

인홀 탄성과 시험을 이용한 암반의 동적 강성 평가

선창국^{*1)} · 강병수²⁾ · 김영수³⁾ · 목영진⁴⁾

¹⁾한국지질자원연구원 지진연구센터

²⁾GS건설 토목사업본부

³⁾한국종합기술개발공사 감리사업본부

⁴⁾경희대학교 토목건축대학

Evaluation of Dynamic Rock Stiffness Using In-hole Seismic Technique

Chang-Guk Sun^{*1)} · Byung-Soo Kang²⁾ · Young-Su Kim³⁾ · Young-Jin Mok⁴⁾

¹⁾Korea Earthquake Research Center, Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources

²⁾Civil Business Division, GS Engineering and Construction Corporation

³⁾Construction Supervision Division, Korea Engineering Consultants Corporation

⁴⁾College of Architecture and Civil Engineering, Kyung Hee University

지반의 동적 강성은 내진 설계나 내진 성능 평가 외에도 구조물의 거동 평가에 필요한 중요한 지반 정수이다. 지난 수십년 동안 이 물성을 효율적이고 정밀하게 측정하기 위해, 여러 가지 검측공 탄성과 시험 기법들이 개발 및 적용되어 왔다. 게다가, 최근 지하 공간의 개발 및 구조물의 대형화로 인해 암반 강성의 평가를 위한 신뢰성 있는 지반 조사 기법의 개발이 더욱 절실히 요구되고 있다. 본 논문에서는 "인홀 탄성과 시험"으로 명명된 새로운 기법을 적용하여 구조물 기초 암반과 터널 막장 암반의 동적 강성을 측정하였다. 국내 여러 지역의 암반에서 수행한 인홀 시험 결과를 다른 탄성파 시험 결과와 비교함으로써 인홀 시험 기법의 신뢰도를 평가하고, 이 기법의 효율성과 정밀성을 입증하였다.

주요어 : 동적 암반 강성, 인홀 탄성과 시험, 전단파 속도, 공내 탄성과 시험

Dynamic stiffness of subsurface materials is one of the most 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 borehole seismic testing techniques have been, thus, developed and used during past several decades. Moreover, recent rush of underground-space projects and increasing size of structures put more stress on reliable site investigation techniques in estimating stiffness of rock mass. In this paper, a new technique called "in-hole seismic test" has been implemented to measure the dynamic stiffness of rock masses at subsurface foundations and tunnel-faces. The reliance of in-hole seismic test was evaluated by comparing the testing results at several rock sites with those of other borehole techniques and the technique turns out to be an efficient and accurate in-situ testing technique.

Key words : dynamic rock stiffness, in-hole seismic test, shear wave velocity, borehole seismic test

* Corresponding author: pungsun@snu.ac.kr

서 론

제한된 국토 여건 속에서 최근 사회적 토지 수요가 급증함에 따라 공간 활용성의 극대화를 위한 다양한 기술이 개발되고 있으며, 그 중에서도 터널과 같은 지하 공간 개발이나 대형 구조물의 기초 시공은 지질 및 지반공학 관련 기술로서 대표될 수 있다. 이로 인해 지질 및 지반공학적 측면에서 지표면 부근 토사뿐만 아니라 기반암에 대한 역학적 특성 평가에 대한 중요성이 강조되고 있다. 특히, 최근 해외의 강진 발생으로 인한 구조물 및 인명 피해 사례와 더불어 한반도 주변의 강진 발생으로 인해 국내의 지역적 지진 안전성에 대한 다각적 경각심이 대두되고 토목 구조물의 내진 설계 및 내진 성능 평가에 대한 관심이 증가하고 있는 가운데, 인간이 직접 접하고 있는 토사와 더불어 진원을 포괄하는 암반에 대한 지진공학적 특성 규명 연구가 다각적으로 진행되고 있다 (Sun, 2004). 즉, 지반의 동적 특성을 정확히 평가함으로써 부지의 지진 전파 및 증폭 특성을 평가하고 지하 및 지상 구조물의 지진 응답 특성을 예측할 수 있으며, 이를 위해 지난 수십년 동안 다양한 지반 조사 기법들이 개발 및 적용되어 왔다 (Mok 등, 2003). 일반적으로 지반의 동적 특성은 전단파 속도와 같은 강성으로 대표되며, 동적 강성을 측정하기 위한 지반 조사 기법 역시 이를 신뢰성 높게 얻기 위한 현장 탄성과 시험에 주로 집중되어 왔다.

본 연구에서는 지하 공간 개발의 활성화 및 구조물의 대형화에 따른 암반 특성의 합리적 평가가 주요 지반공학 분야로 대두되고 있는 여건 하에서 터널 및 구조물 기초 암반과 같은 지하 암반의 동적 강성을 효율적이고 신뢰성 높게 평가하기 위하여 다양한 현장 탄성과 시험 방법중 암반 강성 측정에 적합한 인홀 시험 기법을 도입하고 시험 장비를 개발하였다. 또한, 국내 여러 부지에서 실제 현장에 대한 적용 시험을 수행하고 인홀 시험의 검증 목적을 수행된 다른 종류의 현장 탄성과 시험과 결과를 비교 및 분석하였다.

현장 탄성과 시험

현장 탄성과 시험은 발진자(source)와 수신기(receiver)를 이용하여 지반의 전파 특성을 평가하는 기법으로서, 검측공의 유무에 따라 공내 탄성과 시험(borehole seismic tests; 관입 탄성과 시험 포함)과 비파괴 탄성과 시험으로 구분된다. 공내 탄성과 시험의 경우 다시 발진자와 수신기의 기하학적 구성에 따라

크로스홀(cross-hole), 다운홀(down-hole), 업홀(up-hole), 인홀(in-hole) 시험 등으로 분류된다. 지반 매질을 통해 전파 되는 체적파(body wave)와 표면파(surface wave)중 공내 탄성과 시험으로부터 획득하는 주된 파의 종류는 압축파(compressional wave)와 전단파(shear wave)로 구분되는 체적파이다. 지반 밀도나 포아송 비(Poisson's ratio)와의 관계를 토대로 압축파 속도(compressional wave velocity, V_p)는 지반의 구속계수(constrained modulus)나 탄성계수(Young's modulus)와 같은 압축 강성으로 표현될 수 있으며, 전단파 속도(shear wave velocity, V_s)로는 전단계수(shear modulus)를 결정할 수 있다. 이러한 압축파 속도와 전단파 속도는 지반의 동적 특성을 대표하는 중요한 지반 정수로서, 두 속도 간의 관계를 이용하여 포아송 비도 결정할 수 있다. 일반적으로 지진 시 지반을 매질로 하여 전파되는 여러 탄성과 성분 중 암반이나 토사와 같은 고체 매질을 통해 전파하는 전단파에 의한 지반 및 구조물의 피해가 주류를 이루므로, 지반 및 지질공학적 관점에서는 주로 현장 탄성과 시험 기법은 우선적으로 지반 매질의 전단파 속도(V_s)를 결정하기 위해 활용된다. 본 연구에서는 기존 탄성과 시험 기법중 주요 공내 탄성과 시험의 장비 및 방법을 비교하고, 터널 및 기초 암반의 전단파 속도 및 그에 따른 동적 강성을 효율적으로 평가할 수 있는 인홀 시험을 위한 장비 개발 및 관련 국내 적용 결과를 분석하였다.

전단파 속도 및 전단 계수 결정

지반의 대표적 동적 특성인 전단파 속도(V_s)는 원지반 상태의 강성(stiffness)을 결정하기 위한 기본 변수로서 밀도와 함께 이용된다. 특히, 지반의 전단 강성인 전단계수(shear modulus, G)의 결정 시, 지반 밀도는 정량적 값의 변화량과 변수의 관계적 영향성이 전단파 속도에 비해 상대적으로 작으므로, 지반의 강성을 대표적으로 전단파 속도를 이용하여 표현한다. 전단파 속도는 지반의 지진시 거동 뿐만 아니라 공용 하중 상태의 지반 거동의 평가에도 매우 중요한 변수로서, 동적 재하나 초기 정적 재하 상태인 미소 전단 변형률($<10^{-3}$)에서 지반의 변형 특성을 나타낸다. 즉, 전단파 속도를 통해 변형률에 따라 비선형적으로 변화하는 지반의 전단계수(G) 중에서도 미소 변형률 (최대)전단계수((maximum) shear modulus at small strain, $G_0 (=G_{max})$)를 결정할 수 있다. 지반의 밀도(density, ρ)와 전단파 속도를 이용하여 식 (1)에서 제시한 바와 같이 미소 변형률 전단 계수,

G_0 를 산정할 수 있다. 또한, 정해진 발진자와 감진기 간의 거리(1)에 대한 전단파의 통과 시간(t_s)을 현장에서 측정하게 되면 식 (2)와 같이 전단파 속도를 얻을 수 있다.

$$G_0 = \rho V_s^2 \quad (1)$$

$$V_s = \frac{l}{t_s} \quad (2)$$

크로스홀 탄성과 시험

크로스홀 탄성과 시험(cross-hole seismic test)은 지반공학 분야에 소개된 이래로 지난 수십년 동안 지반의 체적파(body waves)인 압축파 속도(compression wave velocity, V_p)와 전단파 속도(shear wave velocity, V_s)의 깊이 분포를 결정하기 위해 매우 효율적으로 이용되어 왔다(Mok, 1987). 크로스홀 시험은 적어도 두 개 이상의 시험공이 필요하며, 한 개의 발진공에서 가진된 전단파나 압축파의 신호를 그 외의 수신공에서 감진하여 각 공간 거리를 전파하는데 걸린 시간

을 토대로 체적파 속도를 결정하게 된다. Fig. 1은 크로스홀 탄성과 시험의 개요도로서, 다양한 크로스홀 발진자중 본 연구진에서 개발하여 활용해온 발진 장비를 함께 도시하였다. 기계식 발진자(mechanical source)는 연직방향 전단파(SV-wave)를, 그리고 압전 소자식 발진자(piezoelectric source)와 스프링식 발진자(spring-loaded source)는 횡방향 전단파(SH-wave)와 함께 압축파를 발현할 수 있다. 각 발진자는 동일 심도에서 상하 또는 좌우 방향의 양방향 가진이 가능하므로 위상이 180° 다른 극성(polarity)을 띠는 한쌍의 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 있고 양질의 탄성과 신호를 획득할 수 있으므로, 그 신뢰도가 매우 높고 분석이 간편한 반면, 경제적으로는 두 개 이상의 시험공이 소요되므로 다소 불리한 현장 탄성과 시험 기법이다. 본 연구에서는 일부 부지에서 크로스홀 시험을 수행하였으며, 현장에서 획득한 전단파 신호의 초기 도달 시점을 판독하고 시험 심도별 전파 경로를 고려하여 전단파 속도를 결정하였다.

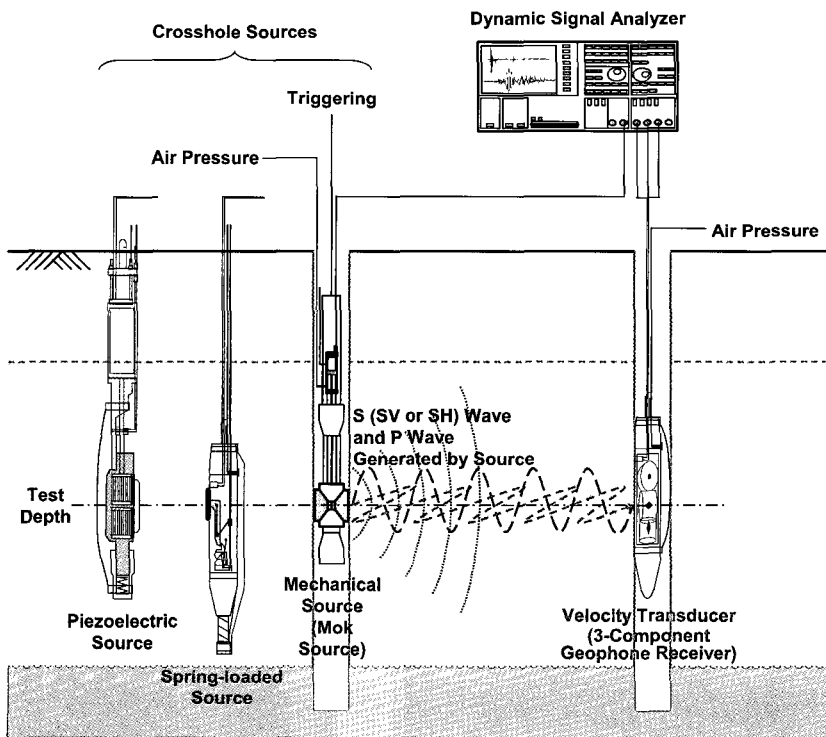


Fig. 1. Schematic diagram of cross-hole seismic test.

다운홀 탄성과 시험

다운홀 탄성과 시험(down-hole seismic test)은 지반의 전단파 속도와 압축파 속도 측정에 최근 가장 보편적으로 적용되는 기법중 하나로서, 지표면에 설치된 발진용 가진판의 양쪽 옆면을 타격하여 극성을 띠는 한쌍의 전단파를 발생시키거나 가진판을 연직 방향으로 타격하여 압축파를 발생시켜서 지중에 설치된 시험공의 감진기로부터 탄성파를 획득하게 된다. 감진기에서 측정되는 전단파는 횡방향 성분(SH-wave)이며, 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. 일반적으로 지반공학적 관점에서는 지반의 전단파 속도 결정을 위해 현장 탄성과 시험이 수행되고 있고, 다운홀 시험 역시 이에 주된 관점을 두고 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 교차법, 극간법, 상호상관법 등의 신호 도달 시점 및 시차를 우선 결정해야 하며, 이를 토대로 직접법, 간접법, 수정간접법, 그리고 굴절전파경로법과 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. 본 연구의 일부 대상 부지에서도 다운홀 시험을 실시하여 교차법으로 전단파의 초기 도달 시차를 심도별로 판단하고, 각 시험 심도간 도달 시차를 토대로 굴절전파경로법에 따라 깊이별 전단파 속도 분포를 결정하였다.

업홀 탄성과 시험

업홀 탄성과 시험은 다운홀 시험과는 반대의 전파 경로를 형성하여 지반의 전단파 속도를 측정하기 위해 활용되는 현장 탄성과 시험 기법이다. 즉, 업홀 시

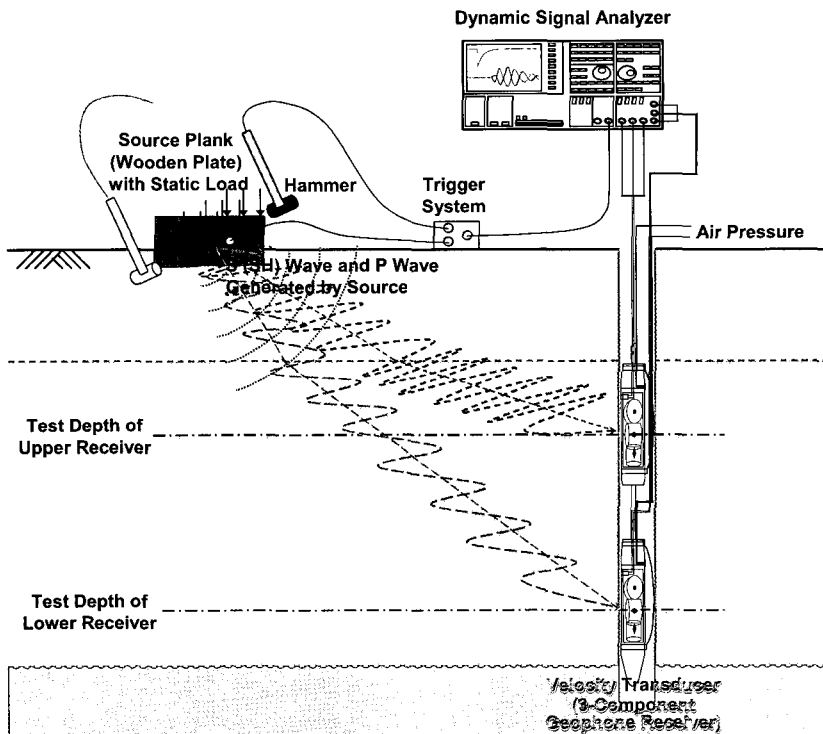


Fig. 2. Schematic diagram of down-hole seismic test.

험에서는 지중의 발진자에서 발생된 전단파를 지표면에 설치된 한 개 이상의 감진기에서 획득하여 깊이별 전단파 속도 분포를 결정하게 된다. 최근 국내에서는 업홀 시험의 합리적 방안으로서 표준관입시험(Standard Penetration Test, SPT)의 해머 에너지를 발진자로 활용하여 샘플러(split-spoon sampler)에서 발현되는 연직방향 전단파(SV-wave)를 이용하는 기법이 제시된 바 있으며(김동수 등, 2003), 발파를 통한 발진으로부터 전단파 및 압축파 신호를 획득하기도 한다. Fig. 3에는 표준관입시험 수행시 병행될 수 있는 업홀 시험의 개념을 도시하였다. 일반적으로 업홀 시험에서는 발진자의 신호 발현 시점을 확인하기 어려운 경우가 대부분이며, 이에 따라 발진자 신호는 제외하고 동일 감진기에 대해 시험 깊이별 도달 시간 차이를 이용하거나 두 개 이상의 감진기간 동일 시험 심도에 대한 도달 시차를 이용하여 깊이별 전단파 속도 추상을 도출한다. 기본적으로 신호 분석과 전단파 속도 분포 산출 방법은 다운홀 분석 기법과 유사하지만, 발진자의 특성상 수신된 전단파의 극성을 이용할 수는 없다. 업홀 시험의 관건은 적용성이 확실한 발진자의 활용 여부이므로 이와 관련된 장비 개발 및 활용 연구를 통해 보다 신뢰성 높은 시험 수행이 가능할 것으로

판단된다. 일부 본 연구 대상 부지에서도 SPT의 샘플러 및 해머 에너지를 이용한 업홀 시험을 실시하였다. 따라서 SPT 진행 과정과 동일하게 굴진을 병행하며 업홀 시험을 수행하였으며, 깊이별 전단파 속도 추상은 시추 굴진 중 SPT 종료 심도에서 획득한 전단파 신호의 초기 도달 시점을 판독하고 각 시험 심도 및 수신 기간 도달 시차를 토대로 다운홀 시험 분석 기법과 동일한 굴절전과경로법을 적용하여 도출하였다.

인홀 탄성파 시험

인홀 탄성파 시험(in-hole seismic test)은 실무적 용이성을 확보함과 더불어 다운홀 시험의 적용 한계성 및 크로스홀 시험의 경제적 문제점을 보완하기 위해 개발된 현장 탄성파 기법이다(Mok 등, 2003). Fig. 4는 인홀 시험의 개요도로서, 단일 시험공 내에 발진자와 수신기를 설치하고 공벽에 대한 타격을 통해 공벽의 길이 방향을 따라 전파되는 연직방향 전단파(SV-wave)를 발생시키게 된다. 공벽 주변을 통과한 전단파는 감진기 내의 속도계에서 수신되며, 경우에 따라 두 개 이상의 감진기 설치 적용함으로써 지반을 대상으로 보다 종합적이고 신뢰성 높은 전단파 속도 결과를 결정할 수 있다. 인홀 탄

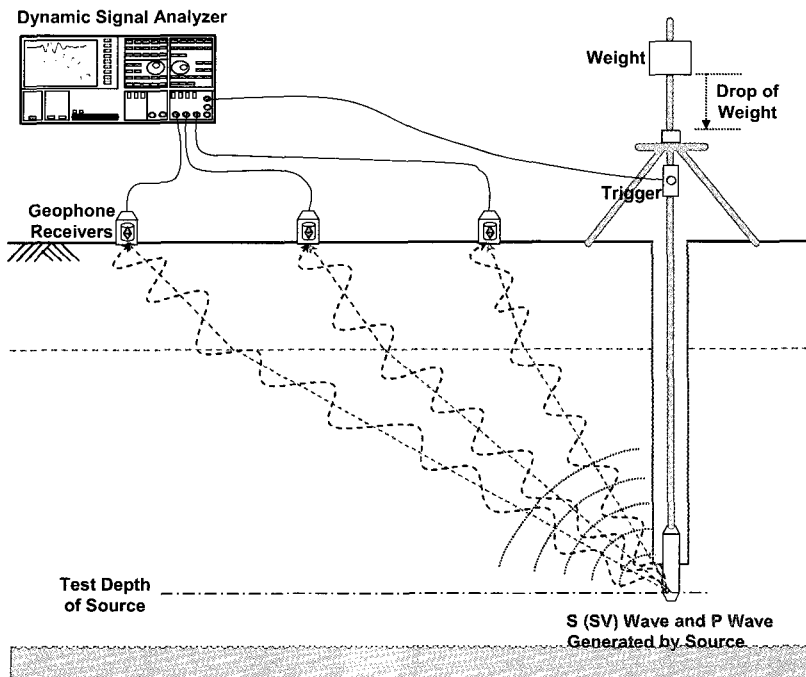


Fig. 3. Schematic diagram of up-hole seismic test.

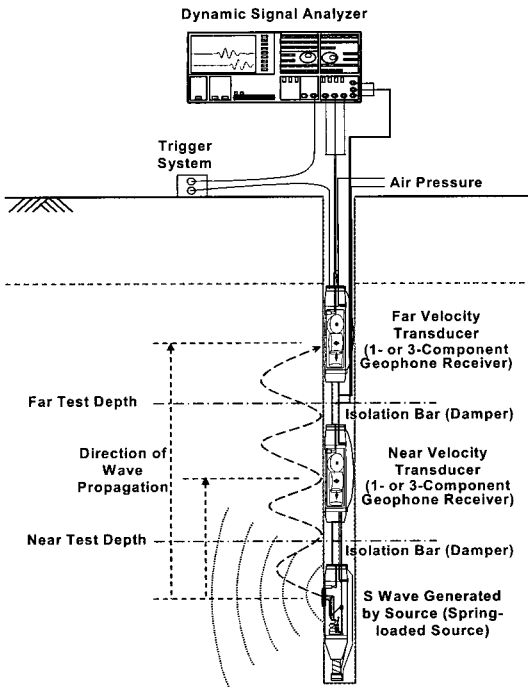


Fig. 4. Schematic diagram of in-hole seismic test.

성과 시험의 개념은 기본적으로 Fig 5에 묘사된 기존 부유식 PS 검층(suspension PS logging)과 유사하다.

부유식 PS 검층은 발진자와 감진기들이 일체화되어 있는 프루브(probe)를 유체로 채워진 시험공에 띄우고 압전소자 발진자(piezoelectric electronic source)의 공내 유체에 대한 압력파(pressure wave) 발생을 통해 공벽에 전단파나 압축파를 가진하게 되며, 발진자의 상부에 위치한 감진기에서는 공벽을 따라 전달된 탄성파가 공내에서 압력파로 전환되어 이를 수신하게 된다(GEOVision, 2002). 부유식 PS 검층은 최초 개발 적용된 일본 뿐만 아니라 최근 미국에서도 활발하게 이용되고 있으며(Swift 등, 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 PS 검층과는 달리 인홀 시험에서는 발진자와 감진기를 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 감진기에서 획득할 수 있다. 또한, 인홀 시험은 간단한 장비를 이용하여 단일 시험공에 대해 지반 강성을 측정하므로 경제적인 뿐만 아니라, 전파 경로인 발진자와 감진기 또는 감진기 간 거리에 대한 전단파 도달 시점 결정만으로 지반의 전단파 속도를 산출할 수 있으므로 분석 방법이 매우 간편하다.

인홀 시험 장비의 개발

인홀 시험 장비는 Fig 4에서 확인할 수 있는 바와 같이, 발진자, 감진기 및 연결바(isolation bar)로 구성되는 본체부, 이를 지반에 위치시키기 위한 방향 조절 로드(orientation rod), 시험공내에서 본체부를 지반에 밀착시키기 위해 이용되는 압축 공기 공급 장치(air compressor), 그리고 오실로스코프(oscilloscope)를 기본으로 하는 자료 획득 장치(data acquisition system) 및 전원으로 구성된다. 전체적으로 구성 부속 장비는 다른 현장 탄성파 시험과 유사하거나 오히려 간단하다. 특히, 본체부의 경우 크로스홀 및 다운홀 시험에서도 이용할 수 있는 감진기를 적용하였으며, 발진자는 크로스홀 시

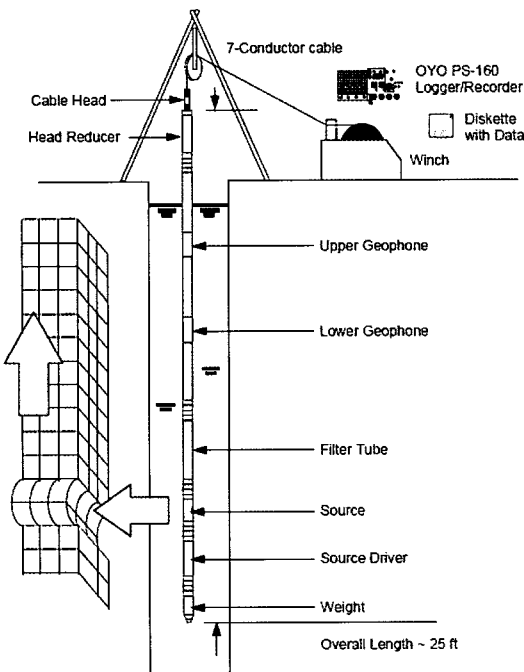


Fig. 5. Schematic diagram of suspension PS logging (after GEOVision, 2002).

험에서도 활용할 수 있다.

본 연구를 위해 개발된 인홀 시험용 발진자는 장비 내에 스프링이 연결된 공이를 장착하여 타격하는 개념을 고안해 개발한 것으로서, Fig. 6에 제시한 단면의 발진자는 초기에 개발된 스프링식 발진자이다. 초기 개발 발진자는 공이와 장전 스프링에 연결된 철선(wire)을 지표면에서 인력으로 당겨서 시험을 수행하는 장비이며, 철선의 피로 망실, 철선의 꼬임을 방지하기 위한 충분한 공간 확보 등과 같은 단점이 있다. 이를 보완하기 위하여 장비 내에 스프링-감속모터를 설치하여 Fig. 7과 같은 개선된 형태의 스프링-감속모터식 발진자들을 개발하였다. 발진자 내부의 개략 구성은 Fig. 7(a)와 같으며, 실질적인 세부 부품 구성 및 배치는 Fig. 7(b)의 하부 삽입 사진과 같다. 스프링-감속모터 발진자는 NX-시험공용(Fig. 7(b); 발진자의 외경 60 mm) 및 BX-시험공용(Fig.

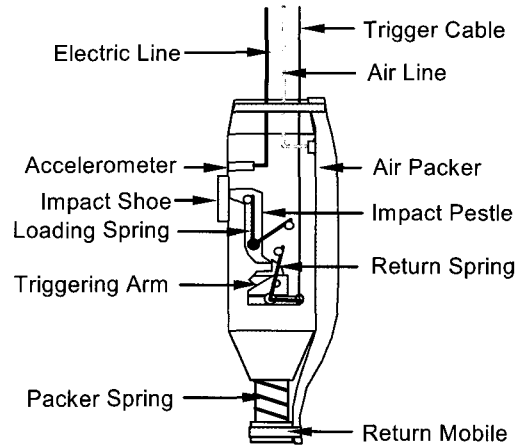
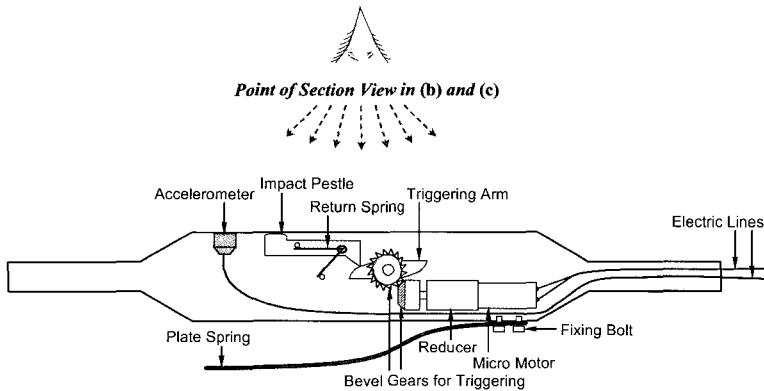
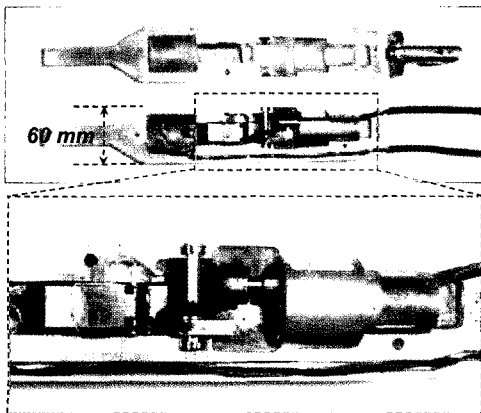


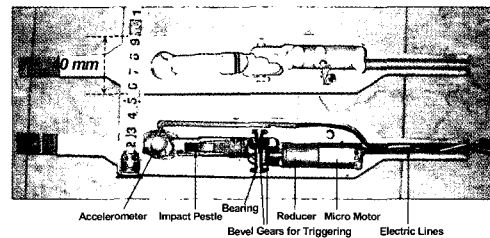
Fig. 6. Schematic diagram of spring-loaded manual type source.



(a) Schematic diagram of micro geared type source

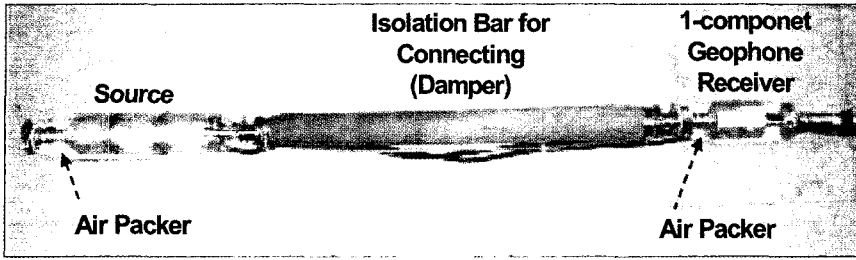


(b) Section view of source for NX-borehole

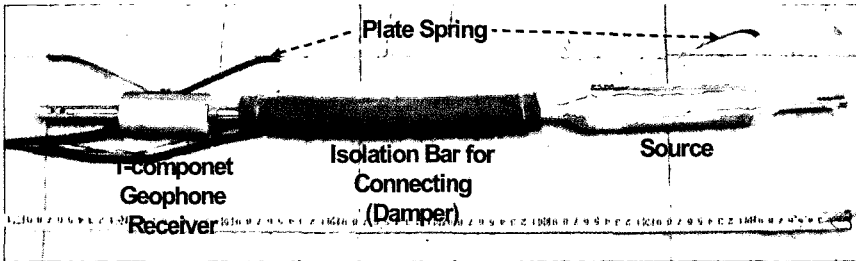


(c) Section view of source for BX-borehole

Fig. 7. Schematic and section view of micro geared motor type source.



(a) Probe for NX-borehole



(b) Probe for BX-borehole

Fig. 8. Probe of micro geared motor type source-bar-receiver.

7(c); 발진자의 외경 40 mm)에 관계없이 동일 설계 개념을 적용하였고, 단지 시험공 형성을 위해 실시하는 시추공의 직경 조건(직경 76 mm의 NX 및 직경 54 mm의 BX)에 따라 보다 작은 직경의 시험공에서도 인홀 시험이 가능하도록 BX-시험공용 발진자를 추가 제작하였다. 또한, 기존 스프링식 발진자 역시 NX 크기 시추를 통한 시험공 형성 조건에 대해서만 인홀 시험 적용이 가능하다. 특히, BX-시험공용 스프링-감속모터식 발진자는 최소 45 mm 정도의 시험공에서도 현장 탄성과 시험이 가능하므로, 매우 광범위한 분야에 대해 활용성이 우수하다. 스프링-감속모터식 발진자와 감진기를 연결바로 체결하여 인홀 탄성과 시험이 가능하도록 구성한 본체는 Fig. 8과 같다. 연결바는 발진자의 가진시 진동이 감진기에 도달하지 않도록 차단하거나 감진기에서 획득한 지반의 전단파 초동을 용이하게 확인할 수 있는 재질이어야 한다. 따라서 본 연구에서는 재료적 고찰과 다양한 연결바의 예비 적용을 토대로 지반의 강성보다 충분히 작은 강성을 가질 뿐만 아니라 발진자와 감진기의 간격 확보가 가능하고 시험시 손상 우려가 적으면서 손쉽게 확보 가능한 진공호스를 댐퍼(damper) 기능의 연결바로 채택하였다. 또한, BX-시험공용 스프링-감속모터식 발진자와 감진기에는 공벽과의 밀착을 위해 일반적으로 적용되어온 압축 공기 주머니(air packer) 대신 신속한

인홀 시험이 가능하도록 Fig. 8(b)에서 확인할 수 있는 바와 같이 판스프링(plate spring)을 도입 적용하였다.

암반에 대한 인홀 시험

개발된 인홀 탄성과 시험 장비를 이용하여 국내 주요 부지들을 대상으로 암반 지반의 동적 강성인 전단파 속도를 측정하였다. 또한, 일부 부지에서는 암반 지반 상부의 토사 지반에 대한 전단파 속도도 인홀 시험을 수행하여 평가하였고, 인홀 시험 결과의 비교를 위해 크로스홀, 다운홀 및 업홀 탄성과 시험도 부분적으로 병행하였다.

시험 대상 부지 현황

본 연구에서는 주요 지반 구조물들을 대상으로 인홀 시험을 포함한 다양한 현장 탄성과 시험을 수행하여 암반의 전단파 속도를 측정함으로써 동적 강성을 평가하였다. 대상 지역은 Fig. 9에 제시한 바와 같이 총 5개 지역인 인천, 평창, 아산, 보은, 그리고 임실이며, 강성 평가 대상 암반이 지지하거나 포함하는 지반 구조물은 대상 지역의 순서대로 각각 안벽 부두, 사력 댐, 방조제, 터널,

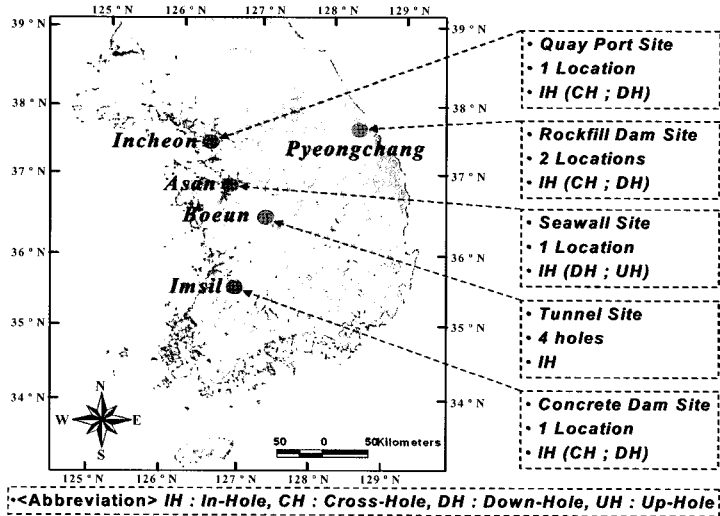


Fig. 9. Geographic locations and seismic testing contents of target sites.

그리고 콘크리트 댐이다. 이 중 댐과 방조제 부지에서는 스프링식 발전자를 이용하여 인홀 시험을 실시하였고, 안벽 부두와 터널 부지에서는 각각 NX-시험공용과 BX-시험공용 발전자를 활용하였다. 보은의 터널 부지를 제외한 4 곳에서는 시추 조사가 선행된 인홀 시험 외에도 Fig. 9의 우측 삽입 설명에서 확인할 수 있듯이 부지에 따라 크로스홀, 다운홀 및 업홀과 같은 시험도 병행 실시하였을 뿐만 아니라 암반 상부의 토사에 대한 전단파 속도도 종합 평가하였다. 평창의 사력댐 부지에서는 기초부와 우안부의 두 지점에서 현장 탄성과 시험을 수행하였으며, 보은의 터널 부지의 경우 두 막장에서 총 4개의 발파용 장약공을 대상으로 인홀 시험을 실시하였다.

각 부지별 지질 분포 현황을 토대로 기반암의 지질 특성을 확인한 결과, 인천 안벽 부두는 화강암, 평창 사력댐은 석회암, 아산 방조제는 화강암, 보은 터널은 천매암, 그리고 임실 콘크리트댐은 유문암으로 파악되었고, 시추 조사 및 코어 확인 과정에서도 동일 기반암이 확인되었다. Fig. 10은 보은의 터널을 제외한 각 부지(IC, PCF, PCR, AS, IS)의 시추 조사 결과로부터 확인된 지층 분포를 개략적으로 도시한 것으로서, 암반에 대한 TCR(Total Core Recovery) 및 RQD(Rock Quality Designation)도 제시하였다. 시추 조사 결과에 따르면, 인천 부지(IC)는 상부 7.0m 두께의 매립토층 하부에 심도 19.0m까지 점토질 실트의 해상 퇴적토층이 발달해 있고 그 아래로는 심도 38.0m까지의 풍화산류토층과 심도 40.2m까지의 풍화암층이 연암 상부에 분포되어

있다. 평창의 사력댐 부지는 기초부와 우안부의 두 부지에 대해 시추 조사를 수행하였으며, 기초부(PCF)에서는 두께 3.4m의 암괴 및 토사 매립층 하부에 0.5m 정도 두께의 모래 및 자갈 퇴적층이 분포하였고 그 아래에는 심도 6.0m까지 보통암의 기반암이 경암 질의 암반 상부에 분포하고 있다. 또한, 우안부(PCR)에는 1.6m 심도까지 매립층이 분포하고 그 하부에는 비교적 신선한 경암이 발달되어 있다. 아산 방조제(AS)의 경우, 심도 16.5m의 실트 및 세립 모래질 점토의 퇴적층 상부에 방조제 조성을 위한 모래질 매립토층이 분포하고, 풍화산류토층이 17.1m부터 20.0m까지 그리고 그 아래에 심도 27.0m까지 풍화암이 연암 상부에 발달되어 있다. 임실(IS)의 콘크리트댐 부지는 5.2m 심도의 경암 상부에 전석 매립토층이 분포하고 있다. 보은의 터널에서는 시험 수행 부지에서 직접 시추 조사를 실시하지는 않았으나, 터널 막장의 암반 상태와 장약공으로부터 회수된 암석편을 확인해 본 결과, 절리가 상당히 발달된 보통암 정도였고 암석의 경도는 비교적 낮게 파악되었다.

시험 대상 부지에서의 인홀 시험 수행

대상 부지에서의 시추 조사가 완료된 후 현장 탄성과 시험을 위해 풍화암 일부 심도까지 PVC 케이싱을 설치하고 주변 지반을 모래와 시멘트풀(cement paste)로 충전하여 시험공을 형성하였다. 자립 가능한 풍화암 및 그

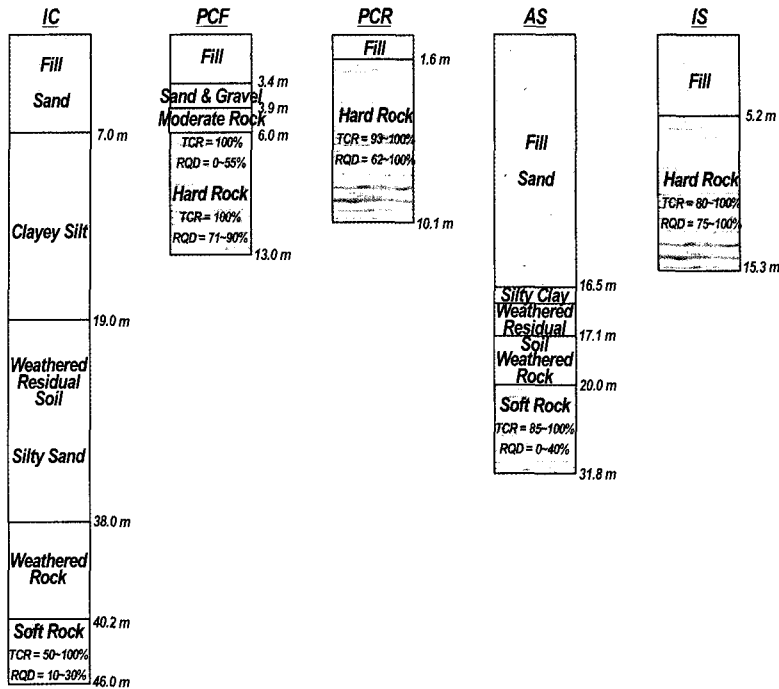


Fig. 10. Borehole logs at testing sites (with exception of tunnel site at Boeun).

하부 연암 이상의 경질 암반은 나공 상태를 유지하여 탄성파 시험의 수행 준비를 하였다. 다만, 아산 방조제 부지에서는 시추중 표준관입시험(SPT)의 샘플러를 이용한 업홀 탄성파 시험을 시험공 형성 이전에 미리 실시하였다. 시추 대상 부지에서의 인홀 탄성파 시험의 발진자와 감진기 간격은 0.5 m 또는 1.0 m로 유지하였고 시험은 모든 부지에서 0.5 m 깊이 간격으로 실시하였다. 인천 부지(IC)의 인홀 탄성파 시험 수행 심도 분포는 나공 상태의 풍화암과 연암 지반을 대상으로 한 39.0 m부터 45.0 m까지 이다. 또한, 평창 사력댐의 기초부(PCF)의 경우 4.0~12.0 m의 심도에서 그리고 우안부(PCR)의 경우 2.0~9.0 m의 심도에서 인홀 시험을 실시하였다. 아산의 방조제 부지(AS)에서는 연암층인 24.0~29.0 m까지 인홀 시험을 수행하였고, 임실 콘크리트댐 부지에서는 경암 지반을 대상으로 7.0~14.0 m의 범위에서 인홀 탄성파 시험을 실시하여 암반의 전단파와 속도를 평가하였다. 시추를 통한 시험공 대신 장약공을 이용한 보은의 터널 부지에서는 총 4 곳의 횡방향 발파 장약공(BE01, BE02, BE03, BE04)에 대해 막장부터 횡방향으로 약 3.0 m부터 4.0 m 정도의 깊이까지 인홀 시험을 수행하였다.

Fig. 11은 단일 시험 심도에서 획득한 대표적인 발진

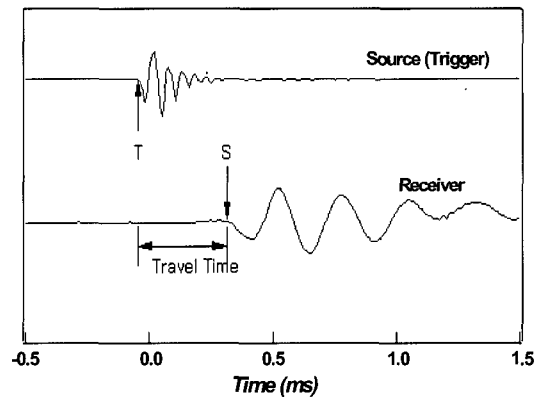
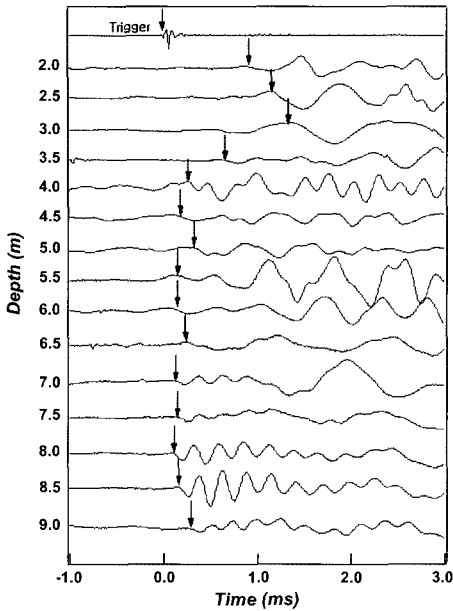
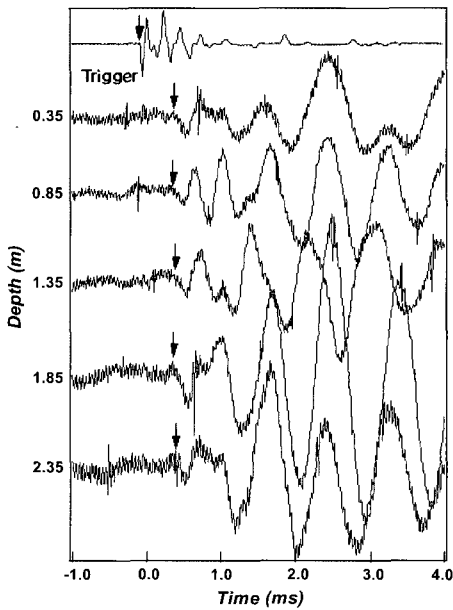


Fig. 11. Typical source and receiver signal of in-hole seismic test.

(Trigger) 신호와 수신(Receiver) 신호를 예시한 것으로서, 발진 시점(T)과 전단파의 초기 도달 시점(S)의 시간차를 관측하여 전파 시간(Travel Time) 결정할 수 있고 발진자와 감진기의 거리를 고려하여 식 (2)에 따라 간편하게 전단파 속도(V_s)를 산출할 수 있다. 이와 같은 인홀 시험 심도의 발진 및 수신 신호를 종합하여 시험 구간의



(a) Right abutment of rockfill dam at Pyeongchang (PCR)



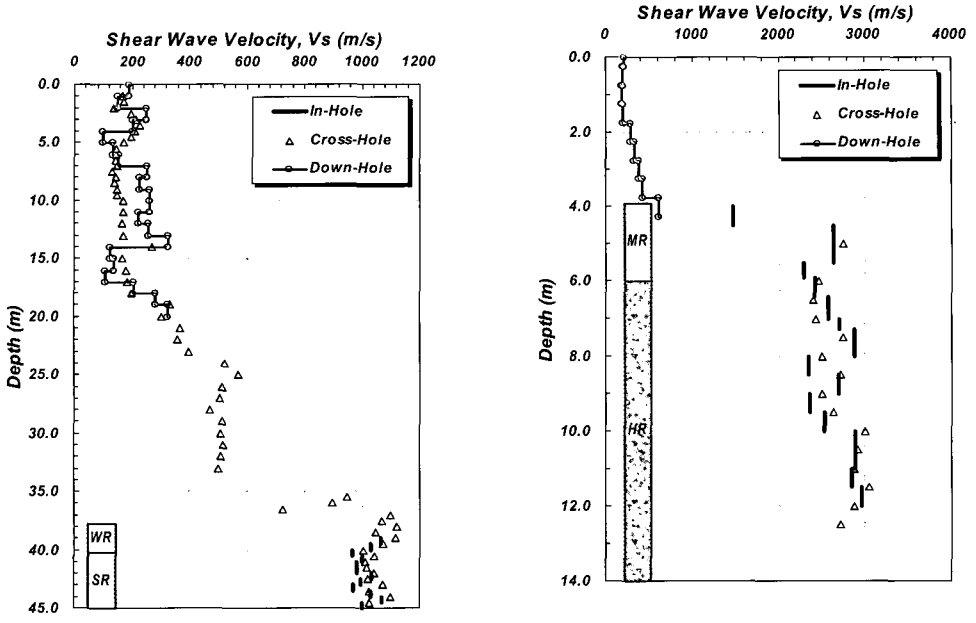
(b) 4th horizontal drilling hole of tunnel-face at Boeun (BE04)

Fig. 12. Shear wave signals with depth obtained from in-hole seismic tests at representative sites.

깊이별 전단파 신호 주상을 얻을 수 있다. Fig. 12는 본 연구의 대상 부지 중 대표적인 부지의 깊이별 획득 신호 분포를 도시한 것이며, Fig. 12(a)는 평창 사력댐의 우안부(PCR)에서 인홀 시험을 통해 획득한 깊이별 신호 분포이고 Fig. 12(b)는 보은 터널에서의 네 번째 시험공(BE04)의 횡방향 깊이별 획득 신호 분포이다. 각 신호 분포에는 예시적인 발진 신호와 더불어 전단파의 초기 도달 시점을 지시하여 제시하였다.

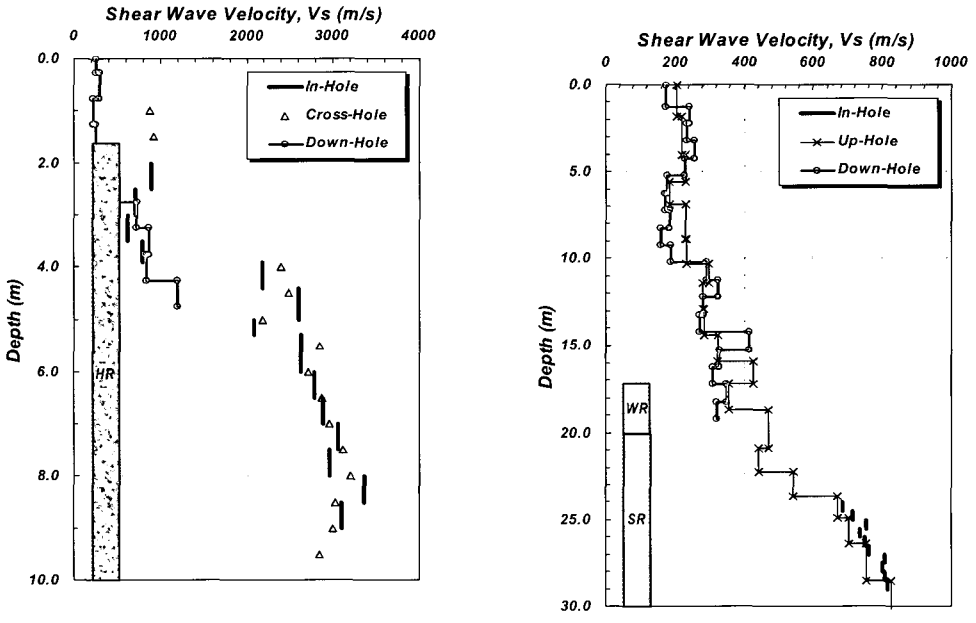
인홀 시험을 이용한 암반의 전단파 속도 결정

인홀 시험은 앞서 언급한 바와 같이 크로스홀 시험에 비해 경제적이고 시험 장비 및 조건이 간편할 뿐만 아니라 현장에서의 신호 획득과 동시 분석이 가능할 정도로 매우 효율적인 시험 기법이다. 즉, 현장에서 획득한 깊이별 신호 분포로부터 전단파의 초기 도달 시점을 바로 확인하고 깊이별 전단파 속도 주상을 산출하여 제시할 수 있다. Fig. 13은 본 연구 대상 부지에서 수행한 인홀 시험 및 다양한 현장 탄성과 시험으로부터 결정된 지반의 깊이별 전단파 속도 분포이다. 각 부지별 전단파 속도 분포에는 토사 이외의 암반의 전단파 속도를 차별적으로 파악할 수 있도록 풍화암(WR), 연암(SR), 보통암(MR), 그리고 경암(HR)의 심도 분포를 삽입 도시하였다. 일반적으로 지반공학적 활용 목적으로 수행되고 있는 여러 탄성과 시험 기법 중 크로스홀 시험의 높은 신뢰성은 보편적으로 인정되어 왔으며(Sun, 2004), 이에 따라 본 연구에서도 개발 적용된 인홀 시험의 검증을 위하여 인천 안벽 부두(IC 부지; Fig. 13(a)), 평창 사력댐 기초부(PCF 부지; Fig. 13(b)), 평창 사력댐 우안부(PCR 부지; Fig. 13(c)), 그리고 임실 콘크리트댐 기초부(IS 부지; Fig. 13(e))에서는 크로스홀 시험을 병행하였다. 크로스홀 시험 수행 부지의 깊이별 전단파 속도 분포에서 확인할 수 있는 바와 같이, 인홀 시험으로부터 결정된 암반의 전단파 속도는 크로스홀 시험의 전단파 속도와 거의 일치하고 있다. 또한, 아산 방조제(AS 부지; Fig. 13(d))에서는 인홀 시험을 병행하였으며, 인홀 시험 역시 인홀 시험의 전단파 속도와 매우 유사한 암반의 전단파 속도를 나타냈다. 따라서 비교적 간편하고 경제적인 인홀 시험을 활용하여 지반 구조물의 기초 암반에 대한 동적 강성인 전단파 속도를 효율적이고 신뢰성 높게 평가할 수 있을 것으로 판단된다. 그러나 토사부에서는 시험공에 케이싱을 설치하므로 암반 나공 상태와는 달리 케이싱 신호로부터 토사의 전단파를 구분하여 판독하기가 어렵다. 이



(a) Quay wall for port at Incheon (IC)

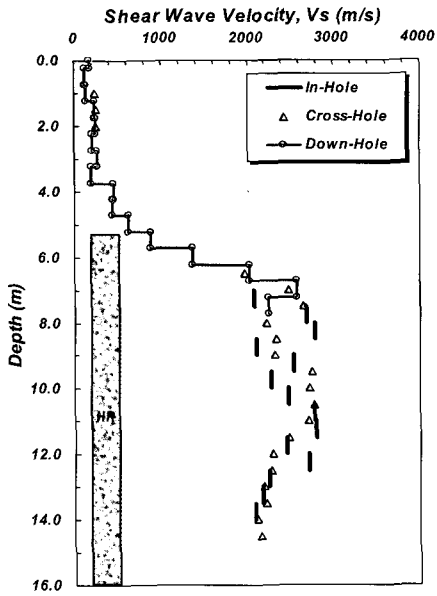
(b) Foundation of rockfill dam at Pyeongchang (PCF)



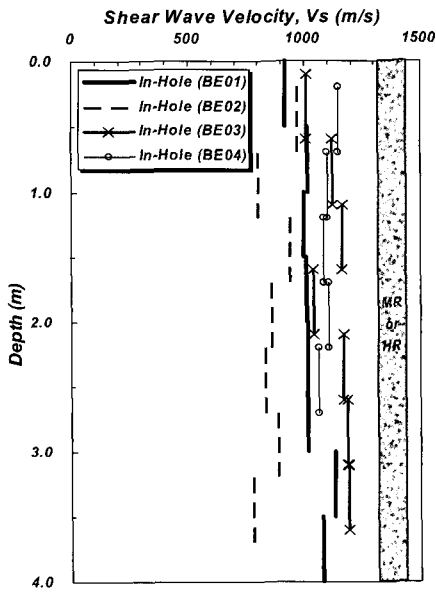
(c) Right abutment of rockfill dam at Pyeongchang (PCR)

(d) Tide embankment at Asan (AS)

Fig. 13. Shear wave velocity profiles from seismic tests at testing sites.



(e) Foundation of concrete dam at Imsil (IS)



(f) tunnel-face at Boeun (BE01 ~ BE04)

Fig. 13. Shear wave velocity profiles from seismic tests at testing sites. (Cont'd)

로 인해 현재의 인홀 시험 장비를 이용할 경우 토사층에 대한 전단파 속도의 획득은 제한적이며, 관련 장비 및 기법의 보완과 같은 토사에서의 인홀 시험에 대한 지속적인 연구가 필요할 것으로 판단된다.

현장에서는 시추시 암반에 대한 코어를 회수하였으며, 그중 PCF, PCR, 그리고 IS 부지에서는 일부 암석 코어에 대한 실내 탄성과 속도를 결정하였다. 암석 코어에 대한 전단파 속도는 2,800~3,300 m/s 정도로서, 실내 시험 조건에서는 시료의 크기가 작은 코어 형태의 암석에 대해 전단파 속도를 측정할 반면, 현장 시험 조건에서는 절리나 균열을 다수 포함한 암반에 대해 전단파 속도를 측정하였기 때문에 현장에서 인홀 시험으로부터 결정된 암반의 전단파 속도에 비해 큰 분포를 보였다. 또한, Fig. 14에 도시한 바와 같이 시추시 파악된 RQD와 인홀 시험의 전단파 속도와와의 관계를 살펴본 결과, 대체로 RQD가 증가함에 따라 전단파 속도도 증가하는 경향을 보였다. 그러나 암종이나 절리 상태 그리고 암질과 같은 보다 근본적인 암반 전단파 속도의 영향 요소에 대한 고려 없이, 본 연구 대상 암반에 국한된 제한적인 자료를 활용하여 전단파 속도와 RQD와의 상관관계를 분석함에 따라 정량적인 관계성을 찾기는 어려웠다. 따라서 암반 특성의 종합적 평가 및 활용의 일환으로, 향후 국내 다양한 지역에 대한 현장 및 실내 자료의 축적을 통해 암반 및 암석의 전단파 속도와 암종 또는 암반 상태를 고려한 종합적이고 정량적인 상관관계의 도출이 필요할 것으로 판단된다.

연구 대상 부지중 시추를 실시한 인홀 시험 부지들 (Fig. 13(a)~(e))에서는 모두 다운홀 시험을 병행하였으며, Fig. 13에 도시된 바와 같이 깊은 심도의 토사층이나 암반층에 대해서는 다운홀 시험으로부터 전단파 속도를 획득하지 못했다. 다운홀 시험은 앞서 묘사된 바와 같이 지표면에서 발진을 하므로 지중의 전파 경로 상에 자갈질 토사와 같이 큰 간극을 갖는 지층이 존재하거나 시험공과 지반의 접촉이 불량할 경우 지중에서의 신호 획득이 어려울 수 있다. 또한, 지표면 부근에서 발생된 전단파는 하부의 단단한 암반 경계층에서 회절(diffraction) 및 굴절(refraction)되므로 발생 전파 에너지에 비해 매우 적은 에너지만이 암반층에 도달하고, 이로 인해 지중의 단단한 지반에 대한 다운홀 시험이 제한적일 수 있다. 이와 같은 이유로 본 연구에서는 깊은 심도의 토사층과 암반층에 대한 전단파 속도를 다운홀 시험으로부터 결정하지 못하였으며, 인홀 시험과 다운홀 시험의 전단파 속도 간의 상세한 비교 분석도 이루어 지지 못했다. 그러나 Fig. 13(c) 및 Fig. 13(e)와

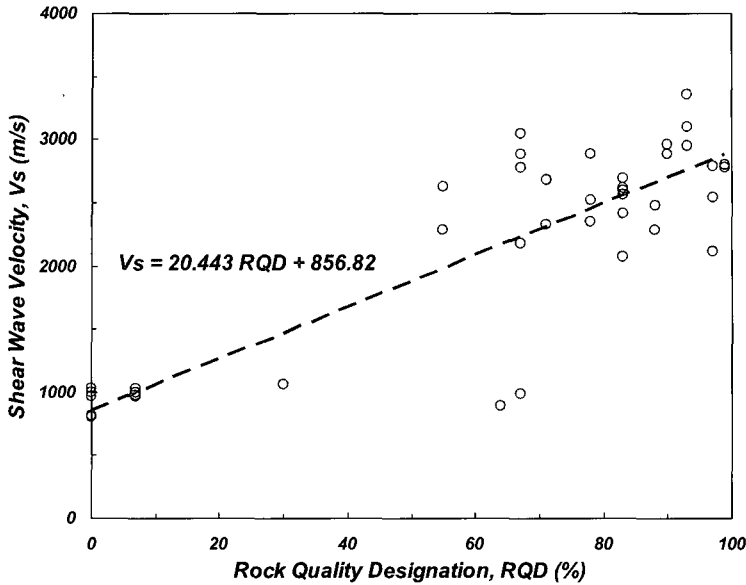


Fig. 14. Correlation between shear wave velocity and RQD based on in-hole seismic tests at testing sites.

같이 다운홀 시험의 하부 수행 심도와 인홀 시험의 상부 수행 심도가 교차하는 경우 산출된 전단파 속도는 대체로 유사하므로, 인홀 시험과 다운홀 시험을 상호 보완적으로 활용하여 부지에 대한 암반 및 토사의 종합적인 깊이별 동적 강성을 평가할 수 있을 것으로 보인다.

본 연구에서 고안하여 개발된 인홀 시험은 그 구성 장비가 매우 간단하고 시험 수행 및 분석 과정이 현장에서 일괄적으로 진행 및 완료될 수 있으므로 기존 현장 탄성과 시험에 비해 매우 효율적이다. 이러한 인홀 시험의 장점에 근거한 실무적 적용성은 매우 광범위하다. 인홀 시험의 실질적 활용 방안으로서 보은 터널 막장(BE01~BE04 시험공; Fig. 13(f))에서 발파용 장약 공들을 대상으로 매우 짧은 시간동안 인홀 시험을 수행하고, 막장으로부터 횡방향 깊이에 대한 전단파 속도를 결정함으로써 터널 암반의 강성을 현장에서 평가하였다. 터널에 대한 동적 강성 평가는 일반적으로 시공과 병행되기 보다는 지표면에서의 시추 조사 및 공내 탄성과 시험을 통해 실시되므로 실제 터널 막장 부근의 동적 강성과는 다소 차이를 보일 수 있으나, 인홀 시험은 시공 직전 터널 막장에서의 장약공을 활용하거나 보다 깊은 횡방향 심도까지 시험공을 형성하여 터널 암반의 전단파 속도와 같은 동적 강성을 원위

치에서 직접 평가함으로써 실제 시공 과정중의 기준 및 참고 변수로 활용 가능할 것이다.

결 론

1. 공학적 건지의 중요성이 크게 증가하고 있는 암반을 대상으로 현장에서 효율적으로 인홀 시험을 수행할 수 있는 스프링식 발진자를 개발하였으며, 추가적으로 시험의 용이성 및 소구경 시험공에 대한 적용성의 확보를 위해 NX-시험공용 및 BX-시험공용의 스프링-감속모터식 발진자로 개선 제작하였다.

2. 개발된 장비를 활용하여 국내 5 곳의 지역에 대한 인홀 시험을 수행하였으며, 인홀 시험을 통해 지반 구조물의 기반암과 터널 막장의 암반에서 전단파 신호를 효과적으로 획득하여 깊이별 전단파 속도 분포를 산출하였다.

3. 대상 부지에 대해 병행된 다양한 현장 탄성과 시험의 전단파 속도와 비교해 본 결과, 암반 지반에서 인홀 시험의 전단파 속도는 신뢰성 높은 현장 탄성과 기법인 크로스홀 시험의 전단파 속도와 일치하였으며, 이에 따라 암반에 대한 동적 강성 평가 기법으로서 인홀 시험이 합리적임을 확인하였다.

4. 터널 시공시의 장약공에 대한 인홀 시험을 실시하

여 원위치에서 터널 암반의 횡방향 깊이별 전단과 속도를 신속하고 효과적으로 결정하였으며, 인홀 탄성과 시험 기법이 암반 지반에 대한 매우 경제적이고 효율적인 동적 강성 평가 기법으로 실제 현장에서 광범위하게 적용될 수 있을 것으로 판단된다.

투 고 일 2005년 7월 3일
심 사 일 2005년 7월 4일
심사완료일 2005년 8월 29일

사 사

본 연구는 한국학술진흥재단 연구과제(과제번호 R05-2004-000-10394-0)의 지원과 서울대학교 공학연구소의 연구 협조에 의해 이루어진 것으로 이에 깊은 감사를 드립니다.

선창국
한국지질자원연구원 지진연구센터
대전시 유성구 가정동 30번지
TEL: 042-868-3114
Fax: 042-861-9720
E-mail: pungsun@snu.ac.kr

참고문헌

- 김동수, 방은석, 서원석, 2003, 표준관입시험을 이용한 업홀시험에서 전단과 속도 주상도의 도출, 한국지반공학회논문집, 19(2), 135-146.
- GEOVision, 2002, Suspension P-S Velocity Logging Method, <http://www.geovision.com>, Accessed in 12 November 2002.
- 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., Kang, B.S., 2003, A pilot study of in-hole seismic method, Journal of the Korean Geotechnical Society, 19(3), 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., Diehl, J., 2001, ROSRINE Field Procedures Manual, USC Report to PEER, University of Southern California.

강병수
GS건설 토목사업본부
서울시 중구 남대문로 5가 537번지
Tel: 02-728-1742
Fax: 02-728-2331
E-mail: bskang@gsconst.co.kr

김영수
한국종합기술개발공사 감리사업본부
서울시 광진구 구의동 546-1
Tel: 02-2049-5160
Fax: 02-2049-5161
E-mail: yskim@kecc.co.kr

목영진
경희대학교 토목건축대학
경기도 용인시 기흥읍 서천리 1번지
Tel: 031-201-2927
Fax: 031-202-8854
E-mail: yjmok@khu.ac.kr