

최근 경주지역 미소지진 진원 위치

한민희¹ · 김광희^{1*} · 손 문¹ · 강수영¹ · 박정호²

¹부산대학교 지질환경과학과

²한국지질자원연구원 지진연구센터

Location of Recent Micro-earthquakes in the Gyeongju Area

Minhui Han¹, Kwang-Hee Kim^{1*}, Moon Son¹, Su Young Kang¹, and Jung-Ho Park²

¹Department of Geological Sciences, Pusan National University

²Earthquake Research Center, Korea Institute of Geosciences and Mineral Resources

요 약: 우리나라 남동부에 위치한 경주와 그 주변지역에서는 과거부터 최근까지 크고 작은 지진이 반복적으로 발생하고 있다. 계기지진자료를 검토하여 경주 주변 약 20 km × 30 km 지역 내에서 지진이 많이 발생하고 있음을 확인하였다. 본 연구에서는 이 지역에서 2010년 1월부터 2014년 12월 사이에 발생했지만, 그 규모가 너무 작아 미처 보고되지 않은 300 개 이상의 미소지진을 식별하고 그 발생위치를 결정하였다. 연구지역 지하의 속도구조와 진원요소 결정에 사용하는 속도 모델의 차이로 인한 오차를 줄이기 위하여 JHD 방법을 사용하였다. 연구지역에서는 활성으로 의심되는 제4기 단층들이 여러 장소에서 보고되고 있으므로, 이 단층들과 미소지진발생과의 관련 가능성을 조사하였다. 본 연구에서 새로이 발생 사실이 보고되는 미소 지진들은 연일구조선의 남측분절, 석읍단층 그리고 와읍분지 경계단층과 관련이 있는 것으로 나타난다.

주요어: 경주, 미소지진, 진원요소, 연일구조선, 석읍단층, 와읍분지

Abstract: Small to large earthquakes have been reported in Gyeongju and its vicinity in southeast Korea during historical period as well as instrumental observation period. We identified and located more than 300 earthquakes that occurred between January 2010 and December 2014 in a 20 km × 30 km area, but were unreported because of their small magnitudes. We used the Joint Hypocenter Determination (JHD) method to minimize the influence of the differences between the actual earth structure and 1-D velocity model for earthquake locations. The potential relationship between the previously reported Quaternary faults and the earthquake hypocenters was investigated. Many micro-earthquakes were found to be located in the southern segment of the Yeonil Tectonic Line, the Seokup fault, and the Waup basin boundary faults.

Keywords: Gyeongju, micro-earthquakes, earthquake hypocenters, Yeonil Tectonic Line, Seokup fault, Waup basin

서 론

지진의 발생은 지하에 지진을 일으키는 구조, 즉 활성단층 (지진 유발 단층)의 존재를 지시하며, 한반도 지진발생현황 규명으로부터 우리나라 지진위험성, 지진 방재대책 수립, 지하속

도구조, 진원메커니즘 등의 각종 지진관련 연구가 시작된다. 따라서 정확한 지진발생위치 파악은 지진재해 대응 정책수립 과 지진 관련 연구를 위하여 가장 우선적으로 선결되어야 할 과제이다. 기상청에서 발표하는 1978년부터 최근까지의 진앙 분포를 살펴보면 한반도 내륙에서 발생하는 지진은 광범위하고 산만하게 분포하지만, 공간적으로 집중되어 지진군 (Earthquake cluster)을 형성하면서 발생하기도 한다. 이러한 공간적 지진군 형성은 대부분의 지진이 기존의 단층에서 발생하는 이해와 다르지 않다. 특히, 규모 3.5 이상 지진의 발생 위치는 미소 지진이 자주 발생하는 지역과 일치하는 경향을 관찰할 수 있다(Fig. 1, a). 이러한 점을 감안할 때 과거와 현재의 중소규모 지진의 발생위치 분석과 미소지진 특성 연구를 통한 단층 규명은 지진의 발생 메커니즘을 이해하고 향후 한반도에서 발생 가능한 지진의 규모와 위치를 규명하는데 아주

Received: 21 March 2016; Revised: 8 April 2016;

Accepted: 11 April 2016

*Corresponding author

E-mail: kwanghee@pusan.ac.kr

Address: 63 Beon-gil 2, Busandaehak-ro, Geumjeong-gu, Busan 46241, Korea

©2016, Korean Society of Earth and Exploration Geophysicists

This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

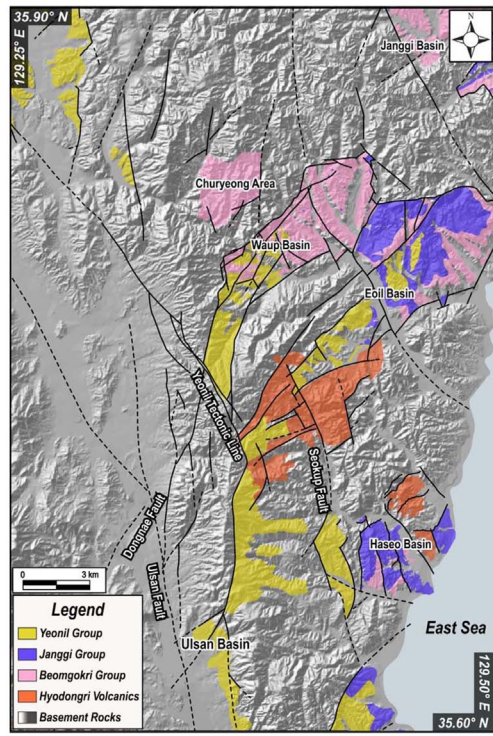
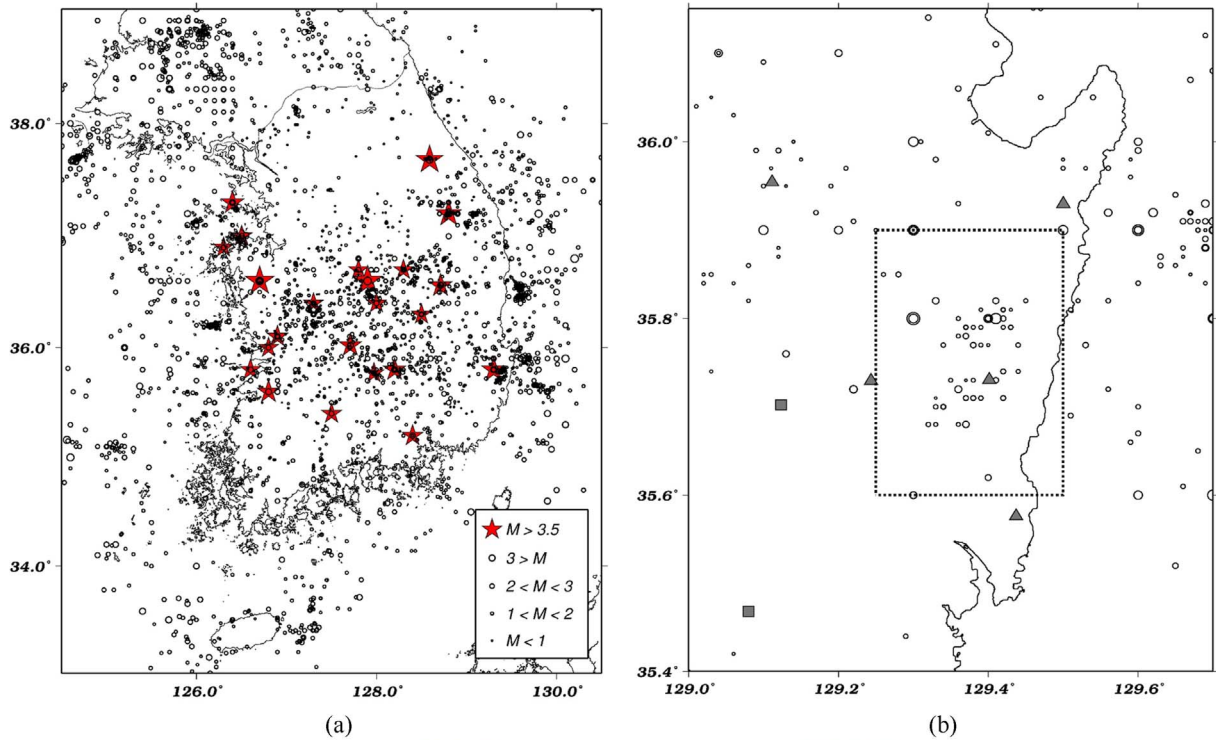


Fig. 1. (a) Seismicity in the southern Korea peninsula between 1978 and 2014 reported by the Korea Meteorological Administration (KMA). Earthquakes occurring on land with magnitudes greater than 3.5 are shown by red stars. (b) Seismicity in the Gyeongju area. Circle sizes indicate different magnitudes of seismicity. Seismic stations operated by KMA and the Korea Institute of Geosciences and Mineral Resources (KIGAM) are shown by squares and triangles, respectively. (c) Structural map showing the distribution of sedimentary basins, major faults and stratigraphic units of the study area, which is enclosed by dotted lines in (b).

중요한 단서를 제공할 수 있다.

역사기록에 의하면 한반도는 지진으로 인한 피해를 반복적

으로 경험하였으며, 경주지역에서는 한반도에서 발생한 지진 중 가장 큰 재해를 야기한 역사 지진이 서기 779년에 발생했

었던 것으로 추정된다(e.g. Chiu and Kim; 2004, Lee and Yang, 2006). 계기지진 기록에도 경주지역에서는 중소규모 지진이 자주 발생하는 것으로 보고되고 있으며, 특히 1997년 6월 26일 발생한 규모 4.2 지진은 우리나라의 지진방재체제에 대한 전면적인 보강의 필요성을 제기하였고(Kim *et al.*, 2006), 결과적으로 우리나라 지진관측망 현대화의 계기를 제공하였다. 기상청에서 발표한 1978년 이후 경주지역에서 발생한 진원 위치를 살펴보면, 한반도 남부의 다른 지역에 비해 많은 수의 지진이 발생했음을 확인할 수 있다. 특히, Fig. 1, b의 점선으로 표시된 약 20 km × 30 km 지역 내에서 많은 수의 지진이 발생했음을 보여주고 있으므로, 본 연구에서는 이 지역을 경주 미소지진 다발지역이라 명칭 하겠다. 경주 미소지진 다발지역은 남쪽으로는 우리나라 제1의 산업도시 울산, 북쪽으로는 동해안 최대 항구 도시 포항과 접해있다. 또한 경주에는 5기의 원전과 중저준위 방사성폐기물 처분시설이 위치해 있어서 각계의 비상한 관심의 대상이 되는 지역이다. 최근 들어 이 지역에서는 울산단층 동편지역에서 활성으로 의심되는 단층들이 많이 보고되고 있으며, 그 중 일부는 기하, 운동양상, 지리적 위치 등에서 서로 상관관계를 보이고 있다(e.g. Kyung and Atsumasa, 1995; Choi, 2003; Lee, 2003). 본 연구에서는 기상청과 한국지질자원연구원에서 경주 미소지진 다발지역 및 그 주변에 운영하고 있는 지진관측소의 연속 지진기록 자료로부터 규모 2.0 이하의 미소지진 자료를 추가 확보하여 기존에 발표된 지진자료와 함께 분석하였고, 진원 정보는 연구지역 단층 분포와 어떻게 연관 될 수 있는 지를 살펴보았다.

연구지역의 지질 및 지진발생 현황

우리나라에는 선캄브리아기의 시생대에서부터 신생대에 이르기까지의 암석이 다양하게 분포되어 있고, 지질분포에 따라 여러 개의 지질구로 구분되는데 추가령지구대를 경계로 남과 북에서 현저한 차이를 보인다. 추가령지구대 남쪽은 경기육괴, 옥천습곡대, 영남육괴, 경상분지, 연일분지로 이루어져 있고, 본 연구의 대상지역은 경상분지와 연일분지에 걸쳐 있다. 연구지역에서 가장 눈에 띄는 구조는 북북동-남남서 방향의 양산단층계 동래단층과 북북서-남남동 방향의 계곡을 따라 발달되어 있는 울산단층이다(Fig. 1, c). 1990년대 초 양산단층 중앙부에 대한 항공사진 관측과 현지 지형, 지질 조사를 통하여 양산단층계가 제4기에도 지속적으로 활동하고 있다고 보고되면서, 이 지역 제4기 단층운동과 관련된 신기 지체구조 운동에 대한 관심이 고조되기 시작했다(Jo *et al.*, 1994). 영남지역 LANDSAT-1 영상에는 뚜렷한 선상구조로 나타나지만, 지질도상에는 표시되어 있지 않은 지구구조 선구조(tectonic lineament)가 존재함이 보고되고(Kim *et al.*, 1976), 후에 이를 울산단층이라고 칭하고 있다. 울산단층은 경주에서 울산에 이르는 북북서-남남동 방향의 계곡을 따라 위치하고 있는 듯 하지만, 실제

로 이 계곡을 따라서 “울산단층”이라고 인정할 만한 노두 혹은 기타 다른 증거들이 관찰되지 않으며, 단지 지구물리탐사에 의해서만 이 단층이 인지되고 있을 뿐이다(e.g. Lee and Um, 1992; Baag and Kang, 1994; Choi, 2003). 오히려 울산단층으로부터 약 6 km 동편에 위치한 곳에서 수십 m의 연속적인 단층 파쇄대의 존재가 추적·확인되었으며, 이 구조선이 한반도 남동부에서 발생한 마이오세 지각변형을 최종적으로 규제한 서쪽 한계선으로 인식되어 연일구조선(Yeonil Tectonic Line)이라 명명되었다(e.g. Kim *et al.*, 1997; Son *et al.*, 2002; Son *et al.*, 2015).

국가지진종합정보시스템에서 제공하는 역사지진 자료에 의하면, 경주지역에서 지진관련 기록이 100 회 이상 보고되었으며, 이 중 규모 6 이상의 지진도 10 회 이상 발생한 것으로 파악되고 있다. 이 중에는 우리나라 역사상 가장 큰 인명피해를 유발시켰던 서기 779년 규모 6.7의 경주지진이 포함되어 있다(Kyung *et al.*, 2010; NECIS, 2015). 1978년 이후 경주지역에서 발생한 지진 중 가장 큰 규모의 지진은 1997년 발생한 규모 4.2 지진이며, 1999년 규모 3.0 이상 지진 3회 발생, 2014년 규모 3.5 지진이 발생하는 등 최근에도 많은 수의 소규모 지진이 발생하고 있지만, 지진의 공간적 집중현상을 파악하기는 어렵다(Fig. 1, b).

연구자료

기상청과 한국지질자원연구원에서는 전국적인 지진관측망을 운영하고 있는데, 특히 경상분지 양산단층 주변에 많은 수의 지진관측소를 운영하고 있다. 본 연구에서는 중소규모 지진 발생 다발지역에서의 미소지진 발생현황을 자세히 조사하기 위해 기상청 지진관측망과 한국지질자원연구원 지진관측망 중 경주지역에 위치한 13개 관측소에 2010년부터 2014년까지 기록된 연속지진자료를 수집하였다. 연구지역에서는 규모 2.0 이상의 소규모 지진과 함께 규모 2.0 이하의 미소지진도 자주 발생하고 있지만, 그 규모가 너무 작아서 지진목록에 수록되지 않거나 관측 한도 이하의 지진이어서 감지되지 못하는 경우도 많다. 본 연구에서는 지진은 같은 장소에서 반복적으로 발생하는 성향이 있고, 이 지진들을 같은 관측소에서 기록하면 그 파형이 유사하다는 특성을 이용하여 기상청 지진관측목록에 수록되지 않은 미소지진 검출을 시도하였다(e.g. Gibbons and Ringdal, 2006; Kim and Park, 2010; Kim *et al.*, 2010; Kim *et al.*, 2011). 우선 기상청 지진목록에 수록되어 있는 지진들을 유사한 파형을 찾기 위한 템플릿 파형으로 사용하였다. P파와 S파의 도착시간을 포함한 템플릿 파형을 연속지진파형에 적용하여 파형의 유사성이 0.3 이상 되는 시간을 감지한 후, 2 개 이상의 관측소에서 감지된 시간을 추출하였고, 추출된 각 자료가 지진자료인지를 확인하였다(Fig. 2). 초동 P파와 S파의 도착시간은 추출된 파형자료로부터 직접 측정하였다. Fig. 3은

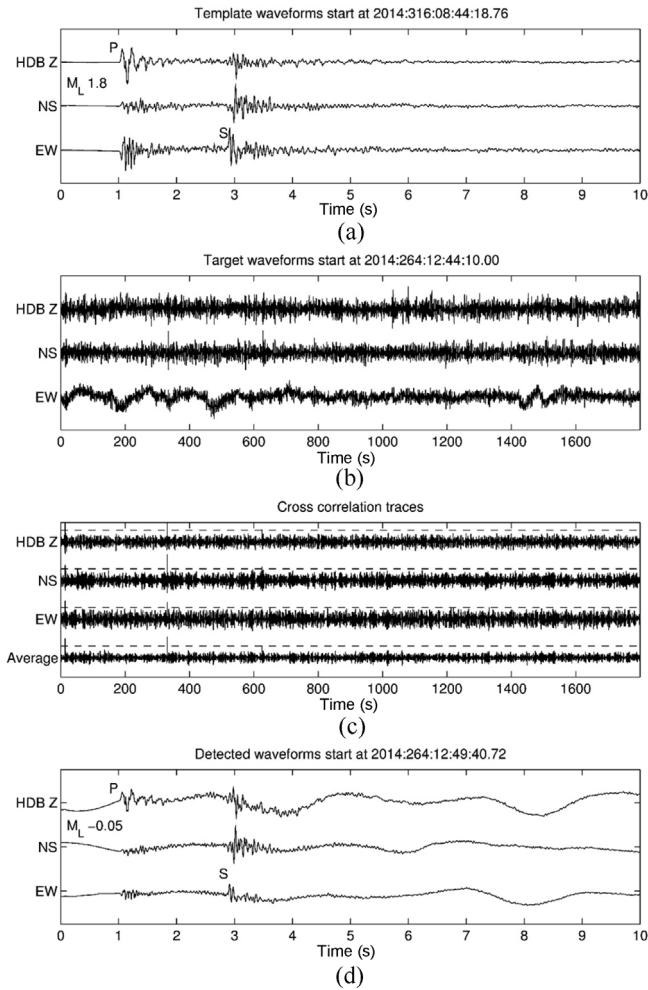


Fig. 2. Detection of micro-earthquakes from the continuously recorded data. See text for details.

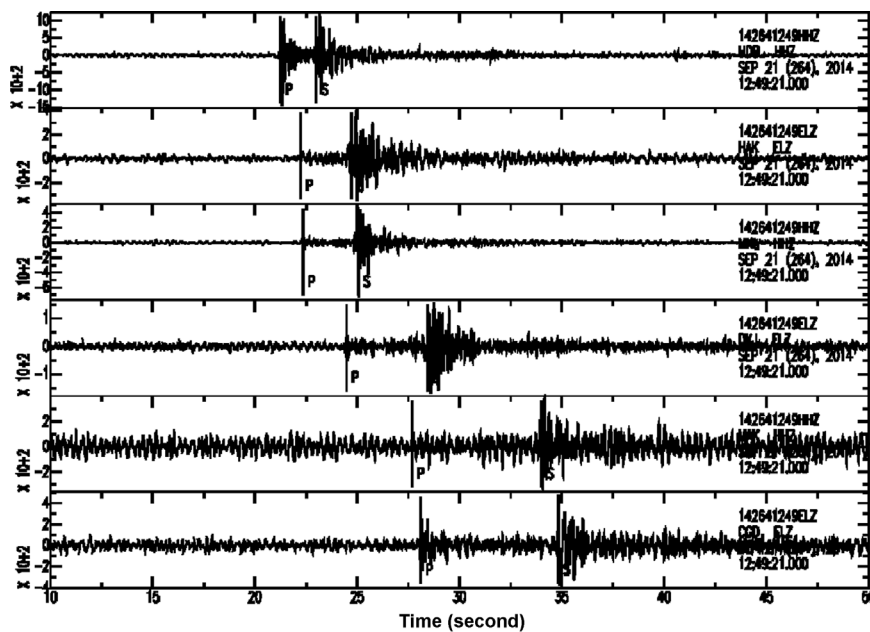


Fig. 3. Vertical component waveforms of detected event in Fig. 2. P- and S-wave arrivals are read from horizontal components and shown in this figure.

이러한 방법으로 확인한 미소지진 중에 2014년 9월 21일 발생한 규모 -0.05 의 경주지역 6개 관측소에 기록된 수직성분 지진파형과 P파와 S파 도착시간 측정 결과이다.

초기분석을 통하여 2010년 1월부터 2014년 12월 사이에 지진이라고 의심되는 신호 729 개를 확인하였다. 이 중 경주 미소지진 다발지역에서 발생하였고, P파 도착시간을 4 개소 이상의 지진관측소에서 높은 신뢰성을 가지고 측정할 수 있는 지진은 310 개이다(Fig. 4, b). 여기에는 기상청에서 발생 사실을 발표한 규모 0.9 ~ 3.5 지진 21 개도 포함되어 있다(Fig. 4, a).

기상청과 한국지질자원연구원에서는 각 기관에서 운영하는 관측망 자료를 이용하여 한반도 및 주변해역에서 발생하는 지

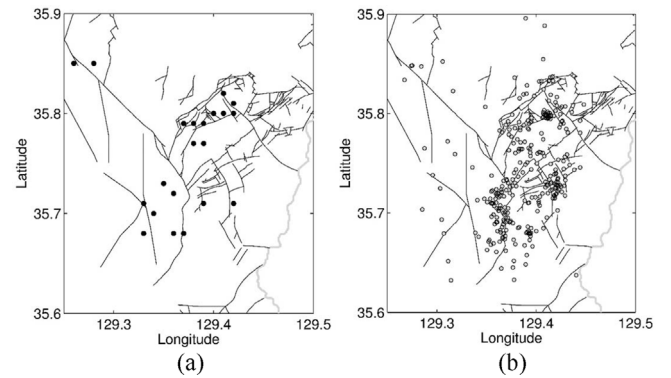


Fig. 4. (a) Locations of 21 earthquakes occurred in the study area and reported by Korea Meteorological Administration. Major faults observed at the surface are shown in the background. (b) Locations of 310 micro-earthquakes including those shown in (a). Earthquake locations are determined using Hypoellipse and 1-D velocity model proposed by Kim (1999).

진을 감시하고 있으며, 규모 2.0 이상의 지진이 발생하면 대국민 지진발생통보 서비스를 제공하고 있다. 본 연구에서 활용한 지진자료는 대부분이 기상청에서 발생사실을 공표하는 지진보다 작은 규모의 지진이며, 경우에 따라 이를 구분할 필요가 있으므로 본 연구에서는 규모 2.0 이하의 작은 지진을 미소지진 (micro-earthquake)이라 부르고, 채석장 발파와 같은 인공지진은 제외하였다.

결 과

본 연구에서는 경주 미소지진 다발지역에서 발생한 310 개 지진을 Hypoellipse (Lahr, 1999)에 적용하여 지진발생위치를 결정하였다(Fig. 4, b). 연구지역에서 발생하는 지진의 초기 진원 깊이 분포에 의하면, 지진은 지표 가까운 곳으로부터 깊이 약 20 km까지 발생하며, 깊이 약 14 km 부근에서 가장 많이 발생한다. 초기 지진발생위치들은 연구지역 전체에 걸쳐 산만하게 분포하고 있다.

본 연구에서는 연구지역에 위치한 한국지질자원연구원 지진 관측자료 분석을 통하여 제시된 8개 층으로 구성된 1차원 속도모델을 사용하였다(Fig. 5, Kim, 1999). 그러나 1차원 속도모델로는 연구지역 지하의 횡적 속도구조 변화를 제대로 반영할 수는 없다. 실제 지하 속도구조와 지진파 전달시간 계산에 사용하는 1차원 속도모델의 차이는 진원위치 결정에 오류를

야기할 수 있고, 특히 깊이 결정에 있어서는 아주 중요한 역할을 할 수도 있다. 속도모델과 실제 지하구조 사이의 차이로 인한 오차를 최소화하기 위하여 본 연구에서는 관측소 보정을 사용하여 지진의 상대적 발생위치를 결정하는 JHD (Joint Hypocenter Determination) 방법을 사용하였다(Pujol, 1995, Kim *et al.*, 2005; Kim *et al.*, 2011). 재결정의 대상이 되는 지진은 총 310 개이며, 지진발생위치 재결정의 과정에서 83 개의 지진은 관측자료와 속도모델의 부정확성, 충분치 못한 자료 등으로 인하여 최종 결과에서 제외되었다. 결과적으로 227 개 지진에 대한 진원요소가 재결정 되었으며, 이 지진들의 Hypoellipse를 사용한 초기 진원 요소를 Fig. 6에, JHD 방법을 사용한 결과를 Fig. 7에 표시하였다. JHD 방법으로 재결정된 진원요소는 초기 지진발생위치로부터 평균적으로 동쪽으로 0.9 km, 남쪽으로 0.1 km, 그리고 0.8 km 깊게 이동하였으며, 최초 진원보다 공간적으로 더욱 좁은 지역에서 발생한 것으로 나타난다.

연구대상 기간인 2010년부터 2014년 까지 이 지역에서 발생하고 기상청에서 그 발생사실을 공표한 21개 지진의 진원요소와 비교해 보면, 진앙위치는 평균 약 2.0 km 진원시간은 약 0.45 초 차이가 있다(Fig. 8). 재결정된 21개 지진위치는 전반

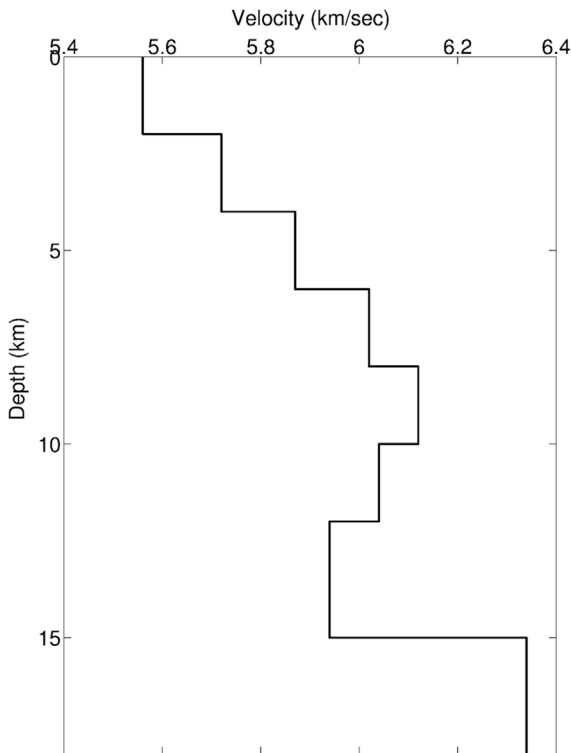


Fig. 5. P-wave velocity model of the study area proposed by Kim (1999).

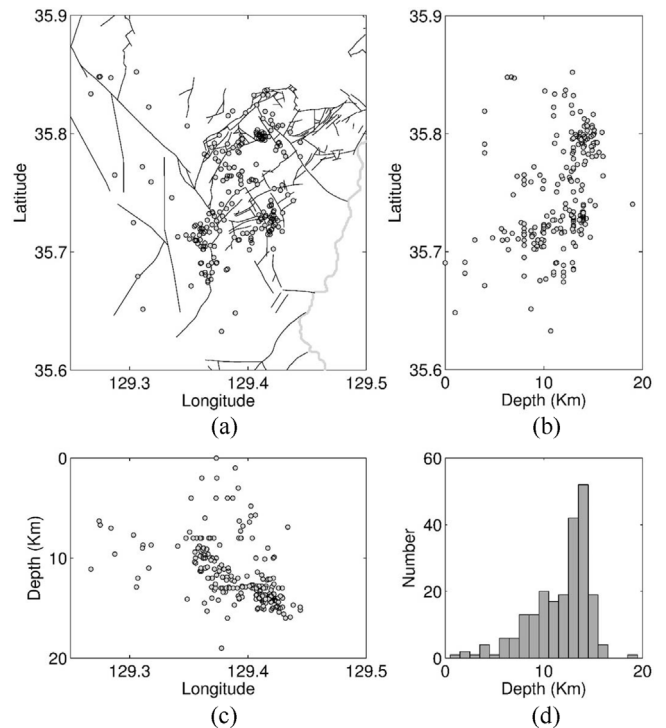


Fig. 6. Initial earthquake hypocenters determined by a routine earthquake location process using Hypoellipse. (a) The map view of the seismicity on top of the major faults observed at the surface, (b) north-south cross-sectional view, (c) east-west cross-sectional view, and (d) histogram of the number of events versus depths of hypocenters. There are 227 earthquakes, including 21 earthquakes reported by the National Earthquake Comprehensive Information System.

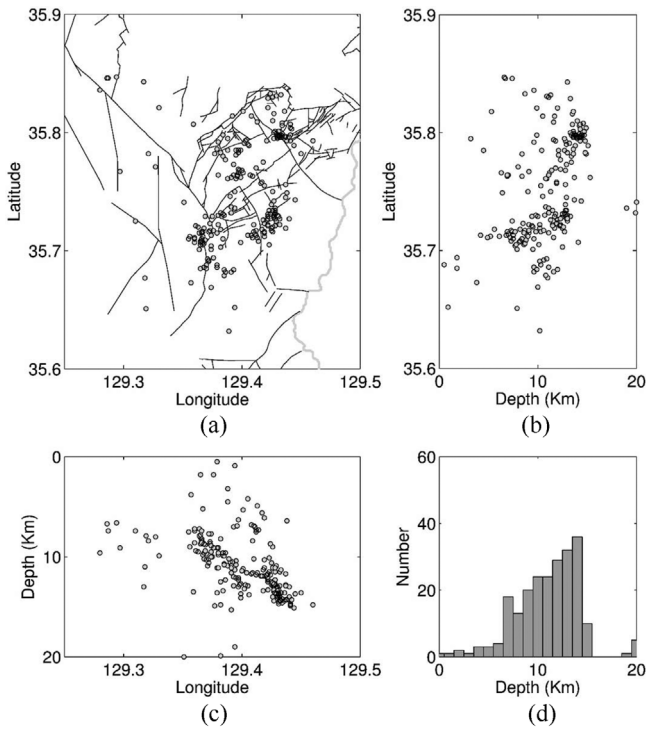


Fig. 7. Relocated earthquake hypocenters determined by the JHD method. (a) ~ (d) Same as the ones shown in Fig. 5.

적으로 기상청에서 발표한 위치보다 동쪽에 위치하고, 그 분포는 기상청 발표보다 좁은 지역에 공간적 군을 이루며 발생하고 있다(Fig. 8). 이러한 지진위치의 상대적 정확성 향상은 지진발생위치 결정 과정에서 연구지역 지하구조와 진앙결정에 사용한 속도모델의 차이로 인하여 발생하는 주파시간의 차이를 관측소 보정치로 처리하였기에 가능했던 것으로 생각된다. 이 관측소 보정치의 분포를 살펴보면 전반적으로 연구지역의 서쪽에 위치한 지진관측소에는 음의 보정치, 동쪽에 위치한 지

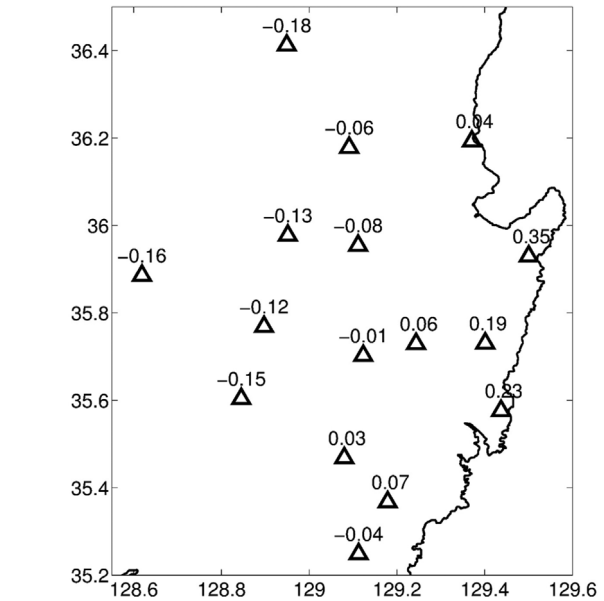


Fig. 9. Distribution of P-wave station corrections applied during the joint hypocenter determination.

진관측소에는 양의 보정이 적용되었다(Fig. 9). 이러한 보정치의 차이는 지하 속도구조의 차이에 기인한 것으로 생각된다. 정확도가 향상된 지진발생위치 분포에 의하면 많은 지진이 연일구조선의 남측분절 주위, 석읍단층 주위, 2014년 규모 3.5 지진이 발생한 와읍분지 북동부분 주변, 그리고 와읍분지 중앙부분과 남서부분 주변에서 발생한다.

논의 및 결론

본 연구에서는 경주지역 미소지진 다발지역에서 2010년부터 2014년 사이에 크고 작은 지진이 반복적으로 발생하고 있

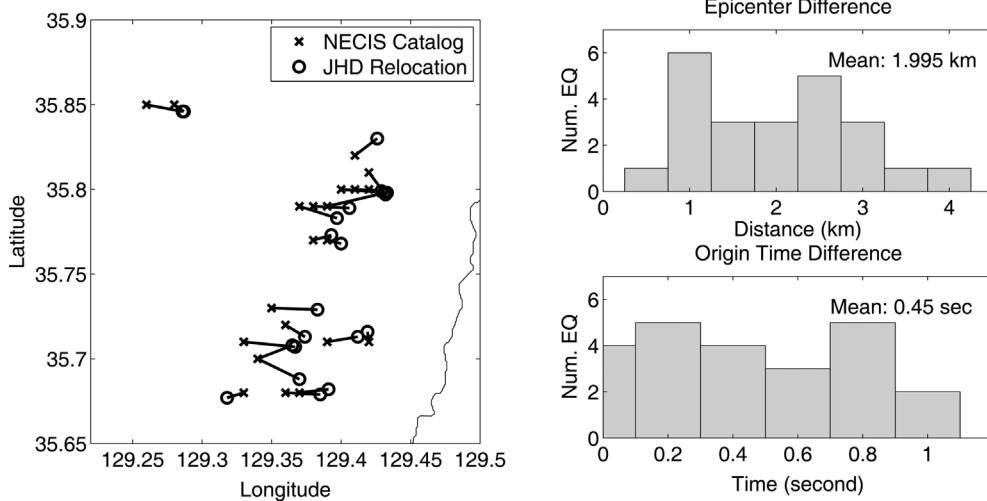


Fig. 8. Comparisons of the epicentral parameters and origin times of 21 earthquakes reported by the NECIS and relocation results in the study.

음을 확인하였다. 이 지역에서는 활성단층으로 의심되는 신생대 제4기 단층 노두들이 여러 곳에서 확인되었고, 지표 관측 결과에 따르면 많은 곳에서 남북방향의 주향을 보이고 있으며, 동-서 혹은 동북동-서남서 방향의 응력장 하에서 재활성된 것으로 생각된다(Chang, 2001; Son *et al.*, 2007). 이러한 결과는 한반도 지진자료해석(Jun, 1991; Kim and Park, 2010; Rhie and Kim, 2010)과 세계응력도(Zoback, 1992)에 나타나는 한반도 주변에서의 현재 응력방향과 일치한다. 연구지역에서 발견된 단층 노두들 중 일부는 기하, 운동양상, 지리적 위치 등이 서로 상관관계를 가지고 있는데, 특히 연일구조선을 따라서 기재되는 단층 노두들이 하나로 연결된 단층을 형성한다면 그 길이는 최소 20 km가 될 것이다.

경주 미소지진 다발지역에서는 활성으로 의심되는 제4기 단층이 여러 곳에서 발견되고 있으므로, 어느 단층이 이 지역 미소지진 발생과 관련이 있는가에 대한 연구가 필요하다. 기상청 발표에 의하면 경주 미소지진 다발지역에서는 2010년부터 2014년까지 지진이 21 회 발생한 것으로 보고되었으나, 본 연구에서는 파형의 유사성을 이용하여 총 310 회의 지진기록을 확인하였다. 이 자료들의 지진 발생위치를 정확히 결정하여, 이 지역 단층과의 상관관계를 조사하였다. 연구지역 내에 존재하는 주요 지질구조 중의 하나인 연일구조선 남측분절은 남북의 주향을 가지며, 본 연구에서 확인된 미소지진의 발생현황 역시 연일구조선 남측분절 주변에 남북 방향으로 위치해 있다. 또한 연일구조선 동편에서 거의 남북 방향으로 나란히 달리는 석읍단층 주변과 그 북쪽의 와음분지 경계단층 주변에서도 많은 지진이 발생하고 있음을 확인하였다.

감사의 글

두 분의 심사위원께서 주신 의견은 논문의 완성도를 높이는 데 많은 도움이 되었습니다. 감사합니다. 연구자료 준비에 도움을 주신 추민정, 허보람, 어기일, 장한에게 감사드립니다. 본 연구는 지진기술개발사업(KMIPA2015-3010)의 지원으로 수행되었습니다.

References

- Baag, C.-E., and Kang, D. J., 1994, Geophysical Studies on Major Faults in the Gyeongsang Basin: Aeromagnetic and Radiometric Data Interpretation on the Ulsan Fault, *Journal of Geological Society of Korea*, **30**, 193-205.
- Chang, T. W., 2001, Quaternary Tectonic Activity at the Eastern Block of the Ulsan Fault, *Journal of the Geological Society of Korea*, **37**, 431-444.
- 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 of the Seismological Society of America*, **94**, 269-284.
- Choi, W.-H., 2003, *Neotectonics of the Gyeongju-Ulsan Area in the Southeastern Part of Korean Peninsula*, Ph.D., Seoul National University, Seoul, Korea.
- Gibbons, S. J., and Ringdal, F., 2006, The detection of low magnitude seismic events using array-based waveform correlation, *Geophysical Journal International*, **165**, 149-166.
- Jo, W.-R., Okada, A., Jun, M.-S., Kim, S. K., Watanabe, M., Sato, H., Jeon, J. S., and Chi, H. C., 1994, Active fault topography and trench survey in the central part of the Yangsan fault, southeast Korea, *Journal of the Korea Geomorphological Association*, **1**, 67-83.
- Jun, M.-S., 1991, Body-wave analysis for shallow intraplate earthquakes in the Korean peninsula and Yellow Sea, *Tectonophysics*, **192**, 345-357.
- Kim, I.-S., Son, M., Jung, H.-J., Lee, J.-D., Kim, J.-J., and Paik, I. S., 1997, Geological Characteristics of Kyongju-Ulsan Area: Paleomagnetism and Magnetic Susceptibility of the Granitic Rocks in the Ulsan Fault Area, *Economic and Environmental Geology*, **31**, 31-43.
- Kim, J. H., Kang, P. C., and Lim, D. H., 1976, A Study of the Relation between Geologic Structures and Ore Deposits in Ryeongnam Province using Landsat-1 Images, *Journal of the geological society of Korea*, **12**, 79-89.
- Kim, K.-H., Chiu, J.-M., Pujol, J., and Chen, K.-C., 2005, Earthquake Relocations, Fault Zone Geometry and Constraints on Lateral Velocity Variations using the Joint Hypocenter Determination Method in the Taiwan Area, *Earth, Planets and Space*, **57**, 809-823.
- Kim, K.-H., and Park, Y., 2010, The January 2007 M_L 4.8 Odaesan Earthquake and Its Implications for Regional Tectonics in Korea, *Bulletin of the Seismological Society of America*, **100**, 1395-1495.
- Kim, K.-H., Ryoo, Y.-G., Yu, C., Kang, S. Y., and Kim, H.-J., 2011, Relocation of Youngduk Offshore Micro-earthquakes, *Jigu-Muli-wa-Mulli-Tamsa*, **14**, 267-273.
- Kim, S. K., Jun, M.-S., and Jeon, J.-S., 2006, Recent Research for the Seismic Activities and Crustal Velocity Structure, *Economic and Environmental Geology*, **39**, 369-384.
- 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 of the Seismological Society of America*, **100**, 1120-1137.
- Kim, W., 1999, P-wave velocity structure of upper crust in the vicinity of the Yangsan Fault region, *Geosciences Journal*, **3**, 17-22.
- Kyung, J. B., and Atsumasa, O., 1995, Liquefaction Phenomena due to the Occurrences of Great Earthquakes: Some Cases in Central Japan and Korea, *Journal of Geological Society of Korea*, **31**, 237-250.
- Kyung, J. B., Jung, M. K., Baek, J. J., Im, Y. J., and Lee, K., 2010, *Historic Earthquake Catalog in the Korea Peninsula*, 475, Seoul, Korea Meteorological Administration.
- 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 Um, C. R., 1992, Geoelectric Survey of the Ulsan Fault: Geophysical Studies on Major Faults in the Kyeongsang Basin, *Journal of Geological Society of Korea*, **28**, 32-39.
- Lee, K., and Yang, W.-S., 2006, Historical Seismicity of Korea, *Bulletin of the Seismological Society of America*, **96**, 846-855, doi:810.1785/0120050050.
- Lee, Y.-H., 2003, *Quaternary faults in the eastern area of the Ulsan Fault*, Master, Pusan National University, Pusan, Korea.
- NECIS, 2015, National Earthquake Comprehensive Information System, Historic Earthquakes.
- Pujol, J., 1995, Application of the JHD technique to the Loma Prieta, California, Mainshock-Aftershock Sequence and Implications for Earthquake Location, *Bulletin of the Seismological Society of America*, **85**, 129-150.
- Rhie, J., and Kim, S., 2010, Regional moment tensor determination in the southern Korean Peninsula, *Geosciences Journal*, **14**, 329-333.
- Son, M., Chong, H.-Y., and Kim, I.-S., 2002, Geology and Geological Structures in the Vicinities of the Southern Part of the Yonil Tectonic Line, SE Korea, *Journal of the geological society of Korea*, **38**, 175-197.
- Son, M., Kim, J.-S., Chong, H.-Y., Lee, Y.-H., and Kim, I.-S., 2007, Characteristics of the Cenozoic crustal deformation in SE Korea and their tectonic implications, *Korean Journal of Petroleum Geology*, **13**, 1-16.
- Son, M., Song, C. W., Kim, M.-C., Cheon, Y., Cho, H., and Shon, Y. K., 2015, Miocene tectonic evolution of the basins and fault systems, SE Korea: dextral, simple shear during the East Sea (Sea of Japan) opening, *Journal of the Geological society*, **172**, 664-680.