

한반도 및 주변의 지진 메카니즘 특성

전명순* · 전정수

한국지질자원연구원 지진연구센터

Focal Mechanism in and around the Korean Peninsula

Myung-Soon Jun* and Jeong Soo Jeon

Earthquake Research Center, KIGAM

요 약: 20세기에 한반도 및 인근에서 발생한 지진 중, 그 메카니즘이 Waveform Modelling 혹은 Moment Tensor Inversion 등 정량적인 방법에 의해 밝혀진 규모 4.5 이상의 18개 지진의 발생 원인을 분석하고 이들을 한반도 주변 동아시아 지역에서 발생하는 지진들과 비교 분석하였다. 한반도 및 인접지역에서 발생한 지진의 대부분은 주향이동 단층 운동에 의한 메카니즘에 다소의 역단층 운동이 첨가된 단층운동을 보여주고 단층작용을 일으킨 주응력 방향은 거의 수평한 동북동-서남서 방향을 나타낸다. 이는 같은 판내 지역인 북동부 중국 지역과 일본 남서부의 주응력 방향과 매우 유사하고 동해 동부와는 상당한 차이를 보인다. 이는 한반도 및 그 주변에서 지진을 일으키는 주응력은 동쪽에서 유라시아판 밑으로 침강하는 태평양판의 영향뿐만 아니라 서남쪽에서 충돌하는 인도판의 영향도 상당히 작용하는 것으로 해석된다.

주요어: 한반도, 동아시아, 지진 메카니즘, 주 응력 방향

Abstract: In and around the Korean Peninsula, 18 intraplate earthquake focal mechanisms since 1936 were analyzed to understand the characteristic of focal mechanism and regional stress orientation and tectonics. These earthquakes are largest ones from the last century and may represent the characteristics of earthquake in this region. Focal mechanism of these earthquakes show predominant strike-slip faulting with small amount of thrust components. The average P-axis is almost horizontal ENE-WSW direction. This mechanism pattern and the direction of maximum stress axis is very similar with northeastern part of China and southwestern part of Japan. However they are quite different with the eastern part of East Sea. This indicate that not only the subducting Pacific Plate from east but also the indenting Indian Plate controls focal mechanism in the far east of the Eurasian Plate.

Keywords: Korean Peninsula, east Asia, focal mechanism, principle stress axis

서 론

한반도는 유라시아 판의 동남부에 위치하면서 판 경계로부터 수백 Km 떨어진 판 내 지역에 해당한다. 이런 판 내에서 발생하는 판 내부 지진(intra-plate earthquake)은 판 경계부에서 발생하는 지진과 비교하면 지진이 시간적 지역적으로 불규칙하고 산만하게 발생하며 빈도도 상대적으로 낮고, 크기도 작다. 이는 판 내부의 경우 단층의 활동 주기가 길어 수 만년 혹은 수 십 만년에 한번씩 움직이면서 지진을 발생시키기 때문으로 추측된다. 본 연구에서는 이제까지 밝혀진 한반도 및 인

근 지역에서 발생한 지진 중 메카니즘이 정량적으로 밝혀진 규모 4.5 이상인 18개 지진의 자료를 종합 분석하여 한반도 및 주변에서 발생하는 지진의 메카니즘 특성을 밝히고 지진을 일으키는 주응력 방향을 파악하여 이를 인접 지역인 중국 북동부 및 일본 서남부 및 동해 동쪽과 비교 검토하여 동아시아의 판구조론적 관점에서 토의코자 한다.

지진자료

지구 내부에 대한 이해가 증대되고, 관측 기술의 발달과 함께, 1960년대에 전 세계적으로 WWSSN 지진 관측망이 설치되면서 일관성 있는 지진자료의 획득이 가능하게 되었다. 이런 자료를 이용해, 큰 지진의 경우 원거리(Teleseismic) 지진 기록으로부터 초동의 polarity를 읽어 단층면 해(Fault Plane Solution)를 구해 지진의 발생 메카니즘을 이해하게 되었다. 이들 자료는 현재 우리가 이해하는 판구조론을 뒷받침하는 결정

2010년 7월 31일 접수; 2010년 8월 18일 수정; 2010년 8월 24일 채택
*Corresponding author

E-mail: junms@kigam.re.kr

Address: Earthquake Research Center,

Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources
92 Gwahang-no, Yuseong-gu, Daejeon 305-350, Korea

Table 1. Earthquake parameters of 18 events in and around the Korean Peninsula.

No.	Date	Location		Mag.	Nodal plane 1		Nodal plane 2		P-axis		T-axis	
		ϕ° N	λ° E		ϕ_s	δ	ϕ_s	δ	Az.	Dip.	Az.	Dip.
1	1936.07.04	35.20	127.60	M _w 5.1 ^a	14	64	121	60	67	3	335	42
2	1963.09.06	36.47	130.76	M _w 5.7 ^b	32	69	129	72	260	2	351	28
3	1963.09.07	36.53	130.79	M _w 5.8 ^b	25	61	122	79	250	12	347	29
4	1976.10.06	35.31	124.18	M _w 5.4 ^b	199.5	61.8	306.8	61	253	1	163	43
5	1978.08.29	39.18	124.50	M _L 4.6 ^c	30	75	120.5	84	74.5	5.5	166	15.6
6	1978.11.23	38.37	125.65	M _L 4.5 ^c	43	75	308.5	75	86	22	176	11
7	1980.01.07	40.22	125.02	M _w 5.1 ^d	215.7	62.3	309.1	83.6	79	15	176	24
8	1980.09.20	38.30	130.70	M _w 4.9 ^b	210	60	66	35.5	316	14	83	67
9	1981.04.15	35.78	130.10	M _w 5.2 ^b	312	75	219	79	266	3	175	19
10	1982.02.14	38.46	125.65	M _w 5.3 ^b	245.2	43.8	100.6	52	72	71	174	4
11	1982.02.28	37.00	129.52	M _L 4.6 ^b	33	75	128.2	70	261.2	4	170.5	26
12	1994.07.25	34.99	124.50	M _b 5.5 ^e	215.2	37	374.4	74.1	82.5	21.8	200	49.3
13	1996.12.13	37.30	128.80	M _L 4.5 ^f	181	50	292	65	58	8	158	30
14	1997.06.25	35.82	129.18	M _w 4.8 ^f	135	52	31	72	87	13	346	40
15	2003.03.22	34.86	124.35	M _w 4.9 ^g	26	83	118	79	72	3	341	13
16	2003.03.30	37.98	123.80	M _w 4.7 ^g	88	61	312	38	196	13	314	65
17	2004.05.29	36.66	130.10	M _w 5.0 ^g	358	47	173	44	86	2	314	87
18	2007.01.20	37.69	128.58	M _w 4.6 ^g	208	90	298	88	253	1	163	1

a: Shimazaki (1984), b: Jun and Kulhanek (1991), c: Kang and Choi (1993), d: Jun (1993), e: 김성균 등(1996), f: Kim and Kraeva (1999), g: 한국 지질자원연구원(2007)

적인 자료로 활용되었다. 그러나 한반도 근처에서 발생하는 지진들은 크기가 작아서 원거리 지진기록이 매우 불량하여 이런 방법을 적용하는데 한계가 있다. 이런 경우는 근거리에서 조밀한 양질의 지진 관측망이 필요하나 한반도에서 양질의 Digital 지진관측은 최근에 시작되어 한반도 인근의 지진 발생 메카니즘에 관한 연구는 매우 제한적 일 수밖에 없다.

본 연구에서는 한반도 및 인근지역에서 발생한 지진 중, 메카니즘이 waveform modelling 이나 waveform inversion을 통해 정량적으로 밝혀진 지진 중 그 규모가 4.5 이상으로 그 특성이 일대의 텍토닉 특성을 반영한다고 판단된 18개 지진을 분석하였다. 이를 통해 한반도 및 그 주변에서 발생하는 지진의 메카니즘을 밝히고 이를 동아시아의 인접 지역 특성과 비교하고 판구조론적 관점에서 토의코자 한다.

한반도에서 20세기에 발생해 피해를 일으킨 것으로 확인된 지진은 1936. 7. 4 지리산 쌍계사에서 발생했던 지진과 1978. 10. 7에 충남 홍성에서 발생했던 지진이다. 남북 분단이후, 북한에서는 1952. 3. 19 (M 6.5) 평남에서 발생한 지진을 비롯해 상당 규모의 피해지진이 발생했을 가능성(1980. 1. 8 의주 지진 및 1982. 2. 14 안악지진)이 있으나 자세한 자료는 확인된 바 없다. Shimazaki (1984)는 1936년 당시의 Wichert 지진계에 기록된 지리산 쌍계사 지진의 대구와 부산의 지진 기록 중 P파와 S파를 modelling한 synthetic seismogram으로부터 지진 메카니즘을 추정했다. 비록 매우 제한적인 숫자의 지진자료를 사용하였으나 분석방법이 정량적이고 그 결과가 Jun (1990)이 분석한 한반도 주변의 주 응력 방향(principle stress

axis)과 유사하여 신빙성 있는 자료로 판단된다. Jun (1990) 및 Jun (1991)은 1960년 이후 한반도 및 동해와 황해에서 발생한 지진 중 비교적 규모가 큰 8개 지진의 원거리 지진자료를 Modelling이나 Moment Tensor Inversion에 의해 지진 메카니즘을 구했다. 또 Jun (1993)은 원거리 short-period vertical component P-파를 modelling 하여 동해 서부에서 발생한 지진의 메카니즘 및 발생 깊이를 계산하였다. Kang and Choi (1993)는 1936년 지리산 쌍계사 지진부터 1987년까지 한반도에서 발생한 19개 지진의 메카니즘을 발표한 바 있다. 이들이 어떤 자료를 어떻게 분석하였는지 자세한 기술은 없으나 P파의 초동(polarity)을 분석하여 단층면해를 구한 것으로 추측된다. 이들 지진의 메카니즘 특징은 주향이동(strike-slip)이 우세하고 동서 방향의 주응력 방향을 제시하고 있어 Jun (1990)의 연구결과에 의해 나타난 한반도 주변의 일반적인 지진 특성과 일치하여 이중 북한 지역에서 발생한 규모 4.5 이상의 지진 2개를 본 연구에 포함시켰다. 또한 김성균 등(1996)은 Waveform Inversion을 통해 황해남부 지진의 메카니즘을 구했다. Kang and Baag (2004)은 Grid Search Algorithm으로부터 구하고 이를 Harvard 대학의 Centroid Moment Tensor (CMT)와 비교 검토하였다. 또한 한국지질자원연구원(2007)은 2001년 이후 한국지질자원연구원 관측망의 자료를 이용하여 28개 지진의 메카니즘을 Moment Tensor Inversion을 이용해 구했다. 이중 지체구조적 관점에서 의미가 있다고 판단된 규모 4.5 이상의 지진 4개를 포함하였다.

이렇게 정량적인 방법에 의해 지진 메카니즘이 구해진 규모

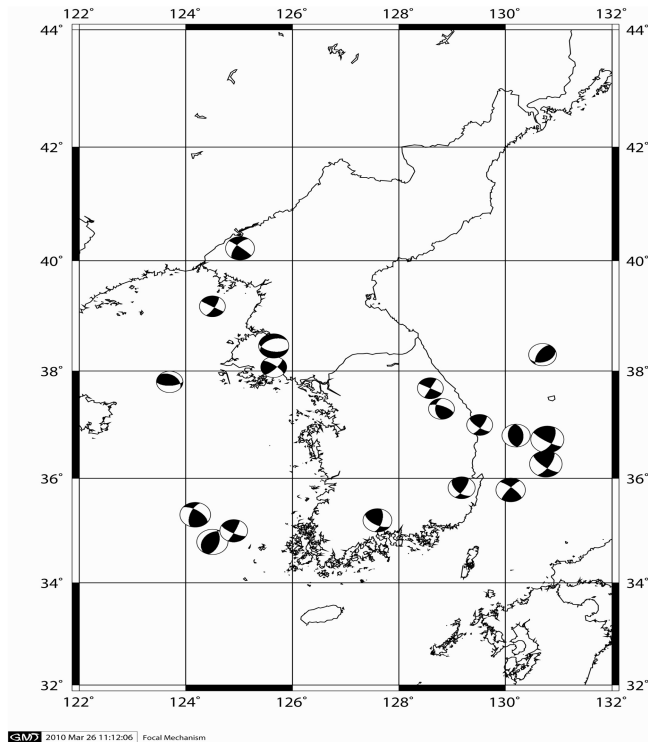


Fig. 1. Epicentral distribution of 18 studied earthquakes and their simplified mechanism diagram.

4.5 이상의 지진 18개 의 특성을 분석 하고자 한다. Table 1은 본 연구에 사용한 지진의 지진원 요소를 보여주고 Fig. 1은 이들 지진의 지역적 분포와 단층면 해를 보여준다.

한반도 및 주변 지진의 메카니즘 특성

Fig. 1에서 beach ball은 lower-hemisphere equal area projection에 의한 지진의 단층면 해를 나타낸 것이다. Beach ball에서 검은 부분은 압축(compression)을 흰 부분은 확장(dilatation)을 나타낸다. 한반도 및 인근에서 발생하는 대부분의 지진이 주향이동 단층 운동에 의한 메카니즘에 다소의 역단층(thrust faulting) 운동이 첨가된 단층운동 특성을 보여준다. 그러나 중부 동해안과 황해에서 각각 2개씩의 역단층 운동에 의한 지진이 나타나고 황해도 지역에서 정단층(normal faulting) 운동에 의한 메카니즘이 나타나는데 이는 지역적인 현상으로 판단된다.

Fig. 2는 이들 18개 지진의 주 응력축의 방향을 lower-hemisphere equal area projection에 표시한 것이다. 그림에서 압축력(P-axes)의 위치는 검은 점으로 인장력(T-axes)의 위치는 흰점으로 표시했다. 그림에서와 같이 한반도 및 인근에서 발생하는 지진은 그 주 응력방향이 거의 수평한 동북동-서남서 방향의 압축력(compressional forces)에 의한 것으로 나타난다.

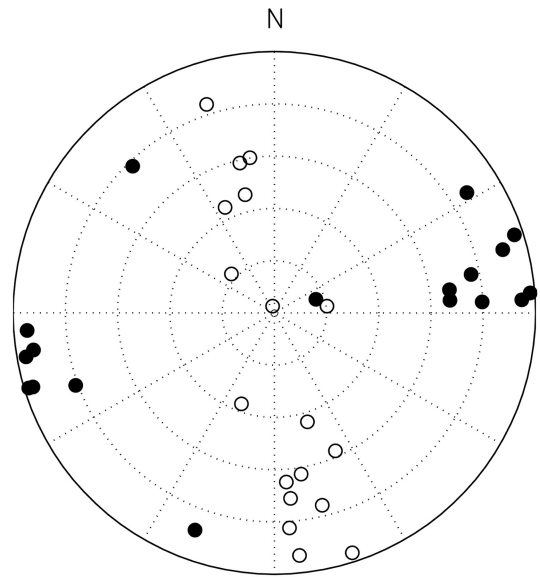


Fig. 2. Lower-hemisphere equal area projection of the P (solid circle) and T (open circle) axis of earthquakes listed in Table 1 and shown in Figure 1.

Fig. 3은 본 연구에서 분석한 한반도 및 주변의 18개 지진의 메카니즘과 1976년 이후 USGS에서 발표한 중국 북동부와 일본 남서부 및 동해에서 발생한 지진의 메카니즘을 Centroid Moment Tensor로 구한 규모 6.0 이상의 지진을 함께 표시한 것이다(USGS, 2010). 그림에서 중국 북동부에서 발생한 지진들은 대부분 다소의 역단층운동이 첨가된 주향이동 단층운동 특성을 보여준다. 예외적으로 한 개의 역단층운동에 의한 지진과 한 개의 정단층운동에 의한 메카니즘이 나타나는데 이는 지역적인 현상으로 판단된다. 이는 중국 북동부에서 나타나는 지진의 메카니즘이 한반도 및 주변의 지진 메카니즘과 매우 유사하여 중국 북동부와 한반도 주변은 동일한 지체구조 환경 하에서 유사한 응력분포를 보이는 것으로 판단된다. 한편 일본 남서부에서는 한반도 주변 및 중국 북동부와 유사한 주향이동 단층 운동에 의한 메카니즘이 우세하지만 일본측 동해 동쪽에서 발생하는 지진들은 대부분 역단층 운동을 보인다. 이들 동해 동쪽에서 역단층운동을 나타내는 지진들은 가끔 쓰나미를 발생시키기도 하고 또한 이 일대에 새로운 판 경계를 그리는 증거로 이용되기도 한다.

Fig. 4는 Fig. 3에 표시된 지진들의 주 응력 축의 방향을 표시한 것이다. 그림에서 주향이동 단층운동을 나타내는 지진은 흰색 원으로 표시했고 짧은 직선은 지진을 발생시킨 압축력의 방향을 나타내고, 역단층 운동을 나타내는 지진은 검은 원으로 표시했고 짧은 직선은 압축력의 방향을 보여준다. 정단층 운동의 경우는 진앙을 별(star)로 표시했고 짧은 직선은 지진을 발생시킨 주 응력인 인장력의 방향을 나타낸다.

이 일대에서 발생하는 지진이 주로 주향이동 단층과 역단층 운동에 의한 것을 감안하면 이들 지진을 일으킨 주응력인 압

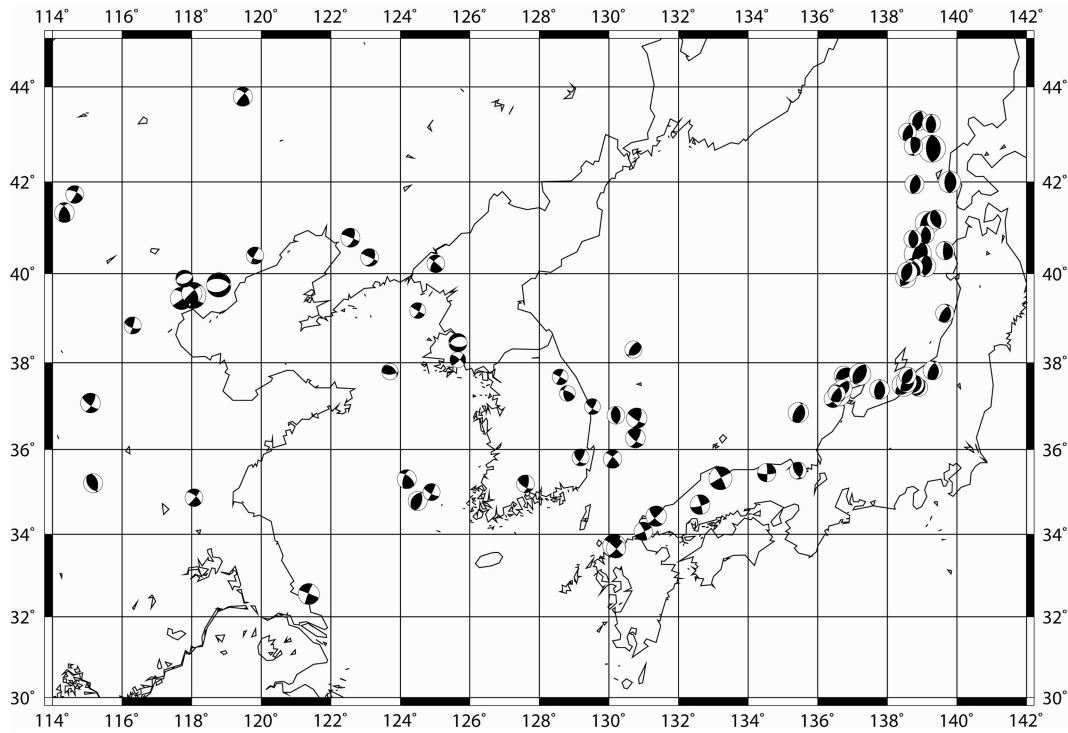


Fig. 3. Comparison of 18 studied focal mechanism in and around the Korean Peninsula and neighboring east Asia region.

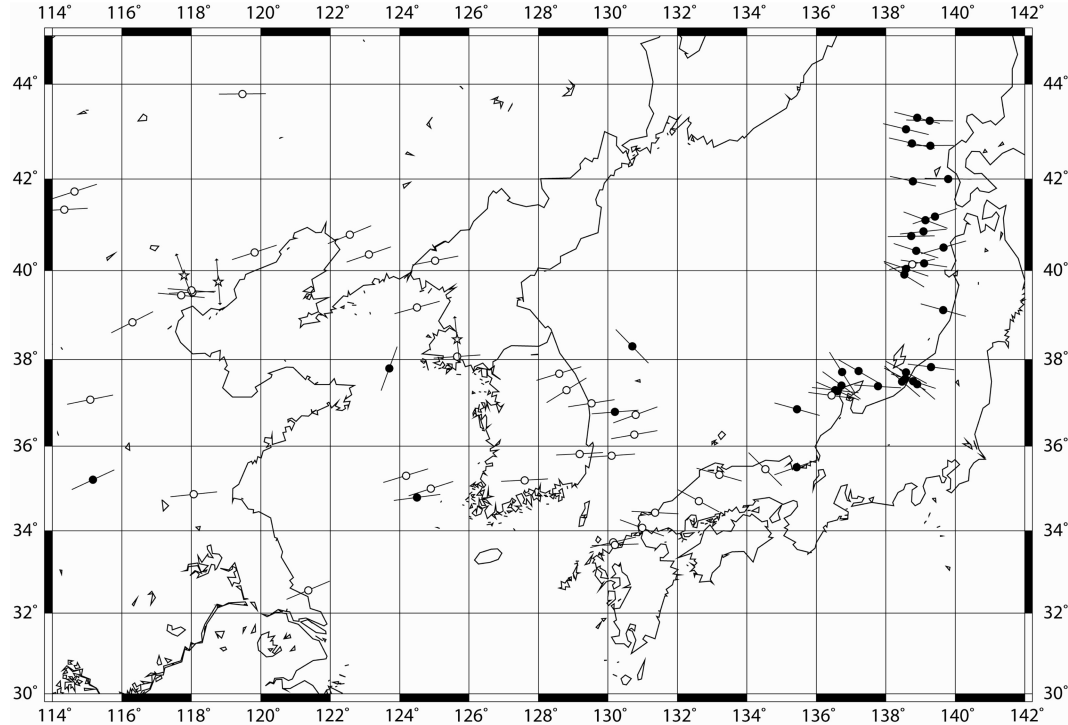


Fig. 4. Maximum stress axis for the major earthquakes for the Far east Asia region.

축력의 방향을 비교하는 것이 지체구조적 의미를 갖는다고 판단된다. 한반도 및 주변에서 지진을 발생시킨 주응력 방향은 거의 수평한 동북동-서남서 방향을 보이는데, 이는 같은 판내

지역인 중국 북동부의 자료와 비교하면 주응력 방향이 매우 유사하다. 이와 대조적으로 동해 동부에서는 지진을 일으키는 주 응력 방향이 서북서-동남동 방향을 보여 한반도 주변 및 중

국 북동부와는 상당한 차이를 보인다. 한편 일본 남서부에서 발생하는 지진은 메카니즘은 중국 북동부 및 한반도 주변과 같은 양상을 보이나 지진을 발생시킨 주 응력축의 방향은 다소 차이를 보인다. 이는 일본 서남부에서 유라시아판 아래로 침강하는 필리핀 판(Phillipine Plate)의 영향이 추가된 것으로 판단된다. 이번 연구에서는 한반도 주변 및 중국 북동부뿐만 아니라 남서 일본까지도 유사한 메카니즘의 지진들이 발생하는 것으로 나타났다. 한편 동해의 동측에서 발생하는 지진들은 그 메카니즘이 주로 역단층 운동에 의한 것으로 그 주 응력축은 동쪽에서 유라시아판 밑으로 침강하는 태평양판의 운동 방향인 북북서-남남동 방향과 일치하나 중국 북동부, 한반도 주변 및 일본 남서부와 다소 다른 양상을 보인다. 이는 한반도 및 그 주변에서 지진을 일으키는 주응력은 동쪽에서 유라시아판 밑으로 침강하는 태평양판의 영향 뿐만 아니라 서남쪽에서 충돌하는 인도판의 영향이 중국 북동부, 한반도 주변 및 서남 일본에 까지 광범위한 지역에 작용하는 것으로 해석된다. 이는 Jun (1990)의 결과 및 Kato (2003)가 동아시아 일대의 GPS 관측 결과를 토대로 해석한 결과와도 유사하다.

결 론

일반적으로 지진활동이 빈발하지 않고 그 분포도 산만한 한반도 및 인근에서 1936년 이후 발생한 규모 4.5 이상의 크기를 가진 18개 지진의 메카니즘 특성을 분석하였다. 이 지역이 일반적으로 지진활동이 심하지 않은 판 내부 지역임을 감안하면 이들 18개 지진은 이 지역의 지진 특성을 반영한다고 할 수 있다. 이들 지진의 메카니즘 특성은 주향이동 단층작용에 의한 지진이 우세하고 일부 역단층 운동이 가미된 특징을 갖는다. 이들 자료를 같은 판 내 지역인 일본 남서부와 중국 북동부와 유사한 메카니즘을 보인다. 그러나 동해의 일본측에서 발생하는 지진들은 주로 역단층운동에 의해 발생하는 것으로 나타났다. 또한 한반도 및 주변에서 발생하는 지진들에 작용하는 주응력 방향은 중국 북동부 및 일본 서남부와 매우 유사하고 동해 동부와는 상당한 차이를 보인다. 이는 한반도 및 그 주변에서 지진을 일으키는 주응력은 동쪽에서 유라시아판 밑으로 침강하는 태평양판의 영향 뿐만 아니라 서남쪽에서 충돌하는 인도판의 영향도 상당히 작용하는 것으로 판단된다.

사 사

이 연구는 한국지질자원연구원 주요사업인 ‘실시간 지진관측 및 대도시 지진위험도 예측 기술 개발’ 및 소방방재청 ‘활성단층 지도 및 지진위험지도 제작’ 과제의 일환으로 수행되었습니다.

참고문헌

- 김성균, 김민선, 서구원, 1996, 지진파형 역산에 의한 황해남부 지진의 메카니즘, 한국지구과학회지, **17**, 326-329.
- 한국지질자원연구원, 2007, 실시간 지진분석 및 지진 재해 정량적 예측 기술 P.27(GP2007-006-02)
- U.S. Geological Survey, 2010, http://earthquake.usgs.gov/earthquakes/eqarchives/epi/epic_global.php (last accessed July, 2010)
- Jun, M. S., 1990, "Source parameters of shallow intraplate earthquakes in and around the Korean Peninsula and their tectonic implication", Ph.D. Thesis, Uppsala University.
- Jun, M. S., 1991, "Body-wave analysis for shallow intraplate earthquakes in the Korean Peninsula and Yellow Sea", *Tectonophysics*, **192**, 345-357.
- Jun, M. S., and Kulhanek, O., 1991, "Source parameters of earthquakes in and around the Korean Peninsula deduced from spectral analysis", *Phys. Earth Planet. Inter.*, **65**, 255-266.
- Jun, M. S., 1993, "Source properties of earthquakes in and around the Korean Peninsula", in *1993 Joint Conference of Seismology in East Asia*, p. 170-173.
- Kang, S. D., and Choi, Y. C., 1993, "On the seismicity of Korea", in *Continental Earthquakes, selected papers of the second International Conference on Continental Earthquakes*, p. 185-193.
- Kang, T. S., and Baag, C. E., 2004, "The 29 May 2004, Mw = 5.1, offshore Uljin earthquake, Korea", *Geoscience Jour.*, **8**(2), 115-123.
- Kato, T., 2003, "Tectonics of the eastern Asia and the western Pacific as seen by GPS observation", *Geoscience Journal*, **7**, 1-8.
- Kim, S. G., and Kraeva, N., 1999, Source parameter determination of local earthquakes in Korea using moment tensor inversion of single station data, *Bull. Seism. Soc. Am.* **89**, p. 1077-1082.
- Shimazaki, K., 1984, "Mid-plate, plate-margin, and plate-boundary earthquakes and stress transmission in far east", in *A collection of papers of international symposium on continental seismicity and earthquakes prediction (ISCSEP)*, p. 132-147.