



Article

# 강원도 북평분지 역암과 주변 화성암에서 발견된 에오세(50-48 Ma) 저어콘 연대: 판구조론적 고찰

조문섭<sup>1,\*</sup>, 이유영<sup>2</sup>, 김정민<sup>2</sup>, 정원석<sup>3</sup>, 홍태경<sup>4</sup>

<sup>1</sup>서울대학교 지구환경과학부

<sup>2</sup>한국기초과학지원연구원 지구행성물질분석연구단

<sup>3</sup>충북대학교 지구환경과학과

<sup>4</sup>연세대학교 지구시스템과학과

## Eocene (50-48 Ma) zircon ages recorded in a Bukpyeong Basin conglomerate and its surrounding igneous rocks: A plate tectonic perspective

Moonsup Cho<sup>1,\*</sup>, Yuyoung Lee<sup>2</sup>, Jeongmin Kim<sup>2</sup>, Wonseok Cheong<sup>3</sup>, Tae-Kyung Hong<sup>4</sup>

<sup>1</sup>School of Earth and Environmental Sciences, Seoul National University, Seoul 08826, Republic of Korea

<sup>2</sup>Center for Earth and Planetary Materials Analysis, Korea Basic Science Institute, Ochang 28119, Republic of Korea

<sup>3</sup>Department of Earth and Environmental Sciences, Chungbuk National University, Cheongju 28644, Republic of Korea

<sup>4</sup>Department of Earth System Sciences, Yonsei University, Seoul 03722, Republic of Korea

Received: January 8, 2026 / Revised: February 12, 2026 / Accepted: February 19, 2026

\*Corresponding author: E-mail: moonsup@snu.ac.kr

**요약:** 우리는 북평분지의 역암과 주변암들로부터 저어콘 U-Pb연대를 측정하여 분지 확장에 관한 자료를 제공하고, 더 나아가 한 반도의 신생대 화성-지구조 발달사를 동아시아 판구조 운동에 비추어 검토하였다. 한 개 역암 시료의 기질부와 석영반암질 역에서 각각 추출한 저어콘의 <sup>206</sup>Pb/<sup>238</sup>U 기중평균연대는  $49.1 \pm 0.7$  Ma (n=10)과  $48.7 \pm 0.6$  Ma (n=14)이다. 또한, 분지 서쪽 인근에 산출하는 규장질 응회암( $48.2 \pm 0.5$  Ma; n=19)과 삼화화강암( $48.6 \pm 0.5$  Ma; n=10) 역시 오차 범위 내에서 동일한 저어콘 연대를 보인다. 전자는 오십천단층의 바로 서쪽에 산출하며, 북평분지 퇴적체의 주요 근원암으로 추정된다. 또한, 오십천단층의 운동 시기는 응회암을 절단하며 발달하므로 약 48 Ma 이후이다. 이들 에오세 연대는 양산단층 부근에서 보고된 화강암체와 암맥군(+화산암류)의 약 58-47 Ma 연대와 일치하며, 북평분지와 포항분지가 서로 유사한 지구조 환경에서 형성되었음을 시사한다. 한반도 내 광역적인 에오세 화성 활동은 일본과 극동 러시아에서 보고된 약 60-46 Ma 기간의 화성 활동 갭(magmatic gap)과 대조적이며, 이러한 차이는 약  $50 \pm 10$  Ma 경 일본 해구에 거의 평행하게 섭입한 이자나기-태평양판 해령(Izanagi-Pacific ridge)의 영향일 것으로 추정된다. 하지만, 이들 판과 해구 사이의 기하 및 운동학적 관계는 물론이고, 해령 섭입에 따른 슬랩-창(slab window)의 발달 시기 역시 정확히 알기 어렵다. 그럼에도 불구하고, 우리나라의 에오세 화성 활동이 한반도뿐만 아니라 동아시아의 지구조 발달사를 연구하는 데 중요한 열쇠를 쥐고 있음은 분명하다.

**주요어:** 저어콘 U-Pb 연대, 에오세 화성활동, 북평분지, 오십천 vs. 양산단층, 이자나기-태평양판 해령 섭입

**ABSTRACT:** We measured the U-Pb ages of zircons from a conglomerate and the surrounding rocks of the Bukpyeong Basin to provide geochronological data on basin development, and further examined the Cenozoic tectono-magmatism in the Korean Peninsula in the context of East Asian plate tectonics. The weighted mean <sup>206</sup>Pb/<sup>238</sup>U ages of zircons extracted from the matrix and quartz porphyritic cobble of a conglomerate are  $49.1 \pm 0.7$  Ma (n=10) and  $48.7 \pm 0.6$  Ma (n=14), respectively. Furthermore, a felsic tuff ( $48.2 \pm 0.5$  Ma; n=19) and a Samhwa granite ( $48.6 \pm 0.5$  Ma; n=10), both of which occur near the basin, also yielded zircon <sup>206</sup>Pb/<sup>238</sup>U ages that are identical within the error range. The former, which occurs immediately to the west of the Osipcheon Fault, is presumably the major provenance of sediments in the Bukpyeong Basin. In addition, the timing of fault movement must be posterior to ca. 48 Ma, because the fault transects the tuff. The Eocene ages documented in this study are consistent with ca. 58-47 Ma ages reported from granitic bodies and dykes (+volcanic rocks) near the Yangsan Fault, suggesting that the Bukpyeong and Pohang (+ its equivalent) basins formed under similar tectonic environments. The widespread Eocene magmatic activity in the eastern Korean Peninsula contrasts markedly with ca. 60-46 Ma magmatic gap reported in Japan and the Russian Far East. This apparent discrepancy potentially reflects the diachronous timing of subduction, at around  $50 \pm 10$  Ma, for the Izanagi-Pacific ridge which

is positioned subparallel to the Japanese trench. However, the precise timing for the development of slab window (s) associated with ridge subduction remains uncertain, as does the kinematics and geometric relationship between the two plates and the trench. Nevertheless, it is evident that Eocene magmatic activity in Korea holds a key to understanding the tectonic evolution not only of the Korean Peninsula but also of East Asia.

**Key words:** detrital zircon U-Pb ages, Eocene magmatism, Bukpyeong Basin, Osipcheon vs. Yangsan faults, Izanagi-Pacific ridge subduction

## 1. 서론

우리나라의 신기 지구조(Neotectonics) 운동에 대한 연구는 경주와 포항 지진이 발생한 이후 매우 활발해졌다. 특히, 양산단층을 중심으로 지진 활동의 특성 및 활성단층의 역사를 밝히기 위해 국가 차원에서 많은 연구가 이루어지고 있다(e.g., Cheon *et al.*, 2020; Lee *et al.*, 2020; Hong *et al.*, 2024). 이와는 대조적으로, 경상권 이외 지역에 기록된 신생대 지질-지구조(tectonics)에 대한 자료는 부족한 편이다. 이러한 자료 축적의 편차는 더 큰 규모의 지구조 운동을 이해하는 데 걸림돌로 작용하고 있다. 예를 들어, 동해의 열림(opening)에 따른 지구조 환경과 메커니즘은 비교적 잘 알려져 있지만, 이 열림 운동이 동해안의 마이오세 육상 분지와 어떻게 연계되어 있는지에 대한 연구는 드물다. 이는 그동안 양산단층과 연일구조선 부근에 분포하는 포항-울산 지역의 분지 연구에 역량이 집중되었기 때문이다. 그러나 최근 북평분지에 대한 서로 다른 분지 발달사 모델이 제안되어 세간의 이목을 끌고 있다(Kim, 2024; Lim *et al.*, 2025).

동해의 열림과 확장이 중기 마이오세(약 15 Ma; Son *et al.*, 2015) 이후 점차 종료되면서 압축성(compressional) 지구조 운동이 지배적이 되었고, 이에 수반되어 만들어진 해저 퇴적층 내 역단층 구조가 울릉 분지와 동해 쪽 한반도 대륙의 연안에 존재한다는 사실은 오랜 기간 알려져 왔다(Yoon and Chough, 1995; Kwon *et al.*, 2009; Choi *et al.*, 2012). 최근 Kim (2024)은 울릉 분지의 서쪽 경계에 해당되는 동해안 해역에서 얻은 일련의 탄성과 반사 자료 연구 결과를 바탕으로(Kim *et al.*, 2018; Lee *et al.*, 2023a), 압축성 신기 지구조 운동의 중요성을 강조한 바 있다. 또한, Kim (2024)은 동해안의 육상-연안 퇴적분지에 대한 연구가 신기 지구조 운동을 이해하는 데 필수적이며, 북평-목호 분지가 전기 플라이오세에 일어난 압축성 운동의 산물인 피기백(piggyback) 퇴적분지라고 추론했다. 이 제안은 동해의 울릉-후포-목호 단층 등 주요 단층이 기존의 정단층에서 역단층으로 재활성화된 지구조 반전(tectonic inversion)을 기록하고 있다는 해저 탄성과 반사 자료의 해석에 기반한다. 이와 같은 구조적 역전 현상을 섭입대 태동(subduction initiation)에 연계시킨 Kim *et al.* (2018)과 Lee *et al.* (2023a)의 제안은 학계의 주목을 받고 있다. 하지만, 최근 Lim *et al.* (2025)이 보고한 야외 조사 연구 결과는 Kim (2024)의 제안과 크게

다르다. 즉, 북평분지는 정단층에 의해 지배 받은 전형적인 당겨열림(pull-apart) 분지에 해당하며, 양산단층 부근의 중기 마이오세 퇴적분지와 잘 대비된다고 해석하였다.

이 연구는 북평분지의 역압과 주변의 화성암체를 대상으로(그림 1) 저어콘 결정화 연대를 측정함으로써 분지 주변에 발달한 오십천단층의 운동 시기를 가늠해 보고자 수행되었다. 또한, 단층 주변의 여러 화성암이 제공하는 화성-지구조(tectono-magmatic) 정보를 획득해 북평분지가 어떤 지구조 환경에 놓여 있었는지 추론하였다. 궁극적으로, 우리는 북평분지와 오십천단층 주변의 화성암에 대한 암석연대학적 정보를 제공함으로써, 백악기-신생대 지구조 발달사를 보다 명확하게 밝히려 하였다. 또한, 오십천단층에 대한 지질-지구물리학적 자료를 종합적으로 검토해 더 거시적인 암석-지구조 모델을 제시하고자 노력하였다. 그 결과는 이자나기 판의 운동 및 이자나기-태평양 판 사이의 해령 섭입을 아우르는 지구조 모델과(e.g., Wu and Wu, 2019; Wu *et al.*, 2024; Yamaoka *et al.*, 2025) 함께 동아시아 지구조 발달사를 이해하는데 중요한 기초 자료로 활용될 것이다.

## 2. 지질 개요

북평분지는 강원도 동해시 부근에서 북동-남서 방향으로 길쭉하게 뻗어 있는, 폭과 길이가 각각 약 5 km와 10 km에 달하는 썩기 형태의 퇴적체이다(그림 1). 분지 중앙부 서쪽에서 시추를 통해 확인된 퇴적층의 두께는 150-200 m 또는 그 이상일 것으로 추정된다(Kim, 2024). 분지 주변의 기반암으로 영남육괴 선캠브리아 편마암, 고생대 조선누층군의 결정질 석회암, 쥘라기 화강암, 에오세 응회암과 삼화화강암(아래 참고) 등이 산출한다(그림 1b).

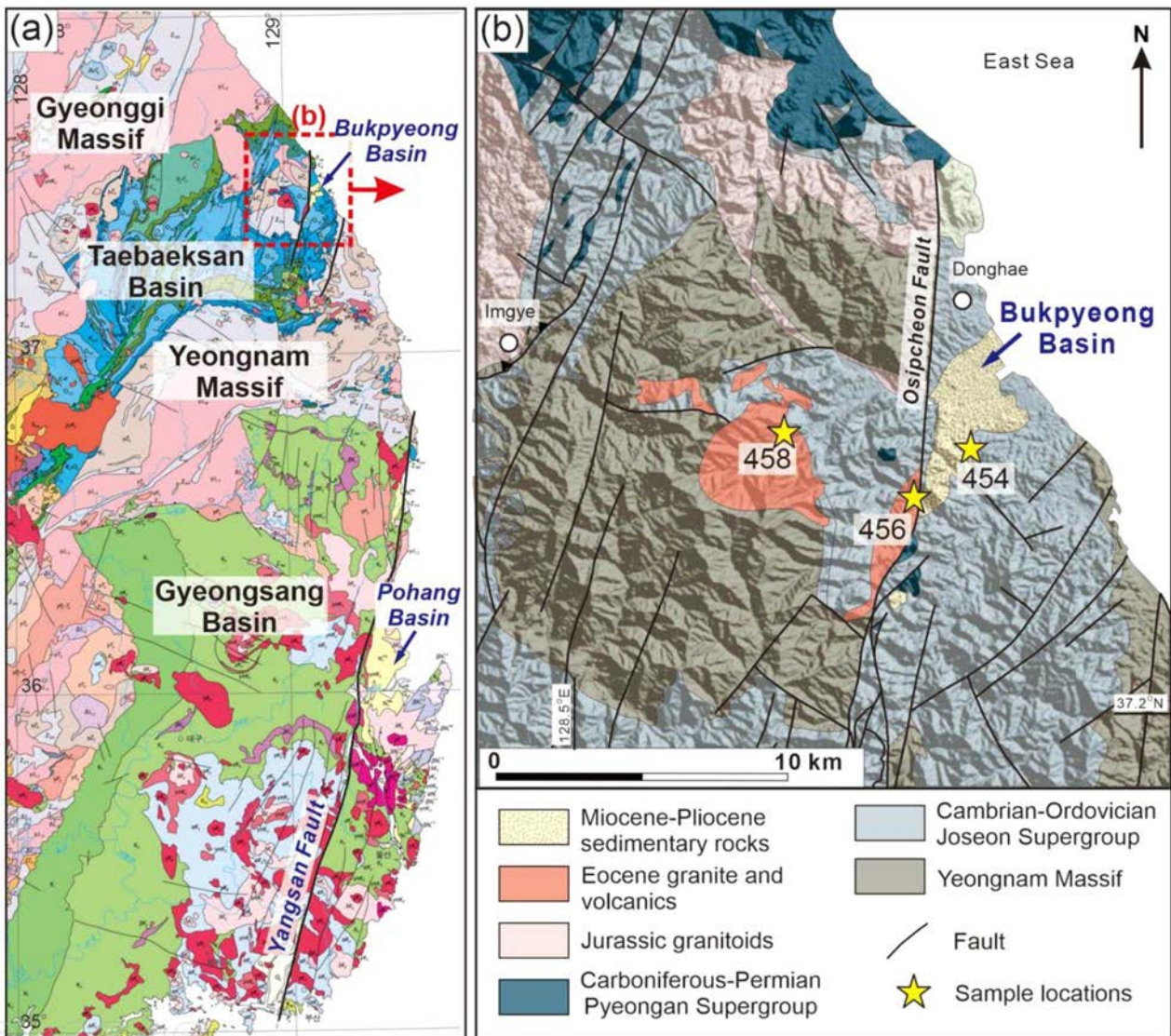
북평분지의 층서는, Lim and Choi (1982)의 지질도를 근거로, 하부의 북평층과 상부의 도경리역암으로 구성되고 알려져 왔다. 북평층은 이질, 사질, 역질 미고결 퇴적층의 호층으로 구성되며, 두께는 약 40 m에 달한다. 이 층에서는 구조류, 포자-화분, 이매패류, 복족류, 어류 이빨 등 다양한 화석이 보고된 바 있으며, Kim (2024)은 이들 화석의 대부분이 플라이오세에 속함을 제시한 바 있다. 하지만, Lim *et al.* (2025)의 표에 나와 있듯이, Lee and Jacobs (2010)은 북평층에서 *Neocometes* 화석을 동아시아에서 처음으로

발견해 마이오세(18-15.2 Ma) 생층서 연대를 보고한 바 있다.

Lim and Choi (1982)가 오래전 제시한 북평분지 층서는 Lim *et al.* (2025)가 최근 작성한 지질도와 크게 다르기 때문에, 층서 해석에 주의가 필요하다. Lim *et al.* (2025)는 북평분지의 충전물인 비화산성 퇴적층들을 총 3개의 퇴적상 조합인 A, B, C층(비공식 지층명)으로 구분하였다. 최하부의 A층은 주로 각력암으로 구성되는데, 분지 경계인 서쪽에서 분지 내부인 동쪽으로 갈수록 거력질 역암의 비율은 점차 감소하여 왕자갈 역암으로 대체되는 경향을 보인다. B층은 역암과 역질사암, 사암 등이 혼재하며 이들은 연속성이 불량하다. 역암은 역지지성(clast-supported) 조직을 보이며, 역들은 주로 아각형-아원형의 왕자갈-자갈로, 기질은 분급이 불량한 조립-중립질 모래로 구성된다. B층

의 상부로 갈수록 사암의 비율이 증가하며, 일부 세립질 사암에서는 두께 10 cm 미만의 얇은 갈탄층 및 탄화목 등 유기물이 풍부한 층들이 관찰된다. 최상부의 C층은 주로 이질암으로 구성되며, 괴상의 유백색 이암과 세립질 사암-이암의 교호층이 산출하기도 한다.

Lim *et al.* (2025)는 분지 서쪽을 경계 짓는 단층이 북동-북북동 방향의 정단층과 이들을 잇는 북서-북북서 방향의 우수향 이음단층들로 구성된다고 제안하였다. 이 단층들은 동해시와 삼척시 통리 협곡을 잇는 오십천단층에 인접해 있으며, 후자는 북평분지 남서쪽의 인접한 화산암체를 절단한다(그림 1b). 이 화산암체는 백악기 분화 산물로 알려져 왔으나(Kee *et al.*, 2019), 이번 연구에서 에오세로 판명되었다(4.2절 참조). 한편, 북평분지 동쪽에서는 주로 재결정된



**Fig. 1.** (a) Geological map of the eastern Korean Peninsula (adopted from Kee *et al.*, 2019). (b) Geological map of the study area showing the sample locations (modified from Cho *et al.*, 2018).

고생대 탄산염암이 기반암이며 상부의 분지 충전물과 부정합 경계를 보인다(Lim *et al.*, 2025). Lim *et al.* (2025)의 결과는 북평분지가 동쪽에서 서쪽으로 이동한 충상단층에 의해 퇴적물들을 공급받은 피기백 분지라는 제안(Kim, 2024)과 대조적이다.

### 3. 암석 기재

우리는 4개 시료에서 저어콘을 분리해 U-Pb 연대를 측정하였으며, 이들 시료는 (1) 북평분지 미고결 역암에서 채취한 왕자갈 역과 사암질 기질부(각각 454-C와 454-M 시료); (2) 오십천단층에 의해 절단된 규장질 응회암(456); (3) 삼화화강암(458)을 포함한다. 분석된 각 시료는 신선하며, 시료 456에서 일부 이차광물(제올라이트)이 관찰된다. 이들의 광물 조성과 위치 좌표는 표 1에 정리되어 있다.

**북평분지 미고결 역암(시료 454):** 이 시료는 Lim *et al.* (2025)의 B층에 해당되는 역암으로, 왕자갈 역은 암편과 반정들을 포함하는 전형적인 반상구조를 특징적으로 보여

준다. 석영과 장석이 특징적인 반정으로 나타난다. 역암의 기질부는 중립질(약 1-2 mm) 입자가 대부분인 사질암이며, 완전히 고화되지 않은 탓에 칼로 긁어낼 수 있을 정도로 약하다. 저어콘 U-Pb 분석은 같은 장소에서(그림 1b) 채집한 왕자갈 역(cobble; 454-C)과 기질부(454-M) 시료를 대상으로 수행하였다(그림 2a). 왕자갈 역은 마그마 용융물(melt)와의 반응에 따른 용식(resorption) 구조를 보이는 석영과 함께 장석 반정으로 구성된 규장질 반암이며, 세립의 기질이 특징적이다(그림 3a).

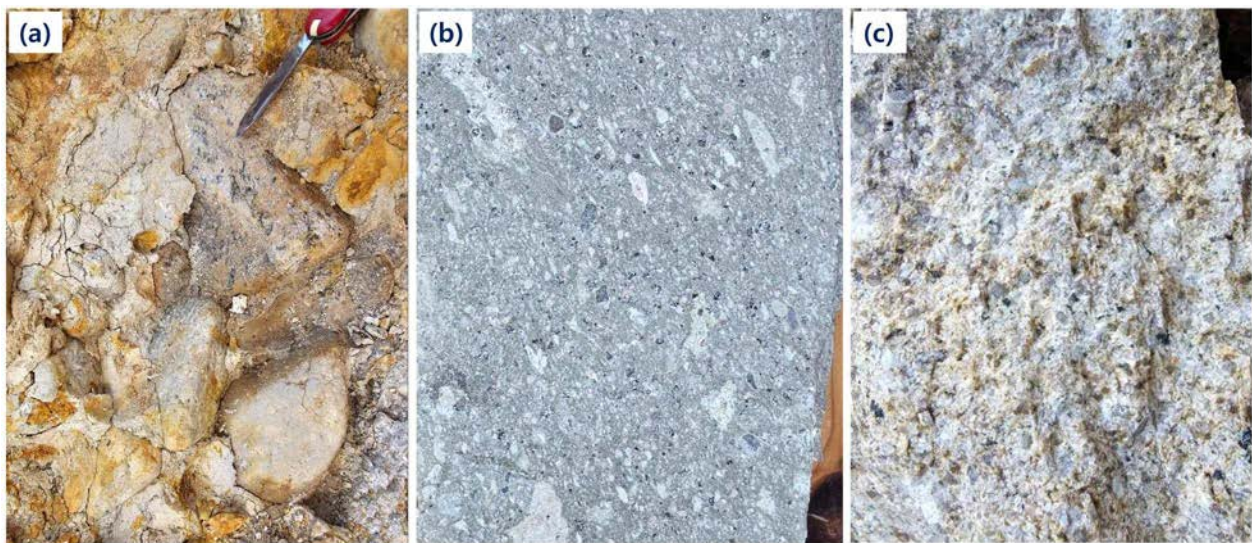
**규장질 응회암(시료 456):** 북평분지의 서쪽에 인접해 위치하며, 오십천단층에 의해 절단된 이 응회암은 전체적으로 연갈색 또는 연회색을 띤다. 1-3 mm 크기의 투명한 연회색-담흑색 반정으로 나타나는 석영 단결정(monocrystalline quartz)은 모드가 2-3% 정도 되어 육안으로도 잘 관찰된다(그림 2b). 석영은 자형-반자형 결정들이 대부분이며 용식 구조가 특징적이다(그림 3b). 수 mm에서 1 cm에 달하는 화산암편들과 함께, 부분적으로 신장된 부석 편이 다수 나타나기도 한다(그림 3c; Lim *et al.*, 2025). 이들 암편은 장

**Table 1.** Rock types, mineral assemblages and GPS locations for the samples analyzed in the study area.

Sample	Rock type	Mineral assemblage	GPS location
454-C	Cobble, conglomerate	Qz + Kfs + Pl ± Opq ± Zrn	N37°27'46.4", E129°06'58.2"
454-M	Matrix, conglomerate	n.a.*	Ditto
456	Felsic tuff	Pl + Qz ± Opq ± Chl ± Zrn	N37°24'57.4", E129°04'41.0"
458	Samwha granite	Kfs + Qz + Pl ± Bt ± Opq ± Zrn	N37°40'49.1", E129°02'14.1"

\*The matrix sample is unconsolidated and too fragile to make a thin section.

Mineral abbreviations: Qz, quartz; Kfs, K-feldspar; Pl, plagioclase; Bt, biotite; Chl, chlorite; Opq, opaque mineral; Zrn, zircon.



**Fig. 2.** Outcrop photographs. (a) Cobbles in the unconsolidated conglomerate (sp. 454-C). The blade of the knife used for scale is 4 cm long. (b) Felsic tuff (sp. 456) containing lithic fragments and ca. 1-2 mm specks of quartz phenocrysts; (c) Slightly-altered Samhwa granite (sp. 458).

축이 일정한 방향성을 지니는 완배열상(eutaxitic) 조직을 보이기도 해 화산암 기원임을 말해준다. 또한 세맥을 따라 이차광물인 제올라이트 등으로 채워진 변질대가 관찰된다. 현무암질 용암류가 미로면 고천리 길가에 꽤 넓게 산출하는데, 응회암과의 관계는 아직 불분명하다.

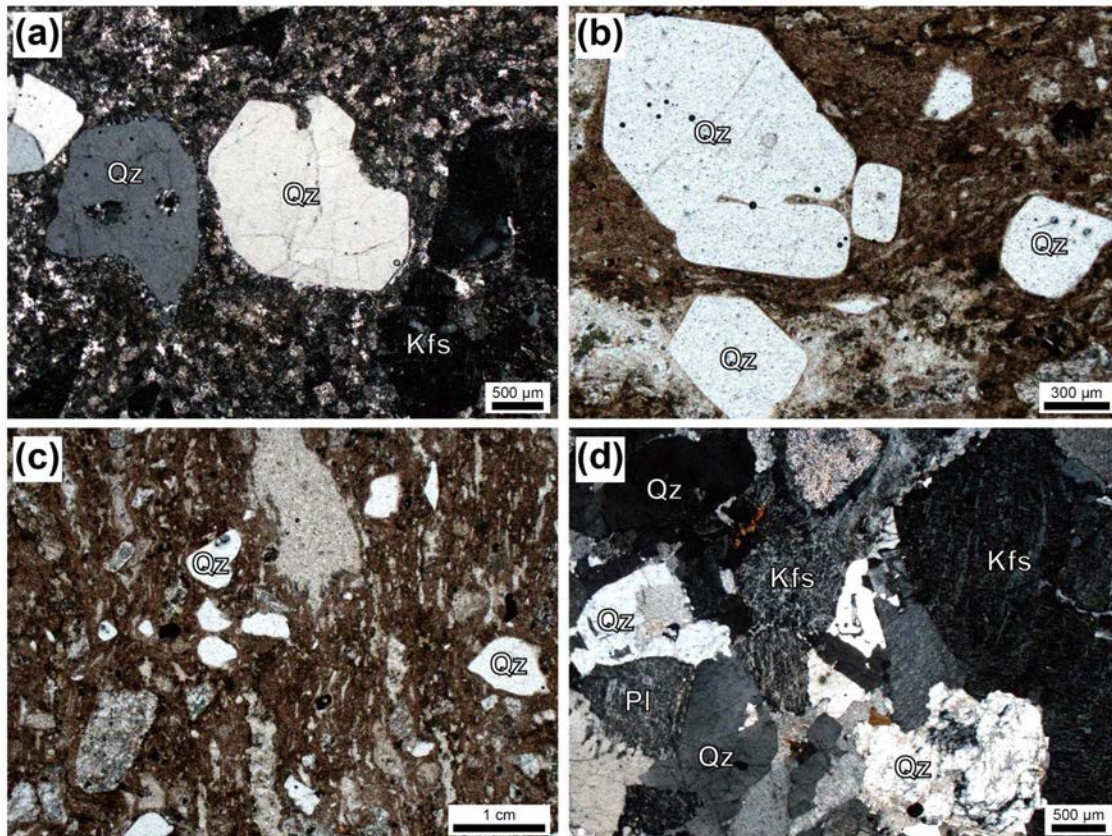
**삼화화강암(시료 458):** 이 화강암은 북평분지 서쪽 10여 km 떨어진 곳에서 폭이 약 7-8 km에 달하는 암주(stock) 형태로 산출한다(그림 1b). 대부분 우백질 화강암으로 구성되며, 투명한 연회색의 중립질 석영과 유백색의 조립질 장석, 그리고 세립-중립질 흑운모가 반정으로 산출한다(그림 2c). 주 구성 광물은 정장석, 석영, 사장석이며, 흑운모와 티탄철석이 소량 관찰된다(그림 3d). 정장석 반정 주변으로 미문상 조직(micrographic texture)이 나타나기도 한다(그림 3d).

## 4. 저어콘 U-Pb 연대

### 4.1. 분석 방법

저어콘 U-Pb 연대 분석은 한국기초과학연구원 오창

센터에 설치된 CAMECA IMS 1300-HR<sup>3</sup> 이차이온질량분석기(SIMS)를 사용하여 수행되었다. 수작업으로 선별한 저어콘 결정은 FC1 저어콘 표준 시료와 함께 직경 2.54 cm의 에폭시 마운트에 고정시킨 뒤, 결정의 중심부가 노출되도록 충분히 연마하고 ~30 nm 두께의 금으로 코팅하였다. 연마된 저어콘의 내부 조직은 한국기초과학연구원 오창 센터의 주사전자현미경(SEM; JEOL-6610LV)을 사용해 후방산란전자(backscattered electron) 및 음극선발광(cathodoluminescence; CL) 영상을 얻어 분석하였다(그림 4). 저어콘 U-Pb 연대 분석 방법은 Whitehouse *et al.* (1997)을 따랐다. 약 10 nA의 일차 이온 빔을 사용하였으며, 직경 ~25  $\mu\text{m}$ 의 빔 조리개를 이용한 켈러(Köhler) 모드를 적용하여 분석 영역 전반에서 균일한 스퍼터링(sputtering)이 이루어지도록 하였다. 이차이온컬럼에서는 분자 이온 간섭으로부터 Pb<sup>+</sup> 피크를 분리하기 위해 약 30 eV의 에너지 슬릿과 약 5,500의 질량분해능(M/ $\Delta$ M)을 적용하였다. 이차이온의 강도는 단일 전자증배관(electron multiplier, EM)을 이용한 피크-점핑(peak jumping) 모드로 다음 순서에 따라 측



**Fig. 3.** Thin-section photomicrographs taken under the crossed nicols. (a, b) Resorption textures of quartz are present in (a) the K-feldspar-quartz porphyry clast in conglomerate (sp. 454-C) and (b) the felsic tuff (sp. 456). (c) Eutaxitic texture in felsic tuff (sp. 456). (d) Altered feldspathic grains and micrographic intergrowths observed in the Samhwa granite (sp. 458). Abbreviations: Kfs, K-feldspar; Qz, quartz; Pl, plagioclase.

정하였다: 196 ( $^{90}\text{Zr}_2^{16}\text{O}$ ), 200 ( $^{92}\text{Zr}_2^{16}\text{O}$ ), 200.5 (배경), 204 (Pb), 206 (Pb), 207 (Pb), 208 (Pb), 209 ( $^{177}\text{Hf}^{16}\text{O}_2$ ), 238 (U), 248 ( $^{232}\text{Th}^{16}\text{O}$ ), 254 ( $^{238}\text{U}^{16}\text{O}$ ), 270 ( $^{238}\text{U}^{16}\text{O}_2$ ). 보통납 (common Pb) 보정을 위해서  $^{204}\text{Pb}$  측정치와 Stacey and Kramers (1975)에 제시된 모델납 성분을 이용하였다. 저어콘의 U-Pb 동위원소 성분과 연령 계산에는 각각 Geochronology.excel과 Isoplot/EX 프로그램을 사용하였다(Ludwig, 2008). 분석 결과는 표 2에 나타나 있다.

#### 4.2. 분석 결과

**북평분지 역암(시료 454):** 역암의 기질부(454-M)에서 분리한 저어콘 결정들은 대부분 자형이며 입자의 장축 길이는 대략 200-300  $\mu\text{m}$ 로 장-단축 비율이 대략 3:1 정도이다(그림 4a). 이들은 음극선 발광영상에서 미약한 진동누대 (oscillatory zoning) 조직을 보인다. 왕자갈 역(454-C)에서 분리한 저어콘도 유사한 특징을 나타낸다(그림 4b). 역암

의 기질부에서 얻은 가장 젊은 쇄설성 저어콘 그룹은  $49.1 \pm 0.7 \text{ Ma}$  ( $n=10$ )의  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  가중평균연대를 보인다(그림 5a). 이외에 보다 오래된 쇄설성 저어콘들도 산출하며, 약 320-310 Ma, 390-370 Ma, 그리고 1.88-1.83 Ga 연대를 보인다(표 2). 이 연대들은 북평분지 주변에 분포하는 고원생대 기반암 및 평안누층군 퇴적암에서 흔히 보고된(e.g., Jang *et al.*, 2024) 연대와 일치한다. 또한, 역암 내 반암질 왕자갈 역에서 구한 저어콘의 가중평균연대는  $48.7 \pm 0.6 \text{ Ma}$  ( $n=14$ ; 그림 5b)로 기질부 연대와 오차범위 내에서 동일하다.

한편 우리가 얻은 결과는 Jeong (2016, 미발표 자료)이 분지 서쪽(동해시 지가동)에서 채취한 북평층 상부의[Lim *et al.* (2025)의 B층 상부에 해당됨] 1개 사암으로부터 얻은 예비결과( $n \sim 60$ )와 잘 일치한다. 즉  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  가중평균연대( $49.0 \pm 0.1 \text{ Ma}$ ;  $n=25$ ), 그리고 쇄설성 저어콘의 석탄기-고원생대 연대 모두 동일하다.

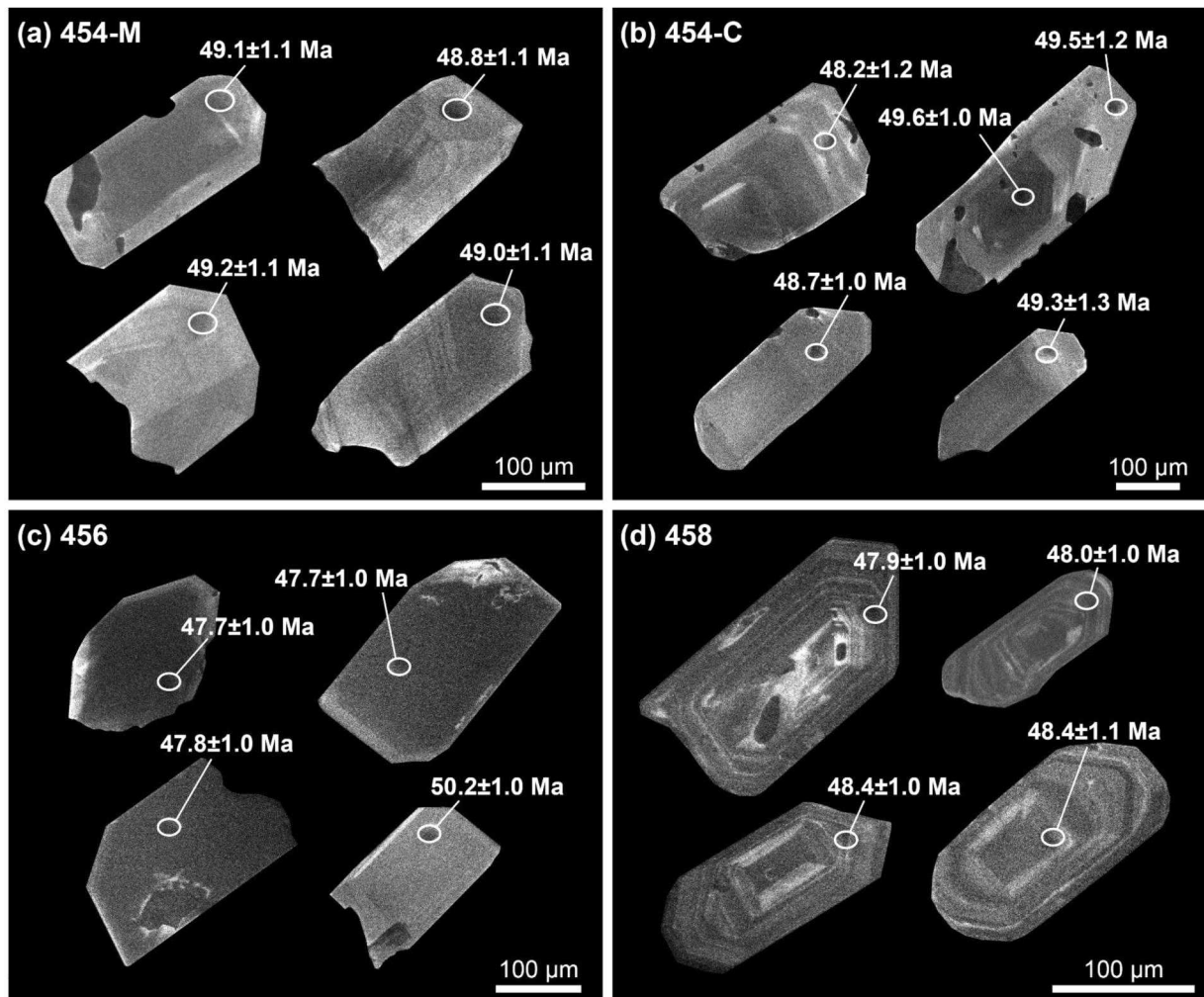


Fig. 4. Representative cathodoluminescence images of zircon selected from four analyzed samples.

**Table 2.** U-Th-Pb isotopic compositions of zircon for the analyzed samples.

Spot no.	U (ppm)	Th (ppm)	Th /U	common <sup>206</sup> Pb(%)	<sup>206</sup> Pb*/ <sup>238</sup> U	±%	<sup>207</sup> Pb*/ <sup>206</sup> Pb*	±%	Date** (Ma)	
<i>Sample 454-M, conglomerate matrix</i>										
454-M@001	627	48	0.08	0.08	16.7750	2.1	0.0543	0.8	373.3	±7.5
454-M@002	272	231	0.85	0.09	19.6825	2.2	0.0532	1.0	319.5	±6.8
454-M@003	183	93	0.51	0.10	130.0843	2.2	0.0505	3.2	49.4	±1.1
454-M@004	324	120	0.37	0.00	3.0158	2.1	0.1153	0.3	1884.2	±4.5
454-M@005	47	50	1.07	0.07	3.0374	2.1	0.1116	0.8	1825.8	±13.7
454-M@006	231	136	0.59	0.59	129.6703	2.3	0.0451	3.0	49.5	±1.2
454-M@007	255	152	0.60	0.68	130.3128	2.1	0.0470	2.7	49.3	±1.0
454-M@008	209	103	0.49	0.31	130.4386	2.3	0.0472	3.0	49.2	±1.1
454-M@009	286	187	0.65	0.06	3.9710	2.4	0.1118	0.3	1828.5	±5.9
454-M@010	285	155	0.54	0.12	130.9203	2.2	0.0494	3.1	49.1	±1.1
454-M@011	141	57	0.40	0.02	2.9625	2.1	0.1148	0.4	1876.3	±6.7
454-M@013	347	60	0.17	0.03	3.0646	2.2	0.1152	0.2	1882.9	±4.4
454-M@014	264	140	0.53	0.43	131.3795	2.2	0.0481	3.2	48.9	±1.1
454-M@015	183	85	0.47	1.19	131.1748	2.6	0.0474	3.7	49.0	±1.3
454-M@016	447	308	0.69	0.03	16.1368	2.0	0.0544	0.7	387.6	±7.7
454-M@017	196	98	0.50	0.40	130.9965	2.1	0.0468	3.1	49.0	±1.0
454-M@018	414	303	0.73	0.35	132.0139	2.2	0.0480	2.2	48.6	±1.1
454-M@019	184	104	0.57	1.02	129.9602	2.1	0.0498	3.1	49.4	±1.1
454-M@020	68	75	0.57	1.01	17.6445	2.8	0.1598	6.6	307.8	±11.5
<i>Sample 454-C, cobble in conglomerate</i>										
454-C@001	97	43	0.44	0.00	132.5893	2.4	0.0514	6.3	48.2	±1.2
454-C@002	168	90	0.54	0.56	131.4636	2.5	0.0512	3.2	48.6	±1.2
454-C@003	118	55	0.47	0.42	135.5342	2.5	0.0505	3.9	47.2	±1.2
454-C@004	198	123	0.62	1.09	132.0433	2.2	0.0535	2.9	48.2	±1.0
454-C@005	273	152	0.56	1.42	132.7622	2.1	0.0358	6.4	49.1	±1.0
454-C@007	97	51	0.53	0.51	131.2313	2.5	0.0460	5.2	49.0	±1.2
454-C@008	218	119	0.54	1.39	130.3491	2.4	0.0472	2.9	49.3	±1.2
454-C@009	99	47	0.47	0.95	129.2102	2.6	0.0530	4.5	49.3	±1.3
454-C@011	63	27	0.42	2.91	132.8152	2.6	0.0499	5.7	48.2	±1.2
454-C@013	536	443	0.83	0.60	130.4088	2.1	0.0421	2.9	49.6	±1.0
454-C@014	134	72	0.54	0.14	129.5013	2.5	0.0481	4.3	49.5	±1.3
454-C@015	189	107	0.57	0.89	131.6020	2.1	0.0486	3.1	48.7	±1.0
454-C@017	106	48	0.46	0.45	132.8044	2.6	0.0512	5.4	48.1	±1.3
454-C@019	150	79	0.53	0.02	130.3214	2.2	0.0475	3.5	49.2	±1.1
454-C@021	142	82	0.58	0.74	131.3718	2.5	0.0467	3.6	48.9	±1.2
<i>Sample 456, fescic tuff</i>										
456@1	203	71	0.35	0.73	130.4986	2.2	0.0486	3.1	49.1	±1.1
456@2	1616	1058	0.65	0.19	134.3731	2.2	0.0485	1.2	47.7	±1.0
456@3	4507	3455	0.77	0.10	134.7945	2.1	0.0467	1.2	47.7	±1.0
456@4	6217	5916	0.95	0.05	135.3230	2.1	0.0474	0.7	47.4	±1.0
456@5	4955	3978	0.80	0.09	133.8322	2.2	0.0467	0.9	48.0	±1.0
456@6	215	130	0.60	1.09	130.4463	2.4	0.0486	3.0	49.1	±1.2

Table 2. continued.

Spot no.	U (ppm)	Th (ppm)	Th /U	common $^{206}\text{Pb}(\%)$	$^{206}\text{Pb}^*/^{238}\text{U}$	$\pm\%$	$^{207}\text{Pb}^*/^{206}\text{Pb}^*$	$\pm\%$	Date** (Ma)	
456@7	8712	7032	0.81	0.01	134.2793	2.2	0.0474	0.6	47.8	$\pm 1.0$
456@8	342	190	0.56	0.00	129.7560	2.1	0.0485	2.5	49.4	$\pm 1.0$
456@9	5561	5163	0.93	0.06	134.5382	2.1	0.0471	0.7	47.7	$\pm 1.0$
456@10	5949	5597	0.94	0.06	134.6477	2.1	0.0475	0.9	47.7	$\pm 1.0$
456@11	4556	3534	0.78	0.16	135.2779	2.2	0.0461	0.9	47.5	$\pm 1.1$
456@12	7736	7083	0.92	0.03	135.2729	2.1	0.0471	0.6	47.5	$\pm 1.0$
456@13	6662	5043	0.76	0.09	135.6587	2.1	0.0468	0.7	47.4	$\pm 1.0$
456@14	6892	6552	0.95	0.04	133.7812	2.1	0.0470	0.7	48.0	$\pm 1.0$
456@15	419	261	0.62	0.26	130.3635	2.1	0.0472	2.6	49.2	$\pm 1.0$
456@16	308	191	0.62	0.29	127.8383	2.2	0.0482	3.2	50.2	$\pm 1.1$
456@17	3028	2136	0.71	0.17	133.2577	2.1	0.0464	1.4	48.2	$\pm 1.0$
456@18	4114	3395	0.83	0.14	133.5224	2.1	0.0463	0.9	48.1	$\pm 1.0$
456@19	368	217	0.59	0.96	130.4498	2.1	0.0475	2.4	49.2	$\pm 1.0$
<i>Sample 458, Samhwa granite</i>										
458@01	1049	558	0.53	0.39	132.9473	2.1	0.04558	2.1	48.4	$\pm 1.0$
458@02	866	381	0.44	0.09	131.2057	2.1	0.04721	1.6	48.9	$\pm 1.0$
458@03	746	366	0.49	0.03	133.9591	2.0	0.04827	2.6	47.9	$\pm 1.0$
458@04	599	246	0.41	1.23	131.6913	2.2	0.04008	6.0	49.2	$\pm 1.1$
458@05	951	428	0.45	0.18	132.8428	2.3	0.04633	1.5	48.4	$\pm 1.1$
458@06	906	348	0.38	0.06	132.0385	2.2	0.04837	1.6	48.6	$\pm 1.0$
458@07	663	312	0.47	0.19	132.8938	2.1	0.04824	1.8	48.2	$\pm 1.0$
458@08	1039	509	0.49	0.09	131.1558	2.1	0.04871	1.4	48.9	$\pm 1.0$
458@09	979	398	0.41	1.07	132.2729	2.2	0.04420	3.7	48.7	$\pm 1.1$
458@10	1230	672	0.55	0.06	132.5361	2.0	0.04757	1.3	48.4	$\pm 1.0$
458@11	1229	667	0.54	0.03	129.5814	2.2	0.04671	1.3	49.6	$\pm 1.1$
458@12	1231	698	0.57	0.03	133.4572	2.1	0.04849	1.3	48.0	$\pm 1.0$
458@13	1120	685	0.61	0.20	132.0886	2.0	0.04858	1.7	48.5	$\pm 1.0$
458@14	949	505	0.53	0.14	129.4772	2.1	0.04683	1.6	49.6	$\pm 1.0$
458@15	965	394	0.41	0.11	130.8728	2.3	0.04776	1.5	49.0	$\pm 1.1$

Errors are  $1\sigma$ ; Pb\* denotes radiogenic Pb.

\*\* $^{207}\text{Pb}$ -corrected  $^{206}/^{238}\text{U}$  (<1000 Ma) and  $^{204}\text{Pb}$ -corrected  $^{207}/^{206}\text{Pb}$  dates (>1000 Ma).

**규장질 응회암(시료 456):** 응회암에서 분리된 저어콘 결정들은 대부분 자형으로 장축 길이는 대략 100-200  $\mu\text{m}$ 이고, 장-단축 비율은 2:1 정도이다(그림 4c). 음극선 발광영상에서 관찰한 저어콘 결정들은 특별한 내부조직을 보이지 않는다(그림 4c). 이들의  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  가중평균연대는  $48.2 \pm 0.5$  Ma ( $n=19$ )이다(그림 5c).

**삼화화강암(시료 458):** 이 화강암의 저어콘 결정들은 대부분 자형이며 입자의 장축 길이는 대략 100-250  $\mu\text{m}$ 이고, 장-단축 비율은 3:1 정도이다(그림 4d). 이들은 음극선 발광영상에서 뚜렷한 진동누대(oscillatory zoning) 조직을 보여준다(그림 4d). 삼화화강암에서 구한  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  가중평

균연대는  $48.6 \pm 0.5$  Ma ( $n=10$ )이다(그림 5d). 이 연대는 Kim and Park (2016)이 보고한 저어콘의 SHRIMP (Sensitive High Resolution Ion Microprobe)  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  가중평균연대인  $49.7 \pm 0.2$  Ma ( $n=8$ )과 비교해 약 1백만년 젊지만, 두 연대 모두 삼화화강암이 예오세 이퍼르절(Ypresian Stage; 56.0-47.8 Ma)에 관입했음을 지시한다.

## 5. 토 의

### 5.1. 북평분지 발달사

북평분지의 형성 시기에 대한 두 가지 제안, 즉 마이오세

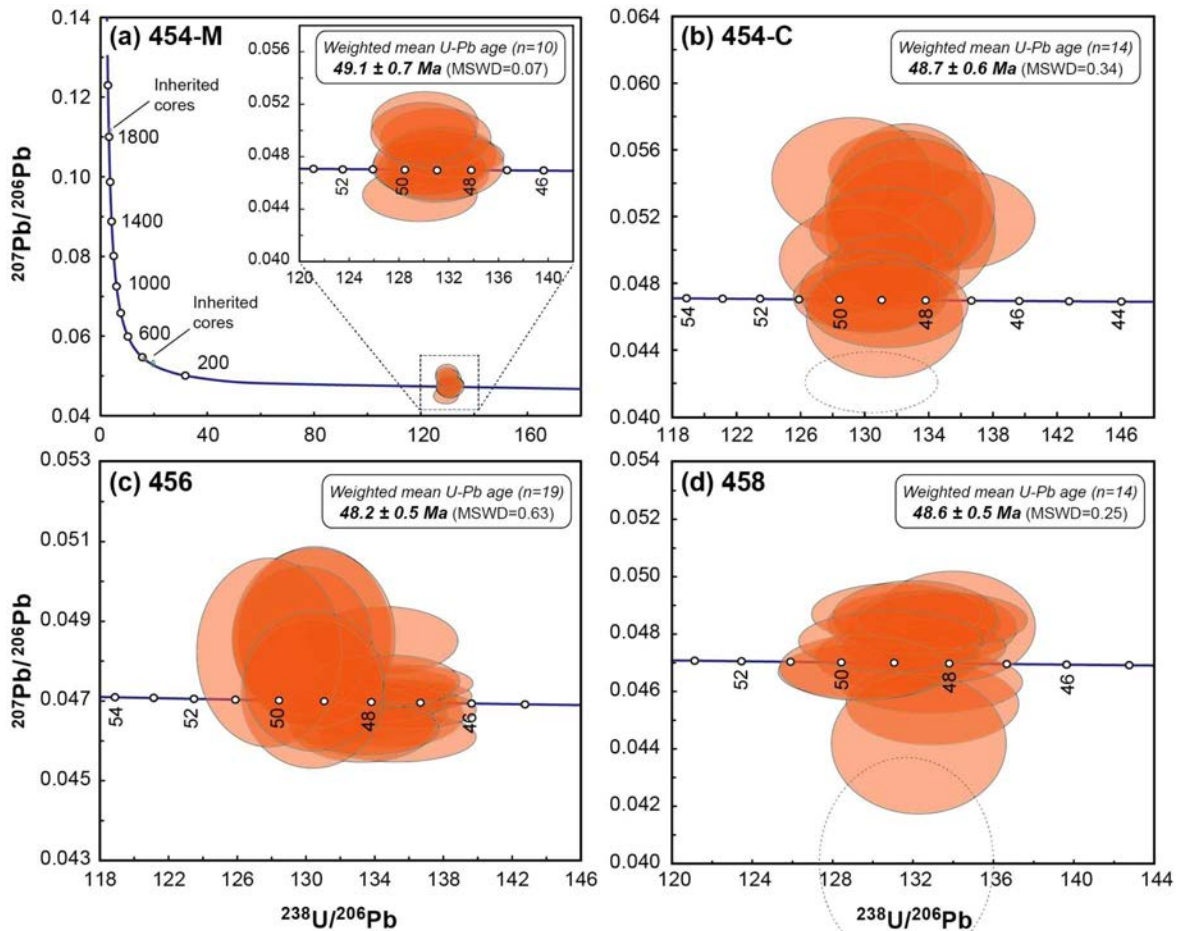
(Lim *et al.*, 2025)와 플라이오세(Kim, 2024)의 분지 확장 가설을 검증하기 위해 쇄설성 저어콘의 U-Pb 연대를 측정하였다. 그러나, 우리가 분석한 B층의 역암(시료 454; Lim *et al.*, 2025) 내에서 마이오세 또는 그보다 젊은 퇴적 동시기(syn-depositional)의 쇄설성 저어콘은 발견되지 않았다. 그 결과, 쇄설성 저어콘을 활용해 북평분지의 확장 시기를 구분하려는 시도는 성공적이지 않았다. 또한 우리의 연대 측정 결과는 북평분지의 확장 시기에 마이오세 화산 활동이 주변에 드물거나 없었음을 시사하며, 이는 포항 및 장기 분지의 신진기(Neogene) 퇴적암에 기록된(e.g., Lee *et al.*, 2014; Kim *et al.*, 2023) 전기 마이오세 화성 활동과 대조를 이룬다.

한편 역암 시료에서 얻은 가장 젊은 쇄설성 저어콘 그룹의 가중평균연대는  $49.1 \pm 0.7$  Ma ( $n=10$ )으로 예오세 화성 활동을 지시한다(그림 5a). 이 결과는 B층에 속한 한 개 사암에서 Jeong (2016)이 보고한  $49.0 \pm 0.1$  Ma와 일치한다. 또한, 역암의 기질부와 사암에서 각각 얻은 두 연대는 역암 내의 석영반암질 왕자갈 역에서 구한 저어콘 결정화 연대

( $48.7 \pm 0.6$  Ma;  $n=14$ ; 그림 5b)와 오차범위 내에서 일치한다. 이는 역암과 사암의 쇄설물들이 주로 반암 또는 화산암으로부터 유래했음을 시사한다. 이러한 추론은 북평분지 서쪽의 오십천단층에 의해 절단된(그림 1b) 규장질 응회암의 연대 측정 결과로도 확인된다. 이 응회암에서 얻은 저어콘의 가중평균연대는  $48.2 \pm 0.5$  Ma ( $n=19$ ; 그림 5c)로 분지 충전물에서 얻은 연대와 거의 일치한다.

북평분지의 확장 시기를 규제하는 절대 연령을 얻기는 어려웠지만, 중요한 정보는 화석 자료로부터 찾을 수 있다. Kim (2024)는 북평분지에서 보고된 화석들의 연대 자료를 표로 정리하여, 북평층이 마이오세 최후기부터 플라이오세에 걸쳐 퇴적되었다고 제안하였다. 그러나, 이 표에는 Lee and Jacobs (2010)이 북평층에서 발견한 마이오세(18-15.2 Ma) *Neocometes* 화석이 누락되어 있다. 따라서, 북평분지가 마이오세(17 Ma)부터 발달하기 시작했다는 Lim *et al.* (2025)의 해석이 더 타당해 보인다.

분지 발달사에 대한 또 다른 정보는 북평분지 내 역암과 사암에서 얻은 쇄설성 저어콘의 연대 분포 양상을 통해 유



**Fig. 5.** Tera-Wasserburg concordia diagrams of zircon U-Pb ages of four analyzed samples. Note that the inherited components of detrital zircon are found only from the matrix of conglomerate (sp. 454-M).

추할 수 있다. 약 49 Ma의 최대퇴적연대(Maximum depositional age)는 마이오세(약 17 Ma 이후) 퇴적 시기보다 훨씬 오래 전에 북평분지 권역에서 일어난 에오세 화성활동을 지시한다. 이들 젊은 그룹을 제외하면 쇄설성 저어콘의 연대는 대부분 약 320-310 Ma, 390-370 Ma, 그리고 1.88-1.83 Ga의 세 그룹으로 대표된다. 이러한 분포 양상은 Jang *et al.* (2024)이 태백산 분지의 평안누층군 사암에서 보고한 누적 연대 분포(cumulative probability) 곡선과 비슷하며, 양자가 서로 유사한 퇴적 환경, 즉 배호분지 환경에서 형성된 인장성 열개분지의 산물(Cho *et al.*, 2021)임을 시사한다.

한편, 북평분지로부터 약 10km 서쪽에 분포하는 삼화화강암에서 얻은 저어콘의  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  가중평균연대는  $48.6 \pm 0.5$  Ma ( $n=10$ )으로, Kim and Park (2016)이 보고한  $49.7 \pm 0.2$  Ma ( $n=8$ )과 거의 일치한다. 참고로 삼화화강암과 규장질 응회암은 1:100만 지질도(그림 1a; Kee *et al.*, 2019)에서 백악기 암체로 기재되어 있어 수정이 필요해 보인다. 무엇보다 흥미로운 사실은 북평분지 인근의 화산암뿐만 아니라 화강암질 암주에도 에오세 기록이 남아있는 점이다. 에오세 화성암의 산출은 반세기 전 태백-삼척 지역의 도폭 또는 광상 연구에서 이미 보고된 바 있다(표 3; Yun and Silverman, 1979; Jin *et al.*, 1989; Lee *et al.*, 1993; Won *et al.*, 1994). 특히, 삼척시 원덕읍 사곡리에서 작은 암주 형태로 산출하는 알칼리 화강암의 경우, 정장석과 리베카이트(riebeckite)의 K-Ar 연대가 약 52 Ma로 서로 일치한다(Lee *et al.*, 1993). 사곡리 화강암이 비교적 빠르게 냉각된 천부 화성암체임을 고려할 때, 에오세 K-Ar 광물 연대는 화강암의 결정화 연대와 유사할 것으로 추정된다. 따라서, 강원도 동남부의 에오세 화성 활동은 기존에 알려진 것보다 더 넓은 지역에서 일어났으며, 향후 저어콘 U-Pb연대 측정, 전암 화학 분석 등을 통해 보다 자세한 연구가 필요해 보인다.

결론적으로, 북평분지는 오십천단층 또는 이에 수반된 정단층에 의해 구획된 대륙 내 열개 분지일 가능성이 크며, 분지 내 역암과 사암은 모두 유사한 쇄설성 저어콘의 분포 패턴을 보인다(그림 5). 이들 저어콘 입자를 포함해 쇄설성 퇴적물의 근원지(provenance)는 북평분지의 서(북)쪽에 위치했을 것으로 판단된다. 즉, (1) 에오세 규장질 응회암(또는 화강반암)과 삼화화강암(이 연구); (2) 강릉 탄전의 석탄기 평안누층군(e.g., Jang *et al.*, 2024); (3) 선캄브리아기 반암인 1.85 Ga 편마암 복합체(e.g., Lee *et al.*, 2023b) 등이 주요 근원지였을 것이다. 오십천단층을 기준으로 서쪽에서 공급된 쇄설물이 단층 부근에서 거력을 포함하는 역암으로 급속하게 쌓인 반면, 분지 중심부(depocenter)인 동쪽으로 갈수록 세립화되는 퇴적상의 변화(Lim *et al.*, 2025) 역시 분지 서쪽에 근원지가 있음을 뒷받침한다.

## 5.2. 경상분지 내 에오세 화성 활동

북평분지와 주변암의 연대 측정을 통해 약 50-48 Ma의 화성 활동이 밝혀졌으며, 이는 반세기 전 태백-삼척 지역에서 보고된 에오세 화성암체의 존재를 더욱 부각시킨다. 우리의 결과는 여러 면에서 경상 분지 내, 특히 양산단층 부근에서 보고된 에오세 이퍼르질 화성 활동과 비견된다. 이에 우리는 그간 발표된 에오세 연대 자료들을 오십천단층과 양산단층 권역으로 나누어 표 3에 종합 정리하였다. 정리된 내용 외에도 Shin (2012, 2013)은 경상분지 동남부에 분포하는 고진기(Paleogene) 화강암체의 에오세 저어콘 및 인회석 피션 트랙(ZFT, AFT) 연대를 수십개 보고하였다. 그러나, 이들 FT 연대의 폐쇄 온도는 각각 약  $200^\circ\text{C}$ 와  $100^\circ\text{C}$ 로(Shin, 2012) 상대적으로 낮아 관입 연대와 차이가 날 수 있기 때문에 표에 나열하지 않았다. 그럼에도 불구하고, ZFT 및 AFT 연대의 체계적인 변화는 에오세 화성-지구조 활동에 대해 시사하는 바가 크다(아래 참조). 또한 Rb-Sr 전암 연대(e.g., Cheong and Kim, 2012; Park, 2012)도 다수 보고되었으나, 이 연대 역시  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  초기치의 가변성,  $^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$  비의 작은 변화폭 등으로 인해 지질학적 의미가 불확실해 고려 대상에서 제외하였다.

강원권에서 우리가 처음으로 보고하는 50-48 Ma의 에오세 화성 활동은 반세기 전 K-Ar 연대 측정을 통해 이미 보고된 바 있다(표 3). 당시에는 이퍼르질 연대가 지니는 광역적 의미를 파악하기 어려웠지만, 이후 경상분지 동남부에서 피션 트랙 연대,  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  연대, SHRIMP 저어콘 연대 측정 등(표 3) 보다 정밀한 연대 자료들이 축적되며 그 의미가 부각되어 왔다.

포항-경주 지역에 넓게 분포하는 화산암과 화강암을 대상으로 Shin (2012, 2013)은 많은 양의 ZFT 및 AFT 연대를 발표하였다. 이들 중 포항시 곽강동에 산출하는 3개의 유문암질 응회암에서 얻은 ZFT 가중 평균 연대는  $52.1 \pm 2.3$  Ma이다. 이 응회암체에 해당되는 포항 시추 코어의 화산암 시료에서 얻은 저어콘  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  연대는  $49.4 \pm 0.4$  Ma로(Lee *et al.*, 2014) 서로 유사하다. 이 응회암 연대는 서남부 쪽으로 약 15 km 떨어진 포항시 기계면에 산출하는 A-형 화강암의 54.0-53.7 Ma(표 3)와도 비슷하다. 기계 화강암은 경주시 남산 화강암과 동일한 A-형으로, 양산단층의 좌우편에 각각 산출하는 점에 착안해 Hwang *et al.* (2007)은 이 우수향 주향 단층의 변위량이 약 21.3 km라고 제안하였다. 남산 화강암 역시 54-51 Ma 연대(표 3)를 지니기 때문에, 이 해석은 널리 받아들여지고 있다. Park and Jang (2023)은 최근 경주 지역에 분포하는 화강암체를 각섬석 화강섬록암(토함산 화강암), 흑운모 화강암(경주 화강암) 그리고 알칼리장석 화강암(남산 화강암)의 세 종류로 구분하였으며, A-형인 남산 알칼리 화강암을 제외하고 다른 두 암체는

**Table 3.** Summary of Eocene radiometric ages available from the eastern Korean Peninsula. Several Paleocene ages are also included for reference.

Locality	Rock type	Analytical Method	Age (Ma)	Reference
<i>Osipcheon Fault area, Gangwon Province</i>				
Donghae city	Matrix, conglomerate	U-Pb zircon	49.1 ± 0.7	This study (youngest age population of detrital zircons)
	Cobble, conglomerate	U-Pb zircon	48.7 ± 0.6	This study
Miromyeon, Samcheok	Felsic tuff	U-Pb zircon	48.2 ± 0.5	Ditto
Samhwa Temple, Donghae	Granite	U-Pb zircon	48.6 ± 0.5	Ditto
		U-Pb zircon	49.7 ± 0.2	Kim and Park (2016)
Sagokri, Samcheok	Granite	K-Ar riebeckite	51.7 ± 2.6	Lee <i>et al.</i> (1993); based on unpublished data of Yong Jun Kim
Pungmun, Sagokri, Samcheok	Granite	K-Ar K-feldspar	52.0 ± 1.6	Yun and Silberman (1979)
Punggokri, Samcheok	Rhyolitic tuff	K-Ar whole rock	51.7 ± 6.7	Jin <i>et al.</i> (1989)
Samcheok (-Uljin)	Rhyodacite	K-Ar whole rock	49.3 ± 2.0 (50.8 ± 2.0*)	Yun and Silberman (1979)
<i>Northern Gyeongsang Province</i>				
Daejeonsa, Juwangsang National Park	Basalt	<sup>40</sup> Ar/ <sup>39</sup> Ar whole rock	57.0 ± 0.9; 55.7 ± 0.8	Zhang <i>et al.</i> (2022)
<i>Yangsan Fault area, Southern Gyeongsang Province</i>				
Gokgangdong, Pohang	Rhyolitic tuff	Zircon fission track	52.1 ± 2.3	Shin (2013)
		U-Pb zircon	49.4 ± 0.4	Lee <i>et al.</i> (2014); Drill core sample
Gigye, Pohang	Alkali granite	U-Pb zircon	53.9 ± 0.3	Hwang <i>et al.</i> (2012)
		U-Pb zircon	53.7 ± 0.2	Cheong and Jo (2017)
		U-Pb zircon	54.0 ± 0.3	Choi and Choi (2025)
Gyeongju **	Biotite granite	U-Pb zircon	53.9 ± 0.4	Cheong <i>et al.</i> (2013); Cheong and Jo (2017)
	Alkali granite	U-Pb zircon	55.2 ± 0.6	Choi and Choi (2025)
Hoamri, Gyeongju	High-silica granite	U-Pb zircon	52.2 ± 0.5	Ditto
Namsan, Gyeongju **	Alkali granite	U-Pb zircon	53.6 ± 0.7	Hwang <i>et al.</i> (2008)
		U-Pb zircon	54.4 ± 0.4	Jo <i>et al.</i> (2016)
		U-Pb zircon	51.6 ± 0.5; 51.3 ± 0.8	Lee <i>et al.</i> (2020)
		U-Pb zircon	54.2 ± 0.4; 53.2 ± 0.3	Choi and Choi (2025)
Moari, Gyeongju	Biotite granite	U-Pb zircon	48.9 ± 0.6	Lee <i>et al.</i> (2020)
Dongcheonri, Gyeongju	Alkali granite	U-Pb zircon	51.6 ± 0.5	Ditto
Tohamsan, Gyeongju **	Hornblende granodiorite	U-Pb zircon	57.5 ± 0.5; 56.8 ± 0.9	Cheong and Jo (2017)
		U-Pb zircon	57.0 ± 0.6	Choi and Choi (2025)
Tohamsan, Gyeongju	Andesitic dyke	<sup>40</sup> Ar/ <sup>39</sup> Ar whole rock	55.9 ± 1.5	Kim <i>et al.</i> (2005)
	Rhyolitic dyke	<sup>40</sup> Ar/ <sup>39</sup> Ar whole rock	53.0 ± 1.0	Ditto
Gyeongju-Ulsan	Mafic dyke	<sup>40</sup> Ar/ <sup>39</sup> Ar whole rock	47.3 ± 0.8; 48.0 ± 1.3; 52.4 ± 0.9	Ditto
Bangeojin, Ulsan	Granitoid	U-Pb zircon	58.4 ± 0.7	Jo <i>et al.</i> (2016)
Daejeongri, Ulsan	Granitoid	U-Pb zircon	48.0 ± 0.5	Ditto

Some of unpublished zircon U-Pb ages of ~50 Ma, cited by Park (2012), are not listed here.

\* Age re-calculated using a new decay constant (Jin *et al.*, 1989).

\*\* Following the threefold classification of granitoids by Park and Jang (2023).

I-형에 해당된다. 이들 연대는 약 58-48 Ma의 범위를 보이며, 알칼리 화강암은 상대적으로 젊은 54-51 Ma 연대를 지닌다(표 3). 이러한 결과는 최근 발표된 Choi and Choi (2025)의 저어콘 U-Pb 연대 자료에서도 그대로 확인된다. 또한 Cheong and Jo (2017)에 따르면, 에오세 화강암은 경주, 기계 지역 외에도 보다 동쪽에 위치한 대전리, 호암 지역에서 확인되며, 이후 화성 활동의 휴지기를 거쳐 경주 북동쪽에서 권이리 화강암이 올리고세(27.1 ± 0.5 Ma)에 관입하였다.

한편, Kim *et al.* (2005)는 경주-울산 지역에 분포하는 염기성-산성 암맥들을 대상으로  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  전암 연대를 보고하였다. 현무암질 암맥의 연대는 52-47 Ma인 반면, 안산암질 및 유문암질 암맥은 각각 56 Ma와 53 Ma의 연대를 보인다(표 3). 이들 암맥은 불국사 화강암을 관입하고 있으며, 최후기에 일어난 불국사 화성 활동을 대표한다. 또한 경상북도 청송군 주왕산 서쪽에 위치한 대전사 현무암에서 얻은  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  전암 연대는 57-56 Ma로(표 3; Zhang *et al.*, 2022) 주변암인 하양층군 퇴적암들에 비해 상당히 젊은 연대를 보인다(Hwang *et al.*, 2017). 따라서 이 연대가 지니는 지질학적 의미는 불확실하다.

이상의 결과를 종합하면, 그동안 많은 연구자들이 보고한 바와 같이 경상분지 남동부의 팔레오세 최후기-에오세 초기의 화성 활동은 약 58-47 Ma의 1천만년동안 일어났으며, A-형 화강암과 암맥군은 각각 54-51 Ma와 56-47 Ma에 관입했음을 알 수 있다. 이러한 연대 범위는 Lee *et al.* (2014)이 포항 시추 코어의 두개 사암에서 얻은 쇄설성 저어콘  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  연대에도 잘 반영되어 있다. 즉, 두 시료에서 얻은 (팔레오세-)에오세 점분석 연대 그룹은 각각 60-50 Ma (평균 값은 57 Ma), 60-47 Ma (평균 값은 51 Ma) 범위에 속하며, 경상분지의 에오세 화성 활동을 대변해준다.

앞서 언급한 포항-경주 지역의 화산암과 화강암에서 얻은 저어콘/인회석 피션트렉 연대(Shin, 2012, 2013) 중 에오세-마이오세에 해당하는 것들이 다수 보고되었다. 특히, 경주와 양산 사이 약 20 km에 걸쳐 분포하는 6개 화강암 시료에서 구한 ZFT 및 AFT 연대 값들은 서로 유사하며( $\Delta t_{\text{ZFT-AFT}} < 3$  Ma), 모두 53-49 Ma 범위에 속한다(Shin, 2012). 이는 에오세 이퍼르절 시기에 후기 백악기 화강암체들이 상대적으로 빠르게 용기했음을 지시한다. 이러한 용기는 동해안 쪽에 주로 분포하는 이퍼르절 화성암체의 관입 시기와 일치하며, 양자가 서로 연계되어 있음을 시사한다. 따라서 에오세 화성 활동은 양산단층의 동부 지역뿐만 아니라 백악기 후기-팔레오세(약 85-60 Ma) 불국사 화강암으로 대표되는 경상 화산호(Chough and Sohn, 2010) 권역에서 광범위하게 영향을 미친 지구조적 사건일 것으로 판단된다.

결론적으로, 에오세 이퍼르절 화성암체는 경상분지 남

동부로부터 강원도 중부의 북평분지 권역에 이르기까지 동해안을 따라 꽤 넓은 지역에서 일어난 광역적인 화성 활동의 산물이라고 판단된다. 이러한 활동이 과연 어떤 지구조적 배경 하에 일어났는지 아래에 토의한다.

### 5.3. 에오세 화성-지구조와 해령 섭입

#### 5.3.1. 한반도와 일본열도의 화성 활동 갭: 시간적 차이

경상분지 동남부를 포함해 우리나라 동해안을 따라 길게 분포하는 에오세 이퍼르절 화성 활동은 새로운 지구조적 해석을 필요로 한다. 우리가 취합한 약 58-48 Ma (표 3)의 화성 활동은 약 2천만년의(약 48-27 Ma; Jo *et al.*, 2016) 긴 화성 활동 갭(magmatic gap)을 거쳐 동해의 열림에 수반된 후기 올리고세-마이오세 화성암의 산출로 이어진다. 한반도의 에오세 화성 활동은 일본 열도와 극동 러시아에서 보고된 소강(lull) 기간(약 60-46 Ma, 예: Yamaoka and Wallis, 2023; Wu *et al.*, 2024)과 중첩된다. 따라서 동아시아의 에오세 대륙호에 기록된 지역별 화성 활동의 시간적 차이는 흥미로운 이슈로 대두되고 있다.

우리나라와는 달리 일본에서는 에오세 화성 활동 갭에 대한 연구가 오랫동안 진행되어 왔다(e.g., Imaoka *et al.*, 2011; Wu *et al.*, 2024; Yamaoka *et al.*, 2025). 연구자에 따라 갭 기간의 범위는 조금씩 다르지만, Imaoka *et al.* (2011)이 종합 정리한 연대 자료에 따르면, 일본 산인대(山陰帶; Sanin belt)의 추고쿠(中國; Chugoku) 지역에 산출하는 신생대 화산암은 약 60-45 Ma 화성 활동 갭을 보이는 반면, 심성암체는 약 52-43 Ma로 보다 젊은 갭을 보여준다. 이들이 제시한 방대한 자료는 대부분 K-Ar 또는 Rb-Sr 연대로 당시로서는 최선이었지만, 지금은 보다 정확한 U-Pb 연대가 발표되고 있어 이전 연구의 결과를 덮어 쓰기도 한다. 일례로, 경주 남산 화강암에서 Kim and Kim (1997)이 A-형과 I-형 화강암들을 따로 분석해 얻은 두 Rb-Sr 전암 연대는  $49.7 \pm 0.1$  Ma로 서로 일치하지만, 저어콘 U-Pb 연대는 54-51 Ma로(표 3) 수백만 년 더 오래 되었음을 지시한다. 마찬가지로, Imaoka *et al.* (2011)이 52.7 Ma로 제시한 우시로다니(後谷) 화강반암 역시 Rb-Sr 전암 연대인 탓에 온전히 신뢰하기 어렵다. 만약 이 한 개 연대를 제외하면, 산인 지역의 화성활동 갭은 약 56-45 Ma로 대표될 수 있다. 일본 열도의 백악기-고진기 연대 자료들을 종합한 Yamaoka and Wallis (2023)도 Rb-Sr 전암 연대는 신뢰도가 떨어진다는 이유로 고려 대상에서 제외하였다. 이들은 U-Pb 연대에 바탕을 둔 화성 활동 갭 연대로 60-46 Ma를 제시하였으며, 이 기간은 우리가 구한 팔레오세 최후기-에오세 초기(58-48 Ma)의 화성 활동 시기와 중첩된다. 동해의 열림 이전에 한반도와 일본열도는 서로 인접해 있었고, 경상분지의 유천층군은 “경상 화산호”(Chough and Sohn, 2010)라

불리울 만큼 일본의 산인대 화산호와 잘 대비된다. 따라서, 두 지역에서 관찰된 에오세 화성 활동의 유무 차이는 설명이 어려워 보인다.

일본의 암석학자들은 에오세 화성 활동 갭에 대해 연구해 오며 수많은 지질 연대와 전암 및 동위원소 지구화학 자료를 축적해 왔다. 특히 Imaoka *et al.* (2011)은 이전 연구자들의 결과와 자신들이 직접 분석한 60개의 K-Ar 연대 결과를 취합해 에오세(약 56-45 Ma)의 화성 활동 갭을 제안하였다. 이들은 또한 팔레오세 동안 해양판 슬랩(slab)의 섭입 각도가 점차 증가하며 대륙호(+배호, backarc)가 열개(rifting)되었다고 추론하였다. 열개에 수반된 인장력이 작용하면 연약권 맨틀 물질의 상승과 이류(advection)가 일어나 초생 맨틀 성분과 유사한 마그마가 만들어지는데, 이러한 지구조 환경은 인도-유라시아 대륙의 충돌에 따른 원거리장(far-field) 효과로 추정하였다. 우리나라에서도 유사한 가설이 경상분지 내 에오세(약 56-47 Ma) 암맥들을 연구한 Kim *et al.* (2005)에 의해 제기된 바 있고 현재까지도 원용되고 있다.

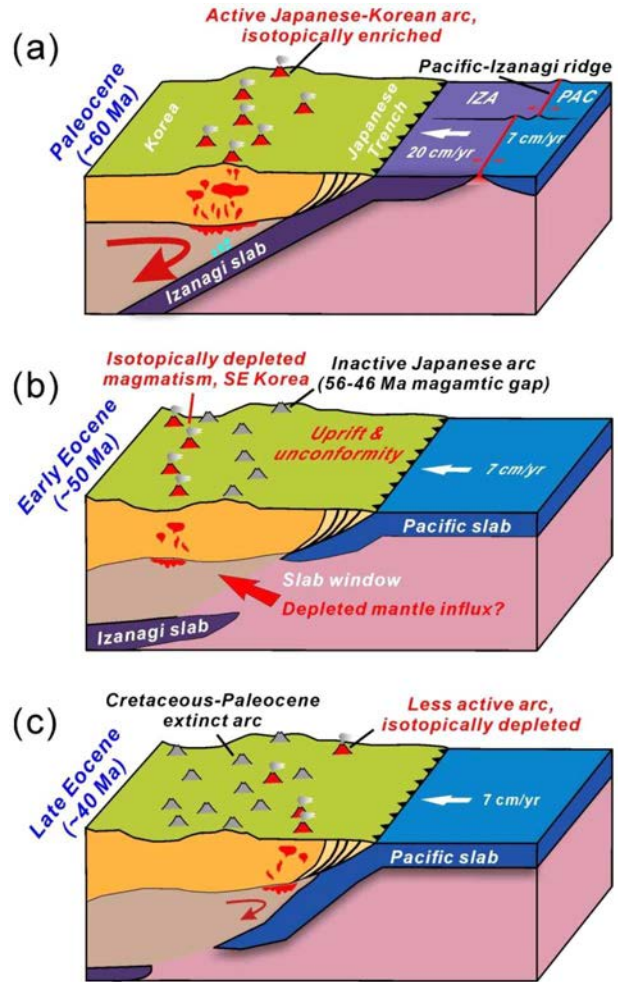
### 5.3.2. 해령 섭입과 슬랩-창 모델: 판구조론적 고찰

일본 열도의 백악기-고진기 화성 활동에 대한 연구는 최근 Wu and Wu (2019), Yamaoka and Wallis (2023) 및 Yamaoka *et al.* (2025)에 의해 집대성되며 새롭게 해석되었다(그림 6). Yamaoka and Wallis (2023)은 주로 저어콘 연대에 기반해 산인대의 화성 활동 갭이 60-46 Ma에 나타나며, 이는 이자나기-태평양판 해령(Izanagi-Pacific ridge; IPR)의 섭입과 연계된다는 제안을 하였다. 이러한 해석은 새로운 판 복원 모델(Seton *et al.*, 2015; Kimura *et al.*, 2019; Wu and Wu, 2019)이 제시되며 가능케 되었다. 이 모델은 이전 연구와 달리 IPR이 일본 해구와 거의 평행하게 섭입했음을 지시한다(그림 6a). Wu and Wu (2019)는 일본 열도만 아니라 극동 러시아의 시코테 알린대(Sikhote-Alin belt)와 사할린 섬에서 모두 약 56-46 Ma 시기에 화성 활동 갭이 존재하며, 이 마그마 활동의 소강은 IPR과 해구 사이의 거의 평행한 기하 관계로 설명이 가능하다고 제안하였다(그림 6a). 더 나아가 Wu *et al.* (2024)는 맨틀 토모그래피 자료를 분석해 이자나기판의 운동사를 복원함으로써 IPR의 섭입 시기가  $50 \pm 10$  Ma 경이며(그림 6b), 이 때에 화성 활동 갭을 비롯해 동아시아의 화성-지구조 환경에 큰 변화가 있었다고 해석하였다.

한편, Nanayama *et al.* (2021, 2022)은 홋카이도 히다카대(Hidaka Belt)의 응회암 및 쇄설성 저어콘 연대 연구를 통해 약 46-40 Ma 기간의 화성 활동 갭을 제시하였다. 46 Ma에 종료된 팔레오세-에오세 화성 활동은 Wu and Wu (2019)가 일본열도를 포함해 동아시아에서 제시한 56-46

Ma 갭과 크게 다르다. 하지만, 히다카대에 기록된 화성 활동의 종료 시점은 한반도 동해안의 48-47 Ma (표 3)과 유사하므로 흥미롭다.

이상에서 살펴본 바와 같이 에오세 화성 활동 갭은 동아



**Fig. 6.** Schematic diagrams showing Paleogene tectonic evolution of Japan and Korea during the Izanagi (IZA)-Pacific (PAC) ridge-trench intersection (modified from Wu and Wu, 2019). (a) Very active Paleocene arc magmatism characterized by relatively enriched isotopic signatures and high magmatic areal addition rates during the fast (20 cm/yr) subduction of the Izanagi plate. (b) At around  $50 \pm 10$  Ma, the Izanagi-Pacific ridge (IPR) subduction under the Asian continent produced a slab window, ultimately resulting in the ca. 56-46 Ma magmatic gap in the Sanin Belt, Japan. By contrast, the A-type granitic magmatism at 54-51 Ma is widespread in the eastern Gyeongsang Basin, Korea. The relatively depleted isotopic signatures of the A-type granites (e.g., Choi and Choi, 2025) could be linked to the influx of asthenospheric materials into the mantle wedge via the IPR or slab window. (c) After ca. 48-47 Ma, magmatism ceased in the Korean Peninsula until the Oligocene opening of the East Sea. By contrast, arc magmatism resumed in the Sanin Belt, Japan, at around 45 Ma.

시아 대륙호를 따라 지역별로 차이가 나는데 그 이유는 아직 불확실하다. 그럼에도 불구하고, 우리나라 동해안 쪽에서 에오세 화성 활동이 활발한 기간(58-47 Ma) 동안에 일본의 산인대에서는 화성 작용이 소강 상태에 접어들게 된다(그림 6b). 이와 같은 차이는 IPR 섭입에 따른 화성 활동의 종료가 산인대에서 먼저(약 60-56 Ma경) 일어났고, 해령이 계속 중한지괴 대륙 밑으로 섭입되면서 약 54-51 Ma 기간 중에 슬랩-창이 한반도 아래에 발달하였고, 48-47 Ma 경 한반도 역시 화성 활동이 종료되었음을 시사한다(그림 6b, 6c). 더 나아가 이러한 차이는 IPR 섭입에 따른 판 운동의 속도나 슬랩의 섭입 각도 등 화성-지구조 환경의 변화 또는 섭입 시기의 지역별 편차(e.g., Liu *et al.*, 2020)로 설명할 수 있기 때문에 향후 자세한 연구가 필요해 보인다.

우리나라의 경우, 이자나기판과 태평양판 사이의 해령이 약 90 Ma 시기에 일본 해구에 거의 수직하게 섭입되며 강력한 화성 활동을 일으켰다는 모델(Maruyama *et al.*, 1997)이 아직도 많은 연구자들 사이에 회자되고 있다. 이와 함께, 약 90-80 Ma의 IPR 해령 섭입에 기초한 슬랩-창(slab-window; Hwang *et al.*, 2012) 또는 다중(multiple) 슬랩-창 모델(Kim *et al.*, 2012)이 제안된 바 있다. 하지만, 최근 전지구적 판운동 복원 모델이 새롭게 제안되며(e.g., Seton *et al.*, 2015), IPR이 해구에 거의 평행하게 약 55-50 Ma경 섭입하였다는 모델이 대두되었다(그림 6; Wu *et al.*, 2019, 2024; 두 모델을 상호 비교한 Kim *et al.* (2015)의 그림 2 참조). 북평-포항분지의 하부에서도 IPR 해령이 섭입되면서 슬랩-창(e.g., Thorkelson, 1996; Liu *et al.*, 2020)이 만들어짐에 따라, 연약권 맨틀이 상부로 상승하며 결핍 맨틀 조성을 갖는 초생 마그마가 생성될 수 있다(그림 6b). 따라서 포항-경주 지역에서 보고된 A-형 화강암(e.g., Choi and Choi, 2025) 역시 IPR 해령의 섭입에 따른 지구화학적 변화를 고려해야 보다 정확한 화성-지구조 발달사를 확립할 수 있을 것이다. 또한 58 Ma 이후에 관입한 경상분지 화강암들은 백악기 암체들에 비해 저어콘의  $\epsilon_{\text{Hf}}$  값이 눈에 띄게 높아지는데(Cheong and Jo, 2017; Choi and Choi, 2025), Cheong and Jo (2017)은 이 특징적 변화를 에오세 지각 물질의 초생화(rejuvenation), 즉 연약권 맨틀 물질의 유입으로 설명한 바 있다. 결핍된 동위원소 성분을 보여주는 연약권 맨틀의 유입은 IPR 섭입(그림 6b)에 수반될 수 있으므로 보다 자세한 연구가 필요해 보인다.

한편, 최근의 지진파 탐사 연구 결과(Hong *et al.*, 2024)에 의하면, 북평분지를 규제하는 오십천단층을 따라 지금도 미소지진이 군집형(clustering)으로 일어나고 있고, 이 지진의 단층면해는 대부분 우수향 주향 이동을 지시한다. 이와 함께, 동해안을 따라 내륙 쪽보다 빠른 P파 속도를 갖는 “고속도대(High Vp belt)”가 나타나며, 이러한 Vp 이상

대는 동해의 열림에 연계된 고열개대(paleo-rift belt)를 반영한다고 제안되었다(Hong *et al.*, 2024; Park and Hong, 2024; Lee *et al.*, 2025). 하지만, 우리나라의 동해안을 따라 산출하는 에오세 화성암들은 또 다른 가능성을 제시한다. 즉, 에오세 초기에 일어난 IPR 섭입에 의해 슬랩-창이 북평에서 포항분지에 이르기까지 길게 발달하였고, 이 창을 통해 뜨거운 맨틀이 상부로 이동해 올라오며 결국 상당히 결핍된 맨틀 성분을 보이는 화성암체(A-형 화강암 포함)를 만들었다는 가설(그림 6b)이다. 즉 “고속도대”를 이루는 하부지각(+맨틀)이 약 50 Ma 시기에 이미 생성되기 시작했을 가능성이 있다는 점이다. 현재로서는 하부 지각 물질의 생성 연대를 알 수 없기 때문에 구체적인 증거를 제시하기 어렵다. 다만, 지각 하부의 고철질암이 언제 만들어졌는지 정확히 모르는 상황에서 여러 가능성을 열어 놓는 게 바람직해 보인다. 향후 화성-지구조 정보를 아우르는 지진-지구조 모델이 제공되길 바란다.

## 6. 결론

북평분지와 인근의 4개 시료에서 얻은 저어콘  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  연대는 약 50-48 Ma로 에오세 화성 활동이 경상분지뿐만 아니라 태백산분지 권역에서도 격렬했음을 말해준다. 또한  $48.2 \pm 0.5$  Ma ( $n=19$ ) 응회암을 절단하는 오십천단층은 이 퍼르질 이후에 운동했음을 지시한다. 저어콘 연대 자료는 퇴적물의 공급원이 분지 서쪽에 있었으며, Lim *et al.* (2025)가 제안한대로 북평분지가 반지구(half-graben) 구조 분지, 즉 분지 서쪽의 정단층에 의해 규제된 당겨열림 분지임을 지시한다.

우리가 얻은 50-48 Ma  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  연대는 기존의 K-Ar 연대 결과와 일치하며, 더 나아가 양산단층 주변에서 꾸준히 보고된 에오세 연대와 잘 대비된다. 이들 연대를 종합해 보면(표 3), 북평분지 권역에서 경상분지 남동부에 이르기까지 동해안을 따라 꽤 넓은 지역에서 팔레오세 최후기-에오세 초기(약 58-47 Ma)의 화성 활동이 있었음이 분명하다. 약 1천만년동안 일어난 이 광역적 화성 활동은 일본 열도와 극동 러시아에서 보고된 약 56-46 Ma의 소강 기간과(그림 6; Wu and Wu, 2019; Wu *et al.*, 2024; Yamaoka *et al.*, 2025) 큰 대조를 이룬다. 지리적으로 서로 인접한 에오세의 동아시아 대륙호 조각들이 왜 서로 다른 화성 활동 시기를 기록하는지 현재로서는 밝히기 어렵다. 무엇보다 판 경계부인 IPR 해령과 해구 사이의 교차각 등 기하학적 관계를 알 수 없기 때문이다. 하지만, 우리나라의 에오세 화성 활동은 IPR 섭입에 따른 슬랩-창 맨틀 유입(그림 6b)에 연계될 가능성이 크며, 향후 보다 자세한 화성-지구조 연구를 통해 우리나라는 물론이고 동아시아 전체에 걸친 에오세

판의 복원 및 지구조 진화사가 확립되길 바란다.

## 감사의 글

논문 원고에 대한 유익하고 사려 깊은 비평을 제공해주신 심사위원들과, 초고를 읽고 빠른 코멘트로 도움을 주신 박계현 교수, 정창식 박사과 이승렬 박사에게 감사드린다. 또한, 태백 지역 야외 조사 시 많은 도움을 주신 임순복 선배님께 감사드린다. 이 연구는 한국기상산업진흥원의 지진 기술개발사업(KMI2022-00710)에 의해 지원되었다.

## REFERENCES

- Cheon, Y., Ha, S., Lee, S. and Son, M., 2020, Tectonic evolution of the Cretaceous Gyeongsang Back-arc Basin, SE Korea: Transition from sinistral transtension to strike-slip kinematics. *Gondwana Research*, 83, 16-35.
- Cheong, A.C.S. and Jo, H.J., 2017, Crustal evolution in the Gyeongsang Arc, southeastern Korea: Geochronological, geochemical and Sr-Nd-Hf isotopic constraints from granitoid rocks. *American Journal of Science*, 317, 369-410.
- Cheong, C.S. and Kim, N., 2012, Review of radiometric ages for Phanerozoic granitoids in southern Korean Peninsula. *Journal of the Petrological Society of Korea*, 21, 173-192 (in Korean with English abstract).
- Cheong, C.S., Yi, K., Kim, N., Lee, T.H., Lee, S.R., Geng, J.Z. and Li, H.K., 2013, Tracking source materials of Phanerozoic granitoids in South Korea by zircon Hf isotopes. *Terra Nova*, 25, 228-235.
- Cho, M., Cheong, W., Ernst, W.G., Kim, Y. and Yi, K., 2021, U-Pb detrital zircon ages of Cambrian-Ordovician sandstones from the Taebaeksan Basin, Korea: Provenance variability in platform shelf sequences and paleogeographic implications. *The Geological Society of America Bulletin*, 133, 488-504, <https://doi.org/10.1130/B35521.1>.
- Cho, M., Min, K. and Kim, H., 2018, Geology of the 2018 Winter Olympic site, Pyeongchang, Korea. *International Geology Review*, 63, 267-287, <https://doi.org/10.1080/00206814.2017.1340196>.
- Choi, H. and Choi, S.H., 2025, Petrogenesis of the Late Cretaceous-Paleogene I- and A-type granite association from the Gyeongsang Basin, southeastern Korean Peninsula. *Lithos*, 514-515, 108220.
- Choi, H., Hong, T.-K., He, X. and Baag, C.-E., 2012, Seismic evidence for reverse activation of a paleo-rifting system in the East Sea (Sea of Japan). *Tectonophysics*, 572-573, 123-133.
- Chough, S.K. and Sohn, Y.K., 2010, Tectonic and sedimentary evolution of a Cretaceous continental arc-backarc system in the Korean Peninsula: new view. *Earth-Science Reviews*, 101, 225-249, <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2010.05.004>.
- Hong, T.-K., Park, S., Lee, J., Lee, J. and Kim, B., 2024, Middle to lower crustal earthquakes in the western East Sea (Sea of Japan) and their implications for neotectonic evolution. *Tectonophysics*, 880, 230346, <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2024.230346>.
- Hwang, B.H., Ernst, W.G. and Yang, K., 2012, Two different magma series imply a Palaeogene tectonic transition from contraction to extension in the SE Korean Peninsula. *International Geology Review*, 54, 1284-1295, <https://doi.org/10.1080/00206814.2011.636990>.
- Hwang, B.H., McWilliams, M., Son, M. and Yang, K., 2007, Tectonic implication of A-type granites across the Yangsan fault, Gyeonggi and Gyeongju areas, southeast Korean Peninsula. *International Geology Review*, 49, 1094-1102.
- Hwang, S.K., Son, Y.W. and Choi, J.O., 2017, Geological history and landscapes of the Juwangsang National Park, Cheongsong. *Journal of the Petrological Society of Korea*, 26, 235-254 (in Korean with English abstract).
- Imaoka, T., Kiminami, K., Nishida, K., Takemoto, M., Ikawa, T., Itaya, T., Kagami, H. and Iizumi, S., 2011, K-Ar age and geochemistry of the SW Japan Paleogene cauldron cluster: Implications for Eocene-Oligocene thermotectonic reactivation. *Journal of Asian Earth Sciences*, 40, 509-533.
- Jang, Y., Kim, S.W., Samuel, V.O., Kwon, S., Park, S.I., Santosh, M. and Yi, K., 2024, Paleozoic tectonic evolution of the proto-Korean Peninsula along the East Asian continental margin from detrital zircon U-Pb geochronology and Hf isotope geochemistry. *Geoscience Frontiers*, 15, 101700.
- Jeong, E.K., 2016, Integrative study and constructing a database on the Miocene plant remains from Korea and Japan. Ministry of Science, ICT and Future Planning, 37 p, <https://doi.org/10.23000/TRKO201700015104> (in Korean with English abstract).
- Jin, M.S., Kim, S.-Y., Seo, H.-J. and Kim, S.-J., 1989, K-Ar whole rock ages of the rhyolitic rocks at Punggog in the Jangseong sheet, Taebaegsan area. *Jour. Korean Inst. Mining Geol.*, 22, 17-20.
- Jo, H.J., Cheong, A.C.S., Ryu, J.S., Kim, N., Yi, K., Jung, H. and Li, X.H., 2016, *In-situ* oxygen isotope records of crustal self-cannibalization selectively captured by zircon crystals from high- $\delta^{26}\text{Mg}$  granitoids. *Geology*, 44, 339-342.
- Kee, W.S., Kim, S.W., Hong, P.S., Lee, B.C., Cho, D.R., Byun, U.H., Ko, K., Kwon, C.W., Kim, H.C., Jang, Y., Song, K.Y., Koh, H.J. and Lee, H.J., 2019, 1:1,000,000 Geological Map of Korea. Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources.
- Kim, C.S. and Kim, G.S., 1997, Petrogenesis of early Tertiary A-type Namsan alkali granite in the Gyeongsang Basin, Korea. *Geoscience Journal*, 1, 99-107, <https://doi.org/10.1007/BF02910481>.
- Kim, G.-B., 2024, Cenozoic tectonic evolution of the eastern Korean margin, inferred from the stratigraphic relationship between Mukho and Bukpyeong basins, Korean East Coast. *Journal of the Geological Society of Korea*, 60, 169-179, <http://dx.doi.org/10.14770/jgsk.2024.009> (in Korean with English abstract).
- Kim, G.-B., Yoon, S.H., Kim, S.S. and So, B.D., 2018, Transition from buckling to subduction on strike-slip continental margins: Evidence from the East Sea (Japan Sea). *Geology*, 46, 603-606, <https://doi.org/10.1130/G40305.1>.
- Kim, J.-S., Kim, K.-K., Jwa, Y.-J. and Son, M., 2012, Cretaceous to Early Tertiary granites and magma mixing in South Korea: Their spatio-temporal variations and tectonic implications (multiple slab window model). *Journal of the Petrological*

- Society of Korea, 21, 203-216 (in Korean with English abstract).
- Kim, J.-S., Son, M., Kim, J.-S. and Kim, J., 2005,  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  ages of Tertiary dyke swarm and volcanic rocks, SE Korea. *Journal of the Petrological Society of Korea*, 14, 93-107 (in Korean with English abstract)
- Kim, M.-C., Jeong, R.-Y., Gahng, G., Chae, Y.-U., Song, C.W., Kang, H.-C. and Son, M., 2023, Incipient subsidence and subsequent clockwise rotation of the Miocene Janggi onshore basin, SE Korea, associated with the back-arc opening of East Sea. *Marine Geophysical Research*, 44, 11, <https://doi.org/10.1007/s11001-023-09520-5>.
- Kim, M.-J. and Park, K.-H., 2016, SHRIMP U-Pb age of Samhwa Granite in the Taebaek area. *Annual meeting of the Petrological Society of Korea (Abstracts)*, Busan, p. 111 (in Korean).
- Kim, Y., Lee, C. and Kim, S.-S., 2015, Tectonics and volcanism in East Asia: Insights from geophysical observations. *Journal of Asian Earth Sciences*, 113, 842-856, <https://doi.org/10.1016/j.jseas.2015.07.032>.
- Kimura, G., Kitamura, Y., Yamaguchi, A., Kameda, J., Hashimoto, Y. and Hamahashi, M., 2019, Origin of the early Cenozoic belt boundary thrust and Izanagi-Pacific ridge subduction in the western Pacific margin. *Island Arc*, 28, e12320.
- Kwon, Y.K., Yoon, S.H. and Chough, S.K., 2009, Seismic stratigraphy of the western South Korea Plateau, East Sea: Implications for tectonic history and sequence development during back-arc evolution. *Geo-Marine Letters*, 29, 181-189.
- Lee, C.H., Kim, Y.J. and Choi, B.R., 1993, Geological report of the Chukpyon and Imwonjin sheet (1: 50,000). Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources, Daejeon, 94 p (in Korean with English abstract).
- Lee, J., Hong, T.-K., Lee, J., Park, S., Kim, B., Celis, S. and Liu, Y., 2025, Continent-side paleo-rift structure in the western East Sea (Sea of Japan) and linkage between Moho uplift and mountain range formation. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 130, e2025JB031780, <https://doi.org/10.1029/2025JB031780>.
- Lee, J.H., Yoon, S.H., Kim, Y.M., So, B.D. and Kim, G.B., 2023a, Failing subduction initiation in an opposing pair of incipient-diffuse subduction margins: A case from the East Sea (Japan Sea). *Tectonics*, 42, 2023TC007773.
- Lee, S.R. and 39 others, 2020, Research on geologic hazard assessment of large fault system-focusing on central region of the Yangsan fault (R&D Report NP2018-017). Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources, Daejeon, 502 p (in Korean with English abstract).
- Lee, T.-H., Yi, K., Cheong, C.-S., Jeong, Y.-J., Kim, N. and Kim, M.-J., 2014, SHRIMP U-Pb zircon geochronology and geochemistry of drill cores from the Pohang Basin. *Journal of the Petrological Society of Korea*, 23, 167-185, <https://doi.org/10.7854/JPSK.2014.23.3.167> (in Korean with English abstract).
- Lee, Y., Cho, M. and Kim, J., 2023b, Fluid-fluxed partial melting of the Buncheon granitic gneiss in the Yeongnam Massif, Korea: Protracted (ca. 1.86-1.84 Ga) reworking of the Paleoproterozoic Korean Arc. *Lithos*, 456-457, 107308.
- Lee, Y.-N. and Jacobs, L.L., 2010, The platanthomyine rodent Neocometes from the Miocene of South Korea and its paleobiogeographical implications. *Acta Palaeontologica Polonica*, 55, 581-586, <https://doi.org/10.4202/app.2010.0013>.
- Lim, B., Kim, M.-C., Ha, S., Kim, K.H. and Son, M., 2025, Geometry and Extension Mode of the Bukpyeong Basin, Donghae-Samcheok Area, Gangwon-do, South Korea. *Korean Journal of Mineralogy and Petrology*, 38, 55-75, <https://doi.org/10.22807/KJMP.2025.38.1.55> (in Korean with English abstract).
- Lim, S.B. and Choi, Y.J., 1982, Geology and lignite resources of Bukpyeong area, Gangweondo, Korea. *Korean Institute of Energy and Resources Bulletin*, 35, 1-38 (in Korean with English abstract)
- Liu, K., Zhang, J., Xiao, W., Wilde, S. and Alexandrov, I., 2020, A review of magmatism and deformation history along the NE Asian margin from ca. 95 to 30 Ma: Transition from the Izanagi to Pacific plate subduction in the early Cenozoic. *Earth-Science Reviews*, 209, 103317, <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2020.103317>.
- Ludwig, K.R., 2008, User's Manual for Isoplot 3.6: A Geochronological Toolkit for Microsoft Excel. Berkeley Geochronology Center Special Publication, Berkeley.
- Maruyama, S., Isozaki, Y., Kimura, G. and Terabayashi, M., 1997, Paleogeographic maps of the Japanese Islands: plate tectonic synthesis from 750 Ma to the present. *Island Arc*, 6, 121-142, <https://doi.org/10.1111/j.1440-1738.1997.tb00043.x>.
- Nanayama, F., Tajika, J., Yamasaki, T., Kurita, H., Iwano, H., Danhara, T. and Hirata, T., 2021, The emplacement of *in situ* greenstones in the northern Hidaka Belt: The tectonic relationship between subduction of the Izanagi-Pacific ridge and Hidaka magmatic activity. *Island Arc*, 30, e12403, <https://doi.org/10.1111/iar.12403>.
- Nanayama, F., Yamasaki, T., Kanamatsu, T., Iwano, H., Danhara, T. and Hirata, T., 2022, Origin and evolution of the Paleo-Kuril arc inferred from detrital zircon U-Pb chronology in eastern Hokkaido, NE Asia. *Island Arc*, 31, e12458, <https://doi.org/10.1111/iar.12458>.
- Park, J. and Jang, Y.-D., 2023, A preliminary study on the genesis of high-silica granite by incomplete separation of felsic cumulate-melt: leucocratic granites along the eastern contacts of the Middle Yangsan Fault, South Korea. *Journal of the Geological Society of Korea*, 59, 585-613, <https://doi.org/10.14770/jgsk.2023.039> (in Korean with English abstract).
- Park, K.H., 2012, Cyclic Igneous Activities During the Late Paleozoic to Early Cenozoic Period Over the Korean Peninsula. *Journal of the Petrological Society of Korea*, 21, 193-202 (in Korean with English abstract).
- Park, S. and Hong, T.-K., 2024, Continent-side uplifted mantle and geological imprints along a paleo rift in the western East Sea (Sea of Japan). *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 129, e2024JB029049, <https://doi.org/10.1029/2024JB029049>.
- Seton, M., Flament, N., Whittaker, J., Muller, R.D., Gurnis, M., and Bower, D.J., 2015, Ridge subduction sparked reorganization of the Pacific plate-mantle system 60-50 million years ago. *Geophysical Research Letters*, 42, 1732-1740, <https://doi.org/10.1002/2015GL063057>.
- Shin, S.-C., 2012, Cooling and thermal histories of Cretaceous-

- Paleogene granites from different fault-bounded blocks, SE Korean Peninsula: Fission-track thermochronological evidences. *Journal of the Petrological Society of Korea*, 21, 335-365 (in Korean with English abstract).
- Shin, S.-C., 2013, Revised fission-track ages and chronostratigraphies of the Miocene basin-fill volcanics and basements, SE Korea. *Journal of the Petrological Society of Korea*, 22, 83-115 (in Korean with English abstract).
- Son, M., Song, C.W., Kim, M.-C., Cheon, Y., Cho, H. and Sohn, Y.K., 2015, Miocene tectonic evolution of the basins and fault systems, SE Korea: dextral, simple shear during the East Sea (Sea of Japan) opening. *Journal of the Geological Society*, 172, 664-680, <https://doi.org/10.1144/jgs2014-079>.
- Stacey, J.S. and Kramers, J.D., 1975, Approximation of terrestrial lead isotope evolution by a 2-stage model. *Earth and Planetary Science Letters*, 26, 207-221.
- Thorkelson, D.J., 1996, Subduction of diverging plates and the principles of slab window formation. *Tectonophysics*, 255, 47-63.
- Whitehouse, M.J., Claesson, S., Sunde, T. and Vestin, J., 1997, Ion microprobe U-Pb zircon geochronology and correlation of Archean gneisses from the Lewisian Complex of Gruinard Bay, northwestern Scotland. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 61, 4429-4438, [https://doi.org/10.1016/S0016-7037\(97\)00251-2](https://doi.org/10.1016/S0016-7037(97)00251-2).
- Won, C.K., Lee, M.W., Noh, J.H. and Lee, H.K., 1994, Cretaceous volcanic activity in Tongri Basin. *Journal of the Geological Society of Korea*, 30, 542-562 (in Korean with English abstract).
- Wu, J., Wu, T.-J. and Yamaoka, K., 2024, Linking Pacific plate motions to metamorphism and magmatism in Japan during Cretaceous to Paleogene times. *Elements*, 20, 103-109, <https://doi.org/10.2138/gselements.20.2.103>.
- Wu, J.T.-J. and Wu, J., 2019, Izanagi-Pacific ridge subduction revealed by a 56 to 46 Ma magmatic gap along the northeast Asian margin. *Geology*, 47, 953-957, <https://doi.org/10.1130/G46778.1>.
- Yamaoka, K., Morohoshi, T., Sato, D. and Mikuni, K., 2025, Ignimbrite flare-up in Late Cretaceous-Paleocene Japan empowered by hot mantle inflow. *Progress in Earth and Planetary Science*, 12, 75, <https://doi.org/10.1186/s40645-025-00755-x>.
- Yamaoka, K. and Wallis, S.R., 2023, Clockwise rotation of SW Japan and timing of Izanagi-Pacific ridge subduction revealed by arc migration. *Progress in Earth and Planetary Science*, 10, 62, <https://doi.org/10.1186/s40645-023-00594-8>.
- Yoon, S.H. and Chough, S.K., 1995, Regional strike slip in the eastern continental margin of Korea and its tectonic implications for the evolution of Ulleung Basin, East Sea (Sea of Japan). *Geological Society of America Bulletin*, 107, 83-97.
- Yun, S. and Silberman, M.L., 1979, K-Ar geochronology of igneous rocks in the Yeonhwa-Ulchin zinc-lead district and southern margin of the Taebaegsan basin, Korea. *Journal of the Geological Society of Korea*, 15, 89-100.
- Zhang, Y.B., Wan, B., Zhai, M.-G., Wang, T., Zhang, X.-H., Li, Q.-L., Peng, P. and Hou, Q.-L., 2022, Late Cretaceous-early Paleogene magmatism in the Gyeongsang basin, southeast Korea and its implications for middle Paleogene climate change. *Journal of Asian Earth Sciences*, 237, 105346.