

## 다층 구성 부지에서의 깊이별 실체파 속도의 결정을 위한 시추공간 탄성과 탐사 발진 장치 개발 및 적용

선창국<sup>1\*</sup> · 목영진<sup>2</sup>

<sup>1</sup>한국지질자원연구원 지진연구센터

<sup>2</sup>경희대학교 토목건축공학부

### Development and Application of a Source for Crosshole Seismic Method to Determine Body Wave Velocity with Depth at Multi-layered Sites

Chang-Guk Sun<sup>1\*</sup> and Young-Jin Mok<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Earthquake Research Center, Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources

<sup>2</sup>School of Architecture and Civil Engineering, Kyung Hee University

**요 약:** 실체파 속도 결정 목적의 여러 시추공 탄성과 시험 기법 중에서 크로스홀 기법은 지반 동적 특성 평가에 신뢰성이 가장 높은 결과를 도출할 수 있는 기법 중의 하나로 알려져 있다. 이에 본 연구에서는 지하수위 존재 여부에 관계 없이 토사 뿐 만 아니라 암반을 대상으로 크로스홀 탄성과 시험을 성공적으로 수행할 수 있도록, 연직 시추공 안에서 지반에 대한 수평 방향 가진이 가능한 다목적의 스프링식 발진 장치를 개발하고, 국내 주요 시설물 부지들을 대상으로 크로스홀 탄성과 시험을 실시하였다. 대상 부지에서의 수평방향 가진의 크로스홀 탄성과 시험으로부터 전단파 속도 및 압축파 속도와 같은 실체파 속도의 결정을 통해 지반 동적 특성을 효율적으로 평가하였으며, 적용 대상인 시설물들의 내진 성능 평가 및 내진 설계를 위한 근본 자료로 제시하였다.

**주요어:** 크로스홀 탄성과 시험, 전단파 속도, 압축파 속도, 시추공 탄성과 기법

**Abstract:** Among various borehole seismic testing techniques for determining body wave velocity, crosshole seismic method has been known as one of the most suitable technique for evaluating reliably geotechnical dynamic properties. In this study, to perform successfully the crosshole seismic test for rock as well as soil layers regardless of the groundwater level, multi-purposed spring-loaded source which impact horizontally a subsurface ground in vertical borehole was developed and applied at major facility sites in Korea. The geotechnical dynamic properties were evaluated by determining efficiently the body wave velocities such as shear wave velocity and compressional wave velocity from the horizontally impacted crosshole seismic tests at study sites, and were provided as the fundamental parameters for the seismic performance evaluation and seismic design of the target facilities.

**Keywords:** crosshole seismic test, shear wave velocity, compressional wave velocity, borehole seismic method

## 서 론

인류의 터전인 지반에 대한 합리적인 조사의 중요성은 지반공학의 개념적 도입시기부터 현재까지 지속적으로 인지되어 오고 있으며, 그 이유는 불확실성이 상존하는 지반의 특성을 올바르게 파악하고 정량화하는 과정이 선행되어야만 시설물의

체계합리적인 설계 및 성능 평가가 가능하기 때문이다. 특히, 최근 구조물이나 건축물의 내진 성능 요구가 극대화되고 있는 상황 하에서 지반의 동적 특성에 대한 정확한 평가 필요성 또한 절실하게 제시되고 있다. 이와 같은 필요성을 충족시킬 수 있는 대표적인 현장 시험 기법이 바로 시추공 탄성과 시험(borehole seismic tests)이며, 그 중에서도 크로스홀 탄성과 시험(crosshole seismic test)은 결과의 신뢰성이 가장 높은 시험 방법으로 알려져 있다(Butler and Curro, 1981; Mok, 1987; Winterstein and Paulsson, 1990). 크로스홀 탄성과 시험을 위해서는 여타의 시추공 탄성과 시험들과는 달리 두 공이상의 시추를 통한 시험공 설치가 요구되며, 그에 따른 경제적 단점으로 인해 현재까지 일반적인 시설물의 설계에서 적극적으로

2006년 4월 3일 접수; 2006년 8월 22일 채택  
한국물리탐사학회 제7회 특별 심포지엄-시추공 물리탐사-에서(일부)발표  
\*Corresponding author

E-mail: pungsun@kigam.re.kr

Address: Earthquake Research Center,

Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources,

30 Gajeong-dong, Yuseong-gu, Daejeon, 305-350 Korea

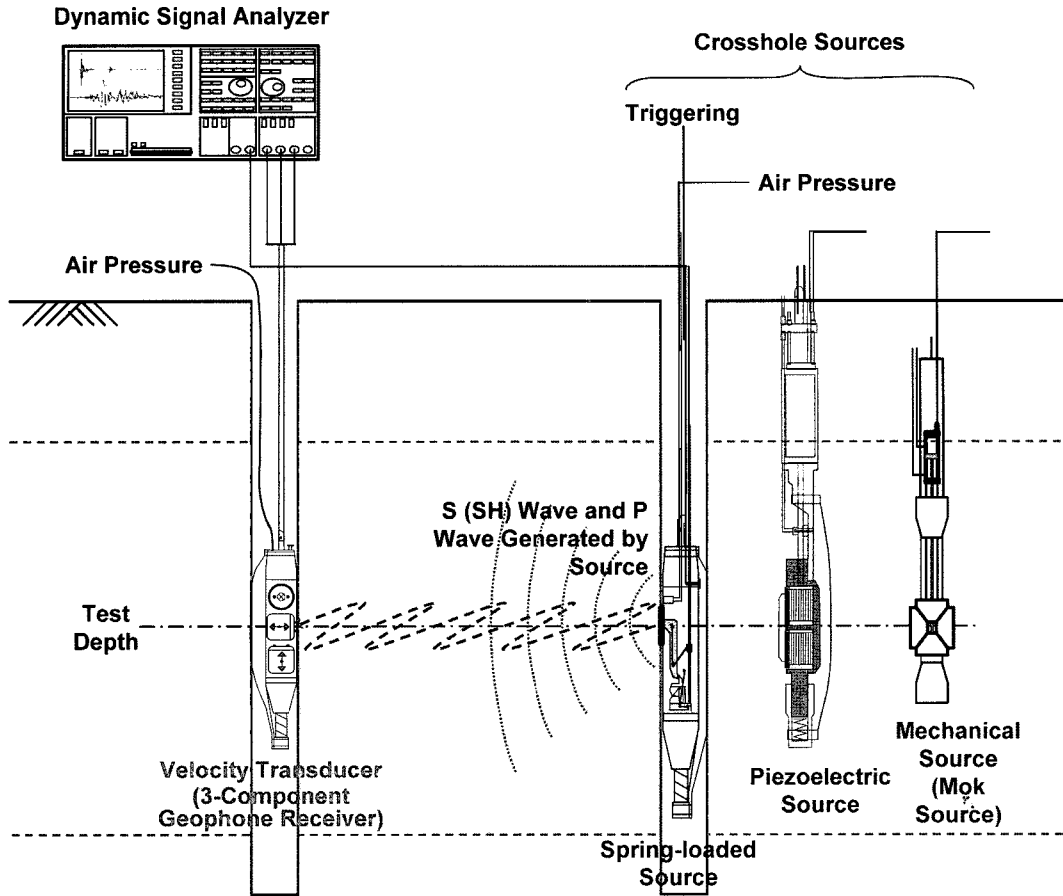


Fig. 1. Schematic diagram of crosshole seismic test.

반영되는 사례는 드물다. 그러나 이러한 경제적 이유보다도 실제 중요 구조물의 설계나 성능 평가에 크로스홀 탄성과 시험을 지반 동적 특성 결정을 위한 기법으로 쉽게 도입하지 못하는 근본적 이유는 선정된 지반의 대상 심도까지 성공적인 조사를 위해서는 목적에 적합하도록 정교하게 제작된 특수한 발진 장치가 필요하기 때문이다(복영진 등, 2005).

본 연구에서는 지진공학 및 지반동역학적 관점에서 활용되고 있는 기존 시추공 탄성과 시험들의 장단점을 고찰하고 기존 크로스홀 발진 장치의 적용 제한 사항 및 현장에서의 실무적 활용성을 고려하여 지반의 깊이별 동적 특성을 원위치에서 용이하게 획득할 수 있는 크로스홀 탄성과 시험용 발진 장치를 개발하였다. 더불어 국내 주요 부지들에서 기존 및 개발된 발진 장치를 이용한 크로스홀 탄성과 시험을 수행하여 발진 장치와 현장 지반 조건에 따른 크로스홀 탄성과 시험의 활용성을 분석하였다. 개발된 발진 장치를 적용한 크로스홀 탄성과 시험 부지에서는 다양한 지층 조건에 대한 깊이별 지반의 동적 특성을 효율적으로 평가함으로써, 크로스홀 탄성과 시험의 신뢰성 및 합리성을 확인하였을 뿐만 아니라 대상 시설물의 내진 설계 및 내진 성능 평가를 위한 근본 특성 자료로 제시하였다.

### 지반의 동적 특성 결정을 위한 현장 시추공 탄성과 시험

지반의 동적 특성은 일반적으로 미소변형률( $< 10^{-3}$  %)에서 지반의 변형 특성으로서 대표된다. 지반의 변형 특성은 역학적인 경계 및 재하 조건에 따라 전단계수(Shear modulus,  $G$ ), 구속계수(Constrained modulus,  $M$ ), 탄성계수(Young's modulus,  $E$ ) 그리고 이 계수들의 관계 변수인 포아송 비(Poisson's ratio,  $\nu$ )로 제시될 수 있다. 미소변형률 조건의 전단계수( $G$ ) 및 구속계수( $M$ )는 지반의 실체파 속도(body wave velocity)인 전단파 속도(shear wave velocity,  $V_S$ ) 및 압축파 속도(compressional wave velocity,  $V_P$ ) 그리고 밀도(density,  $\rho$ )로 직접 표현되며, 이들 간의 상호 관계는 다음의 식 (1)~식 (3)과 같다.

$$G = \rho V_S^2 \tag{1}$$

$$M = \rho V_P^2 \tag{2}$$

$$\nu = \frac{(V_S/V_P)^2 - 0.5}{(V_S/V_P)^2 - 1.0} \tag{3}$$

전단파(S-wave)는 지반 내 토사나 암반 매질을 따라 전파되

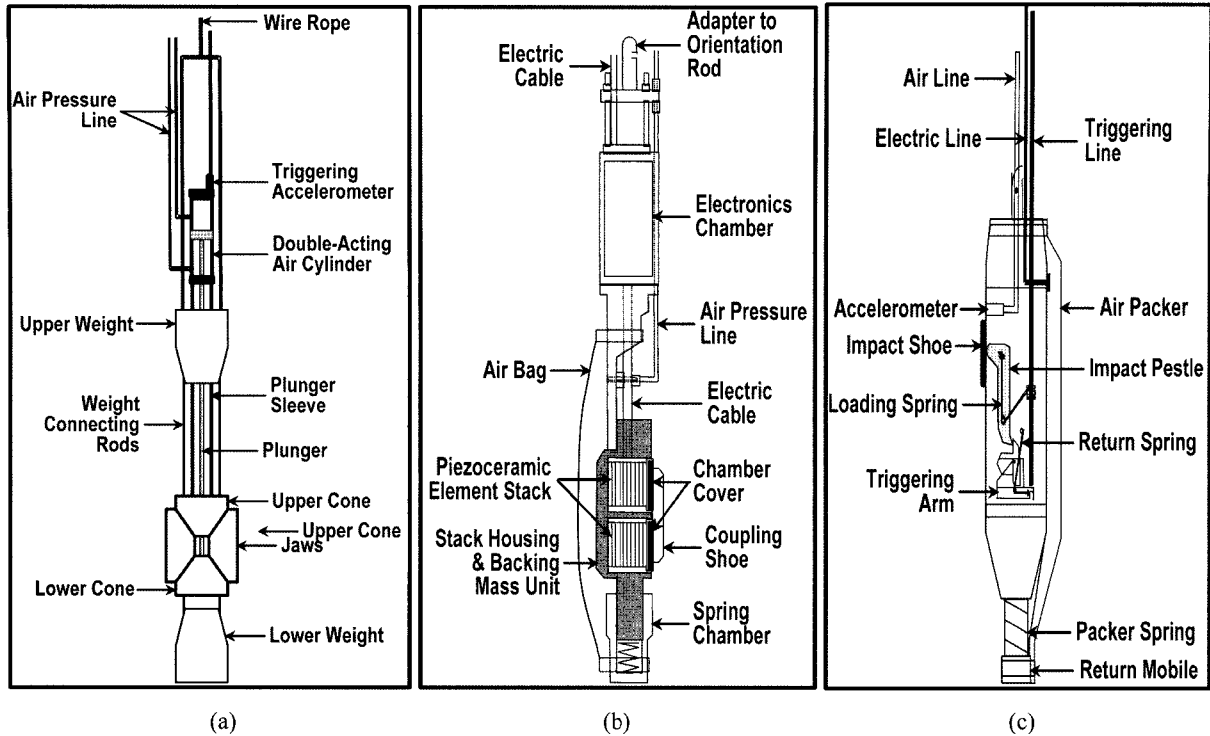


Fig. 2. Crosshole sources applied in this study: (a) mechanical source, (b) piezoelectric source and (c) spring-loaded source.

고 파의 진행 방향에 대해 입자가 직교 운동을 하는 반면, 압축파(P-wave)는 지반 내 토사나 암반 뿐만 아니라 유체를 따라서도 전파되고 파의 진행 방향을 따라 입자가 압축 운동을 한다. 전단파는 지표면의 상하 방향을 수직축으로 하는 직교 좌표계를 적용할 경우 지반 매질 입자의 운동 방향에 따라 수직 전단파(SV-wave)와 수평 전단파(SH-wave)로 분리할 수 있다. 지반공학적 측면에서 주로 적용되고 있는 현장 탄성과 시험중 시추공 탄성과 시험의 경우 발진기(seismic source; 음원(音源))와 수신기(seismic receiver)의 기하학적 구성에 따라 본 연구에서 적용 수행된 크로스홀(crosshole), 다운홀(downhole) 및 인홀(inhole) 탄성과 시험과 더불어 업홀(uphole) 탄성과 시험 등으로 분류된다(선창국 등, 2005a).

크로스홀 탄성과 시험은 지반공학 분야에 소개된 이래로 지난 수십 년 동안 지반의 실체파(body waves)인 압축파 속도( $V_p$ )와 전단파 속도( $V_s$ )의 깊이 분포를 결정하기 위해 매우 효율적으로 이용되어 왔다(Stokoe and Woods, 1972; Mok, 1987). 크로스홀 탄성과 시험의 개요도는 Fig. 1과 같으며, 기존에 개발 활용되어 온 발진 장치와 본 연구에서 개발한 발진 장치를 함께 도시하였다. 제시된 발진 장치들은 본 연구의 현장 적용에서 부지별로 활용되었다. 기계식 발진기(mechanical source)는 수직 전단파를, 그리고 압전소자형 발진기(piezoelectric source)와 스프링식 발진기(spring-loaded source)는 수평 전단파와 함께 압축파를 발현할 수 있다.

다운홀 탄성과 시험은 단일 시험공 만이 필요하므로 크로스

홀 탄성과 시험에 비해 경제적인 반면, 시험 심도가 깊어지거나 전파 경로 상에 공동이 존재할 경우 신호 획득 및 분석이 어려울 수 있다(Sun, 2004). 또한, 지하수위 아래의 포화된 지반에서는 지층의 압축파 전달 속도가 물의 압축파 속도(약 1,550 m/s)에 비해 작을 경우 토사 매질의 압축파 신호 획득에 문제가 발생할 수 있다. 인홀 탄성과 시험은 실무적 용이성을 확보함과 더불어 다운홀 탄성과 시험의 적용 한계성 및 크로스홀 탄성과 시험의 경제적 문제점을 보완하기 위해 개발된 현장 탄성과 기법이다(Mok *et al.*, 2003). 인홀 탄성과 시험의 경우 시추공 경계면을 따라 전파되는 전단파를 쉽게 획득하고 관측할 수 있으나 적용 장비에 따라 대상 지반 조건의 제한성을 가질 수 있다(선창국 등, 2005a).

### 크로스홀 탄성과 시험용 발진 장치

크로스홀 탄성과 시험 장비 구성중 가장 중요한 부분이 발진 장치이다. 이에 본 연구에서는 기존 발진기의 일반 사항을 고찰하고 국내의 복합적 여건에 따른 적용성, 실용성, 경제성 등을 고려하여 발진 장치를 개발하였다. 현재까지 지반공학적으로 국내에서 활용되어 온 주요 발진기의 형태는 기계식(mechanical)과 압전소자형(piezoelectric)으로서, Fig. 2(a)와 Fig. 2(b)에서 기본적인 구성을 확인할 수 있다. 기계식 발진기는 공벽에 밀착시키기 위한 췌기 장치와 타격 해머로 이루어져 있다(Mok *et al.*, 1988). 이 발진기는 풍부한 에너지 발현

이 가능하므로 크로스홀 탄성과 시험에서 진단과 측정에 매우 실용적으로 활용되고 있다. 그러나 개방형 구조이므로 지하수 위 아래의 지반과 같이 시험공 내에 유체가 존재할 경우 타격 시 유체 저항으로 인해 측정 가능한 진단파의 발현이 어려울 수 있고, 이로 인해 현장 적용이 불가능할 수 있다. 압전소자형 발진기는 충격 에너지의 발현 및 조절을 위해 전기적 제어가 가능한 압전소자를 이용한다(백영식 등, 1996; 목영진 등, 2003). 압전소자형 발진기는 방수 처리된 장치 내에서의 전압 제어를 통해 일정한 탄성과 에너지를 반복적으로 발생시킬 수 있음에 따라 활용성이 우수하다. 그러나 고가의 정교한 기계와 전기 장치가 요구되므로 고가이고 내구성이 다소 취약하며, 발생 에너지로부터 구현되는 매질에서의 변형이 작아서 토사보다는 암반 지반에 적합하다. 이와 같은 기존 크로스홀 탄성과 시험용 발진 장치의 현장 시험 상황에 따른 제한적 적용 한계성을 개선하기 위한 목적으로 보다 다양한 현장 지반 조건에서 효율적으로 동적 특성을 획득할 수 있는 발진기를 개발하였다.

보다 효율적이고 체계적인 크로스홀 탄성과 시험을 위해 본 연구에서 개발한 발진 장치는 Fig. 2(c)와 같은 스프링식 발진기(spring-loaded source)이다. 이 발진기에서는 이중 처리된 트리거 라인(triggering line)의 안쪽 트리거 케이블(trigger cable)로 트리거 공이(trigger arm)를 회전시키면, 스프링으로 장전된 충격 공이(impact pestle)가 공벽을 때리는 동시에 재장전 스프링(return spring)에 의해 재장전 된다. 공기 주머니(air packer)에 압축 공기를 주입하여 발진기를 공벽에 밀착시킴으로써 충격 에너지를 극대화한다. 개발된 스프링식 발진기는 비교적 간단하여 가벼울 뿐만 아니라 견고하고 발현 가능 에너지가 커서 토사 지반에 대해서도 적용성이 우수하며, 전기 장치를 위한 부대 시설이 요구되지 않는 기계식이다.

**크로스홀 탄성과 시험 수행 및 지반 동적 특성 평가**

기존 발진 장치들과 본 연구에서 개발된 발진 장치를 이용하여 국내에 분포하는 다양한 지층 조건의 주요 부지들을 대상으로 크로스홀 탄성과 시험을 수행하였다. 또한, 일부 부지에서는 진단파 속도 결정을 위해 실무에서 보편적으로 수행되는 다운홀 탄성과 시험과 나공(裸孔) 상태의 시험공이 형성된 지반에 대해 제한적으로 적용될 수 있는 인홀 탄성과 시험도 병행하여 크로스홀 탄성과 시험으로부터 결정된 깊이별 동적 특성과 비교하였다.

**시험 대상 부지 현황**

크로스홀 탄성과 시험의 대상 지역은 Fig. 3에 제시된 바와 같이 총 6 개 지역인 인천, 경주, 임실, 하동, 부산 그리고 통영 지역이며, 그 중 통영 지역의 경우 동일 현장 내에서 약 100 m 이격된 2 부지를 그리고 그 외 지역의 경우 각 1 부지

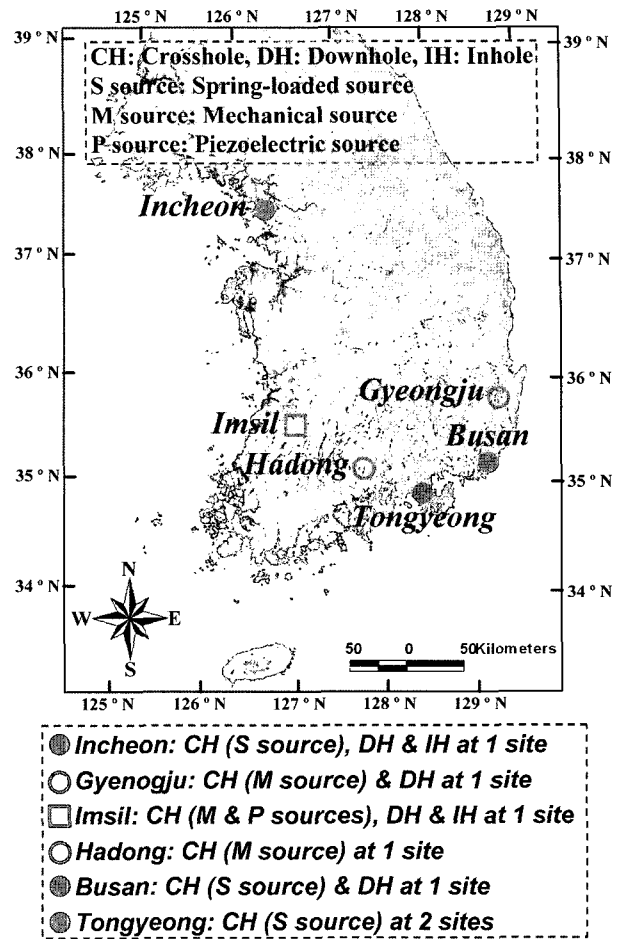


Fig. 3. Geographic locations of crosshole testing sites.

를 대상으로 크로스홀 탄성과 시험을 수행하였다. 인천, 부산 및 통영 부지에서는 개발된 스프링식 발진기 적용한 크로스홀 탄성과 시험을 통해 진단파와 압축파의 두 종류 실체파를 획득하였고, 경주 및 하동 부지에서는 기계식 발진기를 그리고 임실 부지에서는 현장 여건에 따라 기계식과 압전소자형을 병용하여 진단파 신호만을 획득하기 위한 시험을 수행하였다. Fig. 3에서 확인할 수 있는 바와 같이, 통영과 하동 부지를 제외하고는 추가적으로 진단파 속도 결정을 위한 다운홀 또는 인홀 탄성과 시험을 병행하였다. 특히, 개발된 스프링식 발진기를 적용하여 크로스홀 탄성과 시험을 수행한 부지들의 경우, 인천 및 부산 부지는 기존 항만 시설 부지이고 통영 부지는 신규 플랜트 시설 부지이므로 시험으로부터 결정된 깊이에 따른 실체파 속도 분포는 각각 내진 성능 평가와 내진 설계에 직접 활용될 수 있다.

시험 대상 부지들의 시추 조사로부터 확인한 지층 구성은 Fig. 4와 같다. 안벽 부두 시설인 인천 및 부산 부지에서는 시설물 조성을 위한 매립토(Fill) 지반이 각각 6.6 m 및 19.7 m 두께로 두껍게 분포하였으며, 댐 시설물 하류의 기초부인 임실 부지에서도 경암(Hard rock) 상부에 분포하는 5.2 m 두께의

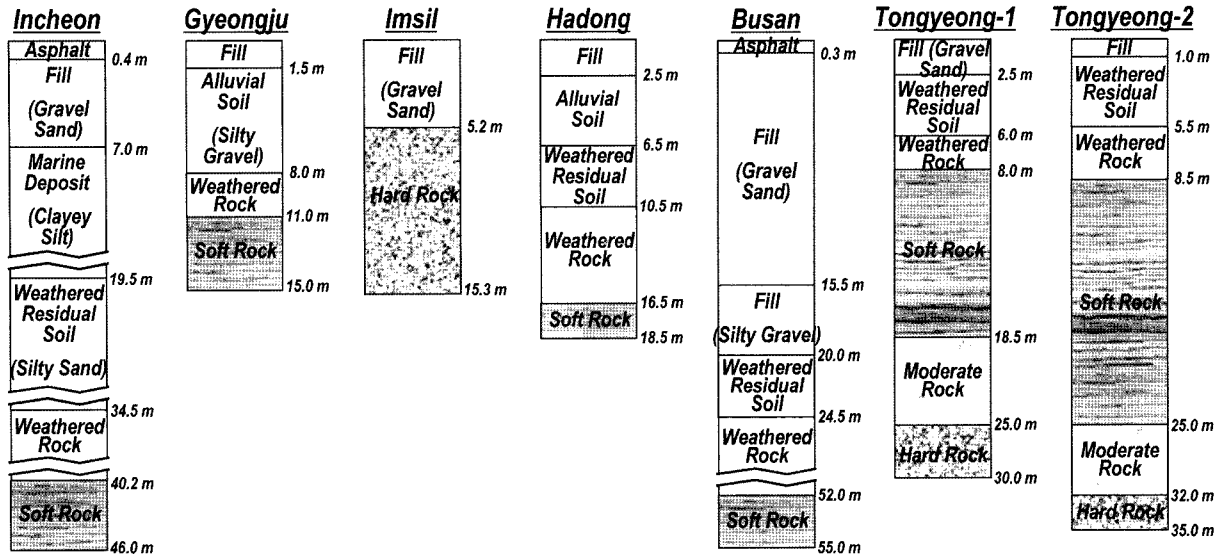


Fig. 4. Borehole logs at crosshole testing sites.

매립토를 확인하였다. 특히, 부산 부지 매립토의 경우 상부 15.2 m 두께의 자갈질 모래의 하부에 구성 성분이 다소 상이한 4.5 m 두께의 실트질 자갈이 존재하고 있었다. 반면, 인천 부지에서는 부산 부지와는 달리 매립토 아래에 12.5 m 두께의 점토질 실트의 해성 퇴적토(Marine deposit) 층이 발달해 있었다. 인천과 부산 부지 모두 깊은 심도(인천 40.2 m, 부산 52.0 m)에 분포한 연암(Soft rock) 상부에 풍화잔류토(Weathered residual soil)와 풍화암(Weathered rock)이 각각 약 20 m와 30 m 정도의 두께로 분포하고 있었다. 시험 대상 경주 부지의 경우 1.5 m 두께의 매립토 하부에 자갈질 퇴적토(Alluvial soil)가 6.5 m 두께로 심도 11.0 m부터 존재하는 연암 위에 발달한 3.0 m 두께의 풍화암 상부에 분포하였다. 하동 부지는 산지 내에 위치한 구릉 지역으로서 16.5 m 심도의 연암 상부에 매립토, 퇴적토, 풍화잔류토 및 풍화암이 다양하게 분포하고 있고 퇴적토와 풍화잔류토는 4.0 m 그리고 풍화암은 6.0 m 두께 분포를 보였다. 통영 지역의 시험 대상 부지는 해안에 인접한 구릉 지역으로서, 지표면 부근의 1.0~2.5 m 두께의 매립토 하부에 풍화잔류토와 풍화암이 발달하였고, 그 아래에는 지표면 기준 심도 8.0~8.5 m부터 모암의 연암, 보통암 및 경암이 분포하고 있었다.

#### 대상 부지에서의 크로스홀 탄성과 시험 수행

대상 부지에서의 시추 조사는 지표면 상에서 약 3.0 m 정도 이격 거리로 크로스홀 탄성과 시험을 위한 2 개의 시추공을 굴착하였다. 시추 조사가 완료된 후 크로스홀 탄성과 시험과 같은 시추공 탄성과 시험의 수행을 위해 풍화암 심도까지 PVC 케이싱을 설치하고 주변 지반을 모래와 시멘트풀(cement paste)로 충전하여 시험공을 형성하였다. 자립 가능한 풍화암 및 그 하부 연암 이상의 경질 암반은 나공 상태를 유지하였다.

크로스홀 탄성과 시험을 위해서 먼저 각 부지별로 지표면에서의 발전공과 수신공의 이격 거리를 확인하고, 경사계를 이용하여 각 시험공의 깊이별 경사도를 조사함으로써 시험 심도별 발전기와 수신기의 실제 이격 거리를 확인하였다.

이미 기술된 바와 같이, 대상 부지중 인천, 부산 및 통영에서는 수평 전단파와 압축파를 발전시킬 수 있도록 개발한 스프링식 발전 장치를 이용하여 전단파 뿐만 아니라 압축파 획득을 위한 시험을 수행하였으며, 경주와 하동의 경우 수직 전단파 발생 목적의 기계식 발전기를 이용하여 전단파 획득을 위한 크로스홀 탄성과 시험을 수행하였다. 또한, 임실 부지의 경우 지하수위 상부 토사 지반에서는 기계식 발전기를 사용하여 수직 전단파를 획득하고 나공 조건의 하부 암반 지반에서는 압전소자형 발전기를 이용하여 수평 전단파를 획득하였다. 본 연구에서는 크로스홀 탄성과 시험과 더불어 다른 시추공 탄성과 시험에도 보편적으로 적용할 수 있도록 직교하는 세 개의 지오폰(geophone)을 내장하여 압축파와 수평 전단파 및 수직 전단파를 모두 획득할 수 있는 3-방향 속도계형의 수신기를 사용하였다(Fig. 5).

크로스홀 탄성과 시험은 발전기와 수신기를 동일 심도로 유지한 상태로 지반 특성을 고려하여 지표면 부근부터 1.0 m 또는 0.5 m 간격으로 시험 심도를 증가시켜 가며 실시하였다. 스프링식 발전기를 적용한 크로스홀 탄성과 시험은 발전기와 수신기를 방향 룯드(orientation rod)에 연결하여 시험공 내에 위치한 기기들의 방향성을 확보한 상태로 대상 심도별 시험을 수행하였다. Fig. 5는 시추 방향 평면상에서의 압축파 및 전단파의 발전과 그에 상응하는 발전공과 수신공간의 전파 경로에 대한 모식도로서, 묘사된 바와 같이 3-성분 수신기 내의 종축 지오폰(longitudinal geophone)을 발전기를 향하도록 위치시킨 후 발전기의 방향을 평행 및 직교하게 변환시켜 가며 동일 심

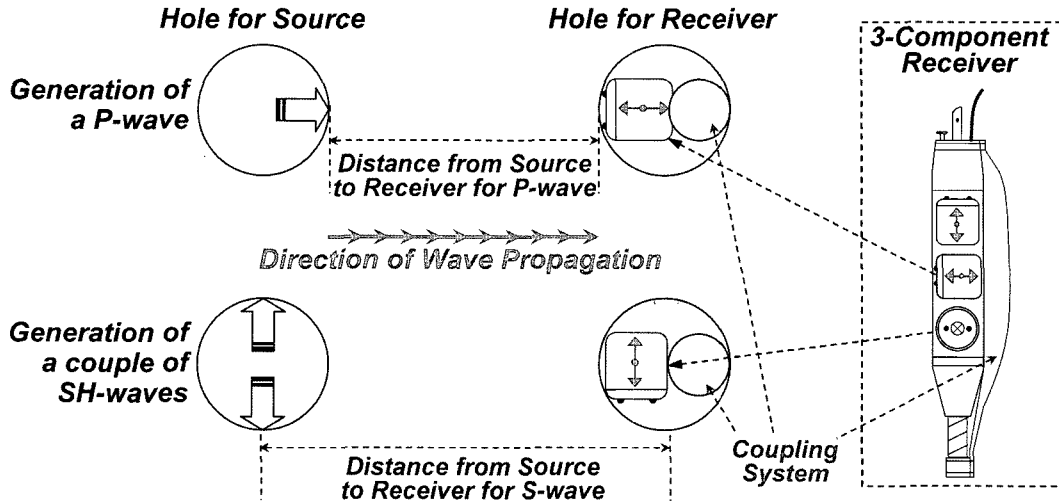


Fig. 5. Configuration of source and receiver for acquiring P- and SH-wave in the horizontally impacted crosshole seismic test.

도에서 시험을 수행한다. 압축파 신호는 발진기의 충격 공이를 수진기 방향으로 타격하여 측정한다. 또한, 타격 방향을 수진공에 직교하도록 조정하여 첫번째 전단파 신호를 획득한 후, 다시 방향을 180° 전환하여 타격함으로써 첫 번째 전단파 신호와 위상이 180° 다른 두 번째 전단파 신호를 획득할 수 있다. 이처럼 위상이 180° 다른 한 쌍의 전단파 신호를 계측함으로써 전단파 신호의 극성(polarity)을 이용하여 도달 시점을 용이하게 판독할 수 있다. 스프링식 발진기를 이용한 전단파 획득 과정은 압전소자형 발진기를 적용한 크로스홀 탄성과 시험 과정에서도 동일하게 적용되었다. 그러나 기계식 발진기는 상향 및 하향 타격을 통해 방사 방향으로 한 쌍의 수직 전단파가 전파되므로 수진기의 방향만을 전단파 획득이 가능하도록 유지하여 시험을 진행하였다.

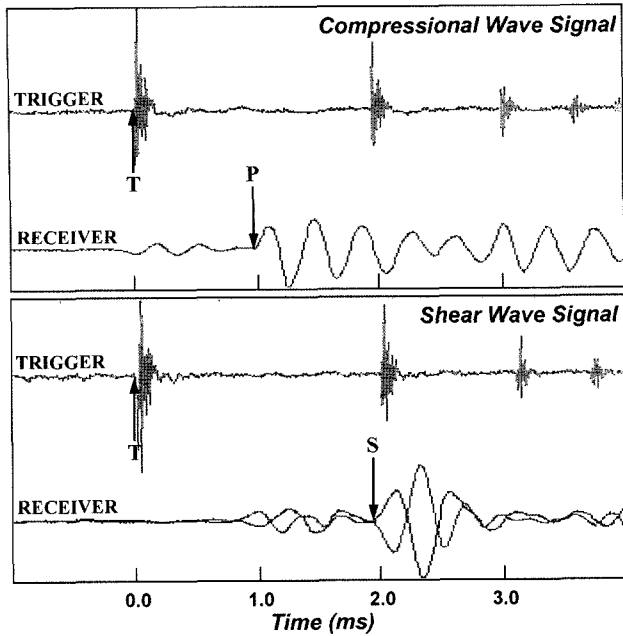
기계식 발진기를 이용하여 크로스홀 탄성과 시험을 실시한 경주와 하동 부지의 경우 시추 조사 심도 내에서는 지하수위가 존재하지 않음에 따라 연암에 해당되는 13.0 m와 18.0 m 심도까지 현장에서 전단파 신호를 획득하였으며, 경주 부지에서는 크로스홀 탄성과 시험용 발진공에 인접한 지표면에 가진판을 설치하고 크로스홀 탄성과 시험의 수진공을 대상으로 현장에서 보편적으로 이용되고 있는 다운홀 탄성과 시험을 깊이 14.0 m까지 병행하였다. 임실 부지에서는 2.5 m 깊이부터 지하수가 분포함에 따라 그 상부에서는 기계식 발진기를 그리고 하부 나공 조건의 경암에서는 6.5 m부터 14.5 m 심도에 걸쳐 압전소자형 발진기를 이용한 전단파 신호 획득 목적의 크로스홀 탄성과 시험을 수행하였다. 또한, 전단파 신호의 비교 획득을 위해 약 8.0 m 깊이까지 다운홀 탄성과 시험을 병행하였고 경암 지층에서는 인홀 탄성과 시험도 병행하였다.

개발된 스프링식 발진기가 적용된 인천 부지에서는 지표면 부근의 매립토부터 44.5 m 깊이의 연암까지 압축파 및 전단파 신호 획득을 위한 크로스홀 탄성과 시험을 수행하였으며, 다운

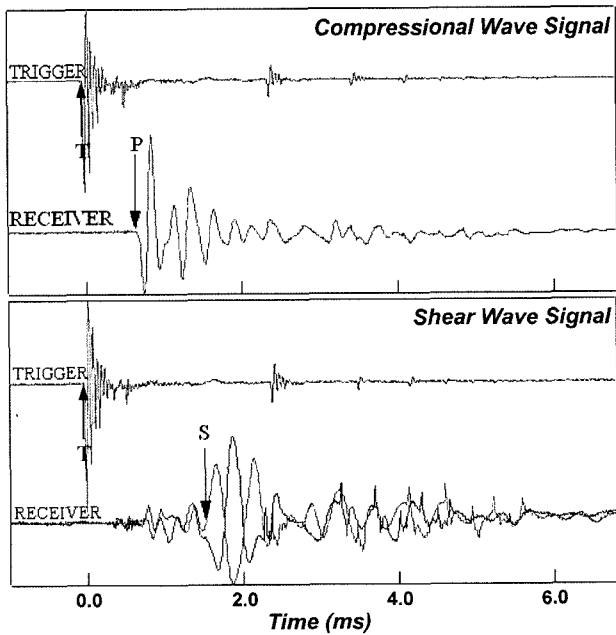
홀 탄성과 시험을 병행하여 심도 20.0 m까지 전단파 신호를 획득하였다. 뿐만 아니라 부지 하부 나공 상태의 연암에서는 인홀 탄성과 시험을 수행하여 전단파 신호를 측정하였다. 부산 부지에서는 비교적 깊은 심도인 54.5 m의 연암까지 크로스홀 탄성과 시험을 실시하여 성공적으로 압축파와 전단파 신호를 계측하였으며, 다운홀 탄성과 시험의 경우 수진공을 대상으로 24.0 m까지 전단파 신호를 획득할 수 있었다. 통영의 두 대상지인 통영-1 및 통영-2 부지에서는 추가적인 다운홀 탄성과 시험을 실시하지 않았으며, 크로스홀 탄성과 시험을 각각 28.3 m의 경암 및 28.9 m의 보통암까지 수행하여 압축파 및 전단파 신호를 획득하였다.

현장에서 크로스홀 탄성과 시험을 통해 획득한 신호 자료들의 전형적인 형태에 대한 대표적인 예를 Fig. 6에 제시하였으며, 본 연구 대상 부지 중 두 부지의 단일 심도에서 획득한 압축파 및 전단파의 대표적인 발진 신호와 수진기에서의 측정 자료이다. 실제 측정된 신호 자료는 적용 장비 뿐만 아니라 시추공간 거리, 시추공 상태, 자료 획득 간격 등 여러 복합적 매개 변수에 의해 영향을 받게 된다. 그러나 본 연구에서는 매개 변수의 정량적 영향 분석을 고려한 시험 수행보다는 내진 설계 및 내진 성능 평가 목적의 실무적 시험 수행 및 분석을 실시하였다. Fig. 6과 같은 획득 신호 자료를 이용하여 발진 시점(T)과 압축파의 초기 도달 시점(P로 표기함)과 전단파의 도달 시점(S로 표기함)의 시간차를 판독하고 발진기와 수진기 간의 거리( $l$ )를 통과하는 데 소요된 압축파의 전파 시간( $t_p$ )과 전단파의 전파 시간( $t_s$ ) 결정한다. 전파 시간 및 발진 장치와 수진기의 거리를 고려하여 각각 식 (4)와 식 (5)에 따라 압축파 속도( $V_p$ )와 전단파 속도( $V_s$ )를 산출할 수 있다.

$$V_p = \frac{l}{t_p} \tag{4}$$



(a)

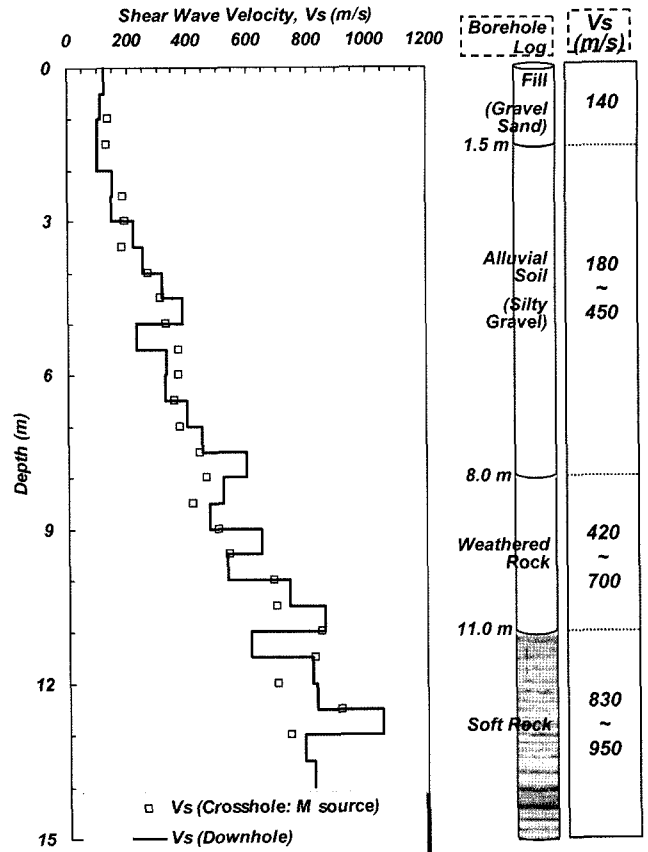


(b)

**Fig. 6.** Typical source and receiver signals from crosshole seismic test (a) at the depth of 12.0 m in Incheon site and (b) at the depth of 13.8 m in Tongyeong-1 site. The distance from source to receiver is 2.94 m for (a) and 2.89 m for (b).

$$V_s = \frac{l}{t_s} \quad (5)$$

본 연구에서는 7 개 대상 부지들의 각 시험 심도에서 크로스홀 탄성과 시험으로부터 획득한 전단파 신호의 신호대 잡음비가 양호하여 신뢰성 높은 지층 및 심도별 전단파 속도를 결정하였다. 또한, 스프링식 발전기를 이용한 크로스홀 탄성과



**Fig. 7.** Shear wave velocity ( $V_s$ ) with depth determined from crosshole test at Gyeongju site. The  $V_s$  profile determined from downhole test were also plotted for comparing with the  $V_s$  from crosshole test. The mechanical source was adopted for crosshole test.

시험을 통해 압축파 자료를 획득한 인천, 부산 및 통영 부지에서는 심도별 압축파 속도를 도출하였다. 시험 대상 부지별로 병행된 다운홀 탄성과 시험 자료는 지반내 정확한 전파 경로를 고려하기 위하여 Snell의 법칙에 근거한 굴절과 경로법을 적용한 역산 해석을 이용하여 전단파 속도 분포를 도출하였다 (선창국 등, 2005b; Kim et al., 2004).

#### 대상 부지에서의 크로스홀 탄성과 시험을 통한 지반 동적 특성 평가

크로스홀 탄성과 시험은 다른 현장 탄성과 시험에 비해 신뢰도가 높고 분석이 매우 용이한 반면, 2 개 이상의 시추가 구됨에 따라 다소 비경제적일 수 있다. 그러나 동적 특성 평가 대상 시설물의 중요성 측면을 감안할 때, 무엇보다도 공학적으로 필요한 심도까지의 동적 특성을 높은 신뢰도로 결정하는 것이 가장 중요하며, 이러한 요구 사항은 지반 조건과 결부되어 시험 기법 및 장비의 한계로 인해 만족되지 못하는 경우가 실제 현장에서 종종 발생되어 왔다. 이에 본 연구에서는 다양한 지반 조건에서 효율적으로 크로스홀 탄성과 시험이 가능한 수평방향 발전 장치를 개발하여 국내 부지들을 대상으로 크로스홀 탄성과 시험을 수행하여 높은 신뢰성 갖은 지반의 동적

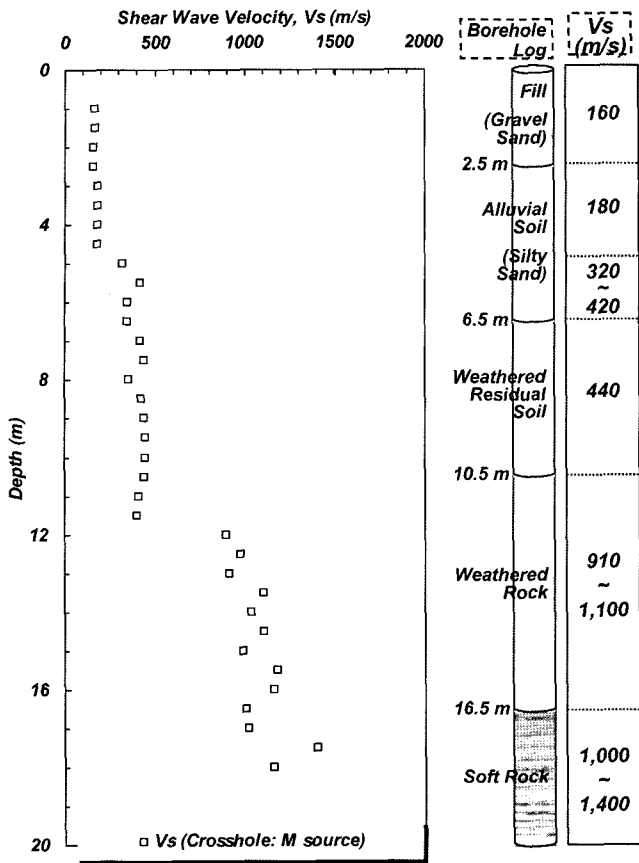


Fig. 8. Shear wave velocity ( $V_s$ ) with depth determined from crosshole test at Hadong site. The mechanical source was adopted for crosshole test.

특성을 도출하였다. 또한, 기존의 기계식 및 압전소자형 발전기를 이용한 크로스홀 탄성과 시험을 국내 다른 부지들에서 적용하여 발전기 특성에 따른 크로스홀 탄성과 시험 수행 과정 및 결과에 대해 고찰하였다.

기존의 발전기(Mok *et al.*, 1988; 백영식 등, 1996)를 이용하여 경주, 하동 및 임실 부지에서 크로스홀 탄성과 시험을 수행하고 Fig. 7, Fig. 8 및 Fig. 9에 제시된 바와 같이 전단파 속도를 결정하였으며, 각 부지에서의 시추 조사로부터 파악된 깊이 에 따른 지층 분포도 확인할 수 있다. 전단파 속도는 현장 획득 신호를 토대로 식 (5)에 따라 산정하였다. Fig. 7과 Fig. 9에는 각각 경주와 임실 부지에 대한 다운홀 탄성과 시험을 통해 측정된 전단파 속도 분포와 비교 · 도시하였고, Fig. 9에는 임실 부지의 경암 지층에서의 인홀 탄성과 시험을 이용하여 측정된 전단파 속도도 함께 제시하였다.

탄성과 발전을 위한 타격부가 외부로 노출된 개방형 구조의 기존 기계식 발전기를 이용한 크로스홀 탄성과 시험의 가장 중요한 관건은 시추공 내 지하수의 존재 유무이며, 지하수가 존재할 경우 측정 가능한 전단파의 발전이 어렵거나 측정 자료의 신호대 잡음비가 불량할 수 있다. 시추 종료 심도까지 지하수위가 관측되지 않은 경주와 하동 부지에서의 크로스홀 탄

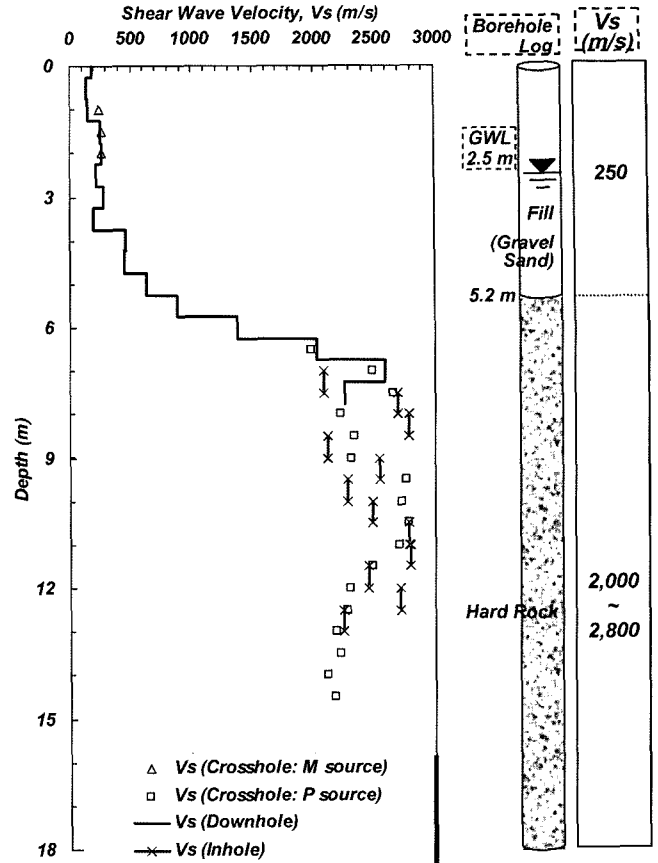


Fig. 9. Shear wave velocity ( $V_s$ ) with depth determined from crosshole test at Imstil site. The  $V_s$  profile determined from downhole test and the  $V_s$  from inhole test were also plotted for comparing with the  $V_s$  from crosshole test. The mechanical and piezoelectric source was adopted for crosshole test in shallow soil and deep hard rock, respectively.

성과 시험은 대상 심도까지 전단파 신호를 성공적으로 획득함에 따라 Fig. 7과 Fig. 8로 도시된 바와 같이 지표면 부근 매립도부터 기반암의 연암까지 깊이별 전단파 속도를 결정할 수 있었다. 반면, 댐 하류의 기초 지반에 위치한 임실 부지에서는 지표면 아래 2.5 m부터 지하수가 존재하여 기계식 발전기를 이용한 크로스홀 탄성과 시험은 2.0 m 깊이까지만 제한적으로 실시할 수 있었고, 지하수위 아래의 나공 구간인 경암에 대해서는 압전소자형 발전기를 이용하여 크로스홀 탄성과 시험을 수행하였다. 임실 부지에서 적용된 압전소자형 발전기는 발전 에너지가 부족하여 PVC 케이싱이 설치된 토사 지반에서의 신호 획득은 어려웠다.

경주 부지(Fig. 7)의 경우 지층 변화보다는 깊이 증가에 따라 크로스홀 탄성과 시험으로부터 결정된 전단파 속도가 점진적으로 증가하는 경향을 보였으며, 이와 같은 경향은 병행된 다운홀 탄성과 시험의 전단파 속도 분포에서도 확인할 수 있다. 즉, 인위적으로 조성된 매립토를 제외한 지층의 경우 동일 지층에서도 심도 증가에 따라 전단파 속도가 증가하였다. 경주



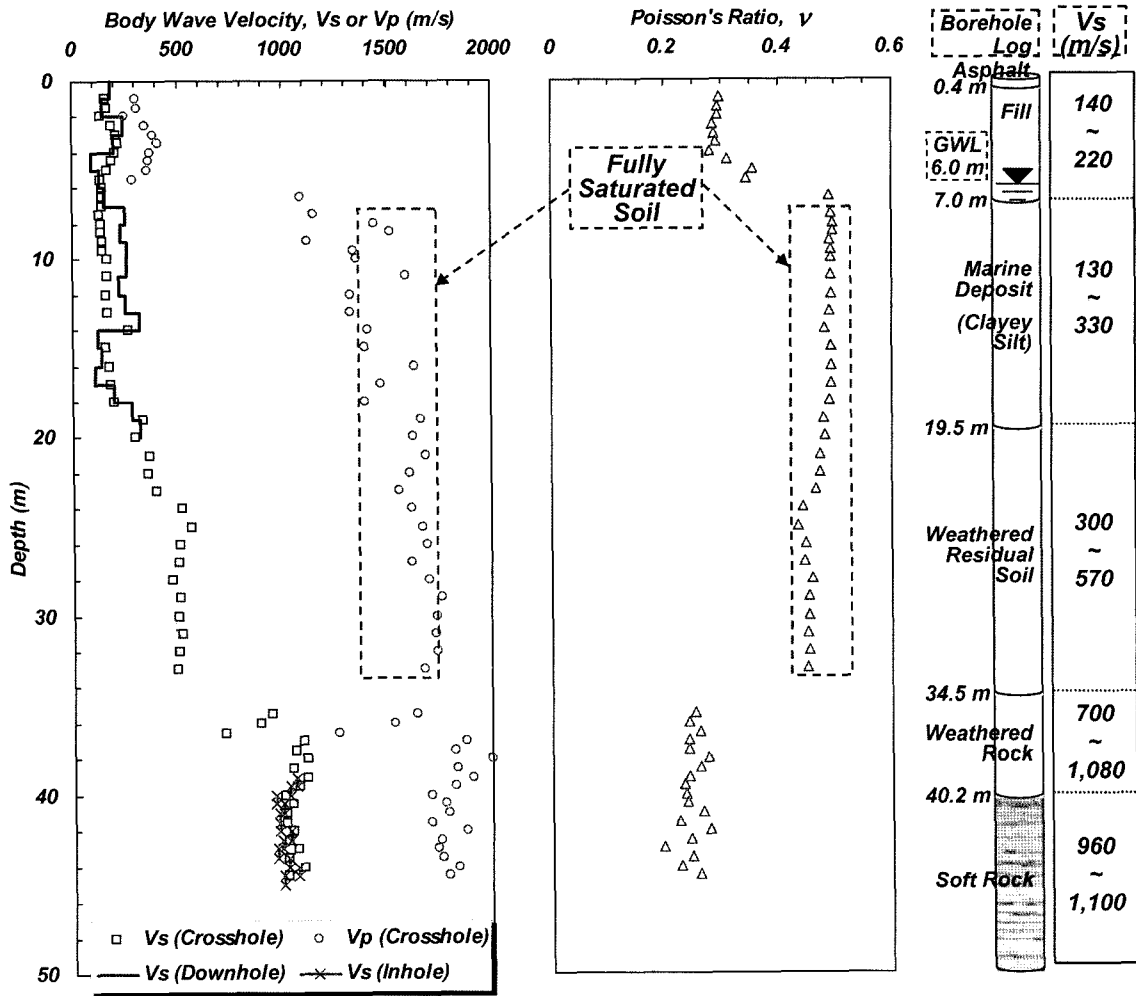


Fig. 10. Body wave velocity and corresponding Poisson's ratio with depth determined from crosshole test at Incheon site. The shear wave velocity ( $V_s$ ) profile determined from downhole test and the  $V_s$  from inhole test were also plotted for comparing with the  $V_s$  from crosshole test. The spring-loaded source developed in this study was adopted for crosshole test.

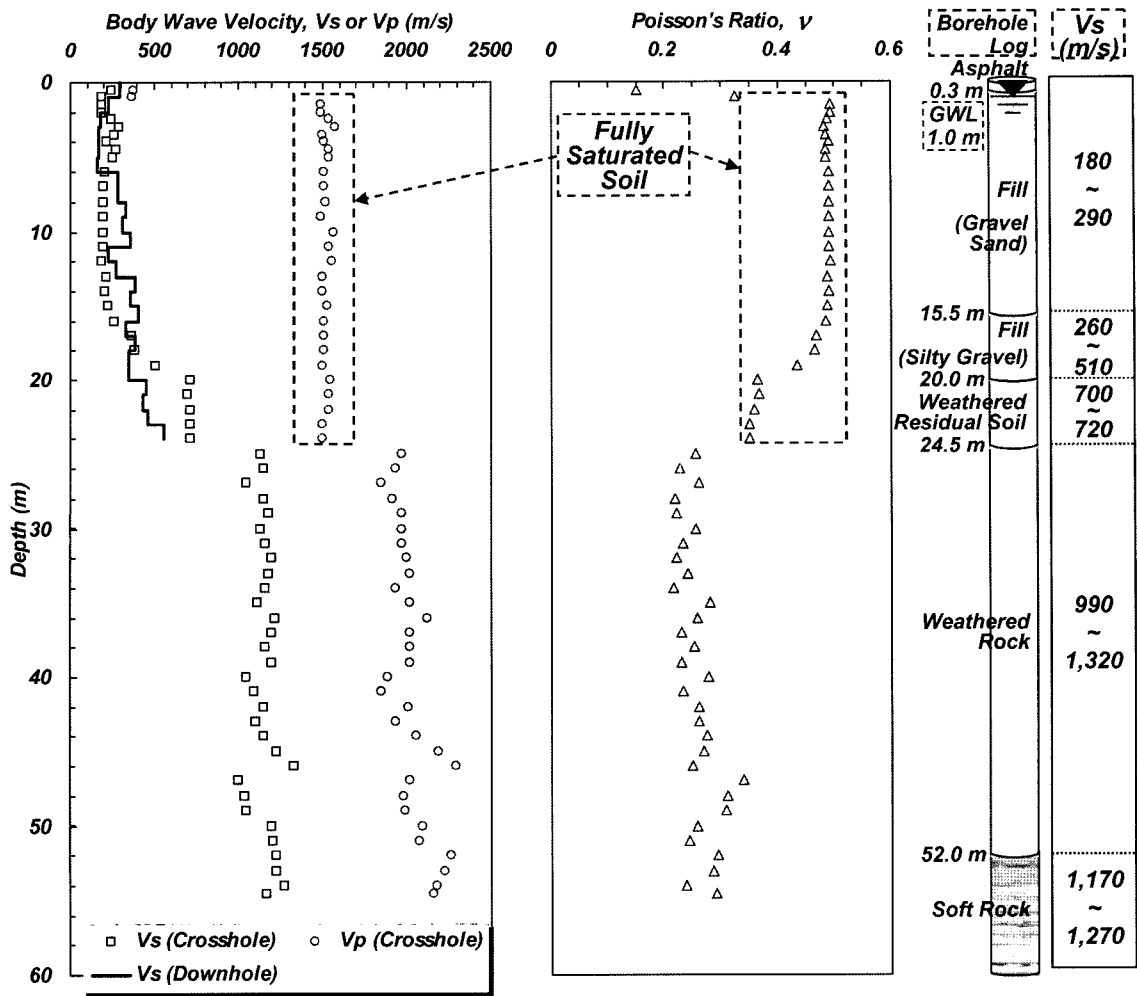
부지의 경우 자갈이 다소 존재하는 모래질 매립토에서는 약 140 m/s 정도, 실트질 자갈로 구성된 퇴적토에서는 180 ~ 450 m/s 정도, 풍화암에서는 420 ~ 700 m/s 정도, 그리고 비교적 파쇄가 심한 것으로 조사된 연암에서는 830 ~ 950 m/s 정도의 전단파 속도를 나타냈다.

하동 부지(Fig. 8)는 크로스홀 탄성과 시험만 수행되었고, 대체적으로 심도 증가에 따라 전단파 속도가 증가하지만 점진적인 증가보다는 지층 변화에 따른 전단파 속도의 변화 양상을 보였다. 하동 부지에서는 매립토의 경우 대략 160 m/s 정도, 실트질 모래로 구성된 퇴적토의 경우 상부에서는 약 180 m/s 그리고 하부에서는 320 ~ 420 m/s 정도, 조립질 모래로 구분될 수 있는 풍화잔류토의 경우 대체로 440 m/s 정도, 풍화잔류토의 연속된 지층인 풍화암의 경우 상부 일부를 제외한 대부분 영역에서 910 ~ 1,100 m/s 정도, 그리고 파쇄가 심한 연암에서는 약 1,000 ~ 1,400 m/s의 전단파 속도 분포를 보였다.

임실 부지에서 크로스홀 탄성과 시험으로 도출된 전단파 속

도(Fig. 9)는 지하수위 상부의 자갈질 모래로 구성된 매립토에서는 약 250 m/s, 그리고 비교적 신선한 상태인 경암에서는 약 2,000 ~ 2,800 m/s의 정도로 결정되었다. 이러한 지층 조건별 전단파 속도 분포는 지표면 매립토부터 경암 상부까지 수행된 다운홀 탄성과 시험 및 경암을 대상으로 병행된 인홀 탄성과 시험의 결과와도 유사한 경향을 보였다. 경주, 하동 그리고 임실 부지에서 기존 발전기를 이용한 크로스홀 탄성과 시험 자료 취득 과정 및 그 결과로 볼 때, 개방형 구조의 기계식 발전기에 대한 활용 편의성에도 불구하고 지하수위 아래에서의 현장 적용 어려움과 압전소자형 발전기의 토사 지반에 대한 적용의 제한성을 확인하였다.

Fig. 10 및 Fig. 11은 각각 인천과 부산 부지에서 수행한 크로스홀 탄성과 시험 결과로서, 압축파 속도와 전단파 속도, 그리고 포아송 비를 도시한 것이다. 수진공에서 수행한 다운홀 탄성과 시험으로부터 결정된 전단파 속도와 시추 조사로 확인된 지층 분포를 Fig. 10과 Fig. 11에 비교 도시하였고, 인천 부



**Fig. 11.** Body wave velocity and corresponding Poisson's ratio with depth determined from crosshole test at Busan site. The shear wave velocity ( $V_s$ ) profile determined from downhole test were also plotted for comparing with the  $V_s$  from crosshole test. The spring-loaded source developed in this study was adopted for crosshole test.

지의 연암 층에서 인홀 탄성과 시험을 이용하여 결정된 전단파 속도를 Fig. 10에 나타내었다. 대상 부지의 지층은 매립토, 퇴적토, 풍화잔류토, 풍화암, 그리고 연암으로 구성된 다층 조건으로서 국내 주요 항만 부지의 보편적인 지층 조건이다. 국가적 주요 인프라 시설물인 접안 부두의 경우 그에 상응하는 내진 성능이 요구되며, 이의 정량적 평가는 깊이별 지반 동적 특성의 정확한 파악이 선행되어야 비로소 수행될 수 있다.

본 연구의 제시된 크로스홀 탄성과 시험 결과(Fig. 10과 Fig. 11)에서 확인할 수 있는 바와 같이, 대상 부지의 모든 지층 조건에서 압축과 속도 및 전단파 속도와 포아송 비를 효율적으로 평가하였으며, 이러한 결과는 본 연구의 대상인 항만 시설물의 내진 성능 평가를 위한 지반 동적 특성으로 활용될 수 있다. 크로스홀 탄성과 시험으로부터 결정된 대상 부지의 지층별 전단파 속도를 분포를 살펴보면, 인천 부지(Fig. 10)에서는 자갈질 모래로 구성된 매립토의 경우 140~220 m/s 정도, 점토질 실트 퇴적토의 경우 약 130~330 m/s, 조립질 모래로 분류

될 수 있는 풍화잔류토의 경우 300~570 m/s 정도, 풍화암에서는 약 700~1,080 m/s, 그리고 비교적 파쇄가 심한 연암의 경우 960~1,100 m/s 정도를 보였다. 또한, 부산 부지(Fig. 11)의 전단파 속도 분포는 상부 자갈질 모래의 매립토에서는 180~290 m/s 정도, 하부 실트질 자갈로 구성된 매립토에서는 260~510 m/s 정도, 풍화잔류토의 경우 약 700~720 m/s, 풍화암의 경우 990~1,320 m/s 정도, 그리고 연암 층의 상부에서는 1,170~1,270 m/s 정도로 결정되었다. 대체로 지층 별로 상이한 전단파 속도 분포를 보였으며, 전체적으로는 심도 증가에 따라 지층의 강성이 증가하므로 전단파 속도도 증가하는 경향을 확인할 수 있었다.

인천과 부산의 부지에서 수행된 현장 크로스홀 및 다운홀 탄성과 시험 결과를 비교해 볼 때, 다운홀 탄성과 시험은 심도가 증가함에 따라서 진폭 감쇠로 인하여 깊은 심도까지 양질의 자료취득이 어려웠지만 천부의 전단파 속도 분포는 크로스홀 탄성과 시험과 유사한 결과를 도출할 수 있었다. 나공 구간

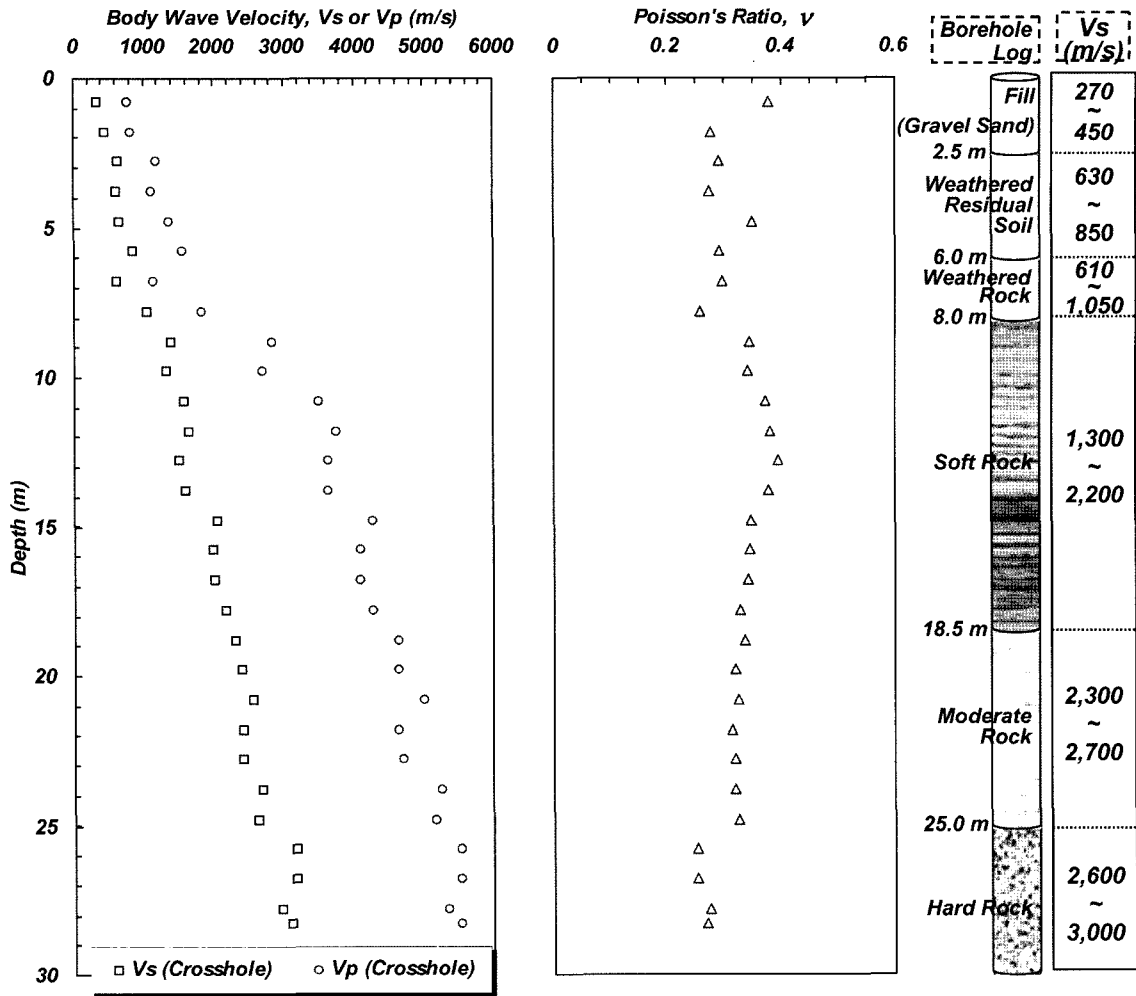


Fig. 12. Body wave velocity and corresponding Poisson's ratio with depth determined from crosshole test at Tongyeong-1 site. The spring-loaded source developed in this study was adopted for crosshole test.

에서 수행한 인홀 탄성과 시험 결과는 대체로 크로스홀 탄성과 시험의 전단파 속도와 유사하였다. 따라서 복합적인 지층 조건의 지반에 대한 깊이별 동적 특성의 결정에는 실무에서 보편적으로 적용되고 있는 다운홀 탄성과 시험이나 나공과 같은 제한적인 시추공 환경에만 적용되고 있는 인홀 탄성과 시험에 비해 본 연구의 스프링식 발전기와 같은 적합한 발전 장치가 적용된 크로스홀 탄성과 시험이 보다 유용할 것으로 판단된다.

그러나 Fig. 10 및 Fig. 11에서 파선 상자로 표시한 지하수 위(인천 부지의 경우 6.0 m, 부산 부지의 경우 1.0 m) 아래에 분포하는 완전 포화 조건의 토사 층에서는 실제 토사 입자의 압축과 속도라기보다는 일반적인 물의 압축과 속도(약 1,550 m/s)로 평가됨에 따라 포화 토사 층에서는 전단파 속도만이 항만 시설물에서의 유효한 지반 동적 특성으로 활용 가능하였다. 그 외 지층에서의 포아송 비는 인천 부지의 불포화 토사 층에서는 0.28 ~ 0.36, 그리고 풍화암 및 연암 층에서는 두 지역 모두 대체로 0.25 정도로 결정되었다. 따라서 지하수위가 토사

층 내에 분포하는 다양한 층상 구조의 지반을 대상으로 지표면부터 기반암까지의 전체적인 지반 동적 특성 평가 시에는 전단파 속도의 결정이 우선되어야 하며, 일반적으로 지반 동역학적 활용을 위해서는 토사 입자와 같은 고체 매질을 대상으로 한 지반의 깊이별 전단파 속도만이 평가되기도 한다.

본 연구에서는 접안 부두 이외에도 주요 국가 플랜트 저장 시설을 대상으로 크로스홀 탄성과 시험을 실시하였으며, 위의 접안 부두 항만 시설물에 대한 내진 성능 평가 목적과는 달리 플랜트 시설물의 내진 설계를 위해 지반 동적 특성을 평가하였다. Fig. 12와 Fig. 13에는 대상 시설물의 현장 지역 내에서 100 m 정도 이격된 두 부지(통영-1과 통영-2)의 크로스홀 탄성과 시험으로부터 결정된 압축파 속도 및 전단파 속도 그리고 포아송 비를 제시하였다. 더불어 시추 조사로부터 확인된 대상 부지의 지층 분포 역시 도시하였다. 통영 지역의 대상 부지는 시추 조사를 통한 부지 현황에서 기술한 바와 같이 지형적으로 구릉지에 위치하므로, 항만 부두 시설물의 대상 부지와는 달리 매립토 지층은 단순히 부지 조성만을 위해 상대적으

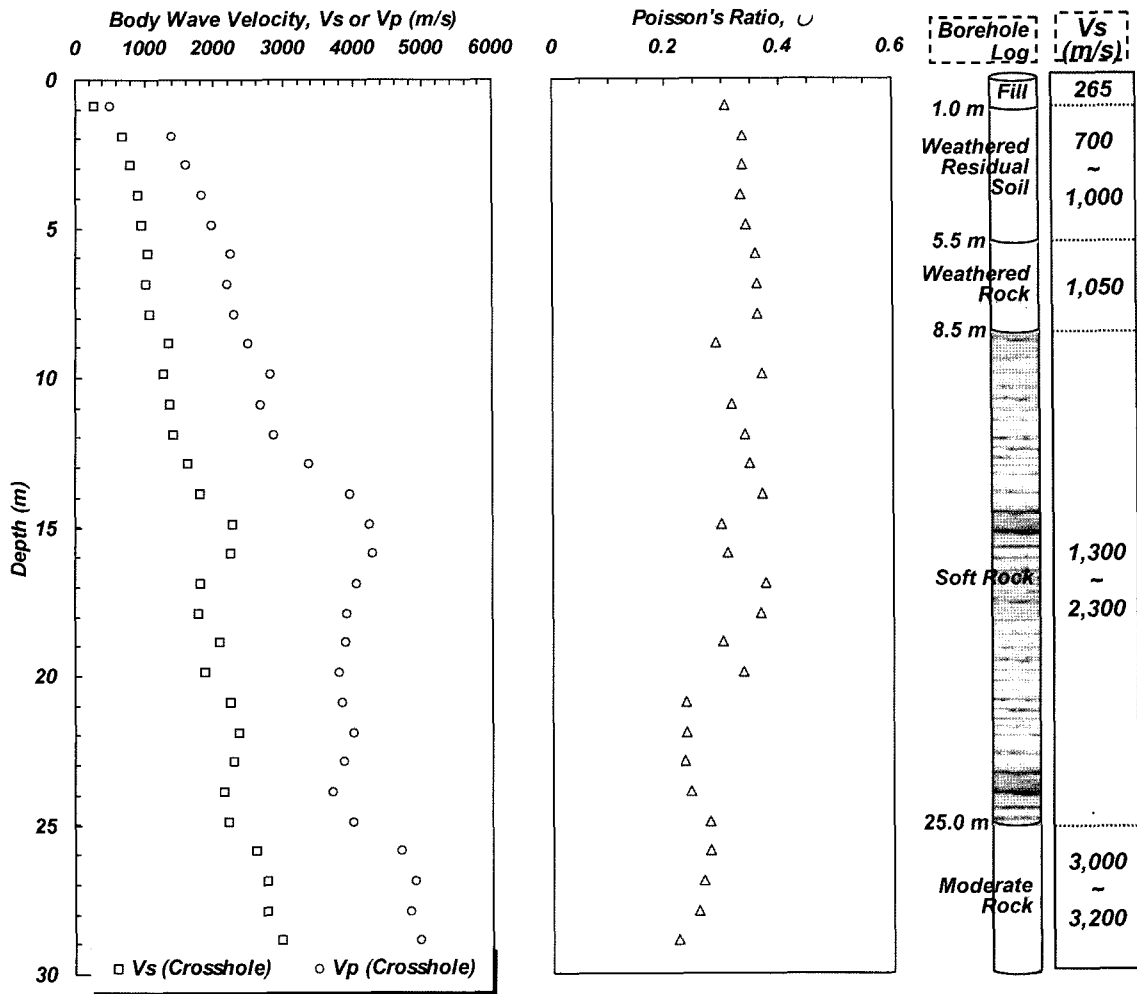


Fig. 13. Body wave velocity and corresponding Poisson's ratio with depth determined from crosshole test at Tongyeong-2 site. The spring-loaded source developed in this study was adopted for crosshole test.

로 얇게 형성되어 있으며, 퇴적토는 발달되어 있지 않다. 즉, 얇은 두께의 매립토 아래부터 모암의 풍화 지층(풍화잔류토 및 풍화암)이 발달해 있고 그 하부에는 연암, 보통암 및 경암이 공학적 기반암으로 존재하고 있다. 따라서 통영 지역 대상 부지에서는 이미 항만 시설물 부지의 다층 지반(매립토, 퇴적토, 풍화잔류토, 풍화암, 연암) 조건 부지에 대해서 효율적으로 지반 동적 특성을 결정할 수 있었던 수평방향 발진 크로스홀 탄성과 시험을 수행하여 풍화 지층을 포함한 암반층의 깊이에 따른 동적 특성을 결정함으로써 다양한 경도 조건의 암반에 대한 크로스홀 탄성과 시험의 유용성을 확인하였다.

Fig. 12 및 Fig. 13과 같이 지반의 동적 특성을 나타내는 탄성과 속도와 탄성계수는 대상 부지에 위치할 대규모 플랜트 시설에 대한 내진 설계 목적의 지진성 거동을 예측하기 위한 기본 자료로 활용될 수 있다. 연구 대상인 통영 지역에서의 크로스홀 탄성과 시험으로부터 결정된 대상 부지의 지층별 전단파 속도를 분포를 살펴보면, 불균질한 지층 상태인 자갈질 모래의 매립토에서는 비교적 편차가 넓은 270 ~ 450 m/s 정도,

그리고 풍화잔류토의 경우 630 ~ 1,000 m/s 정도로서 본 연구의 인천이나 부산 부지뿐만 아니라 국내의 다른 풍화 지층 발달 지역(Kim, 2001)에 비해서도 상당히 큰 전단파 속도 분포를 나타냈다. 또한, 심도 6 ~ 1 m 구간인 풍화암 지반의 전단파 속도는 풍화암 상부 일부 심도에서만 약 610 m/s로 결정되었을 뿐, 대부분 1,050 m/s 정도의 분포를 보였다.

통영의 두 부지 모두에서 연암 층이 가장 두껍게 발달한 지층(통영-1 부지에서는 10.5 m 두께, 통영-2 부지에서는 16.5 m 두께)으로 조사되었으며, 연암에서는 대략 1,300 ~ 2,300 m/s 정도의 전단파 속도 분포가 결정되었다. 두 부지의 보통암 지반에서는 전단파 속도가 2,300 ~ 3,000 m/s 정도의 분포 범위를 나타냈고, 통영-1 부지의 크로스홀 탄성과 시험으로부터 평가된 경암의 전단파 속도는 비록 경암 상부의 일부 심도의 결과이지만 대체로 3,000 ~ 3,200 m/s의 범위로 결정되었다. 본 연구 대상인 통영 지역의 두 부지는 외부의 토사 유입이나 퇴적 작용 없이 모암 및 그의 풍화 지층으로 지반이 구성됨에 따라 대체로 심도 증가에 따라 전단파 속도는 점진적인 증가 경

향을 보였다. 물론, 통영-2 부지의 경우 연암 층 내에서 압축파 속도와 전단파 속도의 급감 후 점진적인 증가 경향을 보이기도 하였으나, 대체로 지반의 실체파 속도는 지층 조건에 따라 다르게 결정되었다. 통영 지역 대상 부지에서는 토사 지층 내에서 지하수위가 관측되지 않았으며, 이에 따라 조사 지반의 전체 시험 심도에 대해서 활용 가능한 포아송 비를 결정할 수 있었다.

통영 지역의 크로스홀 탄성과 시험으로부터 측정된 지반의 압축파 속도와 전단파 속도를 토대로 결정된 포아송 비를 확인해 보면, 풍화잔류토의 경우 통영-1 부지에서는 0.27~0.35의 비교적 넓은 분포 범위를 보인데 반해 통영-2 부지에서는 0.33~0.34의 상대적으로 큰 값 범위에서의 좁은 변화 폭을 보였으며, 풍화암의 경우 통영-1 부지와 통영-2 부지에서 각각 0.26~0.30과 0.36 정도로 나타났다. 또한, 풍화암 하부에 놓인 연암이나 그보다 더 큰 경도의 보통암 및 경암의 공학적 기반암(Sun, 2004)에 대한 포아송 비도 시험 심도별로 결정하였다. 연암의 포아송 비는 통영-1 부지의 경우 0.32~0.40 그리고 통영-2 부지의 경우 0.23~0.37로서 다소 큰 값의 분포 범위를 보였으며, 보통암에서는 통영-1 부지와 통영-2 부지에 대해 각각 0.32~0.34 및 0.22~0.28로서 연암에 비해 다소 작은 분포 범위를 나타냈다. 경암의 경우 통영-1 부지에서만 포아송 비를 확인하였는데, 0.26 정도로 결정되었다. 통영 대상 지역에서의 기반암의 포아송 비 분포 경향을 살펴보면, 통영-1 부지가 통영-2 부지에 비해 다소 큰 값을 보였으나, 두 부지 모두에서 심도 증가나 기반암의 경도 증가에 따른 포아송 비의 일반적인 감소 경향을 확인할 수 있었다. 다만, 연암 층 내에서 심도 20 m 부근부터 보통암으로 구분되는 25 m까지의 압축파 속도가 전단파 속도에 비해 상대적으로 작아짐으로 인해 포아송비가 하부 보통암과 유사하게 나타났으며, 이는 현장에서의 암반 분류에 있어서의 오류 또는 연암 내에서의 절리 방향의 변화 등에 의한 것으로 추정된다.

현장에서의 크로스홀 탄성과 시험으로부터 결정된 전단파 속도와 압축파 속도 그리고 두 실체파 속도의 관계를 통해 산정된 포아송 비는 시추 조사에 근거한 지층 조건이나 공학적 판단에 근거한 층서 구분을 토대로 이상화하여 대상 시설물에 대한 기초 지반의 동적 특성으로서 내진 설계 및 내진 성능 평가에 활용된다. 이미 기술된 바와 같이, 본 연구의 대상인 인천과 부산 부지에서는 기존 항만 시설물 부지임에 따라 내진 성능 평가를 위한 기초 지반의 동적 특성으로서 깊이별 전단파 속도와 압축파 속도 및 포아송 비가 활용되었으며, 통영 부지에서는 신규 플랜트 시설물 부지임에 따라 내진 설계의 기초 지반 동적 특성 자료로 이용되었다. 대표적으로 전단파 속도 분포는 각 부지의 지진 응답 해석을 위한 기본 입력 자료로 활용되었고, 이러한 해석 과정을 통해 내진 설계 및 내진 성능 평가를 위한 지표면 부근에서의 정량적 지진 지반 운동을 예측하였다. 또한, 현행 내진 설계 기준(건설교통부, 1997)

에 따른 설계 지반 운동 결정 목적의 지반 분류를 위하여 30 m까지의 평균 전단파 속도를 산정하였으며, 지반 분류에 따라 부지별 지진 증폭 정도를 결정할 수 있다(Sun *et al.*, 2005). 뿐만 아니라 조사 결정된 지반의 동적 특성은 해당 시설물에 대한 공용 층의 정적 상태 평가를 위한 기본 자료로도 활용될 수 있다. 특히, 시설물별로 사전에 계획된 조사 목표 심도까지 본 연구에서 개발된 크로스홀 발전 장치를 이용하여 토사 뿐만 아니라 암반을 포함한 다양한 지층 조건을 대상으로 모든 시험 심도에서 효율적으로 지반의 동적 특성을 평가하였으며, 크로스홀 탄성과 시험 장비 및 기법의 지반 및 지진공학적 유용성과 신뢰성을 확인하였다.

## 결론 및 제언

내진 설계 및 내진 성능 평가 뿐만 아니라 공용 상태 평가를 위한 기초 지반의 동적 특성을 효율적이고 신뢰성 높게 결정하기 위한 기법의 개발 및 적용의 일환으로, 현장 크로스홀 탄성과 시험의 발전 장치를 개발하고 국내 주요 시설물들에 대한 적용 연구를 수행하였다. 본 연구에서는 기존의 일반적인 크로스홀 탄성과 시험에서 적용되어 온 발전 장치와는 구분되고 다양한 지층 조건에 대해서 지하수위 존재 유무에 관계없이 수평 전단파 및 압축파 생성이 가능한 스프링식 크로스홀 탄성과 시험용 발전 장치를 개발하였다. 개발된 크로스홀 발전기를 이용하여 인천, 부산 및 통영의 주요 시설물 부지들을 대상으로 다양한 지층 조건의 현장에서 깊이별 전단파 및 압축파를 획득하고, 항만 시설물들의 내진 성능 평가와 플랜트 시설물의 내진 설계를 위한 지반 동적 특성 자료로서 전단파 속도와 압축파 속도와 그에 따른 포아송 비를 결정하였다. 또한, 기존의 기계식 및 압전소자형 발전기를 이용한 크로스홀 탄성과 시험을 국내 다른 부지들에서 수행한 결과, 본 연구에서 개발 적용된 스프링식 발전기와는 달리, 시험 대상 심도 내에서의 지하수 존재 유무에 따른 개방형 구조의 기계식 발전기의 적용 한계성과 토사층에 대한 압전소자형 발전기의 활용 제한성을 확인하였다. 기계식과 압전소자형 발전기를 적용한 크로스홀 탄성과 시험 부지들에서 병행된 다운홀 및 인홀 탄성과 시험의 전단파 속도 결과는 본 연구에서 개발된 스프링식 발전기 적용의 크로스홀 탄성과 시험 결과와 유사하게 결정되었다.

인천과 부산의 항만 시설물 부지에서 개발된 발전 장치를 이용한 크로스홀 탄성과 시험과 다운홀 탄성과 시험으로부터 결정된 전단파 속도를 비교한 결과, 두 시험 기법으로 도출된 전단파 속도 분포는 유사하게 나타났다. 그러나 다운홀 탄성과 시험의 경우 심도가 깊어짐에 따라 탄성과 에너지의 감쇠로 인하여 깊은 심도까지 신호대 잡음비가 높은 자료를 취득하지 못한 반면에, 크로스홀 탄성과 시험에서는 다양한 토사 및 암반 조건에 대해 계획된 심도까지 전단파 속도를 효율적으로

평가할 수 있었다. 인천 부지를 대상으로 병행한 인홀 탄성과 시험의 결과도 크로스홀 탄성과 시험의 전단파 속도와 유사하였으나, 크로스홀 탄성과 시험과는 달리 인홀 탄성과 시험의 경우 케이싱이 없는 나공 구간에서만 적용 가능하였다.

이와 같은 현장에 대하여 개발된 크로스홀 탄성과 시험용 발진 장치를 적용한 결과, 크로스홀 탄성과 시험 장비 및 기법의 유용성과 신뢰성을 확인하였다. 따라서 주요 시설물에 대한 지반 동적 특성 평가 목적으로 시추공 탄성과 시험을 수행하고자 할 경우, 시험 지반 조건, 시험 심도 등을 고려하여 높은 수직 분해능과 신뢰도를 갖는 지반의 실체파 속도 측정이 가능한 조사 기법을 선정해야 하며, 크로스홀 탄성과 시험의 경우 다양한 시험 환경에 적합한 발진 장치를 이용하는 것이 중요할 것으로 판단된다.

## 사 사

본 연구는 한국지질자원연구원 자체연구개발사업인 ‘지역적 종합 내진 대책 수립을 위한 지반 정보 시스템 구축 기법 개발’ 과제의 지원으로 수행된 바, 이에 깊이 감사드립니다.

## 참고문헌

- 건설교통부, 1997, 내진설계기준연구(II).
- 목영진, 강병수, 김정환, 2003, 인홀 시험을 이용한 암반의 동적 물성치 측정, 대한토목학회 논문집, **23**, 119-125.
- 목영진, 선창국, 김정환, 정진훈, 박철수, 2005, 횡방향 발진 크로스홀 탄성과 시험을 이용한 지반의 동적 특성 평가, 제7회 특별심포지엄 논문집, 한국물리탐사학회, 전남대학교, 155-175.
- 백영식, 목영진, 임수빈, 1996, 지반구조의 영상화를 위한 Seismic Geotomography 개발, 건설교통부.
- 선창국, 강병수, 김영수, 목영진, 2005a, 인홀 시험을 이용한 암반의 동적 강성 평가, 지질공학, **15**, 309-323.
- 선창국, 조성민, 정종홍, 정경자, 2005b, 지반의 전단파 속도 결정을 위한 SCPTU의 활용 방안 고찰, 2005년 기초·연약지반·지반조사 기술위원회 공동 학술발표회 논문집, 한국지반공학회, 한양대학교, 99-114.
- Butler, D. K., and Curro, J. R., Jr., 1981, Crosshole seismic testing-Procedure and pitfalls, *Geophysics*, **46**, 23-29.
- Kim, B. H., 2001, *Investigation for Shear Wave Velocity and Degree of Weathering of Decomposed Granite Soil in Hongsung*, M.Sc. Thesis, Seoul National University.
- Kim, D. S., Bang, E. S., and Kim, W. C., 2004, Evaluation of various downhole data reduction methods for obtaining reliable Vs profiles, *Geotechnical Testing Journal*, **27**, 334-341.
- Mok, Y. J., 1987, *Analytical and Experimental Studies of Borehole Seismic Methods*, Ph.D. Dissertation, the University of Texas at Austin.
- Mok, Y. J., Kim, J. H., and Kang, B. S., 2003, A pilot study of in-hole seismic method, *Journal of the Korean Geotechnical Society*, **19**, 23-31.
- Mok, Y. J., S'anchez-Salinero, I., Stokoe, K. H. II, and Roesset, J. M., 1988, In situ damping measurements by crosshole seismic method, *Proceedings of the Earthquake Engineering and Soil Dynamics II - Recent Advances in Ground Motion Evaluation*, Geotechnical Special Publication No. 20, ASCE, New York, 305-320.
- Stokoe, K. H. II, and Woods, R. D., 1972, In situ shear wave velocity by cross-hole method, *Journal of Soil Mechanics and Foundation Division*, **98**, 443-460.
- Sun, C. G., 2004, *Geotechnical Information System and Site Amplification Characteristics for Earthquake Ground Motions at Inland of the Korean Peninsula*, Ph.D. Dissertation, Seoul National University.
- Sun, C. G., Kim, D. S., and Chung, C. K., 2005, Geologic site conditions and site coefficients for estimating earthquake ground motions in the inland areas of Korea, *Engineering Geology*, **81**, 446-469.
- Winterstein, D. F., and Paulsson, N. P., 1990, Velocity anisotropy in shale determined from crosshole seismic and vertical seismic profile data, *Geophysics*, **55**, 470-479.