

2012년 울산 남동쪽 외해에서 발생한 연속 지진의 지진학적 특성

박은희 · 박순천* · 최영진
국립기상연구소

요 약

본 연구에서는 2012년 울산 남동쪽 외해에서 발생한 6회의 연속 지진에 대한 진원 특성에 대해 분석하여, 동해 지구조와의 연관성을 밝히고 지진 활동에 대해 이해하고자 하였다. 이 지진에 대한 분석을 위해 기상청 상시 지진 관측망과 일본 방재과학기술연구소의 F-net 관측소 자료를 사용하였다. 1차원 지각속도구조모델을 적용한 HYPOELLIPSE를 사용하여 진원 재결정을 수행한 결과, 진앙은 반경 1.5 km 범위 내에 포함되었으며, 진원 깊이는 13~17 km로 비슷한 깊이를 나타내었다. 그리고 Tsuboi 식을 이용하여 재계산된 규모는 2.0~3.2로 소규모의 지진이었다. 그 중 가장 큰 규모를 가지는 2월 24일에 발생한 지진에 대한 단층면해 결과는 주향 311°, 경사 69°, 면선각(rake) 44°와 주향 201°, 경사 48°, 면선각 150°가 쌍으로 역단층 성분을 포함하는 주향이동단층이었다. 연속 지진의 진앙 분포와 단층면해 결과를 고려하면, 복잡한 구조를 가진 울릉분지 남서부 경계의 돌고래 충상단층대와 관련 있을 것으로 생각된다.

주요어: 울산 외해, 연속 지진, 돌고래 충상단층대

Eun Hee Park, Sun-Cheon Park and Young-Jean Choi, 2013, Seismic characteristics of the 2012 Ulsan offshore earthquake sequence. Journal of the Geological Society of Korea. v. 49, no. 4, p. 493-502

ABSTRACT: To understand the characteristics of seismic activity and tectonical relationship, we analyzed the source parameters of 6 earthquakes occurred offshore of Ulsan, Korea offshore in 2012. For the analysis, we used permanent stations of Korea Meteorological Administration (KMA) and Broadband Seismograph Network (F-net) of the National Research Institute for Earth Science and Disaster Prevention (NIED). For the hypocenter determination, 1D velocity structure and HYPOELLIPSE were used. The epicenters were distributed within a radius of about 1.5 km. And the focal depths of the earthquakes were in the range of 13 - 17 km, indicating shallow events. Using the equation of Tsuboi, magnitudes were estimated to be 2.0 - 3.2. To find fault movement of earthquake sequence, focal mechanism for the largest earthquake (M_L 3.2) was analyzed. According to the result of focal mechanism, this earthquake was an oblique strike-slip faulting along either a failure plane of strike 311°, dip 69° and rake 44°, or that of strike 201°, dip 48° and rake 150°. Considering the distribution of epicenters and fault plane solution, the sequence in 2012 seems to be related to the Dolgorae Thrust Belt of complex structure.

Key words: offshore Ulsan, earthquake sequence, Dolgorae Thrust Belt

(Eun Hee Park, Sun-Cheon Park and Young-Jean Choi, National Institute of Meteorological Research, 61 Yeouidaebang-ro 16 gil, Dongjak-gu, Seoul 156-720, Korea)

1. 서 론

기상청(<http://www.kma.go.kr>)에서 발표한 우리나라의 지진을 살펴보면 그림 1과 같이 분포한다. 여기에 나타난 지진은 1999년부터 2012년 사이에

발생한 규모 2.0 이상의 지진으로 규모에 따라 크기를 달리하여 나타냈으며, 동해에서 발생한 연속 지진은 별표로 도시하였다. 우리나라에서 발생한 지진들은 대부분이 규모 4 이하의 소규모 지진이며, 한반도 전역에서 산발적으로 발생하는 경향을 보인다.

* Corresponding author: +82-70-7850-6708, E-mail: suncheon@korea.kr

그러나 동해 일부 지역에서는 지진이 수시간 또는 수일 간격을 가지고 연속적으로 발생하는 경우가 있다. 2006년 4월에는 울진 앞바다에서 11차례의 지진이 연속적으로 발생하였고(Kang and Shin, 2006), 2007년과 2008년 영덕 해역에서도 10회의 연속 지진이 발생하였다(Shin *et al.*, 2012). 그리고 기상청 발표 결과에 따르면, 2012년 2월 울산 남동쪽 외해에서도 수일 간격으로 지진이 5차례 연속적으로 발생하였다.

Kang and Shin (2006)과 Shin *et al.* (2012)은 2006년 4월 울진 앞바다에서 발생한 연속 지진과 2007년

9월, 10월과 2008년 12월에 영덕 해역에서 발생한 연속 지진에 대해 분석하였다. 이들 연구에서는 연속 지진들에 대한 지진학적 특성과 함께 단층면해를 분석하여 울릉분지 경계의 울릉단층과 후포분지 동쪽의 후포 단층에서 연속 지진이 발생하였을 것으로 지구구조와의 연관성을 생각하였다. 그리고 연속 지진의 관계를 전형적인 본진-여진의 관계가 아닌 군발 지진의 형태로 보았다.

2012년 2월 19일에서 26일 사이에 발생한 5회의 지진은 울릉분지 남서 경계부에 속하는 울산 동구 남동쪽 약 60 km 해역에서 발생하였다. 이 지역에는

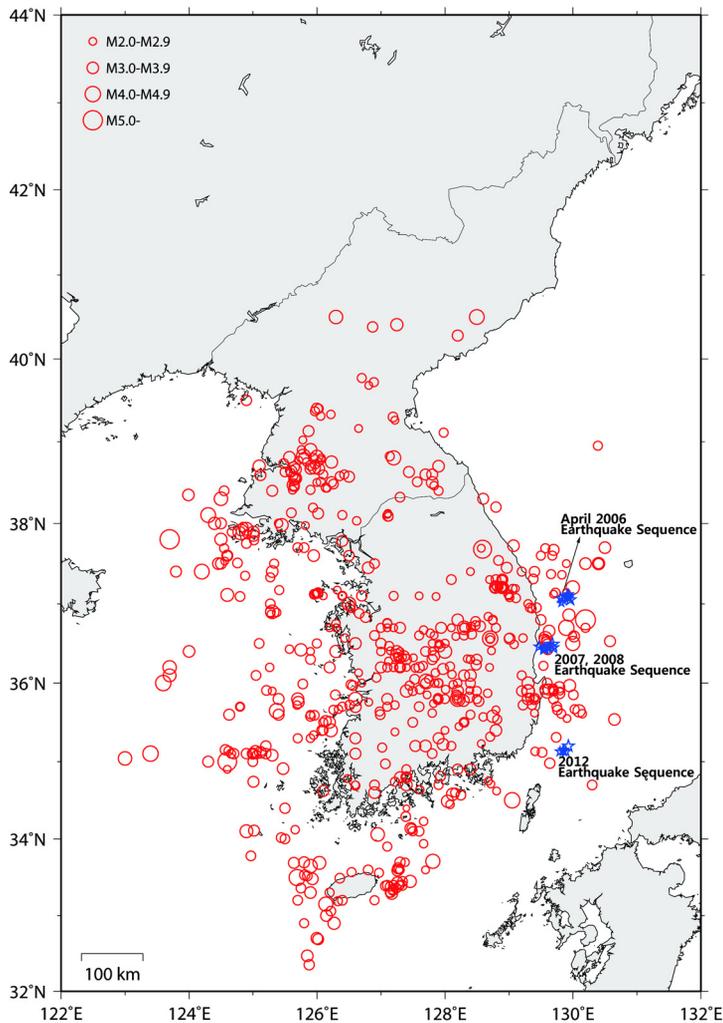


Fig. 1. Earthquake distribution with magnitude greater than 2.0 occurred from March 1999 to December 2012. Stars are earthquake sequences reported by Korea Meteorological Administration (KMA).

돌고래 층상단층대가 너비 6~8 km로 60 km 이상 비스듬히 연장된 형태로 발달하였으며, 쓰시마섬 북쪽의 쓰시마단층에 연결되어 있다(Chough *et al.*, 2000). 이곳은 2012년 이전에는 지진 발생 빈도가 낮았던 지역으로 그 주변에서의 지진 연구도 수행되지 않았다. 따라서 본 연구에서는 2012년 울산 외해에서 발생한 연속 지진의 진원 특성에 대해 분석하여, 동해 지구구조와의 연관성을 밝히고 지진 활동에 대해 알아보려고 한다.

2. 지진 자료

2012년 2월 울산 남동쪽 외해에서 발생한 연속 지진들에 대한 분석에는 기상청 상시 지진 관측망에 기록된 자료를 주로 이용하였으며, P파와 S파의 구분이 가능한 자료는 모두 사용하였다. 그러나 기존의 상시 지진 관측망만을 분석에 이용할 경우, 분석할 수 있는 지진 자료가 지진 발생 지역의 서쪽에만 위치되어 지진 분석 결과에 영향을 주게 된다. 이를 보완하기 위하여 일본 방재과학기술연구소의 F-net 관측소 자료도 이용하였다. F-net 자료의 경우, 약 200 km 범위 내에 있는 관측소 자료를 사용하였다.

이 연구에 사용된 관측소들의 위치는 그림 2에 나타내었다.

1999년 이후, 기상청 발표 지진 중 2012년 2월 연속 지진과 동일한 지역에서 발생한 지진은 없었다. 그러나 연속 지진 자료를 분석하여 기상청에서 발표하지 않은 1회(2012년 3월 27일)의 지진을 더 검출할 수 있었다. 따라서 이 지역의 지진 발생 특성 분석을 위해, 추가적으로 검출한 지진을 포함하여 6회의 지진에 대한 진원 특성을 분석하였다.

3. 진원 재결정

진원 요소는 지진을 나타내는 기본 요소이며, 다른 분석을 위해서도 중요한 자료이다. 기상청에서는 단시간 내에 통보하기 위해 자료를 분석하기 때문에 정확성보다는 신속성에 중점을 두게 된다. 따라서 정확한 진원 요소를 찾기 위해 진원을 재결정하여 기상청 발표 결과와 비교하였다. 진원 재결정에는 진원으로부터 반경 250 km 내에 위치하는 기상청 관측소와 200 km 내의 F-net 관측소에 기록된 지진 자료를 사용하였다. 파의 도달시간 측정은 매뉴얼적 방법으로 이루어졌으며, S파의 도달시간은 S파가 정

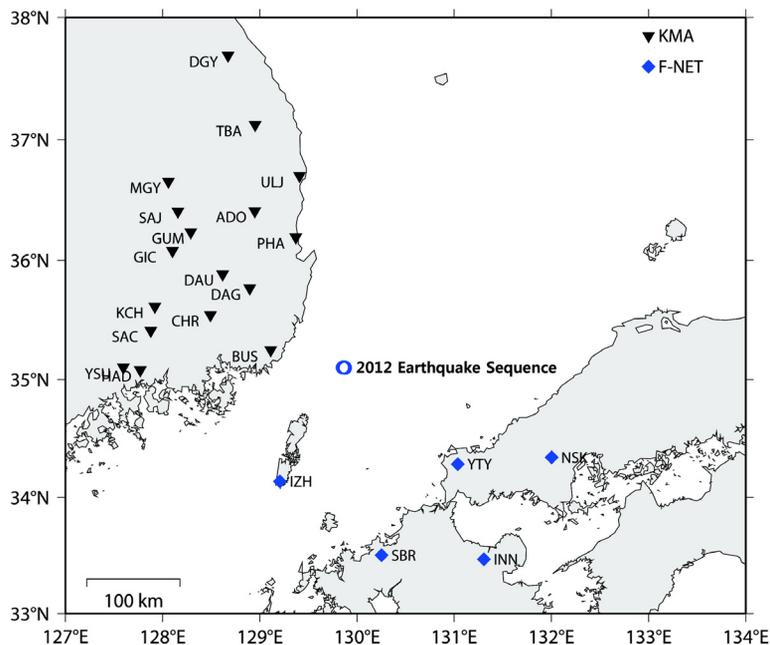


Fig. 2. Distribution map of KMA station (inverted triangle) and F-net station (diamond) used in this study.

Table 1. Velocity model (Chang and Baag, 2006; Chang and Baag, 2007) used for relocation of events in this study.

Depth (km)	P-Velocity (km/s)	Vp/Vs
0.0	5.67	1.76
5.12	6.05	
16.7	6.67	
31.9	7.88	

Table 2. Source parameters of 2012 earthquake sequence.

Date (yyyy/mm/dd)	This Study								KMA			
	Origin time (hh:mm:ss)	Latitude (°)	Longitude (°)	Depth (km)	RMS	SEH*	M _L	Number of station	Origin time (hh:mm:ss)	Latitude (°)	Longitude (°)	M _L
2012/02/19	11:21:29.06	35.1024	129.8759	13.63	0.2155	2.3	2.7	18	11:21:29	35.13	129.89	2.7
2012/02/21	13:30:55.76	35.1028	129.8564	13.88	0.1441	3.0	2.5	14	13:30:56	35.13	129.80	2.5
2012/02/23	15:54:55.26	35.1048	129.8604	16.72	0.2231	5.1	2.2	13	15:54:55	35.13	129.85	2.4
2012/02/24	00:05:32.76	35.0997	129.8525	13.82	0.2029	2.7	3.2	20	00:05:32	35.20	129.93	3.2
2012/02/26	15:26:25.47	35.1033	129.8679	16.66	0.2502	4.5	2.0	13	15:26:26	35.15	129.85	2.5
2012/03/27	04:19:59.41	35.0970	129.8807	13.46	0.2460	6.0	2.4	9	-	-	-	-

*SEH is the horizontal 68% confidence limit in the least-well-constrained direction.

확히 구분되는 경우에만 사용하였다. 측정된 파의 도달시각은 Chang and Baag (2006)의 1차원 지하 속도구조모델의 P파 속도와 $V_p/V_s=1.76$ 을 가정하였으며(Chang and Baag, 2007; 표 1), HYPOELLIPSE (Lahr, 1980)를 이용하여 역산을 통해 진원 재결정을 실시하였다. 이렇게 재결정한 진원 요소는 기상청 발표 결과와 함께 표 2에 나타내었다. 그리고 그림 3에 재결정한 진앙과 기상청에서 발표한 진앙을 지도에 나타내고, 계산된 진원 깊이를 진앙이 포함 되도록 축선을 그어 단면도로 나타내었다.

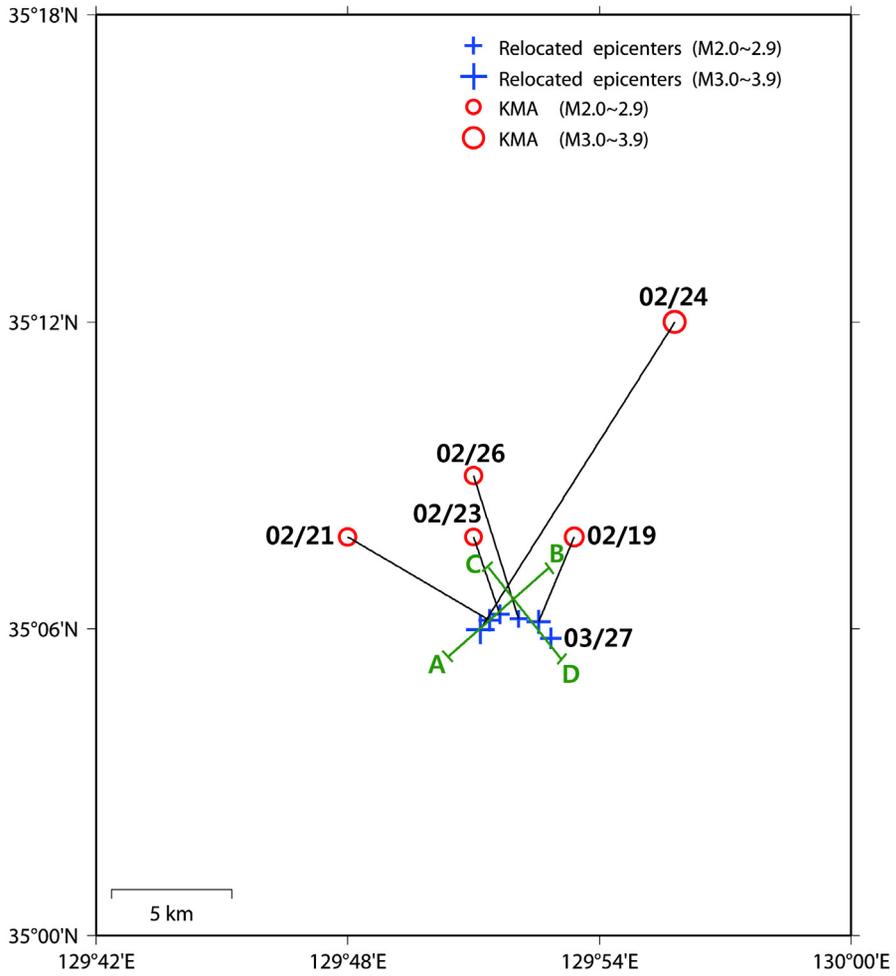
지진이 발생한 시각인 진원시와 진앙은 기상청 발표와 재결정한 결과의 소수점 이하 자리수가 다르다. 따라서 정밀도에서 차이를 가지므로 서로간의 정확한 비교는 어렵지만, 진원시의 경우는 기상청 발표 결과와 약 1초 이하의 시간 차이를 가지며 비슷한 시각을 나타내었다. 그리고 진앙의 경우는 기상청 발표 결과와 최대 13 km의 차이를 가지며, 평균 약 6.2 km와 표준편차 약 4.1 km로 진앙의 발생 경향도 유사점을 보이지 않았다. 그러나 재결정된 진앙은 수평방향의 신뢰도를 나타내는 SEH (표 2)가 2~6으로 다소 크지만, 반경 1.5 km 범위 내에 집중되어 분포하는 것으로 나타났다. 그리고 진원

깊이는 13~17 km로 큰 차이를 보이지 않고, 비슷한 깊이를 나타내었다. 비슷한 위치에서 지진이 발생할 경우, 지진 발생의 원인이 동일할 것으로 예상되므로 파형도 비슷할 것으로 여겨진다. 따라서 진앙에서 비교적 가까운 BUS와 DAG 관측소의 수직 파형을 2~10 Hz의 대역 통과 필터를 사용하여 그림 4에 도시하였다. 그림 4를 보면, 두 관측점에서 모든 지진에 대해 P-S시가 유사하게 나타나는 것을 알 수 있다. 그리고 6개 지진의 파형은 거의 유사한 형태를 나타내지만, 2월 21일, 23일, 24일의 파형과 2월 19일, 26일, 3월 27일 파형이 각각 좀 더 유사성을 보인다. 각 쌍의 지진은 진원 깊이에서는 차이가 있지만, 진앙은 약 0.5 km 정도로 서로 가까이 위치하고 있다.

4. 규모 재결정

규모는 진원으로부터 200 km 내에 위치하는 속도 관측소에 기록된 파형을 사용하였다. 속도 관측소에 기록된 수평성분을 Wood-Anderson 지진계로 변환하여 S파의 최대진폭을 측정하였다. 이렇게 측정된 진폭의 기하평균 값을 Tsuboi (1954)의 식에

(a)



(b)

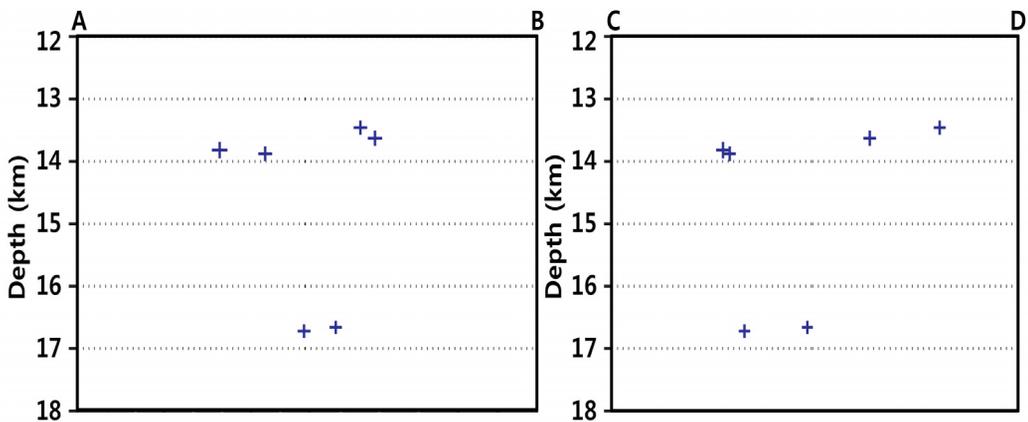


Fig. 3. (a) Epicentral map and (b) the cross sections of 2012 Ulsan offshore earthquakes.

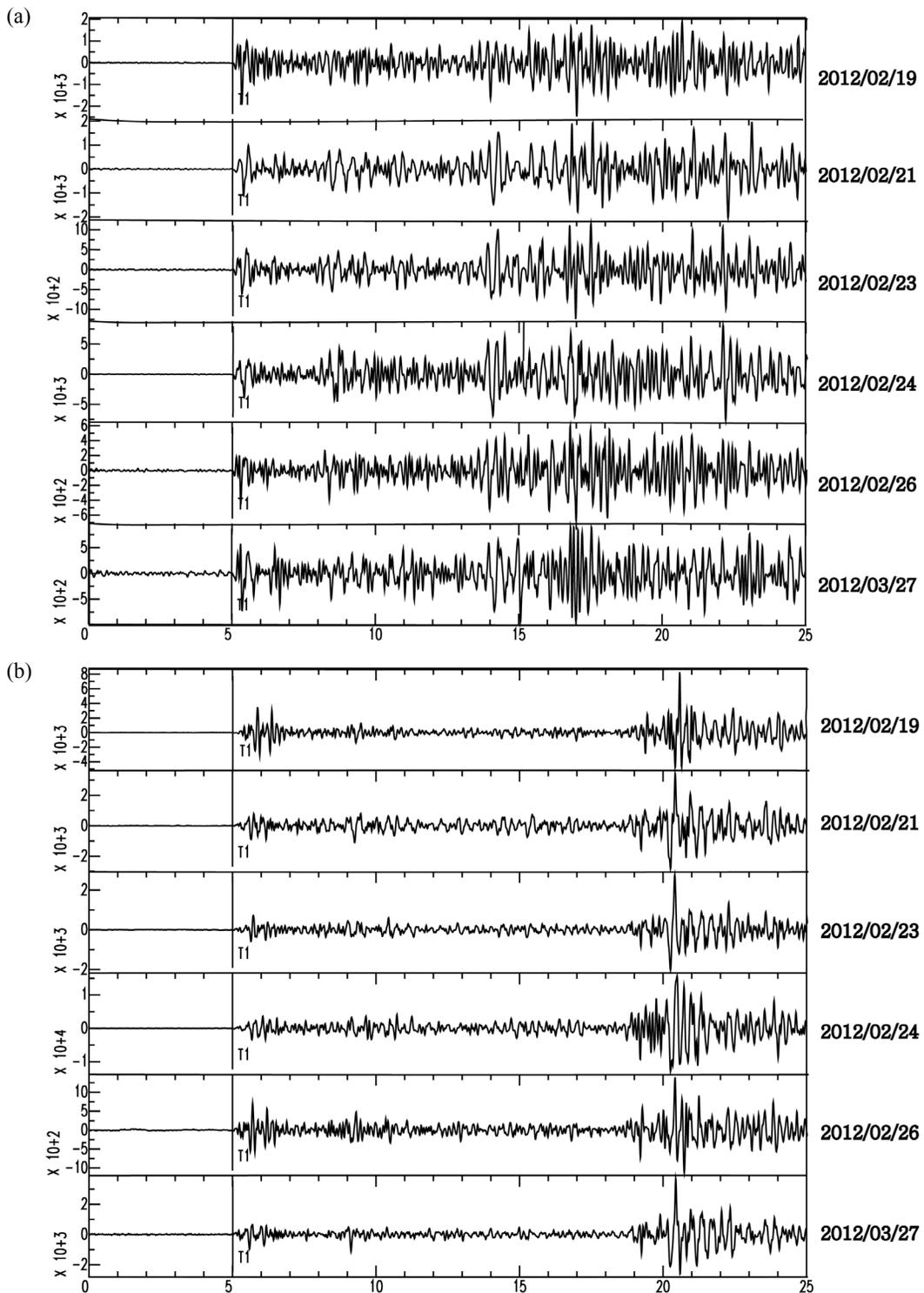


Fig. 4. Vertical component seismograms recorded at the station (a) BUS ($\Delta=70$ km) (b) DAG ($\Delta=150$ km) for events occurred on Ulsan offshore in 2012. The seismograms are aligned on P arrival time and bandpass filtered between 2 and 10 Hz. P arrival times are indicated with T1.

대입하여 규모를 재결정하였다. 재결정된 규모는 2.0~3.2로 대부분 기상청 발표 규모와 비슷한 값을 나타내었다(표 2). 그러나 2012년 2월 23일과 2월 26일에 발생한 지진은 기상청 발표 결과보다 작은 규모를 나타내었다.

규모 차이를 보이는 지진에 대한 정확도를 판단하기 위해 각 관측소에 도달한 지진 파형의 진폭을 비교하였다. 만약 비슷한 위치에서 발생한 지진이 같은 규모를 보이면 진폭의 크기가 비슷할 것으로 예상할 수 있다. 따라서 계산한 규모와 기상청 발표 규모가 2.5로 동일한 2월 21일 지진과 기상청 발표 규모는 2.5이지만 재계산된 규모가 2.0으로 작게 나온 2월 26일 지진에 대한 최대진폭과 규모 차이를 비교하였다. 그림 5에는 규모결정에 이용한 속도 관측소의 지진계의 수평 기록을 Wood-Anderson 지진계로 변환하여 측정된 S파의 최대변위에 대한 기하평균 값의 차와 각 관측소에서 계산된 규모의 차를 나타내었다. 2월 21일 지진이 2월 26일의 지진에 비해 진폭과 규모가 크게 나타나는 것을 볼 수 있었다. 따라서 2012년 2월 26일 지진은 규모 2.5보다 작은 규모를 가진다고 판단된다.

5. 단층면해

2012년 연속 지진을 일으킨 단층 운동에 대해 알아보기 위하여, 2012년 발생한 지진 중 규모 3.2로

최대규모를 가지는 2월 24일 지진에 대한 단층면해를 구하였다. 단층면해를 구하기 위해 비교적 구분이 잘되는 총 9개 관측소에 기록된 파형에서 Pg와 Pn을 구분하지 않고 초동극성을 읽었다. 그리고 초동극성을 읽은 자료에 FOCMEC (Snoke, 2003)을 적용하여 이 지진에 대한 단층면해를 구하였다. 역산하여 구해진 여러 개의 단층면해에서 중간값(median)을 이용하여 하나의 해를 얻었다. 이에 의해 구해진 가장 적절한 단층면해는 주향 311°, 경사 69°, 면선각(rake) 44°와 주향 201°, 경사 48°, 면선각 150°가 쌍이며, 역단층 성분을 포함한 주향이동단층이었다(그림 6).

동해의 지질 구조와 지진의 연관성을 찾기 위해 2006년 발생한 연속 지진과 2007년, 2008년에 발생한 연속 지진의 진앙을 그림 7에 도시하고, 각 연속 지진 중 가장 큰 규모의 지진에 대한 단층면해를 나타내었다(Kang and Shin, 2006; Shin *et al.*, 2012). 그리고 본 연구에서 결정한 2012년 연속 지진의 진앙과 2월 24일 발생한 규모 3.2 지진에 대한 단층면해를 나타내었다.

2006년 4월 울진 앞바다에서 발생한 연속 지진은 울릉분지 서부 경계에 위치하였다. 그리고 연속 지진 중 최대 규모 3.2를 가지는 지진의 단층면해 결과, 정단층 성분을 가지는 주향이동단층으로 나타나 울릉분지 경계의 울릉단층에서 발생한 것으로 Kang and Shin (2006)은 추정하였다. 2007년, 2008년에 발생한 연속 지진은 영덕 해역에 위치하며, 가장 큰

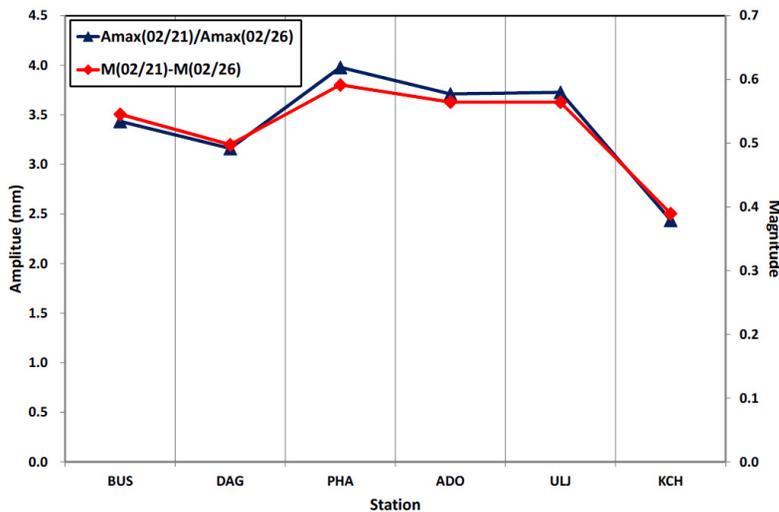


Fig. 5. Relative amplitudes and magnitude differences of February 21, 2012 and February 26, 2012 events.

규모를 가지는 지진의 단층면해는 약간의 층상운동이 포함된 주향이동단층이 우세하게 나타났다. 따라서 이 연속 지진은 후포분지 동쪽의 후포단층에 관계될 것으로 생각된다(Shin *et al.*, 2012).

2012년에 발생한 연속 지진은 울릉분지 남서부 경계에 위치한다. 이 지역의 단층 및 습곡들은 돌고래 층상단층대(Dolgorae Thrust Belt)라고 한다. 각각의 층상단층들은 기본적으로 북동-남서 주향으로 남동 방향의 경사를 가지고 있으며, 북서-남동 방향의 압축응력을 받는다(Chough *et al.*, 2000). 단층면해의 분석 결과는 돌고래 층상단층대와 주된 경사방향은 다르지만, 진앙과 주향을 고려하면 이 지진은 돌고래 층상단층대를 구성하고 있는 지질 구조와 관련되어 있을 것으로 생각된다.

6. 토의 및 결론

2012년 2월과 3월에 울산 남동쪽 외해에서 발생한 6회의 연속 지진은 반경 약 1.5 km 범위 내에 분포하는 것으로 분석되었다. 그리고 진원 깊이는 13 ~ 17 km로 비슷한 깊이를 나타내었으며, 규모는 2.0 ~ 3.2로 대부분 기상청 발표 결과와 비슷하게 나타났다. 그러나 2012년 2월 23일과 26일에 발생한 지진은 기상청 발표 결과보다 작은 규모를 나타내는데, 이 규모 차이는 규모 계산에 사용된 관측소의 관측환경 특성에 의한 진폭 변화가 영향을 끼친 것으로 생각된다. 2012년 2월 24일에 발생한 규모 3.2의 지진에 대한 단층면해는 역단층 성분을 포함하는 주향이동단층으로 나타났다.

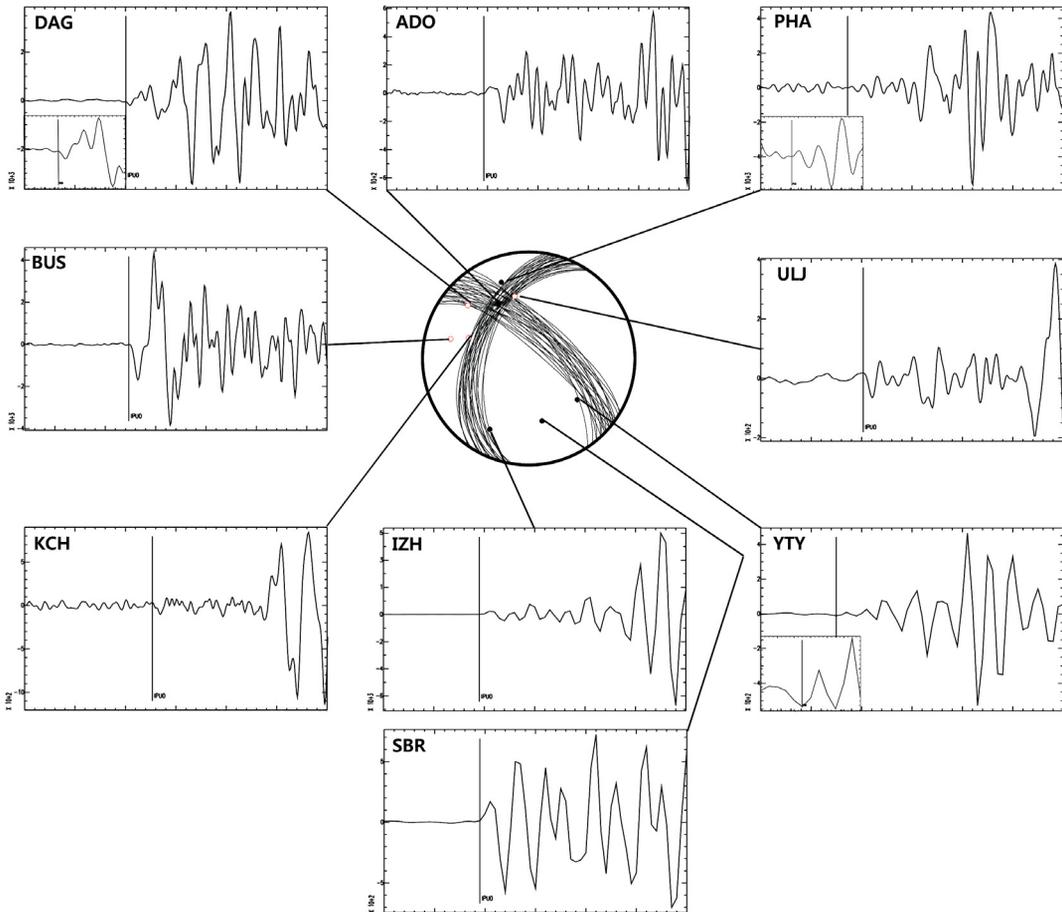


Fig. 6. Focal mechanism solutions obtained by inversion of P polarities for February 24, 2012 event (M_L 3.2). Open and closed circles represent down (dilatational) and up (compressional), respectively.

이 연속 지진들의 분석에는 기상청 상시 지진 관측망을 기본으로 사용하였다. 그리고 지진 관측망의 방위각을 고려하여 일본 방재과학기술연구소의 F-net 관측소 자료를 추가하여 분석의 정확도 향상에 이용하였다. F-net 자료를 추가하여 관측소 방위각에 따른 진앙 재결정 정확도 향상 정도를 알아보기 위해 기상청 지진 관측망만을 분석에 이용한 경우와 F-net 자료를 추가하여 분석에 이용한 경우를 비교해보았다. 두 경우 얻어진 진앙 결과를 그림 8에 나타내었다. 기상청 자료만을 이용한 진앙 재결정 결과는 약 18 km 반경

내에 분포하여 F-net 자료를 추가한 경우보다 더 넓은 진앙 분포를 보였다. 그리고 F-net 자료를 추가한 결과보다 더 북쪽에 위치하였다. 2월 26일 지진의 경우, 규모가 작아서 파형구분에 어려움이 있고, 사용할 수 있는 관측소 수가 적기 때문에 진원 결정 오차가 커진 것으로 판단된다. 기상청 자료에 F-net 관측 자료를 추가한 경우, 진앙은 반경 약 1.5 km 내에 집중되어 남동 방향의 관측소를 추가함으로써 진원 결정 정확도가 크게 향상된 것으로 판단할 수 있다.

2012년 연속 지진의 연구 결과를 이 지역의 지질과 연관지어보면 돌고래 층상단층대와 관련되어 있을 것으로 생각된다. 돌고래 층상단층대는 울산 외해의 울릉분지 남서부 경계 지역에 위치하며 너비 6~8 km로 60 km 이상 비스듬히 연장된 단층대로서 쓰시마섬 북쪽에서 쓰시마단층과 연결되어 있다 (Chough *et al.*, 2000). 중기 마이오세 말 이후에 북서-남동 혹은 동-서 방향의 횡압력이 우세해지면서 울릉분지가 서서히 닫히기 시작하였다. 그래서 횡압력에 의한 지구조 운동으로 북동-남서 주향의 층상단층대와 습곡이 발달하였다. 후기 마이오세 이후, 일부 지역에서 북서-남동 방향의 압축력이 북동-남서 방향으로 변화되어 남서 방향의 경사방향이 형성되었다. 그리고 주향이동을 포함하는 횡압축 움직임에 의한 압축변형이 수반되어 단층면의 주향과 지층의 주향이 비스듬한 복잡한 층상단층과 습곡이 존재한다 (Lee *et al.*, 2004; Lee *et al.*, 2011; Shinn *et al.*, 2012). 또한 돌고래 층상단층대의 복잡한 구조에 따라 주된 경사방향에 반대되는 북서 방향의 경사도

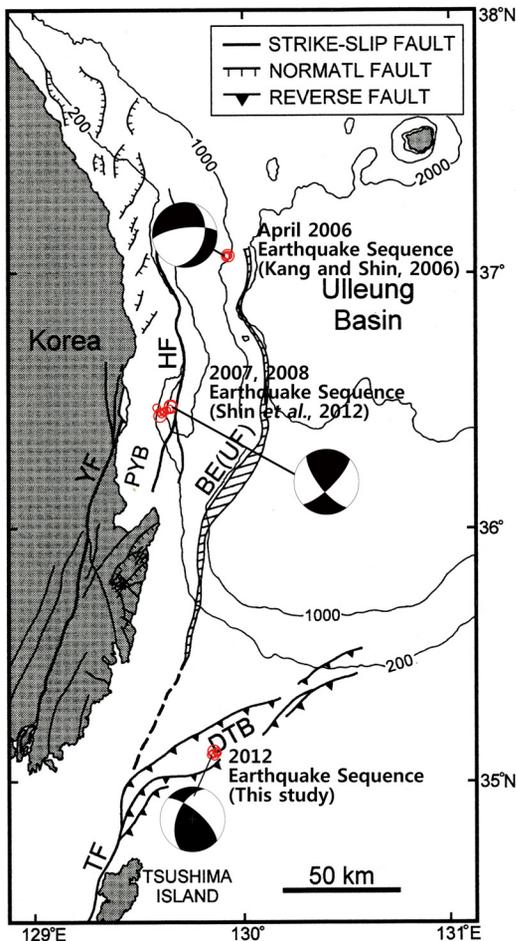


Fig. 7. Epicentral locations and fault plane solutions of earthquake sequences on major geological structures of the eastern margin of Korea (Kang and Shin, 2006; Shin *et al.*, 2012). BE = basement escarpment, DTB = Dolgorae Thrust Belt, HF = Hupo Fault, PYB = Pohang-Yongduk Basin, TF = Tsushima Fault, UF = Ulleung Fault, YF = Yangsan Fault. Modified after Chough *et al.* (2000).

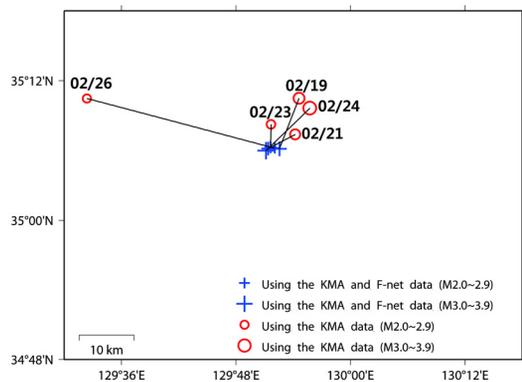


Fig. 8. Comparison of epicenters when using KMA data only and using both KMA and F-net data.

존재한다. 따라서 단층면해 분석 결과, 경사방향이 돌고래 층상단층대의 주 경사방향과 상이하지만 주향(201°)와 이 단층대의 복잡성을 고려하면 2012년 연속 지진은 이 단층대와 관계가 있을 것으로 생각된다(Yoon *et al.*, 2003).

돌고래 층상단층대는 층상단층과 배사구조에서 잠재적인 탄화수소의 부존 지역으로 탄성과 탐사 및 물리검층이 이루어졌으며 층서적, 퇴적학적 연구가 다수 이루어진 지역이다(Chough *et al.*, 1997; Yoon and Hwang, 2009; Shinn *et al.*, 2012). 그러나 본 연구 지역과 그 주변의 지진에 대한 연구는 부족한 실정이다. 따라서 울산 남동쪽 외해를 비롯한 동해에서 발생하는 지진에 대한 연구가 더 필요할 것으로 생각된다.

사 사

본 연구는 기상청 국립기상연구소 주요 사업인 '관측·지진 기술 지원 및 활용 연구'의 일환으로 수행되었습니다. 논문의 완성도를 높이기 위해 좋은 의견을 주신 홍태경 편집위원과 두 분의 심사위원께 감사드립니다.

REFERENCES

- Chang, S.-J. and Baag, C.-E., 2006, Crustal Structure in Southern Korea from Analysis of Regional Broadband Waveforms and Travel Times. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 96, 856-870.
- Chang, S.-J. and Baag, C.-E., 2007, Moho Depth and Crustal Vp/Vs Variation in Southern Korea from Teleseismic Receiver Functions: Implication for Tectonic Affinity between the Korean Peninsula and China. *Bulletin of Seismological Society of America*, 97, 1621-1631.
- Chough, S.K., Lee, H.J. and Yoon, S.H., 2000, Marine geology of Korean seas. 2nd ed., ELSEVIER.
- Chough, S.K., Yoon, S.H. and Park, S.J., 1997, Stratal patterns in the southwestern margin of the Ulleung Basin off southeast Korea: sequence architecture controlled by back-arc tectonism. *Geo-Marine Letters*, 17, 207-212
- Kang, T.-S. and Shin, J.S., 2006, The offshore Uljin, Korea, earthquake sequence of April 2006: seismogenesis in the western margin of the Ulleung Basin. *Geosciences Journal*, 10, 159-164.
- Lahr, 1980, HYPOELLIPSE/MULTICS: a computer program for determining local earthquake hypocentral parameters, magnitude, and first motion pattern. U.-S. Geol. Surv. Open file Rep., 59-80.
- Lee, G.H., Kim, B., Chan, S., Huh, S. and Kim, H.-J., 2004, Timing of trap formation in the southwestern margin of the Ulleung Basin, East Sea (Japan Sea) and implications for hydrocarbon accumulations. *Geosciences Journal*, 8, 369-380.
- Lee, G.H., Yoon, Y., Nam, B.H., Lim, H., Kim, Y.-S., Kim, H.J. and Lee, K., 2011, Structural evolution of the southwestern margin of the Ulleung Basin, East Sea (Japan Sea) and tectonic implications. *Tectonophysics*, 502, 293-307.
- Shin, J.S., Son, M. and Kim, I., 2012, Hypocenter relocation and focal mechanism of earthquake sequences in 2007, 2008 at the offshore Yeongdeok. *Journal of the Geological Society of Korea*, 48, 401-409 (in Korean with English abstract).
- Shinn, Y.J., Yoo, D.G., Hwang, S., Park, Y.C. and Huh, D.G., 2012, A Preliminary Screening of CO₂ Geological Storage in Ulleung Basin, Korea. *Journal of Korean Society For Geosystem Engineering*, 49, 47-58 (in Korean with English abstract).
- Snoko, J.A., 2003, FOCMEC: Focal mechanism determination. Virginia On-line: <http://www.geol.vt.edu/outreach/vtso/focmec>.
- Tsuboi, C., 1954, Determination of Gutenberg-Richter's magnitude of earthquakes occurring in and near Japan. *Zishin*, 7, 185-193 (in Japanese).
- Yoon, B.-S. and Hwang, I.-G., 2009, Tectonics and related depositional pattern in the SW margin of Ulleung Basin. *Journal of the Geological Society of Korea*, 45, 311-329 (in Korean with English abstract).
- Yoon, S.H., Chough, S.K. and Park, S.J., 2003, Sequence model and its application to a Miocene shelf-slope system in the tectonically active Ulleung Basin margin, East Sea (Sea of Japan). *Marine and Petroleum Geology*, 20, 1089-1103.

투 고 일 : 2013년 4월 10일

심 사 일 : 2013년 4월 10일

심사완료일 : 2013년 8월 26일