

Remote triggering of fault-strength changes on the San Andreas fault at Parkfield

Taka'aki Taira, Paul G. Silver, Fenglin Niu & Robert M. Nadeau

Seismic scatterer의 time-varying 특성은 중부 California의 Parkfield 근처의 San Andreas fault zone에서 stress-induced changes를 조사하기 위해 사용되어 왔다. 시간에 대한 scatterer 작용을 측정하기 위해 두 지진기록의 cross-correlation으로 유도된 decorrelation index $D(t)$ 를 사용하였고, High-Resolution Seismic Network (HRSN)에 의해 기록된 cluster화 된 repeating microearthquake 을 사용하여 22년(1987-2008)의 기간 동안 time-dependent scatterer 그룹의 작용을 추적할 수 있었다.

이 연구에서 세 번의 특이점을 발견했는데 첫 번째 $D(t)$ 의 특이점은 1992년 9월 10일과 1993년 2월 5일 사이의 기간에서 시작된 것으로 보여진다. 이 특이점은 1990년대 중반에 정점에 다다르고 다음 10년 동안 점차적으로 감소한다. 이 특이점은 1993년 Parkfield aseismic transient와 관련된 stress-induced fluid migration의 영향으로 해석된다. 두 번째 특이점은 2004년 9월 28일 $M_w=6.0$ 의 Parkfield earthquake이 발생한 시기(지진 발생 전 24일 전부터 발생 후 2시간)에 시작된 것으로 보여지며 순간적인 coseismic change와 일치한다. 관측된 구조적 변화는 아마 post-seismic stress relaxation과 직접적인 단층의 피해의 결과로 단층 주변의 fluid redistribution 때문이다. 세 번째 특이점은 2004년 Parkfield earthquake 이후 약 3개월에 나타난다. $D(t)$ 의 증가는 3개월 동안 일어났고 $D(t)$ 는 이후 1년 동안 천천히 감소했다. 또한 repeating-earthquake 특성 역시 변화였다. 2004년 Parkfield 지진 후에 T_r 은 증가하다가 3개월 이후에 중단되었다. 13개의 sequences 중 6개에서 2004년 Parkfield 지진의 6개월 이후에 T_r 이 가장 작은 값으로 나타났다. 이러한 현상을 탐구하기 위해 2004년 Parkfield 지진에 의한 post-seismic 효과를 Omori's law $T_r = at^p$ 을 가정하여 제거하고 residual recurrence interval $\hat{T}_r(t) = T_r(t)/(at^p)$ 을 계산하였다. 모든 가능한 sequence들을 사용하여 2004년 Parkfield 지진 이후 3개월부터 residual이 증가함을 발견했다. 이러한 증가된 변화성은 T_r 에서의 additional perturbation과 단층의 물리적 성질의 시간적 변화를 제안한다.

이러한 변화성의 흥미로운 점은 \hat{T}_r 과 M_0 사이의 비례하는 상호작용이다. 이러한 상호작용은 지진 발생에 대한 slip-predictable model과 일치한다. 상호작용을 가장 잘 보여주는 것은 sequence K3이다. \hat{T}_r 과 M_0 의 상호작용은 2004년 Parkfield 지진 이후 2~3개월 동안 단층의 강도의 변화를 제안한다. 2004년 Parkfield 지진 이후 6개월이 지났을 때 $\hat{T}_r(M_0)$ 의 감소는 단층이 시간적으로 약해짐을 지시한다. 3번째 특이점이 2004년 12월 21과 26일 사이에서 시작되었음을 발견했고 5일 동안에 발생한 구조적으로 가장 큰 지진은 2004년 12월 26일에 $M_w=9.1$ 의 규모로 발생한 Sumatra-Andaman earthquake이다. timing은 이 지진으로부터 dynamic stress가 단층지역의 구조적 변화와 단층의 강도 변화의 원인이 되는 fluid flow를 일으켰다고 제안했다. 이 연구는 이러한 동일한 dynamic stress가 단층강도의 긴 시간 동안의 변화를 일으킬 수 있다고 제안했다.

첫 번째와 세 번째 특이점에서 $D(t)$ 의 작용에서의 유사성들은 remote triggering의 가능성을 높인다. 관측 기간인 22년 동안 Parkfield에서 가장 큰 값으로 관측된 dynamic stress 변화는

1992년 6월 28일의 규모 $M_w = 7.3$ 인 Landers 지진이며 이 지진은 California와 Nevada에서 microseismicity를 일으켰다. 첫 번째 특이점은 1992년 Landers 지진으로부터 몇 개월 이후에 시작되었으며 repeating-earthquake 특성도 변화였다. Moment는 1990년대 중반에 가장 작은 값을 가졌고 $D(t)$ 와 geodetic slip rate는 최대값을 보였다. 이러한 지표 모두는 2004년 Parkfield 지진 이전에 1992년 이전의 상태로 되돌아 갔다. 세 번째 특이점과 같이 모든 작용은 1992년 Landers 지진의 dynamic stress는 구조를 변화시키고 연구지역에서 단층을 약하게 했다고 제안한다. 이러한 해석에서 1992년 Landers 지진은 1993년 Parkfield aseismic transient와 약해진 단층에 의해 $M > 4$ 의 cluster를 일으켰다.

Remote triggering의 두 hypothesized episode 사이에 많은 유사성이 있지만 차이점도 있다. 첫 번째는 1992년 Landers 지진은 San Andreas fault에서 유발된 slip으로 발생하였지만 2004년 Sumatra-Andaman 지진은 그렇지 않다. 두 번째는 2004년 Sumatra-Andaman 지진의 경우 $D(t)$ 의 관측한 변화의 징후가 순간적인 반면 1992년 Landers 지진의 경우에는 수 개월 동안 나타났다. Repeating-earthquake 특성에서의 상응되는 변화는 2004년 Sumatra-Andaman 지진은 몇 개월이었지만 1992년 Landers 지진은 몇 년이었다. 세 번째는 dynamic stress에 대한 민감도이다. 2004년 Sumatra-Andaman보다 큰 stress를 발생시킨 3개의 Parkfield 이전의 지진들(the 3 November 2002 $M_w = 7.9$ Denali earthquake, the 16 October 1999 $M_w = 7.1$ Hector Mine earthquake, and the 22 December 2003 $M_w = 6.5$ San Simeon earthquake)이 있다. 이 지진들은 $D(t)$ 에서 관측할 만한 변화를 발생시키지 않았다.

2004년 Parkfield 지진은 단층에서 2가지 주요한 효과를 가지고 있다. 첫 번째는 새로운 fracture의 발생으로 인해 단층이 손상되었고, 두 번째는 단층에 축적된 stress의 대부분이 사라졌다. Fluid migration의 시간척도(time scale)와 단층 강도의 변화는 매질의 투수성의 함수이다. 이것은 Parkfield-earthquake-induced damage가 투수성을 증가시키고 지진 이후에 fluid migration에서 시간상수는 감소한다. 또한 dynamic stress에 대한 증가된 민감도를 발생시키고 1999 Hector Mine, 2002 Denali, 2003 San Simeon의 dynamic stress보다 작은 Sumatra-Andaman dynamic stress에 positive한 반응으로 설명한다.

$D(t)$ 가 단층 강도에서 fluid-induced 변화에 대한 proxy라는 추론은 몇 가지 의미를 내포한다. 첫 번째, 이것은 단층 강도의 변화를 연속적으로 모니터 할 수 있다. 두 번째, fluid redistribution은 표면측지학에 의해 탐지할 수 없다. 세 번째, 단층 강도에 의한 효과는 공간적으로 불균질하다. 마지막으로 San Andreas fault의 일부 지역(연구지역)에서 장거리의 영향(~ 8000 km)은 전세계적으로 분포한 활성단층이 같은 방식으로 영향을 미칠 수 있다. 이러한 큰 지진들이 전지구적 지진대의 temporal clustering을 발생시킬 수 있다라고 추측한다. 이 가설은 2004 Sumatra-Andaman 지진 이후 3년 동안 발생한 $M \geq 8$ 인 지진들의 높은 수치에 의해 뒷받침됨으로 나타난다.