

2013년 2월 5일 규모 3.5 거창 지진과 여진의 지진원 분석

박지환¹ · 이현미² · 신동훈^{2,*}

¹한국지질자원연구원 지진연구센터

²전남대학교 지구환경과학부

요 약

지난 2013년 2월 5일 경남 거창 인근에서 규모 3.5의 지진이 발생했는데, 이 지진은 비교적 작은 규모의 지진임에도 불구하고 이례적으로 다수의 여진을 동반하였다. 이 연구에서는 본진과 규모 1.0 이상의 11개 여진을 분석하였다. 본진은 127.9837°E, 35.7657°N인 지점의 약 8 km 깊이에서 발생하였으며, P파 초동 극성과 SH/P파의 비율을 사용해 얻은 본진의 단층면해와 본진과 여진의 상대적 진원 비교를 통해, 주향 300°, 경사 86°를 가진 단층면에서 -15°의 미끄럼각을 가지는 좌수향 주향이동 단층과 관련이 있음을 알 수 있었다. S파 변위 스펙트럼 분석을 통해 본진의 지진모멘트와 모멘트 규모는 각각 $6.42e+21$ dyne/cm와 3.8로 결정되었다. 경험적 그린 함수를 이용한 본진의 단층반경은 약 468 m이며, 응력강하량은 27.3 bar로 S파 변위 스펙트럼을 이용한 응력강하량과 유사하게 결정되었다. 이 본진을 중심으로 반경 0.1° 이내의 지역에서 2000년부터 지금까지도 계속적으로 유사한 미소지진이 있음을 확인하였으며, 이 지역에 대한 상세한 미소지진활동 감시와 연구가 필요할 것으로 판단된다.

주요어: 거창, 지진, 여진, 지진원 요소, 미소지진

Jihwan Pak, Hyun-Me Rhee and Dong-Hoon Sheen, 2016, Analysis of M 3.5 Geochang earthquake on February 5, 2013 and its aftershocks. Journal of the Geological Society of Korea. v. 52, no. 4, p. 421-432

ABSTRACT: An earthquake (M_L 3.5) occurred near Geochang on 5 February 2013. Although this was a rather small earthquake, a number of aftershocks unusually followed in this region. We analyzed the main shock and 11 aftershocks with magnitude greater than M_L 1.0 in detail. The main shock occurred at 127.9837°E, 35.7657°N, and a depth of about 8 km. The fault plane solutions from P-polarities and amplitude ratios of SH and P waves, and the relative locations of main shock and aftershocks represent that the events could be related with a lateral strike-slip fault with 300° in strike, 86° in dip and -15° in rake. For the main shock, seismic moment of $6.42e+21$ dyne/cm and moment magnitude of 3.8 are obtained from the S-wave displacement spectra. The empirical Green's function analysis yields a radius of 468 m for a circular rupture and the stress drop about 27.3 bar, which is similar to the result from S-wave displacement spectra. It was found that similar microearthquake have consistently occurred within 0.1° of the main shock from 2000 to the present, which suggests that a comprehensive monitoring and analysis for microseismic activity be necessary to understand the seismic characteristics in this region.

Key words: Geochang, earthquake, aftershock, source parameters, microearthquake

(Jihwan Pak, Earthquake Research Center, Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources, Daejeon 34132, Republic of Korea; Hyun-Me Rhee and Dong-Hoon Sheen, Faculty of Earth Systems and Environmental Sciences, Chonnam National University, Gwangju 61186, Republic of Korea)

1. 서 론

지난 2013년 2월 5일 경남 거창 인근에서 규모 3.5의 지진이 발생했는데, 이례적으로 다수의 여진을 동반하였다. 기상청 지진연보에 따르면, 2001년부터

2014년까지 기상청에서 발표한 지진 중에서 진도 4 (IV) 이상을 나타낸 유감지진은 총 8회 발생하였으며, 이들 유감지진 중에서 해역이 아닌 한반도 내륙에서 발생한 지진은 총 4회이다. 2007년 1월 2일 발생한 규모 4.8의 오대산 지진과 2009년 5월 2일 발생

* Corresponding author: +82-62-530-3454, E-mail: dhsheen@jnu.ac.kr

한 규모 4.0의 안동 지진, 2012년 5월 11일 발생한 규모 3.9의 무주 지진 및 거창 지진이 이에 해당한다.

오대산 지진은 2001년 이후 내륙에서 발생한 가장 큰 규모의 지진으로, 진원 재검정과 단층면에 분석을 비롯한 지진원의 특성에 대한 많은 연구들이 수행되었다(Jo and Baag, 2007; Ko et al., 2009; Kim and Park, 2010; Kim et al., 2010; Park and Hahm, 2010). 또한 규모 2.6의 여진을 동반했던 규모 4.0의 2009년 안동 지진에 대해서도 단층면에 분석과 파형 역산을 통한 지진학적 특성 분석이 수행되었다(Choi and Noh, 2010).

이러한 지진들의 정밀 분석을 통해 해당 지진의 지진학적 특성을 파악할 수 있었다. 본 연구에서는 비교적 작은 규모임에도 불구하고, 이례적으로 다수의 여진을 수반했던 거창 지진에 대한 정밀 분석을 통해 이 지진의 지진학적 특성을 파악하고자 한다.

2. 자료선정 및 처리

다중 채널 상호상관법(Gibbons and Ringdal, 2006)을 사용하여, 지난 2013년 2월 5일 경남 거창에서 발생한 본진과 관련된 전진과 여진을 조사하였다. 그림 1에

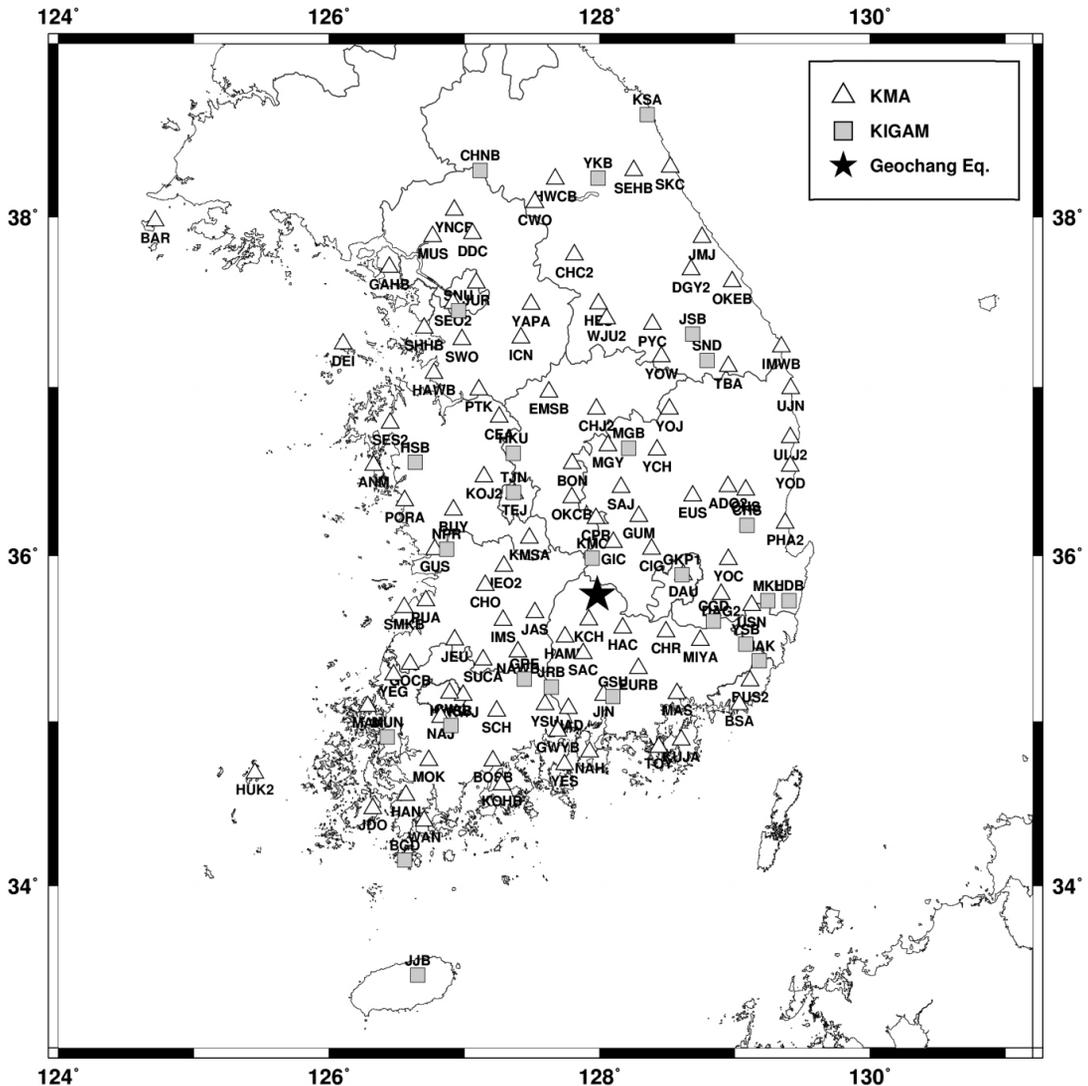


Fig. 1. Location of epicenter and distribution of seismic stations used in this study.

본진의 진앙과 본 연구에 사용된 한국지질자원연구원(KIGAM)과 기상청(KMA) 지진관측소의 위치를 도시하였다.

진앙으로부터 약 18 km 떨어진 가장 가까운 거창 관측소(KCH)에 기록된 3성분기록에서 본진의 P파와 S파가 포함된 3.8초 동안의 지진파형을 기준으로, 본진 전후 4주 동안 거창 관측소의 연속 지진기록에서 본진과 상관도가 높은 미소지진을 검색하였다. 연속 지진 기록을 24시간 단위로 잘라내어 평균과 기울기를 제거하고 테이퍼링을 한 다음, 3.0 ~ 15.0 Hz의 대역 통과 필터를 적용하였다. 서로 다른 규모의 지진 파형을 비교하기 위하여 진폭을 정규화하여, 본진의 기준파형과 상호상관하였다. 이때 상호상관한 파형은 가장 큰 상관계수값을 중심으로 부엽(side-lobe)도 높은 값의 상관계수를 가질 수 있기

때문에, 한 지진을 여러 개의 유사한 지진으로 해석할 수 있다. 이를 방지하기 위해 Gibbons and Ringdal (2006)이 제안한 비율화된 상관계수(scaled correlation coefficient)를 측정하여 전진과 여진의 존재를 조사하였다. 경험적으로 본진과의 상호상관계수가 0.5 이상이며, 비율화된 상관계수가 8 이상인 경우를 본진과 유사한 지진으로 가정하였다. 총 4주 동안의 연속 지진 자료에서 54개의 여진을 발견하였으나, 이 조건을 만족시키는 전진은 발견하지 못하였다. 본진 발생 이전의 지진파형을 육안으로도 확인하였으나, 전진으로 해석할만한 신호는 관찰되지 않았다. 또한 발견된 여진 중에서 육안으로 재확인하였을 때, 9개 지진은 신호대 잡음비가 너무 낮아 P파와 S파의 식별이 어려웠다.

그림 2는 이 연구를 통해 발견한 45개의 여진과 본

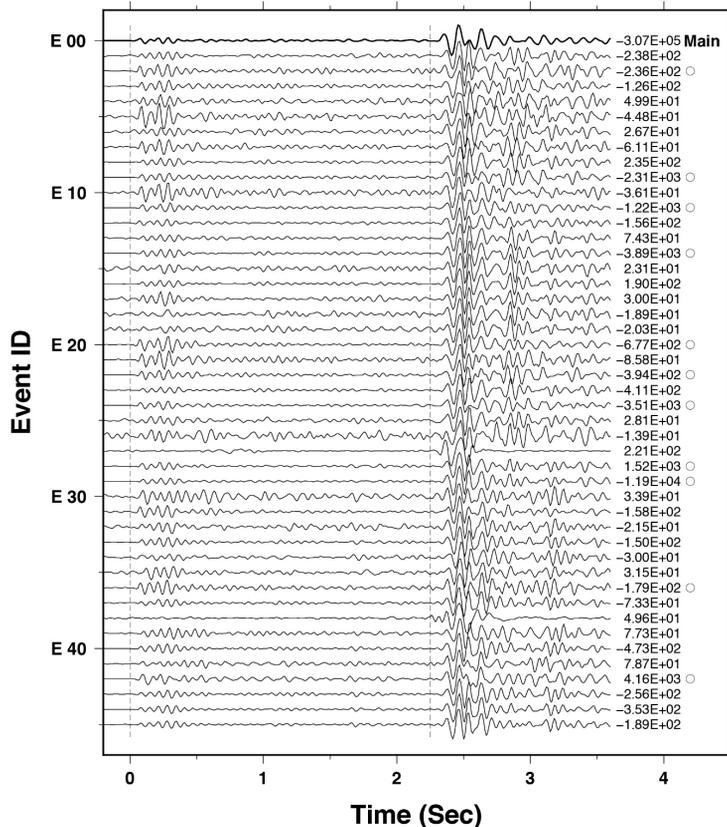


Fig. 2. Normalized seismograms of vertical component of main shock (thick line) and 45 aftershocks (thin lines) without instrument correction. The values at the end of signals indicate the peak amplitude (in count). Seismograms of 11 aftershocks used in this study are indicated by circles at the right. Vertical dashed lines represent the arrival times of P and S waves.

Table 1. Hypocentral parameters of main shock and 11 aftershocks used in this study, obtained from NECIS.

No.	Event ID	Origin time (KST)	Lat. (°N)	Long. (°E)	Mag.	Note
0	E00	2013/02/05 21:25:36	35.77	127.97	3.5	Main shock
1	E02	2013/02/05 21:32:29	35.75	127.99	1.5	
2	E09	2013/02/05 22:43:55	35.77	127.97	1.3	
3	E11	2013/02/05 23:36:26	35.77	127.97	1.1	
4	E14	2013/02/06 00:30:43	35.76	127.99	1.4	
5	E20	2013/02/06 04:12:47	35.78	127.96	1.2	
6	E22	2013/02/06 04:47:58	35.77	127.98	1.2	
7	E24	2013/02/06 22:59:31	35.77	127.98	1.4	
8	E28	2013/02/07 22:24:53	35.77	127.98	1.4	
9	E29	2013/02/07 23:54:44	35.76	127.99	1.8	
10	E36	2013/02/11 02:04:05	35.76	127.98	1.0	
11	E42	2013/02/16 05:10:42	35.76	127.99	1.5	

Table 2. Hypocentral parameters for the Geochang earthquakes determined by HYPOELLIPSE and JHD.

Event ID	HYPOELLIPSE					JHD					
	Origin Time (UTC)	Long. (°E)	Lat. (°N)	Depth (km)	RMS residual (sec)	Origin Time (sec)	Long. (°E)	Lat. (°N)	Depth (km)	RMS residual (sec)	
E00	2013/02/05 12:25:36.70	127.9837	35.7657	7.57	0.18	36.6178	127.9731	35.7726	7.74	0.02	
E02	2013/02/05 12:32:29.76	127.9721	35.7720	9.93	0.07	29.4774	127.9817	35.7715	8.79	0.11	
E09	2013/02/05 13:43:56.06	127.9784	35.7725	9.23	0.17	55.8826	127.9750	35.7712	8.21	0.02	
E11	2013/02/05 14:36:25.90	127.9687	35.7741	10.09	0.17	25.7470	127.9697	35.7722	8.29	0.04	
E14	2013/02/05 15:30:43.36	127.9683	35.7732	8.51	0.17	43.1375	127.9713	35.7727	7.74	0.02	
E20	2013/02/05 19:12:47.18	127.9641	35.7763	9.45	0.17	46.9699	127.9701	35.7743	8.03	0.03	
E22	2013/02/05 19:47:59.19	127.9747	35.7693	9.89	0.07	58.9548	127.9770	35.7712	8.42	0.03	
E24	2013/02/06 13:59:32.11	127.9794	35.7738	8.91	0.18	31.9566	127.9739	35.7729	8.07	0.02	
E28	2013/02/07 13:24:53.00	127.9650	35.7774	7.47	0.19	52.8272	127.9708	35.7732	7.44	0.04	
E29	2013/02/07 14:54:44.94	127.9746	35.7737	7.98	0.16	44.7518	127.9716	35.7728	7.74	0.02	
E36	2013/02/10 17:04:06.04	127.9769	35.7653	11.45	0.06	5.8971	127.9731	35.7721	8.66	0.07	
E42	2013/02/15 20:10:42.38	127.9753	35.7736	8.16	0.18	42.1273	127.9743	35.7719	8.01	0.04	
Average RMS (sec)					0.15±0.05	Average RMS (sec)					0.04±0.03

진 기록을 나타낸다. P파를 기준으로 0.2초 앞에서 P 파 도달 후 3.6초까지의 파형을 도시하였다. 각 지진 파형의 진폭은 각각 정규화되었으며, 최대진폭은 파형에 함께 기재하였다. 이 여진들 중에서, 15개 이상의 지진관측소에서 지진 파형 식별이 가능했던 총 11개의 여진을 분석하였으며, 지진 파형의 오른쪽에 원으로 표시하여 구분하였다. 이 여진들은 기상청의 국가지진종합정보시스템(National Earthquake Comprehensive Information System, NECIS)에서 규모 1.0 이상의 지진으로 분석되었으며, 거창 지진의 본진과 여진의 진원시와 진앙 및 규모는 표 1과 같이 주어졌다.

3. 진원 결정

진원 결정 정확도를 높이기 위해서는 P파와 S파의 도달시간에 대한 정확하고 일관된 결정과 실제적인 속도구조 모델의 사용이 필요하다. 규모가 작은 여진의 일관된 지진파 도달시간 결정을 위해 본진의 지진 파형을 이용하였다. 각 관측소의 지진 기록에서 본진의 P파와 S파 도달시간은 육안으로 관찰하여 결정하였으며, 각 본진 파형과 상호상관하여 여진들의 P파와 S파 도달시간을 결정하였다. 또한 속도모델에 의한 영향을 줄이고자, 6개의 한반도 1차원 속도모델(Lee, 1979; Kim and Kim, 1983; Kim and

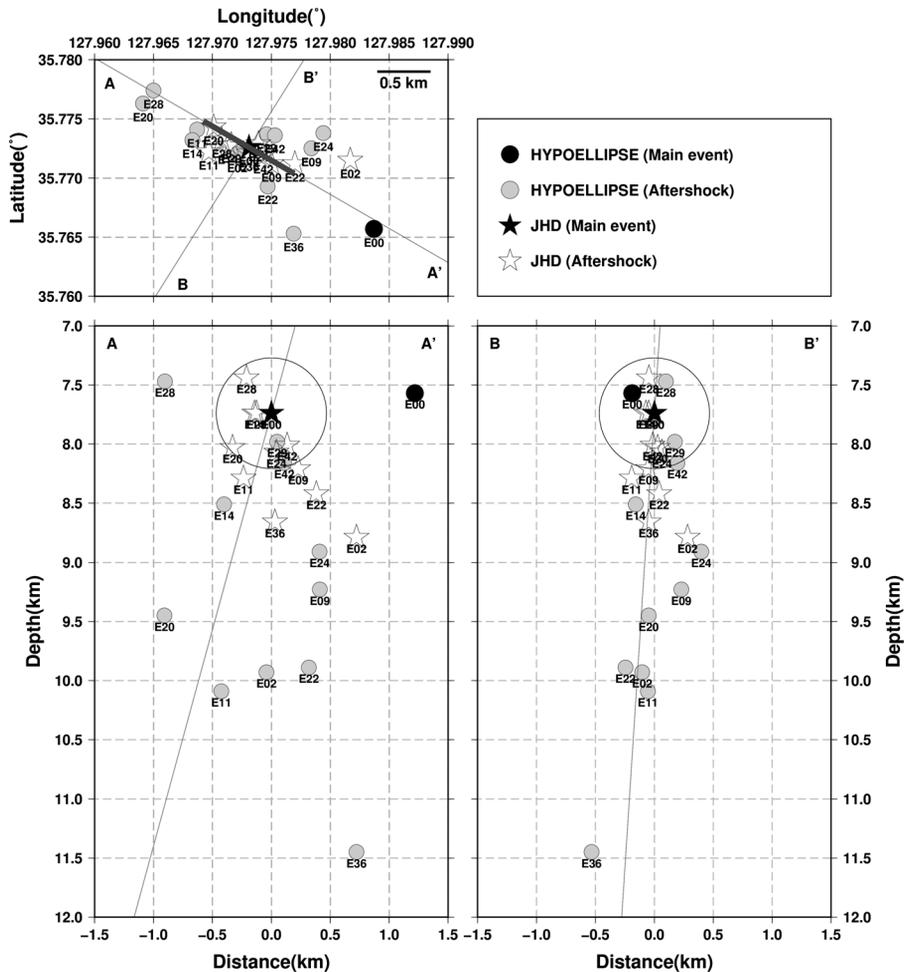


Fig. 3. Locations of events and fault planes of main shock. Circles and stars represent the locations determined by HYPOELLIPSE and JHD, respectively. Black symbols indicate the locations of the main shock. The fault planes, obtained from the P-polarities and SH/P ratio, are represented by solid lines. A-A' and B-B' show the cross-sectional view along fault planes. Thick line in plain view and empty circles in cross-sectional views correspond to the fault radius.

Jung, 1985; Kim, 1995; Chang and Baag, 2006; Kim *et al.*, 2011)을 사용하여 진원을 결정하여 그 결과를 비교하였다.

이때 반복적인 계산을 통하여 최적의 해를 찾는 Geiger의 방법에 기초한 HYPOELLIPSE (Lahr, 1999)를 이용하여 본진과 11개 여진의 진원을 결정하고, 잔차(residual)의 제곱평균제곱근(root-mean-square, RMS)을 비교하였다. Kim (1995)의 속도모형을 사용하여 얻은 RMS는 약 0.20이었으며, 이를 제외한 나머지 5개의 속도모형을 사용하였을 때 얻은 RMS는 약 0.15 ~ 0.16 범위를 나타냈다. 이 중에서도 Kim and Kim (1983)의 속도모형을 사용했을 때 가장 낮은 RMS를 얻을 수 있었다. 이 속도모형을 사용하여 결정한 본진과 여진의 진원 재결정 결과는 표 2에 제시하였으며, 본진은 21시 25분 36.07초 경에, 경도 127.9837°E, 위도 35.7657°N인 지점의 약 8 km 깊이에서 발생한 것으로 분석되었다.

본진과 여진의 상대적인 분포를 파악하기 위해 JHD (Joint Hypocenter Determination; Pujol, 1988) 방법

을 사용하여 진원을 재결정하였다. HYPOELLIPSE 계산에 사용된 관측 자료 중에서, 본진은 총 15개의 관측소에서 관측한 P파와 S파의 도달시간을, 여진들은 최소 8개 관측소의 P파 도달시간과 3개의 S파 도달시간을 사용하였다. JHD를 이용하여 계산된 RMS도 표 2에 제시하였으며, HYPOELLIPSE와 JHD를 이용하여 얻은 진원 분포는 그림 3과 같다. JHD에 의해 본진과 여진들의 상대적인 위치가 더 가깝게 결정된 것을 알 수 있으며, 본진과 여진들이 서북서-동남동의 방향으로 7 ~ 9 km 범위에 분포하는 것을 확인할 수 있다.

4. 단층면해

본진의 P파 초동극성 95개와 SH/P 진폭비 16개를 이용하여 FOCMEC (FOCal MEchanism determination; Snoke, 2002) 프로그램으로 본진의 단층면해를 결정하였다(그림 4a). 이를 통해 본진은 주향이동단층에 의해 발생하였음을 알 수 있다. 또한 그

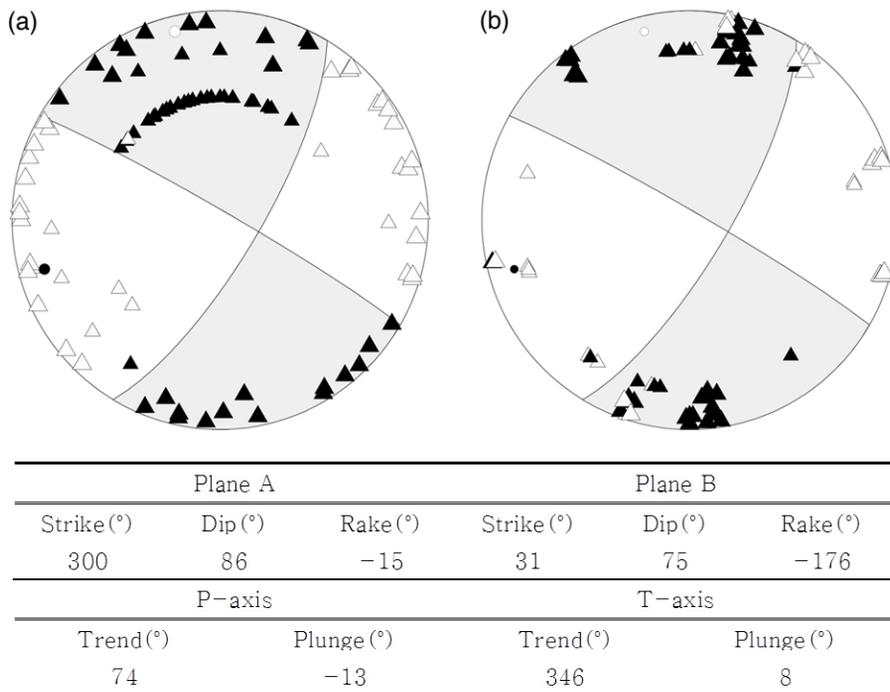


Fig. 4. Focal mechanism and observed polarities of P waves at the stations. Polarities of (a) main shock and (b) aftershocks are superimposed on the focal mechanism of main shock. Each station's location on the focal sphere is indicated by triangles. Black and white triangles correspond to compressional and dilatational polarities, respectively. Black and white dots represent the P and T axes, respectively.

림 3에서 본진과 여진들의 진원 분포와 비교하면, 본진은 주향(Strike) 300°, 경사(Dip) 86°의 단층면에서, 미끌림각(Rake) -15°를 가지는 좌수향 운동과 관련이 있는 것으로 판단된다.

여진은 규모가 작아 P파 초동의 극성을 근거리의 일부 관측 자료에서만 구분 가능하였기 때문에 정확한 단층면해를 결정하기 어려웠다. 하지만 본진의 단층면해와 여진들의 관측소 별 초동 극성을 비교해보면 대부분의 여진 관측자료가 본진의 단층면해에 부합하는 것을 알 수 있다(그림 4b). 이는 여진들도 본진과 동일하거나 유사한 단층운동에 의해 발생하였음을 의미한다. 이 지역의 지질도를 검토하였지만, 이와 관련 지을 수 있는 알려진 지질 구조(단층)는 확인할 수 없었다.

5. 지진원 요소

이 연구에서는 Brune의 진원모델을 가정한 S파 변위 스펙트럼 분석 방법(Jo and Baag, 2001)과 작은 규모의 여진을 이용하는 경험적 그린함수 방법(Empirical Green's Function, EGF; Mori and Frankel, 1990)을 사용하여 본진의 지진원 상수를 결정하였다.

이 연구에서는 Brune 지진원 모델(Brune, 1970)에 근거하여 S파 변위 스펙트럼 분석을 통해 지진원 요소를 결정할 때, 반복 계산방법을 통해 보다 안정적인 계산을 수행할 수 있는 Jo and Baag (2001)의 방법을 사용하였다. 그림 5는 일부 관측소의 S파 변위 스펙트럼과 도출된 Brune 진원 스펙트럼을 함께 도시한 것이다. 총 30개 관측소의 자료를 사용하여

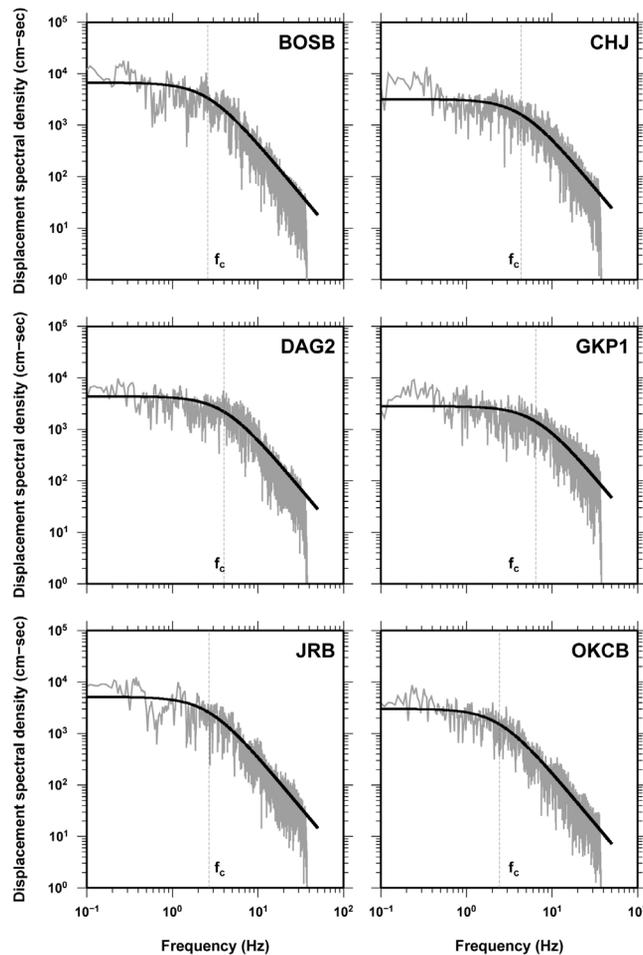


Fig. 5. Example of observed S-wave displacement spectra (gray lines) and estimated theoretical ω^{-2} spectra (black lines). Vertical dashed lines represent the corner frequencies (f_c).

지진모멘트, 모서리 주파수 및 응력강하량의 중앙값을 지진원 요소로 결정하였는데, 본진의 지진모멘트와 모서리 주파수는 약 6.42×10^{21} dyne/cm와 약 2.63 Hz로 결정되었으며, 응력강하량은 약 28.1 bar로 측정되었다. 지진모멘트를 이용하여 모멘트 규모를 계산하였으며, 본진의 모멘트 규모(M_W)는 3.8 이었다.

경험적 그린함수 방법(Mori and Frankel, 1990)은 동일한 관측소에 기록된 규모가 큰 지진에 대하

여 규모가 작은 지진의 지진파를 이용하여 단층 반경, 응력강하와 같은 지진원 요소를 결정하는 방법이다. 큰 규모의 지진과 동일한 지점에서 발생한 작은 규모의 지진에 대한 파형이 유사한 경우 경험적 그린함수로 사용할 수 있으며, 이때 작은 규모 지진의 지진파는 큰 규모의 지진파와 동일한 관측소의 지진계 및 기록계에 전파되는 파의 경로가 동일해야 한다(Park and Mori, 2005).

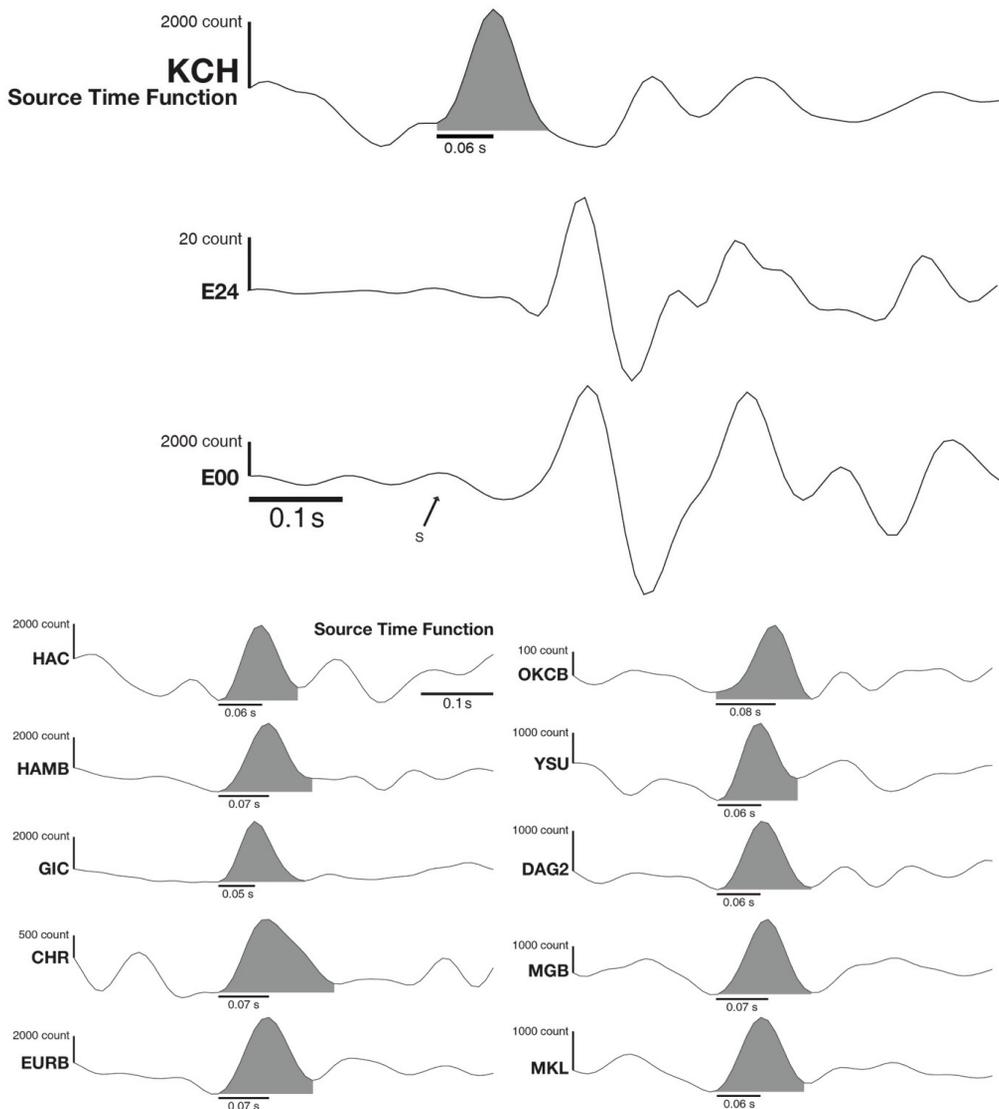


Fig. 6. Source time functions measured by deconvolution of waveform of an aftershock from that of main shock. E00 and E24 represent waveforms of main shock and aftershock, respectively. Shaded regions indicate the source time function for each station. Times and horizontal bars below the shaded region represent estimated rise times of the fault.

Table 3. Parameters for estimating fault radius at each seismic station.

Station	Azimuth (°)	Take-off angle (°)	θ (°)	Fault radius (m)
KCH	199.26	114.00	150.38	268
HAC	142.82	105.11	110.94	646
HAMB	217.50	100.63	163.79	246
GIC	17.05	100.30	14.38	169
CHR	117.99	97.81	87.56	949
EURB	150.59	97.37	119.74	626
OKCB	328.27	96.18	61.47	734
YSU	205.64	95.42	169.89	190
DAG2	89.52	95.35	59.38	524
MGB	12.02	94.35	17.90	251
MKL	91.65	93.56	61.56	550
Fault radius average				468±247

큰 규모의 지진파를 작은 규모의 지진파로 디컨벌루션하면 지진파 전파효과는 사라지고, 지진원 특성을 설명할 수 있는 진원시간함수를 구할 수 있다. 상승 시간은 진원시간함수가 최대가 될 때까지의 시간으로 결정하는데, 그림 6은 본진(E00)을 7번째 여진(E24)으로 디컨벌루션하여 구한 진원시간함수와 상승 시간을 나타낸다. 대체로 경험적 그린함수로 사용하는 작은 규모의 지진은 큰 지진 보다 규모가 1.0~2.0 정도 작다(e.g., Mueller, 1985; Frankel *et al.*, 1986; Park and Mori, 2005). 이 연구에서는 두 지진의 규모 차이가 2.1이며, 이로 인해 작은 지진의 진원함수를 큰 지진에 대해 상대적으로 델타함수로 사용할 수 있다고 가정하였다.

본진의 단층반경 r 은 상승시간 τ_r 를 이용하여 다음 식 (1)과 같이 계산할 수 있다(Mori and Frankel, 1990).

$$r = \frac{\tau_r v}{[1 - v \sin\theta / c(x_0)]} \quad (1)$$

$c(x_0)$ 는 지진파의 속도이고, v 는 단층파열속도로, 일반적으로 S파 속도의 0.7 ~ 0.9배로 가정한다(Mori and Frankel, 1990; Stein and Wysession, 2009). 이 연구에서는 진원에서의 S파 속도를 Kim and Kim (1983)의 속도모델에서 진원 깊이가 약 8 km에 해당하는 3.40 km/s로 가정하였으며, 단층파열속도는 S파 속도의 0.8배에 해당하는 2.72 km/s로 사용하였다. θ 는 파선벡터와 단층면에 수직인 법선 벡터를 이용하여 계산하며, 단층면의 경사와 주향 및 지진파의 출발

각과 방위각에 따라 다르다. 표 2에서 결정한 진원 깊이, Kim and Kim (1983)의 속도모델과 그림 4의 단층면해를 이용하여 각 관측소로 전파한 파선 경로를 고려하여 단층 반경을 계산하였으며, 그 결과는 표 3과 같다.

응력강하량($\Delta\sigma$)은 다음 식을 이용하여 계산하였다.

$$\Delta\sigma = \frac{7}{16} \frac{M_0}{r^3} \quad (2)$$

S파 변위 스펙트럼을 이용해 측정한 지진모멘트 (M_0)와 경험적 그린함수를 이용한 주 단층면의 단층반경을 이용해 결정한 응력강하량은 약 27.3 bar이었다.

본진과 여진 분포를 그림 4에 제시한 본진의 단층면해에 투영하고, 단층 반경을 중첩하여 그림 3에 도시하였다. 이때 본진이 Brune의 지진원 모델에서 가정한 것처럼 단층반경의 중심에 있는 것으로 가정하였다. 얇은 실선은 단층면의 방향을 나타내며, 수평 단면에서 굵은 실선과 수직 단면에서 원은 단층 반경을 의미한다. 본진과 여진의 상대적인 위치가 주 단층면과 매우 잘 일치하며, 이 연구에서 분석한 11개의 여진 중에서 6개의 여진이 본진의 단층반경 내에서 발생한 것을 알 수 있다. 하지만 시간에 따른 여진 발생 지점의 변화는 관찰할 수 없었다.

6. 토 의

NECIS에 따르면 2013년 2월 거창 본진을 중심의

로 0.1° 반경에서 2000년부터 최근까지 발생한 규모 1.0 이상의 지진은 총 37회이며, 이 중에서 12개의 지진은 이 연구에서 분석한 본진과 여진이다. 본진과 가장 가까운 거창 관측소(KCH)는 2006년말부터

운영되었기 때문에, 이 시기 이전에 발생한 지진과 거창 관측소의 관측 자료가 없는 지진을 제외한 총 18개 지진자료를 이번 본진과 비교하였다(표 4). 앞에서 여진 검색에 사용한 방법과 동일한 방법을 사

Table 4. Hypocentral parameters and correlation coefficients of microearthquakes near the Geochang earthquake. Hypocentral parameters were obtained from NECIS.

No.	Event ID	Origin time (KST)	Lat. (°N)	Long. (°E)	Mag.	Coefficient	Scaled coefficient
1	H01	2008/09/25 22:26:26	35.75	128.00	1.76	0.26	6.64
2	H02	2009/03/15 22:58:34	35.76	128.03	1.04	0.23	4.73
3	H03	2010/05/18 18:12:34	35.75	128.04	1.50	0.42	9.91
4	H04	2011/02/05 04:18:23	35.79	127.93	1.02	0.25	5.04
5	H05	2011/05/13 00:50:29	35.80	127.89	1.05	0.23	5.30
6	H06	2011/11/10 08:40:32	35.82	127.96	1.19	0.42	8.65
7	H07	2011/11/13 08:37:52	35.82	127.96	1.27	0.18	7.83
8	H08	2012/05/06 16:46:22	35.75	128.01	1.23	0.52	10.84
9	H09	2012/07/02 03:29:42	35.73	128.06	1.63	0.28	13.04
10	H10	2013/05/07 17:38:40	35.78	127.93	1.07	0.65	15.44
11	H11	2013/09/07 05:00:25	35.72	128.00	1.50	0.41	7.29
12	H12	2013/10/07 21:10:57	35.81	128.05	1.38	0.35	7.63
13	H13	2013/12/15 07:00:54	35.77	127.96	1.26	0.54	8.06
14	H14	2014/08/26 05:26:40	35.76	127.98	1.34	0.33	5.87
15	H15	2015/01/31 09:51:56	35.77	127.97	1.28	0.67	12.64
16	H16	2015/02/19 04:12:50	35.78	128.07	1.29	0.23	4.73
17	H17	2015/07/20 03:59:27	35.80	127.98	1.23	0.48	7.10
18	H18	2015/07/20 17:53:41	35.77	127.97	1.73	0.56	8.94

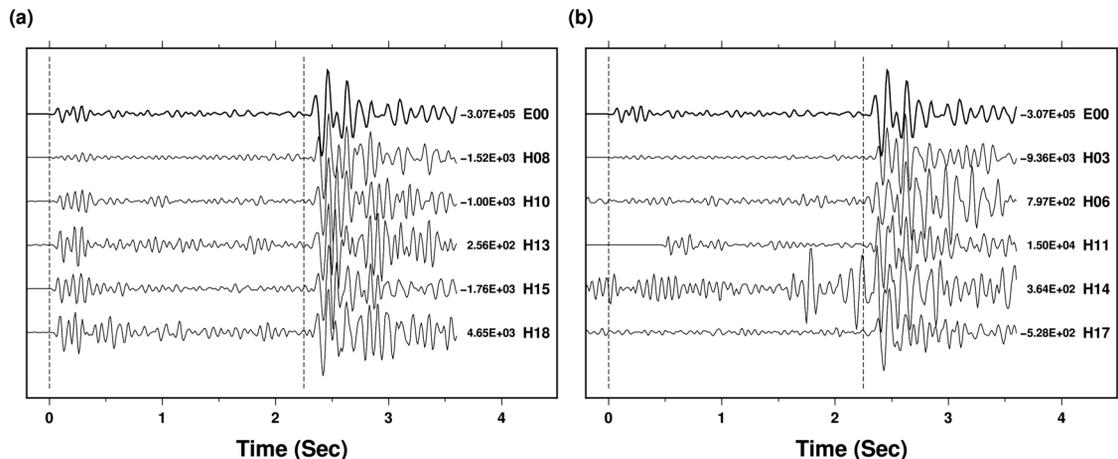


Fig. 7. Comparison of waveforms of the main shock (E00) with microearthquakes. (a) represents the waveforms satisfying the event identification criteria in this study and (b) the waveforms not satisfying the criteria. The values at the end of signals indicate the peak amplitude (in count).

용하여, 2013년 거창 본진 파형과의 상관성을 비교해 보니, 5개의 지진이 본진과 매우 유사한 것으로 분석되었다(그림 7a). 하지만 상관도가 낮은 지진 중에서도 본진 파형과 유사한 지진기록을 가지는 것을 일부 확인할 수 있다(그림 7b). 그리고, 앞서 살펴본 바와 같이 2013년 2월 본진 이후 4주 동안에 NECIS에 기록되지 않은 규모 1.0 이하의 작은 규모의 여진이 더 존재했음을 감안한다면, 이 지역에서 간헐적이지만 꾸준히 미소지진의 활동이 있는 것으로 판단된다.

특히 Cheng and Wong (2016)은 주향이동단층과 관련된 큰 규모의 지진은 발생 기작에 따라 크게 3 가지 유형으로 구분할 수 있는데, 이 중에서 2가지 유형의 주향이동단층 지진이 전진을 동반했던 것으로 보고하였다. 따라서 국내 내륙에서 최근 발생한 가장 큰 지진이 주향이동단층 지진인 오대산 지진은 본진 발생 4일전부터 적어도 37개의 전진이 발생했던 점은 특히 주목할 필요가 있다(Kim and Park, 2010). 이와 더불어 2009년 5월 2일 발생한 규모 4.0의 주향이동단층 지진이 안동지역에서 발생하였는데, 이 지진도 여러 여진을 동반하였으며, 비슷한 지진 파형을 가진 일련의 지진이 끊임없이 발생하고 있다(Choi and Noh, 2010). 또한 2010년 2월 9일 발생한 규모 3.1의 주향이동단층 지진인 시흥 지진 역시 전진은 발견되지 않았지만, 이 지역에서 오래 전부터 지금까지 지속적으로 미소지진활동이 있음이 보고되었다(Kim and Kim, 2013). 이 연구에서도 2013년 거창 지진의 전진은 발견되지 않았지만, 이 지역에서 동일한 형태의 미소 지진 활동이 과거에서부터 지금까지 계속 진행되고 있는 것은 명확하며, 상세한 미소지진활동 연구를 통해, 지진 발생 기작을 지속적으로 파악할 필요가 있는 것으로 사료된다.

7. 결론

2013년 2월 5일 발생한 거창 지진은 한반도 내륙에서 발생한 지진 중 이례적으로 다수의 여진을 수반한 지진으로, 본진 발생 이후 2주 동안의 연속 지진자료로부터 총 45개의 여진을 발견하였다. 이 연구에서는 본진과 규모 1.0 이상인 11개 여진을 분석하였다.

지금까지 알려진 6개의 한반도 지각속도모형을 사용하여 진원을 결정하였는데, Kim and Kim (1983)

의 속도모형을 사용했을 때 본진과 여진의 관측자료에 대해 가장 작은 오차를 가지며 진원이 결정되었다. 거창 지진의 본진은 21시 25분 36.70초 경에 경도 127.9837°E, 위도 35.7657°N인 지점의 약 8 km 깊이에서 발생한 것으로 분석되었으며, 상대적인 진원 결정을 통해 본진과 여진이 북서-남동 방향의 선형적인 분포를 가지는 것을 확인하였다.

본진의 P파 초동극성과 SH/P 진폭비를 이용하여 단층면해를 결정하였는데, 본진 및 여진의 상대적인 분포를 고려하여 본진은 주향 300°, 경사 86°, 미끌림각 -15°의 수직에 가까운 서북서-동남동 방향의 좌수향 주향이동단층에 의해 발생한 것으로 사료된다.

Brune의 지진원 모델을 가정하여 S파 변위 스펙트럼으로부터 계산된 본진의 모멘트 규모는 3.8이었으며, 응력강하량은 약 28.1 bar로 측정되었다. 경험적 그린함수 방법을 이용하여 얻은 주 단층면의 단층반경은 468 m이며, 응력강하량은 S파 변위 스펙트럼을 이용한 분석과 비슷하게 약 27.3 bar로 측정되었다.

이번 본진을 중심으로 반경 0.1° 내에서 2000년부터 발생했던 지진을 검색하여 상관분석을 수행한 결과, 동일한 형태의 지진파형을 가지는 다수의 지진 기록이 있음을 확인하였다. 이는 2013년 본진과 동일한 단층면에서 소규모 지진들이 지속적으로 발생하고 있음을 의미하며, 향후 지속적인 미소지진활동 감시와 분석이 필요할 것으로 판단된다.

사 사

이 연구는 한국기상산업진흥원 지진기술개발사업(KMIPA2015-3020)의 지원으로 수행되었습니다.

REFERENCES

- Brune, J.N., 1970, Tectonic stress and the spectra of seismic shear waves from earthquakes. *Journal of geophysical research*, 75, 26, 4997-5009.
- 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, 3, 856-870.
- Cheng, Y. and Wong, L.N.Y., 2016, Occurrence of Foreshocks in Large Earthquakes with Strike-Slip

- Rupturing. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 106, 1, 213-224.
- Choi, H. and Noh, M., 2010, Source parameters of the May 2, 2009 Andong earthquake in South Korea. *Geosciences Journal*, 14, 3, 269-276.
- Frankel, A., Fletcher, J., Vernon, F., Haar, L., Berger, J., Hanks, T. and Brune, J., 1986, Rupture characteristics and tomographic source imaging of $M_L \sim 3$ earthquakes near Anza, Southern California. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 91, B12, 12633-12650.
- Gibbons, S.J. and Ringdal, F., 2006, The detection of low magnitude seismic events using array-based waveform correlation. *Geophysical Journal International*, 165, 149-166.
- Jo, N. and Baag, C.-E., 2001, Stochastic Prediction of Strong Ground Motions in Southern Korea. *Journal of the Earthquake Engineering Society of Korea*, 5, 17-26 (in Korean with English abstract).
- Jo, N. and Baag, C.-E., 2007, The 20 January 2007, M_w 4.5, Odaesan, Korea, earthquake. *Geosciences Journal*, 11, 1, 51-58.
- Kim, K.-H. and Park, Y., 2010, The 20 January 2007 M_L 4.8 Odaesan earthquake and its implications for regional tectonics in Korea. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 100, 3, 1395-1405.
- Kim, S., Rhie, J. and Kim, G., 2011, Forward waveform modelling procedure for 1-D crustal velocity structure and its application to the southern Korean Peninsula. *Geophysical Journal International*, 185, 1, 453-468.
- Kim, S.J. and Kim, S.G., 1983, A study on the crustal structure of South Korea by using seismic waves. *Journal of the Korean Institute of Mining Geology*, 16, 1, 51-61 (in Korean with English abstract).
- Kim, S.K., 1995, A study on the crustal structure of the Korean Peninsular, *Journal of Geological Society of Korea*, 31, 4, 393-403 (in Korean with English abstract).
- Kim, S.K. and Jung, B.H., 1985, Crustal structure of the southern part of Korea. *Journal of Korean Institute Mining Geology*, 18, 2, 151-157 (in Korean with English abstract).
- Kim, W.-Y., Choi, H. and Noh, M., 2010, The 20 January 2007 Odaesan, Korea, earthquake sequence: re-activation of a buried strike-slip fault?. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 100, 3, 1120-1137
- Kim, W.Y. and Kim, K.H., 2013, The 9 February 2010 Siheung, Korea, earthquake sequence: Repeating earthquakes in a stable continental region. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 104, 1, 551-559.
- Ko, M.S., Cahng, C., Lee, J.B. and Shim, T.M., 2009, Application of Coulomb stress model to the Odaesan earthquake and its aftershock distribution. *Journal of the Geological society of Korea*, 45, 6, 741-750 (in Korean with English abstract).
- Lahr, J.C., 1999, HYPOELLIPSE: A computer program for determining local earthquake hypocentral parameters, magnitude, and first motion pattern (Y2K compliant version), U.S. Geological Survey Open-File Report 99-23.
- Lee, K., 1979, On crustal structure of the Korean Peninsula. *Journal of the Geological society of Korea*, 15, 4, 253-258.
- Mori, J. and Frankel, A., 1990, Source parameters for small events associated with the 1986 North Palm Springs, California, earthquake determined using empirical Green functions. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 80, 2, 278-295.
- Mueller, C.S., 1985, Source pulse enhancement by deconvolution of an empirical Green's function. *Geophysical Research Letters*, 12, 1, 33-36.
- Park, S.-C. and Hahm, I.-K., 2010, Rupture pattern of a moderate earthquake in Odaesan, Korea. *Geosciences Journal*, 14, 2, 191-200.
- Park, S.-C. and Mori, J., 2005, Source parameters of the May 29, 2004 South Korea earthquake (M_L 5.2). *Earth, planets and space*, 57, 6, 471-475.
- Pujol, J., 1988, Comments on the joint determination of hypocenters and station corrections. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 78, 3, 1179-1189
- Snoke, J.A., 2002, FOCMEC: focal mechanism determinations. *V. Tech*, 1-14.
- Stein, S. and Wysession, M., 2009, *Earthquakes, An introduction to seismology, earthquakes, and earth structure*. Blackwell Publishing, 215-285.

Received : June 8, 2016

Revised : August 10, 2016

Accepted : August 11, 2016