

Kern County 지진에 대한 연구 A study of Kern County earthquake

김준경(Kim, Jun Kyoung)

한국원자력 안전기술원

요 약/Abstract

본 연구는 한반도의 지진지체구조 특성(Seismotectonic Characteristics)에 부합되는 내진설계용 부지응답 스펙트럼 작성을 위한 유사지진 선정에 관한 연구이다. Seismic Moment Tensor를 이용 파형을 Inversion한 결과에 의하면 지진원 특성상, Kern County 지진(1952년 7월 21일, 리히터 규모 $ML = 7.2$)은 한반도 지진지체구조 특성에 부합되는 현실적으로 유사한 외국의 지진들 중의 하나로서, 선정된 Kern County 지진으로 부터 발생한 강지진동 자료를 전산처리하여 표준응답 스펙트럼과 일반적 특성을 비교하여 보는 일도 의미있는 일이라고 할 수 있다.

The purpose of this study is to evaluate compatability of seismic source characteristics of the Kern County earthquake to those of Korean Peninsula seismotectonics. The compatability could be used to make Korean type response spectrum from the strong ground motions observed from the assigned earthquake. The July 21, 1952, Kern County, California, earthquake is the largest earthquake to occur in the western U.S. since 1906, and the repeat of this event poses a significant seismic hazard. The Kern County event was a complex thrusting event, with a surface rupture pattern that varied from pure left-lateral strike-slip to pure dip-slip. A time dependent moment tensor inversion was applied to ten observed teleseismic long-period body waves to investigate the source complexity. Since a conventional moment tensor inversion(constant geometry through time) returns a non-double-couple source when the seismic source changes(fault orientation and direction of slip) with time, we are required to use the time dependent moment tensor which allows a first-order mapping of the geometric and temporal complexity. From the moment tensor inversion, a two-point seismic source model with

significant overlap for the White Wolf fault, which propagates upward(20 km to 5 km) from SW to NE, fits most of the observed seismic waveforms in the least squares sense. Comparison of P, T and B axes of focal mechanisms and focal depths suggests that seismic source characteristics of the Kern County earthquake is consistent with those of Korean Peninsula Seismotectonics.

서 언

본 연구는 한반도의 지진지체구조 특성 (Seismotectonic Characteristics)에 부합되는 내진설계용 부지응답 스펙트럼(Site Response Spectrum) 작성을 위한 유사지진 선정에 관한 연구이다.

우리나라 현실상 원자력 관련 시설물의 내진설계를 위하여 가장 필수적인 입력 자료중의 하나인 의미있는 강지진동 자료(Strong Ground Motion)가 전무하여 미국 원자력 규제 위원회 (US NRC)의 여러가지 규제요건중 하나인 Reg Guide 1.60의 표준응답 스펙트럼을 과기처 고시(제 83-5호)로서 원용하고 있다.

한반도의 지진지체구조 특성에 부합되는 내진설계용 부지응답 스펙트럼 작성을 위해서는 지진과 관련된 모든 요소들을 충분히 고려하여야 한다. 그러므로, 모든 지진관련 요소들의 정보를 함축하고 있는 지진자료 특히 관측된 강지진동 파형자료가 빈약한 우리나라 현실을 고려할 때 원자력 관련 시설물 등의 중요 구조물 내진설계에 원용되고 있는 표준응답 스펙트럼의 모양 특성(Shape Characteristics)이 한반도내 지진지체구조 특성에 대한 부합 여부는 아직 확인되지

않고 있는 실정이다.

또한, 최근에 표준응답 스펙트럼 모양 특성이 특히 저주파수 대역에서 너무 보수적 (Conservative)이라는 연구보고도 있다 (Trifunac and Anderson, 1978; Newmark and Hall, 1982). 또한, 이러한 점을 고려하여 부지조건을 토양 및 암반 등으로 분리하여 새로운 부지응답 스펙트럼(Ground Response Spectrum)등도 제시되었다 (Newmark and Hall, 1982).

그러므로, 자연적 귀결로서 우리나라의 원자력 관련 시설물의 내진설계용 부지응답 스펙트럼을 개발하기 위하여 다음 사항에 대한 연구가 필요하다고 하겠다. 즉, 관측된 강지진동 파형자료가 거의 없기 때문에, 한반도 지진지체구조 특성에 부합되는 현실적으로 가장 유사한 외국의 지진을 우선 선정한 후, 선정된 유사지진으로부터 발생한 강지진동 자료를 전산처리하여 미국 원자력 규제위원회의 Reg Guide 1.60에서 정의된 표준응답 스펙트럼과 일반적 특성을 비교하여 보는 일도 당연한 과제이며 의미있는 일이라고 할 수 있다.

본 연구에서 우선 Kern County 지진 (1952년 7월 21일, 리히터 규모 ML = 7.2)을 임의로 유사지진 선정을 위한 대상으로 삼았으

며, 이용된 지구물리 자료는 Kern County 진앙으로부터 원지진 진앙거리(Teleseismic Distance)에서 관측된 10 개의 체파형(7 개 P 파형, 3개 SH 파형)이다. Kern County 지진을 임의로 선정할 이유는 본론에 구체적으로 언급되어 있다.

지진원 특성을 대표하는 여러가지 모델중에서 시간중속 함수로서의 Seismic Moment Tensor가 지진원 특성을 대표하는 모델을 이용하였다(Gilbert and Dziewonski, 1971; Buland and Gilbert, 1976; Backus and Mulcahy, 1976). 그리고 Forward 가 아닌 Inverse 방법을 이용하여 Kern County 지진을 야기시킨 단층면의 주향, 경사 및 Slip Angle, 진원심도, Source Time Function, 복잡 또는 단순 지진원등과 같은 지진원의 제매개변수들을 평가하였다(Langston, 1981; Barker and Langston, 1981; Sipkin, 1982). 지진원 변수들을 구할 때 진원심도를 제외한 모든 지진원 관련 변수들을 선형적 Inversion 과정으로 구하였다. 그러나, 진원심도의 경우 관측파형의 유도된 지진원 제매개변수를 이용하여 작성된 합성파형에 대한 부합성 및 기존 지진지체구조 특성과 부합성을 평가기준으로 비선형 Inversion 과정으로 구하였다(Stump and Johnson, 1977).

지진원특성 유도방법 및 결과

일반적으로 강지진동 자료가 임의 지역의 중요구조물 내진설계와 같은 목적에 의미를 갖기 위하여 지진원 특성, 지진파가 통과하는 중간 매질의 탄성적 특성 및 구조물이 위치하고 있는 부지의 탄성적 특성 등의 기본적 요소를 충분히 대표할 수 있어야 한다(Helmberger, 1983; Wallace, 1986). 예를들면 지진원 특성을

잘 대표하기 위하여 지진규모면에서 미소지진(Micro Earthquake) 보다는 Macro Earthquake가 되어야 하며 그리고 중간규모 이상의 규모가 되어야 한다. 왜냐하면 미소지진의 특성은 내진설계의 주요 대상이 되는 중간규모 이상의 지진원 특성을 대표하기에는 탄성 에너지의 상대적 규모 등에서 너무나 많은 문제점을 갖고 있기 때문이다. 그러므로 대표될 수 없는 미소지진으로부터 야기된 강지진동을 이용, 스케일하여 내진설계에 적용할 경우 결과적으로 구조물의 안전성에 많은 문제점을 내포할 수 있다. 여기서 지진지체구조 특성이라 함은 주향단층, 정단층, 역단층등의 단층면위에서 순간적인 변위에 의한 지진을 발생시키는 지체구조력, 또한 이러한 지체구조력과 관련된 지진발생특성 특히 지진 규모별 연간 지진발생 빈도 및 지진발생의 시간적인 양상등을 말한다.

우리나라의 경우, 주로 태평양판(Pacific Plate)이 유라시아판(Eurasia Plate) 아래로 침강(Subduction) 할 때 발생하는 지체구조력이 커다란 부분적 요소로 작용하는 것으로 알려져 있다(Jun, 1991; Juan, 1986; Hilde, 1984). 또한, 탄성적으로 성질이 판이한(Heterogeneous) Interplate 단층면상에서 지진이 발생한 것이 아니고, 탄성적 성질이 서로 동일한(Homogeneous) Intraplate 내부의 약대와 관련하여 지진이 발생하고 있는 것으로 알려져 있다(김준경, 1991). 그리고, 우리나라 원자력 시설의 주도입국인 동시에 원자력 시설물의 내진설계와 관련된 기초자료를 주로 원용하고 있는 북미의 지진지체구조와 비교할 경우, 특히 지진원 및 지진파 전달 특성을 고려할 경우, 지진활동이 활발하고 주로 판경계에서 지진이 발생하는 북미 서부지역보다는 상대적으로 지진활동이 활발하지 못하고 진앙이 주로 판 내부에 위치하는 북미 대륙 동부의 지진지체구조 특성

에 더욱 유사한 것으로 알려져 왔다(정대현, Personal Communication). 그러나, 최근의 연구보고에 의하면 MMI 스케일 VI 이상에 대해서는 북미 대륙의 동부 및 서부지역의 지진과 전달특성 차이가 거의 없는 것으로 보고하고 있다(Hanks and Johnston, 1992). 또한, 이러한 외형적 차이점에 대한 가장 커다란 요소는 지진원 요소중의 하나인 Stress Drop으로 보고하고 있다(Kanamori and Clarence, 1986; Wallace, 1986).

첫째, 북미에서 발생한 지진파형 자료를 본 연구의 자료로 이용하는 이유는 위에서 언급한 바와 같이 한반도 지진지체구조와 비교한 연구 결과가 존재하고 있다는 장점외에도 미국에서 1932년 강지진동이 처음 관측된 이후로 강지진동에 대한 자료가 가장 많이 축적되어 있으며 또한 데이터 베이스화가 가장 잘 되어 있다.

둘째, 북미에서 발생한 지진 중 Kern County 지진을 임의로 본 논문의 연구대상으로 선정한 이유는, 강지진동 자료의 풍부성 면에서 살펴보면 Kern County 지진은 Overburden (Stiff Soil or Soft Soil), Rock 조건등 여러 가지 내진대상 구조물의 다양한 부지조건에서 관측되었다. Near Field, Regional Distance, Teleseismic Distance 등 다양한 범위의 진앙거리 뿐만 아니라 변위장, 속도장 및 가속도장 등 여러가지 관측된 물리량 자료가 여타 지진에 비하여 상대적으로 훨씬 풍부하기 때문에 선정되었다. 또한, Kern County 지진은 미국의 원자력 규제요건인 표준 응답스펙트럼 작성을 위하여 이용된 100 여개의 지진자료중의 하나로서 이용되었다(Reg Guide 1.60). 여러 가지 원자력 관련 NUREG 보고서 뿐만 아니라 EPRI 보고서 등에서도 원자력 시설물의 내진설계 연구를 위하여 Kern County 강지진동 자료의 중요성에 대하여 언급하고 있다.

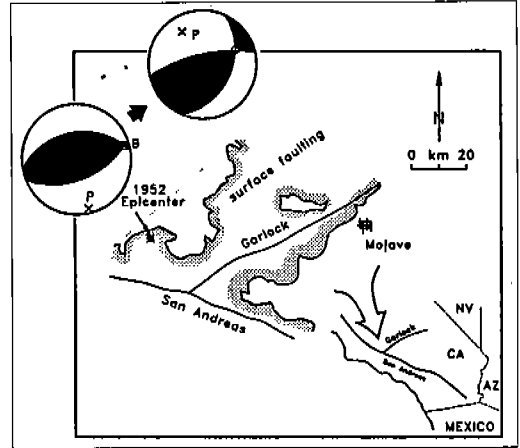


Fig. 1 Two focal mechanisms with the epicenter location of the 1992 Kern County earthquake. Two focal mechanisms show dominantly thrust motion and also show that strike angle is rotated counterclockwise, dip angle becomes shallower. There is more strike slip component at NE portion of the White Wolf fault.

Kern County 지진의 진앙지는 Fig. 1 에서 보는 바와 같이 Big Band 지역에 위치하고 있고 주위는 San Andreas 단층 및 Garlock 단층과 같은 선구조가 분포하고 있다. Kern County 지진과 직접 관련된 Seismogenic 단층인 White Wolf 단층도 보여주고 있다. Kern County 지진의 특징은 진앙지 부근에서는 지진과 직접 관련된 지표단층이 거의 발견되지 않았고 진앙지로부터 약 60km 북동쪽에서 지표단층이 발달하여 계속 북동쪽으로 연속되어 있음을 보여주고 있다.

Fig.2는 Seismic Moment Tensor Inversion을 위하여 이용된 10개의 체파형을 보여주고 있으며 이들 체파형 중에서 7개는 P 파형, 3개는 SH 파형으로 이루어져 있다. 그리고 Seismic Moment Tensor Inversion 과정으로부터 결과되는 2개의 Subevent 중에서 첫번째

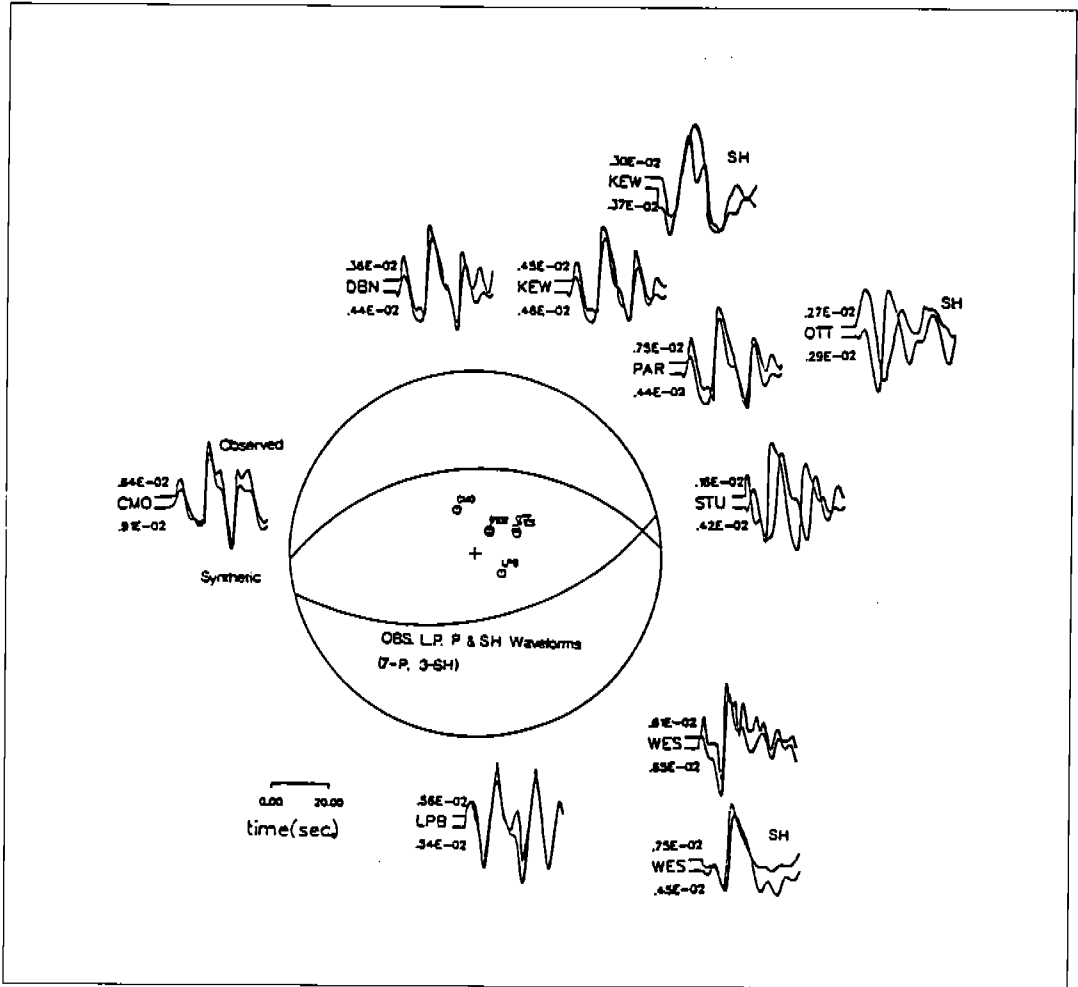


Fig. 2 Teleseismic station distribution and corresponding long period teleseismic P and SH waveforms(upper ones are observed and lower ones are synthetic) for the moment tensor inversion. 7 P-waveforms and 3 SH-waveforms are used for waveform inversion which are recorded on a variety of historic instruments. This figure also shows waveform matches between observed and synthetic results from the time dependent moment tensor inversion.

Subevent의 Focal Mechanism 및 지진파의 관측점의 위치를 보여주고 있다. 각각의 파형 Trace 중에서 위의 파형은 관측된 파형, 아래의 파형은 Seismic Moment Tensor Inversion 과정으로부터 유도되는 결과를 이용한 합성파형 (Langston and Helmberger, 1975)을 나타낸다. P 파형 및 SH 파형의 초동극성(First Motion Polarity) 뿐만 아니라 파형 전체적으

로 관측파형 및 합성파형이 대체로 잘 일치되고 있음을 보여주고 있다.

또한, 본 연구에서는 Seismic Moment Tensor 요소를 시간독립변수로 보는 방법 (Time Independent)을 이용하지 않고, 이 방법보다 더욱 많은 장점을 지니고 있는 시간종속 변수로서의(Time Dependent) Seismic Moment Tensor Inversion 방법을 이용하였

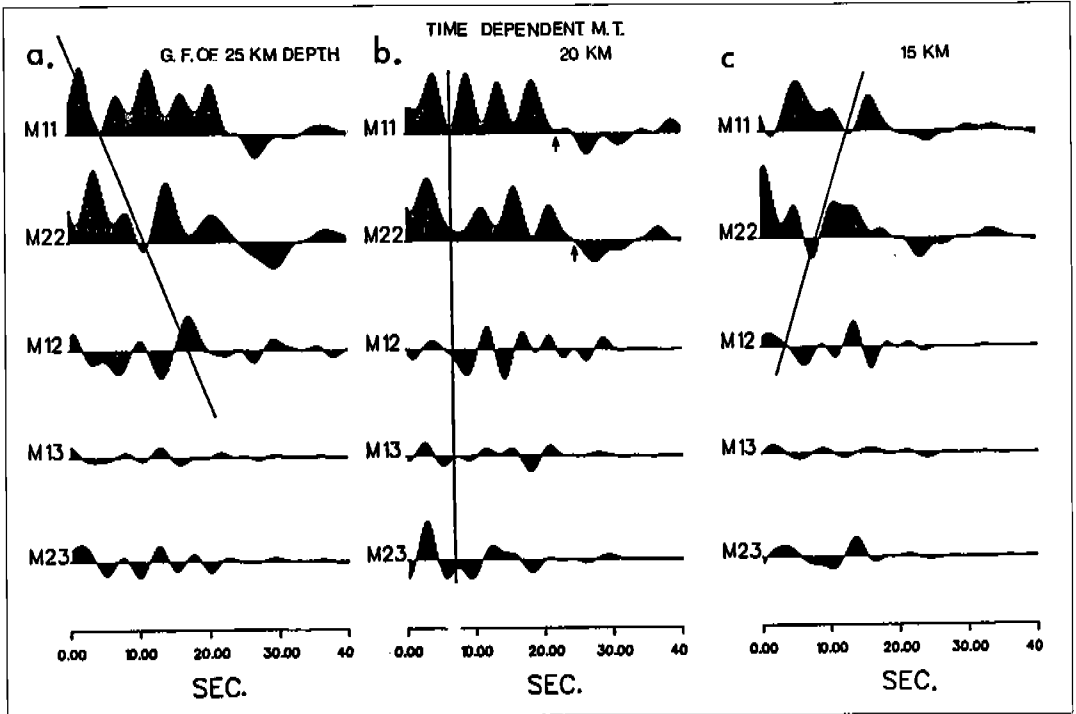


Fig. 3 Resultant time dependent moment tensor elements or moment tensor functions from the waveform inversion of the 1952 Kern County earthquake with Green's functions of 25km, 20km and 15km focal depths. Considering the temporal consistency, resultant moment tensor functions for three different focal depths show clockwise rotation of temporal lines for 25km, 20km, and 15km focal depths. Time dependent moment tensor elements for 20km focal depth show most well developed temporal consistency and those for 15km focal depth show worst.

다. 이 방법은 문제를 선형화 할 수 있다는 점, 파형 Inversion 이전에 지하핵 실험, 마그마의 돌발적 유입 그리고 단층면위의 변위에 의한 지진의 발생 등 지진원에 대한 정보가 전혀 필요없다는 점 등의 특징을 지니고 있는 방법이다. Fig. 3은 진원깊이의 변화에 따른 5개 Seismic Moment Tensor 결과를 보여주고 있다. 이상의 Inversion 결과에 의하면 Kern County 지진은 0-8초 동안 약 20km의 깊이에서 지진발생 관련 주변위가 발생하였고 8-15 초 동안 약 5 km의 깊이에서 단층면 위의 주변위 발생에 의한 지진임을 Fig. 4는 보여주고 있다.

또한, Fig. 4는 5개의 시간종속 Seismic

Moment Tensor 요소의 조합으로부터 결과되는 Focal Mechanism에 의하면 Kern County 지진은 약간의 차이는 있으나 주압축 응력방향은 남북 수평방향이고 주인장 응력방향은 거의 수직인 복합 역단층임을 보여주고 있다.

또한, Fig. 5는 본 방법의 장점 중의 하나인 시간종속(Time Dependent) 변수로서 Seismic Moment Tensor Inversion 방법을 이용 약 3초 간격으로 Time Window를 이용하여 Kern County 지진의 Focal Mechanism의 시간적인 변화를 보여 주고 있다. 즉, 첫 지진 시작점으로 부터 북동쪽으로 전파하여 갈수록, 동시에 진원심도가 감소하여 갈수록 지진을

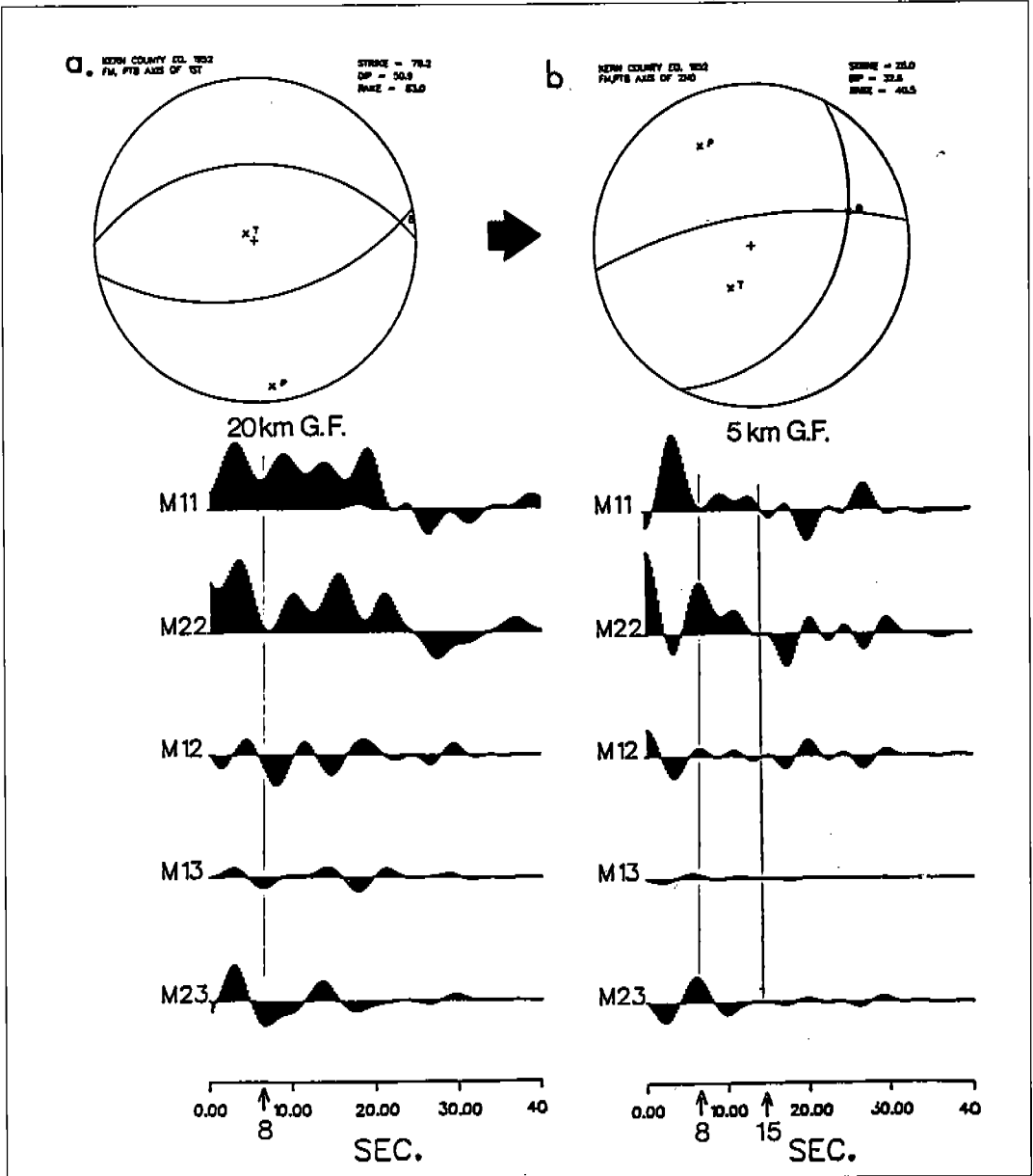


Fig. 4 Two focal mechanisms and corresponding moment tensor functions for two subevents from the waveform inversion of the 1952 Kern County earthquake. The focal depths are resolved as 20km and 5km for the first and second subevent, respectively.

야기시킨 단층면의 주향의 반시계 방향(CCW)으로의 변화 및 사교변위 성분의 점진적인 가미를 잘 보여주고 있다. 이와 같은 주향의 변화 및 사교변위 성분의 점진적인 가미는 광역적 지체

구조력의 변화에 의한 결과라고 해석하기 보다는 진원심도가 감소할수록 국지적 요소 즉, 국지적으로 이미 존재하고 있는 약대, 진원심도가 얇아짐으로서 지층력의 수평·수직성분의 상대적

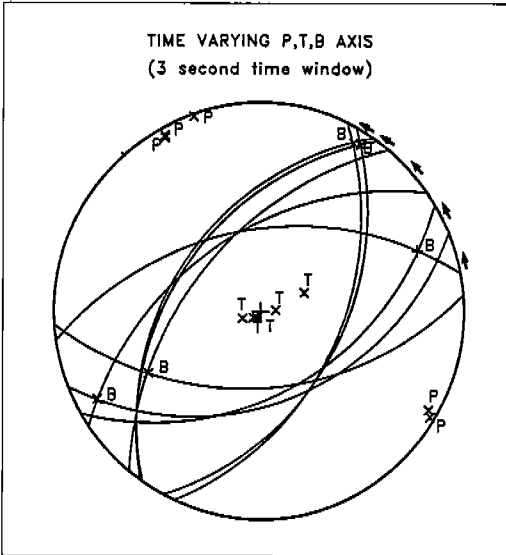


Fig. 5 The evolving P, T and B axes with 3 seconds time windows from zero to 15 seconds of seismic energy release. There are counterclockwise rotation in strike with time. All the P, T, and B axes from the waveform inversion are pretty well stabilized for this time interval.

변화 등에 의한 영향이 상대적으로 더욱 중요한 역할을 하는 것으로 생각된다(Zoback and Zoback, 1980).

시간중속 Seismic Moment Tensor 요소의 조합으로부터 결과되는 Kern County 지진의 Focal Mechanism에 의하면 약간의 차이는 있으나 구조지질적으로 이미 지표에 발달되어 있는 주단층과 주향 및 경사 등이 대체로 잘 일치하고 있다. 또한, Fig. 6에서 보여주는 바와 같이 Castle(1978), Dunbar et al.,(1980), Stein and Thatcher(1981) 등에 의한 연구 결과와 잘 일치하고 있다.

결 언

결론적으로 Kern County 지진원 특성에 대

한 평가 결과와 적어도 지금까지 알려져 있는 한반도 지진지체구조 특성과의 비교를 통하여 과연 Kern County 지진이 유사지진으로 선정될 가능성에 대하여 검토하였다.

Kern County 지진은 첫째, 판구조론적으로 의미를 살펴보면 탄성적으로 성질이 판이한 (Heterogeneous) 판경계인 Interplate 단층면 상에서 지진이 발생한 것이 아니고, 지진이 단층면 주위의 탄성적 성질이 서로 비슷한 (Homogeneous) Intraplate 상에서 발생하고 있는 것으로 알려져 있다.

Interplate 및 Intraplate 에서 발생하는 지진은 상호간에 지진원 메카니즘의 특성, 지진파가 전달되는 중간매질의 특성(주파수 함수로서의 감쇠특성)등 관측된 지진파의 파형을 결정하는 데에 중요한 요소들 면에서 커다란 차이점이 있는 것으로 지적되고 있다(Trifunac and Anderson, 1978). 그러므로, 현재까지 알려진 한반도 지진지체구조 특성상 Intraplate에서 발생한다는 지진발생 특성과 잘 부합되고 있다.

둘째, 지진규모 면에서 리히터 지진규모가 약 7.2로서 임의의 지체구조구의 지진학적 특성을 충분히 대표할 수 있는 규모이다. 또한, 현재 한반도의 가능한 지진지체구조구 (Seismotectonic Province) 개념을 이용한 각 구조구에 가능한 최대잠재지진 규모보다는 상대적으로 지진규모가 크지만 Scale Down 하여 충분히 이용가능하다(Newmark and Hall, 1982; CAN/CSA-N289.5-M91, 1991).

셋째, Kern County 지진원의 메카니즘을 고려할 때 Focal Mechanism으로 부터 유추가능한 지체구조력 중 주압축 응력방향(Principal Compressional Stress)은 대체로 남북 수평 방향이고 주인장 응력방향(Principal Tensional Stress)은 수직성분 및 사교성분이 동시에 가미된 역단층임을 보여주고 있다. 이러

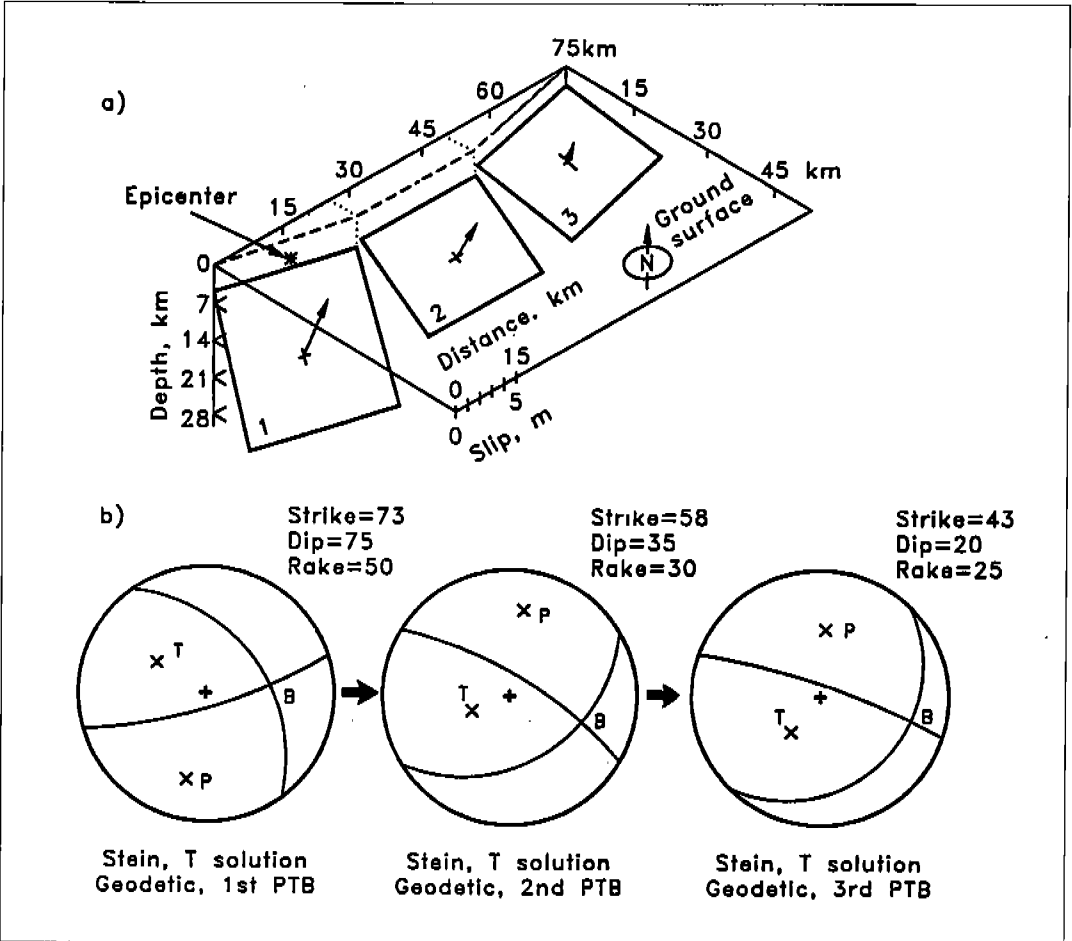


Fig. 6 Three planar fault surfaces and corresponding inferred focal mechanisms of the 1952 Kern County earthquake from Stein and Thatcher's (1981) interpretation using geodetic data. Three evolving focal mechanisms show counterclockwise rotation in strike, shallower in dip angle, and more left lateral strike slip at later part of seismic energy release.

한 Focal Mechanism은 우리나라에서 발생한 대표적인 계기지진들 중 홍성 지진(1978년 10월 7일) 및 지리산 지진(1936년 7월 3일)의 Focal Mechanism이 보여주는 바와 같이 역단층을 야기시킨 수평 주응력 방향면에서 잘 부합되고 있다.

넷째, 강지진동 자료의 풍부성 면에서 살펴보면 Overburden(Stiff Soil or Soft Soil), Rock 조건등 여러가지 부지 조건뿐만 아니라

다양한 범위의 진앙거리에서 관측된 자료가 여타 지진에 비하여 상대적으로 풍부하다. 또한 Kern County 지진은 미국의 표준 응답스펙트럼 작성 등을 위하여 중요한 자료로 이용되었으며 여러가지 NUREG 보고서에서도 Kern County 지진으로부터 관측된 강지진동 자료를 내진설계용 기본자료로서 언급하고 있다.

다섯째, 진원심도를 고려할 때 진앙은 맨틀내부가 아닌 전형적 지각내에서 발생하였다. 이 점

또한 홍성 지진, 지리산 지진, 일련의 포항 앞바다 지진(1963년)뿐만 아니라 계기관측에 기초하여 평가된 한반도에서 발생한 대부분의 지진재해 평가에 중요한 지진원의 진원심도가 일반적인 지각내에 분포되어 있다는 사실에 비추어 보아 한반도내 지진지체구조 특성과 대체로 잘 부합되고 있다.

결론적으로 Kern County 지진은 한반도 지진지체구조 특성에 부합되는 현실적으로 유사한 외국의 지진들 중의 하나로서, 선정된 Kern County 지진으로부터 발생한 강지진동 자료를 전산처리하여 표준응답 스펙트럼과 일반적 특성을 비교하여 보는 일도 의미있는 일이라고 할 수 있다.

참 고 문 헌

- 김준경, 1991, 초동극성분포를 이용한 홍성지진의 Focal Mechanism 연구, 지질공학회지, 1, pp.121-136.
- Backus G. and M. Mulcahy 1976, Moment Tensors and other phenomenological description of seismic sources - I. Continuous Displacements, Geophys. J., 46, pp. 341-361.
- Barker, J.S. and C.A. Langston, 1981, Inversion of teleseismic body waves for the moment tensor of the 1978 Thessaloniki, Greece, earthquake, Bull. Seismol. Soc. Am., 71, pp. 1423-1444.
- Buland, R. and F. Gilbert, 1976, Matched filtering for the seismic moment tensor, Geophys. Res. Papers 3, pp.205-206.
- CAN/CSA-N289.5-M91, 1991, Ground Motion Determination for Seismic Qualification of CANDU Nuclear Power Plants.
- Castle, R. O., 1978, Leveling Surveys and the Southern California Uplift, Earthquake Inform. Bull., 10, pp.88-92.
- Dunbar, W.S., D.M. Boore, and W. Thatcher, 1980, Pre-, Co- and Post-Seismic Strain Changes Associated with the 1952 ML=7.2 Kern County, California Earthquake, Bull. Seismol. Soc. Am., 70, pp.1893-1905.
- Gilbert, F. and A.M. Dziewonski, 1975, An application of normal mode theory to the retrieval of structural parameters and source mechanisms from seismic spectra, Phil. Trans. Roy. Soc. London, Ser. A., 278, pp. 187-269.
- Hanks T. C. and A. C. Johnston, 1992, Common Features of the Excitation and Propagation of Strong Ground Motion for North American Earthquakes, BSSA, 82, pp.1-23.
- Helmberger, D.V. 1983, Theory and application of synthetic seismogram, Earthquake observation, theory, and interpretation, Soc. Italiana di Fisica, Bologna, Italy.
- Hilde, T.W.C., Uyeda, S. and Kroenke, L., 1984, Evolution of the Western Pacific and its margin, Tectonophysics, 38, pp.145-165.
- Juan, V. C., 1986, Thermal Tectonic

- Evolution of the Yellow Sea and East China Sea- Implication for Transformation of Continental to Oceanic Crust and Marginal Basin Formation, *Tectonophysics*, 125, pp. 231-244.
- Jun, M.S., 1991, Body-wave Analysis for Shallow Intraplate Earthquake in the Korean Peninsula and Yellow Sea, *Tectonophysics*, 192, pp.345-357.
- Kanamori, H. and R. A. Clarence, 1986, Earthquake Repeat Time and Average Stress Drop, *Earthquake Mechanics*, Geophysical Monograph 37, Maurice Ewing 6, pp.227-235.
- Langston C.A., 1981, Source inversion of seismic waveforms: the Koyna, India, earthquakes of 3 September 1967, *Bull. Seismol. Soc. Am.*, 71, pp.1-24.
- Newmark N.M. and W. J. Hall. 1982, Earthquake spectra and design. EERI monograph series, Earthquake engineering research institute publication, California.
- Sipkin, S.A., 1982, Estimation of earthquake source parameters by the inversion of waveform data: synthetic waveforms, *Phys. Earth planet. Int.*, 30, pp.242-259.
- Stump, B.W. and L.R.Johnson, 1977, The determination of source properties by the linear inversion of seismograms, *Bull. Seismol. Soc. Am.*, 67, pp.1489-1502.
- Trifunac. M.D. and J.G. Anderson, 1978, Preliminary empirical models for scaling pseudo relative velocity spectra, Appendix A in *Methods for prediction of strong earthquake ground motions*. U.S. Nuclear Regulatory Commission Report NUREG/CR-0689.
- Wallace, T.C., 1986, Inversion of Long Period Regional Body Waves for Crustal Structure, *Geophysical Research Letters*, Vol 13, No 8, pp. 749-752.
- Zoback, M. L. and M. Zoback, 1980, State of Stress in the Conterminous United States, *J. Geophys. Res.*, 85, pp.6113-6156.