

# P파 속도 토모그래피를 이용한 터널 주변의 암반손상 평가

## Assessment of Rockmass Damage around a Tunnel Using P Wave Velocity Tomography

박 철 수<sup>1</sup> Park, Chul-Soo

사 공 명<sup>2</sup> Sagong, Myung

목 영 진<sup>3</sup> Mok, Young-Jin

김 대 영<sup>4</sup> Kim, Dae-Young

### Abstract

Construction of a tunnel induces rock masses damage around the tunnel. The degree of damage produced on rock masses will affect on the mechanical and hydraulic behaviors of the rock masses. In this paper, P wave velocity measured by cross-hole test was used to assess rock masses damage around the test tunnel. Initiation of source signal was carried out using mechanical impact at the source installed borehole. In consequence, the generated P wave signal was low noise and apparent wave form, which allows accurate pick-up of first arrival time. From the test, the region where rock damage is expected shows relatively low P wave velocity. In addition, with multiple points of P wave velocity measurement along each cross-hole, two dimensional P wave tomography was obtained. The tomography provides apparent view of the rock damage behind the tunnel. The measured P wave velocity was correlated with features of rock masses, porosity and Q value.

### 요 지

터널의 시공은 항상 주변 암반의 손상을 초래한다. 발생하는 손상의 정도는 주변암반의 역학적 및 수리학적 거동에 영향을 미친다. 본 논문에서는 크로스홀 시험을 통하여 P 파 속도를 측정하여 터널주변 암반의 손상을 계측하였다. 발진공에서의 탄성과 신호발생을 위하여 기계적인 충격을 가하였으며 그 결과로 발생된 P 파 신호는 잡음이 적으며 파의 초동 도달시간 판별이 용이하였다. 실험결과 암반의 손상이 예상되는 구간에서 P 파의 속도가 낮게 검출되었다. 크로스홀 공 내 다중의 지점에서 P 파 계측을 수행하여 이차원 P 파 토모그래피를 생성하였는데, 생성된 토모그래피는 터널 배면의 암반 손상이 발생한 구간에 대한 가시적인 결과를 나타내었다. 측정된 P 파의 속도로부터 간극율 또는 Q 값과의 상관관계를 통해 암반 특성의 정량적인 손상 평가가 가능하였다.

**Keywords :** Cross-hole test, P wave velocity, Rockmass damage, Tomography

### 1. 서 론

암반내 지하공간 굴착시 주변 암반을 손상시키며 이

러한 손상은 최종적으로 터널하중과 높은 상관성이 있다. 특히 불연속면이 잘 발달하지 않은 지반조건에서 초기 지압이 크게 작용하는 경우 공동주변의 암반은 취성과

1 정회원, 한국철도기술연구원 철도구조연구실 박사후연구원 (Member, Korea Railroad Research Institute)

2 정회원, 한국철도기술연구원 철도구조연구실 선임연구원 (Member, Korea Railroad Research Institute, rockcore@krrri.re.kr, 교신저자)

3 정회원, 경희대학교 토목건축대학 교수 (Member, Kyunghee Univ.)

4 정회원, 현대건설 기술품질개발원 부장 (Member, Hyundai Institute of Technology and Quality Development)

\* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2010년 5월 31일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

괴 거동을 보이며 이와 관련하여 캐나다 URL(Underground Research Laboratory) 에서 다양한 연구가 수행 되어왔다 (Martin 등, 1997; Martino와 Chandler, 2004). 주어진 초기지압조건에서 미소균열의 발생으로 인한 암반손상은 주변 암반의 강도를 약화시키며 이러한 현상은 비가역적으로 발생하는 것이 확인되었다. 이와 같이 발생하는 암반손상의 정도 및 범위는 암반의 상태, 특성, 지압조건 등에 따라 다를 것이다.

터널 설계단계에서 주어진 암반조건 및 지압조건에 따라 탄성 혹은 탄소성적인 방법(Park과 Kim 2006; Carranza-Torres와 Fairhurst, 1999; Carranza-Torres와 Diederichs, 2009; Fahimifar와 Ranjbarnia, 2009)에 의하여 해당 터널 주변 암반에 대한 손상영역의 평가가 가능하다. 그러나 이러한 방법들은 각 방법의 기본 가정에 의해 그 한계는(예를 들면 암반의 탄소성적 거동, 손상영역 형태의 가정 등)분명히 있으며 또한 기존에 제안된 방법은 시공의 영향을 전혀 고려하지 않는 단점이 있으므로 발파 등으로 인한 손상의 발생을 고려할 수 없다. 일반적으로 터널현장의 경우 불연속면이 존재하는 상태이므로 취성의 암반파괴도 발생 가능하지만 불연속면의 발달로 인한 암반블록의 변형 및 탈락이 더욱 잦은 빈도로 발생한다. 따라서 시공 중 막장 혹은 그 후방에서 암반의 손상을 측정하고 손상의 크기 및 범위를 평가할 수 있는 방법이 제시되어야 한다.

터널 주변 암반손상의 평가와 관련해서는 음향방사법(Acoustic Emission)과 초음파를 이용한 터널 주변 암반손상 평가를 시도한 사례가 있다(Falls와 Young, 1998, Meglis 등, 2005, Balland 등, 2009). AE에 의한 계측은 굴착으로 인하여 미소균열이 발생하는 소리를 음파로 측정하며, 초음파 기법은 발생된 미소균열의 분포를 초음파의 속도를 이용하여 간접적으로 평가할 수 있는 기법이다. 초음파의 경우 일반적으로 20kHz 이상의 주파수를 가진 파로서 비파괴분야에서 자주 사용되며 직진성 및 조향성은 좋고 주파수가 높은 관계로 파의 전파거리가 체적탄성파에 비해 짧다. Meglis 등(2005)의 연구결과 초음파 기법을 이용하여 터널주변의 암반손상을 평가 할 때 초음파 센서가 삽입될 검측공의 간격이 약 50cm 이내였다. Meglis 등(2005)의 현장시험 결과 신선한 Lac du Bonnet 화강암의 경우 1MHz 주파수에서 음파 속도는 약 6,000m/sec이었고, 현장에서 채취한 암시편에 대한 실내시험 결과 약 4,000~5,000m/sec이었다. 미소균열이 발달한 손상부에서 채취한 시료의 음파는

약 3,000m/sec의 속도로 관측되고 손상의 발달에 따른 초음파의 속도가 작게 관측되는 양상을 보였다. 이와 같이 음파 혹은 탄성파의 속도 변화 측정에 의한 암반손상의 평가는 유효한 기법으로 인식되고 있다.

본 연구에서는 타격에 의하여 생성되는 탄성파를 이용하여 터널 주변 암반의 손상을 평가하고자 한다. 앞서 언급한바와 같이 초음파의 경우 파의 짧은 전파거리로 인해 공 간의 간격이 좁아져 잦은 검측이 요구된다. 그러나 타격에 의한 체적탄성파의 경우 발생하는 파의 주파수가 낮으므로 발생하는 파는 더욱 먼 거리를 전파할 수 있는 장점이 있다. 본 논문에서는 시험터널내에 천공한 검측공을 이용하여 검측공 탄성파 시험 중에서 신뢰성이 가장 높은 크로스홀 시험(crosshole test)을 수행하였다. 크로스홀 시험으로 부터 계측된 P 파 속도를 사용하여 터널주변 암반의 손상영역을 평가하였다.

## 2. 크로스홀 시험 장비 및 방법

크로스홀 시험은 지반의 P 파 및 S 파 속도를 깊이별로 측정할 수 있는 현장 시험 기법이다(Hoar and Stokoe, 1978). 그림 1과 같이 약 3m 간격의 두 개 이상의 검측공에서 한쪽은 발진자를 설치하고 나머지 검측공에는 감지기를 동일한 깊이에 설치한다. 이때 발진자에서 발생시킨 체적파가 지반을 수평방향으로 통과하여 감지기에 도달하는 시간을 측정하여 깊이별로 탄성파 속도를 측정할 수 있고, 또한 전단탄성계수와 포아송비를 구할 수 있다(Mok 1987). 크로스홀 시험은 파의 진행경로가 일정하고, 발진자와 감지기가 같은 위치에 있어 자세한 지층구조를 알아낼 수 있는 정밀한 측정 방법이다. 지반조사 목적으로는 일반적으로 측정심도를 0.5m 씩 표층에서 지반 하부로 증가시키고, 검측공(직경 75mm) 내

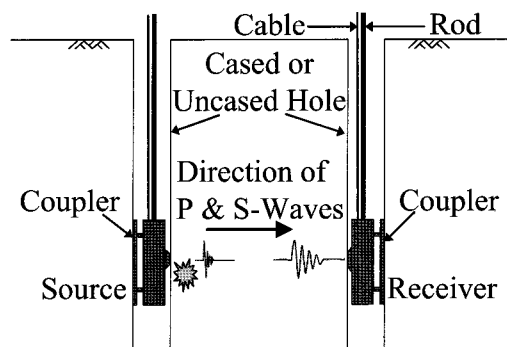


그림 1. 크로스홀 시험 개요도(Park 등, 2008)

에 설치할 정도로 소형이며 효율적인 타격에너지를 낼 수 있는 성능 좋은 발진자가 필요하다. 일반적으로는 크로스홀 시험은 그림 1과 같이 두 개의 검측공만으로도 수행할 수 있지만, 지층간의 탄성파 속도 차이로 인한 굴절파의 간섭, 지반의 비등방성 등의 영향을 최소화하기 위하여 세 개의 검측공을 사용하는 것이 바람직하다 (Hoar and Stokoe, 1978).

탄성파 시험을 수행할 때 발진자의 목적은 식별이 가능한 양질의 P 파와 S 파를 발생시키는 것이다. 이러한 목적에 부합하는 발진자의 요건은 다음과 같이 정리될 수 있다. 첫째, 발진자는 풍부한 에너지를 발생시켜 신호 대 잡음비가 커야한다. 둘째, 발진자는 방향성을 갖추어 탄성파 에너지가 한 방향에 집중적으로 발생하게 하며 주요 입자 진동 방향에 감지기의 방향 설정이 손쉽게 이루어져야 한다. 마지막으로 우수한 반복성을 갖추어야 한다. 일반적으로 S 파는 먼저 도달하는 P 파를 비롯하여 다른 파에 섞여 계측되기 때문에 S 파의 최초 도달 시점을 구분하기 어렵다. 따라서 지난 수십 년간 양질의 S 파를 발생시키기 위한 발진자가 개발되었고 크로스홀 시험에 성공적으로 사용되어 왔다. 쉽게 타격 방향을 반전할 수 있는 기계식 발진원으로 뼈기형 발진자(Mok, 1987), 전자석을 이용한 Dizzy 발진자(Fuhriman, 1993), 압전소자를 이용한 발진자인 BeBop(Roblec, 1990)과 GeoPing(목영진 등, 1998) 등을 예로 들 수 있고, 최근 Park 등(2008)은 그림 2와 같이 서보모터로 충격공이를 작동시켜 응력파를 발생시키는 전기-기계식 발진자(Electro-Mechanical Source)를 개발하여 토사 및 암반에서 성공적으로 적용한 사례가 있다. 본 연구의 크로스홀 현장시험에서는 Park 등(2008)이 개발한 전기-기계식

발진자를 사용하였으며, 기존의 지반조사 목적이 아닌 터널주변 암반의 손상영역을 평가하기에 적합한지 그 적용성을 확인하고자 하였다. 공학적 측면에서 매질 내에 존재할 수 있는 공극수의 영향 때문에 P 파 보다는 S 파 속도 검측을 더욱 많이 사용하지만, 본 연구에서는 대상 매질이 물의 P 파 속도보다는 일반적으로 훨씬 빠른 암반이므로 계측이 상대적으로 수월한 P 파를 사용하였다.

본 연구에서 수행한 크로스홀 시험 장비의 주요구성은 전기-기계식 발진자(source)와 속도계를 장착한 감지기(receiver), 탄성파 제어장치, 신호획득장치, 방향조정장치로 구성되어 있다. 전기-기계식 발진자의 기본 작동 원리는 고탄력 스프링을 이용하여 충격공이(impact pestle)를 방아쇠가 장전 되듯이 당겼다(loading), 튕기면서(releasing) 공벽을 타격하여 충격에너지가 발생하도록 하는 것이다(그림 2 참고). 기어-서보모터 발진 장치(gear-servomotor device)의 사용으로 전 과정을 반복해서 손쉽게 자동으로 작동시킬 수 있으며, 지속적으로 일정한 크기의 탄성파를 발생시킨다. 충격공이는 공벽에 점(point)으로 탄성파 에너지가 전달되기 때문에 크로스홀 시험을 수행할 때 계측간격을 세밀하게 하여 탄성파 속도의 정밀한 계측이 가능하다. 발진자의 공벽밀착 시스템은 지하수위 아래에서 수압으로 인한 공기 주머니의 팽창 한계와 지속적인 공기 공급이 이루어져야 하는 불편함을 없애기 위해 공기주머니(air packer) 대신 기계식 밀착 장치(mechanical packer)를 고안하였다. 이로 인해 공기를 공급하는 부대장비가 필요치 않아 크로스홀 시험 장비를 간편하게 하였다. 기계식 밀착 장치는 감지기에도 동일하게 장착하였다. 탄성파의 발생 및 발진자

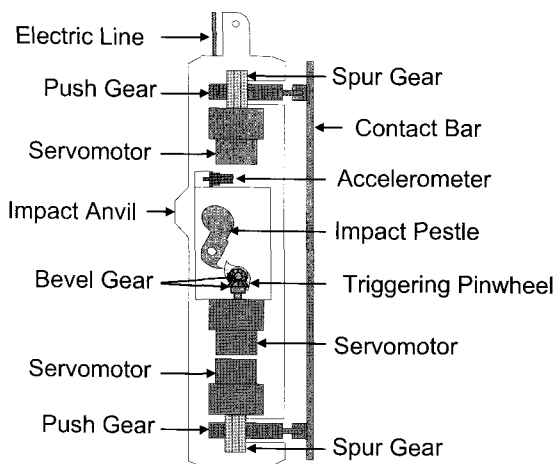


그림 2. 전기-기계식 발진자 개요도(Park 등, 2008)

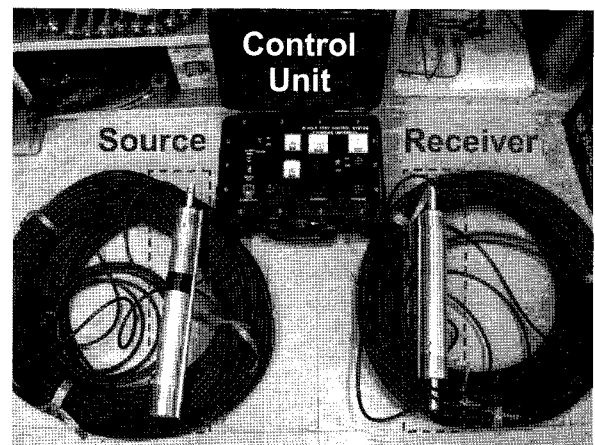


그림 3. 전기-기계식 발진자, 감지기 및 제어장치

와 감지기의 공벽 밀착은 탄성과 제어장치(control unit)를 통해 간단하게 조작할 수 있다. 전기-기계식 발전자와 감지기 그리고 탄성과 제어장치는 그림 3과 같다.

전기-기계식 발전자를 이용하여 크로스홀 시험을 수행할 때 파의 전파 방향과 입자 운동 방향을 조절하여 P 파 또는 S 파를 계측할 수 있다. 그림 4는 전기-기계식 발전자를 이용한 크로스홀 시험과 인홀 시험에서 계측된 응력파의 종류를 도시한 것이다. 췌기형 발전자와 달리 전기-기계식 발전자로부터 계측되는 크로스홀 시험의 S 파는 입자운동(particle motion)이 수평방향이고 검측공면(vertical borehole plane)의 바깥으로 운동(out-of-plane)하는 SH 파이다. 크로스홀 시험을 통해 계측된 대표적인 P 파, SH 파 신호는 그림 5에 나타내었다. 모든 신호의 도달 시점이 명확하고 특히 SH 파의 극성 특성이 잘 나타나고 있다. 본 시험장비를 사용한 이전 연구(Park 등, 2008)에서는 암반을 포함한 자연지반의 탄성과 속도 주상도와 층상 구조를 성공적으로 평가하였다. 본 연구에서는 기존의 평가 목적을 새로운 영역으로 확

대하여 터널굴착에 따른 암반의 손상영역을 평가하고자 하였다. 그림 5와 같은 암반에서의 양질의 신호는 터널 암반현장의 크로스홀 시험에 암반의 손상영역 평가를 목적으로 본 시험장비를 적용하는 것이 가능함을 보여주었다.

### 3. 크로스홀 현장시험

#### 3.1 현장시험 개요

크로스홀 시험은 시험터널에서 수행되었다. 시험터널은 용인시 구성면 마북리에 있는 현대건설 시험터널에서 수행되었다. 본 현장은 용인지역에 넓게 분포하는 경기편마암 복합체 중 대표적인 호상 흑운모편마암으로 구성되어 있으며 부분적으로 규장 편마암과 각섬석 편마암이 존재한다. 호상구조를 가진 편마암이 우세하나 부분적으로 편리구조가 발달한 흑운모 편암이 국부적으로 나타나며 열수변질의 증거도 관찰되었다(정연문 등, 1996).

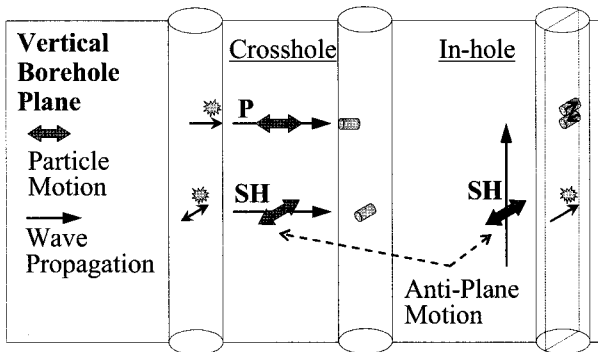


그림 4. 전기-기계식 발전자를 이용한 검측공 탄성파 시험의 발전자와 감지기 방향과 계측되는 응력파의 종류(Park 등, 2008)

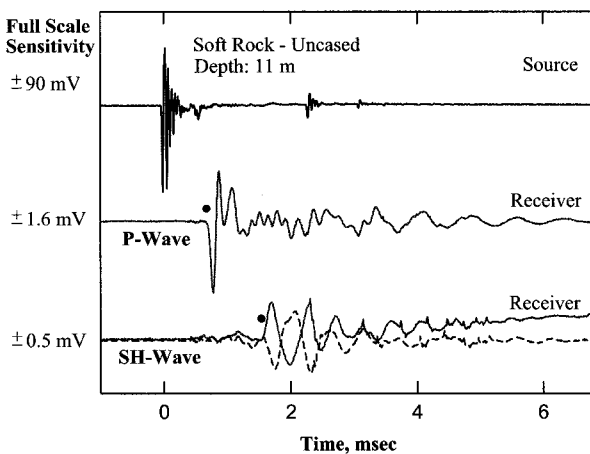
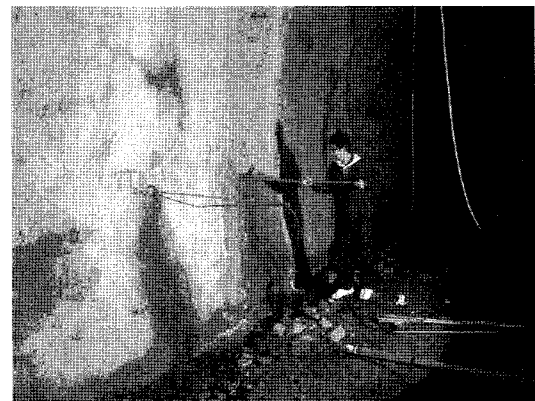


그림 5. ○○ LNG저장시설 부지 암반에서 계측한 전형적인 크로스홀 시험 결과(Park 등, 2008)



(a) 프로브 삽입



(b) 계측

그림 6. 발전자와 감지기 검측공 삽입 및 P 파 계측 전경

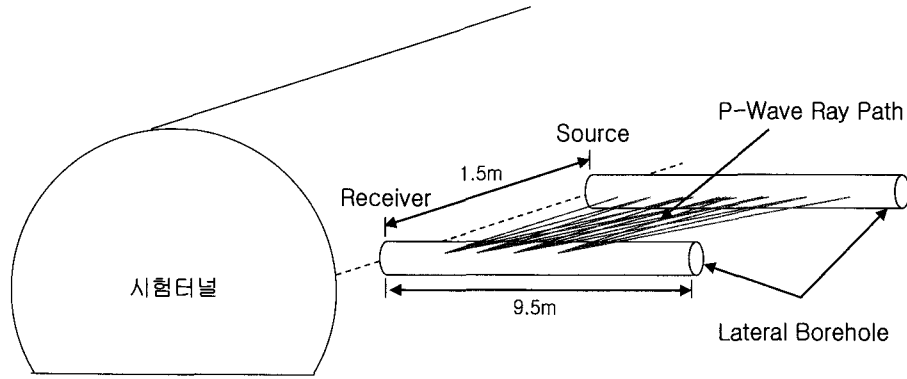


그림 7. 시험터널의 크로스홀 시험 검측공 개요도

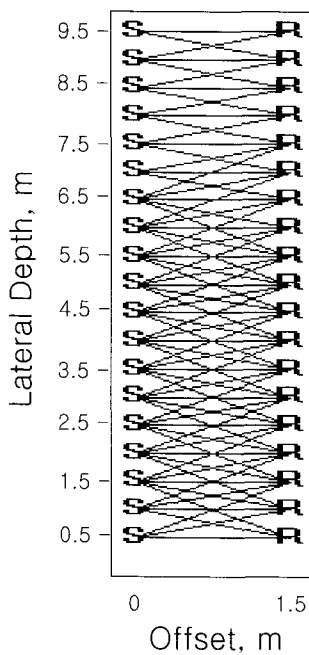


그림 8. 크로스홀 시험의 P 파 전파경로

그림 6은 시험터널에서 수행된 크로스홀 시험 계측 전경이다. 대략 30m~40m 길이로 수평 보링된 검측공 2개는 횡방향으로 1.5m 이격되어 있다. 암반의 P 파 속도는 그림 7과 같이 터널 굴착면에서부터 깊이 9.5m까지 계측하였다. 계측은 검측공 입구 0.5m 깊이에서부터 시작하여 발진자 및 감지기의 검측공내 계측 위치를 각각 0.5m 간격으로 이동시키며 진행되었다. 발진자의 위치가 고정되면 발진자 위치  $\pm 0.5\text{m}$ 와  $\pm 1.0\text{m}$ 의 위치에 감지기를 이동시켜 전파경로를 바꿔가며 P 파 속도를 계측하였다. 자세한 전파경로는 그림 8에 나타내었다. 크로스홀 시험에서 발진자(S)와 감지기(R)의 위치를 그림 8과 같이 구성하여 총 79개의 전파경로에서 P 파 속도를 계측하였다.

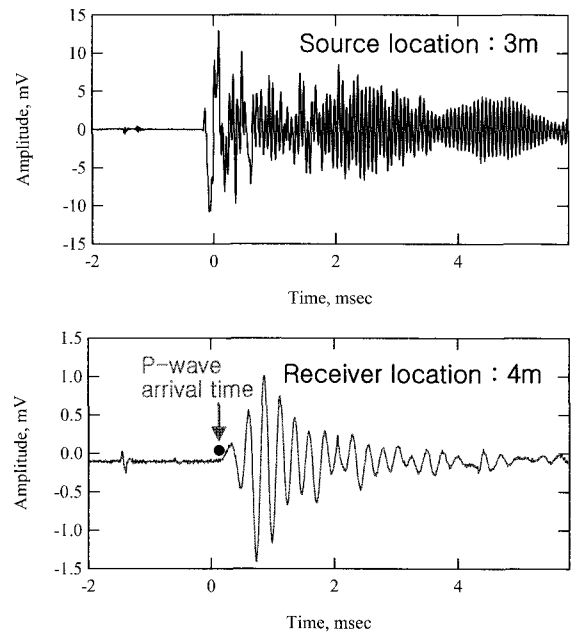


그림 9. 시험터널에서 계측한 대표적인 트리거 신호 및 P 파 신호(전파경로: Source 3m-to-Receiver 4m)

### 3.2 크로스홀 시험 결과

그림 9는 발진자 깊이 3m와 감지기 깊이 4m 사이의 전파경로에서 계측한 대표적인 트리거 신호 및 P 파 신호이다. 크로스홀 시험에서 계측된 거의 모든 신호는 그림 9와 같이 초동의 판별이 용이할 만큼 양질의 신호였다. 일반적인 물리탐사용 발진원은 광대역 지반 탐사에 적합한데 반해 크로스홀 시험에 적용된 전기-기계식 발진자의 가장 큰 특징은 계측간격을 수 cm 단위로 세밀하게 조절하면서 대상 매질의 국부적인 정밀 탐사를 할 수 있는 것이다. 그림 10은 발진자 위치 3m에서 계측한 모든 전파경로의 P 파 신호 일례를 보여준다. 감지기는 2.0m~4.0m 까지 0.5m 간격으로 이동하였고, 발진자와

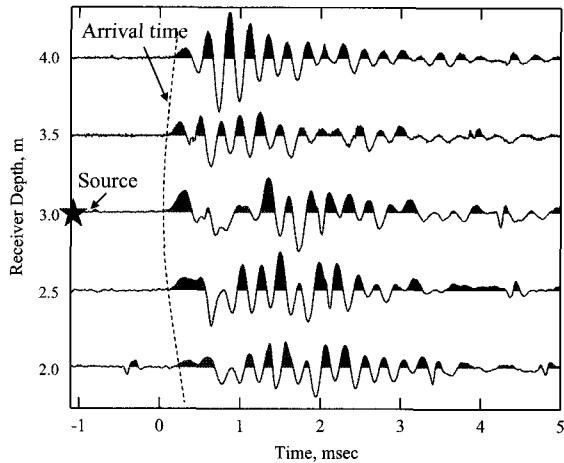


그림 10. 발진자 위치 3m에서 계측한 모든 전파경로의 P 파 신호 일례

감지기의 거리가 멀어질수록 P 파 초동도달시간이 조금씩 길어졌다. 해당 단면의 P 파 속도 분포는 그림 10의 전파경로와 중첩되는 다른 전파경로에 대한 정보를 함께 이용하여 역산을 통해 결정된다. 그러나 그림 10의 결과만을 이용해 P 파 속도를 도출하면 그 변화가 크지 않을 것으로 예상할 수 있다. 실제로 역산 결과 그림 12의 P 파 속도 토모그래피에서도 확인할 수 있듯이 이 구간의 P 파 속도는 대략 5,500m/sec 전후로 큰 변화가 없었다.

그림 11은 발진자와 감지기가 동일한 깊이로 셋팅되었을 때의 P 파 신호만을 5m 깊이까지 도시한 것이다. P 파의 도달 시점을 살펴보면 깊이 3m를 제외하고 깊이 0.5m에서 깊이가 깊어질수록 도달 시점이 짧아지는 것을 확인할 수 있다. 도달 시간이 상대적으로 긴 터널 굴착면에서 대략 1m까지는 P 파 속도가 작게 평가되며 터널 굴착에 의한 손상영역으로 유추할 수 있다. 3m 깊이에서 P 파 도달 시간이 길어지면서 국부적으로 P 파 속도가 변하는 것은 터널 굴착에 의한 손상이라기보다는 원지반의 물리적 특성에 의한 것으로 보인다.

크로스홀 시험으로 획득한 그림 8과 같은 총 79개의 전파경로 정보를 이용해 계측 단면의 2차원 P 파 속도 분포를 그림 12와 같이 도출하였다. 크로스홀 시험으로 결정된 각 전파경로의 초동도달시간은 발진자와 감지기의 위치좌표와 함께 크로스홀 토모그래피 도출을 위한 중요한 정보가 된다. 크로스홀 토모그래피 기법을 위하여 GeoTomCG 프로그램을 사용하였다(Tweeton 등, 1992; Tronicke 등, 2001). 이 프로그램은 가정된 속도 구조 모델의 초동 정보의 계산, 실험을 통해 획득한 초

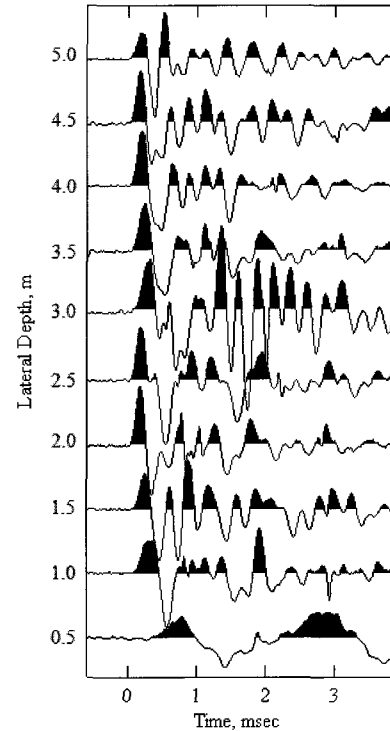


그림 11. 동일 깊이의 발진자와 감지기에서 계측한 P 파 신호

동 정보와의 차이 산출 및 모델 수정 등 3단계를 반복적으로 수행하여 속도 구조 모델을 개선하는 방식으로 진행된다. 계측이 검측공 깊이 0.5m부터 시작되어 검측공 0~0.5m의 속도 정보는 없다. 계측 단면은 전반적으로 P 파 속도가 커서 양호한 암반의 상태를 나타내고 있다. 계측결과의 의미 있는 특징으로는 터널의 굴착면 주변 암반의 P 파 속도가 3,600~5,000m/sec의 범위에 위치한 암반의 P 파 속도보다 작게 평가되었다는 점이다. 계측된 단면의 P 파 속도가 6,000m/sec 정도로 전반적으로 신선한 암반의 특징을 나타내고 있는 것과 비교하여 상대적으로 터널주변의 암반이 굴착으로 인하여 손상이 발생한 것으로 판단된다. 이와 같은 결과는 크로스홀 시험에 사용한 전기-기계식 발진자와 시험으로 획득한 P 파 속도가 각각 터널주변 암반의 손상영역을 평가하는데 매우 유용하게 사용될 수 있는 시험기법이므로 인자임을 확인시켜주었다.

그림 12에서 가운데 2차원 분포도는 P 파 속도에 관한 것이고, 좌우 2차원 분포도는 기존 연구자가 제안한 경험식을 이용해 P 파 속도를 다른 역학적 물성치로 변환한 것이다. 왼쪽의 2차원 분포도는 Sousa 등(2005)이 화강암에 대해 제안한 P 파 속도와 간극율과의 경험적 관계를 이용한 것이다. 오른쪽의 결과는 Barton(2002)이 제시한 경험식을 사용해 P 파 속도를  $Q_c$ -value로 변환한

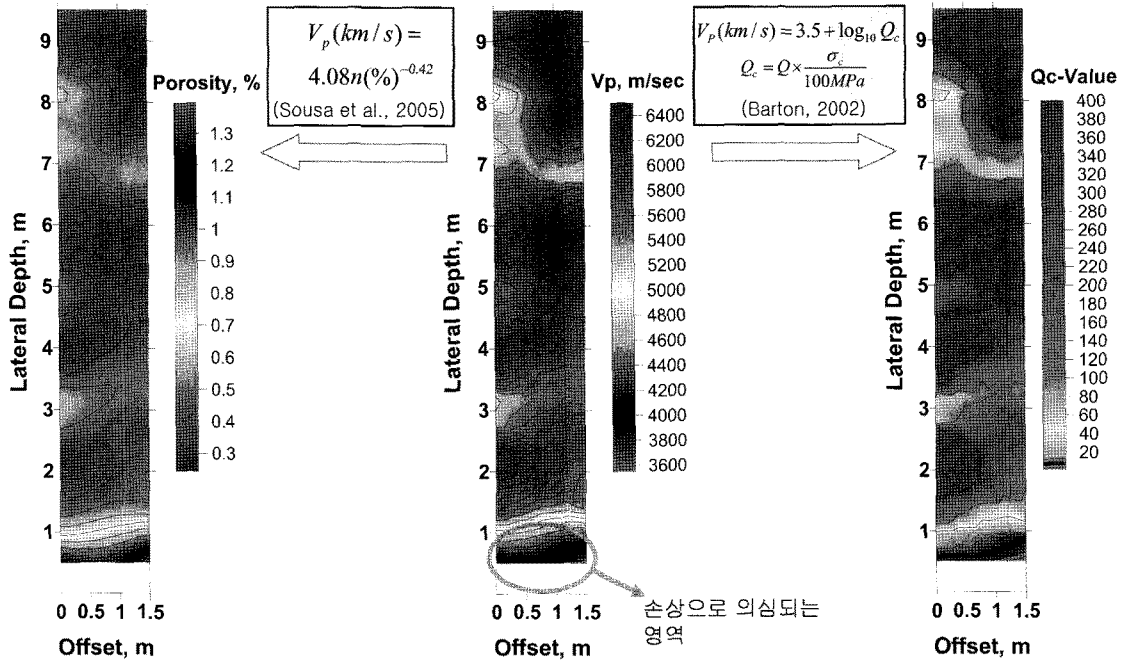


그림 12. P 파 속도, 공극률 및 Q-value 2차원 분포도

것이다. Qc-value는 암석의 연경도를 포함한 암 상태 및 조건에 따라 다양하게 변하는 Q-value를 해당 암반의 일축압축강도로 정규화한 Q-value이다. 본 결과로부터 암반의 P 파 속도와 여러 가지 역학적 특성치와의 상관 관계 설정에 관한 가능성을 확인하였으며 다양한 공학적 인자로 터널주변 암반의 손상 평가가 가능할 것으로 판단된다.

이상의 실험결과는 전기-기계식 발전자를 이용하여 터널 주변의 암반손상에 대한 평가가 가능함을 나타내고 있는데 이 결과를 바탕으로 향후에는 터널의 지보재로 사용되는 록볼트용 공(대략 45mm 직경)을 이용하여 크로스홀 시험을 수행하고, 측정된 P 파 속도를 인자로 암반의 손상영역대를 파악하고자 한다. 따라서 시험터널에서 사용한 75mm 검측공 용 전기-기계식 발전자를 향후 록볼트용 공에 사용가능하도록 소형화하여 손상영역대 탐사용 측정장비를 개발할 계획이다.

#### 4. 결론

본 논문에서는 전기-기계식 발전자를 이용하여 터널 주변 손상영역의 평가를 위한 목적으로 시험터널 내에서 크로스홀 시험이 수행되었다. 확인된 주요 결론은 다음과 같다.

- (1) 전기-기계식 발전자를 이용한 크로스홀 시험에서 초동도달시간의 판별이 용이한 양질의 P 파 신호를 측정하였다. 측정간격을 세밀하게 조절하면서 대상 매질의 국부적인 정밀 탐사가 가능한 전기-기계식 발전자의 적용성을 확인하였다.
- (2) 현장적용 시험결과 시험터널의 굴착에 의한 손상영역 깊이는 대략 1m 범위로 나타났으며, 배면에 위치한 암반의 P 파 속도가 6,000m/sec 정도로 전반적으로 신선한 암반의 특징을 나타낸 반면 손상영역대의 P 파 속도는 대략 3,600~5,000m/sec의 범위에서 배면에 가까울수록 점점 증가하였다.
- (3) 크로스홀 토모그래피 기법을 통해 측정 단면의 2차원 P 파 속도 분포를 도출하였고, 터널주변 암반의 손상영역에 대한 상대적인 P 파 속도 변화를 통해 정성적 판단이 가능함을 확인하였다.
- (4) 크로스홀 시험의 결과인 P 파 속도를 인자로 사용하여 터널주변 암반의 손상을 정량적으로도 평가할 수 있으며, 향후 다양한 암반재료의 물성시험을 통해 암반의 역학적 물성을 인자로 정량적인 손상 평가가 가능할 것으로 판단된다.

#### 감사의 글

본 연구는 건설교통부가 출연하고 한국건설교통기술

평가원에서 위탁시행 한 2006년도 건설핵심기술연구개발사업(과제번호: 05-건설핵심 D10, 과제명: 해저시설물 차폐기술 연구)에 의하여 연구비가 지원되었으며, 저자 일동은 지원에 감사 드립니다.

## 참 고 문 헌

1. 목영진, 백영식, 임수빈 (1998), "탄성과 시험을 이용한 그라우팅 성과 평가", *한국지반공학회 분학술발표회 논문집*, pp.85-92.
2. 정연문, 이명성, 송명준, 우익, 이영남 (1996), "지오레이다 토모그래피를 이용한 굴착에 의한 암반물성 변화에 관한 연구", *한국지반공학회 1996 가을학술발표회 논문집*, pp.115-122.
3. Balland, C., Morel, J., Armand, G., and Pettitt, W. (2009), "Ultrasonic velocity survey in Callovo-Oxfordian argillaceous rock during shaft excavation", *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, Vol.46, pp.69-79.
4. Barton, N. (2002), "Some new Q value correlations to assist in site characterization and tunnel design", *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstract*, Vol.39, pp.185-216.
5. Carranza-Torres, C., and Diederichs, M. (2009), "Mechanical analysis of circular liners with particular reference to composite supports. For example, liners consisting of shotcrete and steel sets", *Tunnelling and Underground Space Technology*, Vol.24, pp.506-532.
6. Carranza-Torres, C., and Fairhurst, C. (1999), "The elasto-plastic response of underground excavations in rock masses that satisfy the Hoek-Brown failure criterion", *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, Vol.36, pp.777-809.
7. Falls S. D., and Young, R. P. (1998), "Acoustic emission and ultrasonic-velocity methods used to characterise the excavation disturbance associated with deep tunnels in hard rock", *Tectonophysics*, Vol.289, pp.1-15.
8. Fahimifar, A., and Ranjbaria, M. (2009), "Analytical approach for the design of active grouted rockbolts in tunnel stability based on convergence-confinement method", *Tunnelling and Underground Space Technology*, Vol.24, pp.363-375.
9. Fuhrman, M. D. (1993), *Crosshole Seismic Tests at Two Northern California Sites Affected by the 1989 Loma Prieta Earthquake*, Master Thesis, The University of Texas at Austin.
10. 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.
11. Martin, C. D., Read, R. S., and Martino, J. B. (1997), "Observations of brittle failure around a circular test tunnel," *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, Vol.34, No.7, pp.1065-1073.
12. Martino, J. B., and Chandler, N. A. (2004), "Excavation-induced damage studies at the Underground Research Laboratory", *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, Vol.41, pp.1413-1426.
13. Meglis I. L., Martin C. D., and Young, R. P. (2005), "Assessing in situ microcrack damage using ultrasonic velocity tomography", *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, Vol.42, pp.25-34.
14. Mok, Y. J. (1987), *Analytical and Experimental Studies of Borehole Seismic Methods*, Ph. D. Dissertation, The University of Texas at Austin.
15. Park, K. H., and Kim, Y. J. (2006), "Analytical solution for a circular opening in an elastic-brittle-plastic rock", *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, Vol.43, pp.616-622.
16. Park, C. S., Lim, J. Y., Choi, C. L., Kong, B. C., and Mok, Y. J. (2008), "Recent Development of Borehole Seismic Tests", *Proceeding of The 14<sup>th</sup> World Conference on Earthquake Engineering (CD-ROM)*, October 12-17, 2008, Beijing, China.
17. Roblee, C. J. (1990), *Development and Evaluation of a Tomographic Seismic Imaging Techniques for Characterization of Geotechnical Sites*, Ph. D. Dissertation, The University of Texas at Austin, pp.680.
18. Sousa, L. M. O., del Rio, L. M. S., Calleja, L., de Argandona, V. G. R. and Rey, A. R. (2005), "Influence of microfractures and porosity on the physico-mechanical properties and weathering of ornamental granites", *Engineering Geology*, Vol.77, pp.153-168.
19. Tronicke, J., Tweeton, D. R., Dietrich, P., and Appel, E. (2001), "Improved Crosshole Radar Tomography by using Direct and Reflected Arrival Times", *Applied Geophysics*, Vol.47, pp.97-1005.
20. Tweeton, D. R., Jackson, M. J., and Roessler, K. S. (1992), *BOM-CRATRA-A Curved Ray Tomography Computer Program for Geophysical Application*, USBM RI 9411.

(접수일자 2009. 7. 27, 심사완료일 2009. 10. 30)