

제주도 꽃자왈 형성의 주요 원인

안웅산¹ · 손영관^{2,*} · 강순석³ · 전용문¹ · 최형순⁴

¹제주특별자치도 세계유산·한라산연구원

²경상대학교 지구환경과학과

³제주지질연구소

⁴국립산림과학원 난대·아열대산림연구소

요 약

화산섬 제주도에서는 용암류 상에 형성된 독특한 자연숲을 ‘꽃자왈’이라 부른다. 본 연구에서는 제주도 북동부의 구좌·성산꽃자왈과 제주도 남서부 안덕꽃자왈에 대하여 수치고도모델(DEM)을 이용한 음영기복도 및 경사분석도, 야외 암상기재 등의 방법을 이용하여 꽃자왈의 토대를 이루는 용암유역도를 새롭게 작성하고, 용암류와 그 상위에 형성된 꽃자왈과의 성인적 관계를 살펴보았다. 연구결과, 구좌·성산꽃자왈의 토대를 이루는 용암류가 인근의 여러 단성화산(오름)에서 유래했다는 기존의 연구와 달리 대부분의 용암류가 동거문오름에서 유래하였으며, 구좌·성산 꽃자왈의 북동부 일부분 지대(둔지봉 남쪽부분)는 둔지봉에서 분출한 용암류 내에 분포한다. 안덕꽃자왈은 기존연구에서 제시된 바와 같이 병악오름에서 유래한 용암유역 내에 분포한다. 층서적 관점에서 꽃자왈을 이루는 용암류의 하위에는 고토양이 분포하는데 비해, 용암류의 상부, 즉 꽃자왈 지표에는 토양층이 매우 희박하다. 이러한 꽃자왈의 표면적 특징은 꽃자왈을 이루는 용암류가 고토양층을 덮은 후 용암류 표면에 토양이 퇴적되거나 침전되는 시간이 매우 짧았음을 지시하는 것으로, 꽃자왈을 이루는 용암류가 매우 젊은 용암류임을 의미하는 것이다. 이러한 추론은 구좌·성산꽃자왈(약 9,400년), 조천꽃자왈 중 선혈꽃자왈(약 1.1만년), 안덕꽃자왈(Lee *et al.*, 2014: 약 5,000년)에 있어서 용암류 하위의 고토양층에서 얻은 매우 젊은 방사성탄소연대 결과에 의해 지지된다. 우리는 꽃자왈지대의 특징과 층서관계를 바탕으로 꽃자왈 형성(잔존)의 가장 큰 원인은 ① 용암류의 매우 젊은 연대, ② 그로 인한 토양층의 부재, ③ 지형기복에 있을 것으로 판단한다. 앞으로 꽃자왈을 이루는 용암류를 대상으로 한 직·간접적인 연대측정연구가 보다 활발히 이루어진다면, 용암류의 연대를 보다 명확히 밝힐 수 있을 것이다.

주요어: 제주도, 꽃자왈, 용암류, 아아, 파호이호이, 고토양, 방사성탄소연대

Ung San Ahn, Young Kwan Sohn, Soon Seok Kang, Yong Mun Jeon and Hyeong Sun Choi, 2015, The major causes of Gotjawal formation in Jeju Island. *Journal of the Geological Society of Korea*. v. 51, no. 1, p. 1-19

ABSTRACT: "Gotjawal" is a Jeju dialect for a peculiar natural forest developed upon some lava flows. Gotjawal terrain has been valued for its geological and environmental importance in addition to its biological diversity. There have been, however, few geological studies on the Gotjawal terrain, leading to some controversies regarding the definition and delimitation of the terrain. Previous geological studies have focused on the surface morphology and petrology of the lava flows, although a few recent studies reported that the formation of Gotjawal is not related with the surface morphology or petrology of the lava flows. This study outlines the realms of the Gotjawal lava flows on the basis of field observations of the lavas and an analysis of surface topography and slope gradient using digital elevation models (DEM) in the Gujwa-Seongsan Gotjawal and Andeok Gotjawal in the northeastern and southwestern parts of Jeju Island, respectively. This study also reevaluates the origin of the Gotjawal terrain based on the field relationships of the lava flows. It was found by this study that the lava flows of the Gujwa-Seongsan Gotjawal originated mostly from the Donggeomun oreum except for some lava in the northeastern part of the gotjawal which originated from Dunjibong, in contrast to earlier studies which suggested several monogenetic volcanoes for the sources of the lava flows. Meanwhile, the lava flow of the Andeok Gotjawal is inferred to have originated from the Byeongak oreum, as suggested by earlier studies. It is notable that the Gotjawal lava flows overlie paleosol layers whereas they are mostly devoid of soil at the surface. We interpret that the poor soil development on the surface of the lavas is attributable to short time span since the lava flow emplacement, which

* Corresponding author: +82-55-772-1476, E-mail: yksohn@gnu.ac.kr

was too short for top soil layer to develop. In other words, the Gotjawal-forming lavas are inferred to be very young. This inference is in part supported by the very young radiocarbon ages of the paleosols beneath the Gotjawal-forming lavas: ca. 9,400 yr BP at Gujwa-Seongsan Gotjawal; ca. 11,000 yr BP at Seonheul Gotjawal, a part of Jocheon Gotjawal; ca. 5,000 yr BP at Andeok Gotjawal (Lee *et al.*, 2014). On the basis of the overall characteristics and stratigraphy of the Gotjawal terrain, we infer that three main controls played a role in forming the Gotjawal terrain: ① very young ages of lava flows; ② poor soil development on the young lava flows; ③ topographic relief of the lava flows that can affect the land use by the humans. Further age dating for lavas related to Gotjawal through direct and indirect methods will contribute to understanding more precise age of the lava.

Key words: Jeju Island, Gotjawal, lava flow, aa, pahoehoe, paleosol, radiocarbon dating

(Ung San Ahn and Yong Mun Jeon, World Heritage · Mt. Hallasan Research Institute, Jeju Special Self-Governing Provincial Government, Jeju 690-700, Republic of Korea; Young Kwan Sohn, Department of Earth and Environmental Sciences and Research Institute of Natural Sciences, Gyeongsang National University, Jinju 660-701, Republic of Korea; Soon Seok Kang, Jeju Geological Institute, Jeju 690-813, Republic of Korea; Hyeong Sun Choi, Warm-Temperate · Subtropical Forest Research Center, Korea Forest Research Institute, Jeju 697-050, Republic of Korea)

1. 서 언

제주도의 동부와 서부지역에는 제주어로 ‘곶자왈’이라 부르는 지대가 비교적 넓게 분포한다(Song, 2000) (그림 1). 제주어 사전(Jeju Special Self-Government Province, 2009)에 따르면 곶자왈은 “나무와 덩굴 따위가 마구 엉클어져 수풀같이 어수선하게 된 곳”으로 정의되어 있다. 그러나 비교적 명확한 곶자왈의 정의에도 불구하고 제주특별자치도와 환경단체 등에서 언급하는 곶자왈은 각각 그 영역이 서로 달라 혼돈이 있어 왔다(Park *et al.*, 2014). 제주특별자치도는 광역수리지질도, 항공사진, 인공위성사진, 토지이용현황 등을 분석하여 총 5개 지역, 총 113.3 km² (제주도 전체면적의 약 6.1%)에 해당하는 지역을 곶자왈로 지정 관리하고 있다(Jeju Province, 1997). 이에 반해, 곶자왈공유화재단 등 환경단체는 곶자왈의 지질학적 특성에 대한 연구결과(Song, 2000)를 근거로 ‘암괴상 아아 용암류’가 분포하는 지역을 곶자왈 영역으로 인식하고, 총 4개 권역 10개 지역으로 구분하고 있다(그림 1).

정확한 영역과 성인에 있어 논란이 있는 곶자왈은 과거 쓸모없는 땅으로 여겨졌지만, 1990년대 이래 곶자왈의 개발과 지하수 보전문제가 지역사회의 논쟁거리가 되고, 자연환경 보호에 대한 사회적 관심이 높아지면서 그 인식에 큰 변화가 생기기 시작하였다(Park *et al.*, 2014). 이러한 요구에 따라 곶자왈 형성의 원인과 특징을 밝히기 위한 지질학적 연구가 수행된바 있다(Song, 2000; Song and Yun, 2002;

Jeon *et al.*, 2012; Park *et al.*, 2014).

1990년대 초기 지질학적 연구에서는 곶자왈 지대가 전형적인 암괴상 아아(Aa)의 특징을 보이는 용암지대라는 것에 주목하고, 곶자왈을 이루는 용암류를 “곶자왈 용암”이라고 명명한바 있다(Song, 2000). 하지만 최근 들어 곶자왈이 아아 뿐만 아니라 파호이호이 지대에도 발달한다는 것이 보고되었으며(Jeon *et al.*, 2012), 하나의 곶자왈 지대를 이루는 용암류의 표면적 특징이 아아(aa), 파호이호이(pahoehoe), 전이(transitional)적 특징 등 다양한 형태를 보일 뿐만 아니라, 마그마의 성분과도 특별한 연관성이 없음이 보고되었다(Park *et al.*, 2014). 이러한 일련의 연구 결과는 곶자왈을 형성하는 지배적인 요인에 대해 새로운 관점에서 접근할 필요성이 있음을 의미한다고 할 수 있다. 본 논문은 곶자왈을 이루는 용암류의 특징과 층서적 관계를 바탕으로, 곶자왈 형성(잔존)의 주요 지질학적 요인을 보고하고자 한다.

2. 연구대상 및 방법

2.1 용암유역도 작성

제주도는 신생대 제4기의 현무암질 화산활동으로 형성된 화산섬으로, 지표의 대부분이 용암 및 화산쇄설성 퇴적물로 구성되어 있으며, 이들의 상부에는 비교적 얇은 토양층이 발달해 있다. 특히 곶자왈 지대에는 토양층의 발달이 매우 빈약하다(Song, 2000; Jeon *et al.*, 2012; Park *et al.*, 2014).

우리는 제주도 곶자왈지대 중 북동부의 구좌·성

산 꽃자왈과 남서부의 안덕꽃자왈을 조사하였다. 앞서 언급한 바와 같이 Jeju Province (1997)와 Song (2000)에서 구좌-성산 꽃자왈지대는 그 영역이 서로 크게 다른 긴 하지만, Jeju province (1997)상의 꽃자왈지대는 Song (2000)의 꽃자왈 영역 내에 포함된다. 안덕꽃자왈이 경우 일부 영역을 제외하면 그 범위가 비교적 잘 일치한다(그림 1). Song (2000)은 구좌-성산 꽃자왈이 여러 단성화산(오름)에서 유래한 여러 용암류로 구성된 것으로 보고하고, 공급지가 서로 다른 용암류를 구분하여 4개의 꽃자왈용암류로 보고하였다. 최근 Park *et al.* (2014)은 Jeju Province (1997)에서 꽃자왈지대로 구분한 영역에 대하여 용암의 표면 특징을 조사하고, 구좌-성산 꽃자왈지대는 아아(50.6%)에서 파호이호이(40.8%)에 걸치는 다양한 특징을 보이고, 안덕꽃자왈지대는 전형적인 아아(87.4%)의 특징을 보임을 정량적으로 보고하기도 하였다.

기존 연구에서 조사된 바와 같이 꽃자왈은 용암류를 토대로 형성된 숲으로, 꽃자왈 형성과 용암류는 어떤 점에서 밀접한 연관관계가 있음을 유추할 수 있다. 우리는 야외조사를 통해 꽃자왈을 이루는

용암류의 유역(이하 용암유역)을 파악하고, 용암류 분포와 꽃자왈 분포영역과의 관계, 용암류와 주변 용암류와의 층서적 관계 등을 파악하고자 구좌-성산 꽃자왈 지대의 용암유역도(lava flow map)를 새롭게 작성하였다.

하와이와 같은 현생 화산지역에서는 용암유역도 작성을 위해 화산활동 전후의 항공 및 위성사진 그리고 용암류 표면의 풍화상태 등 다양한 자료를 활용한다(Heliker *et al.*, 2003). 제주도의 경우 항공사진을 활용하여 개개의 분화구에서 흘러나온 용암류들의 대략적인 분포를 파악한 바 있으나(Yun *et al.*, 1987), 화산활동 이후 식생 발달, 농경지 개간, 퇴적 작용 등으로 용암류 분출 당시의 지표특징이 가려지고 지형이 변형된 경우가 많아 용암유역을 명확히 구분하는 것에 상당한 어려움이 있다. 이러한 이유로 화산활동 이후 식생이 우거져 접근이 힘든 외국의 화산지대에서는 SIR-C (레이더 이미지)를 활용한 수치고도모델(Digital Elevation Model) 자료를 토대로 화산지형에 대한 경사분석을 실시하여 용암유역 구분은 물론, 용암류의 물리적 특징을 연구하

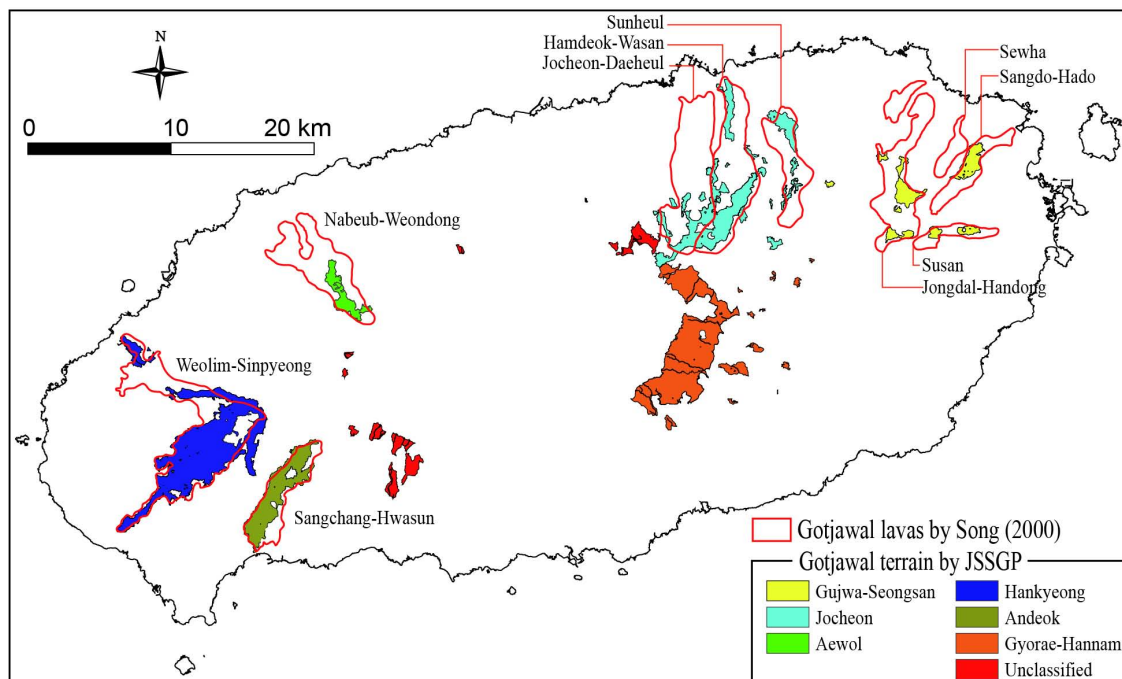


Fig. 1. Distribution of Gotjawal terrains on Jeju Island. Areas outlined by red lines show the Gotjawal areas defined and named by Song (2000). Gotjawal terrains designated by the Jeju Special Self-Governing Province (1997) are represented by colored areas, and are classified after Park *et al.* (2014).

기도 하였다(MacKay *et al.*, 1998).

제주도는 식생발달 및 농경지 개간 등으로 직접적인 용암류 유역 구분에 어려움이 있음을 감안하여, 야외조사에 앞서 수치지형도(1:5000)를 기반으로 수치고도모델을 생성하여 활용하였다. 수치고도모델은 지형에 대한 3D이미지는 물론 지형경사 및 경사방향 등을 가시화할 수 있어 화산활동에 의한 지형적 특징을 손쉽게 찾아낼 수 있다. 이러한 이유로 꽃자왈의 기반을 이루는 용암류의 범위를 작성하는데 유용하다. 더불어 기존 지질도(Won *et al.*, 1993; Park *et al.*, 1998; Park *et al.*, 2000a, 2000b) 및 Song (2000)의 자료를 참조하였다.

단성화산활동에 대한 최근 연구들은 “단성화산”이라는 용어가 가지는 직접적인 의미와 달리, 하나의 단성화산에서 일련의 순차적 화산활동 과정에서 서로 다른 맨틀 기원지에서 서로 다른 부분용융 정도와 분별결정작용, 그리고 정치(storage or emplacement)를 겪은 마그마 패치들이 분출함으로 인해 하나의 단성화산에서 다양한 조성과 분출형태를 보이는 것이 보고되고 있다(Carracedo *et al.*, 1992; Luhr, 2001; Brenna *et al.*, 2010, 2011; McGee *et al.*, 2011; Needham *et al.*, 2011). 이는 제주도 단성화산(오름)들의 화산활동 결과물을 해석함에 있어 화산분출양상 및 마그마 조성의 변화 가능성을 고려해야만 함을 의미한다.

따라서 본 연구에서는 수치고도모델을 활용한 용암류의 지형적 특징, 현생 단성화산활동의 분화 특성, 용암류의 기재적 특징 등을 종합적으로 고려하여 용암유역도를 작성하고 꽃자왈 지대의 용암류 특성과 형성원인에 대하여 연구하였다.

2.2 꽃자왈을 이루는 용암류의 연대측정

Song (2000), Song *et al.* (2007), Park *et al.* (2014)은 꽃자왈 지대가 제주도 화산활동 및 형성과정에서 가장 마지막 단계의 화산활동기 동안 분출한 용암류에 형성되었다고 보고한 바 있다. 이는 꽃자왈의 형성이 용암류의 젊은 연대와 깊은 연관이 있음을 의미하는 것으로 해석할 수 있다.

이번 연구에서는 구좌-성산꽃자왈과 조천꽃자왈 내 선홍꽃자왈을 이루는 용암류의 연대를 추정하기 위하여 이들 용암류 하위의 고토양층에 대한 탄소연대측정을 실시하였다. 이들 두 꽃자왈의 경우, 안덕

꽃자왈의 경우(Lee *et al.*, 2014)와 같이, 꽃자왈을 이루는 용암류 직하부에서 탄소연대측정용 고토양을 채취할 수 있는 노두가 존재하지 않는다. 이러한 이유로 우리는 꽃자왈을 이루는 용암류와 그 주변 용암류들 간의 상호 선후관계를 고려하여 용암류의 연대를 간접적으로 추정하였다. 안덕꽃자왈의 경우 꽃자왈을 이루는 용암류의 직하부 고토양에 대하여 탄소연대 및 광여기루미네선스 연대를 측정한 Lee *et al.* (2014)의 연구결과를 참조하였다.

우리는 먼저 구좌-성산 꽃자왈 연대측정을 위해 다랑쉬오름 분석층의 하위에 분포하는 고토양층(4점)에 대한 탄소연대측정을 실시하였다. 다랑쉬오름 분출시 퇴적된 분석층은 층서상 동거문오름 용암류의 하위에 놓인다(그림 2). 즉 다랑쉬오름 분출 이전에 퇴적된 고토양층의 연대를 측정함으로써 다랑쉬오름 분출 이후에 일어난 동거문오름 화산활동의 시기를 간접적으로 유추하는 것이다.

한편, 선홍꽃자왈의 경우 제주도폭(1:50,000)에서 선홍리 현무암질안산암으로 기재된 용암유역 내에 분포하는데(Park *et al.* 1998), 이 용암유역은 함덕리에서 월정리까지 넓은 범위에 분포한다. 우리는 이 용암유역의 서쪽 가장자리에 해당하는 함덕리(1점)와 동쪽 가장자리에 해당하는 월정리(2점)에 위치한 저류지 절개지에서 고토양층을 채취하여 탄소연대측정을 실시하였다. Park *et al.* (1998)에서 선홍리 현무암질안산암으로 기재된 영역이 하나의 화산에서 유래한 용암류로 이루어졌다고 볼 수는 없을 것이다. 하지만, 기존연구(Park *et al.*, 1998)에서 하나의 용암류 단위로 기재된 용암류 하위에 분포하는 고토양층에 대한 방사성탄소연대 측정을 통해 선홍리 현무암질안산암을 이루는 용암류들의 생성시기를 대략적으로 추정할 수는 있을 것이다. 이들 두 지역의 고토양층에 대한 방사성 탄소연대측정은 각각 한국 지질자원연구원과 서울대학교 기초과학공동기기원에서 가속기 질량분석기(AMS)를 활용하여 측정되었다.

3. 연구결과

3.1 구좌-성산 꽃자왈

구좌-성산 꽃자왈 지대에 대하여 수치고도모델을 이용한 음영기복도 및 경사분석도, 야외 암상비

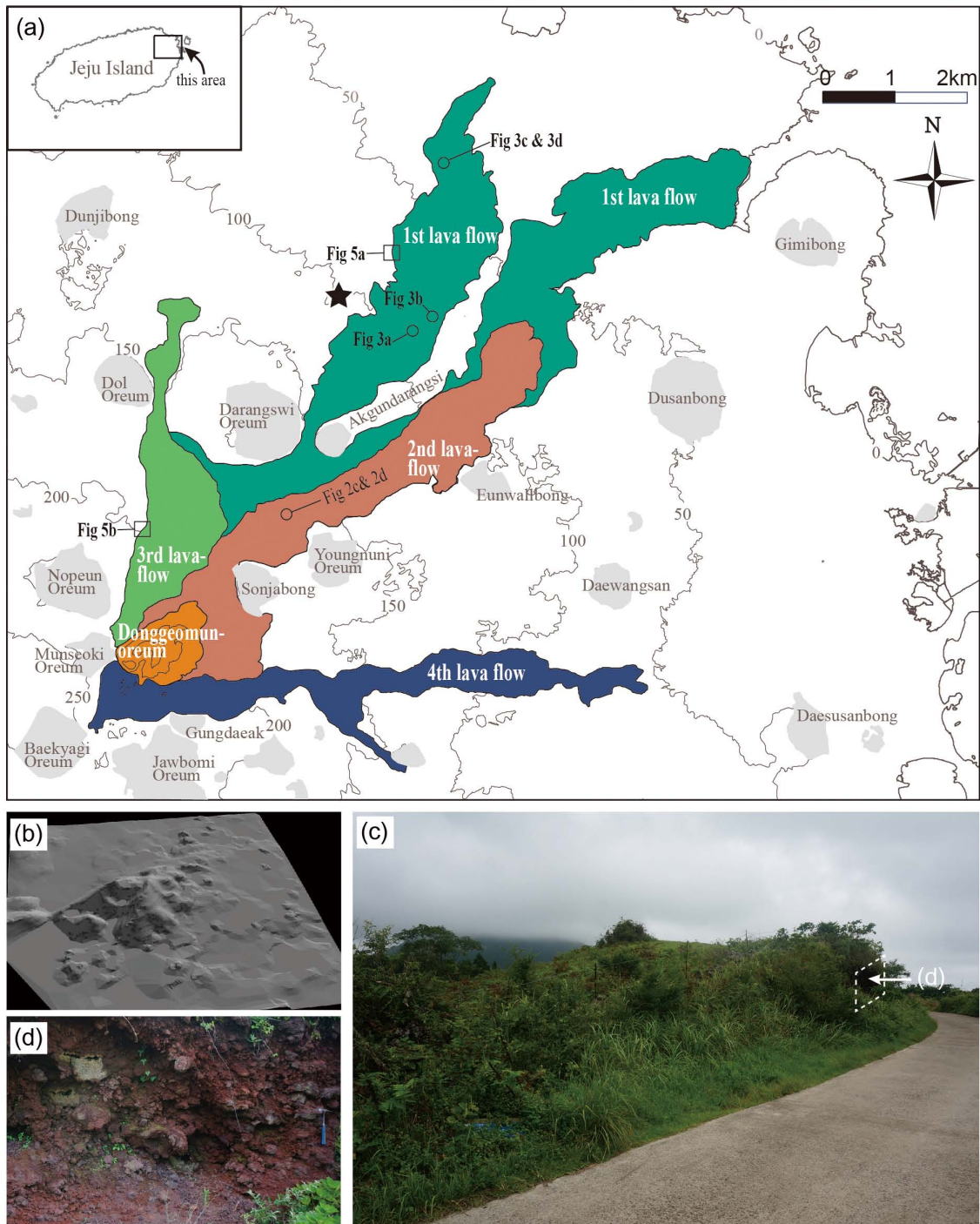


Fig. 2. a) Distribution of the lava flows constituting the Gujwa-Seongsan Gotjawal, which originated from the Donggeomun Oreum scoria cone. Characteristics of four sequential lava flows are briefly described in Table 1. A black star is the location of the sample for carbon isotope age dating for Darangswi Oreum, which predates Donggeomun Oreum. b) Digital elevation model of Donggeomun Oreum characterized by irregular morphology instead of typical volcanic cone morphology. c) Elongated scoria mound produced by lava-rafting of scoria. d) Outcrop of dissected scoria mound.

Table 1. Types and Source of lava flows related to Gujwa-Seongsan Gotjawal.

	Song (2000)			This study		
	Lava flow	Lava type	Source	Lava flow	Lava type	Source
Gujwa-Seongsan Gotjawal	Jongdal-Handong Gotjawal lava	Aa	Donggeomun Oreum	1 st &3 rd lava	Pah	Donggeomun Oreum
	Sewha Gotjawal lava	Aa	Darangswi Oreum	1 st lava	Pah ≈ Tr ≈ Aa	
	Sangdo-Hado Gotjawal lava	Aa	Yongnuni Oreum	1 st ~ 2 nd lava	mainly Aa with partly Pah	
	Susan Gotjawal lava	Aa	Baekyagi Oreum	4 th lava	mainly Aa with partly Tr and Pah	

Pah : Pahohoe, Tr : Transition

교를 통해 작성한 용암유역(lava flow area)은 그림 2와 같다. 구좌-성산 꽃자왈의 토대가 되는 용암류는 동거문오름 분석구에서 유래하였으며, 크게 네 번의 순차적 용암류가 분출된 것으로 파악된다. 첫 번째 용암류는 동거문오름으로부터 북쪽 및 북동쪽으로 흘러, Song (2000)에 의해 기재된 종달-한동꽃자왈의 일부 지역, 상도-하도 꽃자왈, 세화꽃자왈 지역 내에 분포하고 있다. 이 용암류는 야외 노두에서 0.2~1 mm 크기의 감람석 반정이 잘 관찰되며, 기질부에는 아주 드물게 미정질의 침상 사장석이 관찰된다. 용암류 표면부의 기공은 직경이 2~15 mm로 대체로 둥글거나 약하게 신장된 특징을 보인다. 이 용암류의 중하류 구간에서는 하위에 놓이는 전형적인 침상장석감람석현무암(AFOB)과 쉽게 구분된다. 두 번째 용암류는 첫 번째 용암류가 흐른 세 갈래의 흐름 중 상도-하도 방향을 따라 멀세운동산까지 흘렀다. 야외 노두에서 첫 번째 용암류와 달리 감람석 미반정이 육안으로 잘 관찰되지 않으며, 0.2 mm 크기의 미정질의 침상 사장석이 드물게 관찰되며, 1~2 mm 크기의 휘석반정이 아주 드물게 관찰된다. 대체로 용암류의 표면에서 관찰되는 기공들은 첫 번째 용암류에 비해 크기가 작고(2~5 mm) 신장된 형태를 띠며, 그 밀도가 더 높다. 본 용암류의 남동쪽에서 층서상 하위에 놓이는 용눈이오름 용암류는 1~2 mm의 감람석 반정이 다수 관찰되어 야외에서 두 용암류가 쉽게 구분된다. 세 번째 용암류는 동거문오름의 남서부에서 분출하여 북쪽으로 흘러 지금의 종달-한동꽃자왈 지역과 비자림 부근까지 분포하는데, 야외에서 첫 번째 용암류와 암석 기재적 특징이 유사하다. 네 번째 용암류는 현재

동거문오름 분석구의 트여진 방향 즉, 남쪽으로 흘렀으나 좌보미오름과 관련된 용암 및 스코리아 뗏목(scoria raft)에 막혀 방향을 바꿔 동쪽으로 흘러갔다. 이 용암류는 용눈이오름, 손자봉, 궁대악 등과 같은 인근 단성화산 및 용암류에 의해 형성된 오목한 지형, 즉 지형적으로 낮은 곳을 따라 흘러가면서 좁고 긴 용암유역을 형성한 것으로 여겨진다(그림 2a의 네 번째 용암류). 동거문오름이 원추에 가까운 콘의 형태가 아닌 매우 불규칙한 형태를 가지게 된 원인 또한 여러 단계에 걸친 순차적 화산활동을 지시하는 증거가 된다(그림 2b). 이 용암류는 야외 노두에서 두 번째 용암류와 암석 기재적 특징이 유사하나, 침상 사장석 미반정이 0.2~0.5 mm로 좀 더 크고, 2~3 mm 크기의 휘석결정 및 5 mm 크기의 백색 외래암편이 간혹 관찰된다. 이 용암류는 북쪽으로 감람석 반정이 뚜렷이 관찰되는 용눈이오름 용암류와 접한다.

앞에서 살펴본 네 차례 순차적 용암류의 표면적 특징을 각각 살펴보면, 첫 번째 용암류는 동거문오름 가까운 곳에서는 대체로 파호이호이가 우세하나, 세화꽃자왈을 이루는 용암류의 중심축에서 외곽부 가장자리로 가면서 그리고 상도-하도 꽃자왈을 이루는 용암류의 하류구간으로 가면서 전이적 특징 및 아아의 특징을 보인다(그림 3; 표 1). 두 번째 용암류는 아아의 특징이 우세하며, 용암류 상류구간에는 용암분출 및 용암의 흐름과정에서 떠내려 온 스코리아 뗏목이 여러 개의 스코리아 언덕지형을 이루고 있다(Valentine *et al.*, 2007; Riggs and Duffield, 2008; Németh *et al.*, 2011) (그림 2c, 2d). 세 번째 용암류는 동거문오름의 북쪽에 평탄한 대지를 이루는

용암류로 전형적인 파호이호이의 특징을 보인다. 네 번째 용암류는 공급지로부터 멀어지면서, 그리고 용

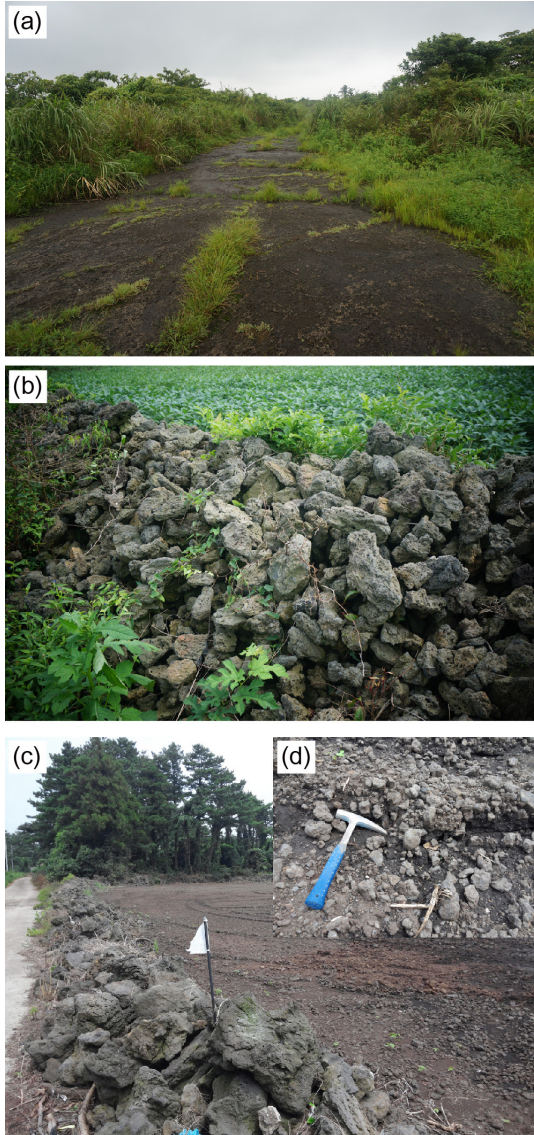


Fig. 3. Various surface features on the 1st lava flow unit from Donggeomun Oreum. Locations of the photos are shown in Figure 2a. The western branch of the bifurcating 1st lava flow was regarded as Sehwa Gotjawal by Song (2000), but was not designated as a Gotjawal terrain by Jeju Special Self-Governing Province (1997). a) Pahoehoe lava having smooth, billowy, and ropy crust. b) Crustal feature transitional between slabby pahoehoe lava and scoriaceous-spinose aa lava. c) Cultivated farmland above an Aa lava field, partially preserving rough, brecciated clinker surface at the distal lava flow margin. d) Exposed clinker on the cultivated farmland.

암류의 중심부에서 가장자리로 가면서 대체로 파호이호이에서 전이용암을 거쳐, 아아로 표면특징이 변화해가는 양상을 보인다(Lipman and Banks, 1987; Wolfe *et al.*, 1988; Hon *et al.*, 2003).

토지이용등급도(Jeju Province, 1997) 상에는 구좌-성산꽃자왈의 북서쪽에 위치한 둔지봉의 남쪽 지역 일부도 꽃자왈 지대로 지정되어 있다. 이 꽃자왈 지대는 3D지형이미지 및 경사분석도, 암상 등을 볼 때(그림 4), 동거문오름 용암류와 별개로 둔지봉에서 유래한 용암류 상에 분포하는 것으로 판단된다. 둔지봉은 남쪽으로 트인 말굽형 분석구로 분석구에서 가까운 부분에는 스코리아 퇴적층이 지표를 덮고 있다. 분석구의 남쪽방향 인근 영역에는 비교적 넓은 지역에 걸쳐 스코리아가 불규칙한 언덕을 이루고 있는데, 이러한 특징은 동거문오름의 북동쪽 및 남쪽 부분과 유사하다. 말굽형 둔지봉의 트인 방향은 한라산 순상체의 전체적 지형경사 방향과 반대 또는 사교하는 방향이다. 이러한 이유로 둔지봉 분화구가 터진 곳으로 흘러나온 용암은 남쪽으로 약 1.5 km를 흘러가다 북동쪽으로 우회하여 흘러간 것으로 해석된다. 둔지봉으로부터 남쪽으로 흘러간 용암류는 돌오름 및 한라산 순상체의 완만한 지형적 장애물에 영향을 받아 그 선단부에서 지형경사가 비교적 급하다(그림 4b). Jeju province (1997)는 현재 이 영역만을 꽃자왈지대로 구분하고 있는데 비해(그림 4b), Song (2000)은 둔지봉용암류 영역을 꽃자왈로 구분하고 종달-한동꽃자왈의 일부분으로 표기하고 있다(그림 1).

한편, 구좌-성산 꽃자왈지대를 이루는 용암류와 꽃자왈이 아닌 인접 지역의 지표 특징은 명확히 구분된다. 그림 5는 구좌-성산 꽃자왈 지대와 그 인근의 비꽃자왈 지대와의 관계를 보여준다. 꽃자왈 지대에는 토양이 거의 발달하지 않는데 비해 비꽃자왈 지대는 토양이 비교적 잘 발달되어 대부분 농지로 이용되고 있다(그림 5). 그림 5b 지점에서는 층서상 용암류 아래에 놓이는 스코리아층이 농지로 사용되고 있으며, 스코리아층을 덮고 있는 얇은 용암층은 농지확장을 위해 제거되기도 하였다. 이러한 야외층서관계는 꽃자왈을 이루는 용암류가 토양층(혹은 스코리아층) 퇴적 이후에 발생한 화산활동의 결과로, 층서상 하위에 놓이는 보다 오래된 토양층을 덮고 있음을 보여주는 것이다(그림 5a).

3.2 안덕곶자왈

야외 노두에서 안덕곶자왈의 기반을 이루는 용암류는 회색을 띠며, 1~2 mm의 감람석 반정 및 2~4 mm 크기의 휘석 반정을 약 1% 가량 함유한 치밀질 암석이다. 이 용암류의 북서부로는 세립 감람석 현무

암, 사장석 풍부 조면현무암, 침상장석감람석 현무암 등과 접하고, 남동부에는 감람석 현무암, 사장석 풍부 조면안산암, 치밀질 조면암 등의 암상과 접하고 있어 비교적 쉽게 야외에서 용암류의 경계가 구분된다. 그 결과, 기존 지질도(Park *et al.*, 2000b), 곶자왈 분포도

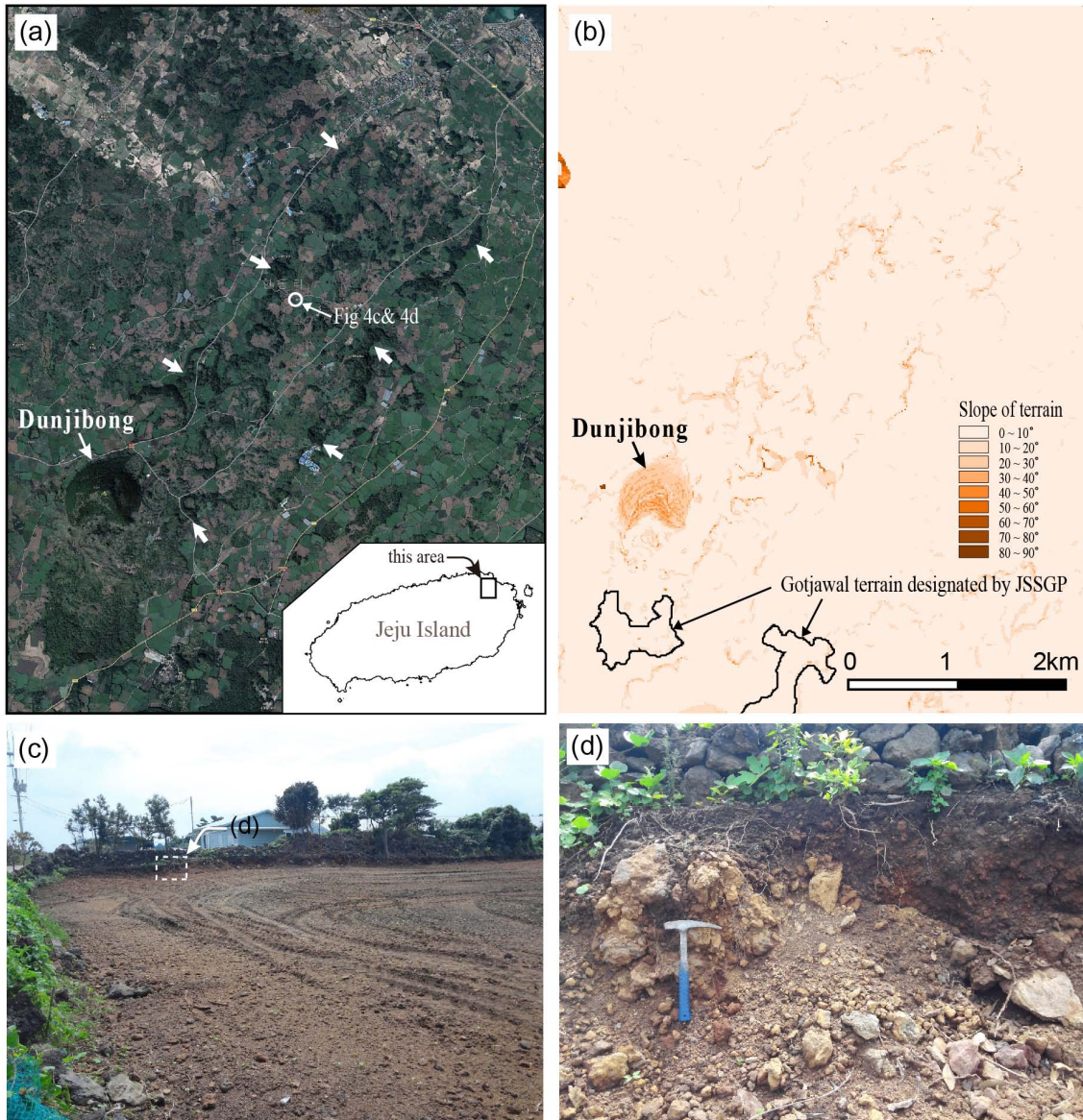


Fig. 4. a) An areal view of Dunjibong scoria cone and lava flow which originated from the cone. The edge of the lava flow is easily recognized by thick forest (white arrows). This area of Dunjibong lava flow is not included in the Gotjawal terrain by Jeju Special Self-Governing Province (1997), but Song (2000) regarded it as a part of the Jongdal-Handong Gotjawal. b) The lava flow margin with thick forest has steep slope compared with the surrounding area or the upper surface of the lava flow. c) Cultivated clinkery upper surface of the Dunjibong lava flow. d) Scoriaceous clinker exposed on the border of a recently cultivated farmland.

(Song, 2000), 그리고 수치고도모델을 비교할 때, 안덕꽃자왈 영역은 병악오름에서 분출한 용암류(이하 병악용암류)의 영역과 비교적 잘 일치하며(Song, 2000), 꽃자왈 영역과 비꽃자왈 영역이 명확히 구분된다(그림 6a). 안덕꽃자왈의 토대를 이루는 병악용암류는 용암류의 상·하부에 클링커층이 잘 발달한 전형적인 아아의 특징을 보인다(Song, 2000; Park *et al.*, 2014). 안덕꽃자왈 내에는 현재 2개의 채석장이 있어, 병악용암류의 특징과 층서를 잘 관찰할 수 있다. 병악오름에서 1.4 km의 거리에 위치한 채석장 단면에서 꽃자왈의 토대를 이루는 병악용암류의 두께는 1.5~4 m인데 비해, 4.6 km의 거리에 위치한 채석

장에서는 약 20 m로 그 두께가 더 두꺼워진다. 또한 화산체에서 멀어 질수록, 즉 용암류가 공급지로부터 더 멀리 흘러갈수록 클링커층이 더 두껍게 발달한다(그림 6b, 6c). 특히, 이 용암류의 상부에는 용암류의 흐름에 의해 자가파쇄(*autobrecciation*)로 형성된 클링커층이 발달하는데 클링커층의 상위에는 토양층이 거의 발달하지 않았다(그림 6d). 그러나 이 용암류의 하부에는 적갈색 혹은 적색의 고토양층이 약 0.5~1 m 두께로 분포한다(그림 6b, 6c). 이는 구좌·성산 꽃자왈 지대에서 용암류의 하부에 고토양층(스코리아층)이 놓이는 특징과 유사하다. 즉 꽃자왈을 형성한 용암류 상부에는 토양층이 거의 없거나 빈약하고, 용암류의 하부에는 퇴적층(고토양 혹은 스코리아층 등)이 연속적으로 잘 발달하는 공통점을 인지 할 수 있다.

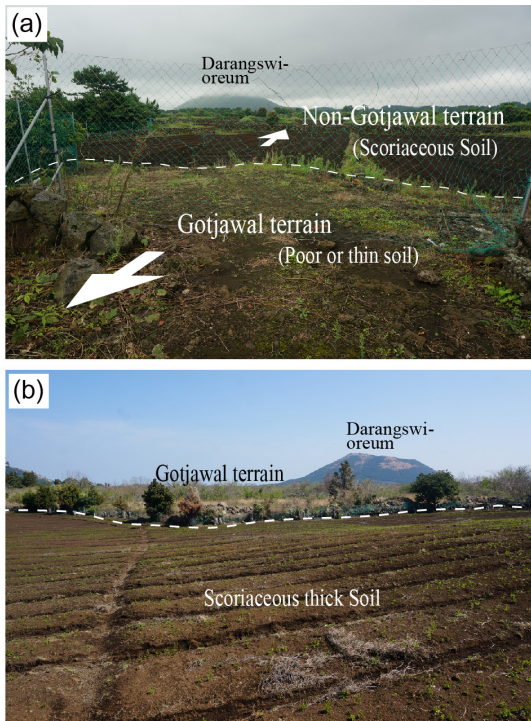


Fig. 5. a) Photograph of the border of the Sewha Gotjawal, as defined by Song (2000). Jeju Self-Governing province did not include this area in the Gotjawal terrain. Gotjawal terrain with poor soil development is distinguished from the non-Gotjawal terrain with thick soil. Poor or thin soil on Gotjawal terrain makes it inappropriate for cultivation. b) The Gotjawal-forming lava overlies a scoriaceous soil. Thin marginal part of the lava was artificially removed to expand the agricultural land. Both Song (2000) and Jeju Special Self-Governing province (1997) regarded this site as Gotjawal. Locations of the photographs are shown in Fig. 2a.

3.3 연대측정 결과

다랑쉬오름 북동쪽에 넓게 분포하는 다랑쉬오름 분석층 하부에서 채취한 고토양에 대한 탄소연대측정 결과, 분석층 직하부의 고토양층에서 $9,400 \pm 120$ Cal. yr BP와 $9,500 \pm 60$ Cal. yr BP, 고토양층 내 80 cm 깊이 부근에서 $17,915 \pm 215$ Cal. yr BP의 연대를 얻었다. 고토양층의 최하부(180~185 cm 깊이)에서는 탄소함량의 부족으로 연대를 얻지 못하였다(그림 7; 표 2).

조천꽃자왈 내 선흘꽃자왈 북쪽에 위치한 저류지 절개면상에서 선흘리 현무암질안산암 하부에 놓이는 고토양에 대해서 $11,150 \pm 90$ Cal. yr BP, 그리고 월정리 저류지에서 채취된 고토양에서는 $11,250 \pm 200$ Cal. yr BP와 $11,290 \pm 120$ Cal. yr BP의 연대를 얻었다(그림 8; 표 3).

4. 토 의

본 연구에서는 제주도 꽃자왈 중 구좌·성산 꽃자왈, 안덕꽃자왈 지대에 대해 용암유역, 용암유역 내 꽃자왈지대의 분포, 용암류의 유형, 용암류 연대 등을 조사하였다. 조사결과를 바탕으로 꽃자왈을 이루는 용암류의 특징을 화산학적·층서적 관점에서 해석하고, 이를 근거로 꽃자왈 형성의 주요 원인들에 대하여 살펴보았다.

4.1 용암류의 표면적 특징 : 아아와 파호이호이

1990년대 지질학적 관점에서 제주도 꽃자왈을 연

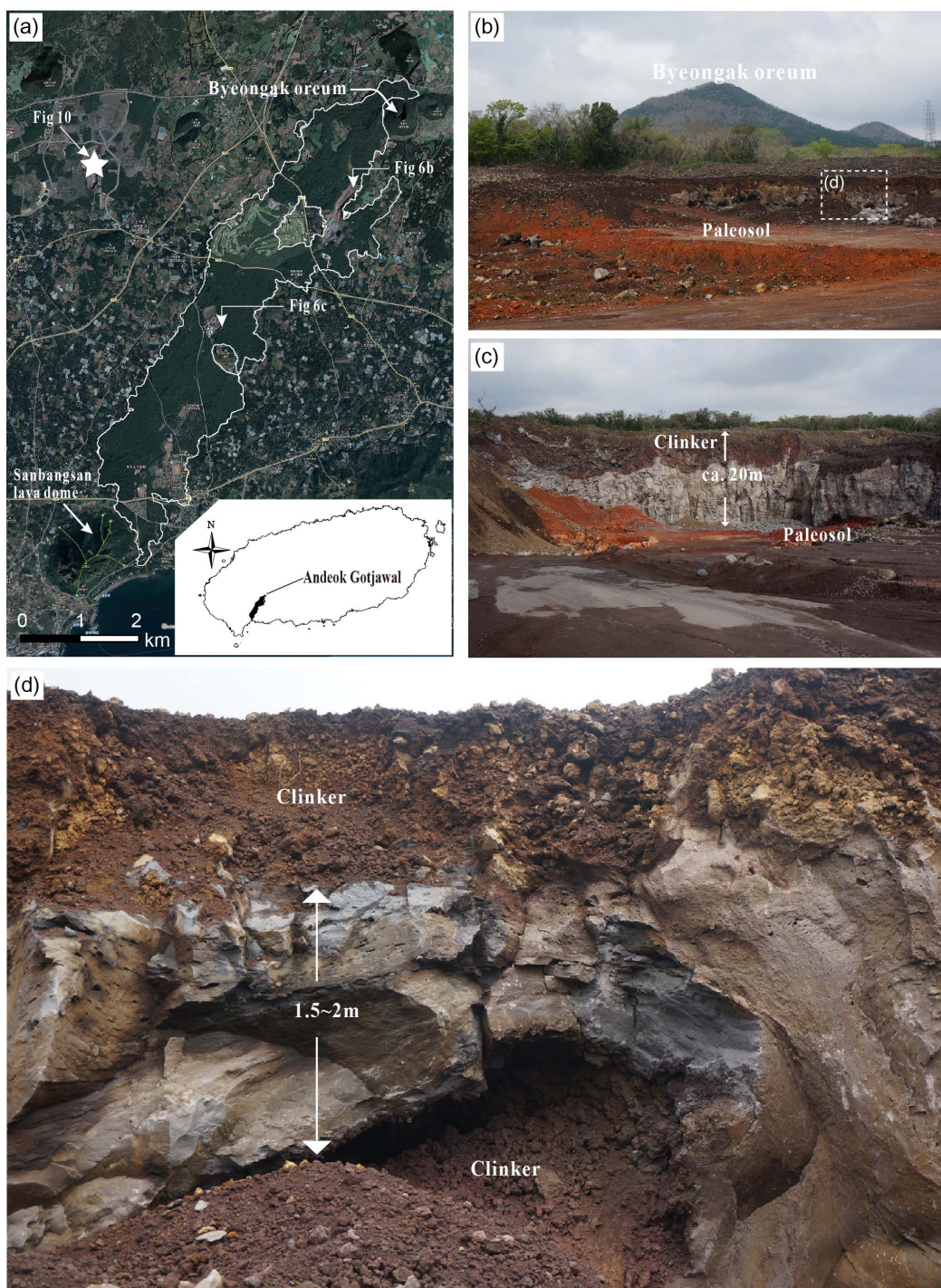


Fig. 6. a) An areal view of the Andeok Gotjawal. White lines indicate the boundary of the Gotjawal terrain designated by Jeju Special Self-Governing Province (1997). A white star is the location of quarry on the photo of Fig. 10. b) Overview of dissected lava flows in a quarry, 1.4 km away from the source vent of the Byeongak Oreum scoria cone. c) Overview of deeply dissected lava flows in another quarry, 4.6 km away from Byeongak Oreum. These two outcrops show reddish paleosol beneath the Gotjawal-forming lava flows. d) Close-up of the upper portion of clinkery lava with poor soil development.

Table 2. AMS radiocarbon data for paleosol underlying scoria deposit from Darangswi Oreum which predates the Donggeomun Oreum related with Gujwa-Seongsan Gotjawal.

Location	Latitude	Longitude	sample code	$\delta^{13}\text{C}$ (‰)	^{14}C age yr BP	Calibrated age (2 σ range) Cal yr BP
Spot 1	N33° 29' 33.4"	E126° 49' 59.2"	294-1 (0-5 cm)	-13.1	8,350±50	9,500±60
Spot 2	N33° 29' 33.1"	E126° 49' 58.6"	294 (0-5 cm)	-17.2	8,390±50	9,400±120
Spot 2	N33° 29' 33.1"	E126° 49' 58.6"	294 (80-90 cm)	-17	14,730±70	17,915±215
Spot 2	N33° 29' 33.1"	E126° 49' 58.6"	294 (180-185 cm)	-	ND	ND

The ^{14}C age is determined by accelerator mass spectrometer at the Korea institute of geoscience and mineral resources in Daejeon, South Korea. ND means no age data by low carbon content.

Table 3. AMS radiocarbon data for paleosol underlying the lava related with Seonheul Gotjawal.

Location	Latitude	Longitude	sample code	$\delta^{13}\text{C}$ (‰)	^{14}C age yr BP	Calibrated age (2 σ range) Cal yr BP
Spot 1	N33° 31' 54.88"	E126° 41' 23.34"	1205-01	-21.98	9,690±70	11,150±90
Spot 2	N33° 39' 25.70"	E126° 47' 06.8"	1401-02	-20.73	9,810±70	11,250±200
Spot 2	N33° 39' 25.70"	E126° 47' 06.8"	1401-03	-17.56	9,860±60	11,290±120

The ^{14}C age is determined by accelerator mass spectrometer at the Seoul National University National Center for Inter-University Research Facilities in Seoul, South Korea.

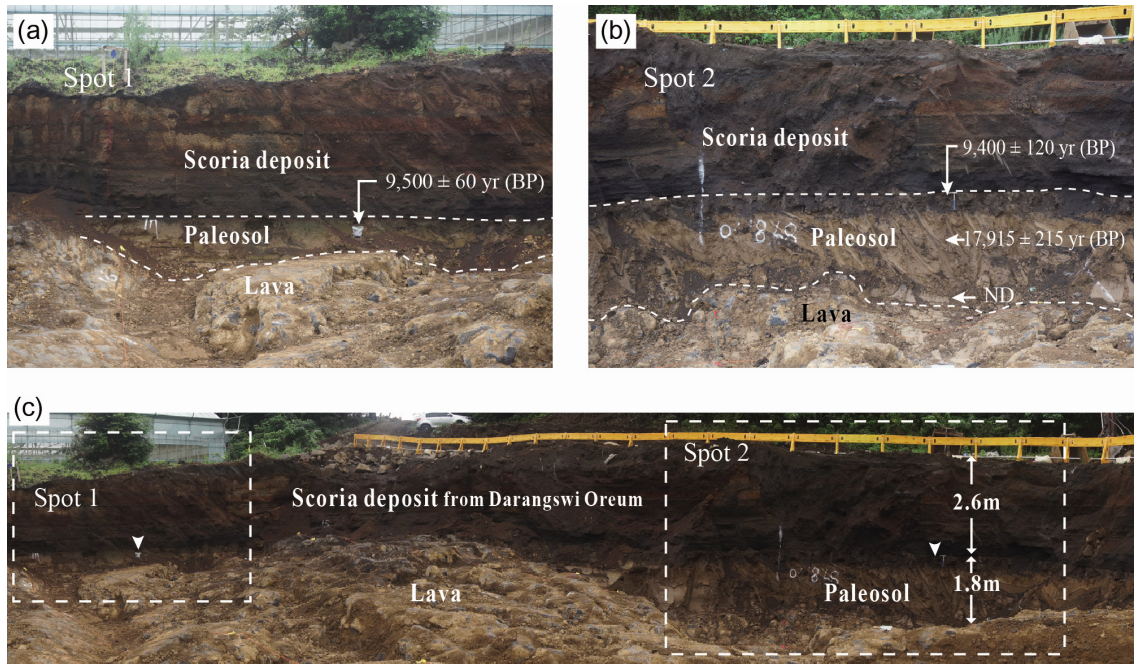


Fig. 7. Outcrop features of the radiocarbon-dated paleosol beneath the scoria deposit, which originated from the Darangswi Oreum. Results of age dating are shown in Table 2. The location of sampling is marked with black star in Fig. 2.

구하기 시작한 이후 약 20여 년간 꽃자왈은 아아의 특징을 가지는 용암류와 관련이 있는 것으로 믿어져

왔다(Song, 2000). 하지만 최근 꽃자왈을 이루는 용암이 아아(Aa)뿐만 아니라 파호이호이(Pahoehoe) 분포지에서도 나타난다는 연구결과들이 보고된 바 있다(Jeon *et al.*, 2012; Park *et al.*, 2014). 이해를 돕기 위해서 간략히 “아아”와 “파호이호이”의 어원과 그 특징에 관하여 간략히 소개한다.

흔히 현무암질 용암류의 표면적 특징을 표현하는 용어로 ‘파호이호이’와 ‘아아’라는 용어가 널리 쓰이고 있다(Hazlett and Hyndman, 1996; Hon *et al.*, 2003). ‘파호이호이’는 용암의 표면이 밋밋하고, 표면에 밧줄구조가 흔히 발달하며 지형적으로 작고 완만한 언덕들이 잘 발달하는 특징을 가지는데 비해, ‘아아’는 용암층의 상·하부에 까칠까칠하고 각진 형태를 가지는 자가파쇄 각력, 즉 클링커(clinker)가 발달한다(Hazlett and Hyndman, 1996). 원래 이들 용어는 하와이 원주민들이 사용하던 하와이어로, Dana (1849)에 의해 과학 서적에 소개된 이후 오늘날과 같이 현무암질 용암의 표면적 특징을 기재하는 보편적인 용어로 사용되고 있다(Wright and Takahashi, 1989, 1998). 최초 서적에 소개한 학자나 하와이 원주민들은 ‘파호이호이’, ‘아아’와 같은 용어를 이미 식어서 암석화된 용암지대의 특징을 묘사하는 용어로 사용하였다. 하지만 시간이 지나면서 이들 용어가 현생 화산활동지대에서 흘러가고 있는 용암류를 기재하는 용어로도 확대되어 사용되면서 용어의 의미와 정의가 복잡해지게 되었다. 이러한 이유로 최근 하와이 화산활동과 용암류의 흐름을 연구한 학자들은 ‘파호이호이’, ‘아아’라는 용어는 이미 굳어진 암석을 기술하는 것에만 국한하여 사용하고, 흘러가는 용암이나 식어가고 있는 용암을 기술하기 위해서는 ‘아아 용암류’(aa flow)와 ‘파호이호이 용암류’(pahoehoe flow)라는 용어를 사용할 것을 제안하기도 하였다. 특히 용암채널(lava channel)의 흐름특징을 기재하는 용어로는 이들 용어를 사용하지 말 것을 제안하기도 하였다. 왜냐하면 용암채널을 따라 흘러가는 용암은 여러 조건에 따라 최종적으로 ‘아아’가 되기도 하고 ‘파호이호이’가 되기도 하기 때문이다(Hon *et al.*, 2003).

현생화산지대에서의 연구에 따르면 하나의 단성화산에서 순차적으로 분출(eruption) 혹은 분천(effusion)한 용암류는 ‘아아’를 형성하기도 하고 ‘파호이호이’를 형성하기도 한다(Swanson, 1973; Holcomb, 1976;

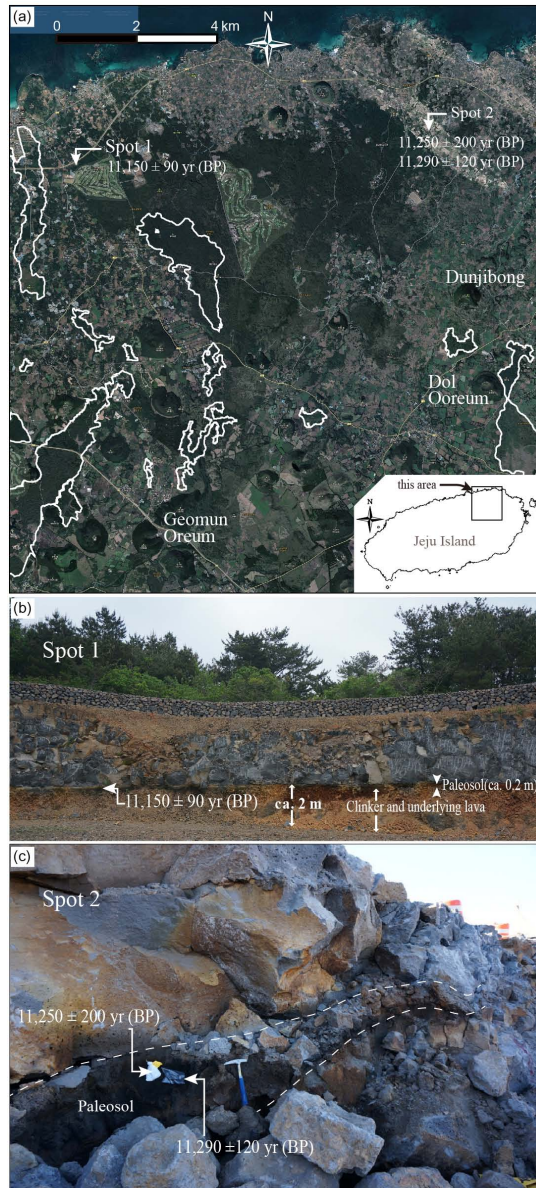


Fig. 8. Locations and outcrop features of the paleosol beneath the to Seonheul Gotjawal lava, where three radiocarbon ages were obtained. The area of the lava flows including Seonheul Gotjawal was named and shown on the geological map as Seonheul-ri basaltic andesite by Park *et al.* (1998). Results of dating are shown in Table 3. White-lined areas represent Gotjawal terrains designated by Jeju Special Self-Governing Province (1997).

Geological Survey (US) and Holcomb, 1980; Heliker and Mattox, 2003). 아아 혹은 파호이호이와 같은 용암류의 형태적인 특징에 영향을 미치는 요인으로는 용암의 온도, 가스함량, 결정화정도, 분출률과 분출 지속시간, 그리고 용암이 흘러가는 지형경사 등을 들 수 있다(Peterson and Tilling, 1980; Lipman and Banks, 1987; Rowland and Walker, 1990; Cashman *et al.*, 1999). ‘아아’는 비교적 짧은 시간에 많은 양의 용암이 분출처럼 뿜어져 나올 때 주변 공기에 의해 비교적 많이 식고, 마그마가 가진 가스를 크게 잃어버려, 결과적으로 가스를 적게 가진 상대적으로 낮은 온도의 용암이 흘러가면서 형성된다. 특히 이러한 용암이 경사가 급한 곳을 흘러갈 때 전단변형이 크게 일어나 아아의 특징이 나타난다(Peterson and Tilling, 1980; Rowland and Walker, 1990; Cashman *et al.*, 1999). 이에 비해 ‘파호이호이’는 상대적으로 적은 양이지만 오랜 시간에 걸쳐 꾸준히 분류(effusion)하는 경우 완만한 지형을 천천히 흘러가면서 넓은 용암대지를 이룬다(Mattox *et al.*, 1993; Hon *et al.*, 1994; Garcia *et al.*, 1998; Kauahikaua *et al.*, 1998). 비교적 적은 양의 용암이 지속적으로 분출하여 흘러가면서 형성되는 파호이호이 용암류에는 큰 규모의 전형적인 용암동굴이 흔히 형성되는 것으로 알려져 있다(Greeley, 1987;

Kauahikaua *et al.*, 1998)). 뿐만 아니라 하나의 공급지에서 유래한 한 갈래의 용암류에서도 화구로부터 멀어짐에 따라 파호이호이, 전이형, 아아로 순차적으로 관찰되거나(Lipman and Banks, 1987; Wolfe *et al.*, 1988; Cashman *et al.*, 1999; Polacci *et al.*, 1999), 아아의 특징을 가지던 용암류가 경사가 완만한 곳에 이르러 파호이호이의 형태를 띠기도 한다(Hon *et al.*, 2003).

이번 연구에서 구좌-성산 곳자왓은 동거문오름에서 순차적으로 분출한 용암류가 파호이호이, 전이적 특징, 아아의 특징을 모두 보이는 것으로 조사되었다. 더불어 각각의 순차적으로 분출한 용암류 상에는 아아, 파호이호이에 관계없이 곳자왓이 형성되어 있음이 확인되었다. 이러한 결과는 아아 혹은 파호이호이와 같은 현무암질 용암의 표면적 특징은 용암류의 조성, 물리적 특성, 분출양상, 지형경사 등과 같은 요인에 의해 결정되는 표면적인 현상으로, 곳자왓의 형성을 결정짓는 결정적인 요인이 아님을 의미한다.

4.2 곳자왓 형성의 주요 원인

우리는 곳자왓지대의 특징과 층서적 관계를 검토한 결과 곳자왓의 형성(잔존)의 가장 큰 요인이 ① 용암류의 매우 젊은 연대, ② 그로 인한 토양층 부재,

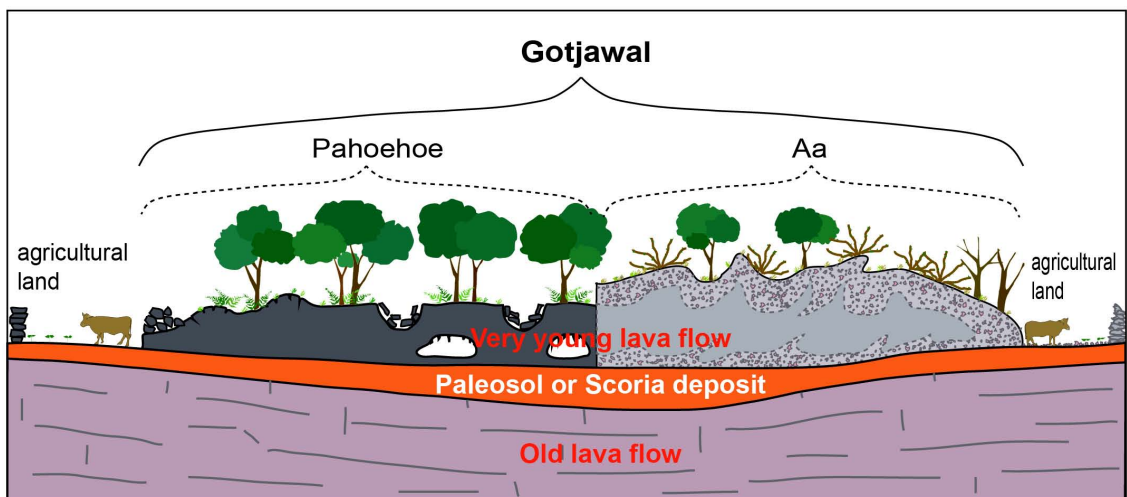


Fig. 9. A cartoon illustrating the development of the Gotjawal terrain, which is inferred to develop and be preserved on very young lava flows, irrespective of the surface features of either pahoehoe or aa lavas. The Gotjawal-forming lava flows have thin soils or lack soils on the surface, thereby making the lava field useless for agriculture. On the other hand, old lava flows with thick soil covers may have been preferentially cultivated for farming.

③ 지형기복이라 판단한다(그림 9).

4.2.1 용암류의 매우 젊은 연대(꽃자왈을 이루는 용암류의 연대)

Park *et al.* (2014)은 꽃자왈의 기반을 이루는 용암류들에 대한 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 연대측정으로 약 11만 5천년~약 2만 6천년의 연대를 보고하였다. 그런가 하면, Lee *et al.* (2014)은 제주도 남서부의 안덕꽃자왈 내 용암층 하부 고토양층에 대해 탄소연대측정과 광여기루미네선스 연대측정을 통해 각각 2,250~7,410 Cal. yr BP와 $4,600 \pm 300$ yr BP의 매우 젊은 연대를 보고하기도 하였다.

이번 연구에서 동거문오름 분석층 직하부의 고토양층에서 얻은 탄소연대(약 9400 yr BP)는 동거문오름 화산활동 이전에 분출한 다랑쉬오름의 분출연대가 적어도 약 9400 yr BP 이후 일어났음을 지시한다. 이는 야외층서 관계에서 다랑쉬오름 용암류 및 분석층 상위에 놓이는 동거문오름 용암류(구좌-성산 꽃자왈의 기반이 되는 용암류)가 적어도 9400 yr BP보다 젊다는 것을 지시한다. 또한, 선흘꽃자왈이 위치하는 선흘리 현무암질안산암의 직하부 고토양층에서 얻은 약 11,000 yr BP 연대 또한 선흘리 현무암질안산암이 약 1.1만년 이내의 매우 젊은 용암류임을 지시한다. 비록 퇴적층에서의 탄소연대측정에 있어 탄소성분의 재동형상은 퇴적시기보다 오랜 연대치를 나타내거나(Weaver, 1991; Eglinton *et al.*, 1997; Newnham *et al.*, 2004), 탄소성분이 퇴적층을 침투

해 아래로 스며들거나, 후기의 식물 뿌리에 의해 보다 젊은 연대를 보이는 현상이 보고된 바도 있다(Vandergoes and Prior, 2003; Newnham *et al.*, 2007). 하지만 최근 Lee *et al.* (2014)에서의 안덕꽃자왈의 고토양층에서의 연구결과는 층서적으로 동일한 층준에 해당하는 인접한 두 지점의 고토양층을 대상으로 수직적으로 연속적으로 연대측정을 실시했을 뿐만 아니라, 직경 1~2 cm (최대 10 cm) 크기의 목탄편들에 대한 연대측정결과와 광여기루미네선스 연대측정 결과가 비교적 잘 일치하는 양상을 보여 고토양에서의 탄소연대측정이 비교적 신뢰할 만한 결과라 여겨진다.

이상의 연대측정 결과들은 구좌-성산꽃자왈, 안덕꽃자왈, 선흘꽃자왈 등과 같은 제주도의 꽃자왈을 형성한 용암류가 지금까지 알려진 것보다 훨씬 젊은 용암류임을 지시하는 것이다.

4.2.2 빈약한 토양층

꽃자왈에 대한 그간의 연구에서 꽃자왈의 정의에 있어 공통점을 찾아보면, 꽃자왈은 “토양이 거의 없거나 그 표토층의 심도가 다른 지역에 비해 상대적으로 얇다”(Song and Yun, 2002; Park *et al.*, 2014)는 것이다. 즉 꽃자왈의 표면에 토양층이 빈약한 것은 결국 “암괴들이 불규칙하게 흩어져 있는(Jeon *et al.*, 2012)”이라는 표현과 같이 용암류의 표면적 특징을 그대로 드러나게 하는 것이다.

꽃자왈의 상부에 토양이 빈약한 것과 대조적으로 꽃자왈을 이루는 용암층 아래에는 고토양(이질 퇴적물 및 스코리아 퇴적물)이 분포한다. 이들 고토양층은 채석장과 같은 단면에서 양호한 연장성을 관찰할 수 있어, 이 토양층이 용암류 아래에 횡적으로 연장성 있게 발달해 있음을 유추할 수 있다(그림 10). Song (2000)은 제주도 4개 꽃자왈 지대를 이루는 용암류에 대하여 용암류의 암상과 분포특성을 조사하고 이들 꽃자왈을 이루는 용암류의 하부에 공통적으로 지표퇴적물(epiclastic sediment)이 분포한다고 기재한바 있다. 이후 Song and Yun (2002)은 꽃자왈 아래에 넓게 분포하는 흑갈색을 띠는 이질 사암층(퇴적층)을 “탐라층”으로 기재하기도 하였다. 기존연구에서 꽃자왈 하부에 놓이는 지표퇴적물(epiclastic sediments) 혹은 “탐라층”으로 기재된 일부 퇴적층은 꽃자왈을 이루는 매우 젊은 용암류에 의해 피복



Fig. 10. Laterally persistent paleosol layer exposed on a deeply dissected quarry section in Hankyeong Gotjawal. The location of quarry is marked in Fig. 6a with an white star.

된 고토양층으로 해석할 수 있을 것이다.

우리는 앞서 꽃자왈을 이루는 용암류가 매우 젊은 용암류임을 살펴보았다. 그렇다면 용암류의 분출연대와 토양층이 빈약한 현상과는 어떠한 관계가 있는 것일까? 우리는 꽃자왈을 이루는 젊은 용암류의 상부에는 토양이 퇴적되거나 침전될 시간적 여유가 없었으며, 이로 인해 토양이 없는 매우 젊은 용암류의 상부는 농지로 사용될 수 없었을 것이라 판단한다. 즉 토양층 빈약의 결과로 농지로 개간되어 활용되지 못하고 잔존한 지역이 천연 자연숲 혹은 초목지로 남아 팥감조달이나 방목장 등으로 활용되면서 꽃자왈이라 명명되고 보존된 것이라 판단된다. 이러한 이유로 꽃자왈의 형성 혹은 잔존의 가장 큰 요인은 젊은 용암류 연대와 그로 인한 토양층의 빈약에 있다고 여겨진다.

하지만 비교적 짧은 과거에 발생한 화산활동에 의해 용암류가 형성되었다 하더라도, 그 상부에 이보다 더 젊은 화산활동에 의한 화산쇄설물 혹은 재동된 화산분출물(세립질의 스코리아, 화산재 등)이 쌓이게 되면 쇄설성 스코리아 지대는 쉽게 농지로 개간되어 꽃자왈지대로 남겨지지 못했을 것으로 추정된다. 하나의 예로, 구좌-성산 꽃자왈을 형성한 용암류의 근원지인 동거문오름의 경우 분석구 인근 지역에는 화산활동과정에서 분출한 스코리아 및 용암류에 의해 떠내려 온 스코리아 뗏목이 넓게 분포하여 목장지대로 활용되어 꽃자왈로 잔존하지 못한 것으로 판단된다. 즉 스코리아가 분포하는 지대는 치밀한 용암 암반만 노출된 지역보다 상대적으로 쉽게 농경지로 개간되었을 것으로 생각된다. 뿐만 아니라, 쇄설성 클링커가 발달하는 아아는 비쇄설성의 표면적 특징을 갖는 파호이호이(그림 3a)에 비해 상대적으로 쉽게 농지로 개간되는 것으로 추정된다. 둔지봉 용암류의 중하류 부분에서 평탄한 용암류 상부부분(그림 4a ~ 4d), 세화꽃자왈의 말단부(그림 3c) 및 외곽부(그림 3b) 등이 농경지로 활용되는 사례가 이러한 해석을 뒷받침한다. Jeju Province (1997)는 이렇게 개간된 지역을 꽃자왈지대에서 제외시킨데 비해, Song (2000)은 꽃자왈로 구분하였다.

4.2.3 지형기복 및 경사

꽃자왈 형성에 주요한 요인 중에 하나는 지형기복이 심하다는 것이다. 용암류 유역에서 지형적 기복

은 분출하는 마그마의 성분, 물성의 차이, 단위시간당 분출량, 용암이 흘러가는 지형의 경사, 기존 지형의 굴곡 등에 크게 영향을 받는다(Pinkerton and Sparks, 1976; Lipman and Banks, 1987; Kilburn, 1993; Kilburn and Guest, 1993; Hon *et al.*, 1994). 이러한 지형적 기복은 용암 분출 이후 그 표면에 토양층이 어느 정도 발달하더라도 농지로의 사용을 불가능하게 하는 주요한 원인이 될 것이다. 그 대표적인 예가 민오름에서 유래한 용암류 상에 형성된 교래꽃자왈과 둔지봉에서 유래한 둔지봉 남쪽의 꽃자왈 지대, 그리고 선흘꽃자왈지대이다. 특히 선흘꽃자왈은 토양이 없으면서 튜물러스가 다수 발달한 곳으로(Jeon *et al.*, 2012), 농지로 활용하는데 어려움이 많은 대표적인 지대이다. 우리는 앞서 둔지봉에서 유래한 용암류의 분포영역은 지형적 특징에 근거하여 쉽게 인지할 수 있었다. 둔지봉의 경우 분석구가 터져나가면서 남쪽으로 열린 부분에는 용암류 및 스코리아 뗏목으로 인해 지형의 기복이 심하다. 이에 비해 용암류가 둔지봉을 휘어 감싸면서 지형적으로 낮은 곳을 향해 흘러가는 과정에서 용암류의 상부는 평평한 특징을 보이며 용암류의 가장자리 부분들은 급한 경사를 이룬다(그림 4b). 상대적으로 평평한 지형을 이루는 용암류의 상단부는 경작지로 활용되고 있다. 그에 비해 지형경사 및 기복이 심한 둔지봉의 인접부(둔지봉의 남쪽 인접부)와 용암류의 가장자리는 수목이 무성하게 자란 것을 인지할 수 있다(그림 4a). 즉 동일한 용암류 상에서도 지형적으로 평탄한 부분은 경작지로 활용되는데 비해, 지형기복이 심하고 경사가 급한 부분은 꽃자왈 혹은 부분적인 수목지역으로 남게 됨을 알 수 있다(그림 4a, 4b). 이러한 특징은 지형기복 및 지형경사가 심하면 심할수록 농경지로의 활용이 어려워 꽃자왈로 잔존할 가능성이 높아진다는 해석이 가능하다.

4.3 꽃자왈 지대의 범위

기존 연구(Song, 2000)는 구좌-성산 꽃자왈을 이룬 용암류가 동거문오름, 다랑쉬오름, 용눈이오름, 백약이오름 등에서 유래했다고 해석한 바 있다(표 1). 하지만 우리는 이번 연구를 통해, 둔지봉에서 유래한 용암류에 발달한 꽃자왈을 제외하면, 구좌-성산 꽃자왈 지대 대부분은 동거문오름에서 순차적으로 분출한 용암류 상에 발달한 것으로 해석한다. 이

러한 결과는 기존의 연구결과와 비교하였을 때, 꽃자왈을 이루는 용암류의 분포영역은 대략적으로 일치하나 그 공급지에 대한 해석은 서로 상이한 것이다. 본 연구에서의 해석에 의하면, 동거문오름 인근의 여러 화산(다랑쉬오름, 용눈이오름, 백악이오름 등)들은 동거문오름 화산활동 이전에 형성되었으며, 동거문오름 분출 이전의 화산활동으로 형성된 용암지대 혹은 화산쇄설성 퇴적층은 화산활동 휴지기 동안의 퇴적작용(해빈모래, 풍성기원의 퇴적물, 그리고 화산쇄설물의 재동층 등)에 의해 퇴적물로 덮이게 된다. 이러한 다양한 기원의 토양층은 이후 동거문오름 화산활동 시 매우 젊은 용암류에 의해 부분적으로 피복되었다. 즉 지금의 꽃자왈지대를 형성한 용암류는 토양층이 형성될 시간적 여유가 없을 만큼 짧은 과거에 일어난 화산활동으로 형성된 용암류임을 유추할 수 있다. 이렇게 매우 젊은 용암류로 피복된 용암유역은 토양이 빈약하고 암반이 드러나 농경지로 활용되지 못하게 되었다. 이에 비해 이 용암류에 덮이지 않은 지대는 상대적으로 토양이 발달하여 농경지로 개간되어 숲으로 잔존하지 못하게 된 것이다(그림 9). 하지만 일부 용암류의 경우 용암류의 가장자리 및 하류구간에서는 자가파쇄작용에 의한 클링커가 생성되어 농경지로 활용이 보다 용이할 수 있다. 그 예로 세화꽃자왈과 같은 일부 매우 젊은 용암류의 가장자리나 하류구간은 농지로 개간되어 꽃자왈의 성격을 잃어가기도 한다.

이상의 꽃자왈 층서와 특징을 종합하면, 매우 젊은 용암류의 영역이 모두 꽃자왈로 잔존하는 것이 아니라, 부분적으로 쇄설성 특징을 가지는 부분 혹은 퇴적물이 상대적으로 더 우세하게 퇴적된 곳 등은 꽃자왈로 잔존하지 못하고 농지나 목장 등으로 활용된 것으로 해석할 수 있다. 이는 하나의 용암류 분포영역과 꽃자왈지대의 분포영역이 일치하지 않을 수 있음을 의미하는 것이다. 이런 의미에서 Song (2000)이 제시한 “꽃자왈용암류”라는 용어는 농경지나 목장 등으로 활용할 수 없을 만큼 토양층이 빈약하게 발달한 매우 젊은 용암류로, 그 영역은 인간의 간섭이 가해지지 않는다면 꽃자왈로 잔존(형성)할 가능성이 있는 “매우 젊은 용암류”의 분포영역으로 해석할 수 있을 것이다. 본 연구 및 최근의 연구(Lee *et al.*, 2014)에서 꽃자왈을 이루는 용암류가 약 0.5 ~ 1.1 만년 보다 젊은 용암류임을 알 수 있었다.

향후 꽃자왈을 이루는 다른 용암류들을 대상으로 한 직·간접적인 연대측정 연구가 보다 많이 수행된다면, 꽃자왈을 이루고 있는 용암류의 연대를 보다 명확히 밝힐 수 있을 것이다.

현재 제주특별자치도 토지이용등급도상에서 꽃자왈 지대로 관리하는 부분은 꽃자왈의 토대가 되는 매우 젊은 용암류 분포영역 중 일부분이다(그림 1). 이 영역은 대체로 꽃자왈용암류(Song, 2000) 범위 내의 지역으로, 토지이용등급도 작성 당시(1997) 농지 및 기타 용도의 목적으로 활용되는 지역을 제외한 부분이다. 즉 토지이용등급도 상의 꽃자왈지대(Jeu province, 1997)는 꽃자왈용암류(Song, 2000) 영역 내에서 “나무와 덩굴 따위가 마구 엉켜져서 수풀같이 어수선하게 된 곳”이라는 꽃자왈 정의(Jeu Special Self-Government Province, 2009)에 준하는 곳으로서, 비교적 넓은 범위에 연속적으로 발달한 미개발 숲 지대만을 한정하여 지정한 것으로 판단된다. 이러한 기준의 차이가 현재 꽃자왈 지대의 범위에 대한 혼돈을 불러일으키는 원인이라 여겨진다.

새로운 관점에서 바라보면 꽃자왈은 인간의 경제활동(과거 농경사회에는 농경지 및 목장으로의 개간 활동 등)의 결과로 형성된 제주의 자연숲임을 인식할 수 있다. 따라서 인간의 경제활동이 지속되고 더욱 확대되어 가는 불가피한 현실을 감안할 때, 꽃자왈로 잔존할 수 있는 매우 젊은 용암유역 내에서 아직까지 미개발된 잔존 꽃자왈 지대의 범위를 명확히 하고, 꽃자왈 보전과 개발에 따른 장기적 관점에서의 실익을 고려한 보전과 활용 계획을 마련하는 것이 필요할 것이다.

5. 결 론

제주도 북동부의 구좌-성산꽃자왈과 제주도 남서부 안덕꽃자왈에 대하여 수치고도모델(DEM)을 이용한 음영기복도 및 경사분석도 작성, 야외 암상비교 등의 방법을 이용하여 꽃자왈의 토대를 이루는 용암유역도를 작성하였다. 기존 연구결과와 달리 구좌-성산꽃자왈의 토대를 이루는 용암류는 대부분이 동거문오름에서 유래한 것으로 판단된다. 일부 북동부 일부분지역(둔지봉 남쪽부분)은 둔지봉에서 분출한 용암류 내에 분포한다. 안덕꽃자왈은 기존연구에서 제시된 바와 같이 병악오름에서 유래한 용암유

역 내에 분포한다.

층서적 관점에서 꽃자왈을 이루는 용암류의 하위에는 고토양이 분포한다. 이에 비해 용암류의 상부, 즉 꽃자왈 지표에는 토양층이 매우 희박하다. 이러한 꽃자왈의 표면적 특징은 용암류가 고토양층을 덮은 이후 그 표면에 토양이 퇴적되거나 침전되는 시간이 매우 짧았음을 지시하는 것이다. 즉, 꽃자왈을 이루는 용암류가 제주도 화산활동 최후기에 형성된 매우 젊은 용암류임을 지시하는 것이다. 이러한 추론은 구좌-성산꽃자왈(약 9,400년), 조천꽃자왈 중선홀꽃자왈 지역(약 1.1만년), 안덕꽃자왈(Lee *et al.*, 2014: 약 5,000년)에서 용암류 하위의 고토양층에서 얻은 매우 젊은 연대결과에 의해 지지된다.

우리는 꽃자왈지대의 특징과 층서관계를 바탕으로 꽃자왈형성(잔존)의 가장 큰 원인은 ① 용암류의 매우 젊은 연대, ② 그로 인한 토양층의 부재, ③ 지형기복에 있음을 제안한다. 앞으로 꽃자왈을 이루는 용암류를 대상으로 한 직·간접적인 연대측정연구가 보다 활발히 이루어진다면, 꽃자왈을 이루고 있는 용암류의 연대를 보다 명확히 밝힐 수 있을 것으로 기대된다.

사 사

이 논문은 국립산림과학원 난대·아열대산림연구소 “용암숲 꽃자왈의 가치발굴 및 지속가능한 활용 기반 구축” 연구와 관련하여 수행된 위탁과제 결과에 기초하여 쓰여졌다. 연구과정에서 제주도 고토양에 대한 탄소연대측정 결과를 공유해주시고, 일부 고토양에 대한 탄소연대를 측정해주신 한국지질자원연구원 홍세선 박사님과 이진영 박사님께 감사드린다. 논문의 심사과정에서 건설적인 비평과 유익한 조언으로 논문의 오류와 부정확한 표현을 바로잡아 주신 안동대학교 지구환경과학과 황상구 교수님과 미국극동공병단 지반환경공학부 박준범 박사님께 감사드린다.

REFERENCES

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*, 23, 70-75.
 Brenna, M., Cronin, S.J., Smith, I.E.M., Sohn, Y.K. and Nemeth, K., 2010, Mechanisms driving polymagmatic activity at a monogenetic volcano, Udo, Jeju Island, South Korea. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 160, 931-950.
 Carracedo, J.C., Rodriguez Badiola, E. and Soler, V., 1992, The 1730-1736 eruption of Lanzarote, Canary Islands: a long, high-magnitude basaltic fissure eruption. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 53, 239-250.
 Cashman, K.V., Thornber, C. and Kauahikaua, J.P., 1999, Cooling and crystallization of lava in open channels, and the transition of Pahoehe Lava to Aa. *Bulletin of volcanology*, 61, 306-323.
 Dana, J.D., 1849, United States Exploring Expedition During the Years 1838, 1839, 1840, 1841, 1842. Printed by C. Sherman, Philadelphia.
 Eglinton, T.I., Benitez-Nelson, B.C., Pearson, A., McNichol, A.P., Bauer, J.E. and Druffel, E.R.M., 1997, Variability in Radiocarbon Ages of Individual Organic Compounds from Marine Sediments. *Science*, 277, 796-799.
 Garcia, M.O., Ito, E., Eiler, J.M. and Pietruszka, A.J., 1998, Crustal contamination of Kilauea volcano magmas revealed by oxygen isotope analyses of glass and olivine from Puu Oo eruption lavas. *Journal of Petrology*, 39, 803-817.
 Geological Survey (US) and Holcomb, R.T., 1980, Preliminary geologic map of Kilauea volcano, Hawaii. The Survey.
 Greeley, R., 1987, The role of lava tubes in hawaiian volcanoes. In: Decker, R.W., Wright, T.L. and Sauffer, P.H. (eds), *Volcanism in Hawaii*. United State Government Printing Office, Washington, 1589-1602.
 Hazlett, R.W. and Hyndman, D.W., 1996, *Roadside geology of Hawaii*. Mountain Press, 314 p.
 Heliker, C., Swanson, D.A. and Takahashi, T.J., 2003, The Pu'u O'o-Kupaianaha eruption of Kilauea Volcano, Hawaii: the first 20 years. US Geological Survey, Reston, Virginia, 206 p.
 Heliker, C. and Mattox, T.N., 2003, The First Two Decades of the Puu Oo-Kupaianaha Eruption; Chronology and Selected Bibliography. In: Heliker, C., Swanson, D.A. and Takahashi, T.J. (eds), *The Pu'u O'o-Kupaianaha Eruption of Kilauea Volcano, Hawaii: The First 20 Years*. U.S. Geological Survey, Reston, Virginia, 1-26.
 Holcomb, R.T., 1976, Preliminary map showing products of eruptions, 1962-1974 from the upper east rift zone of Kilauea Volcano, Hawaii. US Geological Survey.
 Hon, K., Gansecki, C. and Kauahikaua, J., 2003, The

- Transition from Aa to Pahoehoe Crust on Flows Emplaced During the Pu'u O'o-Kupaianaha Eruption. In: Heliker, C., Swanson, D.A. and Takahashi, T.J. (eds), The Puu Oo-Kupaianaha Eruption of Kilauea Volcano, Hawaii: The First 20 Years. U.S. Geological Survey, Reston, Virginia, 89-103.
- Hon, K., Kauahikaua, J.P., Denlinger, R. and Mackay, K., 1994, Emplacement and inflation of pahoehoe sheet flows: observations and measurements of active lava flows on Kilauea Volcano, Hawaii. Geological Society of America Bulletin, 106, 351-370.
- Jeju Province, 1997, General Investigation Report on Mid-mountain Area of Jeju Island, 344 p (in Korean).
- Jeju Special Self-Government Province, 2009, Jeju Dialect Dictionary. 730 p (in Korean).
- Jeon, Y.M., Ahn, U.S., Ryu, C.G., Kang, S.S. and Song, S.T., 2012, A review of geological characteristics of Gotjawal terrain in Jeju Island: Preliminary Study. Journal of the Geological Society of Korea, 48, 425-434 (in Korean with English abstract).
- Kauahikaua, J., Cashman, K.V., Mattox, T.N., Heliker, C.C., Hon, K.A., Mangan, M.T. and Thornber, C.R., 1998, Observations on Basaltic lava streams in tubes from Kilauea Volcano, Island of Hawai'i. Journal of Geophysical Research: Solid Earth (1978-2012), 103.B11, 27303-27323.
- Kilburn, C.R., 1993, Lava crusts, aa flow lengthening and the pahoehoe-aa transition. In: Kilburn, C.R. and Luongo, G. (eds), Active lavas: monitoring and modelling. UCL Press, London, 263-280.
- Kilburn, C.R. and Guest, J.E., 1993, Aa lavas of Mount Etna, Sicily. In: Kilburn, C.R. and Luongo, G. (eds), Active lavas. UCL Press, London: 73-106.
- Lee, J.Y., Kim, J.C., Park, J.B., Lim, J.S., Hong, S.S. and Choi, H.W., 2014, Age of volcanic activity from Quaternary deposits in Sangchang-ri, Jeju island, Korea. Journal of the Geological Society of Korea, 50, 697-706 (in Korean with English abstract).
- Lipman, P. and Banks, N., 1987, Aa flow dynamics, Mauna Loa 1984. US Geological Survey Professional Paper, 1350, 1527-1567.
- Luhr, J., 2001, Glass inclusions and melt volatile contents at Parícutin Volcano, Mexico. Contributions to Mineralogy and Petrology, 142, 261-283.
- MacKay, M.E., Rowland, S.K., Mouginiis-Mark, P.J. and Garbeil, H., 1998, Thick lava flows of Karisimbi Volcano, Rwanda: insights from SIR-C interferometric topography. Bulletin of volcanology, 60, 239-251.
- Mattox, T.N., Heliker, C., Kauahikaua, J. and Hon, K., 1993, Development of the 1990 Kalapana flow field, Kilauea volcano, Hawaii. Bulletin of volcanology, 55, 407-413.
- McGee, L.E., Beier, C., Smith, I.E.M. and Turner, S.P., 2011, Dynamics of melting beneath a small-scale basaltic system: A U-Th-Ra study from Rangitoto volcano, Auckland volcanic field, New Zealand. Contributions to Mineralogy and Petrology, 162, 547-563.
- Németh, K., Risso, C., Nullo, F. and Kereszturi, G., 2011, The role of collapsing and cone rafting on eruption style changes and final cone morphology: Los Morados scoria cone, Mendoza, Argentina. Central European Journal of Geosciences, 3, 102-118.
- Needham, A.J., Lindsay, J.M., Smith, I.E.M., Augustinus, P. and Shane, P.A., 2011, Sequential eruption of alkaline and sub-alkaline magmas from a small monogenetic volcano in the Auckland Volcanic Field, New Zealand. Journal of Volcanology and Geothermal Research, 201, 126-142.
- Newnham, R.M., Lowe, D.J., Green, J.D., Turner, G.M., Harper, M.A., McGlone, M.S., Stout, S.L., Horie, S. and Froggatt, P.C., 2004, A discontinuous ca. 80 ka record of Late Quaternary environmental change from Lake Omapere, Northland, New Zealand. Palaeogeography, palaeoclimatology, palaeoecology, 207, 165-198.
- Newnham, R.M., Vandergoes, M.J., Garnett, M.H., Lowe, D.J., Prior, C. and Almond, P.C., 2007, Test of AMS ¹⁴C dating of pollen concentrates using tephrochronology. Journal of Quaternary Science, 22, 37-51.
- Park, J.P., Kang, B.R., Koh, G.W. and Kim, G.P., 2014, Geological characteristics of Gotjawal terrain in Jeju Island. Journal of the Geological Society of Korea, 50, 431-440 (in Korean with English abstract).
- Park, K.H., Cho, D.L. and Kim, J.C., 2000a, Geologic report of the Mosulpoo-Hanrim Sheet (1:50,000). Korea Institute Geology, Mining and Materials, Taejeon, 56 p (in Korean with English abstract).
- Park, K.H., Cho, D.L., Kim, Y.B., Kim, J.-C., Cho, B.-W., Jang, Y.N., Lee, B.-J., Lee, S.-R., Son, B.K., Cheon, H.Y., Lee, H.Y. and Kim, Y.U., 2000b, Geologic report of the Seogwipo-Hahyori Sheet (1:50,000). Jeju Provincial Government, 163 p (in Korean with English abstract).
- Park, K.H., Lee, B.J., Cho, D.L., Kim, J.C., Lee, S.R., Choi, H.I., Hwang, J.H., Song, G.Y., Choi, B.Y., Cho, B.U. and Kim, Y.B., 1998, Geologic report of the Jeju-Aewol Sheet (1:50,000). Korea Institute Geology, Mining and Materials, Taejeon, 290 p (in Korean with English abstract).
- Peterson, D.W. and Tilling, R.I., 1980, Transition of basaltic lava from pahoehoe to aa, Kilauea Volcano, Hawaii: field observations and key factors. Journal of Volcanology and Geothermal Research, 7, 271-293.
- Pinkerton, H. and Sparks, R., 1976, The 1975 sub-terminal

- lavas, Mount Etna: a case history of the formation of a compound lava field. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 1, 167-182.
- Polacci, M., Cashman, K.V. and Kauahikaua, J.P., 1999, Textural characterization of the pahoehoe-aa transition in Hawaiian basalt. *Bulletin of Volcanology*, 60, 595-609.
- Riggs, N. and Duffield, W., 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.
- Rowland, S.K. and Walker, G.P., 1990, Pahoehoe and aa in Hawaii: volumetric flow rate controls the lava structure. *Bulletin of volcanology*, 52, 615-628.
- Song, S.T., 2000, Distribution and Lithology of the Aa Rubble Flows in Cheju Island, Korea. Ph.D. thesis, Pusan National University, Pusan, 118 p (in Korean with English abstract).
- Song, S.T., 2007, The Gotjawal in Jeju. The National Folk Museum of Korea, 180 p (in Korean, title translated).
- Song, S.T. and Yun, S., 2002, Lavas in Gotjawal Terrain, Jeju Island, Korea: No. 1. Jocheon-Hamdeok Gotjawal Terrain. *Journal of the Geological Society of Korea*, 38, 377-398 (in Korean with English abstract).
- Swanson, R.A., 1973, Pahoehoe Flows from the 1969-1971 Mauna Ulu Eruption, Kilauea Volcano, Hawaii. *Geological Society of America Bulletin*, 84, 615-626.
- Valentine, G.A., Krier, D.J., Perry, F.V. and Heiken, G., 2007, Eruptive and geomorphic processes at the Lathrop Wells scoria cone volcano. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 161, 57-80.
- Vandergoes, M.J. and Prior, C.A., 2003, AMS dating of pollen concentrates-a methodological study of late Quaternary sediments from south Westland, New Zealand. *Radiocarbon*, 45, 479-492.
- Weaver, B.L., 1991, The origin of ocean island basalt end-member compositions: trace element and isotopic constraints. *Earth and planetary science letters*, 104, 381-397.
- Wolfe, E.W., Christina A, N., Banks, N.G. and Duggan, T.J., 1988, Geologic observations and chronology of eruptive events. US Geological Survey Professional paper, 1463, 1-97.
- Won, C.K., Lee, M.W., Lee, D.Y. and Sohn, 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).
- Wright, T.L. and Takahashi, T.J., 1989, Observations and interpretation of Hawaiian volcanism and seismicity, 1779-1955: an annotated bibliography and subject index. University of Hawaii Press, 270 p.
- Wright, T.L. and Takahashi, T.J., 1998, Hawaii bibliographic database. *Bulletin of volcanology*, 59, 276-280.
- Yun, S.K., Han, D.S. and Lee, D.Y., 1987, Quaternary geology in the southern part of Jeju Island. Korea Institute Geology, Mining and Materials, Taejon, 64 p (in Korean with English abstract).

Received : November 3, 2014

Revised : December 29, 2014

Accepted : January 6, 2015