원생대 이후 트라이아스기까지의 남한과 동북아시아의 지구조 진화

오창환*

전북대학교 지구환경과학과, 전북대 지구환경시스템 연구소

The tectonic evolution of South Korea and Northeast Asia from Paleoproterozoic to Triassic

Chang Whan Oh*

Department of Earth and Environmental Sciences and The Earth and Environmental Science System Research Center,
Chonbuk National University, Jeonju 664-14, Korea

요약: 최근 송림 조산운동시기인 트라이아스기에 홍성 지역의 에클로자이트와 경기육괴 내에 광범위하게 나타나는 충돌 후 화성암이 형성되었음이 확인되었다. 이러한 새로운 발견에 의해 1980년대 말에 확인된 남중국판과 북중국판의 충돌대인 트라이아스기 친링-다비-수루 충돌대가 한반도의 홍성 지역으로 연결된 후 양평 지역을 거쳐 오대산 지역으로 연결되는 모델이 제시되었다. 그 이후 충돌대는 일본 서남부의 고생대 섭입 복합체와 북한의 고생대 섭입 복합체인 연변대로 연결될 가능성이 높다. 이럴 경우 경기육괴는 홍성-양평-오대산 충돌대를 경계로 나뉘어져야하며 충돌대 북부는 북중국판에 남부는 남중국판에 대비될 것이다. 남중국판과 북중국판의 충돌은 페름기에 한반도로부터 시작하여 중국 쪽으로 진행되었으며 트라이아스기 말에 충돌이 완료되었다. 다비-수루-홍성-양평-오대산 충돌대를 따라 동측에서 서측으로 변성조건이 체계적으로 변화한다. 가장 동측에 해당하는 오대산 지역에서는 245-230 Ma 초고온 변성작용이 한반도의 서측에 해당하는 홍성지역에서는 230 Ma 고압변성작용이 그리고 중국의 수루, 다비 지역에서는 220 Ma의 초고압 변성작용이 일어났다. 충돌대를 따라 나타나는 체계적인 변성조건의 변화는 충돌 전 섭입된 해양지각의 양이 동측에서 서측으로 증가하여 섭입하던 대륙판과 해양판의 분리되는 깊이가 동측에서 서측으로 점차 증가하였기 때문인 것으로 생각된다. 한반도 남부 영남육괴와 남중국판 남부에 광범위하게 나타나는 페름기-트라이아스기 섭입 관련 화성암은 북중국판과 남중국판의 페름기-트라이아스기 충돌이 남중국판 남쪽 경계부에서의 섭입작용을 시작시켰을 가능성이 있음을 지시한다. 즉 한반도의 송림 조산운동 시기에는 경기육괴지역에서 대륙충돌이 일어나 한반도가 형성되었으며 동시에 대륙충돌에 의해 영남육괴 남측에 섭입대를 형성되었을 것으로 예상된다. 홍성-양평-오대산 충돌대를 경계로 하여 경기육괴 북부와 남부는 모두 콜롬비아 초대륙 형성 후기인 1870-1840 Ma에 대륙충돌이나 섭입 작용에 의해 화성 및 변성작용을 강하게 받았다. 옥천 변성대는 중국 남중국판 내에 나타나는 760 Ma 경에 형성된 난후아 열곡대에 대비될 수 있으며 그럴 경우 경기육괴 남부와 영남육괴는 각각 남중국판의 북부 양쯔판과 남부 커테시아판에 대비된다. 최근 경기육괴 변성퇴적암, 옥천변성대 등에서 광역적으로 발견되는 실루리아기-데본기의 쇄설성 저어콘은 경기육괴 내에 데본기 혹은 그 이후 고생대 시기의 퇴적암이 존재할 가능성을 제시하고 있으며 홍성과 광천 지역에서 확인된 데본기의 변성작용과 함께 페름기-트라이아스기의 대륙충돌 이전인 고생대 중기에도 경기육괴에 활발한 지구조 운동이 일어났음을 지시한다.

핵심어: 송림조산운동, 홍성-양평-오대산 충돌대, 친링-다비-수루 충돌대, 옥천변성대, 난후아 열곡대

Abstract: Recent studies reveal that eclogite formed in the Hongseong area and post collision igneous rocks occurred throughout the Gyeonggi Massif during the Triassic Songrim Orogeny. These new findings derive the tectonic model in which the Triassic Qinling-Dabie-Sulu collision belt between the North and South China blocks extends into the Hongseong-Yangpyeong-Odesan collision belt in Korea. The belt may

*Corresponding author

Tel: 063-270-3397

E-mail: ocwhan@jbnu.ac.kr

be further extended into the late Paleozoic subduction complex in the Yanji belt in North Korea through the Paleozoic subduction complex in the inner part of SW Japan. The collision belt divides the Gyeonggi Massif into two parts; the northern and southern parts can be correlated to the North and South China blocks, respectively. The collision had started from Korea at ca. 250 Ma and propagated to China. The collision completed during late Triassic. The metamorphic conditions systematically change along the collision belt: ultrahigh temperature metamorphism occurred in the Odesan area at 245-230 Ma, high-pressure metamorphism in the Hongseong area at 230 Ma and ultra high-pressure metamorphism in the Dabie and Sulu belts. This systematic change may be due to the increase in the depth of slab break-off towards west, which might be related to the increase of the amounts of subducted oceanic slab towards west. The wide distribution of Permo-Triassic arc-related granitoids in the Yeongnam Massif and in the southern part of the South China block indicate the Permo-Triassic subduction along the southern boundary of the South China block which may be caused by the Permo-Triassic collision between the North and South China blocks. These studies suggest that the Songrim orogeny constructed the Korean Peninsula by continent collision and caused the subduction along the southern margin of the Yeongnam Massif. Both the northern and southern Gyeonggi Massifs had undergone 1870-1840 Ma igneous and metamorphic activities due to continent collision and subduction related to the amalgamation of Columbia Supercontinent. The Okcheon metamorphic belt can be correlated to the Nanhua rift formed at 760 Ma within the South China blocks. In that case, the southern Gyeonggi Massif and Yeongnam Massif can be correlated to the Yangtze and Cathaysia blocks in the South China block, respectively. Recently possible Devonian or late Paleozoic sediments are recognized within the Gyeonggi Massif by finding of Silurian and Devonian detrital zircons. Together with the Devonian metamorphism in the Hongseong and Kwangcheon areas, the possible middle Paleozoic sediments indicate an active tectonic activity within the Gyeonggi Massif during middle Paleozoic before the Permo-Triassic collision.

Key words: The Songrim Orogeny, Hongseong-Yangpyeong-Odesan collision belt, Qinling-Dabie-Sulu collision belt, The Okcheon metamorphic belt, The Nanhua rift

서론

1980년대 말 중국에서 남중국판과 북중국판의 충돌대인 트라이아스기의 친링-다비-수루 충돌대가 발견된 후 이 충돌대가 한반도로 연결될 것인지에 대한 국제적인 관심이 커지면서 한반도의 지구조 연구가 활발해졌다(Yin and Nie, 1993; Ernst and Liou, 1995; Zhang et al., 1997; Oh and Kusky, 2007). 그리고 최근 SHRIMP를 이용한 저어콘 U/Pb 절대연령 분석을 포함한 첨단 분석기자재를 활용한 연구가 활성화되면서 많은 새로운 발견이 보고되었다. 그 결과 최근 한반도의 지구조 해석에 큰 변화가 일어나고 있다. 가장 대표적인 것은 국내 지질학이 시작한 이래 한반도에서 발견되지 않았던 고압변성작용의 증거인 트라이아스기 에클로자이트(eclogite)가 경기육괴 서남부의 홍성지역에서 발견된 것이다(Oh et al., 2003, 2005). 이 암석은 섭입대나 대륙충돌대에서 생성되는 암석으로 한반도가 원생대로부터 계속 하나였다는 기존 개념에 큰 변화를 가져왔다. 그 후 경기육괴내의 여러 유라기 화성암이 트라이아스기 충돌 후의 화성암으로 밝혀지고, 이들의 경기육괴 내에서의

광역적인 분포는 에클로자이트와 함께 북중국판과 남중국판 간의 대륙 충돌대가 한반도를 가로지르는 것을 확인시켜주었다(Choi S.G. et al. 2008; Peng et al., 2008; Lee and Oh, 2009; Seo et al., 2010; Williams et al., 2009; 김태성, 2011). 이와 함께 경기육괴 내 시생대로 판단되었던 편마암 대부분이 원생대 초기의 변성퇴적암으로 밝혀지고 있으며 변성퇴적암으로 주로 이루어졌을 것으로 판단되던 경기육괴 내에서 적지 않은 변성화성암이 나타남을 확인하였다(Lee et al., 2000; 조동룡과 김용준, 2003; Zhai et al., 2005; 오창환 외, 2006 와 그 안의 참고문헌들, Zhai et al., 2005; 김태성 외, 2011; 기원서와 김현철, 2011; 이병춘 외, 2011). 또한 경기육괴 내에서 섭입대 혹은 대륙 열곡 환경에서 만들어진 것으로 판단되는 원생대 말 화성암이 발견되었고 원생대 초 변성퇴적암으로 생각되던 일부가 고생대 중기에 형성된 변성퇴적암일 가능성이 제시되었으며 고생대 중기에 일어난 강력한 변성작용이 보고되고 있다 (Choi P.Y. et al., 2008; Cho et al., 2010b; 조동룡, 2010; Kim S.W. et al., 2011, Kim et al., 2009). 육천변성대에 서도 원생대 말 대륙 열곡 환경에서 만들어진 화강암

이 발견되었으며 옥천변성대내와 경상분지에서 많은 원생대 말 고생대의 저어콘이 보고되고 있다(Lee et al., 1998; Kim et al., 2007b; 이태호외, 2010; Cho et al., 2010a; 박계현외 2011). 이는 경기육괴와 옥천 변성대를 포함한 한반도 남부가 원생대 말, 고생대 중기에 상당히 복잡한 지구조 운동을 받았음을 지시하며 한반도 지구조가 새롭게 해석되어야 할 필요성을 강력히 제시하고 있다. 본 논문에서는 이러한 새로운 발견을 중국과 일본을 포함한 전 세계의 지구조 진화와 관련하여 원생대 초 이후 트라이아스기 까지 한반도가 경험한 지구조 진화를 설명하고자 한다.

한반도의 지질 개요

한반도의 기저는 북으로부터 3개의 주요 변성복합체인 낭림, 경기, 영남 변성복합체로 구성되어 있으며 이들 육괴는 원생대 초기에 형성된 변성퇴적암과 원생대 초기에 관입한 화성암으로 주로 구성되어 있으며 일부 지역에서 시생대 암석이 확인되었다(그림 1a; Lee et al., 2003; Zhao et al., 2006; Cho et al., 2008; 오창환 외 2006; 이병춘 외 2011). 그리고 낭림육괴와 경기육괴 사이에는 임진강대가 분포하며 경기육괴와 영남육괴 사이에는 옥천대가 분포한다. 임진강대는 대본기에 퇴적된 후 약 250 Ma 경에 변성을 받은 변성퇴적암으로 주로 구성되어 있으며 변성도는 북쪽에서 남쪽으로 흑운모대에서 석류석대 십자석대를 거쳐 남정석대로 증가하며 최고 변성 온도-압력 조건은 11.5 kb, 815°C이다(Ree et al., 1996; Cho et al., 2007; Kim and Cho, 2008; Kim and Jung, 2010). 옥천대는 북동쪽의 태백산 분지와 남서쪽의 옥천변성대로 나뉜다. 남서쪽의 옥천변성대는 주로 원생대 말기 열곡(rifting) 분지 형성시 형성된 쌍모식 화산암과 고생대 퇴적암으로 구성되어있다(Lee et al., 1998; Kim et al., 2006b; 임순복외, 2005; 임순복외, 2006). 그리고 240-290 Ma경에 중압형의 변성작용을 받았으며 변성도는 남동쪽에서 북서쪽으로 흑운모대에서 석류석대를 거쳐 석류석-십자석대로 증가하며 최고 변성조건은 9 kb, 620°C이다(Oh et al., 2004; Kim et al., 2005). 또한 옥천변성대는 광역적으로 관입한 주라기 화강암에 의해 접촉 변성작용을 받았다. 이에 반해 태백산 분지는 낭림육괴 내에 나타나는 평안분지와 같이 주로 고생대 퇴적암으로 구성되어있다. 그리고 두 지역에서 실루리아기에서 석

탄기 초기 사이에 형성된 퇴적암이 발견되지 않는다(Lee and Lee, 2003). 최근 연구에 의해 실루리아기 이후에 퇴적된 고생대 변성퇴적암이 임진강대와 옥천대 뿐 아니라 경기육괴 서남부인 홍성, 태안 지역과 경기육괴 동부인 오대산 지역에 존재할 가능성이 제시되었다(조동룡, 2010; Cho et al., 2010b; Kim S.W. et al., 2011). 임진강대와 옥천변성대에서 인지되는 페름기-트라이아스기의 변성작용은 원인이 오랫동안 밝혀지지 않았으나 최근 한반도 내에서 일어난 북중국판과 남중국판의 대륙 충돌에 의해 일어난 것으로 판단되고 있다. 대륙 충돌 이후 섭입작용에 의해 형성된 주라기 대보 화강암과 백악기의 불국사 화강암이 한반도를 광범위하게 관입하였다. 그리고 백악기에는 경상도 지방에 경상분지가 형성되었다.

한반도를 형성한 트라이아스기 송림운동과 동아시아 지구조 진화

송림조산운동은 한반도 북부지역에서 처음 인지되었다. 평양탄전 일대의 평안누층군위에 놓인 트라이아스기-주라기 초 대동층군의 기저부에는 뚜렷한 난정합이 나타나며 이 부정합면 아래의 상원계와 조선누층군은 심한 습곡작용과 트러스트 단층운동을 받았다. 이로부터 평안누층군 퇴적 이후- 대동층군 퇴적 이전에 강력한 지각변동인 송림조산운동이 있었음이 인지되었다(Kobayashi, 1930). 송림조산운동은 페름기 후기부터 트라이아스기 사이에 일어난 것으로 한반도의 북부지역과 중국의 요동반도 일대를 교란시킨 가장 강력한 운동으로 알려져 있지만, 한반도의 남부 지역에서는 단순히 요곡작용이나 용기작용만이 있었던 것으로 알려져 왔다(대한지질학회, 1998). 하지만 최근 한반도 남부지역에서도 송림조산 운동 시기에 일어난 많은 변성 및 화성작용과 구조운동이 보고되고 있다. 그리고 이들 변성 및 화성작용은 오랫동안 확인되지 못했던 송림조산운동을 일으킨 동북아시아 지구조 진화에 대해 중요한 정보를 제공하고 있다.

1980년대에 중국 친링, 다비 및 수루 지역에서 고압 및 초고압 변성작용을 지시하는 에클로자이트가 여러 곳에서 발견되었고 이를 바탕으로 남중국판과 북중국판 간의 충돌대인 친링-다비-수루 충돌대가 확인되었다(그림 1b; Wang et al., 1989; Zhai and Cong, 1996; Oh, 2006; Oh and Kusky, 2007와 그안의 참고문헌들). 친링, 다비 지역의 충돌 시기는 대

Fig. 1. Tectonic map of northeastern Asia showing the tectonic relationships between Korea, China, and Japan, along with the distribution of Permian-Triassic eclogites, collisional igneous activity, and UHT rocks (from Oh and Kusky, 2007). Abbreviations: GB = Gyeongsang Basin; GM = Gyeonggi Massif; IB = Imjingang belt; NM = Nangrim Massif; OMB = Okcheon metamorphic belt; PB = Pyeongnam Basin; TB = Taebaeksan basin; YM = Yeongnam Massif.

략 220 Ma으로 송림조산운동 시기에 해당한다. 이러한 친링-다비-수루 충돌대가 서해를 지나 한반도로 연결될 것인지에 대한 의문이 1980년대 말부터 제기되었다. 1990년대 초부터 임진강대가 가장 유력한 충돌대의 연장선으로 추정되어왔다(Yin and Nie, 1993; Ree et al., 1996). 이러한 추정의 최초 근거는 임진강대에 나타나는 데본기 퇴적암이었는데 그 이유는 친링, 다비 지역에서 충돌 이전에 대륙 연변부에서 퇴적된 데본기 이후 고생대 퇴적암이 나타나기 때문이다(Hacker et al., 2004; Dong et al., 2011). 이후 임진강대에서 발견된 약 250 Ma에 일어난 고압 각섬암상의 변성작용에 의해 이 추정은 더욱 힘을 받게 되었다(Ree et al., 1996). 하지만 임진강대로부터 얻어진 고압 각섬암상의 변성 온도-압력 조건은 8.9-11.5 kb, 640-815°C로 섭입이나 충돌대 지역에서 만들어진 고압 변성작용 조건에 해당되지 않으며 중압 변성작용을 지시한다(그림 2). 최근 Kwon et al. (2009)과 Sajeev et al. (2010)에 의해 고압 백립암이 임진강대로부터 제시되었으나 이 암석으로부터 계산된 변성 온도-압력 조건인 약 18-20 kb, 900-950°C는 고압

변성을 받은 에클로자이트 변성상에 해당한다. 에클로자이트 변성상에 해당할 경우 고압 백립암 대신 에클로자이트가 만들어져야하지만 에클로자이트에 특징적인 광물인 omphacitic 휘석(jadeite 성분을 25% 이상 함유)이 나타나지 않고 휘석 내 jadeite 성분이 5% 이하이다. 따라서 추정된 온도-압력 조건에는 큰 문제가 있다. 그 이유는 변성-온도 압력 추정에 사용한 열역학 상평형 모델에서 고압에서 나타나는 omphacitic 휘석이 고려되지 않고 변성염기성암의 상변화에 중요한 사장석이 포함되어 있지 않으며 700-900°C에서는 염기성암의 변성작용 시 생성되지 않는 용액이 포함되어 있었기 때문으로 생각된다. 기존의 여러 연구들도 임진강대에서 고압형이 아닌 중압형 변성작용이 일어났음을 지시하고 있으며 추정된 최고 변성 온도 또한 815°C 정도로 900-950°C 보다 훨씬 낮다(Ree et al., 1996; Cho et al., 2007). 즉 임진강대가 중압형의 변성작용을 받은 것은 분명하나 고압형의 변성작용을 받은 명확한 증거는 아직 발견되지 않고 있다. 이에 반해 임진강대가 아닌 흥성 지역에서 충돌의 중요한 증거인 약 230 Ma의 에클로자이트

Fig. 2. Inferred metamorphic conditions and P-T paths for the Bibong eclogite in the Hongseong area (Oh et al., 2005) and the Samgot amphibolite in the Imjingang belt (Ree et al., 1996). Thick and thin solid lines represent P-T paths of the Bibong eclogite and the Taohong eclogites in the Sulu belt (Yao et al. 2000), respectively. The petrogenetic grid used is that of Oh and Liou (1998). Abbreviations: BS = blueschist facies; GS = greenschist facies; EA = epidote amphibolite facies; AM = amphibolite facies; EG = eclogite facies; HG = high-pressure granulite facies; LG = low-pressure granulite facies; IB = P-T condition for amphibolite in the Imjingang belt.

트가 발견되어 다비-수루 충돌대가 임진강대가 아닌 홍성 지역으로 연결됨이 확인되었으며 경기육과 북부 지역에 광범위하게 나타나는 230 Ma 충돌 후 화강암에 의해 남중국판과 북중국판의 충돌대가 한반도를 관통할 가능성이 강력하게 제시되었다(Oh et al., 2003, 2005; Oh, 2006; Oh et al., 2006b; Oh and Kusky, 2007; 김태성의, 2011). 이는 송림운동이 현재의 한반도를 최종적으로 형성시킨 중요한 운동임을 지시한다. 송림 운동과 관련된 좀 더 자세한 설명은 다음과 같다.

송림운동과 관련된 트라이아스기 화성 및 변성작용과 이들의 지구조적 의미

비봉 트라이아스기 에클로자이트의 발견과 그 중요성

해양지각을 구성하는 염기성 화성암인 반려암이나

현무암이 섭입대에서 고압 변성작용을 받아 주로 석류석과 jadeite 휘석 성분이 25% 이상인 omphacite 휘석으로 구성된 에클로자이트로 혹은 청색 각섬석인 그로코페인을 포함한 청색편암(blueschist)으로 변성된다. 이들 암석을 형성하는 섭입대의 지온상승율과 이들 암석이 형성되는 온도-압력 조건을 나타내는 변성상도는 그림 3과 같다. 따라서 대륙 내부에서 에클로자이트가 나타날 경우 이는 과거에 그 지역에 섭입대와 해양이 존재하였음을 지시한다. 예로 인도판과 아시아판의 충돌대인 히말라야 지역에 에클로자이트가 나타나는데 이는 충돌 이전에 인도판과 아시아판 사이에 존재하던 해양지각이 아시아판 남쪽 경계부를 따라 섭입하였으며 이때 에클로자이트가 형성되었고 이들 에클로자이트는 두 판사이의 해양지각이 모두 섭입된 후 대륙충돌이 일어날 때 지표면으로 이동하여 현재와 같이 지표면에 노출되었다(그림 3). 따라서 대륙판 내에서의 에클로자이트의 발견은 대륙충돌을 지시한다. 트라이아스기에 일어난 북중국판과 남중국판 간의 대륙 충돌도 이 두 지역 사이에 존재하는 다비-수루 충돌대 내에 나타나는 트라이아스기 에클로자이트에 의해 규명되었다(그림 1b; Wang et al., 1989; Zhai and Cong, 1996).

Oh et al. (2003, 2005)은 한반도에서 고압 변성작용의 증거인 에클로자이트를 경기육과 서남부인 홍성 지역 내 비봉에서 처음 발견하였다(그림 4). 이 암석은 에클로자이트 변성상(17-21 kbar, 835-860°C)에 해당하는 고압 변성작용을 받아 형성되었으며 이후 지표로 상승하여 백립암상(12-15 kbar, 830-850°C)의 후퇴변성작용을 받았고 최종적으로 다시 각섬암상(7-11 kbar, 570-740°C)의 변성작용을 받았다(그림 2: Oh et al., 2005). 에클로자이트 변성작용 시기에는 석류석과 함께 jadeite 성분이 25% 이상이 되는 omphacitic 휘석이 형성되었고 백립암상의 변성작용 시기에는 augitic 휘석이 석류석과 함께 형성되었다. 그리고 최종 후퇴변성작용시기에는 석류석 주변에 각섬석과 장석으로 형성된 심플렉타이트(symplectite)가 형성되었다(그림 4d). Oh et al. (2005)은 Sm-Nd 연령 측정을 통해 변성작용이 225-258 Ma에 일어났음을 보고하였고 이후 Kim et al. (2006a)은 SHRIMP 저어콘 연령측정을 통해 230 Ma에 변성작용이 일어났음을 보고하였다. 뒤에 다시 언급되겠지만 홍성 지역에 나타나는 230 Ma의 충돌 후 화성암을 고려할 때 비봉 에클로자이트는 약 250 Ma에 형성된 후 약 230 Ma에

Fig. 3. The cartoon showing the collision process between the India and Asia continents which constructed the Himalaya. (a) Before continental collision, there was a ocean between them and oceanic slab subducted under the Asia continent. (b) After collision, continental slab subducted by the pulling force of subducted oceanic slab. During the subduction of cold oceanic or continental slab, geothermal gradient was lowered causing high-P/T metamorphism. (c) As a result of high-P/T metamorphism, eclogites formed and some of them uplifted to the surface during the collision process as shown in b and c. The solid lines indicate the geothermal gradient during the high-P/T, intermediate-P/T and low-P/T metamorphism and the dotted line is the P-T path of the eclogites in the western Himalaya (Massonne and O'Brien, 2003). The same abbreviations in Figure 2 are used.

Fig. 4. (a) Simplified tectonic province map of northeast Asia. (b) Geological sketch maps of the Hongseong area after Oh et al. (2005). (c) BSE Image of eclogite consisting of garnet (Grt) and omphacite (Omp) with retrograde minerals, plagioclase (Pl), and clinopyroxene (Cpx). (d) Symplectite of plagioclase and amphibole (Amp) formed between garnet and clinopyroxene during the last stage of retrograde metamorphism. Abbreviations: HSZ = Honam shear zone. The same abbreviations in Figure 1 are used.

백립암상의 변성작용을 받았을 가능성이 있다. 비봉에클로자이트에 의해 지시되는 페름기-트라이아스기의 고압변성작용은 북중국판과 남중국판의 충돌에 의해 형성된 트라이아스기의 다비-수루 충돌대가 한반도의 홍성지역으로 연결됨을 확인시키며 송림조산운동이 대륙충돌에 의하여 일어났을 가능성을 강력하게 제시하였다.

230 Ma의 충돌 후 화성암의 발견과 그 중요성

그 이후 경기육괴의 동부인 오대산 지역에서 Oh et al. (2006a)은 250 Ma의 충돌 후 화강암인 맨거라이트를 발견하였고 이는 대륙 충돌대가 홍성에서 오대산지역으로 연결되며 한반도를 가로지를 가능성을 제시하였다(그림 5). 맨거라이트는 사방회석, 단사회석, 각섬석, 흑운모, 정장석, 사장석, 석영으로 구성되며 사방회석과 정장석이 함께 나타나는 것이 특징적이며 관내부 열곡대나 대륙 충돌 후 환경에서 회강암, 차노카이트와 함께 생성된다(Janasi, 2002; Ilbeyli et

al., 2004; Oh et al., 2006a). 오대산 맨거라이트에서는 섭입대 화강암에서 특징적으로 나타나는 Nb-Ta-Ti 부이상(negative anomaly)과 LILE 원소의 부화 현상을 보여준다. 이는 오대산 맨거라이트가 아프리카 열곡대와 같은 대륙 열곡대가 아닌 섭입작용을 경험한 대륙 충돌 후 환경에서 만들어졌을 가능성을 지시한다(Oh et al., 2006a). 정연중(2008)은 오대산 충돌 후 화성암의 관입 시기가 250 Ma가 아니라 230 Ma 일 가능성을 제시하였다. 김태성 외(2011)는 SHRIMP 저어콘 연령분석을 통해 오대산 맨거라이트가 약 230 Ma에 대륙 충돌 후 환경에서 만들어졌음을 재확인하였고 이 충돌 후 화성암이 Nb-Ta-Ti 부이상과 LILE 원소 부화의 특징과 함께 쇼소니틱(shoshonitic)하고 high Ba-Sr형의 특징을 보여줌을 확인하였다(그림 6, 그림 7). 기존에 Oh et al. (2006a)에 의해 얻어진 약 250 Ma의 연령은 단일(single) 저어콘 U/Pb 측정방법에 의해 얻어졌으며 230 Ma 보다 오래된 연령이 얻어진 이유는 저어콘 안에 들어있던 230 Ma

Fig. 5. (a) Simplified tectonic map of Northeast Asia and geologic map of the Odesan area (modified after Oh, 2010). (b) Photomicrograph showing the assemblage orthopyroxene (Opx) + clinopyroxene (Cpx) + amphibole (Amp) + biotite (Bt) + plagioclase (Pl) + K-feldspar (K-feld) + quartz (Qtz) within mangerite. (c) Back Scattered Electron image showing the assemblage spinel (Spl) + cordierite (Crd) + corundum (Crn) as well as inclusions of corundum, cordierite, and sillimanite (Sil) in spinel within spinel granulite. Abbreviations: HS, Hongseong area; ODS, Odesan area. For other abbreviations, see Figs. 1 and 4.

Fig. 6. The discrimination of tectonic settings for the mangerite and gabbro in the Odaesan area and granitoids in the Ian (Cho et al., 2008), and Daegang (Kim et al., 1998) areas using (a) Zr/Y vs. Zr diagram and (b) Zr-Nb-Y discrimination diagram, the fields are defined as follows: AI, within-plate alkali basalts and within-plate tholeiites; AII, within-plate alkali basalts and within-plate tholeiites; B, E-type MORB; C, within-plate tholeiites and volcanic-arc basalts; D, N-type MORB and volcanic-arc basalts, (c) Y+Nb vs. Rb diagram, (d) SiO₂ (wt.%) vs. Rb/Zr diagram. Open circles for mangerite from Kim T. et al. (2011), filled squares for gabbro from Kim T. et al. (2011), open triangles for mangerite from Oh et al. (2006a), filled triangles for gabbro from Oh et al. (2006a), filled circles for Ian granite (Cho et al., 2008) and open diamond for Daegang Granite (Kim et al., 1998).

보다 오래된 연령을 갖는 inherited 저어콘의 영향 때문인 것으로 예측된다. 그 이후 약 230 Ma에 관입한 충돌 후 화성암이 에클로자이트가 발견된 홍성의 북부 지역, 충청남도 남양 지역, 경기도 양평 지역, 강원도 춘천 인근 지역 등 경기도 전 지역에서 광범위하게 발견되었으며 휴전선 북쪽에서도 동서로 나타나는 약 230 Ma의 충돌 후 화강암이 발견되었다(그림 8; Choi S.G. et al., 2008; Peng et al., 2008; Lee and Oh, 2009; Seo et al., 2010; 박영록, 2009; Williams et al., 2009). 홍성 북부 지역에서는 맨거라이트와 함께 약 230 Ma의 high Ba-Sr 화강암이 함께 나타나며 특히 일부 high Ba-Sr내에 맨거라이트가 엔클레이브(enclave)로 나타나며 이 두 암석은 마그마

상태에서 서로 혼성(mingling)되어 만들어진 것으로 밝혀졌다(Seo et al., 2010). 홍성과 오대산 사이에 위치하는 양평에서는 충돌 후 지구조 환경에서 만들어진 섬장암과 반려암이 함께 나타나며 여러 지역에서 반려암이 섬장암내에 엔클레이브로 나타난다(Lee and Oh, 2009; 이승열, 2010). 오대산 지역에서도 충돌 후 지구조 환경에서 만들어진 반려암이 맨거라이트와 함께 나타난다(김태성외, 2011). 옥천변성대내의 이안 지역과 영남육괴내 대강지역에서는 219 Ma의 경의 화성암이 나타나는데 이들은 그림 6과 7에서와 같이 충돌 후 화성암류에 속하지 않으며 low Ba-Sr형에 속한다. 경기육괴내 충돌 후 화성암들은 모두 쇼소니틱(shoshonitic)하고 고 Ba-Sr(high Ba-Sr)형이며

Fig. 7. REE and spider diagrams for the mangerite and gabbro (from Kim T. 2011). (a) Chondrite-normalized rare earth element (REE) patterns. (b) Primitive mantle-normalized trace element distribution diagrams. Geochemical classification of the mangerite and gabbro in the Odaesan area and granitoids in the Ian (Cho et al., 2008) and Daegang (Kim et al., 1998) areas using (c) Subdivision of subalkalic rocks based on the K_2O vs. SiO_2 diagram and (d) Rb-Sr-Ba ternary diagram for high and low Ba-Sr granite fields. The same patterns in Figure 6 are used.

LILE 원소가 부화되어있으며, Nb-Ta-Ti 부이상을 보여준다. 그리고 충돌 후 맨거라이트, 섬장암, 반려암은 높은 Ni, Cr 성분을 보여주며 이들이 맨틀의 부분 용융에 의해 만들어졌음을 지시한다(Seo et al., 2010; 김태성 외, 2011).

이들 충돌 후 화성암들이 형성 모델은 다음과 같다(그림 9). 한반도에서 일어난 북중국판과 남중국판의 충돌 이전에 북중국판 남쪽 경계부를 따라 두 판 사이에 존재했던 해양지각이 섭입을 하고 있었고 이때 섭입 되던 해양 지각과 해양 퇴적물로부터 LILE가 풍부하고 Nb-Ta-Ti가 상대적으로 결핍된 유체나 용융체가 상부의 암권 맨틀(lithospheric mantle)로 공급되어 암권 맨틀의 성분을 변화시킨다(그림 9a). 두 판 사이에 존재하던 해양지각이 모두 섭입에 의해 소모된 후 두 판이 서로 만나게 되는데 이 때 섭입 되던

해양지각이 마치 추처럼 작용하여 대륙판이 남중국판을 지하로 잡아당겨 섭입시킨다. 대륙판의 섭입이 계속되면서 대륙판의 부력이 점차적으로 증가하다가 대륙판의 부력이 해양판이 지하로 잡아당기는 힘보다 커지게되면 대륙판과 해양판이 분리되어 해양판은 맨틀 하부로 계속 침강하는데 반해 대륙판은 상부로 상승하게된다(그림 9b). 이 때 두 판 사이에 공간이 형성되며 그 공간을 따라 연약권 맨틀 (athenospheric mantle)이 상승하여 암권 맨틀에 높은 열을 공급하게 되고 이 때 맨틀이 부분 용융되어 쇼쇼니틱하며 LILE가 부화되고 Ti-Nb-Ta가 결핍된 충돌 후 반려암을 형성하는 마그마가 생성된다. 이들 마그마의 일부는 대륙판을 관입하나 대부분은 대륙지각보다 밀도가 높아 대륙지각 하부에 정체되고 고화되어 대륙 지각 하부에 새로운 염기성 대륙하부 지각을 형성한다. 이 후

Fig. 8. The distribution of Triassic igneous rocks in South Korea (modified after Kim T. et al. 2011). Abbreviations are the same as those used in Fig. 1. Ages for Triassic plutonic rocks were obtained from the following sources: Sagong et al., 2005; Cho et al., 2008; Choi et al., 2008, Peng et al., 2008; Williams et al., 2009; Park, 2009; Seo et al., 2010; Lee and Oh, 2010; Kim T. et al., 2011).

Fig. 9. Tectonic model for post collision igneous rocks (modified after Kim T. et al., 2011). (a) Subduction stage before continental collision. Water and crustal elements were supplied to the lithospheric mantle from the subducted oceanic crust and sediments. As a result, lithospheric mantle was enriched with water and crustal elements. (b) During the final stages of collision, the oceanic slab broke off from the continental slab, making an opening between the continental and oceanic slabs. The heat of the asthenosphere supplied through this opening to the lithospheric mantle. Partial melting of the lithospheric mantle occurred in response to heat derived from the asthenosphere forming gabbroic magma which underplated the lower crust. (c) The opening became wider resulting more heat supply from the asthenosphere. As a result, the mangeritic magma formed by the partial melting of underplated gabbro and granitic magma, by partial melting of middle continental crust. The mangeritic magma intruded the crust together with granitic magma. In some places of the crust, these two magmas mingled together. (d) During the later post collision stage, the continental slab was thinned by extension and the lower continental crusts were delaminated into the mantle due to their high density obtained during thickening of crust by collision. In this stage, the mantle had uplifted to the shallow depth and undergone partial melting to produce gabbroic and mangeritic magma. They intruded the crust and mingled together in some places.

해양판과 대륙판 사이에 형성된 공간이 확대되면서 더 많은 충돌 후 염기성 마그마가 형성되면서 이들이 상승하여 대륙지각 하부에 높은 열을 공급하며 이때 새로이 형성된 염기성 대륙하부 지각이 용융되어 충돌 후 맨틀라이트와 섬장암을 형성한 중성 마그마가 형성되고 중성질의 하부지각이 용융되어 충돌 후 화강암을 형성한 산성 마그마가 형성된다(그림 9c). 이들 마그마가 대륙지각을 관입하고 일부 지각 내에서는 산성과 중성 마그마가 혼성(mingling)된다. 충돌 후 지구조 환경에서는 충돌 후 화성암이 만들어지면서 동시에 인장력이 작용된다. 이로 인해 정단층이 형성되면서 대륙 충돌에 의해 두꺼워졌던 대륙지각이 얇

아지며 충돌 후 화성암이 생성되는 깊이가 계속 낮아지는 현상이 일어났을 것으로 예상된다(그림 9d). 또한 이 시기에 충돌 시 두꺼워진 대륙지각의 압력에 의해 밀도가 높아진 대륙지각의 하부가 대륙지각으로부터 분리되어 맨틀 내부로 침강하게 된다(그림 9d). 이로 인해 충돌 전 섭입시기에 해양지각과 해양퇴적물의 영향을 받고 많은 부분용융을 받아 DMM + EM II 형태로 변화되어 있던 맨틀이 DMM + EM II + EM I 형태의 맨틀로 성격이 변화하게 된다. 충돌대 이북에 위치한 백령도, 전곡, 간성에 나타나는 신생대 현무암내 맨틀 잔류물이 충돌대 이남에 위치한 제주도 신생대 현무암내 맨틀 잔류물에 비해 EM I 성분이 강한 것(Park et al., 2005) 또한 충돌대 이

Fig. 10. The distribution map of Permo-Triassic subduction-related igneous rocks in the Yeongnam Massif and the South China block and of Permo-Triassic high-pressure rocks in Japan and Yaeyama island indicating the initiation of subduction along the margin of the South China block from Permian.

북에서 대륙 충돌 후 두꺼워진 대륙 지각이 얇아지면서 하부의 밀도가 높은 지각 일부가 분리되어 맨틀내부로 침강하여 맨틀 성분이 변화하였음을 지시하는 좋은 증거이다. 이렇게 해양물질과 지각물질에 의해 혼합된 맨틀이 지각이 얇아지는 현상에 의해 지표 가까이 상승하여 부분 용융되어 쇼소니틱한 반려암질 마그마 뿐 아니라 쇼소니틱한 중성질 맨거라이트와 섬장암을 형성한 마그마를 형성하였을 것이다. 이 때 만들어진 반려암질 마그마와 중성암질 마그마가 서로 혼성되어 나타나기도 한다. 위와 같은 형성과정을 고려할 때 Ni과 Cr 성분이 높은 맨틀 기원의 염기성 반려암과 중성 심성암(맨거라이트, 섬장암)이 함께 나타나는 오대산 지역과 양평 지역에서는 이들 화성암들이 충돌 후 마그마가 낮은 위치로 이동하여온 맨틀의 부분용융에 의해 형성되었으며 Ni과 Cr 성분이 높은 중성 마그마(맨거라이트)와 Ni과 Cr 성분이 상대적으로 낮은 산성 마그마(고 Ba-Sr 화성암)가 혼성된 홍성 북쪽 광천에서는 오대산이나 양평보다 상대적으로 깊은 곳에서 충돌 후 마그마가 형성되었음을

예상할 수 있다. 양평과 오대산 지역 충돌 후 화강암류 내 각섬석이 광천 지역의 화강암류 내 각섬석에 비해 낮은 Al 성분을 갖고 있는데(이승열, 2010; 김태성, 2011) 이는 화강암류의 생성 깊이가 증가할수록 각섬석 내의 Al이 증가하는 경향을 고려할 때 광천지역의 충돌 후 화강암류가 상대적으로 더 깊은 깊이에서 형성되었음을 확인할 수 있는 또 다른 증거이다.

이상에서 언급되었듯이 충돌 후 화성암은 섭입되는 대륙지각 반대편에 형성된다(그림 11c, d). 북중국판과 남중국판의 충돌시 남중국판이 섭입을 하였으므로 충돌 후 화성암은 북중국판내에 나타날 것이다. 따라서 한반도내 남중국판과 북중국판의 경계는 충돌 후 화성암 분포지역의 남쪽 한계인 홍성-양평-오대산 지역을 연하는 선이나 그보다 약간 남쪽에 존재할 것이다. 결론적으로 경기육괴에서 발견된 트라이아스기의 에클로자이트와 충돌 후 화성암은 홍성-양평-오대산을 연결하는 선이 충돌 경계임을 지시한다. 또한 이 선을 중심으로 경기육괴가 북부와 남부 지역으로 나

Fig. 11. Tectonic models showing previously proposed tectonic relationships between Korea, China, and Japan (from Oh and Kusky, 2007). (a) Tectonic model suggested by Yin and Nie (1993). (b) Tectonic model suggested by Zhang (1997). (c) Tectonic model suggested by Ernst and Liou (1995). (d) Tectonic model suggested by Ishiwatari and Tsujimori (2003).

되어져야 하고 북부와 남부 지역은 각각 북중국판과 남중국판에 대비됨을 알 수 있다.

홍성-오대산 충돌대를 따라 나타나는 페름기-트라이아스기 백립암상 변성작용대

대륙충돌에 관련된 것으로 보이는 페름기-트라이아스기 변성작용이 임진강대, 경기육괴, 옥천변성대에 걸쳐 광범위하게 인지된다. 앞에서 언급되었듯이 옥천변성대는 240-290 Ma 경에 중압변성작용을 받았으며 남동에서 북서쪽으로 가면서 변성도가 증가한다 (Oh et al., 2004; Kim et al., 2005). 한편 임진강대의 경우 변성도가 북쪽에서 남쪽으로 증가하며 약

250 Ma 경에 중압형의 변성작용을 받았다(Ree et al., 1996; Cho et al., 2007; Kim and Cho, 2008; Oh and Kusky, 2007; Kim and Jung, 2010). 그리고 경기육괴의 많은 곳에서 페름기-트라이아스기의 변성연령이 보고되었다(Oh and Kusky, 2007 내 그림 8). 특히 경기육괴내 홍성-양평-오대산을 연하는 선을 따라 가장 백립암상 이상의 강력한 변성작용이 일어났다. 홍성지역의 에클로자이트는 후퇴변성시기인 약 230 Ma 경에 백립암상(12-15 kbar, 830-850°C)의 고온 변성작용을 받았으며 양평지역에서도 230-235 Ma에 백립암상의 변성작용(5.5-3.1 kb, 780-740°C)이 그리고 오대산 지역에서는 245 Ma에 초고온 변성작용

(10 kb, 914-1157°C)이 인지된다 (Oh et al, 2005; Oh et al., 2006b; 이승열, 2010; 김태성, 2011). 이는 백립암상 이상의 고온 변성작용이 충돌 후 화강암 형성 시기보다 약 15 Ma 이전에 시작하여 충돌 후 화성작용이 일어난 시기까지 계속되었음을 지시한다. 앞에서 제시된 충돌 후 화성암 모델을 고려할 때 충돌 후 해양판과 대륙판이 분리된 공간으로 이동해 온 연약권 맨틀이 직접 혹은 이로 인해 만들어진 마그마를 통해 간접적으로 대륙지각 하부에 높은 열을 제공하여 고온의 변성작용이 일어났음을 어렵지 않게 예측할 수 있다(그림 9). 그리고 충돌 후 초기에는 중압형의 백립암상 변성작용이 일어나겠지만 대륙지각이 인장력에 의해 얇아지면서 저압형의 백립암상 변성작용으로 변화하였을 것이다. 오대산 지역에 나타나는 초고온 변성작용이 저압형 변성작용임을 고려할 때 이 변성작용이 일어난 245 Ma 경에 오대산 지역은 이미 상당히 지각이 얇아졌음을 지시한다. 이러한 홍성-양평-오대산을 연하는 선을 따라 일어나는 강력한 백립암상 이상의 변성작용은 충돌 후 화성암의 분포와 함께 이 지역이 두 대륙의 충돌 경계임을 지시한다. 옥천변성대에서는 변성정도가 북서 방향으로 증가하며 임진강대의 경우 변성정도가 남쪽으로 증가한다. 이렇듯 두 변성대에서 모두 경기육괴내 대륙 충돌 경계를 향해서 변성도가 증가하고 있는 것 역시 충돌 경계가 경기육괴 내에 존재하며 옥천변성대와 임진강대는 충돌 주변부에서 중압변성작용을 받았음을 지시한다.

경기육괴에 나타나는 230 Ma 충돌 후 화성암을 고려하면 홍성지역의 에클로자이트에서 얻어진 230 Ma의 SHRIMP 저어콘 변성연령은 아마 백립암상의 후퇴변성작용 시기를 지시하며 수루 충돌대의 경우 고압변성작용 시기와 후퇴변성작용 시기가 20 Ma 정도 차이나는 것(Ernst et al., 2007)을 고려할 때 홍성지역의 에클로자이트도 230 Ma보다 20 Ma 정도 이전에 형성되었을 것으로 생각된다. 따라서 Oh et al. (2005)에 의해 제시된 Sm-Nd 연령중 오래된 연령인 258 Ma가 고압변성작용이 일어난 시기로 예상할 수 있다. 중국의 다비-수루 지역에서는 초고압 변성작용이 225 Ma에 일어난 것으로 판단되고 있으며 충돌 후 화성암의 관입은 215 Ma에 일어났다(Chen et al., 2003; Yang et al., 2005, 2007; Ernst et al., 2007). 앞의 연구 내용을 종합하여보면 오대산 지역에서는 245 Ma 이전에 대륙 충돌이 일어났으며 홍성 지역에서

는 250 Ma 경에 그리고 다비-수루 지역에서는 225 Ma 경에 대륙충돌이 일어났음을 유추할 수 있다. 이는 대륙 충돌이 동쪽에서 시작되어 서쪽으로 진행되었을 가능성을 지시한다.

대륙충돌과 함께 일어난 남중국판 남쪽 경계의 섭입작용

영남육괴에서도 페름기 말에서부터 트라이아이스기까지 섭입에 관련된 화성암이 광범위하게 나타난다(그림 8; 이호선, 2010). 이는 남중국판의 커테시아에 해당하는 남부와 하이난 섬에 걸쳐 광역적으로 나타나는 페름기말-트라이아이스기의 섭입 관련 화성암들과 잘 대비된다(그림 10; Li et al, 2006a; Wang et al., 2005). 이는 이 시기에 남중국판의 남쪽 경계부를 따라 섭입작용이 시작되었음을 지시한다. 남중국판의 남부 지역과 대만의 퇴적층으로부터도 페름기말에 남중국판의 남쪽 경계가 비활성 대륙경계(passive margin)에서 활성 대륙경계(active margin)으로 변화함이 인지된다. 이 또한 페름기 말 섭입 작용의 시작을 증거한다. 그리고 이 시기의 섭입대 존재에 대한 또 다른 증거는 일본 남서부와 류큐 화산호(Ryukyu arc) 남단에 위치한 야에야마(Yaeyama) 섬에서 인지되는 페름기말-트라이아이스기의 섭입관련 고압변성작용이다(Faure et al., 1988; Tsujimori, 2002). 남중국판의 남부 경계를 따라 섭입대가 시작되는 페름기말은 대륙 충돌이 시작하는 시기와 일치한다. 이는 다음과 같은 해석을 가능케한다. 남중국판과 북중국판의 대륙 충돌에 의해 남중국판이 북쪽으로 더 이상 이동하지 못하는데 반해 남중국판 남쪽의 해양지각은 계속 북쪽으로 이동함으로써 섭입작용이 일어나 남중국판 남쪽 경계가 비활성 대륙경계에서 활성 대륙경계로 전환되었을 가능성이 있다. 이러한 연구 결과들은 한반도의 송림조산운동시기에 경기육괴 이북에서는 남중국판과 북중국판의 대륙충돌이 일어났으며 영남육괴 남쪽 경계에서는 충돌과 관련되어 일어났을 것으로 예상되는 섭입작용이 발생하였음을 가능성을 지시한다.

송림운동 시기의 동아시아 지구조 진화 모델

송림운동시기의 동북아시아 지구조 모델들의 문제점

남중국판과 북중국판이 충돌하며 남중국판 남쪽 경

계에서 섭입이 진행되던 송림 변동시기에 동북아시아의 지구조를 설명하기 위해 여러 모델이 제시되었다(그림 11). Yin and Nie (1993)는 남중국판의 동쪽이 서쪽보다 튀어나와 있어 북중국판과 먼저 충돌하며 밀려들어가면서 튀어나온 부분의 서쪽에는 좌수향의 탄루 단층이 그리고 동쪽에는 우수향의 호남 전단대가 페름기말-트라이아스기에 형성되었고 두 판의 충돌에 의해 탄루 단층 서쪽에는 다비 충돌대가 그리고 서쪽에는 수루 충돌대가 형성되었다고 주장하였다(그림 11a). 그리고 수루 충돌대는 서해를 지나 임진강대로 이어진다는 모델을 제시하였다. 하지만 최근 호남 전단대가 주라기 초에 형성되기 시작하였음이 확인되었고(Cho et al., 1999; Lee et al., 2003) 이는 대륙 충돌이 진행된 페름기-트라이아스기 보다 훨씬 젊기 때문에 Yin and Nie (1993)의 모델은 적절치 못하다. 뒤에 언급하겠지만 임진강대에서 충돌대의 증거가 발견되지 않은 것 또한 Yin and Nie (1993)의 모델이 적절치 못함을 지시한다. 한편 Zhang (1997)은 두 판의 충돌이 동쪽에서 먼저 일어났고 남중국판이 시계 방향으로 회전하면서 충돌이 서쪽으로 진행되었다고 주장하였으며 Yin and Nie (1993)와 마찬가지로 다비-수루 충돌대가 한반도의 임진강대로 이어질 것이라고 하였으나 한반도를 지난 후 Yin and Nie (1993)의 모델과는 달리 충돌대가 북쪽의 함경도에 나타나는 석탄기-페름기에 형성된 연변(Yanji) 섭입 복합체로 연결된다고 주장하였다(그림 11b). Yin and Nie (1993)와 Zhang (1997)의 두 모델의 문제점은 임진강대가 충돌대라는 증거를 제시하지 못하고 있다는 점이다. Ree et al. (1996)이 임진강대에서 고압변성작용을 보고하였지만 이들이 제시한 8.9-11.5 kb, 640-815°C의 변성 조건은 섭입이나 충돌대 지역에서 만들어진 고압 변성작용 조건에 해당되지 않는다. 최근 Kwon et al. (2009)과 Sajeev et al. (2010)은 임진강대로부터 고압 변성작용을 보고하였지만 앞에서 언급되었듯이 이들이 제시한 온도 압력이 잘못 계산되었다. 즉 임진강대가 중압형의 변성작용을 받은 것은 분명하나 고압형의 변성작용을 받은 명확한 증거는 아직 임진강대에서 발견되지 않고 있다. 즉 임진강대에서는 아직까지 충돌의 증거가 발견되지 않았으며 또한 임진강대가 한반도를 관통하지 못하고 중부지역에서 끝나며 동부지역으로 연장되어 나타나지 않기 때문에 임진강대를 대륙 충돌 경계로 생각하기 힘들다. Ernst and Liou (1995)는 다비-수루 충돌대

가 한반도의 어딘가를 통과한 후 일본 남부의 고생대 섭입 복합체로 연결되고 이는 다시 만주와 러시아의 태평양 연안부에 발달한 고생대말 섭입 복합체로 연결될 것이라고 주장하였다(그림 11c). 하지만 만주와 러시아의 태평양 연안부에 발달한 고생대말 섭입 복합체는 고생대 시기에 북중국판과 떨어져 있어 남중국판과 북중국판의 충돌대의 연장성으로 볼 수 없다. Ishiwatari and Tsujimori (2003)는 대만 북쪽에 위치한 아예야마 섬에 나타나는 트라이아스기의 청색편암을 근거로 다비-수루 충돌대가 서해를 건너 한반도로 연결되지 않고 아예야마 섬으로 연결된 후 일본 남부의 페름기 섭입 복합체 지역으로 연결된다는 모델을 제시하였다. 하지만 이 모델은 한반도 홍성에서 발견된 에클로자이트를 설명할 수 없다. 또한 오끼나와의 페름기말 청색편암은 앞에서 설명한바와 같이 페름기 말부터 남중국판 남쪽 경계를 따라 형성된 섭입대에 의해 생성되었을 것이다. Zhai et al. (2007)은 홍성지역을 포함한 서해안 지역에서 남중국판과 한반도의 충돌이 있었고 한반도 전체는 북중국판에 속한다고 주장하였고 그리고 한반도내에 국한된 모델로서 Kwon et al. (2009)은 홍성과 임진강대를 연결하는 선을 대륙 충돌 경계로 제시하였다. 하지만 이 모델들은 경기육괴에서 나타나는 강력한 230 Ma의 충돌 후 화성작용을 설명하지 못할 뿐 아니라 홍성지역을 제외하고는 서해안을 따라 대륙 충돌의 증거가 발견되지 않는다는 점에서 문제가 있다. 따라서 이 모델들은 송림조산운동시기에 동북아시아에서 일어난 지구조환경을 성공적으로 설명하지 못했다. 그리고 Hao et al. (2007)은 서해안 앞에 대규모 주향이동 단층을 제시하였고 수루 충돌대가 이 주향이동 단층을 따라 한반도 보다 남쪽으로 이동한 후 일본으로 연결되었다는 모델을 제시하였다. 하지만 이 모델 역시 한반도에서 발견된 트라이아스기의 에클로자이트와 충돌 후 화성암을 설명하지 못하는 큰 문제점이 있다.

남중국판과 북중국판의 충돌대의 연장

앞에서 언급되었듯이 남중국판과 북중국판의 충돌 경계인 친링-다비-수루 충돌대는 트라이아스기 에클로자이트가 발견된 한반도의 홍성지역으로 연결되고 홍성-양평-오대산을 연결하는 선 이북으로 나타나는 트라이아스기의 충돌 후 화강암은 대륙충돌대가 한반도를 가로지르며 남중국판과 북중국판의 경계가 홍성-양평-오대산을 따라 존재함을 지시한다. 한반도내에

서 충돌의 영향을 받은 지역의 대략적인 경계는 남쪽으로는 육천변성대 북쪽으로는 임진강대가 될 것으로 판단된다.

남중국판과 북중국판이 충돌하기 직전까지 북중국판의 남쪽에는 고생대의 섭입대가 존재하였으며 이로 인해 고생대 섭입 복합체(subduction complex)가 형성되었을 것이다. 하지만 이들 중 대부분은 대륙 충돌과 그 이후의 지구조 운동에 의해 없어지고 일부만이 친링-다비 지역에 나타나고 있다. 최근 경기육괴 서남부에 위치하는 태안, 월현리층 그리고 오대산 지역의 구룡산층 등에서 고생대 중기의 쇄설성 저어콘이 발견됨으로서 이들이 고생대 중기 이후의 퇴적층일 가능성이 제시되었다(Choi P.Y. et al., 2008, Cho et al., 2010b, 조등룡, 2010; Kim S.W. et al., 2011). Sao et al. (1995)는 함경도와 인근 중국 지역에 석탄기에서 페름기에 걸친 오피오라이트를 함유하는 섭

입 복합체가 존재함을 보고하였다. 이러한 함경도에 나타나는 석탄-페름기의 섭입 복합체는 북중국판의 동쪽에도 역시 섭입대가 발달해 있었음을 지시한다. 앞에서 제시된 여러 자료는 남중국판과의 충돌 이전에 북중국판의 남측과 동측에 섭입대가 발달되어 있었음을 지시한다. 하지만 현재 북중국판의 동측에 해당하는 오대산과 함경도 사이의 동해안 지역에는 고생대의 섭입복합체가 나타나지 않는다. 이 지역에는 과거 일본의 고생대 섭입복합체가 위치하였을 가능성이 높으며 그 이유는 다음과 같다.

일본은 대부분 주라기 이후의 암체로 이루어져 있으며 서남부 내측 일부만이 고생대 이전에 형성되었다(그림 12; Tsujimori, 2002). 일본 서남부 내측중 동해에 가까운 부분에는 북중국판의 대륙 연변부로 생각되는 실루리아기-석탄기의 오키 벨트와 히다 벨트가 존재한다(Isozaki, 1997; Arakawa et al., 2000,

Fig. 12. Map showing the geologic and tectonic subdivisions of southwestern Japan (modified after Tsujimori, 2002). The timing of accretion generally gets younger oceanward. Abbreviations: MTL = Median Tectonic Line; I.S.T.L = Itoigawa-Shizuoka tectonic time.

2001). 그로부터 동쪽으로 석탄기-페름기의 섭입복합체가 발달되어 있으며 그 안에 부분적으로 오르도비스기에서 데본기에 형성된 섭입복합체나 고압형 변성암이 나타난다. 일본 서남부 내측에 발달한 고생대 섭입복합체의 길이가 함경도와 오대산 사이에 위치하기에 적합하고 함경도 섭입복합체와 마찬가지로 주로 석탄기-페름기의 섭입복합체로 구성되어있다. 따라서 한반도를 관통한 대륙충돌대는 일본의 서남부 내측 오기 벨트와 히다 벨트를 포함한 일본 서남부 내측으로 연결된 후 함경도의 석탄-페름기 섭입복합체인 연변대 (Yanji belt)로 연결될 것으로 예상되며 앞으로 이를 확인하기 위한 연구가 필요하다.

송림변동시기의 동북아시아 지구조 진화 모델

고생대 초기에 테시스해 (Tethyan ocean)가 열리면 서 곤드와나의 동부 지역으로부터 남중국판과 북중국판이 분리되어 그 사이에 있는 친링 소대륙과 함께 북쪽으로 이동되었다(Metcalf, 1996). 이때에 북중국의 남쪽 경계면을 따라 활성 대륙경계가 그리고 남중국의 북쪽 경계면을 따라 비활성 대륙경계가 형성되었다(그림 13a). 데본기에 친링 소대륙이 북중국판과 충돌하여 친링 소대륙의 남쪽 경계가 북중국판의 새로운 경계가 되었고 이 지역에 섭입대가 형성되었다(Oh and Kusky, 2007). 북중국판이 곤드와나 초대륙으로부터 분리된 이후 남중국판과 충돌하기 이전까지 북중국판의 남측과 동측 주변부에 섭입대가 존재하였고 지역에 고생대 초기에서 페름기에 해당하는 섭입복합체(subduction complex)가 형성된다. 이러한 섭입복합체의 일부가 현재 친링-다비-수루 충돌대와 홍성 충돌대내에 오피오라이트, 화산호 복합체, 에클로자이트를 포함하는 고압변성대 형태로 남아있으며 일본에서는 서남부 내측에 오르도비스기에서 페름기까지의 섭입복합체로 북한에서는 함경도 동측에 석탄기에서 페름기까지의 오피오라이트를 포함하는 섭입복합체로 나타난다.

페름기에 한반도 동측에서 대륙 충돌이 일어나기 시작하여 점차 서쪽으로 충돌이 진행되면서 탄루 단층이 형성되었을 것으로 생각된다(그림 13 b, c). 그리고 트라이아스기 말기에는 충돌이 친링지역까지 확대된 후 남중국판과 북중국판간의 충돌이 끝난다. 남중국판과 북중국판이 충돌하는 동안 함경도 지역에서는 북중국판과 소대륙판인 뷰레아가 충돌한다. 이에 반해 함경도와 오대산 사이에 위치한 섭입대에서는

Fig. 13. The collision process between South and North China blocks (modified after Oh and Kusky, 2007). (a) An active margin was formed by subduction around the North China block during the mid-Paleozoic; at the same time, a passive margin was developed around the northern boundary of the South China block. (b) The collision started in Korea during the Permian. (c) It propagated into the Shandong Peninsula, producing the sinistral Tanlu fault and dextral fault in the Hida belt along the way. During the collision, the western portion of the North and South China blocks moved southward, along with Japan, while the Shandong and Korea peninsulas moved northward. (d) The collision terminated during the late Triassic. (e) After regional intrusion of Jurassic granitoids in Korea Peninsula, the Hida belt was thrust over the inner zone of southwest Japan, while additional Jurassic and Cretaceous accretionary complexes added to Japan. Abbreviations: NCB = North China block; SCB, South China block; QB = Qinling block; YB = Yangtze block; CB = Cathaysia block; BY = Bureya; NK = Northern Korea; SK = Southern Korea; HB = Hida belt; ISWJ = Inner zone of Southwest Japan.

대륙 충돌이 없이 섭입작용이 계속되어 섭입대가 성장한다. 히다 marginal 벨트를 포함한 일본 남서부 내륙 지역의 Akiyosh belt, Maizuru belt에 트라이아스기에서 시작되어 여러번 재활동된 우수향 주향이동

Fig. 14. Average P-T paths of eclogites from Dabie and Sulu collision belt in China (Liou et al., 1996), P-T paths of eclogites from Hongseong belt (Oh et al., 2005), and spinel granulite in Odesan area in Korea (Oh et al., 2006a). The same abbreviations in Figure 2 are used.

단층이 나타난다(Takagi and Hara, 1994; Otoh et al., 2003; Otoh and Yanai, 1996). 이를 근거로 Oh and Kusky (2007)은 한반도와 일본사이에 우수향 주향이동 단층이 존재하였을 가능성을 제시하였고 대륙 충돌시 우수향 단층에 의해 함경도와 오대산 사이에 존재하던 일본 남서부 고생대 섭입 복합체가 남쪽으로 이동하여 백악기에 충돌대 이남의 한반도 동측에 위치하게 되었을 가능성을 제시하였다(그림 14b, c, d; Oh, 2006; Oh and Kusky, 2007). 남중국판 남측 및 동측 경계를 따라서는 고생대 전기 섭입 복합체는 물론 석탄기 섭입 복합체가 나타나지 않으며 섭입작용이 폐름기 말부터 시작되었다. 따라서 남중국판의 동측 경계에 해당하는 한반도의 충돌대 이남의 동해안 지역에서는 고생대 전기와 중기의 섭입복합체가 형성될 수 없다. 이는 일본의 고생대 전기 및 중기의 섭입 복합체가 북중국판 경계로부터 우수향 주향이동 단층에 의해 이동되어왔을 가능성은 뒷받침한다.

오대산 지역의 변성 연령이 다비-수루 충돌대의 변성 연령보다 약간 더 오래된 사실은 북중국판과 남중국판의 충돌이 한반도 동쪽에서 폐름기 말부터 시작되어 서쪽으로 트라이아스기 말기까지 진행되었을 가능성을 제시한다. 이는 충돌이 동쪽에서 시작되었다는 고기자기 및 퇴적암 연구와 일치한다(Zhao and Coe,

Fig. 15. Schematic tectonic model of collision along the Dabie-Hongseong collision belt (from Oh, 2010). (a) Continental collision started in the east. (b) Collision propagated westward (towards the Sulu and Dabie areas), accompanied by clockwise rotation of the SCB. In the east (the Odesan area), subduction of the continental block ceased due to oceanic slab break-off, which produced an opening in the subducting slab through which high heat flow occurred from the asthenosphere. (c) The zone of oceanic slab break-off propagated to the Hongseong area, terminating the subduction of the continental block after reaching the depths of HP metamorphism; however, subduction of the continental block continued in the Dabie and Sulu areas. (d) In the Dabie and Sulu areas, the continental block reached the depths of UHP metamorphism and the oceanic slab began to break-off. The dashed and dash-dotted lines represent the minimum depths of HP and UHP metamorphism, respectively. NCB, North China block; SCB, South China block.

1987; Zhang, 1997; Oh, 2006; Oh and Kusky, 2007).

다비-수루-홍성-오대산을 연결하는 충돌대를 따라 일어나는 변성작용에는 일정한 패턴이 있다(그림 14; Oh and Kusky, 2007, Oh, 2009). 첫째 변성 연령이 동쪽에서 서쪽으로 245 Ma에서 220 Ma로 감소한다. 둘째 최고 변성온도가 914-1157°C에서 600-880°C로 감소한다. 셋째 최고 압력조건이 9.0-10.6 kb에서 22-41 kb로 증가한다. 이를 바탕으로 다음과 같은 3차원 대륙충돌 시나리오가 예측된다(그림 15; Oh and Kusky, 2007; Oh, 2009). 곤드와나 초대륙의 서쪽에 위치하였던 남중국판과 북중국판이 고생대 초기 곤드와나 초대륙으로부터 분리되어 북쪽으로 이동하였다(Metcalf, 2006; McKenzie et al., 2011). 이때 고생대 중기 이후의 남중국판과 북중국판 사이의 해양

의 넓이는 동쪽에서 서쪽으로 점차 넓어지는 형태를 갖고 있었을 것으로 예상된다. 그 결과 두 판의 충돌 이전 섭입된 해양지각의 양이 오대산을 포함한 동부 지역에서는 상대적으로 적었고 그 양은 서쪽으로 가면서 계속 늘어났을 것이다. 오대산 지역에서는 섭입된 해양지각의 무게는 남중국판을 고압변성작용 초기나 그 보다 낮은 압력의 변성작용을 일으키는 깊이까지 밖에 섭입시키지 못한 반면 홍성 지역에서는 고압 변성작용이 일어날 수 있는 깊이까지 남중국판의 섭입이 일어났고 다비, 수루 지역에서는 섭입된 해양지각의 무게가 남중국판을 초고압 변성조건의 깊이까지 섭입시킬 수 있었을 것으로 생각된다. 그 결과 대륙지각과 해양지각의 분리는 오대산을 포함한 동쪽 지역에서 상대적으로 얇은 위치에서 먼저 일어나고 그 분리 시간과 깊이는 서쪽으로 가면서 짧아지며 깊어진다. 그 결과 두 지각이 분리된 공간을 통해 연약권으로부터 공급된 열적 효과가 동쪽에서 크고 서쪽으로 갈수록 감소하였을 것이다. 대륙지각의 섭입된 깊이가 깊어질수록 부력이 강해져 해양지각으로부터 분리된 이후 섭입된 대륙지각의 지표로의 상승 속도가 증가할 것이다. 즉 다비 수루지역에서 섭입된 대륙지각은 오대산 지역에 비해 빠른 속도로 상승하였을 것이다. 그 결과 오대산 지역에서는 대륙지각의 느린 상승작용이 높은 열적효과와 결합되어 매우 높은 온도인 초고온 변성작용이 일어났으며 홍성 지역에서는 상승 속도의 증가와 열적 효과의 감소에 의해 고압 변성암이 백립암상의 후퇴 변성작용을 받았으며 상승 속도가 빠르고 열적 효과가 가장 약했던 다비, 수루 지역에서는 대부분의 초고압 변성암이 각섬암상의 후퇴 변성작용을 받았다. 그리고 동쪽의 높은 열적 효과에 의해 충돌 후 화성작용이 다비, 수루 지역에 비해 홍성, 오대산 지역에서 강하게 형성되었다..

한반도 형성 이전의 한반도의 지구조 진화

원생대 초기의 지구조 진화

현재 한국지질자원연구원에서 만들어진 1:1,000,000 지질도를 보면 한반도의 상당히 많은 부분이 시생대로 제시되어있으나 최근 여러 연구에 의해 시생대는 매우 제한된 지역에만 나타남이 확인되었다(Zhao et al., 2006; Cho et al., 2008). 경기육괴는 오랫동안 대부분 변성퇴적암으로 구성되어 있을 것으로 생각되

어 왔고 최근 SHRIMP연대 측정을 통해 밝혀진 연령들은 이들 변성퇴적암이 1900 Ma 이전에 형성된 후 1900-1840 Ma 경에 변성 및 화성작용을 받았을 가능성을 지시한다(오창환 외, 2006와 그 안의 참고 문헌). 그리고 변성작용은 약 1870 Ma 경에 집중되어 나타난다(Lee et al, 2000; 조동룡과 김용준, 2003; 고희재 외, 2004). 최근 SHRIMP에 의한 또 다른 발견은 경기육괴내에 나타나는 1870-1850 Ma 화강암이다(Zhai et al., 2005; 김태성, 2011; 기원서와 김현철, 2011; 이병춘 외, 2011). 이들 화성암들은 1900-1800 Ma 사이에 변성작용을 받지 않았으며 대부분 거정질의 장석 반정을 포함하는 중성에서 산성의 화성암이다. 경기육괴 중앙부에 나타나는 의암층군은 과거 변성 퇴적암층군으로 알려져 왔으나 예비 연구에 의해 의암층군의 많은 부분이 1875 Ma 경에 대륙 충돌 후 환경에서 만들어진 화성암으로 확인되었다(이병춘 외, 2011). 이들 의암 화성암체내에는 동일한 시기의 염기성 화성암체가 발견되는데 이들은 판내부 환경에서 만들어진 화산암으로 판단된다. 그리고 본 연구팀의 사전 연구에 의하면 의암 화성암체 주변에 나타나는 용대리 변성퇴적암류에서는 약 1875 Ma의 저압형 변성작용이 인지되었다. 이러한 자료들은 1870 Ma 이전에 경기육괴 북부가 대륙충돌을 경험한 후 1870 Ma부터 충돌 후 화성 및 변성작용을 받았음을 지시한다. 양양 지역에서는 1837 Ma의 화성작용이 인지되며 이 또한 충돌 후 환경에서 일어난 화성작용일 가능성이 높다(김태성, 2011). 인근지역에서 다른 연구자들에 의해서도 동일 시기의 화성암이 보고되었다(Zhai et al, 2005; 기원서와 김현철, 2011). 충돌대 남쪽에서도 변성퇴적암 이외에 부여 지역에서 1875-1881 Ma의 화성작용이 인지되며 섭입대 환경에서 형성된 것으로 해석되었으나(Kim et al., 2008) 충돌 후 환경에서 만들어졌을 가능성도 있다. 이는 경기육괴내 충돌대 북부와 남부 지역이 모두 콜롬비아 초대륙 형성시기에 대륙 충돌 혹은 섭입을 경험하였으며 그로 인해 강한 화성 및 변성작용을 받았다.

영남육괴 북서부에선 약 1990 Ma 경의 섭입 관련 화성작용이 인지되며 이들은 1890-1840 Ma에 변성작용을 받았으며 영남육괴가 전반적으로 이 시기에 변성작용을 받았다(Kim N. et al., 2011). 김종선 외 (2010)은 영남육괴에 나타나는 하동 및 산청 화강암체로부터 약 1855 Ma의 변성연령을 얻었으나 이 연령은 관입 연령일 가능성이 있다. 그리고 오창환 외

(2000)는 소백산육괴의 서남부인 승주-순천 일대의 화강암질 편마암과 반상변정질 편마암으로 부터 약 1420 Ma의 전암-석류석 Sm/Nd 변성연령을 얻었다. 1400 Ma 연령은 남중국의 커테시아 판에서 보고되고 있으며(Li et al., 1992) 이는 앞에 지구조모델에서 제시되었듯이 영남육괴가 남중국의 커테시아판에 해당할 가능성을 제시하는 또 다른 증거가 될 수 있다. 하지만 오창환 외(2000)에 의해 얻어진 연령은 2 point isochron으로부터 얻어진 자료이기 때문에 신뢰성이 낮아 이 연령을 재확인하는 것이 필요하다.

1400 Ma의 변성 및 화성 연령은 로렌시아 서부에서도 보고되어 있어(Nyman et al., 1994) 이를 근거로 Li et al. (1995)는 커테시아판이 로렌시아판의 서부지역일 것으로 예측하였다. 앞으로 영남육괴의 진화과정을 밝히기 위해 이들 화성 및 변성작용에 대한 자세한 연구가 필요하다.

원생대 후기의 지구조 진화

남중국판은 북쪽의 양쯔판과 남쪽의 커테시아판으로 구성되며 양쯔판의 주변부에서는 원생대 후기 화

FIG. 16. (a). Configuration of the mid-Proterozoic supercontinent of Rodinia revised after Li and Powell (2001) and Zhai et al. (2003). (b) Relative positions of East Gondwana, Yangtze, Cathaysia, and Laurentia based on paleomagnetic data at ~1.0 Ga (revised after Li et al., 1995). (c) Late Proterozoic breakup of Rodinia revised after Li and Powell (2001). (d) Rifting zone between East Gondwana, South China, and Laurentia at about 720 Ma (revised after Li et al., 1995). Abbreviations: PRC = Priest River Complex; BB = Belt Basin; NCB = North China block; SCB = South China block; Sib = Siberian block.

성작용이 일어났음이 보고되고 있다. 양쯔판의 주변 부에서 쓰보 조산운동 시기에 해당하는 1000 Ma와 890 Ma 사이에 일어난 화성작용은 섭입대 환경에서 만들어졌으며 820 Ma 이후 760 Ma 사이에 일어난 화성작용은 대륙 열곡대 환경에서 만들어졌다(Ames et al., 1996; Ling et al., 2003; Li et al., 2006b; Ye et al., 2007). 이는 900 Ma 경 완성되었을 것으로 예상되는 로디니아 초대륙 형성 이전에 양쯔판은 독립된 판이었고 그 주변에 섭입작용이 있었으며 890 Ma 이후에 로디니아 초대륙의 일부가 되었음을 지시한다(그림 16; Li and Powell, 2001). 로디니아 초대륙의 일부가 되면서 양쯔판의 북서쪽은 호주판과 그리고 남동쪽은 북미를 구성하는 로렌시아판과 접하게 되었다. 이후 로디니아 분열시 양쯔판의 북쪽 경계, 과거 양쯔판과 로렌시아판의 충돌대 그리고 현재 남중국판의 남쪽 경계가 된 로렌시아 내부에서 대륙 분열이 일어났다(Li and Powell, 2001). 과거 양쯔판과 로렌시아판 충돌대에서 일어나 분열은 해양으로 진화하지 못하고 중단되어 난후아 열곡대를 형성한 반면 양쯔판 북쪽 경계와 로렌시아판 내부의 분열은 바다로 확장되어 현재의 남중국판의 형태가 만들어졌다(그림 16d).

트라이아스기 에클로자이트가 발견된 홍성 지역에서 두 번의 후기 원생대 화성작용이 인지된다. 홍성 지역은 덕정리 화강편마암층과 월현리층으로 구성되어있으며 이들 층내에는 염기성 및 초염기성 암체가 나타난다. 덕정리 화강편마암층은 850 Ma와 830 Ma 사이에 화산호 환경에서 만들어진 산성 화성암이며 덕정리 화강편마암층 서측부는 남중국판과 북중국판의 충돌에 의해 약 230 Ma에 변성을 받았다(Kim et al., 2008). 하지만 동측부에서는 약 420 Ma의 변성연령이 인지된다(Kim et al., 2006a). 이 암체내에 나타나는 대표적인 변성염기성암인 비봉 변성염기성암과 백동지역에서 초염기성암을 관입하고 있는 백동 변성염기성암은 890-860 Ma 경에 역시 화산호 환경에서 만들어졌다(Guo et al., 2004; Oh et al., 2009). 그 이후 비봉 변성염기성암체는 앞에서 언급되었듯이 북중국판과 남중국판의 충돌시기인 트라이아스기에 에클로자이트 변성상의 변성작용을 받았다. 이에 반해 백동지역에서 초염기성암을 관입하며 나타나는 변성염기성암은 고압 백립암상의 변성작용을 받았으며 변성시기가 확실치는 않으나 390 Ma일 가능성이 높다(Oh et al., 2012). 백동지역에서 초염기성암 주변

Fig. 17. Proposed Neoproterozoic tectonic scenario for the Hongseong area, interpreted from the Baekdong ultramafic rocks (from Oh et al., 2012). (a) The nascent back-arc basin stage formed by subduction-zone rollback. (b) The mature arc stage with high input of volatiles from the subducted slab and sediments. (c, d) The transitional stage from island arc to continental arc due to compression.

화강암질 편마암내에 나타나는 변성염기성암은 406 Ma로 중압에 해당하는 변성작용을 받았으며 원암의 형성시기가 분명치 않으나 변성시기와 거의 유사한 406 Ma일 가능성이 있다(Kim et al., 2009). 위 자료들은 홍성지역이 890 Ma와 830 Ma 사이에 섭입이 일어나는 화산호 환경이었음을 지시하며 일부는 트라이아스기 대륙 충돌 시 일부는 고생대 중기에 변성을 받았음을 지시한다.

덕정리 화강편암내 백동, 비봉 지역의 초염기성암은 사문암화 작용을 많이 받았으나 초기 광물군이 부분적으로 보존되어 나타난다. 그리고 초염기성암내 스피넬은 사문암화 혹은 변성작용을 받은 이후에도 초염기성암이 만들어진 초기 지구조 환경을 잘 보존하고 있다고 알려져있다(Ozawa, 1983; Karipi et al.,

2007). 스피넬과 잔류 광물군을 이용한 백동, 비봉 초염기성암에 대한 연구 결과 홍성지역에는 890 Ma에서 870 Ma 사이에 섭입대가 해양쪽으로 밀려나가면서 배호분지가 형성되는 suprasubduction zone이 발달하였다(그림 18a, b, Oh et al., 2012). 이 시기의 초기에는 배호분지 하부의 맨틀이 10%의 부분용융을 받았으며 후기에는 20%의 부분용융작용을 받았다. 한편 이 지역에 나타나는 약 850 Ma에서 830 Ma 사이에 형성된 섭입대 기원의 화강암질 편마암은 이 시기에 홍성 지역에 압축력이 가해져서 배호 분지가 닫히면서 맨틀의 일부가 대륙지각 위로 obduction하였고 이로 인해 홍성 지역이 해양 화산호(island arc) 환경에서 대륙 화산호(continental arc)로 전환되었음을 지시한다(그림 18c, d). 그리고 그 이후 대륙 충돌이 일어나면서 홍성지역이 로디니아 초대륙의 일부가 되었을 것으로 예상된다.

월현리 층은 변성화산암, 편마암, 변성니질암, 대리암, 규암등으로 이루어져 있으며 이들로부터 얻어진 쇄설성 저어콘은 이들이 원생대 말 이후 트라이아스기 사이의 다양한 연령을 보여준다(Kim et al., 2011). Kim et al. (2011)은 월현리층을 고생대 퇴적층이라고 해석하였으나 일부 층은 원생대 충일 가능성이 높아 좀 더 자세한 연구가 필요하다. 월현리층 안에 나타나는 광천 지역의 변성염기성암은 760 Ma

시기에 대륙 열곡대에서 만들어졌다(Oh et al., 2009). 이 염기성암들은 산성암들과 층상으로 교호되어 나타나며 대륙 열곡 형성시 일어난 쌍모식(bimodal) 화산작용을 지시한다. 이는 광천을 포함한 홍성지역이 760 Ma경에는 대륙 열곡대 환경이었음을 지시한다. 광천 변성염기성암은 원생대말 관입 후 406 Ma에 에클로자이트 변성상에 근접하는 고압 백립암상의 변성작용을 받았다. 그리고 후퇴변성작용시 저압 백립암상과 각섬암상의 변성작용을 차례로 받았다(Kim et al., 2009).

이러한 연구 결과는 홍성지역의 원생대말 지구조 진화가 남중국의 북쪽 경계의 지구조 진화와 잘 일치하며 로디니아 형성 이전인 890 Ma에서 830 Ma 사이에 화산호 환경의 화성작용을 받고 그 이후 로디니아 초대륙의 일부가 되었으며 그 후 760 Ma 경 로디니아 분열시 열곡 환경에서의 화성작용을 받았음을 지시한다. 홍성 이외에도 홍성-양평-오대산 충돌대 주변에서 원생대 연령이 보고되고 있다. 춘천지역 대리암으로부터 794 Ma의 연령이 그리고 홍천 지역에서 carbonatite에서 역시 850 Ma의 연령이 보고되었다(박계현과 정창식, 1993; 박중권과 이한영, 2003). 대륙 충돌대인 친링-다비-수루 충돌대를 살펴보면 앞에 언급되었듯이 원생대말 암석이 주로 남중국의 북쪽 경계면에 나타나지만 북중국의 남쪽 경계면을 따라서도 로디니아 형성과 분열에 관련된 원생대말 화성 및 퇴적 작용이 보고되고 있으며 다비-수루 충돌대에 나타나는 대부분 에클로자이트의 원암 연령은 800-700 Ma에 해당한다(Ames et al., 1996; Ling et al., 2003; Li et al., 2006b; Ye et al., 2007; Dong et al., 2011). 따라서 홍성-양평-오대산 충돌경계와 인접부에 나타나는 원생대 말의 화성 및 퇴적 연령은 홍성-양평-오대산을 연하는 충돌대가 친링-다비-수루 충돌대와 대비됨을 보여주는 또 다른 증거이다.

옥천변성대 북동부에 나타나는 계명산층과 문주리층에도 쌍모식 화산작용이 인지되며 그 생성시기가 760 Ma로 이 시기에 옥천변성대에서 대륙 열곡이 일어나며 계명산과 문주리층이 형성되었음을 지시한다(Lee et al., 1998; Kim et al., 2006b). 후기 원생대 암석이 계명산과 문주리층을 제외하고는 옥천변성대 내외에서 보고되지 않고 있지만 최근 SHRIMP U/Pb 저어콘 연령측정을 통해 옥천변성대 변성퇴적암과 경상계 퇴적암에서 많은 원생대 저어콘이 보고되고 있으며 이는 옥천변성대와 그 주변에 후기 원생대

Fig. 18. Simplified paleogeographic map of eastern Gondwana land with probable range of similar detritus (from McKenzie et al. 2011). Detrital belt extension onto South China block (SCB) and Australia is inferred from suggested geometry of margin. NCB-North China block; OR-Ordos region.

시기에 활발한 화성 활동과 그에 관련된 지구조 운동이 있었음을 지시한다(이태호외, 2010; Cho et al., 2010a; 박계현외 2011). 앞에서 언급되었듯이 남중국판내 양쯔판과 커테시아판의 경계에서 760 Ma 대륙 열곡작용이 일어나 난후아 열곡대가 형성되었다(Kim et al., 2006b; Oh and Kusky, 2007; Oh et al., 2009). 난후아 열곡대 위치는 로디니아 초대륙 형성시 양쯔판과 커테시아판이 충돌한 곳으로 두 판 충돌시 충돌 부위에 양쯔판이나 커테시아판 보다 젊은 암석이 형성되었다. 이후 로디니아 초대륙 분열시 충돌 지역에서 열곡 작용이 일어났으며 충돌시 만들어진 젊은 암석들이 열곡 작용과 관련된 마그마의 기원암이 되었다. 따라서 난후아 열곡대내 원생대 화성암은 양쯔판이나 커테시아판에 동시기에 형성된 화성암보다 젊은 모델 연령(T_{DM})을 보여준다. 옥천변성대 내 나타나는 열곡시 만들어진 원생대 화성암은 난후아 지역의 열곡 관련 원생대 화성암과 유사한 모델 연령을 보여줄 뿐 아니라 유사한 지화학적 특성을 보여준다(Kim et al., 2006b). 이러한 자료는 옥천변성대가 남중국의 난후아 열곡대의 연장선일 가능성을 제시한다.

이와 같은 연구 결과 다음과 같은 한-중 대비가 가능하다. 홍성-양평-오대산 충돌대 이남과 옥천변성대 사이 지역은 양쯔판에 해당될 수 있으며 옥천변성대 이남 지역은 커테시아판에 해당될 수 있다(그림 1). 하지만 홍성-양평-오대산 지역을 연하는 지역과 옥천변성대 주변에서 일어난 원생대 후기 지구조 운동에 대한 연구가 매우 미약한 실정이다. 따라서 후기 원생대의 한반도 지구조 운동을 연구하기 위해서는 홍성-양평-오대산 지역과 옥천변성대 주변에서 후기 원생대 시기의 변성 및 화성작용을 찾아 연구하는 것이 필요하다.

고생대 중기 대결충과 지구조 운동

평안분지와 태백산 분지는 캄브리아기-오르도비스기 퇴적층과 그 위를 부정합으로 덮고 있는 석탄기-페름기 퇴적층으로 구성되어 있다. 이들 분지에서 인지되는 퇴적암 형성이 없는 실루리아기-하부 석탄기 대결충은 북중국판의 대부분 지역에서 인지된다. 태백산 분지내 캄브리아기-오르도비스기 퇴적암에 나타나는 삼엽충과 코노돈트는 북중국판에 나타나는 동일 시기의 퇴적층내 삼엽충과 코노돈트와 잘 대비된다(Jeong and Lee, 2000, Choi, 1994, 1998). 최근에 McKenzie et al. (2011)에 의해 히말라야와 북중국판

에만 나타나는 삼엽충 종류가 태백산 분지에 발견되었다. 이러한 실루리아기-하부 석탄기 대결충과 화석 정보에 근거하여 태백산 분지가 북중국판에 해당한다는 의견이 제시되고 있다. 하지만 앞에 언급된 최근 연구에 의해 경기육괴내에 남중국판과 북중국판의 충돌대인 홍성-양평-오대산 충돌대가 밝혀졌으며 이는 태백산 분지를 포함한 홍성-양평-오대산 충돌대 남부는 남중국에 해당됨을 지시한다. 따라서 대륙충돌대를 더 명확히 규명하기 위해서는 이러한 실루리아기-하부 석탄기 대결충 문제와 한중 삼엽충 및 코노돈트 대비에 대한 새로운 해석이 필요하다.

최근 홍성지역 월현리층과 인접한 태안층군에서 많은 원생대와 고생대 중기 이후의 저어콘이 발견되었으며 이를 근거로 Kim S.W. et al. (2011)은 월현리층과 태안층군을 섭입대 주변에서 고생대 초기, 중기, 후기에 걸쳐 만들어진 퇴적암으로 해석하였고 Choi P.Y. et al. (2008) 역시 태안층군을 402 Ma 이후에 만들어진 상부 고생대 퇴적암으로 해석하였다. 이 뿐 아니라 오대산의 구룡산층에서도 고생대 중기의 쇄설성 저어콘이 확인됨으로서 구룡층이 데본기 중기 이후의 퇴적층일 가능성이 제시되었다(조등룡, 2010). 이러한 고생대 중기 쇄설성 저어콘은 옥천변성대에서도 확인되고 있으며 대동층군에 속하는 남포층과 반송층 그리고 경상분지에서도 광범위하게 나타나고 있다(Jeon et al., 2007; 이태호외, 2010; Cho et al., 2010a, 2010b; 박계현외 2011). 또한 Kim et al. (2009)은 홍성지역 변성염기성암으로 부터 고생대 중기의 강력한 변성작용을 확인하였다. 홍성의 백동 지역에 나타나는 변성염기성암은 13-15 kb, 670-680°C의 변성작용을 390 Ma경에 받았으며 홍성의 광천 지역 변성염기성암은 406 Ma에 고압 백립암상(13-19 kb, 880-1070°C)의 변성작용을 받았다. 이러한 정보들은 태백산 지역에서 대결충이 형성되던 고생대 중기에 경기육괴를 중심으로 한 한반도에 화성 및 변성작용 그리고 퇴적작용이 활발히 일어났음을 지시한다. 이러한 고생대 중기의 화성, 변성, 퇴적 작용은 한반도 남부가 북중국판에 속하지 않음을 지시한다.

북중국판의 고생대 초 퇴적암에서는 얕은 바다에서 형성된 코노돈트가 그리고 남중국판의 고생대 초 퇴적암에서는 깊은 바다에서 형성된 코노돈트가 주로 나타나지만 국지적으로는 북중국판에서도 깊은 바다에서 형성된 코노돈트가 나타나며 남중국판에서도 역시 얕은 바다에서 형성된 코노돈트가 나타난다(Zhi-

hao et al., 2007). 특히 남중국판에서 얇은 바다에서 형성된 코노돈트는 한반도 쪽에 가까운 남중국판의 동측인 장수, 장시 지역에서 나타난다. 태백산 분지의 크기는 이러한 장수, 장시 지역보다 작다. 따라서 이제까지는 태백산 분지가 얇은 바다에서 형성된 코노돈트의 존재 때문에 북중국판에 대비되어왔으나 태백산 분지가 남중국판의 장수, 장시와 같은 남중국판의 국지 지역에 해당할 가능성도 있어 이에 대한 연구가 필요하다.

남중국판 남서측에서는 원생대말 이후 고생대 내내 부정합이 발견되지 않는데 반해 남동측에서는 태백산 분지에서 발견되는 대결층에 비해 시간이 짧은 것은 하나 데본기의 대결층이 여러 곳에서 나타나며 양쯔판에 속하는 남중국판의 북부 일부 지역에서는 태백산 분지의 대결층과 거의 유사한 시간 폭의 대결층이 나타나고 있다(Chinese Academy of Geological Sciences, 2001). 이는 남중국판의 서측에서 동측을 지나 한반도 방향으로 점차적으로 대결층이 넓어졌음을 가능성을 제시하며 남중국판의 동부와 한반도에 얇은 바다의 코노돈트가 나타나는 사실과 함께 남중국판이 동측에서 서쪽으로 기울어져 있어 서측에는 깊은 바다 환경이 그리고 동측에는 얇은 바다 환경이 형성되어 있었을 가능성이 크다. 그리고 태백산 지역은 이러한 서측으로 기울어진 남중국판의 가장 동측부에 위치하였고 이 지역에 남중국판에서 가장 얇은 바다가 존재하였을 가능성이 있다.

그리고 Veevers (2000), Jiang et al. (2003)은 캄브리아기 초기에 남중국판이 북중국판과 함께 인도 대륙과 접하여 있었으며 세 지역은 얇은 바다를 공유하고 있었다고 보고하였다(그림 18). 즉 북중국판과 히말라야에서 특징적으로 나타나는 삼엽충(*Kaolishania granulosa*, *Taipaikia globra*, and *Linsgyuanaspis sangae*)이 남중국판에서는 아직까지 보고되지 않았지만, 앞으로 나타날 가능성이 있음을 지시한다. 즉 삼엽충과 코노돈트, 대결층은 태백산 분지 혹은 한반도 모두가 북중국판에 속했다는 절대적 증거가 되지 못한다. 이에 반해 경기육괴내의 대륙충돌대의 증거는 한반도의 북부만이 북중국판에 속한다는 절대적 증거가 된다. 이제까지는 태백산 분지는 거의 북중국판과 비교되었고 남중국판의 거의 비교되지 않았다. 따라서 앞에 제시된 가능성을 확인하기 위하여 앞으로는 태백산 지역과 남중국판 간의 대비 연구가 수행되어야 한다.

결론

1. 남중국판과 북중국판의 충돌대인 트라이아스기 친링-다비-수루 충돌대가 트라이아스기의 에클로자이트가 발견된 한반도의 홍성 지역으로 연결된 후 양평 지역을 거쳐 오대산 지역으로 연결된다. 이 충돌대는 일본 서남부의 고생대 섭입 복합체와 북한의 고생대 섭입 복합체인 연변대로 연결될 가능성이 높다. 즉 경기육괴는 홍성-양평-오대산 충돌대를 경계로 나뉘어져야하며 충돌대 북부는 북중국판에 남부는 남중국판에 해당된다.

2. 남중국판과 북중국판의 충돌은 페름기에 한반도로부터 시작하여 중국쪽으로 진행되었으며 트라이아스기 말에 충돌이 완료되었다. 이때 경기육괴 내 트라이아스의 에클로자이트가 홍성지역에, 그리고 230 Ma의 충돌 후 화성암이 경기육괴 북부 지역에 광역적으로 형성되었다. 또한 이 시기에 홍성-양평-오대산 충돌대를 따라 245-230 Ma의 백립암상의 변성 작용이 일어났다.

3. 다비-수루-홍성-양평-오대산 충돌대를 따라 동측에서 서측으로 변성조건이 체계적으로 변화한다. 가장 동측에 해당하는 오대산 지역에서는 초고온 변성 작용이 한반도의 서측에 해당하는 홍성지역에서는 고압변성작용이 그리고 중국의 수루, 다비 지역에서는 초고압 변성작용이 일어났다. 충돌대를 따라 나타나는 체계적인 변성조건의 변화는 충돌 전 섭입된 해양 지각의 양이 동측에서 서측으로 증가하여 섭입하던 대륙판과 해양판의 분리되는 깊이가 동측에서 서측으로 점차 증가하였기 때문인 것으로 생각된다.

4. 한반도 남부 영남육괴와 남중국판 남부에 광범위하게 나타나는 페름기-트라이아스기 섭입관련 화성암은 북중국판과 남중국판의 페름-트라이아스기 충돌이 남중국판 남쪽 경계부에서의 섭입작용을 시작시켰을 가능성이 있음을 지시한다.

5. 홍성-양평-오대산 충돌대를 경계로 하여 경기육괴 북부와 남부는 모두 2100-1800 Ma 경에 존재했던 콜롬비아 초대륙 형성과 관련된 대륙충돌이나 섭입 작용에 의해 1870-1840 Ma 시기에 화성 및 변성 작용을 강하게 받았을 가능성이 높다.

6. 경기육괴 남부와 영남육괴는 각각 남중국판의 북부의 양쯔판과 남부의 커테시아판에 그리고 옥천변성대는 양쯔판과 커테시아판 사이에 있는 난후아 열곡대에 대비될 가능성이 높다. 그럴 경우 원생대말에

존재했던 로디니아 초대륙 형성시 경기육과 남부와 영남육괴가 830 Ma 경에 각각 양쯔판과 커테시아판의 일부로서 서로 충돌하면서 로디니아 초대륙의 일부가 되었다가 로디니아 초대륙 분열시기인 760 Ma 경에 로디니아 초대륙으로부터 함께 분리되어 나왔을 것이다. 이 때 두 판의 과거 충돌대가 인장력을 받아 중국의 난후아 열곡대와 남한의 옥천변성대가 형성되었을 가능성이 있다.

7. 최근 경기육과 변성퇴적암, 옥천변성대, 대동충군, 경상충군에서 광역적으로 발견되는 실루리아기 이후 고생대 중기의 쇄설성 저어콘은 태안, 홍성, 오대산 지역에서 테본기 혹은 그 이후의 고생대 퇴적암이 형성되었을 가능성을 지시한다. 이는 홍성의 백동 및 광천 지역에서 확인된 테본기의 고 변성작용과 함께 폐름기-트라이아스기 대륙 충돌 이전인 고생대 중기에도 경기육괴에 활발한 지구조 운동이 일어났음을 지시한다.

사 사

이 연구는 한국연구재단의 핵심연구사업 (2010-00237347)과 학술진흥재단 (KRF-2008-313-C00915)의 지원으로 수행되었다. 본 논문의 심사과정에서 유익한 조언을 지적을 해주신 부경대학교의 송용선 교수님과 익명의 심사위원님께 감사를 드립니다.

참고문헌

- 고희재, 이병주, 이승렬, 2004, 한국지질도(1:50,000), 고양도폭 및 설명서, 한국지질자원연구원, 71p.
- 김용준, 조동룡, 이창신, 1998, 한반도 남서부 남원 일대에 분포하는 A형 대강 화강암의 암석학, 지화학 및 지구조적 의미. 자원환경지질학회지, 31, 399-413.
- 김종선, 조형성, 안성호, 송철우, 손문, 김인수, 2010, 한반도 남부 하동-산청 화강암과 암맥군의 연령과 지구조적 의미. 한국광물학회 공동학술 발표회 논문집, 29.
- 김태성, 2011, 경기육과 동부 오대산 일대의 화성작용 및 변성작용과 관련된 한반도내 트라이아스기 대륙충돌. 전북대학교 석사학위논문, 154p.
- 김태성, 오창환, 김정민, 2011, 오대산 지역에 나타나는 맨저라이트와 반려암의 특징과 트라이아스기 한반도 지체구조 해석에 대한 의미. 암석학회지, 20, 77-78.
- 기원서, 김현철, 2011, 한국지질도(1:50,000), 설악산도폭 및 설명서, 한국지질자원연구원, 30p.
- 대한지질학회, 1998, 한국의 지질, 시그마프레스, 802p.
- 박계현, 정창식, 1993, 선캄브리아기 경기육과 중 대륙암의

- 연대측정에 대한 예비연구. 암석학회지, 2, 130-138.
- 박계현, 이태호, 이기욱, 2011, 옥천변성대 대항산규암층 쇄설성 저어콘의 SHRIMP U-Pb 연령. 지질학회지, 47, 423-431.
- 박영록, 2009, 춘천 후동리 일대에 분포하는 중기 트라이아스기 관입암의 부화원지화학 및 Sr-Nd 동위원소 특성: 부화원 맨틀로부터 기원. 암석학회지, 18, 255-267.
- 박중권, 이한영, 2003, 홍천 철-희토류 광상 모암의 암석화학. 암석학회지, 12, 135-153.
- 오창환, 전은영, 박배영, 안건상, 이정후, 2000, 소백산 육괴 서남부인 승주-순천 일대의 화강암질 편마암과 반상변정질 편마암의 변성진화과정. 암석학회지, 9, 121-141.
- 오창환, 김정민, 박영석, 김성원, 2006, 경기육과 고원생대 암류들에 대한 SHRIMP U-Pb 저어콘 연대와 그 의미. 지질학회지, 4, 587-606.
- 이병춘, 오창환, Yengkhom K.S., 이기욱, 2011, 경기육과 의암충군에 나타나는 화성기원 변성암의 SHRIMP 연령 및 지구조적 의미. 추계지질과학연합 학술 발표회 초록집, 1.
- 이승열, 2010, 경기육과 중앙부 양평일대의 대륙충돌과 관련된 화성작용과 변성작용. 전북대학교 박사 학위논문, 221p.
- 이태호, 박계현, 양윤석, 조경오, 김명정, 2010, 경상분지 하부지층들의 SHRIMP U-Pb 저어콘 연령분포. 한국암석학회, 한국광물학회 공동학술 발표회 논문집, 14.
- 이호선, 2010, 중부 영남육괴에서의 삼첩기 초기부터 류라기 초기까지의 화성활동과 변성사건 및 지구조적 의미. 부경대학교 박사 학위논문, 267p.
- 임순복, 전희영, 김유봉, 김복철, 송교영, 2006, 서북옥천대 진산-복수 지역 변성퇴적암층의 층서와 지질시대. 지질학회지, 42, 149-174.
- 임순복, 전희영, 김유봉, 김복철, 조동룡, 2005, 서북옥천대 비봉-연무 지역 변성퇴적암층의 지질시대, 층서 및 지질구조. 41, 335-368.
- 조동룡, 2010, 경기육과 구룡충군 SHRIMP U-Pb 저어콘 연대: 임진강대 연천충군과의 대비와 지체구조적 의미. 한국암석학회 한국광물학회 공동학술발표회 논문집, 33.
- 조동룡과 김용준, 2003, 경기육과 포천 지역의 흑운모편마암과 우백질 화강암맥에 대한 SHRIMP U-Pb 저어콘 연대측정: 광역변성작용 연령 및 퇴적시기 제한. 대한지질학회 제58차 정기총회 및 학술발표회 초록집, 76.
- 정연중, 이기욱, Kamo, S.L., 정창식, 2008, 경기육과 동부 맨저라이트에 대한 저어콘 단일 입자 열이온화질량분석법 연대측정. 지질학회지, 44, 425-433.
- Ames, L., Zhou, G. and Xiong, B., 1996, Geochronology and isotopic character of ultrahigh-pressure metamorphism with implication for collision of the Sino-Korean and Yangtze cratons, central China. Tectonics 15, 472-489.
- Arakawa, Y., Saito, Y. and Amakawa, H., 2000, Crustal development of the Hida belt, Japan: evidence from Nd-Sr isotopic and chemical characteristics of igneous and metamorphic rocks. Tectonophysics, 328, 183-204.

- Arakawa, Y., Kouta, T. and Kanda, Y., 2001, Geochemical characteristics of amphibolites in the Oki metamorphic rocks, Oki-Dogo Island, southwestern Japan: mixed occurrence of amphibolites with different geochemical affinity. *J. Mineral. Petrol. Sci.* 96, 175-187.
- Chen, J.F., Xie, A., Li, H.M., Zhang, X.D., Zhou, T.X., Park, Y.S., Ahn, K.S., Chen, D.G. and Zhang, X., 2003. U-Pb zircon ages for a collision-related K-rich complex at Shidao in the Sulu ultrahigh pressure terrane, China. *Geochemical Journal* 37, 35-46.
- Chinese Academy of Geological Sciences, 2001, Geological Atlas of China. Geological Publishing House, Beijing, 348.
- Cho, D.L., Lee S.R. and Armstrong, R., 2008, 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*, 5, 191-200.
- Cho, K.H., Takagi H. and Suzuki, K., 1999, CHIME monzonite age of granitic rocks in the Sunchang shear zone, Korea: timing of dextral ductile shear: *Geosciences Journal*, 3, 1-15.
- Cho, M., Kim, Y. and Ahn, J., 2007, Metamorphic evolution of the Imjingang belt, Korea: implications for Permo-Triassic collisional orogeny. *International Geology Review*, 49, 30-51.
- Cho, M., Kim, H., Lee, Y., Horie, K. and Hidaka, H., 2008, The oldest (ca. 2.51 Ga) rock in South Korea: U-Pb zircon age of a tonalitic migmatite, Daeijak Island, western Gyeonggi massif. *Geosciences Journal*, 12, 1-6.
- Cho, M., Cheong, W. and Kim, J., 2010a, A geochronologic discontinuity in central Ogcheon Metamorphic Belt, Korea: Evidence from detrital zircon ages in metasedimentary rocks. *Mineralogical Society of Korea and Petrological Society of Korea, annual joint meeting abstract volume*, 31.
- Cho, M., Na, J. and Yi, K., 2010b, SHRIMP U-Pb ages of detrital zircons in metasandstones of the Taeon Formation, western Gyeonggi massif, Korea: Tectonic implications. *Geosciences Journal*, 14, 99-109.
- Choi, D.K., 1994, Late Cambrian trilobite faunal successions of the Joseon Supergroup in the Yeongweol area and their paleobiogeographic implications. In: *IGCP 321 - Gondwana Dispersion and Asian Accretion. Fourth International Symposium and Field Excursion, Abstracts with Programs*, Seoul, 18.
- Choi, D.K., 1998, Ordovician trilobite faunal successions in the Taebaegsan region, Korea. In: *IGCP 410 - The Great Ordovician Biodiversification Event. Abstracts with programs*, Seoul National University, Korea, 10-14.
- Choi, P.Y., Rhee, C.W., Lim, S.-B. and So, Y., 2008, Subdivision of the Upper Paleozoic Taeon Formation in the Anmyeondo-Boryeong area, west Korea: a preliminary approach to the sedimentary organization and structural features. *Geosciences Journal*, 12, 4, 373-384.
- Choi, S.G., Rajesh, V.J., Seo, J., Park, J.W., Oh, C.W., Park, S.J. and Kim, S.W., 2008, Petrology, geochronology and tectonic implications of Mesozoic high Ba-Sr granites in the Haemi area, Hongseong Belt, South Korea. *Island Arc*, 18, 266-281.
- Dong, Y., Genser, J., Neubauer, F., Zhang, G., Liu, X., Yang, Z. and Heberer, B., 2011, U-Pb and $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ geochronological constraints on the exhumation history of the North Qinling terrane, China. *Gondwana Research*, 19, 881-893.
- Dong, Y., Zhang, G., Neubauer, F., Liu, X., Genser, J. and Hauenberger, C., 2011, Tectonics evolution of the Qinling orogen, China: Review and synthesis. *Journal of Asian Earth Sciences*, 41, 23-237.
- Ernst, W.G. and Liou, J.G., 1995, Contrasting plate-tectonic styles of the Qinling-Dabie-Sulu and Franciscan metamorphic belt. *Geology*, 23, 353-356.
- Ernst, W.G., Tsujimori, T., Zhang R. and Liou, J.G., 2007, Subduction-Zone Metamorphism and Tectonic Exhumation Along the East Asian Continental Margin. *Annu. Rev. Earth Planet. Sci.*, 35, 73-100.
- Faure, M., Monie, 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.
- 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, Chonju*, 11-12.
- Hacker, B.R., Ratschbacher, L. and Liou, J.G., 2004, Subduction, collision and exhumation in the ultrahigh-pressure Qinling-Dabie orogen. In *Aspects of the Tectonic Evolution of China*, (ed. J. Malpas, C.J.N. Fletcher, J.R. Ali and J.C. Aitchison), The geological society publishing house, Brassmill Lane, 157-175.
- Hao, T.-Y., Xu, Y., Suh, M., Liu, J.-H., Zhang, L.-L. and Dai, M.-G., 2007, East Marginal Fault of the Yellow Sea: a part of the conjunction zone between Sino-Korea and Yangtze Blocks? *Geological Society of London, Special Publications*, 280, 281-291.
- Ilbeyli, N., Pearce, J.A., Thirlwall, M.F. and Mitchell, J.G., 2004, Petrogenesis of collision-related plutonics in Central Anatolia, Turkey. *Lithos*, 72, 163-182.
- 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.

- Isozaki, Y., 1997. Contrasting two types of orogen in Permo-Triassic Japan: accretionary versus collisional. *Island Arc* 6, 2-24.
- Janasi, V.A., 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.
- Jeon, H., Cho, M., Kim, H., Horie, K. and Hidaka, H., 2007. Early Archean to Middle Jurassic Evolution of the Korean Peninsula and Its Correlation with Chinese Cratons: SHRIMP U-Pb Zircon Age Constraints. *The Journal of Geology*, 115, 525-539.
- Jeong, H. and Lee, Y.I., 2000. Late Cambrian biogeography: conodont bioprovinces from Korea. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 162, 119-136.
- Jijang, G., Sohl, L.E. and Christie-Blick, N., 2003. Neoproterozoic stratigraphic comparison of the Lesser Himalaya (India) and Yangtze Block (South China): Paleogeographic implications. *Geology*, 917-920.
- Karipi, S., Tsikouras, B., Hatzipanagiotou, K. and Grammatikopoulos, T.A., 2007. Petrogenetic significance of spinel-group minerals from the ultramafic rocks of the Iti and Kallidromon ophiolites (Central Greece). *Lithos*, 99, 136-149.
- Kim, H.S. and Jung, W.S., 2010. The use of garnet porphyroblasts to resolve the metamorphic pressure-temperature-deformation (P-T-d) path: An example from the Imjingang belts, South Korea. *Geosciences Journal*, 14, 111-126.
- Kim, N., Cheong, C.S., Park, K.H., Kim, J. and Song, Y.S., 2011. Crustal evolution of northeastern Yeongnam Massif, Korea, revealed by SHRIMP U-Pb zircon geochronology and geochemistry. *Gondwana Research*, doi:10.1016/j.gr.2011.10.003
- Kim, S.W., Oh, C.W., Hyodo, H., Itaya, T. and Liou, J.G., 2005. Metamorphic Evolution of the Southwest Okcheon Metamorphic Belt in South Korea and Its Regional Tectonic Implications. *International Geology Review*, 47, 844-870.
- Kim, S.W., Oh, C.W., Ryu, I.C., Williams, I.S., Sajeew, K., Santosh, M. and Rajesh, V.J., 2006b. Neoproterozoic Bimodal Volcanism in the Okcheon Belt, South Korea, and Its Comparison with the Nanhua Rift, South China: Implications for Rifting in Rodinia. *The Journal of Geology*, 114, 717-733.
- Kim, S.W., Oh, C.W., Williams, I.S., Rubatto, D., Ryu, I.C., Rajesh, V.J., Kim, J.B., Guo, J., and Zhai, M., 2006a. 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, S.W., Kwon, S., Santosh, M., Williams, I.S. and Yi, K., 2011. A Paleozoic subduction complex in Korea: SHRIMP zircon U-Pb ages and tectonic implications. *Gondwana Research*, 20, 890-903.
- Kim, T., Lee, S.Y. and Oh, C.W., 2009. The subduction and collision related middle Paleozoic metamorphism events in the SW of Gyeonggi Massif in South Korea and its meaning to the tectonics in Northeast Asia. *AGU Fall meeting abstract*.
- Kim, Y. and Cho, M., 2008. Two-stage growth of porphyroblastic biotite and garnet in the Barrovian metapelites of the Imjingang belt, central Korea. *J. metamorphic Geol.*, 26, 385-399.
- Kobayashi, T., 1930. The significance of the unconformity at the base of the Daido(Daedong) Formation. *Journal of Geological Society of Japan*, 37.
- Kwon, S., Sajeew, K., Mitra, G., Park, Y., Kim, S.W. and Ryu, I.C., 2009. Evidence of Permo Triassic collision in Far East Asia: the Korean collision orogen. *Earth and Planetary Science Letter*, 279, 340-349.
- 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., Yi, K. and Stern, R.A., 2000. Early Proterozoic Granulites in Central Korea: Tectonic Correlation with Chinese Cratons. *Journal of Geology*, 108, 729-738.
- Lee, S.R., Lee, B.J., Cho, D.L., Kee, W.S., Koh, H.J., Kim, B.C., Song, K.Y., Hang, J.H. and Choi, B.Y., 2003. SHRIMP U-Pb zircon age from granitic rocks in Jeonju shear zone: Implications for the age of the Honam shear zone. *Mineralogical Society of Korea and Petrological Society of Korea, annual joint meeting abstract volume*, 55.
- Lee, S.Y. and Oh, C.W., 2009. Triassic post collisional igneous activity and granulite facies metamorphic event in the Yangpyeong area, South Korea and its meaning to the tectonics of Northeast Asia. *Geological Society of Korea fall meeting Abstract volume*, 227.
- Lee, Y.I. and Lee, J.I., 2003. Paleozoic sedimentation and tectonics in Korea: A review. *Island Arc*, 12, 162-179.
- Li, X., Zhao, Z., Gui, X., Yu, J., 1992. Sm-Nd and zircon U-Pb isotopic constraints on the age of formation of the Precambrian crust in southeastern China. *Chinese Journal of Geochemistry* 11, 111-120.
- Li, X.H., Li, Z.X., Li, W.X. and Wang, Y., 2006a. Initiation

- of the Indosinian Orogeny in South China: Evidence for a Permian Magmatic Arc on Hainan Island. *The Journal of Geology*, 114, 341-353.
- Li, X.H., Li, Z.X., Sinclair, J.A., Li, W.X. and Carter, G., 2006b, Revisiting the "Yanbian Terrane": Implications for Neoproterozoic tectonic evolution of the western Yangtze Block, South China. *Precambrian Research*, 151, 14-30.
- Li, Z.X., and Powell, C.M.A., 2001, An outline of the palaeogeographic evolution of the Australasian region since the beginning of the Neoproterozoic. *Earth Science Reviews*, 53, 237-277.
- Li, Z.X., Zhang, L. and Powell, C.M.A., 1995, South China in Rodinia: part of the missing link between Australia-East Antarctica and Laurentia? *Geology* 23, 407-410.
- Ling, W., Gao, S., Zhang, B., Li, H., Liu, Y. and Cheng, J., 2003, Neoproterozoic tectonic evolution of the northwestern Yangtze craton, South China: implications for amalgamation and break-up of the Rodinia Supercontinent. *Precambrian Research*, 122, 111-140.
- Liou, J.G., Zhang, R.Y., Wang, X., Eide, E.A., Ernst, W.G., and Maruyama, S., 1996, Metamorphism and tectonics of high-pressure and ultra-high-pressure belts in the Dabie-Sulu region, China. In *The tectonic evolution of Asia* (ed. A. Yin, M. Harrison) Cambridge University Press, New York, 300-344.
- Massonne, H. and O'Brien, P.J., 2003. The Bohemian Massif and the NW Himalaya. In *Ultrahigh Pressure Metamorphism* (ed. D.A. Carswell, R. Compagnoni), *EMU Notes in Mineralogy*, Vol. 5. European Mineralogical Union, Budapest, 145-187.
- McKenzie, N.R., Hughes, N.C., Myrow, P.M., Choi, D.K. and Park, T.Y., 2011, Trilobites and zircons link north China with the eastern Himalaya during the Cambrian. *Geology*, 591-594.
- Metcalf, I., 1996, Gondwanaland dispersion, Asian accretion and evolution of eastern Tethys. *Australian Journal of Earth Sciences*, 43, 605-623.
- Metcalf, I., 2006, Palaeozoic and Mesozoic tectonic evolution and palaeogeography of East Asian crustal fragment: The Korean Peninsula in context. *Gondwana Research*, 9, 24-46.
- Nyman, M.W., Karlstrom, K.E., Kirby, E. and Graubard, C.M., 1994, Mesoproterozoic contractional orogeny in western North America: evidence from ca. 1.4 Ga plutons. *Geology*, 22, 901-904.
- 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., 2009, Systematic changes in metamorphic styles along the Dabie-Hongseong and Himalayan collision belts, and their tectonic implication. *Asian Journal of Earth Science*, 39, 635-644.
- 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. and Kusky, T.M., 2007, The Late Permian to Triassic Hongseong-Odesan collision belt in South Korea, and its tectonic correlation with China and Japan. *International Geology Review*, 49, 639-657.
- Oh, C.W., Choi, S.G., Zhai, M. and Guo, J., 2003, The first finding of eclogite relict in the Korean Peninsula and its tectonic meaning. Abstract volume of The West Norway Eclogite Field Symposium, 107.
- Oh, C.W., 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., 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., Sajeev, K., Kim, S.W. and Kwon, Y.W., 2006a, 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., Kim, S.W. and Williams, I.S., 2006b, Spinel granulite in Odesan area, South Korea: tectonic implications for the collision between the North and South China blocks. *Lithos*, 92, 557-575.
- Oh, C.W., Choi, S.G., Seo, J., Rajesh, V.J., Ree, J.H., Zhai, M. and Peng, P., 2009, Neoproterozoic tectonic evolution of the Hongseong area, southwestern Gyeonggi Massif, South Korea; Implication for the tectonic evolution of Northeast Asia. *Gondwana Research*, 16, 272-284.
- Oh, C.W., Seo, J., Choi, 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.
- Otoh, S., and Yanai, S., 1996, Mesozoic inverse wrench tectonics, in far east Asia: Examples from Korea and Japan, In *The tectonics evolution of Asia* (ed. A. Yin, M. Harrison), Cambridge University Press, New York, 401-419.
- Otoh, S., Tsukada, K., Kasahara, K., Hotta, K., and Sasaki, M., 2003, Outline of the shear zones in the Hida Marginal Belt. *Memoir of Fukui Prefectural Museum*, 2, 63-73.
- Ozawa, K., 1983. Evaluation of olivine-spinel geothermometry as an indicator of thermal history for peridotites. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 82, 52-65.
- Park, K.H., Park, J.B., Cheong, C.S. and Oh, C.W., 2005, Sr, Nd and Pb Isotopic Systematics of the Cenozoic Basalts of the Korean Peninsula and Their Implications for the Permo-Triassic Continental Collision Boundary.

- Gondwana Research, 8, 529-538.
- 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, 1-11.
- 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.
- Sajeev, K., Jeong, J., Kwon, S., Kee, W.S., Kim, S.W., Komiya, T., Itaya, T., Jung, H.S. and Park, Y., 2010, High P-T granulite relicts from the Imjingang belt, South Korea: Tectonic significance. *Gondwana Research*, 17, 75-86.
- Sagong, H., Kwon, S.-T. and Ree, J.-H., 2005, Mesozoic episodic magmatism in South Korea and its tectonic implication. *Tectonics*, 24, TC5002, doi:10.1029/2004TC001720
- Sao, J., Tang, K., Zai, L., Li, Z., Xu, G. and Wang, C., 1995, Reconstruction of a paleomargin and its implications: Advance in Yanbian geology, *Science of China (series B)*, 25, 548-555.
- 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.
- Takagi, H. and Hara, T., 1994, Kinematics of the late Triassic dextral shear zone of the Hida belt, Central Japan, and its correlation to the Honam shear zone in the Ogcheon belt. 4th International Symposium and Field Excursion, IGCP 321 abstract volume, 121-122.
- Tsujimori, T., 2002, Prograde and retrograde P-T paths of the late Paleozoic glaucophane-eclogite from the Renge metamorphic belt, Hida mountains, southwestern Japan, *International Geology Review*, 44, 797-818.
- Veevers, J.J., 2000, Billion-year Earth history of Australia and neighbours in Gondwana Sydney. Gemoc press, 400p.
- Wang, Q., Li, J.W., Jian, P., Zhao, Z.H., Xiong, X.L., Bao, Z.W., Xu, J.F., Li, C.F. and Na, J.L., 2005, Alkaline syenites in eastern Cathaysia (South China): link to Permian-Triassic transtension. *Earth and Planetary Science Letters*, 230, 339-354.
- Wang, X., Liou, J.G., and Mao, H.K., 1989, Coesite-bearing eclogites from the Dabie Mountains in central China. *Journal of 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.
- Yang, J.H., Chung, S.L., Wilde, S.A., Wu, F.Y., Chu, M.F., Lo, C.H. and Fan, H.R., 2005, Petrogenesis of post-orogenic syenites in the Sulu Orogenic Belt, East China: geochronological, geochemical and Nd-Sr isotopic evidence. *Chemical Geology*, 214, 99-125.
- Yang, F.Q., Wu, H., Pirajno, F., Ma, B.Y., Xia, H.D., Deng, H.J., Liu, X.W. and Zhao, Y., 2007, The Jiazishan Syenite in northern Hebei: a record of lithospheric thinning in the Yanshan Intracontinental Orogenic Belt. *Journal of Asian Earth Sciences*, 29, 619-636.
- Yao, Y., Ye, K., Liu, J., Cong, B. and Wang, Q., 2000, A transitional eclogite- to high pressure granulite-facies overprint on coesite-eclogite at Taohang in the Sulu ultra-high-pressure terrane, Eastern China. *Lithos*, 52, 109-120.
- Ye, M., Li, X., Li, W., Liu, Y. and Li, Z., 2007, SHRIMP zircon UPb geochronological and whole-rock geochemical evidence for an early Neoproterozoic Sibaoan magmatic arc along the southeastern margin of the Yangtze Block. *Gondwana Research*, 12, 144-156.
- Yin, A. and Nie, S., 1993, An indentation model for the north and south China collision and the development of the TanLu and Honam fault systems, eastern Asia. *Tectonics*, 12, 801-813.
- Zhai, M. and Cong, B., 1996, Major and trace element geochemistry of eclogites and related rocks. In *Ultrahigh-pressure metamorphic rocks in the Dabieshan-Sulu Region of China* (ed. B. Cong), Kluwer Academic Publication, Dordrecht, 128-160.
- Zhai, M., Shao, J., Hao, J. and Peng, P., 2003, Geological signature and possible position of the North China block in the supercontinent Rodinia. *Gondwana Research*, 6, 171-183.
- Zhai, M., Guo, J., Li, Z., Chen, D., Peng, P., Li, T., Hou, Q. and Fan, Q., 2007, Linking the Sulu UHP belt to the Korean Peninsula: Evidence from eclogite, Precambrian basement, and Paleozoic sedimentary basins. *Gondwana Research*, 12, 388-403.
- Zhai, M., Ni, Z., Oh, C.W., Guo, J. and Choi, S.G., 2005, SHRIMP zircon age of a Proterozoic rapakivi granite batholith in the Gyeonggi massif (South Korea) and its geological implication. *Geological Magazine*, 142, 22-30.
- 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., Simon, A.W., Min, S., Won, J.C. and Li, S., 2006, Implications based on the first SHRIMP U-Pb zircon dating on Precambrian granitoid rocks in North Korea. *Earth and Planetary Science Letters*, 251, 365-379.
- Zhao, X. and Coe, R.S., 1987, Palaeomagnetic constraints on the collision and rotation of North and South China, *Nature*, 327, 141-144.

2012년 4월 14일 접수
 2012년 4월 17일 심사개시
 2012년 5월 4일 채택