

한반도를 포함한 북동아시아의 백악기 화성활동과 지구조 진화에 대한 연구

이승환^{1,2,3} · 오창환^{1,2,*} · Kenta Kawaguchi^{1,2}

¹전북대학교 지구환경과학과

²전북대학교 지구환경시스템 연구소

³한국지질자원연구원

요 약

한반도의 117-84 Ma 염기성 및 중성 화성암류의 높은 Ti/V 비율과 Zr 함량은 이들이 판내부 환경에서 형성되었음을 지시하며 한반도의 117-84 Ma 산성 화성암류는 I 혹은 A2 화강암 유형의 성분을 보여준다. 이러한 미량원소 특징은 북중국판과 남중국판의 백악기 화성암류의 미량원소 특징과 매우 유사하며 이는 한반도의 117-84 Ma 백악기 화성암류가 북중국판과 남중국판의 백악기 화성암류와 같이 고태평양판의 후퇴작용에 기인한 인장력에 의해 발생하였을 것으로 생각된다. 북동아시아에서 일어난 고태평양판의 후퇴작용에 의한 화성작용은 145-110 Ma에 북중국판 북동부에서 시작한 후 남동쪽으로 이동하여 117-84 Ma에는 한반도 지역에서 일어났다. 이에 반해 일본지역의 백악기 화성암류는 화산호 환경 하에서 형성되었으며 128 Ma부터 시작되었다. 이는 128 Ma에 고태평양판 섭입대가 태평양 방향으로 물러남에 따라 발생한 인장력에 의해 섭입 해양판이 한반도와 일본 사이에서 끊어진 후, 일본 하부로 섭입하는 해양판의 각도가 증가하면서 형성된 화산호 환경에서 화성활동이 일어났을 가능성을 지시한다. 이 후 약 66 Ma 경까지 일본 남서부에서 화산호 관련 화성활동의 연령은 북서쪽으로 가면서 젊어진다. 이는 해양판의 섭입각도의 감소에 의해 일어났을 것으로 생각되며 이러한 변화는 80 Ma 이후 경상분지를 포함한 한반도 남동부 경계 지역에서 섭입 관련된 화성작용을 일으켰을 가능성이 있다.

주요어: 백악기 화성암, 한반도, 북중국판 북동부, 일본, 지구조 진화

Seung Hwan Lee, Chang Whan Oh and Kenta Kawaguchi, 2021, Cretaceous igneous activity and tectonic evolution of the northeast Asia including the Korean Peninsula. *Journal of the Geological Society of Korea*. v. 57, no. 4, p. 589-614

ABSTRACT: The Cretaceous mafic and intermediate rocks in the Korean Peninsula have high Ti/V and Zr, indicating that they formed in a within-plate tectonic setting. The Cretaceous felsic igneous rocks show trace element compositions comparable to I and A2 type granites. These geochemical features are similar to those of Cretaceous igneous rocks in the northeastern North China Craton (NCC) and the southeastern South China Craton (SCC). It may suggest that the Cretaceous igneous activity in the Korean Peninsula occurred by extension, caused by slab roll back of the paleo-Pacific plate as in the NCC and SCC. The age of extension-related Cretaceous rocks in northeast Asia became younger towards the southeast, from 145-140 Ma in the northwestern area of the NCC to 117-84 Ma in the Korean Peninsula. On the other hand, the Cretaceous igneous rocks in Japan formed in the volcanic arc tectonic setting and started from 128 Ma. These indicate that the extensional stress due to a trench retreat disconnected the subducted oceanic slab in the location between the Korean Peninsula and Japan and then the subduction angle of the oceanic slab under the Japan increased with an initiation of arc-related Cretaceous igneous activities in Japan at ca. 128 Ma. Later, the Cretaceous igneous activities in southwest Japan became younger northward from 128 Ma to 65 Ma. This trend may be caused by a decrease in subduction angle and may have caused arc-related igneous activities in the southern margin of the Korean Peninsula including the Gyeongsang Basin after 80 Ma.

Key words: Cretaceous igneous rock, Korean Peninsula, Northeastern North China Cratons, Japan, tectonic evolution

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

(Seung Hwan Lee, Chang Whan Oh and Kenta Kawaguchi, Department of Earth and Environmental Sciences, Jeonbuk National University, Jeonju 54896, Republic of Korea; Seung Hwan Lee, Chang Whan Oh and Kenta Kawaguchi, Basic Science Research Institute, Jeonbuk National University, Jeonju 54896, Republic of Korea; Seung Hwan Lee, Geology Division, Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources, Daejeon 34132, Republic of Korea)

1. 서 언

한반도를 포함한 북동아시아 지역은 신원생대 곤드와나 초대륙으로부터 연속적으로 분리된 여러 지각들이 충돌하여 형성된 복합체이다(Li and Powell, 2001). 특히 북동아시아는 페름-트라이아스기에 발생한 북중국판과 남중국판의 충돌 이후, 중생대 동안 복잡하고 다양한 지구조 진화를 경험하였으며 그 결과, 중생대 화성암들이 북동아시아 지역에 광역적으로 나타난다(Kee et al., 2010; Kim et al., 2016; Zhai et al., 2016; Cheong and Jo, 2017; Lee et al., 2020, 2021).

백악기에 형성된 화성암류는 한반도 뿐만 아니라 중국과 일본 지역에 걸쳐 넓게 분포하고 있다. 북중국판 북동부 지역에 분포하는 백악기 화성암류는 대부분 145-100 Ma경에 형성되었으며 100-90 Ma에 형성된 화성암은 소량으로 나타난다. 이들 백악기 화성암류는 섭입한 고태평양판의 섭입각도 증가 혹은 해구의 후퇴작용으로 인해 발생한 인장력과 관련된 지구조 환경에서 형성되었음이 보고되었다(Deng et al., 2004, 2007; Yang and Li, 2008; Pei et al., 2011; Tang et al., 2018; Wu et al., 2018; Keevil et al., 2019). 일본지역의 백악기 화성암류의 형성연대는 128-66 Ma이며 모두 섭입 활동과 관련된 화산호 환경하에서 발생한 화성작용이다(Iida et al., 2015; Tsuchiya et al., 2015; Skrzypek et al., 2016, 2018; Kawaguchi et al., 2020).

한반도 백악기 화성암류는 117-66 Ma 동안에 형성되었으며 과거에 수행된 연구에 의하면, 쥐라기 화성암류와 마찬가지로 고태평양 판이 섭입하는 전형적인 화산호 환경 하에서 형성된 것으로 보고되었다(Yun et al., 1994, 1997; Kim et al., 1998; Sung et al., 1998; Sung and Kim, 2012; Zhang et al., 2012). 그러나 최근 연구에서는 한반도의 117-84 Ma에 형성된 백악기 화성암이 단순한 섭입작용에 의한 화성작용이 아니라 섭입하던 고태평양 해양판의 후퇴작용에 기인한 인장력에 의해 상승한 연약권 맨틀이 공

급한 열에 의해 암권 맨틀 및 지각이 용융되어 형성되었음이 제시되고 있다(Sagong et al., 2005; Egawa and Itoh, 2013; Kim et al., 2016; Lee et al., 2020; Im et al., 2021). 이러한 새로운 해석은 북중국판과 남중국판 동부지역에 나타나는 백악기 화성암의 성인에 대한 최근 연구 결과와 잘 일치한다(Li, 2000; Deng et al., 2004, 2007; Yang and Li, 2008; Pei et al., 2011; Liu et al., 2012, 2014, 2016; Tang et al., 2018; Wu et al., 2018; Keevil et al., 2019). 하지만 한반도 북서부에 나타나는 전기백악기 117-100 Ma 화성암의 지구조적 기원에 대한 연구는 아직 부족한 상황이다. 또한 중국과 한반도의 백악기 화성암의 지화학적 및 연대학적 특성을 바탕으로 여러 지구조적 해석이 제시되어 왔으나 중국과 한반도에 나타나는 백악기 화성암을 통합하여 해석한 연구는 부족한 상황이며 이에 따라 한반도와 북동아시아의 백악기 지구조 진화에 대한 해석 또한 불명확한 상황이다. 그리고 북동아시아의 백악기 지구조 진화에 대한 해석에 있어 북동아시아 남동 연변부에 위치한 일본지역 내의 백악기 화성암에 대한 연구 내용 역시 중요하다. 기존 연구에 따르면 일본에서는 190 Ma 이후 쥐라기 섭입 관련 화성작용이 일어나지 않았고 일본 서남부 지역에서는 128-66 Ma에 백악기 화성암이 대륙 연변부 화산호 환경 하에서 형성되었다(Iida et al., 2015; Tsuchiya et al., 2015; Skrzypek et al., 2016, 2018; Kawaguchi et al., 2020). 중국 북동부 지역에서 한반도 지역으로 내려오면서 백악기 화성암의 연대가 145-110 Ma에서 84 Ma로 젊어지는 경향이 보고되었으며 특히 경상분지를 포함한 한반도 남동부 지역에서는 80-66 Ma의 백악기 화성암이 우세하게 나타난다(Kim et al., 2016; Cheong and Jo, 2017; Li et al., 2019). 하지만 일본에서 128 Ma 경부터 발생하는 백악기 화성작용은 중국과 한국에서 남동부로 백악기 화성작용의 연령이 젊어지는 경향에 부합하지 않는다. 따라서 백악기 북동아시아의 지구조 진화를 해석하기 위해서는 한반도, 중국과 일본의 백악기 화성암을 모두 고려한 통합 해석이 필요하다.

따라서 본 연구에서는 현재까지 보고된 한반도, 중국 북동부, 일본지역의 백악기 화성암의 암석학적 연구 내용들을 종합하고 이를 바탕으로 북동아시아의 백악기 화성활동의 성인을 제시하였다. 또한 그 결과를 북동아시아에 나타나는 백악기 화성암의 공간적 연대 분포와 종합하여 북동아시아의 백악기 지구조 진화사를 해석하였다.

2. 일반 지질

한반도를 포함한 북동아시아 지역은 페름-트라이아스기에 발생한 북중국판과 남중국판의 충돌 이후, 중생대 화성암들에 의해 광역적으로 관입되었다(Kee *et al.*, 2010; Kim *et al.*, 2016; Zhai *et al.*, 2016; Cheong and Jo, 2017; Lee *et al.*, 2020, 2021). 한반도의 트라이아스기 화성암은 주로 230-220 Ma 경에 관입하였으며(Oh, 2006; Kim *et al.*, 2011; Yi *et al.*, 2016; Zhai *et al.*, 2016; Kim *et al.*, 2020 and references therein) 이들 트라이아스기 화성암 중, 홍성-양평-오대산 충돌대와 그 이북에 분포하는 화성암들은 충돌 후 지구조 환경에서 형성된 것으로 여겨지는 데에 반해(Oh, 2006; Williams *et al.*, 2009; Kim *et al.*, 2011; Oh and Lee, 2019 and references therein) 옥천변성대와 영남육괴를 포함한 그 이남에 분포하는 화성암들은 섭입대 환경 하에서 형성된 것으로 제시되고 있다(Kim *et al.*, 2011, 2021; Lee *et al.*, 2021). 함경도의 두만강대와 그 서쪽을 포함하는 북중국판 북동부 지역 전역에 넓게 분포하는 트라이아스기 화성암은 255-200 Ma의 연대 분포를 보여주며 주로 충돌 동시성(Syn-collisional) 또는 충돌 후(Post-collisional) 환경 하에서 형성되었다(Wu *et al.*, 2011; Tang *et al.*, 2015).

쥐라기에는 대보 화강암류를 포함한 화성암류가 200-160 Ma에 한반도 전역에 걸쳐 관입하였으며 전기 쥐라기에 해당하는 200-190 Ma 화성암은 주로 한반도 남부 영남육괴 지역에만 분포하고 190-180 Ma에 형성된 화성암은 영남육괴와 함께 옥천대 지역에 주로 나타난다. 180 Ma 이후에 형성된 화성암은 영남육괴를 제외한 한반도 전역에 넓게 분포한다. 한반도의 쥐라기 화성암류는 고태평양 판의 섭입활동과 관련된 화산호 환경에서 형성되었음이 보고되었으며 공간적 연대 분포를 고려하였을 때, 180

Ma 이후부터 flat subduction이 시작되었을 가능성이 제시되었다(Kee *et al.*, 2010; Lee *et al.*, 2021). 북중국판 북동부 지역에서는 아주 드물게 전기 쥐라기에 형성된 쥐라기 화성암이 나타나지만 거의 모든 쥐라기 화강암이 중기-후기 쥐라기에 해당하는 175-145 Ma에 형성되었다(Wu *et al.*, 2011, 2018; Zhai *et al.*, 2016). Wu *et al.* (2018)은 이들 쥐라기 화성암이 북서쪽으로 젊어지는 연대 분포 특성을 보임을 확인하였다. 이렇듯 한반도 남부에서 북중국판 쪽으로 쥐라기 화강암의 연령이 감소하는 경향 특성은 북동아시아 하부로 평평하게 섭입하던 고태평양판의 최전단부가 북서쪽으로 전진한 결과로 해석되었다(Lee *et al.*, 2021).

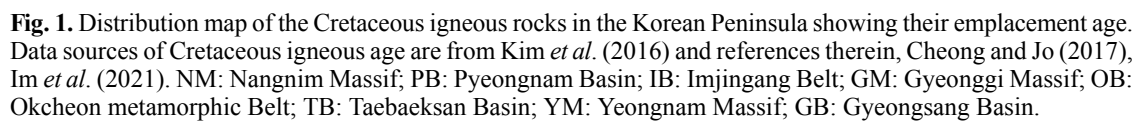
쥐라기 이후, 한반도에 형성된 백악기 화성암류는 117-66 Ma의 형성 연대범위를 보이며 117-100 Ma에 형성된 화성암류는 한반도 전역에 걸쳐 분포한다(Wu *et al.*, 2007; Kim *et al.*, 2012, 2016; Im *et al.*, 2021). 이에 반해 100-80 Ma 화성암은 금강산에서 평택지역을 잇는 선으로부터 남동부 지역에 우세하게 나타나며 경상분지를 포함한 한반도 남동부 가장자리에서는 80-66 Ma 화성암이 집중적으로 분포하고 있다(그림 1).

3. 한반도 백악기 화성암의 분포와 지구화학적 특성

3.1 한반도의 백악기 연대 분포

한반도의 백악기 화성암은 한반도 북부 지역에서는 평남분지의 동, 서부 경계부에 주로 나타나며 부분적으로 낭림육괴와 관모육괴의 북부지역에서도 산출된다(그림 1). 한반도 중부 및 남부지역에서는 백악기 화성암이 경상분지 내에서 광범위하게 분포하며 그 외에는 북동방향으로 발달한 공주-음성, 영동-광주 단층대를 따라 분포하고 있으며 특히 화산암의 경우, 이들 단층대의 백악기 좌수향 주향이동 단층활동으로 인해 형성된 소규모의 인리형 분지들 내에 발달하고 있다(그림 1).

Wu *et al.* (2007)에 의해 한반도 북부 평남분지와 웅진분지 내에 분포하는 백악기 심성암류가 114-109 Ma 경에 형성되었음이 보고되었고, Zhai *et al.* (2016)은 원산시와 경기육괴 북부 통천지역에 분포하는 백악기 심성암 및 화산암류들로부터 각각 106 Ma, 90



Ma의 화성연대를 보고하였다. 기존 연구 자료들을 종합하면, 한반도 북부 지역은 주로 전기 백악기에 형성된 117-106 Ma의 화성암류로 구성되며 후기 백악기에 형성된 화성암은 매우 제한적으로 나타난다. 이에 반해 금강산과 평택을 잇는 선의 남동부에는 전기 백악기에 해당하는 114-107 Ma경에 형성된 화성암류 뿐만 아니라 97-84 Ma의 후기 백악기 화성암류도 함께 나타난다(그림 1; Hwang, 2011; Kim *et al.*, 2012, 2014, 2016; Koh *et al.*, 2013; Cheong and Jo, 2017; Im *et al.*, 2021). 특히 80-66 Ma에 형성된 화성암류는 경상분지를 포함한 한반도 남동부가장자리 지역에 한해서만 나타난다. 위와 같은 연구 결과는 백악기 전기 화성작용은 한반도 전역에 발생하였음을 지시하나 후기 백악기 화성작용은 금강산과 평택을 잇는 선의 남동부 지역에만 발생하였음을 지시한다(그림 1).

3.2 한반도 백악기 화성암의 지화학적 특성

한반도의 백악기 심성암류는 주로 화강암, 알칼리-화강암, 화강섬록암, 몬조섬록암, 섬록암, 섬장암질 화강암으로 구성되며 반려암은 경상분지 일대에서 국부적으로 산출된다(Kim *et al.*, 2016). 백악기 화산암류는 주로 현무암, 안산암, 유문암으로 구성되며 경상분지와 함께 백악기 좌수향 주향이동 단층 활동에 의해 형성된 소규모 인리형 분지들 내에 분포하거나 단층대를 따라 나타난다(Lee, 1999; Sagong *et al.*, 2005; Chough and Sohn, 2010; Kwon *et al.*, 2013; Ryang, 2013; Hwang *et al.*, 2019; Lee *et al.*, 2020). 경상분지는 암상을 기준으로 하위부터 신동층군, 하양층군, 유천층군으로 분류되는데 경상분지의 화산활동은 주로 유천층군 퇴적시기에 발생했기 때문에 대부분의 경상분지 화산암류는 유천층군내에 발달한다(Chang, 1975; Jeon and Sohn 2008; Chough and Sohn, 2010). 이와 함께 경상분지 하양층군 퇴적시기에도 간헐적인 화산활동이 일어난 것으로 알려져 있는데 하양층군 밀양지곡 내에 청룡사현무암, 학봉현무암, 구산동 응회암이 나타나며 영양소분지 내에 오십봉 현무암이 협재하고 있다(Chang, 1975; Jeon and Sohn, 2008; Hwang and Woo, 2009).

한반도의 백악기 화성암류는 심성암과 화산암으로 구성되며 본 논문에서는 연구 편의상 두 암석 모

두를 심성암 분류표에 도시하였다. 뒤에 설명될 북중국판 북동부와 일본지역의 백악기 화성암류 역시 심성암 분류표에 도시하였다. 한반도 백악기 화성암류는 총알칼리 vs. SiO_2 다이어그램에서 염기성 화성암은 반려암, 몬조반려암, 반려암질 섬록암과 몬조섬록암에 해당하는 성분을 가지며 중성질 화성암은 몬조나이트와 섬록암 성분에 해당한다. 산성 화성암류는 화강섬록암 내지 화강암에 해당하는 주원소 성분을 보여준다(그림 2a). 염기성 화성암류 일부를 제외하고는 모든 백악기 화성암류가 AFM 다이어그램에서 칼크-알칼리 영역에 도시되며 이들 대부분은 쇼쇼니틱(Shoshonitic)에서 Medium-K 칼크-알칼리 계열에 해당하는 K_2O 성분을 함유하고 있다(그림 2b, 2c). 백악기 산성 화성암류는 페알루미너(Peraluminous) 내지 메타알루미너스(Metaluminous) 영역에 도시된다(그림 2d). 콘드라이트 값으로 표준화시킨 미량원소 다이어그램에서 염기성-중성 화성암류는 경희토류 원소가 다소 부화된 특성을 보이며 사장석의 분별정출을 지시하는 Eu 부의 이상치는 나타나지 않는다(그림 3a, 3c). 초기맨틀 값으로 표준화시킨 미량원소 다이어그램에서는 Nb, Ta, Ti 성분의 부의 이상치가 관찰된다(그림 3b, 3d). 한반도의 백악기 산성 화성암류는 Eu의 부의 이상치가 뚜렷하게 나타나며 초기 맨틀 값으로 표준화시킨 미량원소 다이어그램에서 Nb, Sr, P, Ti 성분의 강한 부의 이상치가 나타난다(그림 3e, 3f). 한반도 백악기 화성암류의 관입 및 분출 당시의 환경을 유추하기 위해 미량원소 함량을 지구조 분별도에 도시해본 결과, 산성 화성암류 대부분은 Y+Nb vs. Rb 다이어그램에서 충돌 후 환경을 지시하는 영역과 겹치는 화산호 환경 영역 내지 높은 Rb 함량으로 인해 판내부 환경 영역에 도시되기도 한다(그림 4a). FeO_t/MgO vs. $\text{Zr}+\text{Nb}+\text{Ce}+\text{Y}$ 다이어그램에서 80 Ma 이전에 형성된 백악기 화성암들은 I, S 형 화강암 혹은 A 형 화강암의 성분을 보여주며 A 형에 해당하는 화성암은 모두 충돌 후 환경에서 형성된 A2 형에 해당된다(그림 4b, 4c). 이에 반해 80 Ma 이후에 형성된 화성암류는 주로 섭입 활동과 관련된 I 형 화강암의 성분 특성을 보여준다. 한반도의 백악기 중성 및 염기성 화성암류는 $\text{Ti}/1000$ vs. V 다이어그램에서 주로 중앙해령 현무암 내지 후배호 분지 현무암 영역에 도시되고 $\text{Nb}^*2\text{-Zr}/4\text{-Y}$ 다이어그램에서 80 Ma 이전에 형성

된 중성 및 염기성 화성암류 중 일부 암석들이 상대적으로 높은 Y 함량으로 인해 화산호 환경에서 형성된 현무암의 특징을 보이기도 하나, 대부분 판내부 환경에서 형성된 현무암의 성분과 유사한 지화학적 특성을 보여준다(그림 4d, 4e). 80 Ma 이후에 형성된 중성 및 염기성 화성암류는 Nb*2-Zr/4-Y 다이어그램에서 모두 화산호 환경 영역에 도식된다.

4. 북중국판 북동부 지역 백악기 화성암의 분포와 지구화학적 특성

4.1 북중국판 북동부 지역의 백악기 연대 분포

북중국판 북동부 지역의 백악기 화성암은 북경과

서부 랴오닝(Liaoning) 지역 일대가 포함된 안산 습곡대(Yanshan fold belt)와 수루 벨트(Sulu belt), 요동(Liaodong) 지역 일대에 주로 나타나며 다양한 연대분포 범위를 보여준다. 안산 조산운동 초기인 170-136 Ma에는 압축력이 작용하여 트러스트 단층과 습곡대가 형성되었으며 안산 조산운동 중 후기인 136-90 Ma에는 인장력이 작용하여 전기 백악기에 북중국판 북동부 지역에 크고 작은 퇴적분지들을 형성되었다(Dong *et al.*, 2018). 백악기 화성암들은 이들 백악기 분지들 내부와 그 일대에 분포한다(Zhai *et al.*, 2016; Tang *et al.*, 2018). 안산 습곡대 동부 랴오닝 지역에서는 백악기 화성암류가 탄루 단층(Tan-Lu fault)의 백악기 주향이동단층 활동으로 인해 형성된 크고

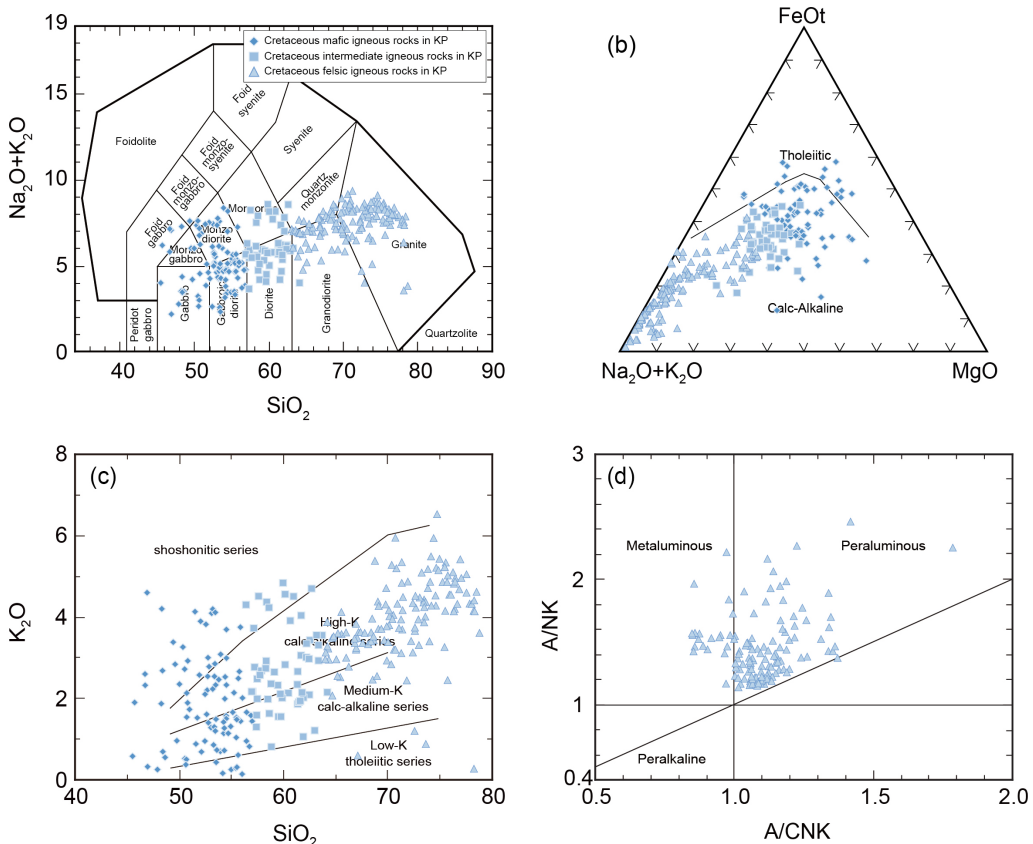


Fig. 2. Chemical classification using major elements of the Cretaceous igneous rocks in the Korean Peninsula in the (a) total alkali ($\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$) vs. silica (SiO_2) diagram (after Middlemost, 1994), (b) FeO^* - $\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$ - MgO diagram (after Irvine and Baragar, 1971), (c) K_2O vs. SiO_2 diagram (after Peccerillo and Taylor, 1976), and (d) A/NK vs. A/CNK diagram (after Maniar and Piccoli, 1989). Data source of Cretaceous igneous rocks in the KP are from Kim and Lee (1993); Hwang and Kim (1994a, 1994b); Yun *et al.* (1997); Kim *et al.* (1998, 2012, 2016); Sung *et al.* (1998); Sagong *et al.* (2001); Lee *et al.* (2010, 2020); Sung and Kim (2012); Kwon *et al.* (2013); Cheong and Jo (2017); Im *et al.* (2021). KP: Korean Peninsula.

작은 인리형 분지들 내에서 형성된 백악기 퇴적층과 협재하거나 그 일대에 분포하고 있다(Chen *et al.*, 1999; Yang and Li, 2008).

북중국판 북동부 지역의 백악기 화성암은 주로 전

기 백악기에 형성되었으며 매우 드물게 후기 백악기에 형성되었다(Tang *et al.*, 2018). 안산 습곡대 내 북경 일대에는 148-136 Ma 경에 형성된 화성암류가 주로 분포하며 이는 전기 백악기의 Berriasian에서

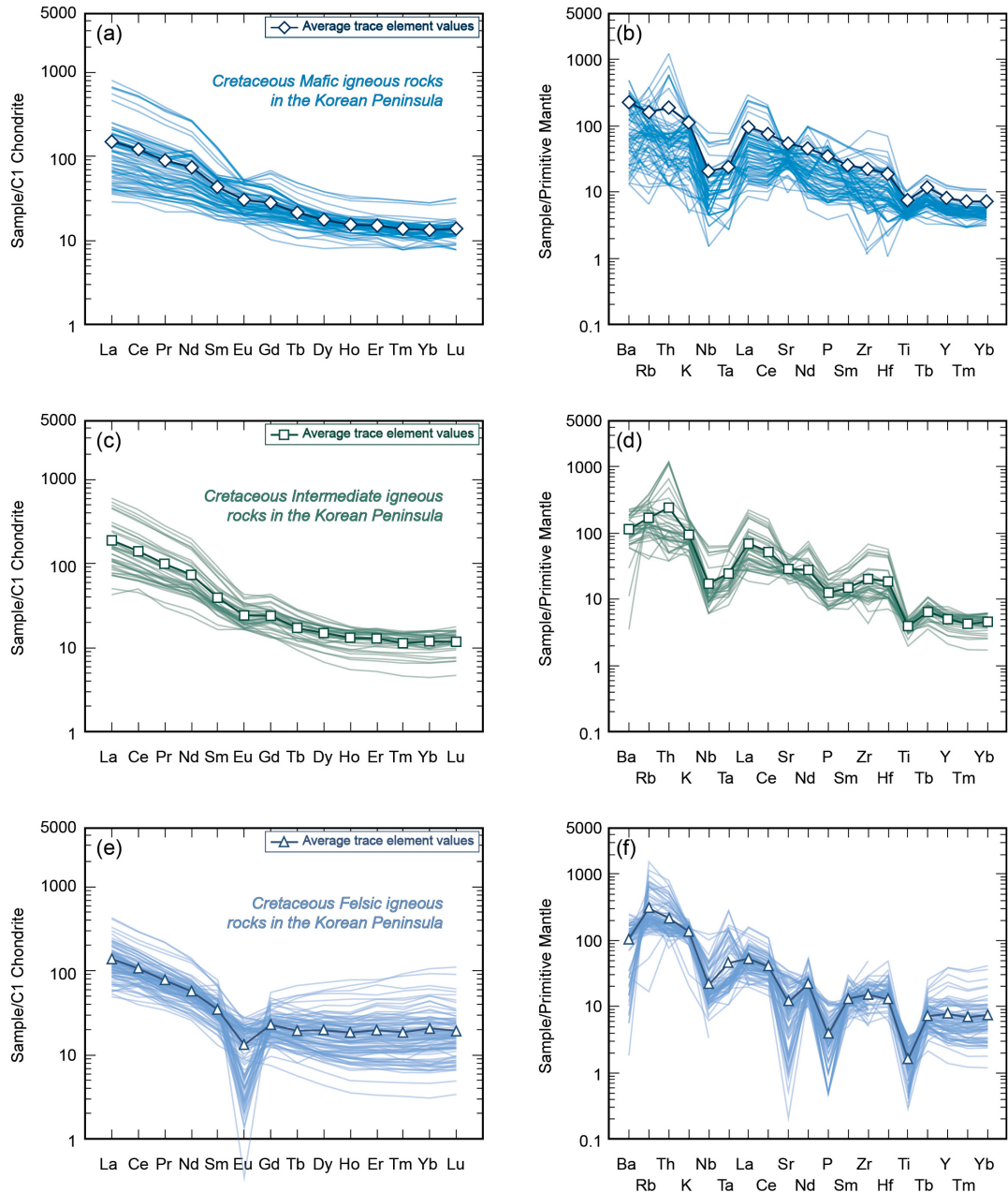


Fig. 3. Chondrite-normalized REE and primitive mantle-normalized multi-element patterns for Cretaceous mafic igneous rocks (a), (b), intermediate igneous rocks (c), (d), felsic igneous rocks (e), (f) in the Korean Peninsula. These diagrams are normalized to the chondrite and primitive mantle compositions suggested by Sun and McDonough (1989). Data sources are shown in figure 2.

Valanginian에 해당한다(Deng *et al.*, 2004, 2007). 이에 비해 안산 습곡대로부터 동편에 위치한 라오닝 동부 지역과 북부 요동 지역에서는 Valanginian 시기에

해당하는 139-120 Ma 경에 형성된 백악기 화성암으로 주로 나타나며 제한적으로 119-118 Ma의 화성암이 나타나기도 한다(Deng *et al.*, 2004, 2007; Yang

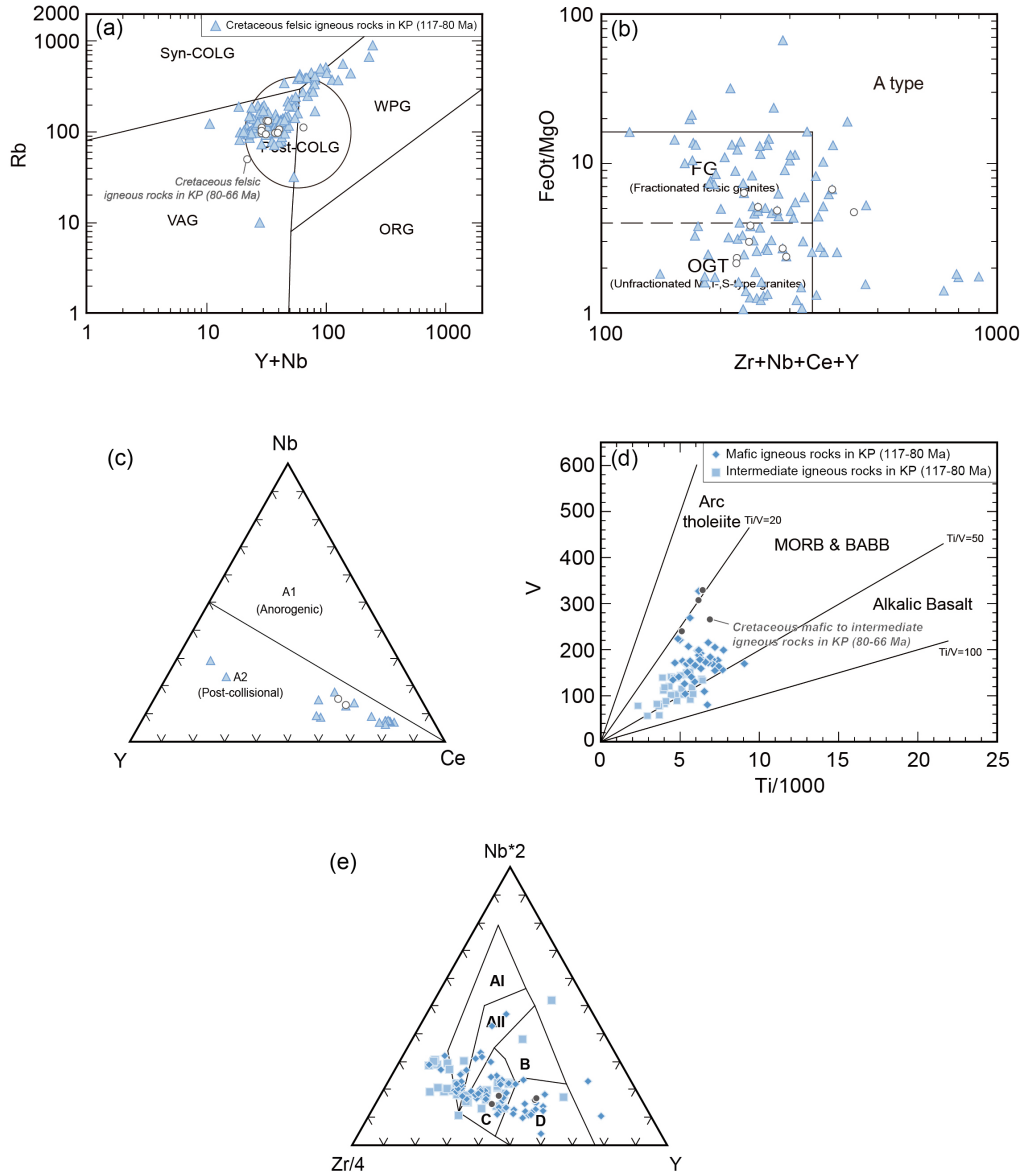


Fig. 4. Tectonic discrimination diagrams for the Cretaceous igneous rocks in the Korean Peninsula. (a) Rb vs. Y + Nb diagram after Pearce *et al.* (1984); (b) FeO/MgO vs. Zr + Nb + Ce + Y diagram after Whalen *et al.* (1987); (c) Nb-Y-Ce diagram after Eby (1992); (d) V vs. Ti/1000 diagram after Shervais (1982); (e) Nb*2-Zr/4-Y diagram after Meschede (1986). MORB: mid-ocean ridge basalt, BABB: back-arc basin basalt, FG: fractionated felsic granite, OGT: unfractionated M-, I-, S-type granites, AI: within plate alkali basalt, AII: within plate alkali and tholeiitic basalt, B: enriched mid ocean ridge basalt, C: within plate tholeiite or volcanic arc basalt, D: volcanic arc basalt. Data sources: 117-80 Ma igneous rocks (Kim and Lee, 1993; Hwang and Kim, 1994a, 1994b; Yun *et al.*, 1997; Sung *et al.*, 1998; Sagong *et al.*, 2001; Lee *et al.*, 2010, 2020; Kim *et al.*, 2012, 2016; Sung and Kim, 2012; Kwon *et al.*, 2013; Cheong and Jo, 2017; Im *et al.*, 2021); 80-66 Ma igneous rocks (Kim *et al.*, 1998; Cheong and Jo, 2017).

and Li, 2008; Pei *et al.*, 2011). 산둥반도 지역과 요동지역 남부를 포함한 중국과 북한의 접경지역에서는 Valanginian 시기에 형성된 130-110 Ma 화성암이 우세하게 나타난다. 산둥반도(Jiaodong Peninsula) 지역에서는 특히 120-110 Ma에 형성된 화성암도 우세하게 나타난다. 이상을 종합하면 북중국판에 분포하는 백악기 화성암류는 북서부지역으로부터 남동부 방향으로 젊어지는 연대분포 특성을 보이며 연대 범위는 145-110 Ma로 나타난다.

4.2 북중국판 북동부 지역 백악기 화성암의 지화학적 특성

북중국판 북동부 지역의 백악기 화성암은 토탈알

칼리 vs. SiO_2 다이어그램에서 중성 및 염기성 화성암은 반려암, 몬조반려암, 몬조 섬록암, 반려암질 섬록암, 섬록암, 몬조니암에 해당하며 이 중 알칼리 계열인 몬조반려암, 몬조섬록암 및 몬조니암의 비중이 높다(그림 5a). 산성 화성암류는 섬장암, 석영 몬조니암, 화강섬록암과 화강암 영역에 도시되며 역시 비알칼리 계열의 화강암과 화강섬록암보다는 알칼리 계열의 석영 몬조니암과 화강섬록암 비중이 높게 나타난다. AFM 다이어그램에서 염기성 화성암 일부를 제외하고는 모든 화성암이 칼크알칼리 계열에 해당하며 쇼쇼니틱하거나 높은 K 함량의 칼크알칼리 계열에 주로 해당한다(그림 5b, 5c). 산성 화성암류는 주로 메타알루미너스나 퍼알루미너스한 특징을

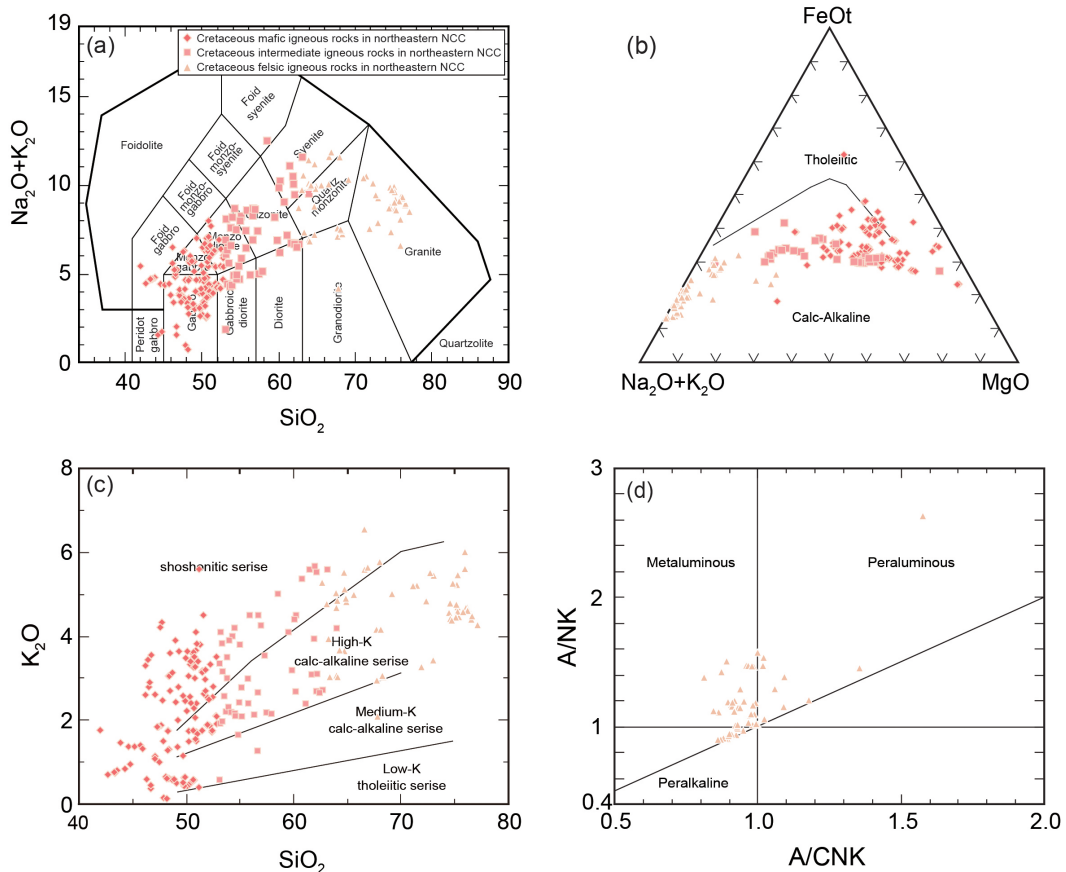


Fig. 5. Chemical classification using major elements of the Cretaceous igneous rocks in the northeastern North China Cratons in the (a) total alkali ($\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$) vs. silica (SiO_2) diagram (after Middlemost, 1994), (b) FeO^* - $\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$ - MgO diagram (after Irvine and Baragar, 1994), (c) K_2O vs. SiO_2 diagram (after Peccerillo and Taylor, 1976), and (d) A/NK vs. A/CNK diagram (after Maniar and Piccoli, 1989). Data sources are from Liu *et al.* (2006, 2008, 2009); Chen *et al.* (2008); Yang and Li (2008); Yang *et al.* (2008); Jiang *et al.* (2010); Pei *et al.* (2011); Zhang *et al.* (2011); Cai *et al.* (2015); Deng *et al.* (2017); Keevil *et al.* (2019); Wan *et al.* (2019); Dong *et al.* (2021).

주로 보여주나 일부 알칼리 성분이 높은 산성 화성암류는 퍼알칼라인한 성분을 보여주며 이는 한반도 백악기 산성 화성암에서는 나타나지 않는 특징이다 (그림 5d). 콘드라이트 값으로 표준화시킨 미량원소

다이아그램에서 염기성-중성 화성암류는 경희토류 원소가 다소 부화된 특성을 보이며 사장석의 분별정출을 지시하는 Eu의 부의 이상치는 나타나지 않는다 (그림 6a, 6c). 초기맨틀 값으로 표준화시킨 미량

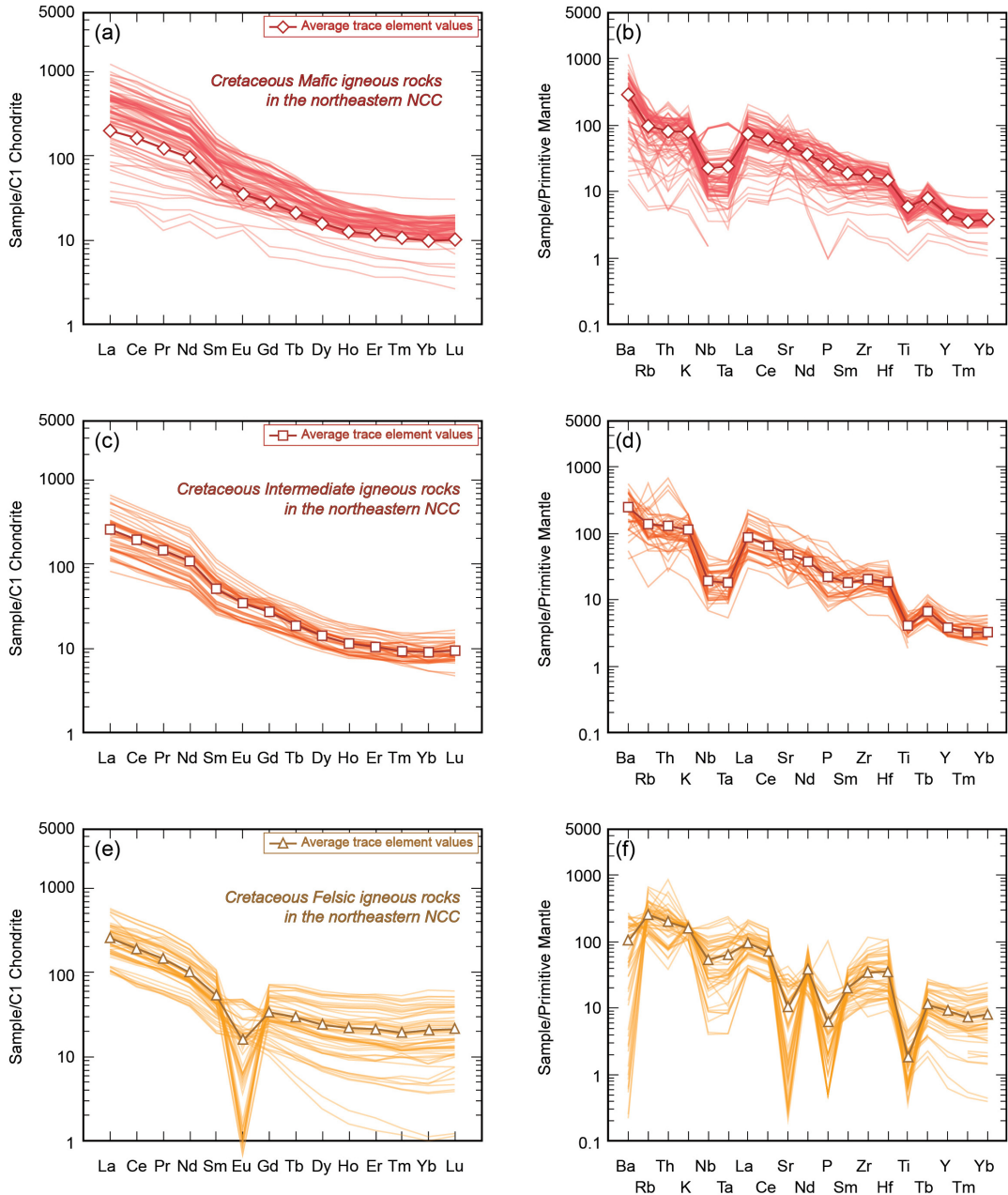


Fig. 6. Chondrite-normalized REE and primitive mantle-normalized multi-element patterns for Cretaceous mafic igneous rocks (a), (b), intermediate igneous rocks (c), (d), felsic igneous rocks (e), (f) in the northeastern North China Cratons. These diagrams are normalized to the chondrite and primitive mantle compositions suggested by Sun and McDonough (1989). Data sources are shown in the figure caption of figure 5.

원소 다이어그램에서는 Nb, Ta, Ti 성분의 부의 이상치가 관찰된다(그림 6b, 6d). 산성 화성암류는 대부분이 Eu의 부의 이상치를 강하게 보여주며 초기 맨틀 값으로 표준화시킨 미량원소 다이어그램에서 Sr, P, Ti 성분의 강한 부의 이상치가 나타난다(그림 6e, 6f). 북중국판 북동부 지역 백악기 화성암의 지구

조 환경을 유추하기 위해 미량원소를 이용하여 지구조 분별도에 도시한 결과, 산성 화성암은 Y+Nb vs. Rb 다이어그램에서 대부분이 화산호 내지 판내부 환경 영역과 겹치는 충돌 후 환경 영역에 도시되며 일부 화성암이 화산호 환경과 판내부 환경 영역에 도시된다(그림 7a). FeO_t/MgO vs. $\text{Zr}+\text{Nb}+\text{Ce}+\text{Y}$

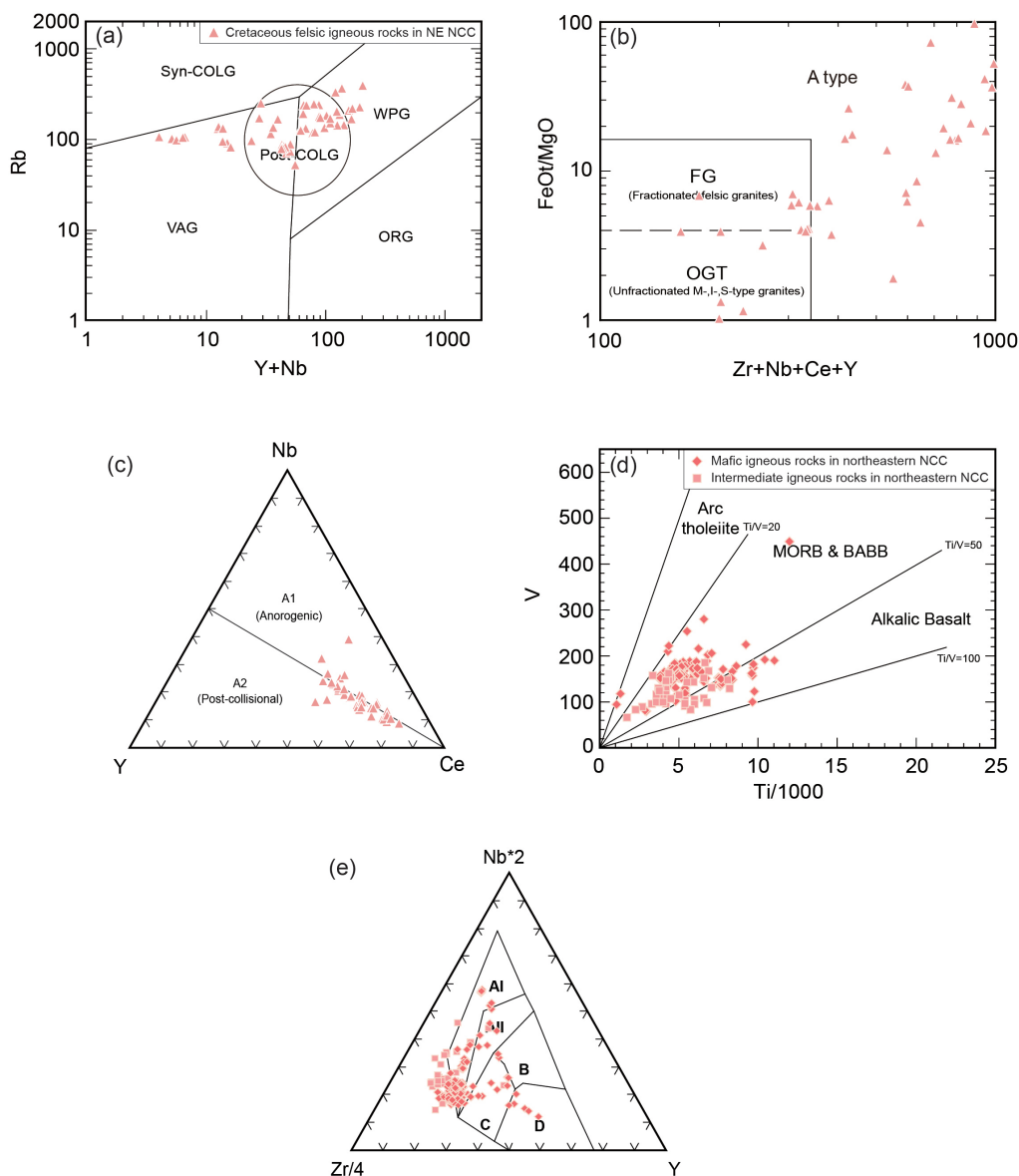


Fig. 7. Tectonic discrimination diagrams for the Cretaceous igneous rocks in the northeastern North China Cratons. (a) Rb vs. Y + Nb diagram after Pearce *et al.* (1984); (b) FeO_t/MgO vs. $\text{Zr} + \text{Nb} + \text{Ce} + \text{Y}$ diagram after Whalen *et al.* (1987); (c) Nb-Y-Ce diagram after Eby (1992); (d) V vs. $\text{Ti}/1000$ diagram after Shervais (1982); (e) $\text{Nb}^*2\text{-Zr}/4\text{-Y}$ diagram after Meschede (1986). Data sources are shown in the figure caption of figure 5. The abbreviations are described in the figure caption of figure 4.

화강암 분류 다이어그램에서는 대부분의 산성 화성암들이 A 형 화강암 영역에 도시되고 이들은 Nb-Y-Ce 분류 다이어그램에서 A2 형의 화강암과 유사한 성분을 가진다(그림 7b, 7c). 염기성 내지 중성질 화성암의 경우, 대부분 인장력과 관련된 지구조 환경을 지시하는 후배호 분지, 판내부 환경 영역에 도시되는 특징을 보인다(그림 7d, 7e).

5. 일본 지역 백악기 화성암의 분포와 지구 화학적 특성

5.1 일본 지역의 백악기 연대 분포

일본 열도 지각의 약 30%는 화강암질암으로 구성되어 있으며 이들 중 80%는 약 130 Ma 이후에 형성된 후기 백악기 암석으로 구성된다(Nakajima *et al.*,

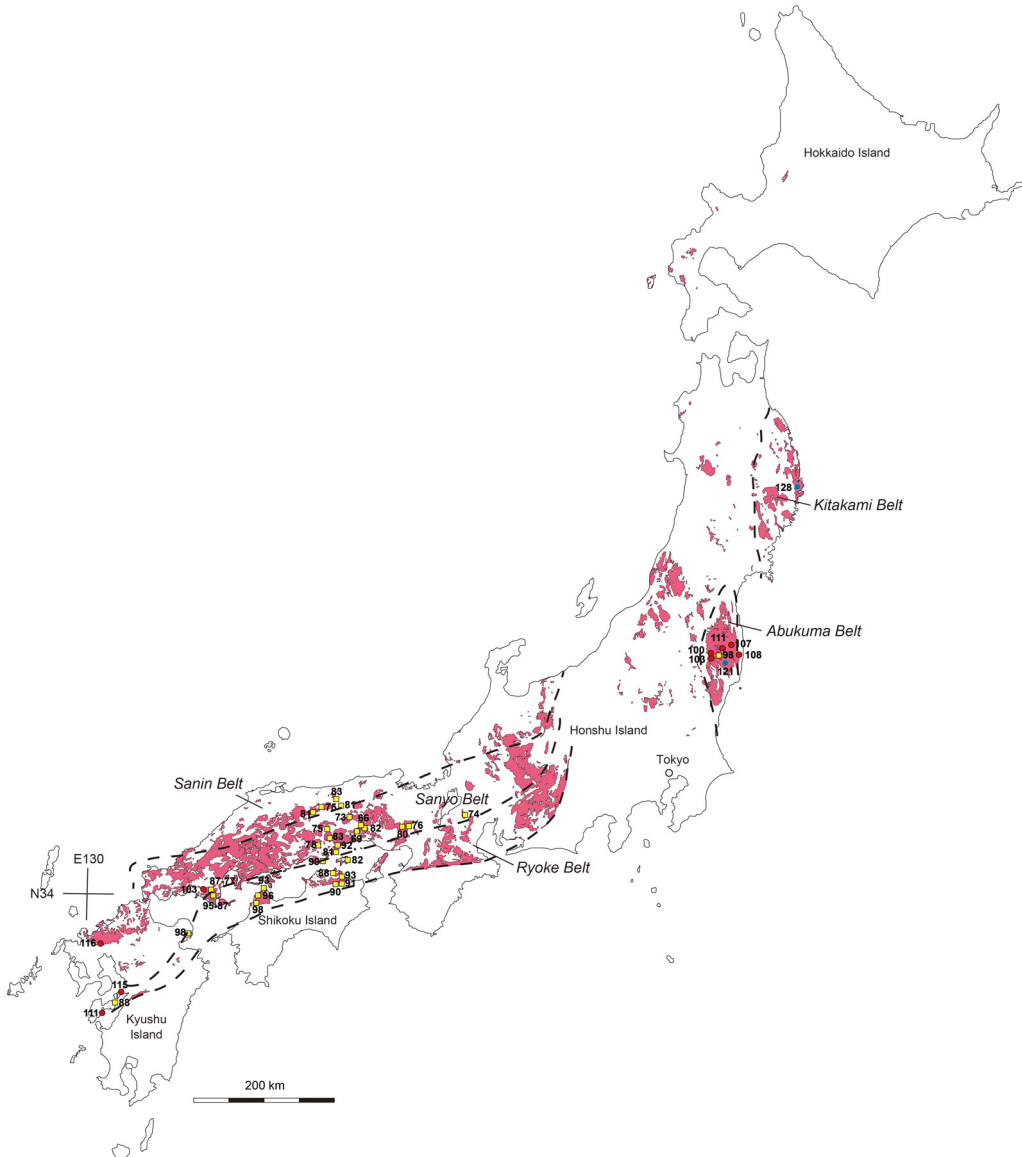


Fig. 8. Distribution map of the Cretaceous igneous rocks in the Japan (after Teraoka and Okumura, 2011; Wu and Wu, 2019). Data sources of the age of Cretaceous igneous rocks are from Imaoka *et al.* (1993); Iizumi *et al.* (2000); Kamei (2002); Kamei *et al.* (2004); Nakajima *et al.* (2004); Ishihara and Chappell (2007); Ishihara and Ohno (2016); Skrzypek *et al.* (2016); Kawaguchi *et al.* (2020); Suga and Yeh (2020).

2016). 이러한 백악기 화성암류는 일본지역내에서 넓게 분포하고 있으나 주로 일본열도 북동쪽과 남서쪽 지역에 집중적으로 나타나고 있다(그림 8).

일본 북동부 지역의 백악기 화성암류는 분포 특성과 암상에 따라 아부쿠마(Abukuma)대와 키타카미(Kitakami)대로 분류 된다. 아부쿠마대의 백악기 화성암류는 주로 화강암질암으로 구성되며 저변성암이 수반되어 나타난다. 아부쿠마대의 백악기 화강암질암은 저어콘의 U-Pb 연대측정을 바탕으로 121-99 Ma경에 형성되었음이 보고되었다(Kon and Takagi, 2012; Ishihara and Orihashi, 2015). 키타카미대의 백악기 화성암류 역시 주로 화강암질암으로 구성되거나 저변성암이 수반되지는 않는다. 키타카미대의 백악기 화성암류는 128-113 Ma의 화성연대를 보여준다(Tsuchiya *et al.*, 2015).

일본지역 남서쪽에 분포하는 백악기 화성암류는 형성시기 및 공간적 분포 특성에 따라 료케대(Ryoke belt), 산요대(Sanyo belt), 산인대(San'in belt)로 분류된다. 큐슈섬 중북부 지역에서 혼슈섬 중부지역까지 분포하는 료케대와 그 이북에 분포하는 산요대와 산인대는 주로 백악기 화강암질암으로 구성되며 료케대에서는 저변성암이 수반되기도 한다. 료케대와 산요대의 백악기 화성암류는 115 Ma부터 형성되기 시작했으며(Hayasaka and Tashima, 2016) 주된 화성활동 시기는 106-50 Ma로 백악기 이후, 신생대까지 지속된 것으로 보고되고 있다(Tani *et al.*, 2014; Skrzypek *et al.*, 2016, 2018; Mateen *et al.*, 2019). 특히 혼슈섬 최북단에 위치한 산인대의 백악기 화성암류는 주로 83-75 Ma의 형성연대를 보여주며 주된 화성활동 시기는 신생대 고 제3기(Paleogene)로 료케대, 산요대보다 젊은 화성활동 시기를 보여준다. 이상을 종합하면 일본 남서부 지역의 백악기 화성암류는 118-65 Ma동안 형성되었으며 북쪽으로 짙어지는 경향을 보여준다.

5.2 일본 지역 백악기 화성암의 지화학적 특성

일본의 백악기 화성암은 토탈알칼리 vs. SiO_2 다이어그램에서 반려암, 몬조반려암, 반려암질 섬록암, 몬조 섬록암, 섬록암, 화강섬록암, 화강암에 해당하는 주원소 성분 함량을 보여주며 대부분이 알칼리도가 높지 않은 비알칼리 계열의 주원소 성분 특성을 보여준다(그림 9a). AFM 다이어그램에서 염기성

화성암 일부를 제외하고는 모든 화성암이 칼크알칼리 계열에 해당하며 높은 K 함량 내지 중간 함량의 K 성분을 갖는 칼크알칼리 계열에 주로 해당한다(그림 9b, 9c). 일본지역 화성암류에서 소쇼니틱한 성분이 나타나지 않는 특성은 한반도나 북중국판 북동부의 화성암류와 비교되는 특징이다. 산성 화성암류는 주로 메타알루미너스나 페알루미너스한 특징을 주로 보여주며 페알칼라인한 성분은 나타나지 않는다(그림 9d). 콘드라이트 값으로 표준화시킨 미량원소 다이어그램에서 염기성-중성 화성암류는 경희토류 원소가 부화된 특성을 보이거나 한반도나 북중국판 북동부의 염기성-중성 화성암류에서 보이는 부화 특성 보다는 약하게 부화되어 있다(그림 10a, 10c). 이와 함께 Eu의 부의 이상치는 나타나지 않으며 초기맨틀 값으로 표준화시킨 미량원소 다이어그램에서는 Nb 성분의 부의 이상치와 Ta 성분의 정의 이상치가 관찰된다(그림 10a-d). 산성 화성암류는 Eu의 부의 이상치가 나타나며 초기 맨틀 값으로 표준화시킨 미량원소 다이어그램에서 Nb, Sr, P, Ti 성분의 강한 부의 이상치가 나타난다(그림 10e, 10f). 일본지역 백악기 화성암의 지구조 환경을 유추하기 위해 미량원소를 이용한 지구조 분별도에 도시한 결과, 산성 화성암은 Y+Nb vs. Rb 다이어그램에서 대부분이 화산호 내지 판내부 환경 영역과 겹치는 충돌 후 환경 영역에 도시되며 일부 화성암이 화산호 환경 영역에 도시된다(그림 11a). FeO_3/MgO vs. $\text{Zr}+\text{Nb}+\text{Ce}+\text{Y}$ 화강암 분류 다이어그램에서는 모든 산성 화성암들이 I 또는 S 형 화강암 영역에 도시되며 한반도와 북중국판 북동부 지역의 산성 화성암류와 달리 A 형 화강암 특성은 나타나지 않는다(그림 11b). 염기성 내지 중성질 화성암의 경우, 중앙해령 현무암 내지 후배호 분지 현무암과 유사한 V, Ti 성분을 보여주나 $\text{Nb}^*2-\text{Zr}/4-\text{Y}$ 다이어그램에서 대부분 화산호 환경 영역에 도시되며 판내부 환경영역에는 거의 해당하지 않는 특성을 보여준다(그림 11c, 11d).

6. 토 의

6.1 한반도 백악기 지구조 진화

고태평양 판은 페름기에 들어 북동아시아 하부로 섭입하기 시작하였고 쥐라기 초기에는 섭입각도가 감소하기 시작하여 중기 이후에는 flat subduction 형

태로 섭입하였다(Oh and Kusky, 2007; Kee *et al.*, 2010; Wu *et al.*, 2018; Park *et al.*, 2019; Lee *et al.*, 2021). 그 후 백악기에 들어 해양판의 섭입 입구인 해구가 해양쪽으로 이동하면서 해양판의 후퇴작용(slab rollback)과 그에 따른 인장력이 북동아시아 일대에 광역적으로 발생하였을 것으로 생각된다(Zheng and Dai, 2018; Zheng *et al.*, 2018; Zhu and Xu, 2019). 이러한 백악기 인장력은 연약권 맨틀을 상승시켰으며 상승한 연약권 맨틀은 열을 공급하여 암권 맨틀과 지각물질을 용융시켰고 이로 인해 남중국판 남동쪽 가장자리와 북중국판 북동부의 백악기 화성작용은 화산호 환경이 아닌 인장력과 관련된 지구조 환경에서 발생하였다(Li, 2000; He and Xu, 2012; Liu *et al.*, 2012, 2014, 2016). 그 결과, 남중국판 남동쪽 가장자리와 북중국판 북동부의 백악기 화강암질

화성암류는 높은 알카리 성분과 함께 I와 A2 type을 모두 보여주며 백악기 중성 및 염기성암류는 판내부 환경에서 만들어진 특성을 보여준다(Li, 2000; Wu *et al.*, 2005; Sun and Yang, 2009; He and Xu, 2012; Liu *et al.*, 2012, 2014, 2016).

백악기 해양판의 후퇴작용이 일어나기 전인 쥐라기에는 flat subduction에 의해 북동아시아지역 남동부 가장자리로부터 수백 km 떨어진 내륙까지 해양판의 섭입이 일어났다(Kee *et al.*, 2010; Wu *et al.*, 2018; Park *et al.*, 2019; Lee *et al.*, 2021). 이에 의해 남중국판의 남동쪽 가장자리와 북중국판 북동부의 암권 맨틀과 지각은 섭입하던 해양지각과 해양퇴적물로부터 공급된 지각물질에 의해 혼염되어 있었다. 해양판의 후퇴에 의한 연약권 맨틀 상승 초기에는 맨틀이 주로 열만 공급함으로써 기존의 암권 맨틀과

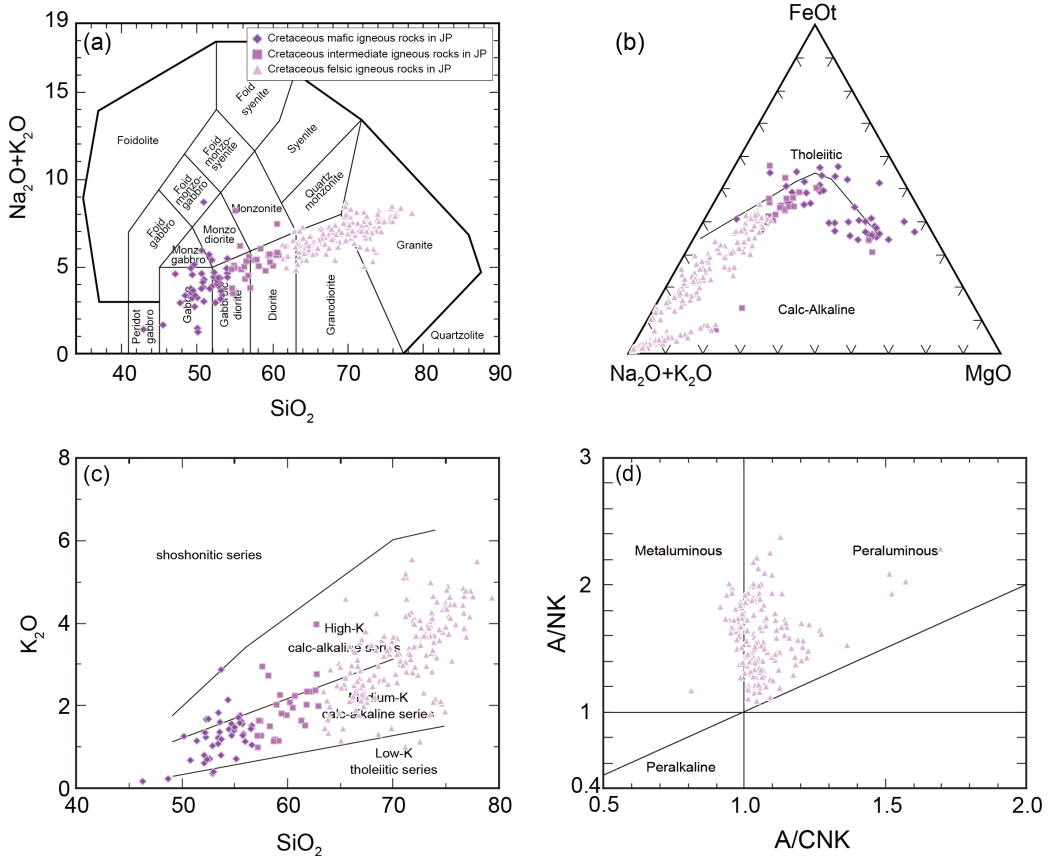


Fig. 9. Chemical classification using major elements of the Cretaceous igneous rocks in the Japan in the (a) total alkali (Na₂O + K₂O) vs. silica (SiO₂) diagram (after Middlemost, 1994), (b) FeO_T-Na₂O + K₂O-MgO diagram (after Irvine and Baragar, 1994), (c) K₂O vs. SiO₂ diagram (after Peccerillo and Taylor, 1976), and (d) A/NK vs. A/CNK diagram (after Maniar and Piccoli, 1989). Data sources are shown in the figure caption of figure 8.

지각을 용융시켜 마그마를 형성하였을 것이나 맨틀 상승이 지속됨에 따라 공급되던 열이 지속적으로 증가하는 한 편 연약권 맨틀의 용융이 일어나기 시작하면서 연약권 맨틀 성분이 공급되었을 것으로 생각된다. 그 결과, 남중국판 가장자리와 북중국판 동부

에서 나타나는 백악기 화성암 중 화강암질암은 I 유형과 A 유형의 특성을 모두 보여준다. 즉 맨틀 상승 초기에는 단순히 쥐라기에 섭입작용에 의해 혼염되었던 지각이 용융되어 I type의 화강암질 화성암을 형성되었을 것이며 맨틀 상승 후기에는 지속적인 열

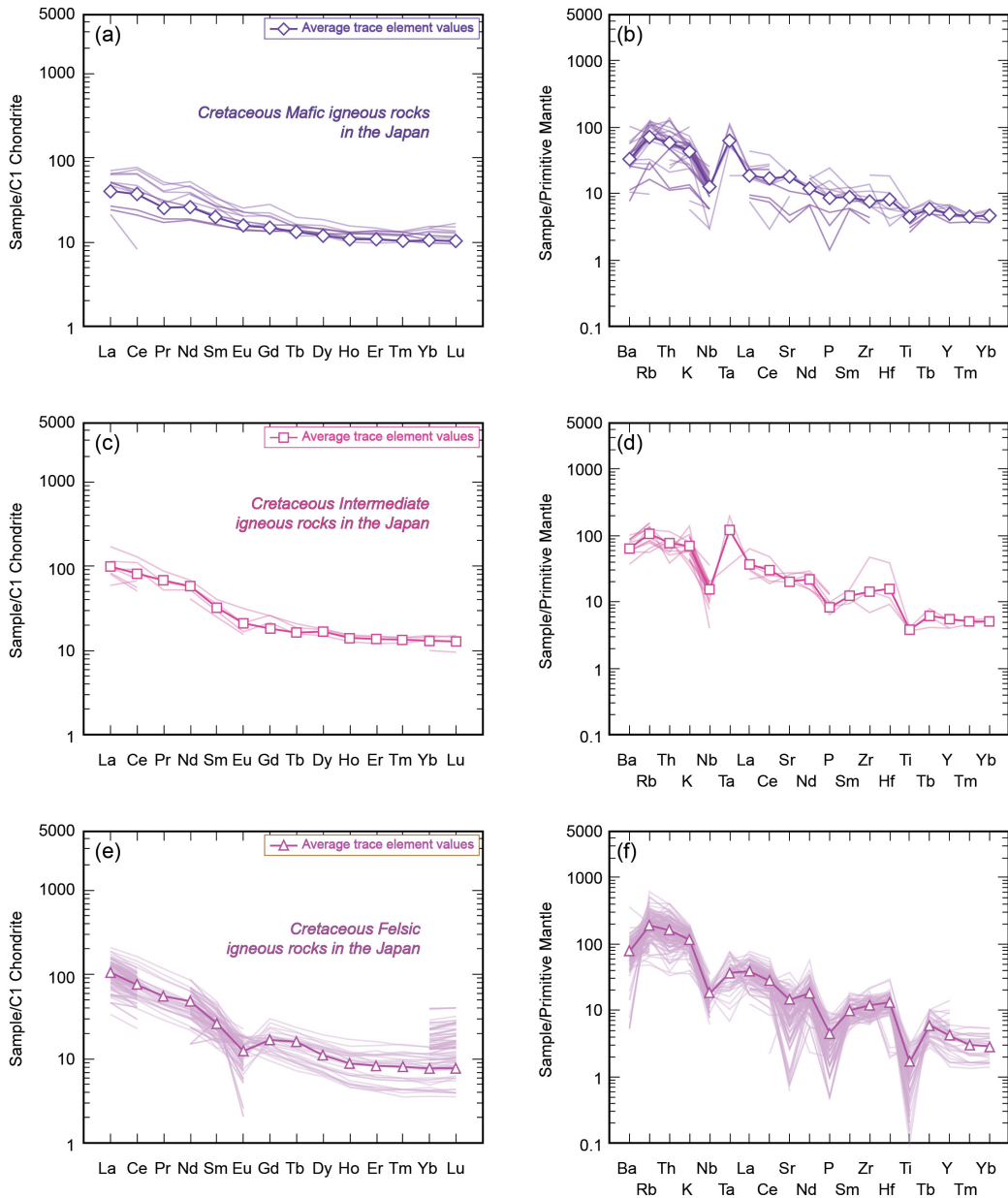


Fig. 10. Chondrite-normalized REE and primitive mantle-normalized multi-element patterns for Cretaceous mafic igneous rocks (a), (b), intermediate igneous rocks (c), (d), felsic igneous rocks (e), (f) in the Japan. These diagrams are normalized to the chondrite and primitive mantle compositions suggested by Sun and McDonough (1989). Data sources are shown in the figure caption of figure 8.

의 공급과 맨틀 성분의 추가 공급에 의해 A type의 화강암질 화성암이 형성되었을 것으로 생각된다. 그리고 백악기의 염기성 및 중성 화성암류는 높은 열에 의해 부화된 암권 맨틀이나 연약권 맨틀로부터 용융되어 생성됨으로서 높은 Zr/Y 비율, 또는 Y 성분에 비해 상대적으로 부화된 Nb, Zr 성분 특성과 같이 판내부 환경에서 형성된 화성암의 지화학적 특성을 보여준다.

한반도의 백악기 화성암의 분포 특성을 다시 정리하자면 전기 백악기에 해당하는 약 117-104 Ma경에 형성된 화성암류는 한반도 전역에 분포한다(그림 1; Wu *et al.*, 2007; Lee *et al.*, 2010; Hwang, 2011; Kim *et al.*, 2012, 2016; Koh *et al.*, 2013; Zhai *et al.*, 2016; Im *et al.*, 2021). 이에 반해, 후기 백악기 100-80 Ma경에 형성된 화성암류는 금강산과 평택을 잇는 선으로부터 남동부 지역에 한해 주로 분포한다.

이러한 한반도의 백악기 화성암류는 고-태평양판의 섭입작용과 관련된 화산호 환경에서 형성되었음이 여러 선행연구들로부터 보고되어왔다(Lee *et al.*, 1987; Hwang and Kim, 1994a, 1994b; Yun *et al.*, 1994, 1997; Kim *et al.*, 1998; Sung *et al.*, 1998; Sung and Kim, 2012; Zhang *et al.*, 2012). 그러나 이들 화성암류의 미량원소 함량은 전형적인 화산호 환경에서 형성된 화성암과는 다른 특성을 보여준다. 117-84 Ma에 형성된 백악기 중성 및 염기성 화성암류의 경우, Ti/V 비율이 20 이상으로 전형적인 화산호 환경에서 형성된 화성암(Ti/V=<20)과는 다른 지화학적 특성을 보여주며 Nb*2-Zr/4-Y 다이어그램에서 대부분 판내부 환경에서 형성된 현무암의 성분과 유사한 지화학적 특성을 보여준다(그림 4d, 4e). 117-84 Ma에 형성된 백악기 산성 화성암류의 경우, 대부분은 Y+Nb vs. Rb 다이어그램에서 충돌 후 환경을 지시

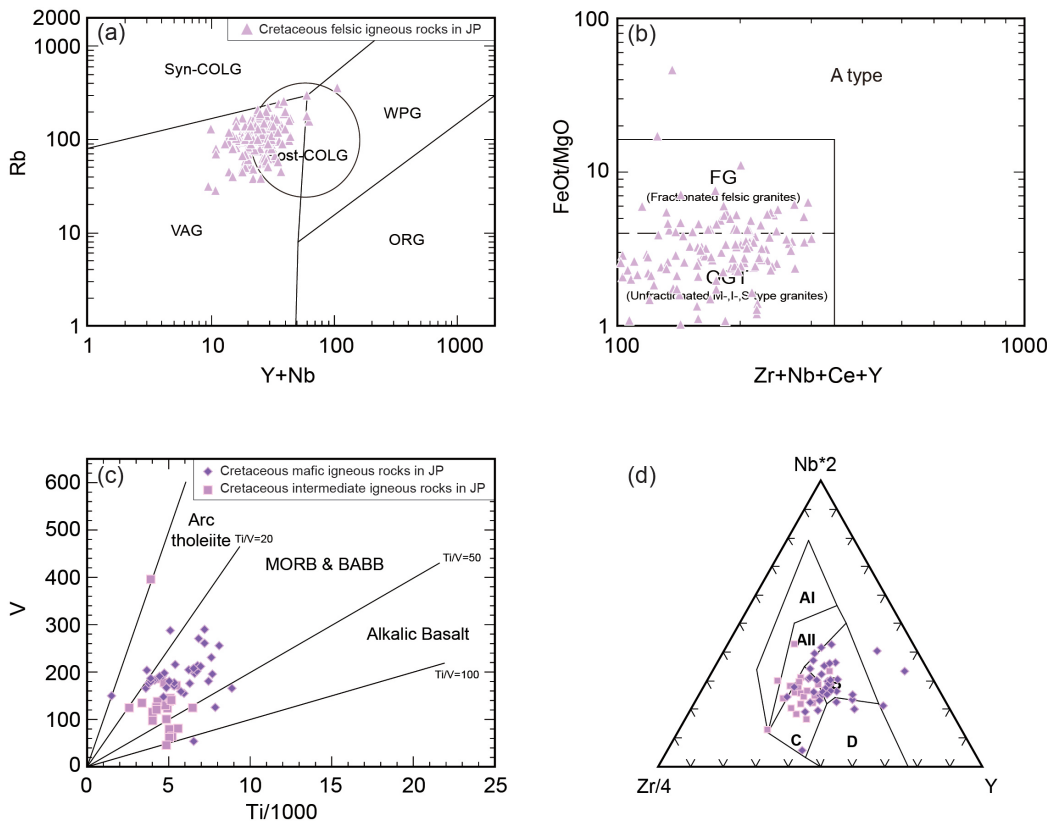


Fig. 11. Tectonic discrimination diagrams for the Cretaceous igneous rocks in the Japan. (a) Rb vs. Y + Nb diagram after Pearce *et al.* (1984); (b) FeO/MgO vs. Zr + Nb + Ce + Y diagram after Whalen *et al.* (1987); (c) V vs. Ti/1000 diagram after Shervais (1982); (d) Nb*2-Zr/4-Y diagram after Meschede (1986). Data sources are shown in figure 8. The abbreviations are described in the figure caption of figure 4.

하는 영역과 겹치는 화산호 내지 판내부 환경 영역에 도시되며 일부는 화산호 환경이 아닌 판내부 환경 영역에 도시되기도 한다(그림 4a). 이와 더불어 일부 산성 화성암류는 인장력과 관련된 지구조 환경에서 형성된 Zr, Nb, Ce, Y 함량 혹은 FeO_t/MgO 비율이 높은 A형 화강암의 성분 특성을 보여주며 이들 화성암은 모두 충돌 후 인장력에 의한 A2형 화강암 성분 특성을 보여준다(그림 4b, 4c).

이러한 한반도 백악기 화성암류와 마찬가지로 북중국판의 북동부와 남중국판 남동부 가장자리에 나타나는 백악기 산성 화성암류는 I형과 A2형 화강암 특성이 함께 나타나며 염기성 및 중성 화성암류는 판내부 환경 특성을 보여준다(그림 4, 7). 즉, 전형적인 화산호 환경 화성암류의 지화학적 특성과 구분되는 한반도 백악기 화성암류의 지화학 특성과 인장력과 관련된 지구조 환경 기원으로 해석되는 남중국판 남동부 및 북중국판 북동부 지역의 백악기 화성암류와의 지화학적 특성이 잘 대비된다. 이는 한반도의 117-84 Ma 화성암류도 남중국판 남동부와 북중국판의 북동부의 백악기 화성암류와 함께 북동아시아 하부로 섭입하던 고-태평양판의 후퇴작용이 발생시킨 광역적인 인장력과 연약권 맨틀의 상승에 인한 열의 공급에 의해 암권 맨틀 내지 대륙지각의 부분 용융되어 형성되었음을 지시한다. 일부 한반도의 117-84 Ma 화성암들이 지구조 분별도에서 화산호 환경 영역에 도시되고, 초기 맨틀 값으로 표준화시킨 미량원소 다이어그램에서 화산호 환경임을 지시하는 Nb, Ta 성분의 부의 이상치와 이온반경이 넓은 친

석원소(Large ionic lithophile element, LILE)들의 부화 특성이 관찰되나 이러한 특성들은 화산호 환경에서 일어난 것이 아니라 앞에 언급되었듯이 해양판의 후퇴작용이 일어나기 전인 쥐라기에 일어난 섭입 작용 시 형성된 암석의 특성이 잔류되어 나타나는 것으로 해석될 수 있다. 염기성-중성 화성암류의 높은 Th/Yb 비율은 마그마 분화과정에서의 지각물질의 혼염 혹은 섭입과정에서 열수 유체 혹은 퇴적물에 의한 변질작용의 산물 일수 있는데 이들 화성암류가 보이는 $(\text{Nb}/\text{Yb})_{\text{PM}}$ 증가에 따른 급격한 $(\text{Th}/\text{Yb})_{\text{PM}}$ 비율의 상승 특성은 높은 Th/Yb 비율이 섭입과정에서 발생한 근원마그마의 부화특성이 아닌 마그마 분화과정에서의 지각물질의 혼염과 작용 결과임을 지시한다(그림 12a, 12b). 따라서 일부 백악기 염기성-중성 화성암류에서 보여지는 화산호 환경 관련 지화학 특성은 백악기 이전에 발생한 섭입작용에 의해 부화된 지화학적 특성을 보유하고 있었던 지각물질과의 혼염에 의한 것으로 생각된다.

6.2 중국, 한반도, 일본을 통합한 북동아시아 백악기 지구조 진화

쥐라기 북동아시아 지역에는 고-태평양판의 섭입과 관련된 화성활동이 광범위하게 일어났으며 약 180-160 Ma에 걸쳐서는 flat subduction의 형태로 한반도를 포함한 북동아시아 하부로 해양판이 섭입함으로써 약 145 Ma경에는 북중국판 하부 지역까지 섭입하기에 이른다(Wu *et al.*, 2018; Lee *et al.*, 2021). 이러한 고-태평양판의 쥐라기 섭입작용의 영향으로

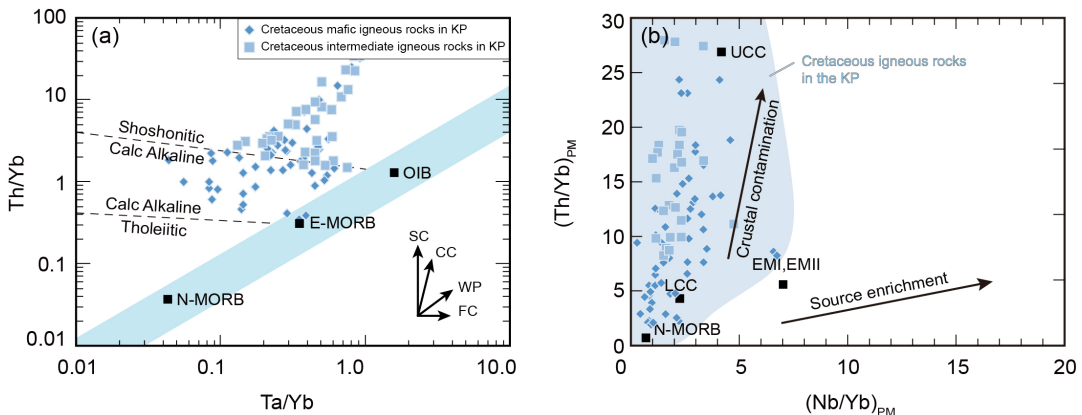


Fig. 12. Variation plots for the Cretaceous mafic and intermediate igneous rocks in the Korean Peninsula in the (a) Th/Yb vs. Ta/Yb (after Pearce, 1983); (b) $(\text{Th}/\text{Yb})_{\text{PM}}$ vs. $(\text{Nb}/\text{Yb})_{\text{PM}}$ (after Jowitt and Ernst, 2013).

북동아시아에서는 170-136 Ma경에 압축력과 관련된 안산 조산운동이 작용하여 트러스트 단층과 습곡대가 형성되었다(Dong *et al.*, 2015, 2018). 이 후 136-90 Ma경에는 인장력이 작용하여 전기 백악기에 크고 작은 퇴적분지들이 안산 습곡대 일대에 형성되었다(Li *et al.*, 2014; Dong *et al.*, 2015, 2018).

북중국판 북동부 지역에 분포하는 백악기 화성암류의 연대분포 특성은 다음과 같다. 북중국판 북서부 내륙지역인 북경 및 서부 랴오닝 지역에서 145-140 Ma에 형성된 화성암이 분포하며 랴오닝 동부지역 및 산둥 반도와 북부 요동 지역에서는 135-120 Ma 화성암이 분포한다. 그리고 120-110 Ma경에 형성된 화성암류는 산둥반도와 남부 요동지역 일대에 한해서 나타난다. 즉 북중국판 북동부 지역에 나타나는 백악기 화성암류는 북경지역에서부터 남부 요

동지역까지 남동방향으로 젊어지는 백악기 연대분포 특성을 보이며 연대범위는 145-110 Ma 전기 백악기에 해당한다. 이를 한반도 백악기 화성암의 연대분포 특성과 종합시키면 북중국판 북서부 지역인 북경에서부터 한반도 지역까지 145 Ma에서 84 Ma경까지 남동방향으로 젊어지는 백악기 연대분포 특성이 나타난다(그림 13). 그리고 선행 연구들에 의해 북중국판 북동부 지역에 분포하는 백악기 화성암류는 고-태평양판의 후퇴작용에 의해 발생한 인장력과 관련된 지구조 환경 하에서 형성되었음이 보고되었다(Wu *et al.*, 2005; Zhu *et al.*, 2012; Deng *et al.*, 2017; Keevil *et al.*, 2019).

이러한 북중국판 북동부와 한반도의 백악기 화성암의 지화학적 특징과 연령 분포로부터 해석될 수 있는 북동아시아에서 일어난 백악기 지구조 진화사

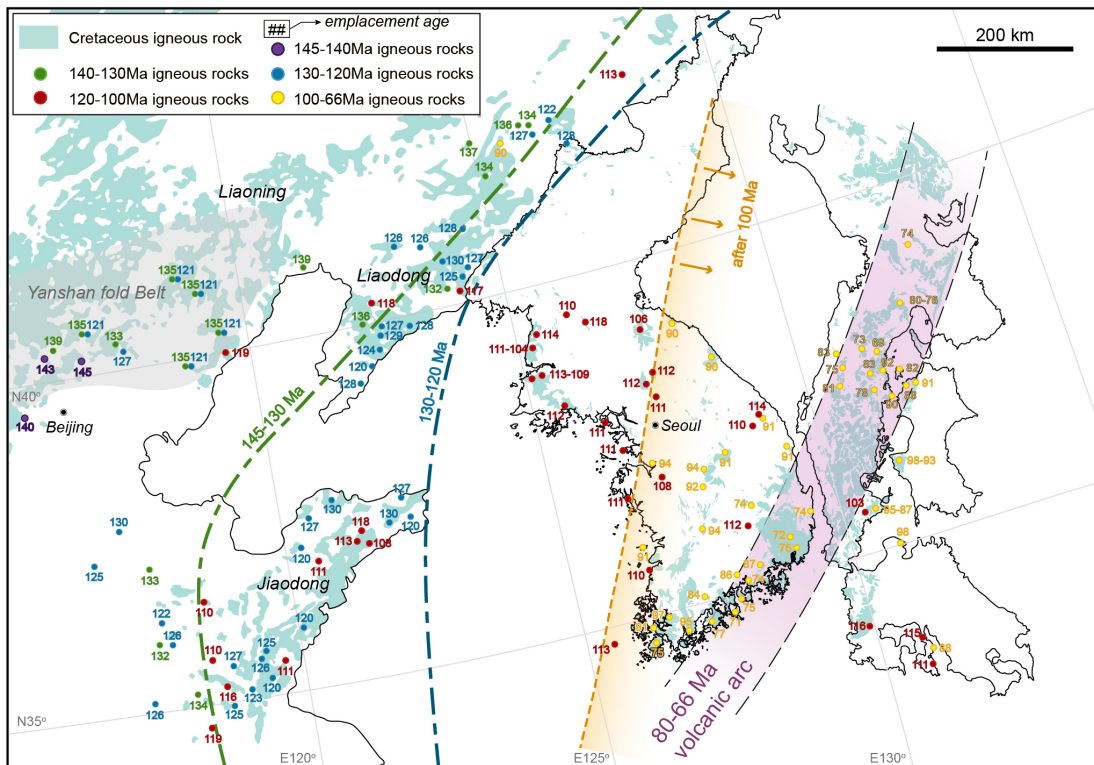


Fig. 13. Distribution map of the Cretaceous igneous rocks in the northeast Asia including northeastern North China Cratons, the Korean Peninsula and Japan. Distribution of the Cretaceous igneous rocks in the northeastern NCC is from Tang *et al.* (2018). Data sources of the age of Cretaceous igneous rocks in the Korean Peninsula are shown in figure caption from Figure 2. Data sources of the age of Cretaceous igneous rocks in the northeastern North China Cratons are shown in figure caption from Figure 5. Data sources of the age of Cretaceous igneous rocks in the Japan are shown in figure caption from Figure 8. The paleogeographic plate reconstruction of the Japanese island during the Cretaceous is after Kojima (1989) and Teraoka and Okumura (2011).

는 다음과 같다. 145 Ma경, 북중국판 북동부 지역인 북경지역까지 섭입했던 고-태평양판의 후퇴작용이 일어나 인장력이 발생하였으며 이와 관련된 화성암이 북경 주변 지역에서 형성되기 시작하였다. 이러한 섭입 해양판의 후퇴작용이 지속됨으로서 인장력이 남동방향으로 확장되어 인장력과 관련된 화성암이 130-120 Ma경에는 랴오닝 동부 지역과 북부 요동 지역에서, 그리고 110-100 Ma경에는 남부 요동 지역, 산둥반도와 한반도 북부에서 발생하였다. 100-80 Ma경에는 이러한 해양판의 후퇴작용에 의한 화성활동이 한반도 남부지역으로 전이되어 최종적으로

로 후기백악기 화성활동이 한반도 남부에 집중적으로 발생하였다.

북중국판 북동부의 백악기 화성암류는 주로 알칼리 성분을 보여주며 쇼쇼니틱 내지 높은 K 함량의 칼크 알칼리질 화성암 특성을 보이는 데에 반해, 한반도의 백악기 화성암류는 비알칼리 특성을 보이며 주로 높은 K 함량에서 중간정도의 K 함량을 함유한 칼크 알칼리질 화성암 특성을 보이며 쇼쇼니틱한 특성은 거의 보이지 않는다(그림 5c). 이는 북중국판 북동부의 백악기 화성암류가 한반도 백악기 화성암류에 비해 알칼리도($\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$)가 높은 특성을 가

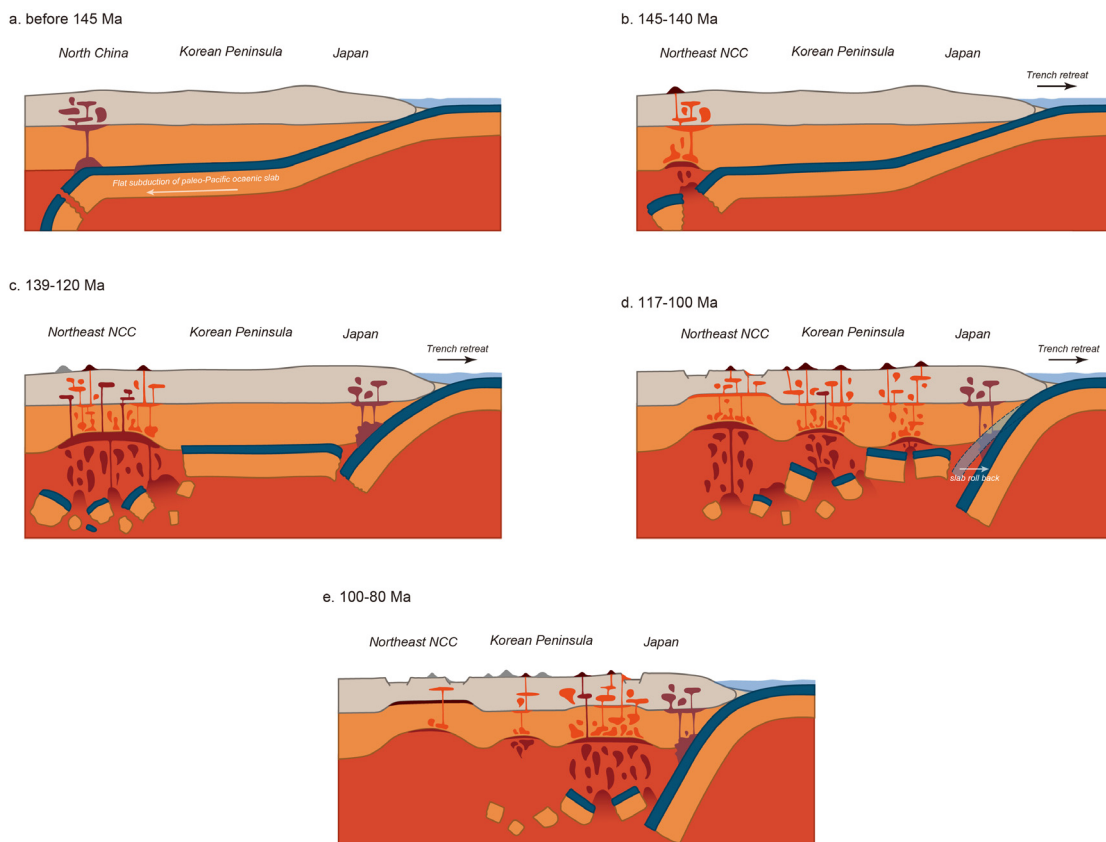


Fig. 14. Tectonic evolution model during Cretaceous in the northeast Asia including northeast North China Cratons, Korean Peninsula and Japan. (a) before 145 Ma: flat subduction of the paleo-Pacific plate with arc related igneous activity in the inland are of northeast North China Cratons, (b) 145-140 Ma: extension related 145-140 Ma igneous activity in the northeast NCC occurred by the initial break-up of the front of the flat subducted oceanic slab due to trench retreat, (c) 139-120 Ma: Southeastward propagation of the break-up of oceanic slab with mantle uplifting may have propagated resulting 139-120 Ma igneous activity in the southeastern margin of the northeast NCC, (d) 117-100 Ma: extension related igneous activity in the northern Korean Peninsula due to extension which was caused by slab roll back due to a continuous increasing subduction angle of the oceanic slab under Japan, (e) 100-80 Ma: Southeastward propagation of extension related igneous activity to the southern Korean Peninsula due to a continuous increasing oceanic subduction angle.

집을 지시한다. 또한 북중국판 북동부의 백악기 화성암류가 한반도의 백악기 화성암류에 비해, 상대적으로 더 부화된 경희토류 원소의 패턴을 보여주며 미량원소 지구조 분별도에서 판 내부환경 특성 내지, 충돌 후 환경을 지시하는 영역에 더 많이 도시되는 특성을 보인다(그림 6, 7). 이러한 북중국판 북동부 지역과 한반도에 나타나는 백악기 화성암류의 미량원소 성분의 차이는 백악기에 한반도에 비해 북중국판 북동부에서 더 높은 열과 더 많은 맨틀 성분이 공급됨에 따라 발생하였을 가능성이 있다.

일본의 북동부 및 남서부에 주로 나타나는 백악기 화성암류는 128-65 Ma 동안에 형성되었으며 일본지역의 전기 백악기 화성암류의 관입이 한반도에 서보다 먼저 시작되었음을 지시한다. 이는 북중국판 북서부에서부터 한반도 남동부 지역까지 남동방향으로 쬼어지는 백악기 화성암류의 연대분포 특성에 부합하지 않는 연대 분포이다. 이와 함께 앞에 기술되었듯이 일본지역의 백악기 화성활동은 한반도나 북중국판 북서부와 다르게 고-태평양판의 섭입작용과 관련된 전형적인 화산호 환경하에서 발생하였음이 보고되었다(Iida *et al.*, 2015; Tsuchiya *et al.*, 2015; Skrzypek *et al.*, 2016; Kawaguchi *et al.*, 2020). 일본지역의 백악기 염기성-중성 화성암류는 판내부 환경 특성보다 화산호 환경에서 형성된 화성암류와 매우 유사한 지화학 특성을 보여주며 산성 화성암류 역시 인장력과 관련된 A 형 화강암 특성을 전혀 보이지 않는다(그림 11). 또한 북중국판 북동부 지역과 한반도의 백악기 화성암류에서 관찰되던 높은 알칼리 함량이 일본지역 백악기 화성암에서는 전혀 나타나지 않으며 경희토류 원소의 함량 또한 매우 약하게 부화된 특성을 보인다(그림 10). 이러한 일본지역 백악기 화성암류의 연대분포와 지화학적 특성은 한반도와 북중국판 북동부 지역과는 다른 지구조 환경 하에서 발생하였음을 지시한다. 이와 더불어 일본지역의 전기백악기 화성암류(128-110 Ma)는 일본 남서부와 북동부 가장자리에 국한되어 분포하며 후기 백악기 화성암류는 혼슈섬 남부 료케대에서 115-85 Ma의 연대분포를 보이고, 료케대 북부 산요대와 산인대에서는 각각 103-66 Ma, 83-75 Ma의 연대분포를 보이고 있다(그림 8). 이는 한반도나 북중국판 북동부 지역에서 보이던 연대 분포 특성과는 달리 북쪽 내지 북서쪽으로 쬼어지는 경향을 보여준다(그림 8).

이러한 일본지역의 연대분포 경향성은 섭입하던 고-태평양판의 섭입각도의 감소에 의한 것일 가능성이 있다.

한반도와 북중국판 북동부, 일본지역에 나타나는 백악기 화성암류의 형성 연대 및 지화학적 특성들을 종합한 북동아시아의 백악기 지구조 진화사는 다음과 같이 제시될 수 있다. 쥐라기인 약 180-145 Ma에 북동아시아지역에 고태평양 해양판의 flat subduction이 일어났다(그림 14a). 145 Ma 경에 들어 고태평양판의 섭입 시작 지역인 해구가 후퇴하면서 인장력이 발생하기 시작하였으며 저각도 형태로 섭입했던 해양판의 전면부가 붕괴되고 이로 인한 연약권 맨틀의 상승과 관련된 화성작용이 북중국판 북동부 북경 지역 일대에서 145-140 Ma 동안 발생하게 된다(그림 14b; Zheng and Dai, 2018; Zheng *et al.*, 2018; Zhu and Xu, 2019). 145-140 Ma 이후, 지속적으로 일어난 해구 후퇴 작용과 인장력에 의해 태평양 섭입 해양판 전면부의 붕괴 현상과 연약권 맨틀의 상승이 남동방향으로 전이 되어 139-120 Ma에는 맨틀 상승과 관련된 화성작용이 북중국판 남동부 가장자리에서 발생하였다(그림 14c). 이와 함께 약 128 Ma 경에는 해구 후퇴작용에 의한 인장력으로 인해 일본지역 하부에 저각도로 섭입하던 고-태평양 해양판이 한반도와 일본 사이에서 끊어지게 되고, 일본 하부로 섭입하는 해양판의 섭입 각도가 증가하면서 화산호 환경이 형성되고 이와 관련된 화성활동이 일어났을 것으로 생각된다(그림 14c). 이 후, 120-100 Ma에는 일본 지역 하부로 섭입하던 고-태평양판 해양판 각도가 증가함에 따라 북동아시아에 일어난 광역적인 인장력이 더 강화되고, 그 결과 맨틀 상승에 의한 화성작용이 남동방향으로 확장되어 산둥반도와 한반도 북서부에 백악기 화성작용이 광역적으로 일어났을 것으로 예상된다. 이 시기에 일본지역에서는 화산호 환경과 관련된 화성활동이 지속적으로 발생하였다(그림 14d). 약 100-80 Ma에 인장력 관련 화성작용이 한반도 남동부에서 일어났으며 이는 이 시기에 섭입되던 해양판의 붕괴와 맨틀 상승이 최종적으로 한반도 남동부로 전이되었음을 지시한다. 하지만 일본에서 100 Ma 이후 섭입 관련 화성암의 연령 분포가 북서쪽으로 가면서 감소하는데 이는 이 시기 동안에 일본 하부에서 고각도로 섭입하던 해양판의 섭입각도가 다시 감소함에 따라 일어났을 가능성을 지시한다. 이러한 지구조적 상황의 변화로 인해 80 Ma

이후에 들어서는 한반도와 북중국판 북동부 지역에서는 인장력이 압축력으로 전환되어 인장력에 의한 화성작용은 중단되었다. 이에 반해, 일본 지역에서는 백악기 말 경까지 화산호 환경 하에서 지속적인 화성활동이 발생하였다(그림 14e). 100 Ma 이후 일본 내에서 화산활동이 북서쪽으로 전이되었으며 최종적으로 80 Ma 이후 백악기 말까지 일본 서부와 경상분지가 포함된 한반도 남동부 가장자리에서 섭입 관련 화성작용이 일어났을 것으로 생각된다.

7. 결 론

본 논문에서는 한반도뿐만 아니라 북중국판 북동부와 일본지역에 나타나는 백악기 화성암의 연대 및 지화학 특성에 대한 종합 검토를 바탕으로 한반도와 북중국판 북동부, 일본지역의 백악기 화성암의 연대 분포 및 지화학 특성의 차이를 밝히고 이를 바탕으로 백악기의 북동아시아의 지구조 진화사에 대한 새로운 해석을 제시하였다.

1) 중국 북동부 안산습곡대 동부 및 서부 랴오닝 지역에서는 145-130 Ma경에 형성된 백악기 화성암이 주로 나타나며 동부 랴오닝과 산둥반도, 북부 요동 지역에서는 139-120 Ma경에 형성된 백악기 화성암이 주로 나타난다. 랴오닝 이남 산둥반도 지역과 남부 요동지역이 포함된 중국과 북한의 접경지역에서는 130-120 Ma 화성암이 우세하게 나타나며 특히 산둥반도 지역은 120-110 Ma에 형성된 화성암이 우세하게 나타난다. 이들 화성암들 역시 인장력과 관련된 맨틀 상승 환경에서 형성되었다.

2) 전기 백악기 117-100 Ma에 형성된 화성암류는 한반도 전역에 걸쳐 나타나며 100-80 Ma 경에 형성된 화성암류는 금강산과 평택지역을 잇는 선으로부터 남동부에 위치한 지역에 주로 나타난다. 이들 화성암들은 판 내부에서 인장력과 관련된 환경에서 형성되었다. 따라서 북동아시아에 분포하는 백악기 화성암의 연대분포는 중국 북동부지역에서 한반도 지역으로 갈수록 145-140 Ma에서 84Ma로 젊어지는 분포 경향을 보여준다.

3) 일본지역의 백악기 화성작용은 128 Ma경에 시작되어 후기 백악기까지 계속 되었으며 고-태평양판의 섭입 활동과 관련된 화산호 환경에서 형성되었다. 이러한 연대 분포는 북중국판과 한반도에서 남동방

향으로 젊어지는 연대 분포 특성과 일치하지 않는다.

4) 쥐라기 말 경까지 고-태평양 해양판이 북동아시아 하부로 flat subduction 하면서 섭입되는 해양판의 최전단부가 서부 랴오닝 일대까지 도달하였다. 전기 백악기에 발생한 해구의 후퇴 작용에 의해 인장력이 북동아시아 지역에 발생하였다. 이 인장력에 의해 섭입된 고-태평양 해양판의 최전단부가 붕괴되었으며 이로 인해 연약권 맨틀이 상승하며 발생한 화성작용이 중국 북동부내 서부 랴오닝 지역에서 나타나기 시작하였다. 이 후 계속된 인장력에 의한 맨틀 상승과 관련된 화성작용이 점차 남동쪽으로 이동하면서 최종적으로 84 Ma경에 한반도에서 일어난 후 종료되었다.

5) 일본에서는 128 Ma경에 일본지역 하부에 위치한 고-태평양 섭입 해양판이 인장력에 의해 한반도 및 중국 북동부 지역 하부에 섭입해 있던 고태평양 해양판과 분리되면서 독립된 섭입 활동이 시작되었고 그 결과 일본지역에서는 대륙 연변부 화산호 환경 하에서의 화성작용이 발생하게 되었다. 100 Ma 이후 섭입 해양판의 섭입각도가 감소함에 따라 일본 내에서 화산활동이 북서쪽으로 전이되었으며 최종적으로 80-66 Ma동안에 일본 북서부와 경상분지가 포함된 한반도 남동부 가장자리에서 섭입 관련 화성작용이 일어났을 것으로 생각된다.

감사의 글

이 논문을 심사하면서 논문의 수준을 향상하는데에 필요한 많은 조언을 해주신 이진용 편집위원장과 익명의 편집위원과 심사위원들께 감사를 드린다. 이 연구는 정부의 재원으로 한국연구재단의 지원(NRF-2017K1A1A2013180)과 한국지질자원연구원의 주요과제인 “국토지질조사 및 지질도·지질주제도 작성 발간(GP2020-003)”에 의해 수행된 결과이다.

REFERENCES

- Cai, Y.C., Fan, H.R., Santosh, M., Hu, F.F., Yang, K.F. and Hu, Z., 2015, Subduction-related metasomatism of the lithospheric mantle beneath the southeastern North China Craton: evidence from mafic to intermediate dykes in the northern Sulu orogen. *Tectonophysics*, 659, 137-151.

- Chang, K.H., 1975, Cretaceous stratigraphy of southeast Korea. *Journal of the Geological Society of Korea*, 11, 1-23.
- Chen, B., Tian, W., Jahn, B.M. and Chen, Z.C., 2008, Zircon SHRIMP U-Pb ages and in-situ Hf isotopic analysis for the Mesozoic intrusions in South Taihang, North China craton: evidence for hybridization between mantle-derived magmas and crustal components. *Lithos*, 102, 118-137.
- Chen, W.J., Zhou, X.H., Li, Q., Yang, J.H., Li, D.M., Chen, S.H., Zheng, D.W., Wan, J.Q., Zhang, G.H. and Wang, F., 1999, Research on Mesozoic volcanic chronology, geochemistry and tectonic settings around the Liaohé River. Internal Report of the Institute of Geology, Seismological Bureau of China (in Chinese).
- Cheong, A.C.S. and Jo, H.J., 2017, Crustal evolution in the Gyeongsang Arc, southeastern Korea: Geochronological, geochemical and Sr-Nd-Hf isotopic constraints from granitoid rocks. *American Journal of Science*, 317, 369-410.
- Chough, S.K. and Sohn, Y.K., 2010, Tectonic and sedimentary evolution of a Cretaceous continental arc-back-arc system in the Korean peninsula: New view. *Earth-Science Review*, 101, 225-249.
- Deng, J., Liu, X., Wang, Q., Dilek, Y. and Liang, Y., 2017, Isotopic characterization and petrogenetic modeling of Early Cretaceous mafic diking-Lithospheric extension in the North China craton, eastern Asia. *GSA Bulletin*, 129, 1379-1407.
- Deng, J., Su, S., Mo, X., Zhao, G., Xiao, Q., Ji, G., Qiu, R., Zhao, H., Luo, Z., Wang, Y. and Liu, C., 2004, The sequence of magmatic-tectonic events and orogenic processes of Yanshan belt, North China. *Acta Geologica Sinica*, 78, 260-266.
- Deng, J., Su, S., Niu, Y., Liu, C., Zhao, G., Zhao, X., Zhou, S. and Wu, Z., 2007, A possible model for the lithospheric thinning of North China Craton: Evidence from the Yanshanian (Jura-Cretaceous) magmatism and tectonism. *Lithos*, 96, 22-35.
- Dong, S., Zhang, Y., Li, H., Shi, W., Xue, H., Li, J., Huang, S. and Wang, Y., 2018, The Yanshan orogeny and late Mesozoic multi-plate convergence in East Asia-Commemorating 90th years of the "Yanshan Orogeny". *Science China Earth Sciences*, 61, 1888-1909.
- Dong, S., Zhang, Y., Zhang, F., Cui, J., Chen, X., Zhang, S., Miao, L., Li, J., Shi, W., Li, Z., Huang, S. and Li, H., 2015, Late Jurassic-Early Cretaceous continental convergence and intracontinental orogenesis in East Asia: A synthesis of the Yanshan Revolution. *Journal of Asian Earth Sciences*, 114, 750-770.
- Dong, Y., Liu, J., Zhang, Y., Dou, S., Li, Y., Liu, S., Liu, G. and Song, Y., 2021, Early Cretaceous Xiuyan adakitic granitoids in the Liaodong Peninsula, eastern China: petrogenesis and implications for lithospheric thinning of the North China Craton. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 58, 50-66.
- Eby, G.N., 1992, Chemical subdivision of the A-type granitoids: petrogenetic and tectonic implications. *Geology*, 20, 641-644.
- Egawa, K. and Itoh, Y., 2013, East Asia-wide flat slab subduction and Jurassic synorogenic basin evolution in west Korea. *Mechanism of Sedimentary Basin Formation-Multidisciplinary Approach on Active Plate Margins*, 61-81.
- Hayasaka, Y. and Tashima, S., 2016, Late Cretaceous igneous activity and erosion history of Sanyo-Ryoke Province constrained by zircon U-Pb chronology, SW Japan. Annual meeting of the Geological Society of Japan (Abstracts). Vol. 61.
- He, Z.-Y. and Xu, X.-S., 2012, Petrogenesis of the Late Yanshanian mantle-derived intrusions in southeastern China: Response to the geodynamics of paleo-Pacific plate subduction. *Chemical Geology*, 328, 208-221.
- Hwang, B.-H., 2011, Timing of granitic magma mixing in the southeastern Gyeongsang Basin, Korea: SHRIMP-RG zircon data. *International Geology Review*, 53, 1150-1162.
- Hwang, S.K. and Kim, S.W., 1994a, Petrology of Cretaceous Volcanic Rocks in the Milyang - Yangsan Area, Korea: Petrotectonic Setting. *Journal of Geological Society of Korea*, 30, 229-241 (in Korean with English abstract).
- Hwang, S.K. and Kim, S.W., 1994b, Petrology of Cretaceous volcanic rocks in the Miryang - Yangsan area, Korea (II): Petrogenesis. *Journal of Geological Society of Korea*, 30, 229-241 (in Korean with English abstract).
- Hwang, S.K., Kim, S.W., Kee, W.S. and Kim, J.J., 2019, U-Pb zircon ages and division of the Cretaceous volcanic arc in the Korean Peninsula: Spatiotemporal evolution of the arc volcanism. *Journal of Geological Society of Korea*, 55, 595-619 (in Korean with English abstract).
- Hwang, S.K. and Woo, B.G., 2009, Role of the Cheongryangsan Conglomerate and the Osipbong Basalt in Classifying Stratigraphy of the Hayang Group, Yeongyang Subbasin. *The Journal of Petrological Society of Korea*, 18, 181-194 (in Korean with English abstract).
- Iida, K., Iwamori, H., Orihashi, Y., Park, T., Jwa, Y.J., Kwon, S.T., Danhara, T. and Iwano, H., 2015, Tectonic reconstruction of batholith formation based on the spatiotemporal distribution of Cretaceous-Paleogene granitic rocks in southwestern Japan. *Island Arc*, 24, 205-220.
- Iizumi, S., Imaoka, T. and Kagami, H., 2000, Sr-Nd isotope ratios of gabbroic and dioritic rocks in a Cretaceous-Paleogene granite terrain, Southwest Japan. *Island Arc*, 9, 113-127.

- Im, S., Park, J.W., Kim, J., Choi, S.G. and Lee, M.J., 2021, Petrogenesis of coeval shoshonitic and high-K calc-alkaline igneous suites in the Eopyeong granitoids, Taebaeksan Basin, South Korea: Lithospheric thinning-related Early Cretaceous magmatism in the Korean Peninsula. *Lithos*, 392, 106127.
- Imaoka, T., Nakajima, T. and Itaya, T., 1993, K-Ar ages of hornblendes in andesite and dacite from the Cretaceous Kanmon Group, Southwest Japan. *Journal of Mineralogy, Petrology and Economic Geology*, 88, 265-271.
- Irvine, T.N. and Baragar, W.R.A., 1971, A guide to chemical classification of the common volcanic rocks. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 8, 523-548.
- Ishihara, S. and Chappell, B.W., 2007, Chemical compositions of the late Cretaceous Ryoke granitoids of the Chubu District, central Japan-Revisited. *Bulletin of the Geological Survey of Japan*, 58, 323-350.
- Ishihara, S. and Ohno, T., 2016, Geochemical variation of the Late Cretaceous-Paleogene granitoids across the Ehime-Hiroshima-Shimane transect, Japan. *Bulletin of the Geological Survey of Japan*, 67, 41-58.
- Ishihara, S. and Orihashi, Y., 2015, Cretaceous granitoids and their zircon U-Pb ages across the south-central part of the Abukuma Highland, Japan. *Island Arc*, 24, 159-168.
- Jeon, Y.M. and Sohn, Y.K., 2008, Characteristics, emplacement processes, and stratigraphic implications of the basalts intercalated in the Hayang Group, Cretaceous Gyeongsang Basin, SE Korea. *Journal of the Geological Society of Korea*, 44, 707-727 (in Korean with English abstract).
- Jiang, Y.H., Jiang, S.Y., Ling, H.F. and Ni, P., 2010, Petrogenesis and tectonic implications of Late Jurassic shoshonitic lamprophyre dikes from the Liaodong Peninsula, NE China. *Mineralogy and Petrology*, 100, 127-151.
- Jowitt, S.M. and Ernst, R.E., 2013, Geochemical assessment of the metallogenic potential of Proterozoic LIPs of Canada. *Lithos*, 174, 291-307.
- Kamei, A., 2002, Petrogenesis of Cretaceous peraluminous granite suites with low initial Sr isotopic ratios, Kyushu Island, southwest Japan arc. *Gondwana Research*, 5, 813-822.
- Kamei, A., Owada, M., Nagao, T. and Shiraki, K., 2004, High-Mg diorites derived from sanukitic HMA magmas, Kyushu Island, southwest Japan arc: evidence from clinopyroxene and whole rock compositions. *Lithos*, 75, 359-371.
- Kawaguchi, K., Hayasaka, Y., Das, K., Shibata, T. and Kimura, K., 2020, Zircon U-Pb geochronology of "Sashu mylonite", eastern extension of Higo Plutono-metamorphic Complex, Southwest Japan: Implication for regional tectonic evolution. *Island Arc*, 29, e12350.
- Kee, W.-S., Kim, S.W., Jeong, Y.J. and Kwon, S., 2010, Characteristics of Jurassic continental arc magmatism in South Korea: Tec-tonic implications. *Journal of Geology*, 118, 305-323.
- Keevil, H.A., Monecke, T., Goldfarb, R.J., Möller, A. and Kelly, N.M., 2019, Geochronology and geochemistry of Mesozoic igneous rocks of the Hunjiang basin, Jilin Province, NE China: Constraints on regional tectonic processes and lithospheric delamination of the eastern North China block. *Gondwana Research*, 68, 127-157.
- Kim, C.-S., Yun, S.-H. and Cheong, C.-S., 1998, Volcanic stratigraphy and petrology of the cretaceous volcanic rocks in the Mt. Sinbul-Youngchui area, Korea. *Journal of Geological Society of Korea*, 34, 137-154 (in Korean with English abstract).
- Kim, K.H. and Lee, J.S., 1993, Petrochemical studies of the Cretaceous volcanic rocks from the Kyeongsang sedimentary Basin. *Journal of Geological Society of Korea*, 29, 84-96 (in Korean with English abstract).
- Kim, S.W., Kwon, S., Jeong, Y.-J., Kee, W.-S., Lee, B.C., Byun, U.H., Ko, K., Cho, D.-L., Hong, P.S., Park, S.-I. and Santosh, M., 2020, The Middle Permian to Triassic tectono-magmatic system in the southern Korean Peninsula. *Gondwana Research*, In Press.
- Kim, S.W., Kwon, S., Koh, H.J., Yi, K., Jeong, Y. and Santosh, M., 2011, Geotectonic framework of Permo-Triassic magmatism within the Korean Peninsula. *Gondwana Research*, 20, 865-889.
- Kim, S.W., Kwon, S., Park, S.I., Lee, C., Cho, D.L., Lee, H.J., Ko, K. and Kim, S.J., 2016, SHRIMP U-Pb dating of the Cretaceous plutonic rocks in the Korean Peninsula: A new tectonic model of the Cretaceous Korean Peninsula. *Lithos*, 262, 88-106.
- Kim, S.W., Kwon, S., Ryu, I.C., Jeong, Y.J., Choi, S.J., Kee, W.-S., Yi, K., Lee, Y.S., Kim, B.C. and Park, D.W., 2012, Characteristics of the Early Cretaceous igneous activity in the Korean Peninsula and tectonic implications. *Journal of Geology*, 120, 625-646.
- Kim, Y.B., Choi, S.J. and Cho, D.-L., 2014, Geological Report of the Yeongam Sheet (1:50,000). Daejeon, Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources, p. 50 (in Korean with English abstract).
- Koh, H.J., Kwon, C.W., Park, S.-I., Park, J. and Kee, W.-S., 2013, Geological Report of the Julpo Sheet (1:50,000). Daejeon, Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources, p. 81 (in Korean with English abstract).
- Kon, Y. and Takagi, T., 2012, U-Pb zircon ages of Abukuma granitic rocks in the western Abukuma plateau, north-eastern Japan Arc. *Journal of Mineralogical and Petrological Sciences*, 107, 183-191.

- Kojima, S., 1989, Mesozoic terrane accretion in Northeast China, Sikhote-Alin and Japan regions. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 69, 213-232.
- Kwon, S.-K., Choi, S.H. and Lee, D.-C., 2013, Sr-Nd-Hf-Pb isotope geochemistry of basaltic rocks from the Cretaceous Gyeongsang Basin, South Korea: Implications for basin formation. *Journal of Asian Earth Sciences*, 73, 504-519.
- Lee, D.W., 1999, Strike-slip fault tectonics and Basin formation during the Cretaceous. *Island Arc*, 8, 218-231.
- Lee, S.G., Shin, S.C., Kim, K.H., Lee, T., Koh, H. and Song, Y.S., 2010, Petrogenesis of three Cretaceous granites in the Okcheon metamorphic belt, South Korea: Geochemical and Nd-Sr-Pb isotopic constraints. *Gondwana Research*, 17, 87-101.
- Lee, S.H., Oh, C.W. and Jung, S., 2021, Jurassic Igneous Activity in the Yuseong Area on the Southern Margin of the Gyeonggi Massif, Korean Peninsula, and Its Implications for the Tectonic Evolution of Northeast Asia during the Jurassic. *Minerals*, 11, 466.
- Lee, S.H., Oh, C.W. and Park, J.W., 2020, The age and geochemistry of the mid-Cretaceous volcanic rocks in the Jinan Basin: Implications for the mid-Cretaceous tectonic environments of the Korean Peninsula and Northeast Asia. *Lithos*, 358, 105383.
- Lee, S.-M., Kim, S.-U. and Jin, M.-S., 1987, Igneous activities of the Cretaceous to the early Tertiary and their tectonic implications in South Korea. *Journal of Geological Society of Korea*, 23, 338-359 (in Korean with English abstract).
- Li, J., Ma, Z., Zhang, Y., Dong, S., Li, Y., Lu, M.A. and Tan, J., 2014, Tectonic evolution of Cretaceous extensional basins in Zhejiang Province, eastern South China: Structural and geochronological constraints. *International Geology Review*, 56, 1602-1629.
- Li, X.H., 2000, Cretaceous magmatism and lithospheric extension in Southeast China. *Journal of Asian Earth Sciences*, 18, 293-305.
- Li, X.H., Fan, H.R., Hu, F.F., Hollings, P., Yang, K.F. and Liu, X., 2019, Linking lithospheric thinning and magmatic evolution of late Jurassic to early Cretaceous granitoids in the Jiaobei Terrane, southeastern North China Craton. *Lithos*, 324, 280-296.
- Li, Z.X. and Powell, C.M., 2001, An outline of the palaeogeographic evolution of the Australasian region since the beginning of the Neoproterozoic. *Earth-Science Reviews*, 53, 237-277.
- Liu, L., Xu, X. and Xia, Y., 2014, Cretaceous Pacific plate movement beneath SE China: Evidence from episodic volcanism and related intrusions. *Tectonophysics*, 614, 170-184.
- Liu, L., Xu, X. and Xia, Y., 2016, Asynchronizing paleo-Pacific slab rollback beneath SE China: insights from the episodic late Mesozoic volcanism. *Gondwana Research*, 37, 397-407.
- Liu, L., Xu, X. and Zou, H., 2012, Episodic eruptions of the Late Mesozoic volcanic sequences in southeastern Zhejiang, SE China: Petrogenesis and implications for the geodynamics of paleo-Pacific subduction. *Lithos*, 154, 166-180.
- Liu, S., Hu, R., Gao, S., Feng, C., Qi, Y., Wang, T., Feng, G. and Coulson, I.M., 2008, U-Pb zircon age, geochemical and Sr-Nd-Pb-Hf isotopic constraints on age and origin of alkaline intrusions and associated mafic dikes from Sulu orogenic belt, Eastern China. *Lithos*, 106, 365-379.
- Liu, S., Hu, R., Gao, S., Feng, C., Yu, B., Feng, G., Qi, Y., Wang, T. and Coulson, I.M., 2009, Petrogenesis of Late Mesozoic mafic dykes in the Jiaodong Peninsula, eastern North China Craton and implications for the founding of lower crust. *Lithos*, 113, 621-639.
- Liu, S., Zou, H., Hu, R., Zhao, J. and Feng, C., 2006, Mesozoic mafic dikes from the Shandong Peninsula, North China Craton: petrogenesis and tectonic implications. *Geochemical Journal*, 40, 181-195.
- Maniar, P.D. and Piccoli, P.M., 1989, Tectonic discrimination of granitoids. *Geological Society of America Bulletin*, 101, 635-643.
- Mateen, T., Okamoto, K., Chung, S.-L., Wang, K.-L., Lee, H.-Y., Abe, S., Mita, Y., Rehman, H.U., Terabayashi, M. and Yamamoto, H., 2019, LA-ICP-MS zircon U-Pb age and Hf isotope data from the granitic rocks in the Iwakuni area, southwest Japan: re-evaluation of emplacement order and the source magma. *Geosciences Journal*, 23, 917-931.
- Meschede, M., 1986, A method of discriminating between different types of mid-ocean ridge basalts and continental tholeiites with the Nb-1bZr-1bY diagram. *Chemical geology*, 56, 207-218.
- Middlemost, E.A., 1994, Naming materials in the magma/igneous rock system. *Earth-Science Reviews*, 37, 215-224.
- Nakajima, T., Kamiyama, H., Williams, I.S. and Tani, K., 2004, Mafic rocks from the Ryoke Belt, southwest Japan: implications for Cretaceous Ryoke/San-yo granitic magma genesis. *Earth and Environmental Science Transactions of The Royal Society of Edinburgh*, 95, 249-263.
- Nakajima, T., Takahashi, M., Imaoka, T. and Shimura, T., 2016, Granitic rocks. In: Moreno, T., Wallis, S., Kojima, T. and Gibbons, W. (eds.), *The geology of Japan*. The Geological Society of London, London, 251-272.

- 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. and Kusky, T., 2007, The late permian to triassic hongseong-odesan collision belt in South Korea, and its tectonic correlation with China and Japan. *International Geology Review*, 49, 636-657.
- Oh, C.W. and Lee, B.C., 2019, The relationship between systematic metamorphic patterns and collisional processes along the Qinling-Sulu-Odesan collisional belt between the North and South China Cratons. *Geological Society, London, Special Publications*, 478, 449-475.
- Park, S.-I., Noh, J., Cheong, H.J., Kwon, S., Song, Y., Kim, S.W. and Santosh, M., 2019, Inversion of two-phase extensional basin systems during subduction of the Paleo-Pacific plate in the SW Korean Peninsula: Implication for the Mesozoic "Laramide-style" orogeny along East Asian continental margin. *Geoscience Frontier*, 10, 909-925.
- Pearce, J.A., 1983, Role of the sub-continental lithosphere in magma genesis at active continental margins. *Continental Basalts and Mantle Xenoliths*, 230-249.
- Pearce, J.A., Harris, N.B. and Tindle, A.G., 1984, Trace element discrimination diagrams for the tectonic interpretation of granitic rocks. *Journal of petrology*, 25, 956-983.
- Peccerillo, A. and Taylor, S.R., 1976, Geochemistry of eocene calc-alkaline volcanic rocks from the Kastamonu area, Northern Turkey. *Contributions of Mineralogy and Petrology*, 58, 63-81.
- Pei, F.P., Xu, W.L., Yang, D.B., Yu, Y., Wang, W. and Zhao, Q.G., 2011, Geochronology and geochemistry of Mesozoic mafic-ultramafic complexes in the southern Liaoning and southern Jilin provinces, NE China: constraints on the spatial extent of destruction of the North China Craton. *Journal of Asian Earth Sciences*, 40, 636-650.
- Ryang, W.H., 2013, Characteristics of strike-slip basin formation and sedimentary fills and the Cretaceous small basins of the Korean Peninsula. *Journal of the Geological Society of Korea*, 49, 31-45.
- Sagong, H., Kwon, S.T., Cheong, C.S. and Choi, S.H., 2001, Geochemical and isotopic studies of the Cretaceous igneous rocks in the Yeongdong Basin, Korea: implications for the origin of magmatism in pull-apart basin. *Geosciences Journal*, 5, 191.
- Sagong, H., Kwon, S.-T. and Ree, J.-H., 2005, Mesozoic episodic magmatism in South Korea and its tectonic implication. *Tectonics*, 24, <https://doi.org/10.1029/2004TC001720>.
- Shervais, J.W., 1982, Ti-V plots and the petrogenesis of modern and ophiolitic lavas. *Earth and Planetary Science Letters*, 59, 101-118.
- Skrzypek, E., Kato, T., Kawakami, T., Sakata, S., Hattori, K., Hirata, T. and Ikeda, T., 2018, Monazite behavior and time-scale of metamorphic processes along a low-pressure/high-temperature field gradient (Ryoke Belt, SW Japan). *Journal of Petrology*, 59, 1109-1144.
- Skrzypek, E., Kawakami, T., Hirajima, T., Sakata, S., Hirata, T. and Ikeda, T., 2016, Revisiting the high temperature metamorphic field gradient of the Ryoke Belt (SW Japan): New constraints from the Iwakuni-Yanai area. *Lithos*, 260, 9-27.
- Suga, K. and Yeh, M.W., 2020, Secular variation of Early Cretaceous granitoids in Kyushu, SW Japan: the role of mélange rocks as a possible magma source. *Frontiers in Earth Science*, 8, 95.
- Sun, J.F. and Yang, J.H., 2009, Early Cretaceous A-type granites in the eastern North China Craton with relation to destruction of the craton. *Journal of China University of Geosciences*, 34, 137-147.
- Sun, S.S. and McDonough, W.F., 1989, Chemical and isotopic systematic of oceanic basalt: Implications for mantle composition and processes. In: Saunders, A.D., Norry, M.J. (Eds.), *Magmatism in the Ocean Basins*. The Geological Society of London, 42, 313-345.
- Sung, J.G. and Kim, J.S., 2012, Petrochemical characteristics and review on petrogenesis on Cretaceous to Tertiary volcanic rocks in the Kyongsang Basin. *The Journal of Petrological Society of Korea*, 2, 217-233 (in Korean with English abstract).
- Sung, J.G., Kim, J.S. and Lee, J.D., 1998, Petrochemical study on the Cretaceous volcanic rocks in Kyeongsang Basin, Korea: possibility of magma heterogeneity. *Economic and Environmental Geology*, 3, 249-264 (in Korean with English abstract).
- Tang, J., Xu, W., Wang, F. and Ge, W., 2018, Subduction history of the Paleo-Pacific slab beneath Eurasian continent: Mesozoic-Paleogene magmatic records in Northeast Asia. *Science China Earth Sciences*, 61, 527-559.
- Tang, J., Xu, W., Wang, F., Zhao, S. and Li, Y., 2015, Geochronology, geochemistry, and deformation history of Late Jurassic-Early Cretaceous intrusive rocks in the Erguna Massif, NE China: Constraints on the late Mesozoic tectonic evolution of the Mongol-Okhotsk orogenic belt. *Tectonophysics*, 658, 91-110.
- Tani, K., Horie, K., Dunkley, D. and Ishihara, S., 2014, Pulsed granitic crust formation revealed by comprehensive SHRIMP zircon dating of the SW Japan granitoids. *Japan Geoscience Union Meeting 2014 Abstract*, Yokohama, SCG61-01.
- Teraoka, Y. and Okumura, K., 2011, Geological map of

- Asia, scale 1 : 5,000,000. Geological Survey of Japan, AIST, Tsukuba.
- Tsuchiya, N., Takeda, T., Adachi, T., Nakano, N., Osanai, Y. and Adachi, Y., 2015, Early Cretaceous adakitic magmatism and tectonics in the Kitakami Mountains, Japan. *Japanese Magazine of Mineralogical and Petrological Sciences*, 44, 69-90 (in Japanese with English abstract).
- Wan, L., Zeng, Z., Kusky, T., Asimow, P., He, C., Liu, Y., Yang, S. and Xu, S., 2019, Geochemistry of middle-late Mesozoic mafic intrusions in the eastern North China Craton: New insights on lithospheric thinning and decratonization. *Gondwana Research*, 73, 153-174.
- Whalen, J.B., Currie, K.L. and Chappell, B.M., 1987, A-type granites: Geochemical characteristic, discrimination and petrogenesis. *Contribution to Mineralogy and Petrology*, 95, 407-419.
- Williams, I.S., Cho, D.-L. and Kim, S.W., 2009, Geochronology, and geochemical and Nd-Sr isotopic characteristics, of Triassic plutonic rocks in the Gyeonggi massif, South Korea: constraints on Triassic post-collisional magmatism. *Lithos*, 107, 239-256.
- Wu, F.-Y., Han, R.-H., Yang, J.-H., Wilde, S.A., Zhai, 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, F.Y., Lin, J.Q., Wilde, S.A. and Yang, J.H., 2005, Nature and significance of the Early Cretaceous giant igneous event in eastern China. *Earth and Planetary Science Letters*, 233, 103-119.
- Wu, F.-Y., Sun, D.-Y., Ge, W.-C., Zhang, Y.-B., Grant, M.L., Wilde, S.A. and Jahn, B.-M., 2011, Geochronology of the Phanerozoic granitoids in northeastern China. *Journal of Asian Earth Sciences*, 41, 1-30.
- Wu, F.Y., Yang, J.H., Xu, Y.G., Wilde, S.A. and Walker, R.J., 2018, Destruction of the North China craton in the Mesozoic. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 47, 173-195.
- Wu, J.T.J. and Wu, J., 2019, Izanagi-Pacific ridge subduction revealed by a 56 to 46 Ma magmatic gap along the northeast Asian margin. *Geology*, 47, 953-957.
- Yang, J.H., Wu, F.Y., Wilde, S.A., Chen, F., Liu, X.M. and Xie, L.W., 2008, Petrogenesis of an alkali syenite-granite-rhyolite suite in the Yanshan Fold and Thrust Belt, Eastern North China Craton: geochronological, geochemical and Nd-Sr-Hf isotopic evidence for lithospheric thinning. *Journal of Petrology*, 49, 315-351.
- Yang, W. and Li, S., 2008, Geochronology and geochemistry of the Mesozoic volcanic rocks in Western Liaoning: Implications for lithospheric thinning of the North China Craton. *Lithos*, 102, 88-117.
- Yi, S.B., Oh, C.W., Lee, S.Y., Choi, S.G., Kim, T. and Yi, K., 2016, Triassic mafic and intermediate magmatism associated with continental collision between the North and South China Cratons in the Korean Peninsula. *Lithos*, 246, 149-164.
- Yun, S.H., Kim, J.S. and Kim, Y.L., 1994, Petrology of the cretaceous Volcanic Rocks in Pusan Area, Korea (II): Petrogenesis and Tectonic setting. *Journal of Korean Earth Sciences Society*, 15, 356-365 (in Korean with English abstract).
- Yun, S.H., Lee, J.D., Lee, S.W., Koh, J.S. and Seo, Y.J., 1997, Petrology of the volcanic rocks in Geoje island, South Korea. *The Journal of Petrological Society of Korea*, 6, 1-18 (in Korean with English abstract).
- Zhai, M., Zhang, Y., Zhang, X., Wu, F., Peng, P., Li, Q., Hou, Q., Li, T. and Zhao, L., 2016, Renewed profile of the Mesozoic magmatism in Korean Peninsula: Regional correlation and broader implication for cratonic destruction in the North China Craton. *Science China Earth Sciences*, 59, 2355-2388.
- Zhang, C., Ma, C.Q., Liao, Q.A., Zhang, J.Y. and She, Z.B., 2011, Implications of subduction and subduction zone migration of the Paleo-Pacific Plate beneath eastern North China, based on distribution, geochronology, and geochemistry of Late Mesozoic volcanic rocks. *International Journal of Earth Sciences*, 100, 1665-1684.
- Zhang, Y.-B., Zhai, M., Hou, Q.-L., Li, T.-S., Liu, F. and Hu, B., 2012, Late Cretaceous volcanic rocks and associated granites in Gyeongsang Basin, SE Korea: Their chronological ages and tectonic implications for cratonic destruction of the North China Craton. *Journal of Asian Earth Sciences*, 47, 252-264.
- Zheng, J.P. and Dai, H.K., 2018, Subduction and retreating of the western Pacific plate resulted in lithospheric mantle replacement and coupled basinmountain respond in the North China Craton. *Science China Earth Sciences*, 61, 406-424.
- Zheng, Y., Xu, Z., Zhao, Z. and Dai, L., 2018, Mesozoic mafic magmatism in North China: Implications for thinning and destruction of cratonic lithosphere. *Science China Earth Sciences*, 61, 353-385.
- Zhu, R.X., Yang, J.H. and Wu, F.Y., 2012, Timing of destruction of the North China Craton. *Lithos*, 149, 51-60.
- Zhu, R. and Xu, Y., 2019, The subduction of the west Pacific plate and the destruction of the North China Craton. *Science China Earth Sciences*, 62, 1340-1350.

Received : July 19, 2021

Revised : August 23, 2021

Accepted : August 24, 2021