

A Study of In-hole Method to Measure Dynamic Stiffness of Subsurface Materials

¹⁾, Mok, Young Jin,
³⁾, Kim, Young Su,

²⁾, Jung, Jin Hun,
⁴⁾, Jung, Jae Woo

- 1) , (Member, prof., Dept. of Civil Engrg., Kyung-hee Univ., moks3@hanmir.com)
2) , (Member, Graduate Student, Dept. of Civil Engrg. Kyung-hee Univ., dovejjh@hanmail.net)
3) , (Member, Graduate Student, Dept. of Civil Engrg. Kyung-hee Univ.)
4) , (Member, Graduate Student, Dept. of Civil Engrg. Kyung-hee Univ.)

개 요 : 이 연구에서는 경제적이고 실용적인 지반의 동적물성치 측정 기술 개발을 위해 인홀 시험법을 연구하였다. 이번 연구에서 개발한 인홀 장비는 NX 크기의 검측공에서 사용할 수 있고 맨손으로 다룰 수 있을 정도로 작고 가볍다. 그리고 기존의 인홀 장비를 보다 편리하게 개량하였다. 또한, 인홀 시험에 있어서 최적의 댐퍼를 개발하였다. 이 장비는 여러 현장에서 크로스홀 시험과 인홀 시험을 통해 성능을 검증하였다.

주요어: 인홀 시험, 크로스홀 시험, 인홀 프로브, 댐퍼

SYSNOSIS : An in-hole seismic method has been developed to meet the requirement of economical testing cost and practicality in engineering practice to measure dynamic soil properties. The in-hole prove developed herein is small and light enough to be fit in three-inch boreholes and to be handled with bare hands. And author modified the existing equipment for the convenient purpose. In addition, the best damper suited to in-hole test was also developed. The performance of the source has been evaluated through extensive cross-hole tests and in-hole tests at various sites.

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

1. 서론

지진 시 지반 거동을 평가하는데 지반의 동적 물성치는 필수적이다. 이 물성치는 전단변형계수와 감쇠비(Damping ratio) 곡선이다. 이 곡선은 미소변형도의 최대전단변형계수와, 최소감쇠비와 변형도에 따른 비선형 부분으로 이루어져 있다. 최대전단변형계수는 현장탄성파시험으로 측정하는데, 여러가지방법이 있으나 이중 가장 널리 사용되는 방법은 크로스홀 방법(Cross hole)과 다운홀 방법(Down hole) 이다(Stokoe and Woods, 1972 ; Mok, Y.J 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, 감지기가 깊어짐에 따라 탄성과 파선(Ray path)이 길어져 양질의 데이터를 획득하기 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. 이 연구에서는 이차 시작품의 기계식 트리거 장치를(목영진, 강병수, 김정환 2003a ; Mok, Y.J., Kim, J.H., and Kang, B.S. 2003b) 서보 모터 트리거장치로 대체하여 양질의 전단파 신호를 발생하고 조작성이 간편한 우수한 장비를 개발하였다.

2. 지반의 강성도를 측정하는 탄성파 시험 방법

2.1 크로스홀 시험(Cross hole Test)

크로스홀 시험은 지반의 P파 속도 및 S파 속도를 깊이별로 측정할 수 있는 현장시험법이다(Stokoe and Hoar, 1978). 그림 1과 같이 2개 이상의 검측공을 설치하고 한쪽은 발진기(Source)를 설치하고 나머지 hole에는 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, Y.J 1987 ; 한국지반공학회, 1997 ; Hoar, 1982). 그리고 파의 진행 경로가 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 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.

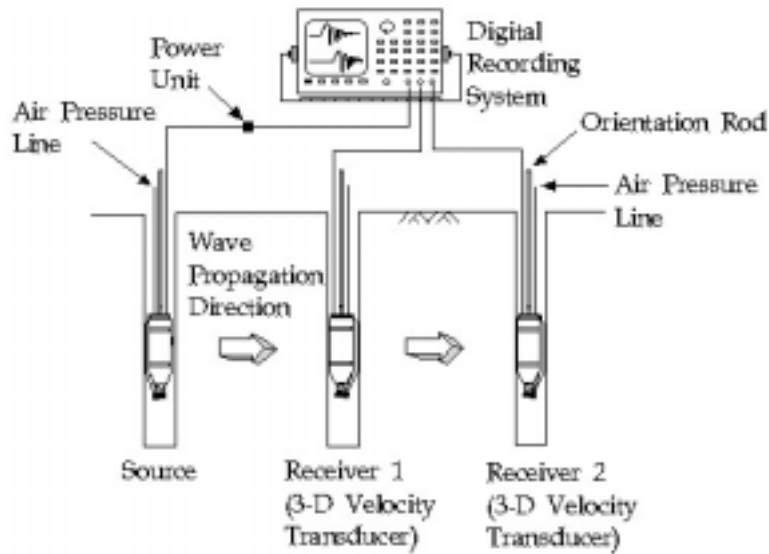


그림 1. 크로스홀 시험 개요도

2.2 다운홀 시험(Down Hole Test)

다운홀 시험은 지반의 동적물성치(압축파 속도, 전단파 속도)측정에 최근 많이 시행되고 있는 현장 탄성과 시험 중 하나이다. 그림 2와 같이, 발진기를 지표 위에 설치하고, 감지기는 검측공내 계획된 측정 깊이에 설치한다. 발진기에 충격을 가해 진동을 유발시키는데, 연직방향으로 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(한국지반공학회, 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 탄성과 속도 산출방법에 관한 연구도 수행되었다(목영진, 1994). 그러나 다운홀 시험은 크로스홀 시험 결과에 비해 대략적인 강성 주상도만 얻어진다. 때문에 이 방법의 장점인 저렴한 비용, 간단한 발진기 사용, 시험의 용이성 등을 무력화시킨다.

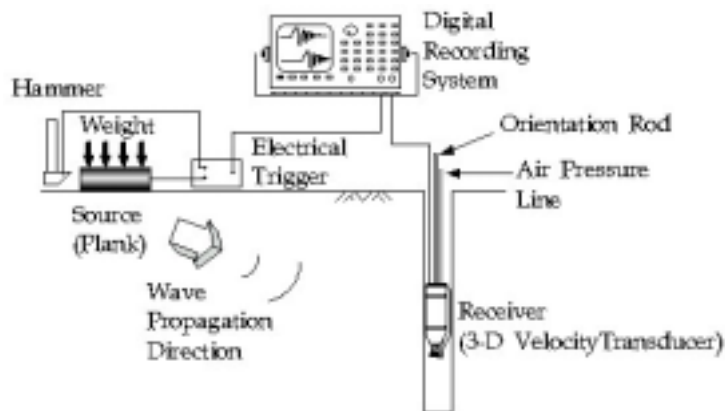


그림 2. 다운홀 시험 개요도

2.3 인홀 시험(In Hole Test)

인홀 시험은 앞서 말한 크로스홀 시험과 다운홀 시험 방법의 장·단점을 보완하여 저렴한 비용과 일반 기술자들이 용이하게 사용할 수 있게 하기 위해 개발되었으며, 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 변형시킴으로써 P파와 S파를 발생시키게 된다. 이때 변환되고 굴절된 전단파(P-S-P 파)를 계측하게 된다. 토사 층에서는 그리 성과가 좋지 않은 것으로 나타났으며 암반에서 적합한 것으로 판명되었다. 이 점을 고려하여 개발한 인홀 프로브는 물을 사용하지 않고 공기주머니(Air Bag)로 공벽에 밀착시켜, 서스펜션 P-S 검측에서 사용한 변환되고 굴절된 전단파가 아닌 직접 전단파(Direct Shear Wave)를 계측할 수 있다. 수평적으로 극성을 갖는 파, 즉 수평전단파(SH)는 비록 실제로 여러 파와 함께 일어났을지라도 이는 수평 경계면에 도달했을 때 다른 파로 바뀌지 않기 때문에 가장 큰 크기를 갖는 전단파가 먼저 도착하게 된다.

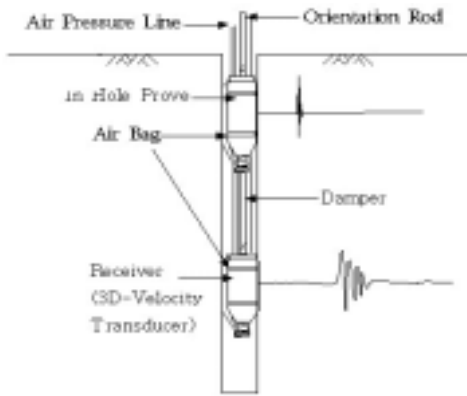


그림 3. 인홀 시험 개요도

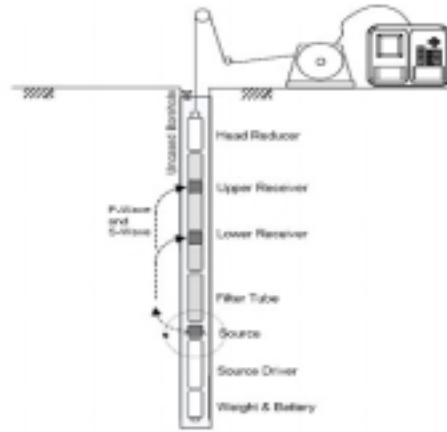


그림 4. 서스펜션 P-S logging 개요도

3. 발진기의 개발

3.1 발진기의 조건

아래와 같은 발진기가 갖추어야 할 필요 조건을 만족하도록 인홀 발진기를 개발하여 왔다. 최근의 삼차 시작품은 기계식 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.
- 지하수위가 있어도 시험이 가능해야 한다.
- 시험을 수행하기 위해서는 발진기의 조작이 간단해야 한다.
- 전단파의 도착지점을 정확히 판단하기 위해 발진기의 충격은 전단파의 극성 특성을 이용할 수 있어야 한다(김정환, 2002),

3.2 발진기의 개발 및 개량

이차 시작품의 스프링식 발진기의 개념도는 그림 5와 같다(Mok, Y.J., Kim, J.H., and Kang, B.S. 2003b).

트리거 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 장진된다. 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 위한 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 1차 개량한 발진기의 모습이다. 몸체 뚜껑부분을 MC나이론을 사용하여 조립 및 해체가 쉬워졌고, 자중을 줄였으며, 크기 또한 작게 줄였다.

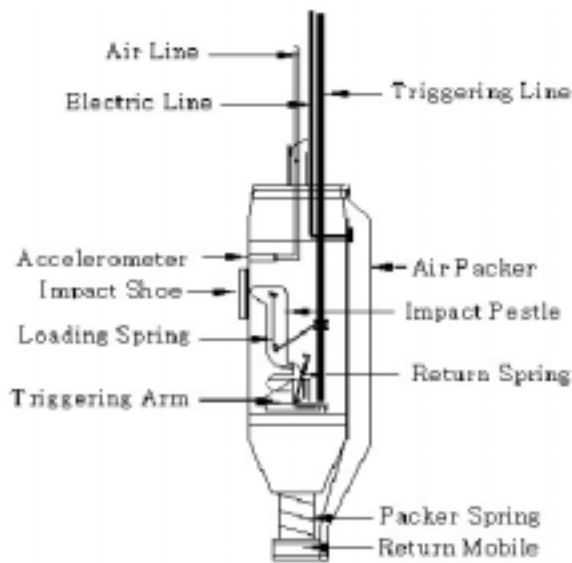


그림 5. 스프링식 발진기의 개요도



사진 1. 2차 스프링식 발진기
정면도(상), 측면도(중), 분해도(하)

앞서 설명 한 것처럼 지금까지는 발진기를 가동시키기 위해 와이어(Wire)를 사용하였다. 이 때문에 반복적인 트리거로 인해 와이어의 손상이 잦았으며, 트리거에 사용되는 와이어가 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 사용함으로써 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 전담하는 인력이 필요 없게 되어 시험에 필요한 인원을 줄일 수 있다.



사진 2. 모터를 이용한 3차 스프링식 발진기 분해도(좌), 세부도(우)

4. 3차 발진기의 검증

4.1 강봉을 이용한 검증

개발된 3차 발진기가 올바르게 작동하는지, 감지기가 감지 할 만큼의 충분한 에너지가 발생하는지 검증하기 위해 강봉에서 가속도계를 이용하여 진단과 속도를 측정하고(사진 3), 3차 발진기와 감지기를 이용하여 진단과 속도를 측정하였다(사진 4). 가속도계를 사용하여 길이 2m의 강봉에서 진단과 속도를 측정한 결과 2181m/s의 속도를 나타내었다. 같은 강봉에서 모터를 사용한 3차 발진기와 감지기를 사용하여 진단과 속도를 측정한 결과 2176m/s로 가속도계를 사용하여 측정한 진단과 속도와 동일한 결과를 보인다(그림 6).



사진 3. 가속도계를 사용한 강봉에서의 신호측정



사진 4. 발진기와 감지기를 사용한 강봉에서의 신호측정

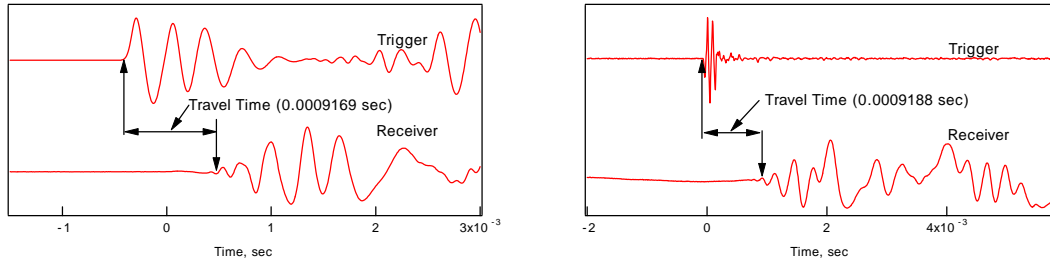


그림 6. 강봉에서 측정된 진단파 신호
(좌) 가속도계를 사용한 신호 (우) 3차 발진기를 사용한 신호

4.2 크로스홀 시험을 통한 발진기의 검증

중앙대학교 안성 캠퍼스 내에 있는 현장은 15m까지 시추를 하였으며, 7m까지는 철(steel)케이싱으로 지지하고 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. 실험 결과는 그림 7, 8, 9에 나타내었고, 이를 통해 두 개의 발진기를 사용하여 획득한 신호와 이를 분석한 결과간의 일치함을 알 수 있다.

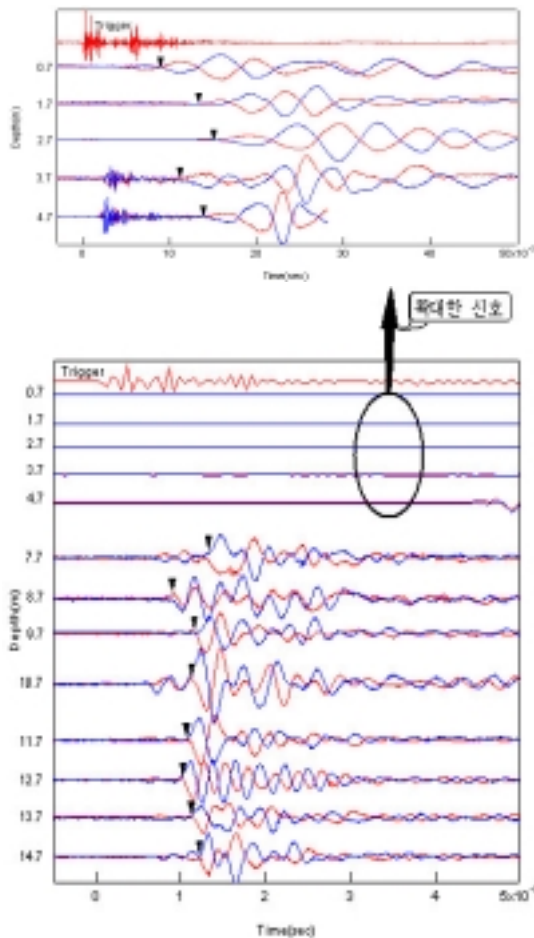


그림 7. 2차 발진기를 사용한 크로스홀 진단파 신호

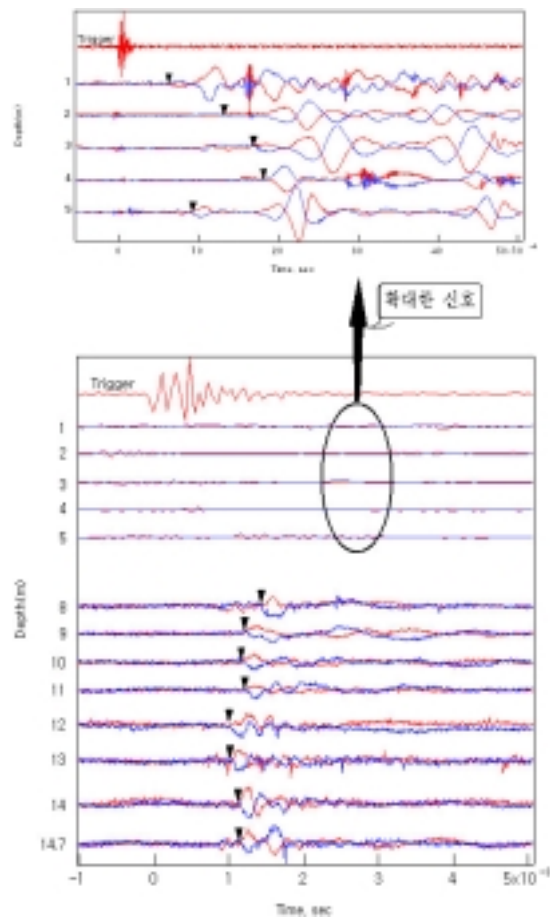


그림 8. 3차 발진기를 사용한 크로스홀 진단파 신호

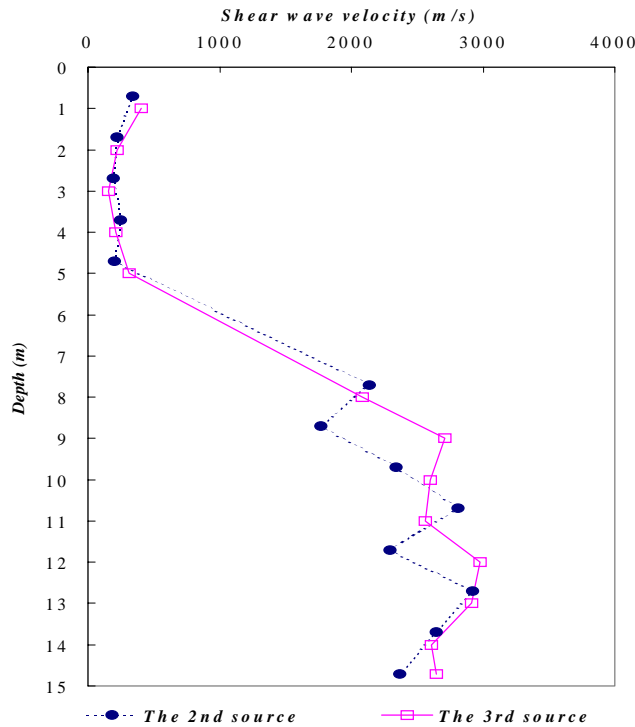


그림 9. 중앙대 현장의 속도 주상도

5. 3차 발진기를 사용한 인홀 시험

5.1 연결제의 개발

인홀 시험은 검측공 상·하를 전파하는 파의 도달 시간을 측정한다. 때문에 발진기와 감지기를 서로 연결하는 연결제가 필요하다. 이때 지반의 강성보다 연결제의 강성이 크면 지반을 통해 전달되는 탄성과 신호보다 연결제를 통해 전달되는 탄성과 신호가 더 빠르게 된다. 때문에 지반을 통해 전달되는 탄성과 신호가 연결제를 통해 전달되는 탄성과 신호에 묻히게 되어 지반을 통해 전달되는 탄성과의 시작점을 식별하기가 매우 곤란하게 되고, 우리가 알고자하는 지반의 동적물성치를 구할 수 없게 된다. 이 때문에 발진기와 감지기 사이를 연결하는 연결제의 중요성을 인식하고 다양한 재료와 원리를 이용한 연결제를 제작하여 인홀 시험에 있어 최적의 연결제를 개발하기 위해 체인, 방진고무, 진공호스, 섬유로프를 사용하여 실험하였다.

5.1.1 체인을 사용한 연결제

전단파의 진행 특성을 고려하여 전단파의 진행 방향과 같은 방향으로 움직여 줄 수 있는 플라스틱 재질의 체인을 사용했다(그림 10). 연결제를 타고 전파되는 전단파 속도를 측정하기 위해 발진기와 감지기사이의 거리를 1m가 되게 하여 공기 중에 띄어 놓은 상태로 시험을 수행하였다. 실험 결과 연결제를 타고 전달되는 Travel Time 은 3.995msec 이고, 전단파 속도는 250 m/s이다.

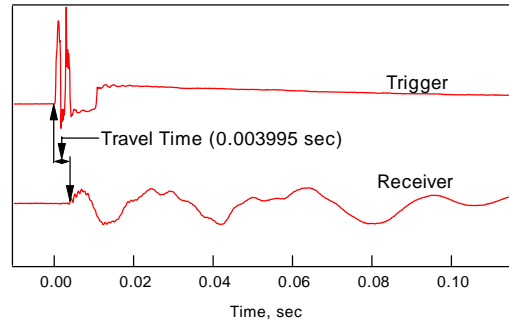


그림 10. 체인을 사용해 연결한 모습과 획득한 신호

5.1.2 방진고무를 사용한 연결계

천연고무를 사용하여 신장률, 인장강도, 탄성이 우수하고 고무의 압축과 전단 특성을 이용한 고효율 다축 방향의 진동과 소음을 제어할 수 있는 RUB-A볼트 방진고무를 사용하였다(그림 11). 앞서 한 실험과 같이 발진기와 감지기의 거리를 1m가 되게 하였으며, 공기 중에 띄워서 실험을 실행하였다. Travel Time은 6.60msec이며, 전단파 속도는 151.5 m/s이다.

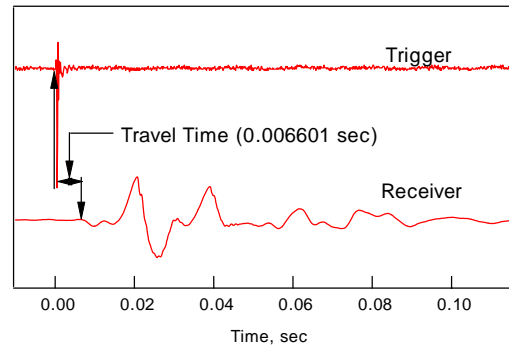


그림 11. RUB-A볼트 방진고무를 사용해 연결한 모습과 획득한 신호

5.1.3 진공호스를 사용한 연결계

외경 50mm 내경 20mm의 실리콘을 압축하여 성형한 진공호스를 사용하였다. 실험방법은 앞서 한 실험법과 동일하다. Travel Time은 13.42msec이며, 전단파 속도는 74.5 m/s이다.

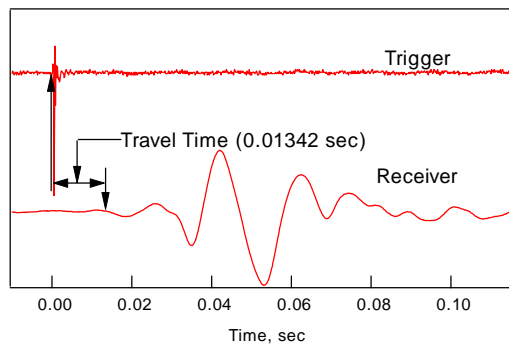


그림 12. 진공호스를 사용해 연결한 모습과 획득한 신호

5.1.4 섬유 로프를 사용한 연결재

일반적으로 시중에 판매하는 섬유 로프를 사용하여 실험을 하였다. 실험 방법은 앞서 한 실험법과 동일하다. Travel Time 은 3.413msec 이며, 전단파 속도는 292.9 m/s이다.

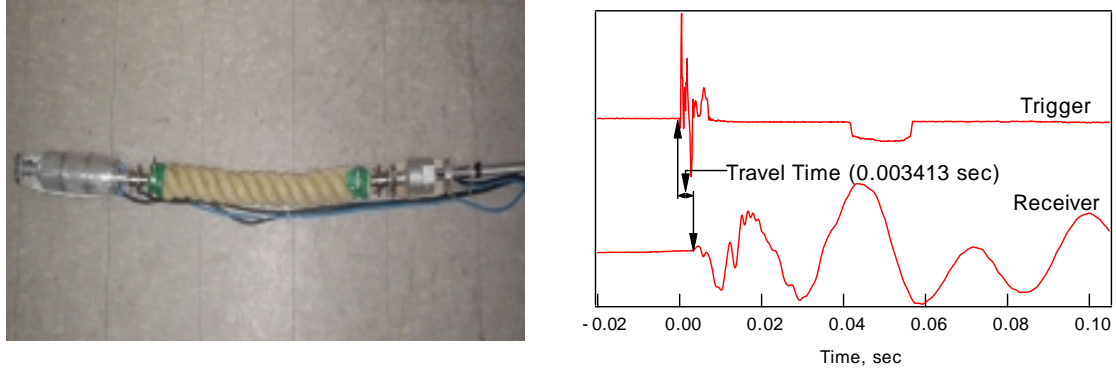


그림 13. 섬유 로프를 사용해 연결한 모습과 획득한 신호

5.1.5 시험결과 비교·분석

앞서 실험한 결과를 표 1에 나타내었다. 표 2는 일반적인 지반의 전단파 속도이다. 표 1, 2를 통해 진공 호스를 연결재로 사용하였을 때 74.5 m/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 시작품은 진공호스를 연결재로 사용하여 인홀 프로브를 제작하여 그 성능을 검증하였다.

표 1. 연결재를 통해 전달되는 전단파 속도

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

표 2. 토사지반에서의 평균적인 전단파 속도

(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
균은 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

5.2 경희대 부지에서의 크로스홀 시험 및 인홀 시험

경희대 구내 화강암 풍화토 현장에서 크로스홀 시험을 위해 파워오거를 사용하여 2개의 홀을 굴착 한 후 실험을 수행하였다. 굴착 심도는 2.8m이며 홀 간격은 2.68m이다. 이 현장에서 인홀시험도 실시하였으며,

발전기와 감지기의 거리는 1m로 하였고, 연결재로는 진공호스를 사용하였다. 케이싱의 영향을 배제하기 위해 케이싱은 설치하지 않았다. 그림 14는 크로스홀 시험에서 얻은 전단파 신호이고, 그림 15은 인홀시험의 전단파 신호이다. 각 신호에서 전단파 초동(도달시점)이 화살표로 표시되어 있다. 그림 16은 이 전단파 도달시간에서 구한 전단파속도 분포이다. 인홀시험 결과가 크로스홀시험 결과와 잘 일치하고, 전단파 초동 판별도 용이한 우수한 전단파 신호를 얻을 수 있어 만족할 만한 인홀프로브를 개발하게 되었다.

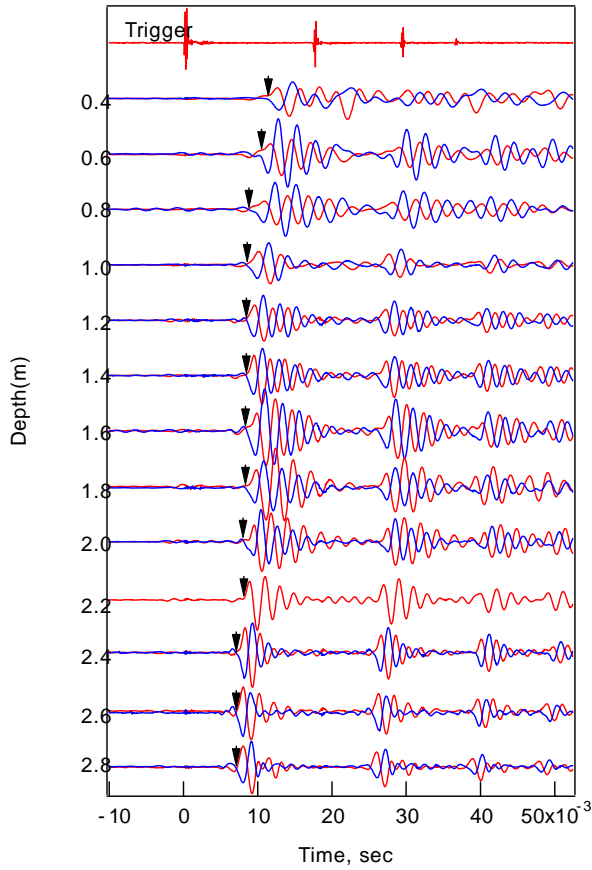


그림 14. 경희대 부지의 크로스홀 전단파 신호

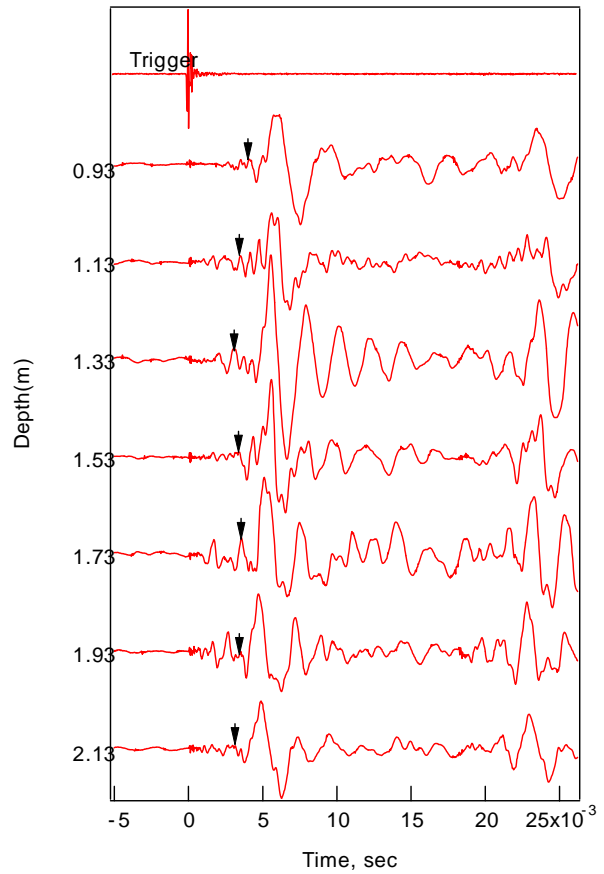


그림 15. 경희대 부지의 인홀 전단파 신호

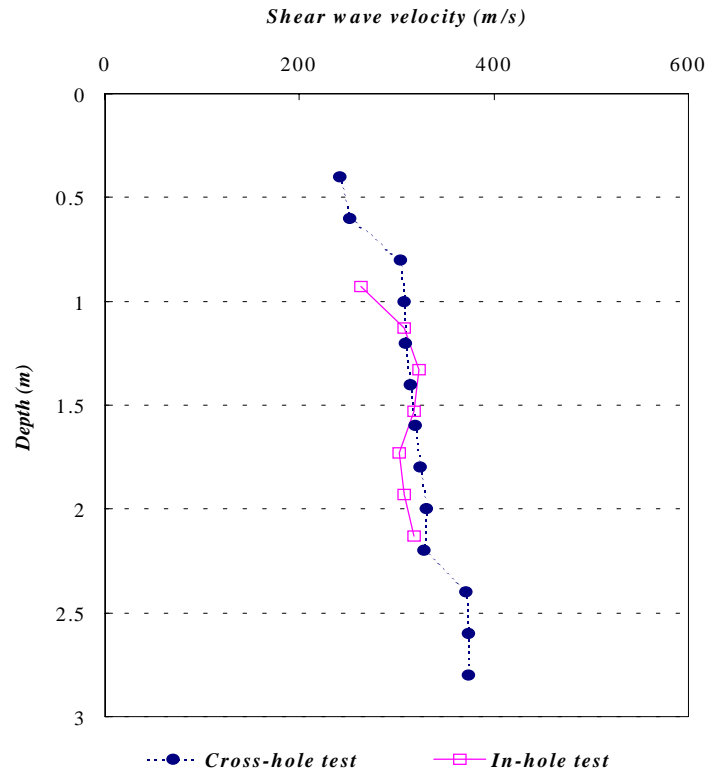


그림 16. 경희대 부지의 전단파 속도와 주상도

6. 결론

내진 설계에 필요한 동적 물성치 측정을 위한 인홀 프로브를 발전시키고 그 성능을 확인하였다. 발전기의 트리거 장치를 기계식에서 전기식으로 개량하여 조작이 편리하게 되었고, 최적의 연결재를 장착한 인홀 프로브를 완성하였다. 이 프로브를 이용하여 크로스홀 시험과 다운홀 시험의 장·단점을 보완한, 저렴한 비용과 일반 기술자들이 용이하게 사용할 수 있는 인홀 시험법을 개발하고 그 신뢰성을 입증하였다.

감사의 글

본 연구는 서울대학교 지진공학연구센터 연구과제(R11-1997-045-07003-0)의 지원에 의해 이루어진 것으로 이에 깊은 감사를 드립니다.

참고문헌

1. 김정한(2002), 지반의 강성도 측정을 위한 인홀 탄성과 시험법의 개발, 석사학위 논문.
2. 목영진(1994), "역산이론을 이용한 다운홀 시험 결과의 해석", 한국지반공학회 논문집 제 10권 제4호, pp. 29-37.
3. 목영진, 강병수, 김정한(2003)a, "인홀 시험을 이용한 암반의 동적물성치 측정", 한국토목학회 논문집 제 23권 제 2C호, pp. 119-125.

4. 한국지반공학회(1997), 진동 및 내진 설계(지반공학시리즈8), pp. 62-77.
5. Hoar,R.J., Stokoe, K.H., II (1978), "Generation and Measurement of Shear Wave in situ", Dynamic Geotechnical Testing, ASTM STP 654, ASTM, pp,3-29.
6. Mok, Y.J. (1987), Analytical and Experimental Studies of Borehole Seismic Methods, Ph.D. Dissertation, The University of Texas at Austin, p. 32.
7. 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.
8. Richard J. Hoar(1982), Field Measurement Of Seismic Wave Velocity And Attenuation For Dynamic Analyses, Ph. D Dissertation, University of Texas at Austin. pp 37-447.
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.