

## 지반의 동적물성치 측정을 위한 인홀탄성파시험의 최근 발전

### Recent Development of In-hole Seismic Method for Measuring Dynamic Stiffness of Subsurface Materials

목 영 진<sup>1</sup> Mok, Young-Jin  
정 진 훈<sup>2</sup> Jung, Jin-Hun  
김 영 수<sup>3</sup> Kim, Young-Su

#### Abstract

An in-hole seismic method, which has been developed for measuring dynamic properties of subsurface materials, was improved in terms of cost effectiveness and practicality. The upgraded features include the motorized triggering system rather than the manual prototype version in the previous studies and a connecting rod between source and receiver in the module. The probe, thus, can be used for the field measurements of soil properties as well as those of rocks. The performance of the probe has been evaluated through extensive cross-hole tests and in-hole tests at various sites.

#### 요 지

이 연구에서는 지반의 동적물성치 측정 기술로 시도된 인홀 시험법을, 경제성과 실용성 측면에서 개선하였다. 이전 연구에서 개발된 인홀 장비의 수동식 트리거(trigger) 시스템을 전기식 시스템으로 개량하였고, 발진기와 수신기 사이에 최적의 연결재를 개발하였다. 이로써, 암반뿐만 아니라 토사층에서도 이 기법을 사용하게 되었다. 이 장비를 여러 현장에서 크로스홀 시험과 인홀 시험을 통하여 그 성능을 검증하였다.

**Keywords :** Cross-hole test, Damper, In-hole probe, In-hole test

#### 1. 서 론

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 현장탄성파 시험으로 측정하는데, 이중 가장 널리 사용되는 방법은, 크로스홀 방법(cross hole)과 다운홀 방법(down hole)

이다(Stokoe and Woods 1972, Mok 1987). 크로스홀 시험은 가장 정밀한 측정방법이나, 검측공이 두개 이상 필요하므로 비용이 고가이며, 검측공(직경 75mm) 내에 설치할 정도로 소형이며 효율적인 타격에너지를 낼 수 있는 성능 좋은 발진기가 필요하다. 또한 케이싱 설치와 주변 지반과 밀실한 접촉을 확보하기 위한 그라우팅을 추가 시행하는 번거로움과 까다로움 때문에 이 방법을 기피하고 있는 실정이다. 반면에, 다운홀 시험은 한 개의 검측공을 이용하여 경제적이고, 간단한 발진원을 사용하여 시험이 간편하다는 장점이 있으나,

1 정회원, 경희대학교 토목공학과 교수 (Member, prof., Dept. of Civil Engrg., Kyung-hee Univ., yjmok@khu.ac.kr)

2 정회원, 남원건설 엔지니어링 사원, 경희대학교 대학원 토목공학과 석사 (Member, NanWonKeonSeol Engrg.)

3 정회원, 한국종합기술개발공사, 경희대학교 대학원 토목공학과 석사 (Member, Korea Engrg., Graduate Student, Dept. of Civil Engrg., Kyung-hee Univ.)

감지기가 깊어짐에 따라 탄성파 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 발진기와 감지기를 동시에 삽입하여 탄성파를 발진하고 감지하는 인홀(In-hole) 장비 시작품을 개발하여 왔다(목영진 외 2003a ; Mok et al. 2003b). 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 하였다.

## 2. 탄성파 시험 방법

### 2.1 크로스홀 시험(Cross Hole Test)

크로스홀 시험은 지반의 P파 속도 및 S파 속도를 깊이별로 측정할 수 있는 현장시험법이다(Hoar and Stokoe 1978). 그림 1과 같이 2개 이상의 검측공을 설치하고 한 쪽은 발진기(Source)를 설치하고 나머지 검측공에는 감지기를 같은 깊이에 설치한다. 이때 발진기에서 발생시킨 진동이 지반을 통과하여 감지기에 도달하는 시간을 측정하여 깊이별로 탄성파 속도를 구할 수 있고, 또한 전단탄성계수(Shear Modulus)와 포아송비(Poisson's Ratio)를 구할 수 있다(Mok 1987, Hoar 1982). 그리고 파의 진행경로가 일정하고, 발진기와 감지기가 같은 위치에 있어 자세한 지층구조를 알아낼 수 있다. 크로스홀 시험은 가장 정밀한 측정방법이나, 검측공이 두개 이상 필요하므로 비용이 고가이며, 검측공(직경 75mm) 내에 설치

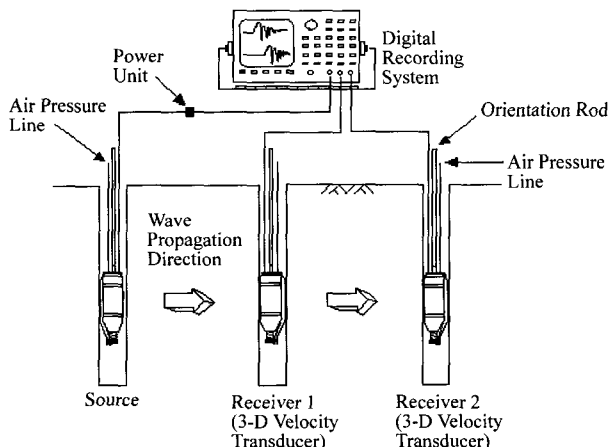


그림 1. 크로스홀 시험 개요도(Mok, 1987)

할 정도로 소형이며 효율적인 타격에너지를 낼 수 있는 성능 좋은 발진기가 필요하다. 또한 케이싱 설치와 주변 지반과 밀실한 접촉을 확보하기 위한 그라우팅을 추가 시행하는 번거로움과 까다로움 때문에 이 방법을 기피하고 있는 실정이다.

### 2.2 다운홀 시험(Down Hole Test)

다운홀 시험은 지반의 동적물성치(압축파 속도, 전단파 속도)측정에 최근 많이 시행되고 있는 현장 탄성파 시험 중 하나이다. 그림 2와 같이, 발진기를 지표 위에 설치하고, 감지기는 검측공내 계획된 측정 깊이에 설치한다. 발진기에 충격을 가해 진동을 유발시키는데, 연직 방향으로 충격을 가하면 압축파 성분, 수평방향으로 충격을 가하면 전단파(SH)성분이 풍부한 진동이 발생한다. 이 시험방법은 1개의 검측공을 설치하기 때문에 크로스홀 시험에 비하여 비교적 경제적이지만, 감지기 위치가 깊어질수록 신호대 잡음의 비(S/N Ratio)가 감소하는 단점이 있다(Mok 1997). 다운홀 시험은 신뢰성 있는 결과 분석을 위해 직접법, 간접법, 수정 간접법, Snell's Law 전파경로법 등의 해석기법들이 개발되었다. 단순한 결과 분석 방법으로 인한 결과의 정확도가 떨어져 역산 이론에 의한 탄성파 속도 산출방법에 관한 연구도 수행되었다(목영진 1994). 그러나 다운홀 시험은 크로스홀 시험 결과에 비해 개략적인 강성 주상도만 얻어지기 때문에, 이 시험이 쉽고 저렴하다는 이점에도 불구하고 활용도의 한계가 있다.

### 2.3 인홀 시험(In Hole Test)

인홀 시험은 앞서 말한 크로스홀 시험과 다운홀 시험

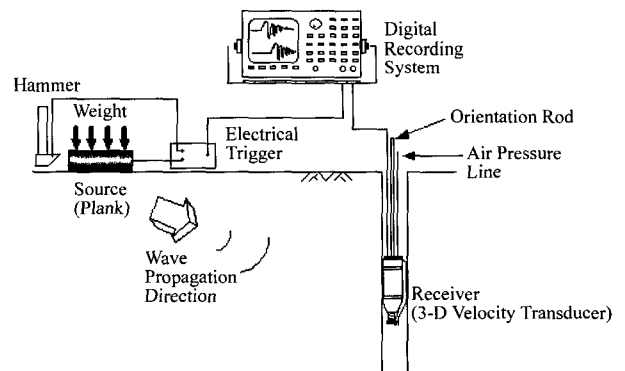


그림 2. 다운홀 시험 개요도(Mok, 1987)

방법의 장·단점을 보완하여 저렴한 비용과 일반 기술자들이 용이하게 사용할 수 있게 하기 위해 개발되었다. 그림 3과 같이 발진기와 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(그림 4). 이 계측기는 전자 햄머가 한쪽방향으로 움직이면서 그 방향의 물에 압력을 가하고 이때 발생한 압력분포가 지반을 변

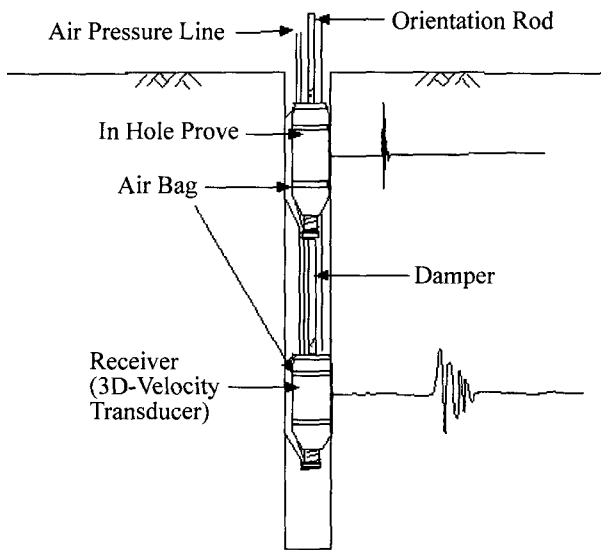


그림 3. 인홀 시험 개요도(목영진 등, 2003)

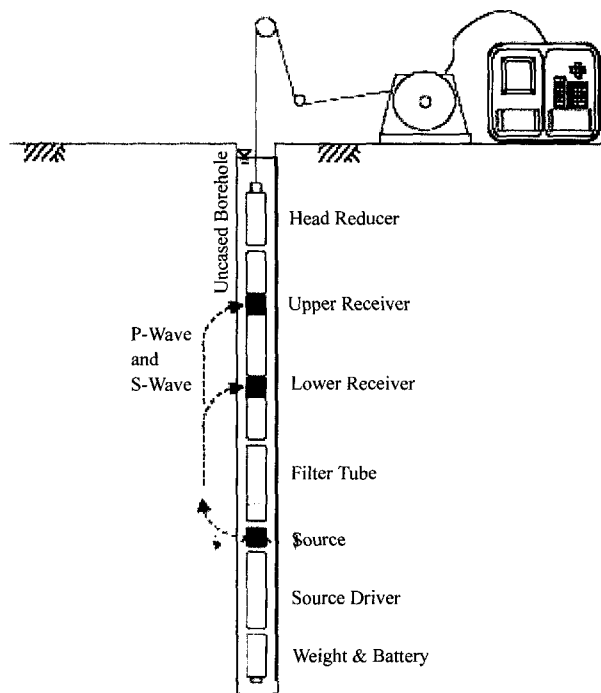


그림 4. 서스펜션 P-S logging 개요도(Stokoe, 2002)

형시킴으로써 P파와 S파를 발생하게 된다. 따라서 변환되고 굴절된 전단파(P-S-P 파)를 계측하게 된다. 토사층에서는 그리 성과가 좋지 않은 것으로 나타났으며 암반에서 적합한 것으로 판명되었다. 이러한 단점을 극복하고자, 인홀 프로브는 물을 사용하지 않고 공기주머니(Air Bag)로 공벽에 밀착시키도록 고안하였다. 공벽의 밀착된 프로브는, 서스펜션 P-S 검측에서 계측하는 변환되고 굴절된 전단파가 대신에, 토사층을 전파하는 직접 전단파(Direct Shear Wave)를 계측할 수 있게 된다. 수평전단파(SH)는 경계면에서 다른 종류의 파(압축파)로 바뀌지 않기 때문에, 식별이 용이한 전단파가 도착하게 된다.

### 3. 발진기의 개선

이 프로브는 발진기, 수신기, 그사이의 댐퍼로 이루어져 있다. 이 중 발진기와 댐퍼 개발이 가장 어렵고 연구의 대부분의 노력을 요하고 있고, 감지기는 소형 속도계(geophone)를 사용하였다. 발진기의 개발과 개량 배경과 경과는 다음과 같다.

#### 3.1 발진기의 조건

아래와 같이 발진기가 갖추어야 할 필요 조건을 만족하도록 인홀 발진기를 개발하여 왔다. 최근의 삼차 시작품은 수동식 트리거 장치를 조작이 간편한 전기식 트리거 장치로 대체하여 아래의 모든 조건을 다 갖추었다.

- 신호 대 잡음의 비(S/N Ratio)를 크게 하여 좋은 신호를 감지하도록 탄성파 에너지를 충분히 크게 만든다.
- 현장지반에서 깊이별로 시험을 수행하기 위해서는 반복성이 뛰어나야 한다.
- 험한 현장조건에 견딜 수 있는 내구성을 갖춘다.
- 지하수위 아래에서도 시험이 가능해야 한다.
- 시험을 수행하기 위해서는 발진기의 조작이 간단해야 한다.
- 전단파의 도착지점을 정확히 판단하기 위해 발진기의 충격은 전단파의 극성 특성을 이용할 수 있어야 한다.

#### 3.2 발진기의 개량

이차 시작품의 스프링식 발진기의 개념도는 그림 5와

같다(Mok 2003b). 트리거(trigger) 라인 안쪽의 트리거 케이블(Trigger Cable)로 트리거 공이(Trigger Arm)를 회전시키면, 스프링으로 장진된 충격 공이(Impact Pestle)가 공벽을 때리는 동시에 재 장진스프링(Return Spring)에 의해 다시 장진 된다. 공기 주머니(Air Bag)에 압축공기를 주입하여, 발진기를 공벽에 밀착시켜 충격에너지를 극대화한다. 이 발진기의 특징은, 장치가 비교적 간단하며 견고하고, 충격 에너지도 커서 토사지반에 적합한 것으로 판명되었다. 또한 기계식이어서 전기를 사용하지 않으므로 전원을 공급하는 부대시설이 필요치 않다. 발진기를 가동시키기 위한 와이어(Wire)는 방수성과 힘을 가한 경우에 감지기가 발진기의 가동으로 인한 영향을 안 받게 하기 위해서 이중으로 보호되어진 와이어를 사용하였다. 사진 1은 이차 개량한 발진기의 모습이다. 몸체뚜껑부분을 MC나이론을 사용하여 조립 및 해체가 쉬워졌고, 자중을 줄였으며, 크기 또한 작게 줄였다.

앞서 설명 한 것처럼 지금까지는 와이어를 잡아 당겨 발진기를 가동(triggering))하였다. 이 때문에 반복적인 트리거로 인해 와이어의 손상이 잦았으며, 트리거에 사용되는 와이어는 기성품이 없어 구입이 용이하지 않았다. 그리고, 약 50m 정도가 되는 와이어를 시험 시에는

곧바로 펴주어야 트리거가 가능하므로 시험 현장에 트리거를 위해 와이어를 펼칠 수 있는 공간이 확보되어야 했으며, 트리거를 위한 별도의 인력이 필요하였다. 이런 문제를 해결하기 위해 사진 2와 같이 3차 발진기를 제작하였다. 3차 발진기에는 트리거를 하기 위하여 2차 발진기에서 사용한 와이어 대신 기성제품인 모터를 사용하였다. 주문 제작하여 사용하던 와이어 대신 모터를 사용

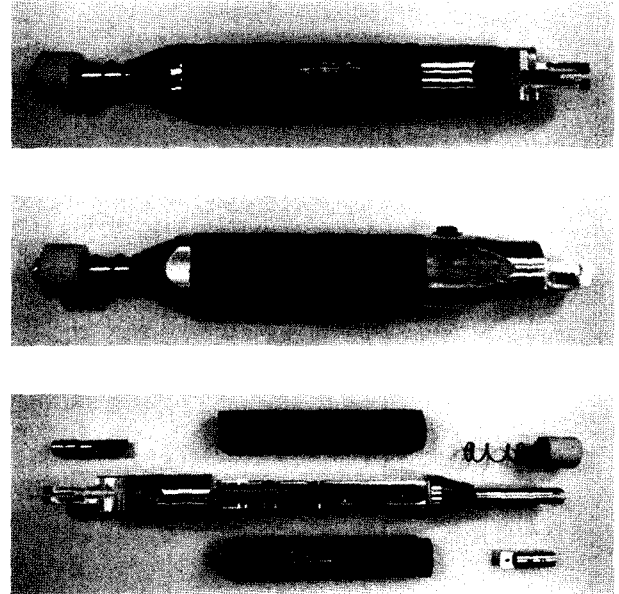


사진 1. 이차 스프링식 발진기 정면도(상), 측면도(중), 분해도(하)

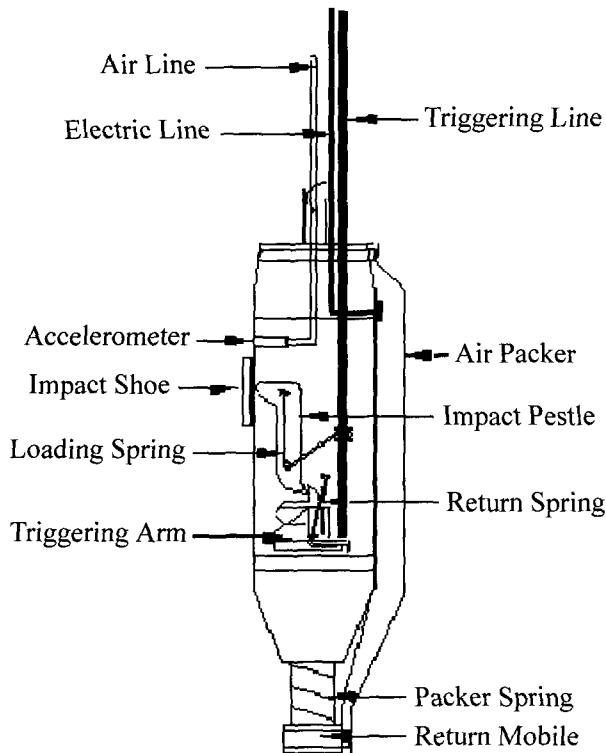


그림 5. 스프링식 발진기의 개요도(목영진 등, 2003)

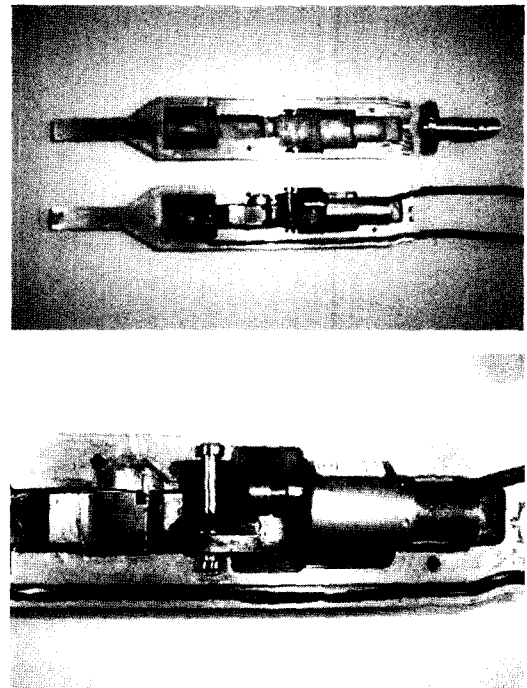


사진 2. 모터를 이용한 삼차 스프링식 발진기 분해도(상), 세부도(하)

함으로써 손쉽게 장비를 구입 할 수 있게 되었고, 트리거 선이 끊어지는 문제를 걱정할 필요 없게 되었다. 그리고 50m 정도 되는 와이어를 펼치기 위한 공간이 확보되지 않아도 시험을 할 수 있으며, 트리거를 전달하는 인력이 필요 없게 되어 시험에 필요한 인원을 줄일 수 있다.

#### 4. 삼차 발진기의 검증

##### 4.1 강봉을 이용한 검증

개발된 3차 발진기의 트리거 시간의 오차 및 전단파 에너지 성분을 검증하기 위하여, 강봉에서 가속도계를

이용하여 전단파를 측정하고(사진 3), 3차 발진기와 감지기를 이용하여 전단파를 측정하였다(사진 4). 가속도계를 사용하여 길이 2m의 강봉에서 전단파 속도를 측정 한 결과 2181m/s의 속도를 나타내었다. 같은 강봉에서 모터를 사용한 삼차 발진기와 감지기를 사용하여 전단파 속도를 측정 한 결과 2176m/s로 가속도계를 사용하여 측정 한 전단파 속도와 동일한 결과를 보여 트리거의 시간 오차는 없는 것으로 검증되었다(그림 6).

##### 4.2 크로스홀 시험을 통한 발진기의 검증

중앙대학교 안성 캠퍼스 내에 있는 현장은 15m까지 시추를 하였으며, 7m까지는 강관(steel) 케이싱으로 지

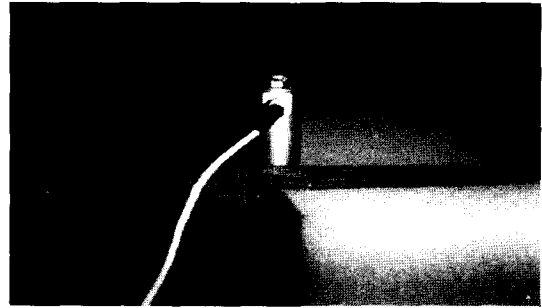
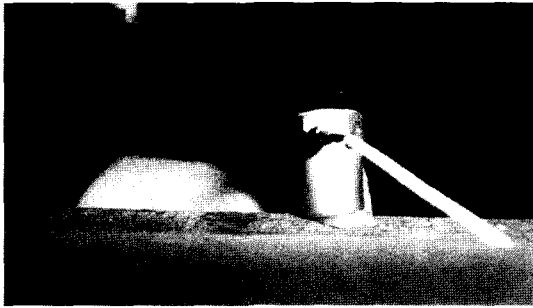


사진 3. 가속도계를 사용한 강봉에서의 신호측정

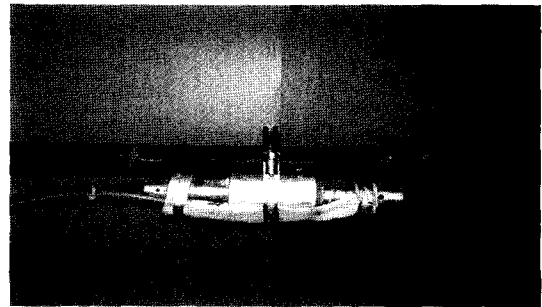
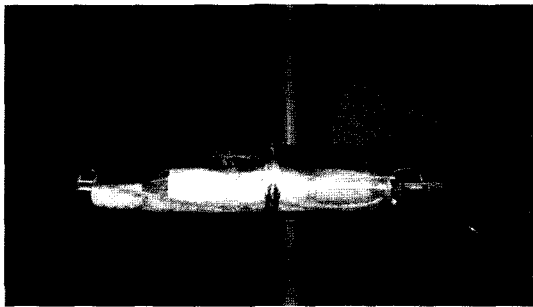


사진 4. 발진기와 감지기를 사용한 강봉에서의 신호측정

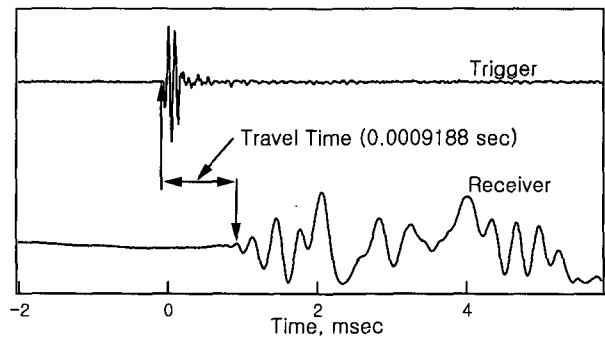
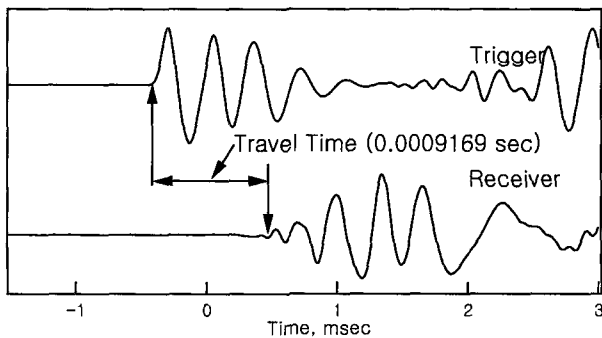


그림 6. 강봉에서 측정 한 전단파 신호  
(좌) 가속도계를 사용한 신호 (우) 삼차 발진기를 사용한 신호

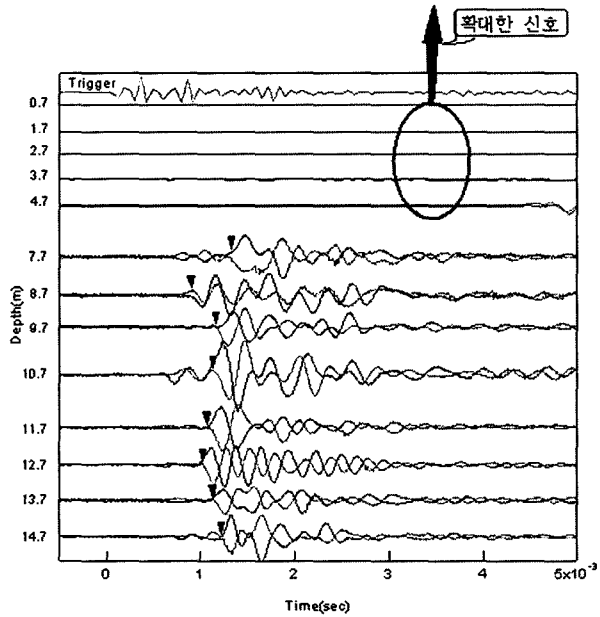
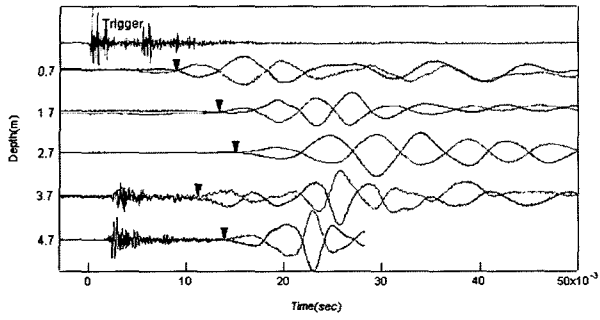


그림 7. 2차 발진기를 사용한 크로스홀 전단파 신호

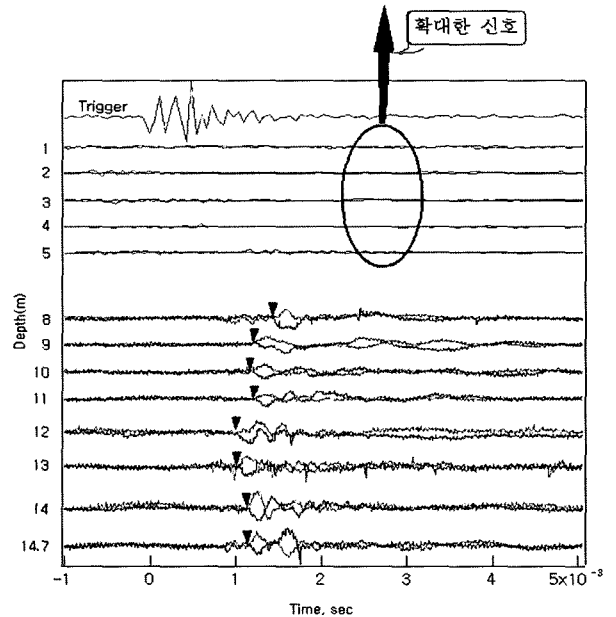
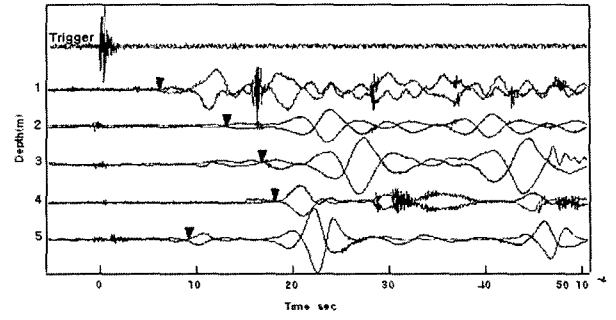


그림 8. 3차 발진기를 사용한 크로스홀 전단파 신호

지하고 그 이하는 나공 상태의 암반이다. 시추공은 크로스홀 시험을 수행하기 위해 두개의 홀을 시추했으며 시추공사이의 거리는 2.97m이다. 이 현장에서 2차 발진기와 3차 발진기를 각각 사용하여 실험하였다. 전단파 도달시간으로 구한 전단파주상도는 그림 9와 같이 서로 잘 일치하고 있다. 깊이 5m와 7m에서는 토사와 암반이 접하고 있어 전단파 도달시점을 판별할 만한 양질의 데이터를 얻지 못하였다.

### 5. 연결재 개발

인홀 시험은 검측공 상·하를 전파하는 파의 도달 시간을 측정한다. 때문에 발진기와 감지기를 서로 연결하는 연결재가 필요하다. 이때 지반의 강성보다 연결재의 강성이 크면 지반을 통해 전달되는 탄성과 신호보다 연결재를 통해 전달되는 탄성과 신호가 더 빠르게 된다. 때문에 지반을 통해 전달되는 탄성과 신호가 연결재를 통해 전달되는 탄성과 신호에 묻히게 되어 지반을 통해

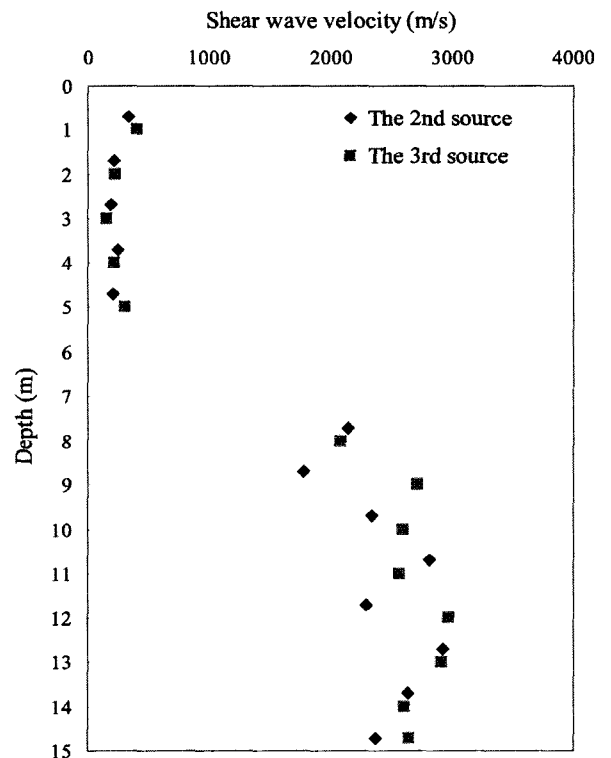


그림 9. 중앙대 현장의 속도 주상도

전달되는 탄성파의 시작점을 식별하기가 매우 곤란하게 되고, 우리가 알고자하는 지반의 동적물성치를 구할 수 없게 된다. 이 때문에 발진기와 감지기 사이를 연결하는 연결재의 중요성을 인식하고 다양한 재료와 원리를 이용한 연결재를 제작하여 인홀 시험에 있어 최적의 연결재를 개발하기 위해 체인, 방진고무, 진공호스, 섬유로프를 사용하여 시험하였다.

### 5.1 연결재 시험

소재와 형태가 다른 체인, 방진고무호스, 실리콘 진공호스, 섬유로프를 대상으로 연결재 적용성을 검토하였다.

전단파의 진행 특성을 고려하여 전단파의 진행 방향과 같은 방향으로 움직여 줄 수 있는 플라스틱 재질의 체인을 시도하였다(그림 10). 연결재를 타고 전달되는 전단파 속도를 측정하기 위해 발진기와 감지기 사이의 거리를 1m가 되게 하여 공기 중에 띄워 놓은 상태로 시험을 수행하였다. 실험 결과 연결재를 타고 전달되는 초동시간(First Arrival Time)은 3.995msec이고, 파의 속도는 250m/s이다.

천연고무를 사용하여 신장률, 인장강도, 탄성이 우수하고 고무의 압축과 전단 특성을 이용한 고효율 다축방향의 진동과 소음을 제어할 수 있는 RUB-A볼트 방진고무를 사용하였다(그림 11). 앞서 한 실험과 같이 발진기

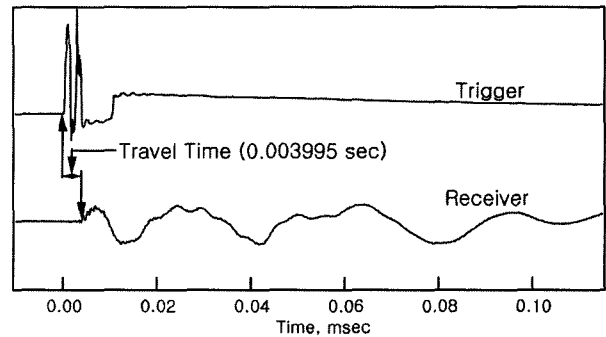
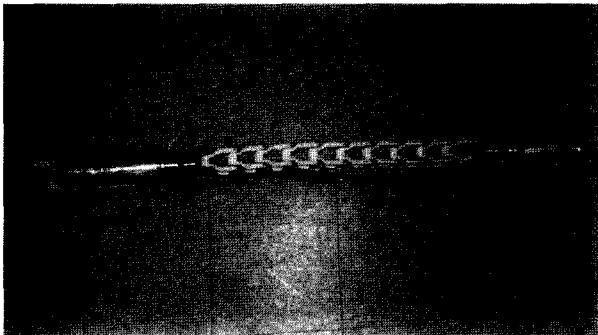


그림 10. 체인을 사용해 연결한 모습과 획득한 신호

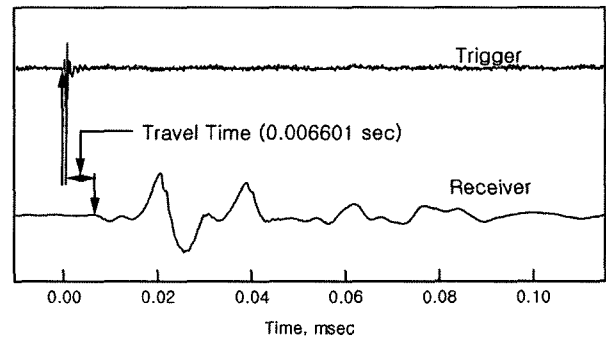
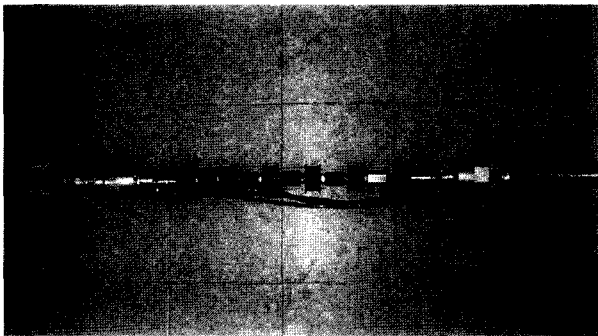


그림 11. RUB-A볼트 방진고무를 사용해 연결한 모습과 획득한 신호

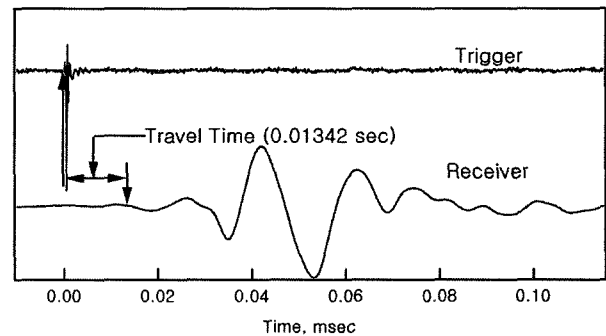
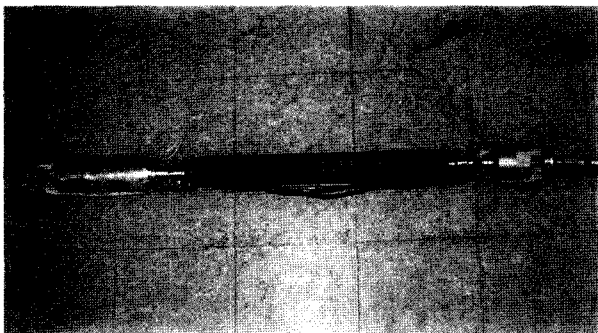


그림 12. 진공호스를 사용해 연결한 모습과 획득한 신호

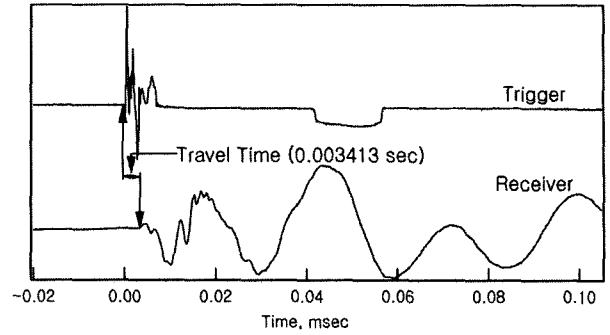
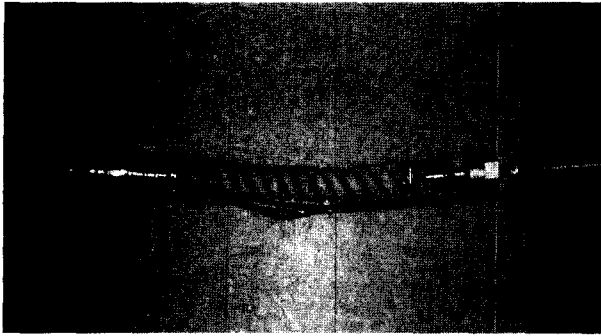


그림 13. 섬유 로프를 사용해 연결한 모습과 획득한 신호

와 감지기의 거리를 1m가 되게 하였으며, 공기 중에 떠서 실험을 수행하였다. 초동시간(First Arrival Time)은 6.60msec이며, 파의 속도는 151.5m/s이다.

외경 50mm 내경 20mm의 실리콘을 압축하여 성형한 진공호스를 사용하였다. 실험방법은 앞서 한 실험법과 동일하다. 초동시간(First Arrival Time)은 13.42msec이며, 파의 속도는 74.5m/s이다.

일반적으로 시중에 판매하는 섬유 로프를 사용하여 실험을 하였다. 실험 방법은 앞서 한 실험법과 동일하다. 초동시간(First Arrival Time)은 3.413msec이며, 파의 속도는 292.9m/s이다.

## 5.2 시험결과 비교 · 분석

앞서 실험한 결과를 표 1에 나타내었다. 표 2는 일반적인 지반의 전단파의 속도이다. 표 1, 2를 통해 진공호스를 연결재로 사용하였을 때 74.5m/s로 연결재를 통해 전달되는 속도가 가장 느리다는 것을 알 수 있으며, 이 속도는 일반적인 토사지반에 적용할 수 있을 만큼 충분히 느리다는 것을 알 수 있다. 이 삼차 인홀 시작점은

진공호스를 연결재로 사용하여 인홀 프로브를 제작하여 그 성능을 검증하였다.

## 6. 토사층 인홀 시험

경희대 구내 화강암 풍화토 현장에서 인홀 시험을 위해 파워오거를 사용하여 한 개의 홀을 심도 2.8m 까지 굴착 한 후 실험을 수행하였다. 인홀시험 프로브는 발전기와 감지기를 1m 간격으로 연결재를 조합하였고, 케이싱의 영향을 배제하기 위해 케이싱은 설치하지 않았다. 그림 14는 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. 인홀 시험 결과를 검증하기 위하여 홀 간격을 2.68m로 하여 추가로 굴착하여 크로스홀 시험을 수행하였다. 발전기와 수신기는 인홀프로브에 사용한 것을 그대로 사용하였다. 그림 15는 크스홀 전단파 신호이고 마찬가지로 화살표로 전단파 초동을 표시하였다. 그림 16은 이 전단파 도달시간에서 구한 전단파속도 분포이다. 인홀의 전단

표 1. 연결재를 통해 전달되는 전단파 속도

연결재	체인	RUB-A 볼트 방진고무	진공호스	섬유로프
초동(msec)	3.995	6.601	13.42	3.413
파 속도(m/s)	250	151.5	74.5	292.9

표 2. 토사지반에서의 평균적인 전단파 속도(기초 구조물/지중 구조물, 도서출판 과학기술 p.242)  
(일반적으로 P파의 속도는 S파의 속도보다 약 1.75배정도 빠르다.)

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



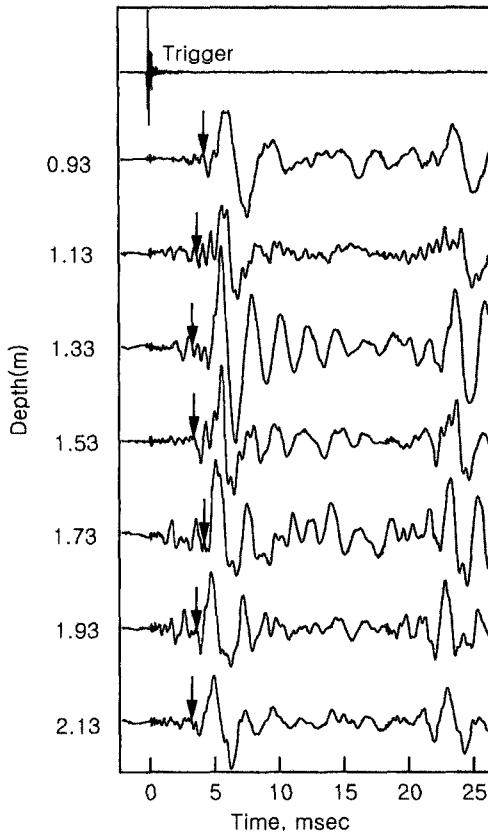


그림 14. 인홀 전단파 신호

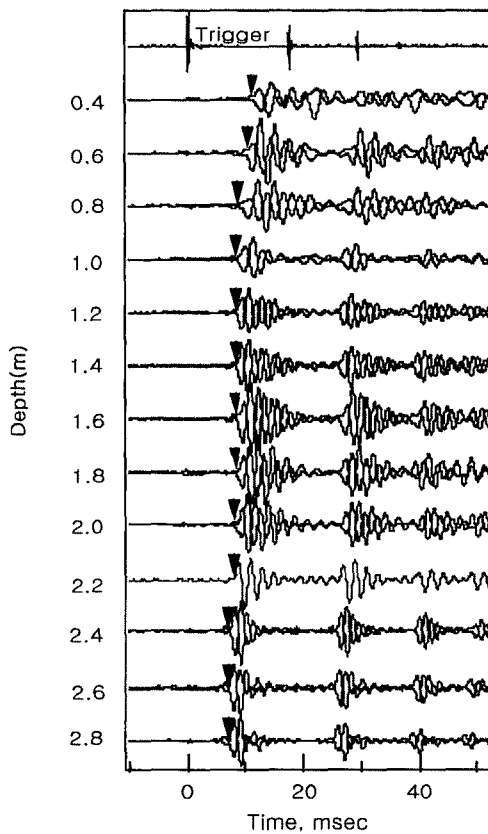


그림 15. 크로스홀 전단파 신호

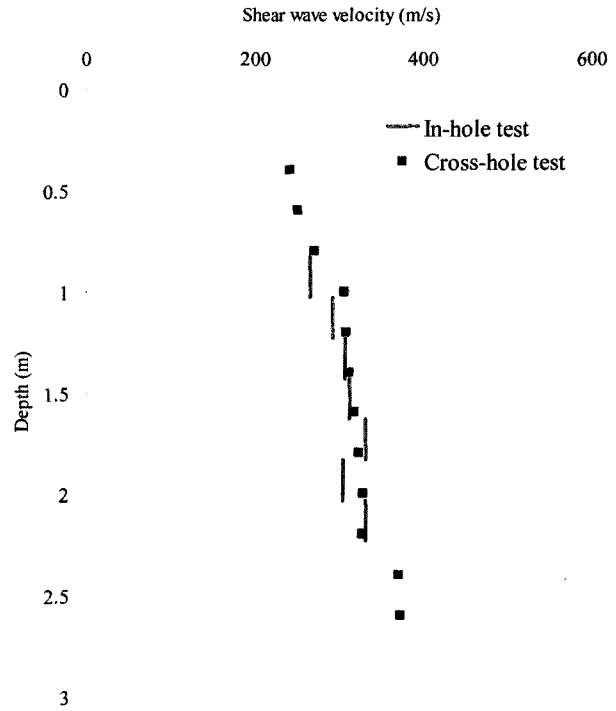


그림 16. 경희대 부지의 전단파 속도 주상도

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

## 7. 결론

내진 설계에 필요한 동적 물성치 측정을 위한 인홀 프로브를 개선하고 그 성능을 확인하였다. 발전기의 트리거 장치를 수동식에서 전기식으로 개량하여 조작이 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 그 신뢰성을 입증하였다.

## 감사의 글

본 연구는 한국과학재단 연구과제(과제번호 R05-2004-000-10394-0)의 지원에 의해 이루어진 것으로 이에 깊은 감사를 드립니다.

## 참고 문헌

1. 목영진 (1994), "역산이론을 이용한 다운홀 시험 결과의 해석", 한국지반공학회 논문집, 제10권, 제4호, pp.29-37.
2. 목영진, 강병수, 김정환 (2003)a, "인홀 시험을 이용한 암반의 동적 물성치 측정", 한국토목학회 논문집, 제23권, 제2C호, pp.119-125.
3. 토목설계의 요점 시리즈3 (1998), "기초 구조물/지중 구조물", 도서출판 과학기술, pp.242.
4. Hoar, R.J. and Stokoe, K.H. (1978), "Generation and Measurement of Shear Wave in suit", Dynamic Geotechnical Testing, ASTM STP 654, ASTM, pp.3-29.
5. Mok, Y.J. (1987), Analytical and Experimental Studies of Borehole Seismic Methods, Ph.D. Dissertation, The University of Texas at Austin, pp.32.
6. Mok, Y.J., Kim, J.H., and Kang, B.S. (2003)b, "A Pilot Study of In-Hole Seismic Method", *Journal of the Korean Geotechnical Society*, Vol.19, No.3, June, 2003, pp.23-31.
7. Hoar, R.J. (1982), Field Measurement Of Seismic Wave Velocity And Attenuation For Dynamic Analyses, Ph.D Dissertation, University of Texas at Austin. pp.37-447.
8. Paik, Y.S., Mok, Y.J., and Im, S.B. (1997), "A Study of the Geotechnical Imaging Techniques using Seismic Geotomography", *Proceedings of the XIV ICSMFE*, pp.565-568.
9. 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*, Vol.98, No.SM5, pp.443-460.
10. Stokoe, K.H., II, et. al. (2002), "Comparison of Vs Profiles from Three Seismic Methods at Yucca Mountain".

(접수일자 2004. 10. 16, 심사완료일 2005. 2. 4)