



Article

임시지진관측망을 활용한 2022년 괴산지진 감시역량 향상

이은진¹, 김광희^{1,*}, 강수영², 손유진¹

¹부산대학교 지질환경과학과

²부산대학교 지질재해연구소

Improved monitoring of the 2022 Goesan earthquake sequence using a temporary seismic array

Eun Jin Lee¹, Kwang-Hee Kim^{1,*}, Su Young Kang², Yujin Sohn¹

¹Department of Geological Sciences, Pusan National University, Busan 46241, Republic of Korea

²Institute of Geohazard Research, Pusan National University, Busan 46241, Republic of Korea

Received: April 8, 2025 / Revised: June 10, 2025 / Accepted: June 18, 2025

*Corresponding author: +82-51-510-2250 / E-mail: kwanghee@pusan.ac.kr

요약: 고밀도 지진관측망은 특정 지역의 지진 활동을 고해상도로 관측하여 미소지진 탐지, 정밀한 진앙 결정, 단층 구조 해석 등을 통해 지진 발생 메커니즘을 심층적으로 이해하는 데 활용된다. 최근 이러한 고밀도 임시 지진관측망의 중요성과 활용도는 지속적으로 증가하고 있다. 본 연구는 임시 지진관측망 설치 위치의 주변 환경, 장비 구성이 관측 성능에 미치는 영향을 고찰하였다. 우리나라 시간으로 2022년 10월 29일, 충북 괴산 지역에서 발생한 규모 4.1 본진 이후, 진앙 반경 약 8 km 이내에 광대역 1개소와 단주기 8개소로 구성된 임시 관측망을 설치하였다. 이 관측망은 여진 활동 감시 및 미소지진 탐지를 목적으로 운영되었다. 약 2주간 수집된 자료를 수동 분석한 초기 결과에 따르면, 기상청 발표 지진보다 약 11배 많은 총 329개의 지진이 검출되었다. 또한, 파워스펙트럼밀도 분석을 통해 각 관측소의 배경 잡음 수준을 평가하여 관측 환경과 장비 성능을 정량적으로 분석하였다. 여진은 주로 본진 중심 1 km 이내, 깊이 12 - 15 km 범위에서 발생하였으며, 대부분의 지진은 본진 발생 후 4일 이내에 집중되었다. 규모 4.1 본진과 규모 0.8 여진의 초동 극성으로부터 도출된 복합단층면해와 지진 발생 위치 분포를 함께 해석한 결과, 서북서-동남동 방향의 거의 수직인 단층에서 좌수향 주향이동 운동이 발생했음을 나타내며, 이는 기존에 제안된 단층의 기하 및 운동 감각과 대체로 일치한다. 본 연구는 고밀도 지진관측망이 상시 관측망의 한계를 보완하고, 정밀한 지진 발생 위치 및 지하 구조 해석, 지진 위험도 평가 등에 유효한 수단임을 시사한다. 본 초록에서 제시한 결과는 초기 분석에 기반한 것으로, 향후 추가적인 자동 검출 및 상세 분석을 통해 보다 정밀하고 종합적인 결론이 도출될 것으로 기대된다.

주요어: 임시지진관측소, 괴산 지진, 복합단층면해, 미소지진

ABSTRACT: High-density seismic networks enable precise monitoring of seismic activity in specific regions by facilitating the detection of microearthquakes, accurate hypocenter determination, and detailed fault structure analysis. The importance and application of temporary dense arrays have steadily increased in recent years. This study examines how environmental factors, and instrumentation at installation sites affect the performance of temporary seismic networks. Following the M_L 4.1 earthquake that occurred in Goesan, Korea, on October 28, 2022 (UTC) (October 29, 2022, KST), a temporary seismic array comprising one broadband and eight short-period stations was deployed within an ~8 km radius of the epicenter. The network was operated to monitor aftershock activity and detect smaller events. Preliminary results from two weeks of manually reviewed data revealed 329 earthquakes, approximately 11 times more than those reported by the Korea Meteorological Administration. Power spectral density analysis was used to quantify background noise levels at each station and to quantitatively assess both site conditions and instrument performance. The located aftershocks were mostly concentrated within 1 km of the mainshock and at depths of 12 - 15 km, with the majority occurring within four days of the main event. Combined a composite focal mechanism solution, derived from the first-motion polarities of the M_L 4.1 mainshock and M_L 0.8 aftershock, with the spatial distribution of earthquake hypocenters, the analysis indicates left-lateral strike-slip motion on a near-vertical fault striking WNW-ESE, consistent with the previously proposed fault geometry and sense of slip. Taken together, these findings demonstrate that dense seismic networks can effectively complement permanent arrays by enhancing the precision of earthquake location, subsurface structural analysis, and seismic hazard assessment. The results presented

here are based on preliminary analyses, and more refined and comprehensive conclusions are expected through future automated detection and in-depth investigations.

Key words: temporary seismic array, Goesan earthquake, composite focal mechanism, microearthquake

1. 서론

고밀도 임시지진관측망은 큰 규모의 지진 이후 발생하는 여진활동을 정밀하게 관측하기 위한 효과적인 수단으로 널리 활용되고 있다(e.g., Pankow *et al.*, 2020; Han *et al.*, 2021; KMA, 2022; Moretti *et al.*, 2023). 상시 지진관측망은 장기적인 관점에서 광역적인 범위에서 발생하는 지진을 관측하기에 적합하지만, 관측소 간 간격이 비교적 넓어 작은 규모의 지진이나 국지적인 지진활동을 관측하는 데 한계가 있다. 이와 비교하여 임시지진관측망은 연구지역에 고밀도의 관측소를 설치함으로써 작은 규모의 지진 탐지 민감도와 지진 발생 위치 정확도를 크게 향상시킬 수 있다. 또한 여진의 공간적 분포와 단층면의 기하 구조를 상세히 규명하는 데 중요한 역할을 한다. 이러한 관측망은 설치와 운영이 비교적 용이하여, 주요 지진 발생 직후 신속하게 설치하고 운영할 수 있다는 장점이 있다. 또한 임시지진관측망으로부터 확보한 자료는 고해상도의 지진 자료를 획득하기 어려운 상시관측망의 한계를 보완하며, 두 관측망이 상호 보완적으로 운용되는 경우 지진 연구와 위험 평가의 효과를 극대화할 수 있다(e.g., Kim, K.-H. *et al.*, 2016, 2020; Moretti *et al.*, 2023).

국내에서도 임시지진관측망을 활용한 연구가 활발히 진행되고 있다. 2016년 9월 12일 19시 44분 경북 경주시 남남서쪽 8 km 지역에서 규모 5.1 전진을 시작으로 48분 후 규모 5.8 본진이 발생하였고 일주일 후 규모 4.5 여진을 비롯하여 수천회의 여진이 이어졌다(Kim, K.-H. *et al.*, 2016, 2017; Kim, Y.H. *et al.*, 2016; Hong *et al.*, 2017; Woo *et al.*, 2019; Heo *et al.*, 2024). 경주지진 직후 Kim, K.-H. *et al.* (2016)은 여진 관측을 목적으로 광대역 지진계 27개소로 구성된 고밀도 임시지진관측망을 신속하게 설치하였다. 10일 동안 수집한 임시지진관측소 자료를 활용함으로써 여진을 추가적으로 검출하였고 여진 분포와 기존에 알려진 지표 단층과의 관계를 분석하였다. 2017년 규모 5.4 포항 지진은 11월 15일 규모 2.2 전진을 시작으로 1년여의 기간 동안 수 천회의 여진이 잇따랐으며, 1905년 최초의 계기지진 관측 이래 국내에서 가장 큰 인적, 물적 피해를 일으킨 지진이다(Hong *et al.*, 2018; Kim *et al.*, 2018, 2020). Kim *et al.* (2020)은 2017년 4월 15일 포항 지열발전소와 인접한 장소에서 발생한 규모 3.1 지진을 계기로 신뢰성 있는 미소지진 위치 결정을 위해 2017년 11월 10일 8개의 임시 관측소를 설치하였다. 그로부터 5일 후 관측소에서 불과 수

백 미터 내에서 규모 5.4 지진이 발생함에 따라 포항 지역 일대에 관측망을 추가적으로 구성하여 운영하였다. 조밀한 임시지진관측망 자료를 활용하여 여진 검출을 수행하였으며, 정밀한 위치 재결정을 통해 포항 지진이 발생한 지하 단층구조를 도출하였다.

본 연구에서는 임시지진관측망 운영의 효과를 최근 운영 사례를 통해 정량적으로 제시하고, 최적의 자료 생산에 영향을 끼치는 요소를 고찰하였다. 2022년 규모 4.1 지진이 발생한 괴산지역에 고밀도 임시지진관측망을 운영하여 2주 동안 발생한 여진을 관측하였다. 2022년 10월 28일 23시 27분 50초(UTC) 충북 괴산군 북동쪽 11 km 지역에서 규모 4.1 지진이 발생하였다. 해당 지진 발생 16초 전 규모 3.5 전진이 관측되었으며, 2분 후에는 규모 2.2와 규모 2.9 지진이 잇따라 발생하였고 약 2주 동안 26회의 여진이 이어졌다(KMA, 2023). 본진 진앙이 위치한 충북 지역에서는 대부분의 사람들이 지진동을 감지하는 진도 V가 보고되었다. 인접한 경북 지역에서는 IV의 계기진도가 관측되었으며, 강원, 경기, 대전 지역에서는 III의 계기진도가 관측되기도 하였다(KMA, 2023). 괴산지진이 발생한 후 괴산군을 포함한 충북지역에서 85건의 유감신고 및 19건의 재산피해가 접수되었다(MOIS, 2022). 우리나라 역사지진 기록은 2년부터 1904년까지의 기간동안 역사문헌에 기록된 지진으로, 이로부터 계기지진 관측이 시작되기 이전에 연구지역에서 발생한 지진활동에 대해 파악할 수 있다(Lee and Yang, 2006; Kyung *et al.*, 2010). Kyung *et al.* (2010)이 분석한 역사문헌에는 본진 진앙 근처에서 발생한 2회의 지진 기록이 존재한다. 첫번째 지진은 1458년 10월 19일에 발생하였으며, 진도는 IV, 규모는 4.1로 추정하였다. 두번째 지진은 1519년 10월 16일에 발생하였으며, 충주, 괴산 등에 지진이 있었고 집이 모두 올랐다는 기록이 존재하며 진도는 IV, 규모는 4.1로 추정하였다. 현대의 지진계로 지진을 관측하기 시작한 1978년 이후, 본진 진앙 반경 20 km 내 1983년 6월 8일 규모 3.4 지진이 보고된 바 있지만, 이후에는 규모 2.0 이하의 미소지진만 보고되었다(KMA, 2024).

2022 규모 4.1 괴산지진과 관련하여 여러 선행연구가 수행된 바 있다(Hong *et al.*, 2023; Kim *et al.*, 2023; Sheen *et al.*, 2023; Lim *et al.*, 2024). Hong *et al.* (2023)은 정합 필터 방법을 사용하여 196개의 지진을 검출하였으며, 지진 자료와 함께 중력, 자력 등 지구물리학적 방법을 활용하여 괴산지진을 일으킨 단층에 대해 연구를 수행하였다. Kim

et al. (2023)은 기상청 발표 지진과 추가적으로 검출한 30개의 지진에 대해 위치재결정을 수행하였으며, 전진과 본진 그리고 규모 2.9 여진이 거의 평행한 두 개의 단층에서 각각 발생하였음을 제시하였다. Sheen et al. (2023)은 괴산지역의 자료에 심층학습 방법을 적용하여 자동화된 방법으로 4일 동안 50개의 지진을 검출하였으며, 템플릿 매칭 방법을 활용하여 2022년 10월 28일 첫 지진 이후 24시간 동안 총 496개의 지진이 발생하였음을 제시하였다. Lim et al. (2024)은 괴산지진 발생 이후 10 km 반경 내 4개의 광대역 임시관측소를 설치하여 운영하였으며, 42개의 지진을 활용하여 전진-본진-여진의 관계를 분석하였다.

본 연구에서 여진 관측을 목적으로 운영된 임시지진관측망은 본진 진앙을 기준으로 약 8 km 내 설치되었으며, 9개의 관측소로 구성되어 있다. 지진 검출은 임시지진관측소와 상시관측소 자료를 사용하여 수행되었으며, 연구기간 동안 기상청 발표 지진의 11배에 해당하는 총 329회의 지진이 검출되었다. 지진의 초기위치는 지진파의 도착시간으로부터 결정되었으며, 이중차분법을 통해 위치재결정을 수행하여 정밀도 높은 진원 분포를 획득하였다. 규모 4.1 본진은 규모 3.5 전진과 불과 약 16초의 매우 짧은 간격으로 발생하였기 때문에 P파 초동극성을 활용한 단층면해 결정에 어려움이 있음을 고려하여, 본 논문에서는 본진과 임시지진관측망에 기록된 미소지진의 P파 초동극성을 활용하여 복합단층면해를 결정하였다. 또한 동일한 장소에 광대역과 단주기 지진계를 설치하여 지진계 종류에 따른 미소지진 관측역량 차이를 비교하였으며, 배경잡음 수준과 지질특성과 같은 관측소의 주변환경이 미소지진 관측에 미치는 영향에 대해 분석하였다.

2. 연구자료

본 연구에서 여진관측망을 활용한 목적은 지진이 발생하는 지역과 가까운 곳에 관측소를 설치하여 규모가 매우 작은 지진까지 관측하는 것이다. 지진발생지역에 여진관측망을 설치할 때 연구지역에서 발생하는 지진의 위치 및 단층에 대한 정보가 알려져 있는 경우, 지진분포 및 단층을 따라 관측소를 설치하거나 시간에 따른 지진 위치 변화를 고려하여 관측소를 이동하면서 관측하기도 한다(e.g., Yuc et al., 2018; Kim et al., 2020). 하지만, 괴산지역에서 발생한 역사지진 기록과 계기지진 정보만으로 관측소 위치를 선정하기에는 어려움이 있었다. 본 연구에서 설치한 관측망은 상시관측소의 분포를 고려하여 8 km 반경 내 7개의 관측소를 설치하였으며, 본진의 진앙과 가까운 곳에 서로 다른 종류의 지진계로 구성된 2개의 관측소를 추가적으로 설치하였다(그림 2b, 2c). 여진은 시간이 경과하면서 발생 빈도가 급격히 감소하므로, 신속하게 관측망을 설치하여 발생하는 여진을 관측할 필요가 있다(e.g., Omori, 1894). 본진 발생 약 7시간 후인 15시 35분경(KST) 첫번째 관측소가 처음으로 설치되었으며 나머지 8개소는 첫 임시지진관측소 설치 이후 약 3시간 내 모두 설치 완료하였다.

본 연구에서 운영한 임시지진관측망은 광대역 1개소(GE01)와 단주기 8개소(GE02 ~ GE09)로 구성되어 있다(표 1; 그림 2b). 광대역 지진계의 기록계는 Nanometrics사의 Centaur, 센서는 Trillium Compact Posthole이다. 기록계는 24-bit 해상도로, 지진계 센서의 민감도는 1500 V/m/s이며, 샘플링 레이트(sampling rate)는 200 Hz로 설정하였다(Nanometrics, 2023). 단주기 지진계는 기록계-센서 일체형인 SmartSolo

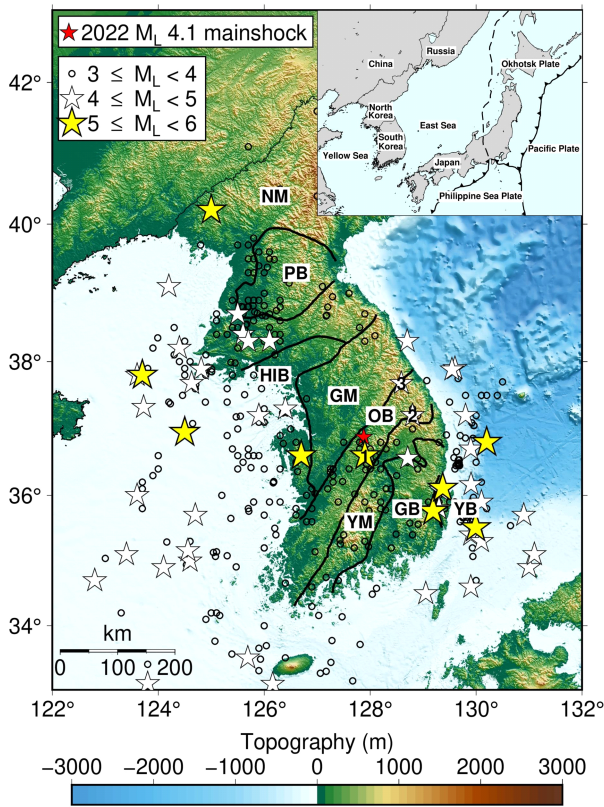


Fig. 1. Topography map (NASA Shuttle Radar Topography Mission, 2013) and major geologic units in Korean Peninsula. Geologic units are shown on a map (Kee et al., 2019). NM: Nangnim Massif; PB: Pyeongnam Basin; HIB: Hongseong-Imgingang Belt; GM: Gyeonggi Massif; OB: Okcheon Belt; YM: Yeongnam Massif; GB: Gyeongsang Basin; YB: Yeonil Basin. Red star represents the 2022 M_L 4.1 Goesan mainshock. The instrumental earthquakes larger than magnitude 5 are denoted as yellow stars. The earthquakes, more than magnitude 4, occurred along the Okcheon Belt are illustrated as text with stars; 1: 1978 M_L 5.2 Songnisan earthquake; 2: 1996 M_L 4.5 Youngwol earthquake; 3: 2007 M_L 4.8 Odaesan earthquake. The inset map represents tectonic boundaries surrounding Korean Peninsula (Bird, 2003).

사의 IGU-16HR 3C이다. 기록계는 32-bit 해상도로, 지진계 센서 민감도는 76.7 V/m/s (SmartSolo, 2022)이며 샘플링 레이트는 250 Hz로 설정하였다. 본 논문에서는 2022년 10월 29일부터 11월 11일까지 약 2주 간의 기상청 상시지진관측소 및 임시지진관측망 자료를 활용하여 지진 감시 능력 향상을 위한 연구를 수행하였다.

3. 연구방법

3.1. 배경잡음

지진관측소의 배경잡음은 관측소에 기록되는 지진자료의 품질에 영향을 줄 수 있다(Bormann, 2012; Molinari *et al.*, 2016; Shin *et al.*, 2019). 특히 잡음의 세기가 신호의 세기보다 큰 경우에는 미소지진이 검출 과정에서 탐지되지 않을 가능성이 높다. 따라서 관측소의 배경잡음 수준과 공간적, 시간적인 변화를 파악함으로써 이러한 특성이 지진관측 역량에 끼치는 영향에 대해 파악하는 것이 중요하다. 본

연구에서는 2022년 10월 29일부터 14일 간 기록된 임시지진관측소에 대한 배경잡음수준을 분석하였으며, McNamara and Buland (2004)에서 제안한 확률밀도함수(PDF; probability density function)를 활용한 파워스펙트럼밀도(PSD; power spectral density) 방법을 적용하였다. 프로그램은 Krischer *et al.* (2015)의 파이썬 소프트웨어 패키지 ObsPy를 활용하였다. 연속파형자료의 길이는 1일(24시간)이며, 이를 1시간(3600초) 단위로 분석하였다. PSD 계산을 수행하기 전, Fast Fourier Transform (FFT) 과정에서 왜곡을 방지하기 위해 자료의 양쪽 10%에 해당하는 구간에 cosine taper 함수를 적용하였다(e.g., McNamara and Buland, 2004; Sheen *et al.*, 2009). 14일의 연속파형자료를 50%씩 중첩하고 1시간 단위로 분할하여 각 관측소당 671개의 PSD를 획득하였다. 그리고 1시간 단위의 자료를 75%씩 중첩하여 13개 분절로 나누고 이 분절들을 평균함으로써 1시간에 해당하는 자료의 PSD를 생성하였다. Peterson (1993)의 New Low Noise Model (NLNM), New High Noise Model (NHNM)

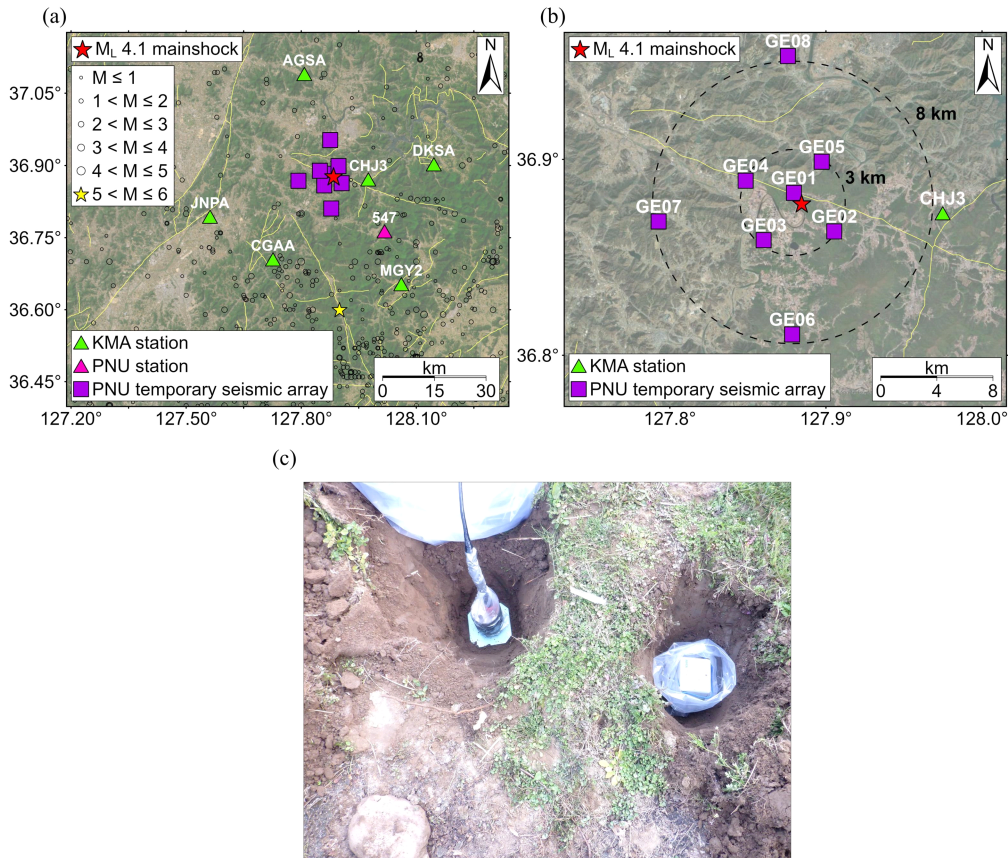


Fig. 2. (a) The distribution of stations and the instrumental earthquakes since 1978. The yellow star is 1978 M_L 5.2 Songnisan earthquake. (b) Geographical distribution of Pusan National University Geophysics Laboratory (PNUGL) temporary seismic array. The location of the M_L 4.1 Goesan earthquake is denoted as red star. The yellow line indicates the surface fault. Stations are located within 3 and 8 km of the epicenter (black dash circles). (c) The station site near the mainshock epicenter. Left: station GE01 equipped with broadband seismometer, right: station GE09 equipped with short-period seismometer.

Table 1. Information for temporary and permanent stations which is utilized to detect aftershocks. PNUGL: Pusan National University Geophysics Laboratory, KMA: Korea Meteorological Administration.

Station	Latitude (°N)	Longitude (°E)	Elevation (m)	Network	Seismometer
GE01	36.8829	127.8795	94	PNUGL	Broadband
GE02	36.8632	127.9053	143	PNUGL	
GE03	36.8588	127.8601	156	PNUGL	
GE04	36.8891	127.8485	126	PNUGL	
GE05	36.8988	127.8973	122	PNUGL	
GE06	36.8106	127.8783	186	PNUGL	
GE07	36.8683	127.7928	229	PNUGL	
GE08	36.9527	127.8756	141	PNUGL	
GE09	36.8829	127.8795	94	PNUGL	
547	36.7652	128.0172	318	PNUGL	Short-period
AGSA	37.0917	127.8081	104	KMA	
CGAA	36.7069	127.7262	230	KMA	
DKSA	36.9044	128.1455	325	KMA	
JNPA	36.7956	127.5620	126	KMA	
CHJ3	36.8730	127.9748	247	KMA	
MGY2	36.6538	128.0608	217	KMA	

과 비교를 위해 속도 자료를 가속도 자료로 변환하였으며, PSD를 응답함수로 나누어 계기보정을 수행하였다. 이후 1 시간 단위의 PSD를 1 dB 간격으로 주기마다 누적함으로써 PDF를 결정하여 이를 주기에 따른 PSD의 분포로 도시하였다. 관측대역을 고려하여 광대역 지진계는 0.02 - 120 초, 단주기 지진계는 0.02 - 0.5초에 해당하는 구간을 설정하였다. 또한 각 주기에서 가장 높은 확률을 나타내는 PSD 값을 최빈값으로 나타내었다.

3.2. 지진 검출과 위치 및 규모 결정

표 1의 임시지진관측소와 기상청 상시관측소의 연속파형자료 수동검토를 통해 최소 4개의 관측소에서 P파와 S파가 확인되는 이벤트에 대해 지진으로 검출하였다. 약 2주간 동안 기상청에서 발표한 지진을 포함하여 총 329건의 지진을 검출하였으며, HYPOELLIPSE (Lahr, 1999)를 활용하여 초기위치를 결정하였다. 이때, 속도모델은 전지구 속도모델 IASP91 (Kennett and Engdahl, 1991)를 한반도에 맞게 수정한 모델을 사용하였다(Park, 2008). 본 연구에서 검출한 지진의 정밀한 진원위치 결정을 위해 한 관측소에 기록된 인접한 두 지진의 주행시간과 이론적인 주행시간 차이(double-difference)를 활용하여 지진 간의 상대적인 위치를 결정하는 HypoDD 소프트웨어 프로그램(Waldhauser and Ellsworth, 2000)을 적용하였다(e.g., Woo *et al.*, 2016; Son *et al.*, 2022). 위치재결정된 이벤트의 규모를 결정하기 위해 규모와 진폭비의 관계를 나타내는 식 1을 활용하였다.

본 연구에서 타겟 이벤트는 규모를 결정하고자 하는 이벤트이며, 레퍼런스 이벤트는 기상청에서 발표한 이벤트를 의미한다. 타겟 이벤트의 상대규모(M_2)는 레퍼런스 이벤트의 규모(M_1)와 최대진폭(A_1)과 타겟 이벤트의 최대진폭(A_2)의 관계로부터 계산되며, 레퍼런스 이벤트와 타겟 이벤트 쌍(pair)은 파형유사성을 기준으로 선정하였다.

$$M_2 = M_1 + \log\left(\frac{A_2}{A_1}\right) \# \tag{1}$$

3.3. 단층면해

괴산 지진이 발생한 단층의 기하와 운동감각을 분석하기 위해, 규모 2 이상 지진에 대해 P파 초동극성(first-motion polarity)을 활용하여 단층면해를 결정하였다. 규모 3.5 전진과 2022년 11월 1일에 발생한 규모 2.9 여진은 각각 122개, 57개 관측소의 P파 초동극성을 활용하여 단층면해를 결정할 수 있었다. 하지만 본진은 전진과 16초 간격으로 발생하였고 본진의 P파가 전진의 코다파와 겹치게 되어 많은 관측소의 P파 초동을 활용하지 못하였다. 또한 지진 발생 당시, 본진 진앙 주변 관측소의 분포가 고르지 못하여 단층면해에 대해 높은 불확실성이 존재하였다. 따라서 근 거리에 위치한 임시지진관측소에 기록된 미소지진과 본진의 복합단층면해를 결정하였다.

복합단층면해는 P파 초동극성을 활용할 수 있는 관측소

수가 적거나 관측소의 분포가 고르지 못한 경우, 비슷한 위치에서 발생한 여러 개의 지진을 하나의 지진으로 간주하여 결정한 하나의 단층면해를 의미한다(Lee and Chung, 1999; Kyung *et al.*, 2001; Zhang and Eaton, 2018). Lee and Chung (1999)은 양산단층 지역에서 발생한 9개의 미소지진에 대해 복합단층면해를 구하였으며, 이로부터 단층면해가 북북동-남남서 방향의 선구조와 일치하며 동북동-서남서 방향의 응력 주압축방향 또한 한반도에서 발생한 지진과 유사함을 확인하였다. Kyung *et al.* (2001)은 중부 지역의 관측망에 기록된 13개의 지진을 5개의 그룹으로 구분하여 P파 초동을 활용한 복합단층면해를 결정하였으며, 이로부터 해당지진을 발생시킨 단층운동의 주응력장과 한국에서 발생하는 주요지진으로부터 도출된 주응력장이 유사함을 확인하였다.

본 연구에서는 본진과 미소지진의 P파 초동극성을 활용하여 복합단층면해를 결정하였다. 이때, 미소지진의 조건은 본진과 인접하며, 같은 단층, 즉 유사한 메커니즘에서 발생한 지진이어야 한다. 미소지진은 본진과의 짧은 이격거리와 수직성분에서의 상호상관계수를 활용한 파형유사성(0.86)을 고려하여 2022년 11월 01일 02시 35분 17초(UTC)에 발생한 규모 0.8 지진으로 선정하였다(그림 3). 단층면해를 결정하기 위해 Hardebeck and Shearer (2002)의 HASH 프로그램을 활용하였다. HASH는 진원, 속도모델 및 관측소의 P파 초동 극성 등 정보가 주어지면 격자 탐색(grid search)을 통해 가능한 해를 찾고 평균 제곱근오차(root mean square difference)와 관측소 분포 비율(station distribution ratio) 그리고 P파 초동 극성의 오차를 활용하여 최적의 단층면해를 제시하는 프로그램이다. 단층면해 결정 과정에서는 지진 위치 결정 과정과 동일한 속도모델을 적용하였으며, 격자 탐색 간격은 5°로 설정하여 수행하였다(e.g., Hardebeck and

Shearer, 2002; Katsumata *et al.*, 2010; Lin and Okubo, 2016).

4. 결과

그림 4는 확률밀도함수를 활용하여 임시지진관측소 배경잡음을 나타낸 것이다. GE01은 광대역 지진계이며, 0.02 - 120초 구간의 주기를 분석하였다. GE02 ~ GE09는 단주기 지진계로, 지진계의 고유주파수를 고려하여 0.02 - 0.5초 구간의 주기를 분석하였다. 임시지진관측소의 배경잡음 수준은 전체적으로 Peterson (1993)의 NLNM과 NHNM 사이에 분포하고 있다. 수평성분과 수직성분을 비교하였을 때, GE01과 GE09에서는 수평성분보다 수직성분의 배경잡음이 낮게 나타났으며, 다른 관측소들은 큰 차이를 보이지 않았다. 규모가 작으며 비교적 근거리에서 관측한 지진 신호는 2-10 Hz 주파수 대역에서 의미있는 신호가 관측되는 것으로 알려져 있다(e.g., Demuth *et al.*, 2016). 수직성분의 0.1-0.5초 주기에서, GE01의 배경잡음 수준은 -148 ~ -123 dB 범위에 분포한다(그림 4a). 같은 장소에 설치된 GE09의 배경잡음 수준은 -136 ~ -117 dB 범위에 분포한다(그림 4b). GE04는 GE09와 비슷한, -138 ~ -118 dB 범위의 배경잡음 수준을 보인다(그림 4c). 동일 주기에서 GE03과 GE07은 약 -142 ~ -137 dB 범위의 배경잡음 수준을 보이며, 이는 다른 관측소에 비해 약 20 dB 낮은 수준이다(그림 4d, 4e).

기상청에 따르면 3회의 전진을 포함하여 2주동안 총 30회의 지진이 보고되었다(KMA, 2023). 본 연구에서는 동일 기간에 대해 임시지진관측소와 상시관측소 자료를 활용하여 기상청 발표 지진 30건을 포함하여 총 329회의 지진을 검출하였다. 지진의 초기위치 결정 결과, 지표단층을 따라 지진이 분포하는 경향을 보였으나 뚜렷한 단층 구조를 관

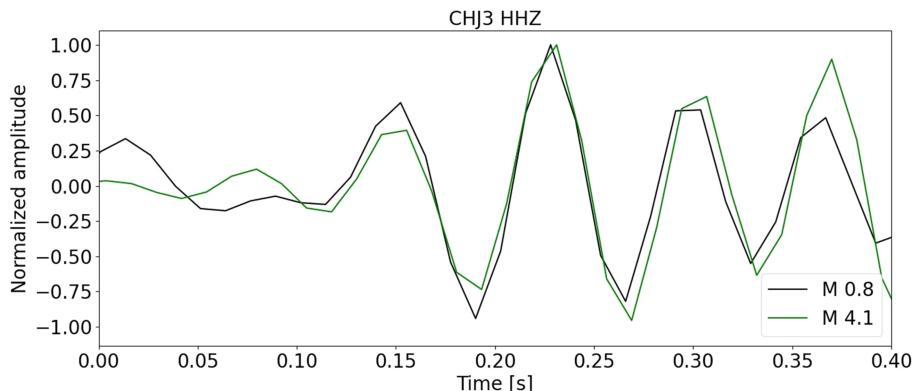


Fig. 3. The waveforms of the M_L 4.1 mainshock (green) and the M_L 0.8 aftershock (black) recorded at permanent station CHJ3. All waveforms are filtered at 10-20 Hz and normalized. Two events are used to determine a composite focal mechanism in figure 7. The cross-correlation coefficient of two events is 0.86. It indicates that two events have high similarity and occur in similar mechanism.

찰하기에는 다소 분산된 분포를 보였다(그림 5a-c). 이에 이중차분법을 활용하여 총 305개 지진에 대해 정밀위치 재결정을 수행하였다. 그림 5d는 재결정된 지진의 분포이며, 그림 5e와 5f는 단면 A-A와 B-B를 나타낸다. 대부분의 지진은 본진 진앙으로부터 반경 1 km 내에서 발생하였고 지표의 단층선을 따라 분포하고 있다(그림 5d). 또한 단면 A-A와 B-B에서 진원은 주로 12 ~ 14 km 깊이에서 발생했음을 알 수 있다(그림 5e, 5f).

상대규모가 결정된 지진은 총 154개로, 그 중 115개는 규모 0.5 이하의 미소지진이다. 가장 규모가 작은 지진은 2022년 11월 2일 11시 31분 26초에 발생한 규모 -2.04 지진이다(그림 6a-c). 그림 6c는 9개의 임시지진관측소와 상시관측소 CHJ3에 기록된 규모 -2.04 지진의 수직성분 파형을 나타낸다. 해당 이벤트의 P파는 GE03에서 약 1초경에 관측되며, GE07과 GE08에서도 약 1.3초, 1.4초에 관측된다. GE01과 GE04, GE09의 파형에서는 지진파를 확인하기 어려우며, GE02, GE05, GE06, CHJ3의 파형에서 P파는 잡음으로 인해 관측이 어려우며, 상대적으로 진폭이 큰 S파는 관측되지만, 도착시간을 결정하는 데에는 어려움

이 있다. 그림 6d의 시간-규모 그래프를 통해 10월 28일에는 규모 1.6, 1.3을 시작으로 규모 3.5 전진과 규모 4.1 본진이 연달아 발생하였음을 알 수 있다. 본진 직후에는 규모 2.9 여진이 발생하였으며, 이후 11월 1일 같은 규모의 여진이 발생하기까지 총 168회의 지진이 발생하였다. 이후에는 시간이 지날수록 1일 여진 발생 횟수가 감소하는 경향을 보인다.

지진이 발생한 단층의 기하와 운동을 해석하기 위해 3개 지진에 대해 단층면해를 결정하였다. 그림 7a, 7b는 본진과 미소지진이 기록된 각 관측소를 진원구(focal sphere)에 도시한 것이며, 그림 7c는 본진과 미소지진의 복합단층면해이다. 복합단층면해는 서북서-동남동 방향(주향 103°, 경사 78°, 면선각 23°) 또는 북북동-남남서 방향(주향 9°, 경사 68°, 면선각 168°)의 주향이동단층 운동을 나타낸다. 규모 3.5 전진의 단층면해는 서북서-동남동 방향(주향 105°, 경사 82°, 면선각 -3°) 또는 북북동-남남서 방향(주향 197°, 경사 87°, 면선각 -173°), 규모 2.9 여진의 단층면해는 서북서-동남동 방향(주향 106°, 경사 62°, 면선각 -14°) 또는 북북동-남남서 방향(주향 203°, 경사 77°, 면선각 -153°)으로

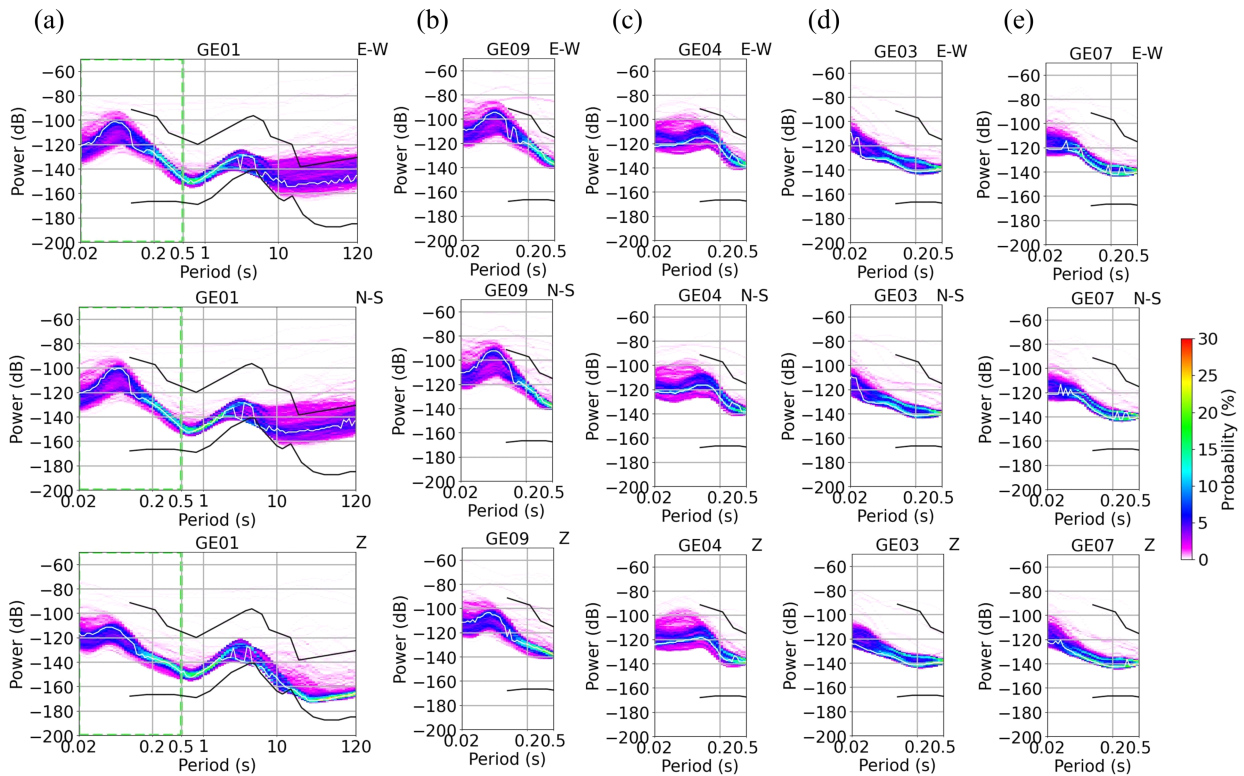


Fig. 4. Power Spectral Density (PSD) plot for temporary seismic stations. (a) broadband seismometer. (b), (c), (d), (e) short-period seismometers. The upper and lower black line represents NHNM and NLNM suggested by Peterson (1993), respectively. The period range of short-period seismometers is between 0.02 and 0.5 seconds, considering its natural frequency (green box). White line is the mode value of PSD. The color bar shows the probability of background noise at each period. The network and channel of station are given at the top in each figure.

결정되었다(표 2). 두 단층면해 또한 복합단층면해와 같은 주향이동단층 운동을 나타낸다. 단층면해를 비교하면, 주향은 비슷하지만 경사는 $62^\circ \sim 82^\circ$, 면선각은 $-14^\circ \sim 23^\circ$ 의 범위를 보이며, 특히 여진 단층면해의 경사는 그림 5f의 단면 B-B에서의 진원 분포와 상이하게 나타났다.

5. 토 의

5.1. 미소지진 관측에 영향을 주는 요소

5.1.1. 광대역과 단주기 지진계

본 연구에서 활용한 단주기 지진계는 기록계와 센서가

일체형으로 구성되어 있으며, 지표 아래 간단하게 설치할 수 있다(SmartSolo, 2022). 또한 광대역 지진계에 비해 비용이 저렴하며, 배터리 교체 없이 약 3주동안 사용할 수 있어 많은 수의 관측소로 구성된 고밀도 지진관측망을 구성하기에 적합하다. 지진이 발생하는 지역과 가까운 곳에서 미소지진을 관측하기 위한 목적으로 한 괴산 임시지진관측망은 9개소 중 1개소는 광대역 지진계로, 나머지 8개소는 단주기 지진계로 구성되어 있다. 단주기 지진계의 관측 역량은 이 지역에서의 미소지진 관측에 중요한 역할을 할 수 있다. 진앙으로부터 가장 가까운 장소에 광대역 지진계(GE01),

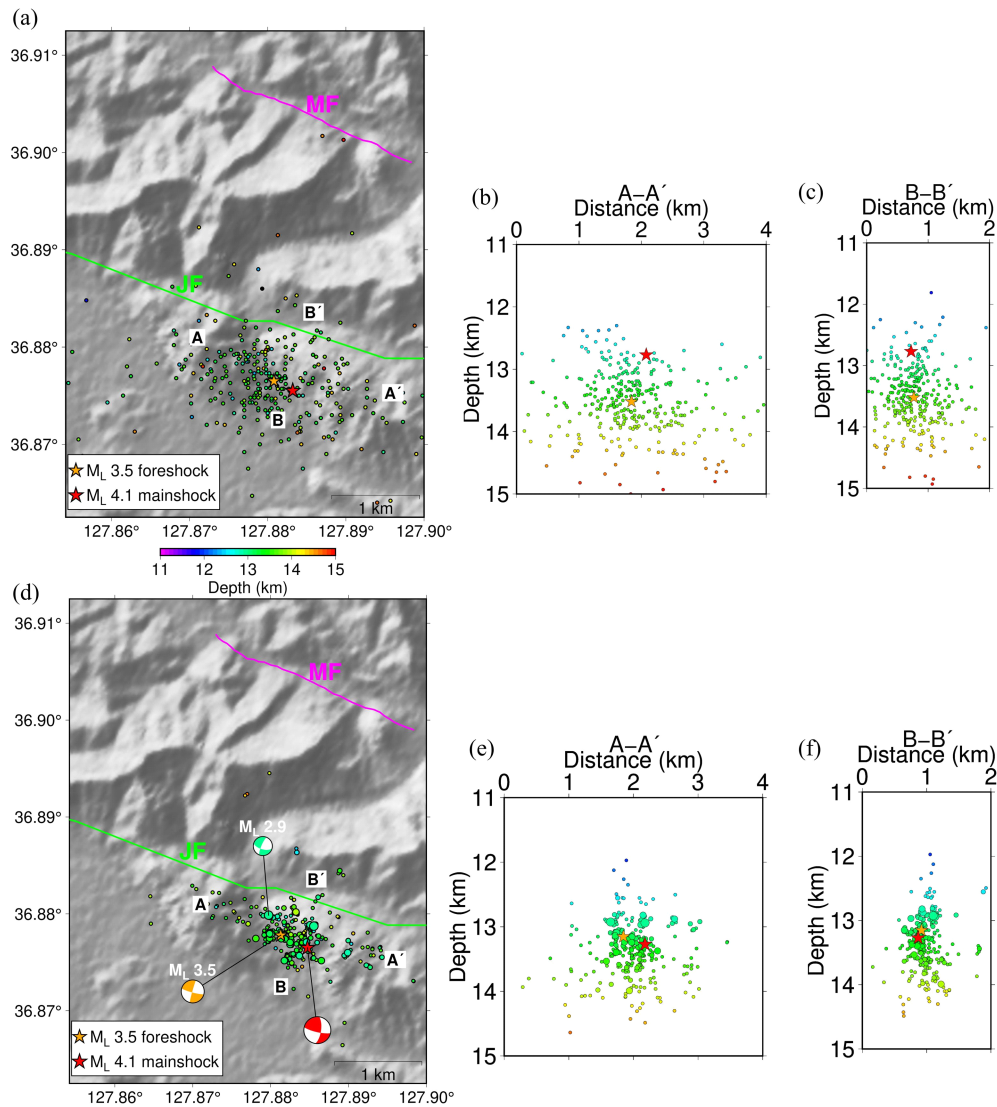


Fig. 5. (a) The initial location of earthquakes using HYPOELLIPSE. (b) Cross sections along A-A (c) B-B in (a). (d) The relocated hypocenters and two focal mechanism solutions (the M_L 3.5 foreshock, the M_L 2.9 aftershock occurred on 1, November) and composite focal mechanism. (e) Cross sections along A-A in (d). (f) Cross sections along B-B in (d). MF: Maesan Fault; JF: Jogok Fault. Red and orange stars are illustrated as the mainshock and the M_L 3.5 foreshock. Respectively. The location of microearthquake used for composite focal mechanism solution is not represented in this map, owing to close distance from the main earthquake. The size and color of dots in (a) and (d) differ by magnitude and depth.

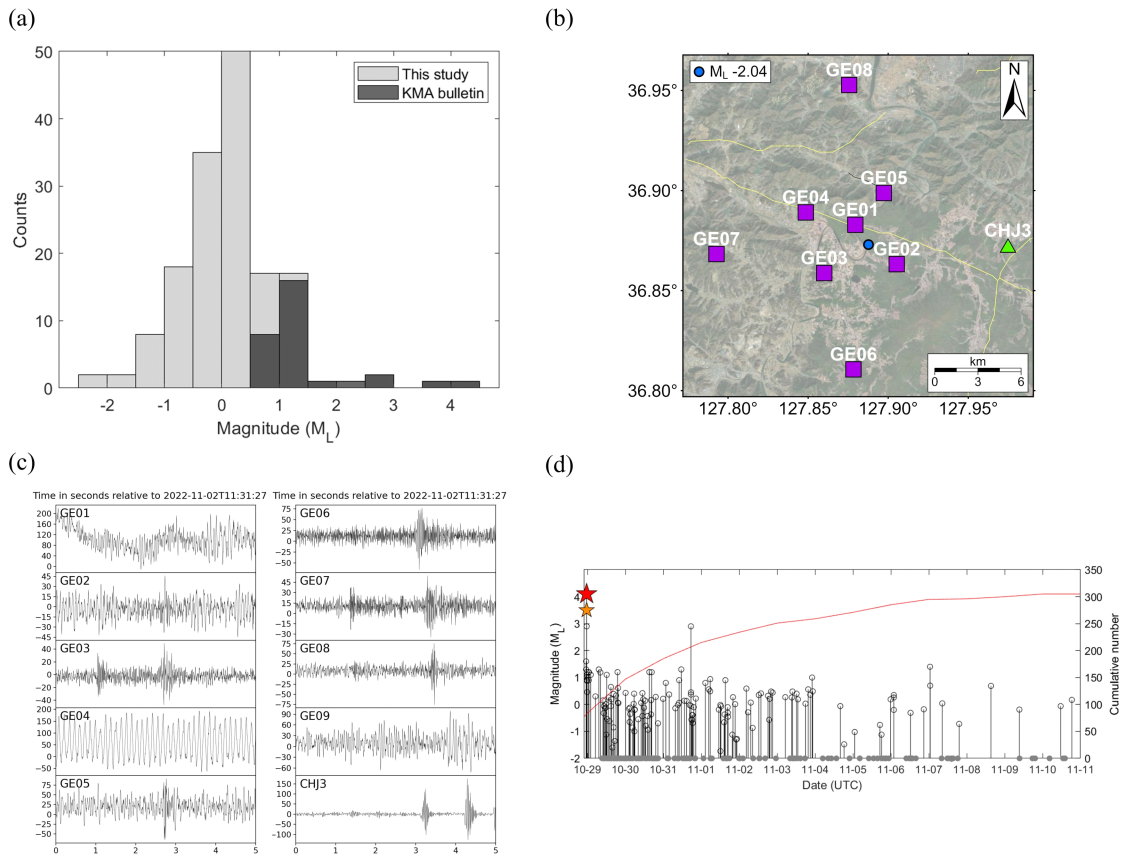


Fig. 6. (a) Magnitude-frequency histogram of the events from the KMA bulletin (dark gray) and this study (light gray). (b) the location of an event with magnitude -2.04 (blue dot). This event occurred on November 2, 2022 at 11:31:26 UTC. (c) Vertical-component waveforms of a M_L -2.04 event recorded at temporary seismic stations (GE01-GE09) and permanent station CHJ3. All waveforms are detrended. (d) The plot for magnitude of Goesan earthquake sequence during the 14 days. Red and orange star represent the mainshock and the largest foreshock, respectively. Gray dots represent events whose magnitudes are not determined. Red solid line is illustrated as cumulative number for events.

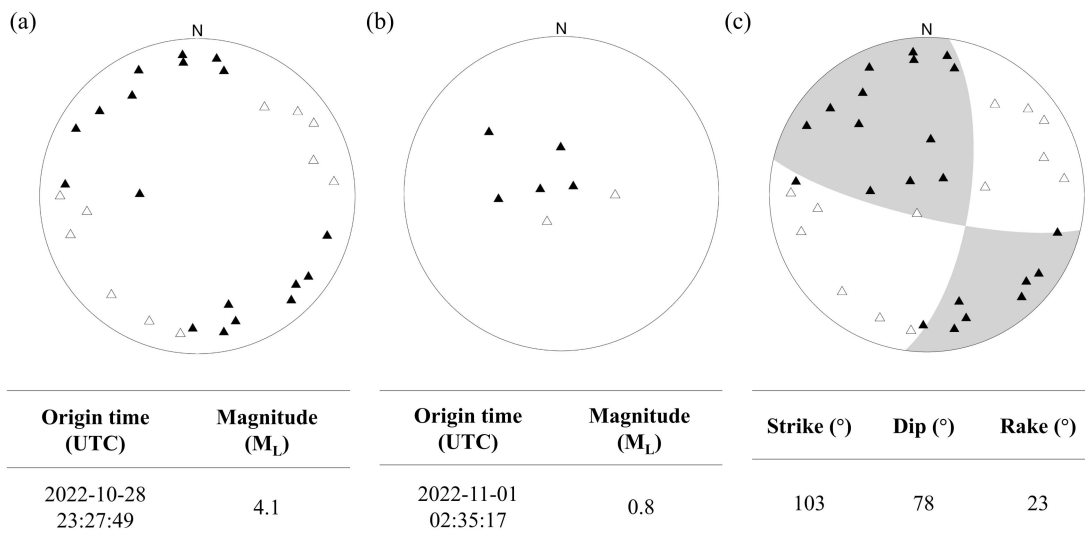


Fig. 7. Focal spheres for (a) mainshock (b) microearthquake and (c) the result of composite focal mechanism solution. The P-wave first motion polarities (up, down) of stations are marked as black and white triangles.

Table 2. Focal mechanism solutions of the M_L 3.5 foreshock and the M_L 2.9 aftershock.

	Strike (°)	Dip (°)	Rake (°)
The M_L 3.5 foreshock	105	82	-3
The M_L 2.9 aftershock	106	62	-14

단주기 지진계(GE09)를 설치하였으며(그림 2c), 각 지진계의 배경잡음 수준과 파형의 유사성 분석을 통해 미소지진 관측역량을 비교하였다.

GE01과 GE09의 배경잡음 수준은 모두 수평성분보다 수직성분에서 낮게 나타나는 특성을 보였으며, 동일 주기에서 두 관측장비의 배경잡음 수준은 약 10 dB 차이를 보였다(그림 3a, 3b). 두 관측소는 동일한 장소에 위치하므로 배경잡음 수준 차이는 광대역과 단주기 지진계 장비의 영향인 것으로 판단된다. 그림 8은 GE01과 GE09에 기록된 2022년 10월 29일 19시 02분 27초(UTC)에 발생한 규모 1.2 지진의 파형을 나타낸다. 해당 지진은 깊이 약 14 km에서 발생하였으며, 두 관측소와 진앙 간의 거리는 약 0.45 km이다. 그림 8a의 수직성분에서 지진 발생 약 1초 후 P파가 관찰되며, 그림 8b와 8c의 수평성분에서 P파 도착 약 1.6초 후 S파를 확인할 수 있다. P파 도착 1초 전후의 잡음과 신호의 비 GE01과 GE09의 신호대잡음비는 각각 26.2 dB, 23.8 dB로 나타났다. GE01과 GE09에 기록된 파형의 유사성을 비교하기 위해 GE09의 파형은 250 Hz에서 200 Hz로 리샘플링(resampling)하였으며, 모든 파형에 대해 5-20 Hz 대역필터(bandpass filter)를 적용하였다. GE01과 GE09의 수직성분 파형유사성은 0.92, 수평성분(E-W, N-S) 파형 유사성은 각각 0.89, 0.87로 두 관측소에 기록된 3성분 파형이 매우 유사하게 나타났다(그림 8a-c). 두 관측소에 기록된 지진 파형의 신호대잡음비와 3성분 파형 유사성을 고려하였을 때, 미소지진을 관측함에 있어 단주기 지진계는 광대역 지진계와 큰 차이를 보이지 않는 것을 알 수 있다. 이는 단주기 지진계 또한 근거리 지진 관측 및 분석을 목적으로 충분히 활용될 수 있음을 시사한다.

5.1.2. 배경잡음

GE03과 GE07의 배경잡음은 0.1 - 0.5초 주기에서 다른 관측소에 비해 낮은 배경잡음 수준인 약 -142 ~ -137 dB 범위에서 분포하고 있다. 0.1 - 1초 주기대역에서 배경잡음 수준은 주로 인간활동에 의해 영향(e.g., McNamara and Buland, 2004; Anthony *et al.*, 2022)을 받는 것을 고려할 때, 인적이 드문 산 속에 위치한 두 관측소는 주변환경에 의한 잡음의 영향이 상대적으로 적어 다른 관측소와 비교하여 낮은 배경잡음 수준을 보인 것으로 판단된다(그림 3d, 3e). 반면, GE09의 배경잡음은 0.1 - 0.5초 주기에서 가장 조용한 관측소인 GE03 및 GE07과 비교하여 최대 약 30 dB 높은 배

경잡음을 보였으며, GE04의 배경잡음 또한 가장 조용한 관측소 GE03 및 GE07과 비교하여 0.1 - 0.5초 주기에서 약 10 dB 정도 높게 나타났다. 지진 발생 당시, GE04가 설치된 장소는 공장으로부터 200 m 내 위치하고 있었으며, GE09가 설치된 장소는 과수원으로 운영 중이었음을 고려할 때, 두 관측소의 배경잡음 수준은 관측소 인근의 산업 및 인간활동에 의한 영향으로 판단된다.

배경잡음 수준이 미소지진 관측역량에 미치는 영향을 파악하기 위해 2022년 11월 5일 23시 49분 51초(UTC)에 발생한 규모 0.19 지진의 파형을 예시로 하여 분석하였다. GE09는 진앙으로부터 가장 가까운 곳에 위치하며, GE07은 진앙으로부터 가장 먼, 약 7 km 떨어진 곳에 위치한다(그림 9a). GE09, GE03, GE04의 진원거리는 약 13.7 ~ 13.9 km이며, GE07의 진원거리는 약 15.51 km이다(그림 9b-e). GE03에 기록된 미소지진 파형은 0.7초와 2.4초에서 P파와 S파의 도착을 확인할 수 있다(그림 9b). GE07의 미소지진 파형 또한 1초와 2.8초에 P파와 S파의 도착을 관찰할 수 있다(그림 9c). 그러나 GE03과 비슷한 진원거리를 갖는 GE04와 GE09의 파형에서는 잡음으로 인해 지진파 신호를 확인하는 것이 어렵다(그림 9d, 9e). 결과적으로, 네 관측소 중 가장 진원거리가 짧은 GE09와 GE03과 진원거리가 유사한 GE04에서는 지진파 신호를 관측하는 것이 어려웠으며, 이는 두 관측소가 주변의 산업 및 인간활동으로 인해 높은 배경잡음 수준을 갖기 때문으로 판단된다. 따라서 배경잡음 수준은 미소지진 관측 역량에 영향을 끼치며, 관측소 설치 시 고려해야할 요소 중 하나이다.

5.2. 전진-본진-여진 특성

큰 규모의 지진이 발생하기 전에는 상대적으로 규모가 작은 지진이 관측되며, 이 경우에는 앞서 발생한 지진을 전진, 이후에 발생한 큰 규모의 지진을 본진이라고 한다(e.g., Mogi, 1963). 그리고 큰 규모의 지진 이후 규모가 상대적으로 작으며, 본진이 발생한 곳에서 일어나는 지진을 여진이라고 한다(e.g., Yabe and Ide, 2018). 2016년 경주지진과 2017년 포항지진에서도 전진-본진-여진의 특징을 확인할 수 있다. 2016년 경주지역에서 규모 5.1 전진을 동반한 규모 5.8 본진 이후, 10일동안 수백회의 여진이 관측되기도 하였다(Kim, K.-H. *et al.*, 2016, 2018). 2017년 포항지진은 규모 5.4 본진이 발생하기 7분 전 규모 2.2와 2.6의 전진이 관측되었으며, 약 10개월의 기간동안 3,101개의 여진이

발생하였다(Kim *et al.*, 2020).

괴산지역에서 발생한 지진 또한 이와 같은 특징을 확인할 수 있다. 상시관측소와 임시지진관측소 자료를 함께 활

용하여 지진을 검출한 결과, 본진 이후 약 2주동안 기상청 발표 지진의 약 11배에 해당하는 총 326회의 여진이 검출되었다. 그림 6a는 연구기간 동안 발생한 여진의 시간에 따

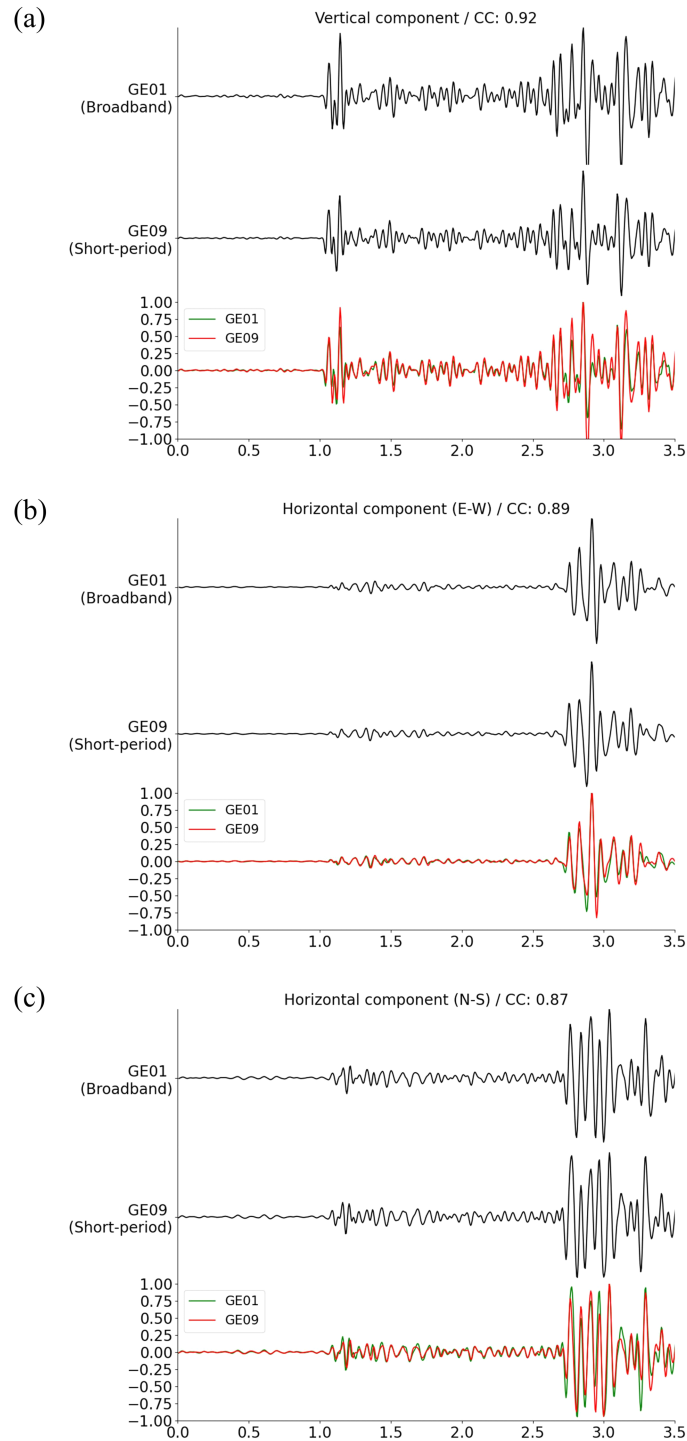


Fig. 8. Waveforms of the M_L 1.2 event recorded at GE01 and GE09. This event occurred on October 29, 2022 at 19:02:27 UTC. The third row in (a) - (c) is overlapped waveforms of GE01 (green) and GE09 (red). All waveforms are filtered at 5-20 Hz. The channel and cross-correlation coefficient (CC) are given at upper center in each figure. (a) Vertical component (b) Horizontal component (E-W) component (c) Horizontal component (N-S).

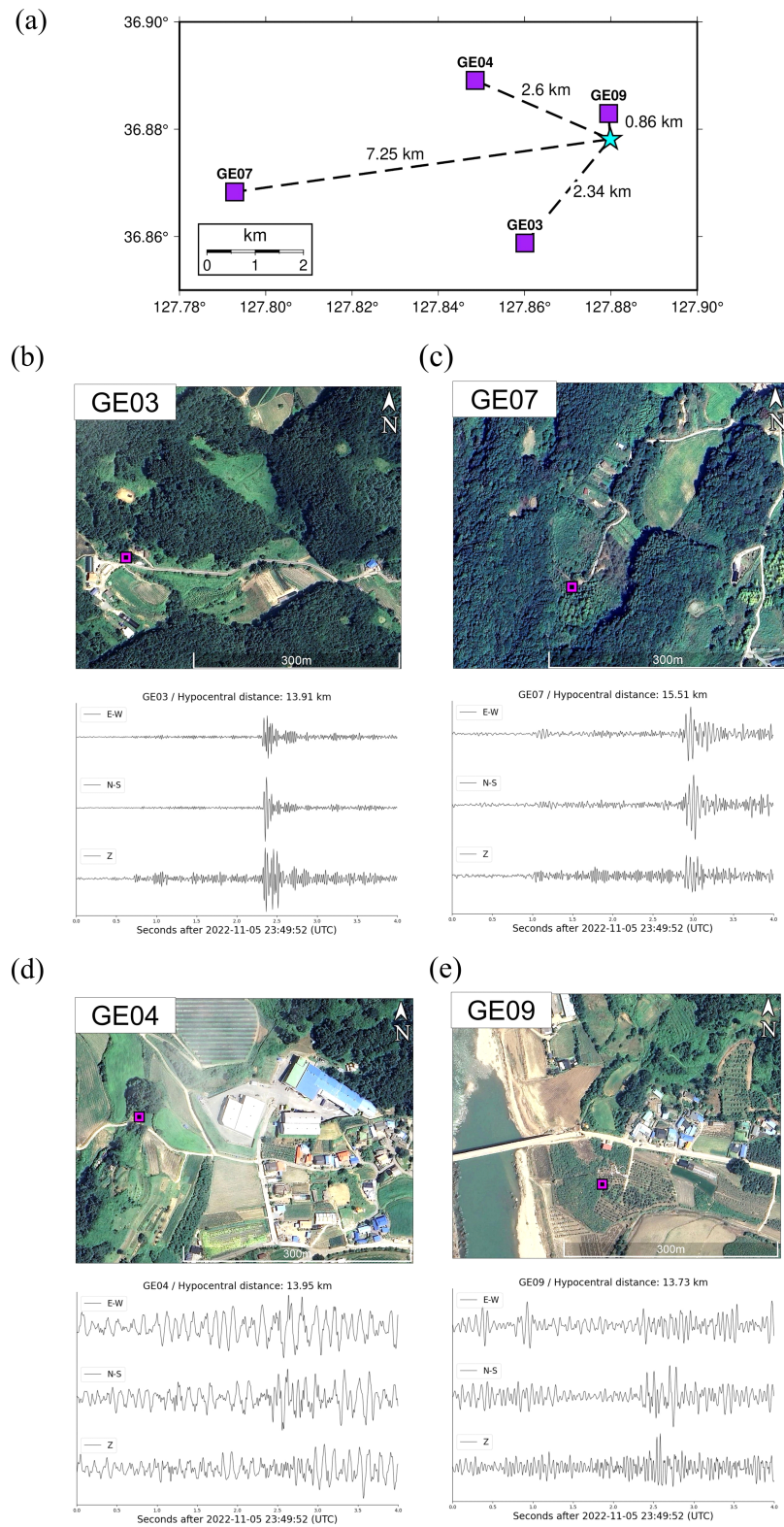


Fig. 9. Map-view for temporary seismic stations and three-component waveforms of microearthquake recorded at each station. (a) Map showing the epicentral distance of each seismic station. The cyan star is illustrated as an event with magnitude 0.19 occurred on November 6, 2022 at 23:49:51 UTC. (b), (c), (d), (e) Map of stations and surroundings. Purple rectangles represent the location of temporary seismic stations. Waveforms with 4 s length are detrended, normalized and filtered at 2-50 Hz. Hypocentral distance and channel are shown at upper right and upper left in each figure, respectively.

른 규모를 나타낸다. 2022년 10월 28일 23시 08분 14초(UTC) 규모 1.6 지진이 처음으로 관측되었으며, 약 19분 뒤인 23시 27분 33초(UTC) 규모 3.5 전진, 규모 4.1의 본진이 16초 간격으로 연달아 발생하였다. 본진 발생 이후 10월 31일 규모 2.9 여진이 발생하기 전까지 연구기간 동안 발생한 지진 중 약 56%에 해당하는 총 172회의 지진이 발생하였다. 10월 31일 17시 27분 53초(UTC) 규모 2.9 여진이 발생한 이후 11월 3일까지 이전 기간과 비교하여 여진 발생횟수가 감소하였지만, 규모 0-1인 지진 28회를 포함하여 78회의 여진이 잇따랐다. 이후 11월 4일부터는 여진 발생횟수가 현저하게 감소하는 경향을 보였다.

5.3. 단층면해와 지진분포

본 연구에서는 규모 3.5 전진, 규모 4.1 본진 그리고 규모 2.9 여진에 대해 단층면해를 결정하였다. 규모 3.5 전진은 임시지진관측망 설치 이전 발생한 지진으로, 기존의 상시관측망 자료로부터 단층면해를 결정하였다. 규모 4.1 본진 또한 임시지진관측망 설치 이전에 발생하였으나, 전진과 짧은 간격으로 발생하면서 활용가능한 관측소의 수가 상대적으로 적었다. 이에 본진의 P파 초동 극성과 임시지진관측망 설치 이후 발생한 미소지진의 P파 초동극성을 함께 활용하여 복합단층면해를 결정하였다. 규모 2.9 여진은 임시지진관측망 설치 이후 발생하여, 상시관측망과 임시지진관측망의 P파 초동극성을 활용하여 단층면해를 결정하였다. 임시지진관측망 자료의 포함 여부에 따른 세 단층면해의 정확도를 평가하기 위해 Hardebeck and Shearer (2002)의 HASH 프로그램을 활용하여 평가하였다.

HASH 프로그램은 관측소 분포 비율(STDR; station distribution ratio)과 P파 초동극성의 불일치(misfit) 비율, RMS (root-mean square), 단층면 불확실도(fault plane uncertainty) 등을 계산하여 단층면해의 정확도를 평가한다. Reasenberg and Oppenheimer (1985)가 제안한 관측소 분포 비율은 진원구에서 nodal plane에 대해 관측소가 어떻게 분포하고 있는지를 계산한 것으로 이 비율이 높을수록 더 나은 관측소 분포를 나타낸다고 할 수 있다(Hardebeck and Shearer, 2002). P파 초동극성의 불일치는 FPFIT (Reasenberg and Oppenheimer, 1985)의 절면(nodal plane) 근처의 자료에 대해 다운웨이팅(down-weighting)을 적용하는 방법으로 계산된다. 전진의 관측소 분포 비율은 29%이며, P파 초동극성 불일치 비율은 3%, 단층면해 정확도는 76%로 나타났다. 복합단층면해는 49%의 관측소 분포 비율, 1%의 P파 초동극성 불일치와 98%의 정확도를 보였다. 여진은 47%의 관측소 분포 비율, 6%의 P파 초동극성 불일치 그리고 95%의 정확도를 보였다. 이처럼 전진의 단층면해와 달리 복합단층면해와 여진의 단층면해가 90% 이상의 높은 정확

도를 보인 이유는 관측소 간의 방위각 차이가 적으며 진앙과 가까운 곳에 설치된 임시지진관측소의 영향인 것으로 판단된다.

괴산지진이 발생한 지역에서는 변형작용으로 인해 서북서-동남동 방향의 좌수향 주향이동단층이 관찰되며, 지질도 상의 조곡단층과 매산단층이 이에 해당한다(Park, 2005; 그림 5). 그림 5d에서 위치재결정된 전진-본진-여진의 진앙은 두 지표단층의 주향을 따라 평행하게 분포하고 있다. 또한 진앙분포와 지표단층의 주향을 고려하였을 때, 서북서-동남동 방향 또는 북북동-남남서 방향의 복합단층면해 절면 중 서북서-동남동 방향의 주향을 갖는 면이 단층면으로 적합하다. 따라서 괴산지진은 서북서-동남동 방향의 좌수향 주향이동단층에서 발생한 것을 알 수 있다. 그러나, 복합단층면해의 경사(78°)는 괴산지진과 관련한 선행연구(Hong et al., 2023; 88°; Kim et al., 2023; 83°; Sheen et al., 2023; 85°; Lim et al., 2024; 87°)와 최소 5°에서 최대 10°까지 차이를 보이며, 괴산지역의 기준에 알려진 두 지표단층까지의 연장여부 또한 현재까지 분석된 자료를 바탕으로 판단하기에는 어려움이 있다.

6. 결론

2022년 10월 28일 23시 27분(UTC) 한반도 중부지역에 위치한 충북 괴산군에서 규모 4.1 지진이 발생하였으며, 본 연구에서는 본진 이후 약 10시간 내 임시지진관측소 9개소를 설치하여 약 2주동안 발생한 여진을 관측하였다. 상시관측소와 임시지진관측소 자료를 활용하여 지진검출을 수행한 결과, 연구기간 동안 기상청 발표 지진 30회를 포함하여 총 329회의 지진이 관측되었다. 본 논문에서 연구기간 동안 검출한 지진 횟수는 동일기간 동안 기상청에서 발표한 지진의 11배, 이전 선행연구에서 제시한 지진 횟수와 최소 약 3배에서 최대 약 8배에 해당하는 수치로, 이는 임시지진관측망을 활용함으로써 여진 관측 역량이 향상된 결과인 것으로 판단된다. 미소지진을 관측하는데 있어 영향을 주는 요소를 파악하기 위해 지진계의 종류에 의한 차이를 비교하였으며, 파워스펙트럼밀도 방법을 활용하여 임시관측소의 배경잡음 수준을 분석하였다. 서로 다른 두 지진계에 기록된 P파의 신호대잡음비와 3성분 파형 유사성으로부터 미소지진 관측역량은 광대역과 단주기 지진계에서 큰 차이를 보이지 않는 것으로 나타났다. 임시관측소의 배경잡음 수준은 관측소 주변환경에 따라 차이를 보였다. 산업 및 인간활동이 이루어지는 곳에 위치한 관측소의 배경잡음 수준은 인적이 드문 곳에 위치한 관측소와 비교하여 최대 30 dB 차이가 나타났으며, 전자의 경우 잡음으로 인해 미소지진 파형에서 지진파 신호를 관측하는 것이 어려운 것으로 보아 미소지진 관측역량이 관측소의 배경잡음 수준에 영향

을 받는 것을 알 수 있었다. P파 초동 극성을 활용한 본진과 미소지진의 복합단층면해, 전진, 여진의 단층면해를 결정하였으며, HASH 프로그램으로부터 관측소 분포 비율, RMS, P파 초동극성 불일치 비율을 계산하여 세 단층면해의 정확도를 평가하였다. 전진의 단층면해는 75%의 정확도를 보였으며, 두 단층면해는 상시관측소와 괴산지역에 설치된 여진관측망 자료를 함께 사용함으로써 90% 이상의 정확도를 보였다. 결과적으로, 이중차분법을 활용하여 획득한 정밀도 높은 진앙분포와 복합단층면해로부터 괴산지진은 서북서-동남동 방향의 좌수향 주향이동단층에서 발생한 것을 알 수 있었다. 최근 전세계적으로 지진 관측소 수가 증가하고 있으며, 지진계의 발달로 저장할 수 있는 자료의 양이 방대해지면서 머신러닝을 활용하여 자동화된 지진검출 및 위상발췌(phase picking)를 수행하는 연구가 활발히 진행되고 있다(Kong *et al.*, 2018; Ross *et al.*, 2018; Mousavi *et al.*, 2019, 2020; Zhu and Beroza, 2019). 향후, 본 연구에서 검출한 괴산지역의 지진목록은 머신러닝의 훈련자료로 활용할 예정이며, 괴산지역의 특징을 학습한 머신러닝 모델은 연구기간 이후 발생한 지진 검출과 위치 결정 등에 효과적으로 활용할 수 있을 것으로 기대된다.

감사의 글

이 연구는 한국기상산업기술원의 영남권 및 수도권 지진집중지역 지하 단층모델 갱신(RS-2022-KM220910)의 지원으로 수행되었습니다.

REFERENCES

- Anthony, R.E., Ringler, A.T. and Wilson, D.C., 2022, Seismic Background Noise Levels across the Continental United States from USArray Transportable Array: The Influence of Geology and Geography. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 112, 646-668.
- Bird, P., 2003, An updated digital model of plate boundaries. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 4, 1027.
- Bormann, P., 2012, *New Manual of Seismological Observatory Practice (NMSOP-2)*, IASPEI, GFZ German Research Centre for Geosciences, Potsdam: Deutsches GeoForschungszentrum GFZ; IASPEI.
- Demuth, A., Ottemöller, L. and Keers, H., 2016, Ambient noise levels and detection threshold in Norway. *Journal of Seismology*, 20, 889-904.
- Han, J., Seo, W., Kim, H.-J., Kim, W.-Y., Won, D., Chung, J.-I. and Kim, K.-H., 2021, Monitoring a short-lived earthquake swarm during April-May 2020 in Haenam, Korea, and its preliminary results. *Geosciences Journal*, 25, 43-57.
- 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.
- Heo, D., Kang, T.-S., Kim, M., Ahn, B.S., Lim, H., Han, J., Kim, K.-H., Rhie, J., Kim, Y.H. and Ree, J.-H., 2024, New insights on seismic activity in the southeastern Korean Peninsula from the Gyeongju Hi-density Broadband Seismic Network (GHBSN). *Geosciences Journal*, 28, 319-333.
- Hong, T.-K., Lee, J., Kim, W., Hahm, I.-K., Woo, N.-C. and Park, S., 2017, The 12 September 2016 M_L 5.8 midcrustal earthquake in the Korean Peninsula and its seismic implications. *Geophysical Research Letters*, 44, 3131-3138.
- Hong, T.-K., Lee, J., Lee, J., Park, S., Kim, B. and Choi, S., 2023, Unravelling a midcrustal seismogenic fault structure from a seismic sequence and geophysical data: application to the 28 October 2022 M_L 4.1 Goesan earthquake in the central Korean Peninsula. *Geophysical Journal International*, 235, 1117-1129.
- Hong, T.-K., Lee, J., Park, S. and Kim, W., 2018, Time-advanced occurrence of moderate-size earthquakes in a stable intraplate region after a megathrust earthquake and their seismic properties. *Scientific reports*, 8, 13331.
- Katsumata, K., Kosuga, M., Katao, H. and the Japanese University Group of the Joint Seismic Observations at NKTZ, 2010, Focal mechanisms and stress field in the Atotsugawa fault area, central Honshu, Japan. *Earth Planet Space*, 62, 367-380.
- Kee, W.-S., Kim, S.W., Kim, H., Hong, P., Kwon, C.W., Lee, H.-J., Cho, D.-L., Koh, H.J., Song, K.-Y., Byun, U.H., Jang, Y. and Lee, B.C., 2019, *Geologic Map of Korea (1:1,000,000)*. Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources.
- Kennett, B.L.N. and Engdahl, E.R., 1991, Traveltimes for global earthquake location and phase identification. *Geophysical Journal International*, 105, 429-465.
- Kim, K.-H., Kang, T.-S., Rhie, J., Kim, Y.H., Park, Y., Kang, S.Y., Han, M., Kim, J., Park, J., Kim, M., Kong, C., Heo, D., Lee, H., Park, E., Park, H., Lee, S.-J., Cho, S., Woo, J.-U. and Kim, J., 2016, The 12 September 2016 Gyeongju earthquakes: 2. Temporary seismic network for monitoring aftershocks. *Geosciences Journal*, 20, 753-757.
- Kim, K.-H., Kim, J., Han, M., Kang, S.Y., Son, M., Kang, T.-S., Rhie, J., Kim, Y.H., Park, Y., Kim, H.-J., You, Q. and Hao, T., 2017, Deep Fault Plane Revealed by High-Precision Locations of Early Aftershocks Following the 12 September 2016 M_L 5.8 Gyeongju, Korea, Earthquake. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 108, 517-523.
- Kim, K.-H., Ree, J.H., Kim, Y., Kim, S., Kang, S.Y. and Seo, W., 2018, Assessing whether the 2017 M_w 5.4 Pohang earthquake in South Korea was an induced event. *Science*, 360, 1007-1009.
- Kim, K.-H., Seo, W., Han, J., Kwon, J., Kang, S.Y., Ree, J.-H., Kim, S. and Liu, S., 2020, The 2017 M_L 5.4 Pohang earthquake sequence, Korea, recorded by a dense seismic network. *Tectonophysics*, 774, 228306.
- Kim, W.-Y., Seo, M.-S., Park, J.Y., Han, S., Son, Y.O. and Kim, Y.H., 2023, The 28 October 2022 M_w 3.8 Goesan Earthquake Sequence in Central Korea: Stress Drop, Aftershock Triggering, and Fault Interaction. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 113, 2416-2431.
- Kim, Y.H., Rhie, J., Kang, T.-S., Kim, K.-H., Kim, M. and Lee, S.-J., 2016, The 12 September 2016 Gyeongju earthquakes: 1. Observation and remaining questions. *Geosciences Journal*,

- 20, 747-752.
- Korea Meteorological Administration (KMA), 2022, Development of Subsurface Fault Structure Model in the Youngnam Region, 494 p (in Korean).
- Korea Meteorological Administration (KMA), 2023, Seismological Annual Report, 314 p (in Korean).
- Korea Meteorological Administration (KMA), 2024, Earthquake Catalog. Available at <https://necis.kma.go.kr/> (November 14, 2024).
- Kong, Q., Trugman, D.T., Ross, Z.E., Bianco, M.J., Meade, B.J. and Gerstoft, P., 2018, Machine Learning in Seismology: Turning Data into Insights. *Seismological Research Letters*, 90, 3-14.
- Krischer, L., Megies, T., Barsch, R., Beyreuther, M., Lecocq, T., Caudron, C. and Wassermann, J., 2015, ObsPy: a bridge for seismology into the scientific Python ecosystem. *Computational Science & Discovery*, 8, 014003.
- Kyung, J.B., Cheong, T.W., Lee, J.G., Lee, D.K. and Lee, E.A., 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).
- Kyung, J.B., Jung, M.K., Baek, J.J., Im, Y.J. and Lee, K., 2010, Historic earthquake catalog in the Korea Peninsula. Korea Meteorological Administration, Seoul, 474 p (in Korean).
- Lahr, J.C., 1999, HYPOELLIPSE: A computer program for determining local earthquake hypocentral parameters, magnitude, and first-motion pattern (Y2K compliant version). U.S. Geological Survey, Denver Open-File Report 99-23.
- Lee, K. and Chung, T.-W., 1999, A Composite Fault-plane Solution of Microearthquakes in the Yangsan Fault Area during 1996. *Journal of the Korean Geophysical Society*, 2, 235-240 (in Korean with English abstract).
- Lee, K. and Yang, W.-S., 2006, Historical Seismicity of Korea. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 96, 846-855.
- Lim, H., Cho, C.S. and Son, M., 2024, The 2022 Goesan earthquake of the moment magnitude 3.8 along the buried fault in the central Korean Peninsula. *Journal of Seismology*, 28, 519-534.
- Lin, G. and Okubo, P.G., 2016, A large refined catalog of earthquake relocations and focal mechanisms for the Island of Hawai'i and its seismotectonic implications. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 121, 5031-5048.
- McNamara, D.E. and Buland, R.P., 2004, Ambient noise levels in the continental United States. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 94, 1517-1527.
- Ministry of the Interior and Safety (MOIS), 2022, https://www.mois.go.kr/frt/bbs/type001/commonSelectBoardArticle.do?bbsId=BBSMSTR_00000000336&nttlId=96194 (May 20, 2025).
- Molinari, I., Clinton, J., Kissling, E., Hetényi, G., Giardini, D., Stipčević, J., Dasović, I., Herak, M., Šipka, V., Wéber, Z., Grácz, Z. and Solarino, S., 2016, the Swiss-AlpArray Field Team, and the AlpArray Working Group: Swiss-AlpArray temporary broadband seismic stations deployment and noise characterization. *Advances in Geosciences*, 43, 15-29.
- Moretti, M., Margheriti, L., D'Alema, E. and Piccinini, D., 2023, SISMICO: INGV operational task force for rapid deployment of seismic network during earthquake emergencies. *Frontiers in Earth Science*, 11, 1146579.
- Mogi, K., 1963, Some discussions on aftershocks, foreshocks and earthquake swarms: the fracture of a semi-infinite body caused by an inner stress origin and its relation to the earthquake phenomena (third paper). *Bulletin of the Earthquake Research Institute, University of Tokyo*, 41, 615-658.
- Mousavi, S.M., Ellsworth, W.L., Zhu, W., Chaung, L.Y. and Beroza, G.C., 2020, Earthquake transformer—an attentive deep-learning model for simultaneous earthquake detection and phase picking. *Nature Communications*, 11, 3952.
- Mousavi, S.M., Zhu, W., Sheng, Y. and Beroza, G.C., 2019, CRED: A Deep Residual Network of Convolutional and Recurrent Units for Earthquake Signal Detection. *Scientific Reports*, 9, 10267.
- Nanometrics, 2023, https://nanometrics.ca/hubfs/Downloads/Data%20Sheets/trillium_compact_ph.pdf?hsLang=en-ca (August 14, 2024).
- NASA Shuttle Radar Topography Mission (SRTM), 2013, Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) Global. Distributed by OpenTopography. <https://doi.org/10.5069/G9445JDF> (April 2, 2025).
- Omori, F., 1894, On the aftershocks of earthquakes. *Journal of the College of Science, Imperial University of Tokyo*, 7, 111-120.
- Pankow, K.L., Rusho, J., Pechmann, J.C., Hale, J.M., Whidden, K., Sumsion, R., Holt, J., Mesimeri, M., Wells, D. and Koper, K.D., 2020, Responding to the 2020 Magna, Utah, Earthquake Sequence during the COVID-19 Pandemic Shutdown. *Seismological Research Letters*, 92, 6-16.
- Park, J.-H., 2008, Crustal velocity structure of the Southern Korean Peninsula using 3-D seismic tomography, Ph.D. thesis, Seoul National University, Seoul.
- Park, S.-I., 2005, Stratigraphy and Geological Structures of the Ogcheon Supergroup in the Jogok area, Goesan, Korea. M.S. Thesis, Seoul National University, Seoul (in Korean with English abstract).
- Peterson, J.R., 1993, Observations and modeling of seismic background noise. U.S. Geological Survey Open-File Report, 93-322.
- Reasenber, P. and Oppenheimer, D.H., 1985, FPFIT, FPLOT, and FPPAGE: FORTRAN computer programs for calculating and displaying earthquake fault-plane solutions. U.S. Geological Survey Open-File Report, 85, 739.
- Ross, Z.E., Meier, M.A., Hauksson, E. and Heaton, T.H., 2018, Generalized Seismic Phase Detection with Deep Learning. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 108, 2894-2901.
- Sheen, D.H., Park, Y.-G., Nam, S.-T., Kim, S.-Y. and Kim, S.-H., 2009, Spectral analysis on seismic background noise. Korea Meteorological Administration, Seoul, 68 p (in Korean with English abstract).
- Sheen, D.-H., Seo, K.J., Kim, S., Kim, B., Hong, Y. and Byun, A.-H., 2023, A rapid and automatic procedure for seismic analysis based on deep learning and template matching: a case study on the M 4.1 Goesan earthquake on October 29, 2022. *Journal of the Geological Society of Korea*, 59, 345-354 (in Korean with English abstract).
- Shin, J.S., Seong, Y.-J. and Son, M., 2019, Characterizing the per-

- formance of new seismic stations in southeastern region, Korea using seismic noise levels. *Journal of the Earthquake Engineering Society of Korea*, 23, 321-327 (in Korean with English abstract).
- SmartSolo, 2022, <https://smartsolo.com/cp-3.html> (August 6, 2024).
- Son, M., Kim, W.-Y. and Cho, C.S., 2022, A scoping review of methods based on waveform similarity applied to seismic events in and around the Korean Peninsula: signal detection, hypocenter relocation, and waveform classification. *Journal of the Geological Society of Korea*, 58, 549-563 (in Korean with English abstract).
- 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.
- Woo, J.-U., Rhie, J. and Kang, T.-S., 2016, Performance Test of Hypocenter Determination Methods under the Assumption of Inaccurate Velocity Models: A case of surface microseismic monitoring. *Geophysics and Geophysical Exploration*, 19, 1-10 (in Korean with English abstract).
- Woo, J.-U., Rhie, J., Kim, S., Kang, T.-S., Kim, K.-H. and Kim, Y., 2019, The 2016 Gyeongju earthquake sequence revisited: aftershock interactions within a complex fault system. *Geophysical Journal International*, 217, 58-74.
- Yabe, S. and Ide, S., 2018, Why Do Aftershocks Occur Within the Rupture Area of a Large Earthquake?. *Geophysical Research Letters*, 45, 4780-4787.
- Yue, H., Zhou, Y., Zhou, S., Huang, Y., Li, M., Zhou, L. and Liu, Z., 2018, The 2017 Jiuzhaigou Earthquake Aftershock-Monitoring Experimental Network: Network Design and Signal Enhancement Algorithm. *Seismological Research Letters*, 89, 1671-1679.
- Zhang, H. and Eaton, D.W., 2018, A regularized approach for estimation of a composite focal mechanism from a set of microearthquakes. *Geophysics*, 83, KS65-KS75.
- Zhu, W. and Beroza, G.C., 2019, PhaseNet: a deep-neural-network-based seismic arrival-time picking method. *Geophysical Journal International*, 216, 261-273.