

## 1999년 경주 인근에서 3차례 발생한 지진들의 지진원 특성 분석

최호선<sup>1,2\*</sup> · 심택모<sup>3</sup>

<sup>1</sup>한국원자력안전기술원 구조부지실, <sup>2</sup>서울대학교 지구환경과학부, <sup>3</sup>한국원자력안전기술원 공학연구소

### Analysis on the source characteristics of three earthquakes nearby the Gyeongju area of the South Korea in 1999

Hoseon Choi<sup>1,2\*</sup> and Taek-Mo Shim<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Structural Systems & Site Evaluation Department, Korea Institute of Nuclear Safety

<sup>2</sup>School of Earth and Environmental Sciences, Seoul National University

<sup>3</sup>Engineering Research Department, Korea Institute of Nuclear Safety

1999년 경상북도 경주 인근에서 지역규모( $M_L$ ) 3.0 이상의 지진이 3차례(4월 24일, 6월 2일, 9월 12일)에 걸쳐 발생하였다. 진앙의 위치를 재결정한 결과 이 지진들의 진앙 사이 거리는 반경 1 km 내에 포함된다. 파형역산을 수행하여 6월 2일 지진의 발진기구를 분석하였으며, 나머지 지진들은 P파와 S파의 초동극성 및 진폭비를 이용하여 발진기구를 분석하였다. 6월 2일 및 9월 12일 지진은 단층면해가 서로 비슷하고, 4월 24일 지진은 상기 지진들의 단층면해를 포함하나 그 분포 범위가 상대적으로 넓다. 이 지진들의 발진기구는 공통적으로 약간의 정 단층 성분을 포함한 주향이동단층의 특성을 보이며, P축의 방향은 동북동-서남서 방향으로 한반도 주응력 방향에 대한 이전 연구결과와 부합한다. 진앙 사이의 거리, 지진파형의 유사성, 지진들을 공통으로 기록한 지진관측소 지진자료 극성의 동일성, 발진기구의 유사성 등을 고려했을 때, 이 지진들은 동일한 단층에서 발생했을 것으로 추정된다. 파형역산을 수행한 결과 6월 2일 지진의 지진모멘트는  $3.9 \times 10^{14}$  N·m로 계산되었으며, 이 값은 모멘트규모 3.7에 해당한다. 스펙트럼 분석을 통해 계산된 모멘트규모는 3.8로, 파형역산에 의한 모멘트규모와 비슷하다. 평균 응력강하는 7.5 MPa로 추정되었다. 3개 지진들을 공통으로 기록한 단일 지진관측소의 스펙트럼을 서로 비교한 결과 4월 24일 및 9월 12일 지진의 모멘트규모는 각각 3.2, 3.4로 추정되었다.

주요어 : 경주, 파형역산, 극성, 발진기구, 스펙트럼 분석

Three earthquakes with local magnitude ( $M_L$ ) greater than 3.0 occurred on April 24, June 2 and September 12 in 1999 nearby the Gyeongju area. Redetermined epicenters were located within the radius of 1 km. We carried out waveform inversion analysis to estimate focal mechanism of June 2 event, and P and S wave polarity and their amplitude ratio analysis to estimate focal mechanisms of April 24 and September 12 events. June 2 and September 12 events had similar fault plane solutions each other. The fault plane solution of April 24 event included those of other 2 events, but its distribution range was relatively broad. Focal mechanisms of those events had a strike slip faulting with a small normal component. P-axes of those events were ENE-WSW which were similar to previous studies on the P-axis of the Korean Peninsula. Considering distances between epicenters, similarities of seismic waves and sameness of polarities of seismic data recorded at common seismic stations, these events might occurred at the same fault. The seismic moment of June 2 event was estimated to be  $3.9 \times 10^{14}$  N·m and this value corresponded to the moment magnitude ( $M_W$ ) 3.7. The moment magnitude estimated by spectral analysis was 3.8, which was similar to that estimated by waveform inversion analysis. The average stress drop was estimated to be 7.5 MPa. Moment magnitudes of April 24 and September 12 events were estimated to be 3.2 and 3.4 by comparing the spectrum of those events recorded at common single seismic station.

**Key words** : Gyeongju, waveform inversion, polarity, focal mechanism, spectral analysis

\*Corresponding author: hoseon@kins.re.kr

서론

1999년 경상북도 경주 인근에서 지역규모 3.0 이상의 지진이 3차례 발생하였다. 이 지진들에 대한 기상청 지진 목록을 Table 1에 정리하였다. 6월 2일 지진과 9월 12일 지진의 진앙은 일치하며, 4월 24일 지진의 진앙도 이들과 거의 비슷하다. Fig. 1은 경상분지를 중심으로 1978년부터 2009년 8월까지 기상청이 발표한, 국내에서 발생한 지진의 진앙 분포를 보여주고 있다. 이 논문의 본문에서 재결정된 3개 지진에 대한 진앙은 별로 표시하였다.

지체구조구상 3개 지진은 모두 경상분지에서 발생하였으며, 진앙의 위치는 경상분지와 연일분지 경계에서

가깝다(Fig. 1 참조). 경상분지는 영남육괴 위에 부정합으로 놓인 중생대 백악기의 중첩내륙호소형 퇴적분지로 퇴적층의 총 층후는 약 8~10 km에 달한다. 분지의 형성은 대보조산운동 이후 형성된 당겨열림 분지로 해석되고 있다. 경상분지는 밀양, 의성, 영양의 3개 소분지로 구분되며 분지의 동쪽은 제3기 연일분지에 의해 피복되어 있다. 20세기 들어 경상분지에서 발생한 가장 큰 지진은 1997년 6월 26일에 발생한 규모 4.2의 지진이다.

이 논문에서는 2006년에 제안된 1차원 지각속도구조 모델(Chang and Baag, 2006)을 적용하여, 1999년 경주 인근에서 3차례 발생한 지진들의 진앙, 발진기구, 스펙트럼 분석 등을 통해 이 지진들의 지진원 특성을 분석하고 지진들 간의 상관성을 추정하고자 한다.

Table 1. KMA catalog of three events.

진원시 (KST*)	규모	위도 (°N)	경도 (°NE)	위 치
1999/04/24 01:35:14	3.2	36.00	129.30	경북 포항 남서쪽 약 8 km 지역
1999/06/02 18:12:23	3.4	35.90	129.30	경북 경주 북동쪽 약 10 km 지역
1999/09/12 05:56:53	3.2	35.90	129.30	경북 경주 북동쪽 약 10 km 지역

\*Korea Standard Time

본론

지진의 위치

기상청에서 발표한 이 지진들의 진앙 위치는 Table 1과 같다. 이 연구에서는 기상청, 한국지질자원연구원 등 국내 지진관측망 운영기관의 지진자료를 수집한 후, 각 관측기록에서 진앙거리 100 km 이내의 P파 초동시간을 선택하여 이 지진들의 진앙을 재결정하였다. 지각속도구조 모델은 Chang and Baag (2006) 모델을 사용하였는데, 이 모델은 광대역 지진파형과 경로시간을 함께 분석하여 구한 1차원 지각속도구조 모델이다. 이 자료들을 HYPOINVERSE-2000 (Klein, 2002)에 입력하여 재결정된 진원 위치를 Table 2에 제시하였다. 지진의 깊이를 고려하지 않을 경우 진앙 사이의 거리는 1 km 내외로 상당히 가까운 거리에서 발생했을 을 알 수 있다.

발진기구

Fig. 2는 당시 기상청이 운영했었던 TAG (대구) 지진 관측소에서 관측된 각 지진들의 속도파형을 정규화해서 보여주고 있다. 각 지진자료들의 P파 및 S파 도달시간이나 파형이 상당히 유사하며, P파의 초동 극성은 모두 마이너스(-)를 나타내고 있다.

진앙 사이의 거리나 지진파형의 유사성 등을 고려할 때 이 지진들은 동일한 단층에서 발생했을 가능성이 높다. 이

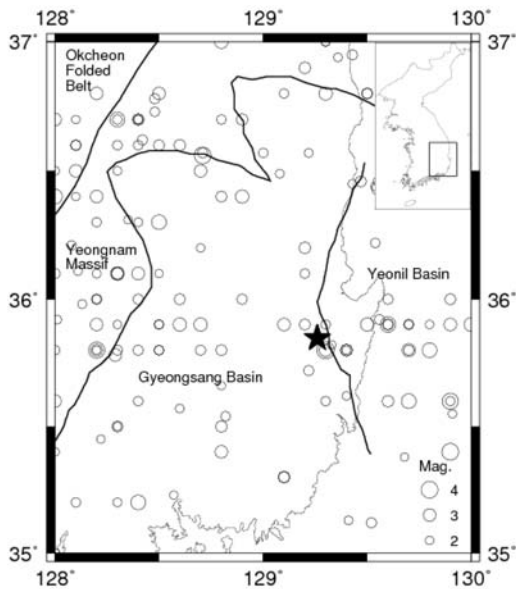


Fig. 1. Epicenters of earthquakes in and around Gyeongsang Basin from 1978 to August 2009 reported by Korea Meteorological Administration (KMA). Stars indicate epicenters of 3 earthquakes which occurred nearby the Gyeongju area in 1999. Boundaries of tectonic provinces are represented by thick solid lines. The inset shows the corresponding area of this epicenter map.

Table 2. Hypocenters of relocated three events.

진원시 (KST)	위도 (°N)	경도 (°NE)	깊이 (km)
1999/04/24 01:35:13.56	35.8473	129.2627	7.02
1999/06/02 18:12:22.53	35.8457	129.2613	7.44
1999/09/12 20:56:51.15	35.8499	129.2580	6.75

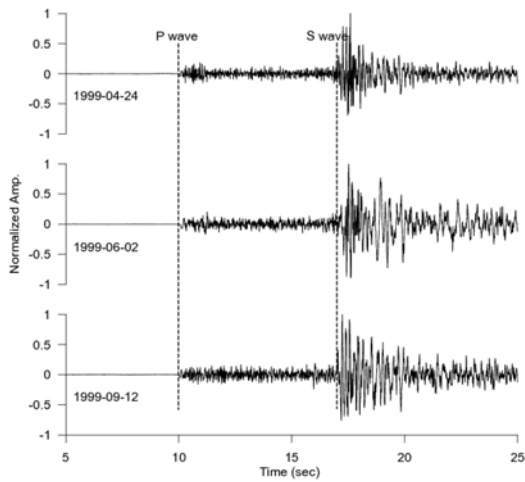


Fig. 2. Normalized velocity waveforms recorded at TAG seismic station. Arrival times of P and S waves are represented by dotted lines.

러한 가능성을 간접적으로 확인하기 위해서 각 지진들의 발진기구를 분석하였다.

각 지진들의 발진기구를 결정하기 위해 파형역산을 시도 하였으나, 6월 2일 지진 외에 나머지 지진들은 저주파수 대역의 필터링을 적용한 후에도 잡음이 제대로 제거되지 않아 이 기법을 직접 적용할 수 없었다. 우선 재결정된 진앙의 위치를 고정한 후 6월 2일 지진의 발진기구를 계산

하였다. 발진기구 계산을 위해, Kubo et al. (2002)이 제안한, 초기에 추정된 지진의 규모별 최소 진앙거리를 고려하였다. 진앙으로부터 최소 50 km 이상 떨어져 있고, 진앙 주변에 방위각 및 거리에 따라 고루 배치되어 있으며, 자료의 품질이 양호한 광대역 지진관측소 5개소를 선정하였다(Fig. 3(a)). 필터링 대역은 0.05~0.1 Hz를 적용하였다. 지진자료들은 지진계의 응답함수를 제거하고 적분하여 변위 지진파형으로 변환하였다. 파형역산을 위해 사용된 지각속도구조 모델은 지진의 위치를 결정할 때 사용된 Chang and Baag (2006) 모델을 그대로 사용하였으며, S파의 지각속도구조 모델을 위해 P파와 S파의 평균 속도 비를 1.78로 가정하였다. 파형역산에 포함되는 지각속도구조 모델의  $Q_s$ 는 380으로 설정하였으며, 이 값은 김성균 외(2002)에 의해 제시된 결과를 바탕으로 한 것이다. 여기에서 지진파형을 다룰 때 주의할 점은 당시 일부 기상청 광대역 지진관측소 지진파형들의 극성이 역전되어 있다는 것이다. 이러한 점을 고려하지 않는다면 잘못된 결과를 얻을 수 있으므로 주의해야 한다. Green 함수 계산을 위해 Bouchon (1981)이 제안한 주파수-파수법을 적용하였다. 지진들은 단층작용에 의해 발생하므로, deviatoric 성분의 지진원으로 간주하여 파형을 모델링하였다. 파형역산을 위해 각 지진관측소 파형들의 상대적인 시간 이동을 허용하였다. 이러한 절차들은 ISOLA 소프트웨어(Sokos and Zahradnik, 2008)에서 수행된다.

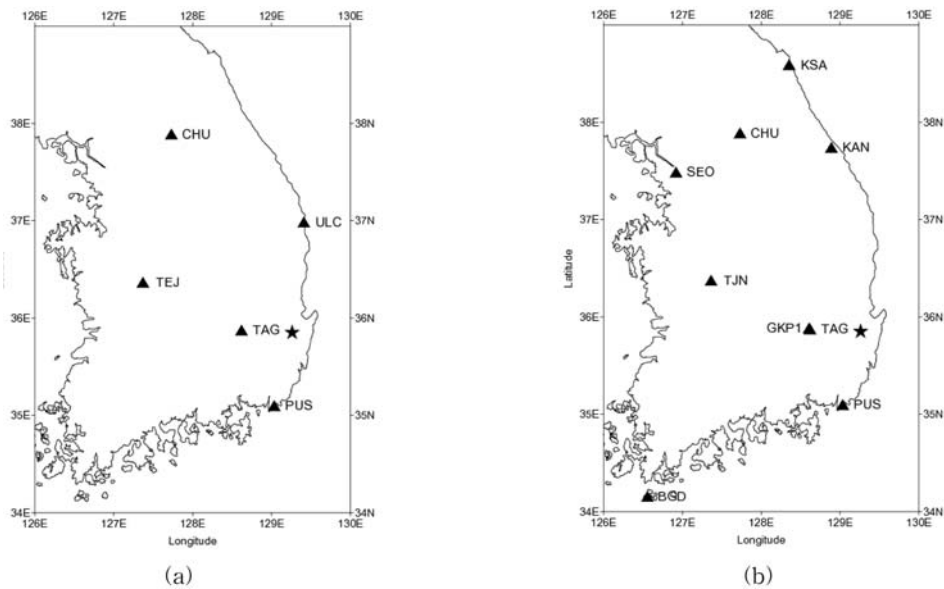


Fig. 3. (a) The distribution of broadband seismic stations for analyzing the focal mechanism of June 2 event. (b) The distribution of broadband seismic stations for analyzing the spectrum of June 2 event. The star indicates the epicenter of June 2 event.

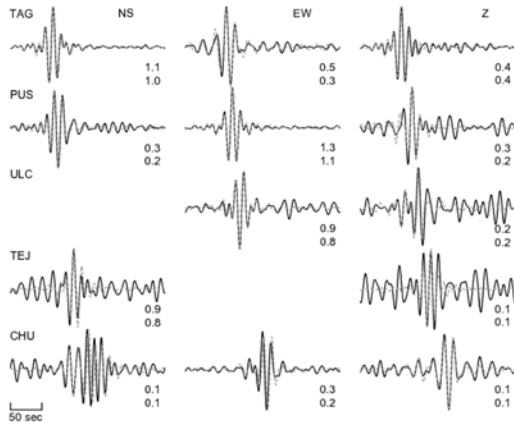
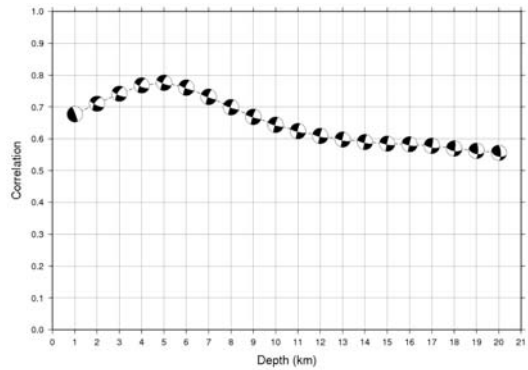


Fig. 4. The comparison between observed (thick lines) and synthetic (dotted lines) waveforms. Figures under each waveform are maximum amplitudes of the observed (upper) and the synthetic (lower) waveform in  $10^{-6}$  m, respectively.

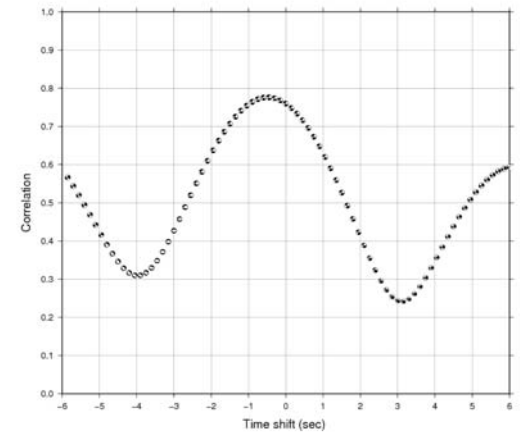
파형역산 결과 지진모멘트는  $3.9 \times 10^{14}$  N·m로 계산되었으며, 이 값은 Kanamori (1977)에 의한 모멘트규모 ( $M_w$ ) 3.7에 해당한다. Fig. 4는 관측 지진파형과 합성 지진파형을 최대진폭으로 정규화하여 비교한 것이다. 파형의 오른쪽 하단 숫자들은 각각 관측 지진파형(상단)과 합성 지진파형(하단)의 최대진폭을 의미하며, 단위는  $10^{-6}$  m이다. 지진파형들은 대체적으로 잘 일치하고 있으나, 일부 지진관측소에서는 저주파수 대역의 잡음이 많이 보이고 있다. 또한 ULC (울진) 지진관측소의 남북 성분, TEJ (대전) 지진관측소의 동서 성분의 경우 관측 지진파형의 품질이 불량하여 파형역산에서 제외하였다.

Fig. 5(a)는 진원의 깊이 변화에 따른 상관계수를 도시한 그래프이다. 지진의 깊이를 1 km부터 20 km까지 1 km씩 증가시키면서 총 20개 깊이에 대한 상관계수를 구하였다. 지진의 깊이가 1 km부터 5 km까지 깊어질수록 상관계수가 점점 증가하다가, 5 km 이후부터는 점점 감소하고 있음을 알 수 있다. 이로부터 6월 2일 지진의 깊이를 5 km로 결정하였는데, 이는 Table 2에 제시된 깊이보다 약간 얕다. Fig. 5(b)는 허용된 시간 이동 범위에 따른 상관계수를 도시한 것이다. 허용된 시간 이동 범위는 -6초부터 6초까지 설정하였다. 가장 큰 상관계수를 갖는 시간 이동은 -0.45초이며, 이는 사용된 지각속도구조 모델이 실제 지각속도구조보다 약간 느리다는 것을 의미한다. 시간 이동을 통해 진원의 오차, 지각속도구조에 대한 불확실성 등을 어느 정도 상쇄시킬 수 있다.

파형역산에 의한 6월 2일 지진의 발진기구의 첫 번째 해는 주향  $206^\circ$ , 경사  $77^\circ$ , 면선각  $-168^\circ$ 이며, 두 번째 해는



(a)



(b)

Fig. 5. (a) The variation of waveform correlation coefficients against the focal depth. (b) The variation of waveform correlation coefficients against the time shift.

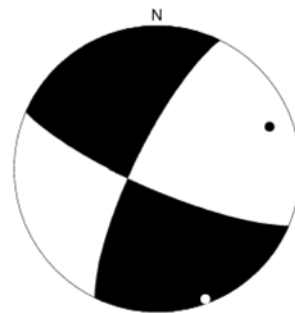
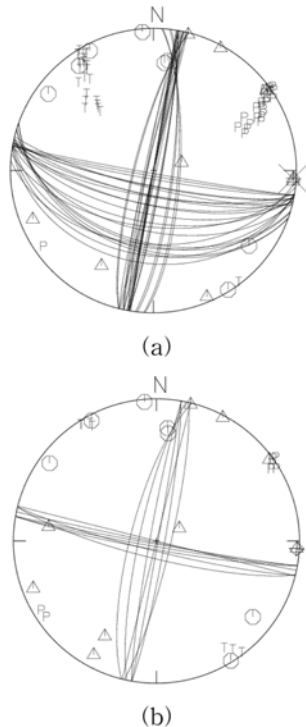


Fig. 6. The focal mechanism of June 2 event analyzed by the waveform inversion analysis with the P-axis (black dot) and T-axis (white dot).

주향  $113^\circ$ , 경사  $78^\circ$ , 면선각  $-13^\circ$ 로 약간의 정단층 성분을 포함한 주향이동단층 특성을 보인다(Fig. 6). P축(

발진기구 분석에 의한 응력의 압축 방향의 주향은 70°로 동북동-서남서의 방향이며, 현재 알려져 있는 한반도 및 주변에서의 주응력 방향인 동북동-서남서 방향과 부합한다(김성균 외, 2006).

파형역산을 직접 적용할 수 없는 4월 24일, 9월 12일 지진들의 발진기구는 P파 및 S파의 극성, 진폭비를 FOCMEC 소프트웨어(Snoke, 2003)에 입력하여 분석하였다. 4월 24일 지진의 경우 17개의 P파 극성, 2개의 S파 극성, 1개의 진폭비를 이용하였으며, 1개의 극성 오류를 허용하였다. 4월 24일 지진의 발진기구는 6월 2일 지진의 발진기구의 특성을 포함하고 있기는 하지만, 동남동-서북서 방향의 단층면해 범위가 넓어 불확실성이 큰 결과를 보여준다(Fig. 7(a)). P축과 T축(발진기구 분석에 의한 응력의 인장 방향)의 방향은 6월 2일 지진의 P축과 T축 방향과 유사하다. 9월 12일 지진의 경우 17개의 P파 극성, 2개의 S파 극성을 이용하였으며, 1개의 극성 오류를 허용하였다. 9월 12일 지진의 발진기구는 6월 2일 지진의 발진기구와 상당히 유사하다. 4월 24일 지진의 발진기구와 비교할 때,



**Fig. 7.** (a) The focal mechanism of April 24 event by P and S wave polarity and their amplitude ratio analysis. (b) The focal mechanism of September 12 event by P and S wave polarity and their amplitude ratio analysis. The up motions are marked by octagons and the down motions by triangles.

두 지진을 기록한 지진관측소의 분포는 거의 비슷하나 9월 12일 지진의 경우 서북서 방향에 위치하고 있는 지진관측소에 의해 단층면해의 분포가 명확하게 결정된다(Fig. 7). 이와 같이 극성분석 기법은 지진관측소 분포에 따라 발진기구 분해능에 결정적인 영향을 받을 수 있으므로 분석에 주의가 필요하다. 9월 12일 지진의 P축과 T축의 방향은 6월 2일 지진의 P축과 T축의 방향과 유사하다.

4월 24일 지진의 동남동-서북서 방향의 단층면해 분포 범위가 넓지만, 3개 지진들의 단층면해는 공통적으로 각각 북북동-남남서, 동남동-서북서 방향일 것으로 판단된다. 이와 같이 진앙 사이의 거리, 지진파형의 유사성, 각 지진들을 공통으로 기록한 지진관측소 지진자료 극성의 동일함, 발진기구 등의 유사성을 고려했을 때 이 지진들은 동일한 단층에서 발생했을 것으로 추정된다.

**스펙트럼 분석**

변위진폭스펙트럼 분석을 통해 6월 2일 지진의 모멘트 규모를 재계산하였다. 변위진폭스펙트럼은 진원, 비탄성 감쇄, 기하학적 감쇄, 지진계 전달함수 그리고 부지효과와 곱으로 표현할 수 있다. 변위진폭스펙트럼 분석을 위해 3성분 합성스펙트럼을 사용하였는데, 3성분 합성스펙트럼은 각 성분별 지진자료를 주파수 영역에서 벡터적으로 합성한 스펙트럼이다(노명현 외, 2003). 비탄성 감쇄와 기하학적 감쇄에는 파형역산 때와 마찬가지로 김성균 외(2002)에서 제시한 식을 적용하였다.

6월 2일 지진의 스펙트럼 분석을 위해 Fig. 3(b)에 제시된 9개 광대역 지진관측소에 기록된 지진자료를 이용하였다. 육안으로 구분이 가능한 S파 도달시간 이후 약 164초 구간을 변위진폭스펙트럼을 구하기 위한 시간창(time window)으로 설정하였는데, 이 구간은 S파 계열의 파열들이 함께 공존하는 충분한 길이이다. 모멘트 규모와 모서리주파수(corner frequency)를 결정하기 위해서 격자탐색법(grid search method) (최호선 외, 2004)을 이용하였다. 격자탐색법은 전체 구간에서 오차가 최소로 되는 전체 최소값(global minimum)을 찾을 수 있다는 장점이 있다. 격자탐색법 적용을 위해 모멘트 규모는 2부터 5까지 구간에서 0.1 간격을 사용하였고, 모서리주파수는 0.5 Hz부터 15 Hz의 구간에서 0.1 Hz의 간격을 사용하였다. 탐색해야 할 총 격자의 수는 4557개(31 × 147)이다.

Fig. 8은 9개 광대역 지진관측소에 기록된 6월 2일 지진 자료에 대한 스펙트럼 분석 결과이다. 저주파수 대역에서 잡음에 의해 진폭이 과도하게 커지는 점과, 고주파수 대역에서 부지특성 등에 의해 진폭이 증폭되는 점을 고려하

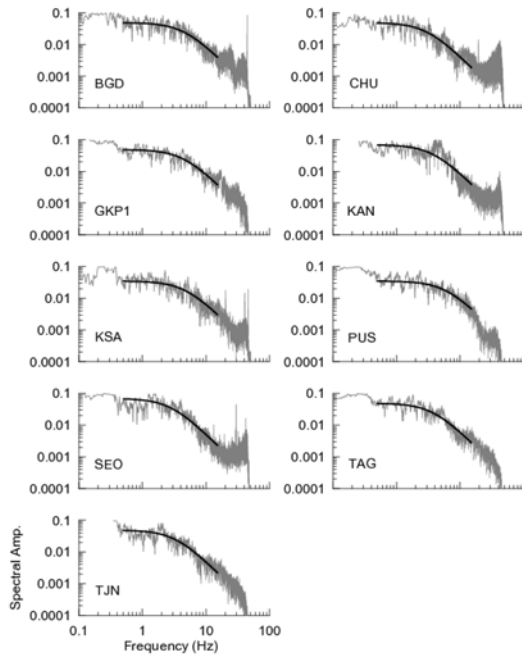


Fig. 8. Composite Fourier amplitude spectra of displacements from June 2 event. Superimposed are estimated model spectra.

여 계산에 사용된 스펙트럼 대역은 0.5~15 Hz이다. 지진관측소에서 구한 모멘트규모는 진원거리, 후방위각 그리고 지진관측소가 위치하고 있는 지역의 부지특성 등에 따라 달라질 수 있다. 이 연구에서는 각 지진관측소에서 얻어진 모멘트규모를 평균하여 최종 모멘트규모를 결정하였다. 계산 결과 6월 2일 지진의 모멘트규모는  $3.8 \pm 0.1$ , 모서리주파수는  $4.0 \pm 1.0$  Hz, 응력강하는  $7.5 \pm 4.2$  MPa로 추정되었다. 스펙트럼 분석에 의한 모멘트규모는 파형역산을 통해 계산된 모멘트규모와 거의 비슷하다.

4월 24일과 9월 12일 지진은 6월 2일 지진에 비해 규모가 작고, 지진자료의 품질이 양호하지 못하여 위와 같은 방법으로 모멘트규모를 구하는 것이 용이하지 않았다. 그래서 공통으로 기록된 단일 지진관측소를 선택하여 스펙트럼을 비교함으로써 모멘트규모를 간접적으로 추정하였다. 단일 지진관측소는 TAG (대구) 지진관측소를 선택하였다. Fig. 9는 계산된 각 지진들의 변위모델진폭 스펙트럼으로, 4월 24일 지진과 9월 12일 지진의 모멘트규모는 각각 3.2, 3.4로 추정되었다.

### 결론 및 토의

Park et al. (2007)은 극성분석 기법을 이용하여 6월 2일

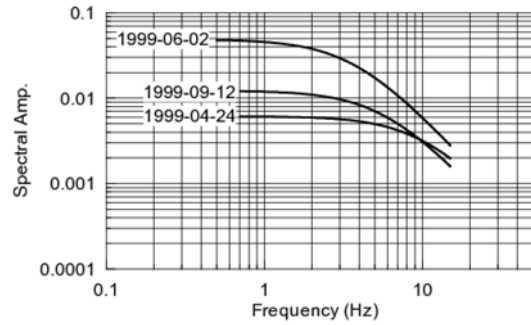


Fig. 9. Comparison between estimated model spectra of three events recorded at TAG seismic station.



Fig. 10. (a) The Focal mechanism of June 2 event by Park et al. (2007). (b) The Focal mechanism of September 12 event by Park et al. (2007).

지진과 9월 12일 지진의 발진기구를 제시하였다(Fig. 10). 그러나 그 결과는 이번 연구결과와 상이하며, 두 지진 간의 상관성은 없는 것처럼 보인다. 그렇지만 본문에서 기술한 것처럼 세 지진의 진앙 사이의 거리, 지진파형의 유사성, 세 지진을 공통으로 기록한 지진관측소에서 지진자료 극성의 동일성을 고려한다면, 세 지진의 발진기구는 유사할 것으로 추정할 수 있다. 이러한 추정을 뒷받침하기 위해 6월 2일 지진은 파형역산 기법을, 나머지 2개 지진은 P파와 S파의 극성분석 기법을 적용하여 발진기구를 계산하였다. 계산 결과 세 지진의 발진기구는 유사하였으며(Fig. 6, 7 참조), 이러한 발진기구의 유사성을 고려한다면 이 지진들은 동일한 단층에서 발생한 것으로 생각할 수 있다.

파형역산을 수행한 결과 6월 2일 지진의 지진모멘트는  $3.9 \times 10^{14}$  N·m로 계산되었으며, 이 값은 모멘트규모 3.7에 해당한다. 스펙트럼 분석에 의한 모멘트규모는 3.8로 추정되어, 파형역산에 의한 모멘트규모와 거의 비슷하다. 평균 응력강하는 약 7.5 MPa로 일반적인 판내 천발지진의 응력강하로 알려진 10 MPa (Ruff, 2002)보다 약간 작다. 이 지진들을 공통으로 기록한 1개 지진관측소의 스펙트럼을 비교한 결과 4월 24일 및 9월 12일 지진의 모멘트 규모는 각각 3.2, 3.4로 추정되었다.

한반도 및 인접지역에서 발생한 지진의 대부분은 약간의 정단층 또는 역단층 성분을 포함한 주향이동단층 운동의 특성을 보이며, 전체적인 P축 방향은 동북동-서남서 방향을 나타낸다(김성균 외, 2006). 이번 3개 지진의 P축 방향도 이 방향과 일치하고 있다. 이 지진들은 경상분지와 연일본지의 경계에 해당하는 곳에서 발생하였는데, 발진기구가 추정되는 단층면 방향과 지표상에 나타난 선구조를 직접 연관시키기는 어렵다. 그러나 1999년 이전이나 이후에 일어난 지진 중에 서로의 진앙거리가 가깝고 발진기구가 유사한 지진들을 모아 종합적으로 분석한다면 발진기구의 2개 단층면 중에 어느 것이 실제 단층면인지에 대해 판단할 수 있을 것이다.

## 사 사

이 논문은 한국원자력안전기술원 기관고유사업인 원전부지 지진감시 사업과 중장기 연구사업인 원전부지 설계 지진 및 지표변형 평가 규제기술개발 사업 연구의 일환으로 수행되었다.

## 참고문헌

- 김성균, 김수경, 지현철, 2002, 한반도 남부에서의 주파수별 가속도 최대진폭의 감쇠, 지질학회지, 38, 237-250.
- 김성균, 전명순, 전정수, 2006, 국내 지진활동 및 지각구조 연구동향, 자원환경지질, 39, 369-384.
- 노명현, 이상국, 최강룡, 2000, 3성분 지진기록 합성에 의한 푸리에 진폭스펙트럼 분석, 지구물리, 6, 25-29.
- 최호선, 노명현, 최강룡, 2003, 한반도 남부 지역의 지역 규모와 모멘트규모의 관계, 지구물리, 7, 185-192.
- Bouchon, M., 1981, A simple method to calculate Green's functions for elastic layered media, Bulletin of the Seismological Society of America, 71, 959-971.
- Chang, S.-J. and Baag, C.-E., 2006, Crustal structure in southern Korea from joint analysis of regional broadband waveforms and travel times, Bulletin of the Seismological Society of America, 96, 856-870.
- Kanamori, H., 1977, The energy release in great earthquakes, Journal of Geophysical Research, 82, 2981-2987.
- Klein, F. W., 2002, User's Guide to HYPOINVERSE-2000, a Fortran program to solve for earthquake locations and magnitudes, Open File Report 02-171, U.S. Geological Survey.
- Kubo, A., Fukuyama, E., Kawai, H. and Nonomura, K., 2002, NIED seismic moment tensor catalogue for regional earthquakes around Japan: quality test and application, Tectonophysics, 356, 23-48.
- Park, J.-C., Kim, W., Chung, T. W. and Baag, C.-E., 2007, Focal mechanisms of recent earthquakes in the Southern Korean Peninsula, Geophysical Journal International, 169, 1103-1114.
- Ruff, L. J., 2002, State of stress within the Earth, International Handbook of Earthquake and Engineering Seismology, Academic Press, 548-551.
- Snoke, J. A., 2003, FOCMEC: focal mechanism determinations, International Handbook of Earthquake Engineering Seismology, Academic Press, 1629-1630.
- Sokos, E. N. and Zahradnik, J., 2008, ISOLA a Fortran code and a Matlab GUI to perform multiple-point source inversion of seismic data, Computers and Geosciences, 34, 967-977.

---

2009년 10월 27일 원고접수, 2009년 11월 30일 게재승인

### 최호선

한국원자력안전기술원 구조부지실  
대전광역시 유성구 구성동 19번지  
서울대학교 지구환경과학부  
서울특별시 관악구 신림동 산 56-1  
Tel: 042-868-0674  
Fax: 042-868-0524  
E-mail: hoseon@kins.re.kr

### 심택모

한국원자력안전기술원 공학연구실  
대전광역시 유성구 구성동 19번지  
Tel: 042-868-0262  
Fax: 042-861-9945  
E-mail: k147stm@kins.re.kr