

유한 요소법을 이용한 2차원 TSP 모델링

이홍¹⁾ · 서정희¹⁾ · 신창수¹⁾

2 Dimensional TSP Modeling Using Finite Element Method

Hong Lee¹⁾, Jung Hee Suh¹⁾ and Chang Soo Shin¹⁾

요약 : TSP 탐사는 터널 및 지하공간의 건설 시 굴착 진행 중인 터널 주위의 지질구조를 파악하기 위하여 VSP 탐사를 터널 내에 적용한 물리탐사 기법이다. 하지만 터널 굴착예정 지역의 지질구조에 따른 터널 주위에서 파의 전파특성을 보여줄 수 있는 인공 탄성파합성 알고리듬이 부족한 실정이다. 이에 본 연구에서는 기존의 2차원 유한 요소 탄성파 모델링 알고리듬을 발전시켜 터널 전방에 여러 형태의 지질구조가 존재하는 경우에 대하여 2차원 시간영역 탄성파 모델링을 수행하였다. 그리고 이로부터 얻은 인공합성 탄성파단면과 파면단면을 통하여 파의 전파특성을 규명하고자 하였다. 우선 TSP 탐사와 동일한 형태의 송수신 배열을 한 후, 균질 매질에 대한 모델링을 수행하여 인공합성 탄성파단면과 파면단면을 동시에 구해 직접파의 전파특성을 분석하였다. 그리고 터널 굴착방향과 수직인 반사면과 평행인 반사면이 존재하는 경우에 대해 각각 모델링을 수행하여 균질 매질의 경우와의 비교, 분석을 통해 반사파들의 전파특성을 고찰하였다. 또한 송신원을 수진기의 앞쪽과 뒤쪽에 배열한 두 가지 경우에 대하여 모델링을 수행하여, 두 방법의 특성과 장단점을 고찰하였다. 이와 같은 모델링을 통하여 TSP 탐사자료의 해석, 역산 알고리듬의 개발 및 송수신 개발 등에 도움을 줄 수 있을 것으로 사료된다.

주요어 : TSP 탐사, 탄성파 모델링, 2차원, 유한 요소법, 송수신 배열

Abstract : TSP (Tunnel Seismic Profiling) survey is a technique for imaging and characterizing geological structures ahead of a tunnel face. The seismic modeling algorithm and the synthetic data could be helpful for TSP surveys. However, there is few algorithm to describe the propagation of the elastic waves around the tunnel. In this study, existing 2-dimensional seismic modeling algorithm using finite element method was modified to make a suitable algorithm for TSP modeling. Using this algorithm, TSP modeling was practiced in some models. And the synthetic data was analyzed to examine the propagation characteristics of the elastic waves. First of all, the modeling for the homogeneous tunnel model was practiced to examine the propagation characteristics of the direct waves in the vicinity of the tunnel. And the algorithm was applied to some models having reflector which is perpendicular or parallel to the excavation direction. From these, the propagation characteristics of the reflected waves were examined. Furthermore, two source-receiver arrays were used in respective models to investigate the properties of the two arrays. These modeling algorithm and synthetic data could be helpful in interpreting TSP survey data, developing inversion algorithm and designing new source-receiver arrays.

Keywords : TSP survey, seismic modeling, 2-dimensional, FEM, source-receiver array

서 론

터널 및 지하공간의 건설시 굴착 진행 중인 터널 주위의 지질구조를 파악하는 것은 안전하고 경제적인 시공을 위하여 매우 중요하다. 선진 조사공을 통하여 굴착예정 지역의 정보를 직접 얻는 것도 가능하나 이 방법은 비용이 많이 들고 터널굴착작업을 지연시키게 된다. 또한 선진 조사공은 조사범위가 제한적이며 굴착예정 지역에 존재하는 지질구조의 방향성을 정확히 파악할 수 없다. 이러한 문제점을 보완하기 위해 Sattle, Frey와 Amberg(1992)는 VSP 탐사를 터널 내에 적용하였는데

현재 이 방법은 HSP(horizontal seismic profiling) 또는 TSP (tunnel seismic profiling) 탐사로 불리고 있다.

그러나 아직 터널 주위에서의 파의 거동양상을 정확하게 보여줄 수 있는 인공 탄성파합성 알고리듬이 불충분하여 탐사 방법의 개선 및 탐사 자료의 해석에 큰 도움을 주지 못하고 있다. 이에 본 연구에서는 터널 주위에 몇 가지 다른 형태의 지질구조가 존재하는 경우 파의 거동양상 및 각각의 경우에 얻을 수 있는 인공합성 탄성파단면에 대해 수치 해석적인 모델링 방법을 통하여 연구하고자 하였다.

수치 해석적인 모델링 방법 중 가장 많이 이용되고 있는 것

*2002년 8월 16일 접수

1) 서울대학교 지구환경시스템공학부

은 유한 차분법과 유한 요소법이다. Alterman과 Karal(1968)에 의해 처음으로 지구물리학에 적용된 유한 차분법은 Madariaga(1976)의 Staggered grid와 Dablain(1986)의 고차 유한 차분법 등으로 발전하여 이용되고 있다. 유한 차분법은 계산 시간이 적게 드는 반면에 경계면의 처리가 어려운 단점이 있다. 유한 요소법은 Lysmer와 Drake(1972)에 의해 처음 적용된 이후 Marfurt(1984) 등에 의해 발전하였는데 복잡한 경계면의 처리는 용이하나 계산 시간이 오래 걸리고 기억 용량을 많이 필요로 하는 단점을 가지고 있다.

본 연구에서는 이 중에서 경계조건의 처리에 보다 적합한 유한 요소법을 이용하여 2차원 시간영역 탄성파 모델링을 수행하였다. 적당한 크기의 시간간격과 격자간격을 사용하여 인공합성 탄성파단면과 각 시간대별 파면단면을 함께 구해 주변의 지질구조에 따른 터널 주위에서 P파, S파, 레일리파 등의 거동양상을 정확히 파악하고자 하였다. 또한 송신원이 수신기의 앞쪽에 배열된 경우와 뒤쪽에 배열된 경우 등 송수신 배열이 다른 2가지 방법으로 모델링을 수행하여 두 방법의 탐사 가능거리 및 탐사자료 해석의 용이성에 대하여 분석을 하였다.

본 문

탄성파동방정식

3차원 직각좌표계에서 균질(homogeneous), 동방성(isotropic) 매질에 대한 파동방정식은 다음과 같은 식으로 표현된다.

$$\rho \frac{\partial^2 \mathbf{U}}{\partial t^2} = (\lambda + 2\mu) \nabla(\nabla \cdot \mathbf{U}) - \mu \nabla \times \nabla \times \mathbf{U} \quad (1)$$

여기서, $\mathbf{U} = [u \ v \ w]^T$ 는 직각좌표계에서 x, y, z 방향의 변위를 나타내는 벡터이고, ρ, λ, μ 는 각각 매질의 밀도, 라메(Lamé) 상수, 강성률(rigidity)이다.

식 (1)을 전개하고 방향에 대한 변화율을 0으로 가정하면, x, z 방향에만 의존하는 다음과 같은 2차원 파동방정식을 얻을 수 있다.

$$\rho \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = (\lambda + 2\mu) \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial x \partial z} \right) + \mu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial z^2} - \frac{\partial^2 w}{\partial x \partial z} \right) \quad (2-1)$$

$$\rho \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} = (\lambda + 2\mu) \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x \partial z} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right) + \mu \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} - \frac{\partial^2 u}{\partial x \partial z} \right) \quad (2-2)$$

이 식에 진원항을 포함하여 정리하면 다음과 같은 식을 얻을 수 있다.

$$\frac{\partial^2 u}{\partial z^2} = \alpha^2 \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \beta^2 \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} + (\alpha^2 - \beta^2) \frac{\partial^2 w}{\partial x \partial z} + f_x \quad (3-1)$$

$$\frac{\partial^2 w}{\partial z^2} = \beta^2 \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \alpha^2 \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} + (\alpha^2 - \beta^2) \frac{\partial^2 u}{\partial x \partial z} + f_x \quad (3-2)$$

여기서, $\alpha = \left(\frac{\lambda + 2\mu}{\rho} \right)^{1/2}$, $\beta = \left(\frac{\mu}{\rho} \right)^{1/2}$ 로 각각 매질의 P파 속도와 S파 속도이다.

유한요소 방정식

변분법을 이용하여 식 (2)의 파동방정식을 전개하여 다음과 같은 시간영역 유한요소 방정식을 구할 수 있다.

$$\mathbf{M} \ddot{\mathbf{U}}(t) + \mathbf{KU}(t) = \mathbf{F}(t) \quad (4)$$

여기서, \mathbf{M} 은 질량행렬, \mathbf{K} 는 강성행렬이며 \mathbf{U} 는 자유도가 2인 각 요소의 절점에서의 변위벡터이다. 변분법을 통한 유한요소 방정식의 유도과정과 질량행렬 및 강성행렬을 구하는 과정은 본 논문에서는 생략하였다.

식 (3)을 정리하면 다음과 같은 식을 얻을 수 있으며

$$\ddot{\mathbf{U}}(t) = \mathbf{M}^{-1}(-\mathbf{KU}(t) + \mathbf{F}(t)) \quad (5)$$

시간에 대한 2차 미분항을 다음의 중앙 유한차분식을 이용하여 표현하면

$$\ddot{\mathbf{U}}(t) = \frac{\mathbf{U}(t + \Delta t) - 2\mathbf{U}(t) + \mathbf{U}(t - \Delta t)}{\Delta t^2} \quad (6)$$

다음의 방정식을 얻을 수 있다.

$$\mathbf{U}(t + \Delta t) = 2\mathbf{U}(t) - \mathbf{U}(t - \Delta t) + \Delta t^2 \mathbf{M}^{-1}(-\mathbf{KU}(t) + \mathbf{F}(t)) \quad (7)$$

시간영역의 해는 식 (7)을 이용하여 시간적분을 수행하여 구할 수 있다.

본 연구에서는 삼각형 및 사각형 요소를 사용하여 질량행렬 및 강성행렬을 구하였다. 그리고 질량행렬의 역연산에 의한 계산 속도의 저하를 막기 위해 Lumped 질량행렬을 사용하였다.

격자 생성

유한 요소법은 다양한 요소를 이용하여 여러 가지 형태의 영역을 모사할 수 있으며 이미 많은 격자 생성 알고리즘이 개발되어 있다. 본 논문에서 사용한 모델링 알고리즘은 우선 2층 이상의 격자를 만든 후 1층의 요소들을 제거하여 1층과 2층의 경계에서 원하는 지표 지형을 얻는 방법을 이용하였다 (이종하, 2001). 제거 후 남은 격자에 대하여 새로운 격자 번호를 지정하고, 각 요소와 관련된 격자를 찾아 그 좌표와 요소의 물성 관련 변수를 저장하여 요소의 강성행렬 및 질량행렬을 구하는데 사용하였다.

안정 조건 및 분산 관계

유한 요소법을 이용하여 수치적으로 해를 구할 때 시간간격과 격자간격의 크기가 작을수록 수치해가 이론해에 접근하게 되나, 컴퓨터의 기억용량이 커지고 계산시간이 길어져야만 한다. 반대로 격자의 크기가 충분히 작지 못하면 분산이 일어나

탄성파의 전파가 왜곡되어 나타날 수 있다. 따라서 매질의 물성 등 매개 변수들에 따라 적당한 시간간격과 격자간격을 정해야 한다. 음향 파동방정식의 경우 Lumped 질량행렬을 사용할 때의 안정 조건은 다음과 같다(부록 A).

$$p = \frac{\alpha \Delta t}{\Delta x} \leq 1 \quad (8)$$

따라서 본 연구에서는 $p = 1.0$ 으로 정하여 모델링을 수행하였다.

그리고 Lumped 질량행렬을 이용한 시간영역 탄성 파동방정식의 경우, 분산 해석을 한 결과 위상 속도의 오차를 1% 이내로 유지하기 위해 필요한 파장 당 격자수 $G_s = (\lambda_s / \Delta x)$ 는 14 이상이고 오차를 2% 이내로 유지하기 위해 필요한 파장 당 격자수는 10 이상이다(부록 B). 본 연구에서는 정확한 해를 구하면서도 계산시간을 최소화할 수 있도록 실험적 반복을 통하여 파장 당 격자수를 15로 정하여 모델링을 수행하였다.

경계조건

지구 매질 내에서 탄성파는 무한히 전파하나, 수치 모델링 시에는 컴퓨터의 기억 용량 등의 한계로 무한 매질에 대한 모델링을 수행할 수는 없다. 따라서 유한의 모델링 영역을 설정하게 되고 이에 따른 인위적 경계가 나타나게 된다. 이러한 인위적 경계에 의해 반사파가 발생하게 되는데 이를 제거하기 위한 여러 가지 기법들이 개발되었다. 본 연구에서는 상하좌우 4면에 스펜지 경계조건(sponge boundary condition)을 적용하여 의도하지 않은 반사파를 최소화하였다. 모델의 가장자리에 적당한 크기의 감쇄대를 설정하여 매 시간마다 감쇄대의 안쪽부터 바깥쪽까지 1부터 0.98까지의 선형적인 가중계수를 곱하여 반사파를 제거하는 효과를 얻을 수 있었다(신창수 외, 1993).

모델반응

본 연구에서는 굴착중인 터널이 존재하는 지형의 수평단면을 모델로 설정하여 2차원 모델링을 수행하였다. 하나의 송신원과 46개의 수진기를 이용하였으며, 터널굴착방향과 수직인 반사면이 존재하는 모델, 터널굴착방향과 평행인 반사면이 존재하는 모델 등에 대하여 각각 인공합성 탄성파단면과 파면단면을 함께 작성하였다. 그리고 각각의 모델에 대하여 송신원이 수진기의 뒤쪽에 배열된 경우(배열A)와 앞쪽에 배열된 경우(배열B) 두 가지로 모델링을 수행하여 두 방법의 특성과 장단점을 파악하고자 하였다. 탄성파단면과 함께 작성된 파면단면은 탄성파 전파의 시간적, 공간적 경로 및 탄성파의 모드 전환 등을 이해하기 쉽게 나타내어 주며, 인공합성 탄성파단면의 해석에 도움을 줄 수 있었다. 본 논문에서는 직접파 및 반사파를 상대적으로 잘 나타내고 있는 수직 성분을 이용하여 파의 전파를 분석하였다. 또한 보다 정확한 묘사를 위하여 인공합성

탄성파단면을 wiggle trace 뿐만 아니라 image 형식으로도 작성하였다.

모델링에 사용된 모델의 크기는 150m×200m이며 주변 매질의 밀도는 3.0 g/cm^3 이고 P파 속도와 S파 속도는 각각 5000 m/sec, 2900 m/sec로 포아송비는 약 0.247이다. 그리고 파쇄대가 존재하는 모델의 경우에는 파쇄대로 가정한 저속도 층의 밀도는 2.0 g/cm^3 , P파 속도와 S파 속도는 각각 3300 m/sec, 2000 m/sec로 가정하였으며 포아송비는 약 0.210이다. 송신원은 최대 주파수 600 Hz의 가우시안 1차 미분함수를 이용하였다. 모델에서 터널의 길이는 120m로 동일하나 배열A에 사용된 모델의 경우 송신원을 터널 입구로부터 50m 지점에 배치하였으며 수진기는 터널 입구로부터 70m지점과 120m지점 사이에 총 46개를 배열하였고 배열B에 사용된 모델의 경우 송신원을 터널 입구로부터 110m 지점에 배치하였으며 수진기는 터널 입구로부터 40m지점과 90m지점 사이에 총 46개를 배열하였다. 모델의 세부적인 형태와 파쇄대의 위치 등은 다음에 이어지는 각각의 경우에 포함시켰다.

파쇄대로 가정한 반사면이 존재하는 모델에 대한 인공합성 탄성파단면의 분석을 위하여, 균질매질의 터널모델에 대한 탄성파 단면을 먼저 구하여 각각의 모델로부터 얻은 탄성파단면의 값과 비교하여 반사 이벤트의 정확한 위치를 알아내었다. 그리고 탄성파단면과 함께 구하였던 파면단면을 이용하여 반사파의 시간적, 공간적인 변화를 파악할 수 있었고, 반사 이벤트를 다시 한번 검증할 수 있었다.

Model I : 굴착방향과 수직인 반사면이 존재하는 모델

배열 A

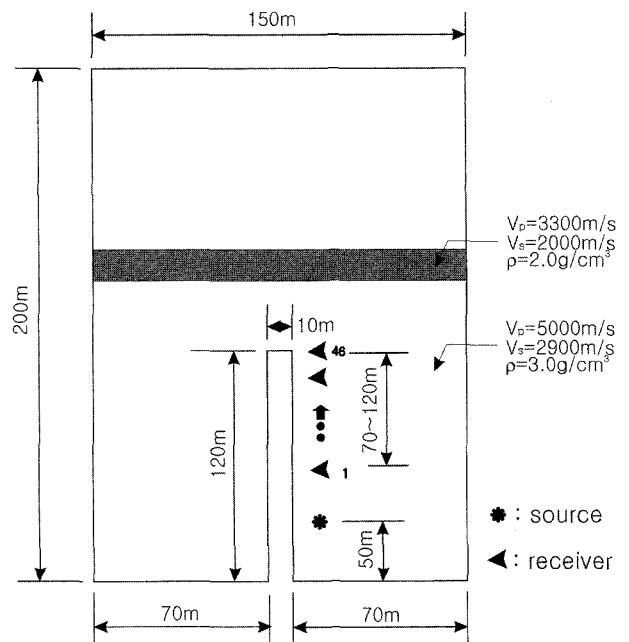


Fig. 1. Model I-A: Model having the reflector which is perpendicular to the excavation direction.

TSP 탐사의 주요 탐사대상중 하나인 파쇄대가 존재하는 경우를 가정하여 모델링을 수행하였는데 파쇄대는 터널굴착방향과 수직으로 존재 경우와 평행하게 존재하는 경우 그리고 비스듬한 기울기로 존재하는 경우로 나누어 모델링을 수행하였다. 비스듬한 기울기의 경우 수직과 수평기울기의 모델링 자료와 거의 유사한 관계로 본 연구에서는 제외하였다. 즉 경사면의 기울기가 터널굴착방향과 수직에 가까울수록 수직 반사면에 대한 모델링 자료와 흡사한 형태의 탄성파단면을 얻을 수 있었고, 경사면의 기울기가 터널굴착방향과 평행에 가까울수록 평행 반사면에 대한 모델링 자료와 흡사한 형태의 탄성파단면을 얻을 수 있었는데, 비스듬한 경사의 모델링 결과로부터는 그 이상의 의미를 찾을 수 없어서 포함시키지 않았다.

첫 번째로 터널로부터 20m 거리에 터널굴착방향과 수직인 반사면이 존재하는 경우를 가정하였는데, 모델의 형태와 송수신 배열은 Fig. 1과 같다.

Fig. 2는 이 모델에 대하여 각각 10 ms, 20 ms, 30 ms, 40 ms에서 구한 파면단면이다. 직접파 외에 파쇄대로 가정한 반사면에서 반사되어오는 반사파들도 관찰되고 있다. Fig. 3은 배열 A와 같은 송수신 배열을 통하여 80 ms 동안 모델링을 수행한 결과를 보여주고 있다. P파와 레일리파의 직접파와 회절파가 나타나고 있으며, 아랫부분에 반사되어 온 P파(①)와 그로부터 터널의 모서리에서 새롭게 발생한 레일리파(②)가 다시 전파

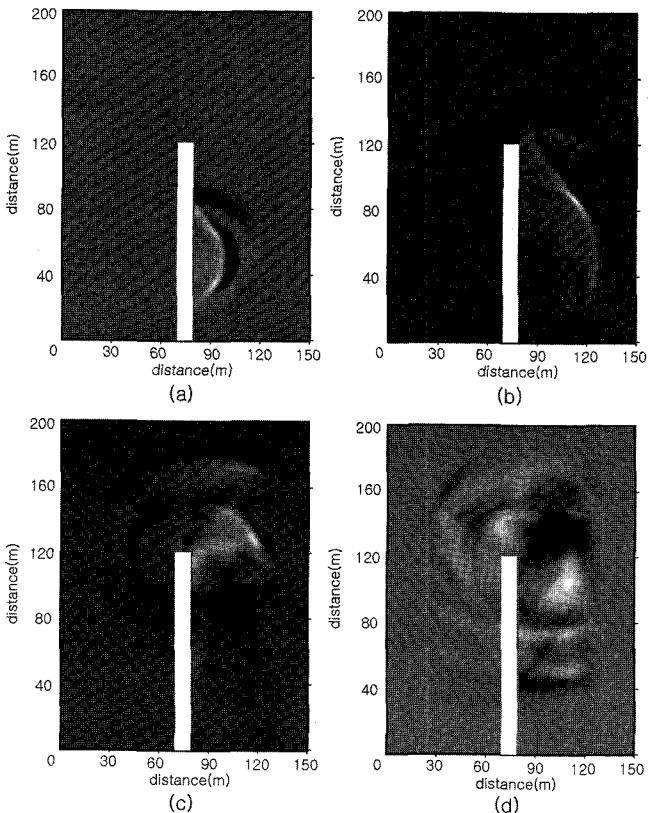


Fig. 2. The snapshots of the wavefield on Model I-A at (a) 10 ms, (b) 20 ms, (c) 30 ms and (d) 40 ms.

하고 있음을 알 수 있다. 그 밖에 ③으로 표시된 위치에 파쇄대의 뒷면에서 반사되어 온 파가 있는 것으로 분석되었다. 하지만 진폭이 상대적으로 매우 작아서 뚜렷하게 나타나지는 않았다.

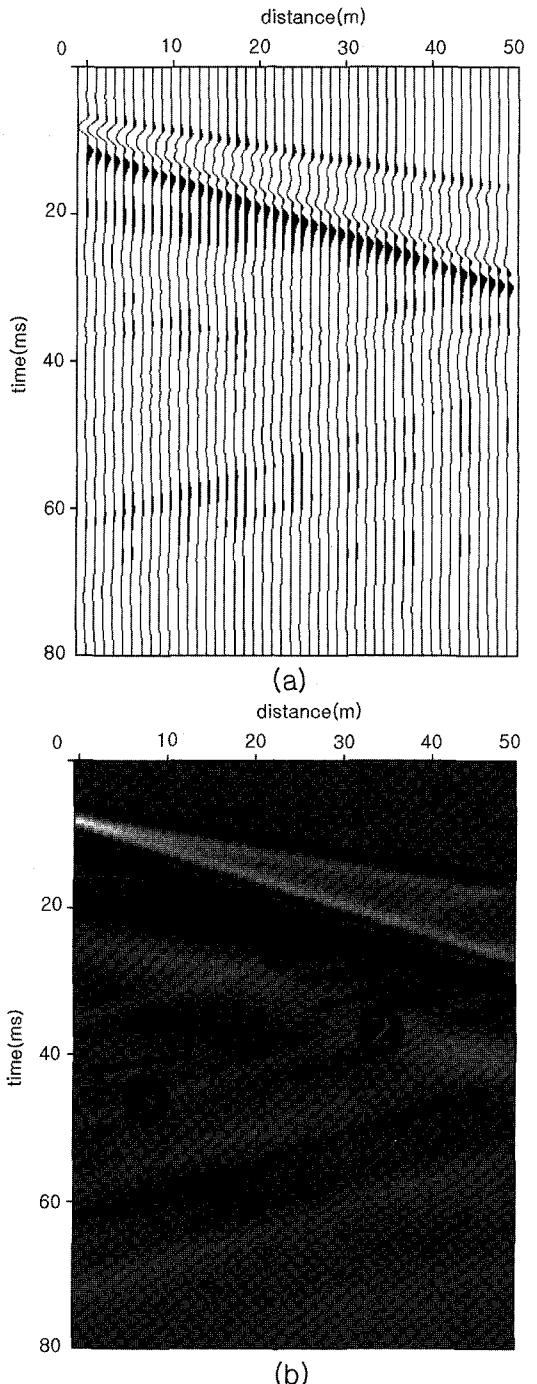


Fig. 3. The synthetic seismogram of Model I-A in (a) wiggle trace and (b) image.

① P-wave which is reflected from the front side of the fracture, ② Rayleigh wave generated from reflected P-wave(①) at the corner of the tunnel, ③ P-wave which is reflected from the rear side of the fracture

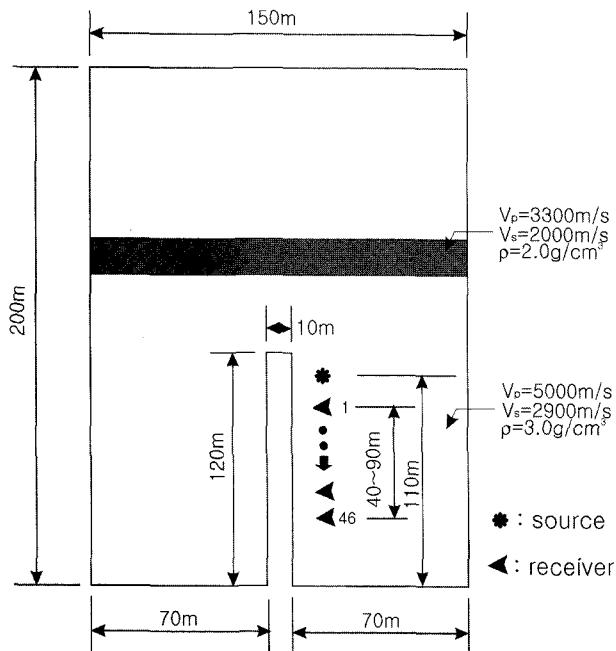


Fig. 4. Model I-B: Model having the reflector which is perpendicular to the excavation direction.

배열 B

이번엔 배열 B로 수직인 반사면이 존재하는 경우에 대하여 모델링을 수행하였는데, 모델의 형태와 송수신 배열은 Fig. 4 와 같다.

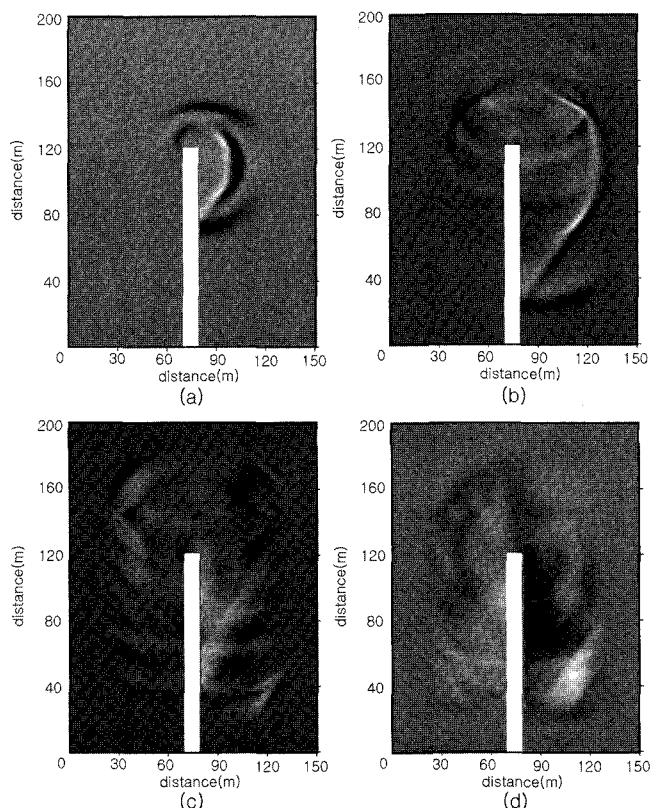


Fig. 5. The snapshots of the wavefield on Model I-B at (a) 10 ms, (b) 20 ms, (c) 30 ms and (d) 40 ms.

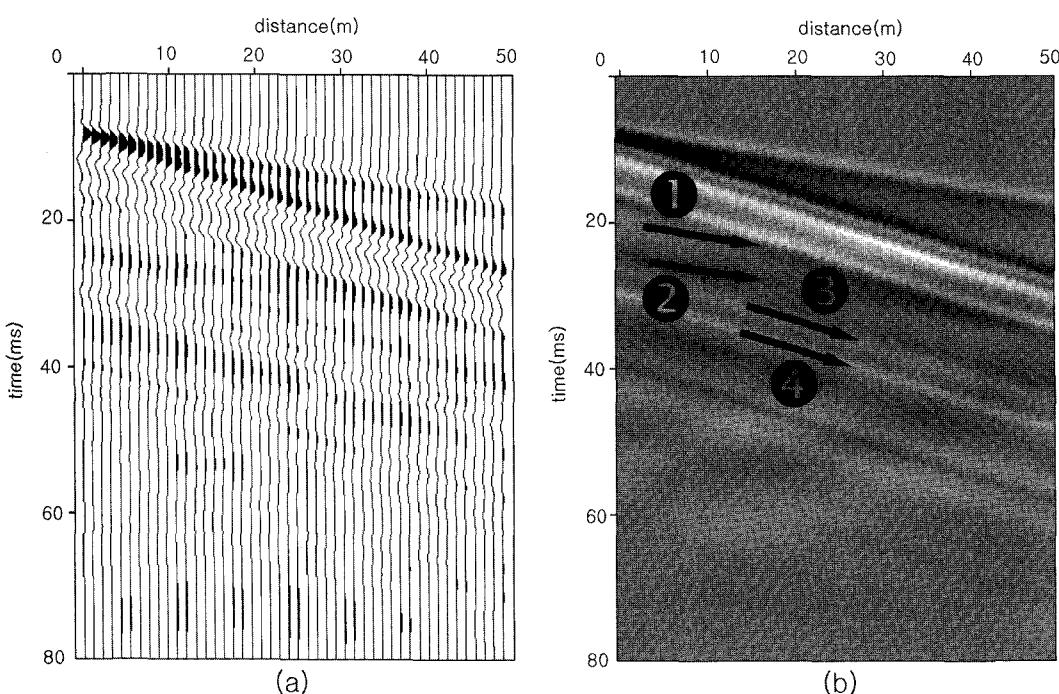


Fig. 6. The synthetic seismogram of Model I-B in (a) wiggle trace and (b) image.

① P-wave which is reflected from the front side of the fracture, ② P-wave which is reflected from the rear side of the fracture, ③ Rayleigh wave generated from reflected P-wave(①) at the corner of the tunnel, ④ Rayleigh wave generated from reflected P-wave(②) at the corner of the tunnel

Fig. 5는 이 모델에 대하여 각각 10 ms, 20 ms, 30 ms, 40 ms에서 구한 파면단면이다. 배열 A의 경우와 같이 직접파 외에 파쇄대로 가정한 반사면에서 반사파가 전파되어 오는 것을 관찰할 수 있다. 하지만 배열 A보다 반사파가 상대적으로 뚜렷함을 알 수 있다. Fig. 6은 배열 B와 같은 송수신 배열을 통하여 80 ms 동안 모델링을 수행한 결과를 보여주고 있다. P파와 레일리파의 직접파와 회절파가 나타나고 있으며 아랫부분에는 파쇄대의 앞면에서 반사되어 온 P파(①), 뒷면에서 반사되어 온 P파(②) 그리고 이 둘이 터널의 모서리에서 새로운 송신원으로 작용하여 발생한 표면파(③, ④)가 전파하는 것을 관찰할 수 있다.

앞의 배열 A와 배열 B를 비교하여 보면, 두 경우에 동일하게 파쇄대로 가정한 반사면에서 반사파가 발생하고 이 반사파에 의해 터널의 모서리에서 새로운 표면파가 발생하고 있음을 알 수 있다. 또한 두 배열의 경우 동일하게 반사 이벤트는 거의 직선에 가까운 형태로 나타났다. 반면 파면단면의 비교에서도 볼 수 있었듯이 배열 B의 경우가 배열 A의 경우보다 반사파가 상대적으로 뚜렷하게 나타나는 것을 알 수 있다. 이는 배열 B의 경우 상대적으로 송신원과 수신기의 거리가 가깝기 때문으로 사료된다. 두 방법에 의한 탄성파단면의 또 다른 차이점은 배열 A의 경우에는 직접파와 반사파의 기울기가 반대방향이라서 반사파를 쉽게 구별해 낼 수 있는 반면 배열 B의 경우에는 직접파와 반사파의 기울기가 같은 방향이라서 현장 탐사결과 해석시 둘의 구분이 쉽지 않음을 예상할 수 있다.

Model II : 굴착방향과 평행인 반사면이 존재하는 모델

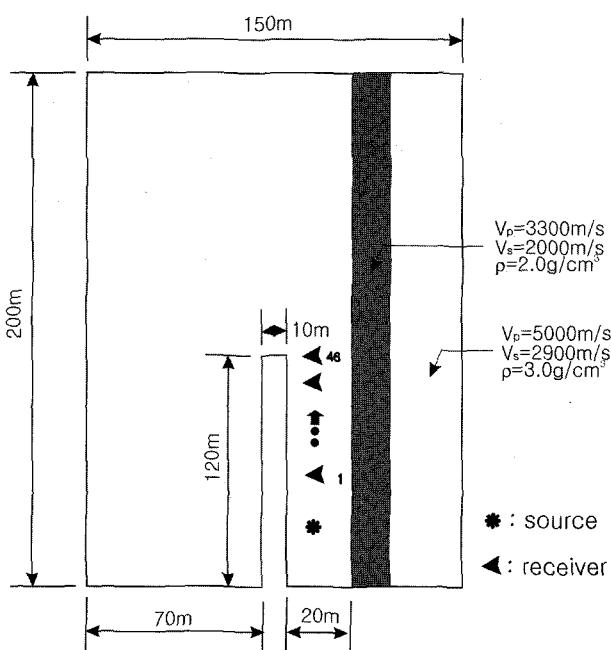


Fig. 7. Model II-A : Model having the reflector which is parallel to the excavation direction.

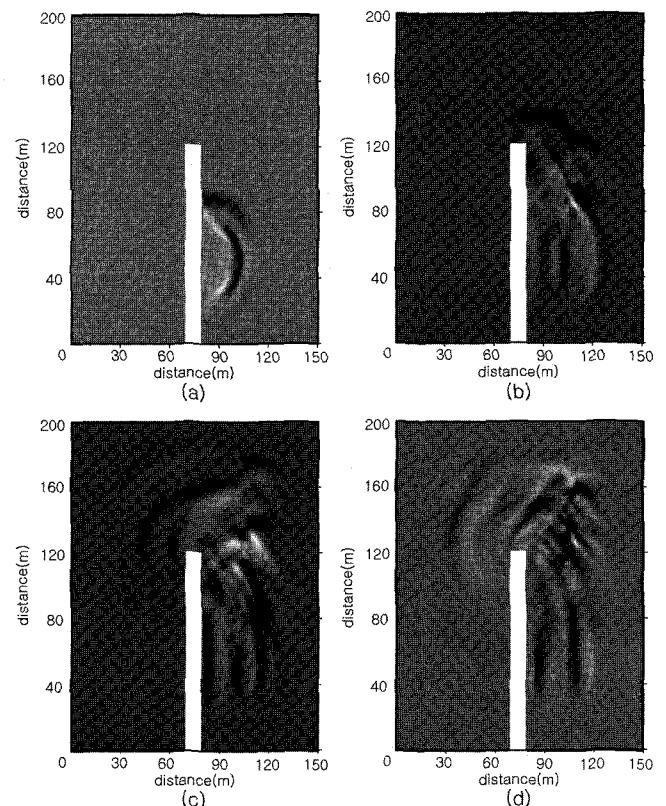


Fig. 8. The snapshots of the wavefield on Model II-A at (a) 10 ms, (b) 20 ms, (c) 30 ms and (d) 40 ms.

배열 A

다음으로 배열 A를 이용하여 Fig. 7과 같이 터널로부터 20m 거리에 터널굴착방향과 평행인 반사면이 존재하는 경우를 가정하여 모델링을 수행하였다.

Fig. 8은 이 모델에 대하여 각각 10 ms, 20 ms, 30 ms, 40 ms에서 구한 파면단면이다. 송신원의 방향성 때문에 수직반사면이 존재하는 경우와는 달리 반사파 중에서 S파의 반사파가 가장 뚜렷하게 나타나는 것을 알 수 있다. Fig. 9는 배열 A와 같은 송수신 배열을 통하여 80 ms 동안 모델링을 수행한 결과를 보여주고 있다. 직접파의 아래쪽에 파쇄대의 앞면에서 반사되어 온 S파(①)와 뒷면에서 반사되어 온 S파(②)가 차례로 나타나고 있다. 같은 배열을 이용한 수직반사면의 경우(모델 I-A)와 달리 반사되어 온 파들이 잘 관찰되는 것은 상대적으로 작은 거리를 이동하여 파의 감쇠가 적었기 때문으로 사료된다. 그리고 모델 I-A(수직반사면, 송수신배열 동일)와는 다르게 반사이벤트가 직선이 아닌 완만한 곡선의 형태로 나타나고 있다. ①로 표시된 반사파의 경우, 송신원과 반사면과의 거리가 짧아서 레일리파의 직접파에 가려져 분석을 하지 않고 육안으로만 관찰하기는 어려웠다. 그리고 파쇄대 구조가 아닌 2층 구조로 된 모델에 대하여 모델링한 결과와의 비교, 분석을 통하여 ②로 표시된 반사파가 파쇄대의 뒷면에서 반사되어 온 파임을 검증하였다.

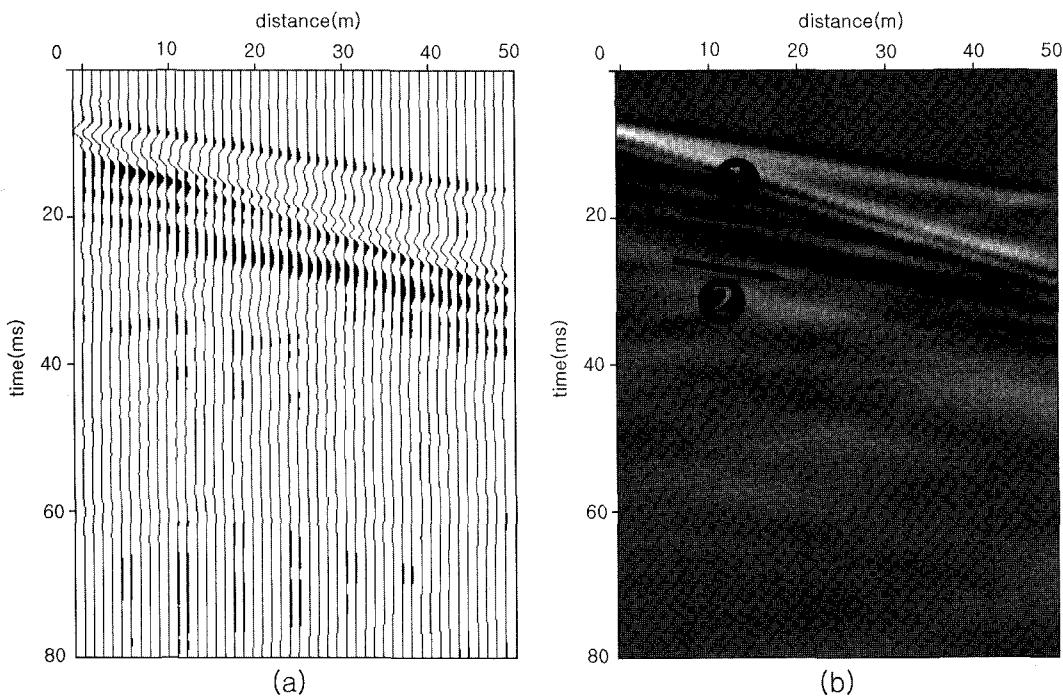


Fig. 9. The synthetic seismogram of Model II-A in (a) wiggle trace and (b) image.

① S-wave which is reflected from the front side of the fracture, ② S-wave which is reflected from the rear side of the fracture

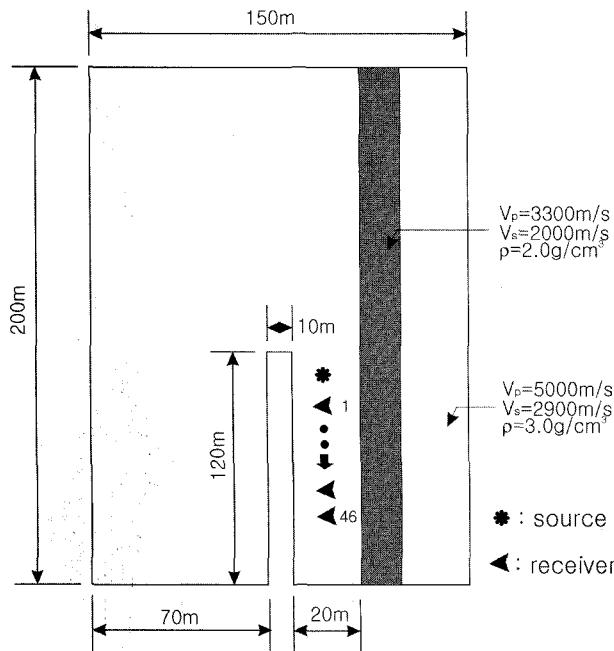


Fig. 10. Model II-B : Model having the reflector which is parallel to the excavation direction.

배열 B

마지막으로 배열 B와 같은 송수신 배열을 통하여 터널굴착방향과 평행인 반사면이 존재하는 경우를 가정하여 모델링을 수행하였는데, 모델의 형태와 송수신 배열은 Fig. 10과 같다.

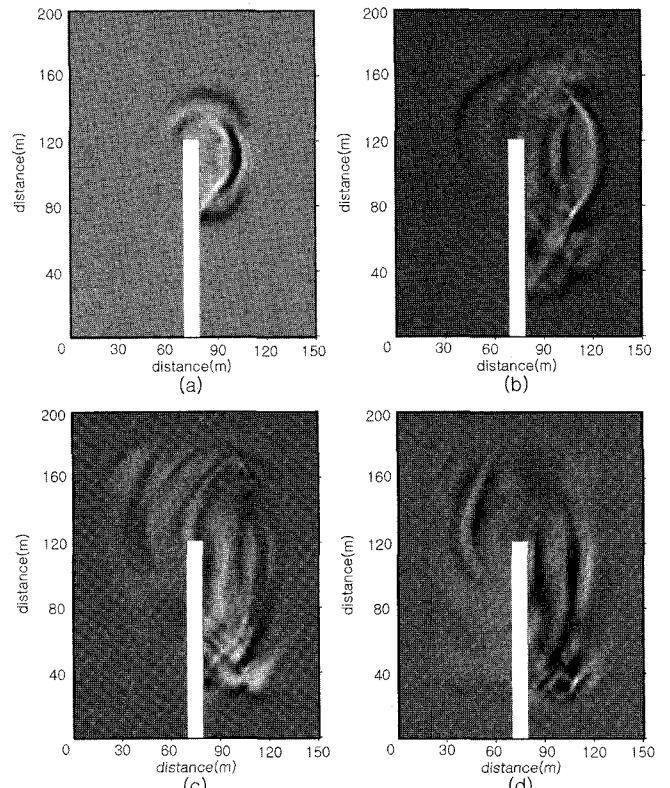


Fig. 11. The snapshots of the wavefield on Model II-B at (a) 10 ms, (b) 20 ms, (c) 30 ms and (d) 40 ms.

Fig. 11은 ① 모델에 대하여 각각 10 ms, 20 ms, 30 ms, 40 ms에서 구한 파면단면이다. 배열 A에서 송신원만 수진기의

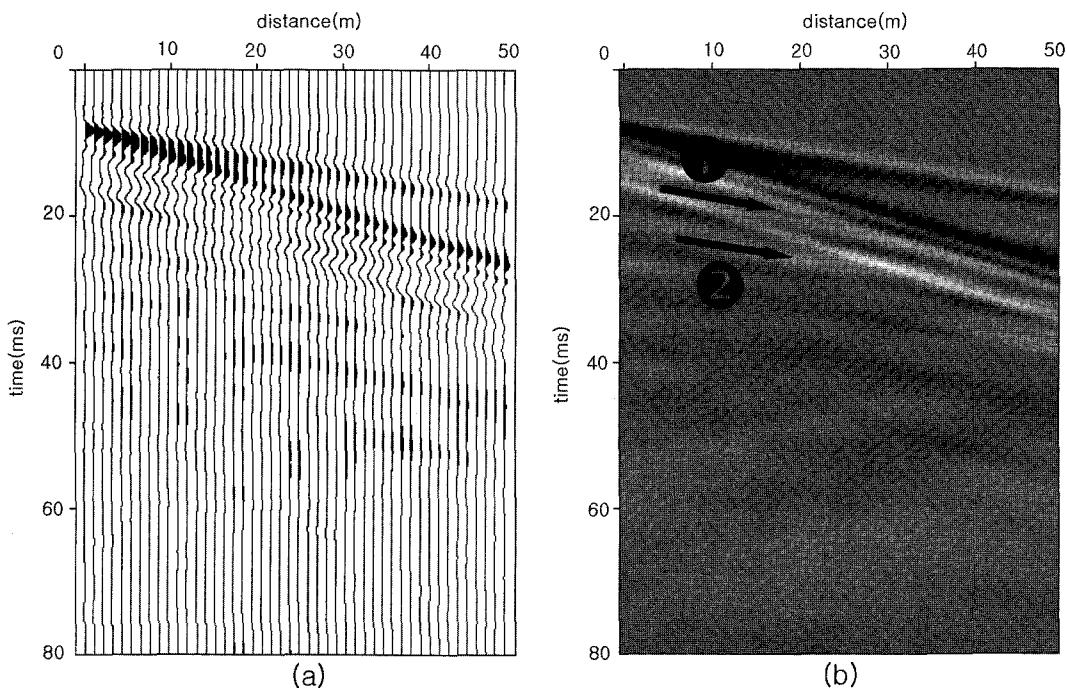


Fig. 12. The synthetic seismogram of Model II-B in (a) wiggle trace and (b) image.

① S-wave which is reflected from the front side of the fracture, ② S-wave which is reflected from the rear side of the fracture

뒤쪽에서 앞쪽으로 옮긴 형태이므로 매우 흡사한 형태의 파면 단면이 구해짐을 알 수 있다. 즉, 배열 A와 같이 S파의 반사파가 뚜렷하게 나타나고 있으며 파쇄대의 앞면과 뒷면에서 각각 S파의 반사파가 발생하고 있다. Fig. 12는 80 ms 동안 모델링을 수행한 결과를 보여주고 있다. 직접파의 아래쪽에 파쇄대의 앞면에서 반사되어 온 S파(①)와 뒷면에서 반사되어 온 S파(②)가 차례로 나타나고 있는데 배열A와 거의 같은 형태인 것을 알 수 있다. 이는 배열A와 배열B를 비교하여 보면 쉽게 알 수 있듯이 반사면을 기준으로 송신원의 위치만이 좌우로 바뀌었기 때문이다. 또한 배열 A와 비슷하게 ①로 표시된 반사파는 레일리파의 직접파에 의해 잘 나타나지 않고 있다. 그리고 ②로 표시된 반사파의 검증은 앞의 경우와 동일하게 수행하였다. 앞에서 살펴본 수직반사면이 존재하는 모델과 비교하여 보면, 모델 I-B(수직반사면, 송수신배열 동일)와는 달리 반사 이벤트가 직선이 아닌 완만한 곡선의 형태로 나타나고 있다.

결 론

본 연구에서는 터널 주변에서 파의 전파 특성을 고찰하여 TSP 탐사의 자료해석 및 송수신 배열에 도움을 주기 위해 2차원 유한요소 탄성파 모델링 알고리듬을 이용하여 인공합성 탄성파단면과 각 시간대별 파면단면을 작성하였다. 우선 균질 매질의 모델에 대한 모델링을 통하여 터널 주변에서 P파, S파, 레일리파 등의 전파특성과 터널 전방의 모서리에 의한 파의

회절 현상을 확인할 수 있었다. 그리고 터널 굴착방향과 수직, 수평 그리고 비스듬한 경사의 반사면이 존재하는 모델에 대한 모델링을 통하여 인공합성 탄성파단면과 파면단면을 동시에 구함으로써 P파, S파, 레일리파 등의 반사 및 회절 등의 특성을 파악하였다. 또한 송신원이 수진기의 뒤쪽과 앞쪽에 배열된 경우를 비교하여 두 방법의 특성과 장단점을 분석하였다. 본 연구를 통하여 다음과 같은 결과를 얻었다.

1. 균질매질의 경우 그리고 터널 전방에 파쇄대 등의 반사면이 존재하는 경우, 표면파 및 반사되어 온 P파, S파 등이 터널의 모서리 등 불규칙한 지형에서 송신원으로 작용하여 새로운 표면파를 발생하게 된다. 이러한 이벤트들은 반사파로 보여지거나, 반사파에 의한 이벤트를 가리는 등 자료의 해석 시 어려움을 줄 수 있음을 확인하였다.

2. 터널 굴착방향과 수직인 반사면이 존재하는 경우에는 반사파 이벤트가 기울기가 P파, S파, 레일리파 등의 속도와 일치하는 직선의 형태로 나타나는 반면, 평행인 반사면이 존재하는 경우에는 반사파 이벤트가 완만한 곡선의 형태로 나타남을 확인하였다.

3. 터널 굴착방향과 평행인 반사면이 존재하는 경우에는 송신원의 위치가 수진기의 앞에 배열된 방법과 뒤에 배열된 방법을 통해 거의 동일한 결과를 얻을 수 있었다. 그러나 터널 굴착방향과 수직인 반사면이 존재하는 경우에는 두 가지 방법이 차이점을 나타냈다. 먼저 송신원이 수진기의 뒤쪽에 배열된 경우에는 직접파와 반사파의 기울기가 반대방향이어서 둘의 구분이 쉬운 반면 송신기와 파쇄대의 거리가 멀어져 반사파의

진폭이 작아졌다. 반대로 송신원이 수진기의 앞쪽에 배열된 경우에는 직접파과 반사파의 기울기가 같은 방향이라는 단점이 있는 반면 송신기와 파쇄대의 거리가 가까워지므로 반사파의 진폭이 상대적으로 커 보다 먼 거리의 반사면까지 탐지할 수 있음을 확인하였다.

앞으로 진원의 종류 및 송수신 배열의 변화를 주어 위와 같은 모델링을 수행한다면 TSP 탐사의 현장 자료해석, 역산 알고리듬의 개발 및 표면파의 영향을 최소화할 수 있는 탐사 방법의 개발에도 도움을 줄 수 있을 것으로 사료된다.

사 사

본 연구는 에너지자원 기술개발사업으로 한국지질자원연구원 기술개발사업 위탁과제의 일환으로 수행되었음을 밝힙니다.

참고문헌

- 민경덕, 서정희, 권병두 공저, 1987, 응용지구물리학: 우성출판사.
 신창수 외, 1993, 수치모형 프로그램에 의한 인공탄성파 합성 및 완전파형 역산연구: 한국자원연구소 보고서.
 이종하, 2001, 불규칙 지형을 고려한 2차원 유한요소 탄성파 모델링: 서울대학교 공학석사 논문.
 차성수 외, 1999, TSP탐사를 이용한 지하유류저장공동 및 도로터널의 시공 중 설계변경 사례 고찰: 한국지구물리탐사학회 1999년도 제 2회 학술발표회(건설현장에 필요한 물리탐사기술 심포지움), p. 117-136.
 Cha, S. S., Lee, J. M., and Nam, K. C., 1996, Prediction of Discontinuity and Determination of Rock Properties for Effective Tunnel Construction Using Vertical Seismic Profiles Applied in Tunnel: *Proceeding of the Korea-Japan Joint Symposium on Rock Engineering*, p. 269-273.
 Becker, Eric B., Carey, Graham F., and Oden, J. Tinsley, 1981, Finite Elements vol. 1: Prentice-Hall.
 Sattle, G., Frey, P., and Amberg, R., 1992, Prediction ahead of the Tunnel Face by Seismic Method - Pilot Project in Centovalli Tunnel, Locarno, Switzerland: *First Break*, vol. 10, p. 10-25.
 Kelly, K. R. and Marfurt, K. J. (edited by), 1990, Numerical Modeling of Seismic Wave Propagation: SEG (Geophysics reprint series).
 Sheriff, R. E. and Geldart, L. P., 1982, Exploration Seismology : Cambridge University Press.
 Inazaki, T., Kurahashi, T., and Research Group on HSP, 1996, Imaging and Characterizing Fractures ahead of Tunnel Face Using In-tunnel HSP Method: *Proceeding of the Symposium on the Application of Geophysics to Engineering and Environmental Problems*, p. 597-600.
 Inazaki, T. et al., 1999, Stepwise Application of Horizontal Seismic Profiling for Tunnel Prediction ahead of the Face: *The Leading Edge*, 18(12), p. 1429-1431.

부 록

부록 A. 안정조건

$$h^2 \frac{e^{a(t+\Delta t)} - 2e^{at} + e^{a(t-\Delta t)}}{\Delta t^2} = -\frac{1}{2}$$

$$[-(\alpha^2 + \beta^2)(D_{xx} + D_{zz}) \pm (\alpha^2 - \beta^2) \sqrt{(D_{xx} - D_{zz})^2 + 4D_{xz}^2}] e^{at}$$

여기서

$$A = e^{a\Delta t}$$

$$B = \frac{1}{2}[-(\alpha^2 + \beta^2)(D_{xx} + D_{zz}) \pm (\alpha^2 - \beta^2) \sqrt{(D_{xx} - D_{zz})^2 + 4D_{xz}^2}]$$

라 놓으면

위 식은 다음과 같이 된다.

$$h^2 \frac{A - 2 + \frac{1}{A}}{\Delta t^2} = -B$$

A에 대하여 정리하면 다음과 같고

$$A = \frac{2 - B \frac{\Delta t^2}{h^2} \pm \sqrt{\left(2 - B \frac{\Delta t^2}{h^2}\right)^2 - 4}}{2}$$

A가 중립을 유지하려면 아래의 조건을 만족해야 한다.

$$\left(2 - B \frac{\Delta t^2}{h^2}\right)^2 - 4 \leq 0$$

이 식을 풀어서 정리하면 다음의 식을 얻을 수 있다.

$$\frac{\Delta t^2}{h^2} \leq \frac{4}{B}$$

$$= \frac{8}{-(\alpha^2 + \beta^2)(D_{xx} + D_{zz}) \pm (\alpha^2 - \beta^2) \sqrt{(D_{xx} - D_{zz})^2 + 4D_{xz}^2}}$$

여기서

$$D_{xx} = -\frac{4}{3} \sin^2 k_z \Delta z \left(1 + 2 \cos^2 \frac{k_x \Delta x}{2}\right)$$

$$D_{zz} = -\frac{4}{3} \sin^2 k_z \Delta x \left(1 + 2 \cos^2 \frac{k_z \Delta z}{2}\right)$$

$$D_{xz} = \sin k_x \Delta x \sin k_z \Delta z$$

이므로

$$\frac{\alpha \Delta t}{h} \leq 1$$

즉, $P \leq 1$ 이다.

부록 B. 분산해석

시간영역에서

$$\frac{\partial^2}{\partial t^2} = \frac{(\alpha^2 + \beta^2)(\partial_{xx} + \partial_{zz}) \mp (\alpha^2 - \beta^2)\sqrt{(\partial_{xx} - \partial_{zz})^2 - 4\partial_{xz}^2}}{2}$$

위 식에 eigenvector $e^{i(wt - k_x x - k_z z)}$ 를 넣으면 다음을 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned} & \frac{e^{i\omega\Delta t} - 2 + e^{-i\omega\Delta t}}{\Delta t^2} \\ &= \frac{-(\alpha^2 + \beta^2)(D_{xx} + D_{zz}) \pm (\alpha^2 - \beta^2)\sqrt{(D_{xx} - D_{zz})^2 + 4D_{xz}^2}}{2h^2} \end{aligned}$$

i) 식을 numerical angular frequency ω_N 에 대해 정리하면

$$\begin{aligned} \omega_N &= \frac{2}{\Delta t} \sin^{-1} \left[\frac{\Delta t \sqrt{(\alpha^2 + \beta^2)(D_{xx} + D_{zz}) \pm (\alpha^2 - \beta^2)\sqrt{(D_{xx} - D_{zz})^2 + 4D_{xz}^2}}}{2\sqrt{2}h} \right] \end{aligned}$$

ii) 므로

$$\begin{aligned} \frac{\omega_N}{\omega_A} &= \\ & \frac{2 \sin^{-1} \left[\frac{\Delta t \sqrt{(\alpha^2 + \beta^2)(D_{xx} + D_{zz}) \pm (\alpha^2 - \beta^2)\sqrt{(D_{xx} - D_{zz})^2 - 4D_{xz}^2}}}{2\sqrt{2}h} \right]}{2\pi f \Delta t} \end{aligned}$$

i) 된다.

먼저 P 파에 대하여 구하면

$$\begin{aligned} \frac{\omega_N}{\omega_A} &= \\ & \sin^{-1} \left[\frac{\Delta t \sqrt{(\alpha^2 + \beta^2)(D_{xx} + D_{zz}) \pm (\alpha^2 - \beta^2)\sqrt{(D_{xx} - D_{zz})^2 - 4D_{xz}^2}}}{2\sqrt{2}h} \right] \\ & \quad \pi \frac{h \Delta t}{\lambda_p} \alpha \end{aligned}$$

여기서 $P = \frac{\alpha \Delta t}{h}$, $G_p = \frac{\lambda_p}{h}$ 라 놓고 정리하면 다음의 식을 구

할 수 있다.

$$\begin{aligned} \frac{\omega_N}{\omega_A} &= \\ & \frac{\sin^{-1} \left[\frac{\beta P}{\alpha G_s \sqrt{2}} \sqrt{\left(1 + \frac{\beta^2}{\alpha^2}\right)(D_{xx} + D_{zz}) + \left(\frac{\alpha^2}{\beta^2} - 1\right)\sqrt{(D_{xx} - D_{zz})^2 + 4D_{xz}^2}} \right]}{\frac{\beta P \pi}{\alpha G_s}} \end{aligned}$$

여기서

$$\begin{aligned} D_{xx} &= \frac{4}{3} \sin^2 \left(\frac{\beta \pi}{\alpha G} \cos \theta \right) \left(1 + 2 \cos^2 \left(\frac{\beta \pi}{\alpha G} \sin \theta \right) \right) \\ D_{zz} &= \frac{4}{3} \sin^2 \left(\frac{\beta \pi}{\alpha G} \sin \theta \right) \left(1 + 2 \cos^2 \left(\frac{\beta \pi}{\alpha G} \cos \theta \right) \right) \\ D_{xz} &= \sin \left(\frac{\beta 2\pi}{\alpha G} \sin \theta \right) \sin \left(\frac{\beta 2\pi}{\alpha G} \cos \theta \right) \end{aligned}$$

이다.

비슷하게 S 파에 대하여 구하면

$$\begin{aligned} \frac{\omega_N}{\omega_A} &= \\ & \frac{\sin^{-1} \left[\frac{P \sqrt{\left(1 + \frac{\beta^2}{\alpha^2}\right)(D_{xx} + D_{zz}) - \left(1 - \frac{\beta^2}{\alpha^2}\right)\sqrt{(D_{xx} - D_{zz})^2 + 4D_{xz}^2}}}{2\sqrt{2}} \right]}{\frac{\beta P \pi}{\alpha G_s}} \end{aligned}$$

여기서

$$\begin{aligned} D_{xx} &= \frac{4}{3} \sin^2 \left(\frac{\pi}{G} \cos \theta \right) \left(1 + 2 \cos^2 \left(\frac{\pi}{G} \sin \theta \right) \right) \\ D_{zz} &= \frac{4}{3} \sin^2 \left(\frac{\pi}{G} \sin \theta \right) \left(1 + 2 \cos^2 \left(\frac{\pi}{G} \cos \theta \right) \right) \\ D_{xz} &= \sin \left(\frac{2\pi}{G} \sin \theta \right) \sin \left(\frac{2\pi}{G} \cos \theta \right) \end{aligned}$$

이다.