

터널탐사에 단일 파동원을 이용한 탄성파 진폭법에 관한 연구

Study of seismic amplitude method using single source for tunnel detection

서백수^{*} 손권익^{**}
Suh, Baek-Soo Sohn, Kwon-Ik

Abstract

There are many techniques to calculate the exact position of deep seated tunnel. Especially, tomography method has been used generally in present days. This method has been performed mainly by wave traveltime. Because of short interval of two measuring boreholes, it was very hard to interpret the exact tunnel position.

To solve this problem, seismic amplitude method was tried to detect exact position of tunnel in this study.

키워드 : 토모그래피, 터널, 주시, 진폭

key words : tomography, tunnel, travel time, amplitude

1. 서론

일반적으로 지하내부에 존재하는 터널은 주변 지층에 비하여 저속대역을 나타내며, 이는 측정되는 주시의 지연을 일으킨다[1]. 다시 말해, 파동원의 발생점과 수신점 사이의 직선경로 상에 터널이 존재할 경우 탄성파는 터널을 투과 또는 우회하여 전파된다. 이때 터널을 투과하는 것은 탄성파 속도에 따른 투과시간, 우회하는 것은 늘어나는 파선경로에 따른 우회시간에 따라 주시의 지연이 일어난다. 때문에 송신원에서 발생된 탄성파가 여러 개의 수신점으로 전파되는 파선 중, 터널의 영향을 받는 범위 내에서 초동의 시간지연이 일어난다. 시간지연의 정도는 터널의 크기 또는 터널 내부의 탄성파 속도에 따라서 변화하게 되며, 터널 내부의

탄성파 속도는 층진 물질의 존재 유무 또는 층진 물질의 종류 및 특성에 따라 달라진다. 그러나 소형 터널의 경우에는 시간지연의 차이가 작으므로 자료해석에 많은 어려움을 야기 시킨다. 지하 터널은 존재 여부에 따라서 인위적으로 굴착되거나 자연적으로 생성된 것이 있으며 원형 또는 사각형에 가까운 형태로 존재한다. 일반적으로 터널은 생성 후 무충진 상태로 존재하지만, 주변 환경의 영향으로 모압과 상이한 매질이 터널 내부에 충진될 수 있다. 이것은 물리탐사를 통한 지질규명에 있어서 매우 중요한 문제가 되며 현장에서 취득한 주시 및 진폭 자료는 터널의 크기 및 내부의 층진 물질의 존재를 추정하는데 있어서 매우 중요한 자료가 된다[2].

본 연구의 대상은 심부 터널의 크기가 알려져 있고, 주위 모양이 균질한 특별한 경우로써 터널 및 모양의 전파속도를 알 수 있을 때이다. 터널의 위치를 찾는 방법으로 여러 곳을 가상터널로 지정하여 각 가상터널의 위치에 대하여 유한차분법을 기반으로 시뮬레이션 한 결과와 실제 측정 자료를

* 강원대학교 지구·환경공학부 교수, 공학박사

** 강원대학교 산업공학과 교수, 공학박사

대조하여 그 중 가장 잘 일치하는 터널의 위치를 잡으려는 것이다.

따라서 본 연구에서는 탄성파의 진폭을 이용하여 터널의 가상위치를 이동함으로써 실제 위치를 찾아내고자 한다. 현장 측정 자료를 이용하여 터널의 이동거리를 변화하면서 계산을 시도하였으며 앞으로의 터널 탐사에 도움을 줄 수 있을 것이다.

2. 파동방정식의 유도

파동의 벡터 운동방정식은 다음과 같이 나타낼 수 있으며

$$\rho \frac{\partial^2 \vec{u}}{\partial t^2} = (\lambda + \mu) \nabla \Theta + \mu \nabla^2 \vec{u} \quad (1)$$

μ : 전단 탄성률(shear modulus)

λ : Lamé의 상수

∇^2 : 라플라시안(Laplacian) 연산자

으로 쓸 수 있다.

이 벡터 운동방정식은 일반적인 파동방정식과 유사한 모양을 가지나, 우변에 서로 상이한 특성을 갖는 두 개의 항이 섞여져 있다. 이것은 우리가 경험적으로 알고 있는 파와 같이 탄성 고체 내에서는 두 종류의 파가 전파된다는 사실을 말해 준다. 따라서 벡터 파동방정식 (1)은 각각 종파(longitudinal wave)와 횡파(transverse wave)의 운동을 나타내는 두 개의 파동방정식으로 분해할 수 있다.

$$\frac{1}{\alpha^2} \frac{\partial^2 \Theta}{\partial t^2} = \nabla^2 \Theta \quad (2)$$

$$\alpha^2 = \frac{\lambda + 2\mu}{\rho}$$

$$\frac{1}{\beta^2} \frac{\partial^2 \xi}{\partial t^2} = \nabla^2 \xi \quad (3)$$

$$\beta^2 = \frac{\mu}{\rho}$$

식 (2)와 (3)은 각각 종파와 횡파의 일반적인 파동방정식이다. 이러한 파동방정식의 해를 구하는 방법으로는 유한요소법, 유한차분법 등이 이용되며 본 연구에서는 유한차분법을 이용하여 계산하였다.

3. 모델링(Modelling)

3.1 파동원의 주파수와 격자간격

유한차분법의 격자망을 진행하는 파는 전파시간

이 경과함에 따라 점차 분산된다. 이러한 현상을 격자분산(grid dispersion) 이라하며, 격자 간격이 클수록 격자분산 효과도 크다. 따라서 파동원의 파장에 비하여 격자간격이 클 경우는 계산의 오차가 생기므로 half-power 파장 당 10개 내외의 격자점이 존재하는 것이 좋다[3]. 특히 규모가 매우 작은 군사적인 터널의 탐지에 있어서는 역산의 중요성이 매우 부각된다[4]. 따라서 본 연구에서는 다음과 같은 관계식을 통하여 half-power 파장 당 8개의 격자점을 설정하였다.

$$V = f \lambda = \frac{\lambda}{T} \quad (4)$$

여기서, V : 모델의 탄성파 속도

f : 파동원의 주파수

λ : 파장

T : 주기

3.2 초동주시와 진폭 선택

탄성파 탐사에서 측정되는 자료는 송신원에서 발생한 탄성파가 매질을 통과하여 수신기에 도달하는 시간과 진폭이 된다. 여기서 파동의 도달시간은 탄성파가 진행하는 경로상의 매질의 속도와, 그리고 파의 진폭은 그 경로상의 매질의 흡수율과 관련되므로 이들의 속도와 진폭으로부터 매질의 물성분포를 규명하게 되는 것이다. 때문에 탄성파 자료의 초동주시(first arrival time)와 진폭(amplitude)를 어느 부분으로 결정하는가는 매우 중요한 문제이며, 해석 결과에 많은 영향을 준다. 또한 초동주시와 진폭을 발췌하는 지점에 따라서 모형계산의 결과가 현저한 차이를 보이며, 본 연구에서는 역산결과가 가장 이론모형과 가까운 결과를 보이는 것으로 알려진 Fig. 1의 peak 1 지점과 같은 최초 파동의 최대 진폭점을 초동으로 선택하였다.

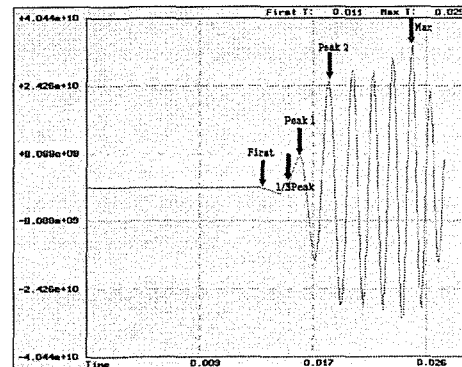


Fig. 1 The classification of first arrival time on seismic trace.

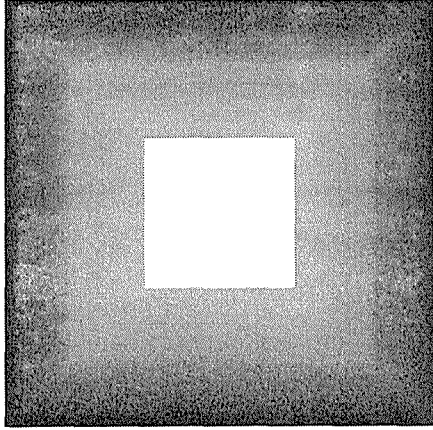


Fig. 2 The sponge boundary.

3.3 반사파의 제거

유한차분법을 이용한 모형반응계산에서는 인위적인 경계면에 의해 반사파가 발생하므로 이를 제거할 필요가 있으며[5], 지표반사파가 직접파와 잘 분리될 수 있다는 조건에서 모델의 모든 방향에 감쇠경계조건(sponge boundary condition)을 모델의 경계면으로부터 12.5 m 넓게 설정하였다(Fig. 2).

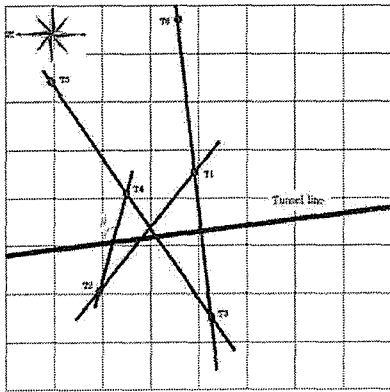


Fig. 3 The location map of the tunnel and boreholes(1:220 scale).

4. 현장위치 및 자료

연구지역은 경기도 한 지역에 위치하며 Fig. 3 과 같이 주위에 $T_1 \sim T_6$ 까지 6개의 시추공이 존재한다. 본 연구에서는 $T_2 \sim T_4$ 시추공의 자료를 사용하였으며, 토모그래피 방법에 의해서 자료를 획득하였다. 이를 모형화 하기위하여 가로

13.6m, 세로 36m 크기의 모형을 고려하였으며, 한 격자의 크기는 0.125m로 가로 109개, 세로 298개의 격자가 형성되었다. Fig. 4는 현장 토모그래피 자료이다.

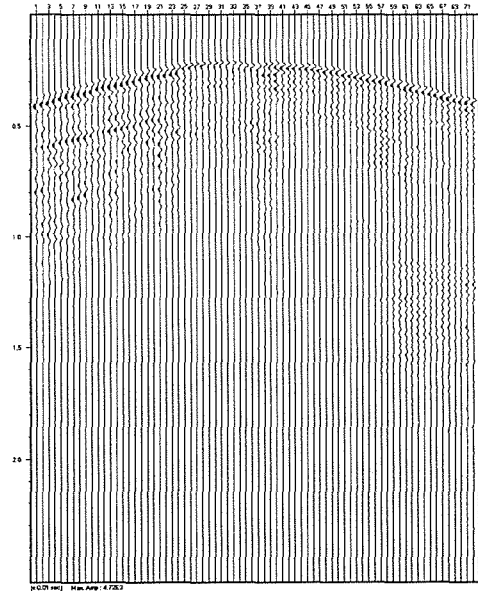
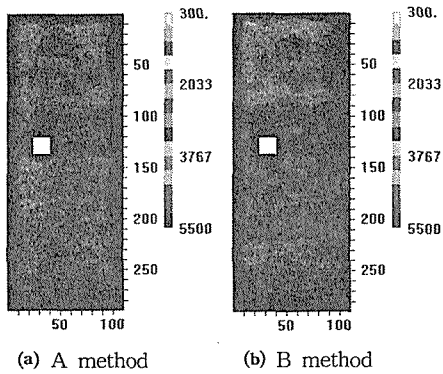


Fig. 4 Synthetic seismogram of field data at $T_2 \sim T_4$ boreholes in Fig. 3.

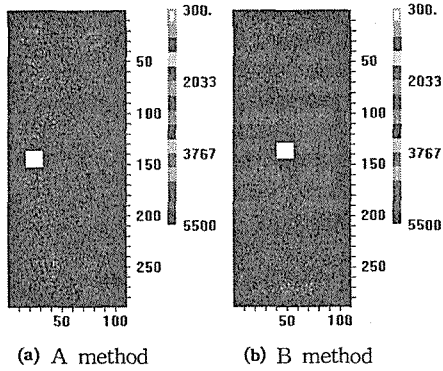
5. 자료처리

모형 연구는 터널 위치와 터널 및 모암의 전파 속도가 정해져 있는 기존 모형에 대한 계산 자료인 “목표자료”를 먼저 구하여 놓고 가상의 터널을 설정하여 구한 “추정자료”를 비교하는 것이다. 목표자료의 최대값과 추정자료의 최대값을 각각 1로 하여 정규화시키는 방법 A와, 목표자료 최대값을 1로 하여 정규화하되 추정자료는 목표자료의 최대값이 발생한 위치의 자료를 1로 하고 나머지는 이를 기준으로 계산하는 방법 B를 사용하였다.

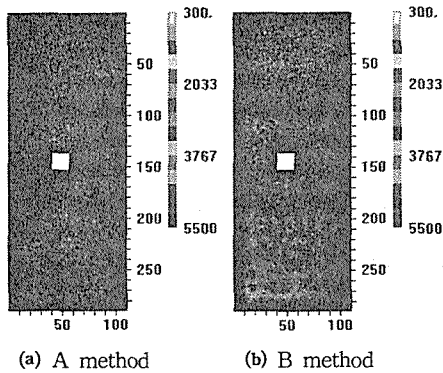
자료 계산의 정확성을 높이고 계산시간의 절약을 위하여 수신기 범위(Table 1)에 대한 연구를 시도하였으며 정규화는 계산하고자 하는 수신기 자료에 대하여 시행하였다.



(a) A method (b) B method
Fig. 5 Amplitude tomogram when 72 numbers of receivers are used.



(a) A method (b) B method
Fig. 6 Amplitude tomogram when 40 numbers of receivers are used.



(a) A method (b) B method
Fig. 7 Amplitude tomogram when 10 numbers of receivers are used.

Fig. 5는 수신기 개수를 72개(수신기 번호 1~72)의 자료를 이용하였으며 각각 A 방법, B 방법에 의한 해석 결과이다. 같은 방법으로 Fig. 6과

Fig. 7은 각각 40개, 10개의 수신기를 사용하였을 때의 결과이다(Table 1 참조).

Table 1 Result of simulation when number of receivers are changed

번호	수신기 개수(수신기 번호)	중심좌표(x, y)	
		A 방법	B 방법
1	72개(1~72)	(4, 16)	(4, 16)
2	60개(5~64)	(2, 17)	(4, 16)
3	50개(10~59)	(3, 17)	(6, 17)
4	40개(15~54)	(3, 18)	(6, 17)
5	30개(20~49)	(5, 18)	(6, 17)
6	20개(25~44)	(7, 18)	(7, 18)
7	10개(30~39)	(6, 18)	(6, 18)

6. 결론

- 터널 위치 추적을 위한 자료계산법으로는 주시를 이용하는 토모그래피 방법이 많이 사용되고 있으나, 현장자료의 경우 잡음 등에 의해서 초동주시를 정확하게 계산하기에는 매우 어려운 실정이다. 이러한 문제는 본 연구의 탄성과 진폭법을 이용함으로써 극복할 수 있을 것이다.
- 탄성과의 초동주시와 진폭의 선택은 본 연구의 자료처리법이나 토모그래피 방법에서 자료해석 결과에 결정적인 영향을 주므로, 앞으로 이에 대한 많은 연구가 진행되어야 할 것이다.
- 자료의 정확성을 높이고 계산 시간을 절약하기 위하여 수신기의 범위를 변화하면서 계산한 결과, B 방법에서는 수신기 자료 전반에 걸쳐서 해석 결과가 좋았으나, A 방법에서는 72~60개의 수신기 자료보다 30~10개의 수신기 자료가 해석결과가 더욱 좋음을 알 수 있었다. 따라서 앞으로의 연구는 여러 상황을 고려하여 30~40개 수신기 자료를 사용하는 것도 가능할 것이다.
- 본 논문에서는 한 개의 파동원을 사용하여 시뮬레이션 하였으나 파동원의 수를 늘리면 더 좋은 결과가 기대되며 이에 대한 연구가 필요하다.

참고 문헌

- [1] 서백수, 손권익, 차영호, "심부 지하터널 조사를 위한 지오토모그래피의 응용", 한국지구시스템 공학회지, 제42권, 6호, pp.588-594, 2005.

산업기술연구(강원대학교 산업기술연구소 논문집), 제27권 A호, 2007.

탄성파 주시 및 진폭 자료의 Simulation에 의한 터널 위치 추적에 관한 연구

- [2] Cook, J. C., "Seismic mapping of underground cavities using reflection amplitude", *Geophysical Prospecting*, vol.30, pp527-538 1965.
- [3] 한현철, "2차원 진 파형 역산을 이용한 탄성파 토모그래피", *서울대학교 공학석사 학위논문*, 1998.
- [4] 서백수, 오석훈, 손권익, 이상철, "터널 탐사를 위한 탄성파 전파양상에 관한 연구" *한국지구과학회지*, 제27권, 5호, pp.539-547, 2006.
- [5] 서백수, "유한요소법에 의한 지하공동 탄성파 탐사에 관한 연구", *서울대학교 공학박사 학위논문*, 1988.