

TRM 기법을 이용한 미세지진 진원 예측

김명선¹⁾, 변중무¹⁾, 설순지¹⁾

¹⁾한양대학교 자원환경공학과 물리탐사연구실, ksunny00@hanyang.ac.kr

Estimation of microseismic event location with Time Reversal Mirrors

Myungsun Kim¹⁾, Joongmu Byun¹⁾, Soon Jee Seol¹⁾

¹⁾Department of Natural Resources and Environmental Engineering, Hanyang University

1. 서론

미세지진의 진원을 예측하는 기법은 직접파의 도달시간과 호도그램을 이용하는 방법이나 삼각법을 이용하는 기법들이 일반적으로 많이 사용되어 왔다. 미세지진의 진원 예측은 광산이 무너졌을 경우 갇힌 광부를 찾거나, 유·가스 회수증진을 위해 수압파쇄시 발생하는 균열대의 위치 모니터링 등 여러 분야에 적용되고 있다. 이 연구에서는 광산이 무너졌을 경우 광산안에 갇힌 광부의 위치를 TRM (Time Reversed Mirror) 방법 (Fink, 1993, 1997, 2006)을 이용하여 찾아내는 방법을 소개하고(Cao et al., 2008), 또한 SWD (Seismic while drilling)나 VSP와 함께 TRM 기법을 이용하여 수압파쇄에 의해 발생하는 미세지진들의 진원을 예측하고(Cao et al., 2008), 이 예측된 진원의 위치가 사용된 속도모델과 송수신기 위치에 따라 어떤 민감도를 갖는지 분석해 보았다.

2. 매몰된 광산 안에 고립된 광부의 위치 찾기

무너진 광산에서 광부를 찾는 방법으로 기존의 방법은 광부들이 광산 내에서 보내는 신호를 지표에서 수신할 때 잡음이 너무 심하기 때문에 정확한 위치를 찾아내기 힘들다. 그러나 광산이 무너지기 전에 미리 지표에서 획득해 놓은 탄성과자료와 광산이 무너진 뒤 광부들이 갱도 내에서 보내는 신호의 상호상관을 이용하여 광부들의 위치를 찾는 TRM법은 잡음이 매우 심할 경우에도 보다 정확한 위치를 찾아낼 수 있다.

일반적인 송신원의 구조보정 영상 $m(x,t)$ 는 다음식과 같다.

$$m(x,t) = \sum_g d(g, \tau_{xg} + t | s, t_{source}), \quad (1)$$

$d(g, \tau | s, t_{source})$ 는 시간 τ 일 때 t_{source} 시간에 발생한 송신원 s 에 대해 수신기 g 에서 기록

한 자료의 시간에 대한 미분을 나타내며, x 는 시도 영상점(trial image point), t 는 시도 시간지연(trial time shift), τ_{xg} 는 가정한 속도모델로부터 계산된 x 로부터 g 까지의 주시를 나타낸다. 이 경우 자료에 잡음이 심한 경우 진폭의 최대값이 모호하여 송신원의 위치에 대해 낮은 해상도를 가지며, 또한 주시계산을 위해 정확한 속도모델이 필요하다. 이러한 문제들을 해결하기 위해 다음과 같은 식을 사용하였다.

$$m(x,t) = \sum_g d(g,t | s, t_{source}) \star g(x,-t | g, 0), \quad (2)$$

여기서 $g(x,t|g,0)$ 는 지표의 수신기에 기록된 지구의 그린 함수이다. 계산된 그린 함수가 아니라 기록된 그린 함수를 사용하므로 속도모델이 필요하지 않다. 이 연구에 사용된 속도모델은 Fig. 1과 같으며 지표에 10 m 간격으로 199개의 수신기가 위치하고, 광산이 무너지기 전에 터널안에 10 m 간격으로 199개의 송신원을 이용하여 지표에서 수신하여 그린 함수를 기록한다. 광산이 무너진 뒤 갯힌 광부의 위치 1300 m, 1500 m 두 곳에서 해머 등을 이용하여 지표에 신호를 보낸다는 가정 하에 Fig. 2와 같은 탄성파자료를 얻었다. Fig. 2의 자료가 $d(g,t|s,t_{source})$ 와 같으므로 광산이 무너지기 전에 미리 지표에서 기록한 그린함수와 상호상관하여 더한 결과를 계산하면 Fig. 3과 같다. 광부가 송신원을 보낸 1300 m와 1500 m 두 위치에서 가장 강한 진폭 값을 나타내며 정확한 위치를 찾아내었다.

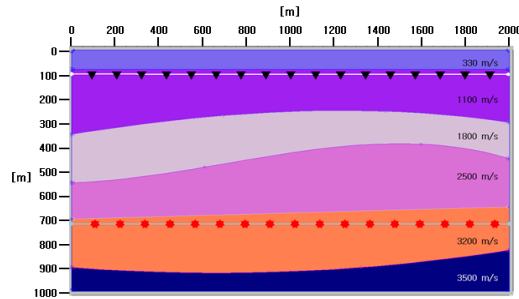


Fig. 1. The velocity model with the mine tunnel located at the depth of around 710 m.

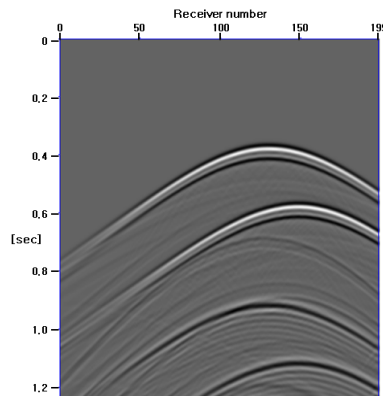


Fig. 2. Shot gather for two sources in the mine and receivers on the surface. Two sources are occurred simultaneously.

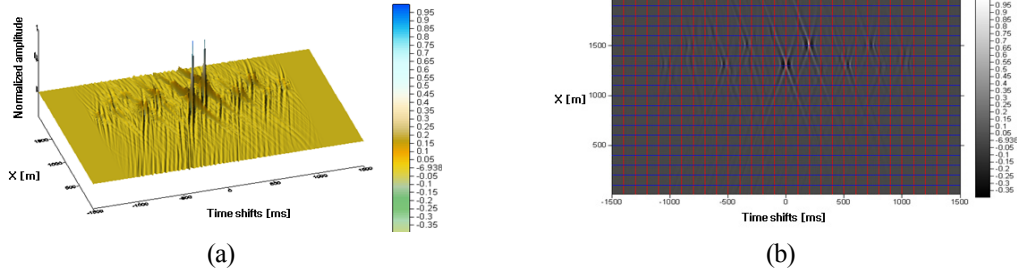


Fig. 3. (a) Migration image $m(x,t)$ from data shown in Fig. 2. (b) The amplitudes represent maximum values at two source locations.

3. 수압파쇄에 의해 발생한 미세지진의 진원 예측

유가스 회수증진을 위하여 수압파쇄시 발생하는 미세지진의 진원을 예측하기 위하여 앞서 적용한 TRM을 이용하였다. 이 방법은 VSP나 SWD 탐사 방법을 결합하면 주입정 근처의 국지적인 속도모델만을 이용하여 송신원을 영상화하기 때문에 시추공 상부에 복잡한 구조가 존재하여도 사용할 수 있는 장점이 있다.

주파수 영역에서 TRM 영상화를 위한 식은 다음과 같다.

$$m(x,t) = \sum_g \sum_{\omega} d(g|s) G(g|x)^* e^{-i\omega t} \tag{3}$$

여기서 $d(g|s)$ 는 수압파쇄에 의해 생성된 송신원으로부터 기록된 자료를 나타내며, $G(g|x)^*$ 는 영상화할 위치인 x 에 위치한 송신원과 수신기 g 의 그린함수의 켈레복소수이다. $G(g|x)^*$ 를 얻기 위해서는 영상화할 위치와 수신기사이의 정확한 속도모델을 알아야 하지만, 수압파쇄에 의해 생성되는 송신원은 시추공 주변에서 발생하므로 시추공 주변의 속도모델과 VSP 자료를 이용한 파동장의 외삽을 통하여 시추공 부근의 그린함수 $G(g|x)$ 를 구할 수 있다.

Fig. 4와 같이 지표에서 발생한 송신원을 시추공에서 수신하고, 수신된 자료들을 다시 송신원으로 사용하여 시추공 주변의 속도모델을 이용한 모델링을 통해 전파 시켜 그린 함수를 얻고, 지표에서 기록된 미세지진 자료와 상호상관하여 미세지진의 진원을 영상화 시킬 수 있다.

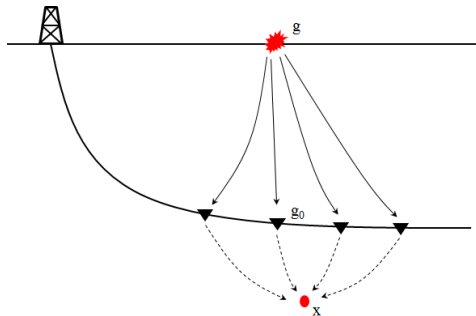


Fig. 4. The sketch for obtaining the Green's function $G(g|x)$ by a forward extrapolation of the VSP data.

지표에 20 m 간격으로 149개의 송신원과, 시추공내에 20 m 간격으로 75 개의 수신기들을 위치시킨 뒤 시추공 부근에서 발생한 미세지진의 진원을 예측해보았다. 미세지진 자료를 잡음이 없는 자료와 신호대잡음비가(S/N ratio) 2인 두 가지 경우에 대해 진원을 예측해 본 결과 신호대잡음비에 크게 상관없이 동일한 위치를 찾는 것을 확인할 수 있었다.

4. 결론

TRM 기법을 이용하여 무너진 광산의 광부를 찾는 경우와, 회수증진을 위해 수압파쇄시 발생하는 미세지진의 진원을 예측한 결과 두 경우 모두 발생한 송신원의 위치를 비교적 정확하게 영상화하였다. TRM 기법을 사용하여 미세지진의 진원을 예측하는 경우 지표와 시추공 사이의 속도정보가 필요 없다는 장점과, 또한 중합을 하기 때문에 신호대잡음비가 낮은 경우에도 진원의 위치를 비교적 정확하게 영상화할 수 있는 장점이 있다. 수압파쇄시 발생하는 미세지진의 진원 예측 결과 수평방향으로 오차가 생긴 이유는 미세지진이 발생하여 지표에 기록되는 파의 경로와 기록된 그린함수의 경로 차이 때문에 생기는 것으로 생각되며 이는 지표에 전개된 수신기의 범위를 넓히면 오차를 더 줄 일수 있을 것으로 예상된다.

5. 사사

이 연구는 2011년도 한국에너지기술평가원에서 시행한 ‘세일·치밀 가스전 탐사기술 개발’ 과제의 일환으로 수행되었습니다(2011T100200110). 이에 감사를 드립니다.

참고문헌

- Cao, W., Fei Tong W., Luo Yi, Mohammed N. Alfaraj, G. T. Schuster, and C. Boonyasirawat, 2008, Estimation of Hydro-fracture Source location with Time Reversal Mirrors, *78th Ann. Mtg.*, SEG, 1421-1425.
- Cao, W., G. T. Schuster, G. Zhan, C. Boonyasirawat, and S. M. Hanafy, 2008, Demonstration of Super-Resolution and Super-Stacking Properties of Time Reversal Mirrors in Locating Seismic Sources, *78th Ann. Mtg.*, SEG, 3018-3022.
- Fink, M., 1993, Time-reversal mirrors, *Journal of Physics D: Applied Physics*, **26**, 1333-1350.
- Fink, M., 1997, Time-reversal acoustics, *Physics Today*, **50**, 34-40.
- Fink, M., 2006, Time-reversal acoustics in complex environments, *Geophysics*, **71**, SI151-SI164.