

월라봉-군산, 제주도 최고기 쌍둥이 화산체의 지질과 화산활동

고기원¹ · 박준범^{2,*} · 고창성³ · 전용문⁴ · 문덕철¹ · 문수형¹ · 임재영³

¹제주개발공사

²미육군국동공병단

³제주대학교

⁴제주특별자치도 세계유산본부

요 약

우리는 월라봉-군산 화산체가 제주도에서 지표에 노출된 화산체 중 최고기 쌍둥이 화산체임을 보고한다. 제주도 남서부에 위치한 월라봉-군산 화산체에 대한 야외지질조사, 용암류에 대한 암석기재, 암석화학 분석 및 Ar-Ar 연대 측정, 주변 시추 주상도의 재해석을 바탕으로 구성지질과 화산층서를 밝히고, 화산활동 시기와 과정을 재구성하였다. 월라봉-군산 화산체는 하위에서 상위로 감에 따라 하부화산쇄설층-I(LVD-I), 알칼리현무암-I(AB-I), 하부화산쇄설층-II(LVD-II), 현무암질조면안산암-I(BTA-I), 현무암질조면안산암-II(BTA-II), 상부화산쇄설층-집괴암 및 분석(UVD-Ag & Sc), 알칼리현무암-II(AB-II), 재동화산쇄설층(RVD)으로 구성되며, 월라봉 서쪽과 북서쪽에서는 조면현무암(TB; 반상장석현무암류)과 접한다. 또한, 지금까지 시추코어에서만 서귀포층에 협재하고 있음이 확인되었던 고기의 현무암질 용암류가 박수기정 일대에 노두(AB-I)로 존재하고 있음을 최초로 보고하며, 917.7±23.2 ka ~ 915.6±11.5 ka의 Ar-Ar 연대를 지닌다. 월라봉-군산 화산체는 약 92만 년 전에서 83만 년 전 동안 현무암질 마그마의 증기마그마 분화를 시작으로 현무암질 조면안산암-조면안산암 조성의 용암류를 분출한 마그마성 분화가 종료되면서 쌍둥이 화산체가 만들어졌다. 약 30만 년의 휴지기 이후 약 53만 년 전 군산 화산체에서의 재활동된 화산활동으로 마그마성 분화(스트롬볼리안)에 뒤 이어 분출한 AB-II가 월라봉-군산 사이의 골짜기를 따라 대평리 남쪽으로 흘러 현재의 해안지형이 완성되었다. 이후, 월라봉-군산 화산체의 침식기가 이어지던 약 12~11만 년 전, 인근의 다른 화산체로부터 분출한 조면현무암 조성의 아아 용암류(TB)가 월라봉-군산 화산체 서쪽 측면을 따라 흘렀으며, 경계면을 따라 창고천이 형성되었다. 월라봉-군산 화산체의 기저부를 이루는 하부화산쇄설층은 용머리 응회환을 이루는 화산쇄설층과 함께 서귀포층에 대비되며, 월라봉-군산-용머리-산방산-가파도는 약 100만 년 전부터 80만 년 전까지의 화산활동 기록을 육상에서 관찰할 수 있는 고기 화산시대임을 제시한다. 또한, 군산은 서기 1007년(고려 목종 10년) 분화기록과는 무관함을 밝힌다.

주요어: 월라봉, 군산, Ar-Ar 연대, 최고기 쌍둥이 화산체, 서귀포층

Gi Won Koh, Jun Beom Park, Chang Seong Koh, Yongmun Jeon, Deok Cheol Moon, Soo Hyoung Moon and Jae Young Im, 2021, Geology and Volcanic Activities of Wollabong-Gunsan, the Oldest Twin Volcanoes in Jeju Island. Journal of the Geological Society of Korea. v. 57, no. 2, p. 141-164

ABSTRACT: We report Wollabong-Gunsan volcanoes as the oldest twin volcanoes among the exposed volcanoes in Jeju Island. We studied geology and stratigraphy, and reconstructed eruptive histories of Wollabong-Gunsan volcanoes, located in the southwestern part of Jeju Island, on the basis of field investigation, petrography, analyses of rock compositions and Ar-Ar age dating of lavas, and reinterpretation of existing borehole logs from surrounding boreholes. Wollabong-Gunsan volcanoes are composed of Lower Volcaniclastic Deposit-I (LVD-I), Alkali Basalt-I (AB-I), Lower Volcaniclastic Deposit-II (LVD-II), Basaltic Trachyandesite-I (BTA-I), Basaltic Trachyandesite-II (BTA-II), Upper Volcaniclastic Deposit-Aggregate & Scoria (UVD-Ag & Sc) and Alkali Basalt-II (AB-II) in an ascending order, and contacted with Trachybasalt lava flow (TB: porphyritic feldspar basalt) in the west and northwest of Wollabong. Also, the occurrence of the older basaltic lava flows such as AB-I, which have been identified as intercalating with Seogwipo Formation in borehole cores is newly reported at the sea shore of Bagsugijeong and the Ar-Ar ages of AB-I range from 917.7±23.2 ka to 915.6±11.5 ka. From ca. 920 ka to 830

* Corresponding author: +82-503-321-6126, E-mail: chunpom@empas.com

ka, Wollabong-Gunsan twin volcanoes might have formed in series of volcanic activities from the initiation of phreatomagmatic eruption of basaltic magma to the completion of magmatic eruption of lava flows in the composition of basaltic trachyandesite to trachyandesite. About 530ka after long dormancy for ca. 300 ka, alkali basaltic lava (AB-II) might have exploded right after Strombolian eruption from Gunsan volcano only due to reactivation of volcanic activities, and flowed to the south of Daepyeongri, finally to form the coastal topography. About 120~110 ka after long period of erosion stage of twin volcanoes since last eruption, aa lava flows in the composition of trachy-basalt which was exploded from the adjacent volcano might have flowed to the west of Wollabong and the north of Gunsan, and formed later Changgocheon (Stream) along the boundary with Wollabong-Gunsan volcanoes. We suggest that along with volcanoclastic units of Yeongmeori Tuff Ring, LVD of Wollabong-Gunsan volcanoes are correlated with Seogwipo Formation and that Wollabong-Gunsan-Yeongmeori-Sanbongsan-Gapado are the belt of the oldest volcanoes in Jeju Island that enable us to observe the records of volcanic activities during the period from ca. 1 Ma to 800 ka. In addition, this study reveals that Gunsan volcano has no geologic relationship with a historical record of volcanic activity in 1007 A.D. (the 10th year of King Mokjong, Goryeo Dynasty).

Key words: Wollabong, Gunsan, Ar-Ar age, the oldest twin volcanoes, Seogwipo Formation

(Gi Won Koh, Deok Cheol Moon and Soo Hyoung Moon, Water Resources R&D Center, Jeju Province Development Corporation, Jeju 63345, Republic of Korea; Jun Beom Park, US Army Corps of Engineers Far East District, Republic of Korea; Chang Seong Koh and Jae Young Im, Jeju National University, Jeju 63243, Republic of Korea; Yongmun Jeon, Jeju World Natural Heritage Headquarters, Jeju Special Self-Governing Province, Jeju 63341, Republic of Korea)

1. 서 언

오늘날 제주도 지질연구의 기반이 되고 있는 축척 1대 5만 지질도(성산과 표선 도폭, Won *et al.*, 1993, 1995; 제주·애월 도폭, Park *et al.*, 1998; 모슬포·한림 도폭, Park *et al.*, 2000a; 서귀포·하효리 도폭, Park *et al.*, 2000b)와 1대 25만 지질도(Park *et al.*, 2000c)는 약 20년 전 구축된 것이다. 기간으로 따지면 제주도 전역의 지질도가 완성되기 까지 약 10년 정도의 기간이 소요되었으며 오늘날까지도 제주도 수자원종합계획의 주요 기본자료로 사용되어오고 있다. 그럼에도 불구하고, 지질도는 조사 기관 간 혹은 도폭 연구자 간 지층명 및 지질계통의 통일성 결여, 도폭 경계 지역에서 지질 경계선의 불일치한 문제점이 지속적으로 지적되어 왔다. 특히 산방산을 포함한 제주 남부 일대에 분포하는 조면암류의 층서는 기존 연구자(예: Haraguchi, 1931; Won, 1975; Yun *et al.*, 1987; Lee *et al.*, 1994) 들이 설정해 온 지질 층서를 무시한 채 백록담과 동일한 층서(한라산조면암)로 해석한 오류를 담고 있다. 제주도 남부에 분포하는 고기(古期)소(小)화산체는 대부분 조면암 용암돔으로, 산방산(K-Ar 연대, 870±130 ka, Yun *et al.*, 1987; K-Ar 연대, 747±23 ka, Won *et al.*, 1986; Ar-Ar 연대, 802±5 ka, Koh *et al.*, 2013), 각수바위(K-Ar 연대, 917±28 ~ 893±27 ka, Lee *et al.*, 1994; Ar-Ar 연대, 799±6 ka, Koh *et al.*, 2013; 저어콘 동위원소 이중 연대, 750±61 ka, Marsden *et*

al., 2021), 월라봉(Ar-Ar 연대, 863±7 ka, Koh *et al.*, 2013), 시오름(K-Ar 연대, 0.700±0.021 Ma, Lee *et al.*, 1994), 문섬(K-Ar 연대, 0.728±0.034 Ma, Won *et al.*, 1986), 섯섬(K-Ar 연대, 0.725±0.038 Ma, Won *et al.*, 1986) 등이며, 약 90만 년 전부터 70만 년 전의 연대를 나타낸다. 이들이 도폭에서는 약 3만 년 전의 연대(예, Marsden *et al.*, 2021)를 지니는 백록담 조면암과 같은 층서에 포함되어 있다는 것이다.

한편, 제주도 형성 초기 퇴적층 및 수성화산체에 대한 연구는 서귀포층의 고생물 및 퇴적학적 연구(예, Yi *et al.*, 1998)와 더불어 용머리 응회암에 대한 연구(Sohn, 1995; Sohn and Park, 2005), 시추코어를 이용한 사계리 심부(深部) 화산쇄설층 연구(Sohn and Park, 2004) 및 신도리 심부 화도충전암(diatreme) 연구(Jeon *et al.*, 2013)가 있다. 이와 더불어 가장 오래된 현무암질 용암류의 연대는 용머리 응회암층 내 포획된 현무암 암편의 K-Ar 연대(1.20±0.05 Ma ~ 0.94±0.05 Ma, Yun *et al.*, 1987; Lee *et al.*, 1988)와 지하수 관측공인 05동홍공의 시추코어 중 서귀포층에 협재한 조면현무암의 Ar-Ar 연대(992±21 ka ~ 988±38 ka, Koh and Park, 2010b)로서 약 100만 년 전의 연대를 나타낸다.

2000년 후반 이후 활발해진 제주도 전역에 걸친 시추 자료에 기반한 암석 연대 연구 결과(예: Koh *et al.*, 2008, 2013, 2021; Koh and Park, 2010b; Brenna *et al.*, 2012b)는 지질 도폭의 개정을 통한 제주도 지

질층서 및 화산활동의 새로운 기술이 절실한 시점에 와 있음을 시사한다.

우리는 서귀포시 안덕면 감산리에 위치한 월라봉의 Ar-Ar 연대가 산방산 및 각수바위보다 더 오래된 연대(Koh *et al.*, 2013)를 나타내며, 월라봉과 인접한 군산이 「고려사절요」 고려 목종 10년(서기 1007년) 화산분화 기록의 위치로 추정되고 있는 점(Nakamura, 1925; Haraguchi, 1931)에 주목하고, 월라봉-군산 화산체에 대한 연구를 수행하였다. 월라봉-군산 화산체의 구성지질 및 층서에 대한 기존 연구 결과는 실제 현상과 다를 뿐 아니라, 80~90년대에 주를 이루던 화산암류의 K-Ar 연대에 기초하거나(Lee *et al.*, 1994) 혹은 한라산조면암과 동일한(Park *et al.*, 2000a) 층서 및 화산활동사로 설명하고 있어 새로운 연구가 필요한 실정이다.

따라서 이 연구는 월라봉-군산 화산체에 대한 야외지질조사를 통한 지질도 작성과 용암류에 대한 암석기재, 암석화학 분석 및 Ar-Ar 연대 측정, 주변 시추 주상도의 재해석을 바탕으로 월라봉-군산 화산체의 구성지질과 화산층서를 밝히고, 화산활동 시기와

과정에 대해 고찰하였다.

2. 지질개요

월라봉(표고 201 m)은 상부에 비해 하부 폭이 비교적 넓은 원추형의 화산체로서 북동쪽 방향으로 열린 말발굽형 화구를 지니고, 남쪽 해안에서는 약 50 m 높이의 해안절벽을 이루며, 정상부의 동남쪽에서는 약 100 m 깊이의 계곡지형을 이룬다. 월라봉 정상에서 동북쪽으로 약 2.2 km 떨어진 안덕면 창천리에 위치한 군산(표고 334.5 m)은 타원형의 화산체로 정상부에 분화구가 없지만 제주도에서 가장 큰 규모의 단성화산체(오름)에 속하며, 침식으로 인해 화산체의 북쪽으로 매우 깊고 험한 계곡지형을 이루고 있다(그림 1).

Lee *et al.* (1994)에 따르면 월라봉-군산 화산체는 군산 하와이아이트 I 및 군산 하와이아이트 II로 구성되며, 이들은 모나지악 장석 현무암으로 둘러싸여 있다. 반면, 모슬포도폭(Park *et al.*, 2000a)에는 하위에서부터 군산응회암, 군산조면현무암, 강정동현무



Fig. 1. Bird's-eye view of the studied area, Jeju Island (photo by Heui Jun Jeong). EL - elevation.

Table 1. Sample locations of volcanic rocks in the studied area, Jeju Island.

ID	Latitude	Longitude	Stratigraphy
DP-1	33.240792	126.358978	Alkali Basalt-I
DP-2	33.237025	126.357822	Alkali Basalt-I
DP-3	33.240353	126.359419	Basaltic Trachyandesite-II
DP-4	33.246361	126.361239	Basaltic Trachyandesite-II
DP-5	33.255128	126.351661	Trachybasalt
DP-6	33.254225	126.350161	Trachybasalt
DP-7	33.251608	126.349147	Trachybasalt
DP-9	33.243931	126.341944	Basaltic Trachyandesite-II
DP-10	33.236819	126.345781	Basaltic Trachyandesite-II
DP-11	33.250803	126.355378	Basaltic Trachyandesite-II
DP-12	33.250742	126.354808	Basaltic Trachyandesite-II
DP-13	33.242444	126.348414	Basaltic Trachyandesite-II
DP-18	33.257156	126.352081	Basaltic Trachyandesite-II
DP-101	33.248953	126.357025	Alkali Basalt-II
DP-2015	33.235997	126.354655	Basaltic Trachyandesite-I
SE06*	33.238341	126.349591	Basaltic Trachyandesite-II

*data from Koh *et al.* (2013).

암질조면안산암(균산 화산체 포함), 한라산조면암(월라봉 화산체), 그리고 이를 둘러싸는 법정동조면현무암 순의 층서를 이루는 것으로 기재되어 있다. Kim *et al.* (2019)은 월라봉 남쪽 해안 박수기정 일대에서 페퍼라이트(peperite) 산상에 대해 보고한 바 있다.

3. 연구방법

연구 지역의 야외조사를 통해 지질분포도를 작성하고 주요 용암류 시료를 채취하였다(표 1; 그림 2). 연구 지역의 지하지질 분포는 한국농어촌공사가 작성한 3개 지하수 관정(D-048, F-548, R-027)의 지질 주상도를 활용하였다.

15개의 용암류 시료에 대해 미국 오리건 주립대학교 Argon Geochronolgy Lab에서, 전암(석기) 주성분과 미량성분은 X-선 형광분석법으로, 전암(석기)의 Ar-Ar 연대는 ARGUS VI 모델 (Thermo Scientific)의 다검출기 불활성기체 질량분석기로 이루어졌으며, ArArCALC v2.7.0 (beta version) 전산프로그램 (Koppers, 2002)으로 절대연대가 계산되었다. 자세한 시료 준비, 장비 및 분석방법은 다음의 웹사이트를 참조 바란다(<http://geochronology.coas.oregonstate.edu/>).

edu/).

암석 주성분 분석치 중 철의 총 함량은 FeO^t 로 나타내었으며, 주성분원소 분석치는 변화도에 적용하기 전 산화비를 고려하여 $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{FeO}$ 비가 0.3 (Middlemost, 1989)이 되도록 철의 총 함량으로부터 Fe_2O_3 와 FeO 값을 각각 재계산하고, 그 다음 다른 모든 주성분 산화물의 값과 합하여 물이 없는 상태의 백분율로 재계산한 후 전암 SiO_2 대 ($\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}$) 함량 분류도 (Le Maitre *et al.*, 2002) 및 주성분 변화 그림에 적용하였다.

Ar-Ar 연대는 플래토(plateau) 연대, 정등시선(normal isochron) 연대, 역등시선(inverse isochron) 연대를 제공하고 있지만, 해석에서는 과잉 아르곤의 영향을 배제할 수 있는 연대인 단계별 가열(incremental heating)에 따른 Ar-Ar 스펙트럼으로부터 얻어진 플래토 연대를 이용하였다.

또한, 산방산과 가파도(Koh and Park, 2010a), 서귀포 지역의 05동홍공(Koh and Park, 2010b), 회수 1호공(미발표, 표 3, 4, 5에 자료 삽입)과 제주도 괴래리 삼다수 시험정 3-3호공(미발표, 논문준비중) 시추코어의 암석화학 및 Ar-Ar 연대와 비교하여 그 특성을 기재하였다.

4. 연구결과

4.1 월라봉-군산 화산체의 지질

월라봉-군산 화산체는 크게 화산성 퇴적층, 용암류, 비화산성 퇴적층으로 이루어져 있으며, 야외지질조사와 용암류의 조성 및 Ar-Ar 연대를 근거로 설정한 층서 및 각 암층의 특징을 요약하면 표 2와 같다. 하위에서 상위로 ① 하부화산쇄설층-I(LVD-I), ② 알칼리현무암-I(AB-I), ③ 하부화산쇄설층-II(LVD-II), ④ 현무암질조면안산암-I(BTA-I), ⑤ 현무암질조면안산암-II(BTA-II), ⑥ 상부화산쇄설층-집괴암층 및 분석층(UVD-Ag & Sc), ⑦ 알칼리현무암-II(AB-II), ⑧ 재동화산쇄설층(RVD)으로 구성된다. 월라봉 서쪽과 북쪽에서 LVD-II와 BTA-II는 다른 화산체로부터 분출한 조면현무암(TB; 반상장석현무암류)과

접한다(그림 2). 이들의 분포상태와 세부적인 주요 특징은 아래와 같다.

4.1.1 하부화산쇄설층-I(LVD-I)

월라봉 남쪽의 박수기정 해안절벽에는 현무암질 용암류인 AB-I과 접하여 퇴적층이 노출되어 있다(그림 2, 3). 이 층은 주로 증기마그마성 분화(phreatomagmatic eruption) 기원의 화산쇄설물이 주를 이루는데, 월라봉-군산 화산체의 최하부에 위치하고 있어 '하부화산쇄설층(Lower Volcaniclastic Deposit)'으로 명명하였고 층의 구성물질과 접하고 있는 용암류(AB-I)와의 층서적 관계를 고려하여 LVD-I과 그 상부의 LVD-II로 구분하였다.

LVD-I은 육상 및 해양환경에서 퇴적된 재동 화산쇄설층과 현무암질 화산쇄설층, 그리고 이를 피복하

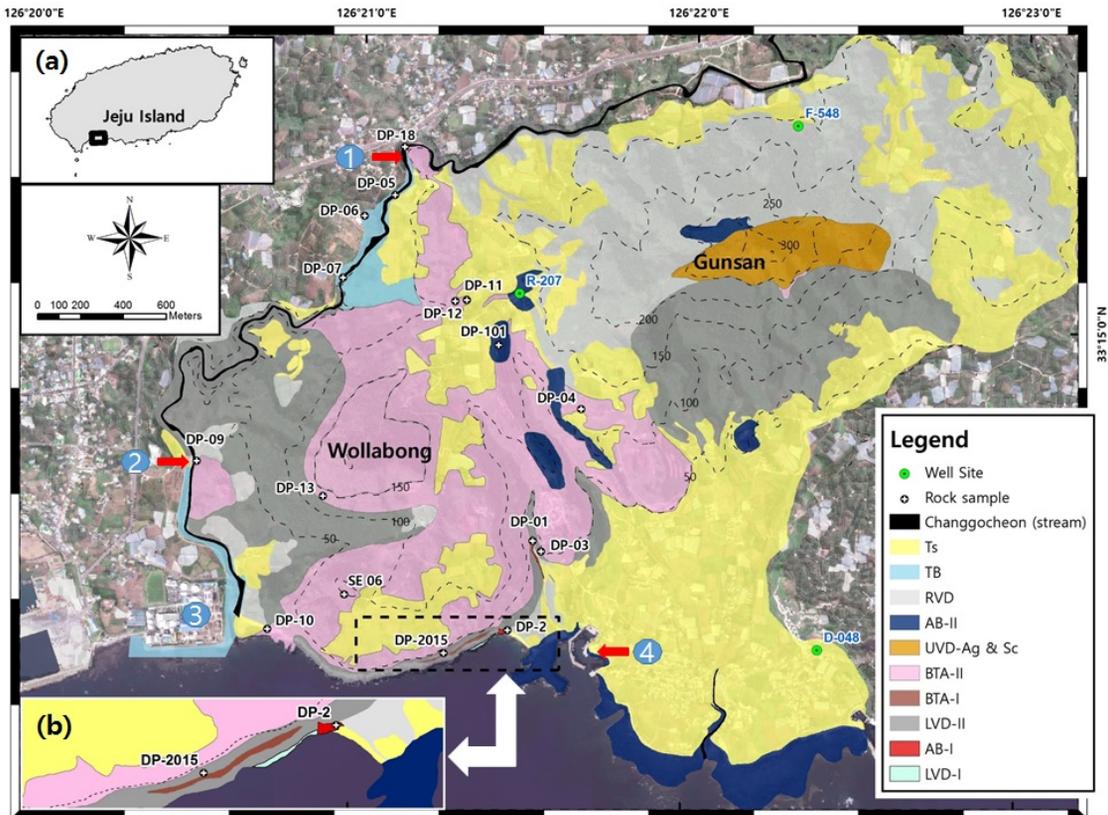


Fig. 2. The geologic map and sampling sites of the studied area, Jeju Island. (a) Index map, (b) Zoom in view of Bagsugijeong area. Abbreviations: LVD - Lower Volcaniclastic Deposit; AB - Alkali Basalt; BTA - Basaltic Trachyandesite, UVD-Ag & Sc - Upper Volcaniclastic Deposit-Agglomerate & Scoria; RVD - Reworked Volcaniclastic Deposit; TB - Trachybasalt; Ts - Top soil. Locations: ① Andeok valley, ② Gaekkuriminyo, ③ Hwasun Power Plant, ④ Daepyeong Port.

Table 2. Summary of stratigraphic units in the studied area, Jeju Island.

Stratigraphic Units		Main Features
Wollabong	Gunsan	
Ts	Ts	- Top soil (Ts) and used as agricultural land.
TB		- Trachybasalt (TB) in composition and porphyritic feldspar texture. - Distributed along the stream (Changgocheon) side and bottom from the south of Andeok Valley to the downstream.
RVD	RVD	- Reworked Volcaniclastic Deposit (RVD). - Distributed mostly in north & south slop of Gunsan and west of Wollabong.
	AB-II	- Alkali Basalt (AB) in composition and aphyric texture with scarce pyroxene phenocrysts. - Developed distinct spheroidal weathering structure. - Distributed near the summit of Gunsan, formed a low hilly terrain between Wollabong and Gunsan. - Distributed mainly at the coast of Daepyeong-ri.
	UVD-Ag & Sc	- Upper Volcaniclastic Deposit (UVD)-Aggregate (Ag) & Scoria (Sc). - Divided into welded scoria air fall deposits distributed mainly at the foot of Gunsan and welded spatter deposits distributed around the summit of Gunsan.
BTA-II	BTA-II	- Trachyandesite (TA) to Basaltic Trachyandesite (BTA) in composition with massive, aphyric texture. - Formed sharp boundary with LVD-II and developed columnar joints. - Distributed mostly in Wollabong area.
BTA-I		- Basaltic Trachyandesite (BTA) in composition with massive, aphyric texture. - Developed columnar joints and basal breccia (autobrecciation). - Bottom of flow composed of mixture with vesicular lava, scoria and volcanic bomb in ash matrix with a light gray color. - Exposed only at the Bottom of the southern clip of Wollabong.
LVD-II	LVD-II	- Lower Volcaniclastic Deposit-II (LVD-II). - The basal part contains a lot of trachytic blocks and shows a massive texture at east cost of Hwasun power plant. But contained subrounded AB-I blocks and a lot of augite phenocrysts in basal layer at Changgocheon. - Baked ash tuff layers in contact with BTA-II in reddish brown color. - The thickness is 40 m from the Changgocheon, but it gradually decreases to 5~10 m thick as it comes to the coastal cliff of Daepyeong-ri (southern part of Wollabong). - Also distributed relatively widely with a thickness of 20~30 m on the southern slope of Gunsan.
AB-I		- Alkali Basalt (AB) in composition with porphyritic olivine augite texture. - Developed planar joints and spheroidal weathering structure. - Baked top portion of LVD-I in reddish brown color.
LVD-I		- Lower Volcaniclastic Deposit-I (LVD-I). - Consist of massive lapilli tuff to volcanic breccia and reworked marine & nonmarine deposits. - Contained subrounded basaltic rock blocks and a lot of augite phenocrysts in lapilli tuff layers.

는 재동층(고토양)으로 이루어져 있다. 지표에 노출된 LVD-I의 규모는 폭 약 230 m, 두께 2~3 m 정도로 파악되며, 파도에 의해 침식된 부분도 존재하고 대부분 해수면 아래에 잠겨 있기 때문에 명확한 분포범위를 지질도에 기재하기 곤란하다(그림 2와 3).

육상 및 해양환경에서 재동된 화산쇄설층은 박수

기정 서단부 해수면 부근에 소규모로 노출되어 있는데, 괴상의 사질층과 자황색을 띠는 니질층으로 이루어져 있으며, 니질층 내에는 화산력 응회암이 불규칙적인 형태로 여러 겹 협재되어 있다. LVD-II와 접하는 경계면에는 층리가 심하게 교란된 구조(그림 4a)와 더불어 괴상의 사질층 내에는 생흔화석(그림

4c)도 발달한다.

현무암질 화산쇄설층은 입자 크기에 따라 화산력(혹은 화산암괴) 응회암과 응회암으로 구분된다. 특히, 화산력 응회암 내에는 다량의 휘석 결정편이 함유되어 있고 원마도가 양호한 크고 작은 현무암괴들이 포함되어 있다(그림 4e). 이들 현무암괴는 단사휘석 반정이 우세한 반상 조직을 이루며(그림 4f), 이러한 암석기재적 특징은 LVD-I 상부의 AB-I 용암류와 유사하다. 따라서 AB-I 용암류와 동질인 현무암질 마그마로부터 LVD-I의 분화시기 동안 형성된 것으

로 해석된다.

박수기정 하부에 AB-I 용암류와 접하는 LVD-I은 층리가 휘어지거나 주향과 경사가 급변하는 특징을 보이고 있어 수성화산체 분화구 인근에서 형성된 것으로 추정된다(그림 4d, 5a, 5b). 또한 용암류와의 접촉면은 약 1~2 m 두께의 적색 산화대가 발달하는데, 용암류의 열에 의해 것으로 추정된다(그림 5c). 용암류의 열에 의해 하부 층의 열 변질 현상은 제주도 타 지역이나 울릉도에서도 흔히 보고된다(예; Hwang *et al.*, 2011; Koh *et al.*, 2021).



Fig. 3. Photograph showing stratigraphic relationship and contacts along the outcrop of Bogsugijeong (seashore cliff in Daepyeongri). The abbreviations of stratigraphy are the same as in Figure 2.

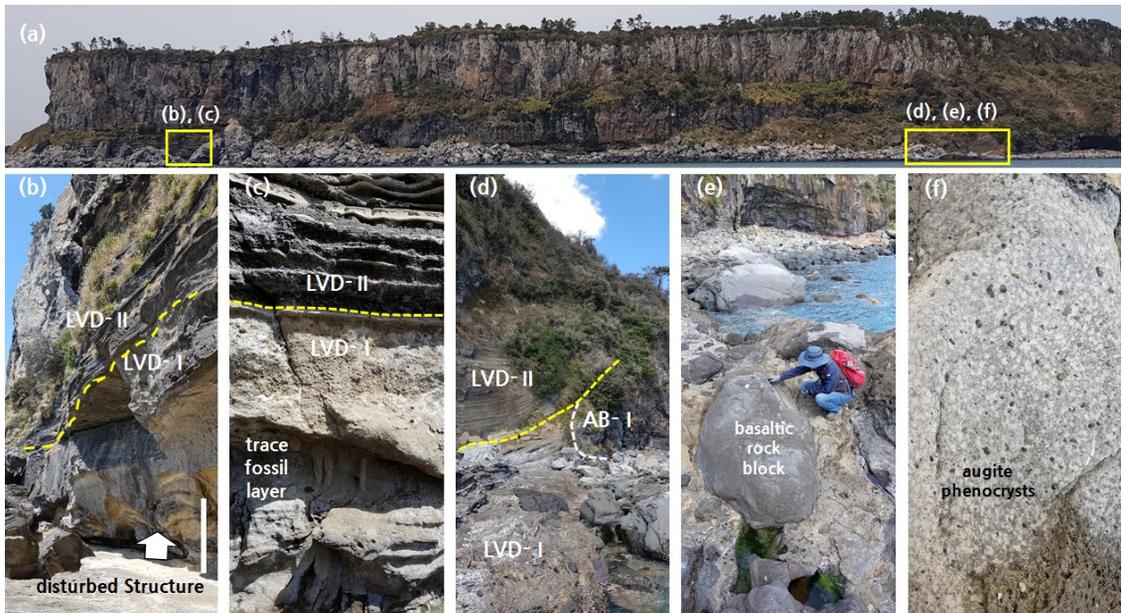


Fig. 4. Photographs of LVD-I. (a) General view of Bogsugijeong. (b) LVD-I with disturbed structure (white bar indicates 2 m high). (c) LVD-I with layer of trace fossils. (d) Contact between LVD-I, LVD-II, and AB-I. (e) LVD-I with basaltic lava blocks. (f) Zoom in view of lava block with abundant clinopyroxene (augite) phenocrysts with 1~2 cm long.

한편, LVD-I의 최상위 층으로 LVD-II와 경계를 이루는 재동층(토양층)은 약 20~30 cm의 두께를 이루며 연한 회색의 미고결 사질 이암층으로 부분적으로 풍화된 AB-I 암괴들을 포함한다. 이 층은 LVD-I와 AB-I의 분출이 종료된 이후 화산활동 휴지기 동안 형성된 층으로, 박수기정 일대에서만 확인되므로 LVD-I의 최상부 단위에 포함하였다.

4.1.2 알칼리현무암-I(AB-I)

AB-I 용암류는 대평 포구의 서쪽 '박수기정물(용천수)'을 중심으로 좌우 약 수십 m 구간, 높이 약 35 m 규모로 노출되어 있으며, 월라봉 남동측 계곡 바닥을 따라 북쪽으로 수백 m 가량 연장된다(그림 2). 서측으로는 LVD-I과 접하고, 동측으로는 LVD-II와 RVD에 의해 피복되어있다(그림 5a).

AB-I 용암류는 괴상의 암체를 이루고 있는데, 판상절리와 구상 풍화구조가 발달한다(그림 5d). 하부 층과 용암류의 경계는 현재 노출된 노두의 동측에서는 매우 예리한 경계를 보이지만(그림 5c) 서측으로 감에 따라 부분적으로 자파쇄각력화 작용으로 클링커가 발달하며 점이적 경계면이 발달한다(그림 5b).

AB-I 용암류는 특징적으로 2~3 mm 크기의 단사 휘석 반정 5% 이상과 소량의 감람석 반정을 포함한 반상감람석휘석현무암에 해당한다(그림 5e).

4.1.3 하부화산쇄설층-II(LVD-II)

LVD-II는 월라봉 북쪽 안덕계곡 하류 약 1 km 지점에서부터 반시계 방향으로 창고천을 따라 화순발전소 동측 해안을 거쳐 박수기정까지 약 3 km 구간에 노출되어 있으며, 월라봉 서-서남쪽 사면으로 연결된다. 또한, 월라봉과 군산 사이 옛 대평저수지 진입로 서측의 계곡 하단부를 따라서도 약 500 m 구간에 노출되며, 군산 남쪽 사면에도 분포한다(그림 2).

창고천을 따라 노출된 LVD-II는 유수침식에 의해 약 30~40 m 높이의 절벽을 이루는데(그림 6a), 기저부는 화산력 응회암으로 이루어져 있으나, 그 상부 대부분은 괴상의 화산력 응회암 및 응회암이다. 기저부의 화산력 응회암은 수 mm에서 수 cm 크기의 치밀질 조면암 각력이 다수 포함되지만, 구상 풍화 구조가 발달한 현무암질 암괴(그림 6b)와 고결된 응회암편도 소량 포함되어 있다. 한편, 화순발전소 동측 해안 및 월라봉 서측 사면에 노출된 화산력 응회

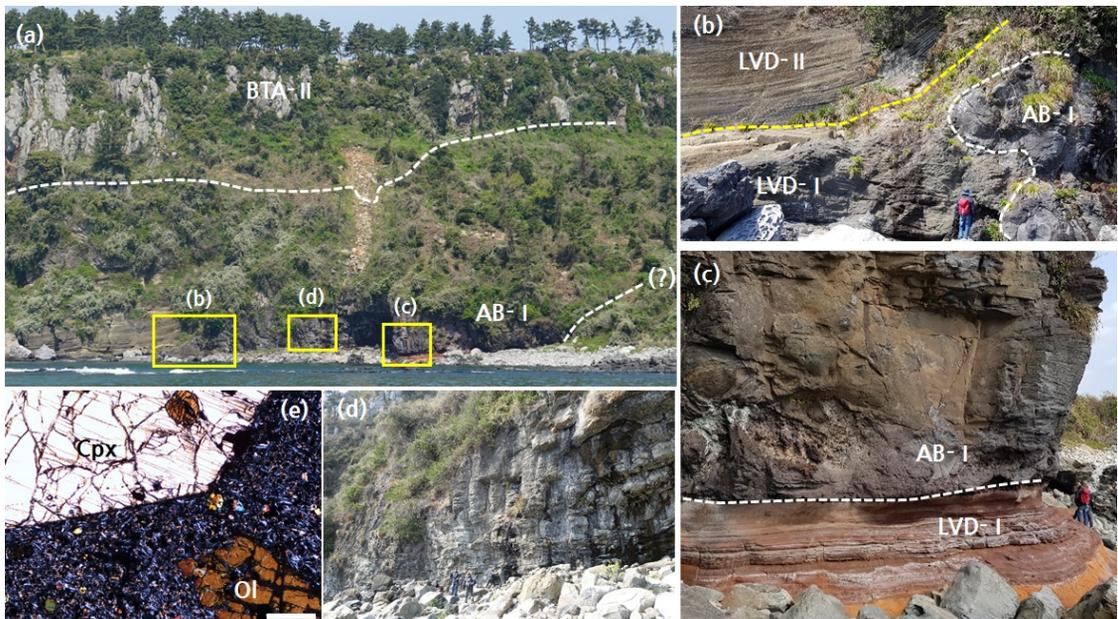


Fig. 5. Photographs of AB-I. (a) General view of Bagsugijeong. (b) Contacts between LVD-I, LVD-II, and AB-I. (c) Contact between LVD-I and AB-I. The uppermost part of the LVD-I is in reddish brown color due to presumed thermal alteration. (d) Lava flow unit with planar joints and spheroidal weathering. (e) Photomicrograph of AB-I (sample ID# DP-01). Under cross polarized light; scale bar 0.5 mm. Cpx - clinopyroxene (augite); Ol - olivine.

암에는 수 cm에서 수 십 cm 크기의 매우 치밀한 조면암질 각력들이 다량 포함되어 있으나(그림 6c), 현무암질 암편이나 암괴는 관찰되지 않는다.

월라봉 서-서남쪽 사면에는 LVD-II가 20~40 m 높이의 봉우리를 이루어 독립적으로 분포하는 곳이 최소 8군데 존재하는데, 이들이 퇴적된 이후 발생한 지속적인 화산활동에 의해 부분적으로 파괴되거나 분리되어 현재와 같이 분산 분포하는 것으로 추정된다(그림 2).

화순발전소 동측 해안부터 박수기정에 이르는 해안절벽에서 LVD-II는 BTA-I 및 BTA-II 용암류의 하위에 위치한다. 특히 해안절벽 하단부 노출지 서

편에서는 LVD-II는 BTA-II와 직접적으로 접하지만, 동편에서는 BTA-I이 이 두 지층 사이에 협재된다(그림 6d). 상위 용암류(BTA-II)와 접하는 경계면은 0.5~1 m 두께의 적색 산화대가 발달하는데, 용암류의 열에 의해 것으로 추정된다.

군산 지역의 LVD-II는 군산 남쪽 사면의 계곡 바닥과 능선을 따라 20~30 m 높이로 동-서 방향 약 1 km, 남-북 방향 약 700 m 범위로 분포한다(그림 2). 화산력 응회암이 주를 이루며, 괴상의 응회암도 국지적으로 관찰된다(그림 6e, 6f). 특히, 화산력 응회암 내에는 2~5 mm 크기의 휘석 결정편을 다량 포함한 층준이 확인되지만, 조면암질 각력은 발견되지 않는다.



Fig. 6. Photographs of LVD-II. (a) LVD-II exposed along stream (Changgocheon) in the west of Wollabong. (b) AB-I block in the basal part of LVD-II (from photo a). (c) Trachytic blocks (yellow arrows) in the basal part of LVD-II along the shore of Hwasun Power Plant. (d) Contacts between LVD-II, BTA-I, and BTA-II. (e, f) LVD-II at the southern slope of Gunsan.

군산에서는 침식과 후기 화산분출물(BTA-I, UVD-Ag & Sc, AB-II)에 의해 피복되어 형성 당시의 형태 추적이 어렵지만, 층의 경사가 전반적으로 정상부의 남쪽인 대평리 해안 쪽으로 기울어져 있는 것으로 보아 군산 정상부 쪽에 분화구가 존재했던 것으로 추정된다.

전체적으로 LVD-II는 월라봉 화산체를 U자 모양으로 둘러싼 형태를 취하고 있으나, 월라봉 북쪽 사면에는 노출되어 있지 않다. 노출된 LVD-II의 두께는 월라봉 서쪽 창고천에서는 40여 m에 이르지만, 화순발전소 동측에서 약 20 m이고, 박수기정물 부근에서는 10 m 정도이다.

상위 암석과의 접촉 관계를 보면, LVD-II는 창고천 서측에서는 TB 용암류(반상장석현무암류)에 의해, 박수기정에서는 BTA-I 및 BTA-II 용암류에 의해 피복되며, 박수기정물 주변에서는 AB-I 용암류를 피복한다(그림 2, 3). LVD-II는 위치에 따라 암상의 변화가 큰 편인데, 수평 혹은 저각도의 (사)층리가 발달한 경우, 괴상의 특징을 보이는 경우 그리고 상부 용암류의 유동과 하중에 의한 비틀리거나 휘어진 구조 등이 관찰된다(그림 4d, 5b). 또한, LVD-II 최상부 응회암은 이를 피복하는 BTA-II 용암류의 열로 인하여 접촉면에서 적색으로 변질되었다. 이 적색 응회암층의 고도는 최저 6 m에서 최대 123 m로서 약 120 m의 고도 차이를 나타내는데, 계곡에서는 낮은 고도에 위치하는 반면 계곡 상부와 군산 쪽 능

선에서는 훨씬 높은 고도에 위치한다. 이 같은 LVD-II 최상부면의 고도 차이는 화산체가 형성된 이후 발생한 화산분화 시 차별적인 블록형 단층운동이 수반되었음을 의미하며, 주로 월라봉 동쪽에 위치한 두 군데 계곡을 따라 일어난 것으로 해석된다. 따라서 이들 계곡은 1차적으로 단층운동에 의해 생겨났고, 그 후 유수 침식에 의해 골짜기가 더 깊어진 것으로 추정된다.

4.1.4 현무암질조면안산암-I(BTA-I)

BTA-I 용암류는 폭 약 440 m, 두께 10~30 m로 박수기정 해안절벽에만 노출되어 있다(그림 3). 암질이 매우 치밀 견고하고, 비교적 폭이 좁은 주상절리가 발달하며, 비반상 조직(aphyric texture)을 보인다.

BTA-I 용암류는 LVD-II와 BTA-II 용암류 사이에 위치하고 LVD-II의 층리 방향에 나란하게 정치되어 있어 암상(Sill) 관입체로 보일 수 있으나(그림 3), 좌우측 및 하부 접촉면에는 관입을 뒷받침할 만한 현상은 찾아보기 힘들다. 특히, BTA-I 용암류와 LVD-II의 좌측 접촉면에는 화산탄을 비롯한 분석 암괴들과 다공질 및 치밀질의 BTA-I 각력들이 분포하여 관입 경계라기 보다 용암류 경계의 특징을 보인다(그림 7). 또한, LVD-II와 접하는 일부 구간 바닥면에는 1 m 내외 두께로 분석과 다공질 및 치밀질 암괴들이 기질(화산재)에 엉겨 붙은 각력질 집괴암층과 유사한 암상을 나타낸다(그림 7b, 7c). 이 같은 양상은 동측



Fig. 7. Photographs of BTA-I. (a) General view of Bagsugijeong. (b) Aggregates including volcanic bombs and blocks in the western margin of BTA-I. (c) Aggregates composed of scoria, vesicular and massive trachytic blocks in the lower portion of BTA-I.

경계면에서도 동일하게 관찰된다. Kim *et al.* (2019) 은 BTA-I의 이러한 특징을 바탕으로 페퍼라이트로 보고한 바 있다. BTA-I 용암류와 LVD-II의 좌우측 및 바닥 접촉면의 양상으로 볼 때, LVD-II 분화활동 말기에 화산탄과 분석을 분출시킨 소규모의 마그마 성 분화가 BTA-I 용암분출과 동시에 진행된 것으로 보인다. 또한, 노출된 BTA-I 용암류의 두께가 가운데 부분은 두텁고 동·서쪽의 가장자리로 가면서 얇아지는 양상으로 나타나는 것으로 미루어, 용암류의 화구는 현 월라봉 방향에 있었던 것으로 추정된다. 좌우 접촉면과 바닥면의 각력질 집괴암층은 BTA-I 용암류에 앞서 분출된 화산탄을 포함한 분석 암괴위를 BTA-I 용암류가 흘러가면서 LVD-II 상부면의 퇴적물과 뒤섞임과 동시에 바닥면의 자파쇄각력화

작용으로부터 떨어져 나온 암괴들과 혼합되면서 국지적으로 형성된 층으로 해석된다.

4.1.5 현무암질조면안산암-II (BTA-II)

BTA-II 용암류는 BTA-I 용암류와 마찬가지로 치밀 견고하고 비반상 조직(그림 8f)을 지니고, 박수기 정 해안절벽 상단부를 비롯하여 화순발전소 동측 해안가, 개끄리민교 동측, 안덕계곡(그림 8d), 월라봉 동쪽 계곡 상단부 등에 20~30 m 두께로 분포하며, BTA-I 용암류에 비해 넓은 폭의 주상절리가 발달한다. 또한, 월라봉 및 군산 남측사면 8부 능선에도 분포한다(그림 8b, 8c).

월라봉 정상 부근에서 BTA-II 용암류는 분화구를 반달 형태로 감싸면서 8부 능선의 좌우로 약 800 m

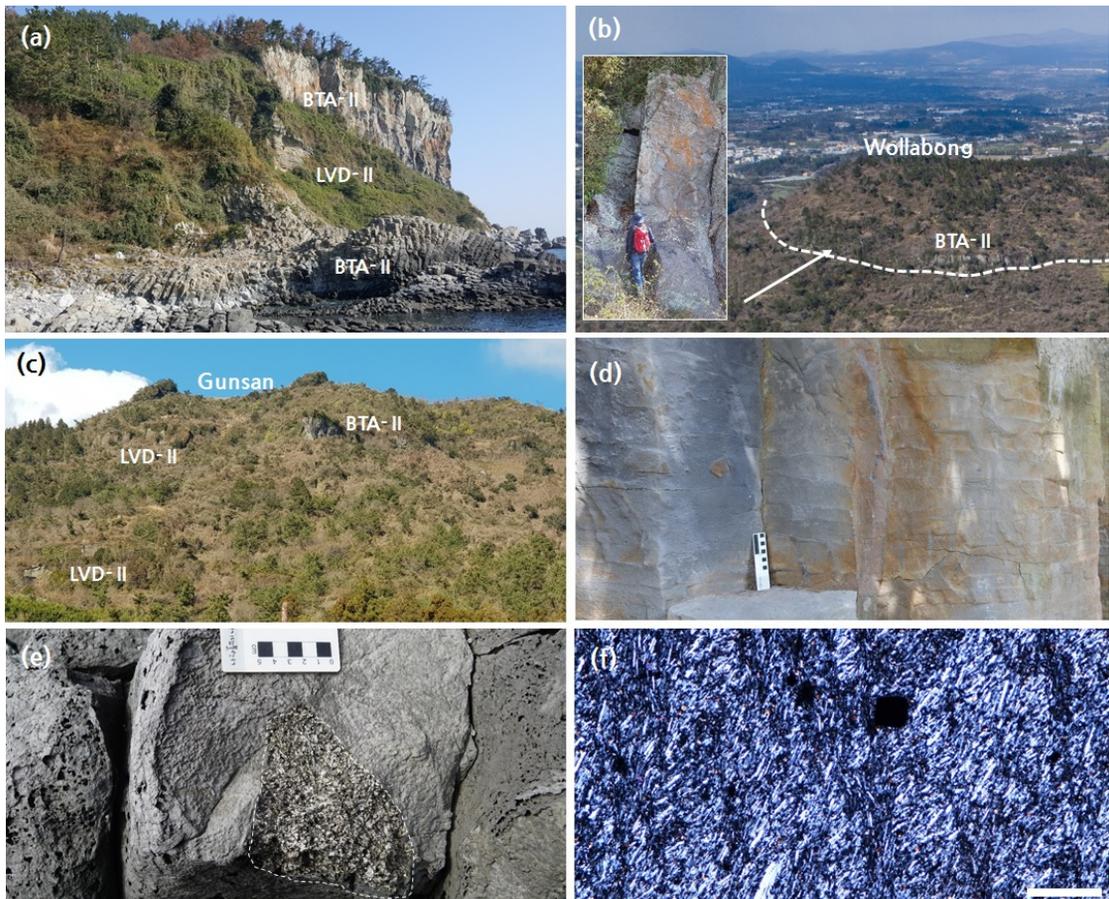


Fig. 8. Photographs of BTA-II. (a) Columnar joints along the seashore at the east of Hwasun Power Plant. (b) Near the summit of Wollabong. (c) Near the summit of Gunsan. (d) Chisel marks on columnar joints in Andeok valley. (e) Granite xenolith (in dotted line) in BTA-II. (f) Photomicrograph of BTA-II (# DP-3). Under cross polarized light; scale bar 0.5 mm.

연장된다. BTA-II 용암류는 노출면의 양쪽 가장자리로 가면서 그 두께는 좁아지고, 하부의 LVD-II와 접하는 부분에서는 BTA-II 용암류가 파쇄된 암괴상으로 분포한다. 이러한 점으로 미루어 윌라봉 화산체의 분화구는 현무암질 조면안산암이 용암돔을 이루었다가 이후 최종 분화 시 용암돔이 파괴되어 오늘날 잔존체만 남아 있는 것으로 추정된다.

윌라봉 분화구에서 용암돔을 깨고 분출한 쿨리(Coulee) 형태의 BTA-II 용암류는 크게 네 방향으로 흘렀을 것으로 추정된다. 첫 번째 흐름은 안덕계곡 방향의 북쪽으로, 두 번째 흐름은 대평리 해안절벽 방향의 남쪽으로, 셋째 및 넷째 흐름은 윌라봉과 군산 사이 방향이다. 화산분화 시 비교적 점성이 높은 중성 용암류의 쿨리 흐름은 테레리페섬의 Montaña de Guaza의 조면암 용암돔(Troll and Carracedo, 2016)과 하와이섬의 Puu Anahulu 용암류(예; Cousens *et al.*, 2003)에서 그 예를 찾을 수 있다.

화순발전소 동측 해안가에는 LVD-II를 밀치고 흘러나온 BTA-II 용암류의 선단부가 분포한다(그림 8a). 비교적 절리면의 폭이 좁은 주상절리대가 발달하며, 드물게 화강암력을 포획하고 있는데(그림 8e), 최근 연구에 따르면 백악기 화강암에 해당한다(Marsden *et al.*, 2021).

한편, 윌라봉 정상에서 서쪽으로 약 600 m 떨어진 개끄리민교 동측에는 높이 40 m, 폭 300 m의 소규모 돔을 이룬다(그림 2).

군산 지역의 BTA-II 용암류는 군산 남쪽 사면 8부 능선에 연장 250 m, 최대 높이 10 m 가량 소규모로 분포할 뿐 아니라, 군산 북동쪽 해발 약 245 m 지점에도 매우 작은 규모로 노출되어 있는데, 이 용암류는 군산에서 분출한 소규모의 용암 로브(lobe)이거나 혹은 피더 암맥(feeder dike)의 잔류지형으로서, 드물게 약 10 cm 전후의 화강암편을 포획하고 있다.

4.1.6 상부화산쇄설층- 집괴암 및 분석(UVD-Ag & Sc)

UVD-Ag & Sc는 군산 정상부 일대와 기슭에만 분포한다(그림 2). 두 군데 돌출부를 비롯한 군산 정상부에는 대체로 짙은 적색을 띠는 분석과 스페터로 이루어진 집괴암층이 분포하며, 비교적 단단하게 엉겨 붙어 고결도가 높은 편이다(그림 9a). 또한, 일부 집괴암층에는 부분적으로 클라스토제닉(clastogenic) 용암도 관찰되며, '구시물(용천수)'도 위치한다. 정

상부에만 제한적으로 분포하는 집괴암층과 달리, 군산 기슭과 윌라봉-군산 사이 지역에는 황갈색을 띠는 낙하(air-fall) 분석층이 비교적 두텁게 분포한다(그림 9b).

UVD-Ag & Sc는 군산 화산체의 재활성(rejuvenated)된 화산활동의 초기 분출된 물질에 해당하며 이 화산활동의 중심인 분화구는 정상부에 위치해 있었을 것으로 추정될 뿐 그 흔적을 찾을 수 없다.

4.1.7 알칼리현무암-II(AB-II)

AB-II 용암류는 군산 정상 서북쪽 봉우리와 남쪽 기슭, 윌라봉-군산 사이 계곡의 능선부, 대평 포구 및 해안가를 따라 비교적 넓은 지역에 분포하며, 윌라봉과 군산 사이에 작고 낮은 언덕 지형을 이룬다(그

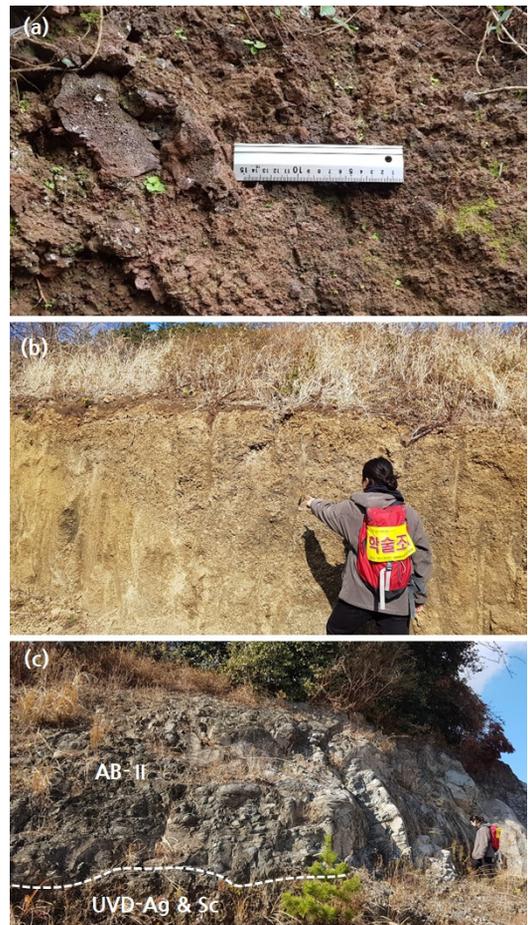


Fig. 9. Photographs of UVD-Ag & Sc. (a) Aggregates. (b) Air-fall scoria. (c) Contact between UVD-Ag & Sc and AB-II.

림 2). AB-II 용암류가 UVD-Ag & Sc를 피복하는 노두는 월라봉-군산 사이 계곡의 능선부, 대평 포구 북쪽 계곡, 군산 기슭 등 여러 곳에서 확인된다(그림 9c). 판상절리와 풍화가 많이 진행된 상태로 구상 구조가 발달한다(그림 10a, 10c). 특히, 월라봉과 군산 사이 및 대평 포구 주변에서 양파형의 핵석 조직을 쉽게 관찰할 수 있다. 한편, 대평리 해안 일대(그림 10b)에서는 다양한 형태의 풍화 조직과 함께 용암류의 유동 당시 퇴적층과의 혼합에 의해 만들어진 다양한 조직이 관찰된다.

AB-II 용암류는 1 mm 미만의 단사휘석 반정(그림 10d)이 매우 드물게 관찰되는 산점 반상(반정 함량이 1 %에서 5 %미만) 내지 이러한 반정이 없는 비반상 조직으로 산출된다.

4.1.8 재동화산쇄설층(RVD)

RVD는 월라봉 및 군산의 화산활동이 종료된 후 오늘날까지 남-북 사면을 따라 발생한 광범위한 삭박 및 침식작용에 의해 화산쇄설층이 붕괴되거나 화

산쇄설물이 재동되어 지표면을 피복하고 있는 층을 말한다(그림 2). 특히, 이 같은 삭박 및 침식에 의해 남-북 사면에는 깊은 골짜기가 생겨났고, 북사면 기슭에는 수십 미터 높이의 언덕지형들도 형성되었다. RVD는 분석, AB-II 암괴, LVD-II에서 떨어져 나온 크고 작은 퇴적층 암괴 등이 뒤섞여 분급이 매우 불량한 편이다. 특히, 수 미터 크기의 AB-II 전석들도 포함되어 있는 것으로 미루어 볼 때, RVD는 화산체가 부분적으로 붕괴하여 만들어진 토석류 기원의 퇴적층(debris flow deposit)으로 해석된다. 한편, 군산 북쪽 사면 기슭에 위치한 F-548 관정의 지질주상도에 의하면, 이 층은 지표(해발 160 m)에서부터 25 m까지 135 m 두께로 분포하고, 그 하위에 2매의 휘석현무암(AB-II 용암류로 해석됨)이 23 m 두께로 LVD-II를 피복한다.

4.1.9 조면현무암(TB)

TB 용암류는 아아 용암류로서, 안덕계곡 남쪽 서안골로 다리를 따라 월라봉 좌측을 감싸며 창고천

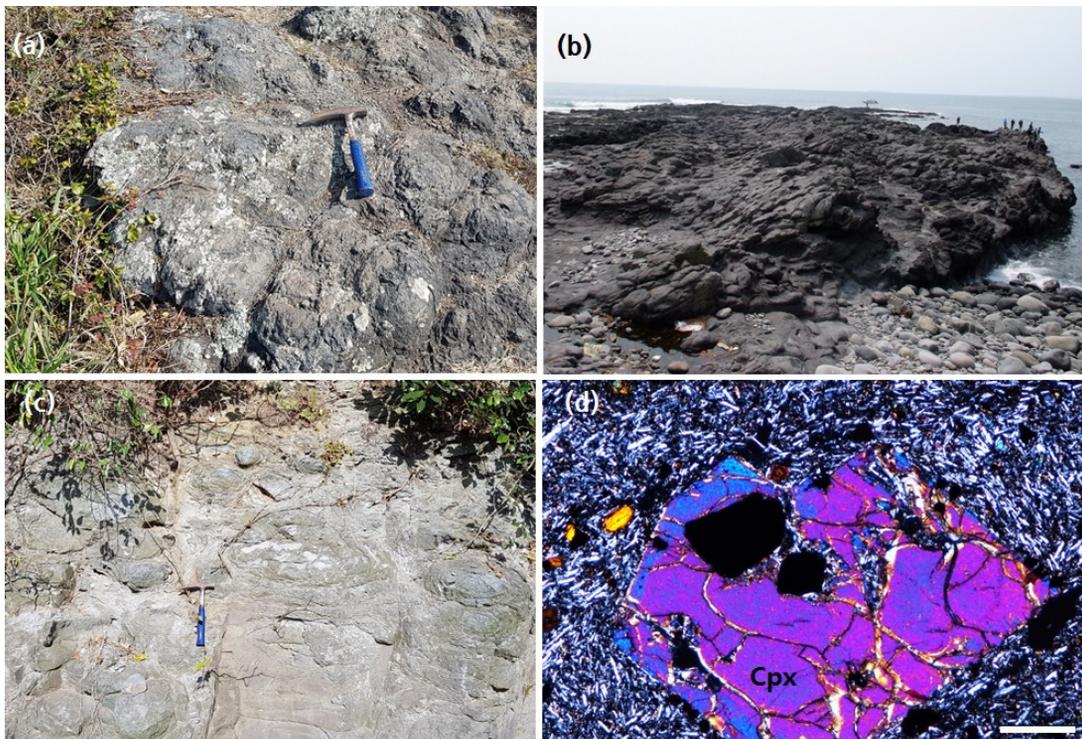


Fig. 10. Photographs of AB-II. (a) Spheroidal weathering texture. (b) Lava flows along the coast of Daepyeong-ri. (c) Spheroidal weathering texture (# DP-101). (d) Photomicrograph of AB-II (# DP-101). Under cross polarized light; scale bar 0.5 mm. Cpx - clinopyroxene (augite).

하류까지 약 2.7 km 연장된다(그림 2, 11a, 11b). TB 용암류는 LVD-II, BTA-II 용암류, RVD와 접한다. 주로 반상장석현무암류의 특징을 지니며(그림 11c), 간혹 단사휘석 반정을 포함하기도 한다.

4.1.10 토양층(Ts)

Ts는 주로 RVD 혹은 BTA-II 용암류의 상부가 풍화되어 토양화된 것을 의미하지만, 화산쇄설물의 걸부분을 제거한 후 인위적인 토지 이용으로 부분적인 성토 및 객토가 이루어진 토양도 포함한다. 따라서 화산쇄설층들이 풍화, 침식, 이동하여 퇴적된 RVD와는 구분된다. 이 Ts는 근산 남쪽과 동쪽, 박수기정 상부 평탄면, 월라봉 북동쪽 등 농경지로 이용되고



Fig. 11. Photographs of TB. (a) Outcrop along Changgocheon (# DP-04). (b) Outcrop along Changgocheon (# DP-06). (c) Photomicrograph of TB (# DP-06). Under cross polarized light; scale bar 0.5 mm. Pl - plagioclase

있다(그림 2).

4.2 용암류의 지화학적 특징

월라봉-근산 화산체를 구성하는 용암류와 이를 피복하는 반상장석현무암류에 대한 전암 주성분 및 미량성분 분석 결과는 표 3, 표 4와 같다.

연구 지역에 분포하는 용암류는 SiO_2 44.1~57.7 wt%, $\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}$ 4.4~9.1 wt%를 지닌 알칼리 계열의 알칼리 현무암-조면현무암-현무암질 조면안산암-조면안산암의 성분에 해당한다. 특히 월라봉-근산 화산체를 구성하는 용암류는 알칼리 현무암(혹은 바사나이트)과 현무암질 조면안산암 및 조면안산암의 조성을 지닌다. AB-I 용암류는 SiO_2 함량 44.1~44.9 wt%, 알칼리 함량 4.4~4.5 wt%의 범위를 가지며, 알칼리 현무암 내지 바사나이트(basanite)에 해당한다. BTA-II 용암류는 SiO_2 함량 50.0~57.7 wt%, 알칼리 함량 6.5~9.1 wt%의 범위를 가지며, 현무암질 조면안산암-조면안산암에 해당한다. BTA-II 중 조면안산암은 월라봉 정상부 일대 돛 혹은 암상의 조성이다. AB-II 용암류는 SiO_2 함량 44.9 wt%, 알칼리 함량 4.6 wt%의 알칼리 현무암에 해당한다. 한편 TB 용암류는 SiO_2 함량 48.5~50.4 wt%, 알칼리 함량 4.8~5.4 wt%의 범위의 알칼리 현무암-조면현무암에 해당하며 주로 조면현무암 조성이다.

Tatsumi *et al.* (2005)에 의해 $\text{SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$ 그림(그림 13)을 이용하여 제주도의 알칼리 용암류를 고알루미나 알칼리암류(high alumina alkalic rocks; HAA)와 저알루미나 알칼리암류(low alumina alkalic rocks; LAA)로 구분한 이후; Brenna *et al.* (2012a, 2012b, 2015a)과 Kim *et al.* (2019)이 화산활동시기에 따른 알칼리 용암류의 암석화학적 특징을 기술하는데 사용되었다. 화산활동시기로 볼 때 HAA 용암류는 약 500 ka 이전 서귀포층 퇴적동시기 화산활동기에, LAA 용암류는 약 500 ka 이후 서귀포층 퇴적후 화산활동기에 분출한 용암류에 해당한다(Koh *et al.*, 2013; Brenna *et al.*, 2015a). 이 연구에서 월라봉-근산 화산체와 인접 지역 용암류는 암석성분 자료와 함께 Ar-Ar 연대 자료를 같이 포함하고 있기 때문에 이전 연구자가 정의한 HAA와 LAA 용암류의 구분선과 그 특징을 객관적으로 비교할 수 있다. 우선 이 연구에 사용된 용암류의 조성 변화는 HAA와 LAA 용암류의 구분선(Brenna *et al.*, 2012b)에 따라 분출시기 별로 HAA와

Table 3. Major element abundances (wt%) of volcanic rocks in the studied area, Jeju Island.

ID	DP-1	DP-2	DP-3	DP-4	DP-5	DP-6	DP-7	DP-9	DP-10	DP-11	DP-12	DP-13	DP-18	DP-101	SE06*	Hoisu-1**
Rock Name	AB	AB	BTA	BTA	AB	TB	TB	BTA	BTA	BTA	BTA	TA	BTA	AB	TA	TB
SiO ₂	44.87	44.14	51.86	52.45	48.55	50.06	50.36	50.03	49.95	50.75	50.77	57.66	52.06	44.87	56.17	46.86
TiO ₂	3.02	3.18	1.94	1.75	2.95	3.12	3.00	2.16	2.24	2.06	2.06	1.08	1.87	3.91	1.21	2.82
Al ₂ O ₃	15.31	14.73	18.79	18.71	17.87	16.23	16.17	18.36	18.29	18.74	18.73	19.13	18.79	16.40	18.94	17.02
FeO [†]	11.71	12.03	8.82	8.35	11.64	12.53	12.19	10.17	9.68	9.40	9.35	5.76	8.68	13.26	6.09	11.76
MnO	0.19	0.18	0.24	0.23	0.15	0.17	0.16	0.24	0.23	0.23	0.24	0.25	0.23	0.20	0.25	0.19
MgO	7.96	8.86	2.26	2.20	3.91	4.12	3.96	2.45	2.76	2.21	2.29	0.90	2.01	5.25	1.18	4.66
CaO	10.69	10.70	7.77	7.58	8.06	7.70	7.68	8.24	8.36	7.69	7.84	4.93	7.47	9.23	5.64	9.13
Na ₂ O	3.52	3.70	4.51	4.51	3.62	3.93	3.87	4.29	4.27	4.48	4.42	5.84	4.57	3.55	5.54	3.15
K ₂ O	0.84	0.77	2.51	2.58	1.21	1.46	1.51	2.18	2.33	2.43	2.41	3.29	2.50	1.03	3.1	1.98
P ₂ O ₅	0.56	0.56	0.88	0.78	0.56	0.67	0.64	1.02	1.07	0.96	1.00	0.33	0.83	0.85	0.397	0.72
LOI	0.77	0.50	0.12	0.34	0.96	0.00	0.25	0.59	0.27	0.39	0.27	0.37	0.30	1.07	N.A	N.A
Total	99.45	99.36	99.70	99.46	99.47	99.99	99.80	99.74	99.44	99.35	99.37	99.54	99.31	99.64	98.52	98.29

Total FeO as FeO[†]. Analyzed by XRF at at Oregon State University.

Abbreviations: AB-Alkali basalt, TB-Trachybasalt, BTA-Basaltic trachyandesite, TA-Trachyandesite.

LOI-loss on ignition; *data from Koh *et al.* (2013); ** unpublished data (358 m below ground surface).

Table 4. Trace element abundances (ppm) of volcanic rocks in the studied area, Jeju Island.

ID	DP-1	DP-2	DP-3	DP-4	DP-5	DP-6	DP-7	DP-9	DP-10	DP-11	DP-12	DP-13	DP-18	DP-101	SE06*	Hoisu-1**
Ni	82	93	0	0	22	12	12	0	0	0	0	0	0	20	0	12
Cr	171	213	0	0	14	1	2	0	0	0	0	1	0	13	2	1
Sc	32	35	8	7	17	18	17	9	9	8	7	3	7	20	3	17
V	318	326	74	64	200	208	205	93	100	84	84	22	69	241	23	243
Ba	592	550	733	712	407	434	441	731	674	727	733	1014	757	602	948	600
Rb	76	14	71	69	18	27	36	42	59	59	61	105	59	86	98	57
Sr	741	677	1027	1018	605	551	558	1009	994	1019	1018	974	1018	1073	1020	797
Zr	282	260	409	390	209	241	231	382	368	407	399	562	419	267	535	333
Y	30	29	38	36	25	30	30	36	38	38	39	50	39	33	43	34
Nb	59.5	55.5	80.5	77.0	38.5	44.1	42.1	73.7	74.3	81.2	79.7	110.3	81.8	59.4	102.9	66.6
Ga	21	20	23	23	23	24	24	22	23	23	23	23	22	20	23	25
Cu	52	57	4	3	37	34	34	5	5	5	4	2	4	28	1	25
Zn	102	97	132	128	123	142	138	130	130	131	131	135	131	111	140	131
La	51	45	70	67	30	37	36	61	62	68	66	100	70	51	88	55
Ce	101	88	138	131	60	71	66	124	130	134	134	171	138	106	161	108
Th	8	7	9	9	5	6	6	9	9	9	9	14	9	7	13	9
Nd	44	41	62	61	30	35	34	57	60	64	62	70	63	53	66	51

Analyzed by XRF at Oregon State University.

*data from Koh *et al.* (2013); **unpublished data (358 m below ground surface).

LAA의 영역으로 구분된다(그림 13). 그러나, 반상장석현무암류(TB) 및 교래리 시추코어 용암류의 일부는 500 ka 이후에 분출한 용암류임에도 불구하고 HAA 영역에 접시된다. 따라서 향후 HAA와 LAA

용암류에 대한 지화학적 특징과 분출연대 관계에 대해 추가적인 연구가 필요하리라 여겨진다.

용암류의 주성분원소 및 호정적 미량원소 변화 특징은 MgO 성분을 분화 지수(differentiation index)

로 하여 변화 경향을 해석하였다(그림 14, 15). 연구 지역의 용암류는 MgO (8.9~0.9 wt%) 함량이 감소함에 따라, CaO (10.7~4.9 wt%)의 함량은 꾸준히 감소

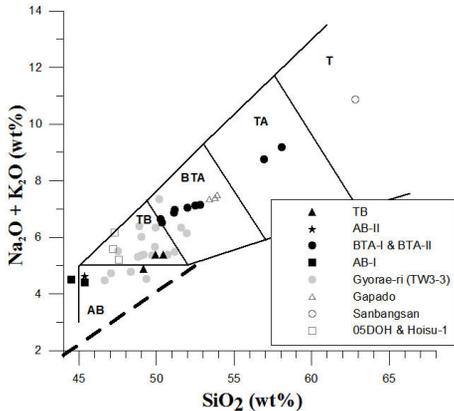


Fig. 12. (Na_2O+K_2O) (wt%) vs. SiO_2 (wt%) plot of the volcanic rocks in the studied area, Jeju Island. The fields show rock nomenclature schemes of Le Maitre *et al.* (2002) with thick dashed line from Macdonald and Katura (1964), dividing alkalic rocks from sub-alkalic rocks. Abbreviation: AB - alkali basalt; TB - trachybasalt; BTA - basaltic trachyandesite; TA - trachyandesite, T - trachyte. Additional data for 05DOH borehole cores from Koh and Park, 2010b, for Gapado and Sanbongsan from Koh and Park, 2010a, for Hoisu-1 borehole from unpublished data (see Table 3, 4 and 5); and for Gyoraeri Test Well 3-3 from unpublished data (*paper in preparation*).

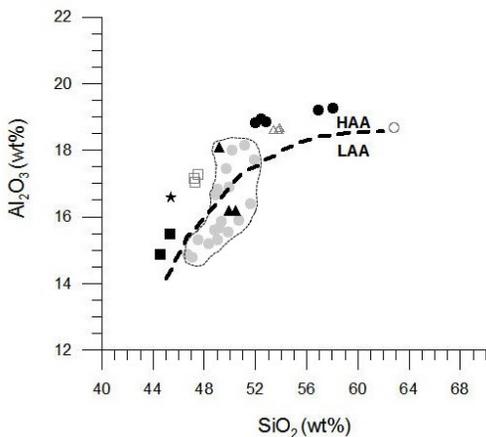


Fig. 13. Al_2O_3 (wt%) vs. SiO_2 (wt%) plot of the volcanic rocks in the studied area, Jeju Island. The symbol is the same as in Figure 12. The thick dashed line from Brenna *et al.* (2012b) is dividing HAA (high-Al alkali) from LAA (low-Al alkali). Dotted area in gray indicates rocks with Ar-Ar ages of younger than 500 ka.

하고, TiO_2 (3.9~1.1 wt%)와 FeO^t (13.3~5.8 wt%)는 거의 일정하다가 MgO 4.0 wt% 이후 감소한다. 반면 SiO_2 (44.1~57.7 wt%), Al_2O_3 (14.7~19.1 wt%), Na_2O (3.5~5.8 wt%), K_2O (0.8~3.3 wt%) 함량은 증가한다. P_2O_5 (0.3~1.1 wt%)함량은 MgO 성분의 감소됨에 따라 증가하다가, MgO 2.0 wt% 이후 감소한다. 한편 Ni (93~0 ppm), Cr (213~0 ppm), Sc (35~3 ppm), V (326~22 ppm)의 함량은 감소한다(그림 15). 이는 연구 지역 용암류의 성분 분화 과정이 주로 마그마 방(chamber) 혹은 화도(conduit) 내에서 감람석과 단사휘석, 사장석, Fe-Ti 산화광물 및 인회석의 정출로 인해 영향 받았음을 지시한다. Nb 함량 변화에 대한 불호정적 (incompatible) 원소의 변화 경향(그림 16)은 Nb 함량(39~110 ppm)이 증가함에 따라 Ba (387~1014 ppm), Zr (195~562 ppm), Y (25~50 ppm), Ce (60~171 ppm)은 정(+)의 증가 경향을 지닌다. 한편, Rb (14~105 ppm)

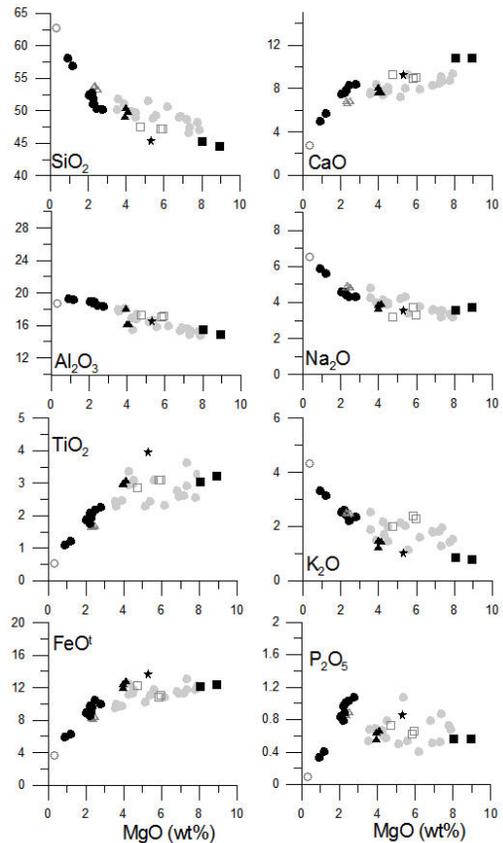


Fig. 14. MgO (wt%) vs. major oxides (wt%) variation diagram of the volcanic rocks in the studied area, Jeju Island. The symbol is the same as in Figure 12.

은 정(+)의 증가 경향을 지니지만 다소 분산되어 점 시되며, Sr (551~1073 ppm)은 인회석이 정출이 주를 이루는 조면안산암에서 감소한다.

연구 지역 및 인용 지역 용암류의 주성분원소 및

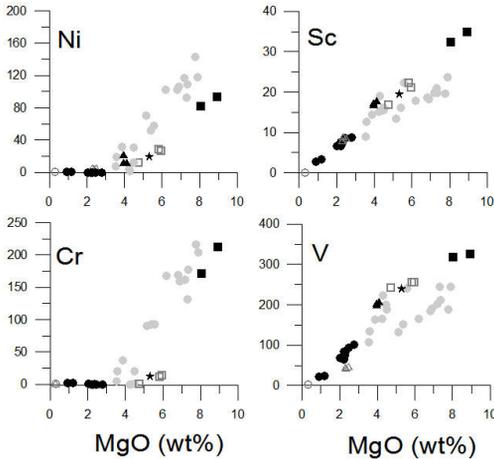


Fig. 15. MgO (wt%) vs. compatible trace elements (ppm) variation diagram of the volcanic rocks in the studied area, Jeju Island. The symbol is the same as in Figure 12.

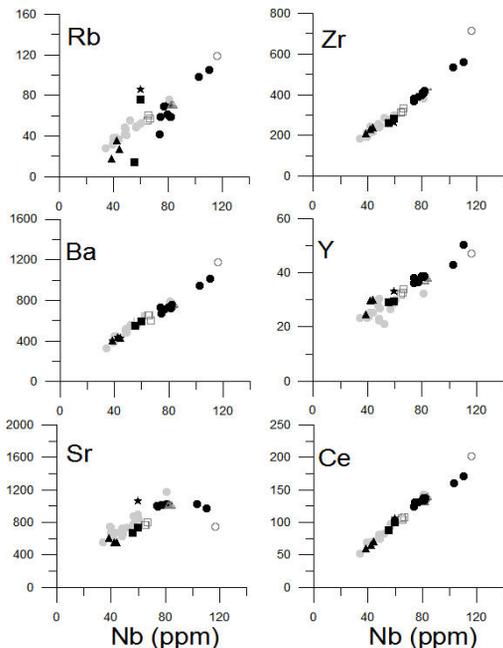


Fig. 16. Nb (ppm) vs. incompatible trace elements (ppm) variation diagram of the volcanic rocks in the studied area, Jeju Island. The symbol is the same as in Figure 12.

불호정적 미량원소 변화 특징은 HAA와 LAA 용암류의 구분에 따른 상관관계가 확연하게 보이지 않는데, 이러한 점은 Kim *et al.* (2019)의 결과와 유사하다. 그럼에도 불구하고 호정적 미량원소인 Ni, Cr, Sc, V의 변화 경향이 HAA와 LAA 용암류가 서로 차이가 나는 것은 분별결정화 작용 동안 주요 조암광물의 정출 비율이 서로 달랐으며, 이는 마그마 방 혹은 화도에서의 분화 환경이 달랐음을 유추할 수 있다 (Brenna *et al.*, 2015a).

4.3 용암류의 Ar-Ar 연대

Ar-Ar 연대 분석결과(표 5) 중 일부 시료에 대한 플래토 연대는 그림 17에 나타내었다. AB-I 용암류의 917.7 ± 23.2 ka ~ 915.6 ± 11.5 ka 에서부터 월라봉-군산 화산체를 둘러싸는 TB 용암류의 116.1 ± 8.7 ka ~ 108.6 ± 3.5 ka까지 연대자료를 얻었다.

AB-I 용암류의 분출연대(약 920 ka)는 그 동안 서귀포 중심지 일원의 시추공에서 회수한 시추코어 시료에서만 보고된 바가 있었으나(Koh and Park, 2010b; Koh *et al.*, 2013), 이 시기의 지표에 노출된 용암류에서 이 연대가 보고된 것은 이 연구가 최초이다. AB-II 용암류의 분출연대(약 530 ka)는 이 시기의 현무암질 용암류가 시추코어에서 대부분 서귀포층에 협재하여 분포하고 있는 것(Koh *et al.*, 2013)과 달리 화산쇄설층을 뒤덮고 육상에 노출된 상태로 분포하고 있음도 최초로 보고한다.

또한, 군산은 고려 목종 때(서기 1007년)에 화산 분출기록(고려사절요)과 일치하는 화산체로 알려져 있었으나(Nakamura, 1925; Haraguchi, 1931) 이번 연대측정에서는 이와 관련된 연대가 산출되지 않았기 때문에 이와는 무관한 것으로 확인되었다.

한편, 유사한 암상(반상장석현무암류)과 절대연대를 지닌 용암류가 연구지역의 동쪽 해안가인 예레 포구 부근에서 AB-II 용암류와 접하여 분포하지만, 연구지역의 대상 범위를 고려하여 이 논문에서는 다루지 않았음을 밝힌다.

5. 토 의

5.1 월라봉-군산 화산체의 형성

월라봉-군산 화산체에 대한 지질조사, 용암류 시료의 현미경적 특징 기재, 암석성분 및 Ar-Ar 연대

Table 5. Result of ^{40}Ar - ^{39}Ar age dating of volcanic rocks in the studied area, Jeju Island.

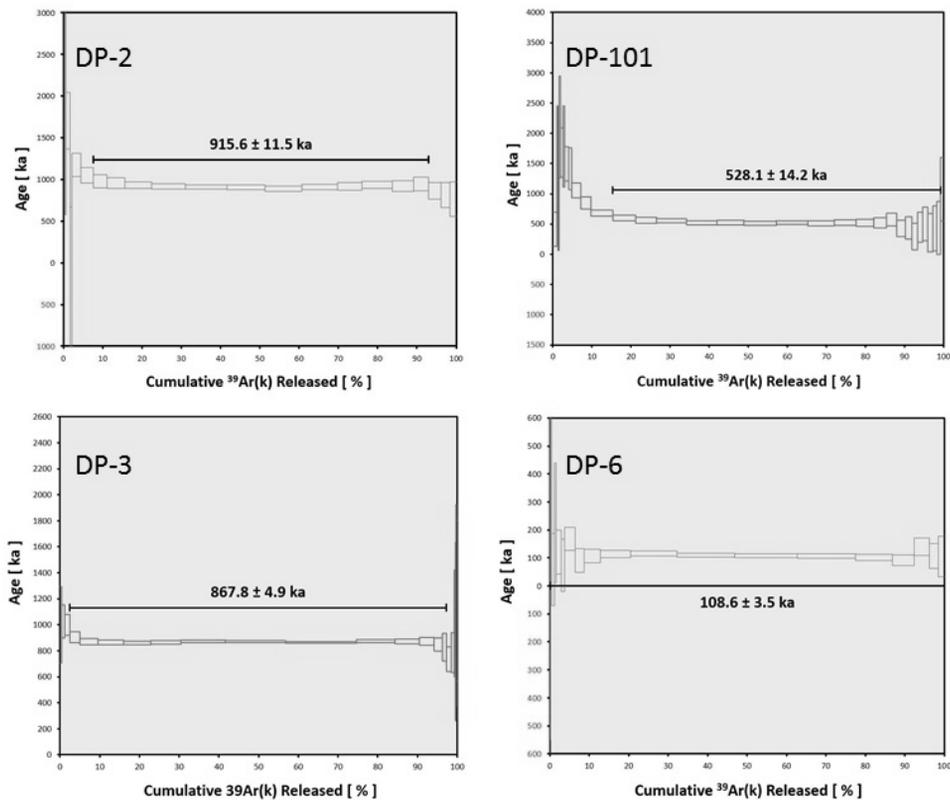
ID	Weighted Plateau					Normal Isochron					Inverse Isochron				
	Age (ka)	2 s.d.	% ^{39}Ar	MSWD	Step	Age (ka)	2 s.d.	$^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$	2 s.d.	MSWD	Age (ka)	2 s.d.	$^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$	2 s.d.	MSWD
DP-1	917.7	23.2	96	0.71	16/19	912.0	29	299.89	5.81	0.70	913.6	29.2	300.16	5.84	0.76
DP-2	915.6	11.5	85	0.86	12/22	906.5	17.7	301.72	5.02	0.77	907.3	17.8	301.71	5.04	0.79
DP-3	867.8	4.9	95	0.65	13/22	867.9	10.1	298.12	13.4	0.68	867.5	10.2	299.05	13.6	0.71
DP-4	838.6	9.3	96	0.26	16/22	840.3	17.3	294.36	28.3	0.27	839.3	17.3	297.35	28.43	0.28
DP-5	114.7	7.4	93	0.12	13/19	107.9	11.8	299.82	1.79	1.17	108.3	11.6	299.81	1.78	1.15
DP-6	108.6	3.5	97	0.19	19/20	108.4	6.2	298.62	2.01	1.11	108.2	6.2	298.71	2.01	1.12
DP-7	116.1	8.7	100	0.07	20/22	102.3	14.3	304.98	5.28	0.26	102.4	14.1	305.05	5.27	0.26
DP-9	865.5	4.5	72	0.71	9/22	862.5	7.4	302.17	7.09	0.66	862.4	7.4	302.37	7.08	0.65
DP-10	863.7	4.4	97	0.56	16/20	867.7	6.7	293.96	5.65	0.42	867.7	6.7	294.07	5.67	0.43
DP-11	869.9	3.7	83	0.71	8/19	872.1	8	295.11	10.8	0.76	872.2	8	295.03	10.76	0.77
DP-12	856.4	5.1	90	1.05	14/20	851.5	6.4	317.55	6.06	1.14	851.4	6.3	317.92	5.94	1.10
DP-13	854.4	4.4	100	0.98	22/22	857.6	5.3	290.21	7.06	0.77	857.8	5.3	290.62	7.06	0.77
DP-18	863.2	4.2	86	1.34	10/20	859.9	7.2	302.63	7.51	1.30	860.1	7.2	302.59	7.58	1.32
DP-101	528.1	14.2	84	0.03	20/32	532.2	14.4	297.49	1.15	1.20	533.5	14.7	297.50	1.18	1.25
DP-2015	868.9	2.1	94	1.50	22/32	867.1	4.2	300.5	10.6	1.52	866.7	4.1	301.91	10.34	1.46
SE-06*	863.2	7.2	94	0.68	5/7	866.1	6.4	230.6	64.7	0.43	866.4	7.1	237.82	67.88	0.29
Hoisu-1**	1053.0	47.3	100	0.91	7/7	1011.2	75.4	297.04	2.23	0.73	1012.8	75.6	297.02	2.24	0.72

Samples irradiated at OSU TRIGA reactor for 6 hours at 1MW power. Neutron flux measured using FCT-3 biotite monitor (Renne *et al.*, 1998).

Material-groundmass; Experiment method - incremental heating; extraction method - bulk laser heating.

Plateau age includes % ^{39}Ar and number of steps in the plateau (steps in plateau / total steps).

*data from Koh *et al.* (2013); ** unpublished data (358 m below ground surface).

**Fig. 17.** ^{40}Ar - ^{39}Ar plateau age results of the volcanic rocks (groundmass) in the studied area, Jeju Island.

를 통해 설정된 9개 층 단위를 바탕으로 월라봉-군산 쌍둥이 화산체 및 주변 지형지질의 형성과정은 다음과 같이 크게 4단계로 구분된다.

5.1.1 월라봉 화산체 기저부 형성: 약 92만 년 이전

이 단계는 월라봉 화산체의 기저부를 이루는 LVD-I 과 AB-I 용암류로 이루어진 초기 화산체가 만들어진 시기로서, AB-I 용암류의 Ar-Ar연대를 고려할 때 그 시기는 약 92만 년 이전에 해당한다. 이 지역의 최초 화산활동은 알칼리 현무암질 마그마의 증기마그마성 분화로부터 시작되어 수성화산체가 만들어지고, LVD-I이 형성되었다. 그리고 수성화산체의 분화구를 이루던 일부가 현재 박수기정 바닥 부분에 흔적으로 남아 있다. 연이어 화산체가 육상에 잠시 노출된 917~915 ka에 AB-I 용암류가 분출되어 대평리 박수기정물 부근과 월라봉 서쪽 창고천 일대에 소규모로 정치되었다.

5.1.2 월라봉-군산 화산체 형성: 약 92만 년 전~84만 년 전

현무암질 화산분화에 뒤이어 약 92만 년 전부터 84만 년 전 사이에 현무암질 조면안산암에서 조면안산암 조성의 화산활동으로 LVD-II와 BTA-I 및 BTA-II 용암류로 이루어진 월라봉-군산 쌍둥이 화산체가 만들어진 시기이다. 월라봉-군산 화산체에서 증기마그마성 분화가 독립적으로 일어나 20~40 m 높이의 응회구가 만들어지면서 LVD-II가 퇴적되었다. 월라봉

의 경우, 증기마그마성 분화가 진행되는 도중에 소량의 BTA-I 용암류가 분출되어 박수기정 절벽 LVD-II 사이에 정치되었고, LVD-II 퇴적이 종료된 이후 월라봉 분화구에 분출된 BTA-II 용암류는 안덕계곡, 박수기정, 월라봉-군산 사이 지역으로 흘러 콜리 지형이 만들어졌다. 한편, 군산 화산체에서는 LVD-II 퇴적이 끝나갈 무렵에 소량의 BTA-II 용암류가 분출되어 정상 남쪽 사면에 소규모로 정치되었다. 이후, 휴지기에 들어갔다.

월라봉-군산 쌍둥이 화산체의 형성과 같이 마그마 배치(batch)의 상승과 화산활동 동안 여러 차례 분화구의 위치가 변경되면서 여러 개의 화산체 및 화산쇄설물의 퇴적된 예는 이미 제주도의 용머리(Sohn, 1995), 일출봉(Sohn *et al.*, 2012), 차귀도-와도(Brenna *et al.*, 2015b)에서 보고된 바 있다.

5.1.3 군산 화산체의 재활성 분화: 약 53만 년 전

월라봉-군산 화산체가 형성된 후 약 30만 년에 가까운 긴 휴지기가 이어지고 난 후, 약 53만 년 전에 화산활동이 재활성되었다. 월라봉 화산체는 BTA-II 용암 분출로 화산활동이 종료되었으나, 군산 화산체의 재활성된 화산분화는 마그마성 분화(스트롬볼리안)로 시작하여 정상 주변에 분석 및 스패터(spatter)가 두껍게 쌓였고, 낙하 분석층은 군산 기슭 및 월라봉-군산 사이 지역 등 보다 넓은 지역을 피복하였다. 연이어 분출한 AB-II 용암류가 월라봉-군산 사이의 골짜기를 따라 대평리 남쪽으로 흘러 현재의 해안지형이 완성되었다. 이 용암류의 선단부에는 낮은 언덕지형이 군데군데 만들어졌고, 대평 포구 서쪽을 비롯하여 수지상의 돌출부가 발달한 해안지형이 만들어졌다. 이 용암류의 분출을 마지막으로 군산 화산체의 화산활동은 완전히 끝나고 침식기에 들어갔다. 화산체의 경사가 급한 군산 정상 주변의 분석과 스패터, 하부화산쇄설층은 지속적인 침식과 삭박을 받아 남-북 방향으로 재동되어 쌓이고(RVD), 화산체의 연약한 부분을 중심으로 골짜기가 만들어졌다. 특히, RVD는 군산 북쪽 기슭에 작은 오름과 같은 산체를 형성하면서 골짜기 큰 지형이 만들어졌다.

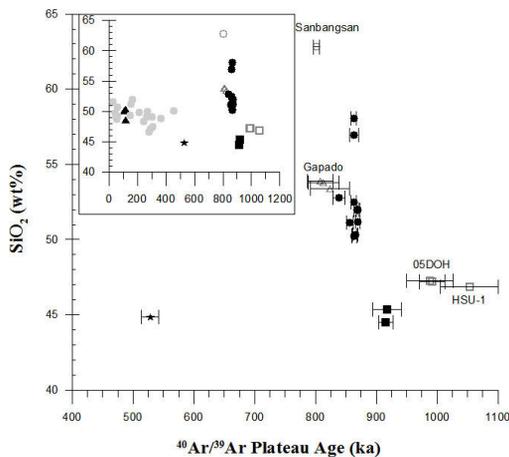


Fig. 18. Ar-Ar age (with 2 SD) vs. SiO₂ (wt%) of the volcanic rocks in the studied area, Jeju Island. The symbol is the same as in Figure 12.

5.1.4 창고천 주변 신기 용암류 정치: 약 12만 년~11만 년 전

월라봉-군산 화산체의 침식기가 이어지던 약 12~

11만 년 전, 두 화산체 인근의 다른 화산으로부터 분출한 장석 반정을 다량 함유한 조면현무암(TB) 조성의 아아 용암류가 월라봉-군산 화산체 서쪽 측면을 따라 흘렀다. 이 후 이 신기 용암류와의 경계면을 따라 유수의 침식에 의해 오늘날의 안덕계곡과 사행하천이 만들어지기 시작했다.

5.2 하부화산쇄설층의 층서적 위치

서귀포층의 지질시대와 층서적 위치에 대해 중기 플라이스토세 동안에 해수면이 상승되는 과정에서 형성된 지층으로 해석(0.73~0.41 Ma; Yun *et al.*, 1987; Lee *et al.*, 1988)된 바도 있지만, 서귀포층은 ① 약 180만 년 전 제주도 화산활동의 시작과 함께 퇴적이 시작되었으며(Yi *et al.*, 1998; Kim and Lee, 2000), ② 주구성 물질은 증기마그마성 화산분화에 의한 화산쇄설물, 해양 및 비해양 퇴적물로 이루어져 있고(Sohn *et al.*, 2008; Sohn and Yoon, 2010), ③ 이 시기의 주 화산분화의 양상은 수성분화라는데 대체로 동의하고 있다. 1920년대부터 서귀포층은 서귀포시 새섬 북쪽 해안절벽에만 육상에 노출된 유일한 노두로 알려져 왔으며, 표식지 노두를 덮고 있는 용암의 K-Ar 연대(0.41±0.01 Ma, Yun *et al.*, 1987)를 근거로 약 41만 년 전에 퇴적이 종료된 것으로 이해되어 왔다. 그러나, 제주도 여러 지점에서 U층까지 굴착된 심부 시추로부터 획득된 시추코어 용암류에 대한 Ar-Ar 연대(예: Koh *et al.*, 2008, 2013; Koh and Park, 2010a, 2010b)에 따르면 표식지에서와 달리 서귀포층을 피복하는 용암류의 연대가 지역적인 차이를 나타내며, 또한 비교적 오랜 기간 동안 서귀포층이 퇴적되는 동안 시기를 달리하는 알칼리 현무암질 용암류가 간헐적·국지적으로 분출되어 서귀포층 사이에 협재되어 있음이 보고되었다.

월라봉-군산 화산체의 하부를 이루는 하부화산쇄설층은 구성물질, 암상, 퇴적구조, 흔적화석 등의 특징으로 미루어 시추코어 기재연구(Sohn and Park, 2004, 2005)와 표식지 연구(Yoon and Chough, 2006; Sohn and Yoon, 2010)로부터 보고된 서귀포층의 특징과 크게 다르지 않다. 또한, 서귀포층 표식지에 대한 자기층서 연구(Kim and Lee, 2000)에서 서귀포층의 중상부 연대가 0.91~0.85 Ma로 해석된 점을 고려하면, 연구 지역 하부화산쇄설층은 서귀포층 층준에 포함되며, BTA-II 용암류의 절대연대를 감안할 때

표식지보다 약 30만 년 앞서 퇴적이 종료된 지층에 해당한다. 이와 함께 연구 지역 인근에 분포하는 산방산 조면암 하위의 용머리 응회환을 이루는 화산쇄설층(Sohn and Park, 2005)도 역시 서귀포층의 암상에 포함되는 것으로 해석된다. 따라서, 육상에 노출된 서귀포층의 분포는 표식지 뿐만 아니라, 월라봉-군산 및 용머리 화산쇄설층까지 확대되며, 상위 용암류의 절대연대를 근거로 할 때 월라봉-군산 화산체의 하부화산쇄설층은 약 90~86만 년 전에, 용머리 화산쇄설층은 약 80만 년 전에, 표식지의 서귀포층은 약 41만 년 전에 퇴적이 종료된 것으로 해석된다. 결론적으로, 월라봉-군산 화산체의 하부화산쇄설층은 지표에 노출된 서귀포층 중에서 가장 오래 전에 화산활동과 퇴적이 종료된 표식지로서의 층서학적 가치를 지닌다.

5.3 월라봉-군산-용머리(산방산)-가파도 고기 화산체

제주도를 형성시킨 화산활동이 언제, 어느 곳에서부터 시작되었고, 어떻게 전개되어 왔는지를 밝히기 위한 연구는 1920년대부터 현재까지 100년에 달하는 오랜 기간 제주도 지질연구의 핵심 주제로 다루어져 왔다. 이러한 관점에서 우리는 이전에 보고된 용암류의 Ar-Ar 연대 및 K-Ar 연대 자료, 그리고 이 연구의 연대 자료와 암석성분 자료를 종합하여 제주도 고기 화산체의 화산활동과 분포에 대하여 고찰하였다(그림 17).

용머리 응회환과 산방산 조면암들의 형성시기는 화산쇄설층 내 감람석휘석현무암 각력의 시기와 이를 피복하는 산방산 조면암의 형성 시기를 고려하면 약 1.20 Ma에서 0.80 Ma 사이에 형성되었을 것으로 추정할 수 있다. 그러나 지금까지 보고된 화산암류의 K-Ar 연대가 Ar-Ar 연대와 비교할 때 상대적으로 오래된 수치연대를 나타내고 있는 점과 현무암질에서 조면암질로 변화하는 모마그마의 분화 과정, 그리고 용머리 화산쇄설층의 상부를 산방산 조면암의 자파쇄집괴암이 직접 피복하고 있는 점으로 미루어 볼 때, 용머리-산방산 화산체는 약 80만 년 전의 화산분화에 의해 형성된 것으로 해석된다.

이미 언급한 바와 같이, 월라봉-군산 화산체의 하부에 분포하는 AB-I 용암류는 제주도 육상에서 확인 가능한 최고기 연대 값을 갖는 용암류이며, 서귀포층 층준에 포함되는 월라봉-군산 화산체의 LVD-I

은 AB-I 용암류가 피복하고 있고, LVD-II는 BTA-I 과 BTA-II 용암류에 의해 피복되거나 관입 관계를 가지고 있어 하부화산쇄설층 형성 시기의 상한을 약 83만 년 전으로 규정할 수 있다. 또한, 대평리 박수기 정 및 안덕계곡을 이루고 있는 BTA-I과 BTA-II 용암류는 산방산 조면암보다 약 6만 년 앞서 월라봉과 군산 화산체의 분화구에서 분출된 용암류에 해당한다. 이 같은 점을 고려 할 때, 월라봉-군산 화산체는 제주도의 최고기 화산체임을 지시한다.

한편, 가파도는 산방산 남서쪽 8.8 km 해상에 위치한 섬으로서, 섬의 북쪽 해역은 수심이 30 m 미만으로 얕은 편이지만 마라도 방향으로는 수심이 90~100 m로 급격히 깊어지는 해저협곡이 존재한다. 가파도는 지표에서 해수면 하 (-)83 m까지 현무암질 조면안산암 조성의 동일 용암류로 이루어져 있고, 수심 5 m 미만 등심선으로 이루어진 지역의 면적은 약 2.7 km²에 이르는데, 이는 지상에 노출된 면적(0.87 km²)보다 3배 정도 넓다. 또 섬의 남쪽과 동·서쪽에는 '광포탄' 등 해수면에 노출된 암초들이 여러 곳 분포한다. 가파도는 산방산보다 약 2만 여년 앞서 형성된 100 m 높이의 용암돔이었으나 해수면이 상승하면서 침식 및 삭박에 의해 현재는 평탄한 모양의 섬으로 존재하고 있다(Koh and Park, 2010a).

우리는 월라봉-군산-용머리-산방산-가파도를 약 100만 년 전부터 80만 년 전까지의 제주도 화산활동 기록을 육상에서 관찰할 수 있는 고기 화산지대로 제시한다.

6. 결 론

월라봉-군산 화산체에 대한 야외지질조사, 용암류에 대한 암석기재, 암석화학 및 Ar-Ar 연대 자료, 주변 시추 주상도의 재해석을 바탕으로 월라봉-군산 화산체의 구성지질과 화산층서를 밝히고, 화산활동 시기와 과정을 고찰하였다.

- 1) 월라봉-군산 화산체는 하위에서 상위로 감에 따라 하부화산쇄설층-I(LVD-I), 알칼리현무암-I(AB-I), 하부화산쇄설층-II(LVD-II), 현무암질 조면안산암-I(BTA-I), 현무암질조면안산암-II(BTA-II), 상부화산쇄설층-집괴암 및 분석(UVD-Ag & Sc), 알칼리현무암-II(AB-II), 재동화산쇄설층(RVD)으로 구성되며, 월라봉 서쪽과 북서쪽에

서는 조면현무암(TB; 반상장석현무암류)과 접한다.

- 2) 연구 지역에 분포하는 용암류는 SiO₂ 44.1~57.7 wt%, Na₂O+K₂O 4.4~9.1 wt%를 지닌 알칼리 계열의 알칼리 현무암-조면현무암-현무암질 조면안산암-조면안산암의 성분에 해당한다. 특히, 월라봉-군산 화산체를 구성하는 용암류는 알칼리 현무암(호혹은 바사나이트)과 현무암질 조면안산암 및 조면안산암의 조성을 지니며, HAA 용암류의 특징을 나타낸다. 용암류의 성분 변화는 주로 마그마 방 혹은 화도 내에서 분화 과정 동안 감람석과 단사휘석, 사장석, Fe-Ti 산화광물 및 인회석의 정출로 인해 영향 받았음을 지시한다.
- 3) 지금까지 서귀포층이 퇴적되는 동안 간헐적·국지적으로 분출된 용암류가 서귀포층에 협재하고 있음이 시추코어에서만 확인되었으나, 대평리 해안가에 노두(AB-I 용암류)로 존재하고 있음이 최초로 확인되었으며, 약 92만 년 전에 AB-I 용암류가 육상으로 분출했음을 지시한다. 한편, 월라봉-군산 화산체를 이루는 BTA-I 및 BTA-II 용암류는 약 87만 년 전~약 83만 년 전 사이에 분출되었는데, 박수기정 해안절벽 상단부, 안덕계곡, 월라봉-군산 사이 지역의 능선 등에 분포하는 BTA-II 용암류는 월라봉 분화구에 형성된 돔을 부수고 유출되어 쿨리 형태로 정치되면서 계곡지형이 만들었다.
- 4) 월라봉-군산 화산체는 약 92만 년 전에서 83만 년 전 사이에 현무암질 마그마에 의한 증기마그마성 분화를 시작으로 현무암질 조면안산암-조면안산암을 분출시킨 마그마성 분화로 종료되면서 만들어진 쌍둥이 화산체이다. 약 30만 년간의 휴지기 이후 약 53만 년 전 군산 화산체에서의 재활성된 화산활동으로 마그마성 분화(스트롬볼리안)에 뒤 이어 분출한 AB-II 용암류가 월라봉-군산 사이의 골짜기를 따라 대평리 해안으로 흘러 현재의 해안지형이 완성되었다. 이후, 월라봉-군산 화산체의 침식기가 이어지던 약 12~11만 년 전, 인근의 다른 화산체로부터 분출한 장석 반정을 다량 함유한 조면현무암 조성의 아아 용암류(TB)가 월라봉-군산 화산체 서쪽 측면을 따라 흘렀으며, 경계면을 따

- 라 창고천이 형성되었다.
- 5) 월라봉-군산 화산체의 기저부를 이루는 하부화산쇄설층은 용머리 응회환을 이루는 화산쇄설층과 함께 서귀포층에 대비된다.
 - 6) 월라봉-군산 화산체가 지금까지 보고된 제주도 화산체 중 최고기 쌍둥이 화산체로서, 월라봉-군산-용머리-산방산-가파도는 약 100만 년 전부터 80만 년 전까지의 화산활동 기록을 육상에서 관찰할 수 있는 고기 화산지대이다.
 - 7) 끝으로, 군산은 고려 10대 왕 목종 때(서기 1007년; 대략 1 ka)에 분출기록과 일치하는 화산체로 알려져 있었으나 이와는 무관한 것으로 확인되었다. 아울러, 이 연구는 제주도 남부 해안 일대에 분포하는 용암류의 절대연대 측정을 포함한 정밀한 지질조사를 통해 기존 연구·발표된 제주도 남부의 지질 및 층서를 새롭게 규명하기 위한 노력이 지속적으로 필요함을 보여준다.

감사의 글

암석성분 분석과 Ar-Ar 연대측정에 애를 써주시고 분석 결과를 함께 논의해 준 오리건 주립대학교 Dr. Daniel P. Miggins, Dr. Anthony Koppers, Dr. Robert Duncan께 깊은 감사를 드린다. 야외지질조사를 함께 해 준 제주연구원 고인종박사와 드론 사진을 제공해 주신 정희준님께도 고마움을 표합니다. 논문의 초고에 세심한 심사를 해주신 심사위원과 편집위원께 감사를 드립니다. 이 연구는 제주특별자치도개발공사의 자체 연구사업에 의해 수행되었다.

REFERENCES

- Brenna, M., Cronin, S.J., Kereszturi, G., Sohn, Y.K., Smith, I.E.M. and Wijbrans, J., 2015a, Intraplate volcanism influenced by distal subduction tectonics at Jeju Island, Republic of Korea. *Bulletin of Volcanology*, 77, <https://doi.org/10.1007/s00445-014-0896-5>.
- Brenna, M., Cronin, S.J., Smith, I.E.M., Maas, R. and Sohn, Y.K., 2012a, How small-volume basaltic magmatic systems develop: a case study from the Jeju Island Volcanic Field, Korea. *Journal of Petrology*, 53, 985-1018.
- Brenna, M., Cronin, S.J., Smith, I.E.M., Sohn, Y.K. and Maas, R., 2012b, Spatio-temporal evolution of a dispersed magmatic system and its implications for volcano growth, Jeju Island Volcanic Field, Korea. *Lithos*, 148, 337-352.
- Brenna, M., Nemeth, K., Cronin, S.J., Sohn, Y.K., Smith, I.E. and Wijbrans, J., 2015b, Co-located monogenetic eruptions~200 kyr apart driven by tapping vertically separated mantle source regions, Chagwido, Jeju Island, Republic of Korea. *Bulletin of Volcanology*, 77, <https://doi.org/10.1007/s00445-015-0928-9>.
- Cousens, B.L., Clague, D.A. and Sharp, W.D., 2003, Chronology, chemistry, and origin of trachytes from Hualalai Volcano, Hawaii. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 4, <https://doi.org/10.1029/2003GC000560>.
- Haraguchi, K., 1931, Saishu Volcano. *Bulletin of the Geological Survey of Chosen (Korea)*, 10, 1-34, 10 pls. (in Japanese).
- Hwang, S.K., Ahn, Y.M., Jang, Y.D. and Kim, Y.B., 2011, Eruptive styles and processes of trachytic rocks in the southeastern Ulleung Island, East Sea, Korea. *Journal of the Geological Society of Korea*, 47, 665-681 (in Korean with English abstract).
- Jeon, Y.M., Ryu, C.K., Yoon, W.S., Kang, S.S. and Song, S.T., 2013, Characteristics and interpretation of subsurface diatreme deposits from western Jeju Island. *Journal of the Geological Society of Korea*, 49, 537-551 (in Korean with English abstract).
- Kim, I.S. and Lee, D., 2000, Magnetostratigraphy and AMS of the Seoguipo Formation and Seoguipo Trachyte of Jeju Island, Korea. *Journal of the Geological Society of Korea*, 36, 163-180 (in Korean with English abstract).
- Kim, J., Kim, D., Kang, J.H., Kang, J.H., Kim, M.J., Moon, K.H., Im, Y.I. and Yun, S.H., 2019, Peperite at Bagsugijong in the Jeju Volcanic Field, Korea. *Annual Symposium of The Geological Society of Korea (Abstracts)*, Jeju, 186 p (in Korean).
- Kim, J.-I., Choi, S.H., Koh, G.W., Park, J.B. and Ryu, J.S., 2019, Petrogenesis and mantle source characteristics of volcanic rocks on Jeju Island, South Korea. *Lithos*, 326-327, 476-490.
- Koh, G.W. and Park, J.B., 2010a, The Study on Geology and Volcanism in Jeju Island (II): Petrochemistry and $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ Absolute ages of the Volcanic Rocks in Gapado-Marado, Jeju Island. *Economic and Environmental Geology*, 43, 53-66 (in Korean with English abstract).
- Koh, G.W. and Park, J.B., 2010b, The study on geology and volcanism in Jeju Island (III): early lava effusion records in Jeju Island on the basis of $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ absolute ages of lava samples. *Economic and Environmental Geology*, 43, 163-176 (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*, 49, 209-230 (in Korean with English Abstract).
- Koh, G.W., Park, J.B., Kim, T.H., Moon, D.C. and Mun, S.H., 2021, Geologic characteristics of Jeju Samdasoo watershed in Jeju Island, Korea (I): Regional surface geology and volcanic activities. *Journal of the Geological Society of Korea*, 57, 49-65 (in Korean with English Abstract).
- Koh, G.W., Park, J.B. and Park, Y.S., 2008, The study on geology and volcanism in Jeju Island (I): Petrochemistry and $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ absolute ages of the subsurface volcanic rock cores from boreholes in the eastern lowland of Jeju Island. *Economic and Environmental Geology*, 41, 93-113 (in Korean with English abstract).
- Koppers, A.A., 2002, ArArCALC software for $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ calculations. *Computers & Geosciences*, 28, 605-619.
- Le Maitre, R.W., Streckeisen, A., Zanettin, B., Le Bas, M.J., Bonin, B., Bateman, P., Bellieni, G., Dudek, A., Efremova, S., Keller, J., Lameyre, J., Sabine, P.A., Schmid, R., Sørensen, H. and Woolley, A.R., 2002, Igneous rocks: A classification and glossary of terms. Recommendations of the International Union of Geological Sciences Subcommission on the Systematics of Igneous Rocks. 2nd Edition, Cambridge University Press, 236 p.
- Lee, D.Y., Yun, S.K., Kim, J.Y. and Kim, Y.J., 1988, Quaternary Geology of the Jeju Island. *Research on Applied Geology of Korea KR-87-29*, Korea Institute of Energy and Resources, 233-278 (in Korean with English abstract).
- Lee, M.W., Won, C.K., Lee, D.Y., Park, G.H. and Kim, M.S., 1994, Stratigraphy and petrology of volcanic rocks in Southern Cheju Island, Korea. *Journal of the Geological Society of Korea*, 30, 521-541 (in Korean with English abstract).
- Macdonald, G.A. and Katsura, T., 1964, Chemical composition of Hawaiian Lavas. *Journal of Petrology*, 5, 82-133.
- Marsden, R.C., Danišik, M., Ahn, U.-S., Friedrichs, B., Schmitt, A.K., Kirkland, C.L., McDonald, B. and Evans, N.J., 2021, Zircon double-dating of Quaternary eruptions on Jeju Island, South Korea. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 410, <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2020.107171>.
- Middlemost, E.A.K., 1989, Iron oxidation ratios, norms and the classification of volcanic rocks. *Chemical Geology*, 77, 19-26.
- Nakamura, S., 1925, Geographical and geological notes of Saishū-to (Quelpart Island), Korea. *Chikyū (Earth)*, 4, 325-336 (in Japanese).
- Park, K.H., Cho, D.L. and Kim, J.C., 2000a, Geologic report of the Mosulpo-Hanrim Sheet (1:50,000). Korea Institute Geology, Mining and Materials, Taejon, 56 p (in Korean with English abstract).
- Park, K.H., Cho, D.L., Kim, Y.B., 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., 2000b, Geologic report of the Seogwipo-Hahyori Sheet (1:50,000). Jeju Provincial Government, 163 p (in Korean with English abstract).
- Park, K.H., Lee, B.J., Cho, D.L., Kim, J.C., Lee, S.R., Choi, H.I., Hwang, J.H., Song, G.Y., Choi, B.Y., Cho, B.U. and Kim, Y.B., 1998, Geologic report of the Jeju-Aewol Sheet (1:50,000). Korea Institute Geology, Mining and Materials, Taejon, 290 p (in Korean with English abstract).
- Park, K.H., Lee, B.J., Kim, J.C., Cho, D.L., Lee, S.R., Park, D.W., Lee, S.R., Choi, Y.S., Yeum, D.Y., Kim, J.Y., Seo, J.Y. and Shin, H.M., 2000c, Geologic report of the Jeju (including Baekado-Jinnampo) Sheet (1:250,000). Korea Institute Geology, Mining and Materials, Taejon, 59 p (in Korean with English abstract).
- Renne, P.R., Swisher, C.C., Deino, A.L., Karner, D.B., Owens, T.L. and DePaolo, D.J., 1998, Intercalibration of standards, absolute ages and uncertainties in $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ dating. *Chemical Geology*, 145, 117-152, [https://doi.org/10.1016/S0009-2541\(97\)00159-9](https://doi.org/10.1016/S0009-2541(97)00159-9).
- Sohn, Y.K., 1995, Structures and sequences of the Yongmeori tuff ring, Cheju Island, Korea: Sequential deposition from shifting vents. *Journal of Geological Society of Korea*, 31, 57-71.
- Sohn, Y.K., Cronin, S.J., Brenna, M., Smith, I.E.M., Németh, K., White, J.D.L., Murtagh, R.M., Jeon, Y.M. and Kwon, C.W., 2012, Ilchulbong tuff cone, Jeju Island, Korea, revisited: a compound monogenetic volcano involving multiple magma pulses, shifting vents, and discrete eruptive phases. *Geological Society of America Bulletin*, 124, 259-274, <https://doi.org/10.1130/B30447.1>.
- Sohn, Y.K. and Park, K.H., 2004, Early-stage volcanism and sedimentation of Jeju Island revealed by the Sagye borehole, SW Jeju Island, Korea. *Geosciences Journal*, 8, 73-84.
- Sohn, Y.K. and Park, K.H., 2005, Composite tuff ring/cone complexes in Jeju Island, Korea: possible consequences of substrate collapse and vent migration. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 141, 157-175.
- Sohn, Y.K., Park, K.H. and Yoon, S.-H., 2008, Primary versus secondary and subaerial versus submarine hydro-volcanic deposits in the subsurface of Jeju Island, Korea. *Sedimentology*, 55, 899-924.
- Sohn, Y.K. and Yoon, S.-H., 2010, Shallow-marine records of pyroclastic surges and fallouts over water in Jeju Island, Korea, and their stratigraphic implications. *Geological Society of America*, 38, 763-766, <https://doi.org/10.1130/G30447.1>.

- i.org/10.1130/G30952.1.
- Tatsumi, Y., Shukuno, H., Yoshikawa, M., Chang, Q., Sato, K. and Lee, M.W., 2005, The petrology and geochemistry of volcanic rocks on Jeju Island: plume magmatism along the Asian continental margin. *Journal of Petrology*, 46, 523-553.
- Troll, V. and Carracedo, J.C., 2016, The geology of the Canary Islands. 1sted, Elsevier, 636 p.
- Won, C.K., Lee, M.W., Lee, D.Y. and Sohn, Y.K., 1993, Explanatory text of the geological map of Sungsan Sheet (1:50,000). Ministry of Construction, Jeju Provincial Government and Korea Water Resources Corporation, 104 p (in Korean, title translated).
- Won, C.K., Lee, M.W., Lee, D.Y. and Yun, S.H., 1995, Explanatory text of the geological map of Pyoseon Sheet (1:50,000). Ministry of Construction, Jeju Provincial Government and Korea Water Resources Corporation, 59 p (in Korean, title translated).
- Won, C.K., Matsuda, J., Nagao, K., Kim, K.H. and Lee, M.W., 1986, Paleomagnetism and radiometric age of trachytes in Jeju Island, Korea. *Journal of Korean Institute of Mining Geology*, 19, 25-33 (in Korean with English abstract).
- Won, J.K., 1975, Study of geologic development and the volcanic activity of the Jeju Island. *Bulletin of Research Institute of Applied Sciences, Kon-Kuk University, Seoul*, 1, 7-42 (in Korean with English abstract).
- Yi, S., Yun, H. and Yoon, S., 1998, Calcareous nannoplankton from Seoguipo Formation of Cheju Island, Korea and its Paleooceanographic implication. *Paleontological Research*, 2, 253-265
- Yoon, S.-H. and Chough, S.-K., 2006, Sedimentary facies and depositional environment of the Seoguipo Formation, Jeju Island. *Journal of the Geological Society of Korea*, 42, 1-17 (in Korean with English abstract).
- Yun, S.K., Han, D.S. and Lee, D.Y., 1987, Quaternary geology in the southern part of Jeju Island. *Korea Institute of Energy and Resources, KR-86-2-(B)-2*, 64 p (in Korean with English abstract).

Received : February 19, 2021

Revised : March 29, 2021

Accepted : April 22, 2021