Research Paper

Geology and Volcanism of Hyeongjeseom (Islet) Volcano, Jeju Island

Jun Beom Park¹, Gi Won Koh^{2,*}, Yongmun Jeon³, Won Bae Park⁴, Soo Hyoung Moon², Deok Cheol Moon²

¹US Army Corps of Engineers Far East District, Korea

²Water Resources R&D Center, Jeju Province Development Corporation, Jeju, 63345, Korea

³Jeju World Natural Heritage Headquarters, Jeju Special Self-Governing Province, Jeju, 63341, Korea

⁴Groundwater Research Center, Jeju Research Institute, Jeju 63147, Jeju, Korea

*Corresponding author : limu50@jpdco.co.kr

ARTICLE INFORMATION

Manuscript received 26 January 2021

Received in revised form 30 March 2021

Manuscript accepted 31 March 2021

Available online 28 April 2021

DOI : <http://dx.doi.org/10.9719/EEG.2021.54.2.187>

Research Highlights

- The Hyeongjeseom is an erosional remnant of volcano which is composed of volcanoclastic deposit, agglomerate and scoria deposit, ponded lava, aa lava flows, reworked deposit and beach deposit.
- It is interpreted that the outcropped volcanoclastic deposit may be a remaining portion of outer ring of a tuff cone.
- Ar-Ar age of lava with basaltic trachyandesite composition is $9.2 \pm 3.6(2s)$ ka, implying that the volcanism may have occurred earlier than the Songaksan tuff ring which erupted ca. 3.7 ka.

ABSTRACT

The Hyeongjeseom (Islet) is an erosional remnant of volcano which is located about 2 km northeast of sea shore of the Songaksan tuff ring, and is composed of volcanoclastic deposit, agglomerate and scoria deposit, ponded lava, aa lava flows, reworked deposit and beach deposit in ascending order from the base. The volcano is formed by volcanoclastic deposits and lava flows that recorded a transition from initial phreatomagmatic to magmatic explosions followed by lava effusion. It is interpreted that the outcropped volcanoclastic deposit may be a remaining portion of outer ring of a tuff cone. A bomb and a ponded lava yield geochemically basaltic trachyandesite compositions (SiO_2 51.3 wt%, $\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}$ 6.0 wt%) and belong to olivine basalt with scarce (<5 %) phenocrysts of olivine, petrographically. By incremental heating Ar-Ar dating method, the plateau age of lava flow in the Hyeongjeseom is $9.2 \pm 3.6(2\sigma)$ ka, implying that the volcanism of Hyeongjeseom may have occurred earlier than the Songaksan tuff ring which erupted ca. 3.7 ka. It still remains a task to find a volcano which matches with a historical record of volcanic activity that occurred a thousand years ago.

Keywords : Hyeongjeseom (Islet), volcanic cycle, Ar-Ar age, Jeju Island

Citation: Park, J.B., Koh, G.W., Jeon, Y., Park, W.B., Moon, S.H., Moon, D.C. (2021) Geology and Volcanism of Hyeongjeseom (Islet) Volcano, Jeju Island. Korea Economic and Environmental Geology, v.54, p.187-197, doi:10.9719/EEG2021.54.2.187.

연구논문

제주도 형제섬 화산체의 지질과 화산활동

박준범¹ · 고기원^{2,*} · 전용문³ · 박원배⁴ · 문수형² · 문덕철²

¹미육군극동공병단

²제주개발공사

³제주특별자치도 세계유산본부

⁴제주연구원

*책임저자 : limu50@jpdco.kr

요 약

형제섬은 송악산에서 북동쪽으로 약 2 km 떨어진 해상에 위치한 침식 잔존 화산체로서, 하부로부터 화산쇄설층, 집괴암 및 분 석층, 분화구 용암, 아아 용암류와 이를 피복하는 재동퇴적층과 해빈퇴적층 순으로 이루어져 있다. 형제섬 화산체는 초기 증기 마그마성에서 후기 마그마성 분출과 용암분류로 변화한 화산분화를 기록하고 있는 분출물로 이루어져 있으며, 노두로 남아있 는 화산쇄설층은 응회구의 외륜 일부로 해석된다. 화산탄과 분화구 용암류는 현무암질 조면안산암의 조성(SiO_2 51.3 wt%, $\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}$ 6.0 wt%)이며 감람석 현무암류에 해당한다. 단계별 가열에 따른 Ar-Ar 연대측정법에 의한 형제섬 용암류의 플래토 연대는 9.2 ± 3.6 ka로서, 약 3천 7백 년 전의 분화 기록을 가지고 있는 인접한 송악산 화산체보다 앞서 형성되었음을 의미한다. 여전히, 약 천 년 전 화산분화의 역사 기록에 부합되는 화산체를 찾는 숙제가 남는다.

주요어 : 형제섬, 화산 윤회, Ar-Ar 연대, 제주도

1. 서 언

오늘날 광의적인 의미에서 수성화산분화는 모든 지구 조적인 환경에서 마그마와 물과의 반응에 의해 일어나는 폭발적에서 비폭발적인 화산분화과정 모두를 포함한다 (Németh and Kosik, 2020). 지하에서 상승하는 마그마가 다양한 유형의 외부 물(지하수, 빙하, 눈, 바닷물, 호수 등) 과 만나 반응하여 생긴 수성화산분화는 응회구, 응회환, 마르와 같이 비교적 분출량이 작은 단성화산체를 형성하 게 된다(Kereszturi and Németh, 2012). 이러한 단성화산 체는 대부분 며칠에서 수십 년에 걸친 단주기성 화산활 동에 의해 만들어진다(Walker, 1993).

제주도에는 한라산을 이루는 중심 화산체의 화산분화 와 연관되지 않는 독립된 마그마 시스템에 의한 화산활 동에 의해 만들어진 다수의 단성화산체들이 분포한다. 그 중 제주도의 해안에 분포하는 우도(응회구), 당산봉(응회 구), 차귀도(응회환) 그리고 송악산(응회환)에 대해서는 비교적 상세히 연구되었다(예: Hwang, 1998; Sohn *et al.*, 2003; Brenna *et al.*, 2010, 2011, 2015). 이들은 초기 수 성화산활동에서 후기 마그마성 분출과 용암분류(lava effusion)로 화산분화 양상이 변해가는 특징을 보인다.

한편, 송악산 해안에서 북동쪽으로 약 2 km 떨어진 해

상에 위치한 형제섬(혹은 형제도)은 하부로부터 응회암, 용암류, 스크리아층의 순으로 지층이 구성되어 있어 송 악산 화산체의 일부로 기재되었다(Park *et al.*, 2000). 형 제섬은 비양도, 송악산과 함께 약 천 년 전 수성화산활 동을 기록하고 있는 역사서(고려사절요)의 화산체로 추 정된 바도 있다(Koh *et al.*, 2019). 그 중 비양도와 송악 산은 화산체의 구성지질 및 연대측정 연구를 통해 역사 시대 분화기록과는 관련성이 없는 것으로 보고되었으나 (Sohn *et al.*, 2003; Ahn *et al.*, 2015; Sohn *et al.*, 2015; Ahn, 2016; Go *et al.*, 2017; Jeon *et al.*, 2019; Koh *et al.*, 2019; Sohn and Sohn, 2019; Marsden *et al.*, 2021), 형제 섬에서 대해서는 아직까지 자세한 연구가 진행된 바 없다.

형제섬은 제주특별자치도 서귀포시 안덕면 사계항에서 남남동쪽으로 약 2 km 떨어진 지점에 있는 무인도이다(그 림 1). 바다 한가운데 바위처럼 보이는 크고 (큰 섬의 썰 물 시 노출면적은 약 50,000 m²) 작은 두 개의 섬이 마 치 형과 아우처럼 마주보고 있다 하여 붙여진 이름이다. 또한 이들 주변에 갯바위(숨은여, 넘적여, 너벽여 등)들 이 있어 보는 방향에 따라 3~8개로 섬의 개수와 모양이 다르게 나타난다.

이 연구는 형제섬에 대한 야외지질조사와 더불어 용암 류에 대한 암석화학 분석 및 Ar-Ar 연대 측정, 주변 해

Fig. 1. Bird's-eye view and general geology of Hyeongjesom, Jeju Island. Abbreviations: Vd-volcaniclastic deposit; Ag & Sc-agglomerate (lava spatters & bombs) & scoria deposit ; Lp-ponded Lava; Lf-lava flow; Rd-reworked deposit; Bd-beach deposit.

저지형 검토 등을 통해 형제섬 화산체의 구성지질과 화산층서를 밝히고 화산활동 시기와 과정에 대해 고찰하였다.

2. 지질각론

형제섬은 하부로부터 화산쇄설층(Volcaniclastic deposit: Vd), 집괴암 및 분석층(Agglomerate and scoria deposit: Ag & Sc), 분화구 용암(Ponded lava: Lp), 아아 용암류(Lava flow: Lf), 재동퇴적층(Reworked deposit: Rd), 해빈퇴적층(Beach deposit: Bd) 순으로 구성된다(그림 1).

2.1. 화산쇄설층(Vd)

화산쇄설층은 형제섬의 본섬 남쪽 끝에 위치한 약 50 m × 20 m 면적의 언덕 지형과 인접한 암초로 나뉘어 분포한다(그림 2a). 화산쇄설층은 형제섬의 층서상 최하부에 위치하며 대부분 북에서 북서방향으로 약 30도 정도 기울어져 있다. 화산쇄설층의 대부분은 사박되고 잔류지형이 많지 않지만, 언덕 지형에서는 층의 경사방향에 따라 하부층과 상부층, 두 개의 지층으로 구분된다. 하부 지층은 상부 지층과 달리 남쪽으로 기울어져 있어, 수성화산체 형성과정에서 분화구 내부와 외부로 경계짓는 분화구 테두리(rim) 부분에 해당하는 지층으로 해석된다(그림 2b). 화산쇄설층은 층리가 잘 발달한 준고결의 암편질(lithic) 화산력 응회암으로서, 화산력은 대부분 아원형에서 원형의 본질 입자로 구성되어 있으며, 드물게 다공질 현무암괴를 포획하기도 한다. 화산쇄설층은 최상부로 갈수록 외래암편의 비율이 증가하는 경향을 보인다(그림 2c, 2d, 그림 3a). 한편, 화산쇄설층 위를 덮고 있는 집괴암층과는 약 40도 정도의 경사를 가지고 매우 뚜렷한 경계면을

보인다(그림 3a).

2.2. 집괴암 및 분석층(Ag & Sc)

집괴암 및 분석층은 화산체 내부를 채우거나 용암류의 상부에 나타나는 지층으로, 지질도폭에서는 스코리아층으로 기재된 바 있다. 그러나 이 지층은 대부분 크고 작은 스패터, 화산탄, 분석이 서로 엉키고 용결(welded)되어 있는 집괴암과 국지적으로 분포하는 분석층으로 구성된다. 집괴암은 색깔에 따라 흑색과 적색으로 구분이 가능한데, 흑색 집괴암은 화산체의 분화구 경계를 따라 나타나며, 두께는 약 2 m 내외이다. 흑색 집괴암의 암괴들은 분화구 테두리 내부에서는 분화구 안쪽으로 배열된 반면, 분화구 외부에서는 화산쇄설층과 나란하게 분화구 테두리의 바깥쪽으로 경사져 있다. 흑색 집괴암은 수 cm에서 수십 cm 크기의 유동형(fluidal) 및 각상의 불규칙한 화산탄과 본질 암괴 등을 포함하고 있다. 때로 다공질의 분석이 깨져 각진 채로 서로 중첩되어 있고 부분적으로 공기 중 강하(air fall)에 의해 떨어지면서 깨진 양상도 동시에 나타난다(그림 3c). 화산탄은 다양한 크기로 분포하는데, 대부분 유선형 형태를 이루고 있으며 아주 드물게 급랭되어 내부가 유리질화된 상태로 발견된다(그림 5a, 5b). 적색 집괴암은 흑색 집괴암의 상부에 수 m 두께로 분포하고 있다. 내부에는 수 cm에서 수십 cm 크기의 불규칙한 암괴와 화산탄들이 엉겨 붙어 있으며, 판상으로 늘어난 흑색의 용암편도 중간 중간 협재되어 있다. 적색 집괴암의 암괴들은 분화구 바깥쪽으로 완만하게 기울어진 형태로 분포하고 있다. 화산쇄설층 내부 및 상부에 흑색 집괴암과 적색 집괴암이 연속적으로 분포하는 점은 화산활동이 초기 수성화산활동에서 마그마성 분

Fig. 2. Field photographs of volcaniclastic deposit, Hyeongjeseom, Jeju Island. (a) outcrop (white arrow), (b) various change of strike-dip angle within deposit, (c) stratified unsorted lapilli tuff, (d) stratified lapilli tuff with occasional accidental clasts.

화로 변화되었음을 지시한다. 마그마성 분화 초기 흑색 집괴암이 분화구의 내부와 분화구 바깥사면 일부에 얇게 쌓이고 빨리 냉각되면서 까맣게 유리질화된 것이다(그림 3a, 3b). 그리고 두꺼운 적색 집괴암은 분화구 용암의 온도와 증기(steam)에 의한 열기로 더욱 용결되고 또한 붉게 산화되었다(그림 3a, 3d). 한편, 분석층은 화산쇄설층 사면을 따라 화산력 크기의 분석과 화산회가 서로 중첩되어 충리를 이루어 소규모로 화산쇄설층 위를 피복하는 경우도 있다(그림 3a, 7a, 7b, 7c).

Fig. 3. Field photographs of agglomerate, Hyeongjeseom, Jeju Island. (a) lava spatters & bombs overlying the slanted volcaniclastic deposit, (b) quenched and fragmented lava spatters & bombs, (c) quenched and fragmented scoria, (d) agglutinated volcanic bombs and lava spatters.

2.3. 분화구 용암(lp)

형제섬의 용암류는 크게 분화구 내부에 분포하는 용암류와 저지대 사면에 분포하는 용암류로 구분이 가능하다. 분화구 용암은 형제섬의 남쪽과 그 주변의 갯바위에 노출되어 있다(그림 4a, 4b). 분화구 용암은 수직을 고려할 때 두께가 최대 15 m 내외이며, 용암류는 전체적으로 치밀한 괴상을 이루고, 외부에는 불규칙한 수직의 주상절리들이 잘 발달되어 있다. 용암에 발달한 균열의 모양·크

Fig. 4. Field photographs of ponded lava, Hyeongjeseom, Jeju Island. (a, b) columnar jointed lava covered by agglomerate, (c) lava intrudes into agglomerate, (d) massive portion of ponded lava.

기·간격의 규칙성과 상하 연결성이 매우 불규칙하다(그림 4b). 특히, 용암의 상부와 하부의 균열 패턴이 다른 것은 상부와 하부의 냉각속도의 차이에 의해서 생겨난 것이다. 일반적으로 냉각속도가 느리면, 균열에 의해 생겨난 기둥의 폭이 넓어지고, 냉각속도가 빠르면 기둥의 폭은 좁아진다. 용암류의 상부는 스파터 혹은 화산탄과 분석이 두껍게 집괴암층을 이루어 덮고 있어 상대적으로 열손실이 적었으리라 추정된다. 한편 화산쇄설층 경계부에서 용암류가 집괴암을 관입하는 관입상을 이루기도 한

Fig. 5. Photomicrographs of (a)(b) volcanic bomb(# HJ-01), (c)(d) ponded lava(#HJ-02). (a, c; under cross-polarized light view; b, d; under plane-polarized light view; scale bar 0.5 mm).

다(그림 4c). 이런 점들을 감안하면 분화구 용암은 집괴암보다 나중에 형성된 것으로 해석된다. 물론 분화구에서 용암분류 동안 화산탄이나 스파터, 분석 등도 동시에 화구로부터 분출되었을 가능성도 있다. 전체적으로 용암류의 두께와 조직, 접하고 있는 화산쇄설층 및 집괴암과의 관계를 고려할 때, 화구에서 나온 용암이 분화구 내부를 채우고 굳어져 만들어진 용암지형(용암연)으로 해

석된다. 용암류는 치밀질이며 감람석 반정을 지닌 감람석 현무암류의 특징을 지닌다(그림 4d). 현미경하에서 감람석은 해정형을 이룬다(그림 5c, 5d).

2.4. 아아 용암류(Lf)

형제섬의 남동쪽과 북쪽 일대 해안가 주변에는 높이가 약 4 m 이내(해수면 위 지표에 노출된 두께)인 용암류가 분포한다. 이 용암류는 분화구를 채우고 있던 용암이 분화구를 파괴하고 섬의 남동쪽에서 북쪽 및 북동 방향으

로 유동된 것으로 추정된다(그림 6a). 스파터, 화산탄과 분석층이 곳에 따라 용암류의 상부를 약 1~2 m 두께로 덮고 있으며, 이들은 상당 부분 용결되어 있다(그림 6b). 이 용암류는 유동 당시 온도가 비교적 낮아 점성이 높았던 것으로 추정되며, 분화구 내에서 위를 덮고 있던 집괴암층 혹은 분석층의 일부가 용암류와 함께 유동되었다(그림 6b, 6c). 용암류는 아아 용암류로서 분화구 용암과 마찬가지로 괴상이며 치밀한 특징을 보이는데 드물게 수

Fig. 6. Field photographs of lava flows, Hyeongjeseom, Jeju Island. (a, b) aa lava flows, (c) very viscous flow surface, (d) ultramafic mantle xenolith clot (yellow arrow; much smaller than coin).

Fig. 7. Field photographs of scoria deposit and reworked deposit, Hyeongjeseom, Jeju Island. The view covered by each image is shown in the inset. (a) black scoria overlying volcaniclastic deposit, (b) relationship between scoria deposit and reworked deposit, (c) re-deposited scoria bottom of the slope, (d) unsorted reworked deposit overlying re-deposited scoria.

cm 크기의 각진 형태인 초염기성 맨틀포획체를 포함하고 있다(그림 6d). 초염기성 맨틀포획체를 포함하고 있는 형태는 인접한 송악산 용암류의 특징(Brenna *et al.*, 2011) 과도 유사하다.

2.5. 재동퇴적층(Rd)

재동퇴적층은 분석층의 상부에 소규모 국지적으로 분포하는 준고결 상태의 역암층으로 단면상에서 2매가 확인된다. 각 역암층의 두께는 약 1 m 내외이며, 두 층 간은 경사각, 입자크기, 원마도 등의 차이로 구분이 가능하다. 하부 역암층은 20도 내외의 각도로 경사져 있으며, 조립질에서 잔자갈 크기의 층이 불규칙하게 교호하고, 부분적으로 사층리가 발달한다. 층의 하부에는 잔자갈 크기의 적색 분석이 우세하고 상부로 갈수록 입자크기가 작은 화산쇄설성 입자들로 구성된 경향을 보인다(그림 7b, 7d). 반면, 상부 역암층은 하부 퇴적층에 사교하는 형태로 나타나며 경사는 거의 수평에 가깝게 나타난다. 층 내부에는 희미한 수평층리가 발달하며 주로 잔자갈에서 왕자갈 크기의 입자들이 불규칙하게 교호하고 30 cm 이상의 거력들도 포함되어 있다. 이 거력들은 가장자리가 매끄럽고 원마도가 양호한 특징을 보인다(그림 7d). 분석층 상부에 나타나는 하부 역암층은 화산체가 형성되고 사면을 따라 퇴적물이 물과 섞여 흘러내리면서 형성된 것으로 추정된다. 반면 상부 역암층은 원마도가 양호한 거력들이 포함되어 있고 지층의 각도가 거의 수평을 이루고 있다. 이 상부 역암층은 화산활동이 종료된 이후 현재와 같이 지상으로 노출되기 이전 홍수류 등에 의해 퇴적된 것으로 추정된다.

2.6. 해빈퇴적층(Bd)

해빈퇴적층은 크게 역질 퇴적층과 사질 퇴적층으로 구분된다. 역질 퇴적층은 주로 현무암질 용암류 기원의 암괴들로 구성되어 있으며 해안가를 중심으로 분포한다. 사질 퇴적층은 주로 미고결된 모래 크기의 퇴적물로 구성된다. 주로 섬의 중앙부를 따라 분포하며, 일부는 역질 퇴적층 하부에 분포하기도 한다(그림 1).

3. 용암류의 조성과 Ar-Ar 연대

채취된 두 개(집괴암층의 화산탄과 분화구 용암)의 시료(북위 33°12'33.32", 동경 126°18'51.82")는 미국 오리건 주립대학교 Argon Geochronolgy Lab에서 전암 주성분원소의 화학분석은 X선 형광분석법으로, 전암(석기) Ar-Ar 연대는 ARGUS VI 모델 (Thermo Scientific)의 다검출기 불활성기체 질량분석기로 이루어졌으며, ArArCALC

v2.7.0(beta version) 전산프로그램(Koppers, 2002)으로 연대가 계산되었다.

표 1과 표 2는 각 시료의 전암 주성분 자료 및 전암(석기)의 Ar-Ar 연대를 정리한 것이다. 암석의 명명은 IUGS의 전암 이산화규소(SiO₂) 대 알칼리(Na₂O+K₂O) 함량 분류도(Le Maitre *et al.*, 2002)에 적용하였다(그림 8). Ar-

Table 1. Major (wt%) element abundances of volcanic rocks from Hyeongjaeseom, Jeju Island

ID	HJ-1	HJ-2	SE02*
Rock Name	BTA	BTA	TB
SiO ₂	51.25	51.31	50.10
TiO ₂	2.30	2.32	2.32
Al ₂ O ₃	16.35	16.41	15.55
FeO ^t	10.53	10.64	10.47
MnO	0.15	0.15	0.15
MgO	5.48	5.44	6.82
CaO	7.34	7.40	7.92
Na ₂ O	4.08	4.13	3.75
K ₂ O	1.88	1.88	1.69
P ₂ O ₅	0.60	0.60	0.54
Total	99.96	100.29	99.31

Analized by XRF, Oregon State University

Total Fe as FeO^t

Abbreviation: TB-trachybasalt, BTA-basaltic trachyandesite

*Sample from Songaksan

Table 2. Result of Ar-Ar age dating of volcanic rocks from Hyeongjaeseom, Jeju Island

ID	Weighted Plateau				
	Age(ka)	2 s.d.	% ³⁹ Ar	Steps ³	MSWD
HJ-01	48.9	22.1	71.0	13/19	1.15
HJ-02*	9.2	3.6	100.0	41/41	0.58
ID	Normal Isochron				
	Age(ka)	2 s.d.	⁴⁰ Ar/ ³⁶ Ar i	2 s.d	MSWD
HJ-01					
HJ-02*	1.8	6.3	301.12	1.76	0.38
ID	Inverse Isochron				
	Age(ka)	2 s.d.	⁴⁰ Ar/ ³⁶ Ar i	2 s.d	MSWD
HJ-01					
HJ-02*	1.7	0.9	301.17	1.77	0.38

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); *Two runs combined.

Fig. 8. $(\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O})(\text{wt}\%)$ vs. $\text{SiO}_2(\text{wt}\%)$ plot of the volcanic rocks from Hyeongjeseom, 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. Recalculated to 100% on anhydrous basis with $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{FeO}$ ratio, 0.4 (Middlemost, 1989) prior to plotting. Abbreviations: ThB-tholeiitic basalt, AB-alkali basalt; TB-trachybasalt; BTA-basaltic trachyandesite; TA-trachyandesite. Symbol: open circle from Hyeongjeseom and closed square from Songaksan (unpublished data).

Ar 연대 자료(표 2)는 플레토(plateau) 연대, 정등시선(normal isochron) 연대, 역등시선(inverse isochron) 연대를 제공하고 있지만, 해석에서는 단계별 가열(incremental heating)에 따른 Ar-Ar 연대 스펙트럼으로부터 얻어진 시료별 플레토 연대를 이용하였다(그림 9). 각 시료의 기재적 특징을 다음과 같다.

HJ01: 급랭된 화산탄 내부의 치밀질 시료로서 다공질이며 유리질 조직이다. SiO_2 51.25 wt%, $\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}$ 5.96 wt%로 현무암질 조면안산암의 조성을 지닌다. 전암(석기)의 Ar-Ar 연대는 48.9 ± 22.1 ka이나, 정등시선과 역등시선 연대가 정의되지 않아, 대기에 의한 오염이 심한 결과로 해석된다.

HJ02: 분화구 내부를 채운 용암류가 굳어져 주상절리대가 발달한다. 치밀하며 감람석 현무암류의 특징을 지니며 SiO_2 51.31 wt%, $\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}$ 6.01 wt%로 현무암질 조면안산암의 조성이다. 한편, 기존 도폭(Park *et al.*, 2000)에서는 송악산의 용암류와 동일한 조면현무암으로 기재된 바 있다. 전암(석기)의 Ar-Ar 연대는 9.2 ± 3.6 ka이다. 두 번의 실험결과를 누적한 결과 상당히 신뢰할 만한 플레토 연대가 얻어졌다. 용암류로서 약 9천 년 전의 연대는 제주도에서 지금까지 보고된 용암류의 Ar-Ar 연대 중 가장 젊은 수치연대이다.

Fig. 9. Ar-Ar plateau ages of the whole rock (groundmass) samples from Hyeongjeseom, Jeju Island.

4. 토 론

형제섬 화산체는 하부에서 상부로 화산쇄설층, 집괴암 및 분석층, 분화구 용암, 아아 용암류로 구성되는 것으로 미루어, 최초 수성화산활동에 의해 만들어졌음을 알 수 있다. 비록 예상되는 최초 화산체의 크기에 비해서 현재 남아있는 화산쇄설층은 극히 일부분이어서 화산체의 형태를 정확히 분류하기는 곤란하다. 그러나, 분화구 용암 및 집괴암과 접하는 화산쇄설층의 외각 부분 경사가 약 30도를 이루는 것으로 미루어 응회구로 판단되지만(Ahn *et al.*, 2015), 응회구의 형성 환경 및 규모를 정확히 확인하기 곤란하다. 화산쇄설층은 주로 화산력응회암이며 간헐적으로 가지고 있는 외래암편은 대부분 현무암괴로서 이 지역 하부 기반을 이루는 그 외 이질 암편은 발견

Fig. 10. Post-glacial sea level rise. (Credit: Robert A. Rohde from Wikimedia Commons is licensed under CC BY-SA 3.0). The red line indicates absolute age of volcanic rock in Hyeongjeseom, Jeju Island.

되지 않는다. 증기마그마성 분화로 응회구가 형성된 이후, 응회구의 화구(vent)로부터 마그마성 분화로 바뀌면서 초기에는 스파터를 우세하게 분출하였고, 후기로 갈수록 분석이 우세하게 분출하는 양식으로 변해간 것으로 추정된다. 또한 동시에 화구 내로 현무암질 조면안산암 조성의 용암분출이 있었고, 마지막으로 분화구의 일부분을 부수면서 아아 용암류가 분화구 밖으로 유동된 것으로 해석된다. 용암류의 조성은 비교적 단순하며 분화된 현무암질 조면안산암인 점과 비교적 크기가 작지만 초염기성 맨틀 포획체를 가지고 있는 점은 현무암질 모마그마가 맨틀 내 근원지에서 형성된 후, 상승하는 과정에서 분화가 있었음을 지시한다(Brenna *et al.*, 2011).

용암류는 약 9천 년 전(9.2 ± 3.6 ka)의 Ar-Ar 연대가 얻어졌다. 이러한 결과는 형제섬 화산체가 기대했던 천 년

전의 화산체에 해당하지 않음을 지시하며, 또한, 약 3천 7백 년 전의 분화 기록을 가지고 있는 인접한 송악산 화산체(Sohn *et al.*, 2003, 2015; Ahn *et al.*, 2015; Marsden *et al.*, 2021)에 비해 고기의 화산체에 해당한다. 따라서 송악산 응회물질의 쌓여 만들어진 하모리층 내에서 형제섬 화산체의 응회물질이 발견되지 않는 것(Anh *et al.*, 2015)은 당연하다. 다만, 그 하모리층 밑 퇴적층 내의 기록이 남아있는지는 알 수 없다.

용암류의 연대를 최후 빙하기 이후의 해수면 변동 그래프에 적용해 보면(그림 10), 당시 해수면은 약 25 m 정도 지금보다 낮았을 것으로 추정할 수 있다. 형제섬 주변의 해저심도가 약 10~30 m 내외로 현재 형제섬에서 남동쪽으로 깊어지는 것에 비해 북서쪽은 형제섬의 침식 잔존체로 인해 상대적으로 깊지 않다(그림 11a). 한편, 해침의 영향을 받아 파괴되고 일부 잔류한 형상을 하고 있는 형제섬 화산체의 구체적인 형태를 해저 지형의 변화로부터 판단하기는 곤란하다. 다만 아아 용암류가 흘러 나간 북북서 방향의 육계도 형태의 해저 지형이 확인된다(그림 11a).

현재 노출되어 있는 화산쇄설층과 분화구 용암류가 접하는 부분, 그리고 압초 형태로 분포하는 분화구 용암류를 연결하여 분화구 외륜부의 규모와 위치를 추정해보았다(그림 11b). 추정된 응회구의 분화구 외경 (직경 약 600 m)은 우도 응회구의 분화구 외경과 유사한 크기를 지닌다. 그러나 우도와 달리 형제섬의 현재 남아 있는 부분은 분화구 외경 크기의 1/20 정도이다.

현재 남아있는 해저지형을 고려할 때 화산분화가 거의 끝나고 해침에 의한 삭박이 일어나 상대적으로 단단한 아아 용암류, 분화구 용암류와 집괴암이 분포하는 지역이 암반으로 잔류하여 현재 형제섬을 이루고 있는 것으로 추정된다.

Fig. 11. (a) bathymetry map (numbers in meter indicate depth from the sea surface; data captured from <http://www.khoa.go.kr/oceanmap/main.do#>) and (b) aerial orthophotography of Hyeongjeseom (dotted circle represents inferred location of crater with approximate 600 m diameter).

5. 결 론

형제섬의 지질, 용암류의 주성분자료를 포함한 Ar-Ar 연대를 보고하고 형제섬 화산체의 화산활동사를 제시한다.

- 1) 형제섬은 하부로부터 화산쇄설층, 집괴암 및 분석층, 분화구 용암, 아아 용암류와 이를 피복하는 재동퇴적층, 그리고 해빈퇴적층 순으로 구성되며, 화산체의 구성 지질은 송악산 화산체와는 별개인 독립된 화산체이다.
- 2) 형제섬 화산체는 최초 수성화산활동에 의해 응회구가 만들어지고, 이후 마그마성 분화로 진행되어 용암류의 분출이 발생하였다.
- 3) 형제섬 화산체를 구성하는 화산쇄설층은 주로 화산력응회암이며 현재 노두는 응회구 외륜의 일부분으로 해석된다.
- 4) 용암류는 감람석 현무암류에 해당하고, SiO₂ 51.3 wt%, Na₂O+K₂O 6.0 wt%인 현무암질 조면안산암의 조성이다.
- 5) 형제섬 용암류의 Ar-Ar 연대는 9.2±3.6 ka로서, 형제섬 화산체는 인접한 송악산 화산체의 형성 이전인 약 9 천 년 전의 화산활동에 의해 만들어졌음을 제시한다. 여전히, 약 천 년 전 화산분화의 역사 기록에 부합되는 화산체를 찾는 노력은 계속되어야 한다.

사 사

이 연구를 위해 야외조사에 함께 참여해 준 제주연구원 고인종 박사에게 고마움을 표합니다. 또한, 이 연구의 기본 자료인 암석성분 분석과 Ar-Ar 연대측정에 애를 써주시고 분석 결과를 함께 논의해 준 오리건 주립대학교 Dr. Daniel P. Miggins께 깊은 감사를 드립니다. 아울러, 이 연구의 수행을 지원해 준 제주개발공사와 논문의 초고에 세심한 심사를 해주신 두 분 심사위원님께 감사를 드립니다.

References

- Ahn, U.S. (2106) Study of the Last Volcanic Activity on Historical Records on Jeju Island, Korea. Jour. Petrol. Soc. Korea, v.25, p.69-83. doi: 10.7854/JPSK.2016.25.1.69
- Ahn, U.S., Sohn, Y.K., Yoon, W.S., Ryu, C.K., Jeong, J.O. and Kang, C.W. (2015) Geochemical fingerprinting of basaltic glass in tephra deposits underlying the human footprints-bearing strata in Jeju Island, Korea: Provenance of tephra and age of the human footprints. Journal of the Geological Society of Korea, v.51, p.105-126 (in Korean with English abstract). doi: 10.14770/jgsk.2015.51.2.105
- Brenna, M., Cronin, S.J., Smith, I.E.M., Sohn, Y.K. and Németh, K. (2010) Mechanisms driving polymagmatic activity at a monogenetic volcano, Udo, Jeju Island, South Korea. Contrib Mineral Petrol., v.160, p.931-950. DOI 10.1007/s00410-010-0515-1. doi: 10.1007/s00410-010-0515-1
- Brenna, M., Cronin, S.J., Németh, K., Smith, I.E.M. and Sohn, Y.K. (2011) The influence of magma plumbing complexity on monogenetic eruptions, Jeju Island, Korea. Terra Nova, v.23, p.70-75. doi: 10.1111/j.1365-3121.2010.00985.x
- Brenna, M., Németh, K., Cronin, S.J., Sohn, Y.K., Smith, I.E.M. and Wijbrans, J. (2015) Co-located monogenetic eruptions ~200 kyr apart driven by tapping vertically separated mantle source regions, Chagwido, Jeju Island, Republic of Korea. Bull Volcanol, v.77: 43 DOI 10.1007/s00445-015-0928-9.
- Go, S.Y., Kim, G.B., Jeong, J.O. and Sohn, Y.K. (2017) Diatreme evolution during the phreatomagmatic eruption of the Songaksan tuff ring, Jeju Island, Korea. Bulletin of volcanology, v.79, 23, 10.1007/s00445-017-1103-2
- Hwang, S.K. (1998) Volcanic Processes of Dongsanbong Volcano, Cheju Island. The Journal of the Petrological Society of Korea, v.7, p.1-14 (in Korean with English abstract).
- Jeon, Y., Koh, G.W., Park, J.B., Moon, D.C., Kim, G.P. and Ryu, C.K. (2019) Geology and volcanic activities of Biyangdo volcano, the northwestern part of Jeju Island, Korea. Journal of the Geological Society of Korea. v.55, p.291-313 (in Korean with English abstract). <http://dx.doi.org/10.14770/jgsk.2019.55.3.291>
- Kereszturi, G. and Németh, K. (2012) Monogenetic Basaltic Volcanoes: Genetic Classification, Growth, Geomorphology and Degradation, Updates in Volcanology - New Advances in Understanding Volcanic Systems, Karoly Németh, IntechOpen, DOI: 10.5772/51387. Available from: <https://www.intechopen.com/books/updates-in-volcanology-new-advances-in-understanding-volcanic-systems/monogenetic-basaltic-volcanoes-genetic-classification-growth-geomorphology-and-degradation>.
- Koh, G.W., Jeon, Y., Park, J.B., Park, W.B., Moon, S.H., and Moon, D.C. (2019) Understanding of Historical Records about Volcanic Activities in Jeju Island, Korea. Journal of the Geological Society of Korea, v.55, p.165-178(in Korean with English abstract). doi: 10.14770/jgsk.2019.55.2.165
- Koppers, A.A. (2002) ArArCALC software for ⁴⁰Ar-³⁹Ar calculations. Computers & Geosciences, v.28, p.605-619. doi: 10.1016/S0098-3004(01)00095-4
- 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, 236p. doi: 10.1017/CBO9780511535581
- Macdonald, G.A. and Katsura, T. (1964) Chemical composition of Hawaiian Lavas. Journal of Petrology, v.5, p.82-133. doi: 10.1093/petrology/5.1.82
- Marsden, R.C., Danisik, M., Ahn, U.-S., Friedrichs, B., Scmitt, A.K., Kirkland, C.L., McDonald, B. and Evans, N.J. (2021)

- Zircon double-dating of Quaternary eruptions on Jeju Island. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, v.410. ISSN 0377-0273, <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*, v.77, p.19-26. doi: 10.1016/0009-2541(89)90011-9
- Németh, K. and Kosik, S. (2020) Review of explosive hydrovolcanism. *Geosciences*, 10, 44; doi:10.3390/geosciences10020044.
- Park, K.H., Cho, D.L. and Kim, J.-C. (2000) Geologic report of the Moseulpo-Hanlim Sheet (1:50,000). Jeju Provincial Government, 56p (in Korean with English abstract).
- Renne, P.R., Swisher, C.C., Deino, A.L., Kamber, D.B., Owens, T.L. and DePaolo, D.J. (1998) Intercalibration of standards, absolute ages and uncertainties in Ar-40/Ar-39 dating. *Chemical Geology*, v.145, p.117-152. doi: 10.1016/S0009-2541(97)00159-9.
- Sohn, C. and Sohn, Y.K. (2019) Volcaniclastic tide-modulated tempestite in a coastal tuff ring, Jeju Island, Korea. *Sci. Rep.*, 9, 3561, <https://doi.org/10.1038/s41598-019-39784-0>
- Sohn, Y.K., Park, J.B., Khim, B.K., Park, K.H. and Koh, G.W. (2003) Stratigraphy, petrochemistry and Quaternary depositional record of the Songaksan tuff ring, Jeju Island, Korea. *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, v.119, p.1-20. doi: 10.1016/S0377-0273(02)00302-5
- Sohn, Y.K., Yoon, W.S., Ahn, U.S., Kim, G.B., Lee, J.H., Ryu, C.K., Jeon, Y.M. and Kang, C.H. (2015) Stratigraphy and age of the human footprints-bearing strata in Jeju Island, Korea: Controversies and new findings. *Journal of Archaeological Science: Reports*, v.4, p.264-275. doi: 10.1016/j.jasrep.2015.09.014
- Walker, G.P.L. (1993) Basaltic-volcano system. In: Prichard, H.M., Alabaster, T., Harris, N.B.W., Neary, C.R. (Eds.), *Magmatic processes and plate tectonics*. *Geol. Soc. Sp. Pub.*, v.76, p.3-38. doi: 10.1144/GSL.SP.1993.076.01.01