



남해도와 사량도에 분포하는 백악기 화산암류의 SHRIMP U-Pb 저어콘 연대측정과 층서

이소진¹ · 황상구^{1,2} · 송교영^{3,*} · 이기욱⁴

¹안동대학교 기초과학연구소

²안동대학교 지구환경과학과

³한국지질자원연구원 국토지질연구본부

⁴한국기초과학지원연구원 환경과학연구부

요 약

남해도와 사량도 화산암류는 암층서적으로 하부 안산암질암류, 하부 유문암질암류, 상부 안산암질암류와 상부 유문암질암류로 구분된다. 이들 중에 하부 유문암질암류의 봉화산옹회암과 상부 유문암질암류의 사량도옹회암에 대한 SHRIMP 저어콘 U-Pb 연대측정을 실시함으로써 분출시기와 층서관계를 확실하게 하였다. 연대 측정 결과에 의하면 봉화산옹회암에서 86.69±0.78 Ma (n=10, 2σ)에 집중되는 일치곡선 연대를 나타내고, 사량도옹회암에서 각각 69.72±0.69 Ma (n=12, 2σ)와 69.16±0.65 Ma (n=12, 2σ)에 집중되는 일치곡선 연대를 나타낸다. 이들 연대는 백악기 후기의 활발했던 호화산작용의 시기임을 의미하고 남해도와 사량도에서 일어났던 각 옹회암의 분출시기를 지시하며, 운문사아층군과 사량아층군의 층서대비를 가능하게 한다. 게다가 이 층서는 경상분지에서는 백악기 후엽 유천층군의 다른 화산단위와 간접적인 층서대비에 기여할 것으로 기대된다.

주요어: 유천층군, SHRIMP 저어콘 U-Pb 연대측정, 분출시기, 아층군, 층서대비

So Jin Lee, Sang Koo Hwang, Kyo-Young Song and Keewook Yi, 2019, SHRIMP U-Pb zircon dating and stratigraphy of the Cretaceous volcanic rocks in Namhae and Saryang islands, southernmost Korea. Journal of the Geological Society of Korea. v. 55, no. 5, p. 621-632

ABSTRACT: The volcanic rocks in Namhae and Saryang islands, are lithostratigraphically classified as lower andesitic rocks and rhyolitic rocks, and upper andesitic rocks and rhyolitic rocks. We ensured their eruption timings and stratigraphic relationships, based on SHRIMP U-Pb dating for zircons from Bonghwasan Tuff of the lower rhyolitic rocks and Saryangdo Tuff of the upper rhyolitic rocks. The results shows that the concordia age of Bonghwasan Tuff is 86.69±0.78 Ma (n=10, 2σ), and those of the Saryangdo Tuff are 69.72±0.69 Ma (n=12, 2σ) and 69.16±0.65 Ma (n=12, 2σ). These ages suggest the period of active arc volcanism during the Late Cretaceous, and indicate the eruption timings of each tuff units of the Namhae and the Saryang islands, and enable them to make a stratigraphic correlation to Unmunsa and Saryang subgroups. Moreover, it is expected that the subgroups can make an indirect stratigraphic correlation to different volcanic units of the Late Cretaceous Yucheon Group in the Gyeongsang Basin.

Key words: Yucheon Group, SHRIMP zircon U-Pb dating, eruption timing, subgroup, stratigraphic correlation

(So Jin Lee and Sang Koo Hwang, Institute of Basic Sciences, Andong National University, Andong 36729, Republic of Korea; Sang Koo Hwang, Department of Earth and Environmental Science, Andong National University, Andong 36729, Republic of Korea; Kyo-Young Song, Geology Division, Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources, Daejeon 34132, Republic of Korea; Keewook Yi, Division of Environmental and Material Sciences, Korea Basic Science Institute, Ochang 28119, Republic of Korea)

1. 서 언

경상분지에서는 백악기 후기부터 고신생기(Paleogene)

초엽까지 활발한 화산작용이 일어났으며 이 화산작용은 심성작용과 결부되어있다(Kim, 1996; Hwang, 2012). 이렇게 형성된 화성암류는 광역적인 마그마 벨

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

트로서 경상분지 남동부에 북동-남서 방향으로 발달하는 경상호를 형성시켰다(Hwang and Kim, 1994a, 1994b; Hwang, 2012).

이들 화성암류는 경상분지 유천소분지에 집중적으로 분포하며(그림 1a), 특히 화산암류는 상당히 복잡한 화산층서를 보여준다. 이 화산암류에 대해 많은 연구가 수행되어 왔지만(예, Hwang and Kim,

1994a, 1994b; Yun *et al.*, 1997; Jwa, 1998; Hwang, 2012), 일부 지역에서 제시된 화산층서가 광역적으로 적용되지 않기 때문에 격리되어있는 화산암류의 층서들을 대비하기 위해서는 많은 어려움이 따른다. 따라서 화산암의 정확한 분출연대를 측정하는 것이 중요하다. 유천소분지 화산암류에 대한 최근 LA-ICP-MS U-Pb 저어콘 연대측정결과에 의하면 밀양지역에서

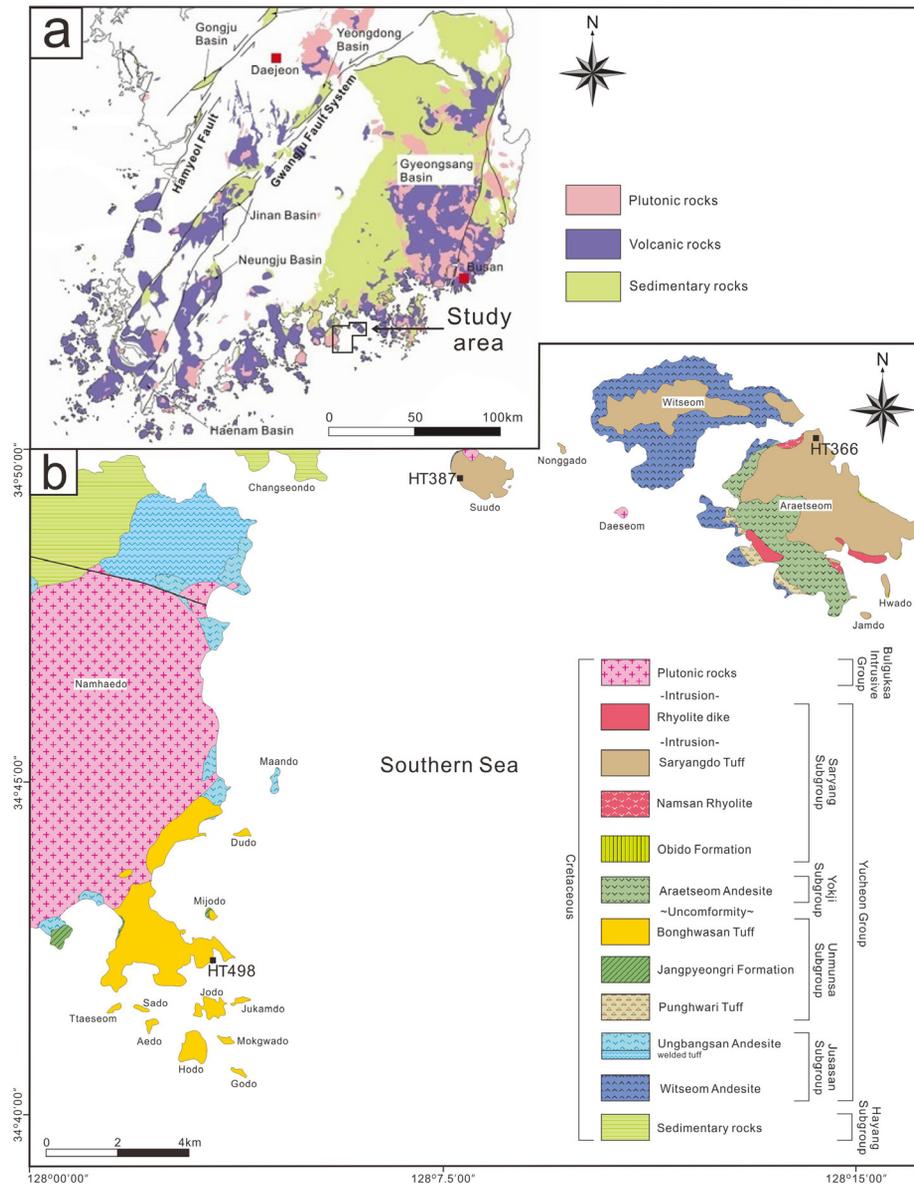


Fig. 1. (a) Geological map showing the location of study area in the southern part of the Korean Peninsula (after KIGAM, 2001); (b) Geological map around Namhae and Saryang islands (modified from Hwang *et al.*, 2016), showing sampling locations of this study.

백악기 후기 $94.4 \pm 0.8 \sim 78.4 \pm 1.5$ Ma에 순차적으로 화산작용이 발생하였으며(Zhang *et al.*, 2012), 이들의 층서대비는 주요 연구대상이 되었다(Hwang *et al.*, 2018a, 2018b).

연구지역은 사랑도와 남해도가 동·서쪽에 자리잡고 있고 그 사이에 수우도, 마안도 등의 작은 섬들이 분포하며, 북쪽의 창선도가 극히 일부 포함되는 도서지역이다(그림 1a, 1b). 선행연구로서 Chi *et al.* (1983)은 사랑도 윗섬에 대한 도폭지질조사를 수행하였으며, Kim *et al.* (1999)와 Lee *et al.* (2019)은 각기 남해도와 사랑도 화산암류에 대한 암석화학적 연구를 수행하였다. 그리고 You *et al.* (2005)은 사랑도의 지질을 개략적으로 설명하였으며, 최근에 Hwang *et al.* (2016)은 사랑도 아랫섬과 남해도 동부 및 그 외 작은 섬들에 대한 도폭지질조사를 수행하여 이 지역의 복잡한 지질에 대한 화산층서를 확립하였다. 또한, Hwang *et al.* (2018a, 2018b)은 통영 육지도와 미륵도 주변 화산암류에 대한 SHRIMP 저어콘 U-Pb 연대측정 결과를 토대로 화산층서에 대한 연구를 수행하였다. 그러나 사랑도와 남해도 지역의 화산암류에 대한 연대측정 연구는 거의 이루어지지 않았고, 도폭지질조사로 확립된 화산층서를 뒷받침할 수 있는 연대자료도 부족하다.

따라서 이 연구에서는 사랑도와 남해도 주변에 분포하는 화산암류에 대해 SHRIMP 저어콘 U-Pb 연대측정 결과를 바탕으로 이들의 분출시기를 정확하게 밝히고, 유천소분지에 분포하는 다른 지역 화산암류와의 층서대비를 하는 것이 목적이다.

2. 지질개요

남해도와 사랑도는 지체구조상으로 경상분지 남부의 유천소분지 최남단에 위치하며, 백악기에 한반도에서 발달한 북동-남서 방향의 여러 화산호들 중에서 경상호의 남부에 해당하는 곳이다. 경상호는 크게 백악기 전기의 화산작용으로 하양층군의 여러 층군에 화산층이 협재되었고, 백악기 후기의 화산작용으로 화산층이 절대적으로 우세한 유천층군이 형성되었다(Hwang, 2012). 이 유천층군은 밀양지역에서 Kim and Lee (1981)에 의해 하부 안산암질암류를 주사산아층군으로, 상부 유문암질암류를 운문사이층군으로 분류된 바 있다. 경상호는 LA-ICP-MS U-Pb

저어콘 연대측정에 의하면 주사산안산암질암류(혹은 주사산아층군)의 형성시기는 84.4~88.8 Ma이고 정각산층 내의 응회암이 88.7 Ma이며 운문사유문암질암류(혹은 운문사이층군)는 88.0 Ma으로 밝혀졌다(Zhang *et al.*, 2012).

남해도와 사랑도 주변 지역은 하양층군 퇴적암류의 상위에 발달하는 백악기 후엽의 안산암질 및 유문암질의 화성쇄설암과 용암으로 주로 구성되며, 심성암류가 이를 관입하고 있다(Hwang *et al.*, 2016). 화산암류의 층서는 하부로부터 하부 안산암질암류(주사산아층군), 하부 유문암질암류(운문사이층군), 상부 안산암질암류(육지아층군), 그리고 상부 유문암질암류(사랑아층군)로 구분된다. 각 아층군을 암상에 따라 세분하면, 주사산아층군은 윗섬안산암과 옹방산안산암으로 구분되고, 운문사이층군은 풍화리응회암, 장평리층과 봉화산응회암으로 구분된다. 육지아층군에는 아랫섬안산암이 속하며, 사랑아층군은 오비도층, 남산유문암과 사랑도응회암으로 구분된다(그림 1b; Hwang *et al.*, 2016).

운문사이층군의 봉화산응회암은 장평리층 위에 놓이거나(그림 2a) 옹방산안산암의 위에 놓이며 화강암에 의해 관입되어있다. 사랑아층군의 남산유문암은 아랫섬안산암 위에 놓이고(그림 2b), 유상엽리가 발달한 유대상 유문암(flow-banded rhyolite)이다(그림 2c). 사랑도응회암은 사랑도 윗섬과 수우도에서 윗섬안산암 위에 놓이며(그림 2d), 사랑도 아랫섬에서 아랫섬안산암 위에 놓이거나 오비도층 위에 놓이기도 한다(그림 2e). 그리고 유문암맥은 오비도층을 맥상으로 관입하고 있다(그림 2f).

본역의 암층들 중 사랑도 동쪽의 미륵도에 분포하는 풍화리응회암과 남산유문암에서 SHRIMP 저어콘 U-Pb 연대측정이 실시된 바 있으며, 풍화리응회암에서 88.95 ± 0.44 Ma, 남산유문암에서 71.74 ± 0.47 Ma의 연대가 보고되었다(Hwang *et al.*, 2018b).

3. 암석기재

3.1 봉화산응회암

남해도 남부 일대와 작은 섬들에 분포하는 봉화산응회암은(그림 1b), 대부분 층리가 잘 발달하지 않는 용결응회암으로 구성되어있고 약한 풍화면에서 용결엽리가 관찰된다. 봉화산응회암이 분포하는 지

역은 비교적 험한 산세를 형성하고 있다.

이 응회암은 암회색을 띠며, 치밀하게 용결된 화산회 기질에 풍부한 결정립과 부석편, 소량의 암편을 함유한다(그림 3a). 결정립은 대부분 1~3 mm 크기의 사장석이며, 약간의 석영과 각섬석을 가진다. 암편은 주로 회색을 띠고 각상이며 5~15 mm 크기를 가진다. 암체의 하부로 갈수록 암편의 크기는 더 커지고 함량은 높아진다. 부석편은 대부분 작고 편평화된 피아메(fiamme)로 산출된다. 이 피아메들은 완

배열상 석리(eutaxitic fabric)를 정의하여 용결엽리(welding foliation)를 형성한다.

현미경 하에서 사장석, 석영, 각섬석으로 구성된 결정립들의 사이에 부석편과 샤드(shard)들이 심하게 압착·용결되어있고 입자들을 비켜가는 양상을 보여준다. 그리고 이들의 배열에 의해 완배열상 석리가 뚜렷하게 정의된다. 기질 내 샤드들은 대부분 유리질로 남아있으며, 부석편들의 내부는 부분적으로 알칼리장석과 실리카로 결정화되어 있다(그림 3b).

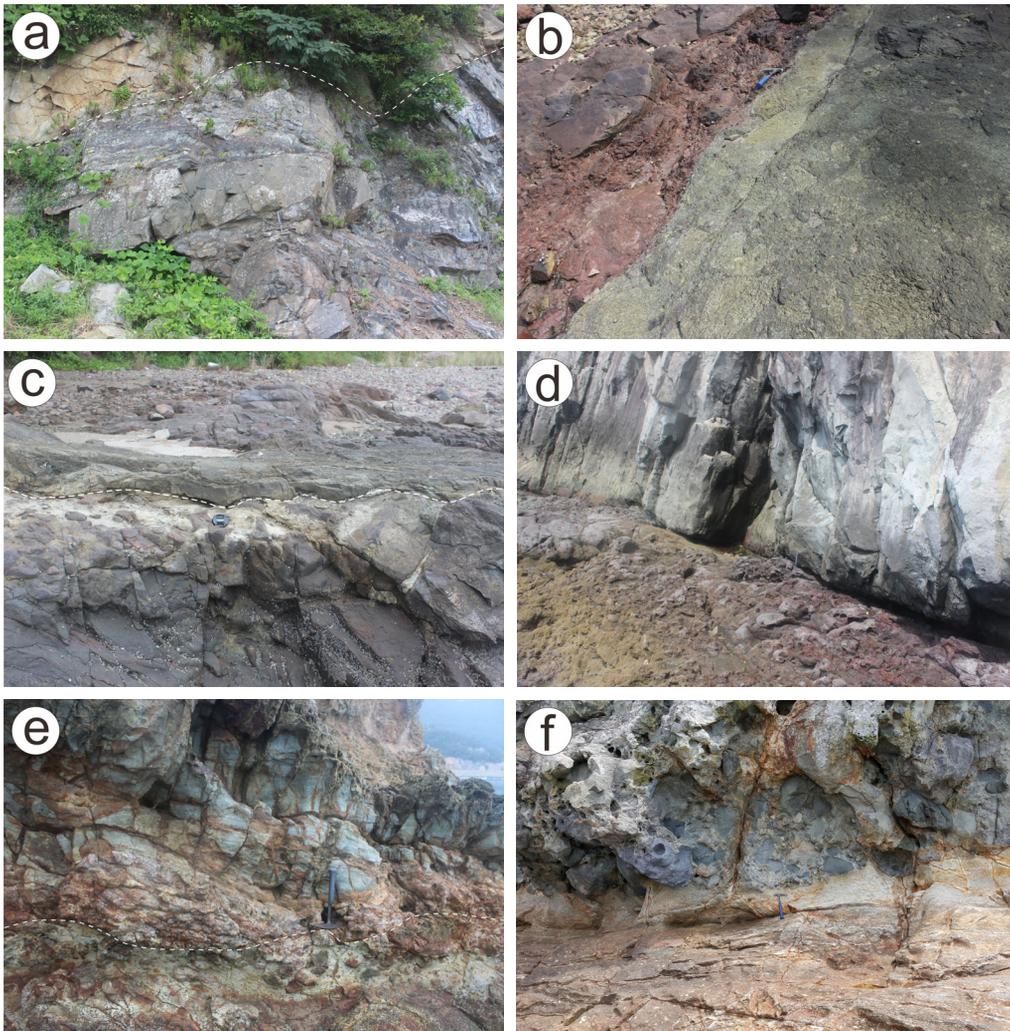


Fig. 2. Outcrop photographs showing representative stratigraphic relationships between the stratigraphic units. (a) Bonghwasan Tuff on the Jangpyeongri Formation in the southern Songjeong Village; (b) Namsan Rhyolite on the Araetseom Andesite in the northern coast of the Araetseom Island; (c) Namsan Rhyolite showing flow-banded structure on the Araetseom Andesite near the Neungyang Port; (d) The basal part of the Saryangdo Tuff on Witseom Andesite in the western Suu Island; (e) The basal part of Saryangdo Tuff on Obido Formation in the Hwado Islet; (f) Rhyolite dike intruding the Obido Formation.

3.2 사랑도응회암

사랑도응회암은 사랑도 윗섬과 아랫섬, 수우도와 작은 섬들에 넓게 분포하며, 본 역의 화산암류 중 층서적으로 가장 상부에 있는 지층이다(그림 1b).

이 암층은 대부분 청회색 내지 갈색을 띠며, 입도에 따르면 대부분 응회암 혹은 라필리응회암에 해당되고 구성물질에 의하면 결정질 응회암(crystal tuff)에 속한다. 결정립은 대부분 자형 혹은 반자형을 보이는 2 mm 내외의 사장석으로 이루어지며, 그 함량은 암체의 하부로 갈수록 증가한다. 특히 수우도와

농가도에서는 결정립이 매우 풍부하며 희미한 용결엽리가 나타난다(그림 3c). 암편은 대부분 데사이트와 안산암으로 구성되고, 그 크기는 1.5 cm 내외이며 최고 6 cm에 이르며, 동쪽으로 갈수록 커진다. 부석편은 대개 암회색을 띠고 치밀한 용결작용으로 압축신장된 피아메의 형태를 보인다. 피아메의 장축은 평균적으로 1~2 cm 내외이고 최고 9 cm에 이른다. 따라서 노두에서 완배열상 석리를 보여주는 용결엽리가 잘 발달된다(그림 3e). 한편 전체적으로 분급은 좋지 않고 내부에 층리가 발달하지 않는다.

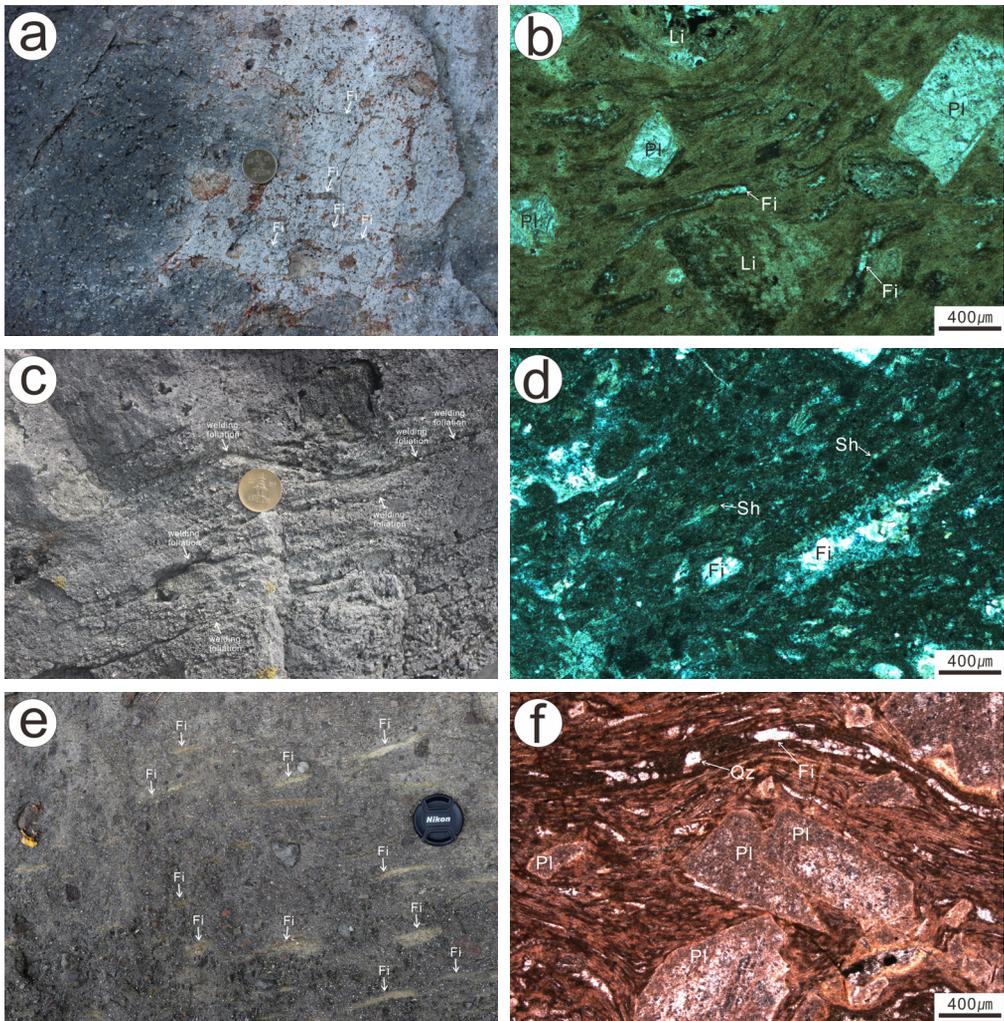


Fig. 3. Outcrop photographs and photomicrographs showing representative lithology and petrography of the volcanic rocks. (a) Outcrop photograph of the Bonghwasan Tuff; (b) Photomicrograph of the Bonghwasan Tuff; (c) Outcrop photograph of the Saryangdo Tuff in the Suu Island; (d) Photomicrograph of the Saryangdo Tuff in Suu Island; (e) Outcrop photograph of the Saryangdo Tuff in the Araetseom Island; (f) Photomicrograph of the Saryangdo Tuff in Araetseom Island: Pl, plagioclase; Qz, quartz; Fi, fiamme; Sh, shards; Li, lithic fragment.

현미경 하에서 수우도에 분포하는 사랑도응회암의 경우 석기에 부석편과 샤아드가 풍부하며, 부석편의 내부는 알칼리장석과 실리카로 결정화되어있다. 용결 엽리는 거의 발달되지 않으며, 미약하게 변질되어 있는 양상이 관찰된다(그림 3d). 아랫섬에 분포하는 암체의 경우 현미경 하에서 석기에 함유된 사장석과 소량의 석영립, 그리고 이들 사이로 심하게 압착·용결된 부석편과 샤아드들이 뚜렷하게 관찰된다(그림 3f).

4. 연대측정

4.1 시료선정 및 분석과정

사랑도와 남해도 주변의 화산암류는 여러 섬에 산재되어 있기 때문에 야외관계만으로 층서를 정립하기가 어렵다. 그러므로 화산층서를 체계화하기 위해 주요 층서단위에 대해 SHRIMP 저어콘 U-Pb 연대측정을 실시하였다. 분석을 위해 운문사이층군의 봉화산응회암에서 1개(남해도 남부: HT498) 시료, 사랑아층군의 사랑도응회암에서 2개(수우도 서부: HT387, 사랑도 아랫섬 북부: HT366) 시료를 채취하였다(그림 1b).

저어콘 분리는 파쇄작업과 수세식 패닝(panning), 중액분리법, 그리고 자성분리법의 절차에 따라 수행되었다. 먼저 시료를 실험실에서 1차로 파쇄하고 2

차로 더 잘게 분쇄한 후, 표준 망체를 이용하여 120~180 메쉬 사이의 입자를 회수하였다. 회수된 입자를 비커에 넣어 물을 이용해 패닝하고, 자석으로 자성 광물을 제거하여 중광물을 농집시켰다. 실체현미경으로 잔류 중광물 입자들을 관찰하여 핀셋으로 저어콘 입자만을 선별하였다. 분리한 저어콘들을 표준물질과 함께 에폭시 몰드에 넣어 마운트를 만들었다. 저어콘 입자가 반쯤 드러날 때까지 마운트를 사포로 갈아낸 후 그 표면을 다이아몬드 연마제로 연마하였으며, 금으로 코팅하였다. 한국기초과학지원연구원 오창본원에서 주사전자현미경(JEOL JSM- 6610LV 모델)을 이용하여 마운트 내 개별 저어콘 입자에 대해 음극선발광(cathodoluminescence; CL)과 후방산란전자(backscattered electron; BSE) 영상을 촬영하였고 분석 위치를 선정하였다.

저어콘의 연대측정을 위해 오창본원의 고분해능 이차이온 질량분석기(SHRIMP IIe)를 이용하였다. U-Pb 분석을 위해 일차 이온빔으로 산소 음이온(O^2)을 이용하였으며, 이때 이온빔의 직경은 25 μm 이고 세기는 4-6 nA이었다. 저어콘 표준물질 FC-1과 SL13을 통해 U 함량측정과 U-Pb 연대보정을 실시하였다. 기기작동과 자료처리절차는 Williams (1998)과 Ireland and Williams (2003)의 방법과 같다. 측정된 자료는

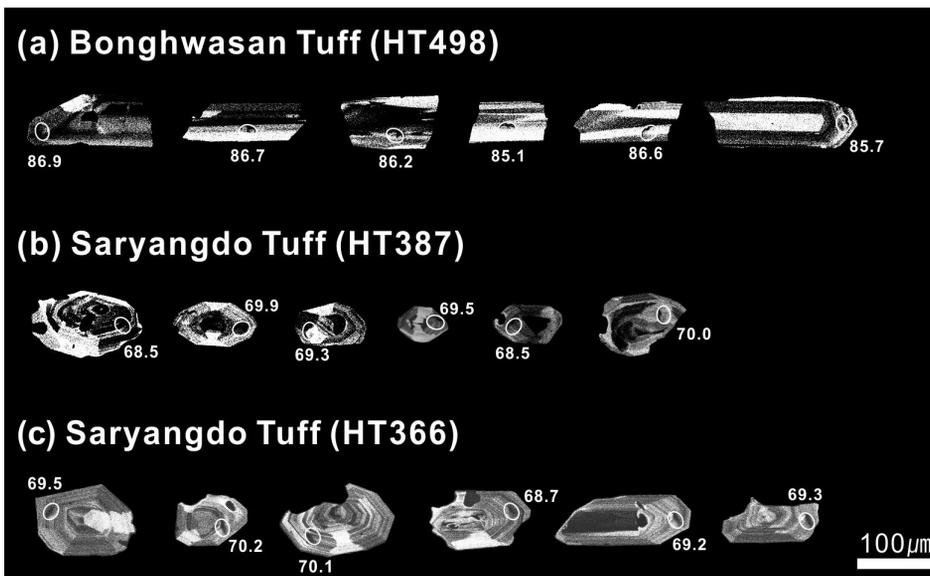


Fig. 4. Representative cathodoluminescence images of the analysed zircon grains, showing the location of analytical spots and $^{206}Pb/^{238}U$ ages in Ma, separated from (a) Bonghwasan Tuff (HT498), and (b) and (c) Saryangdo Tuff (HT387 and HT366).

Table 1. Summary of SHRIMP U-Pb isotopic data of the analytical zircons from the volcanic rocks in Namhae, Suu and Saryang islands.

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	²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb Age	(1) Age	(2) Age
Sample HT498 (Bonghwasan Tuff)													
HT498_1.1	0.17	141	44	0.3245	0.3	0.0491	2.6	0.0291	3.3	86.9	1.0	--	--
HT498_2.1	-0.08	178	52	0.3007	1.7	0.0471	2.6	0.0258	4.9	86.7	0.6	--	--
HT498_4.1	0.09	151	58	0.3984	2.5	0.0484	4.7	0.0274	3.8	86.2	1.4	--	--
HT498_5.1	0.20	190	87	0.4709	1.9	0.0493	2.5	0.0250	3.3	84.7	1.1	--	--
HT498_6.1	-0.11	141	33	0.2446	0.4	0.0468	2.8	0.0264	4.1	85.1	1.7	--	--
HT498_7.1	0.28	132	44	0.3464	0.3	0.0500	2.7	0.0285	4.0	86.6	0.7	--	--
HT498_8.1	0.04	132	36	0.2804	1.4	0.0482	2.7	0.0291	3.9	95.4	1.5	--	--
HT498_9.1	-0.13	215	116	0.5555	1.0	0.0468	2.1	0.0301	2.5	88.3	0.6	38	51
HT498_10.1	0.33	162	47	0.2998	3.1	0.0503	2.5	0.0277	4.6	85.7	1.4	--	--
HT498_11.1	0.01	136	62	0.4697	1.7	0.0478	2.6	0.0296	1.5	84.7	1.2	--	--
HT498_12.1	0.11	332	189	0.5882	0.2	0.0486	1.6	0.0303	2.6	86.5	0.7	-353	165
Sample HT387 (Saryangdo Tuff)													
HT387_1.1	0.84	410	367	0.9232	0.9	0.0540	1.8	0.0219	2.2	68.5	0.4	-1034	449
HT387_2.1	0.07	237	225	0.9796	0.2	0.0480	2.4	0.0252	2.6	71.3	0.5	-463	267
HT387_3.1	0.08	92	68	0.7698	0.3	0.0481	3.9	0.0249	3.0	70.7	0.7	1088	165
HT387_4.1	0.70	103	71	0.7157	0.3	0.0530	4.1	0.0232	3.5	69.0	1.8	514	102
HT387_5.1	0.32	158	146	0.9555	0.6	0.0499	3.0	0.0244	3.8	69.9	0.7	--	--
HT387_6.1	0.30	101	103	1.0539	0.3	0.0498	3.6	0.0250	3.5	69.3	0.6	--	--
HT387_7.1	-0.26	162	167	1.0658	1.5	0.0454	3.0	0.0245	2.2	71.8	1.1	--	--
HT387_8.1	0.06	90	83	0.9489	0.6	0.0479	4.2	0.0225	4.2	71.4	1.0	--	--
HT387_9.1	0.19	191	123	0.6638	0.2	0.0489	2.7	0.0240	3.0	70.2	0.9	--	--
HT387_10.1	0.35	144	111	0.8001	0.2	0.0502	3.0	0.0235	2.5	69.5	0.5	--	--
HT387_11.1	0.53	150	167	1.1484	0.2	0.0516	2.9	0.0239	0.9	68.5	0.5	--	--
HT387_12.1	0.45	130	73	0.5804	0.3	0.0510	3.3	0.0236	1.1	70.0	0.6	--	--
Sample HT366 (Saryangdo Tuff)													
HT366_2.1	0.46	281	264	0.9710	0.3	0.0510	3.8	0.0825	8.6	69.5	0.7	-31	202
HT366_3.1	-0.26	296	303	1.0572	1.3	0.0454	5.1	0.0656	10.0	70.2	1.3	-854	517
HT366_4.1	0.54	293	263	0.9275	1.8	0.0517	3.4	0.0942	6.3	69.0	1.1	68	154
HT366_5.1	0.24	238	178	0.7723	0.3	0.0493	4.1	0.0879	7.4	70.1	1.5	-424	347
HT366_6.1	0.18	221	180	0.8455	0.8	0.0488	4.4	0.0788	7.2	68.7	0.7	-377	339
HT366_8.1	0.09	268	215	0.8279	0.3	0.0481	3.8	0.0923	7.7	67.7	2.4	-657	396
HT366_9.1	0.42	296	252	0.8816	0.5	0.0507	3.8	0.0788	8.5	68.2	1.0	593	160
HT366_10.1	0.07	210	143	0.7065	0.4	0.0479	4.8	0.0819	8.3	69.5	1.5	-188	259
HT366_11.1	0.76	285	230	0.8353	0.3	0.0534	3.9	0.0826	8.2	68.2	2.3	-365	367
HT366_12.1	0.22	265	259	1.0111	0.3	0.0492	3.9	0.0862	8.0	69.2	2.0	-134	214
HT366_13.1	0.96	260	140	0.5574	1.0	0.0550	4.0	0.0843	6.5	69.9	1.2	412	90
HT366_14.1	0.86	241	182	0.7815	0.4	0.0542	4.7	0.0786	8.1	69.3	1.9	-77	303

SQUID version 2.5 및 Isoplot/Ex v. 3.6(Ludwig, 2008, 2009)을 통해 처리되었으며, 이를 통해 연대계산을 수행하였다. 각각의 분석치와 겉보기연대의 오차는 1σ 이고, 가중평균 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 연대 및 일치곡선 연대는 95% (2σ)의 신뢰도를 가진다.

4.2 측정결과

봉화산응회암(HT498): 저어콘 입자들은 대부분 자형이며 장주상으로 산출된다. CL 영상에서 대부분의 저어콘들이 진동누대를 보이는 반면, 상속핵은 관찰되지 않는다(그림 4a). 11개 저어콘 입자의 U과 Th 농도는 각각 132~332 ppm과 33~189 ppm이고, Th/U 비는 0.24~0.57 범위로 나타난다(표 1). U-Th 관계도에서 분석된 저어콘들은 대체로 Th/U 비가 1과 0.1 인 등치선 사이에 직선상으로 도시된다(그림 5). 이는 외형 및 내부구조와 함께 마그마에서 성장한 저어콘의 특징을 지시한다(Vavra *et al.*, 1999; Hartman *et al.*, 2000). 10개 분석점에서의 겉보기 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 연대는 84.7~95.4 Ma의 범위를 가지며(표 1), 가장 오래된 분석치를 제외한 나머지 10개 분석치는 모두 일치곡선 상에 놓인다. 이 10개 분석치의 가중평균 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 연대는 86.69±0.78 Ma이다(그림 6a).

사량도응회암: HT387의 저어콘 입자들은 대부분 동심원상 자형이며, CL 영상에서 진동누대 및 부분 누대를 보인다(그림 4b). 12개 저어콘 입자의 U과 Th 농도는 각각 90~410 ppm과 68~367 ppm이고 Th/U 비는 0.56~1.11 범위로 나타난다(표 1). U-Th 관계도에서 분석치는 Th/U 비가 1인 등치선에 근사하여 직선상으로 도시되는데(그림 5), 이는 내부구조와 함께 화성성인을 반영한다. 누대구조를 가진 저어콘 입자 12개의 겉보기 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 연대는 68.5~71.8 Ma의 범위를 가지며(표 1), 12개의 분석치에 대한 가중평균 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 연대는 69.72±0.69 Ma이다(그림 6b).

HT366의 저어콘 입자들은 대부분 자형이고 주상 혹은 단주상의 형태를 보이며, CL 영상에서 진동누대 및 부분누대가 잘 관찰된다(그림 4c). 12개 저어콘 입자의 U과 Th 농도는 각각 210~296 ppm과 140~303 ppm이고 Th/U 비는 0.54~1.02 범위를 가진다(표 1). U-Th 관계도에서 분석치는 대부분 Th/U 비가 1 인 등치선을 따라 일직선으로 도시되며(그림 5), 이는 화성성인을 시사한다. 누대구조를 가진 저어콘 입

자 12개의 겉보기 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 연대는 67.7~70.2 Ma 범위를 가진다(표 1). 12개의 분석치에 대한 가중평균 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 연대는 69.16±0.66 Ma이다(그림 6c).

5. 토 의

사량도, 수우도와 남해도 주변의 화산암류에 대한 연대측정은 백악기 후엽의 화산활동 시기를 추정하고 경상분지에서 유천층군의 층서를 구분하는데 꽤 중요한 실마리를 제공할 수 있다. 본 연구의 목적은 본 역의 화산암류의 분출시기를 규명하고, 인접 지역과의 대비를 통해 화산층서 관계를 수립하는 것이므로 이에 대해 각기 논의해보도록 한다.

5.1 연대의 지구조적 의미

본 연구에서 봉화산응회암은 86.69±0.78 Ma의 연대를, 사량도응회암은 69.72±0.69 Ma와 69.16±0.65 Ma의 연대를 얻었다. 봉화산응회암은 코니아시안(Coniacyan)에 해당되며 사량도응회암은 마스트리찌안(Maastrichtian)에 속한다. 이 두 시기는 백악기 후엽에 해당되는데, 백악기 후엽은 이자나기판의 섭입이 북서 방향으로 작용하는 시기로서 유라시아판에 대해 직각섭입을 이루어 활발한 호화산작용이 일어났다. 왜냐하면 백악기 후엽(약 90 Ma)에 이자나기판의 섭입방향이 북북

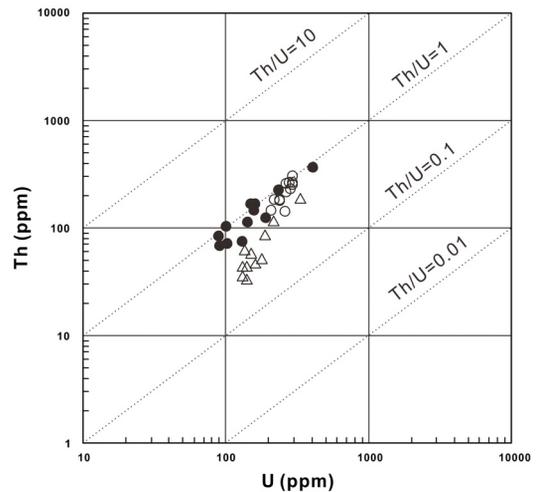


Fig. 5. Correlation diagram showing the proportions of Th to U concentrations (ppm) of the zircons analyzed by SHRIMP. Symbol Δ , Bonghwasan Tuff (HT498); Symbol \bullet , Saryangdo Tuff (HT387); Symbol \circ , Saryangdo Tuff (HT366).

서에서 북서 방향으로 변화하여 이루어진 직각접입은 분지 내에 광범위한 호화산작용을 일으키고 백악기 후엽으로 갈수록 지속적이고 더욱 활발하게 일어나 성숙된 화산호를 형성하였기 때문이다(Klimetz, 1983; Ryu *et al.*, 2006). 이에 따라 봉화산응회암과 사랑도응회암은 이자나기판의 직각접입에 의해 격렬하게 일어났던 호화산작용의 산물이라고 할 수 있으며, 봉화산응회암과 사랑도응회암 사이에 분포하는 아랫섬안산암과 남산유문암(71.74±0.47 Ma; Hwang *et al.*, 2018b)도 같은 의미를 지닌다고 할 수 있다.

5.2 분출시기 및 층서

봉화산응회암에서 86.69±0.78 Ma의 SHRIMP 저어콘 U-Pb 연대측정 결과가 도출되었다(그림 6). 저어콘의 폐쇄온도가 매우 높기 때문에(Brouand *et al.*, 1990; Vavra, 1990; Hanchar and Miller, 1993) 이 연대는 봉화산응회암의 분출시기를 나타내는 것으로 해석된다. 이는 봉화산응회암이 백악기 후엽에 형성되었으며 사랑도응회암보다 빠른 시기에 분출하였음을 지시한다.

사랑도응회암의 경우 69.72±0.69 Ma와 69.16±0.65 Ma의 SHRIMP 저어콘 U-Pb 연대가 도출되었다(그림 6). 이 연대는 사랑도응회암의 분출시기를 나타내는 것으로 해석된다. 또한, 풍화리응회암층과 남산유문암층의 SHRIMP 저어콘 U-Pb 연대는 각각 88.95±0.44 Ma와 71.74±0.47 Ma로 연대가 보고되었다(Hwang *et al.*, 2018b). 따라서 사랑도응회암은 백악기 후엽에 형성되었으며 연구지역의 화산암류 중 가장 마지막에 분출하였다.

봉화산응회암과 사랑도응회암은 약 17.53 Ma라는 상당히 큰 분출연대 차이를 보인다. 이 차이는 두 응회암이 유문암질로서 유사한 조성을 가지지만 층서적으로 완전히 다른 층이라는 것을 지시한다. 그러나 두 암층의 관계는 확실하게 정의하기 어렵다. 왜냐하면 두 섬이 바다로 격리되어 서로 멀리 떨어져 있고, 사랑도 지역에는 본역의 4개 아층군이 모두 산출되는 반면, 남해도 동부에는 육시아층군과 사랑도아층군에 속하는 암층들이 전혀 산출되지 않기 때문에 사랑도응회암과 봉화산응회암의 관계는 정확히 알 수 없다. 그렇지만 봉화산응회암과 사랑도응회암의 연대를 토대로 봉화산응회암은 하부 유문암질암류에 속하고 86.69 Ma로서 유문사아층군으로 분류되며,

사랑도응회암은 상부 유문암질암류에 속하고 69.72~69.16 Ma로서 사랑도아층군으로 분류된다. 또한, 사랑도응회암층에서 채취한 SHRIMP 저어콘 U-Pb 연대

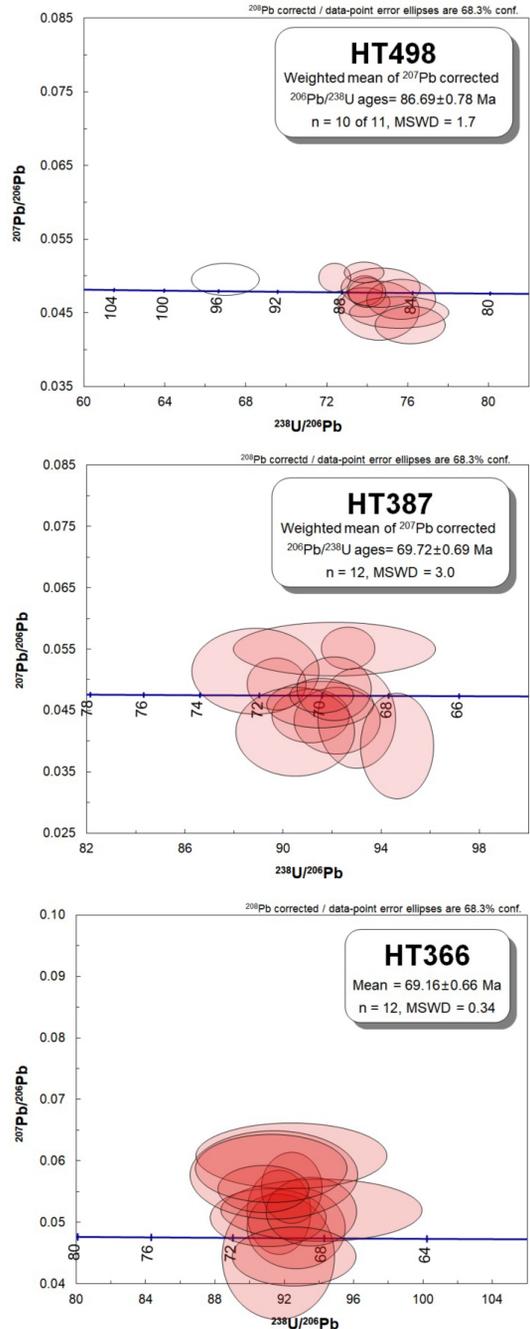


Fig. 6. Concordia diagrams for SHRIMP U-Pb ages of zircons separated from samples (a) HT498, (b) HT387 and (c) HT366.

Table 2. Stratigraphic correlation between two regions of the southern Yucheon Subbasin based on zircon U-Pb ages.

Group	Subgroup	Mireukdo region		Saryangdo and Namhaedo regions	
		Stratigraphic units	U-Pb ages (Hwang <i>et al.</i> , 2018b)	Stratigraphic units	U-Pb ages
Yucheon Group	Saryang Subgroup	Namsan Rhyolite Gollido Tuff Obido Formation	71.74±0.47 Ma	Saryangdo Tuff	69.16±0.65 Ma 69.72±0.69 Ma
				Namsan Rhyolite	
				Obido Formation	
	Yokji Subgroup	Dara Andesite Madong Dacite Mireuksan Andesite	73.01±0.75 Ma	Aratseom Andesite	
	Unmunsa Subgroup	Chudo Tuff Jangpyeongri Formation Punghwari Tuff	82.56±0.95 Ma 88.95±0.44 Ma	Bonghwasan Tuff	86.69±0.78 Ma
				Jangpyeongri Formation	
				Punghwari Tuff	
	Jusasan Subgroup	Yeongwado Andesite Hansando Formation Tongguji Andesite		Unghwasan Andesite	
				Witseom Andesite	

측정치는 각각 69.72±0.69 Ma와 69.16±0.65 Ma로서 0.56 Ma의 시간차이를 나타내는데, 이 차이는 오차를 감안하면 거의 동일시기라는 한계를 지니기 때문에 동일한 암층으로 볼 수 있다.

수우도의 사랑도응회암은 극히 소량의 암편을 함유하는 반면에, 사랑도 아랫섬에서 이 암층은 암편을 풍부하게 함유하며 암편의 크기도 상대적으로 더 크다(그림 2c, 2e). 이것은 이 암체의 화구가 사랑도 아랫섬의 동쪽에 존재했음을 지시한다. 그리고 암질 차이는 마그마챔버에서 결정농집에 의한 연변누대로 해석되었다(Lee *et al.*, 2019).

5.3 층서대비

유천소분지 남부의 미룩도 주변에서 SHRIMP U-Pb 저어콘 연대측정 결과(Hwang *et al.*, 2018b)에 의하면, 하부 유문암질암류에서 풍화리응회암이 88.95±0.44 Ma의 연대를, 추도응회암이 82.56±0.95 Ma의 연대를 갖는다. 상부 안산암질암류의 달이안산암은 73.01±0.75 Ma의 연대를 가지며, 상부 유문암질암류의 남산유문암은 71.74±0.47 Ma의 연대를 갖는다(표 2).

이 연구에서 수행된 운문사아층군에 속하는 봉화산

응회암의 SHRIMP U-Pb 저어콘 연대는 86.69±0.78 Ma로서 미룩도 지역에서 운문사아층군에 속하는 추도응회암과 풍화리응회암의 연대범위(82.56 Ma; Hwang *et al.*, 2018b)에 대비된다. 또 사랑도층군에 속하는 사랑도응회암의 SHRIMP 저어콘 U-Pb 연대는 69.16 Ma에서 69.72 Ma의 범위로서 미룩도 지역에서 사랑도층군에 속하는 남산유문암의 연대(71.74 Ma; Hwang *et al.*, 2018b) 범위에 대비된다. 따라서 미룩도 지역과 남해도, 수우도와 사랑도 지역에서 산출되는 화산암류는 서로 멀리 떨어져있고 바다로 격리되어있기 때문에 직접적인 층서대비는 불가능하지만, U-Pb 연대 자료를 바탕으로 격리된 지역 간의 간접적인 층서대비가 가능하다.

종합하면 유천소분지 남부의 미룩도, 남해도와 사랑도에서 산출되는 화산암류의 SHRIMP U-Pb 저어콘 연대는 88.95 Ma에서 69.16 Ma의 범위를 보여준다(Hwang *et al.*, 2018b; this study). 이 새로운 연대측정 자료는 복잡한 유천층군에 대한 층서대비 기준의 일부로 활용할 수 있다. 그러므로 통영과 남해군 동부 주변의 유천층군의 층서는 표 2에서와 같이 하부로부터 주사산아층군, 운문사아층군, 육지아층

군, 사랑아층군 순으로 구분할 수 있으며, 앞으로 이러한 기준을 바탕으로 하여 인접지역으로 확장시켜 화산층서를 정립시킬 수 있을 것으로 생각된다.

6. 결론

남해도와 사랑도의 화산암류는 암층서적으로 크게 하부 안산암질암류, 하부 유문암질암류, 상부 안산암질암류와 상부 유문암질암류로 구분된다. 하부 안산암질암류는 하부로부터 윗섬안산암과 웅방산안산암으로 구분되고, 하부 유문암질암류는 풍화리응회암과 장평리층, 봉화산응회암으로 구분된다. 상부 안산암질암류에는 아랫섬안산암이 속하고, 상부 유문암질암류는 오비도층과 남산유문암, 사랑도응회암으로 구분된다.

봉화산응회암과 사랑도응회암에 대해 SHRIMP 저어콘 U-Pb 연대측정을 실시함으로써 이들의 분출시기와 층서관계를 확실하게 하였다. 연대측정 결과, 봉화산응회암은 86.69 ± 0.78 Ma ($n=10$, 2σ)에 집중되는 일치곡선 연대를 나타내고 사랑도응회암은 69.72 ± 0.69 Ma ($n=12$, 2σ), 69.16 ± 0.65 Ma ($n=12$, 2σ)에 집중되는 일치곡선 연대를 나타낸다.

이 자료는 남해도, 수우도와 사랑도에서 일어났던 두 응회암의 분출시기를 정의하며 운문사아층군과 사랑아층군으로의 구분을 가능하게 한다. 그러므로 경상분지에서 백악기 후엽 유천층군의 다른 화산층서단위와 간접적인 층서대비에 기여할 것으로 기대된다.

감사의 글

이 논문은 한국지질자원연구원에서 지원하는 “지질도록 조사연구”에 의해 수행된 결과와 추가 자료로 이루어졌다. 연대측정은 한국기초과학지원연구원의 선도장비 이용자 프로그램에 의한 SHRIMP 저어콘 U-Pb 연대측정으로 수행되었다. 또한 심사과정에서 세심하고 유익한 지적으로 논문의 질을 향상시켜주신 익명의 심사위원분들께 감사드립니다.

REFERENCES

Brouand, M., Banzet, G. and Brabey, P., 1990, Zircon be-

- havior during crustal anatexis-Evidence from the Tibetan Slab migmatites (Nepal). *Journal of Volcanology and Geothermal research*, 44, 149-162.
- Chi, J.M., Kim, H.S., Oh, I.S. and Kim, H.C., 1983, Explanatory text of the geological map of Samcheonpo Sheet. Korea Institute of Energy and Resources, 12p.
- Hanchar, J.M. and Miller, C.F., 1993, Zircon zonation patterns as revealed by cathodoluminescence and back-scattered electron images: Implications for interpretation of complex crustal histories. *Chemical Geology*, 110, 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.
- Hwang, S.K., 2012, Tectonic setting and arc volcanisms of the Gyeongsang Arc in the southeastern Korean Peninsula. *Journal of the Petrological Society of Korea*, 21, 367-383 (in Korean with English abstract).
- Hwang, S.K. and Kim, S.W., 1994a, Petrology of Cretaceous volcanic rocks in the Milyang-Yangsan area, Korea: Petrotectonic setting. *Journal of the Geological Society of Korea*, 30, 229-241 (in Korean with English abstract).
- Hwang, S.K. and Kim, S.W., 1994b, Petrology of Cretaceous volcanic rocks in the Miryang-Yangsan area, Korea (II): Petrogenesis. *Journal of the Geological Society of Korea*, 30, 563-577 (in Korean with English abstract).
- Hwang, S.K., Lee, S.J., Song, K.Y. and Yi, K.W., 2018a, SHRIMP Zircon U-Pb dating and stratigraphical implication of the volcanic rocks around Yokjido Island, Tongyeong, Korea. *Journal of the Geological Society of Korea*, 54, 269-280 (in Korean with English abstract).
- Hwang, S.K., Lee, S.J., Song, K.Y. and Yi, K.W., 2018b, SHRIMP U-Pb dating and chronostratigraphy of the volcanic rocks around the Mireukdo Island, Tongyeong, Korea. *Journal of the Petrological Society of Korea*, 27, 25-36 (in Korean with English abstract).
- Hwang, S.K., Park, S.H. and Song, K.Y., 2016, Geological report of the MiJo-Mireukdo Sheets. Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources, 78 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.
- Jwa, Y.J., 1998, Petrology of the igneous rocks in the Goseong area, Gyeongsang Basin II. Trace element ge-

- ochemistry and Rb-Sr radiometric age. *Economic and Environmental Geology*, 31, 473-483 (in Korean with English abstract).
- KIGAM, 2001, Tectonic map of Korea(1:1,000,000). Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources.
- Kim, J.H., 1996, Mesozoic tectonics in Korea. *Journal of Southeast Asian Earth Sciences*, 13, 251-265.
- Kim, J.S., Lee, J.D. and Jeong, N.I., 1999, Petrochemical study on the Cretaceous volcanic rocks in the Namhae island, Korea. *The Korean Earth Science Society*, 20, 640-651 (in Korean with English abstract).
- Kim, S.W. and Lee, Y.G., 1981, Petrology and structural geology of the Late Cretaceous volcanic rocks in the northeastern part of Yucheon basin. *Journal of the Korean Institute of Mining Geology*, 14, 35-49 (in Korean with English abstract).
- Klimetz, M., 1983, Speculations on the Mesozoic plate tectonic evolution of Eastern China. *Tectonics*, 2, 139-166.
- Lee, S.J., Hwang, S.K. and Song, K.Y., 2019, Petrological Evolution of the Saryangdo Tuff in western Tongyeong, *Journal of the Petrological Society of Korea*, 28, 71-83 (in Korean with English abstract).
- 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.
- Ryu, I.C., Choi, S.G. and Wee, S.M., 2006, An inquiry into the formation and deformation of the Cretaceous Gyeongsang (Kyongsang) Basin, southeastern Korea. *Economic and Environmental Geology*, 39, 129-149 (in Korean with English abstract).
- Vavra, G., 1990, On zircon kinematics of zircon growth and its petrogenetic significance: a cathodoluminescence study. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 106, 90-99.
- 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.
- You, H.S., Kim, D.J., Yoo, K.A. and You, Y.S., 2005, Geology and coastal environment of Saryangdo. *Journal of Island Studies*, 17, 157-171 (in Korean with English abstract).
- Yun, S.H., Lee J.D., Lee, S.W., Koh, J.S. and Seo, Y.J., 1997, Petrology of the volcanic rocks in Geoje Island, South Korea. *Journal of the Petrological Society of Korea*, 6, 1-18 (in Korean with English abstract).
- Zhang, Y.-B., Zhai, M., Hou, Q.-L., Li, T.-S., Liu, F. and Hu, B., 2012, Late Cretaceous volcanic rocks and associated granites in Gyeongsang Basin, SE Korea: Their chronological ages and tectonic implications for cratic destruction of the North China Craton. *Journal of Asian Earth Sciences*, 47, 252-264.

Received : August 14, 2019

Revised : October 6, 2019

Accepted : October 21, 2019