

지하 공동에 대한 탄성과 속도 및 진폭 변화에 관한 연구

A study of seismic velocity and amplitude variation around underground cavity

이 상 철* 오 석 훈** 손 권 익*** 서 백 수****
Lee, Sang-Chul* Oh, Seokhoon** Sohn, Kwon-Ik*** Suh, Baek-Soo****

Abstract

This study was designated to clarify the aspect of the wave propagation around the cavity. The change of travelttime and amplitude of the seismic wave was observed according to the various wave velocities of the cavity. The seismic wave detour or penetrate the cavity depending on the seismic velocity of the in-filled material. Generally, seismic wave detours toward high velocity zone around the cavity, and when the velocity of the cavity material reaches to 80 % of the base rock, the wave penetrates the cavity. The travelttime of the detouring seismic wave is not sensitive to the change of the cavity velocity, but as the velocity of the cavity increases, the fall of the amplitude was reduced. The penetrating wave showed the steeply increasing amplitude due to the reiteration of the detouring wave.

키워드 : 탄성파, 공동, 주시, 진폭, 탄성파 속도

Keywords : seismic wave, cavity, travelttime, amplitude, seismic velocity

1. 서론

최근 들어 국가 기반 시설인 도로, 철도 등을 건설할 때 선형의 직선화 및 환경 훼손의 최소화 등을 고려하면서 장대터널들이 건설되고 있다. 또한 국가 경제 성장기에 운용되었던 광산지역들이 새로이 대규모 위락단지로 재개발 되면서 폐갱도 상부에 대규모 구조물들이 건설되고 있다. 이러한 대형 구조물 건설 시 구조물의 안전을 위협하는 불리한 지반조건들을 사전에 충분히 파악하고 위험 요인들에 대하여 구조물의 안정성을 확보할 수 있는 설계 및 안전한 시공이 이루어져야 한다

[1]. 물리탐사 분야에서는 지질 구조를 해명하기 위해 토모그래피 기법의 응용이 증대되고 있는데 [2], 탄성과 토모그래피 기법을 공동 탐지에 적용한 예로 터널과 같은 인공적 공동 지대에서 현장 조사 및 모델링 실험을 통한 속도 및 진폭 변화에 대한 연구가 있었으며[3], 국내에서는 채굴 공동의 충전 효과 검증에 이용한 바 있다[4]. 이와 같이 지하공동 탐사에 탄성과 토모그래피 기법을 응용할 수 있는 이유는 배열된 발전기 및 수신기에 이르는 파선이 불균질한 매질을 통과하면서 주시 및 진폭의 변화를 겪기 때문이다[5].

탄성과 토모그래피 기법은 대표적으로 초동의 도달시각을 측정 자료로 이용하는 방법과 초동의 진폭을 측정 자료로 이용하는 방법이 있다. 그러나 발생원으로부터 탄성과 에너지를 정확하게 제어하는 것이 곤란하며, 계산시간 및 자료처리의 간편성 때문에 주시정보만 이용하는 주시 역산에 대부분

* 강원대학교 대학원 지구시스템공학과 석사과정
** 강원대학교 지구시스템공학과 조교수, 이학박사
*** 강원대학교 산업공학과 교수, 공학박사
**** 강원대학교 지구시스템공학과 교수, 공학박사

의존한다. 또한 측정되는 자료의 양이 의학 분야에서 사용되는 CT 자료에 비하여 상대적으로 부족하기 때문에 전문적인 해석과정이 필요하다[6]. 따라서 지하내부에서의 탄성파의 전파양상에 대하여 보다 정밀하게 규명할 필요가 있다. 일반적으로 지하내부에 존재하는 공동은 주변 지층에 비하여 저속도대역을 나타내며, 이는 측정되는 주시의 지연을 일으킨다. 지하공동은 존재 여부에 따라서 인위적으로 굴착되거나 자연적으로 생성된 것이 있으며 원형 또는 사각형에 가까운 형태로 존재한다. 일반적으로 공동은 생성 후 무충진 상태로 존재하지만, 주변 환경의 영향으로 모암과 상이한 매질이 공동 내부에 충전 될 수 있다. 이것은 물리탐사를 통한 지질규명에 있어서 매우 중요한 문제가 되며 현장에서 취득한 주시 및 진폭 자료는 공동의 크기 및 내부의 충전 물질의 존재를 추정하는데 있어서 매우 중요한 자료가 된다.

2. 모델링

본 연구에 이용된 시뮬레이션 모델의 크기는 20 m × 40 m (가로×세로) 이며, 모델의 내부 정 중앙에 2 m × 2 m 크기의 공동이 존재한다. 모델은 균질등방하며 5,500 m/s의 탄성파 속도를 가지고 공동의 기본 탄성파 속도는 500 m/s이다. 파동원의 발생지점은 모델의 왼쪽 중앙에 위치하며, 반대편에 0.5 m 간격으로 총 80개의 수신점이 설정되었다 (Figure 1).

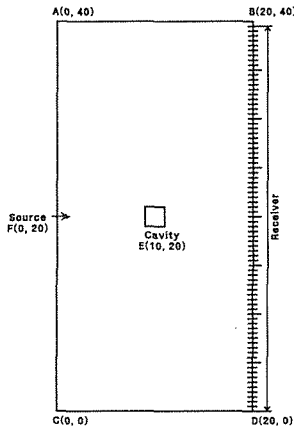


Figure 1 The cavity is located in the model as a rectangle in the model.

3. 전파양상의 변화

모델 내부에 존재하는 공동은 모델에 비하여 낮은 탄성파 속도를 가진다. 모델에 비하여 저속도대

역을 나타내는 공동은 모델 내부를 흐르는 탄성파의 주시 및 진폭의 지연, 감소를 일으킨다. 그 정도는 공동 내부의 충전 물질에 따른 탄성파 속도의 변화에 따라 달라지며, 본 연구에서는 이를 관찰하기 위하여 공동 내부의 탄성파 속도를 500 m/s 부터 5,500 m/s 까지 500 m/s 단위로 11 가지의 조건을 설정하여 주시 및 진폭 자료의 변화를 통하여 탄성파의 전파양상을 연구하였다. 11 가지 조건 중 500 m/s 는 공동 내부에 충전 물질이 없는 무충진 공동을 의미하며 1,000~5,000 m/s 는 충전 공동을, 5,500 m/s 는 공동이 존재하지 않는 조건을 의미한다.

탄성파는 공동의 경계면에서 굴절, 반사 또는 회절현상이 일어나며, 공동을 우회 또는 투과하여 전파된다. 모델의 탄성파 속도가 5,500 m/s 임을 감안할 때, 500 m/s 의 속도를 가지는 공동은 모델 내부에서 저속도 대역을 나타내며, 이때 탄성파는 공동을 투과하기 보다는 공동 주변의 고속도대역 (5,500 m/s)을 따라 우회하는 것이 시간적으로 이득이 된다. 때문에 공동이 존재하지 않을 때 탄성파는 파동원의 발생지점과 수신점사이의 직선경로를 통해 전파되는 것과 비교하여 공동의 존재할 때 공동을 우회하는 만큼 파선경로가 길어지게 되며, 늘어난 파선경로에 대응하는 만큼의 시간지연이 일어나게 된다.

공동의 존재로 인하여 우회하는 탄성파의 시간지연은 500 m/s 의 탄성파 속도를 가지는 공동이 존재할 때 36~44번째 트레이스(trace)에서 최대 0.04 ms 이다(Figure 2).

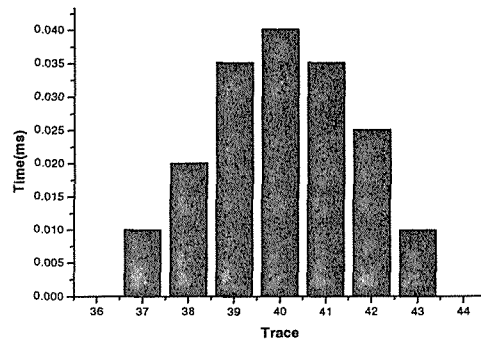


Figure 2 Delay of first arrival time when 5,500 m/s and 500 m/s velocity inside the cavity.

반면 탄성파는 공동을 우회하여 전파하기만 하는 것이 아니며, Figure 3 (b)의 탄성파 자료에서 1차 탄성파 이벤트와 일정 시간간격을 두고 관찰되는 2차 탄성파 이벤트를 통하여 알 수 있다. 이것

은 공동을 투과하여 전파되는 탄성파로 추측할 수 있다.

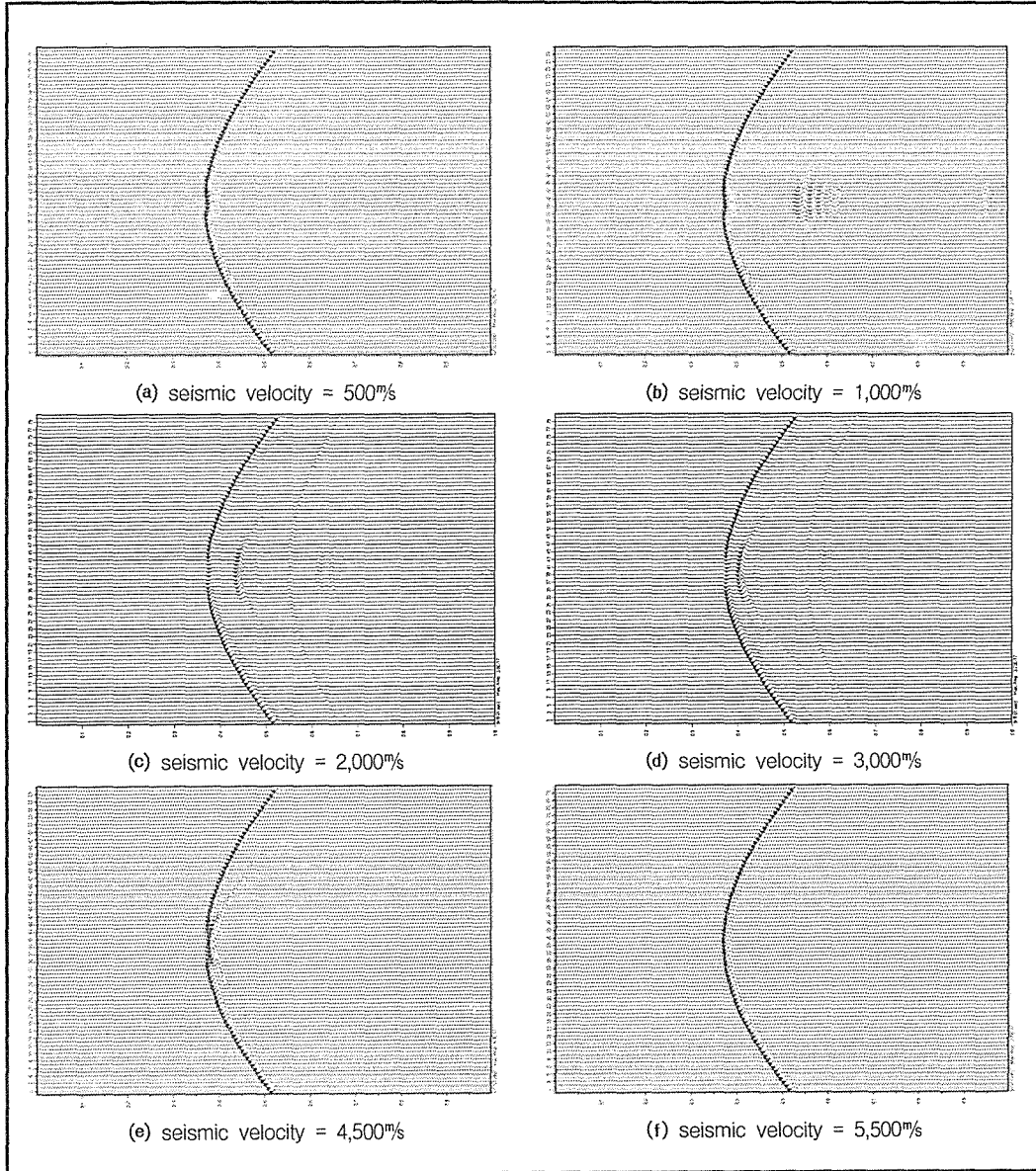


Figure 3 Seismogram of seismic velocity inside the cavity when 5kHz input frequency is used.

공동을 투과하는 탄성파는 그 에너지가 미약하고 주기가 늦기 때문에 우회하는 탄성파와 구분되며 Figure 3 (a)에서와 같이 무충진 상태의 공동(500 %) 내부에는 탄성파 에너지가 전달되지 못하지만, 공동 내부의 탄성파 속도가 1,000 % 일 경

우에는 2차 탄성파 이벤트가 관찰되는 것으로 보아서 공동의 탄성파 속도가 1,000 % 이상일 때는 미약하지만 공동 내부로 탄성파 에너지가 전달되는 것으로 판단된다. 때문에 2차 탄성파 이벤트는 공동을 투과하는 탄성파로 볼 수 있다.

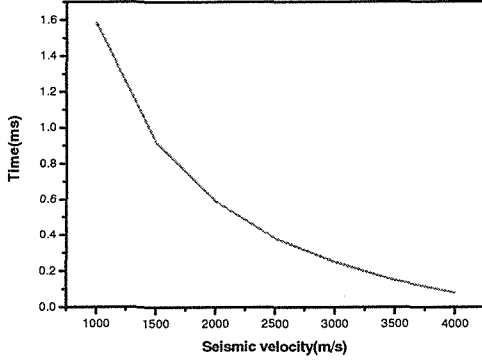


Figure 4 Numerical difference of seismic event from 500% to 4,000% velocity inside the cavity.

2차 탄성과 이벤트는 공동의 탄성과 속도가 1,500~4000 %일 때도 계속 나타나는데, 1차 탄성과 이벤트와의 주시 차이가 공동 내부의 탄성과 속도가 1,000 % 일 때 1.58 ms, 4,000 % 일 때 0.08 ms 로 나타난다(Figure 4). 공동 내부의 탄성과 속도의 증가는 탄성파가 공동을 투과하는 시간을 단축시키게 되며 공동을 우회하는 탄성파의 주시와 점차 유사해진다. 반면, 공동의 탄성과 속도가 4,500 % 일 때는 두 가지 탄성과 이벤트의 주시가 유사하며(Figure 3 (e)), 부분적으로 중첩되어 나타난다.

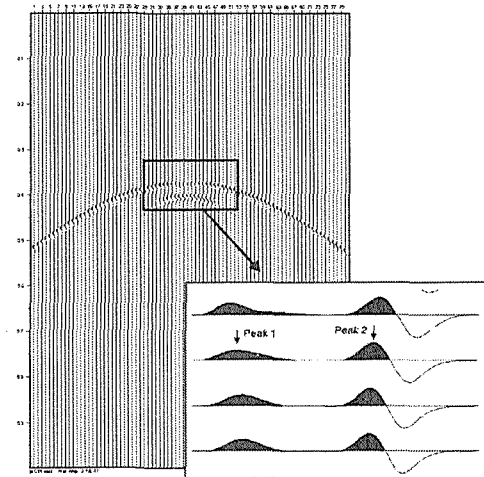
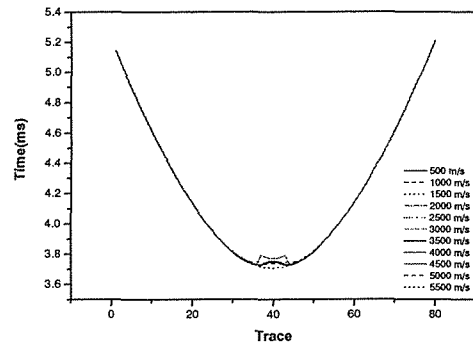


Figure 5 Seismogram of two peaks when seismic velocity is less than 4,000% in the cavity in model.

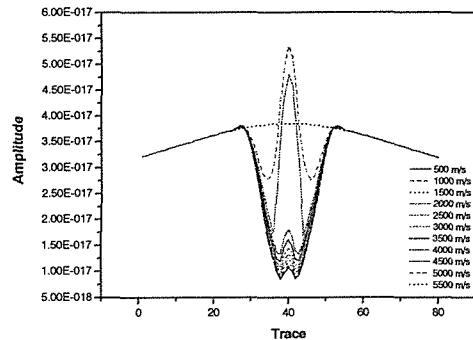
이러한 두 가지의 탄성과 이벤트를 Figure 5와 같이 peak 1과 peak 2로 구분하여 주시 및 진폭

자료의 변화를 관찰하였다.

Figure 6 (a)는 peak 1에 대한 주시자료이며, 공동의 존재로 인한 시간지연이 36~44번 트레이스 부근에서 나타나고 있다. 공동 내부의 탄성과 속도가 500~4,000 % 일 때, 공동이 없는 조건(5,500 %)과 비교하여 최대 0.04 ms의 주시지연이 일어나고 있지만, 공동 내부의 탄성과 속도 변화에 따라 나타날 것으로 예상되던 주시지연은 나타나지 않고 있다. 또한 탄성과 속도 조건 별 주시의 차이가 최대 0.01 ms로 미미하며, 속도 변화에 따른 주시 변화의 일관성이 없기 때문에 공동 내부의 탄성과 속도 변화에 따른 주시 변화로는 보기 어렵다. 반면 공동 내부의 탄성과 속도가 4,500 % 일 때는 다소 가시적인 변화가 나타나는데 탄성과 속도 조건 중 주시지연이 가장 크다. 이것은 Figure 3 (e)에서 볼 수 있듯이 두 가지의 탄성과 이벤트의 중첩으로 인해서 나타나는 현상이다.



(a) arrival time



(b) amplitude

Figure 6 Variation of arrival time and amplitude according to velocity changes inside the cavity.

이와 같이 두 가지의 탄성과 이벤트가 중첩되는 것은 공동 내부의 탄성과 속도가 4,500 % 일 때

공동 주변으로 우회하여 전파되는 탄성과 공동을 투과하는 탄성과 주시가 근사해 짐으로써 나타나는 현상이다(Figure 7). 이것으로 인하여 탄성과 자료에서 초동을 발체하는데 있어서 오류를 범할 수 있기 때문에 Figure 6의 (a)에서와 같이 공동으로 인한 시간지연이 나타날 수 있다.

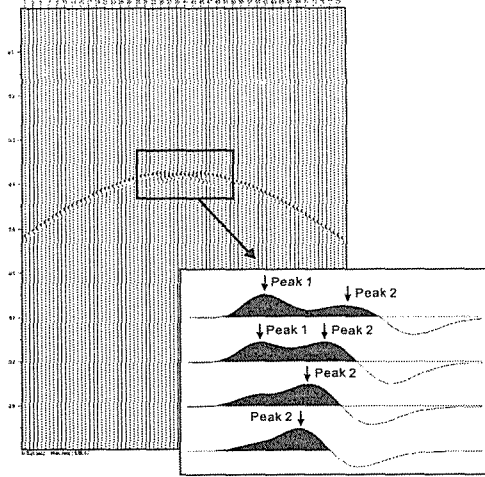


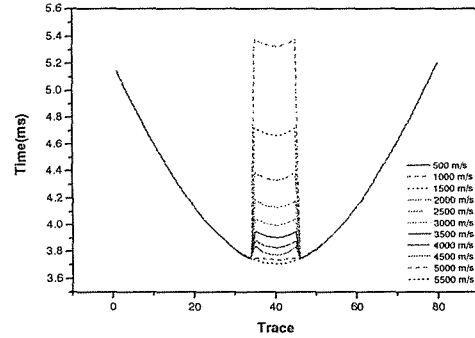
Figure 7 Superposition of two peaks when seismic velocity is 4,500m/s in the cavity in model.

Table 1 Decrease of amplitude with seismic velocity inside cavity

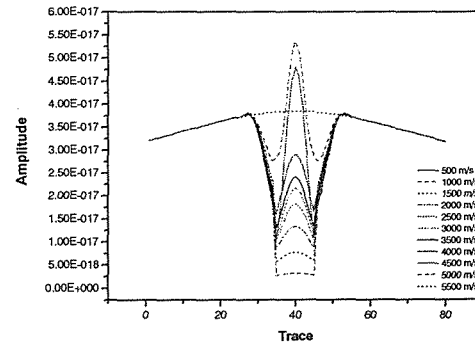
Trace No.	Seismic velocity(m/s)	Decrement of amplitude(%)
40	500	72
	1,000	71
	1,500	69
	2,000	68
	2,500	65
	3,000	62
	3,500	58
	4,000	53
	4,500	125
	5,000	140
	5,500	0

두 가지 탄성과 이벤트의 중첩으로 인해서 나타나는 현상을 제외하였을 때, 공동 내부의 탄성과 속도 변화에 따른 주시의 변화는 없는 것으로 판단된다. 이것은 공동을 우회하는 탄성과는 모델의 탄성과 속도를 따라서 전파되기 때문이다. 즉 공동을 우회하여 전파되는 탄성과는 모델과 공동의 경계면을 따라 또는 공동 주위를 통하여 전파되지만

공동 내부의 탄성과 속도의 변화에는 영향을 받지 않는다고 할 수 있다.



(a) arrival time



(b) amplitude

Figure 8 Variation of arrival time and amplitude that wave go through the cavity according to velocity changes inside the cavity.

반면 peak 1에 대한 진폭의 변화는 주시영역에서의 변화양상과 달리 가시적인 변화를 관찰할 수 있다. Figure 6 (b)의 트레이스 중심부에서 공동의 존재로 인한 진폭감소가 나타난다. 진폭의 감소 추세를 공동이 존재하지 않는 조건(5,500 m/s)에서의 진폭과 비교하였을 때 40번째 트레이스를 기준으로 공동 내부의 탄성과 속도가 500 m/s 일 때 최대 진폭감소가 나타나고 있다. 또한 공동 내부의 탄성과 속도가 증가함에 따라 1~5 % 씩 진폭이 높아지고 있다(Table 1). 그러나 공동 내부의 탄성과 속도가 4,500 m/s 일 때와 5,000 m/s 일 때 공동이 존재하지 않는 조건(5,500 m/s)과 비교하여 각각 125 %, 140 % 의 급격한 진폭 증가를 보이고 있다. 이러한 “이상진폭”은 공동을 우회하는 탄성과와 투과하는 탄성과의 중첩으로 인한 것이며, 이 두 가지 조건에서는 탄성과가 공동을 투과하는 경향을 보이는 것을 알 수 있다.

다음으로 peak 2에 대한 주시 및 진폭자료의 변

화는 Figure 8과 같다. 탄성파가 공동을 우회하여 전파될 때 주시영역에서 변화양상이 나타나지 않는 것과 달리 공동을 투과하는 탄성파의 주시영역에서는 공동 내부의 탄성파 속도가 증가함에 따라 순차적으로 주시가 빨라지는 것을 볼 수 있다(Figure 8 (a)). 반면 진폭영역에서는 우회하여 전파되는 탄성파와 유사한 변화양상을 보이고 있다. 공동을 우회할 때와 같이 파동이 중첩되는 4,500%, 5,000% 조건에서 진폭이 급격하게 증가하는 현상을 볼 수 있다(Figure 8 (b)).

4. 결론

1. 탄성파 자료상에는 나타나는 두 가지 탄성파 이벤트가 나타나며, 공동을 우회하는 탄성파는 투과하는 탄성파에 비하여 주시가 빠르며 탄성파 자료의 초동이 된다. 두 가지 탄성파 이벤트의 시간간격은 공동의 탄성파 속도가 1,000 %일 때 1.58 ms, 4,000 %일 때 0.08 ms 이며, 공동 내부의 탄성파 속도가 빨라질수록 2차 탄성파 이벤트가 1차 이벤트에 점차 근접한다.
2. 공동의 탄성파 속도가 모델의 약 80 % 미만일 경우(4,000 % 미만) 탄성파는 공동을 우회하여 전파되는 경향을 보이며, 공동을 우회하는 탄성파는 모델의 탄성파 속도로 전파되기 때문에 공동 내부의 탄성파 속도변화로 인한 영향을 받지 않는다.
3. 공동의 탄성파 속도가 모델의 약 80 % 이상일 경우(4,500 % 이상) 공동을 투과하는 탄성파와 우회하는 파의 중첩이 일어나며, 비교적 진폭이 높은 공동을 투과하는 탄성파가 초동으로 발췌된다. 이것으로 인하여 공동 주위를 지나는 탄성파가 공동을 투과하는 경향을 보일 때 주시의 변화가 나타난다.
4. 공동의 탄성파 속도가 빠를수록 진폭감소율이 작아지는 현상을 관찰 할 수 있으며, 공동 내부의 탄성파 속도가 500 %일 때 최대 진폭감소율을 보인다. 공동을 투과하는 경향을 보이는 공동의 탄성파 속도 4,500%, 5,000%일 때는 공동이 존재하지 않을 때(5,500%)의 진폭과 비교하였을 때, 진폭이 급격하게 증가하는 “이상진폭”이 나타난다.

한편 본 연구에서는 균질한 모델을 가정하여 실시하였으나 실제의 지반의 경우 공동 이외에도 단층, 파쇄대 등의 저속도대를 나타내는 지질구조 등이 있을 수 있으며 또한 암반 내에 속도 이방성이 존재할 수도 있다. 특히 초동 주시의 지연 현상의

경우는 공동과 모암의 속도 차이 그리고 공동의 크기에 따라 지연 정도가 결정되는데, 본 연구에서는 대부분 0.1ms 내외의 시간지연을 보여주고 있다. 특히 공동 내부의 탄성파 속도에 따른 초동 주시의 변화는 거의 없었다. 이 정도의 시간은 발파점에서의 지연시간 오차, 탐사기의 트리거 시점 오차, 지질구조에 의한 도달시간의 변화, 초동주시의 발췌 오차 등을 감안할 때 실제 탐사결과에서 감지하기 어려운 시간차이로 생각된다. 따라서 향후 소규모 공동의 탐지를 성공적으로 수행하기 위해서는 주변 지질조건 및 시추공의 간격, 송수신 간격 등 다양한 탐사 파라미터들을 최적화 시켜야하며 주시역산에만 의존하는 토모그래피 해석에 있어서 진폭역산을 함께 수행하는 것이 필요할 것으로 판단된다.

참고 문헌

- [1] 서기환, “지하 공동 및 저속도층에서의 탄성파 토모그래피 신호 특성 연구”, 충남대학교 대학원, 공학석사학위논문, 95p, 2002.
- [2] 정호준, 김정일, “터널설계 및 지하공동 탐지를 위한 지반조사에 물리탐사의 활용”, 강원대학교 ECO-NURI 심포지움, part 1, pp.11-23, 2006.
- [3] Rechten, R. D., Greenfield, Roy J. and Ballard, Robert F., Jr., “Tunnel signature prediction for a cross-borehole seismic survey”, *Geophysics*, Vol. 60, pp.76-86, 1995.
- [4] 이두성, “지하공동 충전효과 평가를 위한 시차 공대공 탄성파 토모그래피 연구”, *물리탐사*, Vol. 1, No. 1, pp.25-30, 1998.
- [5] 김종열, 현해자, 김기석, 김유성, 성낙훈, “Geotomography에 의한 암반 구조 연구(I)”, *과학기술처*, 1991.
- [6] 김용인, “수치모형실험을 통한 콘크리트구조물의 결함탐지에 관한 연구”, 강원대학교 대학원, 공학석사학위논문, 66p, 2004.