

## 영주저반에서 봉화 콜드론의 마그마 배관체계와 침하기구

황상구<sup>1,\*</sup> · 조인화<sup>2</sup> · 이보현<sup>3</sup> · 이기욱<sup>4</sup>

<sup>1</sup>안동대학교 지구환경과학과

<sup>2</sup>국립재난안전연구원

<sup>3</sup>한국농어촌공사

<sup>4</sup>한국기초과학지원연구원 환경과학연구부

### 요 약

영주저반은 영남육괴에 위치하며 부석, 춘양 및 장수심성암체와 같은 관입상으로 구성되는 심성암복합체이다. 부석심성암체는 각섬석 흑운모 토날라이트, 흑운모 화강섬록암과 흑운모 화강암의 분화상으로 구분되며, 춘양심성암체는 관입형태에 따라 춘양화강암 암주와 세립질 화강암맥으로 구분된다. SHRIMP U-Pb 저어콘 U-Pb 연대에 의하면 토날라이트(186.6±0.73 Ma), 화강섬록암(185.8±0.69 Ma), 흑운모 화강암(185~177 Ma), 춘양화강암 암주(174.8±1.4 Ma)와 환상화강암맥(172.2±1.4 Ma)의 젊어지는 순서를 나타낸다. 봉화 콜드론은 직경이 6.0×12.8 km이며 세립질 화강암맥으로 보존된 환상암맥과 환상단층에 의해 경계된다. 경계의 외곽부는 챔버의 하층부에 놓이는 선기 및 중기 분화상인 토날라이트와 화강섬록암과 접하지만, 그 내부는 상층부에 놓여야만 하는 후기 분화상인 흑운모 화강암으로 이루어진다. 이러한 지질도 패턴에 따르면, 환상단층 운동학은 흑운모 화강암이 주변의 변성암, 토날라이트 및 화강섬록암에 비해 아래로 이동했다는 것을 나타내며, 이는 아래의 마그마챔버로 침하되는 것을 암시한다. 구조 및 관입 관계에 따르면, 콜드론 침하를 추론할 수 있는 모델은 (1) 하부 마그마챔버에서 마그마 퇴각으로, (2) 그 지붕의 고체화된 흑운모 화강암이 그 아래의 후기 마그마 챔버로 가라앉는다는 것이다. 그래서 연구 지역은 아마도 상부지각 레벨에서의 화산-심성 침하계와 무관한 콜드론 침하계로 해석된다. 이 콜드론은 (1) 부석심성암체의 분화와 정치, (2) 중부지각 레벨에서 이수직의 환상단층 발달, 그리고 (3) 콜드론 침하 및 환상암맥 주입의 진화순서를 보여준다.

**주요어:** 영주저반, 심성암복합체, 환상암맥, 봉화 콜드론, 콜드론 침하

**Sang Koo Hwang, In Hwa Cho, Bo Hyeon Lee and Keewook Yi, 2021, Magma plumbing system and subsidence mechanism of the Bonghwa cauldron in the Yeongju batholith, Korea. Journal of the Geological Society of Korea. v. 57, no. 3, p. 293-306**

**ABSTRACT:** The Yeongju Batholith, located in the Yeongnam Massif, is a plutonic complex composed of intrusive phases such as the Buseok, Chunyang, and Jangsu plutons. The Buseok and Chunyang plutons are divided as differentiated phases of hornblende biotite tonalite, biotite granodiorite, and biotite granite, and into the into Chunyang granite stock and the fine-grained granite dikes depending on the intrusive forms, respectively. The SHRIMP zircon U-Pb ages of the plutons show a decreasing age trend from tonalite (186.6±0.73 Ma) and granodiorite (185.8±0.69 Ma), through biotite granite (185.8~177 Ma), to Chunyang granite (174.8±1.4 Ma), and ring granite dikes (172.2±1.4 Ma). The Bonghwa cauldron, 6.0×12.8 km in diameter, is bounded by the ring faults and ring dikes preserved as fine-grained granite dike. Early and late differentiated phases, tonalite/granodiorite and biotite granite, respectively, occur along the inside and outside of the boundary, and might be emplaced in the lower/middle and upper parts of the chamber. Based on the geological map pattern, ring dike and fault kinematics indicate that the biotite granite moved down relative to the surrounding metamorphic rocks, tonalite and granodiorite, suggesting its subsidence into an underlying magma chamber. The structural and intrusive relationships allow us to evaluate the subsidence by the models (1) retreat of magma in the magma chamber and (2) sinking of the solidified granite in the roof into its magma chamber, and thus suggests the cauldron subsidence regardless of volcano-plutonic system in the upper crust level. The cauldron shows the evolutionary sequence of (1) differentiation and emplacements of the Buseok pluton, (2) development of subvertical ring faults in the middle crust level, and (3) cauldron subsidence and injection of ring dikes.

\* Corresponding author: +82-54-820-5469, E-mail: [hwangsk@anu.ac.kr](mailto:hwangsk@anu.ac.kr)

**Key words:** Yeongju batholith, plutonic complex, ring dike, Bonghwa cauldron, cauldron subsidence

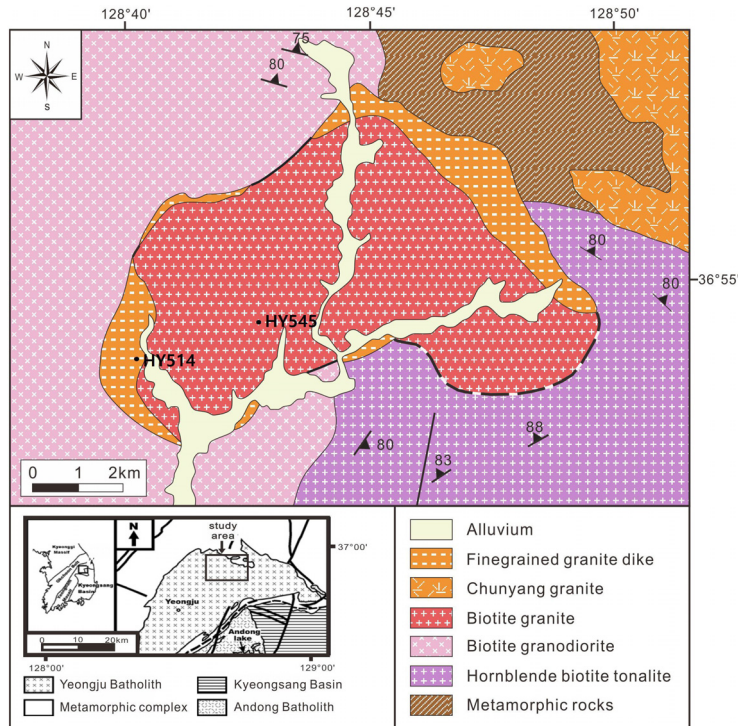
(Sang Koo Hwang, Department of Earth and Environmental Science, Andong National University, Andong 36729, Republic of Korea; In Hwa Cho, National Disaster Management Research Institute, Ulsan 44538, Republic of Korea; Bo Hyeon Lee, Korea Rural Community Corporation, Naju 58217, Republic of Korea; Keewook Yi, Division of Environmental and Material Sciences, Korea Basic Science Institute, Ochang 34132, Republic of Korea)

1. 서 언

지구 대륙지각의 많은 부분은 마그마 과정에 의해 형성되거나 혹은 영향을 받는다(예: Hamilton, 1989; Lipman, 1992; Yanagi and Yamashita, 1994; Brown and Rushmer, 1997). 따라서 마그마 배관체계에 대한 시공간적인 진화는 어떻게 대륙이 성장하고 진화하는가를 이해하려는 우리의 연구에서 중요한 문제 중의 하나이다. 그러나 마그마 챔버는 극히 역동적인 물리·화학적계이고, 혼합, 혼화(mingling), 대류, 재충전 등과 같은 중복과정으로 인해 심성암체에서 상당히 복잡한 양상을 나타낼 수 있다. 이와 대조적으로, 화산 아래의 환상복합체는 분출과정과 같은 그 당시 마그마 사건을 보존하고 있다. 즉 이들은 원추

암상, 환상암맥과 괴상 중심관입체 등을 포함하는 매우 다양한 관입상(intrusive phase)을 가지며, 잠재적으로 칼데라 및 화산뿌리의 진화와 상부지각 마그마 챔버의 상단에 관해 많은 정보를 공급해준다(예: Smith and Bailey, 1968; Lipman, 1984). 그러나 특이한 경우에 지표에 화산작용에 관한 표현 없이도 지하에서 콜드론 침하에 따른 환상암맥이 발생할 수도 있다. 이들에 대해 잘 정의되는 공간적 및 지질학적 관계를 보여줄 때, 환상복합체는 일반적으로 천부지각의 마그마계 진화를 평가할 좋은 기회를 제공한다.

영주저반은 약 1,180 km<sup>2</sup> 면적으로 영남육괴 북동부의 소백산 지구에 위치해 있으며(그림 1), 영남 누층군의 원남층군과 소백산편마암류를 관입했다 (Shin and Choi, 1968; Yoon *et al.*, 1988; Lee, J.H.



**Fig. 1.** Geological map showing several lithofacies of the Buseok and Chunyang plutons in the Yeongju batholith, and indicating two sample locations.

*et al.*, 1989; Lee, M.S. *et al.*, 1989). 봉화 콜드론은 영주저반의 북동부에 위치하며 환상암맥을 포함하는 관입복합체를 이루고 있다(그림 1). 이 복합체는 비교적 작고 접근이 용이하며, 각 관입체마다 구조적인 패턴의 차이를 보여준다. 따라서, 우리는 자세한 구조 자료를 수집하고, 이의 관입 역사와 정치기구를 평가할 수 있다. 영주저반의 복합체에 대한 암석학, 지구화학 및 지구연대학적 연구는 비교적 자세히 수행된 바 있다(Lee *et al.*, 1998; Hwang *et al.*, 1999, 2000; Yoon *et al.*, 2014). 이 저반에서 봉화 콜드론은 잘 보존된 환상암맥으로 둘러싸이며 각 관입체의 연대가 고기일수록 변형도가 심하게 나타난다.

이 논문에서 우리는 영주저반 내에서 발생한 봉화 콜드론의 관입복합체들을 기재하고(그림 1), 중부지각의 마그마 배관체계에서의 이들의 역할을 토의해 보고자 한다. 현재까지 우리의 작업에 의하면 봉화 콜드론에서 환상암맥은 이전에 기재된 많은 백악기 환상관입체와 비교할 때 매우 특이하다. 우리나라 백악기 화산 아래의 복합체는 마그마가 상부지각 마그마 저장소로부터 지표까지 운반된다는 배관체계로 설명되어왔다(Hwang, 2012). 그러나 쥐라기 환상복합체는 영주저반에서 처음으로 발견되었지만 중부지각에서 마그마 이동을 나타내는 배관체계를 현재 충분히 고찰되지 못했다. 따라서 영주저반의 중부지각 심도에서 형성된 환상복합체의 존재는 다음 가능성을 고려할 것이다: (1) 화산-심성 침하계로서 상부지각 레벨로 연결될 가능성이 있고, (2) 환상복합체는 화산작용에 관련되지 않은 채 형성될 가능성도 있다.

## 2. 용어 정의

화산 아래의 환상복합체는 역사적으로 “화산-심성 침하계”의 필수적 요소로 고려되어왔는데, 이 일반적인 용어는 높은 레벨에 있는 칼데라와 그 아래에 있는 마그마챔버를 포함하고 이들 사이에서 발견되는 지질학적 특징까지를 포함한다. 더 구체적으로 본다면, 화산 아래의 환상복합체는 상부지각 마그마 챔버와 지표 칼데라 사이에 굳은 마그마 통로로써 해석되어왔다(예: Turner, 1963; Smith and Bailey, 1968; Walker, 1975; Oftedahl, 1978; Dodge, 1979; Lipman, 1984).

마그마성 환상구조를 기재하는데 사용된 용어는 복잡하고, 여러 용어가 느슨하게 또는 상호 교환적으로 사용되었다. 이러한 용어의 예는 칼데라, 콜드론, 환상구조, 환상복합체, 환상대(ring zone), 환상암맥, 환상암맥복합체, 원추암상 등을 포함한다. 여기서 우리는 이 논문에서 사용되는 몇몇 용어들을 정의하고 가능한 역사적으로 사용했던 것과 일치성을 유지하는 범위에서 재정립하고자 한다.

환상복합체(ring complex)는 원추암상 및/혹은 환상암맥을 포함하는 관입복합체를 설명하는데 사용되는 일반적인 용어이며, 평면도에서 원상, 계란상, 다각상 혹은 호상 관입체를 가지는 어떤 관입복합체를 기재하기 위해 느슨하게 사용될 수도 있다. 원추암상 혹은 환상암맥만 포함하는 복합체를 각각 원추암상 복합체 및 환상암맥 복합체라고 부르기도 한다. 환상복합체는 오랫동안 칼데라와 그 밑에 있는 마그마챔버 사이의 전달 연결고리를 나타내는 것으로 생각되어왔다(예: Turner, 1963; Smith and Bailey, 1968; Oftedahl, 1978).

칼데라(caldera)는 거의 원형의 큰 화산 저지이며, 포함된 화구 직경의 수배 이상 직경을 가지고, 그 아래의 마그마챔버로 지붕이 함몰하여 형성된다(Lipman, 2000; Cole *et al.*, 2005). 다량의 분출로 인해 마그마 챔버의 압력이 낮아지면 화구를 중심으로 생긴 환상단열대를 따라 원통상 블록이 함몰되며, 환상단열대를 따라 마그마 주입으로 환상암맥이 형성되기도 한다.

콜드론(cauldron)은 마그마챔버 위에서 술 모양으로 갈라진 블록이 챔버 내로의 침하 결과로 형성된다(Williams and McBirney, 1979; Komuro, 1987). 이러한 블록의 침하는 마그마 분출이 아니더라도 마그마 퇴각으로 일어날 수 있다(Billings, 1972, Myers, 1975). 마그마의 정수압이 모암의 정암압보다 작다면, 이때도 지하에서 단열대가 얼어진 술 모양으로 형성되어 이 블록이 마그마 속으로 내려앉고 단열대로 마그마가 채워짐으로써 환상암맥과 함께 형성된다(Clough *et al.*, 1909; Anderson, 1936; Billings, 1972; Myers, 1975).

환상암맥(ring dike)은 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. 암형은 일반적으로 규장질이며 냉각 구조는 보

여주지 않는다. 영국 스코틀랜드 글렌코(Glen Coe)에서 콜드론 함몰과 관련하여 Clough *et al.* (1909)가 환상암맥을 처음 기재하였다.

원추암상(cone sheet)은 원상, 계란상, 다각상, 호상을 이룰 수 있는 부조화적 관입체이며 완만하게 혹은 가파르게 내측으로 경사지는 접촉부를 가진다. 이 암상의 두께는 다양하지만, 수십 m 이상을 좀처럼 넘지 않는다. 암형은 고철질에서 규장질(털 혼함)일 수 있고 흔히 급냉 조적을 보여준다. 환상대(ring zone)는 원추암상 및/혹은 환상암맥을 포함하는 환상복합체 부분을 말한다.

위의 몇몇 용어의 의미는 화산-심성 침하계에서 서로 다른 구조적 레벨을 나타낸다는 개념으로 기재되었다. 흔히 환상복합체는 칼데라 아래에 놓이고 심성암체 위에 놓이는 것이다(예: Williams, 1941; Billings, 1945; Jacobson *et al.*, 1958; Smith and Bailey, 1968; Cobbing and Spencer, 1972; Bussell *et al.*, 1976; Oftedahl, 1978; Bonin, 1986). 그래서 환상복합체라는 용어는 흔히 비교적 깊이 침식된 침하계로 보존되지만, 원추암상은 화산체에서 비교적 높은 곳에서 발견될 수 있다(예: Schirnack *et al.*, 1999). 이처럼, 이 침하계에서 지질도 패턴과 위치 간에서 추론되는 관계는 보편적으로 적용될 수 있다. 다른 레벨 간의 중첩 혹은 전환될 수 있고(Lipman, 1984), 어떤 연구자는 지하 콜드론 침하(underground cauldron subsidence)와 이에 조합된 환상암맥 형성이 지표 화산작용 없이 일어날 수 있음을 추론하기도 하였다(예: Myers, 1975). 따라서 지질도 패턴과 절대적 지각심도 간의 엄격한 일치가 있을 필요는 없다는 것을 의미한다.

### 3. 지질배경

영주저반은 영남육괴 북동부의 소백산지구에 노출되는 큰 저반 중의 하나이다. 이 저반은 춘양로부터 영주, 예천과 문경까지 연장되어 있으며(그림 1), 쥐라기 대보조산운동에 의한 거대한 호마그마계의 심성암체로 인식되고 있다(Lee *et al.*, 1998; Hwang *et al.*, 1999).

영주저반의 남측부와 동측부의 변성퇴적암류는 원남층군과 울리층군에 속하며, 다양한 암상의 편마암류와 편암류로 구성되어 있다. 저반의 북부와 북

서부에서 소백산 변성암 복합체는 미그마타이트질 편마암, 페그마타이트질 미그마타이트, 화강암질 편마암과 호상 편마암으로 구성된다(Shin and Choi, 1968; Yoon *et al.*, 1988; Lee, J.H. *et al.*, 1989). 그리고 이들은 남서쪽으로 가면서 화강암질 편마암과 반상변정질 편마암 등의 편마암류를 협재한다. 저반의 인접부는 압쇄화되어 있으며, 압쇄작용은 변성작용과 심성작용 후의 일이다(Chang, 1990).

이 저반은 조성이 토날라이트에서 화강암 범위로 고(Lee *et al.*, 1998; Hwang *et al.*, 1999), 입도가 조립질에서 세립질 범위로서 다양하기 때문에 여러 개의 관입상과 분화상으로 구분하였다(Hwang *et al.*, 1999, 2000). 이 저반은 지질학적, 암석학적, 지화학적 특징들을 토대로 주로 토날라이트질, 화강섬록암질 및 화강암질 조성을 가진 6개의 암상으로 분대되며, 관입접촉부와 포획체에 의한 상호관계와, 마그마성 엽리 등의 내부구조에 의해서 각섬석 흑운모 토날라이트, 반상 흑운모 화강섬록암, 흑운모 화강섬록암, 흑운모 화강암, 춘양화강암, 복운모 화강암 순으로 세분하였다. 그리고 이 저반은 관입복합체(intrusive complex)로서 관입상에 따라 부석암체, 춘양암체와 장수암체로 묶을 수 있는 심성암복합체(plutonic complex)이다(Hwang *et al.*, 1999).

영주저반에서 변형작용은 북동-남서 내지 동서 방향으로 우세한 엽리를 가지는 구조적 뼈대를 형성하는 압쇄엽리이다. 이 저반의 남쪽 변성암류에서 연성 전단대도 이 시기에 일어났다. 압쇄엽리는 대개 N30~80°E, 50~70°NW이며 저반의 남동측 변성암류에 나타나는 전단대에 대체로 평행하다(Chang, 1990).

## 4. 봉화 콜드론의 지질과 암상기재

봉화 콜드론 주변의 지질은 변성암류를 관입한 관입복합체로 산출된다. 관입복합체는 부석심성암체와 춘양심성암체로 구분된다. 분화상과 관입 형태에 따라 전자는 토날라이트, 화강섬록암 및 흑운모 화강암으로 구분되며, 후자는 춘양화강암과 세립질 화강암맥으로 구분할 수 있으며 이들을 기재한다.

### 4.1 부석심성암체

#### 4.1.1 각섬석 흑운모 토날라이트

각섬석 흑운모 토날라이트는 이 지역의 북부에서

원남층군의 변성암을 관입하고 남부에서 흑운모 화강섬록암 및 흑운모 화강암과 접촉한다. 그리고 이 지역의 북동부에서 춘양화강암 및 세립질 화강암맥에 의해 관입된다(그림 2). 변성암류와 접촉부에서 간혹 변성암 포획체가 발견되는 곳도 있다. 일반적으로 대개 북동-남서 주향에 가파른 북서 방향의 경사를 가지는 엽리를 잘 발달시킨다(Hwang *et al.*, 1999). 이 엽리는 토날라이트의 연변부 가까이에서 변성암의 벽암에서의 압쇄엽리에 평행한 고체 상태의 엽리를 보여주고 긴 고철질 내포체가 항상 이에 일치하는 모습을 나타내며 마그마성 엽리(magmatic foliation)와 구별할 수 없다. 대조적으로 마그마성 엽리는 저반 경계부를 따라 동심원상으로 나타내고(그림 1), 전단각각 지시자는 주변 모암에 대해 아래로 이동했음을 일관적으로 보여준다(Hwang *et al.*, 1999).

이 토날라이트는 이 저반의 다른 암상보다 고철질 광물의 함량이 많아서 회색 내지 암회색을 띠며 영주저반 내에서 가장 색지수가 높다. 입도는 조립질 내지 중립질이지만 대체로 등립질이다. 이 암상은 주로 사장석, 석영, 알칼리장석, 흑운모, 각섬석을 함유하고 녹렴석, 스피넬을 드물게 가진다. 각섬석, 흑운모 등의 유색광물은 대체로 15~25% 정도 함유된다.

이 토날라이트는 MH-MY 횡단선에서 SiO<sub>2</sub>가 61.34~64.37 wt.% 범위를 나타낸다(Hwang *et al.*, 2000).

#### 4.1.2 흑운모 화강섬록암

흑운모 화강섬록암은 이 지역의 서반부에 넓게 분포하며 북동부에서 편마암류를 관입했으며(그림 2) 풍화에 약하여 낮은 구릉지와 평야를 이룬다. 토날라이트와 마찬가지로 대체로 북동-남서 주향에 북서 방향으로 가파른 경사를 가지는 희미한 엽리를 나타내기도 한다(Hwang *et al.*, 1999). 이들은 특히 사장석, 흑운모 및 각섬석 결정의 배열로 정의되는 마그마성 엽리를 나타낸다. 이 엽리는 대체로 주변 모암에 대해 동심원상으로 보여주고 위로 이동했다는 일관적인 전단각각 지시를 나타낸다(Hwang *et al.*, 1999).

이 화강섬록암은 회색 내지 담회색을 띠고 조립질로서 대개 등립질의 입상조직을 나타내지만, 간혹 알칼리장석 결정이 아주 드물게 반정으로 나타나는 곳도 있다. 이 암상은 주로 사장석, 석영, 알칼리장

석, 흑운모를 함유하고 각섬석, 녹렴석, 스피넬을 드물게 갖는다. 흑운모 등의 유색광물은 대체로 10~20% 정도 함유된다.

이 화강섬록암은 MH-MY 횡단선에서 SiO<sub>2</sub>가 66.70~68.72 wt.% 범위를 나타낸다(Hwang *et al.*, 2000).

#### 4.1.3 흑운모 화강암

흑운모 화강암은 이 저반의 중부에 반원상으로 분포하며 약 85 km<sup>2</sup> 면적을 가진다. 이 화강암은 세립질 화강암맥과 환상단층에 의해 둘러싸이며(그림 2), 응방산 근처에서 변성암을 포획체로 함유하고 토날라이트와 화강섬록암과 접촉부에서 부분적으로 전단작용으로 파쇄되어있거나 단층 접촉을 한다.

이 화강암은 입도가 대체로 중립질이지만 부분적으로 조립질인 곳이 있고 불균질하지만 거의 몬조화강암에 해당한다. 이 암상은 주로 사장석, 석영, 알칼리장석, 흑운모로 구성되며 녹렴석과 갈럼석이 드물게 관찰된다. 알칼리장석은 간혹 반정으로 나타난다. 유색광물은 6~10% 정도 함유되나 부분적으로 이들이 밀집된 솔리렌 구조를 나타낸다.

이 화강암은 MH-MY 횡단선에서 SiO<sub>2</sub>가 68.65~73.17 wt.% 범위를 나타낸다(Hwang *et al.*, 2000).

### 4.2 춘양심성암체

#### 4.2.1 춘양화강암

춘양화강암은 동부에 분포하며 변성암류와 토날라이트를 관입하면서 암주 형태를 이룬다(그림 2). 이는 일반적으로 괴상으로 엽리가 없지만 1×2 cm 내외의 장석 결정이 반정으로 나타나는 반상조직을 나타낸다.

이 암상은 중립질에서 세립질의 입상조직을 보여주고 조성이 화강암질 내지 화강섬록암질을 나타낸다(Hwang *et al.*, 1999). 대개 회색을 띠고 주로 석영, 사장석, 알칼리장석, 흑운모와 백운모로 구성된다. 장석류는 사장석과 알칼리장석이 거의 대등한 함량을 나타내나 암주의 중심부에서는 사장석이 약간 더 우세해진다. 운모류는 흑운모가 백운모보다 항상 우세하나 변성암과 접촉부로 가면서 백운모가 더 우세해진다. 그래서 이 암상은 전체적으로 북운모 화강암이라 할 수 있다.

이 화강암에 대한 SHRIMP U-Pb 저어콘의 연대는 174.8±1.4 Ma이다(Yoon *et al.*, 2014).

4.2.2 세립질 화강암맥

세립질 화강암맥은 동반부에서 변성암류, 토날라이트와 흑운모 화강암을 관입하고 서반부에서 화강섬록암과 흑운모 화강암을 관입하면서 환상암맥으로 산출된다. 이 암맥은 암상이 세립질 복운모 화강암에 해당된다.

이 복운모 화강암은 엽리가 없고 비반상으로 훨씬 세립질이며 아주 균질한 괴상의 입상조직을 나타낸다. 좁은 암맥에서는 세립질에 해당되지만 두꺼운 암맥에서는 중립질에 가까운 곳도 있다. 이 암상은 회색 내지 녹회색을 띠며 매우 균질한 등립질의 입상조직을 나타낸다. 주로 석영, 알칼리장석, 사장석, 흑운모와 백운모 등으로 구성된다.

5. SHRIMP 저어콘 U-Pb 연대

봉화 콜드론 주변에서 관입복합체는 5개 암상 중 3개 암상에서 SHRIMP 저어콘 U-Pb에 의한 연대가 이미 보고된 바 있다. 각섬석 흑운모 토날라이트는 186.6±0.73 Ma이고 흑운모 화강섬록암은 185.8±0.69 Ma로 측정되었으며, 춘양화강암은 174.8±1.4 Ma로 측정되었다(Yoon *et al.*, 2014). 그래서 나머지 흑운모 화강암과 세립질 화강암맥에 대해 SHRIMP

저어콘 U-Pb 연대측정을 수행하였다.

5.1 흑운모 화강암 연대

흑운모 화강암은 시료 HY545의 저어콘으로부터 측정되었다. 저어콘들은 대부분 자형이며 주상이지만 장주상도 산출된다. CL 영상에서 저어콘들은 중심원상으로 섬세한 진동누대를 보이지만, 상속핵을 가지지 않는다(그림 2a). 14개 저어콘의 U과 Th 농도는 각각 434~1122 ppm과 81~467 ppm이고, Th/U 비는 0.15~0.57의 좁은 범위로 나타난다(표 1). U-Th 관계도에서 분석된 저어콘들은 대체로 Th/U 비가 1인 등치선을 따라 거의 직선상으로 나타난다(그림 3). 이들에 의하면 저어콘들은 외형 및 내부구조와 함께 마그마에서 성장한 저어콘의 특징을 나타낸다(Vavra *et al.*, 1999; Hartman *et al.*, 2000).

측정연대는 통계분석 t-검정에 의해 제외된 가장 젊은 분석치 1개 외 나머지 13개 분석점에서의 겹보기 <sup>206</sup>Pb/<sup>238</sup>U 값이 185~177 Ma 범위를 가지며(표 1), 가중평균 <sup>206</sup>Pb/<sup>238</sup>U 연대를 설정하기가 곤란하다(그림 4a). 그 원인은 HY545 시료의 저어콘 결정 형태 및 음극선발광 영상 관찰결과가 이 결정들이 마그마 형성시 함께 성장한 단일화성기원임을 시사하므로, 약 8 Ma의 범위를 가지는 슈림프 결과는 우

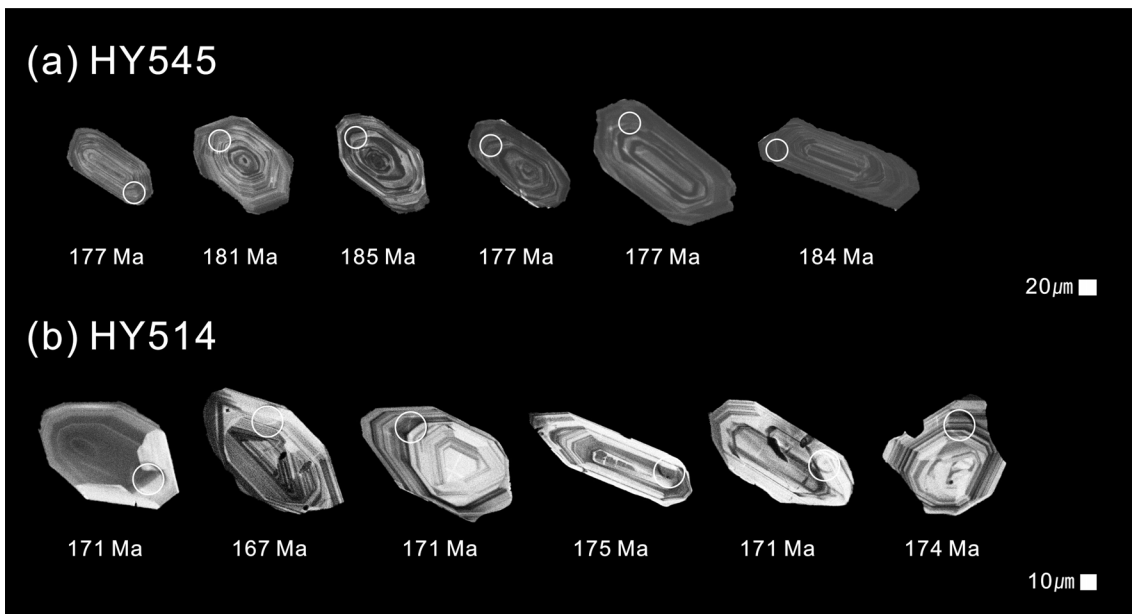


Fig. 2. Representative Cathodoluminescence images of the analysed zircon grains, showing the location of analytical spots and <sup>206</sup>Pb/<sup>238</sup>U ages in Ma, separated from the biotite granite (HY545) and fine-grained granite dike (HY514).

**Table 1.** Summary of SHRIMP U-Pb isotopic data of the analytical zircons from the biotite granite and fine-grained granite dike.

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)	
Sample HY545												
HY545_1.1	-	1005	238	0.24	1.70	0.049	0.9	0.028	0.5	177	0.9	158 ±23
HY545_3.1	0.03	843	467	0.57	0.10	0.050	1.0	0.028	0.4	181	1.0	120 ±33
HY545_4.1	0.12	905	306	0.35	0.50	0.051	2.8	0.029	1.6	185	±3	180 ±68
HY545_5.1	0.04	875	345	0.41	0.40	0.050	1.1	0.028	0.5	177	1	184 ±27
HY545_6.1	0.12	615	96	0.16	2.11	0.051	1.3	0.029	1.1	181	±2	158 ±39
HY545_8.1	0.06	621	226	0.38	0.34	0.050	2.2	0.028	0.6	177	±1	174 ±54
HY545_9.1	0.06	881	125	0.15	0.17	0.050	1.0	0.029	0.5	183	1.0	223 ±26
HY545_11.1	0.07	434	81	0.19	0.85	0.050	1.4	0.028	0.7	179	±1	39.4 ±58
HY545_12.1	-	515	189	0.38	0.95	0.049	1.3	0.028	1.1	179	±2	262 ±42
HY545_13.1	-	816	200	0.25	0.35	0.050	1.1	0.029	0.6	184	±1	225 ±30
HY545_14.1	0.05	941	280	0.31	1.22	0.050	1.0	0.028	0.6	177	±1	163 ±26
HY545_15.1	0.10	809	223	0.28	0.86	0.050	1.1	0.027	1.1	172	±2	203 ±26
HY545_16.1	0.04	700	280	0.41	0.15	0.050	1.2	0.028	1.1	180	±2	64.9 ±47
HY545_17.1	0.01	1122	438	0.40	0.46	0.050	0.8	0.029	0.5	182	1.0	155 ±23
Sample HY514												
HY514_1.1	-	35	34	1.01	0.76	0.047	9.5	0.028	2.7	172	±4	831 ±429
HY514_2.1	-	60	79	1.34	0.53	0.050	4.6	0.029	2.3	188	±4	
HY514_3.1	-	133	133	1.04	0.37	0.049	3.0	0.027	1.5	175	±3	-475 ±363
HY514_4.1	0.05	53	58	1.15	0.51	0.050	4.3	0.027	3.4	168	±6	691 ±256
HY514_5.1	-	155	178	1.19	0.33	0.048	2.7	0.027	2.1	171	±4	394 ±142
HY514_6.1	0.21	74	120	1.68	0.44	0.051	4.0	0.027	1.7	171	±3	-156 ±348
HY514_7.1	0.56	68	54	0.82	0.56	0.054	3.4	0.026	2.0	167	±3	-636 ±731
HY514_8.1	-	166	150	0.93	0.36	0.047	2.3	0.027	1.3	173	±2	312 ±140
HY514_9.1	0.02	126	140	1.15	0.40	0.050	4.5	0.027	1.4	171	±2	61.4 ±165
HY514_10.1	0.03	160	212	1.36	1.05	0.050	1.8	0.027	1.2	171	±2	295 ±86
HY514_11.1	-	126	260	2.13	0.28	0.048	2.1	0.038	1.4	175	±2	615 ±155
HY514_12.1	0.16	64	21	0.82	0.46	0.051	2.8	0.027	1.6	171	±2	-409 ±406
HY514_13.1	0.13	149	141	0.98	0.31	0.051	1.9	0.027	1.2	174	±2	165 ±75

라늄-납 동위원소 시스템이 제어콘 형성시 혹은 그 이후에 일부 교란을 받았을 가능성을 의미한다.

## 5.2 세립질 화강암맥 연대

세립질 화강암맥은 시료 HY514의 제어콘으로부터 측정되었다. 제어콘들은 자형이면서 주상이고 단 주상도 있으며, 음극선발광 영상에서 동심원상의 자형 누대구조를 가지고 상속핵을 보이지 않는다(그림 2b). 제어콘의 U과 Th 농도는 각각 35~166 ppm과

21~260 ppm이고, Th/U 비는 0.82~2.13의 비교적 넓은 범위를 나타내며 등치선 1과 2 사이에서 다소 산만하나 직선상을 보여준다(그림 3). 이도 역시 외형과 내부구조와 함께 화성성인을 나타낸다.

그러나 U 함량은 세립질 화강암맥에서 166 ppm 이하이지만 흑운모 화강암에서 434 ppm 이상이며, Th/U 비는 세립질 화강암맥에서 0.82 이상이지만 흑운모 화강암에서 0.57 이하로서 완전히 다른 군집을 이룬다. 이러한 다른 분포패턴은 두 암상이 다른



심성암체에 속한다는 것을 지시한다.

통계분석 t-검정에 의해 제외된 측정연령이 가장 오래된 분석치 1개 외 나머지 12개 분석점에서의 겹보기  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  값이 167~175 Ma의 범위를 가진다 (표 1). 12개 분석치는 가중평균  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  연대  $172.2 \pm 1.4$  Ma (MSWD=0.90)로 조화적인 군집으로 정의된다(그림 4b). 가장 오래된 분석치 188 Ma는 후방 산란전자영상 관찰 결과 저어콘 결정에 포획된 불순 물과의 혼합분석의 영향인 것으로 해석된다.

6. 콜드론 규모

봉화지역에서 관입복합체는 주로 환상단열대, 관

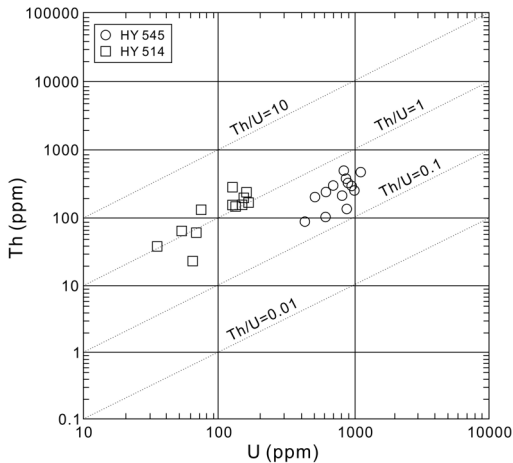


Fig. 3. Correlation diagram showing the proportions of Th to U concentrations (ppm) of the zircons analyzed by SHRIMP.

입 및 침식으로 큰 영향을 받았지만, 엽리측정과 경계추적에 의해 콜드론을 복원할 수 있다. 즉 콜드론은 관입체의 형태와 함몰에 관한 기하학적 관계로부터 추론해낼 수 있다.

봉화 콜드론은 대체로 환상암맥과 단층을 따라 구조적 경계를 구획할 수 있다. 그래서 콜드론 영역은 환상암맥과 환상단층을 이상적으로 연결함으로써 정의된다. 콜드론은 흑운모 화강암이 차지하며 외연부를 따라 환상암맥이 두껍게 관입되어 있고 그 외곽부에 변성암류, 각섬석 흑운모 토날라이트 및 흑운모 화강섬록암이 분포한다.

6.1 환상암맥과 콜드론 형태

봉화 콜드론은 둘레의 총 길이가 40.7 km에 달한다(표 1). 이 둘레는 동측부와 서측부에서 대규모 환상암맥으로 연결되지만, 북측부와 남측부에서 소규모 암맥이 단속적으로 연결되다가 단층 혹은 단열대로 대체된다(그림 1). 암맥들은 경사가 대체로 대부분 수직에 가깝지만, 외측으로  $65\sim 85^\circ$ 로 경사진다.

동측 환상암맥은 북측에서 북동측을 거쳐 동측으로 12.0 km의 낫 모양으로 연결된다. 맥폭은 북동측에서 약 1.6 km로 가장 두껍지만, 북측과 동측으로 갈수록 다소 좁아지다가 10 m 이하로 얇아진다. 따라서 이 환상암맥은 봉화콜드론의 경계를 정의해준다.

서측 환상암맥은 콜드론 서측에서 남서측으로 호상으로 연장되며 6.7 km에 달한다. 이는 서측부에서 맥폭이 최대 약 1.4 km이던 것이  $N15^\circ E$  방향으로 연장되다가 남서측으로 가면서  $N40^\circ W$  방향으로 휘어지고 점점 좁아져 10 m로 얇아진다.

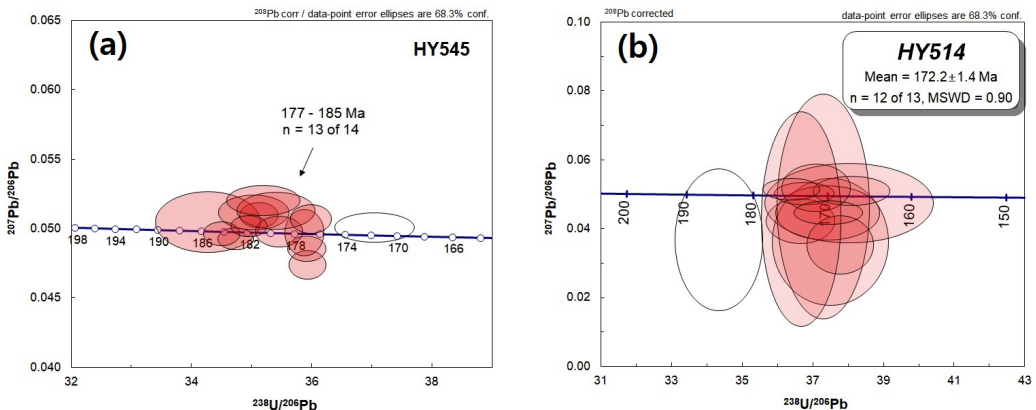


Fig. 4. Concordia diagrams for SHRIMP U-Pb ages of zircons separated from samples (a) HY545 and (b) HY514.



**Table 2.** Ring dikes and faults defining a boundary of the Bonghwa cauldron.

Structures	Length of ring dikes and faults (total 40.7 km)						Cauldron diameter (km)
	Eastern side	Western side	Northern side		Southern side		
	E dike	W dike	N dike	Faults	S dikes	Faults	
Measuring values	12.0	6.7	3.8	1.0+2.3	1.2+1.8	1.8+2.8+7.3	6.0×12.8

북측 환상암맥은 북측에서 동서 방향으로 달리다가 북서측에서 N30°E 방향으로 휘어져 호상으로 연장되며 3.8 km에 달한다. 맥폭은 최대 200 m 이하로 좁고 양쪽으로 10 m 이하로 점점 얇아져 단층 혹은 단열대로 대체된다.

남측 암맥은 남서측에서 N30°E 방향으로 1.2 km로 연장되고 남측에서 N65°E 방향으로 1.8 km에 연장된다. 이들은 맥폭이 최대 250 m 이하로 좁고 각각 양쪽으로 가면서 점차 얇아져 단열대로 대체된다.

따라서 봉화 콜드론은 환상암맥의 총연장 25.5 km와 단층(혹은 단열대)의 총연장 15.2 km로 구획되는 거의 반원상 구역을 말한다(표 2). 이 구역 내에서 가장 짧은 직경은 NNW-SSE 방향으로 6.0 km이고 이에 직각 방향의 직경은 약 12.8 km이다.

이 환상암맥들은 유상엽리를 관찰되지 않지만 관입접촉부가 대개 수직 혹은 외측경사를 이룬다. 콜드론을 경계로 내부의 암상은 오직 흑운모 화강암으로 변성암 포획체를 가지지만 균질한 반면, 외부 암상은 변성암류, 각섬석 흑운모 토날라이트와 흑운모 화강섬록암으로 다양하다(그림 1). 이러한 지질도 패턴에 의하면, 이 환상암맥들은 지하에서 콜드론 침하(cauldron subsidence)로 생긴 틈에 의해 지배되었음을 암시한다. 그러면 이 암맥들은 기존 암체에 이미 형성된 통로에 주입되는 허용식 관입(permissive intrusion)에 의한 것임을 암시한다. 즉 콜드론 침하로 증가하는 하중이 마그마 압력을 증가시킬 때 마그마는 침하로 생긴 환상단열대 틈을 따라 유입되어 채워진 마그마 물질을 암시한다.

## 6.2 미구조 및 미조직 변화

부석섬성암체에서 미구조적 변화는 대체로 연변부로부터 내부로 향하여 일어난다. 이 암체의 연변부에서 토날라이트와 화강섬록암에서 일차적인 마그마성 엽리 (magmatic foliation)가 종종 외측 접

촉부에 대체로 평행하게 인지되지만, 점차 내부 암상으로 갈수록 희미해져 결국 전혀 나타나지 않는다(Hwang *et al.*, 2000). 따라서 중앙부 암상인 흑운모 화강암은 회백색이고 엽리의 식별이 어렵다. 왜냐하면 연변부 암상에서 풍부한 유색광물이 안쪽으로 가면서 석영과 알칼리장석이 증가됨으로써 감소되기 때문이다. 엽리는 주상과 판상 광물 특히 각섬석, 장석과 흑운모의 우세한 방향성을 반영한다. 이러한 엽리는 거의 수직이거나 급경사이며 대체로 이 암체의 외측 접촉부에 평행하고 안쪽으로 약해지는 사실로 본 암체의 정치시에 이미 정출된 결정들이 운동 방향에 따라 배열된 것으로 해석되지만, 토날라이트의 남동 연변부에선 부분적으로 결정화된 부분이 압력에 의해 평면화작용의 결과인 것으로 해석되었다.

그러나 토날라이트에서는 이의 남동측에서 북동-남서 방향으로 더 뚜렷한 압쇄엽리가 발달되어 있다(Hwang *et al.*, 1999). 이 엽리는 마그마성 엽리와 거의 평행하게 중첩되기 때문에 더 선명하지만 두 엽리를 구별하기는 상당히 어렵다.

부석암체에서 입도는 대체로 조립질이지만 이 암체의 접촉부 근처에서 중립질이고 여기서 안쪽으로 갈수록 대부분 조립질로 증가하고 중북부의 흑운모 화강암에서 다시 중립질로 감소한다(Hwang *et al.*, 2000). 알칼리장석은 연변부 암상인 각섬석 흑운모 토날라이트에서 드물게 나타나지만, 흑운모 화강섬록암에서 입도와 함량이 증가한다. 석영은 입도가 점점 증가하고 흑운모 화강암 가까이의 흑운모 화강섬록암에서 최고 직경 1 cm의 결정으로 된다. 이 심성암체의 연변부에서 더 세립화하는 것은 마그마 냉각(magma chilling)에 따라 초래되는 연변상으로 생각된다. 즉 입도의 세립화는 마그마챔버의 연변부에서 온도가 더 빨리 떨어지는 벽쪽과 지붕에서의 열손실로부터 초래된다. 여기서 비교적 빠른 냉각으로 핵생성이 풍부해지고 이들이 조립질로 성장하지

못한 채 고화되어 연변부 중립질 암석을 형성하였고 챔버 상층부의 지붕에서 중립질 흑운모 화강암을 형성하였던 것으로 생각된다. 그리고 각섬석은 그 형태가 대개 자형을 가지는데, 이러한 자형 형태는 마그마가 거의 멜트 상태에서부터 결정화되었음을 암시한다(Presnall and Bateman, 1973).

흑운모 화강암은 이의 북부에서 변성암 포획체를 드물게 함유하는데, 이러한 포획체는 연변부 아니면 지붕에서 가능하다. 흑운모 화강암체는 암석학적으로 부석암체에서의 마그마챔버 상층부에 존재하는 분화물질로 추론하였기에(Hwang *et al.*, 2000) 침하가 일어나야만 가능하다. 즉 칼데라 함몰 혹은 콜드론 침하로 내려앉아야만 상층부의 화강암이 하층부의 화강섬록암과 토날라이트와 같은 레벨에 놓일 수 있다.

## 7. 토 의

영주저반의 북동 중앙부에서 관입복합체는 중부 지각 레벨에서의 심성암 침하계에 관련되는 봉화 콜드론을 노출시킨다. 이 복합체는 저반 내에서 2개의 다른 시기에 심성작용을 겪었던 심성암체를 나타낸다. 전기 부석심성암체는 186.6~177 Ma 심성작용 동안에 형성되었고 후기 춘양심성암체는 174.8~172.2 Ma 심성작용 동안에 형성되었다(표 3). 이때 두 심성암체는 쥐라기 마그마호의 조구조적 환경하에서 진화했지만 관입복합체의 상호관계는 우리가 중부 지각 레벨에서 콜드론과 관련되는 마그마 배관체계를 추론하도록 한다.

### 7.1 환상암맥의 지질 관계

봉화지역에서 환상암맥은 같은 조직과 조성을 가지는 춘양심성암체의 세립질 화강암맥에 해당하며, 부석암체의 각섬석 흑운모 토날라이트, 흑운모 화강

섬록암과 흑운모 화강암을 관입하고 있다(그림 1). 따라서 이 세립질 화강암맥은 침하하는 흑운모 화강암 주변에 환상암맥으로 관입했던 것으로 생각된다(그림 5).

그러나 지질 관계는 역시 흑운모 화강암이 세립질 화강암맥을 등지상 다이아피르(diapir)로 관입했다고 볼 수도 있다(England, 1990, 1992). 이러한 관계는 다이아피르의 정치로 흑운모 화강암의 접촉부에서 세립질 화강암맥 뿐만 아니라 토날라이트와 화강섬록암을 동심원상으로 엮리화되어야만 가능하다(예: Mirriam, 1941). 그리고 흑운모 화강암이 정치할 때 화강암맥이 중간 정도의 멜트를 가졌다면, 물질 이동은 모두 수직이어야 한다(예: Paterson and Vernon, 1995). 이러한 관입 역사는 화강암맥에서의 마그마성 엮리와 일치하고 고기 기반암(변성암류, 토날라이트와 화강섬록암)에서의 동심원상 엮리와도 일치해야만 한다. 그러나 토날라이트 및 화강섬록암과의 접촉부에 평행한 엮리가 관찰되지 않으며, 이 때문에 이러한 가능성은 이들이 흑운모 화강암 이후에 정치되었거나 혹은 동시기의 분화상이어야만 한다.

### 7.2 암상의 연대치와 침하

봉화 콜드론 주변에서 관입복합체는 5개 암상 중에서 3개 암상이 SHRIMP U-Pb 저어콘에 의한 연대를 이미 측정된 바 있다. 각섬석 흑운모 토날라이트는 186.6 Ma이고 흑운모 화강섬록암은 185.8 Ma로 측정되었으며, 춘양화강암은 174.8 Ma로 측정되었다(Yoon *et al.*, 2014).

흑운모 화강암은 SHRIMP 저어콘 U-Pb의 연대가 185~177 Ma의 범위로 측정되었다(그림 4a). 이러한 범위는 앞에서 이 화강암이 정치할 때 마지막 상승(혹은 대류)으로 주위로부터 이미 성장이 끝난 결정이 유입되었던 것으로 해석할 수도 있다. 세립질 화강암맥은 SHRIMP 저어콘 U-Pb 연대가 172.2

**Table 3.** SHRIMP U-Pb zircon ages of the lithofacies in the Bonghwa cauldron.

Pluton	Lithofacies	SHRIMP U-Pb zircon age	Reference
Buseok pluton	Hornblende biotite tonalite	186.6±0.73 Ma	Yoon <i>et al.</i> (2014)
	Biotite granodiorite	185.8±0.69 Ma	Yoon <i>et al.</i> (2014)
	Biotite granite	177~185 Ma	this study
Chunyang pluton	Chunyang granite	174.8±1.4 Ma	Yoon <i>et al.</i> (2014)
	Fine-grained granite dike	172.2±1.4 Ma	this study

Ma로 측정되었다(그림 4b). 이 측정치는 이 암맥이 관입하여 정치한 시기로 해석된다.

그러므로 부석심성암체에서의 토날라이트(186.6 Ma)와 화강섬록암(185.8 Ma)은 흑운모 화강암(185~177 Ma)보다 선기의 분화물이라고 해석했던 것(Hwang *et al.*, 2000)을 지지한다. 그리고 화강암맥(172.2 Ma)은 춘양심성암체에서 후기의 분화물로서 춘양화강암(174.8 Ma) 암주보다 나중에 환상암맥으로 관입되었던 것이다. 따라서 환상암맥 주변부에서의 부석심성암체에는 암맥을 따라 동심원상으로 평행한 마그마성 엽리가 발달되지 않았음을 이해할 수 있다.

그렇다면 상층부에 자리잡았던 흑운모 화강암은 어떻게 하층부에 놓였던 토날라이트와 화강섬록암과 동일한 지각 위치에 존재하게 되었는지가 의문이다. 이러한 공간적 접촉관계는 상층부에 정치한 지붕의 흑운모 화강암이 하층부를 거쳐 아래의 마그마 챔버로 내려앉아야지만 가능하다. 그리고 세립질 화강암맥은 침하를 일으키는 흑운모 화강암의 연변부를 따라 환상암맥으로 관입했던 것으로 해석한다(그림 5). 한편 흑운모 화강암에서 변성암 포획체가 산출되고 수직 마그마성 엽리가 없는 것은 이 화강암이 지붕암이라는 것과 함께 하향 침하를 간접적으로 지지해준다.

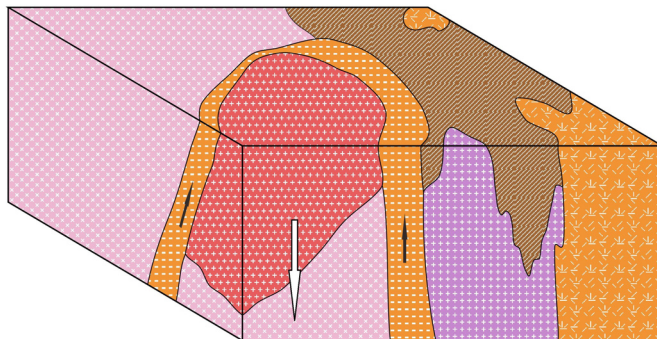
하향 침하관계는 한반도의 백악기 화산-심성 침하계에서 흔하게 관찰할 수 있다(Yun, 1988; Hwang, 1998; Hwang *et al.*, 2017). 화산-심성 침하계를 나타나는 특정 지질도 패턴은 일반적으로 개별 침하계 내에서 상대적인 위치를 나타내는 지표일 뿐이지, 절대적인 노출심도를 나타내는 지표는 아니다. 여기서 칼데라, 환상복합체 및 심성암체는 일반적으로 화산-

-심성 침하계를 통해 점진적으로 더 깊은 단면을 나타낸다(Johnson *et al.*, 2002). 이 단면은 가장 얇은 레벨에서 칼데라를, 더 깊은 레벨에서 이들을 공급했던 심성암체와 중간 레벨에서 둘 사이의 마그마 통로의 굳은 잔여물인 환상복합체를 노출시킨다. 단일 지역에서 이러한 3개 마그마성 요소가 보존되려면 어렵겠지만, 이들 요소가 3차원으로 상부지각과 어떤 “배관체계”로 연결되었는지를 확인할 기회를 제공한다.

### 7.3 가능한 침하기구

어떤 침하기구가 이 관입체의 입체모양을 지배했는지 이들이 중부 혹은 상부지각의 마그마 배관체계에 어떤 중요성을 가졌는지 불확실하다. 환상암맥은 환상단층 및 단열의 발달에 의해 진행되며(Johnson *et al.*, 1999), 이로써 우리는 봉화 관입복합체에서 화산-심성 침하계의 중부지각 레벨에서 환상암맥 형성의 초기단계를 나타낸다고 생각할 수 있다. 따라서 환상암맥이 환상단열을 따라 부석심성암체와 변성 퇴적암 벽암을 관입했음을 보여준다. 이 환상암맥은 콜드론 침하와 관련하여 빠르게 변하는 응력장에 의해 형성되는 동심원상 단열대를 따라 정치되었음을 시사한다.

이들 관입체가 화산-심성 침하계의 부분이 될 수 있지만, 그런 결론에 도달하기 전에 더 많은 사고가 필요하다. 특히, 화강암맥이 원추암상과 조합된 환상암맥이라면, 그렇게 깊은 지각 레벨에서 산출되는 암맥을 기재하는데 사용된 적이 없고, 이들의 형성에 대한 모든 표현은 화산 아래 마그마챔버 위에서 암석의 상향확장과 같은 상부지각 과정과 관련되어



**Fig. 5.** Block diagram showing the three-dimensional geometry. The central plug of biotite granite subsides, allowing intrusion of the ring-shaped fine-grained granite dike around it.

있다(예: Anderson, 1936; Phillips, 1974; Walker 1975; Komuro, 1987; Schirnack *et al.*, 1999). 마그마 챔버는 과압에 도달하면, 몇몇 단계에서 위로 충분한 힘을 가해 상위 지각을 단열시키고 찢어지게 한다. 이러한 단열들은 마그마로 채워지고 빠르게 식어 원추암상을 형성해야만 한다. 그러나 이들은 지표로까지 마그마 운반을 위한 통로를 제공하였는지 어떤지를 알 수 있는 증거를 전혀 발견할 수 없다. 따라서 이 환상암맥은 원추암상과 관련될 가능성이 거의 없는 것으로 생각된다.

그 대신에, 화강암맥이 칼데라 함몰과 조합된 환상암맥이라면, 이 암맥의 내측부에 운동학적 지지자들은 복합체의 내부가 아래로 낙하했다는 것 외에 천부지각 레벨을 보여주어야만 한다. 칼데라 형성에 관한 고전적 견해에 의하면, 칼데라 바닥은 마그마의 방출에 순응하여 지표 근처의 마그마챔버로 가라앉는다는 것을 암시한다. 천부지각의 파열은 이 통로를 통해 챔버로부터 마그마 손실이 멜트의 탈기작용과 조합하여, 마그마 압력을 감소시키고 거의 수직의 환상단층을 따라 지붕 함몰을 쉽게 유도한다. 이러한 단층은 심도 감소에 따라 취성 운동대로 진화하고, 그리고 규장질 마그마를 상승케 하여 환상암맥을 형성할 것이다. 이때 이들이 정지될 심도가 주어질지라도, 우리는 이들 암맥을 칼데라 함몰에 의한 침하기구로 보기에 망설여진다. 이러한 망설임은 지표에서 이에 관련된 화산암의 부재를 반영하고 상부지각의 마그마 배관체계에 대해 이들이 어떤 중요성이 있는지에 관한 불확실성을 반영한다. 한반도에서의 쥐라기 심성암체는 대규모 산출에도 불구하고 아직 이에 관련된 화산암이 발견되지 않았고 대부분 저반으로 노출되니까 더욱 그렇다.

그러므로 이 환상암맥은 지표로 연결되지 않는 콜드론 침하에 의한 것으로 추론할 수밖에 없다. 이 환상관입체가 심성암맥으로 산출되고 칼데라 함몰이라는 증거를 찾지 못한다면 우선 콜드론으로 간주하여왔기 때문이다(Smith and Bailey, 1968). 중부지각의 파열은 마그마챔버로부터 대규모의 마그마 운반으로 중요한 에너지장벽을 완화시킨다. 이 결과는 거의 수직의 환상단열을 따라 지붕 침하를 쉽게 유도한다. 이때의 환상단층은 심도 증가에 따라 국지적으로 변위의 너비와 양이 변하는 연성 운동대로 진화하고, 그리고 환상암맥을 형성하는 비교적 규장

질 멜트의 상승을 위한 화도를 제공한다.

영주저반에서 봉화 콜드론은 잘 보존된 환상암맥이지만, 지표로 혹은 천부지각 레벨로 연결된 명확한 증거는 없다. 따라서 우리는 현재 이 복합체의 정치심도를 단지 막연하게 평가할 수밖에 없다. 중부지각 레벨에서의 환상복합체는 마그마를 공급하는 거의 수직의 환상단열과 같은 마그마 통로를 제공할 것이고, 더 높은 지각 레벨에서 거의 수평의 단열로 연결될 것이다. 이러한 “환상고리”를 통한 더 깊은 마그마 배관체계와의 연결은 같거나 혹은 더 낮은 밀도의 모암을 통해 위쪽으로 관입하기 위해 더 얕은 레벨에서의 마그마가 요구하는 높은 마그마 정압을 제공할 수 있을 것이다. 그러나 이 환상암맥은 칼데라와 연결된 마그마계라기보다 차라리 천부 레벨에 도달하지 못한 마그마계를 나타낼 수밖에 없다.

## 8. 결 론

영주저반은 부석, 춘양 및 장수심성암체와 같은 관입상으로 구성되는 심성암복합체이다. 부석심성암체는 각섬석 흑운모 토날라이트, 흑운모 화강섬록암과 흑운모 화강암의 분화상으로 구분되며, 춘양심성암체는 관입형태에 따라 춘양화강암 암주와 세립질 화강암맥으로 구분된다. SHRIMP U-Pb 저어콘 연대는 토날라이트(186.6 Ma), 화강섬록암(185.8 Ma), 흑운모 화강암(185~177 Ma), 춘양화강암 암주(174.8 Ma), 환상화강암맥(172.2 Ma)의 젊어지는 순서를 나타낸다.

봉화 콜드론은 직경이 6.0×12.8 km이며 세립질 화강암맥으로 보존된 환상암맥과 환상단층에 의해 경계된다. 콜드론의 외곽부는 챔버의 하층부에 놓이는 선기 및 중기 분화상인 토날라이트와 화강섬록암과 접하지만, 그 내부는 상층부에 놓여야만 하는 후기 분화상인 흑운모 화강암으로 이루어진다.

이러한 지질도 패턴은 개별 침하계 내에서 마그마성 요소들이 3차원으로 어떠한 “배관체계”로 상부지각과 연결되었는지를 확인할 기회를 제공한다. 따라서 환상단층 운동학은 흑운모 화강암이 주변의 변성암, 토날라이트 및 화강섬록암에 비해 아래로 이동했다는 것을 나타내며, 이는 아래의 마그마챔버로 침하되는 것을 암시한다. 보존된 구조적 및 관입

관계에 의하면, 우리는 콜드론 침하를 추론할 수 있으며 적용할 수 있는 모델은 (1) 아래 마그마챔버에서 마그마의 퇴각으로 위의 지붕암이 침하하는 것이며, (2) 지붕의 고체화된 흑운모 화강암이 그 아래의 후기 마그마챔버로 가라앉는다는 것이다.

그래서 봉화 콜드론은 상부지각 레벨에서 화산-심성 침하계와 무관한 콜드론 침하계를 나타낸다. 이 콜드론은 (1) 부석심성암체의 분화와 정치, (2) 중부지각 레벨에서 이수직의 환상단층 발달, 그리고 (3) 콜드론 침하 및 환상암맥 주입의 진화순서를 보여준다.

## 감사의 글

이 논문은 야외지질조사에서 얻어진 자료를 바탕으로 추가 연구로 얻어진 결과이다. 연대측정은 한국 기초과학지원연구원의 선도장비 이용자프로그램에 의한 SHRIMP U-Pb 분석으로 수행되었다. 그림은 안동대학교 암석학연구실 현혜원의 도움이 있었다.

## 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-A, 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.
- Brown, M. and Rushmer, T., 1997, The role of deformation in the movement of granitic melt: Views from the laboratory and the field. in Holness, M.B., ed., *Deformation enhanced fluid transport in the earth's crust and mantle*, Chapman and Hall, London, 111-144.
- 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.
- Chang, T.W., 1990, Relative timing of shear zone formation and granite emplacement in the Yecheon shear zone, Korea. *Economic and Environmental Geology*, 23, 453-463 (in Korean with English abstract).
- Clough, C.T., Maufe, H.B. and Bailey, E.B., 1909, The cauldron-subsidence of Glen Coe and the associated igneous phenomena. *Quarterly Journal of the Geological Society*, 65, 611-678.
- Cobbing, E.J. and Spencer, W.P., 1972, The Coastal Batholith of central Peru. *Journal of the Geological Society*, 128, 421-454.
- Cole, J.W., Milner, D.M. and Spinks, K.D., 2005, Calderas and caldera structures : a review. *Earth-Science Reviews*, 69, 1-26.
- Dodge, F.C.W., 1979, The Uyaijah ring structure, Kingdom of Saudi Arabia. *US Geological Survey Professional Paper*, 774-E, 17 p.
- England, R.W., 1990, The identification of granitic diapirs. *Journal of Geological Society*, London, 147, 931-933.
- England, R.W., 1992, The genesis, ascent, and emplacement of the northern Arran Granite, Scotland-implications for granitic diapirism. *Geological Society of America Bulletin*, 104, 606-614.
- Hamilton, W.B., 1989, Crustal geological processes of the United States. In: Pakiser, L.C. and Mooney, W.D., (Eds.), *Geophysical framework of the continental United States*. *Geological Society of America Memoir*, 172, 743-781.
- 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., 1998, Evolution and type of the Wondong caldera, western Yangsan. *Journal of Geological Society of Korea*, 34, 20-32 (in Korean with English abstract).
- Hwang, S.K., 2012, Tectonic Setting and Arc Volcanisms of the Gyeongsang Arc in the Southeastern Korean Peninsula. *Journal of Petrological Society of Korea*, 21, 367-383 (in Korean with English abstract).
- Hwang, S.K., An, U.S. and Kim, S.W., 2000, Spatial compositional variations and their origins in the Buseok pluton, Yeongju batholith. *Economic and Environmental Geology*, 33, 147-163 (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 Geological Society of Korea*, 53, 781-796 (in Korean with English abstract).
- Hwang, S.K., Kim, S.W., Chang, T.W., Kim, J.M. and Lee, S.K., 1999, Intrusive phases and igneous processes in the Yeongju batholith. *Economic and Environmental Geology*, 32, 669-688 (in Korean with English abstract).
- Jacobson, R.R.E., MacLeod, W.N. and Black, R., 1958, Ring-complexes in the Younger Granite province of

- northern Nigeria. Geological Society of London Memoir 1, 72 p.
- Johnson, S.E., Paterson, S.R. and Tate, M.C., 1999, Structure and emplacement history of a multiple-center, cone-sheet-bearing ring complex: the Zarza Intrusive Complex, Baja California, Mexico. Geological Society of America Bulletin, 111, 607-619.
- Johnson, S.E., Schmidt, K.L. and Tate, M.C., 2002, Ring complexes in the Peninsular Ranges Batholith, Mexico and the USA: magma plumbing systems in the middle and upper crust. Lithos, 61, 187-208.
- Komuro, H., 1987, Experiments on cauldron formation: a polygonal cauldron and ring fractures. Journal of Volcanology and Geothermal Research, 31, 139-149.
- Lee, J.H., Lee, S.H. and Chang, T.W., 1989, Geological Report of the Punggi Sheet (1:50,000). Korea Institute of Energy and Resources, 33 p.
- Lee, J.I., Jwa, Y.-J., Park, J.-H., Lee, M.J. and Moute, J., 1998, Petrology and geochemistry of the Youngju and Andong granites in the northeastern Yeongnam massif, Korea. Geosciences Journal, 2, 1-14.
- Lee, M.S., Park, B.S. and Kim, J.H., 1998, Geological Report of the Yongju Sheet (1:50,000). Korea Institute of Energy and Resources, 41 p.
- 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., 1992, Magmatism in the Cordilleran United States: Progress and problems, In: Burchfiel, B.C., Lipman, P.W. and Zoback, M.L. (Eds.), The Cordilleran orogen: Conterminous U.S.: Boulder, Colorado, The Geology of North America, G-3, 481-514.
- 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.
- Miriam, R.H., 1941, A southern California ring-dike. American Journal of Sciences, 239, 365-371.
- Myers, J.S., 1975, Cauldron subsidence and fluidization: mechanisms of intrusion of the coastal batholith of Peru into its own volcanic ejecta. Bulletin of geological Society of America, 86, 1209-1220.
- Oftedahl, C., 1978, Cauldrons of the Permian Oslo rift. Journal of Volcanology and Geothermal Research, 3, 343-371.
- Paterson, S.R. and Vernon, R.H., 1995, Bursting the bubble of ballooning plutons: A return to nested diapirs emplaced by multiple processes. Geological Society of America Bulletin, 107, 1356-1380.
- Phillips, W.J., 1974, The dynamic emplacement of cone sheets. Tectonophysics, 24, 69-84.
- Presnall, D.C. and Bateman, P.C., 1973, Fusion relationships in the system  $\text{NaAlSi}_3\text{O}_8 - \text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8 - \text{KAlSi}_3\text{O}_8 - \text{SiO}_2 - \text{H}_2\text{O}$  and generation of granitic magmas in the Sierra Nevada batholith. Geological Society of America Bulletin, 84, 3181-3202.
- Schirmick, C., van den Bogaard, P. and Schmincke, H.-U., 1999, Cone sheet formation and intrusive growth of an ocean island-the Miocene Tejada complex on Gran Canaria (Canary Islands). Geology, 27, 207-210.
- Shin, B.W. and Choi, S.I., 1968, Explanatory Text of the Geological Map of Sanggungok Sheet (1:50,000). Geological Survey of Korea, 28 p.
- Smith, R.L. and Bailey, R.A., 1968, Resurgent cauldrons. Memoir of the Geological Society of America, 116, 613-662.
- Turner, D.C., 1963, Ring-structures in the Sara-Fier Younger Granite complex, northern Nigeria. Geological Society of London Quarterly Journal, 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, San Francisco, 207 p.
- Yanagi, T. and Yamashita, K., 1994, Genesis of continental crust under island arc conditions. Lithos, 33, 209-223.
- Yoon, R., Song, Y.-S. and Yi, K., 2014, SHRIMP U-Pb zircon ages of the Yeongju and Andong granites, Korea and their implications. Journal of Petrological Society of Korea, 23, 209-220.
- Yoon, S.K., Cha, M.S., Kim, J.J. and Lee, J.T., 1988, Geological Report of the Yecheon Sheet (1:50,000). Korea Institute of Energy and Resources, 27 p.
- Yun, S.H., 1988, Development and the structure of its cauldron of the Hwasan ring igneous complex, northern Kyeongsang Basin, Korea. Journal of Geological Society of Korea, 24, 267-288 (in Korean with English abstract).

---

Received : April 16, 2021

Revised : June 3, 2021

Accepted : June 18, 2021