

제주삼다수 유역의 지질특성(I): 지표지질과 화산활동

고기원¹ · 박준범^{2,*} · 김태형¹ · 문덕철¹ · 문수형¹

¹제주특별자치도개발공사

²미육군국동공병단

요 약

제주도 표선유역 수리지질조사의 일환으로, 제주삼다수 유역 일대 약 27 km²에 대해 지질조사를 수행하고, 1:25,000 축척의 정확도를 지닌 지질도를 작성하였고, 구축된 모든 정보는 ESRI[®] ArcGIS[™] 기반으로 지질정보화하였다. 이 지역은 12개 이상의 크고 작은 소화산체(분석구)로 둘러싸여 있고, 지표지질은 용암류, 화산퇴적층(분석구(층)과 화산쇄설층), 비화산퇴적층(퇴적층, 봉적층 및 표토)으로 구성된다. 용암류는 주로 하천 계곡 주변이나 하상에 노출되어 그 분포가 확인되지만 그 외 지역에서는 대부분 화산퇴적층에 의해 덮여 있다. 지표에 분포하는 용암류는 최하부 반상장석용암류를 포함하여 15개의 용암류로 구분된다. 용암류의 조성은 SiO₂ 46.1~55.9 wt%, Na₂O+K₂O 3.2~7.4 wt%를 지닌 알칼리현무암-조면현무암-현무암질 조면안산암-조면안산암에 해당한다. 이 지역 용암류의 지화학적 경향은 교래교퇴적층을 중심으로 하부에 분포하는 반상장석용암류와 교래교퇴적층 퇴적 동시기 혹은 이후에 분출한 용암류로 구분된다. ⁴⁰Ar/³⁹Ar 절대연대에 의하면 반상장석용암류가 48.5±11.4 ka로 가장 오래된 연대를, 늑서리오름용암류가 17.3±8.6 ka로 가장 젊다. 암층서와 ⁴⁰Ar/³⁹Ar 연대자료를 종합하면, 약 4~6만 년 전 반상장석용암류가 분출된 이후 휴지기 동안 일부 계곡 지형에 교래교퇴적층이 형성되었으며, 이후 약 3만 5천 년 전에서 약 1만 7천 년 전까지 재활성된 화산활동에 의해 지표 지형이 형성된 것으로 해석된다.

주요어: 제주삼다수, 지표지질, ⁴⁰Ar/³⁹Ar 절대연대, 화산활동, 지질정보화

Gi Won Koh, Jun Beom Park, Tae Hyong Kim, Deok Cheol Moon and Su Hyong Mun, 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. v. 57, no. 1, p. 49-65

ABSTRACT: As a part of hydrogeologic study of Pyoseon watershed in Jeju Island, we carried out a geologic investigation of Jeju Samdasoo watershed area, approximately 27 km², made a geologic map with the accuracy of 1:25,000 scale and compiled whole data to the geologic information system on ESRI[®] ArcGIS[™]. The area is surrounded by more than 12 small volcanoes (scoria cones) and is composed of lava flows, volcanic sedimentary deposits (scoria cone and volcanoclastic deposit) and non-volcanic sedimentary deposits (sedimentary formation, colluvium and top soil). The lava flows are only exposed along and at the base of stream valleys and mostly covered with volcanic sedimentary deposits. The lava flows are classified into 15 flow units, and the rock compositions of lava flows belong to alkali basalt-trachybasalt-basaltic trachyandesite-trachyandesite with SiO₂ 46.1~55.9 wt% and Na₂O+K₂O 3.2~7.4 wt%. Geochemical trend of the lava flows are divided into porphyritic feldspar lava flows and others which were erupted during syn- or pro-sedimentation of Gyoraegyo Sedimentary Formation. The ⁴⁰Ar/³⁹Ar absolute age of lava flows ranges from the oldest, 48.5±11.4 ka of Porphyritic Feldspar Lava Flows to the youngest, 17.3±8.6 ka of Nuepseori Oreum Lava Flows. The stratigraphy and ⁴⁰Ar/³⁹Ar absolute age indicate that the topography of the studied area has been formed by a series of (1) lava flow effusion about 40~60 ka, (2) formation of Gyoraegyo Sedimentary Formation on low-lying valley during repose, and (3) rejuvenated volcanic activities during the period from about 35 k to 17 ka.

Key words: Jeju Samdasoo, surface geology, ⁴⁰Ar/³⁹Ar absolute age, volcanic activity, geologic information system

(Gi Won Koh, Tae Hyong Kim, Deok Cheol Moon and Su Hyong Mun, Water Resources R&D Center, Jeju Special Self-Governing Province Developing Corporation, Jeju 63345, Republic of Korea; Jun Beom Park, US Army Corps of Engineers Far East District, Republic of Korea)

* Corresponding author: +82-503-355-6126, E-mail: chunpom@empas.com

1. 서 언

1990년대에 들어 제주도 지하수의 체계적인 보전·관리를 위해 본격적으로 도 전역을 대상으로 한 지질조사가 수행되어 축척 1:5만과 1:25만의 지질도폭(Won *et al.*, 1993, 1995; Park *et al.*, 1998, 2000a, 2000b, 2000c, 2008)이 간행되었고, 그 이후 부속 도서와 도내의 주요 지질명소를 중심으로 활발한 지질 및 암석학적 연구가 수행되었다(예: Yun *et al.*, 2002; Koh *et al.*, 2003, 2005, 2007a, 2007b; Yoon *et al.*, 2006; JSSGP, 2011; Park *et al.*, 2014; Kil *et al.*, 2016). 그러나 용암류의 ^{40}Ar - ^{39}Ar 절대연대를 바탕으로 제시된 제주도 화산활동사(Koh *et al.*, 2013)와 부합하는 제주도 전체적인 지질분포도의 재작성 및 지질층서를 재정립하고자 하는 노력은 아직까지 부족한 실정이다.

우리는 제주도 표선유역(JSSGP, 2018) 수리지질 조사의 일환으로 제주삼다수 유역(38.3 km²) 중 약 27 km²에 대해 지질조사를 수행하여 지질도를 작성하였다(그림 1). 이 지역은 제주시 조천읍 교래리 일대로서, 먹는샘물 제주삼다수의 취수원이 위치하는데 서쪽으로는 한라산국립공원과 접하며, 사려니숲, 삼다수숲, 붉은오름휴양림, 절물오름휴양림, 교래곶자왈 등이 위치하고 삼다수숲 주변은 2018년 유네스코 세계지질공원 지질명소로 선정되기도 하였다. 연구 지역은 제주-애월 도폭(Park *et al.*, 1998)과 서귀포-하효리 도폭(Park *et al.*, 2000b)이 중첩되는 곳으로 두 도폭에 따르면 용암류 간의 경계가 서로 맞지 않거나 층명(제주-애월 도폭-물장음교현무암; 서귀포-하효리 도폭-물장음조면현무암)이 다르다. 따라서 축척 1:5천 수치지형도(1918년 구 지형도 포함), 2009년 촬영된 1 m급 항공 정사영상, 2017년 촬영

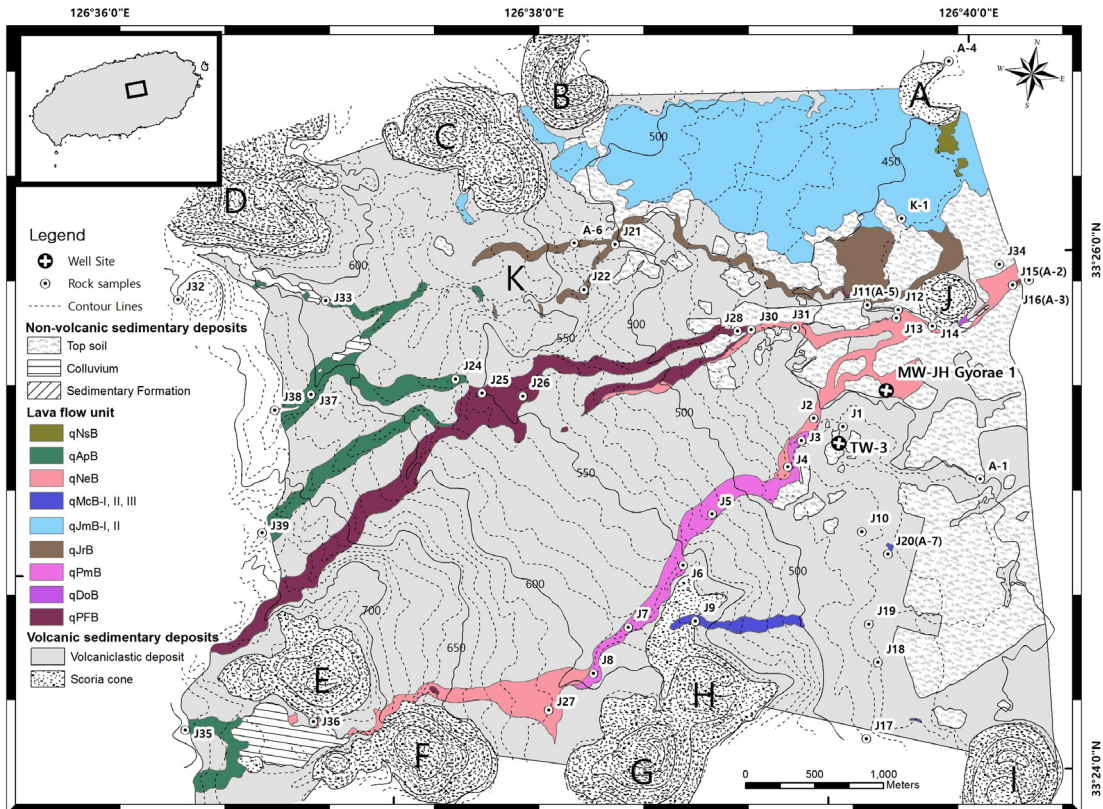


Fig. 1. The geologic map of the studied area, Jeju Island. Oreum Name: A-Nuepseori Oreum, B-Min Oreum, C-Jeolmul Oreum, D-Gaewolyi Oreum, E-Neobgeori Oreum, F-Goepnyeni Oreum, G-Mulchart Oreum, H-Malchart Oreum, I-Bulgeun Oreum, J-Dombae Oreum, K-Jigri Oreum. Note that Table 1 refers to the explanation of code for lava flow unit.

된 50 cm급 위성영상(Worldview-3)을 기본도로 하여 지질조사를 수행하고 주요 용암류에서 암석시료를 채취하였다(표 1). 암상 기재 및 암석화학분석 결과의 해석을 바탕으로 용암류, 화산퇴적층(분석구(층)와 화산쇄설층), 비화산퇴적층(퇴적층, 봉적층 및 표토)으로 구분하고 그 지질경계를 설정하여, 축척 1:2만 5천 지도의 정확도를 지닌 지질도를 작성하였고, ESRI® ArcGIS™ 기반으로 지질정보화하였다(그림 1).

이 논문은 제주삼다수 지역(조천읍 교래리 일대 약 27 km²)의 지질분포 및 용암류의 암석 성분과 ⁴⁰Ar/³⁹Ar 절대연대를 보고하고, 이를 바탕으로 이 지역의 지표지질 및 화산활동에 대해 논하고자 한다.

2. 지질 각론

2.1 분석구(층)

이 지역은 넓거리오름, 궤펜이오름, 물чат오름, 말чат오름, 붉은오름, 성진이오름, 개월이오름, 절물오름, 민오름, 늪서리오름, 돛배오름, 지그리오름 등 12개 이상의 크고 작은 소화산체(분석구)로 둘러싸여 있다. 이들 분석구는 다양한 크기의 화산쇄설물(테프라; tephra)로 구성되어 있으며, 그 중 복합 분석구의 특징을 가지는 경우는 '오름군'이라 명명하였다.

넓거리오름군(그림 1f)은 광거이악(廣巨伊岳) 혹은 광가악(廣街岳)이라고도 하며, 두 개의 분석구로 이루어진 복합 분석구이다. 서쪽의 작은 분석구는 원추형을 이루는 반면, 동쪽의 큰 분석구(넓거리오름; 표고 810 m)는 북서쪽으로 벌어진 말발굽형 분석구를 이룬다.

궤펜이오름군(그림 1d)은 고편악(孤片岳)이라고도 하며, 세 개의 분석구로 이루어진 복합 분석구이다. 가장 서쪽의 분석구는 셋궤펜이오름(표고 770 m), 중간은 셋궤펜이오름(표고 740 m), 그리고 주봉인 동쪽의 것은 큰궤펜이오름(표고 792 m)으로 구분된다. 셋 및 셋궤펜이오름은 원형 분석구를 이루는 반면, 큰궤펜이오름은 분화구에서부터 길이가 동쪽 사면이 더 긴 타원형 분석구이다.

물чат오름(그림 1g)은 수성악(水城岳)이라고도 하며, 주 분석구의 기슭 서쪽과 북쪽으로 약간 튀어나온 소규모 언덕 형태를 지닌 타원형 분석구(표고 717.2 m)이다. 정상부는 원형 분화구로, 분화구 내부에 산

정 화구호가 발달한다.

말чат오름군(그림 1h)은 언성악(言城岳) 또는 마을성악(馬乙城岳)이라고도 하며, 동쪽으로 벌어진 말발굽형 분석구(표고 653.3 m)이다. 남서쪽 사면은 물чат오름과 접하며, 북서쪽 사면에 작은 무명오름(용암분출)을 포함하는 복합 분석구로서 말чат오름군으로 명명하였다.

붉은오름(그림 1i)은 적악(赤嶽) 또는 건을근악(件乙斤嶽), 건근악(件斤嶽), 자악(赭嶽), 적악봉(赤嶽峯)이라고도 하며, 원형 분석구(표고 569 m)로서 중심에서 약간 남쪽에 원형 분화구를 지닌다.

개월이오름군(그림 1d)은 개월오름, 개오리오름, 견월악(犬月岳)이라고도 하며, 크고 작은 세 개의 봉우리로 이루어진 복합 분석구이다. 일반적으로 개월이오름이라 할 때는 송신 시설물이 있는 주봉(표고 743 m)을 가리키며, 북동쪽의 봉우리는 작은개월이오름(표고 664 m), 북쪽의 것은 셋개월이오름(표고 658 m)이라 한다. 서로 군집을 이루어 복잡한 형태의 분석구를 이루며, 개월이오름 정상부와 작은개월이오름 정상부 사이에 원형의 분화구가 있다.

절물오름군(그림 1c)은 대나오름, 다나오름, 사악(寺岳), 단하악(丹霞岳)이라고도 하며, 크고 작은 세 개의 봉우리로 이루어진 타원형 형태를 갖고 있는 복합 분석구이다. 절물오름(표고 696.9 m)은 통상 중앙에 분화구를 지니는 타원형의 원형 분석구이나, 서쪽 하단부에서 소규모 북쪽으로 벌어진 말발굽형 분석구를 하나 더 가지고 있다. 인접한 작은절물오름(표고 656.7 m)은 미약하게 북서쪽으로 살짝 벌어진 말발굽형 분석구이다. 한편, 절물오름과 작은절물오름 사이 남쪽에는 소규모 현무암질 용암구(lava cone) 지형을 이루고 있다.

민오름(그림 1b)은 뒗민오름, 무네오름, 민악(敏岳)이라고도 하며, 절물오름군의 동쪽에 인접하고, 남쪽 봉우리를 주봉(표고 651 m)으로 서너 개의 작은 봉우리가 완만한 기복의 등성이를 이루면서 북동쪽으로 터진 말발굽형 분석구이다. 말발굽형 화구의 단면은 소위 혀 내민 모양으로 분석구의 잔존체가 분포하며, 말발굽형 화구 상단부, 즉 주봉의 안쪽 사면에는 깊이가 약 70 m쯤 되는 깔때기형의 화구 형태가 남아있다.

늪서리오름(그림 1a)은 늪새리오름 또는 만상봉(晚霜峰)이라고도 하며, 원형 분화구에서 절반 이상

Table 1. Sample locations of lava flows at the studied area, Jeju Island.

ID	Latitude	Longitude	Lava Flow Unit Name	Code
J1	33.419333	126.662500	Malchart Oreum Lava Flows II	qMcB-II
J2	33.419528	126.660139	Neobgeori Oreum Lava Flows	qNeB
J3	33.417944	126.659500	Pre-Mulchart Oreum Lava Flows	qPmB
J4	33.416111	126.658833	Neobgeori Oreum Lava Flows	qNeB
J5	33.412194	126.653667	Pre-Mulchart Oreum Lava Flows	qPmB
J6	33.408556	126.652167	Pre-Mulchart Oreum Lava Flows	qPmB
J7	33.403917	126.648833	Pre-Mulchart Oreum Lava Flows	qPmB
J8	33.400556	126.646806	Pre-Mulchart Oreum Lava Flows	qPmB
J9	33.405111	126.653889	Malchart Oreum Lava Flows III	qMcB-III
J10	33.412806	126.665417	Malchart Oreum Lava Flows II	qMcB-II
J11(A-5)	33.427444	126.662694	Jigri Oreum Lava Flows	qJrB
J12	33.427500	126.665111	Porphyritic Feldspar Lava Flows	qPFB
J13	33.426944	126.665083	Jigri Oreum Lava Flows	qJrB
J14	33.426861	126.667944	Dombae Oreum Lava Flows	qDoB
J15(A-2)	33.430444	126.673528	Neobgeori Oreum Lava Flows	qNeB
J16(A-3)	33.430944	126.674722	Porphyritic Feldspar Lava Flows	qPFB
J17	33.399528	126.668639	Malchart Oreum Lava Flows II	qMcB-II
J18	33.404583	126.668472	Malchart Oreum Lava Flows I	qMcB-I
J19	33.406944	126.667250	Malchart Oreum Lava Flows I	qMcB-I
J20(A-7)	33.411667	126.667722	Malchart Oreum Lava Flows II	qMcB-II
J21	33.428389	126.642472	Jigri Oreum Lava Flows	qJrB
J22	33.425111	126.640722	Jigri Oreum Lava Flows	qJrB
J24	33.417861	126.632111	Aphyric Lava Flows	qApB
J25	33.417278	126.634361	Porphyritic Feldspar Lava Flows	qPFB
J26	33.417556	126.637528	Neobgeori Oreum Lava Flows	qNeB
J27	33.397667	126.643889	Neobgeori Oreum Lava Flows	qNeB
J28	33.424250	126.653083	Porphyritic Feldspar Lava Flows	qPFB
J30	33.424500	126.654111	Porphyritic Feldspar Lava Flows	qPFB
J31	33.425139	126.657444	Neobgeori Oreum Lava Flows	qNeB
J32	33.419722	126.609722	Unnamed Oreum Lava Flows	qUnB
J33	33.421389	126.621056	Gaewolyi Oreum Lava Flows	qGwB
J34	33.431611	126.672222	Neobgeori Oreum Lava Flows	qNeB
J35	33.392139	126.616306	Aphyric Lava Flows	qApB
J36	33.394167	126.626000	Neobgeori Oreum Lava Flows	qNeB
J37	33.415167	126.621250	Aphyric Lava Flows	qApB
J38*	33.413750	126.618694	Pre-Muljangori Lava Flows	qPjB
J39	33.405722	126.619444	Aphyric Lava Flows	qApB
K-1	33.433422	126.664089	Jeolmul Oreum Lava Flows I	qJmB-I
A-1**	33.417536	126.673728	Pre-Mulchart Oreum Lava Flows	qPmB
A-4	33.445139	126.664944	Nuepseori Oreum Lava Flows	qNsB
A-6	33.427889	126.639333	Jigri Oreum Lava Flows	qJrB

* from rock core at 7 m below ground surface at MW1-7

** from rock core at 3 m below ground surface at MW1-9

의 부분이 절개, 삭박되어 초승달 모양만 남아있는 말발굽형 분석구(표고 488.9 m)이다.

돔배오름(그림 1j)은 평탄한 형태가 마치 돔배(도마의 제주어)처럼 보인다고 하는 데에서 유래되었으며, 약간 서쪽으로 경사를 지지만, 원형 분화구를 지닌 원형 분석구(표고 466 m)이다.

지그리오름(그림 1k)은 제주시 조천읍 명도암 삼거리 남쪽, 사려니숲길 진입로변에 봉우리(표고 582 m)를 가진 분석구로, 지도 정보에는 이름이 없지만 절물자연휴양림 내 안내문 지도에 지그리오름으로 표기되어 있어 이를 따랐다. 이 분석구는 완전히 파괴되고 하천에 의해 절개되어 그 형태를 판별하기 곤란하다.

2.2 용암류

용암류는 대부분 하천 계곡 주변이나 하상에 노출된 노두에서 그 분포가 확인된다. 그 외 지역에서는 주로 분석층 및 화산쇄설층, 그리고 잔류토에 덮여있다. 용암류는 분출지(오름)가 명확한 경우에는 오름의 이름을 이용했으며, 연구 지역의 경계 외부로부터 기원된 경우 '무명오름' 혹은 암석기재적 특징(반상장석, 비반상)을 이용하여 명명하였다. 용암류의 종류는 약 15개로 구분되는데, 반상장석용암류, 무명오름용암류, 돔배오름용암류, 선물장오리용암류, 비반상용암류, 넓거리오름용암류, 개월이오름용암류, 지그리오름용암류, 늪서리오름용암류, 절물오름용암류 I, II, 선물차오름용암류, 말차오름용암류 I, II, III이다. 그 중 연구 지역의 서쪽 경계부에 분포하는 무명오름용암류, 선물장오리용암류 및 개월이오름용암류를 제외한 주요 용암류의 특징을 기재하면 다음과 같다.

연구 지역 내에서 가장 오래된 용암류인 반상장석용암류(qPFB)는 한라산국립공원 지역 내에서 발원된 것으로, 구체적 위치의 추적은 추후 해결해나갈 과제이다. 성판교와 수장교 사이 넓거리오름 기슭 서쪽 하천에서부터 약 45도 방향의 하천을 따라 분포하고, 제4교래교를 지나 교래교 일대까지 분포한다. 반상장석용암류는 파호이호이 용암류로서 복합용암류 특징을 지니며, 상류에서는 약 50 cm 두께로 수매(10매 이상)의 용암류 단위를 구분할 수 있지만(그림 2a), 하류로 갈수록 용암류 단위를 구분하기는 어렵다. 때로 용암팽창(inflation) 구조가 미약하게 발

달하기도 하며, 일부 구간에서는 깨진 틈을 따라 용암류가 새어나온 용암혀(lava tongue) 혹은 용암발톱(lava toe)의 형상을 이루기도 한다. 특징적으로 사장석 반정의 함량이 높아(10% 이상) 반상 조직으로 쉽게 구분되며, 다공질이다. 사려니숲 내 하천에서는 넓거리오름용암류와 접하기도 하고 제3교래교 인근에서 말단 아아 용암류의 형상으로 전이하여 지그리오름용암류와 접하며, 제4교래교 인근에서는 교래교퇴적층에 의해 피복된다. 육안으로 사장석 반정의 분포를 확연히 인식할 수 있는 반상장석 현무암류의 특징을 지니고 있다. 용암류 단위의 표면부는 다공질을 이룬다. 현미경하에서 사장석은 주로 장방형 혹은 각주상의 자형으로, 칼스바드-알바이트 쌍정(carlsbad-albite twin)이나 칼스바드-페리클린 쌍정(carlsbad-pericline twin)을 이루며, 누대조직(zoning)이 발달하기도 한다(그림 3a). 반정 장석과 석기와와의 경계가 뚜렷하다. 드물게 결정의 깨진 부분으로 석기와 반응에 의해 만들어진 체(sieve)조직을 가진다. 감람석은 미반정으로 대개 자형 내지 반자형을 이룬다. 석기는 대부분 미정질로서, 때로 사장석 결정이 필로탁시틱(pilotaxitic) 조직을 이루기도 한다. 암석지화학적 특징은 SiO₂ 함량 47.8~49.8 wt%, 알칼리(Na₂O+K₂O) 함량 3.9~4.6 wt%의 범위를 가진, 알칼리현무암에 해당한다.

비반상용암류(qApB)도 한라산국립공원 지역 내의 발원지는 추적할 수 없었으나 어후오름(표고 1,025 m) 기원으로 추정되며 추후 확인이 필요하다. 성판교 일대, 수장교 및 물장울교 일대에서 45도 북동쪽으로 발달한 하천변 등지에 분포하며, 사려니숲 북쪽 탐방로 주변의 하천에서 쉽게 그 암상의 특징을 확인할 수 있다. 비반상의 치밀질로서 상류 지역에서는 판상절리가 발달하기도 하며, 석기 부분의 조직 차이에 의해 검정색과 회색의 띠무늬를 지니기도 한다. 상당히 두꺼운 용암류 단위를 가지고 있는 치밀질 용암류이며(그림 2b), 육안으로 반정의 분포를 확인할 수 없는 비반상 현무암류의 특징을 지닌다(그림 3b). 비반상용암류의 표면부는 대부분 치밀질이지만, 드물게 다공질의 특징을 미약하게 보이기도 한다. 암석지화학적 특징은 SiO₂ 함량 52.2~55.9 wt%, 알칼리 함량 6.1~7.4 wt%의 범위를 가지며, 현무암질 조면안산암에서 조면안산암에 해당한다.

넓거리오름용암류(qNeB)는 넓거리오름 남쪽 저

면 기슭에서 분출되어 유동되었으며(그림 2c), 약 40도 북동 방향으로 제4교래교-교래교 일대까지 분포하고 있다. 넓거리오름용암류는 파호이호이 용암류

로서, 소규모의 용암튜브 및 용암로브를 이루며, 용암팽창 구조가 미약하게 발달한다. 하류에 해당하는 돛배오름 인근 제4교래교-교래교 일대에서 약 50~80

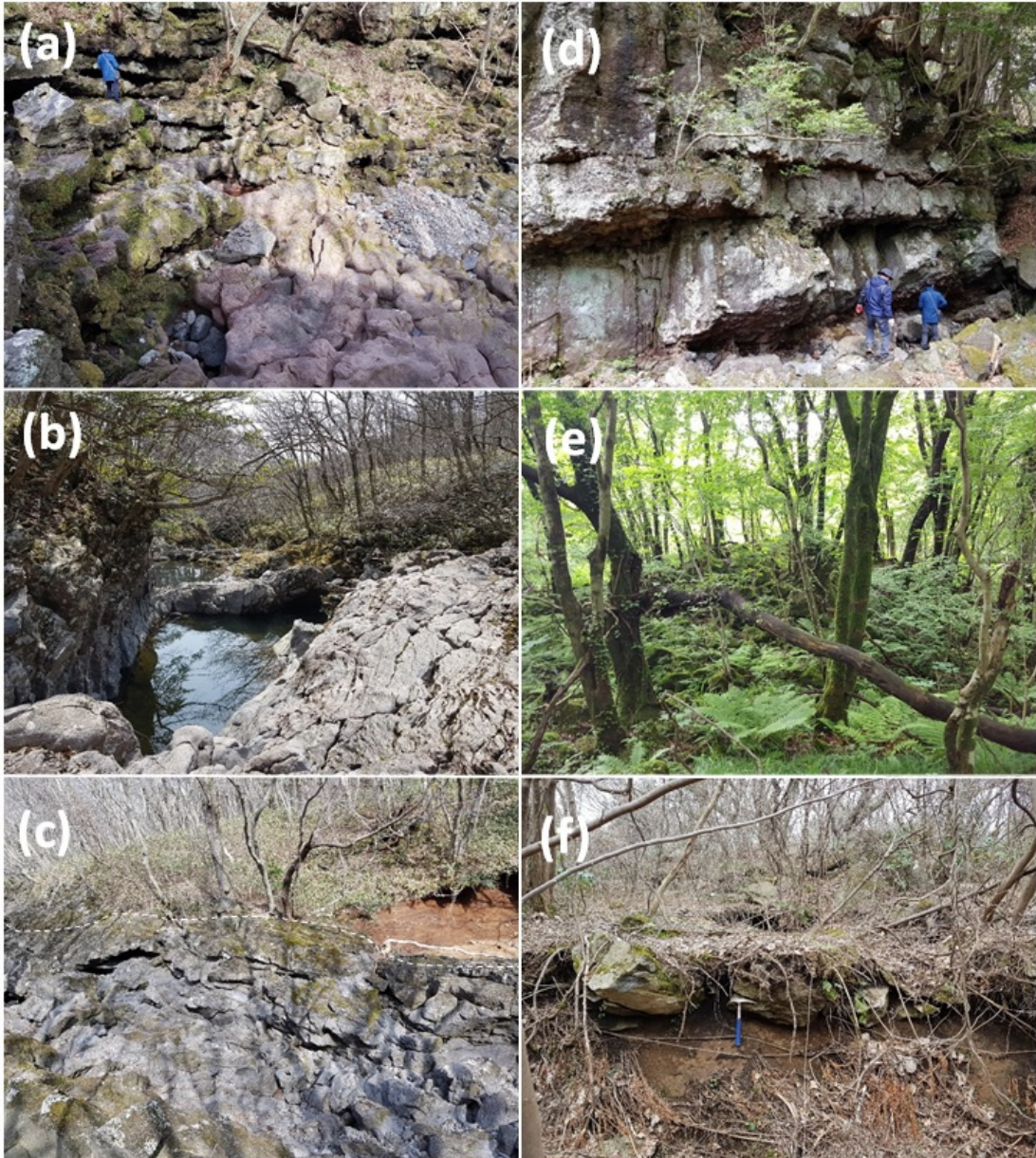


Fig. 2. Field photographs of lava flows. (a) Porphyritic Feldspar Lava Flows. Compound lava flows exposed in the stream valley (33.40411°N/126.624028°E). (b) Aphyric Lava Flows in the stream valley near the northern entrance of Saryeoni Forest Path (33.423639°N/126.632750°E). (c) Neobgeori Oreum Lava Flows. Effused from the base of Neobgeori Oreum (dashed line) (33.394167°N/126.626000°E). (d) Jigri Oreum Lava Flows. Three lava flow units exposed in the stream valley include lots of mantle xenoliths (33.427889°N/126.639333°E). (e) Jeolmul Oreum Lava Flows I; Lava blocks make small mound in Gyorae Gotjawal (33.436639°N/126.660833°E). (f) Malchart Oreum Lava Flows II. A thin lava flow covers unconsolidated tephra layer (33.412176°N/126.667762°E).

cm 두께의 용암류 단위가 2~3대로 구분된다. 넓거리오름용암류의 분출 유동 시 분화구에서는 테프라의 분출이 동시에 활발히 있었음을 나타내는 구조가 곳곳에서 확인된다. 사려니숲 내에서는 소규모의 용암판 혹은 용암괴의 형상으로 화산쇄설층과 함께 섞여 분포하여 용암류의 분포를 추적하기 곤란하기 때

문에 사려니 숲 일대는 화산퇴적층으로 구분하였다. 넓거리오름용암류는 사려니숲 내 하천에서 반상장석 용암류와 접하며, 제4교래교 인근에서는 교래리퇴적층을 피복한다. 암상은 특징적으로 반정 결정이 거의 없는 비반상이지만, 미반정의 감람석이 주를 이루어 마치 노란색 좁쌀이 뿌려져 있는 듯하다. 따라서,

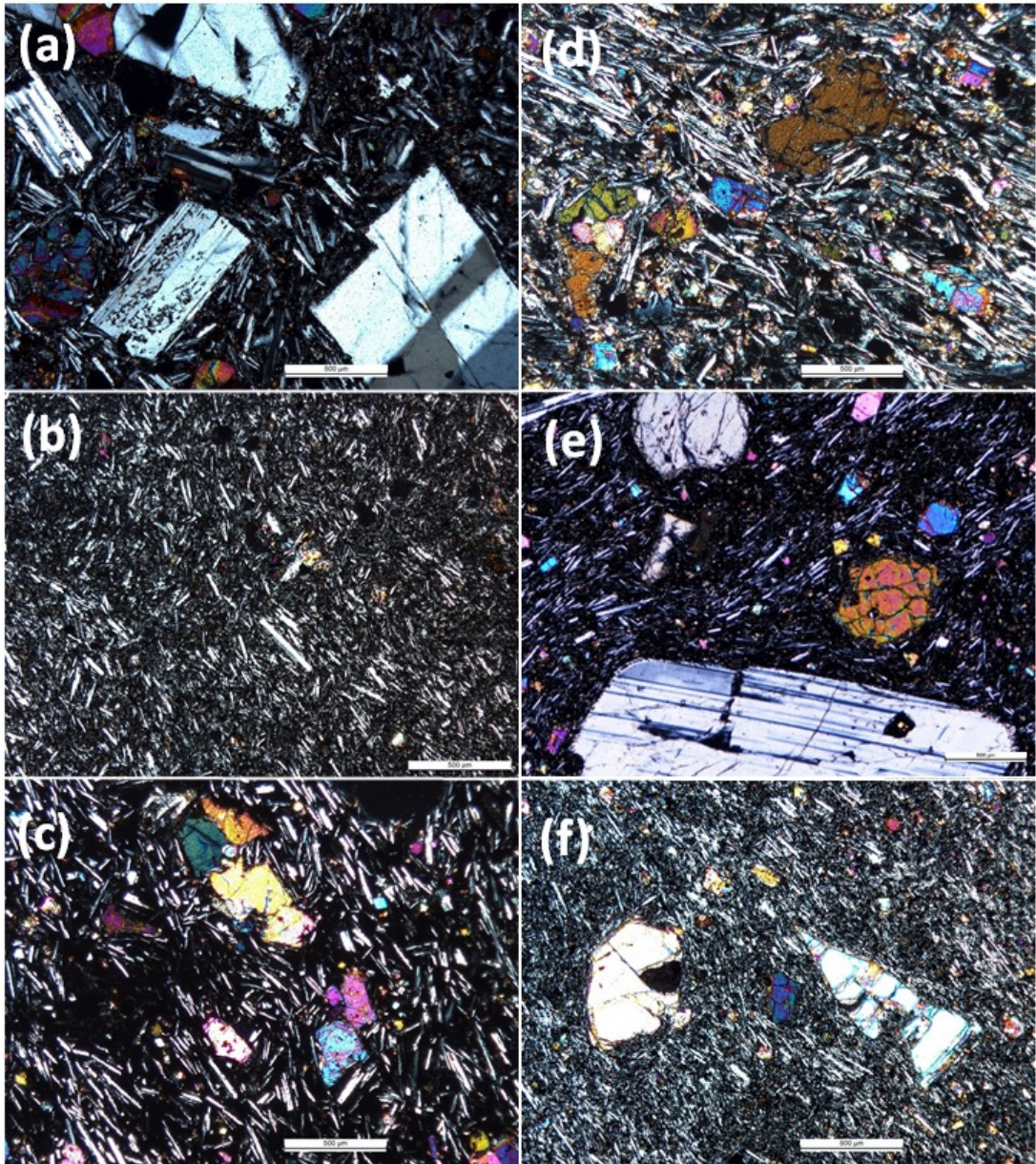


Fig. 3. Microphotographs of lava flows (under cross polarized light; scale bar 0.5 mm). (a) (sample ID #28) Porphyritic Feldspar Lava Flows. (b) (#39) Aphyric Lava Flows. (c) (#34) Neobgeori Oreum Lava Flows. (d) (#11) Jigri Oreum Lava Flows. (e) (#K1) Jeolmul Oreum Lava Flows I. (f) (#20) Malchart Oreum Lava Flows II.

반정 혹은 미반정 광물을 거의 가지고 있지 않은 비반상 용암류보다는 감람석 현무암류로 특징지을 수 있다(그림 3c). 용암류 단위의 표면부는 때로 다공질의 특징을 지닌다. 현미경하에서 미반정의 감람석은 대개 자형 내지 반자형을 이루며, 때때로 해정형을 띠거나 산화에 의해 결정 주변부가 이딩사이트(iddingsite)화 되어 있다. 이 용암류는 아주 드물게 3 cm 가량의 사장석 집적포유체를 포함하는데 사장석 결정의 결정 주변부는 용식되어 반응연(reaction rim)을 지닌다. 석기는 대부분 미정질로서, 때로 사장석 결정이 필로택시틱 조직을 이루기도 한다. 암석지화학적 특징은 SiO_2 함량 49.3~50.8 wt%, 알칼리 함량 4.5~4.9 wt%의 범위를 가지며, 알칼리현무암에 해당한다. 다만, 제4교래교 하상에서 교래교퇴적층을 피복하는 50 cm 두께의 용암류 단위의 조성은 조금 더 분화되어 SiO_2 함량은 51.8 wt%, 알칼리 함량은 5.4 wt%인, 현무암질 조면안산암에 해당한다.

지그리오름용암류(qJrB)는 앞서 기술한 바와 같이 용암의 분출 등으로 생긴 소화산체의 파괴로 인해 오름의 형태를 지니고 있지 않은 지그리오름에서 분출되었는데, 오름의 가운데를 가로질러 지나가는 하천변을 따라 노두가 분포한다. 이 용암류는 동남동 방향으로 흘렀으며, 약 1~2 m 두께의 용암류들이 3매 가량 중첩된 치밀질 용암류의 특징을 보인다(그림 2d). 이 용암류는 명도암 삼거리 인근 하천에서는 다량의 맨틀포획암체와 거정의 단사휘석이 포함하고 있다. 맨틀포획암체는 각진 형태로 수 cm에서 수십 cm까지 다양한 크기로 산출되며, 침정석 페리도타이트(spinel peridotite)에 해당한다(Yun *et al.*, 1998). 오름 밖으로 유동된 용암류는 파호이호이 용암류의 특성을 보이는데, 상층부는 다공질이며 드물게 사장석 반정이 육안으로 구분된다. 때로 이 용암류는 치밀질의 작은 용암돔(dome) 구조를 만들어 하천을 따라 노출되어 있기도 한다. 제3교래교에서는 교래교퇴적층을 피복하고 있다. 삼다수목장 일대에서는 암괴상으로 꽃자왈 숲을 이루는데, 절물오름용암류 I 암괴에 비해 상대적으로 크기가 작으며, 치밀질 암상이고 미반정의 감람석과 드물게 산출되는 맨틀포획암체를 포함한 집적체(cumulate)의 유무에 의해 구분된다. 현미경하에서 미반정의 감람석은 대개 자형 내지 반자형을 이루지만, 때로 해정형을 띠거나 산화에 의해 결정주변부가 이딩사이트화되어 있다

(그림 3d). 드물게 타형의 단사휘석이 반정을 이루기도 하며, 1 cm 가량의 둥근 형태의 사장석의 결정 주변부는 용식되어 반응연을 지닌다. 때로 사장석+단사휘석+사방휘석으로 구성된 집적체 혹은 타형의 사장석 결정이 여러 개 뭉쳐있는 집적체가 관찰된다. 석기는 대부분 미정질이다. 암석지화학적 특징은 SiO_2 함량 48.7~50.9 wt%, 알칼리 함량 4.4~5.4 wt%의 범위를 가지며, 알칼리현무암-조면현무암-현무암질 조면안산암으로 용암류의 위치에 따라 다양하다.

절물오름용암류 I (qJmB-I)는 절물오름과 죽은절물오름의 동쪽 하단부에서 민오름 사이, 그리고 늪서리오름 일대까지 넓게 분포하는 용암류이다. 이 용암류는 절물오름근 분석구의 저면에서 유동되어 절물오름근과 민오름 사이를 지나 북쪽과 남동쪽 방향으로 분포한다. 이 용암류는 파호이호이 용암류의 특징을 지니며, 암괴상 능선과 투물러스 등 용암류의 팽창구조가 상당히 발달하여 교래꽃자왈을 이룬다(그림 2e). 용암류 단위의 겉 부분은 장석 현무암류에 해당하지만 용암류의 위치에 따라 단사휘석이 반정으로 산출하기도 한다. 절면의 기공은 대부분 점성으로 인해 살짝 찌그러진 양상을 나타내며, 석기 부분은 급랭에 의해 유리질 상태에서 굳어진 타킬라이트(tachylite)로 구성된다. 현미경하에서 사장석은 주로 장방형 혹은 각주상의 자형으로, 칼스바드-알바이트 쌍정이나 칼스바드-페리클린 쌍정을 이루며, 누대조직이 발달하기도 한다. 특히 반정 장석과 석기와의 경계가 뚜렷하다. 단사휘석과 감람석은 간헐적으로 반정 혹은 미반정으로 산출한다(그림 3e). 석기는 은미정질의 사장석과 감람석 그리고 유리질 물질의 급랭되어 만들어진 타킬라이트로 구성된다. 암석지화학적 특징은 SiO_2 함량 50.1 wt%, 알칼리 함량 4.5 wt%의 범위를 가지며, 알칼리현무암에 해당한다. 한편, 절물오름용암류 I은 지그리오름용암류와 함께 교래꽃자왈 지질조사 보고서(GTJ, 2018)에서는 민오름에서 분출한 민오름 제5용암류와 제2용암류에 해당한다. 이전 연구와 비교할 때 서로 다른 용암 분출지를 제시하고 있는데, 향후 용암류의 연장성 및 민오름 용암류(Park *et al.*, 2014; GTJ, 2018)와의 관계 등은 해결해나갈 과제이다.

선물찾오름용암류(qPmB)는 물찾오름 북쪽 기슭에서 북동 방향으로 발달한 하천을 따라 노출된 아 용암류이다. 이 용암류는 물찾오름과 말찾오름 분

석층에 의해 피복되는 특징을 지니며, 판상 혹은 괴상의 용암체를 이룬다. 특징적으로 단사휘석 반정으로 다른 용암류와 구분되는데, 위치에 따라 휘석 현무암류 혹은 휘석 장석 현무암류에 해당한다. 암석 지화학적 특징은 SiO_2 함량 49.5~51.9 wt%, 알칼리 함량 5.2~6.2 wt%의 범위를 가지며, 조면현무암에서 현무암질 조면안산암에 해당한다.

말차오름용암류 II (qMcB-II)는 말차오름 정상부, 붉은오름 휴양림 내 목재체험관 뒷편과 그 주변, 삼다수 제2취수원 주변(그림 2f), 그리고 삼다수 숲길 내에서 소규모의 분포를 보인다. 1 m 가량의 용암판을 이루기도 하고 암괴상으로 화산쇄설층과 혼합되어 분포한다. 주로 비반상을 이루지만 간헐적으로 분포하는 사장석 반정에 의해 장석 현무암류로 특징지을 수 있다. 용암류 단위의 표면부는 대부분 치밀질이다. 현미경하에서 이 용암류는 미반정의 사장석과 감람석이 주를 이루며, 미반정의 감람석은 대개 자형 내지 반자형을 이루며, 때로 해정형이다(그림 3f). 드물게 거정의 사장석 반정과 단사휘석 반정을 지닌다. 거정의 사장석은 대부분 결정 주변부 혹은 내부가 용식되어있다. 때로 감람석+단사휘석으로 구성된 집적체가 가진다. 암석지화학적 특징은 SiO_2 함량은 50.3~52.0 wt%, 알칼리 함량은 5.8~6.2 wt%의 범위를 가지며, 현무암질 조면안산암에 해당한다.

2.3 화산퇴적층

화산활동 동안에 만들어진 1차 화산쇄설층은 화구로부터 간헐적인 분출에 의해 분화구(오름) 주변에 쌓인 강하 테프라층과 용암 분출시 분화구 사면의 파괴로 인해 용암류의 암괴와 화산쇄설층이 서로 혼합되어 분포하는 경우에 해당한다. 분석구의 경사면이나 하단부에 국지적으로 분포하는 용암류인 경우, (1) 용암판과 용암괴 그리고 클링커 및 분석구의 일부분이었던 화산쇄설층과 같이 혼합되어 지표층을 피복하거나, (2) 단속적이며 소규모이거나 암괴상으로 분포한다. 따라서 이런 경우 화산쇄설층에서 용암류의 분포 경계를 추적하기 어렵기 때문에 분석구 사면 하단부 주변 일대를 화산퇴적층으로 구분하였다. 한편, 화산활동이 종료된 이후 분석구는 시간이 경과함에 따라 화산쇄설층의 다짐과 풍화·침식작용으로 인해 그 높이가 낮아지고 분석구의 사면 경사각이 낮아진다(Lee and Yun, 2012). 이때 경사지에

서 원래 있던 위치의 미고화 화산쇄설물이 포행(creep)으로 이동되어 다른 장소에 쌓이게 되면 2차 화산쇄설층을 이루게 된다. 비록 오랜 기간의 풍화 침식으로 형성된 화산쇄설층은 통상 화산쇄설층의 범주에서 제외되었으나, 연구 지역은 약 5만 년 이내의 비교적 젊은 화산활동으로 지형 지질을 구성하고 있어 1차와 2차간의 구분 및 도폭화가 용이하지 않으므로, 이 연구에서는 1차 및 2차 화산쇄설층 그리고 그 상위를 피복하는 잔류토 모두를 포함하여 화산퇴적층으로 분류하였다.

2.4 비화산퇴적층

2.4.1 퇴적층

화산활동 휴지기 동안 특정 퇴적 환경에서 만들어진 비화산퇴적층(고토양층을 포함)으로 용암류 사이에 층을 이루어 협재하여 분포한다(그림 4). 제주·애월 도폭(Park *et al.*, 1998)에서 연구 지역의 모든 퇴

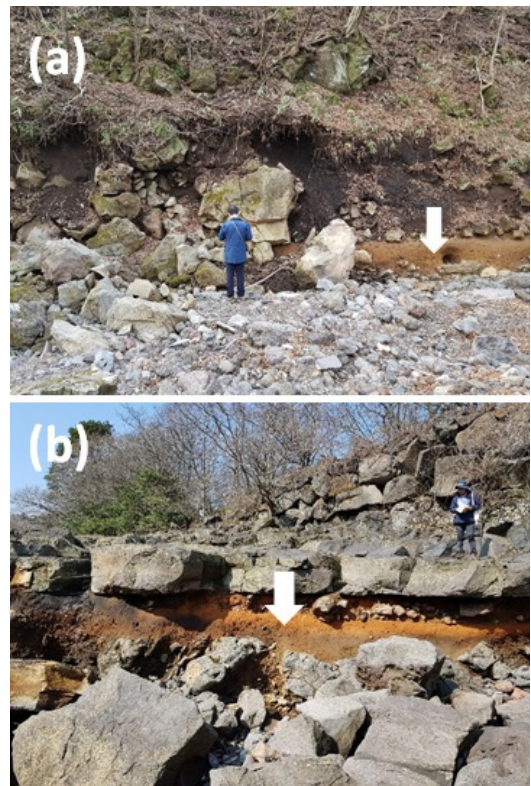


Fig. 4. Field photographs of sedimentary formations. (a) Muljangolgyeo Sedimentary Formation (white arrow) (33.415167°N/126.621250°E). (b) Gyoaegyo Sedimentary Formation (white arrow) (33.430444°N/126.673528°E).

Table 2. Major element abundances of lava flows at the studied area, Jeju Island.

ID	J1	J2	J3	J4	J5	J6	J7	J8
	BTA	AB	BTA	AB	TB	TB	BTA	BTA
SiO ₂	51.97	49.29	51.78	50.83	49.81	49.52	50.87	51.94
TiO ₂	2.33	2.40	2.34	2.31	2.49	2.55	2.34	2.30
Al ₂ O ₃	15.84	15.61	15.87	15.28	14.95	14.76	15.64	15.91
MgO	4.78	6.48	4.73	6.25	6.72	7.01	5.43	4.71
Fe ₂ O ₃ [†]	10.63	11.86	10.73	11.44	11.35	11.45	11.08	10.51
MnO	0.14	0.16	0.14	0.15	0.15	0.15	0.14	0.14
CaO	6.89	7.66	6.90	7.59	7.97	8.02	7.10	6.89
Na ₂ O	4.05	3.33	4.06	3.49	3.40	3.32	3.84	4.01
K ₂ O	2.12	1.21	2.1	1.43	1.8	1.83	1.96	2.11
P ₂ O ₅	0.61	0.52	0.62	0.51	0.52	0.51	0.62	0.60
Igloss	0.19	1.24	0.44	0.43	0.52	0.41	0.65	0.52
Total	99.55	99.76	99.71	99.71	99.68	99.53	99.67	99.64

ID	J9	J10	J11(A-5)	J12	J13	J14	J15(A-2)	J16(A-3)
	TB	BTA	AB	AB	AB	AB	BTA	AB
SiO ₂	49.42	51.25	50.20	47.81	50.86	47.57	51.81	48.74
TiO ₂	2.45	2.36	2.40	2.95	2.34	3.07	2.28	2.91
Al ₂ O ₃	16.19	15.99	14.72	16.12	14.91	15.87	15.15	15.76
MgO	5.48	5.10	6.69	5.54	6.58	5.69	5.76	5.50
Fe ₂ O ₃ [†]	11.49	10.75	12.16	13.45	11.62	13.92	11.23	13.29
MnO	0.15	0.14	0.16	0.17	0.16	0.17	0.15	0.17
CaO	7.36	7.11	8.39	8.53	7.56	8.45	7.35	8.51
Na ₂ O	3.65	3.92	3.33	3.24	3.44	3.19	3.74	3.35
K ₂ O	1.7	2.01	1.24	0.7	1.48	0.69	1.66	0.85
P ₂ O ₅	0.65	0.62	0.43	0.51	0.50	0.53	0.51	0.50
Igloss	1.32	0.37	-0.18	1.05	0.25	0.88	-0.05	0.02
Total	99.86	99.62	99.54	100.07	99.70	100.03	99.59	99.60

Total Fe₂O₃ as Fe₂O₃[†] Analyzed by XRF at at Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources.

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

적층을 교래교퇴적층이라 명명하였으나, 분포 위치 간의 거리가 약 5.5 km 떨어져 있어 각각 물장울교 퇴적층과 교래교퇴적층으로 구분하였다.

물장울교퇴적층은 물장울교 일대 하천변이 표식 지이며 약 0.5~5 m로 다양한 두께를 이루지만, 이 연구에서는 물장울교 동북쪽에 소규모로 분포하는 노두의 암상에 대해 기재하였다(그림 4a). 황갈색 내지 담갈색을 띠는 점토질 내지 사질로 구성된 미고결 내지 준고결 퇴적층이다.

교래교퇴적층은 제4교래교 하부 하천 바닥이 표

식지이며(그림 4b), 제3교래교-제4교래교-교래교 일대 천미천 하천변과 바닥에 약 1~2 m 내외의 두께로 노출되어 있다. 황갈색, 담갈색에서 흑색을 띠는 점토질, 사질, 역질로 구성된 미고결 내지 준고결 퇴적층이다. 층리의 발달이 거의 없는 괴상으로 제3교래교 일대에서는 상부 용암류의 열에 의해 구워져 붉은 색 띠를 지니거나 하부에 테프라층을 피복하고 있음이 확인되며, 제4교래교 일대에서는 측면의 암상 변화가 심하여 때로는 20~50 cm 크기의 용암괴를 포함하기도 한다.

Table 2. continued.

ID	J17	J18	J19	J20(A-7)	J21	J22	J24	J25
	BTA	AB	AB	BTA	BTA	TB	BTA	AB
SiO ₂	50.32	48.65	46.11	51.06	50.56	49.96	53.25	48.23
TiO ₂	2.46	2.50	2.71	2.37	2.27	2.41	2.05	2.95
Al ₂ O ₃	15.69	14.82	15.49	15.66	15.61	14.94	15.99	15.73
MgO	5.64	7.83	8.20	5.49	5.79	6.21	2.89	5.69
Fe ₂ O ₃ ^t	11.21	12.13	13.04	11.00	11.08	11.66	11.39	13.38
MnO	0.15	0.16	0.17	0.15	0.15	0.16	0.17	0.17
CaO	6.76	9.17	9.38	7.23	7.49	7.93	5.86	8.55
Na ₂ O	3.74	2.97	2.69	3.91	3.72	3.63	4.64	3.32
K ₂ O	2.09	0.9	0.54	1.97	1.68	1.71	2.17	0.79
P ₂ O ₅	0.59	0.40	0.43	0.63	0.57	0.56	0.99	0.53
Igloss	1.09	0.19	1.64	0.07	0.76	0.43	0.29	0.19
Total	99.74	99.72	100.40	99.54	99.68	99.60	99.69	99.53

ID	J26	J27	J28	J30	J31	J32	J33	J34
	AB	AB	AB	AB	AB	TB	AB	AB
SiO ₂	50.40	50.45	49.79	48.90	49.50	49.51	47.04	50.45
TiO ₂	2.33	2.32	2.78	2.84	2.39	2.57	2.59	2.39
Al ₂ O ₃	15.13	14.91	15.57	15.82	15.35	16.89	14.70	14.77
MgO	6.45	6.81	5.42	5.66	6.90	3.61	8.57	6.72
Fe ₂ O ₃ ^t	11.56	11.57	12.76	13.10	12.00	12.31	12.75	12.09
MnO	0.15	0.16	0.16	0.16	0.16	0.18	0.17	0.16
CaO	7.67	7.65	8.40	8.49	7.78	7.29	9.01	8.48
Na ₂ O	3.42	3.37	3.55	3.35	3.29	3.91	2.71	3.34
K ₂ O	1.43	1.43	1.05	0.84	1.21	1.38	1.12	1.24
P ₂ O ₅	0.49	0.47	0.50	0.50	0.49	1.08	0.47	0.42
Igloss	0.49	0.60	-0.14	0.39	0.96	0.91	1.26	-0.66
Total	99.52	99.74	99.84	100.05	100.03	99.64	100.39	99.40

2.4.2 표토층

붕적층과 표토로 구분하였다. 붕적층(colluvium)은 주로 경사지에서 여러 작은 하천이 합류하는 평탄한 지역에 선상지를 이루어 소규모로 만들어진 50 cm~1 m 내외의 두께를 지닌 미고결의 퇴적층으로, 원마도가 좋은 자갈, 사질 및 이질 입자가 미약하게 상향 세립화하거나 혹은 괴상의 조적을 이루나, 대부분 그 경계를 지도에 표기하기 힘들기 때문에 분포 확인이 가능한 부분에 대해 기재하였다. 표토는 화산회의 토양화로 인한 토양층(임지 화산회토; 출처: 토양환경정보시스템, <http://soil.rda.go.kr/soil/index.jsp>)이 분포하거나, 용암류의 상부 클링커 혹은

은 화산쇄설층의 걸 부분을 제거한 후 시설물 건축이나 초지 조성 등과 같이 인위적인 토지 이용으로 부분적인 성토 및 객토가 이루어진 부분을 나타낸다.

3. 용암류의 암석화학적 특징

39개 암석 시료에 대한 박편 제작 및 전암 주성분 원소의 화학분석(X-선 형광분석)은 한국지질자원원 구원에서 실행되었다(표 2). 암석의 명명은 IUGS의 전암 SiO₂ 대 (Na₂O+K₂O) 함량 분류도(Le Maitre et al., 2002)에 적용하였다(그림 5). 이때 철의 함량은 Fe₂O₃^t로 나타내었으며, 주성분원소 분석치는 변

Table 2. continued.

ID	J35	J36	J37	J38	J39	K-1	A-6
	BTA	AB	TA	TB	BTA	AB	AB
SiO ₂	52.22	50.40	55.86	50.89	53.44	50.09	48.73
TiO ₂	2.49	2.34	1.65	2.37	2.14	2.41	2.33
Al ₂ O ₃	15.78	14.96	15.82	15.60	16.01	14.80	13.47
MgO	3.63	6.87	2.31	5.78	2.93	6.31	9.25
Fe ₂ O ₃ [†]	11.93	11.62	10.56	11.39	11.52	12.52	12.07
MnO	0.17	0.16	0.17	0.16	0.18	0.16	0.17
CaO	6.57	8.13	5.02	7.74	5.84	8.34	8.72
Na ₂ O	4.25	3.33	4.83	3.68	4.49	3.37	3.03
K ₂ O	1.89	1.28	2.57	1.53	2.16	1.13	1.36
P ₂ O ₅	0.71	0.48	0.88	0.50	0.94	0.45	0.44
Igloss	-0.14	0.12	-0.22	-0.28	0.02	0.36	0.56
Total	99.50	99.69	99.45	99.36	99.67	99.22	99.01

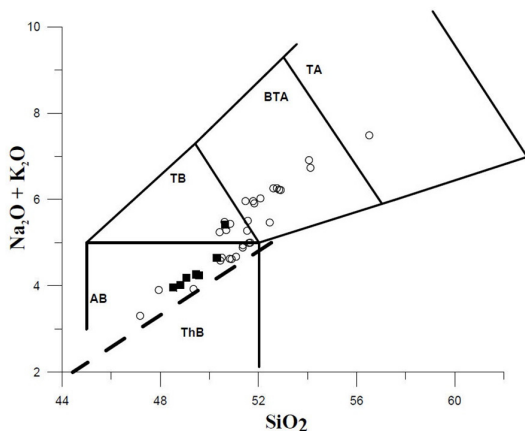


Fig. 5. Na₂O+K₂O (wt%) vs. SiO₂ (wt%) plot of lava flows in the studied area. The fields show rock nomenclature schemes of Le Maitre *et al.* (2002) with dashed line from Macdonald and Katsura (1964), dividing alkalic rocks from sub-alkalic rocks. Abbreviation: ThB-tholeiitic basalt, AB-alkali basalt, TB-trachybasalt, BTA-basaltic trachyandesite, TA-trachyandesite. Black square and open circle indicate porphyritic feldspar lava flows and others, which were erupted during syn- or pro- sedimentation of Gyoraegyo Sedimentary Formation, respectively.

화도에 적용하기 전 산화비를 고려하여 Fe₂O₃/FeO비가 0.3(Middlemost, 1989) 이 되도록 철의 총 함량으로부터 Fe₂O₃와 FeO값을 각각 재계산하고, 그 다음 다른 모든 주성분 산화물의 값과 합하여 물이 없는 상태의 백분율로 재계산한 후 분류도에 적용하였다.

용암류의 조성은 SiO₂ 46.1~55.9 wt%, Na₂O + K₂O 3.2~7.4 wt%를 지닌 알칼리현무암-조면현무암-현무암질 조면안산암-조면안산암에 해당한다. 용암류의 주성분 원소 변화 특징은 MgO 성분을 분화 지수(differentiation index)로 하여 변화 경향을 해석하였다(그림 6). 이 지역의 용암류는 MgO (8.6~2.3 wt%) 함량이 감소함에 따라, Fe₂O₃[†] (13.9~10.5 wt%), CaO (9.4~5.0 wt%)의 함량은 꾸준히 감소하고, TiO₂ (3.1~1.7 wt%)는 거의 일정하다가 MgO 4.0 wt% 이후 감소한다. 반면, SiO₂ (46.1~55.9 wt%), Al₂O₃ (14.7~16.9 wt%), Na₂O (2.7~4.8 wt%), K₂O (0.5~2.6 wt%), P₂O₅ (0.4~1.1 wt%)함량은 증가한다. 이는 연구 지역 용암류의 성분 분화 과정이 주로 마그마 방(chamber) 혹은 화도(conduit)내에서 감람석과 단사회석, 그리고 사장석의 정출로 인해 영향 받았음을 지시한다.

연구 지역의 용암류는 암석층서, 암석기재 및 암석화학적 변화 경향에 의해 크게 두 가지로 구분된다. 즉, 교래교퇴적층 하부에 분포하는 반상장석 용암류(돔배오름용암류, 무명오름용암류, 개월이오름용암류를 포함)와 교래교퇴적층 퇴적 동안 혹은 그 이후 분출한 용암류로 구분된다. 동일한 MgO 함량일 때 반상장석현무암류는 다른 용암류에 비해 TiO₂ (3.1~2.6 wt%), CaO (8.6~7.3 wt%), Fe₂O₃[†] (13.9~12.3 wt%)는 높고, SiO₂ (47.6~49.8 wt%), Na₂O (3.2~3.9 wt%), K₂O (0.7~1.4 wt%)는 낮으며, Al₂O₃ (15.6~16.9 wt%), P₂O₅ (0.5~1.1 wt%) 함량은 유사하다. 이러한 특

징은 이들이 서로 다른 배치(batch)의 마그마로부터 유래된 것으로 해석되나, 이들의 성인적 특징에 대해 향후 추가적인 연구가 진행되어야 할 것으로 사료된다.

4. 용암류의 연대 및 화산활동 고찰

용암시료 중 7개는 미국 오레곤 주립대학교 Argon Geochronology Lab에서, 전암(석기)의 ⁴⁰Ar/³⁹Ar 절대연대는 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 분석 방법은 참조바란다(<http://geochem>

ronology.coas.oregonstate.edu/).

⁴⁰Ar/³⁹Ar 절대연대 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. 그림 7은 단계별 가열(incremental

Table 3. ⁴⁰Ar-³⁹Ar age of lava flows at the studied area, Jeju Island.

ID	Weighted Plateau				
	Age (ka)	2 s.d.	% ³⁹ Ar	Step	MSWD
A-1	35.7	11.1	98.66	22/24	1.14
A-2	26.5	4.9	100.00	20/20	0.74
A-3	48.5	11.4	100.00	20/20	0.89
A-4*	17.6	8.0	96.48	39/45*	0.66
A-5	18.1	6.7	68.84	6/19	1.43
A-6	27.5	2.3	100.00	19/19	0.85
A-7	21.0	4.7	100.00	31/31	0.15

ID	Normal Isochron				
	Age (ka)	2 s.d.	⁴⁰ Ar/ ³⁶ Ar i	2 s.d.	MSWD
A-1	44.7	19.3	297.06	2.52	1.13
A-2	28.6	8.3	298.05	1.54	0.77
A-3	39.3	34.4	299.38	3.01	0.94
A-4*	18.8	11.8	298.40	1.02	0.69
A-5	0.0	29.2	301.70	4.96	1.37
A-6	25.1	4.1	300.94	3.48	0.78
A-7	20.5	9.2	298.84	3.96	0.16

ID	Inverse Isochron				
	Age (ka)	2 s.d.	⁴⁰ Ar/ ³⁶ Ar i	2 s.d.	MSWD
A-1	44.4	1.16	297.20	2.56	1.16
A-2	28.6	7.3	298.09	1.54	0.77
A-3	39.4	16.7	299.41	3.01	0.93
A-4*	18.8	6.3	298.42	1.02	0.69
A-5	0.0	0.0	301.71	4.97	1.37
A-6	24.9	3.9	301.20	3.48	0.77
A-7	20.3	8.3	298.93	3.97	0.16

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 %³⁹Ar and number of steps in the plateau (steps in plateau / total steps); *Combined two runs.

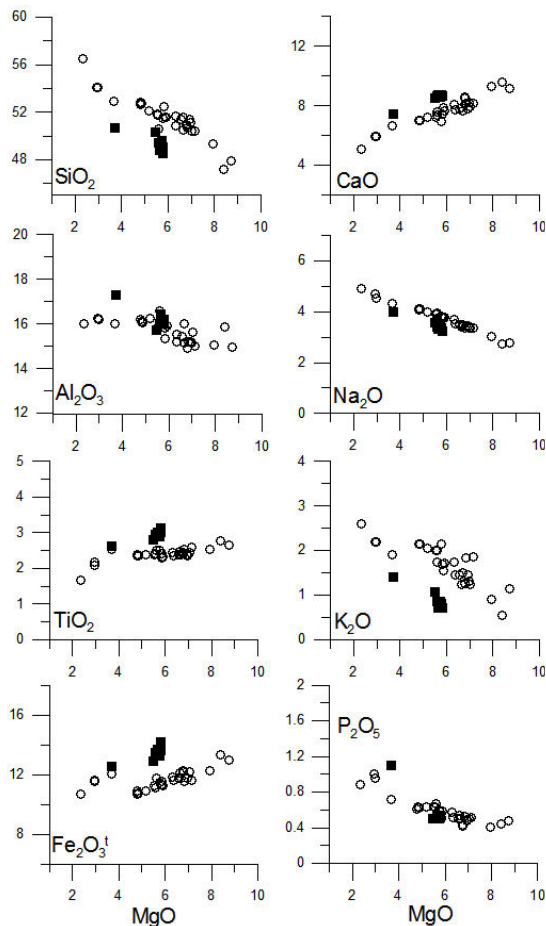


Fig. 6. MgO (wt%) vs. major oxides (wt%) variation diagram of lava flows in the studied area. The symbols are the same as in Figure 5.

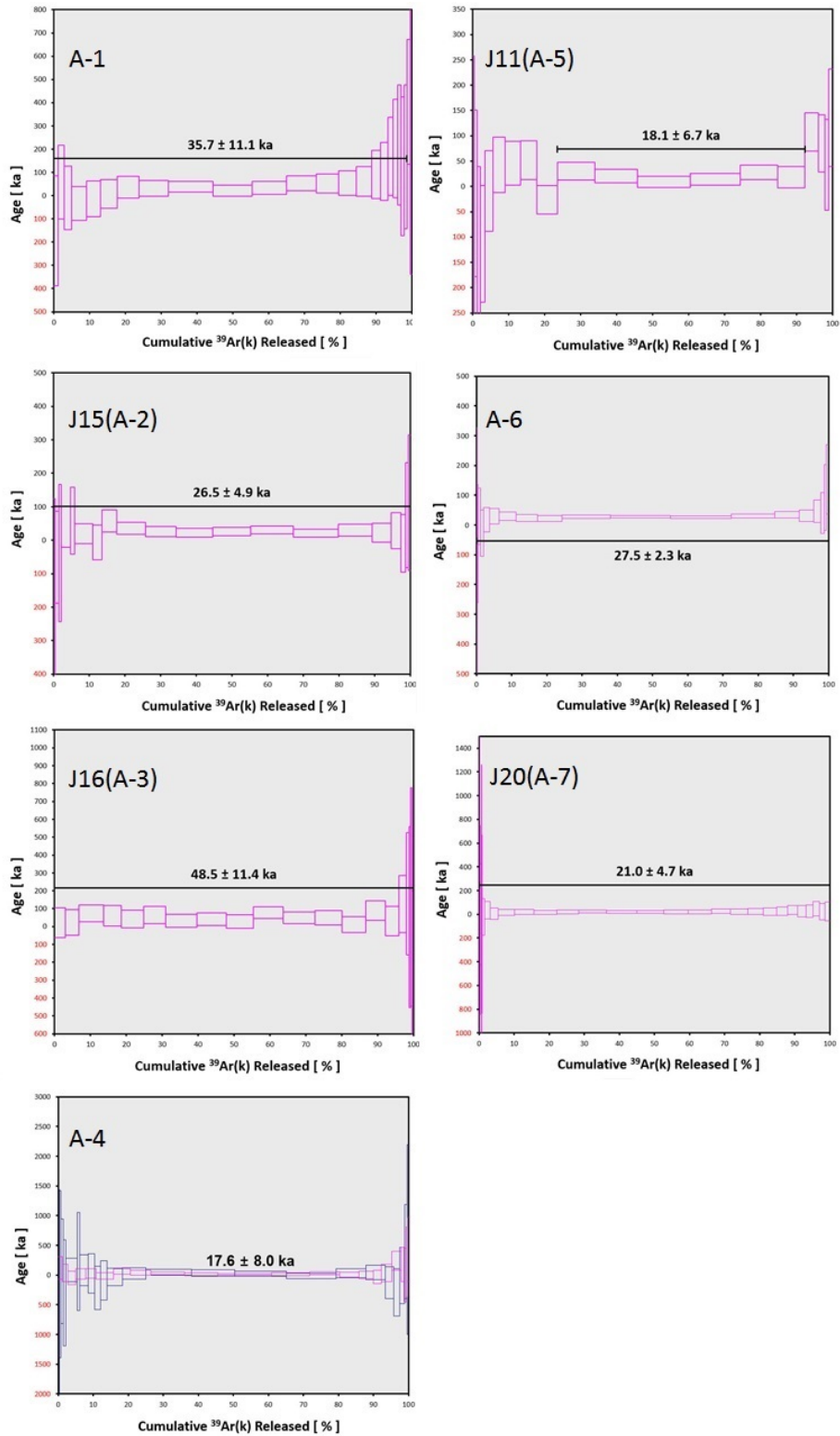


Fig. 7. ^{40}Ar - ^{39}Ar absolute age results of lava flows (groundmass) from the studied area, Jeju Island.

heating)에 따른 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 절대연대 스펙트럼으로부터 얻어진 시료별 플래토 연대를 나타낸다. 용암류의 연대는 교래교퇴적층 하부에 있는 반상장석용암류가 42.3 ± 3.9 ka (시험정 3-3호공 시추코어: 미발표자료), 48.5 ± 11.4 ka (제4교래교 밑 지표시료), 67 ± 18 ka (JH-교래1호공 시추코어, 미발표자료)가 가장 오래된 연대를, 그 위를 피복한 넓거리오름용암류의 연대는 26.5 ± 4.9 ka이고, 선물чат오름용암류는 35.7 ± 11.1 ka, 지그리오름용암류는 25.7 ± 2.3 ka, 18.1 ± 6.7 ka, 말차오름용암류는 21.0 ± 4.7 ka이며, 늑서리오름용암류가 17.3 ± 8.6 ka로서 가장 젊다(표 3; 그림 7, 8). 한편, 반상장석용암류와 넓거리오름용암류의 절대연대는 인접한 시추공인 시험정 3-3호공과 관측공 JH-교래1호공에서 얻어진 연대자료와는 조화적이지만(그림 8), Ahn *et al.* (2020)에 의해 보고된 절대연대, 각각 310 ± 30 ka, 15 ± 5 ka와는 차이를 보인다. 한편, Ahn *et al.* (2018)은 교래교퇴적층의 방사성탄소연대, 광여기 루미네선 연대, 고지자기적 연구를 통해 교래교퇴적층을 덮고 있는 용암류의 분출연대를 14.8 ± 0.7 ka로 해석하고 있다. 이는 이 연구에서 제시하고 있는 교래교퇴적층 이후 용암 분출기(26.5 ± 4.9 ka~ 18.1 ± 6.7 ka)에 대한 해석과는 차이가 있다. 따라서 추후 추가적인 연대 분석 혹은 제3의 분석 방법을 통한 검토가 필요하다.

이 연구에서 얻어진 용암류의 암층서와 연대자료

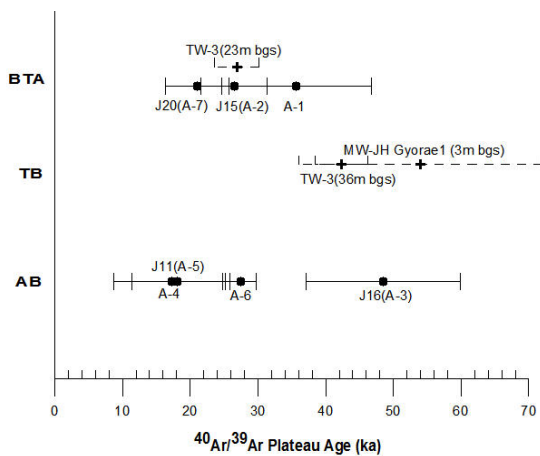


Fig. 8. $^{40}\text{Ar}-^{39}\text{Ar}$ age (with 2 SD) vs. rock types (BTA-basaltic trachyandesite, TB-trachybasalt, AB-alkali basalt) of the studied area, Jeju Island. Three core samples (unpublished data) from the adjacent boreholes, TW-3 and MW-JH Gyoraе 1 are plotted together.

를 종합하면, 이 지역은 약 4~6만 년 전 반상장석용암류가 분출된 이후 휴지기 동안 일부 계곡 지형에 교래교퇴적층이 형성되기 시작했으며, 이후 3만 5천 년에서 1만 7천 년까지 활발한 화산활동이 진행된 것으로 해석되며(그림 8), 최후 활동기는 한라산 백록담 동쪽 능선을 이루는 용암류의 분출시기와 유사하다(Koh *et al.*, 2019).

5. 결론

- 1) 제주도 표선유역 수리지질조사의 일환으로 수행된 지질조사로부터, 제주도 조천읍 교래리 일대 제주삼다수 유역(약 27 km²)의 지질을 용암류, 화산퇴적층(분석구(층)과 화산쇄설층, 비화산퇴적층(퇴적층, 봉적층 및 표토)으로 구분하고, 1:25,000 축척의 정확도를 지닌 지질도 작성하였고, 구축된 모든 정보는 ESRI® ArcGIS™ 기반으로 지리정보화하였다.
- 2) 15개로 구분되는 용암류의 조성은 SiO₂ 46.1~55.9 wt%, Na₂O+K₂O 3.2~7.4 wt%를 지닌 알칼리 현무암-조면현무암-현무암질 조면안산암-조면안산암에 해당한다. 연구 지역의 용암류는 암석층서, 암석기재 및 암석화학적 변화 경향에 의해 크게 교래교퇴적층 하부에 분포하는 반상장석현무암류와 교래교퇴적층 퇴적 동시기 혹은 그 이후 분출한 용암류로 구분된다. 동일한 MgO 함량일 때 반상장석용암류는 다른 용암류에 비해 TiO₂, CaO, Fe₂O₃¹⁺는 높고, SiO₂, Na₂O, K₂O는 낮으며, Al₂O₃, P₂O₅ 함량은 유사하다. 이러한 특징은 이들이 서로 다른 배치의 마그마로부터 유래된 것으로 해석된다.
- 3) $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 절대연대에 의하면 교래교퇴적층 하부의 반상장석용암류가 48.5 ± 11.4 ka로 가장 오래된 연대를, 그 위를 피복한 넓거리오름용암류 및 지그리오름용암류의 연대는 26.5 ± 4.9 ka, 18.1 ± 6.7 ka를 나타내며, 늑서리오름용암류가 17.3 ± 8.6 ka로서 가장 젊다. 암층서와 연대자료를 종합하면 이 지역은 약 4~6만 년 전 반상장석용암류가 분출된 이후 휴지기 동안 일부 계곡 지형에 교래교퇴적층이 퇴적되었으며, 약 3만 5천 년에서 1만 7천 년까지 재개된 화산활동이 있었을 것으로 해석된다.

감사의 글

이 연구를 위해 야외조사를 함께 수행해 주신 제주연구원 고인종 박사에게 고마움을 표합니다. 또한 이 연구의 기본 자료인 암석성분 분석과 Ar-Ar 연대 측정에 애를 써주시고 분석 결과를 함께 논의해 준 오레곤 주립대학교 Dr. Daniel P. Miggins께 깊은 감사를 드립니다. 특히 논문의 초고에 세심한 심사를 해주신 심사위원님께 감사를 드립니다.

REFERENCES

- Ahn, H.-S., Hong, S.-S. and Lee, J.-Y., 2020, Feasibility of lava-heated underlying sediment OSL chronology in age determination of lava effusion since the Late Pleistocene: Confirmation from lava $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ chronology. *Journal of the Geological Society of Korea*, 56, 481-492 (in Korean with English abstract).
- Ahn, H.-S., Kim, J.C., Lee, J.-Y., Lim, J., Sohn, Y.K. and Cho, H., 2018, Magnetic assessment of OSL and radiocarbon ages of sediments beneath a lava in Jeju Island, Korea: Implication of possible resetting of OSL signals and age constraint of the late Quaternary lava. *Quaternary Geochronology*, 48, 45-63.
- Jeju Special Self-Governing Province (JSSGP), 2011, Jeju Geomunoreum research report, 199 p (in Korean).
- Jeju Special Self-Governing Province (JSSGP), 2018, Comprehensive water resources management plan in Jeju Island. 328 p (in Korean).
- Kil, Y.W., Yun, S.-H., Lee, M.W., Yang, K.H. and Seol, J.H., 2016, Origin of Sangumburi, Jeju Island. *The Journal of the Petrological Society of Korea*, 25, 283-298 (in Korean with English abstract).
- Koh, J.-S., Yun, S.-H. and Hong, H.-C., 2005, Morphology and petrology of Jisagae columnar joint on the Daepodong basalt in Jeju Island, Korea. *Journal of the Petrological Society of Korea*, 14, 212-225 (in Korean with English abstract).
- Koh, J.-S., Yun, S.-H. and Jeong, E.-J., 2007a, Petrology of the Basalts in the Seongsan-Ilchulbong area, Jeju Island. *Journal of the Korean Earth Science Society*, 28, 324-342 (in Korean with English abstract).
- Koh, J.-S., Yun, S.-H. and Kang, S.S., 2003, Petrology of the Volcanic Rocks in the Paekrogdam Crater area, Mt. Halla, Jeju Island. *The Journal of the Petrological Society of Korea*, 12, 1-15 (in Korean with English abstract).
- Koh, J.-S., Yun, S.-H. and Kim, S.Y., 2007b, The Basalts and Volcanic Process in the Seondol Cinder Cone, Seobjikoji Area, Jeju Island. *Journal of the Korean Earth Science Society*, 28, 462-477 (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).
- Koppers, A.A., 2002, ArArCALC software for $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ calculations. *Computers & Geosciences*, 28, 605-619.
- Lee, J.-H. and Yun, S.-H., 2012, Morphological analysis of Quaternary monogenetic volcanoes in Jeju island, Korea. *Journal of the Geological Society of Korea*, 48, 383-400 (in Korean with English abstract).
- Le Maitre, R.W., Streckeisen, A., Zanettin, B., Le Bas, M.J., Bonin, B., Bateman, P., Bellieni, G., Dudek, A., Effremova, 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.
- Macdonald, G.A. and Katsura, T., 1964, Chemical composition of Hawaiian Lavas. *Journal of Petrology*, 5, 82-133.
- Middlemost, E.A.K., 1989, Iron oxidation ratios, norms and the classification of volcanic rocks. *Chemical Geology*, 77, 19-26.
- Park, J.B., Kang, B.-R., Koh, G.W. and Kim, G.-P., 2014, Geological Characteristics of Gotjawal Terrain in Jeju Island. *Journal of the Geological Society of Korea*, 50, 431-440 (in Korean with English abstract).
- 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 Segwipo-Hahyori Sheet (1:50,000). Jeju Provincial Government, 163 p (in Korean with English abstract).
- Park, K.H., Koh, D.C., Kim, Y.C., Moon, S.H., Seong, K.S., Shin, J.H., Yum, B.U., Jeon, C.M., Chae, K.T., Hwang, S.H., Kim, G.Y., Kim, Y.J., Kim, T.H., Park, I.H., Park, K.K., Ahn, J.S., Lee, B.J., Cho, S.Y. and Ha, K.C., 2008, Integrated analysis of groundwater occurrence in Jeju. Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources, GP2007-009-04-2008(2), 365 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, doi:10.1016/S0009-2541(97)00159-9.
- The Gotjwal Trust of Jeju (GTJ), 2018, The basic volcano-geologic study of Gyorae Gotjawal terrain. Jeju Special Self-Governing Province Developing Corporation, 86 p (in Korean, title translated).
- 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).
- Yoon, S.-H., Lee, B.-G. and Sohn, Y.K., 2006, Geomorphic and geological characteristics and eruption process of the Hanon volcano, Jeju Island. *Journal of the Geological Society of Korea*, 42, 19-30 (in Korean with English abstract).
- Yun, S.-H., Koh, J.-S. and Ahn, J.Y., 1998, A study of the Spinel-Lherzolite Xenolith in the Alkali Basalt from Eastern Cheju Island, Korea. *Economic and Environmental Geology*, 31, 447-458 (in Korean with English abstract).
- Yun, S.-H., Koh, J.-S. and Park, J.M., 2002, Petrology of the Taeheung-ri Lava in Southeastern Jeju Island. *The Journal of the Petrological Society of Korea*, 11, 17-29 (in Korean with English abstract).

Received : December 13, 2020

Revised : December 27, 2020

Accepted : December 30, 2020