

## 다운홀 탄성파 기법용 전단파 자동 가진원의 개발

### Development of Automatic Shear-wave Source for Downhole Seismic Method

방 은 석<sup>1</sup> Bang, Eun-Seok

성 낙 훈<sup>2</sup> Sung, Nak-Hoon

김 정 호<sup>3</sup> Kim, Jung-Ho

김 동 수<sup>4</sup> Kim, Dong-Soo

#### Abstract

Downhole seismic method is very economic and easy to operate because it uses only one borehole and simple surface source to obtain the shear wave velocity profile of a site. In this study, automatic shear wave source was developed for efficient downhole seismic testing. This source is motor-spring type and easy to control. It can lessen the labor of operator and the working time. Moreover, it can provide better and repetitive signals for data interpretation. By combining developed automatic source with automatic receiver system, PC based data acquisition system, advanced managing program, and semi-automatic downhole performing system were constructed. Through comparison test with manual source, advantages of automatic source were verified. Constructed semi-automatic downhole testing system including automatic shear wave source was applied to the soft soil site. The applicability and reliability were verified and the importance of automating testing system for obtaining reliable result was emphasized.

#### 요 지

지반의 전단파 속도 주상도를 도출하는데 있어 다운홀 기법은 하나의 시추공을 이용하고 간단한 지표면 가진원을 사용하므로 매우 경제적이다. 현장 실험을 더욱 용이하게 하고 양질의 신호를 획득하기 위해 자동 가진원을 개발하였다. 모터-스프링 타입으로 저렴하며 현장에서 다루기 매우 용이하다. 자동 가진원은 수동 가진원에 비하여 육체적 부담을 줄여주고 실험 소요 시간을 단축시킨다. 양질의 반복성이 있는 신호를 발생시켜 결과 해석에 유리하다. 자동 가진원과 더불어 적절한 감지기 시스템, 노트북 기반 신호 획득 장비 및 운용 프로그램과의 조합을 통해 반자동 다운홀 수행 시스템을 구축하였다. 수동 가진원과의 비교 검증 실험을 통해 제작된 자동 가진원의 장점들을 확인할 수 있었다. 또한, 구축된 수행 시스템의 현장 적용을 통해 용이하고 신뢰성 있는 기법 수행을 위해서 시스템을 자동화 하는 것이 유리함을 알 수 있었다.

**Keywords :** Automatic shear wave source, Downhole seismic method, Field testing equipment, Site characterization

#### 1. 서 론

전단파 속도로 대변되는 지반 강성은 내진해석 뿐만 아니라 진동영향 평가, 지반개량 효과 평가, 굴착에 의

한 지반변형 및 기초의 침하량 해석 등에 활용된다 (Stokoe 등, 2004). 따라서 지반 조사의 일부분으로 전단파 속도 주상도 획득이 필수적으로 요구되는 추세다. 이를 위하여 다양한 시추공 탄성파 탐사법과 지표면 탄

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

2 한국지질자원연구원 지반안전연구부 책임기술원 (Principal Technician, Geotechnical Engr. Division, KIGAM)

3 한국지질자원연구원 지반안전연구부 책임연구원 (Principal Researcher, Geotechnical Engr. Division, KIGAM)

4 정회원, 한국과학기술원 건설및환경공학과, 교수 (Member, Prof., Dept. of Civil&Environmental Engr., KAIST)

\* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2008년 5월 31일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

성과 탐사법들이 적용되고 있으며 이중 다운홀 기법(down-hole seismic method)은 지표면 탄성과 탐사법에 비해 신뢰도가 높고 다른 시추공 탄성과 탐사에 비하여 저렴하며 실험 수행이 수월하여 널리 적용되고 있다. 지반공학 분야에 진단파 속도를 적용하기 위해서는 때로는 매우 상세하고 정확한 결과가 필요하며 따라서 더욱 엄격한 탐사의 수행이 요구된다. 다운홀 기법은 기법 자체의 한계 외에 수행 시스템의 하드웨어(hardware) 및 소프트웨어(software) 차이, 수행자의 숙련도와 공학적 판단의 차이는 진단파 속도라는 최종 결과에 영향을 끼치게 되며 이러한 요인들로 인해 다운홀 기법 결과의 신뢰도는 낮다고 인식되어 왔다. 해석 과정에서는 적절한 소프트웨어의 사용으로 경험적 요소들이 극복될 수 있지만 신호 획득 단계에서 양질의 신호를 획득하지 못할 경우에는 해석 자체가 매우 어렵게 된다.

일반적으로 다운홀 시험에서 빔(beam) 형태의 가진판 측면을 슬러지 해머 등으로 가격하여 진단파 성분을 발생시킨다. 시험 심도에 위치한 감지기를 통해 신호를 획득하게 되며 여러 번 타격한 신호들의 중첩(stack)을 통해 신호대잡음비(signal to noise ratio, S/N)를 증가시킨다. 시험 심도가 깊어질수록 양질의 신호 획득을 위해 요구되는 중첩 회수가 증가되어 타격수(hitter)의 육체적 부담이 따른다. 또한 해머로 가진판의 동일 지점에 동일한 에너지로 타격을 하기 힘들어 발생하는 신호가 반복적이지 않게 되며 결국 중첩 시 오류의 원인이 되어 재실험의 빌미가 된다. 이러한 방식은 다운홀 기법을 수행하는데 필요한 최소 인원 및 소요되는 시험 수행 시간을 줄이지 못하는 가장 큰 요인이 되고 있다.

이 논문에서는 다운홀 현장 시험을 체력적 부담 없이 소수의 인원으로 수행하면서 양질의 신호를 용이하게 획득하기 위한 방안으로 제작한 자동 진단파 가진원을 소개하였다. 자동 가진원의 효과를 극대화하기 위해서 적합한 감지기 시스템, 신호 획득 장비 및 운영 프로그램을 구성하여 반자동 다운홀 기법 수행 시스템을 구축하였다. 자동 가진원이 현장 실험에서의 자동화를 위해 개발되었다면 운영 프로그램은 해석 과정에서의 자동화를 위해 작성되었다. 전체 수행 시스템 중 가진원만 달리 구성하여 현장 실험을 수행함으로써 제작된 자동 가진원의 성능을 검증하고자 하였다. 또한 자동 가진원을 포함한 구축된 반자동 다운홀 수행 시스템을 현장에 적용하여 봄으로써 자동화 수행 시스템 구축의 필요성에 대해 고찰해 보고자 하였다.

## 2. 다운홀 기법 개요

다운홀 기법은 크게 현장 실험을 통한 신호 획득, 획득한 신호로부터의 도달시간 정보의 도출, 그리고 최종적으로 획득한 초동 정보를 이용하여 진단파 속도 주상도를 결정하는 작업 등의 3단계로 나뉘어진다. 다운홀 기법의 현장 시험 개요도는 그림 1과 같다. 지표면 가진원을 통해 가진된 진단파 성분을 지중에 위치한 감지기로 감지하는 방식으로 현장 실험이 수행된다. 진단파 성분의 극성 특성을 활용하기 위해 하나의 시험 심도에서 가진판의 정방향 및 역방향 타격을 동시에 수행한다. 도달시간 도출 방법은 객관성 및 정확도 측면에서 초동 인식(first arrival picking) 방법보다는 극간법(peak to peak method)나 교차법(cross-over method), 상호상관법(cross correlation method) 등이 유리하며 그 중 상호상관법이 가장 합리적이라고 알려져 있다(방은석 등, 2007b; Liao, 2005). 진단파 속도 주상도를 도출하기 위한 해석 기법으로 현업에서는 직접법(direct method, DM), 간접법(interval method, IM)이 일반적으로 사용되고 있으나 전파 경로를 고려하는 수정간접법(modified interval method, MIM), 굴절 경로법(refracted ray path method, RRM) 등의 적용이 바람직하다(Joh와 Mok, 1998; Kim 등, 2004). 최근에는 도달시간 정보의 오류를 적절히 고려하여 합리적으로 진단파 속도 주상도를 결정해 주는 평균 굴절 경로법(mean refracted ray path method, MRM)이 소개된 바 있다(방은석 등, 2006). 획득한 자료의 상태를 적절하게 판단하고 현장 상황을 충분히 반영하여 해석을 수행해야 하지만 다운홀 시험을 통해 합리적인 진단파 속도 주상도

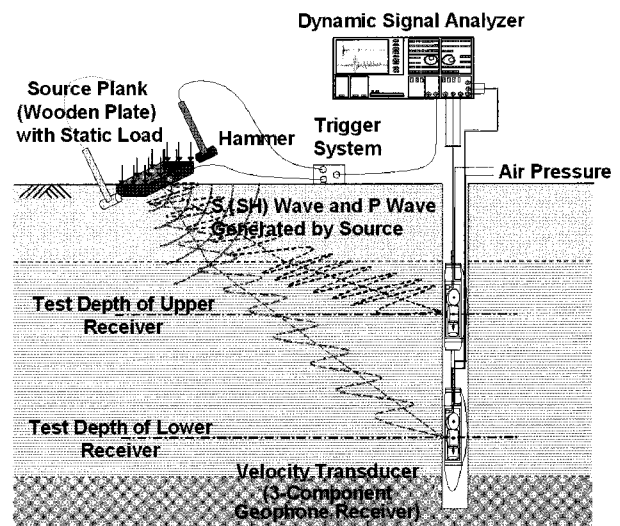


그림 1. 다운홀 현장 시험 개요도

를 도출할 수 있게 된다. 일단 각 시험 심도에서 신호가 획득되어지면 신호 처리 및 결과 도출 과정은 기존에 소개된 각 방법에 의해서 거의 자동적으로 수행이 가능하다. 결국 다운홀 기법에서 최종 결과의 신뢰도에 가장 큰 영향을 끼치는 요인은 현장 실험 단계에서 양질의 신호를 획득하였는가에 대한 여부이며 따라서 이를 위한 현장 실험 장비의 합리적인 구축 및 개선이 요구된다.

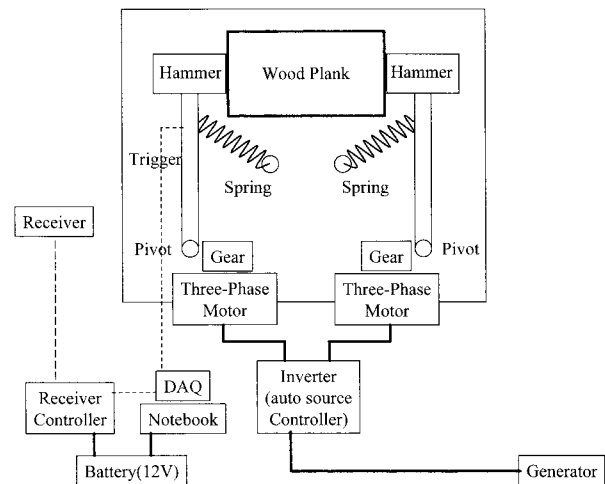
### 3. 자동 가진원의 제작

오늘날 감지기 및 신호 획득 장비의 성능 향상으로 천심도 지반조사를 위한 다운홀 기법 수행에 있어서는 큰 에너지를 발생시키기 위해 대규모 가진원을 구성해야 하는 고민이 줄어들게 되었다. 국내에서 대부분 다운홀 기법을 위해서 보조 실험자가 해머로 가진판을 가격하는 이른바 수동 가진원(manual source)을 사용하고 있다. 이러한 가진 방식은 다른 장비 운용에 비해 수행자의 노동력을 크게 요하는 부분이며 타격 방식에 대한 노하우 및 오퍼레이터(operator)와의 호흡도 중요하다. 동일 형태와 크기를 가지는 파형을 반복적으로 발생시키는 가진원이 증첩 과정에서 매우 유리하며 지반의 댐핑(damping) 특성과 관련된 연구를 위해서도 이러한 가진원이 요구된다.

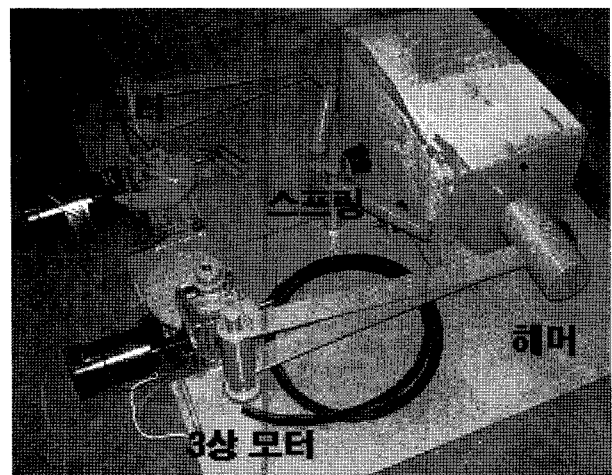
다운홀 기법에서 효율적으로 가진 작업을 수행하기 위해 여러 가지 아이디어가 적용되어 왔다. Campanella와 Stewart(1992)는 차량 측면에 설치된 고정축에 해머를 매달아 해머를 자유 낙하하는 방식으로 적용하였다. 이는 주로 전문 관입 장비를 보유한 탄성파 콘(seismic cone) 사용자들에게 널리 활용되고 있지만 완전 자동화는 아니며 가진의 반복성이 정확히 보장되지는 않는다. 공압방식(pneumatics)은 Meissner 등(1985)에 의해 최초로 시도된 바 있으며 후에 Liu 등(1996)에 의해 기존 공압 방식 가진원 장비의 문제를 개선한 바 있다. 이 방식은 큰 에너지를 발생할 수 있으며 깊은 심도까지 반복적인 전단파 성분의 전달이 가능하다. 하지만, 이러한 공압 방식은 분당 타격 회수에 제한이 있고 공기압축기 등이 필요하여 현장 운용이 번거로운 단점이 있다. 유압 방식(hydraulics)으로도 가진원을 자동화 할 수 있으며 주로 차량 하부에 장비를 일체형으로 부착하는 차량 탑재형 방식으로 적용되고 있다(Stokoe, 2007). 하지만 이러한 장비는 매우 고가이며 대형 차량의 접근이 가능한 현장에 국한되어 적용 가능하다는 문제가 있다. Casey와 Mayne(2002)는 간단한 솔레노이드 햄머(solenoid hammer)

를 이용하여 전단파 발생용 자동가진원(AutoSeis)을 제작하여 적용한 바 있다. 이 장비는 규모가 작아 현장 운용이 용이하나 소형인 만큼 가진 에너지가 작아 가탐 심도는 20m 내외에 불과하다.

본 연구에서는 선행 연구자들의 연구 결과를 바탕으로 우리나라 실정에 맞는 자동 가진원을 제작하고자 하였다. 유압이나 공압의 단점을 인지한 만큼 본 연구에서는 전동 모터를 기반으로 구동되는 방식으로 기본적 형태를 결정하였다. 규모가 크지 않고 조립 및 해체가 간단하여 이동성이 좋으며 저렴한 가격으로 구성이 가능한 가진원을 제작하고자 하였다. 또한 간단한 버튼 조작만으로 작동이 가능하며 반복적 가진이 보장되도록 하였다. 제작된 자동 가진원의 구성도 및 완성된 모습에 대한 사진은 그림 2와 같다. 좌우 타격을 위해서 동일한 타격 장치를 좌우 대칭의 형태로 구성하였다. 가진판 위에 상재하중을 가한 상태에서 원활한 타격을 수행하기



(a) 자동 가진원 구성도



(b) 완성된 자동 가진원의 조립 후 모습

그림 2. 제작된 모터 기반 전단파 자동 발생 가진원

위해 해머는 바닥면과 나란하게 움직이며 가진판을 타격한다. 모터에 부착된 캠 기어가 스프링(spring)으로 고정된 해머를 움직여 주고 캠 기어(cam gear) 영역을 벗어날 경우 스프링에 저장된 에너지로 가진판을 타격하는 방식이다. 이 때 타격 반발로부터 가진원을 고정시키기 위해 가진 바닥판은 이동이 용이한 범위 내에서 무겁고 견고하게 제작하였다. 모터는 감속기를 부착하여 분당 10회 정도 타격이 가능하도록 하였으며 삼상모터(three-phase motor)를 사용하여 일시 정지 후 재가동이 수월하도록 하였다. 이러한 삼상모터를 작동하기 위해서는 삼상전원이 요구되나 단상전원으로 삼상 모터를 구동하기 위해 인버터(inverter)를 이용하였다. 인버터는 단상전원을 내부적으로 직류로 변환한 다음에 삼상전원으로 다시 변환하므로 삼상모터를 무리 없이 구동할 수 있다. 인버터에 있는 전원 공급 조절 버튼의 조작으로 모터를 조작할 수 있으므로 인버터를 바로 자동 가진원의 컨트롤러로 사용하면 된다. 가진 에너지를 증대시키기 위해서 해머의 중량을 크게 하고 스프링 및 모터의 용량을 최적화 하였다. 모터의 용량은 현장에서의 1kw급 소형 발전기로 전원 공급이 가능하도록 500w급 이내에서 결정하였다. 가진판의 중량을 어느 정도 유지하고 자동차 등으로 상재하중을 가해줌으로써 타격 에너지가 지반으로 풍부하게 전파되도록 하였다. 가진판의 경우 측면에 잣은 타격으로 인한 손상을 방지하기 위해 손상 방지판을 덧대어 사용할 수 있으나 잣은 타격에도 견고한 양질의 나무 블록(wood block)을 이용할 경우 손상 방지판 없이 사용할 수도 있다. 실제로 손상 방지판은 타격 시 소음이 크며 나무 블록과의 결속이 완벽하지 않을 경우 타격의 효율이 떨어질 수 있다.

가진 장비에 있어서 획득 신호의 반복성을 보장하려면 가진 에너지나 타격 방식이 동일하여야 하겠지만 다른 중요한 요인 중 하나는 트리거 장치이다. 트리거 장치에 문제가 있을 경우 신호가 전체적으로 시간 축에서 좌우로 이동할 수 있으므로 중첩 작업이 원활하지 않으며 정확한 도달시간 정보 도출에 큰 장애가 된다. 본 장비에는 접촉식 트리거 방식을 채택하였다. 접촉식 트리거는 트리거 파형이 트리거 순간에서 거의 직각형태로 증가하므로 트리거 시점의 반복성을 보장하게 된다. 매우 저렴한 가격으로 제작이 가능하며 고장 날 확률도 적고 현장에서 신속한 수리도 가능하다. 보통의 접촉식 트리거는 해머와 가진판의 접촉을 이용하지만 이럴 경우 해머 및 가진판이 전도체로 만들어지거나 타격면을

전도체로 덧대어야 하므로 불편하며 지반을 통해 전류가 흘러 트리거 오작동을 하는 경우가 있어 원활한 가진 작업을 어렵게 한다. 본 자동 가진원에는 해머 본체에만 관성을 이용한 접촉식 트리거를 설치하는 방식을 채택함으로써 원활한 시험 수행이 가능하도록 하였다. 두 개의 해머에 접촉식 트리거를 각각 설치하고 각각에 연결한 전선을 하나의 전선으로 통합하여 신호 획득 장비에 연결함으로써 두 개의 해머 중 어느 하나가 타격하더라도 트리거가 작동하게 된다. 본 장비는 각 부품들을 쉽게 해체할 수 있으며 조립 또한 간단하여 현장에서의 이동 및 설치가 매우 용이하다.

#### 4. 감지기, 신호 획득 장비 및 운영 프로그램의 구성

자동 가진원의 성능을 극대화시키기 위해서는 가진원 외에 다운홀 기법을 위한 필수 장비들의 적절한 구성 또한 요구된다. 이러한 장비들은 방은석 등(2007a)에 의해 수행된 다운홀 탄성과 탐사 기법 수행 시스템 구성에 관한 선행 연구를 기반으로 하여 구성하였다. 감지기는 시추공용으로는 Geostuff 사의 BHG3를 도입하였다. 이 장비는 공벽접착 및 감지기 방향 조절 부분이 자동화되어 있어 현장 운용이 용이하다. 관입형 감지기로는 콘형태 3방향 감지기와 딜레토메터와 결합한 하이브리드(hybrid) 장비인 전기비저항 탄성과 딜레토메터 장비(Resistivity Seismic Flat DMT)를 제작하여 구성하였다. 관입형 감지기는 주변 지반과의 접촉성이 매우 좋으며 방향 조절 장치가 요구되지 않아 양질의 신호를 획득하는데 유리하다.

신호 획득 장비는 사용자의 노트북을 바로 연결하여 사용하는 시스템으로 구축함으로써 신호 획득과 결과 해석을 연계하고 자료 관리를 용이하게 할 수 있도록 하였다. 상용 장비로는 Geometrics사의 Geode를 도입하였다. Geode는 노트북과 랜(lan) 케이블로 연결할 수 있으며 제공되는 장비 제어 및 신호 획득 프로그램은 제작된 자동 가진원과 연계하여 효과적으로 운용이 가능하다. 이러한 상용 장비 외에 다운홀 기법을 보다 효율적으로 수행하기 위해서 탄성과 탐사용 신호 획득 장비 MultiSeis를 자체 제작하였다. 이러한 자체 제작 장비는 사용자 편의에 준한 신호 획득 및 관리 프로그램을 직접 제작하여 구성함으로써 장점을 극대화 할 수 있다. National Instrument 사의 신호 수집 보드 NI-USB6259 2개를 이용하여 총 32채널까지 사용이 가능하며 12채널

용 NK 커넥터 2개 및 8개의 BNC 커넥터가 부착되어 있다. AC 및 DC 전원 모두 사용이 가능하며 노트북과 USB 케이블로 연결하여 사용한다.

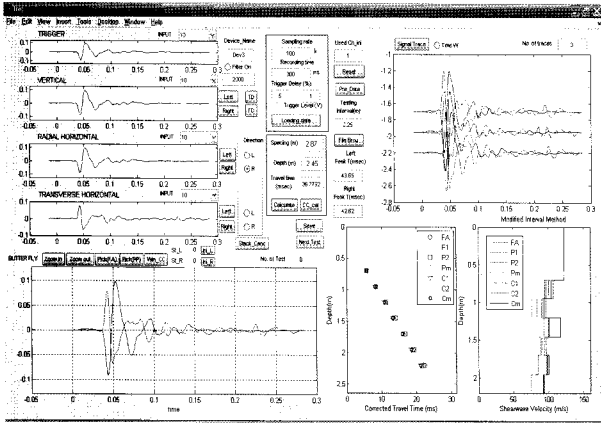
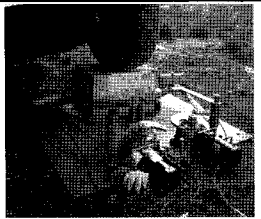
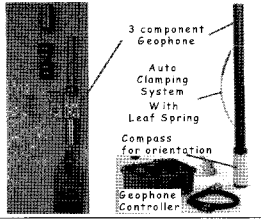

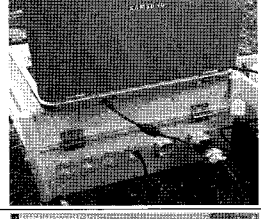
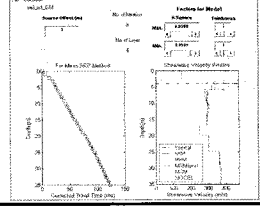


그림 3. 운용 프로그램 Field\_DH\_v1.2의 주 실행화면

방은석 등(2007a)의 연구에서 제작한 운용 프로그램을 바탕으로 자동 가진원 사용에 적합하도록 선택적 중첩(selective stacking) 기능 부분 및 해석 과정 등을 보강하였다. 구성된 장비 운용 프로그램 Field\_DH\_v1.2의 주 실행화면(main command window)은 그림 3과 같다. 하나의 창에서 신호 획득 및 관리, 도달시간 정보 자동 도출, 최종 진단과 속도 주상도 도시 등을 할 수 있어 현장에서 효율적으로 다운홀 기법을 수행할 수 있다. 좌우 타격신호에 대한 동시도시가 이루어지며 타격시 획득한 신호에 대해서 선택적으로 중첩이 가능하여 이전 심도에서 획득한 파형과 비교 확인할 수 있어 효율적인 신호 획득 및 관리가 가능하다. 운용 프로그램 상에서는 초동인식, 극간법, 상호상관법 등으로 도달시간 정보를 도출할 수 있으며 각 도달 시간 정보에 대해서 속도 주

표 1. 구성된 다운홀 수행 시스템 요약

장비 종류		형식 및 모델명	내용	
가진원		자동 가진원	나무 가진판을 차량 등으로 상재하중 재하, 모터 구동 해머로 자동 타격하는 방식	
감지기	시추공용	Geostuff사 BHG-3	10Hz 3성분 지오폰, 모터 구동 판스프링 방식의 공벽 접촉, 지자기 이용 지오폰 방향 자동 조절	
	관입용	콘 형태 RSDMT	10Hz 3성분 지오폰, 관입을 통한 지반 접촉, 로드 이용 관입, 지오폰 방향 고정	
신호 획득 장비 (Notebook based DAQ)	상용 장비	Geometrics Geode, Bendix Connector (24ch)	아날로그 입력해상도(24bit) 최대 신호 획득 간격(약 0.02ms)  내장 프로그램 사용 - 자동 저장, 로우패스 필터(아날로그), 중첩 기능 포함,	
	자체 제작 장비	MultiSeis, NI USB-6259, NK & BNC connector (32ch)	아날로그 입력해상도(16bit) 최대 신호 획득 간격(0.01ms 이상)  자체 제작 프로그램(Field_DH_v1.2) 사용 - 자동 저장, 로우패스 필터(디지털), 중첩 및 동시도시 기능 포함, 도달시간 정보 도출(초동 picking, 극간법, 상호상관법 등) 및 수정 도달시간 자동 도시	
해석 프로그램		Analysis_DH_v1.2	직접법, 간접법, 수정간접법, 굴절경로법, 평균굴절경로법 포함	

상도가 동시에 자동으로 계산되어 도시된다. 다운홀 결과 해석에 있어서는 프로그램 상에 기본적으로 시험간격별 속도 도출 기법 중 발전된 형태인 수정간법 및 굴절경로법을 이용하도록 하였다. 도달시간 정보 획득 및 심도 측정의 오차로 인하여 종종 속도 주상도의 형태가 의미 없이 증감하는 경우가 발생하므로 이러한 현상을 자동적으로 보정해 주는 평균 굴절 경로법(방은석 등, 2006) 또한 첨가되어 있다. 표 1에 본 연구에서 자동 가진원과 더불어 구성된 다운홀 수행 시스템을 요약하여 정리하였다. 구성된 수행 시스템은 완전 자동화는 아니지만 상당부분 자동화 되어 있으므로 기법 수행자의 체력적 부담을 줄여주며 경험 및 전문가적 판단이 요하는 일을 대폭 감소시켜 줄 수 있다.

#### 4. 현장 적용을 통한 검증

제작된 자동 가진원의 적용성을 검증하기 위해서 2개의 시험 부지에서 다운홀 시험을 수행하였다. 경기도 평택 부지는 풍화토, 풍화암 지반으로 시추 후 PVC 시험공을 설치하였으며 따라서 시추공 감지기를 이용하여 시험을 수행하였다. 기 수행한 수동 가진원 결과와의 비교를 통해 자동 가진원의 효율성을 검증하고자 하였다. 부산 강서 부지는 해성점토 연약 지반으로 관입형 감지기를 이용하여 다운홀 시험을 수행하였다. 자동 가진원 및 자체 제작 신호 획득 장비를 이용함으로써 현장 실험에서부터 결과 도출까지 전체적으로 자동화 되어 있는 상태로 다운홀 기법을 수행함으로써 자동화 수행 시스템의 효율성에 대해서 확인하고자 하였다.

##### 4.1 경기도 평택 부지

본 부지는 한국지반공학회 주최로 다운홀 기법에 대한 상호 검증 시험이 실시된 곳이다(김동수 등, 2005). 상호 검증 시험시 모든 참가 기관에서 타격자가 직접 가진원을 해머로 타격하는 방식(이하 수동 가진원)으로 다운홀 기법을 수행하였으며 따라서 개발한 자동 가진원의 성능을 직접적으로 비교 평가하기 용이하다. 본 부지는 상부로부터 매립토, 풍화토, 풍화암, 연암 순으로 구성되어 있다. PVC 케이싱을 풍화암 상단까지 설치하여 연약층의 함몰을 방지하고 콘크리트 밀크 그라우팅을 통해 이벽 현상을 방지한 바 있다. 시추공용 감지기인 Geostuff사의 BHG3 모델을 이용하였으며 신호 획득

장비로 Geometrics사의 Geode를 이용하였다. 동일한 시험공에서 시험을 총 2회 실시하여 반복성에 대해서도 검증하고자 하였다. 상기와 같은 수행 시스템을 이용하여 경기도 평택 부지에서 다운홀 시험을 수행하는 장면은 그림 4와 같다. 정확한 비교 평가를 위해서 수동 가진원을 설치했던 위치와 동일한 위치에 자동 가진원을 설치하였다. 차량을 이용하여 가진판에 상재하중을 가한 뒤 자동 가진원을 조립하였다(그림 4(b)). 자동 가진원을 위한 전원은 1kw 소형 발전기를 사용하였다. 가진원 설치 시간이 오랜 시간을 요하지 않으므로 실험 준비 시간은 수동 가진원을 사용할 경우와 거의 동일하였다. 자동 가진원을 조절하기 위한 인버터와 더불어 감지기 조절 장치, 신호 획득 장비를 그림 4(c)와 같이 한 곳에 모아 놓고 오퍼레이터 1인이 각 장비를 차례로 조작함으로써 전체적인 실험을 진행하였다. 오퍼레이터 외에 감지기 이동을 위한 보조 실험자 1인만으로 실험 진행이 가능하였다(그림 4(a)). 자동 가진원을 사용함으로써 수동 가진원을 사용하였을 때보다 실험 수행자의 육체적 부담 및 실험 소요 시간이 대폭 줄어들었다.

제작된 자동 가진원이 동일한 크기와 형태를 가지는 파형을 반복적으로 발생시키는가에 대한 여부를 검증하기 위해서 동일 시험 심도에서 반복적으로 타격하여

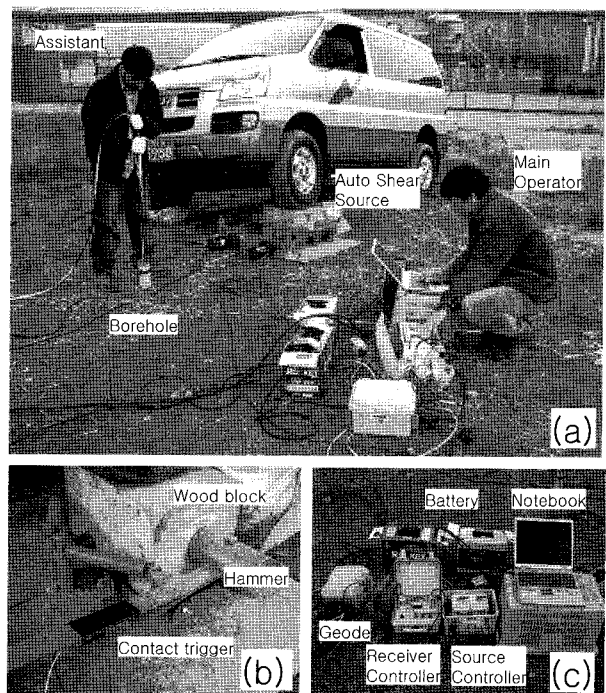


그림 4. 자동 가진원을 이용한 다운홀 시험 수행 장면(경기도 평택 부지): (a) 오퍼레이터와 보조 1인으로 현장 실험을 수행, (b) 자동 가진원, (c) 신호 획득 장비 및 가진원, 감지기 조절 장치와 노트북

획득한 신호를 분석하였다. 그림 5(a)에 도시된 바와 같이 동일 심도에서 반복 타격을 통해 기록한 총 4번의 신호가 전반적으로 유사하며 전단파 성분으로 인식되는 부분의 첫 번째 반파장은 형태가 거의 동일한 것을 확인할 수 있었다. 본 부지는 도로가 인접해 있어 차량 진동이 잡음(noise)의 요인으로 작용하였으며 획득한 신호에서도 확인할 수 있었다. 하지만 이러한 불규칙적인 잡음들은 중첩을 통해 줄여 줄 수 있으며 전단파 성분은 증대되어 더 명확하게 도달 시점을 관찰할 수가 있음을 알 수 있다(그림 5(b)). 매번 파형이 다르거나 트리거가 일치하지 않을 경우 중첩후의 신호는 잡음은 줄일 수 있겠지만 실제 가진원에서 발생하고 있는 전단파 성분의 도달을 정확하게 표현하고 있다고 말할 수 없다. 제작된 자동 가진원의 경우에는 접촉식 트리거를 사용하므로 트리거 시점이 거의 일치하며 동일한 신호를 매번 발생하므로 이러한 중첩 효과를 극대화 시킬 수 있다.

본 부지에서 자동 가진원을 포함한 다운홀 수행 시스템을 이용하여 획득한 깊이별 신호는 그림 6과 같다. 전반적으로 아주 양호한 신호를 획득할 수 있었으며 2번의 실험 결과가 거의 동일한 것을 볼 수 있다. 동일 심도임에도 불구하고 부분적으로 다른 형태의 파형이 획득된 심도가 있는 이유는 시험공을 이용한 다운홀 시험에서는 가진원 문제 외에 감지기 공벽 접촉 상태, 감지기와 가진원 방향 일치 문제 등의 감지기 시스템과 관련된 문제가 크기 때문이다. 그러므로 시추공 감지기를 이용

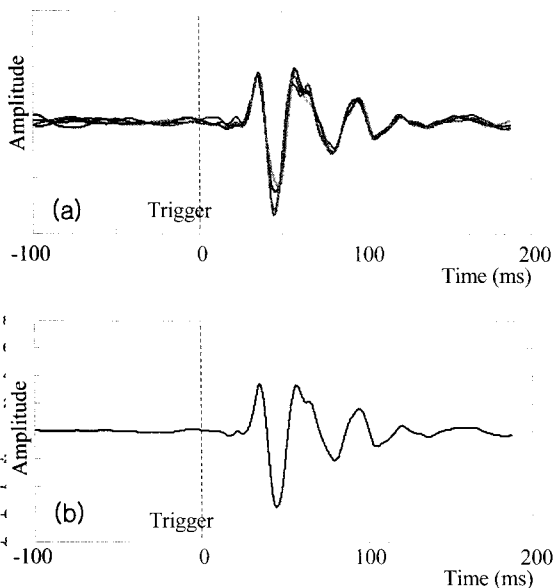


그림 5. 자동 가진원의 동일 파형 생성 여부에 대한 검증 및 중첩 효과: (a) 4회 타격 신호에 대한 동시 도시 결과, (b) 각 신호에 대해 중첩한 신호

하여 시험을 수행할 시에는 이 부분에 특별히 신경 써야 하며 획득한 신호의 파형이 불량하다고 판단될 경우 공벽 접촉 및 방향 조절을 다시 확인해 주는 것이 필요하다. 과거에 수동 가진원을 이용하여 획득한 깊이별 신호는 그림 7과 같다. 감지기는 동일한 제품을 사용하였으며 신호 획득 장비 또한 Geode와 동일한 사양을 가지는 장비인 동일 회사의 StratavisorNZ를 사용하였으므로 가진원만 다른 조건이라고 말할 수 있다. 수동 가진원으로 획득한 깊이별 신호 또한 자동 가진원으로 획득한 신호 못지않게 매우 양호하다. 하지만 하나의 시험 심도에서 해석용 신호를 만들기 위한 타격 횟수가 많았으며 따라서 실험 수행 시간이 상대적으로 길었고 실험 수행자의 체력적 소모가 뒤따랐음을 상기하면 제작된 자동 가진원의 사용이 훨씬 효율적임을 알 수 있다.

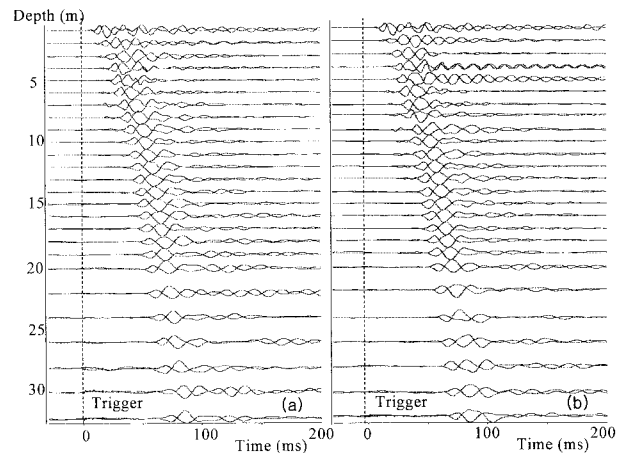


그림 6. 제작된 자동 가진원의 성능 검증을 위해 반복 실험한 결과(경기도 평택 부지): (a) 1차 획득 신호(Automatic #1), (b) 2차 획득 신호(Automatic #2)

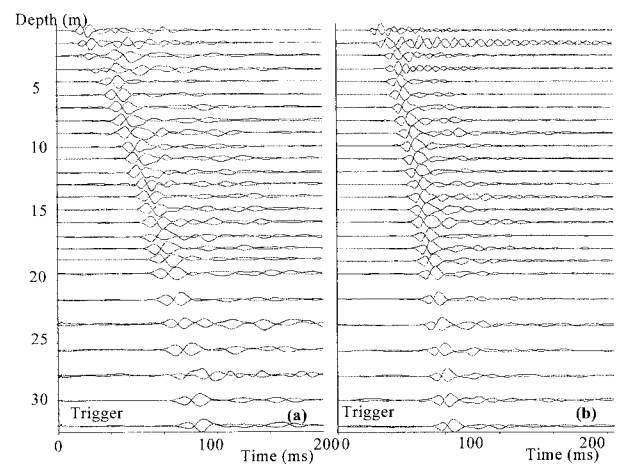


그림 7. 자동 가진원과 성능 비교를 위한 과거 수동 가진원 실험 결과(경기도 평택 부지): (a) 획득 신호 #1(manual #1), (b) 획득 신호 #2(manual #2)

상기 획득한 신호를 이용하여 도달시간 정보를 획득하였으며 그림 8에 그 결과를 비교하여 도시하였다. 자동 인식을 통해 획득한 도달시간 정보의 비교는 획득한 신호의 양호도를 객관적으로 비교하기 힘들므로 모든 도달시간 정보는 전단파 성분의 첫 극대점을 이용하여 자동으로 도출하였다. 수동 가진원으로 획득한 2개의 도달시간 정보들보다 자동 가진원의 경우 더 유사함을 볼 수 있다. 자동 가진원의 경우 동일한 형태의 파형을

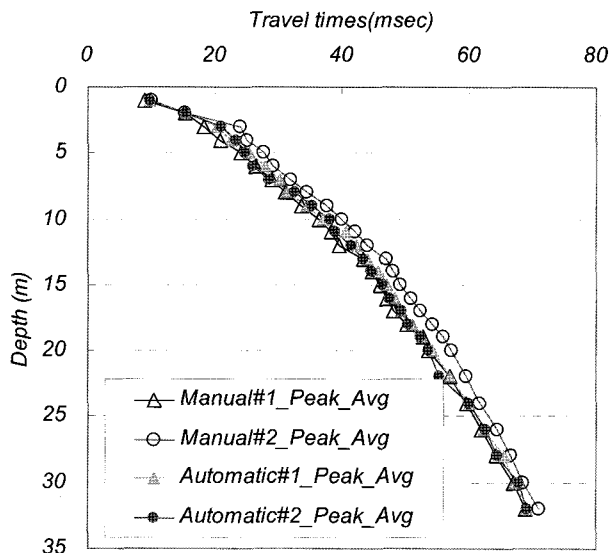


그림 8. 도달시간 정보 비교(경기도 평택 부지)

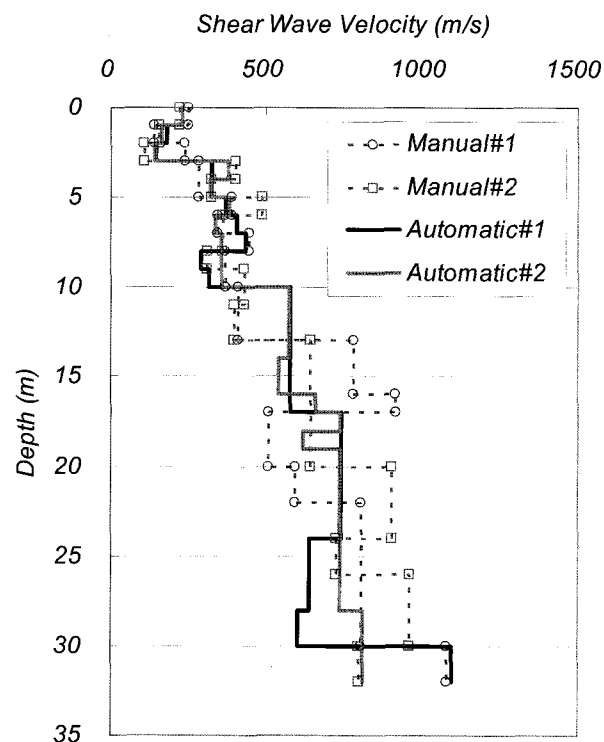


그림 9. 결정된 전단파 속도 주상도의 비교(경기도 평택 부지)

반복적으로 생성해 주기 때문에 중첩을 통해 파형을 개선하는 과정에 있어서도 반복성이 보장되게 되며 이는 곧 도달시간 정보의 일치로 이어지게 된다. 수동 가진원의 경우 중첩과정을 통해서 형태가 양호한 파형을 획득할 수는 있지만 매번 다른 신호가 들어오는 상황에서 중첩할 경우 중첩을 위한 신호를 어떠한 것을 선택하였느냐에 따라 그 결과가 달라질 수 있다.

그림 9에 이러한 도달시간 정보를 이용하여 결정된 전단파 속도 주상도를 도시하였다. 동일 시험공에서 실시했음에도 불구하고 결과는 심도가 깊어질수록 많은 차이를 보인다. 다운홀 시험은 심도가 깊어질수록 파형의 S/N가 안 좋아지므로 도달시간 정보 획득에 있어 오류가 날 확률이 높다. 일반적으로 심도가 깊어질수록 지반의 속도도 증가하므로 그만큼 도달시간 정보 오류로 인해 발생하는 속도 오차 또한 크게 된다. 그림 6과 관련하여 언급한 바와 같이 시험공을 이용한 다운홀 시험에서는 가진원 문제 외에 감지기 공벽 접촉 상태, 감지 방향 일치 문제 등으로 인하여 획득 파형이 달라질 수 있다. 이러한 이유로 동일한 장비로 실험을 수행한다고 하여도 도출된 결과는 차이를 보일 수 있다. 하지만 자동 가진원을 사용한 결과들은 도달시간 정보에서 확인했던 바와 같이 보다 유사한 결과를 보이고 있으며 이는 자동 가진원의 사용이 다운홀 기법을 통해 보다 신뢰성 있는 결과를 도출할 수 있는 적극적인 방안이 됨을 의미한다.

#### 4.2 부산 강서 부지

본 부지는 남해안의 연약지반으로 향후 산업단지 조성을 위해 지반 개량공사가 진행될 곳이다. 해당 지점에서 표준관입시험(SPT)을 수행하여 상세한 층상구조 및 깊이별 N치를 획득하였으며 그림 10과 같다. 시추 결과로부터 본 부지는 다양한 토질이 교차로 퇴적 혹은 매립되어 있는 것을 확인할 수 있었다. 이러한 연약지반에 있어서는 관입형 감지기를 이용하여 다운홀 시험을 수행할 수 있다. 시험공을 이용하여 다운홀 시험을 수행하기 위해서는 시추를 수행하여야 하므로 비용이 크고 지반이 교란될 수 있으며 시험공과 주변 지반과의 이벽현상을 방지하기 위해서 전문적인 처리가 요구된다. 또한 앞서 평택 부지와 관련하여 언급한 바와 같이 시추공 감지기를 이용할 경우 감지기 접촉 및 방향 조절 문제 등으로 정확한 신호를 획득하기 어려운 경우가 있으며



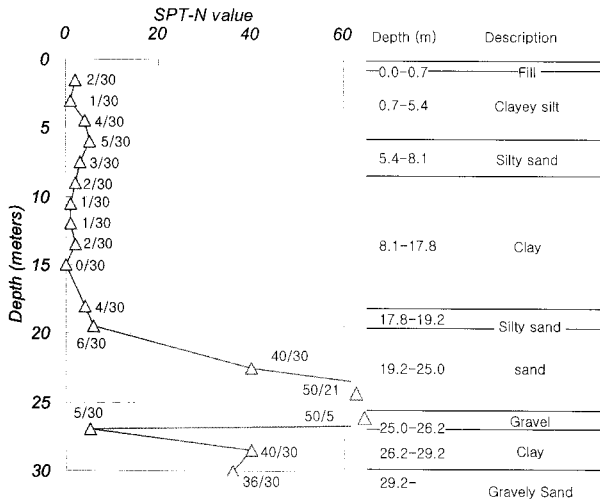


그림 10. 시추 주상도 및 SPT-N치

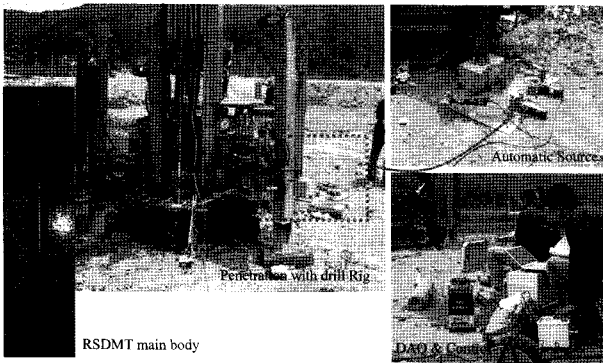


그림 11. 구축된 관입형 다운홀 자동 수행 시스템을 이용하여 다운홀 시험을 수행하는 장면(부산 강서 부지)

로 관입 장비를 통해 감지기의 관입이 가능한 지반에 있어서는 시추공을 이용하는 방식보다 관입형 감지기를 이용하는 것이 보다 유리하다고 할 수 있다. 본 부지에서는 다운홀용 관입형 감지기로 RSDMT 장비를 사용하였다. RSDMT는 다운홀 시험과 더불어 전기비저항 주상도 및 딜레토미터 시험을 동시에 수행할 수 있어 연약지반을 종합적으로 평가하기 유리하다. 신호 획득 장비는 자체 제작 장비인 MultiSeis를 이용하였다. 즉, 자동 가진원을 포함하여 신호 획득 및 관리, 최종 결과 도출에 이르기까지 전체적으로 반자동화되어 있는 수행 시스템을 이용하였다. 장비의 반복성을 검증하기 위해 2m 간격을 두고 총 2지점에서 다운홀 기법을 수행하였다. 상부는 25cm, 점성토가 균질한 하부는 50cm 간격으로 시험하였다. 본 부지에서 자동 가진원을 이용하여 다운홀 시험을 수행하는 장면을 그림 11에 도시하였다. 시추기 지지대를 이용하여 가진관에 상재하중을 가하였으며 관입 지점과 직교하도록 위치를 정하고 조립하

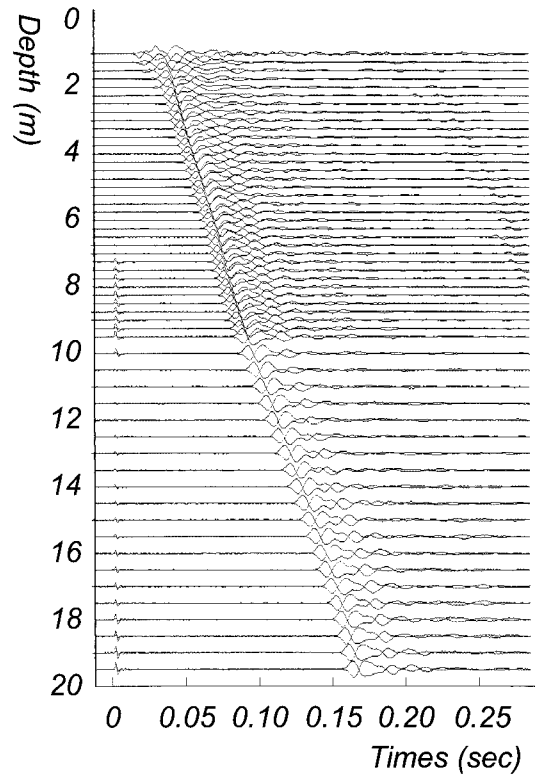


그림 12. 구축된 다운홀 자동 수행 시스템으로 획득한 깊이별 신호(부산 강서 부지)

였다. RSDMT 장비는 콘이나 딜레토미터와 동일한 방식으로 로드를 연결해 가면서 감지기를 지중으로 관입한다. 감지기 관입을 위한 시추 장비 오퍼레이터를 제외하고는 보조 실험자 없이 다운홀 오퍼레이터 1인만으로 실험 수행이 가능하였다. 매 시험 심도에서 신호 획득과 동시에 교차 상관법을 통해 도달시간 정보를 자동으로 획득했으며 굴절경로법을 적용하여 전단파 속도 주상도를 도출하였다. 해당 심도에서 최종 결과까지 도출하는데 있어 실험 수행자의 역할은 자동 가진원 작동을 위해서 Run 과 Stop 버튼을 눌러주는 것과 획득한 신호에 대해 중첩 여부를 판단하는 것이 거의 전부일 정도로 자동적인 기법 수행이 가능하였다.

현장 실험을 통해 획득한 깊이별 신호는 그림 12와 같다. 모든 시험 심도에 대해서 매우 양질의 신호를 획득할 수 있었으며 서로 다른 시험 심도에 있어서도 파형이 유사한 것을 볼 수 있다. 관입형 감지기의 경우 지반과의 접촉이 거의 완벽하며 감지기 방향이 유지되므로 시추공을 이용할 경우에 비해 감지기 시스템으로 인한 문제가 거의 없으며 양질의 신호를 획득하는데 매우 유리하다. 감지기 시스템 문제가 없는 상황에서 자동 가진원으로 매번 동일한 신호를 생성하였으므로 모든 시험

심도에서 유사한 파형을 획득할 수 있다. 최종 시험 심도까지 완료 후 결정된 전단파 속도 주상도는 그림 13과 같다. 2m 떨어진 2지점에서 수행한 결과들이 거의 유사한 것을 볼 수 있다. 동일한 시험공으로 2회 반복 수행했던 평택 부지에 비해 매우 뛰어난 반복성을 보이는 것으로 관입형 감지기와 다운홀 수행 자동화 시스템의 장점을 보여주고 있다. 바로 이웃 지점에서 채취한 비교란 시료를 이용하여 공진주(RC) 실험 및 벤더 엘리먼트(BE) 실험으로 전단파 속도를 측정하였으며 이 때 구속 압을 채취된 심도와 동일하게 적용하였다. 그림 13에서 도시한 바와 같이 2개 시료 모두 해당 깊이에 대해 다운홀 실험 결과와 거의 동일한 것을 확인할 수 있었다. 하중 주파수가 5000Hz인 벤더 엘리먼트 실험 결과가 30Hz인 공진주 실험 결과보다 하중 주파수 효과로 인해 다소 크게 나왔지만 그 차이는 6m/s 이내로 본 시료의 경우 하중 주파수 영향이 크지 않아 다운홀 실험 결과와의 절대치 비교가 가능하였다. 이러한 결과는 채취된 비교란 시료가 교란이 적었음을 의미하며 동시에 본 연구에서 구축한 다운홀 수행 시스템이 합리적인 결과를 제공하고 있음을 보여주고 있다.

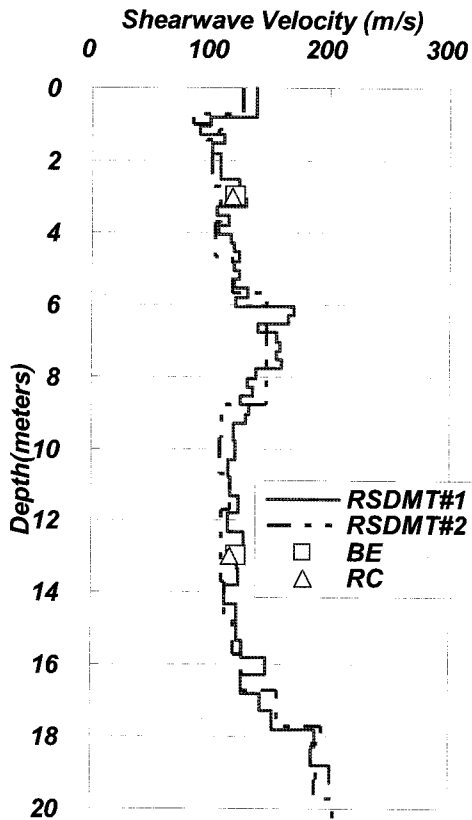


그림 13. 결정된 전단파 속도 주상도 비교를 통한 다운홀 자동 수행 시스템의 신뢰성 검증 (BE: 벤더엘리먼트 실험, RC: 공진주 실험)

## 6. 요약 및 결론

다운홀 기법을 보다 효율적으로 수행하기 위해서 자동 가진원을 개발하였으며 그 적용성을 검증해 보았다. 제작한 자동 가진원은 매우 저렴하게 구성이 가능하며 작동원리가 매우 간단하여 현장에서 운용이 용이하다. 손쉽게 조립 및 해체할 수 있으며 조절판의 버튼 조작만으로 양방향으로의 반복적 타격이 가능하다. 수동 가진원과 비교하여 볼 때 시험 수행자의 체력적 부담이 거의 없으며 시험 시간을 크게 단축할 수 있다. 또한 신뢰성 있는 최종 결과를 도출하는데 있어서도 더욱 유리하다. 현장 검증 실험을 통해 자동 가진원이 수동 가진원에 비해 가지는 장점들을 확인할 수 있었다.

전단파 속도의 지반공학적 적용에 대한 관심이 증대됨에 따라 신뢰성 있는 전단파 속도 주상도의 획득이 중요해 졌으며 본 연구에서는 이러한 노력의 일환으로 현장 실험과 해석 과정에서 가능한 부분을 모두 자동화한 다운홀 기법 수행 시스템을 구축하였다. 여기서 자동 가진원은 현장 실험 단계에서 자동화에 큰 역할을 한다. 이러한 자동화 시스템은 체력적 부담을 줄여 주며 경험 및 전문가적 판단 없이 용이하게 다운홀 기법을 수행할 수 있도록 해준다. 부산 강서 부지에서 수행한 적용성 평가를 통해 이러한 점들을 확인할 수 있었으며 반복 실험 및 실내 실험 결과와의 비교를 통해 결과의 신뢰성에 대해서도 확신할 수 있었다.

## 감사의 글

본 연구는 한국지질자원연구원 기본 사업 “지하 정밀 영상화 융합기술 개발” 연구의 일환으로 수행된 것이며 적극적인 현장 지원을 해 주신 현대건설 관계자 분들께도 깊이 감사드립니다.

## 참고 문헌

1. 김동수, 고평범, 김영수, 방은석, 신형욱, 윤진성, 이양로, 장현삼 (2005), “Round Robin Test를 통한 공내 탄성과 탐사 기법 비교 연구”, *한국지반공학회 봄 학술발표회 특별 Session*, 동적물성치 획득을 위한 현장 및 실내 Round Robin Test 결과 발표, pp.73-88.
2. 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.
3. 방은석, 김동수, 김기석 (2007a), “상호검증시험을 통한 효율적인 효율적인 다운홀 탄성과 탐사 기법 수행 시스템의 구성”, *한국지반공학회 논문집*, Vol.23, No.4, pp.133-147.

4. 방은석, 이세현, 김중태, 김동수 (2007b), “다운홀 기법에서 신뢰성 있는 도달시간 정보 도출에 대한 고찰”, *한국지반공학회 논문집*, Vol.23, No. 8, pp.1-17.
5. 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.
6. 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.
7. 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.
8. 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.
9. Liao, Tianfei, (2005), “Post Processing of Cone Penetration Data for Assessing Seismic Ground Hazards with Application to the New Madrid Seismic Zone”, *Ph. D. thesis*, Georgia Institute of Technology.
10. Liu, H.P., Maier, R.L., and Warrick, R.E. (1996), “An Improved Air-Powered Impluse Shear-Wave Source”, *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol.86, No.2, pp.530-537.
11. Meissner, R.H., Stumpel, H., and Theilen, F. (1985), “Shear wave studies in shallow sediment”, in *Seismic Shear Waves, Part B : Applications*, G. Dohr (Editor), Geophysical Press, London, England.
12. Stokoe, K.H. (2007), “Field seismic testing in geotechnical earthquake engineering”, *Earthquake Geotechnical Engineering*, edited by K.D. Pitlakis, Springer, pp.151-157.
13. Stokoe K.H., Joh S.H. and Woods R.D. (2004), “Some contributions of in situ geophysical measurements to solving geotechnical engineering problems”, *International Site Characterization ISC'2 Porto*, Portugal, pp.19-42.

(접수일자 2007. 8. 27, 심사완료일 2007. 10. 31)