



Review

한반도 지진 활동 연구의 동향과 쟁점

이기화^{1,2}, 송석구^{3,*}

¹서울대학교

²대한민국학술원

³한국지질자원연구원

Recent research trends and issues in seismic activity of the Korean Peninsula

Kiehwa Lee^{1,2}, Seok Goo Song^{3,*}

¹Seoul National University, Seoul 08826, Republic of Korea

²The National Academy of Sciences, Seoul 06579, Republic of Korea

³Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources, Daejeon 34132, Republic of Korea

Received: August 5, 2026 / Revised: August 26, 2026 / Accepted: August 27, 2026

*Corresponding author: +82-42-868-3296 / E-mail: sgsong@kigam.re.kr

요약: 본 논평은 한반도의 지진 활동 연구 동향과 주요 쟁점을 역사지진과 계기지진 관점에서 살펴본다. 판내부 지진환경에 속하는 한반도는 유라시아판 내부에 위치하며, 문헌 기록을 통해 약 2,200회의 역사지진이 수집·분석되었다. 역사지진 분석 결과, 지진은 한반도 전역에서 발생했으나 그 활동은 다른 지역에 비해 북동부에서 비교적 낮았고, 15-18세기에는 이례적으로 높은 지진활동이 전국적으로 발생했다. 또한 주요 지진의 진앙은 중생대 지구조운동으로 형성된 주요 단층 및 지체구조구 경계와 잘 일치하며, 한반도 형성 모델 중 만입쇄기모델과 가장 잘 부합한다. 1978년 홍성지진 발생을 계기로 현대적 지진관측이 본격적으로 시작되었으며 1990년대에는 디지털 지진관측망으로 개선되었다. 또한 2016년 경주지진과 2017년 포항지진을 거치며 관측망이 고밀화되었다. 계기지진 분석을 통해 정밀한 지진 발생 위치와 메커니즘에 대한 자료를 확보할 수 있으며 한반도 지진활동 특성에 대한 이해도를 높이는 데 기여하고 있다. 최근에는 실시간 지진관측을 통한 지진조기경보 시스템 운영 및 인공지능(AI) 기술 접목 등 현대 지진학 기술을 적극 활용하고 있다. 또한 동아시아 지역 및 우주로의 지진연구 확장도 기대해 볼 수 있다. 본 논평이 한반도 지진 특성에 대한 이해를 넓히고, 향후 지진학에 관심 있는 연구자와 학생들에게 유용한 학술적 기초 자료로 활용되기를 기대한다.

주요어: 한반도 지진 활동, 역사지진, 계기지진, 지진관측망, 지체구조

ABSTRACT: This paper reviews research trends and major issues regarding seismic activity in the Korean Peninsula from the perspectives of historical and instrumental earthquakes. Located within the Eurasian Plate, the Korean Peninsula represents an intraplate seismic environment where approximately 2,200 historical earthquakes have been compiled and analyzed from literature records. The analysis indicates that historical earthquakes occurred throughout the peninsula, though activity was relatively lower in the northeastern region than other areas, and an unusually high seismicity over the whole peninsula from the 15th to 18th centuries. Furthermore, the epicenters of major earthquakes closely align with major faults and tectonic boundaries formed during Mesozoic tectonic movements, best fitting the indented wedge model among Korean Peninsula formation models. Modern seismic observation began in earnest with the 1978 Hongseong earthquake and evolved into a digital seismic network in the 1990s. The network was further densified following the 2016 Gyeongju earthquake and the 2017 Pohang earthquake. Instrumental earthquake analysis provides precise data on earthquake locations and focal mechanisms, contributing to a better understanding of the peninsula's seismic characteristics. Recently, modern seismological technologies have been actively integrated, such as operating real-time earthquake early warning systems and applying artificial intelligence (AI). Furthermore, future expansion into East Asian regional studies and space seismology is anticipated. This paper is expected to broaden the understanding of seismic characteristics in the Korean Peninsula and serve as useful basic academic material for future researchers and students interested in seismology.

Key words: seismic activity in the Korean Peninsula, historical earthquakes, instrumental earthquakes, seismic network, tectonic structure

1. 서론

지진활동(seismicity)은 지진자료의 종류에 따라 역사지진활동(historical seismicity)과 계기지진활동(instrumental seismicity)으로 구분할 수 있다. 역사지진활동은 지진계가 발명되어 지진기록이 지진활동의 분석에 본격적으로 활용되기 시작한 20세기 이전의 각종 역사적 사료에 기재된 지진자료에 기반하고 계기지진활동은 그 이후 지진계에 기록된 지진기록에 의존한다. 역사지진활동과 계기지진활동은 특정 지역의 지진활동을 규명하는데 서로 보완적인 역할을 한다. 역사지진자료로는 지진의 진원변수(source parameter)들인 진앙, 규모 등을 정확히 결정할 수 없는 문제점이 있으나 수천 년에 걸치는 장기간의 지진활동을 규명하는 데는 필수적이다. 반면에 계기지진자료는 비록 기간은 짧으나 진원변수들의 정확한 결정을 가능하게 하여 정밀한 지진활동을 분석하는 데 유용하다. 특히 판경계지진활동(interplate seismicity)과 달리 수천 년의 간격을 두고 활성화되는 판내부지진활동(intraplate seismicity)의 경우 역사지진에 관한 연구는 매우 중요하다고 할 수 있다.

판구조론적 측면에서 한반도는 유라시아판(Eurasian Plate)에 속하여 그 지진활동은 판내부지진활동의 범주에 속한다(그림 1). 태평양판(Pacific Plate)과 필리핀판(Philippine Plate)이 일본해구(Japan Trench)와 류큐해구(Ryukyu Trench)에서 북서방향으로 각각 대략 7.9 mm/yr와 5.0 mm/yr의 속도로 유라시아판의 밑으로 섭입하고 있다.

한반도의 지질은 선캄브리아시대 변성암과 퇴적암으로 이루어진 육괴(massif)들이 한반도의 바탕을 이루고 육괴들 사이는 현생누대의 화성암과 퇴적분지들이 채우고 있다. Choi (2014)는 한반도의 지질을 같은 연대의 암석과 지

질학적 역사를 갖는 11개의 지체구조구(tectonic province)로 구분하였다(그림 2).

중생대에 한반도에서 송림조산운동, 대보조산운동, 불국사변동 등 3회의 대규모 지구조운동(tectonic activity or orogeny)들이 일어났으며 이로 인해 중생대 이전의 지각이 심하게 교란되어 주로 북동-남서 또는 북북동-남남서 주향의 많은 단층들이 생성되었다. 신생대에는 중생대와는 달리 백두산, 제주도, 울릉도 및 독도를 생성하는 소규모 지구조운동만이 발생했다.

중생대의 지구조운동은 중한강곡 또는 중한랜드(Sino-Korean Craton)와 남중강곡 또는 남중랜드(South China Craton)의 충돌에 의하여 발생했다고 여겨지고 있다. 이 충돌을 설명하는 3개의 가설이 있다. 즉, 만입썩기모델(indented wedge model), 충돌대모델(collisional belt model), 그리고 지각 분리모델(crustal detachment model) 등이다(그림 3). 만입썩기모델은 남중강곡이 썩기 모양으로 중한강곡에 만입(indent)하여 한반도의 중부는 남중강곡 그리고 북부와 남부는 중한강곡에 속한다는 가설이다. 충돌대모델에서는 중한강곡과 남중강곡이 한반도 중부에서 충돌하여 반도의 북

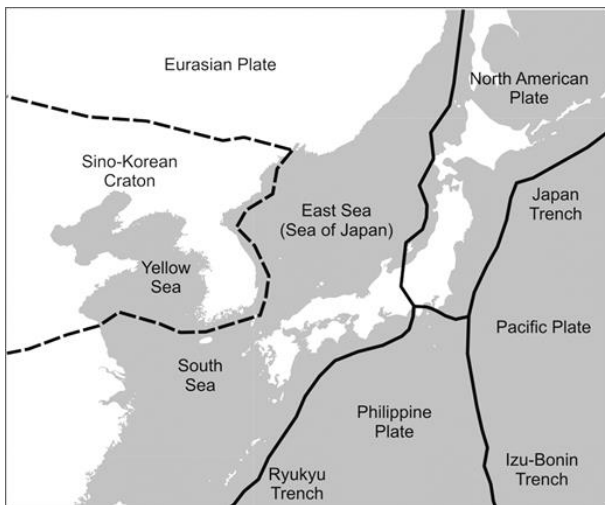


Fig. 1. Plate tectonic setting around the Korean Peninsula (Reproduced from Lee and Yang, 2006 with permission).

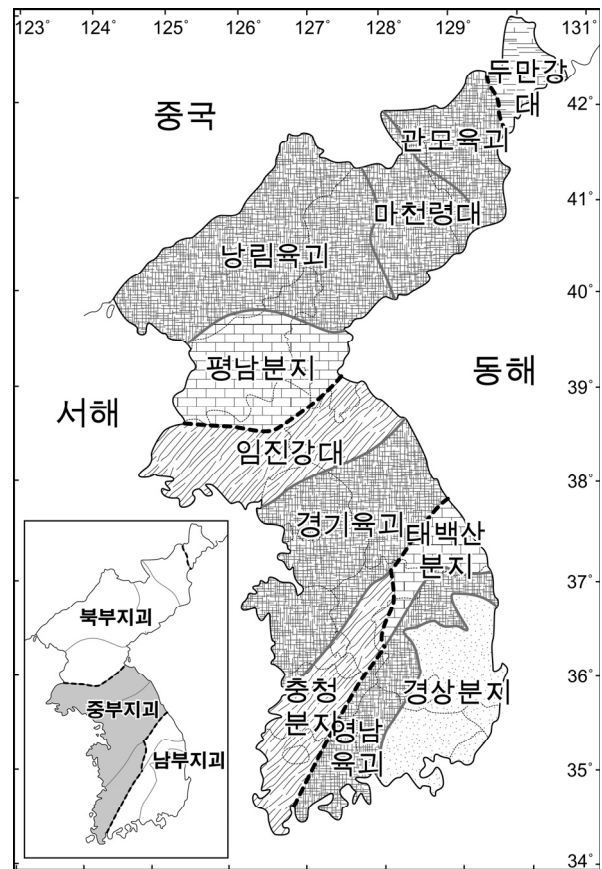


Fig. 2. Major tectonic provinces of the Korean Peninsula (Reproduced from Choi, 2014 with permission).

부는 중한강과 그리고 남부는 남중강괴에 속하게 된다. 지각분리모델은 한반도 전체가 중한강괴에 속하며 중한강괴와 남중강괴의 충돌로 황해변환단층(Yellow Sea Transform Fault)이 발생했다는 가설이다.

2. 역사지진 활동

한반도의 역사지진들에 대한 최초의 연구는 일제시대에 Wada (1912)에 의하여 수행되었다. 그는 삼국사기, 고려사, 고려사절요, 조선왕조실록, 증보문헌비고, 승정원일기, 일성록, 개인 문집 및 지방지, 풍운기, 천변초출등록 등 10여종의 사료를 조사하여 서기 2년(고구려 유리왕 21년)부터 1904년까지 1,644회의 지진 기록을 수집하였다. 그는 이 지진들의 감진 지역과 크기를 그가 임의로 설정한 4개의 진도계급으로 제시하였다. 지진에 관한 사료에서 삼국사기, 고려사, 조선왕조실록이 각기 삼국시대, 고려시대, 조선시대에서 발생한 지진들의 주 사료가 되고 나머지 사료들은 이들을 보완하는 보조 사료가 된다. 이들 사료 중 천변초출등록과 풍운기는 현재 국내에 존재하지 않는다.

한반도 역사지진들에 대한 본격적인 연구는 1980년대에 들어와 국내 학자들에 의해 수행되기 시작하였다. 한반도 지진활동에 관한 순수한 학문적 관심과 아울러 반도 내 고리, 월성 등지에 설립된 원자력발전소의 합리적인 내진설계 문제가 역사지진 활동에 대한 활발한 연구의 필요성을 제고하는 계기가 되었다. 지진학자들은 국사학자들과 공동 연구를 통하여 사료들을 조사하여 추가 지진자료들을 수집하고 이 지진들의 진원변수를 결정하는 체계적인 방법과 절차를 제시하였다(Lee *et al.*, 1985; Lee, 1998; Lee and Han, 1999).

Lee and Yang (2006)은 이 일련의 연구들을 종합하여 한반도에서 발생한 2,185회의 역사지진들과 추가 연구가 필요한 41회의 유사 지진현상들의 목록을 출판하였다. 이 목록에는 분석이 가능한 진원변수들이 포함되었다. 역사지진들에 관한 연구는 현재에도 지속되고 있으며 최근에는 각종 사료에 기록된 지진의 피해 상황을 영문으로 번역하는 작업도 진행하고 있다(Lee, 2025). 이 작업은 한반도의 역사지진 활동을 외국의 지진학자들에게 소개하는 역할을 담당하게 될 것이다.

2.1. 진원변수 결정

역사지진의 경우 대부분의 지진기록이 비과학적이고 또 간결하여 이로부터 지진학적인 측면에서 합리적인 진원변수를 결정하는 작업은 결코 쉽지 않다. 전 세계적으로 지진학계에서 공인된 표준적인 방법이 없을 뿐만 아니라 또 불가피하게 분석자의 주관적 판단이 개입하게 되는 문제점이

있다. 한반도 역사지진들의 진원변수를 체계적으로 그리고 비교적 객관적으로 결정하는 방법은 Lee *et al.* (1985)에 의하여 최초로 제시되었고 Lee and Yang (2006)은 이 방법

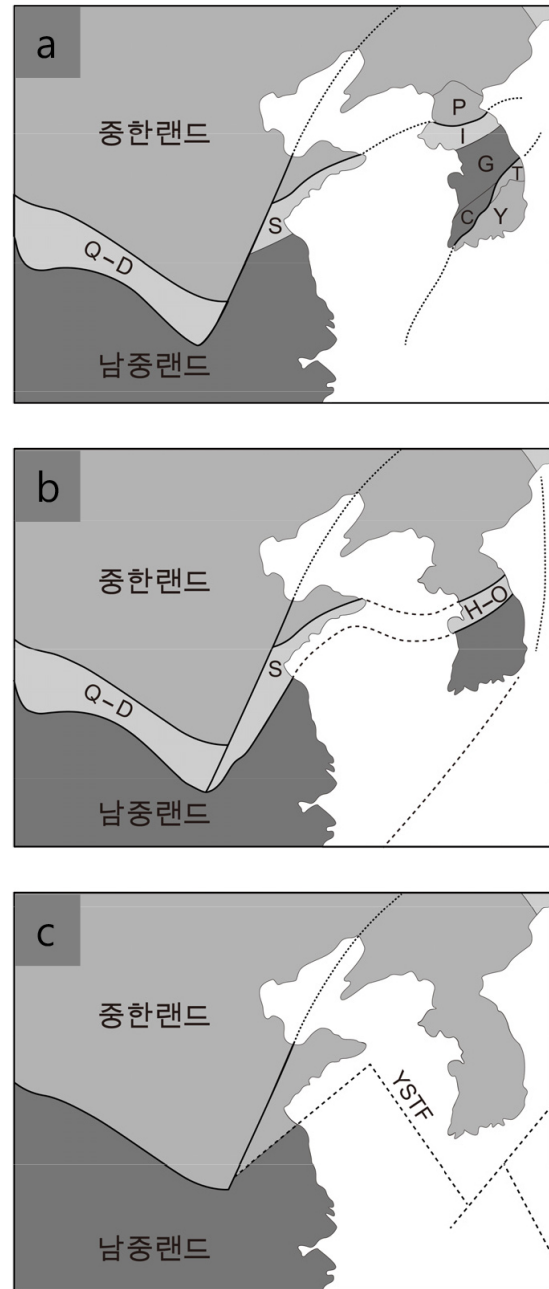


Fig. 3. Collision models related to the formation of the Korean Peninsula. a. indented wedge model, b. collisional belt model, c. crustal detachment model. (C: Chungcheong Basin, G: Gyeonggi Massif, H-O: Hongseong-Odaesan Collisional Belt, I: Imjingang Belt, P: Pyeongnam Basin, Q-D: Qinling-Dabie Belt, S: Sulu Belt, T: Taebaeksan Basin, Y: Yeongnam Massif, YSTF: Hwanghae Transform Fault) (Reproduced from Choi, 2014 with permission).

을 이용하여 연구에 적용하였다. 이 방법을 간략히 서술하면 다음과 같다.

2.1.1. 진앙

- 1) 지진이 단일 지점에서 감지되었을 경우에는 그 지점을 진앙으로 정한다.
- 2) 지진의 복수의 근접한 지점들에서 감지되었을 경우에는 그 지점들의 기하학적 중심을 진앙으로 정한다.
- 3) 지진들이 같은 날 지역적으로 서로 멀리 떨어진 몇 개의 근접한 지점들에서 발생하였을 경우 복수의 지진들이 발생한 것으로 간주하고 2)의 방법으로 그 지진들의 진앙을 결정한다.
- 4) 감진 지점이 명시되지 않고 단지 지진이 발생하였다고 기록된 경우, 그 시대 그 왕국의 수도로 정한다.
- 5) 감진 지역이 광역으로 도(道) 또는 몇 개의 도로 표시된 경우, 그 도 또는 도들을 포함하는 지역의 기하학적 중심으로 진앙을 정한다. 이 경우 진앙의 오차가 다른 경우보다

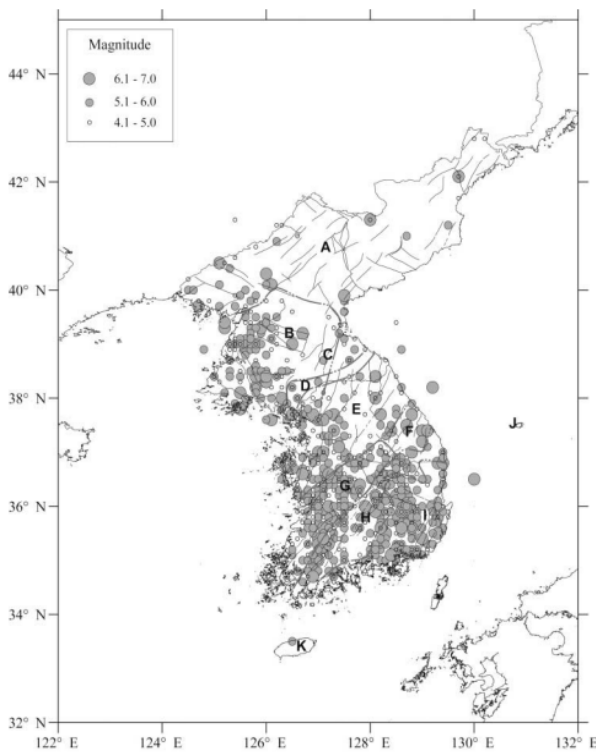


Fig. 4. Epicenters of earthquakes occurring from 2 to 1904 A.D., superimposed on a simplified tectonic map of Korea. Solid lines represent tectonic linearments, mostly faults or inferred faults. Major tectonic provinces are marked as follows. A. Dumangang Basin, B. Nangrim Massif, C. Pyeongnam Basin, D. Imjingang Belt, E. Gyeonggi Massif, F. Taebaeksan Basin, G. Chungcheong Basin, H. Yeongnam Massif, I. Gyeongsang Basin, J. Ulreung Island, and K. Jeju Island (Reproduced from Lee and. Yang, 2006 with permission).

클 것이 예상된다.

감진 지역의 면적을 고려할 때 위의 방법들로 결정된 진앙들의 오차는 대부분 0.250 이내로 평가된다. 다만 역사지진 자료를 분석하거나 활용할 경우에는 계기지진 관측 자료에 비해 상대적으로 오차가 클 수 있음을 유의해야 한다. 역사지진들의 진원 깊이는 정확하게 결정할 수 없다. 대부분의 역사지진이 계기지진의 경우처럼 지각 상부에서 발생했다고 여겨진다. 최근에 Lee (2024)는 진도 감쇄양상과 진원 깊이와의 관계식(Båth, 1973)을 이용하여 한반도의 지진활동이 이례적으로 활발했던 15-18세기에 모호(Moho) 경계면 부근의 심부 지각에서도 역사지진들이 발생했을 가능성을 보여주었다. 이는 향후 축적될 계기지진 자료를 활용하여 심도 있는 후속 연구로 이어질 필요가 있다.

2.1.2. 진도

역사지진의 서술에 의해서는 지진의 크기는 단지 규모가 아닌 진도로만 평가할 수 있다. 한반도 역사지진들의 수정 머켈리진도(MMI)는 다음과 같이 평가했다.

- 1) 단지 지진이 발생하였다고 기록된 경우, 그 진도는 MMI II-IV로 추정했다.

- 2) 감진 지점들만 기록되고 특정한 지점에서의 피해상황이 제시되지 않은 경우, 다음의 절차를 따랐다.

20세기에 한반도에서 발생한 MMI VIII 지진들(1936년 쌍계사지진, 1978년 홍성지진)에서 다음 감쇄공식이 유도되었다(Lee, 1984).

$$I - I_0 = 0.191 - 0.834 \ln \Delta - 0.0068 \Delta \quad (1)$$

이 식에서 I 는 진원거리 Δ 에서 감쇄된 진도, I_0 는 진앙에서의 진도, $\Delta = \sqrt{R^2 + (10)^2}$ 이고 R 은 $I = III$ 에서의 진원거리이다. 쌍계사지진과 홍성지진의 진원 깊이는 10 km로 가정하였다. 식 (1)에 구해진 R 과 Δ 의 값들을 대입하여 I_0 를 구할 수 있다.

식 (1)은 진도감쇄가 진앙진도와 무관하다는 가정을 전제로 하고 있으나 실제로는 진앙 진도와 관계가 있다. 이 현상을 고려하여 Grandori *et al.* (1991)이 제시한 방법에 따라 Lee and Kim (2002)는 한반도와 지진환경이 유사한 중한광괴(Sino-Korean Craton)에서 발생한 11개의 MMI VIII-X의 강진자료를 이용하여 다음 관계식을 도출하였다.

$$I_0 - I = 1/\ln \phi \times \ln [1 + (\phi - 1)/\phi_0 \times (D/D_0 - 1)] \quad (2)$$

이 식에서 ϕ_0 와 ϕ 는 1.31과 1.77 값을 갖는 상수들이고, D_0 는 I_0 VIII, IX와 X에 대하여 각기 5.2, 6.5와 9.3 km의

값들을 갖는다. 식 (2)는 I_0 가 MMI VIII-X의 지진들에 적용하고 D는 이 진도들에 대한 진앙거리를 나타낸다.

3) 진도를 감진지역과 그 지역 내의 특정 지점에서의 피해상황에 의하여 결정할 수 있는 경우에는 감진지역에 의하여 결정된 값을 취한다. 이 경우 두 가지 방법에 의하여 결정된 값들은 일치하거나 단지 1 계급의 차이만 났다. 진도는 감진 지역의 지질학적 조건에 크게 의존함으로 심한 경우에는 ± 3 계급의 차이가 날 수도 있다.

진도가 결정되면 지진의 규모는 Lee and Lee (2003)가 중한강곡의 지진들을 이용하여 결정한 다음의 규모-진도 관계식을 이용하여 결정하였다.

$$M_L = 1.75 + 0.58 I_0 \quad (3)$$

2.2. 진앙과 지질구조

Lee and Yang (2006)은 한반도에서 2년부터 1904년까지 발생한 2,185회의 역사지진들을 분석하여 진앙과 지질구조와의 관계를 밝혔다. 그림 4는 이 역사지진의 진앙분포 지점들을 보여준다. 그림 4에서 먼저 한반도 전역에서 지진들이 발생했음을 볼 수 있다. 지진은 활성단층에서 발생함으로써 이는 한반도 전역에 활성단층들이 존재함을 지시한다. 다음에 한반도 북동부의 지진활동이 다른 지역에 비하여 현저히 낮음을 알 수 있다. 이는 이 지역의 활성단층의 수가 다른 지역에 비해 현저히 적음을 시사한다.

그림 4에서 한반도의 주요지진들은 주로 대규모 단층들과 지질단위(geological unit)들의 경계에서 발생하였음도 볼 수 있다. 이 논평에서의 지질단위는 Choi (2014)의 지체구조와 대체로 비슷하다(그림 2). 한반도 역사지진들의

진앙분포는 현재 한반도의 주요 단층들과 지체구조구들의 경계들이 활성단층임을 시사한다. 그림 4에서 지진활동이 현저히 낮은 함경도 부령에서 1810년 2월에 발생한 규모 6.7을 포함한 일련의 강진들은 관모육곡과 두만강대의 경계(그림 2)와 연관되었음을 알 수 있다. 한반도의 주요 단층들이 주로 중생대의 지구조운동에 의하여 생성되었음으로 이는 중생대에 생성된 주요 단층들이 현재까지 지속적으로 활성단층으로 작용하였음을 시사한다(Lee and Yang, 2006).

현재의 한반도 지질은 중생대 중한강곡과 남중강곡과의 충돌에 의하여 생성되었으며 이 충돌에 관한 3개의 모델(그림 3)이 존재한다. 그림 4에서 보는 역사지진들의 분포는 이 모델 중 만입짜기모델에 가장 부합함을 보여준다고 생각된다. 한반도 북동부의 지진활동이 다른 지역에 비하여 현저히 낮은 현상도 만입짜기모델에 부합한다.

2.3. 규모-빈도 관계

특정지역 지진활동의 특성을 규정하는 중요한 측면은 규모-빈도 관계식이다. 즉 일정 기간에 특정 규모의 지진이 얼마의 빈도로서 발생하는가를 규정하는 것이다. 이 관계는 보통 다음의 관계식으로 표현된다.

$$\log N = A - b M_L \quad (4)$$

여기에서 N은 규모 M 이상 지진들의 발생 횟수이고, A와 b는 상수이다. 이 관계식에서 상수 b는 그 지역의 지체구조적 특성을 반영하는 중요한 변수이다. 규모-빈도 관계식은 지진재해(seismic hazard)의 확률론적 분석에 중요한 역할을 한다.

Lee and Yang (2006)은 그들의 역사지진자료 중 $M_L \geq 4.7$ ($MMI \geq V$)의 지진들에 대하여 회귀분석 방법을 적용하여 다음의 관계식을 도출하였다(그림 5).

$$\log N = 6.09 - 0.71 M_L \quad (5)$$

추정된 b 값 0.71 ($r^2=0.99$)은 1926년부터 1945년간 한반도에서 발생한 $M_L \geq 3.8$ 계기지진들에 대한 b 값 0.8보다 낮다(Lee and Jung, 1980). b 값 0.71은 일본과 그 주변에서 발생한 천발지진들에 대한 b 값 0.936 (Utsu, 1977)보다 낮고 중국에서 발생한 지진들에 대한 값 0.57 (Mei, 1960)보다 높다. Utsu (1977)는 b 값이 호상열도에서 내륙 지역으로 증가하는 현상에 주목했다.

한반도 지진들의 b 값은 판내부 지진활동의 범주에 속한 세계 다른 지역의 값들, 즉 Australia의 0.88 (Allen *et al.*,

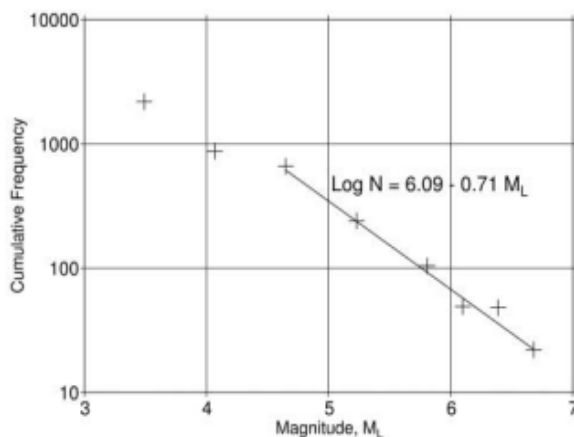


Fig. 5. Magnitude-frequency relationship for Korean historical earthquakes from 2 to 1904 (Reproduced from Lee and Yang, 2006 with permission).

2004), Fennoscandia의 0.85 (Karnik, 1969), 그리고 미국 중동부의 0.96 (Weichert, 1980)과 비교된다.

2.4. 지진활동의 변화

판내부지진활동은 재발간격이 대체로 길고 반복되는 지진들이 매우 드물기 때문에 그 지진학적 특성을 규명하기가 매우 어려운 문제점이 있다(Lay and Wallace, 1995). 이와 연관해서 판내부지진활동의 범주에 속하는 대략 1,900년 기간의 한반도 역사지진 활동의 변화는 어떠한가? 이 문제는 두 가지 측면에서 검토할 수 있다.

그림 6은 지난 19세기 동안 세기별 지진발생 빈도를 보여준다. 이 그림에서 한반도의 지진활동이 1세기에서 14세기 기간에서 세기 당 발생 횟수가 100회 미만으로 낮은 편이고, 15-18세기에는 수백 회에 이르러 이례적으로 높고, 19세기에는 다시 100회 미만으로 낮아진 것을 볼 수 있다(Lee and Yang, 2006). 이 유별난 지진활동을 Richter (1958)는 그의 명저인 Elementary Seismology에 “약 3세기 전에 한국에서 볼 수 있듯이 이례적으로 강진들이 많이 발생하다가 그 후 잠잠해지는 현상이 일어날 수 있다”라고 기술했다. Ambraseys (1971)도 지난 2,000여 년 동안에 동부 지중해 지역의 지진발생 횟수가 단조롭지 않고 심하게 변동함을 발견했다.

특이한 현상으로 1565년 5월 29일부터 1566년 5월 19일까지 평안도 상원에서 발생했던 군발지진(earthquake swarm)은 역사지진 전체 발생횟수의 대략 16%를 점유한다. 조선시대의 지진들은 비교적 잘 기술되어 있다. 비록 그 전 시기의 지진들이 불완전하게 기록되었다 할지라도 이와 같이 활발한 군발지진이 다른 시기에 발생했을 가능성은 거의 없다고 생각된다.

지진활동의 정량적인 분석을 위해서는 지진으로 방출된

에너지가 지진발생 횟수보다 더욱 의미 있는 척도(measure)가 된다. 한반도 역사지진들의 방출 에너지를 계산하기 위해서 규모와 지진에너지 간의 다음 관계식을 이용하였다(Richter, 1958).

$$\log E = 9.9 + 1.9 M_L - 0.024 M_L^2 \quad (6)$$

그림 7은 지난 20세기에 걸쳐 한반도에서 방출된 지진에너지(같은 지역의 계기지진 에너지 포함)의 변화를 보여준다. 지진에너지에서도 한반도의 지진활동이 1-14세기에 낮았고, 15-18세기에 이례적으로 높았고, 19-20세기에 낮았음을 볼 수 있다. 상원에서 발생한 군발지진의 발생 횟수가 16세기 지진발생 횟수의 35%에 이르지만 이로 인한 지진에너지는 그 기간에 방출된 지진에너지의 0.2%에 지나지 않는다. 20세기 초반에 한반도의 지진활동은 비교적 낮은 편이었다(Lee *et al.*, 2003). 지난 19세기 동안에 한반도와 유사한 지진활동의 변화가 중국 및 일본 서부지역에서 관찰되었다(Mei, 1960; Kyung *et al.*, 1996).

2.5. 최대지진

특정 지역의 최대지진(maximum earthquake)은 그 지역의 지진재해를 평가하는데 가장 중요한 변수가 된다. 역사지진 자료에서 산출된 한반도에서 발생한 최대지진의 규모는 6.7 (MMI VIII-IX)로 평가된다. 최대지진 중에서 그 피해상황이 가장 상세히 기술된 지진으로는 1643년 7월 24일 울산에서 발생한 지진을 들 수 있다. 이 지진은 서울과 전라도에서도 느껴졌으며, 대구, 안동, 영덕 등지에서 봉화대와 성가퀴가 무너진 곳이 많았고, 울산에서는 땅이 갈라지고 물이 용솟음쳤다고 기록되어 있다. 가장 큰 인명 피해를 볼

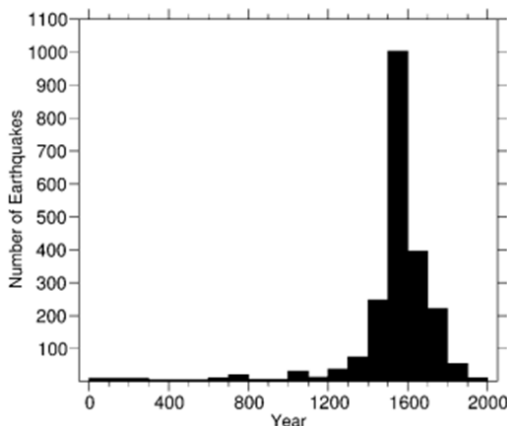


Fig. 6. Variation of the number of earthquakes per century in the Korean Peninsula (Reproduced from Lee and Yang, 2006 with permission).

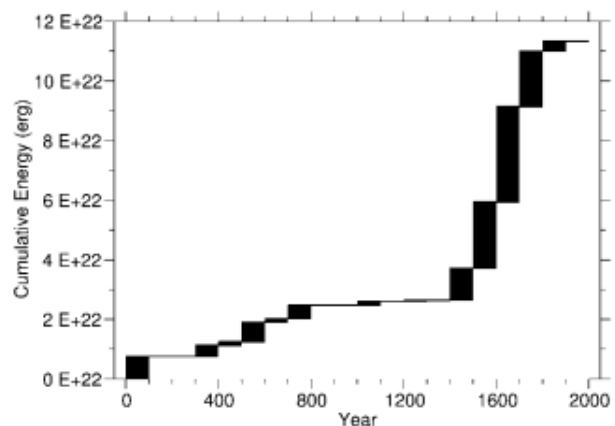


Fig. 7. Cumulative seismic energy release from historical earthquakes from 2 to 1904 (Reproduced from Lee and Yang, 2006 with permission).

러온 지진은 779년 경주에서 발생했으며 집들이 무너져 100여 명이 사망했다. 역사지진 자료에서 평가된 최대지진의 규모는 그 지역에서 발생 가능한 최대지진 규모의 하한치(下限値)에 해당한다. 고지진들에 관한 연구는 최대지진 평가에 도움을 줄 수 있다.

2.6. 결론 및 전망

한반도는 유라시아판 내부에 속하며 그 지진활동은 매우 불규칙하여 수천 년의 간격을 두고 활성화되는 판내부 지진활동의 범주에 속한다. 한반도의 역사지진 기록들은 서기 2년부터 1904년까지 삼국사기, 고려사 및 조선왕조실록 등의 사료에 현재까지 대략 2,200회가 발견되었다(Lee, 2025). 한반도 역사지진들의 진원변수들을 결정하는 체계적인 절차와 방법이 1980년대에 개발되어(Lee *et al.*, 1985) 역사지진활동에 대한 본격적인 연구가 시작되었다. 역사지진들의 수집과 분석이 꾸준히 진행되었고 그 결과로 2000년대에 2,185개의 역사지진들을 분석하여 한반도 지진활동의 전반적 특성이 밝혀졌다(Lee and Yang, 2006). 그 결과를 요약하면 다음과 같다.

1. 역사지진들은 한반도 전역에서 발생했다. 한반도 북동부의 지진활동은 다른 지역에 비하여 낮으며 이는 이 지역의 지각이 다른 지역에 비하여 중생대의 지구조운동에 의하여 상대적으로 덜 교란된 것에 기인한다고 여겨진다.

2. 역사지진활동의 시간적 변화는 판내부지진활동의 전형적인 특성인 매우 불규칙적인 지진에너지의 방출 양상을 보인다. 한반도의 지진활동은 이례적으로 활발했던 15세기부터 18세기간의 기간을 제외하고는 낮은 편이었다.

3. 규모 $M_L \geq 4.7$ ($MMI \geq V$)의 역사지진들에 대한 b 값은 0.71이고 이 수치는 인접한 일본과 중국의 지진들에 대한 해당 값들의 사이에 놓이고 전 세계 다른 판 내부의 안정한(stable) 지역의 값들에 비하여 낮은 편이다. 또 이 값은 20세기 전반부의 한반도의 계기지진들에 대한 b 값 0.8보다 낮다.

4. 대규모 지진들의 진앙은 반도 내 주요 단층들과 주요 지체구조구들의 경계면과 잘 일치한다. 이는 반도 내 주요 단층들과 지체구조구 경계들이 활성단층임을 시사한다. 한반도 주요 단층들이 중생대의 지구조운동들에 의하여 생성되었으므로 이 단층들이 생성된 이후로 지속적으로 활성단층으로 작용하였다고 여겨진다.

계기지진들에 비하여 결정된 진원변수의 오차가 큰 문제점은 있지만 한반도와 같은 판내부 지진활동은 대체로 수천 년의 간격을 두고 활성화함으로 1,900여 년에 걸치는 역사지진들에 관한 연구는 한반도 전역의 지진활동의 특성을 규명하는데 매우 중요하다고 할 수 있다.

역사지진들의 진원변수 추정은 지진학적 측면에서 매우

미흡한 사료의 기록에 의존함으로 불가피하게 분석자의 주관적 판단에 의존하게 된다. 이 문제를 극복하기 위하여 각종 사료의 기록 전체를 제시하여 여러 지진학자들이 다른 판단을 내릴 수 있도록 하는 작업이 필요하다. 특히 외국 지진학자들이 이 작업에 참여할 수 있도록 기록을 영문으로 번역하는 작업이 현재 추진 중이다(Lee, 2025). 이 과정에서 역사지진들의 진원 깊이가 한반도의 지진활동이 이례적으로 활발했던 15-18세기에 상부 지각부터 모호 불연속면까지의 심부 지각에 걸쳐 발생하는 현상이 발견되었다(Lee, 2024). 이 문제는 계기지진 자료 등을 활용한 지속적인 연구가 요구되는 부분이다. 뿐만 아니라 한반도에서 중생대에 발생한 중한강괴와 남중강괴와의 충돌에 관한 3가지 모델 중 만입쇄기모델이 지진활동과 가장 잘 부합함이 발견되었다.

현재까지 확인된 역사지진기록은 2,230여회에 이른다. 추가 역사지진들의 수집과 이들의 분석 방법을 개선하는 문제는 앞으로의 연구 과제들이다.

3. 계기지진활동

지진학(Seismology)은 지구 표면에 땅의 움직임을 관측할 수 있는 지진계를 설치하고 지진 발생 시 지진계에 기록된 지진 파형을 분석하여 지각, 맨틀과 같은 지구 내부 구조와 함께 지진 발생 특성을 연구하는 학문이다. 현대적인 의미의 지진계는 20세기 들어 본격적으로 설치, 운영되었기 때문에 다른 학문에 비해 상대적으로 젊은 학문 분야라고 할 수 있다. 특히 종이에 펜으로 지진 파형을 기록하는 아날로그 지진계와 달리 지진 파형을 디지털 신호로 변환하여 컴퓨터에 저장할 수 있는 디지털 지진계의 개발과 운영은 컴퓨터 계산 능력의 발달과 함께 현대 지진학을 비약적으로 발전시키는 계기가 되었다.

우리나라는 2천 년에 가까운 기간 동안 한반도에서 발생한 지진 활동이 삼국사기, 고려사, 조선왕조실록과 같은 역사 문헌에 비교적 상세히 기록되어 있다. 상대적으로 오랜 기간 지진 활동을 분석해야 하는 판내부 지진환경에서 역사지진 자료는 중요한 정보를 제공한다. 다만 현대적 지진 관측망은 정확성과 신속성을 기반으로 지진 현상을 관측, 분석하여 지진활동을 감시하고 지진재해에 대비하는데 중추적인 역할을 담당한다고 할 수 있다. 우리나라에는 1905년 최초로 지진계가 설치되었고 2차 세계대전이 발생한 1945년에는 지진관측망이 점차 6개소로 확대되어 운영되었다. 2차 대전과 6.25전쟁으로 지진관측이 중단되었으나 1978년 규모 5.0 홍성지진 발생을 계기로 우리나라는 본격적인 계기지진 관측을 시작하였다. 1990년대 디지털 지진계의 전환, 2016년과 2017년에 연이어 발생한 경주, 포

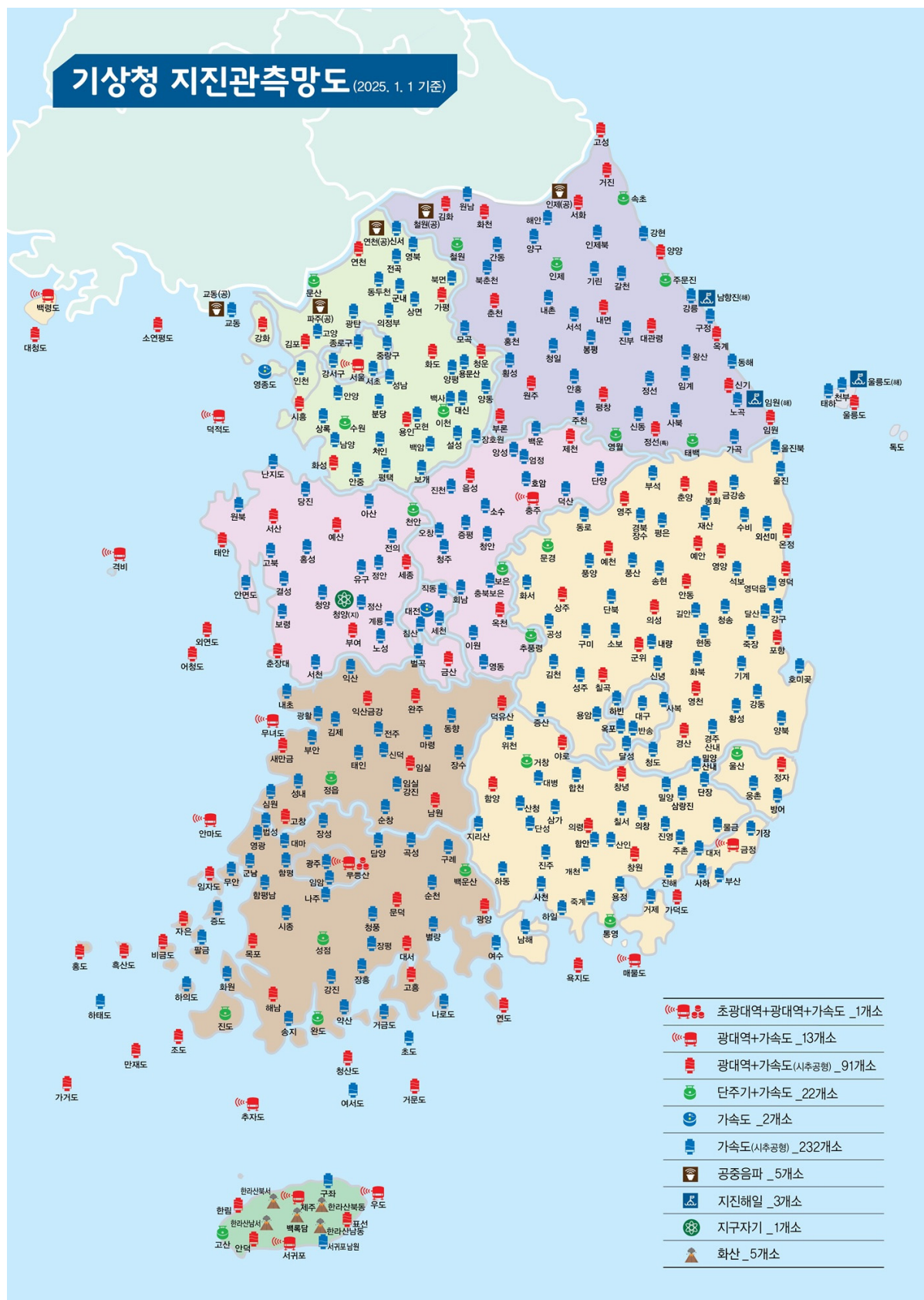


Fig. 8. Seismic station network distribution (Reproduced from KMA, 2025a with permission).

항지진을 계기로 지진관측망이 고밀화되고 지진 연구에 대한 국민적 관심이 증가하는 변곡점을 겪었다.

본 절에서는 현대적 의미의 지진관측망을 활용하여 지진활동을 관측하고 분석하는 방법을 개략적으로 살펴보고 한반도 지진활동의 일반적 특성과 현대 지진학의 미래 방향에 대해 고찰해 보고자 한다.

3.1. 진원변수 결정

지진이 발생한 위치와 시간, 크기 등은 기본적인면서도 중요한 지진원 변수라고 할 수 있다. 지진의 위치를 나타내는 변수로는 진원(hypocenter)과 진앙(epicenter)이 있다. 진원은 지진이 발생한 위치를 삼차원 지하구조에 나타낸 것으로, 일반적으로 위도, 경도와 진원 깊이로 표현된다. 진앙은 지진이 발생한 위치를 지표에 표시한 것으로 진원 깊이를 제외하고 위도와 경도로 표현된다. 지진 발생 위치와 시간은 지진계에 관측된 지진파형의 P파와 S파 도달 시간을 측정함으로써 결정할 수 있다. 일반적으로 지진관측망의 내부에 진앙이 위치하는 경우에 결정 오차가 작다. 그러므로 지진이 해역에서 발생할 경우, 육상 관측망의 외부에 위치하기 때문에 진앙 결정 오차가 큰 경우가 많다. 최근에는 해저 지진계를 설치하여 이러한 약점을 보완하기도 하지만 육상에 설치된 지진계에 비해 설치와 운영에서 환경적, 비용적 제약이 크다는 단점이 있다. 계기지진의 경우 정확한 기록시간을 갖고 있고 많은 수의 관측 센서가 설치되어 있기 때문에 역사지진에 비해 훨씬 정확한 위치결정이 가능하다. 다만 진원 깊이의 경우 지표에 지진계를 설치하는 공간적 한계 때문에 지표면의 위치인 진앙에 비해 정확도가 떨어지는 경향이 있다. 지하 수십 킬로미터의 깊이에 지진계를 설치하고 지표와 통신을 연결하는 것은 현재 기술로는 불가능에 가깝기 때문에 많은 경우 간접적인 방법으로 진원 깊이 오차를 줄이려는 노력을 하고 있다. 이웃한 지진들에서 생성된 지진파가 지표에 도달하는 상대적 시간 차이 정보를 활용하여 진원을 결정하거나 지각에서 지진파 전파 속도 모델을 개선하는 등의 방법이 대표적인 예이다 (Waldhauser and Ellsworth, 2000; Zhang and Thurber, 2003).

지진의 크기를 나타내는 척도로는 규모(magnitude)가 사용된다. 규모는 지진계에 기록된 지진파형의 P파나 S파의 진폭을 측정하고 진앙과 지진계가 설치된 지점의 거리에 따른 지진파 감쇄효과를 보정함으로써 결정한다. 규모는 사용하는 지진파형의 종류나 계산 방법에 따라 몇 가지 종류가 사용되는데 일반인에게 가장 널리 알려진 규모는 1935년에 미국 캘리포니아의 지진학자인 Charles Richter가 제안한 리히터 규모(M_L)이다. 리히터 규모는 미국 캘리포니아 지역에서 고유주기 1초 정도의 Wood-Anderson 지진계에 기록된 지진파형의 진폭을 사용한 규모 결정 방법

으로 그 역사적 중요성에 비해서 제약점도 있다. 우선 캘리포니아 이외의 지역에서도 규모를 결정할 수 있는 표준적인 방법이 필요하고 Wood-Anderson 지진계는 현재 전 세계적으로 거의 사용되지 않는다. 또한 지진파형의 최대진폭은 규모 7.0 이상의 강진에 대해서는 포화현상이 발생하여 정확한 지진 크기의 평가가 어려운 측면도 있다. 최근에는 지진단층의 물리적 특성을 기반으로 계산되는 모멘트 규모(M_w)가 더 널리 사용되고 있는 추세이다.

$$M_w = \log(M_0)/1.5 - 10.73 \quad (7)$$

$$M_0 = \mu DS \quad (8)$$

식 (7)과 (8)에서 보는 바와 같이 모멘트 규모는 지진을 일으킨 단층의 크기(D: 평균 단층 변위, S: 단층 파열 면적)와 탄성 계수(μ : rigidity)로 결정되는 지진 모멘트(M_0)로 계산되기 때문에 사용된 지진계의 종류나 지역에 상관없이 표준적인 값을 결정할 수 있으며 규모 7.0 이상의 강진에 대해서도 포화현상이 발생하지 않아 대규모 지진의 크기도 정확하게 평가할 수 있다. 다만 모멘트 규모도 지진단층 운동의 시간적 변화 특성을 담고 있지 않기 때문에 고주파 지진에너지 발생 효과 등을 설명하기 위해 응력강하(stress drop) 등의 추가적인 지진원 변수들이 사용되기도 한다. 규모는 지진의 크기를 나타내는 척도로 지진발생 시 각 지점의 지진동의 크기를 나타내는 진도(intensity)와 구별된다. 큰 규모의 지진이 발생한 경우, 진도도 비례해서 커지기 때문에 규모와 진도가 자주 혼용되어 사용되기도 한다. 하나의 지진이 발생했을 때 규모는 하나의 값을 가지며 진도는 위치에 따라 다양한 값을 가질 수 있고 진앙거리가 증가하면 감소하는 경향이 있다고 생각하면 쉽게 구별할 수 있다.

지진의 위치, 크기와 함께 지진원의 특성을 기술하는 주요 변수로 단층운동 메커니즘이 있다. 지진은 지하 심부에 단층이 응력을 받아 파열하면서 발생하는 현상으로 방사형태로 폭발하는 지하 핵실험 등과 다르게 단층의 전단변형으로 지진파 에너지가 발생한다. 그러므로 지진의 단층운동 메커니즘은 크게 주향이동(strike-slip)과 경사이동(dip-slip)으로 나눌 수 있고 경사이동은 다시 역단층(reverse fault)과 정단층(normal fault) 운동으로 나눌 수 있다. 지진단층의 운동 메커니즘은 판구조 운동과 관련하여 지각에 작용하는 응력의 특성을 이해할 수 있고 지진을 일으킨 지하 단층의 지하구조를 파악하는데 도움이 되기 때문에 지진 연구에 중요 자료로 활용된다. 마지막으로 주요 지진원 변수인 진원과 규모는 지진원의 공간적, 시간적 변화에는 큰 관심을 두지 않는 측면이 있다. 지진은 지진단층의 동적 파열

과정에서 탄성 에너지가 지진파의 형태로 방출하는 현상으로 2011년 규모 9.1의 동일본 대지진이나 2023년 규모 7.8 튀르키예 대지진과 같은 초대형 지진은 단층 파열 길이가 수백 킬로미터에 달하고 파열 과정이 시작되어 마무리되는 시간도 수백 초에 달한다. 이 경우 진원은 단지 지진단층 파열이 시작되는 지점을 가리킬 뿐이다. 이런 경우에는 지진 발생 특성을 단순히 진원과 규모로 규정하기는 어렵고 지진단층 파열 과정을 동역학적으로 접근하는 단층지진원 모델을 고려할 필요가 있다.

3.2. 지진관측망

우리나라는 이웃하는 일본이나 미국 서부의 캘리포니아 주 등에 비해 지진 발생 빈도가 높지 않은 지역으로 본격적인 지진관측 활동은 뒤늦게 이루어진 측면이 있지만 그림 8에서 보듯이 2016년 규모 5.8 경주지진 이후에는 기상청과 한국지질자원연구원 등을 중심으로 고밀도 지진관측망이 구축되어 양적인 측면에서는 이미 세계적 수준의 지진관측망을 운영하고 있다. 한국지질자원연구원의 경우 일본 및 중국과의 지진 자료 교류를 통해 분석 가능 지역을 넓히는

한편, 주요 지진 발생 지역에 고밀도 임시 관측망을 운영하여 정밀한 미소지진 관측 활동을 이어가고 있다. 초기 지진계는 관측하는 지진동의 주기 대역에 따라 단주기 지진계와 장주기 지진계로 나누어져서 개발되었다. 기술의 발달로 단주기, 장주기를 포괄하는 광대역 지진계가 개발되어 장주기의 원거리 지진파까지 관측하고 있다. 일반적인 광대역 지진계는 지진동의 속도에 민감한 반면 건물의 붕괴 등 지진피해에 영향을 주는 인자는 주로 가속도 지반 운동이라고 할 수 있다. 지진공학적 활용을 위해서 가속도계 지진계도 다수 설치되어 운용되고 있다. 최근에는 지하 심부의 미세한 진동까지 감지할 수 있는 시추공 지진계도 구축되었고 해역 지진을 정밀하게 관측하기 위한 해저 지진계도 설치하여 활용하고 있다. 지진관측 영역은 우주로도 확장할 수 있는데 달이나 화성 표면에 지진계를 설치한다면 외계의 행성에서 지진활동도 관측하고 연구할 수 있을 것이다. 지진관측망의 미래와 관련하여 또 다른 측면은 최근 혁신적으로 성장하고 있는 인공지능 기술과의 접목이다. 각 관측소에서 초당 수십에서 수백 샘플로 수집되고 있는 디지털 지진자료와 인공지능 기술이 접목된다면 새로운 차원의 지진관측과 분석 시스템을 구축할 수 있을 것으로 기대된다. 국내 지진학계에서는 지진파 위상 식별 등 기초적인 부분에서의 인공지능 활용이 이미 시도되고 있다(Han et al., 2024, 2025).

3.3. 계기지진 활동의 이해

일정 기간 발생한 지진의 진앙 분포도는 한 지역의 지진 활동을 이해하는데 유용한 정보를 제공한다. 한반도의 계기지진 발생 분포도(그림 9)를 보면 역사지진 분포도(그림 4)와 비슷한 경향을 보인다. 중소규모 지진들이 한반도 전역에서 발생하는 경향을 보이고 강원도와 강원도 북쪽 지역에서는 상대적으로 지진발생 빈도가 높지 않다. 계기지진과 역사지진 분포의 주요 차이를 생각한다면 수도권 지역을 들 수 있는데 역사지진에서는 다수의 중규모 이상 지진이 관찰되는 반면 계기지진에서는 상대적으로 수도권 지역에 지진발생 빈도가 높지 않다. 이는 역사지진의 진앙결정 오차에 기인할 수도 있고 계기지진 관측기간이 상대적으로 짧은 요인에 기인할 수도 있다. 서울을 포함한 수도권 지역은 우리나라 인구와 첨단산업이 밀집한 지역인 만큼 수도권 지역의 지진재해를 정확히 평가하기 위한 추가적인 연구 노력이 필요해 보인다. 또한 계기지진의 경우 진앙과 주요단층 및 지체구조구 경계와의 관계는 역사지진의 경우처럼 분명하지는 않다. 이는 계기지진들의 규모가 역사지진들에 비하여 작으므로 이와 연관된 소규모 단층들이 한반도 지질도에 표시되지 않은 것에 그 이유가 있으리라 여겨진다. 마지막으로 그림 9에 표현되지 않은 1905년부터

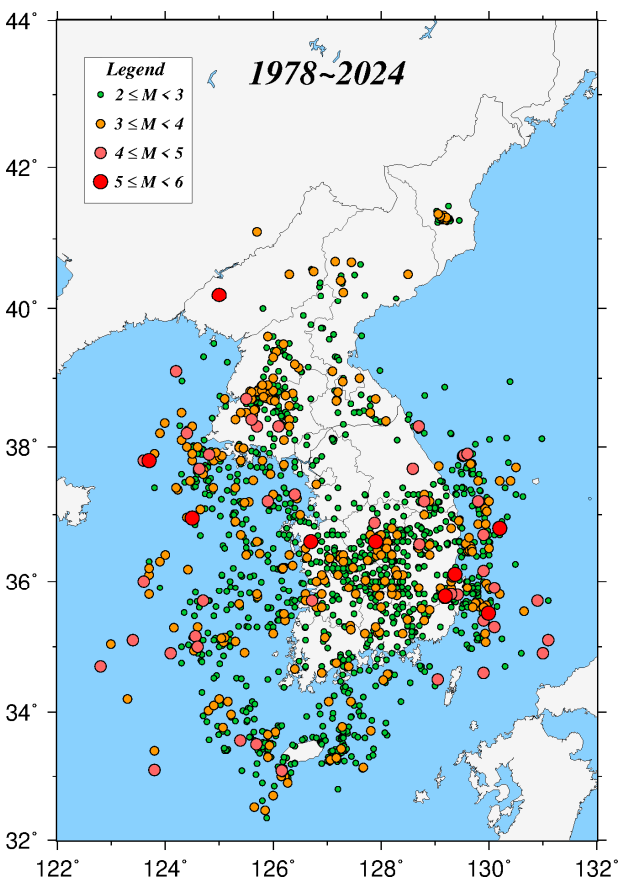


Fig. 9. Epicentral distribution map of instrumental seismicity in Korea (Reproduced from KMA, 2025b with permission).

1945년까지의 일제 강점기 반도의 계기지진활동은 Lee and Jung (1980)과 Lee *et al.* (2003)이 분석하여 정리하였다.

지진발생시 단층운동의 메커니즘을 이해하는 것은 지진 발생 특성을 이해하는데 중요한 요소이고 특히 지진을 발생시킨 지각의 응력 특성을 추론하는데 유용한 정보를 제공한다(그림 10). 한반도에서 발생하는 지진의 단층운동 메커니즘 분포를 보면 내륙에서 발생하는 많은 수의 지진은 북북동-남남서 방향의 주향을 갖는 주향이동단층 운동의 지진이다. 동해안의 일부 지진의 경우 역단층성 운동을 갖는데 내륙지각에서 동해 해양지각으로 전이되는 과정에서 지각 응력 조건의 변화에 기인할 가능성이 높다. 깊이에 따른 지진의 분포도 지진활동을 이해하는데 중요한 요소이다. 그림 10에서 보면 우리나라의 지진은 주로 지표에서 지하 25 km 정도 사이의 지각에서 발생하는 것을 볼 수 있다. 지표로부터 깊이가 증가할수록 온도와 압력 조건은 변화한다. 지진은 주로 취성(brittle) 변형을 하는 지역에서 발생하므로 연성(ductile) 변형을 할 것으로 예상되는 지각 하부나 맨틀 상부에서는 단층 파열에 의한 지진 발생이 어려운 환경이다. 같은 규모의 지진이라고 하더라도 진원 깊이가 얕을수록 지표에 더 큰 피해를 줄 수 있기 때문에 특정 지역에서 발생하는 지진의 진원 깊이를 이해하는 것은 그 지역의 지진재해를 좀 더 정밀하게 평가하는데 도움을 줄 수 있다.

한 지역의 지진활동이 시간에 따라 변화하는 경향을 보이는가 하는 것은 지진활동 특성을 규명하는데 중요한 요소 중 하나이다. 최근 한반도의 지진활동이 예전에 비해 증가하였는지 궁금해할 수 있는데 경주, 포항지진이 최근에 발생하였고 방송을 비롯한 다양한 미디어를 통해서 지진을 좀 더 자주 접하기 때문에 최근 우리나라의 지진활동이 예전보다 활발해진 것으로 느낄 수도 있다. 다만 그림 11에서 보듯이 최근에 기상청에서 관측하는 지진의 총횟수가 증가한 것은 사실이지만 대부분 고밀도 관측망의 구축으로 예전에는 감지하지 못하던 미소지진의 관측 횟수가 증가한 요인이 크다고 볼 수 있다. 규모 3.0 이상의 지진 발생 횟수를 보면 경주, 포항지진이 발생한 시기를 제외하고는 뚜렷한 증가 추이를 보이지는 않고 있다. 한 지역의 지진활동은 인접한 지역의 판구조 경계부의 운동에 영향을 받기 때문에 단기간에 큰 변화를 기대하기는 어렵다. 다만 인접 지역에서 큰 규모의 지진이 발생할 경우 이로 인한 지각 응력 변화가 주변 지역의 지진활동에 영향을 줄 수 있는데 2011년 동일본 지진 발생이 좋은 예이다. 동일본 대지진은 규모가 9.0이 넘는 초대형 지진으로 이에 수반된 지진해일과 후쿠시마 원전사고로 일본에 막대한 인명, 재산 피해를 안겼다. 동일본 대지진이 일어난 일본 해구의 섭입판에는 지진으로 수십 미터의 단층 변위가 발생하였는데 이러한 단층 운동으로 한반도에서도 수 센티미터의 지각 이동이 관찰되었다

(그림 12). 이러한 지각변형은 한반도에서 상시적으로 관찰되는 지각변형의 수준을 넘어서는 것으로 이후 한반도의 지진활동에 상당한 영향을 주었을 가능성이 있다.

한 지역에 발생한 지진의 시공간적 분포와 함께 지진활동 특성을 나타내는 중요한 변수로 규모-빈도 관계식(식 (4))의 상수 b 를 들 수 있다. b 값은 특정 지역에 발생한 지진 목록에서 작은 규모와 큰 규모 지진 사이에 상대적인 발생 비율을 나타내는데 b 값이 작을수록 상대적으로 큰 규모의 지진이 더 많이 발생한다고 볼 수 있다. 그러므로 b 값은 특정 지역의 지각 응력상태를 나타내는 지시자로 평가 받으며(Wiemer and Wyss, 2002), 지진재해평가 연구에서도 중요한 변수로 활용된다. Lee and Yang (2006)은 역사지진 자료를 활용하여 0.71의 b 값을 산출하였는데 이는 계기지진 자료를 포함하여 복수의 연구결과를 종합한 b 값(= 0.96)보다 작은 경향이 있다(Seo *et al.*, 2010). 역사지진 자료의 경우 상대적으로 작은 규모의 지진들이 목록에서 누락되었을 가능성이 있다. 계기지진 자료는 작은 규모의 지진들을 관측할 수 있는 능력이 높긴 하지만 관측 기간이 짧아 큰 규모 지진의 발생 특성을 충분히 파악할 수 없는 제약

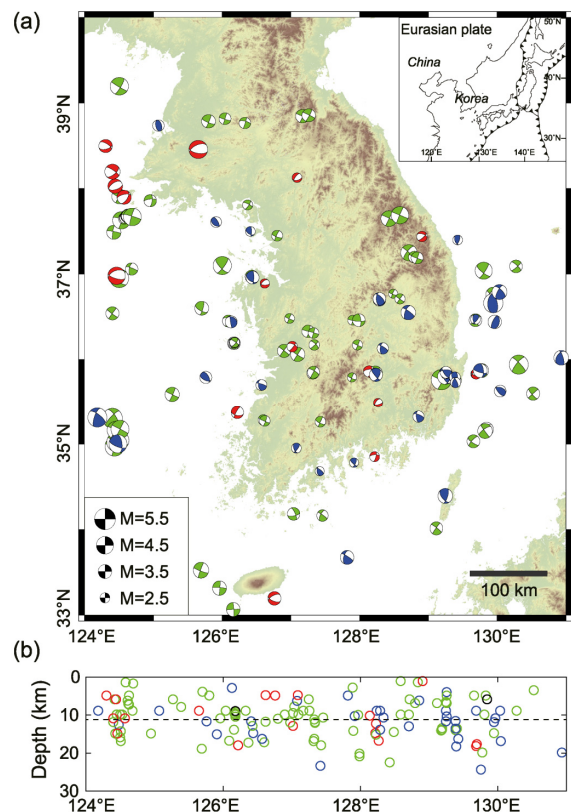


Fig. 10. (a) Focal mechanisms of major earthquakes in the Korean Peninsula (green: strike-slip faulting, blue: reverse faulting, red: normal faulting) and (b) focal depth distribution (Reproduced from Soh *et al.*, 2018 with permission).

이 있다. 상수 b 는 한 지역의 지진발생 특성을 나타내는 중요한 지시자이고 지진재해 평가 연구에도 중요한 역할을 하는 만큼 지속적인 계기지진 관측과 추가 연구를 통해서 안정적인 결과를 도출할 필요가 있다.

2016년과 2017년에 우리나라 동남권에서 연이어 발생한 경주지진과 포항지진은 지진 위험성에 대한 전 국민적

관심을 불러일으키는 계기가 되었다. 2016년 9월 12일에 발생한 경주지진은 규모 5.8 지진으로 우리나라 계기지진 관측 역사상 내륙에서 발생한 가장 큰 규모의 지진이다. 지진이 발생한 경주 인근은 물론 수백 km 떨어진 대전과 서울에서도 많은 사람이 진동을 느낄 정도였다. 그림 13은 경주지진 본진과 여진들의 진앙분포도를 보여주고 있다. 그

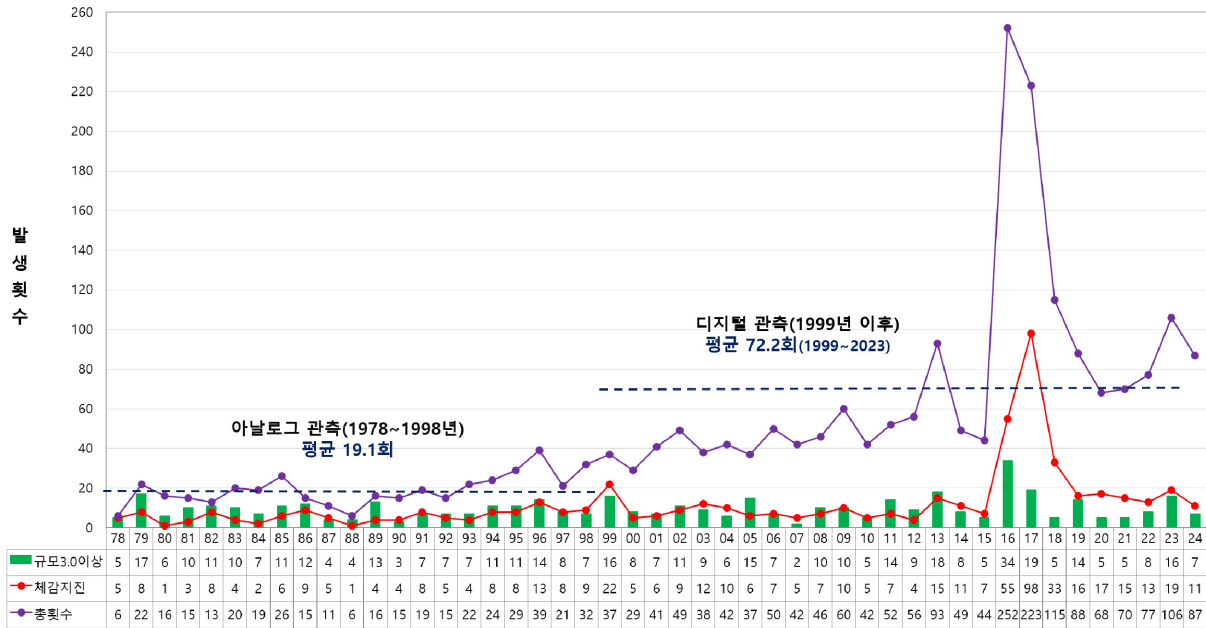


Fig. 11. Annual seismicity trends in the Korean Peninsula (Reproduced from KMA, 2025c with permission).

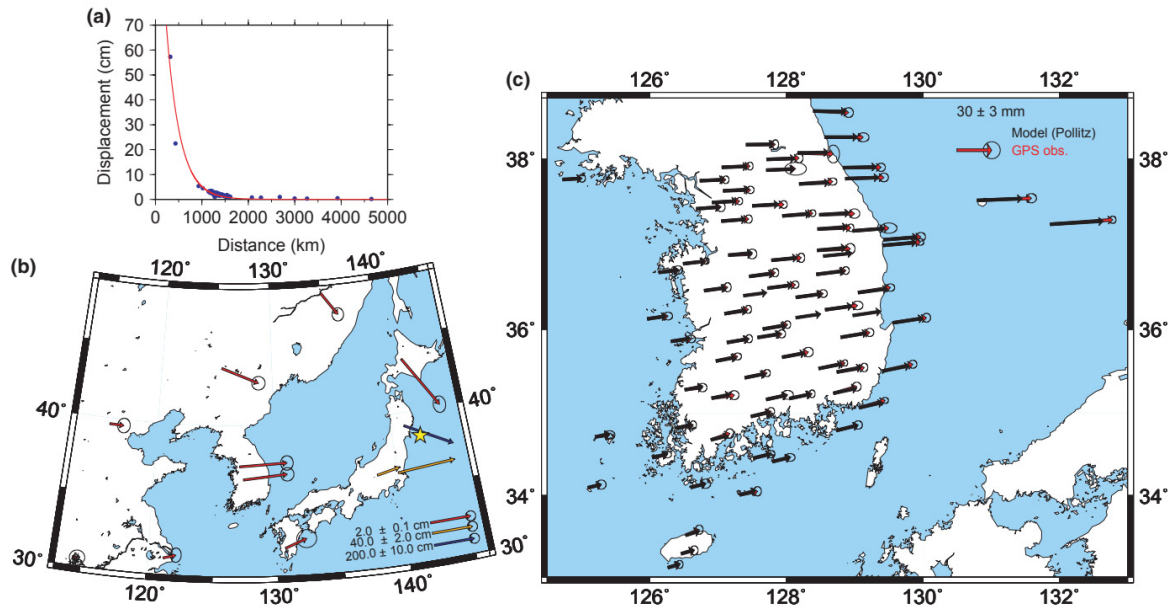


Fig. 12. Crustal movement in the Korean Peninsula triggered by the 2011 Tohoku, Japan, earthquake (Reproduced from Baek *et al.*, 2012 with permission).

림에서 보듯이 경주지진은 양산단층(YSF) 인근에서 단층의 주향 방향보다는 약간 동쪽으로 비스듬한 방향으로 발생한 것을 볼 수 있다. 경주지진 진앙은 경주시에서 남쪽으로 10 km 정도 떨어진 내남면에 위치하는데 인근에 양산단층대가 지나고 있어 양산단층대의 지진위험성이 다시 논란이 되기도 하였다. Lee and Na (1983)는 양산단층대 주변의 미소지진 활동을 분석하여 양산단층의 활성 가능성을 제기하기도 하였는데 이처럼 양산단층대를 포함하는 우리나라 동남권 지역은 지진활동 및 위험성 측면에서 지속적인 관측과 연구가 필요한 지역이다.

포항지진은 2017년 11월 15일 포항시 흥해읍에서 발생

하였다. 규모 5.4의 지진으로 규모 5.8의 경주지진보다 크기는 작지만 진원 깊이가 얕아 더 큰 피해가 발생했다. 이 지진 발생으로 그해 대학수학능력시험이 연기될 정도로 지진 발생은 인명, 재산 피해뿐만 아니라 다양한 사회적 파급효과를 초래할 수 있음을 보여주었다. 그림 14는 포항지진 본진과 여진들의 삼차원 분포도를 보여주는데 지진을 일으킨 단층의 기하구조가 생각보다 복잡할 수 있음을 잘 나타내주고 있다. 지진 발생 시 지표에 설치된 지진계에 기록된 지진파형을 정밀 분석하면 그림에서 보는 바와 같이 매우 복잡한 지진 발생 위치와 단층운동 메커니즘을 결정할 수 있고 이러한 정보는 지진의 발생 특성을 이해하는데 유용

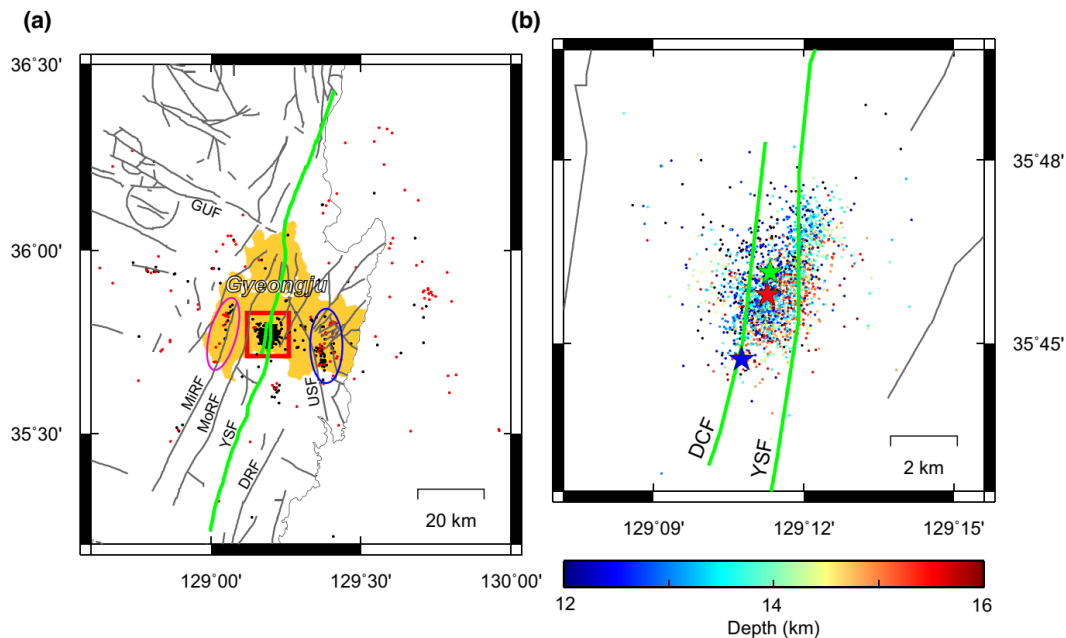


Fig. 13. Epicentral distribution of mainshock and aftershocks of the 2016 Gyeongju earthquake (Reproduced from Woo *et al.*, 2019 with permission).

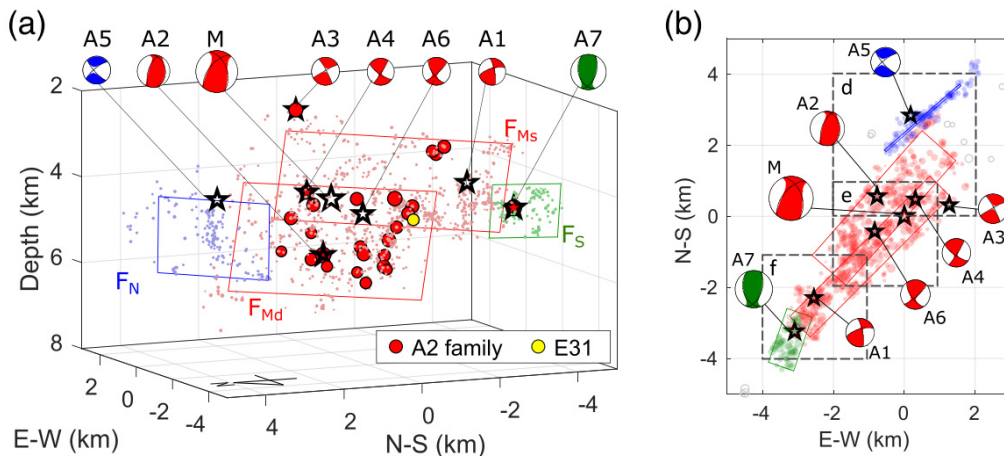


Fig. 14. 3D hypocentral distribution of the 2017 Pohang earthquake sequence (Reproduced from Son *et al.*, 2020 with permission).

한 정보를 제공한다. 포항지진도 경주지진과 비슷하게 양산단층대 인근에서 발생하였다. 다만 인근에 개발 중이던 지열발전소가 포항지진 발생에 영향을 주었다는 의견이 일부 학계에서 제기되었고 정부 합동 조사단은 포항지진이 지열발전소에 의해서 촉발되었을 가능성을 인정하였다(Lee *et al.*, 2019). 지열발전뿐만 아니라 대규모 석유, 가스 개발과 같은 인간의 지하 공간 개발 과정은 지진과 같은 부수 효과를 만들어 낼 수 있는데 인간이 지하공간을 개발하고 활용하는 과정에서 환경오염과 함께 지진과 같은 자연 재난

을 최소화하는 방법을 도출하는 것은 우리에게 남겨진 중요한 숙제라고 할 수 있다.

마지막으로 지진은 단층에 쌓인 응력이 단층의 저항 임계점을 넘어서면서 발생하는 지진단층의 동적 파열 과정이라고 할 수 있다. 그러므로 경주, 포항지진과 같은 규모 5.0 이상의 중규모 지진은 지질발생 특성을 심도 있게 이해하기 위해서 점 지진원으로 표현될 수 있는 미소지진과 다르게 유한단층면에서 단층의 파열과정을 고려할 필요가 있다. 그림 15는 2016년 경주지진에 대해서 지표에서 관측된

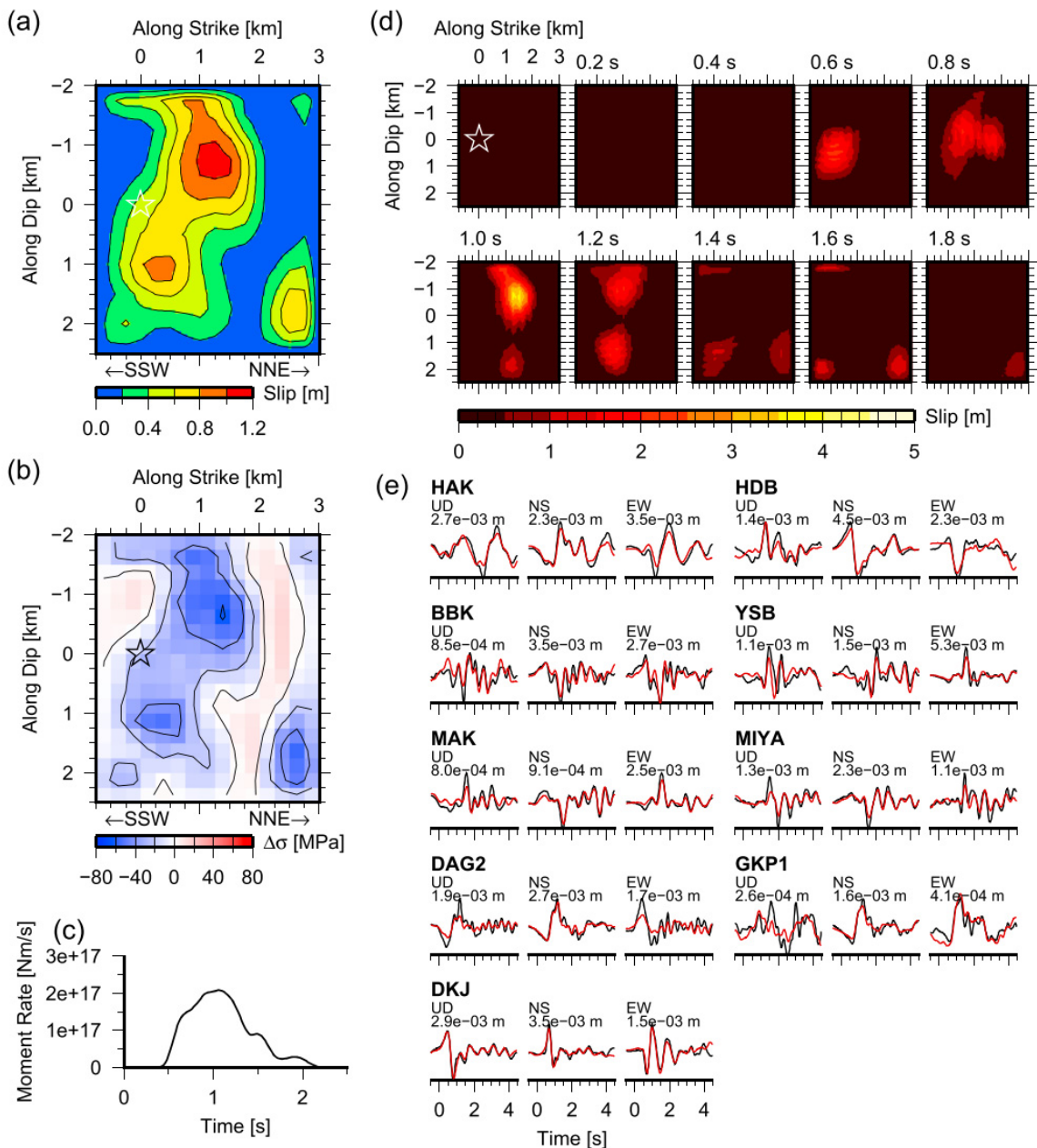


Fig. 15. Finite-fault model of the 2016 Gyeongju earthquake (Reproduced from Uchide and Song, 2018 with permission).

지진파형을 역산하여 경주지진을 일으킨 단층의 동적 파열 과정을 재구성한 연구 결과이다. 그림에서 보듯이 경주지진은 크기가 3~4 km 정도 되는 단층면에서 1~2초 정도의 시간 동안 수십 센티미터의 단층 변위 운동을 일으킨 지진임을 알 수 있다. 그림 16은 2017년 포항지진에 대한 유한 단층 모델 연구 결과인데 이 연구에서는 지진발생 전후에 촬영한 인공위성 지표변위 이미지 자료(InSAR: Interferometric Synthetic Aperture Radar)가 사용되었다. 포항지진은 4~6 km 정도 되는 단층면에서 역시 수십 센티미터의 단층 변위 운동이 발생한 지진임을 알 수 있다. 이처럼 지진은 지하 심부에서 발생하지만, 지표에서 관측된 다양한 지구물리학적 자료를 활용하면 병원에서 초음파나 CT 촬영하듯이 지하 심부 단층 운동을 이미지로 표현할 수 있는 다양한 기술들이 개발되고 있다.

3.4. 결론 및 전망

우리나라는 1978년 본격적인 계기지진 관측을 시작한 이래 지진관측 능력 측면에서 비약적인 발전을 이루었다. 1990년대를 기점으로 아날로그 지진계에서 디지털 지진계의 전환이 이루어졌고 2016년 규모 5.8 경주지진을 계기로 초고밀도 지진관측망이 구축되기도 하였다. 지하 심부 시추공 지진계에서 해저 지진계까지 지진관측의 영역도 확장되는 추세이다. 현대적 지진관측망의 구축과 통신기술의 발달은 관측된 지진자료를 실시간으로 수신하고 분석하여 휴대전화 메시지로 지진재난문자 정보를 알려주는 단계에 이르렀다. 또한 수십 년간 축적된 지진자료는 한반도 지진

활동의 시공간적 분포와 변화 특성을 이해하고 다양한 지진 연구를 수행하는데 유용한 정보를 제공해 주고 있다. 현대적인 지진관측망에 의해 축적되고 있는 계기지진 자료는 역사지진 자료와 함께 우리나라 지진활동을 이해하고 미래에 발생할 수 있는 지진재해에 대비하는 다양한 연구를 수행하는데 크게 기여할 수 있을 것으로 기대된다.

또한 디지털 지진자료와 최근 혁신적인 발전을 하고 있는 인공지능 기술의 접목은 지진관측 분야에 새로운 동력을 제공하고 있다. 그동안 인간이 수행해야 했던 지진자료 분석을 위한 단순 반복작업을 인공지능 알고리즘이 대체할 수 있을 뿐만 아니라 인공지능 시스템은 인간 연구자가 인지하지 못한 미세하지만 유용한 지진신호를 인식하고 인간 연구자가 생각하지 못한 새로운 분석과 해석의 가능성을 보여줄 수도 있다. 우리나라 지진연구는 공간적인 확장도 필요하다고 생각한다. 지금까지는 주로 우리나라 내륙과 근해의 지진활동에 관심을 가졌다면 앞으로는 주변국인 일본, 중국, 몽골 등 동북아 지역으로의 연구 영역 확장도 필요하다고 생각한다. 2011년 동일본 대지진은 우리나라에 직간접적으로 많은 영향을 미쳤고 2024년 여름에 발생한 일본 난카이해곡(Nankai Trough) 인근에서의 지진은 일본 지진 전문가들이 2011년 동일본 대지진 급 초대형 지진이 일본 남해 해곡에서도 발생할 수 있음을 경고하며 국내에서도 큰 이슈가 되었다. 지진 발생은 근본적으로 판구조 운동에 의한 것으로 판경계를 포함하는 거시적인 지진연구는 한반도 지진활동을 심층적으로 이해하는데 크게 기여할 수 있다. 마지막으로 우주로의 확장도 생각해 볼 수 있다. 달과 화성에 지진계를 설치하여 지구 밖 행성의 내부 구조를 연

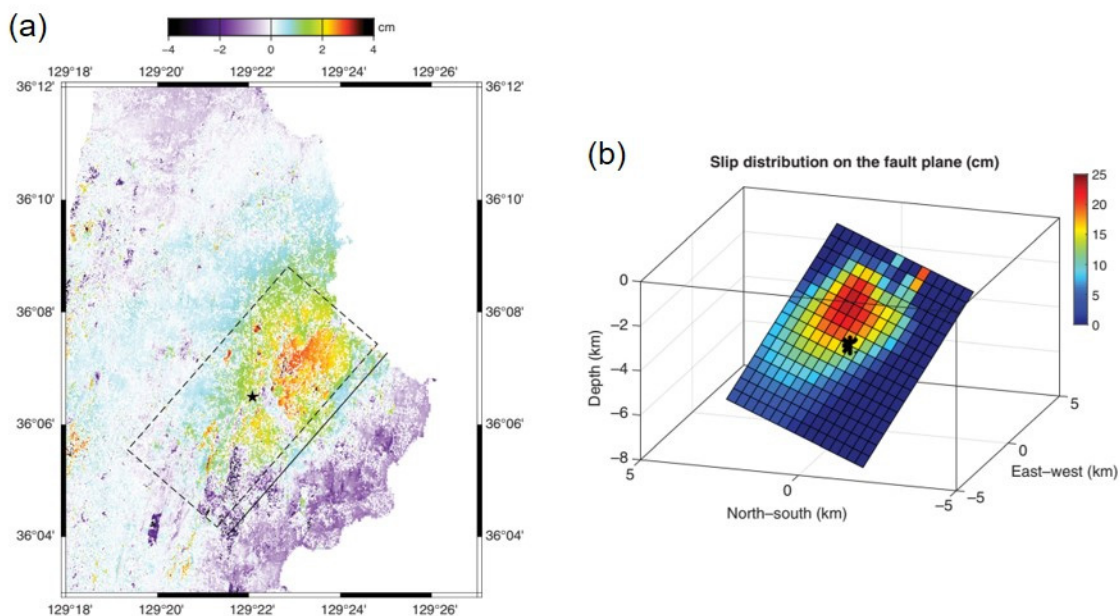


Fig. 16. Finite-fault model of the 2017 Pohang earthquake (Reproduced from Song and Lee, 2019 with permission).

구하고 월진(Moonquake)과 화성지진(Marsquake)을 연구할 수 있는 날을 기대해 본다.

감사의 글

이 연구는 2025년 대한민국학술원 '학문연구의 동향과 쟁점' 발간 사업의 지원을 받아 수행되었습니다. 이 논평은 한국연구재단의 정책연구과제(정책연구 202606)의 수행 결과를 토대로 작성되었으며, 한국연구재단의 공식적인 견해와는 다를 수 있습니다.

REFERENCES

- Allen, T.I., Gibson, G., Brown, A. and Cull, J.P., 2004, Depth variation of seismic source scaling relations: implications for earthquake hazard in southern Australia. *Tectonophysics*, 390, 5-24.
- Ambraseys, N.N., 1971, Value of historical records of earthquakes. *Nature*, 232, 375-379.
- Back, J., Shin, Y.-H., Na, S.-H., Shestakov, N.V., Park, P.-H. and Cho, S., 2012, Coseismic and postseismic crustal deformations of the Korean Peninsula caused by the 2011 Mw 9.0 Tohoku earthquake, Japan, from global positioning system data. *Terra Nova*, 24, 295-300.
- Båth, M., >, 1973, *Introduction to Seismology*. Birkhauser Verlag, Basel and Stuttgart.
- Choi, D.K., 2014, *Geology and Tectonic Evolution of Korea* (in Korean with English summary). Seoul National University Press, 277 p.
- Grandori, G., Drei, A., Perotti, F. and Tagliani, A., 1991, Macroseismic intensity versus epicentral distance: the case of Central Italy. *Tectonophysics*, 193, 165-171.
- Han, J., Kim, S. and Sheen, D.-H., 2025, RPNNet: Robust P-wave first-motion polarity determination using deep learning. *Seismological Research Letters*, 96, 2405-2417.
- Han, J., Seo, K.J., Kim, S., Sheen, D.-H., Lee, D. and Byun, A.-H., 2024, Research catalog of inland seismicity in the southern Korean Peninsula from 2012 to 2021 using deep learning techniques. *Seismological Research Letters*, 95, 952-968.
- Karnik, V., 1969, *Seismicity of the European Area, Part 1*. D. Reidel Publishing Company, Dordrecht-Holland, 364 p.
- Korea Meteorological Administration (KMA), 2025a, Seismic station network distribution (<http://www.kma.go.kr/>).
- Korea Meteorological Administration (KMA), 2025b, Epicentral distribution map of instrumental seismicity in Korea (<http://www.kma.go.kr/>).
- Korea Meteorological Administration (KMA), 2025c, Annual seismicity trends in the Korean Peninsula (<http://www.kma.go.kr/>).
- Kyung, J.B., Oike, K. and Hori, T., 1996, Temporal variations in seismic and volcanic activity relationship with stress fields in East Asia. *Tectonophysics*, 267, 331-342.
- Lay, T. and Wallace, T.C., 1995, *Modern Global Seismology*. Academic Press, San Diego.
- Lee, K., 1984, A study on intensity attenuation in the Korean peninsula. *Journal of the Geological Society of Korea*, 20, 140-146.
- Lee, K., 1998, Historical earthquake data of Korea, *Journal of the Korean Geophysical Society*, 1, 3-22 (in Korean).
- Lee, K., 2024, Deep crustal earthquakes in the Korean peninsula. *Journal of the National Academy of Sciences, Republic of Korea*, 63, 171-182.
- Lee, K., 2025, *Historical Earthquakes of Korea* (in preparation). The National Academy of Sciences, Republic of Korea.
- Lee, K., Chung, N.S. and Chung, T.W., 2003, Earthquakes in Korea from 1905 to 1945, *Bulletin of the Seismological Society of America*, 93, 2131-2145.
- Lee, K. and Han, Y.W., 1999, Evaluation and cataloging of Korean historical earthquakes. Technical Report KINS/HR-193 for Korean Institute of Nuclear Safety, Daejeon, 176 pp (in Korean).
- Lee, K. and Jung, H.O., 1980, A study of instrumental earthquake data of the Korean peninsula. *Journal of the Geological Society of Korea*, 16, 32-45.
- Lee, K. and Kim, J.K., 2002, Intensity attenuation in the Sino-Korean craton. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 92, 783-793.
- Lee, K. and Lee, J.H., 2003, Short note: magnitude-intensity relation for earthquakes in the Sino-Korean craton. *Seismological Research Letters*, 74, 350-352.
- Lee, K., Lee, M.S., Kwon, B.D. and Yang, W.S., 1985, Studies on the seismic risk of the Korean Peninsula (1). *Journal of the Geological Society of Korea*, 21, 227-240.
- Lee, K. and Na, S.H., 1983, A study of microearthquake activity of the Yangsan fault. *Journal of the Geological Society of Korea*, 19, 127-135.
- Lee, K. and Yang, W.S., 2006, Historical seismicity of Korea. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 96, 846-855.
- Lee, K.-K., Ellsworth, W.L., Giardini, D., Townend, J., Ge, S., Shimamoto, T., Yeo, I.-W., Kang, T.-S., Rhie, J., Sheen, D.-H., Chang, C., Woo, J.-U. and Langenbruch, C., 2019, Managing injection-induced seismic risks. *Science*, 364, 730-732.
- Mei, S.Y., 1960, Characteristics of earthquake activity in China. *Acta Geophysica Sinica*, 9, 1-19 (in Chinese).
- Richter, C.F., 1958, *Elementary Seismology*, W. H. Freeman and Company, San Francisco.
- Seo, J.-M., Rhee, H. and Choi, I., 2010, A study on the best estimate of seismicity parameter b-value and its application for the seismic hazard analysis of the Korean Peninsula. *Journal of the Earthquake Engineering Society of Korea*, 14, 35-42 (in Korean with English abstract).
- Soh, I., Chang, C., Lee, J., Hong, T.-K. and Park, E.-S., 2018, Tectonic stress orientations and magnitudes, and friction of faults, deduced from earthquake focal mechanism inversions over the Korean Peninsula. *Geophysical Journal International*, 213, 1360-1373.
- Son, M., Cho, C.S., Lee, H.K., Han, M., Shin, J.S., Kim, K. and Kim, S., 2020, Partitioned fault movement and aftershock triggering: Evidence for fault interactions during the 2017 Mw 5.4 Pohang earthquake, South Korea. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 125, e2020JB020005, <https://doi.org/10.1029/2020JB020005>.

- Song, S.G. and Lee, H., 2019, Static slip model of the 2017 Mw 5.4 Pohang, South Korea, earthquake constrained by the InSAR data. *Seismological Research Letters*, 90, 140-148.
- Uchide, T. and Song, S.G., 2018, Fault rupture model of the 2016 Gyeongju, South Korea, earthquake and its implication for the underground fault system. *Geophysical Research Letters*, 45, 2257-2264.
- Utsu, T., 1977, *Seismology*. Kyoritsu-Shuppan, Tokyo (in Japanese).
- Wada, Y., 1912, A survey of Korean ancient and recent earthquakes. Report of the study of Korean ancient observations. Meteorological Observatory of the Government General of Korea, 79-105 (in Japanese).
- 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.
- Weichert, D.H., 1980, Estimation of earthquake recurrence parameters for unusual observation periods for different magnitudes. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 70, 1337-1356.
- Wiemer, S. and Wyss, M., 2002, Mapping spatial variability of the frequency-magnitude distribution of earthquakes. *Advances in Geophysics*, 45, 259-302.
- 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.
- Zhang, H. and Thurber, C.H., 2003, Double-difference tomography: The method and its application to the Hayward fault, California. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 93, 1875-1889.