

터널탐사를 위한 탄성과 자료처리법에 관한 연구

서백수¹ · 손권익²

¹강원대학교 지구·환경공학부, ²강원대학교 산업공학과

Study of Seismic Data Processing Method for Tunnel Detection

Suh, Baek-Soo¹ and Sohn, Kwon-Ik²

¹Division of Environmental and Geosystem Engineering, Kangwon national University

²Department of Industrial Engineering, Kangwon national University

터널탐사의 탄성과 자료처리 기법에는 주시 토모그램 방법이 많이 이용되어 왔다. 현장자료는 이론 자료와는 달리 파동원과 수신기의 거리 증가에 따른 도착 시간의 차이가 작기 때문에, 피킹과 같은 작은 오차에도 계산 결과는 큰 오류를 범할 수 있다. 본 연구에서는 이러한 문제점을 극복할 수 있는 진폭법과 오차 토모그램 방법을 시도하였으며, 앞으로 현장 자료 처리에 많은 도움을 줄 수 있을 것이다.

주요어 : 터널, 탄성과 자료처리, 주시 토모그램, 진폭법, 오차 토모그램, 피킹

Traveltime tomogram is generally used for interpretation of seismic tunnel data. In the field data, the first arrival traveltime is less dispersive with increasing source-receiver separation compared to theoretical model data. So the result of calculation can be serious despite of small errors such as traveltime picking. In this study, amplitude method and error tomogram method are tried to overcome these problems. This method will help the interpretation of the data from the underground tunnel.

Key words : tunnel, seismic data processing, traveltime tomogram, amplitude method, error tomogram, picking

서론

구조물의 안전을 위협하는 지질구조로는 단층, 석회암 공동, 단층, 파쇄대 및 연약대 등이 있다(정호준와 김정일, 2006). 그 중에서 지하공동이나 지하터널은 대형 구조물의 건설이나 지질구조의 안정성, 또는 군사적인 측면에서도 매우 중요한 역할을 한다. 석회암 지역에서의 지하공동의 유무 및 정확한 위치 조사는 붕락 및 갱내 유출수 등의 큰 재해를 사전에 방지할 수 있다.

복잡한 지하구조 탐사 자료처리를 위하여 여러 가지 자료처리 기법들이 개발되었다(서백수, 1988; 서백수 등, 2006). 주시 역산을 이용한 탄성과 토모그래피는 국내외에서 많은 이론 논문과 함께 현장자료에 대해서도 훌륭한 결과를 보여주었다(Dines and Lytle, 1979, 김중렬 등, 1991). 파선 추적을 이용하는 주시 역산은 계산 시간

의 측면에서 매우 효과적이지만, 고주파수 가정이 필요하며 암영대가 존재하는 경우 파선 추적이 실패할 수도 있다는 단점을 가지고 있다.

따라서 본 연구는 터널의 탐사를 위하여 주시 토모그램 방법과 시뮬레이션 의한 위치 추적 방법을 적용하였으며, 진폭을 이용한 오차 토모그램 방법도 시도하였다. 이론적 자료와는 달리 실제 자료는 매우 불량하여 초동 주시 및 진폭을 찾는 것이 쉽지가 않다. 그러나 지금 제시된 방법은 많은 파동원의 자료를 필요로하지 않고, 또한 전 시간대에 걸친 자료가 필요한 것도 아니다. 측정된 자료 중 잘 나온 자료 일부만 가지고, 그것에 대한 초동 주시와 진폭만 구하여도 좋은 결과를 얻을 수 있을 것으로 판단되어 앞으로의 현장 자료처리에 매우 유용할 것으로 본다.

*Corresponding author: bssuh@kangwon.ac.kr

이론 모형 연구

본 연구에 이용된 이론 모형의 크기는 Fig. 1과 같이 20 m×40 m(가로×세로)이며, 내부에 2 m×2 m 크기의 터널이 존재한다. 모암은 균질 등방하며 5,500^{m/s}의 탄성과 속도를 가진다. 파동원은 AC 사이의 중심인 F(0,20)에 위치하고, 수신점은 BD 구간에 0.5 m간격으로 총 80개의 지점에서 수신한다.

초동주시의 선택

탄성과 탐사에서 측정자료는 송신원에서 발생한 탄성파가 매질을 통과하여 수신기에 도달하는 시간과 진폭이 된다. 여기서 파동의 도달시간은 탄성파가 진행하는 경로상의 매질의 속도와, 그리고 파의 진폭은 그 경로상의 매질의 흡수율(absorption coefficient)과 관련되므로 이들 속도와 진폭으로부터 매질의 물성분포를 규명하게 되는 것이다. 탄성과 주시 해석에 있어서 파동원의 발생 후 수신점에서 기록된 탄성과 중에서 가장 먼저 기록된 신호 즉, 주시곡선 상에서 탄성과 자료의 초동주시(first arrival time)를 어느 부분으로 결정하는가는 매우 중요한 문제이며, 해석 결과에 많은 영향을 준다.

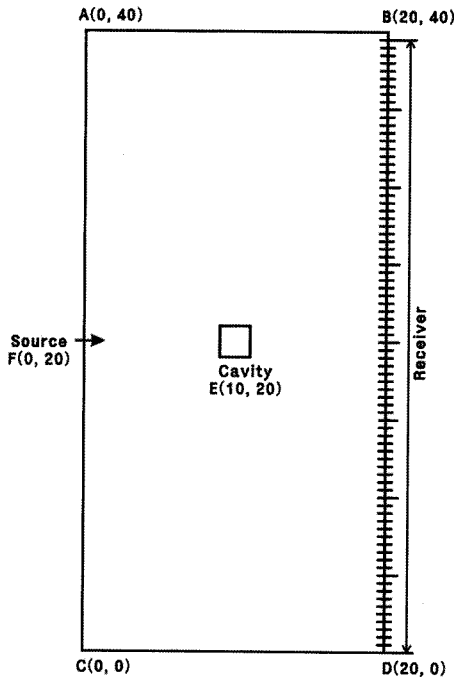


Fig. 1. The cavity is located in the model as a rectangle in the model.

초동주시 역산법의 경우 초동주시를 발체하는 지점에 따라서 모형계산의 결과가 현저한 차이를 보이는 것을 알고, 초동주시의 발체를 다각적으로 검증하고 정성적인 해석을 시도하였다. Fig. 2에 표시한 것과 같이 다섯 부분으로 초동주시를 나누어 유한요소법에 의한 파동의 모형에 대하여 역산을 시도하였으며, Peak 1 지점에서의 역산 결과가 가장 이론모형과 가까운 결과를 보임을 설명하였다(장선웅,2001).

파동원의 주파수와 격자 간격

유한차분법을 이용하는 수치계산에 있어서 격자 간격과 파동원의 주기 및 파장은 계산결과에 매우 큰 영향을 미치며, 일반적으로 주파수와 파장 사이에는 다음과 같은 관계가 성립된다.

$$V = f \cdot \lambda = \frac{\lambda}{T} \tag{1}$$

여기서 V : 탄성파의 속도

f : 주파수

λ : 파장

T : 주기

유한차분법에 격자망을 진행하는 파는 전파시간이 경과함에 따라 점차 분산되며 이러한 현상을 격자분산(grid dispersion) 이라고 한다. 파동원의 파장에 비해 격자 간격이 클 경우에는 계산의 오차가 생기므로 half-power 파장 당 10개 내외의 격자점이 존재하는 것이 좋다(서상용, 1982).

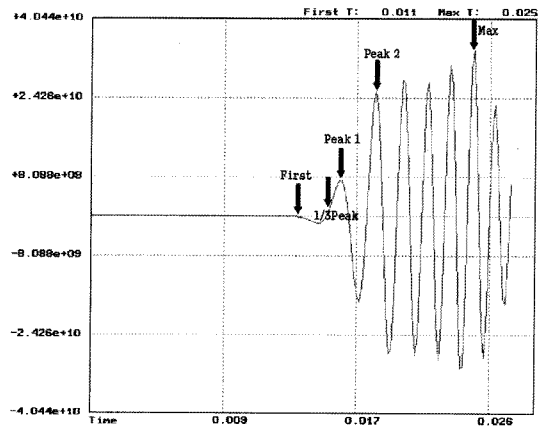


Fig. 2. The classification of first arrival time on seismic trace.

반사파의 제거

유한차분법을 이용한 모형 반응계산에서는 인위적인 경계면에 의해 반사파가 발생하므로 이를 제거할 필요가 있다. 본 연구에서는 지표 반사파가 직접파와 잘 분리될 수 있다는 조건에서 모든 방향에 감쇠 경계조건 (sponge boundary condition)을 설정하였다. Fig. 3-(a)는 감쇠 경계영역을 모델로부터 5m 넓게 하였을 때의 전파 양상이며, Fig. 3-(b)는 감쇠 경계영역을 모델로부터 10m 넓게 하여 모델의 경계면에서의 반사파를 효과적으로 제거하였음을 볼 수 있다.

주시 토모그래프의 이용

탄성과 토모그래피 방법은 그 대상이 인체와 같은 소규모의 대상체가 아니기 때문에 자료의 측정에 있어서 많은 제약이 수반된다. 먼저 대상 단면의 정보를 얻기 위해 송신원으로 탄성파를 사용하며, 수신장치로는 탄성파 에너지를 측정할 수 있는 지오폰(geophone) 혹은 하이드로폰(hydrophone)을 사용한다. 최근까지의 탄성파 토모그래피의 역산기법으로는 초동주시 역산법과 전파형 역산법이 있다(한현철,1998).

주시 역산법

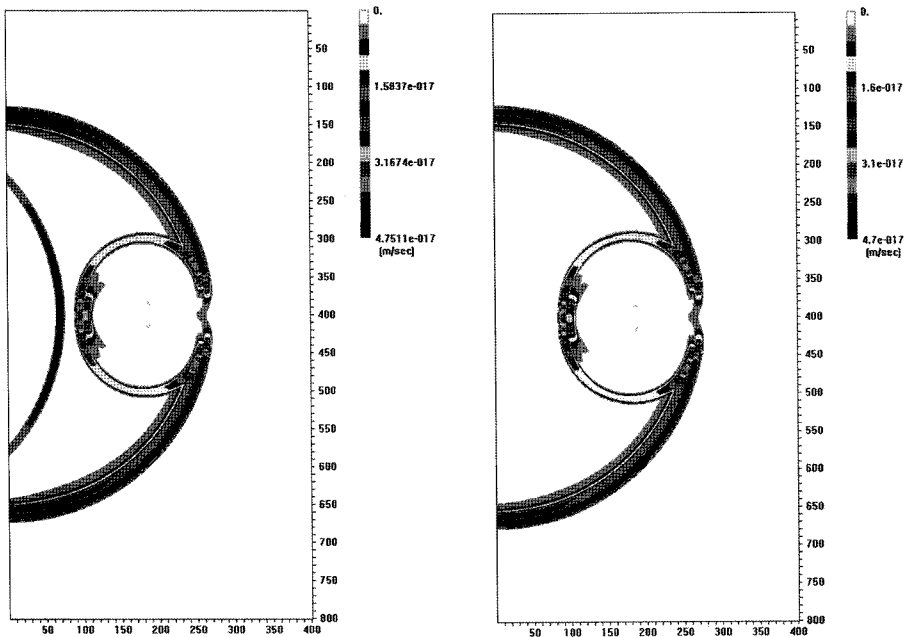
파선 토모그래피는 시추공 사이의 탄성과 전달시간 자료로부터 지하의 속도구조를 재구성하는데 사용된다. 이런 개념을 이용하여 본 연구에서는 시추공의 양쪽측면에 송신기와 수신기를 부착하여 탄성파의 다양한 속도변화를 이용하여 지하 내부의 속도 영상화 단면을 연구하고자 한다.

Fig. 4에서 k번째 파선이 C_k 라는 경로를 따라 송신원으로부터 수신기에 도달한다고 하고 이 경로상에서 매질의 전파속도의 역수(slowness)를 S_j 라 하면 수신기에서의 추정치인 파의 도달시간 b_k 는

$$b_k = \int_{C_k} S_j dr \tag{2}$$

이 되며 b_k 는 경로 C_k 를 따른 S_j 의 투영(projection)이 된다. 즉, 투영은 파선경로를 따른 대상함수 S_j 의 선적분으로 표시된다.

Fig. 4에서와 같이 대상영역을 N개의 요소로 나누어 j번째 요소에서의 k번째 파선경로 C_k 의 길이를 W_{kj} 라 하고 각 요소에서의 속도를 일정하다고 가정하면 식 (2)을 다음과 같이 연립방정식으로 쓸 수 있다.



(a) Enlarged by 5m around boundary (reflection wave)

(b) Enlarged by 10m around boundary (No reflection wave)

Fig. 3. Wave propagation of the tunnel model enlarged by 5m(a) and 10m(b) around boundaries.

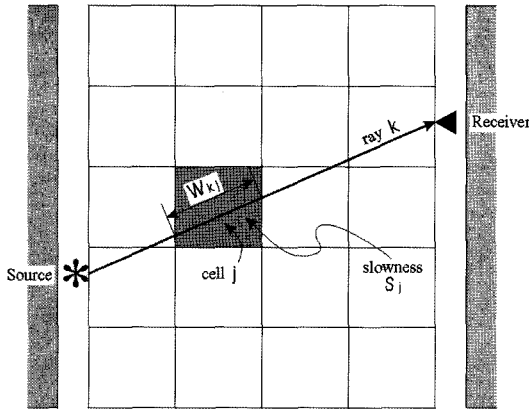


Fig. 4. Cell and typical raypath for the tomographic inversion.

$$b_i = \sum_{j=1}^N W_{kj} S_j \quad (i = 1, 2, \dots, N: N \text{은 파선의 총수}) \quad (3)$$

따라서, 모든 파선에 대해 행렬로 표시하면 다음과 같다.

$$B = AX \quad (4)$$

여기서 는 $M \times N$ 의 행렬로 그 요소 W_{kj} 는 k 번째 파선이 j 번째 요소를 통과하는 길이를 나타내며 하나의 파선이 통과하는 요소의 개수는 매우 작으므로 A 는 변수가 작은 행렬이 된다. 측정된 시간 b_k 와 이론계산치 b_p 의 차이를 잔여오차(residual error)라고 하면

$$\Delta b = \Delta X(5)$$

가 되며, 대부분의 역산 알고리즘은 이 값을 최소화하는데 목적을 두고 있다. 역산기법 중에서 ART (Algebraic Reconstruction Technique)법은 각 셀(Cell)에 임의의 속도를 부여하고 계산된 파선의 주행시간과 측정된 주행시간의 오차를 계산한다. 그리고 각 셀의 속도를 보정하며 모든 파선에 대해 반복적으로 수행하여 오차를 줄여가는 방법이다. SIRT(Simultaneous Iterative Reconstruction Technique)법은 주어진 영역을 통과하는 모든 파선에 대한 보정값을 동시에 계산하며, 모든 영역에 대한 보정값이 계산되면 이를 각 영역에 대해 일시에 보정하는 기법이다. 또한 비선형 문제를 해결하는 반복적 역산기법에는 LSQR(Least Square Method), CG(Conjugate Gradient)법 등이 있다.

Table 1. The geometry of the sources and receivers.

Boreole No. (source-receiver)	Depth of first source(m)	Depth of first receiver(m)	Distance of borehole(m)	Degree of tunnel(θ)
T4-T2	60	63	13.6	110°

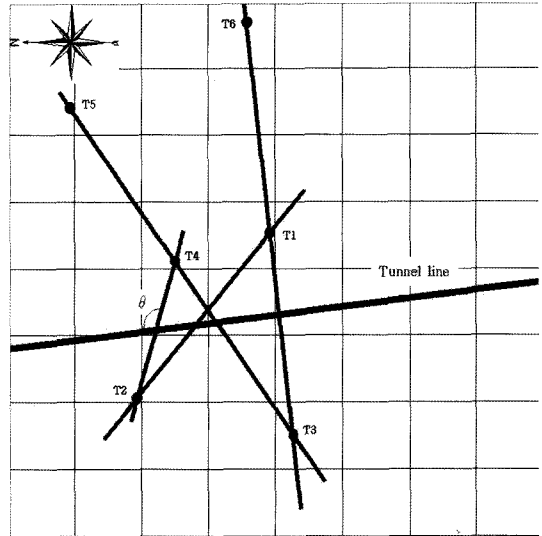


Fig. 5. The location map of the tunnel and boreholes. (1 : 220 scale).

현장 자료 해석

연구대상 터널은 경기도 한 지역에 위치하며 Fig. 5와 같이 터널 주위에 T1~T6까지 6개의 시추공이 위치한다. 터널의 크기는 가로, 세로 각각 2m이며 깊이는 지표에서 약 75m에 위치한다. 파동원으로는 Vibroseis를 사용하였고, 수신기로는 간격이 1m인 24채널 hydrophone을 사용하였으며 ABEM MK-6를 사용하여 자료를 획득하였다. 측정 방법은 수신기를 지표에서 63m지점에서부터 1m 간격으로 24개를 고정시키고, 파동원을 지표에서 60m지점부터 1m 간격으로 이동하면서 자료를 측정하였으며 파동원과 수신원의 위치, 거리 및 각도는 Table 1과 같다.

T4-T2 시추공-시추공 탐사의 현장 측정방법과 동일하게 하기 위하여 지표에서 63m 위치에서부터 Hydrophone 24개를 1m 간격으로 배열하고, 파동원인 Vibroseis를 지표에서 60m 위치에서 1m 간격으로 90m까지 이동하면서 자료를 획득하였다. 현장자료에서 모암의 속도는 약 $5,500 \text{ m/s}$ 로 계산되었으므로 모형계산에서도 파동의 전파속도를 동일하게 $5,500 \text{ m/s}$ 로 하였으며, 터널 내부는 공기로 채워졌다고 가정하여 파동의 전파속도를 340 m/s 로 하였다.

Fig. 6은 이론 터널모형에서 터널의 위치 및 파동의 전파속도를 보여주며 Fig. 7은 T4-T2 시추공-시추공 탐사자료를 ART 법으로 역산한 지오토모그래피 계산결과이다. 이때 초기치는 터널내부와 모암의 파동전파속도의 중간정도인 $3,000\text{m/s}$ 로 하였다. 역산치의 최저치는 300m/s , 최고치는 $5,700\text{m/s}$ 로 하였으며, 이때의 이론 터널모형의 터널 위치 및 모양이 매우 정확함을 보여준다.

이론모형에서 파동의 진행방향이 직선이라고 가정할 경우, 파동원과 수신기의 거리에 따른 도착시간의 상관관계는 Fig. 8에서 볼 수 있으며, 터널의 영향에 의해서 도착시간이 상당히 지연됨을 볼 수 있다. Fig. 9는 T4-T2 시추공 탐사법 현장자료의 파동원-수신기 거리에 따른 도착시간의 상관관계를 보여주며, 자료의 분산 정도가 Fig. 9에 비해서 매우 작음을 알 수 있다. 이 현상

은 파동이 터널 내부를 전파하지 않고 수신기에 전달되기 때문인 것으로 생각된다.

Fig. 10은 시추공사이의 거리가 13.6m이고 터널과의

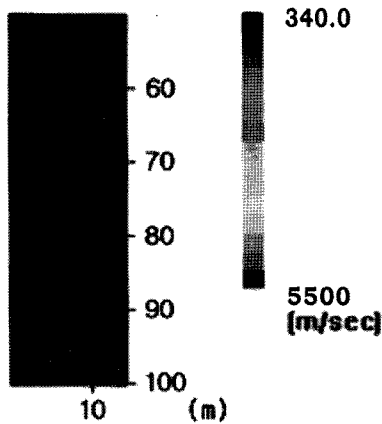


Fig. 6. Theoretical tunnel model.

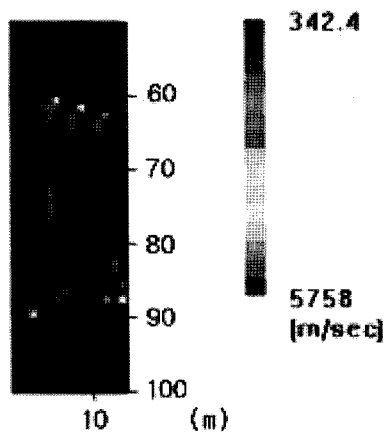


Fig. 7. Velocity tomogram by ART inversion method for theoretical tunnel model.

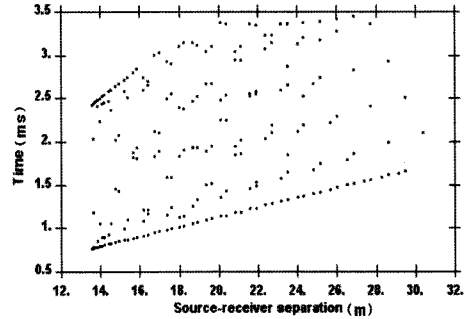


Fig. 8. Relationship between the first arrival time and source-receiver separation in T4-T2 survey when first arrival time was computed theoretically.

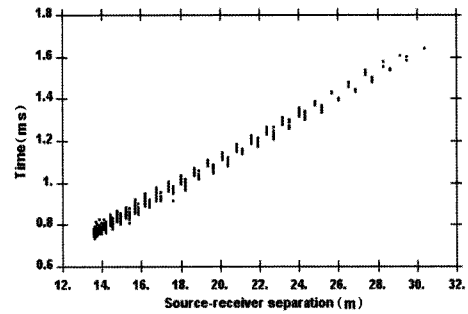


Fig. 9. Relationship between the first arrival time and source-receiver separation in T4-T2 survey when first arrival time was calculated from the real data.

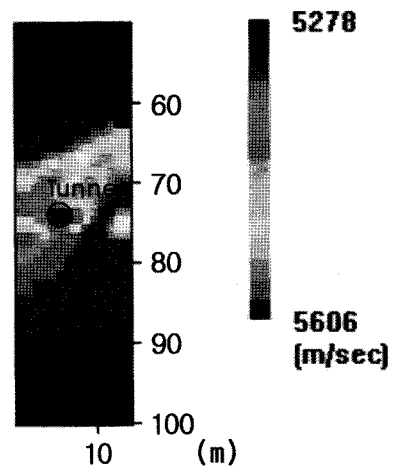


Fig. 10. Velocity tomogram by ART inversion method of T4-T2 data.

각도가 110°인 T4-T2 시추공-시추공 사이의 ART 역산법에 의한 계산 결과이며, 이때 역산 최저치는 3,600^{m/s}, 최고치는 5,700^{m/s}로 입력하였다. 이때 T4에는 송신원, T2에는 수신기를 설치하였으며, 계산된 터널의 위치는 실제 터널의 위치와 비슷하게 나타남을 볼 수 있다.

Simulation에 의한 위치 추적 방법 적용

이론 모형은 Fig. 11에서와 같이 시추공간의 거리는 20 m, 심도는 40 m로 내부 정중앙에 터널이 위치하도록

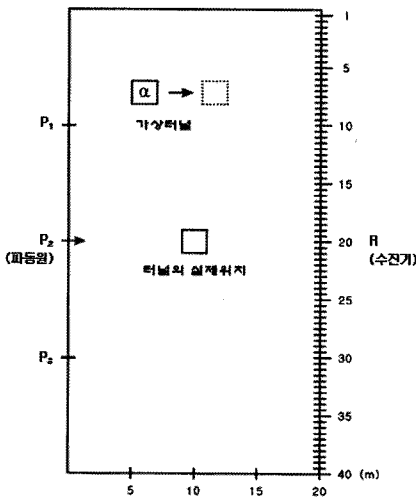


Fig. 11. Theoretical tunnel model.

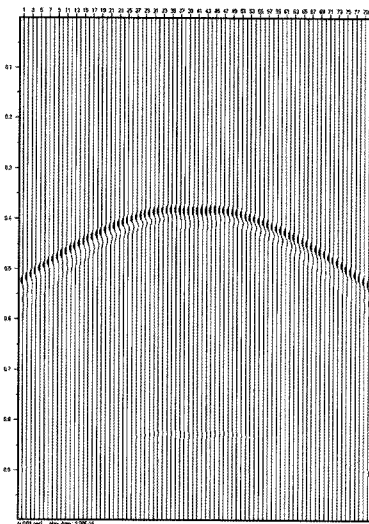


Fig. 12. Theoretical synthetic seismogram for tunnel model of Fig. 11.

하였으며, 그 규모는 2m×2m(가로×세로)로 하였다. 모암의 탄성과 속도는 5,500^{m/s}이며 터널의 탄성과 속도는 340^{m/s}이다. 왼쪽 시추공 1개의 지점에 파동원이 위치하도록 하였으며, 오른쪽 시추공에는 0.5 mm 간격으로 수신기를 배열하여 수신기의 갯수를 변화하면서 계산하였으며, 총 80개의 파선을 얻어낼 수 있도록 하였다. 계산은 유한차분법을 이용하였으며 격자(mesh) 간격은 0.125 m로 하였다(서상용, 1982). Fig. 12는 상기모형에 대하여 계산하여 얻은 합성파형이며, Fig. 13은 T2-T4 시추공 현장 자료를 트레이스별 정규화(trace normalized)한 그림이다.

자료처리 방법은 터널 위치, 터널 및 모암의 전파속도가 정해져 있는 기준모형에 대한 계산 자료인 “목표자료”를 먼저 구하여 놓고, 가상의 터널을 설정해서 구한 “추정자료”를 비교하는 것이다. 1 m 간격으로 터널의 위치를 옮겨 이론적 자료(추정자료)를 구하고, 터널이 존재할 경우의 자료(목표자료)와의 각 수신점별 자료의 오차의 제곱의 합을 구한다. 이를 토모그래피(tomography) 방법처럼 위치별로 오차에 따른 색깔을 달리 주어 어떤 분포 형태를 보이는가를 분석하면 이를 “오차 토모그래피”한다.

주시 및 진폭 토모그램의 이용

컴퓨터에서 다양한 가상모형을 시뮬레이션하기 위하여 가상 터널의 위치 좌표를 x, y 각각의 축으로 1 m, 3 m, 5 m 간격으로 이동시키면서 주시자료와 진폭자료

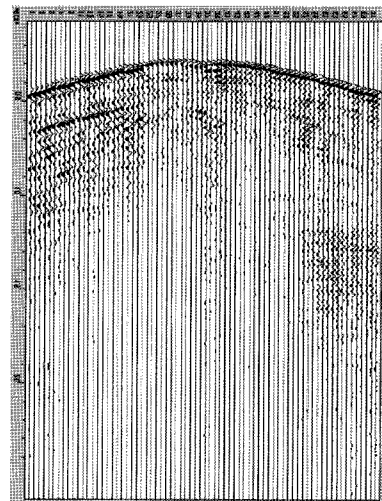


Fig. 13. Synthetic seismogram of field data when source position is 75m depth.

를 각각 취합 비교하였다. 먼저, 주시자료를 근거로 하여 1m 간격으로 위치 추적을 한 결과, 구해진 터널의 중심좌표는 $(x, y) = (10, 20)$ 로 기준모형의 것과 동일하였으나 3m, 5m 간격으로 구한 결과는 각각 $(x, y) = (13, 19)$ 와 $(x, y) = (3, 2)$ 로 나타났다. 3m 간격의 결과는 중심에 비교적 가까웠으나 5m 간격의 경우는 중심과는 거리가 먼 곳을 가리키고 있다.

진폭차료를 근거로 추적을 한 결과는, 간격이 1m인 경우는 $(x, y) = (10, 20)$ 으로 중심을 정확히 가리키고 있으며, 3m, 5m의 경우는 각각 $(x, y) = (12, 19)$ 와 $(x, y) = (12, 22)$ 로 나타났다. 이는 비교적 중심좌표에 근접하였으므로, 다시 간격을 좁혀 세밀한 분석을 하면 정확한 위치를 찾을 수 있다. 각 자료에 대한 종합표는 Table 2에서 볼 수 있다.

이상의 계산결과에 의하면 터널을 1m 간격으로 이동한 경우에는 터널이 위치한 좌표와 정확하게 일치하였다. 터널을 3m 간격으로 이동할 경우에는 주시를 이용 시에는 중심좌표 $(x, y) = (13, 19)$, 진폭을 이용 시에는 $(x, y) = (12, 19)$ 로 계산되었다. 그러나 터널을 5m 간격으로 이동할 경우에는 진폭일 경우에는 $(x, y) = (12, 19)$ 이지만 주시를 이용할 경우에는 $(x, y) = (3, 2)$ 로 나타나 계산에 많은 오차가 발생함을 알 수 있다. 이러한 결과는 초기 조달시간 피킹의 부정확 및 공동 유무에 따른 주시 값들의 차이가 매우 작은 것에 기인한다고 볼 수 있으며, 진폭을 이용한 계산이 보다 바람직하다고 볼 수 있다.

T2-T4 시추공 탐사자료를 이용하여 상기 계산법을 적용하였다. Fig. 14는 수신기 72개(수신기 번호 1~72)의 자료를 이용한 계산 결과이며, Fig. 15, Fig. 16, Fig. 17은 각각 60개, 40개, 20개의 수신기를 사용하였을 때의 계산 결과이다. 자료의 정확성을 높이고 계산 시간을 절약하기 위하여 수신기의 범위를 변화하면서 계산한 결과, 72~60개의 수신기 자료보다 40~20 개의 수신기 자료의 계산 결과가 더욱 좋을 수 있었다.

오차토모그램의 이용

Fig. 11에서와 같이 중앙에 터널이 있다고 가정하고 모형의 좌측 시추공에 파동원이 존재한다. 컴퓨터 시뮬

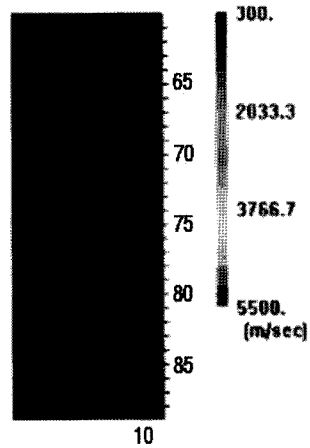


Fig. 14. Amplitude tomogram when 72 numbers of receivers are used.

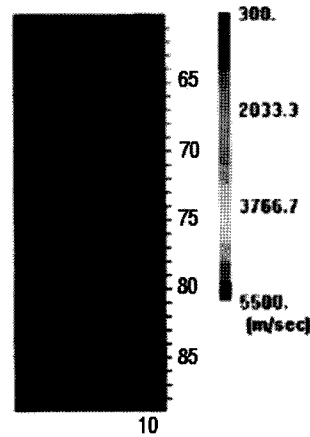


Fig. 15. Amplitude tomogram when 60 numbers of receivers are used.

레이션을 통해 반대편에 배열되어 있는 수신기 $R_i(i=1,2,\dots,n)$ 에서의 트레이스(trace) 자료를 얻을 수 있으며, 이 트레이스 자료에서 주시나 최대 진폭과 같은 필요한 목표자료 $T_i(i=1,\dots,n)$ 를 찾는다. 기준모형에서 터널의 위치가 임의의 지점 α 로 달리하는 가상모형에 대하여 얻어지는 추정자료를 $t_i^\alpha(i=1,\dots,n)$ 라 하면, 두 자료간의 오차의 제곱의 합(S^α)은

Table 2. Result of travel time and amplitude simulation when tunnel is moved by 1m, 3m, 5m interval in theoretical model.

Distance of tunnel movement	Traveltime method	Amplitude method
1 m	(10, 20)	(10, 20)
3 m	(13, 19)	(12, 19)
5 m	(3, 2)	(12, 22)

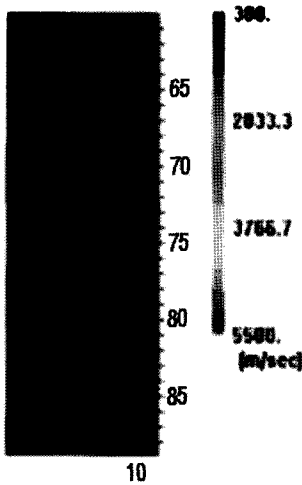


Fig. 16. Amplitude tomogram when 40 numbers of receivers are used.

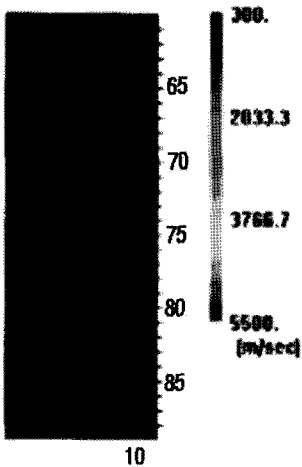


Fig. 17. Amplitude tomogram when 20 numbers of receivers are used.

$$S^\alpha = \sum_{i=1}^n (t_i^\alpha - T) ^2 \quad (6)$$

으로 나타내진다. 여러 지점의 α 에 대하여 S^α 가 최소가 되는 $\alpha(\alpha^*)$ 를 찾는 것이다. 즉

$$\alpha^* = \min_{\alpha} S^\alpha \quad (7)$$

이며, 이 α^* 가 찾으려는 터널의 위치로 추정할 수 있다. Fig. 11의 시추공 이론 모형을 이용하여 상기 식 (7)에 의하여 계산하였다. Fig. 18, Fig. 19는 1개의 파동원이 75m(터널의 중심 부분)에 위치하고, 각각 터널이

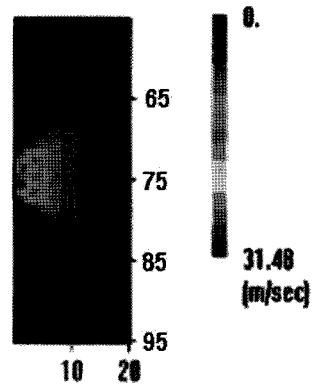


Fig. 18. Error tomogram of no tunnel model when one source is located at 75m depth.

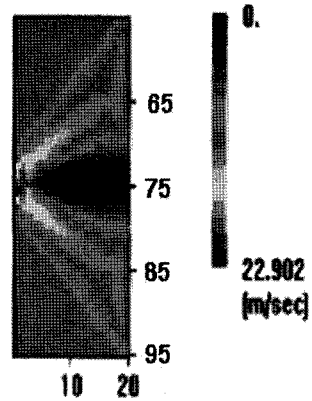


Fig. 19. Error tomogram of tunnel model when one source is located at 75m depth.

존재하지 않을 경우와 존재할 경우의 이론 오차토모그램이며, Fig. 20은 가중치(weighting factor)를 주었을 경우의 이론 오차토모그램이다. Fig. 21은 파동원이 75 m에 위치한 경우의 T2-T4 시추공 현장 자료의 오차 토모그램이며, 이론 오차토모그램 Fig. 20에 비해서 최소 오차 부분이 피킹 여러 등으로 좌측으로 이동된 것을 볼 수 있다.

파동원의 위치를 각각 심도 66 m(모형 상 1/4 지점), 75 m(1/2 지점), 84 m(3/4 지점)로 하고, 이 자료들을 이용하여 상기의 자료처리 방법에 의해서 터널의 위치를 추적하였다. 자료처리는 3개의 파동원 자료를 이용하는 복수 파동원 계산결과는 Fig. 22-(a)에서 볼 수 있으며, 중앙부분에 터널의 위치가 정확하게 존재함을 알 수 있다. Fig. 22-(b)는 심도 66 m 파동원과 75 m 파동원을 사용한 자료의 계산 결과이며, 터널의 위치가 중앙

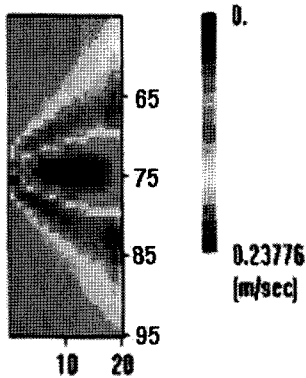


Fig. 20. Error tomogram when weighting factor is added to Fig.18.

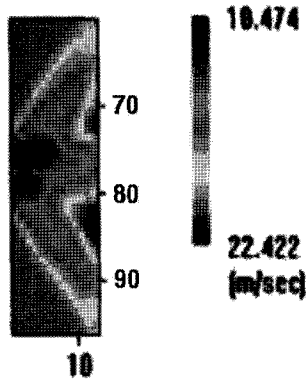
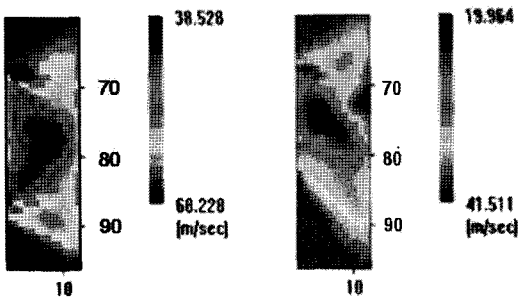


Fig. 21. Error tomogram of T2-T4 data when tunnel is located under earth.



(a) Error tomogram of 3 sources combination (b) Error tomogram of 2 sources combination

Fig. 22. Respective error tomograms of two or three sources combination when tunnel is located under earth.

에서 상좌단 방향으로 이동하여 나타나고 있음을 볼 수 있다. 이것은 이론계산에서와 같이 파동원의 위치에 의한 파선방향에 의한 영향으로 생각된다.

결 론

이상과 같은 연구에 의해서 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1) 이론 계산치의 초동주시는 Fig. 8과 같이 파동원과 수신기의 거리에 따라 상당한 차이가 나타나지만, 현장 자료의 초동주시는 Fig. 9와 같이 시간의 차이가 크지 않음을 볼 수 있다. 따라서 피킹 등과 같은 작은 오차에도 주시 역산의 계산 결과에는 큰 영향을 미칠 수 있으므로 많은 주의가 요구된다.

2) 시뮬레이션에 의한 위치 추적 방법에서는 진폭 자료를 이용한 계산 결과가, 주시 자료를 이용한 결과 보다 정확함을 알 수 있었다. 그리고 많은 수신기(72-60개)를 이용한 자료보다, 적은 수신기(40-20개)를 이용한 계산 결과가 더욱 정확함을 알 수 있었다.

3) 오차 토모그램 방법에서, 한 개의 파동원을 이용한 이론 자료 처리에는 터널의 위치가 거의 정확하게 계산됨을 볼 수 있으며, 중앙부분 자료에 가중치를 주었을 경우에는 더욱 정확하게 계산됨을 볼 수 있다. 그러나 현장 자료의 계산 결과는 피킹 등의 오차에 의해서 터널의 위치가 좌측으로 이동되어 나타남을 볼 수 있다.

4) 오차 토모그램 방법의 현장 자료 처리에서 3개의 파동원 자료를 이용한 계산 결과에서는 터널의 위치를 정확하게 볼 수 있으나, 2개의 파동원을 이용할 경우에는 파동원의 위치에 따라 터널의 위치가 파선 방향으로 기울어 나타남을 볼 수 있다.

5) 실제 자료는 이론적 자료와는 달리 매우 불량하여 초동 주시 및 진폭을 찾는 것이 쉽지가 않다. 본 연구에서 시도한 오차 토모그램 방법은 이것을 최대한 극복할 수 있다. 이 방법은 많은 파동원의 자료를 필요로 하지 않고, 측정된 자료 중 잘 나온 자료 일부만 가지고도 좋은 결과를 얻을 수 있으므로, 앞으로 주시역산과의 병행 연구가 더 진행되면 현장자료처리에 많은 도움을 줄 수 있을 것이다.

참 고 문 헌

김중열, 현해자, 김기석, 김유성, 성낙훈, 1991, Geotomography에 의한 암반 구조 연구(I), 과학기술처.
 서백수, 1988, 유한요소법에 의한 지하공동 탄성과 탐사에 관한 연구. 서울대학교 공학박사 학위논문, 206 p.
 서백수, 오석훈, 손권익, 2006, 터널 탐사를 위한 탄성과 전파양상에 관한 연구, 한국지구과학회지, 제27권 제 5호, 539-547.
 서상용, 1982, 유한차분법을 이용한 과도 전자장의 계산.

- 서울대학교 공학박사 학위논문, 162 p.
- 장 선용, 2001, 다양한 초동주시 역산법을 이용한 콘크리트 구조물내의 결함탐지에 관한 연구, 강원대학교 공학석사 학위논문, 14 p.
- 정호준, 김정일, 2006, 터널설계 및 지하공동 탐지를 위한 지반조사에 물리탐사의 활용, 강원대학교 ECO-NURI 심포지움 논문집, 11-23.
- 한현철, 1998, 2차원 전 파형 역산을 이용한 탄성과 토 모그래피, 서울대학교 공학석사 학위논문, 49 p.
- Dines, K., and Lytle, R. 1979, Computerized geophysical tomography, *Proc IEEE*, 67, 1065-1072.

2007년 10월 27일 원고접수, 2007년 12월 13일 게재승인

서백수

강원대학교 공과대학 지구시스템공학과
200-701 강원도 춘천시 효자동
Tel: 033-250-6254
Fax: 033-254-6255
E-mail: bssuh@cc.kangwon.ac.kr

손권익

강원대학교 공과대학 산업공학과
200-701 강원도 춘천시 효자동
Tel: 033-250-6258
Fax: 033-254-6255
E-mail: khsohn@cc.kangwon.ac.kr