

임시 지진관측망 자료를 활용한 속리산 지역 미소지진 분석 결과와 1978년 규모 5.2 지진의 연관성 분석

김도영 · 김광희[‡]
부산대학교 지질환경과학과

Microearthquakes in the Mt. Songnisan area Using temporary seismic network data and their implications to the 1978 M_L 5.2 earthquake

Doyoung Kim · Kwang-Hee Kim[‡]

Department of Geological Science, Pusan National University, Busan 46241, Republic of Korea

요 약

최근 속리산에서 발생하는 미소지진을 이용하여 지하 단층 구조를 분석하였다. 2019년 4월부터 2021년 4월 까지 속리산 지역에서 운영한 부산대학교 임시 지진관측망 자료와 2007년 1월부터 2021년 4월까지의 기상청 광역 지진관측망 자료를 이용하였다. 2007년부터 2021년간 기상청 발표 지진 119개의 지진파형을 견본 파형으로 템플릿 매칭(template matching) 방법을 적용한 결과 274개 지진을 추가 검출하였으며, 총 393개 지진을 정밀 분석하였다. HYPOELLIPSE를 이용하여 지진의 초기 위치를 결정하였고, 정밀 분석을 위해 HypoDD를 이용하여 지진의 상대 위치를 재결정하였다. 지진 분포는 서북서-동남동 방향을 보이며, 깊이는 18 ~ 20 km 범위에서 집중되어 있다. 규모 1.3 이상 지진 18개의 단층면해를 비교한 결과, 모두 서북서-동남동 및 북북동-남남서의 주향을 갖는 수평이동단층이었다. 지질도에 기재되어 있는 지표 단층과 지진 분포 및 단층면해 분석 결과를 비교하여, 이전에 알려지지 않은 서북서-동남동 방향의 지하 단층이 이 지역의 미소지진 활동에 대한 주원인단층임을 인지하였다. 해당 지하 단층이 존재하는 지역 인근에서 1978년 9월 16일 규모 5.2 속리산 지진이 발생하였으며, 기상청, 미국 지진정보센터(NEIC), 국제지진센터(ISC)의 기록을 확인해보니, 각각의 진앙이 서로 상이하였다. 각 기관의 진앙과 본 연구 결과를 비교한 결과, NEIC와 ISC에서 발표한 진앙 주변에서 현재까지 미소지진이 지속해서 발생하고 있는 것을 확인하였다. 단, 현재 발생하고 있는 미소지진 현황만으로 1978년 속리산 지진 발생 위치를 특정하기에 한계가 있다.

주요어: 미소지진, 템플릿 매칭, 지진 상대위치 결정, 주향이동단층, 1978년 속리산 지진

ABSTRACT: The recent micro-earthquake activity in the Mt. Songnisan area was analyzed to identify the causative subsurface fault structure. We have used seismic data between April 2019 and April 2021 collected from a temporary network deployed in the Mt. Songnisan area by Pusan National University and between January 2007 and May 2021 from the regional seismic network by the Korea Meteorological Administration (KMA). Template matching was performed with 119 earthquakes announced by the KMA in the study area from 2007 to 2021, and as a result, 274 events were detected, and these events with the templates in a total of 393 events were analyzed. The initial result of the was determined using HYPOELLIPSE, and the relative earthquake location was performed using HypoDD for precise analysis. We determined the focal mechanisms of 18 earthquakes with magnitudes greater than 1.3. As a result of analyzing the focal mechanisms of 18 earthquakes with a magnitude of 1.3 or higher, all were horizontally moving faults with strikes of WNW-ESE or NNE-SSW. A comparison of the earthquake distribution and focal mechanism solutions with the mapped faults shows that the previously unknown subsurface fault in the WNW-ESE trend is the main fault responsible for the micro-earthquake activity of the area. The M_L 5.2 Songnisan earthquake occurred on September 16, 1978, near the area where this underground fault exists. The

[‡]Corresponding author: +82-51-510-2250, E-mail: kwanghee@pusan.ac.kr

KMA, U.S. National Earthquake Information Center (NEIC), and International Seismological Centre (ISC) recorded this earthquake, but each epicenter differed. In comparing the epicenters of each organization and the results of this study, it was confirmed that micro-earthquakes have continued to occur around the epicenters announced by NEIC and ISC. However, there are limitations in specifying the exact location of the 1978 Songnisan earthquake based solely on the current status of micro-earthquakes.

Key words: micro-earthquake, template matching, relative earthquake location, strike-slip fault, 1978 Songnisan earthquake

1. 서론

한반도 남부에 위치한 속리산 지역은 1978년 9월 16일 한반도 계기지진 관측이 시작된 이래로 4번째로 큰 규모인 5.2 지진이 발생한 지역이다. 속리산 지진 발생 후 기상청(Korea Meteorological Administration; KMA), 미국 지진정보센터(National Earthquake Information Center; NEIC), 국제지진센터(International Seismological Centre; ISC)에서 각각 지진 발생 위치 및 규모를 발표하였으나, 진앙 간의 거리가 10 km 이상 차이가 나는 등의 상이한 결과를 보인다(표 1). 일반적으로 지진 위치를 결정할 때는 최소 4개 이상의 지진계에서 기록된 지진자료가 필요하다(Kim *et al.*, 2008, 2011). 기상청 지진관측 보고에 속리산 지진을 관측한 국내 지진관측소의 위치정보와 지진파가 관측소에 도달한 도착 시간이 기록되어 있다(표 2). 속리산 지진 발생 당시 국내에서 운영 중이던 지진관측소는 2개소로(KMA, 1992, 2001), 기상청에서 정확한 지진 위치를 결정하기에 지진관측소 수가 부족하였다. 기상청과 달리 미국 지진정보센터와 국제지진센터는 지진 위치 결정에 해외 지진 관측자료를 사용하였다. 국제지진센터에서 사용한 관측소 중

가장 가까운 관측소는 일본의 SHK 관측소로 진앙으로부터 약 4.36° 떨어져 있다(ISC, 2023). 미국 지진정보센터에서 사용한 관측소 중 가장 가까운 관측소는 ATTU 관측소로 진앙과 47.82° 떨어져 있는 미국 알래스카의 애틀섬에 위치한다(IRIS, 2023). 미국 지진정보센터(NEIC)와 국제지진센터(ISC) 두 기관은 비교적 먼 거리의 관측소 자료를 사용하여 지진 위치 결정에 어려움이 있었을 것이다. 따라서, 당시에 세 기관 모두 정확한 지진 위치를 결정하기에 부족한 점이 있어서 서로 다른 결과를 제시한 것으로 보인다.

지진관측망은 지진 관측자료를 송·수신하기 위해 지진관측소를 연결한 정보통신망으로 관측 목적에 따라 관측장비의 종류, 설치 범위, 설치 밀도 등을 달리한다. 국내에서 상시 운영하는 대표적인 광역 지진 관측망으로 기상청이 운영하는 국가지진관측망과 한국지질자원연구원의 연구지진 관측망이 있다. 이들 관측망은 지진관측을 통한 지진 피해 감소, 주변국 핵실험 감시 등에 사용되며, 한반도 전역을 관측 대상으로 하여 약 20 ~ 30 km 간격으로 설치되어 있다(NEICIS, 2023). 지진이 집중되어 발생하는 지진다발 지역의 경우, 비교적 규모가 작은 미소지진이 많이

Table 1. Mt. Songnisan earthquake locations and magnitudes announced by the Korea Meteorological Administration (KMA), U.S. National Earthquake Information Center (NEIC), and International Seismological Centre (ISC).

Institution	Latitude (°N)	Longitude (°E)	Magnitude
KMA	36.6	127.9	M _L 5.2
NEIC	36.490	127.877	M _b 4.6
ISC	36.3635	127.8335	M _b 4.7

Table 2. Origin time of the 1978 Mt. Songnisan earthquake and arrival times of seismic waves at the observation stations (KMA, 1992).

Origin time	Station	P-arrival (H:M:S)	S-arrival (H:M:S)
1978 /09 /16 02:07:05.8	Seoul	02:07:28.8	02:07:46.0
	Gwangju	02:07:34.4	02:07:56.3

발생한다. 미소지진은 소수의 지진관측소에만 관측되거나 관측되지 않아 분석 불가능한 경우가 빈번하여, 주로 임시지진관측망을 운영하여 관측한다. 임시지진관측망은 특정 목적을 가지고 짧게는 수일 길게는 수년간 설치하는 관측망으로, 관측 목적에 따라 관측 환경(장비, 범위, 밀도 등)을 변경하며 운영한다.

본 연구지역은 1978년 속리산 지진 진앙과 인접한 지역이며, 현재까지도 미소지진이 많이 발생하고 있다. KMA, NEIC, ISC 세 기관이 기록해 놓은 진앙 위치가 서로 상이하다는 것을 파악하여, 해당 진앙 범위 내의 미소지진을 분석하기 위해 연구지역을 결정하였다(그림 1). 이후 정밀 관측을 위해 속리산 지역 중 영남권에 해당하는 지역에 임시지진관측망을 설치하였다. 2019년 4월부터 2021년 4월까지 획득한 임시지진관측망 자료와 2007년 1월부터 2021년 4월까지 운영한 기상청 및 한국지질자원연구원의 광역 지진관측망 자료를 활용함으로써 지진자료를 충분히 확보하려 노력하였으며, 이중차분법을 이용한 지진발생위치 재결정을 통해 지진발생위치의 상대적

정확성을 향상시켰다. 미소지진 분포를 이용하여 지하 단층 구조를 파악하였으며, 1978년 속리산 지진과 연관성을 찾기 위해 연구를 수행하였다.

2. 지진지체구조

한반도는 유라시아판 동쪽의 지각활동이 비교적 안정된 판 내부에 위치하므로 판 경계부에 위치하는 일본, 대만 등의 지역에 비해 낮은 빈도의 지진이 발생한다. 그러나 1811-1812년 미국에서 발생한 규모 8.1 New Madrid 지진(Johnston, 1996) 및 멕시코 Puebla에서 발생한 규모 7.1 지진(Alberto *et al.*, 2018; Roeslin *et al.*, 2020) 등 판 내부에 위치하지만, 대규모의 지진이 발생하여 큰 피해가 발생한 사례가 있다. 국내에서도 1978년 홍성지진, 2007년 오대산지진, 2016년 경주지진, 2017년 포항지진 등 중규모 지진이 지속해서 발생하고 있다. 국내 지진 발생 이후 정밀 분석 결과를 보면 기존에 알려지지 않은 지하 단층에서 지진이 발생한 사례를 쉽게 찾아볼 수 있다(Kim and Park, 2010; Kim *et al.*, 2018), 반면에 지표 단층과 유사한 주향을 따라 발생한 사례도 빈번하다(Han *et al.*, 2017). 따라서, 특정 지역의 단층이나 지구구조선은 지진 발생 구조를 암시할 수 있으므로 연구지역의 단층 구조를 파악하는 것이 큰 의미가 있다(Cheong *et al.*, 2001).

속리산 지역은 한반도 중남부에 위치하며, 주요 단층으로 영동 분지의 경계 단층인 북북동 방향의 단층과 이를 절단하는 북서 방향의 단층군이 남동부에 발달하고, 중앙부에는 동서 방향의 단층 및 추정 단층들이 발달한다(Hwang *et al.*, 1996). 연구지역의 단층 구조에 KMA, NEIC와 ISC 세 기관의 속리산 진앙을 도시한 결과, KMA 진앙 인근에서는 단층 구조가 확인되지 않았으며, NEIC와 ISC는 각각 동서 방향의 추정 단층과 서북서 방향의 단층 선상에 위치한다(그림 2).

3. 지진자료

부산대학교 임시지진관측망은 2018년 영남권 지하 단층구조 모델 개발 사업을 수행하며, 영남권 전 지역에 지진관측소를 설치하였다(Pusan National University, 2022). 기상청과 한국지질자원연구원에서 운영 중인

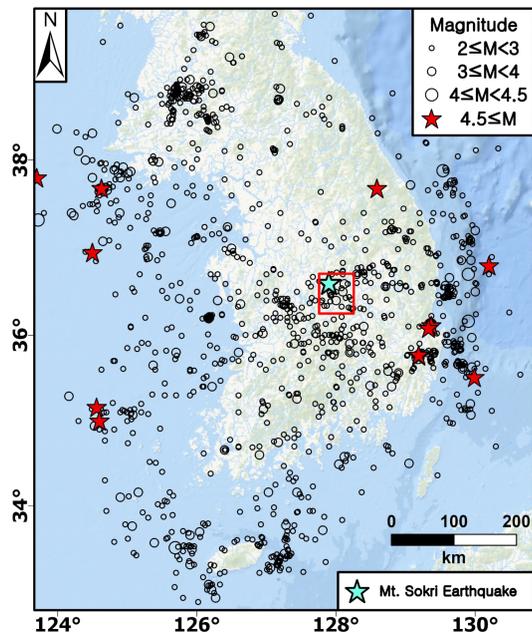


Fig. 1. Distribution of earthquakes from 1978 to 2021 (black open circles) and the 1978 Mt. Songnisan earthquake (cyan star) reported by the Korea Meteorological Administration (NEICIS, 2023). A red square indicates the area shown in the Figure 2.

광역 지진관측망의 관측 밀도를 향상시키기 위하여, 상시 지진관측소 사이의 거리가 비교적 먼 지점을 선정하여 광대역 임시지진관측소를 우선 설치하였다. 이후 기상청에서 발표한 국내 지진 발생 현황을 기

준으로 특정 장소에서 지진이 장기간에 걸쳐 반복적으로 발생하는 것을 확인한 뒤 해당 지역을 지진다발지역으로 선정하여 미소지진 근접 정밀 감시를 위해 관측망 밀도를 높게 설계하여 단주기 임시지진관측소를 설치하였다. 속리산은 지진다발지역 중 하나며 충청권과 영남권의 경계에 위치한다. 영남권 과제를 수행하며 관측소를 설치한 결과 충청권에 속하는 속리산 서쪽 부근에는 관측소를 설치하지 못하였다. 따라서, 충분한 자료를 확보하기 위해 연구지역을 중심으로 80 km 내에 있는 기상청 지진관측망 24개소, 한국지질자원연구원 지진관측망 4개소 자료와 부산대학교 임시지진관측망 19개소 자료를 활용하여 연구를 수행하였다(그림 3).

연구지역에서 발생하는 미소지진 자료를 수집하기 위하여, 2007년 1월부터 2021년 4월까지 기상청에서 발표한 지진 119건의 P파와 S파 초동 도착 시간을 각각 6,885건, 6,702건 결정하였다. 이 중 P파 도착 시간이 명확하게 결정되는 6개소의 관측소를 선정하고, 해당 관측소에서 관측한 지진 파형을 템플릿(그림 4a)으로하였으며, Fast Matched Filter 프로그램(Beaucé *et al.*, 2018)을 사용하여 연속지진자료(그림 4b)에서 지진 검출을 수행하였다. 지진 파형은 지하 속도구조, 지진파 전파경로, 관측 장비, 관측환경의 영향을 많이 받는다. 일정한 범위에서 지속해서 발생하는 지진을 한 관측소에서 관측하게 되면 지진 파들은 유사한 경로 및 지하구조를 통과하여 관측장비에 도달하여, 유사한 파형을 지니게 된다. 이는 상호상관계수(cross-correlation coefficient)가 높을수록 비슷한 위치에서 발생한 것을 의미한다(Gibbons and Ringdal, 2006). 템플릿 매칭을 사용하여 검출한 이벤트들에는 채석장 등의 인공지진, 배경잡음이 심하여 P파와 S파 도착 시간을 결정하지 못하는 신호, 연구지역 이외에서 발생한 지진 등이 포함되어 있다(그림 4c). 본 연구에서는 상호상관계수가 0.6 이상인 지진을 대상으로 이와 같은 신호를 선별하는 과정을 거쳐 자연지진(그림 4d)만 사용하였다.

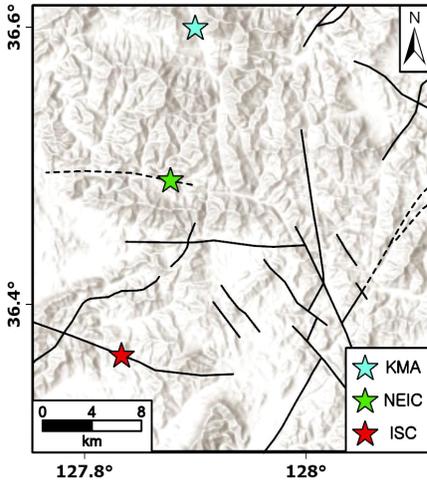


Fig. 2. Mapped fault lines of Mt. Songnisan area (modified from Hwang *et al.*, 1996). The stars indicate M_L 5.2 Mt. Songnisan earthquake epicenters reported by the Korea Meteorological Administration (KMA), U.S. National Earthquake Information Center (NEIC), and International Seismological Centre (ISC).

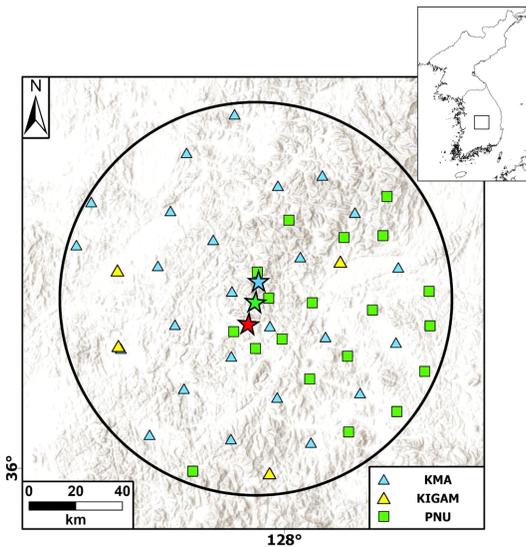


Fig. 3. Seismic stations used in this study (KMA: Korea Meteorological Administration; KIGAM: Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources; PNU: Pusan National University). The radius of the black circle is 80 km.

4. 연구방법

본 연구에서는 Geiger's method (Geiger, 1910, 1912)를 바탕으로 제작된 HYPOELLIPSE (Lahr, 1999) 프로그램을 사용하여 단일 진원 위치(single event loca-

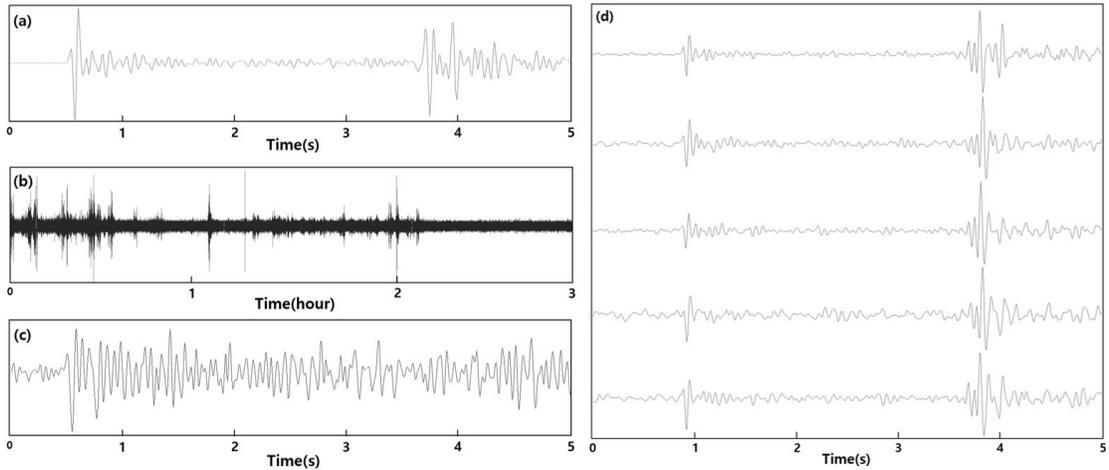


Fig. 4. A typical example of the matched filter method. This method finds waveforms similar to the (a) template in the (b) seismic data. However, not only earthquake is detected but also false alarm waveform such as (c). The detected earthquake waveforms are shown in (d).

tion)를 결정하고, 위치 결정의 정확성을 높이기 위해 HypoDD (Waldhauser and Ellsworth, 2000) 프로그램을 이용하여 이중 차분(double-difference)을 이용한 상대 진원 위치 재결정을 수행하였다. 단일 진원 분석은 가장 기본적인지만 가장 중요한 발생 위치 분석 방법으로, 지진관측소에 관측된 지진의 P파와 S파 도착 시간과 지하 속도구조를 이용하여 지진 위치를 분석하는 방법이다. 지진 발생 위치를 결정하기 위해 최소 4개의 관측소에서 관측한 지진파 도착 시간이 필요하며(Kim *et al.*, 2008, 2011), 해당 방법은 실질적으로 관측한 지진파의 도착 시간과 속도 모델을 기반으로 계산한 이론적 도착 시간의 차이가 최소화되도록 지진 위치와 진원시(origin time)를 조정하여 지진 위치를 구하는 방법이다. 이론적 도착 시간을 구하는데 지하 속도 모델이 사용되는데, 일반적으로 1차원 속도 모델을 사용한다. 1차원 속도 모델은 지하를 깊이에 따라 여러층으로 나누어 각 층의 P파 속도와 V_p/V_s 로 표현한 모델이며, 지하 속도구조의 횡적 변화를 포함하지 못해 실질적인 지하 구조를 표현하지 못한다는 한계가 있다. 이를 모델 오차라고 하며, 진원 위치 결정에 가장 큰 영향을 미치는 요인 중 하나이다(Gomberg, 1991). 본 연구지역은 3차원 속도모델이 따로 연구된 바 없어 전지구속도모델(IASP91)을 한반도에 맞게 개량한 속도모델을 사용하였다(그림 5; Park, 2008). 지진

위를 결정할 때는 우선 속도 모델을 이용한 이론적 도착 시간 및 진원 위치를 가정하고, 실제 관측한 P파 도착 시간, S파 도착 시간을 결정하여 그 차이를 구하게 된다. 이때 계산된 차이 값을 이용하여 다시 초기 진원 위치를 수정하고 동일한 방법으로 이론값과 관측값의 차이 값(root mean square; RMS)이 최소가 될 때까지 반복 계산하는 방법을 사용한다(Lee and Stewart, 1981).

초기 진원 위치를 결정한 후 진원 위치의 상대적 정

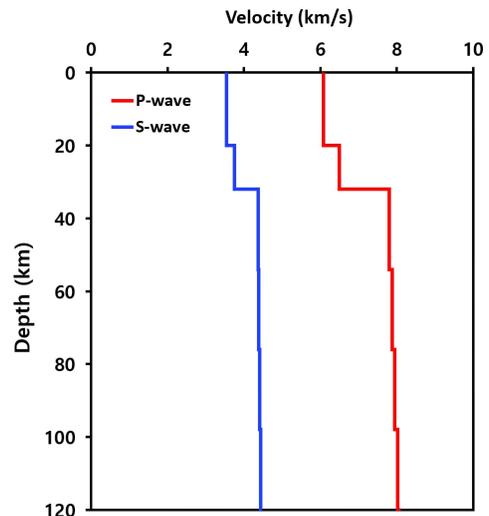


Fig. 5. 1-D velocity model used in this study (Park, 2008).

확도를 높이기 위해 HypoDD 프로그램(Waldhauser and Ellsworth, 2000)을 이용하여 지진 위치 재결정을 수행하였다. 발생 위치가 비슷한 지진들을 한 관측소에서 관측했을 시 P파와 S파의 주행 및 도착 시간과 지진 파형이 유사함을 이용한 방법으로, 진원 위치에 차이가 있으면 파형에서도 차이가 발생함을 활용하여 위치 결정의 정확성을 높이게 된다.

5. 결과

5.1 지진 검출

본 연구에서 수행한 지진 검출은 기상청 발표 지진(119개)에 비하여 개수가 약 3배 이상 증가한 393개 지진을 검출하였다. 이는 관측망 설치 목적에 따른 관측소 설치 밀도 향상에 의한 영향으로 보인다. 기상청 관측소의 경우 전국에서 발생하는 모든 지진에 대한 정보를 취득하여, 주요 지진 발생 시 시민들에게 지진 피해가 발생하지 않도록 신속한 정보전달을 목적으로 우리나라 전역에 지진관측소를 설치하였다. 각각의 관측소는 약 20 ~ 25 km의 거리를 유지하며 일정한 분포로 설치하였다. 반면에 부산대학교의 경우 정밀 관측을 통한 미소지진 분석을 목적으로 관측소를 설치하였으며, 관측소 간 최대거리가 약 15 km로 정밀 분석을 위해 특정 지역에 지진계를 집중적으로 설치한 경우는 관측소 간 거리가 수 km

에 불과하다. 기상청 발표 지진 규모와 본 연구에서 검출한 지진의 규모를 비교한 결과 사람이 일반적으로 느끼지 못하는 규모 0.6 이하 미소지진의 관측 역량에서 차이가 발생한다(그림 6).

일별 지진 발생 횟수와 누적 지진 발생 횟수를 보면 지진의 개수는 특정 연도를 기준으로 점점 많이 발생하고 있는 것으로 보인다(그림 7). 실제로 지진이 자주 발생한 이유도 있지만, 일반적으로 관측소의 수가 증가하여 관측 역량이 높아져 발생하는 효과인 것으로 분석된다. 지진이 자주 발생한 연도는 2012년과 2014년으로 약 85개 이상의 지진이 발생하였

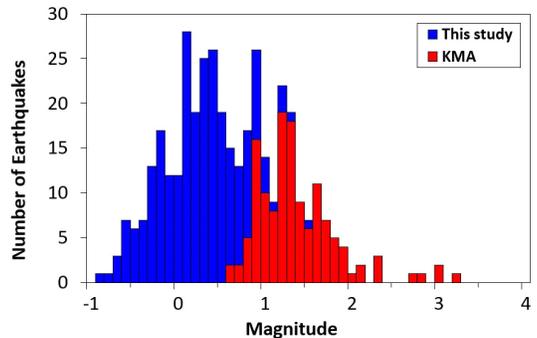


Fig. 6. Number of earthquakes in magnitude bin. 119 Earthquakes reported by KMA. In this study, a total of 393 earthquakes were analyzed by detecting an additional 273 earthquakes.

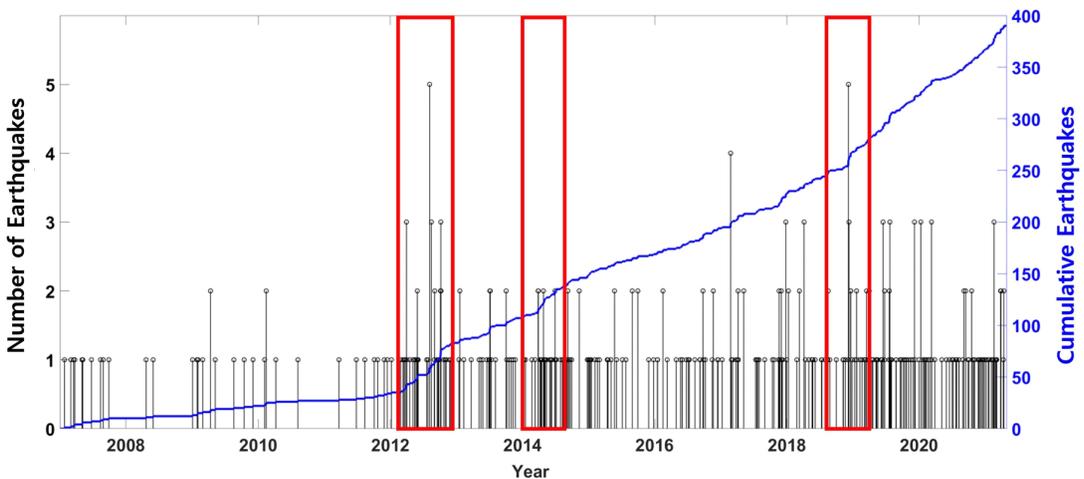


Fig. 7. Number of daily earthquakes and cumulative earthquakes (blue line) in the study area. The number of earthquakes has increased around the time indicated by the red square.

며, 비슷한 시기에 기상청 광역지진관측망이 증설되었으므로, 관측 역량이 향상되어 반영된 효과들도 있을 것으로 분석된다. 이와 유사하게 부산대학교에서 관측을 시작한 2019년을 기점으로 지진 발생 횟수가 증가한 것을 확인할 수 있다(그림 7).

5.2 미소지진 분석

검출 작업이 완료된 393건의 지진자료에 P파, S파 도착 시간 결정 작업을 수행하여 P파 도착 시간 27,278건과 S파 도착 시간 26,375건을 결정하였다. 해당 도착 시간과 HYPOELLIPSE (Lahr, 1999) 프로그램을 사용하여 지진 발생 위치를 결정하였으며(그림 8), 이후 기상청(KMA), 미국 지진정보센터(NEIC), 국제지진센터(ISC)에서 분석한 속리산 지진 발생 위치를 함께 도시하여 비교하였다. KMA 속리산 지진 진앙 부근에서는 미소지진이 발생하지 않고 있으며, NEIC와 ISC 기록 진앙 위치와 인접한, 그림 8a의 검은색 네모에 해당하는 두 구역에서 지진이 가장 집중되어 발생한 사실을 확인하였다. 지진은 지하에 존재하는 단층에 응력이 집중되어 쌓이다 해당 단층의 탄성 한계를 넘어가는 순간 단층이 파열되며 발생한다(Reid, 1910). 즉 반복적으로 지진이 발생하는 지역은 새로운 단층이 형성되어 지진이 발생할 가능성보다 기존

에 존재하는 단층면을 따라 발생할 가능성이 크므로 (Kim *et al.*, 2011; Yoon *et al.*, 2019), 속리산 지진이 발생했을 가능성이 큰 두 지역의 단층 구조를 분석하였다.

그림 8a를 통해 연구지역 중부에 서북서-동남동 주향의 2개의 지진군이 존재하는 것을 볼 수 있다. 그림 8b와 8c가 그림 8a의 중부에 해당하며 약 16~21 km 깊이에 지진분포가 위치한다. 그림 8c를 통해 지도에서 확인한 2개의 지진군이 공간적으로 분리되어있는 것을 확인할 수 있으며 지진이 수직으로 분포되어있는 것으로 보인다. 그림 8d와 8e는 그림 8a의 남서부에 위치하며, 연구지역 중부와 마찬가지로 두 개의 지진군이 존재하는 것으로 보인다. 약 10~15 km 깊이에서 지진이 넓게 분포하고 있으며, 서쪽으로 갈수록 지진 발생 깊이가 깊어지는 경향을 보인다(그림 8d). 그림 8e에서 3 km를 기준으로 두 개의 지진군으로 구분할 수 있으며, 지진군이 지진분포가 수직으로 길게 분포하고 있다. 그림 8b-8e에서 전반적으로 지진이 흩어져 분포하고 있어 지진이 발생하는 단층 구조를 파악하기 어려워 정확한 단층 구조의 파악을 위해 단층면해 분석(그림 9)과 이중 차분을 이용한 지진 위치 재결정을 수행하였다(그림 10). 지진 위치 재결정 과정 중 인접한 지진이 없거나 관

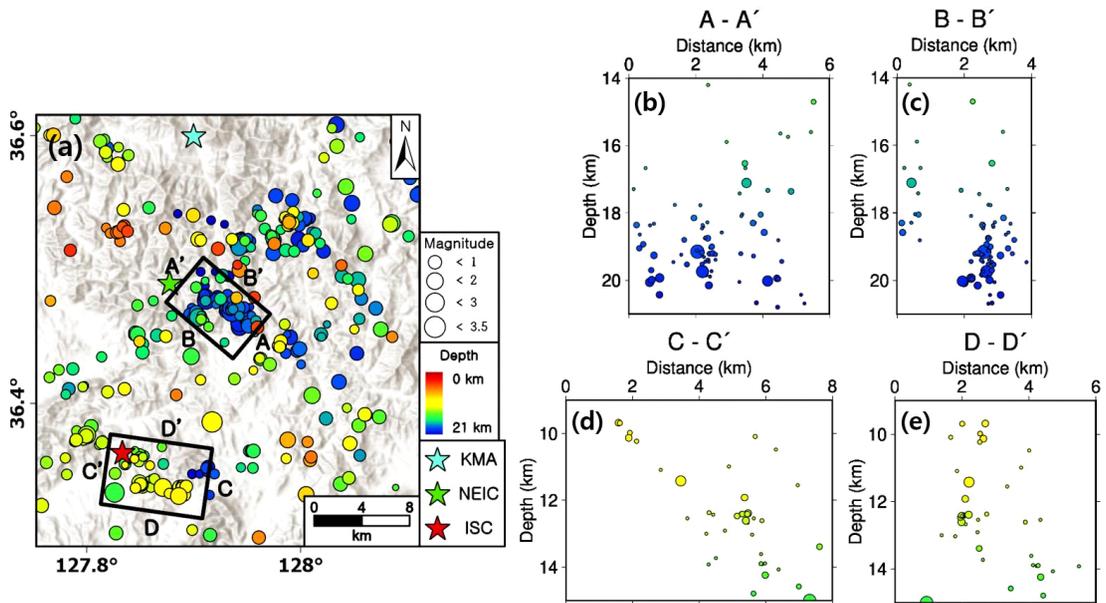


Fig. 8. (a) Earthquake distribution of single event location result in the Mt. Songnisan area. (b)~(e) Cross-sectional view of seismicity indicated by black rectangles in (a).

측된 관측소가 적어 불확실성이 큰 지진 20개가 제외되어 총 373개의 지진 위치가 재결정 되었다.

단층면해 분석의 경우 HASH (Hardebeck and Shearer, 2002, 2003) 프로그램을 이용하여 연구지역 중부 및 남서부에서 발생한 규모 1.3 이상 지진 중 분석할 수 있는 지진 10개의 P파 초동을 이용하여 단층면해 분석을 수행하였다. 삼각 다이어그램에 단층면해 분석 결과를 도시한 결과 모든 단층면해가 서북서-동남동 및 (북)북동-(남)남서 방향의 절면(nodal plane)을 가진 주향이동단층인 것으로 분석되었다(그림 9).

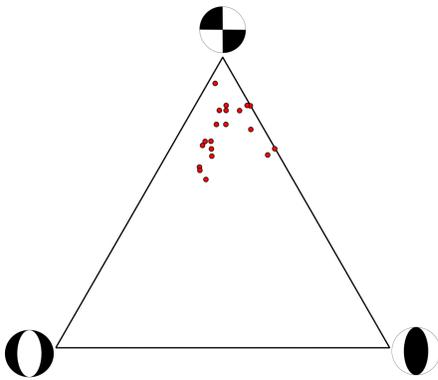


Fig. 9. Ternary diagram of focal mechanism solution.

그림 10a 중부에서 발생하는 지진은 그림 8a와 비교했을 시 지도상에서는 변화가 적지만, 단면도 상에서는 큰 차이를 보인다. 그림 8b에서는 뚜렷한 단층의 구조가 보이지 않았으나, 그림 10b 상에서는 지진들이 깊이 18 ~ 20 km에서 뚜렷한 선상구조를 보이며, 약 4 km에 걸쳐 북서쪽으로 갈수록 지진 발생 깊이가 깊어지는 모습을 보인다. 이는 단층면해의 주향(strike; $290^{\circ} \pm 5^{\circ}$) 경사각(dip; $87^{\circ} \pm 5^{\circ}$) 면선각(rake; $168^{\circ} \pm 4^{\circ}$) 범위와 일치하는 모습을 보인다. 그림 8c에서는 단층이 거의 수직으로 형성된 것처럼 보였으나, 그림 10c에서는 경사각이 단층면해 분석과 유사하게 남서쪽으로 경사진 모습이 보인다. 따라서, 서북서-동남동 방향의 절면이 지진분포 방향과 일치하므로 연구지역 중부에는 서북서-동남동 방향의 좌수향 주향이동단층이 존재하는 것으로 분석된다.

그림 10a 남서부의 단면도를 나타낸 그림 10d와 10e에서는 동-서 또는 서북서-동남동 방향의 선형구조가 나타난다. 그림 10d는 그림 8d와 동일하게 지진이 서쪽으로 갈수록 깊어지는 모습을 보이지만, 약 12 km 깊이에서 지진이 집중되어 발생하고 있다. 그림 10d와 e의 단층면해 분석 범위는 주향($282^{\circ} \pm 2^{\circ}$) 경사각($88^{\circ} \pm 1^{\circ}$) 면선각($180^{\circ} \pm 2^{\circ}$)으로 주향과 경사

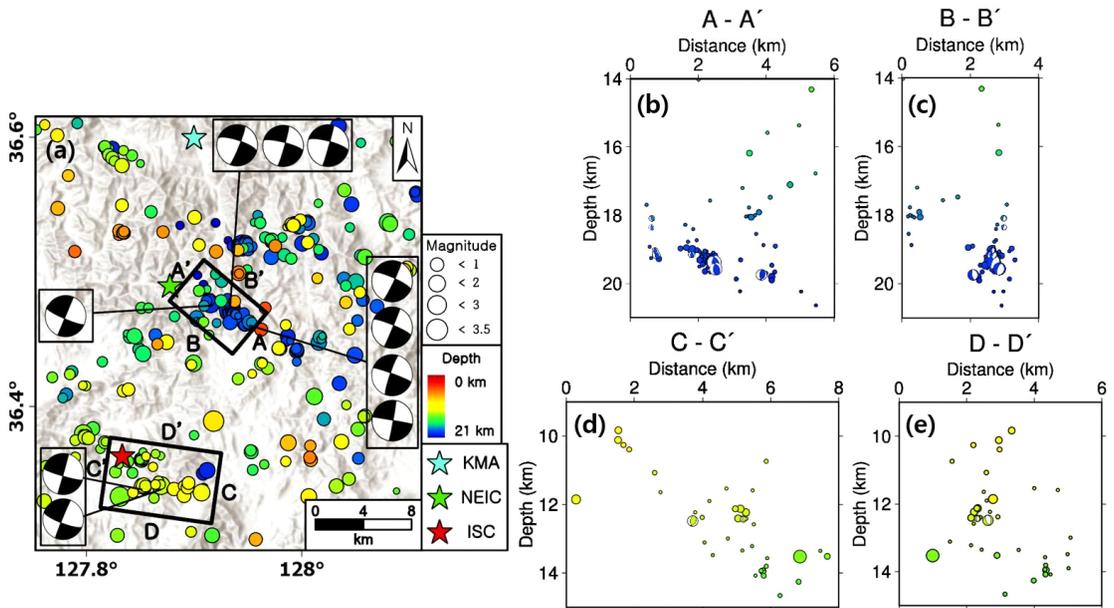


Fig. 10. (a) Earthquake distribution of HypoDD results in the Mt. Songnisan area. (b)~(e) Cross-sectional view of seismicity indicated by white rectangles in (a). Focal mechanisms was analyzed for earthquakes with a magnitude greater than 1.3 that occurred in the area indicated by the black rectangles.

가 일치하는 것으로 분석된다. 면선각의 경우 거의 수평에 가까우며 서쪽으로 깊어지는 단면도와 일치하지 않는 것을 볼 수 있다. 그림 10e에서는 단층이 남쪽으로 기울어진 것으로 보이나 단층면해 분석과 비교하면 북쪽으로 기울어진 모습도 볼 수 있다. 따라서, 연구지역 남서부의 지진다발지역의 경우 서북서-동남동 방향의 주향이동단층에서 지진이 발생하고 있는 것으로 볼 수 있으나, 지진이 여러 지점에서 집중되어 발생하고 단층면해 분석이 가능한 지진의 수가 적어 정확한 단층의 기하를 제시하기에는 어려움이 있다. 정확한 단층의 기하를 제시하기 위해 관측소를 지속해서 운영하여 추가 관측이 필요하다.

진원 재결정 결과(그림 10a)는 단일 진원 위치 결

정 결과(그림 8a)와 유사하지만, 비교적 뚜렷한 선상 구조를 보이거나 지진이 모여있는 경향이 나타난다. 이러한 진원 재결정 결과와 정확도를 평가하기 위해 그림 10b, 10c에 위치하는 지진 중 위치 결정이 잘 된 지진 31개를 대상으로 위치 결정 결과를 비교하였으며(그림 11), 부트스트랩(Bootstrap) 방법을 이용하여 상대위치 오차(relative location error)를 측정하였다(그림 12). 단일 위치 결정 결과는 수평과 수직 모두 넓은 범위에서 분포하고 있다. 수평 방향으로 약 1 km 내에 분산되어 있지만 깊이가 17.8 ~ 20.4 km 범위에서 넓게 분포하고 있다(그림 11a-c). 지진파 주행시간 차이(travel-time difference)를 이용한 위치 재결정 결과 NW-SE 단면도에서 깊이 범

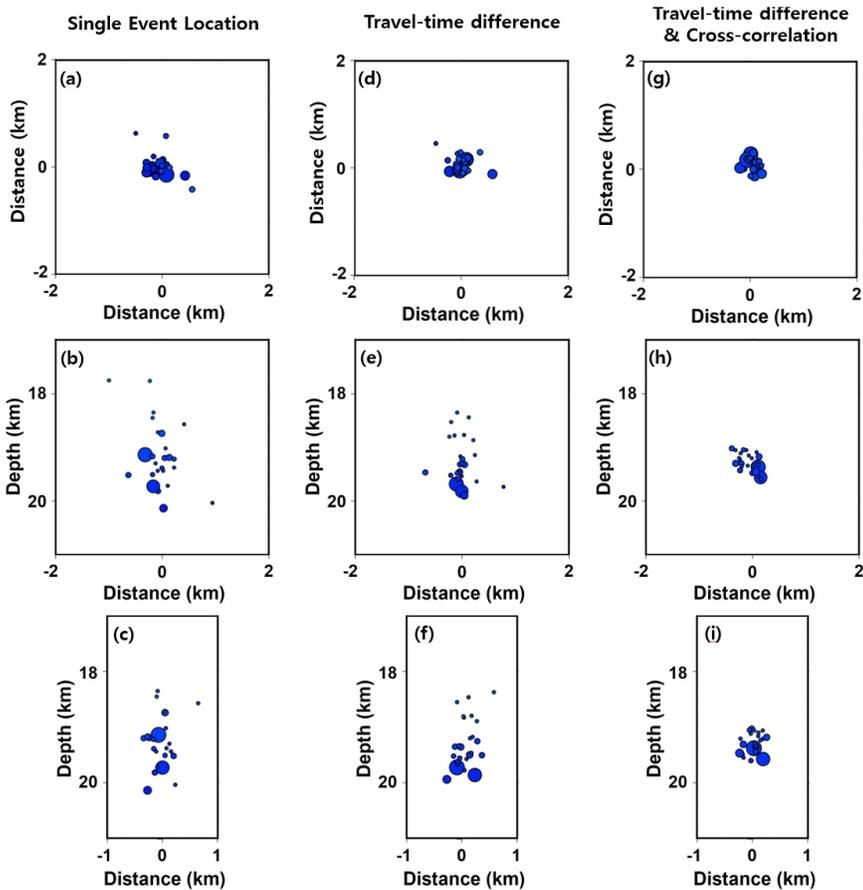


Fig. 11. Locations of the 31 well-located events. (a)-(c) Map view, NW-SE, and NE-SW direction cross-sections of the single event locations for the 31 events, respectively. (d)-(f) Map view, NW-SE, and NE-SW direction cross-sections of the double-difference locations using P and S wave travel time differences for each event pair, (g)-(i) Map view, NW-SE, and NE-SW direction cross-sections of the double-difference locations using P and S wave travel time differences, and the P and S wave cross-correlation.

위가 18.2 km ~ 20 km로 줄어들며 지진 분포가 그림 11b보다 모인 것을 볼 수 있다(그림 11d-e). 지진 파 주행시간 차이와 파형의 유사도(Cross-correlation)를 모두 사용한 결과 지도상에서 한 지점에서 발생한 것으로 보이나, 그림 11h와 비교하여 NW-SE 주향의 단층을 확인할 수 있다. 단층은 남서쪽으로 기울어져 있으며 단층의 북서 방향으로 갈수록 지진 발생 깊이가 깊어지는 경향을 볼 수 있다(그림 11g-11i). 상대위치 오차 측정은 지진별 각 200회의 분석을 수행하였으며, 지진파 주행시간 차에 의한 위치 결정 결과와 파형의 유사도까지 고려한 위치 결정 결과를 각각 분석하였다. 분석 결과 주행시간의 차이를 이용한 위치 결정 결과는 수평 방향으로 약 200 m의 오차를 보였으며, 수직 방향으로는 약 300 m의 오차를 보였다. 지진파 주행시간 차이와 파형의 유사도를 이용한 위치 결정 결과는 수평 방향 약 35 m와 수직 방향 약 65 m의 오차를 보인다. 수직 방향의 오차가 수평 방향 오차보다 상대적으로 크지만, 그

림 10에서 지진분포의 선형 또는 군집구조를 뚜렷하게 볼 수 있으므로 위치 재결정이 잘 수행되었음을 알 수 있다.

연구지역에 작용하는 응력장을 파악하기 위하여 지진다발지역 외의 연구지역에서 추가로 8개의 단층면해를 결정하였다. 총 18개의 단층면해 결과를 이용하여 압력축(P-axis)과 장력축(T-axis)을 분석하였다. 그 결과, 모든 단층면해가 동북동-서남서 방향의 압력축을 가지고 북북서-남남동 방향의 장력축을 가진 것으로 확인되었다. MSATSI (Martínez-Garzón *et al.*, 2014) 매트랩 패키지를 이용해 500회의 부트스트랩 샘플링을 실시하여 미소지진이 발생하고 있는 응력장 분석을 수행하였다. 주응력 방향은 $\sigma_1 = 247^\circ$, $\sigma_2 = 12^\circ$, $\sigma_3 = 155^\circ$ 으로, 동북동-서남서 방향의 압축 응력장 하에서 현재 미소지진이 발생하고 있는 것으로 보인다(그림 13). 이는 한반도 및 인근에서 발생하는 지진들의 최대주응력 방향(동-서 또는 동북동-서남서)과 일치하며(Jun and Jeon, 2010),

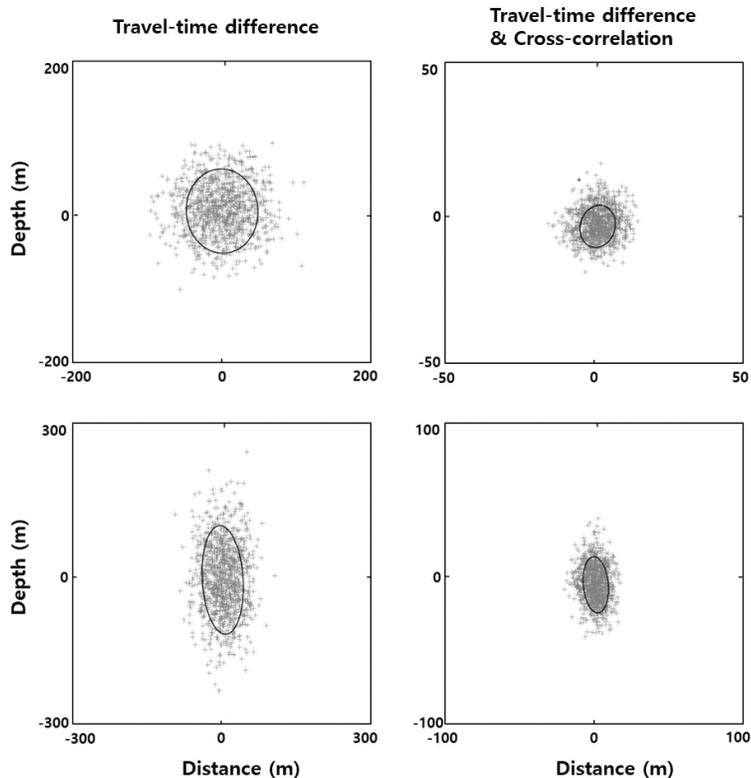


Fig. 12. Bootstrap analysis of the relative location errors obtained using the residual travel times and cross-correlation. The ellipsoid show 95% confidence interval.

남한 중서부지역에서 발생한 지진이 북북동-남남서와 서북서-동남동 방향의 단층면을 가진 주향 이동 단층의 특성을 가졌다는 선행연구와 유사한 결과를 보인다(Cheong *et al.*, 2001; Back *et al.*, 2011).

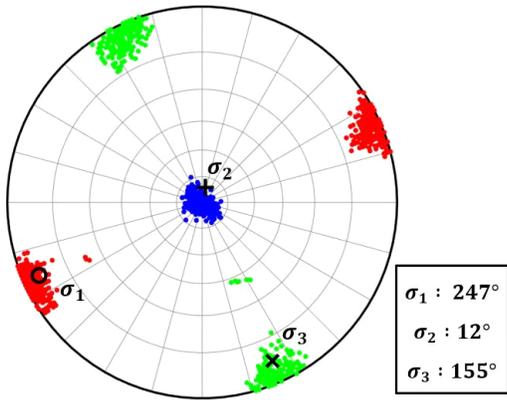


Fig. 13. Principle stress axes inversion result by focal mechanism solution data.

6. 토 의

최근 속리산에서 발생한 미소지진의 파형과 1978년 광주관측소에서 관측한 지진 파형의 차이를 확인하기 위해 자료를 찾던 중 국가기록원 소속 나라기록관에 보관 중인 1978년 광주관측소에서 관측한 속리산 지진 기록지를 확보하였다(그림 14). 해당 지진 기록지를 직접 분석한 결과 규모 5.2 본진의 경우 규모가 커 P파 도착 시간을 확인할 수 있었지만, S파 도착 시간은 확인하기 어려웠다. 따라서, 본진 발생 약 6분 후에 기록되어 있는 지진 파형을 속리산 지진의 여진으로 추정하여 해당 지진의 PS시를 23초로 분석하였다. 이는 1992년 기상청지진연보에 기록된 본진의 21.9초와 약 1.1초의 차이가 있다(그림 14). 시간 차이가 발생한 이유 중 하나는 확보한 지진기록지의 경우 나라기록관에서 보관하고 있는 기록지가 원본이 아닌 송달 용지에 맞는 축소판으로 보관하고 있어, 자료 요청 시 축소판을 전달해 줌으로 실제 지진기록지를 보는 것만큼의 정확한 지진파

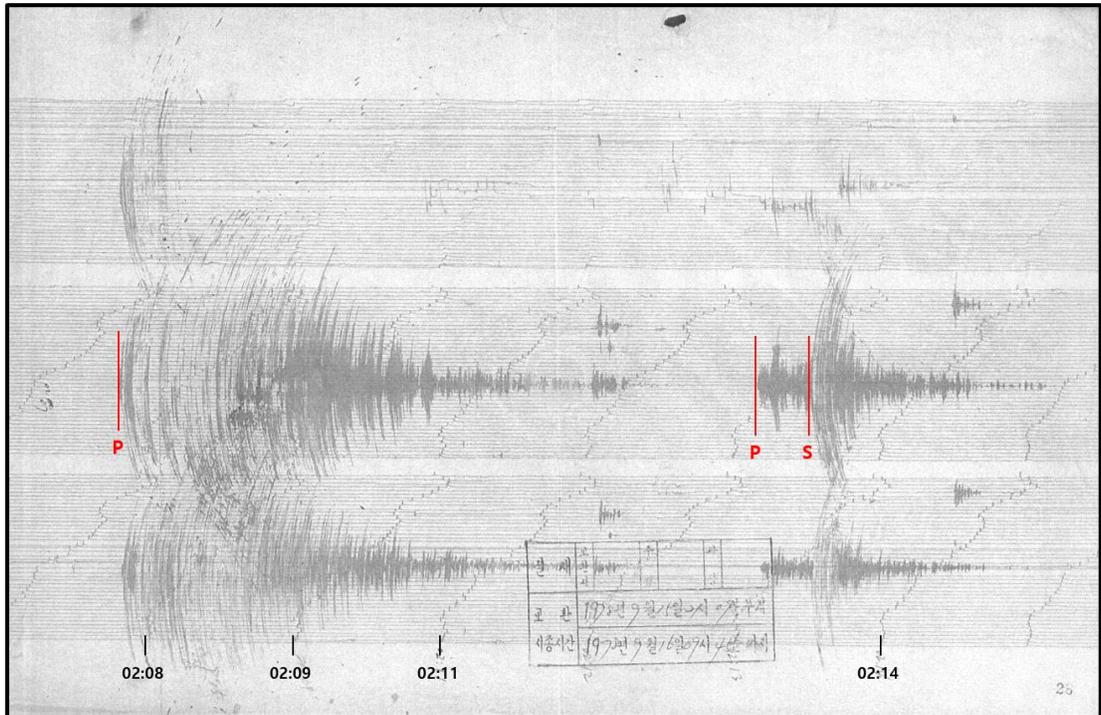


Fig. 14. Seismogram of Mt. Songnisan earthquake observed at 1978 Gwangju analog seismic station. The time was taken from what was recorded on the seismogram. P-wave and S-wave arrival times were determined by reading the waveforms directly.

의 도착 시간을 결정할 수 없기 때문이다. 또한, 2001년 기상청 지진관측보고에 따르면 당시 지진 기록지가 말려있는 드럼 모터의 전원이 일정하지 않아 회전 속도가 불규칙하였으며, 숙련된 전문인력의 부족으로 분석 결과가 적정 수준에 미달했을 것이라 보고된 기록이 있다(KMA, 2001).

파형 비교를 위해 1992년 기상청 지진관측보고에 따른 속리산 지진 발생 당시 광주관측소의 위치(위도 35.10°N 경도 126.53°E)에서 운영되고 있는 기상청 관측소를 찾아보았다. 그러나, 해당 지점에서 운영 중인 관측소를 찾지 못해 과거 지진계 이전 기록을 살펴본 결과 2000년 12월 16일 광주지방기상청 내에 설치되어 있던 지진관측소를 현재 운영되고 있는 KWJ (무등산) 관측소 위치(위도 35.1599°N 경도 126.9910°E)로 이전하였다고 기록되어 있다(KMA, 2001).

지진 파형은 지하 속도구조, 지진파의 전파경로, 관측장비, 관측환경(배경잡음 수준 등)에 영향을 많이 받는다. 일정한 범위에서 지속적으로 발생하는 지진을 한 관측소에서 관측하게 되면 지진파들은 유사한 경로 및 지하 구조를 통과하여 지진계에 도달하며, 지진관측 시 주변 관측환경이 같아 해당 지진들은 유사한 파형을 지니게 된다. 따라서, 관측소의 이전에 의한 관측환경의 변화로 인해 1978년 광주관측소 파형과 현재 운영되고 있는 무등산 관측소에 관측되는 파형의 직접적인 비교가 불가능하였다.

파형의 직접적인 비교를 위해서는 1978년 당시 광주관측소 위치에 지진계를 재설치한 후 속리산 부근에서 발생하는 지진을 관측하여 자료를 확보해야 한다. 해당 방법을 통해 자료를 확보하게 되면 해당 파형들의 직접적인 비교가 가능해지고, 파형의 유사성 및 PS시의 차이를 알 수 있게 되므로 속리산 지진 발생 위치 특정에 오차를 줄일 수 있다.

7. 결론

속리산 지역에서 2007년 1월부터 2021년 4월까지 발생한 지진을 활용하여 지하 단층 구조를 분석하였다. 기상청에서 발표한 119건 지진을 템플릿으로 추가로 274건의 미소지진을 검출하였으며, 총 393건의 지진을 분석에 사용하였다. 검출된 지진을 활용하여 지진 위치 결정을 수행한 결과 연구지역 중부와

남서부에서 지진이 집중적으로 발생하는 것을 확인하였으며, 지하 단층 구조 정밀 분석을 위해 단층면해 분석과 HypoDD를 이용한 지진 위치 재결정을 수행하였다. 정밀 분석 결과 연구지역 중부와 남서부에서 북서-동남동과 동-서 주향의 기존에 알려지지 않은 지하 단층이 존재함을 인지하였다(그림 15).

연구지역 중부의 지진다발지역은 연구지역 동남쪽의 서북서 방향의 단층과 중부의 동-서 방향의 추정 단층의 방향성 또는 연장선과 일치하지만, 지진 발생지역에서는 해당 방향의 단층이 조사된 바가 없다. 따라서, 해당 지역은 단층면해와 지진분포의 주향이 일치하는 서북서-동남동 방향의 지하 단층(blind fault)에서 발생한 것으로 분석된다. 연구지역 남서부의 지진다발지역의 경우 서북서-동남동 방향의 단층면해와 지진분포가 일치하는 경향을 보이나, 단층면해 분석이 가능한 지진의 수가 적어 정확한 단층의 기하를 제시하기에는 어려움이 있다. 따라서, 정밀 분석을 위해 추가적인 자료 수집이 필요하다.

KMA, NEIC와 ISC에서 기록한 속리산 진앙 위치와 지진분포를 같이 도시한 결과 KMA 속리산 진앙 위치 인근에는 현재까지 지진이 관측된 바 없고, NEIC와 ISC 속리산 진앙 위치 인근에서는 미소지진이 지속해서 발생하는 것으로 분석되므로, 속리산 지진은 NEIC와 ISC 발표 진앙 인근에서 발생하였을 것으로 분석된다. 하지만 최근 발생하고 있는 미소지진 현황만으로 1978년 속리산 지진 발생 위치를 특정하기

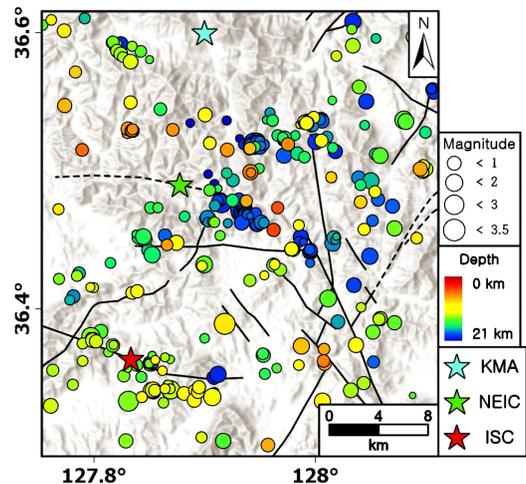


Fig. 15. Comparison of earthquake distribution with mapped faults.

에는 한계가 있다.

최근 속리산에서 발생하고 있는 지진과 1978년 속리산 지진의 파형을 비교하기 위해 당시 운영되던 광주관측소에서 관측한 속리산 지진 기록지를 확보하였다. 직접적인 파형 비교를 위해 광주관측소 위치에서 운영되고 있는 지진관측소를 찾아보았으나, 해당 관측소가 2000년에 이전됨으로 인해 관측환경의 변화로 파형의 비교가 불가능하였다. 따라서, 1978년 광주관측소 위치에 지진관측소를 재설치하여 현재 속리산에서 발생하고 있는 지진의 파형을 1978년 광주관측소 자료와 비교하면 속리산 지진 발생 위치 특성에 오차를 줄일 수 있다.

감사의 글

이 연구는 기상청 한반도 지하 단층-속도구조 통합모델 개발(KMI2022-00910)의 지원으로 수행되었습니다. 두 분 심사위원님의 세심한 검토에 감사드립니다. 주신 의견 덕분에 논문의 질을 높이는 데 많은 도움이 되었습니다. 감사합니다.

REFERENCES

- Alberto, Y., Otsubo, M., Kyokawa, H., Kiyota, T. and Towhata, I., 2018, Reconnaissance of the 2017 Puebla, Mexico earthquake. *Soils and foundations*, 58, 1073-1092.
- Back, J.J., Kyung, J.B. and Choi, H., 2011, Analysis on the Source Characteristics of the Recent Five-year Earthquakes Occurred in the Central and Western Areas of the Korean Peninsula. *Journal of the Korean Earth Science Society*, 32, 161-169 (in Korean with English abstract)
- Beaucé, E., Frank, W.B. and Romanenko, A., 2018, Fast matched filter (FMF): An efficient seismic matched-filter search for both CPU and GPU architectures. *Seismological Research Letters*, 89, 165-172.
- Cheong, T.W., Lee, J.G., Lee, D.K., Lee, E.A. and Kyung, J.B., 2001, Analysis of Fault Plane Solution and Stress Field Using the Micro-earthquakes in the Central Region of South Korea. *Journal of the Korean Earth Science Society*, 22, 292-300 (in Korean with English abstract).
- Geiger, L., 1910, Herbstimmung bei Erdbeben aus den Ankunftszeiten. *K. Gessell. Wiss. Goett.*, 4, 331-349.
- Geiger, L., 1912, Probability method for the determination of earthquake epicenters from the arrival time only. *Bull. St. Louis Univ.*, 8, 60-71.
- 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.
- Gomberg, J., 1991, Seismicity and detection/location threshold in the Southern Great Basin seismic network. *Journal of Geophysical Research*, 96, 16401-16414.
- Han, M., Kim, K.H., Son, M. and Kang, S.Y., 2017, Current microseismicity and generating faults in the Gyeongju area, southeastern Korea. *Tectonophysics*, 694, 414-423.
- Hardebeck, J.L. and Shearer, P.M., 2002, A new method for determining first-motion focal mechanisms. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 92, 2264-2276.
- Hardebeck, J.L. and Shearer, P.M., 2003, Using S/P amplitude ratios to constrain the focal mechanisms of small earthquakes. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 93, 2434-2444.
- Hwang, J.H., Kim, D.H., Choi, D.L. and Song, K.Y., 1996, Geological report of the Andong sheet (1:250,000). Korea Institute of Geology, Mining & Materials, KR-96(S)-1, 67 p (in Korean with English abstract).
- Incorporated Research Institutions for Seismology (IRIS), 2023, https://ds.iris.edu/wilber3/find_stations/197164 (July 6, 2023).
- International Seismological Centre (ISC), 2023, On-line bulletin. <http://www.isc.ac.uk> (July 6, 2023).
- Johnston, A.C., 1996, Seismic moment assessment of earthquakes in stable continental regions-III. New Madrid 1811-1812, Charleston 1886 and Lisbon 1755. *Geophysical Journal International*, 126, 314-344.
- Jun, M.S. and Jeon, J.S., 2010, Focal Mechanism in and around the Korean Peninsula. *Geophysics and Geophysical Exploration*, 13, 198-202 (in Korean with English abstract).
- Korea Meteorological Administration (KMA), 1992, Seismological Bulletin of Korea, 1978-92. Korea Meteorological Administration (KMA), 117 p (in Korean with English abstract).
- Korea Meteorological Administration (KMA), 2001, 1978 ~ 2000 Earthquake Observation Report. Korea Meteorological Administration, 158 p (in Korean with English abstract).
- Kim, K.H., Kim, J., Han, M., Kang, S.Y., Son, M., Kang, T.S., Rhie, J., Kim, Y., Park, Y., Kim, H.J., You, Q. and Hao, T., 2018, Deep fault plane revealed by high-precision locations of early aftershocks following the 12 September 2016 ML 5.8 Gyeongju, Korea, earthquake. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 108, 517-523.
- Kim, K.H. and Park, Y., 2010, The 20 January 2007 ML 4.8 Odaesan earthquake and its implications for regional tectonics in Korea. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 100, 1395-1405.

- Kim, K.H., Rydelek, P.A. and Suk, B.C., 2008, Rapid earthquake location for earthquake early warning. *Journal of the Korean Society of Hazard Mitigation*, 8, 73-79 (in Korean with English abstract).
- Kim, K.H., Ryoo, Y.G., Yu, C.H., Kang, S.Y. and Kim, H.J., 2011, Relocation of Youngduk Offshore Micro-earthquakes. *Geophysics and Geophysical Exploration*, 14, 267-273 (in Korean with English abstract).
- Lahr, J.C., 1999, HYPOELLIPSE: a computer program for determining local earthquake hydrocentral parameters, magnitude, and first motion pattern. Denver, Reston, VA: US Geological Survey, 119 p.
- Lee, W.H.K. and Stewart, S.W., 1981, Principles and applications of microearthquake networks (Vol. 2). Academic press.
- National Earthquake Comprehensive Information System (NECIS), 2023, <https://necis.kma.go.kr> (April 5, 2023).
- Martínez-Garzón, P., Kwiatek, G., Ickrath, M. and Bohnhoff, M., 2014, MSATSI: A MATLAB package for stress inversion combining solid classic methodology, a new simplified user-handling, and a visualization tool. *Seismological Research Letters*, 85, 896-904.
- Park, J.H., 2008, Crustal Velocity Structure of the Southern Korean Peninsula Using 3-D Seismic Tomography, Ph. D. Thesis, Seoul National University, Seoul, Korea, 154 p.
- Pusan National University, 2022, Development of Subsurface Fault Structure Model in the Youngnam Region.
- Reid, H.F., 1910, The California earthquake of April 18, 1906. Report of the state earthquake investigation commission, 2, 16-18.
- Roeslin, S., Huarez-Garcia, H., Elwood, K.J., Dhakal, R.P. and Gómez-Bernal, A., 2020, The September 19th, 2017 Puebla, Mexico earthquake: final report of the New Zealand reconnaissance team. *Bulletin of the New Zealand Society for Earthquake Engineering*, 53, 150-172.
- Waldhauser, F. and Ellsworth, W.L., 2000, A double-difference earthquake location algorithm: Method and application to the northern Hayward fault, California. *Bulletin of the seismological society of America*, 90, 1353-1368.
- Yoon, S., Han, J., Won, D., Kang, S.Y., Ryoo, Y.G. and Kim, K.H., 2019, A Preliminary Study on Micro-earthquakes Occurred from 2010 to 2017 in Busan, Korea. *Journal of the Korean Earth Science Society*, 40, 272-282 (in Korean with English abstract).

Received : September 13, 2023

Revised : October 18, 2023

Accepted : November 22, 2023