

Joint location and source mechanism inversion of microseismic events:
benchmarking on seismicity induced by hydraulic fracturing

D. Anikinev, J. Valenta, F. Stanek and L. Eisner

Geophysical Journal International, V198, P249-258, 2014

Date: 2014/10/8

Summarized by Jeong-Ung Woo

고 신호대잡음비(SNR; signal-to-noise ratio)의 지진의 빈도에 비해 저 SNR의 지진의 빈도는 기하급수적으로 많다. 저 SNR의 미소지진의 경우 stacking을 이용하면 높은 해상도를 얻을 수 있으며 나아가 지진의 위험도(seismic hazard) 및 수압 파쇄(hydraulic fracturing)에 대해서 이해할 수 있다. 미소 지진에 관한 연구는 광업에서 백여년의 역사를 지니며, 석유가스 산업에서의 응용은 시작단계에 있다. 비교적 고 SNR의 지진들은 독립적으로 진원지 결정에 이용될 수 있지만, 지표면에서 관측된 규모 -1미만의 지진들은 그렇지 못하다. 따라서 이들은 위에서 언급한 stacking 및 시차 역 모델링(time-reverse modelling)을 이용하여 처리를 해야한다. 이때 사용되는 기법들에는 semblance, SSA(source scanning algorithm), migration-type approach 등이 있다. 이번 연구에서는 staking을 이용한 지진발생 시각 및 진원지 결정에 있어서 이전의 연구에서는 다루지 않은, 극성 변화(polarity change)를 고려한 새로운 방법을 고안하고자 하였다.

이번 연구에서 사용한 방법인 diffraction stacking은 각 receiver로 부터 P-wave traveltimes을 moveout을 고려해 stacking하는 것으로, 그 값은 source의 위치(r) 및 지진발생시각(t)에 관한 함수로서 다음과 같이 표현된다. $F_0(r, t) = \left| \sum_{R=1}^{N_R} A_R(t + T_R(r)) \right|$ (N_R : #of receiver, A_R : observed waveform, $T_R(r)$: P-wave travel time) 그런데 이 식은 polarity에 의한 p파의 상쇄 효과가 나타나는 지진을 설명하지 못한다. 즉 strike slip fault로 예를들면, 등방 형태로 receiver가 둘러싼 형태에서 stacking값은 이론적으로 0이게 된다. 이러한 문제점은 모멘트 텐서를 도입하여, 해결될 수 있다. 모멘트텐서를 $M(r)$, Green function의 편도함수를 $G_R(r)$ 이라 할 때, polarity change를 고려한 stacking 식은 다음과 같이 표현된다. $F_0(r, t) =$

$|\sum_{R=1}^{N_R} \text{sign}(M(r)G_R(R))A_R(t + T_R(r))|$ 이 식은 모멘트텐서를 구하는 기존의 공식에서 부터 유도 가능하며, 이 방법을 DSMTI(Diffraction stacking with the moment tensor inversion)라고 한다. 이 식에서부터 $F_t(t) = \max_r F(r, t)$ 함수를 이용하여 지진발생시각을 결정할 수 있으며, 그에 따라 최대 공산(likelihood)를 이용하여 지진의 위치를 결정할 수 있고, 최종적으로는 모멘트텐서역시 결정가능하다.

본 연구에서는 위에서 언급한 방법을 USA Oklahoma의 Woodford 가스세일의 수압파쇄지역에 적용하였다. 방사형 선모양으로 배치된 총 911개의 수진기(geophone)가 사용되었으며 3-D isotropic P파 속도모델을 이용하였다. 모델은 음파검층(sonic logs)로 업데이트 하였으며 4번의 발사 데이터로부터, 발사지점의 수평적 정확도는 비교적 정확하게 나타났으나 깊이의 측정에서는 큰 오차를 보였다. 이런 부정확성을 고치기 위해 전체 모델의 속도를 5% 증가시켰다. 이런 결과는 vertical 비등방성의 transverse isotropy-type로 설명된다.

다음으로 고SNR을 지니는 34개의 지진에 대해 DSMTI를 또다른 location을 찾는 방법인 TML(Eisner et al.의 travelttime maximum likelihood)와 비교하는 작업을 하였다. 그 결과 수평적으로는 거의 유사하였으며, 수직적으로는 DSMTI가 평균 75m 위쪽에 기록되었다. 이러한 결과는 신호 감쇄율(signal attenuation)에 의해 설명된다. 지진 메커니즘은 몇몇의 두 평면이 모두 거의 수직에 가까운, 잘 정의 되지 못한 해를 제외하고는 잘 일치하였다.

다음으로 위에서 언급한 4번의 발사 데이터가 기록된 2008년도의 3일동안의 자료를 자동 감지(automatic detection)를 이용하여 $F_t(t)$, STA/LTA(ratio of short term energy avg. to long term avg.) 및 semblance(1이면 실제 지진에 가깝게 나오는 값)가 유사한 패턴을 보임다는 것을 확인하였다. 또한 슬러리 속도(slurry rate)와 실제 감지된 지진의 수치의 유사성을 확인하였다. 최종적으로 감지된 지진은 -0.3~-1.7의 규모로 SNR은 1.5에서 0.07의 값을 지닌다. 총 3일동안의 관측된 지진의 위치는 수평적으로 70도 가량의 NE방향의 경향성을 보여준다. DSMTI의 방법은 source mechanism을 구하는 방법으로서, case study를 통해 신뢰할 만하다는 결과를 보였으며 이는 실제모니터링에도 충분한 효율을 가질 수 있을 것이다.