

터널 탐사를 위한 탄성파 전파 양상에 관한 연구

서백수^{1,*} · 오석훈¹ · 손권익²

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

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

A Study of Seismic Wave Propagation for Tunnel Exploration

Baek-Soo Suh^{1,*}, Seokhoon Oh¹, and Kwon-ik Sohn²

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

²Division of Industrial Engineering, Kangwon National University, Chuncheon, Kangwon-do 200-701, Korea

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

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

요약: 본 논문은 지하 내부에 존재하는 공동의 존재를 밝히기 위한 시추공 토모그래피 탐사에 있어서 보다 정확한 자료의 역산을 위해 공동 주위에서의 파의 전파 양상을 규명하기 위한데 목적이 있다. 터널 탐사에서 주로 사용되는 파원의 주파수는 2-5 kHz에 달하며, 자료의 역산에 있어서 파장의 1/10 내외의 격자간격을 설정하는 것이 적합한 것으로 알려져 있다. 공동을 지나는 탄성파의 전파는 공동 내부의 탄성파 속도에 따라 공동을 우회 또는 투과하며, 우회하는 탄성파는 공동의 탄성파 속도의 영향을 받지만 주로 모암의 탄성파 속도로 전파한다. 또한 모암의 탄성파 속도와 공동의 탄성파 속도 사이의 편차가 작아질수록 탄성파는 공동을 투과하는 특성을 보인다.

주요어: 공동, 역산, 전파 양상, 파장, 탄성파 속도

서론

탐사를 통해 얻은 측정값으로 지하 매질의 물성 분포를 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(이두성, 1994, 2003). 따라서 이 역산과정을 정확하

게 하기 위하여 파의 전파양상을 정확하게 규명할 필요가 있다. 또한 유한차분법을 이용한 수치 계산에 있어서 격자간격과 파원의 주기 및 파장은 계산결과에 매우 큰 영향을 미친다(김중열, 1989). 따라서 사용되는 파원의 주파수에 적합한 격자 간격을 찾아내고, 이것을 통한 정확한 탄성파의 전파 양상을 비교, 관찰한다(한현철, 1998).

모형 계산 및 고찰

*Corresponding author: bssuh@kangwon.ac.kr

Tel: 82-33-250-6254

Fax: 82-33-254-6255

모델링(Modeling)

본 논문에서는 탄성파의 전파양상을 관찰하기 위해

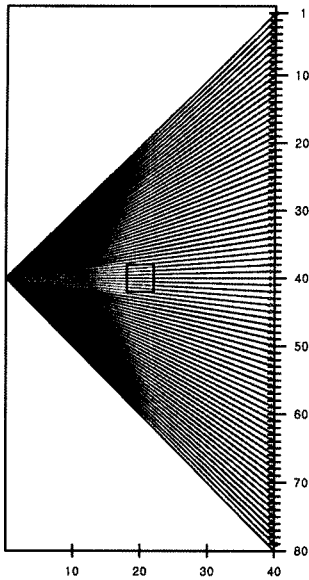


Fig. 1. The tunnel is located as a rectangle in the model.

시추공간 탐사법을 기본으로 하여 모델링을 하였다. 시추공간의 거리는 20 m, 심도는 40 m이고 모암의 탄성과 속도는 5,500 m/s이다. 내부 정중앙에 공동이 위치하도록 하였으며, 그 규모는 2×2 m(가로×세로)로 하였다. 왼쪽 시추공에는 심도 20 m 지점에 파동원이 위치하도록 하였으며, 오른쪽 시추공에는 0.5 m 간격으로 수신기를 배열하여 총 80개의 파선을 얻어 낼 수 있도록 하였다.

Fig. 1은 기본적인 모델링의 모식도를 보여주고 있으며, 파원에서 각 수신점으로 전파되는 파가 페르마

의 원리를 통해 추정되는 전파경로를 표현하였다. 총 80개의 파선을 볼 수 있으며 붉은색으로 나타낸 부분은 파가 전파되면서 공동의 영향을 받을 것으로 추정되는 파선을 나타낸다.

기본적인 파의 전파양상을 보기 위하여 공동이 없는 조건에서 입력주파수 500 Hz일 때의 파동의 전파양상을 관찰하였다(Fig. 2). 파원을 중심으로 하여 원형의 전파양상을 보여주고 있으며 파가 전파될수록 점차 에너지가 감소되는 것을 볼 수 있다. 이때 step 1은 4.5×10^{-4} sec가 경과한 경우의 전파양상이며 step 8까지의 전파양상을 계산하였다. 이것을 토대로 하여 공동이 존재할 때는 파의 전파 양상이 어떻게 변화하는지 시뮬레이션을 통해 비교하였다.

격자 간격의 선택

수치계산에 있어서 격자간격과 파원의 주기 및 파장은 계산결과에 매우 큰 영향을 미친다. 터널의 크기를 가로×세로를 2×2 m라고 할 때, 현장에서 주로 사용하는 파원의 주파수는 2-5 kHz에 달한다. 파원의 파장에 비해 격자간격이 클 경우에는 계산의 오차가 생기므로 파장 당 10개 내외의 격자점이 존재하는 것이 좋다고 알려져 있다(서상용, 1982).

수치계산에 적절한 격자간격을 선택하기 위해 주시 및 진폭의 변화를 관찰하였다. 주파수가 2 kHz이고 격자간격이 0.125 m와 0.5 m일 때, 두 가지를 비교해 보았다(Fig. 3). 주파수와 파장사이에는 다음과 같은 관계가 성립된다.

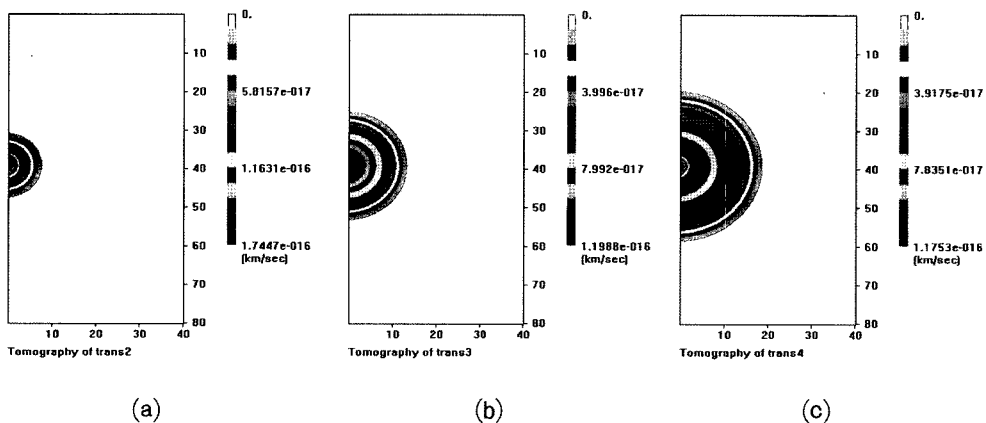


Fig. 2. The snapshot of the wave propagation with 500 Hz source frequency when a cavity is not located ((a)step 2, (b) step 3, (c) step 4).

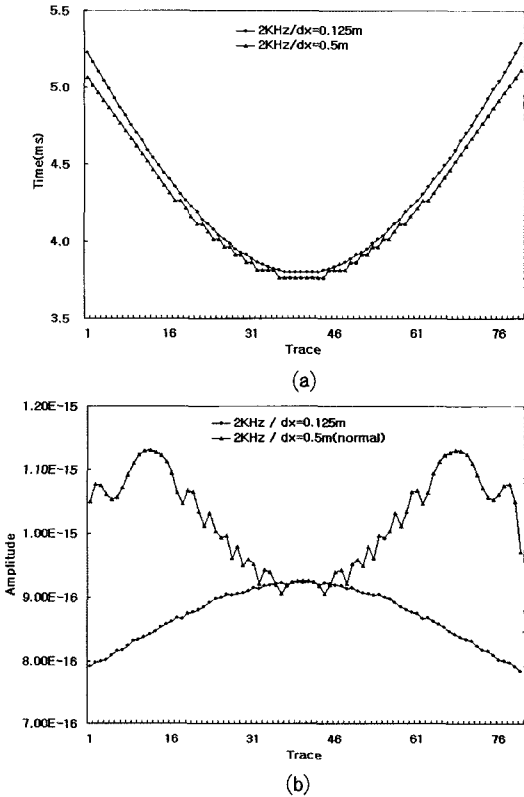


Fig. 3. Variation of (a) arrival time and (b) amplitude when 2 kHz input frequency is used.

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

여기에서 V 는 탄성파의 속도, f 는 주파수, λ 는 파

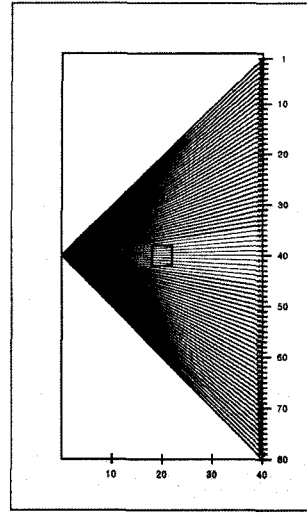


Fig. 4. Diagram of ray path when the size of a model is enlarged by 5m around boundaries.

장, T 는 주기를 뜻한다. 5,500 m/s의 탄성파 속도를 가지는 모델에서 2 kHz의 주파수를 사용하였을 때 파장은 2.75 m가 된다. 주시곡선은 격자간격 변화에도 불구하고 비슷한 양상을 보이지만, 격자간격 $dx = 0.125\text{m}$ 일 때가 0.5m일 때에 비해서 비교적 완만하고 깨끗한 주시곡선이 얻어진다. 진폭에 대해서는 격자간격이 0.125 m일 때 파의 전파경로가 길어질수록 진폭이 작아지는 것을 적절하게 표현하고 있지만, 0.5 m일 때는 다소 상관성이 없어 보이는 곡선이 얻어짐을 알 수 있다.

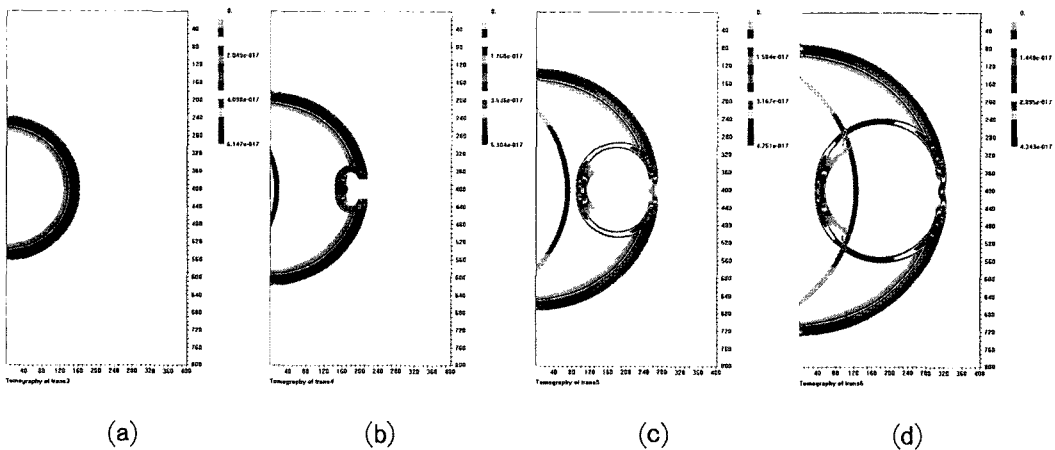


Fig. 5. Snapshots for the cavity model with a grid system enlarged by 5 m around boundaries ((a) step 3, (b) step 4, (c) step 5, (d) step 6).

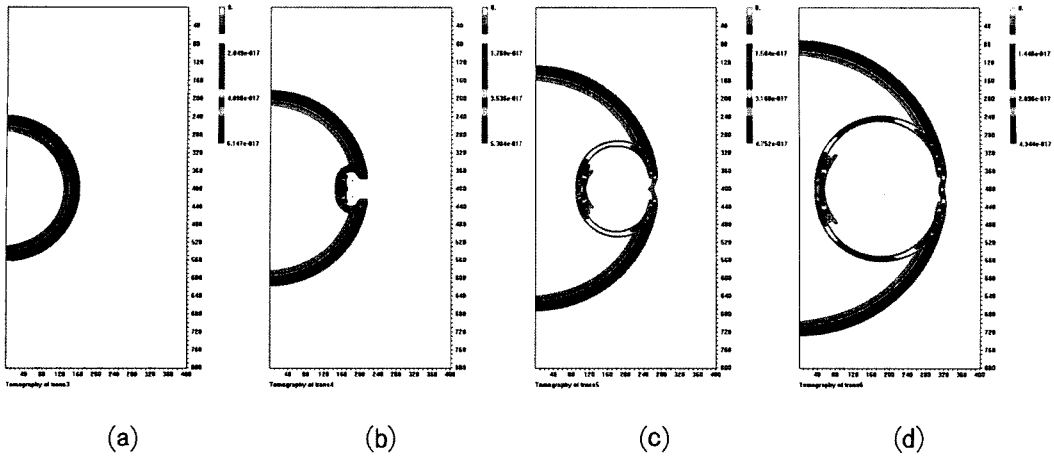


Fig. 6. Snapshots for the cavity model with a grid system enlarged by 10 m around boundaries ((a) step 3, (b) step 4, (c) step 5, (d) step 6).

반사파의 제거

모델상의 파원에서 탄성파를 발생시키면 파는 단일 방향(파원에서 수신점 방향)으로만 전파되는 것이 아니라 방향에 제한이 없이 모든 방향으로 전파된다. 이러한 현상으로 인해 반사파가 생기게 되며, 파원에서 수신점으로 향하는 순수한 탄성파에 잡음으로 작용한다.

따라서 본 시뮬레이션에서는 이러한 영향을 없애고자 모델 주변에 반사파를 감쇄시킬 목적으로 Fig. 4와 같은 모습으로 영역을 크게 설정하였다. 먼저 모델영역의 크기를 초기모델 크기의 주변으로부터 5 m 크게 하여 탄성파의 전파양상을 관찰해 보았다. 탄성파의 전파양상을 총 20 step으로 구분하였으며, Fig.5는 각각 step 3, 4, 5, 6을 보여주고 있다. 입력주파수는 5 kHz를 사용하였으며 모델중앙에 가로 x 세로, 2 x 2 m의 공동이 존재한다.

반사파의 영향을 감쇄시킬 목적으로 모델영역을 5 m 크게 설정하였지만 토모그래피 상에서 저속도를 보이는 검은색의 파원인 반사파가 나타난다. 반사파는 step 4에서부터 형태가 나타나기 시작하며, 정방향으로 점차 퍼져나가서 결국은 step 6에서 공동으로 인해 생성된 반사파와 중첩된다. 중첩된 반사파는 잡음으로 작용하여 자료해석에 어려움을 줄 수 있다.

반사파의 영향을 더 줄이고자 모델영역의 크기를 초기모형 주변으로부터 10 m 크게 하였으며 이 조건에서의 탄성파의 전파 양상은 Fig. 6과 같다. Fig. 5와 비교하였을 때 반사파는 나타나지 않고 있으므로 앞으로의 시뮬레이션은 이와 같은 조건으로 실행하였다.

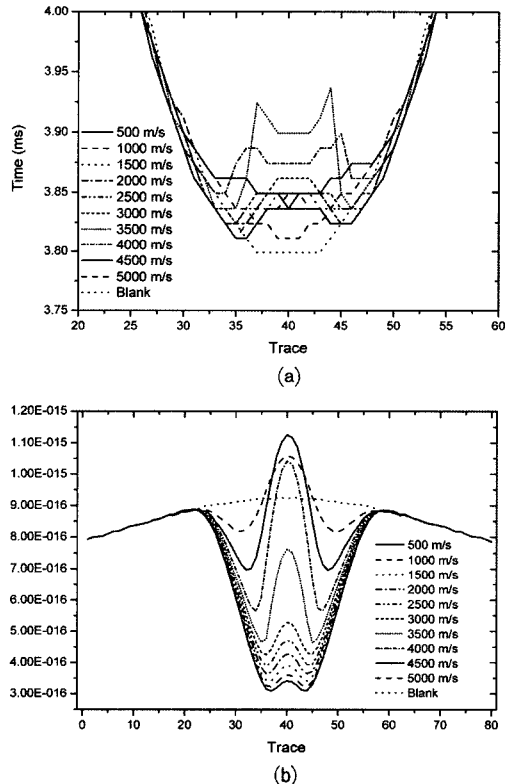


Fig. 7. Variation of (a) arrival time and (b) amplitude according to velocity changes inside the cavity (2 x 2 m).

공동 부근에서의 전파 경로 유추

모델에 공동이 존재할 때의 전파양상을 비교하기 위해 가로 x 세로가 2 x 2 m의 공동이 존재한다고 설정을 하였고, 또한 공동에 충전된 물질이 채워져 있다고

가정하였을 때를 비교하기 위해 공동에서의 전파속도를 달리하며 파의 전파양상을 관찰하였다. Fig. 7에서 보면 공동 부분에서 탄성파의 도달시간이 지연되는 모습을 볼 수 있다. 여기서 첫 번째 가정은 공동을 지날 때 탄성파는 공동의 외부를 타고 흐른다는 것이고, 두 번째 가정은 탄성파가 공동을 투과한다는 것이다. 탄성파의 시간영역을 비교하였을 때 공동의 충전 물질에 따른 탄성파속도의 차이로 인해 공동에서의 탄성파의 도달시간의 지연 정도가 차이는 것을 볼 수 있다.

공동으로 인한 시간지연이 가장 많이 되는 순서대로 나열하면 3,500-4,000 m/s, 3,000-500 m/s, 5,000-blank(5,500 m/s)가 된다(Fig. 7a). 공동이 존재할 때

진폭의 변화를 보았을 때는 공동에서의 탄성파 속도가 느릴수록 공동부근에서 진폭의 편차가 크게 나타난다(Fig. 7b). 그러나 탄성파 속도가 4,000 m/s일 때 공동이 없을 때 보다 오히려 진폭이 크게 나타나며 4,500 m/s일 때 최고값을 보이다가, 5,000 m/s가 되면서 공동이 없을 때의 진폭과 비슷한 양상으로 변화한다.

전파양상을 관찰하기 위한 토모그래피를 비교해 보았을 때(Fig. 8, Fig. 9), 공동에서의 탄성파 속도가 500 m/s일 때는 공동의 외부를 타고 흐르는 파동과, 공동으로 인한 반사파의 모습이 관찰된다. 반면 공동에서의 탄성파의 속도가 4,000 m/s일 때는 공동으로 인한 반사파의 형태는 감소하고 공동을 투과하는 모

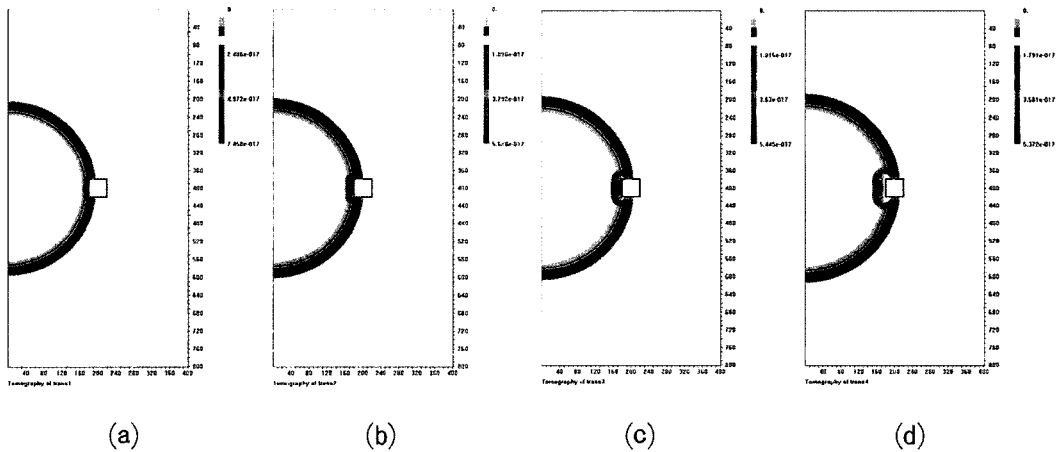


Fig. 8. Snapshots when the seismic wave is going through the cavity which transmits the wave at a velocity of 500 m/s ((a) step 1, (b) step 2, (c) step 3, (d) step 4).

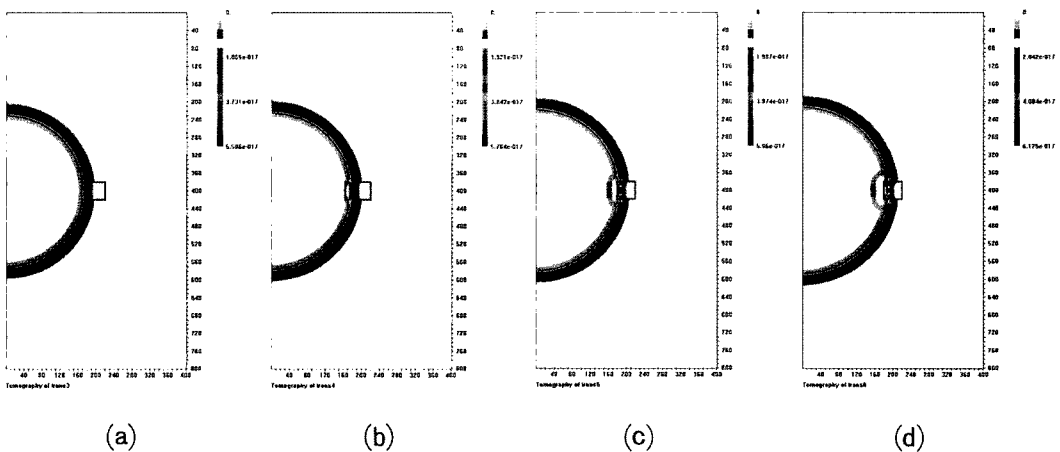


Fig. 9. Snapshots when the seismic wave detours the cavity which transmits the wave at a velocity of 4000 m/s ((a) step 3, (b) step 4, (c) step 5, (d) step 6).

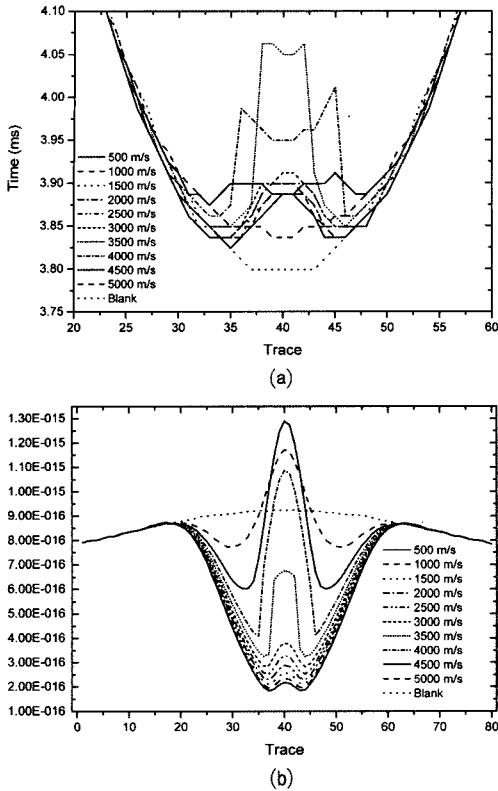


Fig. 10. Variation of (a) arrival time and (b) amplitude according to velocity changed inside the cavity (3 × 3 m).

습이 뚜렷하게 관찰된다. 이것은 공동에서의 탄성파 속도가 일정 한계를 넘어 모암과의 속도차이가 적어 질수록 파가 공동을 투과하는 양상을 보이는 것을 알 수 있었다.

공동 크기에 따른 변화

앞서 관찰한 탄성파의 전파양상을 토대로 공동의 규모가 커졌을 경우에 전파양상이 어떻게 변화하는지 비교해 보았다. 공동크기의 증가로 인해 도착시간 지연 영향을 받는 범위가 넓어졌기 때문에 시간이 지연되는 범위가 넓어졌으며 진폭이 감소되는 영역 또한 범위가 넓어짐을 관찰할 수 있다(Fig. 10).

또한 공동의 규모가 증가함에 따라 공동부근에서의 시간지연 현상이 더 뚜렷해짐을 알 수 있다. 공동의 규모가 4 × 4 m(가로 × 세로)일 때 공동을 투과하는 탄성파 속도차이의 범위가 공동의 크기가 작을 경우보다 더 커짐을 볼 수 있다(Fig. 11).

시간지연이 큰 순서대로 나열하면 2,000-4,500 m/s,

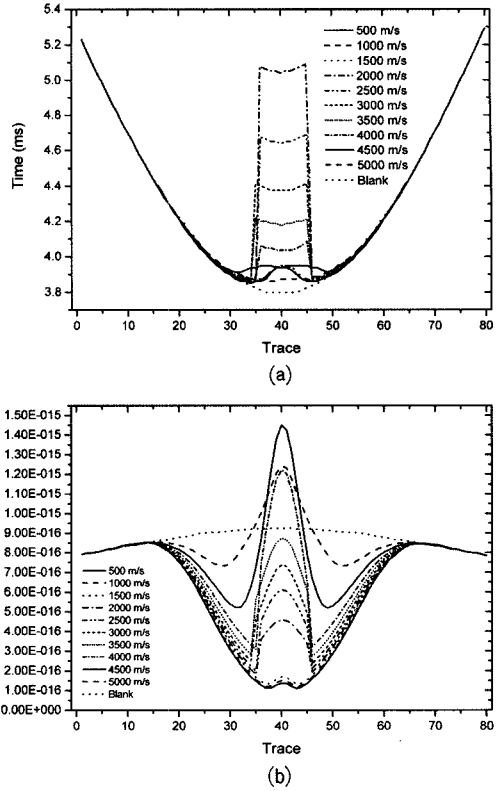


Fig. 11. Variation of (a) arrival time and (b) amplitude according to velocity changed inside the cavity (4 × 4 m).

1,500-500 m/s, 5,000-5,500 m/s(blank), 3단계로 구분할 수 있다. 진폭의 변화에 있어서는 시간지연이 가장 많이 되는 2,000 m/s일 때부터 공동부근에서 진폭의 변화가 커지는 것을 볼 수 있다(Fig. 11).

공동 위치에 따른 변화

공동의 위치에 따라 파의 전파양상을 비교해보았다 (Fig. 12-15). 공동이 중앙에 위치하였을 때와 비교하여 각각 좌우로 5m, 위쪽방향으로 5m 또는 10m 씩 이동시켜가며 공동으로 인해 전파되는 파의 변화를 비교해보았다.

공동에서의 탄성파의 속도는 500 m/s로 하였기 때문에 파는 공동을 투과하지 못하고 공동을 우회하여 전파되는 양상을 볼 수 있다. Fig. 14에서 비교적 정확하게 공동이 위치한 부근에서는 원형으로 전파되던 파가 공동 주변으로 갈라지는 현상이 뚜렷하게 관찰된다. 또한 공동으로 인해 반사파가 원형의 형태로 전파되는 것을 볼 수 있다.

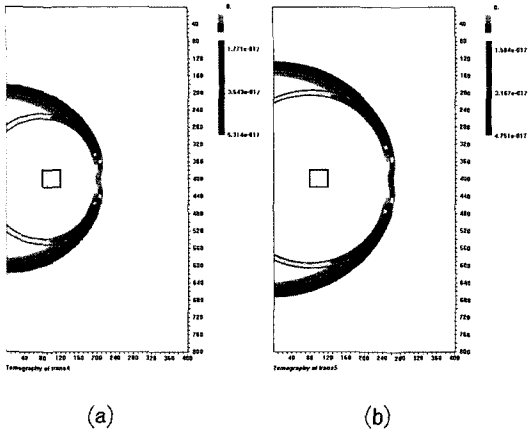


Fig. 12. Snapshots of wave propagation when the cavity is moved to the left by 5 m ((a) step 4, (b) step 5).

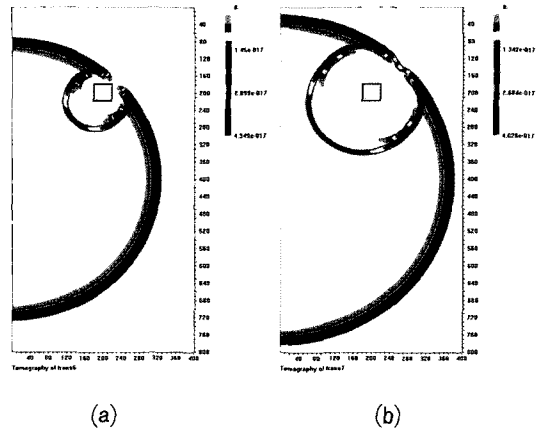


Fig. 15. Snapshots of wave propagation when the cavity is moved up by 10 m ((a) step 6, (b) step 7).

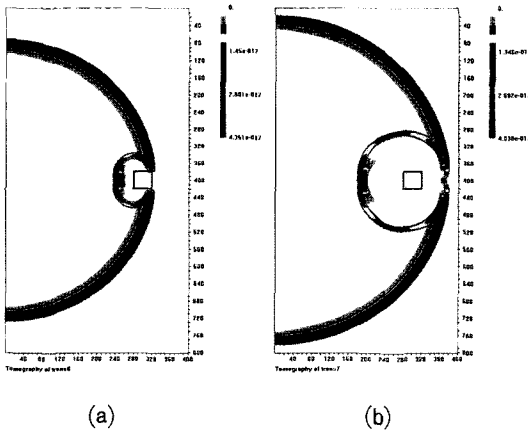


Fig. 13. Snapshots of wave propagation when the cavity is moved to the right by 5 m ((a) step 6, (b) step 7).

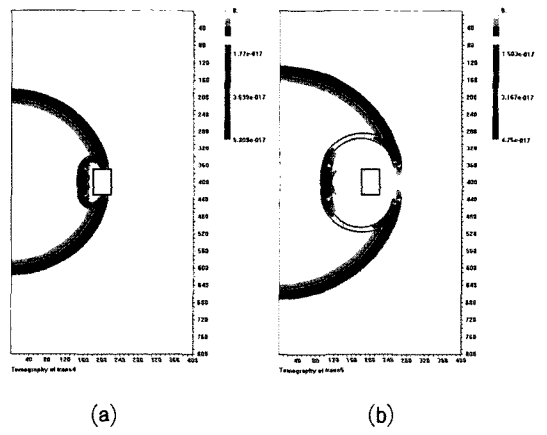


Fig. 16. Snapshots of wave propagation when the size of the cavity is 2×3 m ((a) step 4, (b) step 5).

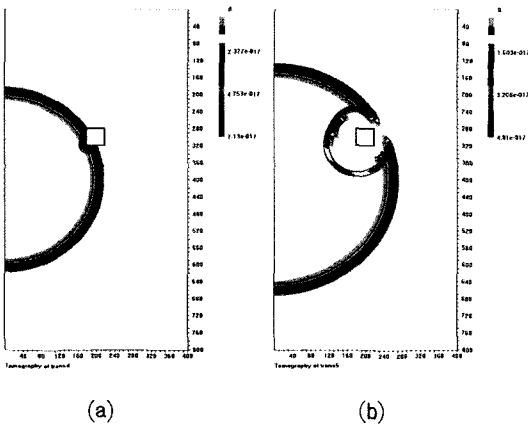


Fig. 14. Snapshots of wave propagation when the cavity is moved up by 5 m ((a) step 4, (b) step 5).

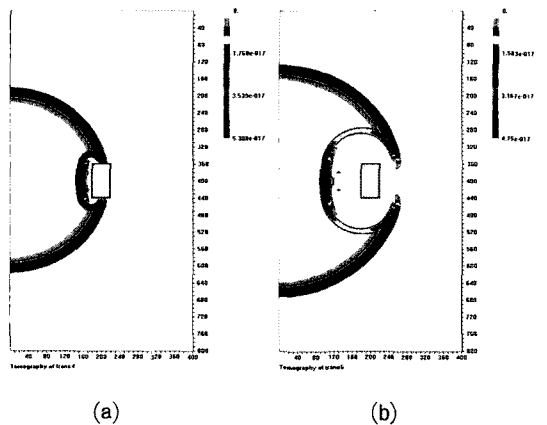
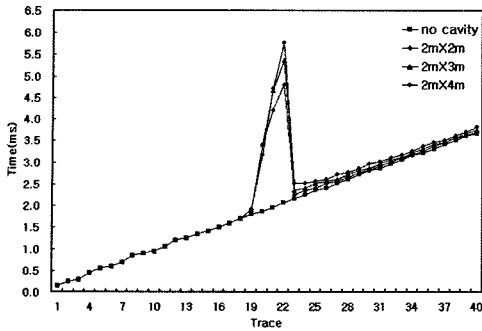
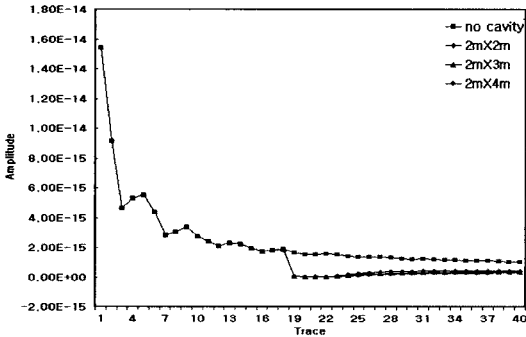


Fig. 17. Snapshots of wave propagation when the size of the cavity is 2×4 m ((a) step 4, (b) step 5).



(a)



(b)

Fig. 18. Variation of (a) arrival time and (b) amplitude observed with 40 horizontally arranged receivers.

공동 길이에 따른 변화

공동의 크기에 따른 전파양상은 공동부근에서 파는 공동을 우회하여 전파되며, 공동의 길이 변화로 인해 반사파의 형태가 공동의 형태를 따라서 타원형의 모습으로 전파되는 것을 볼 수 있다(Fig. 16, Fig. 17).

또한 공동을 지나는 파의 정확한 전파경로를 유추하기 위하여 모델의 중앙부에 40개의 요소를 수평하게 배열하여 각 요소별 도달시간 및 진폭을 비교하였다(Fig. 18). 공동부근에서 파는 공동을 투과하여 전달되고 공동에서의 탄성파 속도(500 m/s)로 전파되기 때문에 모암의 탄성파 속도(5,500 m/s)와 비교하여 급격한 시간지연 현상이 관찰된다. 공동을 우회하여 전달되는 파는 공동이 없을 때와 비교하여 공동의 길이가 길어질수록 점차 시간지연 현상이 커지는 것을 볼 수 있다. 또한 파가 공동을 지나는 시점부터 진폭은 급격하게 감소된다(Fig. 18b).

이와 같이 수평배열을 통한 파의 전파양상을 통해 Fig. 19와 같은 전파경로를 가정하여 보았다. 페르마의 원리를 토대로 하여 전파경로를 유추하였으며, 공동을 우회하는 파는 모암의 탄성파 속도와 같은 속

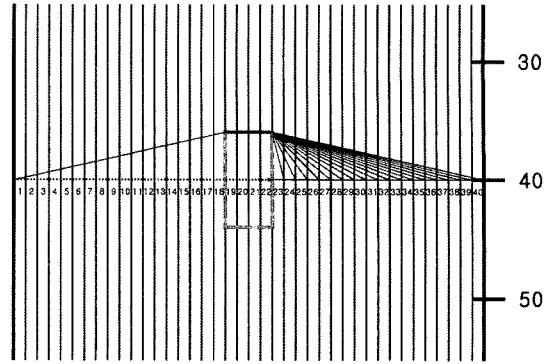


Fig. 19. Assumed ray paths around the cavity which transmits the wave at a velocity of 500 m/s and the cavity size is 2 × 4 m.

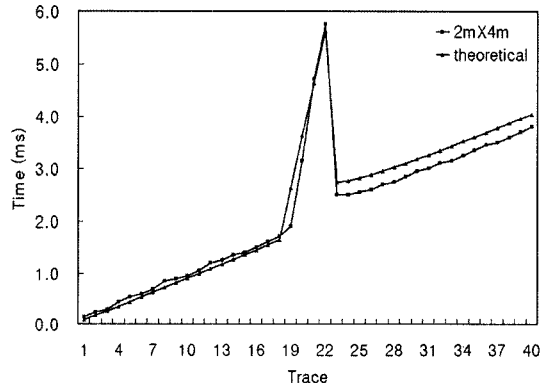


Fig. 20. Arrival time obtained by the simulation is compared with the theoretical data (cavity size: 2 × 4 m).

도로 전파되며, 공동 내부를 지나는 파는 500 m/s로 전파된다고 하였다. 또한 이와 같은 경로를 전파하는 파의 전파시간을 계산하여 시뮬레이션 자료와 비교하여 보았다.

Fig. 20은 공동의 크기가 2 × 4 m일 때의 탄성파의 수평적 도달시간을 시뮬레이션 결과와 비교한 것이다. 시뮬레이션 결과와 계산된 파의 도달시간이 거의 일치하는 것을 볼 수 있다. 따라서 유추한 전파경로는 비교적 정확하다고 판단된다.

결론

이상과 같은 시뮬레이션 비교를 통해서 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) 유한차분법에 의한 수치 계산 결과, 요소의 크기 (파장의 1/10 범위)에 따라 공동 내부의 탄성파

속도 변화에 따른 주시 변화는 큰 차이는 없으나 진폭의 변화는 매우 커서 자료해석에 큰 오류를 가져올 수 있다.

2) 일반적으로 저속도 대역을 갖는 공동(500 m/s)에서는 파가 공동을 빠르게 투과하지 못하고, 공동주변을 빠르게 우회하여 전파된다. 그러나 공동의 충전물질에 의해 공동에서의 탄성파 속도가 일정 한계를 넘어 모암과의 속도 차이가 작아질 때(3,500-5,000 m/s), 파는 공동을 빠르게 투과하여 전파하는 경향을 보인다.

3) 2)의 결과에 의해서 $2 \times 2\text{m}$ (가로 \times 세로) 규모의 공동이 존재할 경우의 주시는 공동의 탄성파 속도가 3,500-4,000 m/s에서 가장 늦게 도착한다. 또한 공동의 탄성파 속도가 4,000-5,000 m/s일 때는 공동이 존재하지 않을 경우보다 중앙 부근의 진폭이 크게 나타난다. 이 결과는 당초 예상과는 다르게 나타남을 볼 수 있으며, 이 현상에 대한 분석은 차후 심도있는 연구가 필요한 것으로 생각된다.

사 사

이 논문은 2006년도 강원대학교 부설 자원개발연구소의 지원을 받아 수행된 연구이며, 관계기관에 감사드립니다.

참고문헌

- 김중열, 1989, 탄성파 발생원배열에 의한 P-방사형 편극. 대한광산학회지, 26(1), 28-38.
- 서상용, 1982, 유한차분법을 이용한 과도 전자장의 계산. 서울대학교 공학박사 학위논문, 162 p.
- 이두성, 1994, 유한차분법에 기초한 파선 경로 계산 알고리즘. 한국자원공학회지, 31(2), 150-155.
- 이두성, 2003, 임펄시브 진원에 의한 공대곡 탄성파기록으로부터 P파, S파 속도 영상도출에 관한 연구. 물리탐사, 6(3), 138-142.
- 한현철, 1998, 2차원 전 파형 역산을 이용한 탄성파 토모그래피. 서울대학교 공학석사 학위논문, 49 p.

2006년 7월 18일 접수

2006년 8월 25일 수정원고 접수

2006년 9월 1일 채택