

초동부호, 진폭, 지진파형을 결합한 미소지진의 진원물림새결정

김영일, 문성철

지역적으로 일어나는 미소지진들의 진원물림새자료는 큰 지진의 파렬특성과 지진을 발생시키는 응력상태에 대한 가치있는 정보를 얻는데 리용될수 있다.[2] 그러나 미소지진들은 기록되는 관측소개수가 적고 소음이 큰것으로 하여 그 진원물림새를 정확히 해석하기가 어렵다. 때문에 미소지진의 진원물림새해석을 위한 방법들에서는 초동부호, 진폭비, 상대진폭, 파형 등 가능한 모든 정보들과 함께 비교적 많은 관측소자료(최소한 8개정도)가 리용되었다.[4]

론문에서는 우리 나라 지진관측조건에 맞게 보다 적은 수의 관측소자료를 리용하여 안정한 진원물림새풀이를 얻을수 있도록 제안된 한가지 방법의 적용결과를 고찰한다.

1. 미소지진의 진원물림새결정방법

제안된 방법은 지진관측망에서 기록한 지진기록의 초동부호와 P 파진폭, 지진파형을 결합하여 미소지진의 진원물림새를 결정하는 2개의 기본적인 단계들로 구성되어있다.

첫번째 단계에서는 지각층상모형에 기초한 파선추적에 의하여 관측소들을 진원구에 투영하는 과정이 진행된다. 두번째 단계에서는 진원구우의 초동부호와 P 파진폭, 진앙거리에 따르는 적당한 주파수대역에서 려파한 지진파형을 리용한 역풀이를 통하여 진원물림새를 결정한다.

관측밀도가 낮은 조건에서 미소지진들의 진원물림새풀이를 안정하게 얻고 해석효과를 개선하기 위하여 새롭게 적용한 처리수법들은 다음과 같다.

① 관측소의 위치효과고려

미소지진의 경우 그것을 기록하는 관측소의 개수가 매우 적고 진원구에 투영된 지진 관측소의 위치가 마디선의 가까이에 놓일 때 나타나는 해석오차를 고려한다. 이때 진원물림새의 주향과 경사, 미끄럼각의 작은 변화와 지각모형의 약간의 차이에 의하여 관측소가 서로 다른 분구로 이동하여 초동부호모순비의 큰 변화를 가져오며 역풀이의 안전성에 부정적인 영향을 주게 된다. 이 경우에 P 파복사모형의 상대진폭값을 판단하여 초동부호의 리용여부를 선택하였으며 상대진폭값이 어떤 한계보다 작은 경우는 기록파형만을 리용하는 방식으로 관측소의 위치효과를 고려해주었다. 이때 수직방향과 함께 방위각을 고려한 북남, 동서방향 초동부호를 결합하여 초동부호를 결정하였다.

또한 반드시 명백한 초동부호자료만을 리용하고 그렇지 못한 경우에는 진폭과 파형자료만을 리용하도록 하였다.

② 고유값공간에서 중심각파라미터에 의한 지진모멘트텐소르의 분해

이 수법은 지진모멘트텐소르해석을 일반화하고 역풀이공간의 무한성과 다가성을 극

복하기 위하여 적용하였다.

지진모멘트텐소르의 고유값을 대각선원소로 하는 행렬 Λ 는 다음과 같이 표시된다.

$$\Lambda = \sqrt{2}M\hat{\Lambda} = \begin{pmatrix} \Lambda_T & 0 & 0 \\ 0 & \Lambda_N & 0 \\ 0 & 0 & \Lambda_P \end{pmatrix} \quad (1)$$

여기서 $\Lambda_T \geq \Lambda_N \geq \Lambda_P$ 이며 $\|\hat{\Lambda}\|^2 = \hat{\Lambda}_T^2 + \hat{\Lambda}_N^2 + \hat{\Lambda}_P^2 = 1$ 로서 표준화되었다.

직각자리표축을 따르는 모멘트성분들은 다음과 같이 표시된다.[1]

$$\hat{\Lambda}_{ISO} = \frac{1}{\sqrt{3}}(1 \ 1 \ 1)^T, \quad \hat{\Lambda}_{DC} = \frac{1}{\sqrt{2}}(1 \ 0 \ -1)^T, \quad \hat{\Lambda}_{CLVD} = \frac{1}{\sqrt{6}}(-1 \ 2 \ -1)^T \quad (2)$$

여기서 ISO, DC, CLVD는 각각 등방성성분, 쌍쌍힘성분, 보상된 선형벡토르쌍극자성분을 표시한다.

고유값벡토르공간에서 고유값벡토르와 $\hat{\Lambda}_{ISO}$ 사이각을 β , $\hat{\Lambda}_{DC}$ 사이각을 γ 라고 하며 이 파라미터들은 다음의 구간에 놓인다.

$$0 \leq \beta \leq \pi, \quad -\frac{\pi}{6} \leq \gamma \leq \frac{\pi}{6} \quad (3)$$

이로부터 지진모멘트텐소르의 고유값공간에서 중심각파라미터에 의한 분해를 진행하면 다음의 식이 얻어진다.

$$M = \sqrt{2}M_0[\cos\beta\hat{\Lambda}_{ISO} + \sin\beta(\cos\gamma\hat{\Lambda}_{DC} + \sin\gamma\hat{\Lambda}_{CLVD})] \quad (4)$$

③ 그린함수계산에 의한 P파진폭결정

선행연구들에서는 보통 파선추적방법에 의하여 반사, 굴절계수들을 고려하여 P파진폭을 계산한다.

여기서는 리론지진동파형을 계산하는 방식으로 3성분지진파형으로부터 P파진폭을 결정하여 역폴이에 적용하였다. 신호대잡음비가 낮은 경우에도 안정한 폴이를 얻기 위하여 지진파형을 관측소방위각에 따르는 동경방향과 자름방향으로 회전시키는 과정을 진행하지 않고 북남, 동서지진기록을 그대로 리용하였다.

또한 적분변환을 하지 않고 속도파형기록을 그대로 리용하여 진앙거리에 따라 0.05~0.15Hz사이에서 2차쌍바터워스대역통과여파기를 적용하였다.

④ 파형의 상관성과 최대진폭비의 분리비교

지진파형은 복사모형의 복잡성과 관측소방위각과 진앙거리에 의한 지진파선경로의 차이에 의하여 최대진폭의 변화가 대단히 크다. 이런 경우 역폴이에서 진폭이 큰 관측소의 파형이 기본역할을 하는 경향이 생기게 된다. 역폴이에서 이러한 영향을 피하기 위하여 관측소별진폭에 따르는 무게를 주어 모든 관측소, 모든 통로에서 파형들의 진폭이 근사되도록 한다.

제안된 방법에서는 절대진폭을 리용하지 않고 관측소별, 통로별P파의 상대진폭비를 리용함으로써 지진크기에 무관계하게 진원물림새파라미터를 추정하는 방식을 적용하였다.

끝으로 진원물림새에 따르는 복사모형은 높은 대칭성을 가지며 이것은 진원물림새폴이의 다가성을 가져온다. 또한 초동부호, P파진폭, 지진파형을 결합하는 과정에 역문제도 강한 비선형성을 가지게 된다. 이와 관련하여 제안된 방법에서는 비선형최량화방법들인

유전알고리즘과 패턴탐색방법, 립자무리화방법과 패턴탐색방법을 결합하여 적용하였다.

이와 같이 미소지진의 진원물림새해석과 관련한 현대적방법들에 기초하고 개선된 방법들이 적용된 제안된 방법을 microMT라고 한다.

2. 실제자료의 분석결과

제안된 microMT의 성능을 비교적으로 보여주기 위하여 선행연구[4]에서 리용된 그리스의 코린스지역에서 2012년 4월 25일 발생한 모멘트지진크기 Mw4.3지진의 기록자료를 다시 분석하였다.

Mw4.3지진의 진앙위치, 관측소분포와 진원물림새해석결과는 그림 1과 같다.

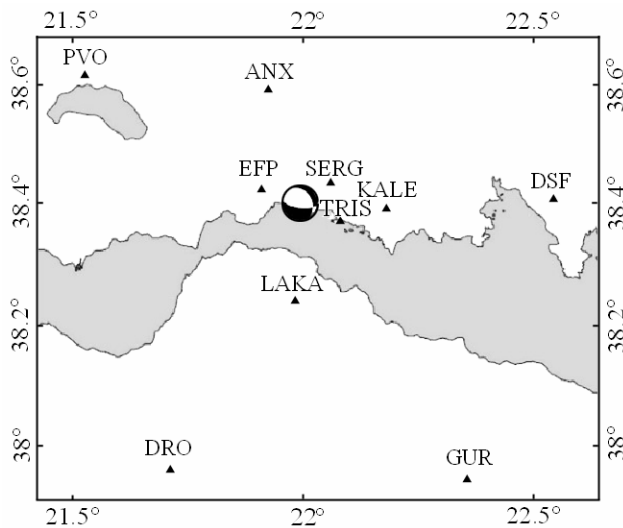


그림 1. Mw4.3지진의 진앙위치, 관측소분포와 진원물림새해석결과[4]

이 지진은 전형적인 정단층형파열과정이다.(관측소 SERG, TRIS 및 EFP들에서의 기록자료는 관측소정보가 정확치 않아 계산에 리용하지 않음.)

코린스지역의 지진파속도구조모형은 표 1과 같다.

표 1. 코린스지역의 지진파속도구조모형

| 층 | 깊이/ km | V_P / ($\text{km} \cdot \text{s}^{-1}$) | V_S / ($\text{km} \cdot \text{s}^{-1}$) | ρ / ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$) | Q_P | Q_S |
|-----|-----------|--|--|---|-------|-------|
| 1 | 0.0 | 2.31 | 1.30 | 2.5 | 300 | 150 |
| 2 | 1.0 | 4.27 | 2.40 | 2.9 | 300 | 150 |
| 3 | 2.0 | 5.52 | 3.10 | 3.0 | 300 | 150 |
| 4 | 5.0 | 6.23 | 3.50 | 3.3 | 300 | 150 |
| 5 | 16.0 | 6.41 | 3.60 | 3.4 | 300 | 150 |
| 6 | 33.0 | 8.37 | 4.70 | 3.4 | 1 000 | 1 000 |
| 반공간 | — | 8.37 | 4.70 | 3.4 | 1 000 | 1 000 |

DSF관측소의 관측파형과 제안된 방법으로 계산한 리론지진동파형을 비교한 결과는 그림 2와 같다.

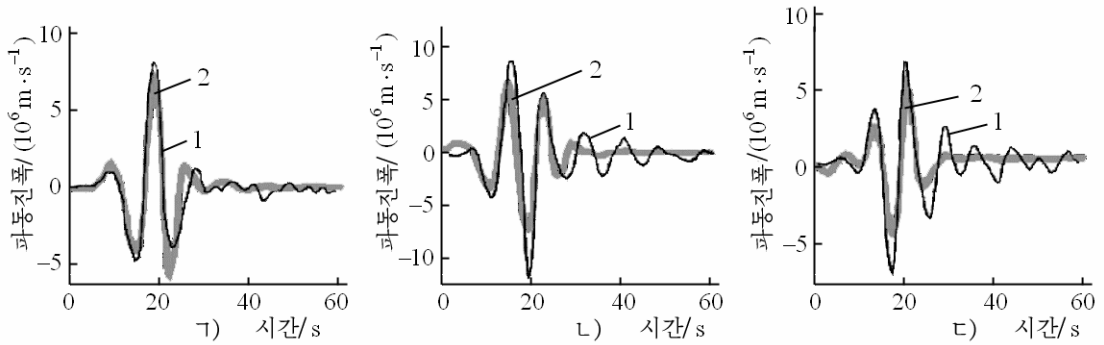


그림 2. DSF관측소의 관측파형과 제안된 방법으로 계산한 리론지진동파형사이의 비교

ㄱ) DSF-동서, ㄴ) DSF-남북, ㄷ) DSF-수직, 1-관측파형, 2-리론지진동파형

그림 2에서 보는바와 같이 두 파형들은 진폭이 큰 초동부분에서 높은 상관도로 잘 일치된다.

제안된 microMT방법으로 얻은 결과를 ISOLA알고리즘[4]에 기초하여 얻은 결과와 비교하였다.(표 2, 그림 3)

두 진원물림새들이사이의 불일치정도는 주향, 경사, 미끄럼각들로부터 계산되는 Kagan각[3]에 의해 평가하였다. 이 각은 두 진원물림새가 일치되도록 하기 위하여 회전시켜야 할 최소각을 의미한다. 이 각은 초동부호의 정확성과 P 파의 진폭자료, 그린함수 GFs의 계산 그리고 역풀이에 리용되는 관측소개수와 분포에 관련된다.

Kagan각은 4차원공간에서의 각이며 일반적으로 이 각크기가 30° 보다 작을 때 두 진원물림새들이들은 물리적으로 같다고 볼수 있다.

표 2. 제안된 microMT와 ISOLA방법과의 비교

| 방법 | 주향 /($^\circ$) | 경사 /($^\circ$) | 미끄럼각 /($^\circ$) | 지진크기 | Kagan각 /($^\circ$) |
|---------|------------------|------------------|--------------------|------|----------------------|
| ISOLA | 327 | 32 | -45 | 4.3 | 기준 |
| microMT | 317 | 39.9 | -57.3 | 4.32 | 10.7 |

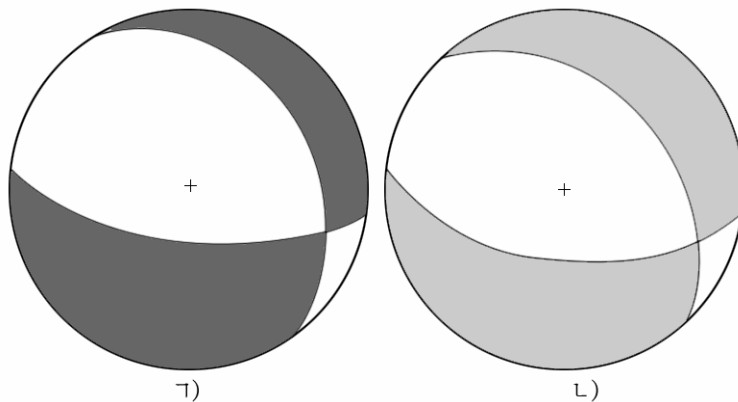


그림 3. 두 방법으로 얻은 진원물림새들이들의 비교

ㄱ) 선행연구결과[4], ㄴ) 제안된 방법으로 얻은 결과

해석결과 두 방법으로 얻은 진원물림새폴이들사이의 Kagan각차는 10.7° 이며 결국 두 진원물림새폴이들은 근사적으로 일치된다고 볼수 있다.

제안된 수법의 안정성을 극히 적은 개수(4개 관측소)의 관측소자료들을 리용하여 평가해보았다. 이를 위하여 서로 다른 4개 관측소조합들에 대하여 얻어낸 진원물림새폴이들을 전체 자료로부터 얻은 쌍쌍힘역폴이(DC)결과(그림 3의 L))우에 겹쳐 그렸다.(그림 4)

얻어진 진원물림새폴이들의 흠어짐정도는 크지 않으며 Kagan각들의 변화폭은 20° 를 넘지 않는다. 이것은 관측소개수가 4개인 경우에도 제안된 방법을 진원물림새해석에 안전하게 적용할수 있다는것을 보여준다.

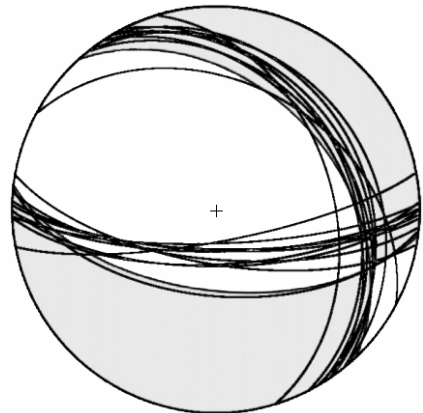


그림 4. 미소지진의 진원물림새폴이들의 분포

맺 는 말

미소지진의 지진파는 국부지역지각의 세부구조를 반영하고 가까운 관측소들에서만 기록되며 고주파특성과 간섭성소음의 중첩으로 인한 복잡성으로 특징지어진다. 제안된 수법은 적은 관측소자료들 리용하여 미소지진의 안정한 진원물림새폴이들을 추출할수 있으므로 우리 나라의 관측조건에 적합하다.

참 고 문 헌

- [1] W. S. Leaney et al.; Geophysical Journal International, 188, 343, 2012.
- [2] L. Fojtíková et al.; Tectonophysics, 492, 213, 2010.
- [3] Y. Y. Kagan; Geophysical Journal International, 171, 411, 2007.
- [4] E. N. Sokos et al.; Seismological Research Letter. 84, 656, 2013.

주제108(2019)년 3월 5일 원고접수

Estimation of Micro-Earthquake Focal Mechanisms by Compromising Polarity, Amplitude and Waveform Constraints

Kim Yong Il, Mun Song Chol

This paper presents an effective technique for estimating micro-earthquake focal mechanisms by compromising the constraints as polarity, P-wave amplitude and waveform data available from the records obtained by local networks of seismic monitoring.

Key words: earthquake focal mechanism, seismic moment tensor, seismic polarity