

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

서백수^{1,*} · 손권익²

¹강원대학교 지구·환경공학부, 200-701 강원도 춘천시 효자2동 192-1

²강원대학교 산업공학과, 200-701 강원도 춘천시 효자2동 192-1

A Study of Tunnel Position Interpretation using Seismic Travel Time and Amplitude Data Simulation

Baek-Soo Suh^{1,*} and Kwon-Ik Sohn²

¹Division of Environmental and Geosystem Engineering, Kangwon National University,
Kangwon 200-701, Korea

²Department of Industrial Engineering, Kangwon National University, Kangwon 200-701, Korea

Abstract: Seismic and georadar prospecting methods have been used to detect deep seated small tunnel in Korea. The tunnel position interpretation of seismic method has been performed mainly by wave travel time and amplitude. But it was very unstable to interpret the exact tunnel position because of short interval of two measuring boreholes and picking mistake of first arrivals. To solve this problem, this study applied travel-time and amplitude data simulation methods to detect tunnel position.

Keywords: seismic prospecting method, tunnel, travel time, amplitude, simulation

요약: 우리나라에서의 심부 소형 터널의 탐사에는 주로 탄성파 탐사법이나 지오레이다 탐사법이 사용되어 왔으며, 그 중에서 탄성파 탐사는 주로 주시나 진폭을 이용하여 터널의 위치를 해석하였다. 그러나 측정 시추공간의 짧은 거리와 초동의 피킹 오차 등에 의해서 터널의 정확한 위치 해석은 매우 불안정하였다. 이러한 문제를 극복하기 위하여, 본 연구에서는 주시 자료와 진폭 자료의 시뮬레이션에 의한 위치 추적을 시도하였다.

주요어: 탄성파탐사, 터널, 주시, 진폭, 시뮬레이션

서론

국내 심부의 소형 지하 터널을 탐사하기 위하여 탄성파 탐사, 지오레이다 탐사 등이 적용되어 왔다. 터널 탐사에 대한 이론적인 모형 연구로는 서상용(1982), 한현철(1998) 등이 각각 전자파 탐사 및 탄성파 탐사에 관해 유한차분법을 이용하여 계산하였고, 서백수(1988)는 유한요소법을 이용하여 탄성파 탐사법의 이론 해를 구하였다. 고광범과 이두성(2003)은 시추공간 탄성파 자료의 3차원 Kirchhoff 구조보정

적용을 시도하였다. 또한 Cook(1965)은 깊은 곳에 위치한 대단위 공동에 대한 탐사를, McCann(1986)은 지표부근의 폐기된 철도 터널에 대해서 탐사를 연구하였다. 그러나 소형 심부 터널의 경우, 터널 크기가 상대적으로 작고 터널 내부와 주위 모암의 전파 속도의 차이가 크다. 따라서 초기도달시간(first arrival time)의 차이가 매우 작고(서백수, 2006), 피킹(picking) 작업의 오류 등 주시역산을 통한 터널의 위치 추적은 부정확한 경우가 많았다. 이에 본 연구에서는 컴퓨터의 처리능력의 향상에 따라 컴퓨터 시뮬레이션(simulation)을 통한 새로운 방법을 시도하였다.

본 연구의 대상은 심부 터널의 크기가 알려져 있고, 주위 모암이 균질한 특별한 경우로써 터널 및 모암의 전파속도를 알 수 있을 때이다. 터널의 위치를

*Corresponding author: bssuh@kangwon.ac.kr
Tel: 82-33-250-6254
Fax: 82-33-254-6255

찾는 방법으로 여러 곳을 가상터널로 지정하여 각 가상터널의 위치에 대하여 유한차분법을 기반으로 시뮬레이션 한 결과와 실제 측정 자료를 대조하여 그 중 가장 잘 일치하는 터널의 위치를 잡으려는 것이다. 본 연구에서는 우선 하나의 공동을 가진 터널 모형을 가정하여 이 공동을 찾아가는 모형실험을 수행하여 결과를 살펴보고, 실제상황에 대한 적용성을 확인하기 위하여 현장자료로 가능성을 확인하였다.

모형연구(Modelling)

모형 연구는 터널 위치와 터널 및 모암의 전파속도가 정해져 있는 기준모형에 대한 계산 자료인 “목표자료”를 먼저 구하여 놓고 가상의 터널을 설정해서 구한 “추정자료”를 비교하는 것이다. 예를 들면, 대상으로 하는 영역의 가로, 세로의 길이가 주어져 있고 중앙에 터널이 있으며 모형의 한쪽에 파동원이 존재하는 기준모형에 대하여 컴퓨터 시뮬레이션을 통해 반대편에 배열되어 있는 수신기 $B(i=1,2,\dots,n)$ 에서의 트레이스(trace) 자료를 얻을 수 있다. 이 트레이스 자료에서 주시나 최대 진폭과 같은 필요한 목표자료 $T(i=1,\dots,n)$ 를 찾는다. 기준모형에서 터널의 위치만 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 $S^\alpha = \sum_{i=1}^n (t_i^\alpha - T_i)^2$ 으로 나타내진다. 여러 지점의 α 에 대하여 S^α 가 최소가 되는

$\alpha(\alpha^*)$ 를 찾는 것이다. 즉 $\alpha^* = \frac{\min S^\alpha}{\alpha}$, 이 α^* 가

찾으려는 터널의 위치로 추정할 수 있다.

가정한 모형은 Fig. 1에서와 같이 시추공간의 거리는 20 m, 심도는 40m로 내부 정중앙에 공동이 위치하도록 하였으며, 그 규모는 2m×2m(가로×세로)로 하였다. 모암의 탄성과 속도는 5,500 m/s이며 공동의 탄성과 속도는 500 m/s이다. 왼쪽 시추공에는 심도 20 m 지점에 하나의 파동원이 위치하도록 하였으며, 오른쪽 시추공에는 0.5 m 간격으로 수신기를 배열하여 총 80개의 파선을 얻어낼 수 있도록 하였다.

유한차분법을 이용하여 계산을 행하였으며 격자(mesh) 간격은 0.125 m로 하였다. Fig. 2는 상기모형에 대하여 계산하여 얻은 합성파형이다.

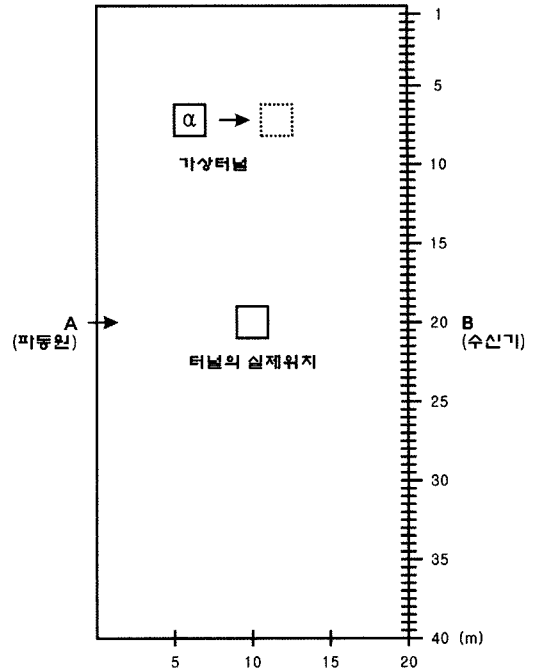


Fig. 1. Theoretical tunnel model.

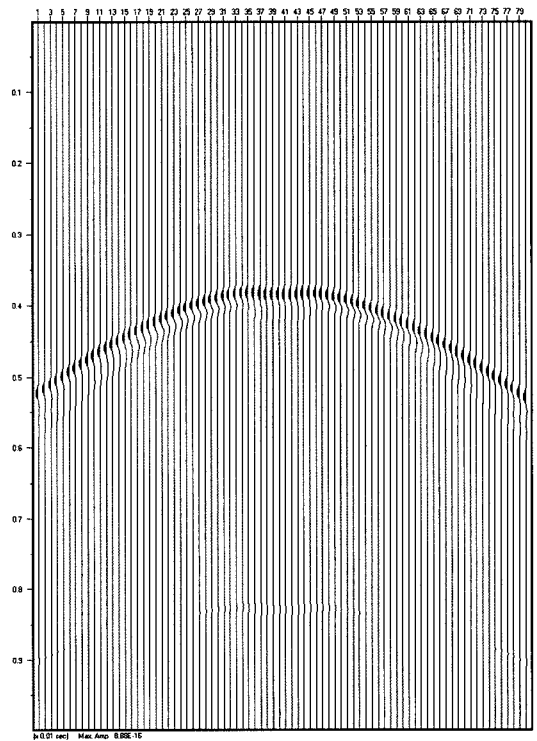


Fig. 2. Theoretical synthetic seismogram for tunnel model of Fig. 1.

Table 1. Simulation procedure when tunnel is moved by 3m interval

y 좌표(격자좌표)	x 좌표(격자좌표)	오차의 제곱의 합
15 m (120)	5 m (40)	1.253326E-29
15 m (120)	8 m (64)	1.004976E-29
15 m (120)	11 m (88)	7.630731E-30
18 m (144)	5 m (40)	4.055796E-30
18 m (144)	8 m (64)	1.537937E-30
18 m (144)	11 m (88)	1.158942E-30
21 m (168)	5 m (40)	7.051871E-30
21 m (168)	8 m (64)	3.637233E-30
21 m (168)	11 m (88)	2.511553E-30

이론 모형 계산

컴퓨터에서 다양한 가상모형을 시뮬레이션하기 위하여 가상 터널의 위치 좌표를 x, y 각각의 축으로 1, 3, 5 m 간격으로 이동시키면서 주시자료와 진폭자료를 각각 취합 비교하였다. Table 1은 3 m 간격(격자 간격으로 24)으로 시뮬레이션 하는 과정을 보여주고 있다.

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

먼 곳을 가리키고 있다. 이에 대한 토모그래프는 Fig. 3에 보여진다.

진폭자료를 근거로 추적을 한 결과는, 간격이 1 m 인 경우는 (x, y) = (10, 20)으로 중심을 정확히 가리키고 있으며, 3 m, 5 m의 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. 1, 3, 5에 대한 토모그래프는 각각 Fig. 4에서 볼 수 있으며, 각 자료에 대한 종합표는 Table 2에서 볼 수 있다.

이상의 계산결과에 의하면 터널을 1 m 간격으로 이동한 경우에는 터널이 위치한 좌표와 정확하게 일치하였다. 터널을 3 m 간격으로 이동할 경우에는 주시를 이용시에는 중심좌표 (x, y) = (13, 19), 진폭을 이용시에는 (x, y) = (12, 19)로 계산되었다. 그러나 터널을 5 m 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.

파동원의 위치에 따른 계산 결과의 변화 양상을 살펴보기 위하여 파동원의 위치를 왼쪽 시추공의 중앙(심도 20 m)에서 상하로 각각 5 m씩 이동(심도 15

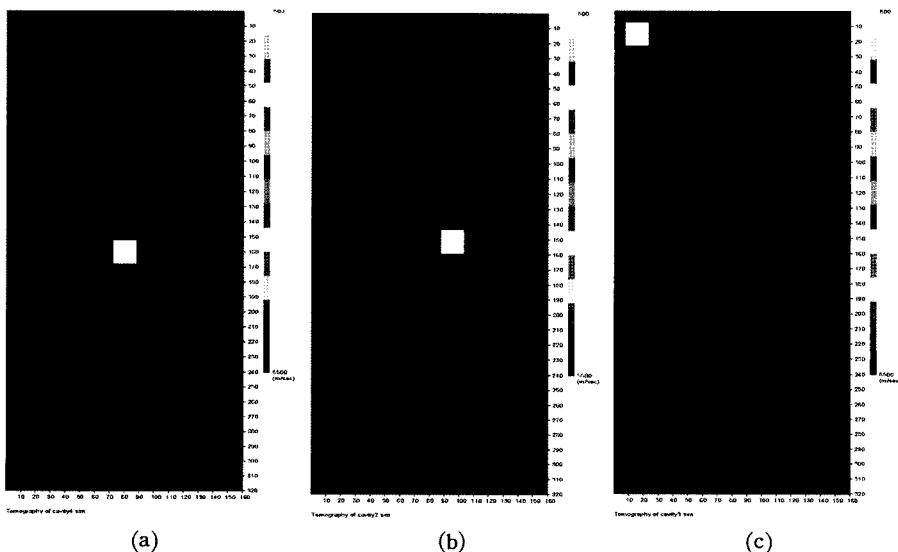


Fig. 3. Travel time tomograms when tunnel is moved by (a) 1 m interval (b) 3 m interval (c) 5 m interval.

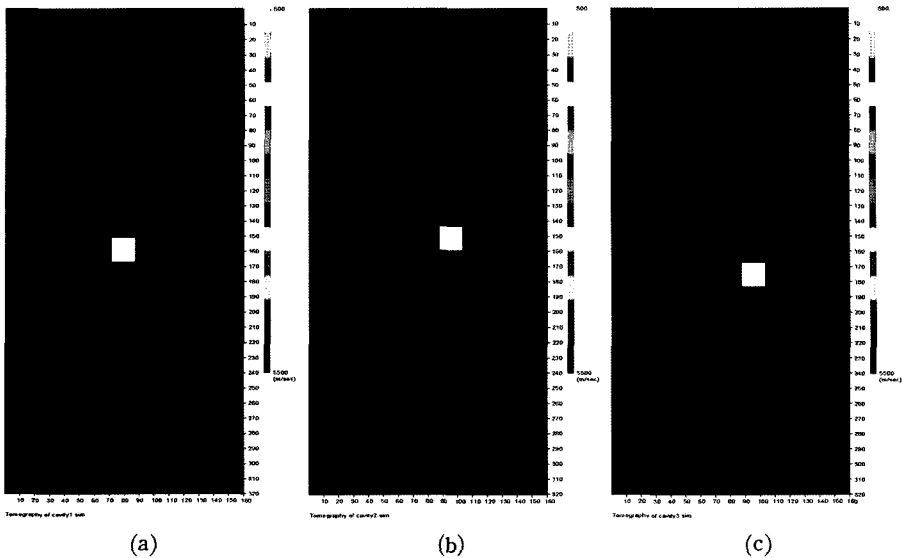


Fig. 4. Amplitude tomograms when tunnel is moved by (a) 1 m interval, (b) 3 m interval and (c) 5 m interval.

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

터널의 위치이동	주시법	진폭법
1 m	(10, 20)	(10, 20)
3 m	(13, 19)	(12, 19)
5 m	(3, 2)	(12, 22)

m, 심도 25 m)하여 진폭자료를 이용하여 동일한 방법에 의해서 계산하였다. 이 결과는 Fig. 5에서 볼 수 있으며 중심좌표는 Table 3에서 세 경우 모두 동일하였다. 이는 파동원의 위치가 결과에 미치는 영향이 적음을 보여준다.

현장자료의 시뮬레이션

모형의 활용성을 실험하기 위하여 현장자료를 통한 실험을 하였다. 현장자료는 제3땅굴 중 한 지점을 선정하여 얻은 파선 자료에서 이론모형계산에서 좋은 결과를 보인 진폭 자료를 택하였다. 터널 및 시추공의 위치는 Fig. 6과 같고 자료처리는 t_2-t_4 시추공 자료를 이용하였다. 터널의 크기는 가로, 세로 각각 2 m이며 깊이는 지표에서 약 75 m에 위치한다. t_2-t_4 시추공의 실제 거리는 13.6 m이며 토모그래피 방식에 의해서 자료를 측정하였으며 이를 모형화 하기 위하여 가로 13.6 m 세로 36 m 크기의 모형을 고려하였

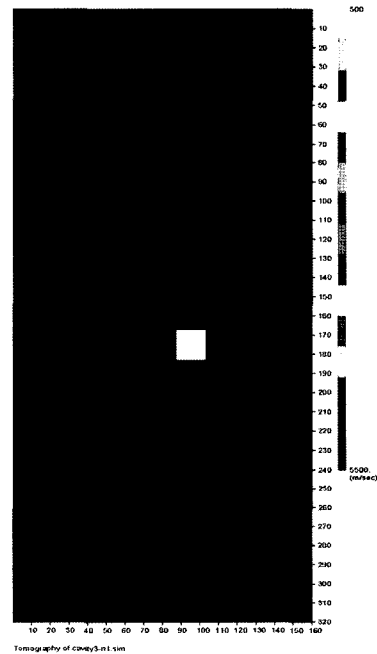


Fig. 5. Amplitude tomogram when source position is moved to 15 m depth.

다. 이는 한 격자의 크기를 0.125 m로 할 경우 가로 109개, 세로 288개의 격자가 형성된다.

Fig. 7의 현장자료의 트레이스를 보면 Fig. 2의 이론자료에 비하여 복잡하게 나타나지만 실제로 사용되는 부분은 초동파형 자료이다. 따라서 이론자료의 파

Table 3. Variation of tunnel center coordinate by source position movement

파동원의 위치	중심좌표
중앙(심도 20 m)	(12, 22)
5 m 위에 위치(심도 15 m)	(12, 22)
5 m 아래 위치(심도 25 m)	(12, 22)

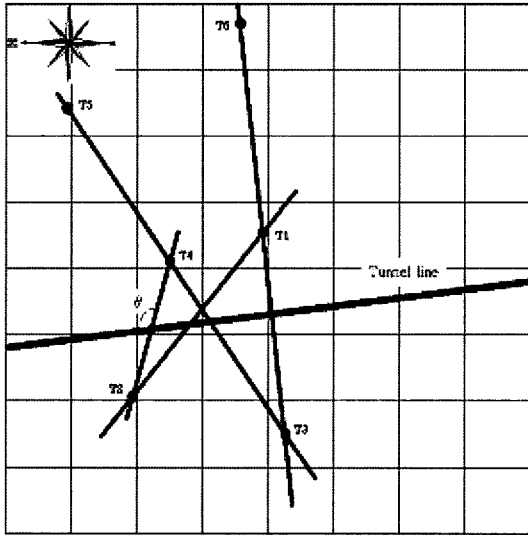


Fig. 6. The location map of the tunnel and boreholes (1 : 220 scale).

동원 파형의 형태는 적절하다고 보여 진다. 그러나 파동원 파형의 진폭은 차이가 있을 수 있으므로 이론 계산의 경우에는 달리 현장자료(목표자료)와 컴퓨터에서 구한 추정자료는 정규화(normalize)작업이 필요하다.

목표자료의 최대값과 추정자료의 최대값을 각각 1로 하여 정규화 시키는 방법 n_1 과 목표자료는 최대값을 1로 하여 정규화 하되 추정자료의 경우는 목표자료의 최대값이 발생한 위치의 자료를 1로 하고 나머지는 이를 기준으로 계산하는 방법 n_2 를 고려하였다. 방법 n_2 는 같은 위치에 최대값이 발생하여야 된다는 가정 하에 그렇지 못한 경우와의 차이를 두드러지게 보이기 위함이다.

Fig. 6 지역의 t_2-t_4 현장 진폭자료를 이용하여 터널의 위치를 1m씩 이동하면서 시뮬레이션을 행하였으며, 이때 n_1 방식, n_2 방식의 자료처리법에 의한 터널의 중심좌표는 각각 Table 4에서와 같이 모두 $(x, y) = (4, 16)$ 이다. 터널의 영향이 큰 중앙부분의 36개 수신 자료를 이용하였을 경우 n_1 방식, n_2 방식의 자료처

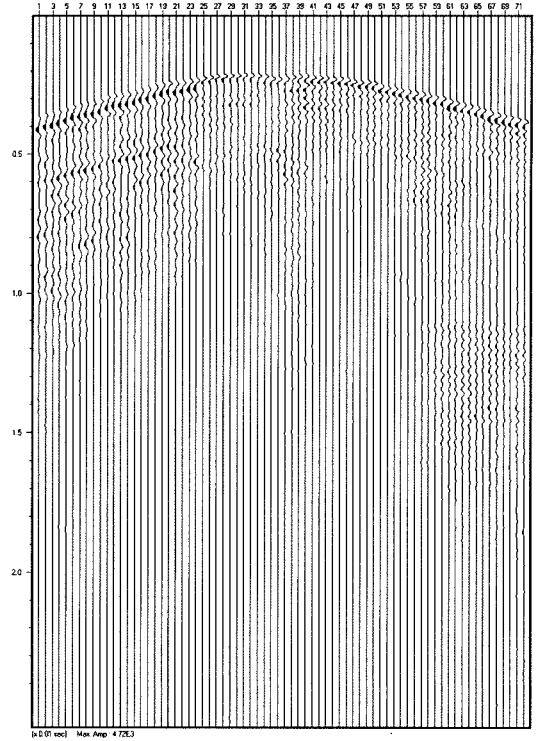


Fig. 7. Synthetic seismogram of field data at t_2-t_4 boreholes in Fig. 6.

Table 4. Result of amplitude simulation when field data is used

터널의 위치 이동	수신방법	진폭법	
		n_1 방법	n_2 방법
1 m	b_1	(4, 16)	(4, 16)
.	b_2	(4, 18)	(7, 17)
3 m	b_2	(2, 18)	(10, 18)
5 m	b_2	(2, 17)	(7, 17)

이때, b_1 : 72개의 수신기 자료 이용
 b_2 : 중앙부분의 36개의 수신기 자료 이용

리법에 의한 터널의 중심좌표는 각각 $(x, y) = (4, 18)$, $(x, y) = (7, 17)$ 이며, 72개의 수신자료를 이용한 결과보다 더 정확함을 알 수 있었다. Fig. 8(a)는 n_1 방식, Fig. 8(b)는 n_2 방식의 자료처리법에 의한 결과를 보여주며 36개의 수신기 자료를 이용한 결과이다.

Fig. 9는 3m 간격으로 터널을 이동하면서, 각각 n_1, n_2 방식에 의해서 자료 처리하여 터널의 위치 추적을 한 결과이며, 터널의 중심좌표는 각각 $(x, y) = (2, 18)$, $(x, y) = (10, 18)$ 이다.

Fig. 10은 5m 간격으로 터널을 이용하면서 각각

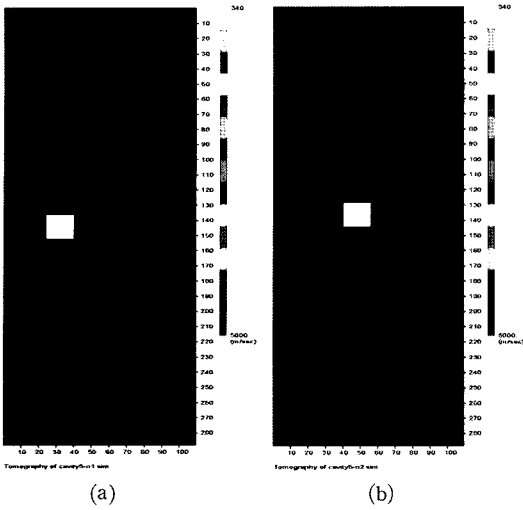


Fig. 8. Amplitude tomograms when tunnel is moved by 1 m interval with (a) method and (b) method.

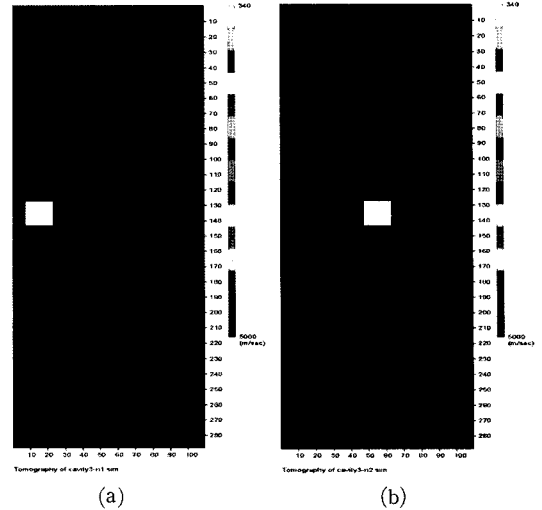


Fig. 10. Amplitude tomograms when tunnel is moved by 5 m interval with (a) n_1 method and (b) n_2 method.

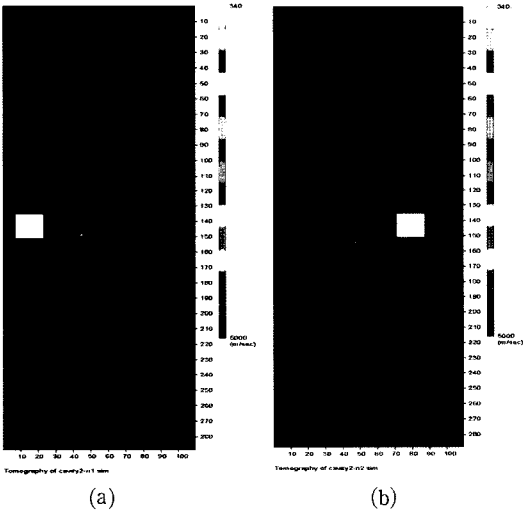


Fig. 9. Amplitude tomograms when tunnel is moved by 3 m interval with (a) n_1 method and (b) n_2 method.

n_1, n_2 방식에 의해서 터널의 위치를 추적한 결과이며, 터널의 중심좌표는 각각 $(x, y)=(2, 17), (x, y)=(7, 17)$ 이다.

현장자료에 대한 계산결과는 Table 4에서 종합적으로 볼 수 있다.

결론

1. 본 논문에서는 일정한 간격으로 가상 터널 위치

를 이동시키면서 시뮬레이션 하여 목표자료와 가장 일치하는 터널 위치를 찾아가는 방법을 제시하였다. 이론모형에 대하여 이동간격을 1, 3, 5 m 간격으로 시행한 결과, 1 m 간격인 경우는 정확한 위치를 찾을 수 있었다. 시뮬레이션 계산시간을 고려한다면 처음에는 3~5 m의 큰 간격으로 개략적인 터널 위치를 찾은 후, 찾아진 터널 주변을 1 m 이하의 세밀한 간격으로 찾아가는 방법을 제시할 수 있다.

2. 이론 모형 터널 계산에서 주시법과 진폭법의 계산 결과를 보면 진폭법이 우수한 것으로 나타났다. 이는 소형 심부 터널의 특성상 초기 도달시간의 차이가 미미하여 오차계산에 상당한 주의를 기울여야 원하는 결과를 기대할 수 있을 것으로 보인다. 반면에 진폭법은 비교적 그 차이가 두드러지므로 일반적으로 더 좋은 결과를 보일 수 있다. 현장자료의 경우는 잡음 등에 의한 피킹 오차까지 있을 수 있어 주시법보다 진폭법이 더 낫다고 보이며, 이 경우 자료의 정규화가 필수적인데 제시된 두 방법 중 n_2 방법이 보다 바람직하다고 생각된다.

3. 현장자료의 시뮬레이션 계산에 있어서 80개의 수신기 자료를 사용하였을 때보다 터널의 영향이 큰 중앙의 40개의 수신기 자료를 이용한 결과가 좋게 나타남을 볼 수 있다. 이것은 터널의 영향이 미치지 못하는 위치의 수신기 자료 오차가 터널 위치선정에 왜곡된 영향을 주고 있으며, 이를 해결하기 위해서 앞으로 수신기 범위 선택과 수신기 위치에 따른 자

료의 가중치(weighting factor)연구가 필요하다. 아울러 본 논문에서는 한 개의 파동원을 사용하여 시뮬레이션 하였으나 파동원의 수를 늘리면 더 좋은 결과가 기대되며 이에 대한 연구가 필요하다. 또한 앞으로는 터널의 크기 변화, 배경 모암의 불균질성에 대한 연구도 진행되어야 할 것이다.

사 사

본 연구는 2006-2007년 교육부 “환경복원 및 청정 기술 인력양성사업단”의 지원에 의해서 수행되었으며 “터널조사를 위한 탄성파 탐사의 적용” 과제의 일부이다.

참고문헌

고광범, 이두성, 2003, 터널탐지를 위한 시추공간 탄성파

- 자료의 3차원 Kirchhoff 구조보정 적용. 한국지구시스템 공학회지, 40(5), 360-366.
- 서백수, 1988, 유한요소법에 의한 지하공동 탄성파 탐사에 관한 연구. 서울대학교 공학박사 학위논문, 206 p.
- 서백수, 오석훈, 손권익, 이상철, 2006, 터널 주위의 탄성파 전파양상에 관한 연구. 제 84회 한국지구시스템공학회 논문집, 291-296.
- 서상용, 1982, 유한차분법을 이용한 과도 전자장의 계산. 서울대학교 공학박사 학위논문, 162 p.
- 한현철, 1998, 2차원 전 파형 역산을 이용한 탄성파 토모그래피. 서울대학교 공학석사 학위논문, 49 p.
- Cook, J.C., 1965, Seismic mapping of underground cavities using reflection amplitude. Geophysical Prospecting, 30, 527-538.
- McCann, D.M., 1986, Application of cross-borehole seismic measurements in site investigation surveys. Geophysics, 51, 914-929.

2006년 12월 5일 접수

2007년 1월 12일 수정원고 접수

2007년 2월 5일 채택