



Article

구미 금오산 화산암류의 SHRIMP U-Pb 연대측정과 칼데라 함몰 시기

황상구¹, 조인화², 기원서³, 송교영^{3,*}

¹국립경국대학교 지구환경과학과

²국립재난안전연구원 전략기획센터

³한국지질자원연구원 국토우주지질연구부

SHRIMP U-Pb dating of the Geumosan volcanic rocks and timing of caldera collapse in Gumi, Korea

Sang Koo Hwang¹, In Hwa Cho², Weon-Seo Kee³, Kyo-Young Song^{3,*}

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

²R&D Strategic Planning Center, National Disaster Management Research Institute, Ulsan 44538, Republic of Korea

³Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources, Daejeon 34132, Republic of Korea

Received: April 9, 2025 / Revised: May 14, 2025 / Accepted: May 20, 2025

*Corresponding author: +82-42-868-3046 / E-mail: kysong@kigam.re.kr

요약: 구미분지에서 금오산 화산암류는 안산암질암류, 유문암질암류와 암맥류로 구분된다. 우리는 저어콘 분리가 가능한 층서단 위에 대해 SHRIMP U-Pb 연대측정을 실시함으로써 이들의 분출 혹은 관입 시기를 명확히 하고 칼데라 함몰 시기를 토론한다. 연대측정에 의하면, 안산암질암류에서 부상리안산암은 75.3±1.4 Ma에 집중되는 일치곡선 연대를 나타낸다. 유문암질암류에서 오봉리용회암은 74.77±0.78 Ma, 도선굴유문암은 74.4±1.2 Ma, 금오산용회암은 74.2±1.1 Ma에 집중되는 일치곡선 연대를 나타낸다. 그리고 유문암맥은 72.1±2 Ma의 가장 젊은 겹보기 연대를 가진다. 이 자료는 금오산 칼데라 주변에서 일어났던 각 층서단위의 분출 혹은 관입 시기를 확실케 한다. 안산암질 화산작용은 적어도 75.3 Ma 무렵에 있었으며 유문암질 화산작용은 74.77 Ma부터 폭발성 분출로 시작되어 74.4 Ma 무렵에 분류성 분출로 전환되었다. 금오산 칼데라는 74.2 Ma 무렵 대규모 금오산용회암의 폭발성 분출에 의한 함몰로 형성되었고 72.1 Ma 무렵 환상 단열대를 따라 유문암맥의 주입으로 끝났다. 따라서 칼데라 함몰은 74.2~72.1 Ma 기간에 일어났을 것으로 생각된다. 이 기간에 화쇄류 분출-칼데라 함몰-환상암맥 관입으로 연결되는 칼데라운회를 겪었다.

주요어: 구미분지, 금오산 화산암류, SHRIMP U-Pb 연대측정, 금오산 칼데라, 함몰시기

ABSTRACT: In the Gumi Basin, the Geumosan volcanic rocks are classified into andesitic rocks, rhyolitic rocks, and dykes. We clarify their eruption or intrusion timings and discuss the caldera collapse timing by SHRIMP U-Pb dating on the stratigraphic units from where the zircon crystals can be separated. The datings yield the coincidence curve ages concentrated at 75.3±1.4 Ma on Busangri Andesite in the andesitic rocks, 74.77±0.78 Ma on Obongri Tuff, 74.4±1.2 Ma on Doseongul Rhyolite and 74.2±1.1 Ma on Geumosan Tuff in the rhyolitic rocks. In addition, the ring dyke rhyolite presents the youngest apparent age of 72.1±2 Ma. These results constrain the timings of the eruption or intrusion of each stratigraphic unit associated with the Geumosan caldera. The andesitic volcanism occurred at least around 75.3 Ma, and the rhyolitic volcanisms began with an explosive eruption around 74.77 Ma and turned into an effusive eruption around 74.4 Ma. The Geumosan caldera was formed by the collapse caused by the explosive eruption of the voluminous Geumosan Tuff around 74.2 Ma, and ended by the injection of the rhyolite dykes along the ring fracture zones around 72.1 Ma. Therefore, the caldera collapse is estimated to have occurred between 74.2 and 72.1 Ma. During the period 2.1 Myr, the volcanisms underwent a caldera cycle leading to ignimbrite eruption, caldera collapse, and ring-dyke intrusion.

Key words: Gumi Basin, Geumosan volcanic rocks, SHRIMP U-Pb dating, Geumosan caldera, collapse timing

1. 서언

구미분지는 영남육괴의 남동부 중간에 위치하며, 백악기 퇴적암류 위에 화산암류가 집중적으로 분출한 후에 암맥류가 관입하고 있다(Kim and Lim, 1974). 이 분지는 최근 화산암류를 암상에 따라 분류한 지질도가 새로이 작성되었고 환상암맥(ring dike)에 의해 칼데라가 인지되었다. 화학분석에 의하면, 화산암류는 섭입대를 지시하는 화산호 환경에서 하부지각의 화성기원 각섬암이 부분용융으로 안산암질 마그마가 형성되었으며 분별결정작용에 의해 유문암질 마그마로 진화하였다고 그 마그마의 성인과 진화가

밝혀졌다(Hwang *et al.*, 2021a). 그러나 지금까지 화산암류의 각 층서단위가 어느 시기에 분출되었는지 칼데라가 어느 기간에 형성되었는지 밝혀지지 않았다.

금오산 칼데라는 직경이 3.5 × 5.6 km이고 환상암맥과 단층으로 둘러싸인다(Hwang *et al.*, 2021b). 환상암맥을 경계로 그 외부에는 퇴적암류와 안산암질암류가 분포하고 그 내부에는 유문암질암류가 주로 분포한다. 유문암질암류 중에서 금오산용회암은 칼데라 함몰에 관련된 층서단위이며 칼데라 내부에만 분포한다. 한편 유문암맥은 칼데라 경계를 이루며 환상으로 관입되어 있다(그림 1). 이 분출암과 암맥의 층서단위들은 금오산 칼데라에서 화산과정을 엮는

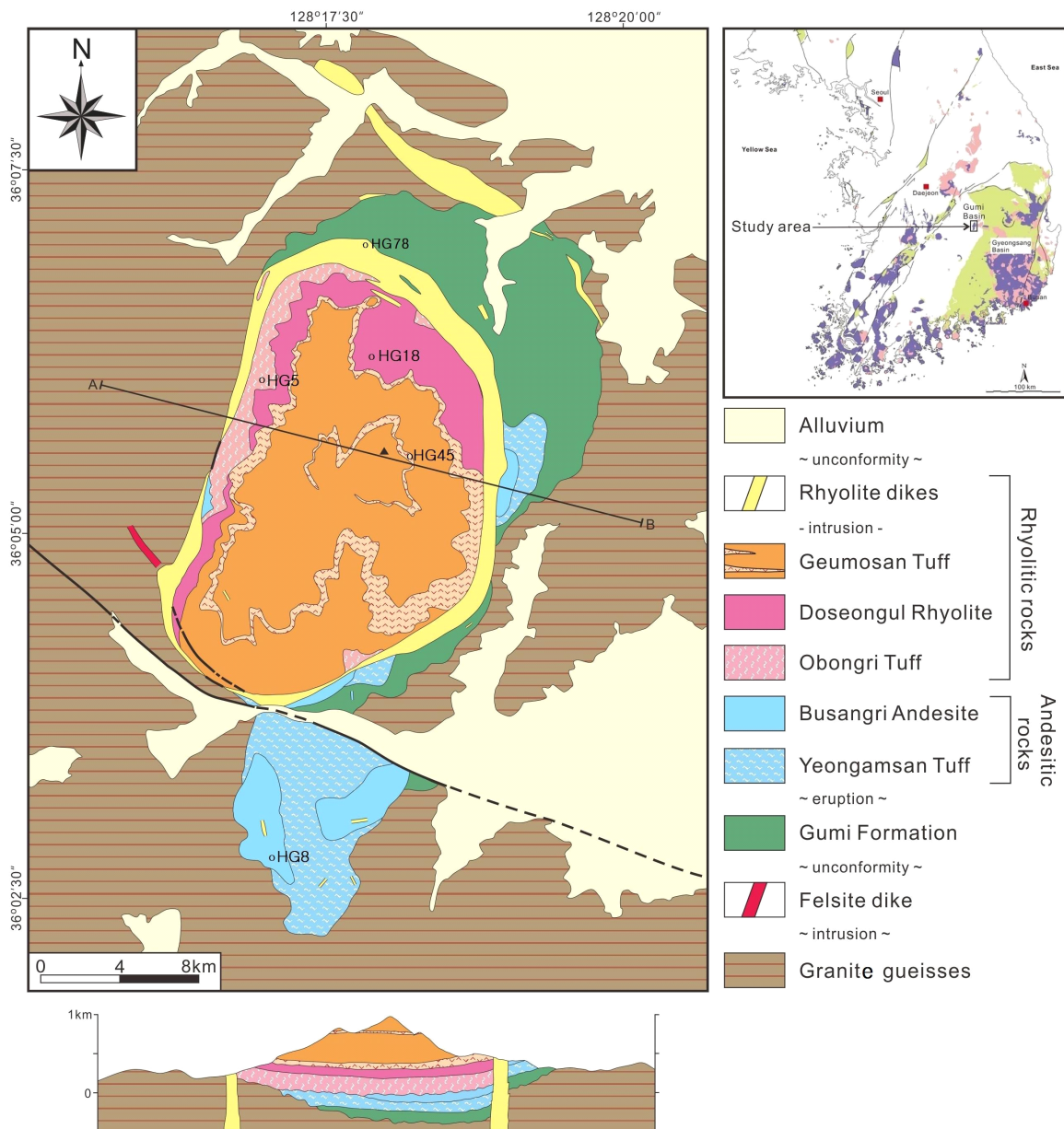


Fig. 1. Geological map around Geumosan caldera (after Hwang *et al.*, 2021b), showing sample locations of the major stratigraphic units.

데 토대가 되었다(Hwang *et al.*, 2021b).

그러나 이곳의 암석들은 금오산 칼데라에 따른 세부적인 층서적 문제뿐만 아니라 구조적인 이해를 확실히 이해하기 위해 주요 암층에 대한 연대측정을 시행해야 한다. 더군다나 한반도 내에서 화산암류는 분지별로 격리되어 존재하므로 인해 화산암층끼리의 층서대비는 암질만으로 논하기란 큰 어려움에 봉착한다. 그러므로 우리는 암상과 상호관계에 의한 암석층서를 바탕으로 주요 암층에 대해 SHRIMP 저어콘 U-Pb 연대측정을 수행함으로써 칼데라 주변 암층들의 정확한 분출 혹은 관입시기를 정의할 뿐만 아니라 층서를 정립하고 금오산 칼데라의 함몰 시기를 정의하고자 한다.

2. 지질 배경

영남육괴 남동부 중간에는 경상분지와 다르게 소규모의 구미분지가 자리잡고 있다. 구미분지에는 기반암 위에 백악기의 퇴적암류와 화산암류가 분포한다. 기반암은 대부분 화강편마암이고 이를 김천화강암이 관입하고 있다(Kim and Lim, 1974; Kim *et al.*, 1989).

구미분지에서 지질은 백악기 후엽의 퇴적암류와 화산암류로 구분된다. 퇴적암류는 낙동층으로 기록되어 있지만(Kim and Lim, 1974), 주로 녹회색 층이고 적갈색 층이 협재되어 있어 층서적으로 경상분지의 어느 층에 대비될지 문제가 있어 구미층으로 기재되었다(Hwang *et al.*, 2021b).

화산암류는 한반도 남동부 도처에서 일어났던 화산호 중에 영남호(Hwang *et al.*, 2019)의 일부에 속한다. 화산암류는 이전에 금오산화산암류로 묶어놓았지만(Kim and Lim, 1974) 안산암질암류, 유문암질암류와 암맥류로 구분된다.

안산암질암류는 김천단층 남부에 주로 분포하고 암맥류 인근에 소규모로 분포한다. 안산암질암류는 안산암질 내지 테사이트질 조성을 가지며(Hwang *et al.*, 2021a) 하부의 화성쇄설암과 상부의 용암으로 구분된다. 하부의 화성쇄설암은 영암산응회암으로, 상부의 용암은 부상리안산암으로 기재되었다(그림 1; Hwang *et al.*, 2021b).

유문암질암류는 모두 유문암질이며 대부분 화성쇄설암으로 구성되지만 중간에 용암층이 협재되기 때문에, 이를 기준으로 하부의 오봉리응회암, 중부의 도선굴유문암, 그리고 상부의 금오산응회암으로 구분되었다(그림 1; Hwang *et al.*, 2021b).

암맥류는 세립질이고 유문암질 조성을 나타내며(Hwang *et al.*, 2021a) 환상암맥과 직선상암맥으로 산출된다(Hwang *et al.*, 2021b). 특히 환상암맥은 유문암질암류를 거의 완전히 둘러싸기 때문에 확실한 함몰구조를 나타낸다고 보았고 금오산 칼데라로 명명하는 단서가 되었다(Hwang *et al.*,

2021b).

3. 시료 분석

3.1. 시료 선정 및 저어콘 분리

구미분지에서 금오산 칼데라 주변의 화산암류에 대한 연대측정은 지금까지 보고되지 않았다. 그래서 주요 층서단위에 대한 분출시기와 칼데라 형성시기를 알아내기 위해 SHRIMP 저어콘 연대측정을 시행하였다. 선택된 층서단위는 안산암질암류의 부상리안산암에서 1개 시료를 선택하였으며, 유문암질암류의 오봉리응회암, 도선굴유문암과 금오산응회암에서 각각 1개 시료를 선정하고 암맥류의 환상암맥에서 1개 시료를 선택하였다(그림 1).

시료는 약 1~2 kg 내외의 암석을 분쇄기로 여러 차례 파쇄한 후, 마지막으로 120 메쉬 망체를 통과하고 180 메쉬 망체를 통과하지 못한 입자를 선택하였다. 비커를 이용하여 이 입자를 초기 팬닝을 한 뒤 자력선별기를 통해 비자성 중광물을 회수했다. 중광물들로부터 가는 붓과 비자성 핀셋을 이용하여 실체현미경 하에서 저어콘을 선별하였다.

3.2. 분석 절차

저어콘 입자들은 점착테이프에 올려놓고 표준물질과 함께 에폭시 액으로 마운트를 제작하였다. 저어콘 마운트는 입자 전체가 잘 드러나도록 갈았다. 그리고 반사광 및 투사광에서 사진을 촬영한 뒤, 이 마운트를 금으로 코팅하였다.

저어콘 마운트는 한국기초과학지원연구원 오창본원에서 주사전자현미경(JEOL JSM-6610LV 모델)을 이용하여 개별 저어콘 입자에 대해 음극선발광(CL; Cathodoluminescence)과 후방산란전자(BSE; Backscattered Electron) 영상을 촬영하고 저어콘 내부구조를 관찰하여 분석 위치를 선정하였다.

저어콘의 U-Pb 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 실시하였다. 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.

4. 분석 결과

분리된 저어콘 입자들은 대부분 투명하고 연황색 내지 연녹황색을 띤다. 또한, 대부분 파편상(fragmental)에서 자

형의 작은 주상(prismatic)결정을 이루고 있지만, 일부 장 주상(long prismatic)과 단주상(short prismatic)인 것도 있다(그림 2). 분리는 되었으나 분석에 포함되지 않은 시료들에서 파편상의 저어콘도 상당히 관찰되는데, 이들은 대개 분쇄기로 파쇄되면서 깨졌을 것이지만, 용암을 제외한 화성쇄설암에서 나온 저어콘들은 폭발성 분출로 인해 깨진 것으로 추정된다. 그리고 연대측정 결과는 표 1에 나열되어 있다.

4.1. 부상리안산암

부상리안산암 시료(HG8)는 영암산 북서쪽 능선에서 채취했으며(그림 1) 반정들의 밀집으로 뚜렷한 반상조직을 나타낸다. 저어콘 입자들은 대부분 자형으로서 주상이며, 드물게 장주상을 나타낸다(그림 2a). 한편 CL 영상에서는 다소 강하게 발광하는 누대 구조를 나타낸다(그림 2a).

미량원소 Th/U 비율은 0.54~1.47 범위이며(표 1), Th/U=1 선 상에 거의 직선상 분포를 나타낸다(그림 3). Th/U 비율이 0.2를 초과하고 있어 대부분 마그마로부터 정출된 화성기원 저어콘임을 지시한다(Hoskin and Schaltegger, 2003). 진동누대를 가진 저어콘에서 16개 분석치는 68.3 ± 6 Ma에서 80.1 ± 1 Ma 범위의 겉보기 연대를 가진다(표 1). 그중에서 불일치 연대를 보이는 가장 높은 분석치와 가장 젊은 분석치를 제외한다. 나머지 12개 분석치는 일치곡선 상에 놓이거나 가까운 위치에 놓이지만, 다소 분산되는 조화적인 군집을 나타낸다. 통계적 계산에서 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 가중평균연대는 75.3 ± 1.4 Ma (MSWD=2.9)를 얻었다(그림 4a).

4.2. 오봉리응회암

오봉리응회암 시료(HG5)는 김천시 오봉리와 구미시 수

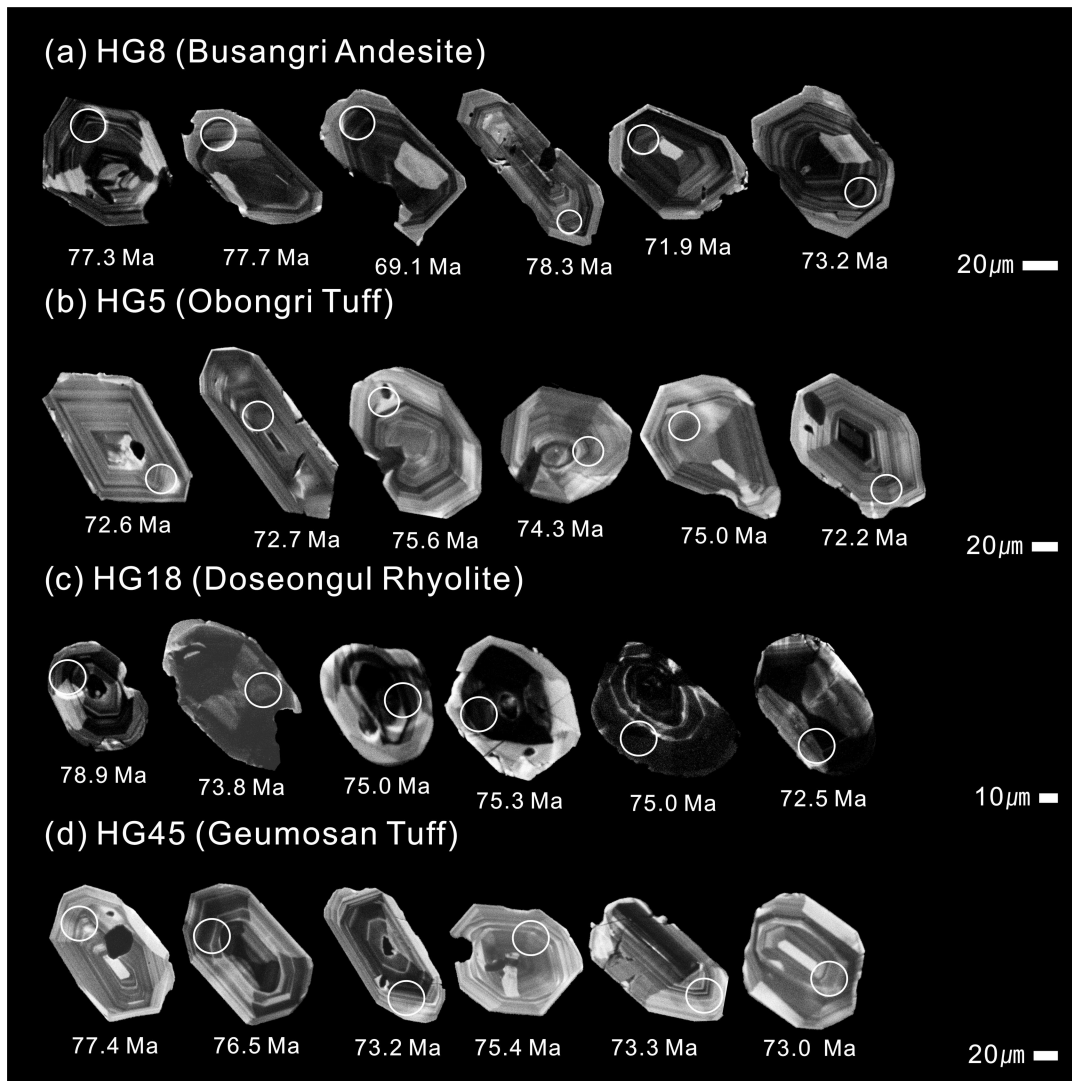


Fig. 2. Representative Cathodoluminescence images of the analyzed zircon grains, showing the location of analytical spots and $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ ages in Ma, separated from the major stratigraphic units.

Table 1. Summary of SHRIMP U-Pb dating of the analytical zircons from the volcanic rocks around Geumosan caldera.

Spot no.	$^{206}\text{Pb}_c$ (%)	U (ppm)	Th (ppm)	$^{232}\text{Th}/$ ^{238}U	$\pm\%$	$^{207}\text{Pb}/$ ^{206}Pb	$\pm\%$	$^{206}\text{Pb}/$ ^{238}U	$\pm\%$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ Age (Ma)	$\pm\%$	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ Age (Ma)	$\pm\%$
Sample HG8 (Busangri Andesite)													
HG8_1.1	0.29	293	416	1.47	± 0.39	0.0499	± 3.0	0.01201	± 4.2	77.3	± 3	-130	± 222
HG8_2.1	-	324	315	1.00	± 0.39	0.0461	± 2.8	0.01225	± 1.5	77.6	± 1	482	± 174
HG8_3.1	0.58	429	341	0.82	± 0.40	0.0522	± 2.5	0.01192	± 2.8	77.1	± 2	-307	± 289
HG8_4.1	0.23	133	88	0.69	± 0.51	0.0494	± 4.9	0.01166	± 2.3	77.7	± 1		
HG8_5.1	-	293	256	0.90	± 0.44	0.0460	± 3.9	0.01076	± 2.1	69.1	± 1	-2	± 95
HG8_6.1	0.01	124	91	0.76	± 0.91	0.0476	± 4.8	0.01190	± 2.6	78.3	± 2		
HG8_7.1	-	235	240	1.05	± 0.43	0.0472	± 3.6	0.01170	± 1.5	74.5	± 1	312	± 181
HG8_8.1	0.02	233	201	0.89	± 0.41	0.0477	± 6.4	0.01203	± 1.4	77.1	± 1	86.0	± 151
HG8_11.1	0.32	168	89	0.54	± 0.49	0.0500	± 4.1	0.01141	± 1.7	71.9	± 1	649	± 236
HG8_12.1	0.05	237	182	0.79	± 0.43	0.0479	± 3.4	0.01143	± 1.4	73.2	± 1	94.2	± 81
HG8_13.1	0.22	140	105	0.78	± 0.47	0.0492	± 4.5	0.01144	± 1.7	74.1	± 1	-407	± 471
HG8_14.1	0.10	133	110	0.85	± 0.81	0.0483	± 4.4	0.01178	± 3.3	76.3	± 2	-386	± 441
HG8_15.1	0.47	207	178	0.89	± 0.81	0.0511	± 3.7	0.01074	± 8.2	68.3	± 6	374	± 145
HG8_16.1	-	167	105	0.65	± 0.46	0.0455	± 3.9	0.01267	± 1.6	80.1	± 1	538	± 244
HG8_17.1	0.35	148	152	1.06	± 0.46	0.0502	± 7.4	0.01131	± 2.4	73.9	± 2	-932	± 894
HG8_18.1	-	214	232	1.12	± 0.42	0.0453	± 3.5	0.01204	± 1.6	76.0	± 1	571	± 217
Sample HG5 (Obongri Tuff)													
HG5_1.1	0.39	123	111	0.93	± 0.90	0.0506	± 4.0	0.0111	± 1.9	72.6	± 1	-939	± 596
HG5_2.1	0.36	163	157	1.00	± 0.78	0.0503	± 3.3	0.0114	± 1.7	72.7	± 1	271	± 94
HG5_3.1	0.11	103	103	1.04	± 0.70	0.0484	± 4.2	0.0118	± 1.5	76.9	± 1	-658	± 439
HG5_4.1	0.24	182	181	1.02	± 0.16	0.0494	± 3.0	0.0118	± 2.2	75.6	± 2	169	± 70
HG5_5.1	3.21	140	152	1.12	± 0.20	0.0729	± 3.5	0.0113	± 2.6	74.3	± 2		
HG5_6.1	-	251	258	1.06	± 0.54	0.0470	± 3.0	0.0112	± 1.7	72.4	± 1	-235	± 164
HG5_8.1	1.06	144	103	0.74	± 0.24	0.0560	± 3.8	0.0110	± 2.7	76.5	± 2		
HG5_9.1	0.52	123	128	1.07	± 0.38	0.0517	± 3.7	0.0114	± 1.1	74.3	± 0.7	-545	± 403
HG5_10.1	-	132	186	1.45	± 1.26	0.0473	± 3.7	0.0117	± 1.8	75.0	± 1	65.1	± 87
HG5_11.1	-	117	113	1.00	± 0.97	0.0465	± 4.0	0.0108	± 2.8	72.2	± 2		
HG5_12.1	-	126	86	0.70	± 0.71	0.0472	± 4.0	0.0116	± 1.0	74.0	± 0.7	149	± 126
HG5_13.1	2.14	120	97	0.83	± 0.69	0.0644	± 3.7	0.0115	± 2.0	73.5	± 1	103	± 314
HG5_14.1	0.14	107	73	0.71	± 0.25	0.0487	± 4.3	0.0118	± 1.1	76.4	± 0.7	-357	± 318
HG5_15.1	1.88	166	139	0.87	± 0.66	0.0627	± 3.4	0.0126	± 2.0	84.6	± 1		
HG5_16.1	0.75	148	177	1.24	± 0.48	0.0535	± 3.4	0.0116	± 1.5	75.8	± 1	-1013	± 598
HG5_17.1	0.59	156	159	1.05	± 0.18	0.0522	± 3.2	0.0118	± 0.9	75.5	± 0.7	236	± 97
Sample HG18 (Doseongul Rhyolite)													
HG18_1.1	1.88	232	260	1.16	± 0.39	0.0625	± 2.6	0.01207	± 1.7	78.9	± 1	-1022	± 811
HG18_2.1	0.28	628	700	1.15	± 2.04	0.0498	± 1.8	0.01186	± 1.3	75.9	± 1	145	± 59
HG18_3.1	0.39	418	462	1.14	± 0.37	0.0506	± 2.4	0.01187	± 1.4	75.0	± 1	558	± 130
HG18_4.1	0.34	588	798	1.40	± 1.02	0.0502	± 2.0	0.01172	± 1.6	75.3	± 1	-27	± 125
HG18_5.1	0.20	465	368	0.82	± 0.97	0.0490	± 2.3	0.01139	± 1.4	73.8	± 1.0	-389	± 240
HG18_6.1	0.08	510	387	0.78	± 0.37	0.0481	± 2.1	0.01170	± 1.4	75.0	± 1	41.1	± 80
HG18_7.1	-	115	153	1.37	± 1.27	0.0491	± 2.9	0.02936	± 1.6	188	± 3	-101	± 189
HG18_8.1	0.80	964	839	0.90	± 0.35	0.0538	± 3.0	0.01131	± 1.6	72.1	± 1	269	± 87

Table 1. continued.

Spot no.	$^{206}\text{Pb}_c$ (%)	U (ppm)	Th (ppm)	$^{232}\text{Th}/$ ^{238}U	$\pm\%$	$^{207}\text{Pb}/$ ^{206}Pb	$\pm\%$	$^{206}\text{Pb}/$ ^{238}U	$\pm\%$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ Age (Ma)	\pm	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ Age (Ma)	\pm
HG18_10.1	0.34	463	525	1.17	± 0.36	0.0502	± 2.3	0.01128	± 3.7	72.5	± 3	-46	± 149
HG18_11.1	1.26	142	100	0.73	± 0.48	0.0574	± 4.1	0.01152	± 3.9	71.4	± 3	1022	± 223
Sample HG45 (Geumosan Tuff)													
HG45_1.1	0.70	145	105	0.74	± 0.36	0.0531	± 3.6	83.3	± 2.1	77.4	± 2	-148	± 256
HG45_2.1	0.02	147	108	0.76	± 0.36	0.0477	± 3.9	83.7	± 1.1	76.3	± 0.8	169	± 121
HG45_3.1	0.27	611	778	1.32	± 0.30	0.0497	± 1.8	83.8	± 1.0	76.5	± 0.7	65.5	± 66
HG45_4.1	0.27	353	227	0.66	± 0.33	0.0520	± 1.6	34.4	± 1.0	186	± 2	-103	± 104
HG45_5.1	0.25	307	371	1.25	± 0.30	0.0495	± 2.8	87.1	± 1.0	73.2	± 0.7	258	± 87
HG45_6.1	0.06	569	166	0.30	± 0.37	0.0513	± 1.0	27.4	± 1.0	231	± 2	214	± 29
HG45_7.1	4.25	480	20	0.04	± 0.88	0.1123	± 1.3	5.1	± 2.4	1110	± 26	1834	± 23
HG45_8.1	-	230	268	1.20	± 0.34	0.0472	± 3.3	85.4	± 1.6	75.4	± 1	-75	± 130
HG45_9.1	0.34	355	128	0.37	± 0.35	0.0526	± 1.4	33.6	± 1.0	190	± 2	74.0	± 71
HG45_11.1	0.31	154	178	1.19	± 0.19	0.0500	± 3.9	86.8	± 2.6	75.0	± 2	-651	± 422
HG45_12.1	2.40	210	255	1.26	± 0.77	0.0665	± 2.8	88.1	± 1.6	73.3	± 1	-253	± 365
HG45_13.1	0.32	209	210	1.04	± 1.55	0.0501	± 3.3	84.9	± 2.7	77.4	± 2		
HG45_14.1	0.35	136	177	1.35	± 1.73	0.0503	± 3.9	85.8	± 2.9	75.9	± 2	-737	± 485
HG45_15.1	0.36	170	142	0.86	± 0.31	0.0535	± 1.8	28.5	± 0.9	224	± 2	42.8	± 102
HG45_17.1	1.87	171	179	1.08	± 0.35	0.0632	± 4.9	87.7	± 1.9	73.0	± 1	134	± 260
HG45_18.1	4.64	148	123	0.86	± 0.39	0.0842	± 2.7	93.3	± 2.5	69.9	± 1	-816	± 1001
HG45_19.1	1.42	62	54	0.91	± 0.38	0.0613	± 3.6	34.5	± 2.7	196	± 4		
HG45_20.1	1.19	65	66	1.05	± 0.30	0.0581	± 4.0	49.3	± 1.8	130	± 2	33.3	± 291
HG45_21.1	0.40	79	64	0.83	± 0.45	0.0506	± 4.7	87.8	± 1.5	71.8	± 1.0	642	± 199
HG45_22.1	0.70	41	27	0.67	± 0.44	0.0563	± 4.0	28.3	± 1.4	226	± 3	-278	± 388
HG45_23.1	0.69	75	77	1.06	± 0.27	0.0530	± 5.1	87.7	± 2.7	74.7	± 2		
HG45_24.1	-	30	26	0.92	± 0.47	0.0658	± 2.1	7.5	± 1.3	803	± 10	845	± 53
HG45_25.1	0.17	166	151	0.94	± 0.41	0.0488	± 3.7	90.0	± 1.1	72.6	± 0.7	-937	± 510
HG45_26.1	0.16	187	143	0.79	± 0.60	0.0488	± 6.2	87.1	± 1.5	74.2	± 1	-264	± 276
Sample HG78													
HG78_1.1	0.25	207	264	1.32	± 0.40	0.0496	± 3.5	0.01193	± 1.5	77.1	± 1	-298	± 337
HG78_2.1	0.02	112	38	0.35	± 0.59	0.0689	± 1.2	0.14885	± 1.5	889	± 13	1039	± 45
HG78_3.1		83	39	0.48	± 0.62	0.0489	± 3.4	0.03452	± 2.1	219	± 4	263	± 137
HG78_4.1		186	246	1.37	± 0.48	0.1540	± 1.6	0.45377	± 3.5	2417	± 89	2392	± 26
HG78_5.1	0.33	219	232	1.09	± 0.51	0.0501	± 4.1	0.01129	± 2.3	27.1	± 2	198	± 96
HG78_7.1	0.36	561	27	0.05	± 1.17	0.1134	± 0.6	0.32378	± 1.6	1803	± 28	1852	± 11
HG78_8.1		789	1275	1.67	± 0.67	0.0466	± 1.7	0.01232	± 1.4	78.4	± 1	299	± 89
HG78_9.1		397	364	1.27	± 0.62	0.0492	± 1.7	0.03064	± 1.4	194	± 3	278	± 69
HG78_10.1	0.15	1183	2609	2.28	± 0.34	0.0487	± 1.3	0.01193	± 1.3	76.9	± 1	-155	± 95
HG78_11.1		699	180	0.27	± 0.38	0.0510	± 0.9	0.03811	± 1.6	242	± 4	168	± 35
HG78_12.1	1.57	835	377	0.47	± 0.90	0.1617	± 1.9	0.44010	± 4.1	2320	± 98	2473	± 32

점동 경계부 능선에서 채취한 시료이다(그림 1). 저어콘 입자들은 자형이고 주로 주상 결정이지만 단주상도 많다. CL 영상에서 매우 강하게 발광하고 동심원상 누대 구조를 선

명하게 나타낸다(그림 2b).

Th/U 비율은 0.70~1.24 범위이고(표 1) Th/U=1 선과 그 바로 아래에 거의 직선상 분포를 보여준다(표 3). 이러한

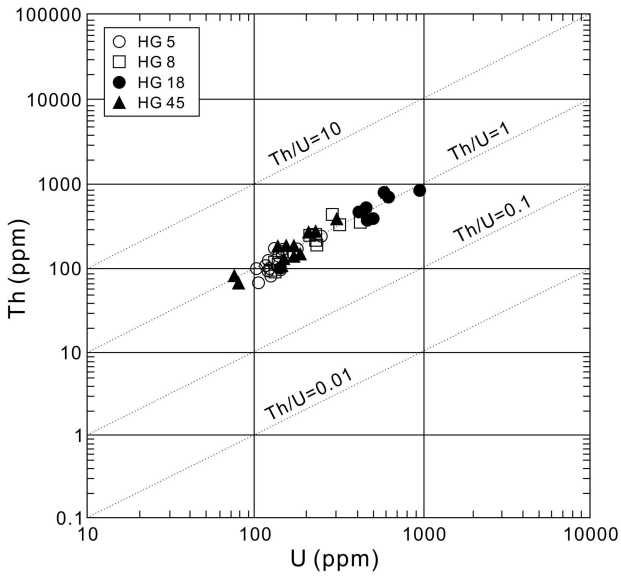


Fig. 3. Correlation diagram showing the proportions of Th to U concentrations (ppm) of the zircons analyzed by SHRIMP.

내부구조와 Th/U=1선 근처 분포는 마그마에서 성장한 화성 성인을 반영한다. 선명한 누대를 가진 저어콘에서 16개 분석치는 72.2±2 Ma에서 84.6±1 Ma 범위의 겹보기 연대를 가진다(표 1). 가장 높은 분석치 1개를 제외하면 15개 분석치는 일치곡선 상에 놓이거나 가까운 곳에 놓이며 조화적인 군집을 형성한다. 통계적인 계산에 의하면 가중평균 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 연대는 74.77±0.78 Ma (MSWD=1.9)로 산출된다(그림 4b).

4.3. 도선굴유문암

도선굴유문암 시료(HG18)는 대해폭포 동쪽 암벽에서 채취한 유대상 유문암이며(그림 1) 저어콘 분리는 쉽지 않았다. 저어콘 입자들은 비교적 작고 자형 또는 반자형이며 대부분 단주상 양상을 나타낸다. CL 영상에서 방사성이 높아 내부구조를 잘 나타내지 않으며 그 내부가 비교적 균질하고 희미하게 발광하지만, 외연이 다소 강하게 발광하는 누대 구조를 보여준다(그림 2c).

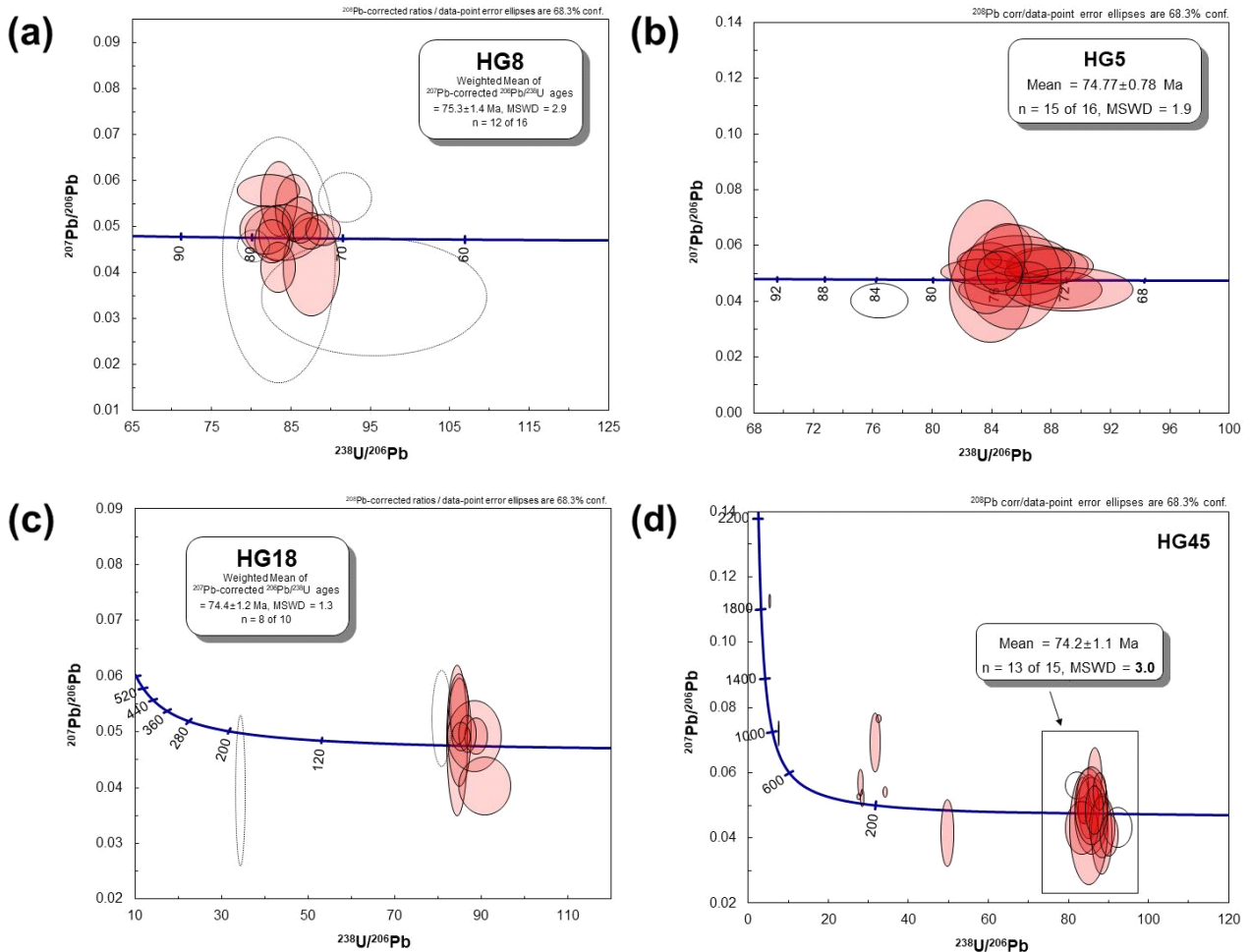


Fig. 4. Concordia diagrams for SHRIMP U-Pb ages of zircons separated from the major stratigraphic units (HG8, 5, 18, 45).

Th과 U 함량은 다른 시료보다 많으며 Th/U 비율은 0.73~1.40 범위에 있고(표 1) Th/U=1선 주위에서 거의 직선상 분포를 보여준다(그림 3). 이러한 내부구조와 그 분포도 역시 마그마에서 성장한 화성 성인을 반영한다. 10개 분석치는 71.4±3 Ma에서 188±3 Ma 범위의 겉보기 연대를 갖는다. 가장 늙은 분석치는 기존 암층의 쥐라기 심성암으로부터 들어온 외래결정(xenocryst)인 것으로 판단된다. 이 분석치와 다음 오래된 분석치 2개를 빼고 나머지 8개 분석치는 일치곡선 근처에서 거의 조화적 군집을 이룬다. 통계적으로 계산하면 가중평균 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 연대는 74.4±1.2 Ma (MSWD=1.3)를 나타낸다(그림 4c).

4.4. 금오산응회암

금오산응회암 시료(HG45)는 금오산 약사암 동쪽에서 채취한 부분용결 응회암이다(그림 1). 저어콘 입자는 자형으로서 주로 주상이고 단주상도 포함된다. CL 영상에서 매우 강하게 발광하고 뚜렷한 동심원상 누대 구조를 선명하게 보여준다(그림 2d).

Th/U 비율은 중원생대 1개, 신원생대 1개, 트라이아스기 3개와 쥐라기 3개를 제외하면 0.74~1.35 범위에 있으며(표 1), Th/U=1선 위를 따라 거의 직선상 배열을 보여준다(그림 3). 이러한 범위는 역시 내부구조와 마찬가지로 마그마에서 성장한 저어콘임을 지시한다. 24개 분석치 중에 늙은 연대 9개를 제외한 15개 분석치는 69.9±1 Ma에서 77.4±2 Ma 범위의 겉보기 연대를 갖는다. 15개 분석치에서 가장 젊은 분석치와 가장 늙은 분석치를 제외하면, 나머지 13개 분석치는 일치곡선 상에 놓이거나 가까운 위치에서 조화로운 군집을 이룬다. 통계적으로 계산하면 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 가중평균연대는 74.2±1.1 Ma (MSWD=3.0)로 정의된다(그림 4d),

4.5. 유문암맥

유문암은 환상암맥의 북동측, 동측, 남동측, 남측에서 채취한 시료로부터 저어콘을 회수하지 못했지만, 오로지 남동측 시료(HG74) 북측 시료(HG78)로부터만 저어콘 입자를 회수하였다. HG74 시료에서는 15개 저어콘이 분리되었으나 그 겉보기 연대가 고원생대(1개), 중원생대(2개), 트라이아스기(5개)와 쥐라기(7개)의 분석치가 나왔다. 따라서 이 저어콘들은 모두 유문암맥의 정치 이전의 기반암에서 나온 옛 저어콘 외래결정으로 판단된다.

HG78 시료에서는 저어콘 11개가 회수되었는데 그 겉보기 연대는 고원생대(3개), 신원생대(1개), 트라이아스기(2개), 쥐라기(1개)와 백악기(4개)를 얻었다(표 1). 백악기 이전의 7개 저어콘들은 화산암류의 분출 이전의 기반암에서 나온 외래결정으로 해석된다. 백악기 분석치 4개는 72.1±2 Ma에서 78.4±1 Ma 범위의 겉보기 연대를 갖는다(표 1).

하지만 이 분석치는 먼저 분출한 화산암으로부터 유입된 외래결정의 옛 저어콘이 포함될 수도 있으므로 관입 연대로 정의하기가 곤란하다. 따라서 그중에서 가장 젊은 겉보기 연대 72.1±2 Ma는 이 암맥의 정치 시기로 해석할 수 있다.

5. 토 의

금오산 칼데라 주변의 지질은 화산암류의 층서뿐만 아니라 구조도 매우 복잡하게 얽혀 있으므로, 먼저 주요 층서단위에 대한 분출 및 관입 시기를 해석하고 칼데라 함몰 시기에 대해 토의하기로 한다.

5.1. 분출 및 관입 시기

부상리안산암은 대부분 환상암맥의 남쪽과 동쪽 칼데라 밖에서 화강편마암을 부정합으로 덮는 영암산응회암 위를 덮고 있으며, 환상 유문암맥에 의해 관입되어 있다(그림 1). SHRIMP 저어콘 U-Pb 측정에서 부상리안산암의 75.3±1.4 Ma 연대는 저어콘의 폐쇄온도가 매우 높기 때문에 이 안산암의 분출 시기를 나타내는 것으로 판단된다. 따라서 부상리안산암은 백악기 후엽의 캄파이나절에 활동하였다.

오봉리응회암은 대부분 환상암맥 내측부의 북서쪽과 북쪽에서 주로 도선굴유문암에 덮이며, 환상암맥 내측부의 남동쪽에서 금오산응회암에 덮여 소규모로 노출된다(그림 1). 이 응회암의 SHRIMP 저어콘 U-Pb 측정연대는 74.77±0.78 Ma로서 저어콘의 폐쇄온도가 매우 높은 것을 감안하면 오봉리응회암의 분출 시기를 나타낸다고 해석된다. 따라서 오봉리응회암도 백악기 후엽의 캄파이나절에 속하고 부상리안산암보다 후기의 분출물임을 나타낸다.

도선굴유문암은 환상암맥 내측부의 북동쪽, 북쪽, 북서쪽과 서쪽에서 오봉리응회암을 덮고 금오산응회암에 의해 덮여 있으며, 일부 환상암맥에 의해 관입되어 있다(그림 1). SHRIMP 저어콘 U-Pb 측정에 의한 이 유문암의 74.4±1.2 Ma 연대는 저어콘의 폐쇄온도가 매우 높기 때문에 도선굴유문암의 분출 시기를 나타내는 것으로 판단된다. 따라서 도선굴유문암도 백악기 후엽의 캄파이나절에 분출하였고 오봉리응회암보다 젊은 용암임을 나타낸다.

이처럼, 부상리안산암은 오봉리응회암과의 선후관계는 절대연대에서 확실하게 나타나지만, 화산활동 측면에서도 찾아볼 수 있다. 두 층서단위 간의 시간 차이는 약 0.53 Myr 연대로 오차 범위 내의 짧은 연대 차이를 나타내지만, 화산활동에 따른 선후관계가 훨씬 큰 의미를 가진다. 화산 분출은 대개 폭발성 분출을 뒤따라 분류성 분출(effusive eruption)로 마감하는 과정이 일반적이다. 이 지역에서 먼저 안산암질 마그마로부터 폭발성 분출(explosive eruption)의 시작으로 영암산응회암이 퇴적된 후에 분류성 분출(effusive

eruption)로 전환되어 75.3 Ma 무렵에 부상리안산암 용암이 정지되었다(Hwang *et al.*, 2021b). 그리고 챔버 내에서 유문암질로 진화한 마그마로부터 다시 폭발성 분출의 시작으로 74.77 Ma 무렵에 오봉리용회암을 퇴적시키고 분류성 분출로 전환되어 도선굴유문암 용암을 정지시켰다. 이러한 과정은 뒤바뀔 순 없을 것이며, 0.53 Myr란 연대 차이는 매우 작은 부정합 관계를 의미한다.

금오산용회암은 환상암맥 내측부에서 도선굴유문암을 덮으면서 중앙부에 넓게 분포하며, 동쪽과 남쪽에서 환상암맥에 의해 관입되어 있다(그림 1). 저어콘 U-Pb 측정에 의한 이 용회암의 74.2±1.1 Ma 연대는 저어콘의 매우 높은 폐쇄온도를 고려할 때 금오산용회암의 분출 시기를 나타낸다고 판단된다. 따라서 금오산용회암도 백악기 후기에 속하고 도선굴유문암보다 나중에 분출한 것이다.

유문암맥은 본역 중앙부에서 대부분 환상암맥으로 산출하고 그 북쪽에 직선상 암맥으로 관입하며 산출된다(그림 1). 이 유문암은 저어콘 연기가 매우 어렵지만 회수한 몇 개의 분석치 중에 가장 젊은 겉보기 연대 72.1±2 Ma를 정지 시기로 해석했다. 따라서 이 연대도 백악기 후엽에 속하고 금오산용회암보다 나중에 정지했음을 나타낸다. 그러나 유문암맥의 72.1 Ma 연대는 금오산용회암의 분출연대 74.2 Ma보다 젊은 나이를 나타낸다. 두 층서단위 간의 연대 차이는 약 2.1 Myr 연대를 가지는데, 이 기간에 칼데라 함몰의 환상단열대를 따라 유문암맥이 관입하였다.

5.2. 시간층서

연대측정은 여러 층서단위 중에서 선택적으로 실시되었으나 안산암질암류에서 부상리안산암이 75.3 Ma의 연대를 나타내고, 유문암질암류에서 오봉리용회암이 74.77 Ma 연대이고, 도선굴유문암이 74.4 Ma 연대이며 금오산용회암이 74.2 Ma 연대로서 층서에 잘 부합되는 순차적인 연대를 나타낸다. 따라서 저어콘 U-Pb 측정치는 야외 관계에 따른 암석층서와 부합되게 상위층으로 가면서 정연하게 젊어지는 경향을 보여주는 연대를 나타낸다.

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

5.3. 칼데라의 함몰 시기

금오산용회암의 74.2 Ma 연대는 화쇄류의 분출 시기이다. 또한 유문암의 72.1 Ma 겉보기 연대는 환상암맥의 관입 시기를 나타낸다. 두 연대 간의 2.1 Myr 시간적 차이는

상당한 간격을 가지지만 오차범위 내에 있다고 볼 수 있다. 따라서 금오산용회암의 화쇄류들이 대규모로 분출된 후에 금오산 칼데라가 형성되었던 걸로 해석된다(Hwang *et al.*, 2021b). 왜냐하면 환상단열대를 따라 칼데라 함몰이 일어나면 칼데라 블록의 하중에 의해 가해지는 압력으로 인해 잔류 마그마가 틈을 따라 주입될 수 있기 때문이다(Druit Sparks, 1985). 그러나 금오산 칼데라에서 환상 유문암맥은 금오산용회암의 화쇄류들이 분출된 후에 칼데라가 피스톤형으로 침하할 때 환상단열대를 따라 순차적으로 관입했던 것(Hwang *et al.*, 2021b)에 부합된다.

대규모 화산폭발의 결과로 마그마챔버의 상부 마그마가 빠져나감과 동시에 이의 지붕이 함몰되어 칼데라를 형성하는 것은 규질 화산활동에서 흔히 일어나는 일반적인 사건으로 본다(Druitt and Sparks, 1985). 따라서 이 환상암맥은 금오산 칼데라에서 일어났던 함몰후 마그마 활동의 대표적인 표시이기도 하다. 왜냐하면 칼데라 형성 분출에 관련되는 환상관입체는 조성상으로 화쇄류에 의한 용회암과 같다고 보기 때문이다(Smith and Bailey, 1968).

그러므로 칼데라 함몰은 금오산용회암의 대규모 분출에 따른 지하 마그마챔버의 압력감소로 일어났고 유문암맥의 관입 때까지 진행되었다. 따라서 유문암맥 관입은 적어도 74.2~72.1 Ma 기간에 진행되었다고 본다. 다시 압력의 증가로 잔류 마그마는 이 기간의 어느 시기에 환상단열대를 따라 집중적으로 관입하였거나 그 기간 내내 서서히 관입했을 것으로 추정된다.

그리고 금오산 칼데라 지역에서는 75.3 Ma에서 72.1 Ma 기간에 걸쳐 3.2 Myr 동안 일어났던 화쇄류 분출-칼데라 함몰-환상암맥 관입으로 연결되는 하나의 완벽한 칼데라운회의 활동기간을 한정시켜 준다.

6. 결론

구미분지에서 금오산 화산암류는 하부의 안산암질암류와 상부의 유문암질암류, 관입암류로 구분된다. 안산암질암류는 영암산용회암, 부상리안산암 순으로 나누어지며, 유문암질암류는 오봉리용회암, 도선굴유문암과 금오산용회암 순으로 세분된다. 관입암류는 환상암맥과 직선상 암맥으로 나뉜다.

주요 층서단위를 대상으로 SHRIMP U-Pb 저어콘 연대 측정을 수행하였다. 안산암질암류에서 부상리안산암은 75.3±1.4 Ma에 집중되는 일치곡선 연대를 나타낸다. 유문암질암류에서 오봉리용회암은 74.77±0.78 Ma에 집중되는 연대를 얻었고, 도선굴유문암은 74.4±1.2 Ma에 집중되는 일치곡선 연대를 얻었으며, 금오산용회암은 74.2±1.1 Ma에 집중되는 연대를 얻었다. 이들 연대는 각 층서단위의 분출

시기를 나타낸다. 그리고 환상암맥은 72.1±2 Ma 겔보기 연대를 얻었으며, 이 연대는 관입 시기를 시사한다.

칼데라 함몰은 대규모 금오산응회암의 분출로 일어났고 환상 유문암맥의 관입 때까지 적어도 74.2 Ma에서 72.1 Ma 기간에 단속적으로 혹은 연속적으로 진행되었다.

따라서 이들 자료는 금오산 주변에서 백악기 후엽의 캄파이나절에 일어났던 각 층서단위의 분출 혹은 관입시기를 확실케 하며 75.3~72.1 Ma 기간에 걸쳐 3.2 Myr 동안 일어났던 화쇄류 분출-칼데라 함몰-환상암맥 관입으로 연결되는 완벽한 칼데라운회의 기간을 한정시켜 준다.

감사의 글

이 연구는 한국지질자원연구원의 기본과제인 ‘국가지질도·지질주제도 디지털전환(DX)과 기반암 내 유망·유해원소 연구 (GP2025-020)’ 과제의 지원으로 수행되었다. 이 논문은 전문가의 권고에 따라 약간 조정되었으며, 심사과정에서 원고의 질 향상을 위해 세심한 검토와 건설적 조언에 감사드린다.

REFERENCES

- Druitt, T.H. and Sparks, R.S.J., 1985, On the formation of calderas during ignimbrite eruptions. *Nature*, 310, 679-681.
- Hoskin, P.W.O. and Schaltegger, U., 2003, The composition of zircon and igneous and metamorphic petrogenesis. In: Hanchar, J.M. and Hoskin, P.W.O. (eds.), *Zircon: Reviews in Mineralogy and Geochemistry*. Mineralogical Society of America, 53, 27-62.
- Hwang, S.K., Ahn, U.S. and Song, K.-Y., 2021a, Genesis and evolutions of the Geumosan volcanic rocks in Southern Gumi, Korea. *Journal of the Geological Society of Korea*, 57, 123-139 (in Korean with English abstract).
- Hwang, S.K., Kim, S.W., Kee, W.-S. and Kim, J.J., 2019, U-Pb zircon ages and division of the Cretaceous volcanic arc in the Korean Peninsula: Spatiotemporal evolution of the arc volcanism. *Journal of the Geological Society of Korea*, 55, 595-619 (in Korean with English abstract).
- Hwang, S.K., Son, Y.W., Seo, S.H. and Kee, W.-S., 2021b, Collapse type and processes of the Geumosan caldera in the southern Gumi, Korea. *Economic and Environmental Geology*, 54, 35-48 (in Korean with English abstract).
- Kim, J.H. and Lim, J.W., 1974, Explanatory text of the geologic map of Gumi Sheet. Daejon, Geological and Mineral Institute of Korea, 20 p.
- Kim, S.W., Yang, S.Y. and Lee, Y.J., 1989, Geological report of the Gimcheon Sheet. Daejon, Korea Institute of Energy and Resources, 22 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.
- Ludwig, K.R., 2008, User's manual for Isoplot 3.6: A Geochronological Toolkit for Microsoft Excel. Berkeley Geochronology Center Special Publication, Berkeley, California, 4, 77 p.
- Ludwig, K.R., 2009, SQUID 2.50: A User's manual. Berkeley Geochronology Center Special Publication, Berkeley, California, 5, 100 p.
- Smith, R.L. and Bailey, R.A., 1968, Resurgent cauldrons. In: Coats, R.R., Hay, R.L. and Anderson, C.A. (eds.), *Studies in Volcanology*, GSA Memoirs, 613-662, <https://doi.org/10.1130/MEM116-p613>.
- 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.