

상호검증시험을 통한 효율적인 다운홀 탄성파 기법 수행 시스템의 구성

Construction of Efficient Downhole Seismic Testing System by the Round Robin Test

방 은 석¹ Bang, Eun-Seok

김 동 수² Kim, Dong-Soo

김 기 석³ Kim, Ki-Seog

Abstract

Downhole seismic method is very economic and easy of operation because it uses only one borehole and simple surface source to obtain the shear wave velocity (V_s) profile of a site. Even though it is widely used by the site investigation companies, universities and institutes, however, the V_s profile determined by downhole seismic method has often low reliability due to employment of wrong combinations of field testing equipment and interpretation method and deficiency of experience. Round robin test was performed and testing equipment and procedure were compared. Adequate downhole seismic testing equipment was constructed based on the comparison and verification study of the round robin test. The data acquisition and software interpretation were also developed for automation and quick test in field. Finally, the effectiveness and applicability were verified through the field test by using the constructed testing system.

요 지

지반의 전단파 속도 주상도를 도출하는데 있어 다운홀 기법은 하나의 시추공을 이용하고 간단한 지표면 가진원을 사용하므로 매우 경제적이다. 따라서 학교와 현업에서 지반조사 및 연구 목적으로 널리 사용되고 있다. 그러나 올바르게 못한 장비의 구성과 해석과정으로 인하여 결과의 신뢰성에 문제가 있어왔다. 본 연구에서는 다운홀 기법의 상호검증시험(Round Robin Test)을 통해 참여 기관에 대해서 각각의 실험 장비와 결과 해석 과정에 대해 비교함으로써 문제점에 대해 분석하였으며 이를 바탕으로 최적의 수행 시스템을 구성하였다. 효율적인 가진원을 제작하고 적절한 감지기를 도입 혹은 제작하였으며 노트북 기반의 신호 획득 시스템을 구축하였다. 신호 획득 및 관리 프로그램, 결과 도출 프로그램을 통해 현장에서 효율적으로 실험을 진행하고 신뢰성 있는 최종 결과를 신속하게 도출할 수 있도록 하였다. 구성된 수행 시스템을 이용하여 현장 적용 실험을 수행하였으며 그 효율성을 확인할 수 있었다.

Keywords : Downhole seismic method, Field testing equipment, Round robin test, Site characterization

1 정희원, 한국지질자원연구원 지반안전연구부 선임연구원 (Member, Senior Researcher, Geotechnical Engr. Division, KIGAM)

2 정희원, 한국과학기술원 건설 및 환경공학과 교수 (Member, Prof., Dept. of Civil and Environmental Engr., KAIST, dskim@kaist.ac.kr, 교신저자)

3 정희원, (주)희송지오테크 대표이사 (Member, President/P.E., Heesong Geotek. Co., Ltd.)

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

1. 서론

지진에 의한 지반응답 특성을 평가하기 위해서는 지반의 전단파 속도 주상도(shear wave velocity profile)의 측정은 매우 중요하다. 최근에는 내진해석 뿐만 아니라 진동영향 평가, 지반개량 효과 평가, 굴착에 의한 지반 변형 및 기초의 침하량 해석 등에도 전단파 속도로 대변되는 지반 강성이 활용된다(Stokoe 등, 2004). 그러므로 토목 건설에 있어 지반 조사의 일부분으로 전단파 속도 주상도 획득이 필수적으로 요구되는 추세다. 현장 탄성과 탐사 기법을 통해 지반의 전단파 속도 주상도의 획득이 가능하며 다양한 기법들이 소개되고 현장에 적용되고 있다. 다운홀 탄성과 기법(downhole seismic method)은 다른 공내 탄성과 탐사에 비하여 장비가 간단하고 저렴하며 실험 수행이 수월하여 현장에서 각광받고 있는 기법중 하나다.

다운홀 기법의 수행 과정은 크게 현장 실험을 통해 깊이별 탄성과 신호를 획득하는 과정, 탄성과 신호에서 도달시간 정보를 획득하는 과정, 그리고 최종적으로 도달시간 정보를 이용하여 전단파 속도 주상도를 도출하는 과정으로 나뉘어진다. 각 과정에 있어서 실험 장비의 하드웨어 및 소프트웨어 차이, 수행자의 숙련도와 공학적 판단의 차이는 전단파 속도 주상도라는 최종 결과에 영향을 끼치게 된다. 따라서 현장 시험에 적합한 장비의 구성과 적합한 해석 기법의 적용 그리고 전문가적인 실험자의 판단 등을 통해 결과의 품질을 향상시킬 수 있다. 본 논문에서는 다운홀 기법을 통해 높은 품질의 최종 결과를 획득할 수 있도록 다운홀 기법 수행 시스템을 효율적으로 구성하는데 그 목적이 있다.

우선 현재 국내의 여러 기관에서 수행되고 있는 다운홀 기법의 현황 및 문제점에 대해 파악해 보고자 경기도 평택 시험 부지에서 수행된 상호 검증 시험(Round Robin Test) 결과 중 다운홀 기법 부분에 대해 고찰하여 보았다. 각 기관에서 사용하는 장비 및 해석 기법 등을 효율적으로 비교하고자 최종 결과인 전단파 속도 주상도 뿐만 아니라 깊이별 신호, 도출된 도달시간 정보 등의 중간 결과도 비교하였다. 이러한 비교 연구를 바탕으로 다운홀 기법에 적합한 최적의 시스템을 구성해 보고자 하였으며 이 시스템은 다운홀 현장 시험 장비의 구성 외에 신호 획득 및 관리 과정, 결과 도출 과정 등을 포함하는 것이다. 구성된 장비를 이용하여 실제 현장에서 다운홀 기법을 수행하여 봄으로써 그 효율성에 대해 확인하여

보았다.

2. 다운홀 기법 개요

다운홀 기법은 크게 현장 실험을 통한 신호 획득, 획득한 신호로부터의 도달시간 정보의 도출, 그리고 최종적으로 획득한 초동 정보를 이용하여 전단파 속도 주상도를 결정하는 작업 등의 3단계로 나뉘어진다. 다운홀 기법의 현장 시험 개요도는 그림 1과 같다. 지표면 가진원을 통해 가진된 전단파 성분을 지중에 위치한 감지기로 획득하는 방식으로 현장 실험이 수행되는데 가진판의 정방향 및 역방향 타격을 통해 극성 특성을 활용하여 전단파 성분의 도달시점을 보다 정확하게 추정하는 방식을 사용하고 있다. 하지만, 압축파의 영향을 완전히 제거할 수 없으며 전단파와 동일한 극성 특성을 보이거나 진행 속도는 압축파의 속도로 이동하는 근접장 성분(near field component)이 존재하는 경우가 있다(Sanches-Salinerio 1987). 또한 시험 심도가 깊어질수록 가진원과 감지기의 거리가 멀어져 전달되는 전단파 성분의 크기가 작아지게 되며 이는 신호 대 노이즈비(signal to noise ratio, S/N)의 저하를 가져오게 되어 실제 전단파 성분의 도달시점 파악에 어려움이 있다. 이를 극복하기 위해서는 적합한 가진원, 감지기 및 신호 획득 장비의 구성을 통해 양질의 신호를 획득하여야 하며 이러한 신호로부터 합리적인 방법으로 도달시간 정보를 도출하여야 한다. 도달시간 정보 도출 방법에 대해서는 여러 가지가 소개된 바 있으나 획득한 파형에 따라 유리한 방법이 다르다.

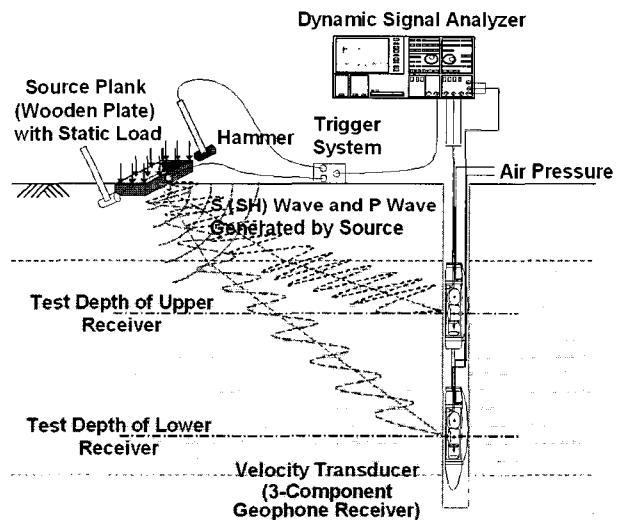


그림 1. 다운홀 탄성과 시험의 개요도

편의상 육안에 의한 초동 인식 방법이 가장 널리 사용되고 있으나 해석자의 경험 및 주관이 많이 요구되는 문제점이 있다.

최종 결과인 전단파 속도 주상도를 도출하기 위한 다운홀 해석 기법에는 직접법(direct method, DM), 간접법(interval method(IM), 수정간접법(modified interval method, MIM), 굴절 경로법(refracted ray path method, RRM)이 있으며 최근에는 평균 굴절 경로법(mean refracted ray path method, MRM) 등이 소개된 바 있다(Joh와 Mok, 1998; Kim 등, 2004; 방은석 등, 2006). 지표면 가진원로부터 발생된 전단파는 다층 구조 형태의 지반을 통과하여 감지기까지 이동하게 되므로 전파 경로를 단순하게 직선으로 가정하기에는 문제가 있다. 현업에서는 직접법 및 간접법 혹은 수정간접법을 사용하고 있으나 이러한 해석기법들은 전파 경로를 직선으로 가정하고 있으므로 결과의 신뢰성에 문제가 생기게 된다. 또한 직접법은 지반의 개략적인 속도 주상도를 도출하고 굴절경로법은 도달시간 정보에 오류가 있을 경우 무의미한 결과를 도출하게 되므로 적용하는데 있어 주의가 요구된다. 획득한 자료의 상태를 적절하게 판단하고 현장 상황을 충분히 반영하여 해석을 수행해야지만 다운홀 시험을 통해 합리적인 전단파 속도 주상도를 도출할 수 있게 된다.

3. 상호검증시험 수행 결과의 고찰

한국 지반공학회 지반진동위원회의 주관을 통해 지반의 동적 물성치 산정을 위해 국내에서 적용되고 있는 현장 및 실내 실험에 대한 상호검증시험(Round Robin Test)이 총 12개 기관(6개 대학, 5개 지반조사 업체 및 1개 연구소)에서 참가하여 수행된 바 있다(김동수 등, 2005a). 현장 실험에 있어서는 평택 서해대교 복단에 시험부지를 조성하고 여러 가지 탄성파 탐사를 수행하였다. 본 논문에서는 그 중 다운홀 탄성파 기법에 대해 수행 장비 및 수행 과정에 있어서의 문제점 등에 대해 고찰해 봄으로써 다운홀 기법 수행 시스템을 새로이 구축하는데 참고하고자 하였다. 다운홀 기법에 대한 상호검증시험은 총 7개 기관(3개 대학, 4개 지반조사 업체)에서 참여하였다. 총 3개소의 시추 작업을 통해 획득한 시추 주상도 및 수평적인 층상구조는 그림 2와 같다. 상부로부터 매립토, 풍화토, 풍화암, 연암으로 구성되었으며 수평적으로 불균등하게 풍화가 진행되어 있는 것을 확

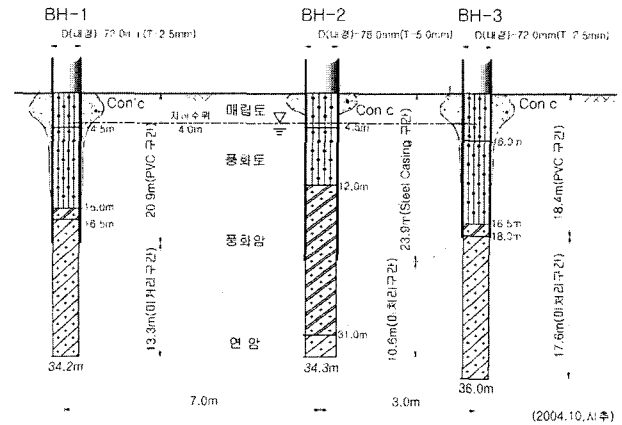


그림 2. 상호검증 시험 부지의 시추 주상도(본 연구에서 사용된 시험공은 BH-1)

인할 수 있었다. 시추공 중 BH-1을 다운홀 기법에 대한 상호검증시험용 시험공으로 설정하였으며 PVC 케이싱을 풍화암 상단까지 설치하여 연약층의 함몰을 방지하였으며 콘크리트 밀크 그라우팅을 통해 이벽 현상을 방지하고자 하였다. 해석과정에서의 변수를 최대한 동일하게 해 주고자 가진원 위치 및 시험 깊이를 동일하게 하였다. 다운홀 기법을 수행하기 위해 각 참가 기관에서 구성한 현장 시험 장비를 비교하고 현장 실험 상황 및 획득한 깊이별 신호의 비교 평가를 통하여 구성 장비의 문제점에 대해 고찰하여 보았다. 또한 도출된 도달시간 정보 및 결정된 전단파 속도 주상도를 비교하여 봄으로써 해석 과정에 있어서의 문제점도 고찰하여 보았다.

3.1 수행 장비의 비교

3.1.1 가진원

다운홀 기법에서 가진원의 품질은 전단파 성분을 얼마나 풍부하게 발생시키는가에 그 기준이 있다. 가진원의 원시적인 형태는 큰 가진 에너지 발생을 위해 구멍이를 파고 추나 해머를 이용하여 토류벽면을 횡방향으로 가격하는 방식이다(Auld, 1977; Larkin과 Taylor, 1979). 가진원은 점차 소형화 되고 간편해졌으며 Michaels(1998)은 모래주머니를 올려놓은 사각기둥형태의 목재 옆면을 해머로 가격하거나 목재 바닥에 썸을 심어 지반에 고정시키고 135°로 경사 타격을 하는 방식을 취한 바 있다. 최근에는 Casey와 Maync(2002)에 의해 동일한 에너지의 전단파를 발생시키고 편리한 현장 실험의 수행을 위해서 슬레노이드 해머를 이용한 자동 지표면 가진원(AutoSeis)이 제작된 바 있다.

본 상호 검증 시험에서 사용된 가진원들은 각 기관마다 형태가 약간씩 다르긴 했지만 Michaels(1998)이 사용한 방식과 유사하였다. 목재나 철, 등을 재료로 하여 제작된 가진판은 주로 사각 널빤지 형태이며 이 가진판에 썬기 등을 이용하여 지반에 고정하는 방식을 취하였다. 또한 가진원 상부에는 사람이 올라가거나 차량 등을 탑재하여 상재하중을 가함으로써 횡방향 타격에 의한 전단력이 지반에 잘 전달되어 전단파가 풍부하게 발생하도록 하였다.

3.1.2 감지기

가진판에 의해 가진된 탄성파는 지중의 시추공 내에 삽입된 감지기(receiver)로 측정하게 된다. 다운홀용 감지기 안에는 지중의 입자 움직임을 3차원으로 파악할 수 있도록 수직 성분과 횡방향(transverse) 및 종방향(longitudinal)의 수평성분 속도계가 설치되어 있다. 감지기에서 이러한 감지부분이 공벽에 밀착된 상태로 물려 있어야지만 지중의 진동을 정확히 계측할 수 있으므로 공벽 밀착 장치(coupling system)가 요구된다. 공기 주머니 이용 방식은 시험 심도를 이동할 때마다 공기의 주입 및 배출을 반복해야 하며 시험 심도가 깊어질수록 지하수위에 의해 수압이 커져 실험하는데 많은 불편함과 어려움이 따른다. 반면에 판 스프링을 이용하는 방식은 수압에 영향을 받지 않는다는 장점이 있으며 공기 주입선이 없어 현장 실험 시 편리하다(Crice, 2002). 최근에는 모터를 이용하여 판 스프링을 움직이는 방식의 상용 제품이 나와 보급되고 있다. 가진방향과 감지 방향을 동일시 해 주기 위한 방향조절 장치에는 방향조절 로드(orientation rod) 방식이 전통적으로 사용되어 왔다. 이 방식은 지상에서 감지기의 방향을 정확히 파악할 수 있다는 장점이 있으나 시험 깊이가 증가함에 따라 로드를 연속적으로 연결해 주어야 하는 번거로움이 있으며 깊은 심도를 탐사할 경우 연결된 총 로드 무게가 커져 문제가 된다. 최근에는 지자기를 이용한 자동 방향 조절 방식(flux-gate compass)이 개발되어 보급되고 있다.

참가한 기관 중 대학에서는 주로 자체 제작한 전통적인 방식의 3성분 감지기를 사용하였으며 지반 조사전문 업체에서는 주로 상용화 장비를 사용하였다. 감지기 내에 삽입된 속도계는 비슷한 감지 능력(0.5-0.7V/in/sec)을 가지는 Mark Product사나 Geospace사의 4.5Hz 혹은 10Hz 속도계가 사용된 것으로 조사되었다. 공내에서 지중 감지기가 얼마나 지반의 움직임을 정확히 모사해 주

느냐에 따라 획득되는 파형의 품질이 크게 좌우되므로 감지기 시스템 부분에 대해서는 깊은 고찰이 요구된다.

3.1.3 신호 획득 장비

신호 획득 장비는 감지기로부터 감지된 지중 진동 정보를 정해진 시간에 대해서 도시하고 기록하는 기능을 한다. 트리거(trigger) 장치는 신호를 획득하기 시작하는 순간을 신호 획득기로 알려주는 것으로 트리거 장치가 일정하게 작동하지 않을 경우 도달시간 정보 획득 시 큰 오류가 발생할 수 있다. 과거에는 가진원 근처 지표면에 속도계를 설치하는 방식이 사용되었지만(Michaels, 1998) 최근에는 좀 더 정확한 트리거를 위하여 해머와 가진판이 닿는 순간 일정 전압이 발생하도록 하는 접촉식 트리거(contact trigger)와 해머나 가진판에 속도계 혹은 가속도계 등의 센서를 부착하는 방식 등이 일반적으로 사용되고 있다(Crice, 2002). 지반조사업체에서는 대부분 해머에 센서를 부착하는 방식을 사용하고 있었으며 대학 쪽에서는 접촉식 트리거 방식 및 가진판에 센서를 부착하는 방식을 사용하고 있었다. 신호 획득 장비로는 중합(stack), 필터링(filtering) 기능 및 좌우타격 신호 동시 도시(overlaid display) 기능 등이 존재하는 것이 현장에서 양질의 신호를 획득하는데 유리하며 획득한 신호의 관리가 용이하게 된다. 또한 깊은 심도를 탐사하기 위해서는 미세한 신호도 획득할 수 있어야 하므로 전기적 잡음(noise)에 안정적이며 아날로그 입력해상도가 높은 장비일수록 유리하다. 과거에는 신호 증폭장치와 도시용 화면만이 존재하는 간단한 오실로스코프가 이용되어 왔다(Hoar 와 Stokoe, 1978). 최근 전기 및 전자 기술의 발전에 따라 신호 획득 장비가 놀랍도록 개선되고 있으며 이에 따라 탄성파 탐사 기술 또한 발전하고 있다.

참가한 기관에서 다운홀 현장 시험용으로 사용하고 있는 신호 획득 장비로는 일반적인 지표면 및 공내 탄성파 탐사 시 전문적으로 사용되는 진동측정기(seismograph) 제품들과 획득한 신호를 기기 내에서 다양하게 신호 처리가 가능한 다기능 신호 획득 장비인 동적신호 분석기(signal dynamic analyzer) 등이 있었다. 아날로그 입력 해상도는 각 기기별로 다양하였으며 중합 기능과 신호 동시 도시 기능의 유무 또한 기기별로 달랐다. 표 1에 참여 기관에서 사용한 감지기와 신호 획득 장비의 사양 및 형태에 대해 요약하여 정리하였다. 한국과학기술원에서는 다운홀 시험에 있어 장비 구성의 차이를 더욱

표 1. 다운홀 시험 수행 기관과 각 기관이 실험 및 해석에 사용한 장비

수행기관	감지기 시스템				신호 획득 장비			
	모델명	삽입된 지오폰	공벽 접촉 방식	방향 조절 방식	모델명	입력 해상도	Stack, Overlay	
한국과학기술원	A	자체제작 3성분감지기	Geospace (GS-20D)	판 스프링	방향 조절 로드	GRAPHTEC MA6000	12bit	X, O
	B	Geostuff (BHG-3)	Geospace (GSC-20DM)	판 스프링 (모터방식)	지자기 이용 회전	GRAPHTEC MA6000	12bit	X, O
	C	Geostuff (BHG-3)	Geospace (GSC-20DM)	판 스프링 (모터방식)	지자기 이용 회전	Agilent 54624A	16bit	X, O
	D	Geostuff (BHG-3)	Geospace (GSC-20DM)	판 스프링 (모터방식)	지자기 이용 회전	Geometrix Stratavisor	24bit	O, X
대학 #1 & 대학 #2	자체제작 3성분감지기	MarkProduct (L-10)	공기 주머니	방향 조절 로드	Agilent 35670A	16bit	X, O	
희송 지오택	Geostuff (BHG-3)	Geospace (GSC-20DM)	판 스프링 (모터방식)	지자기 이용 회전	Geometrix Stratavisor	24bit	O, X	
지반조사 업체 #1	Geostuff (BHG-3)	Geospace (GSC-20DM)	판 스프링 (모터방식)	지자기 이용 회전	OYO Mcseis	18bit	O, X	
지반조사 업체 #2	일본지하탐사 3성분 감지기	Geospace (GS-20D)	공기 주머니	신호 보정 방식	OYO Mcseis	18bit	O, X	
지반조사 업체 #3	Geostuff (BHG-3)	Geospace (GSC-20DM)	판 스프링 (모터방식)	지자기 이용 회전	ABEM사 MARK 6+	18bit	O, X	

확실히 비교하기 위해서 여러 가지로 조합한 상태로 4 번의 현장 시험을 수행하였다.

3.2 수행 결과의 비교

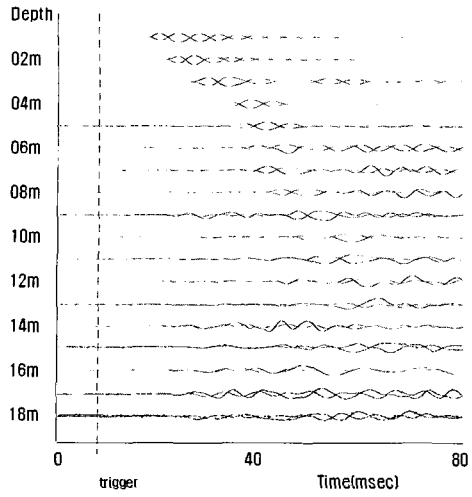
본 절에서는 각 기관에서 수행한 다운홀 기법 수행 결과를 세부적으로 비교하고 고찰하기 위해 깊이별 획득 신호, 도출된 도달시간 정보 그리고 결정된 최종 전단파 속도 주상도 순으로 단계별로 비교하여 보았다.

3.2.1 깊이별 획득 신호

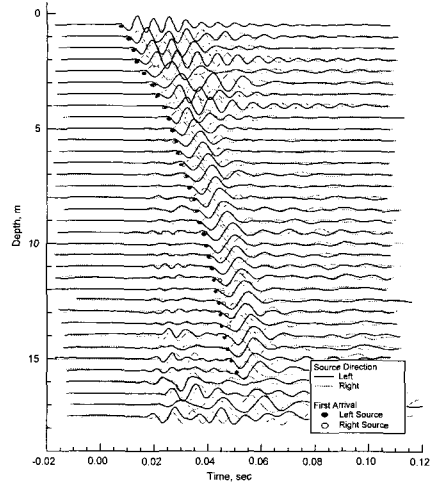
각 기관에서 제출한 깊이별 획득 신호는 서로 다른 장비 조합을 사용하였으므로 동일한 시험공에서 수행했음에도 불구하고 그 파형이 매우 달랐으며 목표 심도까지 신호를 획득하지 못한 경우도 있었다. 그림 3에 그 중 일부를 도시하였다. 그림 3(a)는 한국과학기술원 A의 결과로써 지표면 근처에서는 양호한 신호를 획득하다가 심도가 깊어질수록 신호가 점점 불량해지는 것을 볼 수 있다. 이는 가진원에 의한 상부의 진동이 방향 조절 로드를 타고 직접적으로 감지기로 전달되어 발생한 것으로 판단이 된다. 시험 심도가 깊어질수록 지반을 통해 전달되는 전단파 성분에 비해 로드를 타고 직접적으로 감지기로 전달되는 에너지가 커지므로 깊은 심도의 탐사를 어렵게 하며 풍화암 경계인 15m 근방에서부터

획득 신호의 상태가 안 좋아지는 것을 볼 수 있다. 같은 방식을 이용한 대학 #1에서 제출한 결과(그림 3(b))에서도 유사한 현상이 보였으며 대학 #2에서도 이러한 문제로 인하여 결과를 제출하지 못하였다. 그림 3(c)와 그림 3(d)는 신호 획득 장비의 아날로그 입력 해상도가 좋지 않거나(12bit 장비 사용) 장비내의 심한 전기적 잡음을 제거하지 못한 채 시험을 수행하여 양호하지 않은 신호를 획득한 것을 볼 수 있다.

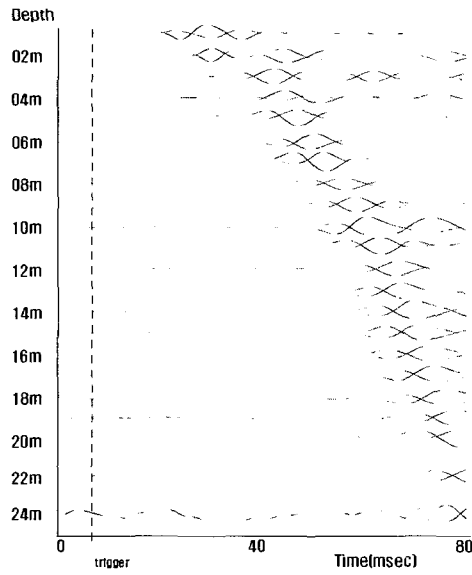
이와 달리 한국과학기술원 D의 결과는 시험심도 전반에 걸쳐 매우 양호한 신호를 획득한 것을 볼 수 있다(그림 3(e)). 신호 획득 장비의 아날로그 입력 해상도가 24bit이며 중합기능까지 있어 양호한 신호 획득에 매우 유리하였으며 감지기 시스템은 공벽 접촉 및 방향 조절이 자동화 되어 있어 시험 수행을 매우 신속하게 할 수 있었다. 동일하게 구성한 다운홀 시험 수행 장비를 가지고 시험을 수행한 희송지오택의 결과(그림 3(f))에서도 종료 시험 심도까지 매우 양호한 결과를 획득한 것을 확인 할 수 있었다. 실시하는 기관에 따라 깊이별 획득 신호의 형태가 매우 다른 것을 볼 수 있었다. 이는 수행 장비의 차이가 주된 원인인 것으로 우선 방향 조절 로드 시스템이 다운홀 시험 수행에 유리하지 않은 것으로 판단이 되었다. 로드 에 의한 잡음도 문제지만 시험 심도가 깊어질수록 로드 무게가 무거워져 감지기의 확실한 공벽 부착이 어려워진다. 공벽 접촉 장치로 공기주머니를



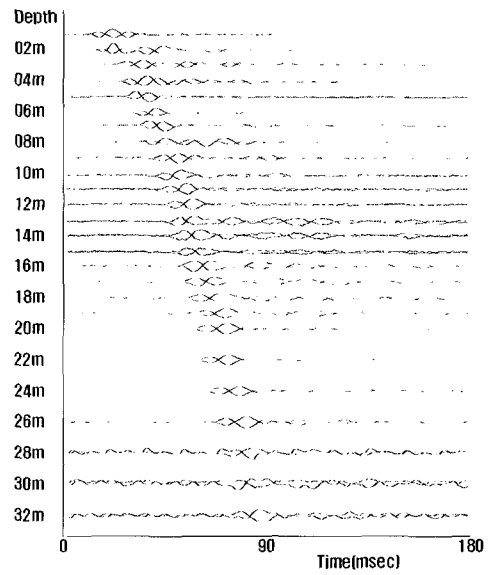
(a) 한국과학기술원 A



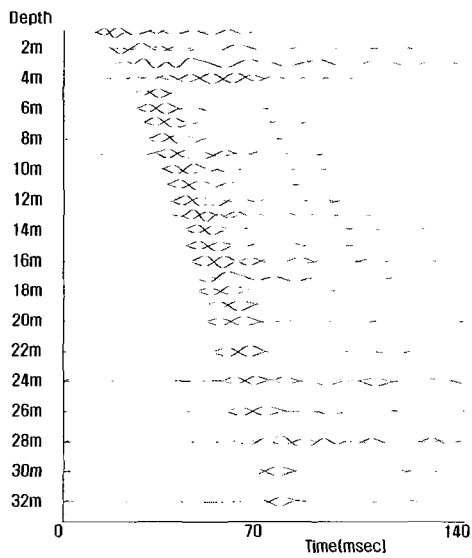
(b) 대학 #1



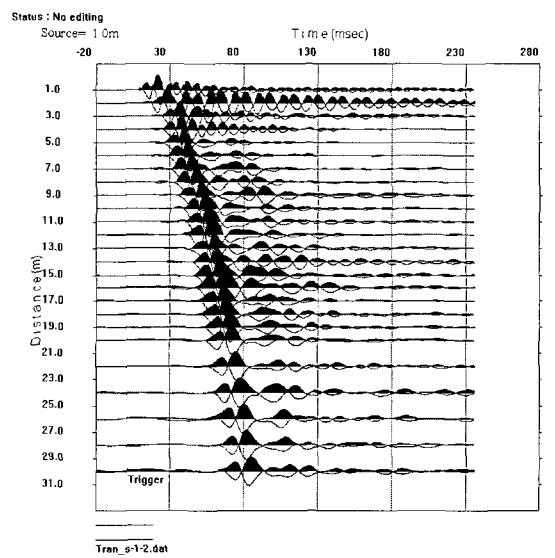
(c) 한국과학기술원 B



(d) 한국과학기술원 C



(e) 한국과학기술원 D



(f) 희승지오택

그림 3. 각 기관에서 제출한 깊이별 획득 신호

이용하는 방식은 경제적이며 자체 제작이 용이하나 공압 장비 연결 부위 등에서 공기가 새어나올 수 있으며 속도계용 라인 외에 공기 주입 및 배출 선 등이 필요하여 효율적 현장 시험을 어렵게 하였다.

본 상호 검증 시험 부지에서 목표 심도까지 탄성파 신호를 획득하기 위해서는 신호 획득 장비의 아날로그 입력 해상도가 최소한 16bit 이상이어야 하는 것으로 나타났다. 또한, 분석 가능한 양질의 신호를 획득하기 위해서는 전기적 잡음 등에 안정적인 장비를 사용해야 하며 필터 기능 및 종합 기능이 존재하며 전단파의 극성 특성을 현장에서 바로 확인할 수 있도록 좌우타격 신호에 대한 동시 도시 기능이 존재하는 장비를 사용하는 것이 유리한 것으로 판단되었다. 현장 실험을 통해 획득하는 깊이별 파형은 도달시간 정보를 정확하게 도출하는데 있어 매우 결정적인 역할을 하므로 적절한 장비 구성을 통하여 양질의 신호를 획득하는데 최선을 다해야 한다.

3.2.2 도달시간 정보의 도출

도달시간 정보를 정확히 도출하는 작업은 획득한 탄성파 신호에 대하여 하나의 숫자 정보로 압축하는 것으로 이러한 숫자 정보가 곧 해석 기법의 입력 값으로 사용되게 된다. 따라서 도달시간 정보를 정확하게 도출하는 것은 매우 중요하다. 도달시간 도출 방법은 초동 추정 방법, 극간법, 상호상관법 등의 여러 가지가 있지만 본 상호검증시험에서는 모든 기관에서 육안에 의한 초동 추정 방법을 이용하였으며 제출된 도달시간 정보를 그림 4에 비교하여 도시하였다. 가진원 거리 및 시험 심도를 동일하게 하여 각 팀이 다운홀 시험을 수행하였지만 획득한 초동 정보는 많은 차이가 나는 것을 볼 수 있다. 근본적인 이유는 3.2.1절에서 언급한 바와 같이 각 기관에서 서로 다른 장비를 사용하여 실험을 수행하였으므로 획득한 신호의 형태 및 품질이 다르기 때문이다. 또한 전단파 성분의 도달시점은 압축파 및 근접장 효과에 의해 그 시점이 명확하지 않은 경우가 많으므로 판단 기준에 따라 전단파 성분의 도달시점에 대한 시간차가 발생할 수 있다. 결과 중에 특별히 다른 도달시간 정보들과 차이가 나는 결과(ENT #1)는 직접 도달시간 결정에 있어 그 기준점이 전반적으로 잘못 되었기 때문으로 판단된다. 이런 도달시간 정보의 오류는 최종적인 전단파 주상도 도출에 있어서 영향을 주게 되므로 신뢰성 있는 도달시간 정보를 효율적으로 도출할 수 있는 방안

의 마련이 시급한 것으로 판단이 되었다.

3.2.3 전단파 속도 주상도의 결정

다운홀 해석 기법에는 직접법, 간접법, 수정간접법, 굴절경로법, 평균 굴절 경로법 등이 있다(Joh와 Mok, 1998; Kim 등, 2004; 방은석 등, 2006). 이 중 간접법, 수정간접법, 굴절경로법은 시험간격별 속도를 도출하는 기법이며 직접법과 평균 굴절 경로법은 전체 지반의 평균적인 속도 주상도를 도출하는 기법이다. 위에 언급한 참고문헌에 각 기법에 대한 상세한 설명이 기술되어 있으므로 본 논문에서는 생략하기로 한다. 모든 참여 기관에서 기본적으로 직접법을 이용하여 결과를 기본적으로 제출하였다. 직접법은 깊이별 도달시간 정보에서 그 기울기가 유사한 자료들끼리 경계를 지어 지반 모델을 구성하고 각 영역에서의 평균 속도를 도출하는 기법으로 시추 주상도 상의 각 토층의 평균 속도를 산출하는데 유리하다. 그림 5(a)에 그 결과를 비교하여 도시하였으며 범례는 생략하였다. 심도가 깊어질수록 전단파 속도는 증가하는 경향을 보였으며 매립토 및 풍화토 등의 토사에서는 200m/s에서 600m/s, 연암에서는 800m/s-950m/s로 도출되어 토질 종류에 따른 전단파 속도의 일반적인 범위에 속하는 것을 알 수 있다. 하지만 각 기관별로 직접법 적용시 설정된 지반 모델이 달라서 전단파 속도 주상도의 형태도 다르고 그 평균 속도도 다른 것을 볼 수 있다. 또한, 풍화암, 연암층을 하나 혹은 두 개의 속도를 가지는 층으로 단순하게 평가하고 있어 지반의 심도별 전단파 속도 변화 양상을 직접법을 이용하여 정확히 파악하기는 힘들다.

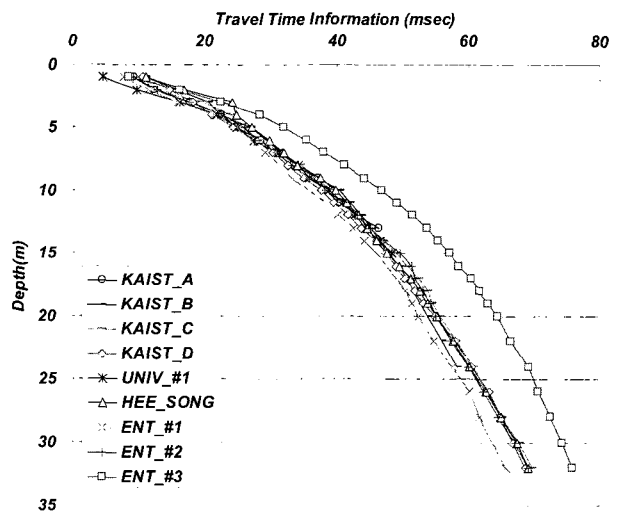
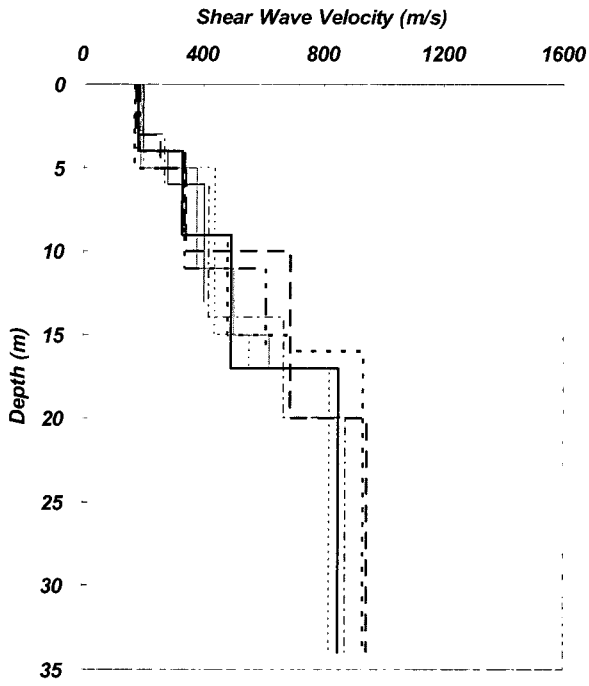
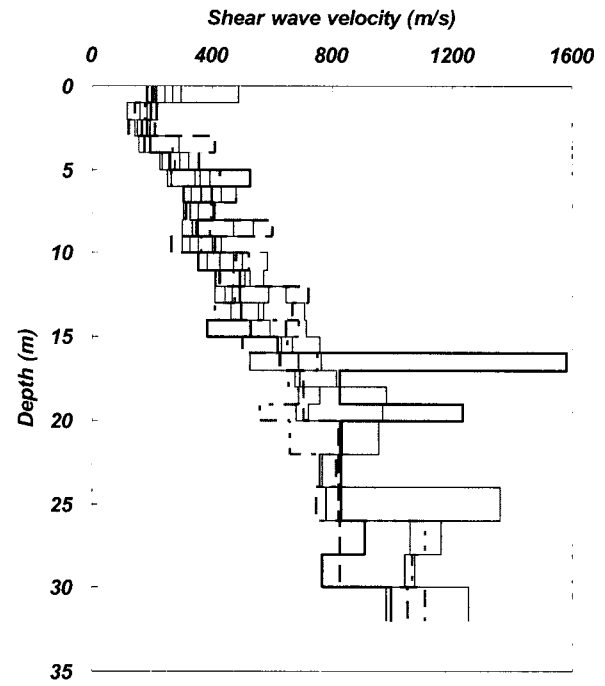


그림 4. 각 기관에서 제출한 시험 깊이에 따른 도달 시간 정보



(a) 직접법 이용 결과



(b) 굴절경로법 이용 결과

그림 5. 각 기관에서 제출된 자료들을 이용하여 결정한 전단파 속도 주상도의 비교

따라서 각 기관에서 제출한 도달시간 정보를 이용하여 시험 간격별 속도 도출 기법 중 하나인 굴절 경로법 (Kim 등, 2004)으로 전단파 속도 주상도를 결정하여 보았으며 그림 5(b)에 그 결과를 비교하여 도시하였다. 굴절 경로법은 전단파의 전파 경로를 굴절 경로로 고려하여 해석하므로 시험 간격별 속도를 도출하는 기법 중 가장 합리적인 것으로 평가되고 있다. 하지만, 직접법으로 도출한 결과에 비해서 분산이 매우 심한 것을 볼 수 있으며 깊이가 깊어질수록 그 분산 정도가 더욱 심하였다. 굴절경로법을 이용할 경우 상세한 결과를 도출할 수 있는 장점이 있지만 도달시간 정보에 오차가 존재할 경우 전단파 속도 주상도 상에서 의미 없이 속도의 증감이 반복되는 등의 잘못된 결과를 도출하게 된다(방은석 등, 2006). 다운홀 기법에서 신뢰성 있게 해석을 수행하는 것은 무조건 자세하게 결과를 도출하는 것이 아니며 주어진 도달시간 정보를 바탕으로 가장 적절하게 지반을 모델링하는 것이라고 할 수 있다. 따라서 획득한 도달시간 정보의 신뢰성 및 결과 적용 대상에 따라 적합한 다운홀 해석 기법을 적용하는 것이 바람직하다.

4. 최적의 다운홀 기법 수행 시스템의 구성

상호 검증 시험을 통해 현재 국내에서 수행되고 있는

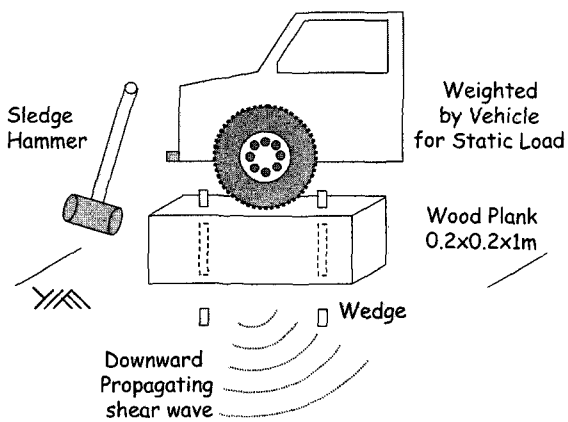
다운홀 기법의 현황에 대한 파악이 가능하였다. 대부분의 기관에서 적합한 장비를 구성하고 운용하고 있었으며 현장 시험 및 결과 도출에 있어 숙련된 수행 능력을 확인할 수 있었다. 하지만 감지기 및 신호 획득 장비의 구성에서 약간의 문제점을 발견할 수 있었으며 다운홀 기법을 더욱 효율적으로 수행하고 신뢰성 있는 전단파 속도 주상도를 도출하기 위해 개선할 사항들을 확인할 수 있었다. 본 연구에서 이러한 고찰을 바탕으로 최적의 다운홀 기법 수행 시스템을 구성하여 보았으며 표 2에 요약하여 정리하였다. 크게 하드웨어와 소프트웨어로 구분되며 양질의 신호 획득이 용이하며 현장에서 효율적으로 시험을 수행할 수 있도록 하드웨어를 구성해 보았다. 본 연구의 핵심은 노트북 기반의 신호 획득 장비 구성이라고 할 수 있는데 적절한 소프트웨어와의 결합을 통해 신뢰성 있는 다운홀 기법의 수행이 가능하게 하였다.

4.1 가진원 시스템의 구성

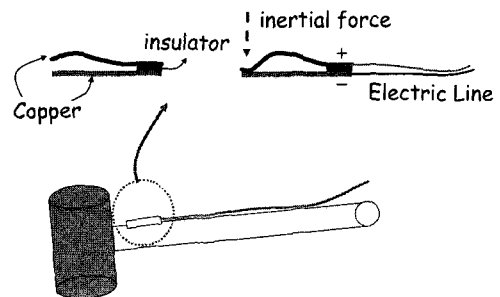
본 연구에서는 상호 검증 시험시 사용되었던 각 기관의 가진원의 장점을 종합하여 그림 6(a)와 같이 가진원을 구성하였다. 지반으로 풍부한 전단파 성분이 전달되며 반복 타격이 유리하고 실험 수행이 용이하도록 가진

표 2. 본 연구에서 구성한 다운홀 기법 수행 시스템 요약

장비 종류	Model 명	내용		
가진원	가진판(자체 제작)	널빤지 형태의 나무로 제작(길이 1m, 나비 0.2m, 높이 0.2m) 봉 형태의 쇠기 제작 관입 차량 등으로 상재하중 재하		
	해머(자체 제작)	슬러지 해머(5kg)		
	트리거 장치(자체 제작)	접촉식 트리거		
감지기	시추공용 Geostuff사 BHG-3(해외 구입)	센서 부분	GS-20D, Geospace	
		공벽 접촉 장치	모터 이용 판스프링 Clamping System	
		방향 조절 장치	지자기 이용 자동 조절 장치	
	연약지반관입용 (자체제작)	센서 부분	GS-20D, Geospace	
		공벽 접촉 장치	관입을 통한 지반 접촉	
		방향 조절 장치	관입 로드를 통한 인식	
신호 획득 장비	Notebook based DAQ, NI DAQPad-6015 (해외 구입)	아날로그 입력해상도	16bit	
		최대 신호 획득 간격	0.02ms	
		자동 저장	자체 소프트웨어 Field_DH_v1.0	
		로우패스 필터		
		중첩 기능		
		동시도시 기능		
		도달시간 정보 도출 (초동 picking, 극간법, 상호상관법 등)	자체 소프트웨어 Analysis_DH_v1.0	
		전단파 속도 주상도 도출 (수정도달시간, 굴절경로법)		
	상세 전단파 속도 주상도 도출 (평균 굴절 경로법 포함)	자체 소프트웨어 Analysis_DH_v1.0		
	탄성파 탐사 장비 Notebook based DAQ, Geode(해외 구입)		아날로그 입력해상도	24bit
			최대 신호 획득 간격	0.02ms
			자동 저장	가능
			로우패스 필터	
			중첩 기능	무 (자체 소프트웨어로 보강 예정)
동시도시 기능				
도달시간 정보 도출 (초동 picking, 극간법, 상호상관법 등)	자체 소프트웨어 Analysis_DH_v1.0			
상세 전단파 속도 주상도 도출 (평균 굴절 경로법 포함)				



(a) 지표면 가진원의 설치 개요도



(b) 해머 부착형 접촉식 트리거

그림 6. 새로이 구성된 가진원 시스템

원을 구성하였다. 썰기를 사용하여 가진판과 지반의 결속력을 증대시키고자 하였으며 자동차 등의 상재하중을 가해줌으로써 전단파가 풍부하게 발생되도록 하고 또한 가진판이 움직이지 않게 함으로써 다수의 타격에 의해서도 가진원의 반복성이 지속되도록 하였다. 트리거 시스템은 그림 6(b)와 같이 가장 단순한 해머 내 접촉식 트리거 방식을 채택하였다. 접촉식 트리거는 저렴하고 다른 센서를 사용하는 방식에 비해 트리거 시점이 매우 정확하고 반복성이 뛰어난 장점이 있다. 또한 가진판-해머 접촉 방식에 비해서 현장 사용성이 우수하다. 가진판-해머 방식은 가진판의 타격면과 해머가 반드시 전도체로 구성되어야 하며 지반을 통해 전류가 흐를 수 있어 타격 행위 외에도 트리거가 되는 문제점이 있다.

4.2 감지기 시스템의 구성

상호 검증 시험에서 감지기 시스템은 현장 시험을 수월하게 하고 양질의 신호를 획득하는데 있어 가장 중요한 장비인 것을 확인할 수 있었다. 본 연구에서는 상호 검증시험 고찰을 바탕으로 감지기 시스템으로 시추공용과 연약 지반 관입용, 두 종류로 구성하였다.

시추공용 감지기 시스템으로는 상호 검증 연구에서 가장 뛰어난 성능을 보여주었던 Geostuff사의 BHG-3를 채택하여 도입하였다. 이 장비는 공벽 접촉 장치가 모터에 의해 작동되는 판 스프링 형태로 수압에 영향을 받지 않고 공벽에 대한 반복적인 탈부착이 용이하게 되어 있다. 지자기를 이용한 자동 방향 조절 장치를 사용하며 인장선(tension line)과 전선(electric line)이 일체형이므로 편리한 시험 수행이 가능하다. 상부에 3성분 지오폰이 삽입되어 있으며 하부에 자동 공벽 접촉을 위한 판 스프링과 자동 방향 조절을 위한 지자기 부품들이 부착되어 있다.

연약지반에서는 시추하는 동안 공벽이 허물어지는 경우가 많아 시추공 주변이 많이 교란된다. 또한 압밀 개량 평가 등을 위해서는 다수의 지점에 대해서 주기적으로 현장 시험을 수행하여야 하므로 시추공 이용방식의 다운홀 기법은 적용성이 떨어진다고 볼 수 있다. 따라서 본 연구에서는 시추공용 감지기 시스템과 별개로 연약지반에서 효율적으로 다운홀 기법을 수행할 수 있도록 관입용 감지기 시스템을 자체 제작하였다. 콘 모양의 선단부에 10Hz 속도계를 3방향으로 삽입하고 각각의 속도계를 전선으로 연결하였다(그림 7). 관입 장비를

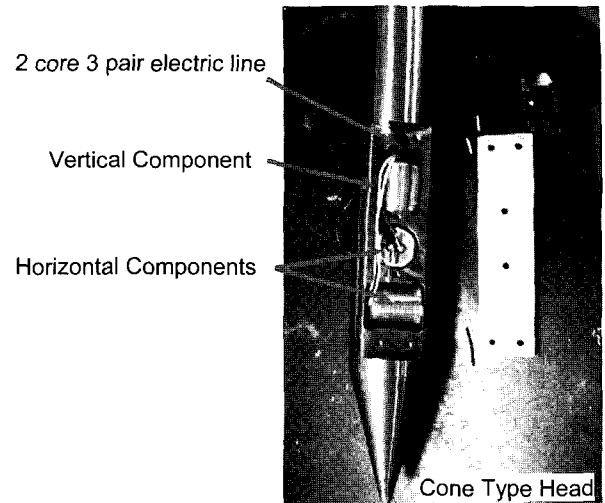


그림 7. 자체 제작한 연약지반용 관입형 감지기

통해 연약지반에 감지기를 밀어 넣는 방식이므로 지반과의 접촉성은 매우 뛰어나며 별도의 방향 조절 장치도 필요하지 않으므로 매우 안정적으로 다운홀 시험 수행이 가능하다. 미국, 유럽 등지에서 탄성파콘(Seismic Cone Penetration Test, SCPT)이 개발되어 콘 실험과 동시에 다운홀 시험을 수행하는 방식으로 적용되고 있지만(Campanella와 Stewart, 1992) 본 연구에서 제작한 감지기 시스템은 매우 저렴하게 제작이 가능하므로 연약지반에서 다운홀 시험만을 신속하게 수행하는데 있어서는 매우 유리하다고 판단된다. 참고로 본 연구에서 소요된 감지기 제작비용은 대략 30만원이다.

4.3 신호 획득 장비 시스템의 구성

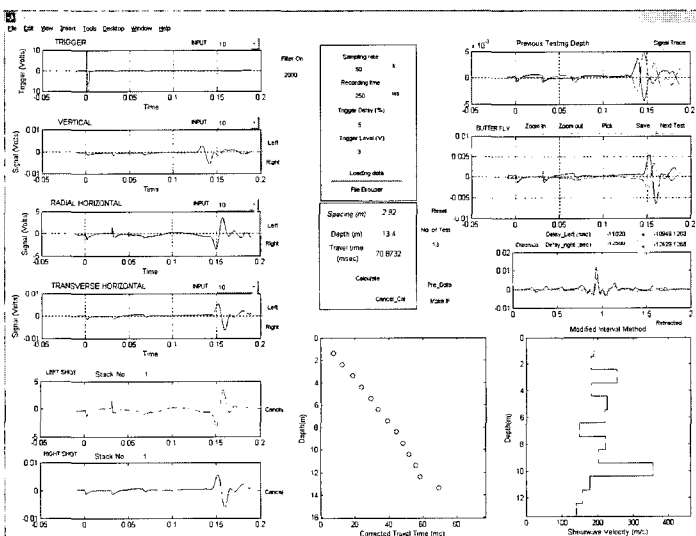
상호 검증시험에 대한 결과 고찰을 통해 현장에서 신호 획득 및 관리를 효율적으로 수행하고 동시에 해석을 수행하는 것이 신뢰성 있는 전단파 속도 주상도를 도출하는데 있어 매우 유리한 것으로 판단되었다. 따라서 본 연구에서는 노트북 기반의 신호 획득 장비의 구성을 통해 이러한 사항을 달성하고자 하였다. 노트북 기반으로 구성하기 위해서는 현장에서 휴대하기 용이한 A/D 보드가 필요하므로 USB 연결 방식의 장비를 섭외하였으며 16bit의 아날로그 입력 해상도를 가지며 채널당 0.02ms 시간 간격으로 데이터 획득이 가능하고 가격이 비교적 저렴한 National Instrument 사의 DAQPad-6015 모델을 채택하였다. A/D 보드를 제어하고 신호를 획득하며 획득한 신호를 관리하고 결과를 해석하는 과정을 위해 MATLAB을 이용하여 프로그램을 적절하게 코딩하였

다. 신호 획득 및 관리 프로그램(Field_DH_v1.0)에는 현장에서 원하지 않는 주파수 대역의 신호를 제거할 수 있도록 필터 기능을 추가 하였으며 잡음이 첨가 되었거나 깊은 심도에서의 미약한 신호를 해석 가능한 신호로 개선하기 위한 중합 기능을 삽입 하였다. 또한 좌우 타격 신호를 동시에 도시 가능하도록 하여 전단파의 극성 특성을 활용한 현장 시험 수행이 용이하도록 하였다. 현장에서 효율적으로 신호를 획득 및 관리하기 위해 필요한 기능들은 추가적인 업그레이드를 통해 개선이 가능하다.

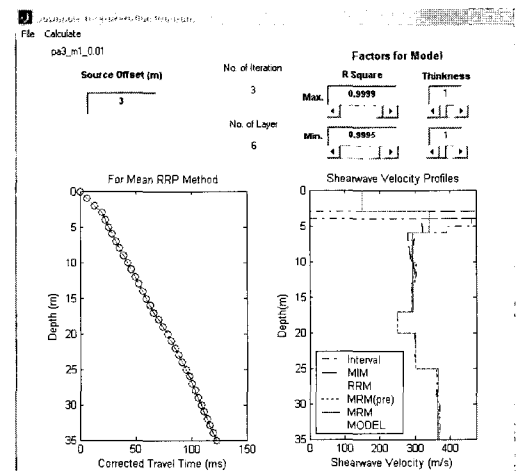
프로그램 Field_DH_v1.0은 단순히 신호 획득 장비를 제어하고 획득한 신호를 관리하는 데 국한된 것이 아니라 도달시간 정보의 효율적인 획득 및 전단파 속도 주상도의 도출 과정을 포함하였다. 현장에서 시험 수행과 동시에 최종 결과를 확인할 수 있음으로 인해 더욱 신뢰성 있는 다운홀 기법의 수행이 가능하게 된다. 그림 8(a)에 프로그램 Field_DH_v1.0의 주화면을 도시하였다. 획득된 파형으로부터 초동 추정(first arrival picking), 극간법(peak to peak method), 상호상관법(cross-correlation method) 등을 통해 도달시간 정보를 획득할 수 있도록 하였다. 획득 파형의 상태에 따라 정확한 도달시간 정보를 도출하기에 보다 유리한 기법이 있으나 육안에 의한 초동 추정 방법은 주관적이며 정확성이 떨어지며 일반적으로 극간법 및 상호상관법이 비교적 정확한 정보를 제공하는 것으로 연구되었다(방은석 등, 2007). 본 프로그램에는 깊이별 수정 도달시간을 시험과 동시에 바로 도시

할 수 있도록 하여 다른 깊이에서의 도달시간 정보와 그 추세가 너무 벗어나는 경우 도달시간 정보 도출 방법을 변경하거나 해당 깊이에서 재시험을 수행할 수도 있도록 하여 다운홀 기법 수행과정에서 가장 중요한 단계인 도달시간 정보 도출을 보다 합리적으로 수행할 수 있도록 구성하였다. 수정 간접법으로 도출된 전단파 속도 주상도가 바로 도시되도록 하였으므로 해당 지반의 전단파 속도를 지속적으로 가늠하면서 현장 시험을 지속할 수 있다. 다운홀 결과 해석 프로그램 Analysis_DH_v1.0 과의 연동 과정을 통해 다른 모든 다운홀 해석 기법(간접법, 수정간접법, 굴절경로법 및 평균 굴절 경로법)으로도 결과의 획득이 바로 가능하도록 구성하였다(그림 8(b)). Field_DH_v1.0에 수정간접법만을 포함시킨 이유는 굴절경로법 및 평균 굴절경로법은 해석 시간이 약간 소요되므로 매회 결과를 확인하기에는 비효율적이고 수정간접법은 특정 경우를 제외하고는 굴절경로법 수준의 신뢰성을 가지기 때문이다. 평균 굴절경로법은 직접법과 굴절경로법의 장점을 결합한 기법으로 굴절 경로를 고려하고 도달시간 정보 획득 오류를 적절하게 보정해 주면서 최종 결과를 도출하므로 획득한 도달시간 정보에 오류가 포함되어 굴절경로법 결과를 신뢰하지 못할 경우 평균 굴절 경로법의 적용을 통해 합리적인 전단파 속도 주상도 도출이 어느 정도 가능하다(방은석 등, 2006).

추가적으로 탄성과 탐사 수행시 널리 사용되는 탄성과 기록기를 이용하여 신호 획득 시스템을 구성하였다. 여



(a) 신호 획득 및 관리 프로그램 Field_DH_v1.0



(b) 결과 도출 프로그램 Analysis_DH_v1.0

그림 8. 구성된 다운홀 신호 획득, 관리 및 결과 분석 프로그램

기서도 마찬가지로 획득한 데이터의 신속한 후처리가 용이하도록 노트북과 연결하여 사용할 수 있는 Geometrix사의 Geode를 도입하였다. Geode는 상호검증시험에서 안정적인 성능을 보인 Geometrix사의 Stratavisor와 동일한 사양을 가지는 기종이다. 24bit의 아날로그 입력 해상도를 가지며 최대 신호 획득 간격이 0.02ms로 다운홀 시험에 적합하며 장비 자체적으로 잡음에 매우 안정적이므로 깊은 심도의 탐사에 매우 유리하다. 앞서 소개한 DAQ-Pad를 사용한 노트북 기반 신호 획득 시스템과 유사하게 Geode로 획득한 신호를 효율적으로 관리하고 다운홀 결과 도출 프로그램과 연계할 수 있는 프로그램을 제작 중에 있다.

5. 구성된 수행 시스템의 현장 검증

5.1 남해안 연약지반 개량 부지

연약지반에 대한 개량 작업이 진행 중인 남해안 항만 건설 부지에서 새로이 구성된 수행 시스템을 이용하여 다운홀 기법을 수행하였다. 개량 대상은 점성토 지반으로 PBD(plastic board drain)을 1.2m 간격으로 포설하고

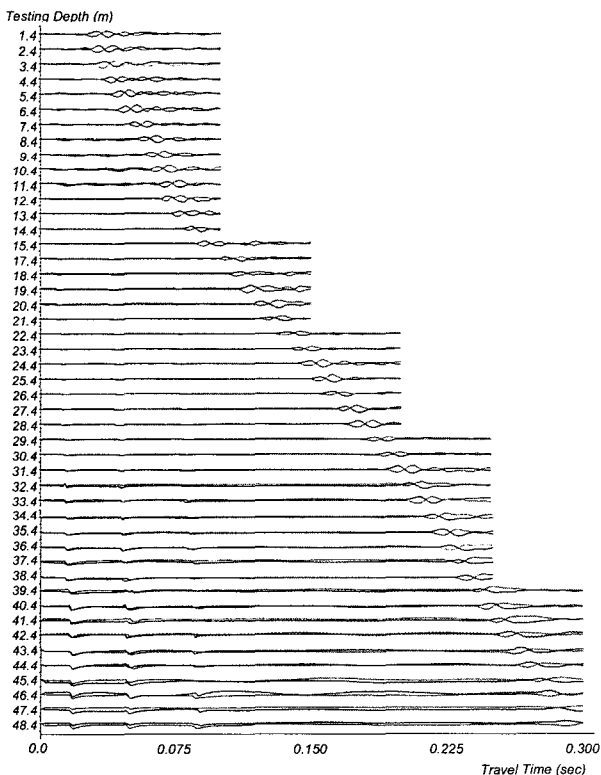


그림 9. 구성된 연약지반 관입형 감지기와 NI-DAQ 시스템을 이용하여 획득한 깊이별 신호

바다모래로 약 13m 높이로 여성토 한 상태였다. 점성토 지반의 개량 정도를 전단파 속도를 이용하여 평가하고자 하였으며 경제적이면서도 정확도가 높은 다운홀 기법을 적용하고자 하였다. 연약지반용 관입형 감지기와 NI-DAQ 방식의 노트북 기반 신호 획득 시스템을 적용하였으며 관입 장비는 GeoMil사에서 제작된 20t 규모의 전문 관입 장비를 사용하였다. 타격과 동시에 신호 획득 및 관리 프로그램으로 신호가 들어오게 되며 선택적 중첩(stack)을 수행하여 전단파 성분을 극대화 시킬 수 있으며 양방향 타격신호를 동시에 도시하여 볼 수 있으므로 현장 시험을 신속하게 수행할 수 있었다. 또한 도달시간 정보를 바로 도출하고 동시에 전단파 속도 주상도가 결정되므로 실험과 동시에 현장 지반 조건을 평가할 수 있어 현장 실험을 효율적으로 수행할 수 있었다.

이렇게 획득한 시험 심도별 신호는 그림 9와 같으며 최종 시험 심도인 48.4m에 이르기까지 전단파 성분의 도달을 확연히 알 수 있을 정도로 양질의 신호를 획득하였다. 획득한 신호가 주파수 특성이 거의 동일하므로 상호상관법을 이용하여 도달시간 정보를 도출하였으며 이를 바탕으로 결정된 최종 전단파 속도 주상도는 그림 10(a)와 같다. 굴절 경로법(RRM) 결과에서 도달시간 정보 오류로 인한 것으로 추정되는 전단파 속도의 증감현상이 보였으므로 평균 굴절 경로법(MRM)을 적용하여 이에 대한 보정 작업을 하였다. 동일 지역에서 수행된 CPT 결과 중 선단 저항력(tip resistance) 값(그림 10(b))과 비교하였을 때 상부 성토 구간과 점성토 구간이 동일하게 구별 되는 것을 볼 수 있으며 이러한 경계는 선행

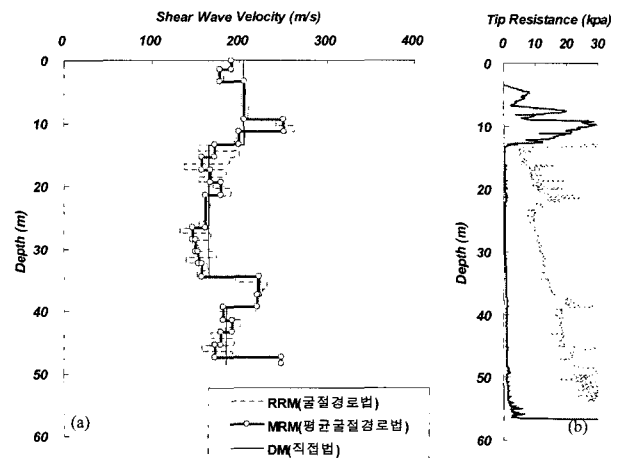


그림 10. 결정된 전단파 속도 주상도와 동일 지역에서 수행된 CPT 결과와의 비교, (a) 굴절경로법, 평균굴절경로법, 직접법을 이용하여 해석한 결과, (b) CPT 결과 중 선단저항력(그래프 내 점선은 실선으로 표현된 실제 계측 값의 20배 크기임)

압밀 하중을 위해 시공된 성토고(13m)와 거의 일치하는 것이다. 또한 전반적으로 CPT 값의 변화 양상과 전단파 속도 변화 양상이 어느 정도 유사한 것을 볼 수 있다. 따라서 지속적인 다운홀 기법 수행을 통해 점성토 구간에 대한 개량 상태를 효율적으로 평가할 수 있으리라 판단이 되었다. 직접법(DM) 결과는 너무 큰 층으로 구분하여 평균값을 제공하고 있으므로 이러한 연약 지반 개량 평가를 위해 적용하기에는 부적합한 것을 볼 수 있다.

5.2 충청남도 예산 부지

2005년 초에 대전-당진간 고속도로 예산 휴게소 예정 부지에 모형부지를 건설하고 여러 가지 탄성과 탐사 기법에 대한 검증 시험을 수행한 바 있다(김동수 등, 2005b; Kim 등, 2006). 모형부지는 검증 비교 연구를 효율적으로 하기 위해 토층 구성을 달리하여 인공적으로 성토하여 제작한 것으로 측량을 통해 지반 층상 구조 형태를 정확히 파악하였다. 또한 모형부지 건설시 성토시마다 깊이별로 매설한 속도계를 이용하여 획득한 압축파 및 전단파 속도에 대한 검증용 비교값(ref)이 있어 탄성과 탐사 기법에 대한 검증 시험이 용이하다. 그림 11에 건설된 모형부지의 평면 개요도 및 매설된 속도계를 이용하여 검증용 기준값을 결정하는 방법을 도시하였다. 매설된 속도계를 이용할 시에 공내 탄성과 탐사에서 발생하는 여러 가지 문제를 제거한 상태에서 구간 속도를 구할 수 있어 신뢰성이 높다고 할 수 있다. 이러한 모형부지에서 본 연구를 통해 구성된 BHG-3 감지기 시스템

및 Geode 기반의 신호 획득 시스템을 검증하고자 하였으며 비교 연구를 위해 기존의 방향조절로드 방식의 감지기 시스템을 동시에 적용하였다.

방향조절로드 방식의 경우 상호 검증 시험에서의 경우와 마찬가지로 특정 깊이 이상에서 잡음에 의해 전단파 성분의 도달을 확인하기가 힘들었으며 결국 목표 심도까지 시험 수행을 하지 못하였다(그림 12(a)). 반면 새로이 구성된 다운홀 시험 시스템을 이용하여 획득한 깊이별 신호는 목표 심도까지 비교적 양질의 신호를 획득할 수 있었다(그림 12(b)). 이러한 양질의 신호를 바탕으로 도달시간 정보를 용이하게 도출할 수 있었으며 다운홀 결과 해석 프로그램 Analysis_DH_v1.0을 이용하여 굴절법 및 평균 굴절경로법을 이용하여 전단파 속도 추상도를 결정하였다. 그림 13에 결정된 전단파 속도 추상도를 모형부지 검증용 비교값 및 SPT-N치와 비교하여 도시하였다. 모형부지 검증용 비교값(ref)과 비교하여 볼 때 정확하게 일치하지는 않는 것을 볼 수 있는데 그 이유는 검증용 비교값의 경우 매설된 속도계들 사이의 평균 구간 속도이며 시험공과 50cm 가량 이격되어 있어 지반 상태가 약간 다를 수 있기 때문으로 판단된다. 하지만 그 형상이 유사하게 증가 혹은 감소하는 것을 볼 수 있다. 동일 시험공에서 실시된 SPT-N치와의 비교에서도 증가 및 감소하는 경향이 유사한 것을 확인할 수 있다. 본 검증부지의 실험을 통해서 기존의 방향조절로드 방식의 다운홀 시험 시스템에 비해서 새로이 구성된 시추공용 감지기 및 Geode 시스템의 현장 적용성을 확인할 수 있었다.

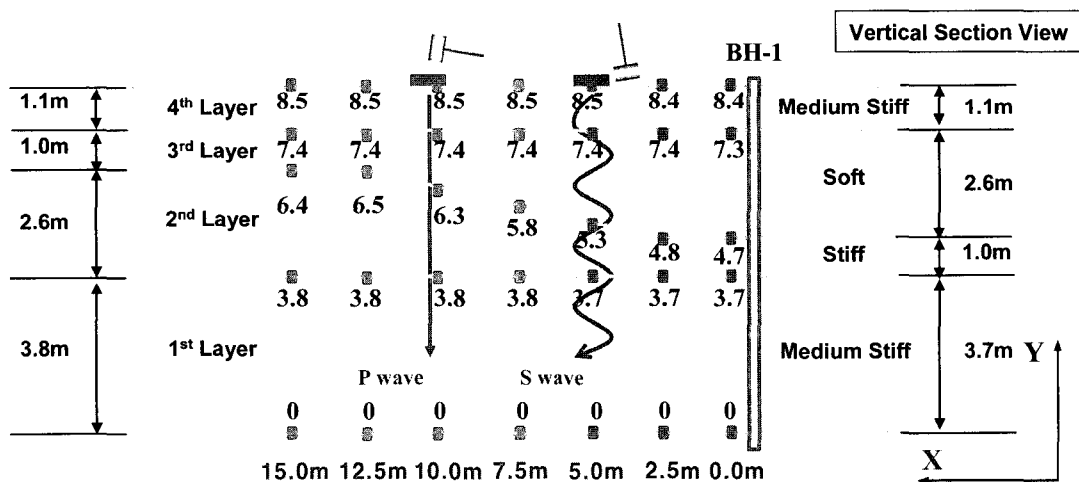


그림 11. 모형부지 형상 및 매설된 속도계를 이용한 검증용 기준값(ref)의 결정 방법 개요 (검증용 시험공 BH-1의 바로 이웃에 위치한 속도계 배열을 사용하여 가진원 거리 0m인 상태의 다운홀 방식으로 검증용 기준값을 획득함)

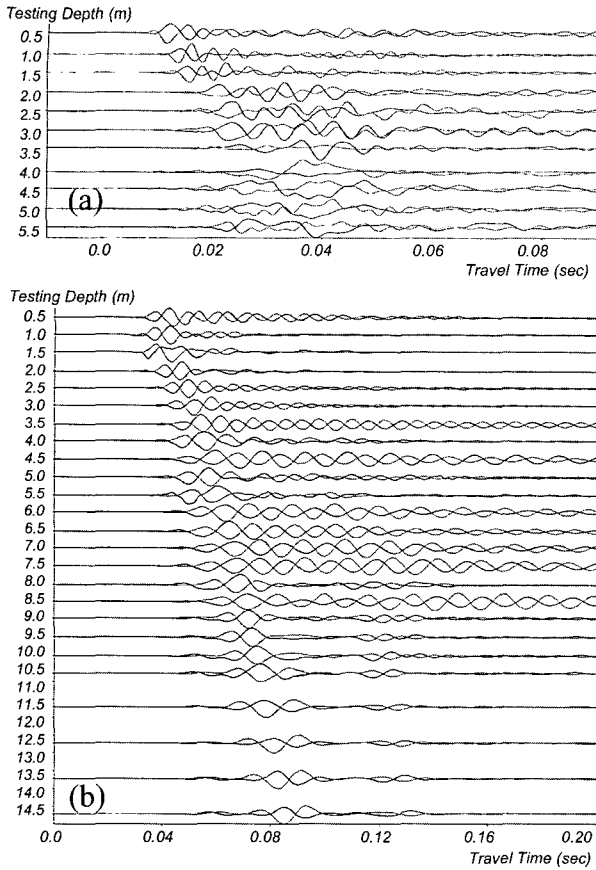


그림 12. 현장 실험을 통해 획득한 깊이별 신호(모형부지): (a) 방향로드 감지기 시스템 이용한 결과, (b) 구성된 시추공용 감지기 및 Geode 시스템을 이용한 결과

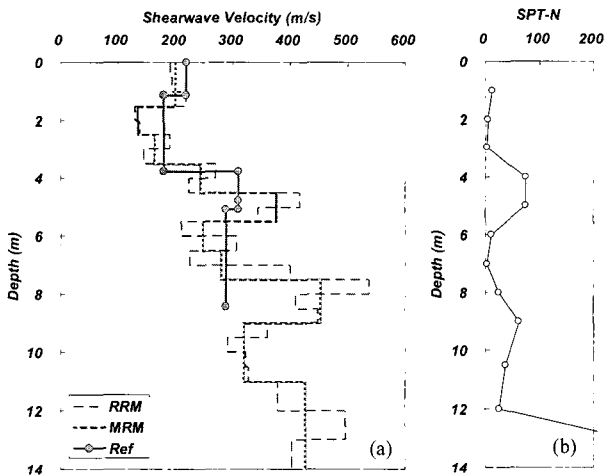


그림 13. 다운홀 기법 수행 결과와 모형부지 기준값 및 SPT-N치와의 비교: (a) 굴절경로법(RRM) 및 평균 굴절 경로법(MRM)을 이용하여 결정된 전단파 속도 주상도와 모형부지 기준값(Ref)과의 비교, (b) 동일 시험공에서 실시된 깊이별 SPT-N치

6. 요약 및 결론

본 논문에서 다운홀 기법에 대한 상호 검증 시험 결과 고찰을 통해 다운홀 기법을 통해 신뢰성 있는 전단파

속도 주상도를 결정하게 위해서는 다운홀 시험에 적합한 실험 장비의 구성, 도달시간 정보의 정확한 도출, 합리적인 전단파 속도의 결정 등 기법 수행 단계별로 개선하고 확립하여야 하는 것들이 있는 것으로 판단이 되었다. 이를 바탕으로 최적의 다운홀 기법 수행 시스템을 구성하고자 하였다. 기본적으로 현장 실험에서부터 결과 도출까지의 일련의 과정을 자동화하고자 하였으며 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 다운홀 현장 시험을 위한 장비에서 감지기의 방향을 조절하기 위해 사용되는 방향 로드는 특정 조건에서 노이즈 발생의 원인이 되는 것으로 나타났다. 또한 현장 시험의 효율성 측면에서 자동화된 장비 사용이 필요한 것을 확인하였다. 따라서 본 연구에서는 시추공용으로는 현장 시험을 효율적으로 수행 가능한 자동화된 상용 장비를 도입하였으며 연약지반용으로는 관입형 다운홀 감지기 시스템을 제작하였다.
- (2) 적합하지 않은 신호 획득 장비의 사용으로 인해 양질의 신호를 획득하는데 많은 어려움이 있었다. 또한 중합, 동시 도시 및 필터링 기능 등이 포함된 장비가 양질의 신호를 획득하는데 더욱 유리한 것을 확인하였다. 따라서 아날로그 입력 해상도가 높고 안정적으로 신호 획득이 가능한 탄성과 탐사용 신호 획득 장비를 도입하였으며 현장에서 효율적인 신호 획득 및 관리가 가능하며 결과 도출까지 자동적인 기법 수행이 가능하도록 노트북 기반의 신호 획득 장비 및 프로그램을 제작하여 신호 획득 시스템을 구성하였다.
- (3) 신뢰성 있는 전단파 속도 주상도를 도출하기 위해서는 도달 시간 정보의 획득을 객관적이며 신뢰성 있게 할 필요성이 있음을 확인하였다. 본 연구에서는 이를 위해 프로그램을 구성하였으며 현장에서 초동 추정법, 극간법, 상호상관법 등을 통해 도달시간 정보를 자동적으로 산출할 수 있도록 하였다. 또한 이와 동시에 최종적인 전단파 속도 주상도를 자동적으로 도출이 가능하도록 프로그램을 연동하여 구성함으로써 신뢰성 있는 다운홀 기법의 수행이 가능하도록 하였다.
- (4) 연약 지반 및 검증용 모형 부지에서 본 연구를 통해 구성된 다운홀 기법 수행 시스템을 적용하여 보았으며 그 효율성을 확인할 수 있었다.

감사의 글

본 연구는 건설교통부가 출연하고 한국건설교통기술평가원에서 위탁시행한 2004년도 건설핵심기술연구개발사업 (04핵심기술B01-04)에 의해 수행된 것이며 이에 감사드립니다. 또한 다운홀 기법의 상호검증시험에 참여해주신 모든 관계자분들께 깊이 감사드립니다.

참고 문헌

1. 김동수, 김기석, 조성민, 황대진, 황성춘 (2005a), "Round Robin Test를 통한 지반 동적 물성치 도출 기법 비교 연구", *한국지반공학회 봄 학술발표회 특별 Session*, 동적물성치 획득을 위한 현장 및 실내 Round Robin Test 결과 발표, pp.1-4.
2. 김동수, 김종태, 방은석, 박헌준 (2005b), "실대형 모형부지를 활용한 HWAW 기법의 2차원 적용성 평가", *대한토목학회 정기 학술대회 전문학회 세션*, 스마트사회기반시설 연구센터, 스마트 구조 건전도 모니터링 기술, CDROM M401B.
3. 방은석, 김동수, 윤종구 (2006), "다운홀 시험에서 신뢰성 있는 전단파 속도 주상도 도출을 위한 해석 기법의 개선", *대한 토목학회 논문집대한토목학회 논문집*, Vol.26, No.3c, pp.157-170.
4. 방은석, 이세현, 김종태, 김동수 (2007), "다운홀 기법에서 신뢰성 있는 도달시간 정보 도출에 대한 고찰", *한국지반공학회 논문집* (심사중).
5. Auld B. (1977), "Cross-Hole and Down-Hole VS by Mechanical Impluse", *Journal of Geotechnical Engineering division*, December, pp.1381-1398.
6. Campanella, R.G. and Stewart, W.P. (1992), "Seismic cone analysis using digital signal processing for dynamic site characterization", *Canadian Geotechnical Journal*, Vol.29, pp.477-486.
7. Casey, T.J. and Mayne, P.W. (2002), "Development of an electrically-driven automatic downhole seismic source", *soil dynamics and earthquake engineering*, Vol.22, pp.951-957.
8. Crice, D. (2002), *Borehole Shear-Wave Surveys for Engineering Site Investigations*, Geostuff, <http://www.georadar.com/Shearwaves2.pdf>.
9. Hoar, R.J. and Stokoe, K.H. (1978), "Generation and Measurement of Shear Waves In situ", *Dynamic Geotechnical Testing*, ASTM STP 654, American Society for Testing and Materials, pp.3-29.
10. Joh, S.H. and Mok, Y.J. (1998), "Development of an Inversion Analysis Technique for Downhole Testing and Continuous Seismic CPT", *Journal of Korean Geotechnical Society*, Vol.14, No.3, pp.95-108.
11. Kim, D. S., Bang, E. S., and Kim, W. C. (2004), "Evaluation of various downhole data reduction methods to obtain reliable Vs profile", *Geotechnical Testing Journal*, Vol.27, No.6, pp.585-597.
12. Kim, D.S., Kim, J.T., Bang, E.S., Park, H.J., and Park, H.C. (2006), "Comparative study of Seismic Field Test using Multi Layered Model Testing Site", *GeoShanghai International Conference*, Shanghai, China.
13. Larkin T.J. and Taylor. P.W. (1979), "Comparison of down-hole and laboratory shear wave velocities", *Canadian Geotechnical Journal*, Vol.16, pp.152-162.
14. Michaels, P. (1998), "In situ determination of soil stiffness and damping", *Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering*, Vol.124, No.8, pp.709-719.
15. Sanchez-Salinero, I. (1987), *Analytical investigation of seismic methods used for engineering applications*, Ph. D. dissertation, Univ. of Texas of Austin. 401p.
16. Stokoe, KH, Joh, SH, and Woods, RD. (2004), "Some contributions of in situ geophysical measurements to solving geotechnical engineering problems", *International Site Characterization ISC'2 Porto*, Portugal, pp.19-42.

(접수일자 2007. 1. 11, 심사완료일 2007. 4. 27)