

## 1996년 양산단층 일대의 미소지진을 이용한 복합단층면해

이기화\* · 정태웅\*\*

\*서울대학교 지구시스템과학과 · \*\*세종대학교 지구과학과

### 요 약

1995-96년 양산단층 지역의 한국자원연구소 지진관측망에 기록된 미소지진을 복합단층면해의 방법으로 해석하였다. 양산단층 지역에서는 주향  $15 \pm 3$ 도에 경사  $60 \pm 8$ 도, 면선각 140도의 역단층이거나, 북서-남동 방향, 즉 주향  $128 \pm 3$ 도, 경사  $56 \pm 8$ 도, 면선각 37도의 역단층으로 분석되었다. 응력의 주압축 방향은 동북동-서남서 방향이고 이 응력에 의해 단층은 역단층 운동이 포함된 주향이동을 이루는 것으로 추정된다. 이 방향은 영월지진을 비롯, 이전 연구에서 구해진 한반도 주변의 응력장 방향과 유사하다.

주요어: 양산단층, 미소지진, 복합단층면해

Lee, Kiehwa and Chung, Tae-Woong, 1999, A Composite Fault-plane Solution of Microearthquakes in the Yangsan Fault Area during 1996. *Journal of the Korean Geophysical Society*. v. 2, n. 4, p. 235-240.

**ABSTRACT:** From the seismic network data of the Korea Institute of Geology, Mining & Materials during 1995-1996, we derived a composite fault-plane solution of the microearthquakes occurred in the Yangsan fault area. The composite fault-plane solution of nine events shows the orientation of fault  $15 \pm 3^\circ$  in strike,  $60 \pm 8^\circ$  in dip and  $140^\circ$  in rake or  $128 \pm 3^\circ$  in strike,  $56 \pm 8^\circ$  in dip and  $37^\circ$  in rake. The compressional axis of the stress field trends ENE to WSW, and this field suggests strike-slip motion with thrust component. The result is consistent with the 1996 Yeong-weol event and the stress field in and around the Korean Peninsula, previously reported.

**Key words:** Yangsan Fault, microearthquakes, composite fault-plane solution

(Lee, Kiehwa, Department of Geological Sciences, Seoul National University, Seoul 151-742, Korea; Chung, Tae-Woong, Department of Earth Sciences, Sejong University, Seoul 143-747, Korea. email: kihwalee@plaza.snu.ac.kr)

### 1. 서 론

경상남북도에는 대보조산운동 이후부터 백악기에 걸쳐 화산암류를 수반한 두꺼운 육성퇴적층이 광범위하게 발달하였는데, 이 지대를 경상분지라고 한다. 경상분지에는 두 개의 우세한 지질구조선이 존재하는데, 하나는 북북동-남남서 방향, 즉 북에서 10-30도 가량 동쪽으로 주향이 기울어진 구조선과 서북서-동남동 방향, 즉 북에서 60-80도 가량 서쪽으로 주향이 기울어진 것이 있다(Kim et

al., 1990). 이 밖에도 지역적으로 정북, 혹은 북에서 20도 서쪽으로 기운 주향의 구조선이 존재하는 것으로 알려져 있다(Lee et al., 1984).

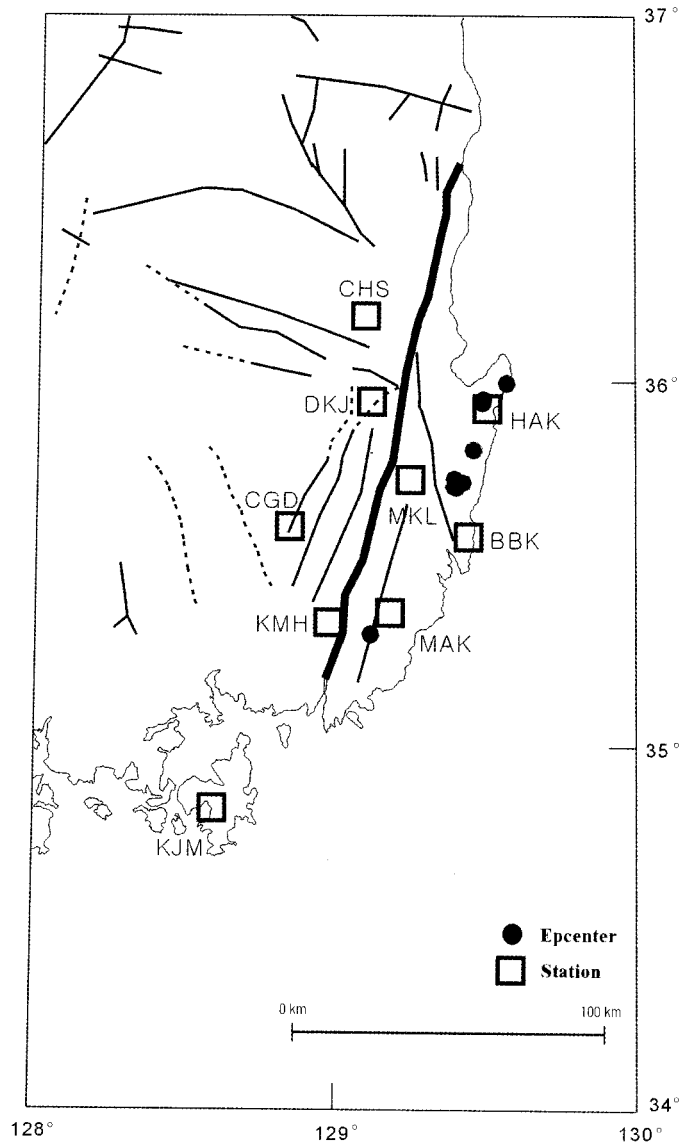
이러한 경상분지 내의 여러 구조선 가운데 가장 중요한 것이 처음 소개한 북북동-남남서 방향에 해당되는 양산 단층으로 이 단층은 그 규모가 크고 구조활동이 최근에 일어났다는 사실에서 많은 관심의 대상이 되어왔다.

양산단층은 경북 영덕에서 부산에 걸치는 길이 약 200 km로써 폭이 수 십 m에서 수 km에 달하

며(김인수 · 김종열, 1983), 지난 2000년간 MM진도 VIII 이상의 파괴적 지진이 10여회 발생하여 활성 단층으로 간주되고 있다(Lee *et al.*, 1984; Lee · Jin, 1991). 또 최근에 이 단층일대의 제 4기 지층에서 단층 운동이 속속 발견되고 있다(경재복 외, 1999). 양산단층은 같은 주향방향의 언양, 동래, 울산단층과 함께 하나의 단층계(fault system)를 이

루고 있는데, 이들 단층대의 주변에는 원자력 발전소를 비롯한 주요 산업시설이 위치하고 있어 이들의 내진설계와 관련하여 지진연구가 중요하게 부각되고 있다.

최근 한국자원연구소는 양산단층을 중심으로 10개소에 지진관측망을 구축하여 미소지진을 관측하고 있다. 이 관측망의 1995-96년 미소지진 자료의



**Fig. 1.** Locations of lineations and seismic stations of KIGAM in the Kyeongsang Basin. Epicenters and stations are represented by solid circles and open squares. Bold line represents the Yangsan fault.

초동 P파의 극성을 이용하여 단층진원의 단층면과 주응력 방향을 추정하고자 한다.

## 2. 양산단층 지역의 진원구조 결정

지진이 발생한 진원의 응력상태는 단층면해(fault-plane solution)로 유추해 낼 수 있다. 이를 위해서는 P 파의 초동운동 방향과 진원과 관측소 사이의 방향각(azimuthal angle) 및 사출각(take-off angle)을 구한 다음 이를 스테레오네트(stereo-net)에 투영하는 방법이 쓰인다. 이때 P 파의 초동이 상향일때는 압축 응력, 하향일때는 인장 응력을 의미한다. 일반적으로 한 개의 지진마다 이러한 단층면해를 구하는 것이 원칙이나 이를 정확히 구하려면 많은 관측소가 진원 주위에 골고루 분포하고 있어야 한다. 현실적으로 이 조건이 불가능할 경우, 예로서 미소지진같은 경우에는 인접한 장소에서 발생한 여러 지진을 하나의 지진으로 간주하고 하나의 단층면해를 구하는 복합 단층면해(composite fault-plane solution)를 구하는 방법이 쓰이고 있다. 이외에 지진규모가 클 경우, 관측소의 수효가 적더라도 기록된 자료의 파형분석을 통하여 진원요소를 구하는 방법이 쓰이고 있다(예; Jun, 1991).

우리나라는 지진관측점의 수효가 적고, 미소지진의 경우는 그나마도 먼 관측점 자료는 구해지지 않기 때문에 본 연구의 경우는 복합단층면해에 의한 접근이 불가피하다. 이때 미소지진들이 비교적 근접하여 있으며 동일한 응력장하에서 발생하였다는 가정이 필요하다.

한국지질도(한국자원 연구소, 1995)의 경상분지에는 여러 방향으로 달리는 선구조가 존재한다(Fig. 1). 이 선구조 중에는 활성으로 여겨지고 있는 양산단층과 같이 단층을 나타내는 선구조가 존재하며, 양산지역의 지진은 이 선구조 단층들과 연관되어 일어나는 것으로 보인다.

본 연구에서는 양산지역의 지진 중, 4 이상의 관측점에서 관측되어 비교적 신뢰할 만한 진원지로 판단되는 9 지진(Fig. 1)의 P파 초동운동, 방향각, 사출각을 하반구(lower hemisphere)에 등적투영하는 프로그램(Reasenberg · Oppenheimer, 1985)을 이용하여 복합단층면해를 구하였다(Fig. 2). 방향각과 사출각은 한국자원연구소(1996)에서 김상조 · 김소구(1983)의 모델을 바탕으로 HYPO71 프로그램(Lee · Lahr, 1975)에 의해 구한 진원위치를 이용하여 파선추적법에 의해 구하였다(Table 1).

단층운동의 방향은 주향(strike), 경사(dip), 면선각(rake)으로 정의된다. 단층이 상반(hanging wall)과 하반(foot wall)으로 구성되어 있을 때, 면선각은 하반에 대한 상반의 미끄러짐 방향을 나타내며, 이 방향이 주향과 이루는 각도이다. 면선각의 범위는 -180도에서 180도로, 양의 면선각은 역단층(thrust fault), 음의 값은 정단층(normal fault)을 뜻한다.

Fig. 2에 나타난 양산단층 지역의 복합단층면해는 북북동-남남서 방향, 즉 주향  $15 \pm 3$ 도에 경사  $60 \pm 8$ 도, 면선각 140도의 역단층이거나, 북서-남동 방향, 즉 주향  $128 \pm 3$ 도, 경사  $56 \pm 8$ 도, 면선각 37도의 역단층으로 분적되었다. 두 방향 중, 북북동-남남서 방향의 주향이 양산지역의 선구조 방향과 비슷하여 이 북북동-남남서 방향이 단층면으로 추정된다(Fig. 2). 응력의 주압축 방향은 동북동-서남서 방향이고 인장응력은 남남동-북북서로 작용되는 것으로 해석되며, 이 응력에 의해 단층은 역단층 운동이 포함된 주향이동을 이루는 것으로 추정된다. 양산단층의 주향이동 가능성은 엄상호 외(1983)에 의해서도 지적되었으며, 1991년 월성지역 지진의 복합단층면해석(한국자원연구소,

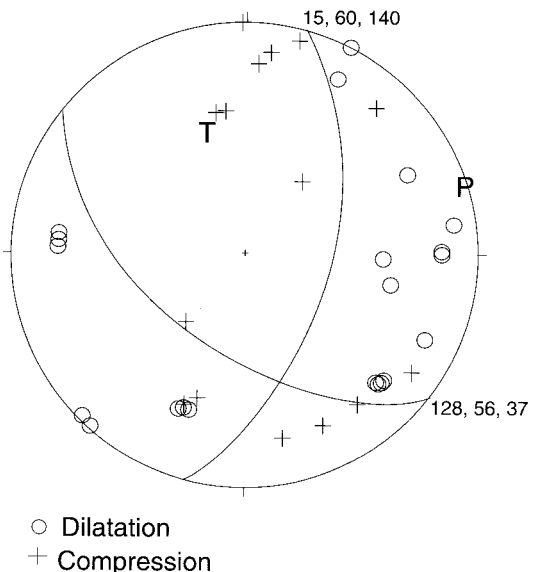


Fig. 2. Composite fault-plane solution for the nine events occurred in the Yangsan fault area. Mean orientations of compressional and dilatational stress-axis are indicated by 'P' and 'T', respectively. Numerals represent the sets of strike, dip and rake in degree, obtained by this solution.

**Table 1.** Earthquakes in the Yangsan fault area used in the composite fault solution.

Earthquakes Origin Date, Time Epicenter (Latitude, Longitude, Depth) (degree, degree, km)	Station	Epicenter Distance (Km)	Azimuth (degree)	Take-off Angle (degree)	Polarity of P-wave
96/2/2 3:35:2.3 35-43.4, 129-24.8, 13.1	MKL	15	272	130	Down
	BBK	17	172	128	Up
	HAK	24	20	119	Down
	DKJ	37	312	110	Down
	MAK	45	208	106	Down
96/2/4 20:47:13.8 35-43.0, 129-24.0, 13.7	MKL	14	276	70	Down
	BBK	16	168	70	Up
	HAK	25	22	119	Down
96/2/5 6:1:13.9 35-43.5, 129-23.9, 13.0	DKJ	36	314	111	Down
	MKL	14	272	70	Down
	BBK	17	168	128	Up
96/2/28 7:7:21.9 35-57.0, 129-29.4, 10.3	HAK	24	23	118	Down
	DKJ	36	313	110	Down
	HAK	3	155	70	Up
	MKL	33	222	107	Up
	DKJ	34	269	107	Down
96/2/28 13:23:57.1 35-56.5, 129-29.3, 9.9	BBK	42	187	104	Up
	CHS	44	305	103	Up
	HAK	2	143	70	Up
96/3/18 22:30:34.0 35-43.2, 129-23.9, 14.3	DKJ	34	270	106	Down
	BBK	41	187	104	Up
	MKL	14	274	70	Down
	BBK	16	168	70	Up
96/5/1 1:00:38.1 35-59.7, 129-34.1, 16.0	HAK	25	22	120	Up
	DKJ	36	314	112	Down
	HAK	10	218	147	Up
	DKJ	42	262	100	Down
96/5/5 2:50:49.3 35-48.8, 129-27.4, 9.3	BBK	48	194	96	Up
	HAK	13	18	125	Up
	MKL	21	244	113	Down
	BBK	26	184	109	Up
96/5/16 11:05:43.3 35-18.5, 129-6.9, 15.0	DKJ	34	295	105	Down
	MAK	9	42	148	Up
	KMH	18	282	126	Down
	BBK	42	44	91	Down
	KJM	71	222	90	down
	HAK	77	27	90	Down
	CHS	97	359	90	Up

1994)에서도 이와 비슷한 결과가 시사된 바 있다.

### 3. 결론 및 토의

판구조론적 견지에서 한반도는 유우라시아판 내부에 속하며 인도판, 태평양판과 필리핀판이 각기 히말라야 산맥, 일본해구, 류큐해구에서 유우라시아판과 충돌한다.

Tapponnier · Molnar (1977)는 중국의 현세 지구조운동이 인도판과 유우라시아판이 대략 5 cm/year의 속도로 충돌하는 현상과 연관되어 있다고 주장했다. 이 두 판들의 충돌은 거대한 응력을 초래하며 이 응력이 유우라시아판을 전파하면서 각각의 약대 주로, 단층이나 지질구조구의 경계의 지층을 파쇄하면서 지진을 촉발시킨다.

일본의 지진활동은 태평양판과 필리핀판이 유우라시아판 밑으로의 침강과 연관되어 있다. 그러나 이 판들의 충돌에 기인하는 응력이 호상열도 뒤의 판내부로 전파하는 현상은 호상열도와 연관된 복잡한 지질구조와 지구조운동으로 히말라야 산맥에서 전파하는 응력처럼 그렇게 명료하지는 않다(Molnar · Tapponnier, 1975).

따라서 한반도에서 지진들을 촉발하는 주된 에너지는 히말라야에서 유우라시아판과 인도판이 충돌하는 판운동에서 유래된다고 생각된다(Lee · Jung, 1980).

판내부에서 발생하는 단층운동은 주향이동형이 우세함이 알려져 있다. 따라서 한반도의 지진활동은 대체로 히말라야 산맥에서 유우라시아판 내부로 전파하는 거대한 응력이 한반도 활성단층들을 주로 그 주향방향으로 파쇄하며 발생한다고 생각된다.

본 연구의 양산단층지역의 미소지진에 대한 복합단층면 해석에서 이 일대의 북북동-남남서의 선구조 방향과 일치하는 단층해 즉, 주향 15 ± 3도에 경사 60 ± 8도, 면선각 140도의 역단층을 포함한 주향이동이 우세함을 볼 수 있었다. 응력의 주압축 방향은 동북동-서남서 방향이고 이는 영월지진(박창업 외, 1998) 및 한반도 주변 지진(Jun, 1991)과 유사한 결과이다.

Zoback (1992)에 의하면 한반도에서 최대 수평응력의 방향이 역시 북북동-서남서 방향으로 나타났다.

## 사 사

본 연구는 한국전력공사 및 한국원자력안전기술원의 지원으로 이루어졌다.

## 참고문헌

- 김상조, 김소구, 1983, 지진파를 이용한 남한의 지각구조 연구, 광산지질학회지, 16, 51-61.
- 김인수, 김종열, 1983, 경상분지 언양 단층지역에 대한 전기비저항탐사 연구, 광산지질학회지, 16, 11-18.
- 경제복, 이기화, 오까다 아쓰마사, 1999, 양산단층대의 고지진학적 연구-변위 지형분석 및 트렌치 조사, 지구물리, 2, 155-168
- 박창업, 신진수, 지현철, 강익범, 류용규, 1998, 1996년 12월 13일 영월지진의 진원단층면 방향, 지구물리, 1, 23-30.
- 엄상호, 최현일, 손진담, 오재호, 박영훈, 신성천, 윤현수, 1983, 경상분지의 경상누층군에 대한 지질 및 지화학적 연구, 한국동력자원연구소, 연구특보.
- 한국자원연구소, 1994, 지진연구, 연구보고서 KR93-1G-4, 41.
- 한국자원연구소, 1995, 한국지질도(1:1,000,000).
- 한국자원연구소, 1996, 경상분지에서의 지진연구(III), 연구보고서 KR-96 (C)-4, 127.
- Jun, M.S., 1991, Body wave analysis for shallow intraplate earthquakes in the Korean Peninsula and Yellow Sea, Tectonophysics, 192, 345-357.
- Kim, Y., Lee, K., and Seong, I.K., 1990, A geoelectric study on the Yangsan fault, north of Kyeongju, Journal of the Geological Society of Korea, 26, 393-403.
- Lee, K. and Jung, H.O., 1980, A study of instrumental earthquake data of the Korean Peninsula, Journal of the Geological Society of Korea, 16, 32-45.
- Lee, K., Jeong, B.I., Kim, Y.H., and Yang, S.J., 1984, A geophysical study of the Yangsan fault area, Journal of the Geological Society of Korea, 20, 222-240.
- Lee, K. and Jin, Y.G., 1991, Segmentation of the Yangsan fault system: Geophysical studies on major faults in the Kyeongsang basin, Journal of the Geological Society of Korea, 27, 434-449.
- Lee, W.H.K. and Lahr, J.C., 1975, HYPO71PC (revised): A computer program for determining hypocenter, magnitude and first motion pattern of local earthquakes, United States Geological Survey Open-File Report, 75-311.
- Molnar, P. and Tapponnier, P., 1975, Cenozoic tectonics of Asia; Effects of a continental collision, Science 189, 419-426.

- Reasenber, P. and Oppenheimer, D., 1985, Fpfit, Fpplot and Fppage: Fortran computer programs for calculating and displaying earthquake fault-plane solutions, United States Geological Survey Open-File Report, 85-739.
- Tapponnier, P. and Molnar, P., 1977, Active faulting and tectonics in China, Journal of Geophysical Research, 82, 2905-2930.
- Zoback, M.L., 1992, First-and second-order patterns of stress in the lithosphere : The World Stress Map Project, Journal of Geophysical Research, 97, 11703-11728.

---

1999년 7월 31일 원고접수  
1999년 12월 23일 원고채택