

영덕 앞바다 미소지진 발생위치 재결정

김광희^{1*} · 유용규² · 유찬호¹ · 강수영¹ · 김한준¹

¹경기도 안산시 상록구 사2동 한국해양연구원

²서울시 동작구 여의대방로 16길 61 기상청

Relocation of Youngduk Offshore Micro-earthquakes

Kwang-Hee Kim^{1*}, Yonggyu Ryoo², Chanho Yu¹, Suyoung Kang¹, and Han-Joon Kim¹

¹Korea Ocean Research and Development Institute, Ansan, Korea

²Korea Meteorological Administration, Seoul, Korea

요약: 대륙지각으로부터 해양지각으로의 지각특성 변화가 나타나는 동해연안 해저에서 발생하는 미소지진의 위치를 JHD (Joint Hypocenter Determination) 방법을 사용하여 정밀 재결정하였다. 기상청 국가지진관측망의 지진관측 능력을 충분히 활용하고 지진발생위치 결정에 사용되는 지진의 수를 충분히 확보하기 위하여 연속지진자료를 점검하여, 20 km × 20 km의 연구지역에서 발생하는 56개의 미소지진 자료를 확보하였다. 우선 일반적으로 사용되는 단일진원인자 결정 방법으로 지진의 발생위치를 결정하였으며, 이 결과만으로는 연구지역 해저에 존재하는 해저 구조를 밝혀내기에 충분치 않다. 그러나 JHD 방법을 적용하면, 지진의 발생위치는 공간적 군을 형성하고 지진 발생의 원인이 되는 4개의 단층을 구체적으로 표시한다. 이들 4개의 단층은 2개의 수직으로 분포하는 진원위치와 2개의 가파르게 남쪽으로 경사져서 분포하는 진원위치로 표시된다.

주요어: 지진발생위치, Joint Hypocenter Determination, 동해, 활단층

Abstract: A cluster of micro-earthquakes in the transition zone between the continental and oceanic crust in the East Sea was relocated using the Joint Hypocenter Determination (JHD) method. In order to increase the number of available earthquakes and to take advantage of the high detection capability of the Korea National Seismic Network (KNSN), continuously recorded seismic data were reviewed to identify 56 micro-earthquakes occurring in a 20 km × 20 km region. The initial earthquake hypocenters were determined using a routine single event location method. Single event locations do not reveal any significant structures in the study area. After relocating the earthquake hypocenters using the JHD technique, the earthquakes were clustered and four potential faults responsible for earthquake generation in the subsurface were delineated. They are defined by two sub-vertical and two steeply south-dipping seismicities located next to each other.

Keywords: Earthquake hypocenters, Joint Hypocenter Determination technique, East Sea, Active faults

서론

2004년 12월 26일 Sumatra-Andaman 지진 및 지진해일에 이어, 2011년 3월 11일 일본 도호쿠 대지진 및 지진해일의 피해를 목격하면서, 우리나라 국민들의 지진에 대한 관심과 우려가 커지고 있다. 특히 일본 도호쿠 지진의 경우 원자력 발전소 사고로 인한 방사능이 유출되면서 전 세계의 방사능 피해에 대한 우려도 더욱 커졌으며, 에너지 소비의 상당부분을 원자력

으로 충당하고 있는 우리나라로서는 일본의 인적, 물적 피해를 남의 일처럼 볼 수도 없는 상황이 되었다. 이와 같이 최근 빈발하는 대규모 지진으로 인하여 많은 피해를 목격하고 있지만 현재의 과학 기술 수준으로는 지진발생에 대한 정확한 단기 예보가 불가능하다(e.g. Geller, 1997). 또한 대규모의 지진은 인명손실, 재산손실 등의 1차적 재해와 더불어 화재, 주요시설의 가동 불능, 공공서비스의 중단, 사회적 혼란 야기 등의 2차적 재해를 수반할 수 있으므로 지진으로 인한 피해 규모는 다른 어떤 자연재해보다 커질 가능성이 크다(강수영 외, 2008). UN 산하 기구인 CRED(Center for Research on the Epidemiology and Disasters)의 통계 자료에 의하면 전 세계 지진 발생 횟수는 지구상에서 발생하는 총 자연재해 횟수의 10% 미만이지만, 지진으로 인한 인명과 재산피해는 자연재해

2011년 8월 25일 접수; 2011년 9월 8일 수정; 2011년 11월 1일 채택;
*Corresponding author

E-mail: kwanghee@kordi.re.kr

Address: Korea Ocean Research and Development Institute, Ansan,
Gyeonggi-do 426-744, Korea

로 인한 전체 피해의 30%에 달하고 있다(CRED, 2011).

지진은 일반적으로 기존에 존재하는 단층면을 따라서 오랜 기간에 걸쳐 축적된 응력이 임계한도에 도달하여 발생한다. 우리나라에서 발생하는 지진은 넓은 지역에 걸쳐 일정한 규칙 없이 산만하게 발생하는 것처럼 보이지만 같은 장소 혹은 비슷한 장소에서 반복적으로 발생하는 경우가 많다(Fig. 1). 다르게 말하면 지진은 지하에 새로운 단층을 형성하면서 발생하기 보다는 기존에 존재하는 단층면을 따라서 발생하는 것이 일반적이다. 이를 다시 해석하면 과거에 발생한 지진을 정확히 분석하고, 현재 지진이 발생하고 있는 현황을 정확히 파악함으로써 향후 발생할 수 있는 대규모 지진의 위치와 크기 등에 관한 정보를 유추할 수 있다. 이런 이유 때문에 지진발생위치를 정확히 알아내고, 지진을 일으키는 단층의 규모, 활동성과 잠재적 위험성, 그리고 주변에 위치하는 다른 단층과의 상호작용 등은 오랜 기간 동안 지진연구자들에게 많은 관심의 대상이 되어왔다.

우리나라에서 과거에 발생한 지진의 위치를 살펴보면 한반도 동남부에 위치한 양산단층 시스템 부근에서 비교적 많은 수의 지진이 발생하였으며, 양산단층 시스템과 지리적으로 가까이 위치하는 동해 해저에서도 비교적 많은 수의 지진이 꾸준히 발생하고 있다. 이 지역은 또한 우리나라 경제 성장의 근간이 되는 각종 산업 시설과 국내 전력소모량의 상당 부분을 생산하는 원자력 발전소를 비롯한 사회간접자본 시설이 다수

위치하고 있어 국민의 재산과 안녕을 확보하기 위해서 이 지역에서 발생하는 지진의 정확한 위치를 파악하고 원인을 규명함으로써 혹시 발생할 수 있는 지진으로 인한 위험성을 인지하고 사전에 대비하는 연구가 매우 시급하고 절실하다.

이 연구에서는 우리나라 동해 해저에서 발생하는 지진의 위치를 정밀 재결정하였다. 기상청 지진관측망의 우수성을 충분히 활용하기 위하여 규모 2.0 이하의 미소지진을 연구에 활용함으로써 지진자료를 충분히 확보하려 노력하였으며, 일반적으로 사용되는 지진발생위치 결정법과는 다른 관측소 보정을 통하여 지진발생위치의 상대적 정확성 향상을 시도하였다.

지진지체구조 환경

지구상에서 발생하는 대부분의 지진은 판과 판의 경계에서 판의 섭입 및 충돌작용에 의하여 발생한다. 한반도의 동쪽에 위치한 일본에서는 유라시아판, 북미판, 태평양판, 필리핀판이 서로 충돌하고 섭입하면서 대규모 지진이 자주 발생하고 있다. 또한 한반도의 남쪽 류큐 트렌치에서는 필리핀판이 유라시아 판 하부로 섭입하면서 많은 지진이 발생하고 있다. 2011년 3월 11일 발생한 일본 동북지진은 태평양 해저지각이 매년 약 83 mm 정도 북미 판과 유라시아 판으로 접근하면서 발생한 대규모 지진의 대표적인 예이다. 일본 동북지진의 발생으로 이 지역의 300 km × 150 km의 단층이 크기는 30~40미터 이동하면서 해저면에 수직변위가 발생하였고, 대규모의 지진해일을 수반하였다(ERI, 2011).

지난 수십 년간 우리나라에서 발생한 지진 발생현황을 보면 피해를 일으킬 수 있는 대규모의 지진 발생은 많지 않다. 그 이유는 우리나라가 비교적 안정된 유라시아 대륙판의 내부에 위치하며, 앞에서 언급한 판의 경계로부터 떨어져 있기 때문이다. 그러나 판 내부에서도 대규모의 지진이 발생하여 피해를 유발하기도 한다. 한반도 부근에서 20세기에 발생한 대규모 판내부 지진으로는 1976년 7월 27일 중국 당산지역에서 발생한 규모(M_s) 7.8 지진이 있다(e.g. SSB, 1980). 일반적으로 당산지진이라 불리는 이 지진으로 인하여 65만명 이상의 사망자(중국정부 공식 사망자 집계는 242,769명)와 79만명 이상의 부상자, 그리고 가깝게는 진앙지인 당산지역에서부터 멀게는 진앙지로부터 약 140 km 이상 떨어져 있는 북경까지 광범위한 지역에 걸쳐 피해를 야기하였다(e.g. USGS, 2011). 1811~1812년 규모 8.0의 미국 중부 New Madrid 지진 또한 판 내부에서 대규모 지진이 발생하여 큰 피해를 야기한 대표적인 예이다(e.g. Johnston and Schweig, 1996). 우리나라는 지난 수십 년간 지진으로 인한 피해가 매우 미비하였지만, 역사문헌 검토에 의하면 우리나라에서도 많은 피해유발 지진이 발생한 바 있으므로 지진으로 인한 피해 가능성을 항상 고려하여야 한다(e.g. Chiu and Kim, 2004; Lee and Yang, 2006; 경재복 외, 2010). 특히 우리나라 오대산 지역에서 2007년 1월 20일

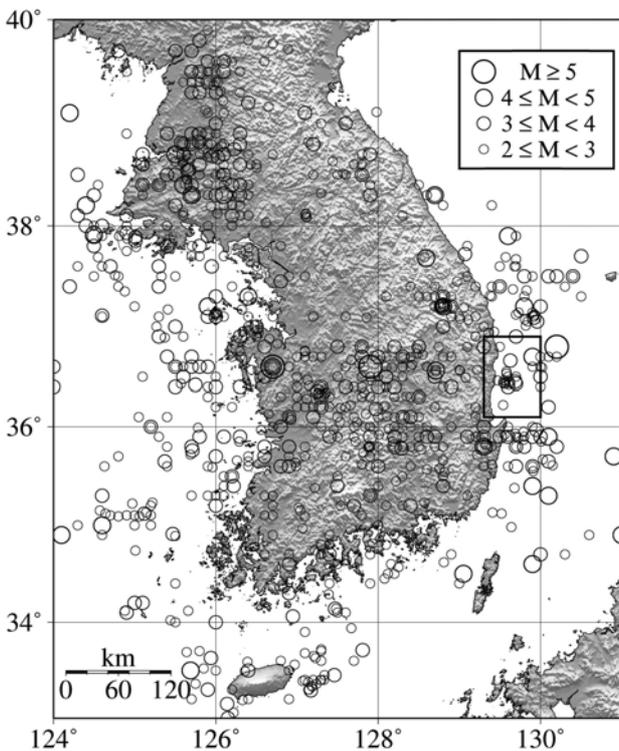


Fig. 1. Distribution of earthquakes in the southern Korean Peninsula between 1978 and 2010. A square in the eastern offshore indicates the location of the Figure 2.

발생한 지진은 우리나라 대부분의 지역에서 지진감지가 보고 되기도 하여, 지진위험성 및 지진관련연구의 필요성을 일깨우기도 하였다(e.g. Kim and Park, 2010; Kim *et al.*, 2010; Park and Hahm, 2011; 경제복 외, 2007; 기상청, 2007).

우리나라 동해는 후열도해로서 마이오세기 열림과 함께 형성되었다. 따라서 한반도의 동쪽에서는 동해의 열림과 관련하여 대륙지각의 리프팅부터 해저면 확장까지 격렬한 신생대의 지구조 운동이 발생했으며, 한반도 동쪽 대륙 주변부에서 관찰되는 지질 및 지형 특성들은 이러한 복잡한 과정을 설명해 주고 있다. 한국대지의 해저면은 거친 지형으로 이루어져 있으며, 동해의 열림과정에서 현재의 위치로 이동한 리프트된 대륙지각의 조각이라 생각된다. 한국대지 남쪽은 전형적인 비활성 대륙주변부의 특성을 나타내고 있으며, 안쪽 리프트(후포분지), 융기된 리프트 측면부(후포뱅크), 그리고 해양분지(울릉분지)로 구성되어 있다. 이 연구의 대상지역인 후포분지는 해안에서 바다쪽으로 완만한 경사를 이루고 있으며 동서방향으로는 15~20 km의 폭을 가지며 남북방향으로 길게 발달한 트러프(trough)이다. 변위가 큰 정단층인 후포단층이 후포분지의 동쪽 경계를 이룬다. 후포분지의 침강은 대부분 경계단층을 따라서만 발생하였으므로 후포분지의 지형은 동서가 비대칭의 형태를 이루고 있다(Yoon and Chough, 1995; 김한준 외, 2011). 후포분지는 동해의 해저면 확장 이전에 올리고세 말기부터 진행된 대륙지각의 리프팅에 의해 형성되었다(Kim *et al.*, 2007). 후포뱅크는 물에 잠긴 리지(ridge)로서 길이가 약 100 km이고 폭은 1~14 km로 변한다. 후포뱅크의 서쪽은 후포분지를 감싸는 융기된 리프트 측면부로 보이며 그 동쪽으로는 급경사를 이루며 낮아져 울릉분지에 도달한다.

연구자료

본 연구를 위하여 기상청 국가지진관측망 자료를 활용하였다. 기상청의 지진관측은 1905년 우리나라에서 계기지진 관측이 시작된 이래 수 차례의 발전 단계를 거쳐 현재의 지진관측망에 이르고 있다. 1963년 미국지질조사소(United States Geological Survey)의 세계지진관측망(WWSSN: World-Wide Standardized Seismograph Network) 사업, 1978년 규모 5.0의 홍성지진, 1996년 영월지진, 1997년 경주지진 등이 현재의 기상청 지진관측망을 구축하도록 동기를 부여한 사건 중 일부이다. 기상청에서 2011년 1월 현재 운영하고 있는 지진관측장비는 초광대역지진계 1대, 광대역지진계 11대, 시추공 광대역지진계 7대, 단주기지진계 31대, 단주기 해저지진계 1대, 가속도계 112대로서 전국에 총 113개 관측소로 구성된 상시지진감시망을 설치/운영하고 있다(기상청, 2011). 연구지역으로부터 가장 가까운 곳에 위치한 지진관측소는 영덕 가속도 지진관측소로서 2000년 3월부터 지진관측이 수행되고 있다.

기상청 국가지진센터에서는 국내에서 발생하는 지진을 감시

하고 필요 시 관계기관과 국민에게 지진 발생사실을 통보하는 기관으로서 국내에서 발생하는 규모 2.0 이상의 모든 지진을 발표하고 있다. 기상청 국가지진관측망의 조밀도를 고려할 때 규모 2.0 이하의 지진에 대해서도 상당한 신뢰성과 정확성을 가지고 지진의 발생위치를 결정 할 수 있을 것이라고 생각된다. 연구지역에서 발생하는 가능한 많은 지진자료 수집을 위하여 기상청 국가지진관측망 2007년 3월부터 2010년 10월까지의 지진자료에 STA/LTA (Short-Term Average/Long-Term Average) 알고리즘을 적용하여 지진의 P파를 검출하였다. STA/LTA 방법에 의하여 자동 검출된 이벤트 목록에는 자연지진 이외에도 연구지역 주변의 채석장 및 건설현장 등에서 발생하는 인공지진 신호, 관측소 배경잡음 수준에 따른 오작동에 의한 신호 등이 포함되어 있다. 우선 STA/LTA 방법에 의하여 추출된 이벤트에 대하여 자연지진 여부를 확인하여 연구지역 내에서 발생한 총 56개의 지진자료를 확보하였다(Fig. 2). 기상청에서 2007년부터 2010년까지 발표한 총 지진의 수가 190여개 이며 연평균 약 47회의 지진이 우리나라에서 발생한다는 점을 고려한다면(기상청, 2011), 약 20 km × 20 km의 작은 연구지역 내에서 3년 8개월의 비교적 짧은 기간 동안 발생하고 수집된 56개의 자연지진은 상당히 많은 수라고 생각된다. 이러한 측면에서 본다면 본 연구지역은 아마도 우리나라에 존재하는 여러 지진 다발지역 중 하나라고 할 수 있을 것이다.

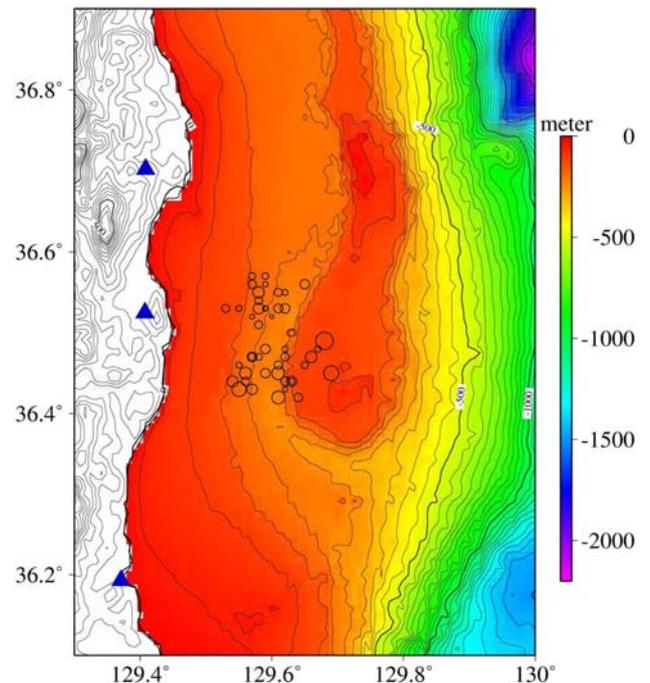


Fig. 2. Location of micro-earthquakes in the Yongduk offshore region. Locations shown in the figure were determined using phase arrival times estimated by STA/LTA algorithm. Depth to the sea floor is color coded and contoured at every 50 meters. Blue triangles indicate the location of KMA seismic stations.

연구방법

지진관측망에서 지진의 발생을 인지하고 가장 먼저 수행되는 과정이 지진의 발생위치와 시간, 규모를 포함한 진원인자를 추정하는 것이다. 지하매질에서의 지진파 전파속도를 1-D 혹은 3-D 모델로 구현 가능하다 가정하고, 진앙 부근 관측소에서 측정된 P파와 S파의 도착시간을 이용하여 지진의 발생위치를 결정한다. 지진 발생위치와 시간을 결정하기 위해서는 지진파 관측소 간의 방위각이 고르게 분포하는 최소 4개의 도착시간 관측이 필요하며, 지진파의 관측된 도착시간과 이론적 도착시간 사이의 차이를 최소화 시키도록 지진의 위치와 발생시간을 조정함으로써 그 값을 구하게 된다. 이론적 도착시간 계산을 위해서는 대상지역의 지진파 전파 속도 구조에 관한 사전 정보가 필요한데 1-D 속도모델을 사용하는 것이 일반적이며 일부 지역에서는 3-D 모델을 사용하기도 한다. 실제 지진의 위치를 구하는 과정에서는 우선 진원 위치와 시간의 초기치를 가정하고 이론적 지진파 도착시간을 계산하여 관측된 지진파 도착시간과의 차이를 구한다. 구해진 차를 이용하여 초기치를 수정하고, 수정된 초기치를 다시 진원 위치와 시간 추정을 위한 초기값에 사용하는 반복적 방법(iterative way)을 사용한다. 이런 반복은 미리 정해진 조건을 충족시킬 때 종결되며, 일반적으로 관측치와 이론치의 RMS (root-mean-square)를 최소화 시키는 값에 도달 할 때까지 반복된다(e.g. Lee and Stewart, 1981).

계산에 사용된 지진파 전파 속도 모델이 실제 지하구조와 유사하고, 관측된 도착시간에 오류가 없다면, RMS는 0에 가까워야 한다. 그러나, 일반적으로 사용되는 1-D 속도 모델은 실제 지하구조의 횡적 변화를 충분히 반영하지 못한다. Model error라고 총칭하는 실제속도구조와 계산에 사용된 모델의 차이는 지진위치를 잘못 결정하게 하는 가장 큰 원인이 되기도 한다(e.g. Gomberg, 1991). Model error를 최소화하기 위해서는, 즉 1-D 속도모델의 한계를 극복하기 위해서는, 실제 지구 구조를 보다 현실적으로 묘사하는 3차원 속도구조의 사용이 바람직하다. 여기서 한가지 주목할 점은 일반적인 지진위치 결정의 과정은 지진파 도착시간의 측정치와 이론치 사이의 RMS를 최소화 시키는 과정으로서, 작은 RMS가 실제로 지진 위치의 정확성을 의미하지는 않는다 (e.g. Pujol, 2004).

본 연구에서는 지진 발생위치의 상대적 정확성을 향상시키기 위하여 Joint Hypocenter Determination (JHD) 방법을 사용하였다. 이 방법에서는 지진요소(진원 위치와 시간)와 관측소 보정(station correction)을 동시에 결정한다. 이 방법은 Douglas (1967)에 의하여 그 효과가 제안되었으며, Pavlis와 Booker (1983) 그리고 Pujol(1988)에 의하여 발전된 형태의 기술이 소개되었다. 지진의 발생위치를 결정하기 위하여 진원에서 관측소까지 지진파의 주파시간을 계산할 때 여러 가지 요인으로 인하여 에러가 발생할 수 있다. 이중 속도모델에 의하

여 발생하는 에러는 (1) 진원부근의 속도모델과 실제 속도구조 차이, (2) 관측소 부근의 속도모델과 실제 속도구조 차이, 그리고 (3) 그 밖의 파의 전파경로 상의 속도모델과 실제 속도구조 사이의 차이에 의하여 발생한다. 상대적 지진발생위치를 결정할 때 비교적 가까운 위치에서 발생한 여러 개 지진의 지진발생위치를 동시에 결정함으로써 진원부근의 속도모델과 실제 속도구조 차이에 의한 영향을 최소화 할 수 있다. 관측소 하부의 속도모델과 파의 전파경로 상의 불확실성 및 그 밖의 파의 전파경로 상의 속도모델과 실제 속도구조 차이를 합하여 관측소보정(station corrections)으로 표현할 수 있고, 이를 통하여 보다 정확한 상대적 지진발생위치를 결정할 수 있다. 여러 개의 지진 발생위치를 동시에 결정 할 때, 관측소 보정 상수를 추가하면,

$$t_{ij} = \tau^0 + T_{ij} + s_i, \quad i = 1, \dots, N \text{ (stations)} \\ j = 1, \dots, M \text{ (events)}$$

여기서 τ^0 는 지진(j)의 진원시간, T_{ij} 는 지진(j)으로부터 관측소(i)까지 지진파가 전달되는데 필요한 시간, t_{ij} 는 초기지진위치와 지하 속도구조의 가정 하에 계산된 관측소(i)에 지진파(j)가 도착하는 시간, s_i 는 관측소보정(station correction)을 표시한다. 관측된 주행시간과 이론적 주행시간의 차(r_{ij})는

$$r_{ij} = (t_{ij})_{obs} - (t_{ij})_{cal} \\ = (t_{ij})_{obs} - (\tau^0 + T_{ij} + s_i) \\ \cong d\tau_j + \frac{\partial T}{\partial x} dx_j + \frac{\partial T}{\partial y} dy_j + \frac{\partial T}{\partial z} dz_j + ds_i$$

이 식을 행렬식으로 표시하고, 양변에 가중치 항(W_j)을 추가하고, 지진원 부근에서 편미분을 A_j 로 표시하면 다음과 같이 된다.

$$W_j \vec{r}_j = W_j A_j d\vec{X}_j + W_j d\vec{s}_j; j = 1, \dots, M$$

결과 및 고찰

본 연구에서 사용하는 지진자료는 2007년 3월부터 2010년 10월 사이에 발생한 지진으로서, 자료의 규모-시간 관계 및 빈도수-시간 관계를 표시하면 Fig. 3과 같다. 사용된 지진 중 가장 큰 지진은 2008년 12월 19일 발생한 규모 3.5 지진이며, 가장 작은 지진의 규모는 -0.1이다. 연구지역 내에서 지진은 비연속적으로 시간적 균을 이루며 발생하고 있으며, 비교적 큰 지진의 발생을 전후로 다수의 지진이 발생하였다. 전반적으로 이 지역에서는 많은 수의 미소지진이 꾸준히 발생하고 있다.

지진목록의 M_c (Magnitude of Completeness)는 지진관측망이 탐지할 수 있는 최소 규모로 정의되며, 일반적으로 관측망의 지진 감시 역량을 정량적으로 측정하기 위하여 사용될 수 있다(e.g. Gomberg, 1991; Rydelek and Sacks, 1989). 본 연구

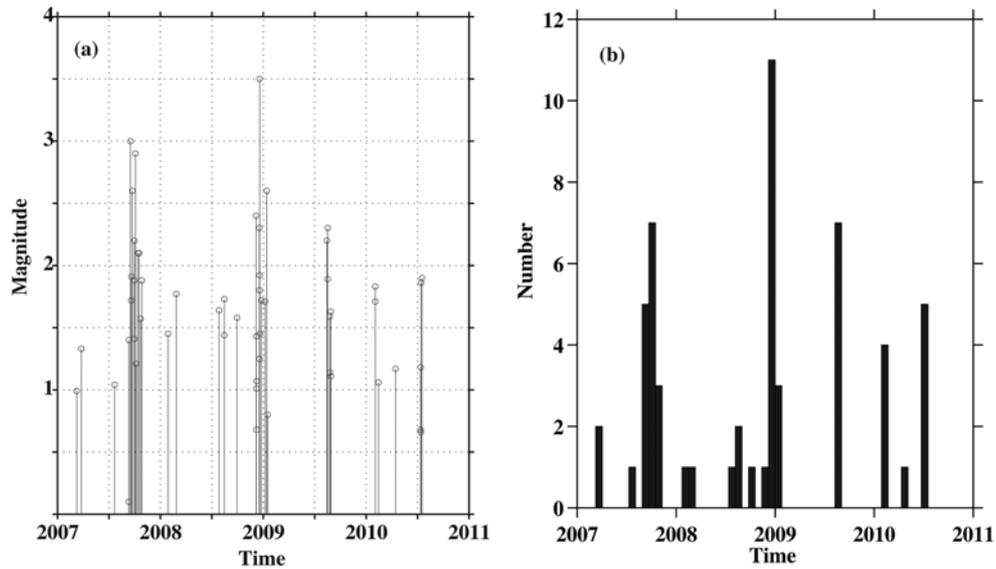


Fig. 3. (a) Magnitude-time distribution of micro-earthquakes in the study area between 2007 and 2010. (b) Temporal distribution of earthquakes.

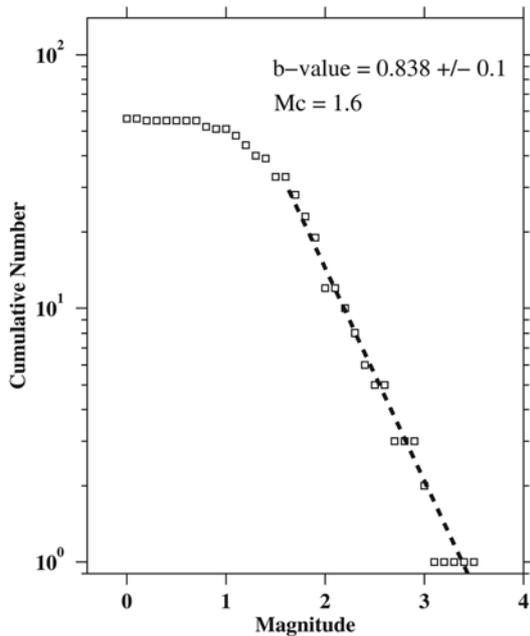


Fig. 4. Frequency-magnitude distribution of micro-earthquakes in the study area. Maximum-likelihood method was used to estimate the a- and b-value of the Gutenberg-Richter relation.

에서는 Gutenberg-Richter의 규모-빈도수 관계식을 이용하여 $M_C = 1.6$, $b\text{-value} = 0.84$ 로 결정하였다(Fig. 4). 기상청 지진연보에 수록되는 지진의 최소 규모가 2.0 임을 고려하면 연구지역 지진목록의 완성도가 상당히 향상되었다고 사료된다.

어떤 지역 내에서 지진 발생위치 결정의 정확성 향상을 위한 연구를 비롯한 대부분의 지진학 연구에서는 신뢰할 수 있는 지하 지진파 속도구조 모델이 반드시 필요하다. 한반도의 지각구조에 관한 연구는 중력과 지진자료를 이용하여 수행되

Table 1. 1-D velocity model used for earthquake location (Kim and Chung, 1985)

| Depth (km) | Vp (km/sec) | Vs (km/sec) |
|------------|-------------|-------------|
| 0 | 5.5 | 3.3 |
| 2 | 6.0 | 3.5 |
| 15 | 6.6 | 3.7 |
| 29 | 7.7 | 4.3 |

어 왔다. 본 연구에서는 지진 발생위치 초기결정과 JHD 방법을 사용한 정밀 재결정을 위하여 김성균과 정부홍(1985)의 지진파 속도모델을 사용하였다(Table 1). 김성균과 정부홍은 경상분지를 포함한 한반도 남부지역 지구 표층부의 지진파 속도구조를 1차원 속도모델에 보다 정확히 반영하기 위하여 지진원의 위치가 확실한 자연지진과 인공지진의 주시곡선을 사용하였다. 본 연구지역이 한반도 남동부의 외부에 위치하여 김성균과 정부홍의 연구지역과 근접하며, 기존의 다른 선행연구의 대상 지역보다 지리적으로 가까이 위치한다. 그러나, 논문의 서두에서 언급한 바와 같이 우리나라의 지질학적 특성을 고려할 때 하나의 1차원 속도 구조로 연구지역의 지하구조를 표현하기에는 많은 한계가 있을 수 있다. 특히 우리나라 동해는 대륙지각과 해양지각이 붙어있는 형태이므로, 대륙지각에서 해양지각으로 변화하면서 나타나는 지하 속도구조의 변화가 있을 수 있음을 고려하여야 한다.

연속자료에 STA/LTA (Short-Term Average/Long-Term Average) 알고리즘을 적용하여 지진의 P파를 검출한 후 자연 지진으로 판단되는 56개 지진자료에 대한 P파와 S파의 도착시간 측정작업을 수행하여 786개의 P파 도착시간과 531개의 S파 도착시간을 측정하였다. JHD 방법을 이용한 지진발생위치 재결정에 앞서 수작업으로 측정된 도착시간과 일반적으로

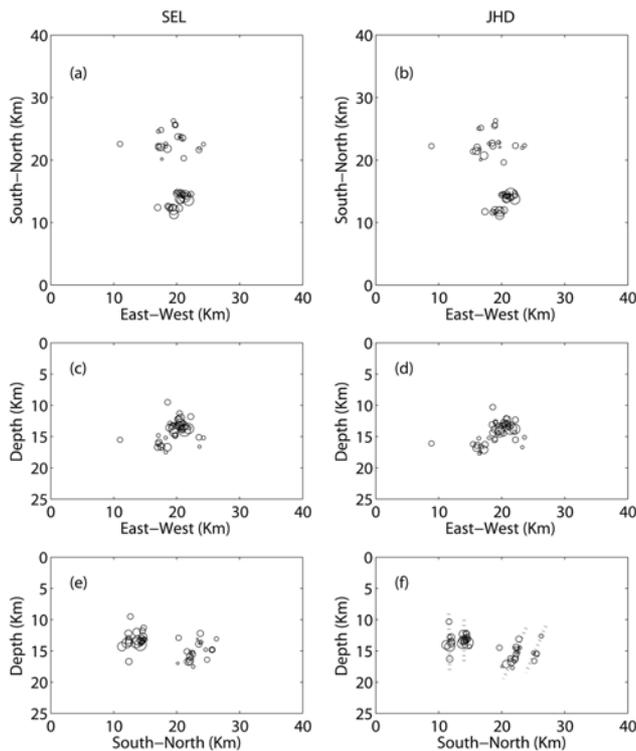


Fig. 5. Hypocenters of micro-earthquakes selected for JHD analysis in the Youngduk offshore region. SEL: Single Event Location, JHD: Joint Hypocenter Determination. (a) and (b) are mapviews of earthquake hypocenters before and after the relocation, respectively. (c) and (d) are cross-sectional view of seismicity in east-west direction before and after the relocation, respectively. (e) and (f) are cross-sectional view of seismicity in south-north direction before and after the relocation, respectively. Potential geometry of active faults are outlined by dotted lines in (f).

사용되는 단일 지진발생위치 결정(Single Event Location, SEL) 프로그램(Hypoellipse, Lahr, 1999)을 사용하여 지진 발생위치를 초기 결정하였다(Fig. 5a, c, e). Fig. 5a의 진앙분포를 살펴보면 STA/LTA 알고리즘에 의하여 자동 측정된 도착시간을 이용하여 결정된 진앙분포(Fig. 2)에 비하여 좁은 지역에 진앙이 분포하고, 남과 북에 두 개의 지진군이 형성되어 있음을 확인 할 수 있다. 진앙 깊이는 9.5 km ~ 17.5 km 사이에 위치한다.

초기 결정된 56개의 지진의 발생위치를 보다 정확히 결정하기 위하여 JHD 방법을 적용한 후 그 결과를 Fig. 5b, d, f에 SEL 결과와 함께 표시하였다. JHD 방법으로 지진의 발생위치를 재결정하는 과정에서는 12개의 지진은 부정확한 도착시간 측정, 속도모델의 부정확성 등으로 인하여 최종 결과목록에서 제외되었다. 결과적으로 44개의 지진 발생위치가 마지막으로 결정 되었다. 정밀 재결정된 지진의 발생위치는 평균적으로 서쪽으로 0.47 km, 남쪽으로 0.29 km, 그리고 0.30 km 깊게 이동하였다. SEL 진앙분포에 비하여 좁은 지역에 진앙이 분포하여, 진원 깊이는 10.3 km ~ 17.7 km 사이에 분포한다. Fig. 5c

와 Fig. 5e의 SEL 결과와 JHD 결과 모두에서 연구지역의 남쪽에서 발생하는 지진은 두 개의 수직으로 분포하는 지진군을 이루며 발생하고 있음이 공통적으로 확인되었다. JHD 방법을 이용한 지진발생위치 정확성 향상 결과는 연구지역의 북쪽에서 발생하는 지진의 진원 분포에서 확인 할 수 있다. Fig. 5f의 북쪽에서는 2개의 지진군이 거의 수직 혹은 남쪽으로 약간 경사진 단층상에서 발생하고 있는 것으로 나타나며, 이러한 현상은 SEL 결과에서는 명확하지 않다. 결과적으로 연구 지역에서 발생하는 지진은 비교적 좁은 지역 안에서 발생하고 있지만 가까이 위치한 서로 다른 4개의 단층에서 발생하고 있다.

감사의 글

두 분의 심사위원께서 주신 의견은 논문의 완성도를 높이는 데 많은 도움이 되었습니다. 감사합니다. 본 연구는 기상지진 기술개발사업(CATER2006-5101, CATER2011-5310)의 지원으로 수행되었습니다.

참고문헌

- Chiu, J.-M. and Kim, S. G., 2004, Estimation of Regional Seismic Hazard in the Korean Peninsula Using Historical Earthquake Data between A.D. 2 and 1995: Bulletin, *Seismological Society of America*, **94**, 269-284.
- CRED, 2011, The International Disaster Database, Volume 2011, <http://www.emdat.be/database> last assessed at 2011-10-01.
- Douglas, A., 1967, Joint epicentre determination, *Nature*, **215**, 47-48.
- ERI, 2011, http://outreach.eri.u-tokyo.ac.jp/eqvolc/201103_tohoku/eng/ last assessed at 2011-09-19.
- Geller, R. J., 1997, Earthquake prediction: a critical review, *Geophysical Journal International*, **131**, 425-450.
- Gomberg, J., 1991, Seismicity and detection/location threshold in the Southern Great Basin seismic network, *Journal of Geophysical Research*, **96**, 16401-16414.
- Johnston, A. C. and Schweig, E. S., 1996, The Enigma of the New Madrid Earthquakes of 1811-1812, *Annual Review of Earth and Planetary Science*, **24**, 339-384.
- Kim, H.-J., Lee, K.-H., Jou, H.-T., Cho, H.-M., Yoo, H.-S., G-T., P., and Kim, J.-J., 2007, Evolution of the eastern margin of Korea: Constraints on the opening of the East Sea (Japan Sea), *Tectonophysics*, **436**, 37-55.
- Kim, K.-H. and Park, Y., 2010, The 20 January 2007 M_L 4.8 Odaesan Earthquake and Its Implications for Regional Tectonics in Korea, *Bulletin of the Seismological Society of America*, **100**, 1395-1405.
- Kim, W.-Y., Choi, H., and Noh, M., 2010, The 20 January 2007 Odaesan, Korea, earthquake sequence; reactivation of a buried strike-slip fault?, *Bulletin - Seismological Society of America*, **100**, 1120-1137.

- Lahr, J. C., 1999, HYPOELLIPSE: A Computer Program for Determining Local Earthquake Hypocentral Parameters, Magnitude, and First-Motion Pattern (Y2K Compliant Version): Denver, U.S. Geological Survey.
- Lee, K. and Yang, W.-S., 2006, Historical Seismicity of Korea: Bulletin, *Seismological Society of America*, **96**, 846-855, doi:10.1785/0120050050.
- Lee, W. H. K. and Stewart, S. W., 1981, Principles and Applications of Microearthquake Networks: New York, New York, USA, Academic Press, 293 p.
- Park, S.-C. and Hahm, I.-K., 2011, Rupture pattern of a moderate earthquake in Odaesan, Korea, *Geosciences Journal*, **14**, 191-200.
- Pavlis, G. L. and Booker, J. R., 1983, Progressive multiple event location (PMEL), *Bulletin of the Seismological Society of America*, **73**, 1753-1777.
- Pujol, J., 1988, Comments on the Joint Determination of Hypocenters and Station Corrections, *Bulletin of the Seismological Society of America*, **78**, 1179-1189.
- Pujol, J., 2004, Earthquake Location Tutorial: Graphical Approach and Approximate Epicentral Location Techniques, *Seismological Research Letter*, **75**, 63-74.
- Rydelek, P. and Sacks, I. S., 1989, Testing the completeness of earthquake catalogues and the hypothesis of self-similarity, *Nature*, **337**, 251-253.
- SSB, 1980, Tangshan Earthquake Catalog: Beijing, State Seismological Bureau, p. 622.
- USGS, 2011, Significant Earthquakes: Earthquakes with 50,000 or More Deaths, USGS.
- Yoon, S. H. and Chough, S. K., 1995, Regional strike slip in the eastern continental margin of Korea and its tectonic implications for the evolution of the Ulleung Basin, East Sea (Sea of Japan), *Bulletin of Geological Society of America*, **107**, 83-97.
- 강수영, 김광희, 석봉출, 유해수, 2008, 경주지역 발생 지진에 대한 지진손실예측 시뮬레이션, 한국방재학회논문집, **8**, 95-103.
- 경제복, 허서운, 도지영, 조덕래, 2007, 2007년 1월 20일 오대산 지진($M_L=4.8$)의 진도, 단층면해 및 단층과의 관계, 한국지구과학회지, 28권, 202-213.
- 경제복, 정미경, 백진주, 임연주, 이기화, 2010, 한반도 역사지진 목록 작성 및 DB 구축 (II), 기상청, p. 475.
- 기상청, 2007, 2007년 1월 20일 강원지역 지진관련 정보, 기상청 보도자료.
- 기상청, 2011, 2010 지진연보, 서울, 기상청, p. 114.
- 김성균, 정부홍, 1985, 한반도 남부지역의 지각구조, 광산지질, **13**, 1-19.
- 김한준, 주형태, 유해수, 김광희, 유이선, 2011, 신기 지구구조운동의 해석을 위한 한반도 근해 천부지질의 고해상 탄성과 탐사: 울진 주변해역, 지구물리와 물리탐사, **14**, 127-132.