

Automated seismic event location by waveform coherence analysis

Francesco Grigoli, Simone Cesca, Ortensia Amoroso, Antonio Emolo, Aldo Zollo

Geophysical Journal International, 196, p1742-1753, 2014

Date: 2014/12/11

Summarized by Jeong-Ung Woo

지진에 대한 관측 데이터는 관측망의 수가 늘어날수록 같이 많아지는데, 거대한 양의 관측자료로부터 진원지를 알아내기 위해서는 오토를 통한 위치 방법이 필요하다. 특히 미소지진의 경우 noise가 심하기 때문에 미소지진의 위치의 오토로 결정하는 방법은 잡음에 방해받지 않는 것이어야 한다. 기존의 오토 위치 결정 방법은 자동화된 P파와 S파의 phase pick을 이용하여 이론상의 P파와 S파의 도달 값과 비교하였을 때 가장 residual을 작게하는 곳으로 결정하는 방식이다. 이때 P파의 도달시간은 잘 결정이 되지만, S파는 먼저 도달하는 P파의 파형이 중첩되서 보여지기 때문에 잘 결정되지 못한다. 이를 보완한 또 다른 S파형을 결정하는 방법으로는, 3성분 polarization 분석에 기반한 특성화 함수를 사용하는 방법도 있다. 이런 자동 picking의 과정은 noise가 심한 경우 분석이 어렵기 때문에 migration과 유사한 delay sum을 이용하여 위치를 결정하기도 한다. 또, Shot-term-average/long-term average(STA/LTA)를 사용하여 지진의 위치를 결정하는 방법도 있는데 이는 correlation에 기반한 방법이다. 이번 연구에서는 Grigoli et al., 2013에 소개된 접근법을 업그레이드 한 방법으로 S파 picking을 좀 더 두드러지게 하는 방법으로서 새로운 특성화 함수를 만들어냈는데, 이 함수는 이전보다 S파 picking이 잘 되도록 고안되었다.

p파의 picking은 Grigoli et al., 2013에서 소개된 것과 마찬가지로 vertical component z에 의해 특성화함수가 $CF^P(j) = z^2(j)$ 로 정의된다. 이때 각 j들은 time index에 해당한다. S파형의 특성화 함수를 나타내기 위해서는 다음의 동서 방향 성분 x와 북쪽 성분 y를 이용해서 만들어낸 analytic trace (해석적 함수이며, Hilbert Transform은 원래의 위상보다 90도 지연시키는 값임) $X(j) = x(j) + iH\{x(j)\}$, $Y(j) = y(j) + iH\{y(j)\}$ 들이 필요하다. 그리고 이를 이용하여 instantaneous covariance matrix Q를 $Q(j) = \begin{pmatrix} X(j)\hat{X}(j) & X(j)\hat{Y}(j) \\ Y(j)\hat{X}(j) & Y(j)\hat{Y}(j) \end{pmatrix}$ 로 정의한 뒤, 이 Hermitian matrix의 양의 실수 eigenvalue중 큰 것을 λ_1 이라고 하면 S파의 특성화 함수 $CF^P(j) = \lambda_1(j)^2 + \epsilon$ 이다. 아주 작은 양의 실수 입실론은 STA/LTA 계산시 분모 term의 하한이 0이 되는 것을 막아주기 위해서 두었다. STA와 LTA는 각각 $STA(j) = \frac{1}{n_s}CF(j) + \left(1 - \frac{1}{n_s}\right)STA(j-1)$, $LTA = \frac{1}{n_l}CF(j - n_s - 1) + \left(1 - \frac{1}{n_l}\right)LTA(j-1)$ 로 두었다. (단, $j = n_s + n_l$ 부터 샘플의 끝까지) 이때 각 n은 short or long time window의 샘플 개수를 의미한다. 그리

고 이들의 비로서 P파와 S파의 picking을 할 수 있다.

위치를 정하는 과정을 살펴보면, 먼저 각 station k 와 x, y, z 방향의 seismogenic region을 정수형 격자점 l, m, n 으로 나누었다. 그리고 이 격자점들 중 이론상가장 짧은 도달시각을 $\tau_{\min}(l, m, n) = \min[\tau_k^p(l, m, n)_{k=1}^N]$ 으로 정의하고 각 격자점에 대해 상대적 도달 시간을 $T_k^{p \text{ or } s}(l, m, n) = \tau_k^p(l, m, n) - \tau_{\min}(l, m, n)$ 으로 두었다. 이제 이를 시간 domain의 격자점으로 고려하기 위해 반올림하는 함수 round를 사용하여 $\Delta T_k^{p \text{ or } s}(l, m, n) = \text{round}\left\{\frac{T_k^p(l, m, n)}{\delta t}\right\}$ 로 두었다. 마지막으로 coherence function을 $C^{p \text{ or } s}(l, m, n, j) = \sum_{k=1}^N W_k^p[j + \Delta T_k^p(l, m, n)]$ 으로 두고 coherence matrix를 $C(l, m, n, j) = \sqrt{\frac{C^p(l, m, n, j)C^s(l, m, n, j)}{N}}$ 로 두었다. 이 상관계수는 0에서 1사이의 값을 가지며 1에 가까울수록, P파와 S파의 first arrival이 일치한다. 따라서 최종적인 위치와 시간은 $C(\hat{l}, \hat{m}, \hat{n}, j) = \text{Max}\sqrt{\frac{C^p(l, m, n, j)C^s(l, m, n, j)}{N}}$ 일 것이고, origin time은 $j = \hat{j}\delta t + \tau_{\min}(\hat{l}, \hat{m}, \hat{n})$ 으로 생각할 수 있다.

실제 이 방법을 사용하기 위해서 남부 이탈리아 Irpinia 지역의 Irpinia Seismic Network (ISNet)의 자료를 이용하였다. 2005년부터 운영된 네트워크는 28개의 단주기, 5개의 broadband 관측망이 100km×70km정도의 지역에 위치한다. 이번 연구에서는 2008년 2월부터 2010년 3월까지 196개의 지진을 이용하였으며 1.1에서 2.7정도의 규모를 가지고 있다. 125Hz로 sampling된 속도계 자료만을 이용하였고 bandpass filter는 1-25Hz로 주었다. 위에서 언급한 방법의 사용 중 δt 는 STA의 경우 0.7초, LTA의 경우 1초로 생각하였다. Seismogenic region은 102×102×36km³으로 생각하였고, 0.5km간격으로 grid를 주었다. 그 결과 구해진 지진의 위치는 동서남북 방향으로 낮은 uncertainty을 가지며 깊이 방향으로 는 보다 큰 uncertainty를 확인할 수 있었다. 위 방법에 대해 상대적으로 정확한 위치 결정법인 double-difference technique(Hypo DD)를 이용한 결과와 기존 위치 결정 방법인 Real Time LOcation(RTLOC)의 알고리즘을 이용한 결과와 비교하였다. 그결과 RTLOC를 이용한 결과보다 이번 연구 방법을 이용한 결과가 Hypo DD에 의한 결과값과 더 비슷함을 확인할 수 있다. 또한 최종적으로 이 지역에서 일어난 196개의 지진의 위치는 이 지역의 fault의 위치와 잘 들어맞는 특성을 보였다.

이번 연구 방법을 가지고 application으로서 1개의 위치 분석을 1분이내로 해내기 위해서는 error 분석을 제외하고 12 core의 96GB RAM을 지닌 Intel Xeon workstation이 필요하다. (각각의 core는 2.4 MHz frequency clock을 가지고 있다.)