

단일 수직 관측정 자료를 이용한 미소진동 위치결정

김도완 · 김명선 · 변중무* · 설순지

한양대학교 자원환경공학과

Locating Microseismic Events using a Single Vertical Well Data

Dowan Kim, Myungsun Kim, Joongmoo Byun*, and Soon Jee Seol

Dept. of Natural Resources and Environmental Engineering, Hanyang Univ.

요약: 최근 수압파쇄가 다양한 분야에서 활용되고 있으며, 이 때 미소진동 모니터링은 균열이 어디서 발생했고 어느 방향으로 발달되어가는지 알 수 있는 가장 효과적인 방법 중 하나이다. 단일 수직 관측정 자료를 이용한 미소진동 위치결정시 일반적으로 P파와 S파의 초동 도달시간의 차이를 이용한 위치역산을 통해 관측정으로부터의 거리와 심도를 계산하고 P파 호도그램 분석을 통해 이벤트가 발생한 방향을 계산한다. 하지만 미소진동 자료는 대부분 신호대잡음비가 매우 낮아 진폭이 상대적으로 작은 P파 자료를 획득하지 못하는 경우가 자주 발생한다. 따라서 본 연구에서는 모니터링에 사용된 모든 수신기에 기록된 도달시간 잔차를 이용하여 이벤트의 위치를 결정하는 역산 알고리즘과 S파를 이용한 방위각 결정 방법을 모듈화하여 기존의 P파와 S파의 시간잔차를 이용하는 위치결정법과 비교 분석하였다. 수치모형 실험을 통하여 위치결정이 가능한 모든 수신기에 기록된 도달시간의 조합간의 시간잔차의 차를 목적함수로 이용하면 S파만을 이용하여도 이벤트가 발생한 시간에 대한 고려 없이 위치역산이 가능함을 확인하였고, 기존의 방법과 비교하여 보다 높은 정확도와 초동발체 오차에 대한 낮은 민감도를 가짐을 확인했다. S파를 이용한 방위각 결정은 이벤트와 수신기 사이의 경사각이 낮은 경우 신뢰할만한 방위각 결정이 가능했지만, 경사각이 20° 이상으로 커짐에 따라 큰 오차를 보이는 한계가 나타났다.

주요어: 수압파쇄, 미소진동 모니터링, 이벤트 위치결정, 단일 수직 관측정, 방위각

Abstract: Recently, hydraulic fracturing is used in various fields and microseismic monitoring is one of the best methods for judging where hydraulic fractures exist and how they are developing. When locating microseismic events using single vertical well data, distances from the vertical array and depths from the surface are generally decided using time differences between compressional (P) wave and shear (S) wave arrivals and azimuths are calculated using P wave hodogram analysis. However, in field data, it is sometimes hard to acquire P wave data which has smaller amplitude than S wave because microseismic data often have very low signal to noise (S/N) ratio. To overcome this problem, in this study, we developed a grid search algorithm which can find event location using all combinations of arrival times recorded at receivers. In addition, we introduced and analyzed the method which calculates azimuths using S wave. The tests of synthetic data show the inversion method using all combinations of arrival times and receivers can locate events without considering the origin time even using only single phase. In addition, the method can locate events with higher accuracy and has lower sensitivity on first arrival picking errors than conventional method. The method which calculates azimuths using S wave can provide reliable results when the dip between event and receiver is relatively small. However, this method shows the limitation when dip is greater than about 20° in our model test.

Keywords: Hydraulic fracturing, Microseismic monitoring, Event location, Single vertical well, Azimuth

Received: 23 April 2015; Final version Received: 15 May 2015; Accepted: 22 May 2015

*Corresponding author

E-mail: jbyun@hanyang.ac.kr

Address: Dept. of Natural Resources & Environmental Eng., Hanyang University, 222 Wangsimni-ro, Seongdong-gu, Seoul, Korea

©2015, Korean Society of Earth and Exploration Geophysicists

This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

서 론

최근 석유·가스 저류층의 회수증진, EGS (Enhanced Geothermal System) 개발, Enhanced CBM (Coal-Bed Methane) 개발 등을 목표로 수압파쇄가 다양한 분야에서 활용되면서 수압파쇄 시 발생하는 미세 균열을 영상화 하기 위한 미소진동 모니터링 연구가 활발히 진행되고 있다(Kim *et al.*, 2010; Häring *et al.*, 2008; Gilliland *et al.*, 2013).

미소진동 모니터링은 크게 지표에서의 미소진동 모니터링과 관측정에서의 미소진동 모니터링으로 분류된다. 지표에서의 미소진동 모니터링은 넓은 지역에 수신기를 설치 할 수 있으며, 높은 수평적 해상도를 기대할 수 있다는 장점이 있지만, 매우 낮은 신호대잡음비의 자료가 취득된다는 단점이 있다. 반면, 관측정에서의 미소진동 모니터링의 경우, 높은 수직적 해상도를 기대할 수 있으며, 상대적으로 높은 신호대잡음비의 자료를 취득할 수 있다는 장점이 있다. 그 중에서도 경제적인 이유로 단일 관측정 모니터링이 가장 보편적으로 이용되고 있다(Seibel *et al.*, 2010).

하지만 단일 수직 관측공 자료를 이용한 미소진동 이벤트 위치결정의 경우, 다중 관측정에서의 모니터링과는 다르게 관측공으로부터의 거리와 심도만으로는 수직공을 중심으로 360° 어디에나 같은 주시를 갖는 격자가 존재할 수 있어 해의 비유일성 문제가 있다(Jones *et al.*, 2014). 따라서 단일 수직 관측공의 경우 필수적으로 이벤트가 발생한 방향을 추가로 계산해야 한다.

전통적인 미소진동 모니터링에서는 단일 수직 관측공 자료를 이용한 위치결정시 P파와 S파의 시간간차의 차를 목적함수로 위치역산(Geiger, 1912)하여 시추공으로부터의 거리와 심도를 계산하고 P파의 극성을 이용한 호도그램(hodogram) 분석(Pearson, 1981)을 통해 이벤트가 발생한 방향을 결정한다.

하지만 이러한 전통적인 미소진동 모니터링에서는 위치결정을 위해 P파 자료를 필수적으로 요구하는 반면, 실제 미소진동 자료는 신호대잡음비가 매우 낮기 때문에 비교적 진폭이 작은 P파 자료를 획득하기 어려운 경우가 발생한다(Kuang *et al.*, 2013). 반면 S파는 진폭이 상대적으로 커서 관측이 쉬워 S파 자료만 존재할 때에도 미소진동 이벤트의 위치결정을 수행하기 위한 많은 연구가 진행되어왔다(Font *et al.*, 2004; Eisner *et al.*, 2009; Kuang *et al.*, 2013; Jones *et al.*, 2014).

Jones *et al.* (2014)는 Font *et al.* (2004)이 제안한 P파 자료가 없어도 사용가능한 모든 수신기에 기록된 도달시간의 조합간의 시간간차의 차를 이용한 위치역산 방법을 시추공 자료에 도입하였고, Eisner *et al.* (2009)는 P파가 아닌 S파의 극성을 이용하여 이벤트의 방향을 결정한 바가 있다.

이 연구에서는 Font *et al.* (2004)이 제안한 모든 수신기에 기록된 도달시간의 조합간의 시간간차의 차를 목적함수로 한 역산결과와 P파와 S파의 시간간차의 차를 목적함수로 한 역산

결과의 정확도와 초동발체 오차에 의한 민감도를 비교 분석하여 Font *et al.* (2004)에 의한 방법의 유용성을 확인하고자 한다. 또한 Eisner *et al.* (2009)이 제안한 S파를 이용한 방위각 결정 결과를 P파를 이용한 호도그램 분석 결과와 비교하여 장점 및 한계점을 제시하고자 한다.

격자탐색을 이용한 미소진동 위치역산

목적함수의 구성

미소진동 위치역산을 위한 가장 간단한 형태는 식 (1)과 같이 수신기에서 관측된 주시와 계산된 주시간의 시간간차를 목적함수로 하여 이를 최소화하는 방법이다.

$$\Phi = \sum_{j=1}^{N_p} [t_{obs}^j - t_{cal}^j]^2 \quad (1)$$

$$t_{obs}^j = t_{pick}^j - t_0 \quad (2)$$

여기서 N_p 는 발체된 도달시간의 개수를 의미하고, t_{obs}^j 와 t_{cal}^j 은 각각 j 번째 관측된 주시와 계산된 주시를 의미한다. 여기서 t_{obs}^j 는 식 (2)와 같이 j 번째 발체된 도달시간 t_{pick}^j 과 이벤트가 발생한 시간 t_0 의 차로 정의 할 수 있다. 하지만 일반적인 경우 미소진동 이벤트의 발생시간을 모르기 때문에, 이벤트의 위치 뿐만 아니라 발생시간 t_0 도 찾아야 하는 변수가 된다. 따라서 식 (1)을 목적함수로 사용하는 경우 역산을 통해 이벤트의 위치 뿐만 아니라 이벤트의 발생시간까지 찾아야 하기 때문에 계산시간이 늘어나고 정확도는 크게 떨어진다(Kim *et al.*, 2010).

이러한 문제를 해결하기 위해서 가장 일반적으로 사용되는 방법은 P파와 S파의 시간간차의 차를 최소화하는 방법이다(Geiger, 1912). 이 경우, 목적함수는 식 (3)과 같다.

$$\Phi = \sum_{j=1}^{N_r} [(t_{pick,P}^j - t_{cal,P}^j) - (t_{pick,S}^j - t_{cal,S}^j)]^2 \quad (3)$$

여기서 N_r 는 수신기의 개수를 의미하고, t_{pick}^j 과 t_{cal}^j 은 각각 j 번째 수신기에서 발체된 도달시간과 계산된 주시를 의미한다. 하부첨자 P와 S는 각각 수신기에 기록된 P파와 S파를 뜻한다. 이 방법은 P파와 S파의 시간간차를 각각 계산하고, 이들의 차를 목적함수로 정의한다. 식 (3)을 목적함수로 사용하면 이벤트가 발생한 시간, t_0 는 상쇄되어 이벤트의 위치만 변수로 남게 된다. 따라서 식 (1)을 목적함수로 사용했을 때보다 계산시간이 줄어들고 보다 정확한 역산결과를 기대할 수 있다. 하지만 이 방법은 P파와 S파 중 하나의 도달시간만 몰라도 사용이 불가능하다는 단점이 있다. 현장에서 취득되는 미소진동 자료는 대부분 신호대잡음비가 매우 낮아, 진폭이 작은 P파의 초동발체가 불가능한 경우가 발생하는데 이 때는 식 (3)을 이용하지 못하게 된다.

이런 경우 사용할 수 있는 방법으로 모든 수신기에 기록된 도달시간의 조합간 시간간차의 차를 최소화하는 방법을 Jones *et al.* (2014)이 Font *et al.* (2004)에 의해 제안된 이론에 근거하여 최근 발표하였다. 이 때의 목적함수는 식 (4)와 같다.

$$\Phi = \sum_{j=1}^{N_p-1} \sum_{k=j+1}^{N_p} [(t_{pick}^j - t_{cal}^j) - (t_{pick}^k - t_{cal}^k)]^2 \quad (4)$$

이 방법은 수신기에 기록된 도달시간의 모든 조합간의 시간간차의 차를 계산한다. 이 때 식 (3)과 마찬가지로 이벤트가 발생한 시간, t_0 는 상쇄되어 이벤트의 위치만 변수로 남게 된다. 이 방법은 크게 두가지 장점을 가지고 있는데 첫 번째는 P파나 S파 중 하나의 초동발체만 가능한 상황에서도 이벤트가 발생한 시간에 대한 정보 없이도 역산이 가능하다는 점이다. 두 번째 장점은 역산에 사용되는 시간간차 조합의 증가로 P파와 S파 자료가 모두 존재하는 상황에서도 식 (3)을 사용하는 경우보다 정확한 위치결정을 기대할 수 있다. 만약 모든 수신기에서 P, S파 초동발체가 이루어졌다면 식 (3)을 이용하는 경우 N_r 개의 시간간차 조합이 만들어지지만 식 (4)를 이용하는 경우 $N_p(N_p - 1)/2$ 개의 시간간차 조합이 만들어진다. 여기서 $N_r = N_p/2$ 의 관계를 갖는다.

격자탐색을 이용한 미소진동 위치결정 알고리즘

이 연구에서는 앞서 소개된 목적함수들을 이용하여 격자탐색을 이용한 미소진동 위치결정 모듈을 개발하였다(Fig. 1). 격자탐색(grid search)은 사용자가 원하는 만큼의 오차 범위 내에서 해를 찾을 수 있다는 장점이 있지만, 찾으려는 변수가 많을수록 또는 탐색 범위가 넓을수록 계산시간이 크게 늘어난다는 단점이 있다. 단일 수직 관측공을 이용한 미소진동의 위치결정의 경우 목적함수로 식 (3)이나 식 (4)를 이용하면 발생시간은 역산을 통해 구할 필요가 없고, 관측공으로부터의 수직거리와 심도만을 역산을 통해 구해내기 때문에 변수가 적고 탐색 범위가 제한적이다. 따라서 격자탐색은 단일 시추공을 이용한 미소진동 위치결정에 효과적이다.

이 모듈에서 입력자료로는 미소진동 자료의 초동 도착시간

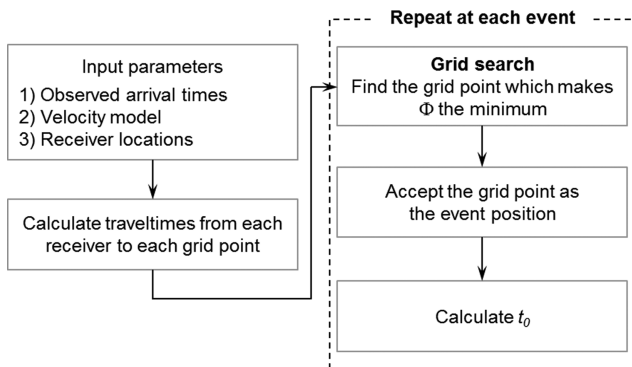


Fig. 1. Flowchart of the proposed method. Φ indicates the objective function.

(t_{pick}), 속도모델, 수신기의 위치를 사용한다. 입력된 속도모델과 수신기의 위치를 이용해 각각의 수신기에서 각각의 격자까지의 주시(t_{cal})를 계산한다. 이 연구에서는 Podvin and Lecomte (1991)이 제안한 아이코날(Eikonal) 방정식을 이용한 유한차분법으로 주시계산하였다. 이 방법은 모든 격자에서의 주시를 한번에 구성하므로 미소진동 위치결정 알고리즘처럼 모든 격자에서의 주시를 계산해야할 때 효과적인 방법이다. 그러나 미소진동 발생위치가 바뀔 때마다 새로운 주시를 계산해야 하는데 이 연구에서는 상반성의 원리를 이용하여 수신기의 개수만큼만 아이코날 방정식을 계산하였다. 이렇게 계산된 주시는 속도모델과 수신기의 위치가 수정되지 않는 이상 바뀌지 않기 때문에 아무리 여러 개의 이벤트가 발생하더라도 단 한번의 주시계산만으로도 모든 이벤트의 위치결정이 가능하다.

주시계산이 모두 이루어지면 각각의 이벤트에 대하여 격자탐색을 통한 위치결정이 이루어진다. 각각의 격자에서 목적함수를 계산하고 목적함수를 최소로 하는 격자가 미소진동 이벤트의 위치로 결정된다. 이벤트의 위치에서는 목적함수가 0이 되므로 식 (1)과 식 (2)를 이용하여 식 (5)를 유도할 수 있다. 따라서 미소진동 이벤트의 위치가 결정된 후에는 필요에 따라 식 (5)를 이용하여 미소진동 이벤트 발생시간도 계산이 가능하다.

$$t_0 = \frac{1}{N_p} \sum_{j=1}^{N_p} (t_{pick}^j - t_{cal}^j) \quad (5)$$

수치예제를 이용한 정확도 비교 실험

목적함수로 관측자료와 계산자료 사이의 P파와 S파의 시간간차의 차(식 (3))를 이용했을 때와 수신기에서의 도달시간의 조합간의 시간간차의 차(식 (4))를 이용했을 때의 역산결과 정확도를 비교하기 위하여 합성 미소진동탄성파자료를 이용하여 수치 모형실험을 진행하였다. 속도모델은 3000 m/s의 P파 속도와 1200 m/s의 S파 속도를 갖는 균질속도모델을 가정하였고, 수직 시추공 내 10 m 간격으로 각각 3개, 5개의 수신기를 배치한 뒤 아이코날 방정식을 이용하여 두 개의 합성자료를 생성하였다(Fig. 2).

주시 계산과 격자탐색을 위한 격자간격을 0.1 m로 설정하여 위치결정을 하였을 때, 7 ms, 3 ms 오차를 갖는 격자를 등고선으로 나타내면 Fig. 3과 같다. 수신기 3개를 이용한 경우(Fig. 2a) P파와 S파 자료가 모두 존재하면 P파와 S파의 시간간차의 차를 최소화하는 방법에서는 수신기의 개수와 같은 3개의 시간간차 조합이 만들어지는 반면, 모든 수신기에 기록된 도달시간의 조합간의 시간간차의 차를 최소화하는 방법에서는 Table 1과 같이 총 15개의 시간간차 조합이 만들어진다. 따라서 수신기가 3개일 때 P파와 S파의 시간간차의 차를 최소화하는 방법은 시간간차 조합이 적어 수직적으로 불확실성이 매우 크지만(Fig. 3a), 모든 수신기에 기록된 도달시간의 조합간의

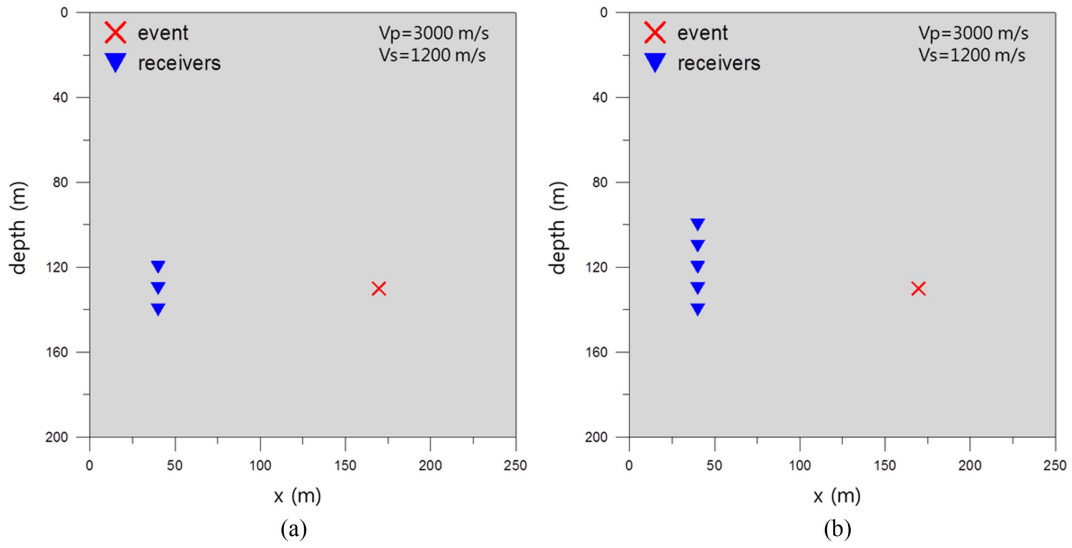


Fig. 2. Schematic diagrams of the velocity model with (a) three receivers and (b) five receivers (reverse triangles) used in generating synthetic microseismic data. The cross indicates the location of the microseismic event.

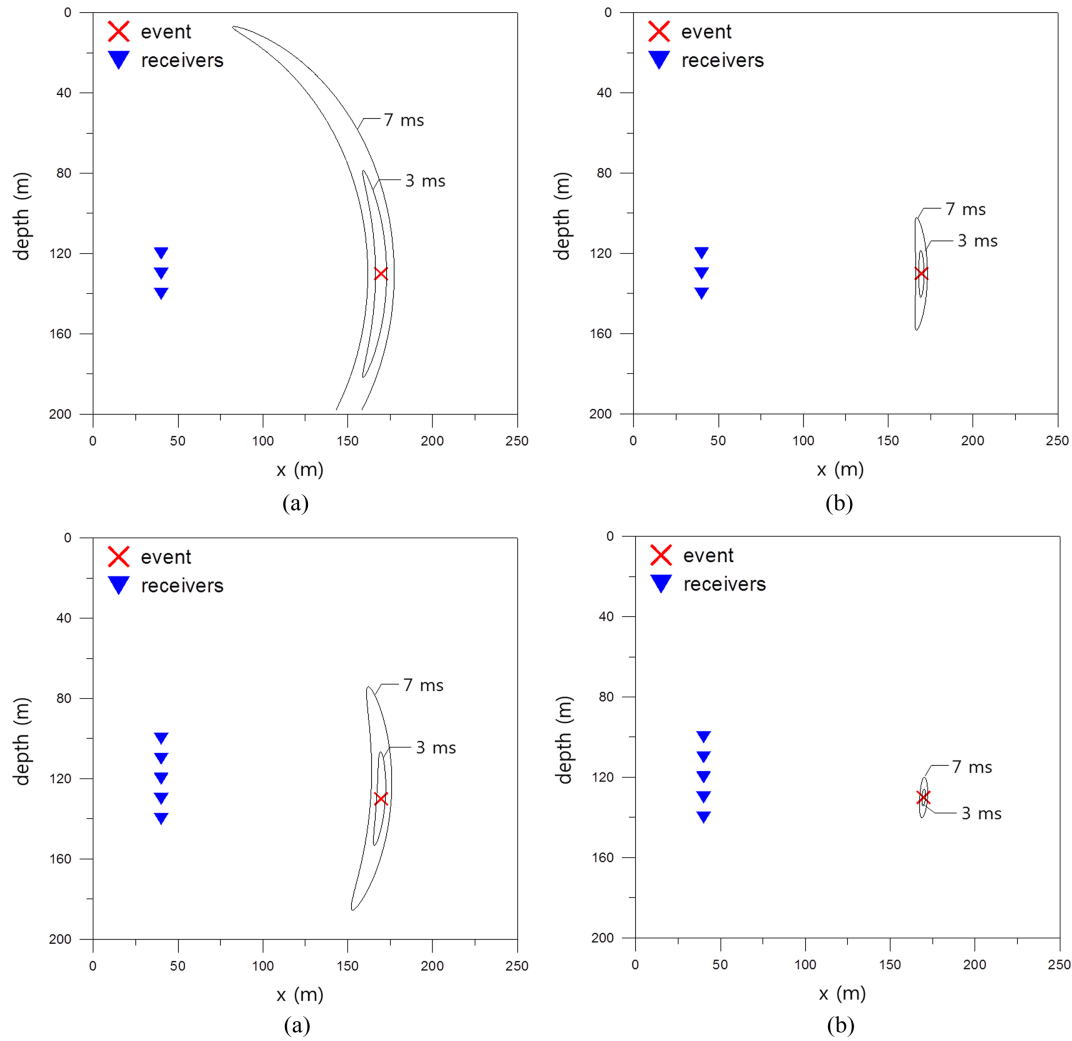


Fig. 3. Comparison of error contours when three receivers ((a) and (b)) and five receivers ((c) and (d)) are used. (a) and (c) show error contours when equation (3) is used as the objective function, and (b) and (d) show error contours when equation (5) is used as the objective function.

Table 1. Available time difference pairs when using differential S to P arrival times and all combination of differential of arrival times (three receivers are used).

Available time difference pairs	
S to P	$(t_{pick,P}^1 - t_{cal,P}^1) - (t_{pick,S}^1 - t_{cal,S}^1), (t_{pick,P}^2 - t_{cal,P}^2) - (t_{pick,S}^2 - t_{cal,S}^2), (t_{pick,P}^3 - t_{cal,P}^3) - (t_{pick,S}^3 - t_{cal,S}^3)$
All combination	$(t_{pick,P}^1 - t_{cal,P}^1) - (t_{pick,S}^1 - t_{cal,S}^1), (t_{pick,P}^1 - t_{cal,P}^1) - (t_{pick,P}^2 - t_{cal,P}^2), (t_{pick,P}^1 - t_{cal,P}^1) - (t_{pick,P}^3 - t_{cal,P}^3), (t_{pick,P}^2 - t_{cal,P}^2) - (t_{pick,P}^3 - t_{cal,P}^3)$
	$(t_{pick,P}^1 - t_{cal,P}^1) - (t_{pick,S}^2 - t_{cal,S}^2), (t_{pick,P}^1 - t_{cal,P}^1) - (t_{pick,S}^3 - t_{cal,S}^3), (t_{pick,P}^2 - t_{cal,P}^2) - (t_{pick,S}^3 - t_{cal,S}^3)$
	$(t_{pick,P}^1 - t_{cal,P}^1) - (t_{pick,S}^1 - t_{cal,S}^1) - (t_{pick,P}^2 - t_{cal,P}^2), (t_{pick,S}^1 - t_{cal,S}^1) - (t_{pick,P}^2 - t_{cal,P}^2), (t_{pick,S}^2 - t_{cal,S}^2) - (t_{pick,P}^3 - t_{cal,P}^3)$
	$(t_{pick,S}^1 - t_{cal,S}^1) - (t_{pick,P}^2 - t_{cal,P}^2), (t_{pick,S}^1 - t_{cal,S}^1) - (t_{pick,S}^3 - t_{cal,S}^3), (t_{pick,S}^2 - t_{cal,S}^2) - (t_{pick,S}^3 - t_{cal,S}^3)$
	$(t_{pick,S}^1 - t_{cal,S}^1) - (t_{pick,S}^2 - t_{cal,S}^2), (t_{pick,P}^2 - t_{cal,P}^2) - (t_{pick,S}^2 - t_{cal,S}^2), (t_{pick,P}^3 - t_{cal,P}^3) - (t_{pick,S}^3 - t_{cal,S}^3)$
	$(t_{pick,S}^1 - t_{cal,S}^1) - (t_{pick,S}^2 - t_{cal,S}^2), (t_{pick,P}^2 - t_{cal,P}^2) - (t_{pick,S}^2 - t_{cal,S}^2), (t_{pick,P}^3 - t_{cal,P}^3) - (t_{pick,S}^3 - t_{cal,S}^3)$

시간잔차의 차를 최소화하는 방법을 이용하면 수신기 조합의 개수가 크게 늘어나 불확실성이 크게 줄어드는 것을 볼 수 있다(Fig. 3b).

이는 수신기의 개수가 많아질수록 급격한 차이를 보인다. 수신기가 5개일 때 P파와 S파의 시간잔차의 차를 최소화하는 방법에서는 5개의 시간잔차 조합이 만들어지지만, 모든 수신기에 기록된 도달시간의 조합간의 시간잔차의 차를 최소화하는 방법에서는 45개의 시간잔차 조합이 만들어진다. 이 때의 오차를 등고선으로 나타내면 P파와 S파의 시간잔차의 차를 최소화하는 방법을 이용한 Fig. 3c보다 모든 수신기에 기록된 도달시간의 조합간의 시간잔차의 차를 최소화하는 방법을 이용한 Fig. 3d의 불확실성이 크게 감소하는 것을 볼 수 있다.

만약 잡음이 많아 P파의 초동발체가 불가능한 경우, P파의 도달시간에 대한 정보가 없기 때문에, P파와 S파의 시간잔차의 차를 최소화하는 방법은 사용할 수 없다. 반면 모든 수신기에 기록된 도달시간의 조합간의 시간잔차의 차를 최소화하는 방법은 여전히 사용 가능하다. 이때 7 ms, 3 ms와 1 ms의 오차를 갖는 격자를 등고선으로 나타내면 Fig. 4와 같다. P파와 S파 자료가 모두 존재할 때에 비해서 불확실성은 증가했지만

수신기의 개수가 3개일 때(Fig. 4a)에 비해 수신기가 5개로 증가함에 따라(Fig. 4b) 정확도가 크게 증가하는 것을 알 수 있다. 따라서 수신기가 5개 이상 존재하면 S파 자료만으로도 보다 신뢰할만한 위치결정을 기대할 수 있다.

초동발체 오차에 의한 민감도 비교 실험

초동발체 시의 오차는 잡음이 많은 미소진동 자료에서 언제나 존재한다. 이러한 초동발체 오차는 미소진동 이벤트의 위치 결정시 주요한 오차의 원인으로 작용한다. 따라서 이 실험에서는 목적함수로 P파와 S파의 시간잔차의 차(식 (3))를 이용했을 때와 모든 수신기에 기록된 도달시간의 조합간의 시간잔차의 차(식 (4))를 이용했을 때의 민감도를 비교하기 위하여 수치모형 실험을 시행하였다. 속도모델은 2층 속도 모델을 가정하였고 수직 시추공 내 10 m 간격으로 60 m에서 130 m 심도에 9개의 수신기를 배치한 후 6개의 미소진동 이벤트를 발생시켜 합성 미소진동탄성파자료를 생성했다(Fig. 5).

초동발체 오차가 있는 상황을 가정하여 실제 초동 도달시간에 평균이 0이고 표준편차가 1 ms인 무작위 오차를 포함시켜 6개의 이벤트에 대하여 100번씩 반복 수행하였다. 목적함수로

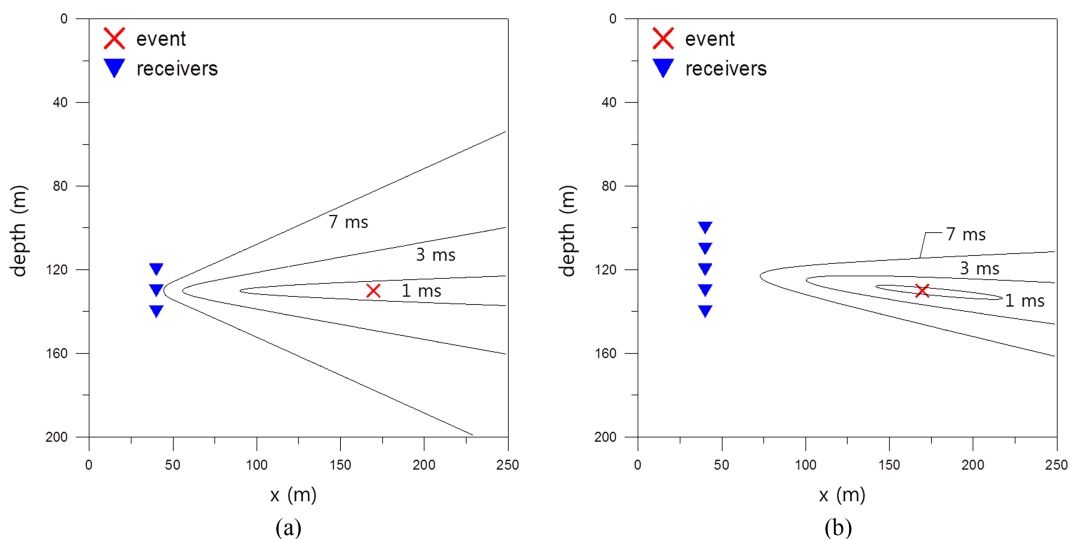


Fig. 4. Error contours when using only S wave arrival times. (a) Three receivers and (b) five receivers are used.

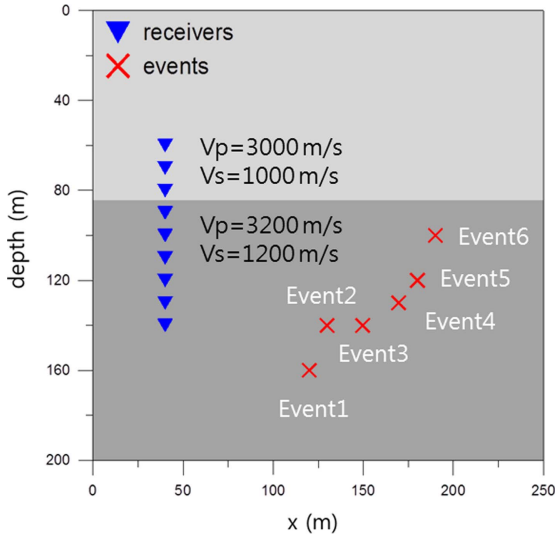


Fig. 5. Schematic diagram of the velocity model with six microseismic events (crosses) and nine receivers (reverse triangles) for sensitivity test on the error in picking the arrival times.

P파와 S파의 시간간차의 차를 이용했을 때와 모든 수신기에 기록된 도달시간의 조합간의 시간간차의 차를 이용했을 때의 역산결과를 각각 Fig. 6a와 Fig. 6b에 도시하였다. Fig. 6a를 보면 식 (3)을 목적함수로 이용한 경우 불확실성이 크기 때문에 작은 초동 발체 오차도 위치결정시 큰 오차를 야기하는 것을 확인할 수 있고 이탈값도 발생한다. 반면 식 (4)를 목적함수로 이용한 경우(Fig. 6b) 실제 위치에 집약적인 결과를 얻을 수 있었다. Table 2는 위치결정 오차의 평균과 표준편차를 표로 나타낸 것이다. 목적함수로 P파와 S파의 시간간차의 차를 이용한 경우보다 모든 수신기에 기록된 도달시간의 조합간의 시간간차의 차를 이용했을 때가 모든 이벤트에서 향상된 결과를 보였다.

다음으로 더 많은 초동발체 오차가 존재하는 상황을 가정하여, 2 ms의 표준편차를 갖는 무작위 오차를 포함시켜 같은 작업을 수행하였다. 이 경우 목적함수로 P파와 S파의 시간간차의 차를 이용했을 때와 모든 수신기에 기록된 도달시간의 조

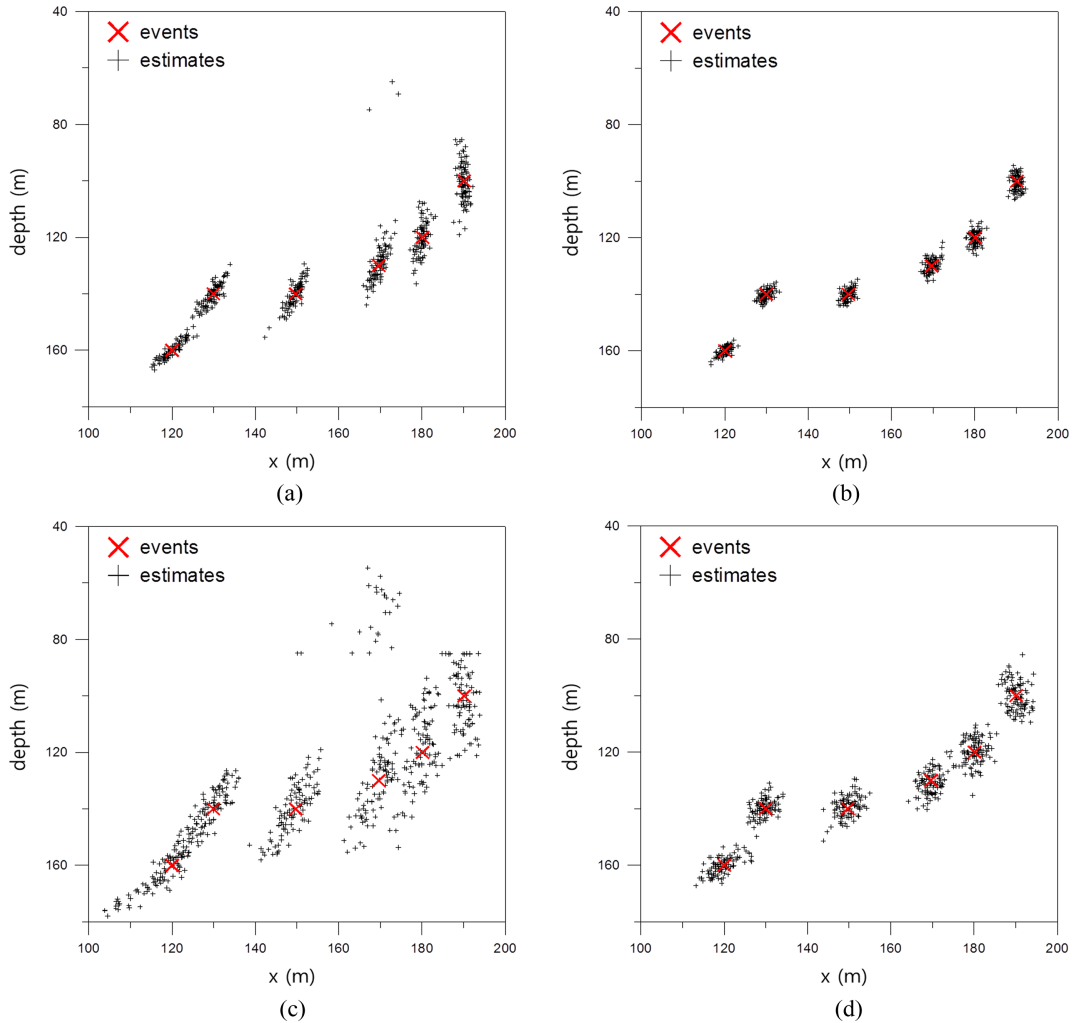


Fig. 6. Location results of sensitivity analysis on the error in picking the first arrival times. The errors were generated by random function which had zero mean and standard deviation of 1 ms ((a) and (b)) and 2 ms ((c) and (d)). (a) and (c) show results when using differences between P and S wave arrival times, (b) and (d) show results when using differences between arrival times of the receivers.

Table 2. Mean value and standard deviation of absolute location errors for each event when first arrival picking errors with zero mean and standard deviation of 1 ms are included.

Event	S to P		All combination	
	Mean (m)	STD (m)	Mean (m)	STD (m)
Event 1	4.7	3.4	1.7	1.0
Event 2	3.2	2.1	1.8	1.1
Event 3	3.8	2.5	2.1	2.1
Event 4	4.2	3.3	2.2	1.4
Event 5	5.0	5.4	2.1	1.3
Event 6	6.1	5.9	2.5	1.5

Table 3. Mean value and standard deviation of absolute location errors for each event and their standard deviation when first arrival picking errors which have zero mean and standard deviation of 2 ms are included.

Event	S to P		All combination	
	Mean (m)	STD (m)	Mean (m)	STD (m)
Event 1	11.6	10.3	3.5	2.2
Event 2	8.0	5.7	3.1	1.9
Event 3	7.0	4.8	4.1	2.7
Event 4	9.2	8.4	4.1	2.4
Event 5	12.6	10.1	4.2	2.5
Event 6	13.6	12.4	4.8	2.6

합간의 시간잔차의 차를 이용했을 때의 역산결과를 각각 Fig. 6c와 Fig. 6d에 도시되어 있다. 목적함수로 P파와 S파의 시간잔차의 차를 이용한 경우, 초동발체 오차가 늘어남에 따라 위치결정시 오차가 크게 증가하였고 이탈값 또한 많이 발생하였다. 반면에 모든 수신기에 기록된 도달시간의 조합간의 시간잔차의 차를 이용한 경우 아직도 충분히 신뢰할 만한 위치결정 결과를 보였으며 이탈값도 발생하지 않았다. Table 3에 그 결과를 나타내었다. 위치결정 오차의 평균과 표준편차 모두 모든 수신기에 기록된 도달시간의 조합간의 시간잔차의 차를 이용했을 때가 크게 향상된 것을 알 수 있다.

미소진동 이벤트의 방향 결정

P파와 S파를 이용한 방위각 결정

단일 수직 시추공의 경우, 3차원의 위치결정을 위해서는 이벤트가 발생한 방향이 추가적으로 계산되어야 한다. 이를 위해서 가장 보편적으로 사용되는 방법은 P파 호도그램 분석(Pearson, 1981)이다. 이 방법은 P파의 입자운동방향이 파의 진행방향과 같다는 성질을 이용한다. 다성분 지오폰에서 취득된 x성분과 y성분의 진폭을 대비도표(cross plot)로 나타내면 그 추세선의 기울기가 이벤트와 수신기 사이의 방위각을 의미한다.

이처럼 P파 호도그램 분석을 이용하는 경우 간단하게 미소

진동 이벤트의 위치결정이 가능하지만 앞서 언급한 바와 같이 잡음이 많아 P파 자료를 취득하기 어려운 경우 진폭이 큰 S파를 이용하여 방위각 결정을 할 수 있다면 미소진동 모니터링을 통해 보다 많은 정보를 취득할 수 있을 것이다. 하지만 S파는 입자운동방향이 파의 진행방향과 다르고 SH파와 SV파가 혼합되어 나타나기 때문에 P파와 같이 일반적인 호도그램 분석을 통해서 미소진동 이벤트의 방향 결정이 불가능하다. 따라서 Eisner *et al.* (2009)은 S파의 극성을 이용한 방향 결정 방법을 제안했다. S파의 느리기(slowness) 벡터를 \vec{p} 로 정의하면, p_z 는 수신기간 S파의 도달시간을 차분하여 계산할 수 있다.

$$p_z(z) = \frac{dT_S(z)}{dz} \quad (6)$$

여기서 $T_S(z)$ 는 심도 z 에 위치한 수신기에 기록된 S파의 도달시간을 의미한다. 일단 p_z 가 계산된 후에는 파의 진행방향과 S파의 입자운동 방향이 수직하다는 성질을 이용한다.

$$\vec{p}(z) \cdot \vec{e}(z) = 0 \quad (7)$$

여기서 $\vec{e}(z)$ 는 심도 z 에 위치한 수신기에 기록된 S파의 극성을 의미한다. 여기서 p_x 를 p_y 와 p_z 로 정리하면 다음과 같다.

$$p_x(x) = \frac{-p_z e_z - p_y e_y}{e_x} \quad (8)$$

여기서 p_y 를 계산하기 위하여 아이코날 방정식을 이용한다.

$$\vec{p}(z) \cdot \vec{e}(z) = \frac{1}{v_S^2(z)} \quad (9)$$

여기서 $v_S(z)$ 는 심도 z 에서의 S파 속도를 의미한다. 식 (8)과 (9)를 이용하면 p_y 는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$p_y(z) = \frac{-b \pm \sqrt{D}}{2a} \quad (10)$$

여기서 각각의 변수들은 다음 관계식을 따른다.

$$\begin{aligned} a &= e_x^2 + e_y^2, \\ b &= 2e_y e_z p_z, \\ c &= p_z^2(e_x^2 + e_z^2) - e_x^2/v_S^2(z), \\ D &= b^2 - 4ac \end{aligned} \quad (11)$$

위 방법을 사용하면 S파를 이용해도 비교적 간단한 수식을 통하여 파의 진행방향 결정이 가능하지만, 이 방법은 다양한 오차의 원인이 존재할 수 있다. 첫 번째로 수신기간 간격이 클수록 식 (6)의 차분에 의한 오차가 증가하여 정확한 파의 진행방향 결정이 힘들어진다. 두 번째로 수신기와 이벤트 사이의 경사각이 클수록 3성분 자료에 SV와 SH 성분이 혼합되어 정확한 극성 벡터, $\vec{e}(z)$ 의 계산이 힘들어진다. 마지막으로 수신

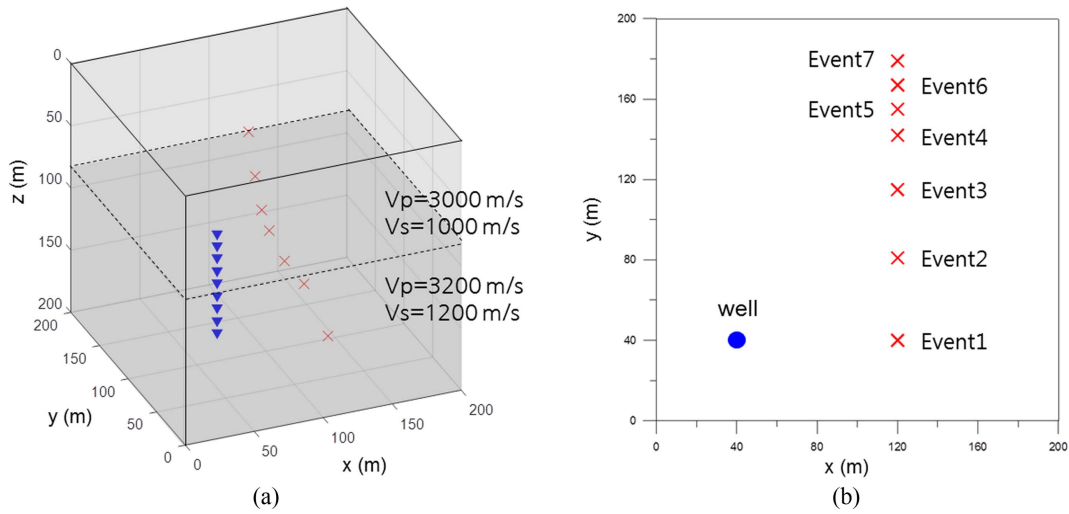


Fig. 7. (a) 3D view and (b) map view of schematic diagram of the velocity model with seven microseismic events (crosses) and nine receivers (reverse triangles).

Table 4. Errors of the calculated angle using P wave polarities and S wave polarities.

Event	Mean of dips	True angle – calculated angle	
		P polarity	S polarity
Event 1	35°	-0.2°	26.9°
Event 2	23°	0.8°	1.3°
Event 3	19°	0.6°	-3.4°
Event 4	13°	0.1°	-0.8°
Event 5	8°	-0.1°	-0.4°
Event 6	0°	-0.4°	-0.2°
Event 7	-10°	-0.5°	0.4°

기가 속도변화의 경계부근에 위치하는 경우 $v_s(z)$ 에 들어갈 속도를 정의할 수 없어 이 방법은 사용이 불가능하다.

경사각에 따른 방위각 결정 실험

P파의 극성을 이용한 호도그램 분석법과 Eisner *et al.* (2009)이 제안한 S파의 극성을 이용한 방위각 결정법의 결과를 비교 분석하기 위하여 합성 미소진동탄성파자료를 생성하여 수치 모형실험을 시행하였다. 속도모델은 85 m를 경계로 2층 속도모델을 가정하였고, 수직 시추공 내 10 m 간격으로 9 수신기를 배치하였다(Fig. 7). 이벤트와 수신기들간의 평균 경사각이 서로 다른 7개의 이벤트를 발생하여 합성자료를 생성하였고 각각의 이벤트 들에 대하여 위치결정을 시행하였다. P파와 S파의 극성을 이용하여 방위각 결정을 한 결과를 Table 4에 나타내었고, 결과를 Fig. 8에 도시하였다. P파 호도그램 분석을 이용한 위치결정 결과를 3D상으로 나타낸 Fig. 8a와 xy 단면상에 나타낸 Fig 8b를 보면 모든 이벤트의 방향결정이 매우 정확한 것을 확인할 수 있다. 반면 S파를 이용하여 방위각 결정시 속도 경계 10 m 이내에 위치한 수신기에서는 방위각 결정이 불가능했으며, 그 결과를 3D상으로 나타낸 Fig. 8c와

xy단면상에 나타낸 Fig. 8d를 보면, 수신기와 이벤트간의 각도로 정의되는 경사각의 평균값이 35°로 가장 큰 1번 이벤트의 경우 부정확한 방위각 결정이 이루어졌다. 반면 나머지 이벤트 들에 대해서는 평균경사가 20° 내외로 작아짐에 따라 충분히 신뢰할 만한 결과를 얻을 수 있었다.

결론

단일 수직 시추공 자료를 이용한 미소진동 이벤트의 위치결정은 관측공으로부터의 거리, 심도 뿐아니라 이벤트가 발생한 방향을 결정해야하고 수신기 배열이 하나의 z축 선상에만 존재하기 때문에 미소진동 위치결정에 불확실성이 크다. 본 연구에서는 P파와 S파의 시간간차의 차를 목적함수로 이용했을 때의 역산결과와 모든 수신기에 기록된 도달시간의 조합간의 시간간차의 차를 목적함수로 하였을 때의 역산결과를 비교 분석하기 위하여 격자탐색을 이용한 미소진동 모듈을 개발하였다.

목적함수로 모든 수신기에 기록된 도달시간의 조합간의 시간간차의 차를 이용한 경우, 3가지의 장점을 확인할 수 있었다. 첫 번째로 P파나 S파 중 하나의 자료만 존재하는 경우에도 발생시간에 대한 정보 없이도 이벤트의 발생 위치만을 변수로 위치결정이 가능했다. 두 번째로 P파와 S파의 시간간차의 차를 목적함수로 이용했을 때의 역산결과보다 시간간차의 조합이 크게 늘어나 위치결정의 불확실성이 크게 감소하였다. 마지막으로 초동발체 오차에 의한 영향이 감소함을 알 수 있었다. 따라서 위치결정시 불확실성이 높은 단일 시추공 자료에서 모든 수신기에 기록된 도달시간의 조합간의 시간간차의 차를 목적함수로 한 위치결정을 한다면 보다 정확한 미소진동 위치결정이 가능하다.

이벤트가 발생한 방향을 결정해주기 위해서 본 연구에서는 수치모형 실험을 통해 P파 호도그램 분석을 이용한 방위각결

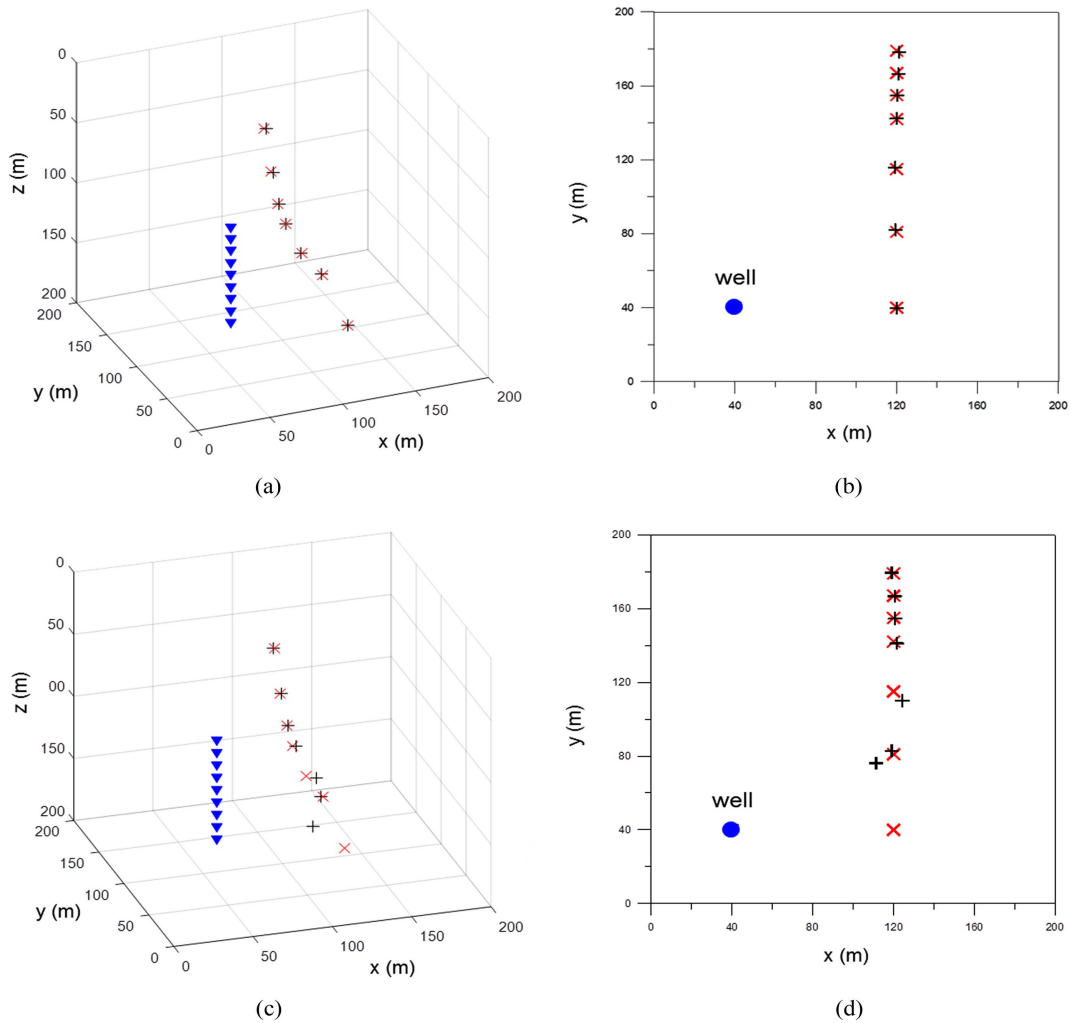


Fig. 8. Comparisons of location results. (a) 3D view and (b) map view of location results using polarities of P waves. (c) 3D view and (d) map view of location results using polarities of S waves.

정법과 S파 극성을 이용한 방위각 결정법의 결과를 비교분석해 보았다. P파를 이용한 방향결정 결과는 모든 미소진동 이벤트에서 매우 높은 정확도를 보인 반면, S파를 이용한 방향결정은 수신기와 이벤트간의 경사각이 작은 경우에만 신뢰할 만한 결과를 얻을 수 있었다. 본 연구에서 시행한 수치모형 실험에서는 이벤트와 수신기 사이의 경사각이 20° 내외까지는 충분히 신뢰할 만한 방위각 결정이 가능했다. 따라서 수신기와 이벤트 사이의 경사각이 20° 내외인 경우, P파 호도그램 분석이 불가능한 상황에서 S파 극성을 이용한 방위각 결정법이 차선택이 될 수 있음을 알 수 있다.

감사의 글

본 연구는 2013년도 산업통상부의 재원으로 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다(No. 20133030000220).

References

- Eisner, L., Fischer, T., and Rutledge, J. T., 2009, Determination of S-wave slowness from a linear array of borehole receivers, *Geophysics*, **176**, 31-39.
- Font, F., Kao, H., Lallemand, S., Liu, C. S., and Chiao, L. Y., 2004, Hypocentre determination offshore of eastern Taiwan using the Maximum Intersection method, *Geophysics*, **158**, 655-675.
- Geiger, L., 1912, Probability method for the determination of earthquake epicenters from the arrival time only, *Bulletin of St. Louis University*, **8**, 56-71.
- Gilliland, E. S., Ripepi, N., Conrad, M., Miler, M. J., and Karmis, M., 2013, Selection of monitoring techniques for a carbon storage and enhanced coalbed methane recovery pilot test in the Central Appalachian Basin, *International Journal of Coal Geology*, **118**, 105-112.
- Haring, M. O., Schanz, U., Ladner, F., and Dyer, B. C., 2008,

- Characterization of the Basel 1 enhanced geothermal system, *Geothermics*, **37**, 469-495.
- Jones, G. A., Kendall, J. M., Bastow, I. D., and Raymer, D. G., 2014, Locating microseismic events using borehole data, *Geophysical Prospecting*, **62**, 34-49.
- Kim, M., Byun, J., and Seol, S. J., 2010, Study on microseismic monitoring method for enhanced oil recovery (EOR), *Journal of the Korean society for geosystem engineering*, **47**, 871-879.
- Kuang, W., Zhang, W., and Zhang, J., 2013, Locating microseismic events with S-wave data only. SEG Annual Meeting.
- Pearson, C., 1981, The relationship between microseismicity and high pore pressures during hydraulic stimulation experiments in low permeability granitic rocks, *Journal of Geophysical Research*, **86**, 7855-7864.
- Podvin, P., and Lecomte, I., 1991, Finite difference computation of traveltimes in very contrasted velocity models: a massively parallel approach and its associated tools, *Geophysical Journal International*, **105**, 271-284.
- Seibel, M., Baig, A., and Urbancic, T., 2010, Single Versus Multiwell Microseismic Recording: What Effect Monitoring Configuration Has On Interpretation, SEG Annual Meeting, Denver, Colorado, 2010-2065.