

1997년 6월 26일 경주지진의 단층면해 비교해석

정태웅* · 김우한**

*세종대학교 지구정보과학과 · **경상대학교 지구환경과학과

요 약

P, S파 극성 및 진폭비를 이용하여 1997년 6월 26일 경주지진의 단층면해를 구하였다. 그 결과, 절단면의 주향, 경사, 면선각이 $150 \pm 4^\circ$, $63 \pm 6^\circ$, $65 \pm 7^\circ$ 또는 $18 \pm 12^\circ$, $26 \pm 3^\circ$, $120 \pm 5^\circ$ 라는 값에서 주향이동이 포함된 역단층성의 단층면이 도출되었다. 동북동-서남서 방향의 주 압축응력을 시사하는 본 연구결과와 단층면해는 저주파 기록을 역산하여 얻은 결과와 거의 일치하며, 양산단층 일대의 미소지진을 복합단층면해에 의해 도출한 결과와도 일치한다.

주요어: 극성, 진폭비, 경주지진, 단층면해, 응력

Tae Woong Chung and Woo Han Kim, 2000, Fault Plane Solutions for the June 26, 1997 Kyong-ju Earthquake. Journal of the Korean Geophysical Society, v. 3, n. 4, p. 245-250

ABSTRACT: By using amplitude ratios (SV/P, SH/P, SV/SH) and P and S wave polarities, we obtained fault plane solutions of the June 26, 1997 Kyong-ju earthquake. The solutions show $150 \pm 4^\circ$ in strike, $63 \pm 6^\circ$ in dip and $65 \pm 7^\circ$ in rake, or $18 \pm 12^\circ$ in strike, $26 \pm 3^\circ$ in dip and $120 \pm 5^\circ$ in rake. This result implies the stress field trending ENE-WSW, which is remarkably consistent with the previous results obtained from the moment tensor inversion, and from the composite fault plane solution for the events occurred around the Yangsan fault area.

Key words: amplitude ratio, polarity, Kyong-ju earthquake, fault plane solution, stress field

(Tae Woong Chung, Department of Earth Information Science, Sejong University, Seoul 143-747, Korea, e-mail: chungtw@sejong.ac.kr; Woo Han Kim, Department of Earth and Environmental Science, Gyeongsang National University, Jinju 660-701, Korea, e-mail: wookim@nongae.gsnu.ac.kr)

1. 서 론

진원에서의 단층운동에 의해 발생한 지진파의 초동과 진폭은 일정한 규칙성을 가지며 분포하는데, 이 규칙성을 바탕으로 단층면해를 구하여 응력장을 추정하게 된다. 단층면해는 P파의 초동극성으로 얻어지는 방법이 일반적이나, 이 경우 진원 주위에 끌고루 관측망이 분포하고 있어야 하는 제한이 있어서 근래에는 소수의 관측점 자료에 대한 파형역산을 통하여 단층면해를 구하는 방법이 많이 쓰이고 있다(예; Dziewonski *et al.*, 1981; Kikuchi and Kanamori, 1991). 그러나, 이

경우도 파형역산을 위해 저주파 기록이 확보되어야 하는데, 한반도에서 주로 발생하는 미소지진의 경우 저주파 파형기록을 확보하는데 어려움이 있다.

이러한 한반도의 고주파 미소지진자료를 이용하여 단층면해를 구하기 위해서는 P파와 SV파의 진폭비(Kisslinger, 1980)를 이용하는 방법이 효과적일 것으로 기대된다. Snoke외(1984)는 Kisslinger의 방법을 발전시켜서 P파, SV파, SH파의 극성과 각각의 진폭비를 이용하는 방법을 개발하였다. 그러나, 가까운 지진의 경우 지진파의 간섭으로 진폭이 왜곡되어 지각구조를 잘 알 수 없는 한반

도에서 진폭비를 이용하는 방법은 결과가 오도될 염려가 있다.

본 연구에서는 이미 Kim & Kraeva (1999)의 저주파 파형합성 연구에 의해 단층면해가 잘 알려져 있는 1997년 6월 26일 경주지진에 대하여 Snoke의 (1984)의 방법을 적용하여 이 방법의 한반도 지진에 대한 유효성을 검증하고자 한다.

2. 자료

1997년 6월 26일 3시 50분 23초에 북위 35° 48.09' , 동경 129° 14.20' 에서 발생한 경주지진은 규모 4.3 으로 1996년 12월에 발생한 규모 4.5의 영월지진에 이어 근래 발생한 큰 규모의 한반도 지진이다. 경주지진은 한국지질자원연구원에서 운영되는 관측망; MKL, DKJ, HAK, BBK, CHS, MAK, KMH, MUN, PCH의 9점 및 교원대학에서 운영되는 관측망; KPO, SBO, CHO의 3점 (Fig. 1)에서 기록되어 자료가 공개되고 있다. 이들 관측망은 미소지진을 기록하기 위한 속도지진계로서 CHS, SBO를 제외한 진앙거리 200 km 이하의 관측망 자료는 포화되어 진폭비를 사용할

수가 없었으며, 40 km 이하의 관측망 자료는 S파 극성도 판독하기 어려운 상태이다(Table 1).

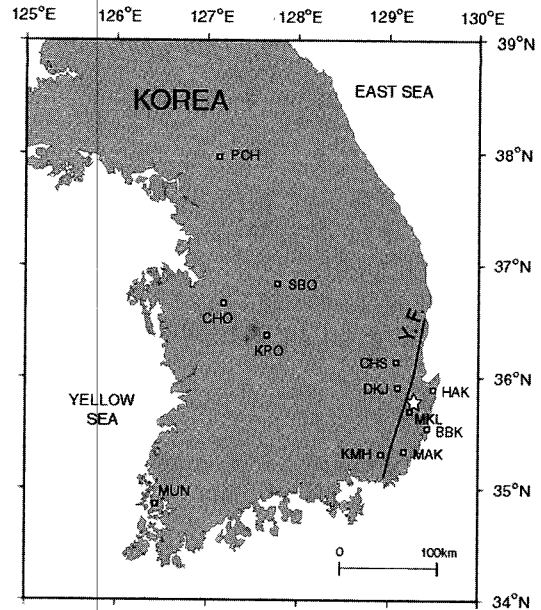


Fig. 1. Station location used in this study (rectangular). The epicenter of Kyong-ju earthquake is denoted as a star. The Yangsan fault (Y.F.) is denoted as a solid line.

Table 1. List of polarities and amplitude ratio from June 26, 1997 Kyong-ju earthquake.

Station	Location		Distance (Km)	Azimuth (degree)	Take-off angle (degree)	Polarities			Amplitude Ratio with Free surface Correction		
	Latitude (N)	Longitude (E)				P	SV	SH	SV/P	SH/P	SV/SH
MKL	35.73	129.24	8.0	175.5	151.3	U					
DKJ	35.94	129.11	19.5	324.5	127.0	U					
HAK	35.92	129.50	27.8	60.0	117.8	D					
BBK	35.57	129.43	30.9	144.0	115.4	U					
CHS	36.17	129.09	43.8	342.6	108.5	U	U	U	0.313	2.905	3.613
MAK	35.36	129.18	48.5	186.0	106.8	U	D	D			
KMH	35.34	128.92	58.3	208.8	70.0	D	U	D			
KPO	36.33	127.74	146.8	293.6	48.8	D	D	U			
SBO	36.80	127.79	170.9	310.5	48.8	U		U			
CHO	36.57	127.23	198.9	295.0	49.0	D		U			
MUN	34.91	126.43	273.3	273.8	49.0	U		U			
PCH	37.96	127.13	304.3	322.0	49.0	U		U			

경주지진은 진원을 중심으로 방위각이 편재되어 P파 극성을 이용한 단층면해가 구해져 있지 않은 상태이다. 본 연구의 사출각(take-off angle)은 김상조·김소구(1983)의 2층 지각 속도구조 모델에 대하여 파선추적법을 이용하여 구하였다.

3. 진폭의 보정

진폭은 속도지진 자료를 적분한 변위자료의 상하 및 Radial 성분에서 P 및 SV파, Transverse 성분에서 SH파의 극성 및 직접파 최대치를 읽어냈다.

진폭을 자료로 이용할 때는 자유표면보정을 행해야 하는데, P파 입사의 경우를 예를 들면, $V_p/V_s = \sqrt{3}$ 이라는 포와송관계가 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 수평성분(3성분계에서 Radial 성분) A_h 와 수직성분 A_v 은 각각 다음과 같이 증폭되어 나타난다(Bullen, 1963).

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

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

이들 증폭된 양을 각각의 성분에서 나누어주는 것이 자유표면보정이다.

수직성분 A_v 와 수평성분 A_h 의 관계에서 얻어지는 식에서

$$\tan \alpha = \frac{A_h}{A_v} \quad (3)$$

α 는 겹보기 반사각이라하며, 입자궤적에서 수직성분과 이루는 각이다. 반사각 e 는 겹보기 반사각 α 와의 관계식,

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

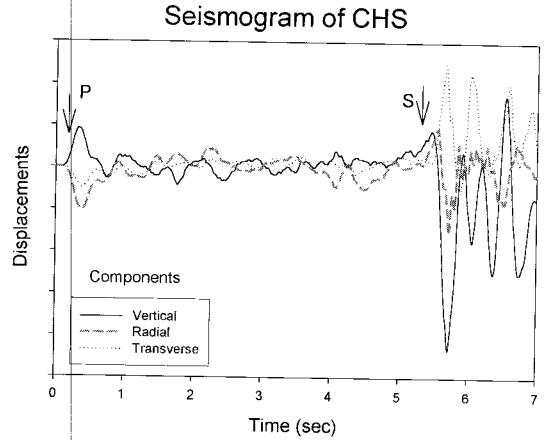


Fig. 2. Displacement seismogram of CHS. The arrivals of direct P and S waves are directed by arrows.

에서 구하여지는 것이다. 자유표면보정은 P파의 상하동 성분 최대값에 대한 Radial 성분 최대값의 역정점값을 겹보기 반사각으로 하여 행하였다. 겹보기 반사각은 P파의 진폭으로부터 구하였는데, 이때 반사각 e 가 30도에서 37도 사이일 때는 자유표면보정값이 불안정하게 된다(예; Munsey and Bollinger, 1985). 본 연구에서는 SBO가 여기에 해당되어 해석에서 제외하였다.

또한 정확한 속도구조 모델이 알려져 있지 않은 관계로 진앙거리 200 km 이상의 자료에서 P 및 S 파 phase를 구분하기가 어려워 결국 CHS 단일 자료에 대해서만 진폭비를 이용하게 되었다(Fig. 2). 가까운 지진의 경우, 복잡한 지각구조로 인하여 직접파 진폭이 상당부분 왜곡될 가능성이 있으나, CHS 자료의 경우 제일 먼저 도달하는 직접파가 가장 진폭이 크고, 후속파의 간섭에 의한 파의 증폭 혹은 감소효과는 상용대수값 0.6 이내라고 가정하였다.

4. 해 석

Snoke의(1984)는 P, S 파 극성 및 진폭비를 이용하여 단층면해를 구하는 FOCMEC(FOCal MEChanism determination)이라는 공개프로그램을 제작하였다. FOCMEC은 B축(주압력축 P와 주장력축 T축에 직교하는 축; 혹은 두 절단면

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

FOCMEC은 P, S와 극성자료만으로도 해석이 가능하도록 고안되었는데, 본 자료에서 극성자료만으로는 단층면해가 도출되지 못하였다. CHS의 진폭비 자료를 추가한 결과, B축의 trend와 plunge 가 $110 \pm 5^\circ$ 와 $16 \pm 6^\circ$, 주향, 경사, 면선각은 한 절단면에서 $150 \pm 4^\circ$, $63 \pm 6^\circ$, $65 \pm 7^\circ$, 또다른 절단면에서 $18 \pm 12^\circ$, $26 \pm 3^\circ$, $120 \pm 5^\circ$ 라는 값이 도출되었으며, 이는 주향이동이 포함된 역단층을 의미한다(Fig. 3). 이 단층면해는 Kim and Kraeva(1999)가 인천에 위치한 광대역지진계의 저주파 기록을 역산하여 얻은 결과와 거의 일치하며, 양산단층 일대의 미소지진을 복합단층면해에 의해 도출한 이기화 · 정태웅(1999)의 결과와도 일치하고 있다(Fig. 4).

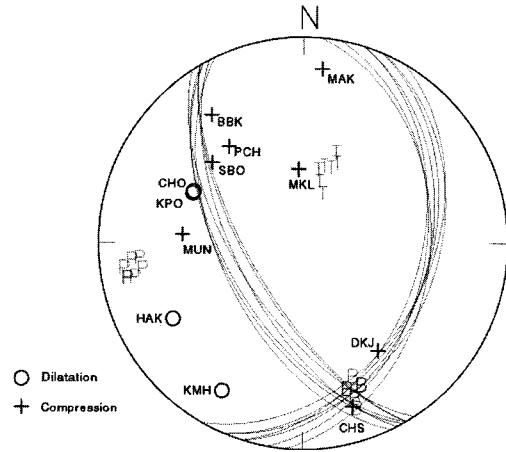


Fig. 3. Fault plane solutions for the June 26, 1997 Kyong-ju earthquake. The characters, P, T and B represent the orientation of compressional, dilatational, and null stress- axis, respectively.

5. 토 의

자료가 한정되어 극성자료에 의한 단층면해를 구할 수 없었던 경주지진에서 진폭자료가 첨가될

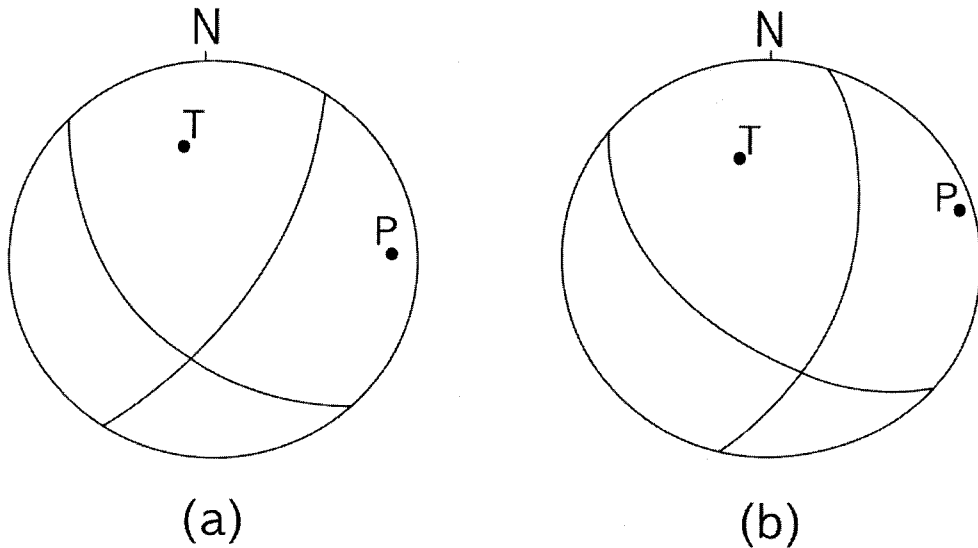


Fig. 4. Previous results of fault plane solutions denoted by nodal lines and stress axis of compression and dilatation: P, T. (a) is obtained from the moment tensor inversion (Kim and Kraeva, 1999), and (b) from the composite fault-plane solution (Lee and Chung, 1999).

경우, 저주파 역산해 및 복합단층면해와도 일치하는 단층면해를 구할 수 있어서 이 방법이 매우 효과적이라는 사실을 확인하였다. 근거리 지진의 지진파는 서로 간섭하여 진폭이 왜곡되는 것으로 알려져 있으나, CHS 자료의 경우, 최대 P 및 S 파는 직접파이며, 비교적 앞부분에 최대진폭이 나타나, 간섭의 영향이 적은 것으로 사료된다.

본 연구결과 및 저주파 역산해가 양산단층 지역의 복합단층면해와 일치하는 것은 경주지진이 양산단층의 활성운동에 의한 것임을 뒷받침하고 있다. 양산단층은 Lee·Na(1983)의 미진활동 관측에 의해 처음으로 활성임이 주장되었으며, 최근에는 트랜치 조사에 의해 제4기 후기까지의 활동 가능성이 제시된 바 있다(경제복 외, 1999).

한반도 주변부에서 발생한 지진의 단층면해 연구를 통하여 얻어진 남한의 주 압축응력장 방향은 ENE-WSW이다(Jun, 1990; 1991, 한국자원연구소, 1994; 박창업외, 1998; 이기화·정태웅, 1999). 이와같은 동서방향의 주압축응력장은 동해 지역에서도 Harvard 연구팀에 의한 여러지진의 대체적인 단층면해에서 확인된다(<http://www.seismology.harvard.edu/CMTsearch.html>). 일본열도의 경우는 태평양판과 필리핀해판이 유라시아판 밑으로 침강하면서 일어나는 지진이 호상열도의 복잡한 지질구조와 연관되어 다양한 단층면해를 나타내고 있으나, 대체로 응력장 방향은 동서방향을 나타내고 있다(예; Le Pichon *et al.*, 1998). 따라서 한반도, 동해 및 일본지역은 유라시아판 남서부에서 인도-오스트레일리아 판과의 충돌이 유라시아판 내부로 전달되는 응력과 태평양판 및 필리핀해판이 유라시아판 하부로의 섭입에 의해 전달되는 응력이 ENE-WSW 방향 혹은 E-W 방향으로 상호작용하여 한반도 내의 주요 약대를 재활성화시키면서 발생한다고 사료된다(Kyung *et al.*, 1996).

사 사

본 논문은 제1저자의 1999년도 한국학술진흥재단의 대학교수 해외파견 연구지원에 의하여 연구되었음을 밝힙니다.

참고문헌

- 경제복, 이기화, Okada, A., Watanabe, M. Suzuki, Y., and Takemura, K., 1999, 양산단층계 남부 상천리 일대의 트랜치조사에 의한 단층특성 규명, 지구과학회지, 20, 101-110.
- 김상조, 김소구, 1983, 지진파를 이용한 남한의 지각구조 연구, 광산지질, 16, 51-61.
- 박창업, 신진수, 지현철, 강익범, 류용규, 1998, 1996년 12월13일 영월지진의 진원단층면 방향, 지구물리, 1, 23-30.
- 이기화, 정태웅, 1999, 1996년 양산단층 일대의 미소지진을 이용한 복합단층면해, 지구물리, 2, 235-240.
- 한국자원연구소, 1994, 지진연구, 연구보고서 KR93-1G-4, 41.
- Bullen, K. E., 1963, An introduction to the theory of seismology, 3rd ed., Cambridge University Press, 381 pp.
- Dziewonski, A. M., T. A. Chou, and J. H. Woodhouse, 1981, Determination of earthquake source parameters from waveform data for studies of regional and global seismicity, Journal of Geophysical Research, 86, 2825-2852.
- 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 H. Kanamori, 1991, Inversion of complex body waves-III, Bulletin of the Seismological Society of America, 81, 2335-2350.
- Kim, S. G., and N. Kraeva, 1999, Source parameter determination of local earthquakes in Korea using moment tensor inversion of single station data, Bulletin of the 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 of the Seismological Society of America, 70, 999-1014.
- 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. and S. H. Na, 1983, A study of microearthquake activity along the Yangsan Fault, Journal of the Geologic Society of Korea, 19, 127-135.
- Le Pichon, X., S. Mazzotti, P. Henry, and M. Hashimoto, 1998, Deformation of the Japanese Islands and seismic coupling: an interpretation based on GSI

- permanent GPS observations, *Geophysical Journal International*, 134, 501-514.
- Munsey, J. W., and G. A. Bollinger, 1985, Focal mechanism analyses for Virginia earthquakes (1978-1984), *Bull. Seism. Soc. Am.*, 75, 1613-1636.
- Snoke, J. A., J. W. Munsey, A. G. Teague, and G. A. Bollinger, 1984, A program for focal mechanism determination by combined use of polarity and SV-P amplitude ratio data, *Earthquake Notes*, 55, 15.

2000년 9월 28일 원고접수
2000년 12월 20일 원고채택