



Article

고흥반도 유주산 칼데라 주변 화성암류의 SHRIMP U-Pb 연대측정과 칼데라 함몰 및 소생 시기

황상구¹, 박정영², 김성원², 고경태², 이기욱³, 기원서^{2,*}

¹안동대학교 지구환경과학과

²한국지질자원연구원 국토우주지질연구본부

³한국기초과학지원연구원 지구환경연구부

SHRIMP U-Pb dating, and caldera collapse and resurgence timings on the igneous rocks around the Yujusan caldera, Goheung Peninsula, Korea

Sang Koo Hwang¹, Jeong-Yeong Park², Sung Won Kim², Kyoungtae Ko², Keewook Yi³, Weon-Seo Kee^{2,*}

¹Department of Earth and Environmental Science, Andong National University, Andong 36729, Republic of Korea

²Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources, Daejeon 34132, Republic of Korea

³Korea Basic Science Institute, Ochang 28119, Republic of Korea

Received: May 7, 2024 / Revised: June 1, 2024 / Accepted: June 1, 2024

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

요약: 고흥반도 남부에서 발견되는 유주산 칼데라 주변의 고흥층군은 하부 유문암질암류(고흥아층군), 중부 안산암질암류(팔영아층군), 상부 유문암질암류(지죽도아층군)와 관입암류로 구분된다. 우리는 분출암류와 관입암류에서 저어온 분리가 가능한 층서단위에 대해 SHRIMP U-Pb 연대측정을 실시함으로써 이들의 분출 및 관입시기, 층서관계를 명확히 하고 칼데라 함몰 및 소생 시기를 토론하였다. 연대측정에 의하면, 중부 안산암질암류에서 구룡산안산암은 83.6 ± 0.8 Ma ($n=15$, 2σ)에 집중되는 일치곡선 연대를 나타낸다. 상부 유문암질암류에서 구암용결응회암은 83.2 ± 1.1 Ma ($n=11$, 2σ)에 집중되는 일치곡선 연대, 별학산유문암은 80~83.2 Ma에 분포하는 연대범위를 가진다. 그리고 섬록암맥은 74.8 ± 1.0 Ma ($n=13$, 2σ)에 집중되는 일치곡선 연대를 가진다. 칼데라 함몰은 구암용결응회암의 대규모 분출로 일어났고 별학산유문암맥의 관입 때까지 진행되었으며, 특히 내측 칼데라 함몰은 안산암맥 관입 때까지 단속적으로 일어났을 것이다. 따라서 함몰은 적어도 83.2~81.9 Ma 동안 진행되었다. 칼데라 소생은 안산암맥 관입 후에 시작하여 섬록암의 정지 때까지 일어났다. 따라서 소생작용은 최대 약 80 Ma 이후에서 74.8 Ma까지 진행되었다. 이 자료는 유주산 칼데라 주변에서 일어났던 각 층서단위의 분출시기 혹은 관입시기를 확실케 하며 83.2 Ma에서 74.8 Ma 기간에 걸쳐 8.4 Myr 동안 화쇄류응회암-칼데라-환상암맥-소생관입체로 연결되는 하나의 칼데라운회의 기간을 한정시켜 준다.

주요어: 고흥반도, 유주산 칼데라, SHRIMP U-Pb 연대측정, 칼데라 함몰시기, 칼데라운회

ABSTRACT: Around the Yujusan caldera in the southern Goheung Peninsula, the Goheung Group are classified as lower rhyolitic rocks (Goheung Subgroup), middle andesitic rocks (Palyeong Subgroup) and upper rhyolitic rocks (Jijukdo Subgroup). By SHRIMP U-Pb zircon dating on major stratigraphic units that can separate the zircon from the eruptive and intrusive rocks, we clarified their eruption and intrusion timings, and stratigraphic relationship and discussed the timings of the caldera collapse and resurgence. Based on the SHRIMP U-Pb dating, the samples yield the concordia ages of 83.6 ± 0.8 Ma ($n=15$) in the Guryongsan Andesite of the lower andesitic rocks, 83.2 ± 1.1 Ma ($n=11$) in the Guam Welded Tuff and 80~83.2 Ma in the Byeolhaksan Rhyolite of the upper rhyolitic rocks, and 74.8 ± 1.0 Ma ($n=13$) in the diorite dyke. Caldera collapses occurred as enormous eruptions of the Guam Welded Tuff and proceeded until the intrusion of the Byeolhaksan Rhyolite dykes, and in particular the inner caldera collapse would have occurred intermittently until the intrusion of the andesite dykes. Accordingly, the collapses progressed for at least about 83.2 Ma to 80 Ma. Caldera resurgences began after the intrusion of the andesite dykes and extended until the emplacement of diorites. Therefore, the resurgence progressed from a maximum of about 80 Ma to 74.8 Ma. These data confirm the eruption or intrusion timings of each unit that occurred around the Yujusan caldera and limits the timing of the volcanic process through a single perfect caldera cycle that leads to ignimbrites-caldera-ring dikes-resurgent intrusions for 8.4 Myr over a period of 83.2 Ma to 74.8 Ma.

Key words: Goheung Peninsula, Yujusan caldera, SHRIMP U-Pb dating, caldera collapse timing, caldera cycle

1. 서 언

고흥반도는 지체구조상으로 영남육괴의 남서부에 위치하며, 백악기 후기의 화산암류가 집중적으로 분출한 후에 심성암류가 관입하고 있는 곳이다. 이 반도는 최근에 도폭 지질조사로 지질도가 완성되었고 화산암류와 화산암류의 주요 층서단위에 대한 SHRIMP U-Pb 연대측정으로 층서가 수립되었다(Kim *et al.*, 2015; Park *et al.*, 2021; Hwang *et al.*, 2022). 고흥반도 남부에서는 유주산 칼데라를 중심으로 환상암맥(ring dike), 중앙관입체(central intrusion)와 함께 칼데라 퇴적층이 인지되는 특이한 지질을 나타낸다(Hwang *et al.*, 2022).

유주산 칼데라는 그 내·외부에 칼데라 형성의 구암용결 응회암이 분포되고, 내·외측 환상암맥과 중앙 관입체가 이에 조합되어있다(그림 1). 이 분출암과 관입암들의 암상과 층서는 구암산 칼데라에서 화산과정을 엮는데 토대가 되고 있다(Hwang *et al.*, 2022).

그러나 이곳의 암석들은 유주산 칼데라에 따른 세부적인 층서적 문제뿐만 아니라 구조적인 이해를 확실히 이해하기 위해 주요 암층에 대한 추가적인 연대측정을 필요로 하였다. 더군다나 고흥반도 내에서도 칼데라 함몰로 인해 잘린 화산암층끼리의 층서대비는 암질만으로 논하기란 더욱 어려움에 봉착하기도 한다. 그러므로 우리는 암상과 상호관계에 의한 암석층서를 바탕으로 하면서 주요 암층에

대해 SHRIMP 저어콘 U-Pb 연대측정을 실시함으로써 칼데라 주변 암층들의 정확한 분출 혹은 관입시기를 알아내고 층서를 정립하며 유주산 칼데라의 형성 시기와 소생 시기를 정의하고자 한다.

2. 지질배경

영남육괴 남서부의 고흥반도에는 백악기 전엽의 퇴적암류, 백악기 후엽의 분출암류와 관입암류가 분포한다(Kim *et al.*, 2015; Chae *et al.*, 2019; Park *et al.*, 2021; Hwang *et al.*, 2022). 화산암류는 하나로 묶어 고흥화산암체로 불리기도 했다(Yun and Hwang, 1988). 고흥반도 남부에서 고흥화산암체는 하부에 유문암질 화성쇄설암 및 용암, 중부에 안산암질 화성쇄설암 및 용암과 상부에 유문암질 화성쇄설암 및 용암이 분포한다. 이들에 대한 층서는 하부로부터 하부 유문암질암류(고흥아층군), 중부 안산암질류(팔영아층군), 상부 유문암질암류(지족도아층군) 순으로 구분할 수 있다. 이러한 층서를 가진 유주산 지역에서는 이들을 관입한 관입암류가 칼데라에 조합된 환상암맥과 중앙관입체로 산출된다.

연구지역의 일대의 종합적인 층서는 기존 연구에서 획득된 저어콘의 U-Pb 연대측정 결과와 함께 표 1에 요약되어 있다. 하부 유문암질암류는 고흥응회암과 운대유문암으로 구분된다. 특히 고흥응회암은 연구지역의 북동쪽에 넓

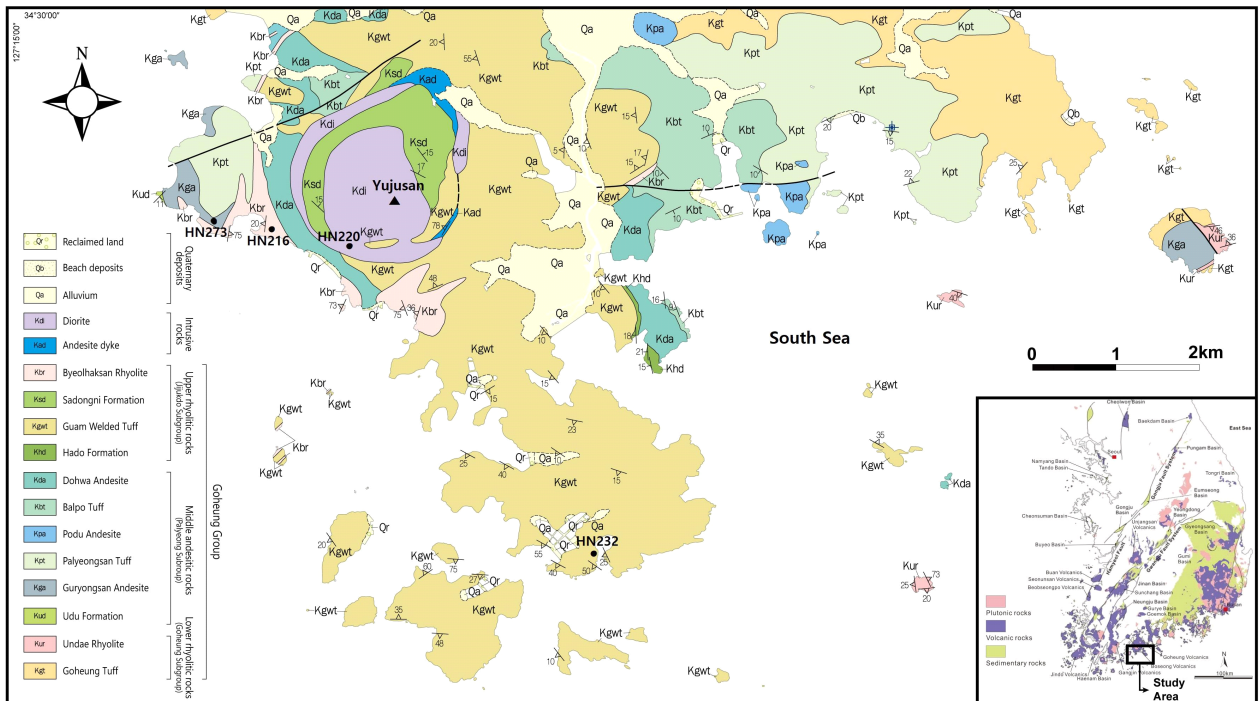


Fig. 1. Geological map around Yujusan caldera (modified from Hwang *et al.*, 2022), showing sample locations of the major stratigraphic units.

Table 1. Zircon U-Pb ages and chronostratigraphy of the igneous rocks around Yujusan caldera.

Lithostratigraphy		SHRIMP U-Pb ages (Ma)	Period	Chronostratigraphy	Remarks	References
Subgroups	Stratigraphic units					
Intrusive rocks	Diorite dyke	74.8±1.0			Resurgent and ring dyke	This study
	Andesite dyke					
Upper rhyolitic rocks		80.30±1.2			Ring dykes	Kim <i>et al.</i> (2015)
	Byeolhaksan Rhyolite	81.83±0.84				Hwang <i>et al.</i> (2022)
		81.9±0.6				This study
	Sadongni Formation			Jjukdo Subgroup	Caldera deposits	
	Guam Welded Tuff	83.2±1.1			Caldera collapse	This study
	Hado Formation				Local lake	
	Dohwa Andesite		Late Cretaceous			
	Balpo Tuff					
	Podu Andesite					
Middle andesitic rocks		81.97±1.17			Stratovolcano	Park <i>et al.</i> (2021) Hwang <i>et al.</i> (2022)
	Palyeongsan Tuff	83.43±0.14		Palyeong Subgroup		
		83.65±0.96				
		83.6±0.8				This study
	Guryongsan Andesite	84.52±0.54			Kim <i>et al.</i> (2015)	
		84.86±0.73				
	Udu Formation				Local lake	
Lower rhyolitic rocks	Undae Rhyolite					
		85.3±1.1		Goheung Subgroup	Composite volcano	Hwang <i>et al.</i> (2022) Chae <i>et al.</i> (2019)
	Goheung Tuff	86.4±0.71				
		85.6±0.23				

계 분포하고 있다(그림 1). 이 고흥회암은 기존 연대측정에서 최하부에서 LA-ICP-MS 저어콘 U-Pb 연대 85.6±0.23 Ma와 최상부에서 SHRIMP 저어콘 U-Pb 연대 86.4±0.71 Ma를 나타낸다(Chae *et al.*, 2019; 표 1). 또한 본역 남동 외곽부의 외나로도에서 SHRIMP 저어콘 U-Pb 연대가 85.3±1.1 Ma를 나타낸다(Hwang *et al.*, 2022; 표 1).

하부 유문암질암류의 상부층인 중부 안산암질암류는 본역 북동부에 주로 분포하며, 하부로부터 우두층, 반상의 구룡산안산암, 치밀용결상의 팔영산응회암과 비반상의 포두안산암이 분포한다(그림 1). 서부로 가면서 층리를 가지는 비용결상의 발포응회암이 포두안산암 위에 존재하고 그 위에 다시 용암류로서 비반상의 도화안산암이 나타난다(그림 1). 구룡산안산암은 현저한 반상조직을 나타내고 SHRIMP 저어콘 U-Pb 84.86±0.73 Ma, 84.52±0.54 Ma 연대를 가진다(Kim *et al.*, 2015; 표 1). 팔영산응회암은 SHRIMP 저어콘 U-Pb 연대 83.99±0.96~80.98±0.65 Ma (Kim *et al.*, 2015), 83.65±0.96 Ma (Hwang *et al.*, 2022; 표 1)를 나타내고 LA-ICP-MS 저어콘 U-Pb 연대가 83.43±0.14 Ma, 81.97±

1.17 Ma를 나타낸다(Park *et al.*, 2021; 표 1).

중부 안산암질암류의 상부층인 상부 유문암질암류는 본역 서부에서 대부분 산출된다(그림 1). 본역 중앙부에서 상부 유문암질암류는 그 기저에 하도층을 두고 그 위를 덮는 대규모 산성 화쇄류암으로서 구암용결응회암, 본역 북서부에서 이를 국부적으로 피복하고 관입하는 소규모 용암돔 및 암맥인 별학산유문암으로 산출된다. 이 유문암맥은 칼데라의 서부에서 불규칙하지만 전체적으로 초승달 모양의 외측 환상암맥을 형성한다(그림 1). 이 별학산유문암은 고흥도에서 SHRIMP 저어콘 U-Pb 연대가 80.30±1.2 Ma와 81.83±0.84 Ma로 밝혀졌다(Kim *et al.*, 2015; Hwang *et al.*, 2022; 표 1). 이 구암용결응회암과 별학산유문암 사이에는 칼데라 퇴적층으로서 사동리층이 국지적으로 산출된다(그림 1).

백악기 후엽 관입암류는 본역 북서부에서 상부 유문암질암류까지 관입하였고 안산암맥과 섬록암맥 및 암주로 산출된다(그림 1). 구체적으로 안산암맥은 유주산 칼데라에서 내측 환상단열대를 따라 구암용결응회암과 사동리층을

관입하며 섬록암맥과 함께 내측 환상암맥을 이룬다(그림 1). 섬록암은 세립질로서 유주산 칼데라에서 내측 환상단열대를 따라 발포응회암, 도화안산암, 구암용결응회암, 사동리층과 안산암맥을 관입하며 내측 환상암맥과 중앙관입체로 산출된다(그림 1).

3. 시료 분석

3.1. 시료선정

고흥반도 남부에서 유주산 칼데라 주변의 화산암류와 심성암류는 아직 연대측정이 이루어지지 않았다. 그래서 명확한 층서를 정립하고 칼데라 형성시기를 알기 위해 이에 관련된 주요 암체에 대해 SHRIMP 저어콘 연대를 측정하였다.

선택된 층서단위는 중부 안산암질암류의 구룡산안산암에서 1개 시료를 선정하였고, 상부 유문암질암류의 구암용결응회암과 별학산유문암에서 각각 1개 시료, 관입암류 중의 섬록암에서 1개 시료를 선정하였다(그림 1).

3.2. 분석절차

시료는 약 3 kg씩을 암석파쇄기로 40메쉬 망채를 통과할 때까지 파쇄한 뒤, 초기 팬닝과 자력선별기를 통하여 비자성 중광물을 모았다. 중광물들로부터 가는 붓과 비자성 핀셋을 이용하여 실체현미경 하에서 저어콘 입자를 핀셋으로 골라냈다. 이 저어콘 입자들은 점착테이프에 올려놓고 표준물질과 함께 에폭시액으로 발라서 고정시켜 마운트를 만들고 약 절반 두께로 갈아서 반사광 및 투사광에서 사진을 촬영하였다. 그리고 이 마운트를 씻고 금 코팅을 하였다.

마운트는 한국기초과학지원연구원 오창본원에서 음극선발광(CL; Cathodoluminescence) 장치를 부착한 주사전자현미경(JEOL JSM-6610LV 모델)을 이용하여 개별 저어콘 입자에 대해 음극선발광과 후방산란전자(BSE; Backscattered Electron) 영상을 촬영하였고 분석 위치를 선정하였다.

저어콘의 연대측정은 오창본원에서 SHRIMP IIe를 이용하였다. U-Pb 분석은 일차 이온빔으로 산소 음이온(O_2^-)을 이용하였으며, 이때 이온빔의 직경은 25 μm 이고 세기는 4-6 nA이었다. 저어콘 표준물질 FC-1과 SL13과 비교하여 U 함량측정과 U/Pb 연대보정을 하였다. 기기작동과 자료처리 절차는 Williams (1998)과 Ireland and Williams (2003)의 방법을 적용하였다. 측정된 분석자료는 SQUID version 2.5 및 Isoplot/Ex v. 3.6(Ludwig, 2008, 2009)을 이용하여 연대계산을 하였다. 각각의 분석치와 겹보기 연대의 오차는 1σ 이고, 가중평균 $^{206}Pb/^{238}U$ 연대 및 일치곡선 연대는 95% (2σ)의 신뢰도를 가진다. 연대측정 결과는 표 2에 나열되어 있다.

4. 연대측정

4.1. 구룡산안산암

구룡산안산암 시료(HN273)는 가화리 화옥 진입 도로변에서 채취한 것으로 큰 반정들의 밀집으로 현저한 반상조직을 나타낸다. 저어콘 입자들은 대부분 자형이고 주상 내지 장주상이며, CL 영상에서 누대 구조가 일관되게 나타나고 강하게 발광하는 모습을 보여준다(그림 2a). 미량원소 Th/U 비는 0.52~1.47 범위이며(표 1), Th/U=1선 주변에 직선상 분포를 나타낸다(그림 3). 이러한 양상들은 마그마에서 성장한 저어콘의 특징을 지시한다(Vavra *et al.*, 1999; Hartman *et al.*, 2000). 진동누대를 가진 저어콘에서 15개 분석치는 81.3 \pm 2 Ma에서 89.8 \pm 3 Ma 범위의 연대를 가진다(표 1). 이 15개 분석치는 콘코디아 그림에서 조화적으로 깔끔하게 한정된 군집을 형성하며 가중평균 $^{206}Pb/^{238}U$ 연대 90.3 \pm 1.6 Ma (MSWD=1.4)를 나타낸다(그림 4a). 이 연대는 구룡산안산암의 초기 정치연대로 해석된다.

4.2. 구암용결응회암

구암용결응회암 시료(HN232)는 구암리 단장 선착장 남측에서 채취한 시료이다. 저어콘 입자들은 자형이고 주로 주상에서 장주상이지만 파편상이 많으며, CL 영상에서 다소 강하게 발광하고 동심원상 누대 구조를 나타낸다(그림 2b). Th/U 비는 0.56~0.75 범위이고(표 1) Th/U=1선 아래에 직선상 분포를 보여준다(그림 3). 이러한 내부구조와 분포는 마그마에서 성장한 화성 성인을 반영한다. 동심원상 누대를 가진 저어콘에서 12개 분석치는 76.8 \pm 1 Ma에서 85.2 \pm 1 Ma 범위의 연대를 가진다(표 1). 콘코디아 그림에서 가장 젊은 분석치를 제외하면 11개 분석치는 가중평균 $^{206}Pb/^{238}U$ 연대 83.2 \pm 1.1 Ma (MSWD=0.92)를 갖는 조화적 군집을 형성하는데(그림 4b), 이는 구암용결응회암의 분출연대로 해석된다.

4.3. 별학산유문암

별학산유문암 시료(HN216)는 가화리 신촌 선착장 부근에서 나온 유대상 유문암이다. 저어콘 입자들은 비교적 작고 자형이면서 대부분 주상이고 날카로운 끝을 가지지만 몇 개가 단주상이다. CL 영상에서는 강하게 발광하며 심한 동심원상 자형 누대 구조를 가진다(그림 2c). Th/U 비는 0.39~1.28 다소 넓은 범위에 있고(표 1) Th/U=1선 주변에 직선상 분포를 보여준다(그림 3), 이는 내부구조와 함께 역시 마그마에서 성장한 화성 성인을 반영한다. 30개 분석치는 74.5 \pm 1 Ma에서 92.3 \pm 2 Ma 범위의 연대를 갖는다. 높은 분석치와 젊은 분석치를 빼고 나머지 18개 분석치는 콘코디아 그림에서 80~84 Ma 연대범위를 갖는다(그림 4c).

Table 2. Summary of SHRIMP U-Pb isotopic data of the analytical zircons from the stratigraphic units around Yujusan caldera.

Spot No.	²⁰⁶ Pb _c (%)	U (ppm)	Th (ppm)	²³² Th/ ²³⁸ U	±%	²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb	±%	²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U	±%	²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U Age (Ma)	²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb Age (Ma)
Sample HN273 (Guryongsan Andesite)											
HN273_1.1	-	151	156	1.07	0.38	0.0862	13.0	0.0140	2.7	89.5±2	1343±252
HN273_2.1	0.16	124	141	1.18	0.39	0.0309	60.6	0.0127	2.6	81.3±2	-1070±1824
HN273_3.1	-	155	154	1.03	0.38	0.0575	25.4	0.0129	2.6	82.7±2	511±558
HN273_4.1	-	91	66	0.75	0.45	0.0791	34.5	0.0132	3.8	84.7±3	1174±683
HN273_5.1	-	120	104	0.89	1.07	0.0349	64.0	0.0129	3.5	82.6±3	-718±1784
HN273_6.1	0.18	93	103	1.14	0.42	0.0686	37.0	0.0132	4.1	84.4±3	888±764
HN273_7.1	-	254	361	1.47	0.35	0.0487	18.7	0.0132	1.6	84.6±1	132±439
HN273_8.1	-	166	207	1.29	0.36	0.0453	30.3	0.0130	2.1	83.2±2	-40±736
HN273_9.1	-	223	112	0.52	0.82	0.0348	29.4	0.0133	1.7	85.0±1	-721±821
HN273_10.1	-	185	154	0.86	0.37	0.0464	27.6	0.0128	2.3	82.3±2	20.2±662
HN273_11.1	-	109	65	0.62	0.46	0.0852	29.4	0.0140	3.9	89.8±3	1320±569
HN273_12.1	0.34	186	233	1.29	0.36	0.0486	27.7	0.0132	2.0	84.5±2	129±652
HN273_13.1	0.90	124	99	0.82	0.42	0.0435	49.0	0.0128	2.9	82.0±2	-141±1214
HN273_14.1	-	191	228	1.23	0.36	0.0473	22.1	0.0130	2.4	83.3±2	65.3±527
HN273_15.1	-	158	187	1.23	0.38	0.0505	31.4	0.0131	2.9	83.7±2	217±726
Sample HN232 (Guam Welded Tuff)											
HN232_1.1	0.12	250	348	1.44	0.40	0.0405	34.7	0.0132	2.3	85.2±1	-402±1029
HN232_2.1	0.26	432	405	0.97	0.39	0.0492	18.6	0.0128	2.2	82.1±2	74.6±219
HN232_4.1	1.83	126	85	0.69	0.62	0.0161	189.0	0.0126	7.6	83.8±6	-492±382
HN232_5.1	-	123	79	0.66	0.61	0.0063	503.7	0.0122	4.1	82.0±1	36.8±200
HN232_6.1	3.91	105	62	0.61	0.72	0.0068	672.9	0.0123	6.3	84.5±2	336±614
HN232_8.1	0.61	116	80	0.71	0.66	0.0090	405.0	0.0119	4.7	80.2±2	219±228
HN232_9.1	0.12	73	52	0.74	0.77	0.0919	50.3	0.0138	7.2	83.7±3	223±298
HN232_11.1	-	170	100	0.61	0.56	0.0231	87.8	0.0128	2.9	84.5±1	270±139
HN232_12.1	-	191	184	0.99	0.48	0.0355	50.7	0.0127	3.2	82.8±2	495±245
HN232_13.1	3.40	96	53	0.56	0.75	0.0046	1092.9	0.0123	7.3	83.9±3	-279±810
HN232_14.1	0.06	108	63	0.60	0.70	0.0531	62.0	0.0121	4.5	76.8±1	-308±285
HN232_15.1	-	132	90	0.71	0.58	0.0303	89.9	0.0130	5.8	85.2±4	323±197
Sample HN216 (Byeolhaksan Rhyolite)											
HN216_1.1	0.08	430	305	0.73	0.47	0.0466	5.4	0.0124	1.1	79.7±0.9	-238±159
HN216_2.1	0.31	597	540	0.93	0.83	0.0490	4.0	0.0128	1.9	81.8±2	-17±193
HN216_3.1	0.12	777	644	0.86	0.42	0.0453	4.8	0.0133	1.0	85.3±0.8	306±103
HN216_4.1	1.29	576	458	0.82	0.90	0.0124	73.9	0.0138	2.1	92.3±2	58.9±289
HN216_5.1	0.43	464	302	0.67	0.46	0.0377	13.0	0.0137	1.3	89.1±1	-122±126
HN216_6.1	6.26	262	236	0.93	0.53	0.0386	42.7	0.0122	5.0	79.2±4	-241±825
HN216_7.1	1.15	196	108	0.57	0.60	0.0449	17.1	0.0128	1.5	82.2±1	457±129
HN216_8.1	0.22	298	170	0.59	0.53	0.0469	7.3	0.0126	2.2	80.9±2	-274±167
HN216_9.1	0.41	469	373	0.82	0.46	0.0460	7.3	0.0122	1.2	78.5±0.9	-416±217
HN216_10.1	1.60	289	219	0.78	0.55	0.0282	41.0	0.0113	1.9	74.5±1	224±209
HN216_11.1	0.20	701	595	0.88	0.43	0.0431	6.8	0.0132	1.0	85.2±0.9	286±119
HN216_12.1	0.62	359	222	0.64	0.51	0.0484	7.6	0.0131	1.2	83.6±1.0	345±105
HN216_13.1	-	277	183	0.68	1.28	0.0294	25.9	0.0128	2.7	83.9±2	151±234
HN216_14.1	-	664	780	1.21	0.44	0.0357	11.2	0.0135	1.1	87.7±0.9	-287±415

Table 2. continued.

Spot No.	²⁰⁶ Pb _c (%)	U (ppm)	Th (ppm)	²³² Th/ ²³⁸ U	±%	²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb	±%	²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U	±%	²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U Age (Ma)	²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb Age (Ma)
HN216_15.1	0.59	395	291	0.76	0.52	0.0524	4.4	0.0131	1.2	83.7±1.0	-230±211
HN216_16.1	0.16	847	708	0.86	0.44	0.0462	4.7	0.0135	1.0	86.5±0.9	-178±155
HN216_17.1	0.33	535	331	0.64	0.43	0.0479	6.6	0.0128	2.2	82.1±2	319±125
HN216_18.1	0.51	285	152	0.55	0.51	0.0363	17.5	0.0124	1.3	80.4±0.9	87.9±115
HN216_19.1	0.23	793	1371	1.79	0.39	0.0468	4.4	0.0127	1.0	81.6±0.8	461±655
HN216_20.1	-	665	559	0.87	0.41	0.0425	5.5	0.0128	1.1	82.4±0.9	-68±136
HN216_20.2	0.22	185	148	0.83	0.53	0.0217	48.2	0.0122	1.7	80.8±1	285±190
HN216_22.1	0.06	291	176	0.62	0.49	0.0460	6.4	0.0127	1.1	81.7±0.9	-119±140
HN216_23.1	0.39	426	367	0.89	0.44	0.0475	6.1	0.0123	1.1	78.6±0.8	-127±206
HN216_24.1	0.45	462	359	0.80	0.43	0.0409	10.6	0.0125	1.6	80.7±1	-55±157
HN216_25.1	0.69	225	165	0.76	0.52	0.0437	16.3	0.0122	2.7	78.6±2	-509±385
HN216_26.1	-	537	476	0.92	0.42	0.0401	8.5	0.0129	1.1	83.7±0.8	-529±251
HN216_26.2	1.17	85	89	1.08	1.14	0.0212	91.0	0.0121	2.9	80.0±1	526±499
HN216_27.1	0.11	739	633	0.89	0.41	0.0459	4.3	0.0126	1.0	81.0±0.8	-162±153
HN216_28.1	0.45	358	428	1.23	0.44	0.0363	15.8	0.0126	2.0	82.1±2	-647±700
HN216_29.1	1.48	144	127	0.91	0.56	0.0549	10.3	0.0124	3.2	78.7±2	29.5±345
Sample HN220 (Diorite)											
HN220_2.1	0.06	247	341	1.43	0.46	0.0355	19.0	0.0105	2.0	68.2±1	-344±1084
HN220_3.1	0.03	459	742	1.67	0.41	0.0382	11.2	0.0113	1.2	73.2±0.8	216±838
HN220_4.1	0.40	522	994	1.97	0.40	0.0585	6.1	0.0116	1.1	73.4±0.7	142±1352
HN220_5.1	-	213	308	1.49	0.48	0.0276	31.2	0.0112	1.7	73.3±1	-
HN220_6.1	0.38	428	762	1.84	0.43	0.0455	7.6	0.0117	1.8	75.1±1	-452±1820
HN220_7.1	0.69	156	192	1.27	0.55	0.0248	54.4	0.0111	2.1	73.0±1	-873±1560
HN220_8.1	0.45	306	429	1.45	0.46	0.0415	13.0	0.0120	1.3	77.6±0.9	-273±972
HN220_9.1	0.28	332	647	2.01	0.44	0.0382	14.9	0.0119	1.3	77.0±0.9	-635±3120
HN220_10.1	0.42	315	438	1.44	0.46	0.0509	4.4	0.0118	1.1	75.5±0.9	453±588
HN220_11.1	0.18	172	198	1.19	0.54	0.0579	12.0	0.0117	1.7	74.0±1	-1064±1272
HN220_12.1	-	431	550	1.32	0.44	0.0386	9.6	0.0116	2.9	75.4±2	38.0±505
HN220_13.1	0.62	217	305	1.45	0.49	0.0525	5.7	0.0120	1.3	76.2±1	357±863
HN220_14.1	-	268	352	1.36	0.49	0.0273	31.3	0.0115	2.5	75.5±2	-641±1160
HN220_15.1	0.21	353	597	1.75	0.44	0.0408	11.6	0.0119	1.2	77.1±0.9	517±895
HN220_16.1	0.35	211	254	1.24	0.50	0.0290	32.4	0.0118	2.7	77.1±2	161±561

그러나 이 유문암이 구암용결응회암을 관입한 것을 고려하면, 그 범위는 80~83.2 Ma로 좁혀져야만 한다. 늙은 분석치들은 기존 암층으로부터 들어온 외래결정 핵(xenocrystic core)의 영향 때문일 것으로 판단된다.

4.4. 섬록암

섬록암 시료(HN220)는 구암리 상동 서측 환상암맥 중에서 채취한 세립질 섬록암이다. 저어콘 입자는 자형 내지 반자형이고 주로 장주상을 보여주며, CL 영상에서 방사성이 높아서 내부구조를 잘 나타내지 않으며 그 내부가 비교

적 균질하고 희미하게 발광하지만 얇은 외연이 다소 강하게 발광하는 누대 구조를 보여준다(그림 2d). Th/U 비는 1.19~2.01 범위로 다른 시료에서보다 높게 나타내고(표 1) Th/U=1선 위를 따라 길게 직선상 배열을 보여주는데(그림 3), 이는 역시 내부구조와 마찬가지로 마그마에서 성장한 저어콘을 지시한다. 15개 분석치는 68.2±1 Ma에서 77.6±0.9 Ma 범위의 연대를 갖는다. 15개 분석치는 가장 젊은 분석치와 가장 늙은 분석치를 빼면, 나머지 13개 분석치는 콘코디아 그림에서 깔끔한 군집을 이루는 가중평균 ²⁰⁶Pb/²³⁸U 연대 74.8±1.0 Ma (MSWD=2.6)로 정의되는데(그림 4d),



Fig. 2. 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 Guryongsan Andesite (HN273), Guam Welded Tuff (HN232), Byeolhaksan Rhyolite (HN216) and Diorite dyke (HN220).

이는 이 섬록암의 정치연대로 해석된다.

5. 토 의

유주산 칼데라 주변은 화산암류가 매우 복잡한 층서와 구조로 얽혀 있으므로, 먼저 이 지역에서 주요 층서에 따른

분출 및 관입 시기, 칼데라 형성 시기를 먼저 풀어보고 칼데라 함몰 후의 소생시기에 대해 토의하기로 한다.

5.1. 야외관계와 분출 및 관입 시기

구룡산안산암은 본역 북서부의 칼데라 밖에서 우두층을 덮고 팔영산응회암에 의해 덮이며, 별학산유문암맥에 의해

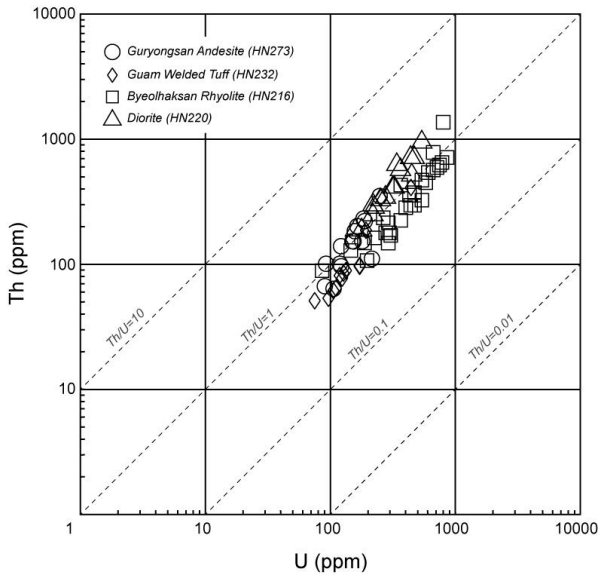


Fig. 3. Correlation diagram showing the proportions of Th to U concentrations (ppm) of the zircons analyzed by SHRIMP.

관입되어 있다(그림 1). SHRIMP 저어콘 U-Pb 측정에서 이 안산암은 83.6±0.8 Ma 연대는 저어콘의 폐쇄온도가 매우 높기 때문에 구룡산안산암의 분출시기를 나타내는 것으로 해석된다. 따라서 구룡산안산암은 백악기 후엽에 활동하였으며 고흥응회암 85.3±1.1 Ma (Hwang *et al.*, 2022) 보다 더 나중이고 팔영산응회암 85.15±0.96 Ma (Hwang *et al.*, 2022)보다 더 먼저 분출했음에 잘 부합한다.

구룡산안산암의 83.6 Ma 연대는 팔영산응회암의 분출 연대 83.43 Ma (Park *et al.*, 2021) 혹은 83.65 Ma (Hwang *et al.*, 2022)와 거의 같은 연대를 보여주니 층서적 정합 관계를 지지해준다. 그러나 구암용결응회암의 83.2 Ma 연대는 팔영산응회암의 분출연대보다 약간 젊은 나이를 나타낸다. 두 층서단위 간의 시간 차이는 약 0.23~0.45 Ma 연대로 오차 범위 내의 짧은 연대 차이를 나타내지만, 야외 산출에 따른 선후관계가 훨씬 큰 의미를 가진다. 이 기간에 폭발성 분출(explosive eruption)로 팔영산응회암이 퇴적된 후에 분류성 분출(effusive eruption)로 포두안산암 용암을 정치

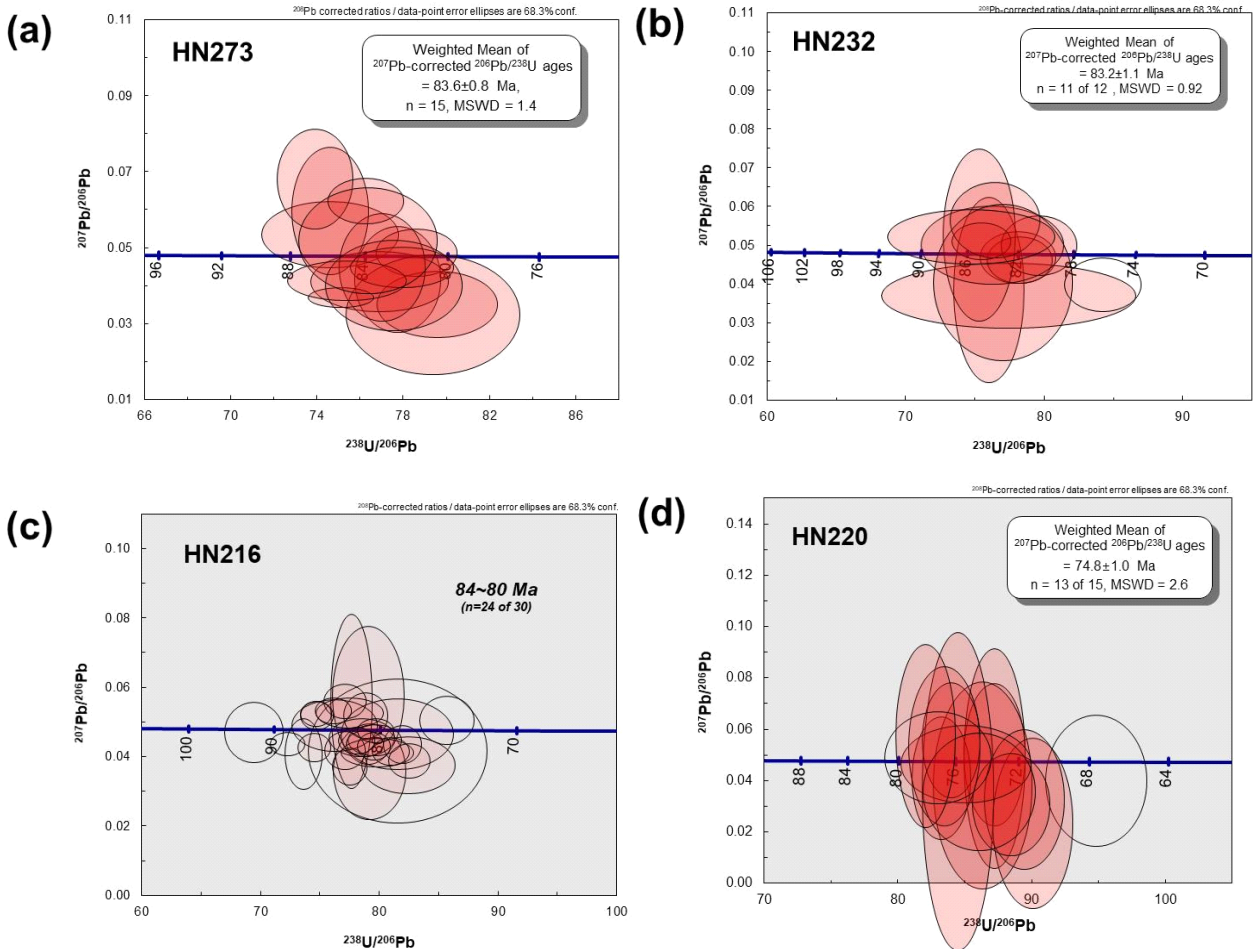


Fig. 4. Concordia diagrams for SHRIMP U-Pb ages of zircons separated from samples (a) HN273, (b) HN232, (c) HN216 and (d) HN220.

시켰으며, 다시 폭발성 분출에 의한 발포응회암을 퇴적시키고 분류성 분출(effusive eruption)에 의한 도화안산암 용암을 정치시켜 성층화산을 이루었다. 화산분출은 대개 폭발성 분출을 뒤따라 분류성 분출로 마감하는 과정이 일상적인데, 이러한 과정이 두 차례 반복되었다.

구암용결응회암은 본역 중앙부의 칼데라 밖에서 발포응회암, 도화안산암 혹은 하도층을 덮고 칼데라 내에서 사동리층에 의해 덮이며, 칼데라 환상단열대를 따라 별학산유문암, 안산암맥과 섬록암맥에 의해 관입되어있다(그림 1). SHRIMP 저어콘 U-Pb 측정에 의한 이 응회암의 83.2±1.1 Ma 연대는 저어콘의 폐쇄온도가 매우 높기 때문에 구암용결응회암의 분출 시기를 나타내는 것으로 판단된다. 따라서 구암용결응회암도 백악기 후기에 속하고 팔영산응회암보다 후기의 분출물임을 나타낸다. 그러나 구암용결응회암은 바로 그 아래에는 국지적이지만 하도층이 있기 때문에 구암용결응회암과 성층화산의 도화안산암 간에 국지적인 부정합 관계를 암시해준다.

별학산유문암은 외측 환상단열대를 따라 구룡산안산암, 팔영산응회암, 도화안산암과 구암용결응회암을 관입하며 산출된다(그림 1). SHRIMP 저어콘 U-Pb 측정에 의하면 80~83.2 Ma 연대범위를 가진다. 따라서 이 연대범위도 백악기 후엽에 속하고 구암용결응회암의 정치시기 83.2 Ma 보다 나중에 정치했을 것이다. 왜냐하면 별학산유문암이 구암용결응회암을 관입했기 때문이다. 두 층서단위 간의 연대 차이는 최대 약 3.2 Myr 연대를 가지는데, 이 기간에 칼데라 함몰의 외측 환상단열대를 따라 별학산유문암이 관입하고 일부 분출하였다.

유주산에서 섬록암은 외측 환상단열대를 따라 별학산유문암이 분출 및 관입되고 안산암맥이 관입한 후에 내측 환상단열대와 중앙화구를 따라 관입한 것이다. SHRIMP 저어콘 U-Pb 측정에 의하면 이 섬록암의 연대는 74.8±1.0 Ma를 나타낸다. 이 연대는 안산암이 관입된 후에 잔류 마그마가 소생(resurgence)할 때 내측 환상단열대가 다시 벌어짐으로써 이 틈을 따라 관입한 시기를 나타낸다.

5.2. 시간층서

연대측정은 여러 층서단위 중에서 선택적으로 실시되었으나 중부 안산암질암류에서 팔영산응회암이 85.15 Ma이고(Hwang *et al.*, 2022) 구룡산안산암이 83.6 Ma의 연대로서 층서에 따라 순차적인 U-Pb 연대를 나타낸다. 또한 상부 유문암질암류에서 구암용결응회암이 83.2 Ma이고, 별학산유문암이 80~83.2 Ma의 연대범위로서 역시 층서에 부합되는 순차적인 연대를 나타낸다. 따라서 저어콘 U-Pb 측정치는 야외관계에 따른 암석층서와 부합되게 상위층으로 가면서 젊어지는 경향을 보여주는 정연한 연대를 나타

낸다.

그러므로 각 층서단위가 칼데라 함몰로 복잡한 층서 관계를 보여줄지라도 암석층서에 일치하는 시간층서(chronostratigraphy)를 나타낸다(표 2). 그리고 안산암질암류에서 반정 등의 결정의 부족으로 저어콘을 얻을 수 없는 층서단위는 야외관계에 따른 암석층서가 더욱 중요해질 것이며 이에 따라 층서를 설정할 수밖에 없다.

5.3. 칼데라의 함몰시기

구암용결응회암의 83.2 Ma 연대는 화쇄류의 분출시기이다. 또한 별학산유문암의 80~83.2 Ma 연대는 외측 유문암맥의 분출 및 관입시기를 나타낸다. 두 연대 간의 최대 3.2 Ma 시간적 차이는 상당히 있지만 실제로 더 짧은 범위 내에 있을 것이다. 따라서 구암용결응회암의 화쇄류들이 분출된 후에 유주산 칼데라가 형성되었던 걸로 해석된다. 왜냐하면 환상단열대를 따라 칼데라 함몰이 일어나면 칼데라 블록의 하중에 의해 가해지는 압력으로 인해 잔류 마그마가 틈을 따라 주입될 수 있기 때문이다. 그러나 유주산 칼데라에서 외측 환상암맥의 유문암맥은 구암용결응회암의 화쇄류들이 분출된 후에 발생한 뚜껑문형 칼데라의 환상단열대를 따라 순차적으로 관입했던 것(Hwang, 1999; Hwang *et al.*, 2017)과 매우 유사하다.

대규모의 화산폭발의 결과로 마그마챔버의 상부가 빠져 나감과 동시에 이의 지붕이 함몰되어 칼데라를 형성하는 것은 구질 화산활동에서 흔히 일어나는 일반적인 사건으로 보고 있다(Druitt and Sparks, 1985). 따라서 이 외측 환상암맥은 유주산 칼데라에서 일어났던 함몰후 마그마 활동의 대표적인 표시이기도 하다. 왜냐하면 칼데라 형성 분출에 관련되는 환상관입체는 조성상으로 화쇄류에 의한 응회암과 같다고 보기 때문이다(Smith and Bailey, 1968).

그러므로 칼데라 함몰은 구암용결응회암의 대규모 분출로 일어났고 별학산유문암맥의 관입 때까지 진행되었으며, 내측 칼데라는 안산암맥 관입 때까지 단속적으로 일어났을 것이다. 따라서 적어도 83.2~80 Ma 동안 진행되었다.

5.4. 칼데라의 소생시기

유주산 칼데라는 함몰 후에 챔버의 잔류 마그마의 상층부가 83.2~80 Ma 무렵에 칼데라의 외측 환상단열대를 따라 거의 동시에 주입되어 별학산유문암의 외측 환상암맥을 형성하였다. 그리고 별학산유문암과 섬록암 간의 연대 차이는 최소 약 5.2 Ma 연대를 가지는데, 이 기간에는 외측 환상단열대 외에 칼데라 바닥에는 칼데라 퇴적층인 사동리층을 퇴적시킬 수도 있었고, 칼데라 함몰의 내측 환상단열대를 따라 안산암맥이 관입하였다.

여기서 안산암맥은 섬록암에 의해 관입되어 산출되기

때문에 유문암맥이 관입한 후, 섬록암맥이 관입하기 전의 어느 시기에 내측 환상단열대를 따라 관입한 것으로 추정된다. 칼데라 함몰이 마그마챔버 속으로 더 깊게 일어남으로써 잔류 마그마의 하층부가 내측 환상단열대를 따라 주입되어 안산암질 화산작용과 동시에 안산암맥을 형성하였다. 이들 암맥의 조성 차이와 공간간적 분포는 적어도 약 5.2 Myr 동안 챔버 내에서 마그마가 상하로 유문암질에서 안산암질로 분화작용이 일어났음을 시사한다. 그리고 내측 환상단열대의 일부를 따라 섬록암맥과 중앙관입체가 노출되는데, 이들의 심성암체는 칼데라 바닥을 돔 모양으로 상승시키는 소생돔(resurgent dome)의 내부흔적을 나타내는데, 원동 칼데라와도 매우 유사하다(Hwang, 1998). 즉 이 유문암맥 및 안산암맥의 관입 후에 칼데라 아래 잔류마그마는 약 5.2 Myr 동안 상부로 서서히 솟는 소생작용(resurgence)으로 칼데라 중앙부에 둥그런 소생돔을 형성하였다. 이 소생시기에 마그마는 약한 내측 환상단열대와 중앙화구를 따라 마지막으로 관입하여 74.8 Ma 무렵에 섬록암맥과 중앙관입체를 정치시켰다. 그러므로 칼데라 소생작용은 안산암맥 관입 후에 시작하여 섬록암의 정치 때까지 일어났다. 따라서 약 80 Ma 이후에서 74.8 Ma까지 진행되었다.

결론적으로 유주산 칼데라 지역에서는 83.2±1.1 Ma에서 74.8±1.0 Ma 기간에 걸쳐 8.4 Myr 동안 일어났던 화쇄류용회암-칼데라-환상암맥-중앙관입체로 연결되는 하나의 완벽한 칼데라유희회의 기간을 한정시켜 준다.

6. 결론

고흥 남부 유주산 지역은 분출암류와 관입암류로 구분된다. 분출암류는 하부 유문암질암류(고흥아층군), 중부 안산암질암류(팔영아층군)와 상부 유문암질암류(지죽도아층군)로 나뉘며 각 암류 간에는 국지적 부정합 관계를 가진다.

하부 유문암질암류는 고흥용회암, 운대유문암으로 구분된다. 중부 안산암질암류는 우두층, 구룡산안산암, 팔영산용회암, 포두안산암, 발포용회암, 도화안산암 순으로 세분된다. 상부 유문암질암류는 하도층, 구암용결용회암, 사동리층, 별화산유문암 순으로 세분된다. 관입암류는 안산암맥과 섬록암으로 나뉜다.

주요 층서단위에 대해 SHRIMP U-Pb 저어콘 연대측정을 실시함으로써 이들의 분출 및 관입 시기와 층서관계를 확실하게 해준다. 중부 안산암질암류에서 구룡산안산암은 83.6±0.8 Ma (n=15, 2σ)에 집중되는 일치곡선 연대를 나타낸다. 상부 유문암질암류에서 구암용결용회암은 83.2±1.1 Ma (n=11, 2σ)에 집중되는 연대를 나타내며, 별화산유문암은 80~83.2 Ma 범위에 분포하는 연대를 가진다. 그리고 섬록암맥은 74.8±1.0 Ma (n=13, 2σ)에 집중되는 일치곡선

연대를 가진다.

칼데라 함몰은 구암용결용회암의 대규모 분출로 일어났고 별화산유문암의 관입 때까지 진행되었으며, 내측 칼데라는 안산암맥 관입 때까지 단속적으로 일어났을 것이다. 따라서 적어도 83.2~80 Ma 동안 진행되었다. 칼데라 소생은 안산암맥 관입 후에 시작하여 섬록암의 정치 때까지 일어났다. 따라서 80 Ma 이후에서 74.8 Ma까지 진행되었다.

이들 자료는 유주산 주변에서 일어났던 각 층서단위의 분출 혹은 관입시기를 확실케 하며 83.2 Ma에서 74.8 Ma 기간에 걸친 8.4 Myr 동안 일어났던 화쇄류용회암-칼데라-환상암맥-소생관입체로 연결되는 하나의 완벽한 칼데라유희회의 기간을 한정시켜 준다.

감사의 글

이 논문은 한국지질자원연구원의 기본과제인 ‘국토 지질조사 및 지질도·지질주제도 발간 (GP2020-003)’ 과제의 지원으로 이루어졌다. 원고의 질 향상을 위해 세심한 검토와 건설적 조언을 주신 심사위원과 편집위원께 감사드린다.

REFERENCES

- Chae, Y.-U., Ha, S., Kim, C.-B., Kim, K.S. and Lim, H.S., 2019, Zircon U-Pb ages of Duwon Formation and Goheung Tuff in Goheung area, southern Korea. *Journal of the Geological Society of Korea*, 55, 583-594 (in Korean with English abstract).
- Druitt, T.H. and Sparks, R.S.J., 1985, On the formation of calderas during ignimbrite eruptions. *Nature*, 310, 679-681.
- Hartman, L.A., Leite, J.A.D., Da 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 the Geological Society of Korea*, 34, 20-32 (in Korean with English abstract).
- Hwang, S.K., 1999, Type and Evolution of the Samrangjin Caldera, Southern Miryang. *Journal of the Geological Society of Korea*, 35, 35-48 (in Korean with English abstract).
- Hwang, S.K., Jo, I.H. and Yi, K., 2017, 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., Park, J.-Y. and Kim, S.W., 2022, Geological report of the Oenarodo-Yenaeri Sheets. *Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources*, 81 p.
- 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.
- Kim, S.W., Park, S.-I., Kee, W.-S. and Kim, B.C., 2015, Geological report of the Goheung Sheet. Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources, 55 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.
- Ludwig, K.R., 2009, SQUID 2.50: A User's manual. Berkeley Geochronology Center Special Publication, 5, Berkeley, California. 100 p.
- Park, S.-I., Gihm, Y.S., Lee, K. and Kim, N., 2021, Geological report of the Daegangri Sheet. Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources, 47 p.
- Smith, R.L. and Bailey, R.A., 1968, Resurge cauldrons. In Coats *et al.*, (eds.), Studies in Volcanology, Geological Society of America Memoirs, 116, 613-662.
- 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.
- 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.
- Yun, S.H. and Hwang, I.H., 1988, Volcano-stratigraphy and petrology of the volcanic mass in the Koheung Peninsula, South Cheolla Province, Korea. Economic and Environmental Geology, 21, 335-348 (in Korean with English abstract).