

제주도 북서부 비양도 화산체의 지질과 화산활동

전용문^{1,*} · 고기원² · 박준범³ · 문덕철² · 김기표⁴ · 류춘길⁵

¹제주특별자치도 세계유산본부

²제주특별자치도개발공사 품질연구본부

³미육군극동공병단 지반환경공학부

⁴제주특별자치도 물정책과

⁵한국지질환경연구소

요 약

비양도 화산체의 지질은 하부로부터 스패터층, 분석층, 용암류로 구성된다. 최하부 스패터층은 비양도 북쪽과 서쪽 해안에 분포하며, 엉겨 붙은 스패터와 대형 화산탄들을 포함하고 있다. 분석층은 섬 중앙의 비양봉을 구성하며 분석들이 역지진된 형태로 분포한다. 용암류는 서쪽 해안을 제외한 해안 전역에 분포하며, 대부분 파호이호이 용암류의 특성을 보인다. 절대연대 측정을 통해 비양도 용암류는 약 2만 6천 년 전후에 형성된 것으로 추정된다. 비양도 화산체는 해수면이 지금보다 약 90~110 m 낮았던 시기에 육상환경에서 짧은 기간 동안 스패터와 대형 화산탄들이 뿜어져 나와 스패터콘을 형성하였다. 스패터콘 형성 이후 연이은 화산활동이 지금의 비양봉에서 발생하여 분석구를 형성하였다. 이 과정에서 측면을 뚫고 파호이호이 용암류가 흘러나와 스킨리아 래프트와 함몰지형이 형성되었다. 일부 용암류는 습지 위를 흐르면서 연료-냉매 상호작용(FCI)에 의한 거품파열(bubble burst) 현상으로 굴뚝모양의 호니토를 형성하였다. 파호이호이 용암 분출 후 소량의 아아 용암류가 남쪽으로 흘러내린 것을 끝으로 화산활동은 종료되었다. 화산활동이 끝나고 해수면 상승에 따라 파도에 의한 침식으로 스패터콘의 대부분이 사박되어 ‘코끼리 바위’와 시스템으로 남게 되고, 상대적으로 침식을 덜 받은 비양봉은 원형의 형태로 남겨졌다. 비양도는 제주도 본섬에서는 흔히 보기 힘든 단성화산체의 육상 화산활동에 의해 만들어진 후 해수면 상승에 의해 섬이 된 화산체로 다양한 산물을 관찰할 수 있는 교과서적인 사례이며, 2014년 제주도 지질공원 대표명소로 추가되었다.

주요어: 비양도, ⁴⁰Ar-³⁹Ar 절대연대, 화산활동, 제주도, 지질공원

Yongmun Jeon, Gi Won Koh, Jun Beom Park, Deok Cheol Moon, Gi-Pyo Kim and Choon Kil Ryu, 2019, Geology and volcanic activities of Biyangdo volcano, the northwestern part of Jeju Island, Korea. Journal of the Geological Society of Korea. v. 55, no. 3, p. 291-313

ABSTRACT: The volcanic body of Biyangdo consists of spatter deposit, scoria deposit and lava flows from bottom to top. The lowest spatter deposit is exposed on the northern and western coasts of the islet and contains agglutinated spatters and large volcanic bombs. Biyangbong, the central part of the islet, is a scoria cone consisting of clast-supported scoria deposits. Its coastal areas are composed of the lava flows except the west, most of which possess the characteristics of pahoehoe lava flows. ⁴⁰Ar-³⁹Ar age dating suggests that the lava flows of Biyangdo formed around 26,000 years ago. The volcano was formed by strombolian eruption on land when the sea level was approximately 90 ~ 110 meters lower than it is at present. For a short period, spatters and large volcanic bombs were emitted to form a spatter cone. Its crater, then, shifted, followed by subsequent volcanic activities at Biyangbong to form Biyang Scoria Cone. During this process, the pahoehoe lava flowed through its base and formed scoria rafts and collapsed trench structures. Some lava flows formed chimney-shaped hornitos resulting from bubble burst phenomenon caused by the fuel-coolant interactions while flowing on the wetland. Volcanic activities came to an end with effusion of a small volume of aa lavas flowing southward after the pahoehoe lava flows. As the sea level rises, major portion of the spatter cone was removed by wave erosion, leaving behind several sea stacks including Elephant Rock, and Biyangbong, relatively less eroded, have remained in its original shape. Biyangdo is a textbook example to take a look at various products of terrestrial volcanic activity of monogenic volcanoes, which are hard to observe in Jeju Island. The island was thus included in the Jeju Geopark in 2014.

* Corresponding author: +82-64-710-6027, E-mail: ymjeon74@korea.kr

Key words: Biyangdo, ^{40}Ar - ^{39}Ar age, volcanism, Jeju Island, Geopark

(Yongmun Jeon, Jeju Heritage Management Division, Jeju Special Self-Governing Province, Jeju 63341, Republic of Korea; Gi Won Koh and Deok Cheol Moon, Water Resource Research Center, Jeju Special Self-Governing Province Development Corporation, Jeju 63345, Republic of Korea; Jun Beom Park, Geotechnical and Environmental Engineering Branch, US Army Corps of Engineers Far East District, Republic of Korea; Gi-Pyo Kim, Environment Division, Jeju Special Self-Governing Province, Jeju 63341, Republic of Korea; Choon Kil Ryu, Korea Institute of Geological Environments, Busan 46981, Republic of Korea)

1. 서론

제주특별자치도는 행정구역상 제주도 본섬과 주변 부속도서로 구성된다. 부속도서 중 북쪽에 위치한 추자군도는 중생대 백악기-신생대 초 화산활동으로 형성되었고, 제주도 본섬 해안을 따라 분포하는 섬들은 신생대 제4기 동안에 형성되었다(Park *et al.*, 2000a, 2000b). 화산지질학적 관점에서 제주도 본섬 주변의 제4기 화산섬은 4개 유형으로 나눌 수 있는데, ① 용암돔(범섬, 문섬, 쇠섬), ② 응회퇴적층-분석구-용암 복합화산(우도, 차귀도, 형제섬), ③ 용암

대지(지귀도, 마라도, 가파도), ④ 분석구(비양도)로서, 이들은 각기 다른 시기 동안의 해수면 변화를 반영한 화산분화 환경에서 형성되었다(Sohn and Park, 2005; Koh *et al.*, 2013).

비양도는 해상에 위치한 섬임에도 불구하고 육상에서의 마그마성 화산분화를 지시하는 분석구와 용암류를 비롯하여 호니토(hornito), 투물리(tumuli), 초대형(5 m 이상 크기) 화산탄, 스패터(spatter) 등 다양한 화산분출물과 화산지형이 발달되어 있어(그림 1), 제주도 지질공원 대표명소로 2014년에 추가되면서 더 많은 사람들이 찾고 있다(Jeon *et al.*, 2016).

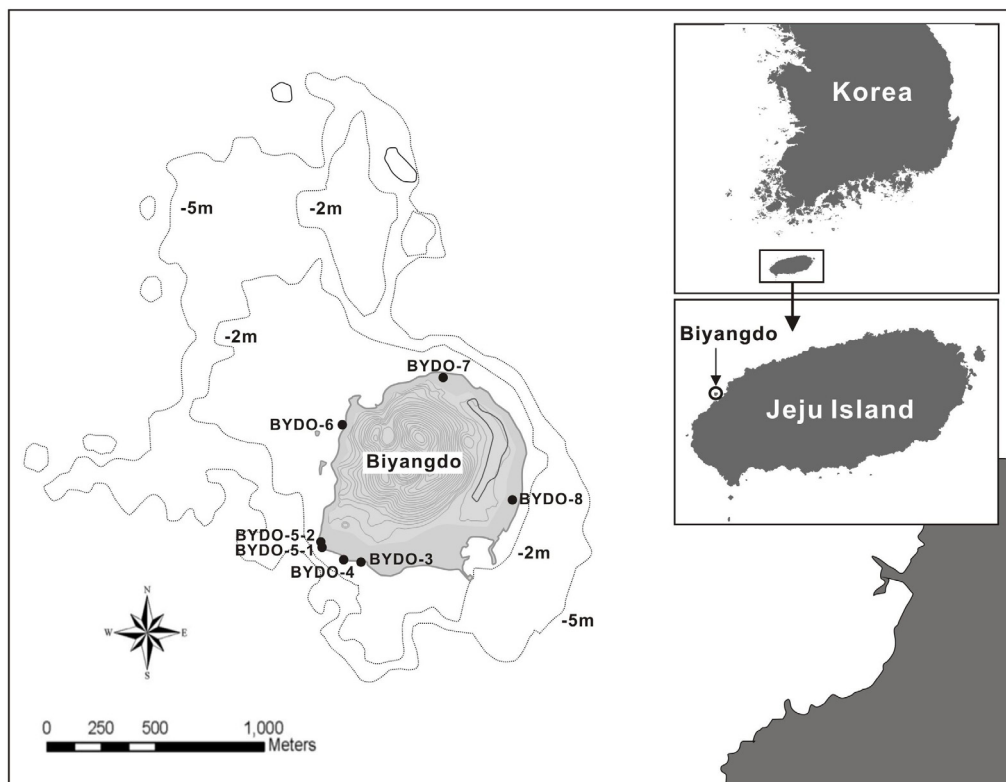


Fig. 1. Bathymetric map around Biyangdo. Broad Lava plateau with a gentle slope is developed to the north and west of the island. Seven volcanic rocks (BYDO with numbers) were sampled along the coast of Biyangdo.

그동안 비양도는 1002년(고려 목종 5년 6월) 화산분화에 의해 형성된 섬으로 추정되어 왔으며(Nakamura, 1925; Haraguchi, 1930), Woo and Kim (2005)은 협재지역 해안사구의 고토양과 탄산염퇴적물에 대한 방사성탄소연대 결과를 1002년의 화산분화 기록과 연관시켜 5단계 해수면 변동과 고환경 변화 및 해안사구의 퇴적과정을 제시하면서, 약 950 BP에 비양도가 수성분화한 것으로 해석하였다. 반면, Miyake *et al.* (1993)은 비양도 용암류에 대한 K-Ar 절대연대 값으로 0.0434 ± 0.0059 Ma로 보고하였고, Koh (2003)은 비양도 남서쪽 해안단애의 표토층에서 출토된 토기편에 대해 약 4,000~5,000년 전 신석기시대 압날 점렬문토기로 감정하였다.

최근 역사문헌의 해석을 통해 1002년 분화 기록의 대상 화산체가 비양도일 수 없음을 밝힌 바 있지만(Koh *et al.*, 2019), 구성지질 및 다양한 화산분출물이 가지는 지질학적 의미와 형성과정에 대한 비양도 화산체의 화산학적 연구는 여전히 미진한 상태이다.

이 연구는 비양도에 대한 야외지질조사와 더불어 용암류에 대한 암석화학적 분석 및 ^{40}Ar - ^{39}Ar 절대연대 측정, 용암류와 화산탄의 방향 측정, 비양도 주변 해저지형 검토 등을 통해 비양도 화산체의 구성지질과 화산층서를 밝히고 화산활동 시기와 과정을 해석하였다.

2. 연구 방법

비양도 화산체를 구성하는 암석의 종류와 분포상태를 파악하여 1/25,000 축척의 지질도를 작성하였다. 아울러, 해안가에 노출된 노두의 용암류 유동단 위별 두께와 전체 매수, 대형 화산탄의 크기와 방위도 측정하였다. 또한 구성암석의 암석화학적 특성과 절대연대를 밝히기 위하여 해안을 따라 용암류 시료 7점을 채취하였다(그림 1). 채취된 화산암 시료의 전암 주성분 및 미량성분 원소의 화학분석은 미국 Oregon 주립대학교 불활성기체 분석실험실에서 X선 형광분석법으로 이루어졌다(표 1). 동일 시료에 대한 전암 ^{40}Ar - ^{39}Ar 절대연대는 동일 실험실에서 MAP 21550모델의 불활성기체 질량분석기로 이루어졌으며, ArArCALC v.2.2 전산프로그램(Koppers, 2002)으로 절대연대가 계산되었다(표 2). 비양도 주변해역의 해저지형은 국립해양조사원 '개방해' 웹 사이트의

수심도를 이용하여 분석하였다.

3. 비양도의 위치 및 지형

비양도는 북위 $33^{\circ} 24'24''$, 동경 $126^{\circ} 13'47''$ 의 제주시 한림읍 협재리 서쪽 해상에 위치한 약 0.52 km^2 의 작은 섬으로 협재해안에서 약 1.5 km 떨어져 있다(그림 1). 섬의 동서 길이는 1,020 m, 남-북 길이는 1,130 m, 해안선 길이는 3.5 km이다. 전체적으로 원형에 가까운 분석구 지형을 보이는 비양도는 섬 중앙부 비양봉 정상 고도가 114.1 m이고 정상부 남쪽과 서쪽에 2개의 분화구가 자리하고 있는데, 분화구 중 가장 깊은 것은 80 m에 이른다.

비양도 화산체의 지형적 요소로는 분석구, 스패터 콘(spatter cone), 해안 파식대 및 암석해안, 습지, 호니토, 투물리스, 화산탄 산지 등이 있다. 중앙에 위치한 비양봉 분석구는 섬의 대부분을 차지하고 있으며, 해안 파식대의 발달은 섬의 서쪽과 동쪽 간에 큰 차이를 보인다(그림 1). 이는 협재리와 마주한 섬의 남동쪽-남쪽 지역은 제주도 본도의 바람막이 역할로 파도에 의한 침식이 적어 파식대가 덜 발달한 반면, 섬의 서쪽-동북쪽은 외해로 개방되어 북서 계절풍과 폭풍에 의한 침식으로 넓은 파식대가 발달한 것으로 보인다. 특히 비양도의 서북쪽 해안에는 '코끼리 바위'와 '춧대바위'로 부르는 시스택(sea stack)과 화산탄 분포지가 있다. 해저수심의 변화 양상에 의하면, 수심 2 m 이내 지역은 비양봉을 기준으로 서북쪽 약 1 km, 북쪽 약 1.4 km까지 확장되며, 이 지역에는 크고 작은 수중 암초들이 발달한다(그림 1). 전체적으로 비양도 주변 해역은 북서 방향으로 용암류의 유동에 의해 만들어진 용암대지가 길게 돌출된 형상을 이루며 연장부의 말단에서 급사면을 형성하고 있다.

4. 비양도 화산체의 구성지질과 층서

기 발간된 축척 1:50,000 모슬포-한림도폭(Park *et al.*, 2000a)에 따르면, 비양도화산체는 제주도 서부 지역에 광범위하게 분포하는 광해약현무암과 이를 분출한 분석구로 구성된다. 이 연구에서는 야외지질조사 결과를 반영하여 비양도 화산체의 지질층서 단위를 하부로부터 스패터층, 분석층, 용암류(조면현무

Table 1. Whole-rock compositions of major (wt%) and trace elements (ppm) of lava flows at Biyangdo, Jeju Island.

	BYDO-3	BYDO-4	BYDO-5-1	BYDO-5-2	BYDO-6	BYDO-7	BYDO-8
SiO ₂	49.67	49.77	50.37	50.11	50.04	49.78	49.41
TiO ₂	2.39	2.39	2.41	2.38	2.40	2.39	2.45
Al ₂ O ₃	15.24	15.21	15.45	15.36	15.35	15.28	15.59
FeO*	10.77	10.86	10.92	10.82	10.89	10.91	11.00
MnO	0.16	0.16	0.16	0.16	0.16	0.16	0.16
MgO	6.12	6.16	6.19	6.19	6.03	6.30	5.95
CaO	7.92	7.92	7.95	7.93	7.91	7.95	7.91
Na ₂ O	3.72	3.76	3.81	3.77	3.69	3.72	3.81
K ₂ O	1.69	1.70	1.72	1.70	1.70	1.67	1.66
P ₂ O ₅	0.61	0.61	0.61	0.61	0.61	0.61	0.63
Total	98.29	98.53	99.59	99.04	98.78	98.78	98.56
Ni	92	94	96	95	89	99	85
Cr	161	158	170	164	163	162	130
Sc	19	19	19	19	18	18	18
V	164	162	167	162	163	161	161
Ba	449	450	458	456	461	454	451
Rb	39	39	41	40	39	33	35
Sr	538	538	535	539	538	541	569
Zr	258	260	254	259	261	257	249
Y	28	28	27	27	27	28	27
Nb	43.0	44.2	44.9	43.5	44.8	43.6	42.8
Ga	23	22	22	23	20	22	21
Cu	35	27	34	28	37	31	25
Zn	129	128	131	130	125	130	131
Pb	2	1	4	1	1	2	1
La	37	41	39	38	34	35	38
Ce	70	76	71	77	69	70	76
Th	7	6	4	6	6	7	6
Nd	35	38	37	36	36	39	37

NOTE: Total FeO as FeO*; Analyzed by XRF at Oregon University Noble Gas Chronology Lab

암)로 세분하였고 이들의 특징과 상하관계는 다음과 같다(그림 2).

4.1 스패터층

스패터층은 비양도 화산체의 지질 단위 중 최하부를 구성하며, 비양도 서쪽 해안을 따라 분포한다(그림 2). 이 층은 다양한 형태와 크기를 가진 스패터와 화산탄으로 구성되며, 대부분 파도에 식박되어 파식대와 시스택 등의 해안지형으로 존재한다(그림

3a). '코끼리 바위'는 스패터층의 전형적인 잔존체로서 높이가 약 20 m이고 스패터와 크고 작은 화산탄들을 포함하고 있다(그림 3b, 3c). 각각의 스패터는 크기가 수 cm에서 수십 cm이며, 대부분 불규칙하게 용결(agglutination)되어 있다(그림 3c). 겹겹이 쌓인 용결된 스패터층 내에서는 희미한 층리가 발달하며 1 m 이상 늘어난 형태를 보이기도 하고 대체로 남동쪽으로 기울어져 있다(그림 3a). 이는 분화구에서 공중으로 분사된 스패터들이 떨어져 안착할 때

Table 2. $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ age dating results of whole rock samples of lava flows at Biyangdo, Jeju Island.

Sample No.	Rock Type*	Total Fusion		Weighted Plateau				Normal Isochron				Inverse Isochron						
		Age (ka)	2 s.d.	Age (ka)	2 s.d.	% ^{39}Ar	Steps	MSWD	Age (ka)	2 s.d.	$^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$ i	2 s.d.	MSWD	Age (ka)	2 s.d.	$^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$ i	2 s.d.	MSWD
BYDO-3	TB	57.6	44.0	30.4	24.3	100.0	7/7	0.60	13.1	58.3	297.0	4.6	0.63	12.8	13.9	297.02	4.56	0.63
BYDO-4	TB	34.3	23.6	18.2	9.5	100.0	7/7	0.55	15.5	10.3	298.3	4.1	0.25	15.5	9.7	298.39	4.10	0.26
BYDO-5-1**	TB	33.3	17.2	26.9	8.9	100.0	5/5	0.46	26.1	10.3	296.1	5.0	0.58	26.2	9.9	296.15	4.97	0.58
BYDO-5-2**	TB	39.0	19.4	27.6	11.8	100.0	7/7	0.81	21.3	13.9	301.2	6.8	0.36	21.7	12.7	301.29	6.82	0.37
BYDO-6	TB	31.6	19.6	22.9	10.7	100.0	7/7	0.47	17.1	13.7	298.3	4.1	0.17	17.1	12.8	298.30	4.08	0.18
BYDO-7	TB	177.7	45.8	56.7	20.1	73.1	5/7	0.31	64.1	46.3	294.2	7.3	0.31	64.0	43.5	294.24	7.26	0.31
BYDO-8	TB	73.8	29.1	27.8	19.2	89.4	6/7	0.34	15.1	29.6	298.2	4.8	0.09	15.1	25.4	298.20	4.75	0.09

*TB-trachybasalt; **Rock core sample

※ Sample irradiated at OSU TRIGA reactor for 6 hour at 1MW power. Neutron flux measured using FCT-3 biotite monitor

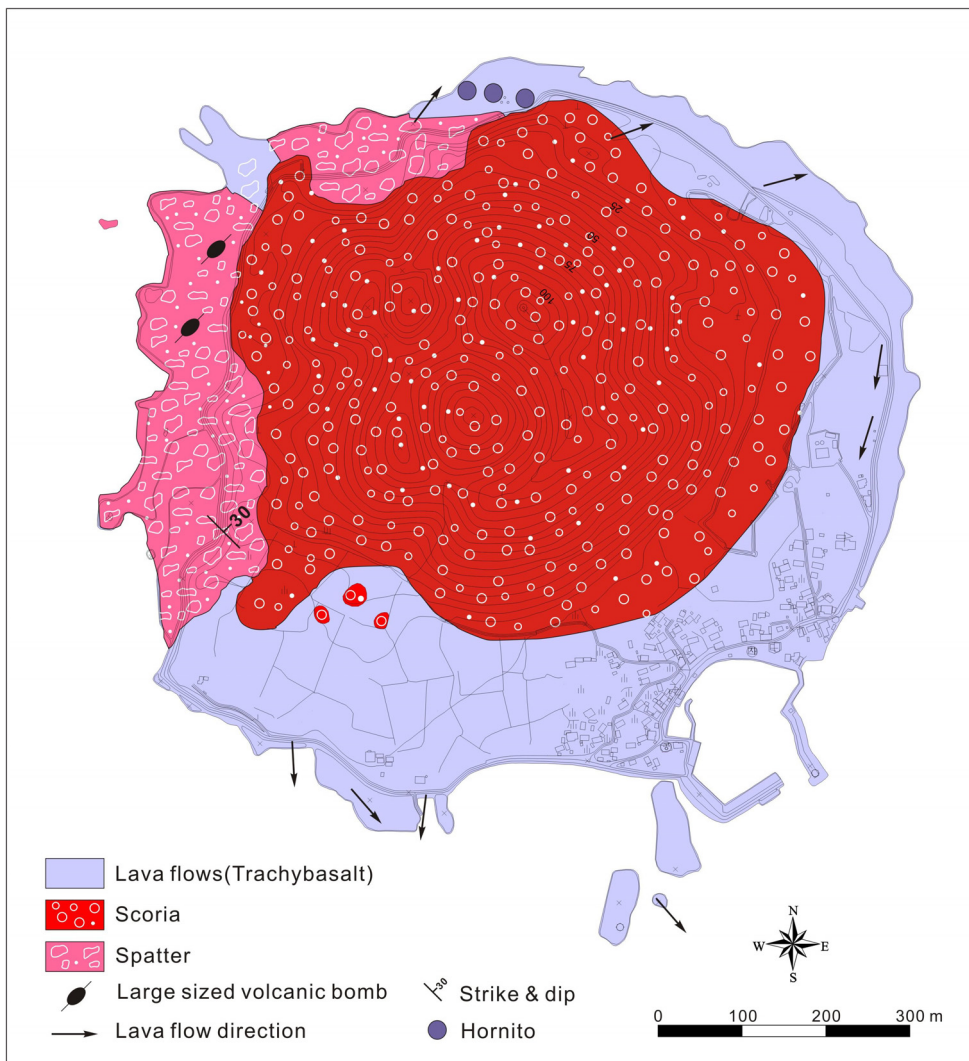


Fig. 2. Geological Map of Biyangdo.

만들어진 미약한 층리로서 N20°E의 주향에 35°SE의 경사를 이룬다. 일부 용결된 스패터층 사이에는 수십 cm에서 최대 2 m 두께의 괴상의 용암류가 협재하는데, 스패터가 치밀하게 엉겨 붙은 형태이다(그림 3d). 스패터층 내부에 괴상 용암류의 존재는 용암의 온도가 비교적 고온이 유지되는 환경이었음을 의미한다. 대기 증으로 분사된 액상 용암 덩어리(또는 스패터)는 지표에 떨어진 후에도 용암 표면에 형성

된 얇은 냉각 껍질이 보온막 역할을 한다. 이로 인해 내부의 용암은 비교적 장시간 유동성을 유지할 수 있으며, 용암 덩어리의 누적으로부터 가해진 압력에 의해 빠져나온 액상 용암이 경사가 낮은 곳으로 흐를 경우, 스패터층 내부에 괴상 용암이 만들어질 수 있다(Head III and Wilson, 1989; Sumner, 1998; Sumner *et al.*, 2005). 이처럼 누적된 스패터들이 서로 엉겨 붙어 용암류처럼 흘러 굳어진 것을 클라스토제닉 용

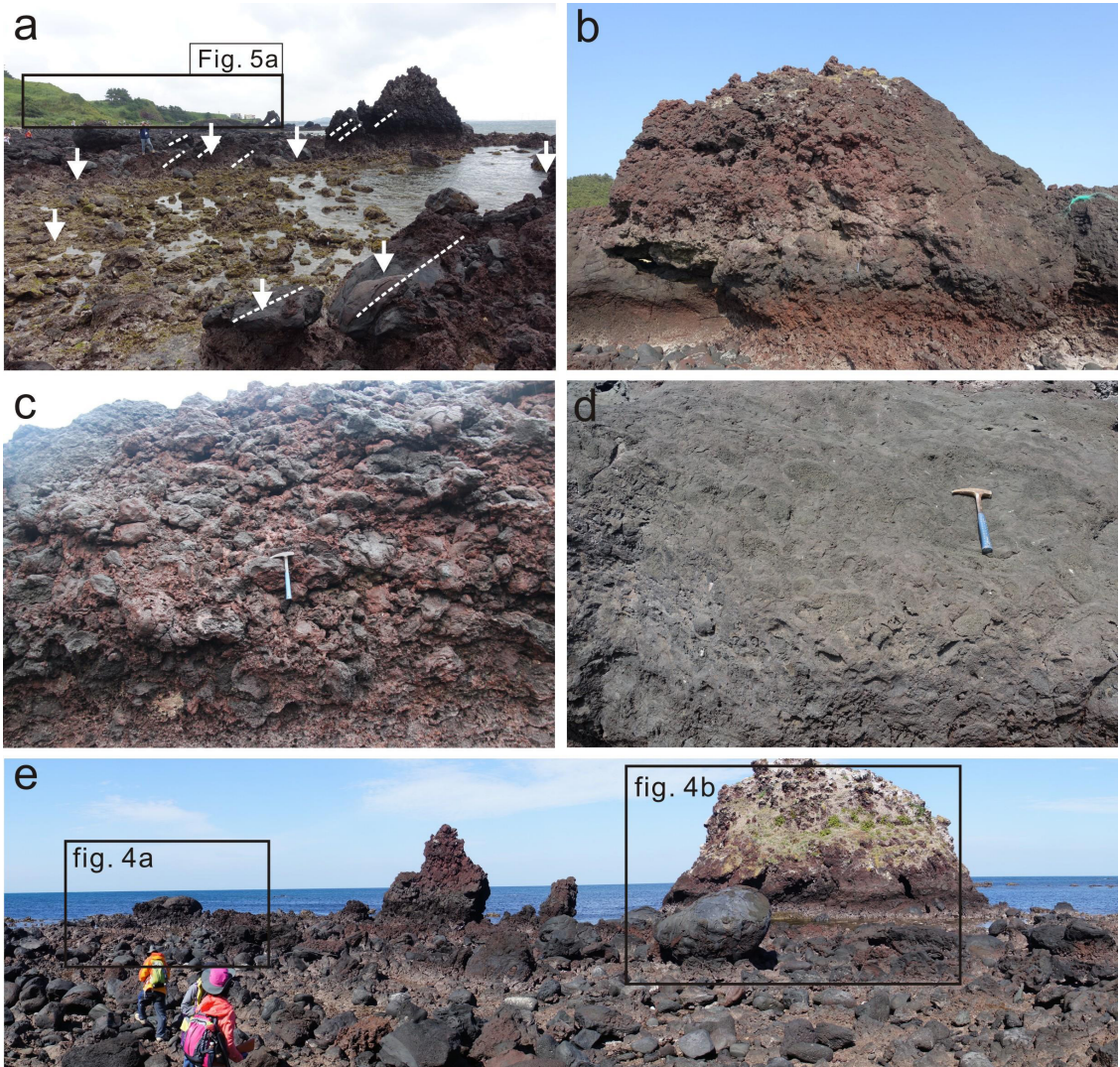


Fig. 3. Spatter deposits around Elephant Rock located in the western part of Biyangdo. (a) A sea stack on the west coast of Biyangdo. The spatters around the Elephant Rock are tilted from the west towards the Biyangbong and the volcanic bombs are arranged in the same direction. (b and c) A section of Elephant Rock with large and small agglutinated spatters. (d) Coalescence of agglutinated spatters. (e) Large volcanic bombs around Elephant Rock.

암(clastogenic lava)이라 하며(Wolff and Sumner, 2000), 1959년 하와이 킬라우에아 이키(Iki) 화산분화와 1983-1986년 하와이 킬라우에아 푸오오(Pu'u 'O'o) 등에서 보고된 바 있다. 특히, 일본 Izu-Oshima 화산분화에서는 누적된 스파터들로부터 빠져나온 용암이 1 km를 흘러간 현상이 보고되기도 하였다(Sumner, 1998; Francis, 1995).

한편 '코끼리 바위' 스파터층에는 크고 작은 화산탄들이 다량 포함되어 있다. 화산탄의 크기는 보통 수십 cm 내외가 우세하지만 수 m에서 최대 7 m에 이르는 초대형 화산탄들도 발견된다(그림 3e). 화산탄의 모양은 (타)원형과 고구마형이 우세하고 일부 길쭉한 리본형, 실린더형, 휘어진형 등 다양하다(그림 4a, 4b). 일부 화산탄은 스파터층 위로 떨어질 때의 충격에 의해 여러 조각으로 부서진 형태로 존재한다. 부서진 대형 화산탄의 단면에서는 적색 스파터들이 엉겨붙은 형태(그림 4c) 또는 용암과 스파터

들이 엉겨붙은 형태(그림 4d)로 나타난다. 전체적으로 화산탄들의 놓인 방향은 스파터층의 층리와 나란하게 분포하는 경향을 나타내며, 바닥 면에 고착된 대형 화산탄 10개의 꼬리방향은 서쪽~서북쪽을 향하고 있다(그림 2). 한편, 화산탄의 분포범위는 비양도의 서북쪽 일대에 한정되며, 북쪽과 남쪽 용암류 분포지에서는 발견되지 않는다(그림 2).

또 다른 형태의 스파터층은 비양도 서쪽 비양봉 등반로 입구에 약 10~20 m 높이의 지형을 이루며, 그 상부에는 분석층이 분포하고 있다(그림 5a). 이 스파터층에도 내부에 미약하게 층리가 발달하며, 주로 북서쪽에서 남동쪽으로 약 20~30°의 각도로 기울어져 있다(그림 5b). 스파터층은 수 cm에서 수십 cm 크기의 붉은색 다공질 스파터가 엉겨 붙어 층을 이루고, 일부 스파터는 늘어진 형태를 보이기도 한다(그림 5c). 그리고 이 스파터층은 '코끼리 바위' 일대의 스파터층과는 달리 초대형 화산탄을 포함하고

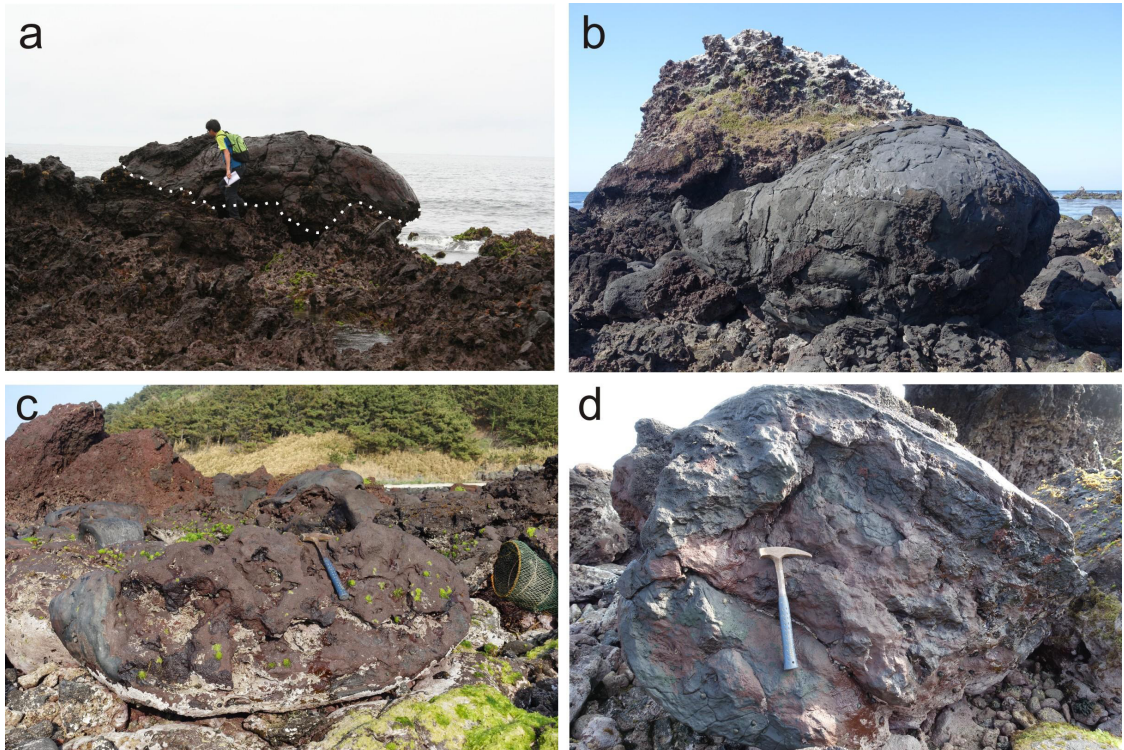


Fig. 4. Volcanic bombs at Biyando. (a) A huge volcanic bomb, 7 meters in diameter and 4 meters in width. (b) A volcanic bomb, 5 meters in diameter, the tail direction of which is well-preserved. (c) The cross section of a large volcanic bomb with agglutinated spatters. (d) A cross section of a large volcanic bomb with agglutinated spatter and lava.

있지 않다.

4.2 분석층

섬 중앙에 위치한 원추형의 비양봉 분석구를 구성하는 분석층은 '애기업은 돌' 주변 해안 절개지와 비양봉 정상부에서 노출된 단면을 확인할 수 있다(그림 2, 6a). 분석은 스트롬볼리안 화산분화에 의해 고온으로 뿔어져 나온 화산력(lapilli) 크기의 다공질 화산분출물을 말한다(Vespermann and Schmincke, 2000). 분석과 스파터는 공통적으로 뜨거운 액체상태의 화산분출물이지만 분석은 스파터에 비해 크기가 작고 떨어지는 과정에서 표면이 고화되어 입자지지(grain support)된 형태로 존재하지만, 스파터는 주로 굳어지지 않은 상태로 떨어지면서 엉겨 붙은 형태로 나타난다는 점에서 구별된다(Cas and Wright, 1987; Houghton *et al.*, 2016).

이 분석층은 적색 또는 암갈색을 띠지만, 대부분 적색층이 우세하며, 구성물질의 입도나 조직 등은 거

의 동일하다. 또한 공통적으로 원마도가 불량하고 주로 수 cm 이하 크기의 분석들이 역지된 양상으로 나타난다(그림 6b). 분석층 내부에는 조립질과 세립질 층준이 불규칙하게 교호하는 양상이 반복되며, 대체적으로 상부로 갈수록 분석의 크기들이 작아지는 상향세립의 경향이 있다. 또한, 분석층 내부에는 수 cm에서 수십 cm 크기의 소형 화산탄이 층리 방향과 나란하게 배열되어있다(그림 6b). 화산탄의 형태는 불규칙한 다각형 모양이 우세하지만 일부 리본 형태로 늘어져 있거나, 고구마 형태를 띠는 것들이 포함되어 있다.

4.3 용암류(조면현무암)

비양도 화산체의 용암류(조면현무암)는 서쪽 해안을 제외한 해안지대 전역에 분포한다(그림 2). 이 용암류는 대부분 파호이호이 용암류의 특성을 보이지만 해경파출소 주변의 좁은 지역에서는 아아 용암류의 특징을 나타낸다(그림 7). 이 용암의 SiO₂ 함량

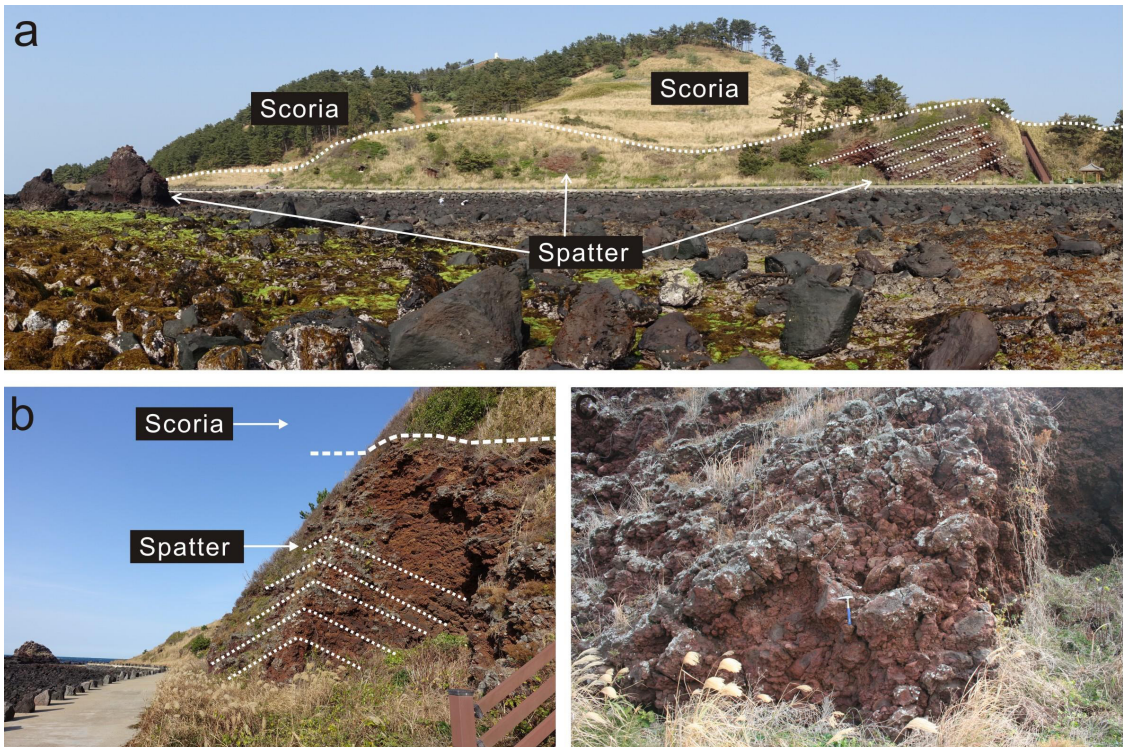


Fig. 5. Field relationship of spatter and scoria deposits at Biyangdo. (a) The spatter deposits on the western coast of Biyangdo. The scoria deposit is overlying the spatter deposit. (b) A stratum of spatter deposits that dip from the west coast towards the Biyangbong. Scoria deposits, fine-grained and homogeneous, are lying at the top. (c) A close-up photograph of an agglutinated spatter of several tens of cm in grain size.

은 50.1~50.6 wt%(평균 50.5 wt%)로서 거의 균질한 함량을 지니며, 전암 실리카 대 알카리 함량 분류

도(Le Bas *et al.*, 1986)에서 모두 조면현무암(trachybasalt)으로 분류된다(표 1). 또한 섬 전체에 분포하는 용암



Fig. 6. Photographs of scoria deposits at Biyangdo. (a) A scoria deposits at the top of Biyangbong contains a small amount of volcanic bombs of several tens of cm. (b) Red scoria deposits at the northern coastal outcrop section. (c) Black scoria deposits. Both red and black scoria are clast-supported regardless of clast size.



Fig. 7. Distribution of lava flows along coastal area of Biyangdo. Other than its western part of aa lava flows, the island is surrounded by pahoehoe lava flows. Scoria rafts and collapsed trench structures, pushed by lava flows, occur along the coast.

류의 성분이 용암류의 외견적 유형에 관계없이 아주 좁은 범위에서 일정한 조성을 유지한다는 점(표 1)은 마그마가 화구를 통해 분출하여 유동, 정지할때까지 거의 성분 분화가 이루어지지 않음을 유추할 수 있다. 한편 비양도 용암류의 조성 특징은 제주도 본섬 내에 분포하는 광해약현무암과는 다르므로(e.g., Koh *et al.*, 2013) 추후 지질도는 수정되어야 한다.

현미경 하에서 용암류는 치밀한 석기(groundmass)를 바탕으로 감람석이 주 반정을 이룬다. 석기는 대체로 미정질의 광물로 구성되지만 괴상이나 0.2~0.3 mm 길이의 침상 사장석이 동일한 방향으로 배열된 필로탁시틱(pilotaxitic) 조직을 이룬다(그림 8a, 8b). 감람석 반정은 0.5 mm 크기 내외이며 위치에 따라 다소간의 함량 변화를 보이거나 대체로 2~3%의 범위로서 산점 반상질 조직을 띤다. 간혹 1 mm를 넘는 감람석이 관찰되며 최대 8 mm 크기에 이르기도 한다. 또한, 매우 드물게 약 2 mm 크기를 갖는 단사휘석과 사장석의 반정이 관찰되기도 한다(그림 8a, 8b). 용암류의 기공은 대부분 지표면에 평행하게 신장된 타원형을 띠며 크기는 수 cm에 이르나 대체로 0.5 cm 크기가 우세하다. 용암류의 다공질 부분은 약 20%의 기공 함량을 갖는다.

비양도 용암류의 공간적 분포 특징을 살펴보면, 비양항 등대 주변 남쪽 해안에는 단위 두께가 1 m 이내로 얇은 판상용암류(sheet lava flow)로 구성된 용암대지가 넓게 펼쳐져 있으며, 특히 폭 10 m 규모의 투물러스가 용암류 말단부에 발달한다(그림 9a, 9b). 비양도 북동쪽 해안에는 최소 30 cm에서 최대 1 m

두께의 얇은 용암류들이 약 4~6매 내외로 누적되어 있다(그림 9c). 용암류의 표면은 대체로 평평하며, 각 용암류의 단위 사이에는 붉은색의 산화대가 발달해 있고, 부분적으로 밧줄구조가 발달하기도 한다. '필랑못' 일대의 용암류에는 투물러스 구조가 잘 발달해 있으며, 투물러스 정상부의 균열대가 분석구의 가장자리 지형과 나란하게 배열되어 있다(그림 7, 9d). 일부 파호이호이 용암류의 상부에는 분석층이 언덕 지형을 이루고 있는 스코리아 래프트(scoria raft)가 나타나며(그림 7, 10a), 분석구 일부 사면 주변을 따라 붕괴도랑과 같은 함몰지형도 존재한다(그림 7). 한편 간조시 드러나는 비양도 북쪽 해상 1.5 km 일대의 넓은 범위에는 용암대지가 곳곳에 분포하고 있는데(그림 1), 모두 동일한 조성의 파호이호이 용암류로 구성되어 있다(그림 10b).

전체적으로 비양도 북동쪽 용암류는 비양봉의 측면에서 해안으로 흘러나와 비양도를 감싸며 흐른 양상을 보인다(그림 1, 7). 이는 분석구가 형성되는 과정에서 분석구 측면을 따라 흘러나온 용암류가 분석층의 일부를 밀고나온 것으로 해석되며(그림 10a), 이 과정에서 용암류가 빠져나가고 표면이 붕괴되면서 아래로 오목한 함몰지형 등이 형성된 것으로 추정된다(e.g., Wolff and Sumner, 2000; Németh *et al.*, 2011). 이와 같이 분석구가 형성되는 과정에서 분석구 측면을 뚫고 용암이 흘러나가면서 발생한 사면붕괴 등에 의해 분석구 가장자리가 함몰되는 사례는 1986년 일본 Izu-Oshima 분출(e.g., Wolff and Sumner, 2000) 등 세계 여러 곳의 화산체에서 보고된다.

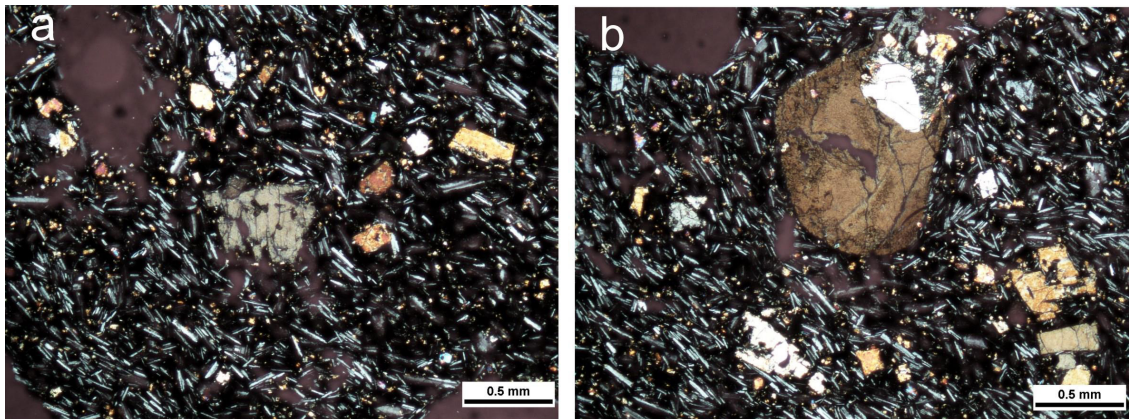


Fig. 8. Photomicrographs of lava flows containing olivines and clinopyroxenes (in the middle of each photo) as major phenocrysts in a groundmass with pilotaxitic texture.

비양도 북쪽 파호이호이 용암류 분포지역에는 굴뚝 모양의 호니토가 분포하고 있다(그림 2). 가장 큰 규모의 호니토는 최대 3 m 높이로서 비양리 주민들은 ‘애기업은 돌’이라 부르며, 2004년 천연기념물 제 439호로 지정·보호되고 있다(그림 11a). ‘애기업은

돌’ 주변에는 약 30여개의 호니토가 N80°E의 방향으로 나란히 배열되어 있다(그림 11b). 호니토는 단면에서는 굴뚝 모양을 하거나 여러 개의 굴뚝이 합쳐진 형태로 나타난다. 호니토 내부는 대부분 비어 있거나 동심원상의 구조가 발달하며, 호니토 외부 표



Fig. 9. Characteristics of pahoehoe lava flows around Biyangdo. (a) Ropy structure on the surface of lava flows, the southern coast of Biyangdo. (b) Tumulus structure developed at the edge of the pahoehoe lava flows. The central part of the tumulus is split apart. (c) The lava plateau with several thin overlapping pahoehoe lava flows on the east coast of Biyangdo. (d) Tumulus structure on the bottom of Paolrangmot wetland. The direction of the tumulus crust is arranged parallel to Biyangbong scoria cone along the island (see Fig. 7).

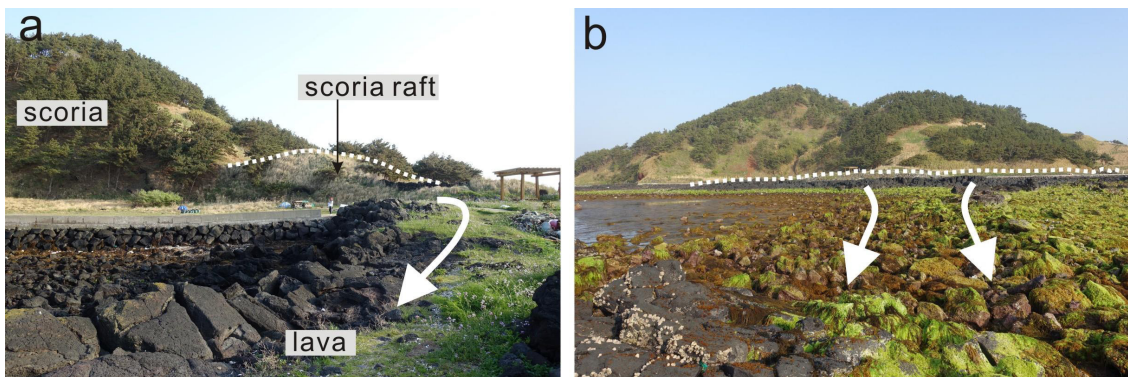


Fig. 10. The scoria raft topography, which was pushed along with the lava flow from the scoria cone's base.

면에는 다양한 크기의 분석과 작은 화산탄들이 달라 붙어 있다(그림 11c). 호니토의 내부 벽면에는 수 cm 크기의 용암기포와 용암이 흘러내린 용암유석 및 용

암종유가 발달하는데(그림 11d), 이는 호니토가 형성될 당시 뜨거운 액체상태의 용암이 벽면을 따라 흘러내리면서 형성되었음을 지시한다. 한편 호니토가

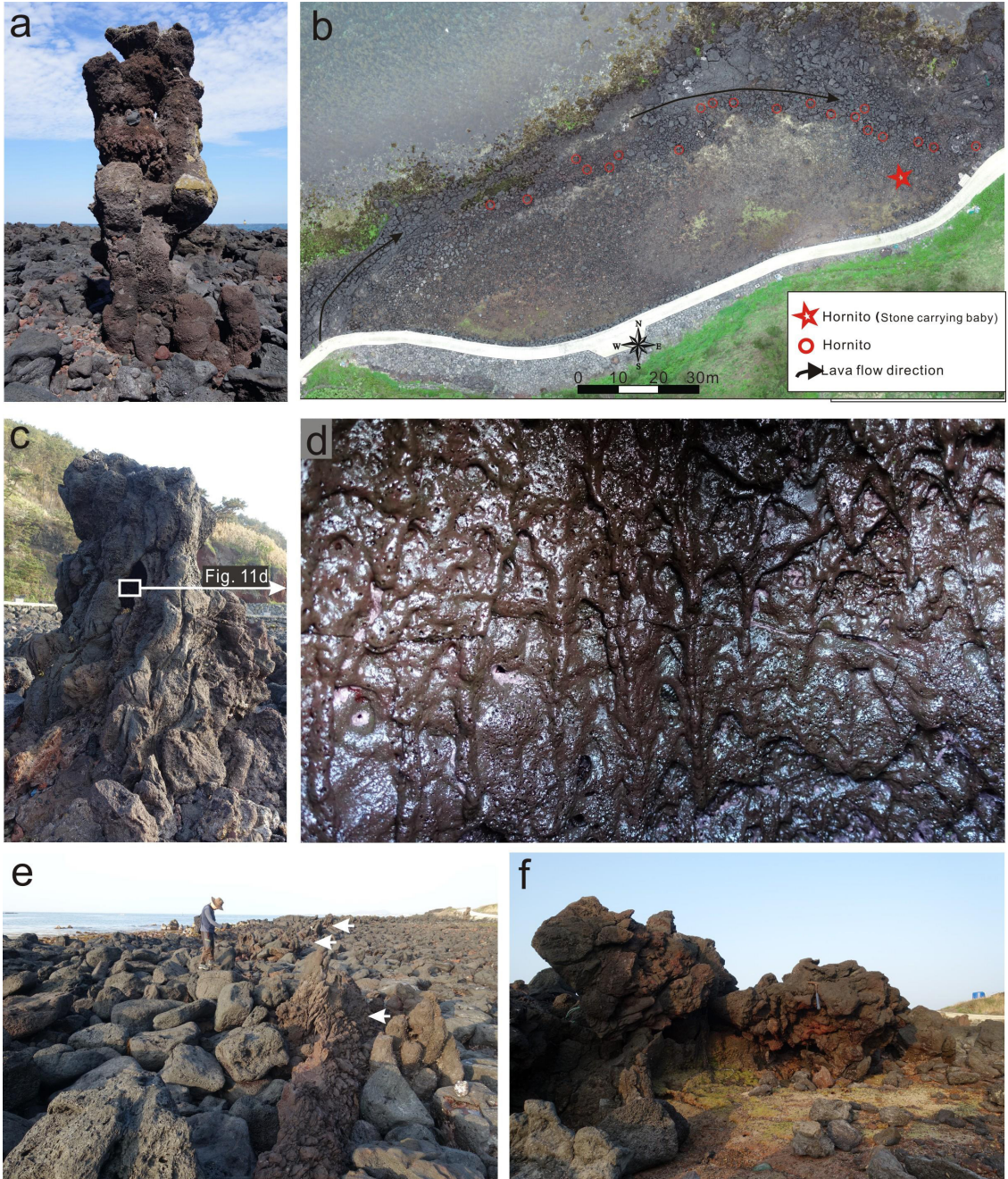


Fig. 11. (a) A photo of a large hornito known as Stone Carrying a Baby. (b) Distribution of hornitos in the same direction as lava flows. (c) A hornito with vacant sphere. (d) The lava flowstone structure on the inner wall of the hornito. (e and f) Lava levee structure, formed inside pahoehoe lava flows with hornitos distributed along the inner lava bank.

분포하는 선상의 지형을 따라 적색을 띠며 불록하게 솟아오른 용암류가 분포한다(그림 11e). 이 용암류는 주변 파호이호이 용암과 달리 표면이 거칠고 스킨이들이 같이 엉겨 붙은 특징을 나타낸다(그림 11f).

한편 아아 용암류는 비양도의 남서쪽 해경파출소를 중심으로 좌우 약 30 m 범위에서 파호이호이 용암류 상위에 분포한다(그림 7). 아아 용암류의 수평적 연장성은 불량하며, 양쪽 가장자리에서는 약 1 m 정도의 두께이지만 중심부로 갈수록 두꺼워져 최대 약 7 m에 달하기도 한다(그림 12a). 중심부는 기공이 거의 없는 치밀한 괴상이지만 상부 및 측면에는 불계 산화된 다공질의 용암판(slab)들이 분포하고 있다. 특히 용암류의 상부에 분포하는 거대 용암판들의 겉면에는 밧줄구조가 발달해 있고 불규칙하게 다각형으로 깨진 상태로 다른 용암판과 서로 섞여있는 양상을 이룬다(그림 12b). 이러한 거대 용암판들은 점성이 높아 용암류가 흐르는 동안 표면이 굳고 내부는 계속 유동하면서 이미 굳은 표면이 점차 깨지는 자가-각력화 작용(auto-brecciation)에 의해 형성된 것으로 해석된다(Wentworth, and Macdonald, 1953). 아아 용암류 상부의 암괴들은 비양봉 쪽에서 바다 방향으로 기울어지거나 누워있는 형태가 우세한 것으로 미루어 볼 때, 파호이호이 용암류가 분출하고 난 이후 일련의 연속적인 분화과정에서 아아 용암류가 비양봉 분화구에서 남서쪽으로 소규모로 흘러나온 것으로 추정된다.

5. 비양도 용암류의 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 절대연대

비양도 화산체의 용암류에 대해 6개 지점(시추코어 포함)에서 7개 시료를 채취하여 전암 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 절

대연대 측정을 실시하였다. 표 2에는 7개 시료의 암석 성분 분류명을 비롯하여 측정 결과 얻어진 총용융(Total Fusion), 플래토(Weighted Plateau), 정 및 역등시선 (Normal and Inverse Isochron) 데이터를 수록하였다. 암석 시료 중의 Ar 동위원소 데이터는 600~1400°C까지 5~7 단계의 가열을 통해 얻어졌으며, 절대연대 값의 표준편차는 2σ이다.

7개 용암류 시료에 대해 전암 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 절대연대 측정결과, BYDO-7 (56.7±20.1 ka)를 제외하면 30.4±24.3 ka (BYDO-3)에서 18.2±9.5 ka (BYDO-4)의 플래토 연대 범위를 보인다(표 2; 그림 13). 이들의 플래토 연대(그림 13)는 비양도 용암류가 전반적으로 과잉아르곤에 의해 영향을 받았음을 지시하며, 플래토 연대 방법을 통해 이러한 영향을 제거하여 신뢰할 만한 연대 자료를 얻을 수 있음을 나타낸다. 한편, 이들의 총용융 연대는 이전 연구자(Miyake *et al.*, 1993)의 K-Ar 절대연대(0.0434±0.0059 Ma) 값과 유사하다. 7개 시료 모두 MSWD (Mean Square of Weighted Deviates)는 1 이하의 값을 나타내었으나, 플래토 연대, 정등시선 연대, 역등시선 연대 그리고 등시선에서 $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$ 의 비율을 고려할때 상대적으로 높은 값으로 보이는 BYDO-7 (56.7±20.1 ka)값을 제외한 6개 시료의 평균 절대 연대는 25.6 ka이다(그림 14). 따라서 비양도는 약 2만 6천 년 전후의 화산분화에 의해 형성된 것으로 해석된다.

6. 토 의

6.1 화산분화 시기와 분화 위치

제주도 화산활동에서 현재와 같은 해수면 환경에



Fig. 12. Photographs of aa lava flow at Biyangdo. (a) A cross section of aa lava flow below the maritime police office. (b) Platy lava slab on the upper part of the aa lava flow.

서 분화한 대표적인 화산으로 송악산(약 3천 7백 년 전: Ahn *et al.*, 2015; Sohn *et al.*, 2015)과 성산일출봉(약 5천 년 전: Sohn *et al.*, 2012)을 들 수 있으며, 이들 화산에서는 수성화산 분출물 기록과 화산분출

동시성 고 해수면(paleo-sea level) 퇴적의 기록을 함께 관찰할 수 있다(e.g., Yoon *et al.*, 2017). 그러나 비양도는 제주도 주변 부속 섬 중에서 유일하게 분석 구와 용암류로만 이루어져 있으며, 마그마-물과의 상

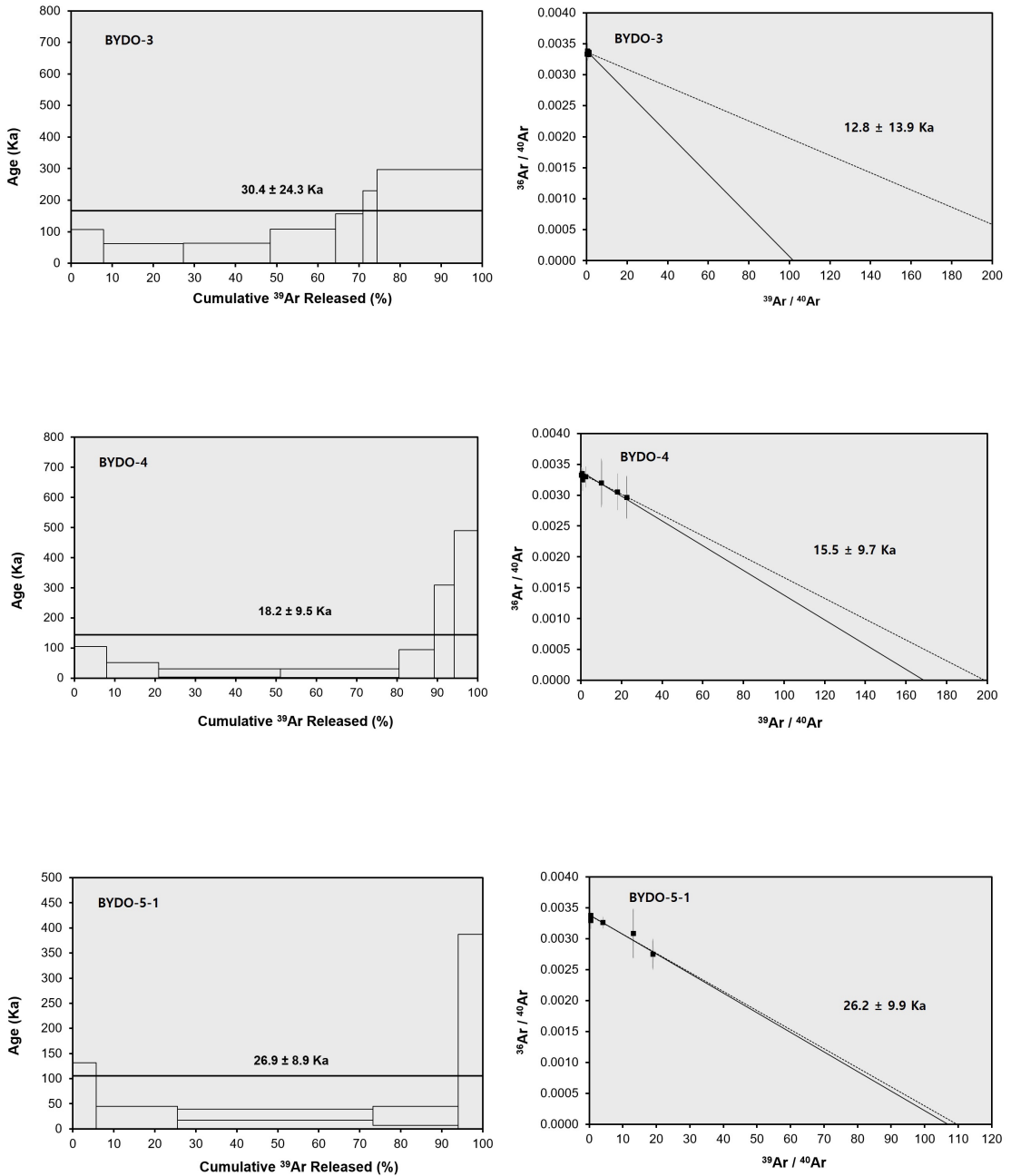


Fig. 13. $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ plateau age spectrum and inverse isochron diagram for 6 whole rock samples of lava flows at Biyangdo.

호작용에 의해 형성되는 분출물은 찾아볼 수 없다. 이러한 비양도의 지질현상은 오늘날 해수면과 같았던 고려 목종 5년 6월 또는 목종 10년의 사서기록의 분화와는 무관하다는 것을 뒷받침한다(Koh *et al.*, 2019). 아울러, 비양도 용암류의 Ar/Ar 절대연대, 26.9 ± 8.9 ka

(BYDO-5-1)를 고기 해수면 변화 기록(e.g., Williams and Gutierrez, 2009)에 적용하면 현재보다 해수면이 약 90~110 m 낮았음을 나타냄으로써(그림 15), 육상환경에서 분화한 비양도 화산체가 해수면 상승에 의해 섬이 되었음을 또한 뒷받침 해준다.

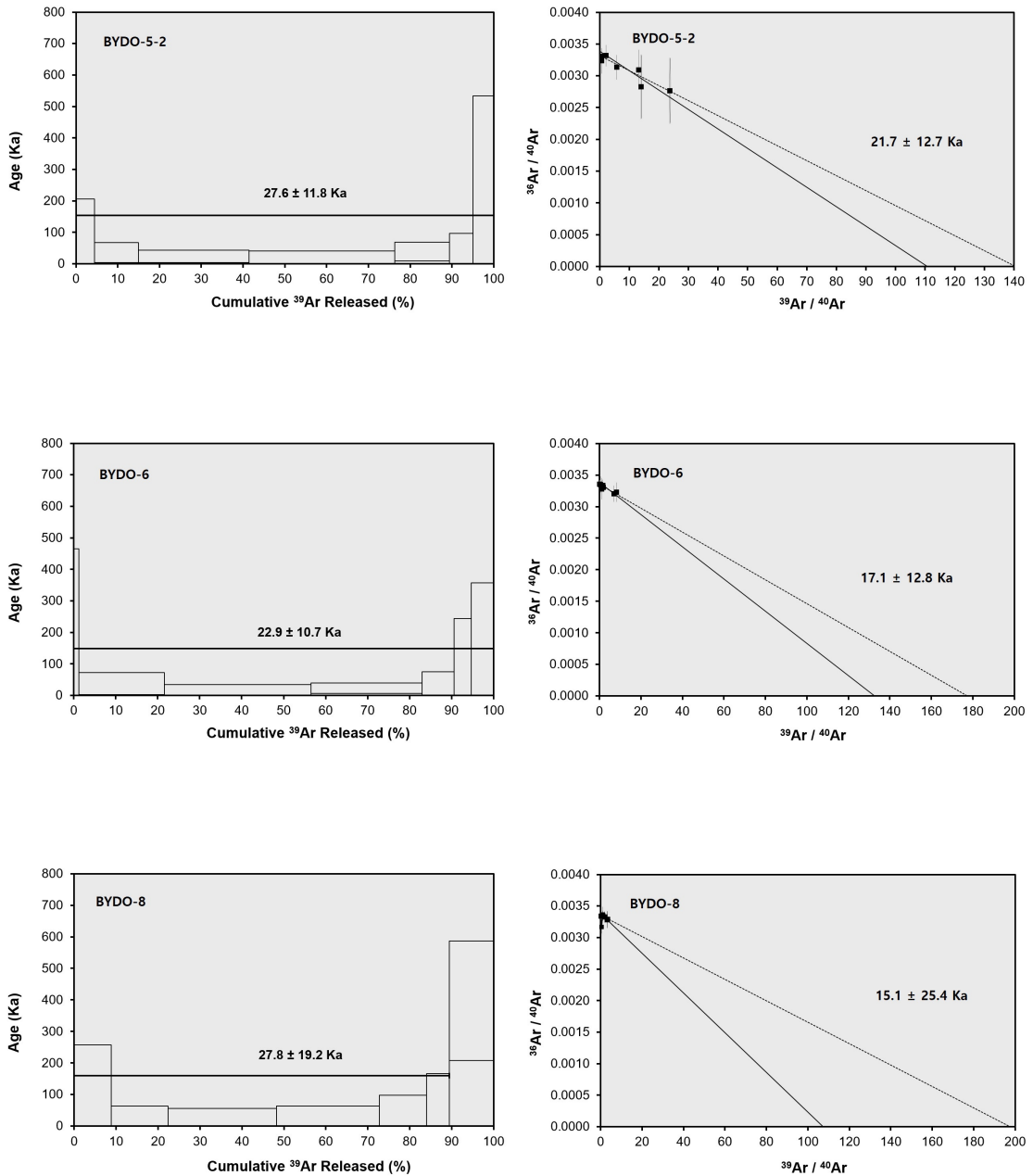


Fig. 13. continued.

스패터는 하와이안 또는 스트롬볼리안 분화과정에서 굳어지지 않은 뜨거운 액체 덩어리 형태로 분사된 용암이 분화구 주변에 떨어져 쌓인 화산쇄설물을 말한다(Sumner *et al.*, 2005; Rader *et al.*, 2018). 스패터는 클라스토제닉(clastogenic) 용암보다 온도가 낮은 액상 용암으로부터 주로 형성되며, 집적률과 냉각률에 따라 스패터에서 테프라로 또는 스패터에서 용암으로 변이되어 나타나기도 한다(Sumner *et al.*, 2005; Rader and Geist, 2015; Jones *et al.*, 2019). 그리고 스패터들이 지표에 빠르게 떨어져 소

풍처럼 늘어난 형태로 서로 엉겨 붙은 모양을 보이는 경우를 집괴암(agglutinate)이라 하며, 분석구 내부나 주변에서 흔히 발견된다(Vespermann and Schmincke, 2000; Sumner *et al.*, 2005). 스패터와 분석의 가장 단순한 구분은 분출하여 떨어질 당시 굳은 알갱이로 떨어졌는지(분석) 아니면 액체 또는 반고화 상태로 떨어져 엉겨 붙었는지(스패터)의 차이라고 할 수 있다. 이러한 스패터의 성인적 특징은 사라진 화산의 분화구 위치를 추정하는데 중요한 단서가 될 수 있다(e.g., Wolff and Sumner, 2000).

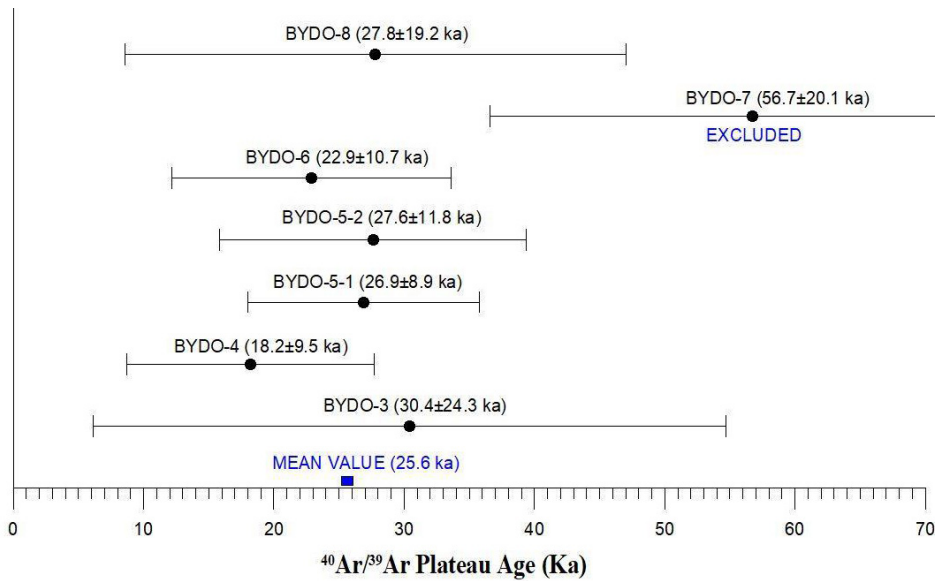


Fig. 14. Variation of ⁴⁰Ar-³⁹Ar absolute ages (with 2 SD) of volcanic rocks from Biyangdo Volcano, Jeju Island.

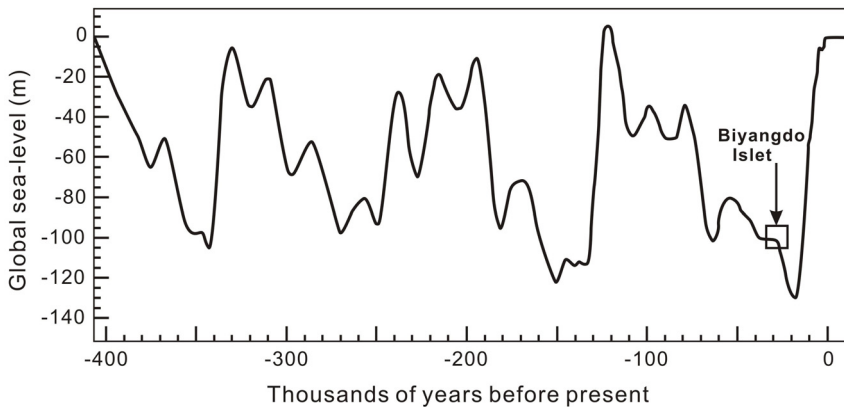


Fig. 15. Quaternary sea level change (e.g., Williams and Gutierrez, 2009). The sea-level curve suggests that the sea level was about 90-110m lower than it is at present at the time of the volcanic eruption of Biyangdo. It is presumed that volcanic eruptions were Hawaiian to strombolian because volcanic activities occurred on land.

비양도 화산체의 최하위 지질단위를 이루는 스페터층은 육상분화로부터 만들어진 초기 분출물로서 '코끼리 바위' 일대와 비양봉 입구 스페터층이 모두 동일하게 엉겨 붙은 스페터로 구성되어 있으며, 지층의 주향과 경사도 연속된다. 그러나 '코끼리 바위' 일대 스페터층이 용결정도와 화산탄 함유 빈도가 높은 반면, 비양봉 입구 스페터층은 입자 크기가 작고 화산탄의 함유율이 낮은 특징을 보인다. 이와 같은 차이는 분화구로부터의 거리에 따른 스페터콘(spatter cone)의 암상변화를 보여주는 것으로서, '코끼리 바위' 일대가 스페터콘의 중심부에 가까운 암상(proximal lithofacies)을, 비양봉 입구는 스페터콘이 원거리 암상(distal lithofacies)을 이루고 있는 것으로 해석된다(e.g., Sumner *et al.*, 2005). 또한, 분석층과 스페터층은 서로 반대 방향으로 기울어져 있으며, 층서상으로 분석층이 스페터층 상부에 위치하고 있다(그림 2, 5a). 이상에서 살펴본 바와 같이, 스페터의 형태와 입자 크기 및 주향·경사, 화산탄의 크기·빈도·방향 등을 종합하면 비양도 화산체의 화산활동은 위치가 다른 두 군데의 분화구로부터 일련의 연결된 화산분화로 인해 발생하였던 것으로 추정된다(그림 16a). 또한, 스페터층의 층리와 화산탄의 방향으로 볼 때, 스페터층을 형성시킨 화산분화의 중심은 현재 비양봉 분화구가 아니라 서쪽~서북쪽 해상일 가능성이 높다. 특히, 스페터층은 비양도 화산분화의 초기 분출물로서 비양봉 분석구가 형성되기 이전에 형성되었으며, 이후 비양봉 분석구를 형성시킨 분화로부터 형성된 분석층에 피복되었다(그림 16b).

스페터층 형성 이후 분화구의 위치가 동쪽(현재의 비양봉)으로 이동되어 분석과 소량의 화산탄을 내뿜는 스트롬볼리안 분화가 진행되면서 비양도 분석구가 형성되기 시작하였고, 동시에 분석구의 측면과 하부를 따라 파호이호이 용암류가 유출하였다(그림 16b). 분석구 측면에서 흘러나간 파호이호이 용암류는 비양도 분석구를 감싸고 흘러 용암대지를 형성하였으며, 일부는 북쪽으로 1.5 km 이상 흘러 지금의 등대 주변의 해저 완사면 지형을 형성하였다. 이 용암류의 일부는 물로 포화된 습지 등을 지나는 과정에서 뜨거운 용암과 차가운 바닥의 물이 급격하게 식으면서 발생한 수증기성 폭발 현상에 의해 굴뚝 모양의 호니토 지형을 만들었다(그림 16b). 현재 지형도와 해도 상에서 용암류는 비양봉에서 북쪽으로 1.5 km 까

지 분포하고 있어 비양봉 형성 당시 면적은 지금보다 약 2~3배 이상 넓었을 것으로 추정된다. 그리고 파호이호이 용암류 분출에 뒤이어 소량의 아아 용암류가 지금의 해경 파출소 인근으로 흐른 것으로 추정된다(그림 16c).

한편, 비양봉 분석구는 정상부 남쪽과 서쪽에 깔대기 형태의 분화구를 가지고 있는데, 현재는 식생의 피복과 접근 위험성으로 확인이 곤란하지만 남쪽은 분화구로 반면 서쪽은 용암의 유동으로 만들어진 함몰구로 추정된다. 비양봉 분석구의 여러 측면을 따라 용암류가 유출되었지만 분석구 사면의 붕괴 흔적은 뚜렷하게 드러나 있지 않다. 이는 용암류가 분석과 함께 밀려나감으로써 하중이 과다하게 작용하지 않아 마그마가 지표로 쉽게 분출될 수 있었고, 분석이 빠져나간 빈 공간(붕괴지형)을 스트롬볼리안 분화로부터 뿜어져 나온 분석들이 메우는 작용이 진행되었기 때문인 것으로 추정된다. 이와 같은 사례는 미국 아리조나 Red Mountain에서 분석구 사면을 통한 용암유출로 인한 압력의 감소로 스트롬볼리안 분출이 추가적으로 발생하여 붕괴된 분석구 사면을 다시 채운 사례에서 찾아볼 수 있다(e.g., Riggs and Duffield, 2008).

6.2 초대형 화산탄과 호니토의 형성

비양도 북서쪽 '코끼리 바위' 일대에는 직경이 최대 7 m, 무게 20톤(현무암 밀도 2,650 kg/m³를 적용) 이상에 달하는 초대형 화산탄이 다수 분포한다. 화산탄의 단면을 보면, 중심부는 스페터와 용암들이 불규칙하게 엉겨 붙어 있고 2-3 cm 두께의 치밀한 여러 겹의 외벽으로 둘러싸여 있으며, 표면은 매끄러운 질감을 나타낸다(그림 4c, 4d). 이러한 특징은 대형 화산탄들이 재순환 과정을 통해 형성되었음을 보여주는 것이다. 즉, 스페터를 분출시킨 화산활동이 진행되는 동안 크기가 큰 스페터는 외부로 날아가지 못하고 분화구 내부로 떨어져 재순환되면서 분화구 내부는 클라스토제닉 용암과 같은 액체 용암의 상태로 존재하게 된다. 재순환된 스페터는 클라스토제닉 용암과 엉겨 붙어 더욱 큰 크기로 뭉쳐지는 과정이 여러 차례 반복되면서 5 m 이상의 대형 화산탄이 만들어진 것으로 추정된다(e.g., Wolff and Sumner, 2000).

한편, 대형 화산탄의 대부분은 원형에 가까운 타원형이나 고구마 모양을 띠고 있으며, 일부는 휘어

진 형태를 이룬다. 크기가 수십 cm 내외로 작은 화산탄은 분화구에서 뿜어져 나와 땅에 떨어질 때까지 대기 중에서 이동과 회전 등에 의해 형태가 결정된다는 것은 일반적인 화산탄의 형성 이론이다. 그러나 장축의 직경이 5 m 이상이고 무게가 20 여 톤에 달하

는 대형 화산탄은 대기 중에서의 회전에 의해서만 원형에 가까운 형태를 띠게 된다는 것은 쉽게 납득하기 어렵다(e.g., Fisher and Schminke, 1984; Wentworth and Macdonald, 1953; Francis 1995; Lockwood and Hazlett, 2010). 비양도 화산탄이 초대형임에도 (타)

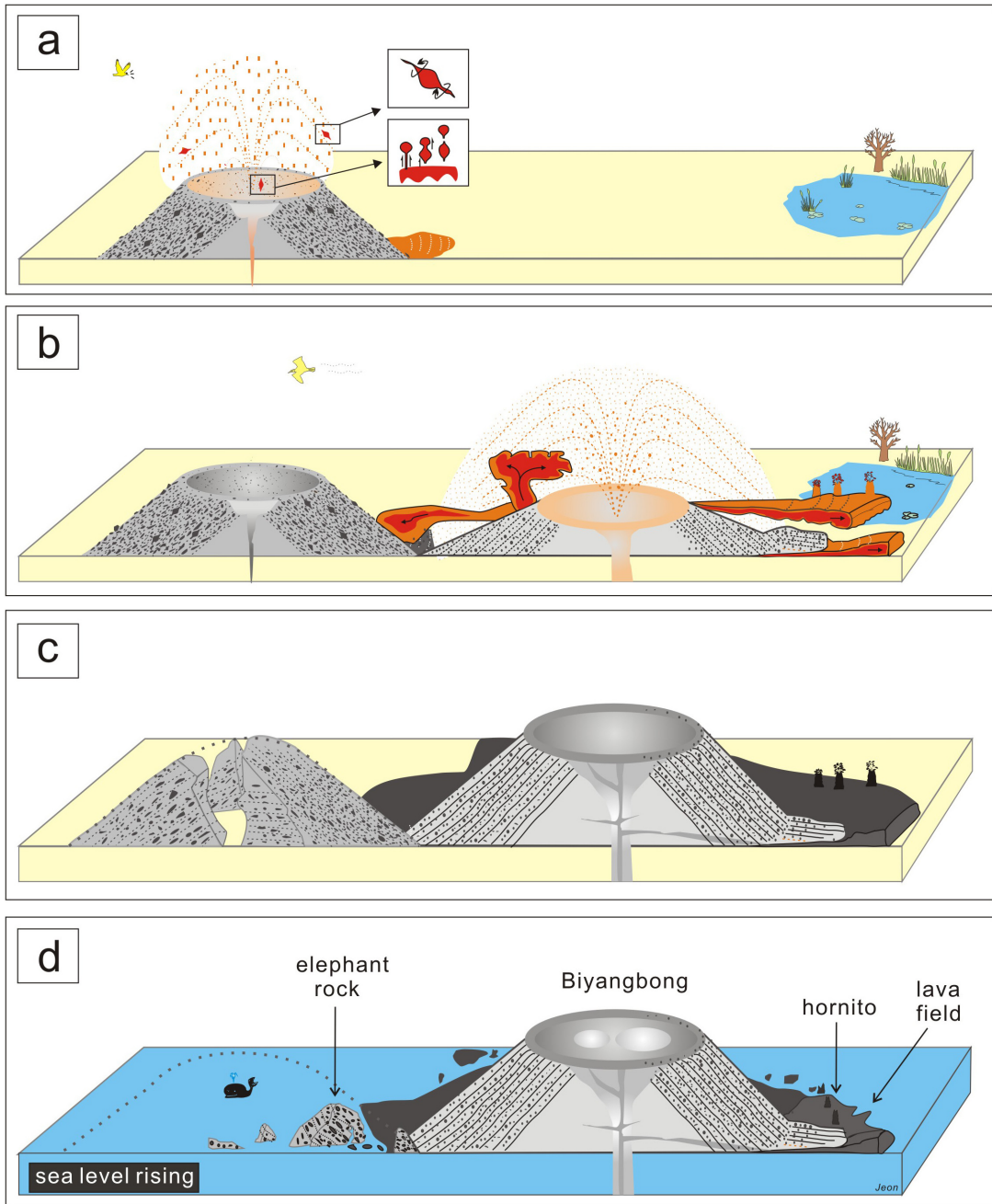


Fig. 16. Cartoons illustrating the volcanic activities in Biyangdo Volcano.

원형이 우세한 것은 분화구에서 분출되는 순간 분출되는 힘에 의해 (타)원형의 모양이 만들어지고 가까운 거리를 이동하는 동안 중심부분은 거의 회전하지 않고 가장자리(꼬리)만 부분적으로 회전함으로써 꼬리부분이 휘감아진 형태를 취한 것으로 추정된다 (Sánchez *et al.*, 2009; Cannon-Tapia, 2017; 그림 3d-3e). 또한, 비양도 화산탄의 중심부는 다공질을 이루고 있는데, 이는 분화 초기 마그마 방(chamber) 상부에 위치한 휘발성분이 많은 마그마의 거품(bubble) 부분이 폭발적으로 분출하였을 의미한다. Galindo *et al.* (2013)은 카나리제도 란사로테(Lanzarote) 섬에서 1730~1736년 사이에 형성된 Timanfaya 분석구 주변 560개 화산탄의 크기와 방향에 대한 연구를 통해 화산탄의 크기가 1 톤일 경우 최대 409 m까지 비행하였고, 28톤의 경우에는 248 m까지 도달한 것으로 보고하였다. Galindo *et al.* (2013)의 연구결과를 고려할 때, 무게가 20 여 톤에 달하는 비양도 초대형 화산탄의 최대 비행거리는 300 m 정도로 추정된다. 따라서 이들 초대형 화산탄의 꼬리방향을 감안할 때, 화산탄을 형성시킨 분화구는 '코끼리 바위' 서쪽 약 300 m 지점으로 추정된다.

한편, 호니토는 'little oven'을 뜻하는 스페인어에서 유래되었으며, 일반적으로 파호이호이 용암류의 표면이나 균열 등을 통해 솟구쳐 오른 용암이 주위로 떨어지면서 형성된 굴뚝모양의 구조를 말한다. 최근 Boreham *et al.* (2018)은 아이슬란드의 비화도 분출 화산지형(rootless eruption features)에 대한 연구에서 호니토가 형성된 곳이 주로 용암 말단부의 습지나 작은 호수 주변에 분포하고 있어 호니토가 물을 포함한 호수, 강, 습지 등에서 형성된다고 보고하였다. Gao *et al.* (2013)은 중국 오대련지 호니토를 대상으로 수행한 연구로부터 호니토가 파호이호이 용암이 흐를 때 얇은 호수나 습지 등의 물을 만나 만들어졌음을 보고한 바 있다. 그러나 하와이섬 킬라우에아 화산지대에서는 용암튜브 직상부에 1~12 m 높이의 호니토가 형성된 사례가 보고되고 있다(Kauhikaua *et al.*, 2003). 이 유형의 호니토는 동굴내부로 용암이 흐르는 동안 용암내부의 높은 가스압력으로 인해 가스와 용암의 일부가 동굴의 천장을 뚫고 솟구쳐 나와 형성되는데, 주로 지표와 인접해 있고 동굴의 천장이 매우 얇은 경우에 형성된다. 이상의 사례로부터 비양도에 분포하는 호니토의 형성 환경을 ① 습지

선단부, ② 용암동굴 상부로 나뉘어 생각해 볼 수 있다. 먼저 용암동굴 상부에 형성된 호니토라고 가정할 경우, 호니토 주변에 용암동굴이 분포해야 하지만 현재까지 확인된 바 없다. 그리고 비양도는 용암대지의 발달 면적이 좁고 지형경사도 매우 완만하여 용암동굴이 발달할 가능성이 낮을 것으로 추정된다. 다음으로 습지 선단부를 가정해 보면, 호니토의 배열이 완만한 호(弧)를 이루며 선상의 분포를 보이고 있음을 감안할 때, 얇은 습지 혹은 물웅덩이 환경을 고려해 볼 수 있다. 즉, 비양봉 분석구 형성과정에서 유출된 용암류가 분석구의 측면을 뚫고 빠져나와 습지 또는 물웅덩이와 같은 지형 위를 흐르면서 발생한 연료-냉매 상호작용(Fuel-Coolant Interaction)에 의해 스패터와 수증기가 뿜어져 나오는 거품 파열(bubble burst) 현상에 의해 굴뚝모양의 호니토가 만들어진 것으로 추정된다(Hamilton *et al.*, 2010; 그림 9). 그러나 비양도 호니토는 표면이 거칠고 용암제방을 만든 용암류의 상부에 분포하고 있어 휘발성분이 높은 용암류가 흐르는 과정에서 거품 파열 현상과 동반되어 발생했을 가능성도 있다.

6.3 비양도의 화산활동 기원

비양도 화산체의 화산활동은 육상환경에서 최소 2개의 독립적인 위치에서 진행되었으며, 그로부터 스패터층(화산탄 포함), 분석층, 용암대지(조면현무암)가 형성되었다. 특히, 이들 지질단위 사이에는 화산활동의 휴지기를 지시하는 고토양층이나 침식면이 존재하지 않아 화산분화가 거의 연속적으로 발생한 것으로 해석된다. 두 개의 화산체가 좁은 공간에 일부 포개진 형태로 존재할 수 있는 화산환경은 크게 두 가지로 해석할 수 있다. 즉, ① 마그마의 분화 통로가 막힘에 따른 화구이동의 가능성, ② 열극을 따른 순차적 화산분화이다.

단성화산의 화산분화 과정에서 화구이동에 의한 복합화산체의 형성은 이미 널리 알려져 있다(e.g., Sohn and Park, 2005; Németh *et al.*, 2011). 따라서 지금까지의 연구결과로서는 비양도 화산체의 화산분화는 초기 대형 화산탄과 스패터를 분출하다가 분화구가 막힘에 따라 화도가 이동하여 현재의 비양봉 분화구 위치에서 분석과 소량의 화산탄들이 분출되는 형태로 변화되었을 가능성이 높다. 또한 하부로부터 마그마 공급량에 따라 분석구의 형성과정에서 초기 측

면 용암분출에 따른 압력감소에 의해 스트롬볼리안 분출로 변했다가 다시 용암분출로 변해가는 과정들이 복합적으로 일어났을 가능성도 보여준다.

한편, 지금까지 제주도에는 하와이섬과 같이 열극에 해당하는 지질구조선이 확인된 사례는 없다. 다만, Haraguchi (1930)가 제주도의 형상과 분석구들의 분포 상태에 기초하여 지질구조선을 제시한 바 있으며, 이후 제주도 지질도폭서(예: Park *et al.*, 2000a, 2000b)에서도 인용된 바 있다. 단순히 이 이론을 적용하면 한림읍 해안 주변에 널개오름-정월오름-망오름-어도오름과 같이 나란히 선상 배열을 하는 분석구가 존재하는 것에 비해, 해파에 의해 파괴 침식되었을 경우를 완전히 배제하기는 힘들지만 비양도와 나란한 동서 방향의 분화구는 찾기 힘들다. 만일 제주도 본섬의 분석구와 비양도를 연결한 북북서 방향은 내륙의 배열에 수직 방향에 해당된다. 그러나 분석구의 배열과 열극을 통한 틈분출 간의 관계를 해석하기 위해서는 동일한 패턴 혹은 군집을 이루는 분석구 간에 시기적 연관성 또한 매우 중요하지만 지금까지 분석구의 연대에 대한 연구는 미진한 상태이다. 최근 지진과 연구에 의하면 제주도에는 암석권내에서 단열감압에 의한 부분용융에 의해 시공간적으로 단속적인 여러 개의 마그마 활동이 일어나고 있고(Song *et al.*, 2018), 제주도의 남서부에서 북부로 사선 형태로 지하에 구조선이 존재할 가능성도 제시되고 있다(Saint Louis University, Earthquake Center, 2018). 비록 육상이나 해도를 통해서도 열극과 같은 구조선이 확인되지 않기 때문에 틈분출에 의한 가능성은 높지 않은 것으로 추정지만, 최근의 지구물리적 연구 결과는 이를 완전히 배제하기도 곤란하다. 따라서 향후 제주도 전체적인 지질구조선에 대한 심도 있는 연구와 더불어 분석구들의 분포 및 배열과 지질구조선과의 연관성을 밝히기 위한 연구가 필요하다.

7. 결론

그동안 비양도는 유사시대 분화기록을 가진 화산으로 알려져 왔다. 또한 제주도 본섬에서는 찾아보기 어려운 길이 7m가 넘는 초대형 화산탄과 높이 3m에 달하는 호니토가 산출되고, 서-서북쪽 방향으로 수심이 얇은 해저지형이 연속되고 있으나, 비양도 화산활동 시기와 양식, 화산체의 규모 등을 밝히기 위

한 연구는 수행되지 않았다. 이 연구에서는 야외지질조사를 통해 지질단위별 특징과 층서를 정립함과 아울러, 6개 지점 7개 화산암 시료에 대한 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 절대연령 측정 및 해저지형 분석 등의 결과를 근거로 비양도가 고려 목종 5년 6월(1002년) 역사기록과는 무관함을 밝혔다. 또한 비양도 화산체의 화산분화는 위치가 다른 2개 지점에서 진행되어 특징이 다른 화산분출물이 형성되었음도 제시하였다. 특히 화산활동이 끝났을 때, 추정되는 화산체의 규모는 현재 비양도의 2 내지 3 배의 크기였으나 서-북서쪽 지역이 침식에 의해 삭박되어 현재와 같은 형태를 이루고 있음도 제시하였다.

비양도 화산체의 지질은 하부로부터 스패터층, 분석층, 용암(조면현무암)로 구성된다. 최하부 스패터층은 비양도 북쪽과 서쪽 해안을 따라 분포하며, 내부에 엉겨 붙은 스패터와 대형 화산탄들이 포함되어 있다. 반면, 분석층은 섬 중앙에 위치한 비양봉을 구성하는 분석구으로서 원마도가 불량하고 주로 수 cm 이하 크기의 분석들이 역지되된 형태로 나타난다. 용암류는 서쪽 해안을 제외한 해안지대 전역에 분포하며, 대부분 파호이호이 용암류의 특성을 보이지만 해경파출소 일대의 좁은 지역에서는 아아 용암류의 특징을 나타낸다. 비양도 북쪽 조간대에는 약 30여 개 호니토들이 호상으로 배열되어 있다. 이들 호니토는 비양봉 분석구 형성과정에서 분석구의 측면을 뚫고 유출된 용암류가 습지 혹은 물웅덩이와 같이 지형 위를 흐르면서 발생한 상호작용(FCI)에 의해 형성된 것으로 추정된다.

한편 용암류의 전암 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 절대연대 측정을 통해 약 2만 6천 년 전후의 비양도의 형성시기를 제시한다. 비양도 화산체는 해수면이 지금보다 약 90~110 m 낮았던 시기에 육상 환경에서 최초의 화산활동이 현재 '코끼리 바위' 인근을 중심으로 짧은 기간 동안 스패터와 대형 화산탄들이 뿜어져 나와 엉겨 붙은 스패터콘을 형성하였다(그림 16a). 스패터콘 형성 이후 분화구가 이동되어 뒤이은 화산활동이 지금의 비양봉에서 발생하여 분석층을 형성하였다.

분석구 형성과정에서 측면을 뚫고 파호이호이 용암류가 흘러나왔는데, 이 과정에서 분석구의 일부 사면과 함께 떠밀려 나와 해안이 언덕지형으로 남게 되었다. 그리고 파호이호이 용암류가 빠져나가고 빈 공간에 함몰이 일어나 붕괴도랑과 함몰지형이 형성되

었고, 용암류는 비양도 분석구를 감싸고 흘러 용암 대지를 형성하였다. 그리고 북쪽으로 흐르던 파호이 호이 용암류는 습지나 물웅덩이를 지나면서 바닥의 물이 용암의 열에 의해 급격히 끓어올라 수증기와 용암이 분출하면서 호니토를 형성하였다(그림 16b). 파호이호이 용암류 분출 후 소량의 아아 용암류가 지금의 해경 파출소 방향으로 흘러내린 것을 끝으로 비양도 화산체의 화산활동은 종료된 것으로 추정된다(그림 16c).

화산활동이 끝나고 해수면 상승에 따라 화산체는 파도에 의한 침식을 겪게 되는데, 서쪽에 위치한 스패터콘이 상대적으로 많은 침식을 받아 화산체의 대부분이 삭박되고 오늘날 '코끼리 바위'와 일부 시스택으로 남게 되었다(그림 16d).

비양도는 제주도 본섬에서는 흔히 보기 힘든 단성화산체의 육상 화산분화 과정과 그 산물에 대해 교과서적인 사례를 관찰할 수 있는 곳이다.

감사의 글

이 연구는 제주특별자치도 한라산연구부 자체 연구사업과 제주특별자치도개발공사 자체연구사업의 일환으로 수행되었습니다. 논문의 심사과정에서 건설적인 비평과 유익한 조언을 해주신 김정민 박사와 과 익명의 심사위원님께서도 감사드립니다.

REFERENCES

- 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*, 51, 105-126 (in Korean with English abstract).
- Boreham, F., Cashman, K., Rust, A. and Höskuldsson, A., 2018, Linking lava flow morphology, water availability and rootless cone formation on the Younger Laxá Lava, NE Iceland. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 364, 1-19.
- Cannon-Tapia, E., 2017, Mechanism of formation of volcanic bombs: insights from a pilot study of anisotropy of magnetic susceptibility and preliminary assessment of analytical models. *Bulletin of Volcanology*, 79, DOI 10.1007/s00445-017-1136-6.
- Cas, R.A.F. and Wright, J.V., 1987, *Volcanic Successions Modern and Ancient: A geological approach to processes, products and successions*. Allen & Unwin Ltd., London, 528 p.
- Fisher, R.V. and Schminke, H.U., 1984, *Pyroclastic rocks*. Springer Verlag, Berlin, 472 p.
- Francis, P., 1995, *Volcanoes. A planetary perspective*. Oxford University Press, Oxford, 443 p.
- Galindo, I., Romero, M.C., Sánchez, N., Dóniz, J., Yepes, J., Morales, J.M. and Becerril, L., 2013, Morphology and distribution of volcanic bombs in Caldera Quemada de Arriba (Lanzarote, Canary Islands): implications for volcanic hazard analysis. En: "1st International Workshop in Environmental Security, Geological Hazards and Management", San Cristobal de La Laguna, Tenerife (Canary Islands), Spain, ISBN 978-84-616-2005-0.
- Gao, W., Li, J., Mao, X. and Li, H., 2013, Geological and geomorphological value of the monogenetic volcanoes in Wudalianchi National Park, NE China, *Geoheritage*, 5, 73-85.
- Hamilton, C.W., Thordarson, T. and Fagents, S.A., 2010, Explosive lava-water interactions I: architecture and emplacement chronology of volcanic rootless cone groups in the 1783-1784 Laki lava flow, Iceland. *Bulletin of Volcanology*, 72, 449-467.
- Haraguchi, K., 1930, Jeju Volcanic Island. Professor Ogawa's Sixtieth birthday Memorial Volume, 595-649, 1 map (1:250,000) (in Japanese, title translated).
- Head III, J.W. and Wilson, L., 1989, Basaltic pyroclastic eruptions: influence of gas-release patterns and volume fluxes on fountain structure, and the formation of cinder cones, spatter cones, rootless flows, lava ponds and lava flows. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 37, 261-271.
- Houghton, B.F., Taddeucci, J., Andronico, D., Gonnermann, H.M., Pistolesi, M., Patrick, M.R., Orr, T.R., Swanson, D.A., Edmonds, M., Gaudin, D., Carey, R.J. and Scarlato, P., 2016, Stronger or longer: Discriminating between Hawaiian and Strombolian eruption styles. *Geology*, 44, 163-166.
- Jeon, Y.M., Koh, J.G., Ki, J.S., and Lee, S.J., 2016, A case study on the geotrail revitalization in the Jeju Island Geopark. *Journal of the Geological Society of Korea*, 52, 527-538 (in Korean with English abstract).
- Jones, T.J., Houghton, B.F., Llewellyn, E.W., Parcheta C.E. and Hölting, L., 2019, Spatter matters-distinguishing primary. *Scientific reports*, 1-11.
- Kaahikaua, J.P., Sherrod, D.R., Cashman K.V., Heliker, C., Hon, K., Mattox, T.N. and Johnson, J.A., 2003, Hawaiian Lava-Flow Dynamics During the Pu'u 'O'o-Kupaianaha Eruption: A Tale of Two Decades 63. *U.S. Geological*

- Survey Professional Paper, 1676, 63-87.
- 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*, 55, 165-178 (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, J.W., 2003, Research report on Biyangdo. Folklore and Natural History Museum, 6-12 (in Korean).
- Koppers, A.A., 2002, ArArCALC software for ^{40}Ar - ^{39}Ar calculations. *computers & Geosciences*, 28, 605-619.
- Le Bas, M.J., Rex, D.C. and Stillman, C.J., 1986, The early magmatic chronology of Fuerteventura, Canary Islands. *Geological Magazine*, 123, 287-298.
- Lockwood, J.P. and Hazlett, R.W., 2010, *Volcanoes: global perspectives*, Wiley-Blackwell, Chichester, 541 p.
- Miyake, Y., Furuyama, K., Yoon, S., Koh, G.W. and Nagao, K., 1993, Temporal chemical variation of Pleistocene volcanic rocks from Cheju Island Korea., In geological correlation of southwest Japan and Korea Peninsular-tectonics for spreading of active continental margin. *Science Report, Shimane Univ.*, 106-111.
- Nakamura, S., 1925, Geographical and geological notes of Saishū-to (Quelpart Island), Korea. *Chikyū (Earth)*, 4, 325-336 (in Japanese).
- Németh, K., Rizzo, C., Nullo, F. and Kereszturi, G., 2011, The role of collapsing and rafting of scoria cones on eruption style changes and final cone morphology: Los Morados scoria cone, Mendoza Argentina. *Central European Journal of Geosciences*, 3, 102-118.
- Park, K.H., Cho, D.L. and Kim, J.C., 2000a, Geological report of the Moseulpo-Hanlim sheet (1:50,000). Korea Institute of Geology, Mining and Materials, 56 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 of Geology, Mining and Materials, 59 p (in Korean with English abstract).
- Rader, E. and Geist, D., 2015, Eruption conditions of spatter deposits. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 304, 287-293. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2015.09.011>.
- Rader, E., Kobs Nawotniak, S. and Heldmann, J., 2018, Variability of Spatter Morphology in Pyroclastic Deposits in Southern Idaho, as Correlated to Thermal Conditions and Eruptive Environment. *Earth and Space Science*, 5, 592-603.
- Riggs, N.R. and Duffield, W.A., 2008, Record of complex scoria cone eruptive activity at Red Mountain, Arizona, USA, and implications for monogenetic mafic volcanoes. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 178, 763-776.
- Saint Louis University, Earthquake Center, 2018, http://www.eas.slu.edu/eqc/eqc_mt/MECH.KR (May 19, 2019).
- Sánchez, M.C., Sarrionandia, F., Arostegui, J., Larrondo, E. and Ibarra, J.G., 2009, Development of spheroidal composite bombs by welding of juvenile spinning and isotropic droplets inside a mafic eruption column. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 186, 265-279.
- Sohn, Y.K., Cronin, S.J., Brenna, M., Smith, I.E.M., Németh, K., White, J.D.L., Murtagh, R.M., Jeon, Y.M. and Kwon, C.W., 2012, Ilchulbong tuff cone, Jeju Island, Korea, revisited: A compound monogenetic volcano involving multiple magma pulses, shifting vents, and discrete eruptive phases. *Geological Society of America Bulletin*, 124, 259-274.
- Sohn, Y.K. and Park, K.H., 2005, Composite tuff ring/cone complexes in Jeju Island, Korea: possible consequences of substrate collapse and vent migration. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 141, 157-175.
- Sohn, Y.K., 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*, 4, 264-275.
- Song, J.-H., Kim, S., Rhie, J., Lee, S.-H., Kim, Y. and Kang, T.-S., 2018, Imaging of lithospheric structure beneath Jeju Volcanic Island by teleseismic traveltome tomography. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 123, <https://doi.org/10.1029/2018JB015979>.
- Sumner, J.M., 1998, Formation of clastogenic lava flows during fissure eruption and scoria cone collapse: the 1986 eruption of Izu-Oshima Volcano, eastern Japan. *Bulletin of Volcanology*, 60, 195-212.
- Sumner, J.M., Blake, S., Matela, R.J. and Wolff, J.A., 2005, Spatter. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 142, 49-65.
- Vespermann, D. and Schmincke, H.-U., 2000, Scoria cones and tuff rings. In: H. Sigurdsson, B.F. Houghton, S.R. McNutt, H. Rymer and J. Stix (Editors), *Encyclopedia of Volcanoes*. Academic Press, San Diego, 683-694 p.
- Wentworth, C.K. and Macdonald, G.A., 1953, Structures and forms of basaltic rocks in Hawaii. United States Geological Survey, 98 p.
- Williams, S.J. and Gutierrez, B.T., 2009, Sea-level rise and coastal change: Causes and implications for the future

- of coasts and low-lying regions. *Shore and Beach*, 77, 13-21.
- Wolff, J.A. and Sumner, J.M., 2000, Lava fountains and their products. *Encyclopedia of volcanoes* (ed. Sigurdson, H. *et al.*), 321-329.
- Woo, K.S. and Kim, J.K., 2005, The age and constituents of the carbonate sand dunes in Hyeopjae area, Jeju Island: Implication for late Holocene sea level change. *Journal of the Geological Society of Korea*, 41, 499-510 (in Korean with English abstract).
- Yoon, W.S., Yoon, S.H., Sohn, C. and Sohn, Y.K., 2017, Records of palaeo-sea level and eruption duration in a coastal tuff ring in Jeju Island, Korea. *Terra Nova*, 29, 52-60.

Received : May 20, 2019
 Revised : June 20, 2019
 Accepted : June 24, 2019