

지반물성치 측정을 위한 인홀탄성파시험

목영진¹⁾, 김영수²⁾, 유창연³⁾, 한만진³⁾

In-hole seismic method for measuring dynamic properties of soils

Young Jin Mok¹⁾, Young Su Kim²⁾, Chang Yeon You³⁾ and Man Jin Han³⁾

요약: 지반의 동적물성치 측정을 위해 시도된 인홀시험법은 경제성과 실용성을 갖춘 공내 탄성파탐사이다. 이전 연구에서 개발된 인홀 장비의 수동식 트리거(trigger) 시스템을 전기식 시스템으로 개량하였고, 발진자와 감지기 사이에 최적의 연결재를 개발하였다. 여러 현장에서 크로스홀 시험과 인홀 시험을 통하여 이 장비의 성능을 검증하였다. 토사층과 암반에서 동적 강성을 평가하였고, 최근에는 터널막장의 수평한 장약공에서도 진단파속도를 측정함으로써 다양한 지반에의 적용성을 확인하였다.

주요어: 인홀 시험, 강성, 토사층, 암반

Abstract: An in-hole seismic tests, which has been developed for measuring dynamic properties of soils and rock mass, is a bore hole seismic method that has cost effectiveness and practicality. The upgraded features include the motorized triggering system rather than the manual prototype version in the previous studies and a damper between source and receiver in the module. The performance of the probe has been verified through extensive cross-hole tests and in-hole tests at various sites. The dynamic stiffness of subsurface materials and rock mass have been evaluated and recently, the measurement of shear wave velocity was successfully adopted at horizontal holes of tunnel-face to install explosives. So the application of in-hole seismic test for various soil materials was certified.

Keywords: in-hole seismic tests, stiffness, subsurface materials, rock mass

1. 서론

지반구조물의 내진해석에서는 정밀한 지반의 동적 물성치 측정이 요구된다. 이 동적 물성치는 전단변형계수(shear modulus)와 감쇠비(damping ratio)곡선으로 이루어져 있다. 이 곡선은 미소변형도의 최대전단변형계수와, 최소감쇠비, 그리고 변형도에 따른 비선형 부분으로 이루어져 있다. 최대전단변형계수는 현장탄성파시험으로 측정하는데, 이중 가장 널리 사용되는 방법은 크로스홀 방법과 다운홀 방법이다(Stokoe and Woods, 1972; Hoar and Stokoe, 1978; Hoar, 1982; Mok, 1987; 목영진, 1994). 크로스홀 시험은 가장 정밀한 측정방법이나, 검측공이 두개 이상 필요하므로 비용이 고가이며, 검측공(직경 75 mm) 내에 설치할 정도로 소형이며 효율적인 타격 에너지를 낼 수 있는 성능 좋은 발진자가 필요하다. 또한 케이싱 설치와 주변 지반과 밀실한 접촉을 확보하기 위한 그라우팅을 추가 시행하는 번거로움과 까다로움 때문에 이 방법을 기피

1) 경희대학교 토목건축대학(Collage of Architecture and Civil Engineering, Kyung Hee University)

E-mail: yjmok@khu.ac.kr

2) ㈜한국종합기술개발공사(Korea Engineering Consultants Corporation Co., Ltd.)

3) 경희대학교 토목건축대학 토목공학과(Major in Civil Eng., Collage of Architecture and Civil Eng., Kyung Hee University)

하고 있는 실정이다. 반면에, 다운홀 시험은 한 개의 검측공을 이용하여 경제적이고, 간단한 발진원을 사용하여 시험이 간편하다는 장점이 있으나, 감지기가 깊어짐에 따라 탄성과 파선(ray path)이 길어져 양질의 데이터를 획득하기 어렵고, 강성도 대비가 큰 지반(토사층과 암반)에서는 적용이 어렵다. 이러한 크로스홀 시험과 다운홀 시험의 장·단점을 보완하여 한 개의 검측공에 발진자와 감지기를 동시에 삽입하여 탄성파를 발진하고 감지하는 인홀(in-hole) 장비 시작품을 개발하여 왔다(목영진 등, 2003; Mok *et al.*, 2003). 이 연구에서는 이전 장비의 수동식 트리거(trigger) 장치를 서보-모터 트리거 장치로 대체하여, 조작이 간편한 우수한 장비로 개량하였다. 또한 이 장비에 최적의 댐퍼를 개발하여 토사층에서도 사용할 수 있게 하였으며 암반 및 터널막장에서의 적용성을 확인하였다.

2. 인홀탄성파시험

인홀 시험은 앞서 말한 크로스홀 시험과 다운홀 시험 방법의 장·단점을 보완하여 저렴한 비용과 일반 기술자들이 용이하게 사용할 수 있게 하기 위해 개발되었다. Fig. 1(a)와 같이 발진자와 감지기를 한 검측공에 설치하여 공벽 뒤의 지층을 따라 수직으로 전파되는 탄성파를 계측한다. 기존의 서스펜션 P-S logging은 Sonde라고 부르는 인홀 프로브(probe)를 물이나 벤토나이트 슬러리로 채워진 검측공에 띄워 탄성파를 계측하였다(Fig. 1(b)). 이 계측기는 전자 햄머가 한쪽방향으로 움직이면서 그 방향의 물에 압력을 가하고 이때 발생한 압력분포가 지반을 변형 시킴으로써 P파와 S파를 발생하게 된다. 따라서 변환되고 굴절된 전단파(P-S-P파)를 계측하게 된다. 토사 층에서는 그리 성과가 좋지 않은 것으로 나타났으며 암반에서 적합한 것으로 판명되었다. 이러한 단점을 극복하고자, 인홀 프로브는 물을 사용하지 않고 공기주머니(air bag) 또는 판스프링(plate spring)으로 공벽에 밀착시키도록 고안하였다. 공벽의 밀착된 프로브는, 서스펜션 P-S 검층에서 계측하는 변환되고 굴절된 전단파가 대신에, 토사층을 전파하는 직접 전단파(direct shear wave)를 계측할 수 있게 된다. 수평전단파(SH파)는 경계면에서 다른 종류의 파(압축파)로 바뀌지 않기 때문에, 식별이 용이한 전단파가 도착하게 된다.

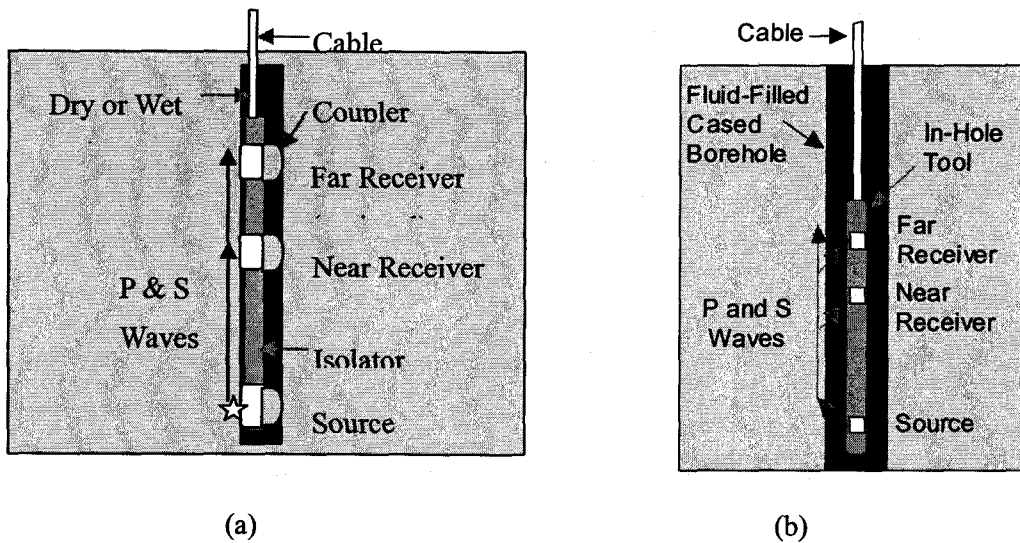


Fig. 1. Conceptual diagram: (a) In-hole seismic tests and (b) Suspension logging.

3. 인홀탄성파시험 장비의 발진자와 연결재

인홀 프로브는 발진자, 감지기, 그사이의 연결재로 이루어져 있다. 이 중 발진자와 연결재(damper) 개발이 가장 어렵고 연구의 대부분의 노력을 요하고 있다. 발진자가 갖추어야 할 필요 조건으로는 신호 대 잡음의 비(S/N Ratio)가 충분히 커야하고, 깊이별로 연속 측정이 가능하도록 반복성이 뛰어나야하며 충분한 내구성을 갖추어야한다. 또한 지하수위 아래에서도 시험이 가능하도록 방수처리가 되어야하며, 전단파의 도달시점을 명확하게 판단할 수 있도록 전단파의 극성을 이용할 수 있어야 한다. 본 연구에서 개발하고 시험에 사용한 인홀 프로브는 위에서 언급한 조건을 만족한다.

인홀 시험은 검측공 상·하를 전파하는 파의 도달 시간을 측정한다. 이 때 발진자와 감지기를 서로 연결하는 연결재의 강성이 지반의 강성보다 크면 지반을 통해 전달되는 탄성파 신호가 연결재를 통해 전달되는 탄성파 신호에 묻히게 되어 지반을 통해 전달된 탄성파의 도달시점을 식별하기 어렵다. 이 때문에 발진자와 감지기 사이를 연결하는 연결재의 중요성을 인식하고 인홀 시험에 있어 최적의 연결재를 개발하였다. Table 1은 일반적인 지반의 전단파의 속도이다(기초 구조물/지중 구조물, 1998). 본 연구에서 채택한 진공호스를 연결재로 사용하였을 때 연결재를 통해 전달되는 속도가 74.5 m/sec로 일반적인 토사지반에 적용할 수 있을 만큼 충분히 느리다는 것을 알 수 있다.

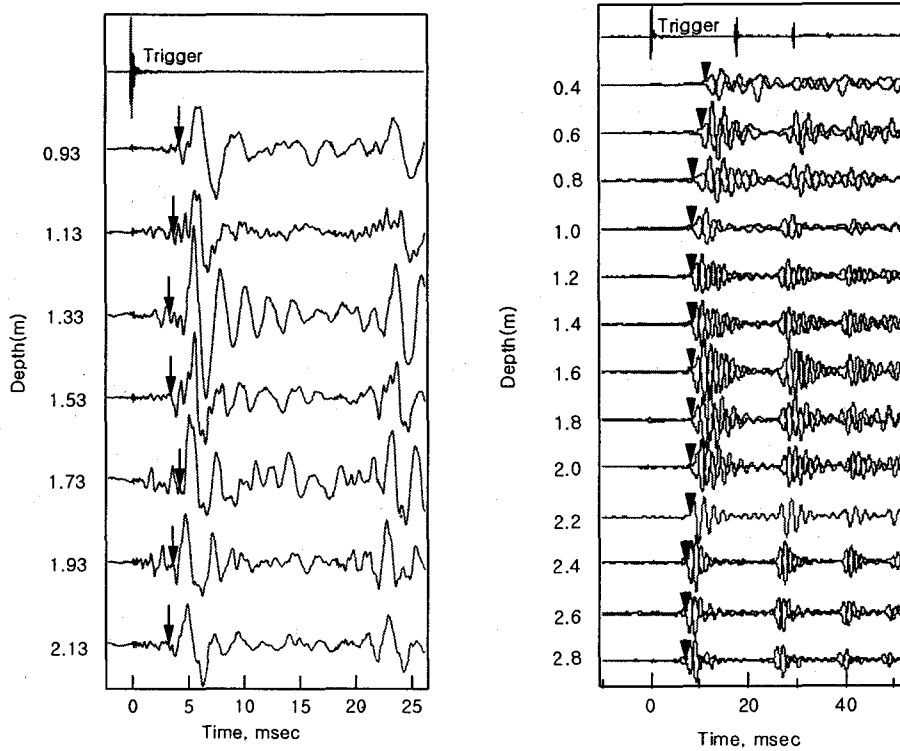
Table 1. Typical shear wave velocity of soils.

지반의 종류	Vs (m/sec)	지반의 종류	Vs (m/sec)
연약한 점토·실트(N<4)	100~150	느슨한 모래·모래자갈(N<10)	150~180
중위의 점토·실트(4<N<8)	150~180	중간의 모래·모래자갈(10<N<30)	180~220
점성이 강한 점토·실트(8<N<15)	180~220	단단한 모래·모래자갈(30<N<50)	220~250
굳은 점토·실트(N<15)	220~300	매우 단단한 모래·모래자갈(N>50)	250~350
풍화암·토단(N>55)	350~500	암 반(N>50)	400~800

4. 인홀탄성파시험의 적용

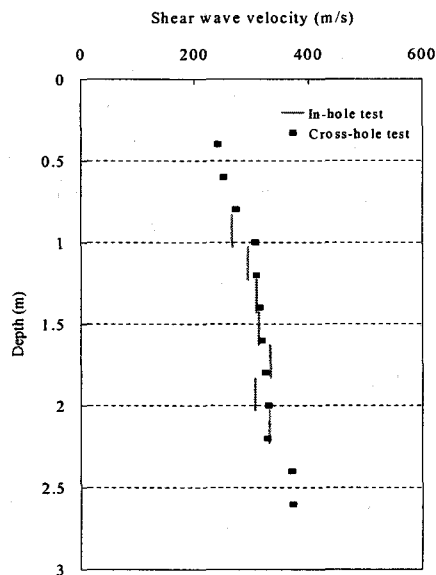
(1) 토사층

경희대 풍화토 지반의 시험부지에서 깊이 2.8 m 까지 인홀시험을 수행하였다. 인홀 프로브의 발진자와 감지기는 연결재를 사용하여 1 m 간격으로 조합하였고, 케이싱의 영향을 배제하기 위해 케이싱은 설치하지 않았다. Fig. 2(a)는 인홀 시험에서 얻은 전단파 신호이고, 각 신호에서 전단파 초동(도달시점)이 화살표로 표시되어 있다. 전단파의 초동시점은 고주파수의 압축파가 끝나고 에너지가 큰 저주파의 파형이 시작되는 시점이다. 인홀시험 결과를 검증하기 위하여 홀 간격을 2.68 m로 하여 추가로 굴착하여 크로스홀 시험을 수행하였다. 발진자와 감지기는 인홀 프로브에 사용한 것을 그대로 사용하였다. Fig. 2(b)는 크로스홀 전단파 신호이고 마찬가지로 화살표로 전단파 초동을 표시하였다. Fig. 2(c)는 이 전단파 도달시간에서 구한 전단파속도 분포이다.



(a) In-hole tests

(b) Cross hole tests



(c) Shear wave velocity profiles

Fig. 2. Shear wave signal and shear wave velocity profiles at KHU site

인홀의 전단파 속도 차이가 8 % 이내로, 크로스홀 시험 결과와 잘 일치하고, 전단파 초동 판별이 용이한 우수한 전단파 신호를 얻을 수 있어 만족할 만한 인홀 프로브 성능을 입증하였다. 이 속도의 차이는 두 기법 사이의 전단파 진행 방향이 다르고(크로스홀은 수평방향, 인홀은 수직방향), 토사층의 이방성, 시험방법의 차이에서 기인하는 것으로 사료된다.

(2) 암반

암반에서의 인홀 시험을 수행하기 위하여 전라북도 정읍시에 있는 섬진강댐과 강원도 평창군에 있는 도암댐을 선정하였다. 두 현장 모두 검측공의 크기는 NX이며 깊이는 섬진강댐이 14 m 이고, 도암댐이 12 m이다. 이 두 현장은 전단파 속도 분포가 2,200 ~ 3,000 m/sec로 나타나는 양질의 경암으로 판명되었다. 섬진강댐과 도암댐에서 수행한 인홀시험의 신뢰성을 확인하기 위하여 인홀 시험을 수행한 동 현장 암반에서 크로스홀 시험, 다운홀 시험,을 수행하여 비교하였다 (Fig. 3). 크로스홀 결과가 인홀 결과와 아주 근접하여 인홀 시험의 신뢰성을 뒷받침하고 있다.

(3) 터널 막장

기존의 NX크기(직경 75 mm)의 검측공에서 사용할 수 있던 장비를 BX크기(직경 54 mm)에서도 사용할 수 있도록 소형화하였다. 개량한 장비를 이용하여 터널시공 시 장약설치를 위해 점보드릴(직경 45 mm)로 천공하는 장약공에서 직접 탄성과 시험을 수행하여 지반조사를 위한 별도의 검측공 없이도 데이터를 획득하였다. 또한, 수직공 뿐만 아니라 수평방향의 검측공에서 시험을 수행하여 적용성을 평가하였다. 현장은 가덕~회복간 고속도로 현장에 위치하고 있는 회복터널에서 시험을 수행하였으며 시험단면은 터널시점 1300 m 지점의 청주방면 3개소, 상주방

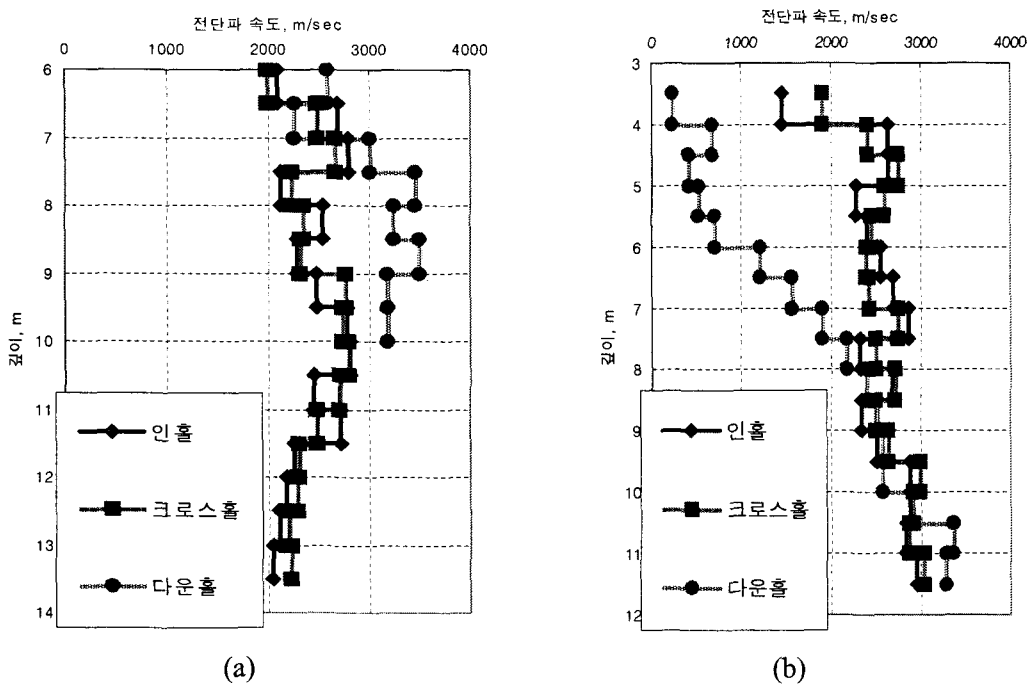


Fig. 3. Shear wave velocity profiles at (a) Sum-jin river dam and (b) Do-am dam site.

면 1개소이다(Fig. 4). 점보드릴이 천공을 마치면, 발파를 위해 장약을 장약공에 설치하였다. 한 단면의 장약공에 장약을 모두 설치하는데 대략 40분 정도가 소요된다. 이 짧은 시간동안 시공에 지장을 주지 않으면서 탄성과 시험을 하였다.

Fig. 5(a)는 상주방면 터널 막장의 장약공에서 획득한 전단파 신호이고 Fig. 5(b)는 전단파 신호를 이용하여 구한 전단파속도 주상도이다. 터널 발파작업이 진행 중인 막장에서 시험을 수행하여 주변에서 발생하는 진동의 최소화, 여유로운 시험시간 확보 등의 최적의 시험 조건을 갖추지 못하였다. 아래의 신호를 살펴보면 균일한 고주파 진동이 발생함을 알 수 있다. 막장에서 시험을 수행하는 동안 환기를 위해 큰 소음을 내며 돌아가는 팬, 인접한 터널 막장에서의 발파를 위한 천공 및 버력 처리 등이 원인으로 판단된다. 이 계측결과는 터널해석에 필요한 변형계

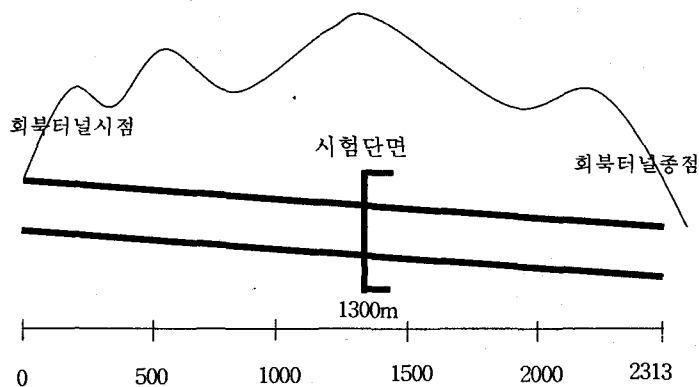


Fig. 4. Vertical section of tunnel and location of tunnel-face for tests.

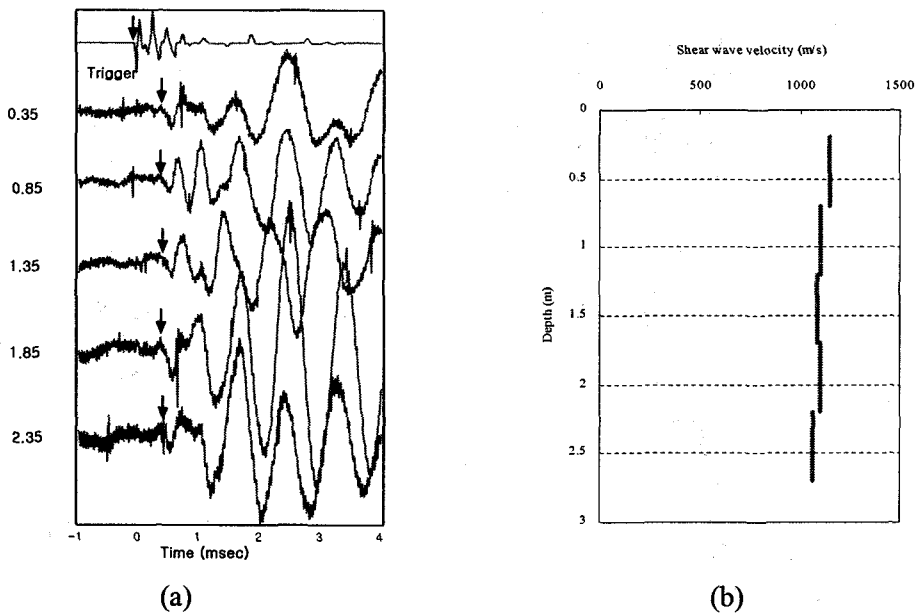


Fig. 5. Shear wave signal (a) and shear wave velocity profile (b) for tunnel-face.

수 추정에도 이용될 수 있다. 지금까지는 암석 공시체의 압축시험결과와 암반의 균열상태, 응력 수준을 감안하여 탄성계수를 추정하였다. 이 현장시험의 장점은 암반의 균열 상태를 반영한 변형계수를 직접 측정할 수 있는 점이다. 이 현장시험에서 측정된 변형계수는 미소변형도(small strain) 범위의 값으로, 사용 하중에 해당하는 현장 변형도를 감안하여 외삽(extrapolation)의 개념으로 추정하여 터널 해석에 사용하여야 한다.

5. 결론

내진 설계에 필요한 동적 물성치 측정을 위한 인홀 프로브를 개선하고 그 성능을 확인하였다. 발진자의 트리거 장치를 수동식에서 전기식으로 개량하여 조작성이 편리하게 되었고, 최적의 연결재를 장착한 인홀 프로브를 개발하였다. 이 프로브를 이용하여 크로스홀 시험과 다운홀 시험의 장·단점을 보완한, 저렴한 비용으로 일반 기술자들이 용이하게 사용할 수 있는 인홀 시험법을 개발하고 토사층 및 암반에서 그 신뢰성을 입증하였다. 또한 BX크기(직경 54 mm)에서도 사용할 수 있도록 소형화하여 터널 막장의 장약공에서 직접 인홀 시험을 수행하여 지반조사를 위한 별도의 검측공 없이도 터널 막장의 전단파 속도 주상도를 획득하였다. 수평방향인 장약공에서 인홀 시험을 수행함으로써 수직공 뿐만 아니라 다양한 형태의 공에서도 시험이 가능함을 알 수 있었으며, 다양한 지반에서의 적용성을 확인하였다.

참고문헌

- 목영진, 1994, 역산이론을 이용한 다운홀 시험 결과의 해석, 한국지반공학회지, **10**, 29-37.
- 목영진, 강병수, 김정한, 2003, 인홀 시험을 이용한 암반의 동적물성치 측정, 대한토목학회지, **23**, 119-125.
- 과학기술 편집부, 1998, 기초 구조물/지중 구조물(토목설계의 요점 시리즈3), 도서출판 과학기술, 242 p.
- Hoar, R. J., and Stokoe, K. H., II, 1978, Generation and Measurement of Shear Wave in situ, Dynamic Geotechnical Testing, *ASTM STP 654*, ASTM, 3-29.
- Mok, Y. J., 1987, *Analytical and Experimental Studies of Borehole Seismic Methods*, Ph. D. Dissertation, The University of Texas at Austin, 32 p.
- 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.
- Ogura, K., 1979, Development of a Suspension Type S-wave Log System, *OYO Technical Note TN-34*, OYO Corp., Tokyo, Japan, 23 p.
- Hoar, R. J., 1982, *Field Measurement of Seismic Wave Velocity And Attenuation For Dynamic Analyses*, Ph. D. Dissertation, University of Texas at Austin, 37-447.
- Stokoe, K. H., II, and Woods, R. D., 1972, In-Situ Shear Wave Velocity by Cross-Hole Method, *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, Proceedings, ASCE*, **98(SM5)**, 443-460.