

인홀 시험을 이용한 터널 막장의 암반강성 측정에 대한 적용성 연구

A Pilot Study of Stiffness Measurements for Tunnel-Face Materials Using In-hole Seismic Method

목 영 진¹ Mok, Young-Jin

김 영 수² Kim, Young-Su

Abstract

The research concentrates on improving the in-hole seismic probe, which has been developed in past five years, to be used in stiffness measurements of tunnel-face materials. The size of probe was reduced to be fit in 45-mm diameter holes (or BX) drilled by a jumbo-drill, which is used to drill holes to install explosives for tunneling. Also trigger system was improved by using a down-speeding motor for operating convenience and air packing system was replaced with a set of plate-springs to eliminate supply of compressed air. These modifications are to adjust the probe for the unfavourable environment inside of tunnels and to test without any further drilling cost. The probe and testing procedure were successfully adopted with horizontal holes drilled by a jumbo-drill at a tunnel-face to evaluate the stiffness of rock mass. The measured shear wave velocities can be used to estimate deformation properties of rock mass for tunnel analyses.

요 지

본 연구는 지난 5년간 개발해온 인홀 발진자를 터널 막장의 강성도 측정에 사용가능하도록 개선하는데 주력하였다. 프로브는 터널의 폭파를 위해 점보드릴로써 천공된 직경 45mm의 홀에 맞추기 위하여 소형화되었다. 또한 트리거 시스템은 감속모터를 사용함으로써 편리하게 되었고, 에어 팩킹 시스템은 압축공기 없이 사용하기 위한 플레이트 스프링으로 교체하였다. 이러한 개선은 프로브를 터널내부의 환경에 적합하게 만들고 추가되는 비용 없이 실험하기 위한 것이다. 프로브와 테스트 과정은 암반의 강성을 측정하기 위해 터널의 막장의 수평 홀에 성공적으로 적용되었다. 측정된 전단파 속도는 터널 해석을 위한 암반의 변형 특성을 측정하는 것에 사용될 수 있다.

Keywords : In-hole seismic probe, Shear wave velocities, Tunnel-Face

1. 서 론

최근 전 세계에서 크고 작은 지진들이 빈번히 발생하고 있다. 국내의 경우도 중규모의 지진 발생이 빈번하여 사회간접시설의 내진 성능에 관심이 높아지고 있다.

지진 시 지반의 거동은 부지특성에 매우 큰 영향을 받는다. 이런 부지특성 즉, 부지 증폭현상을 연구하기 위해서는 지반의 동적 물성치 평가가 필수적이다. 대표적 동적 물성치에는 전단변형계수와 감쇠비(Damping ratio)가 있다. 전단변형계수는 현장탄성파시험으로 측

1 정회원, 경희대학교 토목공학과 교수 (Member, Prof., College of Architecture and Civil Engrg., Kyung Hee Univ., ysmok@khu.ac.kr)

2 정회원, 한국종합기술개발공사 사원 (Member, Engineer, Construction Supervision Division, Korea Engrg. Consultants Corporation)

정하는데, 여러 가지 방법이 있으나 이중 가장 널리 사용되는 방법은, 크로스홀 시험(Cross hole)과 다운홀 시험(Down hole)이다. 크로스홀 시험은 가장 정밀한 측정 방법이나, 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 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 장비 시작품을 개발하여 왔다.

본 연구에서는 기존의 수동식 트리거(trigger) 시스템을 스프링-감속모터를 이용한 전기식 시스템으로 대체하여, 보다 조작성이 용이하고 경제적 장비로 개량하였다. 뿐만 아니라 기존의 NX크기(직경 75mm)의 검측공에서 사용할 수 있던 장비를 BX크기(직경 54mm)에서도 사용할 수 있도록 소형화하였다. 개량한 장비를 이용하여 터널시공 시 장약설치를 위해 점보드릴(직경 45mm)로

천공하는 장약공에서 직접 탄성과 시험을 수행하여 지반조사를 위한 별도의 검측공 없이도 데이터를 획득하였다. 또한, 수직공 뿐만 아니라 수평방향의 검측공에서 시험을 수행하여 적용성을 평가하였다.

이 측정결과를 터널해석에 필요한 변형계수 추정에 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 현장 시험에서 측정된 변형계수는 미소변형도(small strain) 범위의 값으로, 사용 하중에 해당하는 현장 변형도를 감안하여 외삽(extrapolation)의 개념으로 추정하여 터널 해석에 사용하여야 한다.

2. 인홀 시험(In-hole Seismic test)

인홀 시험은 크로스홀 시험과 다운홀 시험 방법의 장·단점을 보완하여 저렴한 비용과 일반 기술자들이 용이하게 사용할 수 있게 하기 위해 개발되었으며, 그림 1과 같이 발진자와 감지기를 한 검측공에 설치하여 공벽 뒤의 지층을 따라 수직으로 전파되는 탄성파를 측정한다. 기존의 서스펜션 P-S logging은 Sonde라고 부르는 인홀 프로브(probe)를 물이나 벤토나이트 슬러리로 채워진 검측공에 띄워 탄성파를 측정하였다(그림 2). 이 측정기는 전자 해머가 한쪽방향으로 움직이면서 그 방

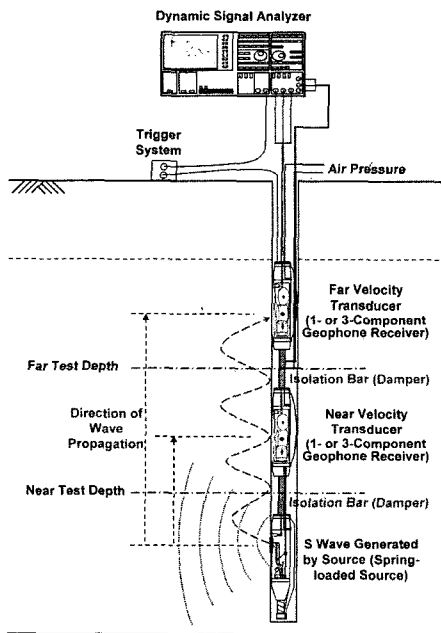


그림 1. In-hole Method

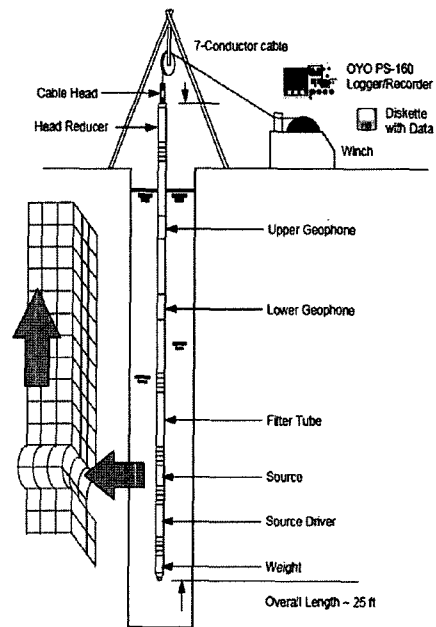


그림 2. Suspension Logging

향의 물에 압력을 가하고 이때 발생한 압력분포가 지반을 변형시키므로써 P파와 S파를 발생하게 된다. 따라서 변환되고 굴절된 전단파(P-S-P 파)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) 혹은 판스프링으로 공벽에 밀착시키도록 고안하였다. 공벽에 밀착된 프로브는 서스펜션 P-S 검층에서 계측하는 변환되고 굴절된 전단파 대신에, 토사 층을 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.

2. Suspension Logging

2.1 신호 분석

인홀 시험에서 구한 신호로부터 매질을 통과한 전단파의 속도는 발진자와 감지기 사이의 거리를 전파시간(Travel Time)으로 나누어서 계산한다. 인홀 시험에서 사용되는 거리는 발진기의 충격판 중앙에서부터 감지기까지의 거리를 사용한다. 전단파의 속도계산은 식 (1)과 같고, 이 속도로부터 전단탄성계수(Shear Modulus)는 식 (2)를 이용하여 구할 수 있다.

$$V_s = \frac{l}{t_s} \quad (1)$$

$$G = \rho V_s^2 \quad (2)$$

여기서,

l = 발진자와 감지기 사이의 거리(1m)

t_s = S파의 도달시간(Travel Time)

G = 전단탄성계수(Shear Modulus)

ρ = 밀도(Density)

3. In-hole probe

3.1 발진자의 개량

두 차례의 개량을 통해 고안된 스프링식 발진자(그림 3)는 반복적인 트리거(trigger)로 인한 와이어의 손상이 잦고, 시험 시 트리거를 위해 와이어를 펼칠 수 있는 공

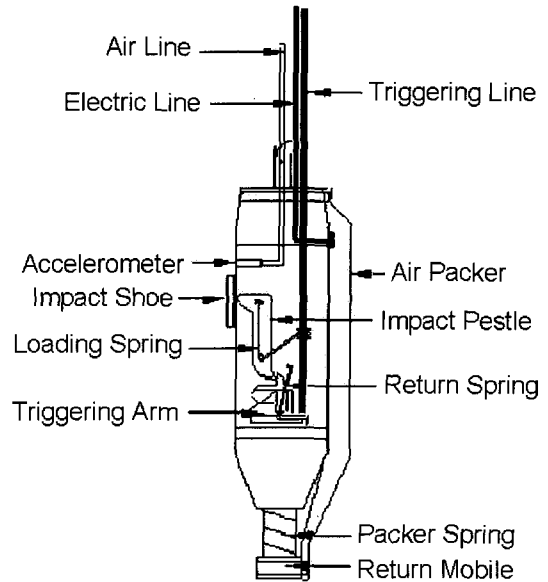


그림 3. 스프링식 발진자 개요도

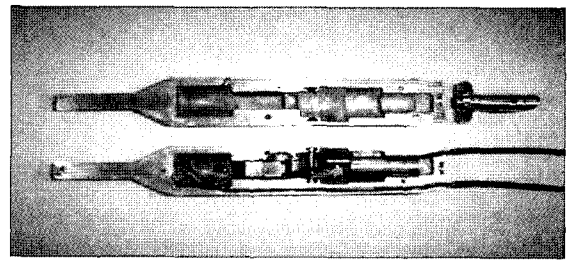


그림 4. NX크기의 스프링-감속모터를 이용한 발진자

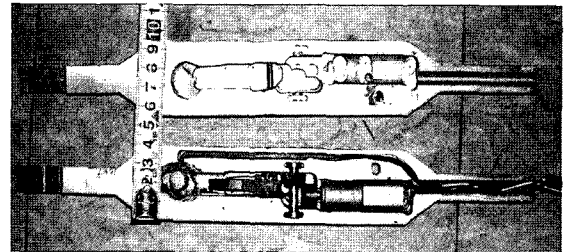


그림 5. BX크기의 스프링-감속모터를 이용한 발진자

간 확보 등의 단점이 있어, 이를 보완하기 위해 스프링-감속모터를 이용하는 전기식 시스템을 사용한 발진자로 개량하였다. 기존의 NX크기(직경 75mm)의 검층공에서 사용할 수 있던 장비(그림 4)를 소형화 하여 직경 45mm의 검층공 혹은 BX크기(54mm)의 검층공에서 사용할 수 있도록 개량하였다(그림 5).

3.2 속도 감지기

석유탐사나 탄성과 지반조사 목적으로 널리 사용되고

있는 지오폰(geophone)은 그림 6과 같이 추스프링-자석(mass-spring-magnet)으로 이루어져 있다. 측정할 질량을 갖는 추가 스프링으로 지반위에 놓인 지지대에 매달려 있다. 이 추에 코일이 부착되어 있고 이 코일의 질량은 추의 질량에 포함된다. 지반이 움직이면 지지대에 부착된 자석이 지반의 진동에 따라 움직이는 반면, 추는 관성에 의해 정지상태를 유지하려는 경향이 있어 자석보다 뒤 늦게 움직이게 된다. 따라서 코일이 자기장내에서 상대적으로 움직이게 된다. 자기장내에서 코일이 움직이면 전압이 발생하게 되는데, 전압의 크기는 움직이는 속도에 비례한다. 따라서 지오폰을 속도 감지기라고 부른다. 이 지오폰의 고유진동수(natural frequency)는 감쇠가 없는 이론적인 경우의 진동수를 말하며, 추의 질량과 스프링의 스프링계수의 비(m/k)에 좌우된다. 즉, 추의 질량과 스프링의 강성에 따라 고유진동수가 결정된다. 발생되는 전압의 크기는 코일의 길이와 코일에 수직으로 작용하는 자기장 밀도(flux density)의 곱에 따라 비례한다. 이 지오폰이 다운홀 탐사관에 장착되어 있다. 일반적으로 토사층에서는 저 진동수(4-20Hz)의 지오폰을, 암반과 같이 단단한 매질에서는 고 진동수(20Hz 이상)의 지오폰을 사용한다. 이번 시험에서 사용한 Geo Space사의 모델번호 GS-14-L9의 사양은 표 1과 같다.

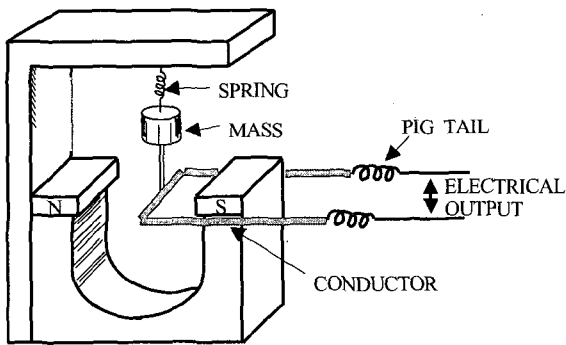


그림 6. 속도감지기(Geophone)의 개념도

표 1. 속도감지기(Geophone) 사양

Geo Space (GS-14-L9)	
Sensitivity ($\pm 15\%$)	600mV/ips
Natural Frequency ($\pm 20\%$)	28Hz
Coil Resistance ($\pm 5\%$)	1500ohms
Coil inductance	90mh
Damping Factor ($\pm 30\%$)	0.28
Damping Constant	738
Displacement Limit	0.09in
Inertial Mass	0.076oz
Orientation Angle	$\pm 180^\circ$

3.3 판스프링을 이용한 커플링

커플링이란 발진자와 감지기의 공내 밀착을 위한 방법으로 기존에는 소방호스와 압축공기를 이용한 에어 패킹 방식을 사용했다. 기존의 방식은 압축공기를 발생시키기 위해 전기와 컴프레서 등의 부대장비가 필요하다. 보통의 시험 현장과 달리 터널 막장에서의 시험은 시간적 여유도 없고, 공간적이나 전원공급의 문제점이 발생하여 판스프링을 사용하였다. 판스프링을 사용함으로써 시험 장비를 간소화 하였고, 압축공기를 주입하는 시간도 단축시킬 수 있었다.

이번 시험에 사용한 판스프링은 두께 0.06mm를 사용하였고(그림 7), 시험공의 직경에 맞게 절곡하여 볼트를 이용 발진자와 감지기에 부착하였다.

3.4 진공호스를 사용한 연결재

연결재는 발진자와 감지기를 연결하기 위한 것으로 시험 대상 지반의 강성보다 연결재의 강성이 작아야 한다. 연결재를 통해 전달되는 전단파 신호보다 대상을 통해 전달되는 전단파 신호가 먼저 들어와야지만 얻고자 하는 데이터를 얻을 수 있기 때문이다. 이번 시험에는 외경 35mm의 실리콘을 압축하여 만든 진공호스를 사용하였다. 진공호스가 연결재로서 적합하다는 것은 이미 검증된 바 있다(정진훈, 2004). 발진자와 감지기가 연결재로 연결된 인홀 프로브는 그림 8과 같다.

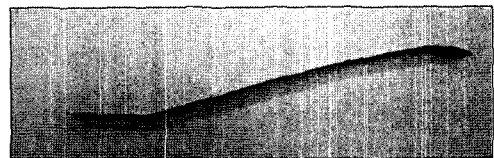
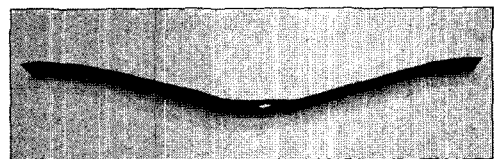


그림 7. 커플링을 위한 판스프링

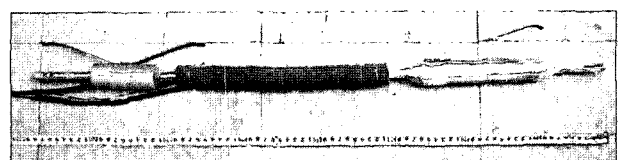


그림 8. In-hole Seismic Probe

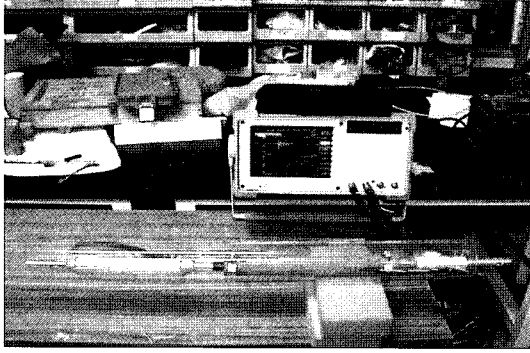


그림 9. 개량된 장비를 사용한 실내시험 전경

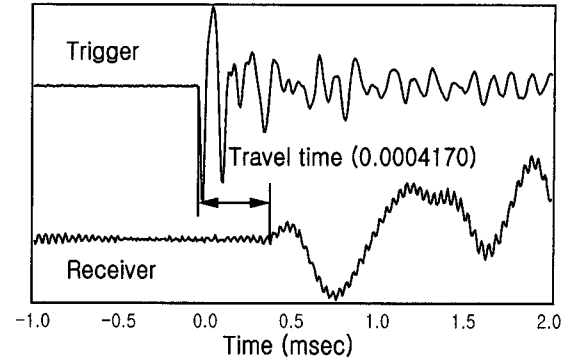


그림 10. 개량된 장비를 사용하여 획득한 전단파 신호

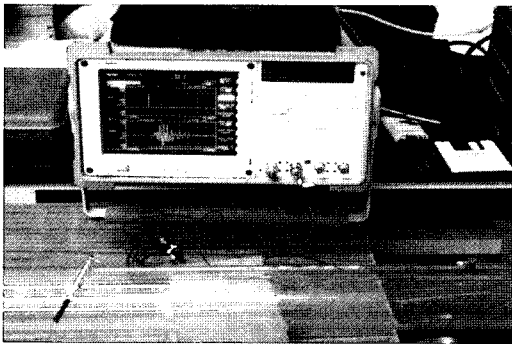


그림 11. 가속도계를 사용한 실내시험 전경

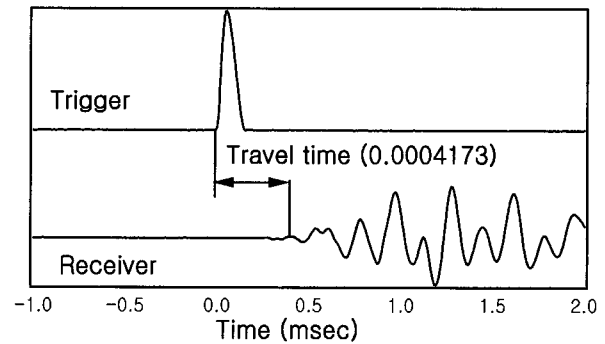


그림 12. 가속도계를 사용하여 획득한 전단파 신호

4. 실내 시험을 통한 검증

4.1 BX 크기의 파이프를 이용한 검증

개량된 스프링-감속모터를 이용한 발진기가 올바르게 작동하는지, 발진기에서 감지기가 감지할 만큼의 충분한 에너지를 발생시키는지를 검증하기 위해 BX 크기와 동일한 플라스틱 파이프를 이용 모의시험을 수행하였다. 개량된 장비로 획득한 신호는 그림 10과 같다. 이 값을 검증하기 위해서 가속도계를 이용하여 동일한 조건으로 시험을 수행하여 그림 12와 같은 신호를 획득하였다. 각각의 전단파 속도를 계산해 보면 1223m/s와 1222m/s로 잘 일치하였다.

4.2 강봉을 이용한 검증

발진자와 감지기 사이의 거리에 따른 영향을 확인하기 위해 강봉에서 발진자와 감지기의 거리를 20cm~200cm까지 변화시켜가면서 전단파의 Travel Time을 측정하였다(그림 13). 그 결과 발진자와 감지기 사이의 거리에 따른 특별한 보정은 필요치 않은 것으로 나타났다.

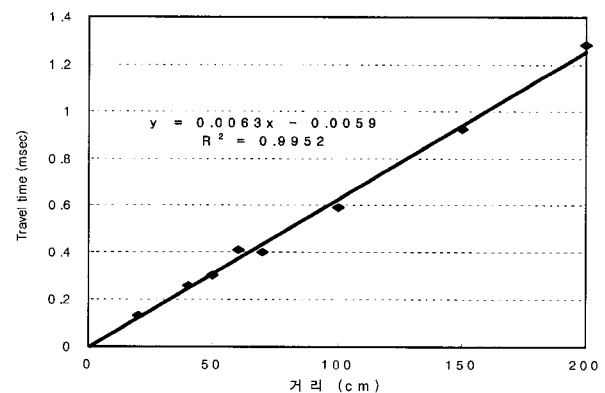


그림 13. 강봉에서 발진자와 감지기 거리별 Travel Time

따라서 인홀 시험 시 다른 보정 없이 발진자와 감지기의 거리만을 이용하여 전단파 속도를 구하면 된다.

5. 터널 현장에서의 적용성 평가

5.1 터널 현장 개요

개량된 장비의 적용성을 평가하기 위하여 현재 시공 중인 청주~상주간 고속도로 건설공사 중 3공구인 가

덕~회북간 고속도로 현장에 위치하고 있는 회북터널에서 시험을 수행하였다. 시험단면은 터널시점 1300m 지점이며 점보드릴(직경 4.5cm)을 이용하여 발파를 위해 횡방향으로 천공한 여러 장약공 중에서 청주방면(1단면) 3개소, 상주방면(2단면) 1개소에서 각각 시험을 수행하였다.

5.2 장약공을 이용한 탄성파 시험

점보드릴이 천공을 마치면, 발파를 위해 장약을 장약공에 설치하였다. 한 단면의 장약공에 장약을 모두 설치

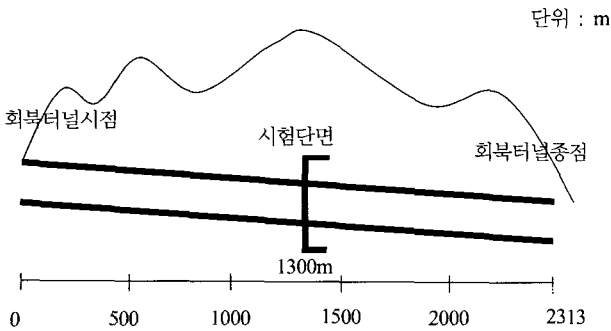


그림 14. 시험 터널의 측면 개략도

하는데 대략 40분 정도가 소요된다. 이 짧은 시간동안 시공에 지장을 주지 않으면서 탄성파 시험을 하였다. 개략된 장비의 검증 및 적용성 평가를 위해 2개 단면 4곳의 장약공에서 직접 인홀 시험을 수행하였다. 시험을 수행한 장약공의 개략적 위치는 아래 그림 16 같고 그림 17은 장약공에 시험 장비를 삽입하는 모습이다.

5.3 전단파 신호 및 전단파 속도주상도

터널 발파작업이 진행 중인 막장에서 시험을 수행하여 주변에서 발생하는 진동의 최소화, 여유로운 시험시

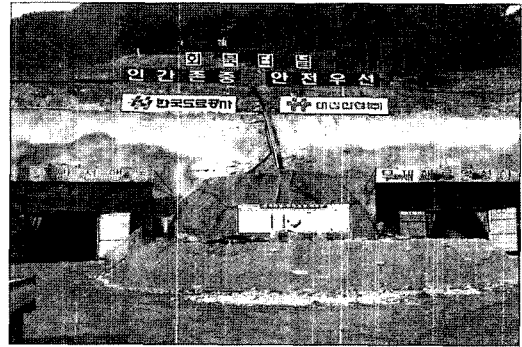


그림 15. 회북터널 전경

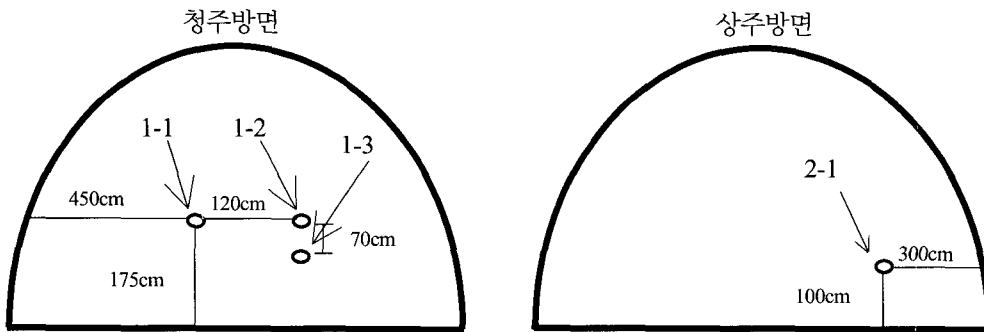


그림 16. 시험 단면의 개략적 위치도



그림 17. 장약공에 시험 장비 설치모습

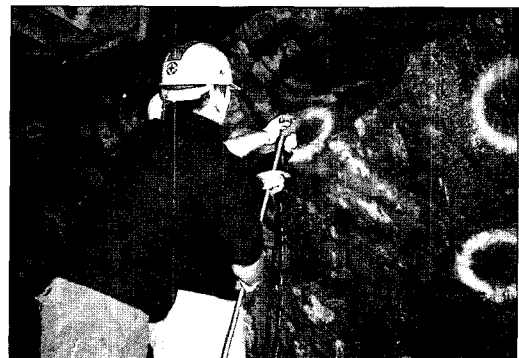


그림 18. 시험 후 장비 회수모습

간 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 막장에서 발파를 위한 천공 및 버럭 처리 등이 원인으로 판단된다.

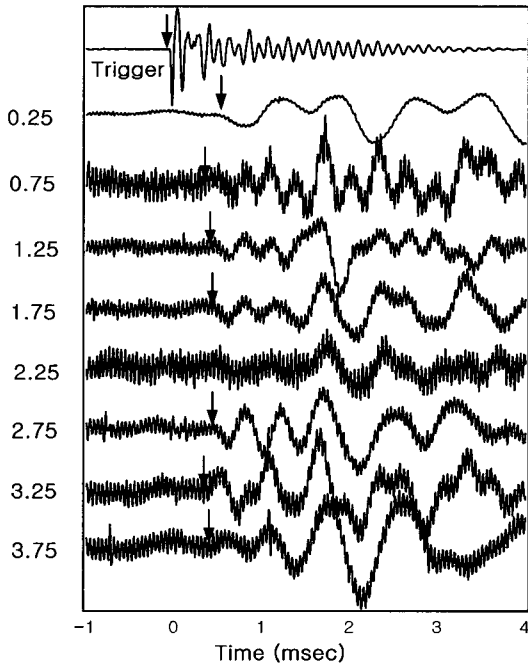


그림 19. 1-1 장약공에서 획득한 전단파 신호

아래의 그림 19는 청주방면 터널 막장(1단면)의 첫 번째 장약공에서 획득한 전단파 신호이고 그림 20은 전단파 신호를 이용하여 구한 전단파 속도 주상도이다. 깊이 2.25m 지점에서는 잡음(고주파)이 심해 도달시점을 결정하지 못하였다. 그림 21~26은 각각의 장약공에서 획득한 전단파 신호 및 전단파 속도 주상도이다.

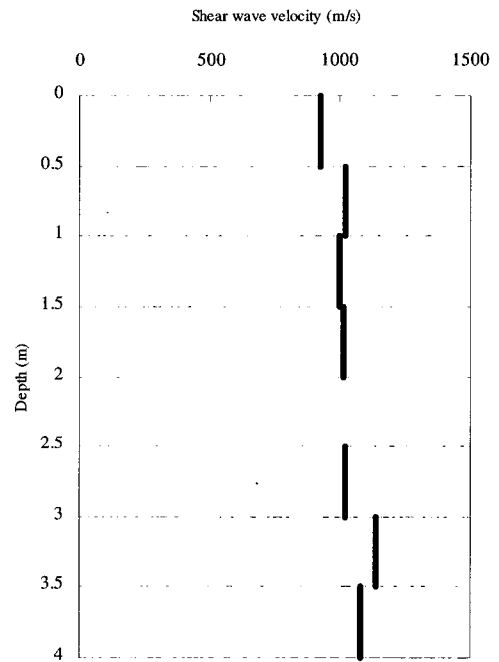


그림 20. 1-1 장약공의 전단파 속도 주상도

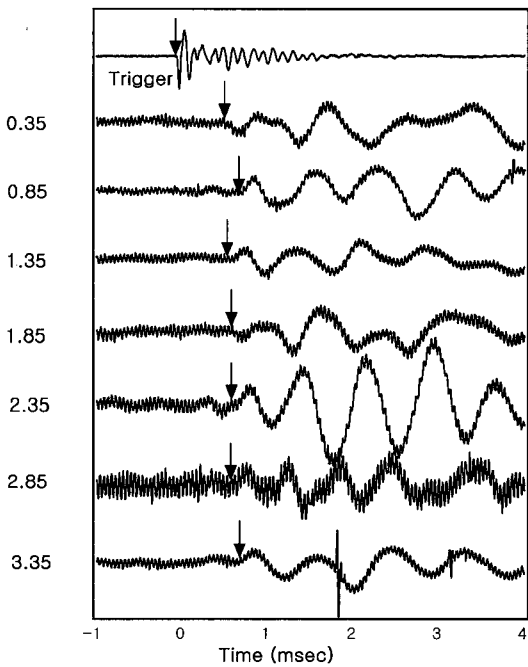


그림 21. 1-2 장약공에서 획득한 전단파 신호

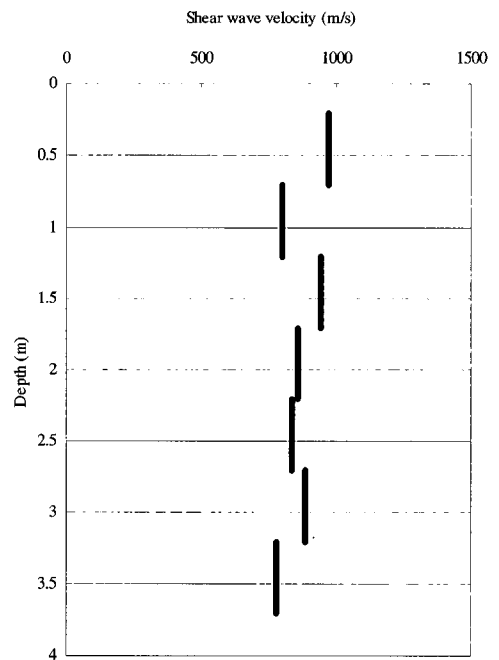


그림 22. 1-3 장약공의 전단파 속도 주상도

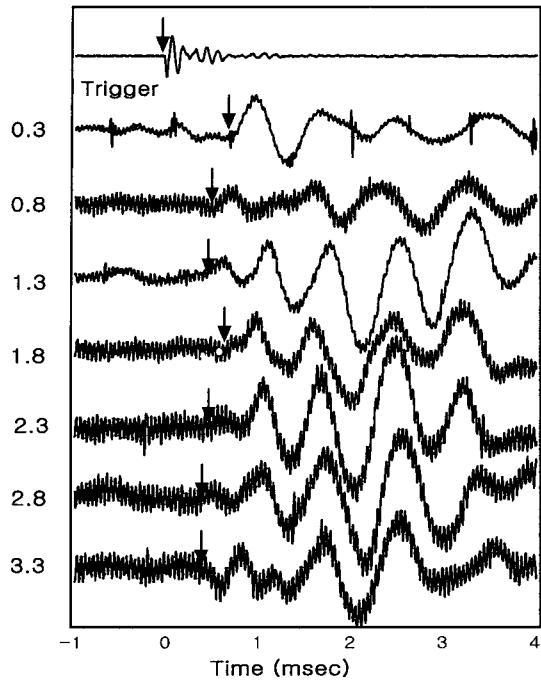


그림 23. 1-3 장약공에서 획득한 전단파 신호

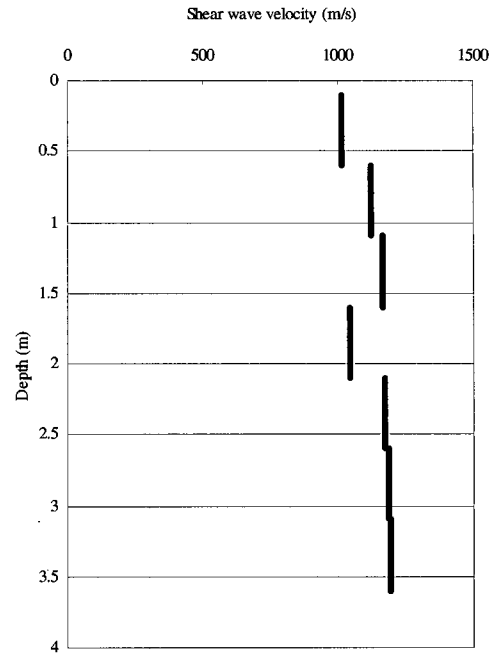


그림 24. 1-3 장약공의 전단파 속도 주상도

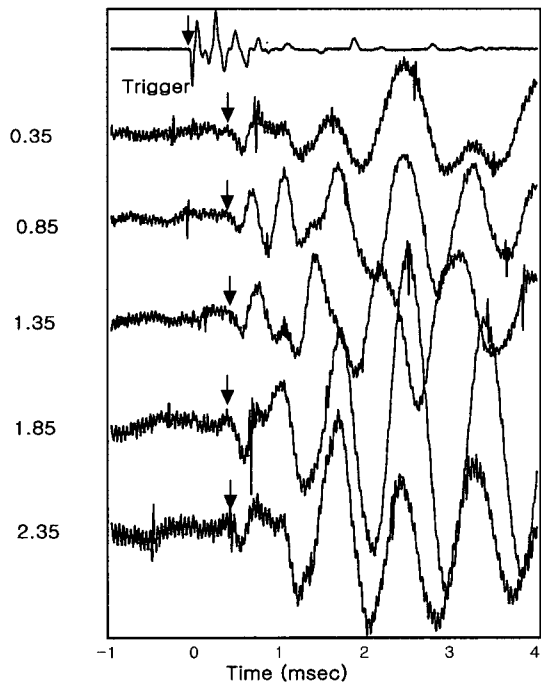


그림 25. 2-1 장약공에서 획득한 전단파 신호

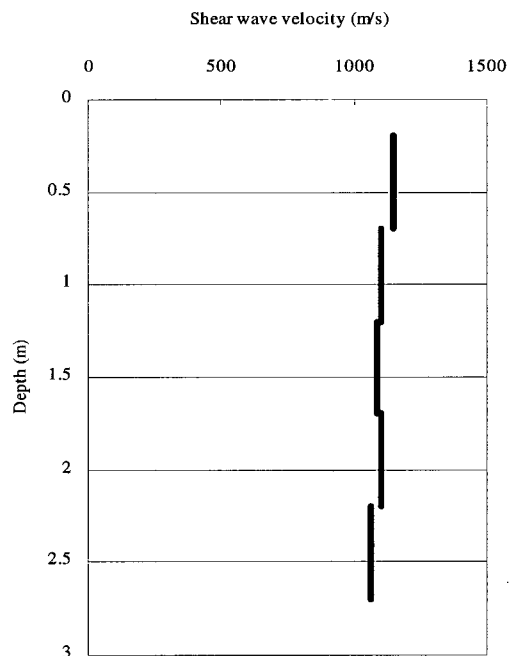


그림 26. 2-1 장약공의 전단파 속도 주상도

5.4 설계 시 수행한 지반조사 자료와 비교

설계 시 수행한 여러 지반조사 중에서 인홀 시험과 유사한 방법인 S-PS검층과 비교하였다. S-PS검층은 총 3공에서 실시하였는데 그 중 인홀 시험을 실시한 지점(터널시점 1300m)과 가장 근접한 공인 TB-5(터널시점

630m)과 TB-5-2(터널시점 1,560m)에서의 결과는 아래 그림 24, 그림 25와 같다. 그림에 나타난 결과 중 Vs를 살펴보면 TB-5에서는 심도가 깊어질수록 Vs가 줄어드는 경향을 나타낸다. 특히 터널 막장에 해당되는 깊이 80m~85m에서의 Vs가 대략 1,500m/s 이다. 또, TB-5-2에서는 심도가 깊어질수록 Vs가 증가하다가 60m지점

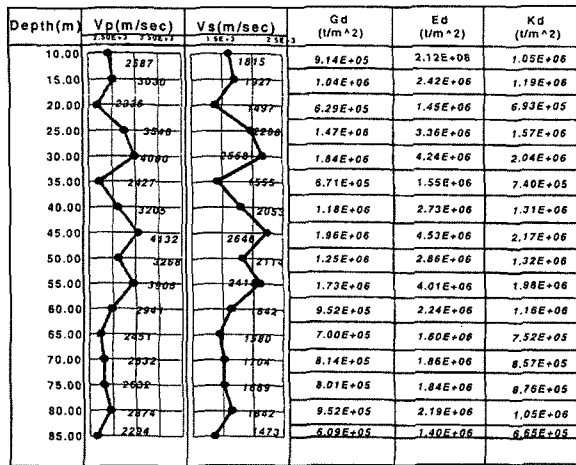


그림 27. S-PS 검층결과 (TB-5)

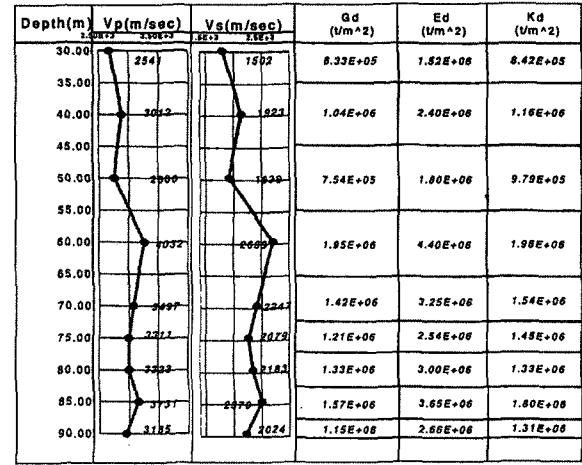


그림 28. S-PS 검층결과 (TB-5-2)

부터는 줄어든다. 막장에 해당되는 깊이는 85m~90m 이고 그 지점에서의 Vs는 대략 2,000m/s이다.

터널 막장에서 직접 수행한 인홀 시험에서 획득한 Vs는 대략 1,000m/s 정도이다. S-PS 검층을 수행한 지점과 인홀 시험을 수행한 지점이 일치하지 않아 직접적인 비교 대상이 되지 못하는 못하지만, 시험을 수행한 지점 모두가 천매암중 지역으로 간접적인 비교가 가능하다. 인홀 시험에서 획득한 Vs가 S-PS 검층에서 획득한 Vs보다 느리게 나타났다. S-PS 검층은 수직공을 사용하였고, 인홀 시험은 횡방향공을 사용하여, 전단파 속도에 큰 영향을 미치는 절리 및 파쇄부분의 영향이 상이하게 평가된 것으로 판단된다.

6. 결론

본 논문은 내진 설계 시 필요한 다양한 지반의 동적 물성치를 제공 할 수 있고, 저렴한 비용과 일반 기술자들이 용이하게 지반의 상세한 강성 주상도를 얻을 수 있는 인홀 시험을 터널 막장에서 실시함으로써 다양한 지반에서의 적용성을 평가하고, 기존의 장비보다 효율적이고 간편하게 장비로 개량하였으며 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 기존의 수동식 트리거(Trigger) 시스템의 발진자를 스프링-감속모터를 사용한 전기식 발진자로 개량하여 보다 조작이 용이하고 경제적인 장비로 개량하였다.
- (2) 기존의 NX크기(직경 75mm)의 검층공에서 사용할 수 있던 장비를 BX크기(직경 54mm)에서도 사용할

수 있도록 소형화 하였다.

- (3) 기존의 소방호스와 압축공기를 이용한 커플링 방법을 판스프링을 이용 커플링을 하여 전원, 컴프레서 등의 시험 장비를 간소화하였고, 시험 시간도 절약하였다.
- (4) 개량한 장비를 이용하여 터널시공 시 장약설치를 위해 점보드릴(직경 45mm)로 천공하는 장약공에서 직접 인홀 시험을 수행하여 지반조사를 위한 별도의 검층공 없이도 터널 막장의 전단파 속도 주상도를 획득하였다.
- (5) 수평방향인 장약공에서 인홀 시험을 수행함으로써, 수직공 뿐만 아니라 다양한 형태의 공에서도 시험이 가능함을 알 수 있었다.

감사의 글

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

터널공사 현장에서 시험을 할 수 있도록 도와주신 도로교통기술원 지반연구그룹에 깊은 감사를 드립니다.

참고 문헌

1. 강병수 (2003), "인홀 시험을 이용한 암반의 동적물성치 측정", 석사 학위논문.
2. 김정환 (2002), "지반의 강성도 측정을 위한 인홀 탄성파 시험법의 개발", 석사학위 논문.
3. 목영진, 조성호 (1998), "탄성파 기법을 이용한 그라우팅 성능 평

가에 관한 실험적 연구”, 연구보고서.

4. 목영진 (1994), “역산이론을 이용한 다운홀 시험 결과의 해석”, 한국지반공학회 논문집 제10권, 제4호, pp.29-37.
5. 송정락 (1995), “지반진동학”, 엔지니어즈, pp.137-145.
6. 이종재 (2001), “검측공 탄성파 시험법을 이용한 현장타설말뚝의 건전도평가” 석사학위 논문.
7. 정진훈 (2004), “지반의 동적 물성치 측정을 위한 인홀시험법에 대한 연구”, 석사학위 논문.
8. 지반공학용어사전, 엔지니어즈 (1996), pp.203.
9. 한국지반공학회 (1997), “진동 및 내진 설계(지반공학시리즈8)”, pp.62-77, 161-165.
10. Dobry, R. and Vucetic, M (1987). “Dynamic Properties and Seismic Response of Soft Clay Deposits”, Proceedings, International Symposium on Geotech. Eng. of Soft Soils, Vol.2, pp.51-87.
11. Hardin, B. O. and Drnevich, V. P. (1972), “Shear Modulus and Damping in Soil : Measurement and Parameter Effects”, Journal of the Soil Mechanics and Foundation Division.
12. Hoar, R.J., Stokoe and K.H., II (1978), “Generation and Measurement of Shear Wave in suit”. *Dynamic Geotechnical Testing*, ASTM STP 654, ASTM, pp.3-29.
13. Meissner, R. (1961), “Wave-Front Diagrams from up-hole shooting”, *Geophysical Prospecting*, Vol.9, No.4, pp.533-543.
14. Mok, Y.J. (1987), “Analytical and Experimental Studies of Borehole Seismic Methods”, Ph. D. Dissertation, The University of Texas at Austin, p.32.
15. Mok, Y. J. et al. (1988), “In Situ Damping Measurements by Crosshole seismic Method”, Proceedings, ASCE, Specialty Conference an Earthquake Engineering and Soil Dynamics II.
16. Ogura, K. (1979). “Development of a Suspension Type S-wave Log System”, OYO Technical Note TN-34, OYO Corp., Tokyo, Japan, 23, pp.23.
17. 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.
18. 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.
19. Stokoe, K. H. II, Abdel-razzak and K. H. (1975), “Shear Moduli of Two Compacted Fills”, *Proceedings of Conference on In Situ Measurement of Soil Properties*, ASCE, Vol.I, Raleigh, NC, pp. 442-449.

(접수일자 2005. 5. 31, 심사완료일 2005. 7. 5)