

초동극성분포를 이용한 홍성지진의 Focal Mechanism 연구

A Study on the Focal Mechanism of the Hongsung Earthquake from the P-Wave Polarity Distributions

김준경(Kim, Joon Kyung)

한국원자력 안전기술원

요 약

본 연구에서는 P파형의 초동극성 분포를 이용하여 홍성지진의 Focal Mechanism을 평가하였다. 비선형 전산처리과정을 이용하여 원지진진앙거리에서 관측된 9개의 P파형의 초동극성 분포와 주향, 경사 및 상반변위방향의 변화로부터 구한 Focal Mechanism과의 부합성을 조사하였다. 위의 과정을 이용하여 처리한 결과 주단층면의 주향 및 경사는 약 247도 및 약 78도로서 홍성부근지역의 선구조와 잘 일치함을 보여주었다. 그러나, 주단층면의 상반변위 방향은 약 40도에서 약 160도까지의 광범위한 값을 보여주었으나, 이는 관측점의 방위각 분포가 불충분하기 때문인 것으로 분석되었다. 위에서 결정된 Focal Mechanism이 의미하는 주응력 방향은 일본 트렌치를 따라서 태평양판이 유라시아판 아래로 Subduction할 때 가능한 지응력장과 상반되지 않음을 보여 주었다. 또한, 이러한 Focal Mechanism으로부터 원자력발전소나 핵폐기물 처리장 및 처분장 건설시, 부지고유응답 스펙트럼 및 강지진동 자료와 같은 내진설계기준을 위해 필요한 한반도의 지진지체구조 특성에 대한 정보를 얻을 수 있다.

Abstract:

The focal mechanism of the Hongsung Earthquake (1978. Oct. 7, $M_L = 5.0$, Latitude 36.62N, Longitude 126.67E) was evaluated using the polarity distribution of the P-Waveforms. Through the non-linear computer process, the compatibility of polarity distributions of the 9 P-Waveforms observed at teleseismic distances from the Hongsung Earthquake epicenter was investigated to those of the focal mechanism determined from the varying strike, dip and rake angles. The resultant values for the strike and dip angle of the principal fault plane, which apparently matches very well the surface lineament of the Hongsung region, are determined to be about 247 degree and 78 degree with uncertainties, respectively. However, the rake angle of the focal mechanism has wide range of 40 degree to 160 degree, which is mainly due to the poor coverage of the azimuthal angle of the observed seismic stations. Due to the consistency of principal stress axes, the resultant focal mechanism could support the current stress regime of that region, which may be caused by subduction of the Pacific Plate under the Eurasia Plate along the Japan Trench. It also provides information of seismic source characteristics of the part of the Korean Peninsula for aseismic design criteria such as Site Specific Response Spectrum and Strong Ground Motion Time History for the nuclear power plants and related nuclear waste disposal facility sites.

1. 서 론

근간에 이르러 원자력관련시설물 즉 원자력 발전소나 핵폐기물 처리장 및 처분장 건설의 안전성에 관하여 국민의 관심이 고조되고 있다. 뿐만 아니라 원자력관련시설물 부지안전의 절대적 중요성을 고려하여 볼 때, 원자력관련 시설물의 내진 설계에 직결되는 우리나라 고유의 지진지체구조 특성(Seismotectonic Characteristics)에 부합되는 지진원의 제반적인 특성에 대한 연구는 중요한 의미를 갖는다 하겠다.

지진원특성을 고려하는 목적은 대체로 두가지 방향으로 요약가능하다. 첫째, 지진원의 특성을 나타내는 Seismic Source Time Function, Stress Drop, Rupture Velocity 및 Rupture Mode, Seismic Moment (M_0)와 같은 매개변수 각각으로부터 단층의 길이 및 단층면위의 Patch의 분포상태등과 같은 지진원의 물리적 특성의 유추가 가능하다(Kanamori and Anderson, 1975). 이러한 물리적 특성의 규명을 통하여 지진발생 메카니즘의 성인 및 지진 지체구조 특성에 대한 설명이 가능하다. 둘째, 지진현상의 결과로서 탄성에너지가 지구 매질을 전파할 때, 지진원의 물리적 특성이 여러가지 내진구조물의 지반하부에서의 지진동에 어떠한 형태로 영향을 끼치는 가를 고려하는 일이다. 후자의 예로서 원자력 관련시설물의 내진설계를 위한 입력자료인 부지응답스펙트럼(Site Response Spectrum) 및 지진동시간이력곡선(Ground Motion Time History)이 있고, 이들은 가동중 및 건설중인 원자력발전소나 관련 핵폐기물 처분장 건설에 따르는 구조물의 내진설계에 가장 기초적이고 필수적인 입력자료이다(U.S.NRC, 1981).

우리나라의 현실을 살펴보면 현재까지 부지응답스펙트럼 제작시 가장 기본적이고 직접적인 자료인 강지진동(Strong Ground Motion) 자료가 전무하여 외국의 기준 즉 미국 원자력 규제위원회(Nuclear Regulatory Commission)에서 발행한 규제지침(Regulatory Guide) 1.

60종의 표준응답스펙트럼(Standard Response Spectrum) (U. S. Atomic Energy Commission, 1973)을 따르고 있는 실정이다. 그러나, 한반도에 진앙지를 두고 있는 의미있는 강지진동 자료는 없다고 하더라도, 1900년대 이후에 발생한 지리산 쌍계사 지진(1936년), 포항앞바다 지진, 북한지역지진 및 홍성지진등과 같이 중간규모(4.0-6.0)의 지진으로부터 여러 범위의 진앙거리에 위치한 세계표준지진망(WWSSN) 및 GDSN(Global Digital Seismic Network)에서 관측된 변위파형의 이용이 최소한 가능하다. 이와 같이 우리나라 혹은 미국 동부지역과 같이 강지진동 자료가 거의 전무하거나 불충분한 지역에서의 문제점을 해결하는 하나의 대안적 방법으로서, 여러범위의 진앙거리로 부터 도출된 지진원 특성을 부지응답스펙트럼 및 지진동시간이력곡선 작성을 위한 기본 자료로서 간접적으로 제공할 수 있다.

홍성지진은 리히터스케일로 약 5.0(동자연, 1981)으로 임의의 지진지체구조구의 지구응력장을 적절히 대표할 수 있는 중간규모로 평가되어 있기 때문에, 한반도의 지응력장, 그에 대한 성인, 한반도의 지진지체구조 특성 및 나아가서는 부지응답스펙트럼 및 지진동시간이력곡선 작성을 위한 연구에 매우 중요한 지진으로 평가할 수 있다. 홍성지진에 대하여 지질학적 및 지구물리학적편을 고려한 연구보고서가 다수 발표된 바 있으나(김소구, 1979; 서정희, 1979; 이기화외, 1980; 김상조, 1980; 동자연, 1981; 김준경, 1990), 한반도 지응력장의 성인, 한반도의 지진지체구조 특성 및 더우기 부지응답스펙트럼 및 지진동시간이력곡선 작성을 위한 연구에 매우 중요한 단서를 제공하는 Focal Mechanism에 대한 연구는 아직 미비하다고 할 수 있다.

이러한 실정에 비추어, 본 연구에서는 홍성 지진으로부터 원지진 진앙거리에 위치한 9개소의 관측소에서 관측된 실체파형(Body Waveform)으로 부터 얻을 수 있는 극성(Polarity) 및 진폭(Amplitude)에 관한 정보중, P파만의 초동극성분포(First Motion Polarity Dis-

tribution)에 대한 전산모델링을 시도하였다. 즉, 지진원으로부터 방위각의 변화에 따라서 P파의 초동극성분포변화에 대한 분석을, Inverse 방법을 이용한 해를 구하지 않고, Forward Polarity Fitting 방법을 통하여 홍성지진원의 Focal Mechanism을 구하려고 시도하였다. 결론으로 본 연구에서 얻어진 Focal Mechanism의 결과로부터 한반도의 지진지체구조 특성에, 대한 함축적 의미를 유도하고자 시도하였다(Wallace et al., 1983; Wallace, 1985). 또한 원지진 진앙거리로부터 도출된 Focal Mechanism을 부지응답스펙트럼 및 지진동시간이력곡선 작성을 위한 일부 기본자료로서 간접적으로 제공할 수 있다.

2. 홍성지진의 특성

홍성지진의 특성에 대하여 살펴보면, 첫째, 홍성지진은 리히터스케일(M_L) 약 5.0 및 Focal Depth가 약 10km(동자연, 1981)로 보고되어 있다. 규모면에서 살펴보면 한반도 지진지체구조 특성연구에 중요한 의미를 함축하고 있는 중간 규모에 해당한다. 이 규모의 지진으로부터 Regional 진앙거리는 물론 원지진 진앙거리(Teleseismic Distance)에서도 적절한 파형모델링이 가능한 S/W비(Signal to Noise Ratio)가 충분히 높은 파형을 획득할 수 있다(Langston, 1978; Baker and Langston, 1981; Wallace, 1985). 또한, 중간규모의 지진은 임의의 지체구조구의 지응력장 특성을, 미지진보다는 상대적으로 매우 잘 대표할 수 있기 때문이다. 그리고, 진앙에서 심도가 약 10km로서(동자연, 1981), 즉, 탄성학적 거동의 차이가 심한 상부맨틀층보다 훨씬 상부의 얇은 지각내의 단층면위에서 전단변위의 발생에 의한 지진으로 보고되어 있다.

둘째, 홍성지진은 지진원 특성을 고려할 때, Isotropic 지진원 또는 Deviatoric 지진원으로 대별할 경우, Deviatoric 지진원으로 분류된다. Deviatoric 지진원중에서도 CLVD 특성을 지닌 지진원이 아닌, 전형적인 Double-Couple 지진

원으로 연구보고되어 있다(김소구, 1979). Double-Couple 지진원이란 지체구조력 및 여타 지응력장 원인에 의하여 단층면상에서 실제로 전단변위의 발생에 의한 탄성 에너지의 발생원으로서, 이러한 전단 변위와 같은 물리적 현상을 Double-Couple이라는 지응력장으로 대표할 수 있다는 이론에 근거하고 있다(Double-Couple Seismic Source Representation Theorem, Aki and Richardson, 1980; Geller, 1976; Sipkin, 1986).

또 하나의 특징으로서, 홍성지진은 비슷한 규모의 여타지진에 비하여 상대적으로 진앙거리의 증가에 따라서 탄성에너지의 감소가 극심하게 관측된다고 보고되어 있다(서정희, 1979). 홍성지진에 의한 물적 피해면에서는 근년에 들어서 한반도 육지에서 발생한 지진중 지리산 쌍계사 지진(1936년 7월 3일, 리히터규모 약 5.0) 다음으로 물적피해가 컸던 지진으로 알려져 있다(김소구, 1979).

3. 지진원 특성의 분류 및 초동극성분포특성

관측파형의 초동분포분석 방법에 대한 설명을 위하여 우선 지진원 특성 분류에 대하여 살펴보면, 우선 지진원으로부터 임의의 진앙거리에서 관측된 지진파의 Radiation Pattern을 이용하여 핵실험(Nuclear Explosion Test) 또는 순수전단변위에 의한 지진과 같은 지진원의 특성에 대한 구별이 가능하다(Wallace et al., 1985). Radiation Pattern이란 지진원을 중심으로 수신점과의 방위각의 변화에 따라서 관측된 지진파의 극성(Polarity) 및 진폭(Amplitude)의 동시적 및 체계적 변화를 말한다.

또한, 지진원특성을 Seismic Moment Tensor로 대표할 경우, 주어진 Moment Tensor 구성성분의 조합에 의한 정보를 이용하여 역시 핵실험 또는 순수전단변위에 의한 지진과 같은 지진원의 특성에 대한 구별이 가능하다(Bakus and Mulcahy, 1976; Geller, 1976; Aki and Richardson, 1980). 지진원을 Seismic Moment

Tensor로 대표할 경우, 순수전단변위에 의한 지진파 같은 Deviatoric 지진원에서는 관측파형 수치모델링을부터 구한 Isotropic Term의 합이 영이 되며, Moment Tensor가 대칭적이다. 핵실험과 같은 Isotropic 지진원일 경우, Isotropic Term의 합이 영이 되지 않으며 Moment Tensor는 역시 대칭적이다. 위에서 살펴본 바와 같이 관측파형 수치모델링을 통하여 Seismic Moment Tensor를 구하면 지진원의 특성 및 단층면의 깊이, 주향, 경사, Slip Angle과 같은 기하학적 특성까지도 유추가능하다(Kim and Wallace, 1989).

본 연구에서는 위에서 언급한 지진원 특성 분류방법중 관측된 지진파의 Radiation Pattern에 의한 분류방법을 이용하였다. 그림 1은 핵실험 및 순수전단변위에 의한 지진과 같은 지진원 특성에 따라서 Radiation Pattern의 변화를 잘 보여주고 있다. 지진원을 중심으로 Focal Sphere를 가상하여 이러한 Focal Sphere를 통과하여 발산하는 각각의 P, SH 및 SV의 극성 및 진폭을 고려하는 원리를 이용한 것이다(그림 1a). 이러한 원리를 이용하여 핵실험과 같은 Isotropic 지진원일 경우, 모든 방위각에 걸쳐서 외부로 밀어부치는 극성 즉, 수신점에서의 초동의 극성이 위로 향하고 있으며, 또한 모든 방위각에 걸쳐서 일정한 진폭값을 보여주고 있다(그림 1b). 오른쪽 그림 1c는 전형적인 Double-Couple 지진원으로서, 이 경우 단층면의 연장선으로부터 방위각의 변화에 따라서 수신점에서의 초동의 극성 및 진폭의 분포가 체계적인 방위각의 함수임을 보여주고 있다(Aki and Richardson, 1980). 그러므로, 같은 규모의 지진원으로 부터 같은 진앙 거리에 있다 하더라도, 방위각에 따라서 변위 파형의 극성과 진폭이 방위각의 Radiation Pattern 함수에 따라서 체계적으로 변화하게 된다. 이 그림에서 알 수 있는 바와같이 진앙거리가 아무리 가깝다 하더라도, 이론적으로 Node라고 불리는 지진원에 의한 P 및 SH 에너지의 진폭이 전혀 없는 방위각도 존재한다.

또한, P, SV 및 SH Wave의 포텐셜 즉 극성

및 진폭이 단층면의 주향, 경사 및 상반의 변위방향(Slip Angle 또는 Rake Angle)의 값에 의해 결정되는 Radiation Pattern 함수인 A의 함수인 것을 그림 2를 통하여 수식적으로 보여주고 있다. 위와 같은 Radiation Pattern과 이를 이용한 결과인 Focal Mechanism과의 관계의 예로서, 수직 단층면 AA' 또는 FF'에서 주향방향의 변위가 그림에서 표시된 화살표 방향으로 발생하는 순수주향단층일 경우, 결과 되는 Focal Mechanism을 그림 3이 보여주고 있다.

관측파형을 이용할 경우 Dislocation Seismic Source Theory(Langston and Helmberger, 1975)에 의하면 임의의 지진원의 Focal Mechanism은 3가지의 기본적인 단층면상에서의 변위 즉, 순수주향방향의 변위, 수직단층면상에서의 변위 및 45도 경사단층면상에서의 수직경사변위등 이상 3가지 기본적인 단층면상에서의 변위의 임의의 조합으로 이루어진다. 3개의 기본적 단층 즉, 수직단층면상에서의 순수주향성분의 변위(Vertical Strike Slip, VSS), 수직단층면상에서 순수경사방향성분의 변위(Vertical Dip Slip, VDS) 및 45° 경사단층면상에서 순수경사방향성분의 변위(45 Degree Dip Slip, 45D)에 대한 Polarity Pattern을 이용하여 그림 4에서 보여주는 바와 같이 해당되는 Focal Mechanism을 구할 수 있다. 동일한 Focal Mechanism에 대해서도 예를 들면 순수주향단층 및 순수경사단층일 경우, 이러한 각각의 단층으로부터 야기되는 Radiation Pattern은 실제파형인 P파형 및 S파형에 따라서도 서로 상이한 분포를 보여준다(그림 5).

실제 관측된 Radiation Pattern의 예로서, 1927년 일본 혼슈우지방에서 발생한 규모 7.5의 Tango 지진에 의한 Regional 진앙거리에서 관측된 지진파의 Radiation Pattern을 그림 6은 보여주고 있다. 즉 진앙지를 중심으로하여 P파 초동의 극성 및 진폭이 방위각의 변화에 따라서 체계적으로 변화하고 있음을 보여주고 있다.

그림 7은 진앙거리의 변화에 따라서 지구

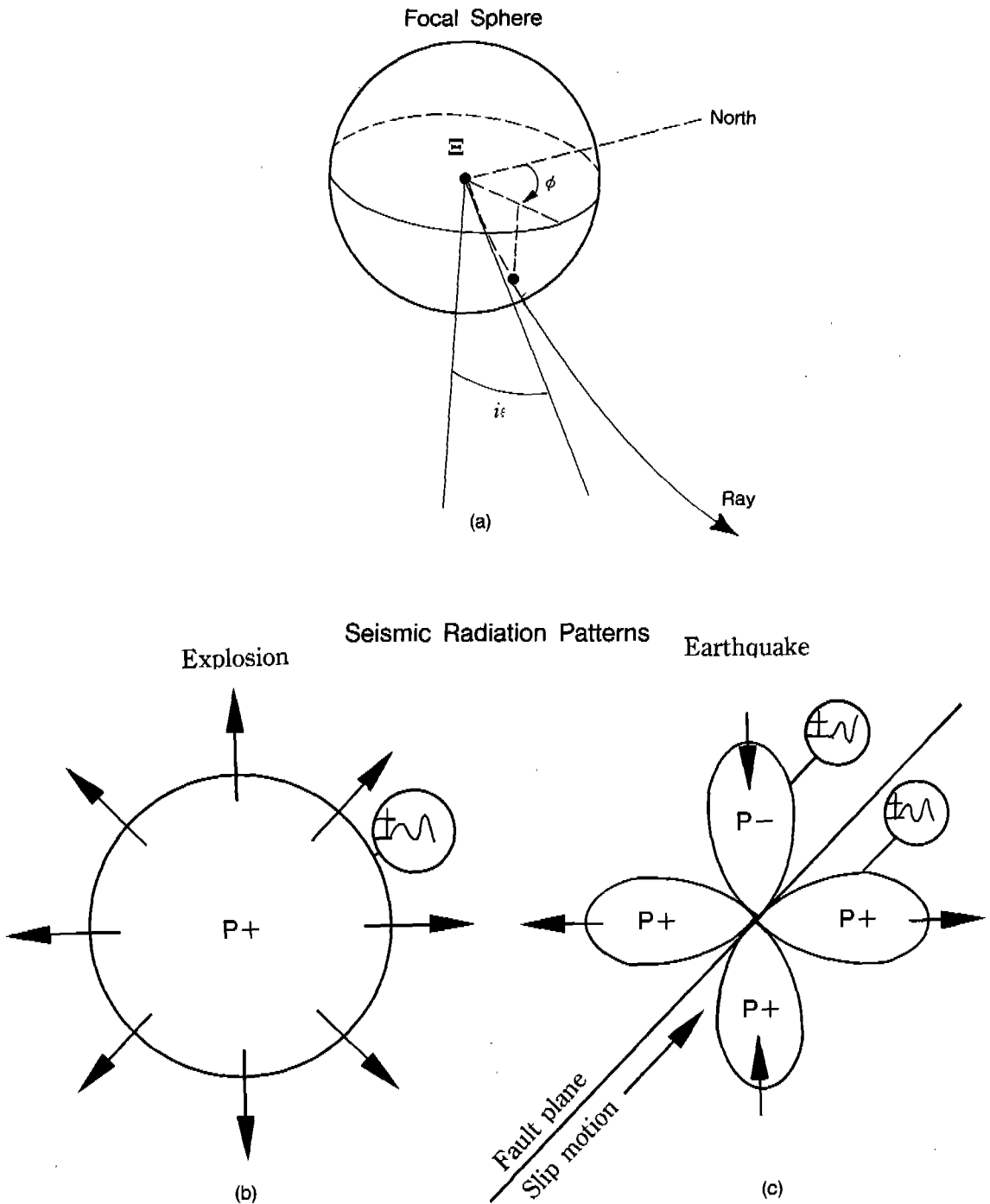


그림 1

Fig. 1. a) The focal sphere for a seismic point source is a sphere centered on the source and having arbitrarily small radius, b) Seismic radiation patterns for isotropic seismic source characteristics, c) Seismic radiation patterns for deviatoric seismic source characteristics.

(2.25)

P-wave:

$$\hat{\phi} = +\frac{M_0}{4\pi\rho} \frac{2}{\pi} \operatorname{Im} \int_c^{+i\infty+c} C_1(p) \frac{p}{\eta_\alpha} \exp[-s\eta_\alpha|z-h|] K_2(spr) dp \cdot A_1(\theta, \lambda, \delta) +$$

$$+\frac{M_0}{4\pi\rho} \frac{2}{\pi} \operatorname{Im} \int_c^{+i\infty+c} C_2(p) \frac{p}{\eta_\alpha} \exp[-s\eta_\alpha|z-h|] K_1(spr) dp \cdot A_2(\theta, \lambda, \delta) +$$

$$+\frac{M_0}{4\pi\rho} \frac{2}{\pi} \operatorname{Im} \int_c^{+i\infty+c} C_3(p) \frac{p}{\eta_\alpha} \exp[-s\eta_\alpha|z-h|] K_0(spr) dp \cdot A_3 ;$$

SV-wave:

$$\hat{\Omega} = +\frac{M_0}{4\pi\rho} \frac{2}{\pi} \operatorname{Im} \int_c^{+i\infty+c} SV_1(p) \frac{p}{\eta_\beta} \exp[-s\eta_\beta|z-h|] K_2(spr) dp \cdot A_1(\theta, \lambda, \delta) +$$

$$+\frac{M_0}{4\pi\rho} \frac{2}{\pi} \operatorname{Im} \int_c^{+i\infty+c} SV_2(p) \frac{p}{\eta_\beta} \exp[-s\eta_\beta|z-h|] K_1(spr) dp \cdot A_2(\theta, \lambda, \delta) +$$

$$+\frac{M_0}{4\pi\rho} \frac{2}{\pi} \operatorname{Im} \int_c^{+i\infty+c} SV_3(p) \frac{p}{\eta_\beta} \exp[-s\eta_\beta|z-h|] K_0(spr) dp \cdot A_3 ;$$

SH-wave:

$$\hat{\chi} = +\frac{M_0}{4\pi\rho} \frac{2}{\pi} \operatorname{Im} \int_c^{+i\infty+c} SH_1(p) \frac{p}{\eta_\beta} \exp[-s\eta_\beta|z-h|] K_2(spr) dp \cdot A_4 +$$

$$+\frac{M_0}{4\pi\rho} \frac{2}{\pi} \operatorname{Im} \int_c^{+i\infty+c} SH_2(p) \frac{p}{\eta_\beta} \exp[-s\eta_\beta|z-h|] K_1(spr) dp \cdot A_5 ;$$

where

s = Laplace-transform variable,

p = ray parameter,

s = Laplace-transform variable,

$\eta_\alpha = (1/v^2 - p^2)^{1/2}$,

h = depth of source,

α = compressional velocity,

β = shear velocity,

ρ = density,

M_0 = seismic moment,

C.A. LANGSTON & HELMBERGER, 1975

그림 2

Fig. 2. Referenced formulations for P, SV, and SH potentials which depend on radiation pattern function A (strike, dip, rake), respectively (from Langston and Helmburger, 1975).

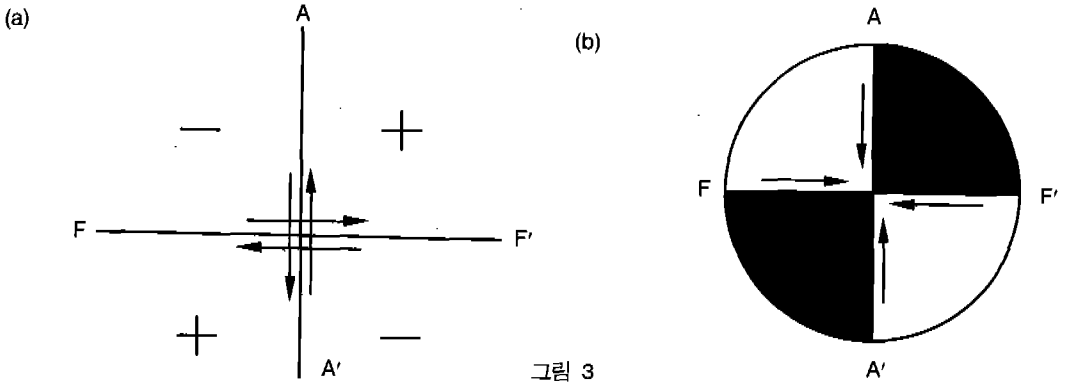


그림 3

Fig. 3. a) Plan view of horizontal displacement on vertical fault AA' or FF' and resulting distribution of compression (+) and dilatations(-), b) corresponding fault plane diagram.

VERTICAL STRIKE SLIP

VERTICAL DIP SLIP

45° DIP SLIP

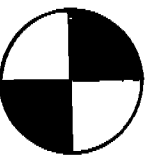
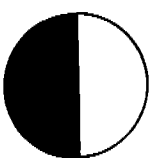


그림 4

Fig. 4. Three fundamental focal mechanisms(VSS, VDS, and 45D) of three main factors to represent the seismic source in the waveform modeling.

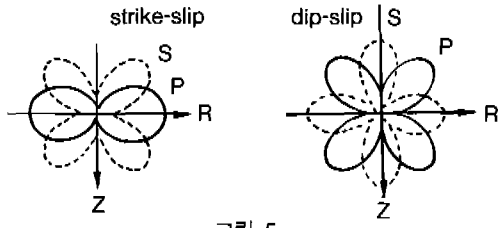


그림 5

Fig. 5. Ground movements in the initial P-phase for the Tango earthquake, Honshu, Japan(1927, M=7.5). Symbols u and d denote the upward and downward initial P-pulses respectively (After, Wallace et al., 1983).

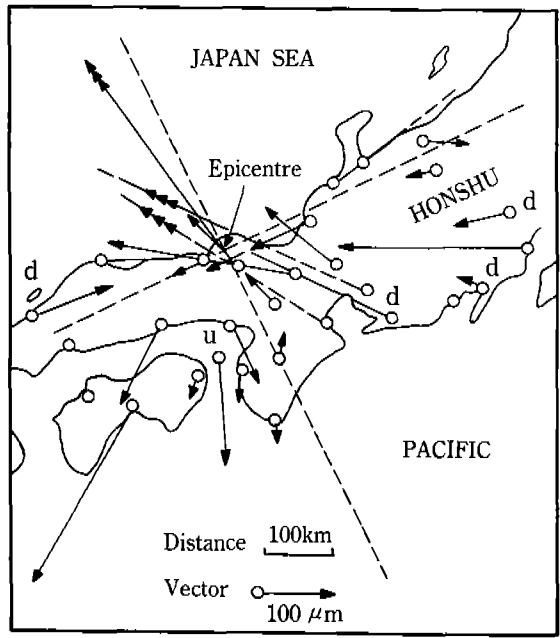


그림 6

Fig. 6. Comparison of the radiation patterns of the initial P- and S-phase for the same given focal mechanisms such as strike-slip and dip-slip.

Seismic Waves Propagating Through the Earth

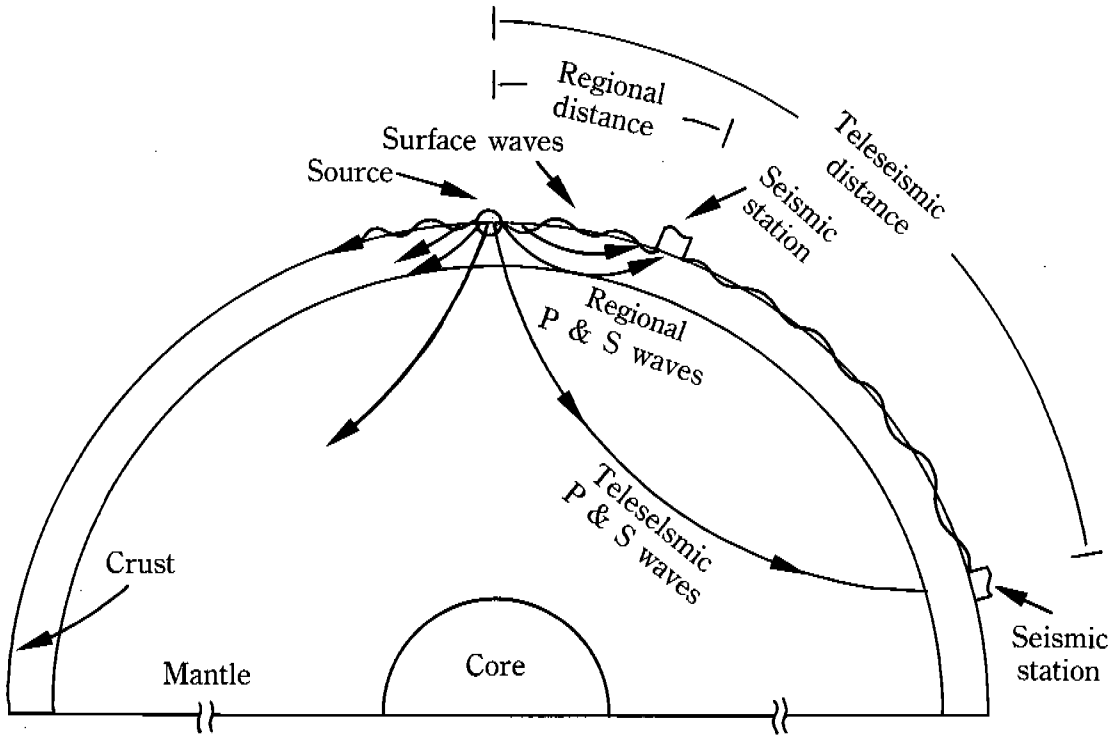


그림 7

Fig. 7. Seismic waves propagating through different depth ranges of the Earth interior corresponding to the different epicentral distances.

내부를 통과하는 지진파의 전달깊이 분포를 보여주고 있다. 본 연구에서 이용한 원지진 진앙거리 약 95도까지의 범위에서 관측된 지진파는, 통과하는 중간매질의 탄성학적 성질이 두개의 두드러진 탄성과 속도 불연속면(심도 약 470km 및 600km)을 제외하고는 비교적 균일하고 잘 알려진 중간 맨틀층을 통과한 에너지이다. 그러므로, 이 거리에서 관측된 지진파는 지진원의 탄성적특성의 연구에 널리 이용되고 있다(Langston, 1978; Baker and Langston, 1981, Wallace, 1985).

이와 비교하여, Regional 진앙거리에서 즉 진앙거리 13도까지의 범위에서 관측된 지진파는 지진파 속도구조의 변화가 심할 뿐만 아니라, 지각내에서 에너지가 전파해 갈 때 지표면

과 모호면의 양 경계면에서 P 에너지와 S 에너지 상호간의 Conversion이 심하기 때문에, 관측파형 수치모델링을 위하여 중간매질의 속도구조가 상대적으로 더욱 중요한 역할을 한다 (Wallace et al., 1983).

4. Focal Mechanism 결과

지진원의 Radiation Pattern 모델링에 관하여 좀더 구체적으로 살펴보면, 우선 지진원의 Radiation Pattern 모델을 결정하는 구체적인 요소에는 Focal Mechanism 요소 즉, 지진원 축점 지역에서의 3가지의 기본적인 단층면상에서의 상반의 변위방향(Slip Angle) 및 단층면의 기하학적인 표현(주향, 경사)이다. Focal

Mechanism 요소는 본 연구에서 구하고자 하는 미지수이다. 둘째로, GRT(Generalized Ray Theory), (Helmberger, 1974)에 의하여 결정되는 Ray의 종류이다. Ray에 관해서는 원지진 진앙거리에서 관측된 P파를 이용하였다. Radiation Pattern을 결정하기 위해 마지막으로 고려해야 할 요소는 지진원 근처에서의 지진파 속도구조모델이다. 수신된 실체파형 중 P파의 극성을 Focal Sphere 하반구에 Mapping 할 경우, 진앙지 부근지각 및 상부 맨틀층의 속도 구조모델 대비가 중요한 역할을 하고 있다. 이를 위해 본 연구에서는 1층 반무한 공간(One-Layer-Over-Half-Space)을 고려하였으며, 지각 및 상부맨틀에 대한 P파의 속도 및 밀도값에 대해서는 미국동부지역 지체구조의 속도구조모델을 이용하였다. 이 모델은 너무 간단하다는 단점은 있으나, 속도모델이 잘 알려져 있지 않는 지역에서 임의의 다층속도구조 모델을 이용하는 것보다 지체구조 특성에 부합되는 일반적인 모델을 이용하면, 상대적으로 모델링 결과에 대한 불확실성을 줄일 수 있다(Helmberger and Malone, 1975).

본 연구에서는 관측된 지진파로부터 우리가 얻을 수 있는 정보인 Radiation Pattern 즉, 극성 및 진폭 2가지의 정보요소 중 관측파형의 극성분포에 대한 정보만을 모델링에 이용하였다. 그림 8에서 보여주는 바와 같이 홍성지진 진앙으로부터 원지진 진앙 거리에 위치한 9개의 GDSN(Global Digital Seismic Network, National Earthquake Information Center Newsletter, 1987) 관측소(Table. 1)에서 수신된 실체파형중 장주기의 수직성분(Long Period, Vertical Component)의 관측파형중 P파의 방위각의 변화에 따라서 초동의 극성분포를 분석하였다. 그림 9는 GDSN을 이루고 있는 여러가지 네트워크, 즉 SRO, ASRO, DWWSSN 및 RSTN SUBNETWORK의 위치를 잘 보여주고 있다. 이러한 분석을 위하여 Inverse 방법을 이용한 해를 구하지 않고, Forward Fitting 전산모델링을 한 결과인 Focal Mechanism을 구하였다.

초동극성분포에 부합되는 Focal Mechanism을 구하는 구체적 절차는 다음과 같다. 우선 수신점의 방위각 및 진앙거리의 함수인 진앙에서 P파의 Take-Off Angle을 고려하여, 원지진 진앙거리에 위치하고 있는 9개의 수신기에서 기록된 실체파형중 P파의 극성분포를, Focal Sphere의 하반구에 Mapping 한다. 다음 절차로서 주향, 경사 및 상반변위 값을 변화시키면서, Focal Sphere 하반구에 미리 Mapping된 P파 초동의 극성분포와 주향, 경사 및 상반변위값의 변화에 의해 결정된 Focal Mechanism의 극성분포를 부합시켜나가는 과정이다. 이러한 절차에서 알 수 있듯이, 이 과정은 비선형 과정으로서(Non-Linear Process), P.C.를 이용 Mapping된 서로 반대되는 극성분포를 양분하는 단층면의 필요조건들을 고려하여, 양자간의 극성분포를 Forward Fitting 시켰다. 이 방법의 장점중의 하나는 주단층면이 정해지면 Auxiliary Fault Plane이 양단층면직교 조건에 의하여 자동적으로 결정되기 때문에, 주단층면 및 Auxiliary Fault Plane 양단층면 모두를 이용하여 관측파형의 극성분포조건을 만족시키는 결과를 얻을 수 있다.

P.C.를 통한 여러 번의 시행착오 후, 우선 Focal Sphere의 하반구에 주어진 9개의 관측된 P파의 극성분포와 비교적 잘 일치되는 실제 단층면 즉, 주향 247도, 경사, 78도인 면을 구할 수 있었다. 본 연구에서 이용한 주향, 경사 및 상반변위값에 대한 정의는 그림 10에 주어졌다. 위에서 구한 지하심부(약 10km)에서의 단층면해는 그림 11에서 보여주고 있는 바와 같이 이 지역의 지표의 특징을 잘 나타내어 주는 주된 선구조(lineament)방향 즉, A, C, D 및 E가 보여주고 있는 선구조 방향과 대체적으로 잘 일치하고 있다.

다음에는 상반의 변위방향의 값을 순수 좌수형 주향단층으로부터 순수역경사단층을 거쳐서, 다시 변위 방향이 반대인 순수 우수형 주향단층등으로 변화시켜 가면서 P파 초동극성분포 특성과의 부합성을 조사하였다. 물론 정단층에 대한 P파 초동극성분포 특성과의 부

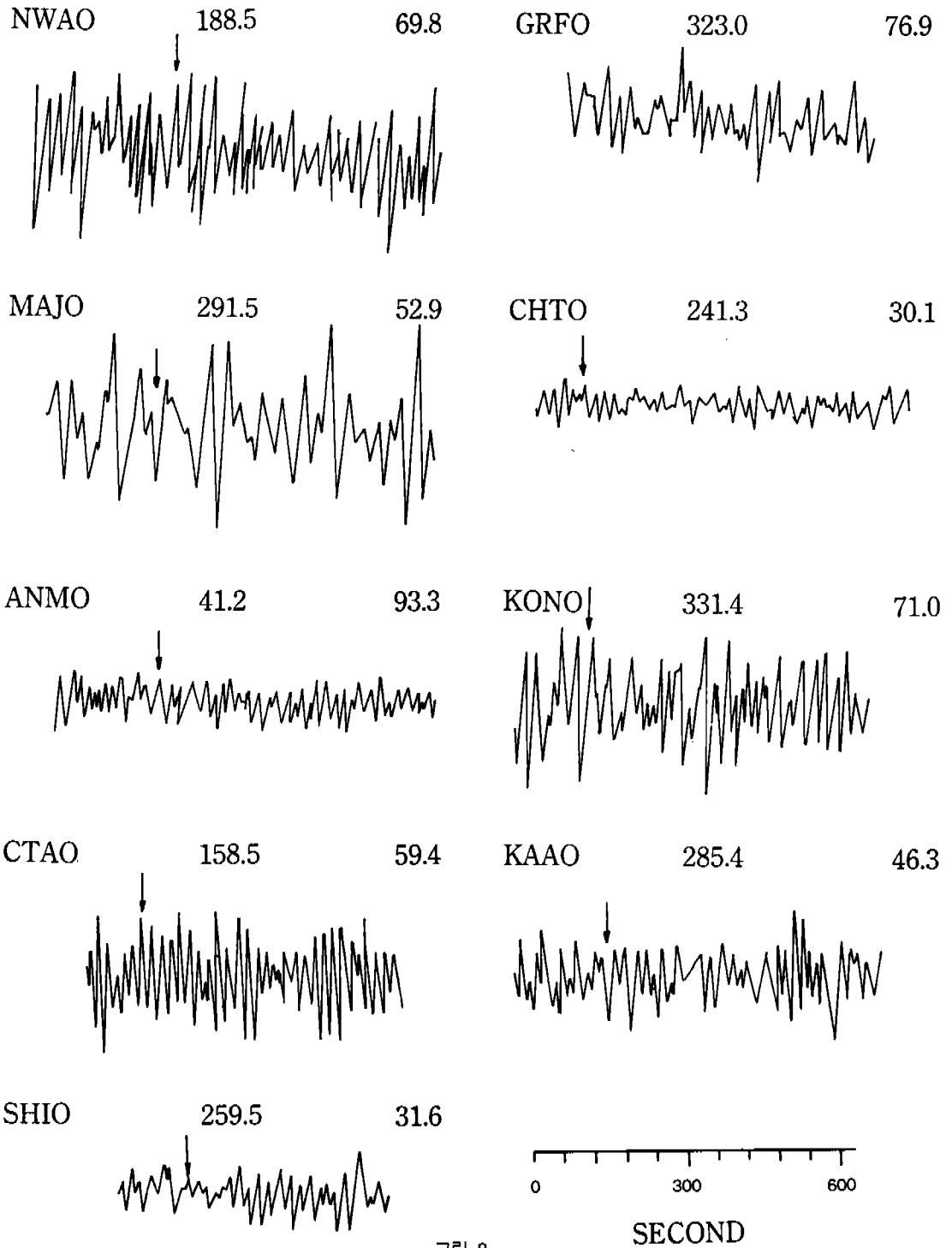


그림 8

Fig. 8. Observed Body-Waveforms(Vertical Component) and indication of the P-arrival at teleseismic distances using SRO and ASRO subnetwork among GDSN system.

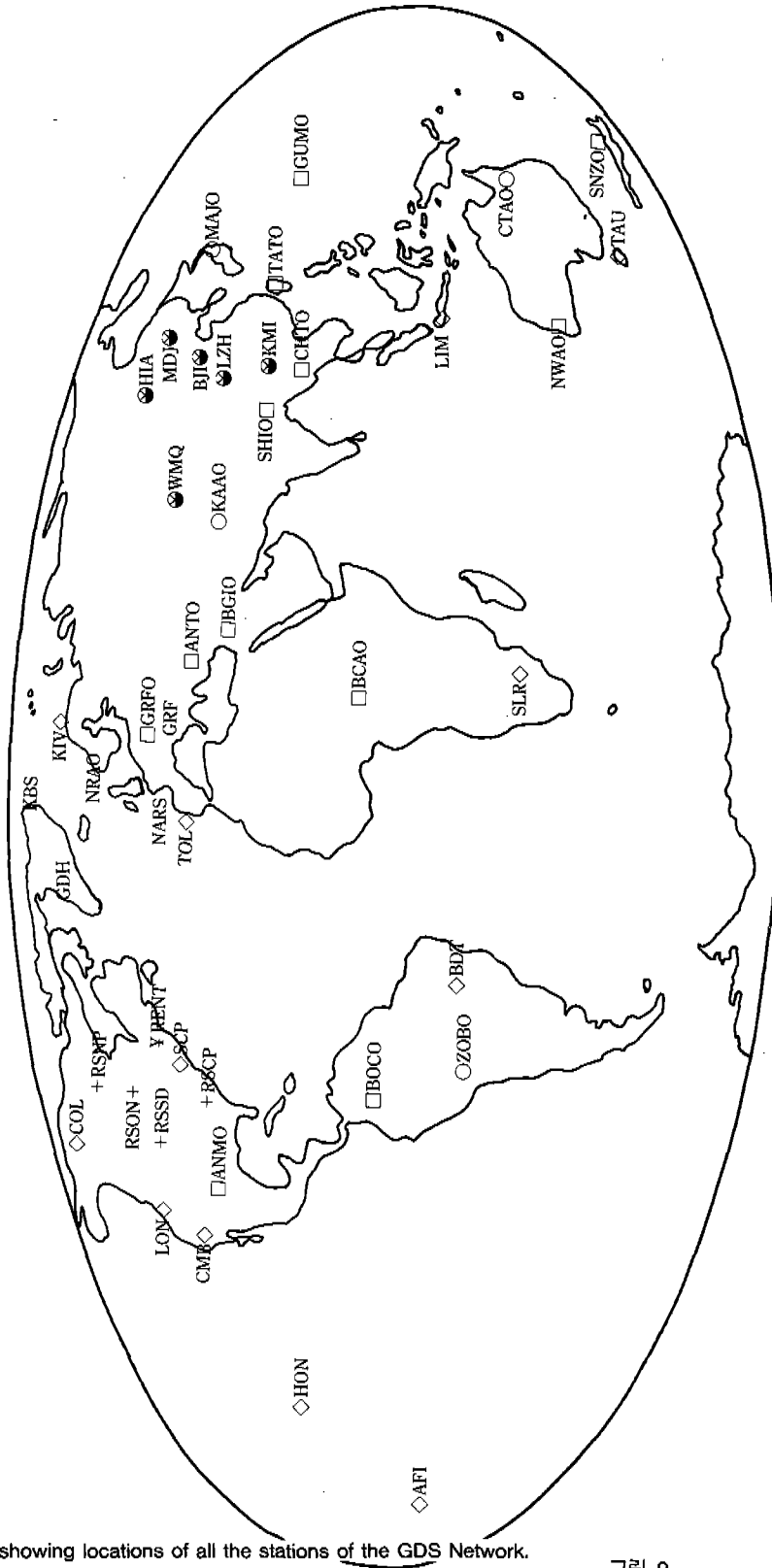


Fig. 9. Map showing locations of all the stations of the GDS Network.

그림 9

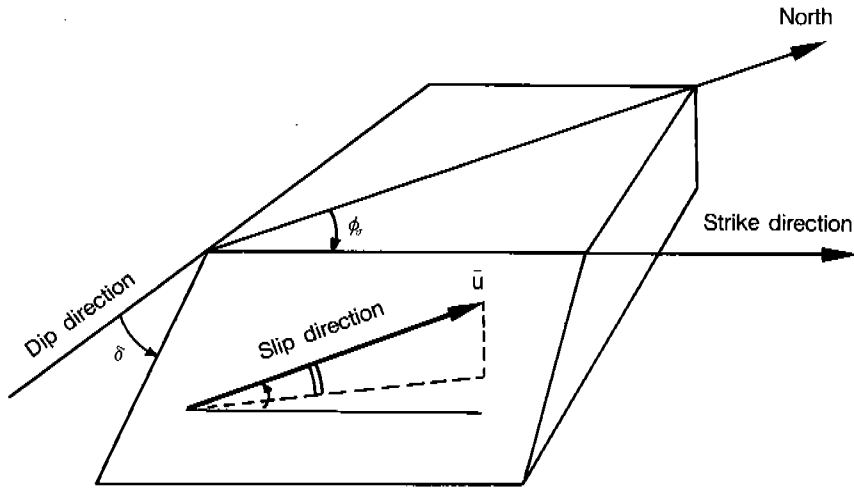


그림 10

Fig. 10. Definition of the fault orientation parameters(strike and dip) and slip direction which are used in this study. Strike slip is measured clockwise round from north, with the fault dipping down to the right of the strike direction(After, Aki and Richardson, 1980).

합성을 조사하였으나, 정단층에 의한 극성분포와 서로 반대되는 관측지진파의 극성분포로 잘 부합되지 않기 때문에 정단층에 대한 가능성을 배제시켰다. 첫째로, 상반의 변위 방향이 단층면의 연장선으로부터 30도일 경우, 9개소에서 수신된 실제파형중 P파의 극성분포와 변화된 주향, 경사, 변위방향값에 의해 결정된 Focal Mechanism에 의한 극성분포를 비교하여 볼 때, 특히 왼쪽 아래코너의 2개의 수신점에서 부합되지 않고 있음을 그림 12a는 보여주고 있다. 둘째로, 변위방향값이 40도일 경우 수신된 P파의 극성분포와 변화된 Focal Mechanism에 의해 결정된 극성분포가 잘 부합되고 있다(그림 12b). 셋째로, 변위방향값이 130도일 경우 수신된 P파의 극성분포와 변화된 Focal Mechanism에 의해 결정된 극성분포가 역시 잘 부합되고 있다(그림 12c). 네째로, 변위방향값이 160도일 경우 수신된 P파의 극성분포와 변화된 Focal Mechanism에 의해 결정된 극성분포가 잘 부합되고 있다(그림 12d). 다섯째로, 변위방향값이 170도일 경우 수신된 P파의 극성분포와 변화된 Focal Mechanism에 의해 결정된 극성분포를 비교하여 볼 때, 특히

오른쪽 아래코너의 1개의 수신점에서 잘 부합되지 않고 있음을 그림 12e를 통해 알 수 있다.

수신된 P파의 극성분포와 가정된 Focal Mechanism에 의해 결정된 극성분포의 부합성 조사에 대한 비선형 과정을 종합해 보면, 실제로 변위가 발생한 단층면의 주향 및 경사 방향의 값은 각각 약 247도 및 78도이며 이 지역의 일반적인 선구조 방향과 잘 일치하고 있다. 그러나 변위 방향의 값은 약 40도에서 약 160도의 범위로서 주향 및 경사값에 비하여 상대적으로 불확실성이 아주 높은 편이다. 더욱 많은 수신점에서의 P파의 초동극성분포에 대한 자료가 보충되면, 방위각에 대한 Coverage를 확대할 수 있기 때문에 이러한 불확실성은 줄어들 것이다. 그러나, 다행스런 점은 앞서도 설명한 바와 같이 극성분포를 고려한 결과 홍성지진의 정단층에 대한 가능성은 확실히 배제시킬 수 있었다.

이상의 결과, 홍성지진으로부터 원지진 진앙 거리에서 관측된 P파의 초동극성분포분석 방법에 의하면, 실제 전단변위가 발생한 단층면의 경사값이 약 78도로서 거의 수직에 가까우며 이러한 단층면위를 변위방향값이 주향성분

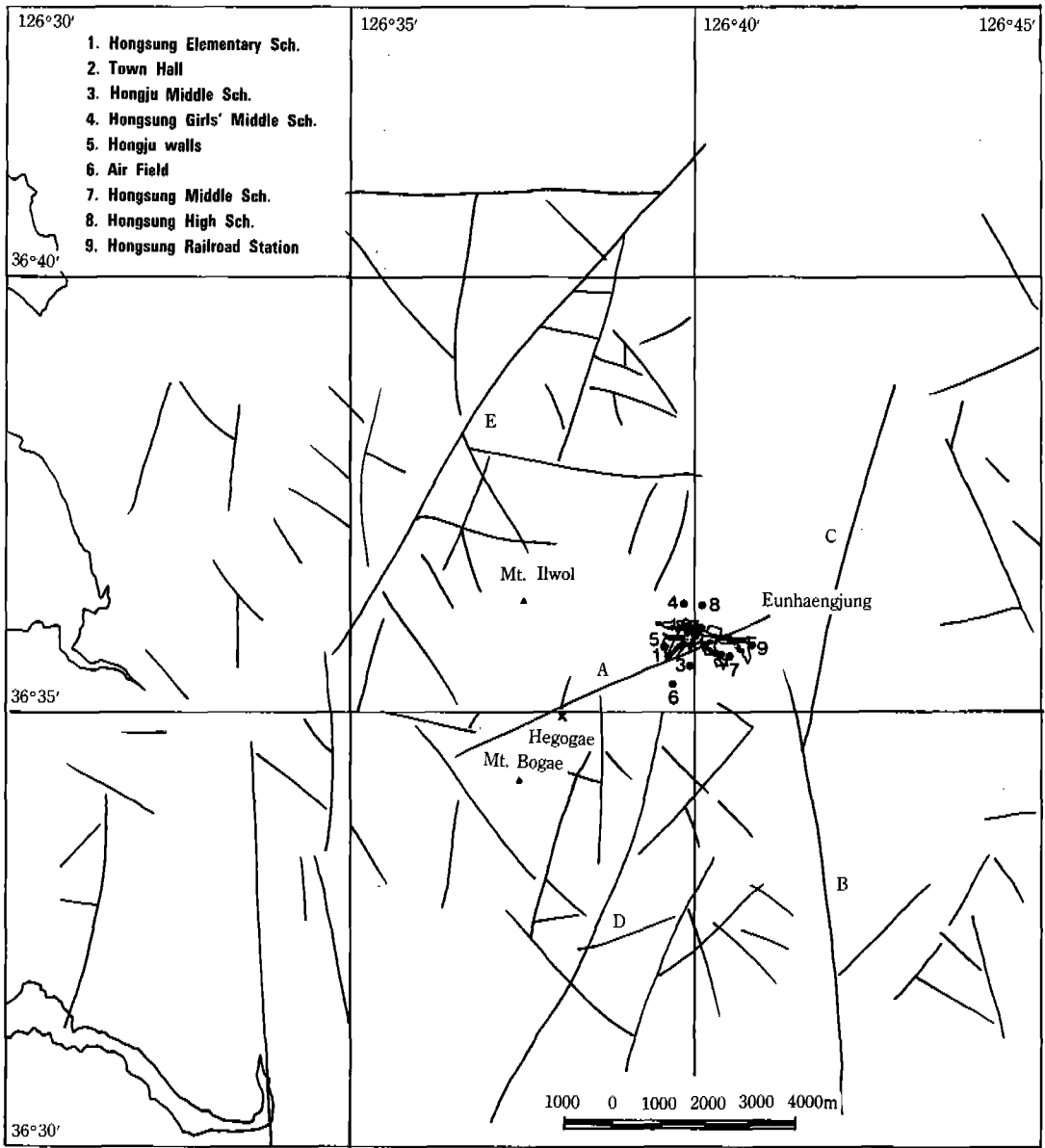


그림 11

Fig. 11. The lineament map of the Hongsung area by aerophoto and LANDSAT(copied from Hanyang University, 1979)

및 역경사성분을 동시에 지니고 있는 것으로 해석이 된다.

5. 결 론

이러한 Focal Mechanism으로부터 얻어진

단층의 주향, 경사값을 고려하여 해 본 결과, 주압축 응력방향(Principal Compressional Axis) 또는 P-axis의 방

이러한 Focal Mechanism으로부터 얻어진 단층의 주향, 경사값을 고려하여 해 본 결과,

HONG-SUNG
EARTHQUAKE

STRIKE=247
DIP =78
RAKE =30

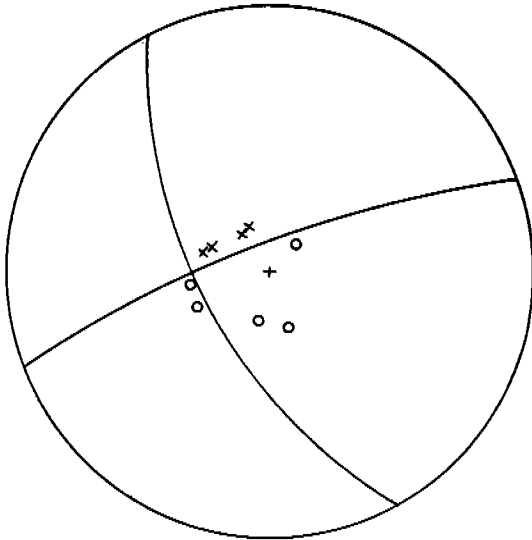


그림 12(a)

HONG-SUNG
EARTHQUAKE

STRIKE=247
DIP =78
RAKE =40

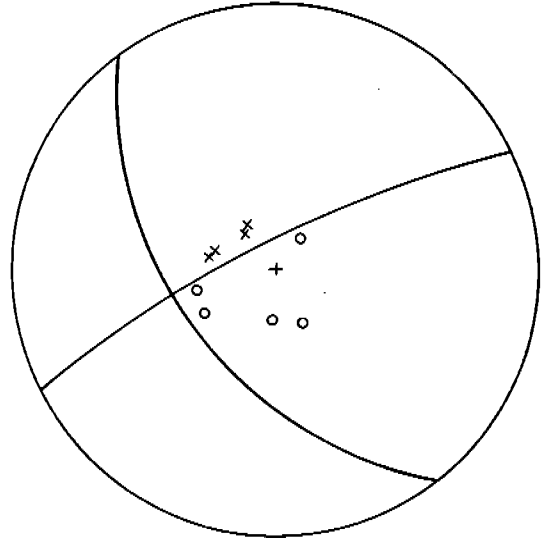


그림 12(b)

HONG-SUNG
EARTHQUAKE

STRIKE=247
DIP =78
RAKE =130

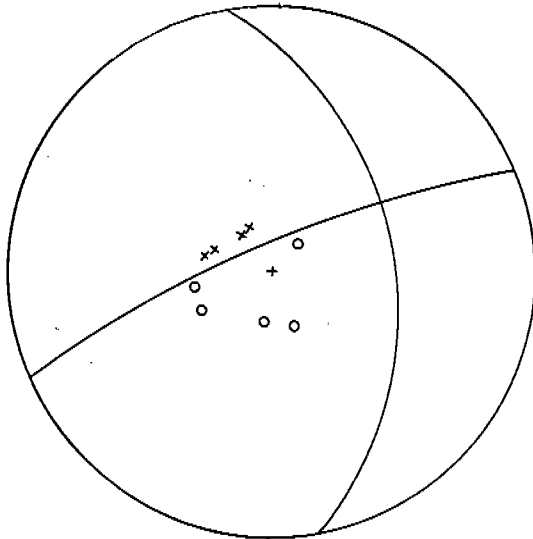


그림 12(c)

HONG-SUNG
EARTHQUAKE

STRIKE=247
DIP =78
RAKE =160

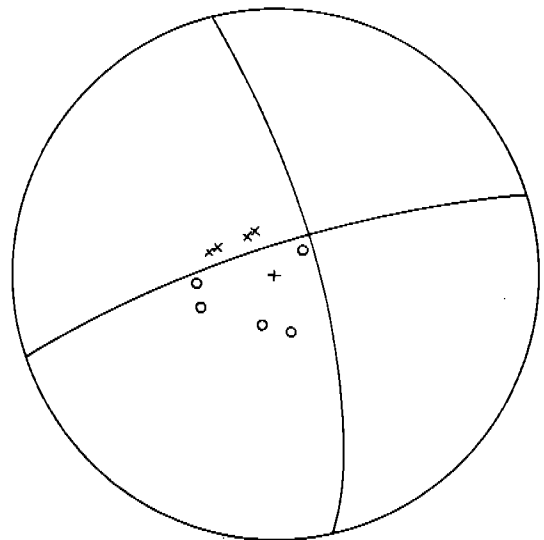


그림 12(d)

HONG-SUNG
EARTHQUAKE

STRIKE = 247
DIP = 78
RAKE = 170

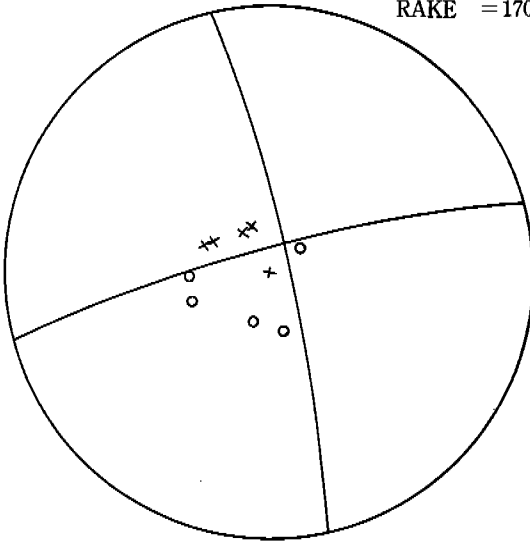


그림 12(e)

Fig. 12. The resultant focal mechanism to fit the initial P-phase polarity distributions of the observed seismic waveforms, a) for the strike, 247 ; dip, 78 ; rake angle, 30 degees, b) for the strike, 247 ; dip, 78, rake angle, 40 degrees, c) for the strike, 247 ; dip, 78 ; rake angle, 130 degrees, d) for the strike, 247 ; dip, 78, rake angle, 160 degrees, e) for the strike, 247 ; dip, 78 ; rake angle, 170 degrees.

주압축 응력방향(Principal Compressional Axis) 또는 P-axis의 방향이 거의 동서수평

방향을 나타내고 있다. 주압축응력방향이 결정 되면 직교조건 및 Rake Angle에 의하여 자동적으로 결정되는 주인장 응력방향(Principal Tensional Axis) 또는 T-axis는 Rake Angle의 변화에 따라서 P-axis와 직교면상에서 B-axis (Intermediate Axis)와 직교상으로 결정된다.

결과적으로 주어진 주압축 응력방향 및 주인장 응력방향이 함축하는 바(Zoback and Zoback, 1980)는 태평양 판이 유라시아판 아래로 Subduction 할때 발생할 수 있는 지구 응력장의 특성과 결코 상반되지 않음을 보여 주고 있다. 홍성지진의 주응력 방향이 한반도 전체의 응력 방향을 대표할 수 있는가에 대해서는 이론의 여지가 있을 수 있다. 그러나, 홍성지역의 일반적 선구조 방향이 한반도의 일반적인 선구조 방향과도 크게 어긋나지 않기 때문에, 홍성지역의 선구조방향과 잘 일치하고 있는 홍성지진의 단층면에 대한 기하학적 형태는 한반도 응력장 특성에 대해 많은 의미를 시사해줄 수 있다.

또한, 우리나라에는 원자력관련시설에 관련된 부지응답스펙트럼 제작시 가장 기본적인 자료인 의미있는 강지진동자료가 전무하여 미국의 원자력규제위원회 발행 규제지침중의 하나인 표준응답스펙트럼을 원용하고 있다. 그러나, 이러한 표준응답스펙트럼의 원용이 한반도 내 지진지체구조특성과의 적합성에 대하여 확인되지 않고 있는 실정이다.

표준응답스펙트럼이 한반도내 지진지체구조

Table 1. Station Distribution for the Observed P-Waves

Station Name	Azimuth Angle (Degree)	Epicentral Distance (Degree)	Location
NWAO	188.5	69.8	Mundaring, Australia
MAJO	291.5	52.9	Matsushiro, Japan
CTAO	158.5	59.4	Charters Towers, Aus.
SHIO	259.5	31.6	Shillong, India
GRFO	323.0	76.9	Grafenberg, Germany
ANMO	41.2	93.3	Albuquerque, U.S.A.
CHTO	241.3	30.1	Chiang Mai, Thailand
KONO	331.4	71.0	Konsberg, Norway
KA AO	285.4	46.3	N/A

특성과 부합되는 부지응답스펙트럼인가에 대한 조사의 예비단계로서, 우선 본 연구에서 결론적으로 도출한 Focal Mechanism을 이용가능하다. 이러한 Focal Mechanism을 이용하여 간접적으로 지진지체구조특성에 부합되는 외국의 유사지진후보를 선정 또는 한반도 지진원

특성에 부합되는 강지진동에 대한 합성파형 (Synthetic Waveforms of Strong Ground Motion)을 제작 후, 표준응답스펙트럼 특성과 비교·검토하는 것도 의미있는 일이라고 할 수 있다.

참고문헌

- 김상조, 1980. Study on earthquake of Korea based on local data of 1926-1943, 광산지질학회지, Vol 13, No 1.
- 김준경, 1990. 홍성 및 북한지역 지진원의 주파수 특성에 관한 연구, 자원공학회지, Vol 27, 373-383.
- 서정희, 1979. 홍성지진(1978.10.7) 조사보고, 대한광산학회지, Vol 16, 158-165.
- 이기화, 정옥희, 1980. 한반도의 계기지진연구, 지질학회지, Vol 16, No 1, P32-45.
- 한국동력자원연구소, 1983. 한반도의 지진위험도.
- 한양대학교 환경과학연구소(김소구), 1979. 홍성지진의 현황조사 연구, R-79-1, 과학기술처.
- Aki K. and P.G. Richardson, 1980. Quantitative seismology, W.H. Freeman and Company, New York.
- Backus, M and M. Mulcah, 1976. Moment tensors and other phenomenological description of seismic sources-I. Contineous displacements, Geophys. J. 46, 341-361.
- Baker, G. and C.A. Langston 1981. Inversion of teleseismic body waves for the moment tensor of the 1978 Thessaloniki, Greece, earthquake, B.S.S.A., 71, 1423-1444.
- Geller, R.J., 1976. Body force equivalent for stress-drop seismic sources, B.S.S.A., 66, 1801-1804.
- Helmberger, D.M., 1974. Generalized ray theory for shear dislocation, B.S.S.A., 58, 179-214.
- Helmberger, B.M. and S.D. Malone, 1975. Modeling local earthquake as shear dislocation in a layered half space, J. Geophys. Res., 35, 4881-4888.
- Kanamori, H and D.L. Anderson, 1975. Theoretical basis of some empirical relations in seismology, B.S.S.A., 65, 1073-1095.
- Kim, J. and T.C. Wallace, 1989. Source Complexity of the 1952 Kern County, California, earthquake, Final Technical Report, WSGS, 14-08-0001-G1350.
- Langston, C.A. and D.V. Helmberger, 1975. A procedure for modeling shallow dislocation sources, Geophys. J.R. Astr. Soc., 42, 117-130.
- Langston, C.A., 1978. The February 9, 1971 San Fernando earthquake: a study of source finiteness in teleseismic body waves, B.S.S.A., 68, 1-29.
- National Earthquake Information Center Newsletter, U.S.G.S., vol, No. 1. Sipkin, S.A., 1986. Interpretation of non-double-couple earthquake mechanism derived from moment tensor inversion, J. Geophys. Res., 91, 531-547.
- U.S NRC, 1981. Standard review plan for the review of safety analysis reports for nuclear power plants, NUREG-0800.
- U.S Atomic Energy Commission, 1973. Design response spectra for seismic design of nuclear power plants, Regulatory Guide, 1. 60.
- Wallace, T.C., D.M. Helmberger, and G.R. Engen, 1983. Evidence of tectonic release from underground nuclear explosion in long-period P waves, B.S.S.A., 73, 593-613.
- Wallace, T.C., D.M. Helmberger, and G.R. Engen, 1985. Evidence of tectonic release from underground nuclear explosion in long-period S waves, B.S.S.A., 75, 157-174.
- Wallace, T.C., 1985. Reexamination of the moment tensor solutions of the 1980 Mammoth Lakes earthquake, J. Geophys. Res., 90, 11171-11176.
- Zoback M.L. and M. Zoback, 1980. State of stress in conterminous United States, J. Geophys. Res., 85, 6113-6156.