



청송 면봉산 칼데라 주변의 화성암류에 대한 SHRIMP U-Pb 연대측정과 화성과정

황상구^{1,*} · 조인화² · 이기욱²

¹안동대학교 지구환경과학과

²한국기초과학지원연구원 환경과학연구부

요 약

면봉산 칼데라 주변의 화성암류는 어봉산화강암질암, 죽장화산암층, 층회암, 면봉산응회암, 유문암, 보현산 화강암질암 순으로 산출된다. 이들의 SHRIMP U-Pb 저어콘 연대측정 결과에 의하면 어봉산화강암질암은 76.92±0.91 Ma, 면봉산응회암은 65.03±0.16 Ma, 동측 유문암맥은 63.45±0.71 Ma, 북서측 유문암맥은 58.00±0.66 Ma, 보현산화강암질암에서 세립질 섬록암은 56.43±0.55 Ma와 흑운모 화강암은 56.07±0.60 Ma의 연대를 나타낸다. 이 자료에 의하면 어봉산화강암질암은 통상적으로 불국사관입암군으로 취급하여 면봉산응회암을 관입하는 것으로 여겨져 왔지만, 면봉산응회암보다 선기인 것을 지시한다. 어봉산화강암질암과 보현산화강암질암은 각각 2차례의 화성윤회의 마지막 사건의 심성암체로 볼 수 있다. 면봉산 지역에서는 회류응회암-칼데라 함몰-환상암맥-심성암으로 연결되는 완벽한 화성윤회를 거치는 복잡한 화성과정을 나타낸다.

주요어: 어봉산화강암질암, 면봉산응회암, U-Pb 연대측정, 정치시기, 화성과정

Sang Koo Hwang, In Hwa Jo and Keewook Yi, 2017, SHRIMP U-Pb datings and igneous processes of the igneous rocks around the Myeonbongsan caldera, Cheongsong, Korea. Journal of the Geological Society of Korea. v. 53, no. 6, p. 781-796

ABSTRACT: Igneous rocks around the Myeonbongsan caldera are divided into Eobongsan Granitoid, Jukjang Volcanics, Tuffite, Myeonbongsan Tuff, Rhyolite and Bohyeonsan Granitoid. Their SHRIMP U-Pb zircon dating acquired age results of 76.92±0.91 Ma from the Eobongsan Granitoid, 65.03±0.16 Ma from the Myeonbongsan Tuff, 63.45±0.71 Ma from the eastern rhyolite dyke, 58.00±0.66 Ma from the northwestern rhyolite dyke, and 56.43±0.55 Ma from the fine-grained diorite and 56.07±0.60 Ma from the biotite granite of the Bohyeonsan Granitoid. The age data indicate that the Eobongsan Granitoid is older than the Myeonbongsan Tuff, though the former is thought to intrude the other because the Bohyeonsan Granitoid has been considered as Bulguksa Intrusive Group. The Eobongsan and Bohyeonsan granitoids may be considered as the later event of each igneous cycle, which shows the composite igneous process of a perfect igneous cycle passing from ash-flow tuff through caldera collapse and ring dyke into pluton in Myeonbongsan area.

Key words: Eobongsan Granitoid, Myeonbongsan Tuff, U-Pb dating, emplacement timing, igneous process

(Sang Koo Hwang, Department of Earth and Environmental Science, Andong National University, Andong 36729, Republic of Korea; In Hwa Jo and Keewook Yi, Korea Basic Science Institute, Ochang 34132, Republic of Korea)

1. 서 언

경상분지는 한반도 남동부에 위치하며(그림 1a), 백악기의 해양판 섭입작용에 의해 활발한 화산활동이 일어났던 곳으로 백악기 퇴적암류와 화산암류, 심

성암류가 분포한다(그림 1b). 청송 면봉산 칼데라는 경상분지의 북동부에 위치하며(그림 1b), 주변에 백악기 후엽의 화산암류가 상당히 분포하고 심성암류가 소규모로 관입하고 있는 지역이다(그림 2).

면봉산 칼데라 주변의 화성암류는 여러 층서단위

* Corresponding author: +82-54-820-5469, E-mail: hwangsk@anu.ac.kr

로 구분되지만 그 정확한 층서와 정치시기와 같은 미해결 문제들이 남아있다. 중요한 이슈 중의 하나는 화성암류의 정확한 분출 및 관입연대를 밝히는 것이다. 심성암류는 간헐적으로 실시된 야외조사에 기초하여 화산암류보다 후기에 관입한 것으로 평가되었다. 그런데 이들 층서는 부분적으로 심성암류가 접촉지역에서 확실한 선후관계를 보여주지 않기 때문에 풀리지 않는 의문점을 가진 것으로 생각된다. 하지만 최근에는 저어콘의 U-Pb 연대측정을 바탕으로 정치시기를 정확하게 알아내거나 또는 그 시기를 보다 좁은 범위로 한정할 수 있다. 그러므로 경상분지에서 나온 화성암류의 연대에 대한 체계적 연구가 가장 중요한 과제 중의 하나이다.

면봉산 칼데라 주변에서 화성암류는 여러 층서단

위로 분류되지만 어봉산화강암질암(혹은 어봉산암주)과 보현산화강암질암(혹은 보현산암주)은 관입체로서로 떨어져 분포하기 때문에 암질만의 대비로 층서를 논하기가 상당히 어려운 과제이고 화산암류와 관계도 불확실하다. 그래서 이 연구는 층서단위에 대한 절대연대 측정이 필수적이며 최근에 정확도가 높은 SHRIMP U-Pb 연대측정 자료를 보고하고 이들을 바탕으로 하여 이 화성암류에 대한 시대구분과 화성과정들을 정립하고 다른 지역의 화성암류와 대비하는데 기여하고자 한다.

2. 지 질

면봉산 칼데라는 경상분지의 북부에 위치한 의성

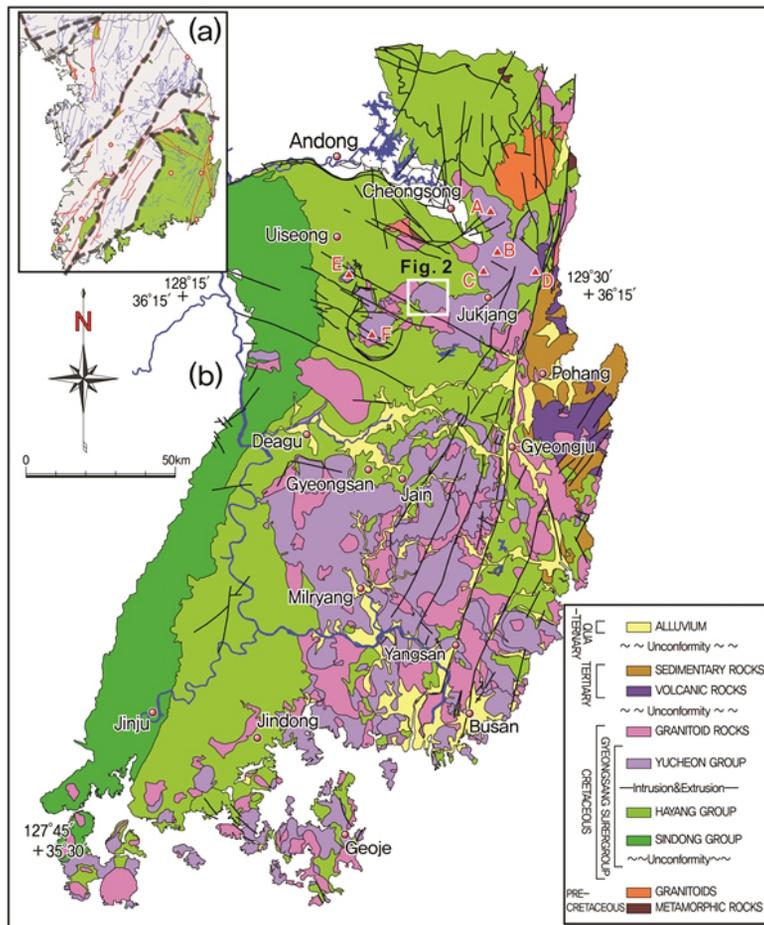


Fig. 1. (a) Index map of South Korea; (b) Regional geological map of the Gyeongsang basin, in which a white box area, Fig. 2, indicates location of the study area.

소분지의 중앙부에 위치한다(그림 1b). 경상분지는 분지 발달사적 및 층서적 차이에 근거하여 서쪽의 낙동곡분, 다시 북부로부터 영양소분지, 의성소분지, 유천소분지로 세분되고, 층서가 하위로부터 신동층군, 하양층군, 유천층군 그리고 이들을 관입한 불국사관입암군 순서로 정의되어 있다(Chang, 1975, 1977, 1985). 면봉산 칼데라 주변은 의성소분지의 동부에 해당하고 하양층군 퇴적암류, 유천층군 화산암류, 불국사관입암군 심성암류의 지질을 나타낸다(Chang *et al.*, 1977; Hwang and Kim, 1999). 그러나 심성암류는 연대측정에 따라 백악기와 제3기 심성암류로 나뉘진다. 그래서 이 칼데라 주변의 층서는 크게 하양층군 퇴적암류, 어봉산화강암질암, 죽장화산암층, 층회암, 면봉산 응회암, 유문암, 보현산화강암질암 순으로 구분된다(그림 2).

2.1 퇴적암류

퇴적암류는 하부의 춘산층과 상부의 신양동층으로 구분된다. 춘산층은 의성소분지에서 흔히 사용되지만 유천소분지의 반야월층에 대비된다(Won *et al.*, 1980).

2.2.1 춘산층

춘산층은 환상단층 외측에서 북동부와 남동부에 넓게 분포한다. 이 층은 주로 녹회색 내지 암회색 셰일과 실트암으로 구성되어 있으며 두께 1 m 이하의

얇은 담수성 석회질암층을 협재한다(Won *et al.*, 1980). 하위의 사곡층과의 경계부에서는 저색(purple)층과 호층대를 이루고 있기 때문에 이 층의 하부에는 드물게 저색 이암이 협재되어 있다. 그러나 이 층의 기저에는 구산동응회암이 협재되어 있어 쉽게 구별된다(Chang *et al.*, 1977). 북서부와 남부에서 이 층은 화강암질암의 관입에 의한 열변성작용으로 혼펠스화되어 있다. 이 층은 구산동도폭에서 약 500 m에 달한다고 한다(Chang *et al.*, 1977).

2.2.2 신양동층

신양동층은 면봉산 칼데라 북서측 외곽부에 소규모로 분포한다. 이 층은 춘산층 위에 정합으로 놓이며 죽장화산암층에 의해 덮인다. 이 층은 주로 암회색 내지 흑색 셰일로 구성되고 세립 사암이 협재된다. 열변성으로 견고하고 엽층리가 발달되어 있는 것이 특징이며, 엽층리는 담회색과 흑색의 띠가 대상구조를 이룬다. 이 층은 하위의 춘산층과 정합적인 관계를 보이지만 상한이 죽장화산암층에 의해 부정합적으로 덮이기 때문에 두께가 100 m 이하로 불규칙하며 정확히 알 수 없다. 그러나 이 층은 구산동도폭에서 약 200 m에 달한다고 추정한다(Chang *et al.*, 1977).

2.2 어봉산화강암질암

어봉산화강암질암은 북서부에서 다소 큰 암주로

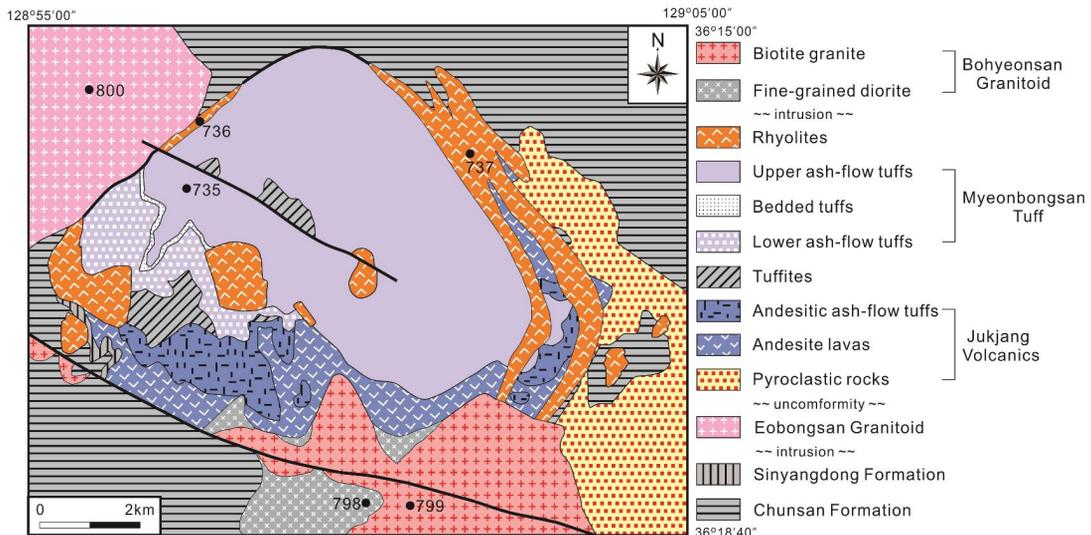


Fig. 2. Geological map around the Myeonbongsan caldera, together showing sample locations of the present study.

출산층을 관입하는 심성암류로 산출되며, 면봉산용회암과 단층관계를 가진다(그림 2). 그리고 이 암주는 폭 5 km에 이르기까지 접촉대를 이루어 많은 퇴적암을 혼펠스화시켰다. 이 암주는 중심부에서 중·조립질 등립상이나 주변부로 갈수록 중립 내지 세립질로 접이되는 연변상을 나타낸다. 서쪽으로 갈수록 섬록암질의 고철질 미립상 포유체를 곳곳에 포함한다. 포유체는 녹회색 내지 암록색을 띠며 사장석과 각

섬석이 우세하게 구성된다. 입도는 극세립질로서 미립상을 나타내며 언뜻 보기에는 안산암과 같은 양상을 보인다. 보통 사장석 반정을 가지며 그 크기는 2~3 mm에서 12 mm 이상으로 매우 다양하다.

이 화강암질암은 중·조립질 등립상 조직을 보여 주며 석영, 사장석, 알칼리장석, 흑운모, 각섬석 등으로 구성된다(그림 3a). 암체의 주변에서는 흔히 심한 듀테릭(duteric) 변질작용으로 장경 3~4 cm의 전기

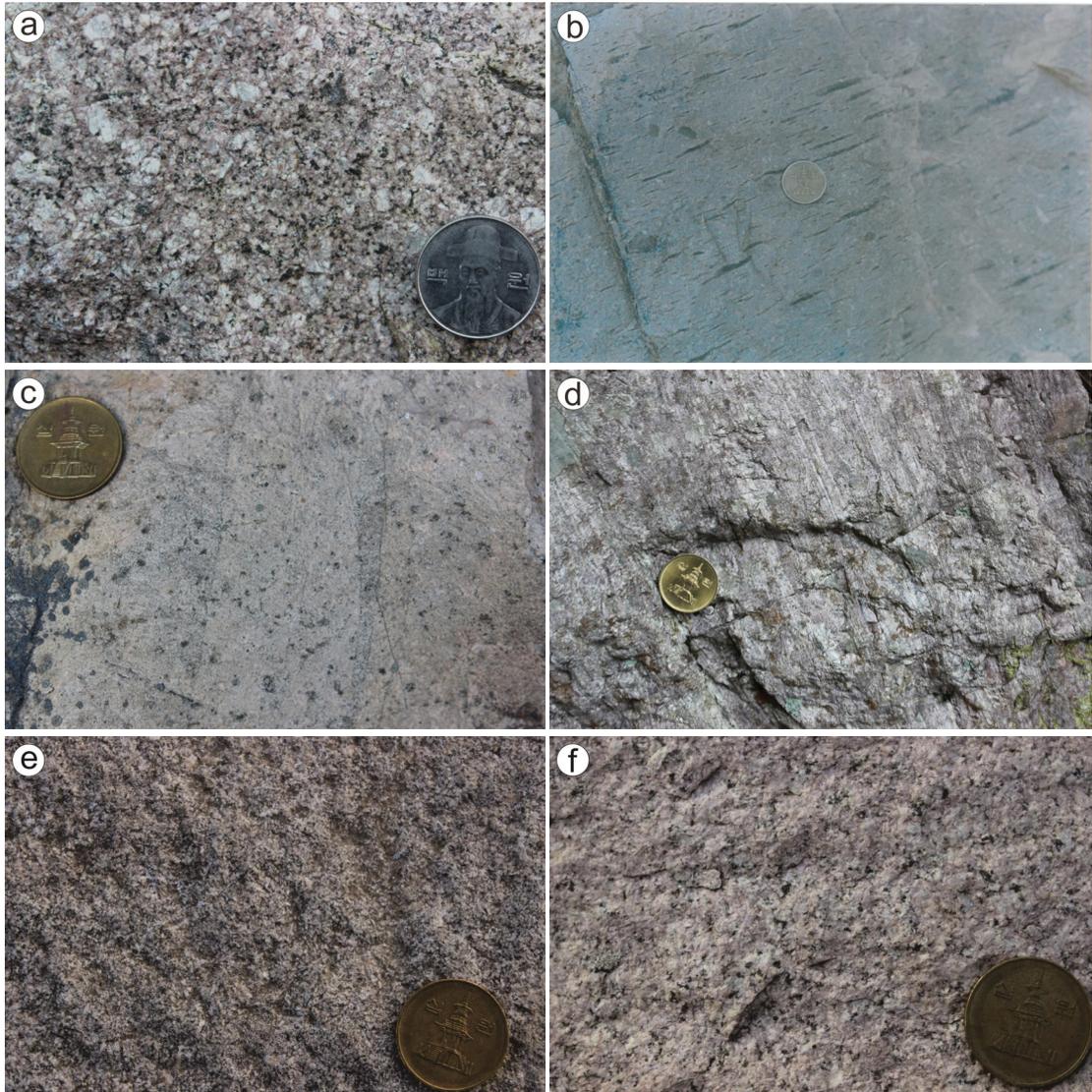


Fig. 3. Outcrop photographs showing representative lithology of the igneous rocks around the Myeonbongsan caldera. (a) Biotite granite in the Eobongsan Granitoid; (b) Upper ash-flow tuff in the Myeonbongsan Tuff; (c) Rhyolite porphyry of the ring dyke; (d) Flow-banded rhyolite of the ring dyke; (e) Fine-grained diorite in the Bohyeonsan Granitoid; (f) Biotite granite in the Bohyeonsan Granitoid.

석이 생성되기도 한다. 그리고 이 암석은 흔히 미아롤리틱(miarolitic) 구조를 보여주어 천부에서 냉각, 고결되었음을 말해준다. 미아롤리틱 구조를 나타내는 경우 전자에 비하여 미사장석과 미량의 백운모가 산출되고 사장석, 흑운모와 각섬석이 적게 함유되어 있다. 그리고 정장석과 석영은 흔히 미문상 조직과 유층상 조직(vermicular texture)을 보여주는 것이 특징이다.

2.3 죽장화산암층

죽장화산암층은 중남부의 서쪽에서 동쪽으로 불규칙하게 대상으로 분포하며, 하부로부터 화성쇄설암, 안산암 용암 및 회류응회암으로 구성된다.

2.3.1 화성쇄설암

화성쇄설암은 칼데라 동측의 외곽부에 넓게 분포하고 동남부로 크게 연장된다(그림 2). 이 암층은 층서적으로 신양동층의 상위에 놓이지만 동부에서 춘산층 상위에 바로 놓이고, 안산암 용암의 하위에 놓인다. 두께는 최고 약 450 m를 보여주며 서쪽으로 점점된다(Hwang and Kim, 1999).

이 암층은 신선한 곳에서 사장석 반정이 다소 나타나며, 알칼리장석도 소량 함유하고 석영도 간혹 발견된다. 전체적으로 괴상을 띠는 부분이 있으나, 주로 납작해진 부석(pumice)이 최대 4×0.2 cm 크기의 피아메(fiamme)를 형성하여 다소 용결되어 나타난다. 암편들은 기저부에서 풍부한 양상인데, 최대 15×8 cm의 크기로 나타난다. 안산암 암편이 대부분이고 데사이트 암편이 소량 함유되어 있다.

2.3.2 안산암 용암

안산암 용암은 중남부에서 동서방향으로 대상 분포하며, 유문암맥과 보현산화강암질암에 의한 관입으로 불규칙한 산상을 나타낸다(그림 2). 이 암층은 동부에서 화성쇄설암의 위에 놓이는 반면에 서부에서 신양동층 위에 직접 놓이고 안산암질 회류응회암에 의해 덮인다. 두께는 최고 약 300 m이며 서쪽으로 갈수록 얇아진다(Hwang and Kim, 1999).

이 용암은 주로 암회색을 띠며, 전반적으로 괴상이지만 국부적으로 유상구조를 보이는 곳도 있다. 이 용암은 최하부에서 각력암을 형성하며, 상부에서 반정이 풍부한 편이지만 하부로 갈수록 반정이 줄어들

고 비반상을 이루는 곳도 있다. 반정은 대부분 사장석이며 대략 1~2 mm 내외 크기이다.

2.3.3 안산암질 회류응회암

안산암질 회류응회암은 중서부와 중동부에 소규모로 분산되어 분포하며, 반드시 안산암의 상위에 놓이고 층회암의 하위에 존재하지만 국부적으로 면봉산응회암에 의해 덮인다(그림 2). 두께는 최대 약 150 m 정도를 보여준다(Hwang and Kim, 1999).

이 암층은 주로 암회색 내지 녹회색을 띠며 풍화면에서는 암갈색 표피를 형성한다. 대부분 사장석을 반정으로 함유하며 흔히 최대 6×1 cm 크기의 피아메를 가진다. 본암의 하부에는 라필리(lapilli) 크기의 암편이 우세하게 나타난다. 이 암편은 대부분 안산암이며, 대개 각상으로 분급이 불량하고 최대 30×20 cm의 크기를 가진다. 기질은 전체적으로 연녹색 내지 암회색을 띠는 변질물이며, 미약하게나마 완배열상 석리(eutaxitic fabric)를 나타내는 곳도 있다.

2.4 층회암

층회암은 중서부와 중앙부에 소규모지만 세 곳에 분포하며, 죽장화산암층 위를 피복하고 면봉산응회암에 의해 덮인다(그림 2). 이 암층은 중서부에서 최고 약 300 m의 두께를 보여준다. 이 암층은 녹회색을 띠고 세립질의 응회질 사암이 가장 우세하며 층리가 잘 발달되어 있다. 이들은 주향과 경사가 남쪽에서 $N65^\circ E$, $30^\circ NW$ 방향으로 가장 우세하지만 북쪽으로 갈수록 점차 완만해진다.

2.5 면봉산응회암

면봉산응회암은 모두 규질 화산쇄설암으로 구성되며 하부 회류응회암, 층상응회암과 상부 회류응회암 순으로 구분된다(Hwang and Kim, 1999).

2.5.1 하부 회류응회암

하부 회류응회암은 중서부의 칼데라 내에 분포하며, 층회암 혹은 안산암질 회류응회암 위에 놓이고 층상응회암에 의해 덮인다(그림 2). 본암은 최고 약 300 m 두께를 나타내며 동쪽으로 갈수록 얇아진다. 특히 하부에는 결정들이 밀집되는 양상을 보여준다.

이 응회암은 특징적으로 결정들이 매우 풍부하여 결정응회암(crystal tuff)에 가깝다. 석영은 큰 결정

의 형태로서 가장 풍부하게 포함되고 사장석도 다소 풍부하며, 그 외에 알칼리장석도 인지된다. 부석이 결정들 사이에서 소규모로 발견되며, 암편은 드물게 나타난다. 기질은 주로 녹회색을 띠며 분급되지 않고 괴상을 나타낸다. 그래서 결정이 풍부한 곳에서는 석영반암의 양상을 보여준다.

2.5.2 층상응회암

층상응회암은 중서부의 칼데라 내에서 하부 회류응회암과 상부 회류응회암의 사이에 얇게 협재된다(그림 2). 본암은 최대 약 30 m 정도의 얇은 두께를 가지고, 주향과 경사가 대체로 N20°E, 18°NW로 나타나며, 동쪽으로 가면서 얇아지고 유문암 플러그의 관입에 의해 절단된다.

이 암층은 대개 3~4 cm, 최대 20~25 cm 두께의 다수의 층으로 구성된다. 두꺼운 층에서는 부석과 암편이 우세하며, 부석은 두꺼운 렌즈상을 보여주고, 암편은 최대 45 × 50 cm 정도의 유문암 블록을 드물게 함유한다. 기질은 대체로 담녹회색을 띠며 다양한 유리편과 결정편으로 구성된다.

2.5.3 상부 회류응회암

상부 회류응회암은 중앙부에 넓게 분포하며, 층상응회암의 상위에 놓이고 약 700 m 이상 두께를 나타낸다(Hwang and Kim, 1999). 이 암층은 하부 회류응회암에 비해 결정을 적게 함유하고 화산회가 풍부한 파리질 응회암(vitric tuff)에 속한다(그림 3b). 반정이 적은 편이지만 사장석 반정이 가장 풍부하고, 석영 반정이 소량 나타난다. 부석은 변질되어 녹회색을 띠며, 대체로 약 12 × 2 cm 정도로 편평화되어 대개 용결엽리를 나타낸다. 암편은 약 2 × 1 cm의 유문암과, 최대 약 5 × 2 cm의 적색 세일과 녹회색 사암 등이 드물게 포함된다. 기질은 풍화된 노두에서 담회색 내지 녹회색 또는 적갈색으로 나타나며 심히 용결되어 있다(그림 3b).

현미경하에서 반정은 사장석, 석영과 알칼리장석으로 구성된다. 사장석 반정은 파편상을 이루는 것이 많고 흔히 쌍정을 나타낸다. 석영 반정은 융식되어 만곡상을 나타내고, 대개 전체적으로 둥근 모양을 이룬다. 알칼리장석 반정은 소량 발견되며 대개 변질되어 있다. 부석은 입자들 사이에 끼여 다소 납작한 모양으로 변형되어 있으며, 용결이 심한 곳에서는

렌즈상으로 늘어나 있다. 이들은 내부에 미정질 석영으로 결정화되어 있고, 경계부에서 침상 결정들이 직각으로 생장되어 축열상 구조(axiolitic structure)를 나타낸다. 그리고 암편은 주로 안산암과 구과상 유문암으로 구성되고 응회질 사암이 소량 포함된다. 기질은 대개 연녹회색 내지 연갈색을 띠고, 용결이 심한 곳에서는 용결엽리를 흔히 발달시킨다.

2.6 유문암

유문암은 칼데라 내의 중앙부에서 플러그상의 중앙관입체로 산출되거나 혹은 칼데라 경계부를 따라 맥상의 환상관입체로 산출되며, 면봉산응회암을 관입하였다(그림 2). 중앙관입체의 유문암은 원통상을 이루어 화구를 따라서 관입한 것이며, 환상관입체의 유문암은 맥상을 이루어 환상단열대를 따라서 관입한 것이다(Hwang and Kim, 1999).

이 유문암은 대개 담회색 내지 회백색을 띠고, 사장석이 반정으로 나타나며, 암체에 따라 다른 조직을 가진다. 암체의 주변부에서는 유상구조를 나타내기도 하고 최고 30 × 40 cm 정도 크기의 관입각력암(intrusion breccia)을 형성하는 곳도 있으나 대부분 괴상으로 산출된다. 특히 동부의 환상암맥은 조직에 따르면 유문반암(혹은 석영반암)에 속하고(그림 3c) 북서부의 환상암맥은 유대상 유문암(flow-banded rhyolite)에 속한다(그림 3d).

경하에서 사장석이 반정으로 산출되며 자형 내지 반자형이고 쌍정을 이룬다. 이들은 가끔 방해석으로 변질되어 있다. 석영은 미립으로 산재되어 있다.

2.7 보현산화강암질암

보현산화강암질암은 최후기 심성암류로서 남부에 분포하며 춘산층, 죽장화산암층과 유문암맥을 관입하고 있는 암주이다(그림 2). 이 암주는 모드분석에 의하면 세립질 섬록암, 석영몬조섬록암과 흑운모 화강암으로 구분된다(Hwang and Choi, 2001). 이 가운데 세립질 섬록암과 흑운모 화강암이 이 지역에 노출된다. 흑운모 화강암은 고철질 암맥의 관입에 따른 마그마 혼합작용에 의해 암맥 주위에 많은 고철질 내포체를 함유한다(Jwa and Kim, 2000).

2.7.1 세립질 섬록암

세립질 섬록암은 보현산 정상부에서 화산암류와

의 경계부를 따라 분포한다(그림 2). 이들은 대부분 산류의 정상부나 능선부에서 산출되는 것이 특징이다. 이 암상은 신선한 면에서 녹회색 내지 암청색을 띠고 대부분 세립질로서 등립질이며 균질한 암질을 보여준다(그림 3e). 이 암상은 비반상이지만 매우 드물게 사장석 반정을 가진다. 그리고 보현산 정상부에는 안산암질 응회암이 세립질 섬록암 속에 포획체 혹은 현수체로 존재한다. 또한 이 섬록암은 흑운모 화강암에 관입되어 있고 그 속에 수 cm~수 m 크기의 동원포획체(autolith)로 존재한다.

현미경하에서 세립질 섬록암은 입상조직을 보이며 사장석, 각섬석, 자철석, 석영과 알칼리장석 등으로 구성된다. 사장석은 장정이 흔히 1 mm 이하이고 종종 라쓰상(lath-like)을 나타내며 일정한 방향성을 보이지 않는다. 이들은 대부분 알바이트 쌍정을 이루며 비교적 큰 결정은 흔히 누대구조를 보여준다. 각섬석은 녹갈색을 띠며 대체로 주상 결정으로 나타나고 또는 침상 결정도 있으며 흔히 녹니석화되어 있다. 자철석은 흔히 각섬석과 함께 또는 각섬석 주위에서 미립으로 존재한다. 알칼리장석은 흔히 사장석을 둘러싸거나 다른 광물 사이에서 석영과 함께 미량으로 나타난다.

2.7.2 흑운모 화강암

흑운모 화강암은 남부에서 넓은 면적으로 분포한다(그림 2). 이 암상은 신선한 면에서 회백색 내지 담황색을 띠고 중립질이며 석영, 사장석, 알칼리장석으로 구성되고 흑운모와 각섬석을 소량 함유한다(그림 3f). 사장석은 다른 결정보다 다소 크게 나타나서 반정을 이루는 것도 있으며, 흑운모나 각섬석은 국부적으로 몰려 있다. 이 암상은 앞에서 언급한 바와 같이 세립질 섬록암을 관입하여 그 속에 이들의 크고 작은 동원포획체를 함유하고 있다(Hwang and Choi, 2001).

흑운모 화강암은 석영, 사장석, 알칼리장석, 흑운모, 각섬석과 자철석 등으로 구성된다. 석영은 다른 결정들 사이에서 타형 결정으로 나타나고 드물게 알칼리장석과 함께 미문상 조직을 보이기도 한다. 사장석은 보다 큰 결정으로서 주로 알바이트 쌍정을 이루고 누대구조를 나타내는 경우도 많다. 흑운모는 국부적으로 몰려 있으며 대부분 녹니석으로 변질되어 있다. 각섬석은 크기가 다양하며 흑운모와 같이

나타난다. 자철석도 미립으로서 흔히 유색광물 주위에서 산출된다.

3. 연대측정 결과

면봉산 칼데라 주변의 화성암류의 층서와 정치시기를 정립하기 위해 SHRIMP 저어콘 연대측정을 실시하였다. 시료는 주요 암체마다 1개씩 선정하였다. 즉 어봉산화강암질암은 흑운모 화강암에서 1개 시료를 선택하였으며, 면봉산응회암은 상부 회류응회암에서 1개 시료를 선택하였고, 환상암맥은 동측 유문반암맥과 북서측 유대상 유문암맥에서 각각 1개씩 시료를 선택하였다. 그리고 보현산화강암질암은 세립질 섬록암과 흑운모 화강암에서 각각 1개씩 시료를 선택하였다.

연대측정은 먼저 한국기초과학지원연구원의 SHRIMP IIe를 이용하여 저어콘의 U-Pb 분석을 실시하였다. U-Pb 분석은 일차 이온빔으로 산소 음이온(O_2^-)을 이용하였으며, 이때 이온빔의 직경은 25 μm 이고 세기는 4-6 nA이었다. 분석에 사용한 저어콘 표준물질로는 FC-1과 SL13을 사용하여 U 함량측정과 U/Pb 연대보정을 실시하였다. 연대측정 절차는 Williams *et al.* (1998)과 Ireland and Williams (2003)의 방법을 적용하였다. 측정자료는 SQUID 2.5 및 Ex v. 3.6 프로그램(Ludwig, 2008)을 이용하여 연대계산을 하였다. 각 분석치와 결보기연대의 오차는 1σ 이고, 가중평균 및 일치곡선(concordia) 연대계산은 95% (2σ)의 신뢰도를 나타낸다.

6개 시료에 대한 정밀분석치는 표 1에 주어졌고, 분석 저어콘의 대표적인 CL 영상은 그림 4에 나타났다.

3.1 어봉산화강암질암

HC800은 어봉산화강암질암 중에서 흑운모 화강암의 시료이다. 저어콘 입자들은 대부분 자형 주상이며 CL 영상에서 강하게 발광하고 동심원상 강한 자형누대를 보여준다(그림 4). 미량원소 Th/U 비는 0.43~1.08 범위로 일반적인 화성암류와 같이 나타나고(표 1) 직선상 분포를 나타내는데(그림 5), 이는 마그마에서 성장한 저어콘의 특징을 반영한다(Vavra *et al.*, 1999; Hartman *et al.*, 2000). 동심원상 진동누대를 가진 저어콘에서 14개 분석치는 73.8 ± 1.7 Ma

에서 80.1 ± 1.4 Ma 범위의 연대를 가진다(표 1). 12개 분석치는 조화적이고 가중평균 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 연대는 76.92 ± 0.91 Ma (MSWD=1.2)를 갖는 균질한 균집을 형성하는데(그림 6a), 이는 어봉산화강암질암의 정치연대로 해석된다.

3.2 면봉산응회암

HC735는 면봉산응회암에서 나온 상부 회류응회암의 시료이다. 저어콘 입자들은 자형이고 주로 장주상이지만 약간은 단주상이며, CL 영상에서 강하게 발광하고 동심원상 강한 자형 누대구조를 나타낸다(그림 4). Th/U 비는 0.39~1.01 범위로 나타나고(표 1) 직선상 분포를 보여주는데(그림 5), 이는 내부구조와 함께 화성성인을 반영한다. 동심원상 누대를 가진 저어콘에서 15개 분석치는 60.9±1.5 Ma에서 67.3±2.5 Ma 범위의 연대를 가진다(표 1). 콘코디아 그림에서 13개 분석치는 가중평균 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 연대

65.03 ± 0.66 Ma (MSWD=1.7)를 갖는 조화적 균집을 형성하는데(그림 6b), 이는 면봉산응회암의 분출연대로 해석된다.

3.3 환상암맥

HC737은 동측 환상암맥의 유문반암의 시료이다. 저어콘 입자들은 자형이면서 대부분 장주상이고 날카로운 끝을 가지지만 몇 개가 단주상이며, CL 영상에서 강한 동심원상 자형 누대구조를 가진다(그림 4). Th/U 비는 0.27~1.48 넓은 범위로 나타나는데(표 1), 이도 내부구조와 함께 역시 화성성인을 암시한다. 19개 분석치 중에서 7개를 제외하고 모든 분석치는 59.4 Ma에서 65.4 Ma 범위의 젊은 연대를 갖는다. 이 분석치는 가중평균 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 연대 63.45 ± 0.71 Ma (MSWD=0.99)로 깔끔하게 한정되는 균집으로 정의되는데(그림 6c), 이는 이 암맥의 정치연대로 해석된다. 7개의 높은 분석치는 67.9 ± 0.7 Ma와 154.5 ± 3.3

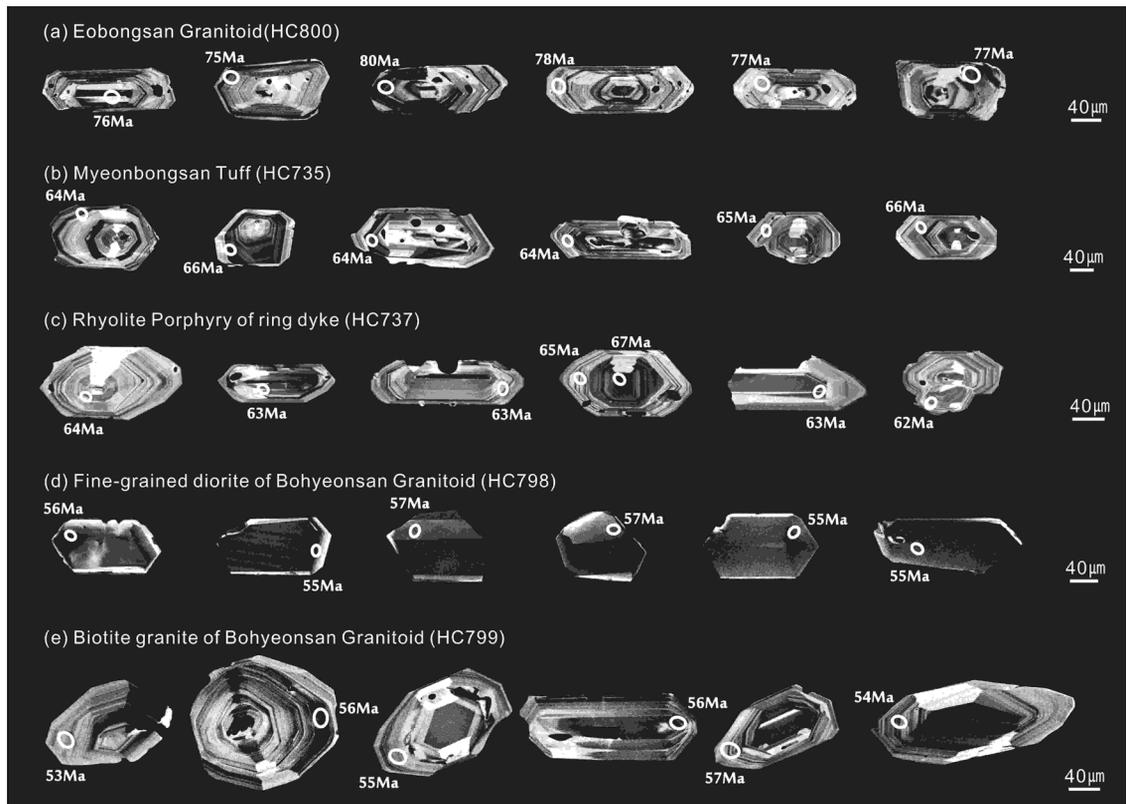


Fig. 4. Representative Cathodoluminescence images of the analysed zircon grains, showing the location of analytical spots and $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ ages in Ma, separated from the Eobongsan Granitoid (HC800), Myeonbongsan Tuff (HC735), Rhyolite porphyry (HC737), Fine-grained diorite (HC798) and Biotite granite (HC799).

Table 1. Summary of SHRIMP U-Pb isotope data of the analyzed zircons from igneous rocks around the Myeonbongsan caldera.

Spot no.	²⁰⁶ Pb (%)	U (ppm)	Th (ppm)	²³² Th/ ²³⁸ U	±%	²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb	±%	²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U	±%	⁽²⁾ ²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U		⁽¹⁾ ²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb	
										Age (Ma)		Age (Ma)	
Sample HC800 (Eobongsan Granitoid)													
HC800_1.1	0.56	172.63	111.23	0.665	0.3	0.0520	4.3	0.0382	1.3	76.3	±0.9	11	±142
HC800_3.1	0.24	482.26	506.18	1.084	0.8	0.0494	2.4	0.0414	2.8	75.8	±1.0	6	±213
HC800_4.1	0.38	203.87	109.15	0.553	0.3	0.0505	3.1	0.0386	2.4	77.3	±1.2	-20	±97
HC800_5.1	-0.00	229.57	148.30	0.667	0.3	0.0475	3.4	0.0390	3.5	80.1	±1.4	-54	±117
HC800_6.1	0.07	167.18	105.70	0.653	0.3	0.0480	8.8	0.0396	1.6	76.5	±1.5	-144	±263
HC800_7.1	0.02	157.06	99.41	0.653	0.3	0.0477	5.5	0.0393	1.6	78.7	±2.1	11	±175
HC800_8.1	0.36	128.48	71.87	0.577	0.4	0.0504	5.9	0.0392	1.8	76.2	±3.4	21	±193
HC800_9.1	2.70	147.25	61.54	0.431	0.4	0.0690	11.4	0.0414	1.7	78.6	±1.6	636	±273
HC800_11.1	0.54	147.68	82.41	0.576	0.4	0.0517	6.2	0.0368	1.9	73.8	±1.6	322	±152
HC800_12.1	0.68	155.65	97.38	0.646	0.3	0.0529	3.3	0.0366	1.1	76.1	±1.0	-11	±116
HC800_13.1	0.43	161.29	92.22	0.590	0.3	0.0509	3.0	0.0376	1.2	77.5	±0.9	-264	±112
HC800_14.1	1.27	148.09	102.71	0.716	0.3	0.0576	10.4	0.0390	2.6	77.7	±1.4	31	±381
Sample HC735 (Myeonbongsan Tuff)													
HC735_1.1	0.42	544.31	342.28	0.646	0.3	0.0506	5.3	0.0262	1.6	64.8	±0.5	-626	±601
HC735_2.1	-0.11	1147.92	437.46	0.397	0.4	0.0464	3.3	0.0309	1.0	66.5	±0.4	-49	±111
HC735_3.1	-0.07	592.94	510.08	0.886	0.2	0.0466	4.9	0.0306	4.7	63.7	±1.5	-285	±288
HC735_4.1	-0.09	559.96	475.22	0.877	1.3	0.0465	5.1	0.0293	1.5	63.7	±2.0	-131	±213
HC735_5.1	-0.65	447.52	274.44	0.635	0.9	0.0420	6.7	0.0254	1.8	64.4	±2.9	-901	±648
HC735_6.1	-0.13	558.91	364.03	0.678	0.3	0.0463	4.9	0.0313	3.3	67.3	±2.4	-707	±491
HC735_7.1	0.11	308.46	121.25	0.401	1.1	0.0481	8.3	0.0260	7.4	60.9	±1.5	1071	±364
HC735_8.1	0.02	1456.19	1193.40	0.846	1.7	0.0474	3.2	0.0258	2.9	64.9	±0.4	132	±95
HC735_9.1	-0.25	771.77	752.11	1.007	0.6	0.0452	4.3	0.0291	1.4	64.4	±0.8	-722	±411
HC735_10.1	-0.22	576.01	374.68	0.679	0.2	0.0454	8.5	0.0269	2.7	62.5	±0.6	-29	±208
HC735_11.1	-0.26	304.42	210.11	0.710	0.3	0.0452	7.5	0.0272	2.1	67.2	±1.3	-797	±742
HC735_12.1	-0.33	534.73	369.21	0.712	0.3	0.0446	5.3	0.0290	1.7	65.1	±0.5	790	±257
HC735_13.1	-0.01	545.30	414.25	0.788	0.7	0.0471	5.1	0.0279	1.5	63.2	±1.3	209	±182
HC735_14.1	-0.65	525.62	740.21	1.457	1.5	0.0421	6.1	0.0267	3.9	67.0	±3.1	182	±276
HC735_14.2	-0.42	152.09	69.36	0.471	0.6	0.0439	10.8	0.0275	3.0	64.7	±0.9	-114	±267
HC735_15.1	0.42	554.51	364.25	0.676	0.2	0.0506	4.8	0.0291	3.3	66.5	±0.5	-231	±341
Sample HC737 (Rhyolite porphyry of ring dyke)													
HC737_1.1	-1.42	115.59	101.27	0.905	0.4	0.0360	10.2	0.0281	5.5	64.7	±3.7	1043	±447
HC737_2.1	0.60	163.21	88.08	0.557	0.4	0.0522	645	0.0309	2.0	70.9	±1.0	--	--
HC737_3.1	0.12	185.80	161.49	0.897	0.3	0.0501	3.8	0.0755	2.1	154.5	±3.2	-176	±245
HC737_4.1	0.17	69.54	47.22	0.701	0.6	0.0486	11.1	0.0278	3.3	62.2	±2.1	685	±496
HC737_5.1	-0.32	129.26	123.82	0.989	1.2	0.0447	14.2	0.0287	2.3	63.6	±1.0	822	±419
HC737_6.1	-0.43	159.86	140.84	0.910	0.3	0.0438	7.4	0.0283	2.1	63.5	±0.8	-117	±183
HC737_7.1	-0.07	252.56	360.68	1.475	1.8	0.0467	5.6	0.0298	1.7	64.0	±1.2	--	--
HC737_8.1	-0.68	190.78	166.11	0.899	0.3	0.0419	12.7	0.0306	1.8	65.4	±0.9	92	±365
HC737_9.1	0.22	103.78	98.48	0.980	0.7	0.0489	8.9	0.0287	2.7	63.0	±0.9	--	--
HC737_10.1	-0.92	154.37	75.45	0.504	0.4	0.0404	6.9	0.0382	1.9	86.9	±1.1	-657	±432
HC737_11.1	-0.07	164.04	132.52	0.834	1.1	0.0467	7.3	0.0282	2.2	62.4	±1.8	--	--
HC737_12.1	-0.58	166.41	198.20	1.230	0.3	0.0426	8.0	0.0298	2.1	63.7	±1.3	357	±352
HC737_13.1	-0.25	170.19	220.77	1.340	1.2	0.0453	12.1	0.0278	2.1	63.1	±1.1	243	±357
HC737_14.1	-0.60	144.68	152.82	1.091	0.3	0.0425	8.7	0.0298	2.3	62.5	±1.5	1623	±337
HC737_15.1	-0.14	156.46	41.52	0.274	0.6	0.0462	8.2	0.0280	2.3	69.4	±1.0	1507	±344
HC737_3.2	0.55	235.34	203.57	0.893	0.5	0.0530	3.7	0.0602	2.1	131.2	±1.6	-50	±233
HC737_10.2	0.67	208.44	71.28	0.353	0.4	0.0533	4.5	0.0449	1.4	100.9	±2.1	-158	±333
HC737_3.3	0.07	135.02	130.43	0.997	0.3	0.0477	7.5	0.0271	2.2	59.4	±1.8	121	±204
HC737_8.2	0.09	555.97	614.76	1.142	0.2	0.0480	2.6	0.0305	2.8	67.9	±0.7	625	±161

Table 1. Continued.

Spot no.	^{206}Pb (%)	U (ppm)	Th (ppm)	$^{232}\text{Th}/$ ^{238}U	$\pm\%$	$^{207}\text{Pb}/$ ^{206}Pb	$\pm\%$	$^{206}\text{Pb}/$ ^{238}U	$\pm\%$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ Age (Ma)	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ Age (Ma)		
Sample HC736 (Flow-banded rhyolite of ring dyke)													
HC736_2.1	-0.17	208.09	166.03	0.824	0.3	0.0455	6.8	0.0253	2.0	59.3	± 0.7	21	± 185
HC736_3.1	0.17	400.33	200.77	0.518	0.3	0.0485	4.7	0.0248	1.4	58.1	± 0.8	343	± 182
HC736_4.1	0.67	249.88	243.58	1.007	0.3	0.0524	6.0	0.0249	1.8	57.4	± 0.9	196	± 211
HC736_5.1	-0.61	404.14	228.75	0.584	0.5	0.0423	9.9	0.0242	1.4	57.7	± 1.1	372	± 290
HC736_6.1	-0.55	456.69	281.28	0.636	0.2	0.0428	4.5	0.0267	1.3	59.9	± 1.2	-620	± 332
HC736_7.1	-0.23	259.62	171.22	0.681	0.3	0.0453	6.3	0.0248	1.8	57.9	± 0.7	689	± 298
HC736_8.1	0.40	369.35	219.48	0.613	0.5	0.0503	5.1	0.0232	1.6	56.4	± 0.7	52	± 213
HC736_9.1	-0.12	297.52	104.83	0.364	0.4	0.0462	11.6	0.0242	3.5	59.1	± 0.8	31	± 283
HC736_10.1	0.06	621.15	607.63	1.010	0.2	0.0476	3.7	0.0269	1.1	57.6	± 0.7	241	± 135
HC736_11.1	-0.15	200.36	101.30	0.522	0.7	0.0460	7.2	0.0251	2.1	58.4	± 0.7	--	--
HC736_12.1	0.11	444.05	264.36	0.615	1.2	0.0479	5.1	0.0229	1.5	56.2	± 1.1	371	± 203
HC736_13.1	0.18	393.85	223.30	0.585	0.3	0.0486	5.4	0.0241	1.5	58.4	± 0.9	-22	± 212
Sample HC798 (Fine-grained diorite of Bohyeonsan Granitoid)													
HC798_1.1	0.34	508	677	1.378	0.4	0.0497	3.4	0.0303	2.7	54.8	± 0.5	544	± 145
HC798_2.1	-0.08	642	1023	1.644	0.4	0.0464	5.0	0.0312	1.6	56.9	± 1.3	-97	± 158
HC798_3.1	-0.02	501	692	1.426	0.3	0.0469	3.5	0.0304	1.9	57.7	± 0.6	193	± 125
HC798_4.1	-0.25	607	980	1.666	0.4	0.0451	3.2	0.0309	2.6	56.8	± 0.5	-584	± 265
HC798_5.1	0.39	588	1118	1.965	0.4	0.0502	3.1	0.0322	3.0	56.7	± 0.9	-239	± 217
HC798_6.1	-0.31	545	1089	2.064	0.2	0.0446	3.5	0.0290	1.1	55.9	± 0.8	197	± 144
HC798_7.1	0.18	460	617	1.383	0.2	0.0486	3.6	0.0301	2.0	56.2	± 1.1	-422	± 295
HC798_8.1	-0.31	518	715	1.424	0.1	0.0447	3.5	0.0312	2.2	57.4	± 0.8	-145	± 119
HC798_9.1	0.16	650	1059	1.682	0.1	0.0483	3.1	0.0288	3.3	55.3	± 0.7	174	± 90
HC798_10.1	0.41	505	868	1.776	0.3	0.0503	3.5	0.0302	2.6	55.6	± 0.7	469	± 136
HC798_11.1	-0.15	527	622	1.218	0.1	0.0459	3.5	0.0297	1.0	57.2	± 0.8	-243	± 179
HC798_12.1	-0.45	629	889	1.458	0.1	0.0435	3.2	0.0298	2.3	56.4	± 0.5	-353	± 164
HC798_13.1	-0.47	503	745	1.529	0.1	0.0434	3.6	0.0325	1.0	57.4	± 0.9	104	± 137
HC798_14.1	-0.01	567	844	1.538	0.4	0.0470	3.0	0.0293	0.9	56.8	± 0.8	-409	± 226
Sample HC799 (Biotite granite of Bohyeonsan Granitoid)													
HC799_1.1	0.09	68.61	46.12	0.694	1.2	0.0478	7.3	0.0315	9.6	57.0	± 2.3	-589.4	± 890
HC799_2.1	1.30	78.00	54.01	0.715	0.4	0.0574	5.7	0.0276	1.9	53.8	± 1.2	1247.5	± 338
HC799_4.1	0.05	91.61	61.42	0.692	0.4	0.0475	5.7	0.0268	1.7	56.9	± 1.3	75.2	± 137
HC799_5.1	0.21	104.98	65.74	0.646	0.4	0.0487	5.0	0.0292	1.6	55.7	± 0.9	-172.2	± 372
HC799_6.1	-0.17	268.47	254.19	0.978	0.2	0.0458	3.3	0.0276	1.0	56.9	± 1.1	-467.5	± 323
HC799_7.1	-0.45	100.65	69.41	0.712	0.4	0.0436	5.7	0.0263	1.7	55.8	± 0.7	-601.8	± 576
HC799_8.1	0.57	160.94	134.15	0.861	0.3	0.0516	8.0	0.0279	1.3	56.5	± 1.0	-1139.7	± 1091
HC799_9.1	0.08	61.68	53.52	0.896	0.4	0.0477	17.8	0.0292	2.3	57.4	± 1.1	1537.0	± 453
HC799_10.1	0.18	111.53	101.63	0.941	0.6	0.0485	4.8	0.0275	1.5	56.1	± 9.6	1038.1	± 306
HC799_11.1	0.82	147.00	153.38	1.077	0.2	0.0536	3.9	0.0279	1.3	56.0	± 0.6	-283.2	± 476
HC799_12.1	1.09	60.36	38.67	0.661	0.5	0.0557	6.7	0.0275	2.2	55.5	± 2.0	--	--
HC799_13.1	1.42	111.06	68.67	0.638	0.4	0.0583	5.4	0.0254	2.0	54.7	± 2.2	541.7	± 120

Errors are 1- σ ; Pb_c and Pb* indicate common and radiogenic portions, respectively.

(1) Common Pb corrected using measured ^{204}Pb .

(2) Common Pb corrected by assuming $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ - $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$ age-concordance

Ma 사이에 흩어지는 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 연대를 보이는데(표 1), 이는 이 암석이 관입할 때 여러 기존 암층으로부터 들어온 외래결정 저어콘의 연대로 해석된다.

HC736은 북서측 환상암맥에서 나온 유대상 유문암이다. 저어콘 입자는 자형 주상이며 CL 영상은 동심원상 강한 누대구조의 특징을 가지는데, 이는 화

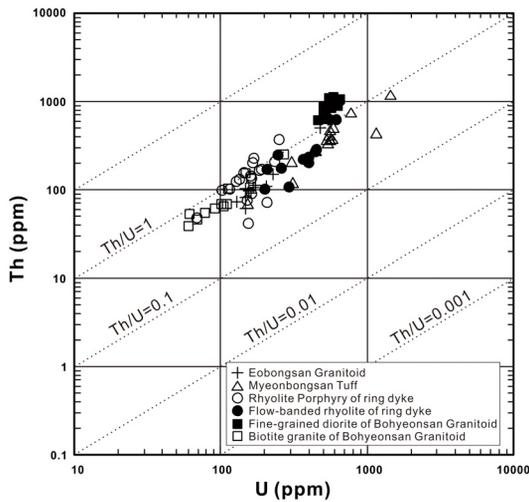


Fig. 5. Correlation diagram showing the proportions of Th to U concentrations (ppm) of the zircons analyzed by SHRIMP.

성성인을 지시한다. 미량원소 Th/U 비는 0.52-1.01 범위를 나타내며(표 1; 그림 5) 이 역시 화성성인을 암시해준다. 13개 분석치는 56.2 ± 1.1 Ma에서 59.9 ± 0.8 Ma 범위의 연대를 가진다(표 1). 콘코디아 그림에서 12개 분석치는 가중평균 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 연대 58.00 ± 0.66 Ma (MSWD=1.5)를 갖는 조화적 군집을 나타내는데(그림 6d), 이는 이 유문암맥의 정치연대로 해석된다.

3.4 보현산화강암질암

HC798은 보현산화강암질암 중에서 세립질 섬록암의 시료이다. 저어콘 입자는 자형이고 주로 주상을 보여주며, CL 영상에서 비교적 균질한 무구조 내부는 희미하게 발광하지만 다소 강하게 발광하는 얇은 누대 외연에 의해 둘러싸인다(그림 4). Th/U 비는 1.22~2.06 범위로 높게 나타나는데(표 1; 그림 5), 이는 역시 내부구조와 마찬가지로 마그마에서 성장한 저어콘을 반영한다. 14개 분석치는 깔끔하게 한정되는

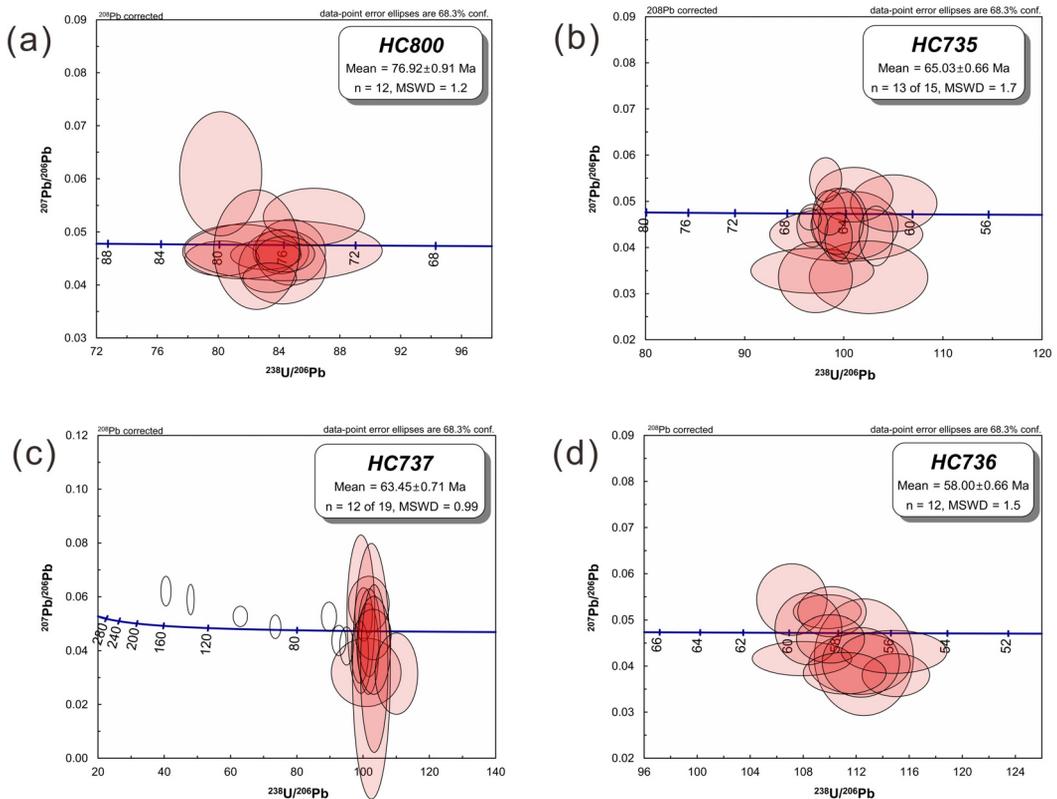


Fig. 6. Concordia diagrams for SHRIMP U-Pb ages of zircons separated from samples (a) HC800, (b) HC735, (c) HC737 and (d) HC736.

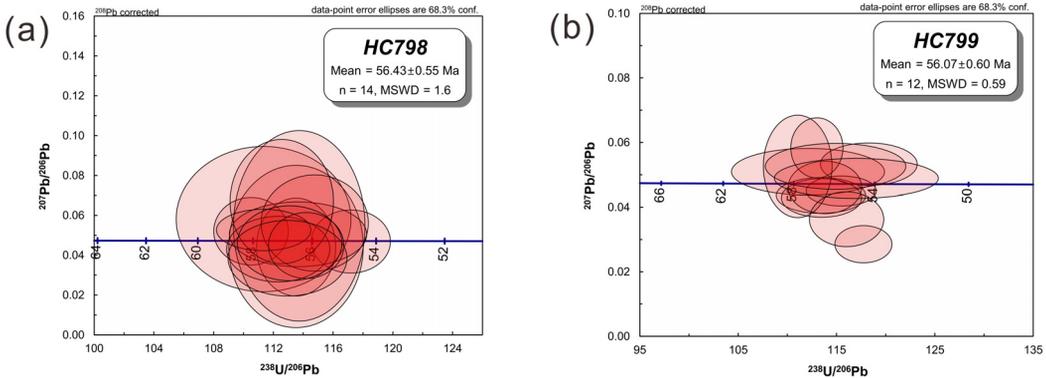


Fig. 7. Concordia diagram for SHRIMP U-Pb ages of zircons separated from samples (a) HC798 and (b) HC799 in the Bohyeonsan Granitoid.

$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 연대 56.43 ± 0.55 Ma (MSWD=1.6)를 보여주며(그림 7a), 이 섬록암의 정치연대로 해석된다.

HC799는 보현산화강암질암에서 나온 중립질 내지 조립질 흑운모 화강암의 시료이다. 저어콘 입자들은 자형이며, CL 영상에서 균질한 무구조 중심부는 희미하게 발광하지만 두꺼운 동심원상 누대 외연은 강하게 발광한다(그림 4). Th/U 비는 0.64~1.08 범위(표 1; 그림 5)로 내부구조와 함께 화성성인을 반영해준다. 13개 분석치는 53.8±1.3 Ma에서 57.4±1.1 Ma 범위의 연대를 가진다(표 1). 콘코디아 그림에서 12개 분석치는 조화적이고 가중평균 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 연대는 56.07 ± 0.60 Ma (MSWD=0.59)이며(그림 7b), 이는 이 화강암의 정치연대로 해석된다.

4. 토 의

경상누층군을 관입한 심성암류는 통상적으로 불국사관입암군으로 묶어서 유천층군의 화산암류보다 후기로 보았지만, 측정된 연대에 의하면 면봉산의 주변 지역에서 두 시기로 나뉜다. 즉 어봉산화강암질암은 화산암류 이전에 하양층군의 퇴적암류만을 관입하였으며 보현산화강암질암은 후기에 화산암류를 관입하였다. 따라서 어봉산암주의 정치시기에 대해 먼저 토의하며, 그 다음에 칼데라 형성시기와 보현산암주의 정치시기를 논의하고 화성과정을 엮어보기로 한다.

4.1 어봉산암주의 정치시기

경상누층군을 관입한 심성암류는 전통적으로 불

국사관입암군으로 묶어서 유천층군 이후에 관입한 것으로 해석하였다. 이에 따라 어봉산화강암질암도 불국사관입암군으로 보고 면봉산응회암을 관입한 것으로 추정하였다(Chang *et al.*, 1977; Hwang and Kim, 1999). 그리고 무포산응회암이 전암 Rb-Sr 연대측정에 의해 63.6 ± 3.4 Ma로 보고된 것에 따라 제3기 심성암류로 보았다(Hwang and Kim, 2006).

어봉산화강암질암은 흑운모 화강암에서 분리한 저어콘들로부터 U-Pb 연대가 76.92 ± 0.91 Ma을 나타낸다. 이 연대는 화강암질 마그마가 퇴적암류를 뚫고 들어오는 관입시기를 암시하기보다 암주상으로 자리잡는 정치시기를 가리키는 것으로 판단된다. 왜냐하면 이 연대는 어봉산암주의 거의 중앙부에서 채취한 시료이기 때문이다. 따라서 공간적으로 생각하면 화강암질 마그마의 정치는 부남암주에서와 같이 전체적으로 연변부에서 먼저 일어났고 점차 중심부로 진행되는 것으로 해석된다.

이 76.92 Ma 연대는 부남암주의 75.75~77.21 Ma 연대치(Hwang *et al.*, 2016)와 일치하는데, 두 암주는 공간적으로 떨어져 있지만 같은 시기에 심성작용이 일어났음을 가리킨다.

4.2 화산암류의 분출시기

면봉산응회암은 SHRIMP 저어콘 U-Pb 측정에 의하면 65.03 ± 0.66 Ma 연대를 나타낸다. 이 연대는 아마도 면봉산응회암의 분출시기를 나타내는 것으로 생각된다. 따라서 면봉산응회암도 백악기가 끝나는 무렵에 속하고 어봉산암주보다 후기의 층서관계를 가진다.

면봉산응회암의 65.03 ± 0.66 Ma 연대는 어봉산화강암질암의 76.92 ± 0.71 Ma 연대보다 매우 젊은 나이를 나타낸다. 두 연대 간의 시간적 간격은 상당히 큰 11.89 Ma의 연대차이를 보여준다. 이 시간적 간격은 어봉산암주가 하양층군 상부의 춘산층(700 m)과 신양동층(100 m)과의 관입 관계를 가지면서 부정합 관계를 가진다고 말할 수 있다. 왜냐하면 어봉산암주가 하양층군의 최상부층인 신양동층을 관입하고 후기의 면봉산응회암과 단층접촉을 하기 때문이다. 이러한 관계는 부남암주가 하양층군의 춘산층을 관입하고 무포산응회암에 덮이는 것(Hwang *et al.*, 2016)과 같은 논리에서 부합된다.

환상암맥의 유문암은 면봉산응회암이 분출되고 칼데라 함몰의 환상단열대를 따라 관입했던 것이다(Hwang and Kim, 1999). SHRIMP 저어콘 U-Pb 측정에 의하면 이 환상암맥의 연대는 동측 유문암맥이 63.45 ± 0.71 Ma이고 북서측 유문암맥이 58.00 ± 0.66 Ma을 나타낸다. 두 연대는 아마도 면봉산응회암이 분출된 후에 칼데라 함몰로 발생한 환상단열대를 따라 순차적으로 관입했음을 나타낸다. 즉 동측 유문암맥은 환상단열대 중에서 동쪽 단열대를 따라 먼저 주입하였으며, 나중에 북서측 유문암맥이 북서쪽 단열대를 따라 주입했던 것이다. 면봉산응회암과 동측 유문암맥 간의 시차는 마그마 주입이 칼데라 함몰시에 즉시 일어나기보다 보현산 마그마의 상승에 따라 기존 환상단열대가 벌어질 때 쉽게 일어났던 것으로 보인다. 유문암맥 간의 주입 시차는 보현산 마그마의 상승할 때 기존 환상단열대의 벌어지는 위치가 시기에 따라 서로 달랐기 때문에 발생한 것으로 해석된다.

4.3 보현산화강암질암의 정치시기

보현산화강암질암은 면봉산응회암을 직접적으로 관입하지 않지만 죽장화산암층을 관입할 뿐만 아니라 환상암맥을 관입하고 있다. 따라서 화성암류 중에서 최후기 관입체라는 것을 알 수 있다. 보현산화강암질암의 흑운모 화강암에서 K-장석의 K-Ar 연대는 52.3 Ma로 측정된 바 있다(Kim *et al.*, 1997). 또한 K-Ar 전암연대는 세립질 섬록암이 약 51.3 Ma로서 보현산암주에서 가장 고기이며, 석영문조섬록암이 약 44.2 Ma이고 흑운모 화강암이 약 40.9 Ma로서 가장 젊다(Hwang and Choi, 2001).

보현산화강암질암은 SHRIMP 저어콘 U-Pb 측정

에 의하면 세립질 섬록암이 56.43 ± 0.55 Ma 연대를 보이고 흑운모 화강암이 56.07 ± 0.50 Ma 연대를 나타낸다. 이 연대는 오차범위 안에서 뚜렷한 차이를 보이지 않지만 세립질 화강암이 흑운모 화강암보다 더 고기인 것으로 짐작된다. 이 연대는 아마도 각 암체의 정치시기를 나타내는 것으로 생각된다. 따라서 보현산화강암질암은 제3기 전엽에 속하고 면봉산 칼데라에 관련된 화산암류보다 후기라는 것을 확인시켜 준다.

4.4 층서관계의 재정립

어봉산화강암질암은 하양층군의 춘산층을 관입하고 면봉산응회암과 환상단층으로 만나지만 풍화물로 덮여 층서관계가 명확하지 않은 채 통상적으로 후자를 관입하는 것으로 여겨져 왔다(Chang *et al.*, 1977; Hwang and Kim, 1999). 더군다나 지금까지 어봉산화강암질암에 대한 정확한 연대를 측정할 바도 없다. 따라서 이 어봉산화강암질암은 기존의 불국사관입암군으로 대비시켰으며 하양층군과 유천층군을 모두 관입하는 것으로 보았다(표 2; Chang *et al.*, 1977; Hwang and Kim, 1999).

그러나 위에서 말한 시간적 간격(11.89 Ma)은 어봉산화강암질암과 면봉산응회암과의 관계가 아마도 난정합을 의미할 수 있는 부정합 관계를 나타낸다. 이 부정합 관계는 지하 심부에 자리잡고 있던 어봉산화강암질암이 지표에 드러날 만큼 침식으로 삭박되고 면봉산응회암이 덮였다는 것을 의미한다. 따라서 이러한 관계는 어봉산화강암질암과 면봉산응회암이 공간적으로 서로 접하지만 시간적으로 백악기 후기에 상당히 큰 시간적 차이를 가지며, 층서적으로 면봉산응회암이 어봉산화강암질암 위에 놓이는 것으로 이 지역에서의 층서를 재정립해야만 한다(표 2). 또한 어봉산화강암질암은 층서적으로 불국사관입암군에 속한다면, 면봉산응회암은 유천층군의 범위를 벗어난다는 것을 의미한다.

면봉산응회암을 포함하여 주왕산 화산지역의 화산암류는 암층 구성원에 의하여 통상적으로 경상분지의 유천층군에 대비하였지만(Hwang and Kim, 2006), 위의 층서관계에 의하면 적어도 경상분지 유천층군 범주를 벗어나기 때문에 일반적인 기대와는 크게 상충되는 결과를 보여준다. 왜냐하면 지품화산암층, 무포산응회암 등의 여러 화산암층들이 면봉산

Table 2. Correlations between previous and present geological sequences, and SHRIMP U-Pb ages in the Cheongsong area.

Previous sequence (Kwon and Lee, 1973; Lee and Hong, 1973; Chang <i>et al.</i> , 1977; Won <i>et al.</i> , 1980)		Present sequence						
Rocks or lithology	Period	Rocks	Formation	SHRIMP age (Ma)	Period	Remarks		
Bohyeonsan Granites Bunam Granites Eobongsan Granites Volcanic rocks	Cretaceous	Plutonic	Bohyeonsan Granitoid	56.07±0.60	Tertiary	this study		
				56.43±0.55				
		Volcanic	Rhyolite	58.00±0.66 63.45±0.71			Cretaceous	Hwang <i>et al.</i> (2017) this study Hwang <i>et al.</i> (2016) Hwang (2017) this study
			Guamsan Tuff	60.1±1.8 63.97±0.94				
			Myeonbongsan Tuff	65.03±0.66				
			Muposan Tuff	67.08±0.96				
			Jipum Volcanics	68.5±1.6				
		Plutonic	Eobongsan Granitoid	76.92±0.91			Cretaceous	Hwang <i>et al.</i> (2016)
			Bunam Granitoid	76.20±0.94 76.64±0.75 75.75±0.72 77.1±1.3 77.21±0.78				

응회암과 유사한 저어콘 U-Pb 연대로 측정되었기 때문이다(Hwang *et al.*, 2016; Hwang, 2017).

4.5 화성과정

이 지역에서 층서는 U-Pb 연대측정치에 따르면 춘산층, 신양동층, 어봉산화강암질암, 죽장화산암층, 면봉산응회암, 환상암맥, 보현산화강암질암 순으로 놓인다(표 2). 그리고 환상암맥은 북동측 유문암맥이 북서측 유문암맥보다 먼저 관입되었다. 보현산화강암질암에서는 세립질 섬록암이 흑운모 화강암보다 먼저 정치되었다.

이 지역에서 화성과정을 엮어보면 다음과 같다. 어봉산 지역에서는 하양층군 퇴적작용이 일어난 후 화산분출이 없이 76.92±0.91 Ma에 화강암질 마그마가 관입하여 어봉산암주를 형성하였다. 그리고 오랜 시간(11.89 Ma)이 지나면서 별다른 화성활동 없이 큰 침식이 일어나면서 어봉산화강암질암이 지표에 노출되기까지 하였다.

이후에 면봉산 지역에서 데사이트질 내지 안산암질 화산활동이 일어나 죽장화산암층을 형성하였으며, 차례로 65.03±0.66 Ma 즈음에 유문암질 마그마의 대규모 분출작용으로 주로 회류응회암을 집적시켜 면봉산응회암을 정치시켰다. 이 대규모 면봉산응회암

의 분출로 인하여 마그마가 일시에 제거됨으로써 마그마챔버의 지붕이 함몰되어 뚜껑문형 면봉산 칼데라가 형성되었다(Hwang and Kim, 1999). 그리고 칼데라의 환상단열대를 따라 잔류 유문암질 마그마가 주입되어 63.45±0.71 Ma에 동측 환상암맥을 형성하였고 다시 58.00±0.66 Ma에 북서측 환상암맥을 형성하였으며, 이들과 함께 중앙화구를 따라 플러그상의 중앙관입체를 형성하였다. 마지막으로 이 칼데라의 남쪽 보현산 지역에서는 화강암질 마그마가 모든 화산암류를 관입하였다. 먼저 암체의 변두리를 따라 56.43±0.55 Ma에 세립질 섬록암이 정치하였고 뒤따라 56.07±0.60 Ma에 흑운모 화강암이 정치하였다.

그러므로 어봉산 지역에서는 아직 심성암으로만 발견되는 단순한 화성과정을 보여주지만, 면봉산 지역에서는 회류응회암-칼데라 함몰-환상암맥-심성암으로 연결되는 하나의 완벽한 화성운회를 거치는 복잡한 화성과정을 나타낸다.

5. 결론

면봉산 칼데라 주변의 화성암류는 어봉산화강암질암, 죽장화산암층, 응회암, 면봉산응회암, 유문암, 보현산화강암질암 순으로 구분된다.

어봉산화강암질암은 하양층군을 관입하고 남동쪽에서 면봉산응회암과 환상단층으로 만나지만 풍화물로 덮여 통상적으로 불국사관입암군으로 취급하여 면봉산응회암을 관입하는 것으로 여겨져 왔다.

SHRIMP를 이용하여 저어콘 U-Pb 연대측정을 실시함으로써 화성암류의 정치시기와 층서관계를 확실하게 하였다. 측정결과에 의하면 어봉산화강암질암은 76.92 ± 0.91 Ma, 면봉산응회암은 65.03 ± 0.66 Ma, 동측 유문암맥은 63.45 ± 0.71 Ma, 북서측 유문암맥은 58.00 ± 0.66 Ma, 보현산화강암질암에서 세립질 섬록암은 56.43 ± 0.55 Ma와 흑운모 화강암은 56.07 ± 0.60 Ma의 정치 혹은 분출 연대를 나타낸다.

이 자료에 의하면 어봉산화강암질암은 면봉산응회암보다 전기이며, 두 암체는 백악기 후엽에 속하지만 약 12 Ma의 시간적 차이와 단층 접촉은 어봉산화강암질암이 침식된 후에 면봉산응회암이 분출했다는 부정합적 층서관계를 암시해준다.

여기서 어봉산화강암질암과 보현산화강암질암은 각각 2차례의 화성윤회의 마지막 사건의 심성암체로 간주된다. 즉 어봉산 지역에서는 아직 심성암으로만 발견되는 불완전한 화성윤회의 단순한 화성과정을 보여주지만, 면봉산 지역에서는 화류응회암-칼데라 함몰-환상암맥-심성암으로 연결되는 하나의 완벽한 화성윤회를 거치는 복잡한 화성과정을 나타낸다.

감사의 글

이 논문은 2017학년도 안동대학교 연구비에 의하여 수행된 연구이다. 연대측정은 한국기초과학지원 연구원의 선도장비 이용자 프로그램에 의한 SHRIMP U-Pb 분석으로 수행되었다. 심사과정 통해 건설적인 제안과 지적으로 논문의 질을 높여주신 익명의 두 심사위원분께 감사드린다. 그림은 암석학 실험실 이소진의 도움으로 제작되었다.

REFERENCES

- Chang, K.H., 1975, Cretaceous stratigraphy of southeast Korea. *Journal of Geological Society of Korea*, 11, 1-23.
- Chang, K.H., 1977, Late Mesozoic stratigraphy, sedimentation and tectonics of southeastern Korea. *Journal of Geological Society of Korea*, 13, 76-90 (in Korean with English abstract).
- Chang, K.H., 1985, *Geology of Korea*. Mineumsa Publishing Co. 270 p (in Korean).
- Chang, K.H., Ko, I.S., Lee, J.Y. and Kim, S.W., 1977, Explanatory text of the geological map of Gusandong Sheet. Korea Research Institute of Geoscience and Mineral Resources, 25 p.
- Hartman, L.A., Leite, J.A.D., Silva, L.C., Remus, M.V.D., McNaughton, N.J., Groves, D.I., Fletcher, I.R., Santos, J.O.S. and Vasconcellos, M.A.Z., 2000, Advances in SHRIMP geochronology and their impact on understanding the tectonic and metallogenic evolution of southern Brazil. *Australian Journal of Earth Sciences*, 47, 829-844.
- Hwang, S.K., 2017, SHRIMP U-Pb Dating and Volcanic History of the Jipum Volcanics, Western Yeongdeok, Korea. *Journal of Petrological Society of Korea*, 26, in press (in Korean with English abstract).
- Hwang, S.K. and Choi, B.Y., 2001, Lithofacies and igneous processes of plutonic rocks in Bohyeonsan area, northern Yeongcheon. *Journal of Geological Society of Korea*, 37, 1-20 (in Korean with English abstract).
- Hwang, S.K., Jo, I.H. and Yi, K., 2016, SHRIMP Zircon U-Pb dating and stratigraphical relationship of the Bunam Stock and Muposan Tuff, Cheongsong. *Journal of Geological Society of Korea*, 52, 405-419 (in Korean with English abstract).
- Hwang, S.K., Jo, I.H. and Yi, K., 2017, SHRIMP U-Pb Dating and Volcanic Processes of the Volcanic Rocks in the Guamsan Caldera, Cheongsong, Korea. *Economic and Environmental Geology*, 50, in press (in Korean with English abstract).
- Hwang, S.K. and Kim, S.H., 2006, Magmatic processes of the Muposan Tuff, southern and eastern Cheongsong, Korea. *Journal of Geological Society of Korea*, 42, 253-271 (in Korean with English abstract).
- Hwang, S.K. and Kim, S.-K., 1999, Type and Evolution in the Myeonbongsan Caldera, Southern Cheongsong. *Journal of Petrological Society of Korea*, 8, 171-182 (in Korean with English abstract).
- Ireland, T.R. and Williams, I.S., 2003, Considerations in zircon geochronology by SIMS. In: Hanchar, J.M. and Hoskin, P.W.O. (eds.), *Zircon: Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, Mineralogical Society of America, 53, 215-241.
- Jwa, Y.-J. and Kim, K.-K., 2000, Petrology of host granites and enclaves in the Bohyeonsan area. *Journal of Petrological Society of Korea*, 9, 187-203 (in Korean with English abstract).
- Kim, S.J., Lee, H.K. and Itaya, T., 1997, K-Ar ages and geochemistry for granitic and volcanic rocks in the Euseong and Shimryeong area, Korea. *Economic and Environmental Geology*, 30, 603-612.

- Kwon, Y.I. and Lee, I.K., 1973, Explanatory text of the geological map of Dopyeong Sheet. Geological and Mineral Institute of Korea, 9 p.
- Lee, H.K. and Hong, S.H., 1973, Explanatory text of the geological map of Dopyeong Sheet. Geological and Mineral Institute of Korea, 23 p.
- Ludwig, K.R., 2008, SQUID 2: A User's Manual. Berkeley, CA, Berkeley Geochronology Center Special Publication, No 2, 100 p.
- Vavra, G., Schmid, R. and Gebauer, D., 1999, Internal morphology, habit and U-Th-Pb microanalysis of amphibolite-to-granulite facies zircons: Geochronology of the Ivrea Zone (Southern Alps). *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 134, 380-404.
- Won, J.K., Yoon, S. and So, C.S., 1980, Explanatory text of the geological map of Sinryeong Sheet. Korea Research Institute of Geoscience and Mineral Resources, 21 p.
- Williams, I.S., 1998, U-Th-Pb geochronology by ion microprobe. In: McKibben, M.A., Shanks, W.C.P., and Ridley, W.I. (eds.), *Applications of microanalytical techniques to understanding mineralizing processes. Reviews in Economic Geology*, 7, Society of Economic Geologists, 1-35.
-

Received : September 17, 2017

Revised : December 3, 2017

Accepted : December 13, 2017