

횡방향 발진 크로스홀 탄성과 시험을 이용한 지반의 동적 특성 평가

목영진¹⁾, 선창국²⁾, 김정한³⁾, 정진훈⁴⁾, 박철수⁵⁾

Evaluation of dynamic ground properties using laterally impacted cross-hole seismic test

Young-Jin Mok¹⁾, Chang-Guk Sun²⁾, Jung-Han Kim³⁾, Jin-Hun Jung⁴⁾ and Chul-Soo Park⁵⁾

요약: 지반의 동적 변형 특성인 전단파 속도(V_s), 압축파 속도(V_p), 그리고 그에 따른 포아송 비(ν)는 내진 설계나 내진 성능 평가 외에도 구조물의 거동 평가에 필요한 매우 중요한 지반 정수이다. 지난 수십 년 동안 이러한 지반 정수를 효율적이고 정밀하게 측정하기 위해, 여러 가지 검측공 탄성과 시험 기법들이 개발 및 적용되어 왔다. 본 연구에서는 가장 신뢰성이 높은 현장 탄성과 기법인 크로스홀 탄성과 시험 기법을 지반 동적 물성을 획득하기 위한 기법으로 선정하였다. 지하수위 존재 여부에 관계없이 토사 뿐만 아니라 암반을 대상으로 크로스홀 시험을 성공적으로 수행할 수 있도록, 연직 시추공 안에서 지반에 대한 횡방향 가진이 가능한 스프링식 발진 장치를 개발하고, 두 곳의 기존 항만 부두 부지와 두 곳의 신규 LNG 저장 시설 부지로 구성된 국내 세 지역을 대상으로 크로스홀 탄성과 시험을 실시하였다. 대상 부지에서의 횡방향 가진의 크로스홀 시험으로부터 깊이별 V_s , V_p 및 ν 와 같은 지반 동적 특성을 효율적으로 결정하였으며, 적용 대상 시설물인 기존 항만 부두 시설물의 내진 성능 평가 그리고 신규 LNG 저장 시설물의 내진 설계를 위한 근본 자료로 제시하였다.

주요어: 크로스홀 탄성과 시험, 전단파 속도, 압축파 속도, 포아송 비, 공내 탄성과 기법

Abstract: Soil and rock dynamic properties such as shear wave velocity (V_s), compressional wave velocity (V_p) and corresponding Poisson's ratio (ν) are very important geotechnical parameters in predicting deformational behavior of structures as well as practicing seismic design and performance evaluation. In an effort to measure the parameter efficiently and accurately, various bore-hole seismic testing techniques have been, thus, developed and used during past several decades. In this study, cross-hole seismic testing technique which is known as the most reliable seismic method was adopted for obtaining geotechnical dynamic properties. To perform successfully the cross-hole test for rock as well as soil layers regardless of the ground water level, spring-loaded source which impact laterally a subsurface ground in vertical bore-hole was developed and applied at three study areas, which contain four sites composed of two existing port sites and two new LNG storage facility sites. The geotechnical dynamic properties such as V_s , V_p and ν with depth were efficiently determined from the laterally impacted cross-hole seismic tests at study sites, and were provided as the fundamental parameters for the seismic performance evaluation of the existing ports and the seismic design of the LNG storage facilities.

Keywords: cross-hole seismic test, geotechnical dynamic properties, shear wave velocity, compressional wave velocity, Poisson's ratio, bore-hole seismic technique

1) 경희대학교 토목건축대학(College of Archit. and Civil Eng., Kyung Hee University)

E-mail: yjmok@khu.ac.kr

2) 한국지질자원연구원 지진연구센터(Korea Earthquake Research Center, KIGAM)

E-mail: pungsun@snu.ac.kr

3) ㈜한국해외기술공사 지반공학부(Department of Geotechnical Eng., Korea Consultants International)

4) ㈜남원건설엔지니어링 지반터널부(Department of Geotechnical Eng., Namwonkeonseol Engineering Co., Ltd.)

5) 경희대학교 토목건축대학(College of Archit. and Civil Eng., Kyung Hee University)

1. 서론

지반공학의 다양한 분야 중 가장 고전적인 분야가 바로 지반 조사이다. 그와 동시에 지반 조사는 현재까지 가장 활발하게 집중 연구되고 있는 분야이기도 하다. 이처럼 지반 조사의 중요성은 지반공학의 개념적 도입시기부터 현재까지 지속적으로 인지되어 오고 있으며, 그 이유는 불확실성이 상존하는 지반의 특성을 올바르게 파악하고 정량화하는 과정이 선행되어야만 시설물의 합리적인 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 공내 탄성과 시험(bore-hole seismic tests)이며, 그 중에서도 크로스홀 탄성과 시험(cross-hole seismic test)은 결과의 신뢰성이 가장 높은 시험법으로 알려져 있다(Sun, 2004; Mok, 1987). 크로스홀 시험을 위해서는 여타의 공내 탄성과 시험들과는 달리 두 공이상의 시추가 필요하며, 그에 따른 경제적 단점으로 인해 현재까지 일반적인 시설물의 설계에서 적극적으로 반영되는 사례는 드물다. 그러나 이러한 경제적 이유보다도 실제 중요 구조물의 설계나 성능 평가에 크로스홀 시험을 지반 동적 특성 결정을 위한 기법으로 쉽게 도입하지 못하는 근본적 이유는 대상 지반의 소정 심도까지 성공적인 조사를 위해서는 정교하게 제작된 특수한 발진 장치가 필요하기 때문이다.

본 연구에서는 지반동역학적 관점에서 활용되고 있는 크로스홀 시험과 같은 기존 공내 탄성과 시험의 장단점을 고찰하고 현장에서의 실무적 활용성을 고려하여 지반의 깊이별 동적 특성을 원위치에서 용이하게 획득할 수 있는 크로스홀 시험용 발진 장치를 개발하였다. 또한, 국내 주요 부지들에서 실제 크로스홀 시험을 수행하여 다양한 지층 조건에 대한 깊이별 지반의 동적 특성을 효율적으로 평가함으로써, 크로스홀 시험의 신뢰성 및 합리성을 확인하였을 뿐만 아니라 대상 시설물의 설계 및 성능 평가를 위한 근본 특성 자료로 제시하였다.

2. 지반의 동적 특성 결정을 위한 현장 공내 탄성과 시험

지반의 동적 특성은 일반적으로 미소변형률($< 10^{-3}$ %)에서 지반의 변형 특성을 의미하며, 저변형률(1 %)의 비선형 변형 거동을 포함한다. 동적 특성 값의 정확한 산정은 지진, 발파, 충격, 폭발 및 기계 진동 등의 외부 진동에 의한 지반의 동적 거동 분석 뿐만 아니라 공용 하중 조건에서 지반의 정적 거동에 대한 정량적 평가를 위해서 필수적이다. 지반의 변형 특성 값은 역학적인 경계 및 재하 조건에 따라 전단계수(Shear modulus; G), 구속계수(Constrained modulus; M), 탄성계수(Young's modulus; E), 체적계수(Bulk modulus; B), 그리고 이 계수들의 관계 변수인 포아송 비(Poisson's ratio; ν)로 대표된다. 미소변형률 조건의 각 계수는 지반의 전단파 속도(shear wave velocity; V_S) 및 압축파 속도(compressional wave velocity; V_P), 그리고 밀도(density; ρ)로 표현되며, 이들 간의 상호 관계는 식 (1) ~ (5)와 같다.

$$G = \rho V_S^2 \quad (1)$$

$$M = \rho V_P^2 \quad (2)$$

$$E = 2(1 + \nu) G \quad (3)$$

$$B = \frac{E}{3(1 - 2\nu)} \quad (4)$$

$$\nu = \frac{(V_S/V_P)^2 - 0.5}{(V_S/V_P)^2 - 1.0} \quad (5)$$

지반의 동적 변형 특성을 표현할 수 있는 변형계수들은 탄성파의 체적파 성분인 전단파(S-wave)와 압축파(P-wave)의 속도로 나타낼 수 있으며, 이들 속도를 측정하는 원위치 탄성파 시험은 지반 동역학적 관점에서 매우 중요한 조사 기법으로 인지되어 왔다. 전단파는 지반 내 토사나 암반 매질을 따라 전파되고 파의 진행 방향에 대해 입자가 직교 운동을 하는 반면, 압축파는 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 연직방향 성분(SV-wave)과 횡방향 성분(SH-wave)으로 분리할 수 있다. 지반공학 및 지반 동역학적 관점에서는 효율성 및 유용성 측면에서 주로 매질 입자의 운동 성분인 전단파 신호의 획득 및 깊이별 속도 분석에 많은 연구가 집중되어 왔으며, 다양한 종류의 현장 및 실내 시험 기법들이 개발되어 적용되고 있다.

지반공학적인 측면에서 주로 적용되고 있는 현장 탄성파 시험은 검측공의 유무에 따라 공내 탄성파 시험(bore-hole seismic tests)과 비파괴 탄성파 시험으로 구분된다. 공내 탄성파 시험의 경우 다시 발진기(source)와 수신기(receiver)의 기하학적 구성에 따라 크로스홀(cross-hole), 다운홀(down-hole), 업홀(up-hole), 인홀(in-hole) 시험 등으로 분류된다. 또한, 인홀 시험 기법과 기하학적으로 구성이 동일한 부유식 P-S 검층(suspension P- and S-wave logging)도 최근 특화된 장비를 도입하여 건설 실무에서 광범위하게 활용되고 있다.

(1) 크로스홀 탄성파 시험

크로스홀 탄성파 시험은 지반공학 분야에 소개된 이래로 지난 수십 년 동안 지반의 체적파(body waves)인 압축파 속도(V_p)와 전단파 속도(V_s)의 깊이 분포를 결정하기 위해 매우 효율적으로 이용되어 왔다(Mok, 1987). 크로스홀 시험은 적어도 두 개 이상의 시험공이 필요하며, 한 개의 시험공에서 가진된 전단파나 압축파의 신호를 한 개 이상의 시험공에서 수신하여 각 공간 거리를 전파하는데 걸린 시간을 토대로 체적파 속도를 결정하게 된다. Fig. 1은 크로스홀 탄성파 시험의 개요도로서, 본 연구진에서 개발하여 활용해온 발진 장비를 함께 도시하였다. 기계식 발진기(mechanical source)는 연직방향 전단파(SV-wave)를, 그리고 압전소자형 발진기(piezoelectric source)와 스프링식 발진기(spring-loaded source)는 횡방향 전단파(SH-wave)와 함께 압축파를 발현할 수 있다. 각 발진기는 동일 심도에서 상하 또는 좌우 방향의 양방향 가진이 가능하므로 위상이 180° 다른 극성(polarity)을 띠는 한 쌍의 전단파를 생성할 수 있다. 크로스홀 시험은 인접한 시험공을 대상으로 동일 심도에서 발진과 수진을 실시함에 따라 시험공 형성시 설치된 케이싱(casing)의 영향을 최소화 할 수 있으므로 양질의 탄성파 신호를 획득할 수 있으므로 그 신뢰도가 매우 높고 분석이 간편한 현장 탄성파 시험 기법이다.

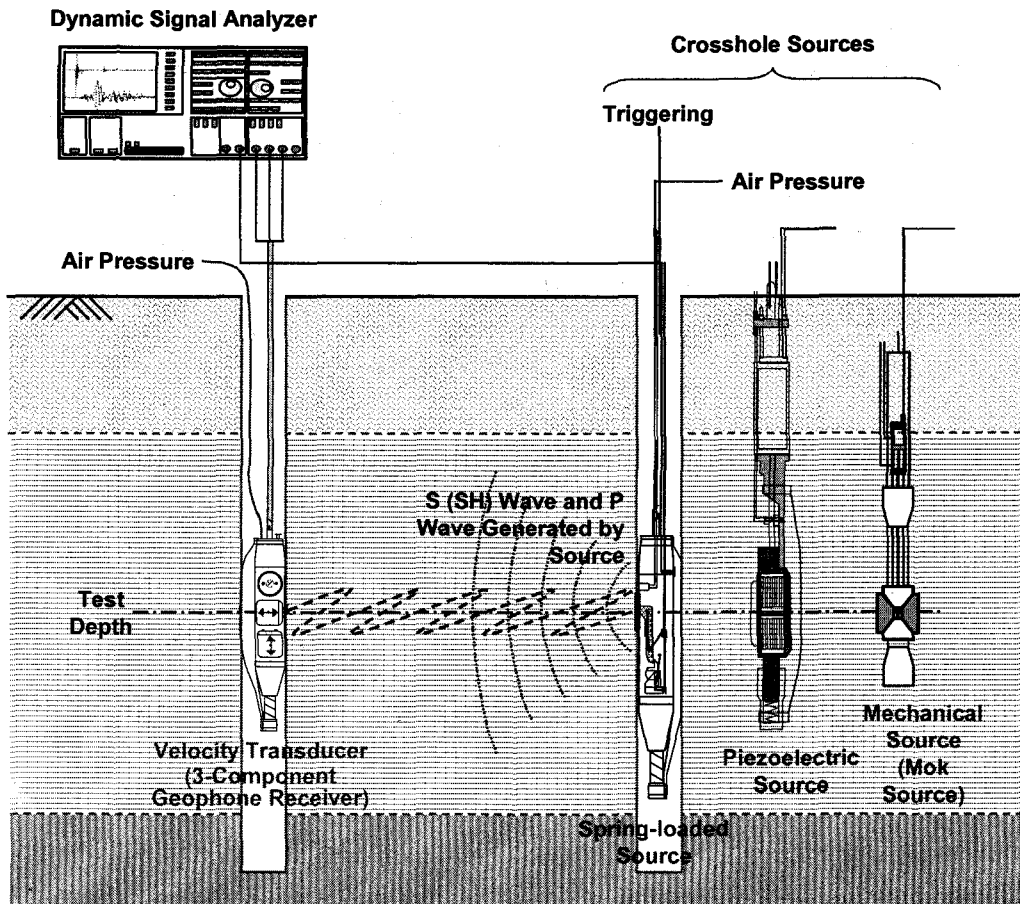


Fig. 1. Schematic diagram of cross-hole seismic test.

(2) 다운홀 탄성과 시험

다운홀 탄성과 시험은 지반의 전단파 속도와 압축파 속도를 결정하기 위해 현장에서 보편적으로 이용해 온 대표적인 기법이다. 지표면에 설치된 발진용 가진판의 양쪽 옆면을 타격하여 극성을 띠는 한 쌍의 전단파를 발생시키거나 가진판을 연직 방향으로 타격하여 압축파를 발생시켜서 지중에 설치된 시험공의 수신기로부터 탄성파를 획득하게 된다. 수신기에서 측정되는 전단파는 횡방향 성분이며, 지하수위 아래의 포화된 지반에서는 지층의 압축파 전달 속도가 물의 압축파 속도(약 1,550 m/s)에 비해 작을 경우 압축파 신호의 획득과 분석이 어려울 수 있다. 다운홀 시험은 Fig. 2의 개요도에서 확인할 수 있는 바와 같이 단일 시험공 만이 필요하므로 크로스홀 시험에 비해 경제적인 반면, 시험 심도가 깊어지거나 전파 경로 상에 공동이 존재할 경우 그리고 단단한 지반 매질에서 체적파의 신호가 감소하므로 소정의 심도까지 신호 획득 및 분석이 불가능한 경우가 발생할 수 있다(Sun, 2004). 또한, 크로스홀 시험의 결과 분석과는 달리 다운홀 시험에서는 깊이별 획득 신호에 대해 신호 도달 시점 및 시차를 우선 결정해야 하며, 이를 토대로 직접법, 간접법, 수정간접법, 굴절전파경로법 등과 같은 여러 전단파 속도 산출 방법을 적용하여 깊이별 전단파 속도 분포를 도출해야 한다. 따라서 각 신호 판독법과 전단파 속도 분석 방법별 장단점을 명확히 이해하고 지반 및 현장 상황에 적합한 방법을 선택하여 적용해야 한다.

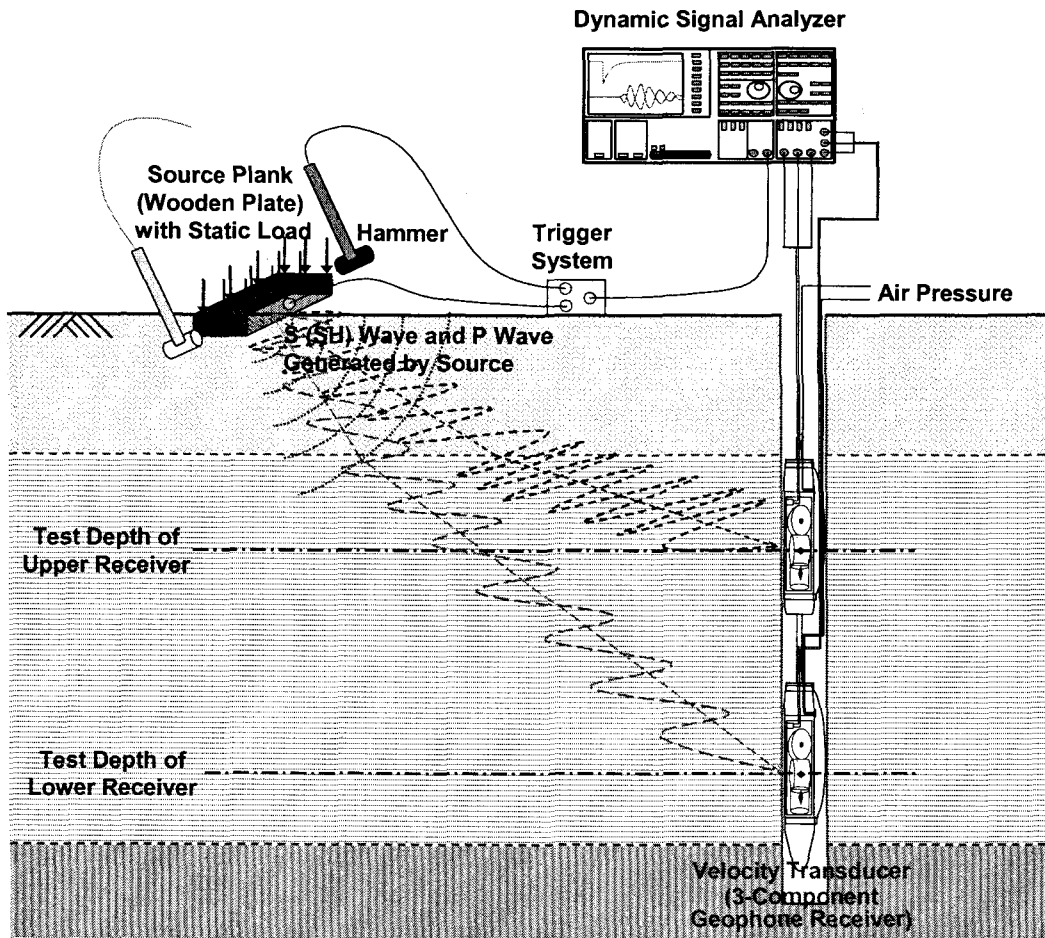


Fig. 2. Schematic diagram of down-hole seismic test.

(3) 업홀 탄성과 시험

업홀 탄성과 시험은 다운홀 시험과는 반대의 전파 경로를 형성하여 지반의 전단파 속도를 측정하기 위해 활용되는 현장 탄성과 시험 기법이다. 즉, 업홀 시험에서는 지중의 발진기에서 발생된 전단파를 지표면에 설치된 한 개 이상의 수신기에서 획득하여 깊이별 전단파 속도 분포를 결정하게 된다. 최근 국내에서는 업홀 시험의 합리적 방안으로서 표준관입시험(Standard Penetration Test; SPT)의 해머 타격을 통한 샘플러(split-spoon sampler)를 발진기로 이용하여 연직방향 전단파를 발현함으로써 업홀 시험을 수행하는 기법이 제시된 바 있으며(김동수 등, 2003), 기존에는 대개 발파를 통한 발진으로부터 전단파 및 압축파 신호를 획득해 왔다. Fig. 3에는 표준관입시험 수행시 병행될 수 있는 업홀 시험의 개념을 도시하였다. 일반적으로 업홀 시험에서는 동일 수신기에 대해 시험 깊이별 도달 시간 차이를 이용하거나 두 개 이상의 수신기간 동일 시험 심도에 대한 도달 시차를 이용하여 깊이별 전단파 속도 추상을 도출한다. 기본적으로 신호 분석과 전단파 속도 분포 산출 방법은 다운홀 분석 기법과 유사하지만, 발진기의 특성상 수신된 전단파의 극성을 이용할 수는 없다. 업홀 시험의 관건은 적용성이 확실한 발진 장치의 활용 여부이므로 이와 관련된 장비 개발 및 활용 연구를 통해 보다 신뢰성 높은 시험 수행이 가능할 것으로 판단된다.

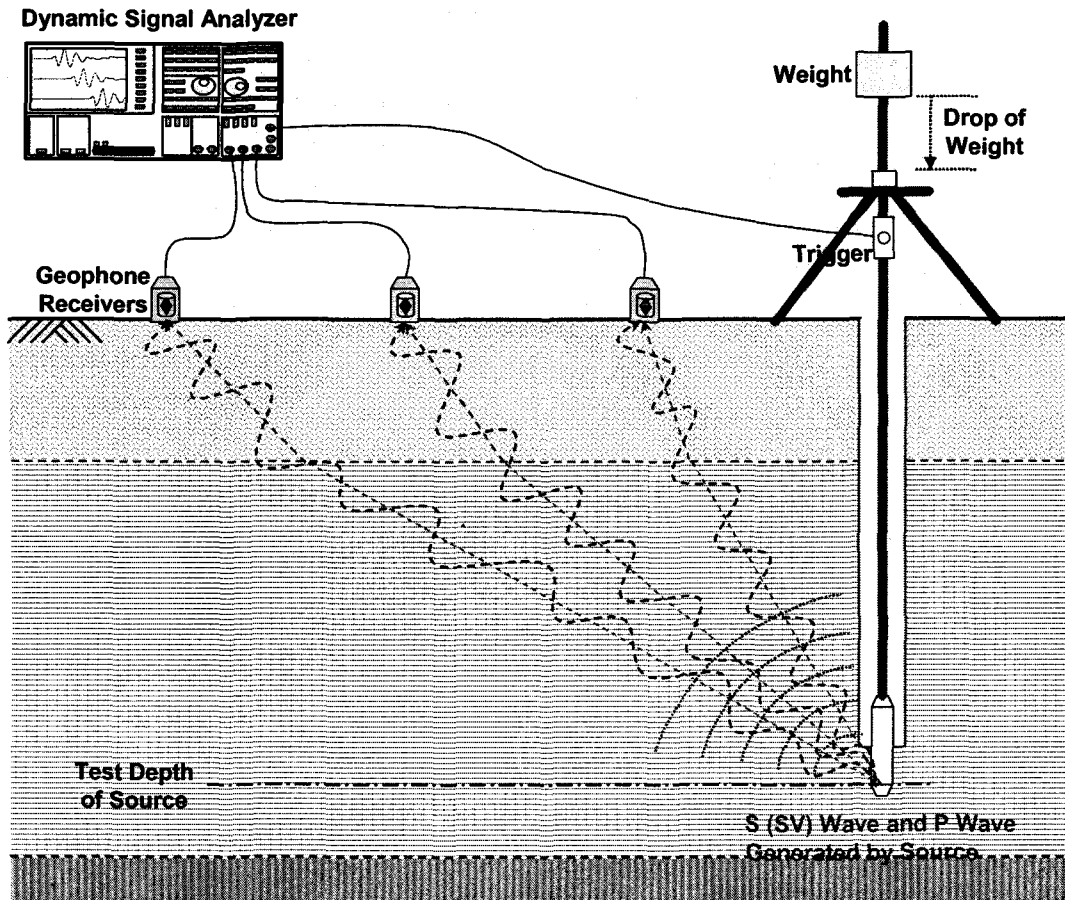


Fig. 3. Schematic diagram of up-hole seismic test.

(4) 인홀 탄성과 시험

인홀 탄성과 시험은 실무적 용이성을 확보함과 더불어 다운홀 시험의 적용 한계성 및 크로스홀 시험의 경제적 문제점을 보완하기 위해 개발된 현장 탄성과 기법이다(Mok *et al.*, 2003). Fig. 4는 인홀 시험의 개요도로서, 단일 시험공 내에 발진기와 수신기를 설치하고 공벽에 대한 타격을 통해 공벽의 길이 방향을 따라 전파되는 연직방향 전단파를 발생시키게 된다. 공벽 주변을 통과한 전단파는 수신기 내의 속도계에서 수신되며, 경우에 따라 두 개 이상의 수신기 설치 적용하여 지반의 전단파 속도를 결정할 수 있다. 인홀 탄성과 시험의 개념은 기본적으로 Fig. 5에 묘사된 기존 부유식 P-S 검층과도 유사하다.

부유식 P-S 검층은 발진기와 수신기들이 일체화되어 있는 프루브(probe)를 유체로 채워진 시험공에 띄우고 압전소자형 발진기의 공내 유체에 대한 압력파(pressure wave) 발생을 통해 공벽에 전단파나 압축파를 가진하게 되며, 발진기의 상부에 위치한 수신기에서는 공벽을 따라 전달된 탄성파가 공내에서 압력파로 전환되어 이를 수신하게 된다(GEOVision, 2002). 부유식 P-S 검층은 최초 개발 적용된 일본 뿐만 아니라 최근 미국에서도 활발하게 이용되고 있으며(Swift *et al.*, 2001), 시험 방법 및 분석 상의 편이성으로 인해 그 활용도가 증대되고 있다. 그러나 기본적으로 유체 압력파의 변환 굴절된 전단파를 측정하고 유체로 충전되지 않은 경우 시험이 불가능하다. 부유식 P-S 검층과는 달리 인홀 시험에서는 발진기와 수신기를 공기주머니(air

packer)나 판스프링(plate spring)을 보조적으로 이용해 시험공에 밀착시킴으로써 지반에 대한 발진과 수진을 가능케 한다. 이로 인해 지반을 전파 매질로 하는 직접 전단파를 측정할 수 있다. 공에 대한 연직방향 전단파(지표면에 대해서는 횡방향 전단파)는 경계면에서 다른 종류의 탄성파로 변환되지 않으므로 신호 판독이 용이한 전단파를 수신기에서 획득할 수 있다.

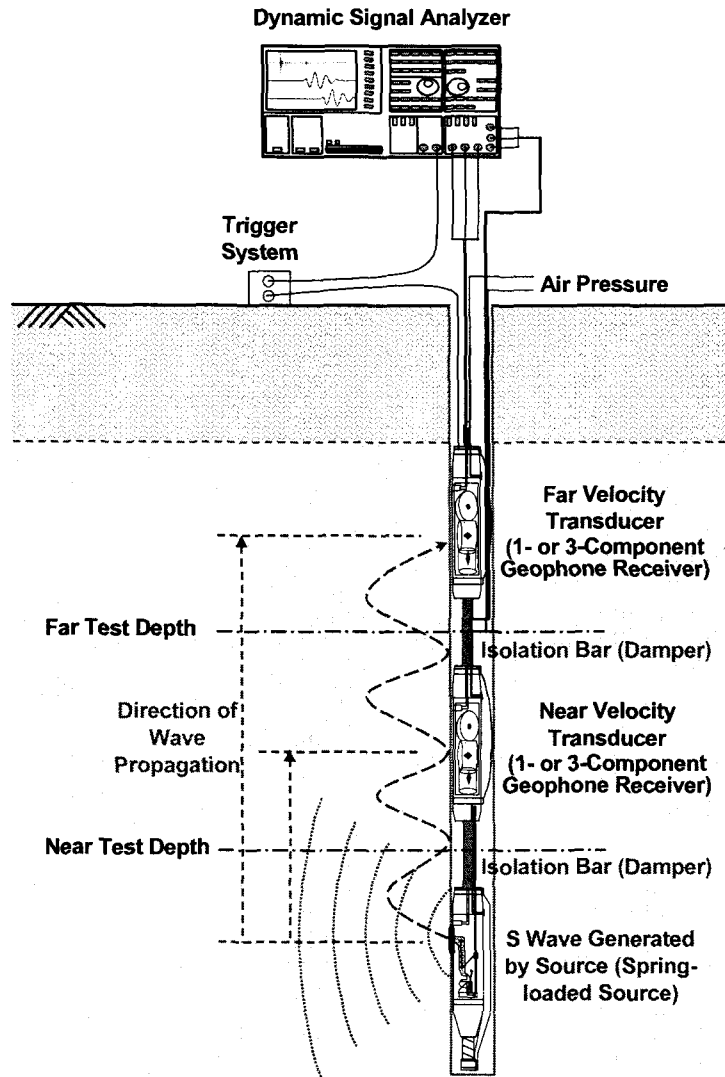


Fig. 4. Schematic diagram of in-hole seismic test.

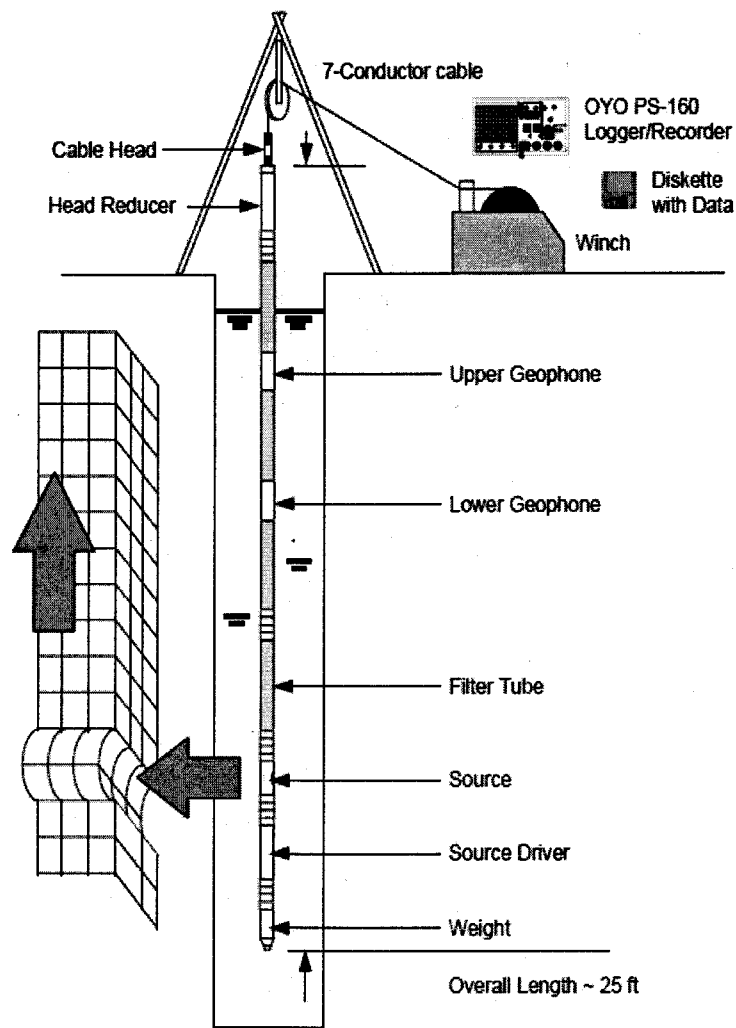


Fig. 5. Schematic diagram of Suspension P-S logging (after GEOVision, 2002).

3. 크로스홀 시험용 발진 장치

크로스홀 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 지반공학적 목적으로 국내에서 활용되어 온 주요 발진기의 형태는 기계식(mechanical)과 압전소자형(piezoelectric)으로서, 각각 Fig. 6과 Fig. 7에서 기본적인 구성을 확인할 수 있다.

기계식 발진기는 Fig. 6에 묘사된 바와 같이 공벽에 밀착시키기 위한 썸기 장치와 타격 해머로 이루어져 있다. 이 발진기는 풍부한 에너지 발현이 가능함에 따라 크로스홀 시험에서 전단파 측정에 매우 실용적으로 활용되고 있으나, 현장 시험 여건에 따라 적용이 불가능한 제한적 상황이 발생할 수 있다. 즉, 개방형 구조이므로 지하수위 아래의 지반과 같이 시험공 내에 유체가 존재할 경우 타격 시 물의 저항이 발생하게 되어 사용할 수 없다. Fig. 7에 제시된 압전소자형 발진기는 충격 에너지의 발현 및 조절을 위해 전기적 제어가 가능한 압전소자를 이용한다

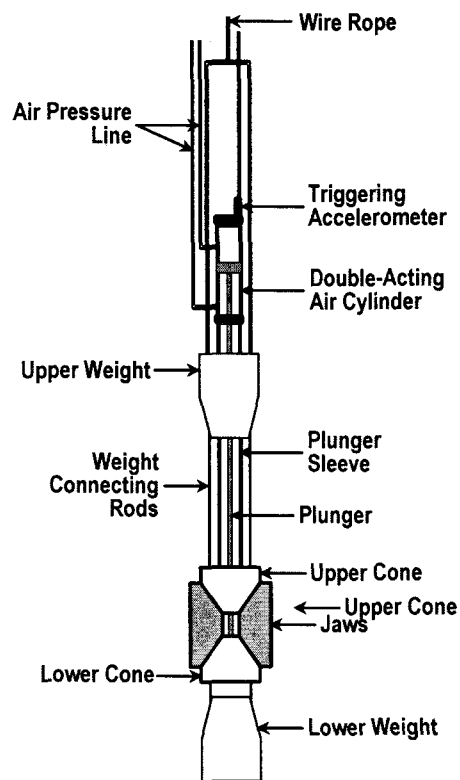


Fig. 6. Mechanical source.

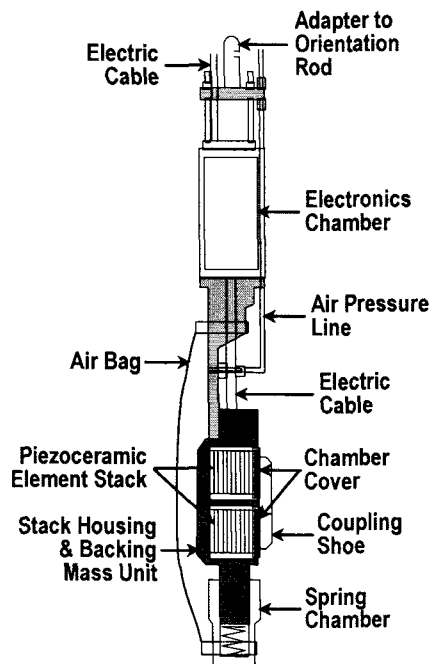


Fig. 7. Piezoelectric source.

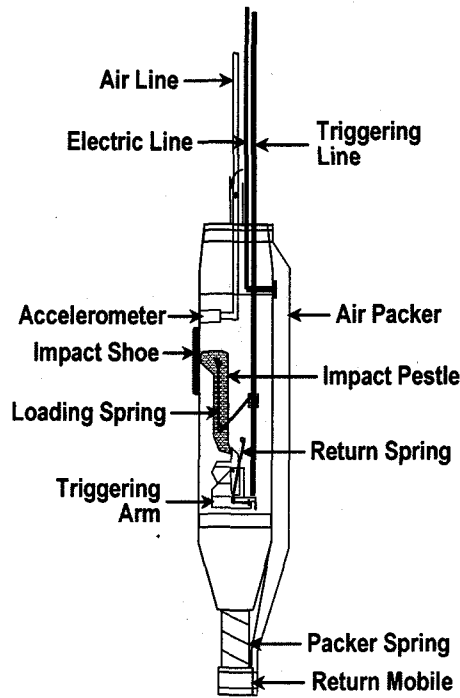


Fig. 8. Spring-loaded source.

(목영진 등, 2003). 압전소자형 발진기는 방수 처리된 장치 내에서의 전압 제어를 통해 일정한 탄성과 에너지를 반복적으로 발생시킬수 있으므로 활용성이 우수하지만, 고가의 정교한 기계와 전기 장치가 요구되므로 고가이고 내구성이 다소 취약하며, 발생 에너지로부터 구현되는 변형이 작아서 토사보다는 암반 지반에 적합하다. 이와 같은 기존 크로스홀 시험용 발진 장치의 제한적 단점에 따라 보다 다양한 현장 지반 조건에서 효율적으로 동적 특성을 획득할 수 있는 발진기를 개발하였다.

크로스홀 시험을 위해 본 연구에서 개발된 발진 장치는 Fig. 8과 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.

4. 크로스홀 시험 수행 및 지반 동적 특성 평가

개발된 발진 장치를 이용하여 국내에 분포하는 다양한 지층 조건의 주요 부지들을 대상으로 크로스홀 탄성과 시험을 수행하였다. 또한, 일부 부지에서는 실무에서 보편적으로 수행되는 다운홀 시험도 병행하여 크로스홀 시험으로부터 결정된 깊이별 동적 특성과 비교하였다.

(1) 시험 대상 부지 현황

크로스홀 시험의 대상 지역은 Fig. 9에 제시된 바와 같이 총 3개 지역인 인천, 부산, 그리고 통영 지역이며, 그 중에서 인천과 부산 지역의 경우 각 1부지를 대상으로 크로스홀 시험과 다운홀 시험을, 그리고 통영 지역의 경우 동일 현장 내에서 약 100 m 이격된 2부지를 대상으로 크로스홀 시험을 수행하였다. 특히, 인천과 부산 지역의 부지는 항만 시설인 안벽 부두로서, 기존 항만 시설물의 내진 성능 평가 목적으로 두 부지에서 각각 2공의 시추 조사를 통한 지층 구성 확인 후 크로스홀 및 다운홀 시험을 수행하였으며, LNG 저장 시설이 위치할 통영 지역의 부지에서는 대상 지역 내 2부지에서 각각 2공의 시추 조사와 더불어 내진 설계 목적의 크로스홀 시험을 실시하였다.

시험 대상 부지의 시추 조사로부터 확인한 지층 구성은 Fig. 10과 같다. 안벽 부두 시설물인 인천 및 부산 부지에서는 시설물 조성을 위한 매립토 지반이 두껍게 분포하였는데, 각각 6.6 m 및 19.7 m 두께 분포였다. 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 층이 발달해 있었다. 인천과 부산 부지 모두 깊은 심도(인천 40.2 m, 부산 52.0 m)에 분포한 연암 상부에 풍화잔류토와 풍화암이 각각 약 20 m와 30 m 정도의 두께로 분포하고 있었다. 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 이 분포하고 있었다.

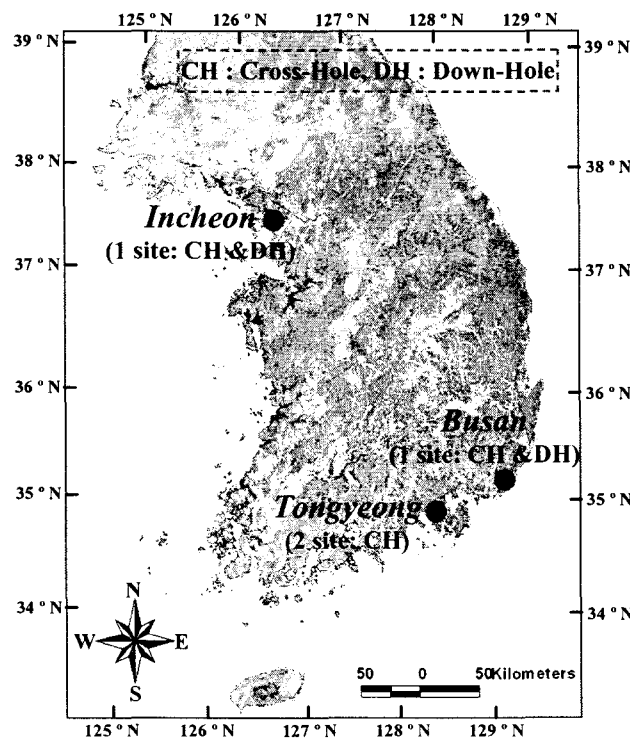


Fig. 9. Geographic locations of cross-hole testing sites.

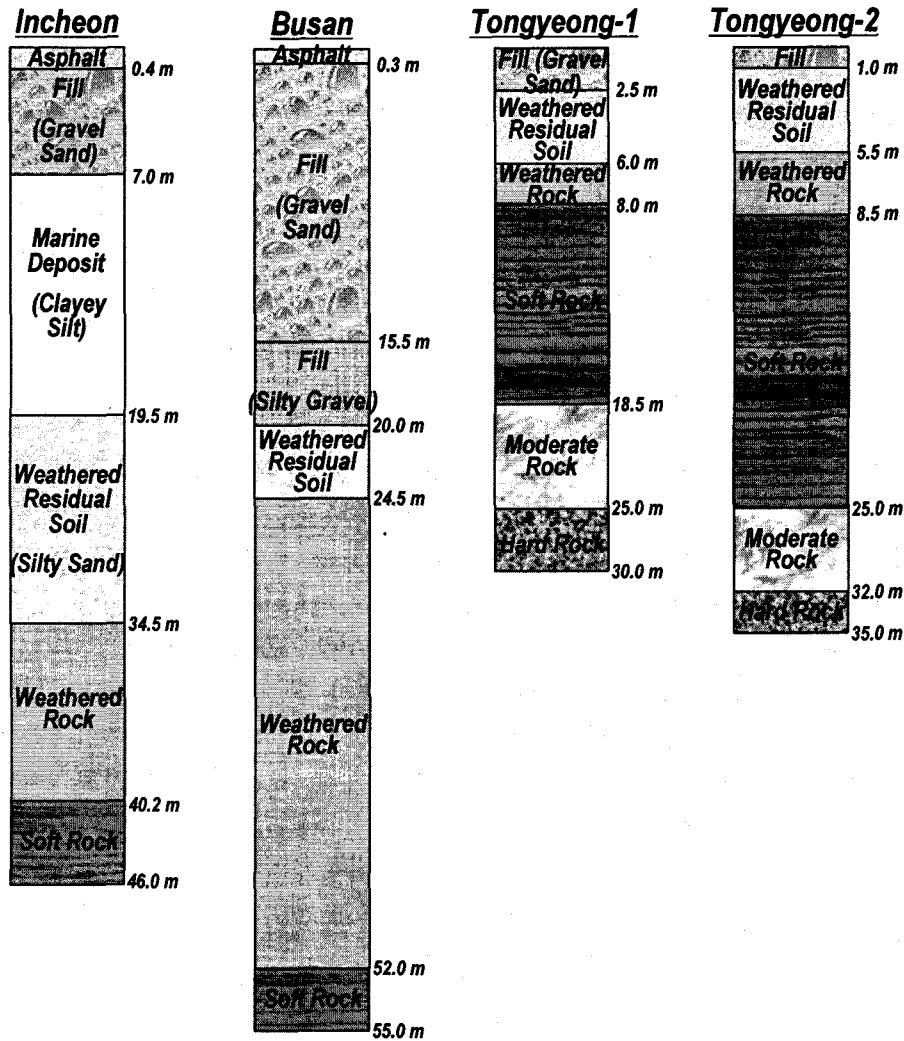


Fig. 10. Borehole logs at cross-hole testing sites.

(2) 대상 부지에서의 크로스홀 시험 수행

대상 부지에서의 시추 조사는 지표면 상에서 약 3.0 m 정도를 이격하여 2 공을 실시하여 각각 크로스홀 시험용 발진공(hole for source)과 수신공(hole for receiver)으로 활용하고자 하였다. 시추 조사가 완료된 후 크로스홀 시험과 같은 현장 탄성과 시험의 수행을 위해 풍화암 일부 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 시험을 위해서 먼저 각 부지별로 지표면에서의 발진공과 수신공의 이격 거리를 확인하고, 경사계를 이용하여 각 시험공의 깊이별 경사도를 조사함으로써 시험 심도별 발진기와 수신기의 실제 이격 거리인 전파 경로 거리를 확인하였다. 본 연구에서 사용된 수신기는 크로스홀 시험과 더불어 다운홀 시험에도 이용할 수 있도록 직교하는 세 개의 속도계(geophone)를 내장하여 압축파(P-wave)와 횡방향 전단파(SH-wave) 및 연직방향 전단파(SV-wave)를 모두 획득할 수 있는 3방향 속도계형 이며, Fig. 11에서 개략적인 구조를 확인할 수 있다.

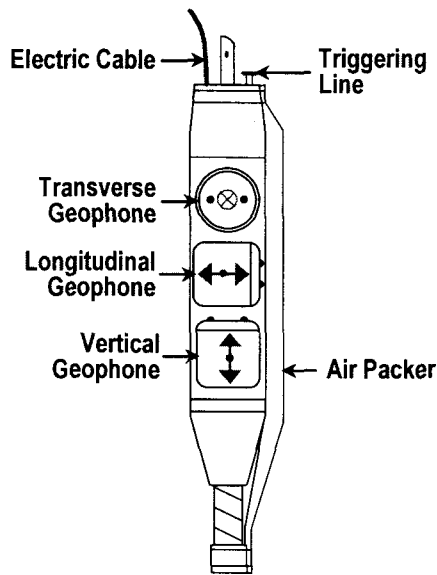


Fig. 11. Three-component geophone receiver.

크로스홀 탄성파 시험은 발진기와 수신기를 동일 심도로 유지한 상태로 지표면 부근부터 인천과 부산 부지의 일부 매립토 지층(0.5 m 간격으로 수행)을 제외하고는 대체로 1.0 m 간격으로 시험 심도를 증가시켜 가며 실시하였다. 시험은 개발된 발진기와 수신기를 방향 로드(orientation rod)에 연결하여 소정 시험 심도에 위치 시킨후, 수신기의 종축 속도계(longitudinal geophone)의 진동 방향이 발진공을 향하도록 조정(교축 속도계(transverse geophone)의 진동 방향을 발진공과의 축 방향에 대해 직교하도록 조정)하고, 수신기의 발진기 내 충격 공이(Fig. 1 및 Fig. 8 참조)의 타격 방향을 수신공을 향하도록 조정하고 타격함으로써 압축파 신호를 획득한다. 또한, 충격 공이의 타격 방향을 수신공에 직교하도록 조정하고 타격하여 첫번째 전단파 신호를 획득한 후, 다시 충격 공이의 타격 방향을 180° 전환하여 타격함으로써 첫 번째 전단파 신호와 위상이 180° 다른 두 번째 전단파 신호를 획득할 수 있다. 이처럼 위상이 180° 다른 쌍의 전단파 신호를 계측함으로써 전단파 신호의 극성(polarity)을 이용하여 도달 시점을 용이하게 판독할 수 있다.

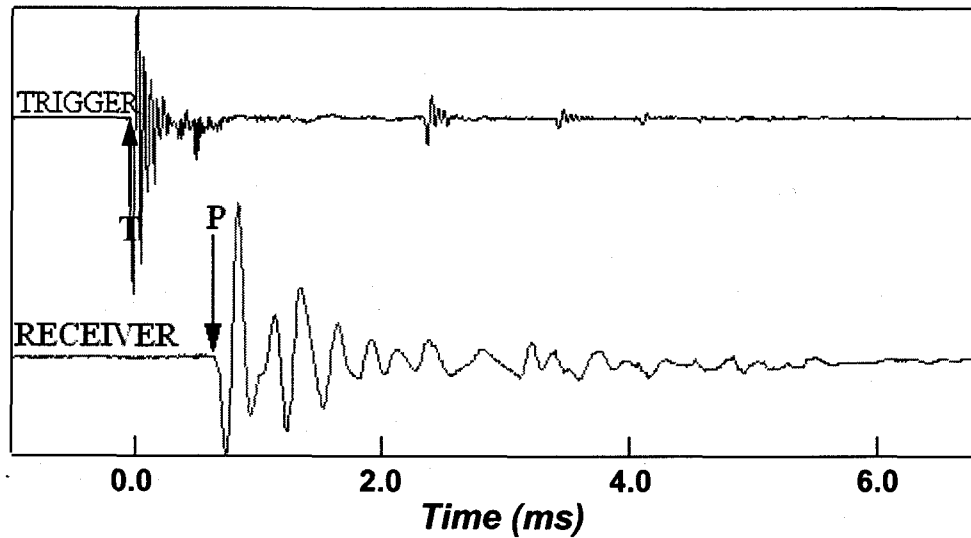
인천 부지에서는 지표면 부근의 매립토로부터 44.5 m 깊이의 연암까지 압축파 및 전단파 신호 획득을 위한 크로스홀 시험을 수행하였으며, 발진공에 인접한 지표면에 발진용 플랭크(plank)를 설치하고 크로스홀 시험의 수신공을 대상으로 현업에서 보편적으로 이용되고 있는 다운홀 시험을 병행하여 심도 20.0 m까지 전단파 신호를 획득하였다. 부산 부지에서는 비교적 깊은 심도인 54.5 m의 연암까지 크로스홀 시험을 실시하여 성공적으로 압축파와 전단파 신호를 계측하였으며, 다운홀 시험의 경우 수신공을 대상으로 24.0 m까지 전단파 신호를 획득할 수 있었다. 통영의 두 대상지인 통영-1(Tongyeong-1) 및 통영-2(Tongyeong-2) 부지에서는 추가적인 다운홀 시험을 실시하지 않았으며, 크로스홀 시험을 각각 28.3 m의 경암 및 28.9 m의 보통암까지 수행하여 압축파 및 전단파 신호를 획득하였다.

Fig. 12는 단일 시험 심도에서 획득한 압축파 및 전단파의 대표적인 발진(Trigger) 신호와 수신(Receiver) 신호를 예시한 것으로서, 발진 시점(T)과 압축파의 초기 도달 시점(Fig. 12a에서 지시된 P)과 전단파의 도달 시점(Fig. 12b에서 지시된 S)의 시간차를 판독하여 발진기와 수신기 간의 거리(l)를 통과하는 데 소요된 압축파의 전파 시간(t_p)과 전단파의 전파 시간(t_s) 결정할 수

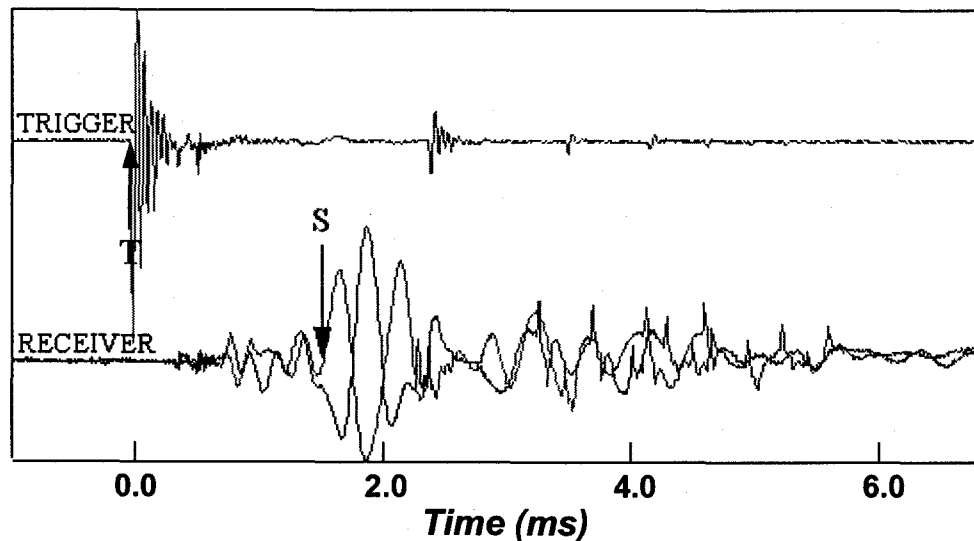
있고 발진 장치와 수신기의 거리를 고려하여 각각 식 (6)과 식 (7)에 따라 압축파 속도(V_P)와 전단파 속도(V_S)를 산출할 수 있다. 본 연구에서는 대상 4 부지의 각 시험 심도에서 크로스홀 시험으로부터 획득한 압축파 및 전단파 신호의 초기 도달 시점을 비교적 용이하게 판독하여 지층 및 심도별 압축파 속도와 전단파 속도를 결정하였다.

$$V_P = \frac{l}{t_P} \quad (6)$$

$$V_S = \frac{l}{t_S} \quad (7)$$



(a)



(b)

Fig. 12. Typical source and receiver signal from cross-hole seismic test: (a) Compressional wave signal; (b) Shear wave signal. The signals were obtained at the depth of 13.8 m in Tongyeong-1 site.

인천과 부산 부지에서는 병행된 다운홀 시험으로부터 획득한 전단파 신호의 각 시험 심도별 전단파의 초기 도달 시점을 판독하고 지반내 전파 경로상의 불균질성을 고려하기 위하여 Snell의 법칙에 근거한 굴절 전파 경로법을 적용한 역산 해석(선창국 등, 2005; Kim *et al.*, 2004)을 통해 깊이별 전단파 속도 분포를 도출하였다.

(3) 대상 부지에서의 크로스홀 시험을 통한 지반 동적 특성 평가

크로스홀 시험은 다른 현장 탄성과 시험에 비해 신뢰도가 높고 분석이 매우 용이한 반면, 두 공이상의 시추가 요구됨에 따라 다소 비경제적일 수 있다. 그러나 동적 특성 평가 대상 시설물의 중요성 측면을 감안할 때, 무엇보다도 소정의 깊이 분포에 대한 동적 특성의 성공적 결정이 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 시험이 가능한 횡방향 발진 장치를 개발하여 국내 대표적 부지들을 대상으로 크로스홀 시험을 수행하여 깊이별 동적 특성을 합리적으로 평가하였다.

Fig. 13 및 Fig. 14는 각각 인천과 부산 부지에서 수행한 크로스홀 시험 결과로서, 압축파 속도와 전단파 속도, 그리고 그에 따른 포아송 비를 시험 수행 심도별로 도시한 것이다. 압축파 속도와 전단파 속도는 이미 언급한 바와 같이 현장에 획득한 신호를 토대로 각각 위의 식 (6)과 식 (7)에 따라 산정하였으며, 포아송 비는 압축파 속도와 전단파 속도를 이용하여 식 (5)로부터 결정하였다. 또한, 수진공을 대상으로 실시한 다운홀 시험으로부터 결정된 깊이에 따른 전단파 속도 분포와 시추 조사로부터 확인된 지층 분포도 Fig. 13과 Fig. 14에 비교 도시하였다. 대상 부지의 지층은 매립토, 퇴적토, 풍화잔류토, 풍화암 그리고 연암으로 구성된 다층 조건으로서 국내 주요 항만 부지의 보편적 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 시험 결과(Fig. 13과 Fig. 14)에서 확인할 수 있는 바와 같이, 대상 부지의 모든 지층 조건에서 압축파 속도 및 전단파 속도와 포아송 비를 효율적으로 평가하였으며, 이러한 결과는 본 연구의 대상 항만 시설물의 내진 성능 평가를 위한 지반 동적 특성으로 활용될 수 있다. 크로스홀 시험으로부터 결정된 대상 부지의 지층별 전단파 속도를 분포를 살펴보면, 인천 부지(Fig. 13)에서는 자갈질 모래로 구성된 매립토의 경우 140~220 m/s 정도, 점토질 실트 퇴적토의 경우 약 130~330 m/s, 조립질 모래로 분류될 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. 14)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. 본 연구의 인천과 부산의 부지들을 대상으로 수행된 현장 크로스홀 및 다운홀 탄성과 시험의 깊이에 따른 전단파 속도 분포에 근거해 볼 때, 크로스홀 시험 결과와는 달리 병행된 다운홀 시험으로부터 결정된 동적 특성인 깊이별 전단파 속도 분포는 다운홀 시험으로 발진된 전파 에너지의 지반 내에서의 소산 및 반사로 인해 깊은 심도까지 얻을 수

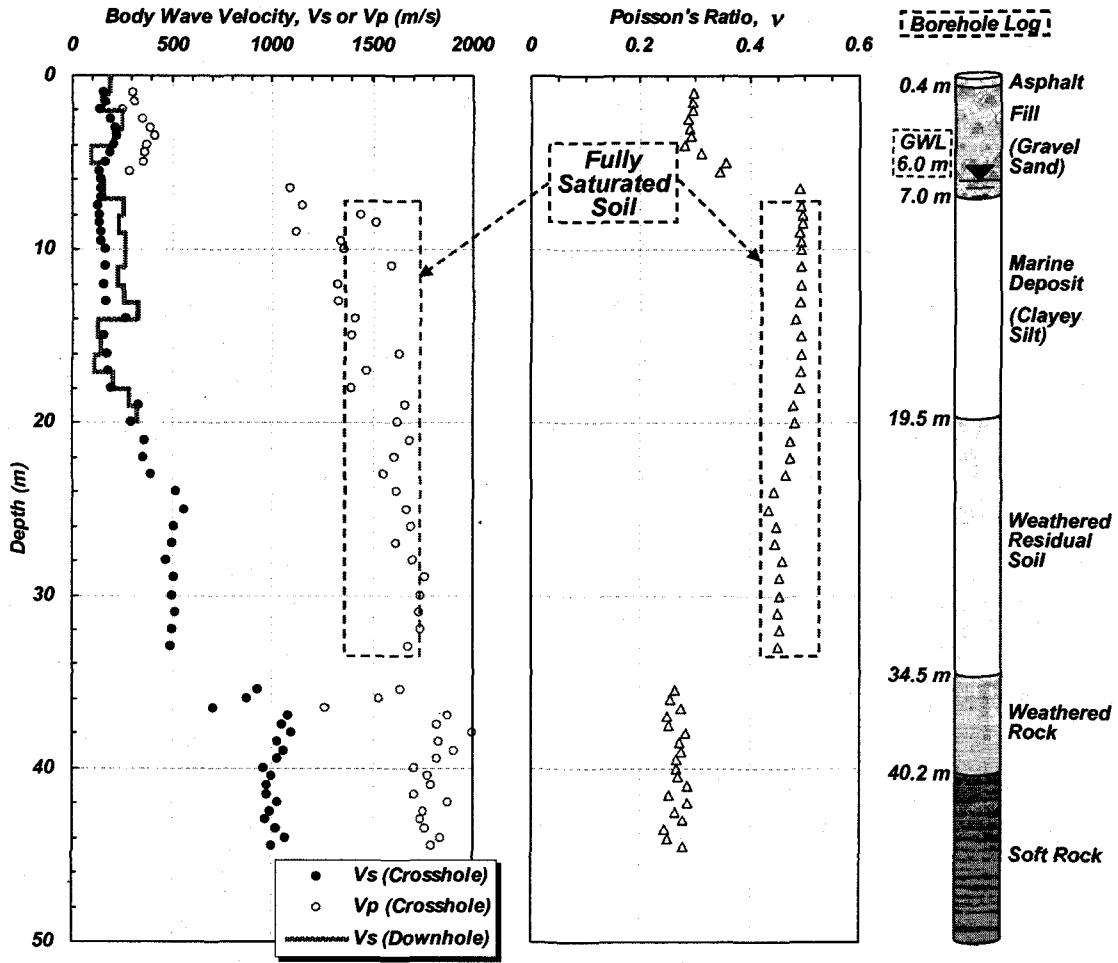


Fig. 13. Body wave velocity and corresponding Poisson's ratio with depth determined from cross-hole test in Incheon site. The shear wave velocity (V_s) profile determined from down-hole test were also plotted for comparing with the V_s from cross-hole test.

없었으며, 깊이별 전단파 속도 분포는 다운홀 시험과 크로스홀 시험의 결과가 유사하게 결정되었다. 따라서 복합적인 지층 조건의 지반에 대한 깊이별 동적 특성의 결정에는 실무에서 보편적으로 적용되고 있는 다운홀 시험에 비해 적합한 발전된 장치가 적용된 크로스홀 시험이 보다 유용할 것으로 판단된다. 그러나 Fig. 13 및 Fig. 14에서 파선 상자로 표시된 지하수위(인천 부지의 경우 6.0 m, 부산 부지의 경우 1.0 m) 아래에 분포하는 완전 포화 조건의 토사 층에서는 실제 토사 입자의 압축과 속도라기 보다는 일반적인 물의 압축과 속도(약 1,550 m/s)가 평가됨에 따라 포화 토사 층에서는 압축과 속도나 포아송 비는 제외하고 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 0.25 정도로 결정되었다. 따라서 지하수위가 토사 층 내에 분포하는 다양한 층상 구조의 지반을 대상으로 지표면부터 기반암까지의 깊이별 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 속도와 전단파 속도만이 평가되기도 한다.

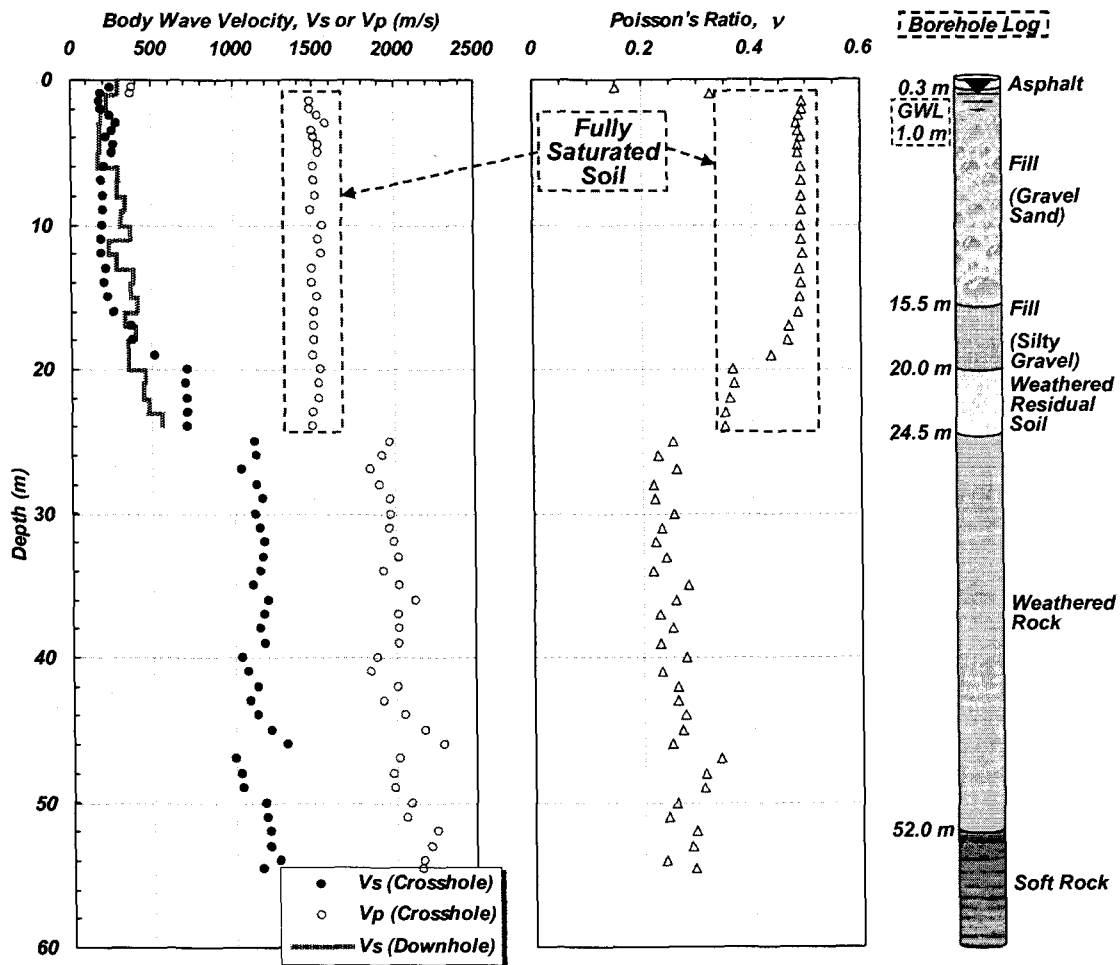


Fig. 14. Body wave velocity and corresponding Poisson's ratio with depth determined from cross-hole test in Busan site. The shear wave velocity (V_S) profile determined from down-hole test were also plotted for comparing with the V_S from cross-hole test.

본 연구에서는 접안 부두 이외에도 주요 시설물로서 LNG 저장 시설을 대상으로 크로스홀 시험을 실시하였으며, 위의 접안 부두 항만 시설물에 대한 내진 성능 평가 목적과는 달리 LNG 저장 시설물의 내진 설계를 위해 지반 동적 특성을 평가하였다. Fig. 15와 Fig. 16에는 대상 시설물의 현장 지역 내에서 100 m 정도 이격된 두 부지(통영-1과 통영-2)의 크로스홀 탄성파 시험으로부터 결정된 깊이별 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 묘사된 바와 같이 지형적으로 구릉지에 위치하므로, 항만 부두 시설물의 대상 부지와는 달리 매립토 지층은 단순히 부지 조성만을 위해 상대적으로 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

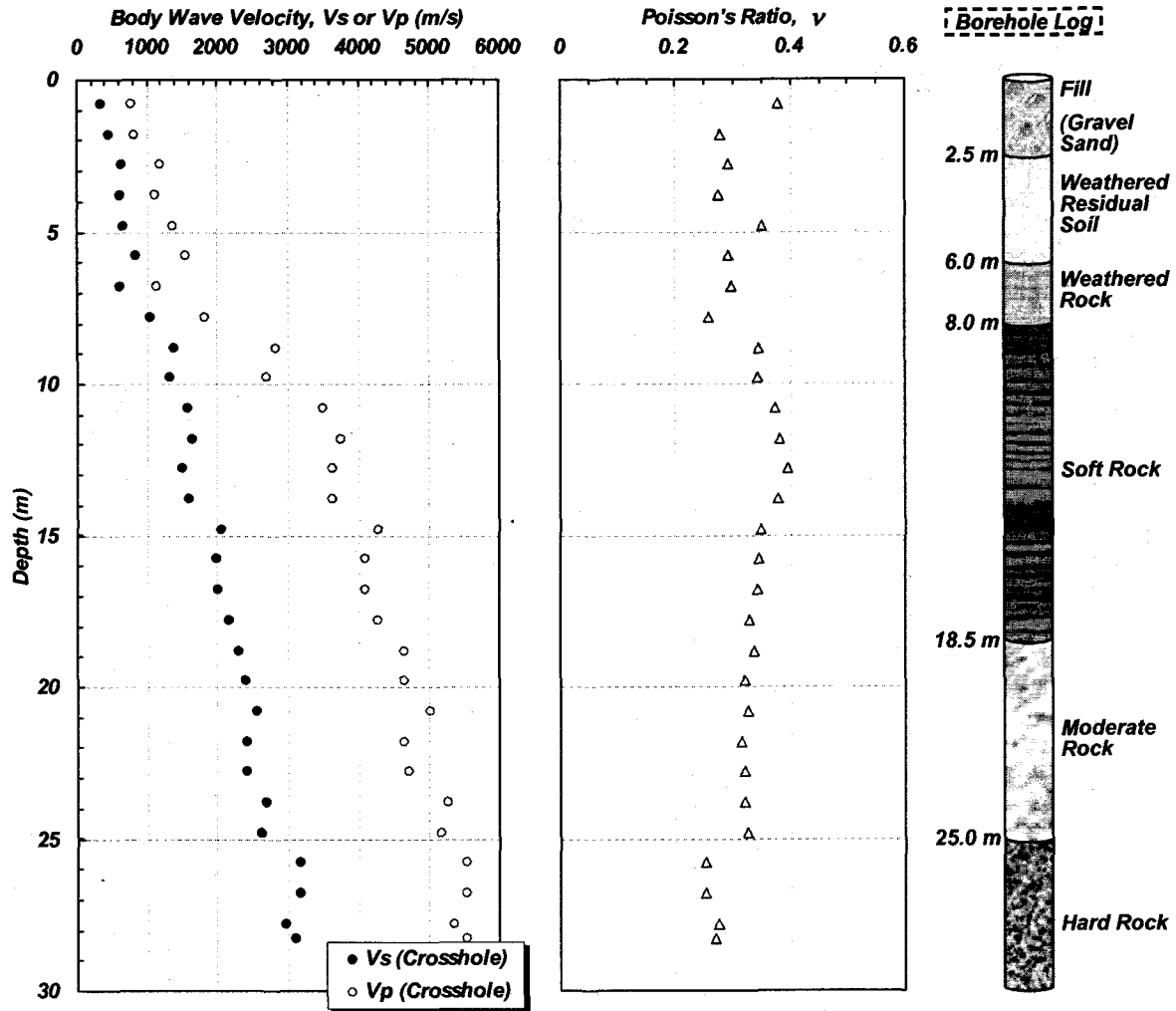


Fig. 15. Body wave velocity and corresponding Poisson's ratio with depth determined from cross-hole test in Tongyeong-1 site.

(매립토, 퇴적토, 풍화산류토, 풍화암, 연암) 조건 부지에 대해서 효율적으로 지반 동적 특성을 결정할 수 있었던 횡방향 발진 크로스홀 시험을 수행하여 풍화 지층을 포함한 암반 층의 깊이 에 따른 동적 특성을 결정함으로써 다양한 경도 조건의 암반에 대한 크로스홀 시험의 유용성 을 확인하였다.

Fig. 15 및 Fig. 16의 깊이별 지반 동적 특성(압축파 속도, 전단파 속도, 포아송 비)은 대상 부지에 위치할 대규모 시설물인 LNG 저장 시설에 대한 내진 설계 목적의 지진시 거동을 예측 하기 위한 기본 자료로 활용될 수 있다. 연구 대상인 통영 지역에서의 크로스홀 시험으로부터 결정된 대상 부지의 지층별 전단파 속도를 분포를 살펴보면, 불균질한 지층 상태인 자갈질 모 래의 매립토에서는 비교적 편차가 넓은 270~450 m/s 정도, 그리고 풍화산류토의 경우 630~1,000 m/s 정도로서 본 연구의 인천이나 부산 부지 뿐만 아니라 국내의 다른 풍화 지층 발 달 지역(Kim, 2001)에 비해서도 상당히 큰 전단파 속도 분포를 나타냈다. 또한, 비교적 얇은 지 층으로 조사된 풍화암 지반의 전단파 속도는 풍화암 상부 일부 심도에서만 약 610 m/s로 결정

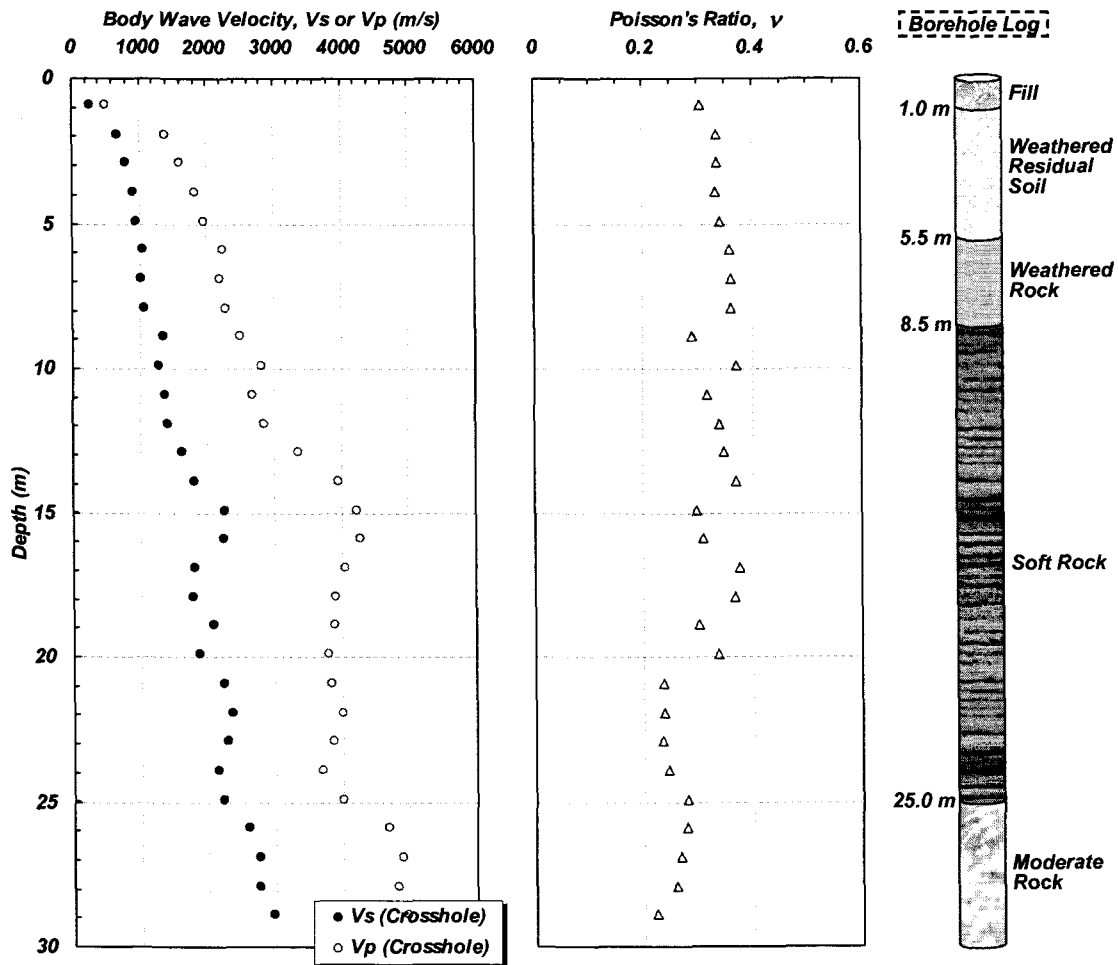


Fig. 16. Body wave velocity and corresponding Poisson's ratio with depth determined from cross-hole test in Tongyeong-2 site.

되었을 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 조사 되었으며, 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 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 경향을 보였다. 물론, 통영-2 부지의 경우 연암 층 내에서 압축파 속도나 전단파 속도의 급감 후 점진적인 증가 경향을 보이기도 하였으나, 대체로 지반의 체적파 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 시험으로부터 측정된 지반의 압축파 속도와 전단파 속도를 토대로 결

정된 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 값의 좁은 분포 범위를 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 살펴 보면, 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.

현장에서의 크로스홀 탄성과 시험으로부터 결정된 전단파 속도 및 압축파 속도 그리고 두 체적파 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 속도, 압축파 속도 및 포아송 비가 활용되었으며, 통영 부지에서는 신규 LNG 저장 시설물 부지임에 따라 내진 설계의 기초 지반 동적 특성 자료로 이용되었다. 뿐만 아니라 조사 결정된 지반의 동적 특성은 해당 시설물에 대한 공용 중의 정적 상태 평가를 위한 기본 자료로도 활용될 수 있다. 특히, 시설물별로 사전에 계획된 조사 목표 심도까지 본 연구에서 개발된 크로스홀 발진 장치를 이용하여 토사 뿐만 아니라 암반을 포함한 다양한 지층 조건을 대상으로 모든 시험 심도에서 효율적으로 지반의 동적 특성을 평가하였으며, 크로스홀 시험 장비 및 기법의 지반 및 지진공학적 유용성과 신뢰성을 확인하였다.

5. 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 발진 장치를 개발하고 국내 주요 시설물들에 대한 적용 연구를 수행하였다. 연구 결과 및 토론 내용을 요약하여 정리하면 다음과 같다.

- 1) 기존의 일반적인 크로스홀 시험에서 적용되어 온 발진 장치와는 구분되고 다양한 지층 조건에 대해서 지하수위 존재 유무에 관계없이 횡방향 전단파 및 압축파 생성이 가능한 스프링식 크로스홀 시험용 발진 장치를 개발하였다.
- 2) 개발된 크로스홀 발진 장치를 이용하여 국내의 인천, 부산 그리고 통영의 세 지역을 대상으로 다양한 지층 조건의 현장에서 깊이별 전단파 및 압축파를 획득하고, 인천과 부산 부지에 위치한 항만 시설물들의 내진 성능 평가와 통영 부지에 위치할 LNG 저장 시설물의 내진 설계를 위한 지반 동적 특성 자료로서 전단파 속도 및 압축파 속도와 그에 따른 포아송 비를 결정하였다.
- 3) 인천과 부산의 항만 시설물 부지에서의 개발된 횡방향 발진 장치를 이용한 크로스홀 탄성과 시험과 보편적으로 활용되는 다운홀 탄성과 시험으로부터 결정된 깊이별 전단파 속도의 비교 결과, 두 시험 기법의 전단파 속도는 유사하게 나타났다. 그러나 다운홀 시험에서는 발진된 전파 에너지의 지반 내에서의 소산 및 반사로 인해 깊은 심도까지 전단파 신호를 획득할 수

없었던 반면, 크로스홀 시험에서는 다양한 토사 및 암반 조건에 대해 계획된 소요 심도까지 전단파 신호를 획득하고 깊이별 전단파 속도를 효율적으로 평가할 수 있었다.

4) 이와 같은 실제 현장에서의 적용 연구 사례를 통해 본 연구의 크로스홀 탄성파 시험 장비 및 기법의 유용성과 신뢰성을 확인하였다. 따라서 주요 시설물에 대한 지반 동적 특성 평가 목적으로 현장 탄성파 시험을 수행하고자 할 경우, 시험 지반 조건 및 심도에 따른 적용성이나 시험 결과의 신뢰도 확보 측면에서 우선적으로 유효 적절한 발진 장치가 적용된 크로스홀 시험이 선행되어야 할 것으로 판단된다.

참고문헌

- 김동수, 방은석, 서원석, 2003, 표준관입시험을 이용한 업홀시험에서 전단파 속도 주상도의 도출, 한국지반공학회 논문집, **19**, 135-146.
- 목영진, 강병수, 김정환, 2003, 인홀 시험을 이용한 암반의 동적 물성치 측정, 대한토목학회 논문집, **23**, 119-125.
- 선창국, 조성민, 정종홍, 정경자, 2005, 지반의 전단파 속도 결정을 위한 SCPT_U의 활용 방안 고찰, 2005년 기초·연약지반·지반조사 기술위원회 공동 학술발표회 논문집, 한국지반공학회, 한양대학교, 99-114.
- GEOVision, 2002, *Suspension P-S Velocity Logging Method*, <http://www.geovision.com>.
- 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.
- 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.
- Swift, J. N., Nigbor, R. L., and Diehl, J., 2001, *ROSRINE Field Procedures Manual*, USC Report to PEER, University of Southern California.