

한반도에 나타나는 페름기-트라이아스기 변성 및 화성작용과 지구조 진화에 대한 기존연구 종합검토

정지완 · 오창환[‡]

전북대학교 지구환경과학과 및 지구환경시스템 연구소

요 약

1990년대 이후의 연구들은 페름기-트라이아스기에 일어난 송림 조산운동이 임진강대, 경기육괴, 옥천대에 중압형 변성작용을 광역적으로 일으켰으며 대륙충돌의 증거인 홍성 지역의 에클로자이트를 형성시켰음을 확인하였다. 그리고 약 230 Ma의 충돌 후 화성암들이 홍성-오대산을 연하는 지역과 그 이북에 분포하는 경기육괴 북부, 임진강대와 낭림육괴 남부에 광역적으로 나타난다. 이들 변성 및 충돌 후 화성작용을 근거로 송림 조산운동 시기에 홍성-오대산지역을 따라 대륙 충돌이 일어났으며 홍성-오대산 충돌대가 중국의 친링-다비-수투 충돌대의 연장선임이 제안되었다. 경기육괴는 홍성-오대산 충돌대를 중심으로 북부 경기육괴와 남부 경기육괴로 구분된다. 충돌 시기에 가장 강한 변성작용이 홍성-오대산 충돌대를 따라 일어났으며 홍성-오대산 충돌대의 북쪽에 분포하는 임진강대에서는 변성도가 남쪽으로 증가함이 확인되었고 충돌대 남쪽에 위치한 옥천변성대에서는 변성도가 북쪽 방향으로 증가한다. 이는 홍성-오대산 지역이 북중국판과 남중국판이 충돌한 위치이며 충돌 시 충돌 주변에 존재하였던 임진강대와 옥천변성대는 중압형 변성작용을 받았음을 지시한다. 페름기-트라이아스기에 일어난 송림 변동 시기에 한반도 남부 지역은 섭입 관련된 280-230 Ma 화성암에 의해 광범위하게 관입되었다. 그 이후 220 Ma경에 섭입대의 후퇴작용에 의해 상승한 연약권 맨틀이 제공한 열에 의해 화성활동이 일어났다. 충돌시기와 유사한 시기에 한반도 남부에서 일어난 섭입 관련 화성활동은 한반도 남부를 포함한 남중국판이 북중국판과의 충돌에 의해 북쪽으로 이동이 중지되면서 남중국판과 함께 북쪽으로 이동하던 해양판이 남중국판 하부로 섭입이 시작하였을 가능성을 지시한다.

주요어: 송림조산운동, 홍성-양평-오대산 충돌대, 변성작용, 충돌 후 화성활동, 섭입관련 화성활동

Ji Wan Jeong and Chang Whan Oh, 2021, A comprehensive review of previous studies on Permo-Triassic metamorphic and igneous activities, and tectonic evolution in the Korean Peninsula. Journal of the Geological Society of Korea. v. 57, no. 4, p. 545-564

ABSTRACT: In the Korean Peninsula, the Permo-Triassic Songrim Orogeny caused ca. 280-250 Ma intermediate-P/T metamorphism in the Imjingang belt (IB), Gyeonggi Massif (GM), and Okcheon metamorphic belt (OMB), and formed ca. 250-230 Ma eclogite in the Hongseong area. The ca. 230 Ma post-collisional igneous rocks are widely distributed in the Hongseong-Odesan belt, northern GM, IB, and southern Nangrim Massif. These data represent that the continental collision occurred along the Hongseong-Odesan collision belt in the Korean Peninsula which was suggested as an extension of the Qinling-Dabie-Sulu collision belt in China. The Hongseong-Odesan collision belt divides the GM into the northern and southern GM. During the collision, the strongest metamorphism occurred in the Hongseong-Odesan belt. In the IB, located to the north of the collision belt, the metamorphic grade increases southwards whereas, in the OMB located to the south of the collision belt, the metamorphic grade increases northwards. This metamorphic pattern indicates that the collision boundary located along the Hongseong-Odesan area and the IB and OMB located on the periphery of the collision belt underwent intermediated-P/T metamorphism during the collision. The subduction-related ca. 280-230 Ma igneous rocks are widely distributed in the southern Korean Peninsula during the Permo-Triassic Songrim Orogeny. After that, ca. 220 Ma granitoids intruded in the within-plate environment due to heat supplied by the upwelling of the asthenospheric mantle caused by an extension related to slab-roll back. The similar age between the collision event in the GM and the subduction event in the southern margin of the Korean Peninsula suggests that the collision stopped the northwards movement of the South China Craton including the southern Korean Peninsula, resulting in the subduction of the oceanic slab which

[‡] Corresponding author: +82-63-270-3397, E-mail: ocwhan@jbnu.ac.kr

continuously moved northwards after the collision.

Key words: Songrim Orogeny, Hongseong-Yangpyeong-Odesan collision belt, metamorphism, post-collisional igneous activity, subduction-related igneous activity

(*Ji Wan Jeong and Chang Whan Oh, Department of Earth and Environmental Sciences, The Earth and Environmental Science System Research Center, Jeonbuk National University, Jeonju 54896, Republic of Korea*)

1. 서 론

한반도는 선캠브리아 시대부터 여러 지구조적 사건을 겪으면서 진화해왔다. 1990년대 이전 연구에서는 고원생대에 강한 변성작용과 함께 일어난 지구조 운동에 의해 현재의 한반도 형태가 형성된 후 유지되어오다가 쥐라기에 광역적인 화성암의 관입과 함께 대보 조산운동이 일어났다고 해석되어왔다(Lee, 1987). 이는 고원생대와 쥐라기 사이에는 한반도가 큰 지구조운동을 받지 않았음을 시사한다. 비록 트라이아스기 송림 조산운동이 보고되기는 하였으나 한반도 남부에서 일어나지 않고 한반도 북부에서 약하게 일어난 것으로 보고되어 한반도 형성에 큰 영향을 미치지 못한 것으로 해석되었다. 하지만 1980년대부터 중국 다비-수루 지역에서의 트라이아스기 에클로자이트의 발견에 의해 북중국판과 남중국판이 다비-수루 충돌대를 따라 트라이아스기에 충돌했다는 연구결과가 제시되기 시작하였고 이러한 충돌대가 한반도로 연결될 것인가는 국내 지질학자는 물론 전세계학자들의 관심의 대상이 되었다(Wang *et al.*, 1989; Zhai and Cong, 1996; Oh, 2006; Oh and Kusky, 2007 and references therein). 1990년대 이후 홍성 지역에서의 에클로자이트 발견과 함께 페름기-트라이아스기 변성작용이 임진강대, 경기육괴, 옥천변성대에 걸쳐 광역적으로 일어났음이 보고되었고 이들은 한반도내에서 일어난 북중국판과 남중국판의 충돌에 의한 것으로 해석되었다(Oh *et al.*, 2005, 2014, 2015; Oh, 2006; Kim *et al.*, 2006, 2008; Lee *et al.*, 2016). 이는 1990년대 이전의 해석과 달리 페름기-트라이아스기에 일어난 송림 조산운동이 한반도의 최종 형태를 만든 중요한 지구조운동이었음을 시사한다. 이러한 국내와 중국에서의 연구 결과를 바탕으로 페름기-트라이아스기에 한반도를 포함한 동북아시아 지체구조 진화에 대한 여러 모델들이 제안되었으나, 아직 모두가 동의할 수 있는 모델이 마련

되어 있지 않은 상태이다.

최근에 페름기-트라이아스기의 변성작용에 대한 많은 연구 결과가 발표되었으며 홍성 지역에서는 충돌대의 증거인 페름기-트라이아스기의 에클로자이트가 경기육괴 서남부인 홍성에서 발견되어 다비-수루 충돌대가 한반도 홍성 지역으로 연결됨이 확인되었다(그림 1; Oh *et al.*, 2005, 2014, 2015; Oh, 2006; Kim *et al.*, 2006, 2008; Lee *et al.*, 2016). 비록 경기육괴 북부에 분포하는 임진강대가 오랫동안 다비-수루 충돌대의 연장선으로 많은 학자들에 의해 주장되었으나 아직 임진강대에서는 대륙충돌 경계부에 나타나는 에클로자이트 등의 증거가 보고되지 않고 있으며 최근에는 임진강대가 충돌 경계부가 아니라는 사실이 Lee *et al.* (2019b)에 의해 발표되었다. 그리고 홍성-오대산을 연결하는 지역과 그 이북에 분포하는 경기육괴 북부와 임진강대에서는 트라이아스기 충돌 후 화성작용이 광역적으로 발달하였다(그림 2; Peng *et al.*, 2008; Park, 2009; Williams *et al.*, 2009; Seo *et al.*, 2010, 2015; Kim *et al.*, 2011a, 2011b; Cho and Lee, 2017). 이러한 페름기-트라이아스기 화성 및 변성작용은 에클로자이트와 함께 페름기-트라이아스기에 한반도를 포함한 동북아시아 지구조운동에 매우 중요한 정보를 제공하나 이들 정보에 기반한 지구조운동에 대한 해석들이 아직 논란중인 상황이다.

대륙충돌이 일어난 페름기-트라이아스기 지구조운동 시기에 한반도 남부와 남중국판의 남부 지역에 섭입 관련 화성암이 광범위하게 분포하고 있다(그림 3; Faure *et al.*, 1988; Wang *et al.*, 2005; Li *et al.*, 2006; Lee *et al.*, 2007; Park *et al.*, 2011; Oh, 2012; Yi *et al.*, 2012). 이는 이 시기에 남중국판의 남쪽 경계와 한반도 남부를 따라 섭입대가 형성되어 있었음을 시사한다. 이 섭입대에 관련된 화성작용은 페름기부터 시작되어 쥐라기까지 계속되었으며 매우 제한되지만 먼저 만들어진 화성암의 일부는 후기 화성작용에 의해 변성을 받았다(Lee *et al.*, 2007; Park *et*

al., 2010, 2011). 즉 송림 조산운동 시기에 한반도 중부 지역에서는 대륙충돌과 그에 관련된 화성 및 변성작용이 일어나고 있으며 한반도 남부에는 섭입작용과 그에 관련된 화성작용이 일어나고 있었을 것으로 생각된다. 따라서 페름기-트라이아스기의 송림 조산운동 시기에 일어난 대륙충돌과 섭입작용에 대한 종합적인 해석이 필요하다. 하지만 이러한 종합적인 연구는 매우 제한적으로만 수행되었기 때문에 이에 대한 많은 추가 연구가 필요하며 왜 섭입대가 형성되었는지를 연구하는 것도 중요하다.

본 연구에서는 한반도 남부에 나타나는 페름기-트라이아스기 변성작용과 충돌 후 화성작용에 대한 기존 연구 결과를 종합하여 한반도 충돌과정에 대한 좀 더 명확한 해석을 시도하였고 페름기-트라이아스기 섭입 관련된 화성작용에 대한 기존의 연구결과를 종합하여 한반도에서 일어난 섭입작용과 관련된 지

구조운동을 해석하고자 한다. 그리고 최종적으로는 앞의 두 연구결과를 종합하여 페름기-트라이아스기에 한반도 남부에서 일어난 대륙충돌과 섭입작용에 관련된 지구조진화를 종합 해석하였다.

2. 한반도 지질개요

한반도는 유라시아판 동쪽 가장자리에 위치하며 북으로는 북중국지괴와 연결되고, 서쪽으로 북중국지괴와 남중국지괴로 구성된 중국대륙과 동쪽으로 일본열도와 인접하게 위치하고 있다(그림 1; Oh et al., 2005, 2014, 2015; Oh, 2006; Kim et al., 2006, 2008; Lee et al., 2016). 한반도의 기저는 북으로부터 4개의 주요 고원생대 변성복합체인 관모육괴, 낭림육괴, 경기육괴, 영남육괴로 구성되어있다. 이 중에 경기육괴는 한반도의 중앙부에 위치하며 북쪽으로는

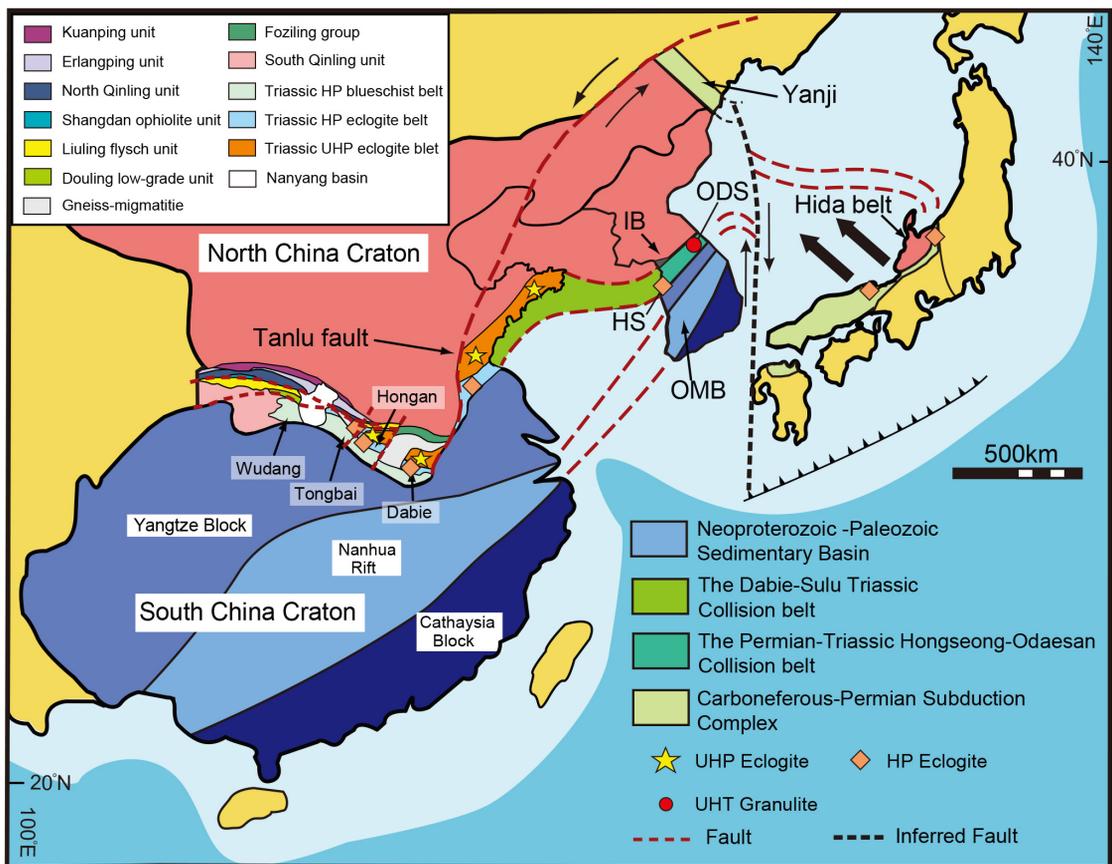


Fig. 1. The tectonic model of the northeast Asia (modified after Oh and Lee, 2018). Abbreviations: IB, Imjingang belt; HS, Hongseong area; ODS, Odesan area; OMB, Okcheon metamorphic belt.

임진강대에 의해 낭림육괴와 분리되며 남쪽으로는 옥천대에 의해 영남육괴와 분리된다. 경기육괴는 주로 약 1.9-1.8 Ga의 변성연령을 보여주는 호상 편마암, 혼성질 편마암 그리고 우백질 편마암과 같은 변성암들로 이루어져 있으며 경기육괴의 제한된 지역에서 시생대의 변성화성암류도 나타난다(Oh *et al.*, 2006a; Zhao *et al.*, 2006; Cho *et al.*, 2008b; Lee *et al.*, 2011). 경기육괴는 페름기-트라이아스기 홍성-오대산 충돌대를 경계로 북부와 남부 경기육괴로 나누어질 가능성이 제시되었으며 경기육괴 북부와 남부에서는 다음과 같은 서로 다른 고원생대 지구조운동사가 인지되었다. 경기육괴 북부에서는 1.93 Ga에 충돌에 의한 변성작용과 그 이후 1.89-1.87 Ga에 일어난 충돌 후 화성작용과 그에 연관된 변성작용이

일어난 것에 비해 경기육괴 남동부인 원주 지역에서는 1.95-1.91 Ga 시기에 섭입 관련 화성 및 변성작용이 일어났으며 1.8 Ga에 충돌 후 화성작용이 일어났음이 보고되었다(Oh *et al.*, 2006a; Zhao *et al.*, 2006; Lee *et al.*, 2011, 2014, 2016; Oh, 2012; Yengkhom *et al.*, 2014). 한편 영남육괴 북쪽 경계부에서는 2.0-1.8 Ga에 섭입대가 존재하였음이 확인되었고 영남육괴 중앙부에 남북 방향으로 형성된 지리산 지역에서는 1.88-1.86 Ga에 대륙 충돌 후 환경에서 일어난 변성 및 화성작용이 인지되었다(Kim *et al.*, 2012b; Lee *et al.*, 2017, 2019a, 2020a; Cho *et al.*, 2020). Lee *et al.* (2020a)은 영남육괴가 2.0-1.8 Ga에 섭입 관련된 화성작용이 나타나지 않는 북중국판이나 경기육괴 북부 및 낭림육괴와 대비될 수 없다고 해석하였다. 이후

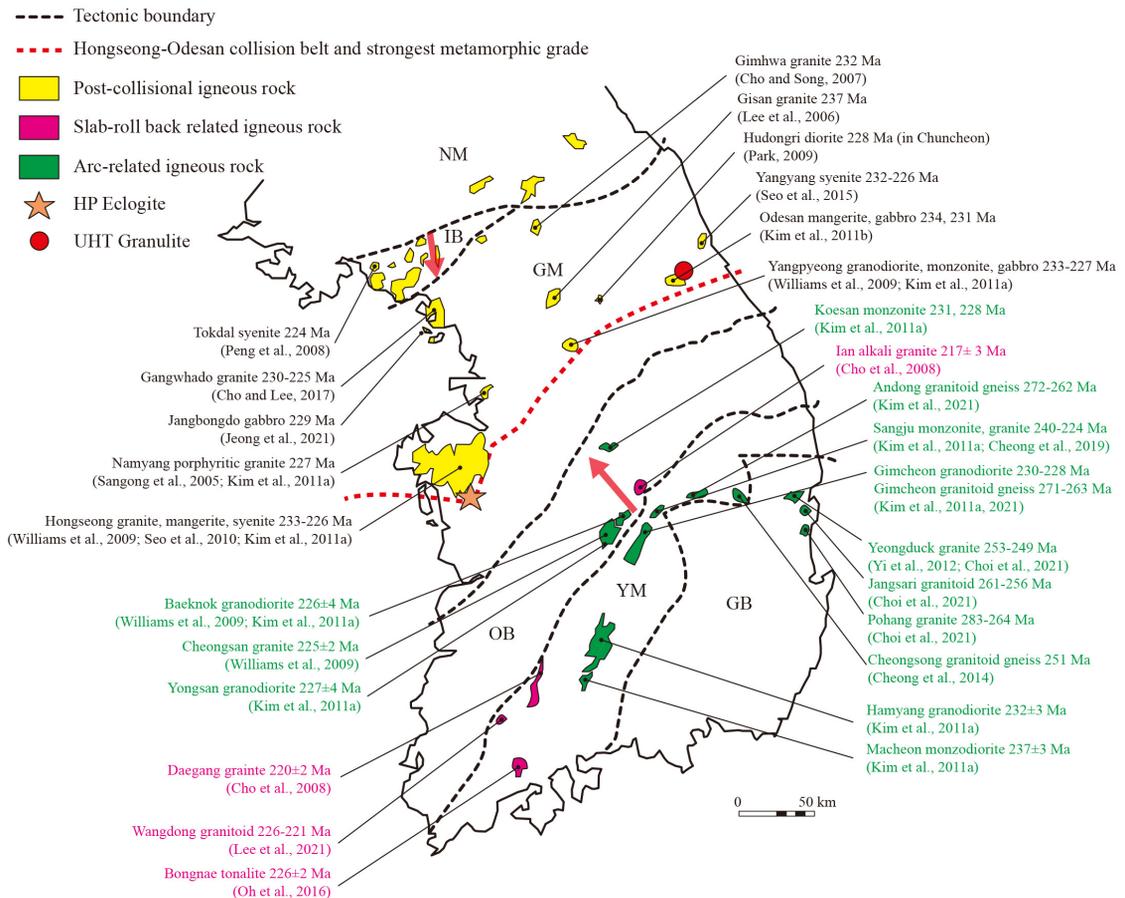


Fig. 2. The distribution map of the Permo-Triassic granitoids in the Korean Peninsula. Abbreviations: NM, Nangrim Massif; IB, Imjingang belt; GM, Gyeonggi Massif; OB, Okcheon belt; YM, Yeongnam Massif; GB, Gyeongsang basin.

남림육괴와 경기육괴 북부에서는 중원생대 말부터 대륙판내 열곡이 형성되어 그 내부에 퇴적암이 퇴적되기 시작하였고 이들 퇴적암은 열곡 환경에서 형성된 900-740 Ma 신원생대 화성암에 의해 관입하였다 (Lee *et al.*, 2020b and references therein). 한편 경기육괴 남서부 지역에서는 신원생대 시기에 섭입 관련된 화성작용이 900-825 Ma에 먼저 일어난 후 열곡 환경에서 형성된 800-700 Ma 화성작용이 일어났다. 이러한 고원생대와 신원생대 암석들로부터 얻어진 정보를 바탕으로 경기육괴 북부와 남부가 서로 다른 지구조 진화를 경험하였다는 해석이 제시되었다 (Lee *et al.*, 2017, 2019a, 2020a, 2020b).

경기육괴 남서부 홍성 지역에서는 고생대 중기의 섭입 관련 화성작용과 대륙 충돌에 의한 변성작용이

일어났다는 연구 결과도 보고되었다 (Kim *et al.*, 2015; Oh *et al.*, 2017; Imayama *et al.*, 2021). 그 이후 임진강대, 경기육괴, 옥천변성대는 페름기-트라이아스기의 광역 변성작용을 받았고 이는 한반도내 대륙 충돌에 기인한 것으로 해석되고 있다. 하지만 충돌대의 위치는 아직도 논란 중에 있다. 그러나 Oh (2012)는 홍성지역에 나타나는 페름기-트라이아스기 에클로자이트와 홍성-오대산과 그 이북지역에 나타나는 트라이아스기 충돌 후 화성암을 바탕으로 홍성-오대산을 연하는 지역이 충돌 경계부로서의 가능성이 가장 높다고 해석하였다. 이는 앞에 언급된 경기육괴 북부와 남부의 고원생대 및 신원생대의 지구조 진화의 차이에 의해서도 잘 지지된다.

대륙 충돌시기에 한반도 남부에서는 페름기부터

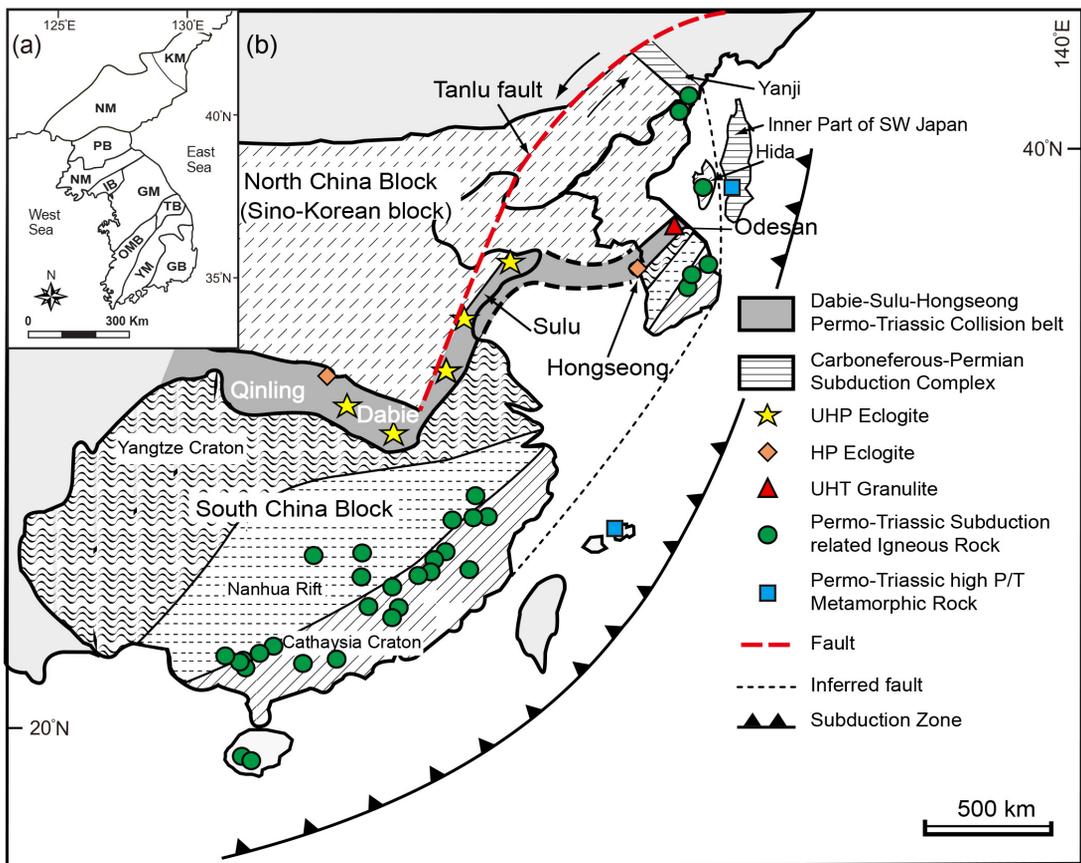


Fig. 3. The tectonic map of the northeast Asia, showing the distribution of the Permo-Triassic subduction-related igneous rocks in the Yeongnam Massif and the southern margin of the South China Craton and of the Permo-Triassic high-P/T type metamorphic rocks in Japan, indicating the initiation of subduction along the margin of the South China Craton from Permian period (modified after Oh, 2012). Data from Faure *et al.*, 1988; Wang *et al.*, 2005; Li *et al.*, 2006; Lee *et al.*, 2007; Park *et al.*, 2011; Oh, 2012; Yi *et al.*, 2012.

섭입 관련된 화성작용이 일어났으며 이러한 섭입작용은 쥐라기를 거쳐 백악기까지 이어졌다(Kim *et al.*, 2021 and references therein). 특히 쥐라기에는 한반도 전지역에 섭입관련 화성활동이 일어나 쥐라기 대보 화성암류(약 190-160 Ma)의 관입이 있었다(Park *et al.*, 2010; Cheong and Kim 2012 and references therein). 그리고 160-120 Ma의 화성활동 휴지기를 지나 백악기에 다시 한반도 전체적으로 화성작용이 일어났다(Hwang, 1994; Hwang *et al.*, 2011 and references therein).

3. 페름기-트라이아스기 충돌관련 변성작용

대륙충돌과 관련된 페름기-트라이아스기 변성작용은 경기육괴, 임진강대, 옥천변성대에 걸쳐 광범위하게 나타난다. 앞서 언급한 한반도 경기육괴 서남부에 위치한 홍성 지역 내 비봉에서 발견된 에클로자이트는 한반도 내에 고압 변성작용과 대륙충돌이 일어난 증거이다(Oh *et al.*, 2005). 이 암석은 260-250 Ma경에 에클로자이트 변성상에 해당하는 고압 변성작용(860-835°C/21-17 kbar)을 받아 형성되었으며 이후 230 Ma경에 지표로 상승하여 백립암상의 후퇴변성(850-830°C/15-12 kbar)을 받았고 최종적으로 각섬암상의 변성작용(740-570°C/11-7 kbar)을 받았다(그림 4; Oh *et al.*, 2005; Kim *et al.*, 2006). 에클로자이트 변성작용 시기에는 경옥(jadeite) 성분이 25% 이상을 함유하는 옴파싸이트질 휘석이 석류석과 함께 형성되었으며 이후 백립암상의 후퇴변성작용 시기에는 석류석과 함께 보통휘석이 형성되었다. 최종 후퇴변성작용시기에는 각섬석과 장석이 석류석 주변에 심플렉타이트 조직으로 형성되었다. 홍성 지역의 페름기-트라이아스기 에클로자이트는 북중국판과 남중국판의 충돌에 의해 형성된 트라이아스기의 친링-다비-수루 충돌대가 한반도의 홍성 지역으로 연결됨을 지시한다(그림 1; Oh *et al.*, 2005, 2014, 2015; Kim *et al.*, 2006, 2008; Oh, 2006; Lee *et al.*, 2016).

경기육괴 동부에 위치한 오대산 지역에서 나타나는 호상 편마암은 초고온 변성작용(950-902°C/9.4-8.8 kbar)을 247-245 Ma에 받았다(그림 4; Oh *et al.*, 2005; Lee *et al.*, 2016). 그 이후 227 Ma경에 대륙충돌 후 지속적인 인장력의 발생으로 초고온 변성작용

을 받은 호상 편마암을 포함하는 하부 지각이 용기하여 660°C/8.7 kbar에서 760-750°C/6.5-6.3 kbar에 해당하는 백립암상의 혼성암화 변성작용을 받았다(그림 4; Lee *et al.*, 2016). 이후 혼성암은 최종적으로 천부로 용기하여 각섬암상의 변성작용(680-575°C/4.5-3.1 kbar)을 받았다(그림 4). 결과적으로 오대산 지역의 하부지각은 247-245 Ma에 초고온 변성작용을 받은 후 용기하였다. 이후 오대산 지역은 227 Ma경 충돌 후 화성암인 맨거라이트와 반려암에 의해 관입되면서 혼성질 변성작용을 받았다(Lee *et al.*, 2016). 이 자료는 트라이아스기 친링-다비-수루 충돌대가 한반도내 홍성-오대산 지역으로 연결될 가능성을 지시한다(그림 1; Oh *et al.*, 2006b; Oh and Kusky, 2007).

Oh *et al.* (2015)에 의하면 양평 지역 북서쪽에 나타나는 석류석-흑운모 편마암은 고원생대 변성작용

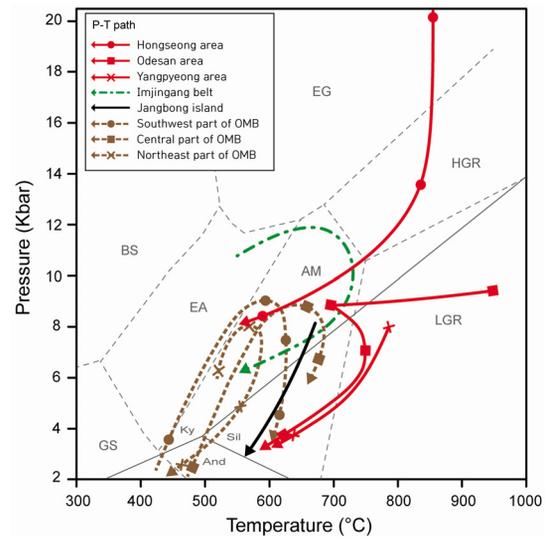


Fig. 4. The P-T paths of the Permo-Triassic metamorphism in the Korean Peninsula on the metamorphic facies diagram constructed by Oh and Liou (1998). The red, yellow, black and brown color indicate the P-T paths in the Hongseong-Yangpyeong-Odesan belt, Imjingang belt, northern Gyeonggi Massif and Okcheon metamorphic belt. Data from Kim, 1995, 2005; Min and Cho, 1998; Oh, 1999; Kim *et al.*, 2002, 2005, 2006, 2007; Oh *et al.*, 2004, 2005, 2015; Lee *et al.*, 2016, 2019b; Jeong *et al.*, 2021. Abbreviation: EG, eclogite facies; BS, blueschist facies; EA, epidote-amphibolite facies; AM, amphibolite facies; HGR, high-pressure granulite facies; LGR, low-pressure granulite facies; GS, greenschist facies; Ky, kyanite; And, andalusite; Sil, sillimanite.

(820-710°C/10-5 kbar)을 그 이후에는 트라이아스기 각섬암상의 변성작용(650-590°C/4-3 kbar)을 받았다(그림 4). 반면에 양평 지역 북부에 나타나는 편마암에서는 235 Ma의 변성연령을 얻었으며 790-750°C/8-7 kbar의 변성작용을 확인하였다. 이는 양평 지역에서 트라이아스기에 광역적인 변성작용이 일어났으며 변성도가 서쪽으로 가면서 감소하고 트라이아스기 변성작용이 낮은 지역에서 고원생대 변성작용이 보존되어 있음을 지시한다. 양평지역의 연구 결과는 홍성과 오대산 지역에 대한 연구결과와 함께 트라이아스기에 일어난 가장 강한 변성작용인 백립암상 이상의 변성작용이 홍성-양평-오대산을 연하는 지역에서 일어났음을 지시하며 이는 트라이아스기의 충돌 후 화성암과 함께 북중국판과 남중국판의 충돌대가 한반도내 홍성-오대산 충돌대로 연결될 가능성이 있음을 지시한다(그림 1; Oh and Kusky, 2007; Kim *et al.*, 2011b).

임진강대는 북쪽의 진곡층과 남쪽의 미산층으로 나뉘며 진곡층은 이질 천매암과 편암 그리고 규암으로 이루어져있다(그림 5; Ree *et al.*, 1996; Lee *et al.*,

2019b and references therein). 진곡층은 중압형의 변성작용을 받았으며 변성도는 북쪽에서 남쪽으로 갈수록 석류석대와 십자석대(586-558°C/8.1-5.5 kbar)에서 남정석대(710-665°C/11.5-9 kbar, 640-610°C/8.8-7.3 kbar)로 증가한다(그림 5; Ree *et al.*, 1996; Cho *et al.*, 2007; Kim and Jung, 2010). 임진강대 남쪽에 위치한 미산층은 주로 각섬암, 사질 편암 그리고 알칼리 화강암으로 구성되어 있으며 이중 각섬암이 648-550°C/13-11 kbar에서 715°C/11 kbar로 전진변성작용을 받은 후 579-569°C/6.7-6.3 kbar로 후퇴변성작용을 받았다(Lee *et al.*, 2019b). 그리고 각섬암과 함께 나타나는 사질 편암은 715-710°C/11 kbar의 변성작용을 받은 후 670-660°C/11-10 kbar의 후퇴변성작용을 받았다. 이는 미산층이 시계방향의 변성진화과정을 겪었음을 지시하며 최대변성조건은 715-710°C/11 kbar임을 지시한다(그림 4). SHRIMP U-Pb 연령측정을 통해 임진강대에 나타난 중압형 변성작용은 약 251-249 Ma에 그리고 후퇴변성작용은 약 229-214 Ma에 일어났음이 확인되었다(Lee *et al.*, 2019b). 이러한 연구결과들은 임진강대에 나타

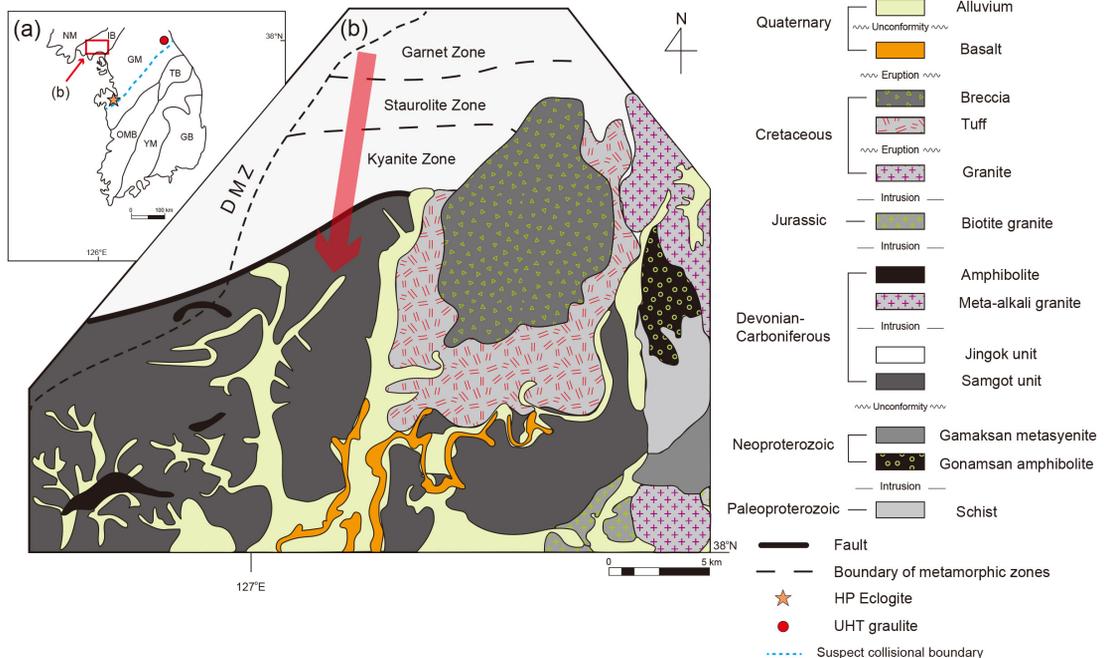


Fig. 5. (a) Simplified tectonic map of the Korean Peninsula and (b) geologic map of the Imjingang belt (modified from Lee *et al.*, 2019b). The arrow indicates the direction of increasing metamorphic grade. Abbreviations: NM, Nangrim Massif; IB, Imjingang belt; GM, Gyeonggi Massif; TB, Taebaeksan basin; OMB, Okcheon metamorphic belt; YM, Yeongnam Massif; GB, Gyeongsang basin; DMZ, Demilitarized zone.

난 변성작용이 고압변성작용을 받은 것이 아니라 북서쪽에서 남동쪽으로 변성도가 증가하는 중압형의 변성작용을 250 Ma경에 받았음을 지시하며 또한 임진강대가 충돌 경계가 아님을 보여준다.

경기육괴 중서부 해안에 위치한 장봉도의 기저암은 고원생대 편마암이며 이를 신원생대 변성퇴적암류가 덮고 있다. 신원생대 변성퇴적암류인 이질 편암과 이를 관입한 신원생대 각섬암은 255-254 Ma에 중압형의 변성작용(680-630°C/8.6-7.3 kbar)을 받은 후 231-230 Ma에 후퇴변성(600-560°C/5.7-3.1 kbar)을 받았다(그림 4; Jeong *et al.*, 2021). 이는 장봉도 지역이 임진강대와 유사하게 페름기-트라이아스기 대륙 충돌 시기인 약 255 Ma에 중압형의 변성

작용을 겪고 충돌 후 화성암이 만들어지던 230 Ma 경에 후퇴변성을 받았음을 지시한다. 후퇴변성작용 시 장봉도와 그 주변 지역에 충돌 후 화성암이 광역적으로 관입하였다.

경기육괴와 영남육괴 사이에 위치하는 옥천변성대는 제천-문경을 경계로 남서부의 옥천변성대와 북동부의 태백산 분지로 나뉜다. 옥천변성대의 남서부에 위치하는 화산면에서는 변성도가 북서부 방향으로 흑운모에서 석류석대를 지나 십자석대로 증가하는 패턴을 보여준다(그림 6; Oh, 1995, 1998; Kim *et al.*, 2005). 십자석대에서는 620-560°C/9-5 kbar 변성작용이 261-237 Ma에 일어났음이 보고되었다(그림 4, 6; Kim *et al.*, 2002, 2005; Oh *et al.*, 2004; Kim,

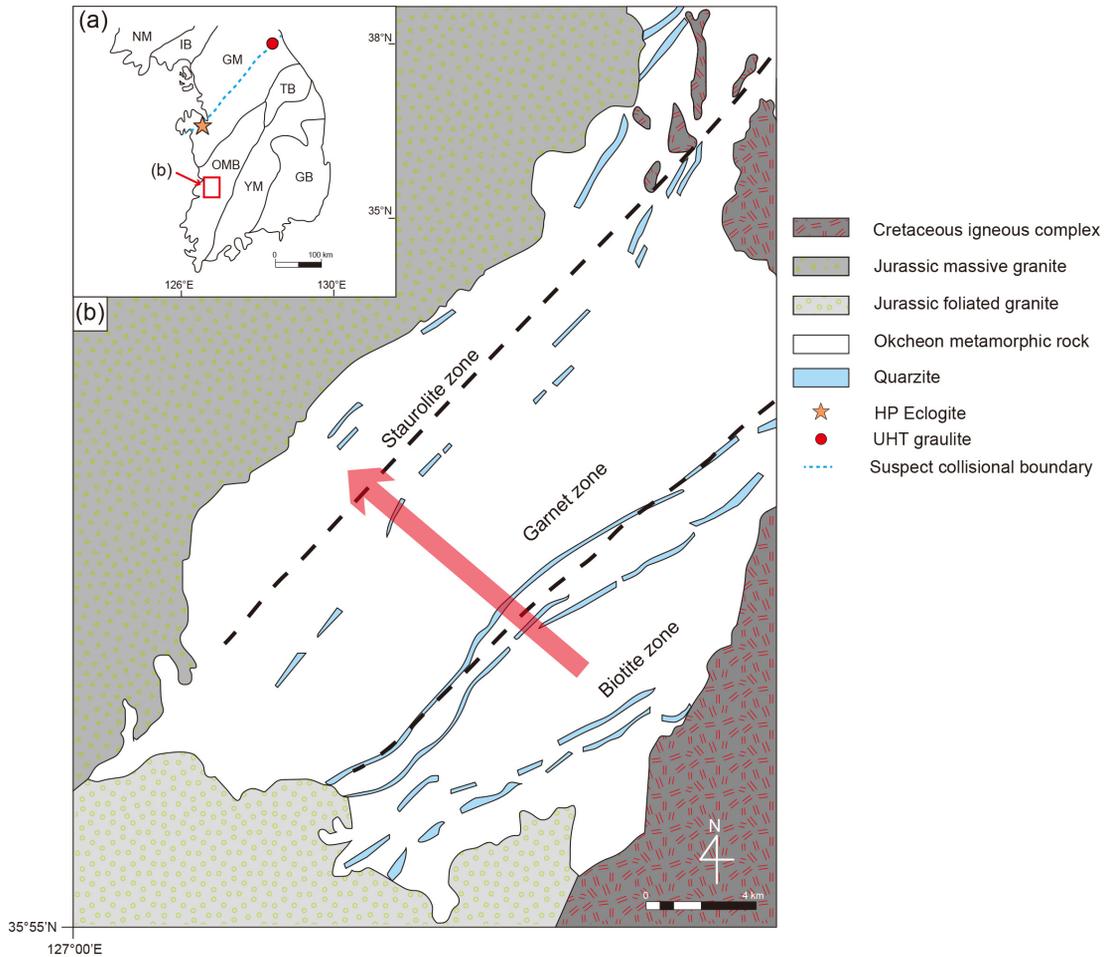


Fig. 6. (a) Simplified tectonic map of the Korean Peninsula and (b) geologic map of the Okcheon metamorphic belt (modified from Kim *et al.*, 2005). The arrow indicates the direction of increasing metamorphic grade. The abbreviation in Fig. 5 are used.

2005). 이러한 변성조건은 옥천변성대 서남부 화산면 지역이 중압형의 광역변성작용을 받았으며 시계방향의 변성진화과정을 겪었음을 지시한다. 옥천변성대 중부에 위치하는 증평-덕평 지역에서도 북서방향으로 흑운모대 → 석류석대 → 십자석대 → 남정석대로 변성도가 증가한다(Kim, 1995; Oh, 1999; Oh *et al.*, 2004). Oh (1999)은 석류석대에서 690-617°C/8.9-6.2 kbar의 변성조건을 얻었으며 Kim (1995)은 630-520°C/9.4-5.2 kbar의 변성조건을 얻었다(그림 4). 옥천변성대 중부의 변성연령은 변성 이질암과 편암의 석류석으로부터 291-276 Ma 연령을 얻었으며 이석류석이 전진 변성작용 시 만들어졌기 때문에 최고 변성시기가 291-276 Ma 이후로 예상된다(Kim *et al.*, 2007). 옥천변성대 북동부에 위치한 청주 지역에서도 북서쪽으로 변성도가 흑운모대-석류석대로 증가함을 보여준다(Min and Cho, 1998). 석류석대의 변성조건은 590-520°C/8-5.8 kbar이며 유체포유물을 통해서 측정된 후퇴변성조건은 500-350°C/3-1 kbar이다(그림 4). 이들 연구 결과들은 옥천변성대 지역도 한반도내에서 일어난 대륙충돌에 의해 261-237 Ma 시기에 변성도가 북서쪽으로 증가하는 중압형의 광역변성작용을 받았음을 지시한다.

4. 페름기-트라이아스기 충돌관련 화성작용

Oh *et al.* (2006b)은 경기육괴 동부 오대산 지역에서 250 Ma 연령을 보여주는 충돌 후 화성암인 맨거라이트를 발견하였고 이를 근거로 대륙 충돌대가 흥성에서 오대산 지역으로 연결되는 모델을 제시하였다(그림 1, 2). 이후 Kim *et al.* (2011b)에 의해 오대산 맨거라이트가 약 230 Ma에 대륙 충돌 후 환경에서 만들어졌음이 재확인되었다. 이러한 230 Ma에 관입한 충돌 후 화성암이 에클로자이트가 발견된 흥성의 북부에서도 인지되었으며 흥성과 오대산 사이에 위치하는 양평 지역에서도 섬장암과 반려암이 충돌 후 환경에서 약 233-227 Ma에 관입하였음이 보고되었다(Yi *et al.*, 2016). 흥성-양평-오대산을 연하는 선이북에 위치하는 경기육괴 북부와 낭림육괴 남부지역에서도 충돌 후 화성암이 광역적으로 나타난다(그림 2, 7a; Peng *et al.*, 2008; Park, 2009; Williams *et al.*, 2009; Seo *et al.*, 2010, 2015; Kim *et al.*, 2011a, 2011b, 2021; Cho and Lee, 2017; Jeong *et al.*, 2021).

춘천 후동리 일대에 분포하는 고철질의 섬록암이 기저암인 변성퇴적암을 관입(228 Ma)하고 있으며 충돌 후 환경에서 형성되었다(Park, 2009). 남양 지역에도 약 227 Ma의 반상화강암이 보고되었으며 남양 지역에 나타나는 반상화강암은 흥성과 양평에 보고된 화성암과 같이 충돌 후 화성암의 지구조 환경을 보여준다(Kim *et al.*, 2011a). 경기육괴 북서부 해안 지역인 강화도, 석모도, 장봉도 지역에서도 충돌 후 화성암 시기인 230-225 Ma의 연령을 보여주는 화강암들이 보고되었고 이들은 충돌 후 환경에서 형성되었을 것으로 예상되고 있다(Cho and Lee, 2017; Jeong *et al.*, 2021). 경기육괴 중부에 위치하는 김화도폭과 기산도폭의 화강암들은 지화학적 분석결과는 보고되지 않고 있지만 연령측정을 통해 충돌 후 화성암 연령과 비슷한 232 Ma와 237 Ma를 얻었으며 이는 경기육괴 중부의 트라이아스기 화강암도 충돌 후 환경에서 형성되었을 가능성을 제시한다(Lee *et al.*, 2006; Cho and Song, 2007). 임진강대와 낭림육괴 남부에 해당하는 해주-원산을 연하는 지역에서도 224 Ma 경에 충돌 후 환경에서 관입한 섬장암들이 보고되었다(Peng *et al.*, 2008; Hwang and Ahn, 2017).

5. 대륙충돌 시기에 일어난 한반도 남쪽 경계의 섭입작용

한반도 남부인 영남육괴에서는 섭입 관련된 페름기-트라이아스기 화성암이 광범위하게 나타난다(그림 2; Kim *et al.*, 2011a, 2021; Oh, 2012; Cheong *et al.*, 2014, 2019). 이 화성암들은 남중국판의 커테시아 남부와 하이난 섬에 걸쳐 나타나는 페름기-트라이아스기 섭입 관련 화성암들과 잘 대비된다(Faure *et al.*, 1988; Wang *et al.*, 2005; Li *et al.*, 2006). 페름기 말에 남중국판의 남쪽 경계에서 비활성 대륙경계에서 활성 대륙경계로의 변화가 일어났음이 남중국판 남단 경계 지역과 대만의 퇴적층으로부터 확인되었고 이 시기에 남중국판 남단 경계를 따라 섭입작용에 의한 화성작용이 광역적으로 일어났다(Li *et al.*, 2006). 일본 남서부의 오미 지역과 류큐 화산호 남단에 위치한 야에야마 섬에서 보고된 섭입 관련 트라이아스기 고압변성작용도 이 시기에 남중국판 남단을 따라 섭입작용이 일어났음을 지시한다(그림 3; Faure *et al.*, 1988; Tsujimori, 2002).

영남육괴 중부 및 동부에 위치하는 안동-청송 지역에서 266-251 Ma 화강암류 편마암이 그리고 경상 분지 동부에 위치한 영덕, 장사리, 포항 지역에서 283-253 Ma의 화강암류가 보고되었다(그림 2; Yi *et al.*,

2012; Choi *et al.*, 2021; Kim *et al.*, 2021). 지화학 분석 결과 이들 화강암류는 부화된 LILE (Large-Ion Lithophile Element)와 낮은 HFSE (high-field-strength element) 패턴을 나타내며 Y+Nb vs. Rb 도표에서

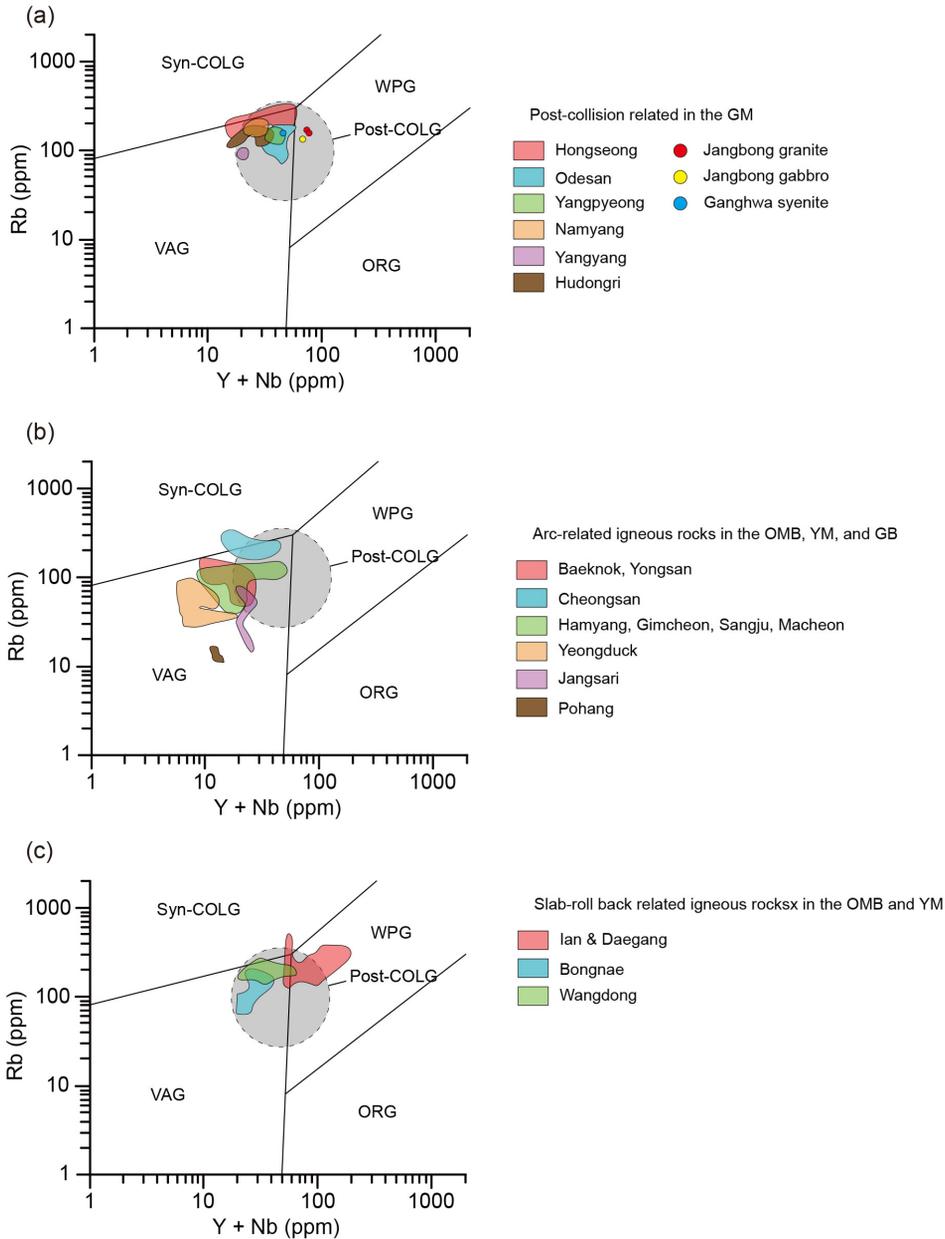


Fig. 7. The plot on the Y+Nb vs. Rb tectonic discrimination diagrams (Pearce, 1996) for (a) post collisional igneous rocks in the Gyeonggi Massif (GM), (b) arc related igneous rocks in the Okcheon metamorphic belt (OMB), Yeongnam Massif (YM), and Gyeongsang basin (GB), (c) slab roll-back related igneous rocks in the YM and OMB. Data from Cho *et al.*, 2008; Park, 2009; Williams *et al.*, 2009; Seo *et al.*, 2010; Kim *et al.*, 2011a, 2021; Oh *et al.*, 2016; Jeong *et al.*, 2021; Lee *et al.*, 2021.

는 충돌 후 화성암보다 화산호 환경에 주로 도시된다(그림 7b; Williams *et al.*, 2009; Kim *et al.*, 2011a, 2021). 영남육괴 중부에 위치하는 김천 지역과 상주 지역의 화강암류에서 271-228 Ma의 관입연령이 확인되었으며 영남육괴 남서부에 위치한 함양 지역의 화강섬록암에서 232 Ma, 마천 지역의 몬조섬록암에서 237 Ma의 관입연령이 보고되었다(Lee *et al.*, 2007; Kim *et al.*, 2011a). 이러한 영남육괴 내에 보고된 트라이아스기 화강암들은 지화학 분석결과 high-K calc-alkaline과 medium-K calc-alkaline에 도시되었으며 Nb와 Ta의 부의 이상치를 주었고, Y+Nb vs. Rb 도표에서 대부분 화산호 환경에 도시되었다(그림 7b; Williams *et al.*, 2009; Kim *et al.*, 2011a, 2021).

옥천변성대 중부에 위치한 청산, 백록, 영산 지역의 화강암류는 앞서 언급한 영남육괴 중부 및 동부의 화성암과 비슷한 연령인 약 230 Ma 경에 관입하였으며(Cho *et al.*, 2008a; Kim *et al.*, 2011a) 옥천변성대 북부에 위치한 괴산 지역의 몬조나이트에서 231 Ma와 228 Ma의 관입연령이 얻어졌다(Kim *et al.*, 2011a). 이들 화강암류는 Y+Nb vs. Rb 도표에서 화산호 환경에 도시되었으며 Nb, Ta의 부의 이상치를 보여준다(그림 7b; Williams *et al.*, 2009; Kim *et al.*, 2011a, 2021). 이러한 지화학 분석결과는 이들 화강암류가 섭입과 관련된 화성활동에 의해 형성되었음을 지지한다(Kim *et al.*, 2021).

이에 반해 옥천변성대내 청산 지역의 동쪽에 위치한 이안 지역에서 보고된 화강암은 약 220 Ma의 화성연령을 보여주며 영남육괴 남서부에 위치한 대강과 왕동 지역의 화강암류에서 각각 220 Ma와 226-221 Ma의 화성연령을 확인하였다(Cho *et al.*, 2008a; Lee *et al.*, 2021). 왕동 지역에서 남쪽에 위치한 북래 지역의 토날라이트도 226 Ma의 화성연령을 보여준다(Oh *et al.*, 2016). 이들은 앞서 영남육괴와 옥천변성대에서 보고된 화성암보다 젊은 연령을 보여준다. 지화학 분석결과 이들 화강암류들은 Y+Nb vs. Rb 도표에서 충돌 후 화성암 영역 안에 도시되지만 이안, 대강 화강암류 등은 충돌 후 화성암 영역뿐 아니라 판내부 환경까지 도시된다(그림 7c; Cho *et al.*, 2008a; Kim *et al.*, 2011a, 2021; Oh *et al.*, 2016; Lee *et al.*, 2021). 이안, 대강과 왕동 지역의 화강암류들은 모두 A₂형 화강암 영역에 도시되는 충돌 후 화강암입이 확인되었다(Cho *et al.*, 2008; Lee *et al.*, 2021).

6. 토 의

6.1 페름기-트라이아스기 변성작용 종합 해석

중국의 북중국판과 남중국판 경계에 나타나는 친링-다비-수루 충돌대에서 고압형 변성작용의 증거인 트라이아스기 에클로자이트들이 발견되었고 이를 바탕으로 두 판이 페름기-트라이아스기에 충돌하였음이 확인되었다(Wang *et al.*, 1989; Yin and Nie, 1993; Ernst and Liou, 1995; Zhai and Cong, 1996; Zhang, 1997). 이후 친링-다비-수루 충돌대가 한반도로 연결될 것인가에 대한 많은 지질학자들의 관심이 있어왔다.

한반도에서 페름기-트라이아스기(250-230 Ma) 변성작용은 임진강대, 경기육괴, 옥천대에서 주로 일어났으며 페름기-트라이아스기의 에클로자이트가 경기육괴 서남부인 홍성지역에서 발견되었다. 홍성 에클로자이트는 고압형 변성작용(860-835°C/21-17 kbar)을 받았으며 페름기-트라이아스기에 한반도내 가장 강한 변성작용이 홍성을 거쳐 양평(790-750°C/8-7 kbar)-오대산(950-902°C/9.4-8.8 kbar) 지역을 따라 일어났다(Oh *et al.*, 2004, 2005; Kim *et al.*, 2006; Oh *et al.*, 2015; Lee *et al.*, 2016).

홍성-양평-오대산 지역보다 북부에 위치한 임진강대에서는 251-249 Ma에 중압형 변성작용(715-710°C/11 kbar)이 인지되었으며 변성정도가 북서쪽에서부터 남동쪽으로 갈수록 증가한다(그림 2, 4, 5; Ree *et al.*, 1996; Cho *et al.*, 2007; Kim and Jung, 2010; Lee *et al.*, 2019b). 장봉도 지역에서도 255 Ma에 중압형 변성작용(680-630°C/8.6-7.3 kbar)이 인지된다(Jeong *et al.*, 2021). 홍성-양평-오대산 지역보다 남부에 위치한 옥천변성대에서도 261-237 Ma에 중압형의 변성작용들이 인지되나 변성정도는 임진강대와 반대로 북서쪽 내지 북쪽으로 증가한다(그림 2, 4, 6; Kim, 1995; Min and Cho, 1998; Oh, 1999; Oh *et al.*, 2004; Kim *et al.*, 2005, 2007). 이에 비해 옥천변성대 북동부에 위치한 태백산 분지는 변성을 받지 않거나 약하게 받은 것으로 알려져 있었지만 Kim *et al.* (2012a)은 태백산 분지의 북동부 지역도 옥천변성대와 마찬가지로 중압형의 변성작용을 받았음이 확인되었다. 이 지역에서는 평안누층군이 퇴적된 이후 중압형 광역변성작용(610-550°C/6-4.8 kbar)을 받았으며 변성 시기는 페름기-트라이아스기로 예측되고 있다(Kim *et al.*, 2012a).

여러 연구자들이 임진강대를 중국의 친링-다비-수루 충돌대의 연장으로 생각하였는데 그 이유는 임진강대가 친링-다비-수루 충돌대와 지리적으로 연결되고 고생대 태본기 시기의 퇴적암을 포함하며 250 Ma 경에 변성작용을 받았기 때문이다(Yin and Nie, 1993; Ree *et al.*, 1996). 하지만 다른 학자들에 의해 임진강대가 충돌 경계가 아닐 가능성이 제기되었으며 그 이유는 앞에 제시된 바와 같이 임진강대로부터 대륙충돌을 지시하는 증거인 고압형 변성작용을 지시하는 에클로자이트나 해양지각이 나타나지 않으며 임진강대가 중압형 변성작용을 받았기 때문이다(Lee *et al.*, 2019b and references therein). 그리고 한반도의 경기육괴 서남부에 위치한 홍성 지역에서 페름기-트라이아스기 에클로자이트가 보고된 사실은 중국의 페름기-트라이아스기 친링-다비-수루 충돌대가 임진강대가 아닌 홍성 지역으로 연장됨이 제안되었다(그림 1; Oh *et al.*, 2005). 이와 함께 경기육괴 중부와 동부에 위치한 양평 및 오대산 지역에서 발견된 맨거라이트를 포함한 트라이아스기 충돌 후 화성암은 페름기-트라이아스기 대륙 충돌대가 홍성에서 양평을 지나 오대산지역으로 연결될 가능성을 지시한다(Oh *et al.*, 2006b, 2015; Kim *et al.*, 2011b; Lee *et al.*, 2016). 페름기-트라이아스기에 홍성-양평-오대산 지역을 따라 가장 높은 변성작용이 일어났으며 임진강대와 옥천변성대에서 일어난 중압형 변성작용이 각각 홍성-양평-오대산 지역 방향으로 증가하는 패턴 역시 홍성-양평-오대산 지역이 충돌대일 가능성을 지시하는 증거이다.

홍성-오대산이 충돌대일 가능성을 지시하는 또 다른 증거는 오대산-홍성-수루-다비-홍안-친링 충돌대를 따라 인지되는 체계적인 변성작용의 변화이다(그림 8; Oh *et al.*, 2014; Oh and Lee, 2018 and references therein). 오대산에서 홍성 지역을 거쳐 수루, 다비로 변성 압력이 증가하며 변성온도가 감소하는 변화를 보이다가 수루, 다비 지역에서 홍안, 통바이 지역을 지나 친링 지역으로 가면서 변성 온도와 압력이 감소하는 경향을 보여주며 친링의 서쪽 끝 지역에서 변성 온도가 크게 증가하는 현상을 보여준다(Oh and Lee, 2018). 각 지역의 최고 변성 압력 조건은 충돌 시 대륙지각의 섭입된 최대 깊이를 지시하며 이 깊이에서 섭입되던 대륙지각의 부력이 대륙지각을 끌고 들어가던 해양판의 잡아당기는 힘보다 커져서 더

이상 섭입되지 않음으로써 대륙판과 해양판 분리가 일어났다(Oh, 2010, 2014; Oh and Lee, 2018). 즉 오대산 지역에서 수루-다비 지역으로 가면서 대륙판의 최대 섭입 깊이가 계속 증가하다가 수루-다비 지역에서부터 서부 친링 지역으로 가면서 대륙판의 최대 섭입 깊이가 다시 감소하는 것을 지시한다. 그 결과 충돌대의 양 끝인 오대산 지역과 친링 서부지역에서는 대륙판과 해양판의 분리가 가장 낮은 곳에서 일어났고 이 때 분리된 판 사이의 공간을 통해 상승한 연약권 맨틀이 충돌대의 다른 지역보다 높은 열을 공급함으로써 초고온 혹은 백립암상의 변성작용이 일어났다. 이에 비해 가장 깊은 곳까지 대륙지각이 섭입된 다비-수루 지역에서는 초고압 에클로자이트가 형성되었고 다비-수루 지역과 양쪽 끝 사이에는 고압 에클로자이트와 청색편암이 형성되었다. 변성 연령이 오대산 지역에서 서부 친링 지역으로 가면서 페름기-트라이아스기에서 트라이아스기 중기로 감소하며 충돌 후 화성암의 연령도 한반도에서는 트라이아스기 중기(약 230 Ma)인데 반해 친링 서쪽 끝 지역에서는 트라이아스기 후기(210 Ma)인 사실은 충

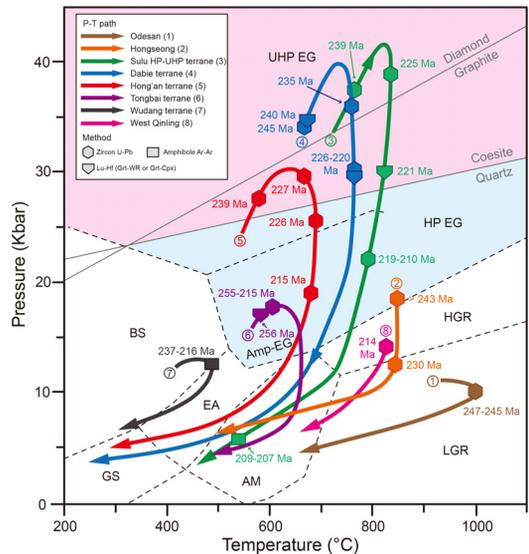


Fig. 8. The P-T-t paths along the Qinling-Sulu-Odesan collisional belt (modified after Oh and Lee, 2018). Abbreviation: UHP EG, ultrahigh-pressure eclogite facies; HP EG, high-pressure eclogite facies; Amp-EG, amphibole-eclogite facies; HGR, high-pressure granulite facies; LGR, low-pressure granulite facies; AM, amphibolite facies; EA, epidote-amphibolite facies; BS, blueschist facies; GS, greenschist facies.

들이 한반도에서 시작하여 중국 쪽으로 진행되어 갔음을 지시한다(Oh and Lee, 2018).

6.2 페름기-트라이아스기 화성작용 종합 해석

페름기-트라이아스기 충돌 이후 홍성 지역의 북부에서 충돌 후 화성암인 맨저라이트와 고함량의 Ba-Sr 화강암이 약 233-226 Ma에 관입하였으며 양평 지역에서도 233-227 Ma의 충돌 후 화성암인 섬강암과 반려암이 그리고 오대산 지역에 234-231 Ma의 맨저라이트와 반려암이 관입하였다(그림 2; Oh *et al.*, 2006b; Williams *et al.*, 2009; Seo *et al.*, 2010; Kim *et al.*, 2011b; Yi *et al.*, 2016). 맨저라이트는 사방휘석과 정장석이 함께 나타나는 것이 특징적이며 대륙 충돌 후 환경이나 판내부 열곡대에서 차노카이트, 회장암과 함께 형성된다(Janasi, 2002; Oh *et al.*, 2006b). 오대산과 홍성 북부 지역의 맨저라이트에서는 섭입대 화강암에서 나타나는 LILE 원소의 부화현상과 Nb-Ta-Ti 부이상을 보여준다. 이는 오대산과 홍성 북부 지역이 대륙 열곡대가 아닌 섭입작용을 경험한 대륙 충돌 후 환경에서 만들어졌을 가능성을 지시한다(Oh *et al.*, 2006b). 홍성-양평-오대산 충돌대를 기준으로 북부에 위치한 경기육괴 북부내 춘천 후동리, 남양, 양양 지역 등에 나타나는 232-226 Ma 화성암들도 충돌 후 화성암 영역에 도시된다(그림 7a). 또한 임진강대와 해주와 원산을 연하는 낭림육괴 남부지역에서도 228-220 Ma의 충돌 후 화성암이 보고되었다(Peng *et al.*, 2008; Hwang and Ahn, 2017). 이 암석들은 전체적으로 쇼쇼나이트(shoshonitic)하며 LREE와 LILE가 부화된 특징을 보인다. 그리고 홍성 북부 지역, 양평, 양양과 오대산 지역에 나타나는 충돌 후 화성암류들은 고함량의 Ba-Sr 특징을 보여주며 이는 연약권 맨틀의 유입에 의한 부분용융의 결과로 해석되었다(Seo *et al.*, 2010; Yi *et al.*, 2016). 이러한 해석은 양평, 오대산과 양양 지역에서 나타나는 맨저라이트와 반려암의 지화학 분석 및 동위원소 값 ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr} = 0.7137\text{-}0.7100$, $\epsilon_{\text{Nd}}(t) = -1.31 \sim -19.7$)에 의해서도 지지된다(Yi *et al.*, 2016). 이 연구들은 약 230 Ma에 경기육괴 북부, 임진강대, 낭림육괴 남부 지역에 광역적인 충돌 후 화성작용이 일어났음을 지시한다.

영남육괴에 위치한 안동, 청송과 경상분지에 위치한 영덕, 장사리, 포항 지역에서 나타나는 280-250

Ma의 화강암류는 대부분 화산호 환경에 도시된다(그림 7b). 그리고 옥천변성대에 위치한 청산, 영산, 괴산 지역 등과 영남육괴에서 산출되는 약 230 Ma 화성암들도 충돌 후 화성암 영역보다 화산호 환경에 도시된다. 이러한 연구들은 영남육괴, 경상분지, 옥천변성대에 나타나는 페름기-트라이아스기(280-230 Ma) 화성암들이 섭입 환경에서 형성되었음을 나타내며 이들 섭입 관련 화성암들은 남중국판의 커테시아판 남부와 그 주변 지역에 걸쳐 나타나는 페름기-트라이아스기 섭입 관련 화성암들과 잘 대비된다(그림 3; Faure *et al.*, 1988; Wang *et al.*, 2005; Li *et al.*, 2006; Lee *et al.*, 2007; Park *et al.*, 2011; Oh, 2012; Yi *et al.*, 2012). Cheong *et al.* (2019)은 영남육괴내에 나타나는 약 250 Ma의 영덕 화성암에 대한 지화학적 연구를 통해 약 250 Ma 시기에 ridge 섭입과 관련된 화성작용이 일어났음을 주장하였으나 이를 검증하기 위해서는 향후 추가 연구가 필요하다. 이후 옥천변성대와 영남육괴내에 위치한 몇몇 제한된 지역인 이안, 대강, 왕동 지역에서 나타나는 220 Ma경 화성암들의 지화학 성분은 섭입 환경에 도시되지 않고 충돌 후 화성암 영역과 판내부 화성암 영역까지 도시된다(그림 7c).

6.3 페름기-트라이아스기 지구조 진화 해석

최근에 제시되거나 확인된 한반도내 페름기-트라이아스기 지질학적 정보를 종합하여볼 때 한반도내에서 다음과 같은 페름기-트라이아스기 지구조 진화가 일어났을 것으로 예상된다(그림 9). 한반도에서 일어난 북중국판과 남중국판의 충돌 이전 시기인 290 Ma경에 북중국판 남쪽 경계부에 대비되는 경기육괴 북부 하부로 두 판 사이에 존재했던 해양지각이 섭입하고 있었고 이때 섭입되던 해양지각과 해양퇴적물로부터 LILE가 풍부하고 Nb-Ta-Ti가 결핍된 유체나 용융체가 상부 암권 맨틀로 공급되어 암권 맨틀의 성분을 변화시켰다(그림 9a; Oh, 2012; Lee *et al.*, 2019b and references therein). 동일 시기에 경기육괴 남부, 옥천변성대, 영남육괴로 구성된 한반도 남부 대륙판의 남쪽 경계부는 해양판과 연결되어 있었을 것으로 예상된다.

이후 280-250 Ma경에 북중국판 남쪽 경계와 남중국판 북쪽 경계에 각각 대비될 수 있는 경기육괴 북부와 남부 사이에 존재하던 해양지각이 모두 섭입에 의해 소모된 후 두 판이 서로 부딪혔고 이때 충돌이

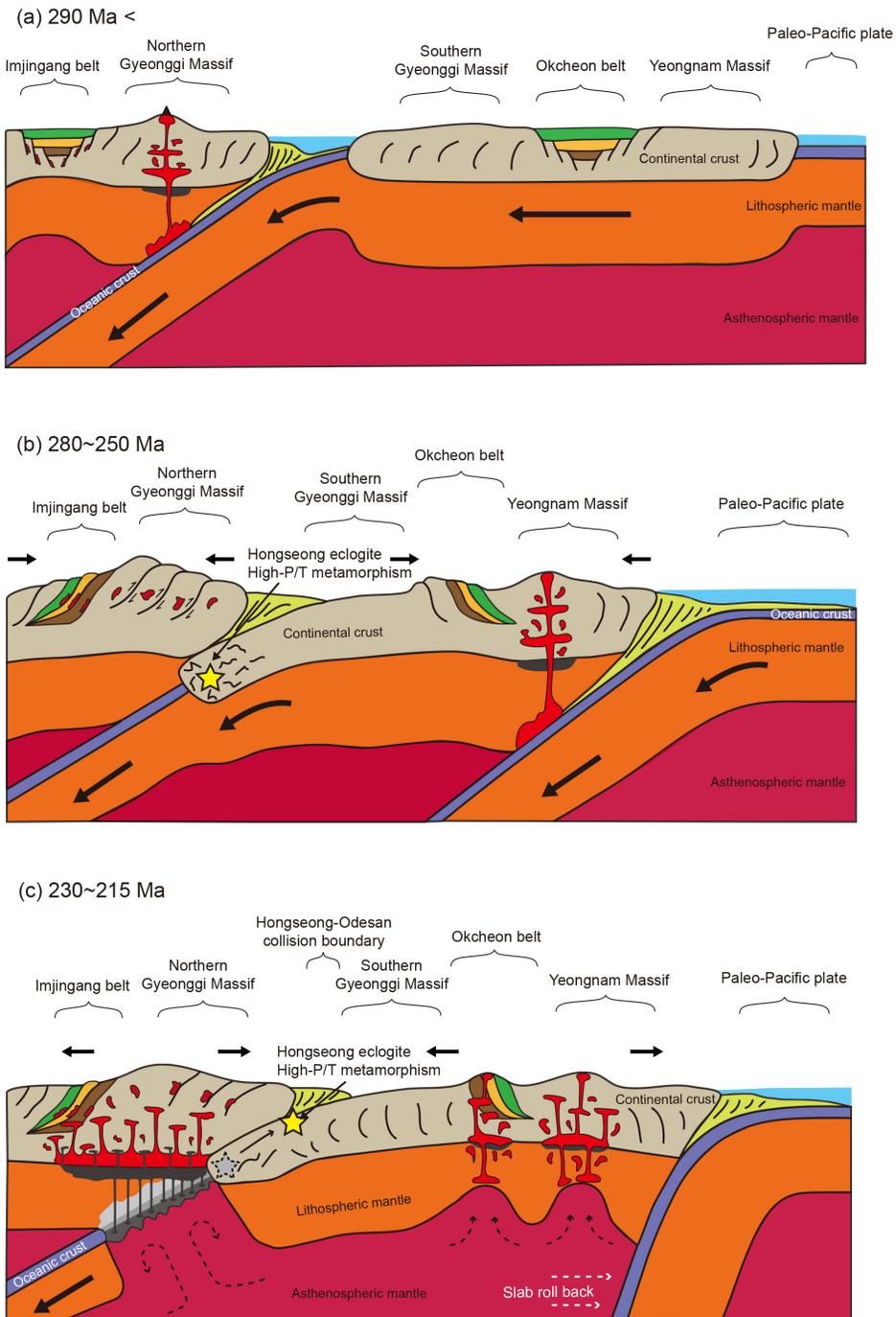


Fig. 9. Tectonic evolution model for the Permo-Triassic igneous events in the Korean Peninsula. (a) 290 Ma < ; there was a subduction along the southern margin of the NCC before the continental collision between NCC and SCC, (b) 280-250 Ma; the subducted southern Gyeonggi Massif underwent high-P/T type metamorphism with the intermediate-P/T metamorphism in the Imjingang belt, the northern Gyeonggi Massif and the Okcheon belt whereas the Paleo-Pacific oceanic slab subducted under the southern margin of Korean Peninsula and SCC, (c) 230-215 Ma; the post-collision igneous activities occurred by slab break-off in the northern Gyeonggi Massif whereas the igneous activities due to slab roll-back occurred in the southern Korean Peninsula.

전에 섭입되었던 해양판이 경기육괴 남부 대륙판을 잡아당겨 섭입시켰다(그림 9b; Oh, 2012; Lee *et al.*, 2019b and references therein). 이 시기에 섭입되던 경기육괴 남부 대륙판내에 존재하였던 염기성 화성암들이 고압 변성작용을 받아 에클로자이트가 형성되었으며 임진강대와 옥천변성대는 충돌대의 연변부에서 충돌에 의해 발생한 압축력에 의해 중압변성작용을 받았다. 두 판의 충돌 시 한반도 남부 대륙판은 더 이상 북쪽으로 이동하지 못하게 되었으나 한반도 남부 대륙판에 연결되어 있었던 해양판은 충돌 이후에도 계속적으로 북쪽으로 이동하였을 것으로 생각된다. 그 결과 한반도 남부 대륙판 남쪽 경계부를 따라 해양판의 섭입이 일어났을 것으로 생각된다. 이때 해양판의 섭입으로 인해 해양지각과 퇴적물로부터 생성된 Nb-Ta가 상대적으로 결핍된 유체나 용융체가 상부의 암권 맨틀로 공급되어 암권 맨틀의 성분을 변화시키면서 영남육괴와 옥천변성대 지역에 페름기-트라이아스기 섭입 관련 화성작용을 일으켰다(그림 7b; Williams *et al.*, 2009; Kim *et al.*, 2011a, 2021; Choi *et al.*, 2021). 이들 섭입 관련 화성암류는 남중국판의 남단 경계부에 걸쳐 나타나는 섭입 관련 화성암류와 잘 대비된다(그림 3; Faure *et al.*, 1988; Wang *et al.*, 2005; Li *et al.*, 2006; Lee *et al.*, 2007; Park *et al.*, 2011; Oh, 2012; Yi *et al.*, 2012).

이후 230 Ma경에 북부 경기육괴, 임진강대, 남부 낭림육괴를 포함하는 한반도 북부 대륙판 밑으로 계속 섭입하던 남부 경기육괴의 부력이 점차적으로 증가하다가 충돌 이전에 섭입한 해양판의 하부로 잡아당기는 힘보다 커지게 되었다. 그 결과 섭입하던 대륙판인 남부 경기육괴와 해양판 사이에 판 분리(slab break-off)가 일어나 해양판은 맨틀 하부로 계속 침강하는데 이에 반해 대륙판은 상부로 상승하게 되었다(그림 9c; Oh, 2012; Lee *et al.*, 2019b and references therein). 이때 해양판과 대륙판 사이에 공간이 형성되며 그 공간을 통해 연약권 맨틀이 상승하여 한반도 북부 대륙판 하부의 암권 맨틀과 하부 지각에 높은 열을 공급하게 되고 이로 인해 맨틀이 부분 용융되어 소쇼나이틱 하며 LILE가 부화되고 Nb-Ta-Ti가 결핍된 염기성 화성암을 형성하는 마그마가 생성되었다. 이들 마그마의 대부분은 대륙지각보다 밀도가 높아 대륙지각 하부에 정체된 후 고화되어 염기성 대륙하부 지각을 형성한다. 이후 해양판과 대륙

판 사이에 형성된 공간이 확대되어 더 많은 염기성 마그마가 형성되면서 상승하여 대륙 지각 하부에 높은 열을 공급하였다. 그 결과 한반도 북부 대륙판 하부에 새롭게 형성된 염기성 대륙하부 지각이 용융되어 충돌 후 화성암인 맨거라이트와 섬장암을 형성한 중성 마그마가 형성하였고 중성질의 하부지각이 용융되어 충돌 후 화강암류를 형성한 산성 마그마가 형성된다(그림 9c; Oh, 2012; Lee *et al.*, 2019b and references therein). 이러한 230 Ma경에 관입한 충돌 후 화성암은 홍성-양평-오대산 충돌대 뿐 아니라 경기육괴 북부와 북서부 서해안 지역에서도 보고되었다(그림 7a; Park, 2009; Williams *et al.*, 2009; Seo *et al.*, 2010; Kim *et al.*, 2011a, 2021; Jeong *et al.*, 2021). 또한 임진강대와 해주-원산을 연하는 지역에서도 230 Ma의 충돌 후 화성암이 형성됨이 보고되었다(Peng *et al.*, 2008; Hwang and Ahn, 2017). 따라서 페름기-트라이아스기의 충돌 후 화성암의 분포는 페름기-트라이아스기의 에클로자이트와 중압변성작용과 함께 한반도 내 트라이아스기 대륙 충돌 경계가 홍성-양평-오대산을 연하는 지역이나 그 주변에 존재할 것임을 지시한다(그림 2; Oh *et al.*, 2006b; Kim *et al.*, 2011b; Yi *et al.*, 2016).

여러 충돌 후 화성암 노두에서 중성 화성암이 산성 화성암내에 포유암(enclave)으로 나타나며 이는 산성과 중성 마그마가 거의 동시에 관입하여 마그마 상태에서 서로 혼성된 것을 지시한다(Seo *et al.*, 2010; Oh, 2012). 충돌 후 지구조 환경에서는 충돌 후 화성암이 만들어짐과 동시에 인장력이 작용하여 정단층이 형성된다. 이로 인해 대륙충돌에 의해 두꺼워졌던 대륙지각이 얇아지며 한반도 북부 대륙판의 남단에 위치한 북부 경기육괴, 임진강대, 남부 낭림육괴 내 충돌 후 화성암이 생성되는 깊이가 계속 낮아지는 현상이 일어났을 것으로 예상된다(Oh, 2012).

230 Ma까지는 영남육괴와 옥천변성대에서는 페름기에 시작된 섭입 관련 화성활동이 지속되고 있었다(그림 7b; Williams *et al.*, 2009; Kim *et al.*, 2011a, 2021). 이후 220 Ma경에 옥천변성대와 영남육괴 내에 몇몇 제한된 지역인 이안, 대강, 왕동 지역에서 화성암을 형성시킨 지구조 환경이 섭입 관련 화성활동에서 판내부 화성활동 환경으로 변화되었다(그림 7c; Cho *et al.*, 2008a; Kim *et al.*, 2011a, 2021; Oh *et al.*, 2016; Lee *et al.*, 2021). 이러한 지구조 환경의 변화

는 한반도 남부 대륙판 하부로 섭입하던 고태평양판의 섭입각도가 증가함에 따라 일어난 섭입판의 후퇴작용(slab roll-back)에 기인할 것으로 해석되었다 (Lee *et al.*, 2021). 섭입판의 후퇴작용은 한반도 남부에 인장력을 발생시켰고 이로 인해 연약권 맨틀이 상승하여 압권 맨틀에 열을 가함으로써 영남육괴와 옥천변성대를 관입한 화성활동이 일어났다(그림 9c; Oh, 2012; Lee *et al.*, 2021 and references therein). 이러한 연구결과들은 송림 조산운동시기에 경기육괴 이북에서는 북중국판과 남중국판의 대륙충돌이 일어났으며 영남육괴 남부경계에서 충돌과 관련된 섭입작용이 발생하였음을 지시한다.

7. 결론

1) 홍성-양평-오대산을 연결하는 지역과 그 이북에 위치한 경기육괴 북부, 임진강대와 낭림육괴 남부 지역에서 트라이아스기 충돌 후 화성작용이 광역적으로 나타났다. 이러한 충돌 후 화성암들은 모두 페름기-트라이아스기 충돌 시기보다 약 15-10 Ma 이후의 연령인 230-225 Ma를 보여주며 광역적인 저압형 변성작용과 함께 일어났다. 충돌 후 화성활동의 분포는 대륙 충돌대의 경계가 홍성-오대산을 연하는 지역이나 그 보다 약간 남쪽에 위치함을 지시한다.

2) 한반도내에 대륙충돌과 관련된 페름기-트라이아스기(261-230 Ma) 변성작용이 경기육괴, 임진강대, 옥천변성대에 광역적으로 일어났다. 경기육괴내 홍성 지역에서 발견된 고압 변성작용을 지시하는 페름기-트라이아스기 에클로자이트는 남중국판과 북중국판의 충돌대인 트라이아스기 친링-다비-수루 충돌대가 한반도로 연결됨을 지시한다. 그리고 다음 증거들은 충돌대가 홍성에서 양평지역을 거쳐 오대산 지역으로 연결됨을 지시한다. 임진강대에서 페름기-트라이아스기 충돌 시기인 250 Ma에 중압형의 변성작용이 인지되며 변성정도가 남쪽으로 갈수록 증가함이 인지되었다. 반면에 옥천변성대에서는 261-237 Ma에 중압형의 변성작용이 인지되었으며 변성정도는 북서쪽으로 갈수록 증가한다. 즉, 임진강대와 옥천변성대에서 모두 경기육괴내 대륙충돌대 쪽으로 변성도가 증가한다. 이는 페름기-트라이아스기 시기에 가장 강한 변성작용이 홍성-양평-오대산 지역에서 발생한 사실과 함께 이 지역이 충돌대의 경계임을

지시한다. 이는 경기육괴가 홍성-오대산 충돌대를 경계로 경기육괴 북부와 남부로 나뉘어짐을 지시한다.

3) 대륙충돌이 일어난 페름기-트라이아스기 시기에 한반도 남부인 영남육괴, 경상분지, 옥천변성대에 섭입관련 280-230 Ma 화성암이 광범위하게 나타난다. 한반도내 페름기-트라이아스기 대륙 충돌 시기와 유사한 시기에 한반도 남부의 섭입 관련 화성활동이 일어남은 한반도 남부를 포함한 남중국판이 북중국판과의 충돌에 의해 북쪽으로 이동이 중지되고 이로 인해 계속 북쪽으로 움직이던 남중국판의 남쪽에 위치한 해양지각이 남중국판 밑으로 섭입이 시작하였을 가능성을 지시한다. 이후 220 Ma경에 왕동, 대강, 이안 지역 등에서 나타나는 화성암들은 해양판의 후퇴에 의한 맨틀 상승에 의해 판내부 환경에서 형성되었음이 확인되었다.

4) 페름기-트라이아스기 한반도 지구조 진화 모델은 다음과 같다. 페름기-트라이아스기 충돌 이전 시기에 경기육괴 북부를 포함한 한반도 북부 대륙판과 경기육괴 남부를 포함한 남부 대륙판 사이의 해양판이 북부 대륙판 밑으로 섭입하고 있으며 동시기에 한반도 남부판은 고태평양판과 연결되어 있었다. 이후 280-250 Ma경에 한반도 북부 대륙판과 남부 대륙판 사이의 해양판이 모두 섭입하여 대륙충돌이 일어났고 이때에 고압 변성암인 에클로자이트가 형성되었다. 동시기에 남중국판의 남쪽 경계와 연결되어 있던 고태평양판이 한반도 남부 대륙판 밑으로 섭입하여 섭입 관련 화성활동을 일으켰다. 이후 230 Ma경에 한반도 북부 대륙판내에 충돌 후 화성암이 광역적으로 관입하였다. 반면 영남육괴, 경상분지, 옥천변성대를 포함하는 한반도 남부 대륙판에서는 226-221 Ma에 섭입되던 고태평양판의 섭입각도가 증가함에 따라 일어난 연약권 상승에 의해 판내부 환경하의 화성암이 생성되었다.

감사의 글

이 연구는 한국연구재단의 핵심연구사업(2017K1A1A2013180)의 지원으로 수행되었다.

REFERENCES

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. *Bulletin*, 131, 609-634.
- Cheong, C.S. and Kim, N.H., 2012, Review of radiometric ages for Phanerozoic granitoids in southern Korean Peninsula. *The Journal of the Petrological Society of Korea*, 21, 173-192 (in Korean with English abstract).
- Cheong, C.S., Kim, N., Kim, J., Yi, K., Jeong, Y.J., Park, C.S. and Cho, M., 2014, Petrogenesis of Late Permian sodic metagranitoids in southeastern Korea: SHRIMP zircon geochronology and elemental and Nd-Hf isotope geochemistry. *Journal of Asian Earth Sciences*, 95, 228-242.
- 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 northeast Asia: Insights from zircon U-Pb-Hf isotope and whole-rock geochemical compositions. *Precambrian Research*, 340, 105631.
- Cho, D.L. and Lee, S.B., 2017, 1: 100,000 tectonostratigraphic map of the Gimpo-Incheon area, map 1: solid geology interpretation. Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources.
- Cho, D.L., Lee, S.R. and Armstrong, R., 2008a, Termination of the Permo-Triassic Songrim (Indosinian) orogeny in the Ogcheon belt, South Korea: Occurrence of ca. 220 Ma post-orogenic alkali granites and their tectonic implications. *Lithos*, 105, 191-200.
- Cho, D.L. and Song, K.Y., 2007, Geological report of the Gimhwa sheet (1:50,000). Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources.
- Cho, M., Kim, H., Lee, Y., Horie, K. and Hidaka, H., 2008b, The oldest (ca. 2.51 Ga) rock in South Korea: U-Pb zircon age of a tonalitic migmatite, Daeijak Island, western Gyeonggi massif. *Geosciences Journal*, 12, 1-6.
- Cho, M., Kim, Y. and Ahn, J., 2007, Metamorphic evolution of the Imjingang belt, Korea: Implications for Permo-Triassic collisional orogeny. *International Geology Review*, 49, 30-51.
- Choi, H.O., Choi, S.H. and Kim, S.S., 2021, Zircon U-Pb geochronology and Sr-Nd-Pb-Hf isotope geochemistry for Permian-Early Triassic arc-related magmatism in Pohang, Jangsari, and Yeongdeok, southeastern Korean Peninsula. *Lithos*, 382, 105930.
- Choi, S.G., Rajesh, V.J., Seo, J., Park, J.W., Oh, C.W., Pak, 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.
- Ernst, W.G. and Liou, J.G., 1995, Contrasting plate-tectonic styles of the Qinling-Dabie-Sulu and Franciscan metamorphic belts. *Geology*, 23, 353-356.
- Faure, M., Monié, P. and Fabbri, O., 1988, Microtectonics and ^{39}Ar - ^{40}Ar dating of high pressure metamorphic rocks of the south Ryukyu Arc and their bearings on the pre-Eocene geodynamic evolution of Eastern Asia. *Tectonophysics*, 156, 133-143.
- Hwang, S.K., 1994, Petrology of Cretaceous volcanic rocks in the Milyang-Yangsan area, Korea, Petrotectonic setting. *Journal of the Geological Society of Korea*, 30, 229-241.
- Hwang, S.K. and Ahn, U.S., 2017, Geochemistry and Tectonic Implications of Triassic Bojongsan Trachyte in the Southern Margin of the Imjingang Belt, Korea. *The Journal of the Petrological Society of Korea*, 26, 113-125 (in Korean with English abstract).
- Hwang, S.K., An, Y.M. and Yi, K.W., 2011, SHRIMP Age Datings and Volcanism Times of the Igneous Rocks in the Cheolwon Basin, Korea. *The Journal of the Petrological Society of Korea*, 20, 231-241 (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, 105923.
- Janasi, V., 2002, Elemental and Sr-Nd isotope geochemistry of two Neoproterozoic mangerite suites in SE Brazil: implications for the origin of the mangerite-charnockite-granite series. *Precambrian Research*, 119, 301-327.
- 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, 106102.
- Kim, H., 1995, Tectonometamorphic evolution of the central Ogcheon belt in the Jeungpyeong-Deokpyeong area. *Journal of the Geological Society of Korea*, 31, 299-314.
- Kim, H., Cheong, C.S. and Cho, M., 2007, The effect of allanite inclusions on U-Pb step-leaching ages and Sm-Nd isotope systematics of garnet from the Ogcheon metamorphic belt, South Korea. *Chemical Geology*, 236, 27-41.
- Kim, H.S. and Jung, W.S., 2010, The use of garnet porphyroblasts to resolve the metamorphic pressure-temperature-deformation (PTd) path: An example from the Imjingang belts, South Korea. *Geosciences Journal*, 14, 111-126.
- Kim, H.S., Ree, J.H. and Kim, J., 2012a, Tectonometamorphic evolution of the Permo-Triassic Songrim (Indosinian)

- orogeny: evidence from the late Paleozoic Pyeongan Supergroup in the northeastern Taebaeksan Basin, South Korea. *International Journal of Earth Sciences*, 101, 483-498.
- Kim, N., Cheong, C.S., Park, K.H., Kim, J. and Song, Y.S., 2012b, Crustal evolution of northeastern Yeongnam Massif, Korea, revealed by SHRIMP U-Pb zircon geochronology and geochemistry. *Gondwana Research*, 21, 865-875.
- Kim, S.W., 2005, Amphibole $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ Geochronology from the Okcheon Metamorphic Belt, South Korea and its Tectonic Implications. *Gondwana Research*, 8, 385-402.
- Kim, S.W., Itaya, T., Hyodo, H. and Matsuda, T., 2002, Metamorphic K-feldspar in low-grade metasediments from the Ogcheon metamorphic belt in South Korea. *Gondwana Research*, 5, 849-855.
- Kim, S.W., Kwon, S., Jeong, Y.J., Kee, W.S., Lee, B.C., Byun, U.H. and Santosh, M., 2021, The middle permian to triassic tectono-magmatic system in the southern Korean Peninsula. *Gondwana Research*, 30, <https://doi.org/10.1016/j.gr.2020.11.017>.
- Kim, S.W., Kwon, S., Koh, H.J., Yi, K., Jeong, Y.J. and Santosh, M., 2011a, Geotectonic framework of Permo-Triassic magmatism within the Korean Peninsula. *Gondwana Research*, 20, 865-889.
- Kim, S.W., 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., 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, 344-370.
- Kim, S.W., Oh, C.W., Williams, I.S., Rubatto, D., Ryu, I.C., Rajesh, V.J. and Zhai, M., 2006, Phanerozoic high-pressure eclogite and intermediate-pressure granulite facies metamorphism in the Gyeonggi Massif, South Korea: implications for the eastward extension of the Dabie-Sulu continental collision zone. *Lithos*, 92, 357-377.
- Kim, S.W., Williams, I.S., Kwon, S. and Oh, C.W., 2008, SHRIMP zircon geochronology, and geochemical characteristics of metaplutonic rocks from the south-western 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., 2011b, The characteristic of mangerite and gabbro in the Odaesan area and its meaning to the Triassic tectonics of Korean peninsula. *The Journal of the Petrological Society of Korea*, 20, 77-98 (in Korean with English abstract).
- 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., 2019a, Paleoproterozoic (2.0-1.97 Ga) subduction-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., 2016, The metamorphic evolution from ultrahigh-temperature to amphibolite facies metamorphism in the Odaesan area after the collision between the North and South China Cratons in the Korean Peninsula. *Lithos*, 256, 109-131.
- Lee, B.C., Oh, C.W. and Wang, X., 2020a, 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., 2011, SHRIMP zircon geochronology, and tectonic meaning of metamorphic rocks of igneous origin in the Euam formation of the Gyeonggi Massif. *Annual Conference of the Geological Society of Korea (Abstracts)*, Jeju, October 26-29, 1 p.
- 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., 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.J., Kim, Y.B. and Ki, W.S., 2006, 1: 50,000 tectonostratigraphic map of the Gisan area. *Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources*, 39 p.
- Lee, B.Y., Oh, C.W., Cho, D.L., Zhai, M., Lee, B.C., Peng, P. and Yi, K., 2019b, The Devonian back-arc basin and Triassic arc-continent collision along the Imjingang belt in the Korean Peninsula and their tectonic meaning. *Lithos*, 328, 276-296.
- Lee, B.Y., Oh, C.W., Lee, S.H., Seo, J. and Yi, K., 2020b,

- 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, 105625.
- Lee, D.S., 1987, *Geology of Korea*, The Geological Society of Korea. Kyohak-Sa Publishing Corporation, Seoul, 514.
- Lee, H.S., Song, Y.S., Park, K.H. and Cheong, C.S., 2007, U-Pb zircon age from Late Permian to Early Triassic (240-250 Ma) granite gneiss in central Yeongnam massif. Annual Conference of the Geological Society of Korea (Abstracts), Chuncheon, October 25-26, 162 p.
- Li, X.H., Li, Z.X., Li, W.X. and Wang, Y., 2006, Initiation of the Indosinian Orogeny in South China: evidence for a Permian magmatic arc on Hainan Island. *The Journal of geology*, 114, 341-353.
- Min, K. and Cho, M., 1998, Metamorphic evolution of the northwestern Ogcheon metamorphic belt, South Korea. *Lithos*, 43, 31-51.
- Oh, C.W., 1995, The metamorphic evolution in the southwestern part of the Ogcheon metamorphic belt. *Journal of the Geological Society of Korea*, 31, 21-31.
- Oh, C.W., 1998, A study on the regional and contact metamorphism in the southwestern part of the Ogcheon Metamorphic Belt. *Journal of the Geological Society of Korea*, 34, 311-332 (in Korean with English abstract).
- Oh, C.W., 1999, Metamorphic evolution of the central Ogcheon Metamorphic Belt in the Cheongju-Miwon area, Korea. *The Journal of the Petrological Society of Korea*, 8, 106-124.
- 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., 2010, Systematic changes in metamorphic styles along the Dabie-Hongseong and Himalayan collision belts, and their tectonic implications. *Journal of Asian Earth Sciences*, 39, 635-644.
- 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., 2014, The systematic metamorphic pattern along the Qinling-Dabie-Hongseong collision belt between the North and South China blocks and its tectonic meaning. *Continental Dynamics*, 26-28.
- Oh, C.W. and Kuský, 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. *Geological Society, London, Special Publications*, 478, 449-475.
- Oh, C.W. and Liou, J.G., 1998, A petrogenetic grid for eclogite and related facies under high-pressure metamorphism. *Island Arc*, 7, 36-51.
- 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.B., Yi, K. and Lee, B.C., 2015, Permo-Triassic and Paleoproterozoic metamorphism related to continental collision in Yangpyeong, South Korea. *Lithos*, 216, 264-284.
- Oh, C.W., Kim, J.B., Park, Y.S. and Kim, S.W., 2006a, SHRIMP U-Pb zircon ages of Paleoproterozoic rocks from the Gyeonggi Massif and their implications. *Journal of the geological society of Korea*, 42, 587-606 (in Korean with English abstract).
- Oh, C.W., Kim, S.W., Choi, S.G., Zhai, M., Guo, J. and Sajeev, K., 2005, First finding of eclogite facies metamorphic event in South Korea and its correlation with the Dabie-Sulu collision belt in China. *Journal of Geology*, 113, 226-232.
- Oh, C.W., Kim, S.W., Ryu, I.C., 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., Krishnan, S., Kim, S.W. and Kwon, Y.W., 2006b, Mangerite magmatism associated with a probable Late-Permian to Triassic Hongseong-Odesan collision belt in South Korea. *Gondwana Research*, 9, 95-105.
- Oh, C.W., Lee, B.C., Yi, S.B. and Zhang, C.L., 2014, Review on the Triassic Post-collisional Magmatism in the Qinling Collision Belt. *The Journal of the Petrological Society of Korea*, 23, 293-309 (in Korean with English abstract).
- Oh, J.I., Choi, S.H. and Yi, K., 2016, Origin of adakite-like plutons in southern Korea. *Lithos*, 262, 620-635.
- Park, K.H., Kim, M.J., Yang, Y.S. and Cho, K.O., 2010, Age distribution of the Jurassic plutons in Korean peninsula. *The Journal of the Petrological Society of Korea*, 19, 269-281 (in Korean with English abstract).
- Park, K.H., Song, Y.S., Lee, H.S. and Kim, M.J., 2011, The Permo-Triassic igneous activity in the Korean Peninsula. *Proceedings of the Annual Conference of the Mineralogical Society of Korea and Petrological Society of Korea (Abstracts)*, Jinju, May 26-27, 90-94 (in Korean with English abstract).

- Park, Y.R., 2009, Enriched geochemical and Sr-Nd isotopic characteristics of middle Triassic plutonic rocks in Hudongri, Chuncheon: derivation from enriched mantle. *The Journal of the Petrological Society of Korea*, 18, 255-267 (in Korean with English abstract).
- Pearce, J., 1996, Sources and settings of granitic rocks. *Episodes*, 19, 120-125.
- Peng, P., Zhai, M., Guo, 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.
- 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.
- Sagong, H., Kwon, S.T. and Ree, J.H., 2005, Mesozoic episodic magmatism in South Korea and its tectonic implication. *Tectonics*, 24, TC5002.
- 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, Hongseong Belt, South Korea. *Gondwana Research*, 18, 479-496.
- Tsujimori, T., 2002, Prograde and retrograde PT paths of the late Paleozoic glaucophane eclogite from the Renge metamorphic belt, Hida Mountains, southwestern Japan. *International Geology Review*, 44, 797-818.
- Wang, Q., Li, J.W., Jian, P., Zhao, Z.H., Xiong, X.L., Bao, Z.W. and Ma, J.L., 2005, Alkaline syenites in eastern Cathaysia (South China): link to Permian-Triassic trans-tension. *Earth and Planetary Science Letters*, 230, 339-354.
- Wang, X., Liou, J.G. and Mao, H.K., 1989, Coesite-bearing eclogite from the Dabie Mountains in central China. *Geology*, 17, 1085-1088.
- 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.
- Yengkhom, K.S., Lee, B.C., Oh, C.W., Yi, K. and Kang, J.H., 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, K., Cheong, C.S., Kim, J., Kim, N., Jeong, Y.J. and Cho, M., 2012, Late Paleozoic to Early Mesozoic arc-related magmatism in southeastern Korea: SHRIMP zircon geochronology and geochemistry. *Lithos*, 153, 129-141.
- Yi, S.B., Oh, C.W., Lee, S.Y., Choi, S.G., 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, 149-164.
- Yin, A. and Nie, S., 1993, An indentation model for the North and South China collision and the development of the Tan-Lu and Honam fault systems, eastern Asia. *Tectonics*, 12, 801-813.
- Zhai, M. and Cong, B., 1996, Major and trace element geochemistry of eclogites and related rocks. Ultrahigh-pressure metamorphic rocks in the Dabieshan-Sulu region of China, 69-89.
- Zhang, K.J., 1997, North and South China collision along the eastern and southern North China margins. *Tectonophysics*, 270, 145-156.
- Zhao, G., Cao, L., Wilde, S.A., Sun, M., Choe, W.J. 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.

Received : July 6, 2021

Revised : July 29, 2021

Accepted : July 29, 2021