

# 신안 앞바다 인근 규모 4.0 이상 지진들의 지진원 상수

## The Source Parameters of Offshore Earthquakes with Magnitude Larger than 4.0 Nearby Sinan

최호선<sup>1)\*</sup>

Choi, Hoseon<sup>1)\*</sup>

<sup>1)</sup>한국원자력안전기술원 구조부지평가실

<sup>1)</sup>Department of Structural Systems & Site Safety Evaluation, Korea Institute of Nuclear Safety

### / A B S T R A C T /

The source parameters of four earthquakes with magnitude larger than 4.0 nearby the offshore Sinan are analyzed. The waveform inversion method is used for analyzing the source parameters of two events (20 August 2012 and 21 April 2013) with C&B and AK135-c crustal velocity structure models. The source parameters of the other two events (26 July 1994 and 23 March 2003) are obtained from references. Focal mechanisms of the events are strike slip faulting or strike slip faulting with a thrust component. The directions of P-axes of the events are ENE-WSW or NE-SW which are similar to previous studies on P-axes in and around the Korean peninsula. With regard to the events nearby the offshore Sinan, the regional stress, rather than being local stress, is seen to be the result of the combination of tectonic forces from the compression of plates colliding to the Eurasian Plate.

**Key words:** Source parameter, Waveform inversion, Focal mechanism, The offshore Sinan

## 1. 서론

2013년 4월 21일 오전 8시 21분경 전남 신안군 흑산면 북서쪽 101 km 해역에서 규모 4.9의 지진이 발생하였다. 같은 날 오후 6시 21분경에는 이 지진의 여진으로 여겨지는 규모 2.4의 지진이 연이어 발생하였다. 본진의 진앙은 사람들이 거주하는 섬이나 육지와는 먼 거리에 위치하고 있어 별도의 재산 피해는 발생하지 않았다. 기상청은 진앙과 인접한 흑산도에서 건물의 창문이 흔들렸고, 광주 등에서 약한 진동만 감지되었다고 밝혔다. 그러나 이 지진은 기상청이 본격적으로 지진을 관측하기 시작한 1978년 이후부터 2013년 말까지 역대 6번째로 큰 지진이었고, 하루 전날인 4월 20일에 중국 쓰촨성에서 발생한 규모 6.9의 지진으로 상당한 인명 및 재산피해가 발생하였기 때문에 지진에 대한 국민의 우려가 고조된 상황이었다.

신안 앞바다 인근에서는 과거에도 규모 3.0~4.0의 지진이 종종 발생하였다(Fig. 1). 특히 이번 지진의 진앙 인근에서 규모 4.0 이상의 지진이 세 차례 발생하였는데, 1994년 7월 26일 전남 홍도 서북서쪽 약 100 km 해역에서 발생한 규모 4.9의 지진, 2003년 3월 23일 전남 홍도 북서쪽 약 50 km

해역에서 발생한 규모 4.9의 지진과 2012년 8월 20일 전남 신안군 흑산면 북서쪽 약 115 km 해역에서 발생한 규모 4.2의 지진이 그것이다(Table 1). 기상청은 2012년 8월 20일 지진을 웹사이트 국내지진목록에 수록하지 않고 있어 과거 신문기사(2012년 8월 20일자 인터넷 아시아경제 ‘전남 신안 연해에 규모 4.2 지진’[1])에서 관련 정보를 차용하였다. 또한 한국지질자원연구원 웹사이트의 지진자료실은 1994년 12월 14일 지진부터 지진목록을 수록했기 때문에 1994년 7월 26일 지진은 지진목록에서 빠져 있다.

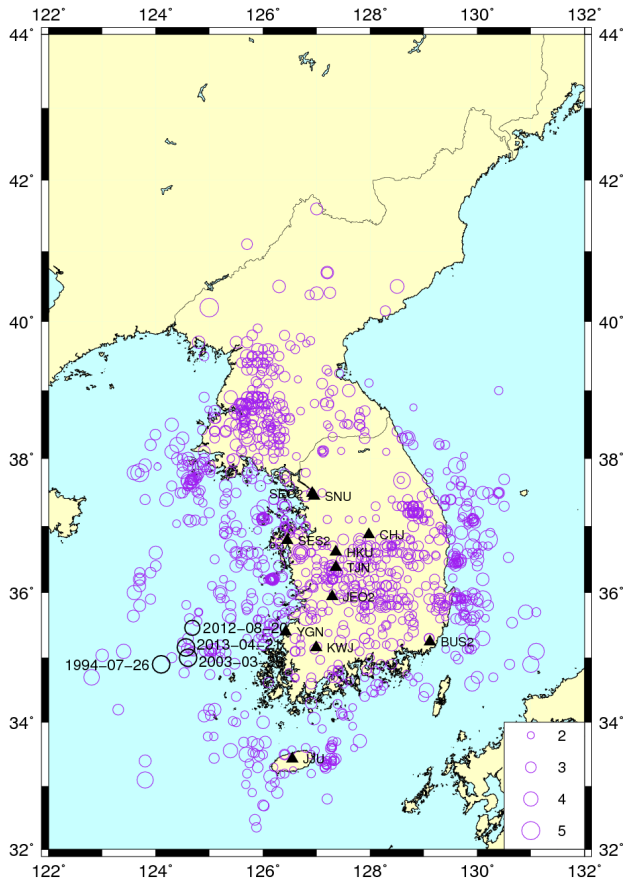
1978년부터 2013년 말까지 국내에서 관측된 규모 3.0 이상 지진의 발생 빈도는 연평균 약 9회, 규모 4.0 이상 약 1회, 규모 5.0 이상 약 0.1회 정도이다. 2013년 신안 앞바다 지진은 규모 5.0에 육박하므로 한반도에서는 드물게 발생하는 중규모 지진이다. 또한 해역에서 발생하여 생기는 지진 위치의 불확실성을 고려하더라도, 지난 20년간 약 0.6°×0.6° 범위의 해역에서 규모 4.0 이상 지진이 네 차례 발생한 것은 한반도와 같은 낮은 지진활동도를 가진 곳에서는 이례적이라고 생각된다. 따라서 이들 지진에 대한 지진원 상수를 결정하고, 이를 기반으로 다양한 후속 연구가 진행된다면 한반도 신안 앞바다의 지진활동 특성을 규명하는데 중요한 자료가 될 수 있을 것이다.

이 연구에서는 Chang and Baag[2]이 제안한 한반도 남부의 1차원 지각 속도구조 모델(이하 C&B 모델)과 Kennett et al.[3]이 제안한 전 지구 속도 구조 평균모델에서 지각에 해당하는 부분을 차용한 모델(이하 AK135-c 모델, c는 crust를 의미)을 적용하여 2012년 8월 20일 지진과 2013년 4월

\*Corresponding author: Choi, Hoseon

E-mail: hoseon@kins.re.kr

(Received 12 May 2014 Revised 6 June 2014 Accepted 9 June 2014)



**Fig. 1.** The epicentral distribution map in the Korea Peninsula reported by the KMA from August 1978 to December 2013. The earthquakes greater than magnitude 4.0 nearby the offshore Sinan are also depicted with their dates. The triangle means the seismic stations used in this study as listed in Table 3.

23일 지진에 대한 지진원 상수를 추정하였다. 1994년 7월 26일 지진과 2003년 3월 23일 지진에 대한 지진원 상수는 Cipar[4]와 Choi[5]를 참고하였다.

## 2. 본 론

### 2.1 자료처리

파형역산 기법을 적용하여 발진기구를 계산하기 위해 한국지질자원연구원 발표한 진원 정보를 사용하였다. 일반적으로 파형역산을 이용하여 발진기구를 계산할 경우 저주파수 영역의 파형을 이용하기 때문에 장주기나 광대역 지진자료가 필요하다. 국내에는 기상청, 한국지질자원연구원, 한국원자력안전기술원 등에서 광대역 지진관측소를 설치하여 운영하고 있으며, 각 기관들의 웹사이트를 통해 관측된 지진자료를 제공하고 있다.

장주기 파형으로 파형역산을 수행하는데 국지적인 지각속도구조 모델(C&B 모델)과 전 지구 속도구조 평균모델에서 지각에 해당하는 부분을 차용한 모델(AK135-c 모델)을 사용하였다. C&B 모델을 적용할 때 S파의 지각속도구조 모델 설정을 위해 P파와 S파의 평균 속도비를 1.78로 가정하였다. C&B 모델은 한반도 남부 지역의 광대역 지진파형과 경로시간을 함께 분석하여 구한 1차원 지각속도구조 모델이다. AK135-c 모델은 지진파형의 경로시간이 일치되도록 조절되어 계산된 전 지구 속도구조 평균모델에서 지각에 해당하는 부분, 즉 모호면 깊이까지의 값을 차용한 모델이다(Table 2). C&B 모델은 한반도 내륙 지역에 적절한 지각속도구조 모델로 생각되며, 이를 서해까지 확장하기 위해서는 추가적인 연구가 필요할 것으로 생각된다. 서해까지 확장된 지각속도구조 모델의 대안으로 생각한 것이 AK135-c 모델이다.

이상적으로는 단일 지진관측소 지진자료만으로도 발진기구와 지진 깊

**Table 1.** The source parameters of the offshore Sinan earthquake, 21 April 2013 and nearby previous earthquakes, 26 July 1994, 23 March 2003, and 12 August 2012 reported by KMA and KIGAM

year-month-day	KMA*			KIGAM**			
	latitude	longitude	magnitude	latitude	longitude	magnitude	depth (km)
1994-07-26	34.90	124.10	4.9	-	-	-	
2003-03-23	35.00	124.60	4.9	34.8607	124.3507	5.1	9.6
2012-08-20***	35.46	124.68	4.2	35.4891	124.6264	4.0	9.8
2013-04-21	35.16	124.56	4.9	35.1690	124.5405	5.0	4.0

\*: Korea Meteorological Administration

\*\* : Korea Institute of Geosciences and Minerals

\*\*\*: This information of KMA is after Asia Economy online newspaper 8 August 2012.

**Table 2.** Two crustal velocity structure models used in this study

C&B			AK135-c		
depth of layer (top, km)	V <sub>P</sub> (km/s)	V <sub>S</sub> (km/s)	depth of layer (top, km)	V <sub>P</sub> (km/s)	V <sub>S</sub> (km/s)
0.0	5.67	3.22	0.0	5.80	3.46
5.1	6.05	3.44	20.0	6.50	3.85
16.7	6.67	3.79	35.0	8.04	4.48
31.9	7.88	4.48	-	-	-

**Table 3.** Seismic instrument information used in this study

2012-08-20				2013-04-21			
code	sensor	recorder	institute	code	sensor	recorder	institute
BUS2	CMG-3T	Q330S	KMA	HKU	STS-2	Q4128	KIGAM
CHJ	STS-2	Q4128	KMA	JEO2	STS-2.5	Q330HRS	KMA
HKU	STS-2	Q4128	KIGAM	JJU	STS-2	Q4128	KMA
KWJ	STS-2	Q680	KMA	KWJ	STS-2	Q680	KMA
SNU	STS-2	Q4128	KIGAM	SEO2	CMG-3T	Q330S	KMA
TJN	STS-2	Q4128	KIGAM	SES2	STS-2.5	Q330HRS	KMA
YGN	STS-2	Q4128	KINS*	TJN	STS-2	Q4128	KIGAM
-	-	-	-	YGN	STS-2	Q4128	KINS

\*: Korea Institute of Nuclear Safety

이를 계산할 수 있어야 하지만(Kubo et al.[6]), 실제로는 파형역산에 입력 되는 파라미터나 지각속도구조의 불확실성, 지진자료에 포함된 잡음 등의 영향으로 두 곳 이상에서 기록된 지진자료가 필요하다. 이 연구에서는 각 지진의 진앙으로부터 충분히 떨어져 있고, 자료의 품질이 양호한 다수의 광대역 지진관측소를 선정하였다(Table 3, Fig. 1). 지진관측소가 진앙 주변의 방위각에 따라 고루 배치되어 있으면 이상적이겠지만, 모든 지진들이 신안 앞바다 인근에서 발생했기 때문에 지진관측소의 방위각은 육지 방향으로 편중되어 있다. Rhie and Kim[7]과 같이 필터링 대역은 0.05 ~ 0.1 Hz를 선택하였다. 지진자료들은 센서와 기록계의 전달함수를 제거하고 적분하여 변위 지진파형으로 변환하였다.

기상청의 센서와 기록계의 전달함수 제거 시에는 유의할 점이 있다. 기상청은 지진관측소 자료 품질 향상을 위해 꾸준히 센서와 기록계를 교체하고 있으며, 이에 따라 지진관측소의 지점명도 수정하고 있다. 최근 JEO와 SES 지진관측소의 센서와 기록계는 각각 STS-2.5와 Q330HRS로 교체되었으며, 지점명도 JEO2와 SES2로 변경되었다. Q330HRS 기록계의 경우 총 6개의 채널을 제공하는데 3개 채널은 26 bit로 기록되고, 3개 채널은 기존과 같이 24 bit로 기록된다. 속도 센서가 26 bit 채널과 연결되어 있을 경우, 수치로 변환될 수 있는 최소 전압, 즉 해상도(해상도란 용어 대신 least significant bit를 쓰기도 함)는 기존보다 4배 수준으로 향상되었으므로, 지진자료에서 전달함수 제거 시 이를 고려해야 한다.

Green 함수 계산을 위해 Bouchon[8]이 제안한 주파수-파수법을 적용하였다. 단층작용에 의해 발생한 지진으로 가정하여, isotropic 성분을 제외한 deviatoric 성분만을 고려하여 파형역산을 수행하였다. 지진의 깊이, 상대적인 시간 허용값, 지진모멘트 등은 식 (1)과 같은 관측 지진파형과 합성 지진파형의 일치도(variance reduction, VR)를 통해 계산된다.

$$VR = 1 - \frac{\sum (d_i - s_i)^2}{\sum (d_i)^2} \quad (1)$$

여기에서  $d_i$ 는 관측 지진파형,  $s_i$ 는 합성 지진파형을 나타낸다. 일치하는 정도가 높을수록 이 값은 1에 가까워진다.

지진의 깊이를 계산하기 위해서 1 km부터 29 km까지 2 km 간격으로 파형역산을 수행한 후, 일치도가 높은 깊이를 기준으로 상하 5 km 범위를

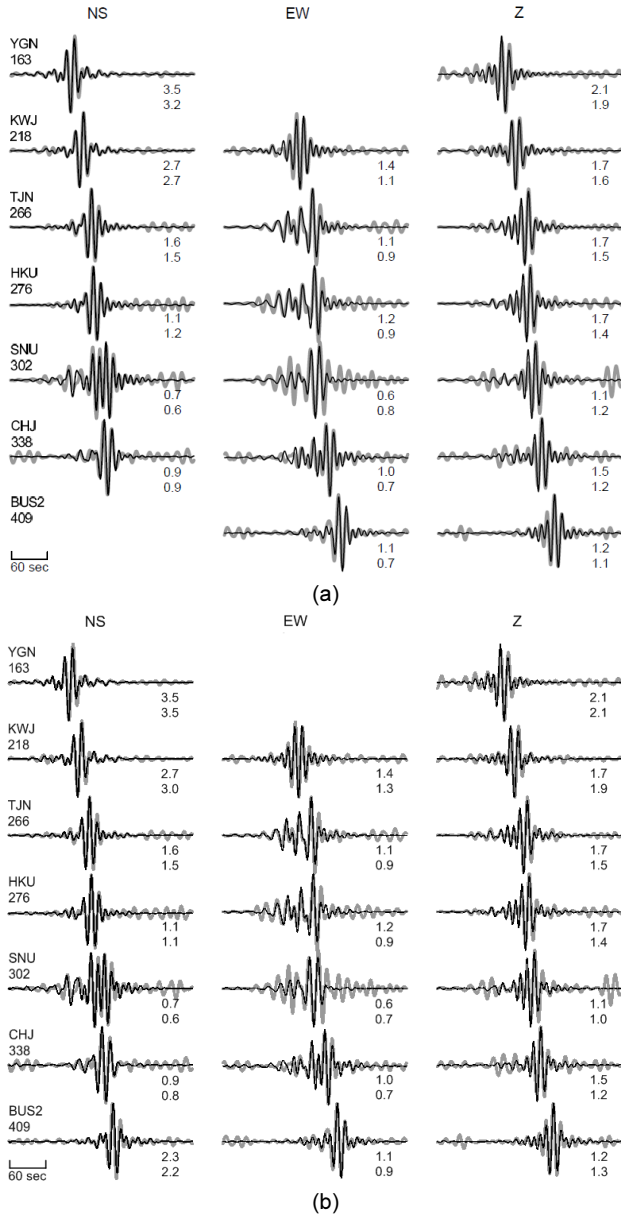
정하여 1 km 간격으로 파형역산을 재수행하였다. 또한 진앙 위치나 지각속도구조 등에 내재하고 있는 불확실성을 감안하여 각 지진관측소 파형들의 상대적인 시간 이동을 -10초부터 10초까지 허용하였다. 이러한 절차들은 Sokos and Zahradnik[9]가 제안한 소프트웨어인 ISOLA에서 수행된다.

## 2.2 2012년 8월 20일 지진

기상청은 전남 신안군 흑산면 북서쪽 약 115 km 해역에서 규모 4.2의 지진이 발생했다고 발표하였고, 한국지질자원연구원은 전남 영광군 서쪽 약 173 km 해역에서 규모 4.0의 지진이 발생하였으며, 지진의 깊이는 9.8 km라고 발표하였다. 서론에서 언급했던 것처럼 신안 앞바다에서 발생하였고, 작지 않은 규모임에도 불구하고 기상청 웹사이트에서는 관련 지진목록과 지진자료를 제공하고 있지 않다. 그러나 현재 관련 지진자료는 기상청의 국가지진종합정보시스템[10]을 통해 제공받을 수 있다.

지진원 상수 추정을 위해 Table 3과 같이 선정된 7개 지진관측소의 광대역 지진자료를 사용하였다. C&B 모델을 적용하여 이 지진에 대한 파형역산을 수행한 결과, 전체 지진파형들의 일치도의 최대값은 0.70이다. 이 때 지진모멘트는  $2.2 \times 10^{14}$  N·m로 계산되었으며, 이 값은 Kanamori[11]에 의하면 모멘트규모 3.5에 해당한다. 지진의 깊이는 12 km로 결정되었다. Fig. 2(a)는 관측 지진파형과 합성 지진파형을 최대진폭으로 정규화하여 비교한 것이다. 굵은 회색 실선은 관측 지진파형을 나타내고, 가는 검은색 실선은 합성 지진파형을 나타낸다. 지진파형 왼쪽 상단에 지진관측소 지점명과 진앙거리를 표시하였다. 지진파형의 오른쪽 하단 숫자는 관측 지진파형(위)과 합성 지진파형(아래)의 최대진폭을 의미하며, 단위는  $10^{-7}$  m이다. 필터링이 적용된 일부 관측 지진파형에서 저주파수 대역의 잡음이 관찰되고 있지만, 대체적으로 관측 지진파형과 합성 지진파형이 잘 일치하고 있다. 다만, YGN의 EW 성분과 BUS2의 NS 성분은 일치도값이 작아(<0.10) 파형역산에서 제외하였다.

AK135-c 모델을 적용하여 파형역산을 수행한 결과 지진모멘트는 C&B 모델에 의한 지진모멘트보다 약간 큰  $2.4 \times 10^{14}$  N·m로 계산되었으며, 이 값도 모멘트규모 3.5에 해당한다. 지진의 깊이는 11 km로 C&B 모델로 계산했을 때보다 1 km 얇게 계산되었는데, 한국지질자원연구원이 발표한 지진의 깊이 9.8 km에 보다 가까운 값이다. 전체 지진파형들의 일치도의 최대값은 0.73이었다. Fig. 2(b)는 AK135-c 모델을 적용하였을 때의 관

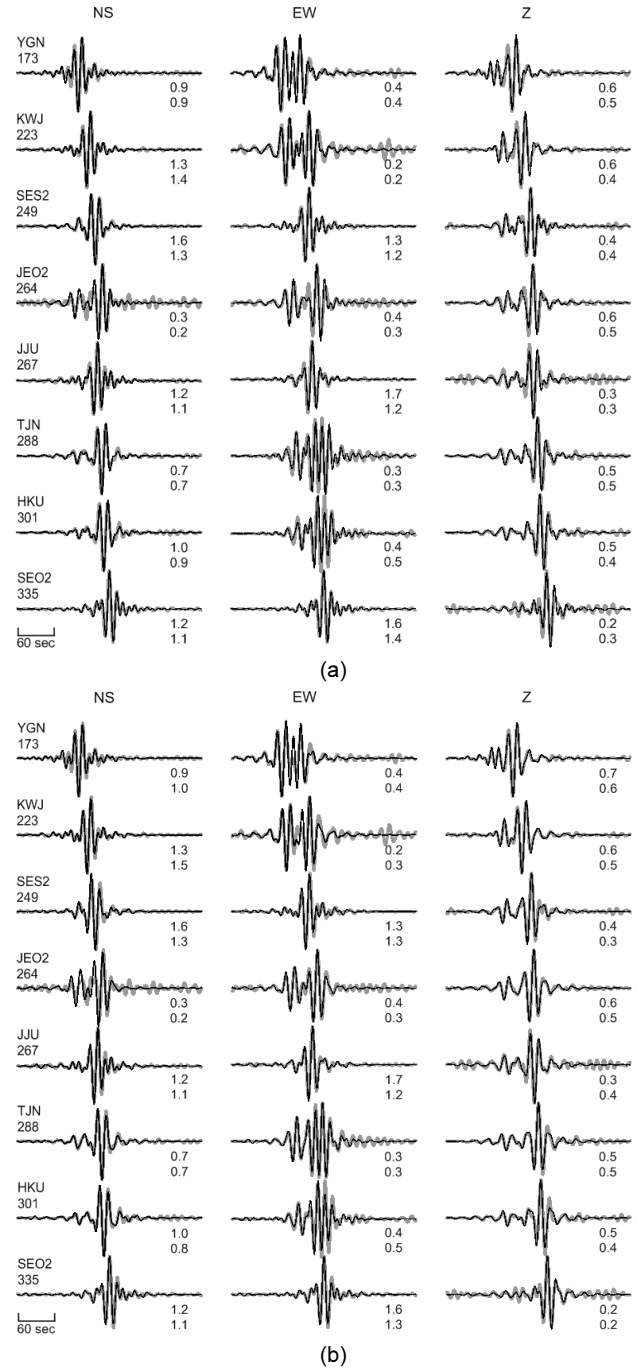


**Fig. 2.** The comparison between observed (thick gray line) and synthetic (thin black line) waveforms of 20 August 2012 earthquake considering (a) C&B model and (b) AK135-c model. The left figures on each waveform are the epicentral distances, and the right two figures under each waveform are maximum amplitudes of the observed (upper) and the synthetic (lower) waveforms in  $10^{-7}$  m.

즉 지진파형과 합성 지진파형을 최대진폭으로 정규화하여 비교한 것이다. C&B 모델을 적용했을 때와는 달리 BUS2의 NS 성분 일치도값이 작지 않아( $\sim 0.67$ ) 파형역산에서 제외하지 않았다.

### 2.3 2013년 4월 21일 지진

기상청은 전남 신안군 흑산면 북서쪽 약 101 km 해역에서 규모 4.9의 지진이 발생했다고 발표하였고, 한국지질자원연구원은 전남 신안군 서북서쪽 약 173 km 해역에서 규모 5.0이 지진이 발생하였으며, 지진의 깊이는



**Fig. 3.** The comparison between observed (thick gray line) and synthetic (thin black line) waveforms of 21 April 2013 earthquake considering (a) C&B model and (b) AK135-c model. The left figures on each waveform are the epicentral distances, and the right two figures under each waveform are maximum amplitudes of the observed (upper) and the synthetic (lower) waveforms in  $10^{-5}$  m.

4.0 km라고 발표하였다.

지진원 상수 추정을 위해 Table 3과 같이 8개 지진관측소를 선정하였다. C&B 모델을 적용하여 이 지진에 대한 파형역산을 수행한 결과 지진모멘트는  $1.2 \times 10^{16}$  N·m로 계산되었으며, 이 값은 모멘트규모 4.7에 해당된다. 지진의 깊이는 5 km로 한국지질자원연구원이 발표한 4 km와 큰 차이가 나지

않는다. 전체 지진파형들의 일치도의 최대값은 0.86이다. Fig. 3(a)은 관측 지진파형과 합성 지진파형을 최대진폭으로 정규화하여 비교한 것이며, 관측 지진파형(위)과 합성 지진파형(아래)의 최대진폭 단위는  $10^{-5}$  m이다.

AK135-c 모델을 기준으로 파형역산을 수행한 결과 지진모멘트는  $1.4 \times 10^{16}$  N·m로 계산되었으며, 이 값도 모멘트규모 4.7에 해당한다. 지진의 깊이는 5 km로 C&B 모델을 사용했을 때와 같은 깊이이다. 전체 지진파형의 일치도의 최대값은 0.89이다. Fig. 3(b)는 관측 지진파형과 합성 지진파형을 최대진폭으로 정규화하여 비교한 것이다.

2012년 8월 20일 지진 분석 결과와 마찬가지로 사용되는 지각속도구조 모델에 따라 일부 지진원 상수들의 값에 약간의 차이를 보인다. 지진파형의 일치도와 한국지질자원연구원이 발표한 지진의 깊이를 같이 고려해 본다면, 한반도 내륙에 적용 가능하도록 만들어진 1차원 국지 지각속도구조 모델인 C&B 모델보다는 전 지구 속도구조 평균모델에서 지각에 해당하는 부분을 차용한 모델인 AK135-c 모델이 신안 앞바다에서 발생한 지진에 대한 지진원 상수 유추에 조금 더 유리한 모델인 것처럼 보인다.

### 2.4 1994년 7월 26일 지진과 2003년 3월 23일 지진

1994년 7월 26일 지진의 지진원 상수를 확인하기 위해 Cipar[4]를 참고하였는데, 표면파규모( $M_s$ ) 5.0, 깊이를 10 km로 발표하였다. 파형역산을 수행하기 위해 당시 운영되고 있던 CDSN(Chinese Digital Seismograph Network)의 5개 지진관측소(HIA, KMI, LZH, MDJ, SSE)에 기록된 수직성분의 지진파형에 격자탐색법을 적용하였다.

2003년 3월 23일 지진의 지진원 상수를 확인하기 위해 Choi[5]를 참고하였다. 파형역산에는 6개 지진관측소(BRD, KWJ, NPR, SEO, SES, TJN)에 기록된 3성분 지진파형이 사용되었다. 파형역산에 의한 지진모멘트는  $1.6 \times 10^{16}$  N·m로 2013년 4월 21일 지진의 지진모멘트보다는 약간 큰 편이나, 모멘트규모는 4.7로 같다(Choi[5]의 Fig. 3에서 지진파형의 단위가  $10^{-6}$  m로 되어 있는데, 이 연구의 Fig. 3과 같이  $10^{-5}$  m이며, 오기입이 확인됨). 스펙트럼을 분석하여 추정된 모멘트규모는 4.8이었다. 당시 파형역산으로 지진의 깊이는 17 km로 다소 깊게 결정되었으나, P파 초동시간으로 재결정된 지진의 깊이도 약 18 km로 계산되어 깊이에 대한 두 결과에 일관성이 있다. 다만, 한국지질자원연구원은 지진의 깊이를 9.6 km로 발표하였으므로 계산에 사용된 지각속도구조 모델의 차이나 P파나 S파 도달시간 선택 차이 등에 의한 영향으로 보인다.

### 2.5 신안 앞바다 중규모 지진들의 발진기구

이 절에서는 앞 절에서 분석한 신안 앞바다 중규모 지진들의 발진기구에 대해서 논한다. 발진기구(focal mechanism)란 지진파를 분석하여 지진을 발생시킨 단층의 방향이나 움직임 방향을 보여주는 일종의 모형제라고 할 수 있는데, 단층면해(fault plane solutions)라는 용어를 사용하기도 한다. 단층면해는 지체구조적인 응력장과 기존 단층 또는 선구조 등과의 관계를 이해하는데 도움을 줄 수 있으며, 강지진동 모사나 지진해일 발생원 등에 사용되는 기본 파라미터이다. 또한 장애에 잠재적인 지진이 단층운동 특성을 이해할 수 있도록 도움을 줄 수 있다. 일반적으로 발진기구는 체적파의 극성

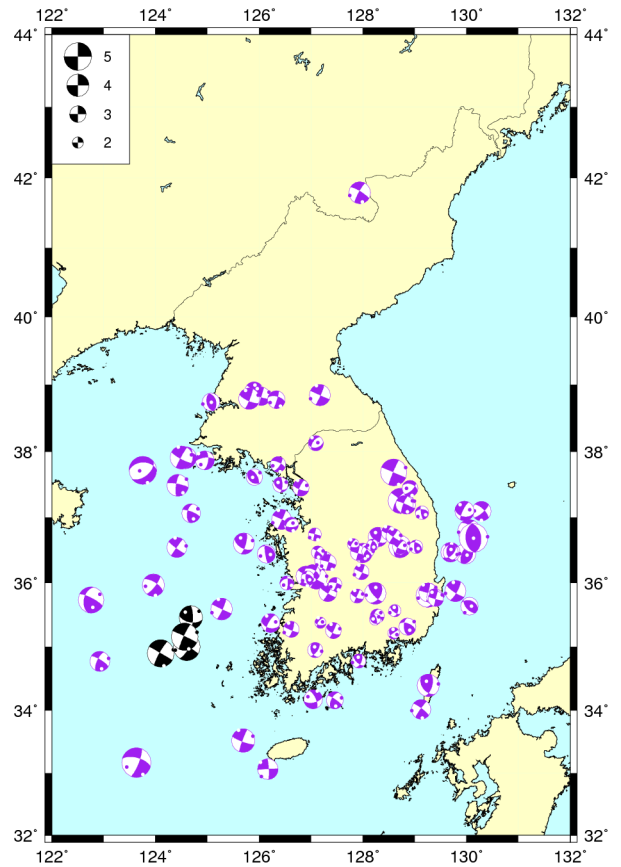
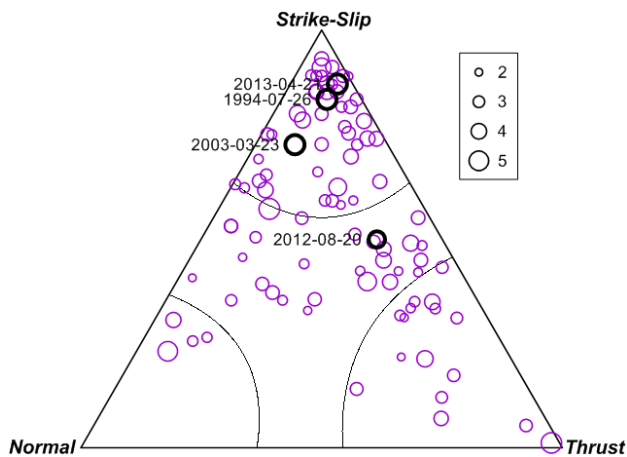


Fig. 4. Focal mechanism solutions of local and regional events around the Korean Peninsula from Choi[13] and this study. The dominant event type is strike-slip faulting. Some thrustal and normal faulting events occur in localized region. The closed dot and open dot mean the P axis and T axis, respectively.

분석을 통하거나 파형분석으로부터 구해낼 수 있다. 이 연구에서는 앞 절에서 지진원 상수를 도출하기 위해 수행된 파형분석에서 부가적으로 획득한 발진기구 정보를 사용하였다. 1994년 7월 26일 지진과 2003년 3월 23일 지진에 대한 지진원 상수는 Cipar[4]와 Choi[5]를 참고하였다.

한반도는 유라시아판의 극동 지역에 위치하여 전형적인 판내 지진의 특성을 보이며, 인도판, 필리핀판, 태평양판이 각기 섭입, 충돌 등의 영향을 미치고 있다. 한반도 및 인근에서 발생한 지진의 발진기구는 대부분 정단층이나 역단층 성분을 약간 포함한 주향이동단층의 특성을 보이는 것으로 알려져 있으며, P축의 방향은 전반적으로 동북동-서남서의 방향을 보인다(Rhie and Kim[7], Kim et al.[12], Choi[13]). Fig. 4는 Choi[13]와 이 연구에서 언급된 지진들의 발진기구를 도시한 것이며, Fig. 5는 Fig. 4의 발진기구들을 삼각다이아그램(Frohlich[14])에 표시한 것이다. 2012년 8월 20일 지진은 역단층 성분을 포함한 주향이동단층의 특성을 보이며, 다른 3개의 지진은 전형적인 주향이동단층의 특성을 보인다. Fig. 4에서 2012년 8월 20일 지진의 오른쪽에 2008년 1월 16일에 규모 3.9의 지진이 발생했는데, 마찬가지로 이 지진도 전형적인 주향이동단층의 특성을 보인다. 이와 같이 신안 앞바다 인근의 중규모 지진들은 대부분 주향이동단층 특성을 보여주며, P축 주향은 동북동-서남서 내지 북동-남서의 방향이다. 이는 현



**Fig. 5.** The event type classification of earthquake depicted in Fig. 4 according to Frohlich[14]. The earthquakes greater than magnitude 4.0 nearby the offshore Sinan are also depicted with their dates.

재 알려져 있는 한반도 및 주변에서의 주응력 방향인 동북동-서남서 방향과 부합하며, 한반도에서 GPS 관측을 통해 계산된 응력의 방향에 관한 연구 결과(Jin and Park[15], Song and Yun[16])와도 일치한다.

### 3. 결론

신안 앞바다 인근 규모 4.0 이상 지진들의 지진원 상수를 분석하였다. 서해는 동해와는 달리 급작스러운 지각속도구조의 변화가 없을 것으로 생각하여 한반도의 국지적인 지각속도구조 모델인 C&B 모델과 전 지구 속도 구조 평균모델에서 지각에 해당하는 부분을 차용한 모델인 AK135-c 모델을 지진원 상수 분석에 사용하였다.

2012년 8월 20일 지진과 2013년 4월 21일 지진의 지진원 상수를 분석하기 위해 파형역산 기법을 사용하였으며 1994년 7월 26일 지진과 2003년 3월 23일 지진은 각각 Cipar[4]와 Choi[5]를 참고하였다. 파형분석 결과 지진파형의 일치도와 한국지질자원연구원이 발표한 지진의 깊이를 같이 고려해 보면 C&B 모델보다는 AK135-c 모델이 신안 앞바다에서 발생한 지진에 대한 지진원 상수 유추에 조금 더 유리한 모델인 것으로 생각된다.

신안 앞바다 인근 지진들의 발진기구는 주향이동단층 특성을 보였으며, 주응력 방향은 한반도의 공통 주응력 방향이라고 여겨지는 동북동-서남서 방향(Rhie and Kim[7], Kim et al.[12], Choi[13])과 거의 일치하며, 또한 서해 중국 연안에서 발생한 지진의 발진기구와 거의 유사한 형태를 보인다. 이 연구에서 언급된 지진들은 모두 기상청 지역규모로 4.0 이상이며, 단층 면해의 공통점을 고려할 때 소규모 지진에서 나타날 수 있는 국지적인 응력 보다는 서해에 전체적으로 작용하는 판구조적 응력 분포를 반영한다. 이 방향은 인도 대륙의 북상에 의한 동아시아 지역의 응력 방향을 판구조적으로 예측한 Eguchi[17]의 결과와도 일치한다. 즉, 서해를 경계로 한반도 서부와 인접하고 있는 중국 동부의 경우 P축의 방향은 인도판이 유라시아판과 충돌할 때 발생하는 응력이 중국 동부에 미치며(Park et al.[18]), 한반도까지 영향을 미치는 것으로 보인다.

서해 지역은 유라시아판 내부에 위치하나 해역이라 물리적인 접근이 어

렵고 체계적인 연구가 진행되지 않아 현재까지 지구구조 모델이 성립되어 있지 않는 상태이다. 그런데 신안 앞바다 인근 지진들과 같이 중규모에 육박하는 지진들이 종종 발생하고 있으므로 이를 계기로 서해 지역의 지진지체구조 및 단층활동 특성에 대한 이해가 요구된다. 지진파형을 활용한 발진기구 연구는 지진의 단층 특성 등을 간접적으로 추론할 수 있는 효과적인 기법이므로 정확한 지진원 상수를 결정하고, 이를 기반으로 다양한 후속 연구가 진행된다면 한반도 신안 앞바다 인근 지진활동 특성 규명 뿐만 아니라 서해 지역의 전반적인 지구구조 모델을 성립하는데 도움을 줄 수 있을 것이다.

### / 감사의 글 /

본 논문은 한국원자력안전기술원 기관고유사업인 원자력시설 부지감시사업의 일환으로 수행되었다. 원고의 개선을 위해 세심한 조언을 해주신 익명의 심사위원들께 감사드린다.

### / REFERENCES /

1. Asia Economy online newspaper, 2012 Aug 8<sup>th</sup>, <http://www.asiae.co.kr/news/view.htm?idxn=2012082022594077990>.
2. Chang SJ, Baag CE, Crustal structure in southern Korea from joint analysis of regional broadband waveforms and travel times, *Bulletin of the Seismological Society of America*, 2006;96:856-870.
3. Kennett BLN, Engdahl ER, Buland R, Constraints on seismic velocities in the earth from travel times, *Geophysical Journal International*, 1995;122:108-124.
4. Cipar JJ, Earthquake focal mechanisms in northeastern China and Korea determined by the grid search algorithm, *Environmental Research Papers*, 1996;1197:1-25.
5. Choi H, Source parameters of two moderate earthquakes at the Yellow Sea area in the Korean Peninsula on March 22 and 30, 2003, *Jigu-Mulli-wa-Mulli-Tamsa*, 2010;13:235-242.
6. Kubo A, Fukuyama E, Kawai H, Nomomura K, NIED seismic moment tensor catalogue for regional earthquakes, *Tectonophysics*, 2002;356:23-48.
7. Rhie J, Kim S, Regional moment tensor determination in the southern Korean Peninsula, *Geosciences Journal*, 2010;14:329-333.
8. Bouchon M, A simple method to calculate green's functions for elastic layered media, *Bulletin of the Seismological Society of America*, 1981;71:959-971.
9. Sokos EN, Zahradnik J, ISOLA a Fortran code and a Matlab GUI to perform multiple-point source inversion of seismic data, *Computers & Geosciences*, 2008;34:967-977.
10. National Earthquake Comprehensive Information System, <http://necis.kma.go.kr/>.
11. Kanamori H, The energy release in great earthquakes, *Journal of Geophysical Research*, 1977;82:2981-2987.
12. Kim SK, Jun MS, Jeon JS, Recent research for the seismic activities and crustal velocity structure, *Journal of Korea Society of Economic and Environmental Geology*, 2006;39:369-384.

13. Choi H, Seismic characteristics of earthquakes around the Korean Peninsula and their tectonic implications, Doctoral Thesis, Seoul National University, 2012.
14. Frohlich C, Triangle diagrams: ternary graphs to display similarity and diversity of earthquake focal mechanisms, *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 1992;75:193–198.
15. Jin S, Park PH, Tectonic activities and deformation in South Korea constrained by GPS observations, *International Journal of Geology*, 2007;2:11–15.
16. Song DS, Yun HS, Crustal strain pattern analysis of Korean Peninsula using repeated GPS measurements, *KSCE Journal of Civil Engineering*, 2008;12:267–273.
17. Eguchi T, Tectonic stress field in East Eurasia, *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 1983;33:318–327.
18. Park Y, Ree JH, Yoo SH, Fault slip analysis of Quaternary faults in southeastern Korea, *Gondwana Research*, 2006;9:118–125.