대성이 더 좋은 기존의 중추를 이용한 가진원 구성을 사용할 예정이다.



(a) 슬러지 해머



(b) 중추



(C) 자유낙하식 중추

그림 3.2.7 각 가진원의 주파수 대역에서의 에너지 분포 비교

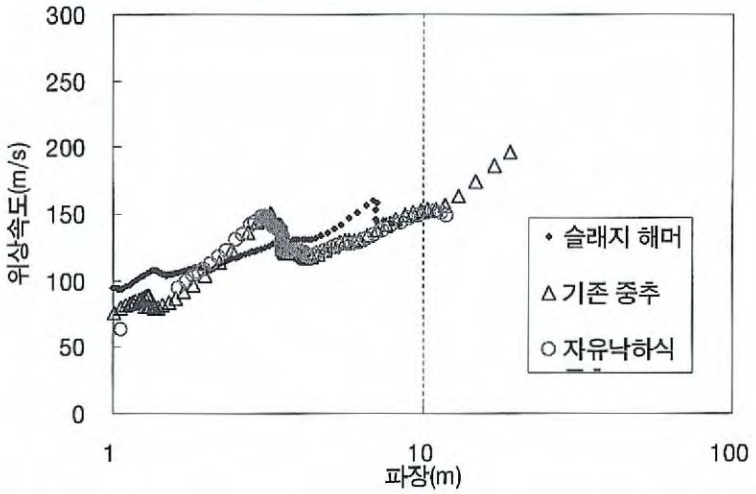
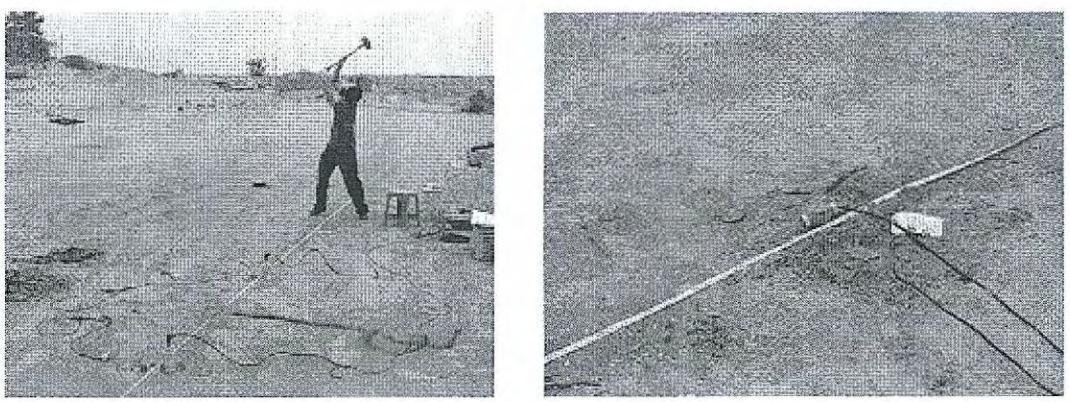


그림 3.2.8 각 가진원으로부터 도출한 분산곡선

나. 감지기 비교

지표면에서의 표면파는 상대적으로 저주파수 성분이 많기 때문에 낮은 주파수 성분을 가진 지오폰을 사용하여 시험을 수행하여 왔다. 기존의 SASW 시험에서는 일반적으로 1Hz 지오폰을 이용하여 시험을 수행하였고, 본 연구팀에서도 HWAW 시험 수행을 위하여 1Hz 지오폰을 이용하였다. 그러나 1Hz 지오폰의 경우 부피가 크고 가격이 비싸다는 단점이 있다. 따라서 상용화를 위해 부피가 작고 가격이 저렴하면서 원하는 주파수 대역의 신호를 측정할 수 있는 감지기의 구성에 대하여 연구를 수행하였다. 표 3.2.2에 나타난 1Hz, 4.5Hz, 10Hz 지오폰을 이용하여 HWAW 시험을 수행한후 (그림3.2.9) 분산곡선을 도출한 후 그림 3.2.10 에 나타내었다.



(a) 1Hz , 4.5Hz (b) 4.5Hz , 10Hz

그림 3.2.9 HWAW 시험에 사용된 감지기

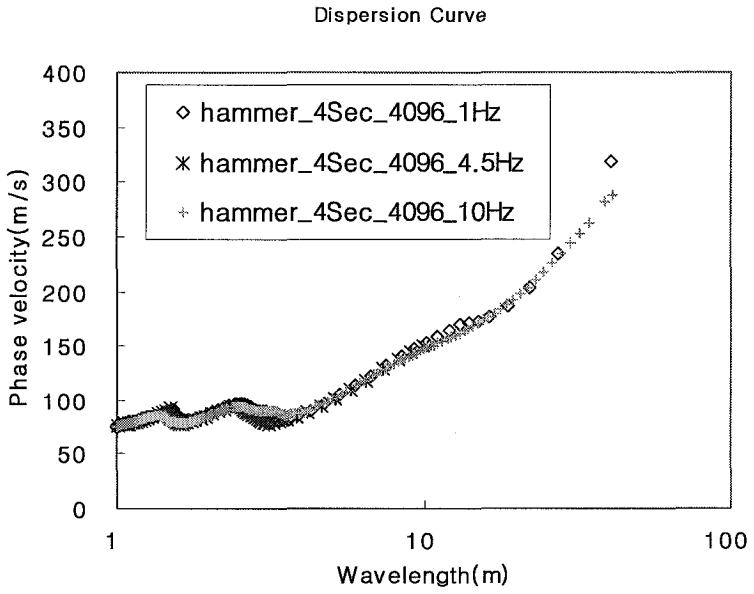


그림 3.2.10 감지기 종류에 따른 영향요소

이 지반의 경우 각 지오폰에서 구한 분산곡선이 유사하게 나타난다. 이는 현장 적용시 저렴한 4.5 Hz 나 10Hz 지오폰을 사용할 수 있음을 나타낸다. 또한 쉽고 저렴하게 다채널 감지기를 이용할 수 있으며 SPT-Uphole 시험에도 사용할 수 있기 때문에 복합 시험 시스템 구성에서도 큰 장점이 된다. 본 시험에서는 10Hz도 분산곡선이 도출되었지만 일반적인 지반에서 6~10Hz 성분이 크게 존재하므로 10Hz 지오폰 사용에 대한 검증을 추가로 실시될 예정이다.

초동을 잡아서 신호를 분석하는 SPT-Uphole이나 기타 시추공 시험과는 달리 파 전체를 이용하여 해석하는 표면파 시험의 경우 감지기에서 왜곡되지 않은 파의 전파를 측정하는 것이 매우 중요하다. 기존에는 쐐기를 이용하여 지오폰을 고정할 때 완전한 표면파가 측정되지 않는다고 판단되어 왔다. 1Hz 지오폰의 경우 크기가 크고 자체 무게가 많이 나가 표면에 추가의 고정장치를 사용하지 않고 쉽게 지표면에 압착되어 놓여 질 수 있었다. 그러나 SPT-Uphole 시험이나 HWAW 시험에 사용될 4.5Hz 지오폰의 경우 지오폰 자체 크기가 매우 작고 가벼우므로 장시간 시험이나 이동이 잦은 시험에서 지반과의 커플링 문제가 발생하게 된다. 따라서 4.5Hz 지오폰에 스파이크 형태의 쐐기를 부착하여 시험을 수행하였다(그림 3.2.11). 그림 3.2.12에서 보여진 바와 같이 쐐기의 부착유무에 따라 파의 획득에 따른 분산곡선

의 형태가 변하지 않으므로 지반 조건에 맞게 쐐기의 탈부착 여부를 결정하여 시험을 수행할 것을 제안한다.

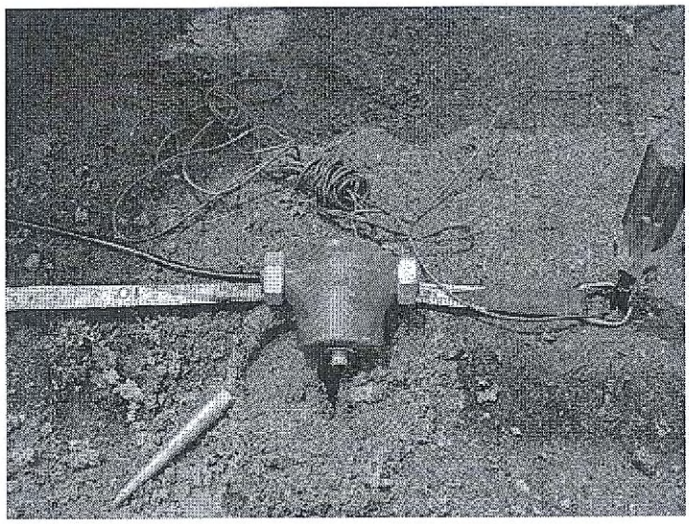


그림 3.2.11 4.5H 감지기의 쐐기 탈부착 형태

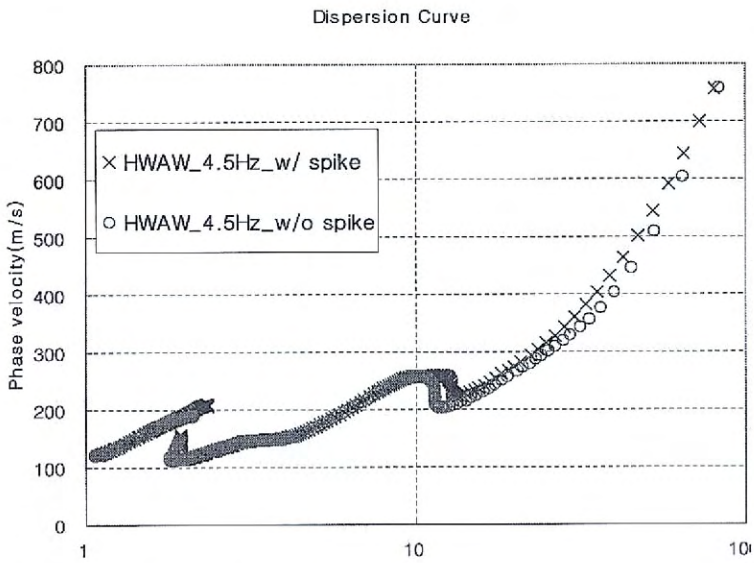


그림 3.2.12 감지기와 지반의 커플링에 관한 영향요소 연구

HWAW 기법을 이용하여 2차원 전단파 속도 분포를 도출할 경우 측선을 옮겨가며 많은 양의 실험을 수행하여야 하므로 간단한 현장 실험 장비가 요구되며 1번의 타격으로 수행될 수 있는 영역을 넓혀 빠른 실험을 수행할 수 있도록 하는 것이 바람직하다. 따라서 그림 3.2.13과 같이 여러 개의 감지기를 동시에 사용하도록

구성하였다. MASW 기법과 같이 여러개의 감지기에서 획득한 신호를 동시에 이용하여 하나의 평균적인 전단파 속도 주상도를 도출하는 것이 아니라 각 감지기 조합을 개별적으로 이용하여 한 번의 실험으로 측선에 대한 여러 지점의 전단파 속도 주상도를 도출할 수 있게 된다. 수치해석 연구 및 현장 검증 연구에서 이러한 방법에 대한 가능성을 확인한 바 있다. 감지기 종류는 기본적으로 4.5Hz 속도계의 사용으로 충분하나 초연약지반의 경우 저주파 대역을 효율적으로 획득하기 위하여 1Hz 속도계를 사용하는 것이 유리하다.

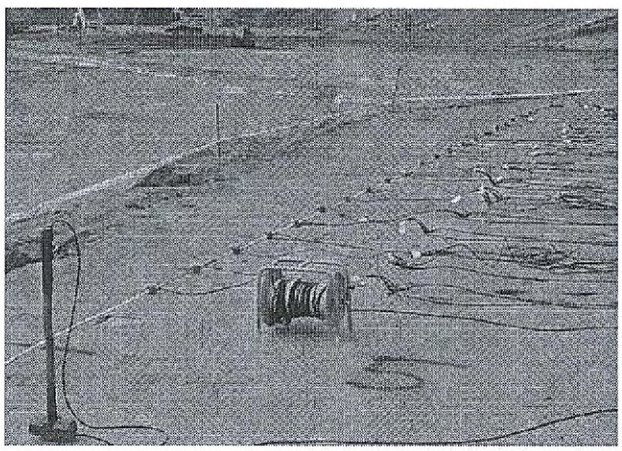


그림 3.2.13 다채널 감지기를 이용한 2D-HWAW 기법의 수행

SPT-업홀과 동시에 사용하기 위하여 미국 Geospace LP사의 24개의 4.5Hz 수직 속도계를 구매하였으며 다채널 표면파 수행을 위한 12 채널 전개 케이블(Spread take out cable) 4개를 같은 회사에서 구매하였다. 케이블은 SPT-업홀 및 2D-HWAW, 기타 표면파 탐사 수행을 위하여 감지기 연결 부분의 간격을 2.5m와 4.5m로 나누어 각 2개씩 구매하였다.

다. 신호 획득 장비

기존에는 미국 Agilent사의 2채널의 HP35670A를 사용하여 시험을 수행하였다. 장비 자체의 사용성, 안정성이 좋고 시험의 신뢰성을 확인 할 수 있는 장점이 있으나 감지기 수의 한계가 있고 시험결과를 플로피 디스켓으로 옮겨야 하는 단점이 있다. 과제의 상용화를 위해서는 신호획득 장비를 바꿔가며 비교연구를 수행하였다. 표3.2.2에 나온 세가지 신호획득장비를 이용하여 동일지점에서 시험을 수행하였

다. 그림 3.2.14에서 보이는 바와 같이 각 장비에 의한 결과에 대한 영향은 없다고 판단된다. 따라서 비슷한 구성으로 SPT 업홀 장비와 마찬가지로 현장 상용화를 위한 노트북을 기반으로 하는 다채널 데이터 획득 시스템을 이용하였다(그림 3.2.15). HWAW의 경우에는 SPT 업홀처럼 높은 sampling rate가 필요하지 않으므로 약 160만원 정도의 저가형 모델인 NI-DAQPad 6015를 이용하였다. 이 DAQPad는 16 채널에서 최대 200k의 sampling rate를 가지고 수직 해상도는 16비트이다. 노트북을 통해 작성된 신호 획득 프로그램과 신호 관리 및 결과 도출 프로그램을 연계하여 효율적으로 HWAW 기법을 수행할 수 있다. HWAW 기법에서 4개의 종연결 감지기를 이용하여 경우 각 채널은 50k의 sampling rate를 가지므로 HWAW 기법을 수행하기 위한 현장 신호를 획득하는데는 문제가 없다. 보급형 DAQPad의 경우는 2D-HWAW 시험을 주로 수행하기를 원하여 저렴한 가격으로 장비를 구매하기를 원하는 기관을 대상으로 한 판매에 초점이 맞춰져 있다.

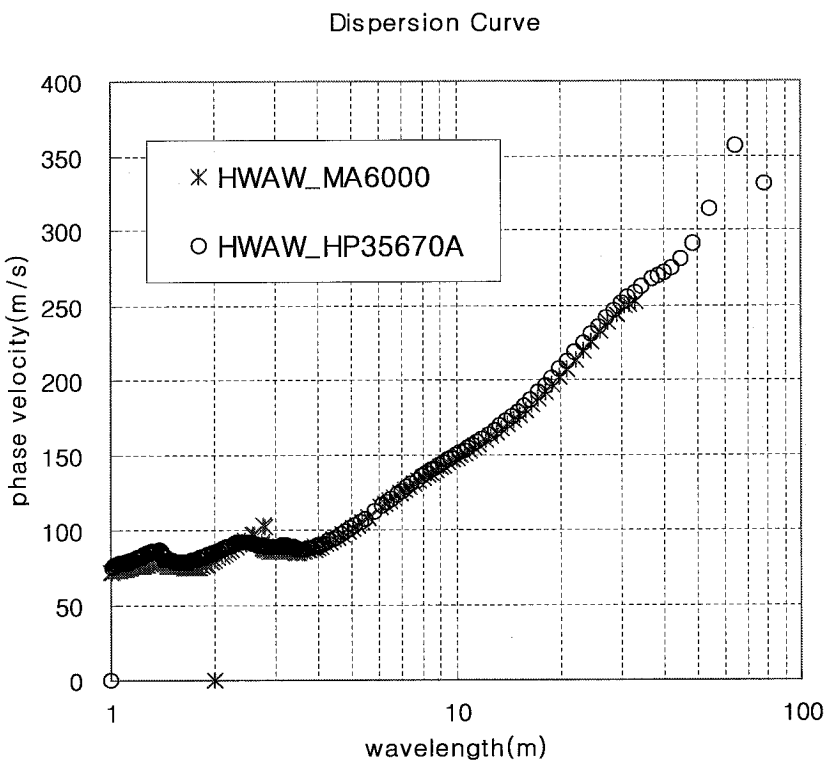
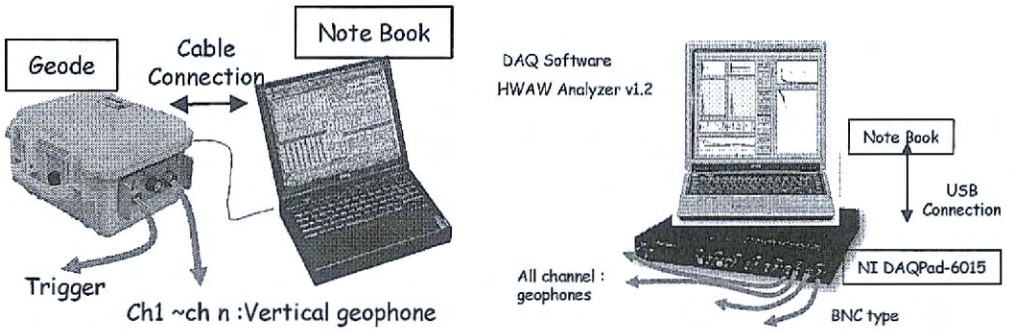


그림 3.2.14 획득 장비에 관한 영향 요소 연구



(a) 고사양 Geode + 노트북 (b) 보급형 DAQPad+노트북

그림 3.2.15 HWAW 기법을 위해 구성된 노트북 기반의 신호 획득 장비

제 3 절 해석프로그램 개선 및 개발

1. SPT 업홀 해석 프로그램

가. SPT 업홀

SPT 업홀 기법 수행 시스템을 위한 프로그램은 크게 세 가지이다. 노트북 기반의 신호 획득 장비를 제어하고 획득한 신호를 관리하는 신호 획득 및 관리 프로그램과 속도 주상도를 1차원 및 2차원으로 도출해주는 결과 해석 프로그램들이다. 본 과업에서는 이러한 프로그램을 매트랩(MATLAB) 및 비쥬얼 베이직(Visual Basic) 기반으로 작성하였다.

(1) 신호 획득 및 관리 프로그램

SPT 업홀 기법에서는 많은 수의 감지기를 이용할수록 영상화하고자 하는 영역의 확대 및 해상도 측면에서 유리하다. 본 과업에서는 최대 12지점까지를 고려하였으며 따라서 최소한 수평·수직 성분 각 12개, 총 24개 채널에서의 신호를 획득하여야 한다. 본 과업에서 자체적으로 구성한 신호 획득 장비는 NI-USB6259를 내장한 장비로 NI사의 신호 수집 보드는 랩뷰(Labview)나 매트랩 등으로 제어 프로그램을 제작할 수 있다. 본 연구에서는 획득한 신호에 대해서 신호 처리 등의 관리가 비교적 용이한 매트랩을 이용하여 신호 획득 및 관리 프로그램 (Field_UH_v1.1)을 코딩하였다. 작성한 프로그램 Field_UH_v1.1의 주화면을 그림 3.3.1에 도시하였다.

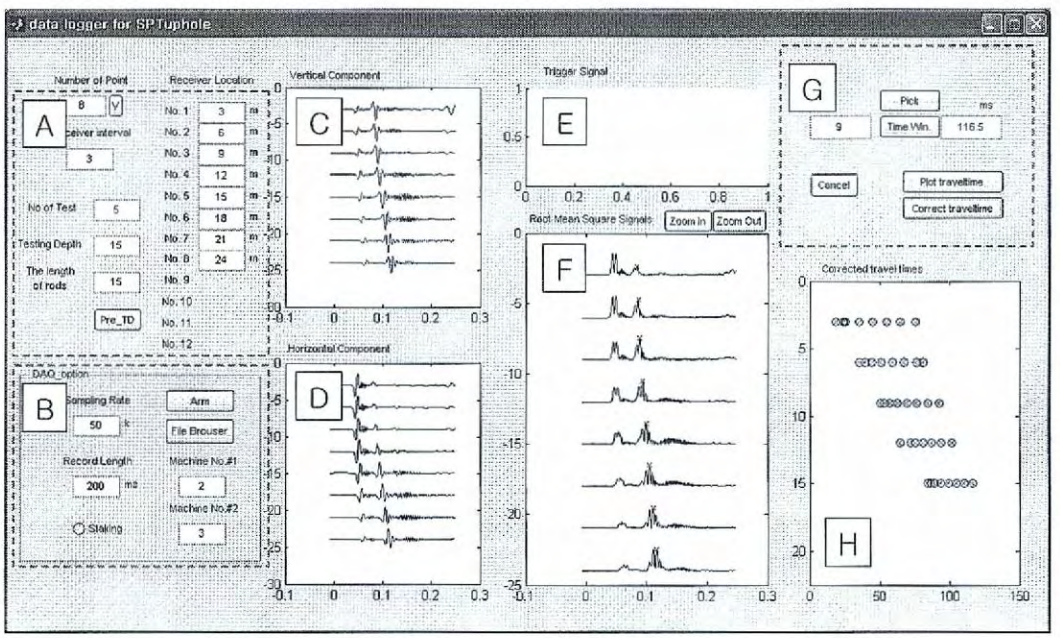


그림 3.3.1 신호 획득 및 관리 프로그램 Field_UH_v1.1

사용한 감지기 개수에 따라 획득 신호 개수를 결정할 수 있으며 시추 지점으로부터 각 감지기 거리를 기입하게 된다(그림 3.3.1내에서 A부분). 시험 심도, 로드 길이 등을 기입하고 신호 획득 간격 및 신호 획득 시간을 결정한 뒤 'Arm' 버튼을 눌러 신호 획득 장비로부터 데이터를 전달 받을 준비를 할 수 있게 된다(그림 3.3.1 내에서 B부분). SPT 타격 한 뒤 지표면 감지기들을 통해 획득된 신호는 트리거 신호와 함께 4개의 창에 즉시 그려지게 된다. 우선 4개의 그래프 창 중 E창에 트리거 신호가 그려진다. 직접 도달시간 정보를 이용해야 하는 SPT 업홀 시험에서는 트리거 상태를 반드시 평가해 주어야 하므로 트리거 신호를 도시하는 것이 필요하다. 트리거 지점이 확실하지 않을 경우 트리거 장치를 교정하거나 교환하여야 한다. C와 D창에 수평 및 수직 성분 감지기로부터 획득된 신호들이 각각 감지기 거리에 따라 그려진다. 이와 동시에 수직 및 수평 성분의 크기합 신호가 F창에 그려지도록 되어 있다. 과년도의 연구에서 SPT 업홀에서 전단파 성분을 보다 정확히 획득하고 도달시간 정보를 보다 효과적으로 획득하기 위해서 수직 성분과 수평 성분의 크기합 신호를 이용하는 것이 바람직하다는 것이 수치해석 및 현장 실험으로부터 고찰된 바 있다. 따라서 실질적으로 업홀 현장 시험에 있어서 사용되는 그림은 F창에 그려진 크기합 신호다.

신호 획득 과정에서 원하지 않는 고주파수 대역의 잡음을 제거할 수 있도록 디지털 필터 기능을 추가 하였다. 디지털 필터의 경우 완벽하게 알리아싱(Aliasing)을 피할 수는 없지만 샘플링을 충분히 자세하게 한 상태에서 디지털 필터의 사용은 원하지 않는 고주파수 대역을 제거할 수 있게 된다. 또한 깊은 심도에서 미약한 전단파 성분 신호를 해석 가능한 신호로 개선하기 위한 중합 기능을 삽입 하였다. 하지만 이러한 중합 기능은 지반이 연약하여 한 번의 타격으로 관입량이 커서 타격 지점의 변화가 무시할 수 없을 정도일 경우에는 사용을 피해야 하며 풍화암 이상으로 다수의 타격을 하여도 관입량을 무시할 수 있을 정도의 경우에 유용하게 사용할 수 있다. 일반적으로 시험 심도가 얕을 경우에는 SPT 타격 에너지가 매우 크므로 한 번의 타격으로도 해석 가능한 신호의 획득이 가능하다. 현장에서 효율적으로 신호를 획득 및 관리하기 위해 필요한 기능들은 추가적인 업그레이드를 통해 개선이 가능하다.

프로그램 Field_UH_v1.1은 단순히 신호 획득 장비를 제어하고 획득한 신호를 도시하는 대만 국한된 것이 아니라 도달시간 정보를 효율적으로 도출하는 과정까지

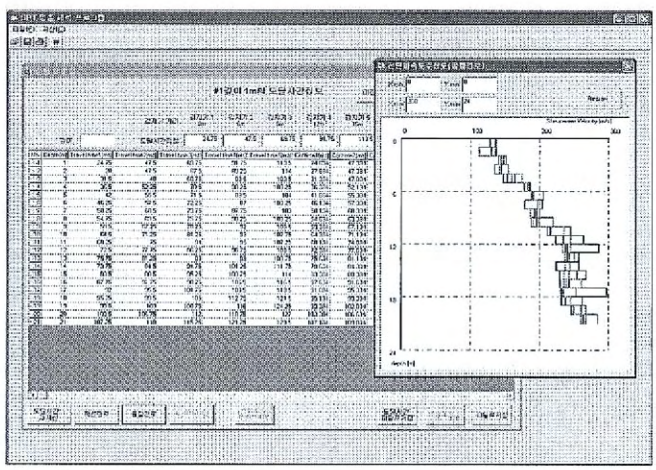
포함하고 있다. 획득한 신호를 다른 프로그램에서 불러 들여 도달 시간 정보를 획득하는 과정을 거치는 것은 비효율적이므로 본 프로그램에서는 신호 획득과 동시에 도달시간 정보를 바로 도출하도록 구성하였다. 도출된 시간 정도는 바로 그래프로 도시되므로 이러한 기능은 획득한 신호의 해석 가능 여부를 점검할 수 있다. 획득한 도달시간 정보는 연계된 해석 프로그램의 입력 파일 형식으로 자동으로 생성해 줌으로써 현장에서 신호 획득과 동시에 해당 시험 심도까지의 1차원 및 2차원 속도 주상도를 도출할 수 있게 된다. 현장에서 시험 수행과 동시에 최종 결과를 확인할 수 있다는 점은 더욱 신뢰성 있는 SPT 업홀 기법의 수행을 보장한다.

초동 추정 방법은 전단파 성분이 도달되는 시점을 육안으로 파악하는 방법으로써 개념적으로 가장 단순한 방법이며 현장에서 적용하기 편리하다. 하지만 SPT 업홀 기법의 경우 압축파 성분 등으로 인하여 정확한 전단파 성분의 도달지점을 추정하기가 매우 어렵기 때문에 초동 추정 방법은 도달 시간 정보 도출에 있어 많은 오류가 발생할 가능성이 있다. 극간법은 자동화가 가능하며 결과의 신뢰성이 뛰어나므로 SPT 업홀 기법에서 도달시간 정보를 획득하는데 있어 실용적 측면에서 가장 적합한 방법이다. 따라서 본 신호 획득 및 관리 프로그램에서 도달 시간 도출 방법은 극간법을 적용하였다. 마우스로 전단파 성분의 첫 반파장이라고 판단되는 구간을 설정할 수 있으며 그 구간 내에서 극대점의 시간 정보를 자동으로 획득하게 된다(그림 3.3.1내 G 구역). 또한 초동 정보 도출을 위한 보정 시간을 후보 파형으로부터 초동 추정 지점과 극대점의 피킹을 통해 도출할 수 있다. 또한 얕은 가진과 먼 감지기 위치에서 표면파 영향을 보정하는 과정이 필요한 것을 수치해석 결과에서 확인한 바 있다. 이를 위해서 각 지점에 대해서 획득한 신호의 입자 운동 그림을 도시하여 줌으로써 표면파에 의한 영향이 어느 영역까지 존재하는지 확인할 수 있도록 하였다. 현장에서 신호 획득 및 분석 과정 등 이 모든 과정을 여러 개의 창을 이용하여 수행할 경우 매우 번거롭게 된다. 따라서 본 과업에서 신호 획득 및 관리 프로그램은 모든 과정에 있어 실행 버튼 및 도시되는 그래프 등이 한 화면에서 이루어지도록 프로그램을 구성하였다. 추가적인 내용은 다음 5절의 SPT 업홀 현장 실험 매뉴얼을 참고하기 바란다.

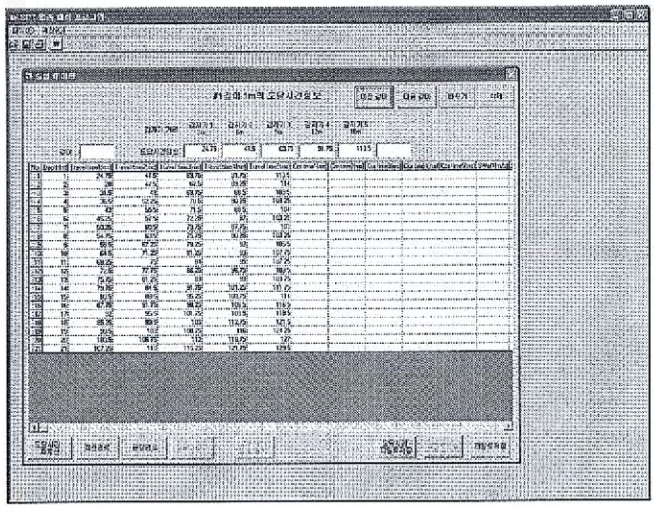
(2) 1차원 해석 프로그램

SPT 업홀 현장 실험을 통해 획득한 도달시간 정보를 이용하여 1차원 전단파 속

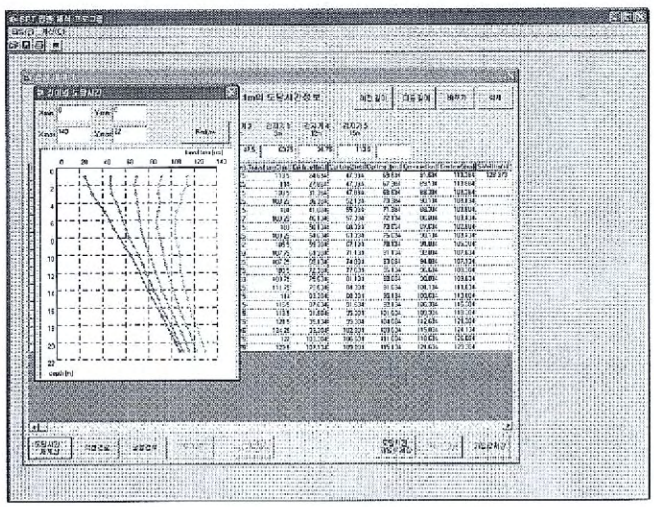
도 주상도를 도출하기 위한 해석 프로그램으로 Anal1D_UH_v1.0을 작성하였다. 제어 프로그램인 Field_UH_v1.1에서 입력 파일을 형식에 맞게 자동으로 생성해 주므로 연동해서 사용할 수 있다(그림 3.3.2). 과년도 연구 결과에서 SPT 업홀 1차원 해석 방법 중 깊이간 DT법이 감지기간 DT법보다 더 합리적인 결과를 제공할 수 있는 것으로 나타났다. 따라서 본 과업에서는 1차원 해석을 위해서 깊이간 DT법을 적용하여 프로그램을 작성하였으며 비쥬얼 베이직을 이용하였다. 본 프로그램의 또 다른 역할은 2차원 해석을 위한 도달시간 정보의 편집 기능이다. 물론 Field_UH_v1.1에서 도달시간 정보를 확인할 수 있고 2차원 해석을 위한 입력 파일이 자동으로 생성되지만 실제로 약간의 수정이 필요하다. 깊이별 각 감지기 도달시간 정보의 그래프만으로 확인할 수 없었던 비이상적인 결과의 요인을 1차원 해석 결과에서 확인할 수 있으며 이를 바탕으로 도달시간 정보를 수정하거나 삭제할 수 있다. 마찬가지로 추가적인 내용은 5절 3의 현장 실험 매뉴얼을 참고하기 바란다.



(a) 깊이간 DT법으로 각 감지기에서의 1차원 속도 주상도 도출



(b) 각 도달시간 정보를 해석 결과를 참고하여 수정 혹은 삭제



(c) 도달시간 정보 다시 그린 뒤 평가, 1차원 해석 다시 수행

그림 3.3.2. 1차원 결과 도출 프로그램 Ana1D_UH_v1.1

(3) 2차원 해석 프로그램

2차원 영상화를 위한 토모그래피 해석을 위해서 프로그램 Ana2D_UH_1.1v를 제작하였다(그림 3.3.3). 기본적으로 본 프로그램은 사용자에게 최대한 고민을 하지 않고 2차원 해석을 할 수 있도록 구성하였다. 따라서 도달시간 정보, 감지기 위치 정보, 시험 깊이 정보를 담고 있는 입력 파일을 읽어드리는 과정과 직선경로 해석, 굴절 경로 해석을 수행하는 메뉴만이 존재한다. 일반적으로 토모그래피 프로그램에서 필요한 모델에서의 셀 크기 등의 결정을 생략하였으며 본 프로그램에서는 각

셀들은 감지기 위치와 시험 깊이를 기준으로 하여 자동으로 나뉘어진다. 본 프로그램에서 2차원 해석을 위한 순서는 다음과 같다. 우선 초기 모델 결정을 위해 직선 경로 해석을 수행한다. 직선 경로 해석은 복잡한 파선 추적 과정이 필요 없으며 파선이 각 셀을 통과하는 통과거리를 간단하게 산출할 수 있다. 기본적으로 직선 경로 가정에서 각 셀의 속도 도출 방식은 다운홀 기법에서 수정간접법과 유사하다. 최상부부터 차례로 한 셀 씩 속도를 통과 거리를 고려하여 속도를 도출하게 된다. 이런 방식으로 도출한 속도는 직선 경로를 고려하고 있기 때문에 감지기 거리가 멀어짐에 따라 오류가 매우 크다. 실제로 직선 경로 가정을 통해 획득한 영상을 굴절경로 가정 해석을 위한 초기 모델로 쓰기에는 무리가 따르는 경우가 많다. 그러므로 본 프로그램에서 굴절 경로 해석을 위한 초기 모델은 직선 경로 해석을 통해 획득한 결과 중 가장 가까운 감지기의 결과만을 이용한다. 굴절 경로 해석을 위한 방법은 직선 경로 해석에 비해 복잡한 파선 추적 과정이 요구된다. 2차원적인 속도 구조에서 파선 추적 과정은 기본적으로 발사법에 기초하였다. 직선 경로 가정 해석에서와 마찬가지로 파선 추적 과정 없이 획득할 수 있는 셀 (1,1)부터 속도를 얻고 (이 셀에서의 속도는 직선 경로 가정과 동일하게 된다.) 차례로 아래 셀로 속도를 얻게 된다. 최종 셀까지 수행한 뒤에는 다시 (2,1)부터 다시 차례로 아래 셀 순서로 속도를 얻어 간다. 이 때 2열에서의 초기 모델은 직선경로에서 얻어진 값을 쓰는 것이 아니고 1열 굴절 경로 해석에서 얻어진 값을 이용한다. 또한 파선이 지나가지 않는 영역(주로 영상에서 오른쪽 아래 삼각형 부분)에 대해서는 수평층 가정을 기본 가정으로 하여 왼쪽 셀의 속도와 동일하다고 가정한다. Ana2D_UH_v1.1 프로그램을 검증하기 위해서 상향 및 하향 경사 모델을 이용하여 검증하였다. 각 모델은 과년도 SPT 업홀 수치해석에서 사용한 경사 모델과 동일한 것이다. 정모델링을 통해 획득한 도달시간 정보를 이용하여 Ana2D_UH_v1.1로 획득한 결과를 그림 3.3.4에 각각 도시하였다. Borehole to surface tomography의 한계상 결과에 있어 신뢰성 있는 영역은 가진원과 감지기가 위치한 부분의 삼각형 부분임을 고려할 때 그 결과가 검증 모델을 잘 표현하고 있는 것을 확인 할 수 있다. 이는 상용 프로그램으로 획득했던 영상에 비해 더욱 양호한 결과를 제공하고 있는 것이다. 이로써 제작된 2차원 해석 프로그램이 작동을 잘 하며 SPT 업홀 기법의 2차원 해석을 위한 프로그램으로 적용이 가능하다는 것을 확인할 수 있었다.

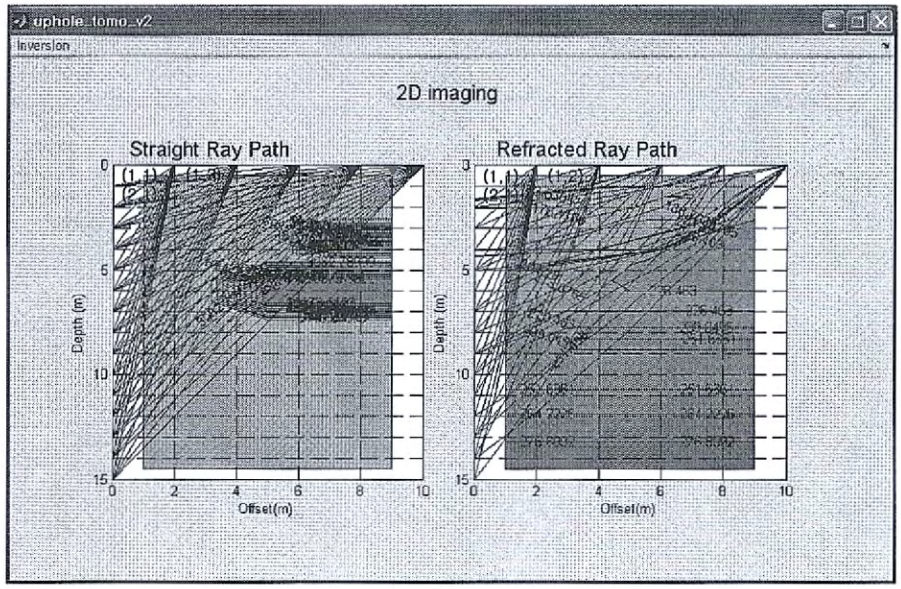


그림 3.3.3. Ana2D_UH_v1.1 주화면 및 2차원 해석 일례

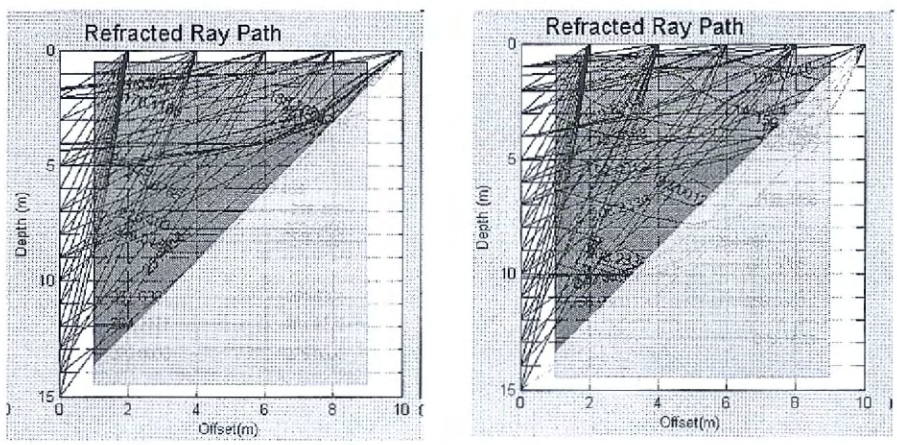


그림 3.3.4. 상향 경사 모델 및 하향 경사 모델을 이요한 검증 결과

2. HWAW기법 자동 분산곡선 도출 프로그램 도입 및 개선

본 연구에서는 HWAW 기법의 상용화시 사용자의 편의를 위해 가진과 동시에 분석 가능 여부 및 결과의 질을 판단할 수 있는 자동 분산곡선 도출 프로그램을 구성하였다. 또한 이를 통해 도출된 실험 분산곡선으로부터 전단파 속도 주상도를 자동으로 도출하는 자동역산 프로그램에 대한 연구를 수행하였다. 각각의 프로그램은 모두 Matlab 및 GUI(graphic user interface)을 이용하여 구현, 작성되었다. 이

러한 프로그램 저작물을 컴퓨터프로그램보호위원회에 등록하여 상용화를 위한 프로그램보호를 실행하였고, 꾸준한 프로그램들의 개발 및 개선을 통하여 HWAW 기법의 상용화를 위한 프로그램을 구축하였다. 향후, 사용자 편의성 및 시험결과의 객관성 증진을 위하여 이러한 해석 프로그램을 지속적으로 업데이트할 예정이다.

HWAW 기법은 두 감진기를 이용하여 표면파의 파동을 시간영역에서 측정한 후, 각 신호에 대하여 하모닉 웨이블릿을 이용한 시간-주파수 해석을 실시한 뒤 각 주파수별로 계산된 역학함수의 동일 위상각 시간 차이를 이용하여 표면파의 파동전파 속도를 계산하는 방법이다. 이 기법은 짧은 간격의 두 감지기를 이용하는 시험방법으로, 표면에서 계측되는 파의 근접장 성분을 적극적으로 이용하며 배경잡음의 영향을 신호처리과정에서 효과적으로 제거할 수 있는 장점을 가지고 있다. 따라서 이 시험을 통해 단일한 시험구성을 이용하여 대상지반의 전체 분산곡선을 결정할 수 있다. 이 과정에는 해석자의 주관적 판단을 배제시킬 수 있는 자동화된 프로그램이 필요하다.

본 연구에서는 HWAW 기법의 실험분산곡선을 효과적으로 도출하기 위한 자동화 프로그램인 HWAW analyzer v1.0(박형춘, 2001)을 도입하였다. HWAW analyzer를 이용하면, 획득한 감지신호를 입력한 후 하모닉 웨이블릿을 이용한 시간-주파수 해석을 할 수 있고, 또한 하모닉 웨이블릿 계수를 이용하여 분산곡선을 자동적으로 도출할 수 있다. 이 프로그램을 여러 현장 시험에 적용시켜 본 결과, 시간-주파수 해석 시에 때때로 오류가 발생하였다. 이는 프로그램 상에서 시간-주파수 해석을 이용한 파의 위상을 결정할 때 생기는 행렬연산 오류로 파악되었으며, 알고리즘을 수정하여 프로그램의 적용성을 증대시킬 수 있었다. 또한 기타 해석 시에 생기는 지엽적인 문제들을 극복하기 위하여 여러 차례 수정을 하였으며, 2005년 6월 HWAW analyzer v1.2를 개발하였다. 본 연구에서는 HWAW analyzer v1.2를 이용하여 모형부지 및 기타 다양한 현장조건에서 시험을 수행하였으며, 프로그램 알고리즘 상의 오류를 수정하면서 프로그램을 개선하였다. 모형부지 및 다양한 현장시험을 통하여 적용된 시험 결과는 4절에 기술하였다.

궁극적으로 HWAW 기법이 상용화 되어 현업에 널리 사용되기 위해서는 사용자 편의의 시험 시스템을 구축하는 것이 필요하다. 따라서 현장에서 실험을 수행하여 획득한 파형을 자동적으로 분산곡선을 도출할 수 있도록 하였다. 현장에서 신호 획득과 동시에 분산곡선을 도출하면 분산곡선의 양호도를 바로 평가할 수 있게 된다.

분산곡선의 상태에 따라 가진원 및 감지기 등의 실험 장비 구성의 교체나 감지기 위치, 감지기 간격, 가진원 거리 등을 바꾸는데 있어 신속한 판단을 가능하게 한다. 이는 곧 현장에서 HWAW 기법을 효율적으로 수행할 수 있도록 해 주며 결과적으로 양질의 분산 곡선을 획득할 수 있게 해준다. 이 프로그램은 앞서 언급한 노트북 기반 신호 획득 장비인 NIDAQ 장비를 이용하였다. 다음 그림3.3.5와 같이 기존의 HWAW analyzer v1.2를 수정, 보완하여 신호 획득 및 분산곡선 도출 과정을 통합한 프로그램을 개발하였으며, 이를 통해 현장에서 획득한 신호를 이용하여 바로 실험분산곡선의 도출이 가능하게 하였다.

먼저 실험 데이터 획득을 위한 Duration, Sampling rate, Trigger 설정 및 감지기와 가진원의 위치에 대한 입력 정보를 프로그램에 입력한다(그림 3.3.5의 D부분). Start 버튼을 누른 후 가진원 위치에서 타격을 하게 되면 입력 Duration 시간 동안의 두 감지기 신호를 획득할 수 있다(그림 3.3.5의 A부분). 이후 E부분의 T-F버튼 및 PSD,CPS 버튼 등을 이용하여 각 신호의 주파수 성분 및 시간주파수 해석 결과를 얻을 수 있다. E 부분의 Rough Vel., Data Recover 등의 여러 버튼 이용하여 기본 위상속도를 결정할 수 있는데 이는 C부분에 도시된다. 이후 경우에 따라 Masking 작업을 수행하게 되면, 결과적으로 실험분산곡선이 도출된다(그림 3.3.5의 F부분). 이에 대한 프로그램 구동 방법은 제 5 절의 3. 시험의 매뉴얼 부분에 기술하였다.

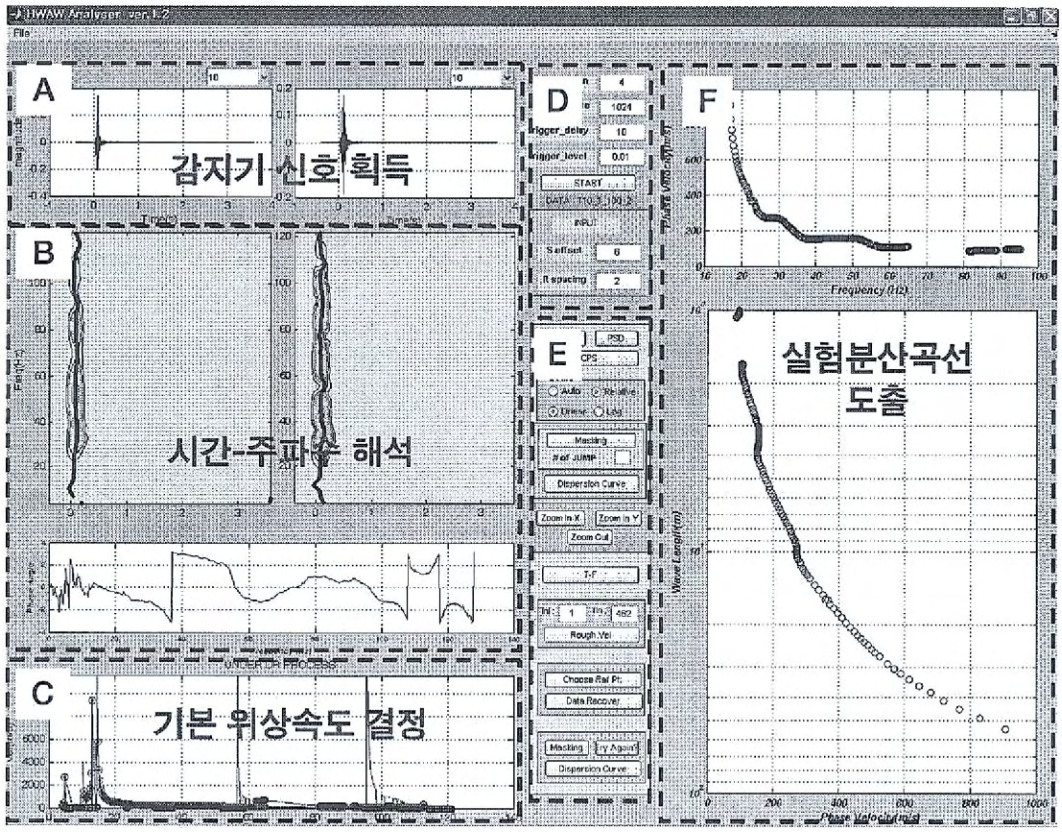


그림 3.3.5 HWAW 기법을 위한 신호획득 및 실험분산곡선 도출 프로그램

개발된 HWAW analyzer를 이용하면, 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. 따라서 비교적 간단한 형태의 가진원으로도 고주파에서부터 저주파까지 분산곡선을 한번의 실험으로 획득이 가능하다는 장점을 가진다.

3. 분산곡선을 전단파 속도로 전환하는 역산 프로그램 도입 및 개선 연구

현장 시험을 통하여 결정된 위상속도 분산곡선을 실험분산곡선이라 하며, 이는 지반의 층상구조 및 각 층의 전단파속도 등의 공학적 물성치 정보를 포함하고 있다. 이론적으로 지반과 같은 층상구조에서의 표면파의 거동을 모사하고 이를 통해 이론적인 분산곡선을 구해낼 수 있다면, 이는 바로 결정된 실험분산곡선에 상응하는 전단파 속도 주상도가 된다. 이처럼 현장에서 측정한 실험분산곡선에 상응하는

전단파 속도 주상도를 결정하는 과정을 역산해석이라 한다. 이 역산해석은 HWAW 시험과 같은 표면파 기법의 신뢰성을 좌우할 수 있는 중요한 해석단계이다.

역산해석은 크게 두 개의 과정을 통하여 이루어진다. 그 중 첫 번째는 이론적을 이론적인 위상속도 분산곡선을 구해내는 정모델링(Forward Modeling) 과정이며, 다른 하나는 실험에서 구한 분산곡선과 정모델링을 통하여 얻어진 이론적 분산곡선이 일치하도록 하는 최적화 해석 과정(Optimization Techniqies)이다. 이러한 두 과정을 통하여 자동화된 반복적 정모델링 기법을 구현하게 되면, 지반의 전단파 속도 주상도를 도출하기 위한 역산해석 프로그램을 완성하게 된다. 다음 그림3.3.6은 역산해석을 위한 정모델링 및 최적화 해석 과정을 도시한 그림이다.

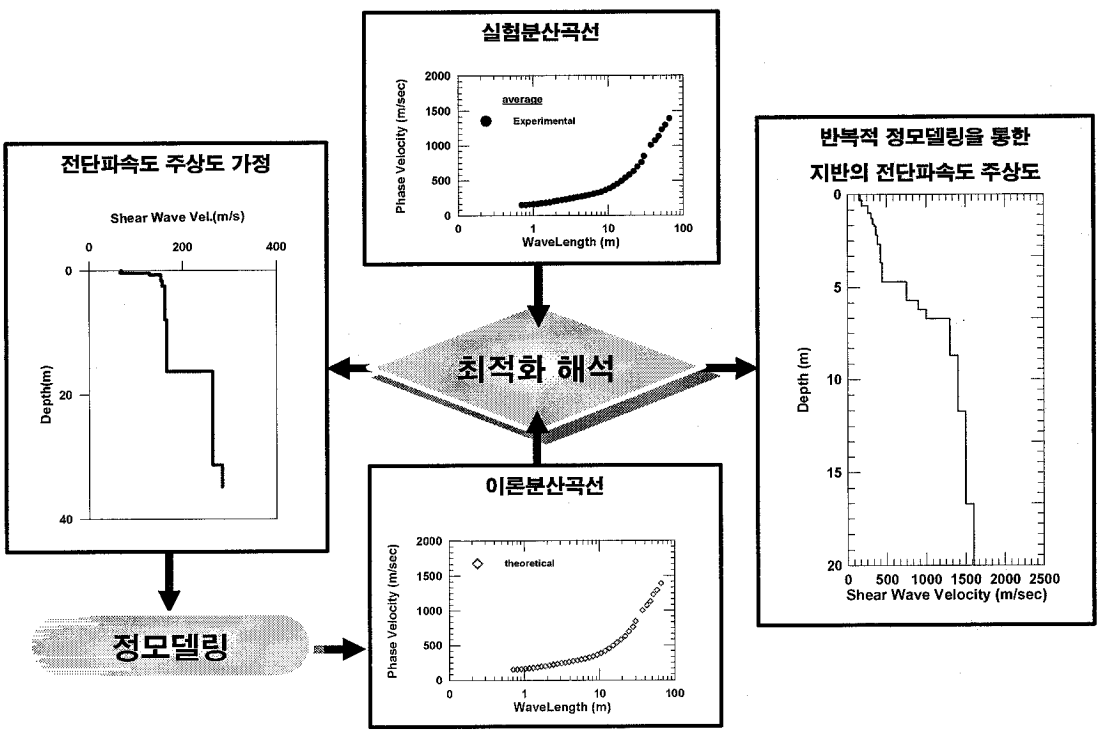


그림 3.3.6 HWAW 시험의 역산해석을 위한 반복적 정모델링

본 연구에서는 HWAW 시험의 역산해석에 가장 적합한 정모델인 동적강성행렬법을 이용한 Kausel의 방법을 구현하고자 하였다. 이는 앞서 1절에서 언급한 바와 같이 가정한 지반모델의 유한요소 해석을 통한 HWAW 기법 검증 연구에 있어서 수치해석 결과와 Kausel의 방법에 의해 구현된 결과가 대부분의 지반강성 모델에서 유사한 결과를 도출한 데 따른 것이다. 따라서 HWAW 기법 자동 분산곡선 도

출 프로그램으로 획득한 실험 분산곡선을 전단파 속도 주상도로 역산하는데 있어 Kausel의 방법의 정모델링 기법이 적합하며 이를 통해 신뢰성 있는 전단파 속도 주상도의 도출이 가능하다는 것을 확인할 수 있었다. 현재 Matlab 및 GUI(graphic user interface)을 이용하여 HWAW 기법의 상용화를 위하여 자체적으로 Kausel의 방법을 기반으로 한 정모델링 프로그램을 구현하였으며, 이에 대한 꾸준한 검증 작업 및 프로그램 오류 수정작업을 진행할 예정이다. 또한 최적화 해석을 통하여 전문가적 판단력과 경험을 배제할 수 있는 자동역산 프로그램을 개발하였고, 이러한 정모델링 및 최적화 해석을 이용한 역산해석을 통하여 지반의 전단파 속도 주상도를 객관적이고 신뢰성 있게 도출할 수 있게 되었다. 이를 통해 HWAW 기법을 통해 두 개의 감지기와 짧은 측선을 이용한 간단한 현장 실험으로 신뢰성 있는 전단파 속도 주상도의 도출이 가능하리라 기대된다. 기존에 개발된 반복적 정모델링 프로그램으로는 WinSASW v1.23(조성호, 1996)이 널리 사용되고 있으며, 이 프로그램은 동적강성행렬법을 이용한 Kausel의 방법을 사용하고 있다. 일반적으로 이 프로그램을 사용하여 전단파 속도 주상도를 가정하고 이론적 분산곡선을 도출해 내는 과정을 반복적으로 수행하여 최종적인 전단파 속도 주상도를 도출해 내고 있다. 즉 반복적 정모델링 기법을 통해 최적의 해를 찾는 과정을 인간의 판단과 경험에 의지하여 해석자가 직접 해를 찾는 시행오차기법을 사용하고 있다. 따라서 이러한 반복적 정모델링 기법은 인간의 주관적인 판단을 필요로 하며, 최적해를 얻는 과정에서 전문가적 경험에 의존해야 하기 때문에 경우에 따라 많은 시행오차 과정을 거쳐야 한다. 또한 과년에 검토되었던 KIESSI(김재민,2001) 프로그램은 정모델링을 효과적으로 구현할 수 있는 프로그램으로 검증되었으나 본 연구의 목표인 HWAW 시험의 자동 역산 프로그램의 상용화를 위해서는 KIESSI의 적용성이 떨어진다고 판단되었다. 이것은 KIESSI 프로그램의 알고리즘이 유한요소 해석을 사용하고 있기 때문이다. 더욱 타당한 결과를 얻기 위해서는 유한요소의 수를 증가시켜야 하고, 그에 따른 응답해석 연산시간 또한 증가하게 된다. 따라서 이 프로그램을 사용하여 최적화 해석을 하게 된다면, 역산을 하는 데에 지나치게 많은 시간을 소요하게 될 것으로 판단되었다.

따라서 본 연구에서는 Matlab v7.1 및 GUI(graphic user interface)를 이용하여 안정적이고 효율적인 새로운 정모델링 프로그램을 개발하고자 하였다. 다음의 그림 3.3.7은 Matlab GUI를 통하여 구성된 정모델링 프로그램이다. 이 프로그램을 이용

하면, 지층의 수를 설정하고 Select 버튼을 누른 후, 각 지층별 물성치, 즉 전단파 속도, 포아송비, 밀도 등을 입력하고 Run 버튼을 클릭하게 되면, 각 파장 길이별 위상속도를 계산하여 이론적인 분산곡선을 도출할 수 있다. 여기에서, 실험에 사용된 가진원과 두 감지기 사이의 거리를 각각 입력 하면, 2D 해석해 뿐만 아니라 3D 해석해를 구하는 정모델링 구현이 가능하도록 프로그램을 구성하고자 하였다.

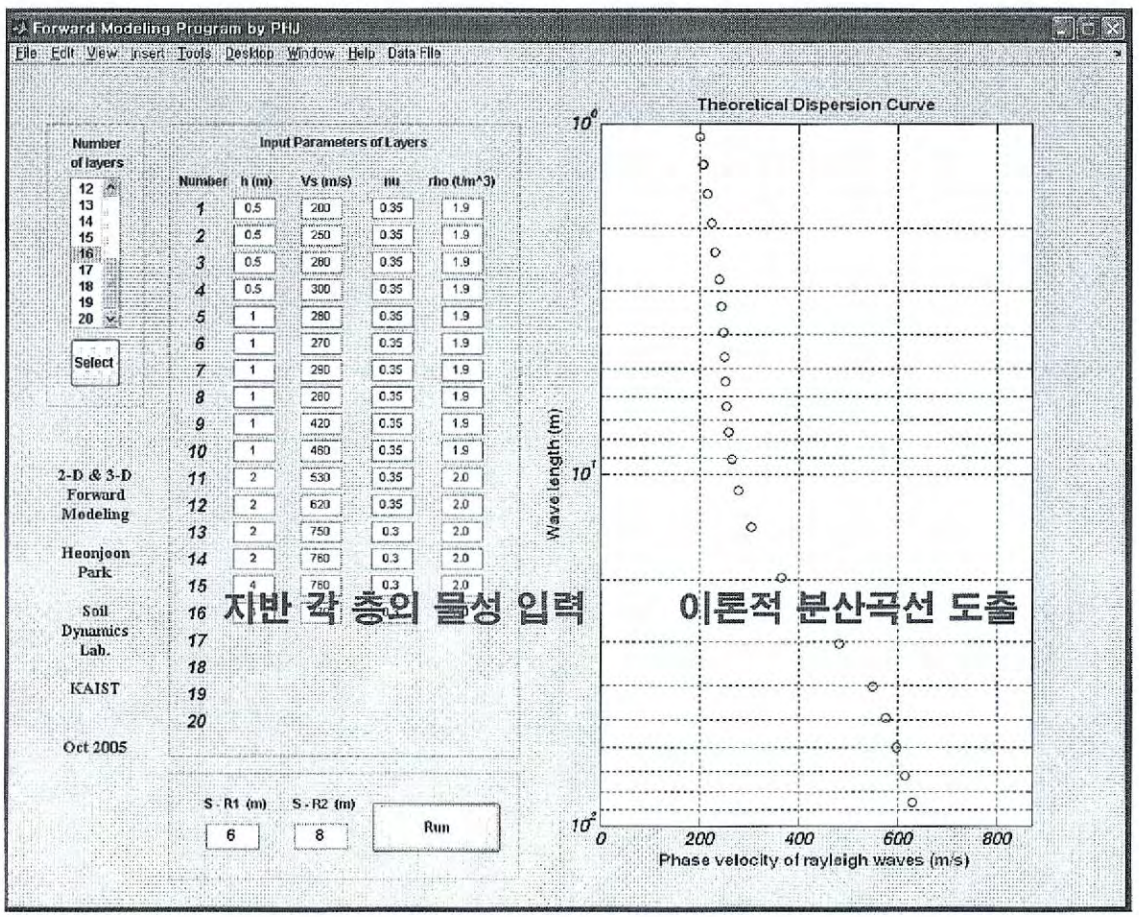


그림 3.3.7 Matlab v7.1 GUI를 이용한 정모델링 프로그램

이 프로그램은 수치해석을 통해 HWAW 기법에 가장 타당한 정모델링 기법으로 알려진 동적강성행렬법(Kausel과 Roesset, 1981; Kausel과 Peek, 1982)을 사용하고 있다. 동적강성행렬은 여러 지층으로 구성되어 있는 지반에서 각 층의 경계면에 작용한 외력과 그에 상응하는 변위관계를 정의하는 행렬이며, 이 행렬은 주파수 또는 파장 길이의 함수로서 일반적인 구조해석에서 언급되는 강성행렬과 같은 형태이다. Kausel과 Roesset(1981)에 의하면 임의 하중으로 인해 발생하는 지층구조의 응답에

대한 관계를 공식으로 제안하였으며, 표면파는 평면파로 가정하였다. 표면파가 감진기로부터 멀리 떨어진 곳에서 발생되어 전파되는 경우 감진기에 도착되는 표면파는 평면의 파면을 가진다고 가정할 수 있다. 이처럼 평면의 표면파를 가정하여 동적강성행렬로부터 구하는 해를 2D 해석해라고 한다. 또한 이후, Kausel과 Peek(1982)는 원형 하중에 대한 다층구조의 응답을 강성행렬의 방법으로 구하는 방법을 제시하였다. 이 방법에서는 원통형 파면을 가지는 표면파 가정이 적용되었으며, 이를 3D 해석해라고 한다. 3D 해석은 표면파의 특별한 모드를 대표하지 않고, 표면파와 체적파가 조합된 해를 주기 때문에, 이는 실제 표면파의 전파특성을 해석하는 적합한 해라고 할 수 있다. 동적강성행렬법을 이용한 3D 해석해를 구하면, 가진원의 위치에 따라서 위상속도가 변화하게 된다. 이는 3D 해석해가 가진원에 의해 발생되는 파들의 모든 모드들을 복합적으로 구한 식이기 때문이다.

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 기본모드뿐만 아니라 고차모드까지 포함된 겉보기 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 짧기 때문에 기존 방법들의 역산과정에서 지반의 횡방향 불균일성에 의해 발생할 수 있는 오류가능성을 최소화 할 수 있다. 실제로 HWAW 시험은 표면파의 여러 모드와 체적파가 중첩된 복합모드를 측정하고 있으므로, 전단파 속도 주상도를 구하는 역산과정에서는 동적강성행렬법의 3D 해석해를 활용하는 것이 중요하다. 또한 탄성파의 발현과 측정이 상대적으로 가까운 위치에서 이루어지는 HWAW 시험에 있어서는 기본모드와 고차모드의 분리가 어려우므로, 기본모드뿐만 아니라 고차모드까지 포함된 겉보기 위상속도를 구해내는 정모델링 과정은 필수적이다.

현재 본 연구에서는 MATALB v7.3 및 GUI를 이용하여 동적강성행렬의 2D 해

석해 및 3D 해석해를 계산하여 이론적인 분산곡선을 도출하고자 하였다. 현재 프로그램의 지속적인 검증과 프로그램 오류수정과정을 계속적으로 수행중이며, 최종적으로 반복적 정모델링 기법을 통한 역산프로그램 검증을 완성할 예정이다.

정모델링 프로그램이 구현되고, 검증된 경우, 실험에서 구한 분산곡선과 정모델링을 통하여 얻어진 이론적 분산곡선이 일치하도록 하는 최적화 해석 과정이 필요하게 된다. 현재까지는 정모델링 프로그램 WinSASW1.23을 사용하여 전단파 속도 주상도를 가정하고 이론적 분산곡선을 도출해 내는 과정을 반복적으로 수행하여 최종적인 전단파 속도 주상도를 도출해 내고 있다. 따라서 이러한 반복적 정모델링 기법은 인간의 주관적인 판단을 필요로 하며, 최적해를 얻는 과정에서 전문가적 경험에 의존해야 하기 때문에 경우에 따라 많은 시행오차 과정을 거쳐야 한다. 이러한 단점을 극복하기 위해서는 최적화 이론에 기반한 컴퓨터 프로그램을 개발하여 인간의 경험이나 전문성이 없이도 자동적으로 전단파 속도 주상도를 구할 수 있어야 한다. 이에 본 연구에서는 실험분산곡선을 전단파 속도로 자동적으로 전환할 수 있는 역산 자동화 프로그램을 개발하고자 한다. 이 프로그램 또한 Matlab v7.3및 GUI를 통하여 구현하였으며, 이 프로그램의 형태는 그림3.3.8과 같다.

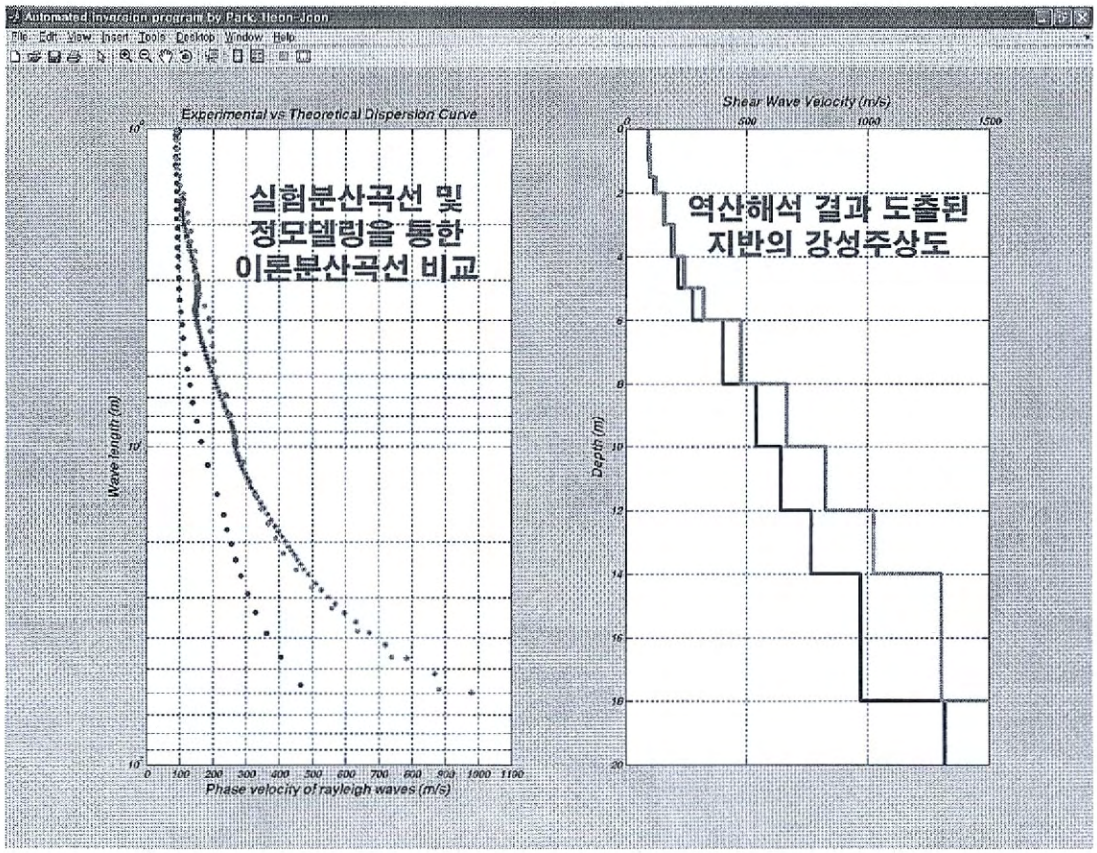


그림 3.3.8 Matlab v7.3 GUI를 이용한 자동역산 프로그램

이 최적화 해석을 통한 자동역산 프로그램 개발을 하기 위해서는 먼저 일정한 최적화 이론이 필요하게 되고, 이를 정모델링 프로그램과 적절히 조합하여 전단파 속도 주상도를 구하고자 하는 사용자가 편리하도록 새롭게 구성되어야 한다. 먼저 기존의 연구자들에 의해 역산해석에 적용된 사례가 있는 최적화 알고리즘은 다음의 표3.3.1과 같다.

표 3.3.1 최적화 알고리즘의 역산해석 적용 사례

최적화 알고리즘	역산해석에 적용된 사례
Least-square method	Xia et al., 1999
Davidon-Fletcher-Powell method	Ganji et al., 1998
Factored secant update algorithm	R. Al-Khoury et al., 2002
Levenge-Marquardt algorithm	
Powell hybrid algorithm	
Simulated annealing	Martinez et al.,2000 Beaty, K. S., 2002
Evolution-based Genetic algorithms	Osama Hunaidi, 1998 Roth; Holliger, 1999
General regression neural-network models	Willams and Gucunski, 1995

현재 본 연구에서는 여러 가지 기존 사례들을 비교분석하여 먼저 최소자승접근법(Least-square method)에 의한 자동화된 역산프로그램을 개발하였다. 최소자승접근법은 MASW 시험의 해석프로그램인 SurfSeis의 자동역산 프로그램에 사용되었으며, 정모델링의 반복횟수와 최대 RMS오차(Root mean squares error)의 결정, 반복정지 조건등을 변화시켜가면서 연산을 할 수 있다. 또한 여러 가지 수학적 최소화 이론 및 전역 최적화 알고리즘을 도입하여, 프로그램을 지속적으로 버전 업데이트할 예정이다. 이와 같은 최적화 이론을 통하여 자동화된 역산해석을 수행하게 되면, 최종적으로 지반의 강성을 나타내는 전단파 속도 주상도를 얻을 수 있다. 이한 예로서 안동 OO교 하부지반에서의 HWAW 시험 및 자동역산 결과를 도시하면 다음과 같다. 그림3.3.9은 실험분산곡선을 통하여 초기 주상도를 계산하고, 그에 대한 이론분산곡선을 계산하고, 최적화 이론을 통하여 자동으로 반복적 정모델링 기법을 구현하면서 계산된 7개의 이론분산곡선 및 주상도를 나타낸 것이다. 반복횟수가 증가할수록 이론분산곡선이 실험분산곡선과 오차가 줄어들고 있음을 알 수 있다.

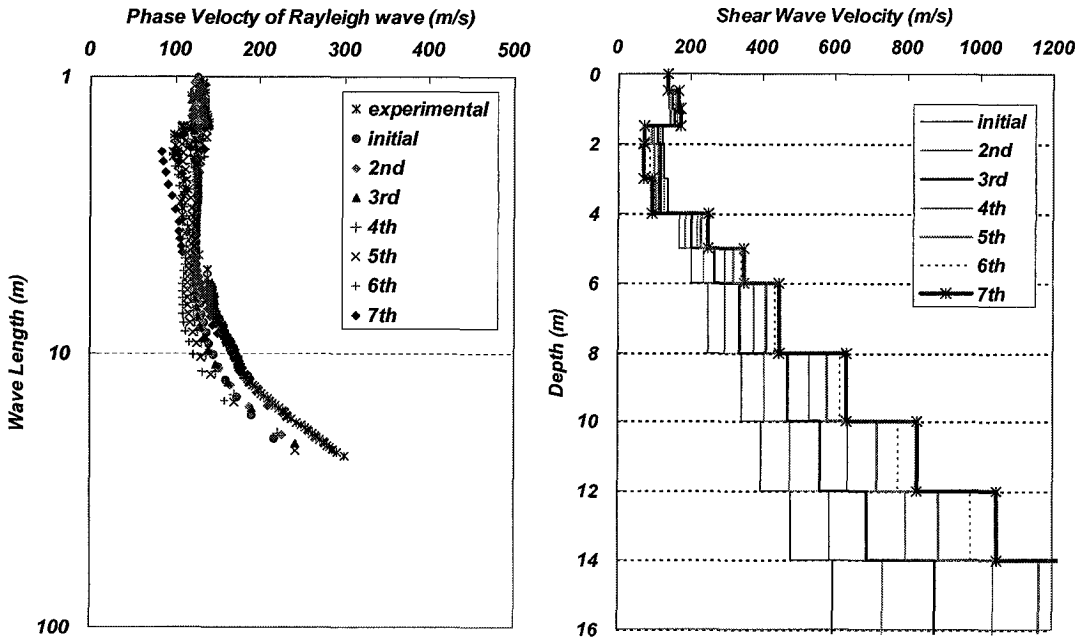


그림 3.3.9 자동화된 반복적 정모델링을 통한 역산 해석 결과의 예

이와 같이 개발된 정모델링 및 최적화 해석 프로그램을 이용하여 추후에도 가상의 지반 가정을 통한 예제 해석 및 지속적인 현장 시험을 통해 프로그램의 코딩상 오류를 수정하고, 실제 현장에서 프로그램을 실행하는 데에 문제가 발생하지 않도록 계속적으로 검증작업을 수행할 예정이다. 최종적으로 HWAW기법 자동 분산곡선 도출 프로그램 및 분산곡선을 전단파 속도로 전환하는 역산 프로그램 개발 및 개선을 통하여, 지반의 전단파 속도 주상도, 즉 강성주상도를 반자동적으로 구현할 수 있게 되었으며, 이 프로그램을 통하여 해석된 다양한 현장 시험 결과는 제 4절에 기술하였다.

제 4 절 다양한 현장 적용을 통한 기법의 검증

본 연구팀은 제안된 기법 및 시험 시스템 구성의 검증을 위하여 3개년도에 걸쳐 다양한 현장에서 시험을 수행하였다. 1차년도에는 기존 기법의 확실한 검증을 위하여 본 상용화 과제의 대상 기술인 SPT업홀 시험과 2D-HWAW시험 뿐만 아니라 대표적 공내 탄성파 탐사 기법들과, 표면파 시험을 추가적으로 실시하여 결과를 비교하였다. 1차년도에서 2차년도에 걸쳐 제안된 기법의 엄밀한 검증을 위하여 실대형 모형시험부지를 건설하여 검증을 수행하였다. 또한 김제, 장안, 대전, 분당등의 다양한 부지에서 현장시험을 통해 제안된 현장 시험 시스템을 검증하였다.

1. 상호검증시험(Round Robin Test)를 이용한 시험기법의 검증

본 연구에서 제안된 기법을 이용한 2차원 영상화 도출 연구에 앞서 기법의 확실한 검증을 위하여 본 상용화 과제의 대상 기술인 SPT업홀 시험과 2D-HWAW시험 뿐만 아니라 다양한 공내탄성파 탐사와 표면파 기법을 동시에 수행하여 결과를 비교하는 상호 검증 시험을 수행하였다(김동수 등 2005). 이 상호 검증 실험은 참여기업인 (주)희송지오텍의 협조하에 2004년 10월-12월에 걸쳐 수행되었다. 예비 현장 시험 부지에서 수행된 시험은 표 3.4.1과 같다.

표 3.4.1 예비 현장 시험 부지에서 수행된 시험 목록

수행한 시험	수량	수행 기관	비고
시추	3공	(주) 희송지오텍	현물
SPT업홀 시험	1공(BH-3)	한국과학기술원	자체 실험
2D-HWAW	측선 7m-33m	한국과학기술원	자체 실험
다운홀 시험	1공(BH-1)	한국과학기술원	자체 실험
크로스홀 시험	1지점(BH-2,3)	경희대학교	실험 협조
인홀	1공(BH-2)	경희대학교	실험 협조
다운홀 시험	3공	(주) 희송지오텍	현물
MASW	측선 6m-45m	(주) 희송지오텍	현물
전기비저항 시험	1측선	(주) 희송지오텍	현물
굴절법 탄성파 탐사	1측선	(주) 희송지오텍	현물

가. 조사지역 현황

SPT업홀 및 HWAW기법의 현장 검증 시험을 수행하기 위한 시험 부지는 서해안 고속도로 서해대교 하부 27번 교각과 28번 교각사이에 조성되었다. 좌측으로는 공장부지, 우측으로는 평택항을 오고가는 컨테이너 트럭이 지나는 도로가 위치하고 있다. 그림 3.4.1은 현장 시험부지의 전경을 나타낸 그림이다.

그림 3.4.2는 현장 시험부지 내 시험시추공의 위치, 지표탐사를 위한 측선을 나타낸 조사 위치도이다. Dist. 0 m는 27번 교각 중심에서 28번 교각 중심 방향으로 8 m 이격된 곳에 위치하고 있으며, 시험시추공 BH-1, BH-2와 BH-3은 측선상에서 각각 Dist. 10 m, 17 m 그리고 20 m에 위치하고 있다.

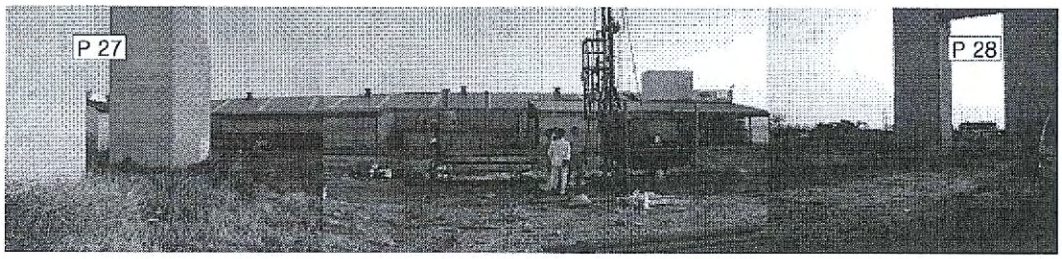


그림 3.4.1 현장 시험부지 전경

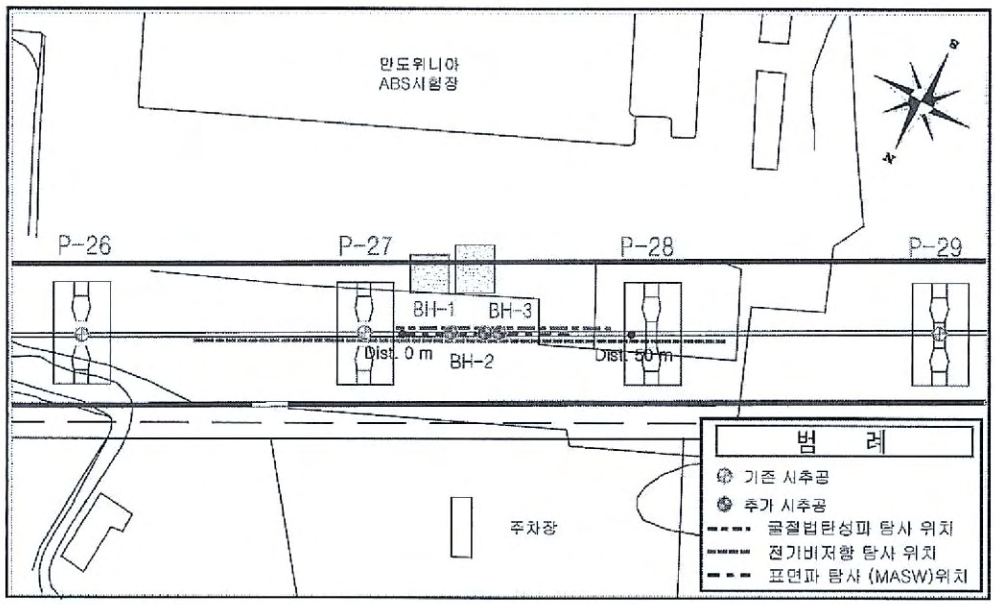


그림 3.4.2 예비 현장 시험부지 및 물리탐사 측선 위치도

1차 예비 현장 시험 수행을 위한 시험시추공 3공을 2004년도 10월에 조성하였다. BH-1은 27번 교각에서 28번 교각 방향으로 18m 이격된 곳에 위치하고 있으며, 지하수위는 3공 모두 지표하부 4 m로 동일하였다. 그림 3.4.3은 현장 시추공에 대한 현황 및 시추결과 조사된 각 지층에 대한 주상도를 나타낸 것이다.

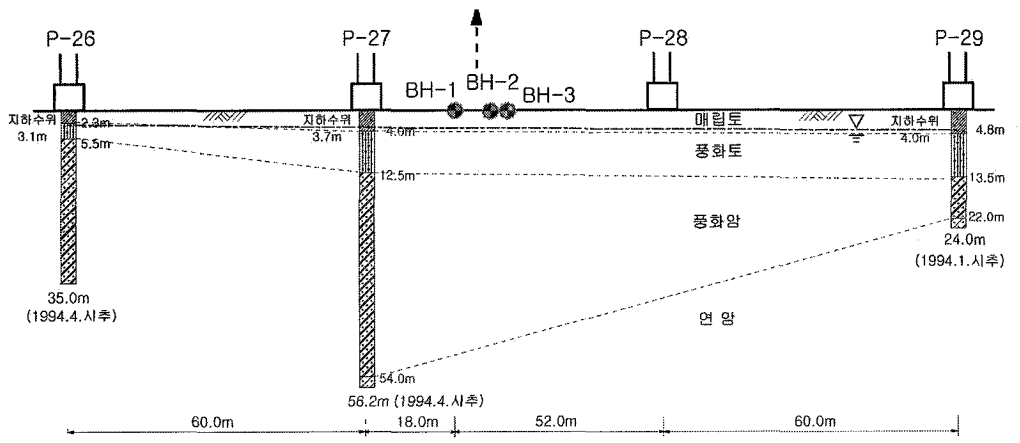


그림 3.4.3 시험용 시추공 모식도와 시추결과 단면도

나. 예비 현장 시험 부지에서 수행한 타 현장 시험 결과

(1) 전기비저항 탐사에 의한 지층구조

예비 시험 부지의 지반 조건을 좀 더 상세히 알아보고자 (주)희송지오텍에서 전기비저항 탐사를 실시 하였으며 그 결과는 그림 3.4.4와 같다. 전기 비저항도표는 지반매질의 전기흐름에 대한 저항정도를 표시하는 것으로 일반적으로 간극이 많을수록 비저항값이 크게 측정되고 매질의 밀도가 높고 매질 내에 간극이 작을수록 비저항값이 작게 측정된다. 그러나 간극이 많은 경우도 간극이 물로 채워져 있을 경우 비저항값은 작게 측정될 수도 있다. 시험부지의 경우는 해안선에 인접해 있고 지하수위가 지하 3m에 위치하고 있기 때문에, 간극이 해수로 채워져 있어서 간극이 많을수록 비저항이 낮게 측정되는 가능성도 있을 것으로 판단된다.

그림 3.4.4의 비저항 컨투어를 참고하여 보면 전반적으로 지표하부 14m 내의 얕은 지층에서는 저 비저항대가 균질하게 나타나고 있고, 14m 하부의 지층에 있어서도 피어 27번을 중심으로 고 비저항대가 균질하게 분포되어 있다. 얕은 지층의 저 비저항대는 매립토와 풍화토층의 영향으로 판단되며, 하부의 고비저항대는 기반암

의 영향으로 판단된다.

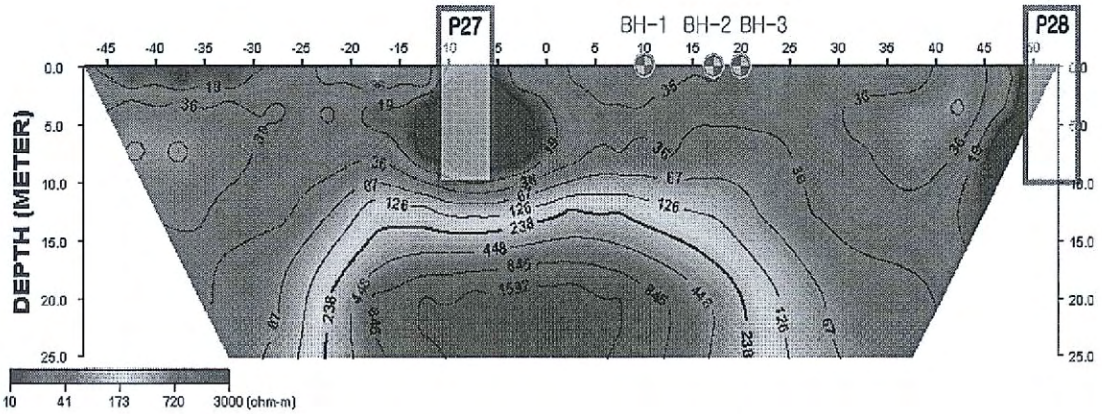


그림 3.4.4. 전기비저항 시험으로 결정된 비저항 컨투어

(2) MASW 시험에 의한 컨투어

예상 시험 부지의 설정된 측선에 대해 실시한 MASW 시험 결과를 그림 3.4.5에 도시하였다. MASW 시험으로 측정된 2차원 전단파속도 컨투어들은 최대가탐심도가 약 10m 정도로 제한되어 있고, 평가된 최고 전단파속도가 350m/sec를 초과하지 않았다. 또한 MASW 시험으로 평가된 2차원 전단파속도 컨투어들이 비교적 완만하고 부드러운 곡선으로 구성되어 있다. MASW 시험 특성상 긴 측선의 평균적인 물성치를 도출하기 때문에 국부적 지반 특성을 잘 모사하지 못 하기 때문인 것으로 판단된다. MASW 시험은 가탐심도가 그다지 깊지 않은 것은 일반 슬러지 해머로 가진을 하게 되고 긴 측선을 가지므로 고주파 및 저주파 대역에서 큰 에너지를 가지는 표면파 획득이 어렵기 때문이다. 이러한 단점을 가지는 MASW 시험은 기반암 상부의 토사 지반을 전체적으로 평가하는데 어려움이 있게 된다.

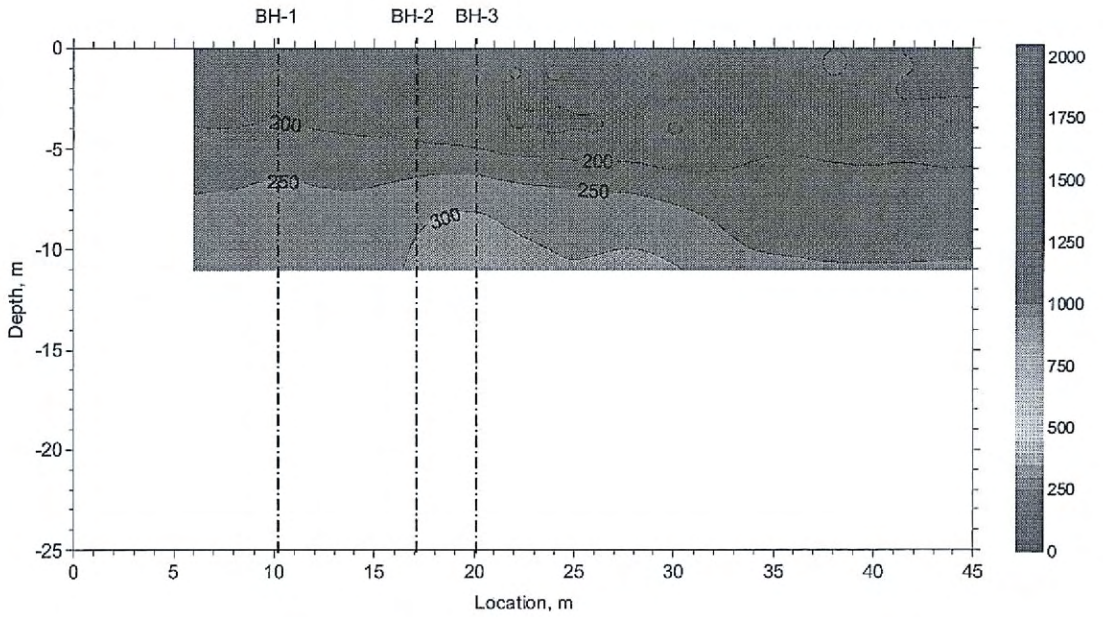
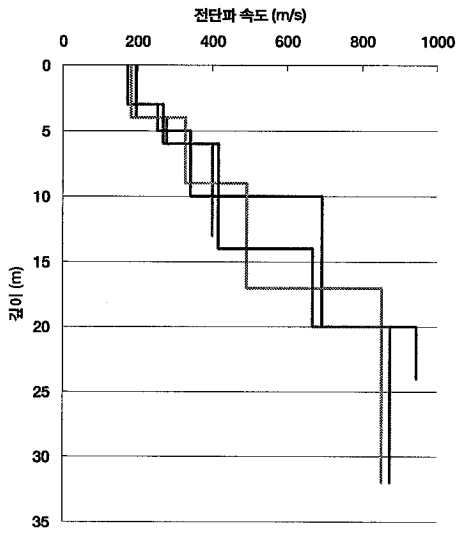


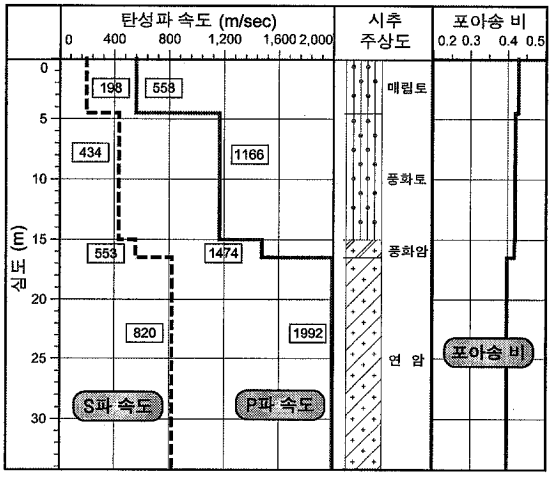
그림 3.4.5. MASW 시험에 의해서 결정된 전단파 속도 컨투어

(3) 다운홀 시험 결과

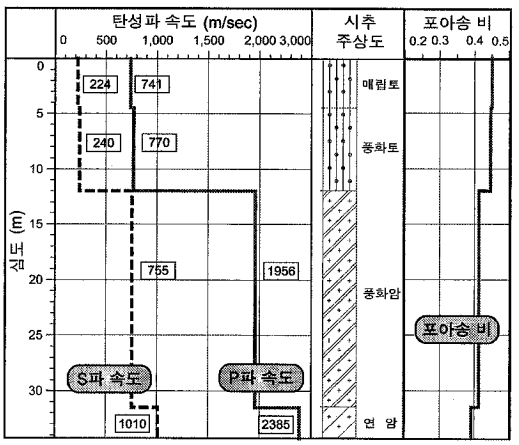
시추를 통해 제작된 시험공 BH-1, BH-2, BH-3에서 다운홀 시험을 수행하였다. (주)희송지오텍에서 BH-1, BH-2, BH-3의 모든 시험공에서 다운홀 시험을 수행하였으며 한국과학기술원에서는 BH-1에서 다운홀 시험을 수행하였다. 한국과학기술원에서 기존에 보유하고 있던 다운홀 시험 시스템에 문제가 발생하여 추가적으로 시험을 수행하기에 어려워 (주)희송지오텍에서 다운홀 시험 수행을 지원해 주었다. 다운홀 시험은 공내 탄성파 탐사 중 검증된 시험 중 하나이다. 그러므로 본 상용화 과제를 수행하는데 있어 향후 있을 추가적인 현장 검증 단계에서 결과 비교 목적으로 지속적으로 시험 수행이 요구되는 바이다. 이러한 이유로 2차년도 예산에 다운홀 시험 시스템 구입 건을 추가하였다. 그림 3.4.6에 예비 시험 부지에서 수행한 다운홀 결과를 도시하였다. 그림 3.4.6(a)는 본 연구팀(한국과학기술원)에 의해 수행된 결과이고 그림 3.4.6(b),(c),(d)는 참여기업인 (주)희송지오텍에 의해 수행된 결과이다.



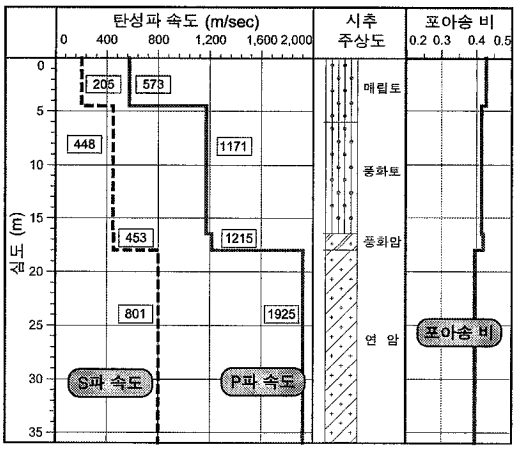
(a) 시추공 BH-1의 탄성파 속도



(b) 시추공 BH-1의 탄성파 속도



(c) 시추공 BH-2의 탄성파 속도

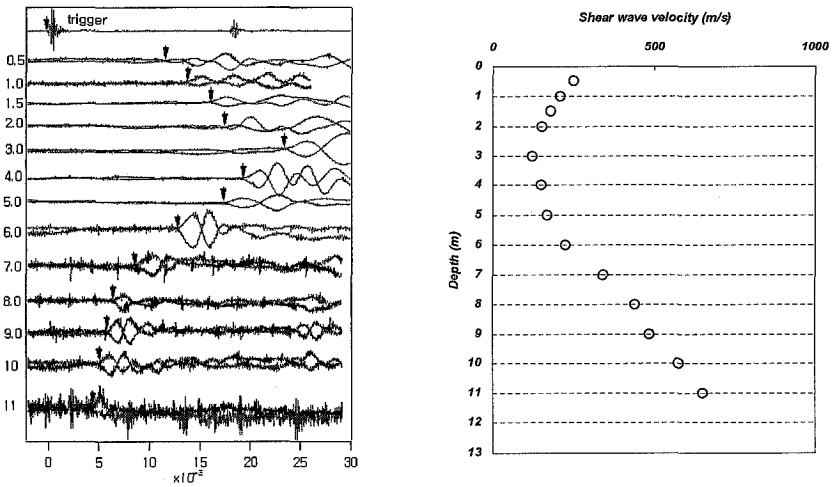


(d) 시추공 BH-3의 탄성파 속도

그림 3.4.6 다운홀 시험 수행 결과

(4) 크로스홀 시험 결과

크로스홀 시험 결과가 탄성파 탐사 중 가장 신뢰성이 높다고 인식되고 있어 결과 비교에서 기준값 역할을 하리라 판단된다. 크로스홀 시험을 통해서 가진 시점을 알려주는 가진원 파형과 전단파 도달 시점을 알려주는 감지기 파형을 획득하여야 한다. 크로스홀 시험은 시험공 이벽 문제 등으로 인해 시험 심도가 깊어질수록 공내에서 가진된 에너지가 효율적으로 지반으로 전달되지 않아 심도 11m의 결과까지만 도출할 수 있었다. 그림 3.4.7에 깊이별 획득 신호와 도출된 전단파 속도 주상도를 도시하였다.

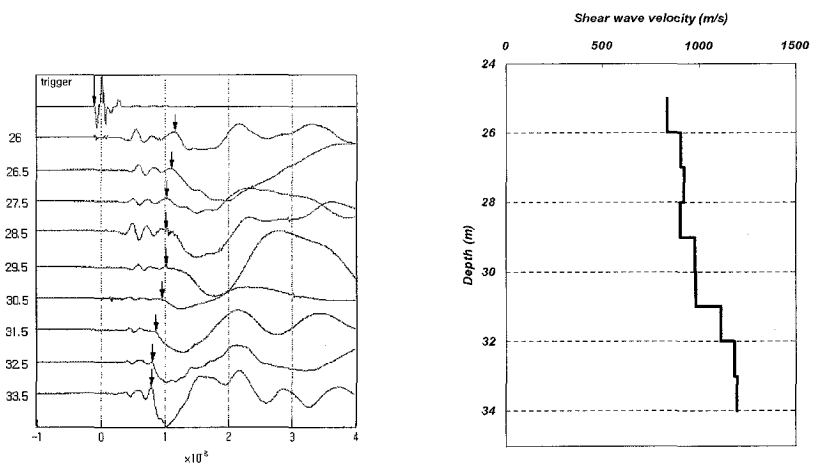


a) 깊이별 획득 신호 b) 도출된 전단파 속도 주상도

그림 3.4.7 크로스홀 시험 결과

(5) 인홀

인홀 시험은 크로스홀 시험과 마찬가지로 가진 시점을 알려주는 가진원 파형과 전단파 도달 시점을 알려주는 감지기 파형을 획득하여야 한다. 인홀 시험은 나공에서만 수행이 가능하므로 지표면 기준 심도 26m 이상에서만 시험 수행이 가능하였으며 획득한 파형은 그림 3.4.8(a)와 같다. 다운홀 시험 결과가 탐사 심도가 깊어질수록 그 신뢰성이 떨어진다고 인식되어 왔으므로 깊은 심도의 물성치 비교에 있어서는 인홀 결과와의 비교 작업을 통해 검증을 할 수 있다고 판단된다. 인홀 시험을 통해 도출된 최종 전단파 속도 주상도는 그림 3.4.8(b)와 같다.

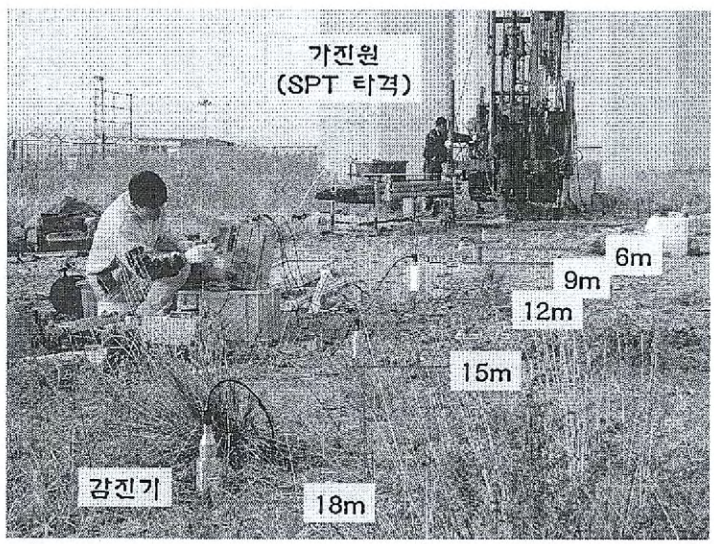


a) 깊이별 획득 신호 b) 도출된 전단파 속도 주상도

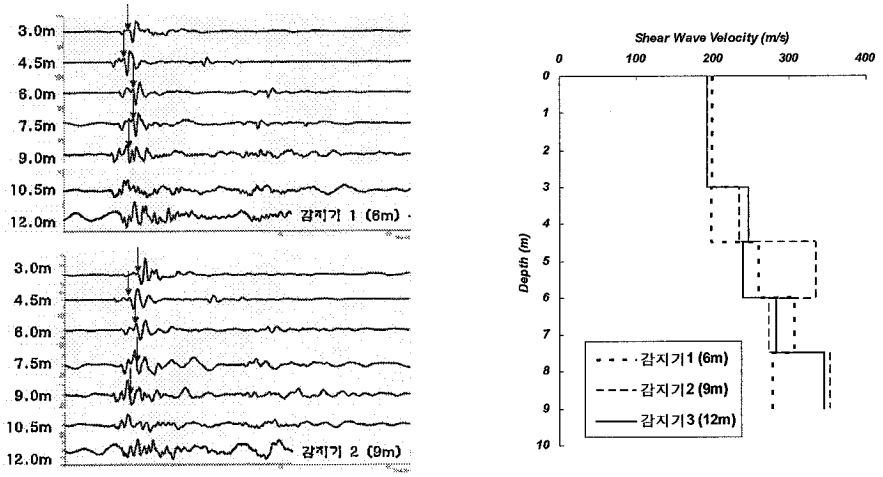
그림 3.4.8 인홀 시험 결과

다. SPT 업홀 시험의 수행

본 예비 실험 부지에서 SPT 업홀 시험은 BH-3공 시추시 업홀 측선을 BH-1, BH-2방향으로 전개하여 수행하였다(그림 3.4.9(a)). 그러므로 각 공내 탄성파 탐사 결과와 탐사 대상 영역이 같아 그 결과 비교가 가능하리라 판단된다. 표 3.4.2에 상호 검증 시험 부지에서 사용된 SPT업홀 시험 시스템을 정리하였다. 본 단계에서는 본연구에서 제안된 시험 구성이 아니라 기존의 SPT업홀 시험 시스템으로 시험을 수행하였다. 기존 시험시스템은 다양한 현장적용과 연구결과를 바탕으로 꾸준히 개산되었다. SPT 업홀 시험을 통해 얻은 깊이별 획득 신호와 1차원 업홀 해석 프로그램을 이용하여 최종적으로 획득한 전단파 속도 주상도를 그림 3.4.9(b)와 (c)에 도시하였다. 본 시험부지에서는 깊이 10m이상에서 자갈층 및 풍화암대가 존재하게 되는데 이러한 이유로 SPT 가진이 효율적으로 이루어지지 않아 SPT업홀 시험 역시 9m까지 수행가능하였다. SPT가진이 효율적으로 이루어지지 않을 경우 압축파 성분이 다량 함유되어 전단파 도달 시점을 찾기 힘들게 된다. 앞서 수치모의 실험에서 심도가 깊어질수록 강성변화가 있을수록 비슷한 현상이 발생하였다. 하지만 이러할 경우 지표면에서 계측되는 속도 시간 이력곡선의 수평 성분과 수직 성분을 동시에 활용하면 전단파 도달 시점을 찾기 더 용이하다는 결론을 수치해석을 통해 얻은 바 있다. 그리하여 이후 SPT 업홀 시험에서부터는 수직, 수평성분의 지표면 감지기를 사용하여 시험을 수행하였다.



a) 예비 시험 부지에서 SPT업홀 시험 수행 장면



b) 깊이별 획득 신호 c)1차원 SPT 업홀 해석 결과

그림 3.4.9 SPT업홀 시험 결과

본 상호 검증 시험의 SPT업홀 시험 결과는 1차원 해석만을 수행하였다. 당시 SPT 업홀에 적합한 토모그라피 프로그램을 확립하지 못하였기 때문이다. SPT업홀 시험의 1차원 결과와 타 공내 탄성파 탐사와의 결과를 비교하여 보았다(그림 3.4.10). SPT 업홀 시험 결과는 전반적으로 크로스홀 시험과 다운홀 시험 결과와 유사한 것을 알 수 있어 SPT업홀 시험 결과가 어느 정도 신뢰성을 가지고 있다고 말할 수 있다. 또한 본 상호 검증 실험을 통해 SPT업홀 시험이 대표적 공내 탄성파 탐사기법인 크로스홀 및 다운홀 시험에 비해서 경제적이고 손쉬운 실험인 것을 알 수 있었다.

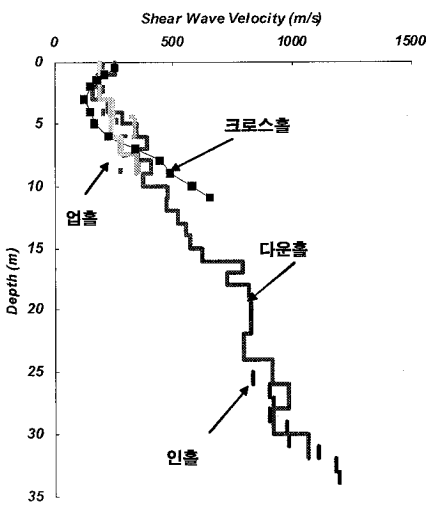


그림 3.4.10 SPT업홀 시험 결과와 타 공내 탄성파 결과와의 비교

표 3.4.2. 1차 예비 시험 부지에서 사용된 SPT업홀 시험 시스템

장비 및 해석	당시 장비 상태	보유 상황	차후 개선 사항
가진원	SPT Source (수동으로 타격)	시추장비에 부착됨	
감지기	1Hz 수직 지오폰 5개	기존 보유 장비	4.5H, 10Hz 수직, 수평 지오폰 각 12개
케이블	BNC 케이블 (5 unit)	기존 보유 장비	Take outs Land Cable (12채널*2roll)
DAQ	Liberty(Nicolet)	기존 보유 장비	Geode(GEOMETRICS) 보급형 DAQ 시스템 제작
제어 및 데이터 저장 장비	노트북	기존 보유 장비	노트북
트리거 장치	로드 셀 (엔빌 하단에 장착)	기존 보유 장비	Hammer Switch (엔빌 하단에 장착)
초동 picking	신호 Display 프로그램 상에서 수동으로 판단	기존 보유 프로그램	자동 초동 획득 프로그램 개발
결과 해석 프로그램	1차원 해석 프로그램 SPT업홀 사용	기존 보유 프로그램	토모그라피 프로그램 개발
실험 장비 세팅 내용 및 결과 해석 과정	1. 수직 성분의 1Hz 감지기 5개를 시추장비로부터 3m간격으로 6m-18m까지 설치 2. BNC Cable을 이용하여 5채널의 속도계와 Liberty에 접속 3. SPT 타격시 트리거용으로 엔빌 하단에 Load Cell 부착 4. SPT 수동 타격을 통해 S/N가 좋은 데이터 노트북으로 자동 획득. 5. 파형 Display 기능이 있는 FlexPro를 이용, 초동을 수동으로 picking 6. 획득된 초동 정보를 SPT_uphole(1차원 업홀 전용 해석 프로그램) 사용, 최종 전단파 속도 주상도 도출		

라. 2D-HWAW 시험 결과

본 예비 현장 부지에서 HWAW 시험에서는 측선 좌표 7m-33m까지 실험을 수행하였다(그림 3.4.11). 두 개의 감진기를 고정시키고 정해진 위치에 놓인 가진원의 일회 타격으로 시험을 수행하는 방식으로 총 14회의 실험을 수행하였다. 하나의 지반구간에 대해서 시험이 완료되면 인접한 지반구간들에 대해서 시험을 반복하여 1차원 전단파속도 주상도를 구하고, 이들 일련의 1차원 전단파속도 주상도를 활용하여 2차원 전단파속도 컨투어 도표를 결정하게 된다. 표 3.4.3에 상호검증 시험 부지에서 사용된 2D-HWAW 기법 시험 시스템을 정리하였다. SPT업홀 시험과 마찬가지로 기존의 2D-HWAW 기법 시험 시스템으로 시험을 수행하였다. 그림 3.4.12에 HWAW 시험으로 결정한 2차원 전단파속도 컨투어 도표를 도시하였다. 우선 2차원 전단강성의 형상과 시추결과와 비교하여 볼 때 시추공 BH-2와 BH-3사이에서 지층이 급격히 하향으로 내려가는 것과 시추공 BH-1의 암반층이 시추공 BH-2의 암반층보다 다소 아래에 위치하고 있다는 것 등은 시추조사 결과와 유사하다. 또한 시추조사시 확인된 풍화암층의 전단파속도는 750~800m/sec, 연암 위치에 해당되는 전단파속도는 800~1100m/sec로 산정되었으므로 적절하게 평가되었다고 판단된다.



그림 3.4.11 예비 시험 부지에서 2D-HWAW 기법 수행 장면

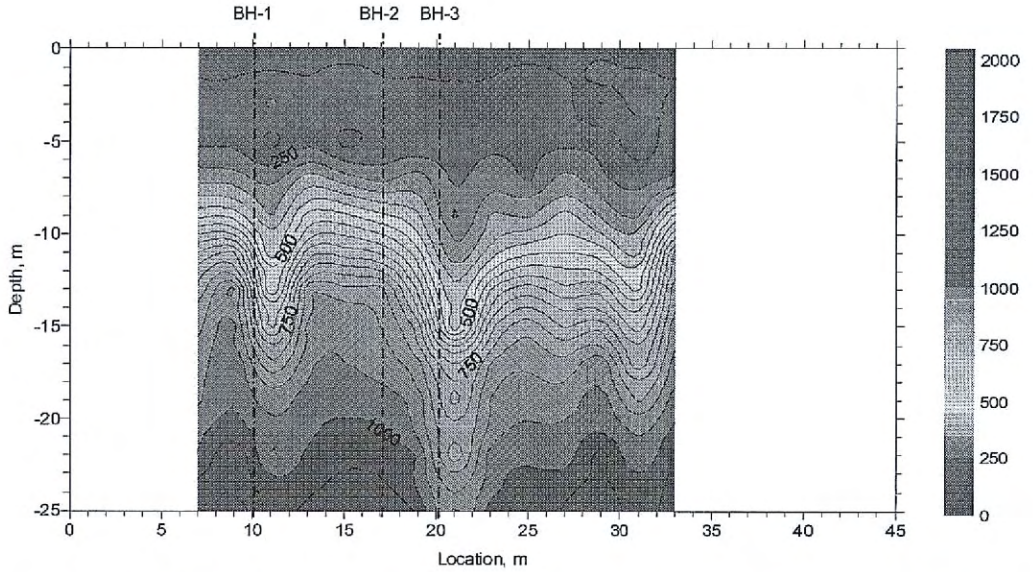


그림 3.4.12 HWAW 시험 수행기관에 의해서 결정된 전단파 속도 컨투어

전반적으로 시추조사 결과의 자료를 참고하여 볼 때, HWAW 시험에 의한 2차원 전단파속도 컨투어가 신뢰성 있게 실제 지반의 층서구조를 충분히 표현하고 있음을 확인할 수 있다. 대표적으로 현장에 적용되고 있는 MASW결과(그림 3.4.5)와 직접적으로 비교하여 볼 때 MASW기법에 비해 2D-HWAW 기법이 지반의 국부적 특성을 잘 모사하는 것으로 판단되어 진다. 이는 다시 한번 좁은 감지기 간격을 이용하여 지반을 평가하는 2D-HWAW기법이 2차원 영상화에 더욱 적합한 기법이라는 것을 보여주는 것이다. 또한 2D-HWAW 기법은 MASW에 비해 가탐 심도가 훨씬 깊으며 그 결과 또한 시추 주상도 및 타 공내 탄성파 탐사와 비교하여 볼 때 신뢰성이 높은 것을 확인 할 수 있었다. MASW 기법은 표면파 탐사 중 대표적으로 상용화에 성공한 사례이다. 하지만 본 실험을 통해 2D-HWAW기법이 MASW 기법에 비해 시험 수행방법부터 도출된 결과의 신뢰성에 있어서까지 모든 부분에 있어 우월하다는 것을 알 수 있었다. 그러므로 본 과제 수행을 통해 2D-HWAW기법이 상용화에 성공할 경우 현 국내 지반조사 업체로부터 수요가 상당수 있으리라 판단이 되며 지반의 신뢰성 있는 2차원 지반 강성 도출 분야에 두드러진 역할을 할 수 있을 것이라 생각된다.

상호검증시험은 과제를 통해 개선된 시험 시스템을 검증에 앞서 기존의 방법을 그대로 적용한 상태에서 시험을 수행하였다. 그러나 본 현장 실험을 통해 SPT업홀 기법과 2D-HWAW기법의 신뢰성을 다시 확인하고 상용화 필요성 및 과제의 성공

적 수행에 가능성 느낌과 동시에 상용화를 위한 많은 개선(현장 실험 장비의 효율적 개선, 신뢰성 있는 해석 프로그램의 도입 혹은 개발)을 위한 노력이 필요하다는 것을 알게 되었다.

표 3.4.3 1차 예비 시험 부지에서 사용된 2D-HWAW 기법 시험 시스템

장비 및 해석	당시 장비 상태	보유 상황	차후 개선 사항
가진원	슬러지 해머	기존 보유 장비	저주파 가진원 제작
감지기	1Hz 수직 지오폰 2개	기존 보유 장비	4.5Hz 수직 지오폰 4개 1Hz 수직 지오폰 4개
케이블	BNC 케이블 (2 unit)	기존 보유 장비	Take outs Land Cable (12채널*1roll)
DAQ	Agilent Analyzer 35670A	기존 보유 장비	Geode(GEOMETRICS) NI DAQ 시스템 제작
제어 및 저장 장비	DAQ장비내에서 제어 및 저장	기존 보유 장비	노트북
분산곡선 도출 프로그램	HWAW Anlayzer v1.20	기존 보유 프로그램	HWAW Anlayzer
역산 프로그램	WinSASW1.23	기존 보유 프로그램	자동 역산 프로그램 개발
2차원 영상화 프로그램	Flex_Pro	기존 보유 프로그램	프로그램 개발 예정
실험 장비 세팅 내용 및 결과 해석 과정	1. 수직 성분의 1Hz 감지기 2개를 측점지점 중심으로 2m간격 설치 2. BNC Cable을 이용하여 2채널의 속도계와 Agilent Analyzer 연결 4. 해머 가진원을 이용하여 2개의 감지기로부터 신호 획득 5. 노트북으로 데이터 이동 뒤 HWAW Anlayzer v1.20를 이용하여 실험 분산곡선 도출 6. WinSASW1.23을 이용 반복적 정모델링 기법을 구사하여 최종 전단파 속도 주상도 도출(3차원 단일 배열 역산) 7. 모든 측점에 대해 전단파 속도 주상도를 도출한 뒤 Flex_Pro를 이용하여 선형 보간을 통한 2차원 Contouring 작업 수행		

2. 모형 부지 건설을 통한 SPT-업홀 토모그라피 및 2D-HWAW 기법 검증

가 모형부지의 조성

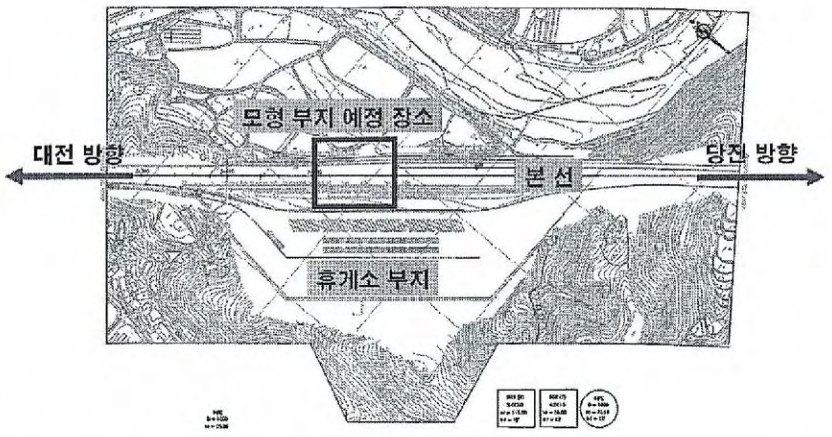
(1) 모형 부지 건설의 필요성

본 과제를 성공적으로 완료하려면 개발된 기법, 개발된 시험 시스템의 검증이 필수적이다. 지금까지 새로운 기법이 개발되었을 경우 그 검증 작업은 일반적인 지반에서 신뢰성이 입증된 타 기법과 그 결과를 비교하는 수준에서 이루어졌다. 하지만 현실적으로 신뢰성이 입증되었다고 하는 타 기법 또한 여러 가지 변수로 인해 정확한 해를 도출하지 못하는 경우가 발생한다. 기법간의 특성 차이와 지반의 불확실성이 더해져 신뢰성 있는 검증을 수행하지 못하게 된다. 본 연구팀에서는 보다 확실하게 개발된 상용화 기술에 대한 검증 작업을 수행하고 기법을 개선, 개발된 시험 시스템을 성공적으로 확립하고자 실대형 모형 시험 부지 건설을 기획하고 실행에 옮겼다.

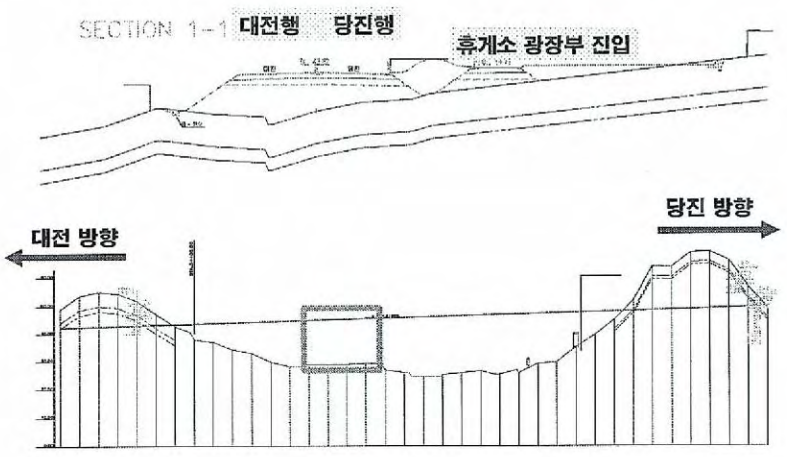
성토 및 다짐을 통해 모형 부지를 건설함으로써 측량을 통해 지반의 층상구조 형상을 정확하게 측정할 수 있다. 또한 매 층 경계마다 검증용 속도계 매설이 가능하므로 성토체가 완성된 뒤 매설된 검증용 속도계를 이용하여 모형 부지 각 층의 강성을 정확하게 도출할 수 있게 된다. 따라서 건설되는 모형 시험 부지는 일반 시험 부지에 비해 지반의 구조적인 형상 및 각 층의 물성을 매우 정확하게 알 수 있다. 그러므로 모형 부지에서 개발된 기법, 개발된 시험 시스템의 검증을 수행한다면 모형부지의 구조적 형상 정보와 물성 정보와 비교함으로써 확실한 검증 작업을 수행할 수 있게 된다. 이런 작업을 통해 SPT-업홀 토모그라피 기법과 2D-HWAW 기법이 검증된다면 성공적인 상용화 연구가 가능하리라 판단된다.

(2) 모형부지의 설계

모형부지의 건설은 2005년 5월-6월에 걸쳐 조성되었다. 토공용 굴삭기, 트럭, 진동 다짐기, 암성토용 컴팩터, 불도저 등이 GS 건설 측의 협조로 지원되었다.



a) 평면도

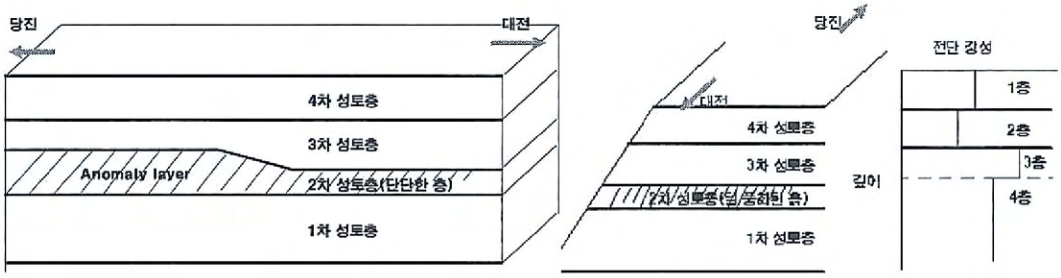


b) 종횡단면도

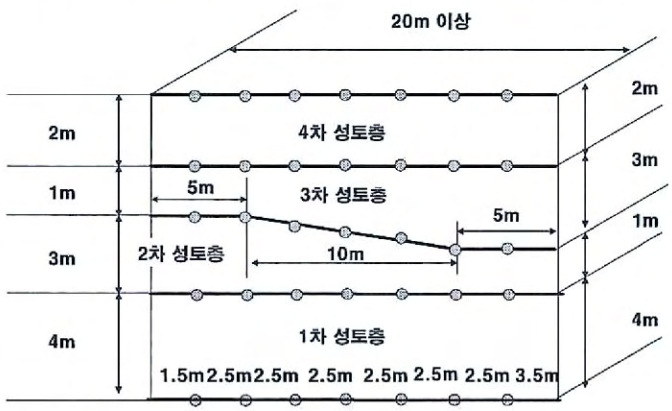
그림 3.4.13 시험부지 건설 위치 (대전-당진간 고속도로 예산 휴게소 예정부지)

모형부지는 GS건설에서 시공을 맡고 있는 대전-당진간 고속도로 7공구 내 예산 휴게소 예정 부지에 건설되었다(그림 3.4.13) 계획된 모형부지 형상은 그림 3.4.14와 같다. 총 4층으로 구성되어 있으며 2차 성토층을 다른 종류의 흙으로 성토하고 다짐 정도를 달리하여 성토체의 전단강성(전단파속도)을 크게 하였고 경사층의 경계를 명확히 구분하도록 하기 위하여 3차 성토층을 느슨하게 하여 강성의 차이를 크게 하고 그림 3.4.14b)와 같은 형태로 나타나도록 조성하는 것이 목표라고 할 수 있다. 또한 모형부지조성에서 가장 핵심은 각 층 경계마다 그림 3.4.15에 나타난 수

평 및 수직 성분의 속도계를 매설하는 것인데 층 경계당 각각 7개 총 14개의 수직 성분 및 수평성분 속도계를 좌표 측량을 통해 동일한 x,y 좌표에 매설함으로써 정확하게 층간 속도를 도출할 수 있게 하였다. 각 층 경계당 14개, 4개의 층경계가 존재하며 2개의 측선을 설정하였으므로 시험 부지 내에는 총 112개의 속도계가 매설되었다.



(a) 모형부지 횡단면도 (b) 모형부지 종단면도



(c) 시험 부지의 형상 및 매설될 속도계의 위치

그림 3.4.14 모형 시험 부지의 설계

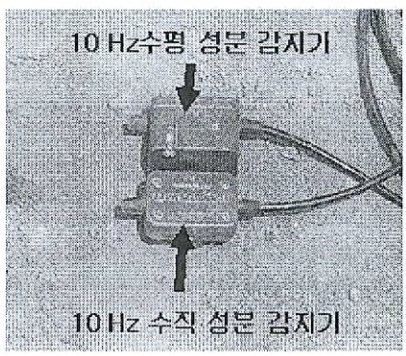


그림 3.4.15 지중에 매설되는 감지기

(3) 모형부지 시공 단계

일반적으로 표면파 시험 수행에서 시험 부지의 높이가 너비에 비해 매우 크면 경계조건에 의한 파의 반사 및 간섭등에 의하여 표면파 탐사기법의 결과가 영향을 받게 된다. 따라서 표면파 탐사 기법과 파의 직접도달시간을 이용하는 다른 기법을 신뢰성 있게 비교하기 위해서는 이러한 경계조건의 영향을 최대한 줄여야 한다. 모형부지 건설시 수평 지표면에 성토를 이용하여 부지를 조성하게 되면 성토고가 높아질수록 옆면의 크기가 커지게 되고, 계획된 성토고까지 성토를 수행하게 되면 표면파의 경계 영향을 제거하기 위해서는 상당한 너비를 가지는 부지가 필요하게 된다. 따라서, 본 과제에서는 모형부지 조성시 기존의 사면을 이용하여 건설하였다. 그림 3.4.16에 나타난 바와 같이 기존 사면을 굴착하고 정지한 후 성토를 통하여 부지를 조성하였다. 기존 사면을 이용할 경우 최종 성토고까지 토공량을 상당히 줄일 수 있고 사면을 이용하여 건설기계의 투입 또한 용이하게 할 수 있었다.

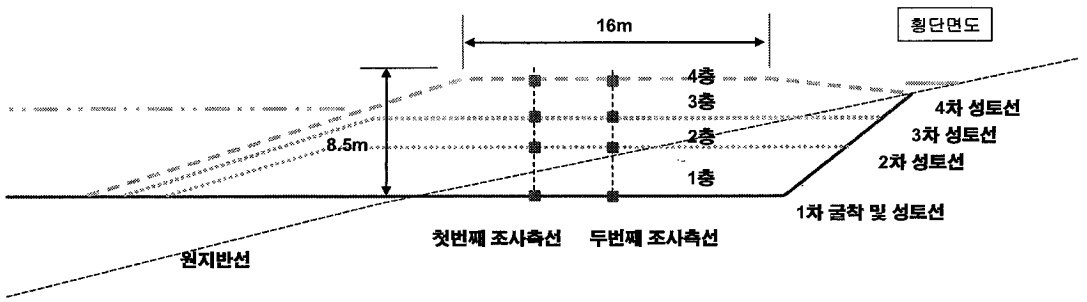


그림 3.4.16 모형부지의 종단면도

모형부지는 다짐정도와 재료의 종류를 조절하여 각 층의 서로 다른 강성을 가지고 경사진 층을 포함한 4층의 성토지반으로 설계되었다. 표 3.4.4은 각 층의 목표 강성도, 다짐정도 및 성토재료를 나타낸다. 모형부지의 1층은 강성이 큰 다짐 토사층으로 설계되었다. 기존사면을 굴착한 후 밑바닥을 정지하고 지중 감지기를 설치하였다. 감지기 설치 후 부지 건설에 영향을 받지 않는 거리의 기준점을 설정하고 각 설치지점의 좌표와 레벨을 측량하였다. 감지기 설치 후 산토를 이용하여 성토하고 진동롤러로 다짐을 수행하여 건설하였다(그림 3.4.17). 1층 성토 및 다짐 후 바닥층에서 측정된 각 지점의 좌표를 이용하여 1층 경계의 감지기를 동일 위치에 설치하였고 레벨을 측량하여 1층의 두께를 산정하였다(그림 3.4.18).

부지의 두 번째 층은 각 탐사기법이 강성변화가 큰 지반의 형상을 찾아내고, 수평층이 아닌 경사층에서 각 기법의 탐사 능력을 확인하기 위하여 경사를 가지는

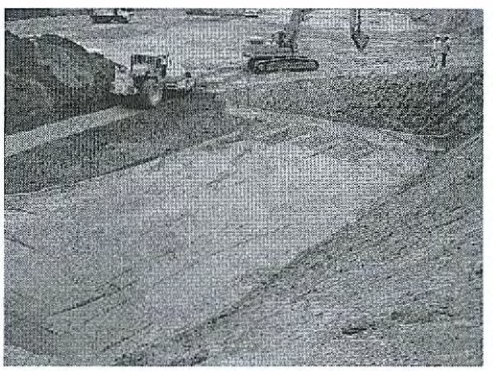
강성이 큰 층으로 설계되었다. 인접한 상하층과의 강성차이를 크게 나타내기 위하여 큰 강성을 가지는 발파암을 이용해 매립하고 양족롤러와 진동롤러를 이용하여 충분한 다짐을 하였다. 수평층이 아닌 길이 방향의 경사지반을 만들기 위하여 추가 성토를 실시하여 층의 양 끝의 높이를 달리 하였다(그림 3.4.19). 2층 건설 후에 1층과 같은 방법으로 감지기를 매설하였다.

표 3.4.4 각 층의 목표 물성 및 건설방법

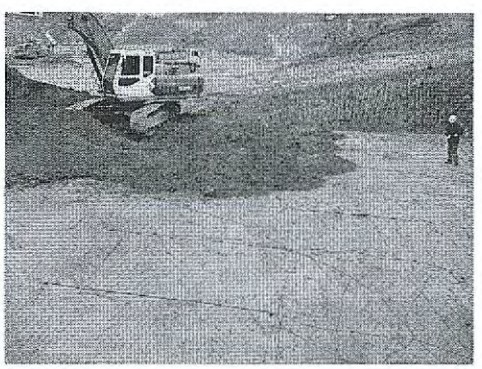
층	목표 물성	다짐두께당 롤러의 통과 회수	성토재료
1층	큰 강성의 토사층	50cm 성토 후 10회 다짐	산토
2층	큰 강성의 발파암층	30cm 성토 후 15회 다짐	발파암
3층	매우 느슨한 토사층	50cm 성토 후 2회 다짐	양질의 토사
4층	중간 강성의 토사층	50cm 성토 후 5회 다짐	산토



(a) 원지반 사면 굴착



(b) 밑바닥 정지



(c) 감지기 설치 후 매립



(d) 진동 롤러로 다짐

그림 3.4.17. 1층 건설과정

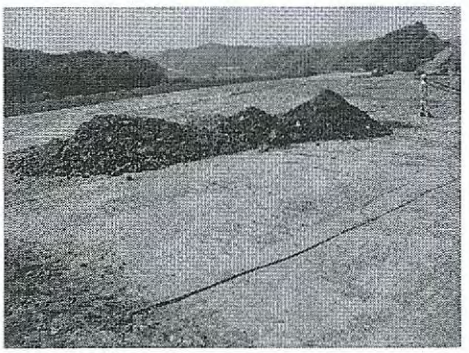


(a) 감지기 설치



(b) 레벨 측량

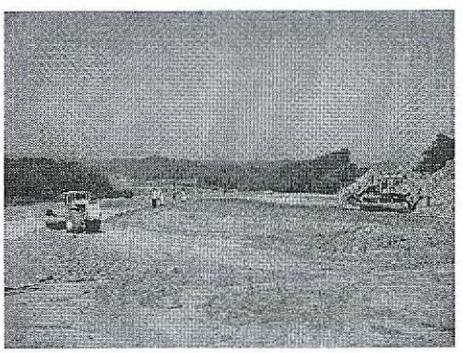
그림 3.4.18. 감지기 설치 및 측량



(a) 발파암 매립



(b) 양족 롤러와 진동 롤러를 이용한 다짐



(c) 경사 지반 성토 및 다짐



(d) 경사 지반위에 감지기 설치

그림 3.4.19 2층 건설과정

세 번째 층은 2층과의 강성차이를 크게 하기 위하여 거의 다져지지 않은 강성이 작은 토사층으로 계획되었다. 양질의 토사를 성토한 후 표면 정지를 위한 최소의

다짐을 수행하였다. 또한 4층은 표면에서의 원활한 시험 수행 및 연약층을 보호하기 위하여 중간정도의 강성을 지닌 토사층으로 건설되었다(그림 3.4.20). 1층과 2층의 경계와 마찬가지로 이 두 층의 경계에서도 감지기를 같은 방법으로 매설하였다. 부지 건설이 끝난후 경계조건의 영향을 줄이고 부지의 안정성 확보를 위하여 사면 반대편 측면에 성토를 실시하였다.



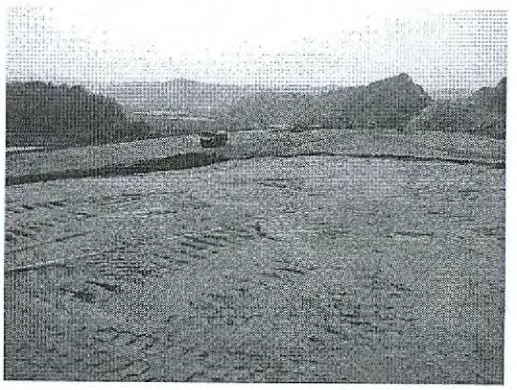
(a) 양질의 토사 성토



(b) 감지기 설치



(c) 4층 산토로 성토



(d) 4층 지표면

그림 3.4.20 3,4층 건설과정

최종적으로 모형부지는 상단 기준으로 약 높이 8.5m, 너비 16m, 길이 26m로 완성되었다. 불행하게도 주변 환경으로 인하여 건설된 모형부지는 처음 계획했던 형상보다 너비가 줄어들게 되었고, 첫 번째 매설감지기 측선이 부지의 모서리 가까이에 위치하게 되어 이 측선의 실험 결과가 부지의 경계에 영향을 받을 가능성이 있어 사용하지 않았다. 본 과제에서는 중앙에 설치된 매설감지기 측선만을 이용하여 검증 연구를 수행하였고 시추 또한 이 측선을 따라서 수행되었다(그림 3.4.21).

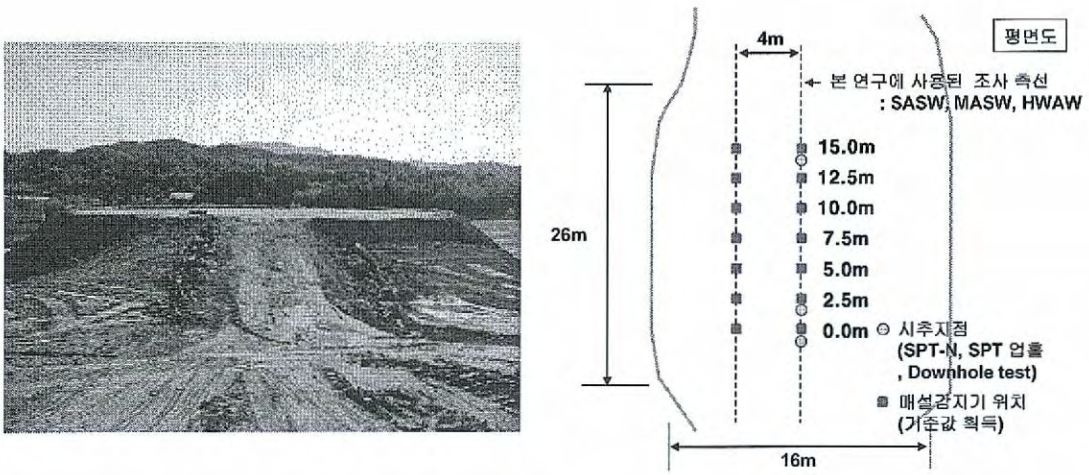


그림 3.4.21 부지의 최종 모형과 시험 수행 측선

그림 3.4.22는 중앙 측선을 기준으로 한 부지의 종단면도와 매설감지기의 좌표를 나타낸다. 본 연구에서 시험 및 결과분석의 편의를 위하여 2축의 좌표계를 사용하였다. x축은 부지의 수평좌표로 매설감지기의 배열을 기반으로 하여 매설감지기의 오른쪽 끝을 0m, 왼쪽 끝을 15m로 설정하였다. y축은 수직좌표로 1층의 바닥면을 0m, 부지의 표면을 8.5m로 하여 설정하였다. 시험결과도 이 좌표계를 이용하여 도시되었다. 수평좌표에서 단면쪽으로 수직한 z축은 본 연구에서 중앙 매설감지기 측선만을 사용하였으므로 적용되지 않았다.

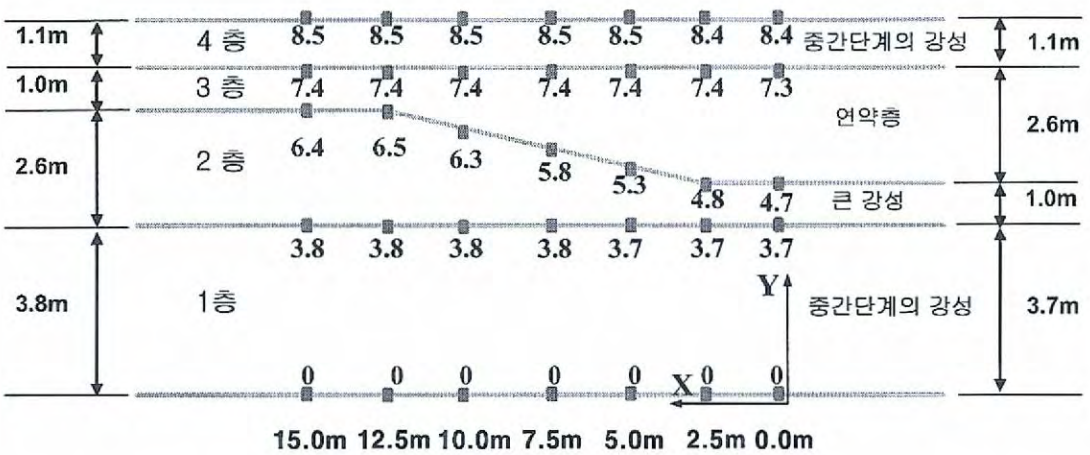
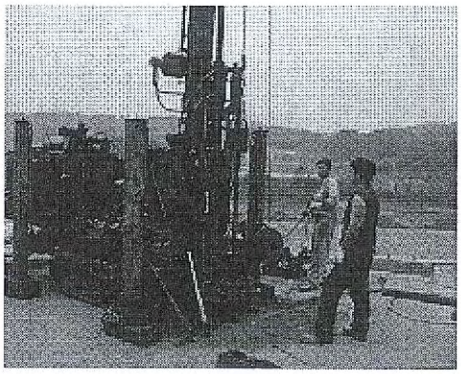
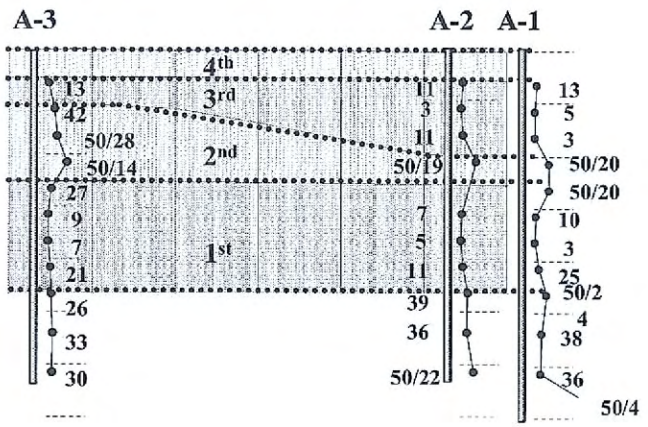


그림 3.4.22 완성된 부지의 종단면도와 매설 감지기의 위치

(4) 모형부지의 물성정보 획득

계획한 바대로 모형 부지가 조성된 바를 확인하기 위하여 시추작업을 실시 하였다. 각 층의 구성 및 N치를 구하기 위하여 시추와 동시에 표준관입시험(standard penetration test, SPT)을 3개의 지점에서 수행하였다(그림 3.4.23(a)). 다운홀 등의 공내 탄성타 탐사를 실시하기 위하여 시험공이 설치되었으며 시추공 A-1은 -0.5m 수평좌표에서 깊이 15m까지 설치되었고 시추공 A-2와 A-3 는 각 2.0m 및 14.5m 지점에서 깊이 12m까지 설치되었다. 모든 시험공은 PVC 케이싱으로 설치하였다. 모형부지의 SPT-N치는 그림 3.4.23(b)에 나타내었으며 SPT-N치의 분포는 부지의 구조적형상과 잘 맞아 모형부지가 계획대로 건설되었음을 확인 할 수 있었다.



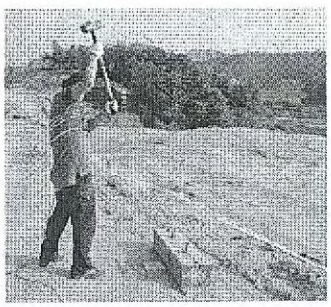


(a) 확인 시추 (b) 부지의 SPT-N 치

그림 3.4.23 확인 시추 및 SPT-N 치

재료의 동적물성치(압축파속도 Vp, 전단파속도 Vs)를 구하기 위하여 지표면에서 압축파(P파)와 전단파(S파)를 가진 시켰다. 가진 방법은 다운홀 시험의 가진방법을 이용하였고 감지기가 매설된 연직방향 지표면 위치에서 수행하였다. P파는 판을 지표면 위에 놓고 수직으로 타격하여 가진시켰고(그림 3.4. 24(a)) S파는 쐐기를 이용하여 양방향 타격을 통하여 가진시켰다(그림 3.4. 12(b). 이렇게 발생된 파를 매설된 감지기를 이용하여 계측하였다(그림 3.4. 24(c),(d)). 감지기간 도달시간차를 이용한 전파시간과 측량을 통해 알고 있는 감지기 사이의 거리를 이용하여 각 층의 P파와 S파의 속도를 구하였다. 이렇게 구한 결과는 SPT-업홀 및 HWAW 기법을

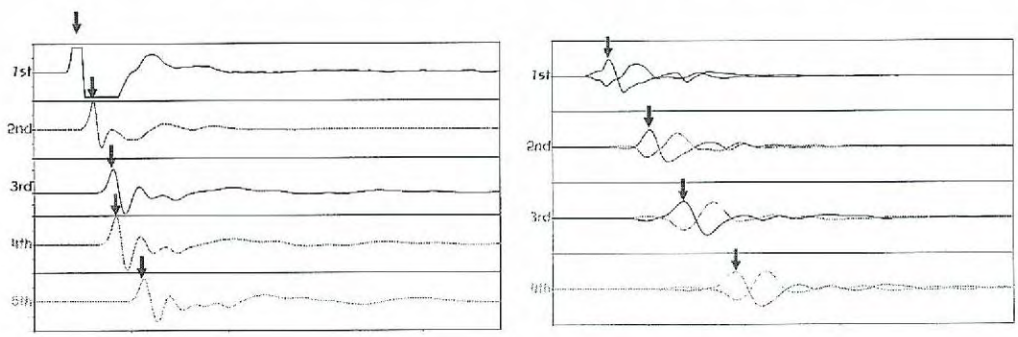
포함한 탄성파탐사 시험결과와의 비교 분석 및 정확성 검증을 위한 기준값(reference value)으로 사용하였다(그림 3.4.25(a)). 본 연구에서는 2차원 전단파속도 도출에 관한 비교 분석 및 검증을 수행하므로 각 지점에서의 구해진 1차원 압축파속도(Vp) 및 전단파속도(Vs)를 선형 보간을 통해 2차원 속도 분포(그림 3.4. 25(b),(c))를 도출하였다. 그림 3.4. 25(b),(c)에서 보이는 바와 같이 경사층으로 인한 수평방향의 변화가 나타나며 이는 모형부지가 계획대로 건설되었고 탄성파 속도를 통해 층을 구분할 수 있다는 것을 의미하며 이 결과를 바탕으로 각각의 탄성파 탐사기법에 대한 검증 연구를 수행하였다.



(a) P파 가진

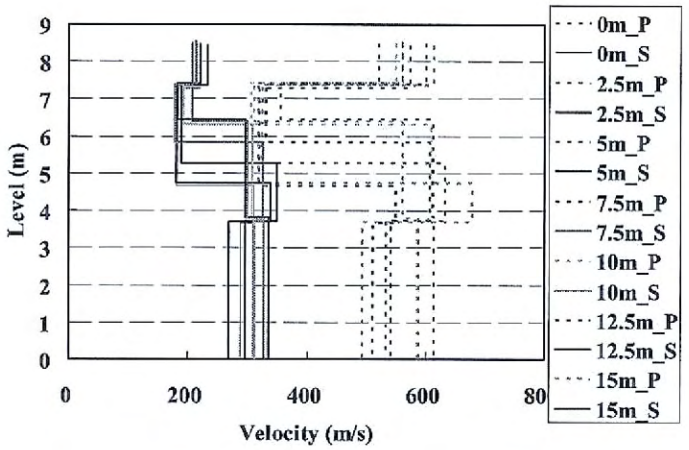


(b) S파 가진

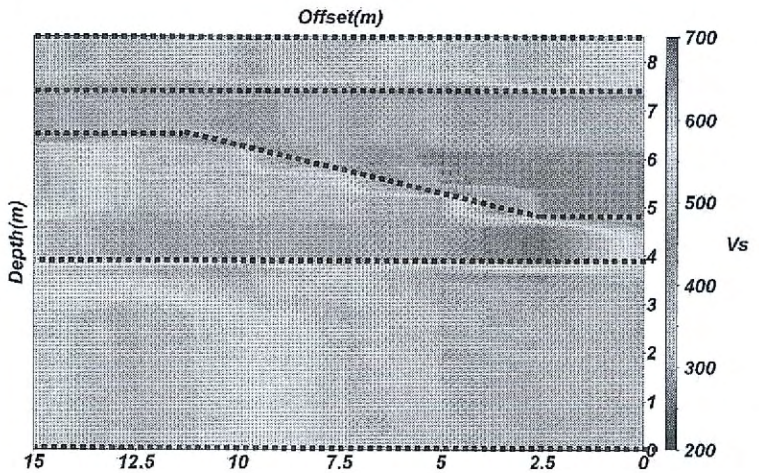


(C) 모형부지의 2차원 압축파속도 분포도 (d) 수평 성분 감지기에서 획득된 S파

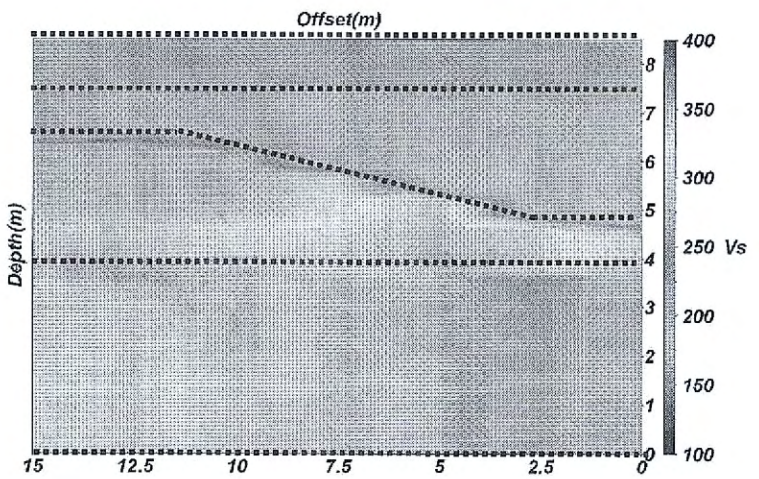
그림 3.4.24 가진 방법 및 감지기의 획득 신호



(a) 각 지점의 Vp, Vs 주상도



(b) 모형부지의 2차원 압축파속도 분포도



(c) 모형부지의 2차원 전단파속도 분포도

그림 3.4.25 모형부지의 물성적 특성(탄성파 속도)의 도출

나. 모형부지에서의 탄성파 탐사를 통한 SPT-업홀 및 HWAW 기법의 검증

모형부지에서 SPT-업홀 시험과 2D-HWAW 기법의 검증을 보다 효율적으로 수행하기 위해 기존의 다양한 현장 탄성파 탐사를 동시에 수행하여 결과를 비교하였다. 표 3.4.5에 2차년도에 모형 시험부지에서 실시한 시험 목록을 정리하였고 표 3.4.6 에는 현장 탄성파 탐사 기법에 사용된 현장 시험 구성 및 해석방법을 정리하였다.

표 3.4.5 모형 시험 부지에서 실시된 시험 목록

시험명	수량	비고
시추 및 SPT	3공	(주)희송지오텍 현물 지원
SPT-업홀 토모그라피	1 지점 (A-1)	
2D-HWAW 시험	7개 측점 (속도계 매설 지역)	
MASW 시험	시험 측선 2	(주)희송지오텍 현물 지원
SASW 시험	시험 측선 2	
다운홀 시험	3 개 (모든 시험공)	
삽입 속도계를 활용한 층별 속도 측정 시험	7개 측점 (속도계 매설 지역)	

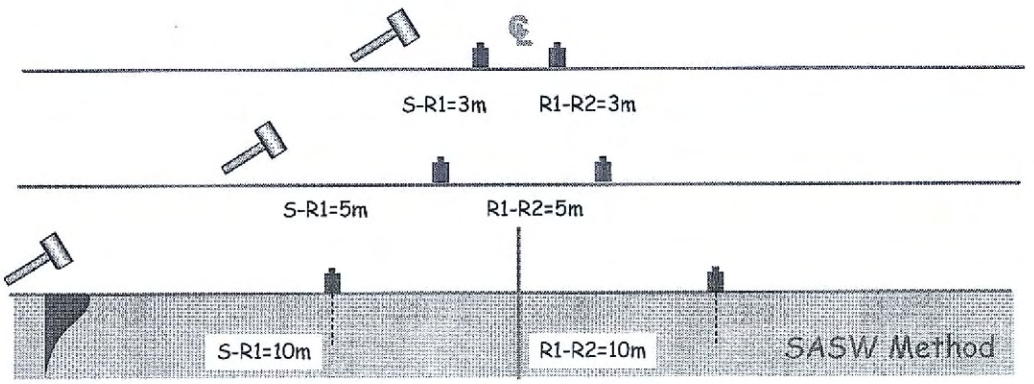
표 3.4.6 각 탄성파탐사 시험 구성 및 해석 방법

탐사 기법	가진원	감지기	자료획득 시스템	전단파속도 산출	해석프로그램
SASW	5kg sledge hammer	1 Hz (Mark Products, 미국)	HP 35670A (미국 Agilent)	동강성행렬법을 이용한 반복 정모델링해석	WinSASW 1.23 (미국 UT)
MASW	5kg sledge hammer	4.5 Hz (Geospace, 미국)	Geode (미국 Geometrics)	전파행렬법을 이용한 자동역산	Surfseis 1.8 (미국 KGS)
HWAW	5kg sledge hammer	1 Hz (Mark Products, 미국)	HP 35670A (미국 Agilent)	동강성행렬법을 이용한 반복 정모델링해석	HWAW Analyzer v1.2 WinSASW 1.23 (미국 UT)
SPT 업홀	SPT	10.0 Hz (Geospace, 미국)	Geode (미국 Geometrics)	토모그래피 역산 기법	GeotomCG (미국 GeoTom)
다운홀	널빤지 타입	BHG-3 (Geostuff, 미국)	Geode (미국 Geometrics)	평균굴절경로법	자체 제작 프로그램

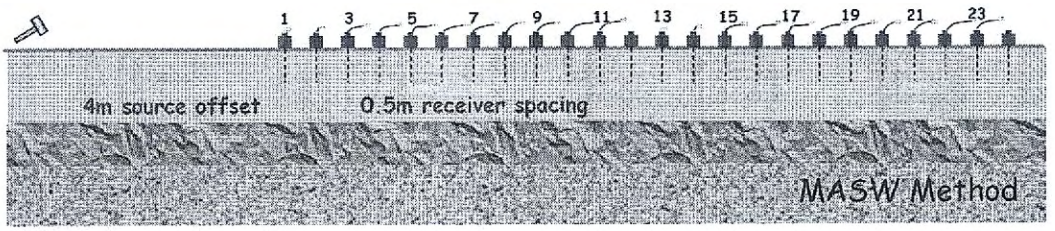
(1) 모형부지에서 수행한 기존 탄성파 시험의 개요 및 결과

표면파 기법으로서 SASW, MASW 기법을 매설된 감지기 중앙 측선을 따라서 수행하였으며 시추공 탐사기법으로 다운홀 시험을 3개의 시추공에서 수행하였다. 모든 시험의 설정은 모형부지의 깊이인 8.5m까지 전단파 속도를 구할 수 있도록 맞춰졌다. SASW 기법 수행은 수평방향 10m 지점을 기준으로 하여 감지기 간격을 3, 5, 10m 간격으로 넓혀가며 시험을 수행하였다. 한 측선의 속도를 구하기 위하여 중심선을 기준으로 감지기 간격을 벌려가며 수행하는 SASW 기법의 특성상 26m 길이의 모형부지에서는 한 지점에서의 평균 전단파속도 주상도만을 획득할 수 있었다. SASW 기법은 분산곡선 도출 및 전단파 속도 주상도 획득 모두 WinSASW v1.23 프로그램을 이용하였다. MASW 기법 수행은 24개의 감지기를 이용하여 감지기 간격 0.5m, 가진원과 첫 번째 감지기 거리(offset) 4m의 시험 구성을 이용하여 수행하였으며, 관심영역의 국부적인 전단파속도 주상도를 획득하기 위하여 측선을 따라 좌표 0.25m부터 12.25m 까지 0.5m 간격으로 평행하게 이동하며 시험을 반복 수행하였다. 분산곡선의 도출 및 역산과정은 자동화프로그램인 Sufseis 1.8을 이

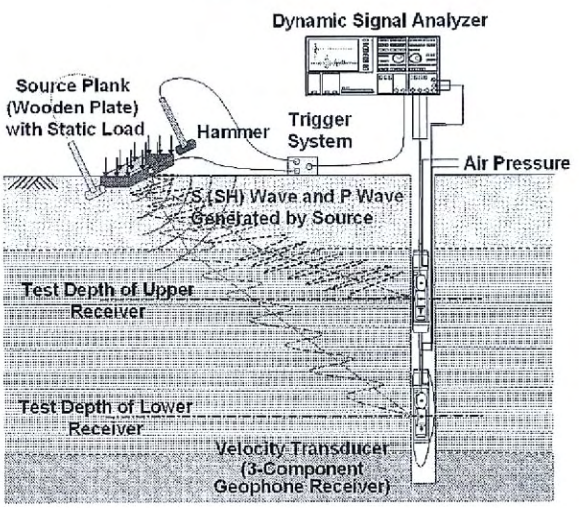
용하였다. 시추공 탄성파 탐사법으로는 다운홀 기법이 수행하였다. 시추가 이뤄진 3개의 시추공에서 0.5m의 수직 간격으로 시험을 수행하였으며 자료는 평균굴절경로법을 이용하여 해석하였다. 그림 3.4.26은 부지에서 수행된 기존 탄성파 탐사기법의 개요도를 나타내었고 각 기법의 현장 수행 장면 사진을 그림 3.4.27에 나타내었다.



(a) SASW 기법



(b) MASW 기법



(c) 다운홀 기법

그림 3.4.26 모형부지에서 수행된 기존 탄성파 탐사

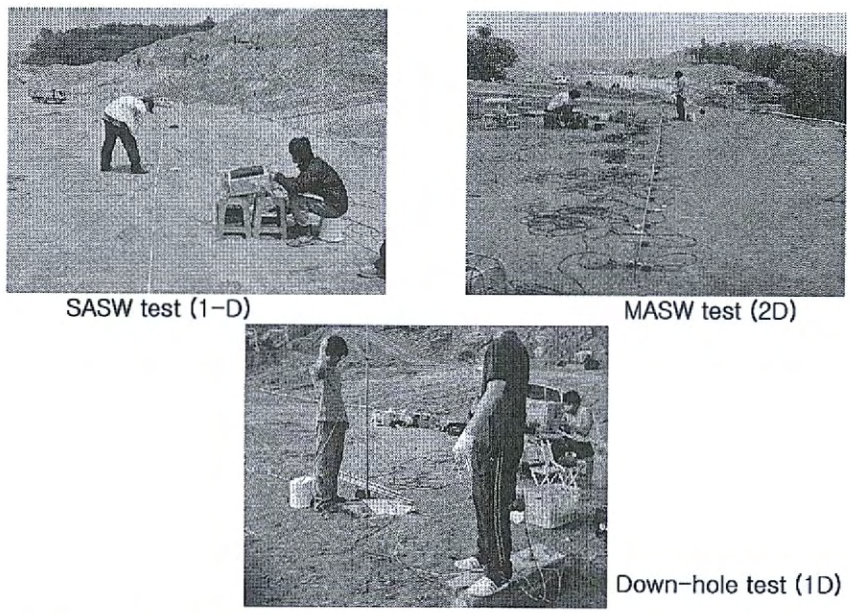


그림 3.4.27 모형부지에서 수행된 기존 탄성파 탐사 수행 장면

SASW 기법과 다운홀 기법은 시험 수행 지점의 1차원 전단파 속도 주상도를 도출하였고 MASW 기법은 측선 중앙의 1차원 전단파 속도 주상도를 구한 후 2D-HWAW와 같은 내삽기법을 이용하여 지반의 2차원 영상화를 도출하였다.

(가) MASW 기법

현재 현업에서 표면파 탐사 및 2차원 전단파 속도 주상도를 도출하는데 가장 많이 사용하고 있는 MASW 기법을 모형부지에서 수행하였다. 각 지점의 획득 결과 중 지중 감지기 매설위치에 가장 근접해 있는 결과를 이용하여 비교 연구를 수행하였다, 그림 3.4.28에 MASW 기법으로 구해진 분산곡선을 나타내며 그림 3.4.29에는 Surfseis를 이용하여 도출한 각 지점의 전단파 속도 주상도를 기준값과 비교하여 나타내었다. 그림 3.4.28에 나타난 분산곡선을 살펴보면 모든 지점의 분산곡선 중 단파장 영역의 부분이 거의 일치하는 것을 볼 수 있다. 따라서 MASW 기법은 이 부분이 대변하는 얕은 층의 물성치를 정확하게 나타내지 못하고 평균적인 물성을 도출함을 알 수 있다. MASW 시험의 결과는 2층에서의 전단파 속도의 증가를 나타내며 좌표에 따라 수평적 변화를 보여준다. 좌표 5m, 7.5m 지점에서는 전체적으로 기준값과 유사한 결과를 도출하고 나머지 좌표에서는 상부층에서 기준값과

유사한 결과를 도출한다. 그러나 5m 이하의 지반에서 아래 층의 기준값보다 적은 전단파 속도를 도출한다. MASW 기법은 많은 감지기를 사용하여 감지기 배열전체의 평균적 전단파속도를 도출하므로 지표로 가까이 갈수록 결과의 수평적 해상도는 감소한다. 본 연구에서는 짧은 감지기 배열을 사용하여 상부층의 수평적 해상도를 향상시켰으나 상대적으로 저주파 영역에서의 위상속도의 정확성이 떨어지게 되었다. 따라서 모형부지 같이 측선이 비교적 짧고 수평강성의 변화가 있는 부지에서는 전체 측선을 따라 MASW 기법을 수행하기에 어려움이 있다.

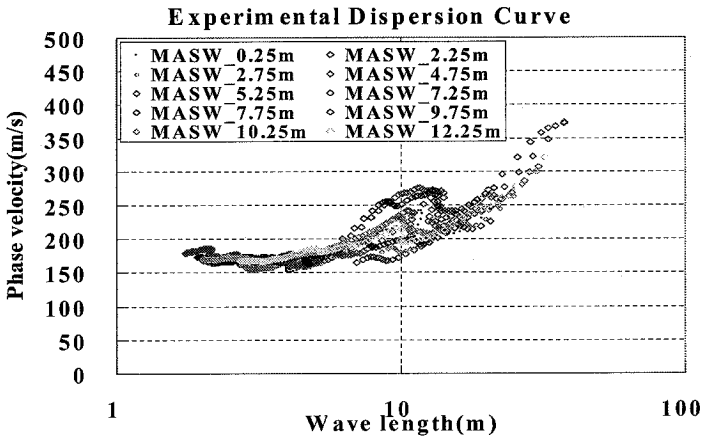


그림 3.4.28 MASW 기법으로 구한 실험분산곡선

MASW 기법을 통해 도출된 각 지점의 1차원 전단파 속도 주상도을 이용하여 선형내삽 기법을 이용하여 지반의 2차원 영상을 도출하여 그림 3.4.30에 나타내었다. MASW 기법으로 평가된 2차원 전단파 속도 영상화는 측선길이의 한계로 전체 부지의 측선에 대한 값을 도출하지 못하며 층경계를 찾아내지만 기준값을 이용한 결과와 비교해 봤을 때 그 경계가 완만하고 부드러운 곡선으로 되어 있다. 위에서 설명한 바와 같이 MASW 기법의 주상도는 긴측선의 평균적인 결과 도출로 국부적인 특성을 파악하는데 한계가 있으므로 지반의 수평적 변화가 심할 경우 2차원 영상화에 적합하지 않다고 판단된다.

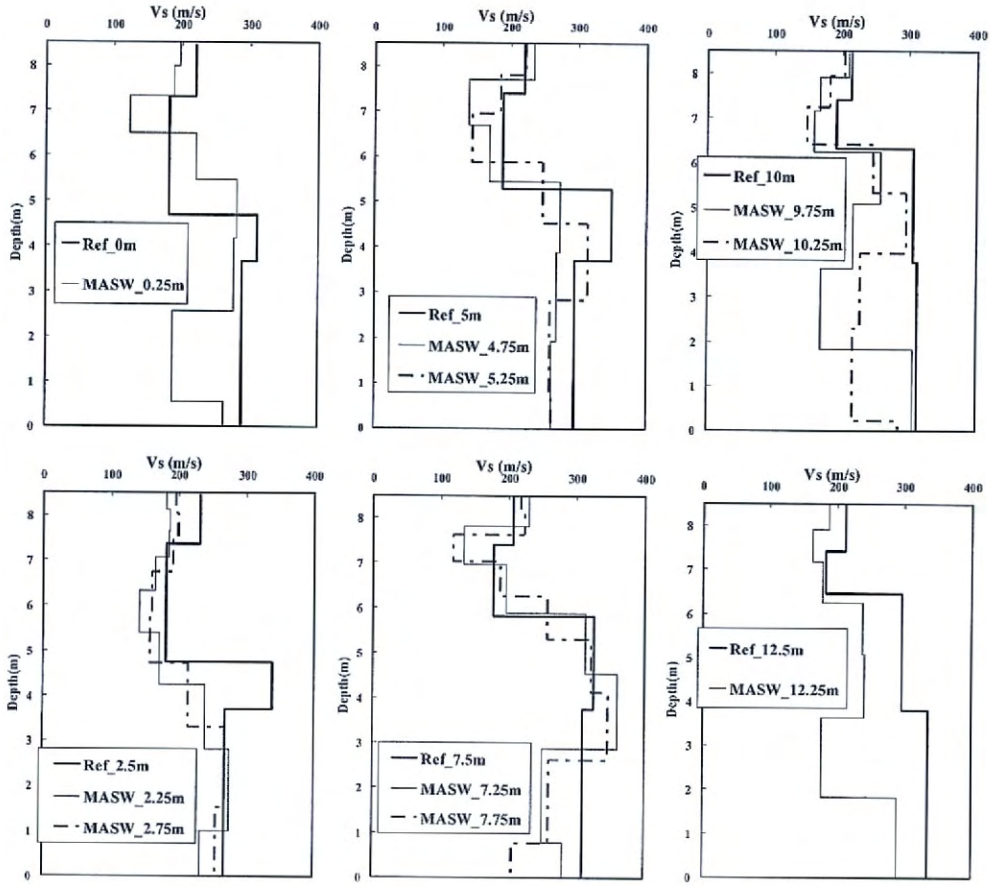


그림 3.4.29 MASW로 구한 전단파속도와 기준값을 이용한 전단파속도의 비교

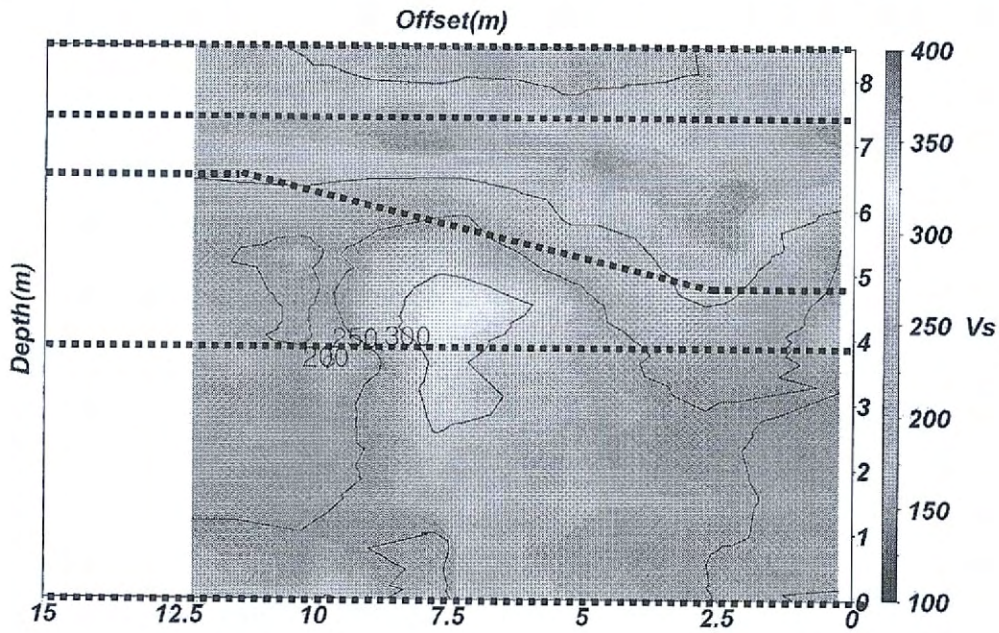


그림 3.4.30 MASW 기법을 통해 도출된 지반의 전단파 속도 2차원 영상화

(나) SASW 기법

기존에 사용되는 대표적인 표면파 시험법인 SASW 기법을 모형부지에서 수행하였으며 획득한 실험분산곡선을 그림 3.4.31에 나타내었다. 역산은 WinSASW v1.23을 이용하여 반복적 정모델링 기법을 이용하여 수행하였다. 도출된 전단파 속도 주상도는 10m 지점에서의 기준값과 비교하여 그림 3.4.32에 나타내었다. SASW 기법으로 구한 1차원 전단파 속도 주상도는 10m 지점을 중심으로 한 전체 측선의 평균적인 값이므로 기준 값과는 잘 맞지 않으며 강성이 증가하는 깊이를 정확히 찾아내지 못하였다. SASW 기법은 측선의 중심을 옮겨가며 수행할 경우 2차원 전단파 속도 분포의 도출이 가능하다. 본 시험 부지에서 수행된 SASW 기법의 경우 전체 측선의 길이가 20m였는데 조성된 모형부지의 상부 면적이 넓지 않아 2차원 전단파 속도 분포 도출을 위한 SASW 기법을 수행할 수가 없었다. 만약 조성된 모형부지의 상부 면적이 넓어 2차원 전단파 속도 분포 도출이 가능하였다 하더라고 앞 절의 MASW 기법에서와 유사하게 측선 전체의 평균적 전단파속도를 도출하므로 국부적 물성치를 신뢰성 있게 도출하기는 어렵게 된다.

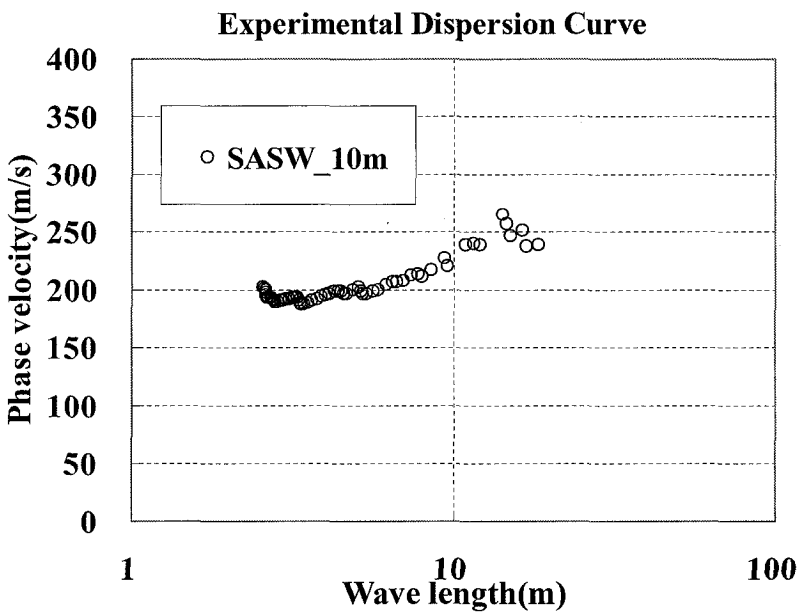


그림 3.4.31 SASW 기법으로 구한 실험분산곡선

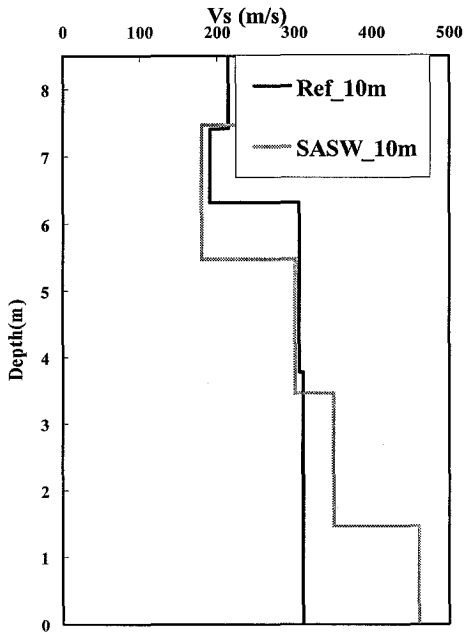


그림 3.4.32 SASW로 구한 전단파속도와 기준값을 이용한 전단파속도의 비교

(다) 다운홀

대표적인 시추공 탐사 기법인 다운홀 기법을 모형 부지에서 수행하였으며 A-1 시추공에서의 현장 시험을 통해 획득한 깊이별 파형을 그림 3.4.33에 나타내었다. 3곳의 시추공에서 구한 1차원 전단파 속도 주상도를 그림 3.4.34에 나타내었다. 3곳의 시추공에서 구한 다운홀 기법의 결과는 깊이별로 상세한 결과를 도출할 수 있었으며 비교적 모형 부지의 기준값과 유사하였다. 다운홀 기법은 시추공 주위의 국부적인 결과를 도출한다. 따라서 모형부지의 전체적인 전단파 속도 주상도를 도출하기 위해서는 많은 시추공을 설치하고 다수의 다운홀 기법을 수행하여야 하므로 비효율적이다.

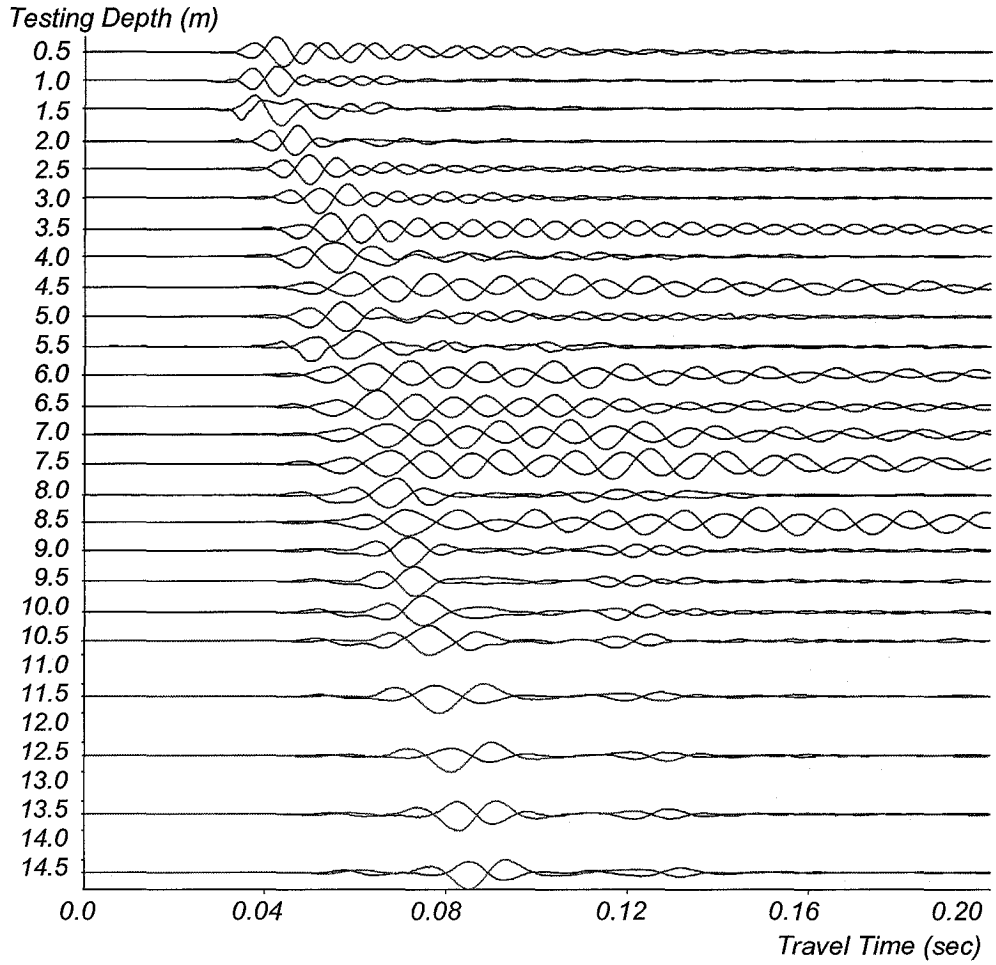


그림 3.4.33 시추공 A-1에서 구한 다운홀 시험의 획득 신호

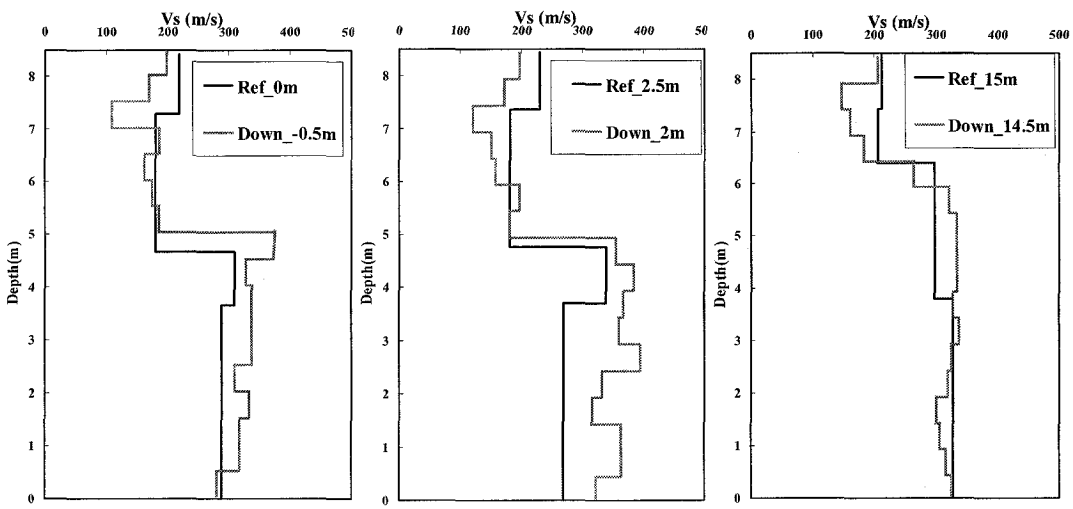
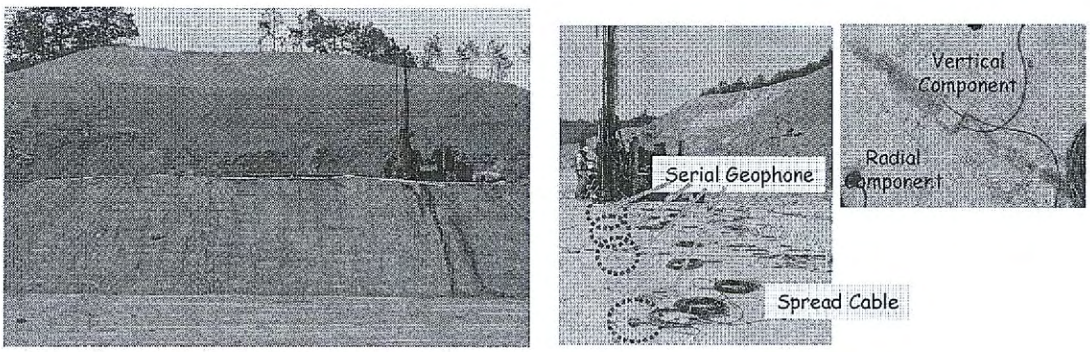


그림 3.4.34 각 시추공에서 구한 전단파 속도와 기준값 비교

(2) SPT-업홀 시험의 수행

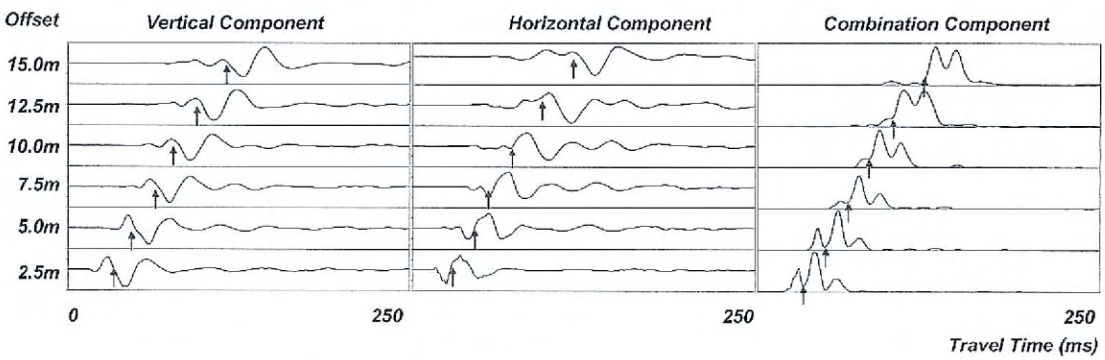
모형 부지를 통해 SPT-업홀 기법을 검증하기 위해서 그림 3.4.35와 같이 SPT-업홀 기법을 수행하였다. SPT-업홀 시험 수행 지점은 시추 지점 중 A-1이다. SPT-업홀 토모그래피 기법으로는 시추공 주변에서의 삼각형 형태의 결과를 도출하기 때문에 조성된 모형 부지 크기보다 더 깊은 깊이(15.0m)까지 시추를 수행함으로써 모형 부지 전체 영역에 걸친 2차원 영상화 결과를 획득하고자 하였다.



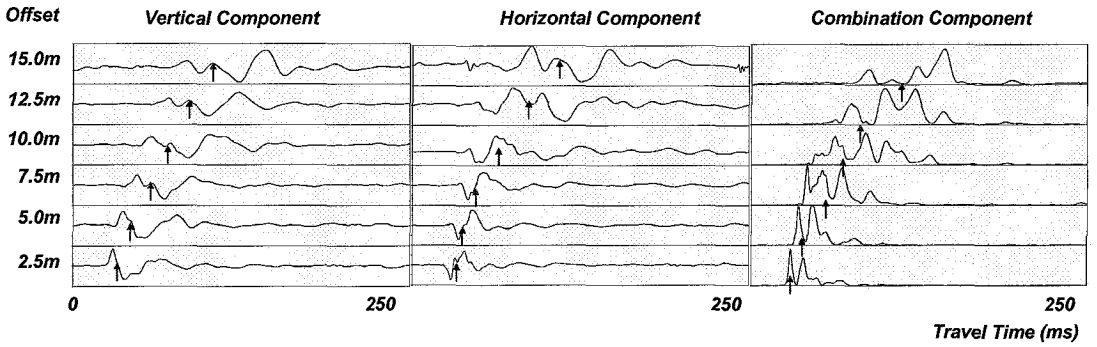
(a) 현장 시험 수행 전경 (b) 지표면 감지기의 설치

그림 3.4.35 모형 부지에서의 SPT-업홀 현장 시험의 수행

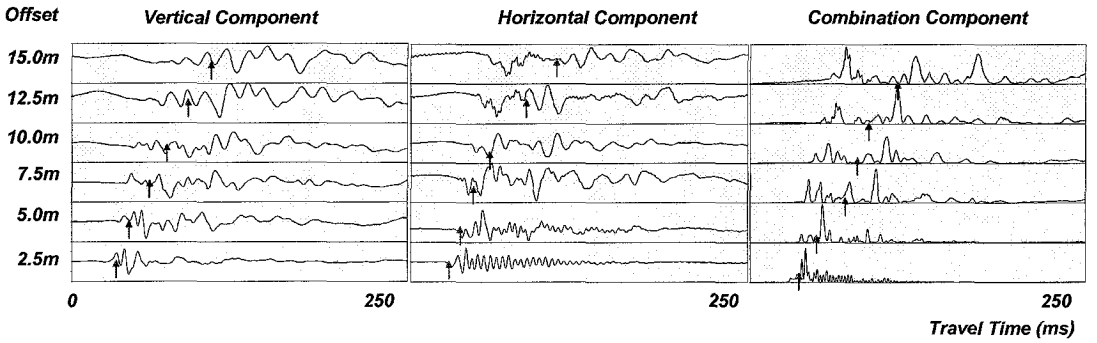
지표면 감지기는 1차년도 연구 결과를 바탕으로 수직 방향과 수평방향의 감지기를 동시에 사용하였으며 시추지점으로부터 2.5m 간격으로 총 6지점에서 측정하였다. 시험 간격은 9m까지는 1m간격, 그 이후부터는 1.5m 간격으로 하였다.SPT-업홀 현장 시험을 통해 획득한 파형 일례를 그림 3.4.36에 도시하였다. 그림 3.4.36(a)는 지중 1m에서 가진시 지표면 각 위치에 설치된 감지기로부터 획득한 파형이며 그림 3.4.36(b)는 지중 5m에서 그림 3.4.36(c)는 지중 8m에 대한 파형이다.



(a) 지중 1m 가진시 지표면 감지기에서 획득한 파형



(b) 지중 5m 가진시 지표면 감지기에서 획득한 파형

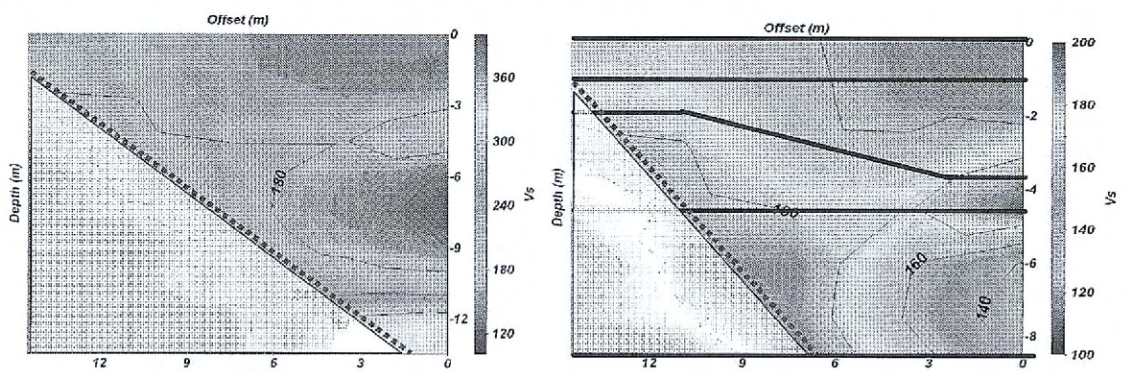


(c) 지중 8m 가진시 지표면 감지기에서 획득한 파형

그림 3.4.36 모형 부지에서 SPT-업홀 현장 시험을 통해 획득한 파형 일례

토모그래피 기법을 위해 획득한 파형으로부터 초동 지점을 추정하여 그림 3.4.36에 화살표로 도시하였다. 경우에 따라서 전단파 성분의 파악이 어려우며 따라서 압축파 이후에 정확한 전단파 성분의 도달시점을 추정하기가 어려운 것을 알 수 있다. 1차년도 연구 결과에서 수직 방향 감지기만을 이용하는 것보다 수평 방향 감지기를 동시에 사용하여 초동 지점을 추정하는 것이 유리한 것을 수치해석을 통해 확인한 바 있으며 그림 3.4.36에서도 두 방향 성분의 크기합 성분의 시간 영역 신호에서 초동 지점을 더욱 추정하기가 유리한 것을 볼 수 있다. 하지만, 두방향 성분의 크기합 성분에서도 명확하게 압축파 성분과 전단파 성분을 구분 지을 수 없는 경우가 많았으며 초동 정보 획득에 많은 어려움이 있었다. 전단파 성분의 도달시점을 최대한 합리적으로 추정하여 보았으며 이러한 도달시간 정보를 바탕으로 토모그래피 기법을 적용, 2차원 전단파 속도 분포를 도출하고 그 결과를 그림 3.4.37에 도시하였다. 그림 3.4.37(a)에서 왼쪽 아래 부분 영역은 시추공-지표면 토모그래피 기법에서 가진원-감지기 배열 특성으로 파선이 지나가지 않은 부분이므로 그

부분을 제외한 영역이 SPT-업홀 토모그래피 기법을 통해 획득한 2차원 결과라고 할 수 있다. 그림 3.4.37(b)에 모형 부지 형상과 비교하여 확대 도시하였다. 그림 3.4.23의 SPT-N치 결과 및 그림 3.4.25(c)의 모형부지의 2차원 전단파 속도 분포 기준 값과 비교하여 볼 때 깊이에 따라 강성이 커지다가 다시 작아지는 현상 및 모형부지 경사 영역을 적당히 모사하고 있다. 하지만 전단파 속도의 절대값에 있어서는 모형부지 기준값과 상당한 차이를 보이는 것을 볼 수 있다. 이는 SPT-업홀 토모그래피 기법을 수행하는데 있어 초동 정보를 정확하게 획득하지 못하여 발생하는 것으로 판단이 된다. 앞서 언급하였듯이 획득 파형이 분석하기에 양호하지 않아 정확한 전단파 성분의 도달 시점을 파악하기 어려운 것을 알 수 있었다. 만약 실제 전단파 성분의 초동 지점보다 일괄적으로 더 늦게 초동 지점을 추정하게 되면 전반적으로 지반의 전단파 속도를 더욱 작게 평가할 가능성이 있으며 양호하지 않은 파형으로 인하여 도달시간 정보를 잘못 도출할 경우 신뢰성 있는 2차원 영상을 획득할 수 없게 된다. 따라서 SPT-업홀 기법을 상용화 하기 위해서는 정확한 초동 지점을 추정하는 방법을 명확히 할 필요가 있음을 알 수 있었으며 이에 대한 추가적인 연구를 수행하였다. 1절에서 언급한 바와 같이 수치해석을 통해 초동 지점을 추정하는 방안에 대한 기초적인 연구를 수행하였다.



(a) 전체 영역에 대한 결과 (b) 모형부지 형상과의 비교

그림 3.4.37 모형 부지에서 SPT-업홀 현장 시험을 통해 획득한 전단파 속도의 2차원 영상화 결과

(3) HWAW 기법의 수행

모형부지에서 수행한 7지점의 HWAW 기법의 분산곡선을 그림 3.4.38에 나타내었고 WinSASW v1.23을 통한 반복적 정모델링 기법으로 구한 전단파 속도 주상도

를 그림 3.4.39에 나타내었다. 각 지점의 단파장 영역에서 분산곡선은 다른 값을 가지게 되고 이러한 분산곡선을 이용해 역산한 전단파 속도는 각 층의 물성치를 나타내어 지반의 국부적인 특성을 파악할 수 있게 한다. 이러한 특성은 HWAW 기법의 결과를 확인하면 더욱 명확해진다. HWAW 기법의 결과는 대체로 기준값의 경향과 잘 맞으며 경사층의 수평 속도변화를 보여준다. 즉, HWAW 기법은 다른 표면파 기법인 SASW 기법이나 MASW 기법에 비해 짧은 감지기 간격(2m)를 사용하고 체적파 성분을 포함하는 근접장 영향을 이용하여 해석을 수행하므로 HWAW 시험 결과는 타 표면파 기법의 결과에 비해 좋은 수평해상도를 가지게 된다. 즉, 본 모형부지 같이 측선이 짧고 탐사 영역이 협소한 경우 HWAW 기법은 지표면 근처의 지반물성치를 구하는데 장점이 있으며 특히 얇은 지반의 수평적 변화를 측정하기 위해서는 다른 기법들보다 HWAW 기법이 더 유용하게 사용될 수 있다.

HWAW 기법을 통해 도출된 각 지점의 1차원 전단파 속도 주상도을 이용하여 선형내삽 기법을 이용하여 지반의 2차원 영상을 도출하여 그림 3.4.40에 나타내었다. 2차원 전단파속도 주상도는 부지의 전체적인 수평적 변화 및 구조적 형상을 잘 나타내며 MASW기법에 비해 상대적으로 하부층의 속도를 잘 파악할 수 있었다. 모형부지의 기준값을 이용한 2차원 결과와 비교해 보면 강성이 큰 2층이나 하부층의 경우에는 HWAW 기법의 결과가 MASW기법의 결과보다 좀 더 상세하고 기준값에 유사한 분포를 가짐을 확인할 수 있다. 즉, HWAW 기법을 이용한 2차원 전단파속도 주상도 도출의 적용성이 뛰어남을 확인할 수 있다.

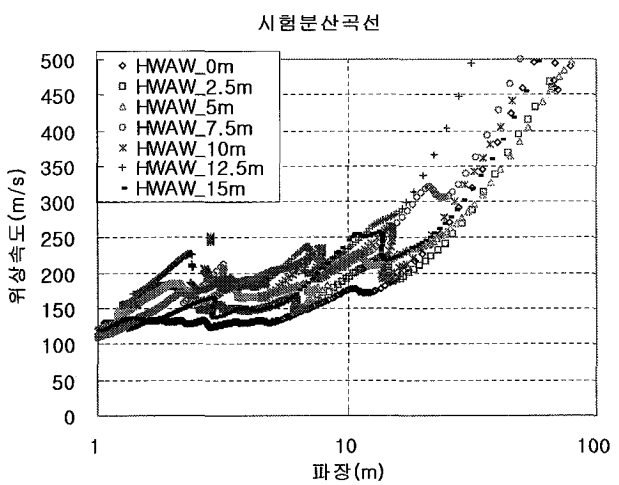


그림 3.4.38 HWAW 기법으로 구한 실험분산곡선

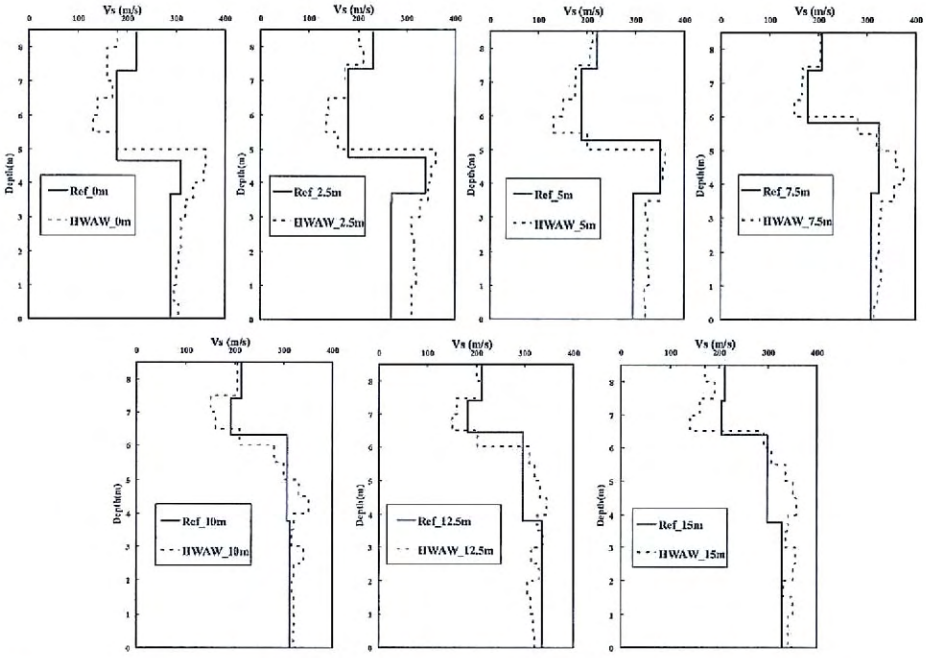


그림 3.4.39 HWAW로 구한 전단파속도와 기준값을 이용한 전단파속도의 비교

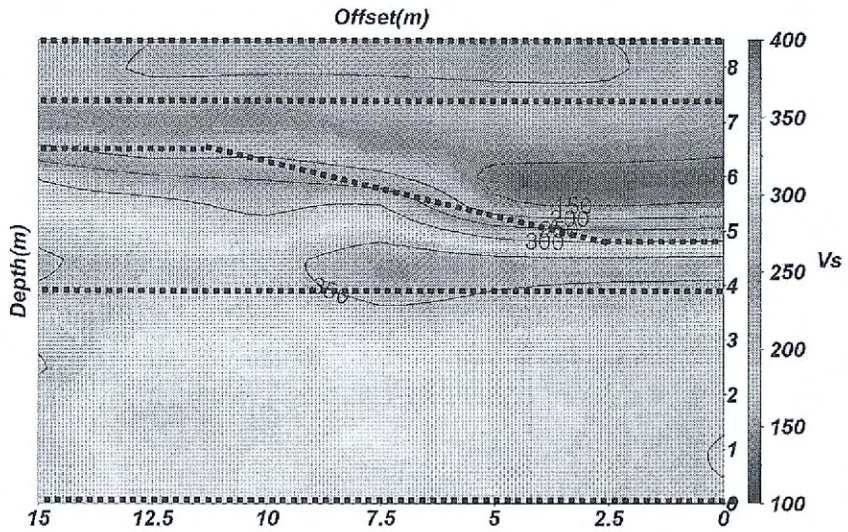
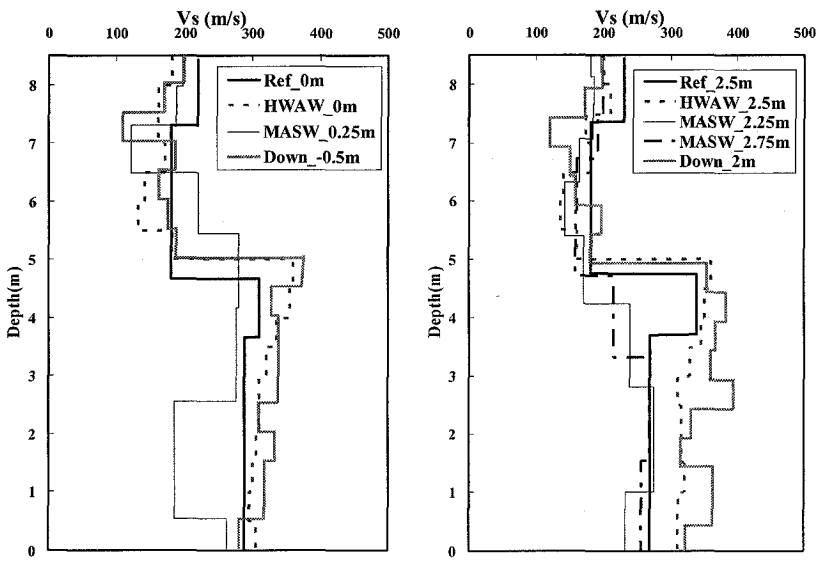


그림 3.4.40 HWAW 기법을 통해 도출된 지반의 전단파 속도 2차원 영상화

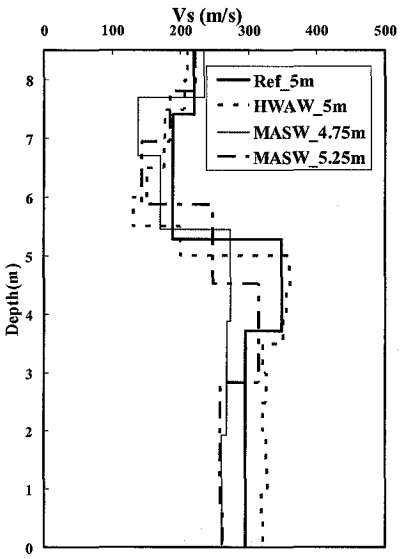
라. 모형부지 시험을 통한 결론

모형부지에서 수행된 각 기법의 1차원 전단파 속도 주상도를 그림 3.4.41에 매설 감지기 지점에서 기준 값과 동시에 도시하였다. 각 기법의 결과는 대체적으로 기준값과 유사한 경향을 보이나 기준값과 약간 다른 경향을 보였다. 이는 SASW 기법

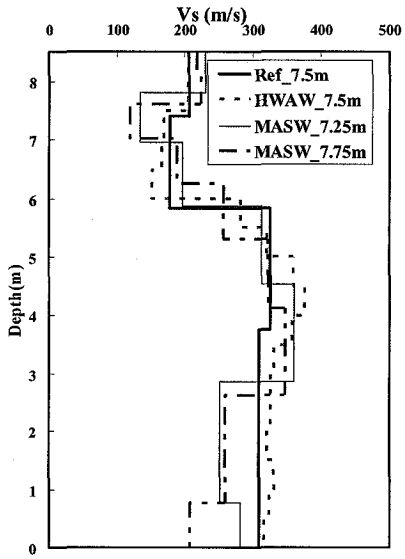
의 경우 한 중심선에서 전체 측선의 평균 전단파 속도 주상도를 도출하기 때문이다. MASW 기법의 경우도 긴 측선의 평균치를 도출하고 지반이 수평층이라는 가정을 바탕으로 기법을 수행하게 되어 있으므로 이러한 경사 지반에서는 그 결과가 약간의 오류를 포함하고 있는 것으로 판단되며 상부 속도는 기준 값과 유사하나 하부 층의 속도는 기준값에 비해 작은 값을 도출하고 있는 것을 볼 수 있다. 다운홀 기법과 HWAW 기법의 1차원 전단파 속도 주상도는 기준 값과 유사한 결과를 도출하는 것을 확인 할 수 있다. 다운홀 기법은 공내 탄성타 탐사 기법이므로 표면파 기법에 비해서는 더욱 신뢰성 있는 결과를 도출할 수 있다. HWAW 기법은 다른 기본의 표면파 기법(SASW, MASW)에 비해 측선의 길이가 짧기 때문에 보다 지반의 국부적 특성을 파악하기에 용이하게 되며 모형 부지 검증 실험을 통해 경사 지반에서도 신뢰성 있는 전단파 속도 주상도 도출이 가능한 것을 확인할 수 있었다.



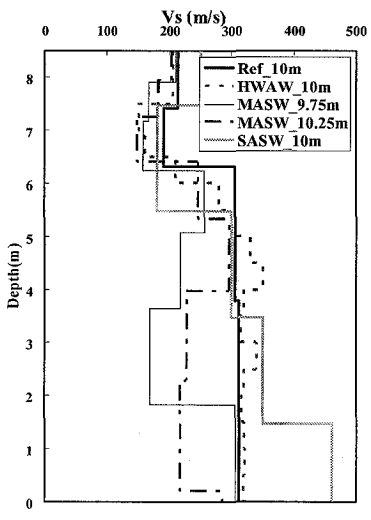
(a) 좌표 0m 기준　　(b) 좌표 2.5m 기준



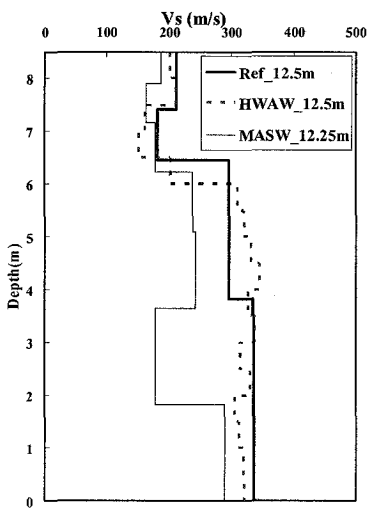
(c) 좌표 5.0m 기준



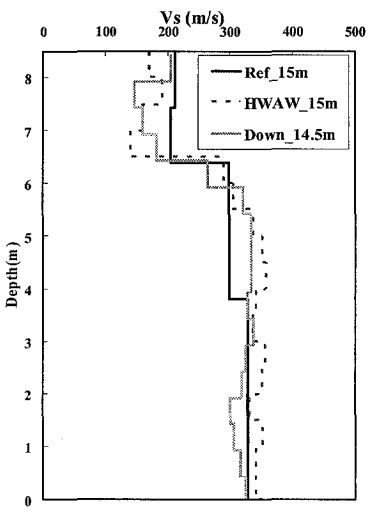
(d) 좌표 7.5m 기준



(e) 좌표 10.0m 기준



(f) 좌표 12.5m 기준

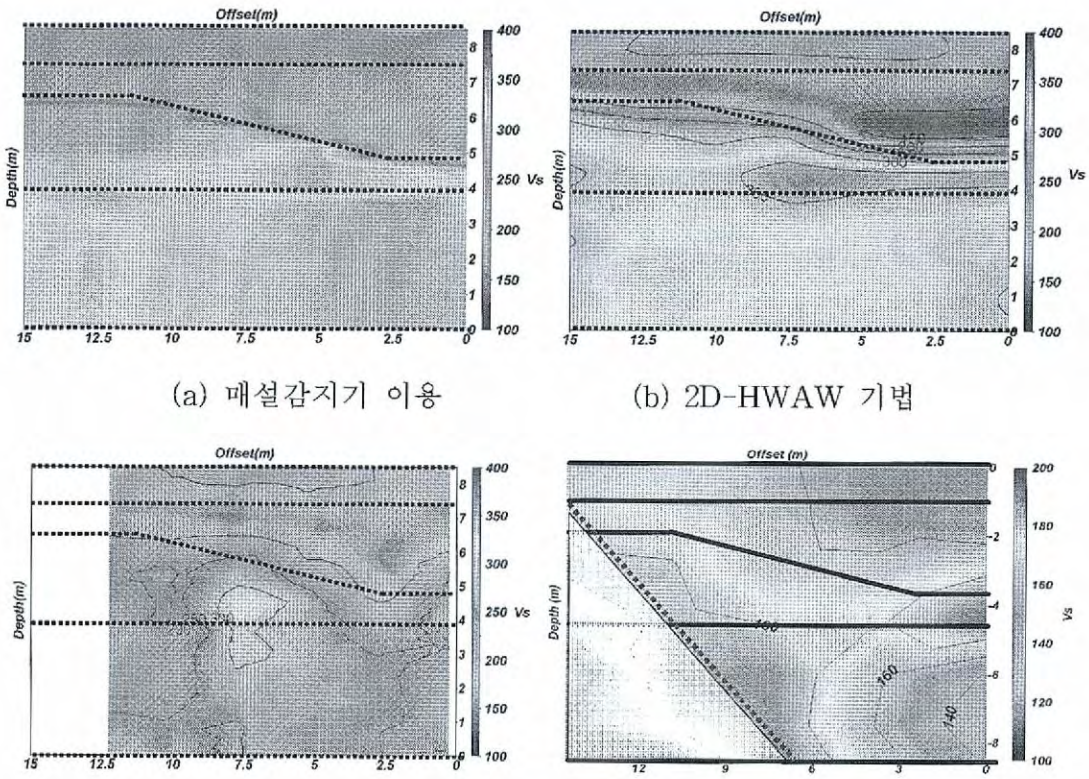


(g) 좌표 15.0m 기준

그림 3.4.41 매설 감지기 위치별 1차원 전단파 속도 주상도

2차원 영상화를 시도한 기법들의 결과를 그림 3.4.42에 도시하였다. 전반적으로 시추조사 결과 및 기준값, 타 공내 탄성파 탐사을 이용한 결과를 참고하여 볼 때, HWAW 시험에 의한 2차원 전단파속도 컨투어가 신뢰성 있게 실제 지반의 층서구조를 충분히 표현하고 있음을 확인할 수 있다. 대표적으로 현장에 적용되고 있는 MASW 결과(그림 3.4.17)와 직접적으로 비교하여 볼 때 MASW 기법에 비해

2D-HWAW 기법이 지반의 국부적 특성을 잘 모사하는 것으로 판단되어 진다. 이는 좁은 감지기 간격을 이용하여 지반을 평가하는 2D-HWAW 기법이 2차원 영상화에 더욱 적합한 기법이라는 것을 보여주는 것이다. MASW 기법은 표면파 탐사 중 대표적으로 상용화에 성공한 사례이다. 하지만 본 예비 실험을 통해 2D-HWAW 기법이 MASW기법에 비해 시험 수행방법부터 도출된 결과의 신뢰성에 있어서까지 모든 부분에 있어 우월하다는 것을 알 수 있었다. 그러므로 본 과제 수행을 통해 2D-HWAW 기법이 상용화에 성공할 경우 현 국내 지반조사 업체로부터 수요가 상당수 있으리라 판단이 되며 지반의 신뢰성 있는 2차원 지반 강성 도출 분야에 두드러진 역할을 할 수 있을 것이라 생각된다.



(a) 매설감지기 이용 (b) 2D-HWAW 기법

(c) MASW 기법 (d) SPT-업홀 기법

그림 3.4.42 각 기법들로부터 구한 모형부지의 2차원 영상화

시추와 동시에 수행하는 SPT-업홀 기법의 모형부지의 2차원 전단파 속도 분포 기준값과 비교하여 볼 때 0m 지점에서 깊이에 따라 강성이 커지다가 다시 작아지는 현상 및 모형부지 경사 영역에서 3번째 층을 적절히 모사하고 있는 등 그 형상

에 있어서는 합리적인 결과를 도출하고 있다고 판단이 된다. 하지만 전단파 속도의 절대값에 있어서는 모형부지 기준값과 약간의 차이를 보이는 것을 볼 수 있다. 이는 SPT-업홀 토모그래피 기법을 수행하는데 있어 초동 정보를 정확하게 획득하지 못하여 발생하는 것으로 판단이 된다. 따라서 SPT-업홀 기법의 상용화를 위하여 정확한 초동 지점을 추정하는 방법을 명확히 할 필요가 있음을 알 수 있었으며 이에 대한 추가적인 연구를 수행하였다. 우선 수치해석을 통해 초동 지점을 추정하는 방안에 대한 기초적인 연구를 수행한 바 있으며 이를 앞서 1절에 정리하였다. SPT-업홀 토모그래피 기법에 있어 합리적인 초동 정보 추정 방안에 대해 추가 현장 검증 등을 통해 확립할 예정에 있다.

모형부지에서의 시험은 1차년도 과제를 통해 개선된 시험 시스템을 적용하여 시험을 수행하였다. 그리하여 본 모형부지 시험을 통해 SPT-업홀 기법과 2D-HWAW 기법의 신뢰성을 다시 확인하고 상용화 필요성 및 과제의 성공적 수행에 대한 자신감을 느끼는 계기가 되었다. 그러나 각 기법에 있어 상용화를 위해 더욱더 현장 실험 장비의 효율적 개선, 신뢰성 있는 해석 프로그램의 도입 혹은 개발을 위한 노력이 필요하다는 것을 알게 되었다. 이러한 모형부지 시험의 경험을 바탕으로 수치해석을 통한 기법 개선 및 검증, 현장 실험 장비 및 해석프로그램의 개선에 대한 연구를 수행하여 본 과제의 성공적 수행을 위해 노력하였다(1, 2, 3 절에 기술). 이러한 연구 결과를 바탕으로 상용화를 위한 최종적인 시험 시스템을 성공적으로 구축 할 수 있으리라 판단된다.

3. 김제 부지에서의 SPT-업홀 토모그라피 기법의 검증

SPT-업홀 토모그래피 기법의 현장 적용성을 평가하기 위하여 SPT-업홀 시험 결과를 이용하여 2차원 전단파 속도 분포를 도출하여 보았다. SPT-업홀 기법이 수행되었던 김제 시험 부지의 현황을 그림 3.4.43에 나타내었다. 또한 본 부지는 SPT-업홀 측선을 따라 총 6개소에서 시추를 수행한 결과가 있어 수평적인 층상 구조 파악이 가능한 지반이므로 SPT-업홀 토모그래피 기법 결과를 검증하기 용이하다. 또한 BH-4에서 5.5m까지의 다운홀 기법 수행 결과도 있어 도출된 전단파 속도값도 직접적으로 비교할 수 있다.

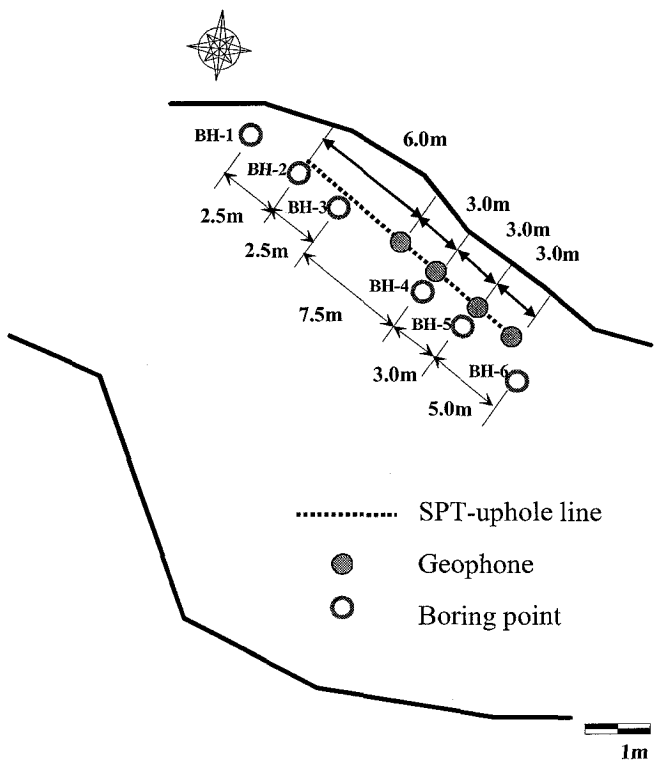


그림 3.4.43 SPT-업홀 시험이 수행된 전라북도 김제 풍화토 부지 개요

김제 시험 부지는 풍화토가 깊게 형성이 되어 있는 지역으로 시추 주상도 상에서도 뚜렷하게 서로 다른 층으로 구분이 되지 않았으며 상부의 약간의 매립토를 제외하고는 시추 영역 전체적으로 통일 분류법 SM으로 구분되는 풍화토 지반으로 확인되었다. 본 시험 부지의 수평적 강성 변화를 상세하게 유추하기 위하여 시추와 동시에 실시된 표준관입시험 결과를 활용하였다. 각 시추 위치별 SPT-N치 결과를

그림 3.4.44에 도시하였다. 본 시험 부지에서 수행된 시추작업 및 표준관입시험은 2개 종류의 장비로 실시되었다. BH-1, BH-3 및 BH-6은 체인식 자동 해머(CME)를 사용하였으며 BH-2, BH-4 및 BH-5는 강선-윈치식 도넛해머를 사용한 결과이다. 이에 따라 표준관입시험을 실시할 때 그 에너지 효율도 서로 다르게 된다. 그러므로 이러한 에너지 효율을 고려하여 SPT-N치 결과를 비교하는 것이 합리적이게 된다(Kim 등, 2004). 그러므로 시추와 동시에 각 장비에 대해 에너지 효율을 측정하였으며 체인식 자동 해머의 평균 에너지 효율은 69%이며 강선-윈치식 도넛해머의 평균 에너지 효율을 52%로 측정되었다. 따라서 그림 3.4.44는 에너지효율 측정 결과를 활용하여 에너지비 60%를 기준으로 하여 보정한 N치를 도시한 것이며 N치가 50이상인 경우 선형적으로 외삽한 결과를 사용하였다. SPT-N치 결과를 살펴볼 때 본 시험부지는 남동 방향, 즉 시추지점으로부터 측선방향으로 강성이 커지는 상향 경사 모델 형상인 것으로 보여 진다. 김제 부지의 2차원적 층상구조를 더욱 확실하게 확인하기 위하여 획득한 SPT-N치 결과를 선형 보간을 통해 그림 3.4.45와 같이 분포도를 도출 하였다. 심도 10m 이상에서는 수평층 형태를 보이나 심도 10m 이하의 얕은 깊이에서는 추정한 바와 같이 시추 지점으로부터 SPT-업홀 측선 방향으로 지반 강도가 점점 커져가는 상향 경사 지반인 것을 알 수 있다. 지금까지 연구 결과에 의하면 강도와 강성은 서로 같은 경향을 보이는 것으로 나타났다. 따라서 SPT-N치 분포와의 비교를 통해 SPT-업홀 토모그래피 기법 결과를 검증할 수 있다.

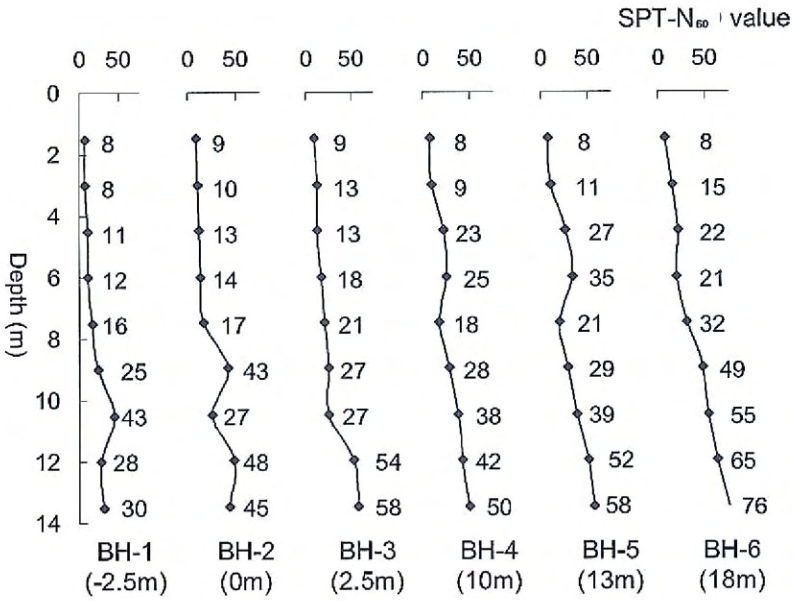


그림 3.4.44 시험 부지 내 총 6개 시추공에서의 SPT-N치 결과

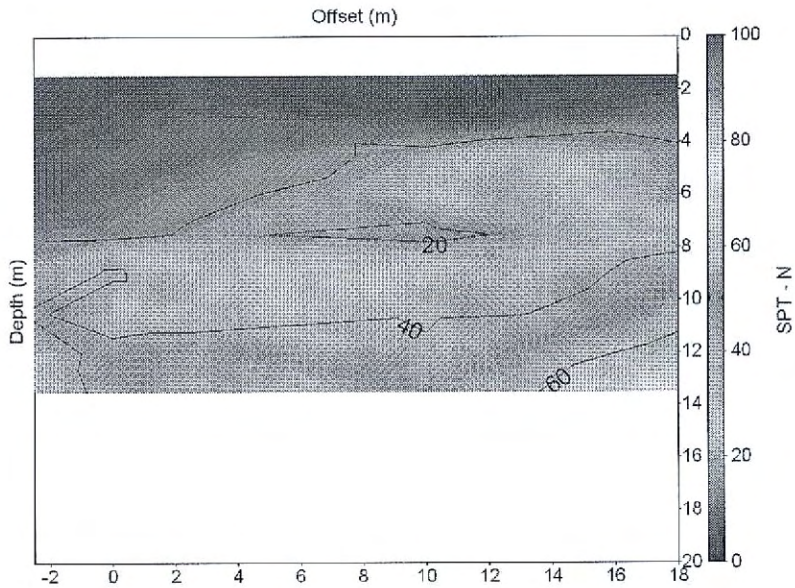


그림 3.4.45 김제 풍화토 부지 SPT-N치 분포도

그림 3.4.45의 SPT-N치 분포도를 대표적으로 적용되고 있는 SPT-N치와 전단파 속도의 관계식인 Imai 와 Tonouchi(1982)의 경험식을 이용하여 SPT-N치를 전단파 속도로 변환한 것을 그림 3.4.46에 도시하였다. 이와 같은 방법으로 추정해 본 결과 본 부지의 전단파 속도 분포는 표층에서는 200m/s 근방이며 심도가 깊어질수

록 서서히 증가하여 심도 10m에서는 300m/s에 이르는 것을 볼 수 있다.

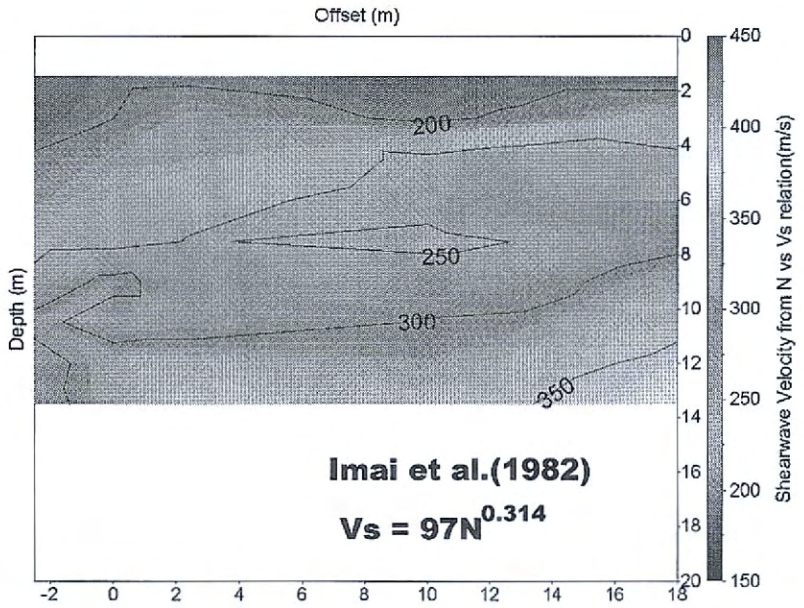
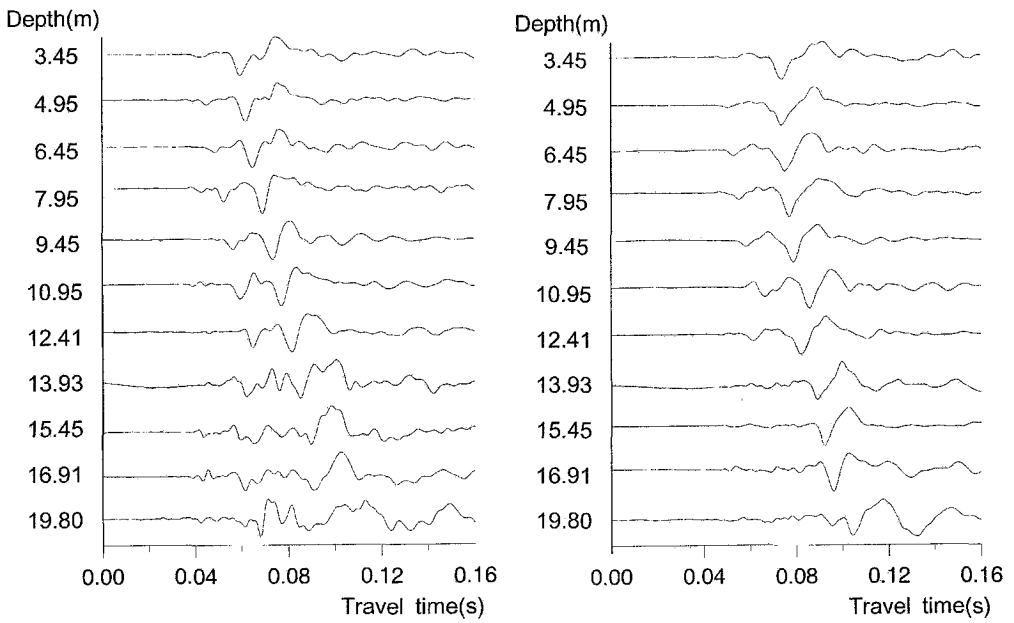


그림 3.4.46 SPT-N치와 전단파 속도 관계식을 이용하여 도출한 김제 풍화토 부지의 전단파 속도 분포도

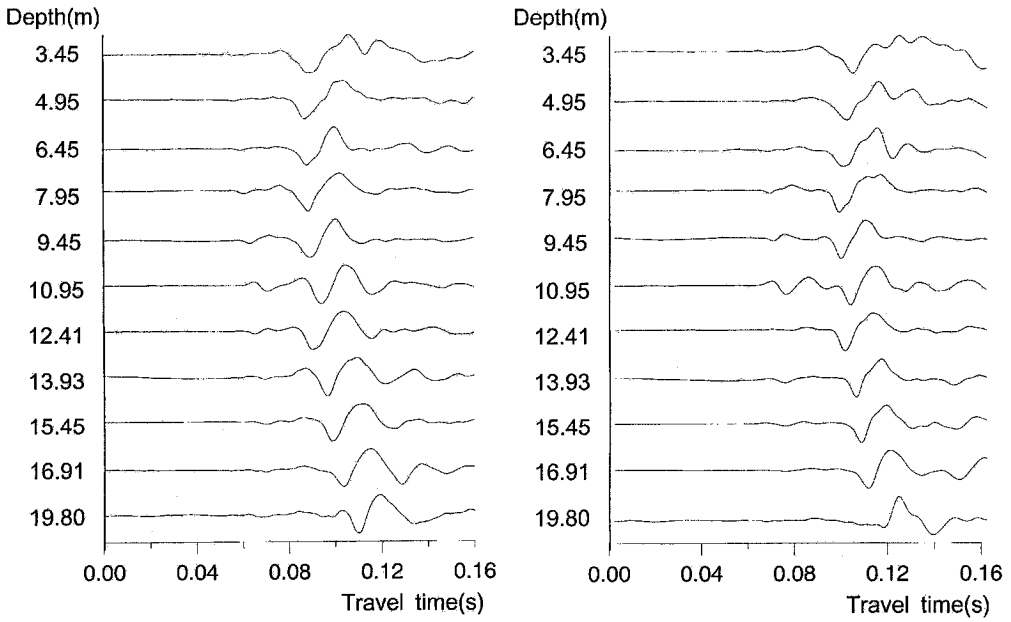
SPT-업홀 시험은 BH-2공을 시추하는 동안 수행되었으며 측선은 6개 시추 지점과 나란한 방향으로 설계하였다. 총 4개의 감지기를 설치하였으며 시추 지점으로부터 6m, 9m, 12m, 15m에 위치하였다. 수직 성분 감지기만을 이용하여 수행되었지만 본 부지의 최종 시험 심도가 깊지 않아 수직 성분만으로도 도달시간 정보를 대부분의 경우 신뢰성 있게 도출이 가능하였고 제안된 SPT-업홀 토모그라피 기법을 적용하여 보았다. 심도 20m까지 시추를 수행하였으며 총 11회에 걸쳐 시험을 수행하였으며 각 감지기에서 획득한 시험 깊이별 수직 방향 속도 시간 이력 곡선은 그림 3.4.47과 같다. 전반적으로 전단파의 도달시점을 파악하기가 용이하였지만 6m에 위치한 감지기의 깊은 심도에서의 파형은 압축파의 영향으로 인하여 전단파 도달시점의 첫 극대점이 불명확하였다.

모든 가진원-감지기 조합에서의 도출된 도달시간 정보를 그림 3.4.48에 도시하였다. 도시된 정보는 수직성분의 극대점을 기준으로 도출된 도달시간 정보를 앞 절에서 확립한 방법에 근거하여 초동 정보로 보정한 결과이며 동시에 트리거(Trigger) 보정 작업도 취한 결과이다. 극대점 기준 정보의 초동 정보로 보정을 위한 기준은

가장 초동지점을 확실하게 인지할 수 있는 감지기 4(15m)의 가진 깊이 12.41m 신호를 이용하였다. 수치해석에서 확인한 바와 같이 가진 깊이와 유사한 감지기 위치에서 획득한 신호상에서 초동 지점을 정확하게 추정하는데 유리하다. 첫 가진 깊이가 3.45m로 깊어 표면파 효과에 대한 보정은 제외하였다. 트리거 보정 작업은 트리거 장치를 표준관입시험 장비의 엔빌 하단에 장착할 경우 가진 깊이가 깊어질수록 SPT 로드의 길이가 길어져 이러한 이유로 타격 시점이 다르게 관측되는 것을 보정하는 작업이다. 감지기 6m의 가진 깊이 16.91m 및 19.80m의 도달시간 정보는 다른 도달시간 정보의 형태와 비교하여 볼 때 실제보다 조금 작게 산정된 것으로 판단되며 이는 압축파 간섭으로 인하여 정확한 전단파 성분의 첫 극대점을 판단할 수 없었기 때문이다. 그러므로 해당되는 도달시간 정보는 1차원 및 2차원 해석시 입력값에서 제외하였다.



(a) 감지기 1 (6m)　　(b) 감지기 2 (9m)



(c) 감지기 3 (12m) (d) 감지기 4 (15m)

그림 3.4.47 SPT-업홀 기법 감지기별 획득 신호(김제 풍화토 부지)

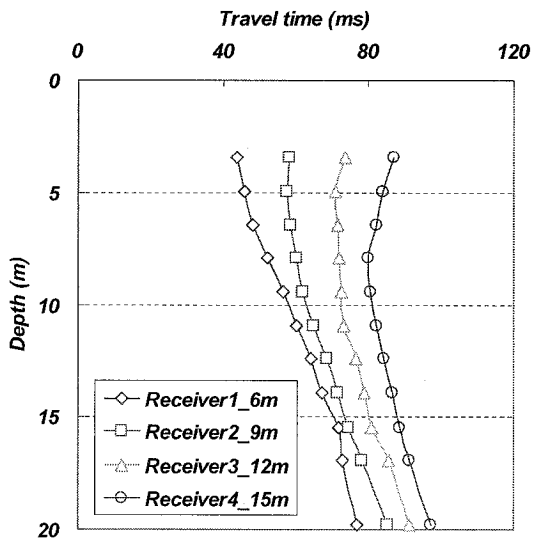


그림 3.4.48 SPT-업홀 시험 감지기별 초동 정보 (김제 풍화토 부지)

기존의 1차원 해석 기법인 깊이간 DT법 및 감지기간 DT법을 이용하여 전단파 속도 주상도를 도출한 결과를 그림 3.4.49에 도시하였다. 감지기간 DT법의 경우 앞의 수치해석을 통한 검증에서 확인한 바와 유사하게 결과가 양호하지 않았다. 깊이간 DT법의 경우에는 깊이가 증가함에 따라 전단파 속도가 서서히 증가하는 경향

을 보였으며 동일 시험공에서 실시한 다운홀 실험의 결과와도 유사하였다. 다운홀 기법은 시험공 설치 문제로 인하여 5.5m까지만 시험 수행이 가능하였다. 4개의 감지기를 기준으로 감지기간 DT법으로 해석한 결과가 모두 유사한 경향을 보였으므로 시험 부지의 층상 구조가 수평적으로 큰 변화가 없는 것으로 추정되어졌다. 1차원 해석 기법만으로 지반 구조의 수평 여부에 대한 추정은 가능하지만 층상 구조 상태를 정확히 판단하기 힘들다. 전단파 속도의 크기는 지표면에서는 200m/s, 심도가 깊어질수록 점점 커져 심도 12m 이상에서는 360m/s를 초과하는 것을 볼 수 있다. 부분적으로 전단파 속도의 증감 특성이 나타나는데 동일 시험공에서 수행한 SPT-N치 결과와도 비교하여 볼 때 본 시험부지는 전반적으로 심도가 깊어질수록 강성이 증가하는 지반이나 부분적 불균질 풍화에 의해 약간의 강성의 증감이 존재하는 지반으로 추정된다.

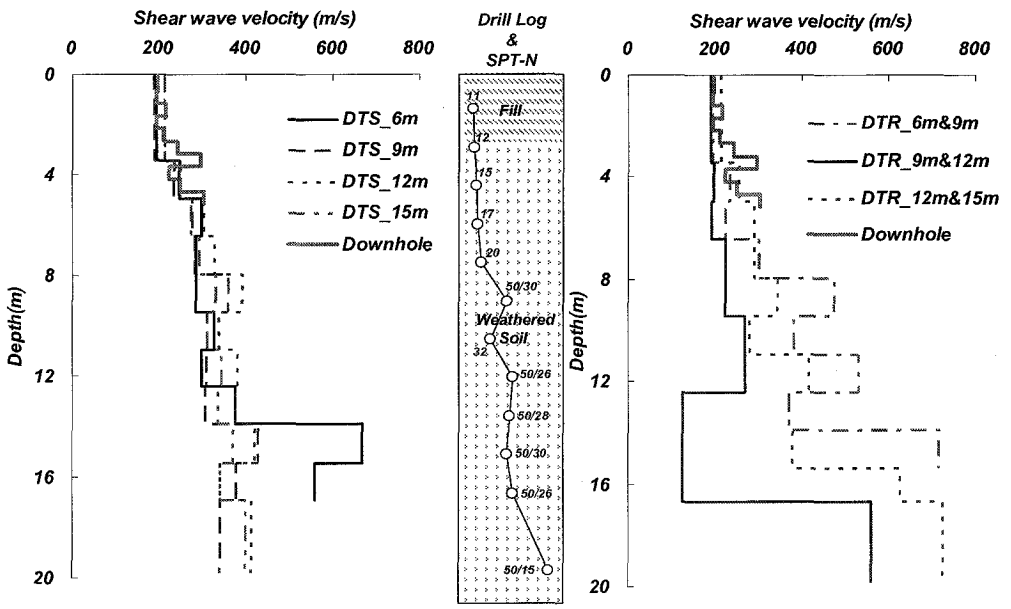


그림 3.4.49 김제 풍화토 부지 SPT-업홀 기법 1차원 해석 결과 (좌측은 깊이간 DT법, 우측은 감지기간 DT법 이용결과, 중간은 깊이별 SPT-N치)

김제 시험 부지에서의 층상 구조 상태를 정확히 추정해 보고자 현장 실험을 통해 도출한 모든 가진원-감지기 조합의 도달시간 정보를 활용하여 토모그래피 역산을 수행, 2차원 전단파 속도 분포를 획득하였다(그림 3.4.50). 토모그래피는 3절에서 소

개한 자체개발 프로그램인 Ana2D_UH_v1.1을 이용하였다. 획득한 2차원 전단파 속도 분포는 심도별 전단파 속도와 증가되는 형상은 1차원 해석 결과와 유사한 것으로 나타났다. 하지만, 기존의 1차원 해석 기법에서 단지 시험 심도에 따른 강성 변화만을 추정할 수 있었던 것에 비해 더욱 유익한 정보의 획득이 가능하였다. 이 지역이 시추공으로부터 업홀 측선 방향으로 경사진 것으로 나타났으며 그 경사가 얕은 깊이에서는 약간 심하고 지중으로 갈수록 작아지며 따라서 수평적 불균질 정도가 작아지는 것으로 판단할 수 있다. 2차원 결과에서 시추공-지표면 주시 토모그래피의 한계로 인하여 심도가 깊어질수록 수평적인 특성을 정확히 도출하기 힘들게 된다. 그러므로 본 시험부지에서 수행한 SPT-업홀 토모그라피 기법 결과에서도 전단파 속도 분포 형상의 12m이하의 결과로 층의 경사나 지반의 불균질 특성을 추정하기가 힘들다. 더욱 깊은 심도까지 지반의 수평적 특성을 정확히 파악하기 위해서는 SPT-업홀 시험의 수행 심도를 더욱 깊게 하고 지표면 감지기 개수를 증가하여 측선의 길이를 더 늘려 주여야 한다. 본 현장 적용에서는 비교 대상 영역을 13.5m로 국한시켰으며 이를 위해 SPT-업홀 기법을 20m까지 수행하였다. 따라서 13.5m까지의 2차원 결과는 어느 정도 신뢰성을 가진다고 판단된다. 본 시험 부지에서 SPT-업홀 토모그라피 기법을 수행의 통해 획득한 전단파 속도 분포 중 신뢰성을 가진다고 판단되는 영역을 그림 3.4.49 내에 점선 형태의 사다리꼴로 표기하였다.

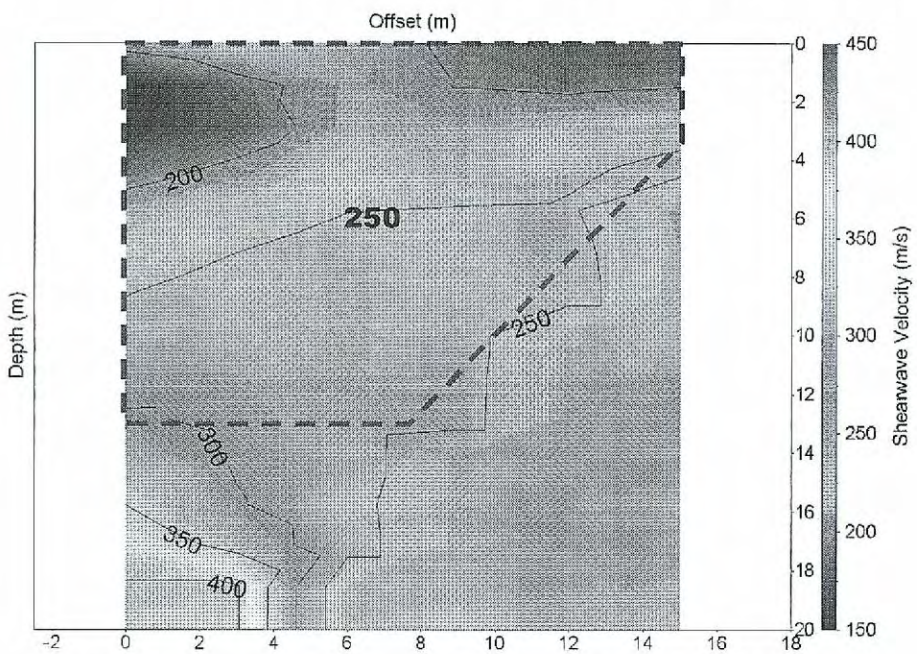


그림 3.4.50 김제 풍화토 부지 SPT-업홀 기법 2차원 해석 결과

그림 3.4.45의 SPT-N치와 전단파 속도 관계식을 이용한 김제 풍화토 부지의 전단파 속도 분포도 결과와 비교하여 보면 SPT-업홀 토모그래피 기법 결과와 매우 유사한 것을 볼 수 있다. 상부 저속도층의 형태와 속도값이 매우 흡사한 것을 볼 수 있으며 전체적인 형상에서도 유사한 것으로 판단된다. 즉, SPT-업홀 토모그래피 기법을 통해 획득한 전단파 속도 분포가 실제 지반의 층상 구조를 잘 모사하며 합리적인 전단파 속도 값을 보여주고 있는 것으로 보여 진다. 그림 3.4.45의 전단파 속도 분포는 경험식으로 변환한 것이므로 오차 정도가 어느 정도 상존한다고 볼 수 있지만 SPT-업홀 토모그래피 결과가 통계적인 값의 범주 내에 속해 있다는 것을 말해주는 것이므로 SPT-업홀 토모그래피 결과의 신뢰성을 검증하는 하나의 방편으로 사용이 가능하였다.

본 시험 부지에서 수행한 현장 실험을 통해 SPT-업홀 토모그래피 기법으로 획득한 전단파 속도의 상대적 분포 형상으로 지반의 구조적인 형상을 추정할 수 있었으며 전단파 속도 자체 값 또한 일반적인 공내 탄성파 탐사 수준으로 높고 실질적인 2차원 분포를 도출이 가능하여 향후 2차원적 물성이 요구되는 지반공학적 문제를 해결하는데 있어서의 입력 변수로 SPT-업홀 토모그래피 결과의 활용이 가능하다고 판단되었다.

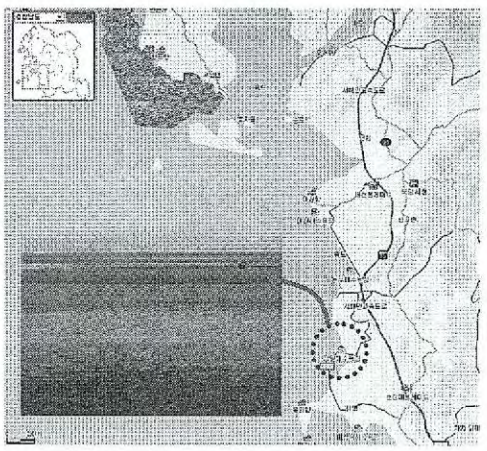
4. 장안 부지에서의 HWAW 기법에 대한 검증 연구

장안 현장 부지에서 HWAW 기법에 대한 영향요소 연구 및 검증 연구를 수행하였다. 대표적 표면파 기법인 SASW 및 MASW 기법을 동시에 수행하였으며 결과 비교를 통해 결과를 검증하고 HWAW 기법의 장점을 확인하고자 하였다.

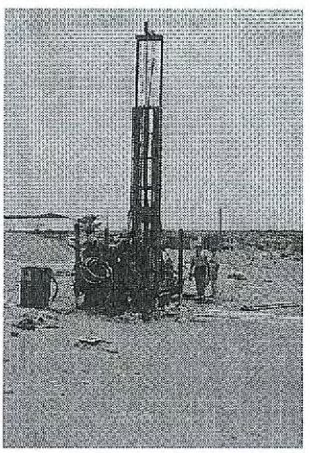
가. 현장 부지 개요

그림 3.4.51에 HWAW 기법에 대한 현장 검증 실험이 수행된 충청남도 서해안 장안 부지에 대한 개요도를 도시하였다. 본 부지는 암반 노두가 드러난 지역에 조류에 의해서 사질토가 퇴적된 지반이다. 3개소에 대해 시추를 수행해 본 결과 거의 수평한 층상구조를 보이며 상부 4m 정도의 사질토가 존재하며 그 이하는 연암이며 중간에 약간의 풍화대가 존재하는 것으로 확인되었다. 시추와 동시에 수행된 각 시추공에서의 SPT-N치 결과를 보면 시추공마다 심도가 깊어질수록 N값이 서로 다

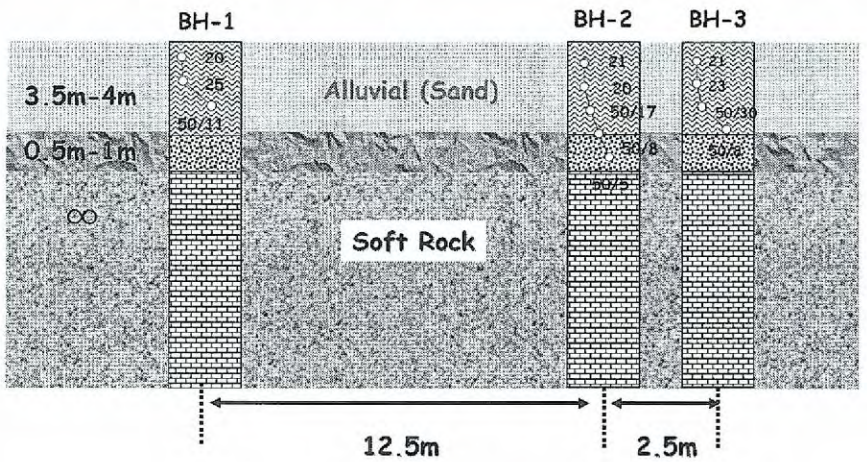
른 값을 가지는 것을 확인할 수 있었다. 시험 부지 근처에 암반 노두가 드러난 지역을 살펴본 결과 불균등한 침식 등에 의해서 암반 노두 표면이 매우 울퉁불퉁한 것이 관찰되었다. 즉 암반 상부에 사질토가 퇴적된 지반 형태로써 거의 수평한 지반 형태를 보이나 국부적으로 암선이 불균등하며 풍화가 불균등하게 진행된 상태인 지반으로 추정할 수 있었다. 큰 경사구조를 보이지 않는 지반이므로 표면파 기법을 수행하기에는 매우 적합한 지반이며 SASW, MASW, HWAW 기법 결과 모두 거의 유사한 결과를 도출할 것으로 판단되었다. HWAW 기법으로는 좀 더 국부적인 지반 상태를 평가하고자 하였으며 HWAW 기법에 대한 여러 가지 영향 요소 연구를 수행하고자 하였다.



(a) 장안 현장 위치 및 사진



(b) 시추 수행 장면



(c) 시추 주상도

그림 3.4.51 장안 현장 부지 개요

나. 기존 표면파 기법의 수행

(1) SASW 기법의 수행

SASW 기법은 그림 3.4.52와 같이 2m, 4m, 8m, 16m, 32m 의 감지기 간격을 이용하였다. 가진원 간격은 일반적인 SASW 기법에서의 구성대로 감지기 간격과 동일하게 설정하였다. 좁은 감지기 간격에서는 슬러지 해머를 이용하여 가진하였으며 감지기 간격 16m 이상에서는 저주파 가진을 위해 중추(drop weight)를 이용하였다. 5개의 감지기 배열을 사용하였으며 1개의 감지기 배열에서 잡음 제거를 위한 평균(average) 작업으로 가진을 10회 이상 수행하였다. 시험 수행 시간은 1시간 정도 소요 되었다.

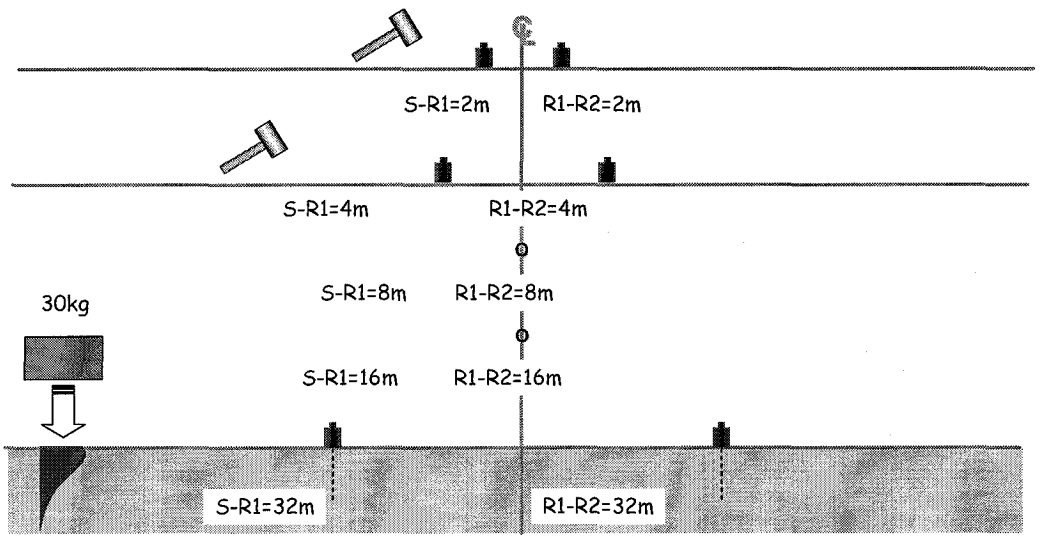


그림 3.4.52 SASW 기법을 위해 설계된 감지기 간격, 가진원 등의 실험 세팅

획득한 복합 실험 분산곡선을 그림 3.4.53에 도시하였다. 대표 분산곡선을 획득하고 자동역산을 통해서 그림 3.4.54와 같이 전단파 속도 주상도를 도출하였다. SASW 기법을 위한 자동역산은 WinSASW 2.3을 이용하였다(조성호, 2002).

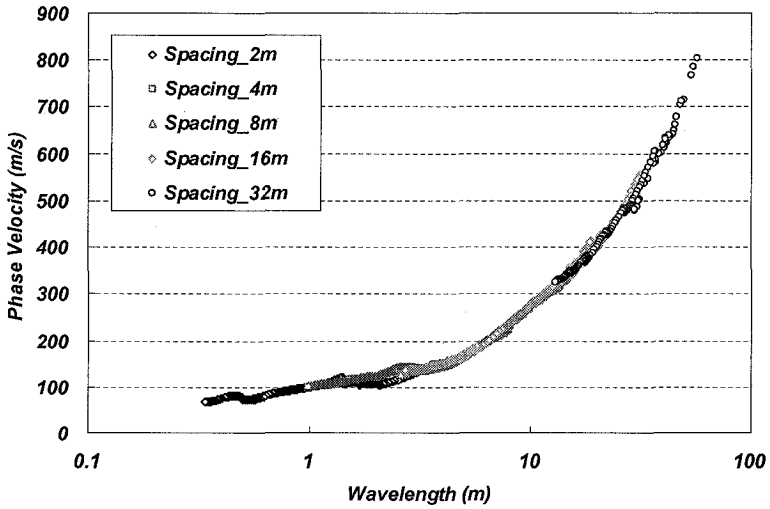


그림 3.4.53 SASW 기법을 통해 획득한 실험 분산 곡선

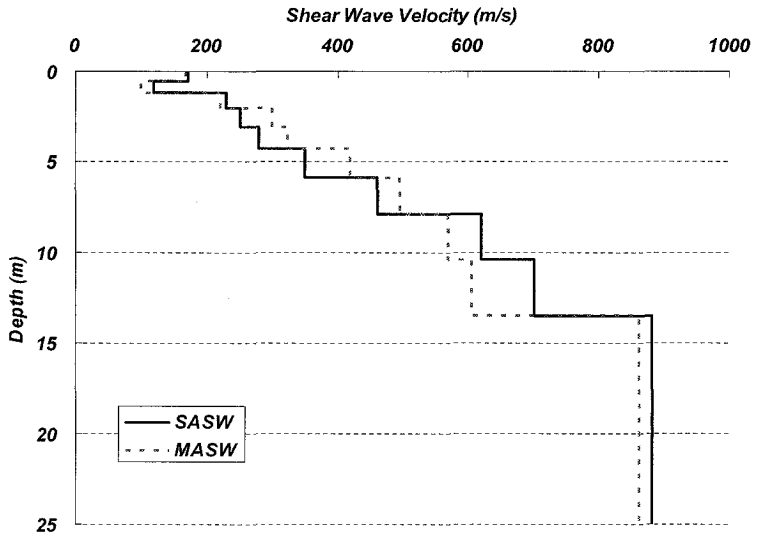


그림 3.4.54 SASW 및 MASW 기법을 통해 결정한 전단파 속도 주상도

(2) MASW 기법의 수행

MASW 기법은 그림 3.4.55와 같이 총 24개 감지기를 이용하여 현장 시험을 수행하였다. 감지기 간격은 1m, 가진원 거리는 8m로 하였다. 현장 시험을 통해 획득된 다채널 탄성파 신호를 이용하여 오버톤(overtone) 분석을 통해 실험 분산곡선을 획득하였다(그림 3.4.56). 자동 역산 과정을 통하여 전단파 속도 주상도를 도출할 수

있었으며 그림 3.4.54에 SASW 기법 결과와 함께 도시하였다. 자동 역산을 포함한 MASW 신호처리는 Surfseis1.8을 이용하였다.

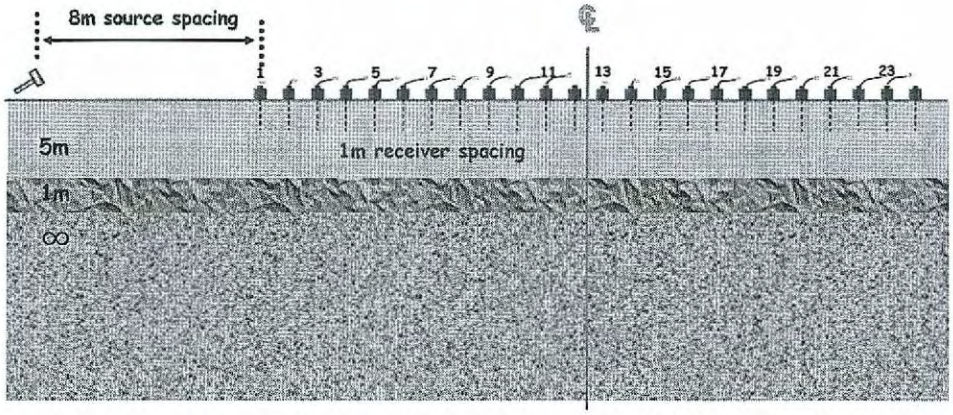
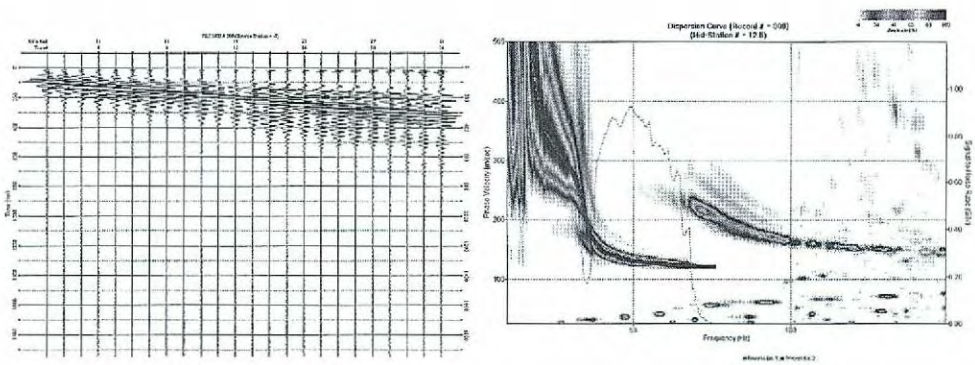


그림 3.4.55 MASW 기법을 위해 설정한 감지기 간격 및 가진원 거리



(a) 다채널 획득 파형 (b) 오버톤 분석 결과

그림 3.4.56 오버톤(overtone) 분석을 통한 실험 분산곡선의 획득

다. HWAW 기법의 수행 및 영향요소 연구

HWAW 기법에 대한 현장 검증 연구를 여러 개의 4.5Hz 감지기를 하나의 측선에 배열하는 방식을 통해 수행하였다. 그림 3.4.57와 같이 1m 간격으로 24개의 속도계를 설치하였으며 가진원 위치를 다양하게 하는 방법으로 검증 연구 및 영향요소 연구를 수행하였다.



그림 3.4.57 HWAW 기법 현장 검증 연구 수행 장면

그림 3.4.58과 같이 가진원을 첫 번째 감지기로부터 0.5m에 위치하여 HWAW 기법을 수행하였다. 앞서 수행했던 수치해석과 유사한 형태이다. 따라서 하나의 가진원에서 거리별로 실험 분산곡선을 도출하여 서로 비교하고자 했으며 근접장의 영향 정도 및 수평적 불균질 특성 등에 대해 고찰하고자 하였다. 감지기 간격 2m 기준으로 하여 획득한 가진원으로부터 거리별 실험 분산곡선을 그림 3.4.59에 동시에 도시하였다. 한 번의 가진을 통해 각 감지기 위치에 따른 9개의 실험 분산곡선을 동시에 도출할 수 있었다. 가진원으로부터 너무 가까운 거리에서는 양질의 신호가 획득되지 않아 감지기 거리 4.5m, 6.5m부터 실험 분산곡선을 획득할 수 있었으며 마지막 감지기 위치인 20.5m, 22.5m까지 획득이 가능하였다. 각 거리별로 분산곡선의 형태는 약간 달랐지만 전반적으로 깊이에 따라 강성이 증가하는 형태인 것을 알 수 있다.

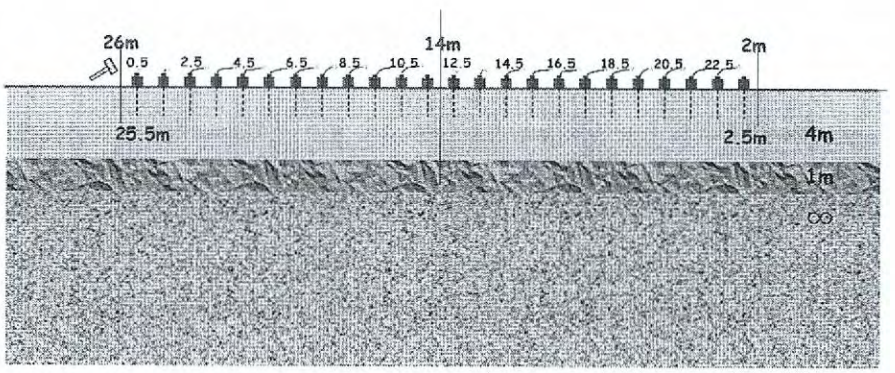
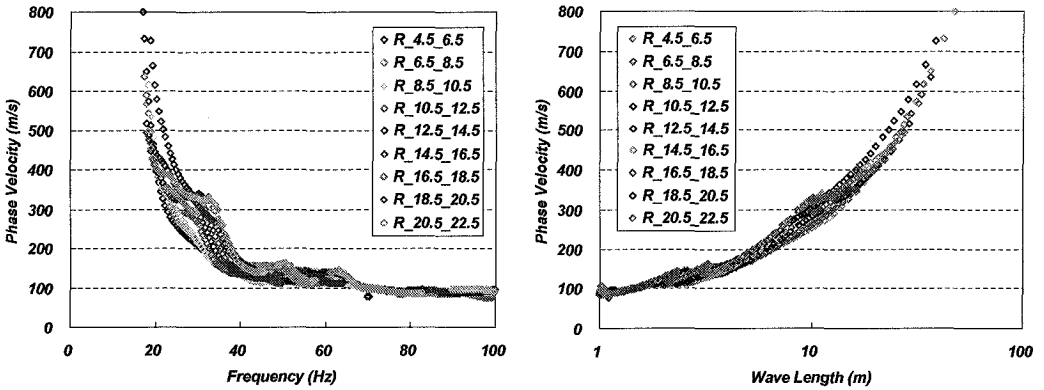


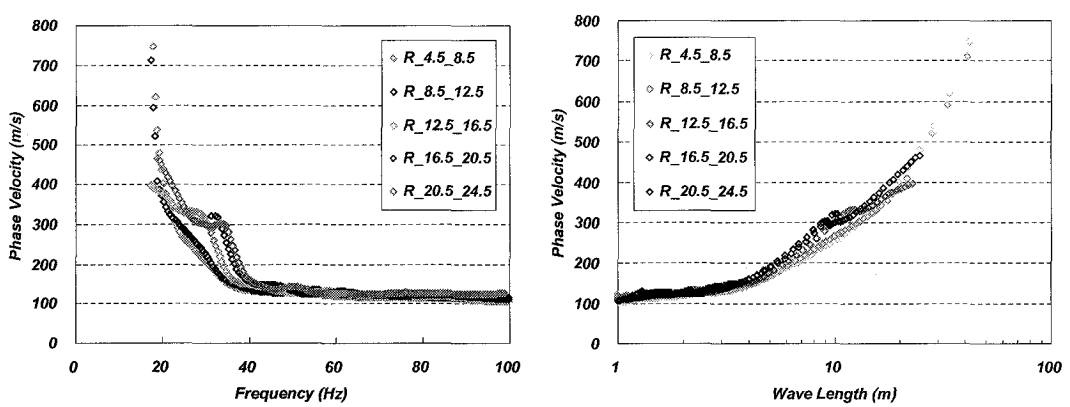
그림 3.4.58 한 번의 가진으로 모든 감지기 위치에서 동시에 실험 분산곡선을 획득하는 방식으로의 HWAW 기법의 수행



(a) 주파수 영역 (b) 파장 영역

그림 3.6.59 그림 3.4.58 방식으로 획득한 가진원으로부터의 거리별 실험 분산곡선 (범례에서 숫자는 가진원으로부터 감지기까지의 거리)

그림 3.4.59의 결과는 가진원 거리가 다르기 때문에 근접장 효과의 영향 정도가 다르며 감지기 위치 또한 다르기 때문에 지반의 수평하지 않은 영향을 동시에 받고 있는 것이 된다. 약 70Hz 이하의 주파수 대역부터 분산곡선의 증감 현상이 심한 것을 볼 수 있다. 이러한 분산곡선의 증감 현상을 줄여주기 위하여 수치해석에서 수행했던 것처럼 감지기 간격을 4m로 하여 실험 분산곡선을 획득하여 보았다 (그림 3.4.60).



(a) 주파수 영역 (b) 파장 영역

그림 3.4.60 동일한 가진원 위치에서 감지기 간격을 4m로 바꾸어 수행한 결과

감지기 간격을 2m로 하였을 때에 비해 40Hz-70Hz 대역에서 분산곡선의 증감 현상이 거의 사라진 것을 볼 수 있다. 즉, 수평적 불균질성이 약간 존재하며 그로 인해 도달시간 오류가 발생하였고 분산곡선의 증감 현상이 나타난 것으로 판단이 된다. 약 40Hz 이하에서 발생하는 분산곡선의 차이는 실제 지반 상태가 감지기 위치에 따라 다르기 때문으로 판단된다. 따라서 본 부지는 상부는 수평적으로 균질하지만 하부는 수평적으로 약간 불균질한 것으로 추정된다. 불균질 경계 깊이는 분산곡선이 차이가 나는 주파수를 40Hz로 가정할 경우 해당 속도를 추정하여 계산해보면 약 3.5m 근방인 것으로 판단이 되며 파장 영역에서와 거의 일치한다. 즉 퇴적층은 수평적으로 거의 균질하며 하부 암반층이 수평적으로 약간 불균질한 것으로 판단되는데 현장 주변 답사 및 시추 결과로부터 추정한 것과 유사하다.

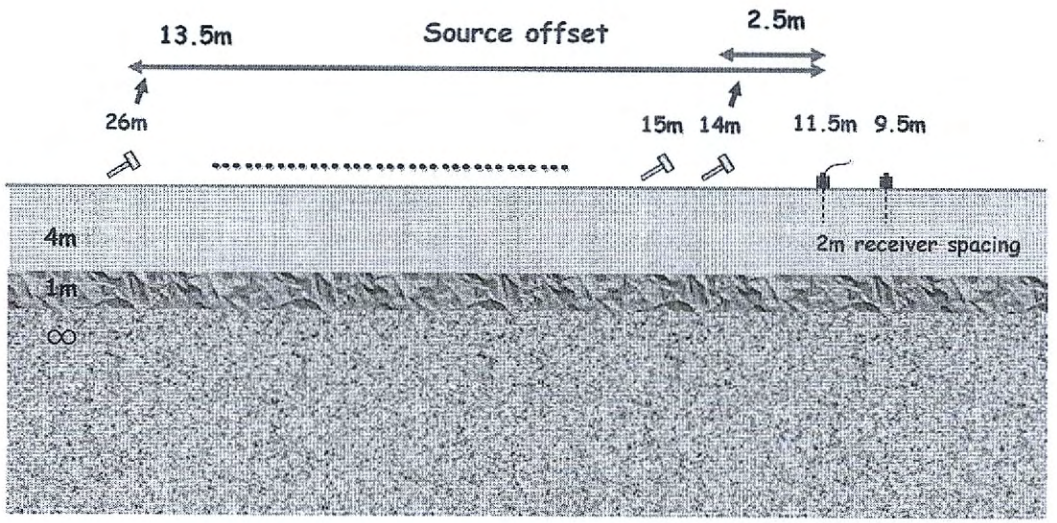


그림 3.4.61 동일한 감지기 위치에서 가진원 위치를 바꾸어 가면서 실험 분산곡선을 획득하는 방식으로의 HWAW 기법의 수행

가진원 거리 효과 즉, 근접장 효과만을 알아보기 위해 그림 3.4.61과 같이 감지기 위치는 고정시켜 둔 상태에서 가진원 거리만 달리하여 HWAW 기법을 수행하여 보았으며 그 결과를 그림 3.4.62에 도시하였다. 가진원 거리는 최소가 2.5m이며 1m 간격으로 이동하여 최대 13.5m로 하였다. 감지기 위치가 동일하므로 동일한 지반에 대해 획득한 실험 분산곡선임에도 불구하고 가진원 거리에 따라 약간씩 차이가 나

는 것을 볼 수 있다. 실험 분산곡선은 가진원으로부터 감지기까지의 지반의 영향을 거의 받지 않으며 감지기 사이 지반을 주로 대변하므로 여기서 실험 분산곡선이 차이가 나는 원인은 가진원 거리에 따른 근접장 효과의 차이로 인한 것이다. 즉, 현장에서도 근접장 효과에 의해 실험 분산곡선이 영향을 받는 현상을 확인할 수 있었다.

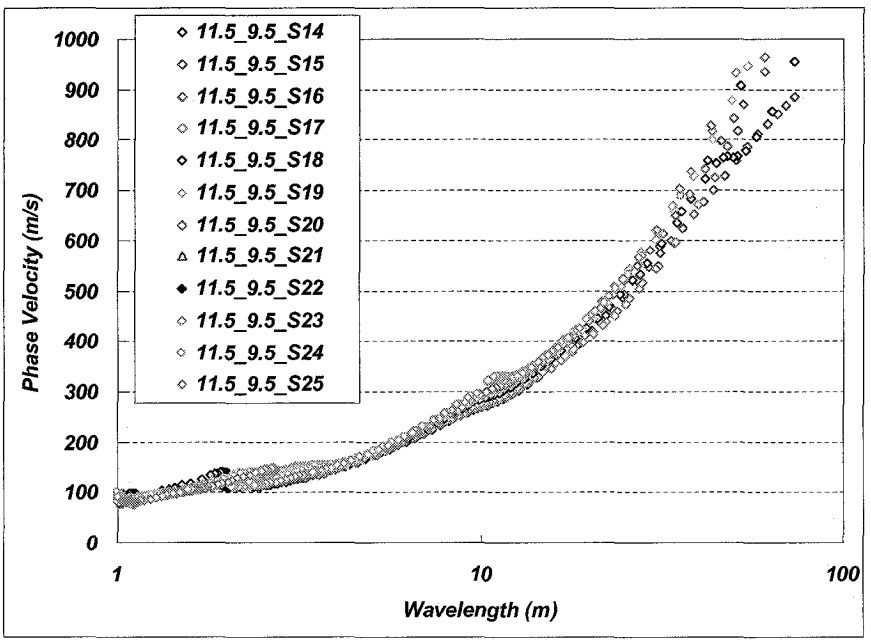
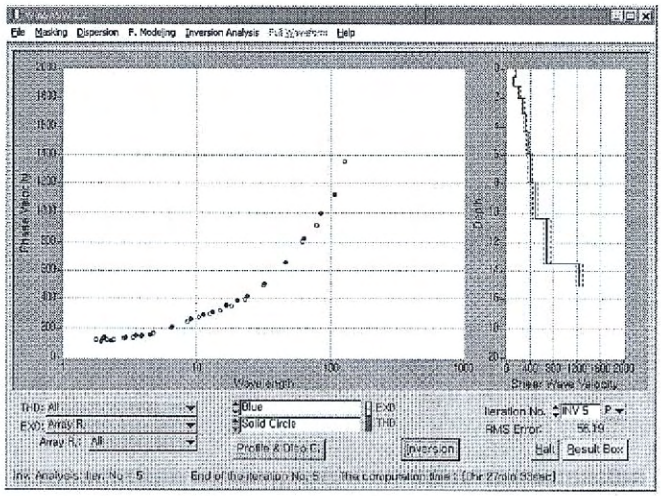


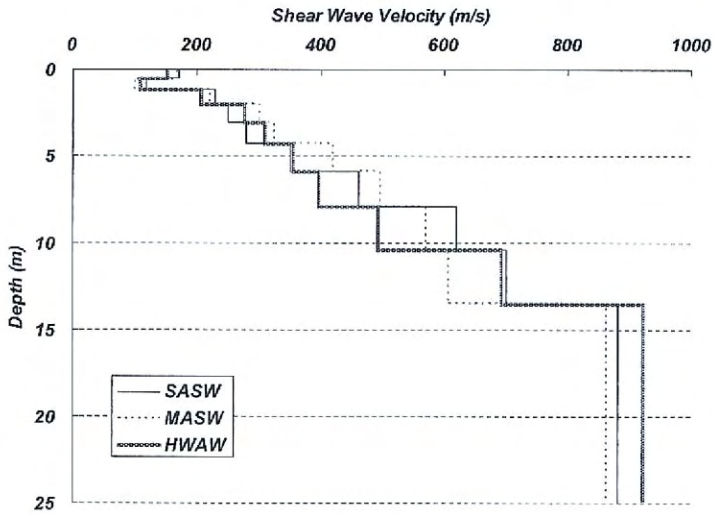
그림 3.4.62 감지기 위치를 고정시키고 가진원 거리를 이동시켜 수행한 결과 (범례에서 숫자는 감지기 1, 감지기 2, 가진원의 좌표를 의미, 즉 감지기 간격은 2m이며 위치가 고정된 상태에서 가진원만 이동시킴)

대표적으로 가진원 거리 8.5m에서의 실험 분산곡선을 자동 역산을 수행하여 전단파 속도 주상도를 도출하여 보았다(그림 3.4.63). 사용된 프로그램은 WinSASW 2.2이며 단일 배열 역산을 수행하였다. WinSASW 2.3 내에 배열 역산(array inversion) 과정에 의거하여 수행하였다. SASW 및 MASW 기법으로 결정된 전단파 속도 주상도와 비교하여 볼 때 절대 속도값이 약간씩 차이가 나지만 거의 유사한 것을 볼 수 있다. 도출된 속도값이 차이가 나는 원인은 그림 3.4.64와 같이 획득한 분산곡선이 차이가 나기 때문이다. 각 기법별로 실험 분산곡선을 획득하는 방식이 다르므로 동일 지반에서 현장 실험을 수행하였음에도 불구하고 측선의 길이 등

의 차이로 인하여 실험 분산곡선이 대변하는 지반의 영역이 다르거나 근접장 효과 등으로 인하여 달라질 수 있게 된다. 결과적으로 SASW, MASW 기법과 비교하여 볼 때 HWAW 기법은 훨씬 단순한 방법으로 유사한 결과를 획득한 것이 되므로 HWAW 기법의 장점을 확인할 수 있었다.



(a) 가진원 거리 8.5에서의 실험 분산곡선을 이용한 자동 역산의 수행
(Solid Circle은 실험 분산곡선이며 Hollow Circle은 역산을 위한 이론 분산곡선, 우측은 결정된 전단파 속도 주상도)



(b) SASW 및 MASW 기법 결과와의 비교

그림 3.3.63 HWAW 기법으로 결정된 지반의 전단파 속도 주상도

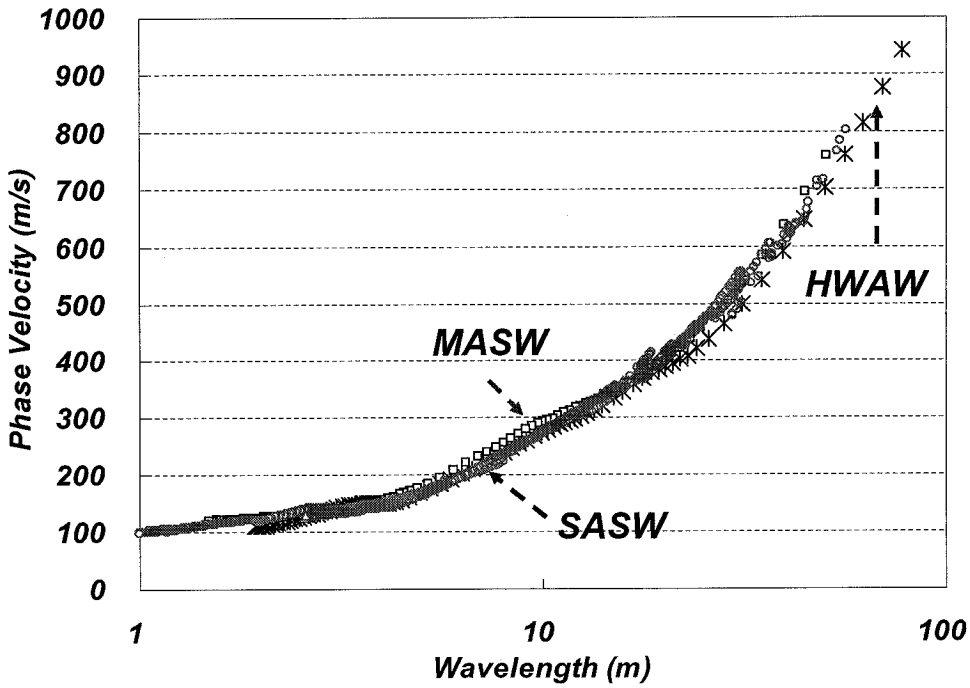


그림 3.4.64. SASW, MASW, HWAW 기법으로 획득한 실험 분산곡선의 비교

결정된 전단파 속도 주상도가 다른 또 하나의 큰 원인으로 역산 기법의 차이이다. 최종 전단파 속도 주상도는 실험 분산곡선과 이론 분산곡선이 일치할 때까지 반복 수행을 하여 결정하게 되는데 완벽하게 일치시키는 것은 거의 불가능하기 때문에 일치 여부에 대한 기준을 정하게 된다. 반복적 정모델링 기법은 개인적 판단에 달라지게 될 것이며 자동 역산인 경우 프로그램에서 설정한 범위 내로의 수렴 여부에 의해 결정된다. 현재까지 완벽한 자동 역산 프로그램은 없으며 적절한 오차 범위 내에서 결과를 도출하고 있다. 하지만 반복적 정모델링 기법은 전문가적인 식견이 없으면 정확한 역산이 불가능 하기 때문에 자동 역산 프로그램을 이용하는 것이 바람직하다. 그래서 본 연구에서도 각 기법에 대해서 자동 역산 프로그램을 도입하여 적용하였다. 현장 결과 분석에서는 MASW 기법은 Sufseis1.8을 SASW 기법과 HWAW 기법은 WinSASW 2.3을 이용하여 자동역산을 수행했었다.

자동 역산 과정에 있어서 실험 분산곡선의 형태에 따라 이론 분산곡선과의 수렴 정도에 영향을 끼치게 된다. 실험 분산곡선의 형태가 굴곡이 덜하고 단순한 형태일수록 자동역산의 수행이 쉬워진다. HWAW 기법에 있어서는 실험 분산 곡선 형태

가 근접장을 적극적으로 이용하므로 그 형태가 더욱 굴곡이 심한 것을 볼 수 있었으며 정확한 역산은 더욱 힘들어 진다. 그러므로 HWAW 기법이 정립되기 위해서는 HWAW 기법에 유리한 역산 프로그램의 개발이 절실한 실정이다.

그림 3.4.66에 그림 3.4.65와 같이 가진원 거리 및 감지기 간격을 일정하게 한 상태에서 측선을 옮겨가며 HWAW 기법을 수행하여 획득한 실험 분산곡선을 동시에 도시하였다. 이러한 방법은 MASW나 SASW 기법에서 2차원 단면을 획득할 때 사용하는 방법이다. 하지만 MASW나 SASW 기법에서는 측선의 길이에 비해 옮기는 측선의 길이가 짧기 때문에 많은 영역에서 구간이 겹치게 된다. 하지만 HWAW 기법은 감지기 간격과 옮기는 측선의 길이가 그림3.4.65와 같이 동일하기 때문에 실질적인 2차원 단면의 획득이 가능하게 된다. 가진원 거리 및 감지기 간격을 일정하게 하였으므로 근접장 영향은 동일하게 작용하며 감지기 사이 지반의 물성치에만 영향을 받게 된다. 분산곡선을 비교한 결과를 보면 상부지반은 동일하지만 하부 지반은 서로 차이가 나는 것을 볼 수 있다. 현장 답사나 시추 주상도로 판단한 부지 상태와 유사하다. 이러한 분산곡선을 이용하여 모든 위치에서 전단파 속도 주상도를 도출하게 되면 해당 부지의 2차원적인 전단파 속도 분포를 도출할 수 있게 된다.

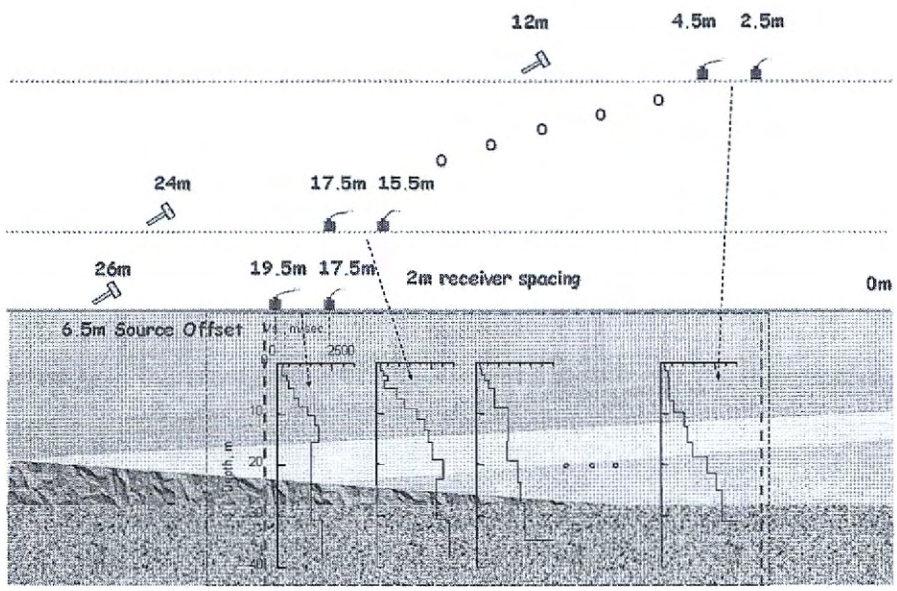


그림 3.4.65 같은 배열의 측선을 이동시켜 가며 HWAW 기법을 수행하는 방법 개요도

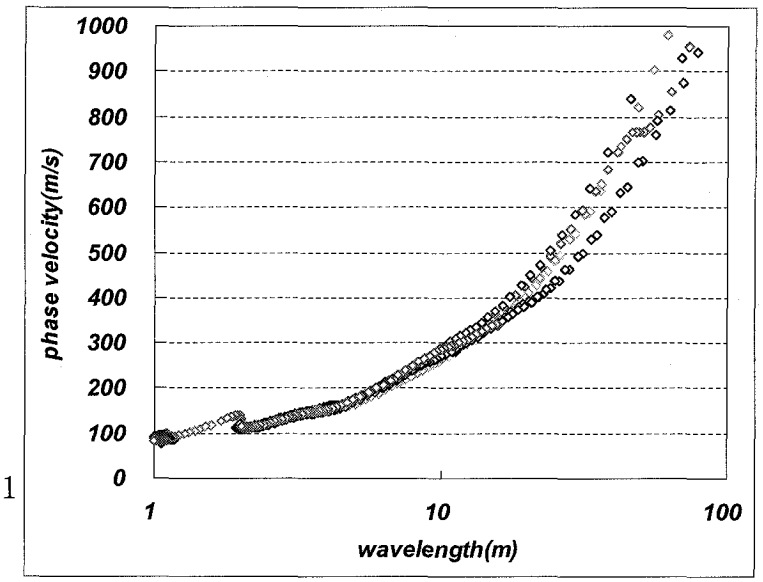


그림 3.4.66 같은 배열의 측선을 이동시켜 가며 HWAW 기법을 수행하여 획득한 실험분산곡선 (가진원 거리 6.5m, 감지기 간격 2m)

HWAW 기법에서는 기존의 방식처럼 측선을 옮겨가며 수행하지 않고 여러 개의 감지기를 이용하여 한 번에 각 감지기 위치에서의 실험 분산곡선을 획득하여도 2차원적인 전단파 속도 주상도를 도출할 수 있게 된다. 그러므로 현장 시험을 간단하게 하면서 2차원적인 전단파 속도 주상도를 도출할 수 있도록 HWAW 기법 현장 시험 장비 시스템을 여러 개의 감지기를 사용하는 방식을 사용하는 것이 유리하다고 판단되며 본 연구에서 종연결 감지기를 이용한 2D-HWAW 기법 수행 시스템을 구성하였다. 또한 획득되는 실험 분산곡선의 형태가 최대한 굴곡이 덜하고 증감 현상이 심하지 않은 상태여야지만 신뢰성 있는 역산 수행이 가능하므로 현장 시험 수행시 시험과 동시에 분산곡선의 양호도를 바로 판단할 수 있도록 현장 시험 시스템을 구성하는 것이 바람직하다. 노트북 기반의 현장 시험 수행 시스템의 구축을 통해 자료 취득으로부터 바로 실험 분산곡선을 자동적으로 도출이 가능하도록 프로그램을 구성한 바 있다. 이를 통해 도출된 결과에 대해 신속한 판단을 바탕으로 가진원 및 감기기 교체, 감지기 간격 변경 등을 함으로써 양질의 분산곡선을 획득할 수 있게 된다.

5. 분당 OO 부지 및 익산 미륵사지 부지에서의 HWAW 기법을 이용한 2차원 영상화 평가

분당 및 익산 부지에서는 NI-DAQPad 기반의 최종 시험 시스템을 이용하여 지반의 2차원 영상화를 도출하였다. 기존 지반 조사시 수행되었던 시추결과를 바탕으로 2차원 영상화의 신뢰성을 검증하였다.

가. NI-DAQPad를 이용하는 시험 시스템의 검증

3절 및 5절에서 소개된 HWAW 기법을 위한 NI-DAQPad의 현장검증을 위하여 그림 3.4.67과 같은 3가지의 시험 구성으로 시험을 수행하였다. 첫 번째로 2절에서 언급한 바 있는 기존 장비인 HP35670A(Agilent사, 미국)와 BNC cable을 연결한 시스템을 이용하였다. 두 번째로는 NI-DAQPad 6015에 BNC connector를 연결한 시스템을 사용하였으며 마지막으로 BNC connector 외에 spread cable을 부착할 수 있도록 개선되어진 박스 형태의 NI-DAQPad 6015(그림 3.5.8 참고)와 spread cable을 연결한 시스템을 사용하였다. DAQPad를 이용한 시스템은 노트북과 3절에서 언급한 신호획득 및 처리 프로그램을 이용하여 신호를 획득, 저장하였다(그림 3.4.68). 현장 시험은 감지기 선을 T-connector 와 짧게 BNC cable을 이용하여 연결하여 동일 감지기로부터 동시에 신호를 획득하였다(그림 3.4.69).

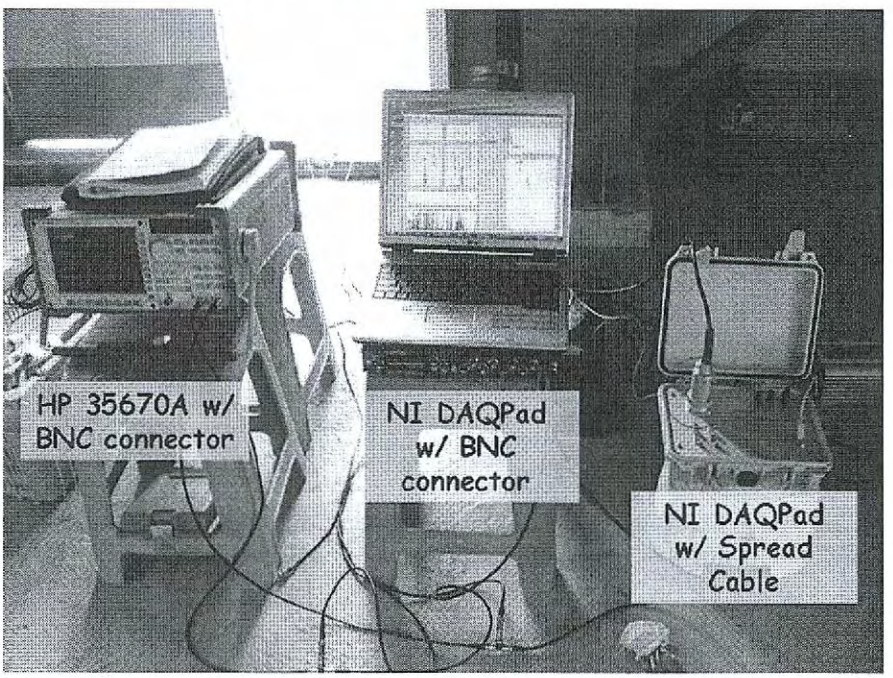


그림 3.4.67 현장 적용성 검증을 위한 세 가지 시험 시스템

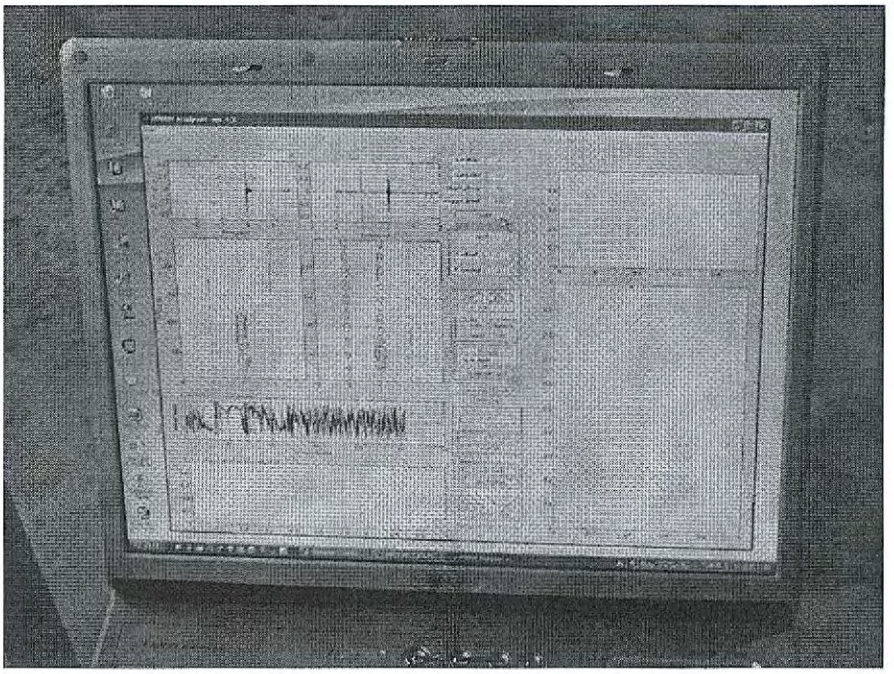


그림 3.4.68 현장 신호 획득 및 해석 프로그램을 이용한 시험 수행

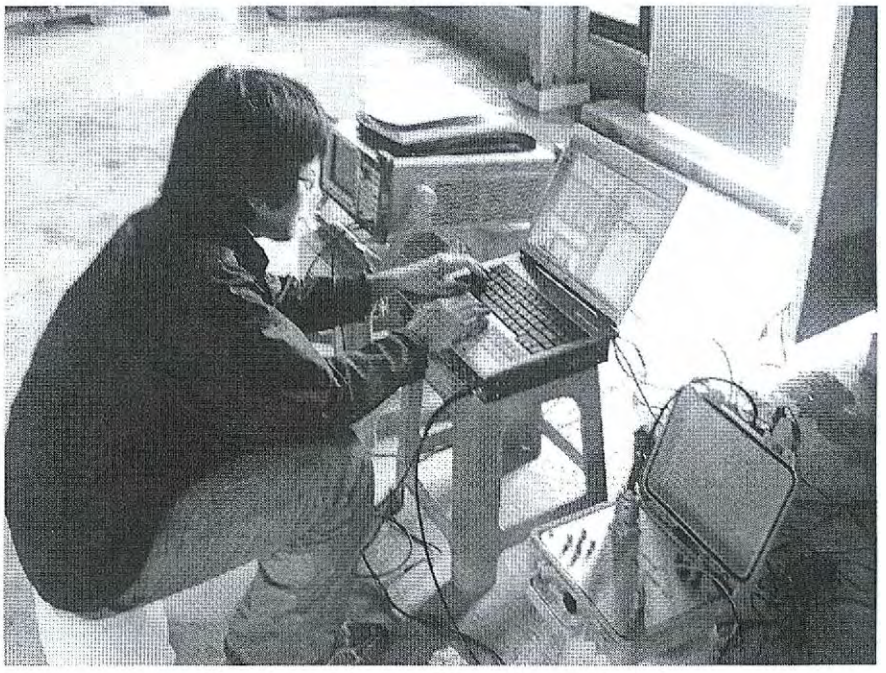


그림 3.4.69 동일 신호의 동시 획득

같은 NI DAQPad를 쓰는 경우는 동일 신호가 들어오므로 신호의 성분 비교는 NI-DAQPad와 HP 35670A의 신호를 이용하여 수행하였다. DAQPad에서는 duration 4초, sampling rate 는 1024S/s 를 이용하여 신호를 획득 하였고 HP 35670A에서는 역시 4초의 duration 과 f.s 100Hz를 이용하여 신호를 획득하였다. 그림 3.4.70는 2개의 채널에서 들어온 신호의 시간영역, 주파수 영역 신호를 보여주며 각 장비에서 두 채널의 신호에 대한 크로스파워스펙트럼을 나타낸다. 그림에서 나타난 바와 같이 두 장비에서 획득한 신호가 거의 일치함을 알 수 있다. 또한 Cross Power Spectrum 역시 해석에 무리가 없을 정도로 유사하게 나왔다.

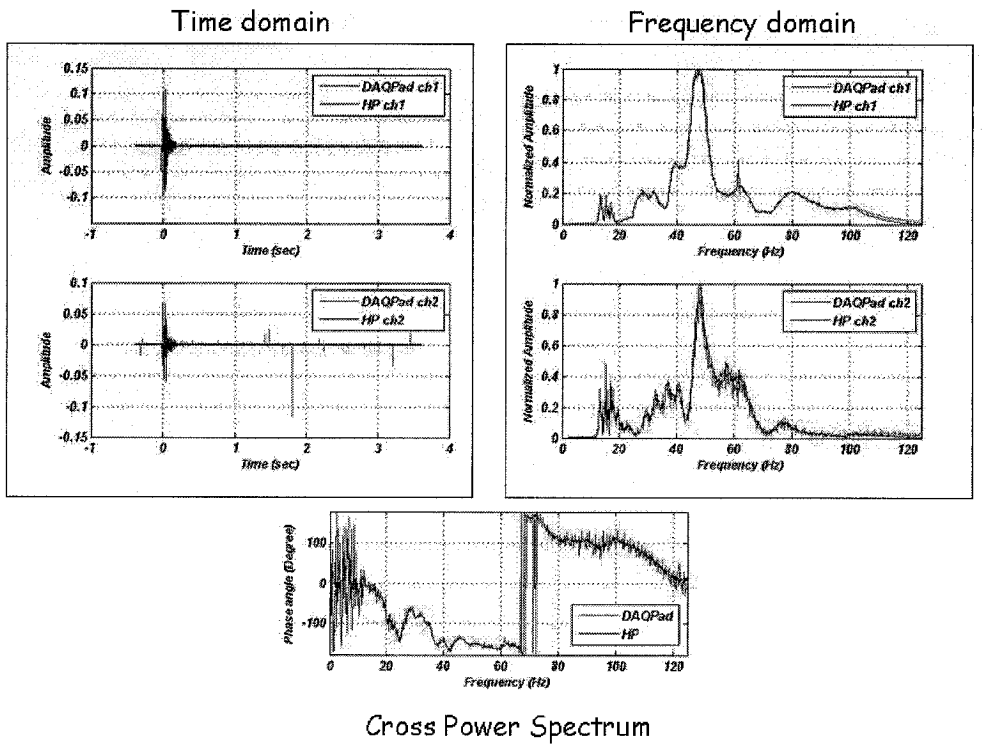


그림 3.4.70 각 장비에서 측정된 신호의 비교

각 장비에서 획득한 신호를 이용하여 분산곡선을 도출해 보았다(그림 3.4.71). 유사한 분산곡선을 도출하는 것을 확인할 수 있었다. 즉, NI DAQPad를 이용하는 현장 시험 장비 구성으로 수행된 시험이 신뢰성있는 결과를 도출하는 것을 확인하였다. 따라서 두 현장에서는 새롭게 제안된 NI-DAQPad를 기반으로한 현장 시험 구성을 이용하여 간편하고 빠른 현장 시험을 수행하였다.

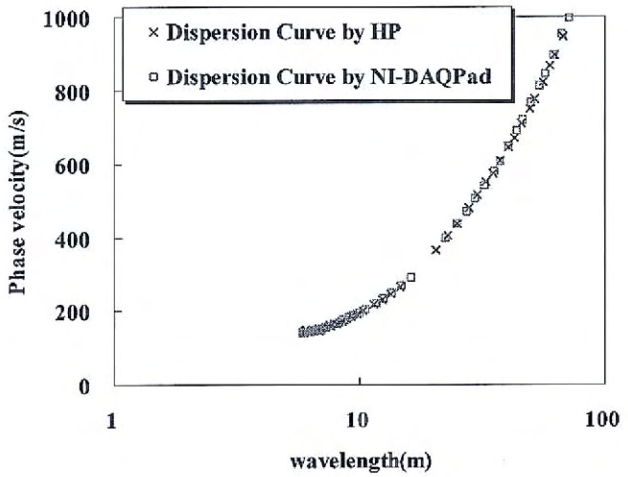


그림 3.4.71 각 장비에서 획득한 분산곡선

나. 분당 OO 공사 부지

(1) 현장 개요

분당 00빌딩 신축현장에서 HWAW 기법을 이용한 2차원 영상화를 수행하였다. 그림 3.4.72은 현장의 평면도로서 토질조사 위치도 포함되어 있다. 당 부지에서는 건물이 들어서는 D-D′ 측선을 따라 시추를 수행하였다. 그림 3.4.73는 당 측선에 있는 시추공 BH-3, BH-5, BH-7의 시추 결과를 나타낸다. 표준관입시험으로 구한 N치와 채취된 시료를 바탕으로 지반을 매립층, 충적층, 연암층, 경암층으로 구분하였다. 이 부지에서는 그림에서 보이는 바와 같이 연암의 깊이가 11.2~11.7m로 비교적 균일한 수평층이다. 2차원 영상화를 위한 HWAW 기법은 세 시추공의 연결선을 따라 수행되었다.

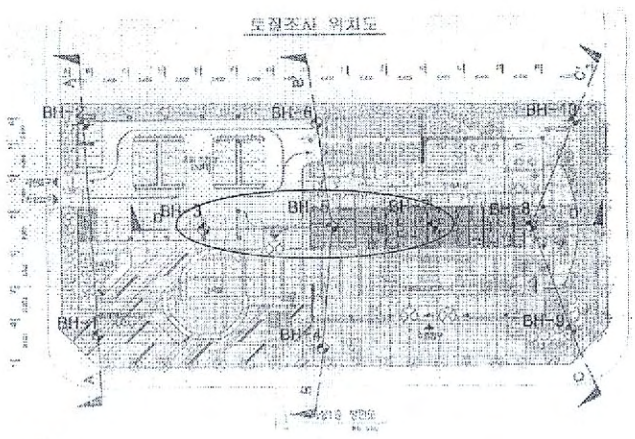


그림 3.4.72 분당 부지의 평면도

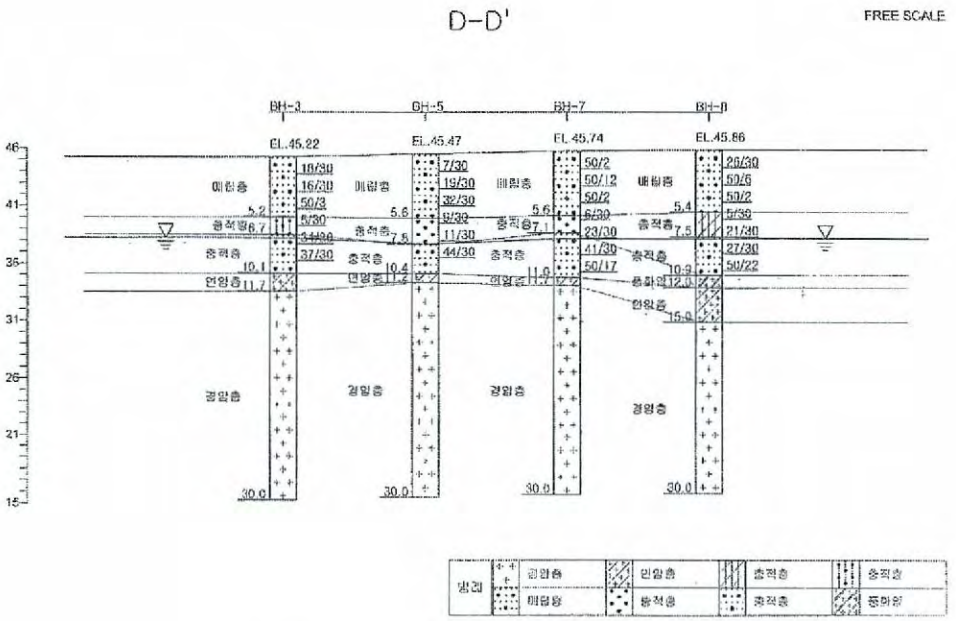


그림 3.4.73 분당 부지의 시추결과

(2) 현장 시험 구성

본 현장에서의 2차원 영상화를 하려는 측선의 길이는 46m로써 BH-3은 0m에 위치하며 BH-5는 24m, BH-7은 45m에 위치한다. 4.5Hz 감지기를 0m부터 2m간격으로 46m 까지 24개를 설치하고 가진원을 이동해 가며 시험을 반복수행하였다. 현장 신호획득 장비는 노트북을 기반으로 한 NI-DAQPad 장비를 사용하였다(그림 3.4.74). 슬레지 해머를 가진원으로 사용하여 시험을 수행하였다.

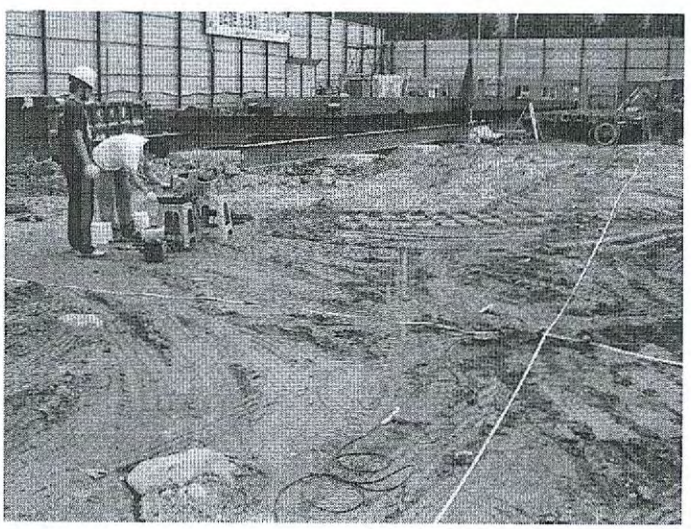


그림 3.4.74 분당 부지에서의 현장 시험 구성

그림 3.4.75는 BH-5 지점에서 수행한 HWAW 기법의 결과를 일례로 나타낸 것이다. 현장에서 신호를 획득하고 시간-주파수 해석을 통하여 분산곡선을 도출하였다.

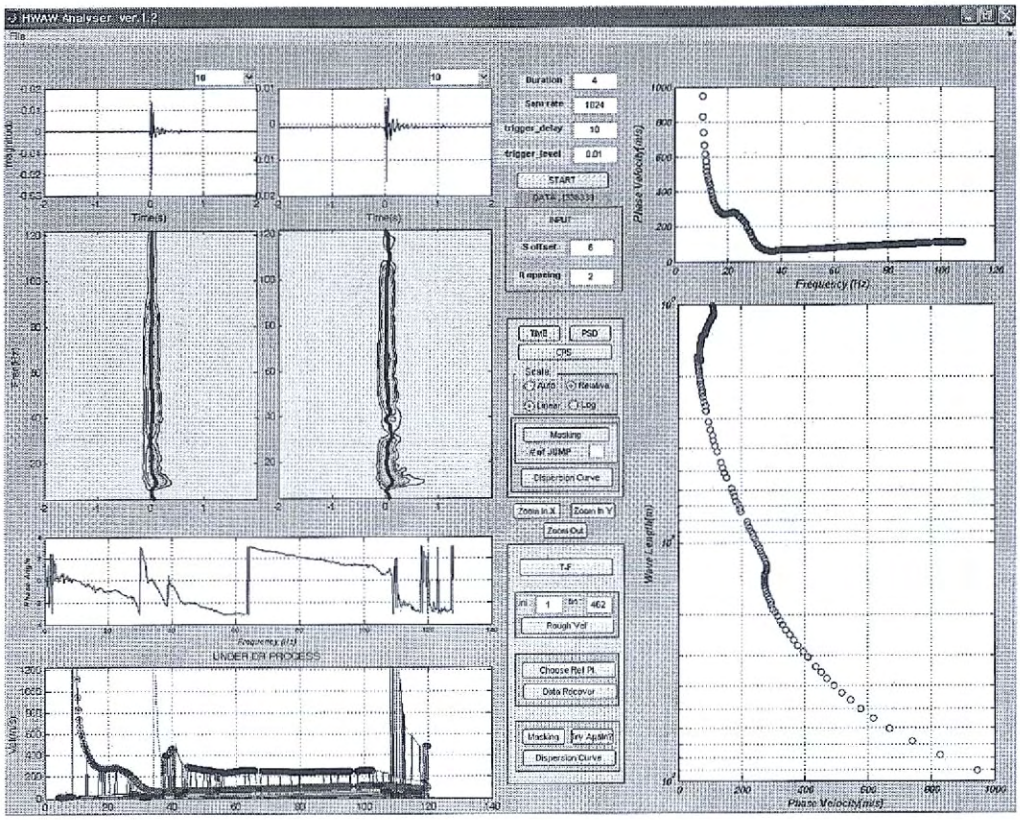


그림 3.4.75 BH-5 지점에서의 HWAW 결과 일례

(3) 시험 결과 및 2차원 지반강성 영상화 도출

현장에서 구한 분산곡선을 본 연구팀에서 개발한 자동역산프로그램에 적용하여 전단파 속도를 도출하였다(그림 3.4.76). 같은 방법으로 24개 지점에서 역산을 수행하여 전단파 속도를 도출한 후 그림 3.4.77에 나타내었고 이 결과를 내삽과정을 통해 2차원 영상화로 도출하여 시추 주상도와 같이 도시하였다(그림 3.4.78). 그림에서 나타나는 바와 같이 약 300m/s 경계에서 매립층과 충적층을 구분할 수 있었고 700m/s에서 충적층과 연암층을, 900m/s에서 연암층과 경암층을 구분할 수 있었다. 2차원 영상은 시추결과와 유사하게 수평하게 도출하여 본 기법을 이용한 2차원 영상화가 실제 부지에 적합하게 도출되었음을 알 수 있었다.

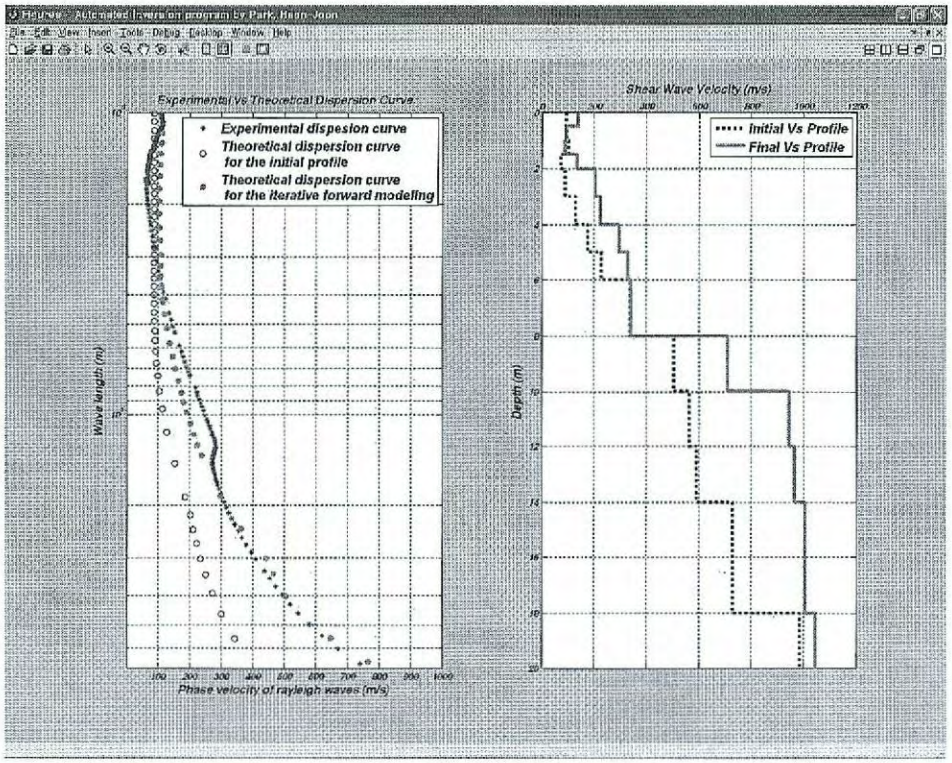


그림 3.4.76 자동역산프로그램을 이용한 전단파 속도의 도출(BH-5 지점)

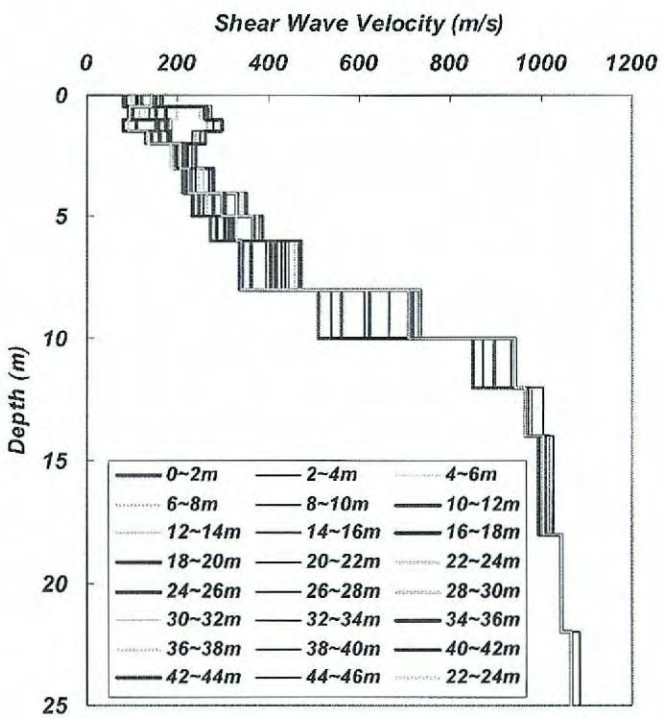


그림 3.4.77 24 지점에서의 전단파 속도 주상도

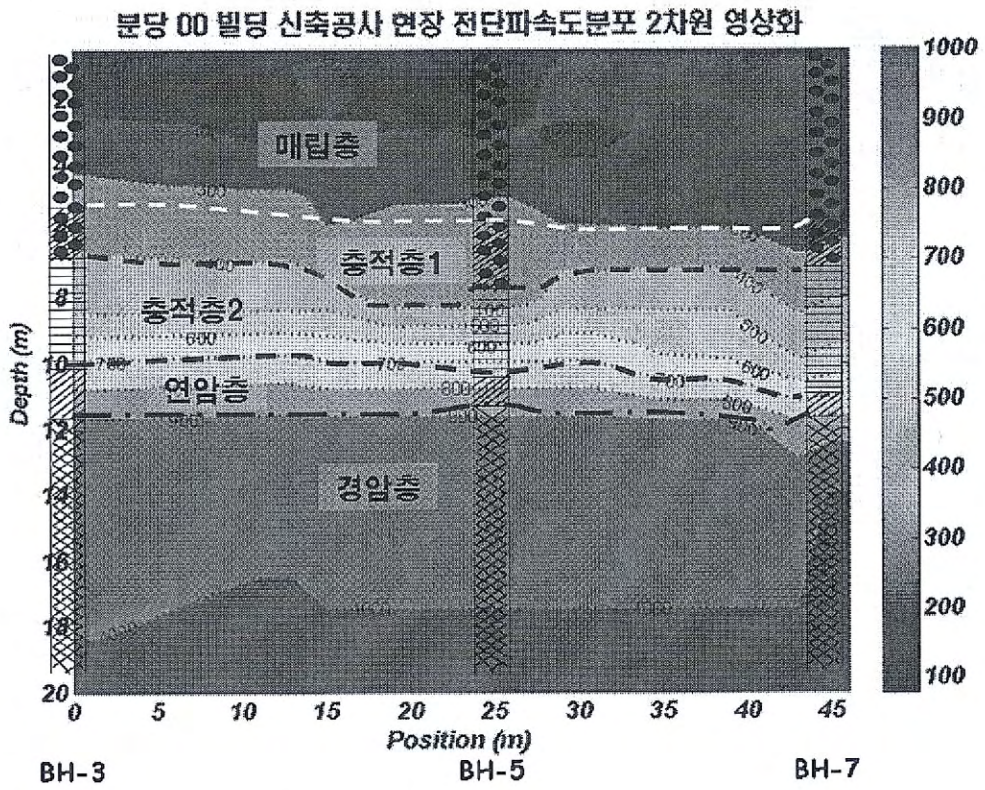


그림 3.4.78 2차원 전단파 속도 주상도

다. 익산 미륵사지 부지

(1) 현장 개요

익산 미륵사지 석탑의 구조안전진단을 목적으로 지반의 구조를 파악하고 지층의 상태 및 지내력에 대한 기초자료를 수집하여 사탑의 붕괴 원인을 밝히고 보존대책에 필요한 자료를 구하기 위하여 HWAW 기법을 이용한 석탑 주위에 대한 2차원 지반강성의 영상화를 도출하였다.

기존의 지반조사를 통하여 미륵사지 석탑을 중심으로 4개의 시추를 수행하였다 (그림 3.4.79). 시추 결과는 그림 3.4.80과 같으며, 표준관입시험으로 구한 N치와 채취된 시료를 바탕으로 지반을 매립층, 충적토층, 풍화토, 풍화암, 연암층으로 구분하였다. 본 연구에서는 BH-4과 BH-3을 연결하는 측선을 따라 지반강성의 2차원 영상화를 도출하였다.

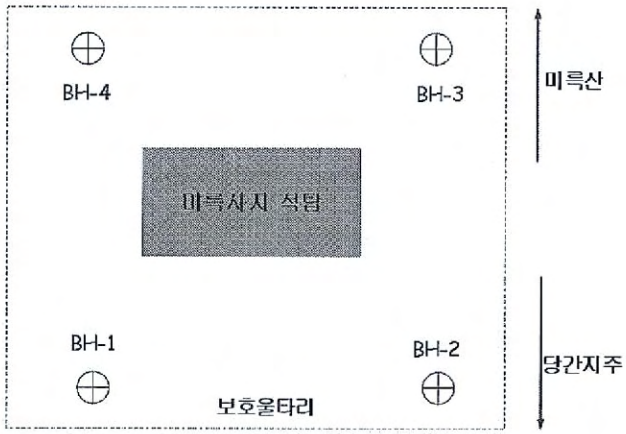


그림 3.4.79 익산부지의 평면도

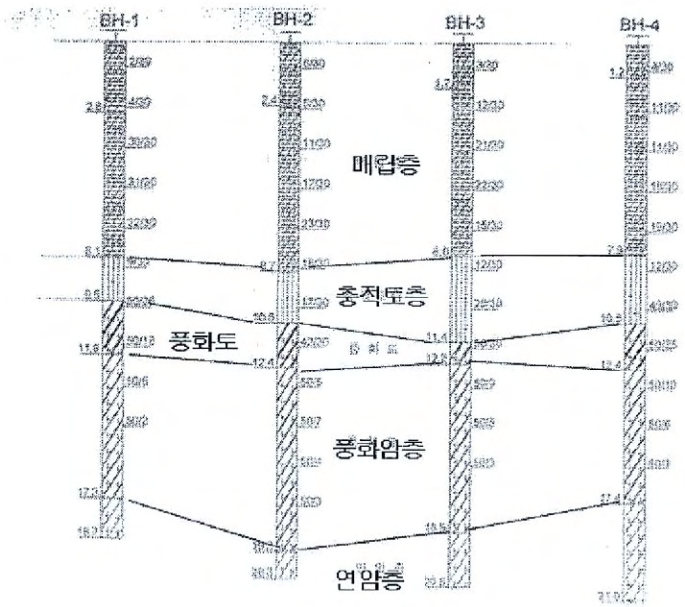


그림 3.4.80 익산부지의 시추결과

(2) 현장 시험 구성

본 현장에서의 2차원 영상화를 하려는 측선의 길이는 28m로써 BH-4는 0m 근처에 위치하며 BH-3는 약 29m에 위치한다. 예전에 시추가 수행된 후 건물이 지어졌기 때문에 본 연구에서는 시추위치와 가장 근접하며 측선이 길게 나오는 건물 벽 앞 공터에서 시험을 수행하였다. 4.5Hz 및 1Hz 감지기를 0m 지점부터 2m간격으로 이동시키며 15지점에서 시험을 반복 수행하였다. 현장 신호획득 장비는 노트북을 기반으로 한 NI-DAQPad 장비를 사용하였다(그림 3.4.81). 또한 슬레지 해머를 가

진원으로 사용하여 시험을 수행하였다.

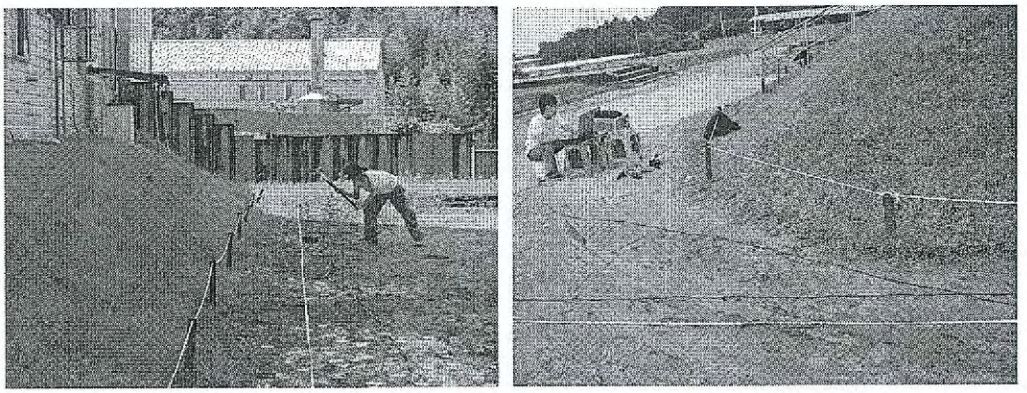


그림 3.4.81 익산 부지에서의 현장 시험 구성

그림 3.4.82는 BH-4 지점에서 수행한 HWAW 기법의 결과를 일례로 나타낸 것이다. 현장에서 신호를 획득하고 시간-주파수 해석을 통하여 분산곡선을 도출하였다.

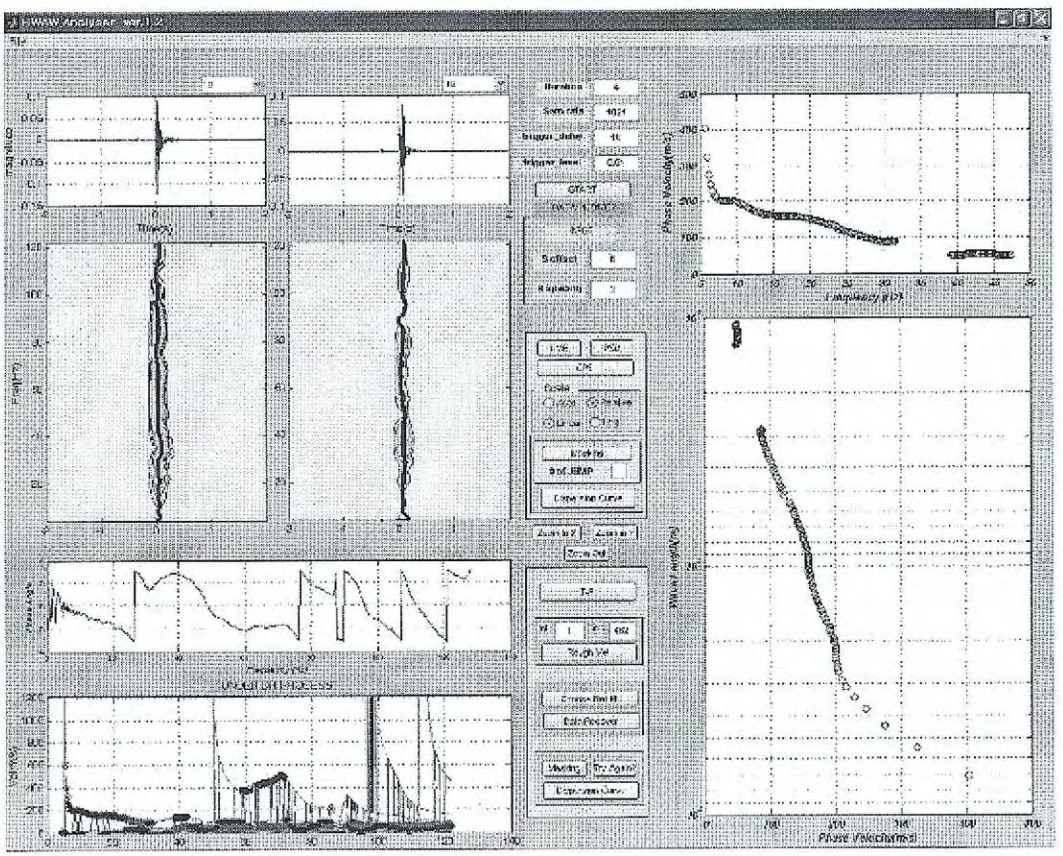


그림 3.4.82 BH-4 지점에서의 HWAW 결과 일례

(3) 시험 결과 및 2차원 지반강성 영상화 도출

현장에서 구한 분산곡선을 분당부지에서와 같이 본 연구팀에서 개발한 자동역산 프로그램에 적용하여 전단파 속도를 도출하였다(그림 3.4.83). 같은 방법으로 15개 지점에서 역산을 수행하여 전단파 속도를 도출한 후 그림 3.4.84에 나타내었고 이 결과를 내삽과정을 통해 2차원 영상화로 도출하여 시추 주상도와 같이 도시하였다(그림 3.4.85). 그림에서 나타나는 바와 같이 약 250m/s 경계에서 매립층과 충적층을 구분할 수 있었고 300m/s에서 충적층과 풍화토층을, 400m/s에서 풍화암층과 연암층을 구분할 수 있었다. 하지만 풍화토층과 풍화암층의 경계라 판단되는 지점에서는 특별한 속도값을 가지지 않았다. 추후 지반의 종류에 따른 전단파 속도의 분포를 조사하여 자료를 구축하면 이와 같은 2차원 전단파 속도 주상도를 이용한 지반 하부구조의 파악이 가능할 것이라 판단된다. 즉, 기존 방법으로는 그림 3.4.80에서와 같이 두 시추공사이를 직선으로 연결하여 하부구조의 층을 구분하였으나 지반강성의 2차원 영상화를 도출할 경우 그림 3.4.85에 나타난 바와 같이 하부지반의 상세 구조를 파악할 수 있을 것이다. 본 현장의 결과는 제안된 HWAW 기법의 현장 상용화 시스템을 이용하여 도출한 2차원 영상화가 실제 현장에 어떻게 적용되는지에 대한 좋은 사례라 판단된다.

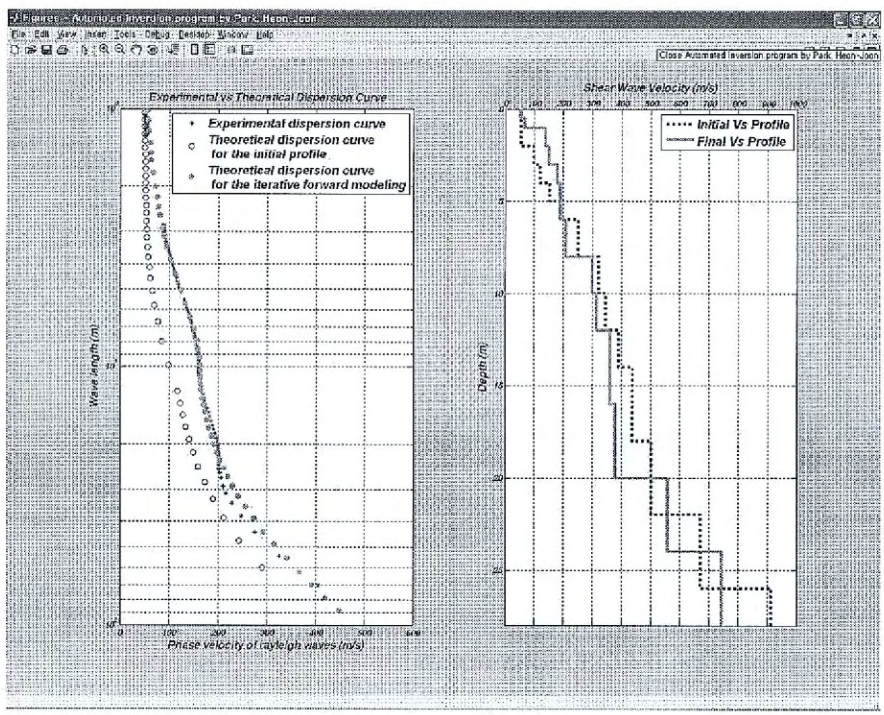


그림 3.4.83 자동역산프로그램을 이용한 전단파 속도의 도출(BH-4 지점)

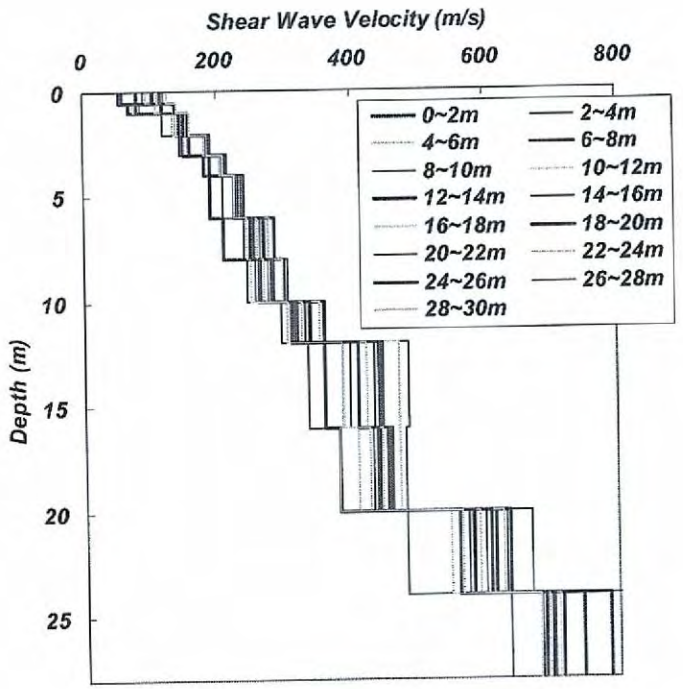


그림 3.4.84 15 지점에서의 전단파 속도 주상도

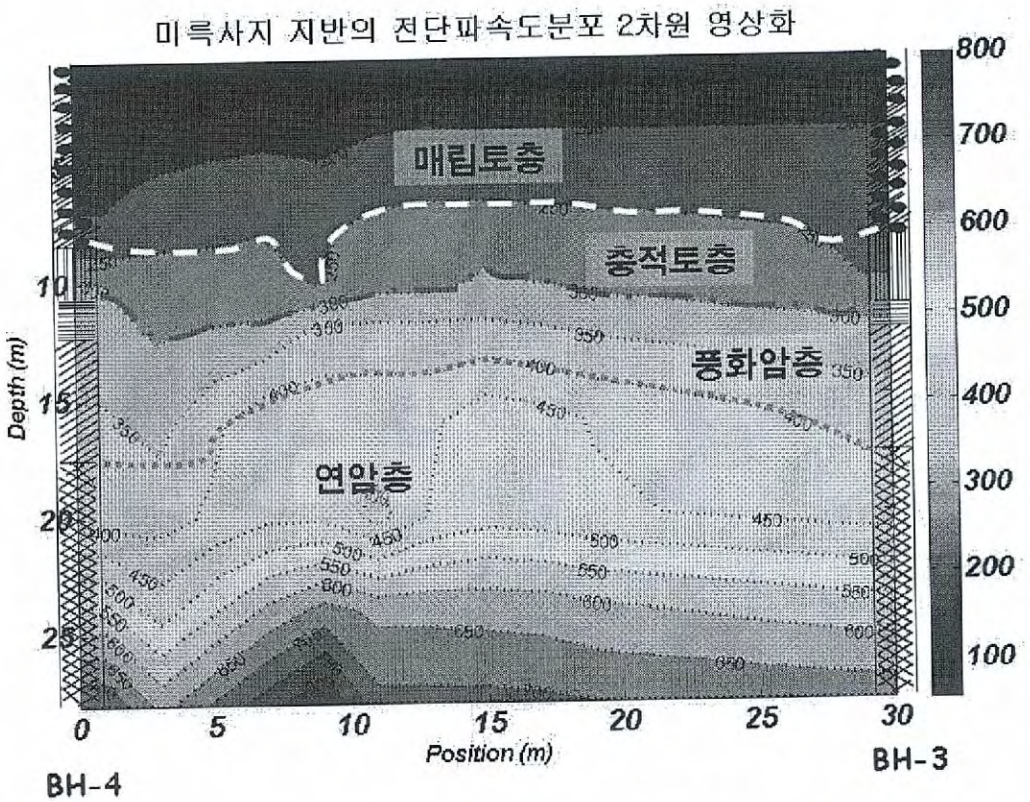


그림 3.4.85 2차원 전단파 속도 주상도

제 5 절 최종 상용화 시스템의 구성

앞서 2절 및 3절에서 기술된 연구결과를 바탕으로 최종적인 상용화 시스템을 구성하여 제안하였다.

1. SPT 업홀 기법

본 과업에서는 최종적으로 제안된 SPT-업홀 기법의 현장 상용화 시스템을 그림 3.5.1과 같이 구축하였다. SPT 업홀 기법을 위해서 필요한 장비는 크게 가진원 관련 장비, 감지기 관련 장비, 신호 획득 관련 장비 및 운영 프로그램으로 구성된다. 가진원 관련 사항은 본 SPT 업홀 기법에서 가장 중요한 특성으로 기존 SPT 시 타격에너지를 이용하는 것이므로 본 과업에서 이와 관련하여 수정된 사항은 없다. 본 기법은 한 측점에서 수직 및 수평 성분을 동시에 측정해야 하므로 보다 정확하게 2방향 거동을 측정하기 위하여 3방향 지표면 감지기를 도입하여 감지기 시스템을 구성하였다. 3방향 지표면 감지기는 집게 형식으로 연결하도록 되어 있으며 Spread Cable을 이용하여 신호 획득 장비까지 연결할 수 있게 된다. 이러한 방식은 물리탐사 분야에서는 탄성파 탐사 수행 시 널리 적용되는 방식으로 감지기 설치 및 철수 등의 현장 장비 운용이 매우 용이하다. 본 과업에서 시스템 구축은 효율적인 가진원 및 감지기 시스템을 구축하는 것뿐만 아니라 현장에서 신호 획득 및 관리를 효율적으로 수행하고 동시에 해석을 수행, 최종 결과를 바로 획득할 수 있는 시스템을 구축하는 것이다. 이를 위해서 본 연구에서는 신호 획득 시스템을 노트북 기반의 신호 획득 장비(Notebook based data acquisition system)로 구성하는 것을 우선으로 하였다. 다음에 각 시스템에 대해서 기술하였다.

가. 감지기 부분

감지기 부분은 속도계와 신호 획득 장비를 연결하는 Spread Cable로 구성되어 있다. 다음 그림 3.5.2에 각 부분의 장비 사진을 도시하였다. 일반적으로 캡핑 및 스파이크가 부착된 감지기는 수직 방향 성분용과 수평방향 성분용이 따로 제작되어 판매가 된다. 이러한 별도로 캡핑된 감지기들을 한 지점에 설치하게 되면 측정 지점이 정확히 일치하지도 않고 거동이 다들 수 있다. 이러한 점은 바로 도달시간 정보 획득의 오류로 이어진다. 본 기법에서는 수평 수직 성분을 동시에 획득하여 그 크기합 신호를 분석하게 되어 있으므로 동일 지점에서의 수평 수직 성분을 동

시에 획득하는 것이 필수적이다. 그러므로 수평 성분 감지기와 수직 성분 감지기를 별도로 운영하는 것보다 동일 케이스에 각 유닛들이 포함되어 있는 3방향 지표면 감지기를 사용하는 것이 SPT 업홀 기법에 보다 유리하다. Spread Cable은 12채널의 케이블 2개를 사용하여 총 24c채널을 사용하게 되며, 각 Cable은 동일한 유닛을 차례로 연결하여 신호 획득 및 관리 프로그램 운용이 용이하도록 한다(그림3.5.2). 감지기는 일반적으로 SPT 시추공으로부터 2~4m의 위치부터 각각 2~4m 간격으로 설치하며, 3방향 감지기 중 2채널을 사용할 경우 12개의 감지기를 사용하여 신호를 획득할 수 있다.

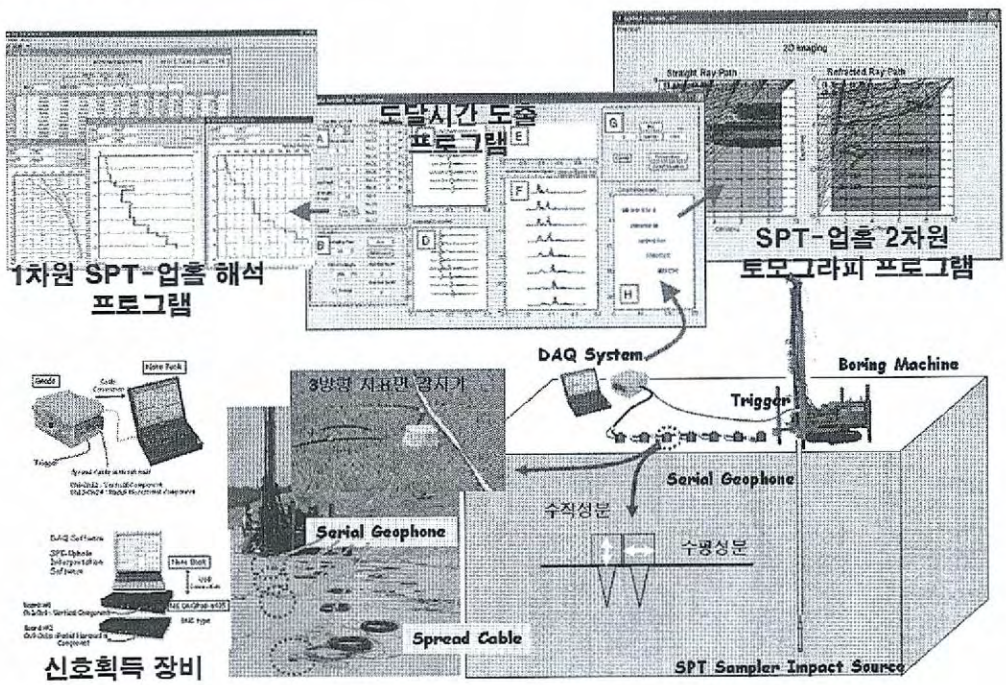


그림 3.5.1 SPT 업홀 기법의 최종상용화 시스템

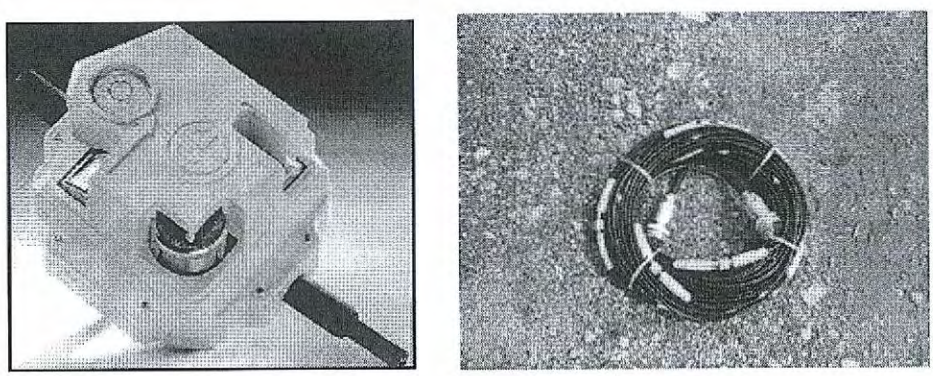


그림 3.5.2 3방향 지표면 감지기 및 Spread Cable

나. 트리거 부분

트리거 부분은 타격 순간의 일치성을 위해서 매우 중요한 부분이다. 일반적으로 SPT 업홀 시험시 에너지 효율 측정을 동시에 수행하므로 트리거 장비로 에너지 효율 측정 장비를 이용할 수 있다(김동수 등, 2003). 에너지 효율 측정을 하지 않을 경우에는 가속도계를 부착하거나 더욱 간단한 압전 소자를 이용한 유닛을 부착할 수 있다. 본 과업에서는 압전 소자를 이용한 유닛으로 트리거 장치를 구성하였다. 트리거 부분은 파형 확인을 통해서 그 양호도를 평가하여야 한다. 이러한 점을 위해서 본 과업에서는 신호 획득 및 관리 프로그램에 트리거 신호를 확인할 수 있도록 하였으며 트리거 장비의 확인, 트리거 레벨 및 트리거 기준 조정을 통해서 트리거 부분의 관리가 가능하도록 하였다.

다. 탄성파 전용 장비 기반 신호 획득 장비

탄성파 전용 정비 중 노트북과 연결하여 사용하는 장비를 도입하여 신호 획득 시스템을 구축하였다(그림 3.5.3). Geode는 현존하는 탄성파 기록기의 장점을 조합한 신제품으로 확장성이 뛰어나며 반사법, 굴절법, 다운홀, VSP 및 토모그래피까지 모든 탄성파 탐사를 수행할 수 있다. Geode 모듈을 지오폰을 연결한 라인 근처에 놓을 수 있으므로 현장 실험이 용이하며 값비싼 아날로그 라인을 길게 설치할 필요가 없다. 따라서 탄성파 탐사뿐만 아니라 지진에 대한 모니터링이나 발파 진동, 중장비로 인한 진동 등을 측정하는데도 용이하다. Geode 모듈은 3.6kg으로 무척 가볍고 컴퓨터와 저가의 네트웍 케이블로 연결을 한다. 또한 작은 12Volt 축전지(battery)로 하루 이상 작동이 가능하다. 표 3.5.1에 기본 Spec을 요약하여 정리하였다.

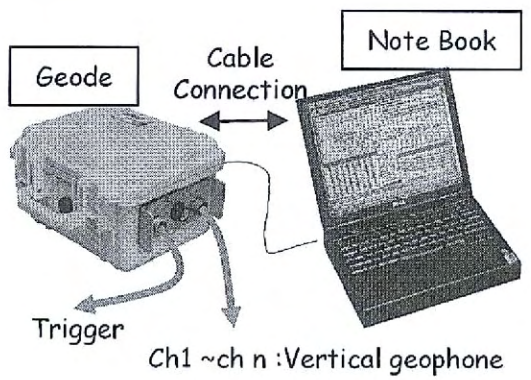


그림 3.5.3. 노트북과 연결하여 사용하는 Geode 신호 획득 장비 개요

Geode 시스템의 소프트웨어는 신호를 획득하는 부문이 잘 되어 있으나 업홀 탄성파 탐사를 위한 후처리 과정은 포함되지 않았다. 획득한 신호는 SEG2 포맷이므로 ASCII 포맷으로 변환한 뒤에 본 과업에서 제작한 해석 프로그램을 이용할 수 있도록 하였다. 본 과업에서 Geode 기반 신호 획득 시스템을 상용화 장비의 일례로 구성한 이유는 기존 지반조사 업체에서 이러한 탄성파 탐사용 장비를 보유하고 있는 경우가 많아 이들 지반조사 업체에서 추가적인 비용을 최소화하는 범위에서 SPT 업홀 상용화 시스템 구축을 할 수 있는 방안을 마련하기 위함이다. Geode 대신 기존 탄성파 장비를 사용할 경우 노트북 기반이 아니라는 점에서 현장 실험과 해석의 연속성 측면에서 데이터 이동 등의 측면에서 약간의 불편함은 있지만 기법의 수행은 가능하다. 또한 지반 조사 업체에서 새로운 탄성파 탐사 장비로 Geode를 구매했을 경우 Geode는 SPT 업홀 기법 외에 다른 탄성파 탐사도 수행 가능하므로 하나의 장비로 다양한 탐사를 수행해야 하는 지반조사 업체 입장에서는 장비 도입을 위한 추가 비용 부담을 덜 수 있다.

표 3.5.1. Geode 장비의 Specification

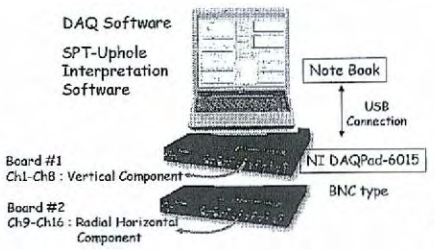
A/D Conversion	24 bit result using Crystal Semiconductor sigma-delta converters and Geometrics proprietary oversampling.
DynamicRange	144 dB (system), 110 dB (instantaneous, measured) at 2ms, 24dB
Distortion	0.0005% @ 2 ms, 1.75 to 208 Hz
Bandwidth	1.75 Hz to 20 kHz. Low corner frequency option available
Common Mode Rejection	> -100 dB at <=100 Hz, 36 dB
Crosstalk	-125 dB at 23.5 Hz, 24 dB, 2 ms
Noise Floor	0.2uV, RFI at 2 ms, 36 dB, 1.75 to 208 Hz
Stacking Trigger Accuracy	1/32 of sample interval
Maximum Input Signal	2.8 VPP
Input Impedance	20 kOhm, 0.02 uf
Preamplifier Gains	SGOS software enables selectable gain pair of either 24 or 36 dB. MGOS software selection between jumpered gain pair 12 and 24 dB, gain pair 24 and 36 dB, or 0dB.
Anti-alias Filters	-3 dB at 83% of Nyquist frequency, down 90 dB
Pre-trigger Data	Up to 4,096 Samples. Optional event detection software enables system for earthquake, vibration monitoring
Sample Interval	0.02, 0.3125, 0.0625, 0.125, 0.25, 0.5, 1.0, 2.0, 4.0, 8.0, 16.0 ms
Record Length	16,000 samples standard, 64,000 samples optional

Delay	0 to 9999 ms in 1 ms steps
DataTransmission	Uses reliable Ethernet connections and requires no custom transmission software. Interfaces directly with network capabilities of Windows 95/98/NT
AuxiliaryChannels	All Geode channels can be programmed as either AUX or DATA. Fixed data aux channels available in StrataVisor DZ
Acquisition and DisplayFilters	LowCut:OUT, 10, 15, 25, 35, 50, 70, 100, 140, 200, 280, 400 Hz, 24 or 48 dB/octave, Butterworth. Notch:50, 60, 150, 180 Hz and OUT, with the 50 dB rejection bandwidth 2% of center frequency. HighCut:OUT, 250, 500 or 1000 Hz, 24 or 48 dB/octave.
LineTesting	Real time noise monitor displays real-time output from geophones. Optional geophone pulse test helps identify bad geophones and shorted or broken cables.
Data Storage	Stores data locally on laptop hard drive for transfer to portable media . Additional tape options available
Triggering	Positive, negative or contact closure, software adjustable threshold
Data Formats	SEG-2 standard with SGOS. SEG-D and SEG-Y available
Power	Requires 12V external battery. Uses 0.65 W/channel during acquisition, sleep mode reduces power consumption by 70% while in standby
Environmental	-30 to 75 degrees C. Waterproof and submersible. Withstands a 1 m drop onto concrete on 6 sides and 8 corners

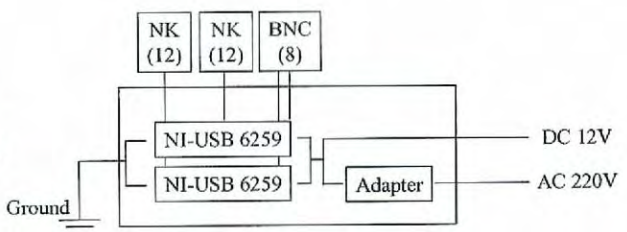
라. NI-DAQ 보드 기반 신호 획득 장비

A/D 보드 기반으로 신호 획득 장비를 제작하고 적절한 제어 프로그램 및 해석 프로그램과의 결합하는 것으로 자동화 수행 시스템 구축 실현하고자 하였다. National Instrument(NI) 사에서는 이러한 목적으로 다양한 A/D보드를 보급하고 있으며 최근에 탄성파 탐사에 적합한 고사양의 제품들이 출시되고 있다. 업홀 탐사를 위해서는 최소 16bit의 아날로그 입력 해상도를 가지며 최소 채널당 50k/s의 샘플 속도를 가진 장비가 요구된다. 그리고 SPT 업홀 탐사를 위해서 최대 12지점, 총 24채널이 요구되므로 트리거 채널까지 포함하여 25채널 이상이 가능하도록 신호 획득 장비를 구성하고자 하였다. 아직까지는 이 정도 사양을 가지는 장비가 존재하지 않으며 아날로그 필터, 동시 획득 기능 등까지의 기능을 포함하면 다채널 장비를 구축하는데 소요되는 비용이 크다. 본 과업에서는 저가형 신호 획득 장비 구성을 목표로 하고 있으므로 SPT 업홀 기법을 수행하는데 문제가 없는 한도 내에서 가장 저렴하게 신호 획득 장비를 구성하고자 하였다. 우선 양호한 신호를 획득하기 위해서 내장되는 A/D 보드는 출시된 제품 중 샘플 속도가 가장 최대인 것을 우선으로 하였다. 또한 노트북과 손쉽게 결합이 가능하고 실시간 데이터 전송

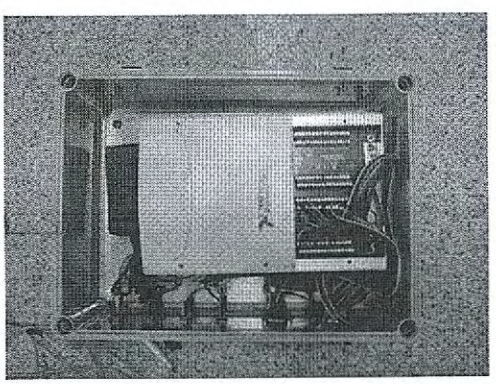
속도에 문제가 없도록 USB 연결 형태의 장비로 선택하고자 하였다. 따라서 NI사에서 보급하고 있는 여러 가지 모델 중 DAQ-6259를 선택하였으며 본 모델에 대한 상세 사양을 표 3.5.2에 정리하였다. 이 모델을 사용할 경우 아날로그 Differential 입력으로 16채널까지 가능하며 이때 각 채널당 샘플 속도는 약 80k/s까지 보장된다. 본 업홀 기법에서는 최대 25개 채널이 소요되므로 DAQ-6259 모델 2개를 이용하여 총 32채널의 아날로그 입력이 가능한 신호 획득 장비를 제작하고자 하였다. 12채널용 NK-27-pin 커넥터 2개와 8개의 BNC 커넥터의 접속이 가능한 박스 형태로 본체를 제작하였다. 12채널용 NK 27 pin 커넥터에 각각 12개 수평 감지기 및 수직 감지기를 연결한 Spread Cable을 연결하게 되며 BNC 커넥터 중 하나를 트리거 채널로 이용하게 된다. 그림 3.5.4에 제작된 NI-DAQ 기반 신호 획득 장비의 사진을 삽입하였다. 현재 전원 공급 부분에 대한 작업 중이며 현장에서 장비 사용이 용이하도록 DC 및 AC 전원 모두 사용 가능하도록 구성하고 있다(그림 3.5.4a).



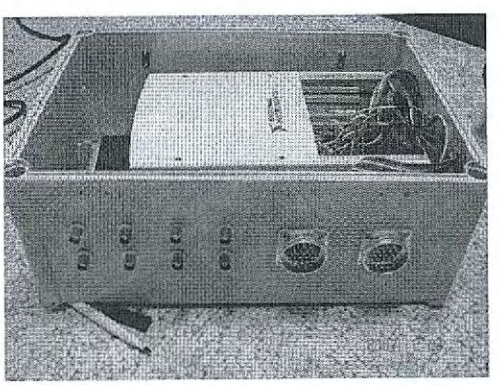
(a) NI DAQPad를 이용한 신호획득장비



(b)장비 구성도



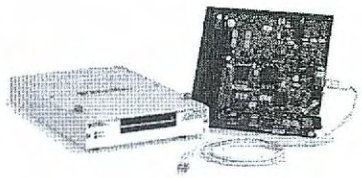
(c) 장비 내부



(d)NK 27 pin 및 BNC 커넥터 부분

그림 3.5.4. NI-USB DAQ 보드를 이용한 다기능 노트북 기반 신호 획득 장비

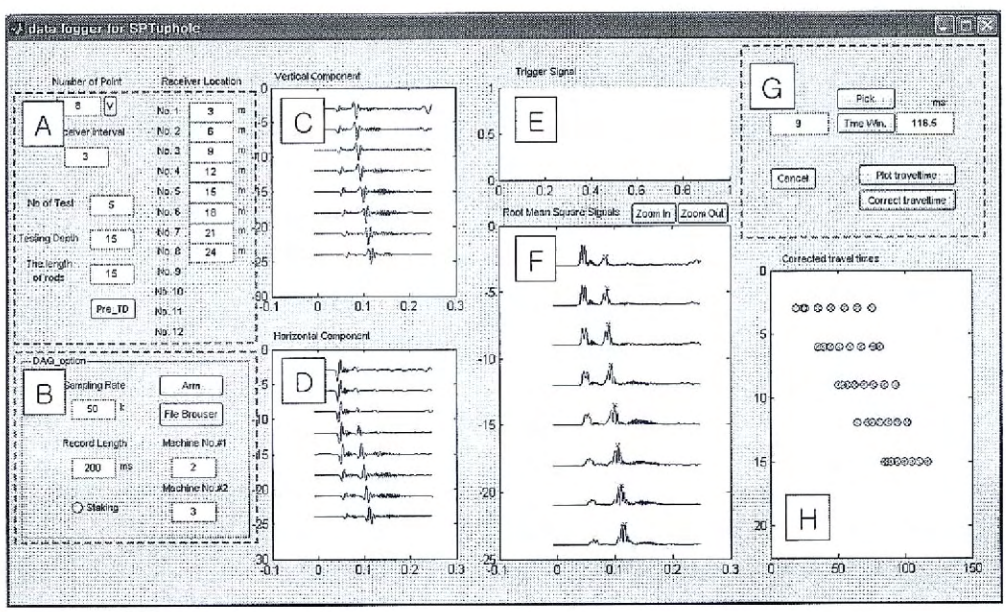
표 3.5.2. NI 사 USB-6259 모델의 세부사양

일반	
NI USB-6259 고속 USB M 시리즈 다기능 DAQ	
버스 종류	USB
운영체제 지원	Windows
측정 타입	구적 엔코더
제품군	M 시리즈
트리거링	아날로그, 디지털
아날로그 입력	
채널 수	32 SE/16 DI
샘플 속도	1.25 MS/s
해상도	16 비트
동시 샘플링	아니오
최대 범위	-10V ~ 10V
온보드 메모리	4095 샘플
아날로그 출력	
채널 수	4
업데이트 속도	2.86 MS/s
해상도	16 비트
최대 범위	-10V ~10V
디지털 I/O	
채널 수	48 DIO
타이밍	하드웨어 타임(10 MHz 이하)
논리 레벨	TTL
최대 입력 범위	0V ~ 5V
최대 출력 범위	0V ~ 5V
입력 전류 흐름	소싱, 싱킹
프로그램 가능한 입력 필터	네
출력 전류 흐름	소싱, 싱킹
전류 드라이브 (채널/총)	24mA/1A
워치독 타이머	아니오
프로그램 가능한 파워업 상태	네
핸드쉐이킹 I/O	아니오
패턴 I/O	네
물리적 스펙	
길이	18.8 cm, 26.67 cm
폭	17.09 cm
높이	4.45 cm
I/O 커넥터	68 핀 수 SCSI-II 타입, 스크류 터미널

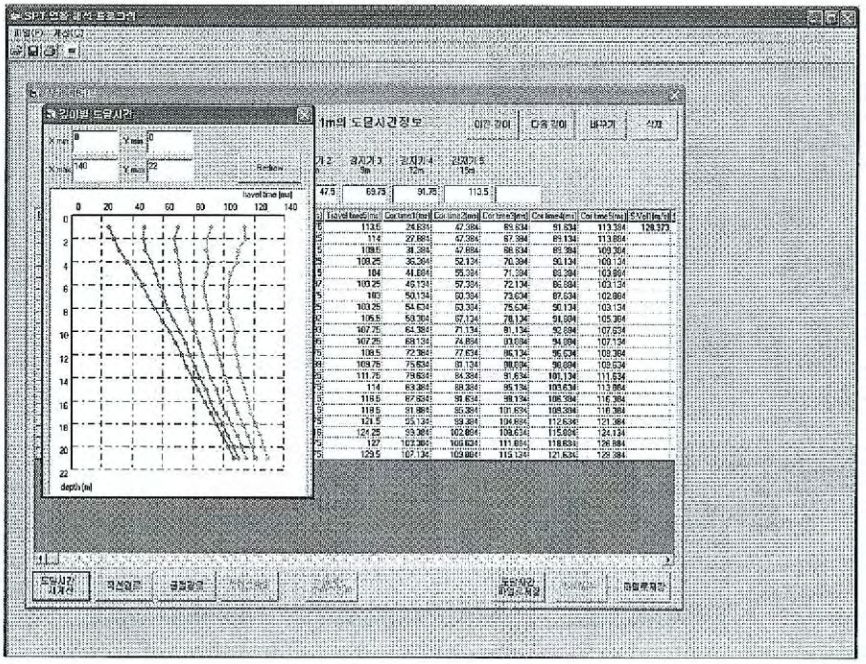
마. SPT 업홀 현장 신호 획득 및 해석 프로그램

그림 3.5.5와 같이 제작된 신호 획득 및 관리 프로그램과 결과 도출 프로그램을 이용하여 현장에서 최종 결과를 도출하여 지반 상태를 실험과 동시에 바로 평가할 수 있다. 신호 획득 및 관리 프로그램에는 신호 획득에서부터 도달시간 정보를 자동적으로 도출하도록 구성되어 있다. 이와 같은 SPT-업홀 기법 수행 시스템의 지속적인 개선을 통해 현장에서 탄성파 탐사 전문가가 상주할 필요 없이 지반조사 실무자들에 의해 시추와 동시에 현장 시험을 간단하게 수행하고 결과를 도출할 수 있도록 할 수 있을 것이며 이는 곧 SPT-업홀 기법이 현업에 널리 사용될 수 있도록 하는 적극적인 해결책이 된다.

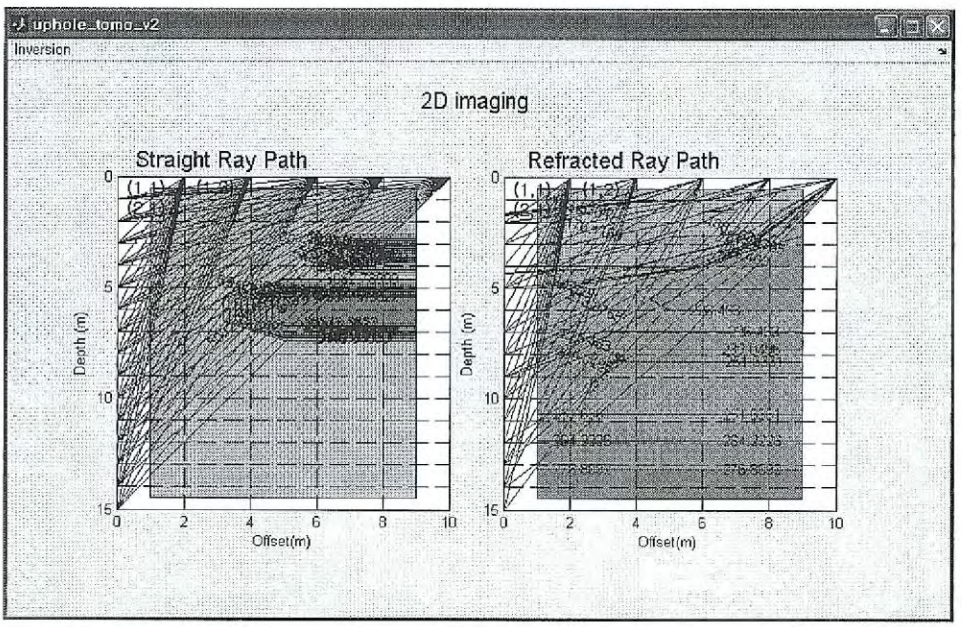
앞서 설명한 바와 같이 NI-DAQ 보드 기반 신호 획득 장비는 MATLAB 및 LABVIEW 프로그래밍을 통해 제어할 수 있다. MATLAB으로 제어하기 위해서는 Data Acquisition Toolbox 2.9 이상이 요구되며 이러한 제어 프로그램을 사용자 편의에 맞게 구성할 경우 매우 효율적인 현장 시험 수행이 가능하다. 본 장비를 위해서 MATLAB으로 제어 프로그램을 구성하였으며 제 3절에서 소개한 바와 같다.



(a) 신호 획득 및 관리 프로그램 Field_UH_v1.1



(b) 1차원 결과 도출 프로그램 Anal D_UH_v1.1



(c) Ana2D_UH_v1.1 주화면 및 2차원 해석 일례

그림 3.5.5 SPT 업홀 신호획득 및 해석 프로그램

최종적으로 표 3.5.3에 본 과업을 통해 구축된 SPT 업홀 수행 시스템을 요약하여 정리하였다.

표 3.5.3. 구축된 SPT 업홀 수행 시스템 개요

장비 종류	Model 명	내용	
가진원	SPT 시 타격에너지	시동 끄고 수동 타격을 권장 정확한 가진 심도를 기입 (타격시 관입량까지 고려)	
	트리거 장치	에너지 효율 측정 장비(가속도계 혹은 Strain Guage) 압전 소자 트리거	
감지기	감지기 본체	3방향 지표면 감지기	
	Spread Cable	Geopace cable with 12 wire wrap takeouts	
신호 획득 장비	Notebook based DAQ, NI USB-6259 (자체 제작)	아날로그 입력해상도	16bit
		최대 신호 획득 간격	0.0125ms
		자동 저장	자체 소프트웨어 Field_UH_v1.1
		로우패스 필터 (디지털)	
		중첩 기능	
		도달시간 정보 도출 (자동 극대점 도출 후 수동 수정)	
	탄성파 탐사 장비 Notebook based DAQ, Geode (해외 구입)	아날로그 입력해상도	24bit
		최대 신호 획득 간격	0.02ms
		자동 저장	가능
		로우패스 필터 (아날로그)	
		중첩 기능	
		동시도시 기능 도달시간 정보 도출 (자동 극대점 도출 후 수동 수정)	데이터 ASCII로 변환 뒤 자체 소프트웨어 Field_UH_v1.1이용
결과 해석 프로그램	1차원 Ana1D_UH_v1.1	도달시간 정보 수정 기능 감지기간 DT법으로 각 감지기별 1차원 속도 주상도 도출	
	2차원 Ana2D_UH_v1.1	발사법을 기초로 한 파선 추적 한 셀씩 차례로 도출	

2. HWAW 기법

본 과업에서 최종적으로 제안된 HWAW 기법의 현장 상용화 시스템은 그림 3.5.6과 같이 구축하였다. HWAW 기법을 위해서 필요한 장비는 크게 가진원 관련 장비, 감지기 관련 장비, 신호 획득 관련 장비, 운영 및 해석 프로그램으로 구성된다. 현장시험 장비 중 가진원은 2절에서 언급한 바와 같이 슬레지해머를 기본 가진원으로 설정하여 시험을 수행하며 연약지반같이 특수지반에서는 별도의 중추 가진원을 권장한다. HWAW 기법에서는 시험 수행시 감지기의 레벨 트리거를 이용하므로 별도의 트리거 장치가 필요하지 않다. 본 기법에서는 기본적으로 2개의 수직성분 가속도계를 이용하여 전단파 속도를 도출하나 효율적인 2차원 영상화를 위한 작업을 위해 4개의 감지기를 이용하는 것을 제안하였다. 현재 HWAW 해석을 위한 소프트웨어에서는 2개의 감지기 신호를 바탕으로 한 분산곡선 도출을 기본으로 구성되었으며, 추후 4개의 감지기 신호를 동시에 획득하여 분산하는 프로그램으로 업그레이드할 예정이다. 본 연구에서 제안된 감지기는 집게 형식으로 연결하도록 되어 있으며 Spread Cable을 이용하여 신호 획득 장비까지 연결할 수 있게 된다. 이러한 방식은 물리탐사 분야에서는 탄성파 탐사 수행 시 널리 적용되는 방식으로 감지기 설치 및 철수 등의 현장 장비 운용이 매우 용이하다. 또한 기존에 많이 사용되던 BNC connector 역시 사용할 수 있도록 장비를 개선하였다. 본 과업에서 시스템 구축은 효율적인 가진원 및 감지기 시스템을 구축하는 것뿐만 아니라 현장에서 신호 획득 및 관리를 효율적으로 수행하고 동시에 해석을 수행, 최종 결과를 바로 획득할 수 있는 시스템을 구축하는 것이다. 이를 위해서 본 연구에서는 신호 획득 시스템을 노트북 기반의 신호 획득 장비(Notebook based data acquisition system)로 구성하는 것을 우선으로 하였다. 다음에 각 시스템에 대해서 기술하였다.

가. 감지기 부분

감지기 부분은 속도계와 속도계를 신호 획득 장비에 연결하는 Spread Cable로 구성되어 있다. 그림 3.5.7에 각 부분의 장비 사진을 도시하였다. 본 기법에서는 SPT업홀과는 달리 수직 성분을 획득하여 분석하게 되어 있다. 따라서 경제적인 4.5Hz 속도계 4개를 이용하여 시험을 수행하는 것으로 구성하였다. Spread Cable은 12채널짜리로서 각 Cable은 동일한 유닛을 차례로 연결하여 신호 획득 및 관리 프로그램 운용이 용이하도록 한다. HWAW 기법에 적합한 4개를 이용하는 종연결

감지기를 사용하는 방안을 불론 기존의 표면파 기법(MASW) 및 SPT 업홀에도 동시에 사용할 수 있는 12채널 cable을 사용하는 것을 제안하였다. 또한 감지기의 위치는 그림 3.5.6에서와 같이 가진원과 첫 번째 감지기를 4m~6m, 감지기들 사이 간격은 2m 또는 3m로 제안하였다.

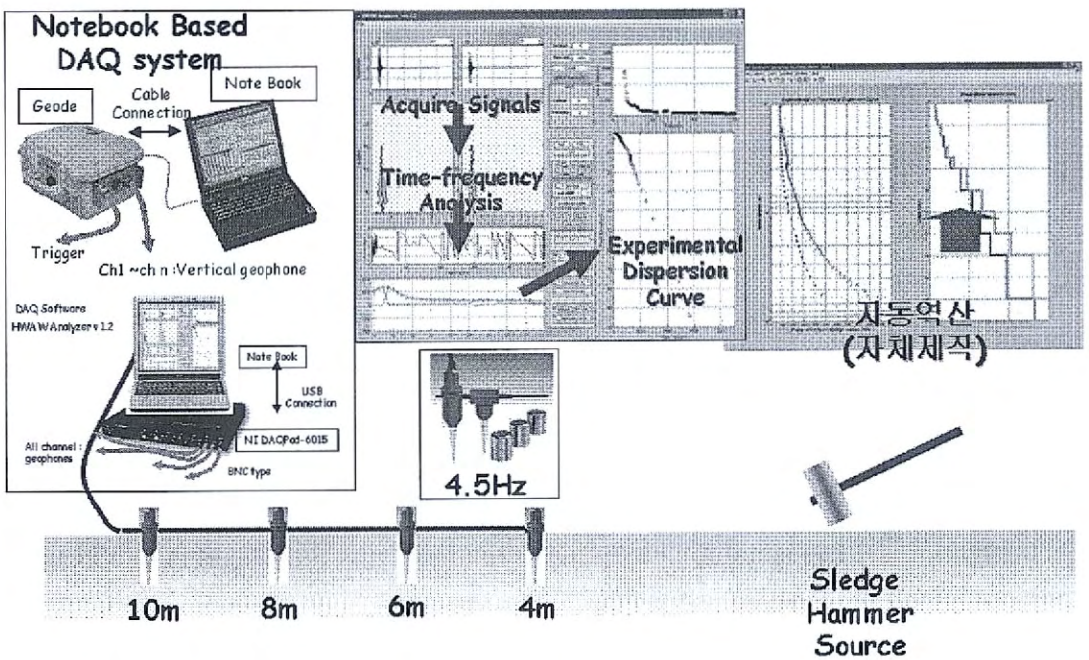


그림 3.5.6 HWAW 기법의 최종상용화 시스템

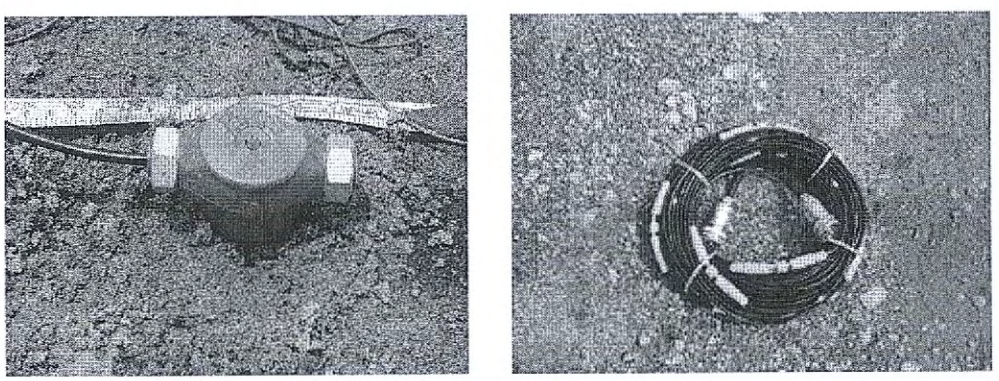


그림 3.5.7. 수직성분 4.5Hz 지표면 감지기 및 Spread Cable

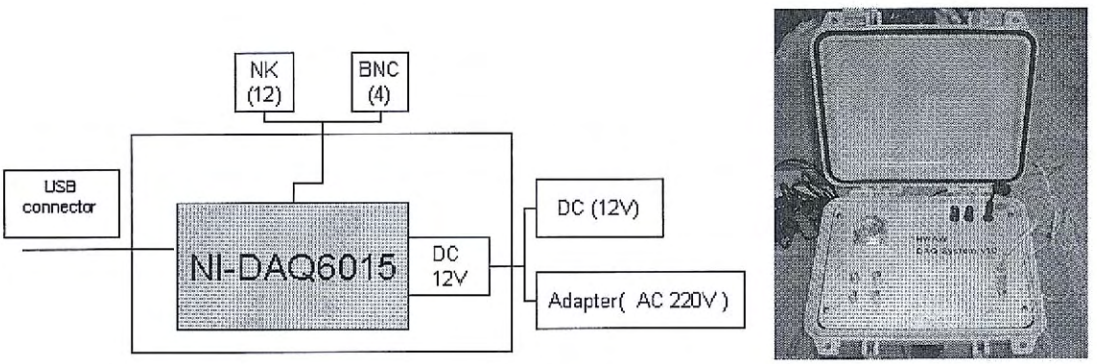
나. 탄성파 전용 장비 기반 신호 획득 장비

HWAW 기법에서도 SPT 업홀 기법에서 제안된 탄성파 전용 장비인 Geode를 이용하여 노트북 기반의 신호 획득 시스템을 구축하였다(그림 3.5.3 및 표 3.5.1). Geode는 앞서 설명한 바와 같이 현존하는 탄성파 기록기의 장점을 조합한 신제품으로 확장성이 뛰어나며 반사법, 굴절법, 다운홀, VSP 및 토모그래피까지 모든 탄성파 탐사를 수행할 수 있는 장비이다. 따라서 지반 조사 업체에서 Geode를 구매했을 경우 HWAW 기법 이외에도 SPT 업홀 기법을 비롯한 다른 탄성파 탐사도 수행 가능하므로 하나의 장비로 다양한 탐사를 수행해야 하는 지반조사 업체 입장에서는 HWAW 기법도입을 위한 추가 비용 부담을 덜 수 있다. SPT업홀에서와 마찬가지로 Geode 시스템의 소프트웨어는 신호를 획득하는 부문이 잘 되어 있으나 표면파 해석을 위한 후처리 과정은 포함되지 않았다. 획득한 신호는 SEG2 포맷이므로 ASCII 포맷으로 변환한 뒤에 본 과업에서 제작한 해석 프로그램을 이용할 수 있도록 하였다.

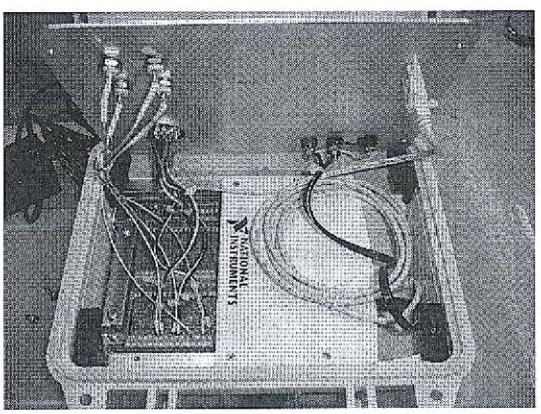
다. NI-DAQ 보드 기반 신호 획득 장비

A/D 보드 기반으로 신호 획득 장비를 제작하고 적절한 제어 프로그램 및 해석 프로그램과의 결합하는 것으로 자동화 수행 시스템 구축 실현하고자 하였다. National Instrument(NI) 사에서는 이러한 목적으로 다양한 A/D보드를 보급하고 있으며 최근에 탄성파 탐사에 적합한 고사양의 제품들 뿐만 아니라 보급형의 필수적인 기능만을 가진 제품들도 출시되고 있다. HWAW 기법 수행을 위해서는 SPT 업홀 및 기타 시추공탄성파 탐사에 필요한 고해상도와 샘플속도가 요구되지 않는다. 또한 4~6채널 이하의 입력채널을 가지며 노트북과 손쉽게 결합이 가능하고 실시간 데이터 전송 속도에 문제가 없도록, USB 연결 형태의 장비로 선택하고자 하였다. 따라서 저가형 신호획득 장비를 이용한 HWAW 기법을 수행하고자 할 때 NI사에서 보급하고 있는 여러 가지 모델 중 NI DAQPad-6015를 선택하였으며 본 모델에 대한 상세 사양을 표 3.5.4에 정리하였다. 이 모델을 사용할 경우 아날로그 Differential 입력으로 최대 8채널까지 가능하며 이때 각 채널당 샘플 속도는 약 25ks/s까지 보장된다. 본 HWAW 기법에서는 NI DAQPad-6259 모델 1개를 이용하여 총 4채널의 아날로그 입력이 가능한 신호 획득 장비를 제작하였다. 기존의 BNC 커넥터 및 spread cable의 Cannon-nk-27 pin connector를 동시에 사용할 수 있도록 박스 형태로 제작하였다(그림 3.5.8). 그림에 나타난 바와 같이 1개의 12채

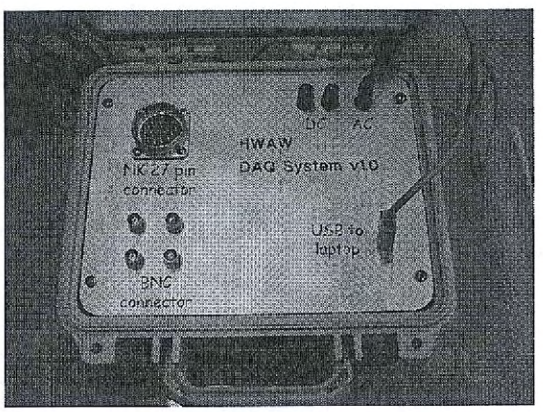
닐용 Cannon NK 27 Pin 커넥터 와 4개의 BNC 커넥터의 접속이 가능하다. 전원은 현장에서 장비 사용이 용이하도록 DC 및 AC 전원 모두 사용 가능하도록 구성하고 있다(그림 3.5.8(c)). SPT 업홀과 동시에 제품을 구매하거나 시험을 수행할 경우 SPT 업홀장비를 그대로 사용하여도 무방하다.



(a) 장비 구성도 및 전체 모습



(b) 장비 내부



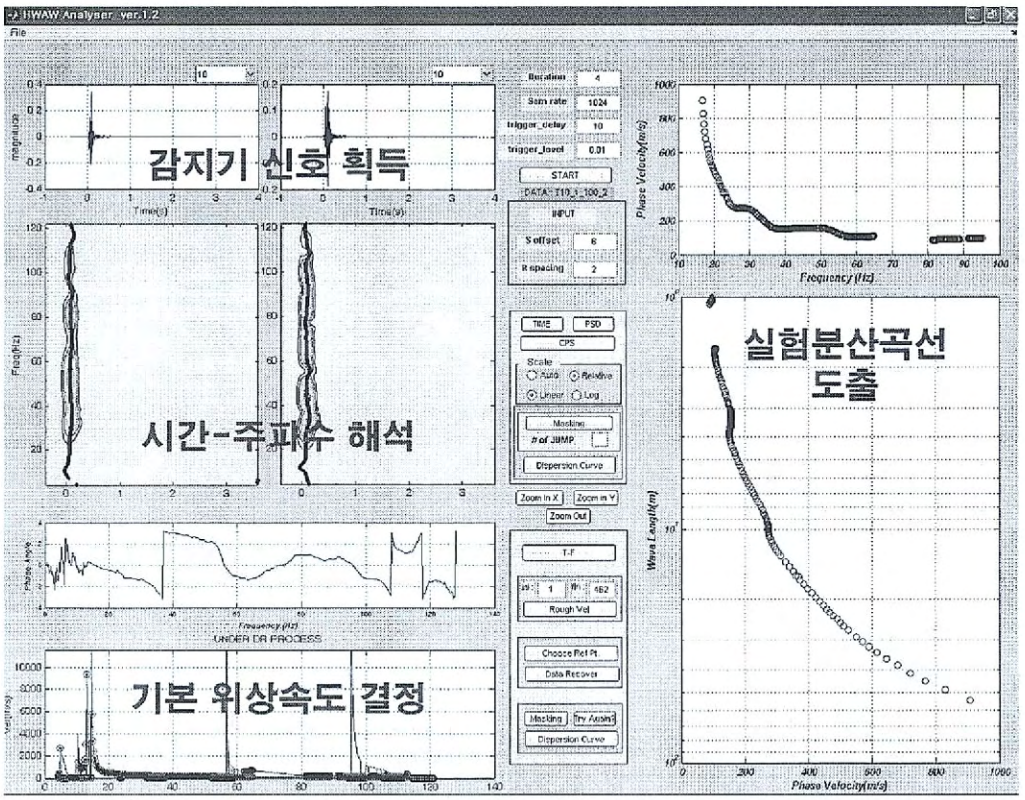
(c) 커넥터 부분

그림 3.5.8. NI-DAQPad 를 이용한 다기능 노트북 기반 신호 획득 장비

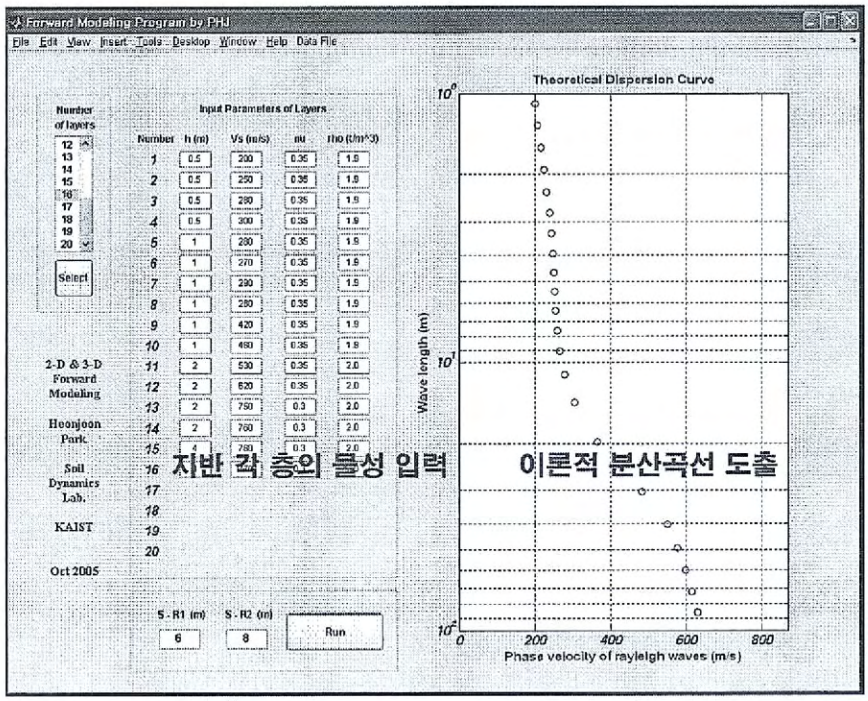
라. 현장 신호 획득 및 해석 프로그램

그림 3.5.9와 같이 제작된 신호 획득 및 해석 프로그램을 이용하여 현장에서 최종 결과를 도출하여 지반의 상태를 동시에 평가할 수 있다. 신호 획득 및 해석 프로그램은 신호 획득에서부터 시간-주파수 해석을 통해 분산곡선을 자동적으로 도출하도록 구성되어있다. 이와 같은 HWAW기법의 현장 시험 시스템은 현장시험을 간단하게 수행하고 국부적으로 상세한 결과를 바로 확인할 수 있고, 해석과정에서 전문

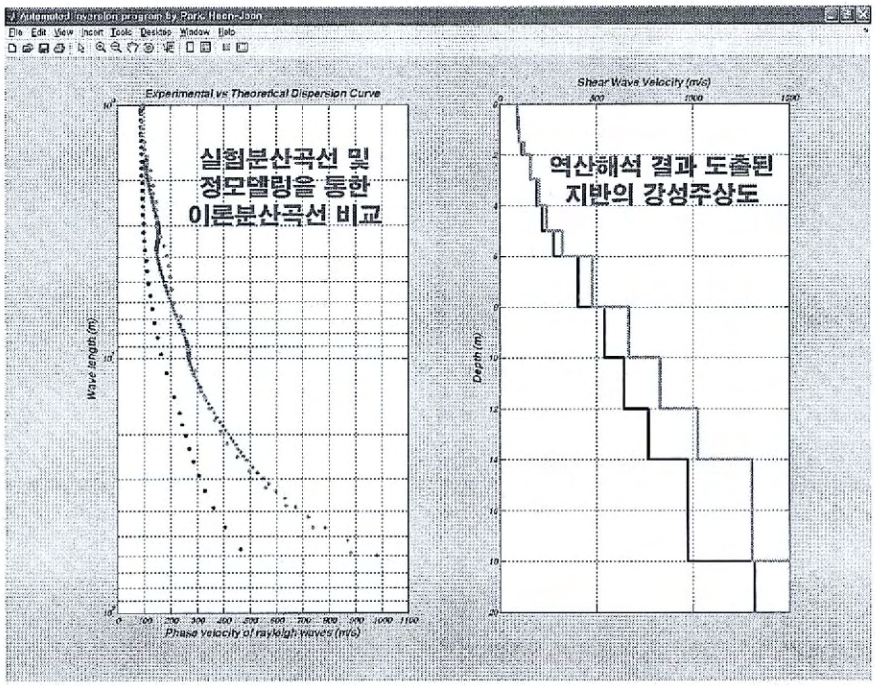
가의 경험 없이 자동으로 도출 할 수 있어 HWAW 기법이 현업에서 널리 이용될 수 있을 것이다. 앞서 설명한 바와 같이 NI-DAQ 보드 기반 신호 획득 장비는 MATLAB 프로그래밍을 통해 제어할 수 있다. MATLAB으로 제어하기 위해서는 Data Acquisition Toolbox 2.9 이상이 요구되며 이러한 제어 프로그램을 사용자 편의에 맞게 구성할 경우 매우 효율적인 현장 시험 수행이 가능하다. 본 장비를 위해서 MATLAB으로 제어 프로그램 및 해석 프로그램을 구성하였으며 이는 제 3절에서 소개한 바와 같다. 최종적으로 표 3.5.5에 본 과업을 통해 구축된 HWAW 시스템을 요약하여 정리하였다.



(a) 현장 신호 획득 및 분산곡선 도출 프로그램



(b) 역산을 위한 정모델링 프로그램



(c) 자동역산 프로그램

그림 3.5.9 HWAW기법의 현장 신호 획득 및 해석 프로그램

표 3.5.4 NI 사 DAQPad-6015 모델의 세부사양

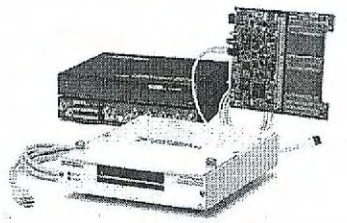
일반	
NI DAQPad-6015 고속 USB 시리즈 다기능 DAQ	
버스 종류	USB
운영체제 지원	Windows
측정 타입	구적 엔코더
제품군	B 시리즈
트리거링	아날로그, 디지털
아날로그 입력	
채널 수	16 SE/8 DI
샘플 속도	200 kS/s
해상도	16 비트
동시 샘플링	아니오
최대 범위	-10V ~ 10V
온보드 메모리	4096 샘플
아날로그 출력	
채널 수	4
업데이트 속도	2.86 MS/s
해상도	16 비트
최대 범위	-10V ~10V
디지털 I/O	
채널 수	2
타이밍	정적, 하드웨어 타임(10 MHz 이하)
논리 레벨	TTL
최대 입력 범위	0V ~ 5V
최대 출력 범위	0V ~ 5V
입력 전류 흐름	소싱, 싱킹
프로그램 가능한 입력 필터	아니오
출력 전류 흐름	소싱, 싱킹
전류 드라이브 (채널/총)	24 mA/192 mA
워치독 타이머	아니오
프로그램 가능한 파워업 상태	아니오
핸드쉐이킹 I/O	아니오
패턴 I/O	아니오
물리적 스펙	
길이	17.6 cm, 30.7 cm
폭	14.85 cm, 25.4 cm
높이	4.3 cm
I/O 커넥터	68 핀수 SCSI-II, BNC, 스크류 터미널

표 3.5.5. 구축된 HWAW기법 수행 시스템 개요

<table>
<tr><th>장비 종류</th><th>Model 명</th><th colspan="2">내용</th></tr>
<tr><td rowspan="2">가진원</td><td>일반적인 지반</td><td colspan="2">슬레지해머를 이용한 가진</td></tr>
<tr><td>연약지반</td><td colspan="2">중추 가진원</td></tr>
<tr><td rowspan="2">감지기</td><td>감지기</td><td colspan="2">4.5Hz 수직방향 속도계
모델명 : GS-11D (GeoSpace, LP)</td></tr>
<tr><td>연결방식</td><td colspan="2">Geopace cable with 12 wire wrap takeouts
혹은 BNC 커넥터</td></tr>
<tr><td rowspan="8">신호
획득
장비</td><td rowspan="5">Notebook based DAQ, NI DAQPad-6015 (자체 제작)</td><td>아날로그 입력해상도</td><td>16bit</td></tr>
<tr><td>최대 신호 획득 간격</td><td>0.02ms</td></tr>
<tr><td>자동 저장</td><td rowspan="3">신호획득 및 처리 프로그램
HWAW Analyzer</td></tr>
<tr><td>Lowpass 필터 (디지털)</td></tr>
<tr><td>신호획득 후 분산곡선 도출</td></tr>
<tr><td rowspan="3">탄성파 탐사 장비
Notebook based DAQ, Geode (해외 구입)</td><td>아날로그 입력해상도</td><td>24bit</td></tr>
<tr><td>최대 신호 획득 간격</td><td>0.02ms</td></tr>
<tr><td>자동 저장</td><td rowspan="2">가능</td></tr>
<tr><td>Lowpass 필터 (아날로그)</td></tr>
<tr><td>신호획득 후 분산곡선 도출</td><td>데이터 ASCII로 변환 뒤 결과 해석프로그램 이용</td></tr>
<tr><td rowspan="2">결과해석 프로그램</td><td>HWAW Analyzer</td><td colspan="2">현장에서 신호 획득 및 분산곡선의 도출</td></tr>
<tr><td>HWAW 자동역산 프로그램</td><td colspan="2">분산곡선을 이용한 지반의 전단파 속도 도출</td></tr>
</table>

3. 각 기법 매뉴얼

가. SPT 업홀

SPT 업홀 현장 시험 수행 순서 및 그와 동반된 프로그램 구동 방법은 다음과 같다. 본 매뉴얼은 자체 제작 장비(DAQPad 기반)로 현장 실험을 할 경우를 중심으로 기술하였다.

1. 시험 측선을 설정한다. 시추 지점으로부터 3방향 지표면 감지기를 측선에 대해서 일정한 간격으로 설치한다. 감지기 간격은 최대 가용 감지기 개수 및 얻고자 하는 영역 등을 고려하여 결정하며 일반적으로 2m-3m 간격으로 한다. 최대 가능한 측점 수는 12지점이며 즉, 24개의 감지기를 사용할 수 있다.

2. 하나의 Spread Cable에 3방향 성분 중 수직방향 성분을 차례로 연결한다. 다른 하나의 Spread Cable에 수평방향 성분을 차례로 연결한다. 수평방향 성분은 측선 방향과 감지기 감지 방향이 동일한 즉 radial horizontal unit을 말한다.

3. 감지기들을 연결한 2개의 Spread Cable을 신호 획득 장비에 연결한다. 자체 제작 장비는 27pin NK 커넥터를 바로 연결하도록 되어 있다. 만약 Spread Cable 커넥터가 24채널용 61pin Bendix 케넥터면 NK 커넥터로 변환시키는 컨버터 unit을 이용해야 한다. 사용할 트리거 유닛을 신호 획득 장비에 연결한다. (Geode 시스템일 경우 Y-spread cable을 이용하여 12채널짜리 Spread Cable 2개를 하나의 61pin Bendix 케넥터로 모아 Geode 본체와 연결)

4. 트리거 신호를 BNC 유닛 중 장비 #1의 첫 번째 포트(No. 13)에 연결한다 (Geode의 경우에는 따로 배정된 Trigger 포트에 트리거 라인을 연결)

5. 신호 획득 장비와 노트북을 연결한다. 자체 제작 장비 본체에 연결된 라인을 노트북의 USB 포트로 연결한다(Geode의 경우에는 Geode 본체와 노트북을 넷웍 케이블로 연결)

6. 자제 제작 신호 획득 장비 전원을 켠 뒤 매트랩을 실행시킨다. 실험 데이터가 저장될 폴더를 새로 만든 뒤 Field_UH_v1.1을 복사(m파일과 fig파일 모두)하고 실행시킨다. (그림 3.5.10) 본 프로그램을 실행시키기 위해서는 매트랩 main program과 data acquisiton toolbox version 2.9 이상이 필요하다(Geode의 경우 Geode 매뉴얼을 참고하여 신호를 획득함).

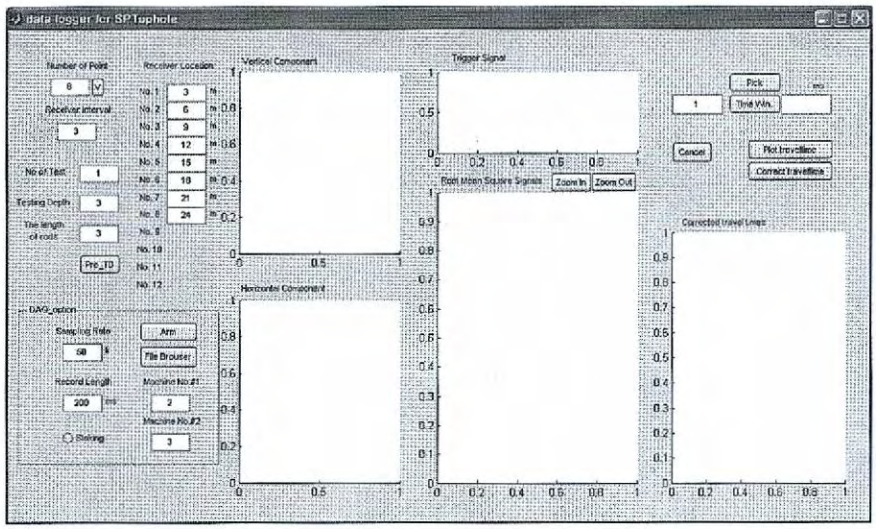


그림 3.5.10 Field_UH_v1.1 프로그램 초기 화면

6. 감지기 개수 및 감지기 간격을 기입하여 감지기 위치를 산출한다. 만약 놓고자 하는 감지기 위치에 이상 물체가 있어 약간의 이동이 있어 감지기 간격이 일정치 않을 경우 정확한 감지기 위치는 수동으로 수정하여 기입한다. 기록할 데이터의 데이터 획득 간격 및 총 기록 시간을 설정해 준다. 데이터 획득 간격은 최대값인 50k를 추천하며 총 기록 시간은 최종 시험 심도 및 지반 속도 등을 고려하여 설정한다.

7. 시험 깊이까지 시추를 수행한 뒤 SPT를 준비한다. 이 때 샘플러 하단의 정확한 심도를 기록하는 것이 매우 중요하다. 그리고 다음 시험에서와의 Rod 길이 차이를 알기 위해서 총 Rod 길이도 기록한다. Rod 길이의 차이는 타격 에너지가 지중의 샘플러 하단까지 도달하는 시간차를 측정하기 위함이다.

8. 엔빌 밑에 트리거 장치를 설치한다. 트리거 장치는 에너지 효율 측정 장비를 이용하거나 본 과업에서 제안한 간단한 압전 소자 방식을 사용할 수 있다. 시동을 끈 상태로 해머 타격이 가능할 경우 시동을 끄고 타격하는 것을 권장한다.

9. 시험 깊이, 총 로드 길이 등을 각 박스에 기입하고 Arm 버튼을 눌러 타격대기 한다. 타격 대기 시간은 10초이다.

10. 해머 타격을 수행한다. 이 때 잡음이 첨가 되지 않도록 타격자들의 발 움직임 등에 신경 쓰도록 한다.

10. 획득되어 들어온 신호에 대해서 전단파 성분의 첫 번째 극대점 시간을 산정한다. 전단파 성분의 첫 극대점은 수평과 수직 크기합 신호를 이용한다. 채널 설정을 해 준 뒤 Time Win 버튼을 누르고 각 채널 신호에 대해서 첫 극대점 후보 지점을 지정한다. 모든 채널에 대해서 동일하게 첫 극대점 후보 지점을 설정한다(그림 3.5.11).

(Geode의 경우 획득한 SEG2 포맷 파일을 SEG2toASCII 변환 프로그램을 이용하여 ASCII로 바꾼 뒤 Arm 버튼 하단에 File Brouser를 이용하여 파형 파일을 읽어드린 뒤 동일한 도달시간 정보 획득 방법을 수행한다.)

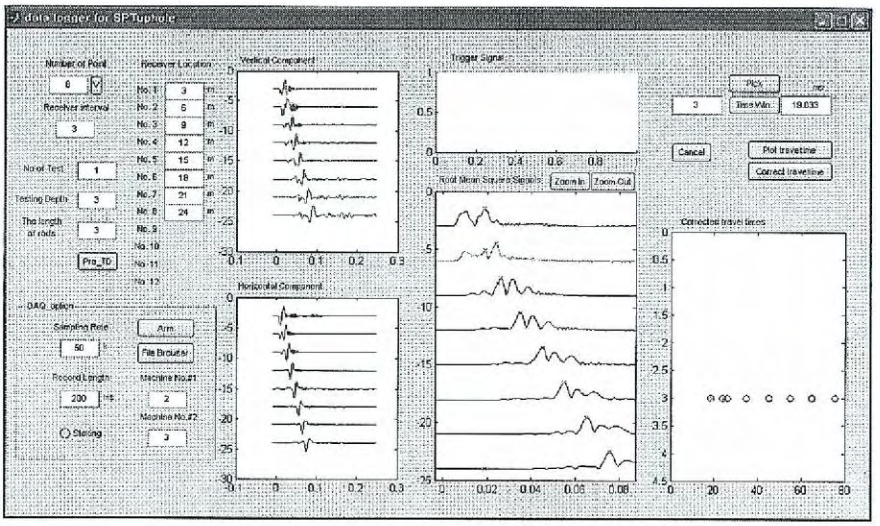


그림 3.5.11. 획득한 신호에 대해서 도달시간 정보를 도출하는 과정

11. 획득된 각 채널에서의 도달시간 정보를 비교하여 이상한 자료에 대해서는 다시 구간을 설정하여 첫 극대점을 산출하거나 pick 버튼으로 임의로 첫 극대점 지점을 지정하여 시간 정보를 결정한다. 완료된 뒤 plot traveltime 버튼으로 최종 결정된 첫 극대점 시간 정보를 확인한다.

12. Correct traveltime 버튼을 이용하여 로드 길이 차이에 의한 오차를 수정해 줌으로써 최종 극대점 시간 정보를 결정한다. 이와 동시에 1차원 및 2차원 해석을 위한 입력 파일이 자동으로 생성되게 된다. 각 위치에서 획득한 파형은 시험 횟수 및 시험 심도가 기술된 파일명으로 자동으로 저장된다.

13. 7에서 12까지의 과정을 최종 시험 심도까지 반복 수행한다(그림 3.5.12).

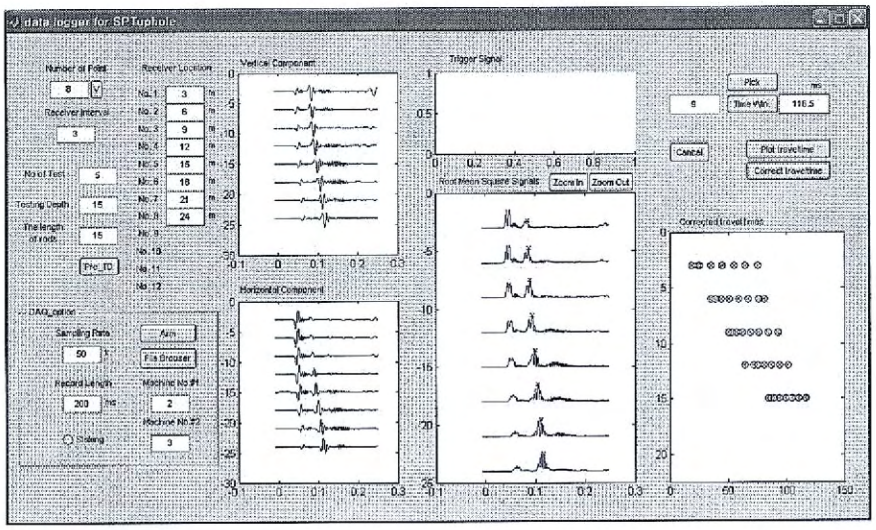


그림 3.5.12 SPT 업홀 실험을 통해 획득한 도달시간 정보

SPT 현장 시험 중간 중간에 1차원 및 2차원 해석을 빠르게 수행함으로써 획득한 도달시간 정보의 신뢰도를 점검하며 현재 지반 상태를 현장에서 확인하면서 실험을 진행할 수 있다. 해석 프로그램 이용 방법은 다음과 같다.

1. Anal1D_UH_v1.1을 실행한다(그림 3.5.13).

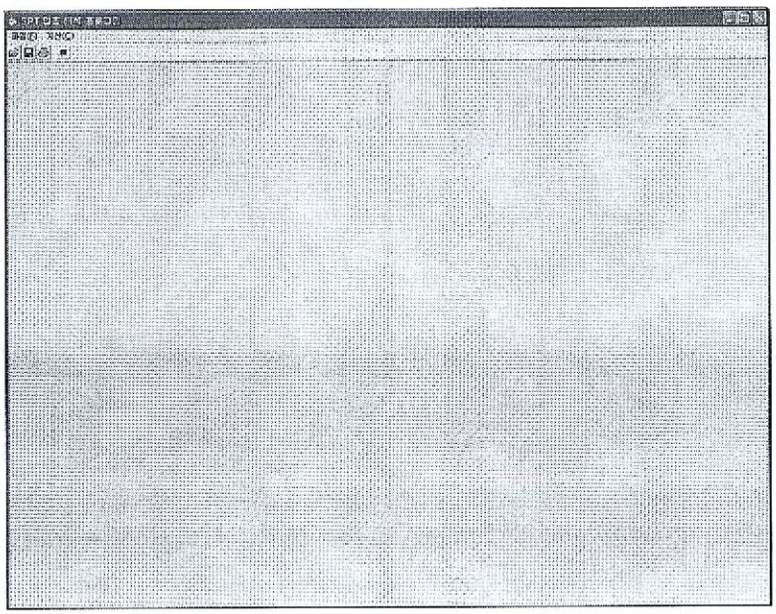


그림 3.5.13. Anal1D_UH_v1.1을 실행 초기 화면.

2. Field_UH_v1.1을 통해 생성된 입력 파일을 읽어 드린다(그림 3.5.14).

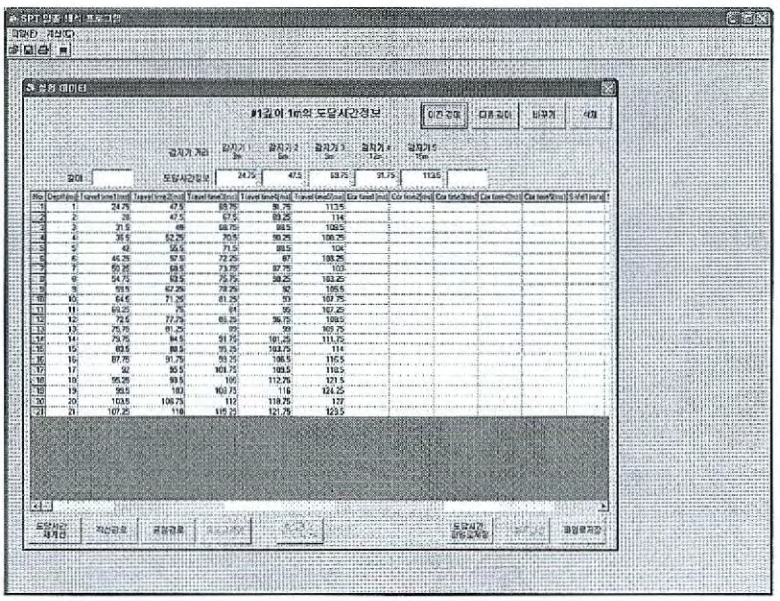


그림 3.5.14. AnalD_UH_v1.1을 실행 뒤 입력 파일을 읽어 드린 화면.

3. 창 왼쪽 아래편의 도달시간 재계산 버튼을 이용하여 깊이별 도달시간 정보를 그려본 뒤 직선 경로 해석을 통해 본 해석 초기 모델을 결정한다(그림 3.5.15, 그림 3.5.16).

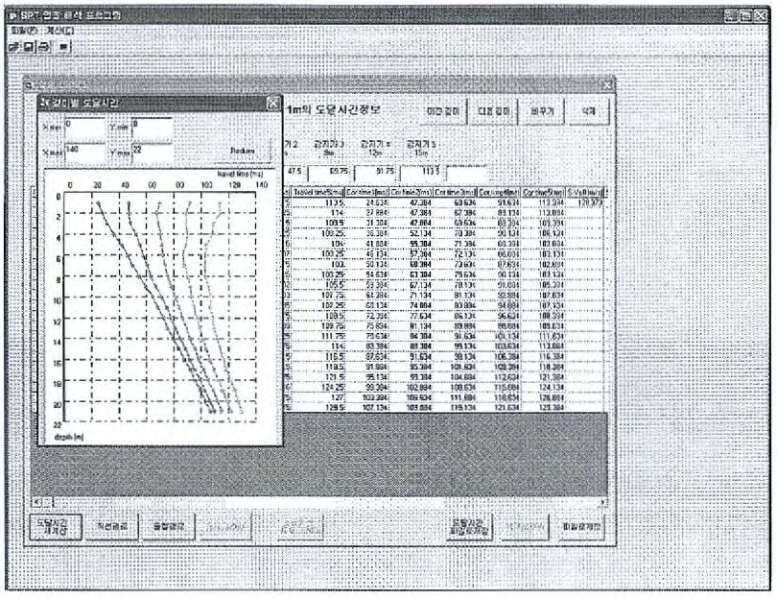


그림 3.5.15. AnalD_UH_v1.1에서 도달 시간 정보 도시 실행 화면.

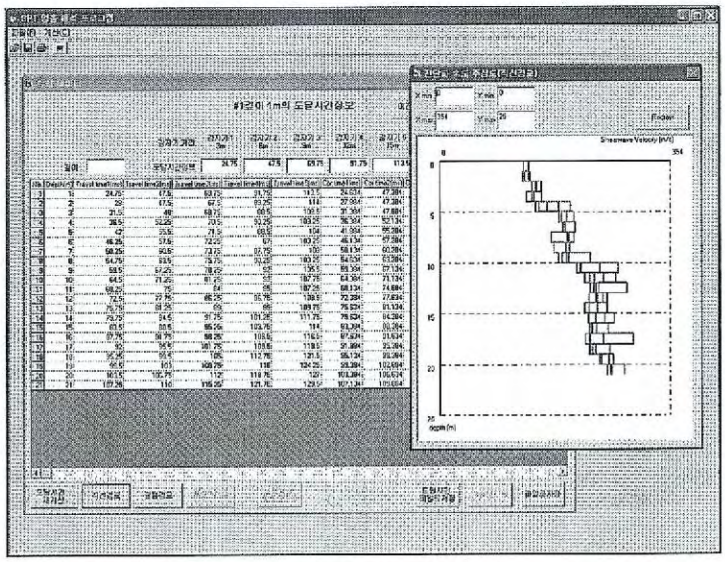


그림 3.5.16 Anal D_UH_v1.1에서 직선 경로 해석 실행 뒤 화면.

4. 굴절경로 해석을 수행한다. 결정된 전단파 속도 주상도를 참고로 하여 오류가 있는 도달시간 정보에 대해 창 상단의 도달시간 정보 수정 부분을 이용하여 수정을 한다(그림 3.5.17, 그림 3.5.14). 수정은 해당 심도의 도달시간 정보를 아예 삭제할 수도 있고 Field_UH_v1.1 프로그램에서 다시 해당 심도에서 획득한 파형을 이용하여 수정 정도를 가늠할 수도 있다.

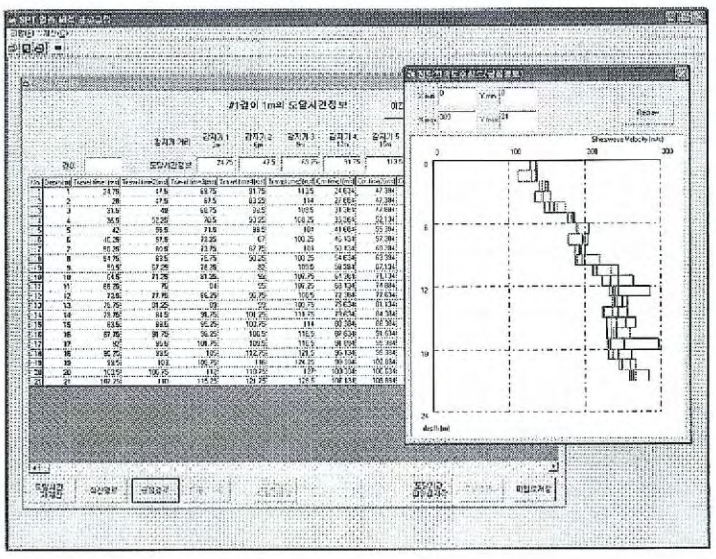


그림 3.5.17. Anal D_UH_v1.1에서 굴절 경로 해석(본 해석) 실행 뒤 화면.

5. 수정된 도달시간 정보 및 1차원 해석 결과를 파일로 저장한다(그림 3.5.18).

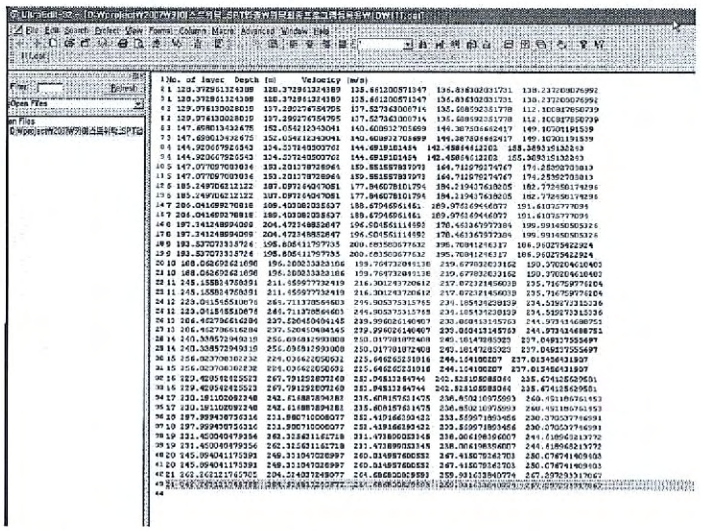


그림 3.5.18 Ana1D_UH_v1.1에서 해석 뒤 파일로 저장된 해석 결과 모습.

6. Ana2D_UH_v1.1를 실행한다(그림 3.5.19).

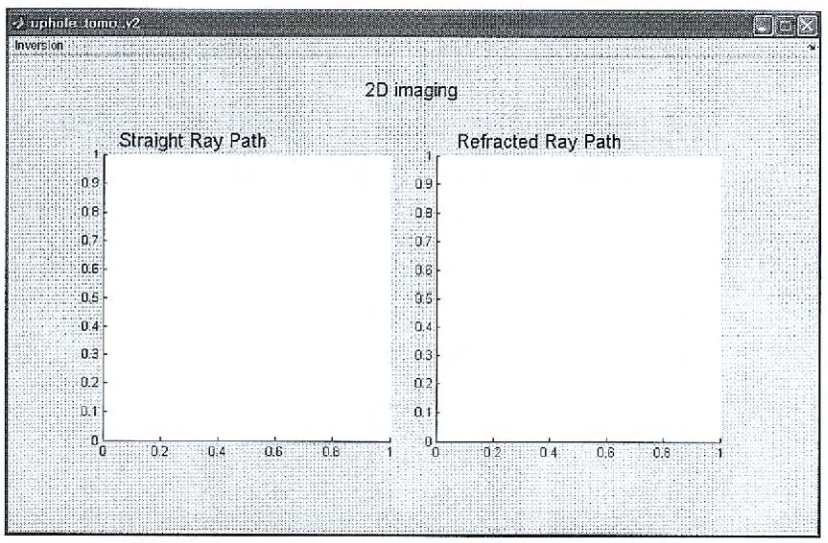


그림 3.5.19 Ana2D_UH_v1.1 실행 초기 화면

7. Field_UH_v1.1이나 Ana1D_UH_v1.1에서 생성된 2차원 해석을 위한 입력 파일을 읽어 드린다. 2차원 본 해석을 위한 초기 모델 결정을 위해 직선 경로 해석을 수행한다(그림 3.5.20).

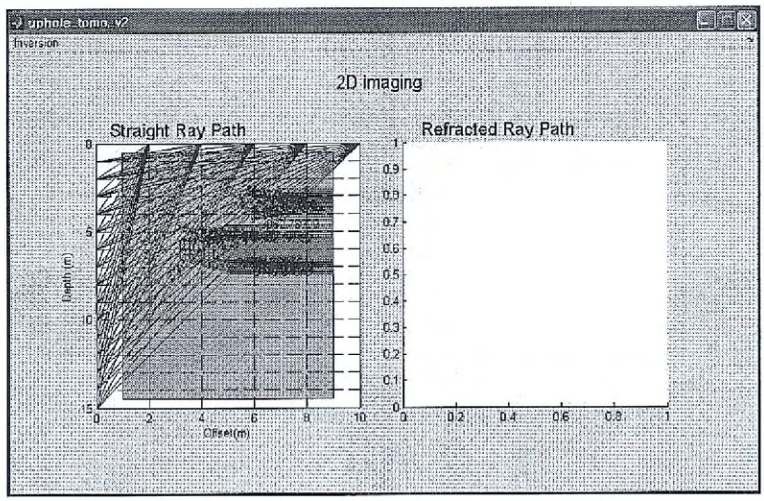


그림 3.5.20. Ana2D_UH_v1.1 직선 경로 해석 수행 뒤 결과 화면

9. 직선 경로 해석 수행 뒤 굴절 경로 해석을 수행한다(그림 3.5.21). 해석이 끝난 뒤 자동으로 생성된 결과 파일을 이용하여 다른 고급 Drawing 프로그램을 이용하여 사용자의 취향에 따라 보고서용 그림을 만들어 줄 수 있다.

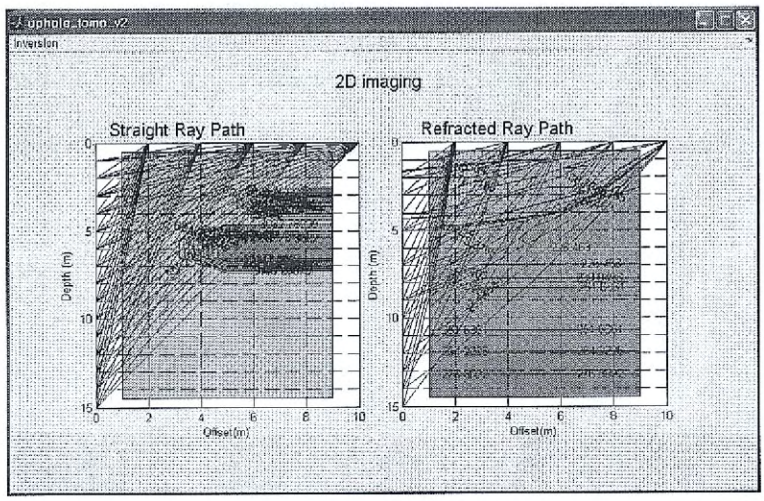


그림 3.5.21. Ana2D_UH_v1.1 굴절 경로 해석 수행 뒤 결과 화면

나. HWAW

지반의 강성구조를 구하기 위한 HWAW 기법의 현장 시험 수행 순서와 동반된 프로그램 구동 방법은 다음과 같다.

1. 조사하고자 하는 지반의 표면을 평평하게 하고 측선을 설치한다.

2. 전단파 속도 주상도를 구하고자 하는 위치에 두 개의 감지기를 2m 간격으로 고정한다.

3. Spread Cable의 접속부 #1에 감지기 #1을, Spread Cable의 접속부 #2에 감지기 #2를 연결한다.

4. 각 Spread Cable을 신호 획득 장비에 연결한다.

5. 신호 획득 장비와 노트북을 연결한 후 전원을 켠다.

6. 실험 데이터가 저장될 폴더를 지정한 뒤 HWAW_DAQ 프로그램(HWAW Analyzer 1.2)을 실행시킨다. (그림 3.5.22)

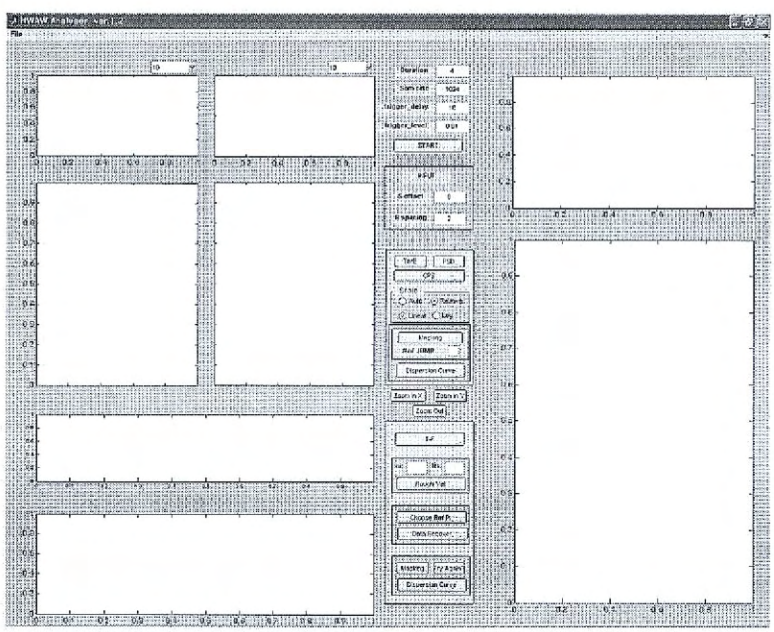


그림 3.5.22. HWAW Analyzer 1.2 프로그램 초기 화면

7. 프로그램 중앙부에서 Duration에는 입력받을 신호의 획득시간을 입력하고(기본 4초), Sampling rate를 입력한다(기본 1024).

8. 프로그램에서 START를 클릭하고, 감지기 #1에서 6~10m 떨어진 지점에서 슬레지 해머를 이용하여 탄성파를 발현시킨다. 이와 동시에 다음 그림 3.5.23과 같이 두 감지기에서의 신호가 올바르게 획득되는지 확인한다. 이 때, Duration 설정 시간 동안에는 가능한 주변 노이즈가 획득되지 않도록 주의한다.

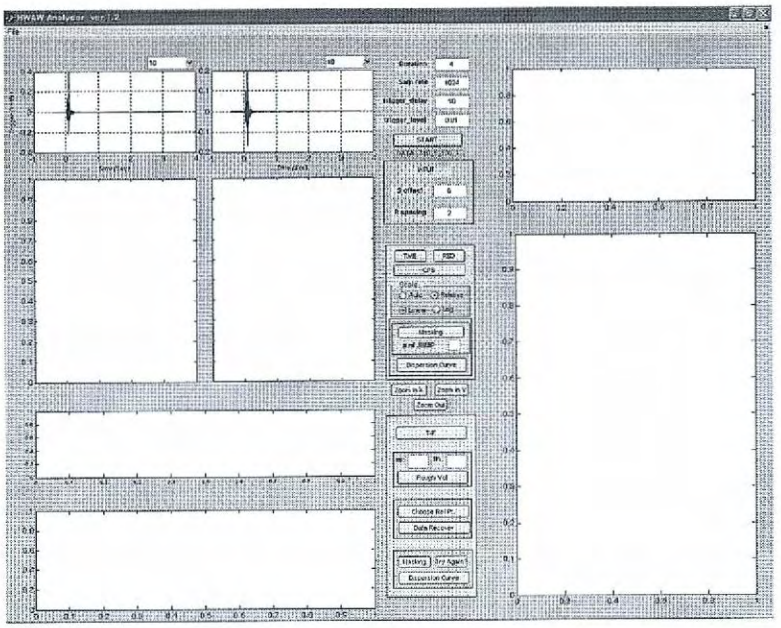


그림 3.5.23. 두 개의 감지기에서의 신호 획득

9. 각 신호의 주파수 성분을 확인하고 싶을 때는 PSD를 클릭하고, 다시 시간영역 신호를 보고 싶을 때는 TIME을 클릭한다. 두 감지기 신호의 위상정보 차이(Cross Power Spectrum)를 확인하고 싶을 때는 CPS를 클릭한다. 다음 그림 3.5.24는 각 신호의 주파수정보 및 위상차를 보여준다.

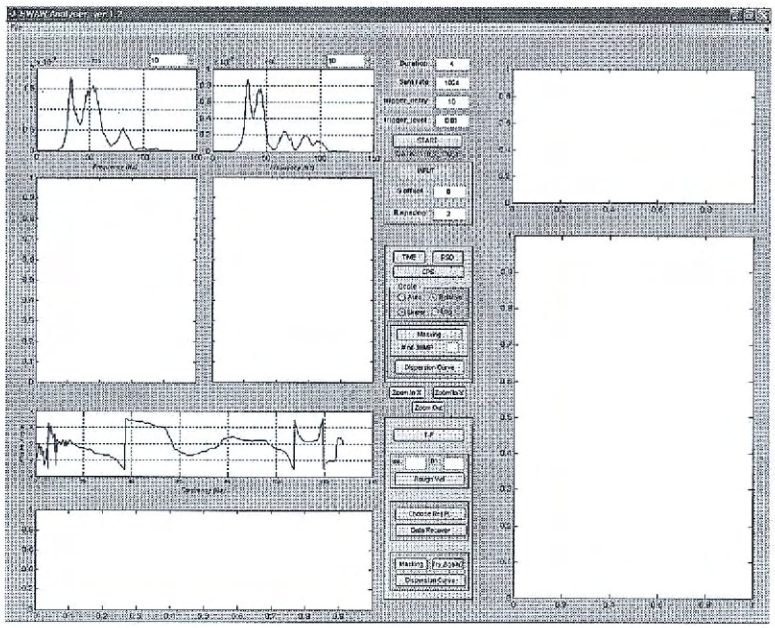


그림 3.5.24. 두 개의 감지기에 대한 주파수영역 정보 확인

10. Input 창의 S offset 창에는 가진원과 감지기 #1 사이의 거리를, R spacing 창에는 감지기 #1과 #2 사이의 거리를 입력한다.

11. 두 신호에 대한 시간-주파수 해석을 위하여 T-F 버튼을 클릭한다. 약 3~10 초 후 하모닉 웨이블렛을 이용한 시간-주파수 지도가 생성된다. 그 모습은 그림 3.5.25와 같다.

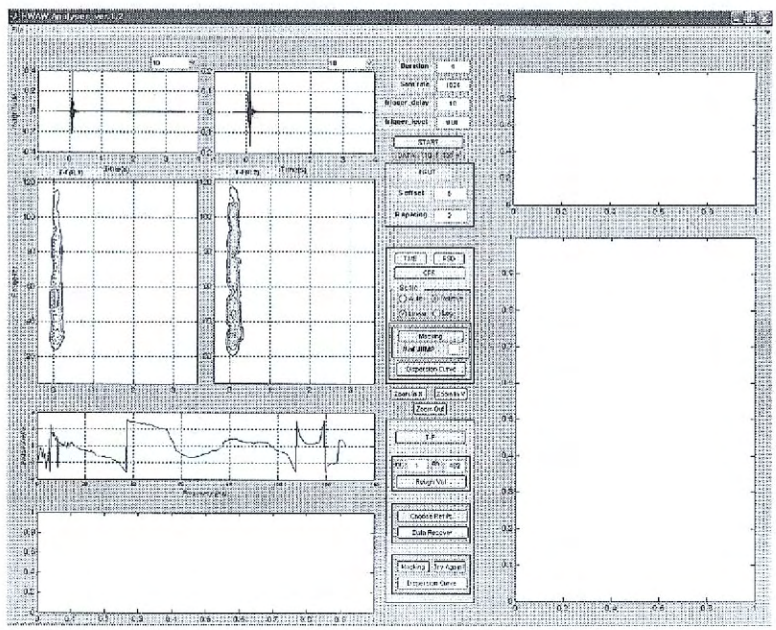


그림 3.5.25. 두 개의 감지기에 대한 시간-주파수 해석 결과

12. Rouph Vel 버튼을 클릭하여 기본 위상속도를 결정하고, Choose Ref Pt. 버튼을 클릭하여 초기 관심 주파수 영역(지반에서는 일반적으로 5~30Hz)에서 Reference Point를 설정한다.

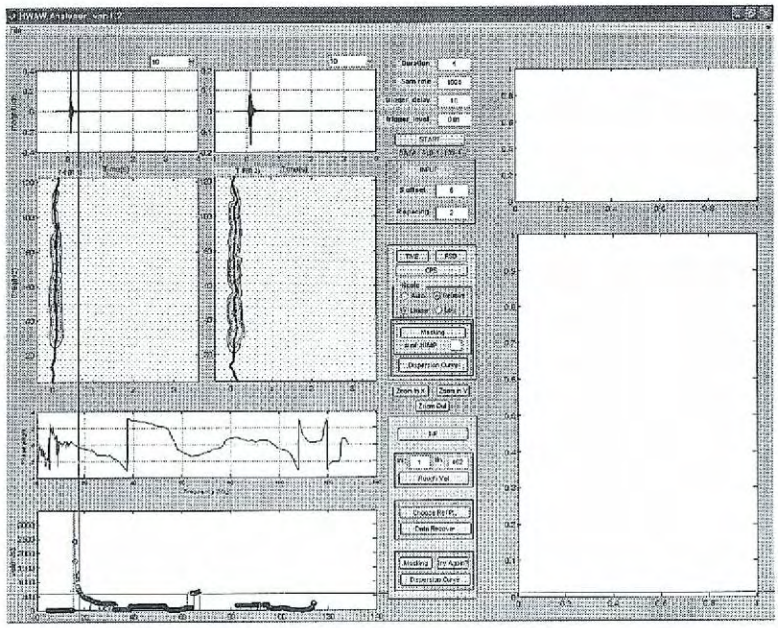


그림 3.5.26. 기본 위상속도 분산곡선의 도출

13. Data Recover 버튼을 클릭하면 그림 3.5.27과 같이 오른쪽 그림 창 두개에 분산곡선이 도시된다. 오른쪽 위의 그림은 주파수별 위상속도 관계를, 오른쪽 아래의 그림은 파장길이와 위상속도의 관계를 도시한 분산곡선이다. 관심 주파수 영역을 변경하거나 데이터 마스킹을 하기 위해서는 Masking 버튼과 Try Again? 버튼, 그리고 Dispersion Curve 버튼을 이용하여 원하는 범위의 분산곡선을 얻을 수 있다.

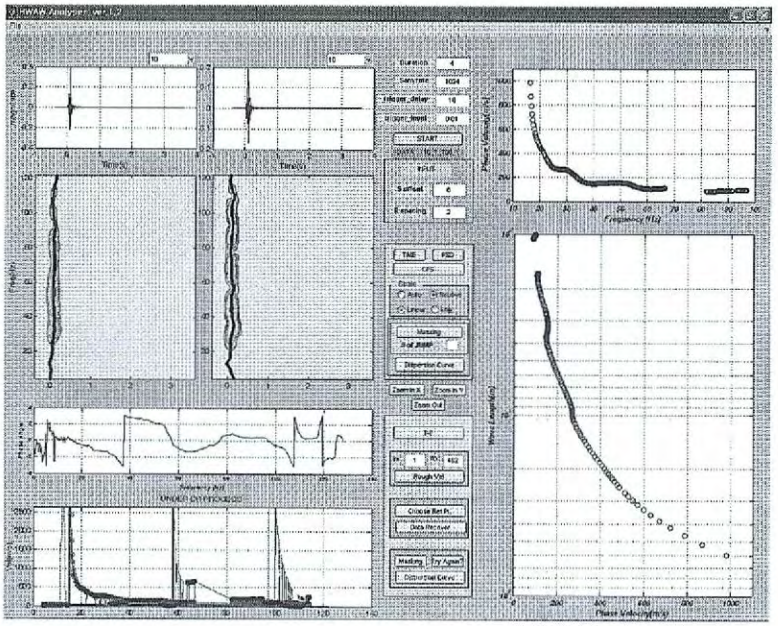


그림 3.5.27. 최종 실험분산곡선의 도출

14. 최종적으로 구한 실험 분산곡선 데이터를 저장한다. 그림 3.5.28과 같이 GUI 창 상단의 File을 클릭하고 Save를 클릭하면, 원하는 폴더에 원하는 이름의 실험분산곡선을 저장할 수 있다. 이 때 데이터는 ASCII 파일 형식으로 저장되며, 세 개의 열로 구성되어 있고, 위상속도, 주파수, 파장길이 순으로 저장된다. 이 때 파일은 주파수로 열정열되어 있다.

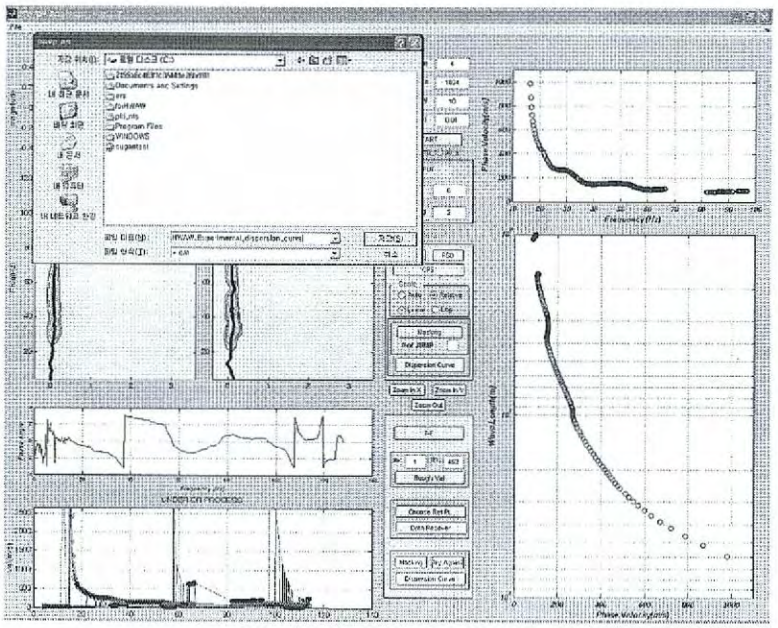


그림 3.5.28. 실험분산곡선의 저장

15. 저장된 실험분산곡선을 이용하여 지반의 전단파속도 주상도를 구하기 위해서는 자동화된 반복적 정모델링을 통한 역산해석이 필요하다. 이를 위해서 inversion 파일을 실행시킨다. 그러면, 그림 3.5.29와 같이 실험분산곡선 파일명을 입력하기 위한 대화창이 나타난다.

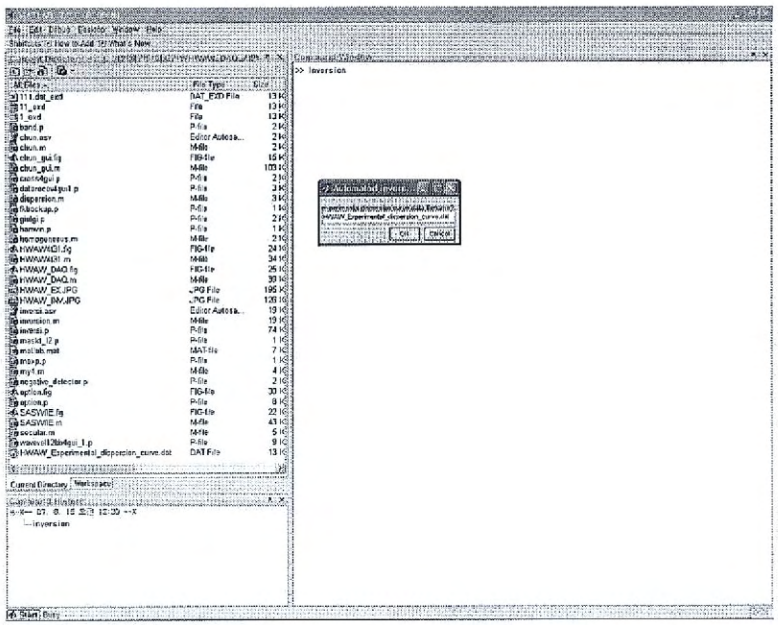


그림 3.5.29. 자동역산해석을 위한 실험분산곡선 불러오기창

16. 현재 버전의 프로그램에서는 자동적으로 초기주상도를 결정하고, 여러번(분산곡선의 형태에 따라 5~15회)의 반복적 정모델링을 통하여 자동적으로 지반의 전단파 속도 주상도록 계산한다. 여기서 최종 전단파 속도 주상도는 실험분산곡선과 같은 파일 이름과 prf 확장자를 가진 ASCII 파일로 자동 저장된다.

역산과정은 자동 시행오차 방법의 횟수에 따라 적게는 1분, 많게는 15분 정도의 시간이 소요된다. 일반적인 결과는 그림 3.5.30과 같다. 여기서 파란색 부분은 자동계산된 초기 주상도와 그에 대한 이론 분산곡선이며, 녹색 부분은 수차례의 Iteration을 통하여 계산된 주상도와 그에 대한 이론 분산곡선이다. 현재 버전에서는 정모델링 기법 및 최적화 알고리즘 부분에 Matlab의 내장함수를 일부 사용하고 있으며, 추후 이러한 코드를 개선하여, 더욱 정확한 역산 결과를 주는 버전의 프로그램으로 업데이트될 예정이다.

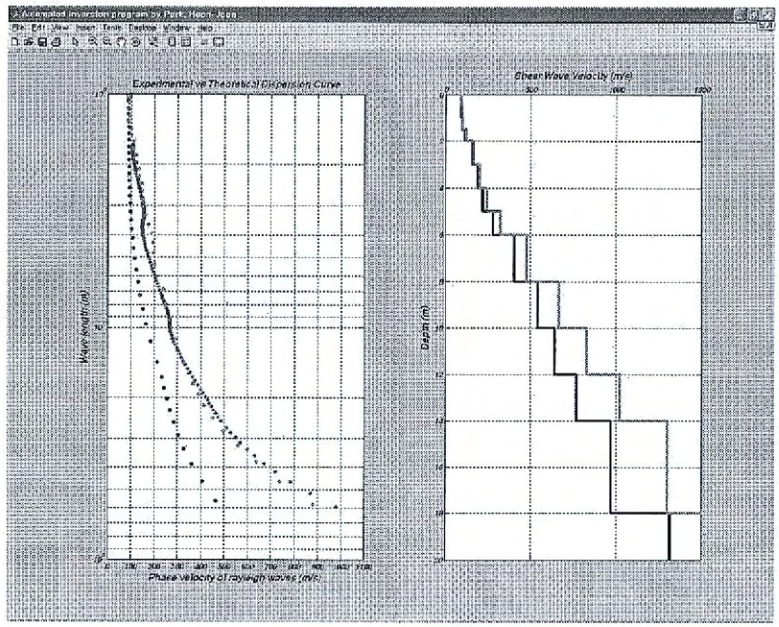


그림 3.5.30. 자동역산해석을 통해 구현된 지반의 전단파 속도 주상도 및 분산곡선 비교

17. 가진원과 감지기 사이의 거리와 감지기 사이의 거리는 일정하게 유지하고, 측선을 따라 가진원-감지기#1- 감지기#2를 이동시켜가면서 위의 6~16의 과정을 반복한다.

18. 최종적으로 구하고자 하는 지반 측선에 대한 시험을 마쳤으면, 지반의 2차원 영상화를 위해 각각의 위치에서 구한 지반의 전단파 속도 주상도를 종합한다. 이후 imaging 파일을 실행시키면 지반의 2차원 강성 주상도를 구할 수 있다(그림 3.5.31).

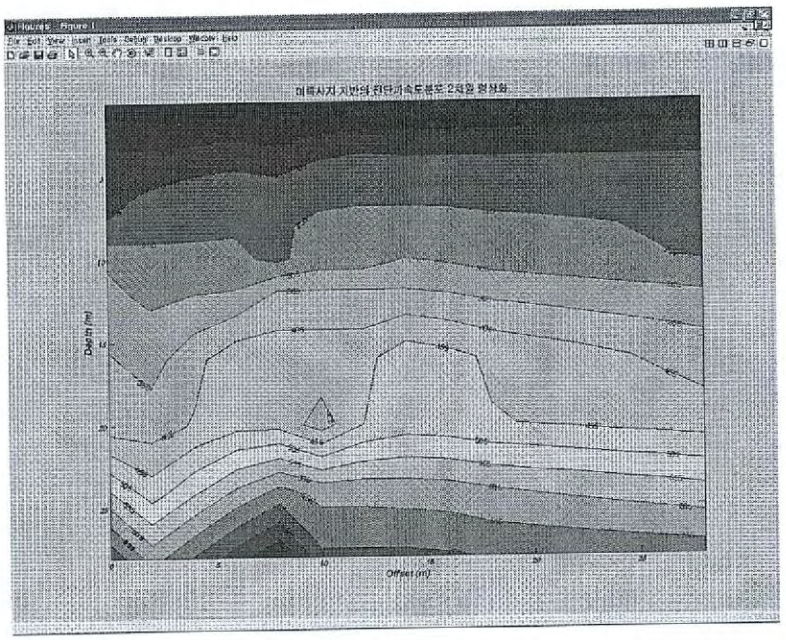


그림 3.5.31. 전단파 속도 주상도 종합을 통해 구현된 2차원 전단파속도 주상도 분포

제 4 장 연구개발목표 달성도 및 관련분야에의 기여도

제 1절 연구목표의 달성도

1. 진도율

가. 연구개발 수행 진도율

구분 / 개발내용	연구개발기간												진도(%)
	1차년도				2차년도				3차년도				
수치해석을 통한 시험 기법의 기법의 검증 및 개선													100%
현장 실험 장비의 개선 및 데이터 획득 시스템 구축													100%
해석 프로그램 개선 및 개발													95%
다양한 현장 적용을 통한 검증													100%
최종 상용화 시스템 제안													100%
총 진도율													98%

..... 당초계획

——— 실 적

2. 목표 달성도 및 내용

목 표	달 성 도 (%)	내 용
수치해석을 통한 시험 기법의 기법의 검증 및 개선	100%	■ 탄성파 전파 모델의 최적 구성 ■ SPT-업홀 - SPT업홀 기법의 현장 시험법 정립 (수평 수직 감지기 동시 배열 방식) - 상용화를 위한 도달시간 도출 방법으로 극대점 기준 도달시간 정보를 자동으로 도출한 뒤 초동 정보로 변환하는 방법 채택 - 확립된 SPT-업홀 토모그래피 기법으로 신뢰성 있는 지반 강성을 도출함을 확인 ■ HWAW 기법 - HWAW 기법을 통해 정확한 지반 물성을 획득 가능한 지에 대한 여부 - 경사진 지반 등의 복잡한 지반형상에서 2D-HWAW기법을 통해 2차원 영상화가 가능한지에 대한 여부 - HWAW 기법의 현장 시험법 정립 (감지기 개수, 가진원 거리 등) - HWAW 기법이 신뢰성 있는 실험 분산곡선을 도출하는 것을 확인 - 역산을 위한 정모델링 기법으로 동적 강성 행렬법을 기반으로 하는 Kausel 방법이 적합함을 확인

현장 실험 장비의 개선 및 데이터 획득 시스템 구축	100%	■ SPT-업홀 - 7-12쌍의 4.5Hz 혹은 10Hz 수평 및 수직 방향 지표면 감지기 및 spread cable을 이용한 시스템 구축 - 수직 해상도가 좋은 24채널 Geode를 이용한 노트북 기반의 신호 획득 시스템 확립 - NI 사의 저가의 DAQPad를 이용한 노트북 기반의 신호 획득 시스템 확립 ■ HWAW 기법 - 진동원 특성을 비교 • 분석한 결과 일반적인 지반에서 슬레지해머를 기본 가진원으로, 저주파 가진원이 필요한(연약지반)에서는 기존의 낙하식 추를 가진원으로 사용 - 감지기 비교 연구를 통해 4.5Hz 감지기 사용의 신뢰성 확보 - 수직 해상도가 좋은 24채널 Geode를 이용한 노트북 기반의 신호 획득 시스템 확립 - NI 사의 저가의 DAQPad를 이용한 노트북 기반의 신호 획득 시스템 확립

해석 프로그램 개선 및 개발	95%	■ SPT-업홀 - 현장 신호획득 및 관리 프로그램 (현장 신호 계측 및 초동 산출의 자동화) - 1차원 해석 프로그램 (전단파 속도 주상도) - 2차원 토모그라피 프로그램 제작 - 3건의 프로그램 등록 ■ HWAW 기법 - 시험과 동시에 실험분산곡선 도출이 가능한 시스템 구축(HWAW Analyzer) - 최적화 해석기법 알고리즘 사례연구 및 정모델링 프로그램 개발 - 역산 최적화 프로그램 개발 - 2건의 프로그램 등록
다양한 현장 적용을 통한 검증	100%	- 상호검증시험(Round Robin Test)를 이용한 시험기법의 검증 - 모형 부지 건설을 통한 SPT-업홀 토모그라피 및 2D-HWAW 기법 검증 - 김제 부지에서의 SPT-업홀 토모그라피 기법의 검증 - 장안 부지에서의 HWAW 기법에 대한 검증 연구 - 대전 OOO 부지에서의 SPT 업홀 토모그라피 및 HWAW 기법 검증 - 최종 시스템을 이용한 분당 OO 부지 및 미륵사지 부지 현장 시험

최종 상용화 시스템 제안	100%	■ SPT-업홀 - 상용화에 적합한 현장 시험 장비 구성 - 탄성파 전용 장비 기반 신호 획득 장비 - NI-DAQ 보드 기반 신호 획득 장비 ■ HWAW 기법 - 상용화에 적합한 현장 시험 장비 구성 - 탄성파 전용 장비 기반 신호 획득 장비 - NI-DAQ 보드 기반 신호 획득 장비

제 2 절 성과의 기여도

본 연구는 SPT업홀 기법과 HWAW기법을 활용하여 사용자 편의의 장비 개발, 해석 프로그램 개발을 통해 적절한 현장 검증을 거쳐 효율적으로 2차원 지반 영상화 기법을 확립하고 업체로의 기술이전을 통해 실용화하는데 그 최종 목표를 두고 있다. 본 연구를 수행하면서 습득한 결과물은 다음과 같은 기여도를 가진다.

- 전단파 속도에 대한 전반적인 이해와 인지도를 높여 여러 지반공학적 문제 해결에 있어 전단파 속도의 활용을 증진시킬 것이다.
- 수치해석을 통한 탄성파 전파모델을 정립함으로서 추후 제안된 기법 및 기존의 기법, 새로이 개발될 기법의 수치해석 적용에 있어 유용한 수치해석 모델을 제시하였다.
- HWAW 기법의 적용성 및 2차원 영상화 적용에 대한 수치해석결과는 기타 표면파 기법의 적용 연구에도 유용하게 사용될 수 있으며 추후 유한경계 및 사면에서의 적용에서도 그 결과를 이용할 수 있을 것이다.
- 본 연구를 통해 개선되고 제안된 현장시험시스템을 이용해 제안된 SPT업홀 및 HWAW 기법뿐만 아니라 타 탄성파 기법을 경제적으로 수행할 수 있을 것이다.
- 상호검증시험 및 모형부지에서 수행된 비교 검증 시험을 통하여 각 기법의 장, 단점 및 현장적용의 유의점을 관련 연구자, 현장 기술자가 인식을 하고 추후 추가연구를 수행할 수 있을 것이다.
- 2차원 영상화에 대한 평가 및 적용을 수차례 실시하여 2차원 영상화에 대한 중요성 및 필요성을 부각시켜 관련 산업분야의 인지도 및 영역확장에 노력을 기했다.
- 관련 연구성과를 국내외 저널 및 학술대회에 발표하여 본 연구에서 제안된 기법 뿐만 아니라 탄성파 탐사 기법에 대한 이해도 및 인지도 향상을 이뤘다고 판단된다.

제 5 장 연구개발결과의 활용계획

제 1 절 활용 방안

본 연구는 SPT업홀기법과 HWAW기법을 활용하여 사용자 편의의 장비 개발, 해석 프로그램 개발을 수행하고 적절한 현장 검증을 거쳐 효율적으로 2차원 지반 영상화 기법을 확립, 실용화 하는데 그 목적이 있다.

그러므로 본 과제의 연구결과를 바탕으로 한 시험 시스템을 통하여 다음과 같이 직·간접적으로 활용할 수 있다고 판단된다.

- 현재 지반조사시 활용되고 있는 여러 지반 탄성파 탐사 기법을 대체

  : 현장 Round Robin Test를 통해 보여진 바와 같이 본 연구의 2D-HWAW 기법은 현재 지반조사에 활용되고 있는 다른 여러 지반 탄성파 탐사 기법에 비해 경제적이며 신뢰성이 높은 2차원 영상화 결과물을 제공하며 가격 경쟁력이 우수하다. 또한 SPT-Uphole 시험은 시추시 동시에 수행되므로 가격 및 시험 시간의 경쟁력이 우수하다. 그러므로 기존 탐사 기법들에 대한 수요가 본 기술로 대체될 것이다.

- 신뢰성있는 도출로 전단파 속도의 활용을 증진시킴

  : 지진시 설계지반운동 결정을 위한 부지 응답해석, 구조물의 내진해석, 진동문제 등 지반의 동적 문제의 주요 입력 변수로 사용될 것이며, 굴착시 변형해석, 기초의 침하 등 정적 변형문제 및 지반개량 평가, 지중 이상대 파악 등에도 적용될 것이다.

- 2차원 지반 강성 영상화의 활용

  : 본 연구를 통해 제안된 현장 상용화 시스템을 이용하여 현장에서 2차원 전단파 속도 주상도를 효율적으로 도출할 수 있어, 이를 이용한 지반 개량효과의 2차원 평가, 풍화토, 풍화암 등의 지층구조를 파악을 위한 지반의 2차원 영상화평가를 수행할 수 있다.

- 타 업체로의 기술 이전을 통하여 개발된 영상화 기법 시스템을 널리 보급

  : 직접적인 벤처 기업 경영을 통해 기술을 활용하지 않더라도 현업에서 활동하고 있는 지반 조사 업체로의 기술이전을 할 수 있다. 기술 이전을 통하여 본 연구 결과가 현업에 널리 보급이 되고 일반화 될 수 있다.

- 상용화 제품 성공시 기술 이전을 통한 이윤 증대

: 현재 국가에서 시행하고 있는 턴키제도로 인하여 지반 조사 시장이 매우 크다. 현재 일본의 OYO등의 탄성파 탐사 장비 전문 제조 회사에서는 전 세계적으로 장비를 판매하여 막대한 이윤을 창출하고 있다. 따라서, 본 기술이 실용화에 성공하고 수요가 많아지게 된다면 전문 제작 업체의 도움으로 박스 일체형 장비를 다량 제작할 수 있는 실험실을 설립, 국내외로 수출하면 이윤을 창출할 수 있으리라 판단된다.

제 2 절 기대 효과 및 응용

- 기술적 측면

현재 현업에서 이용되고 있는 영상화 기법들은 비용이 비싸고 신뢰성이 떨어지는 것이 현실이다. 또한 미시적인 국부적 특성을 정확히 파악해 낼 수 있는 기법 또한 드물다. 본 연구를 통해 효율적인 2차원 영상화 기법의 실용화에 성공할 경우 대략 1m×1m에서 2m× 2m 정도의 좋은 해상도를 가지는 결과를 도출할 수 있다. 이러한 양질의 전단파 속도 결과에 대한 제공은 토목 설계 및 시공 전반에 있어서 경제적이고 안정적인 진행을 할 수 있는 밑거름이 된다. 연구 수행 과정에서 토모그라피 기법 등의 영상화 기법, 웨이블릿을 이용한 시간-주파수 해석 기법 및 역산 과정의 자동화 같은 실용화를 위한 연구 수행 과정에서의 동반된 다양한 기술 발전을 통해 다른 비파괴 기법, 공내 탄성파 탐사법, 표면파 탐사법 등의 관련 연구 전반의 수준 향상에도 크게 기여할 수 있을 것으로 판단된다.

- 경제·산업적 측면

사회간접자본(SOC)의 규모는 전체 예산의 19.4%을 차지하고 있다. 사회간접 자본 건설시 지반조사는 필수적으로 선행된다. 효율적이고 체계적인 지반조사 업무의 수행을 통해 지반조사 공기의 단축 및 정확성에 기여할 수 있을 것으로 판단된다. 또한, 이를 통한 전체적인 공사비 절감 및 시공업체의 경쟁력 향상 등의 직접적 효과 및 국가 사회간접자본(SOC) 예산 절감 등의 부수적 효과도 아울러 얻을 수 있을 것으로 판단된다.

- 타 산업에 미치는 효과

본 기술의 개발로 인해 타 산업에 직접적으로 미치는 효과는 직접적이지 않다. 하지만 간접적으로 타 산업에 미치는 효과는 다음과 같다. 우선 국내에서 본 기술의 실용화가 완료되어 장비의 수요가 많게 되면 내수 시장뿐만 아니라 국외 시장

에 진출하기 위해서 국내 기술로 장비를 제작하거나 소프트웨어를 제작할 수 있는 환경이 조성되어야 한다. 이는 현재 이 분야에서 대부분을 국외 기술력에 의존하고 있는 상황을 탈피하여 탄성파 탐사 장비 분야의 국산화를 이루는 계기가 되리라 판단된다. 궁극적인 본 과제의 효과인 사회 간접 시설의 안정적 설계 및 시공은 우리나라 산업 전반의 안정적 발전에 기여하는 바가 매우 크다고 사료된다.

최종적으로 본 연구가 완료된 후 다음과 같은 분야에 대하여 타 산업 및 국내외 연계·협력 가능성 가지고 있다.

- 시험장비의 산업화로 인한 장비 제조 분야와의 연계
- 기술이전을 통한 지반조사 업체와의 연계
- 국내외 물리탐사분야의 영상화 관련 학계와의 연계

제 3 절 관련 후속 개발 전망

본 연구는 SPT업홀 기법과 HWAW기법을 활용하여 사용자 편의의 장비 개발, 해석 프로그램 개발을 통해 적절한 현장 검증을 거쳐 효율적으로 2차원 지반 영상화 기법을 확립하고 업체로의 기술이전을 통해 실용화하는데 그 최종 목표를 두고 있다. 그러므로 본 과제와 직접적으로 관련된 후속 연구 개발보다는 지속적인 개선과 개발 작업을 수행할 것이다. 하지만 본 과제를 수행하면서 습득하게 될 장비 개발에 대한 노하우, 현장 해석 프로그램 구축에 대한 노하우, 2차원 영상화 구현에 대한 노하우는 또 다른 혁신적 기술을 개발하는데 밑거름이 되기에 충분하다. 그러므로 전망되는 직·간접적 후속 연구는 다음과 같다.

- 개발된 시험장비구성을 활용한 다른 탐사기법의 효율적 수행에 대한 연구
- 개발된 기법과 장비를 이용한 2차원 영상화 도출 및 실제 현장 적용 연구
- 시간-주파수 해석 기법을 활용한 비파괴 검사 기법의 개발에 대한 연구
- 타 탄성파 탐사 등의 지반조사 기법을 이용한 영상화 구현에 대한 연구
- 타 지반조사 기법의 자동화에 대한 연구

제 4 절 기업화 추진 전략(기업으로의 기술이전)

본 연구팀은 비영리단체(한국과학기술원)이므로 연구결과를 이용한 기업화 추진보다 참여기업으로의 기술실시계약을 통한 기술 사업화를 목표로 하고 있다. 결과물인 각 기법의 상용화 장비 및 관련 프로그램을 참여기업인 (주)희송지오텍으로

이전한 후 제품 홍보 및 판매를 계획하고 있다. 참여 기업인 (주)희송지오텍은 지반조사 분야에서 탄탄한 기술력을 가진 기업으로 현장 섭외 및 시추기 지원 뿐만 아니라 현업에서 요구되는 사항에 대한 노하우의 전수를 통해 기술의 현장 적용에 있어서 실용화에 많은 도움을 주었고, 이전된 기술의 지속적인 현장 적용 및 검증이 가능한 업체이다. 또한 장비 및 프로그램 개발 및 판매 경험이 풍부하며 국제적 판매망을 보유하여 해외수출에도 유리하다. 2007년 10월 현재 SPT 업홀과 HWAW 기법으로 나눠서 참여기업과 기술이전사업을 추진중에 있으며 2007년 10월 한국지질자원연구원(KIGAM)으로 제품의 첫 판매가 이뤄질 예정이다. 또한 계약이 성사되는 동시에 참여 기업의 홈페이지(http://www.geo-pros.com)를 통해 광고를 실시할 예정이다.

제 5 절 최종 상용화 제품 완성을 위한 지속적인 노력

본 연구팀에서는 과제를 통한 구축한 상용화 제품의 현장 적용성 확인 및 지속적인 개선작업을 수행하기 위하여 다양한 지반 조건에서 추가적인 현장 시험을 수행할 예정이다. 표 5.1 과 같이 다양한 현장 지반에서 추가 시험을 수행한 후 각 현장 조건하에서의 문제점과 개선점을 파악하여 최종적인 상용화 제품의 완벽성을 높이도록 노력할 예정이며, 제품 판매 후 구매자 및 실험자의 요청이나 개선사항을 수시로 접수하여 사용하기 쉽고 편리한 제품을 만들어 제공할 예정이다.

표 5.1 추가 현장 시험 계획

현장 조건 및 시험 목표	시험 위치	시험기간 (예정)	비고
횡방향 변위가 존재하는 풍화토 및 퇴적토 지반의 2차원 영상화	대전 서남부권 지역	2007년 10~11월	효율적인 2차원 영상화 도출을 위한 장비 및 프로그램 개선
압밀처리중인 연약지반의 2차원 영상화 구현	부산 화전지구	2007년 11~12월	연약지반에서의 적용성 검토
절토 사면 및 성토 사면, 노상의 전단파 속도 도출 및 층상구조 확인	충남 예산	2007년 10월	다짐지반 및 사면에서의 적용성 검토
턴키 지반조사 참여 (참여기업인 희송지오텍과 공동수행)	미정	2007년 10~12월	경제적인 2차원 영상화 도출방안 강구 및 실제 턴키과제 참여를 통한 기법의 홍보

제 6 장 연구개발과정에서 수집한 해외과학기술정보

국제 학술대회(International Site Characterization(ISC'2), SPGIndia 2006, Geoshanghai 2006, ICEGE 2007)의 참가를 통해 국내에서 관련 연구가 활발히 진행되지 않는 연구 분야에 대해 정보를 얻을 수 있었고, 국외 석학들과의 정보 교환을 할 수 있었다. 과거 지하 암반 구조나 석유탐사등에 쓰이던 탄성파 탐사의 지반 공학 분야의 적용사례들을 수집할 수 있었으며, 기존의 표면파 탐사 방법인 MASW 기법의 세계적 사용 추세를 파악하였다. 또한 본 연구팀의 실용화를 수행하고자 하는 요소 기술인 SPT업홀 및 HWAW관련 논문을 발표함으로서 효과적인 홍보를 할 수 있었다. 국제 학회의 최신 동향을 살펴본 결과 본 연구팀의 HWAW 기법과 SPT 업홀 기법은 국제적으로도 독창적이고 발전가능성을 가지고 있다고 판단된다.

추가적으로 활발한 학회 참석 및 문헌 조사를 통해 지반 공학분야에 적용되고 있는 영상화기법(Geotomography)에 대하여 정보를 획득하였으며 이는 추후 과제 수행에 좋은 참고자료가 될 것이다.

- 횡방향 변화 탐지를 위한 MASW기법의 적용(CMP기법등)
- 토모그래피 사례 연구
- SPS logging 기법의 최신 기법
- 수정된 FK 방법(MFK)를 이용한 지반의 전단파 속도 도출 방법
- 또다른 표면파 기법인 상시 진동 탄성파 탐사 방법

제 7 장 참고문헌

김동수, 고광범, 김영수, 방은석, 신형옥, 윤진성, 이양로, 장현삼, 2005a, Round Robin Test를 통한 공내 탄성파 탐사 기법 비교 연구, 한국지반공학회 봄 학술발표회 특별 Session, 동적 물성치 획득을 위한 현장 및 실내 Round Robin Test 결과 발표, pp 73-88.

김동수, 방은석, 서원석, 2003, 표준관입시험을 이용한 업홀시험에서 전단파 속도 주상도의 도출, 한국지반공학회논문집, Vol 19, pp. 135-146.

김재민, (1995) "Development of axisymmetric dynamic infinite elements based on multiple wave functions and its application to solid-structure interaction analysis = 다중 파동함수를 가진 축대칭 동적무한요소의 개발 및 이를 이용한 지반-구조물 상호작용해석" , 박사학위논문, 한국과학기술원.

박형춘, 김동수 (2004a), "HWAW 방법을 이용한 새로운 탄성파 지반조사기법의 개발(I) : 분산곡선의 결정", 대한토목학회 논문집, Vol. 24, No. 2C, pp. 105-115.

박형춘, 김동수 (2004b), "HWAW 방법을 이용한 새로운 탄성파 지반조사기법의 개발(II) : 실험 구성 및 역산과정", 대한토목학회 논문집, Vol. 24, No. 2C, pp. 117-124.

방은석, 김종태, 김동수 (2006) "SPT-업홀 토모그래피 기법을 이용한 지반의 2차원 전단파 속도 분포의 도출", 대한 토목학회 논문집, Vol 26, No. 3C, 2006년 5월, pp. 143-155.

조성호 (1996) WinSASW User manual.

조성호 (1996), Advanced in interpretation and Analysis Techniques for spectral analysis-of-surface-waves (SASW) measurements, 박사학위 논문, The Univ. of Texas at Austin.

조성호 (2002), WinSASW Version 2.0 User's Guide Data Interpretation and Analysis for SASW Measurements, 중앙대학교

조성호, 장대우, 강태호, 이일화, (2005a), CAP SASW 기법에 의한 지반단면의 전단강성구조 평가, 한국지반공학회논문집, Vol 21, pp. 71-81.

조성호, 하의상, 박권규, 강태호, 김종태, 김봉찬, 최재화, 안희윤 (2005b), "지반

하부강성구조 평가를 위한 표면파 기법 비교 연구", 한국지반공학회 봄 학술발표회 RRT 특별 Session, pp. 35-56, 2005.

ABAQUS/Standard Ver. 5.7 User Manual, Finite element software package. Hibbitt, Karlsson & Sorenson, Inc.

Beaty, K. S. ; Schmitt, D. R. ; Sacchi, M., "Simulated annealing inversion of multimode Rayleigh wave dispersion curves for geological structure" Geophysical journal international, v.151 no.2, 2002, pp.622-631

Ganji, Gucunski, and Nazarian (1998) "Automated inversion procedure for spectral analysis of surface waves", Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering, Vol.124, No.8, p.757-770,

Hunaidi, O. (1998) Evolution-based genetic algorithms for analysis of non-destructive surface wave tests on pavements, NDT & E international : independent nondestructive testing and evaluation, v.31 no.4, pp.273-280

Imai, T. and Tonouchi, K., (1982), Correlation of N-value with S-wave Velocity and Shear Modulus, Proceedings of the 2nd European Symposium on Penetration Testing, Amsterdam, pp. 57-72.

Kausel, E. and Peek, R.,(1982) "Dynamic loads in the interior of a layered stratum: An explicit solution", Bull Seismological Soc of Am, Vol. 72, pp. 1459-1481.

Kausel, E. and Roesset J. M.(1981), "Stiffness matrices for layered soils", Bull Seismological Soc of Am, Vol. 71, pp. 1743-1761.

Kim, D.S., Seo, W.S., Bang, E.S., 2004, Energy Ratio Measurement of SPT Equipment, international site characterization(ISC-2), Porto, Portugal, Vol. 1 pp. 339-344.

Lai, C.G., (1998), Simultaneous inversion of Rayleigh phase velocity and attenuation for near-surface site characterization, PhD dissertation, Georgia Institute of Technology, 370p.

Martinez, M. D. ; Lana, X. ; Olarte, J. ; Badal, J. ; Canas, J. A.(2000), "Inversion of Rayleigh wave phase and group velocities by simulated annealing", Physics of the earth and planetary interiors, v.122 no.1/2, 2000, pp.3-17

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.

Park, C.B., R.D. Miller, and J.Xia. (1999), "Multi-channel analysis of surface waves.", Geophysics, v.64,n.3, p.800-808.

Park, H.C., Kim, D.S. (2001), "Evaluation of the Dispersive Phase and Group Velocities using Harmonic Wavelet Transform",NDT&E International Vol. 34, No. 7, 2001, pp. 457-467.

R. Al-Khoury, A. Scarpas, C. Kasbergen, J. Blaauwendraad,(2001) "Spectral element technique for efficient parameter identification of layered media. I. Forward calculation", International Journal of Soils and Structures, Vol. 38, pp.1605-1623.

Roth; Hollige (1999), Inversion of source-generated noise in high-resolution seismic data, The Leading Edge.

Sanchez-Salinero, I. (1987), "Analytical investigation of seismic methods used for engineering applications", Ph. D. Dissertation, The Univ. of Texas at Austin, 1987.

Strobbia, C., 2004, Suface Wave Methods : Acquisition, processing and inversion, PhD dissertation, Politecnico di Tirino.

Williams, T. P., and Gucunski, N., (1995), "Neural Networks for Backcalculation of Moduli from SASW Test," Journal of Computing in Civil Engineering, ASCE, 9, No. 1, pp. 1?8.

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.

주 의 사 항

1. 본 보고서는 건설교통부가 출연하고 한국건설교통기술평가원에서 위탁시행 한 건설기술연구개발사업의 중간 연구보고서입니다.
2. 본 보고서의 내용을 발표할 때에는 반드시 건설교통부가 출연하고 한국건설교통기술평가원에서 위탁시행 한 건설기술연구개발사업임을 밝혀야 합니다.
3. 국가보안 차원에서 필요하다고 인정되는 내용은 대외적으로 발표 및 공개하여서는 아니됩니다.

본 보고서와 관련하여 문의를 원하시는 분은 아래의 문의처로 연락을 주시기 바랍니다.

■ 문의처 : 한국건설교통기술평가원 TEL 031)381-6311

한국과학기술원(주관연구기관명) TEL 042)869-3659

R&D / 04건설핵심 B01-04

SPT-업홀 및 HWAW 기법을 이용한 지반강성의 2차원 영상화 기법 연구보고서

■ 발행일 / 2007. 10. 15.

■ 발행처 / 한국과학기술원

대전시 유성구 구성동 373-1

TEL : 042-869-3659

■ 인쇄처 / 춘양사