

백악기 동아시아 신지구조 모델: 맨틀 플룸의 역할

이창열*

연세대학교 지구시스템학과

A New Tectonic Model of Cretaceous East Asia: Role of Mantle Plume

Changyeol Lee*

Department of Earth System Sciences, Yonsei University, Seoul 03722, Republic of Korea

(Received: 6 September 2019 / Revised: 1 October 2019 / Accepted: 1 October 2019)

The hypothesis of ridge subduction which explains the Cretaceous igneous activities in East Asia including China, Korea and Japan, has been widely accepted in the society. Especially, the hypothesis explains the southwest-to-northeast migration of the Cretaceous adakite emergence in Southwest Japan. However, the hypothesis has several issues because the geochemical analyses and plate reconstruction model are not consistent with the consequences of the ridge subduction. To resolve the issues, a new hypothesis of the plume-continent and plume-slab interaction is suggested, which explains the igneous activities during the Cretaceous. In this review, I briefly introduce the two hypotheses and suggest an additional future study to prove the new hypothesis.

Key words : Cretaceous, igneous activity, ridge subduction, plume-continent and plume-slab interaction

중국, 한국 그리고 일본을 포함한 동아시아 지역의 백악기 시기 화성 활동을 설명하기 위하여 해령 섭입 가설이 제안되어 널리 받아들여 졌다. 특히, 해령 섭입 가설은 남서일본에서 발견되는 아다카이트의 북동 방향으로의 분출 시기의 감소를 잘 설명하였다. 그러나, 해령 섭입 가설은 이후 밝혀진 지구화학 연구 결과 및 판재구성 모델과 배치되기 때문에 여러 문제점을 지닌다. 따라서, 해령 섭입 가설의 문제점을 극복하고 이 시기 화성 활동을 설명하기 위한 플룸-대륙 및 플룸-슬랩 상호 작용 가설이 제안되었고 이 가설은 해령 섭입 가설이 내포한 문제점을 극복할 뿐만 아니라 동아시아 지역의 백악기 화성 활동을 설명할 수 있다. 이 고찰에서는 해령 섭입 가설과 그 대안인 플룸-대륙 및 플룸-슬랩 상호 작용 가설에 대해 요약하여 소개하고 이 대안 가설을 증명하기 위한 추가 연구에 대해 제언한다.

주요어 : 백악기, 화성 활동, 해령 섭입, 플룸-대륙 및 플룸-슬랩 상호 작용

1. 서 론

쥬라기-백악기 시기 동아시아의 지구조는 크게 양쯔 지괴(Yangtze Craton)와 남동중국 습곡계(Southeast China Fold System)를 포함하는 남중국지괴(South China Craton)와 북중국지괴(North China Craton), 그리고 이 두 지괴의 충돌에 의해 형성된 칭링-다비-술

루 충돌대(Qingling-Dabie-Sulu Belt), 한반도 그리고 현재의 일본 열도로 구성된 대륙 지각들과 이 대륙 지각 하부에 섭입(subduction)한 이자나기 판(Izanagi Plate)으로 구성되어 있다(Figure 1). 따라서 이 지구조 중심에 위치한 한반도의 지구조사를 이해하는 것은 중국 및 일본 지각으로 경계지어진 동아시아 지구조사를 이해하는데 중요하다. 그러므로 국내 및 국외 지질과학

This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided original work is properly cited.

*Corresponding author: changyeol.lee@yonsei.ac.kr

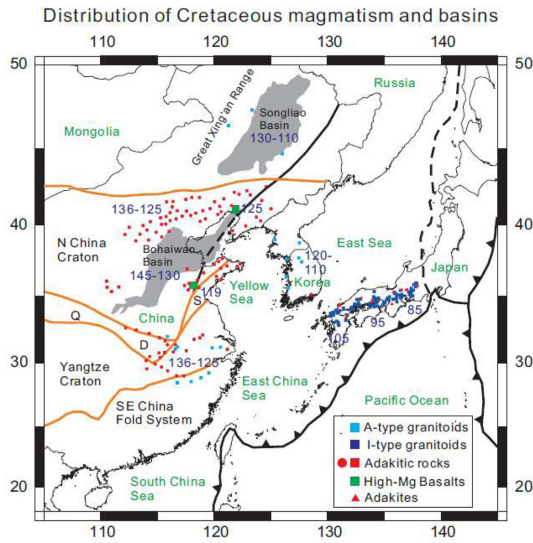


Fig. 1. Tectonomagmatism and basins in East Asia during the Cretaceous depicted on a present-day map. a) A-type granitoids (cyan squares), I-type granitoids (blue squares), adakitic rocks (extrusive: red circles; intrusive: red squares), high-Mg basalts (e.g., picrites) (large green squares), adakites (red triangles), basin-and-range-type basins (gray shaded areas) are described with symbols. The blue numbers represent the ages of the igneous rocks and basin development. Q, D and S represent Qingling, Dabie and Sulu regions, respectively. Modified from Ryu and Lee (2017).

자들에 의하여 한반도의 지구조사 연구가 활발히 수행 되었으며 그 중에서도 쥐라기-백악기 시기 화성 활동의 특성에 대한 연구가 오랫동안 수행되어 왔다.

지금까지 밝혀진 쥐라기-백악기 시기 한반도 화성 활동은 이자나기 판의 섭입에 의한 호화산 활동(arc-volcanism)과 배호(back-arc)에서의 화성 활동으로 특징 지어 진다(Kim *et al.*, 2016; Kim *et al.*, 2012). 후기 쥐라기와 전기 백악기(160-120 Ma)에는 한반도 전역에 화성 작용이 거의 일어나지 않았으며(휴지기: magmatic quiescence) 이는 이 시기에 한반도 지각권 하부에 평탄 섭입(flat subduction)이 존재하여 맨틀 쉼기(mantle wedge)의 부분 용융(partial melting)이 일어나지 않았기 때문인 것으로 해석되었다(Kim *et al.*, 2016). 휴지기 이후의 한반도의 화성 활동은 슬랩 후퇴(slab roll-back)와 섭입 각도의 변화와 관련된 I- 및 A-형 화강암체(granitoids)와 경상 분지의 형성, 그리고 한반도 남부 지방에서 주로 발생한 호화산 작용으로 설명되었다(Chough and Sohn, 2010). 그러므로 백악기 한반도의 화성 활동은 같은 시기 중국과 일본의 화

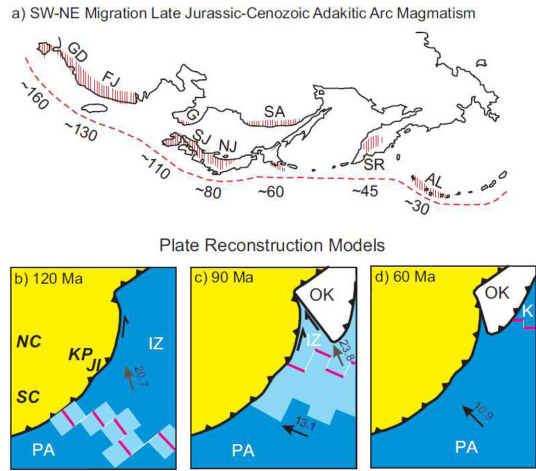


Fig. 2. Schematic map of the southwest-to-northeast distribution of Late Jurassic–Cenozoic adakitic arc magmatism in East Asia and snapshots at 120, 90 and 60 Ma of the plate reconstruction models. a) The Late Jurassic–Cenozoic adakitic arc magmatism is modified from Kinoshita (1995). The abbreviations GD, FJ, G, SJ, NJ, SA, SR, and AL represent Guangdong, Fujian, Gyeongsang, southwest Japan, northwest Japan, Sikhote-Alin, Sredinny, and the Aleutians, respectively. The red dashed line indicates the Late Jurassic–Cenozoic trench, and the numbers along the trench indicate the ages of the adakitic arc magmatism. b-d) The plate reconstruction model is based on Maruyama *et al.* (1997). The abbreviations NC, SC, KP, JI, IZ, OK, and PA represent the North China, South China, Korean Peninsula, Japanese Islands, Izanagi, Okhotsk, and Pacific plates, respectively. The units for convergence rate and slab age are cm/y and Ma, respectively. The magenta Izanagi–Pacific ridge is fragmented by the white transform faults.

성 활동이 주로 해령 섭입(ridge subduction)과 관련된 해석된 것과 다른 해석을 보여준다(Kim *et al.*, 2016).

동아시아 지구조사에 대한 과거 연구들을 통하여 제시된 주목할 사건으로 백악기 시기 이 지역에 발생하였던 해령 섭입을 들 수 있다(e.g., Isozaki *et al.*, 2010; Kinoshita, 2002; Maruyama *et al.*, 1997) (Figure 2). 해령 섭입 가설은 쥐라기 후기부터 백악기 후기까지 현재의 남동중국에서 연해주까지 이르는 과거 섭입대를 따라 이자나기 판과 태평양 판의 발산 경계인 해령이 수직으로 섭입하면서 북동 방향을 따라 이동하였다는 가설이다(Maruyama *et al.*, 1997). 이를 뒷받침하는 화성 활동으로서 이 지역 섭입대에서 발견되는 아다카이트(adakite)의 연대가 제시되었다. 해령 섭입 가설은 이후 학계에서 널리 받아들여져 이에 기

반한 많은 후속 연구들이 수행되었다.

그러나, 최근 제시된 이 지역에 해당하는 판재구성 모델(plate reconstruction model) (Gurnis *et al.*, 2012; Sdrolias and Müller, 2006)은 백악기 동아시아에서 발생한 해령 섭입의 존재 자체에 대한 의문을 제시하였다. 판재구성 모델에 따르면, 백악기 시기 이자나기 판이 동아시아 대륙 주변부를 따라 섭입하였으며 태평양 판과 경계지어진 해령은 백악기 최후기와 신생대 초기에 동아시아 섭입대 전체에 걸쳐 섭입하였음이 제시되었다. 이는 해령 섭입 가설을 부정하는 것으로써 동아시아 지구조사를 다른 관점에서 재해석해야함을 지시한다. 또한 한반도의 화성 활동이 재해석에서 중요한 열쇠가 될 수 있음을 제안한다. 그러므로 이 고찰에서는 과거 제시된 해령 섭입 가설에 대해 전반적으로 소개 및 요약하고 그 문제점을 지적한 후, 새로운 대안으로 제안된 플룸-대륙(plume-continent) 및 플룸-슬랩(plume-slab) 상호 작용 가설에 대해 소개 및 요약하였다. 끝으로 이 가설과 한반도 화성 활동과의 연관성을 파악하고 새로운 가설을 검증하기 위한 추가 연구의 필요성에 대해 제안하고자 한다.

2. 백악기 동아시아 지구조 모델

2.1. 해령 섭입 가설

쥬라기-백악기 시기 동아시아 화성 활동을 설명하는 주요한 지질 현상으로써 해령 섭입 가설이 제안되었다(Maruyama *et al.*, 1997). 그 가설에 따르면 쥬라기 후기 시기 현재의 남동중국의 주변부를 따라 섭입하던 이자나기 판과 태평양 판의 발산 경계인 해령이 섭입하면서 대륙 내부 및 주변부 지역에서 아다카이트가 형성되었다(Figure 2). 지구화학적 정의에 따르면 아다카이트는 Sr이 400 ppm 이상, Y의 양은 20 ppm 이하인 화성암이며 알류산 열도(Aleutians)의 아닥(Adak) 섬에서 처음 확인되어 그 섬 이름에서 유래하였다(Defant and Drummond, 1990; Kay, 1978). 아다카이트가 형성되기 위해서는 섭입판의 해양지각이 에클로자이트(eclogite) 상태에서 부분 용융을 일으켜야 할 것으로 제안되었다(Defant and Drummond, 1990). 이는 섭입대 호화산을 형성시킨 일반적 기작인 고상선(solidus) 감소에 따른 유체 유입 용융(flux melting)과 다른 기작으로써 섭입해양판이 직접 부분 용융을 일으킨 결과로써 제안되었다. 그러므로 차가운 섭입해양판이 직접 용융될 수 있는 섭입 환경에 대한 많은 연구가 수행되었으며, 섭입해양판의 연령이 25 Ma보다 젊

은 환경과 평탄 섭입 등 아다카이트가 생성될 수 있는 특수한 섭입 환경들이 제안되었다(Defant and Drummond, 1990; Gutscher *et al.*, 2000; Peacock, 1996).

섭입해양판의 연령이 25 Ma보다 적어야 아다카이트가 형성될 수 있다는 점은 쥬라기-백악기 시기 동아시아 지역에서 산출되는 아다카이트를 형성시킨 화성 작용이 해령에서 발산된 젊은 섭입해양판의 부분 용융 결과라는 해령 섭입 가설을 뒷받침한다. 해령 섭입 가설은 이후에도 계속 수정 보완되었으며 특히 남서일본에서 발견되는 백악기 아다카이트의 연대와 해령 섭입 시기와의 관계가 정량적으로 해석되었다. Kinoshita (1995, 2002)는 백악기 시기 남서일본을 따라 북동 방향을 따라 분출된 아다카이트의 연대가 북동 방향으로 점점 감소하는 것을 확인하였으며 분출 연대의 이동 속도가 약 1/30 Ma/km임을 제시하였다. 이는 해령이 남서일본을 따라 북동 방향으로 같은 속도로 이동하면서 섭입하였다는 것을 지시하며 해령 섭입이 쥬라기-백악기 시기의 주된 동아시아 지구조 작용임을 제시하였다.

이와 함께 중국 및 한반도 지역에서도 발달한 다수의 I- 및 A-형 화강암체의 관입이 보고되었다(Kim *et al.*, 2016; Wang *et al.*, 2006a; Wu *et al.*, 2002). 또한 보하이완(Bohaiwan) 및 송리아오(Songliao) 분지의 형성이 같은 시기에 발생한 북중국 지괴의 파괴 및 분리(delimitation)와 관련되어 해석된 바 있다. 이들 모두 해령 섭입에 의해 발생한 슬랩 창(slab window)을 따라 유입된 연약권 맨틀의 상승이 그 원인으로 제안되었다(Gao *et al.*, 2008; Ling *et al.*, 2013).

2.2. 해령 섭입 가설의 문제점

해령 섭입에 의한 대륙 내부 및 주변부에서의 화성 활동은 수많은 연구들에 인용되었으며 비교적 최근까지도 널리 받아들여지고 있다. 그러나, 최근의 몇몇 연구를 통해 해령 섭입에 의한 화성 활동에 여러 문제가 제기되었으며(Lee, 2018; Lee and Ryu, 2015; Ryu and Lee, 2017), 그 문제점들을 요약하면 다음과 같다.

첫째, 동중국에서 발견되는 피크라이트(picrite)(Gao *et al.*, 2008)는 고-마그네슘(high-Ma) 현무암의 일종으로 일반적으로 맨틀 플룸처럼 높은 맨틀 온도 환경에서 생성되는 것으로 여겨져 왔다(Ernst and Buchan, 2003). 섭입하는 해령 사이가 벌어지면서 생긴 슬랩 창을 따라 연약권 맨틀(asthenospheric mantle)이 상승하며 북중국 지괴의 분리(delamination)를 일으키고 이에 동반하여 피크라이트가 생성될 수 있다고 제안되었다(Gao *et al.*, 2008; Ling *et al.*, 2013). 그러나 실

제 맨틀이 상승할 수록 단열 온도 감소로 인하여 높은 온도가 유지되지 않는다는 점에서 문제점을 가진다. 또한 백악기 시기 북중국 지괴의 동쪽 부분만 분리가 발생되었는가에 대한 설명으로 부족하다. 그러므로, 일반적인 맨틀 온도보다 높은 온도를 발생시킬 수 있는 지질학적 현상이 별도로 존재하지 않는다면 해령 섭입 가설로 피크라이트의 성인을 설명하는데 어려움이 있다.

둘째, 중국 대륙 내부에 존재하는 과거 아다카이트로 여겨졌던 암석(Ling *et al.*, 2013)들은 실제로는 섭입해양판의 부분 용융이 아닌 두꺼워진 대륙 지각의 하부가 분리되어 맨틀에서 부분 용융을 일으켜 형성된 아다카틱 암석(adakitic rock)인 것으로 제안되었으며 이는 일반적인 아다카이트보다 높은 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 과 낮은 $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ 값에 의하여 뒷받침된다(Castillo, 2012; Wang *et al.*, 2006b; Xu *et al.*, 2002). 이는 기존 가설이었던 해령 섭입에 의한 섭입해양판의 부분 용융이 아다카이트를 형성시켰다는 주장과는 배치된다. 또한 섭입대에서 1000 km 이상 멀리 떨어져 있었던 중국 내륙 지역까지 섭입해양판이 매우 낮은 저각으로 존재했을 가능성이 낮고, 이를 지지하는 지질학적 증거가 없다는 점에서도 해령 섭입 가설은 한계를 가진다(Okada, 1999).

셋째, 최근에 제안된 판재구성 모델은 기존 해령 섭입 모델이 간과하거나 단순화한 태평양 주변의 판 이동과 해수면 변화를 고려하여 크게 개선되었으며, 백악기 전체에 걸쳐 동아시아에서 해령 섭입 자체가 존재하지 않았음을 제안하였다(Gurnis *et al.*, 2012; Sdrölias and Müller, 2006). 오래된 빠른 섭입 속도를 가진 이자나기 판의 섭입은 남서일본의 아다카이트의 성인을 설명하지 못한다.

2.3. 대안: 플룸-대륙 및 플룸-슬랩 상호작용 가설

전술한대로, 해령 섭입 가설은 백악기 동아시아의 화성 활동을 설명하는데 여러 문제점을 내포한다. 특히, 판재구성 모델에서 제안된 것처럼 해령 섭입 자체가 백악기 시기 존재하지 않았다는 점은 이 가설의 유효성에 대한 본질적 의문을 제시한다. 게다가 아다카이트의 다른 성인인 차가운 플룸(cold plume) (Gerya and Yuen, 2003), 평탄 섭입(Gutscher *et al.*, 2000), 슬랩 찢김(slab tear) (Hu and Liu, 2016) 그리고 호하부에서의 마그마의 정출(fractionation) (Richards and Kerrich, 2007) 등 역시 모두 북동 방향으로의 감소하는 아다카이트 분출 연대를 설명하는데 어려움이 있다. 이에 최근에 제기된 문제점들을 극복할 수

있는 대안으로써, ‘플룸-대륙 및 플룸-슬랩 상호 작용’(plume-continent and plume-slab interaction) 가설이 제안되었다(Lee, 2018; Lee and Ryu, 2015; Ryu and Lee, 2017).

플룸-대륙 및 플룸-슬랩 상호 작용 가설은 배호 맨틀에서 유입된 열원에 의한 섭입해양판의 부분 용융에 의한 것으로 마이오세기(Miocene) 동북일본에서 형성된 아부쿠마(Abukuma) 아다카이트의 성인을 설명한 과거 연구에 기반을 두고 있다(Lee and Lim, 2014, 2016). 과거 아부쿠마 아다카이트는 빠르게 섭입하는 오래된 태평양 판의 해양 지각이 동해의 확장에 의해 깊은 맨틀로부터 용승(upwelling)된 뜨거운 연약권 맨틀에 의해 부분 용융을 겪어 생긴 것으로 제안되었다(Yamamoto and Hoang, 2009). 그러나 이 연구는 동북 일본 지역에서 아부쿠마 지역에서만 섭입해양판이 부분 용융을 겪은 이유를 설명하지 못하며, 특히 연약권 맨틀의 상승에 의한 단열 팽창에 따른 온도 감소 때문에 실제 섭입해양판에 도달하는 맨틀의 온도가 해양지각을 부분 용융 시킬만큼 충분히 높지 못하기 때문에 아부쿠마 아다카이트의 성인을 설명할 수 없다는 한계를 가진다. 이를 해결하기 위하여 Lee and Lim (2014, 2016)은 2차원 및 3차원 컴퓨터 수치모델링을 통해 배호 맨틀에서 뜨거운 온도를 가진 맨틀 플룸에서 기인한 맨틀 덩어리(blob)가 맨틀 췌기로 유입되어 섭입해양판을 부분 용융시켰다는 가설을 제시하였다(Figure 3). 이는 태평양 판처럼 오래된 해양판의 지각을 부분 용융시키기 위해 주변 맨틀보다 뜨거운 맨틀이 유입되는 기작을 잘 설명할 수 있다.

맨틀에서 일반적으로 주변 맨틀보다 뜨거운 열을 공급할 수 있는 대표적인 기작이 맨틀 플룸이라는 점에서 착안하여, 플룸-대륙 및 플룸-슬랩 상호 작용 가설이 제시되었으며 이는 중국 대륙 내부에 분포하는 아다카틱 암석, A-형 화강암체, 인장 분지와 남서일본에서 나타나는 아다카이트를 모두 설명할 수 있다(Figures 1 and 4). 예를 들어, 백악기 시기 북중국 지괴의 분리가 열침식(thermal erosion)에 의해 발생하였다는 과거 연구(Gao *et al.*, 2008)는 맨틀 플룸에 의한 열침식으로 설명된다. 또한 열침식으로 인하여 파괴된 하부 지각이 맨틀 플룸 내부에서 부분 용융을 일으켜 아다카틱 암석과 피크라이트를 형성시킬 수 있으므로 이 지역에서 관찰되는 다수의 아다카틱 암석과 피크라이트의 성인도 설명될 수 있다. 또한, 지각 하부에서의 부분 용융에 의한 A-형 화강암체의 형성도 설명된다.

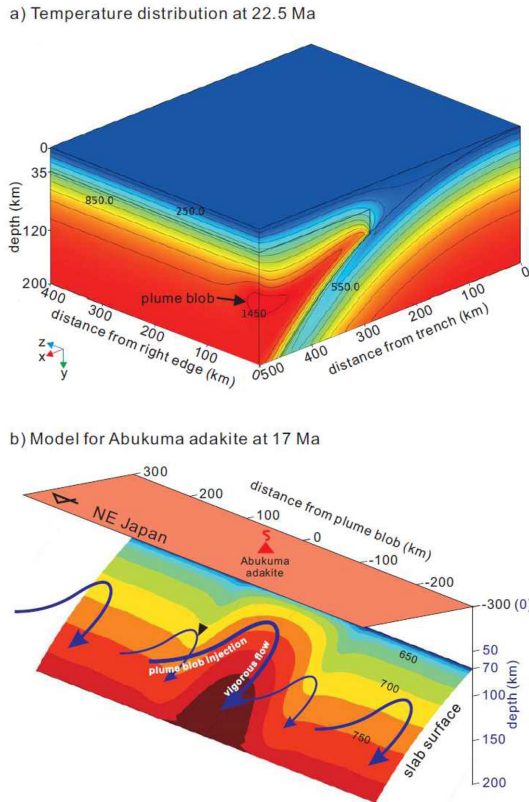


Fig. 3. Temperature distributions of the numerical model designed for evaluating the injection of the plume blob into the mantle wedge in Northeast Japan at 22.5 Ma and a conceptual model for the localized and pulse-like eruption of the Abukuma adakite at 17 Ma. a) Temperature distributions of the 3-dimensional numerical model representing the injected plume blob into the mantle wedge at 22.5 Ma. The subducting slab and overlying plate correspond to the Pacific plate and Northeast Japan, respectively. The temperature contours are depicted every 150°C with the contours of 0 and 100°C. The region where the 1450°C contour exists indicates the plume blob injected from the back-arc mantle. b) A conceptual model for the localized and pulse-like eruption of the Abukuma adakite at 17 Ma, overridden on the slab surface temperatures calculated from the 3-dimensional numerical model at 17.5 Ma. The temperature contours are depicted every 25°C. The Abukuma adakite was generated by the partial melting of the subducted oceanic crust, which results from the hot plume blob. Modified from Lee and Lim (2016).

일반적으로 맨틀 플룸은 해양 지각 하부에서 정치되어 하와이 열도와 같은 열점을 형성하는 것으로 알려져 있다. 그러나 대륙 내부에서도 다수의 열점이 존재하는 것이 제시된 바 있으며, 미국 옐로우 스톤

(Yellowstone)이 대표적이다(Liu and Stegman, 2012). 또한 선캠브리아 시기 호주 대륙 내부에서도 맨틀 플룸에 기인한 열점이 존재하였다는 지질학적 증거가 제시된 바 있다(Betts *et al.*, 2007). 이는 대륙 내부에 맨틀 플룸이 존재하여 다수의 화성 작용을 발생시킬 수 있는 가능성을 잘 보여주므로, 백악기 시기 중국 내륙에서의 맨틀 플룸의 존재도 충분히 가능한 지질 현상임을 제안한다.

중국 대륙 내부에서 상승한 맨틀 플룸은 지각권 하부에서 수평 방향으로 확장되어 퍼져나가며 그 당시 섭입하였던 이자나기 판이 발생시킨 구석 유동(corner flow)에 의해 맨틀 썬개로 유입되었을 것이다(Figure 4). 만약 뜨거운 맨틀 플룸이 맨틀 썬개로 유입된다면 유입된 맨틀이 아부쿠아 아다카이트의 경우처럼 섭입해양판을 가열하여 부분 용융을 발생시킬 수 있으므로 남서일본에 널리 분포하고 있는 아다카이트를 형성시킨 마그마를 생성할 수 있다(Figure 4). 최근 제시된 판재구성 모델은 현재의 일본을 포함한 동아시아 대륙이 이자나기 판에 대해 남서 방향으로 백악기 시기 평균 1/30 Ma/km의 속도로 이동하였음을 제시하였다(Gurnis *et al.*, 2012; Sdrólías and Müller, 2006). 따라서, 맨틀 플룸의 뿌리(root)가 깊은 맨틀에서 고정되어 있었다면 해령 섭입 가설에서 제시한 북동 방향으로의 아다카이트의 분출 시기의 감소 역시 이 모델로 설명될 수 있다. 이처럼 플룸-대륙 및 플룸-슬랩 상호 작용 가설은 해령 섭입 가설로는 설명하지 못하였던 백악기 동아시아의 화성 활동을 설명하는 대안으로 가능하다.

3. 토의 및 제언

해령 섭입 가설의 문제점을 해결하기 위하여 제시된 플룸-대륙 및 플룸-슬랩 상호 작용 가설은 전술한대로 백악기 동아시아 지구조사를 해석하는데 새로운 모델이 될 수 있을 것으로 기대된다. 그러나 대륙 내부에서의 맨틀 플룸의 존재가 대륙 내부뿐만 아닌 대륙 주변부에서의 화성 활동까지 잘 설명할 수 있음에도 불구하고 잘 받아들여지지 않았던 이유로서 크게 두 가지를 들 수 있다. 첫째, 맨틀 플룸의 일반적인 결과물이라고 여겨지는 거대 화성암 지대(large igneous province), 방사형 관입 군체(radial dike swarm) 그리고 지구(rift)들이 중국 내륙에서 관찰되지 않는다는 점이다. 그러나, 맨틀 플룸의 정치 전에 존재했었던 두꺼운 북중국 및 남중국 지괴와 두 지괴의 충돌에 의해

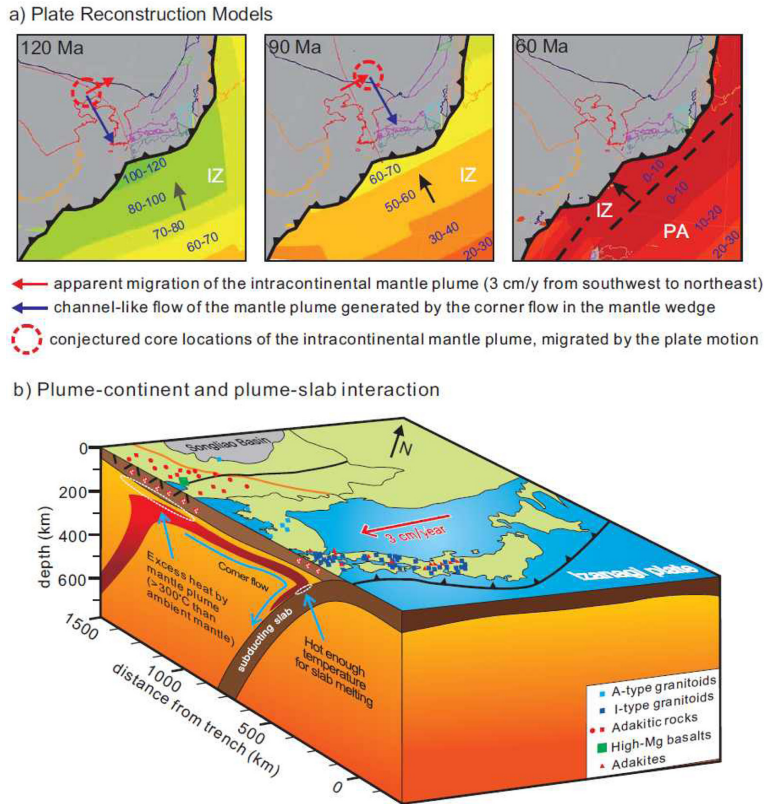


Fig. 4. Snapshots of the plate reconstruction model with the conjectured core locations of the intracontinental mantle plume and a schematic diagram of the plume-continent and plume-slab interaction during the Cretaceous. a) Snapshots of the plate reconstruction model with convergence direction of the Izanagi plate and the conjectured core locations of the mantle plume (dashed circle) migrated from southwest to northeast due to the opponent migration of the overlying continents with respect to the Izanagi plate. The channel-like flow of the mantle plume is generated by corner flow in the mantle wedge. The numbers on the isochrons represent the ages of the oceanic plate. The black dashed line in the snapshot of 60 Ma indicates the mid-ocean ridge between the Izanagi and Pacific oceanic plates. b) Cretaceous tectonic model deduced from the numerical model experiments from Ryu and Lee (2017), depicted on the plate reconstruction model at 90 Ma. The northeast-to-southwest migration of the East Asian continents with respect to the Izanagi oceanic plate (1/30 Ma/km) results in the plume-continent and plume-slab interactions which apparently migrated from southwest to northeast; the migration of the intracontinental and arc magmatism. Modified from Ryu and Lee (2017).

생성된 더욱 두꺼운 대륙 지각권이 주로 용암의 분출 대신 마그마 관입을 발생시켰을 것으로 추정된다. 이는 호주 대륙 동부에 남아 있는 선캠브리아 시기 형성된 A-형 화강관입체의 트랙(track)이 맨틀 플룸에 의해 형성되었다는 해석(Betts *et al.*, 2007)과 유사하다는 점에서 중국 대륙 내부에서 일반적인 맨틀 플룸의 결과물들이 발견되지 않을 수 있다. 또한 중국 내륙에서 발견되는 지역적인 인장 구조(Li, 2000; Wang *et al.*, 2006b)들은 대륙에서 맨틀 플룸이 발생하였을 때 생성될 수 있는 구조(Ziegler and Cloetingh, 2004)로써 생각될 수 있으므로 백악기 시기 중국 내륙에서의 맨

틀 플룸의 존재를 지지할 수 있다. 둘째, 맨틀 플룸의 위치가 그 당시 대륙 주변부에 섭입하였던 이자나기 판의 배호에 위치하고 있어 섭입해양판과 너무 가깝다는 점에서 맨틀 플룸의 발생이 가능한지에 대한 의문이 가능하다. 그러나, 드물기는 하지만 배호에서도 맨틀 플룸이 존재했었다는 몇몇 연구들이 제시된 바 있다(French and Romanowicz, 2015; Hassan *et al.*, 2015). 또한, 최근에 수행된 컴퓨터 수치모델링 실험은 대륙 내부에서의 맨틀 플룸이 섭입해양판에 의하여 지원되었을 가능성에 대해 제시하였다(Heron *et al.*, 2015; Steinberger and Torsvik, 2012). 이는 백악기

Potential Adakite Emergence

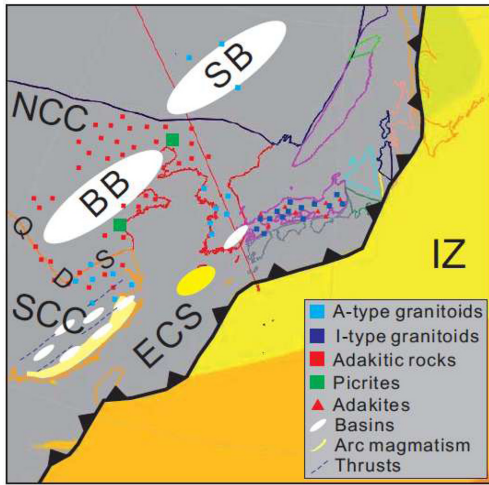


Fig. 5. Conjectured potential emergence of the adakite at 120 Ma with the Cretaceous tectonomagmatism depicted on the plate reconstruction model at 100 Ma. The yellow ellipse indicates a potential emergence of the adakite at 120 Ma based on the numerical model from Lee (2018). NCC (North China Craton), SCC (South China Craton), BB (Bohaiwan Basin), SB (Songliao Basin), Q (Qinling), D (Dabie) and S (Sulu), ECS (East China Sea) and IZ (Izanagi) are described on the figure. Modified from Lee (2018).

시기 이전에 섭입하였던 해양판이 중국 대륙 내부의 맨틀 플룸을 야기하였을 가능성을 제시하므로 대륙 내부에서의 맨틀 플룸의 존재는 충분히 가능하다.

이처럼 백악기 시기 중국 내륙에서의 맨틀 플룸이 발생하였고 뜨거운 맨틀 플룸이 남서 일본 하부 맨틀 췌기로 유입되어 이자나기 판을 부분 용융시켰다는 가설은 중국 대륙과 일본 사이에 존재하였던 한반도의 화성 활동에 큰 영향을 미쳤을 것이다. 이 시기 한반도에서는 A-형 화강암체가 널리 관입하였고(Kim *et al.*, 2016) 이는 중국 대륙과 남서 일본에서 나타나는 A-형 화강암체와 유사하다는 점에서 한반도 하부 맨틀에도 뜨거운 맨틀이 유입되었음을 지지한다. 또한, 한반도 남부 지방에 다시 발생하였던 화산 활동과 그에 수반된 화성작용은 이자나기 판의 섭입에 의한 호화산 작용과 관련된 것으로 제시된 바 있으므로(Kim *et al.*, 2016; Lim *et al.*, 2015), 남서일본의 경우처럼 한반도 남부 지방에서도 아다카이트가 발견될 수 있음을 지지한다. Wee *et al.* (2006)은 경상남도 창원시 진동면 일대에서 아다카이트로 추정되는 암석을 보고하여 큐슈 지방의 그것과 유사하게 해석하였으나, 이후 Kim

et al. (2016)에 의해 진동면에서 발견된 아다카이트가 지화학 분석 결과를 잘못 해석하여 발생한 오류임이 제안되어 현재까지도 한반도에서 보고된 아다카이트는 없다. 한반도 남부 지방에 백악기 시기 호화산 활동이 활발하게 발생하였던 지역이었음에도 불구하고 아다카이트가 발견되지 않는 것은 한반도 남부가 큐슈 지방보다 배호에 위치했을 것으로 설명할 수 있다. Mibe *et al.* (2011)은 실험을 통하여, 아다카이트를 발생시키는 섭입해양판의 부분 용융이 최대 110 km 깊이까지만 발생할 수 있음을 보였다. 만약 한반도 남부 지방이 큐슈 지방보다 배호에 존재하였다면(Chough and Sohn, 2010), 아다카이트는 호화산 지방인 큐슈 지방에서만 발생하였을 것이다. 그러므로, 한반도 남부 지방에서의 아다카이트의 부재가 맨틀 플룸의 한반도 하부 맨틀로의 유입을 부정하는 것은 아니다.

Lee (2018)는 3차원 컴퓨터 수치모델링을 수행하여 남동중국에서 남서일본에 이르는 백악기 시기 섭입대에서의 섭입해양판의 부분 용융의 발생 지점을 정량적으로 분석하였다(Figure 5). 실험 결과는 연령이 높은 이자나기 판이 섭입하였던 남동중국에서는 맨틀 플룸의 유입에도 불구하고 섭입해양판의 부분 용융이 일어나지 않으며 현재의 동중국해에 해당하는 지역에 존재하였을 호화산에서 섭입해양판의 부분 용융이 일어나 남서일본에서까지 지속적으로 섭입해양판의 부분 용융이 일어날 수 있음을 제안한다. 이는 맨틀 플룸의 유입에 의한 섭입해양판의 부분 용융에 의한 아다카이트가 현재의 동중국해에서도 발견될 가능성을 지지한다. 아직까지 이 지역에서 해저시추 등을 통해 아다카이트의 존재가 보고된 적이 없으므로, 플룸-대륙 및 플룸-슬랩 상호 작용 가설을 검증하기 위한 방법으로써 동중국해에서의 해저시추 탐사 등이 수행될 수 있길 기대한다.

사 사

이 연구는 한국연구재단의 이공분야 대학중점연구소 지원사업(과제번호: 2017R1A6A1A07015374)과 연세미래선도연구사업(2019-22-0010)의 지원으로 수행되었습니다.

References

Betts, P.G., Giles, D., Schaefer, B.F. and Mark, G. (2007) 1600–1500 Ma hotspot track in eastern Australia:

- implications for Mesoproterozoic continental reconstructions. *Terra Nova*, v.19, p.496-501.
- Castillo, P.R. (2012) Adakite petrogenesis. *Lithos*, v.134-135, p.304-316.
- Chough, S.K. and Sohn, Y.K. (2010) Tectonic and sedimentary evolution of a Cretaceous continental arc-backarc system in the Korean peninsula: New view. *Earth-Science Reviews*, v.101, p.225-249.
- Defant, M.J. and Drummond, M.S. (1990) Derivation of some modern arc magmas by melting of young subducted lithosphere. *Nature*, v.347, p.662-665.
- Ernst, R.E. and Buchan, K.L. (2003) Recognizing mantle plumes in the geological record. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, v.31, p.469-523.
- French, S.W. and Romanowicz, B. (2015) Broad plumes rooted at the base of the Earth's mantle beneath major hotspots. *Nature*, v.525, p.95-99.
- Gao, S., Rudnick, R.L., Xu, W.-L., Yuan, H.-L., Liu, Y.-S., Walker, R.J., Puchtel, I.S., Liu, X., Huang, H., Wang, X.-R. and Yang, J. (2008) Recycling deep cratonic lithosphere and generation of intraplate magmatism in the North China Craton. *Earth and Planetary Science Letters*, v.270, p.41-53.
- Gerya, T.V. and Yuen, D.A. (2003) Characteristics-based marker-in-cell method with conservative finite-differences schemes for modeling geological flows with strongly variable transport properties. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, v.140, p.293-318.
- Gurnis, M., Turner, M., Zahirovic, S., DiCaprio, L., Spasojevic, S., Müller, R.D., Boyden, J., Seton, M., Manea, V.C. and Bower, D.J. (2012) Plate tectonic reconstructions with continuously closing plates. *Computers & Geosciences*, v.38, p.35-42.
- Gutscher, M.-A., Maury, R., Eissen, J.-P. and Bourdon, E. (2000) Can slab melting be caused by flat subduction? *Geology*, v.28, p.535-538.
- Hassan, R., Flament, N., Gurnis, M., Bower, D.J. and Müller, D. (2015) Provenance of plumes in global convection models. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, v.16, p.1465-1489.
- Heron, P.J., Lowman, J.P. and Stein, C. (2015) Influences on the positioning of mantle plumes following supercontinent formation. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, v.120, p.3628-3648.
- Hu, J. and Liu, L. (2016) Abnormal seismological and magmatic processes controlled by the tearing South American flat slabs. *Earth and Planetary Science Letters*, v.450, p.40-51.
- Isozaki, Y., Aoki, K., Nakama, T. and Yanai, S. (2010) New insight into a subduction-related orogen: A reappraisal of the geotectonic framework and evolution of the Japanese Islands. *Gondwana Research*, v.18, p.82-105.
- Kay, R.W. (1978) Aleutian magnesium andesites: Melts from subducted Pacific ocean crust. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, v.4, p.117-132.
- 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 and geochemistry of the Cretaceous plutonic rocks in the Korean Peninsula: A new tectonic model of the Cretaceous Korean Peninsula. *Lithos*, v.262, p.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. *The Journal of Geology*, v.120, p.625-646.
- Kinoshita, O. (1995) Migration of igneous activities related to ridge subduction in Southwest Japan and the East Asian continental margin from the Mesozoic to the Paleogene. *Tectonophysics*, v.245, p.25-35.
- Kinoshita, O. (2002) Possible manifestations of slab window magmatism in Cretaceous southwest Japan. *Tectonophysics*, v.344, p.1-13.
- Lee, C. (2018) Initiation of adakite occurrence in Cretaceous arc, Northeast Asia. *Geosciences Journal*, v.22(3), p.383-391.
- Lee, C. and Lim, C. (2014) Short-term and localized plume-slab interaction explains the genesis of Abukuma adakite in Northeastern Japan. *Earth and Planetary Science Letters*, v.396, p.116-124.
- Lee, C. and Lim, C. (2016) Three-dimensional time-evolving plume-slab interaction for the generation of the Abukuma adakite, Northeast Japan. *Gondwana Research*, v.38, p.99-112.
- Lee, C. and Ryu, I.-C. (2015) A New Tectonic Model for the Genesis of Adakitic Arc Magmatism in Cretaceous East Asia. In 'Subduction Dynamics: From Mantle Flow to Mega Disasters', Morra, G., *et al.* (Eds.), AGU Monograph, Wiley, p.69-79.
- Li, X.-h. (2000) Cretaceous magmatism and lithospheric extension in Southeast China. *Journal of Asian Earth Sciences*, v.18, p.293-305.
- Lim, C., Huh, M., Yi, K. and Lee, C. (2015) Genesis of the columnar joints from welded tuff in Mount Mudeung National Geopark, Republic of Korea. *Earth, Planets and Space*, v.67, p.152.
- Ling, M.-X., Li, Y., Ding, X., Teng, F.-Z., Yang, X.-Y., Fan, W.-M., Xu, Y.-G. and Sun, W. (2013) Destruction of the North China Craton Induced by Ridge Subductions. *The Journal of Geology*, v.121, p.197-213.
- Liu, L. and Stegman, D.R. (2012) Origin of Columbia River flood basalt controlled by propagating rupture of the Farallon slab. *Nature*, v.482, p.386-389.
- Maruyama, S., Isozaki, Y., Kimura, G. and Terabayashi, M. (1997) Paleogeographic maps of the Japanese Islands: Plate tectonic synthesis from 750 Ma to the present. *Island Arc*, v.6, p.121-142.
- Mibe, K., Kawamoto, T., Matsukage, K.N., Fei, Y. and Ono, S. (2011) Slab melting versus slab dehydration in subduction-zone magmatism. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, v.108, p.8177-8182.
- Okada, H. (1999) Plume-related sedimentary basins in East Asia during the Cretaceous. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, v.150, p.1-11.
- Peacock, S.M. (1996) Thermal and petrological structure of subduction zones (overview) in *Subduction, Top to Bottom*, Bebout, G. E., *et al.* (Eds.), American Geophysical Union, p.119-134.
- Richards, J.P. and Kerrich, R. (2007) Special Paper: Adakite-Like Rocks: Their Diverse Origins and Questionable Role in Metallogenesis. *Economic Geology*, v.102, p.537-576.
- Ryu, I.-C. and Lee, C. (2017) Intracontinental mantle

- plume and its implications for the Cretaceous tectonic history of East Asia. *Earth and Planetary Science Letters*, v.479, p.206-218.
- Sdrolias, M. and Müller, R.D. (2006) Controls on back-arc basin formation. *Geochemistry Geophysics Geosystems*, v.7, DOI:10.1029/2005GC001090
- Steinberger, B. and Torsvik, T.H. (2012) A geodynamic model of plumes from the margins of Large Low Shear Velocity Provinces. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, v.13, DOI:10.1029/2011GC003808
- Wang, F., Zhou, X.-H., Zhang, L.-C., Ying, J.-F., Zhang, Y.-T., Wu, F.-Y. and Zhu, R.-X. (2006a) Late Mesozoic volcanism in the Great Xing'an Range (NE China): Timing and implications for the dynamic setting of NE Asia. *Earth and Planetary Science Letters*, v.251, p.179-198.
- Wang, Q., Wyman, D.A., Xu, J.-F., Zhao, Z.-H., Jian, P., Xiong, X.-L., Bao, Z.-W., Li, C.-F. and Bai, Z.-H. (2006b) Petrogenesis of Cretaceous adakitic and shoshonitic igneous rocks in the Luzong area, Anhui Province (eastern China): Implications for geodynamics and Cu-Au mineralization. *Lithos*, v.89, p.424-446.
- Wee, S.-M., Choi, S.-G., Ryu, I.-C. and Shin, H.-J. (2006) Geochemical Characteristics of the Cretaceous Jindong Granites in the Southwestern Part of the Gyeongsang Basin, Korea: Focussed on Adakitic Signatures. *Economic and Environmental Geology*, v.39, p.555-566.
- Wu, F.-Y., Sun, D.-Y., Li, H., Jahn, B.-M. and Wilde, S. (2002) A-type granites in northeastern China: age and geochemical constraints on their petrogenesis. *Chemical Geology*, v.187, p.143-173.
- Xu, J.-F., Shinjo, R., Defant, M.J., Wang, Q. and Rapp, R.P. (2002) Origin of Mesozoic adakitic intrusive rocks in the Ningzhen area of east China: Partial melting of delaminated lower continental crust? *Geology*, v.30, p.1111-1114.
- Yamamoto, T. and Hoang, N. (2009) Synchronous Japan Sea opening Miocene fore-arc volcanism in the Abukuma Mountains, NE Japan: An advancing hot asthenosphere flow versus Pacific slab melting. *Lithos*, v.112, p.575-590.
- Ziegler, P.A. and Cloetingh, S. (2004) Dynamic processes controlling evolution of rifted basins. *Earth-Science Reviews*, v.64, p.1-50.