Research Paper

Volcanic Activity of the Volcanoes in the Hallasan Natural Reserve, Jeju Island, Korea

Sei Sun Hong^{1,*}, Choon Oh Lee², Jaesoo Lim¹, Jin Young Lee¹, Ung San Ahn³

¹Geologic Research Center, Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources, Daejeon 34132, Republic of Korea

²Geo-Environmental Hazard Research Center, Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources, Daejeon 34132, Republic of Korea

³World Heritage Office, Jeju Special Self-Governing Provincial Government, Jeju 63341, Republic of Korea

*Corresponding author : hss@kigam.re.kr

ARTICLE INFORMATION

Manuscript received 25 November 2020

Received in revised form 18 December 2020

Manuscript accepted 29 December 2020

Available online 26 February 2021

DOI : <http://dx.doi.org/10.9719/EEG.2021.54.1.1>

Research Highlights

- Volcanoes of the Hallasan Natural Reserve, one of the World Natural Heritages, have erupted since the last 20 ka.
- The Lavas in the Hallasan Natural Reserve consists of alkali basalt, transitional basalt, trachybasalt, basaltic trachyandesite, trachyte.
- By the eruptions of trachytes, at least 8 volcanic activities occurred in the Hallasan Natural Reserve.

ABSTRACT

This study reports the Ar-Ar dating results for the volcanic rocks from small volcanoes(oreum) of the Hallasan Nature Reserve. According to the age of $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$, the volcanic activity of the Hallasan Natural Reserve was started from about 192 ka ago. The basaltic trachyandesite and trachyte located in the Y valley near the Eorimok in the western part of the Hallasan Natural Reserve represent an age of about 191~192 ka, showing the oldest record of volcanic activity in the Hallasan Natural Reserve. In the Hallasan Natural Reserve, the small volcanoes older than 100 ka are Y Valley in Eorimok area (192 ± 5 and 191 ± 5 ka), Dongsu-Ak (184 ± 19 ka), Mansedongsan (153 ± 5 ka), Janggumok-Orum (135 ± 6 ka), Eoseungsaengak (123 ± 9 ka), Samgagbong (105 ± 2 ka). And the small volcanoes younger than 100 ka are Witbangae-Oreum, Seongneol-Oreum, Muljangol, Yeongsil, Bori-Ak, Witseneun-Oreum, Witsejokeun-Oreum, Heugbuleun-Oreum, Bangae-Oreum, Albangae-Oreum, Witsebuleun-Oreum, Baengnokdam, Nongo-Ak. According to the eruption of trachytes, the Hallasan Natural Reserve can be interpreted as having about 8 volcanic activities. Among them, 4 volcanic activities are related with the formation of trachyte dome, such as Wanggwanneung, Samgagbong, Yeongsil, and Baengnokdam, and 4 volcanic activities are related with flow or dyke of trachyte. The volcanic activity at the Hallasan Natural Reserve was started from northwest area, to in the southern area, and in the eastern area, and finally volcanic activity related to the formation of Baengnokdam.

Keywords : Hallasan Natural Reserve, $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ age, volcanism, Jeju Island, small volcano(Oreum)

Citation: Hong, S.S., Lee, C.O., Lim, J., Lee, J.Y., Ahn, U.S. (2021) Volcanic Activity of the Volcanoes in the Hallasan Natural Reserve, Jeju Island, Korea. *Economic and Environmental Geology*, v.54, p.1-19, doi:10.9719/EEG2021.54.1.1.

✉ Journal homepage: <http://www.kseeg.org/main.html>

This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided original work is properly cited.

pISSN 1225-7281; eISSN 2288-7962/©2021 The KSEEG. Printed by Hanrimwon Publishing Company. All rights reserved.

연구논문

한라산천연보호구역 소화산들의 화산활동 기록

홍세선^{1,*} · 이춘오² · 임재수¹ · 이진영¹ · 안웅산³

¹한국지질자원연구원 지질연구센터

²지질환경재해연구센터

³제주특별자치도 세계유산본부

*책임저자 : hss@kigam.re.kr

요 약

이번 연구에서는 제주도 한라산 천연보호구역 내 소화산들에 대한 ^{40}Ar - ^{39}Ar 분석을 실시하고 그 결과를 보고한다. 한라산천연보호구역 내 어리목 상수원 부근에 위치하는 현무암질조면안산암 및 조면암이 192 ka 내외로 가장 오래된 연대를 보였으며, 동수악의 알칼리현무암 184 ka 내외, 만세동산의 조면현무암 153 ka 내외, 장구목오름의 현무암질조면안산암 135 ka 내외, 어승생악의 현무암질조면안산암 123 ka 내외, 삼각봉의 조면암 106 ka 내외 등으로 10만년 이상의 연대를 보인다. 10만년 전 이후의 화산활동으로는 윗방애오름의 현무암질조면안산암 94 ka, 성널오름의 알칼리현무암 92 ka, 물장울의 전이질현무암 81 ka, 영실조면암 71 ka, 보리악의 조면안산암 73 ka, 윗세누운오름과 윗세죽은오름의 현무암질조면안산암에서 각각 76 ka, 93 ka, 흙붉은오름의 조면현무암 60 ka, 방애오름과 알방애오름의 전이질현무암은 각각 59 ka, 83 ka, 백록담의 조면암 47 ka, 한라산 북벽의 조면암 35 ka, 윗세붉은오름의 조면현무암 41 ka, 성널오름을 관입한 조면암 32~43 ka, 동수악 부근 조면암 39 ka, 서중천 지류하천의 조면암 37 ka 내외의 연대를 보였다. 따라서 이러한 연대측정 결과로 추정하면 한라산천연보호구역의 화산활동은 약 192 ka에서 홀로세 직전의 17 ka까지 지속되었던 것으로 확인된다. 조면암의 분출시기에 의하면 한라산천연보호구역은 최소 약 8회의 화산활동이 있었던 것으로 해석할 수 있으며, 이 중 왕관릉, 삼각봉, 영실, 백록담 등과 같이 조면암 돛이 형성된 4회의 화산활동과 용암류의 흐름 또는 암맥상의 조면암이 산출된 4회의 화산활동으로 구분할 수 있다. 한라산천연보호구역의 형성은 지표상에 노출된 용암으로 볼 때 가장 먼저 보호구역 북서부에서 시작되어 남부지역, 동부지역, 그리고 마지막으로 백록담 형성과 관계된 화산활동 등의 순서로 진행된 것으로 해석된다.

주요어 : 한라산천연보호구역, $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 절대연대, 제주도, 화산활동, 단성화산(오름)

1. 서 론

제주도는 대륙붕 바다 속의 대륙지각 내 화산활동으로 형성되었으며, 이러한 화산활동은 제주도의 형성과정을 이해하는데 매우 중요하다(Koh *et al.*, 2013). 제주도 화산암의 기반암은 지표에는 나타나지 않으며, 시추코아 자료에 의하면 제주도의 지하에는 화강암 또는 응회암류가 기반암으로 분포하고 그 상부에 미고결 퇴적층인 U-층(uncemented Formation)이 덮고 있다. 이 U-층 상위에 패류 화석을 포함하는 서귀포층이 제주도 지하에 광범위하게 분포하고 있으며, 서귀포층이 형성되는 시기부터 활발한 제주도의 화산활동이 시작되어 우리가 현재 보는 제주도의 모습이 형성되게 되었다.

현재의 제주도의 모습은 1,950m의 한라산이 섬 중앙부에 자리 잡고 있으며, 제주도 전역에 약 368개의 “오름”이라 부르는 단성화산들이 산재되어 있다(Jeju Special Self-Governing Province, 1997). 이들은 대부분 분석구,

응회환, 응회구, 마르, 용암돛, 소순상화산의 형태로 분포한다. 이러한 화산들은 과거 기생화산이라고도 불리었으나, 최근의 연구결과 단일 화산활동에 의해 만들어질 수 있어 제주도는 많은 단성화산체들이 모여 형성된 것으로 보인다(Brenna *et al.*, 2012, Koh *et al.*, 2013).

한라산천연보호구역은 2007년 “제주 화산섬과 용암동굴”이라는 이름으로 성산일출봉, 거문오름 용암동굴계 등과 함께 세계자연유산에 등재되었다. 이들 중 성산일출봉, 거문오름 용암동굴계는 다양한 지질학적 연구(Sohn and Chough, 1992; Hwang *et al.*, 2005; Ahn *et al.*, 2017; Ahn and Hwang, 2008; Ki *et al.*, 2016; Sohn *et al.*, 2009)가 진행된 바 있으나 한라산천연보호구역은 남한에서 가장 높은 산지를 이루고 접근이 용이하지 않아 아직까지 1:5만 지질도가 발간된 것을 제외하고는 지질학적인 연구가 2000년 이후부터 간헐적으로 이루어지기 시작하여(Koh *et al.*, 2003; Ahn and Hong, 2017; Koh *et al.*, 2019) 제주도의 화산활동을 밝히는데 잃어버린 연결고리(missing

link)로 남겨져 있었다. 한라산천연보호구역은 약 92km²의 면적으로 제주도 전체 면적의 약 5%에 불과하지만 대부분 600m 이상의 높은 산지를 이루고 있다. 한라산천연보호구역에는 백록담을 포함하여 약 50여개 내외의 소화산(오름)들이 분포한다. 이 소화산들은 제주도에서는 오름, 악이라는 명칭을 사용하며, 각각의 소화산마다 사라오름, 어승생악 등의 명칭들이 부여되어 있다. 이들 화산들은 제주도화산지대의 중앙부 고지대를 형성시키는데 매우 중요한 역할을 하였다. 한라산천연보호구역에 대해서는 2016년부터 2019년까지 4년간 제주특별자치도 세계유산본부와 한국지질자원연구원이 “한라산천연보호구역 지형, 식생, 기후 기초학술조사”를 수행하였으며, 이 연구에서는 천연보호구역 화산암들의 분출시기를 밝히고자 한다.

2. 연구방법

지질조사는 국토지리정보원에서 발간한 1:25,000 축척의 지형도와 이 지역에 대한 1:50,000 지질도폭(Park *et al.*, 2000)을 기본으로 연구지역 내에 분포하는 화산암층들의 상호접촉관계, 암층 분포, 암석학적 야외 산상, 암석시료채취 등이 현장조사에서 수행되었다. 암석 시료는 실내에서 암편 관찰, 현미경 박편관찰, 주성분원소 분석, ^{40}Ar - ^{39}Ar 절대 연대 측정을 수행하였다. 연대측정 화산암들의 위치는 Fig. 1과 Table 1에 제시하였다.

용암류의 암석명은 TAS 분류도 [Total Alkali ($\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}$) vs SiO_2] (Le Maitre *et al.*, 2002)에 의해 분류되었다. 이때 total FeO는 $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{FeO}$ 의 비가 0.3(Middlemost, 1989)이 되도록 Fe_2O_3 와 FeO값을 재계산하여 다른 산화물의

Fig. 1. Sample locations in the Hallasan Natural Reserve, Jeju Island.

값과 합한 후 물이 없는 상태의 백분율로 재계산하여(Koh *et al.*, 2019) SiO_2 , Na_2O , K_2O 함량을 TAS 분류도에 적용하였다(Table 2과 Fig. 2).

Ar-Ar 연대측정에서 중성자 조사는 미국 Oregon 대학의 원자로를 이용하였으며, Ar-Ar 연대는 한국기초과학지원연구원에 설치되어 있는 레이저 발생장치(Fusions 10.6, Photon Machines)와 다검출기 불활성기체 질량분석기(ARGUS VI noble gas mass spectrometer, Thermo)를 이용하여 측정하였다. 측정방법에 대한 자세한 과정은 Kim *et al.*(2014) 및 Kim and Cho(2020)를 참고하기 바란다.

3. 주성분원소 분석 및 연대측정 결과

윗세붉은오름(HL055) : 윗세오름은 한라산 위에 세 개의 봉우리가 나란히 이어져 있어 붙여진 이름으로 세 오름 중 동쪽편의 윗세오름 대피소가 위치한 오름을 윗세붉은오름, 중간을 윗세누운오름, 가장 서쪽편의 오름은 윗세죽은오름이라 한다. 윗세붉은오름은 해발고도 1,740m, 비고 75m, 둘레는 2,113m로 다른 두 오름과는 달리 정상부가 분석구로 이루어져 있다(Fig. 3(E)). 윗세붉은오름 사면에서는 분석과 용암이 교호하여 산출된다. 서귀포-하효리 1:5만 지질도(Park *et al.*, 2000)에서는 윗세오름조

Fig. 2. Total alkali($\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}$) vs. Silica(SiO_2) diagram of the volcanic rocks from the Halla Natural Reserve. Rock nomenclature is by Le Maitre *et al.*(2002). The solid(Irvine and Baragar, 1971) and dashed(Macdonald and Katsura, 1964) lines divide alkali and sub-alkaline rocks. Abbreviations – AB : alkali basalt, TrnB : transitional basalt, thB : tholeiitic basalt, TB : trachybasalt, BTA : basaltic trachyandesite, BA : basaltic andesite, TA : tracyandesite, T : trachyte, A : andesite, D : dacite, R : rhyolite.

Table 1. The sampling sites of the volcanic rocks at the Hallasan Natural Reserve, Jeju Island, Korea

	sample no.	rock name	Latitude	Longitude	Elevation(m)	locality
1	HL021	BTA	33°23' 39.31"	126°29' 40.81"	994m	Eoseungsaeng
2	HL023	BTA	33°21' 58.81"	126°31' 29.95"	1,813m	Janggumok
3	HL031	BTA	33°21' 37.31"	126°30' 53.61"	1,687m	Witsenuun-Oreum
4	HL034	BTA	33°21' 39.56"	126°30' 39.17"	1,695m	Witsejokeun-Oreum
5	HL039	TB	33°22' 04.92"	126°30' 21.37"	1,608m	Manseidongsan
6	HL043	T	33°21' 44.57"	126°31' 54.83"	1,850m	Baengnokdam
7	HL055	TB	33°21' 36.13"	126°31' 13.99"	1,731m	Witsebuleun-Oreum
8	HL062	T	33°22' 57.70"	126°30' 16.27"	1,090m	Eorimok
9	HL064	BTA	33°23' 19.46"	126°29' 41.48"	970m	Eorimok-kyo
10	HL065-1	BTA	33°24' 41.76"	126°37' 06.71"	649m	upper lava of Muljangol Ssediment
11	HL065-5	TB	33°24' 41.76"	126°37' 06.71"	649m	lower lava of Muljangol Ssediment
12	HL087	T	33°21' 55.78"	126°31' 53.61"	1,650m	near Yongjingak
13	HL089	T	33°22' 27.16"	126°31' 46.59"	1,536m	Samgagbong
14	HL110	T	33°22' 27.81"	126°35' 41.83"	1,060m	Seongneol-Oreum
15	HL112	AB	33°22' 41.67"	126°35' 53.94"	1,040m	Seongneol-Oreum
16	HL117	TB	33°22' 45.03"	126°33' 50.15"	1,225m	Heugbuleun-Oreum
17	HL127	TrnB	33°24' 35.94"	126°36' 46.74"	720m	Muljangol
18	HL136	T	33°21' 57.71"	126°36' 22.55"	814m	Seongneol-Oreum
19	HL143	TrnB	33°21' 38.60"	126°37' 30.60"	655m	Dongsuak
20	HL145	T	33°21' 40.26"	126°37' 23.81"	630m	near Dongsuak
21	HL150	BTA	33°20' 15.00"	126°36' 07.20"	598m	near Suak valley
22	HL153	TA	33°20' 25.36"	126°35' 04.88"	733m	Suak-Gil, 733m
23	HL163	TA	33°20' 49.30"	126°35' 55.30"	644m	Boriak
24	HL172	T	33°21' 19.51"	126°30' 00.57"	1,500m	Yeongsil
25	HL173	TB	33°21' 29.20"	126°36' 51.93"	738m	Nongoak
26	HL178	TB	33°22' 16.90"	126°37' 24.56"	640m	upper lava of Seojung-cheon Sediment
27	HL186	T	33°22' 19.90"	126°37' 12.78"	682m	Seojung-Cheon
28	HL190	TB	33°21' 54.66"	126°33' 56.92"	1,317m	upper lava of charcoal
29	HL200	TrnB	33°19' 20.24"	126°32' 42.14"	720m	Yeong-cheon
30	HL204	TA	33°18' 34.24"	126°30' 57.21"	729m	Akgeun-cheon
31	HL209	TA	33°18' 33.01"	126°29' 10.14"	698m	Gungsan-cheon
32	HL211	BTA	33°18' 49.60"	126°28' 30.91"	710m	Goji-cheon
33	HL212	TrnB	33°21' 15.36"	126°31' 39.16"	1,700m	Bangae-Oreum
34	HL213	BTA	33°21' 23.57"	126°31' 49.06"	1,730m	Witbangae-Oreum
35	HL216	TrnB	33°20' 50.81"	126°31' 47.78"	1,585m	Albangae-Oreum
36	HL219	T	33°19' 23.76"	126°32' 02.14"	850m	Dongheung-cheon
37	HL220	TrnB	33°19' 06.47"	126°32' 21.78"	715m	Dongheung-cheon
38	HL231	BTA	33°20' 20.24"	126°28' 57.81"	1,028m	Dosun-cheon
39	HL233	TrnB	33°20' 56.83"	126°32' 21.98"	1,510m	Donnaeko, 1,510m
40	HL236	TB	33°19' 51.25"	126°33' 22.82"	930m	Donnaeko, 910m

면현무암 분석구로 기재되어 있다. 분석은 현무암질조면 안산암의 조성을 보이며, 용암류는 SiO₂ 함량이 50.74 wt.%, Na₂O+K₂O 함량이 5.08~5.19 wt.%로 조면현무암

에 해당된다(Table 2, Fig. 2). 윗세륵은오름 용암의 ⁴⁰Ar/³⁹Ar 연대는 41±5 ka 이다(Table 3, Fig. 6).

윗세누운오름(HL031) : 윗세누운오름은 윗세오름 중

Table 2. Major element compositions of the volcanic rocks from the Hallasan Natural Reserve area(unit : wt.%)

no.	HL 021	HL 023	HL 031	HL 034	HL 039	HL 043	HL 055	HL 062	HL 065-1	HL 065-5	HL 087	HL 089	HL 110	HL 112	HL 117	HL 127	HL 136	HL 143	HL 145	HL 150
rock	BTA	BTA	BTA	BTA	TB	T	TB	T	BTA	TB	T	T	T	AB	TB	TrnB	T	TrnB	T	BTA
SiO ₂	51.22	50.98	52.64	53.79	50.41	65.02	50.74	61.77	53.88	49.53	66.77	64.88	63.75	49.35	50.64	49.38	64.05	49.00	64.10	50.61
TiO ₂	2.12	2.33	2.15	1.93	2.31	0.37	2.04	0.7	2.03	2.4	0.24	0.37	0.44	2.78	2.77	2.56	0.45	2.37	0.45	2.45
Al ₂ O ₃	16.68	16.91	16.99	16.66	16.15	16.77	17.61	16.95	16.07	16.08	16.05	17.19	16.35	16.39	15.63	15.02	15.43	14.07	16.13	16.02
Fe ₂ O ₃ *	10.88	10.97	10.94	10.64	11.18	4.33	9.86	6.33	11.26	11.75	3.45	3.98	5.45	12.47	12.23	12.56	5.62	12.26	5.61	11.35
MgO	4.18	4.83	3.13	2.87	6.06	0.22	5.02	0.69	2.87	6.16	0.22	0.4	0.49	4.97	5.13	7.19	0.47	8.34	0.5	4.65
MnO	0.16	0.15	0.16	0.16	0.15	0.12	0.14	0.15	0.17	0.16	0.1	0.1	0.13	0.16	0.16	0.17	0.13	0.17	0.13	0.16
CaO	6.29	7.42	5.85	5.55	7.89	1.54	8.24	2.54	5.83	7.72	1.05	2.04	2.11	7.42	7.58	8.34	1.92	8.53	2.1	7.97
Na ₂ O	3.87	3.69	4.41	4.7	3.45	5.84	3.62	5.53	4.48	3.58	5.96	5.99	5.72	3.38	3.76	3.24	5.86	3.01	5.91	3.65
K ₂ O	1.97	1.66	2.35	2.52	1.57	5.26	1.46	4.38	2.17	1.35	5.59	4.43	4.32	1.42	1.63	1.25	4.38	1.18	4.35	1.68
P ₂ O ₅	0.5	0.61	0.8	0.85	0.52	0.10	0.53	0.29	0.98	0.51	0.04	0.12	0.14	0.58	0.56	0.46	0.14	0.49	0.14	0.54
Ig.loss	1.85	0.18	0.29	-0.28	-0.13	0.22	0.4	0.36	-0.06	0.39	0.19	0.16	0.85	1.24	-0.36	-0.07	0.23	0.14	0.16	0.53
total	99.72	99.73	99.71	99.39	99.56	99.60	99.66	99.69	99.68	99.63	99.66	99.66	99.75	100.16	99.73	100.10	98.68	99.56	99.58	99.61

no.	HL 153	HL 163	HL 172	HL 173	HL 178	HL 186	HL 190	HL 200	HL 204	HL 209	HL 211	HL 212	HL 213	HL 216	HL 219	HL 220	HL 231	HL 064	HL 233	HL 236
rock	TA	TA	T	TB	TB	T	TB	TrnB	TA	TA	BTA	TrnB	BTA	TrnB	T	TrnB	BTA	BTA	BA	TB
SiO ₂	58.09	57.17	65.93	50.89	49.83	63.69	50.77	50.36	59.37	60.39	51.03	51.17	51.15	50.36	63.11	50.51	53.46	51.41	51.52	50.31
TiO ₂	1.26	1.35	0.25	2.54	2.57	0.47	2.35	2.45	0.97	1.06	2.71	2.65	2.37	2.75	0.62	2.44	2.07	2.47	2.31	2.47
Al ₂ O ₃	16.44	16.8	16.31	15.6	15.15	16.58	15.62	14.59	16.72	15.9	14.99	15.63	15.92	15.77	16.18	14.65	16.29	16.50	15.35	15.47
Fe ₂ O ₃ *	9.16	9.08	3.34	12	12.01	5.78	11.41	12.11	7.83	8.51	12.6	11.56	11.13	11.91	6.19	11.96	10.98	11.68	11.54	11.75
MgO	1.76	1.96	0.26	5.14	6.36	0.37	5.75	6.91	1.24	1.18	4.7	4.71	5.03	4.71	0.71	6.81	3.01	4.06	4.99	5.52
MnO	0.16	0.16	0.09	0.16	0.16	0.14	0.16	0.17	0.16	0.17	0.18	0.16	0.16	0.17	0.13	0.17	0.17	0.16	0.16	0.17
CaO	4.02	4.66	1.41	7.47	7.94	1.55	7.64	7.99	3.38	3.6	7.15	8.25	7.32	8.37	2.42	8.08	5.37	7.33	8.36	7.56
Na ₂ O	5.12	5.04	5.98	3.64	3.51	5.93	3.66	3.28	5.29	5.25	3.77	3.58	3.73	3.43	5.51	3.31	4.43	4.00	3.43	3.39
K ₂ O	3.09	2.84	5.27	1.54	1.53	4.51	1.69	1.35	3.44	3.16	1.69	1.33	1.75	1.23	4.28	1.34	2.49	1.63	1.27	1.63
P ₂ O ₅	0.49	0.53	0.06	0.55	0.57	0.13	0.55	0.47	0.39	0.38	0.82	0.54	0.52	0.55	0.21	0.47	0.91	0.77	0.44	0.56
Ig.loss	-0.06	-0.15	0.66	-0.07	-0.12	0.63	-0.12	-0.35	0.81	0.07	-0.17	-0.07	0.48	0.47	0.36	-0.25	0.41	-0.42	0.17	0.68
total	99.53	99.44	99.56	99.46	99.51	99.78	99.48	99.33	99.6	99.67	99.47	99.51	99.56	99.72	99.72	99.49	99.59	99.59	99.54	99.51

중간에 위치한다. 윗세누운오름은 해발고도 1,711m, 비고 71m, 둘레는 1,384m 이다. 대부분은 분석으로 구성되어 있으며 오름 중간 부분과 정상부는 용암이 분포한다 (Fig. 3(G)). 서귀포-하효리 1:5만 지질도(Park *et al.*, 2000)에서는 법정동조면현무암 분석구로 기재되어 있다. 이 용암은 SiO₂ 함량이 51.73~52.64 wt.%, Na₂O+K₂O 함량이 5.92~6.76 wt.%로 현무암질조면안산암에 속하며(Table 2, Fig. 2), ⁴⁰Ar/³⁹Ar 연대는 76±4 ka 이다(Table 3, Fig. 6).

윗세죽은오름(HL034) : 윗세죽은오름의 세 오름 중 가장 남쪽에 있는 윗세죽은오름(Fig. 3(F))은 해발고도 1,699m, 비고 64m, 둘레 2,113m이다. 오름의 사면은 분석이 주로 산출되며, 정상부에는 용암이 산출된다. 용암의 암색은 짙은 회색을 띠며, 기공이 발달하였으며, 유상구조가 관찰된다. 서귀포-하효리 1:5만 지질도(Park *et al.*, 2000)에는 법정동조면현무암 분석구로 기재되어 있다. 분석과 용

암은 SiO₂ 함량이 49.00~53.79 wt.%, Na₂O+K₂O 함량이 6.31~7.22 wt.%로 조면현무암에 해당하며(Table 2, Fig. 2), ⁴⁰Ar/³⁹Ar 연대는 93±4 ka 이다(Table 3, Fig. 6).

만세동산(HL039) : 만세동산은 어리목탐방로 중간부에 위치하며, 해발고도 1,606m, 비고 88m이다. 만세동산의 북-남-남서 방향은 가파른 사면을 이루고 있으며, 남동부로는 평원 형태의 매우 완만한 지형을 보인다(Fig. 3(D)). 서귀포-하효리 1:5만 지질도(Park *et al.*, 2000)에는 법정동조면현무암으로 기재되어 있다. 만세동산의 정상부에는 용암이 좌우로 솟아 있으며, 가운데는 평평한 형태를 보인다. 이 용암은 SiO₂ 함량이 50.41 wt.%, Na₂O+K₂O 함량이 5.02 wt.%로 조면현무암에 해당하며(Table 2, Fig. 2), ⁴⁰Ar/³⁹Ar 연대는 153±5 ka 이다(Table 3, Fig. 6).

장구목오름(HL023) : 한라산 정상에서 북서부에 위치한 장구목오름은 백록담 다음으로 가장 높은 고도에 위

Fig. 3. Photographs of $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ dating sites from the Hallasan Natural Reserve, Jeju Island. (A) Eorimok(HL062), (B) Eoseungsaeng (HL021), (C) Janggumok(HL023), (D) Manseidongsan(HL039), (E) Witsebulen-Oreum(HL055), (F) Witsejokeun-Oreum (HL034), (G) Witsenueun-Oreum(HL031), (H) Bangae-Oreum(HL212), (I) Witbangae-Oreum(HL213), (J) Albangae-Oreum(HL216).

Table 3. ^{40}Ar - ^{39}Ar age of the volcanic rocks at the Hallasan Natural Reserve, Jeju Island, Korea. (plateau age. * : integrated age)

sample no.	rock name	material	% ^{39}Ar	step	integrated age(ka)	plateau age(ka)
HL021	BTA	groundmass	100	11/12	122 ± 11	123 ± 9
HL023	BTA	groundmass	56.2	6/12	157 ± 5	135 ± 6
HL031	BTA	groundmass	100	11/12	76 ± 5	76 ± 4
HL034	BTA	groundmass	79.1	6/12	93 ± 4	-
HL039	TB	groundmass	79.1	6/12	148 ± 5	153 ± 5
HL043	T	groundmass	40.1	3/12	47 ± 4	46 ± 5
HL055	TB	groundmass	66.2	7/12	69 ± 6	41 ± 5
HL062	T	groundmass	96.9	9/12	196 ± 6	191 ± 5
HL064	BTA	groundmass	58.7	8/12	193 ± 12	192 ± 11
HL065-1	BTA	groundmass	100	10/11	76 ± 8	73 ± 7
HL065-5	TB	groundmass	100	8/8	117 ± 16	103 ± 13
HL087	T	groundmass	100	6/7	31 ± 3	32 ± 2
HL089	T	groundmass	100	6/7	103 ± 2	105 ± 2
HL110	T	groundmass	100	12/12	35 ± 5	32 ± 4
HL112	AB	groundmass	70.3	5/7	62 ± 15	92 ± 16
HL117	TB	groundmass	100	8/8	55 ± 9	60 ± 8
HL127	TrnB	groundmass	100	9/11	93 ± 10	81 ± 10
HL136	T	groundmass	100	12/12	45 ± 5	43 ± 4
HL143	TrnB	groundmass	100	11/12	200 ± 20	184 ± 19
HL145	T	groundmass	100	10/12	38 ± 4	40 ± 3
HL150	BTA	groundmass	100	11/12	35 ± 10	35 ± 8
HL153	TA	groundmass	84	9/12	86 ± 6	77 ± 5
HL16	TA	groundmass	100	11/12	77 ± 5	73 ± 5
HL172	T	groundmass	94.3	11/12	73 ± 2	71 ± 2
HL173	TB	groundmass	100	12/12	38 ± 13	43 ± 12
HL178	TB	groundmass	71.3	5/12	157 ± 19	22 ± 18
HL186	T	groundmass	67.8	8/13	34 ± 3	30 ± 2
HL190	TB	groundmass	52.7	5/12	71 ± 5	22 ± 6
HL200*	TrnB	groundmass			86 ± 16	-
HL204	TA	groundmass	71.5	7/12	122 ± 10	102 ± 9
HL209	TA	groundmass	100	10/12	110 ± 3	111 ± 2
HL211*	BTA	groundmass			84 ± 11	-
HL212	TrnB	groundmass	100	11/12	62 ± 8	59 ± 6
HL213	BTA	groundmass	84.2	8/12	92 ± 5	94 ± 4
HL216	TrnB	groundmass	54	6/12	110 ± 20	83 ± 14
HL219*	T	groundmass			88 ± 3	-
HL220*	TrnB	groundmass			95 ± 10	-
HL231*	BTA	groundmass			53 ± 10	-
HL233	BA	groundmass	100	12/12	100 ± 30	90 ± 20
HL236	TB	groundmass	57.1	5/12	50 ± 20	40 ± 20

치한 소화산체로 그 높이가 1,813m이다(Fig. 3(C)). 서귀포-하효리 1:5만 지질도(Park *et al.*, 2000)에서 장구목오름은 윗세오름조면현무암 분석구로 분류되어 있다. 장구

목 정상에서 윗세오름 방향으로로는 클래스토제닉 용암이 드문드문 떨어져 분포한다. 장구목 북쪽 끝 능선부에 분포하는 분석은 SiO_2 함량이 58.90~59.70 wt.%, $\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}$

Fig. 4. Photographs of $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ dating sites from the Hallasan Natural Reserve, Jeju Island. (A) Dongsuak(HL143), (B) Seongneol-Oreum(HL112), (C) Nongoak(HL173), (D) Heugbuleun-Oreum(HL117), (E) Boriak(HL163), (F) Muljangol(HL127), (G) Samgagbong (HL089), (H) Yeongsil(HL172), (I) Dongheung-cheon(HL219), (J) Gungsan-cheon(HL209).

Fig. 5. Photographs of $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ dating sites from the Hallasan Natural Reserve, Jeju Island. (A) Eorimok-kyo(HL064), (B) Donnaeko, 1,510m(HL233), (C) Donnaeko, 910m(HL236), (D) Baengnokdam(HL043), (E) Dosun-cheon(HL231).

함량이 8.90 wt.%로 조면안산암에 해당되며, 용암류는 SiO_2 함량이 50.60~50.98 wt.%, $\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}$ 함량이 5.20~5.65 wt.%로 조면현무암 내지 현무암질조면안산암에 해당된다(Table 2, Fig. 2). 장구목오름 용암의 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 연대는 135 ± 6 ka 이다(Table 3, Fig. 6).

어승생악(HL021) : 한라산 정상에서 북서쪽으로 약 6km 지점에 위치한 어승생악은 고도 약 1,169m이며, 비고 약 350m이다. 어승생악의 정상은 분석이 분포하며, 어리목휴게소에서 어승생악으로 올라가는 탐방로 근처에는 용암이 관찰된다(Fig. 3(B)). 서귀포-하효리 1:5만 지질도(Park *et al.*, 2000)에서 어승생악은 법정동조면현무암 분석구에 속한다. 분화구 내의 분석과 용암류의 SiO_2 함량은 51.22~52.36 wt.%, $\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}$ 함량은 5.78~5.87 wt.%로 매우 균질하며, 모두 현무암질조면안산암에 해당되며(Table 2, Fig. 2), $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 연대는 123 ± 9 ka 이다(Table 3, Fig. 6).

방애오름(HL212), 윗방애오름(HL213), 알방애오름(HL216) : 방애오름 구간은 백록담 남쪽의 윗방애오름, 방애오름, 알방애오름을 포함한다. 한라산의 남사면에는 위치한 방애오름(Fig. 3(H))은 고도 1,699m, 윗방애오름(Fig. 3(I))은 고도는 1,747m, 알방애오름(Fig. 3(J))은 고도는 1,585m이다. 이들 세 오름들은 서귀포-하효리 1:5만 지질도(Park *et al.*, 2000)에서 모두 윗세오름조면현무암 분석구로 기재되어 있다. 그러나 이들 오름들은 모두 정상부에 분화구 형태를 보이지 않으며, 용암이 분포하는 것이 특징이다. 이들 암석들은 대부분 장식 반정이 우세하며, 감람석과 단사휘석을 포함한 현무암이다. TAS 암석분류도에 의하면 방애오름은 전이질현무암 내지 조면현무암의 조성을 보이나 SiO_2 함량은 매우 좁은 범위를 보이며, 소량의 알칼리 성분에 의해 암석조성의 차이를 나타낸다. 윗방애오름은 현무암질조면안산암, 알방애오름은 전이질현무암의 조성을 보인다(Table 2, Fig. 2). 방애오

Fig. 6. $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ plateau age of the whole rock(groundmass) samples from the Hallasan Natural Reserve, Jeju Island.

Fig. 6. Continued.

Fig. 6. Continued.

Fig. 6. Continued.

름(HL212)의 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 연대는 59 ± 6 ka, 윗방애오름(HL213)은 94 ± 4 ka, 알방애오름(HL216)은 83 ± 14 ka이다(Table 3, Fig. 6).

영실(HL172) : 한라산 백록담 서남쪽에 위치한 영실은 해발고도 1,639m, 비고 389m로 병풍바위 또는 영실기암으로 부르기도 한다. 영실은 동쪽과 북쪽은 높은 절벽을 이루고 남서쪽으로 열개되어 있는 초승달 형태를 띤다(Fig. 4(H)). 서귀포-하효리 1:5만 지질도(Park *et al.*, 2000)에서 영실은 한라산조면암으로 기재되어 있다. 영실의 용암은 SiO_2 함량이 63.81~65.93 wt.%, $\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}$ 함량이 11.11~11.25 wt.%로 조면암에 해당된다(Table 2, Fig. 2). 영실조면암의 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 연대는 71 ± 2 ka 이다(Table 3, Fig. 6).

삼각봉(HL089) : 관음사 탐방로에서 한라산 백록담 방향으로 약 4.9km 지점에 위치한 삼각봉은 해발 1,696m이며, 용암돔을 이룬다(Fig. 4(G)). 1:5만 서귀포-하효리 지질도(Park *et al.*, 2000)에서 삼각봉은 한라산조면암으로 기재되어 있다. 삼각봉의 용암(HL089)은 SiO_2 함량이 64.88 wt.%, $\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}$ 함량은 10.42 wt.%로 조면암에 해당하며(Table 2, Fig. 2), $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 연대는 105 ± 2 ka 이다(Table 3, Fig. 6).

흙불은오름(HL117) : 한라산 동쪽부에서는 가장 높고 백록담에서 가장 가까운 흙불은오름은 해발고도 1,381m, 비고 146m, 둘레 3,403m이며, 동쪽으로 입구가 벌어진 말굽형 분화구 형태를 보인다(Fig. 4(D)). 흙불은오름은 서귀포-하효리 1:5만 지질도(Park *et al.*, 2000)에서 흙불은오름은 시오름조면현무암 분석구로 기재되어 있다. 흙불은오름의 분화구는 분석으로 구성되어 있으며, 사장석

결정이 뚜렷한 반상조직을 보인다. 분석은 SiO_2 함량이 48.96 wt.%, $\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}$ 함량이 4.53 wt.%로 전이질현무암 조성을 보이며, 오름 사면에서 관찰되는 용암은 SiO_2 함량 50.64 wt.%, $\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}$ 함량 5.39 wt.%로 조면현무암에 해당하며(Table 2, Fig. 2), $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 연대는 60 ± 8 ka 이다(Table 3, Fig. 6).

성널오름(HL112, HL110, HL136) : 한라산 동쪽 사면에서는 가장 큰 소화산체인 성널오름은 3개의 분화구로 이루어져 있으며, 오름 사면에는 분석층이 두껍게 분포한다(Fig. 4(B)). 서귀포-하효리 1:5만 지질도(Park *et al.*, 2000)에서 성널오름은 성널오름조면현무암과 성널오름조면현무암 분석구로 기재되어 있다. 성널오름의 하단부의 동서방향 계곡에서는 현무암질조면안산암이 분포되며, 중간부분에 주로 알칼리현무암이 나타나며, 정상부에서는 조면현무암이 산출된다. 성널오름 남동쪽 사면에서는 주로 알칼리현무암이 산출된다(Table 2, Fig. 2). 조면암은 주로 이들 알칼리현무암을 관입하는 형태로 나타난다. 성널오름 알칼리현무암(HL112)의 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 연대는 92 ± 16 ka이며, 성널오름 북동부의 조면암(HL110)의 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 연대는 32 ± 4 ka이며, 남동부 조면암(HL136)의 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 연대는 43 ± 4 ka 이다(Table 3, Fig. 6).

논고약(HL173) : 논고약은 높이 858m, 비고 143m인 오름으로, 동쪽으로 벌어진 말굽형 분화구 형태를 보이는 산정화구이다(Fig. 4(C)). 서귀포-하효리 1:5만 지질도(Park *et al.*, 2000)에서 논고약은 물장울조면현무암 분석구로 기재되어 있다. 논고약 정상부와 분화구는 분석으로 구성되어 있으며, 분석층은 해발고도 800m까지 확인되며,

이 보다 낮은 고도에서는 논고악의 용암이 동쪽으로 흐른 것이 관찰된다. 논고악 용암(HL173)은 SiO_2 함량이 50.08~53.19 wt.%, $\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}$ 함량이 4.91~6.19 wt.%로 조면현무암의 조성을 보이며(Table 2, Fig. 2), 논고악 조면현무암의 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 연대는 43 ± 12 ka 이다(Table 3, Fig. 6).

동수악(HL143, HL145) : 남원을 한남리에 위치한 동수악은 해발고도 약 700m, 비고 100m, 둘레 약 1,800여m 이다(Fig. 4(A)). 서귀포-하효리 1:5만 지질도(Park *et al.*, 2000)에서 동수악은 물장울조면현무암 분석구에 대비되는 것으로 보았다. 동수악은 분화구 주변과 내부에 분석층이 분포하는 분석구이며, 동수악 서쪽에서 남서방향으로는 분석구의 일부가 잘려 급경사를 이룬다. 동수악 분화구에서 서쪽방향으로는 분석구의 사면을 뚫고 용암이 분출된 것을 관찰할 수 있다. 동수악 용암은 1~5cm의 휘석 외래결정편을 함유하며, 초고철질 맨틀포획체를 함유한다. 동수악의 분석은 SiO_2 함량이 49.00 wt.%, $\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}$ 함량이 4.19 wt.%로 전이질현무암 조성을 보이며, 용암은 SiO_2 함량이 49.00~49.57 wt.%, $\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}$ 함량이 4.19~4.53 wt.%로 전이질현무암 조성을 나타낸다(Table 2, Fig. 2). 동수악 전이질현무암의 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 연대는 184 ± 19 ka 이다(Table 3, Fig. 6). 동수악 서쪽 상류계곡을 따라서 조면암(HL145)이 분포하는데 최대 약 10m의 절벽을 이루기도 한다. 이 조면암(HL145)은 SiO_2 함량이 64.10 wt.%, $\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}$ 함량이 10.26 wt.%이며, $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 연대는 40 ± 3 ka 이다(Table 3, Fig. 6).

보리악(HL163) : 보리악은 논고교에서 서쪽으로 약 1km 지점에 위치한 원추형 화산으로 해발고도는 739.6m, 비고 130m, 둘레는 약 2,800m이다(Fig. 4(E)). 서귀포-하효리 1:5만 지질도(Park *et al.*, 2000)에서 보리악조면현무암 및 그 분석구에 대비되는 것으로 보았다. 보리악 분석구는 신례천에 의해 남서 사면이 절개되어 노출되어 있는데 그 하부는 스패터와 거력의 용암괴가 분포하며, 상향 세립화 특성을 보인다. 하천과 접하는 분석구 저면을 따라서는 반상휘석장석용암류가 분출되었는데 신례천을 따라 수악교까지 흐른 것으로 보인다. 보리악 용암은 SiO_2 함량이 57.17 wt.%, $\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}$ 함량이 7.88 wt.%로 조면안산암 조성을 나타낸다(Table 2, Fig. 2). 보리악 조면안산암의 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 연대는 73 ± 5 ka 이다(Table 3, Fig. 6).

물장울(HL127, HL065-1, HL065-5) : 물장울은 한라산 동쪽 사면에 위치한 화구호를 가진 분석구이다. 물장울의 해발고도는 938m이며, 비고 120m, 둘레 3,094m 이다(Fig. 4(F)). 이 오름은 타원형에 가까운 원추형 화산체이나 북동쪽 사면에 용암이 분출되어 있다. 물장울 지역은 서귀포-하효리 1:5만 지질도(Park *et al.*, 2000)에서 물장울조면현무암과 물장울조면현무암 분석구로 기재되어

있다. 분석은 SiO_2 함량이 50.00 wt.%, $\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}$ 함량이 4.68 wt.%로 전이질현무암 조성을 나타내며, 용암류는 SiO_2 함량이 49.38 wt.%, $\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}$ 함량이 5.47 wt.%로 역시 전이질현무암에 해당된다(Table 2, Fig. 2). 물장울 용암(HL127)의 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 연대는 81 ± 10 ka 이다(Table 3, Fig. 6).

물장울 동쪽 계곡부는 약 1~2m 두께의 화산쇄설성 퇴적층으로 구성된 굴전동역암(Park *et al.*, 2000)이 분포한다. 이 퇴적층 하부의 용암(HL065-5)은 SiO_2 함량이 49.53 wt.%, $\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}$ 함량이 4.93 wt.%로 조면현무암 조성을 나타내며, 상부의 용암(HL065-1)은 SiO_2 함량이 53.88 wt.%, $\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}$ 함량이 6.65 wt.%로 현무암질조면안산암의 조성을 나타낸다(Table 2, Fig. 2). 퇴적층 하부 용암(HL065-5)의 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 연대는 103 ± 13 ka이며, 퇴적층 상부 용암(HL065-1)의 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 연대는 73 ± 7 ka이다(Table 3, Fig. 6).

어리목상수원 부근(HL062, HL064) : 어리목상수원은 어리목휴게소의 무수천과 광령천이 합류하는 곳에 위치한다(Fig. 3(A)). 이 지역은 서귀포-하효리 1:5만 지질도(Park *et al.*, 2000)에서 해안동조면안산암에 속한다. 이 지역은 옅은 분홍색을 띠는 회색의 암맥상 분포를 보이는 용암(HL062)이 분포하며, 두께는 약 3m이다. 이 암석의 SiO_2 함량은 61.77 wt.%, $\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}$ 함량은 9.91 wt.%로 조면암에 해당한다(Table 2, Fig. 2). 또한 광령천의 어리목교 근처는 장석 반정을 함유한 용암이 산출되며 지질도상에서는 대포동조면현무암에 속한다. 이 용암(HL064)의 SiO_2 함량은 51.88 wt.%, $\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}$ 함량은 5.63 wt.%로 현무암질조면안산암에 해당된다. 조면암과 현무암질조면안산암의 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 연대는 각각 191 ± 5 ka, 192 ± 11 ka(Table 3, Fig. 6)로, 한라산천연보호구역 내의 화산암들 중에서는 가장 오래된 연대를 보이고 있다.

용진각 계곡(HL087) : 용진각 계곡 최상류의 백록담 북부 조면암 돛 절벽을 이루는 용암류(HL087)의 주원소 성분 조성은 SiO_2 함량이 66.8 wt.%, $\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}$ 의 함량이 11.6 wt.%로 조면암에 해당된다(Table 2, Fig. 2). 한라산 북벽 조면암의 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 연대는 32 ± 2 ka(Table 3, Fig. 6)이다.

사라오름 남쪽 하천계곡(HL190) : 이 지역은 사라오름과 입석오름 사이에 발달된 계곡들 중 첫 번째 하천계곡으로 해발고도로는 약 1,500m~1,000m의 구간이다. 서귀포-하효리 1:5만 지질도(Park *et al.*, 2000)에서 이 지역은 백록담조면현무암으로 기재되어 있다. 이 지역은 대체로 단사휘석과 장석 반정을 함유한 휘석장석현무암질 용암류가 하천을 따라 암괴상으로 분포한다. 또한 해발고도 약 1,380m~1,250m 구간에는 휘석장석현무암질 용암류 하부에 지질도상에는 미기재된 미고결 퇴적층이 약 700여m의 연장되어 분포하고 있다. 이 퇴적층의 두께는

Table 4. Radiocarbon dating result for charcoal from the intercalated sediment layer between lavas of near Sara-Oreum, the Hallasan Natural Reserve

sample no	$\delta^{13}\text{C}\text{‰}$	^{14}C age (yr BP)	calibrated age (Cal yr BP)	material
HL190	-23.9	23,921±104	27,980±206	charcoal

약 1.5~3.0m 내외이며, 상부는 적갈색을 띄며, 하부는 황갈색으로 띈다. 일부 구간에서는 1~10cm 크기의 탄화목이 산출되기도 한다. 이 탄화목의 방사성탄소 연대측정 결과 약 29,980 yr.BP의 연령을 보인다(Table 4). 이 퇴적층 상부의 용암(HL190)은 SiO_2 함량이 50.77 wt.%, $\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}$ 함량이 5.35 wt.%로 조면현무암에 해당되며(Table 2, Fig. 2), $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 연대는 22±6 ka(Table 4)로 하부 퇴적층의 방사성탄소 연대와 비교적 조화적이다(Table 3, Fig. 6).

서중천 지역(HL178, HL186) : 서귀포-하효리 1:5만 지질도(Park *et al.*, 2000)에서 이 지역은 성널오름조면현무암이 넓게 분포하고, 한라산조면암이 남쪽으로 흐르는 하천 계곡의 사면에 노출되어 소규모로 분포하는 것으로 기재되어 있다. 동수교 주변에서 서중천 상류 하천 계곡을 따라 장석현무암류의 하부에 150~200m 내외의 폭과 1~3m의 두께를 갖는 미고결 퇴적층이 분포하며, 이 퇴적층들은 하천의 서쪽 지류에서도 2개소가 더 확인된다. 이 퇴적층은 두께 약 2~3m로 황갈색을 띄며, 5cm 이상의 현무암역을 함유하기도 한다. 소규모 분포이지만 계곡의 서쪽 사면을 따라 조면암(HL186)이 부분적으로 분포하며, 동수악 서쪽 하천 계곡에서와 마찬가지로 약 10여 m 높이를 갖는 절벽 지형을 이루어 노출되어 있다. 이들 화산암의 주원소성분의 조성은 SiO_2 함량이 50.50~64.53 wt.%, $\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}$ 함량이 5.11~10.58 wt.%로 TAS 화산암 분류도에 의하면 조면현무암, 조면암에 해당된다(Table 2, Fig. 2). 퇴적층 상부 조면현무암(HL178)의 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 연대는 22±18 ka, 조면암(HL186)의 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 연대는 30±2 ka 이다(Table 3, Fig. 6).

한라산 둘레길(수악길 구간 : HL150, HL153) : 이 지역은 한라산 둘레길 중 신례천 상류 수악교 근처의 둘레길 입구(지방도 1131도로에서 접근)에서 돈내코 탐방로 입구까지 조성된 약 4km 구간이다. 이 지역의 위쪽 사면에는 입석오름(해발 1,189m)이 분포하고 있으며, 아래쪽 사면으로는 선돌서원, 선덕사가 위치한다. 1:5만 지질도(Park *et al.*, 2000)에서 이 지역은 백록담조면현무암, 시오름조면현무암이 분포하며, 한라산조면암은 국지적 소규모로 분포하는 것으로 기재되어 있다.

둘레길의 초입은 침상장석현무암류가 분포하는데, 둘

레길 북쪽에 분포하는 반상휘석장석현무암류와의 경계는 불분명하다. 이후 둘레길 중간 부분에는 조면안산암류(HL153)가 분포하는데 침상장석현무암류에 의해 피복된 것으로 판단된다. 경계부에서는 암괴상으로 산발적인 분포를 보이나 하천 계곡에서는 아아 용암류로 확인된다. 침상장석현무암의 주원소성분의 조성은 SiO_2 함량이 50.61 wt.%, $\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}$ 함량이 5.33 wt.%로 현무암질조면안산암에 속하며, 둘레길 중간지역의 HL153은 SiO_2 함량이 58.09 wt.%, $\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}$ 함량이 8.21 wt.%로 조면안산암에 속한다(Table 2, Fig. 2). 침상 장석 조직을 갖는 현무암질조면안산암(HL150)의 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 연대는 35±8 ka, 조면안산암(HL153)의 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 연대는 77±5 ka 이다(Table 3, Fig. 6).

돈내코 탐방로(HL233, HL236) : 이 구간은 오름이 분포하지는 않으며, 1:5만 지질도에서는 백록담조면현무암으로 분류하고 있다(Park *et al.*, 2000). 그러나 암상관찰에 의하면 이 구간은 크게 침상 장석이 우세한 현무암(HL233)과 장석 반정이 우세한 현무암(HL236)의 두 암종이 분포한다. 침상 장석이 우세한 현무암은 해발고도 약 1,200m 내외보다 높은 지역에 분포하며, 이보다 낮은 고도에서는 침상조직이 우세한 현무암에서 장석 반정이 우세한 현무암으로 점이적인 변화를 보인다. 두 용암 사이의 경계는 명확치 않으며, 서로 다른 용암인지는 확실하지 않다. HL233은 SiO_2 함량이 51.52 wt.%, $\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}$ 함량이 4.7 wt.%로 전이질현무암에 속하며, HL236은 SiO_2 함량이 50.31 wt.%, $\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}$ 함량이 5.02 wt.%로 조면현무암에 속한다(Table 2, Fig. 2). 침상장석현무암(HL233)과 반상장석현무암(HL236)의 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 연대는 각각 90±20 ka, 50±20 ka로 서로 다른 시기에 분출되었음을 보여준다(Table 3, Fig. 6).

한라산 둘레길(동백길 구간 : HL200, HL204, HL209, HL211, HL219, HL220) : 영천교차점에서 시오름 구간은 장석이 반정과 침상 결정으로 혼재된 현무암이 주로 관찰되며, 시오름에서 도순천 교차점까지는 장석 반정의 크기는 좀 더 커지나 양적으로는 적어지며, 색상이 차이나는 등 좀더 다양한 현무암이 분포하고 있다. 5만 지질도에서 돈내코-시오름 구간은 백록담조면현무암이, 시오름-도순천 구간은 주로 법정동조면현무암과 윗세오름조면현무암이 우세하게 분포하는 것으로 기재하고 있다. 영천과 둘레길 교차지점(HL200)부터 동홍천(HL220)을 지나 시오름 근처까지는 SiO_2 함량이 48.99~51.02 wt.%, $\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}$ 함량이 4.33~4.77 wt.%(Table 2, Fig. 2)로 비교적 조성이 균질하며, 전이질현무암이 우세하다. 동홍천 상류 구간(Fig. 4(I))으로는 조면암이 하천 침식면을 따라

계곡 지형을 이루어 분포하며, 계곡의 양쪽 정상부는 화산분출물과 용암류의 깨진 암괴를 덮혀 있어 조면암의 분출 정치 이후 발생한 화산분화의 산물에 의해 피복된 것으로 해석된다. 조사구간 내에서 하류 지역에 비해 상류 지역의 조면암은 화강암의 박리와 같은 판상절리가 발달하고 있다. 이 지역의 조면암은 치밀질이고 비반상조직을 보인다. 조면암은 SiO_2 함량이 63.30 wt.%, $\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}$ 함량이 9.99 wt.% 내외의 조성을 보인다(Table 2, Fig. 2).

시오름-법정사까지의 구간은 대부분 장석 반정이 우세한 용암이 주로 산출되지만 궁산천에서는 열은 회색을 띠는 용암이 분포한다(Fig. 4(J)). 이 구간은 SiO_2 함량이 50.31~60.39 wt.%, $\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}$ 함량이 4.88~8.41 wt.%로 다양한 조성을 보이는데 약근천 근처(HL204)는 조면안산암 조성을 나타내며, 궁산천으로 가면서 조면현무암, 소레이이트질현무암의 조성을 보인다. 궁산천의 용암(HL209)은 조면안산암 조성을 나타내며, 궁산천의 서쪽편에서 고지천(HL211)까지는 현무암질조면안산암 조성을 나타낸다(Table 2, Fig. 2). 영천 교차점의 용암(HL200)의 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 연대는 86 ± 16 ka, 동흥천 교차점의 용암(HL220)의 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 연대는 95 ± 10 ka, 동흥천 상류 조면암(HL219)의 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 연대는 88 ± 3 ka, 약근천 교차점의 용암(HL204)의 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 연대는 102 ± 9 ka, 궁산천 교차점의 용암(HL209)의 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 연대는 111 ± 2 ka, 고지천 교차점의 용암(HL211)의 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 연대는 84 ± 11 ka이다(Table 3, Fig. 6).

도순천(HL231) : 이 지역은 영실제1교에서 법정사에 이르는 구간으로 크게 파호이호이 용암류와 아아 용암류의 두 종류가 분포하는데 파호이호이 용암류가 기저를 이루고 있다. 이 용암의 상부에는 기공이 많은 다공질의 특징을 보이며, 용암류의 두께는 2~5m로 두 매의 용암단위가 확인되며, 반상휘석장석현무암의 암상을 나타낸다. 상부에 피복되는 아아 용암류와의 접촉부는 상류에서는 직접 접촉하나 하류로 감에 따라 아아 용암류의 클링커층과 접하게 된다. 도순천 지역의 용암(HL231)은 SiO_2 함량이 53.46 wt.%, $\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}$ 함량이 6.92 wt.%로 현무암질조면안산암 조성을 나타낸다(Table 2, Fig. 2). 도순천(HL231) 용암의 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 연대는 53 ± 10 ka이다(Table 3, Fig. 6).

백록담(HL043) : 한라산 정상부는 백록담을 중심으로 서쪽은 한라산조면암, 동쪽은 백록담조면현무암으로 구분된다(Ahn and Hong, 2017). Koh *et al.*(2019)은 백록담의 동릉의 현무암질조면안산암의 연대를 17.7 ± 2.7 ka, 16.2 ± 3.9 ka임을 밝혔고, 백록담 분화구 북쪽의 1m 내외의 조면암 블록들로 구성된 테일러스에서 50.1 ± 6.2 ka의 연대를 얻었다. 이번 연구에서도 동일한 지역에서 채취한 암석에 대해 47 ± 4 ka의 연대를 얻었다(Table 3, Fig. 6).

4. 토 의

Koh *et al.*(2019)은 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 연대분석을 통하여 한라산 고지대에서의 다중 화산분화가 있었음을 밝혔다. 이 연구에서는 이러한 결과를 바탕으로 더 많은 지역에서 시료를 채취하고 분석하여 좀더 정밀한 화산분화의 기록을 해석하고자 하였다. 그 결과 1,000m 이상의 지형고도를 가지는 한라산천연보호구역은 약 190 ka 전부터 화산활동을 시작하여 약 16 ka(Koh *et al.*, 2019)까지 지속된 것으로 파악되었으며, 다양한 분출기록이 확인되었다. 한라산천연보호구역 서쪽의 어리목상수원 부근의 Y계곡 일대의 조면암과 현무암질조면안산암이 약 191~192 ka의 연대를 보여 한라산천연보호구역에서는 가장 오래된 화산활동의 기록을 나타내었으며, 백록담 동릉의 용암류가 약 16 ka(Koh *et al.*, 2019)으로 가장 젊은 연대를 보였다. 한라산천연보호구역의 동쪽에서는 동수악 용암류가 184 ka로 가장 오래된 분출시기를 보였다. 약 20만년에서 약 10만년에 걸친 화산활동은 한라산천연보호구역의 전 지역에서 해발고도와는 관계없이 일어났음을 보여준다. Y계곡 어리목상수원(191 ± 5 ka), 동수악(184 ± 19 ka), 장구목오름(135 ± 6 ka), 만세동산(153 ± 5 ka), 왕관릉(134 ± 1 ka, Koh *et al.*, 2019), 어승생악(123 ± 9 ka), 삼각봉(105 ± 2 ka), 물장울퇴적층 하부용암(103 ± 13 ka) 등이 이 시기에 분출한 것으로 파악된다. 이 시기에 분출한 오름들은 왕관릉, 삼각봉을 제외하면 대부분 한라산천연보호구역 외곽부에서 분포한다.

10만 년 전 이후의 화산활동도 천연보호구역 내에서 매우 활발히 발생하였음을 보여준다. 초기 성널오름(92 ± 16 ka), 윗방애오름(94 ± 4 ka), 알방애오름(83 ± 14 ka), 물장울(81 ± 10 ka), 윗세누운오름(76 ± 4 ka), 영실조면암(71 ± 2 ka), 보리악(73 ± 5 ka), 방애오름(59 ± 6 ka), 흙붉은오름(60 ± 8 ka) 등은 10만년~5만년 사이의 화산활동에 의해 형성되었으며, 백록담(47 ± 4 ka), 논고악(43 ± 12 ka), 윗세붉은오름(41 ± 5 ka), 윗세죽은오름(30 ± 2 ka), 동수악 부근 조면암(40 ± 3 ka), 성널오름 부근 조면암(43 ± 4 ka, 32 ± 4 ka), 서중천 지류 하천의 조면암(30 ± 2 ka), 백록담 동릉 일대의 조면현무암(16 ± 4 ka, Koh, *et al.*, 2019) 등은 50 ka 전 이후의 비교적 보다 젊은 화산활동의 기록을 가지고 있다. 10만 년 이내의 소화산체들은 1,500m 이상의 고지대와 900m 이하의 저지대에 주로 분포한다.

그러나 이번의 추가적인 연대측정 결과 한라산천연보호구역 일대에서의 화산활동기를 좀더 자세히 구분할 수 있었다. 한라산천연보호구역의 전 지역에서 조면암들이 관찰되며, 이들에 대한 연대결과로 보면 191 ka, 134 ka, 105 ka, 88 ka, 70 ka, 47ka, 40 ka, 30 ka 등 약 8번의 화

산활동기로 구분할 수 있다. 한라산천연보호구역에서 가장 오래된 조면암은 어리목상수원 일대의 용암(191 ka)이다. 그 이후 왕관릉(134 ka), 삼각봉(105 ka), 동홍천 상류(88 ka), 영실(70 ka), 백록담(47 ka), 성널오름 남동부와 동수악 부근(40 ka), 용진각 계곡-성널오름 북부-서중천 지류하천(30 ka) 등의 조면암이 서로 다른 시기의 화산활동 시기를 보이고 있다. 이들 중 돛의 형태를 보이는 조면암은 왕관릉, 삼각봉, 영실, 용진각계곡, 백록담들이며, 나머지 조면암들은 층상 형태나 압맥 형태로 나타난다. 또한 시간적으로 보면 연대가 젊어질수록 조면암의 산출이 빈번해짐을 알 수 있었는데 특히, 3만 년~5만 년 사이에 조면암의 빈번하게 분출되었음이 연대자료에서 확인된다. 지금까지의 연대자료로 추정하면 어리목상수원 조면암 분출에서 그 이후의 왕관릉 분출까지는 약 6만 년의 시간간격을 보이지만 그 이후로는 왕관릉 조면암에서 삼각봉조면암 분출까지는 약 3만 년, 삼각봉조면암에서 동홍천 상류 조면암 출현까지는 약 2만년, 그 이후의 영실조면암 분출까지는 약 2만 년의 시간 간격으로 보이며, 영실조면암에서 백록담의 조면암까지는 약 2만 년의 시간 간격을 보인다. 그 이후로는 약 1만 년의 시간 간격을 보여 조면암의 분출 간격이 연대가 젊어질수록 짧아짐을 알 수 있다.

Fig. 7에 현재까지 발표된 제주도의 육상 노두에서 채취된 현무암들의 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 연대들을 해발고도에 따라 분류하였다. 약 90만년 전부터 20만년 전까지의 지표에서 확인할 수 있는 제주도의 화산활동은 산발적이지만 20만년 전 이후부터 홀로세까지의 화산활동은 제주도의 육상에서 매우 빈번하게 일어났음을 보여준다. Koh *et al.*(2013)은 제주도의 화산활동을 서귀포층을 기준으로 퇴적동시대 화산활동기(약 1.88~0.5 Ma)와 퇴적이후 화산활동기(0.5Ma~홀로세)로 구분하였으며, 50만 년 이후 30만 년~10만 년 동안의 화산활동으로 제주도 지형의 골격을 형성하였다고 하였다. Fig. 7에서 보면 190 ka 이후 제주도에서는 육상 화산활동이 매우 활발하게 일어난 것으로 보이며, 특히 한라산천연보호구역은 192 ka 이후 홀로세 직전까지 지속적인 화산활동으로 형성된 것으로 보인다. 또한 연대측정 결과로 보면 한라산천연보호구역의 북서지역에서 190 ka~100 ka의 오래된 연대들이 집중된다. 따라서 아마도 백록담이 형성되기 이전까지는 장구목이 가장 높은 산지를 형성하였을 것이다. 100 ka 이후에는 주로 한라산천연보호구역 남쪽 지역에서의 화산활동이 많았던 것으로 판단된다. 70 ka 이후부터는 주로 동쪽 지역에 여러 오름들을 형성시키는 화산활동이 있었을 것이며, 특히 30 ka 이후로는 백록담의 형성과 관련된 용암 분출이 활발하였던 것으로 보인다.

Fig. 7. The altitude and Ar-Ar ages of volcanic lava from the outcrops in the Hallasan Natural Reserve.

한라산천연보호구역은 특히 50 ka 이후 분출된 화산들이 다수 포함되는데 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 연대 측정법으로는 정확한 연대를 정의하기에는 오차범위가 큰 것이 사실이다. 논고악, 서중천퇴적층 상부, 물장울퇴적층 상부 등의 용암의 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 연대는 오차범위가 비교적 크고 실제 하부 퇴적층의 광여기루미네선스 연대, 탄소연대보다 더 오래된 연대값을 보이고 있다. Ahn *et al.* (2018, 2020)은 제주시 조천읍 교래리의 2매의 용암층 사이에 협재하는 교래퇴적층을 대상으로 자기학적 방법을 이용하여 퇴적층이 상부 용암에 의해 가열되어 도달한 온도를 정량복원하여, 퇴적층에서 얻은 광여기 루미네선스 연대가 퇴적시기가 아닌 열에 의해 리셋된 이후 경과된 시간, 즉, 상부 용암의 정치된 연대임을 밝혔다. 따라서 용암들 사이에 협재된 퇴적층의 광여기 루미네선스 연대가 퇴적연대인지 아니면 상부 용암의 유동연대인지를 밝히기 위한 지속적인 연구가 필요하다.

$^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 연대 분석이 실시된 화산암들의 위치(Fig. 8)는 1:5만 서귀포-하효리 지질도에 의하면 범정동조면현무암 및 분석구(HL039, HL021, HL204, HL034, HL211, HL031) 윗세오름조면현무암 분석구(HL023, HL213, HL216, HL212, HL055), 굴전동역암(HL065-5, HL065-1), 물장울조면현무암 분석구(HL143, HL127, HL173), 백록담조면현무암(HL220, HL200, HL231, HL150, HL190), 성널오름조면현무암 및 분석구(HL112, HL110), 시오름조면현무암 및 분석구(HL153, HL117), 한라산조면암(HL043, HL209, HL089, HL219, HL172, HL136, HL145,

Fig. 8. Modified geologic map of the Hallasan Natural Reserve (modified after Park *et al.*, 2000). Qbntb : Baengnokdam Trachybasalt, Qbtb : Beopjeongdong Trachybasalt, Qbtbs : Beopjeongdong Trachybasalt Scoria cone, Qhta : Hallasan Trachyte, Qks : Kuljeongdong Conglomerate, Qmtbs : Muljangol Trachybasalt Scoria cone, Qsntb : Seongneolorem Trachybasalt, Qsntbs : Seongneolorem Trachybasalt, Qstb : Sioreum Trachybasalt, Qwtbs : Witseoreum Trachybasalt, Qbrtb : Boriak Trachybasalt, Qhata : Haeandong Trachybasalt.

HL087, HL186, HL178), 해안동조면현무암(HL062), 보리악현무암(HL163) 분포지역에 해당된다. 지질도에서는 동일한 층준으로 분류되었지만 실제 연대측정결과를 보면 최대 10만년 이상의 분출시기 차이를 보이고 있어 서로 다른 시기의 화산활동이 있었음을 보여준다. 또한 지질도에서는 수직적 층서 관계 및 서로 다른 분석구에서의 중심 분출형태를 기준으로 해석하여 암층을 구분하였다. 그러나 서로 다른 시기를 보이는 조면암의 돔의 형성 등을 고려하면 한라산천연보호구역은 19만년 이후 지속적인 화산활동에 의해 형성된 하나의 화산지대로 보는 것이 타당할 것이다. 또한 한라산을 포함한 한라산천연보호구역의 완전한 화산활동사를 규명하기 위해서는 심부 시추를 통한 심도 깊은 연구가 필요할 것으로 보인다.

5. 결 론

한라산천연보호구역의 어승생, 장구목오름, 윗세오름, 방애오름, 성널오름, 동수악, 보리악, 영실, 논고악 등 오름들과 그 주변 용암들에서 채취된 39개의 용암류에 대한 전암 주성분조성과 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 연대를 분석하고 이를 보고한다.

한라산천연보호구역의 용암조성은 알칼리현무암-전이

질현무암-조면현무암-현무암질조면안산암-조면안산암-조면암이다.

$^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 연대 측정에 의하면 한라산천연보호구역은 약 19만 년 이후 홀로세 직전까지 지속적인 화산활동이 있었던 것으로 보인다. 조면암의 분출시기에 의하면 한라산천연보호구역은 최소 약 8회의 화산활동이 있었던 것으로 해석할 수 있으며, 이 중 왕관릉, 삼각봉, 영실, 백록담 등 조면암 돔이 형성된 4회의 화산활동과 암맥상의 조면암이 산출된 4회의 화산활동으로 구분할 수 있다.

한라산천연보호구역내 현재의 한라산의 형태는 지표상의 노출상태로 보아 가장 먼저 보호구역 북서부에서 시작되어 남부지역의 화산활동, 그리고 동부지역의 화산활동, 마지막으로 백록담 형성과 관계된 화산활동 등의 순서로 진행된 것으로 생각된다. 그러나 좀더 정확한 형성 과정을 밝히기 위해서는 한라산천연보호구역에서의 심부 시추를 통한 종합적인 연구가 필요할 것으로 생각된다.

또한 이와 더불어 한라산천연보호구역에 분포하는 용암류의 층서와 명명을 재검토할 필요성이 있음을 제시한다. 한라산천연보호구역은 1:5,000의 정밀지질도를 재작성하여 한라산천연보호구역의 지질계통을 확실히 수립해야 할 것이다.

사 사

이 연구는 문화재청이 출연하여 제주특별자치도 세계유산본부가 지원하고 한국지질자원연구원이 수행한 “한라산천연보호구역 지형, 식생, 기후 기초학술조사”와 한국지질자원연구원의 주요과제(국토지질조사 및 지질도·지질주제도 발간)의 지원으로 수행되었습니다. 또한 논문 심사에서 세심한 검토와 조언을 하여 주신 심사위원들에게 감사드립니다.

References

- Ahn, H.S., Hong, S.S. and Lee, J.Y. (2020) Feasibility of lava-heated underlying sediment OSL chronology in age determination of lava effusion since the Late Pleistocene: Confirmation from lava $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ chronology. *Journal of the Geological Society of Korea*, v.56, p.481-492. (in Korean with English abstract)
- Ahn, H.S., Kim, J.C., Lee, J.Y., Lim, J., Sohn, Y.K. and Cho, H. (2018) Magnetic assessment of OSL and radiocarbon ages of sediments beneath a lava in Jeju Island, Korea: Implication of possible resetting of OSL signals and age constraint of the late Quaternary lava. *Quaternary Geochronology*, v.48, p.45-63.
- Ahn, U.S., Choi, J.H. and Yeo, E.Y. (2017) Eruption timing of the Geomun Oreum through the comparison of radiocarbon and quartz OSL ages, *Journal of the Geological Society of Korea*, v.53, p.367-376. (in Korean with English abstract).

- Ahn, U.S. and Hong, S.S. (2017) Volcanological history of the Baengnokdam summit crater area, Mt. Halla in Jeju Island, Korea, *Journal of the Petrological Society of Korea*, v.26, p.221-234. (in Korean with English abstract)
- Ahn, U.S. and Hwang, S.G. (2008) Interpretation of formation and growth processes of Manjang lava tube through detailed surveying with electronic total station, *Journal of the Geological Society of Korea*, v.44, p.657-672. (in Korean with English abstract).
- Brenna, M., Cronin, S.J., Smith, I.E.M., Sohn, Y.K. and Maas, R. (2012) Spatio-temporal evolution of a dispersed magmatic system and its implications for volcano growth, Jeju Island Volcanic Field, Korea. *Lithos*, v.148, p.337-352.
- Hwang, S.G., Ahn, U.S., Lee, M.W. and Yun, S.H. (2005) Formation and internal structures of the Geomunorm lava tube system in the northeastern Jeju Island, *Journal of the Geological Society of Korea*, v.41, p.385-400. (in Korean with English abstract).
- Irvine, T.N. and Baragar, W.R.A. (1971) A guide to the chemical classification of the common volcanic rocks. *Canadian Journal of Earth Sciences*, v.8, p.523-548.
- Jeju Special Self-Governing Province. (1997) Oreum in Jeju Island, Jeju, 483p. (in Korean).
- Ki, J.S., Jeon, Y., Ryu, C.K. and Kim, S. S. (2016) A significance and meaning of Geomunoreum as a representative geosite of global geoparks, *Journal of the Geological Society of Korea*, v.52, p.763-774. (in Korean with English abstract).
- Kim, J., Choi, J.H., Jeon, S.I., Park, U.J. and Nam, S.S. (2014) $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ age determination for the Quaternary basaltic rocks in Jeongok area. *Journal of the Petrological Society of Korea*, v.23, p.385-391. (in Korean with English abstract)
- Kim, J. and Cho, I.H. (2020) Improvement of $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ age determinations for Quaternary basaltic rocks by eliminating the peak suppression effect. *Journal of Analytical science and Technology*, <https://doi.org/10.1186/s40543-020-00207-9>
- Koh, G.W., Park, J.B., Hong, S.S., Ko, I.J. and Kim, T.H. (2019) Multiple volcanic eruption episodes in the highlands of Mt.Halla(Hallasan), Jeju Island, Korea : $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ ages of lava flows, *Journal of the Geological Society of Korea*, v.55, p.71-86. (in Korean with English abstract)
- Koh, G.W., Park, J.B., Kang, B.R., Kim, G.P. and Moon, D.C. (2013) Volcanism in Jeju Island, *Journal of the Geological Society of Korea*, v.49, p.209-230. (in Korean with English abstract)
- Koh, J.S., Yoon, S.H. and Kang, S.S. (2003) Petrology of the volcanic rocks in the Paekrogdam crater area, Mt. Halla, Jeju Island. *Journal of the Petrological Society of Korea*, v.31, p.1-15. (in Korean with English abstract)
- Le Maitre R.W., Streckeisen A., Zanettin B., Le Bas M.J., Bonin B., Bateman P., Bellieni G., Dudek A., Efremova S., Keller J., Lamere J., Sabine P.A., Schmid R., Sorensen H. and Woolley A.R. (2002) *Igneous Rocks: A Classification and Glossary of Terms, Recommendations of the International Union of Geological Sciences, Subcommittee of the Systematics of Igneous Rocks*: Cambridge, UK, Cambridge University Press, 236p.
- Macdonald, G.A. and Katsura, T. (1964) Chemical composition of Hawaiian Lavas. *Journal of Petrology*, v.5, p.82-133.
- Middlemost, E.A.K. (1989) Iron oxidation ratios, norms and the classification of volcanic rocks. *Chemical Geology*, v.77, p.19-26.
- Park, K.W., Cho, D.L., Kim, J.C., Cho, B.W., Jang, Y.N., Lee, B.J., Lee, S.R., Son, B.K., Cheon, H.Y., Lee, H.Y. and Kim, Y.U. (2000) Geologic report of the Segwipo-Hahyori sheet. Jeju Provincial Government, 163p. (in Korean with English abstract)
- Sohn, Y.G. and Chough, S. K. (1992) The Ilchulbong tuff cone, Cheju Island, South Korea: depositional processes and evolution of an emergent, Surtseyan-type tuff cone, *Sedimentology*, v.39, p.523-544.
- Sohn, Y.G., Woo, K.S., Kwon, C.W., Kim, R. and Jeon, Y.M. (2009) Geoheritages and geomonitoring with special reference to Jeju Island, *Journal of the Geological Society of Korea*, v.45, p.751-770. (in Korean with English abstract).