

## 군위군 동부 고로화산암복합체의 SHRIMP 저어콘 U-Pb 연령과 칼데라 형성과정

황상구<sup>1,†</sup> · 안웅산<sup>2</sup> · 윤운상<sup>3</sup> · 이기욱<sup>4</sup> · 고경태<sup>5</sup>

<sup>1</sup>안동대학교 지구환경과학과

<sup>2</sup>제주특별자치도 세계유산본부

<sup>3</sup>주식회사 넥스지오

<sup>4</sup>한국기초과학지원연구원 환경분석연구부

<sup>5</sup>한국지질자원연구원 국토지질연구본부

### SHRIMP zircon U-Pb ages and Caldera formation process of the Goro volcanic complex in Eastern Gunwi, Korea

Sang Koo Hwang<sup>1,†</sup> · Ung San Ahn<sup>2</sup> · Woon Sang Yoon<sup>3</sup> · Keewook Yi<sup>4</sup> · Kyoungtae Ko<sup>5</sup>

<sup>1</sup>Department of Earth and Environmental Science, Andong National University, Andong 36729, Republic of Korea

<sup>2</sup>World Heritage Office, Jeju Special Self-governing Provincial Government, Jeju 63341, Republic of Korea

<sup>3</sup>NexGeo Inc. Co., Seoul 05703, Republic of Korea

<sup>4</sup>Korea Basic Science Institute, Ochang 28119, Republic of Korea

<sup>5</sup>Korea Institute of Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources, Daejeon 34132, Republic of Korea

#### 요 약

군위군 동부에 위치한 군위댐 주변에는 화산(華山) 칼데라가 백악기 퇴적암류 내에 존재한다. 이 칼데라는 규장질 화산암류와 연관되는 칼데라 중의 하나로서 칼데라와 화산과정을 정확하게 엮을 수 있는 점에서 매우 중요하다. 칼데라 주변에서 화성암류는 어봉산암주, 선암산옹회암, 고로화산암복합체와 기타 심성암 순으로 구분된다. 고로화산암복합체는 대부분 유문암질 회류옹회암으로 구성되지만, 안산암질 옹회암 및 용암의 협재와 산출상태에 의해 하부 안산암질 옹회암 및 용암, 하부 유문암질 옹회암, 옹회암맥, 상부 안산암질 용암, 상부 유문암질 옹회암 및 각력암, 각력암 플리그와 유문암맥 순으로 세분된다. 이들에 대한 SHRIMP 저어콘 U-Pb 연령측정은 화성암류의 분출 혹은 관입시기와 층서관계를 확실하게 해준다. 측정 결과는 고로화산암복합체의 하부 유문암질 옹회암에서  $64.3 \pm 0.5$  Ma, 옹회암맥에서  $64.7 \pm 0.5$  Ma, 상부 유문암질 옹회암에서  $63.9 \pm 0.5$  Ma의 분출 혹은 관입 연령을, 화강암맥에서  $63.6 \pm 0.6$  Ma의 관입 연령을 구하였다. 따라서 이 모든 사건은 고원기 팔레오세 다니아절에 일어났다. 이들 자료는 옹회암맥이 일차의 대규모 회류 분출에 따른 하부 유문암질 옹회암으로 인하여 발생한 외측 환상단층을 통해 관입되었고, 화강암맥은 유문암맥과 더불어 2차의 대규모 회류 분출에 따른 상부 유문암질 옹회암과 각력암을 뒤따라 발생한 내측 환상단열대를 통해 관입된 마지막 관입체임을 지지한다. 화산 칼데라에서 내측 환상단열대는 선기 칼데라 내에 동심원상으로 형성된 후기의 작은 칼데라를 의미한다. 그러므로 화산 칼데라는 분출-함몰-환상암맥 형성과정을 2회 겪은 동지상 칼데라를 나타낸다.

**주요어:** 군위댐, 화산 칼데라, SHRIMP 연대측정, 옹회암맥, 환상암맥

**ABSTRACT:** Around the Gunwi Dam in the eastern Gunwi area, the Hwasan caldera appears within Cretaceous sedimentary rocks. The caldera is associated with felsic volcanic rocks, and is important for unraveling the genetic relationship between the caldera and volcanic processes. Igneous rocks around the caldera include Eobongsan Stock, Seonamsan Tuff, Goro Volcanic Complex and other plutonic rocks in stratigraphic order. The Goro Volcanic

<sup>†</sup>Corresponding author: +82-54-820-5469, E-mail: [hwangsk@anu.ac.kr](mailto:hwangsk@anu.ac.kr)

Complex is almost composed of ash-flow tuffs, but is subdivided into lower andesitic tuffs and lavas, lower rhyolitic tuffs, tuff dikes, upper andesitic lavas, upper rhyolitic tuffs and breccias, breccia plug and rhyolite dikes on the basis of the intercalation and occurrence mode of andesitic tuffs and/or lavas. Their eruption or intrusion timing and stratigraphic relationship can be confirmed by the SHRIMP zircon U-Pb dating. The dating yielded the eruption or intrusion ages of  $64.3 \pm 0.5$  Ma for the lower rhyolitic tuffs,  $64.7 \pm 0.5$  Ma for the tuff dikes and  $63.9 \pm 0.5$  Ma for the upper rhyolitic tuffs and breccias in the Goro Volcanic Complex, and an intrusion age of  $63.6 \pm 0.6$  Ma for granitic dykes. All of the igneous activities occurred in the Danian of the Paleocene, Paleogene. These data suggest that the tuff dikes were intruded along the outer ring faults in association with subsidence of the lower rhyolitic tuffs that formed from primary voluminous ash-flow eruptions, and further indicate that the rhyolite and granite dikes were finally intruded through the inner ring fractures that resulted from secondary large eruptions of the upper rhyolitic tuffs and breccias. The inner ring fracture zone in the Hwasan caldera thus represents a small caldera developing concentrically in the preexisting one. Therefore, the Hwasan caldera is a nested caldera with two cycles of pyroclastic flow-caldera collapse-ring intrusion.

**Key words:** Gunwi Dam, Hwasan caldera, SHRIMP dating, tuff dike, ring dike

## 1. 서 언

한반도에서 백악기 및 고원기 화산암체는 환상복합체(ring complex)로 여러 군데 존재하는데 모두 화산활동에 의한 환상암맥(ring dike)을 갖추고 있으며, 이를 함몰체라 칭했던 경우도 있고(Cha and Yun, 1988) 혹은 칼데라로 불렀던 경우도 있다. 한반도에서 관찰되는 화산 함몰체 각각에 대한 형성 원인과 과정에 관해서는 연구가 아직 미진한 편이다. 화산에서 형성되는 지질 구조중 하나인 환상복합체는 화산-심성 침하계에 속하는 것으로 칼데라와 마그마 챔버 사이에 지반침하로 형성된 모든 지질학적 구성 요소를 말하는 것이다(Shannon, 1988). 여기에는 칼데라와 마그마 챔버 사이의 환상단열대, 환상암맥, 콜드론, 환상단층이 포함된다(e.g., Turner, 1963; Smith and Bailey, 1968; Walker, 1975; Oftedahl, 1978; Dodge, 1979; Lipman, 1984).

칼데라는 원형의 화산 저지로, 화구의 수배 이상 직경을 가지고, 그 아래 마그마챔버로 지붕 함몰에 의해 형성된 것을 말한다(Lipman, 2000; Cole *et al.*, 2005). 다량의 마그마 분출로 인해 마그마챔버의 압력이 낮아지면 화구를 중심으로 생긴 환상단열대를 따라 원통상 블록이 함몰되고, 환상단열대를 따라 마그마가 유입되며 환상암맥이 형성되기도 한다. 콜드론(cauldron)은 마그마챔버 위에서 술 모양으로 갈라진 블록이 챔버 내로의 침하 결과로 형성된 것이다(Williams and McBirney, 1979; Komuro, 1987). 이러한 블록의 침하는 마그마 분출이 아니라라도 지하에서 마그마의 퇴각으로 일어날 수 있다(Billings,

1972; Myers, 1975). 마그마의 정수압이 모암의 정암압보다 작다면, 이때도 지하에서 단열대가 얽어진 술 모양으로 형성되어 이 블록이 마그마 속으로 내려앉고 단열대로 마그마가 채워짐으로써 환상암맥이 함께 형성된다(Clough *et al.*, 1909; Anderson, 1936; Billings, 1972; Myers, 1975). 환상암맥은 평면에서 원상, 계란상, 다각상 혹은 호상일 수 있는 부조화적 관입체이며 거의 수직에 가깝게 외측경사를 나타내는 접촉부를 가진다. 암맥 두께는 다양하나 몇 km까지 달할 수도 있다. 암상은 일반적으로 구상질이며 냉각 구조는 보여주지 않는다. 환상복합체는 원추암상(cone sheet) 혹은/및 환상암맥을 포함하는 관입복합체를 기재하는데 사용되는 일반적인 용어이지만, 이 용어는 평면도에서 원상, 계란상, 다각상 혹은 호상 관입체를 가지는 어떤 관입복합체를 기재하기 위해 느슨하게 사용될 수도 있다. 환상복합체는 칼데라 아래에 놓이고 심성암체 위에 위치한다(e.g., Williams, 1941; Billings, 1945; Smith and Bailey, 1968; Bussell *et al.*, 1976; Oftedahl, 1978; Bonin, 1986).

백악기 경상분지 중 하나인 의성소분지에도 이전부터 6개의 화산암체를 중심으로 환상암맥이 포함된 환상복합체와 함몰체를 중심으로 화산체의 존재가 보고되었다(Chang, 1978; Won *et al.*, 1980; Cha and Yun, 1988; Hwang and Kim, 1999; Hwang, 2002). 이후 이 함몰체들에 대한 연구 결과에 의하면 함몰체는 그 원인이 칼데라 함몰(caldera collapse)에 있다고 결론 짓고 그 함몰과정을 엮어낸 바 있다(Cha and Yun, 1988). 따라서 이 함몰체의 형성 원인이

콜드론 침하(cauldron subsidence)에 의하기보다 칼데라 함몰에 있다고 밝혀졌다면 함몰체로 부르기보다 칼데라로 하는 것이 더 옳은 선택이고 현장감을 더해준다.

경상북도 군위군의 동부에 위치하는 군위댐 주변에는 화산(華山) 칼데라가 백악기 퇴적암 지층들 사이에 존재한다. 이 칼데라는 의성소분지의 규장질 화산암류의 분출과 연관되어 있으며, 원통형(cylindrical), 하향자루형(down-sagging), 뚜껑문형(trap-door)와 둥지형(nested) 칼데라 등의 구조적 형태와 그 형성과정을 정확하게 엮을 수 있는 점에서 매우 중요하다. 화산 칼데라는 군위군 고로면을 중심으로 하여 거의 원형의 함몰구조로 나타나며 그 중앙부에 두꺼운 회류응회암(ash-flow tuff)과 더불어 여러 암상의 화산암류가 분포하고 있다(그림 1). 화산 지역의 칼데라 함몰로 인하여 만들어진 다양한 지질구조는 이미 연구되었지만(Yun, 1988), 세부적인 화산층서 확립과 연령측정 연구는 이뤄지지 못하였다. 따라서 2003년 군위댐 타당성 조사를 하면서 이 지역 화산암류에 대해 중점적으로 조사한 결과 정확한 화

산층서를 수립하게 되었고, 최근에 이 암석들로부터 저어콘을 분리하여 SHRIMP U-Pb 연령측정을 수행할 수 있었다. 따라서 세부적인 화산암 층서조사 결과와 SHRIMP 연령측정 결과를 엮어 최종적으로 환상 함몰구조에 대한 형성과정에 대해서 논해보고자 한다.

## 2. 지질개요

화산 칼데라는 의성소분지의 의성과 영천 사이에서 인식되는 3개의 칼데라 중에서 가장 남동쪽에 위치한다. 이 칼데라는 백악기 말기에 형성된 화산암류 아래의 천부에 정치된 심성암체 위에 형성된 것으로 해석된다(Yun, 1988). 칼데라 주변 일대의 지질은 백악기의 하양층군 퇴적암류, 화산암류, 그리고 심성암류로 구성된다. 하양층군 퇴적암류는 하부로부터 후평동층, 점곡층, 사곡층, 구산동응회암, 춘산층(혹은 반야월층)과 신양동층(혹은 화산층)으로 구성되고 화산암체에 가까워질수록 젊어지는 경향이이다(그림 1).

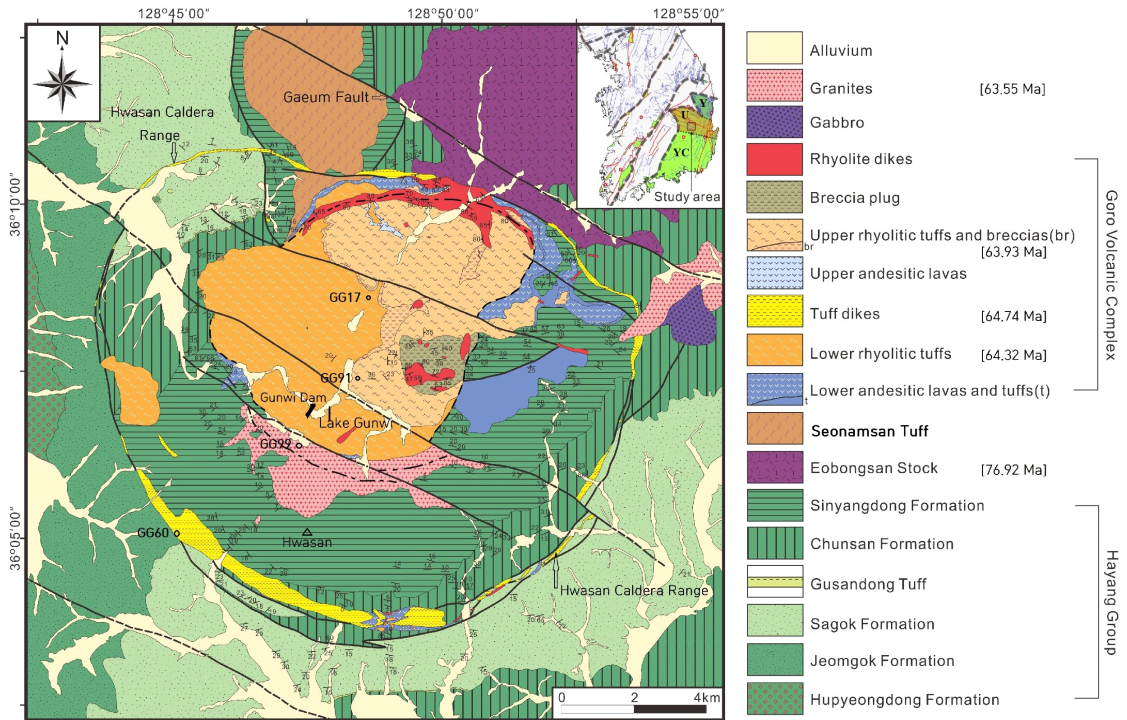


Fig. 1. Geological map around the Hwasan caldera, showing locality of samples for the SHRIMP U-Pb zircon dating. Index map shows the range of Yeongyang (Y), Uiseong (U) and Yucheon (YC) sub-basins in the Kyeongsang Basin.

화산암류는 선암산응회암과 고로화산암복합체로 구분된다. 고로화산암복합체는 대부분 유문암질 응회암층으로 구성되는데, 이 유문암질 응회암은 대부분 회류응회암(ash-flow tuff)으로 구성되고 그 사이에 강하응회암(fallout tuff)과 안산암질 응회암 및 용암이 협재된다. 따라서 고로화산암복합체는 하부로부터 하부 안산암질 응회암 및 용암, 하부 유문암질 응회암, 응회암맥, 상부 안산암질 용암, 상부 유문암질 응회암 및 각력암, 각력암 플러그와 유문암맥 순으로 세분된다(그림 1). 응회암맥과 유문암맥은 칼데라 단열대를 따라 정치한 관입체로서 마그마 챔버로 연결되는 화산 뿌리이고 각력암 플러그는 중앙 화구를 충전한 화산 잔류물이다.

심성암류는 암상에 따라 어봉산암주, 반려암과 화강암으로 구분된다. 어봉산암주는 구산동도폭에서 석영몬조니암, 화강섬록암, 화강섬록반암 및 안산암질 암으로 기재하였고(Chang *et al.*, 1977), 신령도폭에서 흑운모 화강암으로 기재하였다(Won *et al.*, 1980). 그러나 이 암주는 대부분 흑운모 화강암으로 구성되며, 암회색의 고철질 미립상 포유체(mafic microgranular enclave)들이 곳곳에 산재하여 마치 섬록암질 각력암과 같은 혼화(mingling) 양상을 나타낸다(그림 2a). 이중 흑운모 화강암으로부터 구한 SHRIMP 저어콘 U-Pb 연령( $76.9 \pm 0.9$  Ma)에 의하면 암주는 주변의 퇴적암류 퇴적시기와 화산암류 분출시기 사이에 관입 정치한 것으로 판단된다(Hwang *et al.*, 2017).

### 3. 칼데라 화산암류의 세부 지질

주요 연구대상인 화산 칼데라 일대에 분포하는 화산암류는 크게 선암산응회암, 고로화산암복합체로 구성된다. 이 중 고로화산암복합체는 칼데라 내부에 분포하는 화산암류를 총칭하는 것이다.

#### 3.1 선암산응회암

선암산응회암은 칼데라 외곽 북부에 대부분 분포하고 내부에도 소규모로 분포하며 신양동층을 부정합으로 피복하고 있다(그림 1). 이 응회암은 대부분 유문테사이트질 회류응회암이고 상부로 가면서 용결도가 커지고 용결엽리의 발달이 쉽게 관찰된다(그림 2b).

본암은 회백색을 띠며 신선한 부분은 규장암으로

오인될 정도로 치밀해 보이며 풍화된 표면은 화성쇄설조직을 잘 보여준다. 본 응회암은 크게 암편, 기질, 반정으로 구성되어 있다. 암편은 주로 유백색을 나타내고 기질은 담회색 내지 녹회색을 띤다. 암편은 유문암이 주를 이루고 그 외에 이질암과 현무암 암편도 존재한다. 반정은 사장석, 석영과 알칼리장석이 포함되며 암편이 적은 곳에서 쉽게 인지된다. 본암은 담회색 내지 담갈색을 띠는 경우에 루페를 통해 석영 반정이 식별되지만 회색 내지 녹회색을 띠는 경우에 석영 반정의 식별이 맨눈으로 곤란한 경우가 대부분이다. 본암은 하부에서 용결엽리가 발달되지 않지만 상부에서 평면화된 부석(fiamme)의 배열에 의한 완배열상 석리(eutaxitic fabric)를 나타내며 이로부터 용결엽리를 인지할 수 있다(그림 2b).

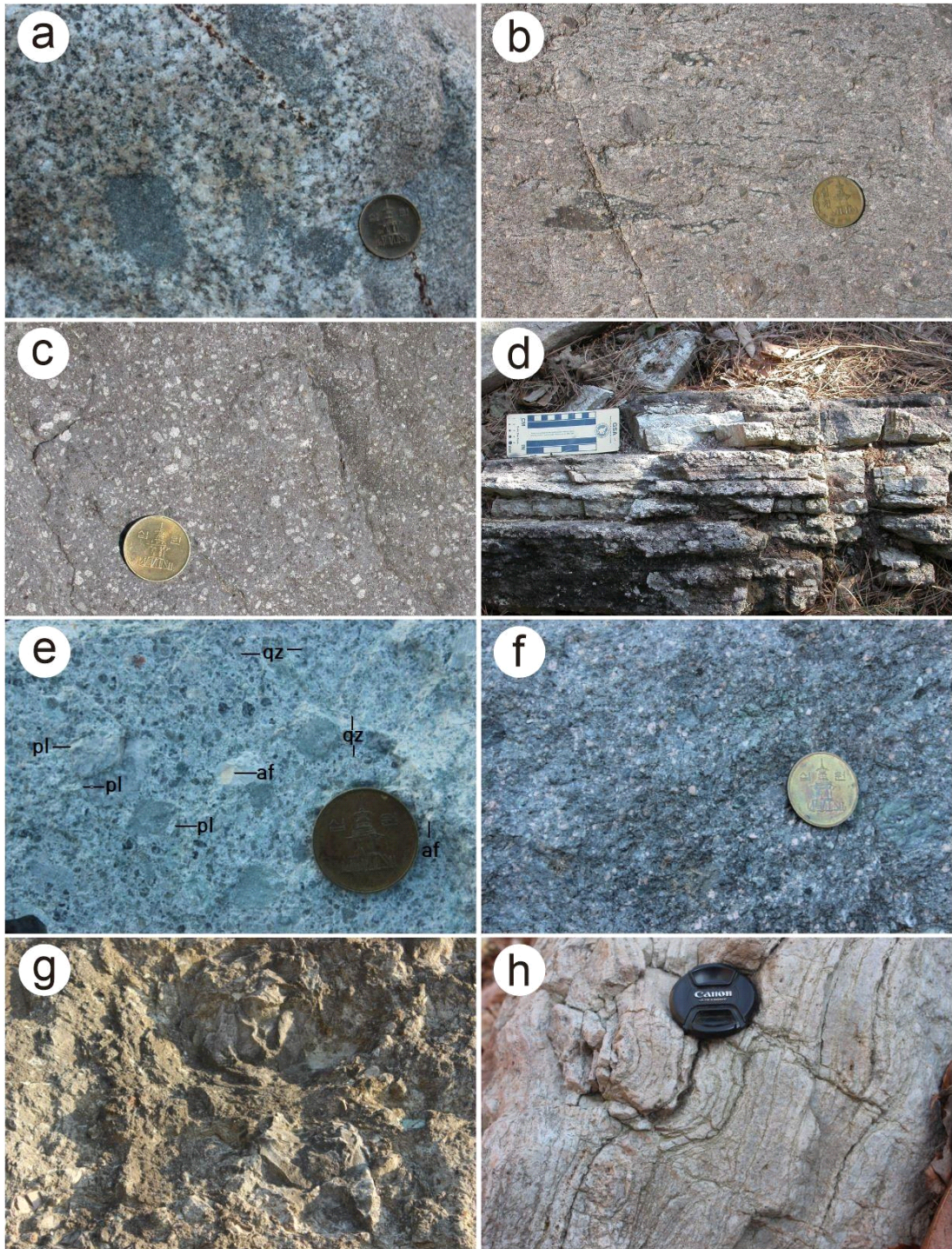
### 3.2 고로화산암복합체

고로화산암복합체는 칼데라 내에서 선암산응회암 위에 정합적으로 놓인다. 이 복합체는 대부분 유문암질 회류응회암으로 구성되지만 산출상태에 따라서 세부적으로는 하부 안산암질 응회암 및 용암, 하부 유문암질 응회암, 응회암맥, 상부 안산암질 용암, 상부 유문암질 응회암 및 각력암, 각력암 플러그와 유문암맥으로 구분할 수 있다.

#### 3.2.1 하부 안산암질 용암 및 응회암

이 암층은 대부분 칼데라 북부에 동서 및 남북 방향으로 분포되며, 선암산응회암 위에 정합적으로 놓이고 하부 회류응회암에 의해 정합적으로 덮인다(그림 1). 대부분 안산암질의 용암으로 구성되나 하부에 얇은 응회암이 협재된다. 이는 초기에 폭발성 분출과 용암분류(lava effusion)가 반복되다가 후기에 용암분류 위주로 진행되었음을 나타낸다.

용암 자체는 암록색 내지 녹회색을 띠며 자형의 사장석 반정을 다량 함유하는 반상조직을 나타냄이 특징이다. 이들 반정은 평균  $2 \times 3$  mm인 것이 가장 흔하고(최대 5 mm) 이들보다 작은  $1 \times 2$  mm인 것도 종종 관찰된다(그림 2c). 이외에 1 mm 이내의 휘석 혹은 각섬석 반정도 관찰된다. 용암류(lava flow)로서 상부 표면에 행인(amygdule)과 적갈색으로 산화된 곳도 발견된다. 이 용암은 칼데라 북측 경계부에서 방위가 EW,  $60 \sim 80^\circ$ S 정도이며, 두께는 동쪽에서 최고 약 350 m 정도이고 서쪽으로 가면서 20 m 이



**Fig. 2.** Outcrop photographs showing representative lithology of igneous rocks in the study area. (a) Mingling part in the Eobongsan Stock; (b) Welding foliation in ash-flow tuff of the Seonamsan Tuff; (c) Porphyritic texture in the lower andesitic lavas; (d) Fallout tuff in the lower rhyolitic tuffs; (e) Ash-flow tuff in the lower rhyolitic tuffs; (f) Ash-flow tuff in the upper rhyolitic tuffs and breccias; (g) Fallback breccia in the central breccia plug; (h) Subvertical flow foliation in the ring rhyolite dike intruding along the inner ring fractures.

내로 얇아진다.

### 3.2.2 하부 유문암질 응회암

이 응회암은 주로 칼데라 내부의 서부와 중서부에 분포하며(그림 1), 하부의 얇은 강하응회암과 상부의 회류응회암으로 구성된다. 강하응회암은 칼데라 내부의 북부에 소규모로 노출되며, 모두 하부 안산암질 용암 위에 놓이고 회류응회암에 의해 덮인다. 두께는 2~10 m로서 얇다. 이 강하응회암층은 응회암과 라필리응회암으로 구성되며 회백색 혹은 담회색으로서 층리가 잘 발달되고 중·세립질로서 분급이 양호하다(그림 2d).

회류응회암은 칼데라 내부의 중서부에 넓게 분포하며, 하부 안산암질 용암 혹은 신양동층 위에 놓이고 상부 안산암질 용암, 상부 유문암질 응회암에 의해 덮인다. 그리고 화강암이 관입하고 있다(그림 1). 이 응회암층은 여러 회류단위로 구성되며 수 m 두께의 강하응회암을 두 차례 협재한다. 두께는 최고 약 500 m 정도이지만 북동쪽으로 가면서 얇아지는 경향이다.

회류응회암은 담회색 내지 청록색을 띠고 주로 석영과 사장석 반정과 소량의 알칼리장석 반정을 함유한다(그림 2e). 반정은 크기가 2~4 mm이고 9~20%를 차지하기 때문에, 이 응회암은 결정비율이 높은 파리질응회암(crystal-rich vitric tuff)으로, SiO<sub>2</sub> 함량이 67~73 wt.%로 매우 높기 때문에 유문암질 응회암으로 분류할 수 있다(Yun, 1988). 그러나 육안 관찰에서 이 암석은 분급이 불량하고 대부분 괴상을 나타내며 석영과 사장석 반정이 현저하므로 석영반암으로 오인하기 쉽다. 이들은 곳에 따라 렌즈 모양으로 편평화된 부석을 산출한다. 따라서 지화학 분석, 육안관찰과 암석현미경 관찰을 활용하여 종합적으로 판단해 보면 이 암층은 유체성이 적은 회류에 의해 형성된 용결된 응회암으로 판단된다.

### 3.2.3 응회암맥

응회암맥은 환상단층을 따라 여러 곳에서 원형의 환상 관입체로 노출되며 화산 칼데라의 외측 경계부를 이루고 있다. 기존 연구자들은 야외 관찰을 근거로 화강반암(Chang, 1978) 또는 석영반암(Won *et al.*, 1980)으로 기재하였지만, 반정 외에 암편과 부석편을 함유하는 화성쇄설성 조직을 나타내기 때문에 결

정이 풍부한 유문암질 응회암을 나타낸다. 환상암맥의 노출 규모는 화산 칼데라 남부에서 노고산-혈암산-조림산으로 이어지는 최대 폭이 약 500 m이며 그 연장이 약 16 km에 달한다.

이 암맥은 결정의 비율이 높은 유문암질 응회암이지만, 국부적으로 안산암을 포획하며 동질의 응회암편을 드물게 수반하고 부석편도 포함한다. 퇴적암과의 남측 접촉부는 환상단층으로 인해 부서진 세일편으로 주로 구성된 단층각력암을 나타내기도 한다. 응회암맥에 포함된 안산암편은 하부 안산암질 용암으로부터 기원했을 것으로 판단된다. 본암은 산출 위치에 따라서 중심부와 연변부에 따라 암편의 구성비 차이가 심한 편이다.

암편의 크기는 대개 2~4 cm이지만 관입 접촉부에서는 1~2 cm로 작아진다. 그러나 세일 각력암을 형성한 접촉부에서는 5~15 cm로 훨씬 더 커지고 30 cm 이상에 달하는 것도 있다. 암편의 크기가 접촉부에서 작아지는 것은 이곳을 따라 함몰이 연속되었음을 의미한다. 암편의 모양은 세일편이 각상 내지 아각상이고 응회암편과 안산암편이 아원상 내지 원상을 나타낸다. 기질은 미세한 화산회와 석영, 사장석, 알칼리장석, 흑운모 반정으로 구성되며, 반정 함량은 대략 25% 정도로 많은 편이다.

이 응회암맥의 형성과정은 다음과 같이 설명할 수 있다. 고로화산암층의 회류응회암이 대량 분출됨에 따라 환상단열대를 따라 지각의 함몰이 발생했다. 이후 이 함몰체가 마그마챔버에 압력을 가함으로써 마그마가 이 단열대의 환상단열을 따라 분출되어 환상암맥이 형성되었다.

### 3.2.4 상부 안산암질 용암

이 용암층은 칼데라 내부의 중북부 계곡부에 소규모로 노출된다(그림 1). 이 용암층은 하부 유문암질 응회암 위에 놓이고 상부 유문암질 각력암 아래에 놓인다. 이 용암은 회색 내지 암녹색을 띠고 상부 표면에서는 암갈색을 띠는 일도 있으며 대체로 육안으로 쉽게 반정이 관찰되지 않는다. 그러나 드물지만 매우 작은 사장석 미정들이 관찰되는 곳도 있다.

### 3.2.5 상부 유문암질 응회암 및 각력암

이 암층은 칼데라 내부의 중앙부와 북부에 분포하며, 하부 유문암질 응회암 위에 놓이고 각력암 플

러그에 의해 관입된다(그림 1). 이들은 하부의 각력암과 상부의 회류응회암으로 구성된다.

하부의 각력암은 주로 칼데라의 중앙부에서 상부와 하부 유문암질 응회암 사이의 경계부를 따라 노출된다(그림 1). 두께는 암체의 중앙부에서 100 m 이상으로 두껍지만 북부로 가면서 약 30 m로 얇아지고 결국 수 m 이하로 얇아진다. 입도 분류에 따른 암상은 암체의 중앙부에서 각력암 내지 응회각력암에 해당하지만, 가장자리로 갈수록 라필리응회암에서 응회암으로 변화한다. 이러한 입도 변화는 두께 변화와 더불어 상부 유문암질 응회암과 함께 산출되는 각력암의 중앙부가 칼데라의 중심부임을 의미한다. 응회암에 해당하는 부분은 층리가 잘 발달되고 분급이 양호하며 여러 층준에서 작은 누적라필리를 함유한다. 라필리응회암 부분은 층리가 미약하고 상향세립화되는 점이층리의 형태가 나타난다. 따라서 각력암 부분은 화쇄류가 이동할 때 무거운 암괴들이 화구 근처에 밀집하여 형성된 처진 응회각력암(lag-fall tuff breccia)에 속한다.

상부의 회류응회암은 칼데라 중앙부에서 각력암 플러그가 관입하고 있으며, 북부에서 유문암맥이 관입하고 있다(그림 1). 이 암층은 지역에 따라 암편의 함량이 달라서 여러 회류단위로 구성된 것으로 보이나 회류 단위 사이에서 예상할 수 있는 강하응회암은 발견되지 않았다. 두께는 암체의 동쪽에서 약 400 m 정도이지만 서쪽에서 300 m 이하로 얇아진다. 이 회류응회암은 담황색 내지 회색을 띤다. 반정은 주로 석영과 알칼리장석이지만 일부 사장석 반정도 관찰된다. 반정 크기는 3~5 mm이고 함유량이 34~39% 정도이기 때문에 결정질응회암(crystal tuff)으로 분류할 수 있다(그림 2f; Yun, 1988). 화학조성도 SiO<sub>2</sub>가 67~73 wt.% 범위에 속하므로 유문암에 속한다(Yun, 1988). 이 결정응회암은 육안관찰에서 층리가 없는 괴상이기 때문에 화강반암처럼 보이기도 한다. 드물긴 하지만 편평화된 부석이 관찰되기 때문에 용결되었음을 인지할 수 있다. 결론적으로, 이 응회암은 유체성이 매우 적은 회류에 의해 형성된 용결 응회암으로 볼 수 있다.

### 3.2.6 각력암 플러그

각력암 플러그는 회귀 응회각력암으로 구성되어 있으며, 이는 본역 중앙부에 거의 원형으로 분포되

며 하위의 신양동층과 상부 회류응회암을 관입한 양상으로 나타난다. 또한 곳곳에서 유문암맥에 의해 관입되어 있다(그림 1).

이 플러그는 대부분 유문암질 화성쇄설암으로 구성되며 이 암석에 유문암, 안산암, 세일과 응회암의 암괴들이 포함되어 있다. 이 암괴들은 직경이 보통 10~30 cm이고 간혹 2 m 이상인 것도 있다. 입도에 따른 암상은 각력암 내지 응회각력암에 속하고 점이적으로 라필리응회암으로 변하며 내부적으로 매우 불규칙하게 혼재되어 있다(그림 2g). 기질은 회백색 내지 회색의 화산회로 구성된다. 암괴를 제외한 기질부의 암상은 라필리응회암과 유사하며 층리 등이 관찰되지는 않는다. 이 암상은 측방으로 연속성이 좋지 않고 수직으로는 상당히 두꺼운 렌즈상이다. 이러한 두께 차이는 원래 지형적 저지에서 상당히 두껍게 집적되고 고지에서 얇게 퇴적된 양상을 나타낸다. 이 플러그의 동측부 경계면은 거의 수직에 가까우며 경계면 주변에는 세일편으로 구성된 각력암이 수 m 폭으로 형성되어 있다. 이 플러그는 거의 칼데라의 중앙부에 위치하고 있기 때문에 중앙화구 지역으로 볼 수 있다. 따라서, 화산 폭발시에 화구 위로 뿜던 1~2 m 내외의 많은 암괴들이 밖으로 이동하지 못하고 화구로 낙하되어 각력암 플러그를 형성했음을 지시한다. 그러므로 이 각력암은 회귀 각력암(fall-back breccia)에 속하는 것으로 판단된다.

### 3.2.7 유문암맥

유문암맥은 고로화산암복합체에서 최후기 암석이다. 이 암맥은 칼데라의 북부에서 여러 가닥의 환상암맥의 형태로 노출되며, 중앙부에 작은 암맥 내지 플러그로 분포하고 있다(그림 1). 분포 위치와 형태에 따르면 전자는 내측부 환상관입체이고 후자는 중앙관입체로 구분된다.

이 유문암은 담홍색 내지 홍회색을 띠고 대체로 유상엽리(flow foliation)가 발달했다(그림 2h). 일부 노두에서는 구과상 구조도 관찰된다. 반정으로는 석영과 사장석이 드물게 나타나며 석기는 미정질 내지 유리질이다. 야외에서 한 암체라도 측방으로 수 100 m 이내에서 색깔과 구조의 차이를 보이는 암상 변화를 나타낸다.

칼데라 북부에 위치한 환상암맥은 대개 유대상 유문암(flow-banded rhyolite)이다. 이 암맥은 백색

의 산악으로 보이고 대부분 절벽을 형성하기 때문에 쉽게 구분할 수 있다. 관입접촉부에서 유상엽리는 가끔 비대칭 유상습곡(flow fold)을 형성하여 이들의 이동방향을 제시해 주기도 한다(그림 2h). 용암류 경계부는 특히 이동할 때 자가각력작용(autobrecciation)에 의해 형성된 유동각력암(flow breccia)도 흔히 관찰된다.

중앙관입체는 대개 유대상 유문암으로서 칼데라 중앙부를 중심으로 맥상 혹은 플러그 모양으로 관입되어 돌출되어 있다. 이를 근거로, 중앙의 유문암맥은 화산 칼데라가 함몰된 후 휘발성물질이 소진된 잔류 마그마가 중앙화구로 상승하면서 분류될 때 그 화도 부위인 것으로 판단된다.

#### 4. 심성암류

심성암류에는 동부와 중남부에 분포하고 감람석 반력암과 흑운모 화강암으로 구분된다(그림 1).

##### 4.1 반력암

반력암은 동부에서 2 km 폭을 갖는 작은 타원상의 암주로 노출되며 춘산층을 관입하고 화강암에 의해 관입된다(그림 1). 화강암과의 접촉부에서는 화강암의 포획암으로도 발견된다. 이 암체의 서측부에서는 유색광물이 적은 섬록암으로 접이되는 경향을 보여주고 광물 입자의 크기에 있어서는 더 조립질로 변한다. 본암은 암회색 내지 흑색을 띠며 조립질로서 등립질이고 주 구성광물은 사장석, 감람석, 휘석이고, 흑운모, 각섬석 등이 수반된다.

##### 4.2 화강암

화강암은 산출형태에 따라 화강암주와 화강암맥으로 구분된다. 화강암주는 본역 동부에서 가음단층을 따라 분포하고, 화강암맥은 칼데라 중남부에서 고로화산암복합체의 남측부를 따라 분포한다(그림 1). 이들은 춘산층, 신양동층과 고로화산암층과 반력암을 관입하였다. 화강암체 주변의 퇴적암은 대략 관입접촉부로부터 5 km 반경까지 접촉변성작용을 받은 것으로 판단된다. 따라서 화강암은 지역의 암석 중에 가장 젊은 암석으로 판단된다.

화강암주는 칼데라 외곽의 동부에서 2 km 정도의 폭을 가지며 북서-남동 방향으로 가로지르는 단

층을 기준으로 두 부분으로 분리되어 있다. 화강암맥은 대체로 신양동층과 하부 유문암질 응회암과의 경계부를 따라 관입하였으며, 지질도 상에 그 형태가 대체로 환상암맥을 형성하고 있다. 이렇게 화강암맥의 평면적 분포의 모습이 환상암맥의 형태를 나타내기 때문에 단면의 형태 또한 수직으로 마그마 챔버까지 연결되어 있을 것으로 추정된다.

이 화강암맥은 중·조립질 등립상 조직을 보여주며 주 구성광물로 석영, 사장석, 알칼리장석, 흑운모, 각섬석 등이 존재한다. 화강암체 곳곳에서는 미아롤리틱 구조(miarolitic structure)가 존재하기 때문에 이 화강암의 생성 깊이가 천부임을 알 수 있다.

#### 5. 분석방법

연대측정에 이용된 시료는 위에 언급한 다양한 암석 중에서 칼데라 형성과정을 이해하는 데 도움이 될 것으로 보이는 유문암질 응회암 3개와 화강암 하나로 결정하였다. 3개의 유문암질 시료는 하부 유문암질 응회암(GG17), 응회암맥(GG60), 그리고 상부 유문암질 응회암(GG91)이다. 그 외에 칼데라 내부에 있는 1개의 화강암 시료(GG99)를 분석하였다(그림 1).

선별된 시료들은 각각 유압파쇄기 등을 활용하여 1~2 kg 정도를 분말화하였으며 이 분말로부터 표준 망체를 이용하여 120~180 메쉬의 입자를 회수하였다. 이 입자들은 수세식 팬닝, 중액법, 자성분리법의 절차에 따른 중광물 선별법을 활용하여 저어콘을 분리하였다. 선별된 저어콘은 표준 저어콘 시료와 함께 시료별로 2.54 cm의 에폭시 마운트(epoxy mount)에 고정되어 입자의 절반이 드러날 정도로 연마하였다. 에폭시 마운트는 한국기초과학지원연구원 오창본원에 보유중인 JEOL-6610LV 주사전자현미경을 활용하여 후방산란전자영상과 음극선발광영상을 촬영하였다.

저어콘의 U-Pb 연령측정은 한국기초과학지원연구원에 보유중인 고분해능 이차이온질량분석기(SHRIMP)를 활용하여 수행되었다. 분석에 이용된 1차 이온빔의 크기와 전류는 각각 ~20  $\mu\text{m}$ , ~3 nA이었다. 저어콘의 U 농도 측정과  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  검정선 수립을 위해서 각각 SL13 (238 ppm U; Clauoué-Long *et al.*, 1995)과 미국 둘루스 복합체(Duluth Complex)로부



터 분리된 FC1 표준 저어콘( $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}=0.1859$ ; Paces and Miller, 1993)을 사용하였다. 분석한 저어콘의 U-Pb 동위원소 성분/연령계산과 다이어그램 도시는 spuid2와 Isoplot/Ex 프로그램을 각각 이용하였다 (Ludwig, 2008). 전반적인 SHRIMP 분석법 및 보통 Pb 보정은 Williams (1998)의 것을 따랐다.

### 6. 연령측정 결과

하부 유문암질 응회암 시료(GG17)에서 나온 저어콘들은 대부분 단주상이며 음극선발광영상에서 심한 진동누대를 보여준다(그림 3a). 19개 분석치에서 U와 Th 농도는 각각 239~1460 ppm과 127~860 ppm 이고, Th/U 비는 0.48~1.24 범위이다(표 1). 이러한 비는 Th/U=1 선 부근을 따라 직선상 분포를 나타낸다(그림 4). 외형 및 내부구조와 더불어 높은 Th/U 비는 마그마에서 성장한 저어콘의 특징을 나타낸다 (Vavra *et al.*, 1999; Hartman *et al.*, 2000). 그러나 저어콘들은 결정 형성과 관련된 선행결정(antecryst),

자생결정(auto-cryst)과 외래결정(xenocryst) 등으로 혼합되어있을 수 있다(Miller *et al.*, 2007). 그러한 결정은 일일이 구별할 수 없기 때문에 문제 있는 외래결정만 제외하고 통계적으로 처리할 수밖에 없다. 결과적으로 19개 분석점에서  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  겹보기 연대는 60.4~75.9 Ma 범위로 측정되었으며(표 1), 콘코디아(concordia) 그림에서 일치곡선 상에서 의미 있는 집중군을 보여준다(그림 5a). 이들을 통계적으로 처리하면 17개 중 12개 분석치로부터  $64.3\pm 0.5$  Ma (MSWD=1.6)의 가중평균  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  연령을 얻을 수 있는데(그림 5a), 이는 이 응회암의 정치연령으로 해석된다.

응회암맥 시료(GG60)의 저어콘들은 자형의 주상이며, 음극선발광영상에서 심한 진동누대를 나타내고 상속핵을 가지지 않는다(그림 3b). 15개 분석치에서 U 농도는 277~721 ppm로 높고 Th 농도도 164~664 ppm로 높은 편이며, Th/U 비는 0.45~1.41 범위를 가진다(표 1). 이러한 비는 대체로 Th/U=1 선을 따라 거의 직선상 분포를 나타내는데(그림 4),

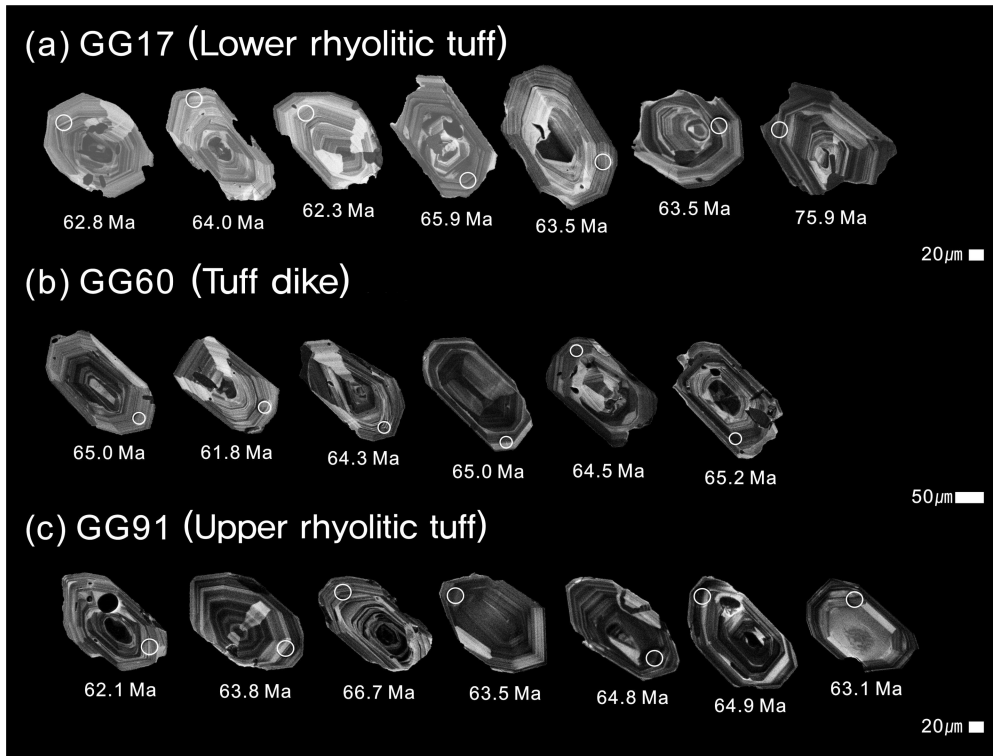


Fig. 3. Representative cathodoluminescence images of the analyzed zircon grains, showing the location of analytical spots and  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  ages in Ma.

**Table 1.** Summary of SHRIMP U-Pb isotope data of the analyzed zircons from igneous rocks in the Hwasan caldera.

Spot no.	<sup>206</sup> Pb <sub>c</sub> (%)	U (ppm)	Th (ppm)	<sup>232</sup> Th/ <sup>238</sup> U	±%	<sup>207</sup> Pb/ <sup>206</sup> Pb	±%	<sup>206</sup> Pb/ <sup>238</sup> U	±%	<sup>206</sup> Pb/ <sup>238</sup> U** Age (Ma)	<sup>207</sup> Pb/ <sup>206</sup> Pb* Age (Ma)
<b>Sample GG17 (Lower rhyolitic tuff)</b>											
GG17_1.1	0.13	251	301	1.2373	±0.4	0.0483	±5.2	0.0218	±1.5	62.8 ±1.0	-290 ±701
GG17_3.1	0.34	530	326	0.6361	±0.4	0.0500	±2.5	0.0226	±2.4	62.4 ±0.5	193 ±69
GG17_4.1	0.17	724	420	0.5987	±0.4	0.0486	±2.0	0.0201	±2.8	65.4 ±0.5	94.4 ±56
GG17_5.1	0.22	534	333	0.6441	±0.4	0.0491	±2.1	0.0210	±1.5	64.5 ±0.5	134 ±80
GG17_6.1	0.12	248	140	0.5815	±0.4	0.0483	±3.2	0.0207	±1.0	64.0 ±1.2	-129 ±105
GG17_7.1	0.49	360	220	0.6315	±0.4	0.0511	±2.7	0.0185	±4.5	62.3 ±0.5	-193 ±147
GG17_8.1	0.21	714	467	0.6756	±0.4	0.0489	±6.3	0.0193	±7.8	60.4 ±3.5	57.9 ±172
GG17_9.1	-0.02	909	645	0.7326	±0.3	0.0471	±1.8	0.0210	±0.6	65.9 ±0.5	-18 ±65
GG17_10.1	0.29	1240	821	0.6840	±0.3	0.0496	±1.4	0.0205	±1.5	65.2 ±0.8	214 ±46
GG17_11.1	-0.12	605	376	0.6408	±0.3	0.0464	±2.0	0.0199	±2.6	64.4 ±1.0	-17 ±67
GG17_13.1	0.10	561	379	0.6979	±0.3	0.0481	±2.2	0.0220	±0.7	64.9 ±0.5	8.0 ±119
GG17_14.1	0.03	925	860	0.9597	±0.3	0.0475	±1.7	0.0200	±3.7	64.7 ±0.5	242 ±85
GG17_15.1	0.13	239	143	0.6160	±0.4	0.0483	±3.3	0.0194	±1.0	63.5 ±0.7	143 ±90
GG17_16.1	-0.27	466	303	0.6717	±0.4	0.0452	±2.6	0.0191	±2.8	63.5 ±0.5	-298 ±99
GG17_17.1	0.54	1460	738	0.5222	±0.6	0.0518	±7.2	0.0097	±4.6	75.9 ±0.9	-287 ±240
GG17_18.1	0.14	501	333	0.6874	±0.4	0.0484	±2.3	0.0230	±0.7	64.1 ±0.8	240 ±67
GG17_19.1	0.27	276	127	0.4766	±0.4	0.0494	±3.2	0.0205	±1.0	63.2 ±0.5	35.5 ±83
<b>Sample GG60 (Tuff dike)</b>											
GG60_2.1	0.09	312	188	0.6204	±0.4	0.0481	±2.8	0.0204	±1.8	65.0 ±0.5	134 ±76
GG60_3.1	0.27	277	164	0.6120	±0.4	0.0494	±3.2	0.0191	±2.7	61.8 ±0.5	-86 ±101
GG60_4.1	0.49	345	323	0.9657	±0.4	0.0512	±2.7	0.0194	±1.0	65.4 ±0.5	375 ±129
GG60_5.1	-0.07	487	664	1.4095	±0.3	0.0467	±2.5	0.0209	±0.8	62.0 ±2.6	-228 ±456
GG60_6.1	0.43	396	324	0.8439	±0.4	0.0507	±4.7	0.0201	±1.9	64.0 ±0.5	4.3 ±157
GG60_7.1	0.52	310	181	0.6054	±0.4	0.0514	±2.7	0.0212	±0.9	64.6 ±0.7	-64 ±90
GG60_8.1	0.12	407	274	0.6956	±0.4	0.0482	±2.5	0.0202	±1.9	62.8 ±1.1	82.9 ±85
GG60_9.1	-0.09	285	314	1.1405	±0.4	0.0466	±3.1	0.0198	±0.9	63.5 ±0.8	-243 ±327
GG60_10.1	0.09	345	321	0.9597	±0.4	0.0480	±2.7	0.0196	±0.9	64.3 ±0.5	-122 ±178
GG60_11.1	-0.01	422	253	0.6200	±0.4	0.0472	±2.3	0.0206	±0.7	65.0 ±0.5	106 ±64
GG60_12.1	-0.05	550	293	0.5512	±0.4	0.0469	±2.1	0.0207	±1.3	64.5 ±0.5	48.0 ±57
GG60_13.1	0.05	721	405	0.5808	±0.3	0.0477	±1.9	0.0206	±1.6	65.2 ±0.5	108 ±50
GG60_14.1	-0.04	371	283	0.7881	±0.4	0.0470	±2.6	0.0216	±0.8	66.0 ±0.5	97.5 ±95
GG60_15.1	0.13	513	222	0.4471	±0.4	0.0483	±2.2	0.0206	±1.4	64.2 ±0.5	-37 ±59
<b>Sample GG91 (Upper rhyolitic tuff)</b>											
GG91_1.1	-0.01	222	158	0.7357	0.4	0.0472	3.4	0.0216	2.2	64.0 ±0.5	-39 ±123
GG91_2.1	0.31	218	143	0.6778	0.4	0.0497	3.5	0.0196	1.2	62.1 ±1.1	-54 ±123
GG91_3.1	-0.11	307	202	0.6786	0.6	0.0464	3.1	0.0192	1.8	64.4 ±0.8	118 ±95
GG91_4.1	0.19	820	1435	1.8069	0.3	0.0488	1.8	0.0198	2.3	63.7 ±0.5	501 ±431
GG91_5.1	0.03	336	362	1.1121	0.4	0.0475	2.9	0.0198	2.6	63.8 ±0.5	292 ±201
GG91_6.1	-0.03	370	274	0.7667	0.4	0.0471	2.7	0.0204	1.8	66.7 ±0.8	-193 ±117
GG91_7.1	0.20	419	359	0.8853	0.4	0.0489	2.5	0.0198	1.5	63.8 ±0.5	281 ±103
GG91_8.1	0.21	339	311	0.9492	0.4	0.0489	2.7	0.0201	1.6	63.5 ±0.5	91.1 ±150
GG91_9.1	0.14	198	187	0.9798	0.4	0.0484	6.0	0.0213	1.2	61.1 ±3.2	317 ±219
GG91_10.1	0.60	513	587	1.1806	0.4	0.0520	2.1	0.0220	0.7	64.0 ±0.5	343 ±173
GG91_11.1	-0.10	719	819	1.1775	0.4	0.0465	2.2	0.0205	0.6	64.8 ±0.8	-208 ±222
GG91_12.1	0.08	716	1050	1.5141	0.3	0.0479	1.9	0.0202	1.6	64.9 ±1.0	-48 ±395
GG91_13.1	0.26	229	181	0.8190	0.4	0.0494	3.5	0.0195	1.1	63.1 ±0.5	313 ±121
GG91_14.1	0.08	257	249	1.0042	0.4	0.0479	3.4	0.0194	1.1	65.5 ±0.6	-156 ±249
<b>Sample GG99 (Granites)</b>											
GG99_1.1	0.91	134	146	1.13	±1.00	0.0545	±5.4	0.0303	±1.2	61.7 ±1.0	61.9 ±0.7
GG99_2.1	-	92	108	1.21	±0.80	0.0469	±4.2	0.0296	±4.0	61.7 ±1.0	62.5 ±0.7
GG99_3.1	0.65	287	486	1.75	±1.62	0.0524	±2.2	0.0314	±3.5	63.8 ±0.7	63.3 ±0.6
GG99_4.1	-	85	55	0.68	±0.43	0.0495	±2.0	0.1304	±2.6	283 ±3	283 ±3
GG99_5.1	-	139	185	1.38	±0.27	0.0468	±5.9	0.0296	±3.5	64.4 ±1.0	64.1 ±0.7
GG99_6.1	0.42	84	81	1.00	±0.38	0.0506	±4.2	0.0284	±2.6	62.5 ±1.0	63.1 ±0.8
GG99_7.1	0.57	92	59	0.66	±0.42	0.0519	±4.0	0.0301	±1.3	66.2 ±1.0	65.4 ±0.8
GG99_8.1	0.14	108	126	1.21	±0.81	0.0484	±3.8	0.0290	±4.7	64.8 ±1.0	63.8 ±1.0
GG99_9.1	-	193	252	1.34	±0.22	0.0468	±2.8	0.0316	±2.8	64.7 ±1.0	64.5 ±0.8
GG99_10.1	0.12	108	120	1.15	±0.90	0.0483	±3.8	0.0301	±3.5	65.4 ±2.0	63.9 ±2.0
GG99_11.1	-	177	253	1.47	±0.41	0.0457	±3.0	0.0298	±3.2	63.0 ±0.8	62.7 ±0.6
GG99_12.1	0.12	241	189	0.81	±0.23	0.0483	±2.4	0.0315	±3.0	63.4 ±0.7	63.2 ±0.6
GG99_13.1	-	244	277	1.18	±0.38	0.0457	±2.4	0.0339	±3.4	62.1 ±1.0	63.6 ±1.0
GG99_14.1	0.63	105	115	1.13	±0.83	0.0523	±3.6	0.0280	±3.3	64.2 ±0.9	62.1 ±0.7
GG99_15.1	-	153	147	0.99	±0.28	0.0470	±3.2	0.0304	±3.9	64.2 ±0.9	64.5 ±0.7
GG99_16.1	0.15	333	269	0.84	±0.20	0.0485	±2.0	0.0323	±3.3	65.4 ±0.8	65.0 ±0.8
GG99_17.1	0.09	498	504	1.04	±0.15	0.0481	±1.7	0.0301	±3.2	64.5 ±0.7	64.5 ±0.7

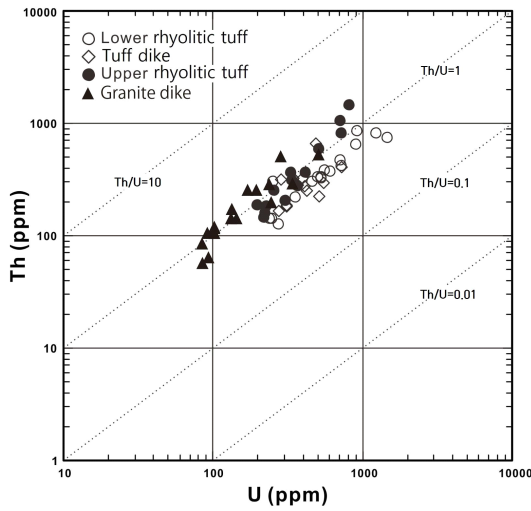


Fig. 4. Correlation diagram showing the proportions of Th to U concentrations (ppm) of the analyzed zircons in the study.

이는 형태 및 내부구조와 함께 일반적인 화성기원을 반영한다. 15개 분석치는 61.8~66.0 Ma 매우 좁은 범위의 겉보기 연령을 가지며(표 1), 14개 분석치는 일치곡선 상에서 의미있는 연령을 나타낸다. 14개 중에 젊은 연령치를 제외한 12개 분석치를 통계적으로 처리하면 가중평균  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  연령  $64.7 \pm 0.5$  Ma (MSWD=1.8)를 갖는데(그림 5b), 이는 응회암 맥의 관입연령으로 해석된다.

상부 유문암질 응회암 시료(GG91)의 저어콘들은 모두 주상을 나타내며, 음극선발광영상에서 진동수대를 보여준다(그림 3). 14개 분석치에서의 U과 Th 농도는 각각 198~820 ppm과 143~1435 ppm이고, Th/U 비는 0.68~1.81 범위를 가진다(표 1). 이 비는 Th/U=1 선을 따라 거의 직선상 분포를 나타내는데(그림 4), 이는 외형 및 내부구조와 더불어 일반적인 화성기원을 나타낸다. 14개의 SHRIMP 분석치는

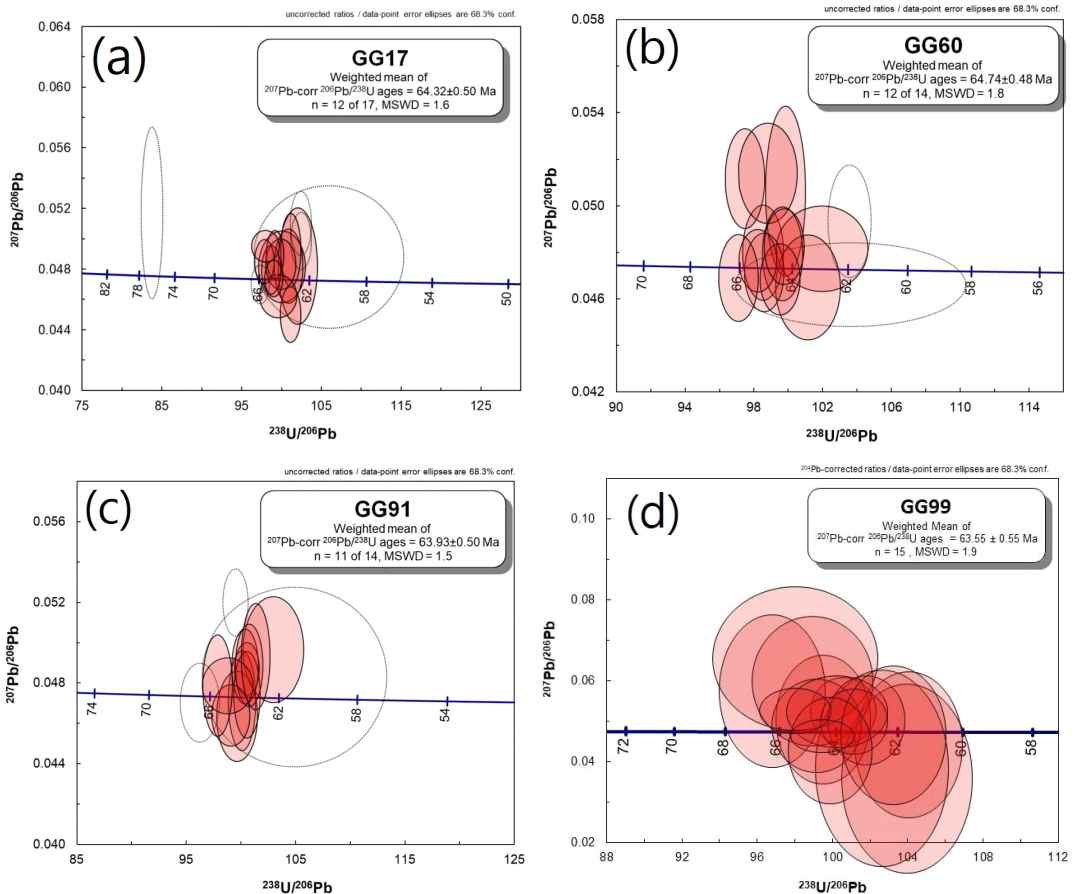


Fig. 5. Concordia diagrams for SHRIMP U-Pb ages of zircons separated from samples in the Hwasan caldera.

61.1~65.5 Ma로 걸보기 연령을 가진다(표 1). 일치 곡선 상에서 젊은 것과 오래된 것을 제외한 가중평균  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  연령은  $63.9 \pm 0.5$  Ma (MSWD=1.5)로 계산되며(그림 5c), 이는 이 응회암의 정치연령으로 해석된다.

화강암맥에서 나온 시료(GG99)의 저어콘들은 대부분 반자형의 입자를 나타낸다. 분석치에서 U 및 Th 함량은 각각 84~333 ppm과 55~486 ppm의 비교적 낮은 범위이고 Th/U 비는 0.66~1.75 범위이다(표 1). 이 비는 대부분 Th/U=1 선의 윗부분을 따라 거의 직선상 분포를 나타내며(그림 4), 이는 일반적인 화성기원을 지시한다. 16개 분석점에서 걸보기  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  연령은 61.7~283 Ma의 범위로 측정되었다(표 1). 집중균을 이루는 그림에서 가장 오래된 분석치 1개를 빼고 15개의 가중평균  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  연령은  $63.6 \pm 0.6$  Ma (MSWD=1.9)이다(그림 5d). 따라서 이 연령은 화강암의 관입연대로 해석된다.

## 7. 토 의

### 7.1 어봉산암주의 정치시기

경상누층군을 관입한 심성암류는 전통적으로 불국사관입암군으로 묶어서 유천층군의 퇴적 이후에 관입한 것으로 여겨져 왔다. 이에 따라 어봉산암주도 불국사관입암군으로 보고 고로화산암복합체를 관입한 것으로 추정하였다(Chang *et al.*, 1977; Hwang and Kim, 1999). 그러나 어봉산암주 흑운모 화강암에서 분리한 저어콘들로부터 측정된 SHRIMP 저어콘 U-Pb 연령은  $76.9 \pm 0.9$  Ma로 보고되었으며(Hwang *et al.*, 2017), 부근의 부남암주에서도 77.2~75.8 Ma의 정치연령이 보고되었다(Hwang and Kim, 2006). 따라서 어봉산암주는 64~63 Ma의 저어콘 연령이 산출된 고로화산암복합체의 형성과 이후 관입한 화강암맥과는 직접적인 관계가 없는 것으로 판단된다.

### 7.2 고로화산암복합체의 1차 분출 및 칼데라 형성 시기

고로화산암복합체는 하부 유문암질 응회암, 응회암맥, 상부 유문암질 응회암에서 SHRIMP 저어콘 U-Pb 연령을 얻었다. 이를 통해 하부 유문암질 응회암의 분출시기가 고원기 팔레오세 다니아절에 해당하는  $64.3 \pm 0.5$  Ma임을 확인할 수 있다. 외측 칼데라

의 환상단열대를 따라 관입한 환상 응회암맥은  $64.7 \pm 0.5$  Ma의 SHRIMP 저어콘 U-Pb 연령을 산출하였다. 야외조사 결과 이 응회암맥은 하부 유문암질 응회암이 분출한 이후 발생한 함몰에 의한 단열대를 따라 관입한 것으로 보고 있다(Yun, 1988). 저어콘 연대측정 결과는 하부 유문암질 응회암층과 환상응회암의 측정결과가 대략 64.5 Ma로 오차범위에서 일치하기 때문에 하부 유문암질 응회암의 분출, 지반의 침강과 단열작용, 그리고 환상 유문암의 분출이 오차범위 내의 짧은 시간 안에 발생했음을 지시한다. 대규모 화산 쇄설물 분출은 칼데라 함몰이 바로 수반되고(Druitt and Sparks, 1985; Druitt and Bacon, 1986; Hildreth and Mahood, 1986), 함몰에 의한 하중압력은 추가적인 분출을 유발하는 것(Gudmundsson *et al.*, 1999)으로 알려져 있으므로 연령측정 결과를 바탕으로 본 연구의 해석에는 큰 문제가 없다. 64.5 Ma의 대규모 화산분출과 이후 수반된 칼데라 형성 및 환상암맥의 형성을 1차 분출로 정의하고자 한다.

### 7.3 고로화산암복합체의 2차 분출 및 칼데라 형성 시기

상부 유문암질 응회암의 대규모 분출시기는  $63.9 \pm 0.5$  Ma이다. 칼데라의 내측에서 환상 암맥을 이루고 있는 또 다른 암체(그림 1)인 화강암맥은  $63.6 \pm 0.6$  Ma의 관입연령을 산출하였다. 상부 유문암질 응회암과 화강암맥의 저어콘 연령( $63.9 \sim 63.6$  Ma)은 1차 분출과 관련된 하부 유문암질 응회암과 환상의 응회암맥이 분출한 시기( $64.5$  Ma)와 오차범위에서 중첩되지만, 야외조사를 통한 관입 양상을 고려할 때 대략 0.3 Ma 정도 이후에 관입 또는 분출했을 것으로 추정된다. 따라서 상부 유문암질 응회암과 화강암맥의 형성은 1차 분출 및 칼데라 형성과는 관계가 없기 때문에 이 암체들의 형성은 2차 분출 및 칼데라 형성시기로 보았다. 연령측정 결과는 대략 63.9 Ma에 2차적인 대규모 분출에 의해 상부 유문암질 응회암이 퇴적되었고, 이후 ~63.5 Ma에 분화구 주변의 함몰과 이에 따른 환상단열대를 따라 화강암맥이 관입했음을 지시한다. 이 두 암체의 연령측정 결과도 거의 일치하기 때문에 대규모 분출 즉시 칼데라가 형성되고 하중압력에 따른 유문암맥의 추가 분출과 더불어 발생했음을 지시한다(Druitt and Bacon, 1986;

Hildreth and Mahood, 1986; Gudmundsson *et al.*, 1999).

**7.4 칼데라 형성과정**

화산층서는 SHRIMP U-Pb 연령과 함께 화산 칼데라 지역에서 화성화정을 다음과 같이 엮어볼 수 있다.

어봉산 지역에서는 하양층군 퇴적작용이 일어난 후 화산분출의 흔적 없이 76.92 Ma에 화강암질 마그마가 관입하여 어봉산암주를 형성하였다. 그리고 별다른 화성활동 없이 장시간(약 10 Ma 이상)에 걸쳐 큰 침식이 일어나고 어봉산암주가 지표에 노출되었다. 이후 선암산 지역에서 유문데사이트질 화산작용이 일어나 선암산응회암을 퇴적시키고 소규모 선암산 칼데라를 형성하였다.

고로 북동 지역에서 안산암질 화산작용이 일어나 하부 응회암과 용암층을 집적시켰다. 그리고 1차 유문암질 화산작용이 64.32 Ma에 대규모로 발생했다. 이로 인해 하부 유문암질 응회암을 집적시켰다. 이 1차 분출은 초기에는 강하회 분출상으로 시작하여 본격적으로 회류 분출상으로 전환되었다. 회류 분출작용은 연속적으로 일어났으며 이때 형성기구는 분연주의 붕괴에 의해 일어났다.

이때 마그마로부터 발생한 화성쇄설물이 큰 부피로 일시에 제거됨으로써 마그마챔버의 지붕이 함몰되어 화산 칼데라를 형성시켰다. 이때 화성쇄설물은 중앙화구를 따라 분출되었겠으나 칼데라 함몰과 거의 동시에 환상열극화구(ring fissure vent)를 따라 분출하였다. 그 증거는 64.74 Ma에 정지한 응회암맥이 환상단열대를 따라 관입되어있기 때문이다. 이러한 두 단계의 칼데라 형성 회류분출상은 Druitt and Sparks (1985)에 의해 제안되었다.

1차 유문암질 화산작용이 끝나고 동쪽 근처에서 안산암질 용암이 칼데라 일부를 덮었다. 그리고 2차 유문암질 화산작용이 63.93 Ma 경에 비교적 큰 규모로 일어났다. 이때도 처음에 강하회 분출상으로 시작하였으나 대규모 회류 분출상으로 바뀌었다. 칼데라 중앙부의 중앙화구로부터 강하회가 소량 분출되고 연이어 회류 분출작용이 대규모로 일어났다. 이때 상부 회류응회암은 변화없이 거의 일정한 암상을 나타내고 환상단열대를 따른 응회암맥이 없으며 중앙부에 중앙화구를 지시하는 각력암 플러그가 존

재한다. 이러한 증거들은 하나의 중앙화구로부터 연속적인 분출이 있었다는 것을 의미한다.

점차 마그마 방출량이 커짐에 따라 마그마챔버의 상위에 환상단열대가 생기고 부분적으로 함몰되었다. 마그마챔버는 마그마의 분출로 인해 점진적 압력 감소로 인해 챔버 내의 부족압력이 상위 하중을 초과할 때 환상단열대와 함께 지붕 함몰이 일어난다. 지붕 함몰은 챔버의 상단에서의 압압을 복구시키게 된다.

화쇄류 분출과 관련해서 내측 칼데라가 함몰되었다는 것은 환상단열대에 유문암맥과 화강암맥의 관입이 이를 지지해준다. 따라서 이들 암맥의 출현은 중앙화구로부터의 회류 분출이 일어난 후에 칼데라 함몰에 의한 환상단열이 발달된 것으로 판단된다. 왜냐하면 유문암맥이 상부 유문암질 응회암과 각력암플러그를 관입하고 화강암맥이 63.55 Ma에 환상단열대를 따라 관입되어있기 때문이다.

이러한 분출은 분출량이 급격히 늘어남으로서 폭발력이 소진되고 칼데라 함몰은 계속되어 내측 환상단열대를 이용한 조용한 마그마 주입으로 전환되었다. 유문암맥과 화강암맥의 환상관입체의 형태와 위치에 의하면 이들의 정치는 칼데라의 연변부에서 구조적인 환상단열대에 의해 지배되었음을 암시한다.

**8. 결론**

군위군 동부에 존재하는 화산 칼데라 주변의 화성암류는 어봉산암주, 선암산응회암, 고로화산암복합체, 기타 심성암 순으로 구분된다. 화성암류에 대한 SHRIMP 저어콘 U-Pb 연령측정을 실시함으로써 화성암류의 분출 혹은 관입시기와 층서관계를 명확히 하였다. 측정결과에 의하면 고로화산암복합체에서 하부 유문암질 응회암은 64.3±0.5 Ma, 응회암맥은 64.7±0.5 Ma, 상부 유문암질 응회암은 63.9±0.5 Ma에 분출 혹은 관입 연대를 가지며, 화강암맥은 63.6±0.6 Ma 관입 연령을 나타낸다. 따라서 이 모두는 고원기 팔레오세 다니아절에 형성되었다.

고로화산암복합체 일대의 야외조사 결과와 이 복합체를 구성하고 있는 일부 화성암에 대한 저어콘 연령측정 결과를 바탕으로 다음과 같은 결론을 내릴 수 있었다. 이 지역은 환상 단열대(또는 환상단층)이 형성되어 이를 따라 환상암맥이 관입하게 된 칼데라

합몰을 유발시킨 최소 2회의 대규모 화산분출작용이 인지된다. 각각의 시기는 1차 분출이 대략  $64.3 \pm 0.5$  Ma 부근이며 2차 분출이 63 Ma로 판단된다. 1차 화산분출은 하부 유문암질 응회암의 대규모 회류 분출( $64.3$  Ma)을 의미하며, 이로 인하여 발생한 함몰과 외측 환상단열대를 통해 응회암맥( $64.7 \pm 0.5$  Ma)이 관입했다. 2차 화산분출은 상부 유문암질 응회암( $63.9 \pm 0.5$  Ma)과 각력암 플러그의 형성을 유발했으며, 이로 인해서 발생한 침강과 내측 환상단열대를 통해서 유문암맥과 더불어 화강암맥( $63.6 \pm 0.6$  Ma)이 관입하였다.

화산 칼데라에서 내측 환상단열대는 선기 칼데라 내에 동심원상으로 형성된 후기의 작은 칼데라를 의미한다. 그러므로 화산 칼데라는 두 차례의 회류응회암-칼데라 함몰-환상암맥으로 이어지는 복잡한 화산과정을 나타내는 동지상 칼데라를 나타낸다.

## 감사의 글

이 연구는 2020년 과학기술정보통신부의 재원으로 한국기초과학연구원 선도장비 이용자 활성화 사업(C030440)의 지원을 받아 수행되었다. 지질도는 2003년 균위담 타당성 조사 시에 작성된 것을 바탕으로 하였고 연대측정은 한국기초과학지원연구원의 SHRIMP U-Pb 분석으로 수행되었다. 심사과정을 통해 건설적 아이디어를 제공하고 세심하게 문장을 다듬어준 편집위원과 두 심사위원에게 사의를 표한다. 그림은 암석학 실험실 이소진과 현혜원의 도움으로 제작되었다.

## REFERENCES

- Anderson, E.M., 1936, Dynamics of formation of cone-sheets, ring-dikes, and cauldron subsidences. *Royal Society of Edinburgh Proceedings*, 56, 128-157.
- Billings, M.P., 1945, Mechanisms of igneous intrusion in New Hampshire. *American Journal of Sciences*, 243, 41-68.
- Billings, M.P., 1972, *Structural geology*, Prentice-Hall, Inc., 3rd ed., 314-360.
- Bonin, B., 1986, Ring complex granites and anorogenic magmatism. *Studies in geology*: New York, Elsevier, 188 p.
- Bussell, M.A., Pitcher, W.S. and Wilson, P.A., 1976, Ring complexes of the Peruvian Coastal Batholith: a long-standing subvolcanic regime. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 13, 1020-1030.
- Cha, M.S. and Yun, S.H., 1988, Cretaceous volcanic cauldrons and ring complexes in Korea. *Journal of the Geological Society of Korea*, 24, 67-86 (in Korean with English abstract).
- Chang, K.H., 1978, Late Mesozoic Stratigraphy, Sedimentation and Tectonics of Southeastern Korea (II) - with discussion on petroleum possibility. *Journal of the Geological Society of Korea*, 14, 120-135 (in Korean with English abstract).
- Chang, K.H., Ko, I.S., Lee, J.Y. and Kim, S.W., 1977, Explanatory text of the geological map of Gusandong Sheet (1:50,000). *Korea Research Institute of Geoscience and Mineral Resources*, 25 p.
- Claoué-Long, J.C., Compston, W., Roberts, J. and Fanning, C.M., 1995, Two Carboniferous ages: A comparison of SHRIMP zircon dating with conventional zircon ages and  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  analysis. *SEPM Society for Sedimentary Geology*, 54, <https://doi.org/10.2110/pec.95.04.0003>.
- Clough, C.T., Maufe, H.B. and Bailey, E.B., 1909, The cauldron-subsidence of Glen Coe and the associated igneous phenomena. *Geological Society of London Quarterly Journal*, 65, 611-678.
- Cole, J.W., Milner, D.M. and Spinks, K.D., 2005, Calderas and caldera structures. *Earth-Science Reviews*, 69, 1-26.
- Dodge, F.C.W., 1979, The Uyajjah ring structure, Kingdom of Saudi Arabia. *US Geological Survey Professional Paper*, 774-E, 17 p.
- Druitt, T.H. and Bacon, C.R., 1986, Lithic breccia and ignimbrite erupted during the collapse of Crater Lake caldera, Oregon. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 29, 1-32.
- Druitt, T.H. and Sparks, R.S.J., 1985, On the formation of calderas during ignimbrite eruptions. *Nature*, 310, 679-681.
- Gudmundsson, A., Marinoni, L.B. and Marti, J., 1999, Injection and arrest of dykes: implications for volcanic hazards. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 88, 1-13.
- 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.
- Hildreth, W. and Mahood, G.A., 1986, Ring-fracture eruption of the Bishop Tuff. *Geological Society of America Bulletin*, 97, 396-403.
- Hwang, S.K., 2002, Collapse type and evolution of the Guamsan caldera, southeastern Cheongsong, Korea.

- Journal of the Geological Society of Korea, 38, 199-216 (in Korean with English abstract).
- Hwang, S.K., Jo, I.H. and Yi, K., 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, 53, 781-796 (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 the 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 the Petrological Society of Korea, 8, 171-182 (in Korean with English abstract).
- Komuro, H., 1987, Experiments on cauldron formation: a polygonal cauldron and ring fractures. Journal of Volcanology and Geothermal Research, 31, 139-149.
- Lipman, P.W., 1984, The roots of ash-flow calderas in western North America: Windows into the tops of granitic batholiths. Journal of Geophysical Research, 89, 8801-8841.
- Lipman, P.W., 2000, Calderas. In: Sigurdsson, H., Houghton, B.F., McNutt, S.R., Rymer, H., Stix, J. (Eds.), Encyclopedia of Volcanoes. Academic Press, San Diego, CA, 1417 p.
- Ludwig, K.R., 2008, User's manual for Isoplot 3.6: A Geochronological Toolkit for Microsoft Excel. Berkeley Geochronology Center Special Publication, 4, Berkeley, California. 77 p.
- Miller, J.S., Matzel, J.E.P., Miller, C.F., Burgess, S.D. and Miller, R.B., 2007, Zircon growth and recycling during the assembly of large, composite arc plutons. Journal of Volcanology and Geothermal Research, 167, 282-299.
- Myers, J.S., 1975, Cauldron subsidence and fluidization: mechanisms of intrusion of the coastal batholith of Peru into its own volcanic ejecta. Geological Society of America Bulletin, 86, 1209-1220.
- Oftedahl, C., 1978, Cauldrons of the Permian Oslo rift. Journal of Volcanology and Geothermal Research, 3, 343-371.
- Paces, J.B. and Miller Jr., J.D., 1993, Precise U-Pb ages of Duluth Complex and related mafic intrusions, northeastern Minnesota: Geochronological insights to physical, petrogenetic, paleomagnetic, and tectonomagmatic processes associated with the 1.1 Ga Midcontinent Rift System. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 98, 13997-14013.
- Shannon, J.R., 1988, Geology of the Mount Aetna cauldron complex, Sawatch Range, Colorado. Unpublished PhD thesis, Colorado School of Mine, Colorado, 435 p.
- Smith, R.L. and Bailey, R.A., 1968, Resurgent cauldrons. Geological Society of America Memoir, 116, 613-662.
- Turner, D.C., 1963, Ring-structures in the Sara-Fier Younger Granite complex, northern Nigeria. Quarterly Journal of the Geological Society, 119, 345-366.
- 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.
- Walker, G.P.L., 1975, A new concept of the evolution of the British Tertiary intrusive centres. Journal of the Geological Society, 131, 121-141.
- Williams, H., 1941, Calderas and their origin. University of California Publications, Bulletin of the Department of Geological Sciences, 25, 239-346.
- Williams, H. and McBirney, A.R., 1979, Volcanology: Freeman, Cooper & Co., 207 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, 1-35.
- Won, C.K., So, C.S. and Yun, S., 1980, Explanatory Text of the Geological Map of Sinryeong Sheet (1:50,000). Korea Research Institute of Geoscience and Mineral Resources, 21 p.
- Yun, S.H., 1988, Development and the structure of its cauldron of the Hwasan ring igneous complex, northern Gyeongsang basin, Korea. Journal of the Geological Society of Korea, 24, 267-288 (in Korean with English abstract).

Received : June 2, 2022

Revised : July 16, 2022

Accepted : August 18, 2022