

탄성과 지오토모그래피를 이용한 지하터널 탐사

서백수¹⁾ · 현병구²⁾

Tunnel Detection Using Seismic Geotomography

Baek Soo Suh and Byung Koo Hyun

ABSTRACT

Geotomography, which reconstructs underground structures, is very important task in recent geophysical data processing. In this study, the field data acquired by U.S. Army was used for tomographic inversion and the result was compared with the tomogram from theoretical model data.

1. 서 론

최근에 지오토모그래프(Geotomography)는 광물 및 석유탐사, 지하수 탐사, 핵 폐기물 저장소 탐사, 터널탐사 등 물리탐사의 여러 방면에 이용되고 있다.

본 연구에서는 미 육군이 현장에서 얻은 자료를 처리하여 이론 모형의 결과와 비교하며, 앞으로의 현장자료 획득작업과 지오토모 그래프 작성에 도움을 주고자 한다.

2. 이 론

Fig. 1에서와 같이 2차원 시추공-시추공 탄성과 탐사에서 진원에서 수신기까지의 전체 걸린 시간(Total travelttime)은

$$t_k = \int_{R_k} \frac{dl}{v(x, z)} = \int_{R_k} S(x, z)dl \quad (1)$$

가 되며 이때 $V(X, Z)$ 는 파의 진행방향 R_k 에서의 속도이며 $S(X, Z)$ 는 점 (X, Z) 에서의 Slowness이다. 식 (1)은 유한의 합으로써 선형방정식의 군으로 다음과 같이 표시할 수 있다.

$$t_i = \sum_{j=1}^L D_{ij} S_j \quad (2)$$

이때 t_i : 측정치

D_{ij} : j^{th} cell에서 i^{th} 파가 진행한 거리

s_j : slowness

만약 측정치 \hat{t} 와 파가 진행한 거리 \hat{D} 를 안다면 우리가 계산해야 할 문제는 model parameter \hat{s} 를 결정하는 것이다.

예상되는 측정치를

$$\hat{t}^p = [t_1^p, t_2^p, t_3^p, \dots, t_N^p] \text{ 라면}$$

$$t_i^p = \sum_{j=1}^L D_{ij} s_j \quad (3)$$

*1993년 4월 접수

1) 강원대학교 자원공학과 부교수

2) 서울대학교 자원공학과 교수

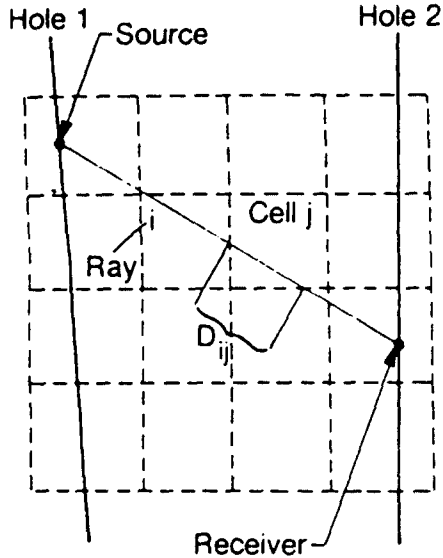


Fig. 1. Borehole locations and discretization of cells.

$$\hat{r} = \hat{t} - \hat{t}_p \quad (4)$$

이때 $\hat{r} = [r_1, r_2, r_3, \dots, r_N]^T$ 는 측정치 \hat{t} 와 이론적인 계산치 t_p 와 차이(error) vector이다. 그러나 많은 측정치 t 와 model parameter s 가 있을 경우 모든 자료에 대하여 문제를 해결하는 것은 어려우므로 다음의 방법을 사용한다.

$$f(s_1, s_2, \dots, s_L) = ||r||^2 = \sum_{i=1}^N r_i^2 = \text{minimum} \quad (5)$$

이때 functional f 는 misfit functional이라 부른다.

식 (5)는

$$\begin{aligned} f(s) &= ||\hat{t} - \hat{t}_p||^2 = ||\hat{D}\hat{s} - \hat{t}||^2 \\ &= (\hat{D}\hat{s} - \hat{t}, \hat{D}\hat{s} - \hat{t}) \\ &= (\hat{D}\hat{s} - \hat{t})^T (\hat{D}\hat{s} - \hat{t}) = \text{minimum} \end{aligned} \quad (6)$$

misfit function의 최소화 문제는

$$\hat{D}^T \hat{D}\hat{s} = \hat{D}^T \hat{t} \quad (7)$$

로 풀 수 있으며

식 (7)은

$$\hat{s} = (\hat{D}^T \hat{D})^{-1} \hat{D}^T \hat{t} \quad (8)$$

로 나타낼 수 있다.

식 (8)에서 SVD(singular value decomposition) 방

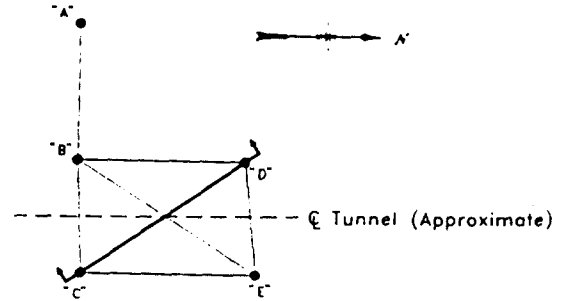


Fig. 2. Plan view of tunnel and boreholes locations.

법을 적용하면

$$\begin{aligned} \hat{D}^T \hat{D} &= (\hat{U} \hat{Q} \hat{V}^T)^T \hat{U} \hat{Q} \hat{V}^T \\ &= \hat{V} \hat{Q} \hat{U}^T \hat{U} \hat{Q} \hat{V}^T \\ &= \hat{V} \hat{Q}^2 \hat{V}^T \end{aligned} \quad (9)$$

가 된다.

식 (7), (8), (9)에서

$$\hat{s} = (\hat{V} \hat{Q}^2 \hat{V}^T)^{-1} \hat{V} \hat{Q} \hat{U}^T \hat{t} \quad (10)$$

이것이 우리가 구하고자 하는 model parameter 방정식이 된다.

3. 모델링 및 계산

Colorado School of Mines(CSM, 미국 Golden에 위치)에서 서쪽 방향으로 40 km 지점에 위치한 Idaho 광산(CSM 소속)의 tunnel 탐지 연구지역에서 미육군이 측정한 현장자료를 전산처리하여 tunnel의 유무를 파악하고 이론적인 모형자료와 비교하였다.

Fig. 2와 같이 터널은 BC와 DE를 관통하여 북쪽으로 진행하고 있으며 크기는 약 가로 7 ft, 세로 7 ft이다. 시추공의 크기는 8 in이며 길이는 약 330 ft이다. D, E 시추공 간의 간격은 34 ft이며 진원과 수신기를 사용한 깊이는 102 ft이다. 터널은 지표에서 220 ft 지점, 계산 모형에서는 약 60 ft 지점에 위치하였다. 진원의 간격은 2 ft로 49개, 수신기의 간격은 1 ft로 사용하였다.

3.1 이론 모형 계산

현장 실측치와 비교하기 위하여 이론모형의 크기를 현장과 똑같이 X방향으로 34 ft, Z방향으로 102 ft로

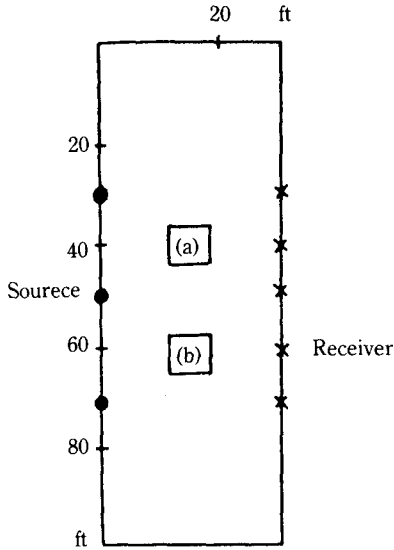


Fig. 3. Theoretical tunnel model with tunnels A and B, source and receiver locations.

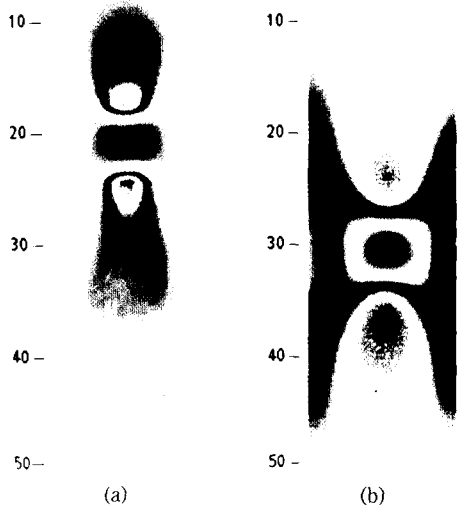


Fig. 4. (a) Reconstruction map for tunnel A. (b) Reconstruction map for tunnel B.

하였다. 우선 프로그램의 정확성을 알아보기 위하여 Fig.3과 같이 터널이 A에 위치할 경우와 B에 위치할 경우를 계산하여 토모그램을 작성하였으며 결과는 각각 Fig.4(a), 4(b)에서 볼 수 있다. 각각의 토모그램에서 터널의 위치를 정확하게 볼 수 있으며(붉은

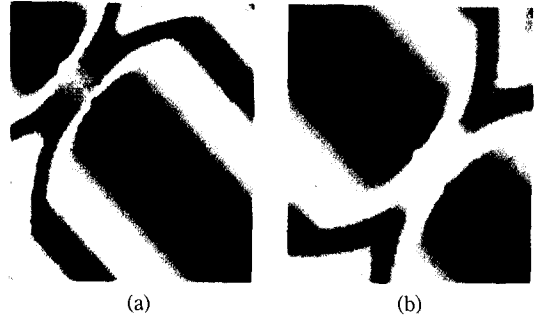


Fig. 5. (a) Traveltime map for tunnel A. (b) Traveltime map for tunnel B.

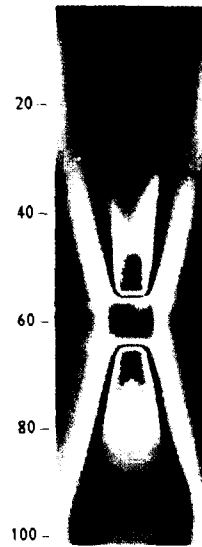


Fig. 6. Reconstruction map for the theoretical model. The same parameters as field data were used for reconstruction.

색깔) traveltime map를 작성하여(Fig.5(a), 5(b)) 터널이 위치한 곳에서의 traveltime의 변화를 고찰하였다. 이때 가로축과 세로축은 각각 진원수와 수신기수를 나타낸다. 계산 시간을 절약하기 위하여 mesh 수를 가로 17개, 세로 50개로 하여 1개의 mesh의 길이를 2ft로 하여 각각 계산하였다. 진원수와 수신기의 배열은 평행하게, 각각의 시추공에 35개씩 배열하였다.

Fig.6은 현장실측때와 똑같은 모형에서의 토모그래피를 보여주며, 진원과 수신기는 현장실측 때와 마찬가지로 각각 49개, 101개를 사용하였다. mesh의

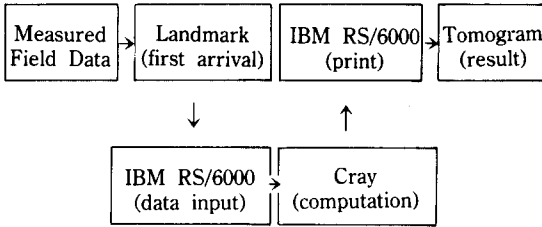


Fig. 7. Field data processing procedure.

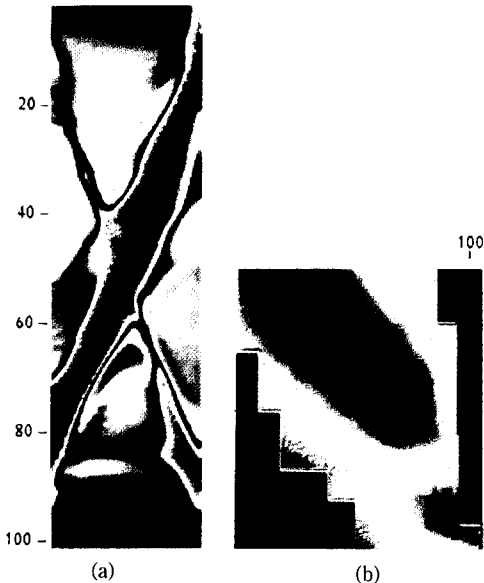


Fig. 8. (a) Traveltime map of field data.
(b) Reconstruction map of field data.

크기는 1ft로 하여 가로 34개, 세로 102개를 하였다. 이때 모양의 속도는 화강암으로 가정하여 13,000 ft/sec로 하였으며 터널은 물이 차 있다고 생각하여 3,300 ft/sec로 하여 계산하였다.

3.2 현장자료처리

여러개의 자료중 DE의 자료로써 이론모형자료와 비교 검토하였다. 현장자료처리 과정은 Fig. 7과 같으며, 현장에서의 기록테이프를 Landmark에서 초기도달시간을 트레이스별로 계산하여 IBM Workstation에 입력시킨다. 이 자료를 초대형 컴퓨터인 Cray로 계산하여 다시 IBM으로 결과를 프린트시킨다.

Fig. 8a는 진원과 수신기간의 전파시간의 분포를 나타내며 이론모형의 분포와 양상이 매우 다를 수 있다. 이때 주위의 붉은 색깔은 자료를 얻지 못한

부분이다. Fig. 8b는 자료처리된 토모그래피이며 터널이 위치한 60 ft 지점에서 약간 아래로 벗어나 위치해 있으며 모양도 약간 변형되었음을 볼 수 있다.

4. 결 론

이상과 같은 이론모형과 현장자료에 의한 토모그래피에서 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1) 이론 모형 자료에서는 터널의 위치가 Fig. 6에서와 같이 정확하게 나타남을 볼 수 있으나 현장자료에서는 터널의 위치가 다소 떨어져 나타나며 모양도 변형되게 나타남을 볼 수 있다. 이것은 현장자료가 Fig. 8a와 같이 모형 전체에서 수신을 하지 못한 부분이 많으며 또한 초기도달시간의 계산이 부정확한 것 등이 원인이 될 것이다. 무엇보다도 현장에서의 좋은 자료획득이 중요하다.

2) 토모그래피 뿐만 아니라 Fig. 5a, 5b, 8a에서와 같이 진원과 수신기 사이의 초기도달시간 map도 터널의 위치선정에 중요한 자료가 될 수 있으며 앞으로의 연구가 필요하다.

3) 역산(inversion)의 계산시 계산반복회수에 따라 계산오차(error)를 점검하여야 하며, 오차의 크기에 따라 토모그래피의 결과도 큰 차이가 남을 알 수 있었다.

참고문헌

- 1) Jackson, D.D., 1972. Interpretation of inaccurate, insufficient and inconsistent data, *Geophysics*, J.R. Astr. Soc. 28, 97-109.
- 2) Lines, L.R. and Treitel, S., 1984. A review of least-squares inversion and its application to geophysical problem, *Geophys. Prosp.* v.32, 159-186.
- 3) Peterson, R.G. and Paulsson, B.N., 1985. Applications of algebraic reconstruction techniques to crosshole seismic data, *Geophysics*, v.50, 1566-1580.
- 4) Pratt, R.G. and Worthington, M.H., 1988. The application of diffraction tomography to crosshole seismic data. *Geophysics*, v.53, no.10, 1284-1294.
- 5) Scales, J.A., 1987. Tomographic inversion via the conjugate gradient method, *Geophysics*, v.52, no.2, 179-185.
- 6) Worthington, M.H., 1984. An introduction to geophysical tomography, *First Break*, v.2, no.11, 20-26.