

Dynamic High-Speed rupture from the onset of the 2004 Parkfield, California, Earthquake

Takahiko, Uchide, Satoshi Ide, and Gregory C. Beroza

지진이 어떻게 발생하는가에 대한 문제는 지진예측이나 지진조기경보에서 매우 중요하다. 특히 대규모 지진과 미소지진의 지진 발생 초기단계의 특성이 상이한가 하는 문제가 이슈가 되어있는데, 이를 풀기위하여 많은 연구자들은 지진파의 초기파형부분을 집중적으로 연구하였다. Umeda(1990) 등은 규모 1~8까지의 전체 지진규모에 대하여 weak phase에 앞서 초기 phase의 지속시간이 전체 지진모멘트의 세제곱에 비례하는 급격한 변화가 있다는 것을 관측된바 있으며, Iio(1992, 1995)은 slow initial phase라고 불리는 phase를 미소지진의 초동 이후에 관측한바 있으며 이러한 현상을 Shibasaki(1998) 등은 nucleation process에서 high speed rupture로의 전이에 의한 것으로 해석한바 있다.

Uchide와 Ide(2007)은 2004년 일본 니가타 지역에서 발생한 지진의 초기단계를 multiscale slip inversion 방법을 이용하여, 초동이후 수십초동안 1m/s이상의 peak slip rate와 rupture velocity가 2.5~3.0km/sec로 빠른 속도로 파괴가 진행되었다는 것을 관측하였는데 이는 갑작스럽게 high speed/energetic rupture로 변환한 slow/weak initiation이 명백하게 아니더라는 것을 보여준다.

이 논문에서는 위 결과에 대한 일반성을 확보하기위하여 2004년 Parkfield 지진에 대하여 유사한 방법을 적용시켜 분석하였다. 즉 2004년 Parkfield 지진이 dynamic rupture가 시작되었을 때, rupture velocity와 slip speed가 높다는 것을 보여주기 위하여 multiscale inversion 방법을 이용하였다. 결과적으로 2004년 니가타 지진과 마찬가지로 Parkfield 지진의 초기단계는 weak 하지도 않고 slow 하지도 않다. 이는 미소지진과 대규모 지진은 유사하게 시작되며, 지진의 최종 사이즈는 지진발생 초기단계로부터는 예측할 수 없다는 것을 명백히 지시한다.

분석에 이용된 자료는 USGS에 의해 운영되는 General Earthquake Observation System (GEOS)과 캘리포니아 Geological Survey(GGS)에 운영되는 네트워크에서 관측된 자료를 이용하였다.

이 논문에서는 rupture 초기단계에서 종결까지의 rupture 진행과정을 분석하기 위하여 multiscale slip method를 이용하였다. 단층면의 주향은 N141°E, dip은 90°N로 가정하였고, rupture 시작점은 Thurber에 의해 재 결정된 진원인 35.816°N, 120.367°W, 깊이는 8.57km로 하였다. multiscale source 모델은 세가지의 scale로 설정하여, 가장 작은 scale을 1, 중간 scale을 2, 가장 큰 scale의 모델을 3으로 명명하였다. 진원지로부터의 rupture front propagation은 trial and error 모델링을 통하여 3.0 km/sec로 가정하였으며, slip rate distribution에서 model parameter의 수는 526개이다.

Scale 1과 2에 대하여 경험적인 Green 함수를 이용하기 위하여 Green 함수 set를 EGF1~EGF3(M_w 2.4~2.5), EGF4~EGF6(M_w 2.7~3.7)로 6개 구성하였으며, 이들은 mainshock과 동일하게 strike slip mechanism을 가진다. Scale 3에 대하여서는 discrete wave number 방법을 사용한 Green 함수를 이용하였다.

분석결과, Scale 1과 Scale 2에서 0.5초와 1.0초에서 누적된 seismic moment는 1.8×10^{16} Nm (M_w 4.8), 1.3×10^{17} Nm (M_w 5.3)이고, 지진의 최종 seismic moment는 1.3×10^{18} Nm (M_w 6.0)이다. 지진원 모델(source model)은 진원지와 진원지에서 18km 북서방향 떨어진 2개의 지역에서 비교되었다. 이들 두개의 high slip 지역은 강진동 자료를 사용하여 slip inversion 결과와 geodetic 결과에서도 관측된바 있다. 관측파형과 모사파형을 비교해보면 variance reduction 이 68.1% 이다. residual의 variance가 data의 error를 반영한다고 가정하면 각각의 model parameter의 standard deviation은 parameter value의 10% 미만이다.

Scale 1과 Scale 2 동안의 지진은 3.0km/sec의 높은 rupture velocity와, 4m/sec의 slip rate로 양방향으로 시작된다. 이 값은 scale 3의 main shock 보다 동일하거나 크다. 이는 Scale 1과 2에서 slip rate amplitude의 potential resolution이 크기 때문이다. 남서방향으로 파괴는 시작된지 3초후에 구속되며, 그 후에 북서방향으로 지진은 지속적으로 성장해나가고 5초후에는 두 번째 주 slip area가 파괴되고 10초안엔 정지된다.

가정된 wave front propagation속도의 유효성을 검증하기 위하여, 2.6, 2.8, 3.2 km/sec에 대하여 검증하였다. 2.8, 3.2km/sec의 모델의 VR 66.2와 70.4로 3.0km/sec의 결과와 비교하여 볼 때 high speed area가 유사한 위치와 시간대에 도달하는 것을 보여주었다. 그러나 2.6km/sec으로 가정한 경우의 VR은 60.4로 낮은 값을 가지므로 유용하지 않다고 결론지었다. 이 논문에서는 모델링 시 3.0km/sec을 사용하였지만, 2.8km/sec이나 3.2km/sec을 사용하여도 유사한 결과를 가질 수 있을것으로 생각된다.

이 논문에서의 연구결과, Parkfield 지진의 rupture는 high rupture velocity를 가지며 복잡하게 진행된다. rupture는 양방향으로 시작되며 0.2초 동안의 rupture velocity는 3.0km/sec이며, slip rate는 3m/sec이다. 이 시간동안 누적 지진모멘트는 모멘트 규모 3.9의 지진모멘트와 같으며, 이 지진이 종료될 때 가지게 되는 최종모멘트의 1/1000배에 해당된다. 이는 어떠한 quasi-static nucleation 과정은 dynamic rupture로 변화될 때 쉽게 관측되는 양상으로 방사(radiation)되지 않는다는 것을 지시한다.

또한 미소지진과 강지진의 초기 단계는 그들의 누적 seismic moment, slip rate, rupture velocity로부터 동일한 것을 알 수 있으며, 따라서 단층의 최종 크기는 지진의 초기단계로부터 예측하기는 어렵다.