2007 한국물리탐사학회· 대한지구물리학회 공동학술대회
2007년 6월 7일(목) ~ 8일(금), 한국지질자원연구원

울진지진(2004/05/29)의 지진원상수에 관한 연구

유성화[1], 김준경[2], 오태석[3]
[1]세명대학교 자원환경공학과 대학원, ctc1234@hanmail.net
[2]세명대학교 자원환경공학과 교수
[3]지질자원연구원 지진연구센터

A study for Earthquake Parameter of Ulgin Earthquake

Seonghwa Yoo[1] , Junkyoung Kim[2] , Teasuk Oh[3]

[1]Semyung Univ
[2]Semyung Univ
[3]KERC Div., KIGAM KERC

Abstract: The source mechanism parameters of the Ulgin earthquake on 29 May 2004 are analyser using moment tensor inversion technique. The Green's function are calculated for the Kim's(1985) crust model of southern Korean Peninsula. Results derived from the Ulgin earthquake show the dependence of azimuthal station distribution and epicentral distances. final results show fairly good agreement to those of other authors. the focal mechanism for the Ulgin earthquake is found to be oblique reverse motion with NNE strike. The focal depth is estimated to be 10-12km.

1. 서론

일반적으로 관측된 지진파형을 이용하여 진앙깊이, 진앙위치 및 지진원 진원기구 등과 같은 지진학적 해를 구하고 있다. 주로 천발지진일 경우 지진학적 해가 지진이 진앙 지역의 제4기 지표지질 현상과 대체로 유사한 특성을 보여주고 있으나 경우에 따라 지진학자 등이 제시한 지진원 발생 모델 보다 지표부근에서 훨씬 복잡한 지질구조를 보여 주기도 한다. 따라서 지진이 발생한 부근지역의 복잡한 진앙 부근 지질 특성을 설명하기 위해 보다 복잡 지진원 모델을 제시하기 시작하였고 또한 최근 관측기술의 향상과 처리 및 분석기술의 발달로 인하여 어느 정도 확인이 가능하게 되었다. 구체적으로 예를 들면 모멘트텐서 지진원 대표이론(Moment Tensor Source Representation Theorem)을 이용하여 지진파형을 분석할 경우 Non double coupled seismic source 성분이 심각하게 구성성분을 이루고 있어, 단순히 단층면위의 slip 현상으로 설명할 수 없는 부분이 많이 관찰되었다(Sipkin, 1997). 이러한 현상은 현재의 우리가 알고 있는 지진원 모델이 지진이라는 물리적 현상을 근본적으로 잘 대표하지 못하고 있거나 또는 관측 자료 및 자료의 분석과정에 문제가 있는 것일 수도 있다. 지진원 복잡성을 연구하기 위해 여러 가지 방법이 제시되어 있고 모멘트텐서 지진원 대표이론도 하나의 방법이다. 본 연구는 모멘트텐서 지진원대표 이론을 이용하여 2004년 5월 29일 발생한 울진지진의 지진원 상수들을 분석하였다.

2. 연구방법

2.1 기본 지배방정식

지진원이 등가 double coupled body force로 대표가능하고 모멘트텐서가 secondrank tensor라고 가정할 경우 지진원에 대한 지구물질의 동탄성학적인 반응은 다음과 같은 식으로 표현 가능하다.

$$Uk(x',t') = Gki,j(x',t';O,O) * Mij(O,t') \quad (1)$$

여기서 Uk ; the displacement in the k-th direction,
Gki,j ; the elastodynamic Green's function,
Mij ; a set of time dependent moment tensors,
* ; convolution operator
k ; vertical (k=l), radial (k=2), and tangential (k=3) motion.

위식에서 변수의 primed variables은 관측소 좌표계를 나타내고 unprimed variables은 지진원 좌표계를 나타낸다. 관측 지진파형으로부터 역산을 통하여 지진원에 대한 정보를 분석해 내기 위하여 역산 과정은 크게 두 가지로 분류된다. 한 가지 방법은 전형적으로 시간영역에서 이루어지는 역산 분석방법이고 다른 하나의 방법은 주파수 영역에서 이루어지는 역산 방법이다. 전형적으로 시간영역에서 이루어지는 역산 분석방법에 대하여 살펴보면 Mij(O,t) 성분이 모두 동일한 source time history를 가지고 있다고 가정하는 것이다. 이 경우 (1)식은 Mij(t)가 아니고 즉 시간함수가 아니고 고정 상수로서 역할을 하고 Mij전체에 대한 시간 변화의 세기를 S(t)로 표시하면 다음 (2)식과 같다.

$$Uk(x',t') = [\ Gki,j(x',t';O,O)*S(t)\ ]\ Mij \quad (2)$$

위식에서 Mij는 주어진 식에서 유일하게 구하여야 할 변수로 취급된다. 또한 S(t)는 the source time function이고 미리 알고 있다고 가정하며 duration of the seismic source 및 rapid or slow rise time와 같은 history of seismic source excitation 등과 같은 지진원 정보를 모두 포함하고 있다. 하지만 seismic source time function인 S(t) 가 잘 알려져 있지 않은 경우 또는 하나의 미지수로 취급될 경우 식 (2)는 비선형식으로 변형된다. 즉 Mij 뿐만 아니라 S(t) 역시 미지수가 된다. 특히 Denudation 면에서 발생하는 지진과 같이 단층면이 시간에 따라서 변할 경우 Mij 도 시간상수가 아니고 시간에 따라 변하는 하나의 변수조합으로 되어 역산과정은 보다 복잡하게 된다. 하지만 시간영역에서의 복잡성 및 이로 인하여 야기된 비선형성을 주파수 영역에서 일부 선형성으로 해결할 수 있다.

3.연구결과 및 토의

본 연구에서 사용한 자료는 울진지진으로부터 비교적 가까운 동해지역에서 2004년 5월 29일 발생한 지진(국지규모 5.1)으로부터 관측된 16개 지반진동 자료를 이용하였으며 Fig. 1에 제시되어 있다. Table. 1은 각 기관별 진앙위치를 제시하였고 Fig. 1은 본 연구에서 이용한 지진자료의 지진관측소 및 진앙위치를 나타내고 있다. 특히 기상청, 한국지질자원연구원 및 미국지질조사연구소가 결정한 3가지 종류의 진앙위치를 표시하였다. 진앙으로부터 가장 가까운 관측소는 ULJ(울진)이고 거리가 약 71km이고 가장 먼 관측소는 BRD(백령도)로서 거리가 약 502km이다. 또한 진앙을 중심으로 관측소의 방위각을 살펴보면 거의 3사분면에 위치하고 있고 유일하게 ULL(울릉도)관측소가 1사분면에 위치하고 있어 방위각 분포의 집중현상을 다소 완화시킬 수 있다.

Table 1 기관별 진앙위치

진앙위치 결정기관	진앙위치		비고
	위도	경도	
한국기상청(KMA)	36.8	130.2	
한국지질자원연구원(KIGAM)	36.6572	130.1047	
미국지질조사연구소(USGS)	36.67	129.94	

본 연구에서는 green function 계산을 위해 KSK 지각모델과 KSG 지각모델, CUS 지각모델(Fig. 2)을 이용하였고 Fig. 2는 지각모델의 속도와 깊이에 대해 그래프로 나타내었다. 세 개의 지각모델 중 KSK지각모델과 KSG지각모델은 4층의 지각구조를 이루고 있고 CUS지각모델은 5층의 지각구조를 이루고 있다. Fig.3 그래프는 세 개의 지각모델을 이용하여 계산된 green function을 가지고 각각의 데이터를 가지고 역산을 수행한 결과로서 각각의 데이터의 지진원심도별 파형일치의 일치성에 대해 나

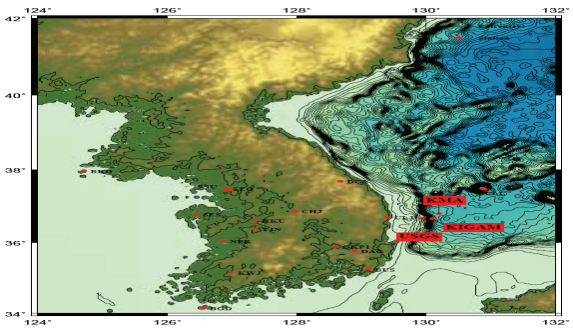

Fig. 1. 진앙지 및 관측소 위치

타내고 있으며 지진원 심도는 약 10-12km이내이다. 지진원 심도를 분석하는 과정은 모멘트텐서 역산과정에서 비선형성을 갖고 있기 때문에 각각의 심도에 따라 역

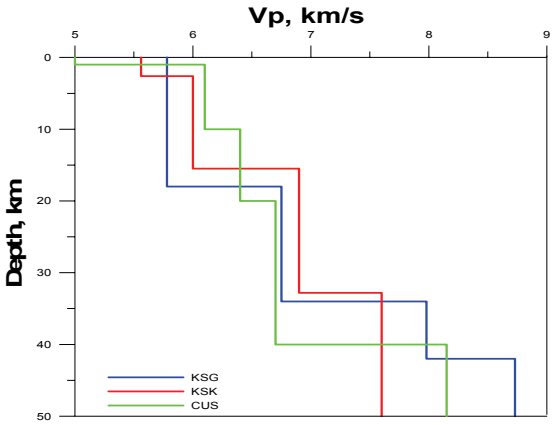

Fig. 2 Crust velocity models of the Korean peninsula

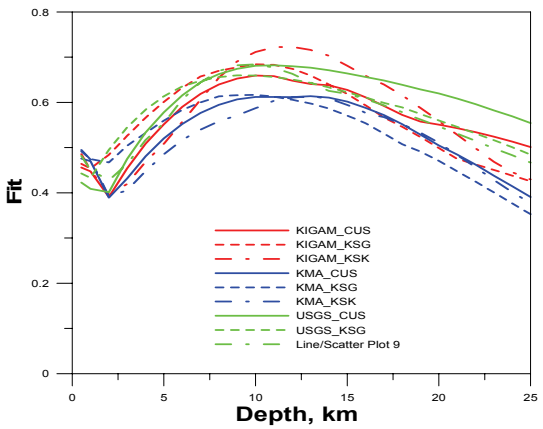

Fig. 3 Depth sensitivity of goodness of fit parameter

산을 반복하고 역산결과 중에서 관측파형과 이론파형(Fig.4)이 가장 잘 일치하는 경우에 해당하는 진원심도가 가장 적합하다고 분석한다. Fig.4 는 본 연구결과 한 관측소의 이론파형과 관측파형을 비교한 것이다. 이론파형과 관측파형이 거의 일치하는 것을 볼 수 있다.

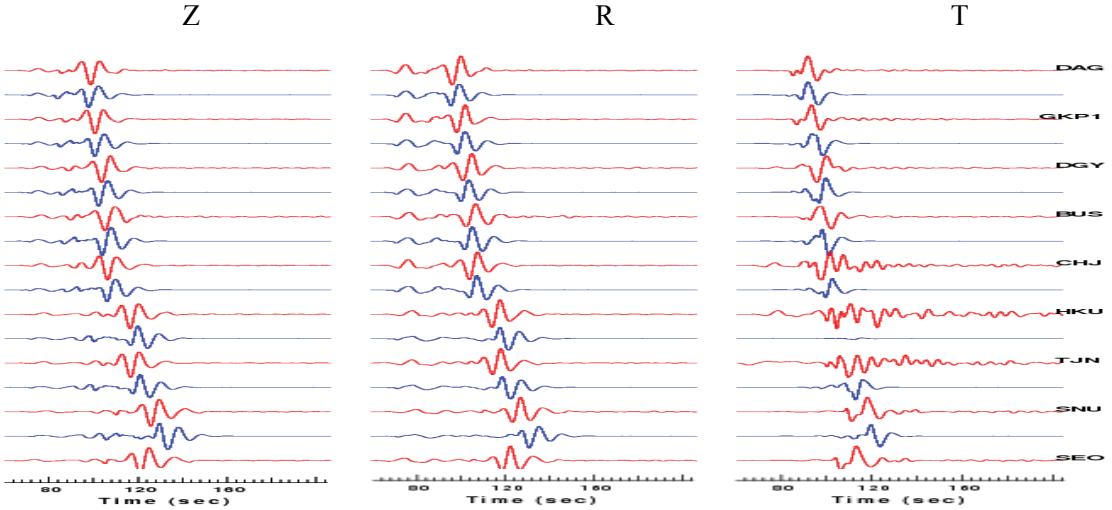

Fig. 4 Comparison of observed(red) and predicted(blue) waveform.

Fig. 5-7과 Table. 4는 진앙거리에 따라 3가지 종류의 지각모델을 이용하여 역산을 수행한 결과(Table. 4)이며 Fig. 5-7은 역산된 결과인 지진원기구(strike, dip, rake)를 Beach Ball로 나타낸 그림이다.

Fig. 5는 3 종류의 지각모델을 KIGAM의 진앙위치로 역산한 결과를 보여주고 있다. 우선 3종류의 모델은 전형적인 reverse fault경향을 보여주고 있다. Fig. 6은 USGS 진앙위치로 역산을 수행을 하였다. CUS모델과 KSG모델은 oblique normal fault의 경향을 보여주고 있으며 KSK모델은 reverse fault경향을 보여주고 있다. Fig. 7은 CUS모델과 KSK모델은 reverse fault경향을 보여주고 있고 KSG모델은 reverse fault경향을 보여주고 있으며 약간의 oblique경향을 보이고 있다.

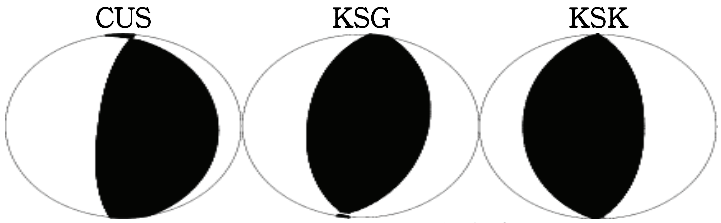

Fig.5 KIGAM 진앙위치

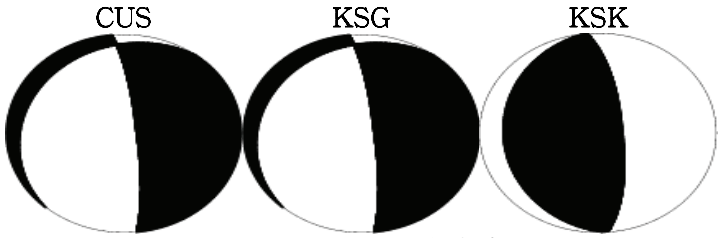

Fig.6 USGS 진앙위치

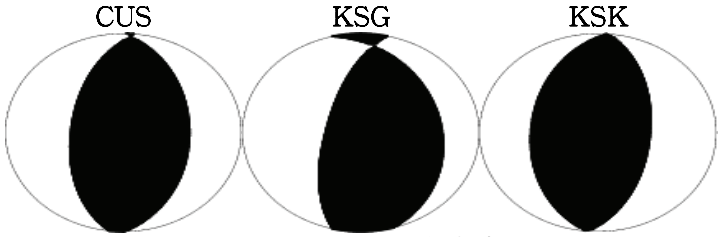

Fig.7 KMA 진앙위치

Table. 4 Analyist result of seismic parameter..

진앙위치 결정기관	지각모델	지진원 기구		M^0	M11+M22+M33
KIGAM	CUS	STK	350 : 185.9	4.67×10^{23}	(0.00115540866)+(-0.632439256)+(0.620885134)
		DIP	20 : 70.71		
		RAKE	75 : 95.38		
	KSG	STK	185 : 12.74	4.84×10^{23}	(-0.0190459341)+(-0.962014377)+(0.981060266)
		DIP	50 : 40.26		
		RAKE	85 : 95.93		
	KSK	STK	180 : 360	3.67×10^{23}	(0)+(-0.939692616)+(0.939692616)
		DIP	35 : 55		
		RAKE	90 : 90		
KMA	CUS	STK	360 : 186.5	5.55×10^{23}	(0)+(-0.981060266)+(0.981060266)
		DIP	40 : 50.18		
		RAKE	85 : 94.19		
	KSG	STK	345 : 193.28	4.51×10^{23}	(0.0530771837)+(-0.837962806)+(0.784885645)
		DIP	30 : 63.05		
		RAKE	65 : 103.71		
	KSK	STK	185 : 5	3.80×10^{23}	(-0.00748071797)+(-0.977327049)+(0.98480773)
		DIP	40 : 50		
		RAKE	90 : 90		
USGS	CUS	STK	220 : 353.99	3.67×10^{23}	(-0.0341525935)+(0.387705982)+(-0.353553385)
		DIP	15 :79.46		

		RAKE	-45 : -100.73		
	KSG	STK	220 : 353.99	2.98×10^{23}	(-0.0341525935)+(0.387705982)+(-0.353553385)
		DIP	15 : 79.46		
		RAKE	-45 : -100.73		
	KSK	STK	175 : 355	2.88×10^{23}	(-0.00488271145)+(-0.637904823)+(0.642787576)
		DIP	20 : 70		
		RAKE	90 : 90		

Fig. 5-7과 Table. 4에서 역산 결과 green function 이 다름에도 불구하고 비슷한 지진원 기구를 보이고 있지만 조금씩 다른 진앙위치에 따라 다른 경향을 보여주는 것을 보아 진앙위치도 모멘트텐서 역산에 중요한 변수라고 생각된다. 그리고 모멘트 텐서 역산을 통하여 얻어진 모멘트 값 중 M_{11} ,$M_{22,}$ M_{33}을 더한 결과 0으로 나타나고 있다. 이것은 울진지진이 순수 double couple임을 증명하고 있다. 모멘트텐서 지진원 대표이론을 현장 관측자료에 적용할 때 중요한 가정은 green's function이 지진파 전달 특성을 대표할 수 있어야 되나 본 연구에서 3종류의 지각모델이 거의 일관성을 보이는 결과가 도출되었다. 따라서 향후 연구에서는 더욱 정교한 방법을 이용하여 분석하고 그 결과들을 비교하면 보다 신뢰성 있는 결과들을 얻을수 있을 것으로 판단된다.

4. 참고문헌

정태웅, 2001, “확장 coda 규격화 방법에 의한 한국 남동부 지역의 Qp-1, Qs-1 연구”, 한국지구과학회지, **22**, 112-119.

Chung T. W. and Lee, K., 2002,“Attenuation of high frequency Lg waves around the Yangsan Fault area, the southeast Korea”, *J. Korean Geophys., Soc*., **5**, 1-8.

연관희, 2002,“수정된 Levenberg-Marquardt 역산방법에 의한 한반도 남부의 추계학적 지진요소평가”, 한국지진공학회 2002년 춘계학술대회논문집, pp. 20-27.

Junn, J. G., Jo, N. D., and Baag, C. E., 2002,"Stochastic prediction of ground motions in southern Korea", *Geoscience Journal*, **6**, 203-214.

정제원, 김준경, 2006,“경주지역에서 발생한 3개지진의 지진원 및 지진파전파 매질특성에 관한연구”, 한국지진공학회 논문집, **10**, 33-39.

Brune, J., 1970,"Tectonic stress and the spectra of seismic shear waves from earthquakes," *J. Geophys. Res.*, **75**, 997-1006.

Boore, D., 1983, "Stochastic Simulation of High-Frequency Ground Motions Based on Seismological Models of the Radiated Spectra", *BSSA*, **73**, 1865-1894.