

## 터널위치 규명을 위한 시추공 탄성파탐사 현장 응용 A Field Application of Crosshole Seismic Survey to the Detection of Tunnel

김 중 열 (Kim, Jung Yul)

한국자원연구소

김 유 성 (Kim, Yoo Sung)

한국자원연구소

### 요약 / ABSTRACT

본 논문은 시추공 탄성과 탐사에 의해 암반 내에 형성된 소규모 터널(크기 약  $2\text{m} \times 2\text{m}$ )도 탐지될 수 있음을 보여주고 있다. 탄성과 전달 측면에서 상기 소규모 터널은 회절파를 유발하게 되어 수신기 배열 일부 구간에는 하나의 특징적인 주시 및 진폭 변화를 갖는 초동으로 도달된다. 이러한 터널효과는 바로 터널의 존재 여부에 대한 중요한 지침이 되며 동시에 그에 대한 진폭 및 주시 분석은 바로 터널 위치에 대한 정보를 제시하는 것이다. 본 논문에서는 우선 수치모델링을 통하여 상기 터널효과를 보다 정량적으로 분석한 후 그로부터 터널 위치 규명을 위한 하나의 효율적인 기법을 제시하고 있으며 나아가서 현장 실험에서도 상기 터널효과가 전 기록을 통하여 일관성을 띠면서 뚜렷이 관찰되고 있음을 보여주고 있다. 더구나 탐사에 의해 규명된 터널 위치는 바로 실존하는 터널의 위치와 훌륭하게 부합되고 있다.

This paper shows that crosshole seismic survey allows to detect even a small size of underground tunnel (about  $2\text{m} \times 2\text{m}$ ). Such a small tunnel (e.g. infiltration tunnel) causes diffraction, as the seismic wave propagates, which results in distinctive variations of traveltime and amplitude of the first arrivals. This effect (or tunnel effect) is a typical indicator for the existence of tunnel and thereby an information about the tunnel location can be obtained. It was shown that the tunnel effect illustrated by numerical modeling (FDM) could be also observed in field measurements. The depth and shape of the tunnel were determined by a simplified processing method based on the use of amplitude variation of the first arrivals. The estimated location of the tunnel was well matched to that of the real tunnel.

서론

수치모델링

터널 탐지를 위한 시추공 탄성과 탐사에서 터널 크기(d)에 대한 탄성과 파장(λ)은 수진기에 도달되는 탄성과의 주시 및 진폭 변화에 상당한 영향을 미친다. 하나의 보기로서 탄성과 속도 약 4,000m/s 을 갖는 암반 내에 전달되는 탄성과의 주파수 범위가 약 1,000Hz~3,000Hz(파장 4m~1.3m)에 달한다면 이 때 지하철이나 도로에서 흔히 볼 수 있는 터널(크기 약 12m×8m)은 주로 탄성과의 전달을 차폐하는 효과를 보여줄 것이 기대된다. 그런데 전력구 터널의 경우(크기 약 4m×4m)에서는 일부분 터널로 인한 탄성과 회절현상(seismic diffraction)이 유발되어 미약하나마 터널을 지나는 탄성과가 인식된다(김중열 외, 1993). 일반적으로 탄성과 회절현상은 불균질 매질(예: 터널)의 크기 d가 2/3λ~1λ에 달하였을 때 가장 뚜렷이 관찰됨을 고려한다면(Berryhill, J.R., 1977; Dresen, L., 1977; 김중열외, 1990) 약 2m×2m 크기의 광산 갱도나 북한의 남침용 터널에서는 탄성과 회절현상이 바로 하나의 터널효과로 대변될 수 있는 것이다.

본 논문은 시추공 탄성과 탐사 기법이 상기 소규모 터널(크기 2m×2m) 탐지를 위해 어느 정도 기여할 수 있는가를 보여주고 있으며 이를 위해 다음과 같은 질문이 제기되었다.

- ① 시추공 사이의 터널 위치가 달라짐에 따라 기대되는 회절현상은 기록에서 어느 정도의 주시 및 진폭 변화가 관찰되고 있는가?
- ② 단순히 진폭 변화로부터 터널의 존재 여부 및 위치를 규명할 기법이 도출될 수 있는가?
- ③ 이론에서 밝혀진 터널효과가 바로 현장 실험에서 대등하게 관찰될 수 있는가?
- ④ 현장 탐사에서 규명된 터널의 위치가 현실적으로 어느 정도 부합되고 있는가?
- ⑤ 심부에 위치한 터널을 탐지하기 위해서는 탐사 경제성에 비추어 어떠한 측정 기법이 바람직한가?

다음은 수치모델링 및 현장 실험 결과를 분석함으로써 상기 질문에 대처하고 있다.

본 논문에서 다루되는 터널효과란 구체적으로 소규모 불균질 매질에 의해 유발되는 탄성과 회절현상이 초동의 진폭 및 주시에서 국부적으로 상대적인 변화를 초래하는 것을 말한다. 이에 대한 이론적인 배경을 살펴보기 위하여 2차원 스칼라 파동방정식에 근거한 일종의 유한차분법(Finite Difference Method: FDM)(조철현, 1992)이 사용되었다.

주파수-공간영역에서의 압력장 파동방정식은 밀도의 공간변화를 무시하면

$$\nabla^2 P(r,rs, \omega) + \frac{\omega^2}{v^2} P(r,rs, \omega) = f(\omega) \delta(r-rs) \quad (1)$$

로 표현될 수 있다. 여기서 ω는 각주파수, v(r)는 매질의 속도, rs는 음원의 위치, f(ω) 및 P(r,rs, ω)는 각각 음원과 압력장의 푸리에성분이다. 식(1)을 유한차분화하기 위해서는 연속함수인 P, f, v 등을 불연속적인 격자점에서의 값들로 표현되어야 한다. 본 논문에서 응용된 모델링은 특히 9격자점으로 확정된 차분식과 가중평균법을 이용함으로써 수치오차(분산 및 이방성)를 감소시키고 동시 모델링 계산속도를 높이는 효과를 초래할 수 있는 일종의 주파수영역 유한차분법이다.

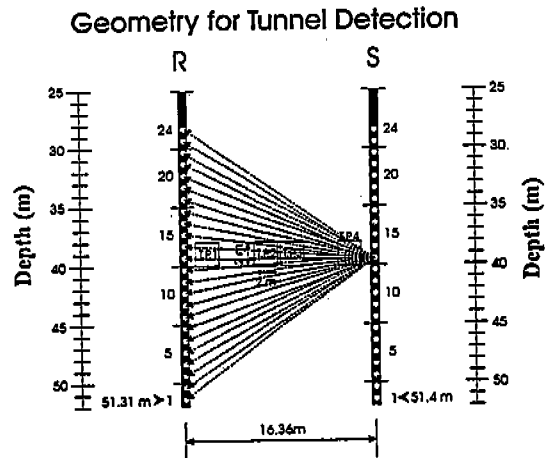


Fig. 1. Four different tunnel (size 2m×2m) locations (T.P.1~4) are shown.

터널위치 규명을 위한 시추공 탄성파탐사 현장 응용

FDM acoustic modeling for tunnel 2x2  
S No. = 13, R No. = 1 - 24, T.P. = 1

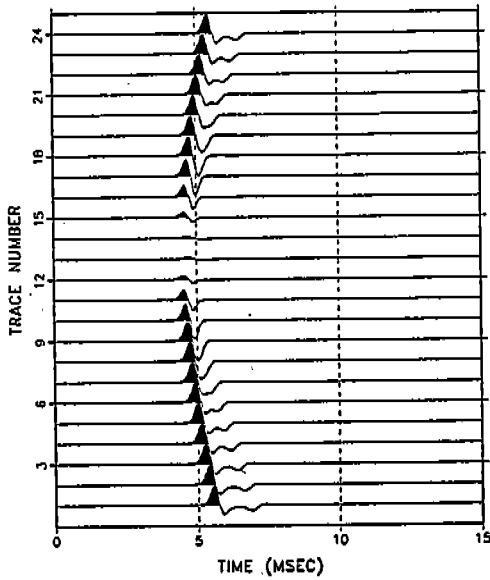


Fig. 2. Synthetic seismogram derived from FDM of 2-D scalar wave equation.  
(a) In case of tunnel (size 2m×2m) T.P.1 in Fig. 1.

FDM acoustic modeling for tunnel 2x2  
S No. = 13, R No. = 1 - 24, T.P. = 3

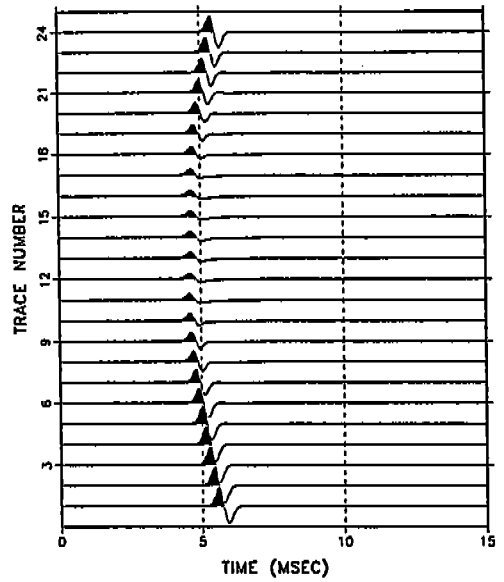


Fig. 2. (continued).  
(c) In case of tunnel (size 2m×2m) T.P.3 in Fig. 1.

FDM acoustic modeling for tunnel 2x2  
S No. = 13, R No. = 1 - 24, T.P. = 2

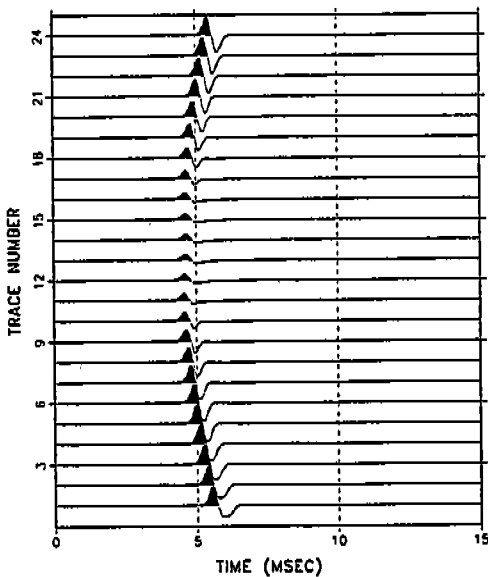


Fig. 2. (continued).  
(b) In case of tunnel (size 2m×2m) T.P.2 in Fig. 1.

FDM acoustic modeling for tunnel 2x2  
S No. = 13, R No. = 1 - 24, T.P. = 4

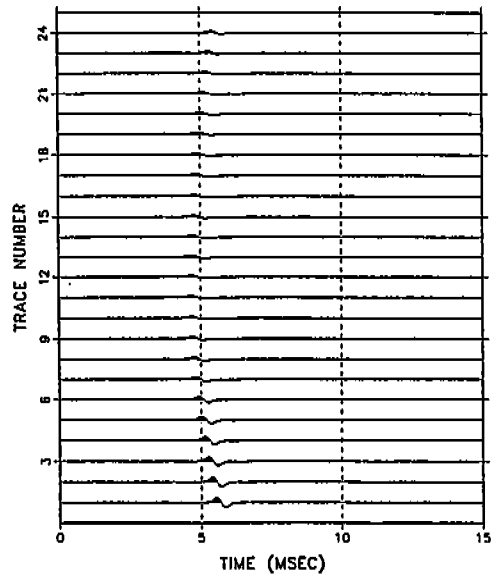
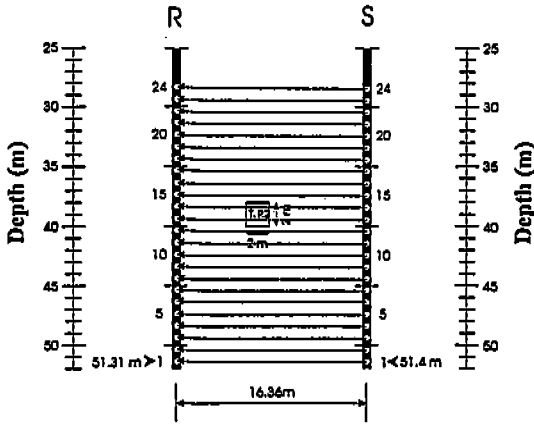


Fig. 2. (continued).  
(d) In case of tunnel (size 2m×2m) T.P.4 in Fig. 1.

Geometry for Tunnel Detection



Geometry for Tunnel Detection

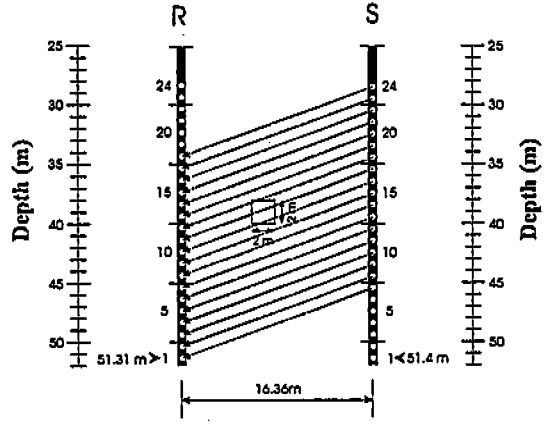
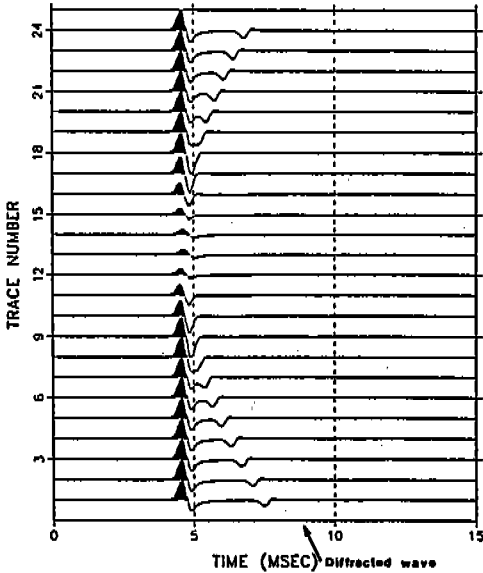


Fig. 3. Numerical modeling for estimating the location of tunnel T.P.2.  
 (a) Raypaths perpendicular to the borehole axis are shown.

Fig. 4. Numerical modeling for estimating the location of tunnel T.P.2.  
 (a) All inclined (downward) raypaths are shown.

FDM acoustic modeling for tunnel 2x2  
 S No. = 1 - 24, R No. = 1 - 24



FDM acoustic modeling for tunnel 2x2  
 S No. = 7 - 24, R No. = 1 - 18

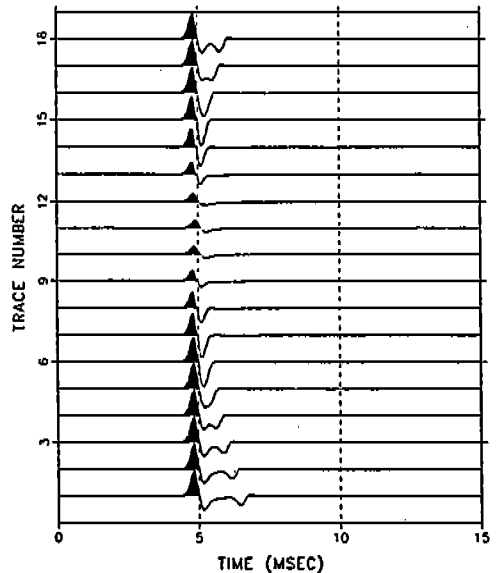


Fig. 3. (continued).  
 (b) Synthetic seismogram for the source-receiver arrangement in (a) by using FDM.

Fig. 4. (continued).  
 (b) Synthetic seismogram for the source-receiver arrangement in (a) by using FDM.

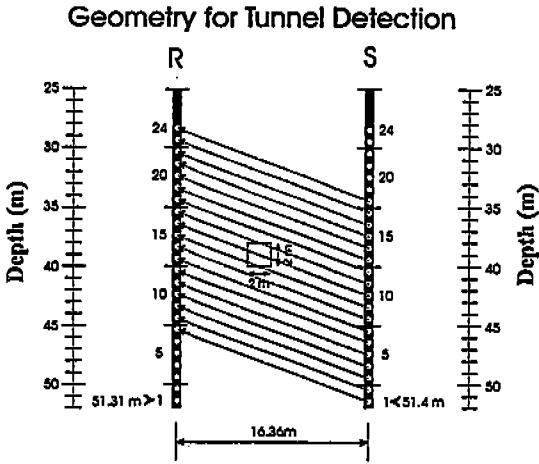


Fig. 5. Numerical modeling for estimating the location of tunnel T.P.2.  
(a) All inclined (upward) raypaths are shown.

Fig. 1은 터널 위치에 따른 효과를 상호비교하기 위하여 동일한 발생원(shot 13)-수진기 배열(24채널)하에 터널의 위치가 옮겨지고 있음을 보여주고 있으며(터널 주위 암반속도 4,000m/s) 그에 따른 개별적인 합성 탄성파기록(주 주파수 2,000Hz)은 Fig. 2에 나타나 있다. 이러한 실험 결과는 바로 현장 탐사에서 터널의 존재 여부 내지 위치 판단을 위한 하나의 지침이 되는 것이다.

다음은 상기 진폭 변화로부터 터널의 위치를 규명할 수 있는 하나의 기법을 소개하기로 한다. Fig. 3은 시추공에 수직인 파선 방향(a 참조)에 대한 기록(b 참조)을 보여주고 있다. 대체로 터널(TP2) 중앙을 통과하는 파선에서는 초동의 진폭이 극소가 됨(trace number 13)과 동시에 그에 따른 도달주기도 가장 늦게 나타나고 있음이 관찰된다. 이와 유사하게 Fig. 4 및 Fig. 5에서는 서로 상반된 경사를 띤 파선들에 대한 기록들을 보여주고 있으며 기대한 바 진폭이 극소가 되는 수신점은 파선방향에 따라 달리하고 있다. Fig. 6은 각 파선방향에 대한 초동 진폭 변화를 수신기 위치에 따라 나타내고(진폭상관도) 있다. 세계의 진폭곡선은 서로 유사한 형태를 띠면서 일정 간격으로 이동되고 있음이 관찰된다.

FDM acoustic modeling for tunnel 2x2  
S No. = 1 - 18, R No. = 7 - 24

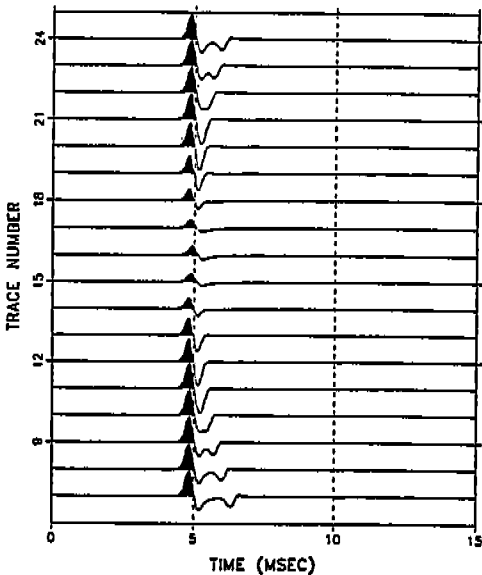


Fig. 5. (continued).  
(b) Synthetic seismogram for the source-receiver arrangement in (a) by using FDM.

Amplitude distribution for T.P.2

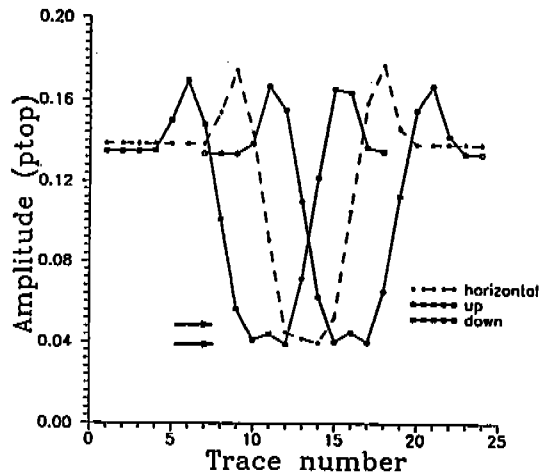


Fig. 6. Amplitude diagram depending on the raypath directions was shown in the case of tunnel T.P.2.

여기서 터널 효과는 대체로 진폭이 크게 떨어진 부분(화살표로 표시한 구간)에 해당되는 파선들과 가장 밀접하게 연관될 것이며 이 때 그들이 상호 중첩되는 부분은 세 파선 방향의 터널효과를 동시에 충족시키고 있기 때문에 바로 터널의 위치로 귀결된다는 것이다. Fig. 7은 상기 기법을 도면화하고 있으며 그 결과는 주어진 터널 위치에 훌륭하게 근접되고 있다.

다음은 현장실험에서도 ① 상기 터널효과가 측정된 shot gather(하나의 shot에 대한 24채널 기록)에서 인식될 수 있는가, ② 진폭상판도에 의한 전산처리기법이 터널의 위치를 실제로 규명할 수 있는가에 대해 서술하고 있다.

**Tunnel Detection using first arrival amplitude**

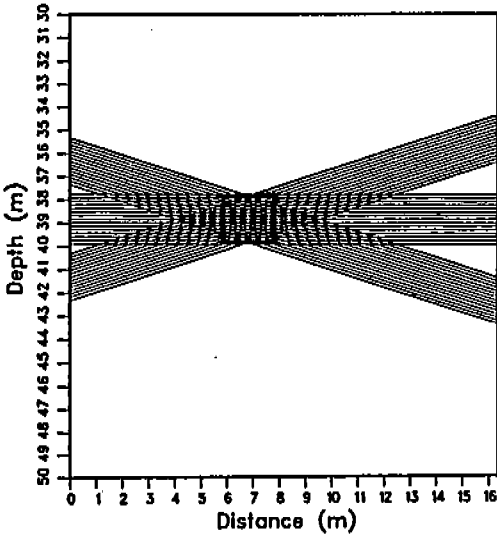


Fig. 7. The tunnel (T.P.2) location was estimated by intersection the raypaths of three directions.

**현 장 실험**

본 현장 탐사는 강원도 북부지역 두개의 시추공(심도 약110m)내에 존재하는 터널(크기 약 2m×2m) 탐지를 위해 수행되었다. 탐사를 위한 측정시스템은 한·독 국제공동연구를 통하여 독자적으로

개발된 것으로서 그의 실효성은 이미 국내 지질 및 토목분야 지반조사에서 입증된 바 있다(김중열 외, 1993). 수신장치는 24개의 Hydrophone(수진기 간격 1m)으로 구성되었으며 발생원은 국내에서 독자적으로 개발된 탄성과 탐사 전용 뇌관(1g 폭약)이 사용되었다(김중열 외, 1993). Fig. 8은 터널 탐지를 위한 하나의 효과적인 측정 과정을 보여주고 있다. 즉, 기본 측정 배열(하나의 발생원에 대한 24채널 수신장치) 전체가 shot 17 위치(심도 약 95m)에서 shot 37 위치(심도 약 75m)까지 1m 간격(offset)으로 상향 이동되면서 측정되었다. Fig. 9~Fig. 12는 측정데이터(샘플링 간격 1/32 ms) 전체로부터 단지 몇개의 특징적인 shot gather를 발췌하여 나타내고 있다.

Shot 20 기록(Fig. 9 참조)의 trace 28-32에서는 진폭의 상대적인 약화가 관찰되고 있으며(화살표로 표시) 또한 초동주시 측면에서도 다소 특이한 현상(trace 32의 초동이 상대적으로 빨리 도달되고 있음)이 인식된다. 이러한 특징은 발생원 위치가 상행됨에 따라 그 범위가 확장되고 있다(Fig. 10 참조). 물론, 여기서 관찰되는 진폭약화가 반드시 터널에 의해 발생되었다고는 할 수는 없으나 주시의 특이한 변화(오목한 주시곡선)는 그대로 회절현상에 의해 초래된 것이라고 추정될 수 있다. Fig. 11은 발생원 위치가 다시 3m 상향되었을 때의 기록을 나타내고 있다. 여기에는 이론에서 밝혀진 터널 효과(Fig. 2(b) 참조) 특히, 주시변화가 trace 28 주위에서 뚜렷하게 관찰되고 있음을 볼 수 있으며 더구나 초동주시들의 대칭성에 비추어(화살표가 표시한 트레이스가 대칭폭) 터널의 심도는 대체로 shot 27(혹은 trace 28) 위치선상에 놓여 있을 것으로 판단된다. 이로부터 발생원이 다시 4 m 상향 이동되면 이전의 주시변화 현상은 기대한 바 그 아래로 이동되어 관찰되는 것이다(Fig. 12에서 화살표로 표시).

지금까지 관찰된 주시 및 진폭 변화는 바로 터널로 인한 회절현상을 그대로 반영하고 있음을 볼 수 있으며 그에 따라 단순히 측정데이터 분석에 의해서도 어느 정도 터널의 위치가 추정될 수 있는 것이다.

Fig. 13에는 이미 수치모델링에서 예시한 바와 동일한 방법(Fig. 3~Fig. 6 참조)으로 세 파선방향에 대한 진폭상판도가 작성되어 상호 비교되고 있

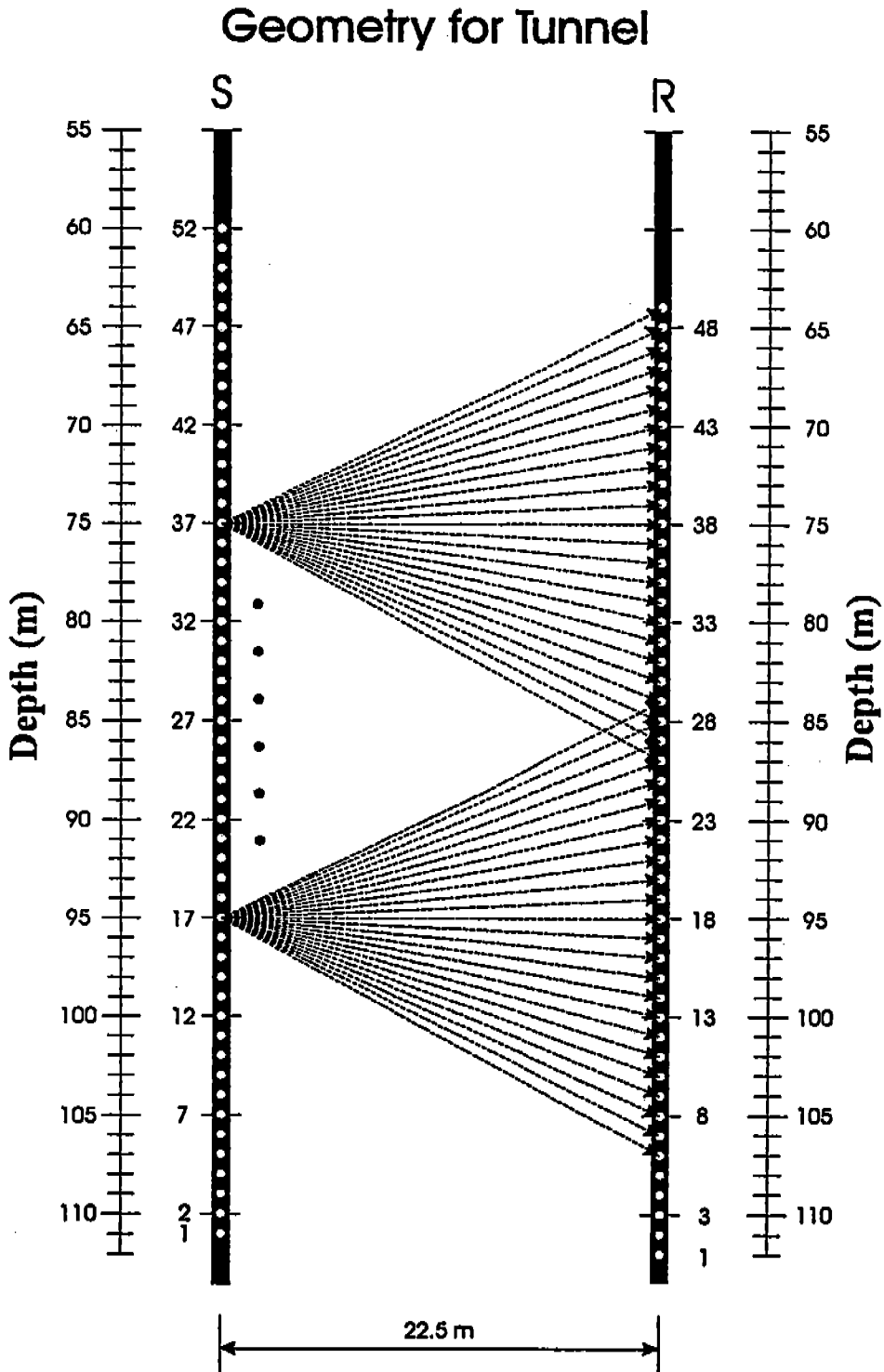


Fig. 8. Shown was a measuring procedure of practical use. A basic source-receiver arrangement (one shot-24 receivers) was moved at constant intervals (1m offset).

다. 진폭의 급격한 하락 상태는 모든 상관도에서 폭연히 인식되고 있음이 관찰되고 있으며 그로부터

규명된 터널의 위치(Fig. 14 참조)는 실제로 존재하는 터널의 위치와 훌륭하게 부합되고 있다.

S No. = 20 , R No. = 9 - 32

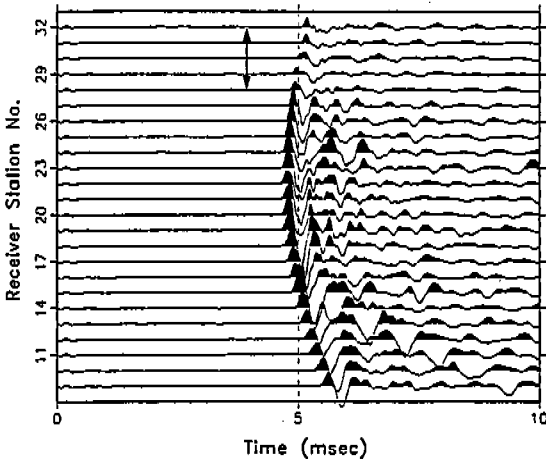


Fig. 9. Shown is an example of cross section data (shot gather : shot No. 20). Sampling interval = 1/32 ms.

S No. = 27 , R No. = 16 - 39

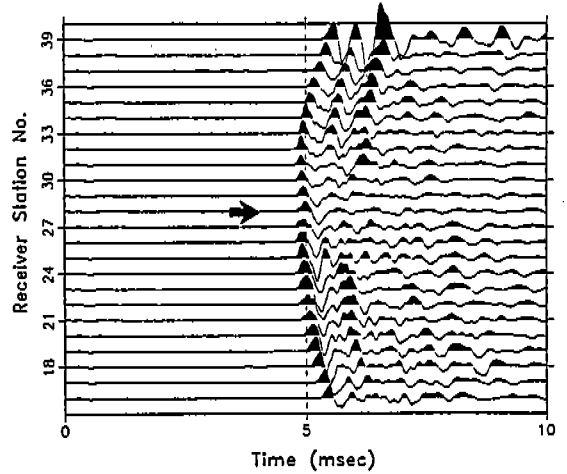


Fig. 11. Shown is an example of cross section data (shot gather : shot No. 27). Sampling interval = 1/32 ms.

S No. = 24 , R No. = 13 - 36

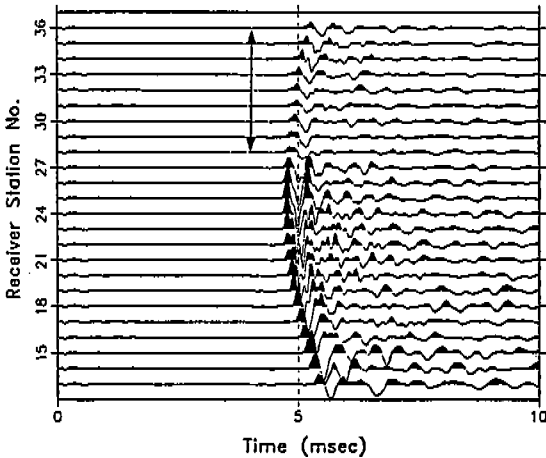


Fig. 10. Shown is an example of cross section data (shot gather : shot No. 24). Sampling interval = 1/32 ms.

S No. = 31 , R No. = 20 - 43

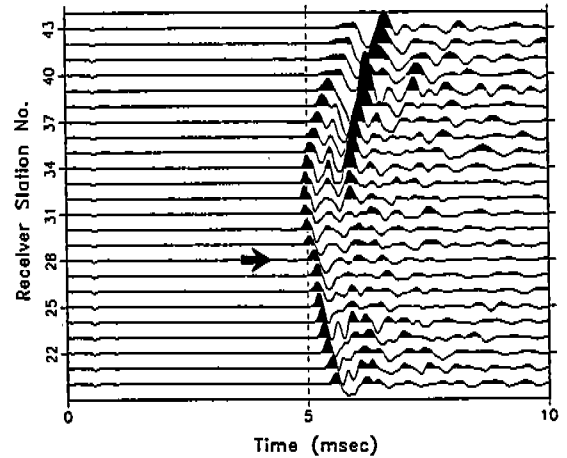


Fig. 12. Shown is an example of cross section data (shot gather : shot No. 31). Sampling interval = 1/32 ms.



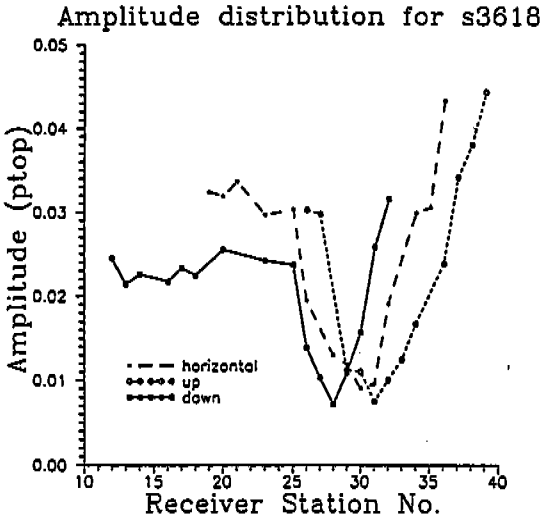


Fig. 13. Amplitude diagram depending on the raypath directions (extracted from the same method as numerical modeling) was shown.

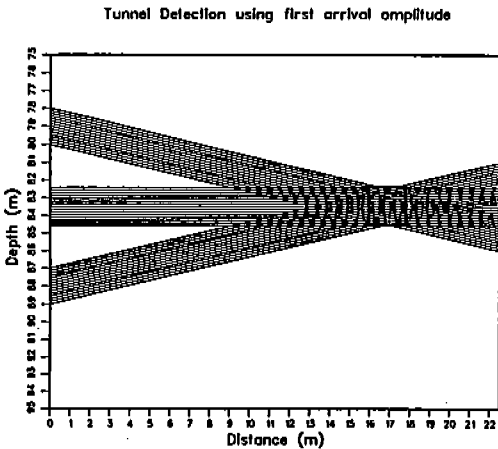


Fig. 14. The tunnel (size about 2m×2m) location was estimated by intersecting the raypaths of three directions.

## 결 언

본 논문은 시추공 탄성과 탐사에 의해 암반 내에 형성된 소규모 터널(크기 약 2m×2m)도 탐지될 수 있음을 보여주고 있다.

우선 터널탐지를 위한 수치모델링은 크게 다음과 같은 세가지 결과를 낳게 하였다.

① 소규모 터널은 주로 탄성과 회절현상을 유발하였으며 그에 따른 기록에서는 제한된 수신기 범위에서 주시 및 진폭의 변화가 특징적으로 나타났다. ② 진폭의 변화폭은 시추공 사이 터널위치에 따라 크게 달리하였으나 반면 주시변화폭은 거의 일정하였다. ③ 진폭의 급격한 약화 현상(진폭상관도 참조)은 바로 파선방향과 직접적으로 상관되기 때문에 이를 활용한 터널탐지 기법은 간단하면서도 현실적으로도 상당한 응용성을 부여할 수 있는 것이었다.

상기 회절현상은 일반적으로 현장실험에서 여러 가지 요인(예 : 단층, 파쇄대)에 의해 관찰될 수 있다. 이에 대한 근원적인 대처방안은 무엇보다 양질의 데이터(예 : 정확한 트리거시점, 파형)를 취득함으로써 그로부터 일차적으로 제반 탄성파전달현상을 보다 효율적으로 분석하는 데 있다고 하겠다. 본 현장실험에서 사용된 시추공발생원은 정확한 트리거시점의 일관성은 물론 넓은 주파수대역을 갖는 탄성파를 발생시킬 수 있었으며 더구나 고분해능 측정시스템은 이전과 비교하여 데이터의 질을 근원적으로 높일 수 있게 하였다. 한편, 본 실험에서는 이론에서 예시한 터널효과가 전기기록을 통하여 일관성을 띠면서 뚜렷이 관찰될 수 있음에 비추어 터널주위 암반상태는 대체로 균질하다고 볼 수 있었다. 물론, 상기 탐사결과가 여러 가지 회절현상으로 부터 바로 터널에 의한 것으로 식별할 수 있는 내용을 대변하고 있지는 않다. 그러나, 이러한 현장실험 사례(case history)는 탄성파를 이용한 바람직한 측정기법으로써 터널탐지를 위한 지침이 될 뿐만 아니라 동시에 재래의 레이더탐사자료를 보완할 수 있는 계기를 마련한 것이 되었다.

## 사 사

본 논문은 과기처 특정과제사업 수행의 일환으로 이루어졌다. 본 현장실험을 가능케 한 육군본부 탐지처 처장님 및 직원여러분께 심심한 사의를 표합니다.

## 참 고 문 헌

---

김중열, 김유성,  
한국자원연구소  
대전광역시 유성구 가정동 30  
TEL : 042-868-3178  
FAX : 042-861-9716

- 김중열, 장현삼, 김유성, 현혜자, 김기석, 1993, Geotomography에 의한 암반구조 연구. 한국자원연구소, 과학기술처, 266.
- 김중열, 현혜자, 김기석, 김유성, 성낙훈, 구자학, 1990, 탄층연속성 조사를 위한 채널과의 연구 (III). 한국자원연구소, 과학기술처, 196.
- 조철현, 1992, 주파수영역에서 가중평균 차분연산자를 이용한 파동방정식 모델링. 서울대학교 대학원 공학박사 학위논문, 110.
- Berryhill, J.R., 1977, Diffraction response for nonzero separation of source and receiver. Geophysics, 42, 1158-1176.
- Dresen, L., 1977, Locating and mapping of cavities at shallow depths by the seismic transmission method. proceeding of DMSR 77, 3,149-171.