

제주도 서귀포 해안의 지질(1): 용암류의 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 연대 및 화산활동

고기원¹ · 박준범^{2,†} · 고창성³ · 문덕철⁴ · 고인종³ · 박원배³

¹제주곶자왈공유화재단 곶자왈연구소

²미육군극동공병단

³제주연구원 지하수연구센터

⁴제주특별자치도개발공사

Geology of coastal region around Seogwipo, Jeju Island (1): $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ ages of lava flows and volcanic activities

Gi Won Koh¹ · Jun Beom Park^{2,†} · Chang Seong Koh³ · Deok Cheol Moon⁴ · Injong Koh³ · Won Bae Park³

¹Gotzawal Research Center, The Gotzawal Trust of Jeju, Jeju 63345, Republic of Korea

²US Army Corps of Engineers Far East District, Republic of Korea

³Groundwater Research Center, Jeju Research Institute, Jeju 63147, Republic of Korea

⁴Jeju Province Development Corporation, Jeju 63345, Republic of Korea

요 약

제주도 서귀포항 주변 약 7 km의 해안 지역에 대한 야외지질조사, 용암류의 암석기재, 전암 주성분 및 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 연대, 주변 시추공에 대한 미발표 시추 주상도의 재해석을 바탕으로 지질과 화산활동에 대해 고찰하였다. 이 지역은 5개의 퇴적층(서귀포층, 정방퇴적층, 남성리응회암, 송산역암, 생수괘퇴적층)과 9개의 용암류(용암류-1a-W, 용암류-1a-E, 용암류-1b-W, 용암류-1b-E, 용암류-2-W, 용암류-2-E, 용암류-3a-W, 용암류-3a-E, 용암류-3b-E)로 구성된다. 용암류는 SiO_2 함량 51.4~58.8 wt%, $\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}$ 함량 5.8~9.7 wt%인 알칼리 계열의 현무암질 조면안산암 내지 조면안산암에 해당하며, 용암류의 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 연대는 437.5±3.2 ka (용암류-1a-W)에서 107.4±1.5 ka (용암류-3b-E)의 범위를 나타낸다. 해안에서 떨어진 엉뜨포포 조면암(SiO_2 함량 60.6 wt%)의 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 연대는 826.3±3.0 ka이다. 서귀포층을 피복하는 용암류(용암류-1b-W)의 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 연대는 429.9±4.4 ka에서 427.3±1.4 ka를 나타내어, 이전 연구 결과에 비해 표식지에서 서귀포층의 퇴적상한을 좀 더 정확히 규명하였다. 용암류-1이 분출했던 약 44만 년 전에서 약 42만 년 전까지 화산활동은 제주도 주변에 만들어진 장력 환경에서 퇴적분지의 구조운동(단층?)과 연관되어 있을 것으로 해석된다. 이 지역의 연안에 대한 지구물리 탐사를 통해 제주도 화산활동 초기의 구조적 특징을 밝히는 연구가 필요하다.

주요어: 서귀포, 지질, 용암류, $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 연대, 구조운동

ABSTRACT: We studied the geology and volcanic activities of a 7-km long coastal region of Seogwipo, Jeju Island, on the basis of field investigation, petrography, whole rock major compositions and $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ ages of lava flows, and reinterpretation of unpublished borehole logs from surrounding boreholes. The studied area is composed of 5 sedimentary deposits (Seogwipo Formation, Jeongbang sedimentary formation, Namseongri Tuff, Songsandong Conglomerate and Saengsungwe sedimentary formation) and 9 lava flow units (Lf-1a-W, Lf-1a-E, Lf-1b-W, Lf-1b-E, Lf-2-W, Lf-2-E, Lf-3a-W, Lf-3a-E and Lf-3b-E). The rock compositions of lava flows belong to basaltic trachyandesite-trachyandesite with SiO_2 51.4–58.8 wt% and $\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}$ 5.8–9.7 wt%. Their $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ ages range from the oldest, 437.5±3.2 ka (Lf-1a-W) to the youngest, 107.4±1.5 ka (Lf-3b-E). The $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ age of Eongtto Falls trachyte (SiO_2 60.6 wt%) shows 826.3±3.0 ka. Compared to the previous research, the upper sedimentation limit of the Seogwipo Formation is more accurately defined in this study since the $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ ages of the lava flow (Lf-1b-W) over the Seogwipo Formation range from 429.9±4.4 ka to 427.3±1.4 ka. It is interpreted that the volcanic

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

activities from *ca.* 440 ka to *ca.* 420 ka which exploded Lava Flow-1 have been closely related with structural movement (fault?) in sedimentary basin under extension environment induced around Jeju Island. The further study to reveal the structural characteristics during the early stage of volcanic activity in Jeju Island is needed by using geophysical exploration of coast in this area.

Key words: Seogwipo, geology, lava flow, $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ age, structural movement

1. 서 언

서귀포시 토평동 거문여(그림 1의 지명 설명 A) 일대에서 서귀포항을 지나 삼매봉(해발 153 m) 서쪽 호근동 돛배낭골(M)까지 약 7 km의 해안은 때로 주상절리가 발달한 수십 m 높이의 절벽 지형을 이룬다. 또한 소정방폭포(B), 정방폭포(C), 소남머리(D), 자구리(E), 서귀포층 표식지(G), 천지연폭포(I), 외돌개(L), 하논분화구(N) 등 다양한 지질자원과 수려한 자연경관을 기반으로 제주올레길 제7코스가 개설되어 있을 뿐 아니라, 천지연폭포와 서귀포 패류화석층은 제주도 세계지질공원에 포함되어 있는 관광명소이기도 하다(그림 1).

거문여(혹은 검은여)는 서귀칼호텔 남쪽 해안지대를 말한다. ‘여’는 썰물일 때는 드러나고 밀물일 때는 물에 잠기는 바위, 또는 물속에 잠겨 보이지 않는 바위 등을 이르는 제주어로서, 거문여는 파호이호이 용암류 말단 지형으로 전체가 검은다는 뜻에서 붙여진 명칭이다. 길이 약 220 m, 두께 약 2~3 m로 남동쪽으로 감에 따라 넓어져 위에서 보면 마치 거인의 발바닥과 같은 모양이다. 용암류의 표면은 절리면을 따라 차별적으로 깊이 침식되어 마치 빙하지대에 균열을 따라 만들어진 크레바스와 유사하다. 돛배낭골은 ‘돛배(부엌에서 쓰는 도마)’, ‘낭(나무)’ 그리고 ‘골(골짜기)’로 이루어진 제주어이다. 돛배낭은 동백나무를 일컫는데, 이 지역의 해안 길은 동백나무 수림지로 이루어져 있다. 약 600 m 길이의 해안을 따라 약 5~10여 m 높이의 해안절벽에 다양한 형태의 주상절리, 타포니, 해식동굴, 그리고 수많은 크고 작은 먹돌(조약돌)이 분포한다.

지질명소 중 서귀포 패류화석층은 1968년 천연기념물 제195호로 지정·보호되고 있는 지층으로서, Yokoyama (1923)가 패류화석 감정을 통해 상부 플라리오세 지층으로 추정하던 이래, 지난 100여 년 간 고생물과 퇴적상(예, Kang, 1995; Yi *et al.*, 1998; Sohn and Park, 2004; Yoon and Chough, 2006; Sohn

and Yoon, 2010), 자기층서(Kim and Lee, 2000), 지하 분포상태(예, Koh, 1997; Son *et al.*, 1998; Oh *et al.*, 2000) 등 여러 분야에서 연구가 수행되어 지질시대(1.88~0.73 Ma; Kim and Lee, 2000)와 구성암상 및 퇴적환경이 소상하게 밝혀졌다.

그러나, 서귀포층 표식지를 피복한 용암류와 문섬과 섬섬 조면암의 연구를 제외하면, 서귀포시 중심지의 해안을 따라 분포하는 용암류에 대한 연구는 거의 이루어지지 않았다. 특히, 서귀포층 내 여러 지점에서 관찰되는 관입암에 대해서는 지금까지 보고된 바 없으며, 서귀포층을 피복한 용암류는 다양한 용암층명으로 기재되어 혼란이 초래되고 있다. 즉, 이 용암류는 서귀포조면암(Won, 1976; Kim and Lee, 2000), 서귀포하와이아이트(Lee, 1982; Tamanyu, 1990; Kang, 1995; Son *et al.*, 1998) 혹은 서귀포조면현무암(Yoon *et al.*, 1995), 서귀포조면안산암(Min *et al.*, 1986; Lee *et al.*, 1988) 그리고 천지연조면안산암(Park *et al.*, 2000a)으로 기재되었다. 연구자에 따라 육안적인 암석기재와 암석성분에 의한 분류를 혼용하여 각각 다른 명칭으로 기재한 결과라 할 수 있다. 특히 이 용암층에서 측정된 K-Ar 연대(0.41 ± 0.01 Ma; Lee *et al.*, 1988)는 지금까지도 서귀포층 퇴적시기의 상한을 정하는데 인용되고 있다.

제주도 화산활동의 시작과 더불어 퇴적되기 시작한 서귀포층이 노출된 표식지 주변에 분포하는 용암류의 분출 시기를 밝히는 것은 지하 분포 서귀포층을 피복하는 용암류의 암석 성분 및 분출 시기 대비는 물론 제주도 화산층서 정립에 중요한 정보가 될 것이다. 또한 지금까지 전혀 보고된 바 없는 서귀포층 표식지 내 관입암과 주변 지표에 분포하는 용암류와의 관계를 비롯하여 외돌개를 포함한 천지연폭포 및 정방폭포를 이루는 용암류의 분출시기 등에 관한 정보는 이들 지질자원의 가치를 높이는데 기여할 것으로 생각된다.

상기와 같은 점들을 감안하여 서귀포시 토평동 거문여에서 서귀포항을 지나 호근동 돛배낭골까지

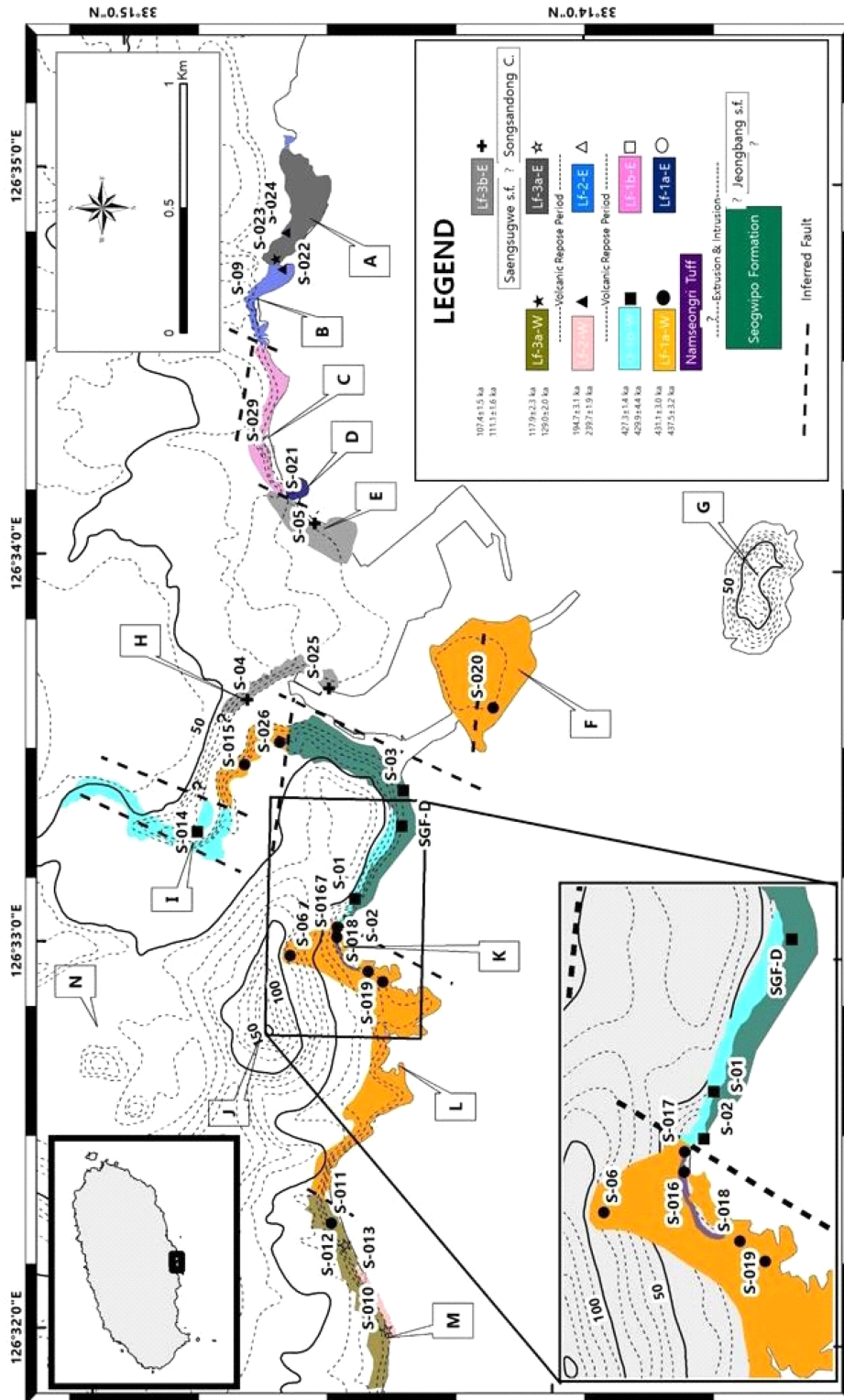


Fig. 1. The location of sampling sites and geologic distribution map of the studied area, Jeju Island. In legend, numbers indicate the lower and upper limit of Ar-Ar age (ka) of lava flow units. Note the stratigraphic relationship between sedimentary formations (? mark) and Jeongbang s.f., Saengsugwe s.f., and Songsandong C. can't be shown on the map due to tiny outcrops below lava flow units. Abbreviation: Lf-Lava flow unit, W-West, E-east, s.f.-sedimentary formation, C-Conglomerate. Name of Locations: A-Geomeunyeo, B-Sojeongbang Falls, C-Jeongbang Falls, D-Sonamseori, E-Jaguri, F-Saeseom (Islet), G-Type locality monument of Seogwipo Formation, H-Saengsugwe, I-Cheonjiyeon Falls, J-Sammaebong, K-Hwanguji, L-Oedolgae, M-Dombaennggol, N-Hanon. The contours are in meters.

약 7 km 해안 지형의 지질에 대해 문헌조사 및 야외 지질조사를 수행하였다. 1:50,000 서귀-하효리 도폭 (Park *et al.*, 2000a)에서 명명되고 분류된 기존의 용암류 및 퇴적층에 대한 기재와 접촉관계, 분포 범위도 검토하였다. 용암류와 퇴적층의 분포, 용암류의 암석기재, 전암 주성분 및 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 연대에 근거하여 용암류를 분류하고, 층서를 설정하였으며 이 지역의 화산활동에 대해 고찰하였다. 이 지역 퇴적층과 관련된 논문은 별도로 준비 중임을 밝힌다.

2. 지질개요

서귀포시 토평동 거문여에서 서귀포항을 지나 호근동 돌배낭골까지 해안을 따라 분포하는 용암류에 대해 도폭에는 하부에서부터 상부로 감에 따라 ‘소정방현무암질조면안산암’, ‘정방동조면안산암’, ‘천지연조면안산암’, ‘대포동조면현무암’, ‘시오름조면현무암’, ‘한라산조면암’으로 구분하였으며, 이들 용암류는 국지적으로 분포하는 ‘서귀포층’, ‘남성리응회암’, ‘송산동역암’을 피복하는 것으로 해석하였다.

3. 연구방법

제주특별자치도 공간포털을 통해 제공되는 6~70 년대에 촬영된 흑백 항공사진은 용암류의 노출 상태를 비교적 선명하게 확인할 수 있는데, 이를 이용하여 해안을 따라 분포하는 용암류의 분포 범위를 추정하였으며, 간조기 동안 해안을 따라 조사하고 분석시료를 채취하였다. 한편, 서귀포 항구에서 서북서쪽으로 약 6.3 km 내륙에 위치한 영포폭포(서귀포시 강정동 5628)를 구성하는 용암류는 아직까지 그 지질 특성이 보고된 바 없으므로 이번 연구에 추가하여 보고하였다.

용암류 시료(표 1)의 박편 제작, 전암 주성분원소의 화학분석을 위한 분말시료 제작 및 X-선 형광분석(XRF)은 한국지질자원연구원에서 이루어졌다(표 2). 전암 분석치 중 철의 함량은 Fe_2O_3^t 로 나타내었으며, 주성분원소 분석치는 변화도에 적용하기 전 산화비를 고려하여 $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{FeO}$ 비를 임의적으로 정하고 철의 총 함량으로부터 Fe_2O_3 와 FeO 값을 각각 재계산한 다음 다른 모든 주성분 산화물의 값과 합하여 물이 없는 상태의 백분율로 재계산한 후 분류도에

적용하였다. 이때 임의의 $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{FeO}$ 비는 Middlemost (1989)의 조면안산암에 해당하는 0.4로 하였다. 이렇게 계산되어 분류된 용암류의 암석성분명이 0.35(현무암질 조면안산암) 혹은 0.45(조면암)의 비를 적용했을 경우에도 변화가 없음을 확인하였다.

또한, 용암류(전암 석기)의 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 연대는 미국 오리곤 주립대학교 Argon Geochronology Lab의 ARGUS VI 모델(Thermo Scientific)의 다검출기 불활성기체 질량분석기로 분석되어 ArArCALC v2.5.2 전산프로그램(Koppers, 2002)에 의해 계산되었다. 자세한 시료 준비, 장비 및 분석 방법은 실험실의 웹사이트(<http://geochronology.ceoas.oregonstate.edu/>)에서 확인할 수 있다. $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 연대 자료(표 3)는 플래토(plateau) 연대, 정등시선(normal isochron) 연대, 역등시선(inverse isochron) 연대를 제공하고 있지만, 해석에서는 과잉 아르곤의 영향을 배제할 수 있는 연대인 플래토 연대를 이용하였다(Schaen *et al.*, 2021).

4. 연구결과

연구 지역의 층서를 그림 1와 같이 제안한다. 용암류와 퇴적층간의 접촉관계 및 용암류의 암상과 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 연대에 따라 층서를 정하고 서귀포항을 기준으로 서쪽(W)과 동쪽(E)으로 구분하였다. 용암류(Lava Flow, Lf)의 명명은 지명이나 암석명을 대신하여 임시적으로 분류하였음을 밝힌다.

연구 지역에 분포하는 용암류의 SiO_2 함량은 51.4~58.8 wt%, $\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}$ 함량은 5.8~9.7 wt%로 알칼리 계열의 현무암질 조면안산암 내지 조면안산암에 해당하는데, 조면안산암의 조성을 가진 용암류가 우세하다(그림 2). 영포폭포를 구성하는 용암류(S-028)는 조면암(SiO_2 함량은 60.6 wt%, $\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}$ 함량은 9.3 wt%)에 해당한다.

SiO_2 함량 변화에 따른 주성분원소의 변화를 검토하였다(그림 3). SiO_2 함량이 증가함에 따라 Al_2O_3 함량 변화(15.9~18.7 wt%)는 특이한 경향성을 나타내지 않은 반면, TiO_2 (2.5~0.9 wt%), Fe_2O_3^t (11.1~5.3 wt%), MgO (4.0~0.8 wt%), CaO (7.2~3.2 wt%), P_2O_5 (1.0~0.2 wt%)의 함량은 감소하고, 반면 Na_2O (3.8~5.8 wt%), K_2O (2.0~3.9 wt%)의 함량은 증가하는 경향성을 보인다. 이러한 성분 변화는 감람석, 단사회석, Fe-Ti 산화광물 및 사장석의 분별정출에

Table 1. Sample location of volcanic rocks in the study area, Jeju Island.

ID	Latitude	Longitude	Lava Flow Unit	Remark
S-06	33.243214	126.549633	Lf-1a-W	entrance of Sammaebong
S-011	33.241487	126.538145	Lf-1a-W	
S-015	33.245025	126.557806	Lf-1a-W	
S-016	33.241534	126.550469	Lf-1a-W	dike
S-017	33.241526	126.550896	Lf-1a-W	dike
S-018	33.240369	126.549025	Lf-1a-W	dike
S-019	33.239836	126.548603	Lf-1a-W	Oedolgae
S-020	33.236062	126.560504	Lf-1a-W	Saeseom
S-026	33.243764	126.558806	Lf-1a-W	Hwangryeong Temple
S-09	33.245086	126.577631	Lf-1a-E	Sojeongbang Falls
S-021	33.243476	126.569289	Lf-1a-E	Sonammeori
SGF-D	33.239276	126.555325	Lf-1b-W	dike
S-01	33.240917	126.552150	Lf-1b-W	dike
S-02	33.241117	126.551167	Lf-1b-W	dike/columnar joints
S-03	33.239250	126.556867	Lf-1b-W	
S-014	33.246678	126.554883	Lf-1b-W	Cheonjiyeon Falls
S-029	33.244422	126.571306	Lf-1b-E	Jeongbang Falls
S-022	33.244092	126.579150	Lf-2-E	upper part of Sojeongbang Falls
S-024	33.243983	126.580736	Lf-2-E	
S-013	33.240376	126.535837	Lf-2-W	
S-023	33.244325	126.579597	Lf-3a-E	Geomeunyeo
S-010	33.239431	126.533591	Lf-3a-W	Dombaenanggol
S-012	33.240986	126.537228	Lf-3a-W	
S-025	33.242019	126.561181	Lf-3b-E	
S-04	33.244967	126.560617	Lf-3b-E	Saengsugwe
S-05	33.242683	126.568250	Lf-3b-E	Jaguri
S-028	33.268678	126.500058	T	Eongtto Falls

의해 영향 받았음을 지시한다, 특히 현무암질 조면 안산암 성분 이후 조면암까지 P_2O_5 함량의 감소는 분별정출과정에서 인회석의 정출이 수반되었음을 나타낸다. 이러한 분별정출과정의 추정치는 이들 용암류가 동원 마그마로부터 유래되었을 경우를 전제로 한다.

그림 4는 대표시료에 대해 단계별 가열(Incremental heating)에 따른 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 연대 스펙트럼으로부터 얻어진 시료별 플래토 연대를 나타낸다. 연구 지역 내 분포하는 용암류의 연대는 437.5 ± 3.2 ka (S-016)에서 107.4 ± 1.5 ka (S-05)를 나타내어, 약 43만 8천 년 전에서 약 10만 7천 년 전 사이에 화산분화가 있었음을 지시한다.

영포폭포 조면암(S-028)의 연대는 826.3 ± 3.0 ka

로서, 서귀포 일대 육상에서 보고된 연대 중 인접한 각수바위 조면암(K-Ar 연대, $917 \pm 28 \sim 893 \pm 27$ ka, Lee *et al.*, 1994; $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 연대, 799 ± 6 ka, Koh *et al.*, 2013)과 함께 가장 오래된 암석 연대를 제시한다.

4.1 퇴적층

4.1.1 서귀포층

서귀포층의 유래는 서귀포항 서쪽 해안가에 패류 화석을 많이 포함한 지층을 Haraguchi (1931)가 ‘Seikipo Formation’이라 명명하면서 기원하였다. 이 층은 30여 m 높이로 약 1 km 지역에 걸쳐 지상에 노출되어 있다(그림 5). 육상에 노출된 서귀포층은 암상, 퇴적 구조, 침식경계면, 생물교란 및 화석 포함 여부 등에

Table 2. Major (wt%) element abundances of volcanic rocks in the studied area, Jeju Island.

ID	S-06	S-011	S-015	S-016	S-017	S-018	S-019	S-020
Rock Name	BTA	TA	TA	TA	TA	TA	TA	TA
SiO ₂	51.36	54.91	56.45	54.81	55.34	54.42	54.06	53.38
TiO ₂	2.20	1.58	1.38	1.70	1.65	1.69	1.74	1.82
Al ₂ O ₃	17.56	17.39	17.34	17.35	17.39	17.37	17.55	18.72
Fe ₂ O ₃ [†]	9.89	8.60	7.23	8.36	8.18	8.85	8.96	9.00
MnO	0.21	0.22	0.20	0.20	0.20	0.21	0.21	0.21
MgO	2.90	2.01	1.71	2.20	2.00	2.15	2.11	1.47
CaO	6.10	5.79	4.92	5.88	5.71	6.09	5.81	3.35
Na ₂ O	3.76	5.28	4.96	4.96	5.22	4.66	4.49	4.12
K ₂ O	2.91	3.06	3.55	3.10	3.21	3.01	3.03	3.59
P ₂ O ₅	0.87	0.72	0.52	0.68	0.66	0.81	0.83	0.66
LOI	1.85	-0.14	1.27	0.36	-0.07	0.37	0.82	3.32
Total	99.61	99.42	99.53	99.60	99.49	99.63	99.61	99.64

ID	S-026	S-09	S-021	SGF-D	S-01	S-02	S-03	S-014
Rock Name	TA	BTA	BTA	TA	TA	TA	TA	TA
SiO ₂	54.58	53.53	52.44	58.78	58.10	55.00	58.32	57.30
TiO ₂	1.90	1.95	2.06	1.07	1.16	1.69	1.17	1.31
Al ₂ O ₃	17.31	17.20	17.54	17.59	17.65	17.33	17.62	17.51
Fe ₂ O ₃ [†]	9.01	9.10	9.59	6.38	6.60	8.28	6.69	7.08
MnO	0.19	0.20	0.20	0.19	0.19	0.20	0.19	0.19
MgO	1.77	2.56	2.52	1.19	1.27	2.10	1.29	1.48
CaO	5.19	6.50	5.36	3.87	3.92	5.67	4.28	4.70
Na ₂ O	4.64	4.43	4.01	5.74	5.54	5.17	5.75	5.14
K ₂ O	3.06	2.92	3.06	3.91	3.84	3.19	3.74	3.65
P ₂ O ₅	0.78	0.80	0.82	0.37	0.41	0.68	0.41	0.48
LOI	1.08	0.45	2.00	0.41	0.83	0.19	0.07	0.70
Total	99.51	99.64	99.60	99.50	99.51	99.50	99.53	99.54

Total Fe₂O₃ as Fe₂O₃. Analyzed by XRF at Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources. Abbreviation: BTA-basaltic trachyandesite; TA-trachyandesite, T-trachyte, LOI-Loss On Ignition.

따라 10개의 화석포함층 단위와 4개의 화석비포함층 단위로 구분된다(Yoon and Chough, 2006).

이 연구에서는 기존 보고된 지층 기재 내용 이외에도 노두의 여러 부분에서 용암류 1b-W에 의해 관입되어 있음과 함께 단층도 발달하고 있음을 보고한다.

최근 빈번해진 태풍과 낙석 붕괴 위협에 대한 안전 조치로서 서귀포층의 분포지 노두에 대해 일반인의 접근을 금지하고 있다.

4.1.2 정방퇴적층

정방퇴적층은 최근 정방폭포의 서쪽 해안에 분포

하는 용암류의 지속적인 암반 붕괴로 인해 그 분포 범위가 점차 넓게 확인되고 있으며, 간조 시 3~5 m 두께로 노출된다(그림 6a). 준고결 내지 미고결 퇴적층으로 쉽게 부스러지며, 황갈색 내지 담갈색의 점토질 역암층 및 사질 역암층으로 구성되어 있다. 용암류 1b-E에 의해 피복되었다. 도폭에서는 서귀포층과 동일한 것으로 기재하고 있으나, 이 연구에서는 각각의 퇴적층을 피복하는 용암류의 암석성분(용암류 설명 참조)이 서로 다르므로 정방퇴적층으로 분리해 기재하였다. 노출된 부분은 퇴적층의 상부 일부분으로 추정되지만 향후 서귀포층과의 암층

Table 2. continued.

ID	S-029	S-022	S-024	S-013	S-023	S-010	S-012	S-04
Rock Name	BTA	BTA	TA	BTA	BTA	BTA	TA	TA
SiO ₂	52.83	53.74	54.47	51.63	54.59	54.69	55.16	58.20
TiO ₂	2.06	2.22	1.76	2.51	1.68	1.96	1.90	1.28
Al ₂ O ₃	17.04	16.12	16.20	16.11	17.01	15.97	15.89	16.05
Fe ₂ O ₃ [†]	9.45	10.80	10.71	11.09	9.77	10.32	10.07	9.14
MnO	0.19	0.17	0.17	0.16	0.16	0.16	0.16	0.17
MgO	2.73	2.71	2.25	3.95	2.52	2.68	2.52	1.62
CaO	6.81	5.33	5.27	7.21	5.59	5.54	5.44	4.09
Na ₂ O	4.41	4.22	4.54	4.04	4.77	4.68	4.85	5.22
K ₂ O	2.84	2.62	2.76	2.01	2.36	2.57	2.62	3.22
P ₂ O ₅	0.83	0.81	0.70	0.74	0.80	0.98	0.96	0.61
LOI	0.44	0.86	0.76	0.11	0.32	-0.16	-0.05	-0.18
Total	99.63	99.60	99.59	99.56	99.57	99.39	99.52	99.42

ID	S-025	S-05	S-028
Rock Name	TA	BTA	T
SiO ₂	56.65	54.85	60.64
TiO ₂	1.39	1.81	0.94
Al ₂ O ₃	16.77	16.45	17.60
Fe ₂ O ₃ [†]	9.76	10.30	5.33
MnO	0.17	0.17	0.28
MgO	1.55	2.44	0.80
CaO	3.18	5.12	3.85
Na ₂ O	4.68	4.69	5.81
K ₂ O	3.33	2.64	3.44
P ₂ O ₅	0.66	0.82	0.24
LOI	1.55	0.29	0.62
Total	99.69	99.58	99.55

서 대비 등 보다 상세한 연구가 필요하다.

4.1.3 남성리용회암

도폭에서 최초 명명되었으며 서귀포시 삼매봉 남쪽 황우지 해안에 20~30 m의 두께로 노출된 해안절벽 단면이 표식지이다(그림 7). 남성리용회암은 이 지역 이외에서 확인되지 않아 국지적으로 분포하는 것으로 해석되며 동측으로는 서귀포층이 인접한다. 준고결의 현무암질 화성쇄설층으로 회색 내지 황갈색을 띠며 화산회, 화산력, 그리고 화산암괴로 구성되어 있다. 완만한 경사의 층리가 잘 발달해 있으며 국부적으로 저각도 사층리와 역접이층리를 보이기

도 한다. 여러 개의 소규모 단층 구조가 발달하며(그림 7a), 용암류-1a-W에 의해 관입되거나 피복되었다(그림 7b, 7c).

남성리용회암은 서귀포층이 퇴적된 이후 천해환경에서 만들어진 수성화산체의 산물인 것으로 해석되었다(Kim, 2022).

4.1.4 송산동역암

도폭에서 최초 명명되었으며 서귀포시 서귀동 소남머리 해안에 길이 약 40 m, 두께 3~5 m로 노출된 지역이 표식지이다(그림 6b). 준고결 내지 미고결의 역암층으로 용암류-3b-E에 의해 피복되는데, 최근

Table 3. 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.	$^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$	MSWD	Age (ka)	2 s.d.	$^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$	MSWD		
S-06	433.5	2.0	93	0.83	18/24	431.8	3.2	303.07	7.37	0.79	431.7	3.2	303.76	7.42	0.76
S-011	432.6	1.5	97	0.71	21/24	434.3	3.9	295.41	6.43	0.72	434.1	3.9	295.74	6.41	0.71
S-015	431.2	3.0	95	0.35	20/24	431.4	8.0	298.04	12.18	0.38	431.0	7.9	298.90	12.13	0.37
S-016	437.5	3.2	90	0.31	18/22	437.3	8.6	282.62	10.48	0.89	437.4	8.6	282.74	10.55	0.87
S-017	434.6	2.0	94	0.40	20/24	434.7	4.5	287.67	5.88	0.58	434.6	4.5	287.82	5.90	0.60
S-018	433.9	1.2	70	1.20	10/24	432.0	10.2	302.89	23.78	1.34	432.2	10.2	302.55	23.91	1.33
S-019	437.5	2.5	94	0.62	20/24	436.6	4.1	300.76	8.68	0.64	436.5	4.1	301.48	8.74	0.63
S-020	436.1	1.5	95	1.33	20/24	436.8	1.5	296.73	1.72	1.09	436.9	1.6	296.77	1.78	1.17
S-026	434.8	5.7	89	0.44	23/24	433.3	6.1	300.39	3.26	0.40	433.5	6.1	300.52	3.26	0.40
S-09	433.2	2.3	92	0.72	20/24	433.2	3.1	291.21	4.55	0.83	433.4	3.2	291.34	4.56	0.84
S-021	433.2	3.6	97	0.65	20/24	434.0	4.7	297.51	3.64	0.69	434.1	4.8	297.68	3.65	0.67
SGF-D	429.6	1.7	62	1.79	10/26	433.0	8.5	283.96	34.83	1.86	433.0	8.6	284.38	35.29	1.88
S-01	427.6	1.5	88	2.02	15/25	428.2	2.3	295.62	7.21	2.00	428.2	2.4	296.37	7.45	2.13
S-02	429.7	1.6	71	1.63	21/28	429.5	2.3	294.20	3.02	1.65	429.5	2.3	294.29	3.02	1.65
S-03	427.3	1.4	97	1.27	20/24	428.2	3.3	296.64	5.79	1.31	428.2	3.3	296.81	5.81	1.32
S-014	427.7	1.9	99	0.55	22/24	428.2	2.2	297.84	1.32	0.53	428.3	2.1	297.85	1.32	0.53
S-029	429.9	4.4	100	0.45	26/26	428.7	5.5	300.03	4.72	0.44	428.6	5.5	300.44	4.73	0.45
S-022	211.7	4.0	100	0.32	24/24	211.6	5.4	293.28	2.17	0.36	211.7	5.4	293.30	2.17	0.36
S-024	239.7	1.9	95	0.96	21/24	239.3	2.3	295.08	2.34	1.12	239.5	2.4	295.17	2.43	1.21
S-013	194.7	3.1	97	1.18	19/24	194.6	4.8	295.14	1.58	1.62	194.6	4.7	295.20	1.57	1.59
S-023	129.0	2.0	100	0.73	23/24	129.5	2.6	298.05	1.54	0.75	129.5	2.6	298.06	1.54	0.76
S-010	123.4	3.0	88	1.54	15/22	120.9	5.0	299.71	1.85	1.53	121.0	5.0	299.72	1.85	1.53
S-012	117.9	2.3	91	0.64	20/24	118.9	2.8	297.10	2.22	0.61	118.9	2.8	297.20	2.22	0.61
S-025	113.1	1.6	100	0.71	24/24	113.0	2.0	296.26	1.37	0.78	113.1	2.0	296.28	1.37	0.77
S-04	109.9	1.4	99	0.52	22/24	109.9	2.1	295.35	2.44	0.61	109.9	2.1	295.38	2.45	0.61
S-05	107.4	1.5	88	0.84	18/24	106.6	3.3	299.22	2.94	0.88	106.6	3.3	299.29	2.95	0.88
S-028	826.3	3.0	100	1.15	26/26	826.3	3.2	297.50	2.39	1.15	827.0	3.2	297.38	2.39	1.15

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).

낙석 방지를 위한 석축공사로 노출지 전체가 가려져 더 이상 관찰할 수 없다.

4.1.5 생수궤퇴적층

천지연 계곡 입구 용천이 있는 작은 동굴인 ‘생수궤’ 내부 용암류-3b-E 하부에 소규모로 노출된 퇴적층(그림 6c)으로 도폭에는 송산동역암에 대비되는 것으로 기재되었다. 비록 송산동역암과 비슷한 고도에 분포하지만, 분포위치와 피복되는 용암류가 서로 달라서 이 연구에서는 구분하여 기재하였다.

4.2 용암류

4.2.1 용암류-1a

용암류-1a는 용암류 단위(lava flow unit) 전체가 치밀하며 비현정질 용암류로서, $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 연대가 437.5 ± 3.2 ka (S-016)에서 431.1 ± 3.0 ka (S-015)의 화산 분화로 형성된 용암류이다. 용암류의 SiO_2 함량은 51.4~56.5 wt%, $\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$ 함량은 6.7~8.9 wt%인 현무암질 조면안산암 내지 조면안산암에 해당한다.

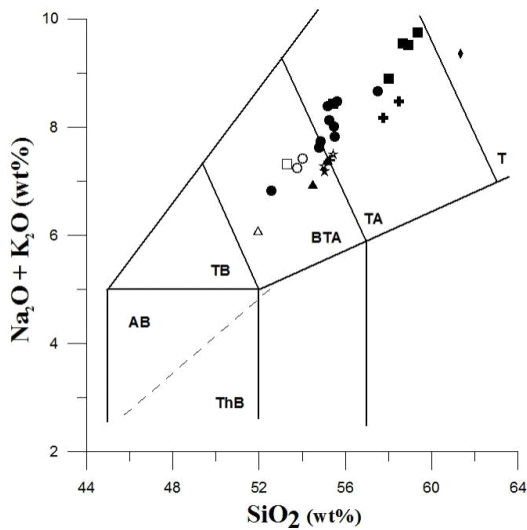


Fig. 2. $(\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O})$ (wt%) vs. SiO_2 (wt%) plot of the volcanic rocks in the studied area, Jeju Island. The fields show rock nomenclature schemes of Le Maitre *et al.* (2002) with thick solid line from Macdonald and Katura (1964), dividing alkalic rocks from sub-alkalic rocks. Abbreviation: ThB-tholeiitic basalt, AB-alkali basalt; TB-trachybasalt; BTA-basaltic trachyandesite; TA-trachyandesite, T-trachyte. The symbol is the same as in Figure 1 and black diamond represents trachyte from Eoengtto Falls.

서귀포항 서쪽의 용암류-1a-W가 분포하는 삼매봉 남쪽 서흥동 외돌개-황우지 해안은 서쪽에서부터 언뱅이안여, 도라간여, 서너분덕, 쇠머리코지, 외돌개, 무근덕, 우두암, 기차바위, 동너분덕, 신선바위, 선녀탕, 황우지 12 진지동굴 등 다양한 이름이 붙여진 해안경승지로서 길이 약 2 km, 높이 20~30 m의 해안절벽 지형이다. 특히 외돌개(명승 제79호)는 높이 20여 m, 폭 약 7~10 m의 돌기둥으로 해식 작용에 의해 만들어진 시스택이다. 비현정질인 이 지역의 용암류는 조면안산암으로 수십 m의 단일 용암류 단위로 다양한 형태의 주상절리대 및 해식지형을 이루고 있다(그림 8a, 8b). 한편, 삼매봉 7부 능선 부에 수 m의 용암류 단위가 노출된 현무암질 조면

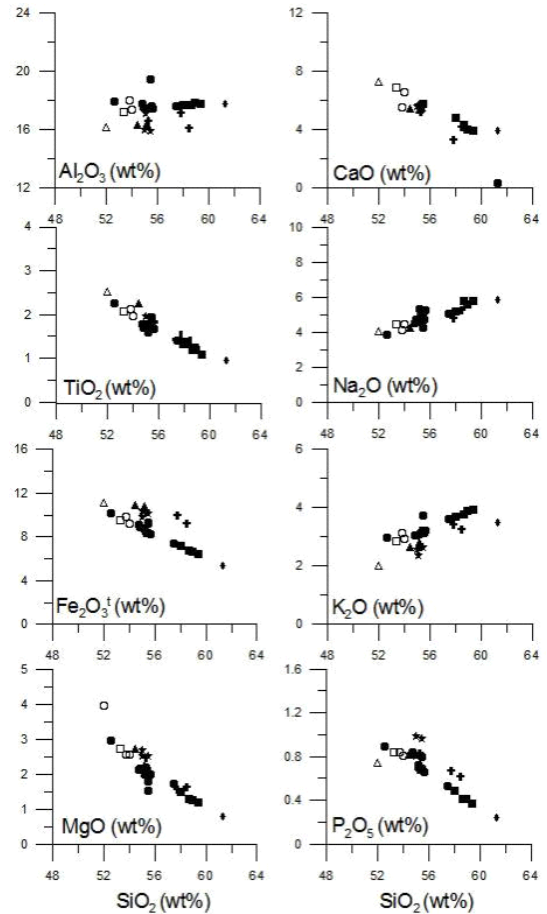


Fig. 3. Major oxides (wt%) vs. SiO_2 (wt%) variation diagram of the volcanic rocks in the studied area, Jeju Island. The symbol is the same as in Figure 1 and black diamond represents trachyte from Eoengtto Falls.

안산암인 용암류는 그 표면에 클링커가 발달하고 있는 아아 용암류로써 육상으로 이동되었음을 지시한다. 황우지 해변에서는 1~5 m 두께를 지닌 3개의 암맥으로 남성리응회암을 관입한다(그림 7b, 7c, 8c). 암맥 중 하나는 10~15 cm 크기의 초고철질 맨틀포획암을 포함한다. 또한, 천지연 주차장 서측 계곡에서는 단애를 이루며, 서귀포항 서쪽 새섬 전체는 표면부가 편평한 하나의 용암류 단위로 이루어져 있다. 도폭에서는 ‘천지연조면안산암’으로 기재하였다.

용암류-1a-W는 남성리응회암과는 응회암 형성 이후 관입하거나 피복한 관계를 뚜렷하게 나타내지만, 서귀포층과는 접촉면에서 대부분 붕괴된 절벽

지형을 이루고 있어 단절되거나 접근이 불가하여 직접적인 관계 확인이 불가능하다. 한편, 기존 연구자료(Koh *et al.*, 2013) 중 서귀포층 표식지와 인접한 천지연(CHY)공의 해발 (-)112 m 지점에서 서귀포층 중간 부분을 관입한 용암류는 현무암질 조면안산암이며 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 연대는 437 ± 15 ka로서 용암류-1a에 해당한다.

서귀포항 동쪽의 용암류-1a-E는 현무암질 조면안산암이다. 소남머리 동측에 독립적인 주상절리대로 해안절벽지형을 이루고 있다(그림 8d). 또 소정방폭포에서는 하부 용암류 단위로 간조 때 두께 약 5 m, 길이 20여 m로 노출되지만, 해수면 아래의 두

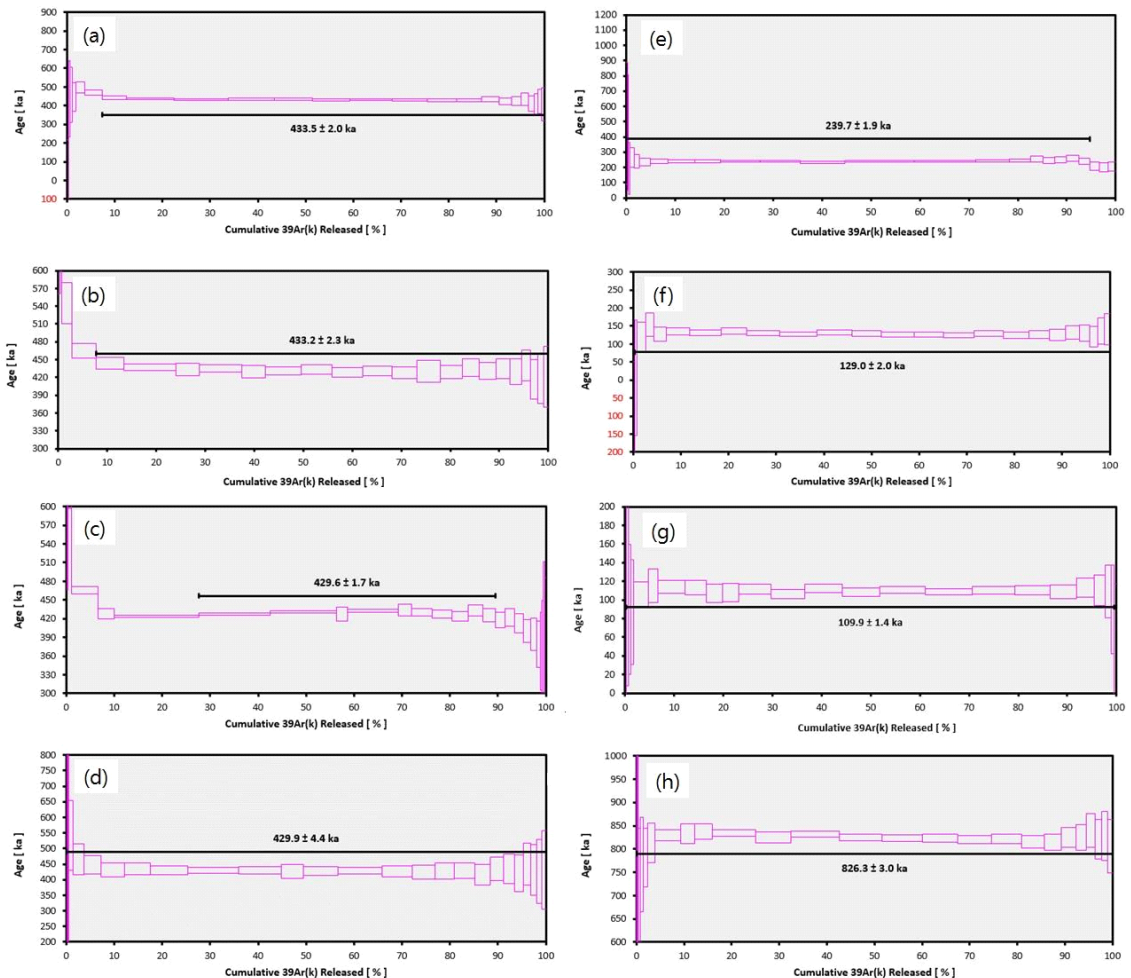


Fig. 4. ^{40}Ar - ^{39}Ar absolute age results of the volcanic rocks (groundmass) in the studied area, Jeju Island. (a) (sample ID#) S-6 (Lf-1a-W). (b) S-9 (Lf-1a-E). (c) SGF-D (Lf-1b-W). (d) S-29 (Lf-1b-E). (e) S-24 (Lf-2-E). (f) S-23 (Lf-3a-E). (g) S-4 (Lf-3b-E). (h) S-28 (trachyte from Eoengtto Falls).

계는 정확히 알 수 없다(그림 8e, 8f). 사장석과 케어슈타이트(kaesutite) 반정(혹은 미반정)이 매우 드물게 산점으로 관찰된다. 도폭에서는 ‘소정방현무암질조면안산암’으로 기재하고 있다.

4.2.2 용암류-1b

용암류-1b는 용암류 단위 전체가 치밀하며 비현정질 용암류로서, $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 연대가 429.9 ± 4.4 ka (S-029)에서 427.3 ± 1.4 ka (S-03)의 화산분화로 형성된 용암류이다. 서쪽의 용암류-1b-W는 SiO_2 함량 55.0~58.8 wt%, $\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$ 함량 8.4~9.7 wt%인 조면안산암에 해당하는 반면, 동쪽의 용암류-1b-E는 SiO_2 함량 52.8 wt%, $\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$ 함량 7.3 wt%인 현무암질 조면안산암에 해당한다. 즉 서귀포층을 피복하는

용암류의 조성은 조면안산암인 반면, 정방퇴적층을 피복하는 용암류는 현무암질 조면안산암으로서 그 조성이 다르다.

서귀포항 서쪽의 용암류-1b-W는 서귀포층을 관입하거나 이를 피복하여 분포한다(그림 8c). 서귀포

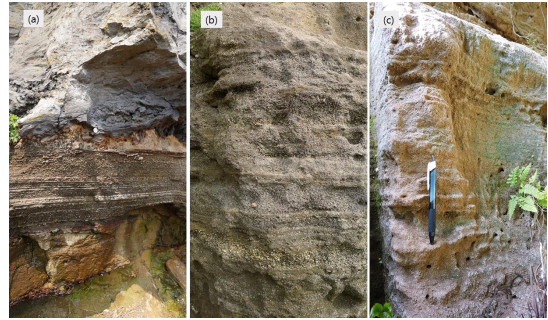


Fig. 6. Field photographs of sedimentary layers. (a) Jeongbang sedimentary formation. (b) Songsandong Conglomerate. (c) Saengsugwe sedimentary formation.



Fig. 5. Field photographs of Seogwipo Formation. (a) Lower part. (b) Upper part near Hwangryong Temple. (c) Folded layers at the bottom of Cheonjiyeon Falls.

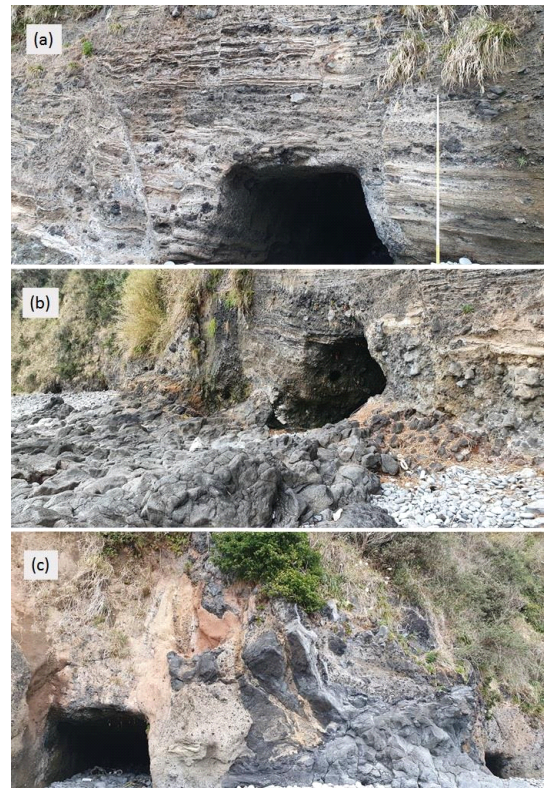


Fig. 7. Field photographs of Namseongri Tuff. (a) Blocky lapilli tuff with various fractures. (b) and (c) Dike intrusions of Lf-1a-W.

층 표식지의 해안선을 따라 여러 곳에서 서귀포층 내 소형의 관입체 형태로 노출되어 있다. 주를 이루는 용암류는 황우지 해변에서 서귀포층을 관입하는 암맥으로 지표로 노출된 이후 동쪽으로 유동되어 서귀포층의 최상위를 덮으며 아아 용암류로서 분포한다. 현재 해수면 위에서 최초 서귀포층과 접하는 부분에서는 다양한 형태의 페퍼라이트 조직(peperitic texture)을 이루고 있는 것으로 미루어(그림 9a, 9b) 관입 당시 비교적 물기를 많이 가지고 있는 서귀포층을 관입했었음을 짐작할 수 있다(Martin and Nemeth, 2007). 이후 지속적인 용암류의 공급과 유동 이후 냉각되는 동안 만들어진 주상절리대가 발달한다. 또한, 용암류의 가장 앞부분 하부 바닥은 용암류의 유동 시 만들어진 자파쇄 각력과 분석층이 서로 혼합

되어 화산성 퇴적층을 이룬다(그림 9c). 이런 암상으로 미루어 이 용암류가 유동될 당시 인근 지역(삼매봉으로 추정)에서 스트롬볼리형 화산분화가 동시에 소규모로 이루어지고 있었을 것으로 추정된다.

이 용암류의 두 번째 분포지는 천지연폭포의 절벽이다. 이 용암류는 북쪽으로 연장되어 서귀교 다리 하부에서 연외천의 동쪽 절벽 지형으로 이어진다. 도폭에서는 천지연폭포 계곡의 양쪽 일대까지 연장되는 것으로 해석하였다. 이 연구에서는 용암류의 조성과 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 연대에 근거하여, 동쪽 계곡은 용암류-1b-W 및 용암류-3b-E로 구분하였으나 아쉽게도 두 용암류의 경계는 확인이 불가능하였다.

서귀포항 동쪽의 용암류-1b-E는 비형정질이며 현무암질 조면안산암이다. 정방폭포 주변의 수십m 두

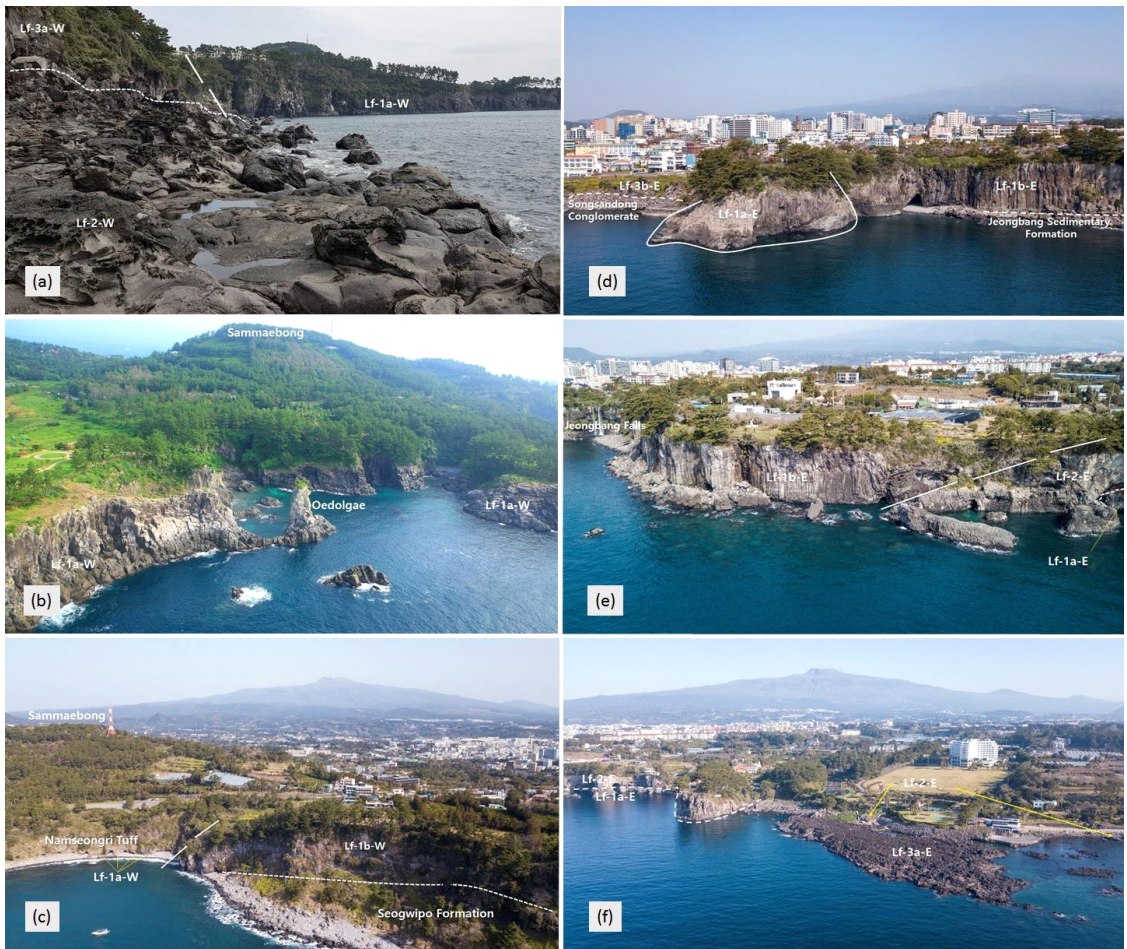


Fig. 8. Field photographs of lava flow units. (a) Dongbaenanggol seashore. (b) Oedolgae seashore. (c) Hwanguji seashore. (d) Sonammeori seashore. (e) Jeongbang Falls seashore. (f) Geomeunyeo seashore.

계 단일 용암 절벽지형을 이루고 있으며 용암류-1a-E에 비해 상대적으로 절리 폭의 규모가 큰 주상절리대를 이루고 있다(그림 8d, 8e). 도폭에서는 ‘정방동조면안산암’으로 기재하고 있다. 이 용암류는 하부의 정방퇴적층을 피복한다.

용암류-1a와 용암류-1b간의 접촉관계는 용암류-1a와 서귀포층과의 관계처럼 접촉면에서 대부분 붕괴된 절벽 지형을 이루고 있어, 단절되거나(단층으로 추정) 접근이 불가능하여 직접적인 관계 확인이 곤란하다.

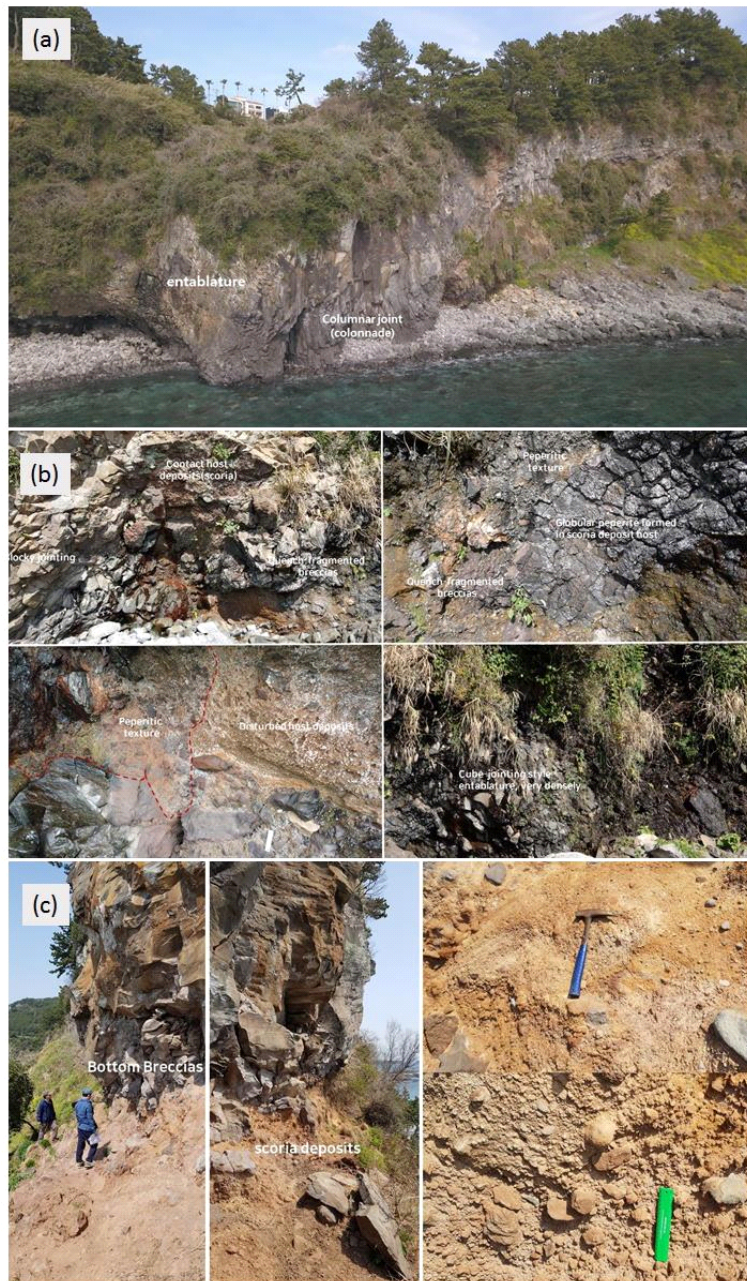


Fig. 9. Field photographs of Lf-1b-W. (a) Columnar joints at proximal part. (b) Various peperitic texture at the contact with Seogwipo Formation. (c) Breccia and scoria underneath the lava flow at the distal part.

4.2.3 용암류-2

용암류-2는 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 연대가 239.7 ± 1.9 ka (S-024)에서 194.7 ± 3.1 ka (S-013)의 화산분화로 형성된 용암류이다. 용암류는 SiO_2 함량 51.6~54.5 wt%, $\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$ 함량 6.1~7.3 wt%인 현무암질 조면안산암에 해당한다.

서귀포항 서쪽의 용암류-2-W는 호근동 돛배낭골 동쪽 해안의 최하부에 분포하는 파호이호이 용암류로써 반상휘석장석현무암의 특징을 지닌다. 이 용암류는 파식대에 위치하여 해수면 아래의 두께는 정확히 알 수 없으며(그림 8a), 용암류-3a-W에 의해 피복된다. 도폭에서는 용암류-2-W와 용암류-3a-W 모두 ‘대포동조면현무암’으로 기재되었다.

서귀포항 동쪽의 용암류-2-E는 소정방폭포를 구성하는 상위 용암류 및 거문여 해안을 따라 소규모 독립적으로 노출되어 분포한다(그림 8f). 특히 이들은 거문여를 이루는 용암류-3a-E에 비해 상대적으로 더 풍화되어 있다. 소정방폭포에서는 하부 용암류-1a-E와의 경계부에서 미약하게 토양층이 발달한다. 이들 용암류는 용암류 단위 전체가 치밀하며 비현정질 조직이 우세하지만 거문여 해안에서는 케어슈타이트 반정(혹은 미반정)이 매우 드물게 산점으로 관찰된다. 도폭에서는 ‘정방동조면안산암’으로 기재하고 있다.

4.2.4 용암류-3

용암류-3은 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 연대가 129.0 ± 2.0 ka (S-023)에서 107.4 ± 1.5 ka (S-05)의 화산분화로 형성된 용암류이다. 용암류는 SiO_2 함량 54.6~58.2 wt%, $\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$ 함량 7.1~8.4 wt%인 현무암질 조면안산암 내지 조면안산암에 해당한다.

서귀포항 서쪽의 용암류-3a-W는 호근동 돛배낭골 해안 최하부의 용암류-2-W를 피복하고 용암단위 전체가 치밀하며 비현정질의 현무암질 조면안산암 내지 조면안산암에 해당한다. 주상절리가 발달한 해안절벽을 이루고(그림 8a) 소규모의 용암동굴이 형성되어 있으며, 동굴에서 용암류가 유출된 흔적도 관찰할 수 있다. 돛배낭골 동쪽 해안에서 작고 볼록한 언덕지형을 이루는데 용암류-1a-W를 용암류-3a-W가 그 주변을 감싸고 유동된 형태를 이루고 있지만, 인접한 해안절벽에서 용암류-1a-W와의 접촉면은 절벽 지형(단층으로 추정)을 이루고 있어 접근이 불

가하여 직접적인 관계 확인이 곤란하다(그림 8a). 도폭에서는 ‘한라산조면암’으로 기재하고 있다.

서귀포항 동쪽의 용암류는 생수계, 자구리-소남머리, 거문여 일대에 분포한다. 거문여를 이루고 있는 용암류-3a-E는 다공질 반상휘석장석현무암의 특징을 지니며(그림 8f) 현무암질 조면안산암에 해당한다. 거문여는 파호이호이 용암류가 유동과정에서 점성 증가에 의해 생겨나는 형태적 변화 즉, 전이형 용암류(transitional lava flow)로 변화된 형태를 볼 수 있다. 도폭에서는 ‘시오름조면현무암’으로 기재하고 있다. 한편 천지연 계곡 동쪽 절벽 입구 일대에 분포하는 용암류-3b-E는 용암류 단위 전체가 치밀하며 비현정질로서 조면안산암에 해당한다. 특히 생수계에서는 생수계퇴적층을 피복하며 접촉면에서는 얇은 판상의 절리가 발달한다. 도폭에서는 ‘정방동조면안산암’으로 기재하고 있다. 용암류-1b-W와의 경계는 천지연 계곡의 동쪽 상부는 대부분 절벽을 이루고 있어 접근이 불가하여 확인이 곤란하다.

자구리 일대에 분포하는 용암류-3b-E는 바다 쪽으로 용암채널을 이루기도 하고 반상장석현무암의 특징을 지니며 현무암질 조면안산암에 해당하는데, 이 지역에서 가장 젊은 용암류에 해당한다. 약 2~10 m의 두께로 노출되어 있으며 하부에 송산동역암을 피복하고 있다(그림 8d). 도폭에서는 ‘시오름조면현무암’으로 기재하고 있다.

5. 고찰

제주도의 용암류 분출을 야기한 화산활동기는 지금까지 발표된 용암류의 연대 자료에 근거하면(Won *et al.*, 1986; Lee, D.Y. *et al.*, 1988; Lee, M.W. *et al.*, 1994; Koh *et al.*, 2013, 2019, 2021a, 2021b; Brenna *et al.*, 2015a, 2015b; Hong *et al.*, 2020; Marsden *et al.*, 2020), 크게 5개 단계로 구분된다(그림 10). 그 중 제주도 남부 서귀포 일대는 화산활동기-I, II, -III, -IV에 해당하는 용암류가 분포하고 있으며, 화산활동기-I, -II, -III 용암류는 매우 간헐적이고 국지적으로 분포하고 있다. 특히, 연구 지역인 서귀포항 주변은 화산활동기-III와 화산활동기-IV 동안 매우 제한적인 시기에 분출한 용암류가 분포하고 있음을 알 수 있다. 비록 지금까지 한라산 중심부 지하를 이루는 용암류의 정확한 연대가 부족한

상태이지만, 제주도 남부 지역에 화산활동기-I부터 화산활동기-III까지 분출한 오래 된 현무암질 용암류가 산발적으로 분포하고, 현무암질 조면안산암에서 조면암에 이르는 분화된 용암류가 해안가를 따라 분포하거나 해안에서 벗어나 독립적인 돛상의 섬(범섬, 문섬, 섯섬) 혹은 오름(영포폭포 일대를 포함한 고근산 및 각시바위 등)을 이루고 있는 현상은 이 시기 동안 화산체의 중심 분출보다는 지각변동에 수반된 틈새 분출에 의한 화산분화와 용암분출이 주를 이루었음을 지시한다(예, Mackey *et al.*, 2014).

용암류-1이 분출했던 화산활동기-III 동안인 약 44만 년 전에서 약 42만 년 전까지 해수면은 지금에 비해 최대 (-)130 m에서 최소 (-)50 m까지 급하게 변화(해수면 상승)하던 시기에 해당하지만, 여전히 지금보다 상당히 낮은 위치에 해수면이 있었음을 알 수 있다(Bintanja *et al.*, 2005). 서귀포층 표식지의 최상부는 화산쇄설성 삼각주의 퇴적물이 연암류에 의해 다시 운반되어 해안에 집적된 해변 퇴적층으로 해석(Yoon and Chough, 2006)되는 점에 비추어 당시 서귀포층의 상부는 지표에 노출되었거나 조간대의 환경에 있었을 것으로 추정할 수 있다. 이 시기 동안 화산활동은 제주도 주변에 만들어진 장력 환경에서 퇴적분지의 구조운동과 연관되어 있을 가능성

이 있다(예, Park *et al.*, 2000b; Brenna *et al.*, 2015a). 특히 이 연구에서 얻어진 결과와 같이 서귀포항 주변에서 여러 시기의 용암류가 해안을 따라 경계를 이루는 점은 이러한 추정을 가능하게 한다. 그럼에도 불구하고 단층선으로 추정되는 곳은 가시덩굴 식물에 덮여있는 함몰지형 혹은 해안절벽 지형으로 접근이 불가하거나, 용암류에 의해 피복되어 확인할 수 없다. 따라서 이 연구에서는 용암류와 용암류 간, 용암류와 퇴적층과의 접촉관계 및 시추공에서 포착되는 서귀포층의 심도 차이(논문 준비 중) 등을 고려하여 추정된 단층선으로 표기하였다(그림 1).

서귀포층 표식지 주변의 화산분화 과정을 용암류의 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 연대를 반영하여 추정하면 아래와 같다.

첫째, 장력 환경에서의 정단층이 형성되었고 현 서귀포층 표식지를 포함하는 지역은 단층의 하반이었으며 그 주변 상반 부분은 각 블록마다 고도를 달리하는 마치 꽃 유형의 구조(flower type; Huang and Liu, 2017)를 이루고 있었을 가능성이 있다. 이는 현재 서귀포 주변의 시추공에서 포착되는 서귀포층의 심도가 각각 차별적인 것으로 미루어 추정된다. 둘째, 구조선을 따른 화산활동은 최초 수성화산분화로 남성리용회암이 형성되었으며(Kim, 2022), 이후 계속된 화산활동으로 용암류-1(1a-W, 1a-E, 1b-W, 1b-E)의 분출이 있었다. 용암류-1이 해안선을 벗어난 서귀포 내륙의 시추코어(미발표자료)에서는 발견되지 않는 점에서 이들이 틈새 분화에 의해 분출된 것으로 추정된다. 셋째, 기존 모암에 대한 용암류-1b-W의 관입은 서귀포층 표식지를 포함하는 단층 하반의 암층 부분을 주변에 비해 상대적으로 더 들어 올렸을 것으로 추정된다. 한편, 서귀포층을 피복한 약 42만 8천 년 이후(서귀포층 퇴적 이후 화산활동) 화산활동기-IV까지 약 15만 년 간 서귀포 일대에서는 용암분출이 없었다(그림 11). 이후 화산활동기-IV 동안의 용암류는 서귀포항 북쪽 내륙 지역에서의 화산활동으로 분출한 용암류가 남쪽 해안가로 유동되어 분포한다.

앞으로 이들 구조선의 연장선에 해당하는 이 지역의 연안 및 육상 부분에 대한 지구물리 탐사를 통해 제주도 화산활동 초기의 구조적 특징을 밝히는 연구가 수행되길 기대한다. 이미 월라봉-군산 화산체의 연구(Koh *et al.*, 2021b)에서 언급한 바와 같이 기존 연구·발표된 제주도 남부의 지질 및 층서를

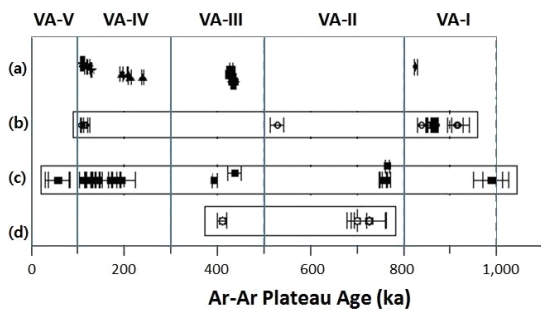


Fig. 10. Ar-Ar ages (with 2 SD) in the southern part of Jeju Island. (a) This study. (b) Wolrabong & Kunsan Area (Koh *et al.*, 2021b). (c) Data from borehole cores (DOH-05, DH-S and HOG) and Kagsubawi trachyte (Koh *et al.*, 2013). (d) K-Ar ages of Munseom & Seopseom trachyte from Won *et al.* (1986), Sioreum trachyte from Lee *et al.* (1994), and trachyandesite from Lee *et al.* (1988). Abbreviation; VA-I, volcanic activity stage-I (1~0.8 Ma); VA-II, volcanic activity stage-II (0.8~0.5 Ma); VA-III, volcanic activity stage-III (0.5~0.3 Ma); VA-IV, volcanic activity stage-IV (0.3~0.1 Ma); VA-V, volcanic activity stage-V (0.1 Ma~Holocene).

새롭게 규명하기 위한 노력이 지속적으로 필요함을 보여준다.

6. 결론

제주도 남부 서귀포항 주변 해안지역에 대한 야외지질조사, 용암류의 암석기재, 전암 주성분 및 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 연대, 주변 시추 주상도의 재해석을 바탕으로 이 지역의 구성지질과 화산층서를 밝히고, 화산활동 시기와 과정을 고찰하였다. 연구 결과를 요약하면 다음과 같다.

1) 이 지역의 지질은 5개의 퇴적층과 9개의 용암류로 구성된다.

2) 퇴적층은 서귀포층, 정방퇴적층, 남성리응회암, 송산역암, 생수곶퇴적층이다.

3) 용암류는 SiO_2 함량 51.4~58.8 wt%, $\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$ 함량 5.8~9.7 wt%인 알칼리 계열의 현무암질 조면안산암 내지 조면안산암에 해당하며, 용암류의 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 연대는 437.5±3.2 ka에서 107.4±1.5 ka로 약 43만 8천 년 전에서 약 10만 7천 년 전 사이에 화산분화가 있었음을 지시한다. 해안에서 떨어진 영포 폭포 조면암(S-028; SiO_2 60.6 wt%)의 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 연대는 826.3±3.0 ka이다. 서귀포 일대 육상에서 보고된 연대 중 인접한 각수바위 조면암과 함께 가장 오래된 암석 연대를 제시한다.

4) 용암류는 암상과 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 연대에 따라 용암류-1a(-W와 -E), 용암류-1b(-W와 -E), 용암류-2(-W와 -E), 용암류-3(a-W, a-E, b-E)로 구분되며, 각 퇴적층과 접하는 용암류는 서로 다르다. 서귀포층은 조면안산암질 용암류-1b-W에 의해 관입 및 피복되며, 정방퇴적층은 현무암질 조면안산암질 용암류-1b-E에 의해 피복되고, 남성리응회암은 현무암질 조면안산암 내지 조면안산암질 용암류-1a-W에 의해 관입되거나 피복되며, 송산동역암은 현무암질 조면안산암질 용암류-3a-E에 의해 피복되고, 생수곶퇴적층은 조면안산암질 용암류-3b-E에 의해 피복되었다.

5) 서귀포층을 피복하는 용암류의 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 연대는 429.9±4.4 ka에서 427.3±1.4 ka로, 이전 연구 결과에 비해 표식지에서 서귀포층의 퇴적상한을 좀 더 정확히 규명하였다.

6) 용암류의 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 연대는 이 지역에서 서귀포층을 피복한 약 42만 8천 년 이후(서귀포층 퇴적

이후 화산활동) 약 15만 년 간 용암분출이 없었음을 지시하며, 약 25만 년 전에서 10만 년 전의 용암류는 서귀포항 북쪽 내륙 지역에서의 화산활동으로 분출한 용암류가 남쪽 해안가로 유동된 것으로 해석된다.

7) 용암류의 분포 양상과 접촉관계, 그리고 퇴적층(특히 서귀포층)의 분포 심도를 고려할 때 약 40만 년 이전의 화산활동은 화산체의 중심 분출보다는 지각변동에 수반된 틈새 분출에 의한 화산분화와 용암분출이 주를 이루었을 것으로 추정된다.

감사의 글

이 연구는 제주연구원 제주지하수연구센터 및 제주특별자치도개발공사의 지원에 의해 수행되었다. 야외지질조사 및 시료채취에 도움을 준 전용문박사께 고마움을 표하며, 논문의 초고에 세심한 심사를 해주신 심사위원과 편집위원께 감사드립니다.

REFERENCES

- Bintanja, R., van de Wal, R.S.W. and Oerlemans, J., 2005, Modelled atmospheric temperatures and global sea levels over the past million years. *Nature*, 437, 125-128.
- 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/s00445-015-0928-9>.
- 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>.
- Haraguchi, K., 1931, Saishu volcano. *Bulletin on the Geological Survey of Chosen (Korea)*, 10, 1-12 (in Japanese).
- Hong, S.S., Lee, C.O., Lim, J., Lee, J.Y. and Ahn, U.S., 2020, Volcanic Activity of the Volcanoes in the Hallasan Natural Reserve, Jeju Island, Korea. *Economic and Environmental geology*, 54, 1-19 (in Korean with English abstract).
- Huang, L. and Liu, C.-Y., 2017, Three types of flower structures in a divergent-wrench fault zone. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 122, 10478-10497.
- Kang, S.S., 1995, Sedimentary facies and paleoenvironment of the Lower Pleistocene Sogwipo Formation, Cheju Island, Korea. *The Quaternary Research*, 34,

- 19-38.
- 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, S.H., 2022, Eruptive and emplacement processes of the Namseongri Tuff, southern Jeju Island, Korea. M.S. thesis, Gyeongsang National University, Jinju, 59 p (in Korean with English abstract).
- Koh, G.W., 1997, Characteristics of the groundwater and hydrogeologic implications of the Seoguipo Formation in Cheju Island. Ph.D. thesis, Pusan National University, Pusan, 326 p (in Korean with English abstract).
- 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*, 55, 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*, 49, 209-230 (in Korean with English Abstract).
- Koh, G.W., Park, J.B., Kim, T.H., Koh, H.J., Moon, D.C., Mun, S.H. and Han, H.J., 2021a, Geologic characteristics of Jeju Samdasoo watershed in Jeju Island, Korea (II): Subsurface geology and volcanic activities. *Journal of the Geological Society of Korea*, 57, 307-328 (in Korean with English Abstract).
- Koh, G.W., Park, J.B., Koh, C.S., Jeon, Y., Moon, D.C., Moon, S.H. and Im, J.Y., 2021b, Geology and Volcanic Activities of Wollabong-Gunsan, the Oldest Twin Volcanoes in Jeju Island. *Journal of the Geological Society of Korea*, 57, 141-164 (in Korean with English Abstract).
- Koppers, A.A., 2002, ArArCALC software for ^{40}Ar - ^{39}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 Subcommittee 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., 1982, Petrology and Petrochemistry of Jeju volcanic island, Korea. *Sci Rep., Tohoku Univ., Ser.*, 315, 521-541.
- 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.
- Mackey, B.H., Castonguay, S.R., Wallace, P.J. and Weldon, R.J., 2014, Synchronous late Pleistocene extensional faulting and basaltic volcanism at Four Craters Lava Field, central Oregon, USA. *Geosphere*, 10, 1247-1254.
- Marsden, R.C., Danisik, M., Ahn, U.-S., Friedrichs, B., Schmitt, A.K., Kirkland, C.L., McDonald, B. and Evans, N.J., 2020, Zircon double-dating of Quaternary eruptions on Jeju Island. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 410, <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2020.107171>.
- Martin, U. and Nemeth, K., 2007, Blocky versus fluidal peperite textures developed in volcanic conduits, vents and crater lakes of phreatomagmatic volcanoes in Mio/Pliocene volcanic fields of Western Hungary. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 159, 164-178.
- Middlemost, E.A.K., 1989, Iron oxidation ratios, norms and the classification of volcanic rocks. *Chemical Geology*, 77, 19-26.
- Min, K.D., Won, J.S. and Hwang, S.Y., 1986, Paleomagnetic study on the volcanic and sedimentary rocks of Jeju Island. *Economic and Environmental Geology*, 19, 153-161 (in Korean with English abstract).
- Oh, J., Yi, S., Yoon, S., Koh, G.W., Yun, H. and Lee, J.-D., 2000, Subsurface stratigraphy of Jeju Island. *Journal of the Geological Society of Korea*, 36, 181-194 (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., 2000a, 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., 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., 2000b, 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).
- Schaen, A.J., Jicha, B.R., Hodges, K.V., Vermeesch, P., Stelten, M.E., Mercer, C.M., Phillips, D., Rivera, T.A., Jourdan, F., Matchan, E.L., Hemming, S.R., Morgan, L.E., Kelley, S.P., Cassata, W.S., Heizler, M.T., Vasconcelos, P.M., Benowitz, J.A., Koppers, A.A.P., Mark, D.F., Niespolo, E.M., Sprain, C.J., Hames, W.E., Kuiper, K.F., Turrin, B.D., Renne, P.R., Ross, J., Nomade, S., Guillou, H., Webb, L.E., Cohen, B.A., Calvert, A.T., Joyce, N., Ganerød, M., Wjibrans, J., Ishizuka, O., He, H., Ramirez, A., Pfänder, J.A., Lopez-Martínez, M., Qiu, H. and Singer, B.S.,

- 2021, Interpreting and reporting $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ geochronologic data. *The Geological Society of America Bulletin*, 133, 461-487, <https://doi.org/10.1130/B35560.1>.
- Sohn, Y.K. and Park, K.H., 2004, Early-stage volcanism and sedimentation of Jeju Island revealed by the Sageye borehole, SW Jeju Island, Korea. *Geosciences Journal*, 8, 73-84.
- 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. *Geology*, 38, 763-766.
- Son, I.S., Lee, M.W. and Youn, J.S., 1998, The subsurface stratigraphy of Cheju volcanic island, Korea. *Journal of Korean Earth Science Society*, 19, 581-589 (in Korean with English abstract).
- Tamanyu, S., 1990, The K-Ar ages and their stratigraphic interpretation of the Cheju Island volcanics, Korea. *Bulletin of the Geological Survey of Japan*, 41, 527-537 (in Japanese with English abstract).
- Won, C.K., 1976, Study of petrochemistry of volcanic rocks in Jeju Island. *Journal of the Geological Society of Korea*, 12, 207-226 (in Korean with English abstract).
- 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).
- Yi, S., Yun, H. and Yoon, S., 1998, Calcareous nannoplankton from Seoguiipo Formation of Cheju Island, Korea and its Paleooceanographic implication. *Paleontological Research*, 2, 253-265.
- Yokoyama, M., 1923, On some fossil shells from the Island of Saishu in the strait of Tsushima. *Journal of the College of Science, Imperial University of Tokyo*, 44, 1-9.
- Yoon, S., Koh, G.W. and Kim, I.T., 1995, Development history of Cheju Island. *Bulletin of Cheju-do Provincial Government*, 98, 148-164 (in Korean).
- Yoon, S.-H. and Chough, S.-K., 2006, Sedimentary facies and depositional environment of the Seoguiipo Formation, Jeju Island. *Journal of the Geological Society of Korea*, 42, 1-17 (in Korean with English abstract).

Received : October 24, 2022

Revised : December 4, 2022

Accepted : January 10, 2023