

# Microseismic source imaging in a compressed domain

Ismael Vera Rodriguez and Mauricio D. Sacchi

Geophysical Journal International, V198. p. 1186-1198, 2014

Date: 2014/11/21

Summarized by Jeong-Ung Woo

세일 가스와 같은 자원을 채취할 때 쓰이는 수압파쇄는 지반 균열에 영향을 준다. 수압파쇄로 발생하는 미소 지진을 모니터링하여 물주입이나, 지반 균열의 특성을 이해하게 되면, 이에 대한 예상과 대비를 할 수 있다. 미소 지진은 대개 한 점에서 발생한다고 가정하며 시간, 위치, 규모는 빠르고 쉽게 계산가능하나, 모멘트텐서해는 그렇지 않다.

이번 연구에서 도입한 개념인 압축센싱(compressive sensing; CS)은 전 파형을 사용하여 지진의 source parameter에 대해 빠르게 계산하는 방법이다. CS는 sparse representation를 이용하여 데이터 양을 줄이면서 계산 시간을 줄이는 방법이다. 줄어든 데이터 양로부터 source parameter를 구하는데에는 Block Orthogonal Matching Pursuit의 개념을 사용한다. 이 연구에서는 Source parameter를 추측하는 데에 사용되는 adjoint method와 inverse method를 CS에 의한 압축 정도에 얼마나 잘 견디는지 비교하려 하였다 .

$\xi$ 에 모멘트  $M_{pq}$ 인 source가 있고, 위치  $x$ , 시간  $t$ , 에 대한 변위장은 eq(2)  $u_n(x, t) = M_{pq} \left[ s(t) * \frac{\partial}{\partial \xi_q} G_{np}(x, t; \xi, t_0) \right] = M_{pq} g_{npq}(x, t; \xi, t_0)$ 로 표시된다. 이를 주파수 영역로 변수를 바꾸면 eq(3)  $U_n(x, \omega) = M_{pq} g_{npq}(x, \omega; \xi, t_0) = M_{pq} S(\omega) A_{npqk} e^{-i\omega t_k}$ 로 표현된다. 여기서  $S$ 는 source time function이며,  $G$ 는 green function,  $N$ 은 receiver 성분이며,  $t_0$ 는 지진 발생 시각,  $pq$ 는 모멘트텐서해와 관련된 값이며,  $k$ 는 지진의 파종류를 의미하고,  $A$ 는 amplitude를 의미한다. Eq(4)  $u = Gm$ 은 행렬, 벡터 표현 방법으로 eq(2)를 바꾼 것이며,  $G$ 는 그린 함수에 의해 생성되는 forward propagation operator이다. 행렬  $G$ 는 대개 커서 역산이 어려우며  $GG^H \approx I$ 인 adjoint 행렬을 이용하면  $\hat{m} = G^H u$ 로써 간단히 모델의 값을 추정할 수 있다. 저 근사가 가능한 정도를 나타내는 coherence는 하나의 자리에서의 6개 성분의 그린 함수에 대한 subcoherence와 여러 자리에서의 그린 함수에 대한 block-coherence가 있다.

$G$ 에 adjoint를 취하여  $m$ 을 구할 때  $G$ 가 정확히 orthogonal이 아니므로,  $m$ 을 정확하게

추정할 수는 없다. 따라서 시간은 더 걸리나 정확성을 위해 다음의 역산을 생각 할 수 있다.  $\hat{m} = (G^H G)^{-1} G^H u$  이를 이용하면 지진의 위치와 모멘트텐서해를 구할 수 있다. 만일 여기에 CS의 개념을 도입한다면 다음의 식을 생각해야 한다.  $\Phi u = \Phi G m$ , Phi는 random matrix로 가우스 분포를 가지는 숫자와 RIP의 조건을 만족하여야 한다. 이를 고려한 역산은  $\hat{m} = (G^H \Phi^T \Phi G)^{-1} G^H \Phi^T \Phi u$ 로 제시된다. 계산은 Matlab을 이용하였으며, 16코어 컴퓨터를 사용하였다.

이 연구에서 가상의 2D모델을 먼저 고려하였다. source에 대한 격자를 15m간격으로 설정하고 수직 성분을 측정하는 receiver가 50m간격으로 41개 설치되어 있으며 합성파 지진 자료는 Peak amplitude ratio가 1, 0.5, 0.25가 되도록 만들었다. 여기서 비압축 및 여러 압축된( $\Phi$ 가 10종류) G값에 대해, adjoint와 inverse의 방법을 사용하여 source parameter를 구한 값과 참값을 비교한 결과와 두 구한 값 사이의 차이를 계산하였다. 그 결과 adjoint로 구한 결과가 노이즈가 적을 때 오차가 많으며, inverse를 이용한 결과가 모멘트텐서해 및 규모 값을 더 잘 추측하였고, 적절한 압축수준이 비압축할 때의 결과를 더 잘 재현할 수 있는 등의 관측 결과를 얻어냈다.

실제 자료는 Arkansas 실험에 비추어, 1성분 및 3성분 geophone으로 2265개의 receiver를 설정하고 격자 간격을 40m로 두고 source node를 14,007개로 설정하였다. 이때 green's function을 512의 time sample로 모으면 dictionary의 크기가 800GB라서 CS또는 ray tracing을 이용하여야 한다. 합성파로 테스트 한 결과는 adjoint method가 location을 더 잘 결정하며 noise level 측면에서 0.48% 압축률이 0.31%, 0.19% 압축률보다 좋을 것이라 보여졌다. Adjoint method를 통해서 지진발생시각 및 지진위치만을 결정하고, 그 뒤 모멘트 텐서해를 비압축 그린함수로 구할 수 있다. 실제 데이터의 압축 adjoint를 통해 source parameter를 추정된 결과는 downhole 결과 자료에 비교하여 동서 방향으로 차이를 있으며, 규모는 (추정컨데, attenuation에 의해) 더 작게 추정되었다.

추후의 연구에서는 미소 지진의 분석 시간을 줄이는 CS에 대해 입력데이터를 어떻게 처리하는가, 결과를 어떻게 하면 좀 더 개선할 수 있는가 등을 더 고려해볼 수 있다.