

## 고원생대에서 트라이아스기까지의 한중 지질 대비 및 페름-트라이아스기 북동아시아 대륙충돌 모델 비교 평가

오창환<sup>‡</sup> · 김용현  
전북대학교 지구환경과학과

### 요 약

최근 한반도에서 페름-트라이아스기에 대륙충돌이 일어났음을 지시하는 에클로자이트가 홍성지역에서 발견되었으며 홍성-양평-오대산 지역과 그 북쪽 지역에서 트라이아스기 충돌 후 화성암들이 광범위하게 발견되었다. 임진강대는 데본기에 후베호 분지에서 형성되었으며 경기육괴, 옥천변성대와 함께 페름-트라이아스기에 충돌과 관련된 중압형 변성작용을 받았음도 확인되었다. 그리고 홍성-오대산-양평을 경계로 구분되는 경기육괴 북부와 남부는 고원생대와 신원생대에 서로 다른 지구조 환경을 경험하였으며 경기육괴 북부와 남부의 신원생대 화성암들이 각각 북중국판과 남중국판의 신원생대 화성암들에 대비됨도 보고되었다. 영남육괴 북부지역에서는 북중국판 동부, 남립육괴, 경기육괴 북부에서 일어나지 않는 2.0-1.7 Ga 화산호 환경에서 일어난 화성 활동이 보고되었다. 또한 지난 30년 동안 페름-트라이아스기 북동아시아 지구조 진화에 대한 여러 지구조 모델들이 제시되었다. 이중 중국의 친링-다비-수루 충돌대가 임진강대로 연결되고 중국의 탄루 단층이 한반도의 호남전단대나 남한구조선(South Korea Tectonic Line; SKTL)에 대비된다는 학설이 많이 인용되고 있다. 하지만 탄루 단층은 남중국판과 북중국판이 충돌을 시작한 페름기에 단층 운동을 시작한데 반해 호남전단대와 남한구조선은 대륙충돌이 끝난 이후에 일어났기 때문에 탄루 단층은 호남전단대와 남한구조선에 대비될 수 없다. 그리고 임진강대에서는 아직도 충돌 경계의 증거가 보고되지 않고 있다. 그리고 이 두 모델과 함께 한반도 모두를 북중국판의 일부로 보는 모델들은 최근 보고된 한중 대비 결과 전체 혹은 일부와 일치하지 않는다. 여러 지구조 모델 중 홍성-양평-오대산 지역을 중국의 친링-다비-수루 충돌대의 연장선으로 제시한 지구조모델이 최근 보고된 여러 지질정보들과 가장 잘 일치한다.

**주요어:** 페름-트라이아스기, 에클로자이트, 충돌 후 화성암, 홍성-양평-오대산, 북동아시아

**Chang Whan Oh and Yong Heon Kim, 2021, The geological correlation between the Korean Peninsula and China from Paleoproterozoic to Triassic and the comparative evaluation among the Permo-Triassic collision models in the Northeast Asia. Journal of the Geological Society of Korea. v. 57, no. 4, p. 369-412**

**ABSTRACT:** Recently, Permo-Triassic eclogite was found in the Hongseong area, indicating the Permo-Triassic continental collision within the Korean Peninsula and the Triassic post collisional igneous rocks were found extensively in the Hongseong-Yangpyeong-Odaesan belt and in the region to the north of the belt. The Imjingang belt was formed in the backarc basin and underwent a collision-related intermediate-P/T metamorphism together with the Gyeonggi Massif and Okcheon Metamorphic Belt. It is also reported that the northern and southern Gyeonggi Massifs, which is separated by the Hongseong-Yangpyeong-Odaesan belt, experienced different tectonic evolution during Paleoproterozoic and Neoproterozoic times, and the Neoproterozoic rocks in the northern and southern Gyeonggi Massifs can be correlated to those in the North and South China Cratons, respectively. From the northern margin of the Yeongnam Massif, 2.0-1.7 Ga arc-related igneous activities were reported but these activities were not observed in the eastern part of the North China Craton and the Nangrim and northern Gyeonggi Massifs. Over the past 30 years, several tectonic models have been proposed to explain the Permo-Triassic tectonic evolution of the Northeast Asia. Among them, many papers have referenced the tectonic models in which the Qinling-Dabie-Sulu collision belt and Tanlu fault in China were correlated to the Imjingang belt and the Honam Shear Zone (or the South Korea Tectonic Line (SKTL)) in the Korean Peninsula respectively. However, the Tanlu fault started its fault movement from the Permian during which the North and South China Cratons began to collide,

<sup>‡</sup> Corresponding author: +82-63-270-3397, E-mail: [ocwhan@jbnu.ac.kr](mailto:ocwhan@jbnu.ac.kr)

whereas the Honam Shear Zone and SKTL started their fault movement after the continental collision. Therefore the Tanlu fault cannot be correlated with the Honam Shear Zone and SKTL. In the Imjingang belt, evidence of collision boundaries is still not found. Along with the above models, the models which consider the whole Korean Peninsula as a part of the North China Craton, do not agree in part or in whole with the recently reported results of the Korea-China geological correlation. Among the proposed tectonic models, the tectonic model, which considers the Hongseong-Yangpyeong-Odaesan belt as an extension of the Qinling-Dabi-Sulu collision belt in China, is best matched with the recently reported geological information.

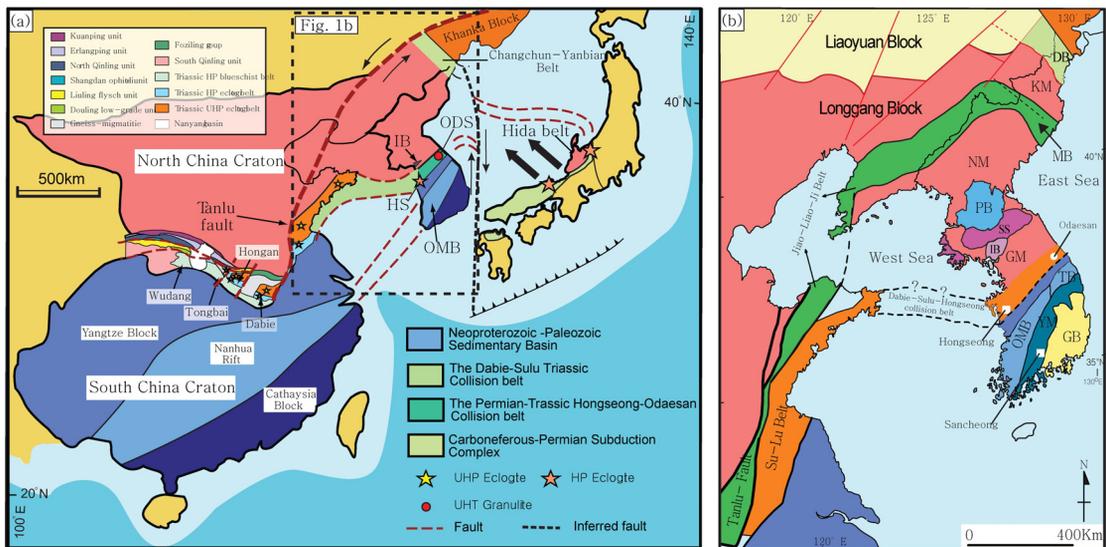
**Key words:** Permo-Triassic, Eclogite, Post collisional igneous rocks, Hongseong-Yeongpyeong-Odesan, Northeast Asia

(Chang Whan Oh and Yong Heon Kim, Department of Earth and Environmental Sciences, Jeonbuk National University, Jeonju 54896, Republic of Korea)

## 1. 서 언

한반도 전체는 오랫동안 북중국판의 일부로 생각 되어왔다(Lee, 1987). 하지만 중국에서 1980년대 말에 남중국판과 북중국판의 경계인 친링-다비-수루 지역에서 에클로라이트들이 발견되었고 이를 근거로 페름-트라이아스기 충돌대인 친링-다비-수루 충돌대가 인지되었다(그림 1). 그 이후 친링-다비-수루 충돌대의 한반도로 연장 가능성에 대한 국제적인 관심이 커졌고 이로 인해 한반도의 지구조 연구가 북동아시아 지구조 해석에 중요해지면서 여러 개의 서로

다른 페름-트라이아스기 북동아시아 지구조모델이 제시되었다(그림 1, 2; Yin and Nie, 1993; Ernst and Liou, 1995; Zhang, 1997; Ishiwatari and Tsujimori, 2003; Oh, 2006; Oh and Kusky, 2007; Zhai *et al.*, 2007). 그리고 1990년 말부터 SHRIMP를 이용한 저어콘 U/Pb 절대연령 분석이 한국 지질 연구에 도입 되었을 뿐 아니라 SHRIMP를 포함한 첨단 분석기자가 국내에 다량 도입되면서 한국 지질에 대한 연구가 활성화되고 많은 새로운 지질학적 발견이 보고 되었다. 그 결과 최근 한반도의 지구조 해석에 큰 변화가 일어나고 있다. 대표적인 새로운 발견은 고압

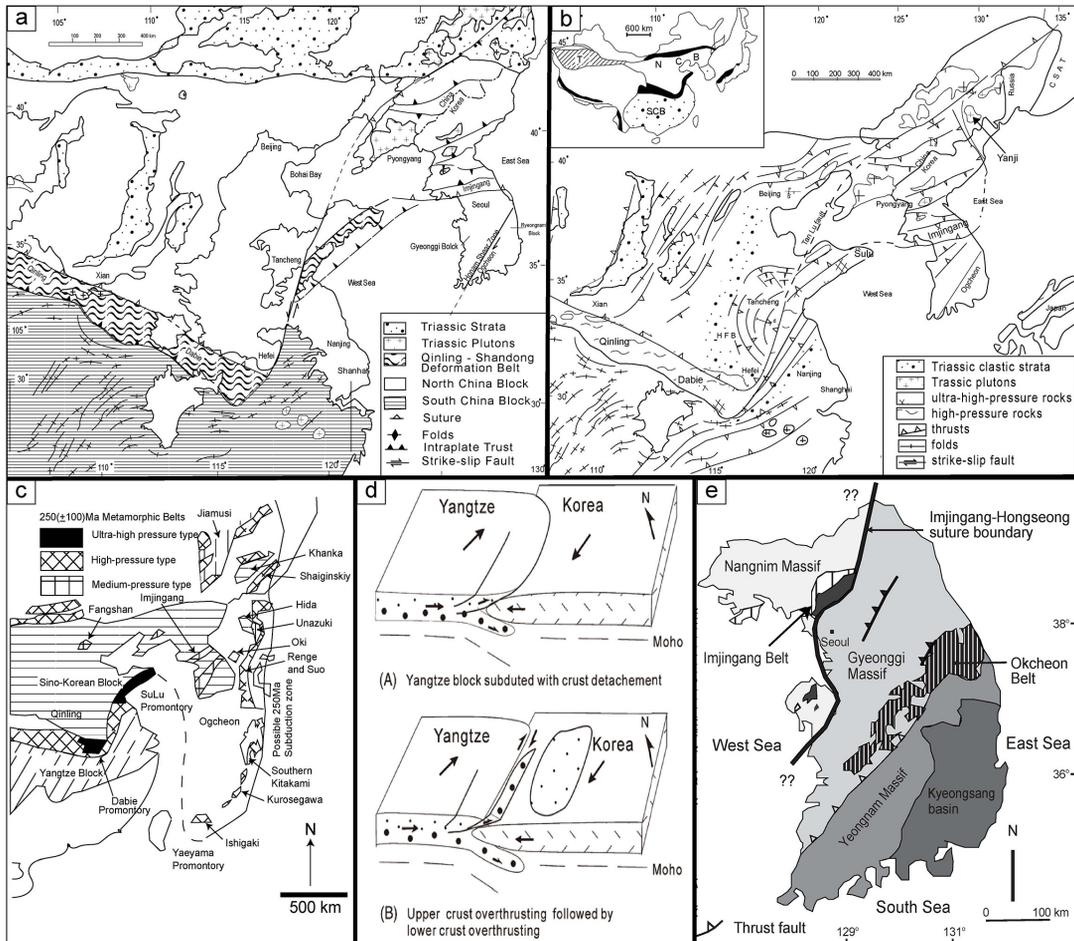


**Fig. 1.** (a) Tectonic map of the Northeast Asia and (b) Tectonic map of the Korean Peninsula and eastern China (modified after Oh *et al.*, 2019). Abbreviations are as follows: DB=Dumangang Belt; GB=Gyeongsang Basin; GM=Gyeonggi Massif; HS=Hongseong Area; IB=Imjingang Belt; KM=Kwanmo Massif; MB=Macheonryeong Belt; NM=Nangrim Massif; ODS=Odesan Area; OMB=Okcheon Metamorphic Belt; PB=Pyongyang Basin; SS=Sangnim System; TB=Taebaeksan Basin; YM=Yeongnam Massif.

변성작용의 증거인 페름-트라이아스기 에클로자이트(eclogite)가 경기육괴 서남부의 홍성지역에서 발견된 것이다(Oh *et al.*, 2003, 2005). 이 암석은 섭입대나 대륙충돌대에서 생성되는 암석으로 대륙판 내에서 발견된 경우 그 지역에 대륙 충돌이 일어났음을 시사하기 때문에 한반도에 페름-트라이아스기에 대륙 충돌이 있었음을 확인시켰주었으며 이로 인해 1980년까지 지속되어왔던 한반도가 고원생대 이후 현재까지 하나의 육괴였다는 기존 개념에 큰 변화를 가져왔다. 그 후 오대산 지역에서 트라이아스기 충돌 후 화성암인 맨거라이트가 발견되었고 이를 계기로 경기육괴 내의 여러 쥐라기 화성암들이 트라이아스기 형성된 충돌 후 화성암으로 확인되었다(Oh *et*

*al.*, 2006b; Choi *et al.*, 2009; Williams *et al.*, 2009; Seo *et al.*, 2010; Kim *et al.*, 2011; Yi *et al.*, 2016). 이들 트라이아스기 충돌 후 화성암들은 경기육괴 북부뿐 아니라 임진강대 그리고 낭림육괴에 남부에 걸쳐 나타나 확인되었다(Peng *et al.*, 2008; Hwang *et al.*, 2017). 이들 충돌 후 화성암들 역시 임진강대, 경기육괴, 옥천변성대에 광역적으로 일어난 충돌 관련 중압형 변성작용과 함께 경기육괴내 홍성-양평-오대산에서 충돌이 일어났음을 시사하는 증거로 생각되고 있다(Kim *et al.*, 2005; Yengkhom *et al.*, 2014; Lee, B.Y. *et al.*, 2019; Jeong *et al.*, 2021).

이와 함께 경기육괴 내 선캄브리아기 편마암 대부분이 시생누대가 아닌 원생누대 초기의 암석으로



**Fig. 2.** Tectonic models for the Northeast Asia during the Permo-Triassic time. Tectonic models suggested by (a) Yin and Nie (1993), (b) Zhang (1997), (c) Ishiwatari and Tsujimori (2009), (d) Zhai *et al.* (2007). (e) Kim *et al.* (2011). (modified after Oh *et al.*, 2019).

밝혀지고 있으며 이들은 주로 고원생대 변성퇴적암 (1.93-1.87 Ga)으로 주로 이루어졌을 것으로 생각했던 기존 개념과 달리 상당히 많은 고원생대 화성암 (1.88-1.84 Ga)을 포함하고 있는 것으로 확인되었다 (Zhai *et al.*, 2005; Kee and Kim, 2011; Lee *et al.*, 2014, 2016a; Yenkhom *et al.*, 2014). 이들 고원생대 화성암과 변성암들로부터 경기육괴 북부의 고원생대 화성 및 변성작용(1.93-1.84 Ga)이 콜롬비아 초대륙 형성시 북중국판 동부에 형성된 산동-요동-길림 충돌대(Jiao-Liao-Ji Collision Belt)를 따라 일어난 충돌에 영향을 받아 일어난 것으로 해석되었다(그림 1; Lee *et al.*, 2014; Yenkhom *et al.*, 2014). 이와 달리 경기육괴 남동부인 원주 지역에서는 약 1.96-1.91 Ga에 일어난 화산호 관련 화성암이 그리고 영남육괴 북쪽 경계부에서는 2.0-1.7 Ga에 일어난 화산호 관련 화성작용이 새로이 인지되었다(Lee *et al.*, 2016a, 2019, 2020; Cho *et al.*, 2020). 경기육괴 북부와 북중국판 동부에서는 2.0-1.7 Ga에 일어난 화산호 관련 화성작용이 보고되지 않았고 1.95-1.84 Ga 사이에 충돌 혹은 충돌 후 환경에서 형성된 화성작용이 나타난다(Lee *et al.*, 2014; Zhao *et al.*, 2016; Wang, X.P. *et al.*, 2020a, 2020b). 또한 경기육괴 내에서 섭입대 혹은 대륙 열곡 환경에서 만들어진 것으로 판단되는 신원생대 화성암과 퇴적암이 발견되었고 고생대 중기의 퇴적암, 섭입관련 화성작용과 강력한 변성작용도 보고되고 있다(Kim *et al.*, 2008, 2013; Oh *et al.*, 2009, 2017; Cho *et al.*, 2010; Cho, 2014; Park *et al.*, 2014; Imayama *et al.*, 2021). 옥천변성대에서도 신원생대에 대륙 열곡 환경에서 만들어진 화성암 발견되었으며 옥천변성대 내와 경상분지 내 퇴적암으로부터 많은 신원생대와 고생대의 쇄설성 저어콘이 보고되었다(Lee *et al.*, 1998, 2018; Kim *et al.*, 2006a, 2020). 이는 경기육괴와 옥천변성대를 포함한 한반도 남부가 원생대, 고생대 중기 그리고 페름-트라이아스기에 상당히 복잡한 지구조 운동을 받았음을 지지하며 한반도 지구조 진화가 새롭게 해석되어야 할 필요성을 강력히 제시하고 있다.

본 논문에서는 페름-트라이아스기 북동아시아 지구조 진화를 설명하기 위해 제시된 여러 모델 소개와 함께 앞에 언급된 최근 한반도에서 확인된 새로운 발견을 바탕으로 수행된 한중 대비 연구 결과를 종합 정리해서 제시하였다. 그리고 새로운 지질 자

료를 바탕으로 이제까지 제시된 여러 페름-트라이아스기 북동아시아 지구조 모델들을 평가하여 어떤 지구조 모델이 가장 적절한지를 제시하였다.

## 2. 한반도의 지질 개요

한반도의 기저는 북으로부터 4개의 주요 변성복합체인 관모, 낭림, 경기, 영남육괴로 구성되어 있다(그림 1b). 관모와 낭림육괴 사이에는 고원생대 충돌대인 마천령계가 위치하고 있으며 이는 북중국판 동부에 나타나는 산동-요동-길림 고원생대 충돌대의 연장선이다. 그리고 낭림육괴와 경기육괴 사이에는 임진강대가 분포하며 경기육괴와 영남육괴 사이에는 옥천대가 분포한다. 임진강대는 추가령 단층의 서측에만 발달하고 동측으로는 연장되지 않는다(그림 1b). 낭림육괴와 경기육괴 북부는 원생대 초기에 퇴적된 후 변성을 받은 변성퇴적암과 이들 퇴적암을 관입한 화성암으로 주로 구성되어 있으며 일부 지역에서 시생대 암석이 확인되었다(Lee and Cho, 2003; Zhao *et al.*, 2006; Cho *et al.*, 2008; Lee *et al.*, 2014, 2016a). 이와 달리 관모 육괴는 시생대 암석으로만 구성되어 있으며 이는 산동-요동-길림 충돌대 북쪽에 위치한 시생대 암석으로 구성된 중국의 용강지괴와 대비된다(그림 1b; Zhang *et al.*, 2016). 산동-요동-길림 충돌대를 따라서 1.95-1.90 Ma에 북중국판의 용강지괴와 한반도의 낭림육괴가 충돌하였고 산동-요동-길림 충돌대의 남부 경계부에서는 1.88-1.86 Ga에 충돌 후 환경에서 화성 및 변성작용이 일어났다(Wang *et al.*, 2020, 2021). 낭림육괴와 경기육괴 북부도 충돌 후 환경에서 1.89-1.83 Ga에 형성된 변성암과 화성암으로 주로 구성되어 있으며 일부는 1.93-1.90 Ga에 충돌에 의해 형성된 변성암으로 구성되어 있다(표 1; Zhao *et al.*, 2006, 2016; Lee *et al.*, 2014; Yenkhome *et al.*, 2014; Wang *et al.*, 2020). 이는 낭림육괴와 경기육괴 북부에서 일어난 고원생대 화성 및 변성작용이 산동-요동-길림 충돌대를 따라 일어난 충돌에 의해 일어났음을 지지한다. 이에 반해 경기육괴 남동부에 해당하는 원주지역에서는 1.94-1.91 Ma에 섭입환경에서 형성된 화성암과 변성암이 나타나며 이는 경기육괴 북부와 남부가 서로 다른 고원생대 지구조진화를 경험하였음을 지지한다(표 1; Lee *et al.*, 2016a). 그리고 소백산-무주-장수-곡성을

**Table 1.** The summary of the Paleoproterozoic tectonic evolution of the Nangrim, Gyeonggi and Yeongnam massifs in the Korean Peninsula, the Jiao-Liao-Ji belt in the eastern North China Craton and the Yangtze and Cathaysia Blocks in the South China Craton (modified after Oh *et al.*, 2019).

Time	Event	Location								
		Nangrim Massif	Northern Gyeonggi Massif	Southwestern Gyeonggi Massif	Southeastern Gyeonggi Massif	Northern Margin Yeongnam Massif	Southwestern Yeongnam Massif	Jiao-Liao-Ji Belt in the eastern NCC	North Yangtze Block in the SCC	Eastern Cathaysia Block in the SCC
2.2-2.1 Ga	Magmatism	NR	NR	NR	NR	NR	NR	Arc or post-collision	Syn-collision	NR
	Metamorphism	NR	NR	NR	NR	NR	NR	NR	Intermediate-P/T	NR
2.1-2.0 Ga	Magmatism	Granite emplacement	Granite emplacement	NR	NR	NR	NR	Arc or post-collision	NR	NR
	Metamorphism	NR	NR	NR	NR	NR	NR	NR	NR	NR
1.99-1.96 Ga	Magmatism	NR	NR	NR	Granite emplacement	Arc-related	NR	NR	Arc or Syn-collision	NR
	Metamorphism	NR	NR	NR	NR	NR	NR	NR	Low-P/T	NR
1.94-1.90 Ga	Magmatism	S-type granite	NR	NR	Arc-related	NR	NR	NR	Arc-related	Syn-collision
	Metamorphism	Intermediate-P/T(?)	Intermediate-P/T	NR	Migmatization	NR	Intermediate-P/T	Intermediate-P/T	Migmatization	NR
1.89-1.85 Ga	Magmatism	Post-collision	Post-collision	Arc-related	NR	Arc-related	Post-collision	Post-collision	Post-collision or	Post-collision
	Metamorphism	Low-P/T	Low-P/T	Low-P/T	NR	Low-P/T	Low-P/T	Low-P/T	Ultra High Temperature	Granulite facies
1.84-1.83 Ga	Magmatism	Post-collision	Within Plate	NR	NR	NR	NR	Post-collision (?)	NR	NR
	Metamorphism	Migmatization	NR	NR	NR	NR	NR	Low-P/T	NR	NR
1.80 Ga	Magmatism	NR	NR	NR	Post-collision	NR	NR	Unclear	NR	NR
	Metamorphism	NR	NR	NR	NR	NR	NR	Low-P/T	Ultra High Temperature	NR

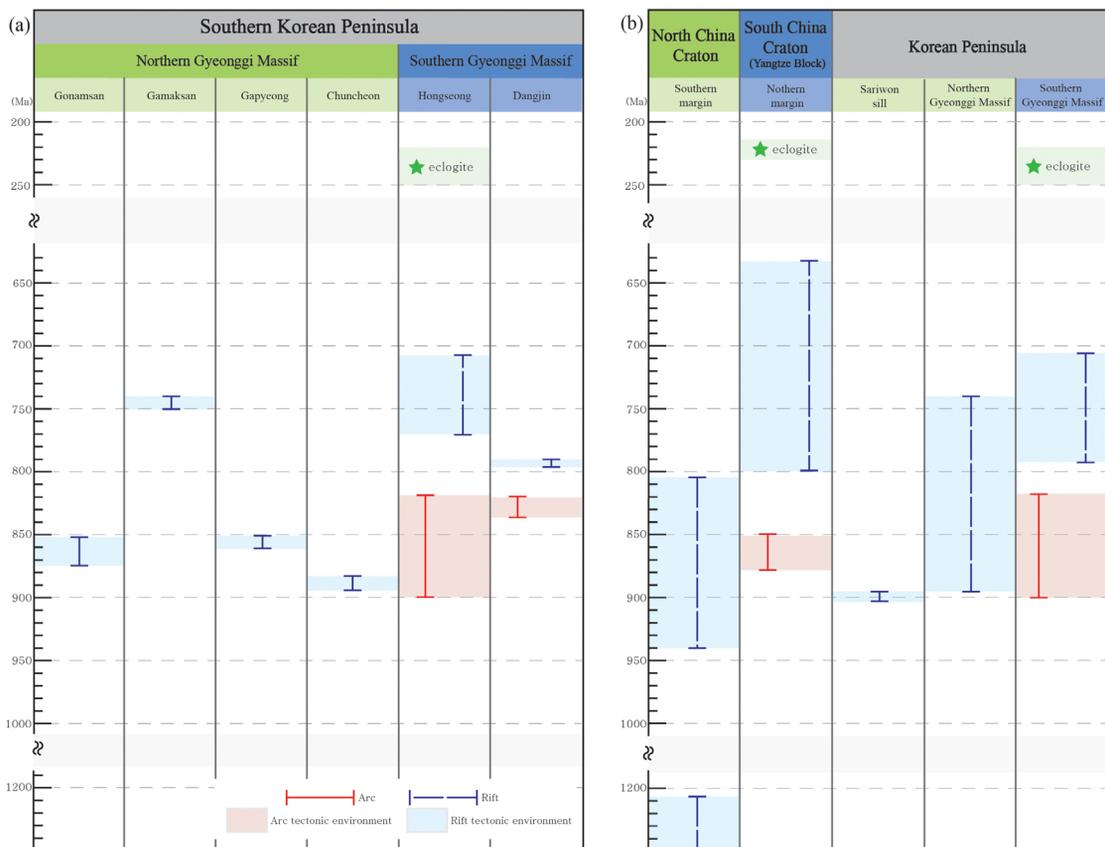
NR: not reported, the relevant references are mentioned in Lee *et al.* (2016a) and Oh *et al.* (2019).

연하는 영남육괴 북부 경계에서는 2.0-1.7 Ga에 형성된 섭입관련 화성암과 변성암이 나타나며 지리산 지역에서는 1.88-1.86 Ga에 충돌 후 환경에서 형성된 화성암과 변성암이 나타난다(표 1; Lee *et al.*, 2017, 2019, 2020; Cho *et al.*, 2020). 이는 영남육괴 동부와 서부가 1.88-1.86 Ga 이전에 충돌하여 하나가 되었으며 두 지역 충돌시 두 지역의 북부 경계에 존재하였던 섭입대가 서로 연결되어 1.7 Ga 까지 지속되었을 가능성을 지시한다(Lee *et al.*, 2019, 2020; Cho *et al.*, 2020).

남령육괴 남부에는 열곡 환경에서 형성된 중원생대-신원생대 퇴적암과 이를 관입한 신원생대 염기성

암맥으로 구성된 상원계가 분포한다(표 2; Peng *et al.*, 2011; Hu *et al.*, 2012; Lee, B.Y. *et al.*, 2020). 그리고 임진강대 주변 고남산지역과 경기육괴 북부 지역 내 가평지역과 춘천지역에서도 열곡환경에서 880-760 Ma에 형성된 신원생대 화성암과 퇴적암이 나타난다(표 2; Lee, B.Y. *et al.*, 2020). 이에 반해 경기육괴 남서부에 해당하는 당진-홍성 지역에서는 900-820 Ma에 섭입대 환경에서 형성된 신원생대 화성암과 790-700Ma에 열곡환경에서 형성된 신원생대 화성암이 나타난다(표 2; Oh *et al.*, 2009; Kim *et al.*, 2013; Lee, B.Y. *et al.*, 2020). 경기육괴 남쪽 경계부인 고군산군도에서는 화산호 환경에서 형성된 950-890

**Table 2.** Simplified chart that show ages and tectonic environments of Neoproterozoic igneous rocks in the North and South China Cratons in China and the Gyeonggi and southern Nangrim Massifs in the Korean Peninsula (modified after Lee, B.Y. *et al.*, 2020).



(a) The comparison between Neoproterozoic igneous rocks in the northern and southern Gyeonggi Massifs in the Korean Peninsula. (b) The comparison between the Neoproterozoic rocks in the southern and southeastern margins of the North China Craton and the northern margin of the South China Craton in China and the southern margin of the Nangrim Massif and the northern and southern Gyeonggi Massif in the Korean Peninsula.

Ma에 형성된 신원생대 암석이 보고되었다(Kee *et al.*, 2019; Kim, W.J. *et al.*, 2021).

옥천대는 북동쪽의 태백산 분지와 남서쪽의 옥천 변성대로 나뉜다. 옥천변성대는 주로 신원생대인 880-760 Ma에 열곡(rifting) 분지 형성시 형성된 쌍 모식 화산암 및 퇴적암과 이를 부정합으로 덮고 있는 고생대 퇴적암으로 구성되어있다(Lee *et al.*, 1998; Kim *et al.*, 2006a, 2017, 2020). 이에 반해 태백산 분지는 낭림육괴 내에 나타나는 평남 분지와 같이 고생대 초기에 퇴적된 조선누층군과 고생대 후기에 퇴적된 평안누층군으로 구성되어 있다(Choi, 2019a, 2019b). 즉 태백산 분지와 평남 분지에서는 오르도비스기 후기에서 석탄기 초기 사이에 형성된 퇴적암이 발견되지 않는다(Chough *et al.*, 2000). 실루리아기 전기 혹은 중기에 해당하는 회동리 층이 오르도비스기 층 위에 퇴적되었다는 보고가 있었으나 이 사실은 현재 논란 중에 있어 이 논문에서는 실루리아기 층에 대해 논하지 않는다. 최근 연구에 의해 평안분지와 태백산 분지 사이에 위치한 임진강대가 고생대 중기인 데본기에 후배호분지에서 퇴적된 퇴적암과 이를 관입한 화성암으로 이루어져있음이 확인되었다(Lee, B.Y. *et al.*, 2019). 데본기에 퇴적된 고생대 변성퇴적암이 임진강대뿐 아니라 경기육괴 서남부인 홍성, 태안 지역과 경기육괴 동부인 오대산 지역에도 존재할 가능성이 제시되었다(그림 3; Cho *et al.*, 2010; Cho, 2014; Kim *et al.*, 2017).

홍성지역과 군산 앞 섬에서는 오르도비스기 후기에 470-450 Ma에 섭입과 관련된 화성작용과 일어났으며 450-390Ma에 광역적인 중압형 변성작용이 일부 고압변성작용과 함께 일어났다(Kim *et al.*, 2011, 2015; Koh *et al.*, 2013; Oh *et al.*, 2014, 2017; Imayama *et al.*, 2021). 이는 이 시기에 홍성-군산을 연하는 지역을 따라 고생대 중기 섭입작용과 대륙충돌이 있었음을 시사한다(Kim *et al.*, 2011, 2015; Imayama *et al.*, 2021).

옥천변성대는 290-240 Ma경에 중압형의 변성작용을 받았으며 변성도는 남동쪽에서 북서쪽으로 혹은 운모대에서 석류석대를 거쳐 석류석-십자석대로 증가하며 옥천변성대의 최고 변성조건은 620°C, 9 kbar이다(Oh *et al.*, 2004; Kim *et al.*, 2005). 이에 비해 임진강대는 250 Ma에 중압형의 변성을 받았으며 변성도가 북쪽에서 남쪽으로 석류석대로 부터 남정석대

를 지나 십자석대로 증가하며 가장 남쪽에 위치한 미산층군에서의 상부각섬암상-백립암상에 해당하는 변성작용(648-550°C, 13-11 kbar)이 일어났다(Lee, B.Y. *et al.*, 2019). 홍성-양평-오대산을 연하는 지역에서 250-230 Ma시기에 한반도에서 가장 강한 변성작용이 일어났다. 홍성지역의 에클로자이트는 에클로자이트 상의 최고 변성작용 이후에 백립암상의 후퇴변성작용을 먼저 받은 후 최종적으로 각섬암상의 후퇴변성작용을 받았으며 양평에서는 백립암상의 변성작용이 그리고 오대산 지역에서는 초고온 변성작용이 일어났다(Oh *et al.*, 2005, Kim *et al.*, 2006b; Oh *et al.*, 2006a, 2015). Kwon *et al.* (2020)은 홍성 에클로자이트 내에 나타나는 옴파사이트(omphacite)가 에클로자이트 변성상에 해당하는 변성작용에 의해서가 아니라 후기 유입된 유체와 기존 광물과의 반응에 의해 형성되었다고 주장하였다. 하지만 이 연구는 각섬암상의 후퇴변성작용을 받은 암석을 대상으로 연구를 수행하였기 때문에 각섬암상의 후퇴 변성작용 이전에 일어난 에클로자이트 변성작용을 평가할 수 없다. 임진강대와 옥천변성대에서 인지되는 페름기-트라이아스기 변성작용의 원인은 오랫동안 밝혀지지 않았으나 최근에 이들 변성작용도 한반도 내에서 일어난 북중국판과 남중국판의 대륙 충돌에 의해 일어난 것으로 판단되고 있다(Oh, 2006; Lee, B.Y. *et al.*, 2019). 최근 연구에서는 태백산 분지 북동쪽의 고생대 후기 퇴적암도 페름-트라이아스기에 중압형의 변성작용을 받았음이 보고되었다(Kim and Ree, 2010). 이 시기에 함경도지역 두만강대에서도 뷰레야-지아무시-칸가판(Bureya-Jiamusi-Khanka block)과 북중국판 사이에 일어난 충돌과 관련되었을 것으로 생각되는 화성작용이 일어났다(Oh, 2006; Oh and Kusky, 2007; Ma *et al.*, 2017).

홍성-양평-오대산을 연하는 지역 북쪽에 위치한 경기육괴 북부, 임진강대 그리고 낭림육괴 남쪽 경계부에 트라이아스기(ca. 230 Ma) 충돌 후 화성암이 광역적으로 관입하였음이 확인되었다(그림 4; Oh *et al.*, 2006b; Choi *et al.*, 2009; Williams *et al.*, 2009; Seo *et al.*, 2010; Kim, T.S. *et al.*, 2011; Yi *et al.*, 2016). 그리고 경기육괴 북부 여러 곳에 나타나는 트라이아스기 광상(예, 양양철광, 홍천 포스코라이트-카보나타이트 광상)들이 충돌 후 환경에서 형성되었음과 경기육괴 북동부에 나타나는 울전 분지가 충돌 후 환

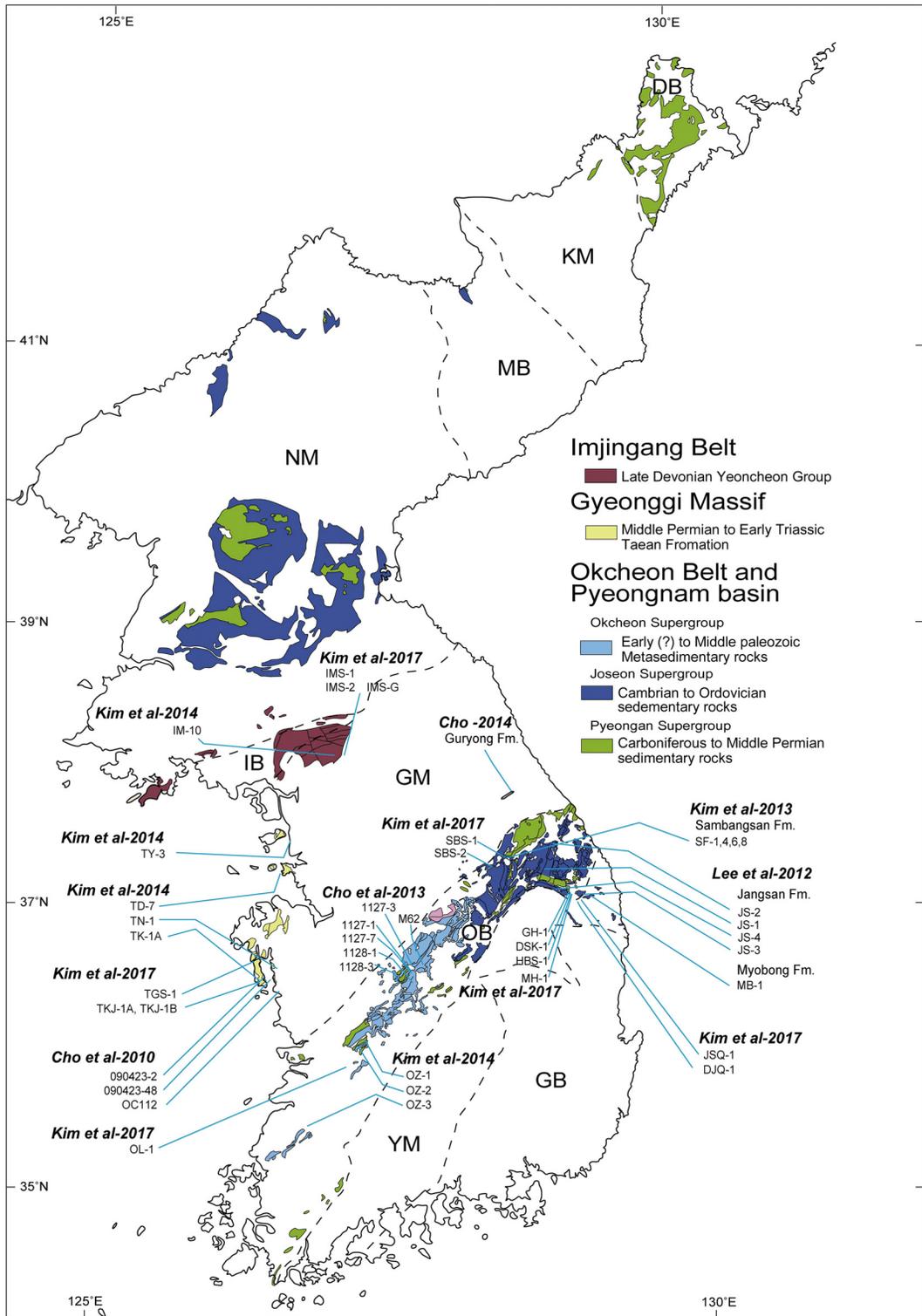


Fig. 3. Detailed geologic map of the South Korean Peninsula, showing distribution of the Paleozoic metasedimentary rocks (modified after Kim et al., 2017).

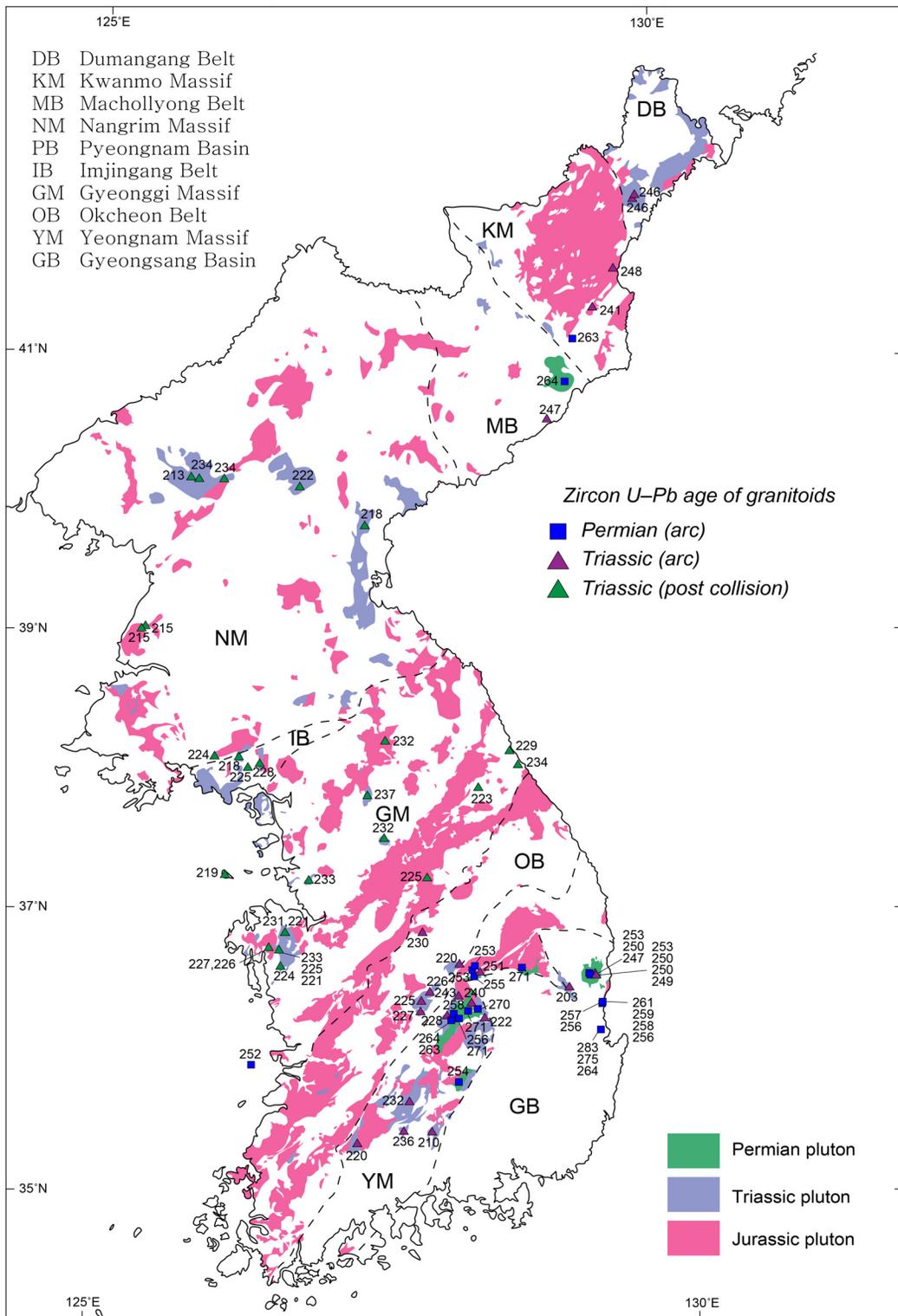


Fig. 4. (a) Geologic map of the Korean Peninsula showing distribution of the Permian and Mesozoic granitoids (modified after Kim *et al.*, 2021).

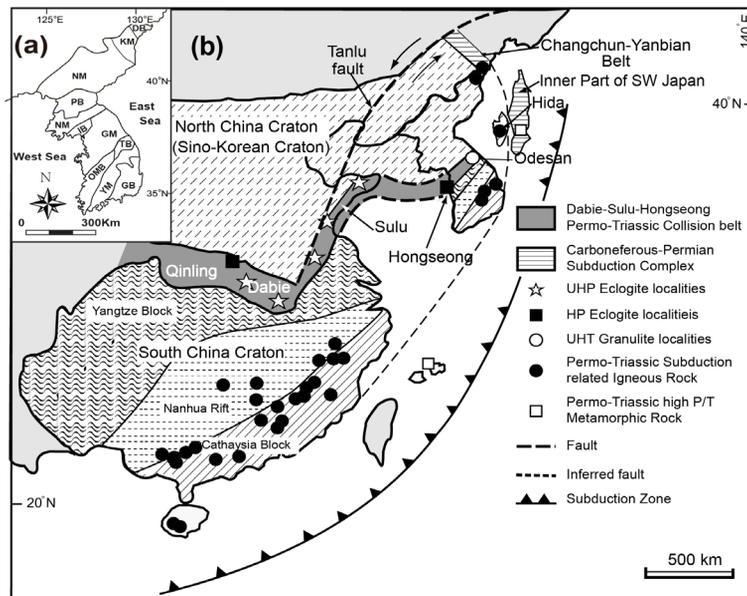
경에서 형성된 후 그 안에 트라이아스기-쥐라기 퇴적암이 퇴적되었음이 보고되었다(Seo *et al.*, 2015, 2016; Choi *et al.*, 2020).

한편 페름-트라이아스기에 한반도 남부에서는 섭입관련 화성작용이 일어났다(Cheong *et al.*, 2019; Kim *et al.*, 2021). 이 시기에 남중국판 남부 경계에서도 페름-트라이아스기(278-215 Ma)에 섭입관련 화성작용이 일어났다(Li and Li, 2007). 이는 남중국판의 남쪽 경계와 영남육괴 남쪽에 페름-트라이아스기부터 섭입대가 생성되었음을 지시한다(그림 5). 섭입대의 형성시기가 남중국판과 북중국판의 대륙 충돌 시기와 유사한 것은 대륙 충돌에 의해 남중국판이 더 이상 북쪽으로 이동하지 못하게되자 남중국판과 함께 북쪽으로 이동하던 해양판이 남중국판의 남쪽 경계부를 따라 섭입이 시작된 것으로 추정된다. 이 섭입작용은 쥐라기까지 계속되었다. Cheong *et al.* (2019)는 옥천대와 영남육괴내에 나타나는 트라이아스기 화성암 중 쇼쇼니틱한 성분을 보여주는 일부 트라이아스기 화성암들이 대륙충돌에 의해 형성된 것으로 해석되기도 하였으나 최근 Lee *et al.* (2021) 연구에 의해 이들이 섭입시 섭입판의 후퇴에 따른

맨틀 상승에 의해 형성된 것으로 확인되었다.

### 3. 중국의 지질개요

중국은 여러개의 판이 페름-트라이아스기에 충돌하여 형성되었고 그 중 북중국판과 남중국판이 한반도와 대비되고 있다. 북중국판의 기반암은 시생대와 고원생대 변성암 및 화성암으로 구성되어있다(그림 6). 북중국판에서 나타나는 가장 오래된 시생대 암석의 연령은 3.7 Ga이며 대부분 시생대 암석은 2.7-2.5 Ga에 형성되었다(Zhao and Zhai, 2013). 북중국판은 콜롬비아 초대륙 형성시 여러 소규모 판이 1.95-1.90 Ga 사이에 충돌하여 형성되었다(Zhai and Santosh, 2011). 이때 형성되었을 것으로 생각되는 충돌대는 콘달라이트 벨트(Khondalite Belt), 북중국 중앙조산대(Trans North China orogen)와 산둥-요동-길림 충돌대이다(그림 6). 이 충돌대를 따라 1.89-1.83 Ga에 충돌 후 화성 및 변성작용이 일어났다(Zhai and Santosh, 2011). 1.80 Ga 이후 부터는 콜롬비아 초대륙 분열이 일어났고 이로 인해 북중국판 내에 열곡대가 형성되었으며 열곡작용과 연관된 회장암



**Fig. 5.** The distribution map of the Permo-Triassic subduction-related igneous rocks in the Yeongnam Massif, Hida belt, Dumangang belt (southeastern part of the Changchun-Yanbian belt) and the South China block and of the Permo-Triassic high-pressure rocks in Japan and Yaeyama island indicating the initiation of subduction along the margin of the South China block from Permian (modified after Oh, 2012). The same abbreviations in the Fig. 1 are used.

을 포함한 화성암이 형성되었고. 이 열곡작용은 고원생대 말인 1600 Ma 경까지 계속되었다(Peng, 2015). 그리고 중원생대인 1400-1200 Ma와 신원생대인 1000-800 Ma에도 열곡작용이 일어났다(그림 7; Peng, 2015). 중원생대 열곡 관련 화성과 퇴적작용은 주로 북중국판 북부경계에서 일어났음에 비해 신원생대인 1000-800 Ma는 열곡관련 화성 및 퇴적작용이 주로 북중국판 남부와 동남부 경계부에서 일어났으며 그 결과 Xu-Huai-Lv-Da 열곡대가 형성되었다(그림 8; 표 2b). 이는 이 시기에 북중국판이 여러 다른 판과 연결되어 있다가 중원생대에서 신원생대 사이에 분리되어 나왔을 가능성을 지시한다.

남중국판은 북쪽은 양쯔판과 남쪽은 커테시아판으로 나뉜다(그림 8). 양쯔판 내에 나타나는 가장 오래된 암석은 3.2 Ga 경에 형성되었으며 2.9 Ga에 화성작용과 충돌 후 환경에서 형성된 2.65 Ga 경의 화성작용도 인지된다(Guo *et al.*, 2015; Wang, Z. *et al.*, 2013). 그리고 2.1-1.93 Ga 경에 섭입환경이나 충돌환경에서 형성된 화성 및 변성작용이 보고되고 있

으며 1.85 Ga 경에 충돌 후 환경에서 일어난 화성 및 변성작용도 보고되고 있다(Wu *et al.*, 2007; Wang *et al.*, 2015; Li *et al.*, 2016). 그리고 1.78 Ga 경부터 대륙 분열이 일어났다(Li *et al.*, 2014). 커테시아판 내에는 1.93 Ga에 충돌시 형성된 화성암과 1.88-1.85 Ga 경에 충돌 후 환경에서 생성된 A-type 화성암과 차노카이트(Charnockite)가 변성작용과 함께 인지된다(Zhao *et al.*, 2014). 커테시아판 내에 1.93 Ga 보다 오래된 암석이 존재하였을 것으로 유추되지만 노두가 발견되지는 않았다.

양쯔판의 주변경계부를 따라 섭입작용이 최소한 1150-850 Ma에 일어났을 것으로 생각되며 이는 양쯔판이 로디니아 초대륙의 일부가 되기 이전에는 독립된 판으로 존재하였음을 지시한다(표 2b; Li *et al.*, 2008; Oh *et al.*, 2009; Qiu *et al.*, 2011). 일부 지역에서는 820-780 Ma까지 섭입이 지속되었을 가능성이 있다(Li *et al.*, 2008; Lin *et al.*, 2016; Kim, W.J. *et al.*, 2021). 신원생대에 로디니아 초대륙이 형성되면서 양쯔판과 커테시아판이 충돌하였고 이로 인해 장난

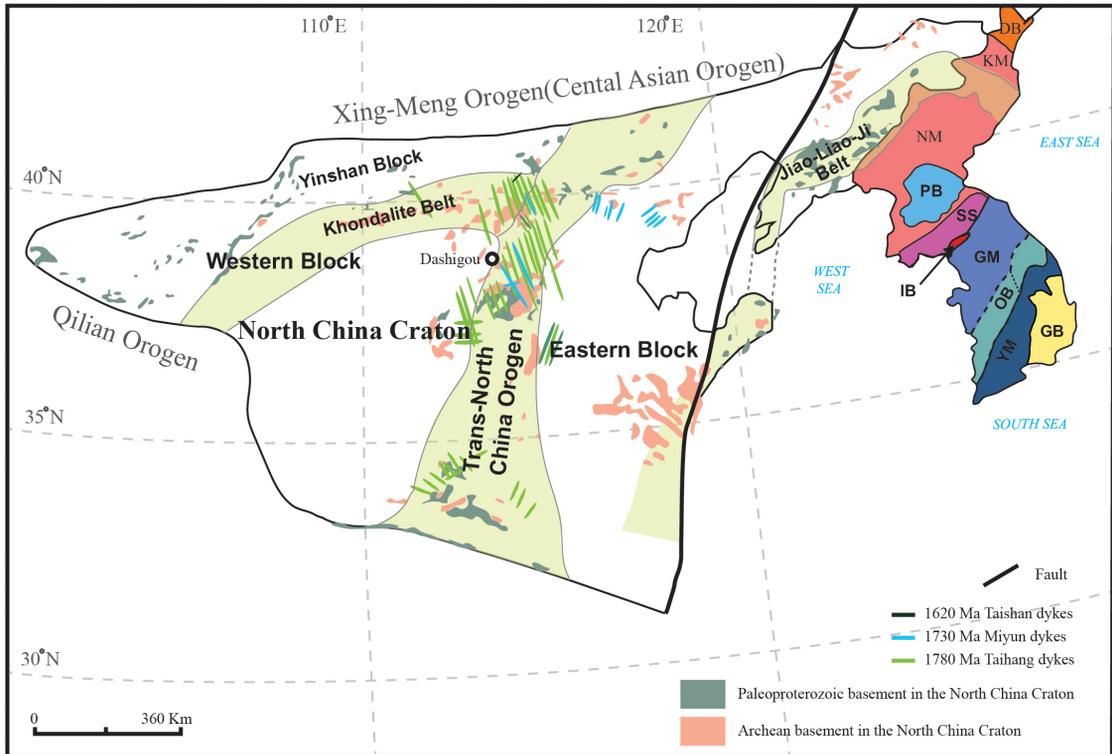


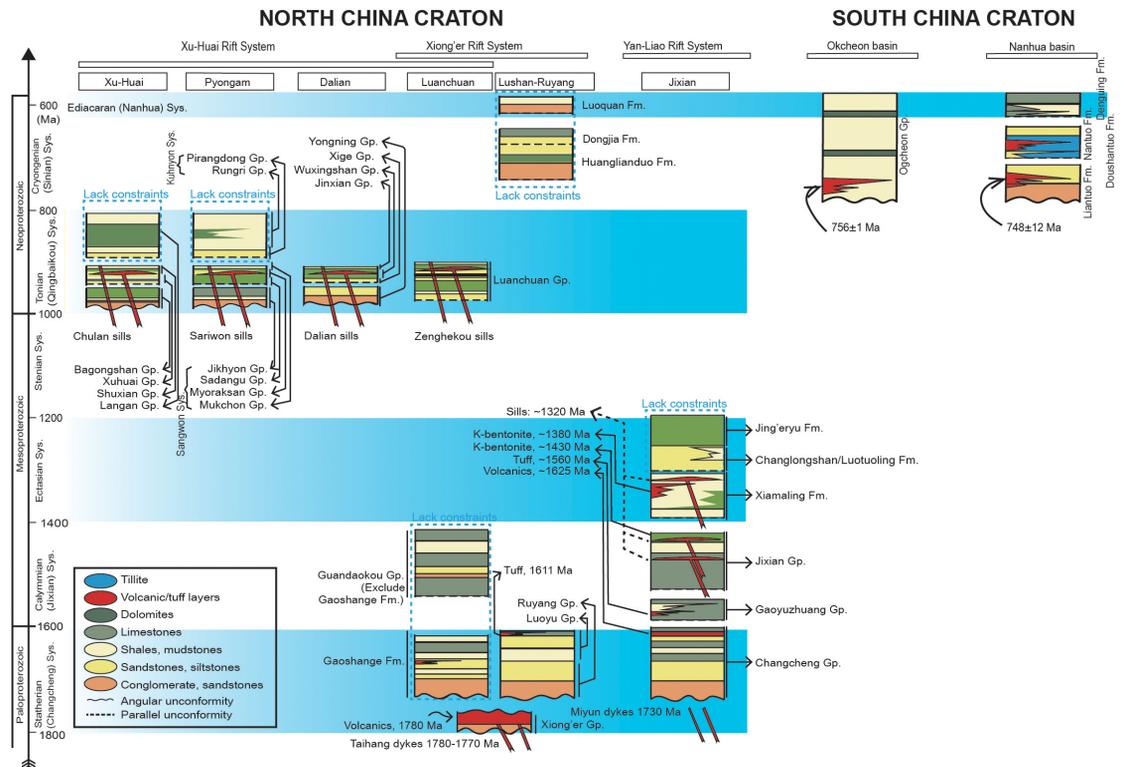
Fig. 6. Sketched map showing the distribution of Proterozoic mafic dyke swarms and related associations in the North China Craton (modified after Peng, 2015). The same abbreviations in the Fig. 1 are used.

조산대가 형성되었다(그림 9; Charvet, 2013). 그 이후 로디니아 초대륙이 분열되면서 양쯔판과 커테시아판으로 이루어진 남중국판이 로디니아 초대륙으로부터 분리되어 나왔으며 분리 초기에 남중국판의 주변부와 남중국판 내부에 위치한 양쯔판과 커테시아판의 충돌부를 따라 열곡작용이 화성작용과 함께 일어났다(그림 10; Li and Powell, 2001). 그 결과 양쯔판과 커테시아판 사이에 800-690 Ma에 난후아 열곡대가 형성되었다(그림 8, 9; 표 2b; Wang and Li, 2003). 양쯔판의 북쪽 경계부에서도 830-650 Ma에 열곡작용과 그에 관련된 화성작용이 일어났다(Zhao *et al.*, 2018).

북중국판의 대부분 지역에서 고생대 초기와 후기 퇴적암이 퇴적되었고 그 사이인 오르도비스기 후기에서 석탄기 중기까지의 퇴적암이 퇴적되지 않는 대결층이 나타나지만 북중국판 주변부에는 대결층 시기에도 퇴적암이 퇴적된다(Li *et al.*, 2010; Dong *et al.*, 2011). 그리고 북중국판의 주변부에서는 고생대

에서 중생대에 걸쳐 섭입 혹은 대륙 충돌에 관련된 화성작용과 변성작용이 나타난다(Dong *et al.*, 2011). 남중국판 내에서는 동부 지역에 데본기의 결층이 많이 나타나며 남동부의 커테시아판 동부 지역에서는 오르도비스기 후기-실루리아기 대결층도 보고되고 있고 이는 우니-윤카이 조산대를 따라 일어난 고생대 중기의 대륙충돌에 기인하는 것으로 해석되고 있다(Rong *et al.*, 2010; Wang *et al.*, 2013; Guo *et al.*, 2019; Xu *et al.*, 2019). 우니-윤카이 조산대는 커테시아판과 장난조산대에 걸쳐 북동 방향으로 분포하며 그 원인이 논쟁 중에 있다(그림 8). 남중국판 주변에서 가해진 압축력에 의해 판내부의 약선대가 재형성되어 충돌대가 형성되었다는 의견과 우니-윤카이 조산대를 따라 섭입대가 형성되어 있다가 오르도비스기에 충돌을 했다는 의견이 제시되고 있다(Wang *et al.*, 2007; Liu *et al.*, 2018).

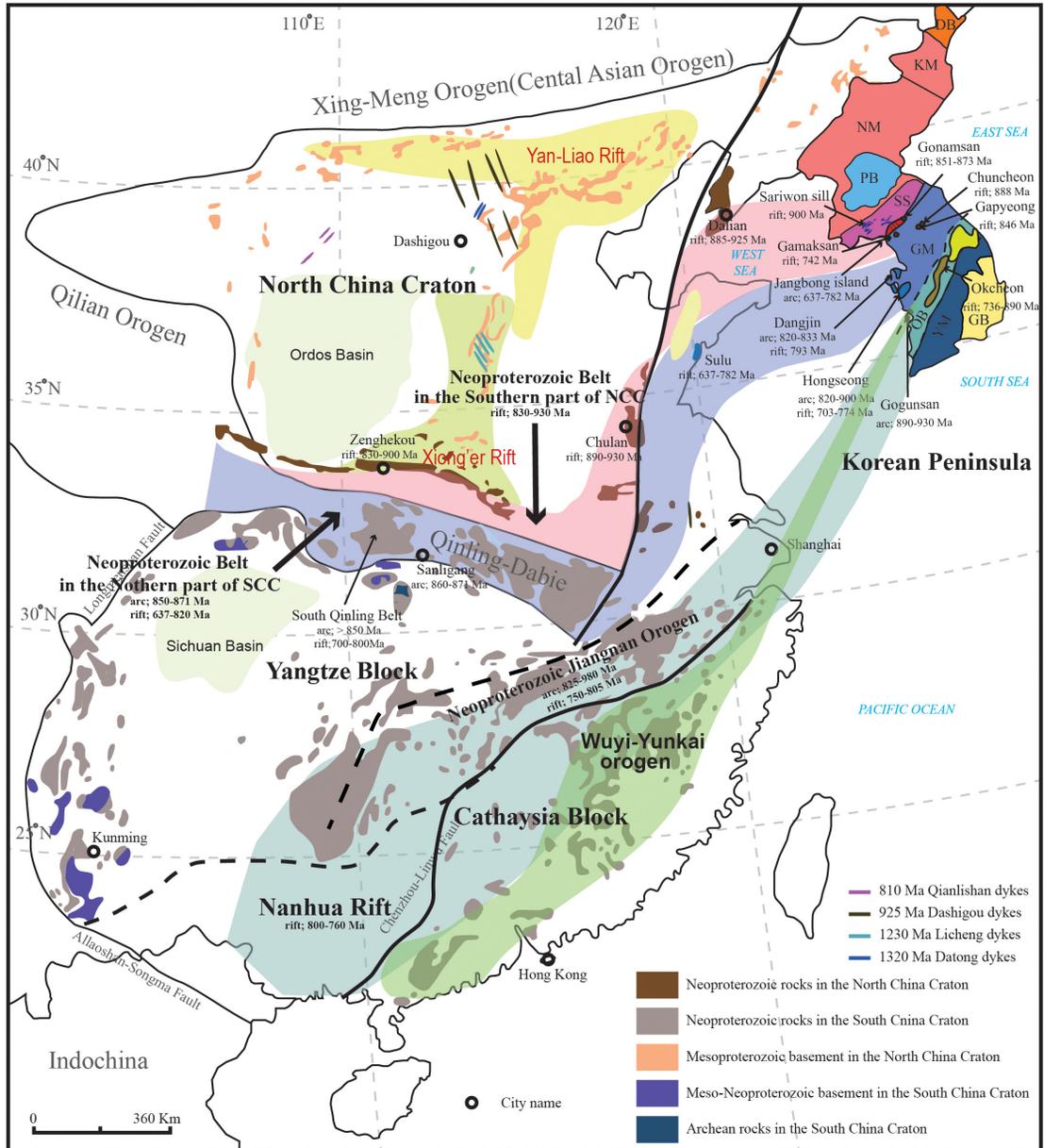
페름-트라이아스기에 일어난 남중국판과 북중국판의 충돌에 의해 북중국판 하부로 섭입된 남중국판



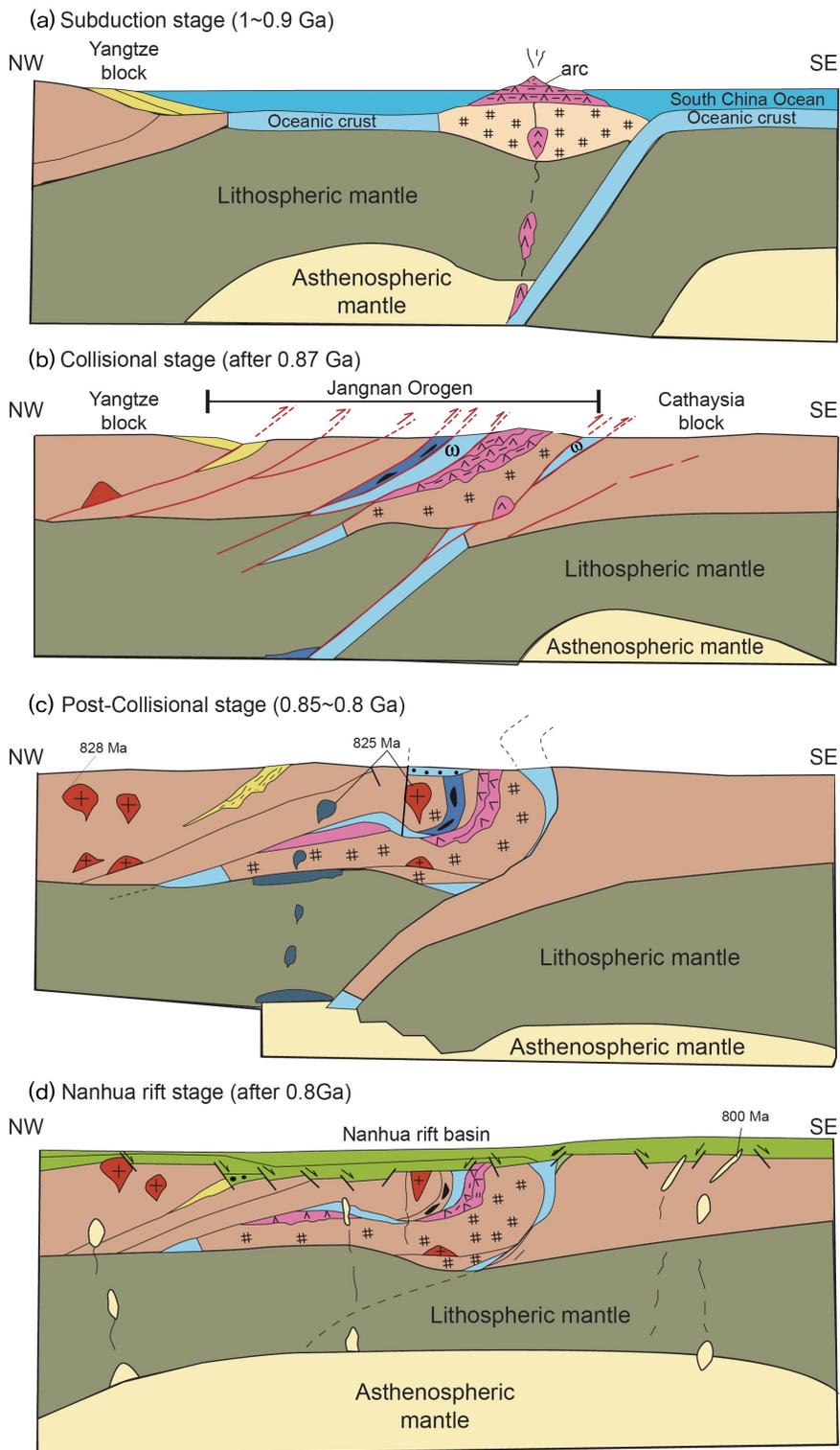
**Fig. 7.** Representative strata in the Xu-Huai, Pyongnam, Dalian, Luanchuan, Lushan-Ruyang, and Jixian basins of the Xu-Huai, Xiong'er, and Yan-Liao rift systems in the North China Craton, Nanhua basin in the South China Craton and Okcheon basin in the southern Korean Peninsula (modified after Peng *et al.* (2011) and Peng (2015)).

의 북부 일부는 초고압 및 고압 변성작용을 받았으며 이 때 남중국판 북부 경계의 신원생대 화성암들이 에클로자이트로 변성되었고 두 판 사이의 친링-다비-수루 충돌대가 형성되었으며 충돌대 일부지역에서는 충돌 후 화성암이 형성되었다(Wang *et al.*, 1989; Zhai and Cong, 1996; Oh *et al.*, 2018). 그리

고 충돌 이전에 북중국판의 남부 경계와 남중국판의 북부 경계에는 데본기에서 석탄기 사이의 퇴적암이 퇴적되었다(Dong *et al.*, 2011). 북중국판의 서부 경계와 북부 경계에서도 페름-트라이아스기에 대륙충돌이 일어난 것에 반해 한반도 북부 동해안에 해당하는 북중국판의 동쪽 경계 일부에서는 대륙 충돌이



**Fig. 8.** The distribution of Neoproterozoic rocks in the Korean Peninsula and China (modified after Lee, B.Y. *et al.*, 2020) and the correlation between Neoproterozoic rocks in the Korean Peninsula and those in China. The same abbreviations in the Fig.1 are used.



**Fig. 9.** Tectonic evolutionary model of the Jiangnan orogenic belt in the South China Craton during the Neoproterozoic (modified after Charvet, 2013).

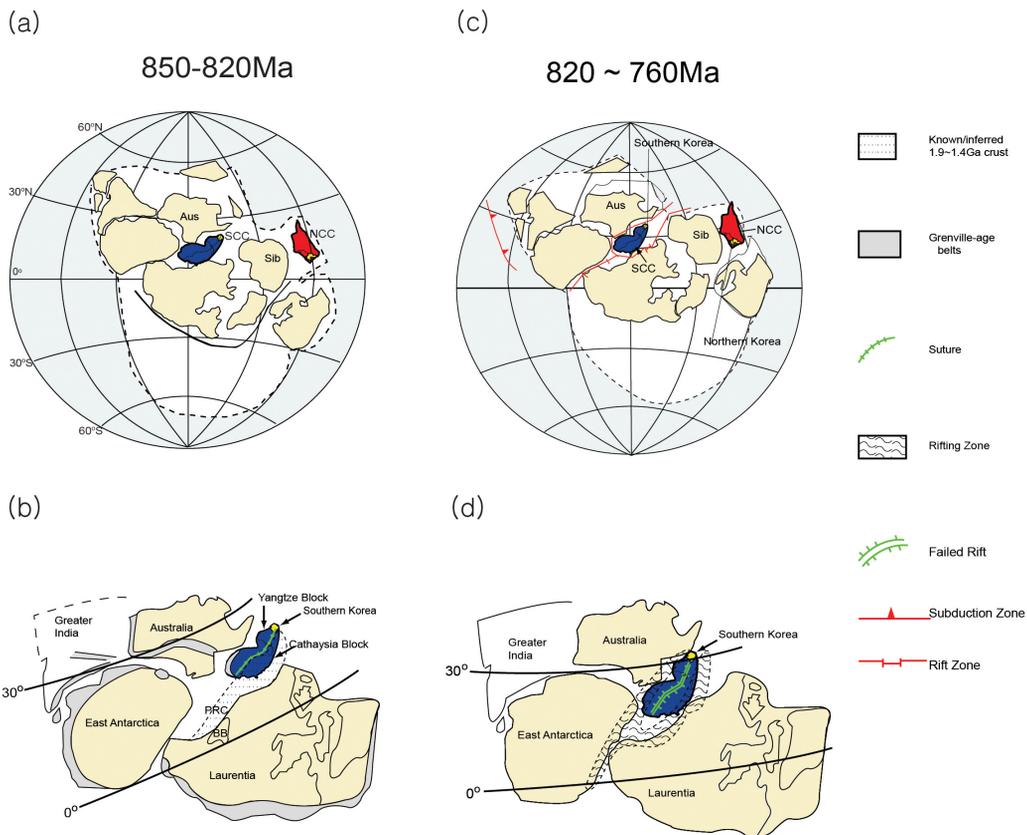
일어나지 않아 대륙 충돌 이전에 존재했던 섭입대가 페름-트라이아스기에도 지속적으로 유지되었을 것으로 예상된다(Oh, 2006; Oh and Kusky, 2007; Zhang *et al.*, 2009; Wang *et al.*, 2016; Ma *et al.*, 2017).

남중국판과 북중국판의 대륙 충돌이 일어나던 시기에 남중국판 남부 경계지역에서는 비활성경계(passive margin) 환경에서 화산작용과 섭입작용을 수반하는 활성경계(active margin) 환경으로의 전환이 일어났다(Li and Li, 2007). 앞에 언급되었던 북중국판 동부 경계에 유지되던 섭입대와 페름기 이후 남중국판 남부 경계에 시작된 섭입대가 북중국판과 남중국판의 충돌 이후 시간이 지나면서 서로 연결되어 동아시아 대륙 밑으로 고태평양판이 섭입되는 긴 섭입대가 형성되었을 것으로 예상되며 이 섭입작용은 쥐라기를 지나 백악기까지 계속되었다(Oh, 2006; Oh and

Kusky, 2007).

#### 4. 한반도와 동북아시아 페름-트라이아스기 지구조 모델

1980년대 말까지 한반도는 북중국판의 일부로 생각되어왔고 한반도와 북중국판을 연결하는 판을 한중판(Sino-Korean Craton)이라고 불렀다(Lee, 1987; Zhai *et al.*, 2007). 이러한 지구조 모델은 태백산 분지에 나타나는 오르도비스기 후기에서 중기 석탄기에 걸쳐 나타나는 대결층과 고생대 초기 화석이 북중국판에 나타나는 고생대 대결층과 고생대 초기 화석과 잘 대비되는 것을 근거로 하고 있다(Lee, 1987; Zhai *et al.*, 2007). 하지만 1980년대 말 북중국판과 남중국판사이에 위치한 다비-수루 벨트에서 페름-



**Fig. 10.** (a). Configuration of the Neoproterozoic of Rodinia supercontinent, (b) Relative positions of East Gondwana, Yangtze, Cathaysia, and Laurentia based on paleomagnetic data, (c) Breakup of Rodinia and (d) Rifting zone between East Gondwana, South China, and Laurentia (modified after Li and Powell (2001) and Zhai *et al.* (2003)). Abbreviations: BB = Belt Basin; NCB = North China block; PRC = Priest River Complex; SCB = South China block; Sib = Siberian block.

트라이아스기 에클로자이트가 발견되면서 북중국판과 남중국판이 페름-트라이아스기에 충돌하여 하나가 되었음이 밝혀졌고 그 이후 중국의 다비-수루 충돌대가 한반도로 연결될 것인가에 대한 의문이 제기되면서 여러 다른 지구조 모델들이 제시되었다.

가장 대표적인 지구조 모델은 Yin and Nie (1993)에 의해 제시된 지구조 모델이다(그림 2a). 이 지구조 모델에서는 남중국판의 동부 지역이 서부 지역에 비해 튀어나와 있었고 이로 인해 북중국판과 남중국판의 충돌이 동쪽에서 먼저 일어났고 충돌 후 남중국판이 북중국판 밑으로 밀려들어가면서 남중국판의 왼쪽 경계에 탄루 좌수향 단층이 형성되었다고 주장하고 있다. 그리고 탄루 단층 동쪽에 위치한 수루 충돌대는 단층 서측에 있던 다비 충돌대와 분리되어 탄루단층을 따라 북쪽으로 이동하였다. Yin and Nie (1993)는 수루 충돌대가 한반도의 임진강대로 연결되며 호남전단대는 남중국판이 북중국판 내부로 밀려들어가면서 남중국판 우측에 형성된 우수향 단층으로 탄루 좌수향 단층에 대비된다고 제안하였다. 그리고 영남육괴는 낭림육괴 동쪽에 위치하고 있었으며 호남전단대에 의해 북쪽에서 현재 위치로 이동되어왔다고 주장하였다. Ree *et al.* (1996)은 임진강대에 나타나는 고압 각섬암상 변성작용과 250 Ma의 변형작용을 이 모델을 지지하는 중요한 증거로 제시하였다. 이 지구조 모델에서는 낭림육괴와 영남육괴는 북중국판에 그리고 경기육괴는 남중국판에 대비하였다.

이 모델은 Chough *et al.* (2000)에 의해 수정 제안되었다. 이 지구조 모델에서는 호남전단대 대신 남한구조선(South Korea Tectonic Line; SKTL)을 제시하였다. Cluzel (1992)은 호남전단대가 태백산 분지의 동쪽에 위치한 태백층군과 서쪽에 위치한 영월층군 사이를 지나가는 것으로 판단하였고 두 층군은 각각 북중국판과 남중국판에 대비된다고 설명하였으며 앞에 설명한 Yin and Nie (1993)의 모델은 이 의견을 바탕으로 제안되었다. 이에 비해 Chough *et al.* (2000)의 모델에서는 남한구조선이 태백산 분지의 북서쪽 경계부로 연결되며 태백산 분지 전체를 영남육괴의 일부로 제시하고 있다. 이 모델에서는 우수향 단층에 의해 이동해온 태백산 분지가 옥천변성대와 충돌하였다고 제안하고 있다. Choi (2011)가 주장한 태백산 분지에 나타나는 삼엽충이 북중국판

에 나타나는 삼엽충과 동일하다는 사실이 이 지구조 모델을 지지하는 주요 증거이다.

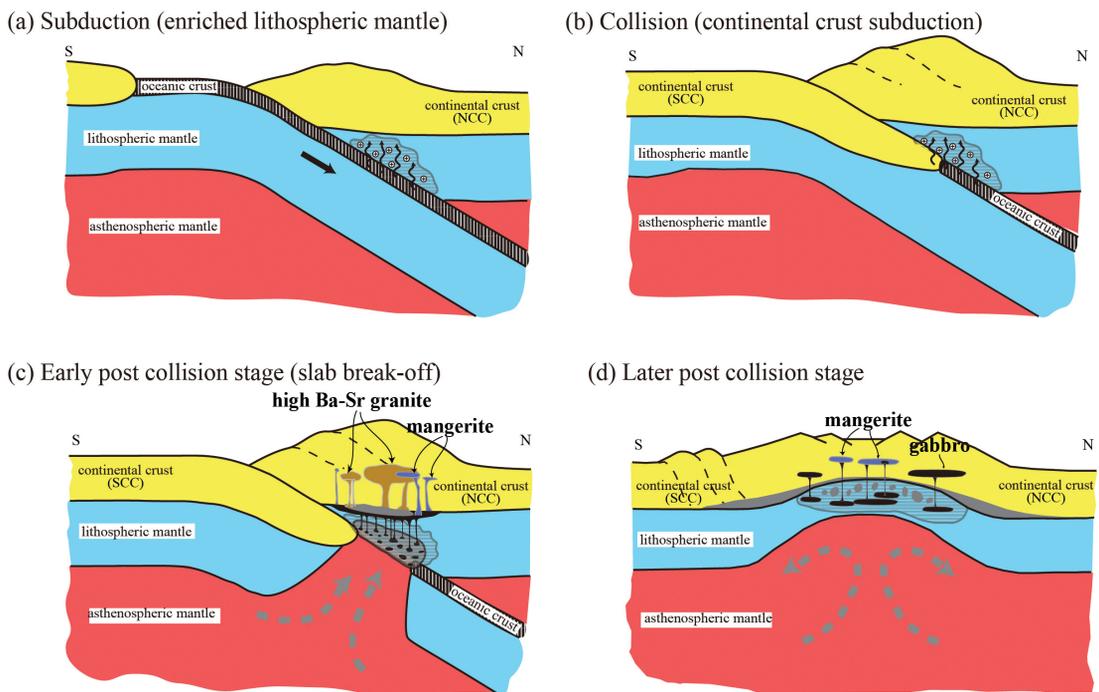
이에 비해 Zhang (1997)은 북중국판의 남부경계에 나타나는 퇴적암 정보를 바탕으로 남중국판과 북중국판이 동쪽에서 먼저 충돌한 후 남중국판이 주로 시계방향으로 회전하면서 충돌이 서쪽으로 진행되었다는 지구조 모델을 제시하였다(그림 2b). 이 모델에서는 다비-수루 충돌대가 한반도의 임진강대로 연결된 후 함경북도지역의 두만강대(Changchun-Yanji belt의 한반도로 연장부)로 연결된다고 주장하였다. 그 이유는 두만강대 지역에서 페름기말과 트라이아스기 초기에 해당하는 251-215 Ma 사이에 충돌 혹은 충돌 후 환경에서 관입한 화성암이 나타나기 때문이다(Ma *et al.*, 2017).

Oh *et al.* (2003, 2005)에 의해 충돌의 직접적이 증거인 페름-트라이아스기 에클로자이트가 임진강대가 아닌 홍성지역에서 발견되면서 중국의 다비-수루 충돌대가 임진강대가 아니라 홍성지역으로 연결된 가능성이 제시되었다. 그 후 Oh *et al.* (2006a)에 의해 오대산 지역에서 트라이아스기 충돌 후 화성암인 맨거라이트가 확인되었고 그 뒤를 이어 양평지역에서도 트라이아스기 충돌 후 화성암이 확인되었다(Williams *et al.*, 2009; Yi *et al.*, 2016). 이와 함께 홍성-양평-오대산을 잇는 선 이북의 경기육괴 북부와 임진강대 그리고 낭림육괴 남부 경계에 해당하는 해주에서 원주를 잇는 지역에서도 트라이아스기 충돌 후 화성암이 보고되었다(그림 4; Peng *et al.*, 2008; Williams *et al.*, 2009; Kim, T.S. *et al.*, 2011; Hwang *et al.*, 2017). 이를 바탕으로 중국의 친링-다비-수루 대륙충돌대가 임진강대가 아니라 홍성-양평-오대산 충돌대로 연결된다는 가설이 Oh (2006)과 Oh and Kusky (2007)에 의해 제시되었다. Oh (2006)과 Oh and Kusky (2007)는 충돌 후 화성암이 다음과 같은 과정을 통해 형성되었다고 설명되었다. 북중국판과 남중국판 사이에 존재하던 해양판이 북중국판 밑으로 모두 섭입하여 없어지면서 두 판이 충돌하게 되고 충돌 시 남중국판 앞에 붙어있었던 이미 섭입된 해양판이 남중국판을 하부로 끌어당겨 남중국판이 북중국판 밑으로 섭입하게 되었다(그림 11a, 11b). 충돌 후 남중국판이 계속 섭입하다가 남중국판의 부력이 증가하여 해양판이 남중국판을 끌어당기는 힘과 같아지는 깊이에서 해양판과 대륙판인 남중국판

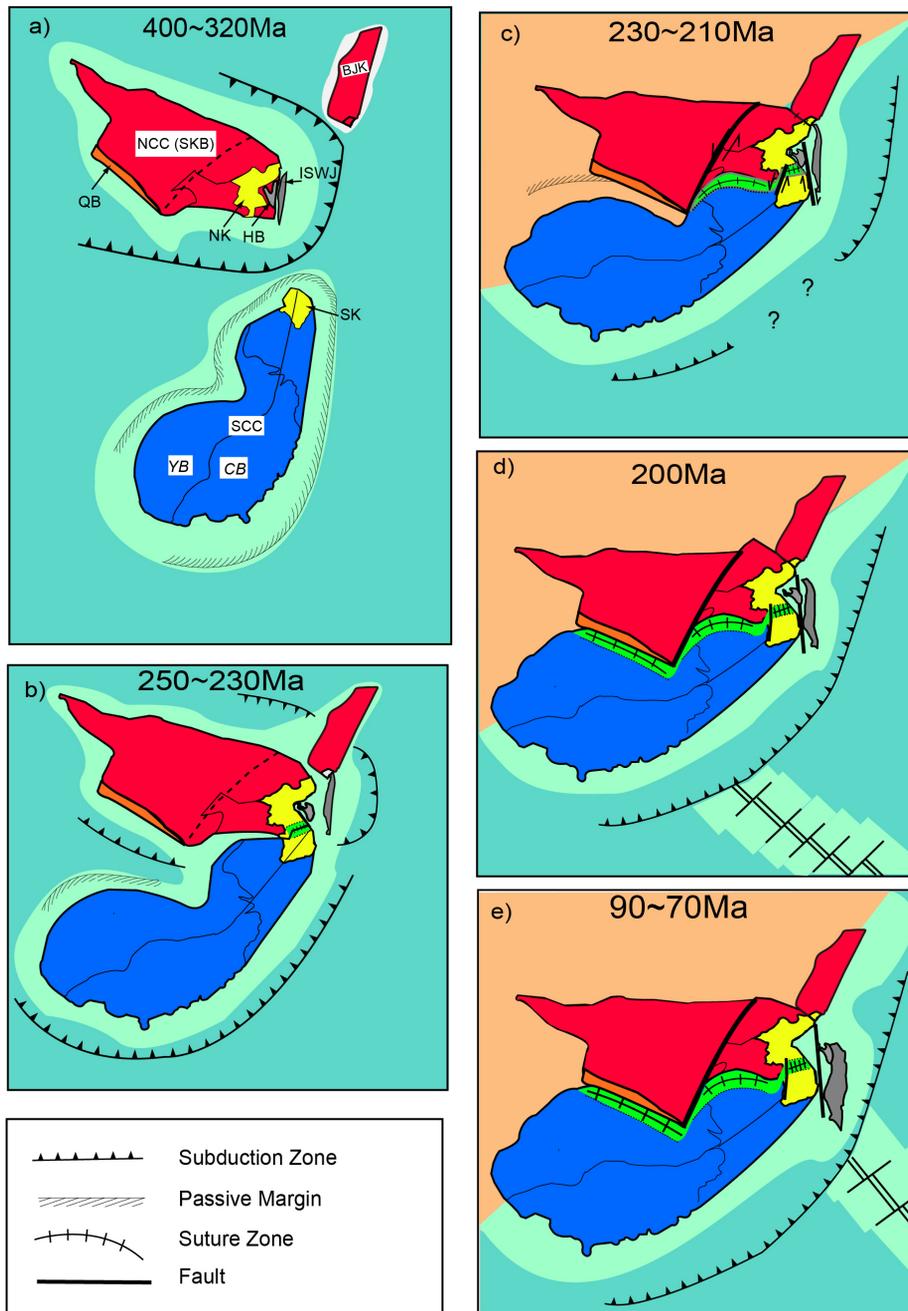
이 분리(slab break-off)가 시작되었다. 이러한 분리 이후 남중국판은 지표로 이동하고 해양판은 더 깊은 곳으로 침강하면서 두 판 사이의 공간이 생겨 확장되었고 그 공간을 따라 연약권 맨틀이 상승하면서 북중국판의 암권 맨틀과 하부지각에 높은 열을 제공하였다(그림 11c). 이러한 높은 열에 의해 충돌 이전에 섭입 환경에서 고대작용을 받은 북중국판 하부의 암권맨틀이 녹아 섭장암과 반력암을 형성한 마그마가 생성되었다(Kim, T.S. *et al.*, 2011; Oh and Lee, 2018). 그리고 이와 함께 이미 변성작용을 받아 물의 양이 감소된 중성질 내지 고철질의 북중국판 하부지각이 높은 온도에서 용융되어 사방휘석이 정장석과 함께 나타나는 산성암질 화성암인 맨거라이트를 형성한 마그마도 생성되었다(Kim, T.S. *et al.*, 2011). 최종적으로 충돌 후 인장력이 매우 강해지면서 연약권 맨틀이 상승하여 연약권 맨틀 자체도 용융되어

판 내부 화학특성을 보여주는 반력암을 형성하였다(그림 11d). 그 결과 230 Ma 경에 북중국판의 남부 경계지역에 해당하는 홍성-양평-오대산으로부터 해주-원산을 잇는 지역까지 광범위한 충돌 후 화성암이 형성되었다. Cheong *et al.* (2019)은 경기육괴내 서부의 태안-홍성대를 충돌대로 제안하였으나 이는 앞에 설명된 남중국판에 속하는 해주-원산에 나타나는 충돌 후 화성암을 포함한 전체적인 충돌 후 화성암 분포를 설명할 수 없다. Oh (2006)과 Oh and Kusky (2007)의 모델에서는 대륙 충돌이 오대산에서 시작된 후 남중국판이 시계방향으로 회전하면서 홍성을 지난 중국쪽으로 진행되었다는 가설을 제시하고 있다(그림 12)

Oh (2006)와 Oh and Kusky (2007)의 지구조 모델에서는 홍성-양평-오대산 충돌대가 함경도 지역의 두만강대로 연결된다고 주장하고 있다. 두만강대



**Fig. 11.** Tectonic model for the Permo-Triassic post-collisional igneous activity (modified after Oh and Lee, 2018). (a) During the subduction stage before collision, lithospheric mantle was enriched by crustal material derived from the subducted oceanic slab and sediment. (b) During collision, the continental slab was subducted by the pulling force of the previously subducted oceanic slab. (c) After collision, the oceanic slab broke off from the continental slab due to buoyancy of the latter creating a gap between the continental and oceanic slabs. The heat supplied from the asthenosphere uplifted through the gap, forming post-collisional igneous rocks. (d) In the later post-collision stage, with more extension than the early post-collision stage, mafic magma intrusion occurred by partial melting of the uplifted asthenospheric mantle with within-plate geochemical characteristics.

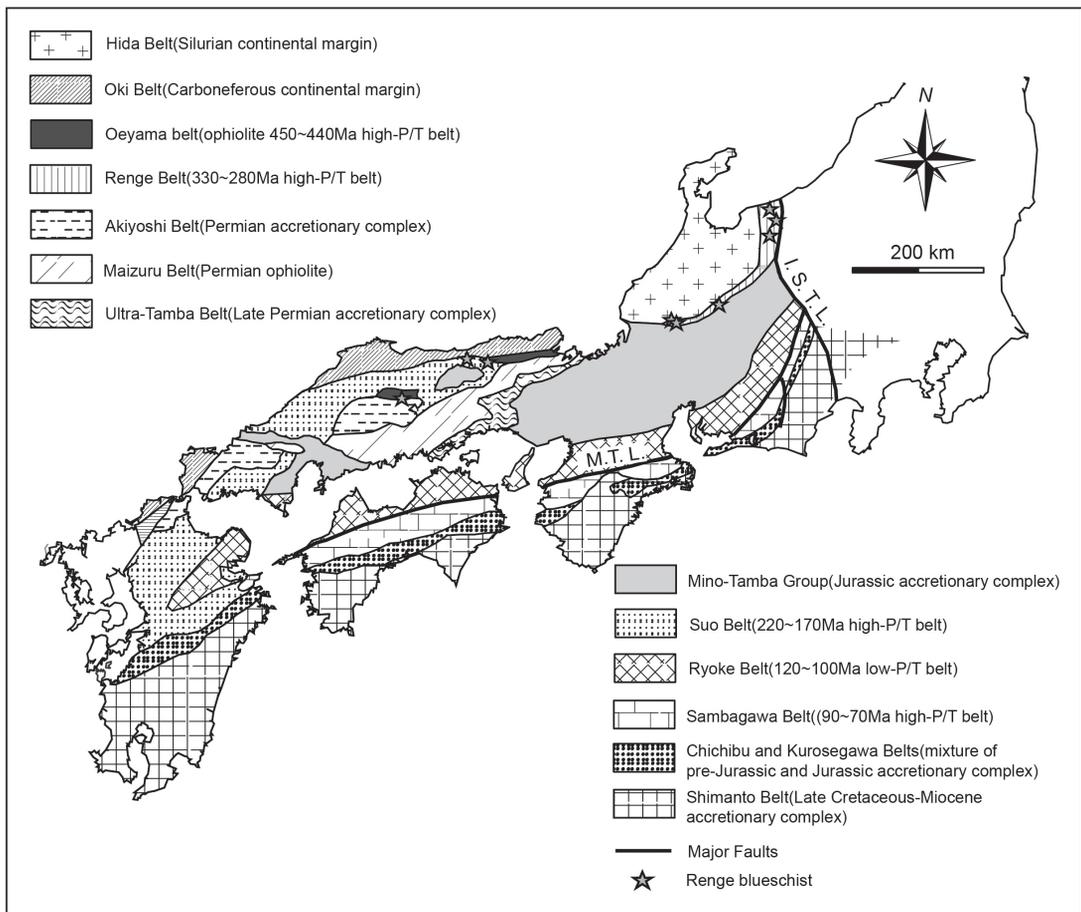


**Fig. 12.** The 2D tectonic model for the collision between the North China Craton (NCC) and South China Craton (SCC) (modified after Oh and Kusky, 2007). (a) An active margin formed by subduction around the NCC during the mid-Paleozoic; at the same time, a passive margin developed along the northern boundary of the SCC. (b) Collision started during the Permian in the area that is now modern-day Korea. (c) Collision propagated into the area that is now the Shandong Peninsula, producing the sinistral Tan-Lu fault and a dextral fault in the Hida belt. During collision, the Shandong and Korean peninsulas moved northward. (d) Collision ceased during the Late Triassic. (e) Until the Cretaceous, Japan moved southward. Abbreviations: BJK = Bureya-Jiamusi-Khanka block; CB = Cathaysia block; HB = Hida belt; ISWJ = Inner zone of SW Japan; NK = northern Korean Peninsula; QB = Qinling block; SK = southern Korean Peninsula; YB = Yangtze block.

는 만주 동부를 구성하고 있는 뷰레아-지아무시-칸가판과 북중국판 동부와 충돌에 의해 형성된 것으로 보고되고 있다(Oh, 2006; Oh and Kusky, 2007; Ma *et al.*, 2017). 즉 충돌 이전에 북중국판 주변에 섭입대가 형성되어 있었고 페름-트라이아스기에는 북중국판이 주변의 여러 판과 충돌하였다. 남쪽에서는 남중국판과 동쪽에서 뷰레아-지아무시-칸가판과 충돌하였다. 이러한 충돌 시기에 북중국판의 동부에 해당하는 오대산과 두만강대 사이에는 충돌이 없었고 섭입이 계속되고 있었을 것으로 생각되나 현재 이 지역에는 고생대 섭입대가 존재하지 않는다. 일본의 경우 대부분 지역이 쥐라기 이후에 형성되었으며 고생대와 트라이아스기 암석은 일본 서남부 지역 일부에만 나타나며 이는 이 시기에 일본은 현재보다 훨씬

크기가 작았음을 지시한다(그림 13). Oh (2006)와 Oh and Kusky (2007)의 지구조모델에서는 고생대 시기의 일본이 한반도 동측 오대산과 두만강대 사이에 형성되었던 섭입대에 위치하고 있다가 페름-트라이아스기의 대륙 충돌시 한반도 동해안을 따라 남쪽을 이동하여 백악기 초기에 영남육괴 동측에도 달하였으며 이 기간 동안 일본은 계속해서 성장하였을 가능성을 제시하였다.

Oh and Lee (2018)는 오대산-홍성-수루-다비-친링 충돌대를 따라 체계적인 변성작용 변화가 일어났음을 확인하였다(그림 14; 표 3). 오대산에서 홍성을 지나 중국의 수루와 다비 지역으로 가면서 변성온도는 감소하면서 변성압력이 증가하는 현상이 확인되었으며 다비지역에서 친링지역으로 가면서 변성온

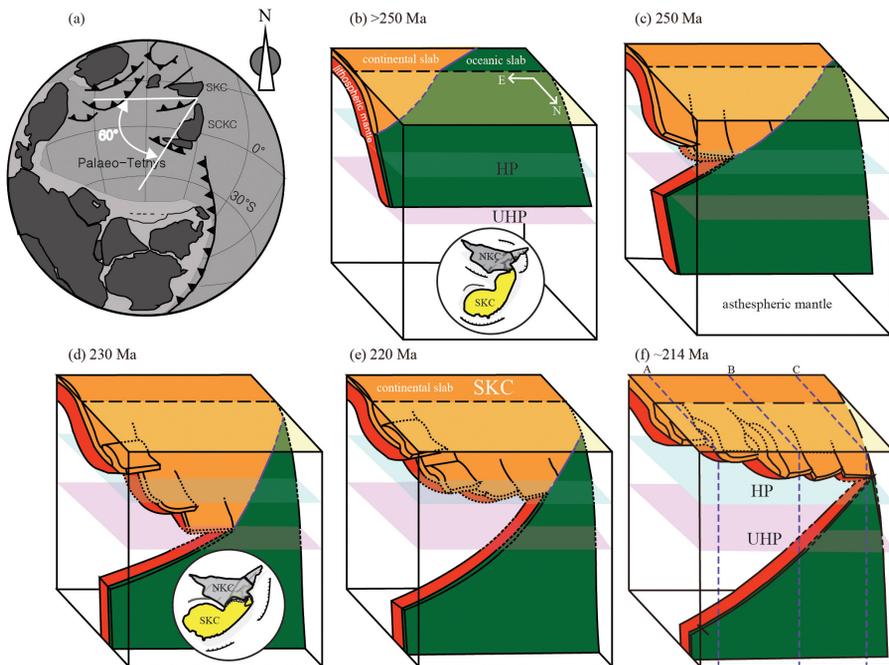


**Fig. 13.** Map showing the geologic and tectonic subdivisions of the southwestern Japan (from Oh and Kusky, 2007). The timing of accretion generally gets younger oceanward. Abbreviations: MTL = Median Tectonic Line; I.S.T.L = Itoigawa-Shizuoka tectonic time.



면서 넓었음에 기인한다고 해석하였다(그림 15a). 오대산 지역에서는 좁은 바다에 의해 대륙 충돌 이전에 섭입된 해양판의 규모와 양이 상대적으로 적어 남중국판을 에클로자이트를 형성할 만한 깊이까지 섭입시키기 전에 남중국판의 부력이 해양판을 잡아당기는 힘보다 커져서 판 분리(slab break-off)가 상대적으로 얕은 지역에서 일어났다. 그 결과 판 분리에 의해 형성된 공간으로 상승한 연약권 맨틀에 의해 매우 강한 열이 하부 지각에 공급됨으로서 초고온 변성작용이 일어났다(그림 11c, 15b). 홍성지역에서는 오대산 지역보다는 더 넓은 바다의 존재하였으며 이에 의해 충돌 이전에 상대적으로 더 많은 해양판이 섭입되었고 그 결과 남중국판이 에클로자이트 형성 깊이까지 섭입된 후 판 분리가 일어났다(그림

15c). 그리고 수루와 다비 지역에서는 충돌 이전에 홍성 지역보다 더 많은 해양판의 섭입에 의해 남중국판이 초고압 에클로자이트가 형성될 깊이까지 섭입된 후 판 분리가 일어났다(그림 15d). 수루와 다비 지역에서 판 분리가 일어난 이후 오대산에서부터 수루지역에 걸쳐서 일어난 판 분리에 의해 대륙판으로부터 분리된 대규모의 해양판이 더 깊은 곳으로 침강하면서 충돌대 측면을 따라 대륙판과 해양판을 찢어내는 힘이 강하게 발생하기 시작하였고 이로 인해 판 분리 깊이가 감소하기 시작하였다(그림 14, 15e). 그 결과 홍안지역에서는 수루-다비 지역에 비해 상대적으로 낮은 압력에서 형성된 초고압 에클로자이트가 형성되며 통바이 지역에서는 초고압이 아닌 고압 에클로자이트를 형성하는 깊이에서 판 분리가 일



**Fig. 15.** The palaeogeographical map showing the relative positions of the NCC (North China Craton) and SCC (South China Craton) before collision and the schematic 3D tectonic model for the collision process along the Qinling-Sulu-Odesan collision belt (modified after Oh and Lee, 2018). (a) Before the collision, the width of ocean between the North Korea-China Craton (NKC) and South Korea-China Craton (SKC) increased towards the west; (b) during the collision, SKC subducted beneath NKC and continental collision started from the east; (c) continental collision propagated towards the west with increasing depth of slab break-off from 9 to 10 kbar in the Odesan area to 17-21 kbar in the Hongseong area; (d) continental collision further propagated towards the west (the Sulu, Dabie and Hong'an units) and depth of slab break-off increased up to 28-43 kbar; (e) after the slab break-off in the Hong'an-Dabie-Sulu collisional belt, the depth of slab break-off decreased to 17-20 kbar in the Tongbai unit due to strong lateral tearing of oceanic slab from the continental slab; (f) the slab break-off occurred at shallower depth where granulite-facies metamorphism occurred in the western Qinling Unit. The dotted lines A-C indicate locations of cross-sectional views shown in the Fig. 16a-c.

어났으며 친링 동부지역에서는 청색편암이 형성되는 깊이에서 판분리가 일어났다(그림 14, 15f). 즉 수루-다비 지역 이후 판분리 깊이가 계속 감소하면서 변성 온도-압력이 지속적으로 감소하였다. 최종적으로 친링 서부지역에서는 오대산 지역에서와 같이 판분리 깊이가 매우 낮아지면서 판분리에 의해 형성된 공간을 통해 상승한 연약권 맨틀이 대륙 지각 하부에 강한 열을 공급하며 백립암상의 변성작용과 충돌 후 화성암이 광범위하게 발생하였다(그림 14, 15f). 이는 판분리의 깊이가 낮은 한반도와 친링서부 지역에서만 충돌 후 화성암을 광역적으로 형성할 수 있는 충분한 열이 대륙지각 하부에 공급되었고 다른 지역에서는 그렇지 못했음을 지시한다(그림 16; 표 3). 한반도의 충돌 후 화성암은 대략 230 Ma에 관입하였고 친링 서부지역에서는 대략 210 Ma에 형성된 사실과 변성작용 시기가 오대산 지역에서 친링지역으로 가면서 짧아지는 것은 충돌이 한반도 오대산 지역에서 중국 친링지역으로 진행되었음을 지시한다고 해석되었다(표 1; Oh and Lee, 2018).

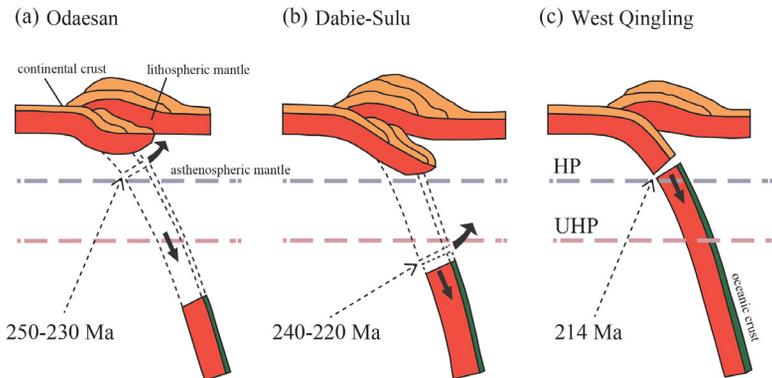
이런 새로운 지구조 모델들이 제시되는 상황에서도 여전히 한반도 전체가 북중국에 속한다는 지구조 모델이 계속적으로 제시되고 있다. Ishiyatari and Tsusimori (2003)는 다비-수루 충돌대가 서해에서 한반도를 우회하여 야에야마(Yaeyama) 군도의 이시가끼(Ishigaki) 섬에 나타나는 트라이아스기 청색편암 지역으로 연결된 후 일본 열도로 연결된다는 지구조 모델을 제

시하였다(그림 2c). 그리고 Zhai *et al.* (2007)은 남중국판이 북중국판의 일부인 한반도의 서부 지역과 충돌한 모델을 제시하였다(그림 2d). 이 지구조 모델에서는 북중국판의 암권 맨틀과 하부 지각은 한반도 밑으로 섭입을 하고 상부 지각은 한반도 지표 위로 밀려올라왔다고 주장하고 있다. 에클로자이트를 포함한 홍성지역은 하부 지각의 일부가 분리되어 상승한 것으로 그리고 임진강대와 옥천변성대로 한반도 위로 밀려 올라온 남중국판의 상부 지각으로 제안하고 있다.

그리고 한중 대비에 대해서는 명확히 설명하지 않았지만 최근에 서해안 지역과 홍성에서 발견된 대본기의 퇴적암과 신원생대 암석의 분포를 바탕으로 임진강대, 서해안지역 그리고 홍성지역을 연결하는 홍성-임진강대도 제안되었다(그림 2e; Kwon *et al.*, 2009; Kim *et al.*, 2011, 2013). Kwon *et al.* (2009)는 경기육괴가 페름-트라이아스기 대륙충돌시 북중국판에 대비되는 낭림육괴 밑으로 섭입되었다고 주장하였고 Kim *et al.* (2011, 2013)은 대륙 충돌 경계가 홍성-임진강대일 가능성을 제시하였다.

5. 고원생대 한중 대비

북중국판은 1.95-1.90 Ga 경 콜롬비아 초대륙 형성시 여러개의 소대륙이 충돌하여 형성되었으며 이 시기에 형성된 충돌대들을 포함하고 있다(그림 6).



**Fig. 16.** The change in the slab break-off depth along the Qinling-Sulu-Odaesan collision belt during propagation of continental collision towards the west (modified after Oh and Lee, 2018). (a) The slab break-off occurred at the depth shallower than the HP eclogite forming depth during ca. 247-245 Ma in the Odaesan area, (b) at the UHP eclogite forming depth during ca. 240-220 Ma in the Sulu, Dabie and Hong'an units and (c) at the depth shallower than the HP eclogite forming depth during ca. 214 Ma in the western Qinling unit. Gray and red dash lines represent the upper limits of HP eclogite forming depth and UHP eclogite forming depth.

그 충돌대 중 하나가 북중국판 동부에 위치한 산동-요동-길림 충돌대이다. 산동-요동-길림 충돌대는 중국 동북부 용강 지괴와 한반도의 낭림지괴의 충돌에 의해 형성되었으며 충돌 이전 이 지역에는 2.2-2.1 Ga 경에 후배호 분지가 발달한 섭입대가 형성되어 있었다(그림 17a; Wang, X.P. *et al.*, 2020a, 2020b). 산동-요동-길림 충돌대는 한반도의 마천령대로 연장된다(그림 1b). 산동-요동-길림 충돌대를 따라 발달한 후배호 분지내에서는 퇴적작용과 함께 화성작용이 일어났으며 이때 형성된 암석들은 1.95-1.90 Ga 에 산동-요동-길림 충돌대를 따라 일어난 대륙충돌에 의해 중압형의 변성작용을 받았고 1.86-1.84 Ga

에는 산동-요동-길림 충돌대의 남쪽 경계를 따라 충돌 후 화성 및 변성작용이 일어났다(표 1; Wang *et al.*, 2020, 2021). 산동-요동-길림 충돌대에서 일어난 충돌에 의해 낭림육괴와 경기육괴 북부지역에서도 1.93 Ga 경에 대륙 충돌에 의해 일어난 중압변성작용이 발생하였으며 1.87-1.84 Ga에 충돌 후 화성 및 변성작용이 광범위하게 일어났다(표 1; Lee *et al.*, 2014; Yengkhom *et al.*, 2014; Zhao *et al.*, 2016). 하지만 산동-요동-길림 충돌대 북부와 그 북쪽에 위치한 용강육괴에서는 이러한 1.87-1.84 Ga에 일어난 충돌 후 화성 및 변성작용이 거의 나타나지 않는다. 산동-요동-길림 충돌대는 마천령대로 연결되며 한

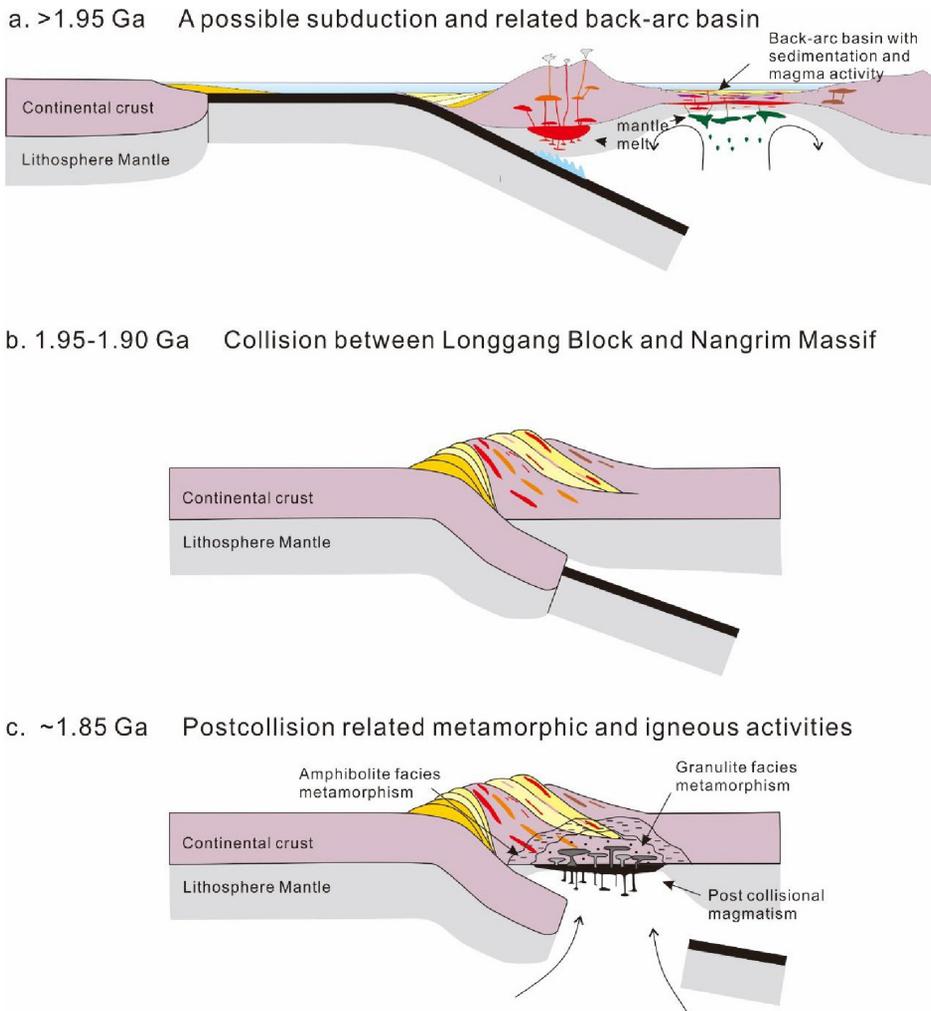


Fig. 17. Simplified model for the tectonic evolution of the JLJB from time before 1.95 Ga to ~ 1.85 Ga (from Wang *et al.*, 2020).

반도의 선캄브리아기 기저암은 마천령대를 경계로 서남부의 낭림육괴와 동부의 관모육괴로 나뉜다. 따라서 관모육괴는 중국 동부의 용강육괴와 대비되며 용강육괴와 마찬가지로 1.87-1.84 Ga 사이에 일어난 충돌 후 화성 및 변성작용을 받지 않았다(Zhang *et al.*, 2016). 충돌 후 화성 및 변성작용은 주로 충돌시 섭입된 대륙판 반대편 대륙 하부에서 일어나기 때문에 충돌 후 화성암이 한반도의 낭림육괴와 경기육괴 북부에 많이 나타나는 사실은 다음과 같이 해석될 수 있다. 2.2-2.1 Ga에 중국 북동부의 용강지괴가 낭림육괴 사이에 존재했던 해양판이 낭림육괴 하부로 섭입되고 있었고 대륙충돌시 이미 섭입된 해양판이 용강지괴를 잡아당겨 낭림육괴 하부로 섭입시켰음을 지시한다(그림 17a, 17b). 섭입되던 용강지괴의 부력이 섭입된 해양판이 하부로 잡아당기는 힘보다 커지는 깊이에서 용강지괴와 해양판이 분리되고 분리의 의해 형성된 공간으로 연약권 맨들이 상승하면서 열을 공급하여 광역적인 충돌 후 화성 및 변성작용을 산동-요동-길림 충돌대에서 경기육괴 북부 지역까지 일으킨 것으로 생각된다(그림 17c). 이로 인해 낭림육괴와 경기육괴 북부에 존재하던 시생대 암석들은 대부분 재활성되어 1.87-1.84 Ga 고원생대 암석으로 전환되었다(Lee *et al.*, 2014; Wang *et al.*, 2020, 2021).

1.93 Ga에 대륙충돌의 영향을 받은 경기육괴 북부와 달리 경기육괴 남부에 해당하는 원주지역에서는 1.94-1.91 Ga에 섭입 관련된 화성작용과 변성작용이 일어났다(표 1; Lee *et al.*, 2016a). 그리고 원주 지역에서는 경기육괴 북부에서 나타나지 않는 1.79 Ga 경의 충돌 후 화성암이 나타난다. 이러한 원주 지역의 지구조 진화는 북중국판의 지구조진화 보다는 남중국판 내 양쯔판의 지구조 진화에 더 유사한 것으로 해석되었다(표 1; Lee *et al.*, 2016a; Oh and Lee, 2018).

한편 소백산 지역에서 무주를 지나 곡성을 연하는 영남육괴 북부경계지역에서 2.02-1.96 Ga경에 섭입대가 존재하였음을 확인하였고 이 섭입대는 1.70 Ga 경까지 존재하였을 것으로 생각되고 있다(그림 18; 표 1; Lee *et al.*, 2019, 2020; Cho *et al.*, 2020). 그리고 영남육괴 중남부에 나타나는 산청-하동을 중심으로 하는 지리산지괴에서는 1.88-1.86 Ga에 충돌 후 환경에서 일어난 화성 및 변성작용이 인지되었다

(Lee *et al.*, 2017). 이러한 지질 정보들은 영남육괴가 하동-산청을 중심으로 1.88 Ga 이전에 충돌하여 하나가 되었고 영남육괴 동부와 서부지역 북쪽 경계에 위치한 섭입대는 연결되어 최소 1.7 Ga까지 지속되었음을 지시하는 것으로 해석되었다(그림 19a, 19b; Lee *et al.*, 2019, 2020; Cho *et al.*, 2020). 북중국판 동부와 낭림육괴 및 경기육괴 북부에서는 2.0-1.7 Ga에 섭입작용이 일어나지 않은 것을 고려하면 영남육괴는 북중국판에 대비되지 않는다. 뒤에 언급되겠지만 경기육괴 남부와 영남육괴 사이에 존재하던 옥천 변성대가 남중국판 내 양쯔판과 커테시아판 사이에 존재하는 난후아 열곡대에 대비될 수 있다는 연구 결과를 고려할 때 영남육괴는 남중국판 내 커테시아판에 대비될 가능성이 있어 향후 이에 대한 연구가 필요하다(표 1; Lee *et al.*, 2017, 2019; Oh and Lee, 2018). 영남육괴는 고원생대에 커테시아판과 함께 시베리아판과 로렌시아판 주변에 그리고 콜롬비아 초대륙 외곽부에 위치하였을 가능성이 제시되었다(그림 19c; Lee *et al.*, 2019).

## 6. 신원생대 한중 대비

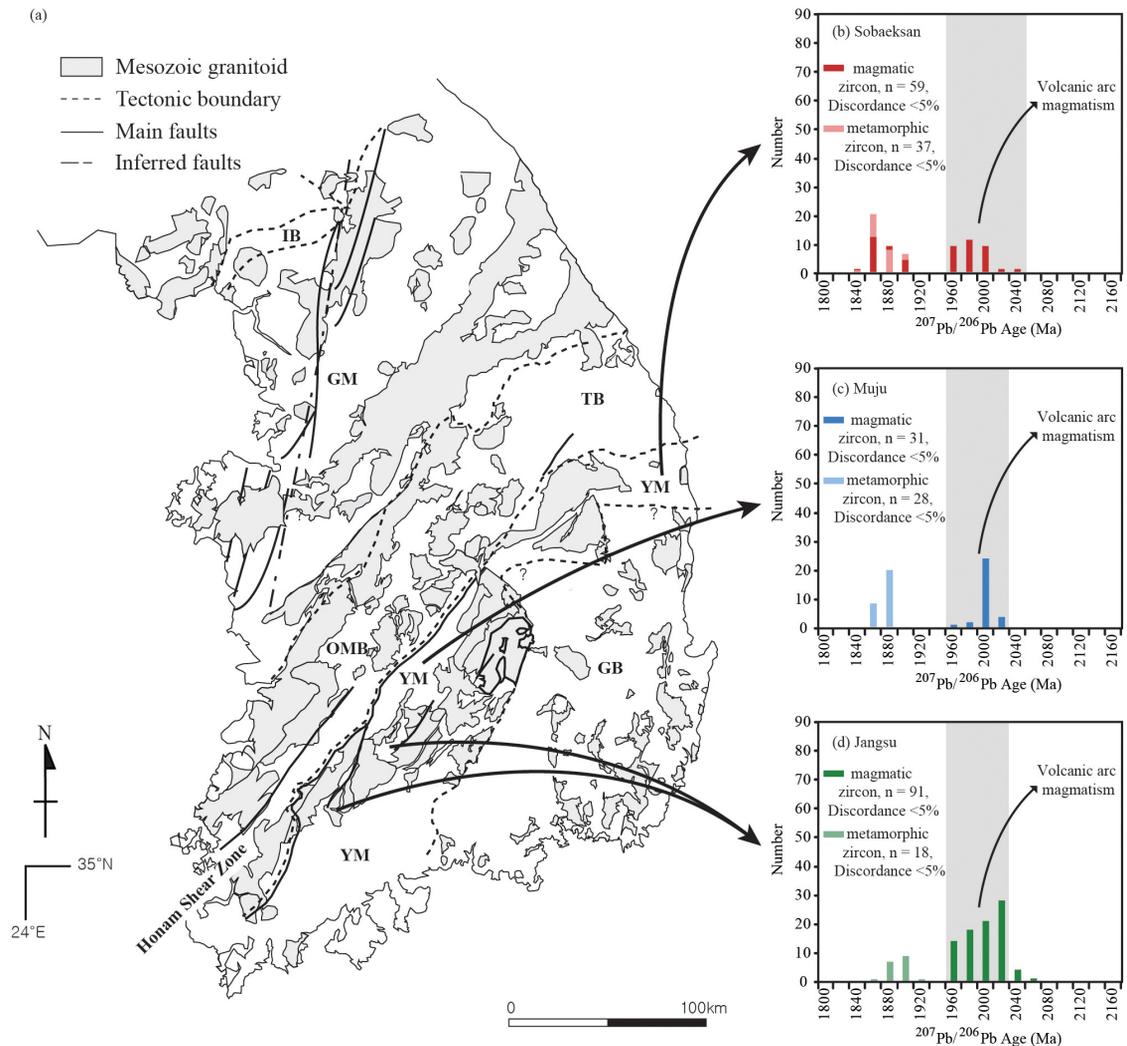
북중국판에서는 남쪽과 동쪽 경계부를 따라 형성된 신원생대 Xu-Huai-Lv-Da 열곡대내에서 신원생대 퇴적암이 이를 관입한 화성암과 함께 퇴적되었다(그림 8; 표 2; Peng *et al.*, 2011; Peng, 2015). 이들 퇴적암은 화성암과 함께 주로 1000-800 Ma 사이에 형성되었고 칭백허 층군(Qingbaikou Formation)으로 불리며 남중국에 나타나는 약 800 Ma 이후에 퇴적된 난후아 층군(Nanhua Formation)과 구별된다(그림 7, 8; Peng *et al.*, 2011; Peng, 2015).

이에 반해 남중국판에서는 북중국판보다 더 활발한 신원생대 화성작용이 일어났다. 특히 남중국판의 북부에 해당하는 양쯔판의 북부와 남부 경계 지역에서는 두 번의 신원생대 화성작용이 인지된다(표 2; Wang and Li, 2003; Li *et al.*, 2008; Oh *et al.*, 2009; Qui *et al.*, 2011; Peng *et al.*, 2012; Lin *et al.*, 2016; Zhao *et al.*, 2018; Kim, W.J. *et al.*, 2021). 첫 번째 화성작용은 섭입환경에서 일어났으며 로디니아 초대륙 형성 이전인 1000-830 Ma에 일어났다(그림 8; Li *et al.*, 2008; Oh *et al.*, 2009; Qiu *et al.*, 2011; Peng *et al.*, 2012; Zhao *et al.*, 2018; Lee, B.Y. *et al.*, 2020;

Kim, W.J. *et al.*, 2021). 그 이후 열곡대 환경에서 일어난 화성작용이 800-760 Ma에 주로 일어났으며 690 Ma까지 지속되었다(Wang and Li, 2003; Oh *et al.*, 2009; Li *et al.*, 2008; Lin *et al.*, 2016; Kim, W.J. *et al.*, 2021). 이러한 두 화성작용이 일어난 시기 사이에 양쯔판과 커테시아판이 충돌하면서 두 판들이 로디니아 초대륙의 일부가 되었을 것으로 해석하고 있다(그림 10; Li and Powell, 2001). 따라서 첫 번째 화성작용은 로디니아 초대륙 형성 이전에 양쯔판 주변에 형성되어있던 섭입작용에 의해서 형성된 것으로

판단되며 이는 양쯔판이 로디니아 초대륙 형성 이전에는 독립된 판으로 존재하였음을 시사한다. 로디니아 초대륙 분열시 현재 형태의 남중국판이 로디니아 초대륙으로부터 분리되면서 형성되었을 것으로 생각될 수 있으며 두 번째 화성작용은 대륙 분열시 형성된 열곡대를 따라 퇴적작용과 함께 일어났으며 이 때 남중국판 열곡대내에 퇴적된 퇴적암은 난후아 층군이라고 불린다.

양쯔판의 남부 경계와 커테시아판의 북부 경계에서 일어난 신원생대 섭입 작용에 의해 형성되기 시

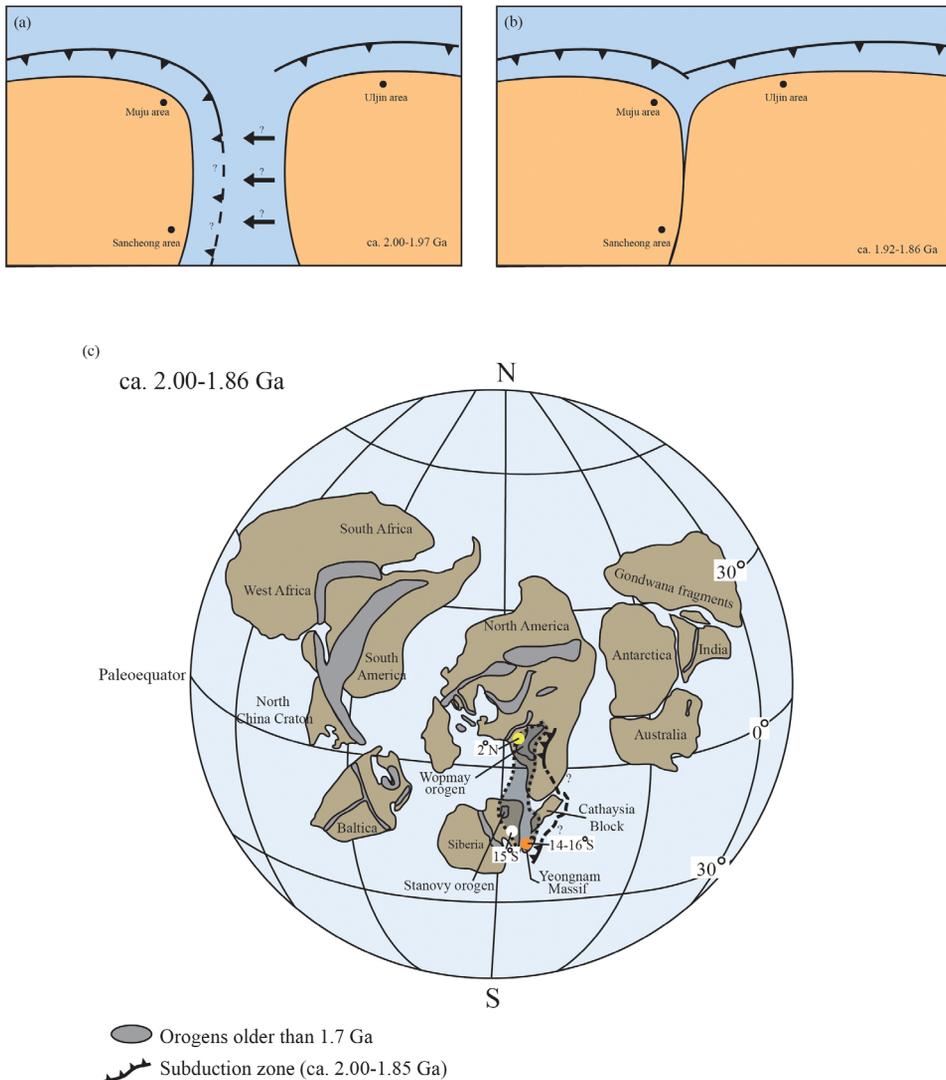


**Fig. 18.** The  $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$  age histograms for the Paleoproterozoic igneous and metamorphic events in the Yeongnam Massif: (a) sketch geological map of the Korean Peninsula; (b-d) histograms of  $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$  ages along the northern margin of the Yeongnam Massif (from Cho *et al.*, 2020).

작한 장난 조산대(Jiangnan Orogenic belt)의 조산 운동은 로디니아 초대륙 형성시 일어난 두 판의 충돌에 의해 완료되었고 장난조산대는 충돌 시기에 강하게 변형을 받았다(그림 9; Charvet, 2013). 그리고 로디니아 초대륙 분열시 장난조산대와 그 인근에서 일어난 열곡작용에 의해 형성된 분지내에 난후아층군이 열곡 관련 화성작용과 함께 퇴적되었다. 그 이후 열곡대내의 퇴적작용은 고생대까지 계속되었다. 장난조산대와 난후아 열곡대 지역의 나타나는 많은

신원생대 화성암은 중원생대와 신원생대 암석이 재 활성화되어 형성되었다(Wu *et al.*, 2006; Zhang *et al.*, 2013; Wang *et al.*, 2014). 이는 양쯔판과 커테시아판이 충돌하기 이전 두 판의 경계부에서 일어난 섭입 작용 등의 지질현상과 관련된 화성작용이 중원생대에서 신원생대에 걸쳐 일어났음을 지시한다.

Peng *et al.* (2011)은 낭림육괴 중부와 남부지역에 나타나는 신원생대의 상원계를 북중국판 남부와 동남부에 형성된 Xu-Huai-Lv-Da 열곡대를 따라 형성



**Fig. 19.** (a-b) Simplified tectonic model of the Yeongnam Massif during ca. 2.00-1.86 Ga. (c) Paleogeographic reconstruction of the Yeongnam Massif, Cathaysia Block, Laurentia and Siberian Cratons during ca. 2.00-1.86 Ga and the orange, yellow and white circles represent locations measured by paleomagnetic data for the Yeongnam Massif (14-16°S), Laurentia (2°S) and Siberia (5°S) (from Lee *et al.*, 2019).

된 칭백허 층군에 대비하였다. 최근 Lee, B.Y. *et al.* (2020)은 경기육괴 북부와 임진강대 주변에서 870-740 Ma 사이에 열곡대 환경에서 형성된 퇴적암과 화성암을 확인하였으며 이들은 상원계와 함께 북중국판의 칭백허 층군에 대비되는 것으로 제시하였다(그림 8, 표 2). Choi (2019b)는 임진강대를 확장해서 낭림육괴 남부의 상원계를 포함시켰고 이렇게 확장된 임진강대를 친링-다비-수루 충돌대의 연장선으로 제안하였다. 하지만 앞에 언급하였듯이 낭림육괴에 나타나는 상원계는 친링-다비-수루 충돌대가 아닌 북중국판의 Xu-Huai-Lv-Da 열곡대에 대비되고 있으며 상원계에서는 친링-다비-수루 충돌대에서 나타나는 섭입 관련 신원생대 화성작용이 나타나지 않는다. 특히 임진강대는 고생대 중기 퇴적층에 국한되기 때문에 상원계를 임진강대로 해석하는 것은 적절치 못하다.

상원계와 경기육괴 북부와 달리 경기육괴 서남부에 위치한 당진-홍성 지역에서는 900-820 Ma 경에 섭입 환경에서 형성된 화성암과 790-799 Ma 경에 열곡대 환경에서 형성된 화성암이 함께 나타난다(Oh *et al.*, 2009; Kim *et al.*, 2013, 2020; Lee, B.Y. *et al.*, 2020). 이들 두 시기의 신원생대 화성작용은 친링-다비-수루 충돌대를 포함한 양쯔판 북쪽 경계에 나타나는 두 시기의 신원생대 화성작용에 잘 대비된다(그림 8, 표 2; Oh *et al.*, 2009; Lee, B.Y. *et al.*, 2020). 그리고 경기육괴 서남부 홍성지역과 중국 양쯔판의 북쪽 경계지역의 신원생대 염기성화성암은 북중국판과 남중국판의 페름-트라이아스기 충돌시 대륙판과 함께 섭입되어 에클로자이트로 변성된 사실 또한 동일하다(그림 1, 8; Kim *et al.*, 2006b).

경기육괴 남부 경계부에 나타나는 고군산군도에서는 950-890 Ma에 섭입관련 화성작용이 일어났으며(Kee *et al.*, 2019; Kim, W.J. *et al.*, 2021) 이들 화성암은 양쯔판의 남부 경계부에 형성된 장난 조산대에서 일어난 신원생대 섭입관련 화성작용과 대비될 수 있다(그림 8; Kim, W.J. *et al.*, 2021). 그리고 경기육괴와 영남육괴 사이에 위치한 옥천변성대 내에 나타나는 신원생대 쌍모식 화성암들의 특성이 양쯔지괴와 커티시아지괴 사이에 나타나는 난후아 열곡대 내 신원생대 쌍모식 화성암과 유사함을 근거로 옥천변성대와 난후아열곡대가 대비될 가능성이 제시되었다(Kim *et al.*, 2006a). Fitches and Zhu (2006)도

퇴적암과 화성암 특징을 근거로 옥천변성대가 난후아 열곡대에 대비될 수 있다고 제안하였다. 고군산군도에서는 강한 변형을 받은 신원생대 말도층 위에 상대적으로 약한 변형을 받았으며 퇴적구조가 잘 관찰되는 신원생대 방축도층이 퇴적되었다. Kim, W.J. *et al.* (2021)은 이 두 층이 각각 섭입환경과 열곡환경에서 퇴적되었으며 방축도층은 옥천변성대 신원생대 퇴적암과 함께 난후아 층군에 대비될 가능성을 제안하였다. 특히 장난조산대와 난후아열곡대 내 신원생대 화성암의  $T_{DM}$  연령(0.9-1.9 Ga)이 고군산군도와 옥천변성대 내 화성암의  $T_{DM}$  연령(0.9-1.7 Ga)과 유사하며 이는 이 지역들의 신원생대 화성암의 대부분은 중원생대와 신원생대 암석들이 재활성되어 형성되었음을 지시한다(Kim *et al.*, 2006a; Wu *et al.*, 2006; Zhang *et al.*, 2013; Wang *et al.*, 2014; Kim, W.J. *et al.*, 2021). 이는 장난조산대 형성 이전에 서로 분리되어 있던 양쯔판 남부 경계와 커티시아 북부 경계에서 섭입 등의 지질현상과 관련된 중원생대와 신원생대의 화성작용이 일어난 것과 같이 옥천변성대 하부에도 중원생대와 신원생대에 형성된 섭입 등의 지질현상과 관련된 화성암이 존재할 가능성과 옥천변성대의 북쪽과 남쪽에 위치한 경기육괴 남부와 영남육괴 북부가 신원생대 이전에 분리되어 있었을 가능성을 제시한다.

## 7. 고생대 한중 대비

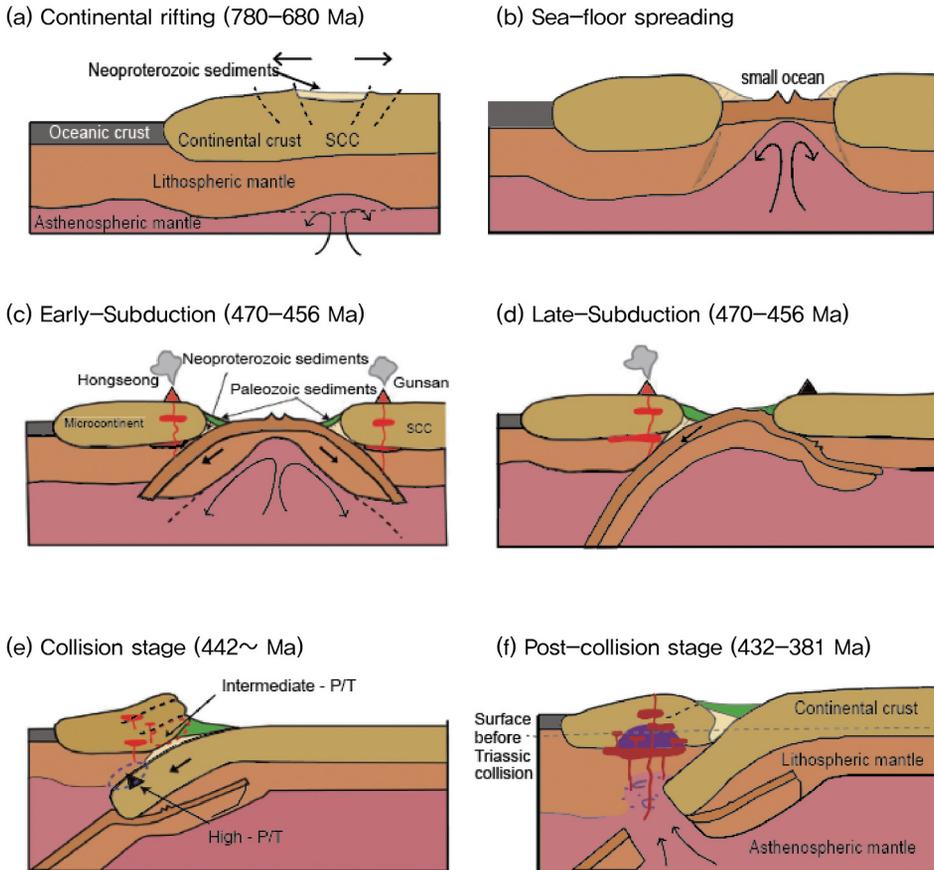
한반도내 고생대 초기 퇴적암은 낭림육괴 내 평남 분지와 영남육괴 북부의 태백산 분지에 주로 퇴적되었다. 이들은 삼엽충 및 코노돈트 화석을 근거로 북중국판에 대비되고 있다(Lee, 1987; Zhai *et al.*, 2007). 하지만 태백산 분지의 퇴적암은 코노돈트 화석을 바탕으로 일부는 북중국판에 일부는 남중국판에 대비되기도 한다(Kobayashi, 1966; Cluzel and Cadet, 1992). 옥천변성대 내에도 고생대 초기의 퇴적암과 고생대 후기의 퇴적암이 퇴적되었음이 채설성저어콘 연구를 통하여 확인되었다(Kim *et al.*, 2017 and references therein).

임진강대는 고생대 중기인 데본기에 후배호 분지에서 퇴적되었고 동 시기의 섭입 관련 화성암에 의해 관입되고 있다(Lee, B.Y. *et al.*, 2019). 그리고 서해안 지역을 따라 대부분, 서산지역, 태안반도에서

도 고생대 중기의 퇴적암이 보고되었다(Choi *et al.*, 2008; Cho *et al.*, 2010). 고생대 중기 퇴적암은 오대산 지역에서도 보고되었다(Cho, 2014).

홍성지역에서도 Kim *et al.* (2015)에 의해 고생대 중기 퇴적암이 보고되었으나 Oh *et al.* (2017)과 Imayama *et al.* (2021)은 이들 암석내 대부분 고생대 연령이 변성연령이라는 주장과 함께 홍성지역이 고생대 중기(450-390 Ma)에 광역적인 백립암상의 변성작용을 받았음을 밝혔다. 즉 홍성지역에서 보고된 고생대 중기 퇴적암은 변성연령을 쇄설성저어콘 연령으로 잘못 해석한 것에 기인하였을 가능성이 있어 향후 이에 대한 추가 연구가 필요하다. 그리고 변성작용 이전에 섭입대 환경에서 일어난 고생대 중기(470-450 Ma)의 화성작용과 섭입 관련 고압 변성작용이 일어났었음이 보고되었다(Kim *et al.*, 2011, 2015; Koh *et*

*al.*, 2013; Oh *et al.*, 2014, 2017; Imayama *et al.*, 2021). 군산 앞 섬에서도 고생대 중기의 섭입 관련 화성작용이 보고되었다. Kim *et al.* (2015)은 홍성지역에 나타나는 고생대 섭입관련 화성작용을 중국의 친링-다비-수루 충돌대에 나타나는 고생대 섭입관련 화성작용에 대비시켰다. 이에 반해 Oh *et al.* (2014, 2017)과 Imayama *et al.* (2021)은 앞에 제시된 연구 결과를 바탕으로 홍성지역에서 고생대 오르도비스기에 섭입대가 있었으며 고생대 오르도비스기-실루리아기에 대륙 충돌이 일어난 지구조 모델을 제시하였다(그림 20). 중국의 커테시아판과 장난조산대에 걸쳐 북서 방향으로 발달된 우니-윤카이 고생대 조산대에서도 고생대 중기(440-390 Ma)에 대륙충돌에 의한 변성 및 화성작용이 함께 일어났는데 이들 화성암중 대부분이 충돌 후 환경에서 만들어졌을 가능



**Fig. 20.** Simplified tectonic model of the Neoproterozoic to early-middle Paleozoic in the Hongseong area, showing (a) continental rifting, (b) formation of small ocean, (c) subduction, (d) continental collision, (e) initial stage of post-collision, and (f) later stage of post-collision (modified after Imayama *et al.*, 2021).

성이 제시되고 있다(Yao *et al.*, 2012; Xia *et al.*, 2014; Yan *et al.*, 2017). 그리고 대륙충돌에 의한 조산운동 이전인 460-440 Ma에는 섭입작용에 의한 화산작용이 일어났다는 연구 결과도 제시되었다(Liu *et al.*, 2018). 따라서 홍성지역에서 고생대 섭입 관련된 화성작용과 광역변성작용을 일으킨 조산운동은 남중국판의 우니-윤카이 조산대를 따라 일어난 고생대 조산운동에 대비될 가능성이 있다. 고생대에 일어난 우니-윤카이 조산운동에 의해 남중국판의 동부가 융기하여 커테시아 융기대를 만들었으며 이 지역에는 태백산 지역과 같이 오르도비스기 후기부터 퇴적작용이 일어나지 않았다(Rong *et al.*, 2010; Guo *et al.*, 2019; Xu *et al.*, 2019). 이는 남중국판 내의 우니-윤카이 조산대에 대비될 가능성이 있는 홍성지역의 고생대 대륙충돌에 의해 태백산 분지 지역이 융기하면서 태백산 지역에 고생대 중기 대결층이 형성되었을 가능성이 있음을 지시한다. 하지만 아직 이를 확인할 수 있는 충분히 연구가 수행되지 못한 상태이다.

고생대 후기 퇴적암은 평남 분지와 태백산 분지 내 고생대 초기 퇴적암 위에 부정합 관계로 퇴적되었다. 두 지역에서 나타나는 고생대 초기와 후기 사이에 걸친 대결층은 북중국판에서도 광범위하게 관찰되기 때문에 이를 근거로 오랫동안 평남 분지와 태백산분지를 포함한 한반도 전체가 북중국판에 대비되어 왔다. 하지만 두 분지 사이에 해당하는 경기육괴 내 임진강대, 서해안, 오대산 지역에 고생대 중기 퇴적암들이 나타나며 이들이 대륙충돌에 의한 중압형의 변성작용을 받았다는 사실은 이들 고생대 중기 퇴적암들이 친링-다비-수루 충돌대내 북중국판 남부 경계나 남중국판의 북부 경계에서 형성된 고생대 중기 퇴적암에 대비될 가능성을 지시한다. 따라서 평남 분지와 태백산 분지의 대결층만으로 한반도 전체를 북중국판에 대비시키 것에는 문제가 있을 수 있다. 즉 태백산 분지의 대결층이 북중국에 해당하지 않으며 앞에서 언급되었듯이 우니-윤카이 조산대를 따라 일어난 대륙충돌에 의해 형성되었을 가능성도 배제할 수 없다.

## 8. 페름-트라이아스기 한중대비

트라이아스기에 한반도에서 일어난 송림운동은 주로 북한에서 일어났고 쥐라기의 대보운동에 비해

훨씬 미약했으며 한반도 남부 지역에서는 일어나지 않은 것으로 판단되어 왔다. 하지만 1990년대에 임진강대, 경기육괴, 옥천변성대로부터 페름-트라이아스기 변성작용이 인지되면서 송림운동이 한반도 남부지역에서 강하게 일어났을 가능성이 제시되었다(e.g., Kim *et al.*, 2005; Oh *et al.*, 2005; Lee *et al.*, 2016b; Lee, B.Y. *et al.*, 2019). 특히 홍성지역에서 발견된 페름-트라이아스기 에클로자이트는 중국의 북중국판과 남중국판의 충돌에 의해 형성된 다비-수루 충돌대가 한반도의 홍성지역으로 연결됨을 확인시켜주었다(Oh *et al.*, 2005). 그 후 오대산 지역에서 트라이아스기 충돌 후 화성암인 맨거라이트가 발견되었고 뒤이어 홍성-양평-오대산을 연하는 지역과 그 북쪽에 위치한 경기육괴 북부와 임진강대 그리고 낭림육괴 남부에 트라이아스기 충돌 후 화성암이 광범위하게 분포함을 확인되었다(Oh *et al.*, 2006b; Peng *et al.*, 2008; Choi *et al.*, 2009; Williams *et al.*, 2009; Seo *et al.*, 2010; Kim, T.S. *et al.*, 2011; Yi *et al.*, 2016; Hwang *et al.*, 2017). Oh (2006)와 Oh and Kusky (2007)는 에클로자이트와 충돌 후 화성암을 바탕으로 홍성-양평-오대산을 연하는 지역을 수루-다비 충돌대의 연장선으로 제시하였다. 이러한 연구 결과는 송림운동은 한반도를 형성한 매우 중요한 지구조운동이며 이 시기에 한반도에서 대륙충돌이 일어나 현재의 한반도 형태가 만들어졌음을 지시한다.

이 시기에 가장 강한 변성작용이 홍성-양평-오대산 지역에서 일어났으며 임진강대에서는 변성작용이 남쪽으로 증가하였고 옥천변성대에서는 변성작용이 북쪽으로 증가하였다(그림 21; Kim *et al.*, 2005; Lee *et al.*, 2016b; Lee, B.Y. *et al.*, 2019). 이는 다음과 같은 지구조 해석을 가능하게 한다. 충돌 경계부인 홍성지역에서는 충돌에 의한 대륙판의 섭입에 의해 고압변성작용이 일어났으며 충돌대 주변에 위치한 임진강대와 옥천변성대에서는 충돌에 의해 발생한 트러스트에 의해 중압형의 변성작용을 받았다. 이는 대륙충돌과 대륙판의 섭입이 홍성-양평-오대산을 연하는 지역에서 일어났으며 이 시기에 대륙판과 함께 섭입된 염기성암이 에틀로자이트로 변성을 받았고 임진강대와 옥천변성대는 충돌에 의해 충돌대 연변부에서 중압형의 변성작용을 받았음을 지시한다(그림 22). 즉 한반도내 페름-트라이아스기 변성작용 분포 형태 역시 홍성-양평-오대산 충돌대가 한반도

내 북중국판과 남중국판의 충돌경계이며 친링-다비-수루 충돌대의 연장선임을 지시한다.

송림변동시기에 영남육괴에서는 섭입관련 화성작용이 강하게 일어났다. 페름기부터 시작된 섭입관련 화성작용은 트라이아스기에 매우 활발하였으며 이후 쥐라기까지 계속되었다(Kim *et al.*, 2021 and references therein). 일부 화성암이 변성을 받기도 하였으나 변성작용은 매우 미약하다. 남중국판의 남쪽 경계부에서도 페름기 말부터 섭입관련 화성작용이 일어났음이 보고되고 있다(Li *et al.*, 2006a; Li and Li, 2007). 그리고 이 시기 이전에는 남중국판 남부 경계가 섭입이 일어나지 않은 비활성 경계였고 페름기 말부터 섭입 관련 화성작용이 수반된 활동경계로 전환되었다(Li *et al.*, 2006a; Li and Li, 2007). 이 자료들은 페름기 후기부터 남중국판의 남쪽 경계와 영남육괴 밑으로 섭입작용이 시작되었음을 지시하며 그 시기가 충돌 시기와 거의 유사함은 남중국판이 충돌에 의해 북쪽으로 이동이 힘들어지면서 북쪽으로 이동하던 해양판의 남중국판의 남쪽 경계부를 따라 남중국판 하부로의 섭입이 시작되었을 가능성을 지시한다(Oh, 2012).

9. 지구조모델 간의 비교

현재까지 제시된 여러 지구조 모델들을 앞에 제시된 내용을 포함한 최근 연구 결과를 바탕으로 종합 평가한 내용은 다음과 같다. Yin and Nie (1993)의 모델은 호남전단대가 탄루 단층과 함께 페름-트라이아스기에 활동한 것을 가정한 상태에서 제시되었다. 하지만 최근의 연구에 따르면 호남전단대의 활동시기는 페름-트라이아스기가 아닌 충돌이 종료된 이후인 쥐라기 초(ca. 190 Ma)임이 밝혀졌으며 태백산지역에서는 호남전단대가 명확히 관찰되지 않는다(Cho *et al.*, 1999, 2007; Jeong *et al.*, 2008; Jo *et al.*, 2013). 그리고 Yin and Nie (1993) 지구조 모델에서는 중요 증거를 제시하지 못한 상태에서 임진강대를 충돌경계부로 제시하였고 이후 Ree *et al.* (1996)은 임진강대에 나타나는 각섬암이 에클로자이트의 고압 변성을 경험한 후 각섬암상으로 후퇴변성을 받았을 것이라는 추측과 페름-트라이아스기의 변형 연령을 그 증거로 제시하였다. 그리고 Sajeev *et al.* (2010)은 임진강대로부터 고압변성작용을 발견하였다고 보고하였다. 하지만 최근 임진강대에 대

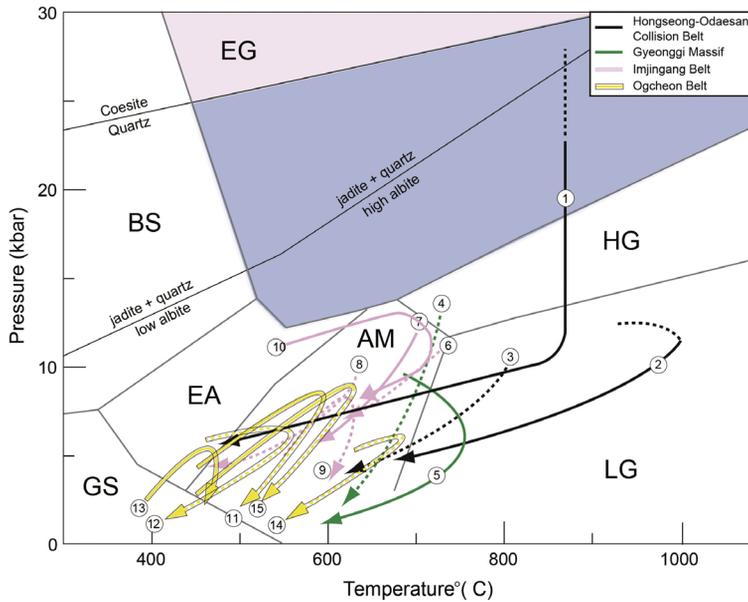
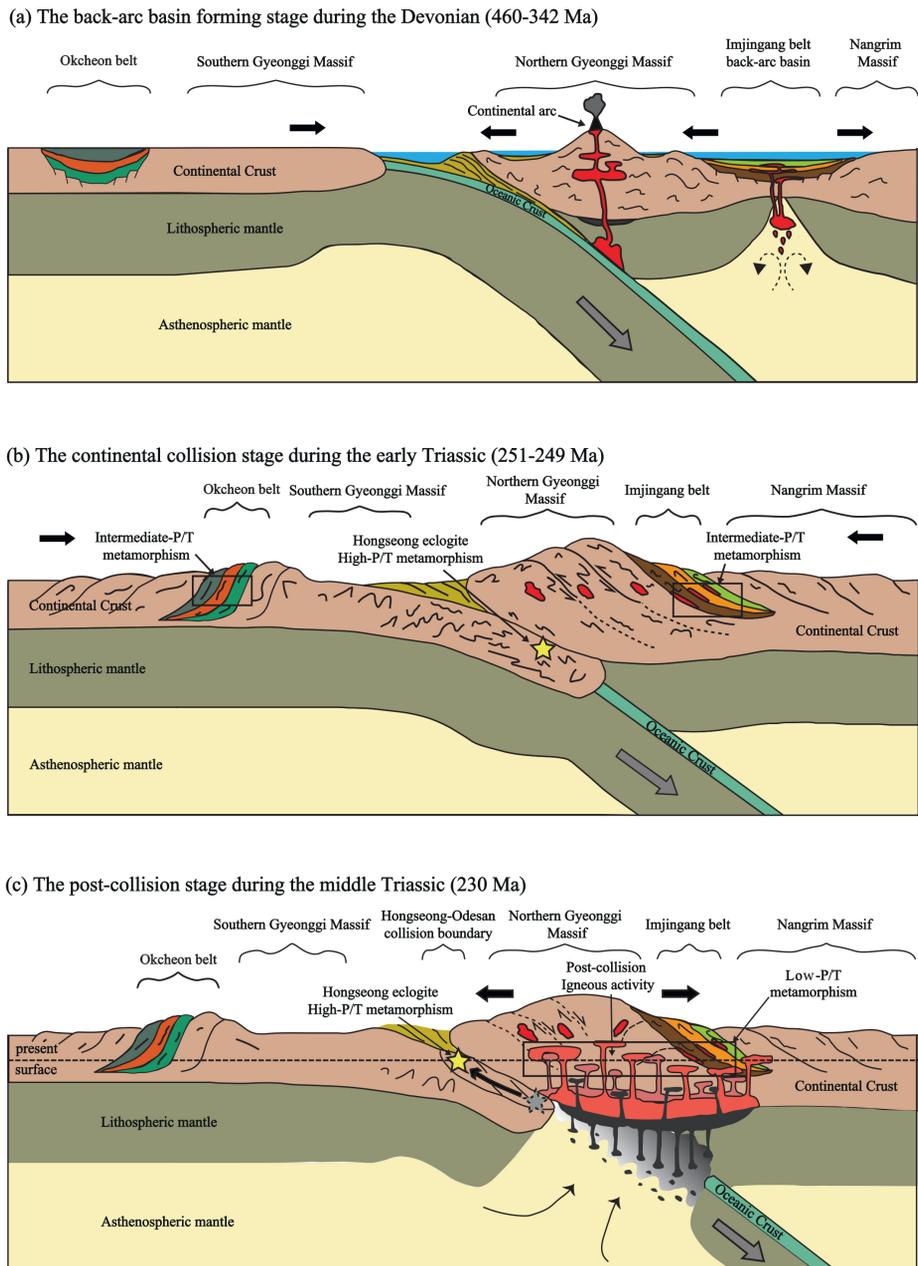


Fig. 21. P-T paths reported for the Hongseong-Yangpyeong-Odaesan collision belt (1-3; black), the other parts of the GM (4, 5; Green), IB (6-10; Pink) and OB (11-15; Yellow) (modified after Lee *et al.*, 2016b). The dotted lines are the inferred P/T paths. The petrogenetic grid used in the study is from Oh and Liou (1988). Abbreviation: BS = blueschist facies; GS = greenschist facies; EA = epidote-amphibolite facies; AM = amphibolite facies; LG = low-pressure granulite facies; HG = high-pressure granulite; EG = eclogite facies.



**Fig. 22.** Tectonic evolution model for the Permo-Triassic collision in the Korean Peninsula (modified after Lee, B.Y. *et al.*, 2019): (a) the Devonian back-arc basin formation stage; a continental arc formed in the northern Gyeonggi Massif, under which the oceanic slab subducted and the Imjin Group and Misan Formation formed by sedimentation and igneous activities in the back-arc basin; (b) the Triassic continental collision stage; high-P/T metamorphism occurred in the Hongseong area due to subduction of the southern Gyeonggi Massif during continental collision and intermediate-P/T metamorphism occurred in the northern Gyeonggi Massif and Imjingang and Okcheon Metamorphic Belt due to thrust movement caused by the collision; (c) the post-collision stage; eclogite uplifted to shallow depth in the Hongseong area and regional post-collision igneous activities occurred with a low-P/T metamorphism in the northern Gyeonggi Massif, Imjingang belt and southern Nangrim Massif due to the heat supply through the opening made by the slab break off between the continental and oceanic slabs. The deep part of the Gyeonggi Massif was exposed to the surface with erosion of the ~45-23 km thick continental crust.

한 연구 결과 임진강대의 각섬암은 고압 변성을 경험하지 않았으며 Sajeev *et al.* (2010)이 제시한 변성 온도-압력 조건은 잘 못 계산된 것임이 확인되었다 (Lee, B.Y. *et al.*, 2019). 임진강대는 고압변성상계열의 변성을 받은 것이 아니라 북쪽에서 남쪽으로 석류석대에서 남정석대와 십자석대를 지나 백립암상으로 변성정도가 증가하는 중압변성상계열을 변성작용을 받았음이 확인되었다(Lee, B.Y. *et al.*, 2019). 즉 임진강대에서는 충돌 경계의 증거가 확인되지 않고 있다. 따라서 Yin and Nie (1993)의 지구조 모델을 지지하는 확실한 증거가 아직까지는 제시되지 못하고 있으며 이 모델은 홍성지역에서 발견된 페름-트라이아스기 에클로자이트와 경기육괴 북부, 임진강대, 낭림육괴에 나타나는 트라이아스기 충돌 후 화성암들을 설명할 수 없다(표 4). 또한 이 모델에서는 경기육괴를 남중국판에 영남육괴를 북중국판 동부에 대비시키고 있다. 하지만 경기육괴 북부에 나타나는 고원생대와 신원생대 암석들이 북중국판에 대비되며 영남육괴의 북부 경계에서는 북중국판 동부에서 보고되지 않는 2.0-1.8 Ga 섭입 관련 화성작용이 보고된 사실 또한 Yin and Nie (1993)모델이 적절치 못함을 지시한다. 또한 Yin and Nie (1993)모델은 경기육괴 내에 홍성-양평-오대산을 연해서 나타나는 강한 페름-트라이아스기 변성작용을 설명할 수 없다. 그리고 최근 경기육괴 북부에서 보고된 충돌 후 환경에서 만들어진 광상과 퇴적분지(Seo *et al.*, 2015, 2016; Choi *et al.*, 2020)를 설명하지 못한다.

Yin and Nie (1993)이 모델을 약간 수정한 Chough *et al.* (2000) 모델에서는 호남 전단대 대신 남한구조선을 제시하고 있고 이 단층대는 217-171 Ma 사이에 형성되었다고 주장하고 있다(Ree *et al.*, 2001). 이 지구조 모델도 Yin and Nie (1993)의 모델이 갖고 있는 문제점들을 모두 갖고 있으며 남한구조선이 형성된 시기 역시 한반도내에서 남중국판과 북중국판의 충돌이 끝난 이후이기 때문에 호남전단대와 마찬가지로 탄루 단층에 대비될 수가 없다(표 4). 그리고 이 모델에서는 1000 km를 이동해온 태백산지역이 옥천변성대와 충돌하였다고 하나 이 지역에서 충돌을 증명하는 변성작용이 인지되지 않고 있다. 게다가 남한구조선은 남한구조선이 처음 제시된 청산전단대 이외 지역에서는 연구된 바가 없어 대부분의 지질학자에 의해 인정받고 있지 못하고 있다. 하지

만 Yin and Nie (1993)과 Chough *et al.* (2000) 지구조 모델은 태백산 지역에 나타나는 삼엽충이 북중국판에 나타나는 삼엽충에 잘 대비되는 사실과 태백산 지역에 나타나는 오르도비스기 후기에서 석탄기 중기 사이에 나타나는 대결충이 북중국판과 낭림육괴에서도 나타난다는 사실에 의해 지지된다.

Zhang (1997)의 모델 역시 임진강대로부터 충돌 경계부의 증거를 제시하지 못하고 있으며 페름-트라이아스기의 홍성 에클로자이트와 홍성-양평-오대산을 연하는 강한 변성작용, 경기육괴 북부, 임진강대 그리고 낭림육괴 남부에 나타나는 트라이아스기 충돌 후 화성암 그리고 경기육괴 북부에 나타나는 트라이아스기 충돌 후 환경에서 형성된 광상과 퇴적분지를 설명할 수 없다(표 4). 그리고 이 모델에서도 경기육괴를 남중국판에 대비시키고 있기 때문에 앞에 언급한 북중국판에 대비되는 경기육괴 북부의 고원생대와 신원생대 암석을 설명할 수 없는 문제점을 갖고 있다.

Kwon *et al.* (2009)와 Kim *et al.* (2011)이 제시한 홍성-임진강대를 충돌대로 보는 모델에서는 임진강대와 홍성지역에 에클로자이트를 포함한 고압변성암이 나타난다는 사실과 경기육괴에서 홍성-임진강대를 따라서만 신원생대와 고생대 중기 이후의 암석이 나타난다는 사실에 근거한다. 하지만 임진강대에 나타나는 고압변성작용은 잘못된 연구였다는 사실이 확인되었으며(Lee, B.Y. *et al.*, 2019; Oh and Lee, 2019) 신원생대와 고생대 중기 이후의 퇴적암은 홍성-임진강대 뿐 아니라 경기육괴 전체 지역에 나타난다(Cho, 2014; Oh *et al.*, 2018; Lee, B.Y. *et al.*, 2020). 그리고 이 모델에서는 홍성-임진강대의 동측에 위치한 대부분의 경기육괴가 남중국판에 속하는데 이는 경기육괴 북부가 북중국판에 잘 대비되는 고원생대와 신원생대 지구조진화 과정을 경험하였다는 것을 설명하지 못한다. 또한 이 모델에서는 홍성-임진강대 동측에 나타나는 경기육괴가 대륙충돌시 낭림육괴 하부나 홍성-임진강대 서부 지역 하부로 섭입하였다고 생각하기 때문에 홍성-임진강대 동측에 해당하는 대부분의 경기육괴에 나타나는 충돌 후 화성암을 설명하지 못한다.

한반도 전체를 북중국판에 대비시키는 대표적인 모델은 2가지이다. 첫째는 Ishiwatari and Tsujimori (2003)에 의한 지구조 모델이다. 이 모델에서는 오키

**Table 4.** Evaluation on the Permo-Triassic tectonic models for the northeast Asia by comparing suitability of each tectonic model with the geological information in the Korean Peninsula from Precambrian to Triassic.

	Oh and Kusky 2007	Yin and Nie 1993	Zhang 1997	Ishiwatari and Tsujimori 2003	Zhai <i>et al.</i> 2007	Kim <i>et al.</i> 2011
Triassic Eclogite	○				○	○
Triassic Post-collisional granitoid	○					
Permo-Triassic metamorphic pattern in the GM, IB, OME	○					
No collision evidences in the IB	○			○	○	
Rift related Neoproterozoic igneous rock in the Norhem GM	○			○	○	
Arc and Rift related Neoproterozoic igneous rocks in the Southern GM	○	○	○			○
Collision related Paleoproterozoic igneous and metamorphic events in the Northern GM	○			○	○	
Arc related Paleoproterozoic igneous and metamorphic events in the Southern GM	○	○	○			○
Arc related Paleoproterozoic igneous and metamorphic events in the northern margin of YM	△		△			△
Devonian-Carboniferous Sedimentary Gab	△	○	△	○	○	△
Devonian Sediments in the IB	○	○	○			○
North China craton type Trilobite, Conodont fossils	△	○	△	○	○	△
Jurassic Honam shear zone	○		○	○	○	○
Post-collisional Triassic ore deposits	○					
Post-collisional Triassic basin	○					

Critical evidences for collision   
  Geologic evidences which need more study  
 Geologic evidences which can not be explained by each tectonic model  
 Circles and triangles mean 'well supported' and 'probably supported' respectively.

나와 섬에 나타나는 섭입대의 증거인 트라이아스기 청색편암을 근거로 친링-다비-수루 충돌대가 오끼나와 현에 위치한 야에야마(Yaeyama) 군도의 이시가키(Ishigaki) 섬으로 연결된 후 일본으로 연결된다고 주장하고 있다. 하지만 페름-트라이아스기에 남중국판과 영남육괴의 남부 지역에 걸쳐 섭입대가 존재했고 이시가키 섬의 트라이아스기 청색편암은 이 섭입대를 따라 일어난 섭입작용에 의해 형성된 암석으로 판단하는 것더 적절하다(그림 5; Li *et al.*, 2006a; Li and Li, 2007; Oh, 2012; Kim *et al.*, 2021 and references therein). 그리고 이 모델에서는 앞의 두 지구조 모델과 마찬가지로 홍성지역의 페름-트라이아스기 에클로자이트, 홍성-양평-오대산 지역에 일어난 강한 페름-트라이아스기 변성작용 그리고

경기육괴 북부, 임진강대와 낭림육괴 남부에 나타나는 트라이아스기 충돌 후 화성암을 설명할 수 없다(표 4). 또한 이 모델은 경기육괴 서남부에 나타나는 신원생대 암석이 남중국판 내에 나타나는 신원생대에 대비되는 사실과 고원생대 북중국판 동부에서 인지되지 않는 경기육괴 남동부 지역에서 일어난 1.95-1.90 Ga의 섭입관련 화성 작용과 영남육괴 북부경계에 나타나는 2.0-1.8 Ga의 섭입관련 화성 작용을 설명하지 못한다. 또 다른 모델은 Zhai *et al.* (2007)에 의해 제시된 모델로 이 모델에서는 서해안 지역에서 남중국판과 한반도가 충돌하였고 이 때 남중국판의 하부는 한반도 밑으로 섭입하는데 반해 상부가 한반도 위로 트러스트 단층작용과 함께 밀려올라왔다고 제시하고 있다. 이 때에 홍성지역에서 하부 지

각의 일부인 에클로자이트가 분리되어 지표로 노출되었다고 주장하였다. 그리고 트러스트 단층 운동은 추가령지구대와 호남전단대를 따라 일어났다고 설명하고 있다. 이 모델에서는 경기육괴 북부에만 나타나는 트라이아스기 충돌 후 화성작용과 홍성-양평-오대산 지역에 나타나는 강한 변성작용이 설명되지 않는다(표 4). 이 모델에 따르면 충돌 후 화성암이 경기육괴 북부에 국한되지 않고 남한 동부지역을 광범위하게 관입하여야 하며 가장 강한 변성작용이 서해안 지역을 따라 일어나야하나 그런 증거는 보고된 바 없다. 그리고 이 모델에서는 경기육괴 남부에 나타나는 남중국에 대비되는 신원생대 암석과 고원생대 북중국판 동부에서 인지되지 않는 경기육괴 동남부 지역에서의 1.95-1.90 Ga 섭입관련 화성 작용과 영남육괴 북부경계에 나타나는 2.0-1.8 Ga 섭입관련 화성 작용을 설명하지 못한다. 그리고 이 모델에서는 압축력이 동-서 방향으로 가해지기 때문에 임진강대와 옥천변성대에서 변성정도와 각각 남쪽과 북쪽으로 증가하는 것을 설명할 수 없으며 이 모델에서 제안된 바와 같이 임진강대와 옥천변성대가 충돌시 동쪽으로 밀로 올라온 증거는 전혀 발견되지 않는다.

하지만 한반도 전체를 북중국판에 대비시키는 앞의 두 모델은 태백산지역에 나타나는 삼엽충이 북중국판에 나타나는 삼엽충에 잘 대비되는 사실과 태백산 지역에 나타나는 오르도비스-석탄기 후기 대결충이 북중국판에도 나타난다는 사실에 의해 지지된다.

Oh (2006)과 Oh and Kusky (2007)가 제시한 지구조 모델은 홍성지역의 페름-트라이아스기 에클로자이트, 홍성-양평-오대산 지역의 강한 페름-트라이아스기 변성작용 그리고 홍성-양평-오대산을 연하는 선 이북의 경기육괴와 임진강대 그리고 낭림육괴 남부에 나타나는 트라이아스기 충돌 후 화성작용을 잘 설명할 수 있다(표 4). 그리고 이 모델에서는 압축력이 남-북 방향으로 가해졌기 때문에 임진강대의 변성정도가 남쪽으로 그리고 옥천변성대의 변성정도가 북쪽으로 증가하는 것도 잘 설명할 수 있다. 이 두지역은 홍성-양평-오대산을 연하는 선을 따라 일어난 대륙 충돌시 충돌대의 연변부로서 중압형의 변성작용을 받았다(그림 21, 22; Kim *et al.*, 2005; Lee *et al.*, 2016b; Lee, B.Y. *et al.*, 2019). 그리고 오대산-홍성-수루-다비-친링 충돌대를 따라 변성 조건과 시기가 체계적으로 변하는 현상은 홍성-양평-오대산

충돌대가 중국의 친링-다비-수루 충돌대와 연결되어 있음을 지시한다(그림 14, 15; 표 3). 그리고 이 모델은 경기육괴 북부와 낭림육괴의 고원생대 화성 및 변성진화과정이 북중국판 동부의 산동-요동-길림 충돌대의 고원생대 화성 및 변성진화과정과 잘 일치한다는 사실과 잘 부합되며 영남육괴 북부의 화성 및 변성진화과정이 북중국판의 진화과정과 다르다는 사실 때문에 문제가 발생하지 않는다. 그리고 경기육괴 북부와 남부의 신원생 화성암과 퇴적암이 각각 북중국판과 남중국판의 신원생대 화성암과 퇴적암에 대비되는 사실과도 잘 일치한다. 또한 이 모델은 홍성지역에 일어난 섭입과 대륙충돌과 관련된 고생대 중기의 화성 및 변성작용이 남중국판에서 고생대 중기에 일어난 대륙 간 혹은 대륙내 충돌과 관련된 화성 및 변성작용과 대비될 수 있다는 가설도 잘 뒷받침한다(Imayama *et al.*, 2021).

앞에서 언급한 내용으로 볼 때 아직 더 연구가 필요하기는 하지만 Oh (2006)와 Oh and Kusky (2007)가 제안한 모델이 가장 적절하다. 그 이유는 이 지구조 모델이 충돌대를 지시하는 직접적인 증거(홍성지역 페름-트라이아스기 에클로자이트, 홍성-양평-오대산 충돌대를 따라 일어난 가장 강한 페름-트라이아스기 변성작용, 홍성-양평-오대산 충돌대 북부와 낭림육괴 남부에 나타나는 트라이아스기 충돌 후 화성암)를 가장 잘 반영하고 있으며 최근 발표된 한반도 내 고원생대와 신원생대 암석과 중국의 고원생대와 신원생대 암석간의 한층 대비 연구결과들을 포함한 간접적인 증거들과도 잘 일치하기 때문이다. 이에 비해 다른 지구조 모델들은 앞에 제시한 직접적인 증거를 설명하지 못할 뿐 아니라 간접적인 증거들의 전체나 대부분을 설명하지 못한다. 하지만 Oh (2006)와 Oh and Kusky (2007)가 제안한 모델은 태백산 분지내에 나타나는 고생대 초기 화석인 코노돈트와 삼엽충 화석이 북중국판에 나타나는 코노돈트와 삼엽충 화석과 잘 일치한다는 사실과 태백산 지역의 고생대 중기의 퇴적결층이 북중국판의 동일시기 퇴적결층과 잘 대비되는 사실을 설명하기 힘들다. 이 문제에 대해서는 다음과 같은 연구가 향후 필요하다.

낭림육괴내 평남 분지와 옥천대내 태백산 분지에 나타나는 오르도비스기 후기-석탄기 중기 까지의 퇴적 결층에 근거하여 한반도 전체를 북중국판에 대비하는 것은 다음과 같은 문제점이 있다. 과거에는 오

르도비스기 후기-석탄기 중기 사이에 형성된 퇴적암이 한반도에서 보고되지 않았으나 최근에는 임진강대를 비롯하여 한반도 여러 곳에서 데본기의 퇴적암이 보고되고 있다. 북중국판에서도 판 내부에서는 데본기를 포함한 고생대 중기 퇴적암이 나타나지 않으나 북중국판 남쪽 경계를 포함한 북중국판 주변부에서는 데본기를 포함한 고생대 퇴적암이 나타난다(Dong *et al.*, 2011). 그 결과 북중국판과 남중국판의 충돌대인 친링-다비-수루 지역에서는 데본기에 해당하는 퇴적암과 화성암이 나타난다. 이러한 중국의 예를 볼 때 평남 분지와 태백산 분지 사이에 위치한 임진강대를 포함한 경기육괴에 나타나는 고생대 중기의 퇴적암의 존재는 두 분지가 데본기에 서로 연결되어 있지 않았을 가능성을 제시한다. 그리고 페름-트라이아스기 화성 및 변성작용 또한 북중국판 내에서 발생하지 않고 북중국판의 남쪽 경계부와 남중국판 북쪽 경계를 포함한 친링-다비-수루 충돌대에서만 발생한다(Dong *et al.*, 2011). 따라서 평남 분지와 태백산 분지 사이에 위치한 임진강대, 경기육괴, 옥천변성대 지역에서 일어난 페름-트라이아스기 화성 및 변성작용 또한 두 분지가 서로 연결되어 있지 않았을 가능성을 지지하는 증거가 될 수 있다. 또한 홍성지역의 에클로자이트와 임진강대내 데본기 화성암이 후배호분지에서 형성됨은 두 분지 사이에 섭입대가 존재하였을 가능성을 지지한다. 그리고 태백산 분지의 대결충 시기가 시작되는 시기에 남중국판 우니-윤카이 조산대에서 대륙 충돌이 440-390 Ma에 일어났으며 이로 인해 남중국내 동남부에 해당하는 지역에서 용기가 일어나 이 지역에서 오르도비스기에서 실루리아기에 해당하는 대결충이 형성되었다(Rong *et al.*, 2010; Yao *et al.*, 2012; Xia *et al.*, 2014; Yan *et al.*, 2017; Guo *et al.*, 2019; Xu *et al.*, 2019). 우니-윤카이 조산대에서의 고생대 중기의 대륙 충돌은 홍성지역에서 일어난 445-392 Ma 시기의 대륙충돌과 연결될 수 있으며 이는 태백산 분지내 대결충도 역시 홍성에서 일어난 대륙충돌에 의해 태백산분지가 용기하면서 형성되었을 가능성을 제시한다. 따라서 향후 이 가능성을 확인하기 위한 연구가 필요하다.

최근 연구에 따르면 석탄기 전기에서 트라이아스기 전기까지 퇴적된 평안누층군은 태백산 분지 뿐 아니라 옥천대 전체에 걸쳐 넓게 분포되어 있다(Kim and

Lee, 2017). Kim and Lee (2017)은 이러한 사실이 Yin and Nie (1993) 지구조모델과 Chough *et al.* (2000) 지구조모델에서 제시된 바와 달리 옥천대가 페름-트라이아스 이전에 호남전단대나 남한구조선에 의해 두 개의 서로 다른 지괴로 나누어질 수 없음을 지지한다고 주장하였다. 그리고 앞에 설명되었듯이 한반도 전체가 북중국에 대비하는 모델에 많은 문제가 있는 점을 고려할 때 이러한 증거들은 태백산 분지가 북중국판에 대비되지 않을 수 가능성을 제시하는 또 다른 증거가 된다. 하지만 아직까지 태백산 분지가 북중국판이 아닌 남중국판에 대비될 가능성에 대한 연구가 수행된 적이 없기 때문에 이에 대한 연구가 향후 꼭 필요하다.

태백산 분지는 크게 태백층군과 영월층군으로 나뉜다. Kobayashi (1966)는 태백층군의 캄브리아기 초기와 중기 삼엽충이 북중국판에 주로 나타나는 얇고 따뜻한 바다에서 살던 황화동물구 삼엽충과 대비될 수 있는데 반해 영월층군의 캄브리아기 초기와 중기의 삼엽충은 남중국판에 주로 나타나는 깊고 차가운 바다에 살았던 강남동물구 삼엽충과 대비된다고 주장하였다. 이를 근거로 Cluzel and Cadet (1992)는 호남전단대가 태백층군과 영월층군 사이를 지나가며 호남전단대를 중심으로 북쪽에 위치한 영월층군을 포함하는 옥천대와 경기육괴는 남중국판에 호남전단대의 남쪽에 위치한 태백산층군을 포함하는 옥천대와 영남육괴는 북중국판에 대비된다는 의견을 제시했다. 하지만 Choi *et al.* (1998)은 두 층군내 오르도비스기의 삼엽충들이 서로 유사성이 매우 높을 뿐 아니라 이들이 북중국판 내 삼엽충과의 유사성이 상당히 높음을 주장하였으며 Jeong and Lee (2000)도 두 층군내 오르도비스기 코노돈트도 서로 유사성이 높으며 이들이 남중국판 삼엽충 보다는 북중국판의 삼엽충에 더 유사함을 제시하였다. 따라서 이들 최근 연구들은 영월층군내 캄브리아기 초기와 중기의 퇴적층들이 북중국판내에 존재하는 일부 수심이 깊은 지역에 퇴적되었고 그 결과 깊고 차가운 바다에 사는 남중국형 삼엽충과 코노돈트가 나타난다고 해석하고 있다(Jeong and Lee, 2000).

유사한 현상이 북중국판내에서도 보고되고 있다. 내몽고의 주요지산(Zhuozhishan)지역과 간수(Gansu)의 핑리양(Pingliang) 지역은 북중국판에 속하지만 이 지역들은 오르도비스기 시기에 수심이 깊었기 때

문에 이 지역들이 포함된 북중국판 북서쪽 부분에서는 남중국형 코노돈트가 나타나는 것으로 보고되고 있다(Wang *et al.*, 1996). 그리고 북중국판 서측에 위치한 타림판내에서는 북중국판형 및 남중국판형 코노돈트가 모두 나타난다(Wang *et al.*, 2007). 비슷한 사례가 남중국판 내에서도 보고되고 있다. 예로 남중국판의 동남부에 위치한 장시(Jiangxi)와 북부 장수(northern Jiangsu)지역에서는 오르도비스기 후기에 북중국형 코노돈트가 나타난다(Wang *et al.*, 1996). 이러한 사실은 북중국판에서는 고생대 초기에 퇴적암이 대부분 얇고 따뜻한 바다 조건에서 퇴적됨으로 황하동물구에 해당하는 삼엽충과 그에 대비되는 코노돈트가 주로 나타나지만 국지적으로는 깊고 차가운 바다 조건에서 퇴적암이 퇴적되고 이 지역에서는 남중국판에 주로 나타나는 강남동물구에 해당하는 삼엽충과 그에 대비되는 코노돈트가 나타남을 지시한다. 동일한 논리로 남중국판에서도 역시 고생대 초기에 퇴적암이 주로 깊은 차가운 바다에서 형성되었으며 그 결과 주로 남중국형인 강남동물구에 해당하는 삼엽충과 그에 대비되는 코노돈트가 주로 나타나지만 국지적으로는 남중국판에서도 얇고 따뜻한 바다에서 형성된 퇴적암이 존재하였고 이들 퇴적암내에서는 황하동물구 삼엽충과 그에 대비되는 코노돈트가 나타날 수 있음을 지시한다. 이러한 사실들은 화석군은 고생물지리구뿐 아니라 국지적인 퇴적환경에 의해 영향을 받음을 지시한다(Jeong and Lee, 2000; Wang *et al.*, 2007). 그리고 북중국판과 남중국판 내에 나타나는 고원생대 초기 퇴적암중 두 판에서 주로 나타나는 화석의 경향과 다른 화석 형태를 보여주는 국부적인 퇴적암의 분포 지역의 넓이가 한반도의 태백산 분지보다 넓을 수 있다. 이와 같은 사실들은 북중국판과 남중국판에 우세하게 나타나는 화석 종류를 이용하여 태백산 분지를 북중국판이나 남중국판과 대비하는 것은 맞을 가능성이 상대적으로 높을 뿐이지 틀릴 수 있다는 것을 의미한다. 특히 남중국판에서 한반도에 가까운 동부지역에 위치한 장수, 장시 지역에서 황하동물구에 대비되는 코노돈트가 나타난다. 따라서 태백산 분지가 남중국판 내 장수, 장시와 같은 남중국판의 국지 지역에 대비될 가능성에 대한 연구가 앞으로 필요하다.

앞에 논의된 내용을 고려해 볼 때 태백산 분지에

나타나는 북중국형 삼엽충과 코노돈트 화석과 오르도비스기 후기-석탄기 중기 대결층은 태백산 분지 혹은 한반도 모두가 북중국판에 속했다는 절대적 증거가 되지 못하는 간접적인 증거이다. 또한 삼엽충과 코노돈트는 해양 화석이기 때문에 대륙을 대비하는데 한계점을 가지고 있다. 이에 반해 경기육괴 내 나타나는 에클로자이트와 충돌 후 화성암 그리고 충돌 관련된 중압형 변성작용은 대륙충돌대에 대한 직접적인 증거들이다. 북동아시아 지구조진화 해석과 한중 지질학적 대비 시에 직접적인 증거가 없을 때는 간접적인 증거도 매우 중요하나 직접적인 증거가 있을 경우에는 간접적 증거보다는 직접적 증거가 우선적으로 고려되는 것이 합리적이다.

## 10. 결 론

1) Yin and Nie (1993)와 Chough *et al.* (2000)의 지구조 모델은 임진강대에서 충돌의 증거나 나타나지 않는 것을 포함하여 여러 문제들이 있지만 특히 이 모델들에서 페름-트라이아스기에 형성된 탄루 단층과 대비될 것으로 생각되는 호남전단대와 남한구 조선이 각각 한반도에서 대륙 충돌이 종결된 이후인 쥐라기 초(190 Ma)와 트리아스기 말에서 쥐라기 중기 사이(217 Ma와 177 Ma 사이)에 일어난 것이 가장 큰 문제점이다. 그리고 평안누층군이 옥천대전 지역에 나타남은 옥천대가 페름-트라이아스기 이전에 옥천변성대와 태백산 분지가 호남전단대나 남한구조선을 중심으로 서로 분리되어 있지 않았음을 지시한다.

2) 한반도를 모두 북중국판으로 생각하는 모델들은 최근에 발견된 페름-트라이아스기의 여러 충돌 관련 증거들과 최근 수행된 경기육괴 내에 나타나는 남중국판에 대비되는 고원생대와 신원생대 암석의 발견과 일치하지 않는다. 또한 이 모델들은 최근 영남육괴 북부 경계에서 북중국판, 낭림육괴, 경기육괴 북부에서는 나타나지 않는 2.0-1.8 Ga 화산호 관련 화성작용이 일어난 사실을 설명할 수 없다.

3) Oh (2006)과 Oh and Kusky (2007)이 제시한 페름-트라이아스기 북동 아시아 지구조 모델이 이제까지 제시된 페름-트라이아스기 북동 아시아 지구조 모델중 가장 적절하며 그 이유는 다음과 같다. Oh (2006)과 Oh and Kusky (2007) 지구조 모델에서는

홍성-양평-오대산 충돌대가 중국의 남중국판과 북중국판이 충돌하여 형성된 친링-다비-수루의 연장선이라고 판단하고 있다. 이는 페름-트라이아스기에 클로자이트가 발견된 홍성 지역을 시작으로 양평 지역을 지나 오대산으로 연결되는 지역에 페름-트라이아스기에 일어난 가장 강한 변성작용이 일어난 사실과 홍성-양평-오대산 이북 지역에서 트라이아스기 충돌 후 화성암이 광범위하게 나타나는 증거들에 의해 잘 지지된다. 이 모델에 따르면 경기육괴는 홍성-양평-오대산을 중심으로 북부와 남부로 나뉘는데 이는 다음과 같은 새로운 연구결과를 만족한다. 낭림육괴와 경기육괴 북부의 고원생대 및 신원생대 화성 및 변성작용이 북중국판의 고원생대 및 신원생대 화성작용과 잘 일치하는데 반해 경기육괴 남부의 고원생대 화성 및 변성작용은 북중국판보다는 남중국판에 더 유사하며 신원생대 화성작용은 남중국판의 신원생대 화성작용에 잘 대비된다.

4) 한반도와 중국을 포함한 페름-트라이아스기 동북아시아 지구구조모델 중 Oh (2006)와 Oh and Kusky (2007)가 제시한 지구구조 모델이 상대적으로 가장 적절하지만 이 모델을 확정하기 위해서는 이 모델에서 남중국에 해당하는 태백산 분지내에 나타나는 북중국판에 대비될 수 있는 고생대 삼엽충과 코노돈트 그리고 고생대 중기 대결충이 나타나는 문제에 대한 해결이 필요하다.

5) 남중국판의 고생대 중기 우니-윤카이 조산대는 한반도 홍성지역으로 연결될 수 있으며 이 조산대를 따라 일어난 445-390 Ma의 대륙 충돌에 의해 남중국판 내 케티시아판 동부와 태백산 분지가 융기하여 오르도비스기 후기부터 대결충이 시작되었을 가능성이 있어 이에 대한 향후 연구가 필요하다

남중국판의 동부에 위치한 장수, 장시 지역의 고생대 초기와 중기 퇴적암에서 북중국형 코노돈트 화석이 발견되고 있음을 고려해 볼 때 태백산 분지도 장수, 장시와 같이 남중국판 내 북중국형 화석을 보여주는 국지 지역일 가능성이 있어 이에 대한 향후 연구가 필요하다.

## 감사의 글

이 논문을 심사하면서 건설적인 심사평을 해주신 이진용 편집위원장과 익명의 편집위원과 심사자들

께 감사를 드린다. 또한 이 논문에 포함된 여러 연구 결과를 얻기 위해 노력한 많은 연구자들에게도 감사한 마음을 전한다. 이 연구는 한국연구재단의 지원(NRF-2017K1A1A2013180)과 전북대 교육연구 및 학생지도 학술트랙 프로그램의 지원을 받아 수행되었다.

## REFERENCES

- Charvet, J., 2013, The Neoproterozoic-Early Paleozoic tectonic evolution of the South China Block: An overview. *Journal of Asian Earth Sciences*, 74, 198-209.
- Cheong, C.S., 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. *GSA Bulletin*, 131, 609-634.
- Cho, D.-L., 2014, SHRIMP U-Pb Zircon Geochronology of the Guryong Group in Odesan Area, East Gyeonggi Massif, Korea: A new identification of Late Paleozoic Strata and Its Tectonic Implication. *The Journal of the Petrological Society of Korea*, 23, 197-208 (in Korean with English abstract).
- Cho, D.-L., Kee, W.-S. and Suzuki, K., 2007, CHIME Monazite Ages of Jurassic Foliated Granites in the Vicinity of the Gangjin Area, Korea. *The Journal of the Petrological Society of Korea*, 16, 101-115 (in Korean with English abstract).
- Cho, D.-L., Lee, B.C. and Oh, C.W., 2020, Petrogenesis of paleoproterozoic (2.02-1.96 Ga) metagranitoids in the southwestern Yeongnam Massif, Korean Peninsula, and their significance for the tectonic history of north-east Asia: Insights from zircon U-Pb-Hf isotope and whole-rock geochemical compositions. *Precambrian Research*, 340, <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2020.105631>.
- Cho, K.H., Takagi, H. and Suzuki, K., 1999, CHIME monazite age of granitic rocks in the Sunchang shear zone, Korea: timing of dextral ductile shear. *Geoscience Journal*, 3, 1-15.
- 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 Ogcheon fold-thrust belt, Korea: evidence for tectonic assembly of Paleozoic sedimentary protoliths. *Journal of Asian Earth Sciences* 63, 234-249.
- Cho, M., Kim, H., Lee, Y., Horie, K. and Hidaka, H., 2008, The oldest (ca. 2.51 Ga) rock in South Korea: U-Pb zircon age of a tonalitic migmatite, Daejok Island, western

- Gyeonggi massif. *Geoscience Journal*, 12, 1-6.
- Choi, M., Na, J. and Yi, K., 2010, SHRIMP U-Pb ages of detrital zircons in metasediments of the Taean Formation, western Gyeonggi massif, Korea: Tectonic implications. *Geosciences Journal*, 14, 99-109.
- Choi, D.K., 1998, Ordovician trilobite faunal successions in the Taebaegsan region, Korea. The Great Ordovician Biodiversification Event. Abstracts with programs, Seoul National University, Korea, 10-14 (in Korean with English abstract).
- Choi, D.K., 2011, A new view on the early Paleozoic paleogeography and paleoenvironments of the Taebaeksan Basin, Korea. The Paleontological Society of Korea, 27, 1-11 (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, P.Y., Rhee, C.W., Lim, S.-B. and So, Y., 2008, Sub-division of the Upper Paleozoic Taean Formation in the Anmyeondo-Boryeong area, west Korea: a preliminary approach to the sedimentary organization and structural features. *Geosciences Journal*, 12, 373-384.
- Choi, S.G., Rajesh, V.J., Seo, J., Park, J.W., Oh, C.W., Park, S.J. and Kim, S.W., 2009, Petrology, geochronology and tectonic implications of Mesozoic high Ba-Sr granites in the Haemi area, Hongseong Belt, South Korea. *Island Arc*, 18, 266-281.
- Choi, Y., Ryu, I.C., Seo, J. and Oh, C.W., 2020, Evolution of the Mesozoic Yuljeon Basin in South Korea and its tectonic implication. *Lithos*, 366-367, <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2020.105560>.
- Chough, S.K., Kwon, S.-T., Ree, J.H. and Choi, D.K., 2000, Tectonic and sedimentary evolution of the Korean Peninsula—a review and new view. *Earth Science Reviews*, 52, 175-235.
- Cluzel, D. and Cadet, J.-P., 1992, Geodynamics evolution of Korea: A view. *The Island Arc*, 1, 64-70.
- 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 Science*, 41, 213-237.
- Ernst, W.G. and Liou, J.G., 1995, Contrasting plate-tectonic styles of the Qinling-Dabie-Sulu and Franciscan metamorphic belt. *Geology*, 23, 353-356.
- Fitches, W.R. and Zhu, G., 2006, Is the Ogehcon metamorphic belt of Korea the eastward continuation of the Nanhua Basin of China?. *Gondwana Research*, 9, 68-84.
- Guo, J.L., Wu, Y.B., Gao, S., Jin, Z.M., Zong, K.Q., Hu, Z.C., Chen, K., Chen, H.H. and Liu, Y.S., 2015, Episodic Paleoproterozoic (3.3-2.0 Ga) granitoid-magma-tism in Yangtze Craton, South China: Implications for late Archean tectonics. *Precambrian Research*, 270, 246-266.
- Guo, X.-W., Xu, H.-H., Zhu, X.-Q., Pang, Y.M., Zhang, X.H. and Lu, H.N., 2019, Discovery of Late Devonian plants from the southern Yellow Sea borehole of China and its palaeogeographical implications. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 531, <https://doi.org/10.1016/j.palaeo.2017.08.039>.
- Hu, B., Zhai, M., Li, T., Li, Z., Peng, P., Guo, J. and Kusky, T.M., 2012, Mesoproterozoic magmatic events in the eastern North China Craton and their tectonic implications: Geochronological evidence from detrital zircons in the Shandong Peninsula and North Korea. *Gondwana Research*, 22, 828-842.
- Hwang, S.K., Kee, W.S. and Yi, K.W., 2017, SHRIMP U-Pb Zircon dating and stratigraphic implications of the Bojongsan Trachyte in the Imjingang belt, Korea. *Journal of the Geological Society of Korea*, 53, 423-432 (in Korean with English abstract).
- Imayama, T., Oh, C.W., Jeon, J. and Yi, K., 2021, Neoproterozoic and middle Paleozoic geological events in the eastern Wolhyeonri complex of the southwestern Gyeonggi Massif, South Korea, and their tectonic correlations in northeastern Asia. *Lithos*, 382-383, <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2020.105923>.
- Ishiwatari, A. and Tsujimori, T., 2003, Paleozoic ophiolites and blueschists in Japan and Russian Primorye in the tectonic framework of East Asia: A synthesis. *Island Arc*, 12, 190-206.
- Jeong, H. and Lee, Y.I., 2000, Late Cambrian biogeography: conodont bioprovinces from Korea. *Paleogeography, Paleoclimatology, Paleoecology*, 162, 119-136.
- Jeong, J.W., Oh, C.W. and Cho, D.-L., 2021, The Neoproterozoic to Triassic tectonic evolution of Jangbong Island in the northwestern Gyeonggi Massif on the Korean Peninsula. *Lithos*, 390-391, <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2021.106102>.
- Jeong, Y.-J., Cheong, C.-S., Park, C.-Y. and Shin, I.-H., 2008, Geochemistry, Isotope Properties and U-Pb Sphene Age of the Jeongeup Foliated Granite, Korea. *Journal of the Korean earth science society*, 29, 539-550 (in Korean with English abstract).
- Jo, H.J., Park, K.-H. and Yi, K., 2013, SHRIMP U-Pb Ages of the Namwon and Sunchang Granites. *The Journal of the Petrological Society of Korea*, 22, 197-208 (in

- Korean with English abstract).
- Kee, W.S. and Kim, H.C., 2011, The Geological Map of Korea (1:50,000), Geological Report of Seoraksan. Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources, 30 p (in Korean with English abstract).
- Kee, W.-S., Kim, S.W., Kwon, S., Santosh, M., Ko, K. and Jeong, Y.-J., 2019, Early Neoproterozoic (ca. 913-895 Ma) arc magmatism along the central-western Korean Peninsula: implications for the amalgamation of Rodinia supercontinent. *Precambrian Research*, 335, 105498.
- 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, M.G. and Lee, Y.I., 2017, The stratigraphy and correlation of the upper Paleozoic Pyeongan Supergroup of southern Korean Peninsula - A review. *Journal of the Geological Society of Korea*, 53, 321-338 (in Korean with English abstract).
- Kim, S.W., Kee, W.-S., Lee, S.R., Santosh, M. and Kwon, S.H., 2013, Neoproterozoic plutonic rocks from the western Gyeonggi massif, South Korea: Implications for the amalgamation and break-up of the Rodinia supercontinent. *Precambrian Research*, 227, 349-367.
- Kim, S.W., Kee, W.S., Santosh, M., Cho, D.-L., Hong, P.S., Ko, K., Lee, B.C., Byun, U.H. and Jang, Y., 2020, Tracing the Precambrian tectonic history of East Asia from Neoproterozoic sedimentation and magmatism in the Korean Peninsula. *Earth-Science Reviews*, 209, <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2020.103311>.
- Kim, S.W., Kwon, S., Jeong, W.-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*, <https://doi.org/10.1016/j.gr.2020.11.017>.
- Kim, S.W., Kwon, S., Park, S.-I., Yi, K., Santosh, M. and Ryu, I.C., 2015, Early to Middle Paleozoic arc magmatism in the Korean Peninsula: constraints from zircon geochronology and geochemistry. *Journal of Asian Earth Sciences*, 113, 866-882.
- Kim, S.W., Kwon, S., Santosh, M., Cho, D.L. and Ryu, I.-C., 2014, Detrital zircon U-Pb geochronology and tectonic implications of the Paleozoic sequences in western South Korea. *Journal of Asian Earth Sciences*, 95, 217-227.
- Kim, S.W., Kwon, S., Santosh, M., Williams, I.S. and Yi, K., 2011, A Paleozoic subduction complex in Korea: SHRIMP zircon U-Pb ages and tectonic implications. *Gondwana Research*, 20, 890-903.
- Kim, S.W., Oh, C.W., Hyodo, H., Itaya, T. and Liou, J.G., 2005, Metamorphic Evolution of the Southwest Okcheon Metamorphic Belt in South Korea and Its Regional Tectonic Implications. *International Geology Review*, 47, 844-870.
- Kim, S.W., Oh, C.W., Ryu, I.-C., Williams, I.S., Sajeev, K., Santosh, M. and Rajesh, V.J., 2006a, Neoproterozoic Bimodal Volcanism in the Okcheon Belt, South Korea, and its comparison with the Nanhua Rift, South China: implications for rifting in Rodinia. *The Journal of Geology*, 114, 717-733.
- Kim, S.W., Oh, C.W., Williams, I.S., Rubatto, D., Ryu, I.C., Rajesh, V.J., Kim, J.B., Guo, J. and Zhai, M., 2006b, 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. *Precambrian Research*, 50, 195-215.
- Kim, S.W., Williams, I.S., Kwon, S.H. and Oh, C.W., 2008, SHRIMP zircon geochronology, and geochemical characteristics of metaplutonic rocks from the southwestern Gyeonggi Block, Korea: implications for Paleoproterozoic to Mesozoic tectonic links between the Korean Peninsula and eastern China. *Precambrian Research*, 162, 475-497.
- Kim, T.S., Oh, C.W. and Kim, J.M., 2011, The characteristic of mangerite and gabbro in the Odaesan area and its meaning to the Triassic tectonics of Korean Peninsula. *The Journal of Petrological Society of Korea*, 20, 77-98 (in Korean with English abstract).
- Kim, W.J., Oh, C.W. and Lee, S.H., 2021, The tectonic evolution of the Gogunsan Islands in the southwestern margin of the Gyeonggi Massif and its implication for the Neoproterozoic tectonic evolution relating to the Rodinia in the Northeast Asia. *Lithos*, 388-389, <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2021.106054>.
- Kobayashi, T., 1966, Stratigraphy of the Chosen Group in Korea and south Manchuria and its relations to the Cambro-Ordovician faunas of other areas. *Journal of the Faculty Sciences, University of Tokyo*, 2, 209-311.
- Koh, H.J., Kwon, C.W., Park, S.I., Park, J. and Kee, W.-S., 2013, Geological Report of the Julpo and Wido Hwangdeungdo Sheets. Korea Institute of Geosciences and Mineral Resources, p. 80 (in Korean with English abstract).
- 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.O., 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, <https://doi.org/10.1038/s41598-020-76999-y>.
- Lee, B.C., Jo, H.J., Lee, S.H. and Jeong, Y.J., 2021, Geochronology and petrogenesis of the Late Triassic A-type granitoids in the Yeongnam Massif and its implication for Late Triassic geodynamics of northeast Asia. *Lithos*, 386, 106018.
- Lee, B.C., Oh, C.W., Cho, D.L. and Yi, K., 2019, Paleoproterozoic (2.0-1.97 Ga) sub-duction-related magmatism on the north-central margin of the Yeongnam Massif, Korean Peninsula, and its tectonic implications for reconstruction of the Columbia supercontinent. *Gondwana Research*, 72, 34-53.
- Lee, B.C., Oh, C.W., Kim, T.S. and Yi, K., 2016b, The metamorphic evolution from ultrahigh-temperature to amphibolite facies metamorphism in the Odesan area after the collision between the North and South China Cratons in the Korean Peninsula. *Lithos*, 256-257, 109-131.
- Lee, B.C., Oh, C.W. and Wang, X.P., 2020, Paleoproterozoic (ca. 1.87-1.69 Ga) arc-related tectonothermal events on northcentral Yeongnam Massif, South Korea and its tectonic implications: Insights from metamorphism, geochemistry and geochronology. *Precambrian Research*, 338, 105562.
- Lee, B.C., Oh, C.W., Yengkhom, K.S. and Yi, K., 2014, Paleoproterozoic magmatic and metamorphic events in the Hongcheon area, southern margin of the Northern Gyeonggi Massif in the Korean Peninsula, and their links to the Paleoproterozoic orogeny in the North China Craton. *Precambrian Research*, 248, 17-38.
- Lee, B.C., Oh, C.W. and Yi, K.W., 2016a, Geochemistry, zircon U-Pb ages, and Hf isotopic compositions of Precambrian gneisses in the Wonju-Jechon area of the southern Gyeonggi Massif: Implications for the Precambrian tectonic evolution of Korea and northeast Asia. *Precambrian Research*, 283, 169-189.
- Lee, B.C., Park, J.H., Oh, C.W. and Yi, K., 2017, Metamorphic and magmatic evolution of the Paleoproterozoic gneisses in the Sancheong area, Yeongnam Massif, South Korea, and their implications to the tectonics in the Northeast Asia. *Precambrian Research*, 298, 439-461.
- Lee, B.Y., Oh, C.W., Cho, D.L., Zhai, M., Lee, B.C., Peng, P. and Yi, K., 2019, The Devonian backarc basin and Triassic arc-continent collision along the Imjingang belt in the Korean Peninsula and their tectonic meaning. *Lithos*, 328-329, 276-296.
- Lee, B.Y., Oh, C.W., Lee, S.W., Seo, J. and Yi, K., 2020, Ages and tectonic settings of the Neoproterozoic igneous rocks in the Gyeonggi Massif of the southern Korean Peninsula and the correlation with the Neoproterozoic igneous rocks in China. *Lithos*, 370-371, 105625.
- Lee, D.S., 1987, *Geology of Korea*. The Geological Society of Korea, Kyohak-Sa Publishing Corporation, Seoul, p. 514.
- Lee, K.S., Chang, H.W. and Park, K.H., 1998, Neoproterozoic bimodal volcanism in the central Ogcheon belt, Korea: age and tectonic implication. *Precambrian Research*, 89, 47-57.
- 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, T.-H., Park, K.-H. and Yi, K., 2018, SHRIMP U-Pb ages of detrital zircons from the Early Cretaceous Nakdong Formation, South East Korea: Timing of initiation of the Gyeongsang Basin and its provenance. *The Island Arc*, <https://doi.org/10.1111/iar.12258>.
- Li, H.-Y., He, B., Xu, Y.-G. and Huang, X.-L., 2010, U-Pb and Hf isotope analyses of detrital zircons from Late Paleozoic sediments: Insights into interactions of the North China Craton with surrounding plates. *Journal of Asian Earth Science*, 39, 335-346.
- Li, L., Lin, S., Davis, D.W., Xia, W., Xing, G. and Yin, C., 2014, Geochronology and geochemistry of igneous rocks from the Kongling terrane Implications for Mesoarchean to Paleoproterozoic crustal evolution of the Yangtze Block. *Precambrian Research*, 255, 30-47.
- Li, Q., Zhao, L., Zhang, Y.B., Yang, J.H., Kim, J.N. and Han, R.H., 2016, Zircon-titanite-rutile U-Pb system from metamorphic rocks of Junshan "Group" in Korea: Implications of tectono-thermal events from Paleoproterozoic to Mesozoic. *Acta Petrologica Sinica*, 32, 3019-3032.
- Li, X.-H., Li, W.-X., Li, Z.-X. and Liu, Y., 2008, 850-790 Ma bimodal volcanic and intrusive rocks in northern Zhejiang, South China: a major episode of continental rift magmatism during the breakup of Rodinia. *Lithos*, 102, 341-357.
- Li, X.H., Li, Z.X., Li, W.X. and Wang, Y., 2006a, Initiation of the Indosinian Orogeny in South China: Evidence for a Permian Magmatic Arc on Hainan Island. *The Journal of Geology*, 114, 341-353.
- Li, Z.-X. and Li, X.-H., 2007, Formation of the 1300-km-wide intracontinental orogen and postorogenic magmatic province in Mesozoic South China: A flat-slab

- subduction model. *Geology*, 35, 179-182.
- Li, Z.X. and Powell, C.M.A., 2001, An outline of the palaeogeographic evolution of the Australasian region since the beginning of the Neoproterozoic. *Earth Science Reviews*, 53, 237-277.
- Lin, M., Peng, S., Jiang, X., Polat, A., Kusky, T., Wang, Q. and Deng, H., 2016, Geochemistry, petrogenesis and tectonic setting of Neoproterozoic mafic-ultramafic rocks from the western Jiangnan orogen, South China. *Gondwana Research*, 35, 338-356.
- Liu, S., Peng, S., Kusky, T., Polat, A. and Han, Q., 2018, Origin and tectonic implications of an Early Paleozoic (460-440 Ma) subduction-accretion shear zone in the northwestern Yunkai Domain, South China. *Lithos*, 322, 104-128.
- Ma, X.-H., Zhu, W.-P., Zhou, Z.H. and Qiao, S.-L., 2017, Transformation from Paleo-Asian Ocean closure to Paleo-Pacific subduction: New constraints from granulites in the eastern Jilin-Heilongjiang Belt, NE China. *Journal of Asian Earth Sciences*, 144, 261-286.
- 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., 2012, The Tectonic Evolution of South Korea and Northeast Asia from Paleoproterozoic to Triassic. *The Journal of the Petrological Society of Korea*, 21, 59-87 (in Korean with English abstract).
- Oh, C.W., Choi, S.G., Seo, J., Rajesh, V.J., Ree, J.H., Zhai, M. and Peng, P., 2009, Neoproterozoic tectonic evolution of the Hongseong area, southwestern Gyeonggi Massif, South Korea; Implication for the tectonic evolution of Northeast Asia. *Gondwana Research*, 16, 272-284.
- Oh, C.W., Choi, S.G., Zhai, M. and Guo, J., 2003, The first finding of eclogite relict in the Korean Peninsula and its tectonic meaning. Abstract volume of The West Norway Eclogite Field Symposium, 107.
- Oh, C.W., Imayama, T., Jeon, J. and Yi, K., 2017, Regional Middle Paleozoic metamorphism in the southwestern Gyeonggi Massif South Korea: its implications for tectonics in Northeast Asia. *Journal of Asian Earth Sciences*, 145, 542-564.
- Oh, C.W., Imayama, T., Lee, S.Y., Yi, S., Yi, K. and Lee, B.C., 2015, Permo-Triassic and Paleoproterozoic metamorphism related to continental collision in Yangpyeong, South Korea. *Lithos*, 216-217, 264-284.
- Oh, C.W., Imayama, T., Yi, S., Kim, T., Ryu, I., Jeon, J. and Yi, K., 2014, Middle Paleozoic metamorphism in the Hongseong area, South Korea and its tectonic meaning to Paleozoic orogeny in Northeast Asia. *Journal of Asian Earth Sciences*, 95, 203-216.
- 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. *The Journal of Geology*, 113, 226-232.
- Oh, C.W., Kim, S.W. and Williams, I.S., 2006a, Spinel granulite in Odesan area, South Korea: tectonic implications for the collision between the North and South China blocks. *Lithos*, 92, 557-575.
- Oh, C.W., Kim, S.W., Ryu, I., Okada, T., Hyodo, H. and Itaya, T., 2004, Tectono-metamorphic evolution of the Okcheon metamorphic belt, South Korea: tectonic implications in East Asia. *Island Arc*, 13, 387-402.
- Oh, C.W. and Kusky, T., 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. and Lee, B.C., 2018, The relationship between systematic metamorphic patterns and collisional processes along the Qinling-Sulu-Odesan collisional belt between the North and South China Cratons. *The Geological Society of London*, 478, 449-475.
- Oh, C.W., Lee, B.C., Yi, S. and Ryu, H.I., 2019, Correlation of Paleoproterozoic igneous and metamorphic events of the Korean Peninsula and China; Its implication to the tectonics of Northeast Asia. *Precambrian Research*, 326, 344-362.
- Oh, C.W., Lee, J.Y., Yengkhom, K.S., Lee, B.C. and Ryu, H.I., 2018, Neoproterozoic igneous activity and Permo-Triassic metamorphism in the Gapyeong area within the Gyeonggi Massif, South Korea, and their implication for the tectonics of northeastern Asia. *Lithos*, 322, 1-19.
- Oh, C.W. and Liou, J.G., 1988, A petrogenetic grid for eclogite and related facies under high-pressure metamorphism. *Island Arc*, 7, 36-51.
- Oh, C.W., Sajeev, K., Kim, S.W. and Kwon, Y.W., 2006b, Mangerite Magmatism associated with a probable late Permian to Triassic Hongseong-Odesan collisional belt in South, Korea. *Gondwana Research*, 9, 95-105.
- Park, S.-I., Kim, S.W., Kwon, S., Thanh, N.X., Yi, K. and Santosh, M., 2014, Paleozoic tectonics of the southwestern Gyeonggi massif, South Korea: insights from geochemistry, chromian-spinel chemistry and SHRIMP U-Pb geochronology. *Gondwana Research*, 26, 684-689.
- Peng, P., 2015, Precambrian mafic dyke swarms in the North China Craton and their geological implications. *Science China Earth Sciences*, 58, 649-675.
- Peng, P., Zhai, M.G., Li, Q.L., Wu, F.Y., Hou, Q.L. and Li, Z., 2011, Neoproterozoic (~900 Ma) Sariwon sills in North Korea: Geochronology, geochemistry and im-

- plications for the evolution of the south-eastern margin of the North China Craton. *Gondwana Research*, 20, 243-254.
- Peng, P., Zhai, M.G., J., Zhang, H. and Zhang, Y., 2008, Petrogenesis of Triassic post-collisional syenite plutons in the Sino-Korean craton: an example from North Korea. *Geological Magazine*, 145, 637-647.
- Peng, S.B., Kusky, T.M., Jiang, X.F., Wang, L., Wang, J.P. and Deng, H., 2012, Geology, geochemistry, and geochronology of the Miaowan ophiolite, Yangtze craton: implications for South China's amalgamation history with the Rodinian supercontinent. *Gondwana Research*, 21, 577-594.
- Qiu, X.F., Ling, W.L., Liu, X.M., Kusky, T.M., Berkana, W., Zhang, Y.H., Gao, Y.J., Lu, S.S., Kuang, H. and Liu, C.X., 2011, Recognition of Grenvillian volcanic suite in the Shennongjia region and its tectonic significance for the South China Craton. *Precambrian Research*, 191, 101-119.
- 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 granitoids in the south central Okchon belt, South Korea' Implications for the timing of strike-slip shearing and thrusting. *Tectonics*, 20, 850-867.
- Rong, J.Y., Zhang, R., Xu, H., Huang, B. and Yu, G., 2010, Expansion of the Cathaysian Oldland through the Ordovician-Silurian transition: Emerging evidence and possible dynamics. *Science China Earth Sciences*, 53, 1-17.
- Sajeev, K., Jeong, J., Kwon, S., Kee, W.-S., Kim, S.W., Komiya, T., Itaya, T., Jung, H.-S. and Park, Y., 2010, High P-T granulite relicts from the Imjingang Belt, South Korea: tectonic significance. *Gondwana Research*, 17, 75-86.
- Seo, J., Choi, S.-G., Kim, D.W., Park, J.-W. and Oh, C.W., 2015, A new genetic model for the Triassic Yangyang iron-oxide-apatite deposit, South Korea: Constraints from in situ U-Pb and trace element analyses of accessory minerals. *Ore Geology Reviews*, 70, 110-135.
- Seo, J., Choi, S.G. and Oh, C.W., 2010, Petrology, geochemistry, and geochronology of the Post-collisional Triassic mangerite and syenite in the Gwangcheon area, Hong-seong Belt, South Korea. *Gondwana Research*, 18, 479-496.
- Seo, J., Choi, S.-G., Park, J.-W., Whattam, S., Kim, D.W., Ryu, I.-C. and Oh, C.W., 2016, Geochemical and mineralogical characteristics of the Yonghwam phoscorite-carbonatite complex, South Korea, and genetic implications. *Lithos*, 262, 606-619.
- Wang, B., Zhou, J.-B., Wilde, S.A., Zhang, X.-Z. and Ren, S.-M., 2016, The timing of final closure along the Changchun-Yanji suture zone: Constraints from detrital zircon U-Pb dating of the Triassic Dajianggang Formation, NE China. *Lithos*, 261, 216-231.
- Wang, J. and Li, Z.-X., 2003, History of Neoproterozoic rift basins in South China: implications for Rodinia break-up. *Precambrian Research*, 122, 141-158.
- Wang, X.H., Oh, C.W., Lee, B.C. and Liu, F.L., 2020, Paleoproterozoic postcollisional metamorphic and igneous activities in the Jinan area of the Jiao-Liao-Ji Belt in the North China Craton and their tectonic implications. *Precambrian Research*, 346, 105793.
- Wang, X.H., Oh, C.W., Wang, X., Zhai, M.G. and Zhao, L., 2021, The ~1.87 Ga granulite facies metamorphism of the South Liaohe Group in the Jiao-Liao-Ji Belt and its tectonic implications. *Lithos*, 392-393, <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2021.106081>.
- Wang, X.-L., Zhou, J.-C., Griffin, W., Zhao, G., Yu, J.-H., Qiu, J.-S., Zhang, Y.-J. and Xing, G.-F., 2014, Geochemical zonation across a Neoproterozoic orogenic belt: isotopic evidence from granitoids and metasedimentary rocks of the Jiangnan orogen, China. *Precambrian Research*, 242, 154-171.
- Wang, X.M., Liou, J.G. and Mao, H.K., 1989, Coesite-bearing eclogites from the Dabie Mountains in central China. *The Journal of Geology*, 17, 1085-1088.
- Wang, X.P., Oh, C.W., Peng, P., Zhai, M.G., Wang, X.H. and Lee, B.Y., 2020a, Distribution pattern of age and geochemistry of 2.18-2.14 Ga I- and A-type granites and their implication for the tectonics of the Liao-Ji belt in the North China Craton. *Lithos* 364-365, <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2020.105518>.
- Wang, X.P., Oh, C.W., Peng, P., Zhao, L., Zhai, M. and Lee, S.H., 2020b, Petrogenesis of ~2.1 Ga mafic and granitic magmatism and tectonic implication of Jiaobei Terrane in North China Craton. *Lithos*, 378-379, <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2020.105806>.
- Wang, Y., Fan, W., Zhang, G. and Zhang, Y., 2013a, Phanerozoic tectonics of the South China Block: Key observations and controversies. *Gondwana Research*, 23, 1273-1305.
- Wang, Z., Bergstrom, S.M. and Lane, H.R., 1996, Conodont provinces and biostratigraphy in Ordovician of China. *Acta Palaeontologica Sinica*, 35, 26-29.
- Wang, Z., Wang, J., Deng, Q., Du, Q., Zhou, X., Yang, F. and Liu, H., 2015, Paleoproterozoic I-type granites and their implications for the Yangtze block position in the Columbia supercontinent: evidence from the Lengshui Complex, South China. *Precambrian Research*, 263,

- 157-173.
- Wang, Z., Wang, J., Du, Q., Deng, Q. and Yang, F., 2013b, The evolution of the Central Yangtze Block during early Neoproterozoic time: evidence from geochronology and geochemistry. *Journal of Asian Earth Sciences*, 77, 31-44.
- Wang, Z.-H., Qi, Y.-P. and Stig, M.B., 2007, Ordovician conodonts of the Tarim Region, Xinjiang, China: Occurrence and use as palaeoenvironment indicators. *Journal of Asian Earth Sciences*, 29, 832-843.
- Williams, I.S., Cho, D.L. and Kim, S.W., 2009, Geochronology, and geochemical and Nd-Sr isotopic characteristics, of Triassic plutonic rocks in the Gyeonggi Massif, South Korea: Constraints on Triassic post-collisional magmatism. *Lithos*, 107, 239-256.
- Wu, F.-Y., Han, R.-H., Yang, J.-H., Wilde, S.A., Zhao, M.-G. and Park, S.-C., 2007, Initial constraints on the timing of granitic magmatism in North Korea using U-Pb zircon geochronology. *Chemical Geology*, 238, 232-248.
- Wu, R.X., Zheng, Y.F., Wu, Y.B., Zhao, Z.F., Zhang, S.B., Liu, X. and Wu, F.Y., 2006, Reworking of juvenile crust: element and isotope evidence from Neoproterozoic granodiorite in South China. *Precambrian Research*, 146, 179-212.
- Xia, Y., Xu, X., Zou, H. and Liu, L., 2014, Early Paleozoic crust-mantle interaction and lithosphere delamination in South China Block: Evidence from geochronology, geochemistry, and Sr-Nd-Hf isotopes of granites. *Lithos*, 184-187, 416-435.
- Xu, H.-H., Wang, Yi, Tang, P., Fu, Q. and Wang, Y., 2019, Discovery of Lower Devonian plants from Jiangxi, South China and the pattern of Devonian transgression after the Kwangsian Orogeny in the Cathaysia Block. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 531, <https://doi.org/10.1016/j.palaeo.2018.11.007>.
- Yan, C., Shu, L., Michel, F., Chen, Y. and Li, C., 2017, Early Paleozoic intracontinental orogeny in the Yunkai domain, South China Block: New insights from field observations, zircon U-Pb geochronological and geochemical investigations. *Lithos*, 268-271, 320-333.
- Yao, W.-H., Li, Z.-X., Li, W.-X., Wang, X.-C., Li, X.-H. and Yang, J.-H., 2012, Post-kinematic lithospheric delamination of the Wuyi-Yunkai orogen in South China: Evidence from ca. 435 Ma high-Mg basalts. *Lithos*, 154, 115-129.
- Yengkhom, K.S., Lee, B.C., Oh, C.W. and Yi, K., 2014, Tectonic and deformation history of the Gyeonggi Massif in and around the Hongcheon area, and its implications in the tectonic evolution of the North China Craton. *Precambrian Research*, 240, 37-59.
- Yi, S., Oh, C.W., Lee, S., Choi, S., Kim, T. and Yi, K., 2016, Triassic mafic and intermediate magmatism associated with continental collision between the North and South China Cratons in the Korean Peninsula. *Lithos*, 246-247, 149-164.
- Yin, A. and Nie, S., 1993, An indentation model for the north and south China collision and the development of the TanLu and Honam fault systems, eastern Asia. *Tectonics*, 12, 801-813.
- Zhai, M.G. and Cong, B., 1996, Major and trace element geochemistry of eclogites and related rocks. In Cong, B., ed., *Ultrahigh-pressure metamorphic rocks in the Dabieshan-Sulu Region of China*: Dordrecht, The Netherlands, Kluwer Academic Publication, p. 128-160.
- Zhai, M.G., Guo, J., Li, Z., Chen, D., Peng, P., Li, T., Hou, Q. and Fan, Q., 2007, Linking the Sulu UHP belt to the Korean Peninsula: Evidence from eclogite, Precambrian basement, and Paleozoic sedimentary basins. *Gondwana Research*, 12, 388-403.
- Zhai, M.G., Ni, Z.Y., Oh, C.W., Guo, J.H. and Choi, S.G., 2005, SHRIMP zircon age of a Proterozoic rapakivi granite batholiths in the Gyeonggi massif (South Korea) and its geological implications. *Geological Magazine*, 142, 23-30.
- Zhai, M.G. and Santosh, M., 2011, The early Precambrian odyssey of the North China Craton: A synoptic overview. *Gondwana Research*, 20, 6-25.
- Zhai, M.G., Shao, J., Hao, J. and Peng, P., 2003, Geological signature and possible position of the North China block in the supercontinent Rodinia. *Gondwana Research*, 6, 171-183.
- Zhang, C.-L., Santosh, M., Zou, H.-B., Li, H.-K. and Huang, W.-C., 2013, The Fuchuan ophiolite in Jiangnan Orogen: geochemistry, zircon U-Pb geochronology, Hf isotope and implications for the Neoproterozoic assembly of South China. *Lithos*, 179, 263-274.
- Zhang, K.J., 1997, North and South China collision along the eastern and southern North China margins. *Tectonophysics*, 270, 145-156.
- Zhang, S.-H., Zhao, Y., Song, B., Hu, J.-M., Liu, S.-W., Yang, Y.-H., Liu, X.-M. and Liu, J., 2009, Contrasting Late Carboniferous and Late Permian-Middle Triassic intrusive suites from the northern margin of the North China craton: Geochronology, petrogenesis, and tectonic implications. *GSA Bulletin*, 121, 181-200.
- Zhang, X.H., Wang, H.Z., Park, H.N., Yang, J.H. and Kim, J.N., 2016, Basement affinity of the Kwanmo Massif, Korean Peninsula: evidence from zircon U-Pb geochronology and petro-geochemistry of the Undokdong meta-intrusive complex. *Acta Petrologica Sinica*, 32, 2965-2980 (in Chinese with English abstract).

- Zhao, G., Cao, L., Wilde, S., Sun, M., Choe, W. and Li, S., 2006, Implications based on the first SHRIMP U-Pb zircon dating on Precambrian granitoid rocks in North Korea. *Earth and Planetary Science Letters*, 251, 365-379.
- Zhao, G. and Zhai, M., 2013, Lithotectonic elements of Precambrian basement in the North China Craton: Review and tectonic implications. *Gondwana Research*, 23, 1207-1240.
- Zhao, J.-H., Li, Q.-W., Liu, H. and Wei, W., 2018, Neoproterozoic magmatism in the western and northern margins of the Yangtze Block (South China) controlled by slab subduction and subduction-transform-edge-propagator. *Earth-Science Reviews*, 187, 1-18.
- Zhao, L., Zhang, Y.B., Wu, F.Y., Li, Q.L., Yang, J.H., Kim, J.N. and Choi, W.J., 2016, Paleoproterozoic high temperature metamorphism and anatexis in the northeastern Korean Peninsula: Constraints from petrology and zircon U-Pb geochemistry. *Acta Petrologica Sinica*, 32, 3045-3069.
- Zhao, L., Zhou, X., Zhai, M., Santosh, M., Ma, X., Shan, H. and Cui, X., 2014, Paleoproterozoic tectonic transition from collision to extension in the eastern Cathaysia Block, South China: Evidence from geochemistry, zircon U-Pb geochronology and Nd-Hf isotopes of a granite-charnockite suite in southwestern Zhejiang. *Lithos*, 184-187, 259-280.

---

Received : July 5, 2021

Revised : August 27, 2021

Accepted : August 29, 2021