

제주도 섭지코지 복합화산체의 특징과 형성과정

전용문^{1,*} · 고정균¹ · 고기원²

¹제주특별자치도 세계유산본부

²제주특별자치도개발공사 품질연구본부

요 약

제주도 동쪽 끝에 위치한 섭지코지는 선돌 분석구, 스파터/스코리아 언덕지형, 아아 및 파호이호이 용암류, 그리고 다수의 관입체로 이루어져 있다. 섭지코지 일대의 최초 화산활동은 스트롬볼리형 분화로 인해 섭지코지 동남쪽(A, B, C 구간)에 스파터와 스코리아로 이루어진 낮은 언덕이 형성되었고, 이 과정에서 9개의 암맥이 관입하였다. 특히 A 구간 암맥중 2개는 스파터/스코리아콘을 형성한 분출암맥이며, 나머지 암맥들은 실린더형으로 원형의 성벽처럼 스파터/스코리아층을 관입하였다. 동시기에 B 구간에서도 분출암맥에 의해 스파터/스코리아콘이 형성되었고, 일부는 지표로 분출되어 용암류를 형성하였다. 분출암맥으로부터 공급된 용암류가 흐르는 중에도 용암을 관통하는 관입이 발생하여 접촉부를 따라 관입체와 용암이 복잡하게 뒤섞인 C 구간을 형성하였다. D 구간의 선돌바위는 선돌 분석구를 형성시킨 분출암맥의 잔존체로 해석되며, 선돌 분석구의 구성물질 형태와 분포는 스트롬볼리형 분화를 지시한다. 선돌 분석구를 형성시킨 화산활동에 뒤이어 섭지코지 북쪽(E, F 구간)에서 소규모 스코리아콘이 형성되고 용암류는 선돌 분석구 사면을 피복하였다. 섭지코지는 선돌분석구를 중심으로 한 단성화산활동에 의해 형성된 것으로 해석되어 왔으나, 분출암맥으로부터의 용암공급에 의한 스트롬볼리형 분화와 중심체 주변의 많은 관입체로부터 스파터/스코리아 및 용암류 형성 등이 복합적으로 진행된 복합화산체의 특징을 나타낸다.

주요어: 제주도, 섭지코지, 단성화산, 복합화산체, 관입

Yongmun Jeon, Jung Goon Koh and Gi Won Koh, 2020, Characteristics and volcanic processes of polygenetic volcanoes in Seopjikoji of Jeju Island, Korea. Journal of the Geological Society of Korea. v. 56, no. 6, p. 653-668

ABSTRACT: Seopjikoji, located at the eastern tip of Jeju Island, includes Seondol Scoria Cone, spatter/scoria in cone or mound form, aa and pahoehoe lava flows, and multiple dyke complexes. The spatter or scoria cones in the southeastern part of Seopjikoji (section A, B, C) were formed by a Strombolian eruption, the first volcanic activity in the Seopjikoji area, with nine dykes penetrating the spatter/scoria during the process. Two of the dykes in section A were feeder dykes that formed spatter/scoria cones. The remaining dykes in cylindrical shape penetrated the spatter/scoria cone, forming a circular, intrusive landform reminiscent of castle ramparts. The process was accompanied by the formation of spatter/scoria cones by feeder dykes in Section B, some of which reached the surface to form a lava flow. Section C was formed as erupted lava from the eruption dykes intruded into lava in the flowing process, causing irregular mixing of the intrusive complex and the lava along the exposed area. It is inferred that the remnants of the feeder dyke that formed Seondol Scoria Cone is Seondolbawi Rock in section D, the shape and distribution of components within which indicates a Strombolian eruption. A small-scale scoria cone was formed in the northern part of Seopjikoji (section E and F) following the volcanic activity that formed Seondol Scoria Cone, with lava flow overlying the slopes of Seondol Scoria Cone. Although Seopjikoji was thought to have been formed through a single monogenetic volcanic eruption, it should be characterized as a polygenetic volcano formed through a complicated process of Strombolian eruption. This is because numerous intrusions around the central body led to the formation of spatter/scoria cones and lava flows.

Key words: Jeju Island, Seopjikoji, monogenetic volcano, polygenetic volcanoes, intrusion

(Yongmun Jeon and Jung Goon Koh, Jeju Heritage Management Division, Jeju Special Self-Governing Province, Jeju 63341, Republic of Korea; Gi Won Koh, Water Resource Research Center, Jeju Special Self-Governing Province Development Corporation, Jeju 63345, Republic of Korea)

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

1. 서 론

단성화산(monogenetic volcanoes)은 지표상에 흔히 분포하는 소형 화산체의 일종으로, 지구뿐만 아니라 금성과 수성 등 태양계 행성에서도 분포가 보고된 바 있다(Wood, 1980; Richardson *et al.*, 2012). 지금까지 단성화산은 수 시간-수 일에 걸쳐 짧은 기간에 한 번의 분화로 형성되며 스코리아콘, 응회환, 응회구, 마르 및 이와 연관된 용암류를 분출시키는 것으로 알려져 왔다(Vespermann and Schmincke, 2000; Sohn *et al.*, 2008; Valentine and Gregg, 2008). 그러나 최근에 단성화산체는 수일에서 수십년 동안에 걸쳐 복잡한 화산활동을 거치면서 화학조성이 변할 뿐만 아니라 용암, 스파터콘, 스코리아콘, 크립토돔, 관입체 등 다양한 화산지형을 연속적으로 형성하는 경우들이 보고되고 있다(Walker, 2000; Martin and Németh, 2006; Brenna *et al.*, 2010; Sohn *et al.*, 2012; Johnson *et al.*, 2014; Tchamabé *et al.*, 2016; Jeon *et al.*, 2019; Rader *et al.*, 2020).

화산활동은 마그마가 지하에서 지표로 상승 및 분출하여 발생하며, 화산체의 모양과 내부구조, 구성 물질 등에 따라 구분이 가능하다. 그러나 화산체의 세부적인 분류체계에 비해 마그마가 지표로 상승하는 과정에서 형성되는 독특한 구조와 특징에 대해서는 거의 알려진 바가 없다. 일반적으로 마그마가 상승하다가 지하에서 그대로 굳어진 경우는 암맥(dyke)이라 하고, 지표로 뚫고 나와 분화(분출)한 경우를 분출암맥(feeder dyke)이라 한다(Geshi *et al.*, 2010; Geshi and Neri, 2014). 분출암맥은 매우 좁은 범위에서 분포하며, 대부분 화산체에 덮여 있어 화산체가 침식 제거되지 않는 이상 지표에 노출되기가 어렵고, 3차원적인 구조를 보임에 따라 인지가 쉽지 않다(Galindo and Gudmundsson, 2012; Geshi and Neri, 2014). 지금까지 분출암맥은 주로 해안이나 계곡의 절벽 또는 채석장 등에서 발견되며 스페인, 아이슬란드, 프랑스, 일본, 이탈리아 등에서 보고된 바 있다(e.g., Delaney and Gartner, 1997; Gudmundsson *et al.*, 2008; Keating *et al.*, 2008; Poland *et al.*, 2008; Geshi *et al.*, 2010, 2012).

제주도 동쪽 가장자리에 위치한 섭지코지는 반도 지형이며, 면적은 약 75만 m²로 인근 우도 면적의 10분의 1에 해당되는 좁은 지역이다. 그러나 섭지코지

는 스코리아콘의 단면을 볼 수 있는 장소이자 뛰어난 경관을 자랑하는 제주도 지질관광의 명소이다. 섭지코지에 대한 지질학적 연구는 Koh *et al.* (2007)과 Yoon *et al.* (2014)에 의해 수행되었다. 이들 연구에서 섭지코지 선돌바위는 스코리아콘의 중심 암경(volcanic neck 또는 plug)이며, 등대 주변은 스코리아콘의 사면에 해당되고, 용암은 스코리아콘의 정상부를 통해 흘러나간 것으로 해석된 바 있다.

이번 조사에서 섭지코지 일대에는 스코리아콘의 특징뿐만 아니라 스파터, 스코리아, 클라스토제닉(clastogenic) 용암, 아아 및 파호이호이 용암, 관입체(암맥과 분출암맥), 용암동굴 등 다양한 지질구조들이 복합적으로 분포하는 것으로 파악되었다. 섭지코지가 좁은 면적임에도 다양한 지질특성을 보이는 것은 단순한 일회성 스트롬볼리형 분화에 의해 형성된 것이 아니라 다양하고 복합적인 화산활동을 통해 형성되었음을 말해준다. 특히, 섭지코지 동쪽 해안 단면에는 상부 용암류와 그 하부에 6개의 스파터 또는 스코리아층이 언덕모양으로 분포하고, 그 사이에 10개의 (분출)암맥구조가 관찰되었다. 다양한 암맥 구조는 섭지코지의 화산활동과 연관된 것으로 추정되며 암맥구조의 분포와 특징에 대한 조사를 통해 섭지코지 일대의 화산활동사를 재구성하였다. 이번 섭지코지 화산활동에 대한 연구는 단순하지 않은 단성화산 또는 복합화산체(polygenetic volcanoes)의 진화과정을 살펴봄으로써 제주도 화산활동의 이해를 넓히는데 의미가 있다.

2. 지질개요

기존 연구에서 섭지코지 일대에는 최하부에 온평리현무암을 기반으로 그 상부에 선돌 현무암과 스코리아콘, 용암 등이 분포하는 것으로 보고된 바 있다(Lee, 1982; Won *et al.*, 1993; Yoon *et al.*, 2014). 특히, Koh *et al.* (2007)은 최하부 온평리현무암은 파호이호이 용암의 특징을 보이고, 선돌 현무암은 아아 용암의 특징을 보이지만 주성분원소 및 미량원소 분석 결과 동일 마그마에서 기원한 것으로 해석한 바 있다.

이번 연구에서 섭지코지 일대의 용암류와 단성화산체의 분포 및 선후관계를 고려하여 지질단면도를 작성하였다(그림 1). 특히 섭지코지에 분포하는 용암류는 암상과 형태적 특징 등에 따라 파호이호이

및 아아 용암으로 구분이 가능하며, 하부에는 얇은 두께의 파호이호이 용암이 국부적으로 분포하고, 상부에는 아아 용암이 우세하게 분포하는 것으로 파악되었다. 이들 용암은 공통적으로 반정의 종류와 크기, 산출빈도 등에서 대부분 유사한 특징을 보이는 것으로 나타났다. 그리고 두 용암류 사이에 고토양층이나 침식면과 같은 시간적인 단절면이 존재하지 않지만 선돌 분석구(스코리아콘)를 기준으로 용암의 선후관계가 확인됨에 따라 섭지코지 남부를 용암류 1로, 북부를 용암류 2로 구분하였다.

3. 섭지코지 암상의 특징 및 해석

섭지코지 지표는 대부분 모래로 덮여 있고 주요

지질단면은 남동쪽 해안절벽을 따라 분포한다. 항공사진에서 동쪽 해안절벽에는 스패터/스코리아가 곳곳에 분포하고 그 상부에 용암이 피복하는 양상을 보인다. 이번 조사에서는 스패터 및 스코리아, 암맥의 산출을 기준으로 A에서 F 구간까지 6개 구간으로 구분하였고, 섭지코지 선돌바위와 등대는 D 구간에 해당된다(그림 2).

3.1 A 구간

3.1.1 A 구간 암상

A 구간은 섭지코지 남동쪽 해안 약 200 m 구간으로, 스패터/스코리아로 이루어진 언덕지형에 아아 및 파호이호이 용암과 관입체/암맥들이 분포한다(그림 2). 스패터/스코리아 언덕지형은 높이가 약 30

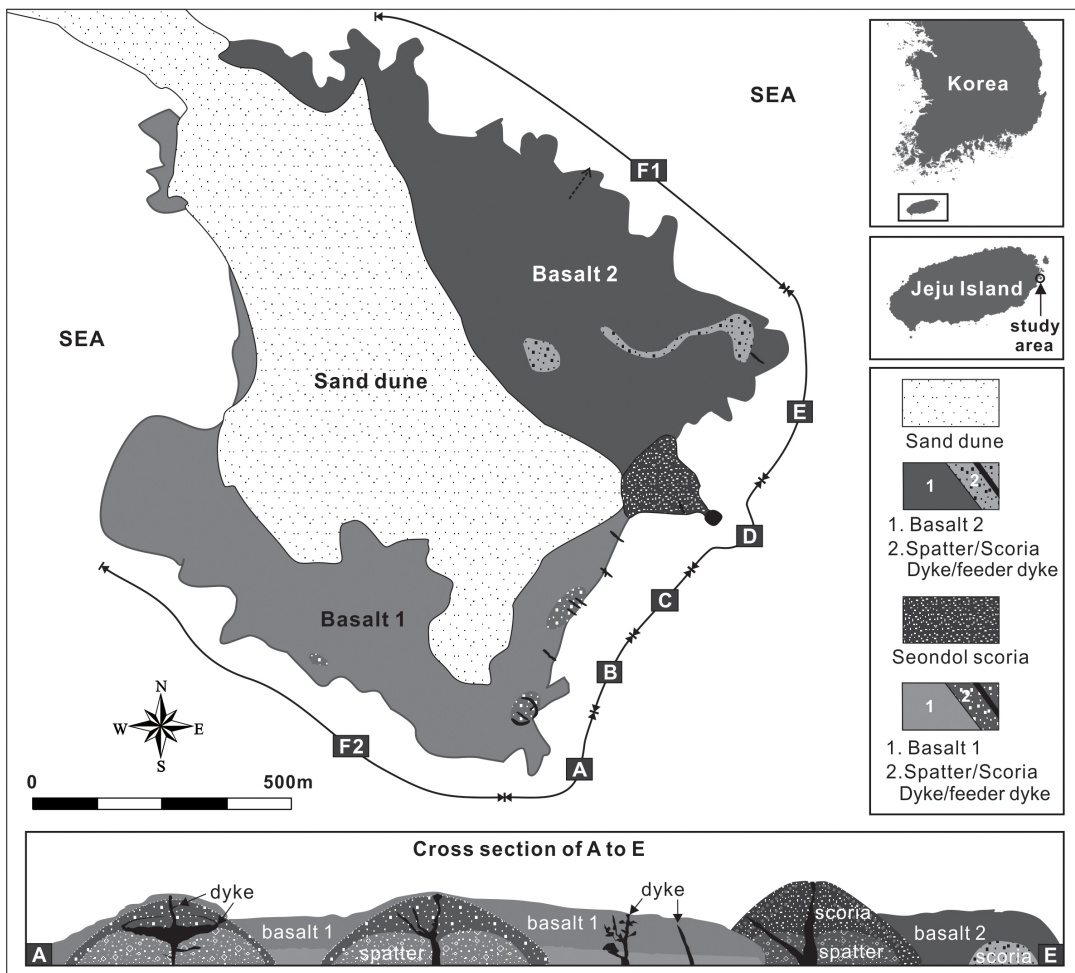


Fig. 1. Geological map of the study area in Seopjikoji.

m이며, 관입체가 원형을 이루며 스패터/스코리아층을 성벽처럼 둘러싼 독특한 형태를 보인다(그림 3a). 스패터/스코리아 언덕지형은 구성물질의 종류와 크기에 따라 하부는 대체로 스패터가 우세하고, 상부는 스코리아가 우세한 양상을 보인다(그림 3b). 스패터층 내에는 수십 cm 크기의 다공질 스코리아와 화산탄을 비롯해 액체처럼 늘어난 유동형(fluidal)의 용암편들이 불규칙하고 치밀하게 엉겨붙은 양상을 보인다. 반면 스코리아층은 1 cm 이하 크기의 스코리아들이 희미한 층리를 보이며 역지지된 양상으로 나타난다. 스코리아층은 남쪽과 북쪽 해안으로 연장되지만 성벽형태의 관입체에 의해 좌우로 단절되어 있다(그림 3b).

스패터/스코리아 지형을 성벽처럼 둘러싸고 서 있는 관입체는 두께가 0.5 m-1 m 내외로 얇고, 높이는 최대 5 m에 달한다(그림 3b, 3c). 관입체의 좌우 양쪽 표면에는 적색 스코리아와 소량의 화산탄이 들러붙어 있고, 내부에도 수 mm 두께의 판상 스코리아층이 여러 겹 끼어있는 양상을 보인다(그림 3c).

한편, 스패터/스코리아로 구성된 언덕지형의 내부에는 3개의 암맥이 관찰된다(그림 3b). 이 암맥은 스패터/스코리아층을 뚫고 실린더(cylinder)나 파이프 형태로 분포함에 따라 성벽모양으로 서 있는 관입체와는 구별된다. 암맥의 폭은 1 m 내외이며, 공통적으로 양 가장자리 표면에 붉은색의 스패터와 스코리아들이 엉겨붙어 있고, 중앙부는 치밀한 특징

을 보인다. 암맥은 중앙부에서 가장자리로 갈수록 기공 함량이 증가하는 경향을 보이며, 기공들은 수직방향으로 길게 신장된 형태로 나타난다(그림 3d).

암맥 1과 2는 스패터층과 직접 연결된 관입체로서, 스패터층에 가까워지면서 불규칙한 갈대기 모양으로 확장되는 양상을 보인다. 암맥 3은 스패터층을 관통하여 원형을 이루며 성벽처럼 서 있는 관입체와 연결되어 있다(그림 3b). 원형의 관입체는 해안에서 불룩한 돔상의 지형을 보이다가 바다쪽으로 방사상 형태로 뻗어나간 용암류의 형태로 변해가는 양상을 보인다(그림 3a, 3b).

3.1.2 A 구간 해석

A 구간은 언덕모양의 스패터/스코리아층을 관입체가 원형에 가깝게 성벽처럼 둘러싸고 서 있으며, 내부에 3개의 암맥이 관찰된다(그림 3b). 좁은 범위에서 스패터/스코리아와 관입지형이 복잡하게 분포하는 원인은 마그마의 관입과 분출이 동시에 연속적으로 발생한 결과로 추정된다. 먼저 지하에서 상승한 마그마가 지표에 가까워지면서 급격한 압력 감소에 따른 감압작용(decompression)에 의해 마그마속 휘발성분이 팽창하여 gas와 액체상태의 스코리아와 화산탄 등이 빠르게 분출되었다(Alidibirov and Dingwell, 1996; Geshi *et al.*, 2010). 짧은 시간 동안 지표로 분출된 다량의 화산쇄설물은 급격히 수직됨에 따라 열 손실이 거의 없는 상태에서 서로 엉

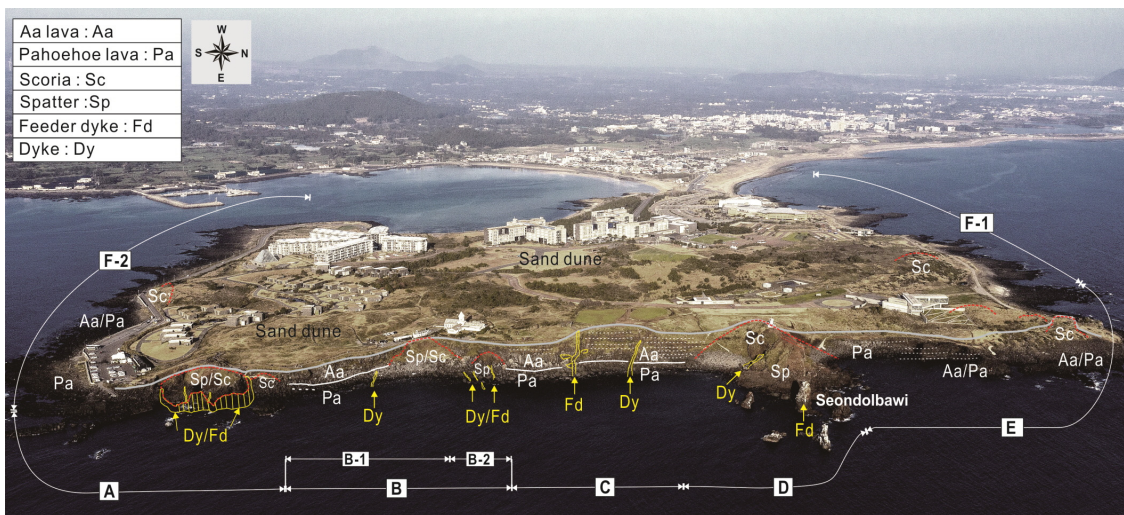


Fig. 2. Aerial photograph of the study area in Seopjikoji.

겨붙어 스페터층을 형성하였다(Sumner, 1998; Sumner *et al.*, 2005; Rader and Geist, 2015; Jones *et al.*,

2018). 그리고 연이어 스코리아들이 분수처럼 뿜어져 나와 쌓이면서 스페터층 상부와 주변에 스코리아

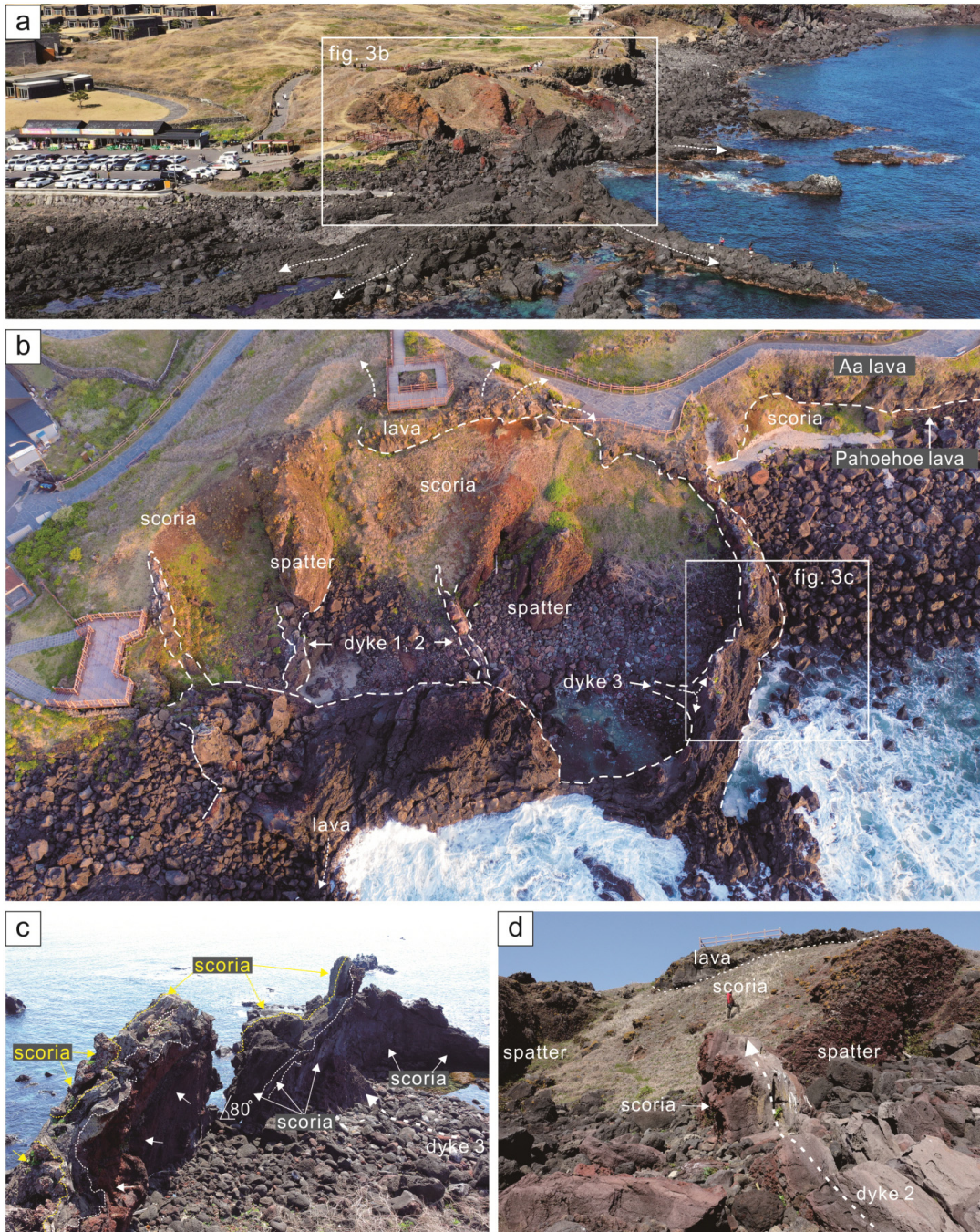


Fig. 3. (a) Aerial photograph of Section A. (b) A close-up of Section A, showing a circular dyke standing like a rampart of a castle composed of spatter/scoria with three internal dykes. (c) Several layers of scoria are interbedded inside the dyke that stands like a castle wall. (d) A dyke extends into the spatter with massive interior and scoria-entangled external sides.

마운드(또는 콘)를 형성하였다(그림 4). 이 최초의 화산분출을 일으킨 마그마의 통로가 현재 스페터/스코리아와 연결된 암맥 1과 2이며, 분출암맥으로 해석된다. 스페터/스코리아층이 형성되고 연이어 암맥 3이 스페터/스코리아층을 뚫고 갈대기 또는 실린더 형태의 관입 구조(cone sheet)를 만들었다(그림 4). 이 과정에서 관입체의 양 측면에 고화되지 않은 스페터/스코리아들이 엉겨붙고 성벽처럼 수직으로 서있는 벽 모양의 관입지형이 남겨지게 되었다(e.g., Nemeth *et al.*, 2011; Skacelova *et al.*, 2020). 기존 연구에서 원형으로 서 있는 관입지형은 아아 용암의 용암수로(lava channel)가 침식되고 벽 부분이 남은 것으로 해석한 바 있다. 그러나 원형을 이루며 서 있는 성벽모양의 지형은 길쭉한 아아 용암의 수로와는 외관상 큰 차이가 있다. 또한 관입체의 양 측면에 엉겨붙은 스페터와 화산탄은 용암류가 흘러가는 과정에서 만들어 질수 없고, 선돌바위를 비롯한 섭지코지 관입체에서 공통적으로 나타나는 특징이다.

3.2 B 구간

3.2.1 B 구간 암상

B 구간은 약 200 m 범위에서 2매의 용암류와 스페터 및 스페터층, 그리고 3개의 관입체/암맥이 분포한다(그림 2, 5a). 세부적으로 B 구간은 용암 하부에 스페터층이 나타나는 구간을 B-1, 용암 하부에 스페터층이 나타나는 구간을 B-2로 구분하였다(그림 2, 5a).

B-1 구간 스페터층은 내부에 수 cm 크기의 스페터가 역 지지되어 있고, 일부 수십 cm 크기의 스페터와 화산탄이 엉겨붙은 형태로 나타난다(그림 5a). 스페터층은 희미한 층리를 보이며 30-40°

각도로 기울어져 있다(그림 5a). 스페터층 내에는 약 1-1.5 m 두께의 암맥 1과 2가 해안가 바닥에서 스페터층으로 연장되어 나타난다(그림 5a, 5b). 두 암맥의 양쪽 표면에는 스페터가 붙어있고 일부는 유체처럼 엉겨붙어 늘어난 형태를 보인다(그림 5b). B-1 구간 상부에는 두께가 최대 8 m인 아아 용암이 분포하는데, 용암의 상하부에는 클링커층이 발달하고 중앙부는 기공이 거의 없는 특징을 보인다(그림 5a, 5b). 클링커는 불규칙하게 각상으로 깨진 용암편들이 엉겨붙어 있으며, 겹겹이 배열된 판상의 클링커층 형태로 산출된다(그림 5c).

B-2 구간은 상부에 용암이 분포하고, 그 하부에 스페터층과 암맥 3이 나타난다(그림 5a, 5d). 스페터층은 수십 cm 크기의 스페터와 화산탄, 용암들이 치밀하게 엉겨붙어 있고, 약 30-40°로 기울어져 있다(그림 5c, 5e). 암맥 3은 해안에서 수직으로 상승하는 형태이며, 해안에서는 약 1-1.5 m 두께를 보이지만 스페터층에 가까워질수록 갈대기처럼 넓어지는 양상을 보인다(그림 5a, 5c). 암맥 3의 표면에는 스페터와 용암들이 엉겨붙거나 늘어나 있으며, 희미한 유동구조를 보이기도 한다(그림 5d). 한편, B-2 구간 스페터층의 측면에는 약 1 m 두께의 파호이호이 용암이 나타난다(그림 5e). 파호이호이가 용암은 다공질이며 수십 cm 두께의 얇은 용암단위들이 중첩된 양상을 보인다.

3.2.2 B 구간 해석

B 구간은 상부 용암류와 하부 스페터/스페터층으로 구성된다(그림 2, 5a). 스페터가 우세한 B-1 구간과 스페터로 구성된 B-2 구간은 경계면 없이 나란히 분포하고 있어 동일 화산체의 일부로 추

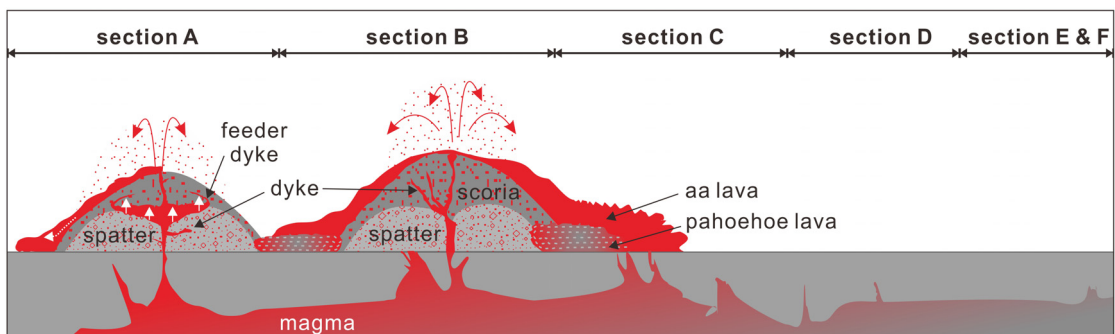


Fig. 4. Schematic diagram of the formation process of Section B from Section A.

정된다. 특히, B-2 구간의 스페터층은 수십 cm 크기의 스코리아와 용암이 엉겨붙어 있고 40° 각도로 가파르게 쌓인 특징으로 볼 때 분화구 또는 주변지역에서 발생한 초기 화산활동에 의해 형성된 것으로 추정된다(Sumner, 1998; Nemeth *et al.*, 2011). 스페터층에 연결된 암맥 3은 스페터층에 가까워지면서 암맥의 폭이 넓어지는 특징을 보인다. 이는 마그마가 지표에 가까워지면서 급격한 압력 감소로 인해 가스팽창과 폭발 등이 발생하여 암맥이 깔대기처럼 넓어진 것을 지시하며, 암맥 3은 분출암맥으로 해석

된다(Geshi *et al.*, 2010, 2012). 그리고 스코리아가 우세한 B-1 구간 암맥 1과 2는 스페터/스코리아 콘이 쌓이는 과정에서 형성된 관입체로 추정된다(그림 4).

한편, 스페터층의 측면과 접하는 파호이호이 용암은 동일한 화산분화 과정에서 화산체의 측면을 따라 흘러나간 것으로 추정된다(e.g., Annen *et al.*, 2001). 그리고 파호이호이 용암의 상부 경계를 따라 아아 용암과 불규칙하게 섞여 있는 특징은 이 일대의 화산활동(스패터, 아아 및 파호이호이 용암)이 동시기

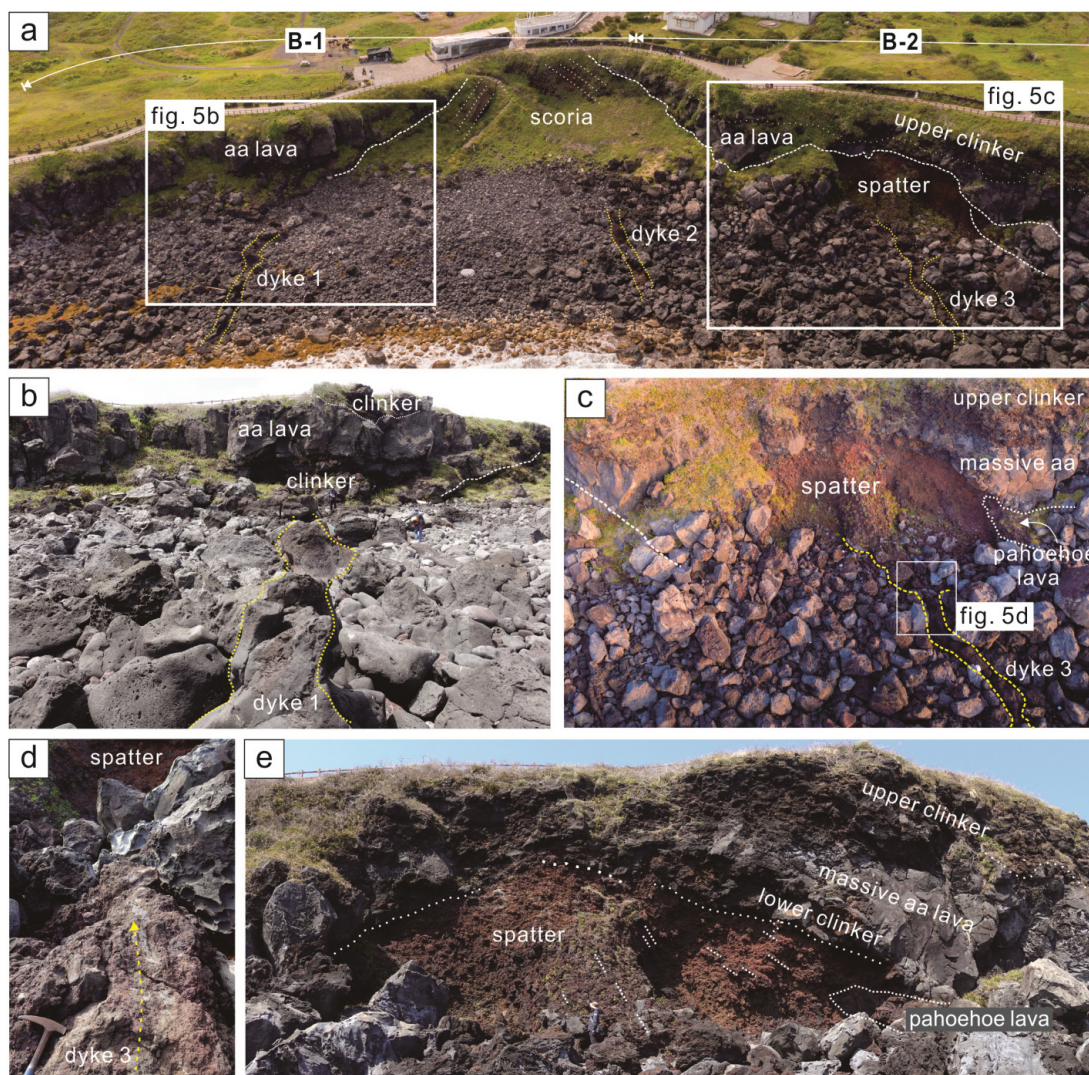


Fig. 5. (a) An aerial view of Section B. (b) Aa lava and dyke 1 in Section B-1. (c) Lava flows and spatter in Section B-2, and dyke 3 widens like a funnel toward the spatter. (d) A close-up of dyke 3. The vesicles are elongated along the direction of the arrow. (e) Section B-2. Pahoehoe lava occurs near the margin of the spatter cone.

에 연속적으로 발생했음을 나타낸다. 따라서 B 구간은 최초 분출암맥(암맥 3)에 의한 스트롬볼리안 분화로 스펙터/스코리아콘이 형성되고 동시에 파호이호이 용암과 아아 용암이 분출하여 화산체의 측면을 따라 흘러나간 것으로 해석된다(그림 4).

3.3 C 구간

3.3.1 C 구간 암상

C 구간은 상부에 약 10 m 두께의 아아 용암과 그 하부에 1-1.5 m 두께의 파호이호이 용암이 분포하며, 두 용암류를 가로지르는 암맥 1과 2가 나타난다

(그림 6a, 6b). 상부 용암은 B 구간 아아 용암의 연장으로 판상의 상부 클링커층이 약 10매 이상 반복적으로 교호하는 특징을 보인다(그림 6c). 하부 파호이호이 용암은 약 10-30 cm 두께로 얇은 용암단위로 로브(lobe)가 수 십매 중첩되어 있다. 각 로브는 공통적으로 중간부분이 다공질이고 상하부에 기공함량이 상대적으로 낮은 특징을 보인다.

암맥 1은 파호이호이 용암과 아아 용암을 수직으로 관입하고 있으며 지표까지 연장되는 것으로 추정된다. 암맥 1은 파호이호이 용암과의 경계에서 판상의 용암 사이를 관통하고 있는 모습을 보이며, 일부

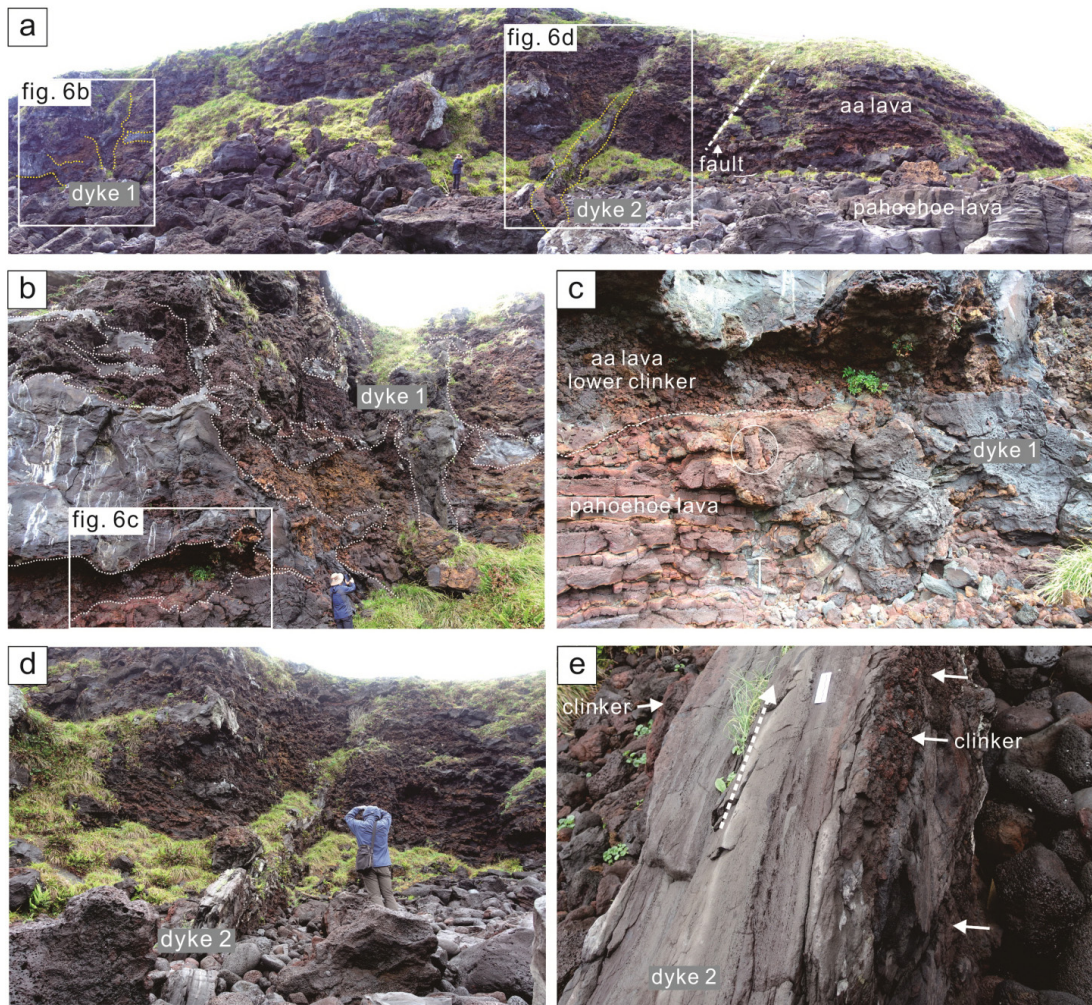


Fig. 6. (a) An aerial photo of Section C. (b) The aa lavas in the upper part were disrupted by the intrusion of dyke 1. (c) The lower part of pahoehoe lava and the lower clinker of aa lava were disrupted by the intrusion of dyke 1. (d) Dyke 2 penetrating a lava flow with an angle. (e) A close-up of dyke 2. The vesicles are elongated along the direction of the dyke.

용암편은 관입체 내부로 포획된 양상으로 나타난다(그림 6c). 암맥 1과 아아 용암의 경계는 매우 불규칙하며, 암맥이 용암 내부를 뚫고 들어가 그물처럼 복잡하게 섞인 양상을 보인다(그림 6b). 일부 클링커편은 암맥에 둘러싸여 있거나 암맥 내부로 포획되어 아메바 모양처럼 측방으로 길게 늘어난 형태를 보이기도 한다(그림 6b).

암맥 2는 아아 용암을 저각도로 관통하고 있으며, 관입 경계부를 따라 클링커층이 일부 휘어진 특징을 보인다(그림 6c). 암맥의 폭은 약 40-70 cm이며, 암맥의 양쪽 가장자리에는 클링커가 불규칙하게 엉겨붙어 있다(그림 6d). 암맥의 중심부는 과상이며 치밀하고 가장자리에는 늘어난 기공들이 여러 겹의 층(layer)을 이루며 분포한다(그림 6e). 신장된 기공은 암맥의 관입방향에 나란하게 배열된 경향을 보인다.

3.3.2 C 구간 해석

C 구간 상부 아아 용암은 B 구간에서 연장된 용암으로 판상 클링커 층의 두께가 더 두꺼워지는 특징을 보인다. 이는 분출지점에서의 이동거리에 따른 온도 감소와 점성의 증가에 따른 결과로 추정된다(Macdonald, 1953; Rowland and Walker, 1990). 하부 파호이호이 용암도 B 구간에서 연장된 용암으로, 각 용암의 분출단위 로브의 중간부분이 다공질이고 상하부에 기공함량이 상대적으로 적은 특징을 보인다. 이는 두께가 얇은 로브가 흐름과 동시에 상하부 표면이 급격히 냉각됨에 따라 내부 가스들이 탈출하지 못한 결과로 풀이된다(Wilmoth and Walker, 1993).

아아 용암 및 클링커와 불규칙하게 섞여 있는 암맥 1은 용암이 흐를 당시 내부로 관입이 일어나 미고결 또는 반 고결된 두 유체들이 섞이고 엉겨붙은 결

과로 추정된다(그림 7). 암맥 1은 단면상에서 용암을 뚫고 지표까지 연장되어 있어 분출암맥으로 추정된다. 그리고 암맥 1과 파호이호이 용암의 경계부에서 용암이 아메바 모양으로 휘어지거나 판상의 용암 사이를 관통하고 있는 모습은 파호이호이 용암이 먼저 분출하여 굳어지는 과정에서 곧바로 상부에 아아 용암이 흐르고, 동시에 암맥 1이 관입한 결과로 해석할 수 있다. 또한 암맥 2도 용암과의 관입 경계부를 따라 클링커층이 일부 휘어진 특징을 보이고 있어 용암이 흐르고 식는 과정에서 동시에 관입이 일어난 것으로 해석된다(그림 7).

3.4 D 구간(선돌바위와 등대)

3.4.1 D 구간 암상

D 구간은 선돌바위 시스템에 포함된 약 300 m 구간으로, 구성물질의 종류, 크기, 암상 등에 따라 선돌바위 시스템, 스파터, 스코리아층으로 구분된다(그림 8a). 선돌바위 시스템은 높이 약 10 m, 직경 약 3 m이며, 주변에는 직경 약 50 m 범위에서 크고 작은 시스템들이 원형을 이루며 분포하고 있다(그림 8b). 선돌바위와 주변 시스템들은 전체적으로 기공이 거의 없고 치밀한 과상이며, 표면에는 스파터와 스코리아들이 엉겨붙어 있다(그림 8b).

선돌바위 상부에는 20-30 m 두께의 스파터층이 분포한다(그림 8c). 스파터층 내부에는 수십 cm 크기의 스코리아와 화산탄을 비롯해 늘어난 용암들이 서로 엉겨붙어 있으며, 약 30-50°로 기울어져 있다(그림 8c, 8d). 스파터층의 상부에는 약 10-30 m 두께의 스코리아층이 분포하는데, 스코리아층은 암색에 따라 하부에는 적색 스코리아층이, 상부에는 흑색 스코리아층이 분포한다. 적색 스코리아층은 두께가 1-3 m이며, 주로 1 cm 내외 크기로 분급이 양호

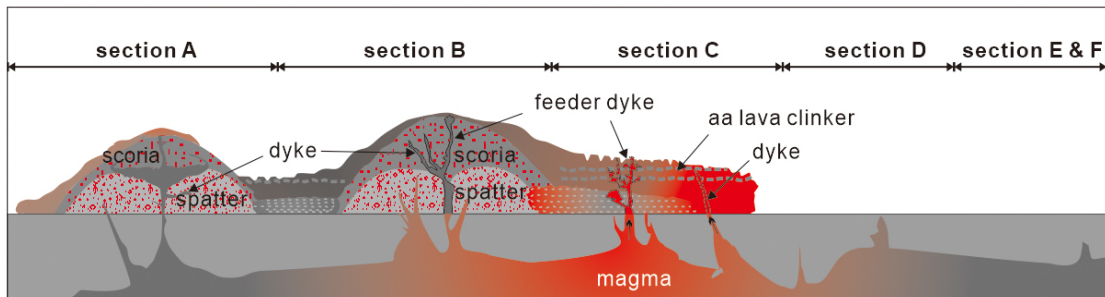


Fig. 7. Schematic diagram of the formation process of Section C in Seopjikoji.

한 다공질 스코리아들이 역지되되어 있다. 반면 흑색 스코리아층은 최대 20 m 두께이며, 주로 수 cm 이하 크기의 스코리아들이 입자크기에 따른 층리를 보이며, 입자 지지된 형태로 나타난다. 이 흑색 스코

리아층은 C 구간 용암류를 덮고 있다(그림 8a). 반면 D 구간과 E 구간의 경계면서는 선돌바위 최상부 흑색 스코리아층이 E 구간 용암류에 의해 덮여있는 양상을 보인다(그림 8a, 8d).



Fig. 8. (a) An aerial photo of Section D. (b) The Seondolbawi Rock comprises a massive clastogenic lava with a circular pattern with scoria entangled on the surface of the lava. (c) The spatter layer and the upper scoria layer surrounding the Seondol scoria cone. (d) The stratified scoria layer, overlain by the lava flows in Section E, is on top of Seondolbawi Rock.

3.4.2 D 구간 해석

선돌바위는 기존 연구에서 선돌 분석구를 만든 분화구의 암경으로 알려져 왔다. 이번 조사에서도 선돌 분석구는 바다 위에 10 m 높이로 솟아있고 치밀하게 엉겨붙은 괴상의 특징을 보이며, 표면에 스킨리아와 스파터들이 엉겨붙어 있어 스킨리아콘을 만든 암경이며, 분출암맥으로 해석된다. 선돌바위를 둘러싸고 원형을 이루는 시스택 지형은 엉겨붙은 괴상의 용암으로 구성되어 있어 클라스토제닉 용암으로 해석된다. 선돌바위 상부의 스파터층은 화산분화 초기 분수처럼 뜨거운 상태로 빠르게 뿜어져 나온 스킨리아와 용암 덩어리들이 엉겨붙어 형성되었다(Sumner, 1998; Gottsmann and Dingwell, 2002; Nemeth *et al.*, 2011). 연이어 입자크기가 작은 세립질 스킨리아와 화산탄들이 분출하여 화산체의 바깥쪽 사면에 쌓여 스킨리아층을 형성하였다(그림 9). 스킨리아의 색이 적색 또는 흑색으로 나타나는 원인은 분출당시 뜨거운 증기에 의해 고온산화(high temperature oxidation)가 일어날 경우 적색을 띠고, 증기에 노출이 적을 경우 흑색 스킨리아가 형성되는 것으로 알려져 있다(Yamanoi *et al.*, 2004).

선돌 분석구의 가장자리를 구성하는 흑색 스킨리아층은 C 구간 용암류를 피복하고 있고, E 구간 용암류에 의해 피복된 양상을 보인다(그림 8a, 8d). 이는 선돌 분석구(D 구간)가 형성되기 이전에 A-C 구간에서 먼저 화산활동이 일어나고, 이후 선돌 분석구가 형성되었음을 말해준다. 그리고 선돌 분석구의 화산활동이 종료되고 다시 E 구간에서 화산활동이 일어나 선돌 분석구의 스킨리아층을 덮은 것으로 해석할 수 있다(그림 9). 그러나 층간의 경계면에서 고

토양층이나 침식면이 없는 특징을 볼 때 화산활동은 연이어 발생한 것으로 추정된다.

3.5 E 구간

3.5.1 E 구간 암상 및 해석

E 구간은 선돌 분석구에서 약 400 m에 이르는 구간으로 용암류가 대부분을 차지하고 용암류 하부에 2개의 스킨리아층이 협재되어 나타난다(그림 10a). 스킨리아층은 5-7 m 높이의 언덕지형을 이루고 있으며(그림 10b), 내부에 수~수십 cm 크기의 스킨리아들이 엉겨붙어 있고 소량의 화산탄도 포함되어 있다(그림 10c). 용암류의 두께는 최대 약 5 m 내외이며, 1-3매의 용암류가 중첩되어 있으며, 부분적으로 상하부에 클링커가 협재되어 있다. 용암류는 섭지코지 내륙 방향에서 스킨리아층을 덮고 해안을 따라 흘러간 양상을 보인다.

E 구간 용암류 하부에 분포하는 스킨리아층은 용암류 분출 이전에 형성되었으며, 스킨리아들이 용암 표면에 들러붙은 특징으로 볼때 스킨리아콘이 형성되고 연이어 용암류가 분화구의 내부 및 측면으로 흘러나간 결과로 추정된다(그림 9).

3.6 F 구간

3.6.1 F 구간 암상 및 해석

F 구간은 섭지코지 북부와 남부에 분포하는 넓은 용암대지로 암석학적 특징 및 용암류의 형태가 모두 유사한 양상을 보인다. F 구간은 분포 위치에 따라 섭지코지 북부(F-1)와 남부(F-2)로 구분하였다(그림 2).

섭지코지 북부 F-1 구간은 완전한 용암대지가 발달해 있고, 1-2 m 높이의 낮은 언덕지형이 부분적으

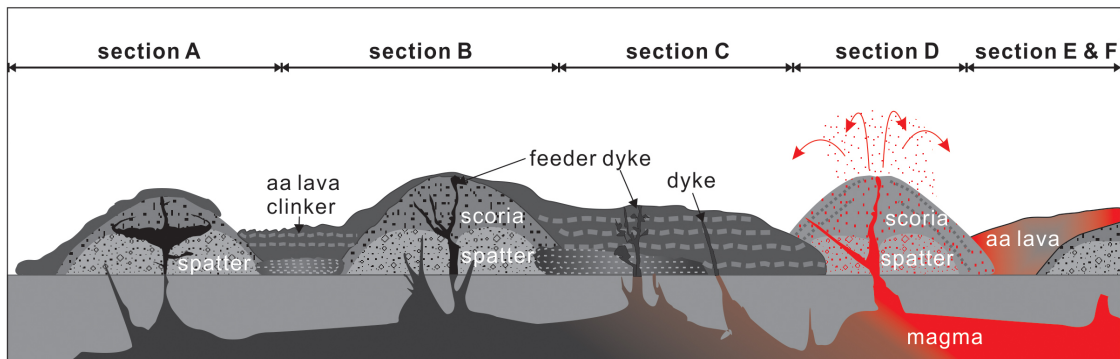


Fig. 9. Schematic diagram of the formation process of Section F from Section D in Seopjikoji.

로 발달한다(그림 11a). 언덕지형 내부에는 수~수십 cm 크기의 스킨리아와 소량의 화산탄 등이 엉겨

붙어 있다. 용암류는 스킨리아층의 측면과 상부를 넘어 해안쪽으로 흘러가는 양상을 보인다.



Fig. 10. (a) An aerial photo of Section E. (b) The scoria mound is widespread under the lava, which flowed toward the sea. (c) A close-up photo of a scoria layer.

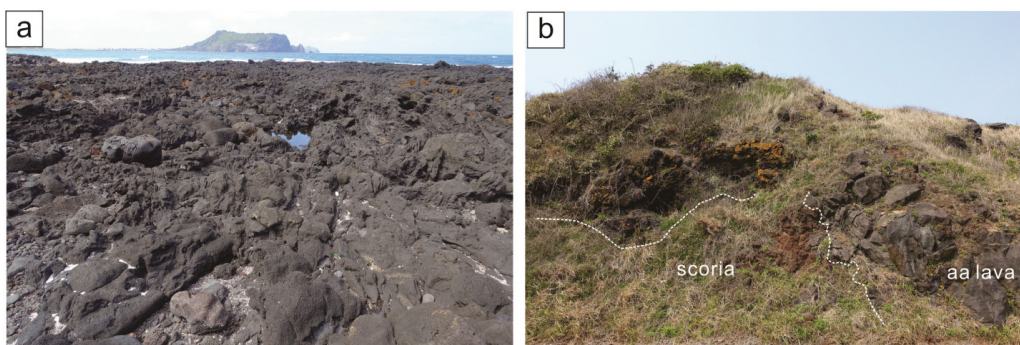


Fig. 11. (a) The surface of the lava in Section F-1 is uneven with partially interbedded clinker. (b) The boundary between the lower scoria and the upper aa lava in Section F-2.

섭지코지 남부 해안 F-2 구간은 평탄한 용암대지를 이루고 있지만 표면이 울퉁불퉁한 아아 용암의 특징을 보인다. F-2 구간 섭지코지 주차장 주변에는 약 5 m 두께의 언덕모양 지형이 남아있다. 언덕지형 내부에는 스코리아층이 분포하고 있으며, 용암류는 스코리아층을 피복하거나 측면을 따라 흘러나간 특징을 보인다(그림 11b).

섭지코지 북부(F-1)와 남부(F-2) 해안 용암류는 두께가 최대 5 m에 이르고 상하부에 불규칙한 클링커층이 존재하는 것으로 미루어 아아 용암류에 의해 형성된 것으로 해석된다. 또한 용암류 하부에 스코리아 층을 협재하는 것은 용암류 분출 당시 소규모 스트롬볼리형 분화가 먼저 일어나 화산체를 형성한 결과로 추정된다. 각각의 용암류는 공통적으로 흑색 또는 암회색을 띠며, 치밀한 석기 내에 소량의 감람석을 포함하고 있다. 산출위치에 따라 용암류의 표면은 다공질인 반면, 내부는 치밀한 괴상의 특징을 보인다. 한편, 섭지코지 E, F 구간 용암류와 A, B, C 구간의 용암류는 공통적으로 소량의 감람석 반정만 포함하고 있어 동일기원의 마그마에서 기원한 것으로 추정된다. 또한 Koh *et al.* (2007)은 섭지코지 일대에 온평리 현무암과 선돌바위 현무암 등 11개 암

석을 분석한 결과, 변화 패턴이 거의 나란하고 REE 패턴에서 MgO 함량이 감소함에 따라 La/Yb 비가 거의 일정함을 통해 이 암석들이 동일한 마그마 기원에서 기원하였다고 추정한다. 따라서 섭지코지 일대의 용암류는 동일기원의 마그마에서 기원하였으며, 형성순서에 따라 A, B, C 구간이 먼저 형성되고 D 구간 선돌 분석구가 형성된 이후 E, F 구간에서 화산활동이 일어난 것으로 추정된다(그림 9).

4. 결 론

제주도 동쪽 가장자리에 위치한 섭지코지는 우도면적의 10분의 1에 불과한 좁은 지역이지만, 선돌 분석구를 비롯해 최소 6개 이상의 스페터/스코리아 지형(마운드 또는 콘)과 아아 및 파호이호이 용암 그리고 10개의 관입체/암맥이 분포하고 있다. 이렇게 좁은 범위에서 다양하고 복잡한 화산 지형이 분포하는 원인은 화산활동 과정에서 분출과 관입이 동시에 연속적으로 발생한 결과로 해석된다.

섭지코지 일대의 최초 화산활동은 스트롬볼리안 분화에 의해 섭지코지 동남쪽(A, B, C 구간)에 스페터콘 또는 스코리아콘들을 형성하였다(그림 12a).

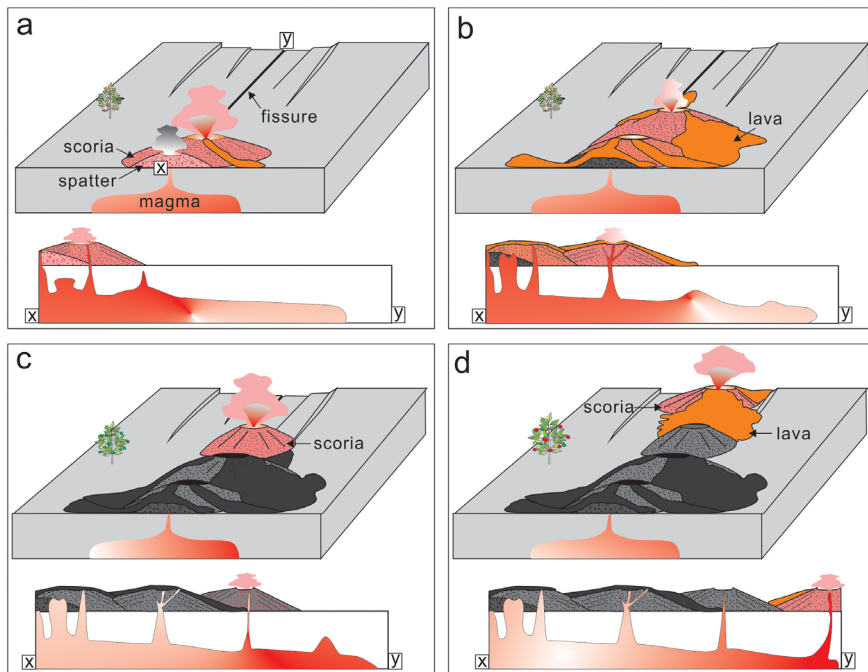


Fig. 12. Schematic diagram of the formation process of Seopjikoji.

이 과정에서 9개의 암맥이 스페터/스코리아층을 관입하였는데, 특히 A 구간 암맥 1과 2는 스페터/스코리아콘을 형성한 분출암맥이었으며, 암맥 3은 실린더형으로 스페터/스코리아층을 관입하여 성벽처럼 서있는 원형의 지형을 형성한 것으로 해석된다(그림 3, 12b).

B 구간은 초기에 분출암맥 3에 의해 스페터와 스코리아콘이 형성되었고(그림 5), 동시에 암맥 1과 2가 스페터와 스코리아콘을 관입하였다. 그리고 암맥 중 일부는 지표로 분출되어 용암류를 형성한 분출암맥으로 추정된다. 분출암맥으로부터 공급된 용암류가 흐르는 중에도 용암을 관통하는 관입이 발생하여 접촉부를 따라 관입체와 용암이 어지럽게 뒤섞인 C 구간을 형성한 것으로 추정된다(Geshi *et al.*, 2010, 2012).

A, B, C 구간의 화산활동에 연이어 D 구간에서도 분출암맥(선돌바위)에 의한 스트롬볼리형 분화가 발생하여 선돌 분석구가 형성되었다. 선돌 분석구는 최초 스페터를 우세하게 분출하여 분화구 주변에 클라스토제닉 용암과 스페터 지형을 형성하였고, 점차 스코리아가 우세한 분출로 변화하였으며, 흑색 스코리아는 C 구간 용암류를 덮으며 선돌 분석구의 형성이 종료되었다(그림 7, 12c).

선돌 분석구 형성 이후 E, F 구간에서 화산활동이 발생하여 스코리아콘을 형성하고 아아 용암이 흘러나가 E, F 구간 곳곳에 클링커 지형을 남겨놓았다. 용암류 중 일부는 선돌 분석구쪽으로 흘러, 선돌 분석구 최상부 스코리아층을 피복하면서 화산활동이 종료되었다(그림 12d).

섭지코지 일대에 분포하는 여러개의 스페터/스코리아 지형은 대부분 북동에서 남서방향으로 선상 분포를 보이고 있다. 이는 섭지코지 지하에서 일직선으로 형성된 열극(fissure)을 따라 동시기에 분출이 일어났을 가능성을 생각해 볼 수 있다. 하와이의 경우 열극 주변을 따라 연장성 있게 스페터/스코리아콘 지형들이 분포한다. 이와 같은 지역을 spatter rampart라 부르며, 주로 열극 단층대를 따라 상승한 분출암맥에 의해 형성된다(e.g., Cappello *et al.*, 2012; Galindo and Gudmundsson, 2012; Jones *et al.*, 2018). 따라서 섭지코지 일대에 선상으로 분포하는 스페터/스코리아콘은 열극을 따라 형성된 spatter rampart일 가능성도 있다.

섭지코지는 마그마가 선상으로 분출 및 관입하는 과정에서 먼저 스페터/스코리아콘을 형성하고 용암류가 분출되었다. 그리고 동시에 마그마가 상승하는 과정에서 스페터/스코리아콘과 용암류를 관입하면서 다양한 암맥지형을 비롯한 화산구조를 형성한 것으로 추정된다. 이후 섭지코지 일대의 화산활동이 종료되고 해수면 상승과 파도의 침식에 의해 섭지코지의 동쪽사면이 깎여나가 암맥과 스페터층, 스코리아층이 지표상에 드러나게 되었다.

지금까지 제주도 화산활동 연구는 대부분 수성화산체의 형성시기와 과정을 중심으로 수행되었다. 예를 들어 송악산과 우도는 수성화산에서 육상환경의 단성화산 활동으로 변화하는 과정에 대해 연구되어 있고, 성산일출봉은 연속적인 수성화산 활동에 의해 형성되었음이 밝혀진 바 있다. 그러나 섭지코지는 동시기에 스트롬볼리안 화산활동과 마그마 관입에 의해 여러개의 스페터와 스코리아콘, 용암류를 형성한 단성화산 복합체로 추정된다. 섭지코지 화산 활동사는 단성화산의 개념이 단순히 일회성 화산활동에 국한되는 것이 아니라 지하에서 보이지 않는 수많은 분출과 관입활동이 수반되는 복합적인 과정을 통해 형성될 수 있음을 보여주는 사례로, 제주도 단성화산 및 복합화산체의 형성과정을 이해하는데 중요한 의미가 있는 것으로 생각된다.

감사의 글

이 논문은 제주특별자치도 세계유산본부 한라산 연구부의 자체 연구과제로 수행되었습니다. 논문에 많은 조언을 주신 손영관 교수님과 권창우 박사님께 감사드립니다. 아울러 사진 제공에 도움을 주신 정희준 지질공원 해설사 선생님과 고인종 박사님께도 감사드립니다.

REFERENCES

- Alidibirov, M. and Dingwell, D.B., 1996, Magma fragmentation by rapid decompression. *Nature*, 380, 146-148.
- Annen, C., Lénat, J.F. and Provost, A., 2001, The long-term growth of volcanic edifices: numerical modelling of the role of dyke intrusion and lava-flow emplacement. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 105, 263-289.

- 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. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 160, 931-950.
- Cappello, A., Neri, M., Acocella, V., Gallo, G., Vicari, A., and Del Negro, C., 2012, Spatial vent opening probability map of Etna volcano (Sicily, Italy). *Bulletin of Volcanology*, 74, 2083-2094.
- Delaney, P.T. and Gartner, A.E., 1997, Physical processes of shallow mafic dike emplacement near the San Rafael Swell, Utah. *Geological Society of America Bulletin*, 109, 1177-1192.
- Galindo, I. and Gudmundsson, A., 2012, Basaltic feeder dykes in rift zones: geometry, emplacement, and effusion rates. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 12, 3683.
- Geshi, N. and Neri, N., 2014, Dynamic feeder dyke systems in basaltic volcanoes: the exceptional example of the 1809 Etna eruption (Italy). *Frontiers in Earth Science*, 2, 13.
- Geshi, N., Kusumoto, S. and Gudmundsson, A., 2010, Geometric difference between non-feeder and feeder dykes. *Geology*, 38, 195-198.
- Geshi, N., Kusumoto, S. and Gudmundsson, A., 2012, Effects of mechanical layering of host rocks on dike growth and arrest. *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 223, 74-82.
- Gottsmann, J. and Dingwell, D.B., 2002, The thermal history of a spatter-fed lava flow: the 8-ka pantellerite flow of Mayor Island, New Zealand. *Bulletin of Volcanology*, 64, 410-422.
- Gudmundsson, A., Friese, N., Galindo, I. and Philipp, S.L., 2008, Dike induced reverse faulting in a graben. *Geology*, 36, 123-126.
- Jeon, Y., Koh, G.W., Park, J.B., Moon, D.C., Kim, K.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*, 55, 291-313 (in Korean with English abstract).
- Johnson, P.J., Valentine, G.A., Cortés, J.A. and Tadini, A., 2014, Basaltic tephra from monogenetic Marcath Volcano, central Nevada. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 281, 27-33.
- Jones, T.J., Houghton, B.F., Llewellyn, E.W., Parcheta, C.E. and Hoeltgen, L., 2018, Spatter matters-distinguishing primary (eruptive) and secondary (non-eruptive) spatter deposits. *Scientific reports*, 8, 1-12.
- Keating, G.N., Valentine, G.A., Krier, D.J. and Perry, F.V., 2008, Shallow plumbing systems for small-volume basaltic volcanoes. *Bulletin of Volcanology*, 70, 563-582.
- Koh, J.S., Yun, S.H. and Kim, S.Y., 2007, 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).
- Lee, M.W., 1982, Petrology and geochemistry of Jeju Volcanic Island, Korea. *Science Report, Tohoku University, Series 3*, 15, 177-256.
- Macdonald, G.A., 1953, Pahoehe, aa, and block lava. *American Journal of Science*, 251, 169-191.
- Martin, U. and Németh, K., 2006, How Strombolian is a 'Strombolian' scoria cone? Some irregularities in scoria cone architecture from the Transmexican Volcanic Belt, near Volcan Ceboruco, (Mexico) and Al Haruj (Libya). *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 155, 104-118.
- Németh, K., Risso, 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.
- Poland, M.P., Moats, W.P. and Fink, J.H., 2008, A model for radial dike emplacement in composite cones based on observations from Summer Coon volcano, Colorado, USA. *Bulletin of Volcanology*, 70, 861-875.
- Rader, E. and Geist, D., 2015, Eruption conditions of spatter deposits. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 304, 287-293.
- Rader, E., Wysocki, R.S., Heldmann, J., Harpp, K., Bosselait, M. and Myers, M., 2020, Spatter stability: constraining accumulation rates and temperature conditions with experimental bomb morphology. *Bulletin of Volcanology*, 82, 49, <https://doi.org/10.1007/s00445-020-01386-4>.
- Richardson, J.A., Miller, D.M., Bleacher, J.E., Connor, C., Gregg, T.K., Connor, L.J. and Glaze, L.S., 2012, Comparison of monogenetic volcano clusters on earth, venus, and mars. *AGUFM*, 2012, V44C-04.
- Rowland, S.K. and Walker, G.P., 1990, Pahoehe and aa in Hawaii: volumetric flow rate controls the lava structure. *Bulletin of Volcanology*, 52, 615-628.
- Skacelova, Z., Rappich, V., Valenta, J., Hartvich, F., Sramek, J., Radon, M. and Pecskey, Z., 2010, Geophysical research on structure of partly eroded maar volcanoes: Miocene Hnojnice and Oligocene Rychnov volcanoes (northern Czech Republic). *Journal of Geosciences*, 55, 333-345.
- Sohn, Y.K., Cronin, S.J., Brenna, M., Smith, I.E.M., Nemeth, 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., Park, K.H. and Yoon, S.H., 2008, Primary versus secondary and subaerial versus submarine hydro-volcanic deposits in the subsurface of Jeju Island, Korea. *Sedimentology*, 55, 899-924.
- 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.
- Tchamabé, B.C., Kereszturi, G., Németh, K. and Carrasco-Núñez, G., 2016, How Polygenetic are Monogenetic Volcanoes: Case Studies of Some Complex Maar-Diatreme Volcanoes. In *Updates in Volcanology-From Volcano Modelling to Volcano Geology*. IntechOpen.
- Valentine, G.A. and Gregg, T.K.P., 2008, Continental basaltic volcanoes-Processes and problems. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 177, 857-873.
- Vespermann, D. and Schmincke, H.U., 2000, Scoria cones and tuff rings. Academic press. *Encyclopedia of Volcanoes*: San Diego, California, Academic Press, 683-694.
- Walker, G.P., 2000, Basaltic volcanoes and volcanic systems. *Encyclopedia of volcanoes*, 283-289.
- Wilmoth, R.A. and Walker, G.P., 1993, P-type and S-type pahoehoe: a study of vesicle distribution patterns in Hawaiian lava flows. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 55, 129-142.
- Won, C.K., Lee, M.W., Lee, D.Y. and Song, Y.K., 1993, Explanatory text of the geological map of Seongsan Sheet (1:50,000). Ministry of Construction, Jeju Provincial Government and Korea Water Resources Corporation, 104 p (in Korean, title translated).
- Wood, C.A., 1980, Morphometric evolution of cinder cones. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 7, 387-413.
- Yamanoi, Y., Nakashima, S., Okumura, S. And Takeuchi, S., 2004, Color change measurements of a scoria and simulation heating experiments by spectro-colorimetry. *Kazan*, 49, 317-331.
- Yoon, S.H., Choo, K.H. and Park, Y.S., 2014, Comparative analysis of geomorphological and geological characteristics of small-scale volcanoes applicable to field guide for Jeju Island gaoheritages. *Journal of the Geological Society of Korea*, 50, 133-150 (in Korean with English abstract).

Received : October 26, 2020

Revised : November 24, 2020

Accepted : November 25, 2020