

Precise location of San Andreas Fault tremors near Cholame, California using seismometer clusters: Slip on the deep extension of the fault?

David R. Shelly,¹ William L. Ellsworth,¹ Trond Ryberg,² Christian Haberland,² Gary S. Fuis,¹ Janice Murphy,¹ Robert M. Nadeau,³ and Roland Burgmann³

Received 17 October 2008; revised 26 November 2008; accepted 2 December 2008; published 6 January 2009.

San Andreas Fault에서 발생한 24시간 동안의 tremor에서 low frequency earthquake (LFE)의 진원을 정밀하게 결정하였다.

P- and S-Wave의 도달시간으로 부터 발생 위치를 결정한 LFE를 master template로 사용하여 24시간 동안 발생한 LFE들의 진원을 정밀하게 결정하였다.

SNR을 높이기 위하여 여러 관측소를 4개의 군으로 묶은 후, event-pair differential time을 구하여 위치 결정에 사용하였다.

Tremor를 구성하는 LFE들의 발생 위치는 SAF의 단층면의 연장면상의 깊은 위치에 분포한다. 이는 일본 등에서 발견되는 섭입대의 tremor와 비슷한 shear slip으로 해석된다. 또한 SAF가 지각의 바닥부분까지 연장된다는 것을 시사하고 있다.

Slow slip events인 Non-volcanic tremor는 몇몇 섭입대와 주향이동 단층 아래에서 발생한다.

주향이동 단층 지역에서 발생하는 tremor는 섭입대에서와 다르게 관련된 지형적인 변형을 동반하지 않는다.

이러한 tremor를 발생하는 에너지원의 위치를 결정하는 것은 매우 어렵다.

Shelly et al. (2006)은 이 tremor에서 상대적으로 impulsive한 body wave의 도달시간을 이용하여 몇몇 LFE의 발생 위치를 결정하였다.

Ide et al. (2007)은 LFE의 합산한 파형을 이용하여 모멘트텐서를 구함으로써 이들이 판의 이동방향과 부합하는 shear slip에 의해 발생하는 것을 밝혀냈다.

Shelly et al. (2007a)는 non-volcanic tremor가 연속적인 LFE의 발생으로 인해 나타나는 현상임을 밝혔으며, 이들 LFE이 시간에 따라 발생 위치가 이동하는 현상을 밝혀냈다.

LFE에 의해 발생하는 tremor는 매우 유사한 패턴의 파형이 반복된다.

이미 알려진 LFE에 의한 파형을 template이라고 하는데, 이와를 비교를 통해서 비슷한 파형을 가지는 이벤트와의 상대적인 거리를 정밀하게 구할 수 있다.

2007년 가을, SAF의 Cholame 지역 근처에 설치된 3개의 temporary array와 permanent 관측소들의 자료를 이용하여 이 지역에서의 tremor source의 위치를 정밀하게 결정하였다.

이 연구에서는 tremor 활동이 활발했던 2007년 10월 6일의 자료가 사용되었다.

이 날의 tremor 활동 중에서 한 이벤트에 대해서 P- and S-wave의 도달시간을 결정할 수 있었다.

이를 grid search 방법을 통해 진원의 위치를 구했는데, SAF 아래인 위도 35.74°, 경도 120.28°, 깊이 26km이었다.

이 이벤트는 보통의 지진과 유사해 보이지만 LFE임이 확실하며 이를 'master event'로 사용하여 다른 이벤트들의 상대적인 위치를 구하였다.

사용된 주파수 밴드는 2~8Hz이다.

Master event에서 6초 동안의 s-wave를 추출하여 하루동안의 연속 자료에서 0.02초 단위로 비교하여 LFE를 감지하였다.

낮은 SNR을 극복하기 위하여 master event와의 상관값을 4개의 관측소군으로 나누어 합산하여 분석에 이용하였다.

도달시간 차이는 각각의 관측소군에서 나온 자료를 합산했을 때 가장 큰 peak 값을 가지는 1초 미만의 time shift 값으로 부터 얻어진다.

이렇게 얻어진 도달시간 차이를 Double Difference algorithm을 이용하여 이벤트 간의 상대적 위치를 구하였다.

5개의 template으로부터 감지된 148개의 LFE의 진원은 SAF를 따라 분포한다.

이들의 깊이는 몇 미터 범위내에 분포한다.

이는 'primarily creeping faults'에서 발생하는 미소지진의 'streaks' 분포와 유사하며 'geometric or frictional boundary'의 위치를 나타내는 것으로 보인다.

이러한 'tremor streak'의 위치가 고정된 것인지 아니면 시간에 따라 변하는 것인지에 대해서는 추가적인 연구가 필요하다.

흥미로운 점은 진원의 깊이가 이 지역에서의 모호 깊이와 비슷하다는 점이다.

tremor는 SAF의 단층면의 연장면 깊은 곳에서 발생하고 있으며 이는 Nankai 해구의 섭입대에서와 같이 shear slip에 의해 발생하는 것으로 보여진다.

또한 단층면의 NW 또는 SE 방향으로 15-40km/hr의 속도로 진원의 위치가 이동하는 것을 발견할 수 있다.

bootstrap 분석에 의하면 master template LFE의 진원 위치는 위아래로 약 ± 3 km, 수평적으로 약 ± 4 km의 오차를 가지는 것으로 나타난다.

또한 속도구조로 인해 약 2km의 추가적인 오차요인이 있을 수 있다.

상대적의 위치는 보다 정확하게 구해지는데, 약 1km의 오차를 예상할 수 있다.

Cholame tremor의 진원은 약 25km 깊이에 SAF의 주향을 따라 선형으로 분포한다.

이는 SAF의 보통 지진이 발생하는 seismogenic한 곳보다 더 깊은 곳에서 shear slip에 의해 발생하는 것으로 해석된다.

Tremor는 'geometric or frictional boundary'에서 발생하는 것으로 여겨지는 데, 그에 따르면 SAF는 보통 지진이 발생하는 10km 깊이보다 깊은 곳까지 연장되는 것으로 보여진다.

Cascadia나 일본 남서부와 달리 지형의 변화가 없는 것은 이 지역의 tremor의 활동도가 낮기 때문으로 생각된다.