

## 한반도 백악기 화산호의 구분과 U-Pb 저어콘 연대: 호화산작용의 시공간적 진화

황상구<sup>1,2</sup> · 김상욱<sup>3</sup> · 기원서<sup>4,\*</sup> · 김정진<sup>1</sup>

<sup>1</sup>안동대학교 지구환경과학과

<sup>2</sup>안동대학교 기초과학연구소

<sup>3</sup>경북대학교 지질학과

<sup>4</sup>한국지질자원연구원 국토지질연구본부

### 요 약

한반도의 백악기 화산암류는 고-K 칼크알칼리 계열로서 유라시아대륙 남동부 아래로 이자나기판의 섭입작용에 의한 호화산작용의 산물이다. 한반도 중부 및 남부에서 백악기 화산암류를 분포에 따라 경기호, 음성호, 옥천호, 영남호 및 경상호의 5개 화산호로 구분하고, 지금까지 보고된 U-Pb 연대자료를 시공간적으로 검토했다. 각 화산호에서 활동의 시작시기와 종식시기를 정리하면 다음과 같다. 시작시기는 경기호에서 활동이 115 Ma 경에 시작되었고 음성호와 경상호에서는 110 Ma 경에 시작되었으며 화산호 간에 상당히 큰 차이를 보이는 데, 이는 아마도 화산호에 따라 연대측정 자료의 부족과 단층운동의 제어에 따른 마그마 생성시기의 차이에 기인하는 것으로 생각된다. 종식시기는 경기호에서 활동이 109 Ma 경에 끝났고 음성호, 옥천호와 영남호가 80 Ma 경에 종료되었다. 경상호는 활동이 내륙쪽에서 80 Ma에 종료되었지만 해구쪽의 화산전면부에서는 고신기 전엽까지 지속되었다. 그러므로 한반도에서 호화산작용은 시공간적으로 볼 때 해구쪽으로 가면서 순차적으로 젊어지며 두 차례 큰 종식 변곡기를 가진다. 이에 따라 한반도에서 백악기 섭입대의 조구조운동은 백악기 화산호의 시공간적 진화를 바탕으로 설명할 수 있다. 1) 115~100 Ma 동안 이자나기판의 얇은 섭입각으로 인해 섭입대 심부의 슬랩용융으로부터 내륙에 경기호를 형성하였다. 2) 100~80 Ma 동안, 섭입작용은 강한 수렴률로 지속되었으며 95 Ma 경부터 이자나기판의 운동이 북서 방향으로 전환됨에 따라 음성호, 옥천호, 영남호와 경상호에서 호화산작용이 더욱 활발해졌다. 3) 80~60 Ma 동안, 급경사 섭입작용으로의 전환은 주로 경상호 전면부 근처에서 호화산작용이 일어나게 하였다. 이로 인해 호화산작용은 주로 경상호의 전면부에서 일어났고 기타 화산호에서는 종식되었다.

**주요어:** 한반도, 백악기, 화산호, U-Pb 연대, 이자나기판, 호화산작용

**Sang Koo Hwang, Sang Wook Kim, Weon-Seo Kee and Jeong Jin Kim, 2019, U-Pb zircon ages and division of the Cretaceous volcanic arc in the Korean Peninsula: Spatiotemporal evolution of the arc volcanism. Journal of the Geological Society of Korea. v. 55, no. 5, p. 595-619**

**ABSTRACT:** The Cretaceous volcanic rocks in the Korean Peninsula are a high-K calc-alkaline series, suggesting the products of the arc volcanism caused by subduction of the Izanagi plate in the southeastern margin of the Eurasian continent. In this study, the Cretaceous volcanic rocks in the central and southern parts of the Korean Peninsula are divided into five volcanic arcs, such as Gyeonggi, Eumseong, Okcheon, Yeongnam and Gyeongsang, where the spatiotemporal variation of the previous U-Pb age data were reviewed. Considering the beginning time of each volcanic arc, the Gyeonggi Arc began in volcanism around 115 Ma and the Eumseong and Gyeongsang arcs began around 110 Ma, but there is a significant difference among volcanic arcs, probably due to a lack of age data and a difference in timing of producing a magma under control of faulting. But in terms of their ceasing time, the Gyeonggi Arc finished in volcanism around 109 Ma, while the Eumseong, Okcheon and Yeongnam arcs terminated around 80 Ma. Gyeongsang Arc also ceased in volcanism at that time in the inland, but continued in the volcanic front toward trench until the Early Paleogene. Thus, the arc volcanism in the Korean Peninsula spatiotemporally became younger sequentially as it moves toward trench, with two major turning timing of the volcanic ceasing.

\* Corresponding author: +82-42-868-3346, E-mail: wskee@kigam.re.kr

Accordingly, the Cretaceous tectonism of the subduction zone in the Korean Peninsula can be spatiotemporally described based on the evolution of the Cretaceous volcanic arcs. 1) For 115 ~ 100 Ma, slab melting causing by the shallow subduction angle may have occurred in the deeper part of the subduction zone to form the inland Gyeonggi Arc. 2) For 100 ~ 80 Ma, the subduction continued with a strong convergence and as the Izanagi plate shifted toward NW direction from 95 Ma, the arc volcanism became more active in other volcanic arcs except the Gyeonggi Arc. 3) For 80 ~ 60 Ma, the transition to steep subduction resulted mainly in arc volcanism that only occurred near the front of Gyeongsang Arc, but the arc volcanism was terminated in other volcanic arcs.

**Key words:** Korean Peninsula, Cretaceous, volcanic arc, U-Pb age, Izanagi plate, arc volcanism

(Sang Koo Hwang and Jeong Jin Kim, Department of Earth and Environmental Sciences, Andong National University, Andong 36729, Republic of Korea; Sang Koo Hwang, Institute of Basic Sciences, Andong National University, Andong 36729, Republic of Korea; Sang Wook Kim, Department of Geology, Kyungpook National University, Daegu 41566, Republic of Korea; Weon-Seo Kee, Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources, Daejeon 34132, Republic of Korea)

## 1. 서 언

한반도에는 대규모 중생대 화산암류와 심성암류가 넓게 분포되어 있다. 그러므로 이들의 연대, 시공간 분포와 조구조적 성격에 관한 연구는 중생대 화성활동과 더 나아가 중생대 조구조 환경 변화에 대해 이해하는데 중요하다.

한반도에서 중생대 마그마작용은 전통적으로 송림, 대보와 불국사 활동으로 나뉘었다(Kim, 1970, 1971; Reedman and Um, 1975). 불국사 활동은 백악기 후엽에서 고신기(Paleogene) 전엽까지 일어난 화성활동이며 강력한 화산작용에 심성작용이 시공간적으로 매우 밀접하게 조합되어 있다(Kim, 1996).

그러나 한반도에서 백악기 화산암류는 대개 NE-SW 및 NNE-SSW 방향의 큰 단층선을 따라서 발달하는 작은 분지들에 분포한다. 이들 퇴적분지는 유라시아 판 아래로 이자나기판의 섭입작용(Engegbretson *et al.*, 1985; Xu *et al.*, 1987; Chough *et al.*, 2000)의 지배 하에서 주향이동 단층운동(Kwon *et al.*, 2009; Chang and Zhao, 2012)에 수반되는 열곡 및 인리형 분지들이다.

이들 분지는 쇄설성 퇴적층으로 채워졌고 상부에 용암과 화산쇄설암을 협재하거나 덮고 있으며, 화산쇄설암으로만 구성되기도 한다. 비록 많은 연구가 수행되었지만, 층서와 마찬가지로 정확한 분출시기와 같은 미해결 문제들이 남아 있다. 화산암류의 분출 연대는 간헐적으로 측정된 K-Ar, Rb-Sr과 소량의 U-Pb 연대에 기초하여, 120 ~ 50 Ma 범위로 평가되었다. 그러나 이들 연대의 일부는 신뢰도의 문제

가 있는 것으로 생각된다. 예를 들면, 낮은 폐쇄온도는 K-Ar 자료의 신뢰도를 떨어뜨리고, Rb/Sr 동위원소비의 좁은 범위는 Rb-Sr 동위원소 연대에서 큰 오차를 가져온다. 그러나 최근에 많은 저어콘 U-Pb 연대측정 결과들이 보고되면서 화산암류의 정확한 연대 정립이 가능해졌다. 한반도에서 백악기 화산암류의 최근 연대군은 일반적으로 남동 방향으로 가면서 더 젊어진다. 저어콘 U-Pb 연대는 임진강대와 경기육괴에서 대체로 120~100 Ma, 옥천대, 경기육괴와 경상분지에서 100~80 Ma, 경상분지의 남동해안을 따라서 대략 80~65 Ma이다(Kim *et al.*, 2016).

이 연구에서는 한반도 백악기 화산암류를 지역에 따라 5개 화산호로 구분하고, 이에 따라 기존에 보고된 정확한 U-Pb 연대측정 자료를 중심으로 검토하였다. 또한 이를 통해 이자나기판의 섭입에 따른 조구조적 상관성과 백악기 호화산작용의 시공간적 진화를 해석하였다.

## 2. 지질배경

한반도에서 주요 암석-조구조 단위는 북서에서 남동으로 가면서 선캄브리아시대 경기육괴, 고생대 옥천대, 선캄브리아시대 영남육괴와 백악기 경상분지 순으로 놓인다. 최근 연구들은 이 지역의 판구조에 관해 여러 새로운 제안을 하면서 이들 다양한 단위에 대한 마그마사, 변성사 및 조구조사에 초점을 두어 진행되어왔다(Lee and Cho, 2003; Oh, 2006; Metcalfe, 2006; Kim, S.W. *et al.*, 2006, 2011; Williams *et al.*, 2009).

경기육괴는 주로 선캄브리아시대의 변성암류와

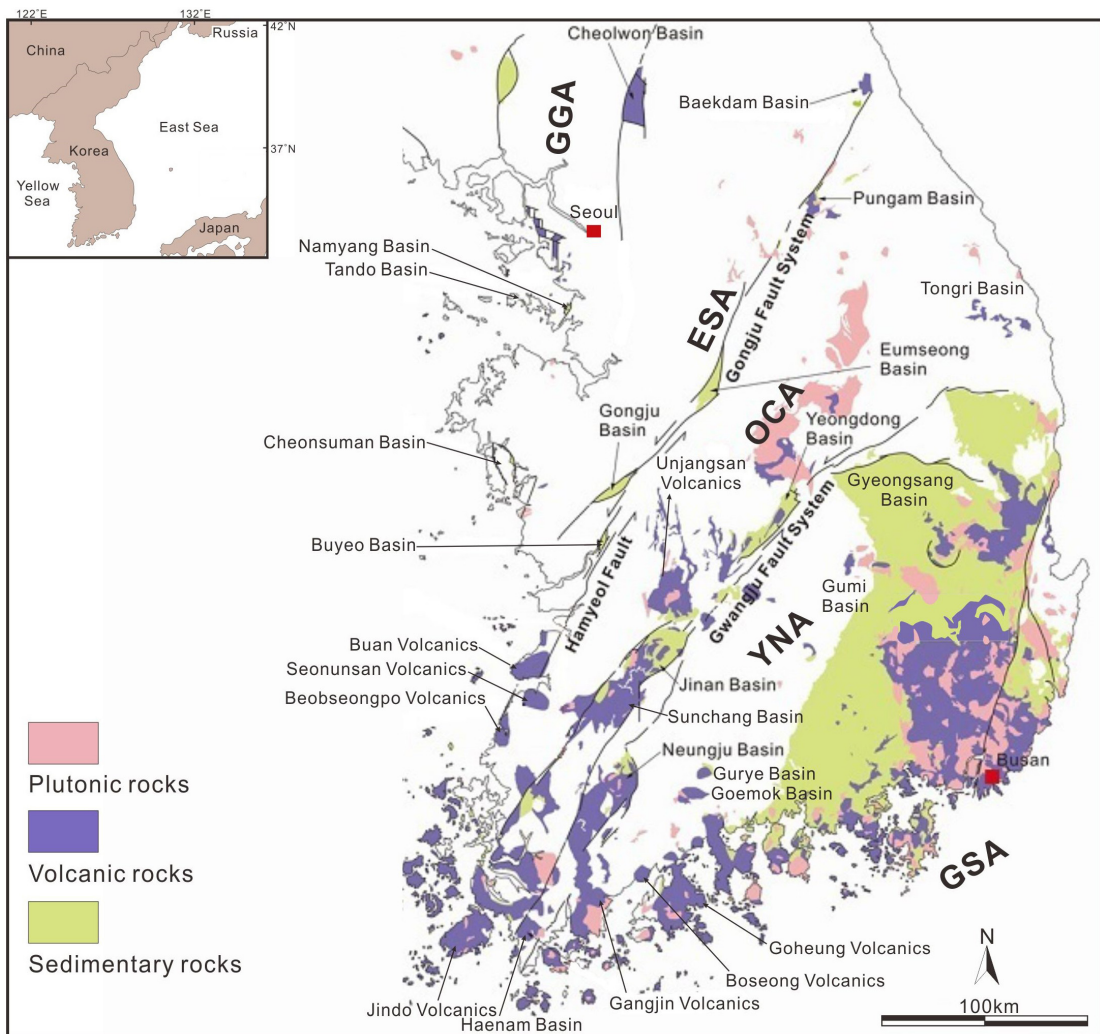
중생대 화강암질암으로 구성된다. 변성암류는 기반암인 편마암과 편암으로 구성된 경기변성암복합체와 상위의 지표지각 암석인 서산층군으로 구성된다.

영남육괴는 소백산복합체와 태백산층군으로 나뉘지며, 이들은 모두 다상 변성작용을 겪었고 부분적으로 녹색편암상으로 후퇴되었다. 소백산복합체는 다양한 편마암들과 백립암을 포함한다. 이들은 2.9-2.7 Ga, 2.59-2.47 Ga, 1.83-1.91 Ga 연대를 가진다(Sagong *et al.*, 2003; Kim *et al.*, 2006). 태백산층군은 층상 이질 및 사암-이질 편암을 포함하는 변성퇴적암으로 구

성된다.

옥천대는 경기육괴와 영남육괴 사이에 놓이며, 북동쪽 태백산분지와 남서쪽 옥천변성대로 구분된다. 옥천변성대는 저변성 및 중변성도의 변성퇴적암과 변성화산암으로 구성된다. 광역변성작용은 녹색편암상 내지 각섬암상이다. 이는 이 변성대를 관입한 중생대 심성암체의 접촉대에서 열변성작용이 뒤따라 일어났다. 한편 북동부 태백분지는 고생대에서 중생대 전기의 화석을 가진 변성퇴적암으로 구성된다.

경상분지는 한반도의 남동부에 위치한다(그림 1).



**Fig. 1.** Geological map of the Korean Peninsula, showing the overall distribution of the Cretaceous sedimentary, volcanic and plutonic rocks, and fault systems. The volcanic rocks are divided as five volcanic arc: Gyeonggi Arc (GGA), Eumseong Arc (ESA), Okcheon Arc (OCA), Yeongnam Arc (YNA) and Gyeongsang Arc (GSA) from the volcanic zones by their banded distribution.

**Table 1.** Occurrences and dating data of the volcanic rocks in the Imjingang Belt and Gyeonggi Massif.

Basin	Stratigraphic unit	Occurrence mode	Magma type	Age (Ma)	References
Cheolwon Basin	Jijangbong Tuff Sinseo Breccia Rhyolite Dongmakgol Tuff Geumhaksan Andesite	Epiclastics Ring dike Lava Pyroclastics	Rhyolitic Andesitic	SHRIMP 113 SHRIMP 115.0±1.1	Hwang <i>et al.</i> (2011)
Bupeong Volcanics	Gyemasan Welded Tuff Yaksan Welded Tuff	Dike Breccia Pyroclastics	Rhyolitic	K-Ar 121±6 K-Ar 131.2±4.0 K-Ar 132.9±4.1	Suh and Park (1986) Kim <i>et al.</i> (1998)
Tando Basin		Dike Pyroclastics	Rhyolitic Andesitic	SHRIMP 111±1 SHRIMP 111±3	Kim <i>et al.</i> (2012)
Gureopdo Volcanics	Gureopdo Tuff	Pyroclastics	Rhyolitic	SHRIMP 114.3±1.4	Cho and Lee (2016)
Cheonsuman Basin		Pyroclastics Lava	Rhyolitic Andesitic Basaltic	SHRIMP 109±3 SHRIMP 109~111	Kim <i>et al.</i> (2012)

이 분지는 서쪽과 북쪽이 선캠브리아시대의 변성암(영남육괴)으로 경계되고 동쪽이 소량의 퇴적암이 협재된 제3기 칼크알칼리 화산연속체에 의해 덮인다. 이 분지는 상부로 가면서 신동, 하양 및 유천층군으로 세분되는 경상누층군의 두꺼운 퇴적암층 및 화산암층으로 구성된다(Chang, 1975, 1988). 신동 및 하양층군은 육성 환경에서 퇴적된 쇄설암으로 구성되는 반면에 유천층군은 화산암으로 지배되는 특징을 가진다. 상위의 유천층군은 주로 화산암층(용암과 화성쇄설암)과 소량의 화산쇄설암층(층회암)으로 구성된다.

한반도 북부에서는 백악기 초엽에 대체로 NNE-SSW 방향의 큰 구조선을 따라서 분지가 형성되어 각각 자성계와 대보계라고 하는 퇴적암층에 화산암류를 발달시켰다(Kim and Pak, 1993). 한반도의 남부에서는 경상분지를 비롯하여 임진강대, 경기육괴, 옥천대, 영남육괴에서도 대개 NNE-SSW, NE-SW 방향의 큰 구조선을 따라서 작은 분지가 형성되었고, 그 분지에는 하부에 퇴적암류와 동시에 상부에 화산암류가 여러 곳에 분포되어 있다.

### 3. 백악기 화산암류 분포

한반도 북부에는 백악기 전기의 대보계와 자성계라고 하는 화산암류가 분포하지만(Kim and Pak, 1993), 이들에 대한 자세한 자료가 부족하여 이 논문에서는

제외하였다.

한반도 남부에서는 백악기 전엽부터 고신기 전엽까지 화산암류가 대개 NNE-SSW, NE-SW 방향의 큰 구조선을 따라서 여러 곳에 단속적으로 분포한다(그림 1). 그러나 이들은 전체적으로 NE-SW 방향으로 대상 분포를 이루고 있다. 이 대상 분포는 대체로 한반도의 조구조적 배경과도 일치하는 모습을 보여주며 5개의 화산대로 나뉜다. 이 화산대들은 북쪽으로부터 각각 경기, 음성, 옥천, 영남과 경상화산대라고 호칭한다. 경기화산대는 임진강대 경계부와 경기육괴 서부에 분포하며, 음성화산대는 공주단층계를 따라 NE-SW 방향으로 길게 분포한다. 옥천화산대는 옥천대 내에서 광주단층계를 따라 NE-SW 방향으로 분포하며, 영남화산대도 마찬가지로 영남육괴 내에 NE-SW 방향으로 흩어져 분포한다. 경상화산대는 대체로 한반도 남동부 해안을 따라 대규모의 활모양으로 분포한다.

#### 3.1 경기화산대

경기화산대는 임진강대 및 경기육괴 내에서 철원분지, 부평 화산암체, 남양분지, 굴업도 화산암체, 탄도분지, 천수만분지 등으로 이어진다(그림 1; 표 1).

##### 3.1.1 철원분지

이 분지는 임진강대에서 동두천단층과 동송단층

의 사이에 위치한다. 이 분지는 최대 24.5x9.9 km 크기의 마름모 형태로서 북동-남동 방향으로 길게 형성되어 있다.

철원분지에는 하부에 화산성 퇴적암이 소규모로 협재되지만 대부분 화산암류로 채워져 있으며 철원층군이라 한다(Kee *et al.*, 2008). 이 철원층군은 하부로부터 궁평층, 중리층, 금학산안산암, 동막골응회암, 유문암, 신서각력암, 지장봉응회암 순으로 놓인다.

철원분지 화산암류는 저어콘 SHRIMP U-Pb 연대 측정결과 유문암이 115.0±1.1 Ma이고, 지장봉응회암의 최소연대는 113 Ma를 보여준다(Hwang *et al.*, 2011). 그리고 화강반암은 111.24±0.85 Ma와 109.1±1.1 Ma의 평균연대를 보여준다.

SiO<sub>2</sub> 조성이 48.80~78.38 wt.% 범위이고 중-K 내지 고-K의 칼크알칼리 암석계열에 속하며 섭입대의 화산호 중에서 대륙호에 속한다(Hwang *et al.*, 2010).

### 3.1.2 부평 화산암체

인천 부평일대의 화산암류는 지름 약 10 km의 환상구조로 산출된다. 이 화산암류는 유문암질이며 약 산용결응회암, 계마산용결응회암, 관입각력암, 장식반암과 관입유문암으로 구성된다(Suh and Park, 1986).

약산용결응회암은 부평광산을 중심으로 폭이 약 3 km, 길이가 동서 방향으로 약 9 km 연장된다. 계양산응회암은 계양산을 중심으로 폭이 약 3 km, 길이가 남북 방향으로 10 km로 분포하며, 최고 약 500 m 두께를 가진다. 관입각력암은 암맥 혹은 파이프상으로 산출되며 매우 불규칙한 형태를 나타낸다.

관입유문암의 K-Ar 전암연대는 121±6 Ma(Suh and Park, 1986)와 132.9±4.1 Ma 및 131.2±4.0 Ma로 보고되었다(Kim *et al.*, 1998).

### 3.1.3 탄도분지

이 분지는 서해안에 위치하며 최대거리 약 4 km인 마름모꼴의 작은 인리형 분지이다(Kim *et al.*, 2012). 분지충전물은 두께가 약 1.5 km 이상 달하며, 주로 쇄설성 퇴적물로 구성된다. 역질 사암은 분지의 하부에 존재하며, 상부에는 처트질 이암과 함께 층상 안산암질 응회각력암, 유문암질 라필리응회암 및 응회암으로 구성된다.

최근 이 분지에서 유문암의 저어콘 U-Pb 연대는 111±1 Ma이고, 안산암은 111±3 Ma로 백악기 전엽

으로 나왔다(Kim *et al.*, 2012).

### 3.1.4 굴업도 화산암체

이 화산암체는 경기만 내에 굴업도, 백아도, 선갑도 등의 작은 섬들에 분포하며 화성쇄설암과 용암으로 구성된다. 화성쇄설암은 굴업도응회암으로서 심하게 용결된 라필리응회암에 속하고 유문암질 내지 데사이트질이다. 용암은 유상엽리가 선명하게 발달된 유문암이며 300 m 이상의 두께를 가진다.

굴업도응회암은 SHRIMP U-Pb 연대가 114.3±1.4 Ma로서 백악기 초엽의 화산작용에 의한 것이다(Cho and Lee, 2016).

### 3.1.5 천수만분지

이 분지는 충남 안면도 해안에 위치하며, 남북 방향의 단층에 의해 경계된다. 이 분지를 채운 천수만층은 주로 역암으로 구성되는 백악기 쇄설성 퇴적암으로 구성되며, 그 위에 현무암, 안산암, 데사이트와 유문암질 응회암으로 구성되는 화산암류가 소규모로 덮고 있다(Jeong *et al.*, 1994; Kim *et al.*, 2012).

이 화산암류는 주원소 및 미량원소의 분석치에 의하면 대부분 칼크알칼리 계열에 속한다. 이들 중 가장 신기 화산암류인 데사이트에서 K-Ar 전암연대가 89.4±2.4 Ma와 91.9±2.3 Ma로 보고되었다(Jeong *et al.*, 1994). 그러나 천수만분지에서 산출된 안산암과 유문암질 응회암의 SHRIMP U-Pb 연대는 각각 109~111 Ma와 109±3 Ma로 측정되었다(Kim *et al.*, 2012).

## 3.2 공주단층계를 따르는 음성화산대

음성화산대는 경기육괴 남변부에서 금왕단층, 공주단층과 함평단층으로 이어지는 NE-SW 방향의 공주단층계를 따라 백담, 풍암, 음성, 공주 및 부여분지, 그리고 변산, 선운산 및 법성포 화산암체로 연결된다(그림 1; 표 2)

### 3.2.1 백담분지

이 분지에는 미시령 사이에 하부의 퇴적암층과 상부의 화산암층으로 구성되는 백담층군이 분포한다. 백악기 백담층군은 암상과 암색을 기준으로 하여 대승령층, 작은감투봉층, 용대리응회암, 세존봉응회암과 석영장석반암으로 구분된다(Kee *et al.*, 2010; Kim *et al.*, 2010).

**Table 2.** Occurrences and dating data of the volcanic rocks in basins along the Gongju Fault System.

Basin	Stratigraphic unit	Occurrence mode	Magma type	Age (Ma)	Reference
Baekdam Basin	Porphyry Sejonbong Tuff Yongdaeri Tuff	Volcanic dome Pyroclastics	Rhyolitic	SHRIMP 84.4±2.1 SHRIMP 88.8±0.7 SHRIMP 104.8±3.5 SHRIMP 108.0±3.1	Kim <i>et al.</i> (2010)
Pungam Basin		Intrusives Pyroclastics Lava	Rhyolitic Andesitic Basaltic	K-Ar 72.6~94.4	Cheong and Kim (1999)
Eumseong Basin		Pyroclastics Lava	Rhyolitic Andesitic Basaltic	K-Ar 65.98±0.93 K-Ar 100	Lee <i>et al.</i> (1992) Choi (1996)
Gongju Basin		Pyroclastics Lava	Basaltic	K-Ar 93.2±1.4	Lee <i>et al.</i> (1992)
Byeonsan Volcanics	Mangryeongsan Tuff Seokpo Tuff Yamido Rhyolite and others	Intrusives Lava Pyroclastics Epiclastics	Rhyolitic Dacitic	SHRIMP 85.7±2.9 SHRIMP 88.7±2.0 SHRIMP 93.6±2.1	Koh <i>et al.</i> (2013) Choi and Hwang (2013)
Seonunsan Volcanics	Wolpyeong Tuff Gulchi Rhyolite Isangsan Tuff Gyeongsusan Dacite	Epiclastics Intrusives Lava Pyroclastics	Rhyolitic Dacitic	SHRIMP 84.9±1.0 SHRIMP 86.5±1.7	Koh <i>et al.</i> (2013)
Beopseongpo Volcanics	Gyema Rhyolite Hongnong Andesite Seongsan Tuff Sangha Tuff	Lava Autobreccia Pyroclastics	Rhyolitic Andesitic	SHRIMP 87.46±0.86 SHRIMP 87.66±0.76	Kwon <i>et al.</i> (2015)

용대리응회암은 대부분 유문암질 회류응회암으로 구성되며 구성원에 의하면 결정이 매우 풍부한 파리질 응회암(crystal-rich vitric tuff)에 속하고 용결되어 있으며, 하부에 얇은 강하응회암(fallout tuff)을 협재한다. 세존봉응회암은 마등령 북쪽에서 설악산맥을 따라 북쪽으로 산출된다. 이 응회암은 유문암질이고 용결되어 있으며, 전체적으로 반정을 약 50% 내외로 포함하기 때문에 결정질 응회암(crystal tuff)으로 분류된다. 석영장석반암은 황철봉으로부터 신선봉까지 화산 돔 형태로 산출되며 능선부에서 급사면을 이루는 험준한 지형을 형성한다. 이 반암은 드물게 암편을 함유하기 때문에 관입 용결응회암 양상을 나타낸다.

용대리응회암은 SHRIMP U-Pb 연대가 104.8±3.5 Ma에서 108.0±3.1 Ma로 측정되었고, 세존봉응회암은 88.8±0.7 Ma로 측정되었으며, 반암은 84.4±2.1 Ma로 측정되었다(Kim *et al.*, 2010).

### 3.2.2 풍암분지

풍암분지(혹은 갑천분지)는 NE-SW 방향의 주향

이동 단층선을 따라서 발달된 단층연변 침하지(fault margin sag) 혹은 횡압축 분지(transpression basin)로 해석되며, 그 규모는 길이 약 25 km, 너비 약 8 km 정도이다. 이 분지는 소량의 화산물질을 함유하는 퇴적암층과 분출상 및 관입상 화산암류를 포함한다.

이 분지에서 화산암류는 현무암, 안산암 및 안산암질 응회암, 테사이트질 및 유문암질 응회암으로 구성되고 안산암이 가장 우세하다. 특히 하부에 현무암질 안산암과 응회암이, 중부에는 응회질 사암, 실트암과 집괴암이, 상부에는 암회색 안산암 순으로 놓인다(Lee *et al.*, 1992).

화산암류는 분출 안산암, 관입 안산암, 역암 내의 안산암편, 화성쇄설암에 대해 K-Ar 전암연대가 72.6~94.4 Ma 범위로 측정되었다(Cheong and Kim, 1999). 이 화산암류는 SiO<sub>2</sub>의 함량에 따르면 현무암, 안산암 및 테사이트, 그리고 유문암으로 구분되며, 안산암과 테사이트가 가장 우세하다. 판별도에서 칼크알칼리 계열을 나타내고 화산호에 속한다(Lee *et al.*, 1992).

### 3.2.3 음성분지

이 분지는 풍암분지와 동일 구조선상에 놓이고 33x8 km 크기이다(Lee *et al.*, 1992; Choi, 1996). 분지의 서부에서는 초평리층과 백야리층이 놓이며, 동부에서는 그 위에 화산암층이 덮는다. 화산암층은 상부로 갈수록 현무암질에서 안산암질과 유문암질로 점차 변화하며, 하부에서 용암이 우세하지만 상부로 가면서 화성쇄설암이 우세하다. 최상부에는 유문암이 30여 m 두께로 덮고 있다.

화산암류에 대한 K-Ar 연대측정 결과, 현무암이 약 100 Ma (Choi, 1996)와 유문암이  $65.98 \pm 0.93$  Ma로 보고되었다(Lee *et al.*, 1992).

이 분지의 화산암류는 SiO<sub>2</sub>의 함량에 따라서 현무암(46.9%), 안산암(54.9%~55.8%), 테사이트 및 유문암(58.8%~69.7%)으로 구분되며, 안산암이 우세하다. 이들 암석의 화학분석치는 칼크알칼리 계열을 나타낸다(Lee *et al.*, 1992).

### 3.2.4 공주분지

이 분지는 25x4 km 크기이며, 주향이동단층에 의한 인리형 분지이다. 북서부에는 백악기 화산암류가 소규모로 분포하며, 화산암류는 현무암질 용암, 응회암, 응회각력암 등으로 구성되며 하부에는 용암이 절대적으로 우세하지만 상부로 가면서 화성쇄설암이 풍부해진다(Lee *et al.*, 1992).

현무암의 K-Ar 연대가  $93.2 \pm 1.4$  Ma로 보고되었는데(Lee *et al.*, 1992), 이는 풍암분지, 음성분지의 현무암질 화산활동과 거의 유사한 시기이다.

이 화산암류는 SiO<sub>2</sub>의 함량에 따라서 현무암(48.35%), 현무암질 안산암(52.7%~57.0%), 안산암(60.0%~64.2%)으로 구분되며, 대부분 현무암질 용암류로 산출된다. 이 화산암류는 화학적으로 칼크알칼리 계열에 속하며, 섭입작용에 따른 화산활동이 일어났음을 반영한다(Lee *et al.*, 1992).

### 3.2.5 변산 화산암체

이 화산암체는 근산·부안·방축도·장자도도폭(Choi and Hwang, 2013)과 줄포·위도·하왕등도도폭(Koh *et al.*, 2013)에서 대부분 유문암질 내지 테사이트질 화성쇄설암과 용암 및 관입암으로 구성되고 약간의 퇴적암층을 협재한다. 이 화산암체는 하부로부터 천마산응회암, 연동응회암, 우제동응회암, 석포응회암,

격포리층, 곰소유문암, 유정재응회암, 변산응회암, 백련리유문암, 기상봉응회암과 삼예봉유문암으로 구분된다.

석포응회암은 SHRIMP U-Pb 연대가  $88.7 \pm 2.0$  Ma로 측정되었으며(Koh *et al.*, 2013), 위도에서 망령산응회암은  $85.7 \pm 2.9$  Ma로 측정되었고 기상봉응회암에 대비된다. 그리고 야미도에 산출되는 유문암은  $93.6 \pm 2.1$  Ma로 측정되었다(Choi and Hwang, 2013).

### 3.2.6 선운산 화산암체

이 화산암체는 고창 동부에 10x14 km 크기의 타원상으로 분포하며 칼데라 함몰체로 남아있다. 이 화산암체는 하부로부터 경수산테사이트, 이상산응회암, 굴치유문암, 월평응회암과 응회질 퇴적암층 순으로 구분된다(Park and Lee, 1988).

경수산테사이트는 화성쇄설 조식이 관찰됨으로써 경수산응회암으로 개칭하였으며 저어콘의 SHRIMP U-Pb 연대가  $86.5 \pm 1.7$  Ma와  $84.9 \pm 1.0$  Ma로 측정되었다(Koh *et al.*, 2013).

선운산 화산암류는 화학적으로 칼크알칼리 계열에 속하며 SiO<sub>2</sub> 함량이 58~70%로 증가함에 따라 전체적으로 테사이트질에서 유문암질로 분화되어감을 나타낸다(Park and Lee, 1988).

### 3.2.7 범성포 화산암체

이 화산암체는 영광 서해안을 따라 7.5x15 km의 타원상으로 분포한다. 가음도도폭에서 여러 암상으로 분류되었으며(Chang and Hwang, 1984), 그 후에 하부 산성 화산암류를 대질산화산암층, 중부 중성 화산암류를 수리봉화산암층, 상부 산성 화산암류를 옥녀봉화산암층으로 명명하였다(Won *et al.*, 1991). 그리고 북부의 범성포도폭에서 하부 산성 화산암류를 상하응회암과 성산응회암으로 분리하였고, 중부 중성 화산암류와 상부 산성 화산암류를 각각 홍농안산암과 계마유문암으로 개칭하였다(Kwon *et al.*, 2015).

SHRIMP U-Pb 연대측정에 의하면 성산응회암은  $87.46 \pm 0.86$  Ma와  $87.66 \pm 0.76$  Ma로 측정되었고, 계마유문암에서는  $84.9 \pm 1.1$  Ma 연대를 얻었다(Kwon *et al.*, 2015).

이 화산암체는 화학적으로 칼크알칼리 계열로 나타난다. 따라서 이 지역의 화산암류는 백악기 후엽에 유라시아판 연변부에서 고태평양 해양판의 섭입

**Table 3.** Occurrences and dating data of the volcanic rocks in the Okcheon Belt.

Basin	Stratigraphic unit	Occurrence mode	Magma type	Age (Ma)	Reference
Tongri Basin		Intrusives Autobreccia Pyroclastics Lava	Rhyolitic Dacitic Andesitic Basaltic	K-Ar 49.42±0.75 K-Ar 56.03±2.46 K-Ar 66.92±2.1	Won <i>et al.</i> (1994)
Mungyeong Volcanics		Dike Pyroclastics Lava	Rhyolitic Andesitic	K-Ar 89	Kim (1971)
Muju Basin	Jeoksangsan Formation Seolcheon Tuff	Lava Autobreccia Pyroclastics	Andesitic Rhyolitic	K-Ar 90.30±1.28 K-Ar 91.16±2.00	Park and Lee (1997)
Unjangsan Volcanics	Seodaesan Tuff	Pyroclastics	Rhyolitic	K-Ar >85	Kim (1971)
Sunchang Basin	Naejangsan Rhyolitic Rocks Baekyangsa Andesitic Rocks	Intrusives Pyroclastics Lava	Rhyolitic Dacitic Andesitic Basaltic	K-Ar 76.4±1.1 K-Ar 75.3±3.0 K-Ar 85.0~72.5 K-Ar 90.4~77.9 K-Ar 92.8~80.8	Won (1990) Paik <i>et al.</i> (1979)
Neungju Basin	Mudeungsan Tuff Hwasun Andesite and others	Intrusives Pyroclastics Lava	Rhyolitic Andesitic	SHRIMP 85.41±0.58 SHRIMP 85.82±0.84 SHRIMP 87.72±0.59	Jung <i>et al.</i> (2014)
Mokpo Volcanics	Yudalsan Tuff Namak Tuff Jaeundo Tuff Rhyolite I Gijwado Tuff Maewolri Tuff and others	Intrusives Lava Pyroclastics	Rhyolitic Andesitic	SHRIMP 78.44±0.67 SHRIMP 80.2±0.9 SHRIMP 83.77±0.62 SHRIMP 84.6±2.0 SHRIMP 86.3±2.6 SHRIMP 97.55±0.62	Kihm <i>et al.</i> (2014) Kim <i>et al.</i> (2014) Choi <i>et al.</i> (2016)
Haenam Basin	Yeongpungri Tuff Dueokbong Tuff Jamduri Rhyolite Hwawon Formation	Lava Pyroclastics	Rhyolitic Andesitic Basaltic	SHRIMP 85.6±1.7 SHRIMP 97.7±1.1 SHRIMP 98.5±0.6 SHRIMP 98.2±1.3 SHRIMP 99.7±1.1 K-Ar 95.4±2.9 K-Ar 103.4±2.5	Kim <i>et al.</i> (2014) Kim and Nagao (1992)
Jindo Volcanics	Jindo Rhyolite Samji Tuff	Lava Pyroclastics	Rhyolitic	K-Ar 72.5~75.4 K-Ar 73.9~76.3	Kim and Nagao (1992)

에 의해 생성된 칼크-알칼리 계열의 마그마 활동과 관련된 것으로 해석하였다(Won *et al.*, 1991).

### 3.3 옥천화산대

옥천화산대는 옥천대 내와 남변부에 수조의 NE-SW 단층선을 따라 통리분지, 문경 화산암체, 영동분지, 무주분지, 운장산 화산암체, 순창분지, 능주분지, 목포 화산암체, 해남분지, 진도 화산암체 등으로 연결

된다(그림 1; 표 3).

#### 3.3.1 통리분지

이 분지에서 화산암류는 태백-통리 사이의 백병산, 연화산, 복두산 일대의 3개 지역에 분리되어 분포하므로 백병산, 연화산 및 복두산 화산암체로 나뉘인다(Won *et al.*, 1994).

백병산 화산암체는 5x6 km 규모의 타원상으로



분포하며 약 500 m 두께를 가진다. 이 화산암체는 하부로부터 현무암, 안산암, 유문암질 용결응회암 등의 순서로 구분된다. 안산암은 K-Ar 연대가  $66.92 \pm 2.1$  Ma로 측정되었다. 연화산 화산암체는 약 200~300 m 두께를 가지고, 유문암질 응회암과 유대상 유문암이 수차례 교호한다. 하부 유문암은 K-Ar 연대가  $56.03 \pm 2.46$  Ma로 측정되었다. 복두산 화산암체는 하부의 데사이트, 중부의 유문암질 응회암, 상부의 유문암 및 각력암으로 구성된다. 데사이트의 K-Ar 연대는  $49.42 \pm 0.75$  Ma로 측정되었다(Won *et al.*, 1994).

백병산 화산암체는 SiO<sub>2</sub> 함량이 46.30~75.0%, 연화산 화산암은 74.65%~76.31%, 복두산 화산암은 66.33~72.49% 범위이다(Won *et al.*, 1994). 이들은 칼크알칼리 계열에 속하며 고-K 영역에 도시된다. 이런 특징은 대륙연변부에 분포하는 화산암류의 화학적 조성과의 일치한다.

### 3.3.2 문경 화산암체

문경 운달산과 대미산 일대의 화산암류는 운달산 화강반암이라고 기재되었지만(Kim *et al.*, 1967), 이후에 운달산화산암, 대미산응회암과 화강반암맥으로 구분되었다(Jin *et al.*, 1992). 운달산화산암은 안산암질 내지 데사이트질이고, 대미산응회암은 데사이트질 내지 유문암질 조성을 가진다. 화강반암맥의 K-Ar 연대가 약 89 Ma로 보고되었다(Kim, 1971).

### 3.3.3 무주분지

이 분지는 퇴적암류와 화산암류로 구성되며 약 2,000 m 두께를 가진다. 층서는 설천응회암, 방이리층, 길왕리층, 적상산층 순으로 설정되었다(Park and Lee, 1997). 이중에 설천응회암과 적상산층이 화산암류로 구성된다. 설천응회암은 약 800 m 두께를 가지며 결정이 풍부한 라필리응회암이다. 이 응회암은 K-Ar 전암연대가  $91.16 \pm 2.00$  Ma로 측정되었다(Park and Lee, 1997).

적상산층은 층리가 잘 발달되는 라필리응회암과 라필리암(lapillistone)으로 구성되고 상부는 안산암질 용암과 각력암 및 응회암이 교호한다. 안산암질 용암의 K-Ar 전암연대는  $90.30 \pm 1.28$  Ma로 측정되었다(Park and Lee, 1997).

설천응회암은 대개 유문암질 회류응회암에 속하고 SiO<sub>2</sub> 조성이 69.2~77.9% 범위이며 칼크알칼리 계열

의 고-K 계열에 속한다. 미량원소 거동과 희토류원소 패턴은 백악기 후엽에 해양판의 섭입에 따른 대륙연변부의 조구조적 위치를 나타낸다(Kim, M.-S. *et al.*, 2008).

### 3.3.4 운장산 화산암체

이 화산암체는 운장산을 중심으로 21x25 km 크기의 타원상 칼데라 함몰체로 분포하며, 백악기 진안분지의 산수동층을 부정합으로 덮고 있다.

이 화산암체는 하위로부터 낙천리층, 서대산응회암, 석영반암, 화강암의 순으로 분류된다. 서대산응회암은 화산암체의 중앙부에 넓게 분포하며, 두께가 최대 약 1,000 m이며, 체적은 약 430 km<sup>3</sup>이다. 이 암층은 주로 데사이트질~유문암질 용결응회암이지만, 환상단층 근처와 하부에서는 응회각력암, 라필리응회암으로 접이된다. 중심부의 화강암은 중립질 내지 조립질이며 K-장석에 대한 K-Ar 절대연대가 85 Ma이다(Kim, 1971).

### 3.3.5 순창분지

이 분지는 순창과 정읍 일대에서 목포-전주 및 광주-진안을 잇는 북동방향의 좌수향 이동단층에 의해서 형성된 인리형 분지로서, 50x25 km의 마름모꼴이다. 이 분지의 서부는 내장산 화산암체와 동부는 강천사 화산암체로 구분된다. 내장산 화산암체는 크게 하부의 백양사안산암질암류와 상부의 내장산유문암질암류로 구분되었다.

내장산 화산암체에서 백양사 현무암이 K-Ar 전암연대가  $92.8 \pm 9.9 \sim 80.8 \pm 1.3$  Ma로 나왔고, 안산암의 K-Ar 전암연대가  $90.4 \pm 4.0 \sim 77.9 \pm 3.0$  Ma로, 내장산 화산각력암이  $75.3 \pm 3.0$  Ma (Paik *et al.*, 1979) 등으로 보고되었다. 그리고 강천사 화산암체에서 하부 무이산 현무암은 K-Ar 전암연대가  $85.0 \pm 1.3 \sim 72.5 \pm 1.5$  Ma로 측정되었다(Won *et al.*, 1990).

이 화산암류는 동부에서 SiO<sub>2</sub> 함량이 47~72% 범위, 서부에서 45~74% 범위로서 거의 같은 조성을 보여준다. 이들 화산암류는 화학조성상으로 칼크알칼리 계열에 속하며, 백악기 유라시아판 연변부에 고태평양 해양판의 섭입에 따른 칼크알칼리 계열 마그마의 화산활동에 의한 것이다(Won *et al.*, 1990).

### 3.3.6 능주분지

이 분지는 직경 약 40 km 크기의 원형 함몰체이

며, 동부가 안산암질암류와 유문암질암류로 구성되는 무등산 화산암체로, 남서부가 주로 유문암질암류로 구성되는 능주 화산암체로 구분된다. 이 두 화산암체는 중간의 화순지역에서 서로 교호하는 양상을 보여준다. 특히 무등산 화산암체는 백악기의 퇴적암층, 화순안산암, 도곡유문암(94~92 Ma), 남평응회암, 송학리응회암, 궁월리유문암, 다도응회암, 무등산응회암 순으로 형성되었다.

무등산응회암은 화학성분에 의한 분류에 의하면 대부분 테사이트 영역에 속하며, SHRIMP U-Pb 연대가  $87.72 \pm 0.59$ ,  $85.82 \pm 0.84$ ,  $85.41 \pm 0.58$  Ma로 측정되었다(Jung *et al.*, 2014).

### 3.3.7 목포 화산암체

이 화산암체는 영암과 목포로부터 신안군의 여러 화산섬들을 포함하며, 대부분 유문암질 응회암과 관입암으로 구성되어 있다. 목포도폭은 7개 단위로 구분되고(Kihm *et al.*, 2014) 영암도폭은 6개 단위로 구분되며(Kim *et al.*, 2014) 분계·자은도·비금도·기좌도도폭은 7개 단위로 나뉘어 있다(Choi *et al.*, 2016).

이 화산암체의 여러 층으로부터 수차례의 화산유희를 인지할 수 있다. 첫 번째 유희는 매월리응회암이 SHRIMP U-Pb 연대측정 결과  $97.55 \pm 0.62$  Ma에, 기좌도응회암이  $86.3 \pm 2.6$  Ma, 유문암(I)이  $86.4 \pm 2.0$  Ma에 정치하였다. 두 번째 유희는 자은도응회암이  $82.9 \sim 83.7$  Ma에 사옥도응회암과 함께 넓게 쌓였고 환상단열대를 따라서 유문암이 정치되었다. 세 번째 유희는 남약응회암이  $80.2 \pm 0.9$  Ma에 비금도응회암과 함께 활동하였고 마지막으로 유달산응회암이  $78.44 \pm 0.67$  Ma에 정치되었다(Kihm *et al.*, 2014; Kim *et al.*, 2014; Choi *et al.*, 2016).

### 3.3.8 해남분지

이 분지에는 하부로부터 소량의 현무암 및 안산암과 안산암질 화성쇄설암으로 구성된 화원층과 산성화산암의 여러 층으로 구성되어 있는 해남층군이 분포한다. 이들은 대부분 후기의 심한 열수에 의한 납석화작용 또는 명반석화작용을 받은 곳이 많다.

K-Ar 전암연대 측정결과, 화원층 내의 현무암의 연대가  $103.4 \pm 2.5$  Ma에서  $101.9 \pm 2.7$  Ma이고, 안산암이  $95.4 \pm 2.9$  Ma에서  $94.1 \pm 2.0$  Ma로 측정되었다(Kim and Nagao, 1992).

그러나 해남분지 북단에서 SHRIMP U-Pb 연대 측정에 의해 잠두리유문암이  $99.7 \pm 1.1$  Ma,  $98.2 \pm 1.3$  Ma과 두억봉응회암이  $98.5 \pm 0.6$  Ma,  $97.7 \pm 1.1$  Ma로 밝혀졌으며, 영풍리응회암이  $85.6 \pm 0.7$  Ma로 측정되었다(Kim *et al.*, 2014).

### 3.3.9 진도 화산암체

이 화산암체는 하부로부터 여귀산용결응회암, 진도유문암, 안산암질 응회암 등이 분포하며, 여귀산용결응회암 하부에는 삼도층과 만길리층과 같은 응회질 퇴적암층이 협재된다(Kim and Yoon, 1971).

이 화산암체에 대한 K-Ar 전암연대 측정결과, 삼지응회암이  $73.9 \sim 76.3$  Ma로 밝혀졌으며 고군면의 유교리의 진도유문암이  $72.5 \sim 75.4$  Ma로 측정되었다(Kim and Nagao, 1992).

## 3.4 영남화산대

영남화산대는 영남육괴 내에서 구미분지, 구례분지, 괴목분지, 보성, 강진, 남창 및 고흥 화산암체로 산점상으로 연결된다(그림 1; 표 4).

### 3.4.1 구미분지

이 분지에는 하부의 퇴적암류와 상부의 화산암류로 구성된다. 퇴적암류는 회색 사암 및 역암이 호층을 이루며, 층서상으로 낙동층에 해당한다(Kim and Lim, 1974). 이 층은 화산암체를 향해 안쪽으로  $15 \sim 60^\circ$  경사를 이룬다.

화산암류는 하부에 안산암질암류, 상부에 유문암질암류로 나뉜다. 안산암질암류는 용결응회암과 안산암용암으로 구분되며, 유문암질암류는 하부 응회암, 유문암 용암, 상부 용결응회암과 유문암맥으로 구분된다. 유문암맥은 환상암맥으로 관입하고 있으며, 유문암질암류는 안쪽에 퇴적암류 및 안산암질암류는 바깥쪽에 분포한다. 접촉부에서 각력화된 관입각력암(intrusion breccia)을 형성하고 퇴적암과의 접촉부에서 호온펠스화되어 있다. 따라서 금오산 화산암체에서는  $5.1 \times 9.9$  km 크기의 칼데라를 예상할 수 있다.

### 3.4.2 구례분지

이 분지에서 층서는 하부로부터 수평리층, 금정리역암, 토금층과 오봉산층으로 구분되었다(Lee and Song, 2007). 오봉산층은 규장질 화성쇄설암, 안산암, 화성

**Table 4.** Occurrences and dating data of the volcanic rocks in the Yeongnam Massif.

Basin	Stratigraphic unit	Occurrence mode	Magma type	Age (Ma)	Reference
Gumi Basin		Intrusives Lava Pyroclastics	Rhyolitic Andesitic		
Gurye Basin	Obongsan Formation	Intrusives Autoclastics Lava Pyroclastics	Rhyolitic Andesitic	K-Ar 81.3±2.40 K-Ar 106.67±2.40	Lee and Song (2007)
Goemok Basin	Munysan Volcanic Complex	Intrusives Lava Pyroclastics	Rhyolitic Andesitic Dacitic	K-Ar 58.4±1.2 K-Ar 56.0±1.2	Kim, Y.-L. <i>et al.</i> (2008)
Boseong Volcanics	Hoeryeongdong Tuff Docheonri Rhyolite Obongsan Tuff Gaeksanri Andesite	Pyroclastics Lava	Rhyolitic Andesitic		
Gangjin Volcanics	Seokjeongri Rhyolite Mamyeongdong Tuff Songsanri Rhyolite Jangguri Tuff Mananri Rhyolite	Lava Pyroclastics	Rhyolitic		
Namchang Volcanics	Buyongsan Extrusives Yongsori Extrusives	Lava Pyroclastics	Andesitic Rhyolitic		
Goheung Volcanics	Byeolhaksan Rhyolite Podu Andesite Paryeongsan Tuff Guryongsan Andesite	Intrusives Lava Pyroclastics	Dacitic Andesitic Rhyolitic	SHRIMP 80.30±1.2 SHRIMP 81.40±1.3 SHRIMP 83.99~80.98 SHRIMP 84.86±0.73	Kim <i>et al.</i> (2015)

쇄설암, 유문암 순으로 구분되며, 이들을 합쳐서 등주리봉 화산암복합체로 칭하였다(Koh *et al.*, 2009).

토금층에 협재된 응회암은 K-Ar 전암연대가 106.67±2.40 Ma로 보고되었고, 최상부의 유문암질 응회암은 81.3±2.40 Ma로 보고되었다(Lee and Song, 2007).

화산암복합체는 화학적으로 SiO<sub>2</sub> 함량이 52.0~78.5 wt.%의 넓은 조성범위를 나타내며, 대부분 중-K와 고-K 영역의 칼크알칼리 계열의 경향을 나타내며 구조 판별도에서 화산호 영역 중에서도 대륙연변호에 속한다(Koh *et al.*, 2009).

### 3.4.3 괴목분지

이 분지는 하부의 퇴적암류와 상부의 문유산 화산암복합체로 구성된다. 문유산 화산암체는 아래로부터 응회질 퇴적암, 산성 화성쇄설암, 안산암과 유문암으로 구성되어 있다. 산성 화성쇄설암은 데사이트질 내지 유문암질 화성쇄설암으로 구성된다. 안산암은 가장 넓게 분포하며, 유문암은 안산암을 관입

하고 유상엽리를 발달시킨다.

K-Ar 전암연대측정에 의하면 데사이트질 화성쇄설암은 58.4±1.2 Ma이고, 안산암은 56.0±1.2 Ma이다(Kim, Y.-L. *et al.*, 2008). 화학분석 자료에 의하면 이 문유산 화산암체는 중-K에서 고-K의 범위의 칼크알칼리 계열이며, 섭입대와 관련된 대륙연변부 화산호라는 지구조적 배경을 보여준다(Kim, Y.-L. *et al.*, 2008).

### 3.4.4 보성 화산암체

이 화산암체는 하부로부터 객산리안산암, 오봉산 응회암, 도천리유문암, 회령동용결응회암 순으로 분포하며 용암층과 화산쇄설암층이 교호한다(Lee, 1970). 이들 화산암류는 환상으로 분포하는 것과 같이 칼데라 함몰체일 가능성이 있다.

### 3.4.5 강진 화산암체

이 화산암체는 용소리분출암류와 부용산분출암류

등으로 구분된다(Chang and Kim, 1967). 용소리분출암류는 유문암질로서 대부분 응회암, 라필리응회암과 응회각력암 등의 화성쇄설암으로 구성되며 소량의 용암류도 수반한다. 화성쇄설암은 대부분 부석편이 심하게 압착되고 용결엽리를 형성한다. 부용산분출암류는 안산암질로서 대부분 라필리응회암과 응회각력암 등으로 구성되고 용암을 수반한다. 이 화성쇄설암도 여러 층준에서 용결엽리를 보여주지만 용소리분출암류 만큼 심한 용결을 나타내지 않는다.

### 3.4.6 남창 화산암체

이 화산암체는 하부로부터 만안리유문암, 장구리응회암, 송산리유문암, 마명동응회암과 석정리유문암 순으로 놓인다(Kim and Park, 1967). 이들은 모두 유문암질로서 화성쇄설암과 용암이 교호하며, 화성쇄설암은 부석편이 압착되어 용결엽리를 발달시키고 유문암은 미세한 유상엽리를 발달시킨다.

### 3.4.7 고흥 화산암체

이 화산암체는 하부로부터 고흥응회암, 운대유문암, 구룡산안산암, 팔영산응회암, 포두안산암과 별학산유문암 순으로 구성된다(Kim *et al.*, 2015).

고흥응회암은 유문암질 응회암에 속하며, 팔영산응회암은 데사이트질 내지 유문암질 응회암에 해당된다. 팔영산응회암은 SHRIMP U-Pb 연대측정에 의하면  $83.99 \pm 0.96 \sim 80.98 \pm 0.65$  Ma의 연대를 나타낸다(Kim *et al.*, 2015). 안산암은 구룡산안산암과 포두안산암으로 구분되었다. 구룡산안산암은 현저한 반상조직을 나타내고 SHRIMP U-Pb 연대가  $84.86 \pm 0.73$  Ma이며, 포두안산암은 대개 비반상이고 SHRIMP U-Pb 연대가  $81.40 \pm 1.3$  Ma이다. 유문암은 주로 암맥상으로 관입되거나 분출상으로 산출된다. 별학산유문암의 연대는 SHRIMP U-Pb 연대측정에 의해  $80.30 \pm 1.2$  Ma로 밝혀졌다(Kim *et al.*, 2015).

## 3.5 경상화산대

경상화산대는 경상분지에서 NNE-NE-WSW 방향으로 활모양 분포를 나타낸다(그림 1). 이 분지에서 경상누층군은 신동층군, 하양층군과 유천층군으로 구분된다(Chang, 1975). 하양층군에는 퇴적암층의 여러 층위에 현무암과 응회암이 소규모로 협재되고, 유천층군에는 대부분 안산암질 내지 유문암질의

용암과 화성쇄설암으로 구성된다.

### 3.5.1 하양층군에서 화산암류

하양층군에서 화산암류는 하부로부터 청룡사현무암, 학봉현무암, 오십봉현무암, 세천동현무암, 대전사현무암, 함안현무암, 구산동응회암, 하마현무암, 채악산현무암 순으로 협재되어 있다(표 5; Kim *et al.*, 2000).

(가) 청룡사현무암: 이 현무암은 칠곡층 최상부에 남북 방향으로 약 12 km 길이로 평균 5~6 m 두께를 가지며 신라역암의 하한으로부터 30~40 m 가량 아래에 협재된다. 청룡사현무암은 수매의 용암 흐름단위(flow unit)로 구성되며 퍼호이호이(pahoehoe)의 특징을 보인다(Jeon and Sohn, 2008).

이 용암은  $\text{SiO}_2$ 가 43~53% 범위이고 화학적으로 현무암질 조면안산암에 해당된다(Kim *et al.*, 2000). SHRIMP U-Pb 연대측정에 의하면 청룡사현무암의 연대는  $108.0 \pm 2.6$  Ma로 측정되었고(Kim, J.S. *et al.*, 2011) 그 아래의 진주층은  $112.4 \pm 1.3$  Ma로 나왔다(Lee *et al.*, 2010).

(나) 학봉현무암: 이 현무암은 대구 학봉을 중심으로 NE-SW 방향으로 약 20 km 길이로 산출되며, 3매의 용암 단위가 100 m 내외의 두께를 가진다. 용암 단위는 상단과 하단에 현무암질 각력암이 산출되는데, 이는 용암이 흐를 때 자가파쇄작용으로 형성되는 자가각력암(autobreccia)에 해당된다(Jeon and Sohn, 2008).

화학조성은  $\text{SiO}_2$ 가 44~57% 범위이고 화학적으로 현무암 내지 현무암질 안산암에 해당된다(Kim *et al.*, 2000). 그 아래 신라역암의 SHRIMP U-Pb 연대가  $110.4 \pm 2.0$  Ma이므로(Lee *et al.*, 2010), 학봉현무암은 110 Ma보다 약간 더 젊을 것으로 생각된다.

(다) 오십봉현무암: 이 현무암은 영양소분지에서 청량산역암과 도계동층 사이에 분포하며, 두께는 15 m에서 700 m 범위이다. 오십봉현무암은 지역에 따라 2~13매의 용암 단위들로 구성되고 저색 역암, 사암과 이암을 얇게 협재한다. 전반적으로 용암 단위는 하부에서 두껍고 매우 넓게 분포하는데 비해 상부로 가면서 얇아지고 퇴적암이 다소 두꺼워지고 빈번해진다.

오십봉현무암은  $\text{SiO}_2$ 가 48~53% 범위이고 화학적으로 대개 현무암에 해당된다(Kim *et al.*, 2000).

(라) 세천동현무암: 이 현무암은 영양소분지 중앙

**Table 5.** Occurrences and dating data of the volcanic rocks in the Hayang Group in the Gyeongsang Arc.

Stratigraphic unit	Intercalation level	Occurrence mode	Magma type (SiO <sub>2</sub> %)	Age (Ma)	Reference
Chaeyaksan Basalt	below the Geoncheonri Formation	Epiclastics Lava Pyroclastics	Basaltic (46~57%)		Kim <i>et al.</i> (1999, 2000)
Sinsudo Tuff	below the Jindong Formation	Pyroclastics	rhyolitic	SHRIMP 95.79±0.98	Kim <i>et al.</i> (2013)
Hama Basalt	on the Banyawol Formation	Epiclastics Lava	Trachybasaltic (45~55%)		Kim <i>et al.</i> (2000)
Gusandong Tuff	between the Haman and Banyawol Formation	Pyroclastics	Rhyolitic	La-ICP-MS 97.1±2.0, 97.3±1.8 SHRIMP 103.0±1.2 SHRIMP 104.1±1.3	Jwa <i>et al.</i> (2009) Kim <i>et al.</i> (2013)
Haman Basalt	in the Haman Formation	Lava Pyroclastics	Basaltic (45~53%)		Kim <i>et al.</i> (2000)
Daejeonsa Basalt	in the Dogyedong Formation	Autoclastics Lava	Basaltic (48~53%)		Yun <i>et al.</i> (2000)
Secheondong Basalt	in the Dogyedong Formation	Autoclastics Lava	Basaltic (43~55%)		Kim <i>et al.</i> (2000)
Osipbong Basalt	on the Cheongryangsan Conglomerate	Lava	Basaltic (48~53%)		Kim <i>et al.</i> (2000)
Hakbong Basalt	on the Silla Conglomerate	Autoclastics Lava	Basaltic (44~57%)	SHRIMP >110.4±2.0	Lee <i>et al.</i> (2010)
Cheongryongs a Basalt	in the Chilgok Formation	Lava	Basaltic (43~53%)	SHRIMP 108.0±2.6	Kim, J.S. <i>et al.</i> (2011)

부에서 도계동층 중부에 10~20 m 두께로 협재된다. 이 현무암은 2매의 용암 단위와 그 사이에 사암, 이암 및 역암이 협재되어 있다. 각 현무암 단위마다 상단에는 현무암편 사이의 공간이 퇴적물로 메워진 얇은 현무암질 각력암이 산출되고 기저부에는 얇은 현무암질 라필리응회암층을 이룬다. 각력암은 용암이 흐를 때 점성의 증가로 인해 상단부가 자가파쇄작용 (autofragmentation)으로 생긴 파편 사이에 퇴적물이 침투하여 형성된 자가각력암으로 해석된다.

세천동현무암은 오십봉현무암과 매우 유사하게 SiO<sub>2</sub>가 43~55% 범위이고 화학적으로 대개 현무암에 해당된다(Kim *et al.*, 2000).

**(마) 대전사현무암:** 이 현무암은 주왕산 입구에서 도계동층 상부에 약 60 m 두께로 협재된다. 대전사 현무암은 각력암이 협재되어 있어 여러 매의 현무암질 용암단위들로 구분된다(Yun *et al.*, 2000). 각 용암단위는 전체적으로 7~10 m 두께이고 각력암은 현무암 파편들이 밀집되어 있고 그 사이에 적갈색

퇴적물로 채워져 있다. 이 각력암은 용암이 흐를 때 자가파쇄작용에 의한 자가각력암으로 해석된다. 따라서 이 용암은 표면이 많은 클링커를 가진 아아 용암(aa lava)으로 분류된다.

조성은 SiO<sub>2</sub>가 48~53% 범위이고 화학적으로 칼크알칼리 현무암에 해당된다(Yun *et al.*, 2000).

**(바) 함안현무암:** 이 현무암은 함안층 상부에 협재되며 용암과 화산쇄설암의 호층이며 화산쇄설암이 용암보다 우세한 편이다.

조성은 SiO<sub>2</sub>가 45~53% 범위이고 화학적으로 대체로 현무암 범주에 속한다(Kim *et al.*, 2000).

**(사) 구산동응회암:** 이 응회암은 유천 및 의성 소분지에서 함안층과 반야월 사이에서 산출된다. 이 응회암은 약 1~4 m 두께로서 남북으로 200 km 이상 연장되며, 소분지 간의 층서대비에 중요한 건층으로 이용되었다(Chang *et al.*, 1997, 1998). 구산동 응회암은 결정함량이 높지만 부석편을 거의 포함하지 않은 특이한 화쇄류암이며, 조성은 유문암 내지

유문데사이트이다.

구산동응회암은 저어콘의 LA-ICP-MS 분석에서 북쪽과 남쪽 응회암 연대가 각각  $97.1 \pm 2.0$  Ma와  $97.3 \pm 1.8$  Ma로 나왔고(Jwa *et al.*, 2009), SHRIMP U-Pb 연대측정에서도 북쪽 응회암에서  $103.0 \pm 1.2$  Ma, 남쪽 응회암에서  $104.1 \pm 1.3$  Ma로 나와 거의 동시에 분출된 것으로 해석된다(Kim *et al.*, 2013).

**(아) 하마현무암:** 이 현무암은 의성소분지에서 구산동응회암과 반야월층(혹은 춘산층) 사이에 협재되며, 현무암질 화산쇄설암과 용암의 호층으로 구성되어 있다.

화학적 조성은  $\text{SiO}_2$ 가 45~55% 범위이고 화학적으로 조면현무암 내지 조면안산암에 해당된다(Kim *et al.*, 2000).

**(자) 신수동응회암:** 이 응회암은 유천소분지 남부에서 함안층에 하부에서 산출되며, 구산동응회암보다 약간 위에 놓인다. 이 응회암은 SHRIMP U-Pb 연대측정에서  $95.790 \pm 0.98$  Ma로 나왔으며 구산동응회암보다 약간 후에 분출된 것으로 해석된다(Kim *et al.*, 2013).

**(차) 채약산현무암:** 이 현무암은 유천소분지 북부에서 반원상으로 넓게 분포하며, 건천리층 아래에 협재되고 약 300 m 두께를 가진다. 이 현무암은 화산쇄설암이 우세하고 3매의 용암이 협재되어 있으며 대부분 스피라이트화(spilitization)되어 있다. 화산쇄설암은 대체로 하부가 화성쇄설암이고 중부가 각력암이며 상부가 지표쇄설암이다(Kim *et al.*, 1999).

화학적 조성은  $\text{SiO}_2$ 가 46~57% 범위이고 화학적으로 현무암 내지 현무암질 안산암 범위에 해당된다(Kim *et al.*, 1999, 2000).

### 3.5.2 유천층군 화산암류

경상분지 유천층군의 화산암류는 경상분지 동남부를 따르고 남해안으로 연장되는 화산대로 보고 경상호(Hwang and Kim, 1994) 혹은 경상화산호라고 칭하였다(그림 1; Chough and Sohn, 2010). 유천층군은 유천소분지에 가장 광범위하게 분포하며, 유천층군은 조성과 U-Pb 연대치에 의해 주사산아층군(하부 안산암질암류), 운문사이층군(하부 유문암질암류), 육지아층군(상부 안산암질암류)과 사랑아층군(상부 유문암질암류)로 구분된다(표 6; Kim and Lee, 1981; Hwang *et al.*, 2019).

**(가) 주사산아층군:** 이 아층군은 유천소분지에서 하양층군의 건천리층(혹은 진동층) 위에 놓인다. 이들은 안산암질 용암과 화성쇄설암으로 구성되고 응회질 퇴적암층을 협재한다. 밀양 일대에서 주사산아층군은 하부로부터 팔용산응회암, 종남산안산암(비반상 안산암), 안산암질 생철리응회암(라필리응회암)과 밀양안산암 순으로 구성된다.

종남산안산암은 LA-ICP-MS U-Pb 연대가  $94.4 \pm 0.8$  Ma로 측정되었고, 밀양안산암은 하부에서  $94.3 \pm 2.0$  Ma로, 상부에서  $88.8 \pm 1.0$  Ma로 측정되었다(Zhang *et al.*, 2012).

**(나) 운문사이층군:** 이 아층군은 유천소분지 중앙부에서 능선부에 주로 분포하며 남부에서 주로 섬지역에 분포한다. 유천소분지 중앙부에서 이들은 3개의 칼데라가 확인되면서 이 칼데라 형성과 함께 회류응회암과 강하응회암이 밀접히 연관되어 있음을 인식하여, 이에 따라 양산응회암, 원동응회암 및 삼랑진응회암으로 분류되었다(Hwang and Kim, 1990). 원동응회암의 연대는 LA-ICP-MS U-Pb 연대측정에 의해  $88.0 \pm 0.8$  Ma, 삼랑진응회암은  $88.0 \pm 0.7$  Ma로 밝혀졌다(Zhang *et al.*, 2012).

유천소분지 남부에서 운문사이층군은 SHRIMP U-Pb 연대측정에 의해 풍화리응회암( $88.95 \pm 0.44$  Ma), 봉화산응회암( $86.69 \pm 0.78$  Ma), 추도응회암( $82.56 \pm 0.95$  Ma), 자부포응회암( $82.06 \pm 0.55$  Ma), 노대도응회암( $81.30 \pm 0.54$  Ma), 갈도응회암( $80.43 \pm 0.53$  Ma) 순으로 구분되며 그 연대치에 의하면 분출시기는  $88.95 \sim 80.45$  Ma 범위를 나타낸다(Hwang *et al.*, 2018a, 2018b; Lee *et al.*, 2019).

**(다) 육지아층군:** 이 아층군은 유천소분지의 남부에 부정합적으로 분포한다. 이곳에서는 통영 미륵도에서 화성쇄설암층의 협재에 의해 하부로부터 미륵산안산암, 마동데사이트, 달야안산암 순으로 구분되고, 서쪽 지역에서 아랫섬안산암과 두미도안산암 순으로 구분된다(Hwang *et al.*, 2016b). 달야안산암의 하부 라필리응회암의 연대는 SHRIMP U-Pb 측정에 의하면  $73.01 \pm 0.75$  Ma이다(Hwang *et al.*, 2018a). 유천소분지 중앙부에서 범도리안산암은 이보다 좀 빠른  $78.4 \pm 1.5$  Ma로 밝혀졌다(Zhang *et al.*, 2012).

**(라) 사랑아층군:** 이 아층군은 남쪽 주변부의 통영에서 하부로부터 오비도층, 곤리도응회암, 남산유문암, 사랑도응회암 순으로 구분된다(Hwang *et al.*, 2016b).

**Table 6.** Stratigraphy and dating data of the volcanic rocks of the Yucheon Group in the Gyeongsang Basin.

Subgroup	Area	Stratigraphic unit	Occurrence mode	Age (Ma)	Reference
Sayang Subgroup	Uiseong and Yeongyang subbasins	Guamsan Tuff	Pyroclastics	SHRIMP 60.1±1.8 SHRIMP 63.77±0.94	Hwang <i>et al.</i> (2017b)
		Myeonbongsan Tuff	Pyroclastics	SHRIMP 65.03±0.66	Hwang <i>et al.</i> (2017a)
		Unjusan Tuff	Pyroclastics	SHRIMP 66.08±0.62 SHRIMP 66.65±0.96	Hwang <i>et al.</i> (2019)
		Muposan Tuff	Pyroclastics	SHRIMP 67.08±0.96	Hwang <i>et al.</i> (2016a)
		Jipum Volcanics	Lava Pyroclastics	SHRIMP 68.5±1.6	Hwang (2017)
	Southern Yucheon Subbasin	Saryangdo Tuff	Pyroclastics	SHRIMP 69.16±0.66 SHRIMP 69.72±0.69	Lee <i>et al.</i> (2019)
		Namsan Rhyolite	Intrusives Lava	SHRIMP 71.74±0.47	Hwang <i>et al.</i> (2018a)
Yokji Subgroup	Southern Yucheon Subbasin	Dara Andesite	Lava Pyroclastics	SHRIMP 73.01±0.75	Hwang <i>et al.</i> (2018a)
	Central Yucheon Subbasin	Beomdori Andesite	Lava Pyroclastics	LA-ICP-MS 78.4±1.5	Zhang <i>et al.</i> (2012)
Unmunsa Subgroup	Southern Yucheon Subbasin	Galdo Tuff	Pyroclastics	SHRIMP 80.43±0.53	Hwang <i>et al.</i> (2018b)
		Nodaedo Tuff	Pyroclastics	SHRIMP 81.30±0.54	
		Jabupo Tuff	Pyroclastics	SHRIMP 82.06±0.55	
		Chudo Tuff	Pyroclastics	SHRIMP 82.56±0.95	Hwang <i>et al.</i> (2018a)
		Bonghwasan Tuff	Pyroclastics	SHRIMP 86.69±0.78	Lee <i>et al.</i> (2019)
	Punghwari Tuff	Pyroclastics	SHRIMP 88.95±0.44	Hwang <i>et al.</i> (2018a)	
	Central Yucheon Subbasin	Samrangjin Tuff	Pyroclastics	LA-ICP-MS 88.0±0.8	Zhang <i>et al.</i> (2012)
Wondong Tuff		Pyroclastics	LA-ICP-MS 88.0±0.7		
Jeonggaksan Formation		Pyroclastics Sediments	LA-ICP-MS 88.7±0.7		
Jusasan Subbasin	Central Yucheon Subbasin	Miryang Andesite	Lava	LA-ICP-MS 88.8±1.0 LA-ICP-MS 94.3±2.0	Zhang <i>et al.</i> (2012)
		Jongnamsan Andesite	Lava	LA-ICP-MS 94.4±0.8	
	Southern Yucheon Subbasin	Goseong Formation	Pyroclastics Sediments	SHRIMP 92.1±3.2	Kim, J.S. <i>et al.</i> (2011)

SHRIMP U-Pb 연대측정에 의하면 남산유문암은 71.74±0.47 Ma (Hwang *et al.*, 2018a), 사랑도응회암은 69.72±0.69 Ma에 정치되었다(Lee *et al.*, 2019).

이 사랑아층군은 의성 및 영양소분지에서 하부로

부터 지품화산암층, 내연산응회암, 주왕산응회암, 너구동층, 무포산층, 면봉산응회암, 운주산응회암과 구암산응회암 순으로 구분된다. 그리고 면봉산응회암, 운주산응회암과 구암산응회암은 각각 칼데라를 동

반한다(Hwang, 2002). SHRIMP U-Pb 연대측정에 의하면, 지품화산암층은  $68.5 \pm 1.6$  Ma (Hwang, 2017), 무포산응회암은  $67.08 \pm 0.96$  Ma에 분출되었고(Hwang *et al.*, 2016a), 면봉산응회암이  $65.03 \pm 0.66$  Ma (Hwang *et al.*, 2017a), 구암산이  $63.77 \pm 0.94$  Ma (Hwang *et al.*, 2017b)에 분출되었다.

## 4. 토 의

### 4.1 백악기 화산대의 분포와 화산호

백악기 화산암류의 대략 절반 이상이 경상분지에서 남서-북동 방향으로 활 모양을 이루면서 대상으로 분포한다(그림 1). 나머지는 임진강대, 경기육괴와 옥천대의 북동 혹은 북북동 방향의 단층대를 따라 형성된 작은 분지에 산발적으로 분포하면서 전체적으로 대상을 이룬다. 이들의 대상 분포는 대체로 한반도의 조구조적 배경과도 일치하는 모습을 보여주며 5개의 화산대로 나뉘지며, 북쪽으로부터 각각 경기, 음성, 옥천, 영남과 경상화산대라고 호칭하였다.

경기화산대는 한반도 중부에서 임진강대 및 경기육괴 내에서 철원분지, 부평 화산암체, 남양분지, 탄도분지, 굴업도 화산암체와 천수만분지 등이 발달하는데 이들이 대체로 북북동 방향으로 대상 분포를 가진다. 이 분지들은 대개 북북동 혹은 남북 방향으로 달리는 단층을 따라 발달하는 작은 화산퇴적분지들이다.

음성화산대는 대체로 경기육괴와 옥천대의 경계부를 따라 발달하는 공주단층계에 백담분지, 풍암분지, 음성분지, 공주분지, 부여분지, 변산 화산암체, 선암산 화산암체와 법성포 화산암체 등이 북동 방향( $N30^\circ E$ )으로 대상 분포를 이룬다. 공주단층계는 금왕단층, 공주단층 및 함평단층으로 연결되며, 금왕 및 공주단층에는 5개 화산퇴적분지가 형성되어 있고 함평단층에는 3개 화산암체가 분리되어 분포한다. 이 화산대는 다른 화산대와 달리 가장 중심부에 있는 음성분지의 이름을 따라 호칭하게 되었다.

옥천화산대는 옥천대의 내부 혹은 남동 경계부에서 발달하는 광주단층계를 따라 통리분지, 문경 화산암체, 무주분지, 운장산 화산암체, 순창분지, 능주분지, 목포 화산암체, 해남분지와 진도 화산암체 등이 대체로 북동 방향( $N40^\circ E$ )으로 대상 분포를 이룬다. 이들은 대개 북동부에서 규모가 작고 고립되어

분포하지만, 남서부로 갈수록 규모가 커지며 분지가 서로 연결되고 화산체의 구분이 어려워진다.

영남화산대는 영남육괴의 내부에서 발달하는 구미분지, 구례분지, 괴목분지, 보성 화산암체, 강진 화산암체, 남창 화산암체, 고흥 화산암체 등이 북동 방향( $N40^\circ E$ )으로 대상 분포를 가진다. 이들은 대부분 규모가 매우 작고 독립적으로 분포하지만 남서부에서는 서로 연결되고 경계가 불명확해지며 부분적으로 옥천화산대와도 연결된다.

경상화산대는 경상분지 내부에 가장 큰 규모로 대상 분포를 형성하며, 남해안을 따라 동북동 방향이다가 북동 방향으로 바뀌고 결국 동해안을 따라 북북동 방향으로 바뀌어 남동쪽으로 불룩한 활 모양을 이룬다. 이 화산대는 남서부로 갈수록 영남화산대와 합쳐지고 옥천 화산대와도 합쳐진다. 경상화산대는 대부분 여러 큰 화산체가 복합되어있는 유천층군을 의미하겠지만, 하양층군에도 매우 작은 규모의 화산암층이 협재되어 있다.

이와 같이 한반도 남부에서 백악기 화산암류는 북동 방향의 대상 분포에 의해 5개 화산대로 구분되고 그 방향성이 고해구에 대체로 직각을 이룰 뿐만 아니라, 후술하겠지만 암석조구조적으로 대륙연부에서 섭입작용에 따른 칼크알칼리 계열의 마그마 작용에 의한 화산호로 해석되어왔다. 그러므로 이들 화산대는 '화산호'란 조구조적 의미를 가미한다면 각각 경기호(Gyeonggi Arc), 음성호(Eumseong Arc), 옥천호(Okcheon Arc), 영남호(Yeongnam Arc) 및 경상호(Gyeongsang Arc)로 호칭할 수 있으며 이들 모두를 합쳐 한국호(Korean Arc)로 부를 수 있다. 이러한 의미는 이미 경상분지 화산암류에 대한 조구조적 위치를 해석하면서 한국호의 일부로서 경상호라고 제시한 바 있다(Hwang and Kim, 1994).

경기호를 제외하고 4개 화산호는 그 남서부가 대체로 진도 화산암체를 중심으로 수렴하는 양상을 보이는데, 이러한 양상이 북동부의 먼 곳에서도 역시 수렴되어 만날 것으로 예상할 수 있다.

### 4.2 백악기 화산호의 암석성인

한반도에서 백악기 화산호는 지화학적으로 대개 섭입에 관련된 고-K 칼크알칼리 계열의 미량원소 및 희토류원소(REE) 특징을 보여 준다(예: Kim, S.W. *et al.*, 1991, 1993; Won *et al.*, 1990, 1991, 1994; Lee



*et al.*, 1992; Hwang and Kim, 1994; Yun *et al.*, 2000; Kim, M.-S. *et al.*, 2008; Kim, Y.-L. *et al.*, 2008; Koh *et al.*, 2009; Hwang *et al.*, 2010). 이 화산암류는 Y/(Nb-Rb) 구분도에서 VAG 영역에 표시되고 REE 패턴은 대륙지각 아래의 섭입대에서 생성된 화산호를 가리킨다.

한반도에서 백악기 화산호의 Sr 및 Nd 동위원소 조성(예: Kim *et al.*, 2012; Kwon *et al.*, 2013)은 위에서와 함께 상부맨틀 마그마 근원지를 반영한다(Rudnick and Gao, 2003). 백악기 화산암류가 현저한 Eu 이상과 함께 흔히 낮은 Sr/Y와 La/Yb 비를 가진다는 것을 고려하면, 이들은 정상적인 화산호 배경의 산물임을 암시한다.

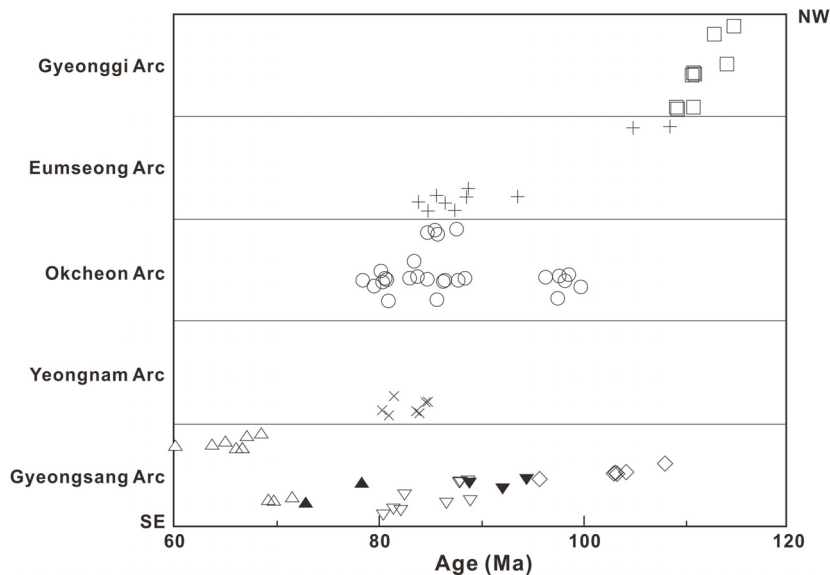
그러나 경상분지 하양층군에 협재하는 현무암층들은 알칼리 현무암과 칼크알칼리 현무암을 포함하는 다양한 계열의 현무암에 속한다. Ti-Zr-Sr 삼각도에서 청룡사현무암은 알칼리 계열의 범주에 속하지만 다른 현무암들은 대체로 칼크알칼리 계열로 분류된다. 유동성이 적은 Nb와 Y를 결부시키면 Zr/Ti-Nb/Y 관계도에서 대부분 현무암들은 칼크알칼리 계열에 속하지만 청룡사현무암 및 하마현무암은 알칼리 및 칼크알칼리 계열의 경계부에 걸쳐 있다(Kim *et al.*, 2000). 따라서 청룡사 및 하마현무암은 알칼리 계열을 나타내지만(Kim *et al.*, 2000), 오십봉, 세천동 및

대전사 현무암은 칼크알칼리 계열을 나타낸다(Kim *et al.*, 2000; Yun *et al.*, 2000). 한편 학봉, 함안 및 채약산현무암은 주원소 조성이 알칼리 계열을 나타내지만 미량원소 판별도에서는 칼크알칼리 계열을 나타내는 양면성을 보여준다(Kim *et al.*, 2000).

이러한 화학적 특성으로 본다면 청룡사현무암은 110 Ma 이전에 대륙판의 열곡작용으로 경상분지가 생겨나면서 압력감소로 인해 상부맨틀의 부분용융으로부터 생성된 알칼리 현무암질 마그마로부터 기원한 것으로 보인다. 그러나 110 Ma 경부터 고해양판의 섭입작용이 시작/재개되어 칼크알칼리 현무암질 마그마가 생성되었고 점차 우세하게 활동했던 것으로 판단된다. 그러므로 알칼리 현무암층들은 호화산작용의 결과물로 간주하기보다는 경상분지 형성과 관련하여 신장성 응력에 의한 분지 확장시에 열곡작용(rifting)의 산물로 생각된다.

#### 4.3 화산호의 지질연대 범위: 호화산작용의 시공간적 이동

매우 정확한 연대를 제공하는 SHRIMP 및 LA-ICP-MS U-Pb 연대자료에 따르면, 각 화산호의 공간적 분포는 대체로 북서쪽으로부터 남동쪽으로 명확한 시간적 이동을 보여주는데(그림 2), 이는 백악기 동안 한반도 호화산작용의 시공간적 이동을 제시해준다.



**Fig. 2.** Frequency distribution diagram of SHRIMP and LA-ICP-MS zircon U-Pb ages of the Cretaceous volcanic rocks along the volcanic arc throughout the Korean Peninsula.

경기호는 오로지 임진강대와 경기육괴에 분포하며 SHRIMP U-Pb 연대가 115.0~109.0 Ma 범위를 가진다(표 1; Hwang *et al.*, 2011; Kim *et al.*, 2012; Cho and Lee, 2016). 한편 이 연대범위는 낭림육괴 남서부의 남포-해주 사이의 심성암류 범위(114~109 Ma; Wu *et al.*, 2007)와 같다. 이러한 연대는 백악기 전엽(late Aptian to early Albian)에 활동했음을 의미하며, 과거에 이 화산암류를 백악기 후엽으로 여겨졌던 것과 크게 다르다.

음성호는 공주단층계를 따라 분포하며 SHRIMP

U-Pb 연대가 108.0~84.9 Ma 범위를 나타낸다(표 2; Kim *et al.*, 2010; Choi and Hwang, 2013; Koh *et al.*, 2013; Kwon *et al.*, 2015). 이 범위는 백악기 전엽 말기에서 후엽 전기(Albian to Santonian)에 해당되며, 경기호의 활동이 끝난 후에 음성호의 활동이 있었음을 보여준다. 또한 이 화산호는 북동부에서 먼저 활동하였고 남서부에서는 뒤따라 일어났음을 보여준다. 이러한 활동시기의 차이는 아마도 단층운동의 시기 및 심도와 맞물려있을 것으로도 생각된다.

옥천호는 옥천대 내부에 분포하며 SHRIMP U-Pb

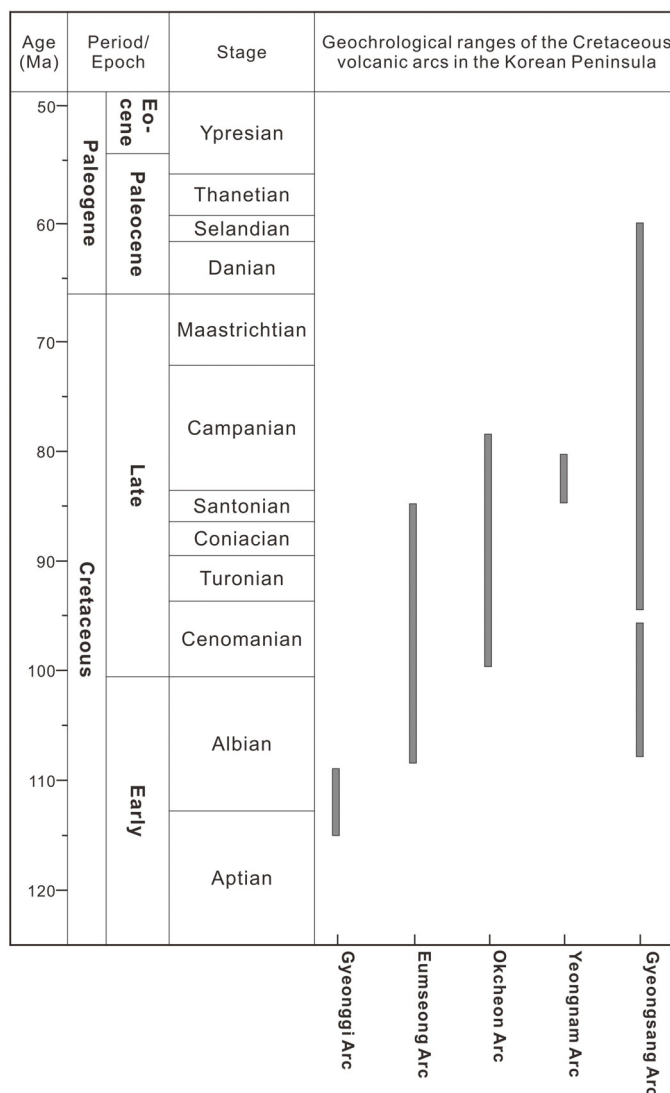


Fig. 3. Geochronological ranges of the volcanic arcs in the Korean Peninsula, based on the SHRIMP and LA-ICP-MS zircon U-Pb age data.

연대가 99.7~78.4 Ma 범위를 가진다(표 3; Jung *et al.*, 2014; Kihm *et al.*, 2014; Kim *et al.*, 2014; Choi *et al.*, 2016). 이 연대범위는 백악기 후엽 전기 및 중기(Cenomanian to early Campanian)에 해당하며(그림 3), 음성호의 남서부와 같은 시기에 활동했지만 이보다 더 늦게까지 진행했음을 보여준다. 그러나 북동부에 대한 연대 자료가 없기 때문에 이 화산호 전체의 활동과정을 반영하지 못한다.

영남호는 오로지 영남호 내부에만 존재하며 SHRIMP U-Pb 연대가 84.9~80.3 Ma 범위이다(표 4; Kim *et al.*, 2015). 이 연대 범위는 백악기 후엽 중기(Santonian to early Campanian)에 해당하며(그림 3), 옥천호의 남서부의 범위에 포함된다. 아마도 이 자료는 고흥반도에서만 나온 관례로 거리상으로 옥천호의 남서부와 상당히 가까우며, 이 화산호의 전체 활동상황을 반영하지 못한다.

경상호는 경상분지에 분포하며 U-Pb 연대가 하양층군에서 108.0~95.8 Ma 범위이며(표 5; Jwa *et al.*, 2009; Kim, J.S. *et al.*, 2011, 2013), 유천층군에서 94.4~60.1 Ma 범위이다(표 6; Kim, J.S. *et al.*, 2011; Zhang *et al.*, 2012; Hwang *et al.*, 2016a, 2017a, 2017b, 2018a, 2018b, 2019; Hwang, 2017; Lee *et al.*, 2019). 하양층군에서의 연대범위는 백악기 전엽 말기에서 후엽 초기(Albian to Cenomanian)에 해당하며(그림 3), 음성호의 초기 활동시기와 같다. 유천층군에서의 연대범위는 백악기 후엽 초기에서 후기를 지나 고신기 전엽 전기(Turonian to Selandian)에 해당한다(그림 3). 그러나 숨겨진 화산활동을 나타내는 쇄설성 저어콘의 U-Pb 연대에 의하면 묘곡층은 138.6 Ma이고 신동층군은 127~109 Ma 범위이며, 하양층군은 108.7 Ma에 시작되었다(Lee *et al.*, 2010, 2015, 2018a, 2018b).

백악기 화산호는 그 공간적 분포가 그 활동의 시간적 변천과도 연관이 있는 것으로 생각된다. 말하자면 각 화산호는 활동의 시작시기와 종식시기가 매우 다를 것으로 생각된다. 시작시기는 경기호가 가장 빠르며, 음성호와 경상호가 약간 늦고 옥천호는 더 늦은 편이며 영남호는 훨씬 더 늦은 편이다(그림 3).

이에 대한 이유는 (1) 측정자료의 부족과 (2) 단층운동에 따른 상부맨틀의 감압효과를 고려할 수 있다. 첫 번째 이유는 아마도 용적이 따른 측정자료의 부족에 기인하는 것으로 생각된다. 왜냐하면 경기호는 용적이 작으면서 여러 지역에 흩어져 있어서 시

료수집이 수월했지만 기타 화산호는 용적이 크기 때문에 하부 화산암층이 쉽게 노출되지 않아 시료수집이 어려울 뿐만 아니라, 하부 화산암층이 대부분 현무암 혹은 안산암으로 산출되며 이들로부터 저어콘 분리가 어렵기 때문이다. 일례로 해남분지에서 해남층 내의 현무암이 K-Ar 103.4 Ma 연대(Kim and Nagao, 1992), 구례분지에서 오봉산층 내의 안산암이 K-Ar 106.7 Ma 연대(Lee and Song, 2007)로 보고되었기 때문이다.

두 번째 이유는 단층운동에 의해 상부맨틀의 압력감소 효과로 인해 마그마 생성을 쉽게 유도할 수 있다. 영남호를 제외한 4개 화산호는 모두 북북동 혹은 남동 방향의 단층운동에 의한 지배를 받고 있다. 단층대는 암압의 감소와 함께 마그마 생성을 촉진시키며, 마그마의 이동통로 역할을 한다. 그런데 같은 단층대라도 심도가 다르면 상부맨틀에 미치는 감압 효과도 다를 수 있다. 그러므로 이러한 단층운동의 성격에 따라 마그마의 생성시기가 다를 수 있기 때문에 화산호의 시작시기도 다를 수 있다.

각 화산호의 면적은 대략 경상호가 약 50% 이상을 차지하고 옥천호가 약 20%, 음성호가 약 15%, 영남호가 약 12%를 차지하여 경기호가 3% 미만으로 추산된다. 즉, 경기호가 현저히 적고 경상호가 현저하게 넓으며 나머지는 비슷한 면적을 가진다. 이와 같이 3개 그룹으로 묶을 때, 북서쪽에서 남동쪽으로 가면서 계단식으로 현저하게 면적이 증가됨을 알 수 있으며 이에 따라 용적도 삼차원적으로 더 크게 증가된다고 할 수 있다. 이러한 증가는 북서 방향으로 발달하는 동일한 백악기 섭입대에서 발생하는 호화산작용이 북서쪽에서 남동쪽으로 가면서 순차적으로 종식되었음을 암시한다.

구체적으로 한반도에서 백악기 화산호는 같은 섭입대에 의해 만들어진 지표 산물이라면, 백악기 전엽 후기에 섭입대는 해양판의 하강 슬랩이 백악기 전엽에 내륙으로 적어도 임진강대 아래까지 뻗었음을 반영한다. 그렇다면 경기호와 함께 음성호와 경상호 뿐만 아니라 옥천호와 영남호에서도 이와 유사한 시작시기를 발견할 수 있을 것이다. 그래서 미진한 분지의 하부 퇴적층에 협재하는 현무암 혹은 현무암질 안산암에 대한 연대측정이 앞으로 이에 대한 답을 기대할 수 있다.

그러나 각 화산호의 종식시기를 보면, 경기호는

이미 백악기 전엽 말기(Albian), 110 Ma 경에 끝났고, 음성호, 옥천호와 영남호는 백악기 후엽 중기(Campanian)에 끝났으며, 경상호는 고신기 전엽 초기(Selandian), 60 Ma까지 진행되었다. 이러한 종식 시기는 섭입대에서 백악기 전엽, 100 Ma에 내륙으로 임진강대 아래까지 뻗었던 해양판의 하강 슬랩이 백악기 전엽 말기에 음성호 부근 아래에서 되말림(rollback)이 일어났음을 암시한다. 그리고 백악기 후엽 중기 80 Ma에도 되말림이 경상호의 전면부 부근에서 일어났음을 지시한다.

따라서 백악기 화산호의 시공간적 변화는 호화산작용의 시작이 아마도 모든 화산호에서 거의 같을 수 있지만 종식시기는 북서쪽에서 남동쪽으로 가면서, 즉 해구쪽을 향하여 이동하면서 순차적으로 종식되었던 것으로 해석된다.

#### 4.4 백악기 호화산작용의 조구조적 진화

한반도에서 백악기 화산호의 U-Pb 연대와 지구 화학적 자료는 내륙에서 해구로의 이동을 설명해주는 호화산작용의 시공간적 진화를 보여 준다. 이러한 자료를 토대로 한반도에서 백악기 호화산작용의 조구조적 진화를 엮을 수 있다. 160~120 Ma 동안, 한반도에서는 뚜렷한 마그마작용이 없는 마그마휴지기(magmatic gap)이었는데, 이는 이 시기동안 평탄하게 놓인 비활동의 섭입환경이었다(Kiminami and Imaoka, 2013). 이 시기동안 북동 아시아대륙 연변부는 북쪽으로 이자나기판의 사교섭입에 의해 유도되는 좌수향 렌치 조구조운동을 받던 시기이다(Klimetz, 1983). 그러므로 이 연대범위의 화산암층이 실제로 한반도에 존재하지 않지만, 감춰진 일시적 분출에 의한 쇄설성 저어콘이 백악기 초엽 퇴적층에서 흔하게 발견된다. 한국과 일본의 쇄설성 저어콘에서 135 Ma의 빈도피크는 신장성 환경 하에서 마그마작용의 시작시기로 보았다(Lee *et al.*, 2018a). 이 연대는 아마도 Maruyama *et al.* (1997)이 이자나기판의 섭입방향이 북동 방향에서 북쪽 방향으로 변환했다는 시기(약 140 Ma)에 해당되며 화산작용이 최소화되었던 시기이다.

약 120 Ma 시기에는 이자나기판의 섭입방향이 북쪽에서 북북서 방향(N10°W)으로 약간 변화되었다(Maruyama *et al.*, 1997). 이 사교방향의 섭입은 NE-NNE 방향의 좌수향 주향이동 단층대(예, 경기

육괴, 옥천대 경계부 단층들)를 형성하고(Kwon *et al.*, 2009; Chang and Zhao, 2012) 이에 수반되는 인리형 분지가 열리도록 유도하였다(Lee, 1999). 인리형 분지발달은 지각의 두께가 얇아지는 열개현상을 동반함으로써 압압의 감소와 함께 마그마 생성을 촉진시켰으며, 열개지가 마그마의 이동통로로 이용되며 용암을 분출시켰다. 한편 이때 이자나기판의 앞은 섭입각은 섭입대의 심부에서 슬랩용융이 일어나 내륙에서 경기호의 정치(약 115~109 Ma)를 도왔다. 또한 이자나기판의 되말림은 맨틀웨지 내의 강한 코너류(corner flow)와 상부지각 레벨에서 배호확장을 초래하였다(예: Kim *et al.*, 2012, 2016).

그리고 110~100 Ma동안, 섭입 슬랩의 주기적 버클링의 표시가 되는(Lee and King, 2011), 이자나기판의 수렴률 감소로 인해 섭입하는 슬랩의 경사가 증가했다(Gurnis *et al.*, 2012). 섭입 슬랩의 급경사는 배호확장을 일으켰고, 이로 인해 비해성 경상분지와 소규모 단층경계의 인리형 분지를 확대시켰다(예: Lee, 1999; Chough and Sohn, 2010; Kim *et al.*, 2012, 2016). 호화산작용은 115 Ma 이전부터 이미 시작되었으며, 백악기 후엽으로 가면서 격렬하게 지속되었다.

약 95 Ma부터 이자나기판의 섭입방향이 북북서 방향에서 북서 방향(N30°W)으로의 전환(Maruyama *et al.*, 1997)에 의해서 대륙연변부에 대해 직교방향으로의 변화는 분지발달을 종식시켰고 마그마 생성을 용이하게 하여 백악기 후엽동안 격렬한 화산작용이 지속되게 하였다. 즉 이때부터 이자나기판의 수렴 증가(Gurnis *et al.*, 2012)는 천부 섭입작용을 초래하였고 내륙으로 경기호를 제외한 곳에서 강한 화산작용이 시작되어 장기간 지속됨으로서 음성호, 옥천호와 영남호를 형성하였다.

그 후 80 Ma에 섭입 슬랩의 되말림과 가파른 섭입의 결과로 인해, 화산 전면부가 해구쪽으로 이동되어 경상호의 전호(forearc) 근처에서 주로 화산작용을 일으키는 결과를 초래하였다. 한반도는 대륙판과 사교섭입하는 해양판 간의 약한 커플링으로 인해 백악기 후엽동안 전체적으로 신장 상태 혹은 전단인장 상태에 있었던 것으로 해석된다. 왜냐하면 여러 지역에 칼데라 및 화산조구조성 저지가 발달되어 있는 것은 신장성 혹은 전단인장성 응력의 지배하에 있었음을 암시하기 때문이다(Dickinson and Lawton,

2001). 이 신장성 응력과 화산작용의 증가는 아마도 섭입각의 증가 때문이며, 이는 더 무거운 해양판의 섭입이 원인일 것으로 생각된다(Perfit and Davidson, 2000).

그리고 42 Ma 전에 대륙판 아래로 섭입되는 해양판의 슬랩 백터는 갑자기 서북서 방향(N50°W)으로 변화하였고(Maruyama *et al.*, 1997) 새로운 조산유회(orogenic cycle)로 바뀌었다(Clague and Jarrard, 1973). 결과적으로 해구로의 이동을 표시하는, 한반도의 백악기 조구조화산작용은 남동 방향으로의 시공간적 이동을 보여준다.

## 5. 결론

한반도의 백악기 화산암류는 고-K 칼크알칼리 계열로서 유라시아대륙 남동부 아래로 이자나기판의 섭입작용에 의한 호화산작용의 지표 산물이다. 한반도 중부와 남부에 분포하는 백악기 화산암류는 경기호, 음성호, 옥천호, 영남호 및 경상호의 5개 화산호로 구분된다. 이에 따라 이전에 발표된 U-Pb 연대자료를 시공간적으로 검토할 수 있었다.

호화산작용의 시작시기는 경기호에서 115 Ma 경이고 음성호와 경상호에서 110 Ma 경이지만 화산호마다 상당히 불규칙한데, 이는 아마도 화산호에 따라 시료채취의 어려움에 따른 연대측정 자료의 부족과 단층운동의 제어에 따른 마그마 생성기기의 차이에 기인한 것으로 생각된다. 종식시기는 경기호에서 109 Ma 경이고 음성호, 옥천호와 영남호에서 80 Ma 경이다. 경상호에서 화산작용은 내륙쪽에서 3개 화산호와 같이 80 Ma에 종료되었지만 해구쪽의 화산 전면부에서 고신기 전엽까지 지속되었다. 그러므로 한반도에서 호화산작용은 시공간적으로 볼 때 해구 쪽으로 가면서 순차적으로 젊어지며 2번의 큰 종식 변곡기를 가진다.

이에 따라 한반도에서 백악기 섭입대 조구조운동은 백악기 화산호의 시공간적 분포를 바탕으로 설명할 수 있다. 1) 160~135 Ma 동안 이자나기판의 평탄한 슬랩 섭입작용으로 인해 화산작용이 없었지만, 아마도 135 Ma부터 고태평양판의 방향전환으로 인해 퇴적분지의 열림과 함께 약한 백악기 화산작용이 시작되었다. 2) 115~100 Ma 동안 이자나기판의 앞은 섭입각으로 인해 섭입대 심부의 슬랩융융으로부

터 내륙에 경기호를 형성하였다. 3) 100~80 Ma 동안 섭입작용이 강한 수렴률로 지속되면서 호화산작용을 일으켰으며 95 Ma 경부터 이자나기판의 운동이 북서 방향으로 전환됨에 따라 음성호, 옥천호, 영남와 경상호에서 호화산작용이 더욱 활발해졌다. 4) 80~60 Ma 동안 급경사 섭입작용으로의 교대는 주로 경상호 전면부 근처로 호화산작용의 이동을 초래하였다. 이로 인해 호화산작용은 주로 경상호의 전면부에서 일어났고 기타 화산호에서는 종식되었다.

## 감사의 글

이 논문은 한국지질자원연구원에서 지원하는 '디지털맵핑에 의한 통합지질정보 제공기술 개발'에 의해 수행된 결과와 지금까지 백악기 화산암류에 대한 연구 결과를 정리한 것이다. 그리고 관련 자료의 제공과 건설적이고 유익한 코멘트를 해준 부경대 박계현 교수님, 부산대 윤성호 교수님과 편집위원님에게 감사를 표한다.

## REFERENCES

- Chang, K.H., 1975, Cretaceous stratigraphy of southeast Korea. *Journal of the Geological Society of Korea*, 11, 1-23.
- Chang, K.H., 1988, Cretaceous stratigraphy and paleo-current analysis of Kyongsang Basin, Korea. *Journal of the Geological Society of Korea*, 24, 194-205 (in Korean with English abstract).
- Chang, K.H. and Kim, K.T., 1967, Explanatory text of the geologic map of Gangjin Sheet. Daejeon, Geological Survey of Korea, 15 p.
- Chang, K.H., Lee, Y.J., Suzuki, K. and Park, S.O., 1998, Zircon morphology, CHIME age and geological significance of Kusandong Tuff. *Journal of the Geological Society of Korea*, 34, 333-343.
- Chang, K.H., Park, S.O. and Kim, H.S., 1997, Cretaceous stratigraphy and geologic history of medial Kyongsang Basin: tectonics and volcanism. *Geoscience Journal*, 1, 2-9.
- Chang, K.H. and Zhao, X., 2012, North and South China suturing in the east end: what happened in Korean Peninsula? *Gondwana Research*, 22, 493-506.
- Chang, T.W. and Hwang, S.K., 1984, Geological report of the Gaeumdo Sheet. Daejeon, Korea Institute of Energy and Resources, 27 p.

- Cheong, D. and Kim, K., 1999, Basin evolution and provenance of sediments of the Cretaceous Poongam sedimentary Basin. *Korean Journal of Petroleum Geology*, 7, 28-34 (in Korean with English abstract).
- Cho, D.-L. and Lee, S., 2016, Geological report of the Gureopdo, Deokjeokdo, Baegado and Seongapdo sheets. Daejeon, Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources, 54 p.
- Choi, B.Y. and Hwang, J.H., 2013, Geological report of the Gunsan, Buan, Bangchukdo and Jangjado sheets. Daejeon, Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources, 54 p.
- Choi, S.-J., Kim, Y.B. and Gihm, Y.-S., 2016, Geological report of the Bungye, Jaeundo, Bigeumdo and Gijwado sheets. Daejeon, Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources, 69 p.
- Choi, Y.S., 1996, Structural evolution of the Cretaceous Eumseong Basin, Korea. Doctoral degree dissertation, Seoul National University, 158 p.
- Chough, S.K., Kwon, S.-T., Ree, J.-H. and Choi, D.K., 2000, Tectonic and sedimentary evolution of the Korean Peninsula: a review and new view. *Earth-Science Reviews*, 52, 175-235.
- Clague, D.A. and Jarrard, R.D., 1973, Tertiary Pacific plate motion deduced from the Hawaii-Emperor chain. *Geol. Soc. Am. Bull.*, 84, 1135-1154.
- Dickinson, W.R. and Lawton, T.F., 2001, Tectonic setting and sandstone petrofabrics of the Bisbee basin (USA-Mexico). *Journal of South American Earth Sciences*, 14, 475-504.
- Engebretonson, D.C., Cox, A. and Gordon, R.G., 1985, Relative motion between oceanic and continental plates in the Pacific Basin. *Geological Society of America Special Paper*, 206, 59 p.
- 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 and Geosciences*, 38, 35-42.
- Hwang, S.K., 2002, Collapse type and evolution of the Guamsan caldera, southeastern Korea. *Journal of the Geological Society of Korea*, 38, 199-216 (in Korean with English abstract).
- Hwang, S.K., 2017, SHRIMP U-Pb Dating and Volcanic History of the Jipum Volcanics, Western Yeongdeok, Korea. *Journal of the Petrological Society of Korea*, 26, 341-352.
- Hwang, S.K., An, Y.M. and Yi, K., 2011, SHRIMP Age Datings and Volcanism Times of the Igneous Rocks in the Cheolwon Basin, Korea. *Journal of the Petrological Society of Korea*, 20, 231-241 (in Korean with English abstract).
- Hwang, S.K., Jo, I.H. and Yi, K., 2016a, SHRIMP zircon U-Pb dating and stratigraphical relationship of the Bunam Stock and Muposan Tuff, Cheongsong. *Journal of the Geological Society of Korea*, 52, 405-419 (in Korean with English abstract).
- Hwang, S.K., Jo, I.H. and Yi, K., 2017a, SHRIMP U-Pb datings and igneous processes of the igneous rocks around the Myeonbongsan caldera, Cheongsong, Korea. *Journal of the Geological Society of Korea*, 53, 781-796 (in Korean with English abstract).
- Hwang, S.K., Jo, I.H. and Yi, K., 2017b, SHRIMP U-Pb datings and volcanic processes of the volcanic rocks in the Guamsan caldera, Cheongsong, Korea. *Economic and Environmental Geology*, 50, 467-476 (in Korean with English abstract).
- Hwang, S.K., Kim, S.H., Hwang, J.H. and Kee, W.S., 2010, Petrotectonic Setting and Petrogenesis of Cretaceous Igneous Rocks in the Cheolwon Basin, Korea. *Journal of the Petrological Society of Korea*, 19, 67-87 (in Korean with English abstract).
- Hwang, S.K. and Kim, S.W., 1990, Silicic ash-flow tuffs with calderas in the terrane between Miryang and Yangsan, Korea. *Journal of the Geological Society of Korea*, 26, 329-340 (in Korean with English abstract).
- Hwang, S.K. and Kim, S.W., 1994, Petrology of Cretaceous volcanic rocks in Miryang-Yangsan area, Korea: Petrotectonic setting. *Journal of the Geological Society of Korea*, 30, 229-241 (in Korean with English abstract).
- Hwang, S.K. and Kim, S.W., Kim, S.K., Ahn, U.S., Jo, I.H., Lee, S.J. and Kim, J.J., 2019, Chronostratigraphic implication of the Yucheon Group in Gyeongsang Basin, Korea. *Journal of the Geological Society of Korea*, 55, 633-647 (in Korean with English abstract).
- Hwang, S.K., Lee, S.J., Song, K.Y. and Yi, K., 2018a, SHRIMP U-Pb dating and chronostratigraphy of the volcanic rocks around the Mireukdo Island, Tongyeong, Korea. *Journal of the Petrological Society of Korea*, 27, 67-78 (in Korean with English abstract).
- Hwang, S.K., Lee, S.J., Song, K.Y. and Yi, K., 2018b, SHRIMP zircon U-Pb dating and stratigraphical implication of the volcanic rocks around the Yokjido Island, Tongyeong, Korea. *Journal of the Geological Society of Korea*, 54, 269-280 (in Korean with English abstract).
- Hwang, S.K., Park, S.H. and Song, K.-Y., 2016b, Geological Report of the Mijo.Mireukdo sheets. Daejeon, Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources, p. 78.
- 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).

- abstract).
- Jeong, J.-G., Kim, W.-S. and Song, M.-Y., 1994, Structure and physical properties of the earth crust material in the middle of Korean Peninsula(3): Petrochemical study on the volcanic rocks in northeastern area of Anmyondo. Korea. *Journal of the Petrological Society of Korea*, 2, 128-137 (in Korean with English abstract).
- Jin, M.-S., Kim, S.-J., Shin, S.-C., Choo, S.-H. and Chi, S.-J., 1992, Thermal history of the Jecheon granite pluton in the Ogcheon Fold Belt, South Korea. *Journal of the Geological Society of Korea*, 1, 49-57 (in Korean with English abstract).
- Jung, W., Kil, Y. and Hur, M., 2014, A petrological study of the Mudeungsan Tuff focused on Cheonwangbong and Anyangsan. *Journal of the Petrological Society of Korea*, 23, 325-336 (in Korean with English abstract).
- Jwa, Y.J., Lee, Y.I. and Orihashi, Y., 2009, Eruption age of the Kusandong Tuff in the Cretaceous Gyeongsang Basin, Korea. *Geosciences Journal*, 13, 265-273.
- Kee, W.-S., Kim, H., Kim, B.C., Choi, S.-J., Park, S.-I. and Hwang, S.K., 2010, Geological Report of the Seoraksan Sheet. Daejeon, Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources, p. 94.
- Kee, W.-S., Lim, S.-B., Kim, H., Kim, B.C., Hwang, S.K., Song, K.-Y. and Kihm, Y.-H., 2008, Geological Report of the Yeoncheon Sheet. Daejeon, Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources, p. 83.
- Kihm, Y.H., Choi, P., Hwang, J.H., Kim, H., Ko, K. and Chun, H.Y., 2014, Geological Report of the Mokpo Sheet. Daejeon, Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources, p. 93.
- Kim, H.S. and Pak, I.S., 1993, Meso-cenozoic volcanism. In: *Geology of Korea*, Foreign Languages Book Publishing House, Pyongyang, 313-330.
- Kim, I.J. and Nagao, K., 1992, K-Ar ages of the hydrothermal clay deposits and the surrounding igneous rocks in southwest Korea. *Journal of the Petrological Society of Korea*, 1, 58-70.
- Kim, J.H., 1996, Mesozoic tectonics in Korea. *Journal of Southeast Asian Earth Sciences*, 13, 251-265.
- Kim, J.H. and Lim, J.W., 1974, Explanatory text of the geological map of Gumi Sheet. Daejeon, Geological and Mineral Institute of Korea, p. 20.
- Kim, J.-S., Cho, H., Kim, H.-G. and Son, M., 2013, SHRIMP U-Pb Zircon Ages of the Gusandong (Kusandong) Tuff in the Cretaceous Gyeongsang Basin. *Journal of the Petrological Society of Korea*, 22, 235-249 (in Korean with English abstract).
- Kim, J.-S., Cho, H., Son, M. and Sohn, Y.K., 2011, Geological age of the Gyeongsang Supergroup. 2011 Fall Joint Annual Conference of The Geological Societies in Korea (Abstract), JeJu, 20 p (in Korean).
- Kim, K.H., Tanaka, T. and Nagao, K., 1998, Nd and Sr isotopes and K-Ar ages of the granitic and rhyolitic rocks from the Bupyeong silver mine area. *Economic and Environmental Geology*, 31, 149-158.
- Kim, M.-S., Yun, S.-H. and Koh, J.-S., 2008, Petrological study on the Seolcheon Tuff in the Yeongnam Massif, Muju. *Journal of the Geological Society of Korea*, 44, 199-217 (in Korean with English abstract).
- Kim, N.J., Choi, S.O. and Kang, P.J., 1967, Explanatory text of the geologic map of Munkeong Sheet. Daejeon, Geological Survey of Korea, 37 p.
- Kim, O.J., 1970, Geology and tectonics of the mid-central region of South Korea. *Journal of Korean Institute of Mining Geology*, 2, 73-90.
- Kim, O.J., 1971, Study on the intrusion epochs of younger granites and their bearing to orogenesis in South Korea. *Journal of Korean Institute of Mining Geology* 4, 1-10.
- Kim, S.U. and Park, Y.D., 1967, Explanatory text of the geologic map of Namchang Sheet. Daejeon, Geological Survey of Korea, 16 p.
- Kim, S.W., Hwang, S.K., Lee, Y.J. and Koh, I.S., 2000, Diversity of the Cretaceous basaltic volcanics in Gyeongsang Basin, Korea. *Journal of the Petrological Society of Korea*, 9, 1-12 (in Korean with English abstract).
- Kim, S.W., Hwang, S.K., Yang, P.S., Lee, Y.J. and Koh, I.S., 1999, Petrology of Chaeyaksan basaltic rocks and application of hornblende geobarometer. *Journal of the Petrological Society of Korea*, 8, 92-105 (in Korean with English abstract).
- Kim, S.W., Kwon, S., Koh, H.J., Yi, K., Jeong, Y.J. 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, SRIMP U-Pb dating and geochemistry 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, S.W., Lee, J.Y. and Kim, Y.K., 1993, Petrology of the Cretaceous andesitic rocks in Taegu-Jain area. *Journal of the Geological Society of Korea*, 29, 324-337 (in Korean with English abstract).
- Kim, S.W., Lee, J.Y., Kim, Y.K. and Koh, I.S., 1991, Petrology of the Cretaceous volcanic rocks in southern Yuchon minor basin. *Journal of the Geological Society*

- of Korea, 27, 24-39 (in Korean with English abstract).
- Kim, S.W. and Lee, Y.G., 1981, Volcanic petrology and geological structures of Cretaceous volcanic rocks in the northeastern Yucheon basin. *Mining Geology*, 14, 35-49 (in Korean with English abstract).
- Kim, S.W., Oh, C.W., Williams, I., Ryu, I.-C., Guo, J.H. and Zhai, M.G., 2006, HP metamorphic events from the southwestern Gyeonggi Massif, South Korea, and tectonic implications. *Lithos*, 92, 357-377.
- Kim, S.W., Park, S.-I., Kee, W.-S. and Kim, B.C., 2015, Geological Report of the Goheung Sheet. Daejeon, Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources, 54 p.
- Kim, S.W. and Yoon, Y.Y., 1971, Explanatory text of the geologic map of Jindo Sheet. Daejeon, Geological Survey of Korea, 25 p.
- Kim, Y.B., Cho, D.-L. and Choi, S.-J., 2014, Geological Report of the Yeongam Sheet. Daejeon, Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources, p. 77.
- Kim, Y.B., Chwae, U. and Hwang, S.K., 2010, Geological report of the Changamjeon sheet. Daejeon, Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources, 67 p.
- Kim, Y.-L., Koh, J.-S., Lee, J.-H. and Yun, S.-H., 2008, Petrological Study on the Cretaceous Volcanic Rocks in the southwest Ryeongnam Massif: (1) the Mt. Moonyu volcanic mass, Seungju-gun. *Journal of the Petrological Society of Korea*, 17, 57-82 (in Korean with English abstract).
- Kiminami, K. and Imaoka, T., 2013, Spatiotemporal variations of Jurassic-Cretaceous magmatism in eastern Asia (Tan-Lu Fault to SW Japan): evidence for flat-slab subduction and slab rollback. *Terra Nova*, 25, 414-422.
- Klimetz, M., 1983, Speculations on the Mesozoic plate tectonic evolution of Eastern China. *Tectonics*, 2, 139-166.
- Koh, H.J., Kwon, C.W., Park, S.-I., Park, J. and Kee, W.-S., 2013, Geological Report of the Julpo Sheet. Daejeon, Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources, 81 p.
- Koh, J.-S., Yun, S.-H. and Kim, Y.-L., 2009, Petrology of the Mt. Dungjiribong Volcanic Complex, Gurye-gun, Southwest of Ryeongnam Massif. *Journal of the Petrological Society of Korea*, 18, 349-370 (in Korean with English abstract).
- Kwon, C.W., Ko, K. and Koh, H.J., 2015, Geological Report of the Beopseongpo, Anmado, Songido, Bunamgundo and Imjado sheets. Daejeon, Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources, 57 p.
- 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, 505-519.
- Kwon, S., Sajeev, K., Mitra, G., Park, Y., Kim, S.W. and Ryu, I.-C., 2009, Evidence for Permo-Triassic collision in far east Asia: the Korean collisional orogen. *Earth and Planetary Science Letters*, 279, 340-349.
- Lee, C. and King, S.D., 2011, Dynamic buckling of subducting slabs reconciles geological and geophysical observations. *Earth and Planetary Science Letters*, 312, 360-370.
- Lee, D.-W., 1999, Strike-slip fault tectonics and basin formation during the Cretaceous in the Korean Peninsula. *The Island Arc*, 8, 218-231.
- Lee, M.H., 1970, Petrological study on rhyolite and tuff in the Deukryang-Myeon, Boseong-gun. Master thesis, Seoul National University, 59 p.
- Lee, M.W., Won, C.K. and Kim, K.H., 1992, The Cretaceous volcanic activities and petrology in the Kyonggi Massif: On the Kapcheon, Eumsung and Kongju Basins. *Journal of the Geological Society of Korea*, 28, 314-333 (in Korean with English abstract).
- Lee, S.J., Hwang, S.K., Song, K.-Y. and Yi, K., 2019, SHRIMP U-Pb zircon dating and stratigraphy of the Cretaceous volcanic rocks in Namhae and Saryang islands, southernmost Korea. *Journal of the Geological Society of Korea*, 55, 621-632 (in Korean with English abstract).
- Lee, T.-H., Park, K.-H., Chun, J.-H. and Yi, K., 2010, SHRIMP U-Pb zircon ages of the Jinju Formation and Silla Conglomerate, Gyeongsang Basin. *Journal of the Petrological Society of Korea*, 19, 89-101 (in Korean with English abstract).
- Lee, T.-H., Park, K.-H. and Yi, K., 2018a, SHRIMP U-Pb ages of detrital zircons from the early Cretaceous Nakdong Formation, SE Korea: initiation of non-marine basin development and tectonic inversion. *Island Arc*, 27, e12258.
- Lee, T.-H., Park, K.-H. and Yi, K., 2018b, nature and evolution of the Cretaceous basins in the eastern margin of Eurasia: A case study of the Gyeongsang Basin, SE Korea. *Journal of Asian Earth Sciences*, 166, 19-31.
- Lee, T.-H., Park, K.-H., Yi, K., Geng, J. and Li, H., 2015, SHRIMP U-Pb ages and Hf isotopic composition of the detrital zircons from the Myogok Formation, SE Korea: development of terrestrial basin and igneous activity during the early Cretaceous. *Geosciences Journal*, 19, 189-203.
- Lee, Y.-U. and Song, J.-H., 2007, The Stratigraphy and the Depositional Environments of the Cretaceous Gurye Basin, Jeollanamdo, Korea. *Journal of the Geological Society of Korea*, 43, 265-279 (in Korean with English abstract).
- Lee, S.R. and Cho, M., 2003, Metamorphic and tectonic



- evolution of the Hwacheon granulite complex, Central Korea: composite P-T path resulting from two distinct crustal-thickening events. *Journal of Petrology*, 44, 197-225.
- 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*, 6, 121-142.
- Metcalf, I., 2006, Paleozoic and Mesozoic tectonic evolution and palaeogeography of East Asian crustal fragments: the Korean Peninsula in context. *Gondwana Research*, 9, 24-46.
- 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.
- Paik, K.H., Yoon, K.S., Kim, E.H. and Freeland, M.H., 1979, Geology and geochronology of Gwangju fault area. *Journal of the Geological Society of Korea*, 15, 201-208.
- Park, J.B. and Lee, D.S., 1988, Study on the volcano-stratigraphy and petrology of the volcanic mass in the Banamri area, the west of the Gochang, north Cheolla province. *Journal of the Geological Society of Korea*, 24, 41-56 (in Korean with English abstract).
- Park, J.W. and Lee, Y.I., 1997, Lithostratigraphic revision of the Cretaceous Muju Basin, Korea. *Journal of the Geological Society of Korea*, 33, 65-77 (in Korean with English abstract).
- Perfit, M.R. and Davidson, J.P., 2000, Plate tectonics and volcanism. In: Sigurdsson, H., Houghton, B.F., McNutt, S.R., Rymer, H. and Stix, J. (Eds.), *Encyclopedia of Volcanoes*. Academic Press, San Diego, 89-113.
- Reedman, A.J. and Um, S.H., 1975, *Geology of Korea*. Korea Institute of Energy and Resources, Seoul.
- Rudnick, R.L. and Gao, S., 2003, Composition of the continental crust. In: Rudnick, R.L. (Ed.), *The Crust*. Elsevier, Amsterdam, 1-64.
- Sagong, H., Cheong, C.S. and Kwon, S.T., 2003, Paleoproterozoic orogeny in South Korea: evidence from Sm-Nd and Pb step leaching garnet ages of Precambrian basement rocks. *Precambrian Research*, 122, 1-21.
- Suh, K.S. and Park, H.I., 1986, Mesozoic Igneous Rocks in the Bupyeong District. *Journal of Korean Institute of Mining Geology*, 19, 179-192 (in Korean with English abstract).
- 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.
- Won, C.K., Lee, M.W., Kim, K.H., Hong, Y.K., Woo, J.G. and Lee, J.M., 1990, The study on Cretaceous volcanism in the Sunchang Trough: Compare study between Kyeongsang Basin, Sunchang Trough and Inner zone of SW Japan. *Journal of the Geological Society of Korea*, 26, 165-184 (in Korean with English abstract).
- Won, C.K., Lee, M.W. and Lee, J.M., 1991, A study on the Cretaceous volcanic activity of the Bupseongpo area. *Journal of the Geological Society of Korea*, 27, 416-433 (in Korean with English abstract).
- Won, C.K., Lee, M.W., Noh, J.H. and Lee, H.K., 1994, Cretaceous volcanic activity in Tongri Basin. *Journal of the Geological Society of Korea*, 30, 542-562 (in Korean with English abstract).
- 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.
- Xu, J.W., Zhu, G. and Tong, W.X., 1987, Formation and evolution of the Tancheng-Lujiang wrench fault system: a major shear system to the northwest of the Pacific Ocean. *Tectonophysics*, 134, 273-310.
- Yun, S.H., Lee, M.W., Koh, J.S., Kim, Y.L. and Ahn, J.Y., 2000, Petrochemical study of the Daejeonsa Basalt in the Mt. Juwang area, Cheongsong. *Journal of the Petrological Society of Korea*, 9, 84-98 (in Korean with English abstract).
- 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 cratic destruction of the North China Craton. *Journal of Asian Earth Sciences*, 47, 252-264.

---

Received : August 26, 2019

Revised : October 17, 2019

Accepted : October 28, 2019