

한반도 신원생대 화성활동에 대한 종합검토 및 신원생대 한중 대비

이보영^{1,2,*} · 오창환^{1,2} · 윤하원^{1,2}

¹전북대학교 지구환경과학과

²전북대학교 지구환경시스템 연구소

요 약

한반도, 북중국판 그리고 남중국판에는 신원생대 화성암이 널리 분포하고 있으며, 북중국판과 남중국판 내 신원생대 화성암의 지구조 진화과정은 서로 잘 구별된다. 따라서 신원생대 화성암은 한-중 대비를 포함한 북동 아시아 지구조 진화과정 해석에 매우 중요하다. 상원누층군과 경기육괴 북부에 위치한 고남산, 감악산, 가평, 춘천 지역과 장봉도 일대에는 917-742 Ma 시기 열곡대 환경에서 형성된 화성암류가 산출한다. 이 화성암류는 북중국판의 남부 및 남동부에 위치한 Xu-Huai-Lv-Da 열곡대 내 산출하는 930-830 Ma 화성암류와 대비된다. 반면에, 경기육괴 서남부 당진, 홍성 일대에서는 890-820 Ma에 화산호와 관련된 화성활동이 일어났으며, 이후 793-730 Ma에 열곡과 관련된 화성활동이 발생했다. 양쯔괴 북부 친링-다비-수루 지역에서도 화산호와 관련된 화성활동이 1118-808 Ma 시기에 있었으며, 이후 812-637 Ma에 열곡과 관련된 화성활동이 일어났다. 즉, 경기육괴 서남부 지역에 나타나는 신원생대 화성활동은 남중국판 내 북부 지역의 신원생대 화성활동과 대비된다. 그리고 경기육괴 남서부에 위치한 고군산군도와 옥천변성대에서는 화산호와 관련된 화성활동이 930-893 Ma 시기에 있었으며, 이후 871-742 Ma 시기에 열곡과 관련된 화성활동이 일어났다. 고군산군도와 옥천변성대 내 신원생대 화성암류는 남중국판 내 장난 조산대의 화산호 관련 화성암류(932-828 Ma)와 난후아 열곡대의 열곡 관련 화성암류(849-771 Ma)에 각각 대비된다.

주요어: 신원생대 화성암, 경기육괴 북부, 경기육괴 남부, 고군산군도, 옥천변성대

Bo Young Lee, Chang Whan Oh and Hawon Yun, 2021, Review on the Neoproterozoic igneous activity in the Korean Peninsula and the Neoproterozoic correlation between the Korean Peninsula and China. Journal of the Geological Society of Korea. v. 57, no. 4, p. 467-493

ABSTRACT: Neoproterozoic igneous rocks are widely distributed in the Korean Peninsula and North and South China Cratons. The tectonic evolution of the Neoproterozoic rocks within the North and South China Cratons are well distinguished each other. Therefore, Neoproterozoic rocks are very useful for interpretation of the tectonic evolution of Northeast Asia including the geological correlation between the Korean Peninsula and China. The Neoproterozoic rocks of the Sangwon Supergroup in the southern Nangrim Massif and of the Gonamsan, Gamaksan, Gapyeong, Chuncheon areas, and Jangbong island in the northern Gyeonggi Massif, were formed in a rift environment during 917-742 Ma. These rocks can be compared with rift-related igneous rocks (930-830 Ma) in the Xu-Huai-Lv-Da rift zone in the southern and southeastern margins of the North China Craton. On the other hand, an arc-related igneous activity occurred ca. 890-820 Ma and then rift-related igneous activity occurred ca. 793-730 Ma in the Dangjin and Hongseong areas of the southwestern Gyeonggi Massif. Similarly, arc-related igneous activity occurred ca. 1118-808 Ma and then rift-related igneous activity occurred ca. 812-637 Ma in the Qinling-Dabie-Sulu collision belt, the northern margin of the Yangtze Block. Therefore, the Neoproterozoic igneous rocks in the southern Gyeonggi Massif can be correlated with that of the northern margin of the South China Craton. In the Gogunsan island and Okcheon metamorphic belt, arc-related igneous activity occurred ca. 930-893 Ma and then rift-related igneous activity occurred ca. 871-742 Ma, respectively. The Neoproterozoic igneous rocks in the Gogunsan island and Okcheon metamorphic belt can be correlated with Neoproterozoic igneous rocks in the Jiangnan orogeny (932-828 Ma) and Nanhua rift (849-771 Ma) in the South China Craton, respectively.

Key words: Neoproterozoic igneous rock, Northern Gyeonggi Massif, Southern Gyeonggi Massif, Gogunsan

* Corresponding author: +82-63-270-3397, E-mail: dlqhdud4486@naver.com

island, Okcheon metamorphic belt

(Bo Young Lee, Chang Whan Oh and Hawon Yun, Department of Earth and Environmental Sciences, Jeonbuk National University, Jeonju 54896, Republic of Korea, Bo Young Lee, Chang Whan Oh and Hawon Yun, Basic Science Research Institute, Jeonbuk National University, Jeonju 54896, Republic of Korea)

1. 서 언

한반도와 중국을 포함한 북동아시아 일대에는 로디니아 초대륙의 형성 및 분열과 관련된 신원생대 화성암류가 광역적으로 분포하고 있으며, 이 신원생대 암석들에 관한 연구는 로디니아 초대륙과 북동아시아의 지구조 진화사 해석에 중요하다(Peng, 2015; Kim *et al.*, 2020). 특히, 신원생대 화성암은 퇴적암에 비해 정확한 형성 시기와 지구조 환경을 지시해준다. 북중국판에 산출하는 신원생대 화성암과 남중국판에 산출하는 신원생대 화성암의 형성환경과 지구조 진화가 상이하다. 따라서, 신원생대 화성암은 한국과 중국의 지질을 대비하는데 매우 중요하다. 최근 한반도 여러 지역에서 신원생대 암석이 보고되고 있으나(Kim *et al.*, 2013; Oh *et al.*, 2009, 2018; Lee *et al.*, 2020) 중국과 한반도의 신원생대 암석 대비는 여전히 논란 중에 있다.

한반도와 중국의 신원생대 암석들의 대비는 북중국판과 남중국판의 충돌에 의해 형성된 페름-트라이아스기 친링-다비-수루 충돌대(Qinling-Dabie-Sulu collision belt)가 한반도 어디로 연장되는지를 포함한 페름-트라이아스기 북동아시아의 지구조 진화를 이해하는데 중요한 정보를 제공할 수 있다. 페름-트라이아스기 충돌대를 포함한 북동아시아 지구조 진화에 대해 여러 모델이 제시되고 있으며, 그 중 대표적인 다섯 가지 모델은 다음과 같다. 1) Yin and Nie (1993) 모델에서는 친링-다비-수루 충돌대가 한반도 임진강대로 연결되며, 낭림육괴와 영남육괴는 북중국판에, 경기육괴는 남중국판에 대비된다. 2) Zhang (1997)이 제시한 모델에서는 친링-다비-수루 충돌대가 한반도의 임진강대를 지나 두만강대로 연결되며 임진강대 이북에 위치한 낭림육괴는 북중국판에, 임진강대 이남에 위치한 경기육괴와 영남육괴는 남중국판에 대비 된다. 3) 충돌대가 일본 오키나와 지역과 일본 열도쪽으로 연결되면서 한반도 전체가 북중국판에 속한다는 모델이 Ishiwatari and Tsusimori (2003)에 의해 제시되었다. 4) Oh *et al.* (2005)은 홍

성 지역에서 대륙충돌을 지시하는 페름-트라이아스기 에클로자이트를 발견하여 충남 홍성을 충돌대로 제시하였다. 이후 오대산과 양평 지역에서 맨저라이트를 포함한 트라이아스기 충돌 후 화성암들이 광역적으로 확인되었다(Oh *et al.*, 2006; Yi *et al.*, 2016). 이들 자료를 바탕으로 친링-다비-수루 충돌대가 홍성-오대산으로 연결되는 모델이 제시되었다(Oh and Kusky, 2007). Oh (2006)와 Oh and Kusky (2007)는 페름-트라이아스기 이전에는 경기육괴 북부와 남부가 분리되어 있었고 각각 북중국판과 남중국판에 대비되며 페름-트라이아스기에 홍성-오대산을 따라 충돌하였다고 주장하였다. 이는 경기육괴 북부와 남부가 페름-트라이아스기 대륙충돌 이전인 고-신원생대 시기에 서로 다른 지구조 과정을 겪었을 가능성을 제시한다. 5) Kim *et al.* (2013)은 홍성-임진강대를 따라 충돌이 발생했으며, 홍성-임진강대의 서부와 동부는 각각 북중국판과 남중국판에 대비됨을 제시하였다.

기존 연구에서 고원생대 시기에 경기육괴 북부와 남부는 서로 다른 지구조 분화과정을 겪었을 가능성이 제시됐지만(Lee *et al.*, 2014, 2016) 경기육괴 남부의 고원생대 연구자료가 충분치 않아 이를 바탕으로 경기육괴 북부와 남부의 지구조 진화를 중국과 대비하는데 한계가 있었다. 그리고 한반도에 산출하는 신원생대 화성활동과 중국에 산출하는 신원생대 화성활동 간의 비교 연구가 부족하다. 이런 문제를 해결하기 위하여, 북중국판과 남중국판 내에 분포하는 신원생대 화성암의 형성 시기와 지구조 환경을 밝히고, 이를 바탕으로 한국과 중국 간의 지질대비를 수행하는 연구가 최근에 수행되고 있다(Lee *et al.*, 2020).

본 연구에서는 지금까지 한반도, 북중국판, 남중국판에서 보고된 신원생대 화성암의 공간적 분포양상과 형성시기 및 지화학적 특성을 종합 해석하고 이를 바탕으로 한반도와 중국에 산출하는 신원생대 화성활동을 대비하고자 한다. 한·중 간의 신원생대 화성활동 대비 결과를 활용하여 페름-트라이아스기 한반도를 포함한 북동아시아 지구조 진화에 대한 모

텔 중 어떤 모델이 가장 적절한지를 제시하고자 한다.

2. 일반지질

2.1 한반도 지질개요

한반도 기저암은 북에서부터 남으로 선캄브리아

기 관모육괴, 낭림육괴, 경기육괴, 영남육괴로 이루어져있다(그림 1a). 낭림육괴 내에는 평남분지가 위치하며, 평남분지 남쪽 가장자리에는 상원누층군이 넓게 분포하고 있다(그림 1b; IGSASDPRK, 1996; Peng *et al.*, 2011; Hu *et al.*, 2012). 낭림육괴와 경기육괴 사이에 임진강대가 분포하지만 한반도를 가로지르

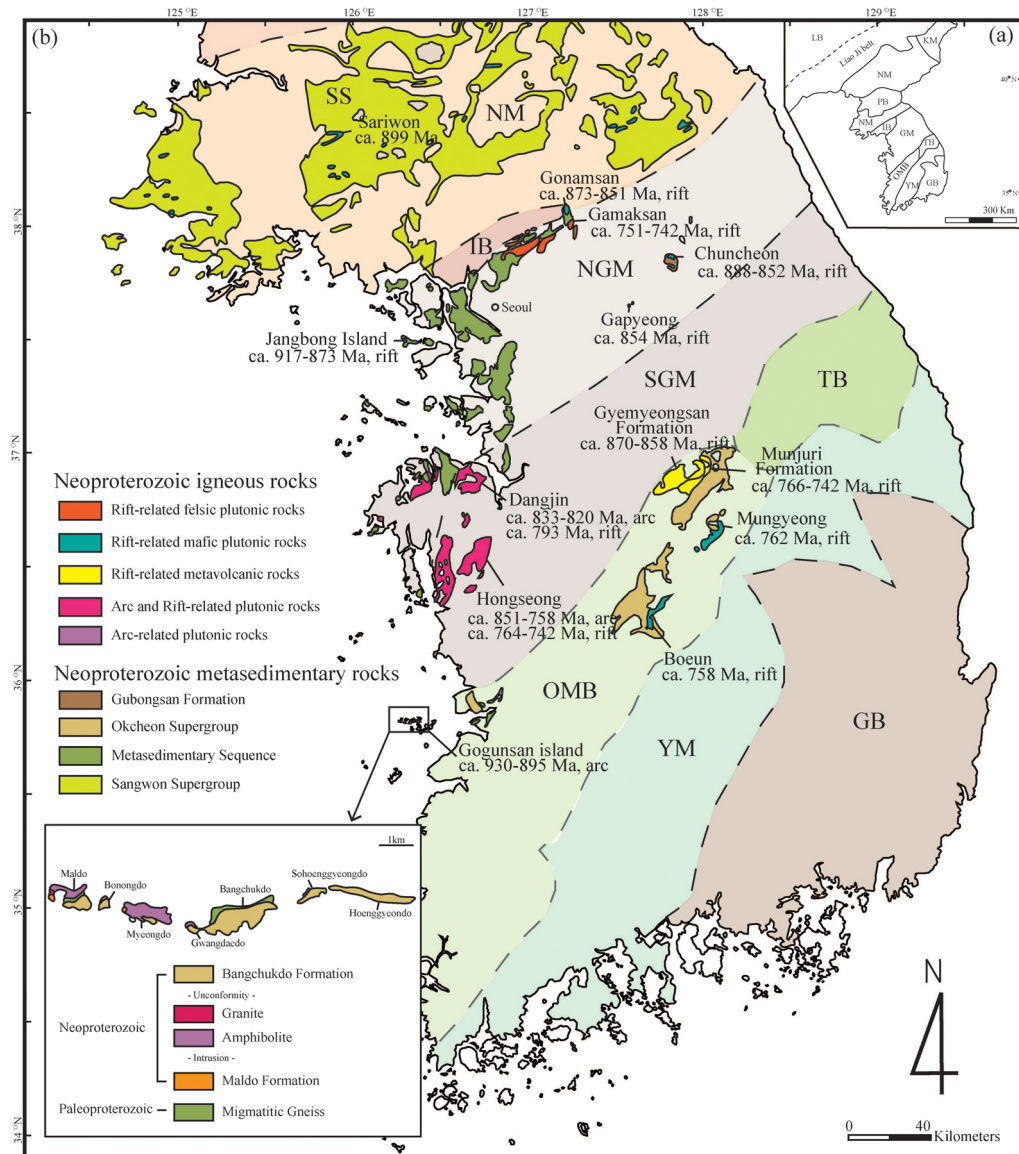


Fig. 1. (a) The tectonic map of the Korean Peninsula and China (modified after Kim *et al.*, 2020). (b) The geological map of the Korean Peninsula (modified after Kim *et al.*, 2021b). Abbreviations are as follows: LB = Longgang Block, KM = Kwanmo Massif, NM = Nangrim Massif, PB = Pyeongnam Basin, SS = Sangwon Supergroup, IB = Imjingang belt, NGM = northern Gyeonggi Massif, SGM = southern Gyeonggi Massif, TB = Taebaeksan Basin, OMB = Okcheon metamorphic belt, YM = Yeongnam Massif, GB = Gyeongsang Basin.

지는 않는다(Lee *et al.*, 2019b). 경기육괴와 영남육괴 사이에 위치한 옥천대는 북동쪽의 태백산 분지와 남서쪽의 옥천변성대로 구분되며(Lee *et al.*, 1998; Kim *et al.*, 2006), 영남육괴 남서쪽에 경상분지가 분포하고 있다(Cheong *et al.*, 1998).

고원생대 시기인 2.18-2.14 Ga에 낭림육괴와 중국 통강지괴 사이에 위치한 지아오-리아오-지 충돌대(Jiao-Liao-Ji collision belt)에서는 남쪽 방향으로 섭입작용이 일어나고 있었으며, 이후 1.95-1.90 Ga에 대륙충돌로 인해 중압형 변성작용이 발생하였다(Wang *et al.*, 2020a, 2020b, 2021). 이후, 1.86-1.84 Ga에 충돌 후(post-collisional) 환경에서 화성활동이 저압형 변성작용과 함께 발생하였다. 지아오-리아오-지 충돌대 이남에 위치한 낭림육괴와 경기육괴 북부에서도 충돌과 관련된 중압형의 변성작용이 1.93 Ga에 인지되며, 저압형의 변성작용을 동반한 충돌 후 화성활동이 1.89-1.84 Ga에 일어났다(Lee *et al.*, 2014; Oh *et al.*, 2019). 하지만 경기육괴 북부와는 다르게 경기육괴 남동부에서는 1.94-1.91 Ga에 화산호 관련 화성활동이 있었으며, 이후 1.79 Ga에 충돌 후 변성작용을 받았다(Lee *et al.*, 2016). 경기육괴 남동부에 나타나는 1.94-1.91 Ga 화산호 관련 화성활동은 양쯔지괴 북쪽 가장자리에 나타나는 화산호 환경에서 형성된 1.98-1.93 Ga 화성암류와 대비 될 가능성이 있다(Lee *et al.*, 2016). 영남육괴 북부 경계부에서는 2.0-1.7 Ga에 섭입 관련 화성암이 나타나며, 영남육괴 중앙부인 지리산(하동-산청) 지역에서는 1.88-1.86 Ga의 충돌 후 환경에서 형성된 화성암이 나타난다(Lee *et al.*, 2017). 이는 영남육괴가 하동-산청 지역을 기준으로 동부와 서부 영남육괴로 나뉘며 이들이 1.88 Ga 이전에 충돌하였고 이후 두 영남육괴 북부에 존재하던 섭입대가 서로 연결되었으며, 이 섭입대는 영남육괴 북부 경계를 따라 1.7 Ga까지 지속되었을 가능성을 지시한다(Lee *et al.*, 2019a). 하지만 영남육괴 북부 경계와는 다르게 북중국판, 낭림육괴, 그리고 경기육괴 북부에서는 2.0-1.7 Ga의 섭입 관련 화성활동은 나타나지 않는다(Lee *et al.*, 2017). 이러한 사실들은 경기육괴 북부와 남부 그리고 영남육괴가 고원생대 시기에 서로 다른 지구조 환경하에서 형성되었을 가능성을 지시한다.

한반도 북부에서는 중-신원생대에 해당하는 상원누층군이 오래 전부터 보고되었으며(IGSASDPRK,

1996; Peng *et al.*, 2011; Hu *et al.*, 2012), 한반도 남부에서는 신원생대 화성암이 1998년 옥천대 내 문주리 지역에서 처음으로 보고되었다(Lee *et al.*, 1998). 그 이후 경기육괴 북부의 고남산, 감악산, 가평, 춘천, 장봉도 지역과 경기육괴 서남부의 당진, 홍성 지역에서 중-신원생대 변성퇴적암과 신원생대 화성암이 보고되었다. 경기육괴 북부 신원생대 화성암류는 모두 열곡대와 관련된 화성활동에 의해 형성되었음에 반해(Jeon, 1999; Cho *et al.*, 2001; Lee *et al.*, 2003, 2020; Choi *et al.*, 2013, 2014; Oh *et al.*, 2018; Kim *et al.*, 2020; Jeong *et al.*, 2021), 경기육괴 서남부의 신원생대 화성작용은 화산호와 열곡대 환경과 관련된다(Kim *et al.*, 2006, 2008, 2013, 2020; Oh *et al.*, 2009; Choi *et al.*, 2013, 2014; Lee *et al.*, 2020). 또한, 경기육괴 남서부에 위치한 고군산군도의 신원생대 화성활동은 화산호 환경에서 일어났으며, 옥천변성대 내 신원생대 화성활동은 열곡대 환경에서 일어났다고 보고되었다(Lee *et al.*, 1998; Cho and Kim, 2005; Kim *et al.*, 2006, 2020, 2021b; Cheong *et al.*, 2014, 2015; Kee *et al.*, 2019). 이후 페름-트라이아스기에 일어난 대륙충돌로 임진강대, 경기육괴, 옥천변성대가 광역적인 중압형 변성작용을 받았다. 임진강대에서는 북쪽에서 남쪽으로 석류석대, 남정석대, 십자석대로 변성도가 증가하고 있으며, 이와 반대로 옥천대에서는 남쪽에서 북쪽으로 흑운모대, 석류석대, 석류석-십자석대로 변성도가 증가하고 있다(Oh *et al.*, 2004; Kim *et al.*, 2005; Lee *et al.*, 2019b). 그리고 이 시기에 가장 강한 변성작용은 임진강대와 옥천변성대 사이에 위치한 홍성-양평-오대산 지역에서 일어났다(Lee *et al.*, 2016 and references therein). 이 시기에 홍성 지역에서는 신원생대 염기성화성암이 에클로자이트로 변성되었다(Oh *et al.*, 2012).

2.2 중국 지질개요

중국은 페름-트라이아스기 친링-다비-수루 충돌대를 기준으로 북중국판과 남중국판으로 구분된다. 북중국판과 남중국판의 기저는 시생대와 고원생대 암석으로 구성된다. 북중국판은 콜롬비아 초대륙 형성시기에 해당하는 1.95-1.90 Ga에 여러 소규모 판의 충돌에 의해 형성되었고 그 시기에 콘달라이트대(Khondalite belt), 중앙조산대(Trans North China Orogen), 지아오-리아오-지 충돌대(Jiao-Liao-Ji col-

lision belt)가 형성되었다(Zhai and Santosh, 2011; Zhang *et al.*, 2016b). 1.89-1.83 Ga경에 중앙조산대와 지아오-리아오-지 충돌대를 따라 변성작용과 충돌 후 화성활동이 발생하였고, 1.80 Ga 이후 일어난 콜롬비아 초대륙의 분열과 관련된 열곡작용이 고원생대 말(ca. 1600 Ma)까지 계속되었다(Peng, 2015). 북중국판의 북서부, 중앙, 남동부에서는 로디니아 초대륙의 분열과 관련된 열곡작용이 일어났으며, 이 열곡작용에 의해 형성된 분지(Yan-Liao, Xu-Huai, Lv-Da 등) 내에 중-신원생대 퇴적암류와 화성암류가 주로 산출한다(Peng *et al.*, 2010; Wang *et al.*, 2012b; Peng, 2015). 특히, 북중국판 남부와 남동부 경계를 따라 형성된 Xu-Huai-Lv-Da 열곡대는 열곡 관련 화성활동과 함께 칭백호층군(1.0-0.8 Ga)이 퇴적되었으며, 낭림육괴의 평남분지 내 상원누층군과 대비된다(Wang *et al.*, 2011, 2012b; Peng, 2015; Zhang *et al.*, 2016b).

남중국판은 양쯔지괴와 커테시아지괴로 구분되며, 로디니아 초대륙 형성 전 양쯔지괴와 커테시아지괴는 분리되어 있었다(Li *et al.*, 2008b; Oh *et al.*, 2009; Qiu *et al.*, 2011). 양쯔지괴에는 2.1-1.93 Ga경에 섭입 혹은 충돌 환경에서 형성된 화성암과 1.85 Ga경에 충돌 후 환경에서 형성된 화성암이 나타난다(Wu *et al.*, 2007; Li *et al.*, 2014; Wang *et al.*, 2015b; Li *et al.*, 2016). 1.78 Ga 이후 콜롬비아 초대륙 분열과 함께 열곡 환경이 형성되었으며 이와 관련된 화성활동이 나타난다(Li *et al.*, 2014). 양쯔지괴 북부인 친링-다비-수루 충돌대에서는 섭입 혹은 열곡 환경에서 형성된 신원생대 화성암류가 산출한다(Qiu *et al.*, 2011; Peng *et al.*, 2012; Zhao *et al.*, 2013). 양쯔지괴의 북서부에서 서부 지역을 따라 나타나는 Panxi-Hannan 지역에도 중-신원생대 변성화산암과 변성퇴적암층이 나타나며, 이를 신원생대 화성암이 관입하고 있다(Zhao *et al.*, 2013). 양쯔지괴 남부 지역에서는 신원생대 초기에 섭입 관련 화성활동이 일어났으며 로디니아 초대륙 형성 시 커테시아지괴와 충돌하여 장난 조산대(Jiangnan orogeny)를 형성하였다(Charvet, 2013). 로디니아 초대륙의 분열시기에 장난 조산대를 따라 난후아 열곡대(Nanhua rift)가 형성되었다(Wang and Li, 2003). 난후아 열곡대에서는 열곡과 관련된 쌍모식 화산작용과 퇴적작용이 일어났다(Li *et al.*, 2003b; Wang *et al.*, 2015a).

이후 남중국판과 북중국판의 페름-트라이아스기 충돌 시 양쯔지괴 북부가 북중국판 하부로 섭입하면서 고압 변성작용을 받아 친링-다비-수루 충돌대가 형성되었고, 양쯔지괴 북부에 존재하던 신원생대 염기성 암석이 고압변성작용을 받아 에클로자이트로 변성되었다(Wang *et al.*, 1989; Zhai and Cong, 1996; Oh *et al.*, 2018).

3. 한반도 신원생대 화성활동

3.1 상원누층군과 경기육괴 북부 지역의 신원생대 화성활동

낭림육괴 남부 황해도와 강원도에는 상원누층군과 구원누층군이 넓게 분포하고 있으며, 상원누층군은 녹색편암상 변성작용을 받은 약 7,000-8,000 m 두께의 변성퇴적암층들로 구성된다(Peng *et al.*, 2011). 상원누층군은 하부에서 상부로 직현층군, 사당우층군, 묵천층군, 멸악산층군으로 구성되며, 그 위를 부정합으로 덮고 있는 구원누층군은 비랑층군, 능리층군으로 구성된다(Peng *et al.*, 2011; Kim *et al.*, 2016; Park *et al.*, 2016). 상원누층군 내 직현층군은 주로 규암, 천매암, 편암 등으로 구성되며, 사당우층, 묵천층군, 멸악산층군은 주로 탄산염암으로 스트로마톨라이트를 포함하고 있다(Kim *et al.*, 2016, 2021a). 상원누층군은 두께 약 150 m와 길이 약 10 km에 이르는 사리원 염기성 관입암상(sill) 또는 암맥(dyke)에 의해 관입되고 있다(Ryu *et al.*, 1990; Paek *et al.*, 1996; Peng *et al.*, 2011). 상원누층군의 최하부에 위치한 직현층군 내 가장 젊은 쇄설성 저어콘의 연대가 약 990 Ma인 사실은 상원누층군이 990 Ma 이후에 퇴적되었음을 시사하며(Hu *et al.*, 2012), 이를 사리원 염기성암이 약 899 Ma에 관입하였다(그림 2; Peng *et al.*, 2011). 이 사리원 염기성 관입암은 반려암질의 주원소 성분을 보여주며, Ti vs. Zr 지구조판별도에서 판내부환경 현무암(WPB)영역에 도시된다(그림 3a, 3b). Nd-Sr 동위원소($\epsilon_{\text{Nd}} \sim -2$) 연구를 통하여 사리원 염기성 관입암이 결핍된 맨틀인 연약권 또는 초생 암권맨틀로부터 형성되었음이 확인되었다(Peng *et al.*, 2011). 이는 상원누층군이 990-899 Ma 사이에 판내부 열곡 환경에서 퇴적되었음을 지시한다.

경기육괴 북부에 위치한 고남산 일대는 고원생대 반상변정질 편마암을 기저로, 동쪽으로 연천층군과

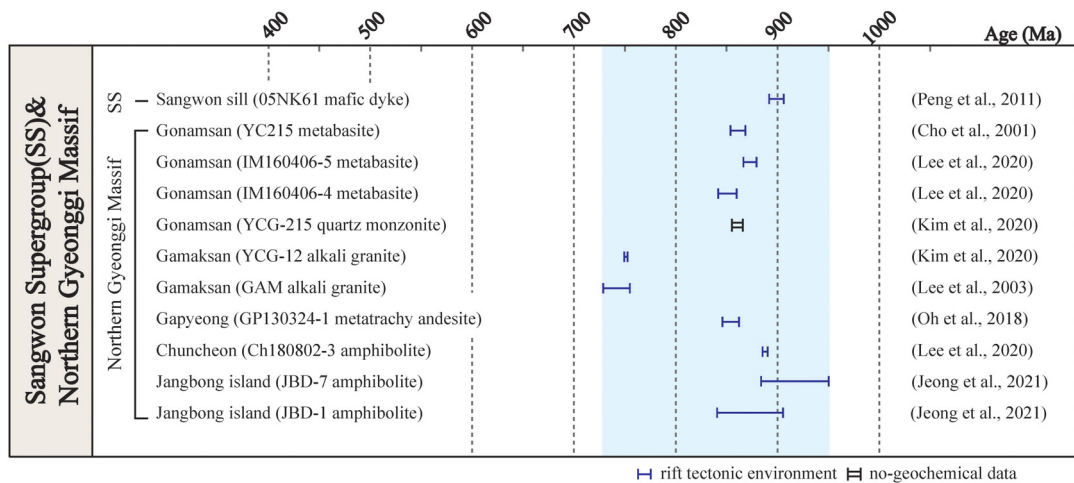


Fig. 2. The distribution diagram of U-Pb ages for the Neoproterozoic rocks in the the Sangwon Supergroup and for those in the Gonamsan, Gamaksan, Gapyeong, Chuncheon, Jangbong island within the northern Gyeonggi Massif.

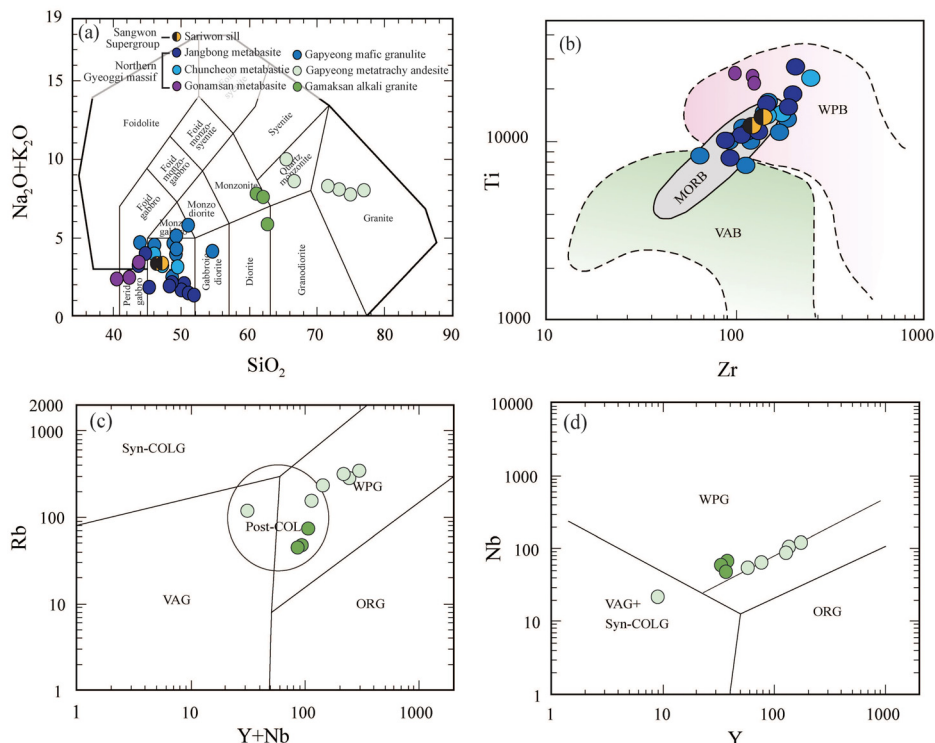


Fig. 3. The geochemical classifications and tectonic settings for the Neoproterozoic rocks in the Sangwon Supergroup and those in the Gonamsan, Gamaksan, Gapyeong, Chuncheon, Jangbong island within the northern Gyeonggi Massif. (a) Total alkali ($\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}$) vs Silica (SiO_2) classification diagram after Middlemost (1994); (b) Ti vs. Zr diagram after Pearce and Cann (1973); (c) Rb vs. Y+Nb diagram after Pearce *et al.* (1984); (d) Nb vs. Y diagram after Pearce *et al.* (1984). Abbreviations are as follows: WPB = within-plate basalt, MORB = mid-ocean ridge basalt, VAB = volcanic arc basalt. Syn-COLG = syn collision granite, VAG = volcanic arc granite, ORG = ocean ridge granite, WPG = within plate granite, Post-COLG = post collision granite. Data are collected from references in Fig. 2.

접하고 있다. 고남산 신원생대 변성염기성암은 암주(stock)나 관입암상의 형태로 고원생대 편마암과 변성퇴적암을 관입하고 있다(Kee *et al.*, 2008). 고남산 변성염기성암은 전암분석 노름(norm) 값을 바탕으로 고남산 각섬암과 알칼리 반려암질로 분류된다(Chang *et al.*, 1987; Kim and Lee, 1994). 각섬암의 일부가 각섬암이라고 지칭하기엔 유색광물의 구성비(10% 미만)가 낮으며, 이들은 최근 변성석영몬조니암으로 구분되었다(Kee *et al.*, 2008). 고남산 변성석영몬조니암은 약 861 Ma에 정치하였으며(Kim *et al.*, 2020), 고남산 변성염기성암은 873-851 Ma에 관입하였다(그림 2; Cho *et al.*, 2001; Lee *et al.*, 2020). 고남산 변성염기성암은 총알칼리($\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}$) vs. SiO_2 도표에서 감람암질 반려암 내지 반려암 영역에 도시되며, Ti vs. Zr 지구조판별도에서는 판내부 환경 현무암 영역에 해당하는 지화학적 특성을 보여준다(그림 3a, 3b). Sr-Nd 동위원소 분석($\epsilon\text{Ndt}\sim-0.68\sim-5.02$)을 통해 고남산 각섬암의 원암이 열곡대 환경에서 지각물질에 의해 혼염되지 않은 부화된 맨틀(enriched mantle)로부터 형성되었음이 제시되었다(Lee *et al.*, 2020).

고남산의 남서쪽에 위치한 감악산 일대에는 변성된 알칼리 화강암질암이 동서 방향으로 신장되어 분포한다. 감악산 알칼리 화강암질암 내 저어콘의 U-Pb 연대측정을 통해 Lee *et al.* (2003)은 감악산 알칼리 화강암질암이 742 Ma에 형성되었음을 제시하였으며 Kim *et al.* (2020)은 751 Ma에 정치하였음을 제시하였다(그림 2). 감악산 알칼리 화강암질암은 총알칼리 vs. SiO_2 도표에서 섬록암과 몬조니암에 해당하는 주원소 성분을 보여주며, Rb vs. Y+Nb와 Nb vs. Y 도표에서는 판내부환경 화강암 영역(WPG)에 도시된다(그림 3a, 3c, 3d). Sr-Nd 동위원소($\epsilon\text{Ndt}\sim-8.3\sim-18$) 연구를 통해 감악산 알칼리 화강암이 오래된 지각이 용융되어 형성되었음을 확인되었다(Lee *et al.*, 2003).

경기육괴 북부에 위치한 가평 일대 기반암인 고원생대 편마암류와 접하고 있는 가평층은 북북동쪽으로 연장되어 나타나며 변성석회질암, 대리암, 흑운모 편마암, 변성염기성암과 변성산성질 화산암으로 구성되어있다(Oh *et al.*, 2018). 이들 암석 내에는 변형작용에 의한 압쇄 조직(mylonitic texture)과 엽리(foliation)가 나타나며, 백립암상의 변성작용을 받

은 이후 일어난 각섬암상의 후퇴변성작용이 인지된다(Oh *et al.*, 2018). 그리고 저어콘의 U-Pb 연대측정을 통해 가평층 내 변성산성화산암의 형성 시기는 854 Ma로 제시되었다(그림 2; Oh *et al.*, 2018). 총알칼리 vs. SiO_2 도표에서 변성산성화산암은 석영몬조니암과 화강암 영역에 도시되며 변성염기성암은 반려암-반려암질 섬록암 영역에 도시된다(그림 3a). 이는 가평 일대에서 신원생대에 쌍모식 화성활동이 일어났음을 지시한다. 이들 암석의 미량원소 함량을 이용하여 지구조판별도에 도시해본 결과, 변성산성화산암은 한 개 시료를 제외한 대부분이 판내부 환경에 도시되며, 변성염기성화산암도 판내부 환경에 도시된다(그림 3c, 3b, 3d). 이는 가평 일대의 신원생대 화성암도 판내부 열곡 환경에서 형성되었음을 지시한다.

춘천 지역에서는 선캄브리아기 편마암인 용두리 편마암 복합체 위에 구봉산층군이 놓여있다(Park *et al.*, 1974; Ree, 1993). 구봉산층군은 하부에서부터 상부로 평촌리층, 신리층, 감정리층으로 나누어지며 주로 석회암, 흑운모 편암, 변성석회질암, 규암 등으로 구성된다. 춘천 각섬암은 암상이나 암주 형태로 구봉산층군을 관입하고 있다. 감정리층을 관입하는 춘천 각섬암의 원암은 반려암이며 약 888 Ma에 관입하였고, Ti vs. Zr 지구조판별도에서는 판내부 환경에 도시된다(그림 2, 3a, 3b; Lee *et al.*, 2020).

경기육괴 북서부에 위치한 장봉도는 고원생대 편마암이 기저를 이루고 있으며 그 상부에 신원생대 변성퇴적암이 나타난다(Cho and Lee, 2017). 신원생대 변성퇴적암은 주로 이질편암, 석영편암, 석회질편암 등으로 구성되며 이들 변성퇴적암류 내 가장 젊은 쇄설성 저어콘의 연대가 1000-920 Ma로 보고되었다(Cho and Lee, 2017). 장봉도에 나타나는 각섬암은 변성퇴적암을 관입한 후 각섬암상의 변성작용을 받았으며, 일부 각섬암은 부딘(Boudin)형태의 변형구조를 보여주기도 한다(Jeong *et al.*, 2021). 각섬암은 총알칼리와 SiO_2 분류도에서 반려암 영역에 도시되며, 약 917-873 Ma경 열곡과 관련된 판내부 환경에서 형성되었다(그림 2, 3a, 3b; Jeong *et al.*, 2021).

이러한 연구 결과는 한반도 상원누층군과 경기육괴 북부에 위치한 고남산, 감악산, 가평, 춘천, 장봉도 지역의 신원생대 화성활동이 약 917-742 Ma에 열곡 환경에서 형성되었음을 지시한다(그림 2).

3.2 경기육괴 서남부 당진-홍성 지역의 신원생대 화성활동

경기육괴 서남부에 위치한 당진 지역에서는 기반암인 고원생대 편마암을 신원생대 변성염기성암(metabasite)과 변성산성화성암(meta acidic igneous rock)이 관입하였다(Lee *et al.*, 2020). 변성염기성암은 감람암질 반력암에서 섬록암 영역에 도시된다(그림5). 변성염기성암은 약 833-820 Ma경에 섭입과 관련된 화산호 환경에서 형성되었으며, 793 Ma경에 열곡 환경에서 형성되었다(그림 4, 5; Lee *et al.*, 2020).

당진 지역의 남쪽 홍성 일대에서도 화산호와 열곡 환경에서 형성된 화성암들이 함께 나타난다(그림

4). 이 화성암들은 변성염기성암과 변성산성화성암으로 구분되며, 변성염기성암은 감람암질 반력암에서 섬록암 영역에 그리고 변성산성화성암은 화강섬록암에서 화강암 영역에 도시된다(그림 5a). 변성염기성암은 890-856 Ma 시기 섭입과 관련된 화산호 환경에서 관입하였으며(Guo *et al.*, 2004; Oh *et al.*, 2009), 변성산성화성암은 851-822 Ma에 화산호 환경에서 관입했다(Kim *et al.*, 2008, 2013). 따라서, 홍성 지역에서는 약 890-822 Ma 시기에 화산호와 관련된 화성활동이 있었음을 알 수 있다. 그리고 홍성 지역에서는 화산호 화성활동 이후, 열곡 관련 화성활동이 나타난다(그림 5b, 5c, 5d). 열곡 환경에서 형성된 변

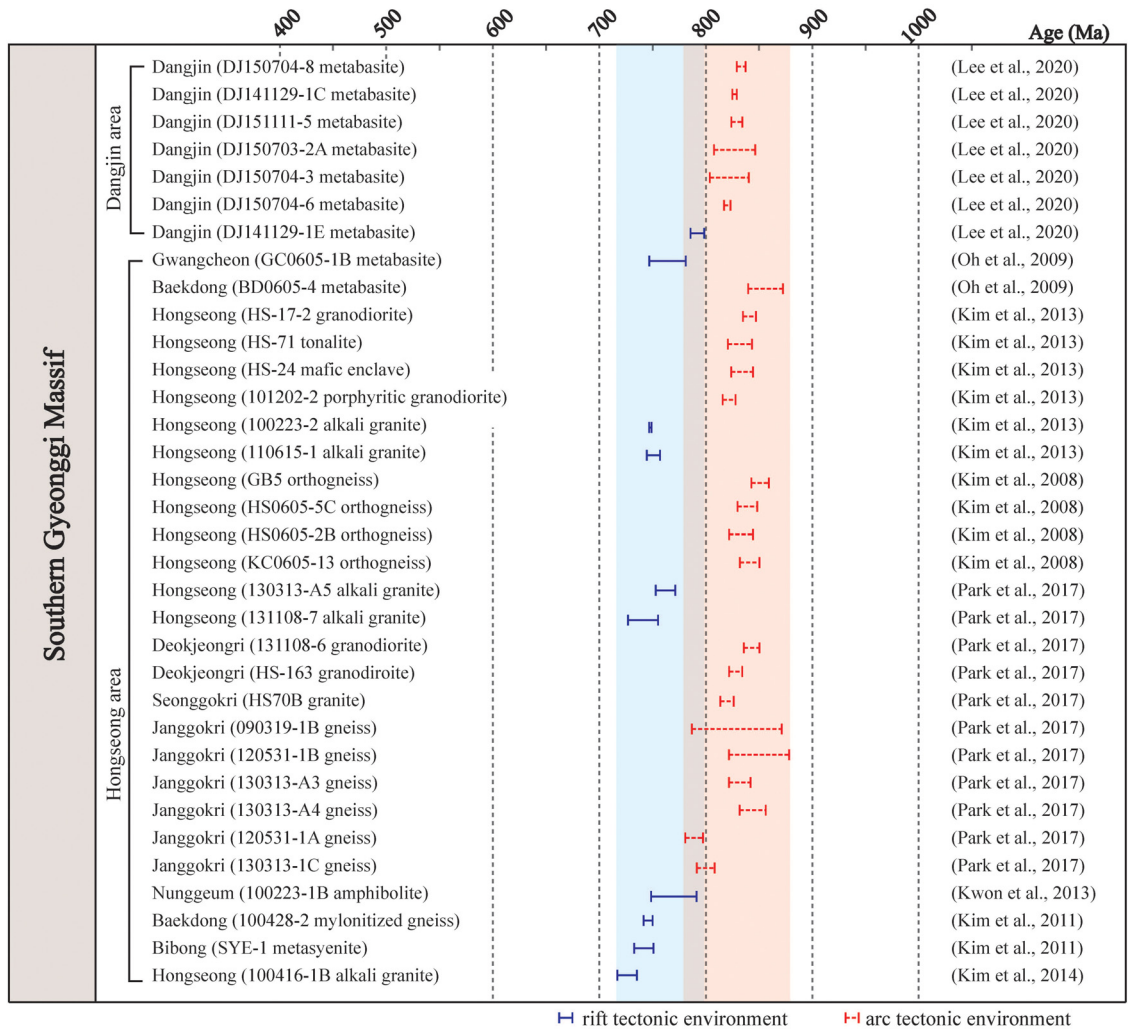


Fig. 4. The distribution diagram of U-Pb ages for the Neoproterozoic rocks in the Dangjin and Hongseong areas within the northern Gyeonggi Massif.

성염기성암은 793-770 Ma에 관입하였으며(Oh *et al.*, 2009; Kwon *et al.*, 2013), 변성산성화성암도 열곡 환경에서 762-730 Ma에 관입하였다(Kim *et al.*, 2011, 2013, 2014; Kwon *et al.*, 2013; Kim and Park, 2016; Park *et al.*, 2017). 즉, 홍성 일대에는 열곡과 관련된 화성활동이 793-730 Ma 시기에 활발했다(그림 4).

3.3 고군산군도와 옥천변성대 지역의 신원생대 화성활동

옥천대 남서쪽 서해안에 위치한 고군산군도는 말도, 명도, 방축도, 선유도, 신시도, 장자도, 야미도, 무녀도 등으로 이루어진 섬이다. 고군산군도는 기반암인 고원생대 혼성질 편암과 그 위에 퇴적된 신원생대 말도층과 방축도층으로 구성된다(Kee *et al.*, 2019). 말도층은 흑운모 편암으로 구성되며, 중압형의 변성작용과 강한 변형작용을 받아 압쇄조각과 강한 엽리구조를 잘 보여준다. 말도층을 부정합으로 덮고 있는 방축도층은 주로 변성사암으로 구성되며,

얇은 세일층과 부분적으로 호층을 이룬다. 방축도층은 강한 변형작용을 보여주지 않으며, 변성작용 또한 매우 약하게 경험하였다(Kim *et al.*, 2021b). Kim *et al.* (2021b)은 쇄설성 저어콘의 연대를 바탕으로 말도층이 1156-900 Ma 이후에 퇴적되었으며, 방축도층의 변성사암은 792-763 Ma 이후에 퇴적되었음을 제시하였다. 이러한 쇄설성 저어콘의 연대분석 자료는 고군산군도 말도층과 방축도층이 신원생대에 퇴적되었을 가능성을 시사한다. 고군산군도에 나타나는 변성염기성암과 변성산성화성암은 말도층을 관입하고 있으며, 일부 지역에서는 변성염기성암과 변성산성화성암이 마그마 상태에서 서로 섞인 구조(mingling texture)가 관찰된다. 기존 연구에 의하면 말도에 나타나는 변성염기성암은 916-899 Ma에 관입하였으며, 명도에 나타나는 변성염기성암과 변성산성화성암은 각각 930-893 Ma와 907-895 Ma에 관입하였다(그림 6; Kee *et al.*, 2019; Kim *et al.*, 2021b).

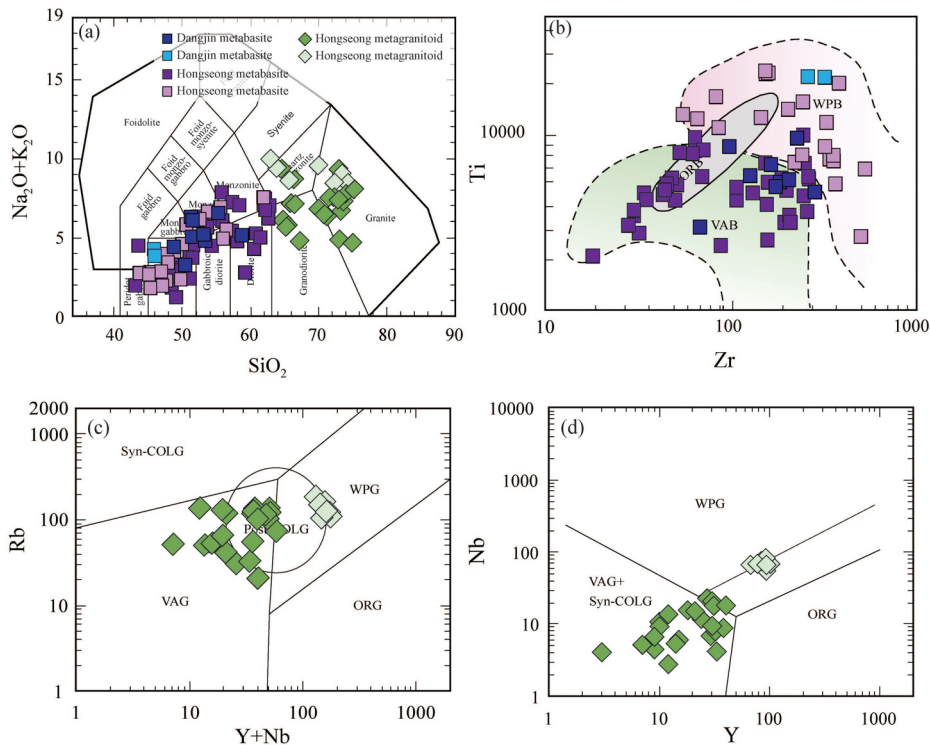


Fig. 5. The geochemical classifications and tectonic settings for the Dangjin and Hongseong areas within the southern Gyeonggi Massif. (a) Total alkali (Na_2O+K_2O) vs Silica (SiO_2) classification diagram after Middlemost (1994); (b) Ti vs. Zr diagram after Pearce and Cann (1973); (c) Rb vs. Y+Nb diagram after Pearce *et al.* (1984); (d) Nb vs. Y diagram after Pearce *et al.* (1984). Abbreviations in Fig. 3 are also used. Data are collected from references in Fig. 4.

고근산군도의 변성화성암류 중 변성염기성암은 주로 반려암 내지 반려암질 섬록암 영역에 해당되며, 변성산성화성암은 화강섬록암과 화강암 영역에 도시된다(그림 7a). 또한, 미량원소를 활용한 지구조판별도에서 변성염기성암과 변성산성화성암은 모두 화산호 환경 영역에 도시된다(그림 7b, 7c, 7d).

옥천대는 북으로 경기육괴, 남으로는 영남육괴와 접하고 있으며 옥천대 북동부의 태백산 분지와 남서부의 옥천변성대로 나뉜다. 옥천변성대는 변성퇴적암과 변성화산암으로 구성되며(Kim *et al.*, 2006, 2020; Cheong *et al.*, 2014), 북동부는 서창리층, 황강리층, 문주리층, 대향산규암, 향산리돌로마이트층, 계명산층으로 구성된다(Ryu *et al.*, 2009). 서창리층은 주로 천매암과 규암, 탄산염암이 박층으로 교호되며(Kim *et al.*, 2021a), 황강리층은 세립질 흑색기질에 수 센티미터 크기의 역을 포함한 역암으로 구성된다(Kim and

Min, 1996; Ryu and Ahn, 2016). 문주리층은 사질암, 녹니석편암, 변성산성화산암과 각섬암으로 구성되며(Koh *et al.*, 2005), 계명산층은 주로 변성산성화산암과 일부 변성화강암 내지 변성퇴적암으로 구성된다(You *et al.*, 2012). 계명산층과 문주리층에 나타나는 변성산성화산암은 각각 871-858 Ma(그림 6; Kim *et al.*, 2006, 2020; Cheong *et al.*, 2015)과 766-742 Ma에 분출하였다(그림 6; Lee *et al.*, 1998; Cho and Kim, 2005; Kim *et al.*, 2006, 2020). 옥천변성대 남부의 보은과 문경 지역에 나타나는 각섬암은 각각 762 Ma와 758 Ma에 관입하였다(그림 6; Cheong *et al.*, 2014). 계명산층과 문주리층의 화성암들을 총알칼리 vs. SiO₂ 도표에 도시한 결과, 변성염기성암은 주로 반려암 영역, 변성산성화산암은 화강섬록암과 화강암 영역에 해당되며(그림 7a), 이들 화성암들은 모두 지구조판별도에서 판내부 환경에 도시된다(그림 7b, 7c, 7d).

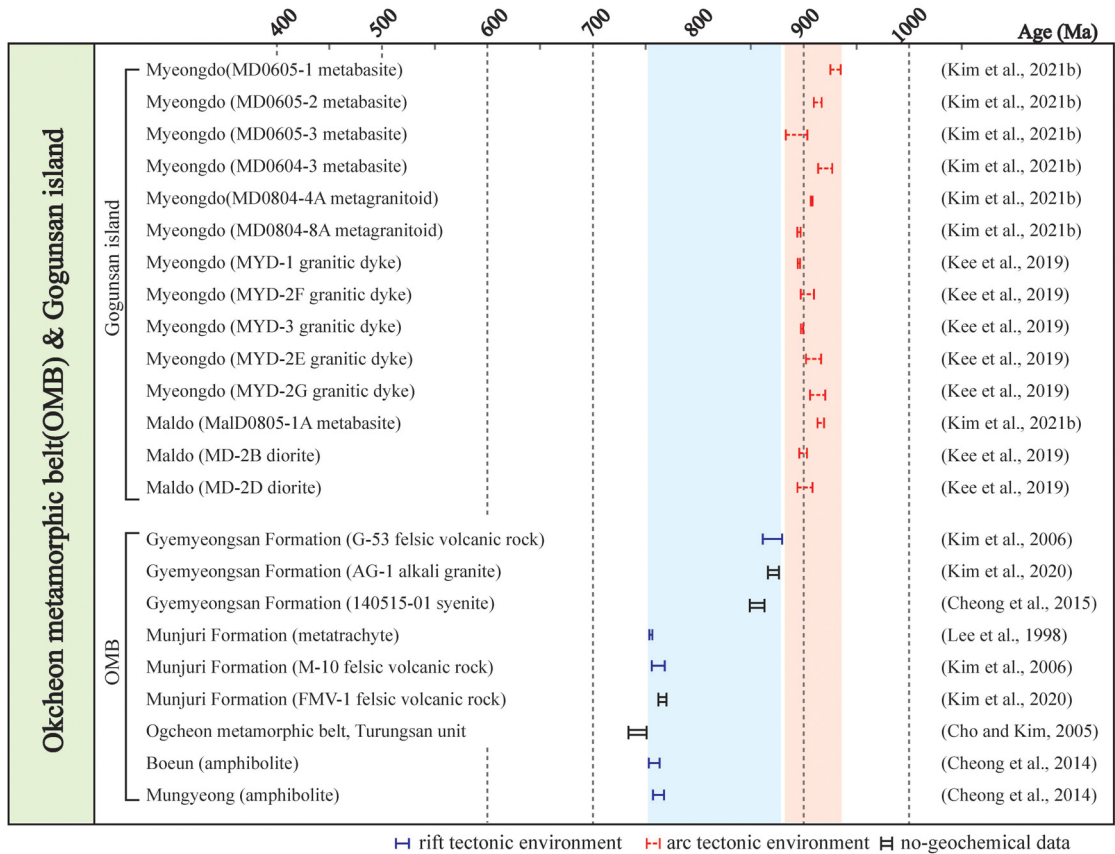


Fig. 6. The distribution diagram of U-Pb ages for the Neoproterozoic rocks in the Gogunsan island and Okcheon metamorphic belt.

4. 중국 신원생대 화성활동

4.1 북중국판 남부와 남동부 경계의 신원생대 화성활동

북중국판의 남부 및 남동부 경계에 나타나는 신원생대 Xu-Huai-Lv-Da 열곡대를 따라 염기성 암맥군이 관입하고 있다(그림 8). Liaoning에 위치한 Lv-Da 분지는 4개의 층으로 구성되며 하부부터 Yongning, Xihe, Wuxingshan, Jinxian층으로 구성된다(Peng *et al.*, 2011). Yongning층은 주로 역암과 사암으로 구성되며, 두께는 약 500-6000 m이다(BGMRL, 1989). 이를 부정합으로 덮고 있는 Xihe 층의 두께는 약 800-1400 m로 규암, 셰일로 구성되며, 부분적으로 석회암이 교호한다(BGMRL, 1989). Wuxingshan층은 규암, 셰일, 돌로마이트로 구성되며, 두께는 약 750-1700 m이다. Jinxian층은 석회암과 부분적으로 협재하고 있는 셰일층으로 구성되며, 두께는 약 600-1500 m

이다(BGMRL, 1989). Lv-Da 분지내 퇴적암을 Dalian 염기성암이 924-886 Ma에 관입하고 있다(Zhang *et al.*, 2016b). Chulan에 위치한 Xu-Huai 분지의 두께는 약 1500 m이며, 하부로부터 규암, 대리암, 돌로마이트로 구성되고 이들 퇴적암을 Chulan 염기성암이 930-890 Ma에 관입하였다(Wang *et al.*, 2012b). Zenghekou에 위치한 Luanchuan 분지에서는 Zenghekou 염기성암이 900-830 Ma에 관입하였다(Wang *et al.*, 2011; Peng, 2015). Dalian, Chulan, Zenghekou 염기성암들은 반려암질에 해당되며, 판내부 환경에 도시된다(그림 9a, 9b).

Xu-Huai-Lv-Da 신원생대 열곡대와 그 안에 나타나는 930-830 Ma에 관입한 Dalian, Chulan, Zenghekou 염기성 화성암들은 이 시기에 북중국판 남부와 남동부 경계에서 로디니아 초대륙으로부터의 분열이 시작되면서 열곡대가 형성되었고, 그 안에 열곡대 확장과 관련된 화성암 관입과 함께 퇴적암이 퇴

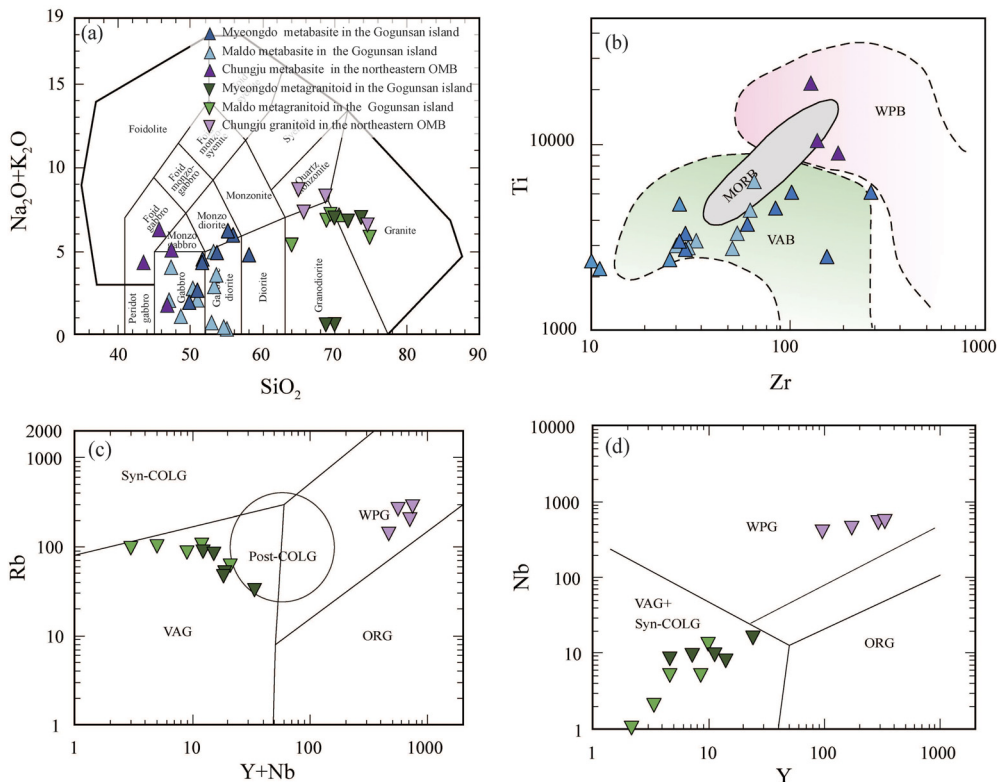


Fig. 7. The geochemical classifications and tectonic settings for the Gogunsan island and Okcheon metamorphic belt. (a) Total alkali ($\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}$) vs Silica (SiO_2) classification diagram after Middlemost (1994); (b) Ti vs. Zr diagram after Pearce and Cann (1973); (c) Rb vs. Y+Nb diagram after Pearce *et al.* (1984); (d) Nb vs. Y diagram after Pearce *et al.* (1984). Abbreviations in Figs. 1 and 3 are also used. Data are collected from references in Fig. 6.

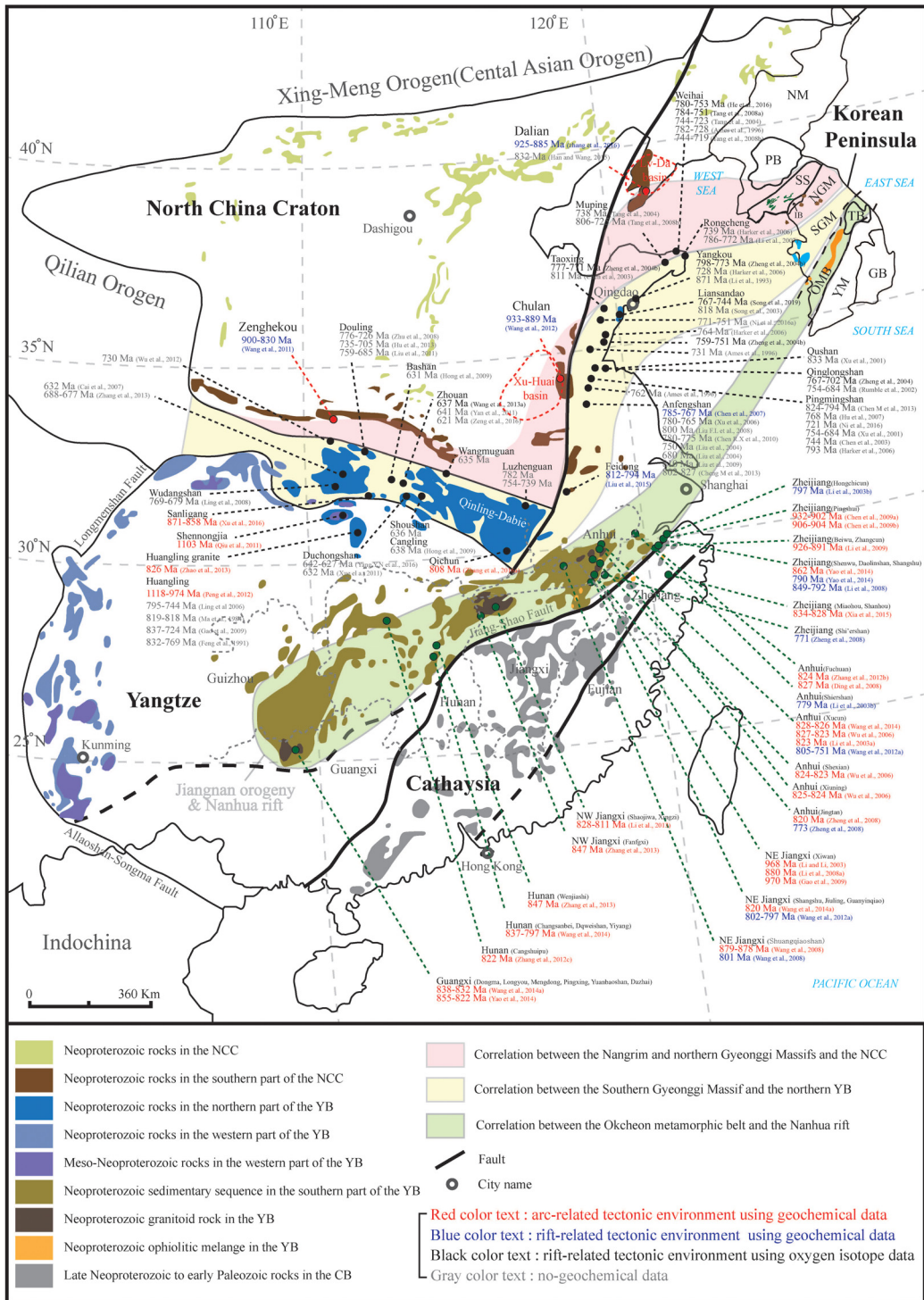


Fig. 8. The distribution of Neoproterozoic rocks in the Korean Peninsula and China (modified after Lee *et al.*, 2020) and correlation between Neoproterozoic rocks in the Korean Peninsula and those in the China. Abbreviations in Fig. 1 are also used. NCC = North China Craton, YB = Yangtze Block, CB = Cathaysia Block, NM=Nangrim Massif, PB=Pyeongnam Basin.

적되었음을 지시한다(Peng *et al.*, 2011; Peng, 2015).

4.2 양쯔지괴 북부 경계부 일대의 신원생대 화성 활동

양쯔지괴 북부에 위치한 친링-다비-수루 충돌대를 따라 화산호와 열곡 환경에서 형성된 신원생대 염기성암과 산성화성암이 산출한다(그림 8; Song *et al.*, 2019 and reference therein). 충돌대 서쪽에 위치한 Sanligang 지역에는 871-858 Ma 시기에 화산호에서 형성된 화성암과 1100-980 Ma에 형성된 오피오라이트가 산출한다(그림 8; Xu *et al.*, 2016 and reference therein). Sanligang 보다 남쪽에 위치한 Shennongjia와 Huangling 지역에는 화산호 관련 화성암이 1103 Ma와 1118-826 Ma에 관입했으며(그림 8, 9c, 9d; Qiu *et al.*, 2011; Peng *et al.*, 2012; Zhao *et al.*, 2013), 충돌대 중앙에 위치한 Qichu 지역에는 화산호 관련 화성암이 808 Ma에 관입하였다(Zhang

et al., 2016a), Zhouan 지역에는 열곡 관련 화성암이 637 Ma에 관입하였고(Wang *et al.*, 2013a), Feidong과 Anfengshan 지역에서는 열곡 관련 화성활동이 각각 812-794 Ma와 785-767 Ma에 일어났다(Chen *et al.*, 2007; Liu *et al.*, 2015). 그 외에도 충돌대 내 Qinglogshan, Taoxing, Yangkou, Weihai 지역에서 나타나는 784-702 Ma 화성암류의 저어콘의 산소 동위원소 함량은 이들 암석이 열곡대 환경에서 형성되었음을 지시한다(Zheng *et al.*, 2004; Tang *et al.*, 2008; He *et al.*, 2016).

4.3 양쯔지괴 남부 경계부 일대의 신원생대 화성활동

남중국판 남부에는 신원생대 로디니아 초대륙 형성 시, 양쯔지괴와 커테시아지괴의 충돌에 의해 형성된 장난 조산대가 분포한다(Zhao, 2015 and reference therein). 장난 조산대 내에는 동부에서 서부로 가면서 Zhejiang, Anhui, Jiangxi, Hunan, Guangxi

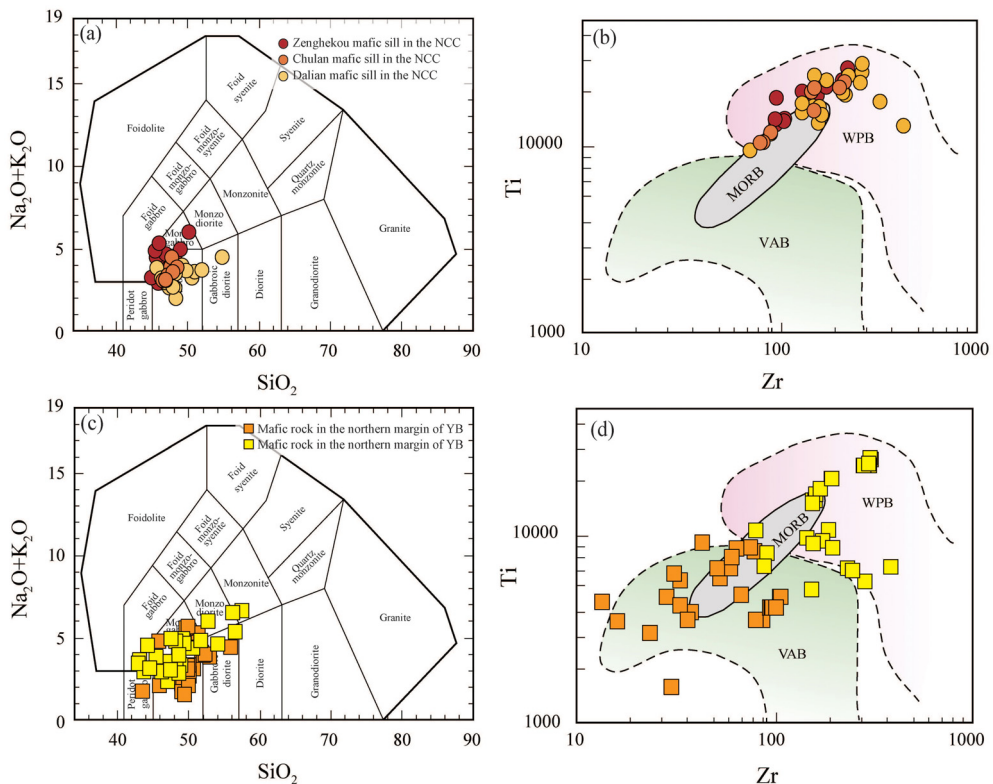


Fig. 9. The geochemical classifications and tectonic settings for the Dalian, Chulan, Zengkou areas within the southern margin of North China Craton (a, b) and the northern margin of Yangtze Block (c, d). (a, c) Total alkali ($\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}$) vs Silica (SiO_2) classification diagram after Middlemost (1994); (b, d) Ti vs. Zr diagram after Pearce and Cann (1973). Abbreviations in Figs. 3 and 8 are also used. Data are collected from references in Fig. 8.

자치구들이 위치하고 있다(그림 8). 장난 조산대에서도 양쯔괴 북부 경계 지역처럼 화산호뿐 아니라 열곡 환경에서 형성된 신원생대 염기성암과 산성화성암이 나타나고 있다. 이들 중 염기성암을 지구조 판별도에 도시하여 형성 시 지구조 환경을 구분하였다(그림 10).

장난 조산대 동부 Zhejiang 자치구 내에 위치한 Hongchicun, Pingshui, Beiwu, Zhangcun, Shewu, Danlinshan, Shangshu, Miaohou, Shanhou, Shi'ershan 지역에서 신원생대 화성암이 산출한다(그림 8). 화성암들 중 변성염기성암은 반려암에서 섬록암 영역에 도시되며(그림 10a, 10b), 그 중 화산호 관련 화성암들이 Pingshui, Beiwu, Zhangcun 지역에서는 932-891 Ma에 관입하였으며(Chen *et al.*, 2009a, 2009b; Li *et al.*, 2009), Miaohou와 Shanhou 지역에서는 834-828 Ma에 관입하였다(Xia *et al.*, 2015, 2018 and reference therein). 이에 반해 열곡대와 관련된 화성암은

Hongchicun 지역에서 797 Ma에 관입하였다. Shewu, Danlinshan, Shangshu 지역에서는 화산호와 관련된 화성암이 862 Ma에 관입하였으며, 이후 849-790 Ma에 열곡 환경과 관련된 화성암이 관입하였다(Li *et al.*, 2008b; Yao *et al.*, 2014). Shi'ershan 지역에서는 771 Ma에 열곡과 관련된 화성암이 관입하였다(Zheng *et al.*, 2008). 이상을 종합하면 Zhejiang 자치구에서는 화산호 관련 화성암이 932-828 Ma에 형성된 후 열곡 관련 화성암이 849-771 Ma에 형성되었다.

Anhui 자치구는 Zhejiang 자치구보다 서쪽에 위치하며, Anhui 자치구 내 Fuchuan, Shiershan, Xucun, Shexian, Xiuning, Jingtang 지역에서 신원생대 화성암이 산출된다(그림 10c, 10d). 화산호 관련 화성암이 Fuchuan 지역에서는 827-824 Ma에 관입했으며, Shexian과 Xiuning 지역에서는 824-823 Ma와 825-824 Ma에 관입했다(Wu *et al.*, 2006; Ding *et al.*, 2008; Zhang *et al.*, 2012a; Liu *et al.*, 2019 and reference

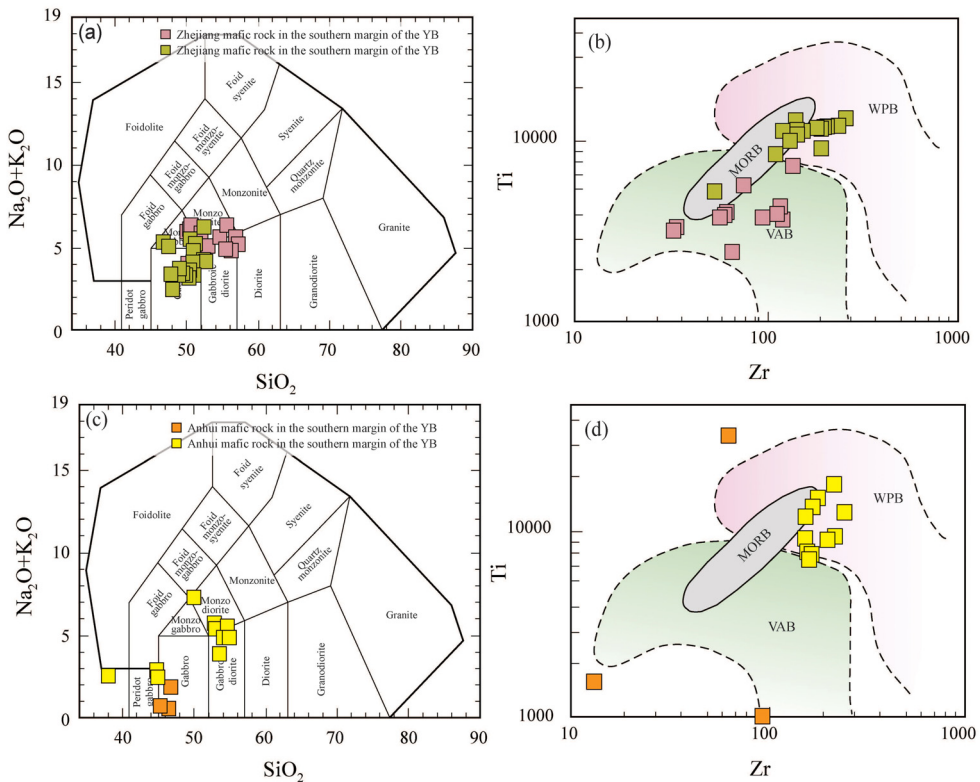


Fig. 10. The geochemical classifications and tectonic settings for the Zhejiang, Anhui provinces in the southern margin of Yangtze Block. (a) Total alkali (Na₂O+K₂O) vs Silica (SiO₂) classification diagram after Middlemost (1994); (b) Ti vs. Zr diagram after Pearce and Cann (1973). Abbreviations in Figs. 3 and 8 are also used. Data are collected from references in Fig. 8.

therein). Xucun 지역에서는 화산호 관련 화성활동이 828-823 Ma에 발생하였으며, 이후 열곡 환경과 관련된 화성활동이 805-751 Ma에 발생하였다(Wu *et al.*, 2006; Wang *et al.*, 2012a; Wang *et al.*, 2014). Jingtang 지역에서도 화산호와 열곡 관련 화성활동이 각각 820 Ma와 773 Ma에 있었으며, Shiershan 지역에는 열곡 관련된 화성활동이 779 Ma에 있었다(Li *et al.*, 2003a; Zheng *et al.*, 2008). 종합하면 Anhui 자치구에서는 신원생대 화산호 관련 화성활동이 828-820 Ma에 있었으며, 이후 열곡 관련 화성활동이 805-751 Ma에 있었다.

Jiangxi 자치구 내 Xiwan, Shangshu, Jiuling, Guanyinqiao, Shuangqiaoshan, Shaojiwa, Xingzi, Fanfngxi 지역에서 신원생대 화성암이 산출된다(그림 11a, 11b). 화산호 관련 화성암이 Xiwan 지역에서는 970-880 Ma (Li and Li, 2003; Li *et al.*, 2008a; Gao *et al.*, 2009), Jiangxi의 북서쪽에 위치한 Shaojiwa, Xingzi 지역에서는 828-811 Ma, Fanfngxi 지역에서는 847

Ma에 관입하였다(Li *et al.*, 2013; Zhang *et al.*, 2013). 그리고 Shangshu, Jiuling, Guanyinqiao 지역에서는 화산호와 열곡 관련 화성활동이 각각 820 Ma와 802-797 Ma에 일어났다(Wang *et al.*, 2012c, 2013b). Shuangqiaoshan 지역에서는 화산호 관련 화성암이 879-878 Ma에 관입하고, 이후 열곡 관련 화성암이 801 Ma에 관입했다(Wang *et al.*, 2008). 결론적으로, Jiangxi 자치구에서는 화산호 관련 화성활동이 970-811 Ma에 있었으며, 이후 열곡 관련 화성활동이 802-797 Ma에 발생하였고, Anhui와 Jiangxi 지역에서 대륙충돌이 811-805 Ma에 일어났을 가능성을 제시한다.

Jiangxi보다 서쪽에 위치한 Hunan 자치구에서 신원생대 화성암은 Wenjiashi, Changsanbei, Dqweishan, Yiyang 지역에서 산출하며, 모두 화산호 환경에서 형성되었다(그림 11c, 11d). 화산호 관련 화성암이 Wenjiashi 지역에서는 847 Ma, 그리고 Changsanbei, Dqweishan,

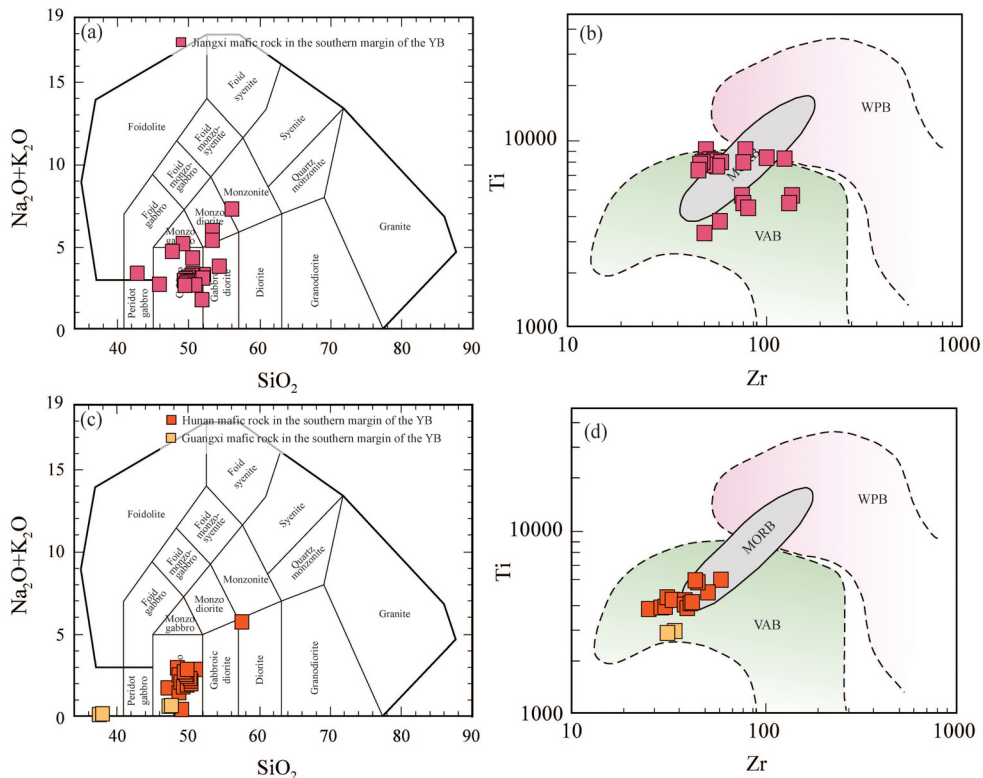


Fig. 11. The geochemical classifications and tectonic settings for the Jiangxi, Hunan and Guangxi provinces in the southern margin of Yangtze Block. (a) Total alkali (Na₂O+K₂O) vs Silica (SiO₂) classification diagram after Middlemost (1994); (b) Ti vs. Zr diagram after Pearce and Cann (1973). Abbreviations in Figs. 3 and 8 are also used. Data are collected from references in Fig. 8.

Yiyang 지역에서는 837-797 Ma에 관입하였으며(Zhang *et al.*, 2012b, 2013; Wang *et al.*, 2014), 이들 지역보다 서쪽에 위치한 Cangshuipu 지역에서는 822 Ma에 관입하였다(Zhang *et al.*, 2012b). 종합하면, Hunan 자치구에서는 847-797 Ma에 화산호 관련 화성활동이 발생하였다. 장난 조산대 서부에 위치한 Guanxi 자치구에도 화산호 관련 화성암이 인지된다(그림 11c, 11d). Guaxi 자치구 내에 위치한 Dongma, Longyou, Mengdong, Pingxing, Yuanbaoshan, Dazhai 지역에서는 화산호 관련 화성암이 855-822 Ma에 관입했다(Wang *et al.*, 2014; Yao *et al.*, 2014). 결론적으로, Hunan 및 Guanxi 자치구에서는 화산호 관련 화성활동이 855-797 Ma에 발생하였고, 대륙충돌이 797 Ma 이후에 일어났을 가능성이 있다.

5. 토 의

5.1 한반도의 신원생대

남령육괴 남부에 위치한 상원누층군은 주로 중-신원생대 퇴적암(ca. >990 Ma)으로 구성되어 있다(Hu *et al.*, 2012). 상원누층군 서쪽 서해안에 위치한 백령층군에서는 중원생대(ca. >1050 Ma) 쇄설성 저어콘이 주로 산출되며(Kim *et al.*, 2016), 이와 함께 백령층군의 상부층으로 예상되는 소청도의 퇴적층 내에서 신원생대 스트로마톨라이트가 산출되는 것은 백령층군이 하부 상원누층군에 대비되는 퇴적층임을 시사한다(Kim *et al.*, 2016, 2021a). Choi (2014)는 상원누층군을 난후아 열곡대와 대비된다고 제시하였다. 이와 달리 Peng (2015)은 상원누층군은 난후아 열곡대 내 퇴적층 보다는 북중국판 남부와 동남부 경계에 발달된 Xu-Huai-Lv-Da 열곡대 내 칭백호층군과 대비된다고 제시하였다. 상원누층군을 관입하고 있는 899 Ma 사리원 화성암은 인장력에 의해 지각이 벌어지는 열곡 환경에서 형성되었으며, 이와 대비되는 화성작용이 Xu-Huai-Lv-Da 열곡대에서도 나타나는데 반해 남중국판에서는 899 Ma 시기에 형성된 화성암은 모두 섭입과 관련된 화산호 환경에서 형성되었다(그림 12; Peng *et al.*, 2011; Peng, 2015; Kim *et al.*, 2021b and references therein). 따라서 상원누층군은 난후아 열곡대의 퇴적층과 대비되지 않고 북중국판의 Xu-Huai-Lv-Da 열곡대 내 칭백호층군에 대비시키는 것이 타당하다.

경기육괴 북부 고남산, 감악산, 가평, 춘천, 장봉도 지역에서도 사리원 신원생대 화성암과 대비될 수 있는 열곡대 환경에서 형성된 신원생대 화성암이 분포하고 있다(Lee *et al.*, 2003, 2020; Kee *et al.*, 2008; Jeong *et al.*, 2021). 고남산과 감악산 지역의 신원생대 화성암은 주변암과의 관입관계가 분명치 않은 반면 가평, 춘천, 장봉도 지역에서는 중-신원생대 변성 퇴적층을 신원생대 화성암이 관입하고 있다(Kee *et al.*, 2008; Oh *et al.*, 2018; Lee *et al.*, 2020; Jeong *et al.*, 2021). 고남산(873-851 Ma), 감악산(774-742 Ma), 가평(854 Ma), 춘천(888 Ma), 장봉도(914-873 Ma) 지역에 나타나는 신원생대 화성암 연구를 종합하면 약 914-742 Ma 시기에 열곡과 관련된 화성활동이 경기육괴 북부 지역에서 일어났음을 알 수 있다(Lee *et al.*, 2020; Jeong *et al.*, 2021). 상원누층군을 관입하는 899 Ma 화성암도 경기육괴 북부에 나타나는 신원생대 화성활동(914-742 Ma)과 비슷한 시기에 형성되었으며, 두 화성활동 모두 인장력에 의해 판이 분리되는 열곡 관련 지구조 환경에서 형성되었기 때문에 상원누층군의 신원생대 화성활동과 경기육괴 북부 신원생대 화성활동이 잘 대비된다(그림 12).

상원누층군과 경기육괴 북부 신원생대 화성활동은 모두 열곡 환경에서 형성된 반면에, 경기육괴 서남부 당진과 홍성 지역은 화산호 환경과 열곡 환경에서 형성된 화성암이 함께 나타나고 있다(Lee *et al.*, 2020). 당진 지역에서는 833-820 Ma에 화산호 환경에서 화성암이 형성되었으며, 793 Ma에 열곡 관련 화성암이 형성되었다(Lee *et al.*, 2020). 당진 지역과 비슷하게 홍성 지역에서도 890-822 Ma 화산호 환경에서 화성암이 형성된 이후 770-746 Ma 열곡 관련 화성암이 형성되었다(Oh *et al.*, 2009; Kwon *et al.*, 2013; Kim and Park, 2016). 당진과 홍성 지역의 신원생대 화성활동을 종합하면, 890-820 Ma에는 화산호 환경에서 화성활동이 일어났으며, 793-730 Ma에는 열곡 환경에서 화성활동이 일어났음을 알 수 있다(Lee *et al.*, 2020). 화산호 환경에서 열곡 환경으로 바뀌는 820-793 Ma 사이는 로디니아 초대륙이 최종적으로 형성되었던 시기로 예상되며 이 시기에 경기육괴 서남부 지역에서 대륙충돌이 일어났을 가능성이 있다.

육천변생대 북동부 계명산층과 문주리층에서는 화성활동이 각각 871-858 Ma, 766-742 Ma에 일어

났다(Cho and Kim, 2005; Kim *et al.*, 2006, 2020; Cheong *et al.*, 2015). 그리고 두 층 주변에 나타나는 서창리층의 일부는 중원생대(가장 젊은 쇄설성 저어콘 연령, 1033-917 Ma) 그리고 그 외는 신원생대(가

장 젊은 쇄설성 저어콘 연령, 754-751 Ma)에 퇴적된 것이 확인되었으며, 황강리층의 가장 젊은 쇄설성 저어콘 연령(758-741 Ma)은 황강리층이 신원생대에 퇴적되었을 가능성을 지시한다(Kim and Min,

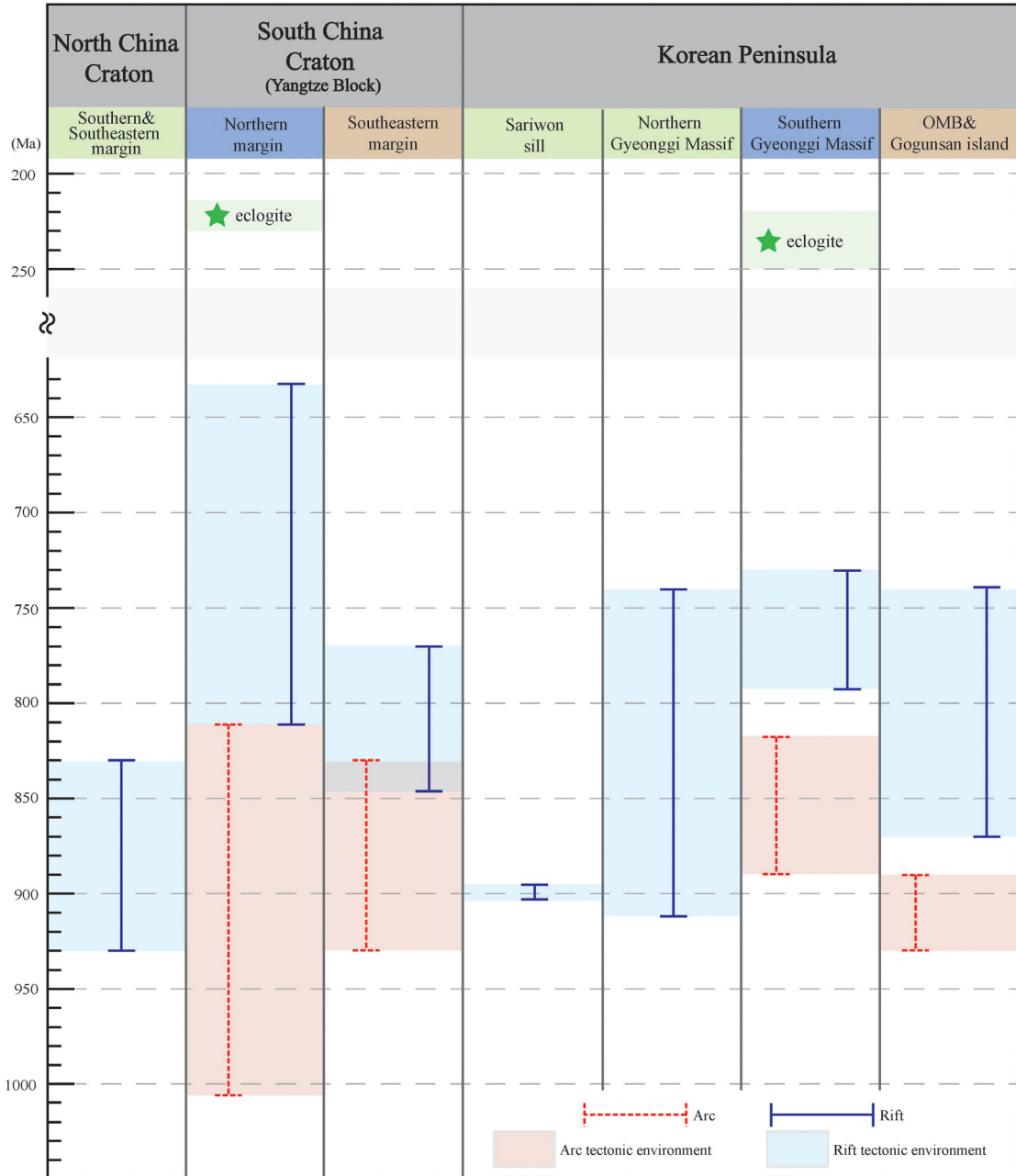


Fig. 12. The simplified comparison chart that shows ages and tectonic environments of Neoproterozoic rocks in the North and South China Cratons and Korean Peninsula. Abbreviations are as follows: OMB = Okcheon metamorphic belt. Data are collected from references in Figs. 2, 4, 6, 8.

1996; Cho *et al.*, 2013; Ryu and Ahn, 2016). 일부 학자들은 크리요지니아기 빙하시대에 형성된 빙하기원 퇴적층인 황강리층이 문주리층을 부정함으로 덮고있다고 주장하고 있다(Fitches and Zhu, 2006; Choi, 2014). 종합하면 옥천변성대에서는 1033-917 Ma 이후 퇴적작용이 시작되어, 871-742 Ma 시기에 열곡과 관련된 쌍모식 화성활동과 퇴적작용이 일어났고, 그 후에 빙퇴석을 포함한 황강리층과 일부 서창리층이 퇴적되었다.

고군산군도의 말도층 내 변성퇴적암의 쇄설성 저어콘 연대는 말도층이 1156-900 Ma 이후에 퇴적되었으며, 화산호 관련 화성암(930-893 Ma)이 말도층을 관입하였고, 최종적으로 방축도층이 열곡대 환경에서 792-763 Ma 이후 말도층 상부에 퇴적되었다(Kee *et al.*, 2019; Kim *et al.*, 2021b). 말도층은 강한 변형작용과 함께 중압형의 각섬암상의 변성작용을 받은 반면에, 방축도층은 사층리와 같은 퇴적구조가 잘 관찰되며 변성작용을 거의 받지 않았다(Kim *et al.*, 2021b). 고군산군도 내 화산호 관련 화성암(930-893 Ma)은 경기육괴 서남부에 나타나는 화산호 관련 화성암(890-820 Ma)보다 먼저 형성되었다. 고군산군도 말도층의 쇄설성 저어콘의 연대와 옥천변성대 서창리층의 쇄설성 저어콘의 연대가 유사한 것은 이 두 층이 동일한 시기에 형성되었을 가능성을 지시한다. 고군산군도에서는 화산호 관련 화성활동이 930-894 Ma에 있었고 중압형 변성작용이 907-895 Ma에 일어났으며, 792-763 Ma 시기에는 열곡대 환경에서 퇴적암이 형성되었다. 그리고 옥천변성대 내 계명산층과 문주리층에서는 871-742 Ma에 열곡 관련 화성암과 퇴적암이 함께 산출된다. 종합하면 고군산군도와 옥천변성대 지역에서는 895 Ma 까지 섭입작용이 일어났고, 그 이후 로디니아 초대륙을 형성한 대륙충돌이 일어났으며, 871-742 Ma에는 로디니아 초대륙 분열과 관련된 열곡 환경이 형성되었을 가능성이 있다(Kim *et al.*, 2021b).

결론적으로 상원누층군과 함께 경기육괴 북부에서는 914-742 Ma 동안 열곡과 관련된 화성활동이 발생하였다. 이와 대조적으로, 경기육괴 서남부 일대에서는 890-820 Ma 동안 화산호 관련 화성활동이 있었고, 793-730 Ma에 열곡과 관련된 화성활동이 있었다. 즉, 경기육괴 서남부에서는 820-793 Ma에 대륙충돌이 일어났을 가능성이 있다. 따라서 신원생대

에 열곡 관련 화성활동만 일어났던 경기육괴 북부는 섭입 관련 화성활동 이후 열곡 관련 화성활동이 일어난 경기육괴 서남부와 서로 다른 지구조 진화과정을 경험했음을 알 수 있다. 고군산군도와 옥천변성대에서는 화산호 환경에서 열곡 환경으로 전이가 893-871 Ma에 일어났을 것으로 예상된다(그림 12).

5.2 중국의 신원생대

북중국판의 경계부와 중앙에는 중-신원생대에 형성된 퇴적분지와 신원생대 염기성 화성암이 나타난다(Peng, 2015). 그 중 북중국판의 남부와 남동부 경계부를 따라 Xu-Huai-Lv-Da 열곡대가 형성되어 있으며 이 열곡대 내에 신원생대 칭백호층군(1.0-0.8 Ga)의 퇴적작용이 신원생대 염기성 화성활동과 함께 일어났다. Xu-Huai-Lv-Da 열곡대 동쪽 지역에서는 Dalian 염기성 화성암이 924-886 Ma에 관입하였으며, 중앙지역에서는 Chulan 염기성 화성암이 930-890 Ma에 관입하였고(Wang *et al.*, 2012b; Zhang *et al.*, 2016b), 서쪽 지역에서는 Zenghekou 염기성 화성암이 900-830 Ma에 관입하였다(Wang *et al.*, 2011). 상원누층군을 관입하는 사리원 염기성 화성암(899 Ma)은 Dalian Chulan, Zenghekou 염기성 화성암(930-830 Ma)과 유사한 지구조 환경에서 동시기에 군집(swarm)형태로 관입 했으며, 이는 로디니아 초대륙이 분열시 형성 되었을 것으로 해석되고 있다(그림 12; Peng, 2015; Lee *et al.*, 2020).

남중국판의 양쯔지괴 북부 경계부에 나타나는 트라이아스기 친링-다비-수루 충돌대를 따라 신원생대 화성암이 분포한다. 충돌대 서쪽에는 섭입작용에 의해 형성된 1118-826 Ma 화성암이 나타나며, 충돌대 중앙에는 화산호 관련 화성암(808 Ma)과 열곡 관련 화성암(637 Ma)이 나타난다(Qiu *et al.*, 2011; Peng *et al.*, 2012; Wang *et al.*, 2013a; Zhao *et al.*, 2013; Zhang *et al.*, 2016a). 충돌대 동쪽에는 812-702 Ma에 열곡 관련 화성활동이 인지된다(Zheng *et al.*, 2004; Chen *et al.*, 2007; Tang *et al.*, 2008; Liu *et al.*, 2015; He *et al.*, 2016). 종합하면, 양쯔지괴 북부 경계에서는 화산호 관련 화성활동(1118-808 Ma) 이후 812-637 Ma 시기에 열곡 관련 화성활동이 일어났다(그림 12). 화산호 관련 화성활동과 열곡 관련 화성활동이 중첩되는 812-808 Ma 시기에는 양쯔지괴 북부 경계를 따라 로디니아 초대륙 형성과 관련된 대륙충

돌이 있었을 것으로 예상되며, 이 시기에 형성된 화성암의 일부는 충돌 전 섭입작용에 의해 부화된 지각의 재용융으로 인해 화산호 환경 특성을 보유하고 있었으며, 그 외 화성암은 대륙충돌 후 이어지는 충돌 후 환경에서 발생된 인장력에 의해 상승한 맨틀이 공급한 성분에 의해 열곡 환경 특성을 보여준 것으로 생각된다.

양쯔지괴 남부 경계에서도 섭입작용과 관련된 신원생대 장난 조산대 화성암류와 대륙 분열시 형성된 신원생대 난후아 열곡대 화성암류가 산출하는데, 장난 조산대 동부에 위치한 Zhejiang 자치구에서는 화산호 관련 화성활동이 약 932-828 Ma에, 열곡 관련 화성활동이 849-771 Ma에 발생하였다(Li *et al.*, 2008b, 2009; Zheng *et al.*, 2008; Chen *et al.*, 2009a, 2009b; Yao *et al.*, 2014). 화산호 환경과 열곡 환경이 중첩되어 나타나는 849-828 Ma에는 로디니아 초대륙을 형성한 대륙충돌이 있었을 것으로 생각된다. 장난 조산대 중동부와 중부 지역에 위치한 Anhui 자치구와 Jiangxi 자치구에서는 화산호 관련 화성활동이 970-811 Ma에 발생했으며, 이후 열곡 관련 화성활동이 약 805-751 Ma에 발생하였다(Li and Li, 2003; Wu *et al.*, 2006; Li *et al.*, 2008a; Gao *et al.*, 2009; Wang *et al.*, 2012a; Wang *et al.*, 2014). 이 지역에서 화산호와 열곡 환경이 중첩되어 나타나는 811-805 Ma에 대륙충돌이 있었을 것으로 생각된다. 장난 조산대 서부에 위치한 Hunan과 Guanxi 자치구에서는 855-797 Ma에 일어난 화산호와 관련된 화성활동이 인지된다(Zhang *et al.*, 2012b, 2013; Yao *et al.*, 2014; Wang *et al.*, 2014). 양쯔지괴 남부에서 나타나는 신원생대 화성활동을 종합해보면, 양쯔지괴와 커테시아지괴 충돌이 동부(849-828 Ma)에서 시작하여 중앙(811-805 Ma)으로 진행되었고 서부에서는 797 Ma 이후에 일어났을 것으로 예상된다(그림 12). 양쯔지괴와 커테시아지괴 사이에 위치한 난후아 열곡대에서 열곡 관련 화성활동도 가장 동부에 위치한 Zhejiang에서 849 Ma경에 시작되어 805 Ma에는 중앙부에 위치한 Anhui와 Jiangxi까지 확장된 후 751 Ma까지 지속되었다.

양쯔지괴 남쪽 경계와 북쪽 경계 모두에서 신원생대 시기에 화산호 관련 화성활동 후 열곡 관련 화성활동이 일어났다. 이는 양쯔지괴가 로디니아 초대륙의 일부가 되기 이전에는 각각 독립된 판으로 존

재하였고, 그 주변에 섭입대가 형성되어 있었을 것을 지시한다. 이들 또한, 섭입대는 양쯔지괴가 로디니아 초대륙의 일부가 되면서 일어난 대륙충돌에 의해 종료되었고, 이후 로디니아 초대륙 분열시기에 남중국판 주변부와 내부에 열곡이 만들어지면서 열곡 관련 화성 및 퇴적작용이 일어난 것으로 해석된다.

5.3 한반도와 중국의 신원생대 화성활동 대비

낭림육괴 남부 가장자리에 위치한 상원누층군과 경기육괴 북부(고남산, 춘천, 가평, 장봉도, 백령도)에는 중-신원생대 퇴적암이 나타나며, 열곡 관련 화성암이 약 917-742 Ma에 이들 퇴적암을 관입하거나 분출하여 퇴적암과 함께 쌓였다(Hu *et al.*, 2012; Peng, 2015; Kim *et al.*, 2016; Lee *et al.*, 2020 and references therein). 북중국판의 남부와 남동부 경계를 따라 중-신원생대 시기에 열곡 관련 Xu-Huai-Lv-Da 퇴적분지가 형성되어있고, 이 분지 내에 위치한 Dalian, Chulan, Zenghekou 지역에서도 930-830 Ma에 열곡과 관련된 화성암이 퇴적암을 관입하고 있다(Hu *et al.*, 2012; Peng, 2015; Lee *et al.*, 2020). 이는 낭림육괴 남부와 경기육괴 북부의 신원생대 화성암들이 북중국판의 남부 및 남동부 경계의 화성암들과 잘 대비되며 이들 지역의 신원생대 지구조 환경이 열곡 환경이었음을 지시한다(Hu *et al.*, 2012; Peng, 2015; Lee *et al.*, 2020). 또한, 이들 신원생대 화성암들은 북중국판이 로디니아 초대륙으로부터 분열되는 과정에서 형성되었을 것으로 예상된다(Lee *et al.*, 2020).

경기육괴 서남부에 위치한 당진-홍성 지역에서는 신원생대 초기에 화산호와 관련된 화성활동이 있었으며, 그 후 열곡 환경에서 화성활동이 일어났다. 당진-홍성 지역에서는 화산호 관련 화성활동이 890-820 Ma에 일어났으며, 열곡 관련 화성활동이 793-730 Ma에 발생했다. 이러한 당진-홍성 지역의 신원생대 화성활동은 양쯔지괴 북부에 해당하는 친링-다비-수루 지역에 나타나는 신원생대 화성작용과 잘 대비된다. 친링-다비-수루 지역에서는 화산호 관련 화성활동이 약 1118-808 Ma에 있었고, 812-637 Ma에 열곡 관련 화성활동으로 바뀌었으며 두 화성활동의 시기가 겹치는 812-808 Ma에는 로디니아 초대륙을 형성시킨 대륙충돌이 있었을 것으로 생각된다(Qiu *et al.*, 2011; Peng *et al.*, 2012; Zhao *et al.*, 2013;

Zhang *et al.*, 2016a). 따라서, 경기육괴 서남부 당진-홍성 지역에서도 화산호 관련 화성활동이 끝나고 열곡 관련 화성활동이 일어나기 전인 820-793 Ma 시기에 로디니아 초대륙을 형성한 대륙충돌이 발생하였을 가능성이 있다(Oh *et al.*, 2009; Lee *et al.*, 2020). 홍성 지역과 친령-다비-수루 지역 모두에서 신원생대 염기성 화성암들이 페름-트라이아스기 남중국판과 북중국판 간의 대륙충돌에 의해 고압변성작용을 받은 것도 두 지역이 잘 대비됨을 지시한다(Oh *et al.*, 2009; Lee *et al.*, 2020).

옥천변성대 내 열곡대 환경하에서 일어난 약 871-742 Ma 쌍모식 화성활동이 여러 연구자에 의해 남중국판 내 난후아 열곡대에서 일어난 신원생대 쌍모식 화성활동과 대비되었다(Kim *et al.*, 2006; Choi, 2014). 여러 기존 연구는 옥천변성대에서 일어난 두 번의 쌍모식 화산활동(ca. 870 Ma와 760 Ma)이 난후아 열곡대에서 일어난 두 번의 쌍모식 화산활동(850-820 Ma와 780-750 Ma; Li *et al.*, 2003a; Wang and Li, 2003)과 잘 대비될 수 있고 옥천변성대 내에서 보고된 빙하기원 황강리 퇴적층이 난후아 열곡대 내에서 발견된 신원생대 빙하기원 퇴적층과 잘 대비된다고 주장하였다(Fitches and Zhu, 2006; Zhao and Cawood, 2012; Choi, 2014). Kim *et al.* (2006)은 옥천변성대 쌍모식 화성암과 난후아 열곡대 화성암간의 유사한 기원, 형성 시기 그리고 모암연령을 근거로 옥천변성대가 난후아 열곡대에 대비된다고 제시하였다. 이에 반해 Kim *et al.* (2021a)은 옥천변성대 내 서창리층의 쇄설성 저어콘 연령 분포특성이 상원누층군의 쇄설성 저어콘 연령 분포특성과 유사하며 남중국판 내 쇄설성 저어콘 연령 분포와 다름을 근거로 옥천변성대가 상원누층군과 함께 북중국판에 속하며 한반도 전체가 북중국에 대비된다고 주장하였다. 하지만 Kim *et al.* (2021a)의 논문에서 수행된 서창리층 내 쇄설성 저어콘 연령 분포와 남중국판 내 쇄설성 저어콘 연령 분포의 비교는 다음과 같은 문제점들이 있다. 첫째, 논문에 인용된 남중국판 내의 고생대 퇴적암의 쇄설성 저어콘 연령 분포를 신원생대 서창리층의 쇄설성 저어콘 연령 분포와 비교하여 서로 다름을 주장하였으나 남중국판 내에서 신원생대와 고생대 사이에 일어난 여러 지질 작용에 의해 고생대 시기에 쇄설성 저어콘을 공급한 지표 암석의 분포가 신원생대 시기의 지표 암석 분

포와 전혀 다를 수 있다는 문제점이 있다. 둘째, 양쯔지괴 남동부 경계와 커테시아지괴에서는 지역과 시기에 따라 매우 다양한 쇄설성 저어콘 연령 분포를 보여주기 때문에 일부 쇄설성 저어콘 연령 분포를 이용한 단순한 지구조 대비는 매우 불확실하다는 한계가 있다(Kim *et al.*, 2012a; Wang *et al.*, 2012a). 예로 남중국판 내 나타나는 시바오층군(Sibao Group)에서는 Kim *et al.* (2021a)이 대비에 사용한 남중국판내 고생대 퇴적암과 달리 서창리층 내 상대적으로 오래된 암석의 경우와 같이 후기 고원생대와 중원생대에 해당하는 쇄설성 저어콘이 많이 나타난다(Wang *et al.*, 2012a). 셋째, Kim *et al.* (2021a)은 한반도 전체가 북중국판에 해당된다고 주장하고 있으나 경기육괴 남부에 나타나는 화산호 관련 신원생대 화성암은 북중국판에서 나타나지 않는다.

고군산군도와 옥천변성대에서 나타나는 화산호 관련 화성활동 시기(930-893 Ma)와 열곡 관련 화성활동 시기(871-742 Ma)는 양쯔지괴 북부 경계에서 나타나는 신원생대 화산호 및 열곡 관련 화성활동 시기 보다 훨씬 이전에 발생했음에 반해 양쯔지괴 남부 경계에 형성된 장난 조산대의 동부 지역에서 나타나는 화산호 관련 화성활동 시기(932-828 Ma) 및 난후아 열곡대 화성활동 시기(849-771 Ma)와 비슷하다. 고군산군도에서 나타나는 화산호 관련 화성암의 관입 시기(930-893 Ma)와 T_{DM} 연대(1.7-0.9 Ga)가 중국의 장난 조산대 동부지역의 화산호 관련 화성암의 관입 시기(932-828 Ma) 및 T_{DM} 연대(1.9-0.9 Ga)와 유사하며 이는 두 지역의 신원생대 화성암들이 서로 잘 대비되며 중원생대와 신원생대 암석들이 재활성되어 형성되었음을 지시한다(Kim *et al.*, 2006, 2021b; Wu *et al.*, 2006; Zhang *et al.*, 2013; Wang *et al.*, 2014). 고군산군도 내 화산호 관련 화성암에 의해 관입을 받고 강한 변형작용과 중압형의 변성작용을 받은 말도층은 양쯔지괴와 커테시아지괴가 충돌한 장난 조산운동 이전에 화산호 환경에서 퇴적된 후 충돌 시 변성을 받은 장난 조산대의 Jiuling Terrane에 대비될 수 있으며, 약한 변형을 받은 방축도층은 옥천변성대 내 신원생대 퇴적암과 함께 로디니아 초대륙 분열시기에 형성된 난후아 열곡대 내 퇴적층과 대비될 수 있다(Charvet, 2013; Yao *et al.*, 2014; Kim *et al.*, 2021b). 이러한 연구 결과들은 고군산군도와 옥천변성대 역시 화산호 관련 화성활동 시기와 열곡

관련 화성활동 시기 사이(893-871 Ma)에 로디니아 초대륙을 형성한 대륙충돌이 있었을 가능성을 제시한다. 장난 조산대에서는 대륙충돌이 동부에서부터 시작하여(849-828 Ma) 중앙(811-805 Ma)으로 진행되었으며 서부에서는 797 Ma 이후에 일어났을 것으로 예상된다. 따라서 고군산군도와 옥천변성대 지역에서 893-871 Ma에 대륙충돌이 일어났을 가능성을 고려할 때 양쯔지괴와 커테시아지괴 간의 충돌은 한반도에서 시작하여 남중국판 쪽으로 진행되었을 가능성이 있다. 열곡작용도 역시 옥천변성대에서 871 Ma에 먼저 일어난 후 849 Ma에는 난후아 열곡대 동부로부터 진행되었으며, 805 Ma에는 중부지역에서 일어났을 것으로 예상된다(Kim *et al.*, 2021b). 장난 조산대와 난후아 열곡대 내 신원생대 화성암의 T_{DM} 연대가 1.9-0.9 Ga를 보여주는 사실은 장난 조산대를 따라 양쯔지괴와 커테시아지괴가 충돌하기 전인 후기 고원생대에서 신원생대 사이에 두 판의 경계에서 일어났던 열곡 혹은 화산호 관련 화성활동에 의해 후기 고원생대와 중원생대 화성암들이 형성되었으며, 장난 조산대 충돌과 난후아 열곡대 형성 시 이들 화성암들이 용융되어 신원생대 암석이 만들어졌을 가능성을 지시한다(Kim *et al.*, 2006; Wu *et al.*, 2006; Zhang *et al.*, 2013; Wang *et al.*, 2014). 이는 옥천변성대와 고군산군도의 신원생대 암석의 T_{DM} 연대가 1.7-0.9 Ga인 사실 또한 옥천변성대 북쪽의 경기육괴 남부 경계와 남쪽의 영남육괴 북부 경계에서도 장난 조산대를 형성한 대륙충돌 이전 양쯔지괴의 남부 경계와 커테시아지괴의 북부 경계에서 일어났던 지질 현상이 동일하게 일어났을 가능성을 시사한다(Kim *et al.*, 2021b). 그러나, 이러한 가능성을 주장하기 위해서는 커테시아지괴와 영남육괴 간의 대비가 중요하나 이에 대한 연구가 매우 부족하여 향후 이에 대한 연구가 필요하다.

결론적으로 신원생대 화성암을 이용한 한중 대비 결과, 낭림육괴 남부와 경기육괴 북부는 북중국판의 남부와 남동부 경계와 대비되며, 경기육괴 남부는 양쯔지괴 북부 경계와 대비된다(그림 8). 고군산군도와 옥천변성대는 남중국판의 장난 조산대와 난후아 열곡대에 대비 될 가능성이 크다. 또한, 경기육괴 북부와 경기육괴 남부가 신원생대 시기에 다른 지구조 분화과정을 보여주는 것은 경기육괴의 북부와 남부가 페름-트라이아스기 충돌 전에 분리되어 있었음을

시사한다. 이러한 연구 결과는 경기육괴 전체가 남중국판에 해당한다고 제시하였던 Yin and Nie (1993), Zhang (1997)의 모델과 임진강-홍성대 동측의 경기육괴 전체가 남중국판에 대비된다는 Kim *et al.* (2013) 모델과 거리가 있으며, 경기육괴 전체가 북중국판에 해당한다고 제시한 Ishiwatari and Tsusimori (2003) 모델과도 맞지 않는다. 따라서, 본 연구 결과는 경기육괴 북부가 북중국판과 연결되고, 경기육괴 남부가 남중국판 양쯔지괴와 연결되는 Oh and Kusky (2007) 모델을 잘 뒷받침해준다.

6. 결론

1) 상원누층군과 경기육괴 북부(고남산, 감악산, 가평, 춘천, 장봉도 일대)에 나타나는 화성암류는 917-742 Ma에 열곡 환경에서 형성되었으며, 북중국판의 남부 및 남동부(Dalian, Chulan, Zenghekou)에 나타나는 930-830 Ma 열곡 관련 화성암류와 대비된다.

2) 경기육괴 서남부(당진, 홍성 일대)에서는 890-820 Ma에 화산호 관련 화성활동이 있었으며, 그 후 793-730 Ma 시기에 열곡과 관련된 화성활동이 일어났다. 이와 유사한 시기에 양쯔지괴 북부인 칭링-다비-수루 지역에서도 화산호와 관련된 화성활동(1118-808 Ma)과 열곡과 관련된 화성활동(812-637 Ma)이 확인된다. 따라서 경기육괴 서남부 지역의 신원생대 화성작용은 양쯔지괴 북부 지역의 신원생대 화성작용과 잘 대비된다.

3) 옥천변성대와 고군산군도 지역에서는 930-893 Ma에 화산호 관련 화성활동 이후 871-742 Ma에 열곡과 관련된 화성활동이 일어났다. 이들 화성활동은 양쯔지괴의 장난 조산대 동부지역에 나타나는 화산호 관련 화성활동(932-828 Ma) 및 열곡 관련 화성활동(849-771 Ma)과 각각 대비된다.

4) 경기육괴 북부와 남부의 신원생대 화성암들이 각각 북중국판과 남중국판의 신원생대 화성암들에 대비되는 사실은 Oh and Kusky (2007)가 제시한 경기육괴 북부와 남부가 각각 북중국판과 남중국판에 대비되는 지구조 모델을 잘 뒷받침해준다.

감사의 글

이 논문을 심사하면서 좋은 심사평을 해주신 편

집위원장과 익명의 심사위원들께 감사를 드린다. 또한 이 연구를 위해 여러 좋은 조언을 해주신 이승환 박사에게도 고마운 마음을 전한다. 이 연구는 한국연구재단의 지원(NRF-2017K1A1A2013180)을 받아 수행되었다.

REFERENCES

- Bureau of Geology and Mineral Resources of Liaoning (BGMRL), 1989, Regional Geology of Liaoning Province. Geological Publishing House, Beijing, 856.
- Chang, H.W., Yun, B.W. and Park, N.Y., 1987, Petrochemical Study on the Alkaline Gabbroic Host Rocks of Titaniferous Magnetite Deposits in Gonamsan, Yeoncheon-Gun, South Korea. *Journal of the Korean Institute of Mining Geology*, 20, 2, 85-95.
- Charvet, J., 2013, The Neoproterozoic-Early Paleozoic tectonic evolution of the South China Block: An overview. *Journal of Asian Earth Sciences*, 74, 198-209.
- Chen, R.-X., Zheng, Y.-F., Zhao, Z.-F., Tang, J., Wu, F.-Y. and Liu, X.M., 2007, Zircon U-Pb age and Hf isotope evidence for contrasting origin of bimodal protoliths for ultrahigh-pressure metamorphic rocks from the Chinese Continental Scientific Drilling project. *Journal of metamorphic geology*, 25, 873-894.
- Chen, Z.G., Guo, K.Y., Dong, Y.G., Chen, R., Li, L.M., Liang, Y.H., Li, C.H., Yu, X.M., Zhao, L. and King, G.F., 2009a, Possible early Neoproterozoic magmatism associated with slab window in the Pingshui segment of the Jiangshan-Shaoxing suture zone: Evidence from zircon LA-ICP-MS U-Pb geochronology and geochemistry. *Science in China Series D: Earth Sciences*, 52, 925-939.
- Chen, Z.G., Xing, G.F., Guo, K.Y., Dong, Y.G., Cheng, R., Zeng, Y., Li, L.M., He, Z.Y. and Zhao, L., 2009b, Petrogenesis of keratophyes in the Pingshui Group, Zhejiang: Constraints from zircon U-Pb ages and Hf isotopes. *Chinese Science Bulletin*, 54, 1570-1578.
- Cheong, C.-S., Kim, N., Yi, K., Jo, H.J., Jeong, Y.-J., Kim, Y., Koh, S.M. and Iizuka, T., 2015, Recurrent rare earth element mineralization in the northwestern Okcheon Metamorphic Belt, Korea: SHRIMP U-Th-Pb geochronology, Nd isotope geochemistry, and tectonic implications. *Ore Geology Reviews*, 71, 99-115.
- Cheong, C.-S., Kwon, S.T., Kim, J.M. and Chang, B.U., 1998, Geochemical and isotopic Study of the Onjeongri Granite in the Northern Gyeongsang Basin, Korea: Comparison with Cretaceous to Tertiary Granitic Rocks in the Other Part of the Gyeongsang Basin and the Inner Zone of Southwest Japan. *The Journal of the Petrological Society of Korea*, 7, 77-97.
- Cheong, W., Cho, M., Yi, K., Kim, Y., Lee, S.R. and Kim, H., 2014, SHRIMP U-Pb ages of zircon and baddeleyite in the Boeun and Mungyeong amphibolites Geochronologic evidence for the Neoproterozoic (~790-750 Ma) rifting in the Ogcheon Metamorphic Belt, Korea. Annual Conference of the Geological Society of Korea (Abstracts), Jeongseon, October 29- November 1, 31.
- Cho, D.-L., Kwon, S.-T., Jeon, E.-Y. and Armstrong, R., 2001, SHRIMP U-Pb zircon geochronology of an amphibolite and a paragneiss from the samgot unit, Yeoncheon complex in the injingang belt, Korea. Annual Conference of the Geological Society of Korea (Abstracts), Daegu, October 26-27, 89.
- Cho, D.-L. and Lee, S.-B., 2017, 1: 100,000 tectonostratigraphic map of the Gimp'o-Incheon area, map 1: solid geology interpretation. Korea Institution of Geoscience and Mineral Resources.
- 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. and Kim, H., 2005, Metamorphic evolution of the Ogcheon metamorphic belt: review and new age constraints. *International geology review*, 47, 41-57.
- Choi, D.K., 2014, Geology and tectonic evolution of the Korean Peninsula. Seoul National University press, 227 p.
- Choi, S.J., Kee, W.-S., Koh, H.J., Kwon, C.W., Kim, B.C., Kim, S.W., Kim, Y.B., Kim, Y.H., Kim, H., Park, S.-I., Song, K.-Y., Yeon, Y.K., Lee, S.R., Lee, S.S., Lee, S.R., Lee, Y.S., Lee, H.-J., Cho, D.-L., Choi, P.-y., Han, J.G., Han, H.J., Hwang, J.-h., Ko, K.T. and Kwon, S., 2013, Technical development of tectonic evolution and geological information construction (GP2011-004-2013 (2)). Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources, 376.
- Choi, S.J., Kee, W.-S., Ko, K., Koh, H.J., Kwon, C.W., Kim, B.C., Kim, S.W., Kim, Y.B., Kim, Y.H., Kim, H., Park, S.-I., Song, K.-Y., Yeon, Y.K., Lee, S.R., Lee, S.S., Lee, S.R., Lee, Y.S., Lee, H.-J., Cho, D.-L., Choi, P.-y., Han, J.G., Han, H.J., Hwang, J.-h., Park, J.E., Lee, T.H., Kwon, S. and Choi, T.J., 2014, Technical Development of Tectonic Evolution and Geological Information Construction. Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources GP2011-004-2014(3), 426 (in Korean with English abstract).
- Ding, B.H., Shi, R.D., Zhi, X.C., Zheng, L. and Chen, L., 2008, Neoproterozoic (~850 Ma) subduction in the Jiangnan orogen: evidence from the SHRIMP U-Pb dating of the SSZ-type ophiolite in southern Anhui Province. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 27, 375-388 (in Chinese with English abstract).
- Fitches, W.R. and Zhu, G., 2006, Is the Ogechon meta-

- morphic belt of Korea the eastward continuation of the Nanhua Basin of China?. *Gondwana Research*, 9, 68-84.
- Gao, J., Klemm, R., Long, L., Xiong, X. and Qian, Q., 2009, Adakitic signature formed by fractional crystallization: An interpretation for the Neo-Proterozoic meta-plagiogranites of the NE Jiangxi ophiolitic melange belt, South China. *Lithos*, 110, 277-293.
- Guo, J., Zhai, M., Oh, C.W. and Kim, S.W., 2004, 230 Ma Eclogite from Bibong, Hongseong area, Gyeonggi Massif, South Korea: HP metamorphism, zircon SHRIMP U-Pb ages, and tectonic implication. Abstract volume of International Association for Gondwana Research, South Korea Chapter. Miscellaneous Publication, No. 1, International Association for Gondwana Research, 11-12.
- He, Q., Zhang, S.-B. and Zheng, Y.-F., 2016, High temperature glacial meltwater-rock reaction in the Neoproterozoic: Evidence from zircon in-situ oxygen isotopes in granitic gneiss from the Sulu orogen. *Precambrian Research*, 284, 1-13.
- 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.
- IGSASDPRK (Institute of Geology State Academy of Sciences, DPR of Korea), 1996, *Geology of Korea*. Foreign Languages Books Publishing House, Pyongyang, 631.
- 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.
- Jeon, Y.E., 1999, Petrologic, Geochemical and Nd-Sr Isotopic Study for the Amphibolites from the Imjingang Belt and the Central-northern Gyeonggi Massif, Korea: Implications for the Eastward Extension of Triassic Suture Zone in China. Ph.D. thesis, Yonsei University, Seoul, 228 p.
- 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, 106102.
- 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.
- Kee, W.-S., Lim, S.-B., Kim, H., Kim, B.C., Hwang, S.K., Song, K.-Y. and Kihm, Y.-H., 2008, Geological Report of the Yeoncheon Sheet (1:50,000). Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources, 83 p (in Korean with English abstract).
- Kim, K.H. and Min, K.D., 1996, Geochemical and Stable Isotopic Studies of the Matrix of Pebble Bearing Phyllitic Rocks and Carbonate Rocks from the Suanbo and Susanri District in the Okchon Geosynclinal zone. *Economic and Environmental geology*, 29, 25-33 (in Korean with English abstract).
- Kim, K.H. and Lee, H.J., 1994, Geochemistry and K-Ar Age of Gabbroic Rocks in the Konamsan Area of Yonchon Province, South Korea. *Economic and Environmental geology*, 27, 29-39 (in Korean with English abstract).
- Kim, M.J., Ha, Y., Park, J.-W. and Park, K.-H., 2021a, U-Pb ages and Hf isotopic compositions of the detrital Zircons from Baengnyeongdo and Daecheongdo: Correlation with North Korea and the North China Craton. *Journal of the Geological Society of Korea*, 57, 17-33 (in Korean with English abstract).
- Kim, M.J., Park, J.-W., Lee, T.-H., Song, Y.-S. and Park, K.-H., 2016, LA-MC-ICPMS U-Pb Ages of the Detrital Zircons from the Baengnyeong Group: Implications of the Dominance of the Mesoproterozoic Zircons. *Economic and Environmental Geology*, 49, 433-444 (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, 103311.
- 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., Ryu, I.-C., Williams, I.S., Sajeev, K., Santosh, M. and Rajesh, V.J., 2006, 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. and Park, S.-I., 2016, Geochronological and Geotectonic Implications of the Serpentine Bodies in the Hongseong Area, Central-western Korean Peninsula. *Economic and Environmental Geology*, 49, 249-267 (in Korean with English abstract).
- Kim, S.W., Park, S.-I., Ko, K., Lee, H.-J., Koh, H.J., Kihm, Y.H. and Lee, S.R., 2014, 1:100,000 Tectonostratigraphic map of the Hongseong area, map 1: Solid Geology Interpretation. Korea Institution of Geoscience and Mineral Resources.
- Kim, S.W., Santosh, M., Park, N. and Kwon, S., 2011,

- Forearc serpentinite melange from the Hongseong suture, South Korea. *Gondwana Research*, 20, 852-864.
- 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 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, W.J., Oh, C.W. and Lee, S.H., 2021b, The tectonic evolution of the Gogunsan Island 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, 106054.
- Koh, S.-M., Kim, J.-H. and Park, K.-H., 2005, Neoproterozoic A-type volcanic Activity within the Okcheon Metamorphic Belt. *The Journal of the Petrological Society of Korea*, 14, 157-168 (in Korean with English abstract).
- Kwon, S., Kim, S.W. and Santosh, M., 2013, Multiple generations of mafic-ultramafic rocks from the Hongseong suture zone, western South Korea: implications for the geodynamic evolution of NE Asia. *Lithos*, 160-161, 68-83.
- Lee, B.C., Oh, C.W., Cho, D.L. and Yi, K., 2019a, 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., 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., 2016, 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., 2019b, 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 Penin-sula and the correlation with the Neoproterozoic igneous rocks in China. *Lithos*, 370-371, 105625.
- 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., Cho, M.S., Cheong, C.-S., Kim, H.C. and Wingate, M.T.D., 2003, Age, geochemistry, and tectonic significance of Neoproterozoic alkaline granitoids in the northwestern margin of the Gyeonggi massif, South Korea. *Precambrian Research*, 122, 297-310.
- 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, L., Lin, S., Xing, G., Davis, D.W., Davis, W.J., Xiao, W. and Yin, C., 2013, Geochronology and geochemistry of volcanic rocks from the Shaojiwa Formation and Xingzi Group, Lushan area, SE China: Implications for Neoproterozoic back-arc basin in the Yangtze Block. *Precambrian Research*, 238, 1-17.
- 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, W.-X. and Li, X.-H., 2003, Adakitic granites within the NE Jiangxi ophiolites, South China: geochemical and Nd isotopic evidence. *Precambrian Research*, 122, 29-44.
- Li, W.-X., Li, X.-H., Li, Z.-X. and Lou, F.-S., 2008a, Obduction-type granites within the NE Jiangxi Ophiolite: Implications for the final amalgamation between the Yangtze and Cathaysia Blocks, *Gondwana Research*, 13, 288-301.
- Li, X.-H., Li, W.-X., Li, Z.-X. and Liu, Y., 2008b, 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, W.-X., Li, Z.-X., Lo, C.-H., Wang, J., Ye, M.-F. and Yang, Y.-H., 2009, Amalgamation between the Yangtze and Cathaysia Blocks in South China: Constraints from SHRIMP U-Pb zircon ages, geochemistry and Nd-Hf isotopes of the Shuangxiwu volcanic rocks. *Precambrian Research*, 174, 117-128.
- Li, X.-H., Li, Z.-X., Ge, W.C., Li, W.-X., Liu, Y. and Wingate, M.T.D., 2003a, Neoproterozoic granitoids in South China: crustal melting above a mantle plume at ca. 825 Ma?. *Precambrian Research*, 122, 45-83.
- Li, Z.-X., Li, X., Kinny, P., Wang, J., Zhang, S. and Zhou, H., 2003b, Geochronology of Neoproterozoic syn-rift

- magmatism in the Yangtze Craton, South China and correlations with other continents: evidence for an mantle superplume that broke up Rodinia. *Precambrian Research*, 122, 85-109.
- Liu, L., Yang, X., Santosh, M., Aulbach, S., Zhou, H., Geng, J. and Sun, W., 2015, Neoproterozoic intraplate crustal accretion on the northern margin of the Yangtze Block: Evidence from geochemistry, zircon SHRIMP U-Pb dating and Hf isotopes from the Fuchashan Complex. *Precambrian Research*, 268, 97-114.
- Liu, Z., Tan, S.-C., He, X.-H., Wang, D.-B. and Gao, B., 2019, Petrogenesis of mid-Neoproterozoic (ca. 750 Ma) mafic and felsic intrusions in the Ailao Shan-Red River belt: Geochemical constraints on the paleogeographic position on the South China block. *Lithosphere*, 11, 348-364.
- Middlemost, E.A., 1994, Naming materials in the magma/igneous rock system. *Earth-science reviews*, 37, 215-224.
- 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., Choi, S.G., Seo, J., Rajesh, V.J., Lee, 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., 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., 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., 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., Yeongkhom, K.S., Lee, B.C. and Ryu, H.I., 2018, Neoproterozoic igneous activity and Permian-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., Sajeev, K., Kim, S.W. and Kwon, Y.W., 2006, Mangerite Magmatism associated with a probable late Permian to Triassic Hongseong-Odesan collisional belt in South, Korea. *Gondwana Research*, 9, 95-105.
- Oh, C.W., Seo, J., Chok, S.G., Rajesh, V.J. and Lee, J.H., 2012, U-Pb SHRIMP zircon geochronology, petrogenesis, and tectonic setting of the Neoproterozoic Baekdong ultramafic rocks in the Hongseong Collision Belt, South Korea. *Lithos*, 128-131, 100-112.
- Paek, R.-J., Gap, K.-H. and Jon, G.-P. (Eds.), 1996, *Geology of Korea*. Foreign Languages Books Publishing House, Pyongyang, 631.
- Park, H.I., Chi, J.M., Chang, K.H. and Ko, I.S., 1974, Explanatory Text of the Geological Map of Naepyeong Sheet (1:50,000). Geological and mineral Institute of Korea (in Korean with English abstract).
- Park, H.U., Zhai, M.G., Yang, J.H., Peng, P., Kim, J.N., Zhang, J.B., Kim, M.C., Park, U. and Feng, L.J., 2016, Deposition age of the Sangwon Supergroup in the Pyeongnam basin (Korea) and the Early Tonian negative carbon isotope interval. *Acta Petrologica Sinica*, 32, 2181-2195.
- Park, S.-I., Kim, S.W., Kwon, S., Santosh, M., Ko, K. and Kee, W.-S., 2017, Nature of Late Mesoproterozoic to Middle Neoproterozoic magmatism in the western Gyeonggi massif, Korean Peninsula and its tectonic significance. *Gondwana Research*, 47, 291-307.
- Pearce, J.A. and Cann, J.R., 1973, Tectonic setting of basic volcanic rocks determined using trace element analyses. *Earth and Planetary Science Letters*, 19, 290-300.
- Pearce, J.A., Harris, N.B.W. and Tindle, A.G., 1984, Trace element discrimination diagrams for the tectonic interpretation of granitic rocks. *Journal of Petrology*, 25, 956-983.
- Peng, P., 2015, Precambrian mafic dyke swarms in the North China Craton and their geological implications. *Earth Sciences*, 28, 649-675.
- Peng, P., Zhai, M., Li, Q., Wu, F., Hou, Q., Li, Z., Li, T. and Zhang, Y., 2011, Neoproterozoic (~900 Ma) Sariwon sills in North Korea: geochronology, geochemistry and implications for the evolution of the south-eastern margin of the North China Craton. *Gondwana Research*, 20, 243-254.
- Peng, R.M., Zhai, Y.S. and Wang, J.P., 2010, Discovery of Neoproterozoic acid volcanic rock in the western section of Langshan, Inner Mongolia, and its geological significance (in Chinese). *Chinese Science Bulletin*, 55, 2611-2620.
- 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., 1993, Contact relationship between the yongduri gneiss and the gubongsan group near chuncheon area: preliminary results. Annual Conference of the Geological Society of Korea (Abstract), October 29-30, Gwangju, 23 (in Korean).
- Ryu, J.-P., Kang, M.-S., Kim, J.-P., Tongbang, G.U., Jang, T.-G., Song, Y.-P. and Kwon, J.-R., 1990, Geological Constitution of Korea, 4. Industrial Publishing House, Pyeongyang, 304.
- Ryu, Y. and Ahn, J., 2016, A test for Snowball Earth hypothesis in Korean peninsula by analyzing stable carbon isotopes of carbonates from the Okcheon Supergroup. *Journal of the Geological Society of Korea*, 52, 829-845 (in Korean with English abstract).
- Song, Z., Liu, H., Meng, F., Yuan, X., Feng, Q., Zhou, D., Romani, J.R.V. and Yan, H., 2019, Zircon U-Pb Ages and Hf Isotopes of Neoproterozoic Meta-Igneous Rocks in the Liansando Area, Northern Sulu Orogen, Eastern China, and the Tectonic Implications. *Journal of Earth Science*, 30, 1230-1242.
- Tang, J., Zheng, Y.-F., Gong, B., Wu, Y.-B., Gao, T.-S., Yuan, H. and Wu, F.-Y., 2008, Extreme oxygen isotope signature of meteoric water in magmatic zircon from metagranite in the Sulu orogen, China: Implications for Neoproterozoic rift magmatism. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 72, 3139-3169.
- 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, J., Zhou, X., Deng, Q., Fu, X., Duan, T. and Guo, X., 2015a, Sedimentary successions and the onset of the Neoproterozoic Jiangnan sub-basin in the Nanhua rift, South China. *International Journal of Earth Sciences*, 104, 521-539.
- Wang, L.J., Griffin, W.L., Yu, J.H. and O'Reilly, S.Y., 2012a, Early crustal evolution in the western Yangtze Block: evidence from U-Pb and Lu-Hf isotopes on detrital zircons from sedimentary rocks. *Precambrian Research*, 222-223, 368-385.
- Wang, M.X., Wang, C.Y. and Zhao, J.H., 2013a, Zircon U/Pb dating and Hf-O isotopes of the Zhouan ultramafic intrusion in the northern margin of the Yangtze Block, SW China: Constraints on the nature of mantle source and timing of the supercontinent Rodinia breakup. *Chinese Science Bulletin*, 58, 777-787.
- Wang, Q.H., Yang, D.B. and Xu, W.L., 2012b, Neoproterozoic basic magmatism in the southeast margin of North China Craton: Evidence from whole-rock geochemistry, U-Pb and Hf isotopic study of zircons from diabase swarms in the Xuzhou-Huaipei area of China. *Science of China Earth Science*, 55, 1416-1479.
- Wang, X.H., Oh, C.W., Lee, B.C. and Liu, F.L., 2020a, 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*, 393-393, 106081.
- Wang, X.-L., Jiang, S.-Y., Dai, B.-Z., Griffin, W.L., Dai, M.-N. and Yang, Y.-H., 2011, Age, geochemistry and tectonic setting of the Neoproterozoic (ca.830 Ma) gabbros on the southern margin of the North China Craton. *Precambrian Research*, 190, 35-47.
- Wang, X.-L., Shu, L.-S., Xing, G.-F., Zhou, J.-C., Tang, M., Shu, X.-J., Qi, L. and Hu, Y.-H., 2012c, Post-orogenic extension in the eastern part of the Jiangnan orogen: Evidence from ca 800-760 Ma volcanic rocks. *Precambrian Research*, 222-223, 404-423.
- Wang, X.-L., Zhao, G., Zhou, J.-C., Liu, Y. and Hu, J., 2008, Geochronology and Hf isotopes of zircon from volcanic rocks of the Shuangqiaoshan Group, South China: Implications for the Neoproterozoic tectonic evolution of the eastern Jiangnan orogen. *Gondwana Research*, 14, 355-367.
- Wang, X.-L., Zhou, J.-C., Griffin, W.L., 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.-L., Zhou, J.-C., Wang, Y.-S., Kitajima, K., Wang, D., Bonamici, C., Qiu, J.-S. and Sun, T., 2013b, Magmatic evolution and crustal recycling for Neoproterozoic strongly peraluminous granitoids from southern China: Hf and O isotopes in zircon. *Earth and Planetary Science Letters*, 366, 71-82.
- 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., 2020b, 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, 105518.
- Wang, Z., Wang, J., Deng, Q., Du, Q., Zhou, X., Yang, F. and Liu, H., 2015b, 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.
- 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., Niu, Y. and Liu, L., 2018, Neoproterozoic amalgamation between Yangtze and Cathaysia blocks: The magmatism in various tectonic settings and continent-arc-continent collision. *Precambrian Research*, 309, 56-87.
- Xia, Y., Xu, X., Zaho, G. and Liu, L., 2015, Neoproterozoic active continental margin of the Cathaysia block: Evidence from geochronology, geochemistry, and Nd-Hf isotope of igneous complex. *Precambrian Research*, 269, 195-216.
- Xu, Y., Yang, K.-G., Polat, A. and Yang, Z.-N., 2016, The ~860 Ma mafic dikes and granitoids from the northern margin of the Yangtze Block, China: A record of oceanic subduction in the early Neoproterozoic. *Precambrian Research*, 275, 310-331.
- Yao, J., Shu, L. and Santosh, M., 2014, Neoproterozoic arc-trench system and breakup of the South China Craton: Constraints from N-MORB type and arc-related mafic rocks, and anorogenic granite in the Jiangnan orogenic belt. *Precambrian Research*, 247, 187-207.
- 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.
- You, B.-W., Lee, G.J. and Koh, S.M., 2012, Mineralogy and mineral-chemistry of REE minerals occurring at Mountain Eorae, Chungju. *Economic and Environmental Geology*, 45, 643-659. (in Korean with English abstract).
- 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, 128-160.
- Zhai, M.G. and Santosh, M., 2011, The early Precambrian odyssey of the North China Craton: a synoptic overview. *Gondwana Research*, 20, 6-25.
- Zhang, K.J., 1997, North and South China collision along the eastern and southern North China margins. *Tectonophysics*, 270, 145-156.
- Zhang, S.-B., Wu, R.-X. and Zheng, Y.-F., 2012a, Neoproterozoic continental accretion in South China: Geochemical evidence from the Fuchuan ophiolite in the Jiangnan orogen. *Precambrian Research*, 220-221, 45-64.
- Zhang, S.-B., Zheng, Y.-F., Zhao, Z.-F. and Yuan, H.-L., 2016a, The extremely enriched mantle beneath the Yangtze Craton in the Neoproterozoic: Constraints from the Qichun pyroxenite. *Precambrian Research*, 276, 194-210.
- Zhang, X.H., Wang, H.Z., Park, H.N., Yang, J.H. and Kim, J.N., 2016b, 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).
- Zhang, Y., Wang, Y., Fan, W., Zhang, A. and Ma, L., 2012b, Geochronological and geochemical constraints on the metasomatised source for the Neoproterozoic (~825 Ma) high-mg volcanic rocks from the Canghuiyu area (Hunan Province) along the Jinan domain and their tectonic implications. *Precambrian Research*, 220-221, 139-157.
- Zhang, Y., Wang, Y., Geng, H., Zhang, Y., Fan, W. and Zhong, H., 2013, Early Neoproterozoic (~850 Ma) back-arc basin in the Central Jiangnan Orogen (Eastern South China): Geochronological and petrogenetic constraints from meta-basalts. *Precambrian Research*, 231, 325-342.
- Zhao, G., 2015, Jiangnan Orogen in South China: Developing from divergent double subduction. *Gondwana Research*, 27, 1173-1180.
- Zhao, G. and Cawood, P.A., 2012, Precambrian geology of China. *Precambrian Research*, 222-223, 13-54.
- Zhao, J.-H., Zhou, M.-F. and Zheng, J.-P., 2013, Neoproterozoic high-K granites produced by melting of newly formed mafic crust in the Huangling region, South China. *Precambrian Research*, 233, 93-107.
- Zheng, Y.-F., Wu, R.-X., Wu, Y.-B., Zhang, S.-B., Yuan, H. and Wu, F.-Y., 2008, Rift melting of Juvenile arc-derived crust: Geochemical evidence from Neoproterozoic volcanic and granitic rocks in the Jiangnan orogen, South China. *Precambrian Research*, 163, 351-383.
- Zheng, Y.-F., Wu, Y.-B., Chen, F.-K., Gong, B., Li, Long and Zhao, Z.-F., 2004, Zircon U-Pb and oxygen isotope evidence for a large-scale ¹⁸O depletion event in igneous rocks during the Neoproterozoic. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 68, 20, 4145-4165.

Received : August 4, 2021

Revised : August 31, 2021

Accepted : August 31, 2021