

개인용 컴퓨터에 의한 지진의 진원인자 결정

김소구* · 김태우*

Determination of Hypocenter Parameters Using a Personal Computer

So Gu Kim* and Tae Woo Kim*

ABSTRACT: The parameters of the Korean earthquake have been determined by the manual method, which results in consuming more time and more errors. In this study we used HYPO71PC to determine earthquake parameters and to identify unknown active faults and lineaments in South Korea. The epicenters determined by the new computer technique are almost identical with the manual method of Korea Meteorological Agency. It is also found that most of epicenters are coincident with unknown faults that are defined as the un-determined faults on the tectonic map of Korea, and/or structural lineaments in South Korea.

서 언

1991년 한해 동안 본 교에서, MEQ-800 (sensor S-7000) 과 PS-2 (sensor SS-1)에서 지진을 측정하였다. 이 자료와 기상청에서 측정된 지진자료를 토대로 지진 인자를 산출했다. 이 기초 자료는 여러 경험적 작도 또는 그래프 해석 방법보다 신속하고 정확한 전산처리 방법중의 하나인 HYPO71PC를 이용하여 처리되었다. 이것은 국지 지진 인자, 즉 진원 규모, 초동 형태 등을 찾는 데 쓰이던 범용 컴퓨터 프로그램인 HYPO71 (Lee and Lahr, 1975)에서 IBM PC (80387)에 호환이 되는 FORTRAN 77으로 작성된 HYPO-71PC이다. 이전 것보다 기능면에서나 계산능력면에서나 향상된 것이다. 전산 해석결과와 기상청에서 발표한 진앙 결과는 지체 구조도 (한국동력자원연구소, 1984)에 표시하여 비교 검증해 본 결과, 상호 단층에 일치하는 것도 있고 차이를 보인 것도 있었다. 본 연구에서는 지진 인자들을 광범위하게 결정하는 HYPO71PC를 이용하여 한반도 지진인자 결정의 적합한 방법을 찾아 본다. 경제적이고, 신속한 전산처리를 통해 아직 확실하게 알려지지 않은 활단층 지역을 규명하고, 또한 새로운 활단층 지역을 탐사하는데 응용하여, 이 전산해법이 유력한 기대 효과를 가져다 줄 것을 제안하고자 한다.

지진 규모 결정

지진규모 산정에는 단층면위 면적, 지진파의 최대진폭, 신호의 지속시간 등 여러 학자들에 의해 다양한 각도로 산출 되어왔다. 그 중에서 Lee et al. (1972)는 USGS에 의해 측정된 351개의 지진기록을 이용해서 신호의 지속 시간에 관한 지진 규모를 결정하는 경험식을 산출했다.

$$M = -0.87 + 2.00 \log \tau + 0.0035 \Delta \quad (1)$$

M : estimate of Richter magnitude

τ : signal duration (sec)

Δ : epicentral distance (km)

이후에, 여러 학자들이 연구한 지진파 지속규모 (signal duration magnitude)의 model은 보통, 다음과 같이 주어진다.

$$M_D = a_1 + a_2 \log \tau + a_3 \Delta + a_4 h \quad (2)$$

혹은,

$$M_D = a_1 + a_2 \log \tau + a_3 \Delta$$

τ : signal duration (sec)

Δ : epicentral distance (km)

h : focal depth (km)

* 漢陽大學校 地球海洋科學科 (Dept. of Earth and Marine Sciences, Hanyang University, Ahnsan 425-751, Korea)

윗 식의 상수 a_1, a_2, a_3, a_4 는 Richter 규모와 함께 correlating signal duration, 진앙, 진원 깊이 등에 의해 결정된다. 지속시간은 지진동이 시작한 초동에서 끝날때까지의 잡음(noise)을 제거한 연속적인 실제 지속시간을 의미 한다. 이 잡음은 지진계 filter 즉, low-cut/high pass filter 또는 high-cut/low pass filter를 통해서 제거될 수 있다. 신호 지속(signal duration) 방법은 미소지진 관측소에서 널리 사용 되어 왔다(Adams, 1977; Lee and Wetmiller, 1978). 국내의 경우는 미소지진(규모 2~3 내외)이 주로 발생하기 때문에, 또한 미소지진은 고주파(high frequency)이며 주기를 읽기 어렵기 때문에 지진파 신호 지속 규모 결정 모델을 사용함이 타당하다고 본다. 기초 자료가 더 많이 모이면 안산 지역의 지각 모델을 산출하여 기본상수를 결정할 수 있다. 본 연구에서 사용한 것은 지속규모 모델로서, 이것으로 규모를 결정한 뒤 기상청 결과와 비교하였다.

진앙 결정

진앙 위치결정을 위해서 Geiger's Method를 이용하였다. 진원관측에서 우리는 4차원 즉 시간좌표 t , 그리고 공간좌표 x, y, z 를 생각한다. 따라서, 공간에서 vector $\bar{\chi}$ 는 다음과 같다.

$$\bar{\chi} = (t, x, y, z)^T \quad (3)$$

여기서 T 는 transpose 표시이다.

진원은 관측소 (x_k, y_k, z_k) , $k=1, 2, \dots, m$ 에서의 도착시간 τ_k 를 사용했을때 진원과 진원시는 trial vector $\bar{\chi}^*$ 로 Euclidean 공간에서 나타내면 다음과 같다.

$$\bar{\chi}^* = (t^*, x^*, y^*, z^*)^T \quad (4)$$

여기서, t^*, x^*, y^*, z^* 는 초기 추측 진원시와 진원 좌표(trial hypocenter parameter)로 가정한다. χ^* 에서 k 번째 관측소에 도달하는 이론 도달시간 t_k 는

$$t_k(\chi^*) = T_k + t^* \quad k = 1, 2, \dots, m \quad (5)$$

로 나타낸다. 여기서 T_k 는 이론 주행시간, 그리고 t^* 는 추측 진원시이다. 우리가 만약 k 번째 관측소에서의 도착시간 residual r_k 를 관측시간과 이론 도달시간의 차로 나타내면 다음과 같다.

$$r_k(\chi^*) = \tau_k - t_k(\chi^*) \quad (6)$$

$$= \tau_k - (T_k + t^*) \quad k = 1, 2, \dots, m$$

Geiger는 Gauss-Newtonian Method 를 활용해 진원과 진원시는 윗 식 (6)을 최소 자승화 하므로 수행 하였다.

$$F(\chi^*) = \sum_{k=1}^m [r_k(\chi^*)]^2 \quad (7)$$

윗 식을 최소자승 방법에 의해 풀기 위해서는 공간과 시간좌표를 각각 미분해서 0이 되면 되기 때문에 비선형 최적모델에서 결국 m 개의 선형 연립 방정식이 산출되게 된다. 또한, m 개의 선형 연립방정식과 4개의 미지수 결정을 위해서 4개의 동시 연립 방정식인 normal equation으로 축소된다. 즉

$$G \cdot \delta \chi = \rho \quad (8)$$

$$G = \begin{pmatrix} m & \Sigma a_i & \Sigma b_i & \Sigma c_i \\ \Sigma a_i & \Sigma a_i^2 & \Sigma a_i b_i & \Sigma a_i c_i \\ \Sigma b_i & \Sigma a_i b_i & \Sigma b_i^2 & \Sigma b_i c_i \\ \Sigma c_i & \Sigma a_i c_i & \Sigma b_i c_i & \Sigma c_i^2 \end{pmatrix}$$

$$\rho = (\Sigma r_k, \Sigma a_k r_k, \Sigma b_k r_k, \Sigma c_k r_k)^T \quad (10)$$

여기서 $a_k = (\partial T_k / \partial x) |_{x^*}$, $b_k = (\partial T_k / \partial y) |_{x^*}$, $c_k = (\partial T_k / \partial z) |_{x^*}$ 이다.

식 (8)을 풀어서 $\delta \chi$ 를 구하고 χ^* 를 $\chi^* + \delta \chi$ 로 놓고 계속 반복해서 풀어나가면 진원시 t 와 진원 (x, y, z) 를 구할 수 있다. 방정식 (8)은 4개 이상의 관측값만 가지면 풀수 있으나 이들 관측소가 진원을 중앙으로 배치가 골고루 분포되어 있지 않을 때는 위 행렬식은 부적합(ill-condition)이 된다. 또한 지진 관측소가 대부분 지표위에 설치되어 있기 때문에 역시 진원 깊이 결정에는 어느 인자보다 오차가 따라온다.

자료 해석 및 결과

본 논문에서 다룬 지진 자료는 본과에서 소지한 지진계를 이용하여 한 해 동안 관측된 자료와 기상청에서 측정된 자료를 수집하여 HYPO71PC에 입력시 필요한 기초자료를 지진 기록지에서 얻었다(Fig. 1). 지진을 결정하기 위해서는 기본적으로 3개 이상의 지진 관측소에서 측정된 자료가 있어야 한다. 얻어진 기초 측정자료로부터 프로그램을 이용해 각각의 지진인자들을 결정 하였다. Table 1은 한반도 남한의 각 지진 관측소의 위치를 나타내며

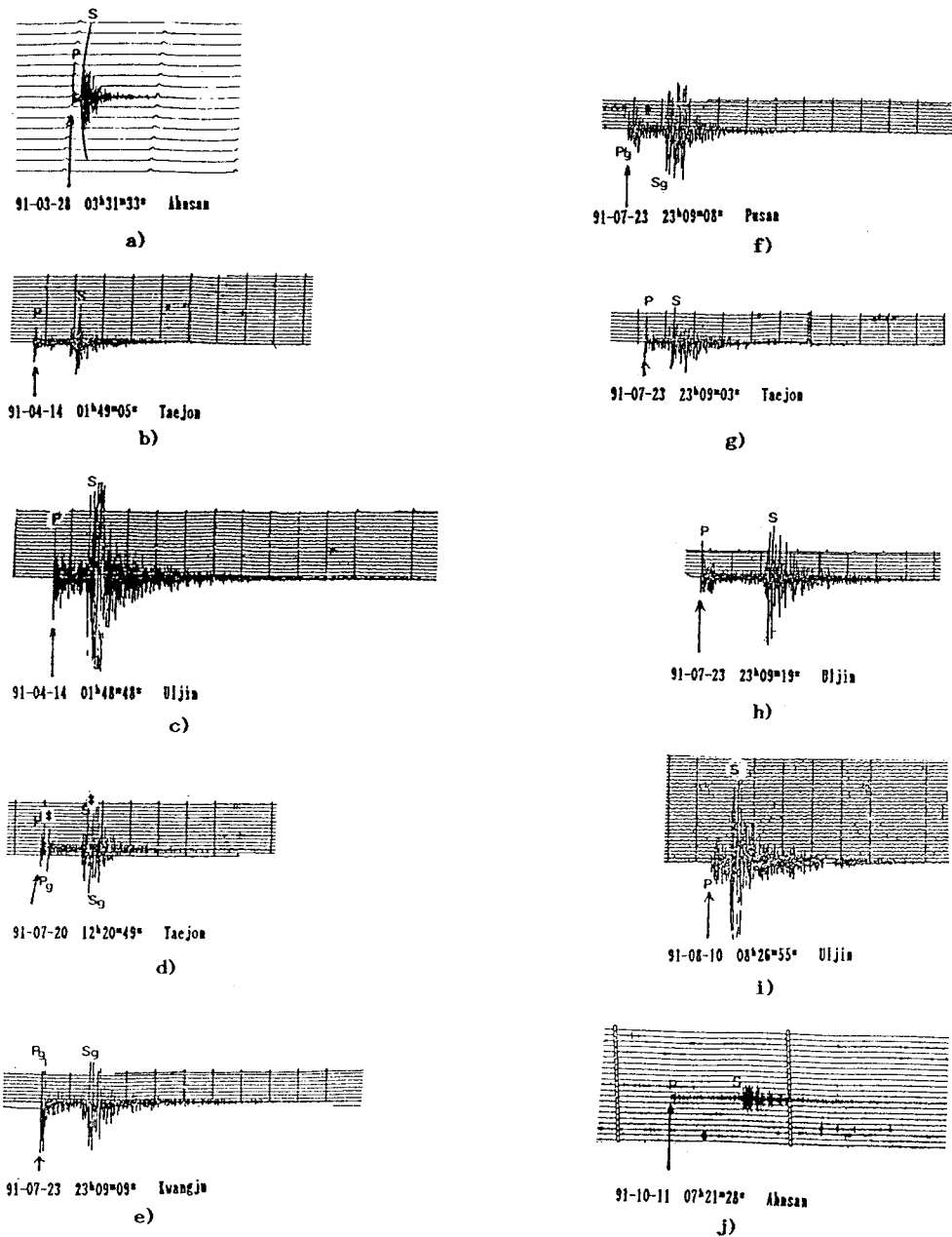


Fig. 4. Seismograms from local seismic station network in Korea.

Fig. 2는 이들을 지도에 도시한 것이다. 지진 인자를 결정하는 흐름도는 Fig. 3에서 보여 준다. HYPO71PC를 이용해서 얻은 결과는 진원시, 진앙 위치, 진원 깊이, 규모, 진원 mechanism이다. 특이할만한 사실은 결과에 대한 분석 자료의 신뢰성도 평가 되어진다. 규모결정은 일본

표준 지진계에서 고려하는 Tusboi 방식 대신에 F-P 지속 시간법을 택했다. Fig. 4는 다른지진 자료보다 관측 자료가 많은 1991. 7. 23. 경남 거창 지진의 focal mechanism을 그래픽으로 재현한 결과의 일부이다. 이 그림은 최적의 결과를 나타내며 프로그램 자체에서 지원하는 그래픽이다.

Table 1. Seismic Station Network in Korea.

Stations	Latitude	Longitude
Seoul	37° 34'	126° 58'
Pusan	35° 06'	129° 02'
Kwangju	35° 08'	126° 55'
Taejon	36° 18'	127° 24'
Kangrung	37° 45'	128° 54'
Taegu	35° 53'	128° 37'
Ullin	36° 59'	129° 25'
Sosan	36° 46'	126° 28'
Chunchon	37° 54'	127° 44'
Cheju	33° 17'	126° 10'
Chupungryong	36° 13'	128° 00'
* Ahnsan	37° 20'	126° 48'

* H.Y.U. Station

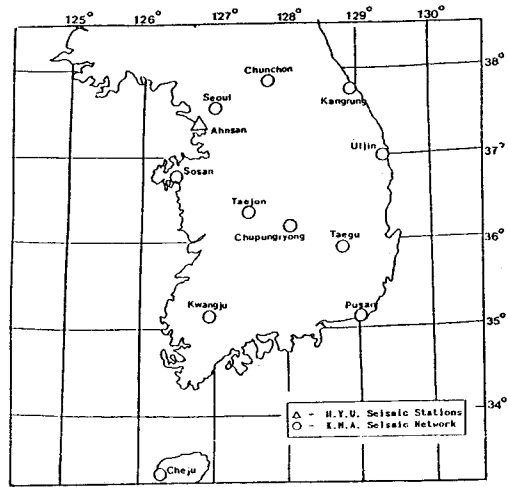


Fig. 2. Seismic station network in Korea.

그림에서 보는 바와 같이 국내 지진의 응력 방향은 북북서 방향으로 (Kim, 1980; Jun, 1990) 남한 및 일본 구주지역의 응력분포 (stress distribution)와 일치한다 (Otsuka와 개인 논의, 1990). Table 2는 1991년 1월부터 10월까지 발생한 지진 parameter를 HYPO71PC를 이용하여 분석해 본 결과이다. 기상청에서 발표한 것과 비교하여 나타냈다.

논 의

한반도 지각 모델에 대한 충분한 연구가 필요하다. 남한의 지각모델은 연구 된 바가 있으나 (김상조, 김소구, 1983) 더욱 수정 보완된 자료가 시급하다. 더우기 북한의

지각 모델을 산정하면 한반도 전체 지각 모델을 통해, 국내지진의 진원 parameter를 재결정하고 새로운 단층구조를 밝히는 것 외에도 인공지진을 전산화 모델을 통해 정확히 밝혀낼 수 있게 된다. 현재 이 연구에서 이용한 잠정적인 지각 모델은 일부 지각 지질단면도 (Kobayashi, 1944)와 지진파 관측 (Kim, 1991)에 의거해서 취해진 것이다. 현재까지는 앞서 언급한 지각모델이 지진 관측자료와 잘 일치함을 발견했다. 지진 관측소에 대한 지층 모델 자료 또한 시급하다. HYPO71PC 가 요구하는 자료에는 진앙지역 및 관측소의 지각모델, delay model 등이 있다.

Table 2. Comparison of Hypocenter Parameters Determined by HYPO71PC and K.M.A. (1991. 1.~1991. 10.).

No.	Date (Y-M-D)	Origin Time (H : M : S)	Hypocenter LAT.(N) LONG.(E)	Focal Depth (km)	Nag.	Comments
1	91-03-28	K.M.A. HYPO71PC 03:31:32.08	37° 00.00' 126° 24.00' poor data		2.70	Dangjin, Chungnam *felt
2	91-04-14	K.M.A. HYPO71PC 01:48:32.05 01:48:45.86	36° 30.00' 128° 42.00' 36° 30.00' 128° 34.77'	30.00	2.70 2.85	Eusung, Kyongbuk *felt
3	91-04-27	K.M.A. HYPO71PC 20:01:01.00 20:00:55.56	36° 06.00' 127° 12.00' 36° 05.87' 127° 13.29'	10.64	3.00 3.19	Taejon *felt
4	91-07-20	K.M.A. HYPO71PC 12:20:30.00 12:20:22.14	35° 18.00' 127° 54.00' 35° 14.96' 127° 47.36'	5.00	3.10 3.05	Sanchong, Kyongnam
5	91-07-23	K.M.A. HYPO71PC 23:08:50.00 23:08:41.31	35° 36.00' 128° 00.00' 35° 41.04' 128° 02.96'	2.01	3.10 3.19	Guhchang, Kyongnam
6	91-08-10	K.M.A. HYPO71PC 08:26:45.90 08:26:37.98	36° 30.00' 129° 42.00' 36° 35.82' 129° 31.00'	0.24	2.70 2.87	Ullin, Kyongbuk (near shore)
7	91-10-11	K.M.A. HYPO71PC 07:20:46.04 07:20:44.95	36° 48.00' 129° 18.00' 36° 51.33' 129° 12.29'	20.00	3.20 3.23	Youngyang, Kyongbuk

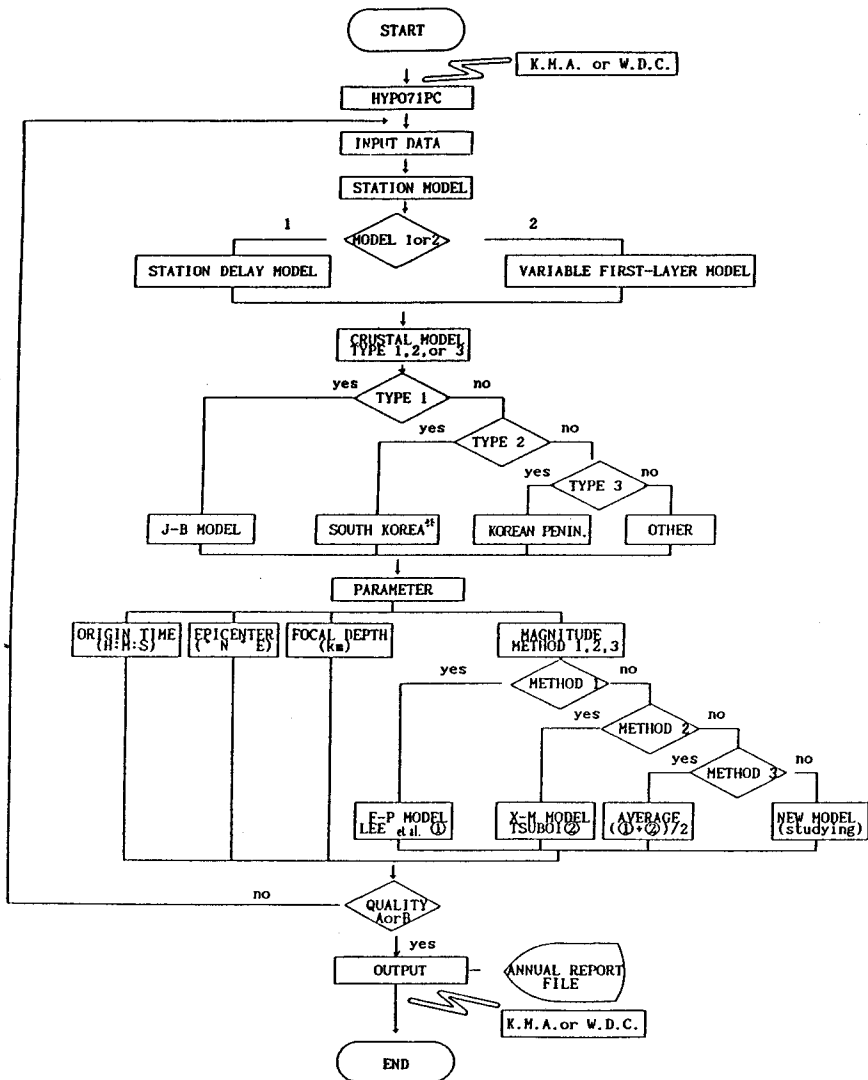


Fig. 3. A HYPO71PC flowchart showing determining earthquake parameters. *; Tentative model is the central part of Korea based on geological section (Kobayashi, 1944), K.M.A.; Korea Meteorological Agency, and W.D.C.; World Data Center.

지진 관측소 위치의 위도, 경도 값이 세밀할수록 더 좋은 분석 자료를 기대할 수 있다. 따라서, 지진 관측소의 정확한 지각모델과 그에 따른 자료가 더 많이 수집되면 신뢰할만한 결과를 잘 얻을 수 있다.

이 전산 해법으로 많은 자료를 이용하여 새로운 활단층 지역을 신속하게 채울 수 있다. 즉, 계속 지진 자료를 수집하여 HYPO71PC를 이용해 정확히 진앙 위치를 구하여 단층이 없다고 알려진 곳에 분포되는 정도를 보아서 간접적으로 알려지지 않은 새로운 활단층을 채울 수 있다.

새롭게 발견된 활단층 지역은 산업 구조물 부지를 선정하는데 있어서 절대적인 고려 대상이 된다.

분석된 자료가 좋지않은 것은 기초측정 자료의 재분석과 더불어 진원깊이를 다시 가정 하여야 한다. 좋은 자료를 얻기 위해서는 모든 진원은 골고루 분포된 지진 관측소에서 발생하고, 또한 지진계 분포는 수평면 보다는 지하 수직으로 분포 되어야 한다. 어려운 문제는 지진 기록자체가 명확하지 않아 재구성을 하는 작업이다. 이런 부류의 자료는 기초 측정시에 많은 오차를 수반하기에 많은 경

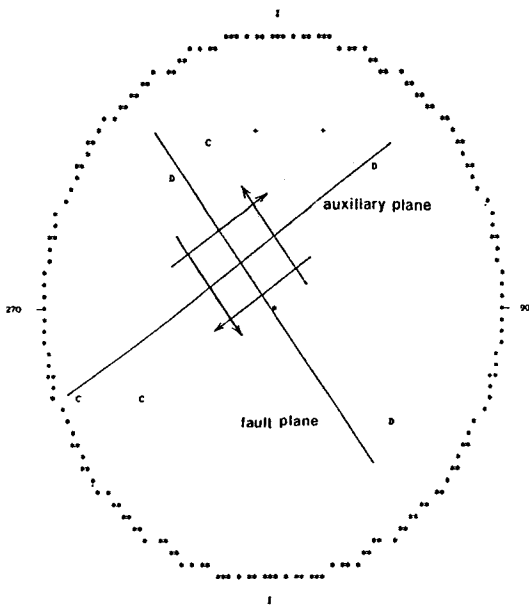


Fig. 4. A output of focal mechanism (from 91-07-23) C; Compression, D; Dilatation, and +; Poor Compression.

험을 요구하게 된다.

결론

본 연구에서, 이상의 결과들을 종합해 볼 때 다음과 같은 결론들을 얻을 수 있다.

1. 전산 해법으로 얻은 진앙위치를 지체 구조도 (한국 동력자원 연구소, 1984)에 도식한 후 비교하였다 (Fig. 5). 그 결과, No. 2, No. 4, No. 7은 미결정 단층에 위치한다. No. 3은 백악기말에서 제 3기로 추정되는 단층에 위치한다. No. 5는 미결정 단층 근처에 위치하고 있는 것으로 결과가 좋지 않고, No. 6은 단층위치와 검증이 되지 않았지만 분석이 우수한 것으로 보아 해당 단층이 있는 것으로 추정된다.

2. 일반적으로, 지진관측 결과는 P와 초동의 압축과 팽창분석이 4분 면성을 지닌다는데 기초를 둔 지진 mechanism은 single couple moment와 double couple moment인 두 가지로 해석할 수 있다. 그럼 4에서 보면 각

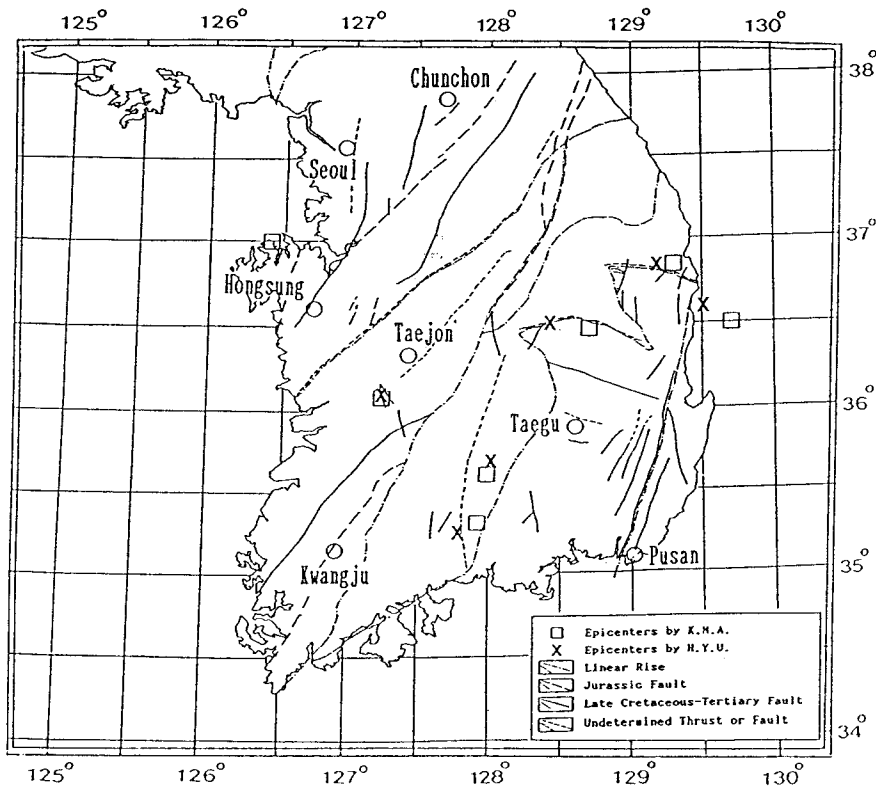


Fig. 5. A active fault map as compared with hypocenters determined by H.Y.U stations and K.M.A. stations.

4분면에서 압축과 팽창이 한쌍을 이루는 double couple를 잘 보여주며 구조응력 방향은 북북서 방향임을 알 수 있다. 또한, 오늘날 대부분의 focal mechanism은 double couple 운동을 한다는 것이 판명 되었다 (김상조, 김소구, 1982).

3. 대전 지진 관측소에서 측정된 지진파는 2개 이상의 위상을 동반한다. P*, Pg 등의 초동 등이 그 예이다. 진원 깊이도 수 km 미만인 것으로 미루어 보아 대전 지역은 Conrad 불연속면이 존재해서 지진파가 이 불연속면에서 굴절되어오는 것으로 추정된다.

4. Table 2에서 비교해서 나타낸 F-P 지속시간 모델에서 정한 규모값과 기상청이 Tsuboi 식에서 결정한 값은 매우 일치함을 볼 수 있다. 본 연구에서 규모 결정을 위해 사용한 F-P 지속모델의 규모값과 기상청 규모와의 표준 편차는 0.066이다.

사 사

본 연구를 수행함에 있어서, 지진 관측 자료를 제공해 준 기상청 관측실에 계시는 여러분과 김상조 관측과장님께 깊은 감사를 드린다.

참고문헌

金尚照, 金昭九 (1982) 韓國 地震의 메카니즘 解析. 대한광산학회지. 19권, p. 165-170.
 金尚照, 金昭九 (1983) 地震波를 利用한 南韓의 地殼構造 研究.

대한광산지질학회지, 16권, p. 51-61.
 Adams, R.D., ed. (1977) Survey of practice in determining magnitudes of near earthquakes. Part 2. Europe, Asia, Africa, Australia, and Pacific. World Data Cent. A Solid Earth Geophys. SE-8, p. 1-67.
 Kim, So Gu (1980) Earthquakes of the Korean Peninsula and Its Vicinity (Seis-mic Risk of the Korean Peninsula and Plate Tectonics). BULL. IISEE, v. 18, p. 101-126.
 Kim, So Gu (1991) Determination of Q-Factors of Body Waves and Source Parameters for Earthquakes in the Korean Peninsula. Basic Science, v. 10, p. 195-203.
 Kobayashi, T. (1944) On the Cambrian Sea Connection Between South Chosen and Eastern Teinchan. Proc. Imperial Academy, v. 20.
 Jun, Myung-Soon (1990) Source Parameters of Shallow Intraplate Earthquakes in and Their Tectonic Implication. Uppsala Univ., p. 3-16.
 Lee, W.H.K., Bennett, R.E. and Meagher, K.L. (1972) A Method of Estimating Magnitude of Local Earthquakes from Signal Duration. U.S. Geological Survey Open File Report, p. 1-15.
 Lee, W.H.K. and Stewart, S.W. (1981) Principles and Applications of Micro-earthquake Networks. Academic Press, p. 122-134, p. 153-157.
 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. Geol. Sur. Open-File Rep. (U.S) 75-311, p. 1-116.
 Lee, W.H.K. and Wetmiller, R.J. (eds.) (1978) Survey of practice in determining magnitudes of near earthquakes. Part 1: North, Central, and South America. World Data Cent. A Solid Earth Geophys., Rep. SE-9,1-102.
 Um, S.H. and Chun, H.Y. (1984) Tectonic Map of Korea. Korea Institute of Energy and Resources.