

# Cascadia tremor located near plate interface constrained by S minus P wave times

Mario La Rocca, Kenneth C. Creager, Danilo Galluzzo, Steve Malone, John E. Vidale, Justin R. Sweet, Aaron G. Wech

깊은 곳에서 발생하는 Nonvolcanic tremor(NVT)는 Cascadia와 일본과 같이 몇몇의 구조적으로 활동적인 지역에서 관측된다. NVT는 작은 진폭, 높은 주파수에서의 에너지 부족, emergent onsets, 명확한 impulsive phase의 부재, 그리고 몇 분에서 며칠 동안의 지속 등의 특징이 있다. Cascadia의 지진관측소에서 Impulsive phase 뚜렷하지 않은 점은 보편적인 방법에 의한 정확한 발생 위치를 찾는 것을 방해한다.

일본의 Shikoku에서 기록된 NVT의 경우, 각각의 지진기록에서 S파가 확인된 경우가 있었다. 이 때 S파로 지진기록을 이용하여 정해진 관측소에 기록된 지진들의 지진기록을 stack하여 선명한 P파의 파형을 구한다. S-P시간을 이용하여 정확한 깊이를 구할 수 있는데, 일본의 tremor 위치는 섭입하는 판의 경계면 근처에서 발견된다.

Cascadia에서 발생한 tremor의 위치는 세가지 다른 방법들을 사용하여 40km 범위 이상의 깊이의 계산결과를 제시했다. 첫 번째 방법은 지진파 신호의 envelope의 도착시간(arrival time)과 S파 속도모델에 기초를 둔 전통적인 위치 방법을 사용하였다. 두 번째 방법은 Source Scanning Algorithm으로 이론적인 S파의 시간지연(time delay)이 가능한 source의 위치의 격자에 일치하는 것과 같은 지진기록을 stack한다. 세 번째 방법은 지진파의 파면에 대한 slowness vector와 공통의 source에 대한 back project를 계산하기 위해 small-aperture array를 사용한다. 이러한 모든 경우에서 공통적인 신호의 모양은 direct S파의 위상이라는 가정아래서 처리된다.

Cascadia tremor의 깊이에 대한 계산은 진앙의 위치에 대한 일반적인 예러로 보고된 10km보다 더 큰 불확실성을 나타내는 것으로 보이며 깊이 역시 마찬가지이다. 이 논문에서 저자들은 같은 지역의 tremor로 인해 발생한 지진들의 위치를 결정하기 위해 두 가지 방법의 사용하여 이 가정을 테스트하였다. 저자들은 tremor source의 깊이 해상도를 향상시키는 새로운 위치결정 처리과정을 적용하였다.

Pacific Northwest Seismograph Network의 low-noise 관측소와 Cascadia에서 2004년 7월에 발생한 ETS 이벤트들을 기록하기 위해 설치한 6개의 3성분의 단주기 지진관측소로 구성된 3개의 array로부터 데이터를 얻는다(Fig. 1). Array 데이터의 편광분석(polarization analysis)은 대부분의 신호가 깊은 곳에 위치한 source로부터 발생한 shear wave로 예상되는 5km/s이상의 겉보기 속도(apparent velocity)의 S파 편광을 포함하고 있음을 나타낸다. P파의 편광현상은 tremor 신호들 중 일부에서 관측된다.

신호 대 잡음 비율을 향상시키기 위해서, 먼저 각 array의 각 성분에 대해서 모든 관측소의 관측자료들을 stack한 다음 2~8Hz의 bandpass-filter를 한 300-s window를 사용하여 수직성분과 각각의 수평 성분의 stack한 trace를 cross-correlation을 계산한다. 많은 수의 트레이스에서 cross-correlation의 envelop은 3.5~6.0s의 positive lag time에서 뚜렷하고 지속적인 피크(peak)을 보여준다(Fig. 2). 특히 7월 9일~18일까지 매일 5-min window로 관측된 Sequim과 Sooke array에서 분명하게 나타난다. Lopez array에서는 비슷한 lag가 tremor가 array에 가까운 위치에서 발생한 7월 9일과 10일에 드물게 보인다.

Positive lag에서 뚜렷한 피크는 첫 번째 반사되지 않고 매질을 통과하는 수직성분의 P파와 수평성분의 S파의 도달과 일치한다. 연속적인 상호작용(correlation)은 거의 일정한 S-P time ( $t_{s-p}$ )을 갖는 몇 십분의 시간에 의해 특징지어진다. 몇몇의 경우에 이러한 피크(peak)이 분명할 때, stack한 지진기록의 visual inspection은 동일한  $t_{s-p}$ 인 각각의 P와 S파의 arrival pair를 나타낸다(Fig. 3). 이러한 양상은 일본에서 관측된 것과 같이 일부의 Cascadia tremor가 개별적인 LFE로 구성되었음을 지시한다.

Fig. 2에서는 Sequim에서 5.2s와 Sooke에서 3.7s의  $t_{s-p}$  lag time을 보여준다. 전체 tremor 주기 동안  $t_{s-p}$ 이 4.5s 보다 작게 나타나는 시간간격이 존재하지 않는다. 4.5s 근처의  $t_{s-p}$ 에 해당하는 시간 동안 이 array에서 관측된 작은 수평성분의 slowness는 source가 array 바로 아래에 있음을 의미한다. Sooke array에서는 모든 S-P 시간은 3.7s~4.4s사이이다.  $t_{s-p}$ 가 3.7s(Fig. 2)인 가장 작은 값은 array 바로 아래에 source의 위치와 일치한다. Lopez array에서는 명확한 cross-correlation 피크(peak)를 갖는 약간의 tremor의 주기가 있고  $t_{s-p}$ 값은 5.5s이다.

$t_{s-p}$ 와 array analysis에 의한 slowness를 결합하면 source의 깊이를 정확하게 구할 수 있다. Standard layered Earth model에 기초하여 Sequim array 아래에 있는 tremor는  $39.2 \pm 2$ km의 깊이에 위치해 있는 반면 Sooke array( $t_{s-p}=3.7$ s) 아래에는  $31 \pm 2$ km에 위치한다.  $t_{s-p}$ 의 array 측정에 기초한 거리의 제약이 있을 때와 없을 때의 모두에 대한 tremor의 위치를 Fig. 1에 진앙의 위치와 Fig. 4에 단면의 모습을 보여준다. Envelope cross-correlation을 사용하여 구한 위치에 대한 깊이의 범위는  $t_{s-p}$  조건을 추가하여 위치를 결정한 같은 tremor와 비교하였을 때 더 크게 나타났다(Fig. 4). 판의 경계면 위로 평균 source 거리는 3km이고 표준편차는  $\pm 5$ km이다.

신호에서 명확한 correlation과 안정된  $t_{s-p}$ 은 Cascadia의 깊은 곳에서 발생한 tremor의 일부가 자주 반복되고, 개별적인 이벤트의 연속적인 발생으로 이루어졌음을 나타낸다. 다음과 같은 두 가지 이유 때문에 모든 tremor들의 위치를 결정할 수 없었다. 첫 번째 이유는  $t_{s-p}$ 의 안정된 결정은 오직 하나의 장소에서 발생한 장시간의 주기 동안에 나타난 tremor에 달려있다. 두 번째는 이 연구에서 사용한 방법이 P와 S파가 수직과 수평성분으로 정확하게 분리되어 있을 때 각 array 아래의 tremor에 가장 민감하다는 점이다. 비록 관측된 모든 tremor의 위치를 결정할 수 없었지만, 각 array 아래의 tremor가 섭입하는 지역의 경계면에서 발생했고, 다른 연구들과 대조적으로 깊이가 얇은 곳에서 발생한 tremor에 대한 증거가 없음을 알았다. 이 연구에서 사용한 방법은 만약 array 아래에 tremor가 존재한다면 깊이가 얇은 tremor를 찾는 데 적합하다.

만약 이 연구의 결과가 Cascadia에서 발생한 대부분의 NVT의 전형이라면 Global Positioning System으로 관측된 slow slip의 동시 발생은 깊은 곳에서 발생한 tremor와 slow slip이 일본에서 추론된 것과 유사하게 Cascadia에서 같은 source process의 두 개의 징후임을 지시한다. 이 가설은 Subduction megathrust를 따라 나타나는 fault slip에 의해 발생한 신호의 예상된 polarization에 잘 일치하는 tremor 신호의 polarization 특징에 의해 뒷받침된다.