

## 인도네시아 머루압 유전에 이산화탄소 주입 시 균열대 생성 여부 모니터링

김도완<sup>1</sup> · 변중무<sup>1\*</sup> · 김기석<sup>2</sup> · 안태웅<sup>3</sup>

<sup>1</sup>한양대학교 자원환경공학과

<sup>2</sup>(주)희송지오테크

<sup>3</sup>한국지질자원연구원

### Monitoring of Fracture Occurrence During Carbon Dioxide Injection at the Meruap Oil Reservoir, Indonesia

Dowan Kim<sup>1</sup>, Joongmoo Byun<sup>1\*</sup>, Kiseog Kim<sup>2</sup>, and Taewoong Ahn<sup>3</sup>

<sup>1</sup>*Dept. of Earth Resources and Environmental Engineering, Hanyang Univ.*

<sup>2</sup>*Heesong Geotek Co., Ltd*

<sup>3</sup>*Korea Institute Geoscience and Mineral Resources (KIGAM)*

**요약:** CO<sub>2</sub>-EOR (CO<sub>2</sub>-Enhanced Oil Recovery)은 석유회수증진법 중 하나로, 석유 생산량을 증대시키는 동시에 이산화탄소를 지중에 격리시킬 수 있는 기술이다. 하지만 이산화탄소 주입 시, 지층 내 균열이 발생하는 경우 저류층 내에 이산화탄소의 영구저장이 어려워지고, 지하수 및 토양의 오염을 야기할 수 있다. 따라서 이 연구에서는 인도네시아 머루압 유전에 이산화탄소 주입 시, 미소진동 모니터링을 수행하여 저류층 내 균열의 발생여부를 파악하고자 하였다. 미소진동 초동 발체에는 Improved MER (Modified Energy Ratio) 방법을 이용하였다. 초동 발체 후에는 이벤트의 방위각을 계산하기 위하여 다성분 지오폰에서 기록된 트레이스를 이용해 호도그램 분석을 수행하였다. 최종적으로 초동 발체 결과와 호도그램 분석 결과를 이용하여 미소진동 위치결정을 수행하였다. 미소진동 위치결정 결과를 통해 저류층 주변에 균열의 발생여부를 확인해 본 결과, 미소진동 발생 위치는 모두 지표에서 나타나고 있으며 저류층 내 균열은 확인되지 않았다. 또한 잡음의 특성을 분석하여 초동 발체된 이벤트가 대부분 규칙적인 기계적 잡음에 의한 것임을 확인할 수 있었다.

**주요어:** CO<sub>2</sub>-EOR, 미소진동 모니터링, 이벤트 위치결정

**Abstract:** CO<sub>2</sub>-EOR (Carbon Dioxide-Enhanced Oil Recovery), one of the enhanced oil recovery methods, helps to not only enhance the production of oil, but also store carbon dioxide in underground. However, if micro fractures occur when during the injection of CO<sub>2</sub>, it is difficult to make permanent storage of CO<sub>2</sub> in reservoir and can cause contamination of groundwater and soil. Therefore, in this study, we performed microseismic monitoring to investigate the occurrence of fractures during the CO<sub>2</sub> injection at the Meruap oil reservoir, Indonesia. To pick the first arrivals of microseismic events, Improved MER (Modified Energy Ratio) method was used. After picking the first arrivals, hodogram analysis was carried out by using the data recorded at three component geophones to calculate the back azimuth of events. Finally, locations of microseismic events were decided by using the results of first arrival picking and hodogram analysis. Estimated locations showed that all microseismic events were occurred at surface and any fracture did not occur around the reservoir. Moreover, by analyzing noise characteristic, we confirmed that almost of picked first arrivals were due to the repetitive mechanical noise.

**Keywords:** CO<sub>2</sub>-EOR, Microseismic monitoring, Event location

Received: 26 January 2016; Revised: 26 February 2016;

Accepted: 26 February 2016

\*Corresponding author

E-mail: [jbyun@hanyang.ac.kr](mailto:jbyun@hanyang.ac.kr)

Address: Dept. of Earth Resources and Environmental Engineering,  
Hanyang University, 222 Wangsimni-ro, Seongdong-gu, Seoul, Korea.

©2016, 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.

### 서론

최근 석유·가스 저류층 내 잔존 석유자원의 회수율을 증진시키기 위한 석유회수증진법(Enhanced Oil Recovery)에 대한 관심이 높아짐에 따라 국내외에서 관련기술 개발을 위해 활발한 연구가 진행 중이다. 이러한 석유회수증진법 중 하나인 CO<sub>2</sub>-EOR은 고압의 이산화탄소를 주입하여 저류층내 원유의 점성도를 낮춰 석유자원의 회수율을 높이는 방법이다. 또한 CO<sub>2</sub>-EOR 공법은 석유 생산량을 증대시키는 동시에 이산화탄소를 지중에 영구적으로 격리시킬 수 있는 기술로, 온실가스에 대한 관심이 높아짐에 따라 CCS (Carbon Capture and Sequestration) 측면에서도 주목 받고 있다(Kim and Bae, 2013).

하지만 이산화탄소 주입 시, 이산화탄소를 고압으로 주입하기 때문에 저류층 내 균열이 발생할 수 있으며, 이렇게 발생한 균열을 따라 이산화탄소의 누출이 발생할 수 있다. 이산화탄소가 저류층 밖으로 누출되는 경우 이산화탄소의 지중저장이 어려워지고, 누출된 이산화탄소로 인하여 지하수 및 토양의 오염이 야기될 수 있다. 따라서 이산화탄소 주입 시 저류층 내 균열의 발생여부를 파악하는 것이 매우 중요하며, 이는 미소진동 모니터링 기술을 이용하여 알아낼 수 있다.

미소진동 모니터링 기술의 일환인 미소진동 이벤트 위치결정 기술은 파쇄대의 위치 및 성장 방향, 발생시간 등을 예측할 수 있는 기술이다. 미소진동 이벤트의 위치결정을 위해서는 미소진동 이벤트의 초동 발체가 선행되어야 한다. 또한 미소진동 모니터링에 사용되는 수신기가 단일 배열로 설치된 경우, 해의 비유일성 문제가 발생하기 때문에 호도그램 분석을 통해 이벤트가 발생한 방향이 추가적으로 계산되어야 한다(Jones et al., 2014).

미소진동 이벤트의 초동 발체와 호도그램 분석은 모두 잡

음이 클수록 오차가 크게 발생한다. 따라서 신호 대 잡음비가 낮은 미소진동 자료의 특성상, 정확한 미소진동 이벤트 위치결정을 위해서는 잡음에 강한 초동 발체와 호도그램 분석 방법이 필요하다. 보편적으로 사용되는 초동 발체 방법으로는 STA/LTA (Short Term Average/Long Term Average) 방법(Earle and Shearer, 1994)과 MER (Modified Energy Ratio) 방법(Wong et al., 2009)이 있지만 두 방법 모두 잡음이 높아짐에 따라 오차가 크게 발생된다는 단점을 지니고 있다. 따라서 Lee et al. (2013) 등은 낮은 신호 대 잡음 비에도 보다 일관적인 결과를 도출하기 위하여, MER 방법을 개선한 IMER (Improved MER)을 제안한 바가 있다. 또한 Wong et al. (2009)은 다성분 지오폰에서 기록된 x, y축 성분의 에너지를 가중치로 사용하는 가중 최소자승근사법(weighted least-squares approximation)으로 이벤트의 방위각을 계산하는 방법을 제안하였다. 이를 이용하면, 에너지가 상대적으로 작은 잡음의 영향은 줄이고 에너지가 큰 신호의 영향을 높여 정확도를 향상시킬 수 있다.

이 연구에서는 인도네시아 머루압 유전지대에서 이산화탄소 주입 시 취득된 미소진동 모니터링 자료를 자료처리하여 미소진동 이벤트 위치결정이 수행되었다. 미소진동 이벤트의 위치결정은 초동 발체, 호도그램 분석결과를 이용하여 격자탐색법을 통해 수행되었다. 또한 주변 잡음이 많은 지역 특성상, 미소진동 이벤트의 위치결정 이후 잡음의 특성을 분석하여 위치결정 결과의 타당성을 확인해보고자 하였다.

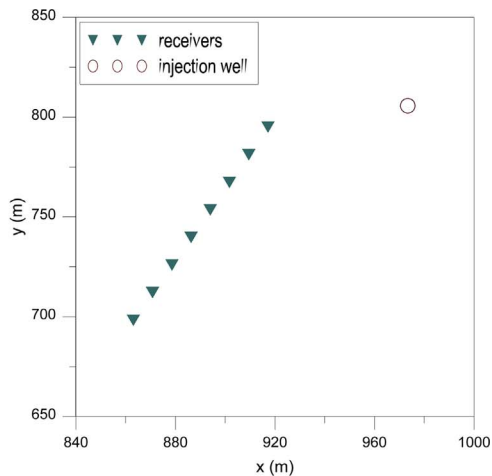
### 미소진동 이벤트 위치결정

#### 모니터링 대상지역

이산화탄소 주입 및 미소진동 모니터링이 수행된 대상지역은 인도네시아 사로나운 내 위치한 머루압 유전지대로, 이산



(a)



(b)

Fig. 1. (a) Air photo of target area (from Google Earth). (b) The converted Cartesian coordinates of receivers and injection well.

화탄소 주입정도로의 진입로 1개의 축선상에 15 m 간격으로 8개의 다성분 지오폰이 설치되었다. 이산화탄소 주입정과, 지오폰의 위치는 Fig. 1a에 도시된 바와 같다. 제공된 좌표정보는 위경도 좌표로 기록되어있으나 위경도 좌표로 위치결정 시 작은 위경도 오차도 큰 거리오차로 작용할 수 있기 때문에 본 용역에서는 직교 좌표로 환산하여 위치결정을 수행하였다(Fig. 1b).

다성분 지오폰에서 미소진동 신호는 0.5 ms 간격으로 기록되었고 32 sec 동안의 측정과 15 sec 동안의 자료 저장 과정이 반복되었다. 2015년 6월 3일부터 7월 6일까지 심도 약 650 m에서 총 476.8톤의 이산화탄소가 주입되었으며, 이 중 6월 9일부터 7월 6일까지 중 19일 동안 미소진동 모니터링이 이루어졌다. 이 논문에서는 그 중 가장 주입이 많이 이루어진 6월 20일, 30일과 7월 1일, 3일의 관측자료를 이용하여 미소진동 이벤트 위치결정을 수행하였다.

### IMER을 이용한 초동 발체

미소진동 자료는 통상적으로 모멘트 규모 0 이하의 미세 지진파로, 신호의 에너지가 매우 작아 정확한 초동 발체가 매우 어렵다. 또한 미소진동 모니터링 수행 시 자료의 양이 방대해 보다 정확한 자동 초동 발체에 관한 연구가 꾸준히 진행 중에 있다. 그 중에서도 MER 방법(Wong *et al.*, 2009)은 인접한 두 개의 윈도우를 설정하여 두 윈도우 내 에너지의 비와 두 윈도우가 접한 지점에서의 진폭을 이용하는 자동 초동 발체 방법이다. MER은 식 (1)과 같이 정의된다.

$$MER_i = [ER_i \cdot \text{abs}(x_i)]^3, \quad i = 1, 2, 3, \dots, ns \quad (1)$$

여기서  $x_i$ 는 윈도우가 인접한 지점의 진폭을 의미하며  $ns$ 는 트레이스 내 기록된 샘플의 총 개수이다.  $ER_i$ 는 인접한 윈도우의 에너지 비율을 의미하며 식 (2)와 같이 정의된다.

$$ER_i = \frac{\sum_{j=i}^{i+ne} x_j^2}{\sum_{j=i-ne}^i x_j^2} \quad (2)$$

여기서  $ne$ 는 윈도우의 길이를 의미한다. MER 방법은 트레이스 내 모든 샘플에서의 MER을 계산하고 이 중 MER 값이 가장 큰 샘플이 기록된 시간을 이벤트 초동 시간으로 간주한다. 하지만 MER 방법은 미소진동 신호가 최소위상이 아닌 경우, 혹은 신호 대 잡음 비가 낮은 경우 이탈값이 발생한다는 단점이 있다.

이러한 문제점을 개선하여 Lee *et al.* (2013)이 제안한 IMER방법은 기존 MER 방법과는 다르게 3개의 윈도우를 사용한다(Fig. 2). MER 방법을 IMER 방법으로 확장하는 첫 단계로 첫 번째 윈도우와 두 번째 윈도우, 첫 번째와 세 번째 윈도우 사이의 MER을 각각 계산한다.

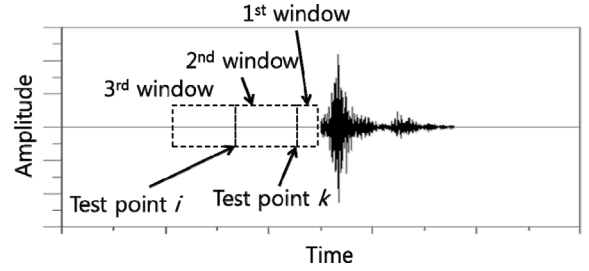


Fig. 2. Windows and test points used in IMER method.

$$MER_{k(1,2)} = [ER_{k(1,2)} \cdot \text{abs}(x_k)]^3, \quad k = 1, 2, 3, \dots, ns \quad (3)$$

$$ER_{k(1,2)} = \frac{\sum_{j=k}^{k+ne_1} x_j^2}{\sum_{j=k-ne_2}^k x_j^2} \quad (4)$$

$$MER_{i(1,3)} = [ER_{i(1,3)} \cdot \text{abs}(x_i)]^3, \quad i = 1, 2, 3, \dots, ns \quad (5)$$

$$ER_{i(1,3)} = \frac{\sum_{j=i+ne_2}^{i+ne_1+ne_2} x_j^2}{\sum_{j=k-ne_3}^i x_j^2} \quad (6)$$

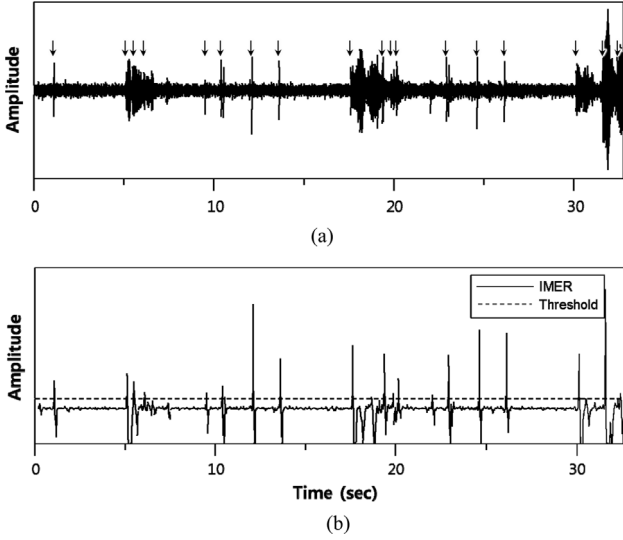
여기서  $ne_1$ ,  $ne_2$  그리고  $ne_3$ 은 각각 첫 번째 윈도우, 두 번째 윈도우, 세 번째 윈도우의 길이를 의미한다. 위의 관계식에서 점  $k$ 가 신호를 지나기 전에는  $MER_{k(1,2)}$ 와  $MER_{i(1,3)}$ 은 거의 같은 값을 갖는 반면, 점  $k$ 가 신호를 지나는 순간 점  $i$ 는 아직 잡음 영역에 존재하므로  $MER_{k(1,2)}$ 와  $MER_{i(1,3)}$ 은 서로 다른 값을 갖는다.

다음으로 식 (7)에 따라  $IMER_k$ 은  $MER_{k(1,2)}$ 와  $MER_{i(1,3)}$ 의 이동 평균인  $MA_{k(1,2)}$ 와  $MA_{k-ne_2(1,3)}$ 의 차로 정의한다.

$$IMER_k = MA_{k(1,2)} - MA_{k-ne_2(1,3)}, \quad k = 1, 2, 3, \dots, ns \quad (7)$$

식 (7)과 같이 계산된 IMER 방법을 이용하는 경우, 잡음의 영향을 줄이고 신호가 최소위상이 아닌 경우에도 안정적인 초동 발체가 가능하다. 또한 MER 방법에서는 MER의 최대값만을 초동으로 간주하는 반면, IMER 방법에서는 IMER의 평균을 기준값(threshold)로 설정하여 기준값을 넘을 때를 모두 초동으로 간주한다. 따라서 IMER 방법을 이용하게 되면 하나의 이벤트 뿐만 아니라 여러 개의 연속적인 이벤트에 대해서도 초동 발체가 모두 가능하다. 이 연구에서는 IMER을 적용 시, 좀 더 잡음에 엄격한 초동 발체를 위하여 IMER의 평균의 2배를 기준값으로 사용하였다.

Fig. 3은 취득된 자료 중 32 sec 동안 4번 지오폰에 기록된 x성분 트레이스에 IMER을 적용하여 초동 발체한 결과이다. Fig. 3a는 초동 발체 결과를 보여주며, Fig. 3b에는 계산된 IMER을 도시하였다. 계산된 IMER은 잡음영역에서는 작은



**Fig. 3.** (a) A seismogram recorded for 32 sec and the arrows indicate auto-picks. (b) The calculated IMER and its threshold. The arrivals are determined when IMER exceeds the threshold.

값을 갖고, 신호가 들어오는 부분에서 큰 값을 가져 초동발체에 용이함을 알 수 있다.

### 호도그램 분석을 이용한 방위각 계산

이 연구에서 사용된 수신기 배열과 같이 수신기가 단일 배열로 설치된 경우, 해의 비유일성 문제를 해결하기 위해서는 이벤트 방위각을 계산해야 한다. 방위각 계산 방법 중 호도그램 분석은 P파의 입자운동방향이 파의 진행방향과 같다는 성질을 이용한다(Albright and Pearson, 1982). 따라서 식 (8)과 같이  $\mathbf{d}_x$ 와  $\mathbf{d}_y$ 를 정의하면,  $\mathbf{d}_x$ ,  $\mathbf{d}_y$ 와 방위각  $m$ 의 관계는 식 (9)와 같다.

$$\mathbf{d}_x = \begin{pmatrix} g_x(t_1) \\ g_x(t_2) \\ \vdots \\ g_x(t_n) \end{pmatrix}, \mathbf{d}_y = \begin{pmatrix} g_y(t_1) \\ g_y(t_2) \\ \vdots \\ g_y(t_n) \end{pmatrix} \quad (8)$$

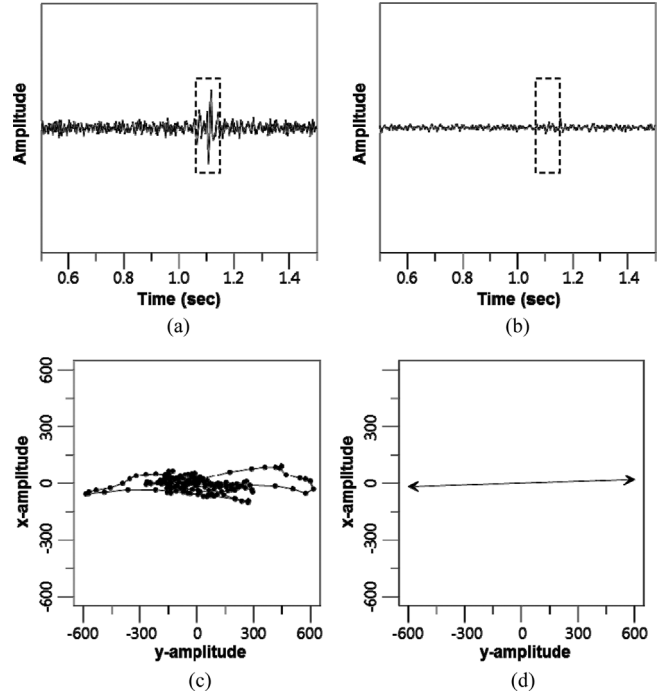
$$\mathbf{d}_x m = \mathbf{d}_y \quad (9)$$

여기서  $g_x(t_i)$ 와  $g_y(t_i)$ 는 각각 시간  $t_i$ 에서 기록된  $x$ 성분과  $y$ 성분의 진폭을 의미하고,  $n$ 은 호도그램 분석에 사용된 윈도우 내 샘플의 개수를 의미한다.

호도그램 분석에서 가장 쉽게 방위각을 계산하는 방법으로는 식 (10)을 이용하는 최소자승근사법이 있다.

$$m = (\mathbf{d}_x^T \mathbf{d}_x)^{-1} \mathbf{d}_x^T \mathbf{d}_y \quad (10)$$

이러한 근사법은 잡음이 없는 경우 정확한 방위각 계산이 가능하지만, 잡음에 민감하여 낮은 신호 대 잡음 비에서 큰 오차를 보이게 된다. 따라서 Han *et al.* (2010)는 식 (10)에



**Fig. 4.** (a) The  $x$ -component and (b)  $y$ -component traces which recorded at the multi-component geophone. The dotted box means the window for hodogram analysis. Its length is 90 ms and started from picked arrival time. (c) The cross-plot of the  $x$  and  $y$ -component traces. (d) The result of hodogram analysis using weighted least-squares approximation.

가중치  $\mathbf{W}$ 를 추가하여 식 (11)를 제안하였다.

$$m = (\mathbf{d}_x^T \mathbf{W} \mathbf{d}_x)^{-1} \mathbf{d}_x^T \mathbf{W} \mathbf{d}_y \quad (11)$$

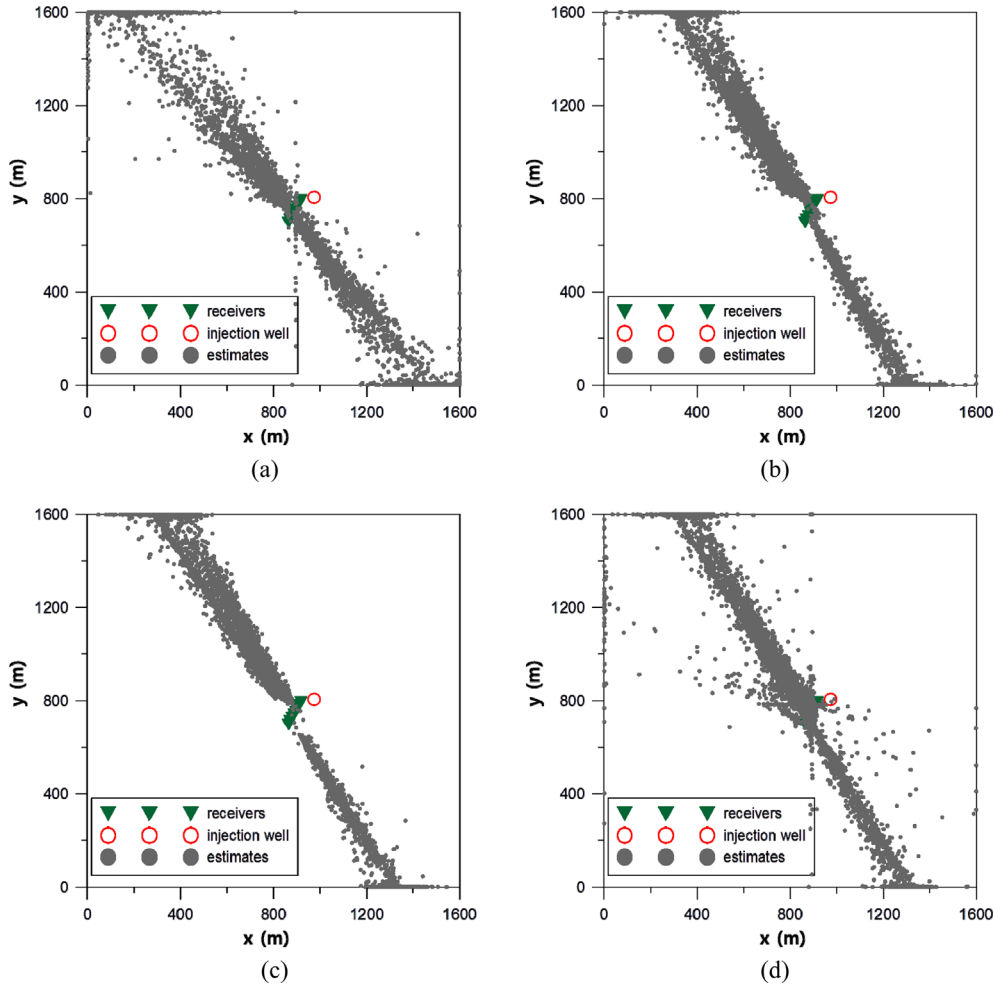
여기서  $\mathbf{W}$ 는 대각행렬이며  $x$ 성분과  $y$ 성분에서 기록된 에너지를 주대각 원소로 사용한다(식 (12)). 일반적으로 잡음부분의 에너지는 신호의 에너지보다 작아 식 (11)를 사용하면 잡음의 영향을 상대적으로 감소시킬 수 있다.

$$\text{diag}(\mathbf{W}) = [g_x^2(t_1) + g_y^2(t_1), g_x^2(t_2) + g_y^2(t_2), \dots, g_x^2(t_n) + g_y^2(t_n)] \quad (12)$$

Fig. 4a와 Fig. 4b는 각각 Fig. 3a의  $x$ ,  $y$  성분 트레이스 중 0.5 sec에서 1.5 sec까지의 영역을 확대하여 도시한 그림이다. 초동 발체된 시간으로부터 90 ms의 윈도우를 설정하여 호도그램 분석 하였으며, 이를 Fig. 4d에 도시하였다. 가중 최소자승근사법을 적용하여 신호의 추세를 잘 따르는 것을 확인할 수 있다.

### 미소진동 이벤트 위치역산

미소진동 초동 발체 결과와 호도그램 분석 결과를 이용하여 미소진동 이벤트 위치결정을 수행하였다. 위치결정에는 Kim *et al.* (2015)이 개발한 위치역산 모듈이 사용되었다. 미소진동 이벤트 위치결정은 총 두 단계에 걸쳐서 이루어졌다. 첫 번째로는 앞서 결정된 방위각의 정보를 이용하여  $x$ ,  $y$ 좌표



**Fig. 5.** Map view of location results (grey circles) on (a) June 20, (b) June 30, (c) July 1 and (d) July 3, 2015. Green reverse triangles and red circle indicate receivers and injection well, respectively.

를 결정하는 과정이다. 이 과정을 수식으로 나타내면 식 (13)을 최소화하는  $x, y$  좌표를 결정하는 것과 같아 지며, 이 연구에서는 격자탐색법을 이용하여 결정하였다.

$$\Phi_1(x, y) = \sum_{i=1}^{nr} \left( \frac{ry_i - y}{rx_i - x} - m_i \right) \quad (13)$$

여기서  $rx_i$ 와  $ry_i$ 는 각각  $i$ 번째 수신기의  $x, y$  좌표를 의미하고  $nr$ 은 수신기의 개수를 의미한다. 두 번째로 이벤트의  $x, y$  좌표가 결정된 후에는 식 (14)를 최소화하는  $z$  좌표를 격자탐색법을 이용하여 결정하였다.

$$\Phi_2(x, y, z) = \sum_{j=1}^{N_p-1} \sum_{k=j+1}^{N_p} \left[ (t_{pick}^j - t_{cal}^j) - (t_{pick}^k - t_{cal}^k) \right]^2 \quad (14)$$

여기서  $N_p$ 는 발체된 도달시간의 개수를 의미하고,  $t_{pick}$ 과  $t_{cal}$ 은 각각 발체된 도달시간과 계산된 주시를 의미한다.

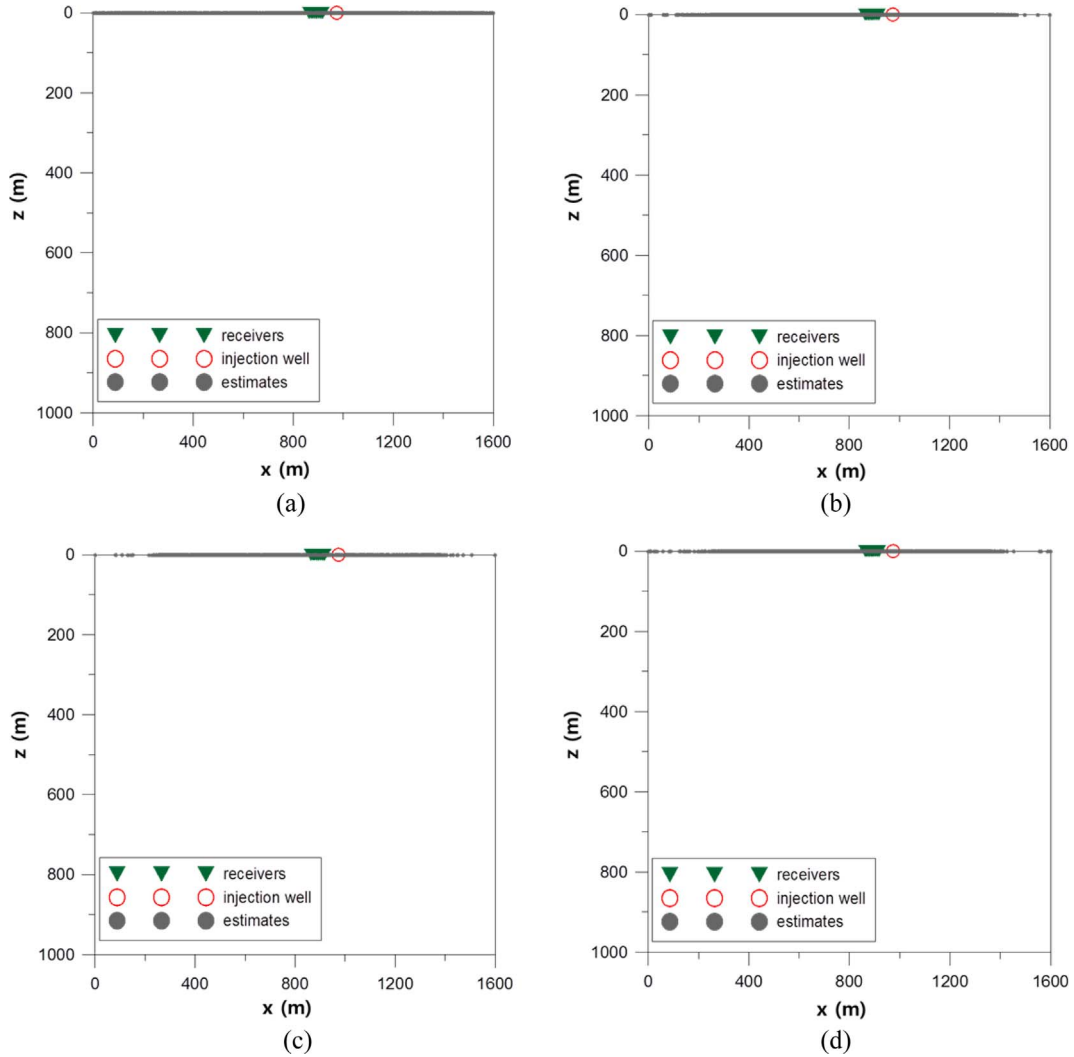
Fig. 5와 Fig. 6은 각각 위치역산이 수행된 4일의 역산결과를  $xy$  평면과  $xz$  평면에 도시한 그림이다. Fig. 5를 보면 위

지역산 영역에 비해 수신기가 설치된 영역이 협소하고 수신기가 모두 단일 축선상에 존재하기 때문에 정확한  $xy$  좌표를 획득했다고 보기는 힘들다. 다만, 위치역산 결과가 모든 날짜에서 일정한 추세를 보이는 걸로 보아 추세선상에 지속적인 잡음원이 존재하는 것으로 판단된다. 또한 Fig. 6을 보면 모든 위치역산 결과가 이산화탄소 주입이 이루어진 심도가 아닌 지표에서 위치결정 되는 것을 확인할 수 있다. 따라서 이 연구에서 수행한 미소진동 위치결정을 통해, 균열에 의한 미소진동 이벤트는 관측되지 않았으며 초동 발체된 신호들은 모두 잡음원으로부터 발생한 것으로 해석된다.

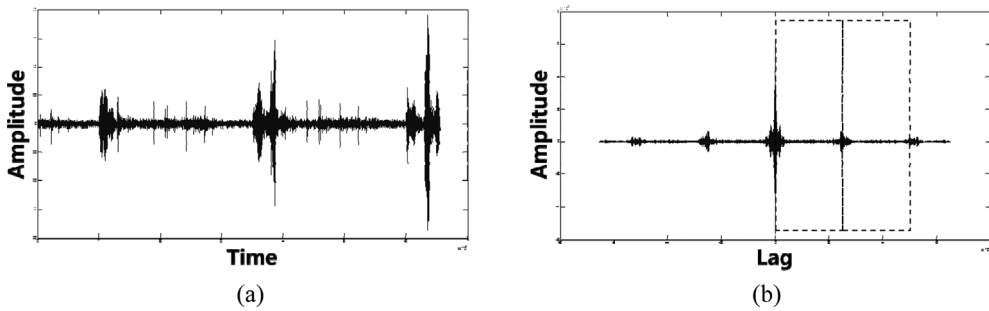
### 잡음 분석

#### 자기상관을 이용한 잡음의 특성 파악

이 연구에서 수행된 미소진동 이벤트 위치결정을 통해서 저류층 내 균열에 의한 미소진동 이벤트가 발견되지 않았으며 지속적인 잡음원이 존재한다는 결론을 얻을 수 있었다. 따



**Fig. 6.** Cross section of location results (grey circles) on (a) June 20, (b) June 30, (c) July 1 and (d) July 3, 2015. Green reverse triangles and red circle indicate receivers and injection well, respectively.

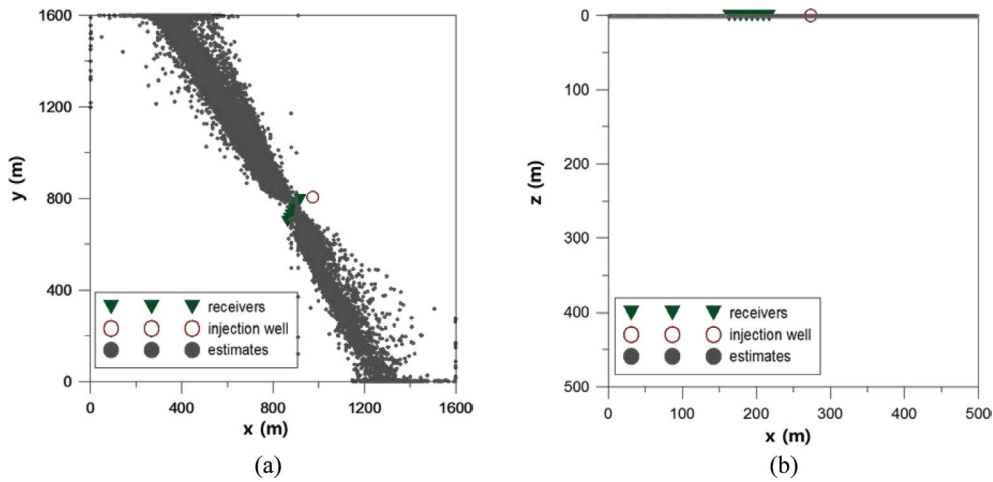


**Fig. 7.** (a) Input microseismic trace. (b) Autocorrelation result of (a). The width of dotted boxes is about 12.5 sec. It shows an existence of repetitive noise.

라서 결론의 타당성을 더욱 확보하기 위해 잡음의 특성을 분석하였다. 그 첫 단계로 각각의 수신기에서 기록된 트레이스들에 자기상관을 적용하여 규칙적인 잡음의 존재를 확인하고자 하였다.

Fig. 7a는 하나의 지오폰에서 32 sec 동안 기록된 트레이스

이며, Fig. 7b는 Fig. 7a의 자기상관 결과이다. 그림에서 볼 수 있듯이 해당 지역에서는 규칙적인 잡음이 발생하며, 이는 약 12.5 sec의 주기성을 지니고 있다. 마찬가지로 이러한 특징은 다른 지오폰에서도 모두 확인되어, 주기적으로 잡음을 발생시키는 잡음원의 존재를 확인할 수 있었다.



**Fig. 8.** (a) Map view and (b) cross section of location results (grey circles) which obtained during four days after injection of carbon dioxide. Green reverse triangles indicate receivers and red circle is injection well.

**이산화탄소 주입 종료 후 모니터링**

해당 지역의 잡음 특성을 파악하기 위한 두 번째 단계로, 이산화탄소 주입 종료 후 동일한 모니터링 과정을 수행하여 이산화탄소 주입 시의 모니터링 결과와 비교하였다. 모니터링은 이산화탄소의 주입이 끝나고 수 일 후인 2015년 8월 29일부터 9월 1일까지 나흘 동안 이루어졌다.

이산화 탄소 주입 종료 후 모니터링이 수행된 나흘 동안 발췌된 신호들에 대하여 위치결정한 결과를 Fig. 8에 도시하였다. 이산화탄소 주입 중 모니터링 결과인 Fig. 5, Fig. 6와 마찬가지로 모두 지표에서 위치결정 되었으며, xy 평면상 모두 동일한 추세를 보였다. 이는 이산화탄소 주입 여부와 관계없이 해당지역의 지표상에 잡음원이 존재하고 있음을 의미한다.

**결 론**

이 연구에서는 인도네시아 머루압 사로나운 유전지대에서 이산화탄소 주입 시 미소진동 위치결정 기술을 사용하여 저류층 내 파쇄여부를 파악하였다. 위치역산을 통해 결정된 이벤트들은 모두 지표에서 위치결정되었고, xy평면 상에서 대부분의 이벤트들이 가시적으로 일정한 선상에 위치결정되는 것을 확인할 수 있었다. 이러한 결과가 나온 이유는 모니터링에 단일 축선상에 존재하는 소량의 수신기만이 사용되어 정확한 위치결정 결과를 얻기 힘들었기 때문이다. 하지만 모든 이벤트가 지표, 하나의 선 상에서 위치결정되는 모습으로 보아, 해당 선 상에 지속적으로 잡음을 발생시키는 잡음원이 존재한다고 보여진다. 또한 모든 이벤트가 이산화탄소 주입이 이루어진 심도가 아닌 지표에서 위치결정된 것으로 보아 저류층 내 균열은 아닌 것으로 판단된다.

위치결정 이후, 해당지역 잡음의 특성을 분석하였다. 첫 번째로 각각의 수신기에서 기록된 트레이스들에 자기상관을 적

용하여 반복적인 잡음이 지속적으로 나타나고 있음을 확인하였다. 두 번째로 이산화탄소 주입이 이루어지지 않을 때에도 해당 잡음 특성이 나타나는지 확인해 보기 위하여 이산화탄소 주입 종료 후 수일이 지난 후 동일한 모니터링 과정을 반복하였다. 이를 통해 잡음은 이산화탄소 주입과 관계없이 나타남을 확인할 수 있었다.

이 연구에서는 수신기가 풍화된 지표 위에 설치되었으며, 단일 축선상 소량 존재하여 정확한 위치결정에는 어려움이 있었다. 하지만 실제 CO<sub>2</sub>-EOR 현장에 적용 시 효과적인 수신기 배열에 대한 고려가 앞서 이루어 진다면 보다 정확하게 파쇄 정보를 획득할 수 있을 것으로 기대된다.

**감사의 글**

본 연구는 2016년도 산업통상부의 재원으로 한국에너지기술연구원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다 (No. 20134010200520, No. 20122010200060).

**References**

Albright, J. N., and Pearson, C. F., 1982, Acoustic emissions as a tool for hydraulic fracture location: Experience at the Fenton Hill Hot Dry Rock Site, *Society of Petroleum Engineers Journal*, **22**, 523-530.

Earle, P. S., and Shearer, P. M., 1994, Characterization of global seismograms using an automated picking algorithm, *Bulletin of the Seismological Society of America*, **84**, 366-376.

Han, L., Wong, J., and Bancroft, J. C., 2010, Back propagation analysis for hypocenter location, *CREWES Research Report*.

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, D., Kim, M., Byun, J., and Seol, S. J., 2015, Locating Microseismic Events using a Single Vertical Well Data, *Geophysics and Geophysical Exploration*, **18**, 64-73.
- Kim, H. M., and Bae, W., 2013, Enhanced Oil Recovery (EOR) Technology Coupled with Underground Carbon Dioxide Sequestration, *Tunnel and Underground Space*, **23**, 175-184.
- Lee, M., Kim, D., Choi, J., Kim, M., and Byun, J., 2013, Improved MER method for accurate first arrival picking, *KSGE 101st conference, Expanded Abstracts*, 95-97.
- Wong, J., Han, L., Bancroft, J. C., and Stewart, R. R., 2009, Automatic time-picking of first arrivals on noisy microseismic data, *CREWES Research Report*.