



Review

한반도의 페름기-트라이아스기 지구조-변성 진화: 섭입-충돌 모델의 종합적 검토

김형수

고려대학교 지구환경과학과

Permian-Triassic tectono-metamorphic evolution of the Korean Peninsula: A review of subduction-collision models

Hyeong Soo Kim

Department of Earth and Environmental Sciences, Korea University, Seoul 02841, Republic of Korea

Received: August 5, 2026 / Revised: August 16, 2026 / Accepted: August 18, 2026

*Corresponding author: +82-2-3290-3182 / E-mail: haskim2@korea.ac.kr

요약: 한반도의 페름기-트라이아스기 지체구조-변성 진화를 설명하기 위해 썬기형 대륙 충돌, 섭입-충돌과 대륙형 변환단층, 경기육괴 내부 및 주변의 충돌·조산대, 그리고 이중 섭입-충돌을 포함한 다양한 지체구조 모델이 제안되어 왔다. 본 연구는 주요 지체구조의 변성 압력-온도 경로, 구조, 지구연대 및 화성암 자료 그리고 층서·고생물 자료들을 종합하여 각 모델의 근거와 한계를 검토하였다. 태백산분지의 북중국 지괴 친연성, 임진강대와 홍성-임진강대의 중압-고압 변성 및 수축 이후 신장변형, 경기육괴의 공간적으로 불균질한 열적 기록, 영남육괴에서 페름기-트라이아스기 광역변성 기록이 뚜렷하지 않은 점과 한반도 동부의 장기간 섭입 관련 화성활동은 단일한 섭입-충돌 체계만으로는 일관되게 설명하기 어렵다. 특히 평안누층군에 지역적으로 나타나는 두 단계 변성-변형과 썬설성 저어콘 기록, 영덕 지역의 후기 고생대 화산호 자료는 한반도 동부에 능동적 대륙연변부가 존재했음을 지지한다. 따라서 송림 조산운동은 중서부의 대륙 충돌과 동부의 해양판 섭입-화산호 활동이 시공간적으로 중첩된 복합 조산작용으로 해석될 수 있다. 향후에는 주요 지체구조 경계의 접촉관계와 변형 특성, 지역별 변성-변형-화성 진화와 시공간적 관계에 대한 통합적 이해가 필요하다.

주요어: 한반도, 페름기-트라이아스기, 송림 조산운동, 지체구조-변성 진화, 섭입-충돌 모델

ABSTRACT: Several tectonic models have been proposed to explain the Permian-Triassic tectono-metamorphic evolution of the Korean Peninsula, including wedge indentation associated with continental collision, subduction-collision coupled with continental transform faulting, collisional and marginal-orogenic belts within and around the Gyeonggi Massif, and dual subduction-collision. This review integrates metamorphic pressure-temperature paths, structural relationships, geochronological and magmatic records, and stratigraphic-paleontological evidence from major tectonic provinces to assess the basis and limitations of these models. The North China Block affinity of the Taebaeksan Basin, medium-to high-pressure metamorphism followed by a transition from contractional to extensional deformation in the Imjingang and Hongseong-Imjingang belts, spatially heterogeneous thermal records within the Gyeonggi Massif, the poorly defined Permian-Triassic regional metamorphic record in the Yeongnam Massif, and prolonged subduction-related magmatism in eastern Korea cannot be explained by a single subduction-collision framework. In particular, the regionally expressed two-stage metamorphic-deformational evolution and detrital zircon record of the Pyeongan Supergroup, together with Late Paleozoic volcanic-arc records from the Yeongdeok area, support the existence of an active continental margin in eastern Korea. The Songrim orogeny may therefore be interpreted as a composite orogenic process generated by the spatiotemporal superposition of continental collision in northwestern Korea and oceanic-plate subduction and arc magmatism along the eastern margin of the peninsula. Future studies should integrate the contact relationships and deformation characteristics of major tectonic boundaries with regional metamorphic-deformational-magmatic evolution and the spatiotemporal relationships among these processes.

Key words: Korean Peninsula, Permian-Triassic, Songrim orogeny, tectono-metamorphic evolution, subduction-collision models

1. 서론

한반도를 포함한 동아시아에서 고생대 말-중생대 초기의 섭입-충돌과 이에 수반된 조산운동은 지난 30여 년간 지속적으로 논의되어 온 핵심 연구 주제이다. 특히 한반도의 페름기-트라이아스기 지체구조 진화와 관련해서는 서로 다른 두 광역 지체구조계의 영향이 주요 쟁점으로 다루어져 왔다. 하나는 남중국 지괴(South China Block)의 북향 대륙 섭입과 북중국 지괴(North China Block 또는 Sino-Korean Block)와의 충돌로 형성된 친링-통바이-홍안-다비-수루(Qinling-Tongbai-Hong'an-Dabie-Sulu) 대륙충돌 조산대가 한반도까지 동쪽으로 연장되는지에 관한 문제이다. 다른 하나는 북중국 지괴의 북쪽과 북동쪽에서 고 아시아해(Paleo-Asian Ocean)의 폐쇄와 부가작용으로 형성된 중앙아시아 조산대(Central Asian Orogenic Belt)와 한반도 동쪽의 고 태평양판(Paleo-Pacific Plate) 섭입이 한반도의 지각 진화에 미친 영향이다. 이러한 서로 다른 지구조 과정의 상대적인 중요성과 시공간적 중첩 관계를 설명하기 위해 대륙 충돌대의 동쪽 연장, 대륙형 변환단층, 경기육괴 내부의 충돌대 및 서로 다른 두 개의 섭입-충돌계를 포함하는 다양한 지체구조 모델이 제안되었다(Cluzel *et al.*, 1991; Yin and Nie, 1993; Ree *et al.*, 1996; Chough *et al.*, 2000; Oh *et al.*, 2005, 2006; Kwon *et al.*, 2009; Kim and Ree, 2013; Kim, H.S. *et al.*, 2013, 2015; Cho *et al.*, 2017a, 2017b; Cheong *et al.*, 2019).

암석학, 지구연대학, 구조지질학, 퇴적학, 고생물학 및 지구물리학 분야에서 많은 연구가 수행되었음에도 불구하고, 한반도의 페름기-트라이아스기 지체구조 진화에 대해서는 아직 합의된 모델이 확립되지 않았다. 이러한 불확실성은 우선 한반도가 중생대 이후 고 태평양판 계열의 섭입과 관련된 반복적인 화성활동과 변성·변형작용을 경험하면서 이전 지질 기록의 상당 부분이 중첩되거나 소실된 데 기인한다. 또한, 한반도를 구성하는 주요 지체구조구의 범위와 경계, 그리고 각 지체구조구의 북중국 또는 남중국 지괴에 대한 친연성(affinity)이 연구자에 따라 다르게 해석되고 있다. 실제로 전통적인 지체구조 구분과 최근 제안된 구분은 임진강대, 경기육괴 서부, 옥천변성대 및 태백산분지의 범위와 상호 경계에서 뚜렷한 차이를 보인다(그림 1). 특히, 선캄브리아 시대 기반암으로 구성된 경기육괴와 영남육괴의 경계는 매우 모호하다. 예를 들면, 이 두 육괴가 각각 독립된 지체구조 단위인지, 여러 지각 파편(crustal fragment)의 집합체인지, 그리고 두 육괴 사이의 경계 위치와 접촉관계는 아직 명확히 규명되지 않았다. 또한, 한반도 각 지체구조구에서 보고된 페름기-트라이아스기 변성 압력-온도 경로는 변성 조건과 경로의 형태에서 상당한 공간적 차이를 보인다. 이러한 차이는 서로 다른 섭입-충돌 환경, 변성 시기와 매몰-식박 과정의 차이, 지각 파편의 지구조적 병치(tectonic juxtaposition) 또는 후기 열적 중첩을 반영할 수

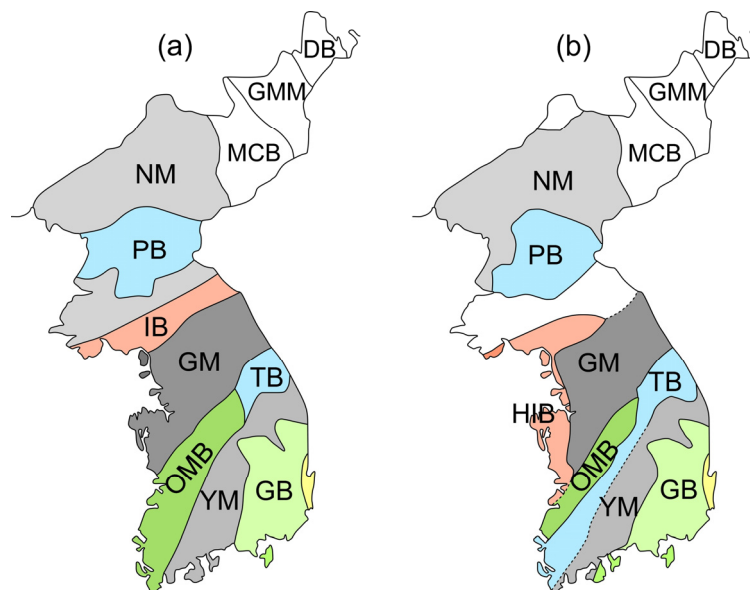


Fig. 1. Simplified tectonic maps of the Korean Peninsula showing (a) the traditional division of major tectonic provinces (KIGAM, 2001) and (b) a revised division including the Hongseong-Imjingang Belt and the expanded Taebaeksan Basin (Kee *et al.*, 2019). DB, Dumangang Basin; GB, Gyeongsang Basin; GM, Gyeonggi Massif; GMM, Gwanmo Massif; HIB, Hongseong-Imjingang Belt; IB, Imjingang Belt; MCB, Macheollyeong Belt; NM, Nangrim Massif; OMB, Okcheon Metamorphic Belt; PB, Pyeongnam Basin; TB, Taebaeksan Basin; YM, Yeongnam Massif. Jeju Island, Ulleungdo, and Dokdo, which are composed predominantly of Cenozoic rocks, are omitted from the map for clarity.

있으므로, 특정 변성 연대나 고압 변성암의 산출만으로 하나의 충돌대를 설정하기는 어렵다.

그 결과, 기존 모델들은 충돌대의 위치와 연장(extent), 각 지체구조구의 친연성(affinity), 섭입 방향 및 섭입-충돌계의 공간적 배열과 상호관계에 대해서도 서로 다른 해석을 제시한다. 이러한 모델들을 검증하기 위해서는 개별 연대자료에 의존하기보다, 화석군과 퇴적물 기원으로부터 추정된 고지리, 변성암의 압력-온도-시간-변형 경로, 화성활동의 시공간적 변화, 주요 경계부의 구조와 운동학, 그리고 지구물리학적 자료를 함께 고려해야 한다. 특히, 각 자료가 동일한 지체구조 경계와 이동 방향, 그리고 일관된 매몰-삭박 및 열적 진화과정을 지시하는지를 검토하는 것이 중요하다. 본 논문에서는 먼저 한반도를 구성하는 주요 지체구조구의 구분과 지질학적 특성을 정리하고, 각 지역에서 보고된 고생대 말-중생대 초기 변성작용과 압력-온도 경로를 비교한다. 이를 바탕으로 지금까지 제안된 대표적인 섭입-충돌 모델의 주요 가정과 지질학적 근거를 검토하고, 각 모델이 설명할 수 있는 현상과 설명하기 어려운 문제를 구분한다. 궁극적으로는 특정 모델을 우선적으로 채택하기보다, 한반도의 페름기-트라이아스기 지체구조 진화를 제약하는 핵심 증거와 향후 검증이 필요한 주요 쟁점들을 제시하고자 한다.

2. 한반도의 지체구조

한반도의 지체구조는 전통적으로 낭림육괴, 경기육괴, 영남육괴의 세 선캄브리아 시대 기반암 지체구조로 구분되어 왔다. 낭림육괴와 경기육괴 사이에는 임진강대가, 경기육괴와 영남육괴 사이에는 옥천변성대와 태백산분지가 분포한다(그림 1a; Chough *et al.*, 2000; KIGAM, 2001). 2000년대 이후 이차이온 질량분석기를 이용한 저어콘 U-Pb 연대측정이 보편화되면서 한반도 변성·화성 사건의 시기가 보다 정밀하게 규명되었고, 이를 바탕으로 기존 지체구조 구분도 재검토되기 시작하였다(e.g., Lee and Cho, 2012). 대표적으로 Kee *et al.* (2019)은 임진강대, 경기육괴 서부와 옥천변성대 북서부에 분포하는 암석의 산출 양상, 형성 시기 및 지질구조의 연속성을 근거로 이들 지역을 하나의 홍성-임진강대로 통합하였다(그림 1b). 또한, 태백산분지의 변성퇴적암류가 기존에 알려진 범위보다 넓게 분포하여 영남육괴 북서부 경계의 상당 부분을 피복한다고 해석하였다. 아래에서는 한반도 주요 지체구조구의 기반암 구성과 지질학적 특성을 정리하고, 각 지역에서 보고된 주요 변성암의 산출 양상과 고생대 말-중생대 초기 변성 압력-온도 경로를 비교한다.

2.1. 낭림육괴

낭림육괴는 남쪽의 평남분지와 북동쪽의 마천령대 사이에 위치한다(그림 1). 기반암은 후기 시생누대 낭림층군과 고원생대 낭림복합체 및 연호산복합체의 화강암류로 구성된다(Lee and Cho, 2012). 약 2.7-2.5 Ga에 형성된 낭림층군은 규암, 대리암, 각섬암 및 편마암류로 이루어지며, 저압-고온형 백립암상 변성작용과 부분용융에 따른 혼성암질 조직을 흔히 보인다. 이 암석들은 과거 경기육괴와 영남육괴의 일부 편마암 복합체와 함께 한반도의 대표적인 시생대 기반암으로 대비되었으나, 최근 연대학적 연구에 따르면 경기육괴와 영남육괴 기반암의 대부분은 고원생대에 형성된 것으로 밝혀졌다(e.g., Lee *et al.*, 2000; Cho *et al.*, 2006; Song *et al.*, 2009; Kim, N. *et al.*, 2012).

한편 Wu *et al.* (2007)이 낭림산맥을 배수하는 대동강-청천강-성천강 하구 모래의 쇄설성 저어콘을 분석한 결과, 불일치도 10% 미만인 194개 분석점 중 약 73%가 1.83 Ga에 집중되었고, 3.4, 2.9, 2.6-2.5 및 2.4-2.2 Ga 연대군은 소수였다. 약 1.8 Ga 저어콘의 음의 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 값과 시생대 Hf 모델연대는 이 화성활동이 오래된 지각 물질의 재순환에 기인했음을 지시한다. 따라서 낭림육괴에는 시생대 지각 성분이 존재하지만, 광역적인 연대 기록은 약 1.8 Ga의 고원생대 화성활동과 지각 재작용이 우세한 것으로 해석된다.

낭림육괴 주변부에는 고원생대 증산층군, 황해층군 및 의주층군이 분포한다(Lee and Cho, 2012). 이들은 주로 변성퇴적암과 결정질 편암으로 구성되며, 황해층군에는 산성 화산암도 포함하며 중원생대 지층으로 보고되었다(Yang *et al.*, 2016). 상부 선캄브리아 지층으로는 후기 중원생대-신원생대 상원계와 신원생대 연탄층군이 있으며, 이 가운데 연탄층군은 북중국 지괴의 시니안계(Sinian System)와 대비된다. 이러한 층서적 대비와 약 1.8 Ga 화성-열 사건의 유사성은 낭림육괴와 북중국 지괴 사이의 지체구조적 연관성을 평가하는 데 중요한 근거를 제공한다(Wu *et al.*, 2007). 다만 두 지역은 저어콘 U-Pb 연대분포에서 차이를 보이므로, 이러한 유사성만으로 낭림육괴를 북중국 지괴의 특정 지체구조 단위와 직접 대비하는 데에는 주의가 필요하다.

2.2. 경기육괴

경기육괴는 한반도 중앙부에 위치하며, 선캄브리아 시대 기반암은 고원생대 서산층군과 경기편마암복합체, 그리고 고원생대 춘천계와 고생대 데본기 연천층군으로 구성된다(Lee and Cho, 2012). 기반암은 주로 호상 또는 안구상 편마암으로 이루어지며 각섬암, 규암, 대리암 및 탄산규암이 협재된다. 경기육괴의 결정질 기반암은 약 1.94-1.86 Ga에 상부 각섬암상-백립암상 조건의 광역변성작용과 혼성암화작용을 경험하였다(그림 2; Lee *et al.*, 2000; Song

et al., 2011; Lee and Cho, 2012). 이후 페름기-트라이아스기 동안 경기육과 일부 지역에 중압형 각섬암상 변성작용과 화성활동이 중첩되었으며(Lee and Cho, 2003; Cho *et al.*, 2017a, 2017b), 쥐라기 화강암류의 관입과 북북동 방향 주향이동단층의 발달이 뒤따랐다.

고원생대 변성작용의 압력-온도 경로는 경기육과 동부의 오대산, 중부의 화천 및 서부의 청계산 지역에서 보고되었으며, 최고 변성 조건은 각각 770-860°C/5.4-10.0 kbar

범위에서 대체로 시계방향의 압력-온도 경로를 보인다(그림 2의 경로 1-3; Kwon *et al.*, 1997; Lee and Cho, 2003; Cho *et al.*, 2017a, 2017b). 이들 지역에서는 트라이아스기에 석류석-근청석 광물조합의 형성과 관련된 중압-고온 변성작용이 다시 중첩되었으며, 약 660-770°C와 3.0-6.0 kbar의 조건이 추정되었다(그림 2의 경로 1-1, 2-1 및 3-1). 오대산 지역에서는 트라이아스기 맨거라이트(mangrite)의 관입과 관련된 초고온 변성작용이 제안되었으나(그림 2의

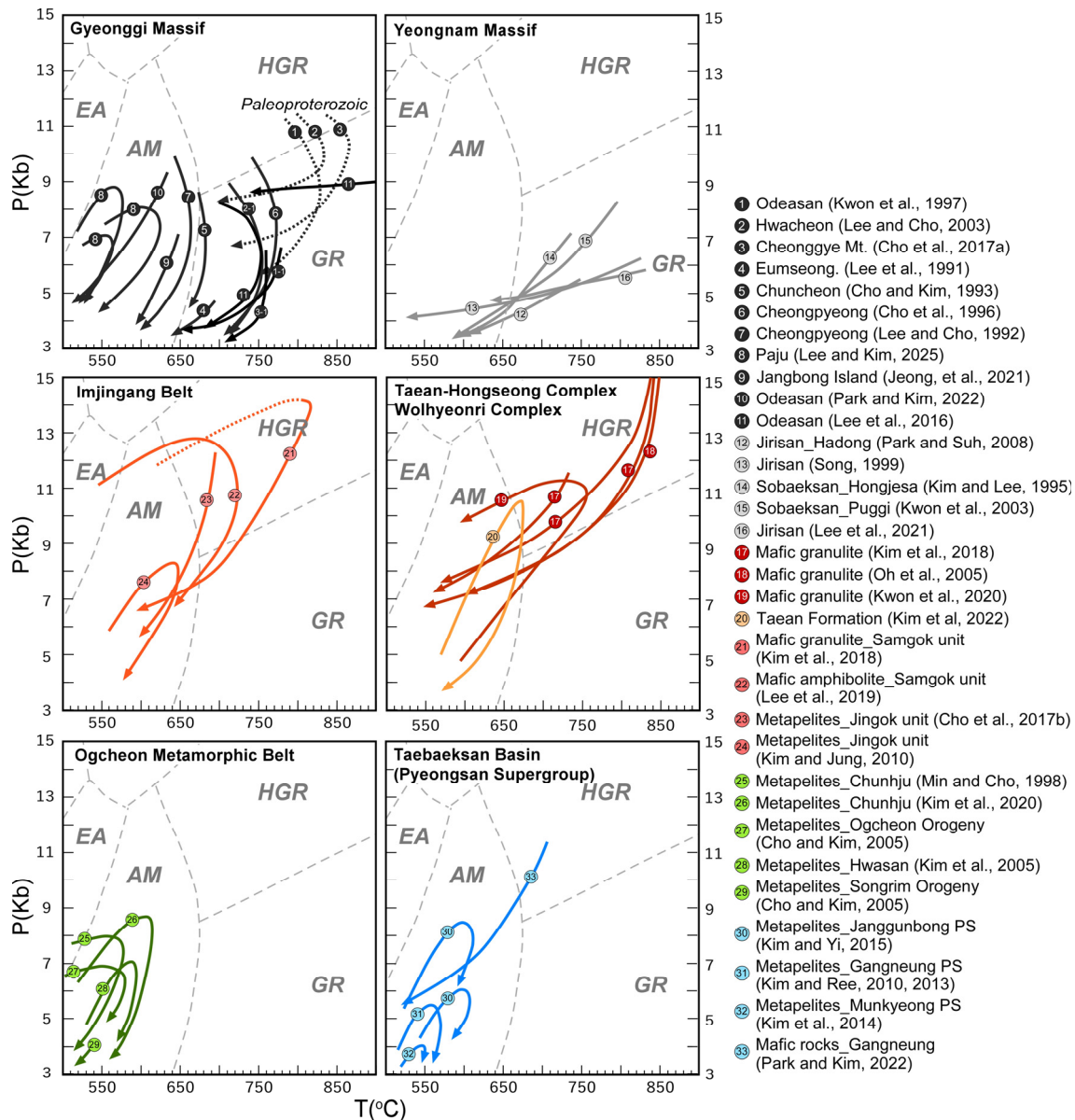


Fig. 2. Compilation of metamorphic pressure-temperature (P-T) paths related to the Songrim orogeny, as reported from the major tectonic provinces of the Korean Peninsula, including the Gyeonggi and Yeongnam massifs, the Imjingang Belt, the Ogcheon Metamorphic Belt, the Taebaeksan Basin, and the Taean-Hongseong and Wolhyeonri complexes in the Hongseong area. EA, eclogite-amphibolite transition; AM, amphibolite facies; GR, granulite facies; HGR, high-pressure granulite facies. Numbered circles correspond to the studies listed in the figure.

경로 11; Kim *et al.*, 2011b; Lee *et al.*, 2016), 온도 추정치의 불확실성으로 인해 논란이 지속되고 있다(Cho *et al.*, 2017b). 한편 오대산 기반암에 협재된 각섬암에서는 $X_{CO_2} [CO_2/(CO_2 + H_2O)] = 0.4$ 의 유체 조건에서 580-630°C와 7.0-9.0 kbar의 변성 조건이 보고되었다(그림 2의 경로 10; Park and Kim, 2022).

경기육괴 중부와 서부의 신원생대 지층에서도 페름기-트라이아스기 각섬암상 변성작용이 널리 확인된다(Kim *et al.*, 2008; Jeong *et al.*, 2021; Lee *et al.*, 2023). 최고 변성 조건은 대체로 550-650°C와 7.0-9.0 kbar이며, 압력 상승 이후 후퇴변성 단계에서 빠른 감압이 나타나는 중압형 시계방향 경로를 기록한다. 경기육괴 전반에서 최고 압력은 약 9-10 kbar로 비교적 유사하지만, 최고 온도는 중부-동부에서 약 650-750°C, 서부에서 약 550-630°C로 나타나 지역에 따라 최대 약 200°C의 차이를 보인다(그림 2). 이러한 공간적으로 불균질한 열적 기록은 경기육괴를 단일하고 균질한 선캄브리아 기반암 단위로 해석하는 데 주의를 요구하며, 내부 기반암 단편의 지체구조적 친연성과 상호 접촉 관계에 대한 추가적인 검증이 필요함을 시사한다.

2.3. 영남육괴

영남육괴의 선캄브리아 기반암은 약 2.0-1.96 Ga의 화성활동으로 형성된 화강암질 원암과 변성퇴적암을 주로 포함하며, 분포 지역에 따라 호남편마암복합체, 소백산편마암복합체 및 태백산편마암복합체로 구분된다(Lee and Cho, 2012). 이들 기반암은 약 1.87-1.84 Ga에 저압-고온형 상부 각섬암상-백립암상 변성작용과 부분용융을 경험하여 혼성암질 및 화강암질 편마암으로 변성되었다(Kwon *et al.*, 2003; Lee and Cho, 2022). 최고 변성조건은 지역에 따라 약 750-850°C와 5-8 kbar로 보고되었다. 태백산편마암복합체는 고원생대 영남계와 이를 관입한 홍제사화강암 및 분천화강암으로 구성된다(Kim and Cho, 2003; Kim *et al.*, 2009; Lee *et al.*, 2011; Kim, N.-H. *et al.*, 2014).

현재까지 영남육괴에서는 페름기-트라이아스기 광역변성작용이 뚜렷하게 확인되지 않았으나, 같은 시기의 화성활동은 여러 지역에서 보고되었다. 영남육괴 서부에는 후기 트라이아스기 화성암이 넓게 분포하며(Kim, S.W. *et al.*, 2011a; Park *et al.*, 2018), 이들은 섭입 또는 충돌 후 지체구조 환경에서 형성된 것으로 해석되어 왔다(Cheong *et al.*, 2019). 또한 영남육괴 중서부와 중동부에서는 아다카이트질(adakitic) 특성을 보이는 페름기-초기 트라이아스기 화성암이 보고되었다(Yi *et al.*, 2012; Kim, S.W. *et al.*, 2021). 따라서 영남육괴는 같은 시기 경기육괴에서 나타나는 광역변성작용과 대조적으로, 주로 섭입 또는 충돌 관련 화성활동을 기록하는 지체구조구로 구분된다.

2.4. 임진강대

임진강대는 경기육괴 북부에 위치하며, 전통적으로 한반도를 동-서 방향으로 가로지르는 습곡-단층대로 정의되어 왔다(그림 1a; Ree *et al.*, 1996; Chough *et al.*, 2000). 그러나 최근 연구에서는 그 분포를 데본기-석탄기 변성퇴적암이 집중적으로 산출되는 중부 지역으로 제한하며, 한반도 전체를 횡단하지 않는 것으로 해석한다(그림 1b; Oh, 2006; Cho *et al.*, 2007; Kwon *et al.*, 2009; Lee *et al.*, 2019; Kim *et al.*, 2022). 남쪽 경계는 신원생대 감악산 화강편마암과의 접촉부로 인식되지만, 동쪽과 북쪽 경계는 여전히 명확하지 않다(Lee *et al.*, 2003; Kee *et al.*, 2019).

임진강대는 주로 데본기-석탄기에 퇴적된 임진층군으로 구성되며, 북한에서는 임진계로 불린다. 북한 지역의 임진층군에서는 복족류, 완족류, 해박함, 이매패류, 규산질 산호 및 육상식물 화석이 보고되었다(Paek *et al.*, 1996; Kim, B. *et al.*, 2012; Choi *et al.*, 2015). 비무장지대(DMZ)의 남쪽의 임진층군은 하부로부터 미산층, 대광리층, 천덕산층으로 구성된다. 대광리층과 천덕산층은(기존 진곡 단위) 주로 변성이질암과 규암으로 구성되고, 미산층은(기존 삼곶 단위) 탄산규산염암과 각섬암을 주로 포함한다(Ree *et al.*, 1996; Cho *et al.*, 2007; Kim and Jung, 2010; Lee *et al.*, 2019). 대광리층과 천덕산층에서는 북쪽에서 남쪽으로 석류석대, 십자석대 및 남정석대가 차례로 나타나며 변성도가 점진적으로 증가한다. 남정석대의 최고 변성 조건은 약 790°C와 11.0 kbar 또는 610-640°C와 7.9-8.8 kbar로 제시되었고(Cho *et al.*, 2007; Kim and Jung, 2010), 전형적인 바로비안형(barrovian type) 중압 변성작용과 시계방향 압력-온도 경로를 지시한다(그림 2의 경로 23과 24). 미산층의 탄산규산염암에 대해서는 정량적인 변성 조건이 보고되지 않았으나, 협재된 각섬암에서는 630-790°C와 8-13 kbar, 660-780°C와 8.5-11.5 kbar 및 약 715°C와 11.0 kbar의 변성 조건이 제시되었다(그림 2의 경로 22; Ree *et al.*, 1996; Cho *et al.*, 2007; Lee *et al.*, 2019). 또한 미산층의 고철질 백립암에서는 790-830°C와 13.0-14.0 kbar의 고압 변성 조건이 보고되었다(그림 2의 경로 21; Kim *et al.*, 2018a). 이 지역의 점진 변성작용은 약 250 Ma, 후퇴 변성작용은 약 235-229 Ma에 발생한 것으로 해석된다(Cho *et al.*, 2007; Lee *et al.*, 2019). 따라서 임진강대는 페름기 말의 지각 매몰과 중압-고압 변성작용 이후 트라이아스기 초에 식박된 조산대의 일부로 해석할 수 있다.

2.5. 홍성-임진강대

Kee *et al.* (2019)은 임진강대와 경기육괴 서쪽 가장자리에서 신원생대 및 고생대 지층과 유사한 변성-구조 기록이 나타나는 점을 근거로, 이들 지역을 하나의 홍성-임진강대로

통합하였다(그림 1b). 이 지체구조대는 기존의 태안-홍성복합체(Tae-an-Hongseong Complex)와 월현리복합체(Wolhyeonri Complex)를 포함한다(Kim, S.W. *et al.*, 2011a; Cho *et al.*, 2017b). 월현리복합체는 주로 준편마암, 편암 및 정편마암으로 구성되며, 고철질 변성화산암, 대리암 및 사문암화 초고철질암이 국지적으로 산출된다(Seo *et al.*, 2005, 2013; Kim *et al.*, 2006, 2018; Kwon *et al.*, 2009). 태안층은 태본기에 퇴적된 저탁암류로 해석되며(Cho *et al.*, 2010, 2013), 페름기-트라이아스기 변성작용을 받아 변성이질암, 각섬암, 탄산규산염암 및 대리암으로 산출된다(Kim *et al.*, 2022). 홍성-임진강대의 기하학적 연속성은 후기 단층운동에 의해 변형된 것으로 해석된다. 특히 Kim *et al.* (2022)은 동-서 방향의 임진강대가 남북 방향의 국화도-안면도-홍성 지역으로 이어지는 양상을 북북동 주향의 예성강단층을 따른 좌수향 변위와 끝림 변형의 결과로 설명하였다.

월현리복합체와 태안-홍성복합체에서 보고된 신원생대 원암(protolith)과 페름기-트라이아스기 변성 기록은 경기육괴의 다른 지역과 차이를 보인다. 홍성 지역의 후퇴변성된 에클로자이트(eclogite)는 약 880 Ma의 원암 연대와 약 230 Ma의 변성 연대를 갖는 것으로 보고되었다(Oh *et al.*, 2005; Kwon *et al.*, 2009). 이 암석에 대해서는 780-900°C와 14-21 kbar의 고압 변성 조건을 기록하는 시계방향 압력-온도 경로가 제안되었으나(그림 2의 경로 17과 18; Oh *et al.*, 2005; Kim, H.S. *et al.*, 2018a), 약 750°C와 11 kbar 조건의 유체 유입에 따른 반시계방향 변성교대작용으로 형성되었다는 해석도 제시되었다(그림 2의 경로 19; Kwon *et al.*, 2020). 따라서 이 암석의 성인과 압력-온도 경로에 대해서는 여전히 상반된 견해가 존재하며, 야외 산출상태, 주변 암석과의 접촉관계 및 핵심 변성조직에 대한 독립적인 재검증이 필요하다. 한편 태본기 태안층의 변성이질암, 각섬암 및 탄산규산염암에서는 각각 600-620°C와 9.0-10.5 kbar, 570-590°C와 7.5-8.5 kbar 및 580-600°C와 7.0-8.0 kbar의 최고 변성 조건이 보고되었다(그림 2의 경로 20; Kim *et al.*, 2022). 이들 암석은 페름기의 점진 변성작용과 수축변형 이후 트라이아스기에 빠르게 삭박되는 시계방향 압력-온도-변형 경로를 기록한다. 이러한 기록은 홍성-임진강대가 페름기-트라이아스기 조산운동 동안에 지각 매몰과 중압-고압 변성작용을 경험했음을 지지한다. 다만 홍성 지역에서 제안된 에클로자이트상 변성작용의 지체구조적 의미를 확립하려면 야외 산출관계, 광물 반응조직, 압력-온도 추정 및 변성 연대의 재현성을 종합적으로 검증해야 한다.

2.6. 옥천변성대

옥천변성대는 북동-남서 방향으로 발달한 습곡-단층대로, 전통적으로 북동부의 태백산분지와 남서부의 옥천변성

대로 구분되어 왔다(그림 1a). 옥천변성대는 신원생대-고생대 퇴적암과 화산암으로 구성된 옥천누층군을 포함하며, 이들 암석은 여러 단계의 변성작용과 변형작용을 경험하였다(Cho and Kim, 2005). Kee *et al.* (2019)은 기존의 옥천변성대에 포함되었던 일부 변성이질암, 변성사질암 및 탄산염암을 태백산분지에 재배치하고, 태백산분지가 옥천변성대 동쪽과 영남육괴 북서부 경계를 따라 남서쪽으로 연장되는 것으로 해석하였다(그림 1b). 이러한 재구분은 두 지체구조구 사이의 경계와 층서적·변성학적 연속성에 대한 재검토를 요구한다.

옥천누층군은 주로 변성퇴적암과 변성화산암으로 구성되며, 녹색편암상에서 각섬암상에 이르는 다양한 변성도를 보인다. 쇄설성 저어콘 연대와 식물화석 자료는 일부 층서단위가 고생대, 특히 석탄기-페름기에 퇴적되었을 가능성을 지시한다(Lim *et al.*, 2005, 2006, 2007; Park *et al.*, 2011; Cho *et al.*, 2013). 옥천변성대의 주 변성작용은 각섬암상에 해당되고, 최고 변성 조건은 490-635°C와 4.2-9.4 kbar 범위의 중압형 광역변성작용으로 해석된다(그림 2; Oh *et al.*, 1995; Min and Cho, 1998; Cho and Kim, 2005; Kim *et al.*, 2005, 2020).

페름기-트라이아스기의 변성·변형 사건은 일반적으로 페름기 옥천조산운동과 트라이아스기 송림 조산운동으로 구분되어 왔다(Cheong *et al.*, 2003; Cho and Kim, 2005; Cho *et al.*, 2018). Cho and Kim (2005)은 평안누층군 퇴적 중 발생한 중압형 각섬암상 변성작용을 옥천 조산운동으로, 그 이후의 350-500°C와 2.0-5.0 kbar 조건에 해당하는 녹색편암상 변성작용을 송림 조산운동으로 해석하였다. 그러나 두 변성 사건에 수반된 변형구조와 상대적 선후 관계가 충분히 제약되지 않았기 때문에, 이들을 서로 독립된 두 조산운동으로 구분할 수 있는지는 추가적인 구조·지질학적·지구연대학적 검증이 필요하다.

2.7. 태백산분지

태백산분지는 하부 고생대 조선누층군과 상부 고생대 평안누층군으로 구성된다(Chough *et al.*, 2000; Choi, 2019a, 2019b). 태백 지역에서 평안누층군은 하부로부터 만향층, 금천-장성층, 함백산층, 도사곡층, 고한층 및 동고층으로 구분되며, 주로 역암, 사암, 실트암 및 셰일과 일부 탄층으로 이루어진다(Lee and Chough, 2006a, b). 평안누층군의 퇴적 종료 시기는 과거 초기 트라이아스기로 해석되었으나, Lee and Chough (2006a, 2006b)는 이를 페름기 말로 조정하였다. 쇄설성 저어콘 연대는 고원생대 입자가 우세한 가운데 약 380 Ma, 320 Ma 및 260 Ma의 화성활동과 관련된 연대군을 포함한다(Kim, H.S. *et al.*, 2012; Kim, D.-Y. *et al.*, 2015; Kim, S.W. *et al.*, 2017; Kim and Lee,

2018). 이러한 연대 분포와 기원지 분석을 바탕으로 평안누층군은 후퇴호 전지분지(retroarc foreland basin) 환경에서 퇴적된 것으로 해석된다.

태백산분지 북부의 강릉-정선, 남서부의 문경 및 영남육괴 북동부의 장군봉-울진 지역의 평안누층군은 광역변성작용과 접촉변성작용을 경험하였으며(Kim and Ree, 2010, 2013; Kim, 2012a, 2012b; Kim and Yi, 2015), 일부 지역에서는 송림 조산운동 동안 최소 두 단계의 광역변성작용을 제안되었다. 초기 변성작용은 약 450-500°C와 2.0-5.0 kbar의 중온-저압 조건에서, 후기 변성작용은 약 550-600°C와 6.0-7.0 kbar의 보다 높은 압력-온도 조건에서 진행된 것으로 해석된다(그림 2의 경로 30과 31). 강릉 지역의 고철질 포획암에서는 약 700°C와 11.0 kbar의 고압 변성 조건도 보고하였다(Park and Kim, 2022).

그러나 이러한 변성·변형 기록은 태백산분지 전역에서 균일하게 나타나지 않는다. 두 단계의 광역변성작용은 주로 분지 가장자리의 평안누층군에서 확인되며, 태백 지역의 중심부에서는 뚜렷하지 않다. 또한 옥천변성대에서는 초기 각섬암상에서 후기 녹색편암상으로 변성도가 감소하는 반면, 태백산분지에서는 초기 녹색편암상에서 후기 각섬암상으로 변성도가 증가하는 상반된 경향이 제안되었다. 따라서 평안누층군의 지역별 변성·변형 차이가 동일한 조산운동 내의 공간적 변성도 변화인지, 서로 다른 지체구조적 위치 또는 변성 시기의 차이인지를 검토해야 한다. 아울러 옥천변성대와 태백산분지에서 제안된 두 단계 변성작용의 시간적·구조적 연관성도 명확히 규명할 필요가 있다.

3. 한반도의 고생대 말-중생대 초기 섭입-충돌 모델

한반도의 중생대 조산운동은 전통적으로 송림, 대보 및 불국사 조산운동으로 구분되어 왔으며, 이 가운데 송림 조산운동은 고생대 말-중생대 초기의 섭입과 대륙 충돌에 관련된 지체구조 사건으로 해석되어 왔다. 송림 조산운동은 평남분지에서 평안누층군과 대동누층군 사이의 경사부정합이 확인되면서 처음 인식되었다(Kobayashi, 1930). 이에 따라 그 시기는 평안누층군 최상부의 퇴적이 종료된 초기 트라이아스기 이후부터 대동누층군이 퇴적되기 시작한 중기 트라이아스기 이전까지로 제한되었다(Kobayashi, 1930; Reedman and Um, 1975; Lee, 1987). 그러나 대동누층군의 퇴적 시기와 지체구조적 의미는 이후 연구를 통해 재검토되었다. Han *et al.* (2006)은 영월 지역 반송층군 하부의 응회암에서 약 187 Ma의 저어콘 U-Pb 연대를 보고하였다. 또한 반송층군이 덕포리 및 공수원 스러스트의 하반에만 분포하고 층 내에 퇴적동시성 변형구조가 발달하는 점을 근거로, 이 층군이 쥐라기 대보변형작용과 동시에 퇴적되

었다고 해석하였다. Jeon *et al.* (2007)은 응회질암과 사암의 쇄설성 저어콘 U-Pb 연대자료를 바탕으로 대동누층군의 퇴적 시기를 약 187-172 Ma로 제시하여 이러한 해석을 뒷받침하였다. 이들 연대 및 구조 자료는 대동누층군의 적어도 일부가 쥐라기 동시조산성 분지에서 퇴적되었음을 시사하며, 평안누층군과 대동누층군 사이의 부정합만으로 한반도 전역의 송림 조산운동 시기를 트라이아스기로 일률적으로 제한하기 어렵다는 점을 보여준다. 고생대 말의 또 다른 조산운동으로는 옥천변성대에서 제안된 옥천 조산운동이 있다. Cluzel *et al.* (1990, 1991)은 실루리아기-데본기에 대륙 내 열곡분지로 발달한 옥천분지가 이후 압축변형으로 폐쇄되면서 북동 주향의 습곡-충상단층대가 형성되었다고 해석하였다. Cho and Kim (2005)은 옥천변성대 변성 퇴적암에서 얻은 약 285 Ma의 연대를 근거로 옥천 조산운동의 시기를 초기 페름기로 재설정하였다. 따라서 옥천 조산운동과 송림 조산운동의 시간적 관계 및 각각이 나타내는 지체구조적 의미는 한반도의 페름기-트라이아스기 진화를 해석하는 데 중요한 쟁점이다.

이 절에서는 1990년대 초부터 최근까지 제안된 한반도의 주요 섭입-충돌 모델을 검토한다. 각 모델이 전제하는 지체구조의 친연성, 충돌대의 위치, 섭입 방향과 운동학적 특성을 비교하고, 이를 뒷받침하는 변성·변형, 화성활동, 퇴적 및 고생물학적 증거와 함께 아직 해결되지 않은 문제를 논의한다. 한편 ‘조산운동(orogeny)’이라는 용어의 적용 범위도 재검토할 필요가 있다. 조산운동은 일반적으로 수렴형 판 경계에서 수축변형과 암석권 또는 지각의 두꺼워짐이 발생하는 과정이며, 흔히 기반암의 변형과 중압-고압형 광역변성작용을 수반한다. 따라서 기반암의 광역변성·변형 기록이 뚜렷하지 않고 주로 피복암층의 변형 또는 저압형·접촉변성작용과 화성활동으로 나타나는 대보 및 불국사 사건을 모두 ‘조산운동’으로 분류하는 것이 적절한지는 추가적인 논의가 필요하다.

3.1. 뺨기형 대륙 충돌 모델(Indented wedge model)

Cluzel *et al.* (1990, 1991)은 판구조론에 근거하여 한반도의 고생대 말-중생대 초기 지체구조 진화를 설명한 초기 모델을 제시하였다. 이 모델은 옥천 조산운동과 송림 조산운동을 서로 연속된 두 단계의 지체구조 사건으로 해석하였다. 먼저 옥천 조산운동은 실루리아기-데본기에 발달한 대륙 내 옥천분지가 압축변형으로 폐쇄되는 과정으로 해석되었으며, 그 결과 옥천변성대에 북동 주향의 습곡-충상단층대가 형성되었다고 보았다. 이후 송림 조산운동 초기에는 북동 주향의 우수향 연성 주향이동전단대인 호남전단대가 형성되었고, 후기에는 우수향 주향이동에 수반된 인리형 분지가 발달한 것으로 해석하였다. 이 모델에서 호남전

단대는 송림 조산운동 동안 작동한 대륙형 변환단층으로 간주되었다. 이 단층을 따라 남중국 지괴에 친연성을 가진 경기육괴, 옥천변성대 및 영월형 조선누층군과 북중국 지괴에 친연성을 가진 영남육괴 및 두위봉형 조선누층군이 지구구조적으로 병치된 것으로 해석하였다. 또한, 덕포리 또는 각동 스러스트를 호남전단대의 일부이자 두 대륙 지괴를 구분하는 판 경계로 보았다.

Yin and Nie (1993)은 이 개념을 확장하여 중국의 탄루 단층과 한반도의 호남전단대가 페름기-트라이아스기에 서로 아평행한 대륙형 변환단층으로 작동하였다고 제안하였다. 이들 단층 사이에 놓인 한반도 지각은 대륙 충돌 과정에서 썩기 모양의 지각 블록이 상대 대륙 내부로 밀려 들어갔으며, 이에 따라 대규모 주향이동과 지체구조구의 병치가 발생한 것으로 해석하였다. 그러나 이 모델은 이후 축적된

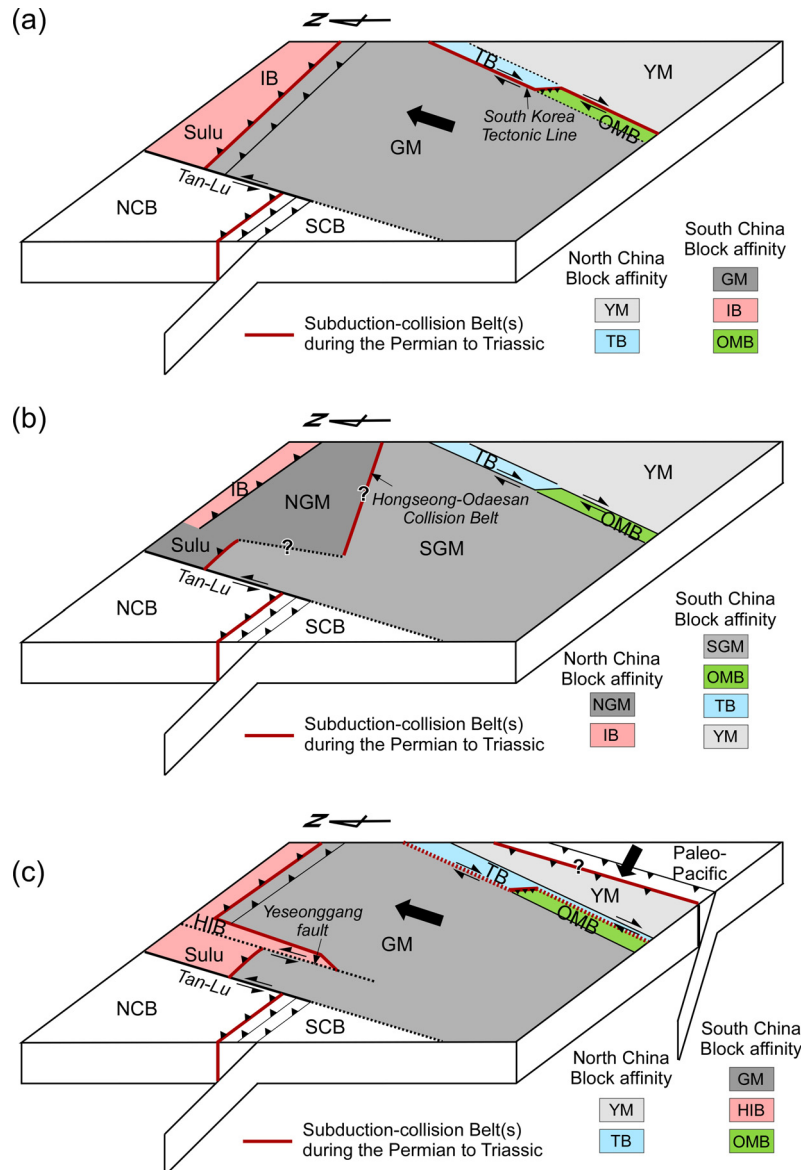


Fig. 3. Schematic tectonic models proposed for the Korean Peninsula and adjacent regions from the late Permian to the Middle Triassic. (a) The subduction-collision and continental transform-fault model involving the South Korean Tectonic Line, (b) the Hongseong-Odaesan collision-belt model, and (c) the dual subduction-collision model. Red lines indicate inferred Permian-Triassic subduction-collision belts. NGM, northern Gyeonggi Massif; SGM, southern Gyeonggi Massif; HIB, Hongseong-Imjingang Belt; NCB, North China Block; SCB, South China Block. Other abbreviations are as in Fig. 1. Compiled and modified after Chough *et al.* (2000), Ree *et al.* (2001), Oh *et al.* (2006), Oh and Kusky (2007), Kim and Ree (2013), Cho *et al.* (2017b), Kim and Lee (2018), Cheong *et al.* (2019), Oh *et al.* (2024) and Kim *et al.* (2025).

여러 지질학적 자료와 완전히 부합하지 않는다. 특히 호남 전단대의 형성 시기와 운동감각, 덕포리-각동 스러스트의 형성 시기와 운동학적 성격, 옥천변성대 내 변성화산암의 원암 형성 시기, 그리고 영월형 조선누층군의 생층서학적 대비 등이 모델의 핵심 가정과 일치하지 않는다는 문제가 제기되었다(Chough *et al.*, 2000; Ree *et al.*, 2001; Cheong *et al.*, 2006). 따라서 켜기형 대륙 충돌 모델은 한반도의 대규모 주향이동과 지체구조구 병치를 설명한 초기 판구조 모델이라는 의의가 있지만, 주요 경계 단층의 시기와 운동학 및 각 지체구조구의 친연성에 대해서는 재검토가 필요하다.

3.2. 섭입-충돌과 대륙형 변환단층 모델: 남한 지구조선 (South Korean Tectonic Line)

Ree *et al.* (1996, 2001)과 Chough *et al.* (2000)은 북중국 지괴와 남중국 지괴의 충돌 및 그 이후의 대규모 주향이동을 바탕으로 한반도의 페름기-트라이아스기 지체구조 진화를 설명하였다. 이 모델에서 경기육괴와 옥천변성대는 남중국 지괴에, 영남육괴와 태백산분지는 북중국 지괴에 속하는 것으로 해석하였다. 특히 영월형과 태백형 조선누층군은 서로 다른 대륙 지괴에 속한 지층이 아니라, 동일한 태백산분지에서 퇴적된 층서 단위로 간주하였다. 이 모델은 송림 조산운동을 후기 페름기-중기 트라이아스기에 일어난 북중국 지괴와 남중국 지괴의 대륙 충돌로 해석한다. 중국 친링-다비-수루 충돌대의 한반도 연장부는 임진강대로 연결되며, 남한에서는 충돌 이후 발달한 대륙 내 변환단층인 남한 지구조선(South Korean Tectonic Line)을 따라 경기육괴-옥천변성대와 영남육괴-태백산분지가 지구조적으로 병치된 것으로 제안하였다(그림 3a). 이후 한반도는 대륙 화산호 환경으로 전환되었고, 쥐라기 대보 지체구조 사건 동안 호남전단대가 형성된 것으로 해석하였다.

Ree *et al.* (2001)은 옥천변성대와 영남육괴의 경계를 따라 발달한 청산전단대를 남한 지구조선의 주요 구간이자 대륙형 변환단층으로 보았다. 한편 옥천변성대와 태백산분지의 경계는 부정합(Son, 1970), 정합(Reedman *et al.*, 1973; Kihm *et al.*, 1996) 또는 충상단층(Chough *et al.*, 2000; Ree *et al.*, 2001)으로 다양하게 해석되어 왔다. Kim, H.S. *et al.* (2018b)은 봉화재 지역의 노두 구조와 미구조를 재검토하여 이 경계를 충상단층 또는 역단층성 전단대로 해석하였으며, 이를 대륙 내 변환단층의 구속성 굴곡부(restraining bend)에서 형성된 압축구조로 제안하였다.

이 모델에서 대륙 충돌대의 일부로 해석되는 임진강대는 바로비안형 중압 광역변성작용, 남향 전단감각을 보이는 수축변형 및 북향 전단감각을 보이는 후기 신장변형을 기록한다(Ree *et al.*, 1996; Cho *et al.*, 2007; Kim and Jung, 2010; Lee *et al.*, 2019).

그러나 이 모델만으로는 이후 보고된 모든 자료를 설명하기 어렵다. 특히 임진강대 북쪽의 낭림육괴와 평남분지에서 남중국 지괴와의 친연성을 시사하는 화석과 층서가 보고되었으며, 경기육괴 서부에서는 후퇴변성 에클로자이트와 고압 고철질 백립암이 발견되었다. 이러한 자료는 북중국-남중국 지괴의 경계를 임진강대와 남한 지구조선으로 단순하게 연결하는 모델과 일치하지 않는다. 또한 남한 지구조선의 연속성, 형성 시기 및 각 구간의 운동학적 일관성도 충분히 입증되지 않았다. 따라서 이 모델을 검증하려면 주요 경계 전단대의 연대와 운동감각, 임진강대 북쪽 지체구조구의 친연성 및 경기육괴 서부 고압 변성암의 지질학적 의미를 함께 재검토해야 한다.

3.3. 홍성-오대산 충돌대 모델(Hongseong-Odaesan collision belt)

2000년대 중반 경기육괴 남서부 홍성 지역에서 에클로자이트가 보고되면서, 중국의 친링-다비-수루 대륙충돌 조산대가 한반도까지 동쪽으로 연장된다는 모델이 제안되었다(그림 3b; Oh *et al.*, 2005). 이후 경기육괴 동부 오대산 지역에서 트라이아스기 망거라이트(mangirite)와 고온 변성기록이 확인되자, 홍성과 오대산을 연결하는 동-서 방향의 대륙 충돌대가 경기육괴 내부를 통과한다는 홍성-오대산 충돌대 모델로 발전하였다(Oh *et al.*, 2006; Oh and Kusky, 2007; Oh *et al.*, 2024). 이 모델은 경기육괴를 북부와 남부로 나누어 북부를 북중국 지괴의 남쪽 연변으로, 남부를 남중국 지괴의 양쯔 블록으로 해석한다. 이에 따라 옥천변성대는 남중국 지괴 내부의 남화 열곡대(Nanhua Rift)의 연장부로, 영남육괴는 카타이시아 블록(Cathaysia Block)의 일부로 대비된다. 한편 Kwon *et al.* (2009)은 홍성 지역의 에클로자이트와 임진강대 삼각 단위의 고압 백립암을 근거로, 북중국 지괴와 남중국 지괴의 경계가 경기육괴 내부가 아니라 낭림육괴와 경기육괴 사이의 임진강 불합대에 위치할 가능성을 제안하였다. 따라서 이들 연구는 모두 한반도에서 대륙 충돌의 영향을 강조하지만, 불합대의 위치에 대해서는 서로 다른 해석을 제시한다.

홍성-오대산 충돌대 모델의 주요 문제점은 경기육괴 남쪽에 위치한 영남육괴와 태백산분지의 지체구조적 친연성을 충분히 설명하지 못한다는 점이다. 영남육괴의 고원생대 기반암은 형성 연대, 변성-화성 진화 및 일부 동위원소 특성을 근거로 북중국 지괴와의 지체구조적 연관성이 제안되어 왔다(Chough *et al.*, 2000; Kim, H.S. *et al.*, 2013; Choi, 2014; Lee *et al.*, 2014, 2017; Cho *et al.*, 2017b). 또한, 태백산분지 역시 캄브리아기 층서 발달, 삼엽충 군집, 오르도비스기 코노돈트 군집, 쇄설성 저어콘 연대 분포 및 고지자기 자료를 종합하면 북중국 지괴와 밀접한 친연성을

보인다(Doh and Piper, 1994; Darby and Gehrels, 2006; Gao *et al.*, 2011; McKenzie *et al.*, 2011; Park and Choi, 2011; Wan *et al.*, 2011; Park *et al.*, 2012, 2013; Kim, H.S. *et al.*, 2013, 2019; Park and Kihm, 2015; Choi *et al.*, 2016; Chough, 2018; Cho, M. *et al.*, 2021; Cho, S.H. *et al.*, 2021; Lee, B.-S. *et al.*, 2022). 따라서 영남육괴를 남중국 지괴의 카타이시아 블록과 직접 대비하는 해석은 이러한 자료와 조화되기 어렵다. 또한 경기육괴 내부에 봉합대가 존재한다는 해석은 주로 변성 저어콘 과성장대에서 얻은 트라이아스기 연대와 고압 또는 고온 변성 조건에 근거하지만, 두 대륙 지괴의 충돌을 직접 지시하는 연속적인 변형대, 멜란지(mélange), 오피올라이트(ophiolite) 또는 봉합 관련 구조는 명확히 제시되지 않았다. 변성 연대와 압력-온도 조건은 충돌대의 존재를 지지할 수 있는 중요한 자료이지만, 그것만으로 봉합대의 위치와 연속성을 확정하기는 어렵다. 경기육괴의 트라이아스기 변성기록도 공간적으로 불균질하다. 동부에서 서부로 갈수록 최고 압력은 대체로 9-10 kbar로 유사하지만, 최고 온도는 약 750°C에서 550°C까지 감소한다(그림 2). 이러한 온도 차이는 동일한 송림 조산운동에서 나타난 지역적 열구조의 차이일 수 있다. 그러나 각 섭암상 트라이아스기 변성작용이 고원생대 백립암상 변성기록을 불완전하게 중첩한 결과이거나, 유체 유입에 따른 변성교대작용 및 부분적인 재평형을 반영할 가능성도 있다. 따라서 홍성-오대산 충돌대 모델을 평가하려면 변성 조건뿐 아니라 암체 간 접촉관계, 변형구조, 변성 시기의 동시성 및 변성기록의 보존 정도를 종합적으로 검토해야 한다.

3.4. 경기 주변 조산대 모델(Gyeonggi Marginal Belt model)

Cho *et al.* (2017a, 2017b)은 경기육괴를 둘러싸는 임진강대, 태안-홍성복합체 및 옥천변성대를 하나의 경기 주변 조산대(Gyeonggi Marginal Belt)로 묶었다. 이 모델은 세 변성대에서 나타나는 쇄설성 저어콘 연대 분포의 유사성을 주요 근거로 하며(Cho *et al.*, 2013), 이들 지체구조구가 공통된 퇴적물 공급원과 지각 진화사를 공유한 것으로 해석하였다. Cho *et al.* (2017a, 2017b)은 경기 주변 조산대를 중국의 친링 미소대륙(Qinling microcontinent) 조산대와 대비하여 친링-경기 미소대륙(Qinling-Gyeonggi microcontinent) 조산대 모델을 제안하였다(Hacker *et al.*, 2006; Dong *et al.*, 2011). 이 모델에서 경기 미소대륙의 기반암은 북중국 지괴와 친연성을 가지며, 그 위에는 남중국 지괴 계열의 신원생대-고생대 퇴적암과 화산암이 피복된 것으로 해석하였다. 이후 이들 피복암체와 기반암 단편이 페름기-트라이아스기 조산운동 동안 경기육괴 주변에 부가되어 현재의 임진강대, 태안-홍성복합체 및 옥천변성대를 형성한 것으로 보았다. 세 변성대에서 보고된 유사한 각섬암상 중압 변성

조건은 이러한 해석을 뒷받침하는 자료로 제시되었다.

그러나 이 모델에는 몇 가지 해결되지 않은 문제가 있다. 첫째, 경기 미소대륙 조산대의 남쪽 경계가 북중국 지괴와 친연성을 보이는 영남육괴와 직접 접하는 지체구조적 관계를 설명하기 어렵다. 둘째, 경기육괴의 선캄브리아 기반암과 주변 변성대 사이에서 부가 또는 봉합을 지시하는 연속적인 단층, 멜란지 또는 전단대가 충분히 확인되지 않았다. 셋째, 쇄설성 저어콘 연대 분포의 유사성은 공통된 퇴적물 공급원이나 재순환을 반영할 수 있으므로, 그 자체만으로 지체구조구의 동일한 기원이나 직접적인 연결을 입증하기는 어렵다.

Kee *et al.* (2019)은 신원생대 및 데본기 지층의 분포와 구조적 연속성을 근거로 임진강대와 경기육괴 서부의 태안-홍성복합체 및 월현리복합체를 통합하여 홍성-임진강대를 제안하였다. Kim, H.S. *et al.* (2022)은 이 지체구조대의 현재 기하학적 형태가 북북동-남남서 방향의 예성강단층을 따른 좌수향 주향이동과 끝림변형에 의해 형성되었다고 해석하였다. 예성강단층을 따른 변위와 회전으로 인해 연천복합체와 임진충군에는 대체로 동-서 방향의 구조가, 태안-홍성복합체와 월현리복합체에는 남-북 방향의 구조가 발달한 것으로 해석된다. 이 단층은 북중국-남중국 충돌과 거의 같은 시기에 형성된 중국의 탄루(Tan-Lu)단층과 대비되는 대륙 내 변환단층으로 제안되었다. 그러나 예성강단층이 북한의 백악기 분지 경계를 이루고 제4기 현무암 분출 지역과도 일치하는 점은 이 단층이 백악기 이후에도 활동했을 가능성을 시사한다. 따라서 단층의 형성 및 주 운동 시기를 북중국-남중국 충돌과 직접 연계하거나 탄루단층과 대비하는 해석에는 추가적인 구조지질학적·지구연대학적 검증이 필요하다. 또한 임진강대, 태안-홍성복합체 및 월현리복합체의 변성퇴적암과 고철질 백립암은 유사한 페름기-트라이아스기 압력-온도-변형 경로를 보인다(그림 2). 이러한 공통성은 이들 지역을 하나의 홍성-임진강대로 묶는 해석을 지지한다. 한편 임진강대와 경기육괴의 경계에는 송림 조산운동 말기의 신장변형과 관련된 경기전단대가 발달한 것으로 제안되었다(Kim, J.-N. *et al.*, 2000). 이는 임진강대가 지각 두꺼워진 후 삭박되는 과정에서 경기육괴와 구조적으로 분리되었을 가능성을 시사한다. 그러나 경기육괴와 옥천변성대 사이의 직접적인 접촉관계는 여전히 명확하지 않으며, 옥천변성대를 임진강대 및 태안-홍성복합체와 동일한 조산대의 일부로 볼 수 있는지도 충분히 검증되지 않았다.

따라서 경기 주변 조산대 모델은 경기육괴 주변 변성대의 공통된 연대학적·변성학적 특성을 통합적으로 설명한다는 장점이 있다. 반면 각 변성대와 경기육괴 사이의 경계 구조, 영남육괴와의 관계 및 쇄설성 저어콘 연대 유사성의 지

체구조적 의미를 명확히 규명해야 한다는 한계를 가진다. 최근 제안된 홍성-임진강대는 경기 주변 조산대의 일부를 보다 구체적인 층서·구조·변성 자료로 재정의한 모델로 볼 수 있으나, 한반도 남부까지 포함하는 전체 지체구조 틀을 확립하기 위해서는 경기육괴-옥천변성대 경계에 대한 추가 연구가 필요하다.

3.5. 이중 섭입-충돌 모델(Dual subduction-collision model)

이중 섭입-충돌 모델은 페름기-트라이아스기 동안 한반도가 방향과 성격이 서로 다른 두 지체구조계의 영향을 받았다고 해석한다. 첫 번째는 북중국 지괴와 친연성을 갖는 영남육괴와 태백산분지의 동쪽 또는 북동쪽에 발달한 남-북 내지 북북동-남남서 방향의 섭입-화산호계이다. 두 번째는 경기육괴의 북향 또는 북북동향 이동과 관련하여 임진강대 일대에 형성된 동-서 방향의 대륙 섭입-충돌계이다. 따라서 송림 조산운동은 하나의 단순한 대륙 충돌 사건이라기보다, 한반도 동부의 해양판 섭입-화산호 활동과 중서부의 대륙 충돌이 시공간적으로 중첩된 복합 조산작용으로 해석된다(Kim and Ree, 2013; Cheong *et al.*, 2019; Kim, H.S. *et al.*, 2025).

한반도 동부 섭입계의 주요 근거는 앞서 기술한 평안누층군의 변성-변형 기록과 쇄설성 저어콘 자료이다. 강릉, 정선, 문경 및 장군봉 지역의 평안누층군에서 보고된 페름기-트라이아스기 저온-중압형 변성작용과 시계방향 압력-온도 경로는 이 분지가 안정한 대륙 내부가 아니라 압축변형이 활발한 능동적 대륙연변부에 위치했음을 시사한다(Kim and Ree, 2010, 2013; Kim, 2012a, 2012b, 2019; Kim and Yi, 2015). 또한 퇴적 시기와 거의 동시대인 후기 석탄기-페름기 쇄설성 저어콘과 화산호 기원의 Hf 동위원소 조성은 영남육괴 동쪽 또는 북동쪽에 장기간 활동한 화산호가 존재했음을 지시한다(Kim, H.S. *et al.*, 2012; Kim and Lee, 2018; Jang *et al.*, 2024). 이에 따라 평안누층군은 인접 화산호로부터 쇄설성 및 화산쇄설성 물질을 공급받는 후화산호 전지분지(retroarc foreland basin)으로 해석되었다.

영덕 지역의 화강암과 고철질-중성질 포획암에서 얻은 저어콘 U-Pb-O-Hf 동위원소 자료는 이 화산호의 지속 기간과 성격을 보다 구체적으로 제약한다. 약 278-255 Ma의 저어콘 핵부와 약 250 Ma의 주변부 연대는 후기 고생대 화산호 활동이 장기간 지속된 후 아다카이트질(adakitic) 심성암체의 관입과 화성-열수 작용으로 이어졌음을 보여준다(Kim, H.S. *et al.*, 2025). 산소 및 Hf 동위원소 조성은 열수 변질된 화산물질의 재순환과 지각-맨틀 상호작용을 지시한다. 따라서 평안누층군의 퇴적동시성 저어콘과 영덕 지역의 심성암 및 포획암은 동일한 화산호-후배호 분지 계

(system)의 서로 다른 부분을 기록한 것으로 해석할 수 있다. 영남육괴와 일본 히다대(Hida Belt)의 페름기 화성암은 연대와 Sr-Nd-Hf 동위원소 특성에서 유사성을 보여, 두 지역이 북중국 지괴의 동쪽 또는 북동쪽 연변을 따라 발달한 광역적인 히다-영남 화산호계의 일부였다는 모델도 제안되었다(Cho, D.-L. *et al.*, 2021; Kim, *et al.*, 2025). 한반도 남동부의 약 265-220 Ma 화성암류가 칼크알칼리(calc-alkali), 아다카이트질, 나트륨질 및 쇼쇼나이트질(shoshonitic) 조성을 보이는 점은 이 섭입계가 정상 섭입뿐 아니라 슬랩(slab) 파열 또는 분절, 암석권 박리작용(delamination)에 따른 연약권 상승 및 화산호 암석권의 재편을 포함하는 복합적인 진화를 경험했음을 시사한다(Cheong *et al.*, 2019).

두 지체구조계의 중첩 가능성은 태백산분지에서 보고된 최대 압축 방향의 변화와도 부합한다. 초기의 동-서 압축은 한반도 동쪽 해양판의 섭입과, 후기의 남-북 압축은 경기육괴의 북향 이동과 임진강대 일대의 대륙 충돌과 관련된 것으로 해석되었다(Kim, H.S. *et al.*, 2012; Kim and Ree, 2013). 그러나 이러한 변화가 두 응력장의 시간적 교체를 나타내는지, 또는 일정 기간 두 지체구조계가 동시에 작용한 결과인지는 아직 명확하지 않다. 종합하면, 이중 섭입-충돌 모델은 한반도 동부의 장기간 지속된 섭입-화산호계와 임진강대 일대의 동-서 방향 대륙 섭입-충돌계를 구분하고, 이들의 시공간적 중첩으로 송림 조산운동을 설명한다. 이 모델은 평안누층군의 변성-변형 및 쇄설성 저어콘 기록, 한반도 동부의 페름기-트라이아스기 화성활동과 영덕 지역의 동위원소 자료를 통합적으로 설명한다는 장점이 있다. 다만 후기 고생대 화산호의 공간적 연장성, 영남-히다 화산호와 동부 중앙아시아 조산대의 관계, 그리고 두 지체구조계의 정확한 작동 시기와 상호작용은 추가 검증이 필요하다.

4. 요약 및 결론

한반도의 페름기-트라이아스기 지체구조 진화를 설명하기 위해 썬기형 대륙 충돌, 섭입-충돌과 대륙형 변환단층, 경기육괴 내부 및 주변의 충돌-조산대, 그리고 이중 섭입-충돌을 포함한 다양한 모델이 제안되어 왔다. 그러나 층서·고생물학, 구조지질학, 변성암석학, 지구연대학 및 화성암 자료를 종합하면, 어느 하나의 모델도 한반도 전역의 지질 기록을 일관되게 설명하지 못한다. 이는 송림 조산운동의 초기 기록이 이후의 화성활동과 변성-변형작용에 의해 부분적으로 중첩되거나 소실되었기 때문일 수 있고, 페름기-트라이아스기 동안 한반도가 서로 다른 방향과 특성을 가진 지체구조 운동의 영향을 동시적 또는 연속적으로 받았을 가능성도 배제할 수 없다.

한반도 지체구조 모델을 제약하는 비교적 확실한 근거

중 하나는 태백산분지의 북중국 지괴에 대한 친연성이다. 태백충군의 캄브리아기 삼엽충과 오르도비스기 코노돈트 군집, 층서 발달, 쇄설성 저어콘 연대 분포 및 고지자기 자료는 태백산분지가 북중국 지괴의 일부였음을 공통으로 지시한다. 또한, 평남분지에서는 사동 스러스트를 경계로 북부와 남부의 고생대 화석군이 각각 북중국 및 남중국 지괴와 다른 친연성을 보인다는 해석이 제시되었다(Oh *et al.*, 2023). 다만 고생물지리학적 대비만으로 봉합대의 위치와 성격을 확정할 수는 없으므로, 사동 스러스트와 주변 경계부의 구조, 변성-변형 연대 및 기반암의 지구화학적 친연성에 대한 독립적인 검증이 필요하다. 이 결과가 추가 연구를 통해 확인된다면, 북중국-남중국 지괴의 경계는 기존에 주로 제안된 경기육괴 내부보다 북쪽인 평남분지 내부 또는 평남분지와 임진강대 사이에 위치할 가능성이 있다. 따라서 향후 지체구조 모델은 태백산분지와 평남분지의 고생물 지리 및 층서학적 제약을 반드시 반영해야 한다.

변성과 화성 기록 역시 한반도의 송림 조산운동이 단일한 대륙 충돌만으로 설명되기 어렵다는 점을 보여준다. 임진강대와 홍성-임진강대에서는 페름기-트라이아스기의 중압-고압 변성작용과 수축 이후 신장변형이 기록된다. 반면 경기육괴에서는 최고 압력이 대체로 유사함에도 지역에 따라 최고 온도가 크게 달라 공간적으로 불균질한 열적 구조가 나타난다. 영남육괴에서는 같은 시기의 광역변성작용이 뚜렷하지 않은 반면, 한반도 동부와 남동부에 장기간의 섭입 관련 화성활동이 기록되어 있다. 특히 평안누층군의 변성-변형 및 쇄설성 저어콘 자료와 영덕 지역의 페름기 화산호-심성암 기록은 한반도 동쪽 또는 북동쪽에 능동적 대륙 연변부가 존재했음을 시사한다. 이러한 자료를 종합하면, 송림 조산운동은 한반도 중서부의 대륙 충돌과 동부의 해양판 섭입-화산호 활동이 시공간적으로 중첩된 복합적인 조산작용으로 해석할 수 있다. 다만 두 지체구조계(system)의 정확한 위치, 작동 시기 및 상호관계는 아직 충분히 규명되지 않았다.

합의된 모델을 구축하려면 특정 연대의 암석이나 단일 고압 변성암을 근거로 각 지체구조구를 북중국 또는 남중국 지괴에 직접 대비하는 접근을 지양해야 한다. 대신 각 지체구조구에서 원암의 형성 및 퇴적 시기, 변성 압력-온도-시간-변형 경로, 주요 단층과 전단대의 변형 양상과 형성 시기를 독립적으로 규명한 후 이들 자료를 통합해야 한다. 특히 경기육괴 내부의 다중 변성-변형 기록, 홍성 고압 변성암의 야외 산출관계와 변성작용의 재현성, 경기육괴-옥천변성대 및 경기육괴-영남육괴의 경계, 태백산분지 내 지역별 변성도의 차이, 그리고 영남육괴에서 페름기-트라이아스기 광역변성작용이 뚜렷하지 않은 원인을 중점적으로 검토할 필요가 있다. 결론적으로 한반도의 페름기-트라이

아스기 지체구조 진화는 단일한 섭입-충돌 체계로 단순화하기 어렵다. 따라서 고생물지리와 퇴적물 기원, 지체구조 구별 변성-변형-화성 작용의 진화, 주요 지구조 경계의 구조 및 이들 사건 사이의 상대적·절대적 시기를 종합한 통합 모델이 요구된다. 나아가 이를 중국, 일본 및 러시아 동부의 동시기 지체구조 기록과 비교함으로써, 한반도의 페름기-트라이아스기 변성-변형 및 화성활동이 북중국-남중국 지괴의 충돌과 동아시아 동부의 해양판 섭입 과정에 어떻게 연계되는지를 보다 명확히 규명할 수 있을 것이다.

감사의 글

이 review 논문은 2025년에 대한민국학술원에서 발간한 “학문연구의 동향과 쟁점: 지질과학편의 제4장 한반도 지체구조와 변성작용: 고생대 말-중생대 초기의 섭입-충돌대”의 내용을 토대로 작성하였다. 원고의 초안을 검토하고 건설적인 토의를 해 주신 고려대학교 이진한 교수와 조석주 교수께 감사드린다. 또한, 심사과정 중에 건설적인 제안과 미비한 점을 지적하여 논문의 완성도를 높여 주신 편집위원과 익명의 심사위원께 감사드린다. 이 연구는 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(NRF-2022R1A2C1003840).

REFERENCES

- Cheong, A.C., Jo, H.J., Jeong, Y.-J. and Li, X.-H., 2019, Magmatic response to the interplay of collisional and accretionary orogenies in the Korean Peninsula: Geochronological, geochemical, and O-Hf isotopic perspectives from Triassic plutons. *Geological Society of America Bulletin*, 131, 609-634.
- Cheong, C.S., Jeong, G.Y., Kim, H., Choi, M.S., Lee, S.H. and Cho, M., 2003, Early Permian peak metamorphism recorded in U-Pb system of black slates from the Okcheon metamorphic belt, South Korea, and its tectonic implication. *Chemical Geology*, 193, 81-92.
- Cheong, C.-S., Kee, W.-S., Jeong, Y.-J. and Jeong, G.Y., 2006, Multiple deformations along the Honam shear zone in southwestern Korea constrained by Rb-Sr dating of synkinematic fabrics: Implications for the Mesozoic tectonic evolution of northeastern Asia. *Lithos*, 87, 289-299.
- Cho, D.-L., Lee, T.-H., Takahashi, Y., Kato, T., Yi, K., Lee, S. and Cheong, A.C., 2021, Zircon U-Pb geochronology and Hf isotope geochemistry of magmatic and metamorphic rocks from the Hida Belt, southwest Japan. *Geoscience Frontiers*, 12, 101145.
- Cho, D.-Y., Kim, Y.-J. and Armstrong, R., 2006, SHRIMP U-Pb geochronology of detrital zircons from iron-bearing quartzite of the Seosan Group: Constraints on age and stratigraphy. *Journal of the Petrological Society of Korea*, 15, 119-127 (in Korean with English abstract).
- 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. *Geological Society of America Bulletin*, 133, 488-504.
- Cho, M., Cheong, W., Ernst, W.G., Yi, K. and Kim, J., 2013, SHRIMP U-Pb ages of detrital zircons in metasedimentary rocks of the central Okcheon fold-thrust belt, Korea: Evidence for tectonic assembly of Paleozoic sedimentary protoliths. *Journal of Asian Earth Sciences*, 63, 234-249.
- Cho, M. and Kim, H., 2005, Metamorphic evolution of the Okcheon metamorphic belt: Review and new age constraints. *International Geology Review*, 47, 41-57.
- Cho, M. and Kim, J.-W., 1993, Occurrence of kyanite in the Yongduri gneiss complex of the Chuncheon-Hongcheon area: its tectono-metamorphic implication. *Journal of the Petrological Society of Korea*, 2, 1-8.
- Cho, M., Kim, T., Yang, S.Y. and Yi, K., 2017a, Paleoproterozoic to Triassic crustal evolution of the Gyeonggi Massif, Korea: Tectonic correlation with the North China craton. In: Law, R.D., Thigpen, J.R., Mersch, A.J. and Stowell, H.H., eds., *Linkages and Feedbacks in Orogenic Systems: Geological Society of America Memoir*, 213, 165-197.
- Cho, M., Kim, Y. and Ahn, J., 2007, Metamorphic evolution of the Imjingang belt, Korea: implications for Permo-Triassic collisional orogeny. *International Geology Review*, 49, 30-51.
- Cho, M., Lee, Y., Kim, T., Cheong, W., Kim, Y. and Lee, S.R., 2017b, Tectonic evolution of Precambrian basement massifs and an adjoining fold-and-thrust belt (Gyeonggi Marginal Belt), Korea: An overview. *Geosciences Journal*, 21, 845-865.
- Cho, M., Min, K. and Kim, H., 2018, Geology of the 2018 Winter Olympic site, Pyeongchang, Korea. *International Geology Review*, 60, 267-287.
- Cho, M., Na, J. and Yi, K., 2010, SHRIMP U-Pb ages of detrital zircons in metasandstones of the Taean Formation, western Gyeonggi massif, Korea: Tectonic implications. *Geosciences Journal*, 14, 99-109.
- Cho, S.H., Lee, B.-S., Lee, D.-J. and Choh, S.-J., 2021, The Ordovician succession of the Taebaek Group (Korea) revisited: old conodont data, new perspectives, and implications. *Geosciences Journal*, 25, 417-431.
- Cho, Y., Cho, M. and Lee, S.R., 1996, Granulite-facies metamorphism and P-T evolutionary path of cordierite gneisses in the Cheongpyeong-Yangpyeong area. *Journal of the Petrological Society of Korea*, 5, 52-65.
- Choi, D.K., 2014, *Geology and Tectonic Evolution of the Korean Peninsula*, First ed, Seoul National University Press, Seoul (in Korean with English abstract).
- Choi, D.K., 2019a, Evolution of the Taebaeksan Basin, Korea: I, early Paleozoic sedimentation in an epeiric sea and break-up of the Sino-Korean Craton from Gondwana. *Island Arc*, 28, e12275.
- Choi, D.K., 2019b, Evolution of the Taebaeksan Basin, Korea: II, late Paleozoic sedimentation in a retroarc foreland basin and assembly of the proto-Korean Peninsula. *Island Arc*, 28, e12277.
- Choi, D.K., Lee, J.G., Lee, S.B., Park, T.-Y.S. and Hong, P.S., 2016, Trilobite biostratigraphy of the lower Paleozoic (Cambrian-Ordovician) Joseon Supergroup, Taebaeksan Basin, Korea. *Acta Geologica Sinica (English Edition)*, 90, 1976-1999.
- Choi, Y.-M., Choh, S.-J., Lee, J.-H., Lee, D.-C., Lee, J.-G., Kwon, Y.-K., Cao, L. and Lee, D.-J., 2015, Devonian strata in Imjingang Belt of the Central Korean peninsula: Imjin system. *Journal of the Petrological Society of Korea*, 24, 107-124 (in Korean with English abstract).
- Chough, S.K., 2018, Recognition of stratigraphic sequence in the northeast Asian continent: a critical essay. *Geosciences Journal*, 22, 857-869.
- Chough, S.K., Kwon, S.-T., Ree, J.-H. and Choi, D., 2000, Tectonic and sedimentary evolution of the Korean peninsula: a review and new view. *Earth-Science Reviews*, 52, 175-235.
- Cluzel, D., Cadet, J.P. and Lapierre, H., 1990, Geodynamics of the Ogcheon Belt (South Korea). *Tectonophysics*, 183, 41-56.
- Cluzel, D., Jolivet, L. and Cadet, J.P., 1991, Early Middle Paleozoic intraplate orogeny in the Ogcheon Belt (South Korea): A new insight on the Paleozoic buildup of East Asia. *Tectonics*, 10, 1130-1151.
- Darby, B.J. and Gehrels, G., 2006, Detrital zircon reference for the North China block. *Journal of Asian Earth Sciences*, 26, 637-648.
- Doh, S.-J. and Piper, J.D.A., 1994, Palaeomagnetism of the (Upper Palaeozoic-Lower Mesozoic) Pyongan Supergroup, Korea: a Phanerozoic link with the North China Block. *Geophysical Journal International*, 117, 850-863.
- Dong, Y., Zhang, G., Neubauer, F., Liu, X., Genser, J. and Hauzenberger, C., 2011, Tectonic evolution of the Qinling orogen, China: review and synthesis. *Journal of Asian Earth Sciences*, 41, 213-237.
- Gao, L., Liu, P., Yin, C., Zhang, C., Ding, X., Liu, Y. and Song, B., 2011, Detrital zircon dating of Meso- and Neoproterozoic rocks in North China and its implications. *Acta Geologica Sinica (English Edition)*, 85, 271-282.
- Hacker, B.R., Wallis, S.R., Ratschbacher, L., Grove, M. and Gehrels, G., 2006, High temperature geochronology constraints on the tectonic history and architecture of the ultra-high-pressure Dabie-Sulu Orogen. *Tectonics*, 25, TC5006.
- Han, R., Ree, J.-H., Cho, D.-L., Kwon, S.-T. and Armstrong, R., 2006, SHRIMP U-Pb zircon ages of pyroclastic rocks in the Bansong Group, Taebaeksan Basin, South Korea, and their implications for Mesozoic tectonics. *Gondwana Research*, 9, 106-117.
- 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.
- Jeon, H., Cho, M., Kim, H., Horie, K. and Hidaka, H., 2007, Early Archean to Middle Jurassic evolution of the Korean Peninsula and its correlation with Chinese cratons: SHRIMP U-Pb zircon age constraints. *Journal of Geology*, 115, 525-539.
- Jeong, J.W., Oh, C.W. and Cho, D.-L., 2021, The Neoproterozoic to Triassic tectonic evolution of Jangbong Island in the north-western Gyeonggi Massif on the Korean Peninsula. *Lithos*, 390-391, 106102.

- Kee, W.-S., Kim, S.W., Kim, H., Hong, P.S., 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, 1:1,000,000 Geologic Map of Korea. Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources, Daejeon (in Korean).
- Kihm, Y.H., Kim, J.H. and Koh, H.J., 1996, Geology of the Deogsanmyeon area, Jecheon-gun, Chugcheongbuk-do, Korea: Contact between the Choseon and Okcheon supergroups. *Journal of the Geological Society of Korea*, 32, 483-499 (in Korean with English abstract).
- Kim, B., Liu, Y., Li, W., Liang, D., Kim, M. and Chae, Y., 2012, Correlation between Rimjingang belt and Dabie-Sulu orogenic belt. *Global Geology*, 15, 97-104.
- Kim, D.-Y., Choi, S.-J. and Yi, K., 2015, SHRIMP U-Pb zircon ages of the metasandstone in the Yeongam-Gangjin area. *Economic and Environmental Geology*, 48, 287-299 (in Korean with English abstract).
- Kim, H.S., 2012a, P-T modeling of margarite + anorthite bearing Al-rich metapelites in the Taebaeksan basin, South Korea: implications for accretion-related metamorphism during the Late Permian-Triassic orogeny. *Geosciences Journal*, 16, 207-227.
- Kim, H.S., 2012b, Temperature and timing of mylonitization of leucocratic granite on the northeastern flank of the Taebaeksan Basin. *Journal of the Korean Earth Science Society*, 33, 434-449 (in Korean with English abstract).
- Kim, H.S., 2019, Reassessment of the Pyeongan Supergroup: Metamorphism and deformation of the Songrim orogeny. *Economic and Environmental Geology*, 52, 367-379 (in Korean with English abstract).
- Kim, H.S., Choh, S.-J., Lee, J.-H. and Kim, S.J., 2019, Sediment grain size does matter: Implications of spatiotemporal variations in detrital zircon provenance for early Paleozoic peri-Gondwana reconstructions. *International Journal of Earth Sciences*, 108, 1509-1526.
- Kim, H.S., Hwang, M.-K., Ree, J.-H. and Yi, K., 2013, Tectonic linkage between the Korean Peninsula and mainland Asia in the Cambrian: insights from U-Pb dating of detrital zircon. *Earth and Planetary Science Letters*, 368, 204-218.
- Kim, H.S. and Jung, W.-S., 2010, The use of garnet porphyroblasts to resolve the metamorphic pressure-temperature-deformation (P-T-d) path: An example from the Imjingang belt, South Korea. *Geosciences Journal*, 14, 111-126.
- Kim, H.S., Kwon, S., Kim, S.W. and Santosh, M., 2018a, Permo-Triassic high-pressure metamorphism in the central western Korean Peninsula, and its link to Paleo-Tethyan Ocean closure: key issues revisited. *Geoscience Frontiers*, 9, 1325-1335.
- Kim, H.S. and Lee, C.H., 1995, Metamorphism of the Buncheon and Hongjesa Granitic Gneisses. *Journal of the Petrological Society of Korea*, 4, 61-87.
- Kim, H.S., Park, Y., Jung, M.-J., Lee, S., Yi, K., Jung, H. and Cheong, A.C., 2025, Protracted late Paleozoic volcanic arc activity along the Northeast Asian continental margin. *Scientific Reports*, 15, 37807.
- Kim, H.S. and Ree, J.-H., 2010, P-T modeling of kyanite and sillimanite paramorphs growth after andalusite in late Paleozoic Pyeongan Supergroup, South Korea: Implication for metamorphism during the Mesozoic tectonic evolution. *Lithos*, 118, 269-286.
- Kim, H.S. and Ree, J.-H., 2013, Permo-Triassic changes in bulk crustal shortening direction during deformation and metamorphism of the Taebaeksan Basin, South Korea using foliation intersection/inflection axes: Implications for tectonic movement at the eastern margin of Eurasia during the Songrim (Indosinian) orogeny. *Tectonophysics*, 587, 133-145.
- Kim, H.S., Ree, J.H., Kang, H.C. and Yi, K., 2022, Pressure-temperature-time-deformation (P-T-t-d) path for Devonian forearc deposits in the Imjingang Belt, South Korea: Implications for Permian-Triassic collisional orogenesis on the eastern margin of Eurasia. *Journal of Metamorphic Geology*, 40, 489-516.
- Kim, H.S., Ree, J.-H. and Kim, J., 2012, Tectonometamorphic evolution of the Permo-Triassic Songrim (Indosinian) orogeny: Evidence from the late Paleozoic Pyeongan Supergroup in the northeastern Taebaeksan Basin, South Korea. *International Journal of Earth Sciences*, 101, 483-498.
- Kim, H.S., Ree, J.H. and Yi, K., 2018b, The tectonic boundary between the Okcheon and Taebaeksan basins, South Korea: A restraining bend of a continental transform fault between the South and North China Cratons. *Island Arc*, 27, e12237.
- Kim, H.S., Ree, J.-H. and Yi, K., 2020, Retrieval of P-T-t-d paths in a syn-metamorphic shear zone: implications for PT calculations and the Permian-Triassic orogeny on the Korean Peninsula. *Journal of Asian Earth Sciences*, 190, 104189.
- Kim, H.S., Seo, B. and Yi, K., 2014, Medium Temperature and Lower Pressure Metamorphism and Tectonic Setting of the Pyeongan Supergroup in the Munkyeong Area. *Journal of the Petrological Society of Korea*, 23, 311-324.
- Kim, H.S. and Yi, K., 2015, Multiple metamorphic episodes recorded in the Paleozoic Pyeongan Supergroup on the northeastern margin of the Yeongnam massif, South Korea: Implications for the Songrim (Indosinian) orogeny. *Journal of Asian Earth Sciences*, 113, 883-896.
- Kim, J., Cheong, C.-S., Lee, S.-R., Cho, M. and Yi, K., 2008, In-situ U-Pb titanite age of the Chuncheon amphibolite: Evidence for Triassic regional metamorphism in central Gyeonggi massif, South Korea, and its tectonic implication. *Geosciences Journal*, 12, 309-316.
- Kim, J. and Cho, M., 2003, Low-pressure metamorphism and leucogranite magmatism, northeastern Yeongnam Massif, Korea: Implications for Paleoproterozoic crustal evolution. *Precambrian Research*, 122, 235-251.
- Kim, J.-N., Ree, J.-H., Kwon, S.-T., Park, Y., Choi, S.-J. and Cheong, C.-S., 2000, The Kyonggi shear zone of the central Korean peninsula: late orogenic imprint of the North and South China collision. *Journal of Geology*, 108, 469-478.
- Kim, M.G. and Lee, Y.I., 2018, The Pyeongan Supergroup (upper Paleozoic-Lower Triassic) in the Okcheon Belt, Korea: A review of stratigraphy and detrital zircon provenance, and its implications for the tectonic setting of the eastern Sino-Korean Block. *Earth-Science Reviews*, 185, 1170-1186.
- Kim, N., Cheong, C.-S., Park, K.-H., Kim, J. and Song, Y.-S., 2012, Crustal evolution of northeastern Yeongnam Massif, Korea, revealed by SHRIMP U-Pb zircon geochronology and geochemistry.

- Gondwana Research, 21, 865-875.
- Kim, N.-H., Cheong, C.-S., Yi, K., Song, Y.-S., Park, K.-H., Geng, J.-Z. and Li, H.-K., 2014, Zircon U-Pb geochronological and Hf isotopic constraints on the Precambrian crustal evolution of the northeastern Yeongnam Massif, Korea. *Precambrian Research*, 242, 1-21.
- Kim, N.-H., Song, Y.-S., Park, K.-H. and Lee, H.-S., 2009, SHRIMP U-Pb zircon ages of granite gneisses from the Pyeonghae area of the northeastern Yeongnam Massif (Sobaeksan Massif). *Journal of the Petrological Society of Korea*, 18, 31-47 (in Korean with English abstract).
- Kim, S.W., Kwon, S., Jeong, Y.-J., Kee, W.-S., Lee, B.C., Byun, U.H., Ko, K., Cho, D.-L., Hong, P.S., Park, S.-I. and Santosh, M., 2021, The Middle Permian to Triassic tectono-magmatic system in the southern Korean Peninsula. *Gondwana Research*, 100, 302-322.
- Kim, S.W., Kwon, S., Koh, H.J., Yi, K., Jeong, Y.-J. and Santosh, M., 2011a, Geotectonic framework of Permo-Triassic magmatism within the Korean Peninsula. *Gondwana Research*, 20, 865-889.
- Kim, S.W., Oh, C., Hyodo, H., Itaya, T. and Liou, J., 2005, Metamorphic evolution of the southwest Okcheon metamorphic belt in South Korea and its regional tectonic implications. *International Geology Review*, 47, 344-370.
- Kim, S.W., Oh, C.W., Williams, I.S., Rubatto, D., Ryu, I.-C., Rajesh, V., Kim, C.-B., Guo, J. and Zhai, M., 2006, Phanerozoic high-pressure eclogite and intermediate-pressure granulite facies metamorphism in the Gyeonggi Massif, South Korea: implications for the eastward extension of the Dabie-Sulu continental collision zone. *Lithos*, 92, 357-377.
- Kim, S.W., Park, S.-I., Jang, Y., Kwon, S., Kim, S.J. and Santosh, M., 2017, Tracking Paleozoic evolution of the South Korean Peninsula from detrital zircon records: Implications for the tectonic history of East Asia. *Gondwana Research*, 50, 195-215.
- Kim, T.-S., Oh, C.-W. and Kim, J.-M., 2011b, The characteristic of mangerite and gabbro in the Odaesan area and its meaning to the Triassic tectonics of Korean peninsula. *Journal of the Petrological Society of Korea*, 20, 77-98 (in Korean with English abstract).
- Kobayashi, T., 1930, The significance of the unconformity at the base of the Daido (Daedong) Formation. *Journal of the Geological Society of Japan*, 37, 593-607.
- Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources (KIGAM), 2001, Tectonic map of Korea (1:1,000,000). Sungji Atlas Co., Ltd., Seoul.
- Kwon, S., Sajeev, K., Mitra, G., Park, Y., Kim, S.W. and Ryu, I.-C., 2009, Evidence for Permo-Triassic collision in far east Asia: the Korean collisional orogen. *Earth and Planetary Science Letters*, 279, 340-349.
- Kwon, S., Samuel, V.D., Song, Y., Kim, S.W., Park, S.-I., Jang, Y. and Santosh, M., 2020, Eclogite resembling metamorphic disequilibrium assemblage formed through fluid-induced metasomatic reactions. *Scientific Reports*, 10, 19869.
- Kwon, Y.W., Kim, H.S. and Oh, C.W., 1997, Polymetamorphism of the Odaesan gneiss complex in the northeastern Gyeonggi Massif, Korea. *Journal of the Petrological Society of Korea*, 6, 226-243 (in Korean with English abstract).
- Kwon, Y.W., Oh, C.W. and Kim, H.S., 2003, Granulite-facies metamorphism in the Punggi area, northeastern Yeongnam Massif, Korea and its tectonic implications for east Asia. *Precambrian Research*, 122, 253-273.
- Lee, B.C., Oh, C.W., Kim, T.S. and Yi, K., 2016, The metamorphic evolution from ultrahigh-temperature to amphibolite-facies metamorphism in the Odaesan area after the collision between the North and South China cratons in the Korean Peninsula. *Lithos*, 256-257, 109-131.
- Lee, B.-S., Cho, S.H., Choh, S.-J. and Wang, X., 2022, Confirmation of the Floian-Darriwilian (Lower to Middle Ordovician) hiatus in the Taebaek Group, Korea: integration of conodont biostratigraphy and sedimentology. *Geosciences Journal*, 26, 649-667.
- Lee, B.Y., Oh, C.W., Cho, D.L., Zhai, M., Lee, B.C., Peng, P. and Yi, K., 2019, The Devonian back-arc basin and Triassic arc-continental collision along the Imjingang belt in the Korean Peninsula and their tectonic meaning. *Lithos*, 328, 276-296.
- Lee, B.Y., Oh, C.W. and Lee, B.C., 2023, The Neoproterozoic continental extension tectonic event in the Chuncheon area of the northern Gyeonggi massif in the Korean Peninsula and its implication for the tectonic correlation between the Korean Peninsula and China. *Lithos*, 456-457, 107297.
- Lee, D.-S., ed., 1987, *Geology of Korea*, Kyohak-Sa, Seoul, 514 p.
- Lee, H.S. and Chough, S.K., 2006a, Sequence stratigraphy of Pyeongan Supergroup (Carboniferous-Permian), Taebaek area, mid-east Korea. *Geosciences Journal*, 10, 369-389.
- Lee, H.S. and Chough, S.K., 2006b, Lithostratigraphy and depositional environments of the Pyeongan Supergroup (Carboniferous-Permian) in the Taebaek area, mid-east Korea. *Journal of Asian Earth Sciences*, 26, 339-352.
- Lee, J. and Kim, H.S., 2025, The pressure-temperature-time path of metasedimentary rocks during the Permian-Triassic collisional orogeny along the northwestern margin of the Gyeonggi Massif, South Korea. *Geosciences Journal*, 29, 196-211.
- Lee, K.J. and Cho, M., 1992, Metamorphism of the Gyeonggi Massif in the Gapyeong-Cheongpyeong area. *Journal of the Petrological Society of Korea*, 1, 1-24.
- Lee, S.M., Song, Y.S. and Lee, C.J., 1991, Petrology of Precambrian gneisses in Changhowon-Eumseong area. *Journal of the Geological Society of Korea*, 27, 87-97 (in Korean with English abstract).
- Lee, S.R. and Cho, K.-O., 2012, Precambrian crustal evolution of the Korean Peninsula. *Journal of the Petrological Society of Korea*, 21, 89-112 (in Korean with English abstract).
- Lee, S.R. and Cho, M., 2003, Metamorphic and tectonic evolution of the Hwacheon granulite complex, central Korea: Composite P-T path resulting from two distinct crustal-thickening events. *Journal of Petrology*, 44, 197-226.
- Lee, S.R., Cho, M., Cheong, C.-S., Kim, H. and Wingate, M.T., 2003, Age, geochemistry, and tectonic significance of Neoproterozoic alkaline granitoids in the northwestern margin of the Gyeonggi massif, South Korea. *Precambrian Research*, 122, 297-310.
- Lee, S.R., Cho, M., Yi, K. and Stern, R.A., 2000, Early Proterozoic granulites in central Korea: tectonic correlation with Chinese

- cratons. *Journal of Geology*, 108, 729-738.
- Lee, Y. and Cho, M., 2022, Paleoproterozoic hot orogenesis recorded in the Yeongnam Massif, Korea. *Korean Journal of Mineralogy and Petrology*, 35, 199-214 (in Korean with English abstract).
- Lee, Y., Cho, M., Cheong, W. and Yi, K., 2014, A massif-type (~1.86 Ga) anorthosite complex in the Yeongnam Massif, Korea: late-orogenic emplacement associated with the mantle delamination in the North China Craton. *Terra Nova*, 26, 408-416.
- Lee, Y., Cho, M., Kim, T. and Kim, H., 2021, Incipient charnockite formation at the waning stage of Paleoproterozoic hot orogenesis, Yeongnam Massif, Korea. *Precambrian Research*, 365, 106388.
- Lee, Y., Cho, M. and Yi, K., 2017, In situ U-Pb and Lu-Hf isotopic studies of zircons from the Sancheong-Hadong AMCG suite, Yeongnam Massif, Korea: implications for the petrogenesis of ~1.86 Ga massif-type anorthosite. *Journal of Asian Earth Sciences*, 138, 629-646.
- Lee, Y.I., Choi, T. and Orihashi, Y., 2011, LA-ICP-MS zircon U-Pb ages of the Precambrian Yuli Group. *Journal of the Geological Society of Korea*, 47, 81-87 (in Korean with English abstract).
- Lim, S.-B., Chun, H.Y., Kim, Y.B., Kim, B.C. and Song, K.-Y., 2006, Stratigraphy and geological ages of the metasedimentary strata in Jinsan-Boksu area, Chungcheongnam-do, NW Okcheon belt. *Journal of the Geological Society of Korea*, 42, 149-174 (in Korean with English abstract).
- Lim, S.-B., Chun, H.-Y., Kim, Y.B., Kim, B.K. and Cho, D.-L., 2005, Geologic ages, stratigraphy, and geological structures of the metasedimentary strata in the Bibong-Yeonmu area, north-western Okcheon Belt, Korea. *Journal of the Geological Society of Korea*, 41, 335-368 (in Korean with English abstract).
- Lim, S.-B., Chun, H.Y., Kim, Y.B., Lee, S.R. and Kee, W.-S., 2007, Geological ages and stratigraphy of the metasedimentary strata in Hoenam-Miwon area, NW Okcheon belt. *Journal of the Geological Society of Korea*, 43, 125-150 (in Korean with English abstract).
- McKenzie, N.R., Hughes, N.C., Myrow, P.M., Choi, D.K. and Park, T.-Y., 2011, Trilobites and zircons link north China with the eastern Himalaya during the Cambrian. *Geology*, 39, 591-594.
- Min, K. and Cho, M., 1998, Metamorphic evolution of the north-western Okcheon metamorphic belt, South Korea. *Lithos*, 43, 31-51.
- Oh, C.W., 2006, A new concept on tectonic correlation between Korea, China and Japan: histories from the late Proterozoic to Cretaceous. *Gondwana Research*, 9, 47-61.
- Oh, C.W., Kim, S. and Lee, J., 1995, The PT condition and timing of the main metamorphism in the southern part of the Okcheon metamorphic belt. *Journal of the Geological Society of Korea*, 31, 343-361 (in Korean with English abstract).
- Oh, C.W., Kim, S.W., Choi, S.G., Zhai, M., Guo, J. and Sajeev, K., 2005, First finding of eclogite facies metamorphic event in South Korea and its correlation with the Dabie-Sulu collision belt in China. *Journal of Geology*, 113, 226-232.
- Oh, C.W., Krishnan, S., Kim, S.W. and Kwon, Y.W., 2006, Mangerite magmatism associated with a probable Late-Permian to Triassic Hongseong-Odesan collision belt in South Korea. *Gondwana Research*, 9, 95-105.
- Oh, C.W. and Kusky, T.M., 2007, The Late Permian to Triassic Hongseong-Odesan collision belt in South Korea and its tectonic correlation with China and Japan. *International Geology Review*, 49, 636-657.
- Oh, C.W., Lee, B.C., Jeong, J.W., Lee, B.Y., Lee, S.H., Yi, S.-B., Kim, S.T. and Lee, D.-S., 2024, Permo-Triassic continental collision process in the Northeast Asia during the final amalgamation stage of Pangea supercontinent and the geological correlations between Korea, China, and Japan. *Episodes*, 47, 555-593.
- Oh, Y., Jung, J., Lee, M., Jeon, J., Lee, S.-B. and Park, T.-Y.S., 2023, Reappraisal of the Neoproterozoic to middle Paleozoic fossils of North Korea and its tectonic implication. *Geosciences Journal*, 27, 661-687.
- Paek, R.J., Kang, H.G. and Jon, G.P., 1996, *Geology of Korea*. Foreign Languages Book Publishing House, Pyongyang, 631 p.
- Park, B.J. and Kim, H.S., 2022, P-T-XCO₂-bulk-rock-composition modeling of garnet decomposition in amphibolite and mafic granulite: Tectono-metamorphic insights into the Permian-Triassic orogeny on the eastern margin of the Korean Peninsula. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 177, 89.
- Park, B.Y. and Suh, G.W., 2008, Geochemistry and Metamorphism of the Gneisses in Gwangyang-Hadong Area. *Journal of Korean Earth Science Society*, 29, 221-245.
- Park, K.-H., Lee, T.-H. and Yi, K., 2011, SHRIMP U-Pb ages of detrital zircons in the Daehyangsan Quartzite of the Okcheon Metamorphic Belt. *Journal of the Geological Society of Korea*, 47, 423-431 (in Korean with English abstract).
- Park, K.-H., Song, Y.-S. and Seo, J., 2018, U-Pb Geochronology of the Triassic foliated granite distributed in the eastern Sancheong area, SW Yeongnam Massif, Korea and its implications. *Journal of the Petrological Society of Korea*, 27, 223-233 (in Korean with English abstract).
- Park, T.-Y. and Choi, D.K., 2011, Trilobite faunal successions across the base of the Furongian Series in the Taebaek Group, Taebaeksan Basin, Korea. *Geobios*, 44, 481-498.
- Park, T.-Y., Kihm, J.-H. and Choi, D.K., 2013, Late middle Cambrian (Cambrian Series 3) trilobite faunas from the lowermost part of the Sesong Formation, Korea and their correlation with North China. *Journal of Paleontology*, 87, 991-1003.
- Park, T.-Y., Sohn, J.W. and Choi, D.K., 2012, Middle Furongian (late Cambrian) polymerid trilobites from the upper part of the Sesong Formation, Taebaeksan Basin, Korea. *Geosciences Journal*, 16, 381-398.
- Park, T.-Y.S. and Kihm, J.-H., 2015, Furongian (late Cambrian) trilobites from the Asiopychaspis subglobosa Zone of the Hwajeol Formation, Korea. *Alcheringa*, 39, 181-199.
- Ree, J.-H., Cho, M., Kwon, S.-T. and Nakamura, E., 1996, Possible eastward extension of Chinese collision belt in South Korea: the Imjingang belt. *Geology*, 24, 1071-1074.
- Ree, J.-H., Kwon, S.-H., Park, Y., Kwon, S.-T. and Park, S.-H., 2001, Pre-tectonic and post-tectonic emplacements of the granulites in the south central Okcheon belt, South Korea: im-

- plications for the timing of strike-slip shearing and thrusting. *Tectonics*, 20, 850-867.
- Reedman, A.J., Fletcher, C.J.N., Evans, R.B., Workman, D.R., Yoon, K.S., Rhy, H.S., Jeong, S.H. and Park, J.N., 1973, Geology of the Hwanggangri mining district, Republic of Korea. Seoul, South Korea: Geology and Mineral Institute of Korea, 118 p.
- Reedman, A.J. and Um, S.H., 1975, The geology of Korea. Geology and Mineral Institute of Korea, Seoul, 139 p.
- Seo, J., Choi, S.G., Oh, C.W., Kim, S.W. and Song, S.H., 2005, Genetic Implications of Two Different Ultramafic Rocks from Hongseong Area in the Southwestern Gyeonggi Massif, South Korea. *Gondwana Research*, 8, 539-552.
- Seo, J., Oh, C.W., Choi, S.G. and Rajesh, V.J., 2013, Two ultramafic rock types in the Hongseong area, South Korea: Tectonic significance for northeast Asia. *Lithos*, 175-176, 30-39.
- Son, C.M., 1970, On the geologic age of the Okcheon Group. *Journal of the Korean Institute of Mining Geology*, 3, 9-15 (in Korean with English abstract).
- Song, Y.-S., 1999, Granulite xenoliths in porphyroblastic gneiss from Mt. Jiri area, SW Sobaegsan massif, Korea. *Journal of the Petrological Society of Korea*, 8, 34-45.
- Song, Y.-S., Park, K.-H., Lee, H.-S., Cao, L. and Orihashi, Y., 2009, LA-ICP-MS U-P Zircon Age of the Granite Gneiss from Jeungsan-Pyeongwon Area of North Korea. *Journal of the Petrological Society of Korea*, 18, 171-179.
- Song, Y.-S., Park, K.-H., Seo, J., Jo, H.J. and Yi, K., 2011, SHRIMP Zircon Ages of the Basement Gneiss Complex in the Pyeongchang-Wonju Area, Gyeonggi Massif, Korea. *Journal of the Petrological Society of Korea*, 20, 99-114 (in Korean with English abstract).
- Wan, Y., Liu, D., Wang, W., Song, T., Kröner, A., Dong, C., Zhou, H. and Yin, X., 2011, Provenance of Meso- to Neoproterozoic cover sediments at the Ming Tombs, Beijing, North China Craton: An integrated study of U-Pb dating and Hf isotopic measurement of detrital zircons and whole-rock geochemistry. *Gondwana Research*, 20, 219-242.
- Wu, F.-Y., Yang, J.-H., Wilde, S.A., Liu, X.-M., Guo, J.-H. and Zhai, M.-G., 2007, Detrital zircon U-Pb and Hf isotopic constraints on the crustal evolution of North Korea. *Precambrian Research*, 159, 155-177.
- Yang, J.H., Peng, P., Jong, C.S., Park, U., Mun, J.G., Kim, C.H. and Ku, H.C., 2016, Comparison on ages of detrital zircons from the Paleoproterozoic to Lower Paleozoic sedimentary rocks in the Pyongnam Basin, Korea. *Acta Petrologica Sinica*, 32, 3155-3179.
- Yi, K., Cheong, C.-S., Kim, J., Kim, N., Jeong, Y.-J. and Cho, M., 2012, Late Paleozoic to Early Mesozoic arc-related magmatism in southeastern Korea: SHRIMP zircon geochronology and geochemistry. *Lithos*, 153, 129-141.
- Yin, A. and Nie, S., 1993, An indentation model for the north and south China collision and the development of the Tan-Lu and Honam fault systems, Eastern Asia. *Tectonics*, 12, 801-813.