

터널 주위의 탄성과 전파양상에 관한 연구

서백수¹⁾, 오석훈¹⁾, 손권익²⁾, 이상철³⁾

¹⁾강원대학교 공과대학 지구·환경공학부, bssuh@kangwon.ac.kr

²⁾강원대학교 공과대학 산업공학과

³⁾강원대학교 공과대학 지구시스템공학과

Study of seismic wave propagation around tunnel

Baeksu Suh¹⁾, Seokhoon Oh¹⁾, Kwonik Shon²⁾, Sangchul Lee³⁾

¹⁾Division of Environmental and Geosystem Engineering, KWNU

²⁾Division of Industrial Engineering, KWNU

³⁾Division of Geosystem Engineering, KWNU

요약 : 본 논문은 지하내부에 존재하는 공동의 존재를 밝히기 위한 시추공 토모그래피 탐사에 있어서 보다 정확한 자료의 역산을 위해 공동 주위에서의 파의 전파양상을 규명하기 위하는데 목적이 있다. 터널탐사에서 주로 사용되는 파동원의 주파수는 2kHz-5kHz에 달하며, 자료의 역산에 있어서 파장의 1/10 내외의 격자간격을 설정하는 것이 적합하다. 공동을 지나는 탄성파의 전파는 공동내부의 탄성파 속도에 따라 공동을 우회 또는 투과하며, 우회하는 탄성파는 공동의 탄성파 속도의 영향을 받지만 주로 모암의 탄성파 속도로 전파한다. 또한 모암의 탄성파속도와 공동의 탄성파 속도 사이의 편차가 작아질수록 탄성파는 공동을 투과하는 특성을 보인다.

주요어 : 지하내부, 공동, 역산, 전파양상, 파장, 공동내부, 탄성파 속도

Abstract : The aspect of wave propagation around cavity was investigated for the exact inversion of crosshole tomography data in order to understand the possibility of the existence of underground cavity. We found that the adequate frequency range for the tunnel investigation was about 2kHz to 5kHz, and the grid space was set up to 1/10 length of wavelength. The propagation of the seismic wave near the cavity may go through or detour the cavity according to the seismic velocity of inside of cavity. The detouring wave propagates with the seismic velocity of mother rock in spite of the velocity of inside of cavity. The smaller the velocity difference between the mother rock and cavity, the more frequent penetration of the seismic wave through the cavity was appeared.

Keywords : cavity, inversion, wave propagation, wavelength, seismic velocity

1. 서론

탐사를 통해 얻은 측정값으로 지하매질의 물성분포를 구하는데 있어서 측정 자료의 역산은 매우 중요하다. 시추공 토모그래피를 이용하는 터널의 탐사에 있어서, 특히 규모가 매우 작은 군사적인 터널의 탐지에 있어서는 역산의 중요성이 매우 부각된다. 따라서 이 역산과정을 정확하게 하기 위하여 파의 전파양상을 정확하게 규명할 필요가 있다. 또한 유

한차분법을 이용한 수치계산에 있어서 격자간격과 파동원의 주기 및 파장은 계산결과에 매우 큰 영향을 미친다. 따라서 사용되는 파동원의 주파수에 적합한 격자간격을 찾아내고, 이것을 통한 정확한 탄성파의 전파양상을 비교, 관찰한다(한현철, 1998).

2. 본론

1) Modeling

본 논문에서는 탄성파의 전파양상을 관찰하기 위해 시추공간 탐사법을 기본으로 하여 모델링을 하였다. 모델링의 폭은 20m, 심도는 40m이고 모암의 탄성파 속도는 5500m/s이다. 내부 정중앙에 공동이 위치하도록 하였으며, 그 규모는 2m×2m(가로×세로)로 하였다. 모델링 원편의 심도 40m되는 지점이 가진점이 되며, 반대편에서는 1m를 1mesh로 하여 총 80개의 trace를 얻어낼 수 있도록 하였다.

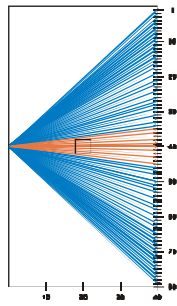


Fig. 1 Ray path used for tunnel investigation.

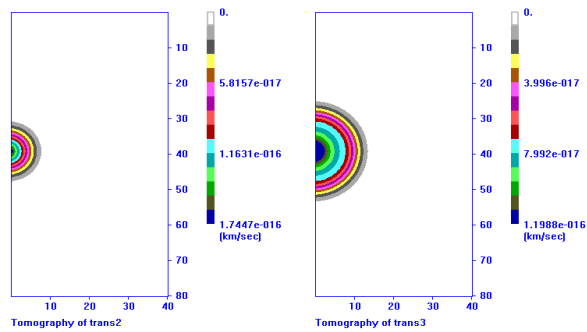


Fig. 2 The snapshot with 500Hz input frequency without cavity.

Fig. 1은 기본적인 모델링의 모식도를 보여주고 있으며, 가진점에서 각 수신점으로 전파되는 파가 페르마의 원리를 통해 추정되는 전파경로를 표현해보았다. 총 80개의 trace를 볼 수 있으며 붉은색으로 나타낸 부분은 파가 전파되면서 공동의 영향을 받을 것으로 추정되는 trace를 나타낸다. 기본적인 파의 전파양상을 보기위하여 공동이 없는 조건에서 입력주파수 500Hz 일 때의 토모그래피를 관찰하였다(Fig. 2). 가진점을 중심으로 하여 원형의 파동원을 보여주고 있으며 파가 전파될수록 점차 에너지가 감소되는 것을 볼 수 있다. 이것을 토대로 하여 공동이 존재할 때는 파의 전파 양상이 어떻게 변화하는지 시뮬레이션을 통해 비교하였다.

2) 격자간격의 선택

수치계산에 있어서 격자간격과 파동원의 주기 및 파장은 계산결과에 매우 큰 영향을 미친다. 터널의 크기를 가로×세로를 2m×2m라고 할 때, 현장에서 주로 사용하는 파동원의 주파수는 2kHz-5kHz에 달한다. 파동원의 파장에 비해 격자간격이 클 경우에는 계산의 오차가 생기므로 파장당 10개 내외의 격자점이 존재하는 것이 좋을 것을 발표하였다(서상용, 1981). 수치계산에 적절한 격자간격을 선택하기 위해 주시 및 진폭의 변화를 관찰하였다. 주파수가 2kHz일 때 격자간격을 0.125m와 0.5m일 때, 두 가지를 비교해 보았다(Fig. 3). 주파수와 파장사이에는 다음과 같은 관계가 성립된다.

$$V=f \cdot \lambda = \frac{\lambda}{T} \quad (1)$$

여기에서 V 는 탄성파의 속도, f 는 주파수, λ 는 파장, T 는 주기를 뜻한다. 주시곡선에서 격자간격 변화에 비슷한 양상을 보이지만, $dx=0.125m$ 일 때가 $0.5m$ 일 때에 비해서 비교적 완만하고 깨끗한 주시곡선이 얻어진다. 진폭에 대해서는 격자간격이 $0.125m$ 일 때 파의 전파경로가 길어질수록 진폭이 작아지는 것을 적절하게 표현하고 있지만, $0.5m$ 일 때는 상관성이 없어 보이는 곡선이 얻어지는 것으로 보아서, $0.5m$ 보다는 $0.125m$ 의 격자간격이 비교적 적절히 설정되었음을 알 수 있었다.

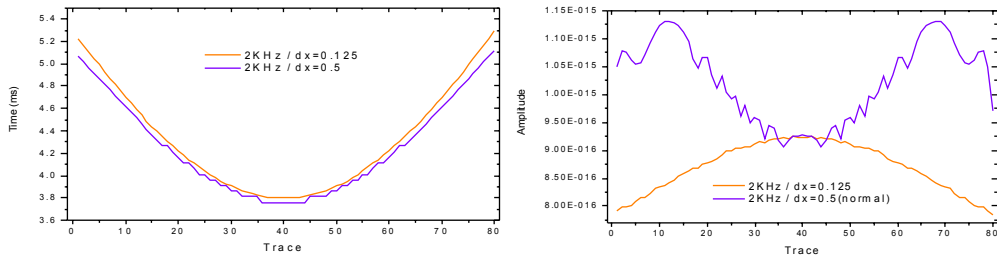


Fig. 3 Variation of arrival time and amplitude with 2kHz input frequency

3) 공동부근에서의 전파경로 유추

모델에 가로×세로가 $2m \times 2m$ 의 공동이 존재한다고 설정을 하였고, 공동에 충전 물질이 채워져 있다고 가정하였을 때를 비교하기 위해 공동에서의 전파속도를 달리하며 파의 전파양상을 관찰하였다. Fig. 4에서 보면 공동 부분에서 탄성파의 도달시간이 지연되는 모습을 볼 수 있다. 여기서 첫 번째 가정은 공동을 지날 때 파는 공동의 외부를 타고 흐르는 것이고, 두 번째 가정은 파가 공동을 투과하는 것이다. 시간영역을 비교하였을 때 충전 물질에 따른 탄성파속도의 차이로 인해 공동에서의 탄성파의 도달시간의 지연 정도가 차이나는 것을 볼 수 있다.

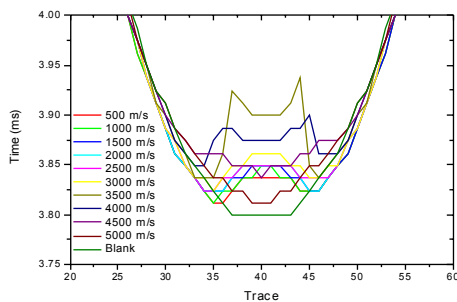


Fig. 4 Variation of arrival time according to velocity inside cavity ($2m \times 2m$)

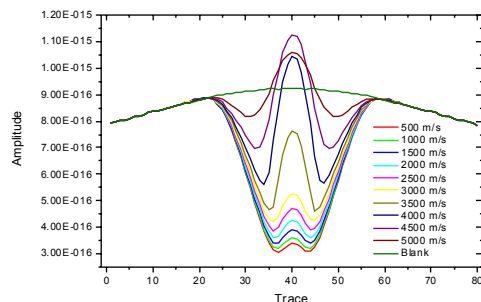


Fig. 5 Variation of amplitude according to velocity inside cavity ($2m \times 2m$)

시간지연이 가장 많이 되는 순서대로 나열하면 $3500m/s-4000m/s$, $3000m/s-500m/s$, $5000m/s-blank(5500m/s)$ 가 된다(Fig. 4). 공동의 탄성파속도가 $5000m/s$ 일 때는 도달시간이 blank일 때 다음으로 빠르며 이것은 매질과의 속도차이가 작아서 공동을 쉽게 투과하는 것으로 보인다. $3500m/s$ 일 때와 $4000m/s$ 일 때도 공동을 투과하는 것으로 생각되며, $3000m/s-500m/s$ 일 때가 공동을 투과하지 못하고 공동 주변을 우회하여 전파되는 것으로 생각된다.

진폭의 변화를 보았을 때는 공동에서의 탄성파 속도가 느릴수록 공동부근에서 진폭의 편

차가 크게 나타난다(Fig. 5). 그러나 탄성과 속도가 4000m/s일 때 공동이 없을 때 보다 오히려 진폭이 크게 나타나며 4500m/s일 때 최고치를 보이다가, 5000m/s가 되면서 공동이 없을 때의 진폭과 비슷한 양상으로 변화한다. 이것은 공동으로 인한 파의 전파경로의 변화 또는 전파시간에 의한 영향으로 생각된다.

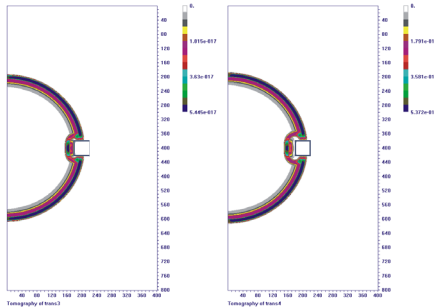


Fig. 6 Seismic wave go through the cavity when 500m/s velocity inside cavity

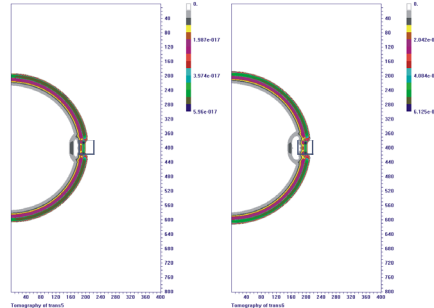


Fig. 7 Seismic wave detour the cavity when 4000m/s velocity inside cavity

Fig. 6과 Fig. 7의 토모그래피로 전파양상을 비교해 보았을 때, 공동에서의 탄성과 속도가 500m/s일 때는 공동의 외부를 타고 흐르는 탄성파의 전파양상과 공동으로 인한 반사파의 모습이 관찰된다. 반면 공동에서의 탄성파의 속도가 4000m/s일 때는 공동으로 인한 반사파의 형태는 감소하고 공동을 투과하는 모습이 뚜렷하게 관찰된다. 이것은 공동에서의 탄성과 속도가 일정 한계를 넘어 모암과의 속도차이가 적어질 때 파가 공동을 투과하는 양상을 보이는 것을 알 수 있었다.

4) 공동크기에 따른 변화

앞서 관찰한 탄성파의 전파양상을 토대로 공동의 규모에 따라 전파양상이 어떻게 변화하는지 비교해 보았다. 공동규모의 증가로 인해 영향을 받는 범위가 넓어졌기 때문에 시간 지연이 되는 범위가 넓어졌으며(Fig. 8), 진폭이 감소되는 영역 또한 범위가 넓어짐을 관찰할 수 있다(Fig. 9).

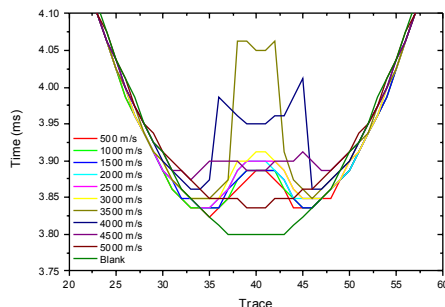


Fig. 8 Variation of arrival time according to velocity inside cavity(3m×3m)

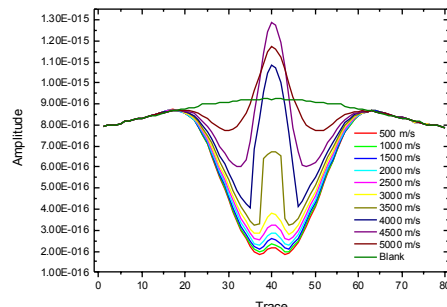


Fig. 9 Variation of amplitude according to velocity inside cavity(3m×3m)

또한 공동의 규모가 증가함에 따라 시간영역에서의 공동부근에서의 시간지연 현상이 더 뚜렷해짐을 알 수 있다. 이것은 공동의 규모가 클수록 공동을 탐지하는 데 있어서 유리함

을 보여준다. 흥미로운 것은 공동의 규모가 4m×4m(가로×세로)일 때 공동을 투과하는 탄성과 속도의 범위가 이전보다 넓어진다는 것이다.

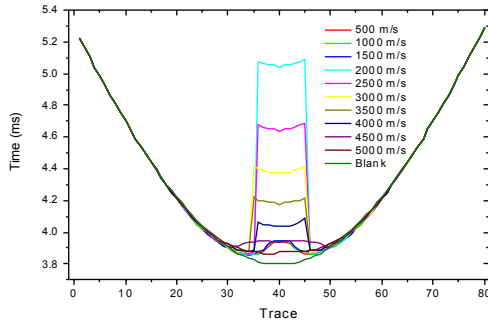


Fig. 10 Variation of arrival time according to velocity inside cavity (4m×4m)

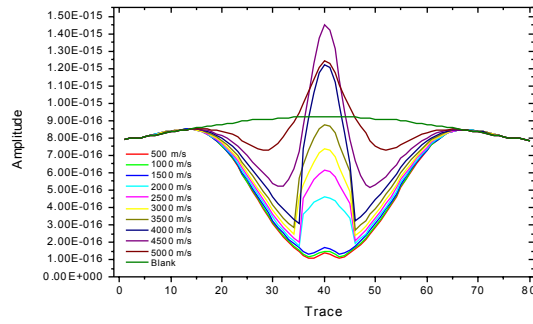


Fig. 11 Variation of amplitude according to velocity inside cavity (4m×4m)

이것을 시간지연이 많은 순서대로 나열하면 2000m/s-4500m/s, 1500m/s-500m/s, 5000m/s-5500m/s (blank)로 구분할 수 있다. 이와 같이 공동을 투과하는 범위가 넓어지는 것은 공동의 규모가 커짐에 따라 공동을 우회하는 것 보다는 투과하는 것이 과의 도달에 있어서 시간적 이득이 크다는 것을 알 수 있다(Fig. 10). 진폭의 변화에 있어서는 시간지연이 가장 많이 되는 2000m/s일 때부터 공동부근에서 진폭의 변화가 커지는 것을 볼 수 있다(Fig. 11).

5) 암석모델에서의 탄성과 속도

본 시뮬레이션에 대한 비교자료를 얻고자 암석모델에 공동을 만들고 주시를 비교하였다. 모델의 중앙에 공동을 만들고, 라인별로 탄성과의 도달시간을 측정하였다(Fig. 12, 13).



Fig. 12 A view of lab model (30cm×30cm×30cm)

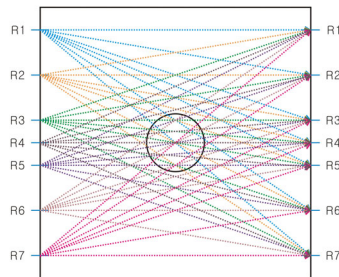


Fig. 13 Propagation of ray path from lab model

모델의 암종은 포천석 화강암이며 3300m/s의 탄성과 속도를 가지고 있다. 이 모델의 공동에 충전 물질을 채우고, 그 충전물질을 바꿔가면서 도달시간의 변화를 관찰하였다. 암석 모델 내부에 공동이 없을 때 전체적인 도달시간이 빠르며, 충전 물질이 물, 모래, 그리고 완전히 비어있을 때 순서로 조금씩 지연되는 것을 볼 수 있었다(Fig. 14). 실험결과 물의 탄성과 속도는 약 1700m/s, 모래에서는 탄성파가 거의 전달되지 않았다(약 400m/s). 암석모델과 충전 물질간의 속도편차로 인해 파가 공동을 우회함을 볼 수 있으며, 이것은 또한 둥근 모양의 공동의 형태로 인한 영향도 있는 것으로 보여진다. 공동 내부에 물, 모래를 채워 넣었을 경우 모두 파가 공동을 우회하는 양상을 보였지만, 탄성파의 도달시간이 충

진 물질이 물, 모래, 비어있는 경우 순서로 빠른 것으로 보아, 충전 물질 각각의 탄성과 속도에 따라서 도달시간이 지연되는 정도가 달라짐을 볼 수 있었다.

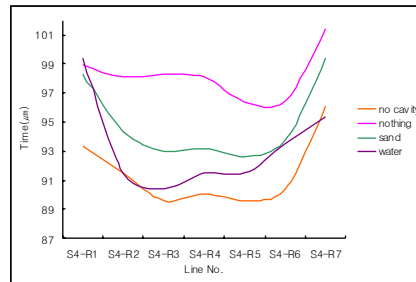


Fig. 14 Variation of arrival time according to velocity inside cavity from lab model

3. 결론

이상과 같은 비교를 통해서 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) 유한차분법에 의한 수치계산 결과 mesh의 크기(과장의 1/10 범위)에 따라 공동 내부의 탄성과 속도 변화에 따른 주시변화는 큰 차이는 없으나 진폭의 변화는 매우 커서 자료해석에 큰 오류를 가져올 수 있다.
- 2) 일반적으로 저속도대역을 갖는 공동(500m/s)에서는 파가 공동을 투과하지 못하고, 공동 주변을 우회하여 전파된다. 그러나 공동의 충전 물질에 의해 공동에서의 탄성과 속도가 일정 한계를 넘어 모암과의 속도 차이가 작아질 때(3500m/s-5000m/s), 파는 공동을 투과하여 전파하는 경향을 보인다.
- 3) 2항의 결과에 의해서 2m×2m(가로×세로) 규모의 공동이 존재할 경우의 주시는 공동의 탄성과 속도가 3500m/s-4000m/s에서 가장 늦게 도착한다. 또한 공동의 탄성과 속도가 4000m/s-5000m/s일 때는 공동이 존재하지 않을 경우보다 중앙부근의 진폭이 크게 나타난다.

참고문헌

- 고광범, 이두성, 2003, “경암 내 소규모 공동 탐지를 위한 시추공간 탄성과탐사 기법의 적용성 연구”, 물리탐사, Vol. 6, No. 2, pp. 57-63.
- 서백수, 1988, “유한요소법에 의한 지하공동탄성과 탐사에 관한 연구”, 서울대학교 공학박사 학위논문.
- 서상용, 1982, “유한차분법을 이용한 과도 전자장의 계산”, 서울대학교 공학박사 학위논문.
- 이두성, 1994, “유한차분법에 기초한 파선 경로 계산 알고리즘”, 한국자원공학회지, Vol. 31, pp. 150-155.
- 이두성, 2003, “임펄시브 진원에 의한 공대곡 탄성과기록으로부터 P파, S파 속도 영상도출에 관한 연구”, 물리탐사, Vol. 6, No. 3, pp. 138-142.
- 한현철, 1998, “2차원 전 파형 역산을 이용한 탄성과 토모그래피”, 서울대학교 공학석사 학위논문.