

남한 중부지역에서 발생한 미소지진의 단층면해와 응력장 해석

경재복^{1,*} · 정태웅² · 이재구¹ · 이덕기³ · 이은아¹

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

²세종대학교 지구환경과학과, 143-747 서울시 광진구 군자동 98

³기상청 기상연구소 해양기상지진실, 156-720 서울시 동작구 신대방동 460-18

Analysis of Fault Plane Solution and Stress Field Using the Micro-earthquakes in the Central Region of South Korea

Jai Bok Kyung^{1,*} · Tae Woong Cheong² · Jae Gu Lee¹

Duk Kee Lee³ · Eun Ah Lee¹

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

²Department of Earth Science, Sejong University, Seoul 143-747, Korea

³METRI/KMA Marine Meteorology and Earthquake Research Lab., Seoul 156-720, Korea

Abstract: By using two methods we obtained fault plane solutions for 5 groups of earthquakes including 13 events, which occurred in the central region of South Korea after December 1997. The first method is the composite fault plane solution by P wave polarity, and the second the solution by amplitude ratio (SV/P, SH/P, SV/SH) and P and S wave polarities. The two method results show similar results. The strike of fault is in the direction of NNE-SSW and WNW-ESE with the movement of strike-slip or strike-slip including thrust component. The compressional axis of the stress field dominantly trends ENE-WSW or NE-SW. The results are almost consistent with the other main events occurred in and around the Korean Peninsula.

Key words: fault plane solution, polarity, amplitude ratio, stress field, central region of South Korea

요약: 1997년 12월 이후 남한 중부지역에서 발생한 지진 중 13개 지진에 대하여, 지역에 따라 5개 그룹으로 구분하여 P 파 극성을 이용하여 구한 복합단층면해와 P, S파 극성 및 진폭비(SV/P, SH/P, SV/SH)를 이용하여 구한 결과를 비교 해석하였다. 지진원에서의 단층운동은 NNE-SSW와 WNW-ESE 방향의 단층면을 나타내며 주향이동 혹은 역단층성 주향이동운동이 우세하게 나타났다. 단층운동에 작용한 주압축응력방향은 ENE-WSW 방향, 혹은 NE-SW 방향을 나타내며, 이는 남한지역에 발생하는 주요 지진에 대하여 구해진 주압축 응력장 방향과 거의 일치한다.

주요어: 단층면해, 극성, 진폭비, 응력장, 남한중부

서론

지구 내부에 축적된 탄성에너지가 탄성한계를 초과하게 되면 이 에너지는 지각의 약대나 기존의 단층을 변위시키면서 지진파 형태로 방출 된다. 이때, 지진원에서의 단층운동 특성을 단층면해라고 한다. 이 단층면해는 P파의 초동극성이나 진폭비, 혹은 파형

분석에서 얻어지는 데, 어떤 지역에서 여러 지진에 대한 단층면해를 구하면 전반적인 응력장의 분포를 알 수 있다.

한반도 주변부에서 발생한 지진의 단층면해 연구가 Jun(1990, 1991)에 의해 발표된 이후, 남한 각 지역에서 일어난 지진에 대한 단층면해 연구는 여러 연구자들에 의해 시도되어 왔다. 경상분지 동부에서 발생한 미소지진 및 1997년 경주지진의 단층면해는 역단층운동이 포함된 주향이동 단층이 우세하며, 응력

의 주 압축 방향은 ENE-WSW, 주 인장방향은 NNW-SSE 방향으로 추정되고 있다(한국자원연구원, 1994; 이기화·정태웅, 1999; Kim and Kraeva, 1999). 1978년 남한 중서부에서 발생한 홍성지진의 경우, 단층면해는 역단층성 주향이동단층운동으로 주 압축 응력 방향은 거의 동-서 수평방향으로 해석되었다(김준경, 1991). 1996년 남한 중동부에서 발생한 영월지진에 대한 단층면해는 역단층 운동이 포함된 주향이동 단층으로서, 응력장의 주 압축 방향은 동북동-서남서의 경향을 나타내는 것으로 해석되었다(박창업 외, 1997).

본 연구에서는 충북 청원군 강내면 다락리 산 7번지에 위치한 한국교원대를 중심으로 한 지진관측망에서 1997년 12월 이후 관측된 남한 중부지역 미소지진의 단층면해를 구하고 지진을 발생시키는 주응력장의 방향을 해석하고자 하였다. 단층면해를 구하는 방법으로서 진폭비와 S파극성을 이용하는 방법에 의한 결과와 관측점수의 한정으로 복합단층면해를 구하는 방법의 결과를 비교 분석하여 이 지역의 단층면해 해석에 대한 신뢰도를 높이고자 하였다.

단층면해

단층면해는 진원을 둘러싼 반구, 즉 진원 반구의 아래쪽을 진원구로 정의하고 지진의 사출각과 P파 초동의 상하동 분포로부터 서로 직교하는 두 개의 절단면으로부터 구한다. 이 때, 둘 중의 하나의 절단면은 실제의 단층면에 대응하며, 이는 지표에 나타난 단층과 거의 일치하게 된다. 이것이 지진의 단층면해를 결정하는 것으로 가장 간단하고 현재도 널리 쓰이는 방법이다(예; Honda, 1962).

P파 초동극성을 이용하여 단층면해를 정확하게 구하기 위해서는 각 지진을 관측하는 많은 관측소가 진원 주위에 골고루 분포해야 한다. 그러나 미소지진의 경우, 관측점의 수와 방향이 제약되어 P파 초동의 상하동만으로 신뢰성 있는 메커니즘을 구하는 것은 매우 어렵다. 이와 같은 문제를 극복하기 위해 인접한 지역에서 일어난 여러 미소지진을 한 단층에서 일어난 지진으로 간주하여 관측점수와 방향을 확보하여 해석하는 복합 단층면해를 구하는 시도가 이루어지게 되었다. 그 한 예로서 한반도의 경우 경상분지 동부에서 발생한 미소지진에 대하여 시도되었으며(한국자원연구원, 1994; 이기화·정태웅, 1999), 미소지진에서 얻

어진 복합단층면해는 1997년 발생한 경주지진의 단층면해와 거의 일치하고 있다(Kim and Kraeva, 1999).

한편, SH파와 SV파의 진폭비의 접선각, 즉 진동방향(Polarization Angle)을 이용하여 단층면해를 추정하는 시도도 있었다(Hirasawa, 1966, 1970; Bernard and Zollo, 1989). 그러나, 지표에의 입사각이 임계각을 넘으면 SV파의 위상이 변하므로, 입사각이 임계각을 넘는 지진파를 이용하여 진동방향을 측정하는 것은 곤란하다. 따라서, 이 방법은 관측망의 분포에 비하여 진원이 충분히 깊은 지진이 아니면 적용이 어렵다.

1970년대 후반부터 디지털기록방식의 광대역지진계에 의한 전지구적 관측망이 설치됨에 따라 장주기 지진파의 관측파형의 역산을 통하여 모멘트를 텐서적으로 구하는 수법(Gilbert, 1973)이 개발되어 수많은 연구에 사용되고 있다(예; Dziewonski *et al.*, 1981; Kikuchi and Kanamori, 1991). 이 방법은 진원시간 함수의 가정하에 Green 함수를 Convolution하여 각 관측점에서의 합성함수를 만들고, 관측파형과의 잔차가 최소가 되도록 모멘트값을 구하는 방법이다. 이 방법은 단층운동 이외에 화산운동 등에도 적용가능하며, 객관적인 값을 얻을 수 있다는 장점이 있는 반면, 지각구조의 영향을 많이 받는 단주기 성분은 잘 설명할 수 없으며, 이러한 단파장이 주성분이 되는 미소지진은 해석할 수 없는 단점이 있다.

이와 같은 문제를 해결하기 위해 지진파의 진폭의 비를 이용하는 방법이 제안되고 있다. 초동의 상하동이 이산적인 값인데 비해 진폭의 비는 연속적인 값으로, 편향된 적은 관측점으로부터도 값을 얻을 수 있으며, 모멘트 텐서법과 같이 후속파까지 정확하게 이론 파형을 합성할 필요가 없으면서 진원에서 관측점 사이의 전파경로의 감쇠나 불균질구조의 영향을 덜 받는 점이 매우 유리하다. Kisslinger(1980) 및 Kisslinger *et al.*(1981)은 상하동 성분을 이용하여 P파와 SV파의 진폭비와의 잔차가 최소가 되는 값을 grid search에 의해 구하고, 발전기구를 추정하는 방법을 고안하였는데, 이 방법에서는 상하동 성분 뿐인 관측점 4점에서도 발전기구를 추정할 수 있었다. grid search는 역산에 있어서 국소적인 최소값을 벗어나 최소지승값을 찾는 방법으로 일반화된 방법이다.

Snoke *et al.*(1984)는 Kisslinger의 방법을 발전시켜서 P파, SV파, SH파의 극성과 각각의 진폭비를 이용하는 방법을 개발하였다. 이 방법은 다른 연구에

채용되어 그 유용성이 확인되고 있다(Munsey and Ballinger, 1985; Rau et al., 1996).

단층면해 해석

복합단층면해에 의한 방법

한국교원대를 중심으로 한 지진관측망에는 1997년 12월 이후 약 3년간 65개의 지진이 관측되었다. 그러나 대부분의 지진의 규모가 2.0~4.0에 해당하여 각각의 지진에 대해 기록된 관측점의 수가 작다. 이들 지진 중 추가로 한국자원연구원의 대전관측소(TJN), 김천관측소(KMC), 구례관측소(GRE), 서울대학교 관측소(SNU)에 기록된 자료를 사용하여 4점 이상의 관측소에 기록된 13 지진을 분석대상으로 선택하였다. Fig. 1은 남한 중부에 위치한 한국교원대(KNUE)와 한국자원연구원(KIGAM) 관측망의 관측점 위치를 나타낸다. 또한 Table 1은 두 관측망에 속한 관측점의 위도, 경도 및 주소를 나타낸다. 지진의 방위각과 사출각은 김상조·김소구(1983)의 속도구조 모델을 사용하여 HYPO 71(Lee and Lahr, 1975)에 의해 구한 진원의 위치를 이용하여 구하였으며, 진원의 하반구에 등적 투영하는 프로그램(Reasenber and Oppenheimer, 1985)을 사용하여 단층면해 혹은 복합 단층면해를 구하였다. Table 2는 분석에 사용된 지진의 목록이며, Table 3은 각 관측소에서 P파 초동 극성을 나타낸다. 분석대상 지진을 Fig. 2에서 보는 바와 같이 진앙이 서로 인접한 지진들을 4그룹으로 묶어 A 그룹(충북 청원지역), B 그룹(대전지역), C 그룹(부여지역), D 그룹(논산지역)으로 구분하여 구하였으며 E지진(충북 보은지역)의 진앙은 다른 지진과 동떨어져 위치함으로 독립적으로 단층면해를 구하였다. Table 4는 각

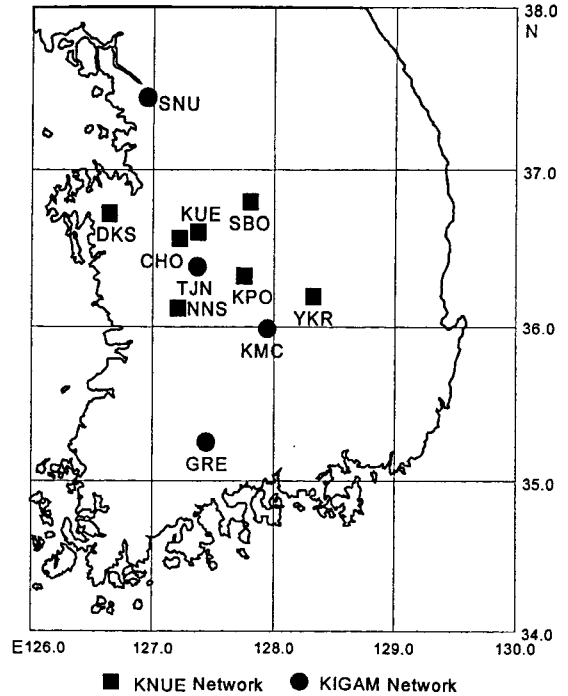


Fig. 1. Location of the earthquake observatories of KNUE (Korea National University of Education) and KIGAM (Korea Institute of Geology and Materials) networks.

그룹(A-E)에 대하여 구한 복합단층면해와 P 및 T축을 나타낸다.

A 그룹은 북서부의 경기육계와 남동부의 옥천대가 만나는 경계지역인 충북 청원군 오창리 일대에서 발생한 3개 지진의 15개 관측점에 대한 복합단층면해이다. 단층면해는 NNE-SSW(주향 25, 경사 71, 면선각 164) 방향의 면과 WNW-ESE(주향 120, 경사 75, 면선각 20) 방향의 면을 나타낸다. 불확실도(uncertainty)는

Table 1. Location of KNUE and KIGAM seismic observation network.

관측소명	위도	경도	주소	관측망
KUE	36° 36.54' N	127° 21.64' E	충북 청원군 강내면 다라리 한국교원대학교	한국교원대 (KNUE)
KPO	36° 19.89' N	127° 44.43' E	충북 옥천군 청성면 거포리	
SBO	36° 48.17' N	127° 47.44' E	충북 괴산군 괴산읍 서부리	
NNS	36° 07.04' N	127° 12.85' E	충남 논산시 양촌면 입화리	
DKS	36° 43.94' N	126° 37.93' E	충남 예산군 덕산면 상가리	
YKR	36° 11.57' N	128° 20.30' E	경북 구미시 고아읍 예강리	
CHO	36° 33.98' N	127° 14.00' E	충남 연기군 서면 기룡리	
TJN	36° 22.83' N	127° 21.69' E	대전 광역시	한국자원연구원 (KIGAM)
KMC	35° 59.19' N	127° 56.55' E	경북 김천시	
SNU	37° 27.22' N	126° 57.27' E	서울대학교	
GRE	35° 15.52' N	127° 26.66' E	전남 구례	

Table 2. List of earthquakes used for the composite focal mechanism solution.

NO	Origin time		Epicenter		Depth (km)	Magnitude
	yy/mm/dd	hh/mm/ss	Latitude	Longitude		
1	99/04/21	11/24/12.25	36-42.21	127-14.35	19.38	2.8
2	99/12/14	14/46/57.33	36-41.76	127-23.39	22.86	3.2
3	00/05/05	04/16/54.84	36-38.87	127-19.11	10.44	2.2
4	00/01/15	18/49/14.62	36-28.82	127-20.73	15.00	2.3
5	98/12/29	12/59/27.01	36-22.93	127-22.90	18.66	2.7
6	98/06/08	11/32/26.06	36-20.21	127-25.40	15.94	2.4
7	99/09/25	06/48/42.21	36-16.74	126-54.09	15.00	2.8
8	99/07/17	15/22/02.68	36-17.62	126-56.61	13.00	3.3
9	99/07/18	19/01/22.70	36-19.71	126-59.91	14.00	2.6
10	00/05/26	21/41/40.63	36-09.87	127-10.40	14.33	2.8
11	99/10/23	13/13/19.01	36-07.62	127-20.01	17.00	2.8
12	99/04/30	20/52/35.92	36-07.05	127-23.58	24.00	2.2
13	99/06/19	20/58/20.97	36-24.56	127-47.83	13.00	3.1

Table 3. Polarity of first motion, take off angle and azimuth angle in each observation site.

NO	date	site name	polarity	take off angle	azimuth angle	NO	date	site name	polarity	take off angle	azimuth angle
1	99/04/21	KUE	U	140	134	7	99/09/25	DKS	U	105	334
		SBO	D	104	77			KPO	D	101	86
		KPO	U	100	133			SBO	D	99	54
		NNS	X	-	-			TJN	D	109	75
		TJN	U	112	163						
2	99/12/14	KUE	U	155	195	8	99/07/17	NNS	X	-	-
		SBO	D	117	72			DKS	U	103	330
		KPO	U	109	142			SBO	D	70	53
		NNS	U	103	194			SNU	U	70	0
		DKS	D	103	273	9	99/07/18	NNS	U	115	140
		TJN	U	119	184			DKS	U	104	324
		KMC	U	98	148			SBO	D	70	53
SNU	U	98	335	TJN	D	113	80				
3	00/05/05	KUE	U	151	139	10	00/05/26	NNS	D	156	145
		SBO	D	103	68			KUE	D	105	19
		KPO	U	101	133			KPO	D	105	70
		DKS	D	100	279			DKS	U	70	322
				SBO	D			70	38		
4	00/01/15	KUE	D	136	5	GRE	U	70	166		
		KPO	D	111	115	11	99/10/23	KPO	D	103	58
		SBO	D	106	48			KUE	X	-	-
		TJN	U	144	173			DKS	U	92	317
				TJN	U			115	5		
5	98/12/29	KUE	U	122	356			12	99/04/30	NNS	D
		KPO	U	114	100	KPO	D			118	53
		SBO	D	99	38	SBO	X			-	-
		TJN	D	174	264	TJN	U			127	354
6	98/06/08	NNS	U	110	218	13	99/06/19			KPO	U
		KUE	U	110	349			SBO	U	107	359
		SBO	D	93	32			DKS	D	70	289
		DKS	X	-	-			TJN	D	108	265
7	99/09/25	KUE	D	105	48			SNU	U	70	327

15, 33, 30도(이하 주향, 경사, 편선각 순)이다. 이 지역의 주 구조선 방향은 NE-SW 방향으로 단층면해와

약간의 차이를 나타낸다. 이때 ENE-WSW 방향의 압축응력과 NNW-SSE 방향의 인장응력이 작용한 것으

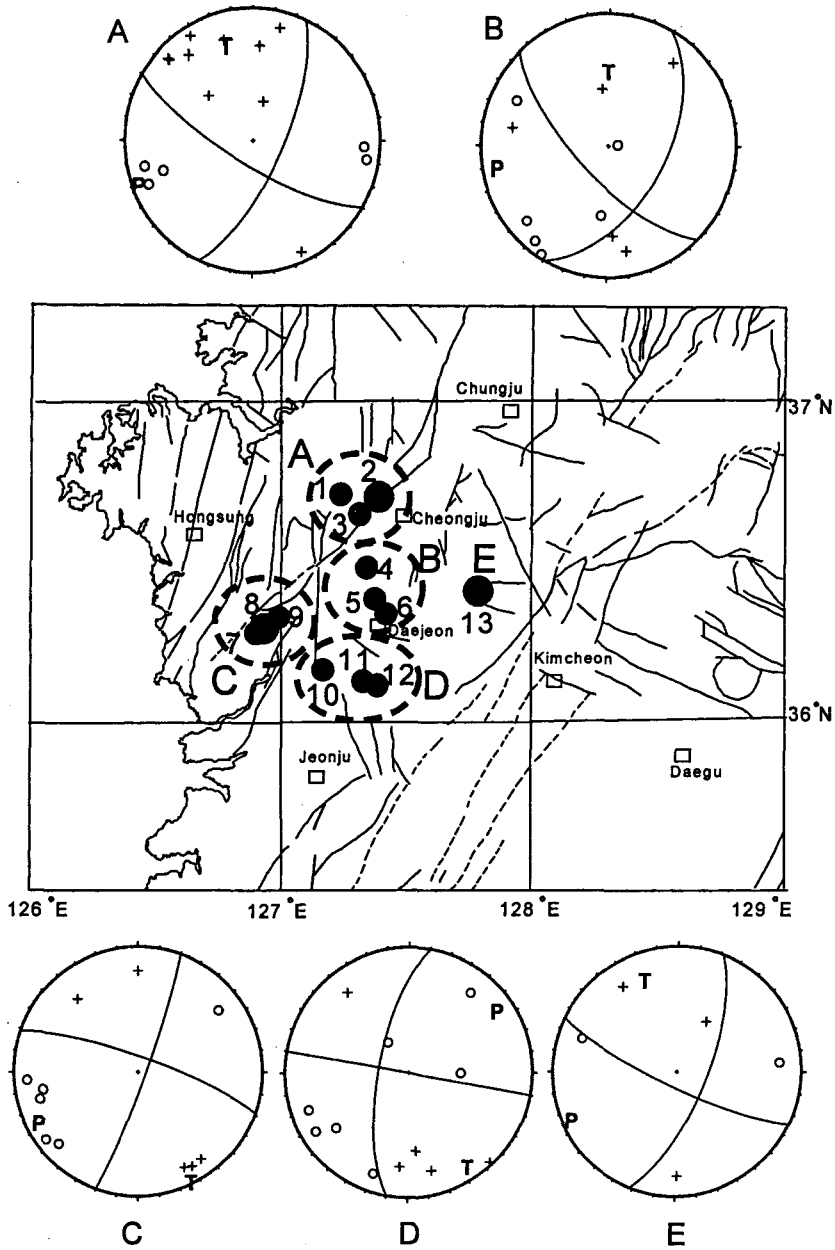


Fig. 2. The earthquake epicenters of A to E groups and composite fault plane solutions of each group.

로 추정되며, 약간의 역단층운동이 포함된 주향이동 단층운동을 나타내는 것으로 생각된다.

B 그룹은 옥천대 내의 대전일대에서 발생한 3개 지진의 12관 측점에 대한 복합 단층면해이다. 단층면해는 NNE-SSW(25, 53, 155) 방향의 면과 NW-SE (135, 70, 40) 방향의 면을 나타낸다. 이때 불확실도는 3, 5, 0도 이다. 이 지역도 역시 거의 E-W 방향

의 압축응력과 N-S 방향의 인장응력의 작용하에 역 단층운동이 포함된 주향이동단층운동의 결과로 추정 된다.

C 그룹은 경기육계와 옥천대의 남단경계인 부여읍 일대에서 발생한 3개 지진의 13개 관측점에 대한 복합단층면해이다. 단층면해는 NNE-SSW(20, 80, -170) 방향의 면과 WNW-ESE(289, 80, -5) 방향의 면을

Table 4. Composite focal mechanism solution in the central region of South Korea.

Group or event	Nodal plane 1		Nodal plane 2		P axis		T axis	
	strike	dip	strike	dip	azimuth	dip	azimuth	dip
A	25°	71°	120°	75°	252°	5°	344°	23°
B	29°	53°	135°	70°	259°	12°	360°	41°
C	20°	85°	289°	80°	245°	12°	153°	4°
D	190°	70°	280°	90°	54°	15°	146°	15°
E	21°	70°	115°	80°	247°	8°	341°	21°

나타낸다. 이때 불확실도는 23, 43, 45도이다. 이 지역의 단층면해는 주위 지역의 주 구조선인 NE-SW 혹은 NNE-SSW 방향과 비교적 잘 대비된다. 이 지진 역시 ENE-WSW 방향의 압축응력과 NNW-SSE 방향의 인장응력의 작용하에 주향이동 단층운동의 결과로 추정된다.

D 그룹은 옥천대 내의 충남 논산시 일대에서 발생한 3개 지진의 12개 관측점에 대한 복합단층면해이다. 단층면해는 NNE-SSW(190, 70, 180) 방향의 면과 WNW-ESE(280, 90, 20) 방향의 면을 나타낸다. 이 지역에는 큰 구조선은 분포하지 않으나 주위 구조선의 방향은 거의 N-S 방향을 나타낸다. 불확실도는 3, 5, 5도이다. 이들 지진은 NE-SW 방향의 압축응력과 NW-SE 방향의 인장응력의 작용하에 주향이동 단층운동의 결과로 추정된다.

E 지진은 충북 보은군 탄부면 일대에서 발생한 지진의 5개 관측점에 대한 단층면해이다. 자료가 불충분하지만 단층면해는 NNE-SSW(21, 70, 169) 방향의 면과 WNW-ESE(115, 80, 20) 방향의 면을 나타낸다. 불확실도는 18, 20, 30도이다. 이 지역의 선구조선 방향인 WNW-ESE 혹은 E-W 방향은 이 지역에서 발생한 지진의 단층면해의 한 면과 잘 대비된다. 응력장 역시 ENE-WSW 혹은 E-W 방향의 압축응력과 NNW-SSE 방향 혹은 N-S 방향의 인장응력의 작용하에 주향이동 단층운동의 결과로 추정된다.

진폭비 및 P파극성 이용 방법

규모가 작은 미소지진의 경우 관측점에 따라 관측 자료의 수가 부족할 때가 많으며 관측점에 따라 P파 극성이 불분명한 경우가 많고 지각구조에도 불확실성이 존재한다. 자료를 잘 설명하는 발진기구는 통상 유일하지가 않는 법인데, 위와 같이 조건이 나빠질수록 많은 발진기구의 해가 존재하게 된다. 만일 상하동의 지진자료에서 P파와 S파의 진폭을 10% 정도

(精度)로 알 수 있다면 발진기구 값의 범위를 줄일 수 있는 구속 조건을 얻게 된다. 또한, 3성분 지진자료가 있다면 SH/P의 진폭비는 거의 독립된 자료가 된다. 어떤 지진에서는 선명한 SV 혹은 SH의 극성 자료를 얻을 수 있는 경우가 있으며, 또한 SV/SH 진폭비는 P가 포함된 진폭비 보다 좋은 구속 조건을 제공한다. 이를 바탕으로 발진기구해의 정도를 높이는 연구가 진행되어왔다.

이러한 원리(예; Aki and Richard, 1980)를 기초로 하여 Snoke *et al.*(1984)는 FOCMEC(FOCal MEchanism determination) 이라는 공개 프로그램을 제작하였다. 진폭비를 자료로 이용할 때는 자유표면보정을 행해야 한다. P파 입사의 경우를 예로 들면, $V_P/V_S = \sqrt{3}$ 이라는 포외송관계가 성립한다고 가정할 때 P파 반사각(수평면에 대하여) e, P파에서 변환된 SV파 반사각 f 사이에는 $\cos^2 e = 3\cos^2 f$ 이라는 관계가 성립하고, 여기서 바깥으로 향하는 진동의 크기 A_k 에 대한 수평 성분(3성분계에서 Radial 성분) A_h 와 수직성분 A_v 은 각각 다음과 같이 증폭되어 나타난다(Bullen, 1963).

$$\frac{A_h}{A_k} = \frac{12 \sin e \sec^2 e \tan f}{4 \tan e \tan f + (1 + 3 \tan^2 e)^2} \tag{1}$$

$$\frac{A_v}{A_k} = \frac{6 \sin e \sec^2 e (1 + \tan^2 e)}{4 \tan e \tan f + (1 + 3 \tan^2 e)^2} \tag{2}$$

이들 증폭된 양을 각각의 성분에서 나누어 주는 것이 자유표면 보정이다.

수직성분 A_v 와 수평성분 A_h 의 관계에서 얻어지는 식에서

$$\tan \alpha = \frac{A_h}{A_v} \tag{3}$$

α 는 겉보기 반사각이라하며, 입자계적에서 수직성분과 이루는 각이다. 반사각 e는 겉보기 반사각 α 와의 관계식,

$$2 \sin^2 e = \frac{V_P^2}{V_S^2} (1 - \cos \alpha) \quad (4)$$

에서 구해진다.

FOCMEC은 B축(주압력축 P와 주장력축 T축에 직교하는 축; 혹은 두 절단면이 만나는 Null축)의 trend

와 plunge를 각각 0에서 360도, 0에서 90도 변형시키고 B축과 직교하는 A축(한 절단면의 축)을 180도 변형시키면서 결정되는 절단면 중에서 초동극성과 진폭비를 만족하는 단층면해를 구한다. 계산의 시간을 줄이기 위해 보통 5도 간격의 각도폭으로 변형시키면서 계산을 행한다.

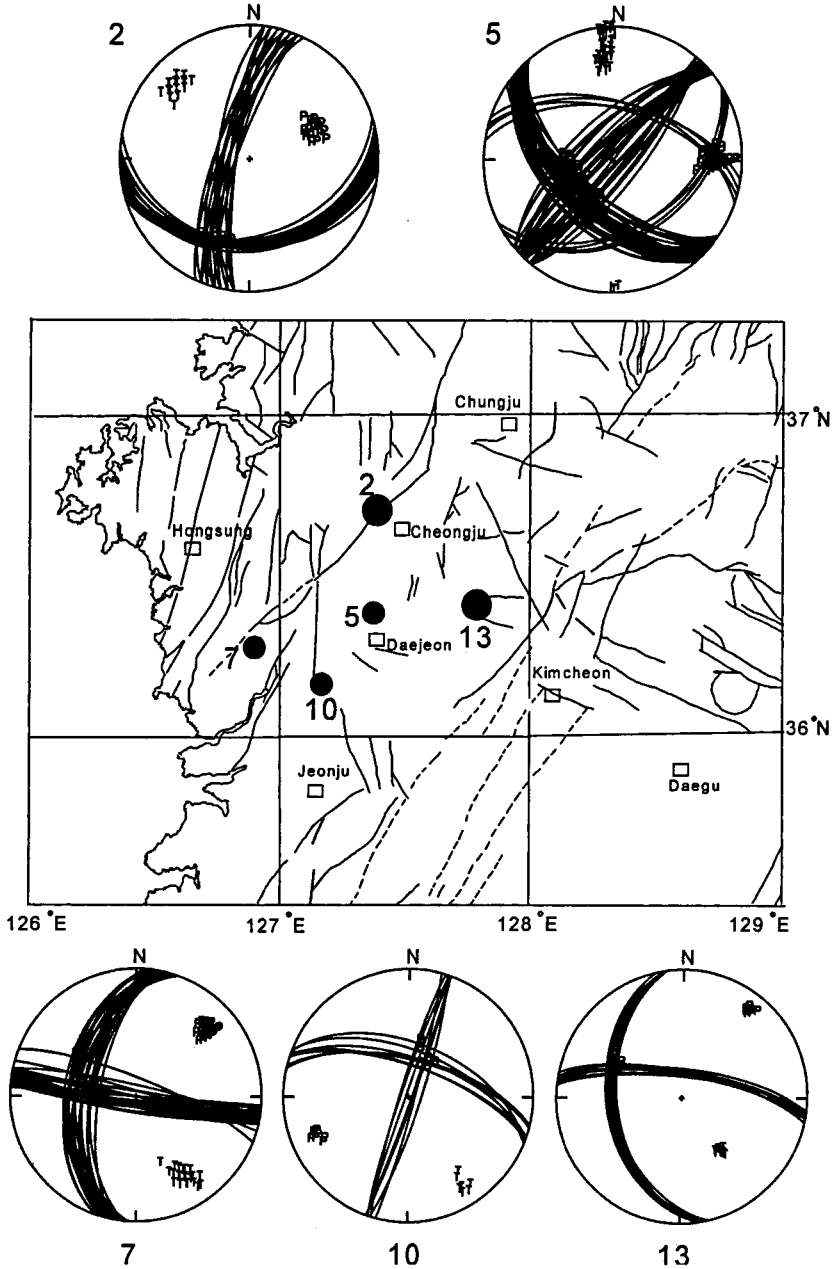


Fig. 3. Fault plane solutions using the amplitude ratio (P/SV, P/SH, SV/SH) and S wave polarity. The numbers indicate the earthquakes described in Table 2.

진폭은 지진 변위자료 상하 및 Radial 성분에서 P 및 SV파, Transverse 성분에서 SH파의 극성 및 직접파 최대치를 읽어냈다. P파의 극성은 명료한 반면, SV 및 SH파의 초동극성은 상당히 판단하기 어려웠으며, 모호한 값을 대입할 경우 이 지역에서 예상되는 단층면해와 양상이 전혀 다른 값이 도출되어, 되도록 확실한 것으로 판단되는 경우 외에는 S파 극성을 도입하지 않았다. 진폭은 가까운 지진의 경우, 복잡한 지각구조로 인하여 직접파 진폭이 상당부분 왜곡될 가능성이 있으나, 본 연구에서는 이러한 진폭의 왜곡이 상용대수값 0.6에서 1 이내라고 가정하였다. 또한 교원대 관측망 중 DKS 및 NNS는 관측점의 수평성분 수신장치에 일부 문제점이 노출되어, 이 관측점에 대한 S파 진폭은 해석에서 배제하였다.

자유표면 보정은 P파의 상하동 성분 최대값에 대한 Radial 성분 최대값의 역정적 값을 곱하기 반사각으로 하여 행하였다. 본 연구에서는 P파의 진폭으로부터 곱하기 반사각을 구하였으며, 이로부터 나온 반사각 ϵ 가 30도에서 37도 사이일때는 자유표면 보정값이 불안정하여 해석에서 제외하였다(예; Munsey and Bollinger, 1985).

복합단층면해에서 구한 A-E 각 그룹 지진 중에서 비교적 관측점 자료가 많은 지진들(Table 2의 2, 5, 7, 10, 13번 지진)을 선택하여 S파 초동극성 및 P, S파 진폭비를 읽고 FOCMEC을 Fig. 3의 결과를 얻었다.

복합단층면해의 결과(Fig. 2)와 진폭비를 통해 구한 결과(Fig. 3)를 비교하면 다음과 같다. A 그룹 지진들의 복합단층면해는 역단층성 주향이동단층이지만 A그룹 내의 2번 지진은 FOCMEC에서 미약하나마 정단층성 단층면해가 도출되었다. 그러나 단층의 주향 방향은 거의 일치한다. B 그룹에서 관측점 기록이 비교적 많은 5번 지진은 진폭 기록이 상당부분 빠져 있다. 이는 관측점 SBO의 반사각 ϵ 가 35로 자유표면 보정값이 불안정하였고, 관측점 KPO는 가까운 관계로 기록이 포화된 연유이다. 부족한 자료에서 도출된 단층면해는 오차가 큰 가운데, 복합단층면해와 유사한 경향이 관찰되었다. C 그룹의 복합단층면해와 7번 지진의 진폭비에 의한 단층면해는 거의 같다. D 그룹의 복합단층면해와 10번 지진의 단층면해도 주향이동단층으로서 유사하며 단층면의 기울기만 약간씩 차이가 난다고 볼 수 있다. 13번 지진의 경우 초동을 이용한 복합단층면해와 진폭비를 이용한 단층면해 모두 역단층성 주향이동단층을 나타낸다. 단층의

주향이동방향은 큰 차이가 없으나 단층면의 경사 방향이 차이가 난다. 따라서 두 방법의 결과를 비교할 때 단층면의 주향방향은 거의 비슷하지만 단층면의 경사나 단층운동의 센스에는 약간의 차이를 나타낸다.

단층면해와 응력장과의 관계

남한중부지역에서 발생한 13개의 미소지진에 대한 단층면해와 복합단층면해를 구한 결과, NNE-SSW와 NWN-SES 방향의 주향이동 단층운동(C, D그룹, 5, 7, 10번 지진) 혹은 주향이동 단층운동에 약간의 역단층운동이 첨가된 단층운동특성(A, B, E그룹, 13번 지진)을 주로 보여준다. 또한, 이러한 단층운동을 가능케 한 응력의 주 압축방향은 단층면해를 구하는 방법에 따라 약간의 차이는 있으나 ENE-WSW 방향(A, B, C, E 그룹)과 NE-SW 방향(D 그룹)을 나타낸다.

한반도와 그 주변지역에서 발생한 주요지진들에 대한 기존 연구의 단층면해를 보면 NNE-SSW 방향의 주향이동 운동이 우세한 단층운동 특성을 보여주며, 주 압축 응력장은 ENE-WSW 방향을 나타낸다(전명순 외, 1999). 남한 중부지역에서 발생한 지진들의 단층면해와 주압축응력장의 방향도 남한전체의 평균적인 방향과 상당히 유사함을 나타낸다. 한반도의 지진활동은 인도-오스트레일리아 판과 유라시아 판의 충돌에 의해 유라시아 판 내부로 전달되는 응력과 태평양 판 및 필리핀해 판이 유라시아 판 하부로의 섭입에 의해 전달되는 응력이 ENE-WSW 방향으로 상호작용하여 한반도 내의 주요 약대를 재활성화시키면서 발생한다고 사료된다(Kyung *et al.*, 1996). 따라서, 남한 중부지역의 경우 지체구조적으로 다른 지역과 큰 차이가 없는 비교적 안정대로서 한반도에 작용하는 광역적 응력장과 거의 동일한 응력장하에 각각의 약대가 간헐적으로 재활성화하면서 국지적으로 중소 규모의 지진이 발생한다고 볼 수 있다.

결론

1997년 12월 이후 남한 중부지역에서 발생한 미소 지진에 대하여 한국교원대와 한국자원연구원의 관측망에 기록된 지진자료를 이용하여 단층면해를 구한 결과 다음과 같은 결과를 얻었다.

1. 13개 지진을 지역에 따라 5개 그룹으로 나누어 P파 초동을 이용한 복합 단층면해를 구하였다. 지진

원의 특성은 주로 NNE-SSW와 WNW-ESE 방향의 단층면과 주향이동 단층운동 내지 역단층성 주향이동 단층운동의 특성을 보인다.

2. 진폭비(SV/P, SH/P, SV/SH)와 S파의 극성을 이용하여 5개 지진의 단층면해를 구하였다. 위 결과와 복합 단층면해를 비교할 때 단층면의 주향방향은 거의 비슷하지만 단층면의 경사나 단층운동의 센스에는 약간의 차이를 나타낸다.

3. 이러한 단층운동을 가능케 하는 응력의 주 압축 방향은 지진에 따라 ENE-WSW 방향 혹은 NE-SW 방향을 나타내고 있으며 남한 내 타 지역에서 발생한 지진의 주 응력장의 방향과 거의 유사하다.

사 사

본 논문의 자료를 제공해 주신 한국자원연구원의 전명순박사와 지현철박사께 감사를 드립니다. 본 논문은 1998년 한국학술진흥재단의 학술연구비에 의하여 지원되었으며, 이에 감사를 드립니다.

참고문헌

김상조 · 김소구, 1983, 지진파를 이용한 남한의 지각구조 연구. 광산지질, 16, 51-61.
 김준경, 1991, 초동국성분포를 이용한 홍성지진의 Focal Mechanism 연구. 지질공학, 1, 121-136.
 박창엽 · 신진수 · 지현철 · 강익범 · 류용규, 1998, 1996년 12월 13일 영월지진의 진원단층면 방향. 지구물리, 1, 23-30.
 이기화 · 정태웅, 1999, 1996년 양산단층 일대의 미소지진을 이용한 복합단층면해. 지구물리, 2, 235-240.
 한국자원연구원, 1994, 지진연구. 연구보고서 KR93-IG-4, 41.
 Aki, K. and Richards, P.G., 1980, Quantitative Seismology: Theory and Methods, W. H. Freeman. San Francisco, CA., 932 p.
 Bernard, P. and Zollo, A., 1989, Inversion of near-source S polarization for parameters of double-couple point sources. Bulletin Seismological Society of America, 79, 1779-1809.
 Bullen, K.E., 1963, An introduction to the theory of seismology, 3rd ed., Cambridge Univ. Press, 381 p.
 Dziewonski, A.M., Chou, T.A. and Woodhouse, J.H., 1981, Determination of earthquake source parameters from waveform data for studies of regional and global seismicity. Journal Geophysical Research, 86, 2825-2852.
 Gilbert, F., 1973, Derivation of source parameters from

low-frequency spectra, Philosophical Transaction of the Royal Society London, Series A, 274, 369-371.
 Hirasawa, 1966, A least squares method for the focal mechanism determination from S wave data; Part I, Bulletin of Earthquake Research Institute. University of Tokyo, 44, 901-918.
 Hirasawa, 1970, Focal mechanism determination from S wave observations of different quality. Journal of Physics of the Earth, 18, 285-294.
 Honda, H., 1962, Earthquake mechanism and seismic waves, Geophysical Notes. University of Tokyo, 15, Suppl. 1-97.
 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.
 Jun, M.S., 1991, Body wave analysis for shallow intraplate earthquakes in the Korean Peninsula and Yellow Sea. Tectonophysics, 192, 345-357.
 Kikuchi, M. and Kanamori, H., 1991, Inversion of complex body waves-III. Bulletin Seismological Society of America, 81, 2335-2350.
 Kim, S.G. and Kraeva, N., 1999, Source parameter determination of local earthquakes in Korea using moment tensor inversion of single station data. Bulletin Seismological Society of America, 89, 1077-1082.
 Kisslinger, C., 1980, Evaluation of S to P amplitude ratio for determining focal mechanisms from regional network observations. Bulletin Seismological Society of America, 70, 999-1014.
 Kisslinger, C., Bowman, J.R., and Koch, K., 1981, Procedure for computing focal mechanisms from local (SV/P) data. Bulletin Seismological Society of America, 71, 1719-1729.
 Lee, W.H.K. and Lahr, J.C., 1975, HYP071PC (revised): A computer program for determining hypocenter, magnitude and first motion pattern of local earthquakes. U.S. Geological Survey Open-File Report 75-311.
 Munsey, J.W. and Bollinger, G.A., 1985, Focal mechanism analyses for Virginia earthquakes (1978-1984). Bulletin Seismological Society of America, 75, 1613-1636.
 Rau, R., Wu, F.T., and Shin, T., 1996, Regional focal mechanism determination using 3D velocity model and SH/P amplitude ratio. Bulletin Seismological Society of America, 86, 1270-1283.
 Reasenber, P. and Oppenheimer, D., 1985, Fpfit, Fpplot and Fppage: Fortran computer programs for calculating and displaying earthquake fault-plane solutions. U.S. Geological Survey Open Report, 85-739.
 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.