

한반도 남서부에서 발생한 미소지진의 진원 기구해 분석

조희규¹ · 강태섭² · 경재복^{1,*}

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

²한국지질자원연구원 지진연구센터, 305-350 대전광역시 유성구 가정동 30

Focal Mechanism Solutions of Microearthquakes in the Southwestern Part of the Korea Peninsula

Hee-Kyu Cho¹, Tae-Seob Kang², and Jai Bok Kyung^{1,*}

¹Department of Earth Science Education, Korea National University of Education, Chung-Buk 363-791, Korea

²Earthquake Research Center, Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources, Daejeon 305-350, Korea

Abstract: Focal mechanisms were analyzed for the seven earthquakes which occurred in the southwestern part of the Korea Peninsula from 2001 to 2005. Grid searches are performed to fit distributions of P-wave first-motion polarities and SH/P amplitude ratios for each event. The focal mechanism solutions imply that most of the events have strike-slip sense including partially thrust component. The compressional axes of the solutions are predominantly ENE-WSW or NE-SW in directions. This result is similar to the directions of the principal compressional axes for major earthquakes occurred around the Korea Peninsula.

Keywords: focal mechanism solution, strike-slip fault, stress field

요약: 2001년부터 2005년까지 한반도 남서부에서 발생한 7개 미소지진에 대한 진원 기구해를 분석하였다. 진원 기구해를 구하기 위하여 P파 초동극성과 SH/P 진폭비 자료를 이용한 격자탐색을 수행하였다. 분석 결과, 대부분의 지진들이 일부 역단층 성분을 포함하는 주향이동 단층 운동과 관계된 것으로 해석된다. 전체적으로 한반도 남서부 지역의 지진원에서 단층 운동을 일으키는 주 압축 응력 방향은 ENE-WSW 또는 NE-SW 방향인 것으로 해석되며, 이 결과는 남한 내의 주요 지진에 대하여 알려진 주 응력장의 방향과 유사하다.

주요어: 진원 기구해, 주향이동 단층, 응력장

서론

지각이 탄성한계 이상으로 응력을 받아 취성파쇄 형태로 파괴가 일어나면 축적된 변형에너지가 지진의 형태로 발산되며, 지진파를 통하여 에너지를 전달한다. 지진기록의 초동과 진폭은 단층운동 방향에 따라 일정한 규칙성을 가지고 분포하므로, 지표면의 관측소에 기록된 지진파를 이용하여 지진원에서의 단층의 운동특성을 분석하고 지진을 발생시킨 응력장의 방향

을 추정할 수 있다. 또한 이러한 자료를 종합하여 광역적인 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 다양한 방법으로 연구되어졌다. 한반도와 그 주변지역에서 발생한 주요 지진 및 미소지진들에 대한 기존 연구들의 단층면해를 보면 북북동-남남서 방향의 주향이동

*Corresponding author: jbkjung@knue.ac.kr
Tel: 82-43-230-3742
Fax: 82-43-232-7176

운동, 북북서-남남동 혹은 남북 방향의 주향이동성 역단층 운동이 우세한 단층운동 특성을 보여주며, 주 압축 응력장은 동북동-서남서 또는 동서 방향을 나타낸다(예: Jun, 1990; 박창업 외, 1998; 이기화와 정태웅, 1999; 정태웅과 김우한, 2000; 경제복 외, 2001; Kang and Baag, 2004).

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 2000년부터 1월부터 2005년 8월까지 한반도 남서부에서 발생한 지진에 대한 진원 기구해를 구하여 단층운동 특성과 한반도 남서부 지역에 작용하는 전반적인 응력장의 분포를 알아보고자 하였다. 이를 위하여 기상청, 한국지질자원연구원, 한국전력연구원, 한국원자력안전기술원 및 각 대학교 등이 운영하는 관측소의 지진 파형 자료와 한국지질자원연구원에서 발표하는 지진원 요소(source parameters)를 이용하였다. 각 지진기록으로부터 구한 P파의 초동 극성을 이용하는 방법과 초동 극성자료에 SH파의 극성 및 SH/P 진폭비를 추가하는 방법으로 진원 기구해를 구하고자 하였다.

연구 방법

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

단층면해는 진원 반구의 아래쪽을 진원구(focal sphere)로 정의하고 진양에서 P파가 관측소로 나아가는 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 단층면해를 구하는 가장 간단하고 널리 쓰이는 방법이다.

Snoko et al.(1984)는 단층면해를 구하기 위해 P파, SV파, SH파의 극성과 각각의 진폭비(SH/P, SV/P, SV/SH)를 이용하는 방법을 개발하였고, 단층면해를 구하는 FOCMEC(FOCal MECHANISM determination)이라는 공개 프로그램을 제작하였다(Snoko, 2000).

진폭비를 사용하면 각 지진별 단층면해를 구하는데 필요한 자료의 수가 증가하는데, P파의 초동극성은 단순히 상하동의 2성분인데 반해 진폭비는 연속적인 값이므로 진원구에 관측소의 위치를 더욱 정확하게 놓을 수 있다는 이점도 있다(Hardebeck and Shearer, 2003). 만약 3성분 지진 자료를 가지고 있다면, SH/P 진폭비는 거의 독립적인 자료로 간주되므로, P파의 초동극성만으로 계산된 단층면해의 범위를 줄이기 위해서 SH파의 극성과 SH/P 진폭비를 추가하여 신뢰도가 높은 구속조건으로 이용할 수 있다. 또한 진폭비를 자료로 이용할 경우 자유표면 보정을 해야 한다.

이 연구에서는 FOCMEC 프로그램(Snoko, 2000)을 이용하여 단층면해를 구하였다. 이 방법을 통하여 B축(주 압력축 P축과 주 장력축 T축에 직교하는 축; 혹은 두 절단면을 만나는 Null축)의 trend와 plunge를 각각 0에서 360도, 0에서 90도까지의 범위에서 격자탐색하고, B축과 직교하는 A축(한 절단면의 축)을 0도에서 180도까지 격자탐색하되 각각 5도 간격의 각도 폭으로 하였으며, 결정되는 절단면 중에서 P파 초동 극성 자료와 SH/P 진폭비를 만족하는 단층면해를 결정하였다. 자유표면 보정은 P파의 상하동 성분 최대값에 대한 Radial 성분 최대값의 역정점 값을 걸보기 반사각으로 하여 행하였다.

2000년부터 1월부터 2005년 8월까지 한반도 남서부 지역에서 발생한 35개의 지진에 대하여 기상청, 한국지질자원연구원, 한국전력연구원, 한국원자력안전기술원 및 각 대학교에서 운영하는 관측망(Fig. 1)의 파형 자료를 분석한 결과, P파의 초동 극성이 뚜렷하게 구분되는 지진파가 10개소 이상의 관측소에서 기록된 7개 지진의 단층면해를 구하였다. 연구에서 사용된 7개 지진의 진앙을 나타내면 Fig. 2와 같다. Table 1은 이 연구에 사용된 7개 지진에 대한 지진원 요소이며 한국지질자원연구원에서 발표한 것이다. 지진의 깊이는 진앙에 비하여 지각구조의 불완전성에 따른 불확실성이 높은 관계로 모든 지진에 대하여 10 km로 가정하고 단층면해를 계산하였다.

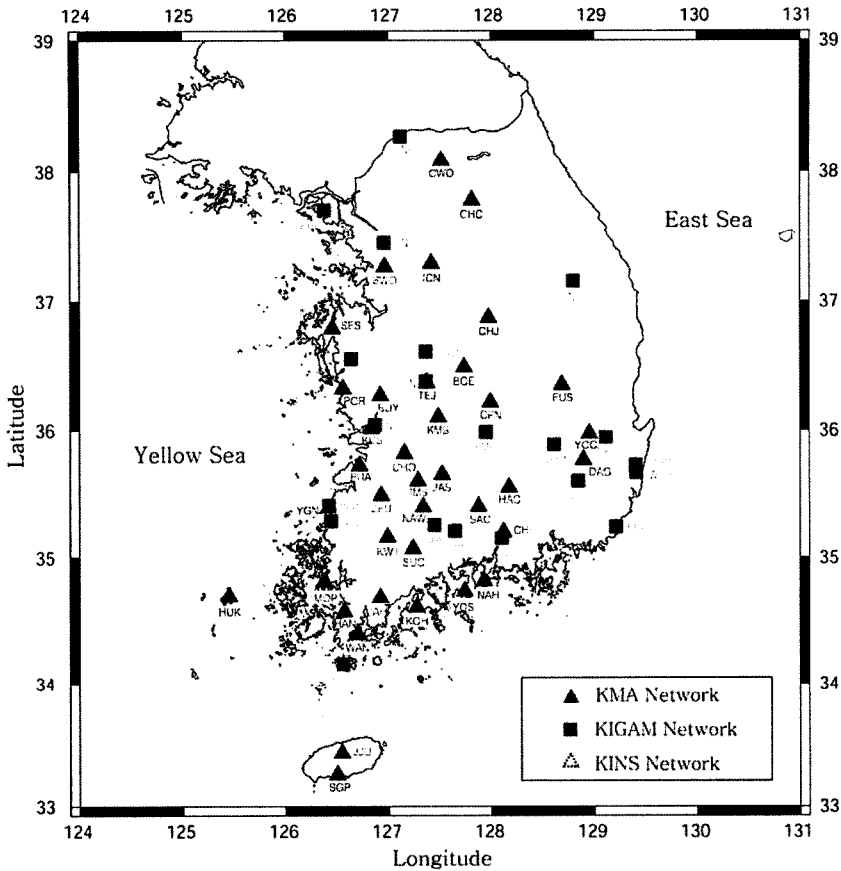


Fig. 1. Location of seismic stations used in this study.

단층면해를 구하기 위해 사용되는 사출각이 지각 속도 구조 모델에 의존하기 때문에, 단층면해는 그 계산에 사용되는 지각 속도 구조 모델의 영향을 받는다. 그러므로 신뢰할 수 있는 속도 구조를 선택하는 것이 단층면해를 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), 김상조와 김소구(1983), 김성균 외(1985), 김성균(1995) 외가 있다. 김성균(1995)은 중력이상과 지진자료 및 표면파 분산자료를 사용하여 지각 속도 구조를 표층, 상부지각, 하부지각 및 상부 맨틀의 4개의 층으로 구분하였다. 지각의 최상부는 P파 및 S파의 속도가 각각 5.56 km/s, 2.82 km/s인 두께 2.6 km의 표층이 존재하고, 그 밑으로 P파 및 S파의 속도가 각각 6.00 km/s, 3.36 km/s인 깊이 15.5 km까지의 상부지각과 6.95 km/s, 4.19 km/s인 깊이 32.8 km의 하부지각으로 구분되며, 그 아래 상부 맨

틀에서의 P파 및 S파의 속도는 각각 7.76 km/s, 4.63 km/s인 4층 구조이다. 이 연구에서는 김성균(1995)의 모델을 사용하였다.

남서부 지역 지진의 진원 기구해

한반도 남서부에서 발생한 7개의 지진에 대해 1차적으로 P파 초동 극성 자료만을 이용해 단층면해를 구하였으며, 그 결과 해의 범위가 넓고 개수가 많은 3개의 지진(Table 1의 No. 1: 부안지진, No. 2: 고창지진, No. 6: 영광지진)에 대해 SH/P 진폭비를 추가하여 FOCMEC 프로그램에서 해의 수렴 정도를 증가시켰다. 3개 지진에 대한 P파 초동극성 및 SH/P 진폭비를 이용한 결과가 Fig. 3에 제시되어 있다.

한반도 남서부 지역에서 발생한 대부분의 지진이 미소 규모이고 양호한 P파 초동이 기록된 관측소의 수가 제한적이기 때문에 한 개의 지진에 대한 해가 하나의 면으로 정해지지 않는다. 따라서 P파 초동 극

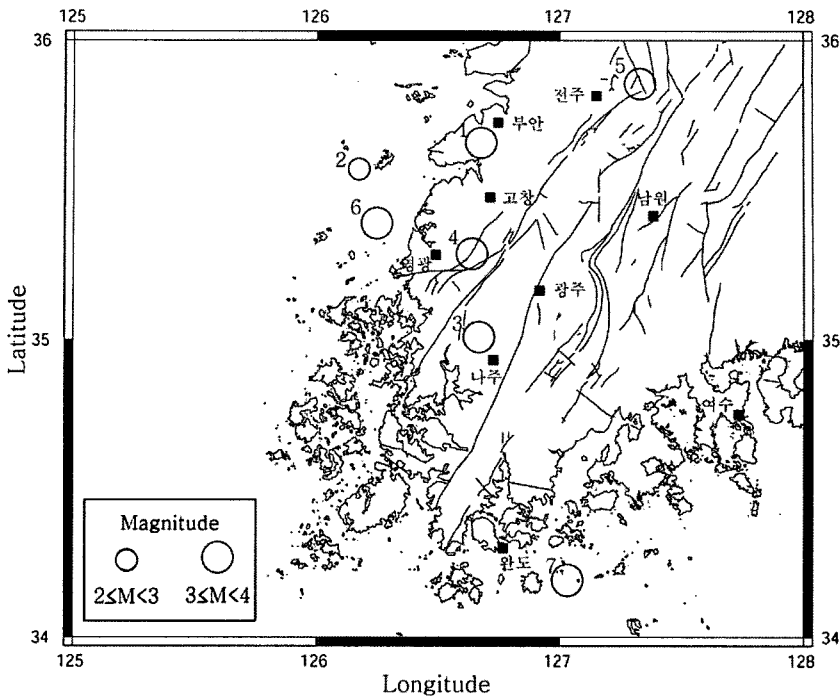


Fig. 2. Epicentral distribution of seven earthquakes used in the study.

성 자료만을 이용한 단층면해가 여러 개인 지진의 경우 여기서 제시된 단층면과 응력축의 방향은 단층면해의 중앙값이고, SH/P 진폭비를 추가하여 구한 단층면해가 여러 개인 지진의 경우 산출된 해 중에서 진폭비에 대한 계산값과 관측값의 차이가 가장 작게 나타나는 해를 대표해로 선택하여 단층면과 응력축의 방향을 나타냈다. Table 2는 본 연구에서 사용된 7개 지진에 대한 단층면해에서 단층면으로 추정되는 2개의 절단면, P축·T축의 특성, P파 초동극성 자료의 수 및 진폭비를 이용한 관측소의 수를 나타낸 것이다.

각 지진에 대한 진원 기구해의 결과를 종합하여 진앙 위에 나타내면 Fig. 4와 같다.

2001년 1월 29일 전북 부안에서 발생한 지진 1에 대한 단층면해로부터 거의 동-서 방향(주향 262°, 경사 87°, 면선각 -40°) 또는 거의 남-북 방향(주향 355°, 경사 50°, 면선각 -176°)의 단층을 추정할 수 있으며, 단층 운동은 정단층 운동이 포함된 주향이동 단층 운동을 보여준다. 이러한 단층 운동을 일으킨 주 압축 응력 방향은 거의 북동-남서 방향으로 나타났다.

2002년 3월 8일 전북 고창 해역에서 발생한 지진 2에 대한 단층면해로부터 거의 서북서-동남동 방향(주향 291°, 경사 45°, 면선각 5°) 또는 거의 동-서 방향(주향 276°, 경사 57°, 면선각 13°) 또는 거의 북-남 방향(주향 179°, 경사 79°, 면선각 147°)의 단층을 추정할 수 있으며, 단층 운동은 역단층 운동이 포함된

Table 1. Source parameters of seven earthquakes used in the study

No.	Origin time		Epicenter		Magnitude
	yy/mm/dd	hh:mm:ss	Latitude (N)	Longitude (E)	
1	'01/01/29	11:44:08.60	35.6597	126.6760	3.5
2	'02/03/08	02:09:33.70	35.5697	126.1718	2.4
3	'02/10/28	11:50:52.80	35.0062	126.6688	3.0
4	'03/02/08	23:46:33.30	35.2893	126.6407	3.1
5	'04/08/06	05:32:53.29	35.8567	127.3318	3.6
6	'05/02/20	22:18:38.75	35.3885	126.2443	3.5
7	'05/08/24	05:06:24.48	34.1922	127.0360	3.3

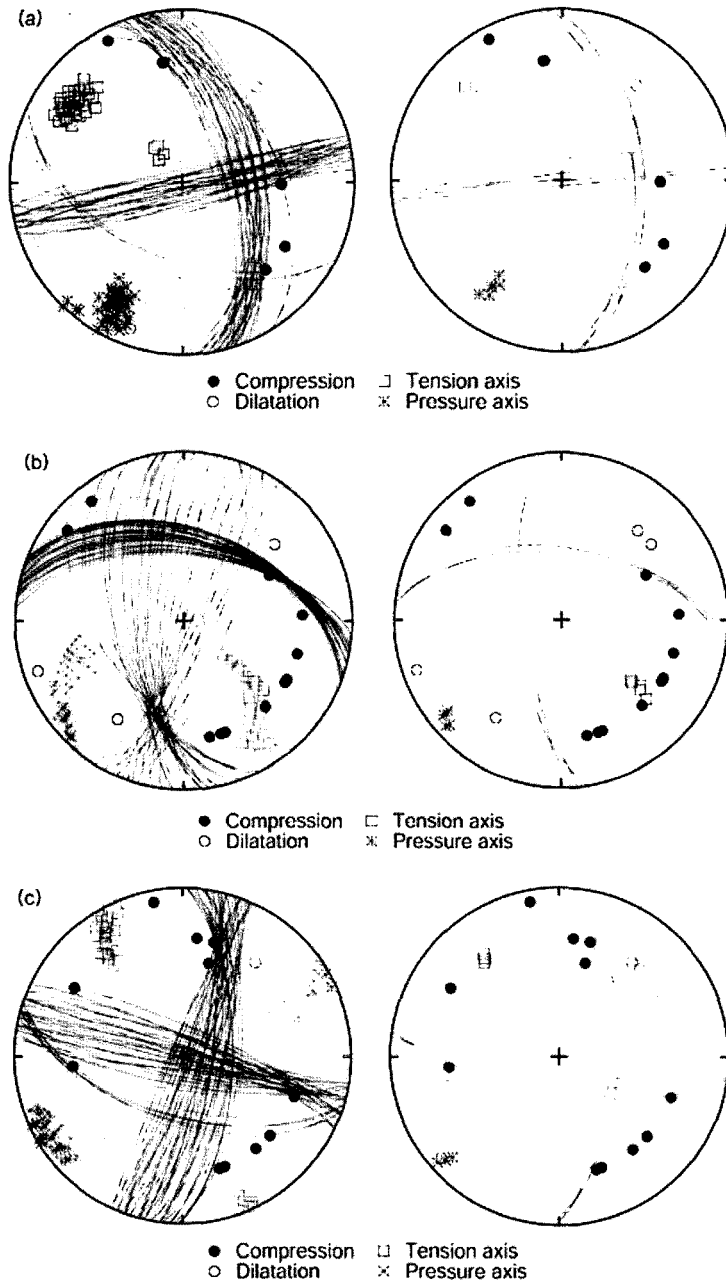


Fig. 3. Focal mechanism solutions obtained from P-wave polarities only (left) and from an additional SH/P amplitude ratios (right). (a) Buan earthquake (No. 1 in Fig. 2), (b) Gochang earthquake (No. 2 in Fig. 2), (c) Youngkwang earthquake (No. 6 in Fig. 2).

주향이동 단층 운동을 보여준다.

2002년 10월 28일 전남 나주에서 발생한 지진 3에 대한 단층면해로부터 거의 동-서 방향(주향 100°, 경사 90°, 면선각 0°) 또는 거의 북-남 방향(주향 10°, 경사 90°, 면선각 180°)의 단층을 추정할 수 있으며, 단층 운동은 주향이동 단층 운동을 보여준다. 이러한

단층 운동을 일으킨 주 압축 응력 방향은 거의 북동-남서 방향으로 나타났다.

2003년 2월 28일 전남 영광에서 발생한 지진 4에 대한 단층면해로부터 거의 북서-남동 방향(주향 313°, 경사 44°, 면선각 22°) 또는 거의 북북동-남남서 방향(주향 206°, 경사 75°, 면선각 132°)의 단층을 추정할

Table 2. Parameters for focal mechanism solution of seven earthquakes

No.	Plane 1			Plane 2			P-axis		T-axis		Data	Ratio
	strike	dip	rake	strike	dip	rake	azimuth	dip	azimuth	dip		
1	262	87	-40	355	50	-176	211	30	316	24	20	1
2	276	57	13	179	79	147	232	14	133	31	15	2
3	100	90	0	10	90	180	55	0	145	0	13	-
4	313	44	22	206	75	132	266	19	157	44	28	-
5	300	90	5	210	85	180	75	4	165	4	44	-
6	98	79	28	2	63	166	228	10	323	28	26	2
7	135	57	-66	276	40	-122	94	68	208	9	20	-

수 있으며, 단층 운동은 역단층 운동이 포함된 주향이동 단층 운동을 보여준다. 이러한 단층 운동을 일으킨 주 압축 응력 방향은 거의 동서 방향으로 나타났다.

2004년 8월 6일 전북 전주에서 발생한 지진 5에 대한 단층면해로부터 거의 서북서-동남동 방향(주향 300°, 경사 90°, 면선각 5°) 또는 거의 북북동-남남서 방향(주향 210°, 경사 85°, 면선각 180°)의 단층을 추정할 수 있으며, 단층 운동은 주향이동 단층 운동을 보여준다. 이러한 단층 운동을 일으킨 주 압축 응력

방향은 거의 동북동-서남서 방향으로 나타났다.

2005년 2월 20일 전남 영광 해역에서 발생한 지진 6에 대한 단층면해로부터 거의 동-서 방향(주향 98°, 경사 78°, 면선각 28°) 또는 거의 북-남 방향(주향 2°, 경사 63°, 면선각 166°)의 단층을 추정할 수 있으며, 단층 운동은 역단층 운동이 포함된 주향이동 단층 운동을 보여준다. 이러한 단층 운동을 일으킨 주 압축 응력 방향은 거의 북동-남서 방향으로 나타났다.

2005년 8월 24일 전남 완도 해역에서 발생한 지진 7에 대한 단층면해로부터 거의 북서-남동 방향(주향

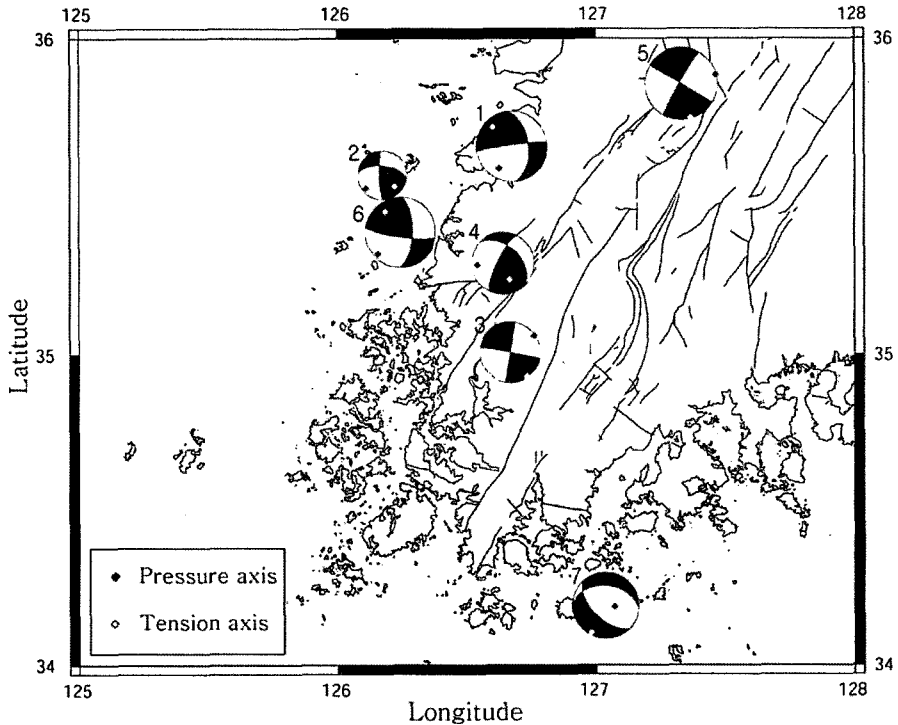


Fig. 4. Epicentral distribution and focal mechanism solutions of seven earthquakes used in this study. (1: Buan earthquake, 2: Gochang earthquake, 3: Naju earthquake, 4: Youngkwang earthquake, 5: Jeonju earthquake, 6: Youngkwang earthquake, 7: Wando earthquake).

135°, 경사 57°, 면선각 -66°) 또는 거의 동-서 방향(주향 276°, 경사 40°, 면선각 -122°)의 단층을 추정할 수 있으며, 단층 운동은 약간의 주향이동 성분이 있는 정단층 운동을 보여준다. 이러한 단층 운동을 일으킨 주 인장 응력 방향은 거의 북북동-남남서 방향으로 나타났다. 전남 완도 해역의 지진의 경우 정단층 운동의 특성을 나타내는데 이는 우리나라 지진의 일반적인 운동 특성이라기보다는 지역적인 현상으로 판단된다.

결론

이 연구를 통하여 결정된 2001년 1월부터 2005년 8월까지 한반도 남서부에서 발생한 7개 지진의 진원 기구해의 분석 결과를 요약하면 다음과 같다.

1. 한반도 남서부에서 발생한 7개의 지진에 대한 진원 기구해를 P파 초동 극성 자료를 이용하여 해석한 결과 전남 나주, 전북 전주 일대에서 발생한 지진은 주향이동 단층운동의 특성을 보이고, 전남 영광 일대의 지진은 역단층 운동이 포함된 주향이동 단층운동의 특성을 보인다. 또한 전남 완도 해역 지진의 지진원은 지역적인 현상으로 판단되는 약간의 주향성분이 있는 정단층 운동 특성이 나타났다.

2. 이 연구를 통하여 분석된 7개의 지진 중 P파 초동 극성 자료만으로 만족할 만한 해를 얻지 못한 지진의 경우 P파 및 SH파의 극성과 진폭비(SH/P)를 추가하여 진원 기구해를 구한 결과, 전북 부안 일대에서 발생한 지진은 경사 주향이동 단층운동의 특성을 보이고, 전북 고창 해역과 전남 영광 해역 지진은 역단층 운동이 포함된 주향이동 단층운동의 특성을 보인다.

3. 최근 한반도 남서부에서 발생한 지진의 진원 기구해로부터 얻어진 단층의 주 압축 응력 방향은 NE-SW 또는 ENE-WSW 방향으로 나타나고 있으며, 이는 남한 내의 주요 지진에 대해 구해진 주 응력장의 방향과 유사함을 보인다.

사사

본 논문에 사용된 지진자료를 제공해주신 기상청, 한국지질자원연구원, 한국원자력안전기술원에 감사

드립니다. 논문의 심사를 통해 많은 조언을 해주신 정태웅 교수(세종대), 김성렬박사(해양연)와 익명의 심사위원에게도 감사를 드립니다.

참고문헌

경제복, 정태웅, 이재구, 이덕기, 이은아, 2001, 남한 중부 지역에서 발생한 미소지진의 단층면해와 응력장 해석. 한국지구과학회지, 22(4), 292-300.

김상조, 김소구, 1983, 지진파를 이용한 남한의 지각구조 연구. 광산지질, 16(1), 51-61.

김성균, 1995, 한반도의 지각에 관한 연구. 지질학회지, 31(4), 393-403.

김성균, 정부홍, 1985, 한반도 남부지역의 지각구조. 광산지질, 18, 151-157.

박창엽, 신진수, 지현철, 강익범, 류용규, 1998, 1996년 12월 13일 영월지진의 진원단층면 방향. 지구물리, 1(1), 23-30.

이기화, 정태웅, 1999, 1996년 양산단층 일대의 미소지진을 이용한 복합단층면해. 지구물리, 2(4), 235-240.

정태웅, 김우한, 2000, 1997년 6월 26일 경주지진의 단층면해 비교해석. 지구물리, 3(4), 245-250.

Hardebeck, J.L. and Shearer, P.M., 2003, Using S/P amplitude ratios to constrain the focal mechanism of small earthquake. Bulletin of the Seismological Society of America, 6, 2434-2444.

Jun, M.S., 1990, Source parameters of shallow intraplate earthquake in and around the Korean Peninsula and their tectonic implication. Ph. D. thesis, University of Uppsala, 142 p.

Kang, T.S. and Baag, C.E., 2004, The 29 May 2004, Mw = 5.1, offshore Uljin earthquake, Korea. Geosciences Journal, 8 (2), 115-123.

Kyung, J.B., Oike, K., and Hori, T., 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. Journal of the Geological Society of Korea, 15, 253-258.

Snoke, J.A., 2000, FOCMEC: Focal mechanism determination. FOCMEC software manual.

Snoke, J.A., Munsey, 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.