

울진지진(2004/05/29)의 지진원 특성에 관한 연구

A study for Earthquake Parameter of Uljin Earthquake

김준경¹⁾

Kim, Jun-Kyoung

국문 요약 >> 2004년 5월 29일 발생한 울진지진에 대해 지진원 상수(지진원기구, 진원깊이, 규모, 지진원 특성 등)를 모멘트텐서 방법을 이용하여 분석하였다. 3종류의 지각모델에 대해 지각응답함수를 구하여 분석에 이용하였다. 또한 최적의 지진원 상수값을 분석하기 위해 3종류의 진앙위치를 고려하여 분석하였다. 관측소의 방위각 분포 및 진앙거리에 대해서 결과값에 약간의 영향을 주었다. 6개의 모멘트텐서 성분을 조합하여 분석한 결과 울진지진은 거의 남북방향의 주향을 가진 전형적인 역단층의 운동에 의해 발생되었다. 분석된 지진원 기구는 울진지진 진앙 주변은 동서방향의 압축방향을 가진 지체역학적인 환경을 가지고 있는 것으로 제시하고 있다. 진원깊이는 약 12km의 값을 가지고 있다. 지진원기구와 기존의 연구결과와 유사하나 진원깊이는 다소 차이가 존재하였다. 이러한 차이는 방법론, 자료 종류 또는 지진원 고유의 기하학적 형태 등에 기인하는 것으로 해석된다.

주요어 모멘트텐서 지진원이론, 지각구조모델, 대각성분

ABSTRACT >> The seismic source parameters of the Uljin earthquake on 29 May 2004, including focal depth, focal mechanism, magnitude, and moment tensor elements for source characteristics, are analysed using moment tensor seismic source inversion. The Green's function for 3 crust models representing the southern Korean Peninsula are used. Also 3 kinds of epicenters are used to find optimum solution for seismic source parameters. Results show that seismic source parameters have a little dependency of azimuthal distribution and epicentral distances of seismic stations. Final results show that the event, considering 6 moment tensor elements, is caused by the typical reverse fault with nearly NS strike. The focal mechanism implies that the tectonic force around epicenter area currently has compressive environment, with nearly EW principal axis. The focal depth is estimated to be about 12km. The resultant focal mechanism show fairly good agreement to those of other studies. However, focal depth is much different from that of other studies.

Key words Moment tensor source representation theorem, crustal velocity model, diagonal component

1. 서론

일반적으로 관측된 지진파형과 다양한 분석방법을 이용하여 진원깊이, 진앙위치 및 진원기구 등과 같은 지진학적 해를 구하고 있다. 천발지진일 경우 관측파형으로 부터 구한 지진원 관련 상수들이 진앙 지역의 제 4기 지표지질 현상과 대체로 유사한 특성을 보이는 경우가 대부분이다, 하지만 경우에 따라 지진학자 등이 제시한 지진원 발생모델 보다 진앙의 지표 부근에서 훨씬 복잡한 지질구조를 보여 주기도 한다. 따라서 진앙 부근지역의 복잡한 지질특성을

설명하기 위해 보다 복잡한 지진원 모델이 다양하게 제시되어 왔다. 또한 최근 관측기술의 향상과 처리 및 분석기술의 발달로 인하여 역시 진앙 부근의 천부심도에서 복잡한 지질 구조에 대해 해석하는 능력이 보다 향상되었다.

또한 최근 모멘트텐서 지진원 대표이론을 적용하여 지각의 천부에서 발생한 지진을 분석한 결과 다양한 지진원 특성을 보여 주었다. 특히 2003년 미국 서부지역 맘모스 레이크에서 발생한 일련의 지진은 non double couple 성분이 지진원의 성분중에서 상당한 부분을 차지하고 있는 경우를 보여 주었다. 이 경우 지진발생의 성인이 단순히 단층면위의 slip 현상으로 설명할 수 없음이 확인되고 있다. 이러한 현상은 현재 우리가 적용하고 있는 지진원 모델이 지진이라는 물리적 현상을 근본적으로 잘 대표하지 못하고 있거나 또는 관측 자료 및 자료의 분석과정에 문제가 있는 것일 수도 있다.

¹⁾ 정회원·세명대학교 자연환경공학과 교수
(대표저자: kjk-512@semyung.ac.kr)

본 논문에 대한 토의를 2008년 2월 29일까지 학회로 보내 주시면 그 결과를 게재하겠습니다.

(논문접수일 : 2007. 10. 8 / 심사종료일 : 2007. 11. 2)

여러 가지 지진원 모델중에서 특히 모멘트텐서 지진원 대표 이론(Moment Tensor Source Representation Theorem)도 지진원의 특성을 대표하는 또 하나의 모델이며 Backus, G. and Mulcahy, M.(1976)⁽³⁾ 및 Gilbert, F. and Dziewonski, A. M.(1975)⁽⁵⁾ 등에 의해 제시되었다.

본 연구는 모멘트텐서 지진원대표 이론을 이용하여 2004년 5월 29일 발생한 울진지진의 지진원기구, 진원깊이 및 지진원 특성 등과 같은 지진원 상수들을 분석하였다. 울진 지진은 최근 한반도를 포함한 주변 지역에서 발생한 지진중에서 중규모에 해당하기 때문에 진앙부근 지역을 포함하여 한반도의 지진지체구조 특성을 이해하기 위해 대단히 중요하다.

모멘트텐서 지진원 대표이론을 적용하는 연구방법은 특히 국내의 경우 Kim, S. G. and Kraeva(1998)⁽⁹⁾는 하나의 광대역 관측소 자료만을 이용하는 방법을 적용하여 국내에서 발생한 중소규모의 지진에 대해 분석하였다. 또한 김준경 외(2007)⁽²⁾은 동일하지 않은 유사한 방법을 이용하여 울진지진과 같은 국내에서 발생한 중규모 지진에 대해 적용하였다. 또한 울진지진에 대하여 그 지체구조적 중요성이 부각되어 최근 Kang, T. S. and Baag C. E.(2004)⁽⁶⁾, USGS⁽¹³⁾, Park, S. C. and Mori, J.(2005)⁽¹²⁾, 및 Kang, T. S. and Shin, J. S.(2006)⁽⁷⁾와에 의해서도 역시 연구가 되어 왔다. 본 연구에서 얻어진 지진원 관련 상수값에 대한 결과를 기존 연구 결과와 비교하여 분석하였다.

2. 모멘트텐서를 이용한 지진원 모델

지진원이 등가의 double coupled body force로 대표할 수 있고 모멘트텐서가 2차 텐서라고 가정할 경우 지진원에 대한 지구물질의 동탄성학적인 반응은 다음과 같은 식으로 표현 가능하다.

$$U_k(x', t') = G_{kij}(x', t'; o, o) * M_{ij}(o, t') \quad (1)$$

여기서, U_k ; the displacement in the k-th direction,

G_{kij} ; the elasto-dynamic Green's function,

M_{ij} ; a set of time dependent moment tensors,

* ; convolution operator

k ; vertical (k=1), radial (k=2), 그리고 tangential

(k=3) 성분 지반진동을 나타낸다.

식 (1)에서 primed 변수는 관측소 좌표계를 나타내고, unprimed 변수는 지진원 좌표계를 나타낸다. 위 식을 이용

하여 관측 지진파형으로부터 역산을 통하여 지진원에 대한 정보를 분석할 경우 파형역산 과정은 크게 두 가지로 분류된다. 한 가지 방법은 시간영역에서 이루어지는 방법이고 다른 방법은 주파수 영역에서 이루어지는 역산 방법이다. 주파수 영역에서 이루어지는 역산 방법은 convolution 연산자가 곱의 연산자가 되고 또한 관측파형 및 지각구조모델에 대한 이론적인 파형 각각이 푸리에 변환을 하고 따라서 모멘트텐서가 미지수가 되는 일차 연립방정식의 해를 구하는 과정과 일치한다.

시간영역에서 이루어지는 역산 방법은 $M_{ij}(O, t)$ 성분이 모두 동일한 지진원 시간이력(source time function)을 가지고 있다고 가정한다. 하지만 시간적으로 변화하는 복잡한 지진원을 분석할 경우 M_{ij} 가 시간적으로 변화한다고 가정할 수 있고 지진원 시간이력을 따로 분리하여 아래 식과 같이 제시가 가능하다.

$$U_k(x', t') = [G_{kij}(x', t'; o, o) * S(t)] \cdot M_{ij} \quad (2)$$

위 식에서 $S(t)$ 는 지진원 시간이력을 나타내고 미리 알고 있다고 가정하거나 근거리 관측파형을 이용할 경우 일반적으로 순간 지진원으로 가정한다. 따라서 위 식에서 M_{ij} 는 주어진 식에서 유일하게 구하여야 할 값이다. 하지만 대규모 지진 등과 같이 지진원의 시간이 상당한 시간동안 지속될 경우 $S(t)$ 역시 구하여야 할 값이다. 특히 지체구조적으로 denudation 면에서 발생하는 지진과 같이 단층면이 시간에 따라서 변할 경우 M_{ij} 도 시간에 따라 변하는 변수로 되어 식 (2)는 보다 복잡하게 된다. 본 연구에서는 순간 지진원으로 가정하였고 M_{ij} 를 역산을 통해 분석하였다.

3. 연구자료

본 연구에서 사용한 자료는 울진으로부터 비교적 가까운 동해지역의 울릉단층 부근에서 2004년 5월 29일 발생한 지진으로부터 관측된 16개 지반진동 자료이다. 표 1은 각 기관이 결정된 울진지진의 진앙위치 좌표를 제시하였고 그림 1은 지진관측소 및 진앙위치를 나타내고 있다. 특히 기상청(KMA)⁽¹¹⁾, 한국지질자원연구원(KIGAM)⁽⁸⁾ 및 미국지질조

〈표 1〉 Epicenter location for 3 different agencies

agency	epicenter location		remarks
	Lat.	Lon.	
KMA	36.8	130.2	
KIGAM	36.6572	130.1047	
USGS	36.67	129.94	

사연구소(USGS)⁽¹³⁾가 결정한 3가지 종류의 상대적인 진앙 위치가 제시되어 있다.

진앙으로부터 가장 가까운 관측소는 ULJ(울진)이며 거리가 약 71km이고, 가장 먼 관측소는 BRD(백령도)이고 거리가 약 502km이다. 또한 진앙을 중심으로 관측소의 방위각을 살펴보면 관측소가 거의 제3 사분면에 위치하고 있고 유일하게 ULL(울릉도) 관측소가 제1 사분면에 위치하고 있어 방위각 분포의 집중현상을 다소 완화시킬 수 있었다.

본 연구에서는 식 (1)에서 제시되어 있는 바와같이 지각의 지진파 전달경로 특성을 대표하고 있는 G(f)를 미리 계산하기 위해 국내 지각모델을 비교적 잘 대표하고 있는 김성

균, 정부홍(1985)⁽¹¹⁾에 의한 지각속도구조 모델(이하 KSK)과 Kim, S. J. and Kim, S. G.(1983)⁽¹⁰⁾에 의한 지각속도구조 모델(이하 KSG) 또한 국내 지각모델과 비교적 유사하다고 알려져 있는 미국 중동부 지역의 지각모델(이하 CUS)을 포함하여 모두 3종류의 지각속도구조 모델을 이용하였다. 그림 2는 3종류의 지각모델을 나타내고 있고, KSK지각모델과 KSG지각모델은 3층의 지각구조를 이루고 있고, CUS지각모델은 4층으로 구성된 지각구조를 이루고 있다.

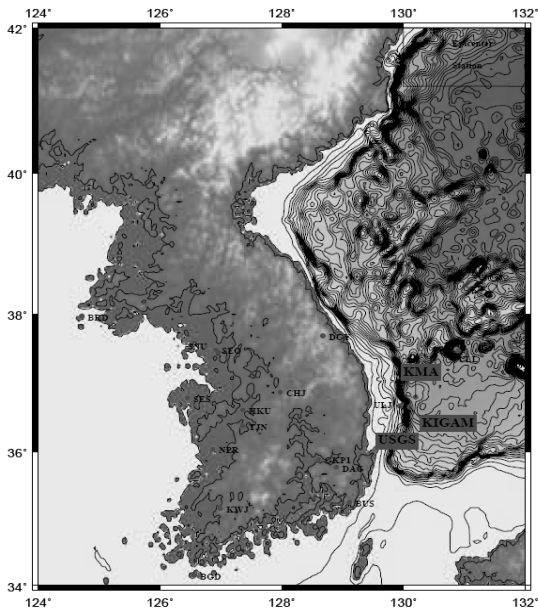
4. 진원심도 분석

위에서 제시된 3종류의 지각모델을 이용하여 우선 이론적인 지각반응함수 G(f)를 계산하였고 이를 이용하여 관측파형의 역산을 통해 진원심도를 분석하였다. 또한 진앙위치를 달리하여 지진원 심도를 분석하였기 때문에 모두 9가지 경우에 대해 분석이 수행되었다. 지진원 심도를 분석하는 과정은 모멘트텐서 지진원 모델을 이용할 경우 식 (1)에서 제시된 바와같이 비선형성을 갖고 있기 때문에 각각의 심도에 따라 역산을 반복하고, 역산결과 중에서 관측파형과 이론파형이 가장 잘 일치하는 경우에 해당하는 진원심도가 가장 적합하다고 분석한다. 관측파형과 이론파형이 일치하는 정도에 대한 관계식은 식 (3)에 제시되어 있다.

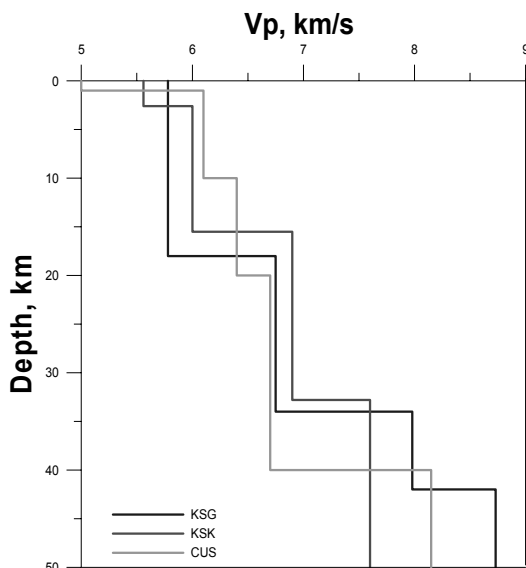
$$\text{Variance Reduction} = \left[1 - \frac{\sum (d_i - s_i)^2}{\sum (d_i)^2} \right] \quad (3)$$

여기서 d_i 는 관측파형자료이고, s_i 는 이론파형이다.

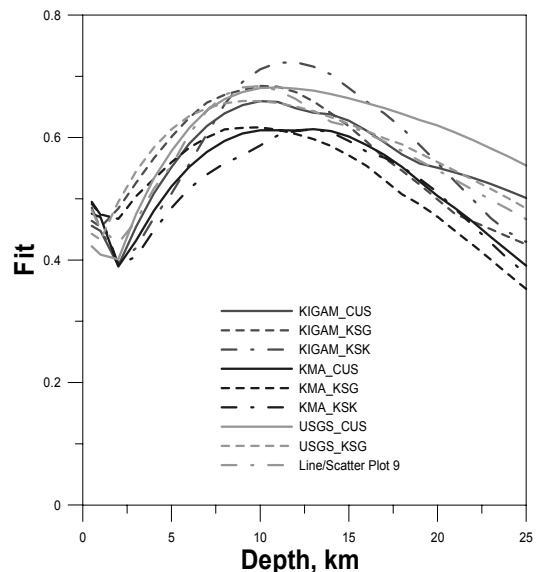
그림 3은 지진원 심도를 분석한 결과를 보여주고 있다.



〈그림 1〉 진앙 및 관측소 위치



〈그림 2〉 한반도남부 지각속도구조 모델



〈그림 3〉 진원깊이 vs. 파형 일치정도

가로축은 지진원 심도를 나타내고 세로축은 관측파형과 이론파형이 일치하는 정도를 나타내고 있다. 그림 3에 의하면 지진원 심도 분석결과 3종류의 지각모델 및 3종류의 진앙위치에 대해 모두 9가지 경우에 대해 분석을 수행하였다. 물론 서로 다른 파형일치 정도를 나타내고 있으나 지진원 심도는 9가지 경우에 대하여 모두 공통적으로 약 10 - 12km의 범위에서 일치정도가 최대값을 가지고 있어 대단히 일관성 있는 결과를 보여 주었다. 그림 3을 살펴보면 한국지질자원연구원 진앙위치 및 KSK 지각모델을 이용한 경우 최대값을 중심으로 양방향으로(진원깊이 감소 및 증가) 감소하는 기울기가 가장 급하여 진원심도를 비교적 쉽게 분석할 수 있었다. 상대적으로 미국지질조사소의 진앙위치를 이용한 경우 최대값을 중심으로 양방향으로 파형일치 정도의 감소하는 기울기가 가장 완만하다.

본 연구에서 분석된 진원심도는 표 2에서 기존 연구결과와 비교하여 제시하였다. Kang, T. S. and Baag, C. E.(2004)⁽⁶⁾, USGS⁽¹³⁾에서 제시된 결과 보다 훨씬 얕은 심도에서 Park, S. C. and Mori, J.(2005)⁽¹²⁾의 결과보다 깊은 심도의 값을

〈표 2〉 Focal depth comparison for 3 different agencies

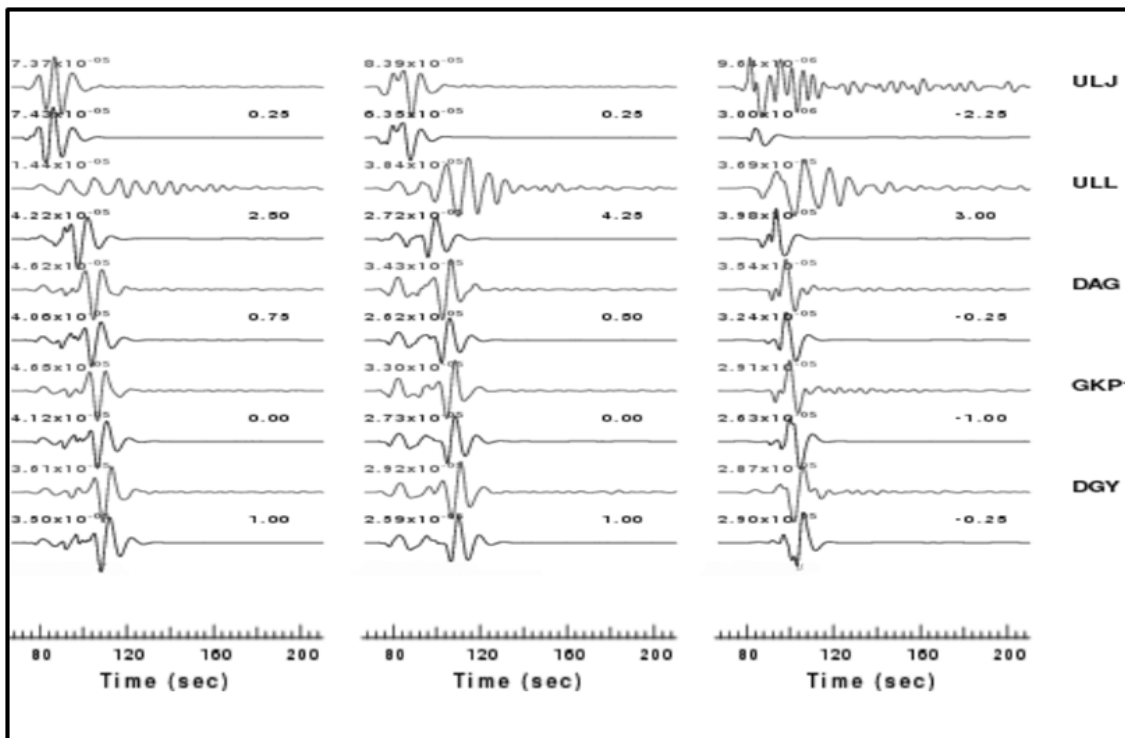
studies	focal depth	remarks
this study	12km	
Kang et. al. (2004)	17.7km	
USGS (2004)	17km	
Park et. al. (2005)	8km	

보여 주어 선행 연구결과와 상당한 차이가 있다. 17.7 km에서 8km의 넓은 범위를 가지는 것은 물론 분석방법론의 차이 및 파형의 band 등에 의한 차이일 수도 있지만 지진원인 울릉단층의 기학적 형태에 기인할 가능성도 있다.

그림 4는 KIGAM⁽⁸⁾이 결정한 진앙위치와 KSK 지각구조 모델이 가장 일치정도가 높으며 이 결과를 사용하여 역산한 결과이며 여기로부터 얻어진 모멘트텐서를 이용하여 진앙거리 순서로 이론파형과 관측파형을 비교한 것이다. 가로축은 시간을 나타내고 있고 왼쪽으로부터 수직성분, radial 성분, 및 tangential 성분 파형을 나타내고 있다. 파형의 오른쪽 끝에는 관측소 이름이 있다. 수직성분 파형을 살펴보면 진앙거리가 증가함에 따라 P파 및 S파의 도달시간 간격이 점차 증가하고 있음을 알 수 있다. 각각의 관측소에서 위 부분은 실제 관측된 파형이고 아래 부분은 이론 파형을 나타낸다. 그림 4에 의하면 교원대(HKU), 대전(TJN) 및 서울대학교(SNU) 관측소 등에서는 수직성분과 radial성분에 비해 상대적으로 tangential 성분의 일치정도가 상대적으로 낮음을 보여주고 있다. 하지만 전반적으로 이론파형과 관측파형이 일치하는 정도가 높은 것을 보여주고 있다.

5. 지진원기구 분석

위에서 제시된 3종류의 지각모델 이용하여 분석을 수행하였다. 또한 진앙위치를 달리하여 지진원 기구를 분석하여



〈그림 4〉 관측파형(위) 및 이론파형(아래)의 비교

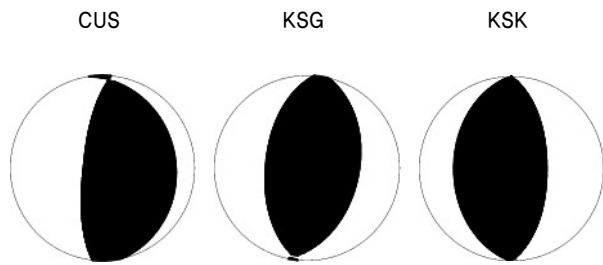
모두 9가지 경우의 결과를 얻을 수 있다. 모멘트텐서 지진원 모델을 이용할 경우 지진원기구를 분석하는 과정은 지진원 심도를 분석하는 과정과 달리 선형성을 갖고 있다. 따라서 각각의 진원심도를 약 1km 씩 증가시키면서 각각 주어진 진원심도에서 주향, 경사 및 rake 각도를 5°씩 증가시켜 가면서 격자망탐색(grid search) 방법을 이용하여 지진원 기구를 분석하였다. 이 경우 식 (3)에서 제시된 관측파형과 이론 파형이 가장 잘 일치하는 경우에 해당하는 지진원기구가 가장 적합하다고 해석하였다.

그림 5에서 7까지 그리고 표 3에서 3종류 진앙위치 및 3종류의 지각모델을 이용하여 역산을 수행한 결과 얻어진 지진원기구를 나타내고 있다. 우선 그림 5는 한국지질자원연구원이 결정한 진앙위치를 이용하여 3종류의 지각모델에 대해 역산한 결과를 보여주고 있다. 단층면의 rake angle이 각각 75°, 85°와 90°의 결과를 보여 주고 있다. 따라서 단층면의 주향 및 경사각에서 상호 약간의 차이가 있지만 3종류의

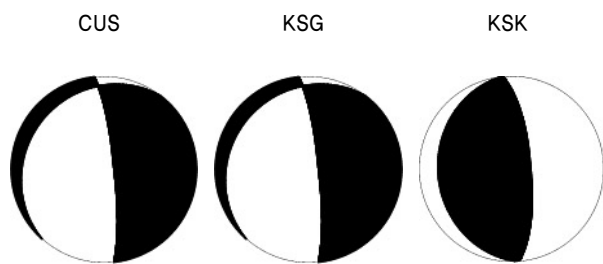
지각모델 모두에 대해 공통적으로 거의 남북 방향의 주향을 유지하고 전형적인 역단층의 경향을 보여주고 있다. 그리고 표 5의 각각의 행에서 2번째 값은 conjugate 단층의 값에 해당하며 관계식을 이용하여 계산하면 정확하게 5° 간격이 되지 않는다.

그림 6은 미국지질조사연구소가 결정한 진앙위치를 이용하여 3종류의 지각모델에 대해 역산한 결과를 보여주고 있다. 단층면의 rake angle이 각각 -45°, -55°와 90°로서 거의 동일한 주향을 유지하면서 정단층과 역단층 경향을 번갈아 가며 보여주고 있다. 따라서 3종류의 모델 각각에 대해 상당히 다른 경향을 보여주고 있어 결과에 대한 일관성이 결여되어 있다.

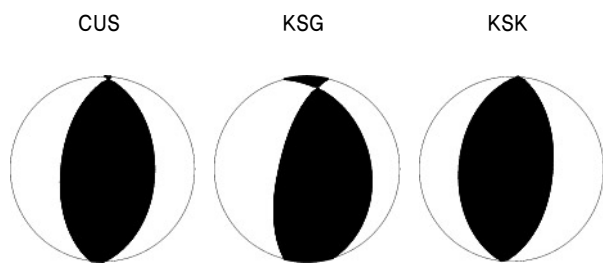
그림 7은 기상청이 결정한 진앙위치를 이용하여 역산을 수행하였다. 단층면의 rake 각도가 각각 65°, 85°와 90°의 결과를 보여 주고 있다. 3가지 종류의 지각모델에 대한 결과는 단층면의 약간 차이는 존재하나 전체적으로 역단층 경향을 보여주고 있다. 또한 3가지 종류의 지각모델에 대한 결과



〈그림 5〉 KIGAM 진앙위치를 이용한 지진원기구



〈그림 6〉 USGS 진앙위치를 이용한 지진원기구



〈그림 7〉 KMA 진앙위치를 이용한 지진원기구

〈표 3〉 Comparison of focal mechanism for 9 different cases.

agency	crustal model	focal mechanism(°)	
		strike	dip
KIGAM	CUS	STRIKE	350 : 185.9
		DIP	20 : 70.71
		RAKE	75 : 95.38
	KSG	STRIKE	185 : 12.74
		DIP	50 : 40.26
		RAKE	85 : 95.93
	KSK	STRIKE	180 : 360
		DIP	35 : 55
		RAKE	90 : 90
KMA	CUS	STRIKE	360 : 186.5
		DIP	40 : 50.18
		RAKE	85 : 94.19
	KSG	STRIKE	345 : 193.28
		DIP	30 : 63.05
		RAKE	65 : 103.71
	KSK	STRIKE	185 : 5.2
		DIP	40 : 50.5
		RAKE	90 : 90.8
USGS	CUS	STRIKE	200 : 343.21
		DIP	19 : 88.46
		RAKE	-42 : -99.83
	KSG	STRIKE	220 : 353.99
		DIP	25 : 79.46
		RAKE	-55 : -100.73
	KSK	STRIKE	175 : 355
		DIP	20 : 70
		RAKE	90 : 90

〈표 4〉 Comparison of diagonal terms of moment tensor for different crustal models and epicenter locations

진앙위치 결정기관	지각 모델	M^0 (dyne · cm)	M11, M22, M33	M11 + M22 + M33
KIGAM	CUS	4.67×10^{23}	(0.0115540866)+(-0.632439256)+(0.620885134)	0.011554
	KSG	4.84×10^{23}	(-0.0190459341)+(-0.962014377)+(0.981060266)	-0.019046
	KSK	3.67×10^{23}	(0)+(-0.939692616)+(0.939692616)	0
KMA	CUS	5.55×10^{23}	(0)+(-0.981060266)+(0.981060266)	0
	KSG	4.51×10^{23}	(0.0530771837)+(-0.837962806)+(0.784885645)	0.053077
	KSK	3.80×10^{23}	(-0.00748071797)+(-0.977327049)+(0.98480773)	-0.007481
USGS	CUS	3.67×10^{23}	(-0.0341525935)+(0.387705982)+(-0.353553385)	-0.034153
	KSG	2.98×10^{23}	(-0.0341525935)+(0.387705982)+(-0.353553385)	-0.034153
	KSK	2.88×10^{23}	(-0.00488271145)+(-0.637904823)+(0.642787576)	-0.004883

〈표 5〉 Comparison of moment magnitude

studies	moment magnitude(M_w)	remarks
this study	4.98	
Kang et. al. (2004)	5.1	
USGS (2004)	5.3	
Park et. al. (2005)	5.1	

는 모두 그림 5에서 제시된 결과와 유사하다.

한국지질자원연구원 및 기상청이 결정한 진앙위치를 이용하여 관측파형을 분석했을 경우 역단층 경향뿐만 아니라 거의 남북 방향의 주향이라는 점에서 상호 유사한 지진원기구의 경향을 보여주고 있어 일관성이 있음을 상대적으로 잘 보여주고 있다. 따라서 미국지질조사연구소의 진앙위치를 이용한 결과는 일관성의 부족하여 진앙위치에 대한 신뢰성이 상대적으로 낮음을 보여주고 있다.

본 연구로부터 얻어진 지진원기구 중에서 가장 일치정도가 높은 것은 KIGAM⁽⁸⁾이 결정한 진앙위치와 KSK 지각구조 모델을 사용하여 역산한 결과이다. 본 연구결과는 Kang, T. S. and Baag, C. E.(2004)⁽⁶⁾, USGS⁽¹³⁾ 및 Park, S. C. and Mori, J.(2005)⁽¹²⁾의 연구결과와 대체로 일치하고 있으나 본 연구로부터 얻어진 지진원기구는 Park, S. C. and Mori, J.(2005)⁽¹²⁾에 의한 연구결과에 보다 유사하다. Chough et al.(2000)⁽⁴⁾은 울진지진 진앙부근에 N-S에서 NNE-SSW 방향의 울릉단층이 존재하고 있고 또한 약 7백만년 내지 천만년 전부터 이 지역은 지체구조적으로 압축응력을 받아 왔음을 제시하였다. 따라서 Chough et al.(2000)⁽⁴⁾가 제시한 내용은 본 연구결과에서 분석된 진앙위치 및 지진원기구와 대단히 잘 일치하고 있어 울진지진과 가장 관련 있는 지진유발단층은 울릉단층임을 확인시켜 주고 있다.

또한 CUS 지각모델을 이용하여 한국지질자원연구원 및 기상청이 결정한 진앙위치를 이용하여 관측파형을 분석했

을 경우 비교적 일관성이 있고 다른 지각모델과 유사한 결과를 보여 주었다. 향후 관측소의 진앙거리 분포를 달리하여 분석할 경우 CUS 지각모델의 유사성을 보다 심도있게 확인할 수 있을 것으로 판단된다.

6. 지진원모멘트 대각성분 및 모멘트 규모 분석

위에서 제시된 3종류의 진앙위치 및 3종류의 지각모델을 이용하여 모멘트텐서 성분중에서 특히 대각성분인 M_{11} , M_{22} 및 M_{33} 등 3성분의 합을 분석하였다. 모멘트텐서 지진원대 표 이론에 의하면 일반적으로 지진파를 발생시킨 원인이 단층면위의 미끄러짐일 경우 M_{11} , M_{22} 및 M_{33} 성분의 합의 절댓값이 영이 되어야 하고, 발파 또는 핵실험과 같이 isotropic 지진원일 경우 M_{11} , M_{22} 및 M_{33} 성분의 합의 절댓값이 영이 아니고 일정한 값을 가진다.(Backus, G. and Mulcahy, M.(1976)⁽³⁾)

본 연구에서 M_{11} , M_{22} 및 M_{33} 성분의 합을 분석하여 울진지진의 지진원 특성을 확인하고자 하였다. 울진지진으로부터 관측된 파형을 이용하여 모멘트텐서 성분값을 구하였고 얻어진 6개 성분값 중에서 M_{11} , M_{22} 및 M_{33} 성분을 더한 결과 표 4에서 제시된 바와 같이 0이거나 0에 가까운 값을 보이고 있어 울진지진이 순수하게 단층면위에서 미끄러짐 현상에 의한 지진임을 한 번 더 확인할 수 있다.

또한 울진지진의 지진모멘트에 대한 분석결과를 보면 3종류의 결과중에서 KIGAM⁽⁸⁾과 KMA⁽¹¹⁾ 진앙위치를 이용한 결과는 3.67×10^{23} 에서 5.55×10^{23} (dyne·cm) 값을 보여주고 있어 대체로 편차가 작음을 보여주고 있다. 이를 모멘트 규모(M_w)로 환산하면 약 4.98에서 약 5.10의 범위에 해당한다.

본 연구로부터 얻어진 지진원기구 중에서 가장 일치정도가 높은 것은 KIGAM⁽⁸⁾의 진앙위치와 KSK 지각구조 모델을 사용하여 역산한 결과이며 이 경우 지진규모는 4.98이다.

지진규모는 표 5에 기존 연구결과와 함께 제시되어 있으며 Kang, T. S. and Baag, C. E.(2004)⁽⁶⁾, USGS⁽¹³⁾ 및 Park, S. C. and Mori, J.(2005)⁽¹²⁾의 연구결과와 잘 일치하고 있다.

7. 결론

모멘트텐서 지진원 모델을 이용하여 진원심도, 지진원기구, 지진원특성 및 규모를 분석하여 기존의 연구 결과와 비교하였다. 진원심도를 분석한 결과 3종류의 지각모델 및 3종류의 진앙위치에 대해 서로 다른 최적의 심도를 나타내고 있으나 대체적으로 지진원 심도는 약 10-12km의 범위이며 12km에서 최적값을 보여 주었다. 본 연구결과에서 분석된 진원심도는 Kang, T. S. and Baag, C. E.(2004)⁽⁶⁾, USGS⁽¹³⁾ 및 Park, S. C. and Mori, J.(2005)⁽¹²⁾의 선행 연구결과와 상당한 차이가 있다. 17.7km에서 8km까지 넓은 범위를 가지는 것은 물론 분석방법론의 차이 및 파형의 band 등에 의한 차이일 수도 있지만 지진원인 울릉단층의 기학적 형태에 기인할 가능성도 있다.

3가지 종류의 진앙위치 및 3가지 종류의 지각모델에 대한 분석 결과 주향, 경사각 및 rake 각도는 약간씩 차이는 존재하나, rake 각도를 분석하면 전체적으로 역단층 경향을 보여주고 있다. 울진지진이 중규모의 지진이기 때문에 이 지역에서 현재의 지체구조적 응력환경을 대표할 수 있다고 가정하면, 울진진앙 부근 지역은 지구구조적으로 압축을 받고 있는 상태를 의미한다. 이러한 해석은 Chough et al.(2000)⁽⁴⁾이 제시한 울진지진 진앙부근에 N-S에서 NNE-SSW 방향의 울릉단층이 존재하고 있고 또한 약 7백만 년전 내지 천만년 전부터 이 지역은 지체구조적으로 압축응력을 받아 온 것으로 제시한 바와 일치한다.

또한 지진원기구 분석으로부터 제시된 지진원 단층의 주향이 거의 남북방향을 이루고 있으며 이 방향은 울릉단층의 주향과 거의 유사하다. 더구나 울진지진의 진앙의 위치가 역시 울릉단층과 거의 일치하고 있으므로 울진지진의 직접적인 유발 원인은 울릉단층으로 해석된다.

또한 울진지진으로부터 관측된 파형을 이용하여 모멘트텐서 성분값을 구하였고 얻어진 6개 성분값 중에서 특히 M₁₁, M₂₂ 및 M₃₃ 등 대각선 성분을 더한 결과 값이 거의 0으로 나타나고 있어 울진지진이 순수하게 단층면의 미끄러짐 현상에 의한 지진임을 제시하고 있고 기존 연구결과를 한 번 더 확인을 시켜주고 있다.

특히 2004년 본 지진 후에 발생한 미소지진과 2006년 4월 울진지진 진앙부근 지역의 10여개 중소규모 지진연속 현

상에 대해서도 모멘트텐서 성분값 분석을 시도하여 그 결과까지 포함하여 종합적으로 분석한다면 울진지진 진앙부근 지역 및 울릉단층의 지체구조적 현상을 보다 심도있게 분석 가능 하다고 해석된다. 따라서 향후 연구에서는 더욱 정교한 방법과 주변에서 발생했던 지진의 특성을 이용하여 분석하고 그 결과들을 비교하면 보다 신뢰성 있는 결과들을 얻을 수 있을 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 2007년도 기상지진개발사업단의 “기상지진기술훈수개발사업(CARTER 2007-5109)”에 의한 것이며 이에 감사드립니다.

참고 문헌

1. 김성균, 정부홍, 한국 남부지역의 지각구조, 광산지질, 1985, Vol. 18, pp. 151-157.
2. 김준경 외, 국내 지진의 응답스펙트럼 특성 분석, 한국원자력안전연구원 연구보고서, 한국원자력안전기술원, 2003, pp. 207.
3. Backus, G. and Mulcahy, M., Moment tensors and other phenomenological descriptions of seismic sources, II, discontinuous displacements, Geophys. J. R. astro. Soc, 47, 1976, pp. 301-329.
4. Chough, S.K., Lee, H.J. and Yoon, S.H., Marine Geology of Korean Seas. 2nded., Elsevier, Amsterdam, 2000, pp. 313.
5. Gilbert, F. and Dziewonski, A. M., An application of normal mode theory to the retrieval of structure parameters and source mechanism from seismic structure, Phil. Trans. R. Soc., A278, 1975, pp. 187-269.
6. Kang, T-S. and Baag, C-E., The 29 May 2004, Mw=5.1, offshore Uljin earthquake, Korea, *Geosciences Journal*, 2004, Vol 8, No. 2, pp. 115-123.
7. Kang, T-S. and Shin, J. S., The offshore Uljin, Korea, earthquake sequence of April 2006: seismogenesis in the western margin of the Ulleung Basin, *Geosciences Journal*, 2006, Vol 10, No. 2, pp. 159-164.
8. KIGAM, 2004, <http://quake.kigam.re.kr>.
9. Kim, S. G. and Kraeva, Source parameter determination of local earthquakes in Korea using moment tensor inversion of single station data, *Bulletin of Seismological Society of America*, Vol 89, No. 4, 1998, pp. 1077-1082.
10. Kim, S. J. and Kim, S. G., A Study on the Crustal Structure of South Korea by using Seismic Waves, *광산지질*, 1983, Vol 16, No. 1, pp. 51-66.
11. KMA, 2004, <http://www.kma.go.kr/neis/>
12. Park, S. C. and Mori, J., Source parameters of the May 29, 2004 South Korea earthquake (ML 5.2), *Earth Planets Space*, 2005, Vol. 57, pp. 471-475.
13. USGS, 2004, http://neic.usgs.gov/neis/FM/neic_jbai_q.html.