

최근 한반도 남서부에서 발생한 지진의 발진기구 분석

조현아^{1,*} · 강태섭² · 경재복¹

¹한국교원대학교 지구과학교육과, 363-791 충청북도 청원군 강내면 다락리 산 7

²한국전력기술주식회사 토목기술처, 499-593 경기도 용인시 기흥읍 구갈리 351-1

서론

지구 물질이 탄성한계 이상으로 응력을 받아 취성파쇄 형태로 파괴가 일어나면 축적된 변형을 에너지가 지진의 형태로 발산되며, 지진은 진동을 지진파로 보내게 된다. 지진파의 초동과 진폭은 일정한 규칙성을 가지고 분포하므로 지표면의 관측소에 기록된 지진파를 이용하면 지진원에서의 단층의 운동특성을 분석하여 지진을 발생시킨 응력장의 방향을 추정할 수 있으며 이러한 자료를 종합하여 지체 구조 운동을 기술할 수 있다.

판 내부 지진은 주로 천발 지진이며 판 경계에서 이차적으로 전달된 응력 등과 관련이 있는 것으로 추정되고 있다. 한반도에서 발생하는 대부분의 지진은 주로 판 내부의 천발 지진에 해당되며, 지구 내부에 작용하는 지질학적 응력에 의하여 발생하는 지체 구조성 지진으로 단층운동을 수반한다.

한반도 각 지역에서 발생한 지진에 대한 단층면해는 Jun(1990) 이후 여러 연구자들에 의해 연구되어졌다. 한반도와 그 주변지역에서 발생한 주요 지진들에 대한 기존 연구들의 단층면해를 보면 북북동-남남서 방향의 주향이동 운동이 우세한 단층운동 특성을 보여주며, 주 압축 응력장은 동북동-서남서 방향을 나타낸다. 한반도에서 발생하는 지진은 유라시아 판 남서부에서 인도-오스트레일리아 판과의 충돌에 의해 유라시아 판 내부로 전달되는 응력과 태평양 판 및 필리핀해 판이 유라시아 판 하부로 섭입하면서 전달되는 응력이 동북동-서남서 방향으로 상호 작용하여 한반도 내의 주요 약대를 재활성화시키면서 발생한다고 생각된다(Kyung et al., 1996).

본 연구에서는 2000년도 이후 한반도 남서부에서 발생한 지진에 대한 단층면해를 구하여 단층운동 특성과 한반도 남서부 지역에 작용하는 전반적인 응력장의 분포를 알아보고자 하였다. 이를 위해 기상청(KMA), 한국지질자원연구소(KIGAM), 원자력안전기술원(KINS)의 모든 관측소의 지진 파형 자료와 한국지질자원연구소(KIGAM)의 지진 요소(source parameters)를 이용했으며, 한반도 지역의 지각 속도 구조 모델은 김성균

(1995) 모델을 사용하였다. 단층면해는 P파의 초동극성 자료를 이용하여 계산하였다.

연구 방법

지진 관측 자료를 해석함으로써 단층운동의 특성을 추정할 수 있는데, 이를 단층면해(fault plane solution) 또는 발진기구해(focal mechanism solution)라고 한다. 발진기구해는 P파의 초동 극성이나 P파·S파의 극성 및 진폭비 또는 관측된 파형을 분석하여 얻어지고, 특정 지역에서 발생한 지진에 대한 발진기구해를 통해 그 지역의 응력장 분포를 추정할 수 있으며, 이러한 자료를 종합하여 지체 구조 운동을 기술할 수 있다.

발진기구해는 진원 반구의 아래쪽을 진원구(focal sphere)로 정의하고 진앙에서 P파가 관측소로 나아간 사출각(take-off angle)과 P파 초동의 극성 분포로부터 서로 수직한 두 절단면으로 구한다. 즉, 이 두 면이 구해지면 각각 단층면(fault plane)과 보조면(auxiliary plane)이 추정되어 단층의 기하가 밝혀지는 것이다. 이것은 발진기구해를 구하는 가장 간단하고 널리 쓰이는 방법이다.

Snook et al.(1984)는 발진기구해를 구하기 위해 P파, SV파, SH파의 극성과 각각의 진폭비(SH/P, SV/P, SV/SH)를 이용하는 방법을 개발하였고, 발진기구해를 구하는 FOCMEC(FOCal MECHANISM determination)이라는 공개 프로그램을 제작하였다. FOCMEC은 P파 초동 극성 자료만으로도 발진기구해를 구할 수 있도록 프로그램화되었다.

본 연구에서는 FOCMEC 프로그램을 이용하여 발진기구해를 구하였으며, B축(주 압력축 P축과 주 장력축 T축에 직교하는 축; 혹은 두 절단면을 만나는 Null축)의 trend와 plunge를 각각 0에서 360도, 0에서 90도로 변형시키고 B축과 직교하는 A축(한 절단면의 축)을 180도 변형시키면서 결정되는 절단면 중에서 P파 초동 극성 자료를 만족하는 발진기구해를 구하였다. 계산 시간을 줄이기 위해 보통 5도 간격의 각도 폭으로 변형시키면서 계산을 행하였다.

발진기구해를 구하기 위해 사용되는 사출각이 지각 속도 구조 모델에 의존하기 때문에, 발진기구해는 그 계산에 사용되는 지각 속도 구조 모델의 영향을 받는다. 그러므로 신뢰할 수 있는 속도 구조를 선택하는 것이 발진기구해를 구하는 데 필수적이다. 그러나 한반도 지표 아래의 속도 구조가 지금까지 명확하게 확립되지 않아서 실제적인 속도 구조를 사용하는 것은 어렵다. 한반도 지역의 지각 속도 구조 모델은 이기화(Lee, 1979), 김상조·김소구(1983), 김성균 등(1985), 김성균(1995) 등이 있다. 김성균

(1995)은 중력이상과 지진자료 및 표면파 분산자료를 사용하여 지각 속도 구조를 표층, 상부지각, 하부지각 및 상부맨틀의 4개의 층으로 구분하였다. 지각의 최상부는 P파 및 S파의 속도가 각각 5.56km/s, 2.82km/s인 두께 2.6km의 표층이 존재하고, 그 밑으로 P파 및 S파의 속도가 각각 6.00km/s, 3.36km/s인 깊이 15.5km까지의 상부지각과 6.95km/s, 4.19km/s인 깊이 32.8km의 하부지각으로 구분되며, 그 아래 상부 맨틀에서의 P파 및 S파의 속도는 각각 7.76km/s, 4.63km/s인 4층 구조이다. 본 연구에서는 김성균(1995) 모델을 사용하였다.

남서부 지역 발생 지진의 발진기구해

2000년에서 2005년 8월 사이에 한반도 남서부 지역에서 발생한 지진 35개 중에서 P파의 초동극성이 뚜렷하게 구분되는 지진파가 10개소 이상의 관측소에서 기록된 7개 지진에 대한 발진기구해를 FOCMEC 프로그램을 이용하여 구하였다. Fig. 1은 본 연구에서 이용한 기상청(KMA), 한국지질자원연구소(KIGAM), 원자력안전기술원(KINS) 관측망의 관측점의 위치를 나타낸다. 또한 Fig. 2는 발진기구해를 구하는데 사용된 7개 지진의 진앙 분포를 나타낸다. 지진 요소(source parameters)는 한국지질자원연구소(KIGAM)에서 계산되어 공개된 자료를 이용하였고 진원 깊이(Depth)는 10km로 가정하고 계산하였다(Table 1).

Table 1. Source parameters of 7 events used in this study.

No.	Origin Time		Latitude (degree)	Longitude (degree)	Depth (km)	Magnitud e
	yyyy/mm/dd	hh:mm:ss				
1	2001/01/29	11:44:08.60	35.6597	126.6760	-	3.5
2	2002/03/08	02:09:33.70	35.5697	126.1718	-	2.4
3	2002/10/28	11:50:52.80	35.0062	126.6688	-	3.0
4	2003/02/28	23:46:33.30	35.2893	126.6407	-	3.1
5	2004/08/06	05:32:53.29	35.8567	127.3318	-	3.6
6	2005/02/20	22:18:38.75	35.3885	126.2443	-	3.5
7	2005/08/24	05:06:24.48	34.1922	127.0360	-	3.3

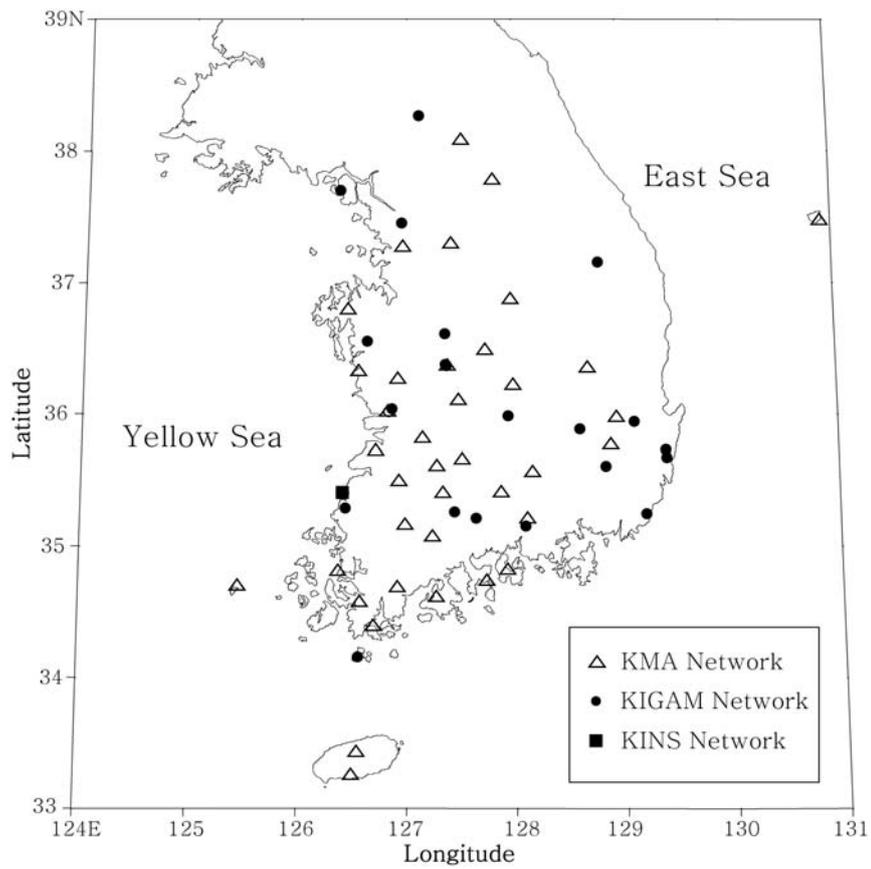


Fig. 1. Location of seismic observation of KMA, KIGAM and KINS network used in this study.

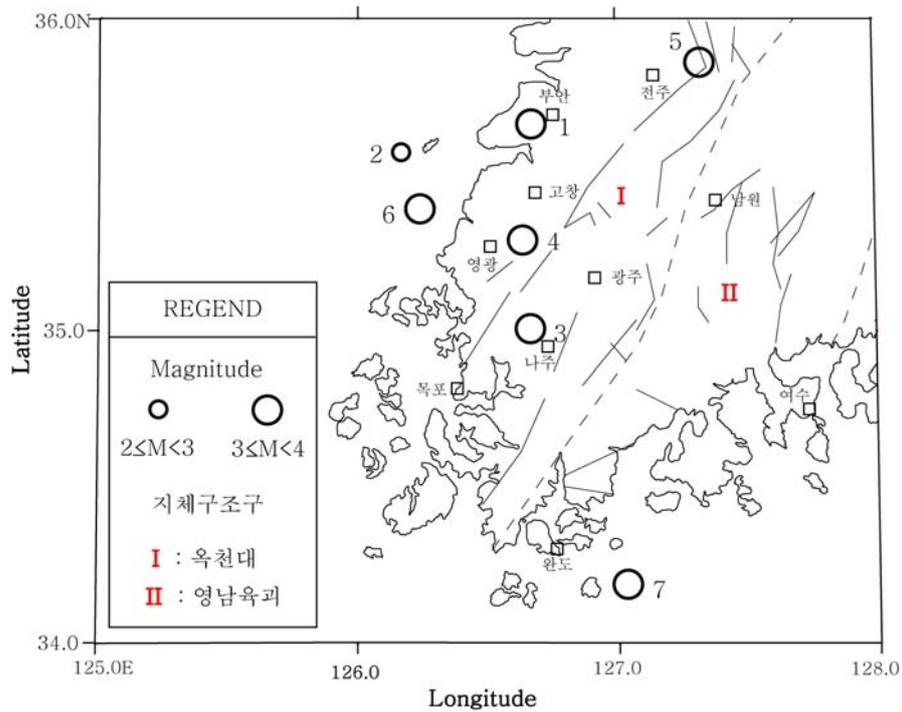


Fig. 2. Epicentral distribution of 7 events used in this study.

본래의 FOCMEC 프로그램은 극성뿐만 아니라 진폭비를 사용하도록 고안되었으나 본 연구에서는 극성 자료만을 사용하였기 때문에 한 개의 지진에 대한 해가 하나의 면으로 정해지지 않는다. 또한 한반도 남서부 지역에서 발생한 대부분의 지진은 미소 규모이기 때문에 양호한 P파 초동이 기록된 관측소의 수가 제한적이다. 따라서 여기서 제시된 단층면과 응력축의 방향은 발진기구해의 중앙값이다. Table 2와 Fig. 3은 한반도 남서부 지역에서 발생한 7개 지진에 대한 발진기구해이다.

전북 부안 일대에서 발생한 지진 1에 대한 발진기구해로부터 거의 NNW-SSE방향 또는 ENE-WSW방향의 단층을 추정할 수 있으며, 단층운동은 주향이동 단층운동을 보여준다. 이러한 단층운동을 일으키는 주 압축 응력장의 방향은 NNE-SSW방향으로 나타났다.

전북 고창 해역에서 발생한 지진 2에 대한 발진기구해로부터 거의 WNW-ESE방향 또는 N-S방향의 단층을 추정할 수 있으며, 단층운동은 역단층 운동이 포함된 주향이동 단층운동을 보여준다. 이러한 단층운동을 일으키는 주 압축 응력장의 방향은

ENE-WSW방향으로 나타났다.

전남 나주 지역에서 발생한 지진 3에 대한 발진기구해로부터 거의 NNE-SSW방향 또는 WNW-ESE방향의 단층을 추정할 수 있으며, 단층운동은 주향이동 단층운동을 보여준다. 이러한 단층운동을 일으키는 주 압축 응력장의 방향은 ENE-WSW방향으로 나타났다.

Table 2. Focal mechanism solutions of 7 events.

No.	plane 1			plane 2			P-axis		T-axis	
	strike	dip	rake	strike	dip	rake	azimuth	dip	azimuth	dip
1	78.26	90.00	40.00	348.26	50.00	-180.00	205.71	27.03	310.81	27.03
2	292.29	48.44	30.79	180.72	67.48	134.10	240.59	11.44	137.73	47.73
3	100.00	90.00	0.00	10.00	90.00	180.00	55.00	0.00	145.00	0.00
4	312.61	43.96	22.18	206.26	74.81	131.76	226.41	18.89	157.13	43.97
5	300.00	90.00	5.00	210.00	85.00	180.00	74.89	3.53	165.11	3.53
6	98.01	77.80	27.62	1.70	63.05	166.29	227.50	9.85	322.80	28.02
7	135.23	57.39	-66.04	275.73	39.67	-122.40	94.49	67.73	208.31	9.39

전남 영광 일대에서 발생한 지진 4에 대한 발진기구해로부터 거의 NW-SE방향 또는 NNE-SSW방향의 단층을 추정할 수 있으며, 단층운동은 역단층 운동이 포함된 주향이동 단층운동을 보여준다. 이러한 단층운동을 일으키는 주 압축 응력장의 방향은 E-W방향으로 나타났다.

전북 전주 일대에서 발생한 지진 5에 대한 발진기구해로부터 거의 NNW-SSE방향 또는 NNE-SSW방향의 단층을 추정할 수 있으며, 단층운동은 주향이동 단층운동을 보여준다. 이러한 단층운동을 일으키는 주 압축 응력장의 방향은 ENE-WSW방향으로 나타났다.

전남 영광 해역에서 발생한 지진 6에 대한 발진기구해로부터 거의 거의 E-W방향 또는 N-S방향의 단층을 추정할 수 있으며, 단층운동은 역단층 운동이 포함된 주향이동 단층운동을 보여준다. 이러한 단층운동을 일으키는 주 압축 응력장의 방향은 NE-SW방향으로 나타났다.

전남 완도 해역에서 발생한 지진 7에 대한 발진기구해로부터 거의 거의 NW-SE방향 또는 E-W방향의 단층을 추정할 수 있으며, 단층운동은 약간의 주향이동 성분이 있

는 정단층 운동을 보여준다. 이러한 단층운동을 일으키는 주 인장축의 방향은 NNE-SSW방향으로 나타났다. 지진 7의 경우 정단층 운동의 특성을 나타내는데 이는 우리나라 지진의 일반적인 운동 특성이라기보다는 지역적인 현상으로 판단된다.

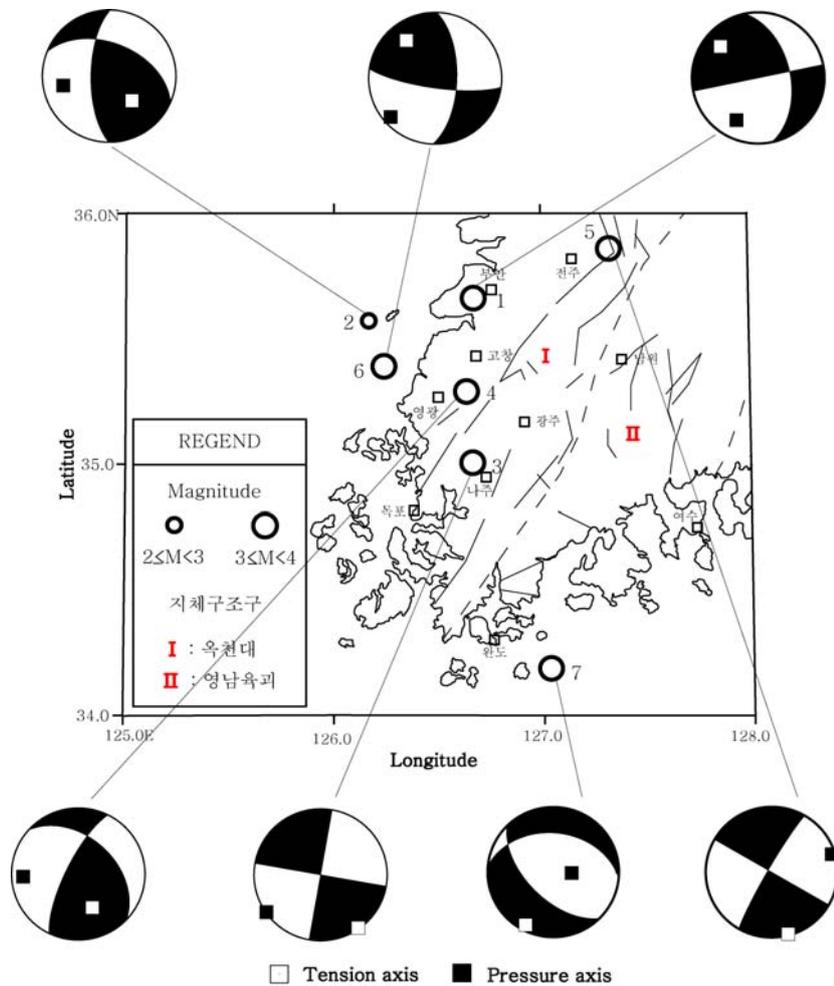


Fig. 3. Epicentral distribution and Focal mechanism solutions of 7 events used in this study.

결론

2000년부터 2005년 8월까지 한반도 남서부 지역에서 발생한 지진에 대하여 기상청 (KMA), 한국지질자원연구소(KIGAM), 원자력안전기술원(KINS)의 관측망에 기록된 지진 자료를 이용하여 발진기구를 분석한 결과 다음과 같은 결과를 얻었다.

1. 한반도 남서부에서 발생한 7개의 지진에 대한 발진기구해를 P파 초동 극성 자료를 이용하여 해석한 결과, 전북 부안, 전주, 전남 나주 일대 지진원의 특성은 주향이동 단층운동의 특성을 보이고 전북 고창, 전남 영광 일대 지진원의 특성은 역단층 운동이 포함된 주향이동 단층운동의 특성을 보인다. 그리고 전남 완도 해역의 지진원의 특성은 지역적인 현상으로 판단되는 약간의 주향성분이 있는 정단층 운동 특성이 나타났

다.

2. 최근 한반도 남서부에서 발생한 지진의 발진기구해로부터 얻어진 단층의 주 압축 응력 방향은 NE-SW방향 또는 ENE-WSW으로 나타나고 있으며 이는 남한 내의 주요 지진에 대해 구해진 주 응력장의 방향과 유사함을 보인다.

참고문헌

- 김상조, 김소구, 1983, 지진파를 이용한 남한의 지각구조 연구, 광산지질, 16, 51-61.
- 김성균, 1995, 한반도의 지각에 관한 연구, 지질학회지, 31, 393-403.
- 김성균, 정부흥, 1985, 한반도 남부지역의 지각구조, 광산지질, 18, 151-157.
- Jun, M. S., 1990, Source parameters of shallow intraplate earthquake in and around the Korean Peninsula and Yellow Sea, Tectonophysics, 192, 345-357.
- Kyung, J. B., K. Oike and T. Hori, 1996, Temporal variations in seismic and volcanic activity and relationship with stress fields in East Asia, Tectonophysics, 267, 331-342.
- Lee, K. H., 1979, On the crustal structure of the Korean Peninsula, J. Geol. Soc. Korea, 15, 253-258.
- Snoke, J. A., 2000, FOCMEC: Focal mechanism determination, FOCMEC software manual.
- Snoke, J. A., Munser, J. W., Teague, A. G., and Bollinger, G. A., 1984, A program for focal mechanism determination by combined use of polarity and SV-P amplitude ratio data, Earthquake Notes, 55, 15.