

스프링식 횡방향 발진 크로스홀 탄성과 시험을 통한 지반 동적 특성의 합리적 산정

Reliable Evaluation of Dynamic Ground Properties from Cross-hole Seismic Test using Spring-loaded Lateral Impact Source

선창국¹⁾ · 목영진²⁾ · 정충기³⁾ · 김명모³⁾

Sun, Chang-Guk · Mok, Young-Jin · Chung, Choong-Ki · Kim, Myoung-Mo

국문 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 위하여, 여러 가지 공내 탄성과 시험 기법들이 개발 및 적용되어 왔다. 본 연구에서는 가장 신뢰성이 높은 현장 탄성과 기법인 크로스홀 탄성과 시험을 지반 동적 특성 획득 기법으로 선정하였다. 지하수위 존재 여부에 관계 없이 토사 뿐만 아니라 암반을 대상으로 크로스홀 시험을 성공적으로 수행할 수 있도록, 연직 시추공 안에서 지반을 대상으로 횡방향 가진이 가능한 스프링식 발진 장치를 개발하고, 두 곳의 기존 항만 부두 부지와 신규 LNG 저장 시설 두 부지로 구성된 국내 세 지역을 대상으로 크로스홀 탄성과 시험을 실시하였다. 대상 부지에서의 개발 발진 장치 적용을 통한 크로스홀 시험으로부터 지표 부근 토사부터 하부 공학적 기반암 및 지진학적 기반암으로 구성된 암반까지의 깊이별 V_S , V_P 및 ν 와 같은 지반 동적 특성을 매우 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, 지반 동적 특성, 전단파 속도, 압축파 속도, 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 from the soil surface to the engineering and seismic bedrock 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.

Key words cross-hole seismic test, geotechnical dynamic properties, shear wave velocity, compressional wave velocity, bedrock, bore-hole seismic method

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, 지진 응답의 올바른 예측을 위한 지반 동적 특성의 합리적 평가의 일환으로 지난 수십 년에 걸쳐 주로 해외 강진 지역을 대상으로 여러 현장 탄성과

¹⁾ 정회원·한국지질자원연구원 지진연구센터 선임연구원
(대표저자: pungsun@kigam.re.kr)

²⁾ 정회원·경희대학교 토목건축대학 교수

³⁾ 정회원·서울대학교 지구환경시스템공학부 교수

본 논문에 대한 토의를 2006년 10월 30일까지 학회로 보내 주시면 그 결과를 게재하겠습니다.

(논문접수일 : 2005. 12. 6 / 심사종료일 : 2006. 7. 4)

기법들이 개발 및 적용되어 왔다.⁽¹⁾ 국내의 경우도 최근 구조물이나 건축물의 내진 성능 요구가 극대화되고 있는 상황에서 지반 특성 획득 목적의 다양한 탄성과 시험 기법들이 도입 활용되고 있다.⁽²⁾ 이와 같은 지진공학적 필요성에 따라 활발하게 적용되고 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.⁽³⁻⁵⁾ 크로스홀 시험을 위해서는 여타의 공내(시추공 또는 검측공) 탄성과 시험들과는 달리 두 공이상의 시추가 필요하며, 그에 따른 경제적 단점으로 인해 현재까지 일반적인 시설물의 설계에서 적극적으로 반영되지 못해 왔다. 그러나 이와 같은 추가 시추 관련 경제적 이유보다도 실제 중요 구조물의 설계나 성능 평가에 크로스홀 시험을 지반 동적 특성 결정 기법으로 쉽게 도입하지 못하는 근본적 이유는 대상 지반의 소정 심도까지 성공적인 조사를 위해서는 정교하게 제작된 특수한 발진 장치가 필요하고 이의 적용이 쉽지 않았기 때문이다.^(2,6)

본 연구에서는 지반동역학적 관점에서 활용되고 있는 크로스홀 시험과 같은 기존 공내 탄성과 시험의 장단점을 고찰하고, 현장에서의 실무적 활용성을 고려하여 지반의 깊이별 동적 특성을 원위지에서 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 내진 설계 및 내진 성능 평가를 위한 근본 특성 자료로 제시하였다.

2. 지반의 동적 특성 결정을 위한 현장 크로스홀 탄성과 시험

지반의 변형 특성을 대표하는 강성으로서의 변형계수(deformation modulus)는 외부 하중에 의해 발생하는 변형률의 증가에 따라 그 크기가 점차 변화하는 비선형 거동을 보인다. 그림 1은 지진과 같은 반복 하중 재하 시의 지반 동적 특성으로서 전단변형률(shear strain, γ)에 따른 전단탄성계수(shear modulus, G)의 관계를 개략화하여 도시한 것이다. 지반의 동적 특성은 일반적으로 탄성한계 전단변형률(γ_{th}^e)보다 작은 미소 변형률(일반적으로 $< 10^{-3}\%$)에서의 지반 변형 특성을 의미하며, 저 변형률이나 중간 변형률(1% 정도)까지의 비선형 변형 거동을 포함하기도 한다. 이와 같은 전단변형률에 따른 지반 동적 특성의 결정시 가장 중요

하게 고려되는 부분은 탄성한계 전단변형률 이전의 미소 변형률 수준에서의 전단탄성계수의 결정이다.^(7,8) 즉, 전단변형률에 따른 전단탄성계수의 비선형 거동 곡선의 형상은 지반 전단탄성계수의 절대 값에 비하면 그 차이가 상대적으로 작으므로, 미소 변형률 (최대)전단탄성계수((maximum) shear modulus at very small strain, $G_0 (=G_{max})$)의 합리적 결정은 지반 및 지진공학적 관점에서 매우 중요하다.

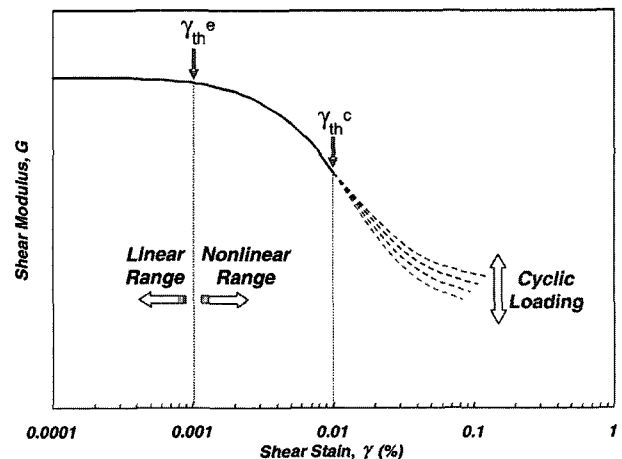
지반의 변형 특성 값은 역학적인 경계 및 재하 조건에 따라 여러 계수로 나타낼 수 있으며, 미소 변형률 조건의 전단탄성계수(G) 및 구속계수(constrained modulus, M)는 지반의 전단파 속도(shear wave velocity, V_S) 및 압축파 속도(compressional wave velocity, V_P)를 토대로 밀도(density, ρ)를 고려한 식 (1) 및 식 (2)로 표현된다. 또한, 변형 특성 계수들의 관계 변수인 포아송 비(Poisson's ratio, ν)는 식 (3)과 같다.

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

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

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

전단파(S-wave)는 지반 내 토사나 암반 매질을 따라 전파되고 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 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

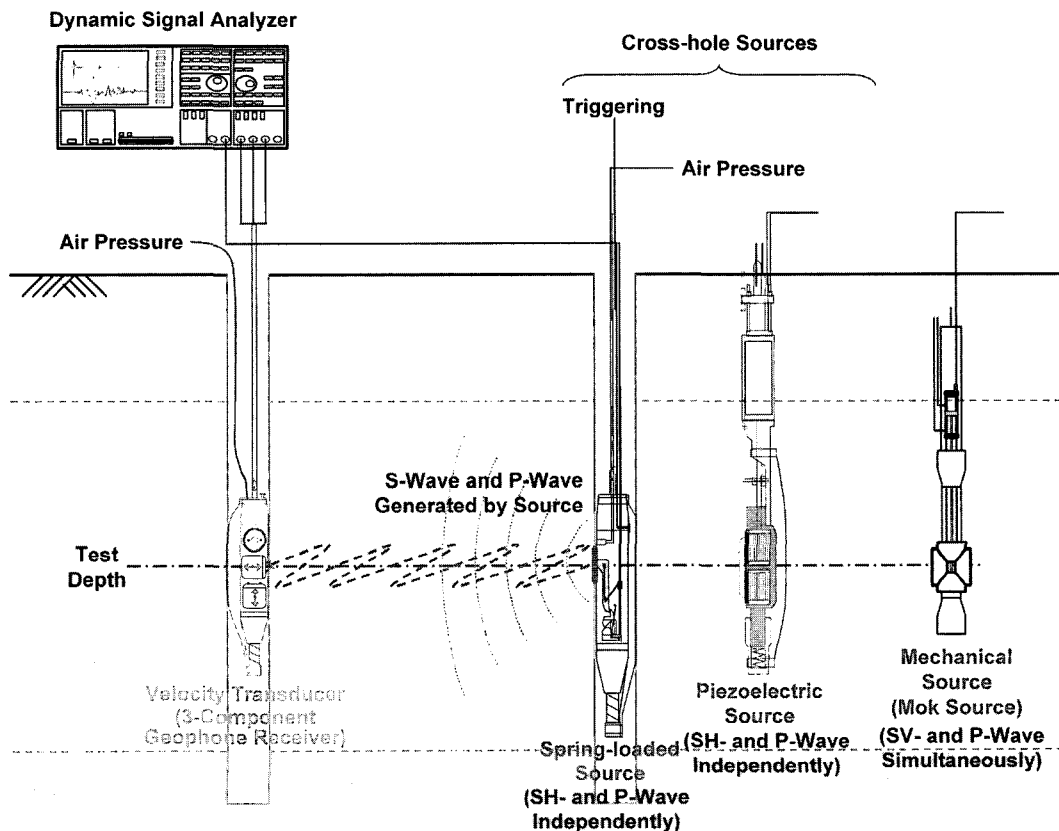


〈그림 1〉 지반의 전단변형률에 따른 전단탄성계수의 비선형 거동

전단파 신호의 획득과 깊이별 속도 분석에 많은 연구가 집중되어 왔으며⁽⁹⁾, 다양한 종류의 현장 및 실내 시험 기법들이 개발되어 적용되고 있다.^(10,11)

지반공학적 측면에서 주로 적용되고 있는 현장 탄성파 시험은 검층공의 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 음파 검층(sonic logging) 기법도 부유식 P-S 검층(suspension P- and S-wave logging)과 같은 특화된 장비를 도입하여 최근 건설 실무에서 광범위하게 활용되고 있다.⁽²⁾

본 연구에서 수행한 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.^(3,6) 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. 그림 2는 크로스홀 탄성파 시험의 개요도로서, 본 연구진에서 개발하여 활용해온 발진 장비를 함께 도시하였다. 기계식 발진기(mechanical source)는 연직방향의 타격을 통해 전단파(SV-wave)를, 그리고 압전소자형 발진기(piezoelectric source)와 스프링식 발진기(spring-loaded source)는 체적파 발현 부인 슈(shoe)를 발진기와 수신기 간 전파 경로에 직교하도록 설치하여 횡방향 전단파(SH-wave)를 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. 기계식 발진기의 경우 전단파 생성을 위한 상향과 하향 타격시 공벽이 팽창하게 되므로 방사방향의 압축파도 생성된다. 반면, 압전소자형과 스프링식 발진기의 경우 지중의 발진기에 연결된 방향조절 로드(orientation rod)를 이용하여 슈(shoe)를 수신기를 향하도록 조정하고 추가적인 시험을 실시함으로써 양질의 압축파 신호를 획득하게 된다. 기계식 발진기는 압전소자형이나 스프링식 발진기와는 달리 지표면에 평행한 평면상에서 발진기의 방향 조절 없이 방사 방향으로 전파되는 연직방향 전단파와 압축파를 동시에 발현시킬 수 있지만, 현장 시험공 및 지반 조건에 따라 실제 발생된 압축파 신호가 상대적으로 미미하거나 획득되지 못하는 경우도 종종 발생할 수



〈그림 2〉 크로스홀 탄성파 시험의 개요도

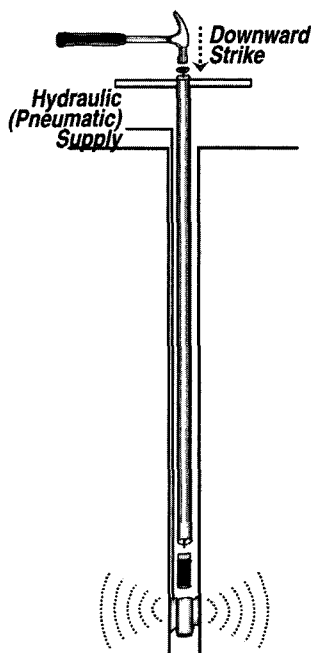
있다. 크로스홀 시험은 인접한 시험공을 대상으로 동일 심도의 발진과 수진을 통해 시험공 형성시 설치된 케이싱(casing)의 영향을 최소화하여 양질의 탄성과 신호를 획득할 수 있으므로 그 신뢰도가 매우 높고 분석이 간편한 현장 탄성과 시험 기법이다.

3. 크로스홀 탄성과 시험용 발진 장치

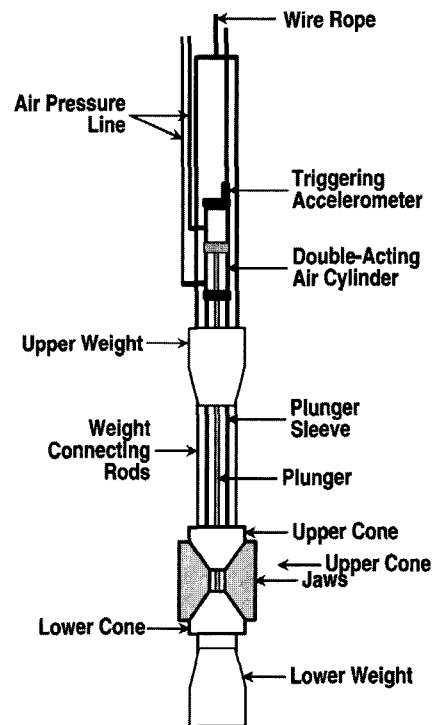
크로스홀 시험 장비 구성중 가장 중요한 부분이 발진 장치이다. 이에 본 연구에서는 국내외의 기존 발진기들에 대한 일반 사항을 고찰하고 적용성, 실용성, 경제성 등을 고려하여 설치 방향에 따라 효율적으로 전단파와 압축파를 각각 발현시킬 수 있는 발진 장치를 개발하였다. 현재까지 지반 공학적 목적으로 활용되어 온 주요 발진기의 변천 과정을 살펴보면, 해외의 경우 고전적인 개념의 발파(explosion)를 통한 체적파의 발현 기법이 시험의 효율성 및 반복성 그리고 압축파와 전단파의 구분 발현을 재고한 기계식 장치를 고안 적용하는 기법으로 개선되어 왔으며⁽¹²⁾, 국내의 경우 해외에 비해 상대적으로 최근부터 크로스홀 탄성과 시험을 적용함에 따라 해외에서 개발된 발진 장치를 도입하거나 개선하여 활용해 왔다.⁽¹³⁾ 전단파 신호 획득을 주목적으로 한 지구물리탐사(Geophysical exploration) 기법 토대의 지반 공학적 크로스홀 시험에서 1980년대까지 가장 보편적으로 적용되어 온 공내 발진 장치는 지표 부근 토사에 압입 적용되어 온 Buffalo gun(또는 in-hole shotgun)을 기본 구성(그

림 3)으로 하는 쐐기(wedge) 형태의 발진 장치였다.^(14,15) 그림 3에서 확인할 수 있는 바와 같이, Buffalo gun은 하향 타격만이 가능하므로 위상이 180° 다른 한 쌍의 전단파를 획득할 수는 없으며, 이러한 제한적 요인을 극복하기 위해 지반 및 지진공학적으로 매우 중요하게 고려되는 전단파의 정확한 측정을 목적으로 하향과 더불어 상향 타격도 가능한 다양한 크로스홀 발진 장치가 1980년대 이후 개발되어 왔다. 또한, 상향과 하향의 타격을 통한 연직방향 전단파 발진기 뿐만 아니라 한 쌍의 횡방향 전단파를 발생시킬 수 있는 발진기의 개발도 진행되어 왔다.⁽⁶⁾

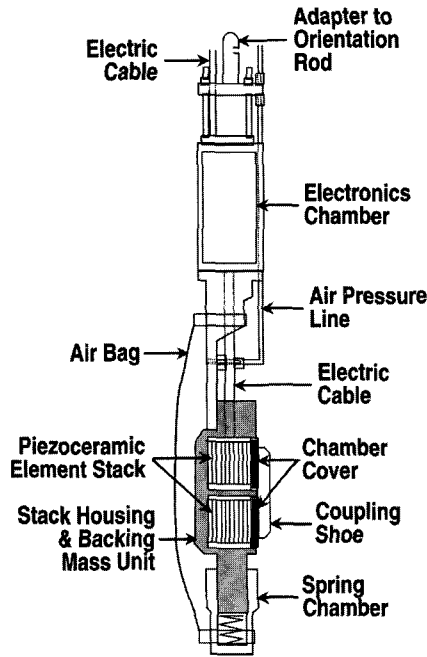
이와 같은 시험공내 발진 장치의 개발 상황 하에서 국내에서도 해외에서 개발된 기계식(mechanical) 발진기를 도입 및 개선하여 1990년대부터 지반공학적 목적으로 본격 적용하게 되었으며⁽¹⁶⁾, 그 이후 국내 자체적으로 압전소자형(piezoelectric) 횡방향 발진기를 개발하여 활용해 왔다.^(13,17) 이처럼 국내에서 지반 및 지진공학적 동적 특성을 평가하기 위하여 최근까지 크로스홀 시험에 적용해 온 주요 발진 장치의 형태는 기계식(mechanical)과 압전소자형(piezoelectric)으로서⁽¹⁸⁾, 각각 그림 4와 그림 5에서 기본적인 구성을 확인할 수 있다. 국외에서는 유럽과 북미 지역을 중심으로 기존의 기계식 및 압전소자형 발진기와 더불어 전기식 충격 발진기나 압축 공기 발진기와 같은 여러 신개념의 발진 장치가 개발되어 지반 체적파 속도의 깊이 분포 결정뿐만 아니라 토모그래피 분야에도 적용되고 있으며⁽¹⁹⁻²¹⁾, 최근 국내에



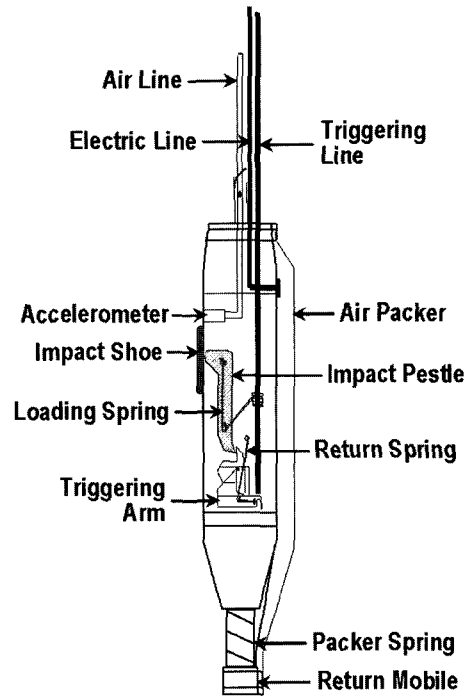
〈그림 3〉 Buffalo gun 형태의 크로스홀 발진 장치의 개요도



〈그림 4〉 크로스홀 시험을 위한 기계식 발진기



〈그림 5〉 크로스홀 시험을 위한 압전소자형 발진기



〈그림 6〉 크로스홀 시험을 위해 개발된 스프링식 발진기

서도 실무적 목적으로 해외에서 개발된 이러한 크로스홀 발진기들이 도입 활용되고 있다.

기계식 발진기는 그림 4에 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. 그림 5에 제시된 압전소자형 발진기는 충격 에너지의 발현 및 조절을 위해 전기적 제어가 가능한 압전소자를 이용한다.⁽¹⁸⁾ 압전소자형 발진기는 방수 처리된 장치 내에서의 전압 제어를 통해 일정한 탄성과 에너지를 반복적으로 발생시킬 수 있으므로 활용성이 우수하지만, 고가의 정교한 기계와 전기 장치가 요구되므로 경제적으로 불리하고 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 그림 6과 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 극대화 할 수 있다. 개발된 스프링식 발진기(그림 6)는 기존 기계식 발진기(그림 4)와는 달리 모든 구성 장치가 방수 처리된 본체 내부에 설치되어 있으므로 지하수위 유무에 관계 없이 시험 수행이 가능하다. 또한, 비교적 간단하고 가벼울 뿐만 아니라 견고하고 발현 가능 에너지가 커서 압전소자형 발진기(그림 5)와는 달리 토사 지반에 대한 적용성이 우수하며, 전기 장치를 위한 부대 시설이 요구되지 않는 기계식이다.

4. 크로스홀 시험 수행

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.

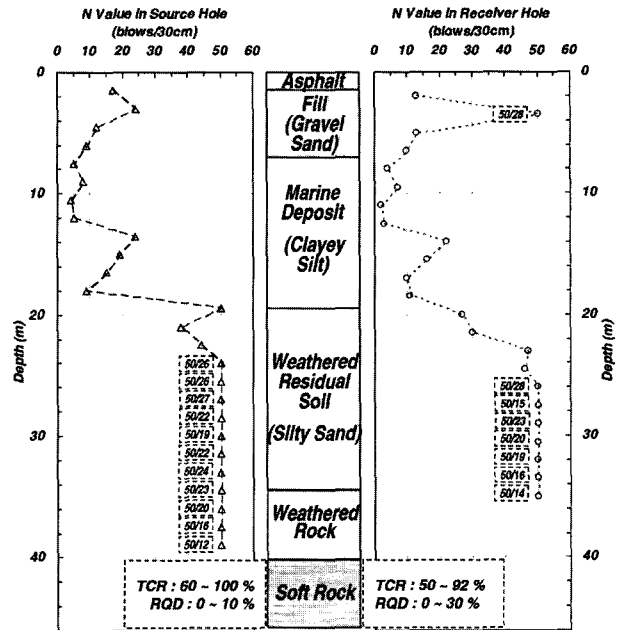
4.1 시험 대상 부지 현황

크로스홀 시험의 대상 지역은 그림 7에 제시된 바와 같이 총 3 곳으로서 인천, 부산, 그리고 통영 지역이며, 그 중에서 인천과 부산 지역의 경우 각 1 부지를 대상으로 크로스홀

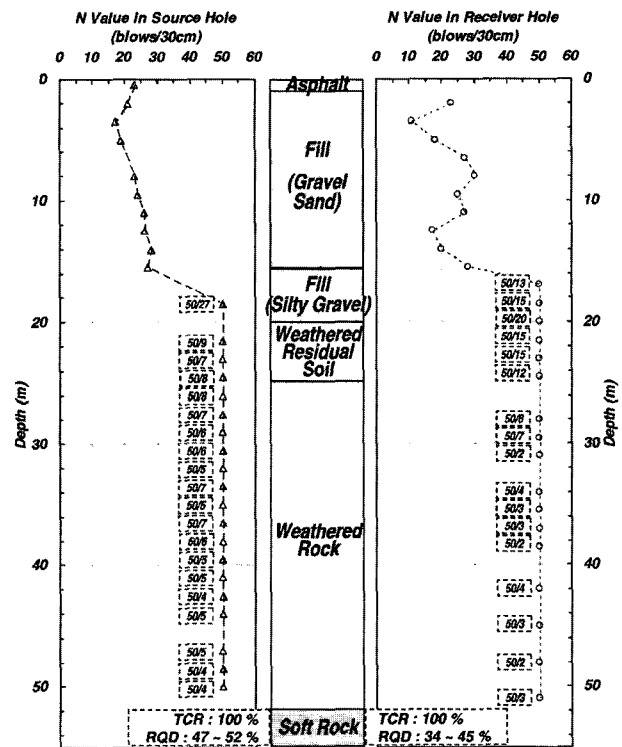
시험과 다운홀 시험을, 그리고 통영 지역의 경우 동일 현장 내에서 약 100 m 이격된 2 부지를 대상으로 크로스홀 시험만을 수행하였다. 특히, 인천과 부산 지역의 부지는 항만 시설인 안벽 부두로서, 기존 항만 시설물의 내진 성능 평가 목적으로 두 부지에서 각각 2 공(발진공과 수신공)의 시추 조사를 통한 지층 구성 확인 후 크로스홀 및 다운홀 시험을 수행하였으며, LNG 저장 시설이 위치할 통영 지역의 부지에서는 대상 지역 내 두 부지에서 각각 2공의 시추 조사와 더불어 내진 설계 목적의 크로스홀 시험을 실시하였다.

시험 대상 부지(인천 부지, 부산 부지, 통영-1 부지, 통영-2 부지)의 시추 조사로부터 확인한 지층 구성은 그림 8과 같으며, 발진공(source hole)과 수신공(receiver hole)의 시추 조사시 병행된 표준 관입 시험(SPT)으로부터 구한 N 값의 분포와 암반층에 대한 개략적인 상태 지표로서의 TCR(Total Core Recovery)과 RQD(Rock Quality Designation)도 확인할 수 있다. 안벽 부두 시설물인 인천 부지(그림 8(a)) 및 부산 부지(그림 8(b))에서는 시설물 조성을 위한 매립토 지반이 두껍게 분포하였는데, 각각 6.6m 및 19.7m 두께 분포였다. 특히, 부산 부지 매립토의 경우 상부 15.2m 두께의 자갈질 모래의 하부에 구성 성분이 다소 상이한 4.5m 두께의 실트질 자갈이 존재하고 있었다. 반면, 인천 부지에서는 부산 부지와는 달리 매립토 아래에 12.5m 두께의 점토질 실트의 해성 퇴적도 층이 발달해 있었다. 인천과 부산 부지 모두 깊은 심도(인천 40.2m, 부산 52.0m)에 분포한 연암 상부

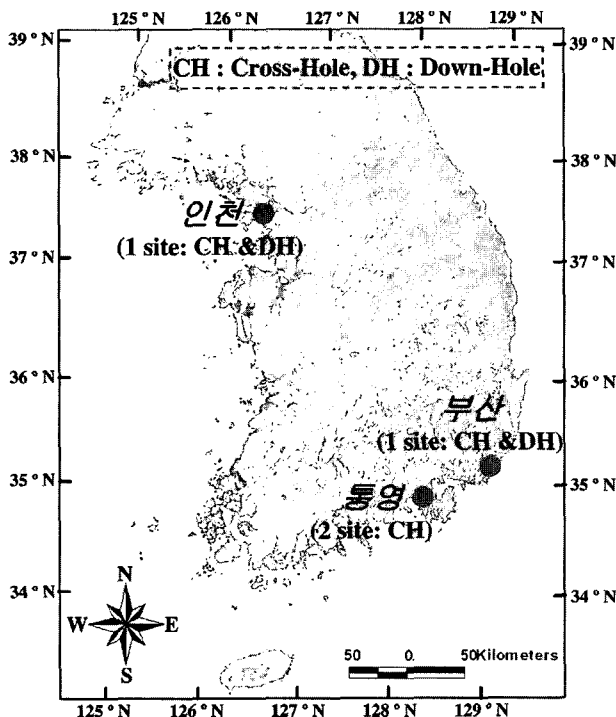
에 풍화잔류토와 풍화암이 각각 약 20m와 30m 정도의 두께로 분포하고 있었다. SPT로부터 결정된 N 값의 깊이별 분포 경향을 살펴보면, 부산과 인천 부지 모두 일부 심도에서의 정량적 차이를 제외하고는 발진공과 수신공에서의 N 값 분포 경향이 대체로 유사하게 나타났다. 인천 부지의 자갈질 모래 매립토와 부산 부지의 실트질 자갈 매립토의 일부



(a) 인천 부지



(b) 부산 부지



〈그림 7〉 크로스홀 시험 대상 부지의 지리적 위치

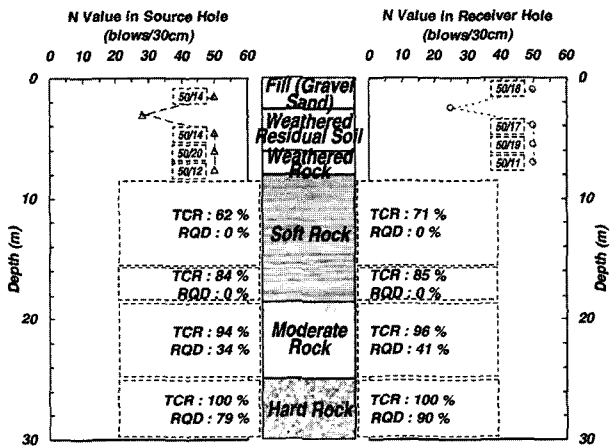
〈그림 8〉 크로스홀 시험 부지의 시추 조사 결과 및 N 값

심도를 제외하고는 하부의 풍화잔류토와 풍화암에서 N 값이 50 이상으로 확인되었다. 또한, 공학적 기반암(engineering bedrock)으로 간주될 수 있는 연암⁽²²⁾에서는 TCR과 RQD에 근거해 볼 때 부산 부지가 인천 부지에 비해 암반 상태가 다소 양호한 것으로 조사되었다. 통영 지역의 시험 대상 부지(그림 8(c)의 통영-1 부지 및 그림 8(d)의 통영-2 부지)는 해안에 인접한 구릉 지역으로서, 지표면 부근의 1.0~2.5m 두께의 매립토 하부에 풍화잔류토와 풍화암이 발달하였고, 그 아래에는 지표면 기준 심도 8.0~8.5m부터 모암의 연암, 보통암 및 경암이 분포하고 있었다. 통영 지역에서는 자갈질 매립토와 연암 상부의 풍화 지층에서 N 값은 대체로 50 이상으로 조사되었다. 더불어 연암을 포함한 기반암에서는 심도가 증가하고 암반의 조건이 보통암 및 경암으로 진행됨에 따라 TCR과 RQD가 커지고 암질이 양호해 지고 있음을 확인하였다.

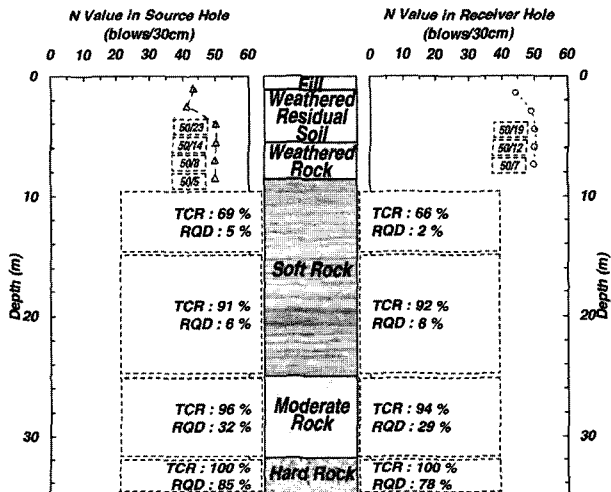
4.2 대상 부지에서의 크로스홀 시험 수행

대상 부지에서의 시추 조사는 지표면 상에서 약 3.0m 정도를 이격하고 2 공을 실시하여 각각 크로스홀 시험용 발진공과 수신공으로 활용하고자 하였다. 시추 조사가 완료된 후 크로스홀 시험과 같은 현장 공내 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 깊이 별 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 성분 속도계형 이며, 그림 9에서 개략적인 구조를 확인할 수 있다.

크로스홀 탄성과 시험은 발진기와 수신기를 동일 심도로 유지한 상태로 지표면 부근부터 인천과 부산 부지의 일부 매립토 지층과 인천의 암반층(0.5m 간격으로 수행)을 제외하고는 대체로 1.0m 간격으로 시험 심도를 증가시켜 가며 실시하였다. 시험은 개발된 발진기와 수신기를 방향 룯드(orientation rod)에 연결하여 소정 시험 심도에 위치 시킨 후, 수신기의 종축 속도계(longitudinal geophone)의 진동 방향이 발진공을 향하도록 조정(교축 속도계(transverse geophone)의 진동 방향을 발진공과의 축 방향에 대해 직교

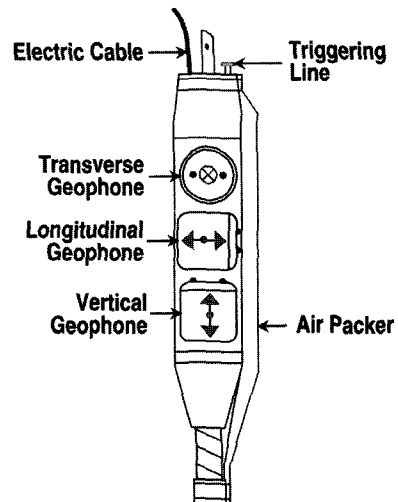


(c) 통영-1 부지



(d) 통영-2 부지

<그림 8> 크로스홀 시험 부지의 시추 조사 결과 및 N 값 (계속)

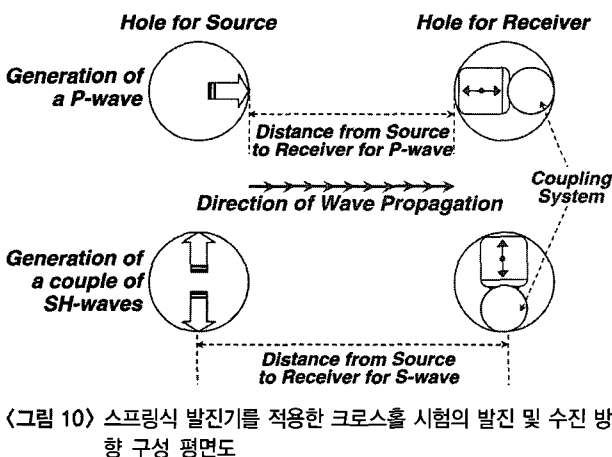


<그림 9> 3성분 속도계 수신기

하도록 조정)하고, 발진기 내 충격 공이(그림 2 및 그림 6 참조)의 타격 방향을 수신공을 향하도록 조정하고 타격함으로써 압축파 신호를 획득한다. 그림 10은 본 연구의 스프링식 발진기나 압전소자형 발진기와 같이 횡방향 전단파(SH-wave)와 압축파를 독립적으로 생성하는 발진기가 적용되는 크로스홀 시험에 대한 시추 방향(지표면과 평행) 평면상에서의 압축파 및 전단파의 발현과 그에 상응하는 발진공과 수신공간의 전파 경로에 대한 모식도이다. 묘사된 바와 같이 발진기와 수신기의 방향을 평행 및 직교하게 변환시켜 가며 동일 심도에서 시험을 수행한다. 또한, 충격 공의 타격 방향을 수신공에 직교하도록 조정하고 타격하여 첫 번째 전단파 신호를 획득한 후, 다시 충격 공의 타격 방향을 180° 전환하여 타격함으로써 첫 번째 전단파 신호와 위상이 180° 다른 두 번째 전단파 신호를 얻는다. 이처럼 위상이 180° 다른 한 쌍의 전단파 신호를 계속함으로써 전단파 신호의 극성(polarity)을 이용하여 도달 시점을 용이하게 판독할 수 있다.

인천 부지에서는 지표면 부근의 매립토부터 44.5m 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 20.0m까지 전단파 신호를 획득하였다. 부산 부지에서는 비교적 깊은 심도인 54.5m의 연암까지 크로스홀 시험을 실시하여 성공적으로 압축파와 전단파 신호를 계속하였으며, 다운홀 시험의 경우 수신공을 대상으로 24.0m까지 전단파 신호를 획득할 수 있었다. 통영의 두 대상지인 통영-1 및 통영-2 부지에서는 추가적인 다운홀 시험을 실시하지 않았으며, 크로스홀 시험을 각각 28.3m의 경암 및 28.9m의 보통암까지 수행하여 압축파 및 전단파 신호를 획득하였다.

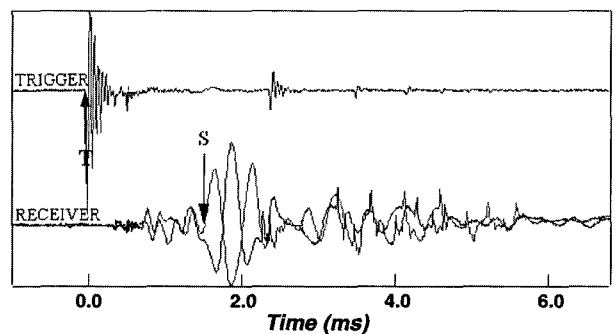
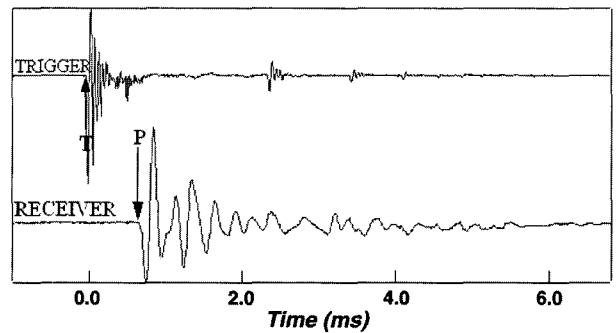
그림 11은 단일 시험 심도에서 획득한 압축파 및 전단파



의 대표적인 발진(Trigger) 신호와 수신(Receiver) 신호를 예시한 것이다. 발진 시점(T)과 압축파의 초기 도달 시점(그림 11(a)에서 지시된 P) 및 전단파의 도달 시점(그림 11(b)에서 지시된 S)의 시간차를 판독하여 발진기와 수신기 간의 거리(L)를 통과하는 데 소요된 압축파의 전파 시간(t_p) 및 전단파의 전파 시간(t_s)을 각각 결정할 수 있다. 이러한 전파 시간(t_p 및 t_s)을 토대로 발진 장치와 수신기의 거리(L)를 고려하여 식 (6)과 식 (7)에 따라 각각 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. 더불어 인천과 부산 부지에서는 병행된 다운홀 시험으로부터 획득한 전단파 신호의 각 시험 심도별 전단파의 초기 도달 시점을 판독하고 지반내 전파 경로상의 불균질성을 고려하기 위하여 Snell의 법칙 기반의 굴절 전파 경로법을 적용한 역산 해석을 통해 깊이별 전단파 속도 분포를 도출하였다.^(10,23)

$$V_p = \frac{l}{t_p} \tag{6}$$

$$V_s = \frac{l}{t_s} \tag{7}$$



〈그림 11〉 크로스홀 시험을 통해 획득한 전형적인 발진 및 수신 신호

5. 크로스홀 시험을 통한 지반 동적 특성의 합리적 평가

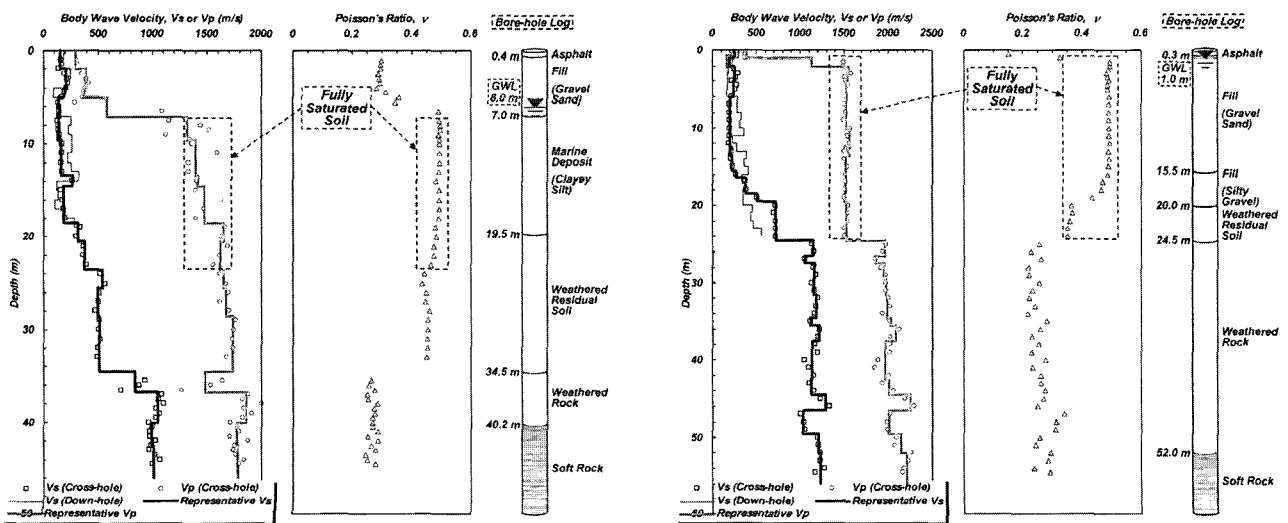
크로스홀 시험은 다른 현장 탄성과 시험에 비해 신뢰도가 높고 분석이 매우 용이한 반면, 두 공이상의 시추가 요구되므로 다소 비경제적일 수 있다. 그러나 동적 특성 평가 대상 시설물의 중요성 측면을 감안할 때, 무엇보다도 소정의 깊이 또는 대상 지층까지의 동적 특성의 성공적 결정이 가장 중요하다. 이러한 요구 사항은 지반 조건과 결부되어 시험 기법 및 장비의 한계로 인해 만족되지 못하는 경우가 실제 현장에서 종종 발생되어 왔다. 이에 본 연구에서는 다양한 지반 조건에서 효율적으로 크로스홀 시험이 가능한 횡방향 발진 장치를 개발하고 국내 대표적 부지들을 대상으로 크로스홀 시험을 수행하여 깊이별 동적 특성을 합리적으로 평가하였다.

5.1 기존 항만 부두 시설 부지의 지반 동적 특성 평가

그림 12는 인천과 부산의 기존 항만 부두 시설 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 현장에서 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 그림 12에 비교 도시하였다. 지반의 동적 특성은 심도에

따른 주상 형태나 지반 조건별 대표 값의 형태로 실무적 활용이 가능하므로 일반적으로 전문가적 견지에 근거한 대표적 분포를 제시하게 된다. 본 연구에서도 그림 12에 삽입된 바와 같이 인천 및 부산의 기존 항만 시설물의 내진 성능 평가를 위한 실질적 자료로 활용 가능한 전단파 속도와 압축파 속도의 대표 주상을 결정하여 제시하였다. 대상 부지의 지층은 매립토, 퇴적토, 풍화잔류토, 풍화암, 그리고 연암으로 구성된 다층 조건으로서 국내 주요 항만 부지의 보편적 지층 구성이다. 국가적 주요 인프라 시설물인 접안 부두의 경우 그에 상응하는 내진 성능이 요구되며, 이의 정량적 평가는 본 연구 결과와 같은 깊이별 지반 동적 특성의 정확한 파악이 선행되어야 비로소 가능하다.

본 연구에서 제시된 이러한 크로스홀 시험 결과로부터 확인할 수 있는 바와 같이, 대상 부지의 모든 지층 조건에서 압축파 속도 및 전단파 속도와 포아송 비를 효율적으로 평가하였으며, 이러한 결과는 본 연구 대상 항만 시설물의 내진 성능 평가를 위한 근본적 필수 자료로 활용된다. 크로스홀 시험을 통해 결정된 대상 부지의 지층별 전단파 속도를 분포를 살펴보면, 인천 부지(그림 12(a))에서는 자갈질 모래로 구성된 매립토의 경우 140~220m/s 정도, 점토질 실트 퇴적토의 경우 약 130~330m/s, 조립질 모래로 분류될 수 있는 풍화잔류토의 경우 300~570m/s 정도, 풍화암에서는 약 700~1,080m/s, 그리고 비교적 파쇄가 심한 연암의 경우 960~1,100m/s 정도를 보였다. 또한, 부산 부지(그림 12(b))의 전단파 속도 분포는 상부 자갈질 모래의 매립토에서는 180~290m/s 정도, 하부 실트질 자갈로 구성된 매립토에서는 260~510m/s 정도, 풍화잔류토의 경우 약 700~



(a) 인천 부지

(b) 부산 부지

〈그림 12〉 기존 항만 부두 시설 부지에서의 크로스홀 시험을 통해 결정한 깊이별 지반 동적 특성

720m/s, 풍화암의 경우 990~1,320m/s 정도, 그리고 연암층의 상부에서는 1,170~1,270m/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 항만 시설 부지들을 대상으로 수행된 본 연구의 현장 크로스홀 및 다운홀 탄성과 시험의 깊이에 따른 전단파 속도 분포를 비교해 본 결과, 크로스홀 시험 결과와는 달리 병행된 다운홀 시험으로부터 결정된 동적 특성인 깊이별 전단파 속도는 다운홀 플랭크에서 발진된 전파 에너지의 지반 내에서의 심도 증가에 따른 소산 및 지층 변화로 인한 반사로 인해 풍화산류토 또는 풍화암으로 구성된 깊은 심도까지 얻을 수 없었으며, 깊이별 전단파 속도 분포는 두 시험의 결과가 대체로 유사하게 산출되었다. 이미 서론에서 언급된 바와 같이 일반적으로 크로스홀 탄성과 시험의 신뢰도는 다운홀 시험과 같은 여타의 공내 탄성과 시험에 비해 높다. 뿐만 아니라 본 연구의 스프링식 횡방향 발진기 적용 결과와 같이 다양한 매질 모두에 유효적절한 발진기를 이용함으로써 다운홀 시험의 심도 및 지층의 적용 제한성을 극복할 수 있다. 따라서 복합적인 지층 조건의 지반에 대한 깊이별 동적 특성의 결정에는 실무에서 보편적으로 적용되고 있는 다운홀 시험에 비해 적합한 발진 장치가 적용된 크로스홀 시험이 보다 유용할 것으로 판단된다.

그러나 그림 12에서 파선 상자로 지시된 지하수위(그림 12(a)의 인천 부지는 6.0m, 그림 12(b)의 부산 부지는 1.0m) 아래의 완전 포화 토사 층에서는 실제 토사 입자의 압축파 속도라기 보다는 일반적인 물의 압축파 속도(약 1,550m/s)가 평가됨에 따라 포화 토사 층에서는 압축파 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 활용 목적의 현장 탄성과 시험에서는 토사 입자와 같은 고체 매질을 대상으로 한 지반의 깊이별 전단파 속도만이 평가되기도 한다.

5.2 신규 LNG 저장 시설 부지의 지반 동적 특성 평가

본 연구에서는 항만 접안 부두 이외에도 주요 시설물로서 LNG 저장 시설 부지에서 크로스홀 시험을 실시하였으며,

기존 항만 시설물에 대한 내진 성능 평가 목적과는 달리 신규 LNG 저장 시설물의 내진 설계를 위해 지반 동적 특성을 평가하였다. 그림 13에는 대상 시설물의 현장 지역 내에서 100m 정도 이격된 두 부지(그림 13(a)의 통영-1 부지와 그림 13(b)의 통영-2 부지)의 크로스홀 탄성과 시험으로부터 결정된 깊이별 압축파 속도 및 전단파 속도 그리고 포아송 비를 제시하였다. 또한, 내진 측면의 실질적 활용 목적 자료로서 전단파 속도와 압축파 속도의 깊이에 따른 대표 주상들도 결정하여 제시하였고, 시추 조사로부터 확인된 대상 부지의 지층 분포 역시 도시하였다.

통영 지역의 대상 부지는 시추 조사를 통한 부지 현황에서 묘사된 것처럼 지형적으로 구릉지에 위치하므로 항만 부두 시설물의 대상 부지와는 달리 매립토 지층은 단순히 부지 조성만을 위해 상대적으로 얇게 형성되어 있으며, 퇴적토는 발달되어 있지 않았다. 즉, 얇은 두께의 매립토 아래부터 모암의 풍화 지층(풍화산류토 및 풍화암)이 발달해 있고 그 하부에는 연암, 보통암 및 경암이 기반암으로 존재하고 있다. 따라서 통영 지역 대상 부지에서는 이미 항만 시설 부지의 다층 지반(매립토, 퇴적토, 풍화산류토, 풍화암, 연암) 조건 부지에 대해서 효율적으로 지반 동적 특성을 결정할 수 있었던 횡방향 발진 크로스홀 시험을 수행하여 풍화 지층을 포함한 암반층의 깊이에 따른 동적 특성을 결정함으로써 다양한 경도 조건의 암반에 대한 크로스홀 시험의 유용성을 확인하였다.

일반적으로 지반공학적 관점에서 암반은 풍화암, 연암, 보통암, 경암 그리고 극경암으로 구분되며, 국내의 경우 일부 풍화암을 제외한 연암 하부 경질 암반을 지진공학적 관점의 기반암으로 볼 수 있다.⁽¹⁰⁾ 이러한 기반암은 다시 정량적으로 전단파 속도(V_s)에 따라 공학적 기반암(engineering bedrock; $V_s > 750\text{m/s}$)과 지진학적 기반암(seismic bedrock; $V_s > 3,000\text{m/s}$)으로 구분할 수 있다.^(24,25) 지진학적 기반암은 지진시 진원(hypocenter)으로서의 실제 단층 운동이 발생하는 암반을 의미하므로 원자력 발전소와 같은 국가 기반 시설물에 대한 내진 설계 및 내진 성능 평가를 위해서는 그의 동적 특성 파악이 선행되어야 한다.⁽²⁶⁾ 이와 같은 기반암 동적 특성 평가의 중요성을 고려해 볼 때, 본 연구의 횡방향 발진 장치가 개발 적용된 크로스홀 시험을 통해 공학적 기반암 뿐만 아니라 지진학적 기반암의 전단파 속도와 압축파 속도 분포를 매우 효율적으로 평가하여 일반적인 탄성과 시험의 제한성을 극복할 수 있는 시험 기법으로서의 지진공학 적 활용이 가능할 것으로 판단된다.

그림 13의 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 예

측하기 위한 기본 자료로 활용될 수 있다. 연구 대상인 통영 지역에서의 크로스홀 시험으로부터 결정된 대상 부지의 지층별 전단파 속도 분포를 살펴보면, 불균질한 지층 상태인 자갈질 모래의 매립토에서는 비교적 편차가 넓은 270~450m/s 정도, 그리고 풍화잔류토의 경우 630~1,000m/s 정도로서 본 연구의 인천이나 부산 부지 뿐만 아니라 국내의 다른 풍화 지층 발달 지역⁽²⁷⁾에 비해서도 상당히 큰 전단파 속도 분포를 나타냈다. 또한, 비교적 얇은 지층으로 조사된 풍화암 지반의 전단파 속도는 풍화암 상부 일부 심도에 서만 약 610m/s로 결정되었을 뿐, 대부분 1,050m/s 정도의 분포를 보였다. 통영의 두 부지 모두에서 연암 층이 가장 두껍게 발달한 지층(통영-1 부지에서는 10.5m 두께, 통영-2 부지에서는 16.5m 두께)으로 조사되었으며, 연암에서는 대략 1,300~2,300m/s 정도의 전단파 속도 분포로 결정되었다. 두 부지의 보통암 지반에서는 전단파 속도가 2,300~3,000m/s 정도의 분포 범위를 나타냈고, 통영-1 부지(그림 13(a))의 크로스홀 시험으로부터 평가된 경암의 전단파 속도는 비록 경암 상부 일부 심도의 결과이지만 대체로 3,000~3,200m/s의 범위로 결정되었다.

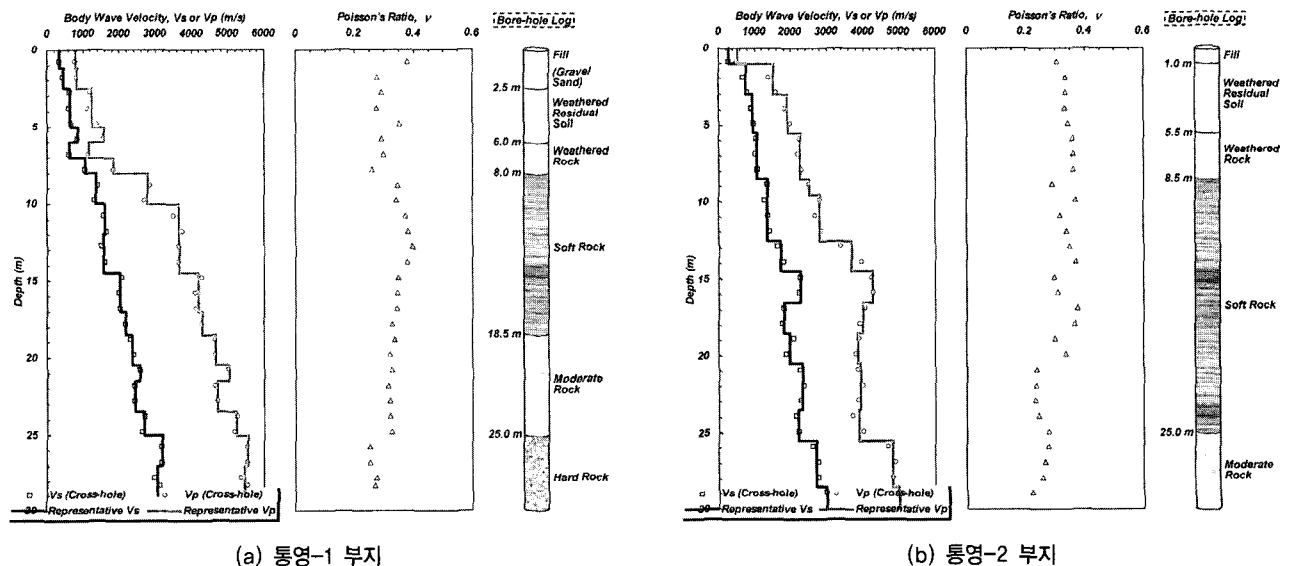
본 연구 대상인 통영 지역의 두 부지는 외부의 토사 유입이나 퇴적 작용 없이 모암 및 그의 풍화 지층으로 지반이 구성되어서 대체로 심도 증가에 따라 전단파 속도는 점진적인 증가 경향을 보였다. 물론, 통영-2 부지(그림 13(b))의 경우 연암 층 내에서 압축파 속도나 전단파 속도의 급감 후 점진적인 증가 경향을 보이기도 하였으나, 대체로 지반의 체적파 속도는 지층 조건에 따라 다르게 결정되었다. 통영 지역 대상 부지에서는 토사 지층 내에서 지하수위가 관측되지 않았으며, 이에 따라 조사 지반의 전체 시험 심도에 대해서 활

용 가능한 포아송 비를 결정할 수 있었다.

통영 지역의 크로스홀 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 값의 좁은 분포 범위를 보였다. 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 경암 지반에 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.

5.3 지반 동적 특성의 활용

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



〈그림 13〉 신규 LNG 저장 시설 부지에서의 크로스홀 시험을 통해 결정한 깊이별 지반 동적 특성

내진 성능 평가에 활용된다. 이미 기술된 바와 같이, 본 연구의 대상인 인천과 부산 부지에서는 기존 항만 시설물 부지이므로 내진 성능 평가를 위한 기초 지반의 동적 특성으로서 깊이별 전단파 속도, 압축파 속도 및 포아송 비가 활용되며, 통영 부지의 경우 신규 LNG 저장 시설물 부지이므로 내진 설계의 기초 지반 동적 특성 자료로 이용된다. 뿐만 아니라 조사 결정된 지반의 동적 특성은 해당 시설물에 대한 공용 중의 정적 상태 평가를 위한 기본 자료로도 활용될 수 있다. 이와 같이 적용성이 다양한 깊이별 지반 동적 특성의 지진공학적 활용의 일환으로, 본 연구에서는 시설물별로 사전에 계획된 조사 목표 심도까지 개발된 스프링식 횡방향 크로스홀 발진 장치를 이용하여 지표 부근의 매립토 및 퇴적토, 풍화산류토, 풍화암, 그리고 공학적 기반암과 지진학적 기반암의 다양한 지반 조건을 대상으로 모든 시험 심도에서 효율적으로 지반의 동적 특성을 평가하였으며, 크로스홀 시험 장비 및 기법의 지반 및 지진공학적 유용성과 신뢰성을 확인하였다.

그렇다할지라도 지진공학적 견지의 동적 특성 결정의 경우 정확성 뿐만 아니라 경제성이나 효율성 등이 고려되어야 하는 현실적 상황이 빈번하므로, 비파괴 탄성과 시험을 포함한 다양한 현장 탄성과 시험들을 대상으로 한 종합적 판단을 토대로 실제 현장 적용 시험 내용을 결정해야 할 것으로 판단된다. 또한, 본 연구의 스프링식 횡방향 발진 크로스홀 시험 적용 부지와 비교 대상 시험의 제한성을 고려해 볼 때, 크로스홀 시험을 포함한 공내 탄성과 시험을 이용한 국내 지반 동적 특성의 체계적 평가를 위해서는 지속적인 현장 탄성과 시험들 간의 이론적 및 경험적 비교 연구가 필요할 것으로 판단된다.

6. 결론 및 제언

내진 설계 및 내진 성능 평가 뿐만 아니라 공용 상태 평가를 위한 기초 지반의 동적 특성을 효율적이고 신뢰성 높게 결정할 수 있는 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 지하수 위 존재 유무에 관계 없이 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 결정하여 제시하였다.
- (3) 본 연구의 인천과 부산 부지에서는 횡방향 발진 크로스홀 탄성과 시험과 실무에서 보편적으로 활용되는 다운홀 탄성과 시험을 병행하였으며, 다운홀 시험에서는 발진된 전파 에너지의 지반내에서의 소산 및 반사로 인해 깊은 심도까지 전단파 신호를 획득할 수 없었다. 반면, 적절한 발진기가 적용된 크로스홀 시험에서는 다양한 토사 뿐만 아니라 공학적 기반암이나 지진학적 기반암과 같은 여러 암반 조건에 대해 계획된 소요 심도까지 전단파 신호를 획득하고 깊이별 전단파 속도를 효율적으로 평가하였다.
- (4) 이와 같은 실제 현장에서의 적용 연구 사례를 통해 본 연구의 크로스홀 탄성과 시험 장비 및 기법의 유용성과 신뢰성을 확인하였다. 따라서 주요 시설물에 대한 지반 동적 특성 평가 목적으로 현장 탄성과 시험을 수행하고자 할 경우, 시험 지반 조건 및 심도에 따른 적용성이나 시험 결과의 신뢰도 확보 측면에서 우선적으로 유효적절한 발진 장치가 적용된 크로스홀 시험이 고려되어야 할 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 한국지질자원연구원 기본사업인 ‘지진통합관측망 운영 및 신속경보시스템 개발 연구(부산-경남 지역)’과 제의 지원과 건설기술기반구축사업(05제안-08) 위탁과제(C105B1000008-05B0100-00812)의 지원 및 서울대학교 공학연구소의 연구 협조에 의해 수행되었으며, 이에 깊이 감사드립니다.

참고 문헌

1. Sirles, P. C. and Viksne, A., "Site-Specific Shear Wave Velocity Determination for Geotechnical Engineering Applications," *Geotechnical and Environmental Geophysics, Investigations in Geophysics No. 5*, Society of Exploration Geophysics, Tulsa, 1990, pp. 121-131.
2. 한국지반공학회, 지반구조물의 내진설계, 지반공학 시리즈 8, 구미서관, 2006.

3. Mok, Y. J., "Analytical and Experimental Studies of Borehole Seismic Methods," Ph.D. Dissertation, the University of Texas at Austin, 1987.
4. Mooney, H. M., *Handbook of Engineering Geophysics, Volume 1: Seismic*, Bison Instruments, Inc., Minneapolis, 1984.
5. Hoar, J. H., "Field Measurement of Shear Wave Velocity and Attenuation for Dynamic Analyses," Ph.D. Dissertation, University of Texas at Austin, 1982.
6. US Army Corps of Engineers, *Engineering and Design: Geophysical Exploration for Engineering and Environmental Investigations*, Engineer Manual, EM 1110-1-1802, 1995.
7. 김동수, 추연욱, "간극수압증가와 동적변형특성 변화에 근거한 사질토 지반의 반복한계 전단변형률", 대한토목학회 논문집, Vol. 24, No. 3C, 2004, pp. 193-203.
8. Vucetic, M., "Cyclic Threshold Shear Strains in Soils," *Journal of Geotechnical Engineering*, ASCE, Vol. 120, No. 12, 1994, pp. 2208-2228.
9. O'Connell, D. R. H., "Replication of Apparent Nonlinear Seismic Response with Linear Wave Propagation Models," *Science*, Vol. 283, No. 5410, 1999, pp. 2045-2050.
10. Sun, C. G., "Geotechnical Information System and Site Amplification Characteristics for Earthquake Ground Motions at Inland of the Korean Peninsula," Ph.D. Dissertation, Seoul National University, 2004.
11. 고동희, 이익효, 김준석, 김동수, "미소변형측정 삼축시험기의 개발 및 적용", 대한토목학회 논문집, Vol. 22, No. 3C, 2002, pp. 219-229.
12. Okko, O., *On the Development in Digital Engineering-Seismic Studies in Finland*, VTT Publications 349, Technical Research Center of Finland, Espoo, 1998.
13. 목영진, "크로스홀 시험을 이용한 암반기초의 동적 물성치 측정", 대한토목학회 학술발표회, 1998, pp. 603-606.
14. Winterstein, D. F. and Paulsson, B. N. P., "Velocity Anisotropy in Shale Determined from Crosshole Seismic and Vertical Seismic Profile Data," *Geophysics*, Vol. 55, No. 4, 1990, pp. 470-479.
15. Pullan, S. E. and MacAulay, H. A., "An In-hole Shotgun Source for Engineering Seismic Surveys," *Geophysics*, Vol. 52, No. 7, 1987, pp. 985-996.
16. 목영진, "In Situ Measurement of Stiffness and Damping of Soils by Crosshole and Downhole Methods", 한국지반공학회 지반진동위원회 제1회 학술논문집, 1992, pp. 1-18.
17. 백영식, 목영진, 임수빈, "지반구조의 영상화를 위한 Seismic Geotomography 개발", 건설교통부, 1996.
18. 목영진, 강병수, 김정환, "인홀 시험을 이용한 암반의 동적 물성치 측정", 대한토목학회 논문집, Vol. 23, No. 2C, 2003, pp. 119-125.
19. Geotomographie, *Borehole Seismic Surveys - What Equipment is Suitable?*, <http://www.crosswellinstruments.de>, 2006.
20. VIBROMETRIC, *Seismic Equipment*, <http://www.kolumbus.fi/vibrometric>, 2004.
21. Griffin, L. M. and Hiltunen, D. R., "Precision of Seismic Wave Propagation Methods in Construction Applications," *Use of Geophysical Methods in Construction, Geotechnical Special Publication No. 108*, S. Nazarian and J. Diehl, ed., ASCE, 2000, pp. 109-125.
22. 선창국, 양대성, 정충기, "서울 평야 지역에 대한 부지 고유의 지진 증폭 특성 평가", 한국지진공학회 논문집, Vol. 9, No. 4, 2005, pp. 29-42.
23. Kim, D. S., Bang, E. S. and Kim, W. C., "Evaluation of Various Downhole Data Reduction Methods for Obtaining Reliable VS Profiles," *Geotechnical Testing Journal*, Vol. 27, 2004, pp. 334-341.
24. ANSS Technical Integration Committee, *Technical Guideline for the Implementation of an Advanced National Seismic System*, <http://www.anss.org/ticplan>, 2001.
25. Nakano, M., Fukuwa, N. and Tobita, J., "Regional Variation of Ground Motion in Nobi Plain, Japan, Based on Seismic Records, Microtremor and Geological Data," *Proceedings of the International Conference on Geotechnical and Geological Engineering; GeoEng 2000*, CD-ROM, Melbourne, Australia, 2000, Paper No. 0645.
26. Ibe, Y., Iizuka, S. and Ebine, T., "The Study for the Evaluation Methods for the Design Basis Earthquake Ground Motions," NUPEC 学術論文 학술논문, <http://www.nupec.or.jp>, 1999.
27. Kim, B. H., "Investigation for Shear Wave Velocity and Degree of Weathering of Decomposed Granite Soil in Hongsung," M.Sc. Thesis, Seoul National University, 2001.