

ISSN 0435-4036 (Print) ISSN 2288-7377 (Online)

제주도 동북부 월정-행원지역 시추공 내 유리질 각력암의 특성과 성인

고창성 $^{1} \cdot 윤석훈^{1, \ddagger} \cdot 황세호^{2} \cdot 신제현^{2}$

¹제주대학교 지구해양과학과 ²한국지질자원연구원 지질환경연구본부 지하수연구센터

요 약

제주도 동북부 월정리-행원리 해안저지대의 7개 시추공에서 회수된 시추코어의 일부 구간은 파쇄된 형태의 유리질 각력암으로 구성되어 있다. 이들의 특성과 성인을 밝히고자 암상에 따른 시추코어 충서분석, 유리질 각 력암 암상분석, 광학영상검층(optical televiewer log) 영상에서의 유리질 각력암 세부 암상분석을 실시하였다. 시추코어는 주요 암상에 따라 현무암질 용암류층, 퇴적층, 고토양층, 유리질 각력암층으로 구분되며 서로 교차 하며 2매씩 발달해 있다. 유리질 각력암층은 다양한 크기의 분리된 각력으로 구성되어 있으며, 각력은 기공이 거의 없는 치밀한 조직을 보인다. 광물조성은 눈에 띠는 반정 광물은 없으며, 주로 침상장석의 미세결정과 화산 유리로 구성되어 있어 암색 또한 대체로 검정 계열을 보이나, 각력의 외곽에는 밝은 갈색의 팔라고나이트가 얇 게 피복해 있기도 한다. 광학영상검층에서 해당 구간은 유리질 각력 뿐만 아니라 부분적으로 각력화된 유리질 현무암과 더불어 팔라고나이트와 유리질 파편으로 이루어진 기질도 함께 확인된다. 이는 용암류와 해수의 접촉 에 따른 급냉파쇄작용에 의한 결과로서, 이때 형성된 각력들은 유리쇄설성 각력암으로 해석된다. 유리쇄설성 각력들과 기질 구성물의 크기, 형태, 색상과 함께 이들의 발달 비율 배열양상을 통해 반파쇄 현무암(SFB), 역지 지 각력암(CSB) 및 기질지지 각력암(MSB) 등 3개의 세부 암상이 구분되며, 각각 용암 삼각주의 표면층(topset), 전면층(foreset), 그리고 기저층(bottomset)에 해당하는 것으로 해석된다. 용암 삼각주 암상의 공간적 분포양상 를 통해 그 당시 연구지역의 해안선은 현재보다 약 1.0~1.5 km 내륙에 발달되어 있었으며, 이후 용암 삼각주의 형성과 전진퇴적으로 현재 해안선 지역까지 육화가 진행된 것으로 추정된다.

주요어: 시추공층서, 유리쇄설성 각력암, 용암 삼각주, 고해안선, 제주도

Chang-Seong Koh, Seok-Hoon Yoon, Seho Hwang and Jehyun Shin, 2020, Origin and characteristics of glassy breccias from the boreholes in the Woljeong-Haengwon area of northeastern Jeju Island, Korea. Journal of the Geological Society of Korea. v. 56, no. 1, p. 17-29

ABSTRACT: This study focuses on the lithological characteristics and origin of fractured glassy breccias interlayered with thick lava-flow units from boreholes in the Woljeong-Haengwon coastal area, NNE Jeju Island, Borehole cores and optical televiewer (OTV) logs were analyzed in terms of mineralogy, lithology, and texture to characterize the stratigrphy and lithofacies. Major lithological units of the borehole cores are divided into basaltic lava flows, sedimentary deposits, paleosoil, and glassy breccias. The glassy breccia units consist of unsorted breccias with low pore contents. The color of breccias is mostly black owing to high proportion of volcanic glass, except for the outer light brown rim covered by palagonite. In OTV log images, glassy breccia units are composed not only of glassy breccias, but of matrix which is mixture of palagonite and volcanic glass. These lithologic features are interpreted as hyaloclastites which were formed by quench fragmentation along the contact between the lava flow and the seawater. Based on the size, shape, color, and developmental proportion of glassy fragments over the matrix, 3 types of lithofacies (i.e. semi-fractured basalt (SFB), clast-supported breccia (CSB) and matrix-supported breccia (MSB)) are classified in the boreholes, and are interpreted as the topset, foreset, and bottomset of the lava-fed delta, respectively. The paleo-coastline of the lava-fed delta has moved seaward from 1.0~1.5 km inland to the current location by progradation of the lava-fed delta.

Key words: borehole stratigraphy, hyaloclastite, lava-fed delta, paleo-coastline, Jeju Island

^{*} Corresponding author: +82-64-754-3436, E-mail: shyoon@jejunu.ac.kr

(Chang-Seong Koh and Seok-Hoon Yoon, Department of Earth and Marine Sciences, Jeju National University, Jeju 63243, Republic of Korea; Seho Hwang and Jehyun Shin, Groundwater Research Center, Geological Environment Division, Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources, Daejeon 34132, Republic of Korea)

1. 서 론

제주도는 약 180 만년 전부터 홀로세까지 지속된 화산활동에 의해 형성된 것으로 알려져 있지만, 지 표에 노출된 암석의 대부분은 100 ka 내외의 젊은 연령을 보인다(Tamanyu, 1990; Koh *et al.*, 2008; Koh and Park, 2010; Brenna *et al.*, 2015). 따라서 제주도 화산활동으로부터 생성된 화산분출물과 화 산활동 휴지기 동안 쌓인 퇴적층의 대부분은 지하에 존재하고 있어 시추조사를 통해서만 확인이 가능하 다. 제주도에서의 시추조사는 1970~1972년까지 한 국농어촌공사에 의해 광역적으로 수행(150개소)되 어 지하의 구성지질과 분포상태 등에 대한 지질학적 정보들이 축적되기 시작하였다.

제주도의 연안지역에서는 파쇄된 형태의 유리질 각력암이 시추코어 상으로 다량 산출되는데, Park *et al.* (1998)에서는 이를 유리쇄설성 각력암으로 보고 하였으나, 이를 아아 용암류의 클링커로 보는 견해가 더욱 많았다. 최근에 수행된 연구들(Koh, G.W. *et al.*, 2013; Koh, C.S. *et al.*, 2019)에서도 이 같은 유리질 각력암의 존재를 확인하였으나 1~2개 시추공의 교 란된 시추코어를 대상으로 연구가 수행되어 이들의 암석학적 특징, 수직적 암상변화, 형성과정 및 형성 환경 등을 설명하기에는 불충분하였다.

최근 제주특별자치도개발공사(Jeju Province Development Corporation)가 국토교통부의 지역특성화 연 구사업의 일환으로 수행한 제주도 동북부 월정리-행 원리 지역 7개 지점 시추조사를 수행하여, 유리질 각 력암의 시추코어를 비롯한 시추공에 대한 광학영상 검층(optical televiewer log; 이하 OTV)이 이루어 져 지층상태를 정밀히 파악할 수 있는 자료가 취득 되었다. 이 연구에서는 월정리-행원리 지역 시추공 에서 관찰되는 유리질 각력암의 시추코어상 암상특 성을 OTV 검층 자료와 비교하여 그 차이점에 대해 기술하였다. 아울러 OTV 검층 자료를 통해서는 이 들의 세부 암상특성과 암상의 공간적인 변화를 확인 하여 형성기원과 형성환경에 대해 해석하였다.

2. 지역개요 및 연구지역

Koh et al. (2013)에서는 제주도 동부지역의 해발 200 m 이내에 분포하고 있는 시추코어 연구를 통해 지역의 지하지질은 하부로부터 U층, 서귀포층, 화산 암층으로 이루어져 있음을 보고하였다. 미고결 사니 층인 U층(Koh, 1997)은 제주도 화산활동 이전에 원 안 대륙붕 환경에서 쌓인 해성층으로 알려져 있다 (Yoon et al., 2004; Jeong et al., 2016). U층 상부는 188~40 만년에 천해환경 하에 일어난 화산활동으로 부터 공급된 화산쇄설물과 휴지기에 육상 퇴적물로 구성되어 있는 서귀포층이 발달되어 있다(Yi et al., 1995; Kim and Lee, 2000; Sohn and Park, 2004). 서귀포층의 상부는 육상 용암류가 피복하고 있으며, 이를 형성시킨 화산활동은 약 3 만년 전까지 이어진 것으로 알려져 있으나(Koh et al., 2013), 화산활동의 일시적인 중단 또는 해수면의 변화는 국지적으로 침 식과 퇴적작용을 발생시켜 용암류 사이에는 고토양 층과 더불어 퇴적층이 협재되어 있다(Son and Lee 1998; Brenna et al., 2015; Koh, G.W. et al., 2013; Koh, C.S. et al., 2019). 일부 시추공들에서는 용암 또는 마그마가 물과의 상호작용을 통해 형성되는 유 리질 각력암이 발달되어 있는 것으로 확인되었다 (Koh et al., 2013).

연구지역은 제주도 동북부 구좌읍 월정리-행원리 해안저지대로서, 점성이 낮은 파호이호이 용암류가 지배적으로 분포하고 있어 3°이하의 완만한 경사와 기복이 거의 없는 평탄한 지형을 이루고 있다(Park *et al.*, 1998). 연구지역의 해안선은 만입된 형태를 보 이며(그림 1), 해역의 수심은 주로 북북동 방향으로 증가되는 양상을 보이며 등수심선의 형태는 약 1 km 떨어진 지점(수심 10 m)까지 해안선과 유사한 형태 를 이루고 있다. 이후에 수심은 북동 방향으로 증가 하는 경향을 보이며, 약 50 m의 수심을 보이는 2~3 km 지점까지 100 m 당 약 2 m의 수심 증가를 보인 다. 그 뒤로 수심은 500 m 내의 거리에서 최대 80 m 까지 급격하게 증가하는 변화양상을 보이나 이후에 는 100 m 당 1 m로 수심이 증가하는 완만한 해저지 형이 나타난다.

3. 연구방법

본 연구는 제주도 동북부 월정리-행원리 해안지역 에 설치된 7개 시추공(그림 1)을 대상으로 실시한 시 추코어 지질검층과 한국지질자원연구에서 취득한 OTV 검층 자료를 기초로 수행하였다. 조사 대상공의 굴착 심도는 해수면 하 (-)106.1~134.50 m 범위이고, 시추코 어는 75 mm (KIGAM, HW1)와 200 mm 구경(WJ1, WJ2, HW2, HW3, HW4)으로 회수되었다(표 1).

우선, 시추코어와 OTV 검층 영상에서 암상변화 가 뚜렷하게 나타나는 곳을 기준으로 6개의 층단위 (하부로부터 퇴적층 I, 유리질 각력암층 I, 현무암질 용암류층 I, 퇴적층 II, 유리질 각력암층 II, 고토양층 이 협재된 현무암질 용암류층 II)를 구분하고 이들 의 특징을 정리하였다. 암상에 대한 분석은 대부분 의 시추공(WJ1, WJ2, HW1, HW2, HW3, HW4호 공)에서 OTV 검층 자료가 취득된 유리질 각력암층 II에 한해서 수행하였다. 여기서는 시추코어상 각력 의 크기, 기공 발달 양상 및 함량, 광물조성, 색상을 관찰하고, 이를 OTV 검층 자료와 대비해 암상의 차 이를 기술하였다. OTV 검층 자료에서는 확인되는 세부 특징(각력과 기질 구성물의 크기, 형태, 색상을 비롯한 각력과 기질의 발달 비율 및 이들의 배열양 상을 통해 나타나는 퇴적구조 등)을 기준으로 반파 쇄 현무암, 역지지 각력암, 기질지지 각력암으로 세 부 암상을 구분하였다. 아울러 암상들의 조합을 통 해 이들의 형성기원을 비롯한 형성환경에 대해 해석



Fig. 1. Location map of study area and boreholes.

Borehole name	e	KIGAM	WJ1	WJ2	HW1	HW2	HW3	HW4
Location X		180935.3	181009.9	180889.7	182554.8	182612.9	183484.8	183378.9
(GRS80)	Y	106913.5	106403.6	106277.8	107166.7	106666.5	106653.8	105589.5
Elevation (m)	Elevation (m)		19.7	25.2	4.5	7.4	11.8	15.5
Caliber (mm)		70.0	200.0	200.0	70.0	200.0	200.0	200.0
Casing (mm)		59.0	200.0	200.0	59.0	200.0	200.0	200.0
Total vertical depth	epth (m) 130.5		130.0	131.3	130.0	117.4	122.0	150.0
OTV logging (n	n)	-	0~(-)96.9	(+)6.2~ (-)94.3	(-)58.5~ (-)90.3	0~(-)90.6	(-)3.2~ (-)91.8	0~(-)55.7
Borehole floor	30rehole floor Sedimentary rock		Sedimentary rock	Sedimentary rock	Sedimentary rock	Sedimentary rock	Sedimentary rock	Volcanic rock

Table 1. General information of boreholes.



Fig. 2. Simplified lithologic core logs for the boreholes in the study area. For borehole locations, see Fig. 1.

하였다.

4. 연구결과

4.1 시추공 층서 개요

시추코어에 대한 지질검층과 OTV 검층 자료를 통해 암상을 분류한 결과, 연구지역의 지하는 화산 암층, 퇴적층, 고토양층으로 이루어져 있으며 이 중 화산암층은 현무암질 용암류층과 유리질 각력암층 으로 구분된다(그림 2). 이 연구의 분석대상인 유리 질 각력암은 전 시추공에서 해수면 하 (-)35~78 m 구 간(유리질 각력암층II)에 15.6~37.7 m 두께로 발달 하지만, HW4호공의 경우 해수면 하 (-)77.5~134.5 m에 한 구간(유리질 각력암층I)이 추가로 관찰된다 (그림 2). 유리질 각력암층II는 서쪽에 위치한 WJ2호공-WJ1호공-KIGAM공에서는 해안방향으로 갈수록 두 께가 점차 감소(25.2~17.0 m)하는 양상을 보이나, 동 쪽 HW4호공-HW2호공-HW1호공에서는 반대로 두 께가 증가(16.8~27.5 m)한다. 다만 HW4호공-HW3 호공-HW1호공의 경우에는, HW4호공-HW3호공은 16.8 m에서 44.6 m로 3배 가까이 증가하지만, HW1 호공에서는 27.5 m로 큰 폭으로 감소된다(그림 2).

4.2 유리질 각력암의 시추코어 암상

시추코어 상에서 유리질 각력암은 잔자갈(granule) 에서부터 거력(boulder)에 이르는 다양한 크기의 분 리된 유리질 각력으로 구성되어 있으며 기질은 나타 나지 않는다(그림 3a). 각력에서는 5 mm 이하의 원 형 기공들이 주로 나타나지만, 그 함량은 20% 이하 로 매우 치밀한 조직을 보인다. 광물조성은 전반적 으로 1 mm 이상의 반정크기를 갖는 침상장석(acicular feldspar) 결정과 불투명한 검정색의 화산유리(volcanic



Fig. 3. (a) Photos for comparison between OTV (optical televiewer) log and drilling core from the same interval of the fractured glassy basalt. (b)~(d) Photos of exterior, scanned thin-section, and microscopic thin-section from a glassy fragment shown in (a).

glass)로 구성되어 있으며, 반정은 1~10% 사이의 함 량을 차지한다. 이와 같은 조직특성은 Koh *et al.* (2017)에서 제안된 제주도 화산암 명명 기준에 따라 침상장석 현무암(acicular feldspar basalt)으로 분 류된다.

각력 표면의 암색은 전반적으로 어두운 회색 내 지 검정계열의 색깔을 띠지만, 단면상에서는 가장자 리로 갈수록 더 짙고 어두워지는 특징을 보인다(그 림 3b). 일부 각력들의 표면에는 밝은 갈색 내지 황 토색의 세립 물질이 얇게 피복되어 있는데, 박편 상 에서는 검정색의 화산유리와 전이적 관계로 나타난 다(그림 3c, 3d). 기존의 연구(Koh, G.W. et al., 2017; Koh, C.S. et al., 2019)에서는 이와 같은 세립 물질을 화산유리가 변질되어 형성된 팔라고나이트(palagonite) 로 보고하였다. 고온의 용암 또는 마그마의 급랭에 의 해 형성되는 화산유리는 대체로 무색 또는 불투명한 검 정색을 띠며, 때로는 투명하게 나타나기도 한다(McPhie et al., 1993). 화산유리가 물과 접하게 되면 수화작용 (hydration)을 통한 이온교환이 수반되어, 몬모릴로나 이트(montmorillonite)와 일라이트(illite) 같은 점토광 물이 혼합된 팔라고나이트로 변질될 수 있다(Kawachi et al., 1983).

4.3 유리질 각력암의 OTV 암상

OTV 검층 자료에서 구분되는 유리질 각력암은 시 추코어에서 관찰된 모습과는 달리 각력뿐만 아니라 부분적으로 각력화가 진행된 현무암을 비롯하여 세 립질 입자들로 이루어진 기질(matrix)도 함께 포함 하여 나타난다. 전반적으로 교란되지 않고 지층의 특 성을 온전하게 유지하고 있어서, 각력(암편)과 기질 구성물의 크기, 형태, 색상을 비롯한 각력과 기질의 발달 비율 및 이들의 배열양상을 통해 나타나는 퇴 적구조 등을 상세하게 관찰할 수 있다. 이 연구에서 는 유리질 각력암의 OTV 검층 자료상의 산출 특성 을 기초로 하여 3개의 세부 암상: (1) 반파쇄 현무암, (2) 역지지 각력암 및 (3) 기질지지 각력암을 구분하 였다(그림 4, 5).

4.3.1 반파쇄 현무암(SFB: semi-fracutred basalt)

반파쇄 현무암(SFB)은 방향성 없이 발달된 불규 칙한 절리들로 인해 부분적으로 불연속적인 파쇄대 가 나타나는 특징을 보인다(그림 4). 현무암체는 기 공함량에 따라 40% 이상의 다공질 조직과, 20% 미 만의 치밀질 조직으로 구분된다(그림 5a). 수직적으 로는 수평절리와 같은 불연속면을 경계로 1 m 내외 의 구간에 걸쳐 다공질-치밀질-다공질의 순으로 조 직변화를 갖는 현무암체가 3~5매로 누층을 이루고 있다. 그러나 WJ1호공의 경우에는 다공질 조직의 현무암체만 관찰되며, 불규칙한 형태로 발달된 절리 면을 기준으로 기공들은 중심부로 갈수록 기공의 크 기가 다소 증가하는 양상을 보인다. 암색은 회색계 열 내지 검정계열의 색깔을 띠며 대체로 다공질 조 직의 암체에서 더 어둡게 나타나는 양상을 보인다 (그림 5a).

현무암체에 발달된 절리는 특정 방향성 없이 복 잡하게 얽혀있는 양상을 보이고, 대부분 기복이 있 는 곡면을 이루고 있으며, 최대 1 m까지 연장되어 나타나기도 한다. 서로 다른 절리가 연결되어 있는 곳에서는 암체가 각력들로 분리되어 있으나, 대부분 간극이 넓지 않아서 직소퍼즐과 같은 배열양상을 보 인다. 각력은 대부분 10 cm 이상의 크기를 가지며, 매우 다양한 형태로 나타나며, 일부 구간에서는 독 립적으로 분리된 각력들이 밝은 갈색의 팔라고나이 트와 혼재되어 있는 모습을 보이기도 한다(그림 4, 5a).

반파쇄 현무암은 HW4호공에서는 3 m로 가장 얇 고, WJ2호공과 HW3호공은 약 10 m의 두께로 가장 두껍게 발달되어 있으며, 해당 구간에 OTV 검층이 이루어지지 않은 KIGAM공, HW1호공을 제외한 나머지 시추공들에서는 4 m 정도의 두께를 갖는 것 으로 확인된다(그림 4). 반파쇄 현무암의 상부에는 절리구조 또는 파쇄대가 나타나지 않는 현무암체가 발달되어 있다. 이 현무암체는 반파쇄 현무암과 유 사하게 다공질 또는 치밀질의 조직을 띠지만, 육안 으로 구분되는 절리구조나 파쇄대는 나타나지 않는 다. 아울러 현무암체의 경계부는 붉은색 내지 밝은 회색을 띠어 반파쇄 현무암과는 뚜렷한 색상 차이를 보인다. 한편, 반파쇄 현무암과는 뚜렷한 색상 차이를 보인다. 한편, 반파쇄 현무암과는 작력암이나 기질지 지 각력암으로 점이적인 암상변화를 보인다(그림 4).

4.3.2 역지지 각력암(CSB: clast-supported breccia)

역지지 각력암(CSB)은 잔자갈에서 암괴 이상의 크기와 더불어 다양한 모양을 갖는 각력들로 구성되

관찰된 것과 유사하나, 여기서는 팔라고나이트 기질 과 혼재되어 있는 양상을 보인다. 반면, 1 m 내외의 크기까지 나타나는 큰 각력들은, 암괴 내지 암체 내 에 발달된 다수의 절리들로 인해 직소퍼즐의 배열로 쪼개져 나타나며, 간극 없이 매우 밀접하게 맞닿아

어 있으며, 대체로 기질의 비율이 10% 이하로 매우 낮게 나타나는 특징을 보인다(그림 4, 5b). 각력들은 전반적인 크기에 따라 발달 양상의 차이를 보이는 데, 약 10 cm 이하의 크기를 보이는 각력들은 개별 로 분리되어 있으며 전반적인 암상은 시추코어에서



Fig. 4. Columnar sections of fractured glassy basalt intervals from OTV logs. For locations, see Figs. 1 and 2.

있다(그림 5b). 암색은 상대적으로 세립의 각력들에 서는 검정색이 우세하지만, 큰 크기를 갖는 각력들 은 어두운 회색 내지 다소 옅은 검정색을 띠고 있다. 이 같은 세립 및 조립의 각력들은 수직·수평적으로 규칙적인 분포나 변화양상이 나타나지 않고 복잡하 게 혼재되어 있기 때문에, 역지지 각력암에서는 층 리와 같은 퇴적구조는 관찰되지 않는다.

역지지 각력암은 WJ1호공에서는 관찰되지 않고, WJ2호공과 HW4호공에서는 반파쇄 현무암 하부에 서부터 약 15 m의 두께로 전 구간에 발달되어 있다 (그림 4). HW2호공과 HW3호공에서도 반파쇄 현무 암 하부에 발달되어 있으나, HW2호공에서는 약 10 m에 두께로 나타나고 하부에는 기질지지 각력암이 발달되어 있다. HW3호공에서는 약 5~10 m의 두께 로 기질지지 각력암과 교대로 발달한다.

4.3.3 기질지지 각력암(MSB: matrix-supported breccia)

기질지지 각력암(MSB)은 세립의 기질부가 차지 하는 비율이 50% 이상으로 우세하고 각력들은 기질 로 둘러싸여 산재하여 나타나는 것이 특징이다(그림 4). 기질은 유리질 암편들이 풍화에 의해 팔라고나이 트화 된 것으로 보이는 황색의 물질들로 구성된 바 탕에 모래 크기 정도의 검정색 유리질 파편들이 무수 히 많이 포함되어 있다(그림 5c). 각력들의 크기는 수 cm에서 수 십 cm까지 폭넓게 나타나며 형태 또한 다양하게 확인된다. 대체로 어두운 회색계열의 색상 을 띠며, 가장자리에는 화산유리로 이루어진 검정색 피각이 2~5 cm의 두께로 나타난다(그림 5c).

일부 1 m 가까이 되는 두께 또는 길이를 갖는 큰 규모의 암괴 또는 암체들은 역지지 각력암에서 관찰 되는 것과 같이 내부에 발달된 절리들로 인해 직소 퍼즐 형태로 각력들이 맞물려 있는 모습도 관찰된다. 그러나 전체적으로 기질지지 각력암에 발달된 각력 들은 고밀도로 서로 맞물려 있는 직소퍼즐의 구조를 이루지 않고 기질부에 의해 구분되는 독립적 분포양 상을 보인다. 일부 장축이 단축에 2배 이상되는 길쭉 한 형태의 각력들은 장축이 수직 또는 수평방향으로 놓여 있기도 하지만 대부분은 불규칙한 배열상태를 보이고 구간에 따른 함량 차이만을 보인다. 기질지 지 각력암은 내부에 층리가 나타나지 않는 괴상의 구조를 이룬다(그림 4, 5c).

기질지지 각력암은 WJ2호공, HW4호공에서는 관 찰되지 않으며, WJ1호공은 반파쇄 현무암의 하부에, HW2호공은 역지지 각력암 아래에 약 15 m의 두께 로, HW3호공에서는 역지지 각력암과 서로 교대하며 2~4 m의 두께로 발달하는 특징을 보이지만, 그 경계 는 다소 점이적이다(그림 4). HW1호공에서도 10 m 이상으로 기질지지 각력암이 발달되어 있는 것이 관 찰되나, 유리질 각력암 구간의 상부까지 OTV 검층



Fig. 5. Imagies of OTV logs showing the characteristics of 3 lithologic facies.

자료가 회수되지 않아 정확한 발달 구간을 특정하는 데 무리가 있다.

5. 토 의

연구지역 시추공에서 인지되는 유리질 각력암의 대표적인 암상특성은 직소퍼즐 형태의 절리가 우세 하게 발달하고 유리질 조직의 각력 및 유리질이 변 질된 팔라고나이트 기질을 포함한다는 것이다. 다량 의 유리질 각력을 생성하는 용암류의 파쇄현상은 주 로 급랭 파쇄작용(quench fragmentation)에 의해 형성된다(McPhie et al., 1993). 급랭 파쇄작용은 일 반적으로 용암류의 빠른 냉각에 따라 발생되는 열응 력(thermal stress)으로 인해 파쇄가 일어나는 현상 으로서, 주로 물과 빙하와 같은 유체와의 접촉에 의 해 일어난다(Rittmann, 1962; Pichler, 1965). 물론, 일반적인 육상 용암류에서도 대기와의 접촉으로 굳 어진 피각이 지속적인 내부 유동에 의해 파쇄되어 '클 링커(clinker)'라고 하는 다양한 크기와 모양의 각력 층이 형성되기도 하지만, 대기 중으로의 열손실이 점 진적으로 일어나기 때문에 유리질 암편이나 조직은 매우 제한적으로 나타난다(McPhie et al., 1993).

육상에서 분출한 용암이 인근 해양이나 호수로 흘 러들어 가는 경우에 용암류의 선단부에서는 물과의 직접적인 접촉이 지속적으로 유지되면서 급격한 온 도변화에 따른 수축 및 팽창 등의 응력과 함께 내부 에 유동하는 용암류에 의한 전단력이 복합적으로 작 용하여 유리쇄설성 각력(hyaloclastite)으로 불리는 암 편의 형태로 파쇄가 일어난다(Rittman, 1962; Silvestri, 1963; Pichler, 1965; Honnorez and Kirst, 1975; McPhie et al., 1993). 유리쇄설성 각력이 만들어지는 과정은 매우 빠르게 진행되며, 형성 초기에 유리쇄설성 각 력들은 대부분 처음 발생된 위치에 머물며 직소퍼즐 과 같은 경계면(절리면) 배열 구조를 보인다(그림 3b, 5b)(Yamagish, 1979). 앞서 제시된 바와 같이, 연구 지역 시추공에서 관찰되는 유리질 각력암의 산출상 은 대체로 육상 용암류의 수중 유입에 따른 유리쇄 설성 각력암의 특징과 유사하며, 용암의 수중유동에 의한 베게용암(pillow lava)이나 함수 미고화퇴적층 으로의 관입에 따른 페퍼라이트(peperite)의 암상특 성(Cas and Wright, 1987; McPhie et al., 1993)과는 현저한 차이를 보인다.

이 연구에서 제시된 일부 시추공(KIGAM, WJ1, HW2)에서 나타나는 유리쇄설성 각력암층(유리질 각 력암층)의 직하부에는 다량의 패각편이 포함된 해성 기원 퇴적층이 발달되어 있는 것을 확인되며(그림 2, 4), 이는 각력암층이 형성될 당시 주변 환경이 오늘 날과 크게 다르지 않은 연안환경임을 지시한다(Koh et al., 2019). 육상 용암류가 해안으로 유입될 때, 물 과의 상호작용으로 인해 유리쇄설성 각력들로 파쇄 가 발생되는 곳을 '통과대(passage zone)'라고 하는 데, 용암류가 통과대를 지나면서 만들어진 다량의 각력과 모래 크기의 쇄설물들은 급격히 해저에 쌓이 게 된다(그림 6)(Long and Wood, 1986; Skilling, 2002; Watton et al., 2013). 이와 같은 과정이 해안지 역을 따라 광범위하게 일어날 경우, 형성되는 쇄설 물들의 퇴적과 뒤이어 지속적으로 공급되는 용암류 로 인해 지역은 점차 육상환경으로 바뀌게 된다. 아 울러 새롭게 형성되는 육지부로 인해 해안선은 바다 쪽으로 전진하게 된다. 이때 육상 용암류로 피복된 해안지대를 비롯한 해저 또는 해안지대의 지하에 발 달된 쇄설성 퇴적물로 이루어진 퇴적체 모두를 총칭 하여 용암 삼각주라고 한다(Moore et al., 1973; Mattox, 1993).

초기에 형성된 유리쇄설성 각력들은 역지지 각력 암과 같이 직소퍼즐 구조로 맞물려 있어 대체로 높 은 안식각을 갖기 때문에 다소 경사진 용암 삼각주 의 전면층(foreset)을 형성한다(그림 6)(Colella and Prioir, 2009; Watton *et al.*, 2013). 그러나 지속적으 로 용압류가 유입되어 압력이 가해지거나 파도에 의 한 쇄파작용 또는 지진과 같은 돌발적인 현상의 발 생되면, 고각으로 전면층을 이루고 있는 유리쇄설성 각력암의 붕괴를 유발시킬 수 있다(McPhie *et al.*, 1993; Watton *et al.*, 2013). 용암 삼각주 전면층의 붕 괴로 유발된 고밀도 저탁류 또는 암설류의 형태로 재동된 쇄설물들은 용암 삼각주 기저부(bottomset) 에 쌓이게 되며, 기질지지 각력암과 같이 기질이 풍 부한 유리쇄설성 각력암층을 형성시킬 수 있다(그림 6)(Skilling, 2002; Nehyba and Nývlt, 2015).

한편, 대기 중에 노출된 삼각주의 표면층(topset) 은 육상환경의 특징이 우세하지만, 조석에 의한 해 수면의 주기적 변화와 쇄파작용에 의한 해수의 비산 운동의 영향도 함께 나타날 수 있다. 육상 용암류가 한 지역에 정치되는 경우 국지적이고 간헐적인 해수 와의 접촉으로 용암류에 차별적 냉각이 발생될 수 있으며, 그 결과 불규칙한 형태의 수축절리를 비롯 한 유리질 조직이 부분적으로 발달될 수 있다(그림 6)(Watton *et al.*, 2013). 지속적인 용암류의 유입으 로 표면층이 두꺼워지면서 각력암층에 하중이 증가 하게 되면 공극수의 상승으로 표면층 용암류 하부에 서 급랭파쇄작용이 발생할 수 있다(Long and Wood, 1986; Skilling, 2002; Watton *et al.*, 2013). 그 결과, 반파쇄 현무암과 같이 수직적인 기공함량 변화와 부 분적인 파쇄대 발달이 나타나는 것으로 해석된다. OTV 검층 자료의 온전한 취득이 이루어지지 않은 KIGAM 공과 HW1호공을 제외한 시추공들에서 반파쇄 현 무암은 유리쇄설성 각력암층(역지지 각력암 혹은 기 질지지 각력암)의 상부를 3~10 m의 두께로 피복하 고 있는 것이 확인된다.

WJ2호공, HW4호공의 유리쇄설성 각력암층은 재

동층(기질지지 각력암)의 발달 없이 반파쇄 현무암 및 역지지 각력암으로 이루어져 있어서 용암 삼각주 형성초기의 해안선이 이들 시추공 인근에 위치하였 음을 유추할 수 있다. 즉, 당시의 해안선은 현재보다 약 1~1.5 km 이상 내륙 쪽에 발달했던 것으로 추정 된다(그림 7a). 아울러, 이들 시추공의 유리쇄설성 각력암층의 두께로 미루어 볼 때, 연안지역의 수심 은 적어도 15 m 이상이었던 것으로 판단된다. 한편, 좀더 바다 쪽에 위치한 HW2호공과 HW3호공에서 도 상부에 역지지 각력암이 나타나는데, 이는 용암 삼각주가 계속해서 외해 쪽으로 전진하였음을 지시 한다(그림 7). KIGAM공과 HW1호공에서도 유리쇄 설성 각력암이 시추코어로 약 20 m 가까이 회수되 었기 때문에, 이 당시 용암 삼각주의 발달은 내륙에 위치한 HW4호공 부근에서부터 최소 현재 해안선 위치의 지역까지 진행되었던 것으로 보인다(그림 7b).



Fig. 6. Schematic illustration of the lava-fed delta and associated hyaloclastite breccias formed by inflow of pahoehoe lava flows in coastal area. SFB: semi-fractured basalt, CSB: clast-supported breccia, MSB: matrix-supported breccia. Modified from McPhie *et al.* (1993) and Abdelmalak *et al.* (2016).

암이 피복하였고, 이후 기질이 풍부한 기질지지 각 력암으로 변질되었을 가능성도 배제하지 못한다. 반 면, 동쪽에 위치한 시추공 중에서는 HW1호공이 약 10 m의 두께로 전 구간이 기질지지 각력암으로 이 루어 졌고, HW2호공은 역지지 각력암 하부에 약 15 m로 발달되어 있다. 이는 용암 삼각주가 전진하는 과정에서 지속적인 전면층의 붕괴로 인한 쇄설물들 의 재동이 일어났고 적어도 HW1호공까지 재동된 쇄 설물들이 이동했다는 것으로 볼 수 있다(그림 7). 다

WJ1호공은 반파쇄 현무암 하부에 기질지지 각력 암이 약 15 m로 전 구간에 걸쳐 발달되어 있는데, WJ2호공의 위치에서 용암 삼각주 전면층을 이루던 유리쇄설성 각력암들이 재동되어 쌓인 것으로 해석 된다(그림 7a). 다만 WJ1호공의 위치가 WJ2호공에 서 약 200 m 떨어져 있고 층의 두께가 14 m로 WJ2 호공의 역지지 각력암과 그 두께가 비슷하기 때문에 재동 이외에도 용암 삼각주가 WJ1호공까지 전진하 면서 재동된 기질지지 각력암의 상부를 역지지 각력



Fig. 7. Location of coastline during the progradation of the lava-fed delta in the study area.

만 HW3호공은 역지지 각력암과 기질지지 각력암 이 수차례 교대하며 발달되어 있고, 유리쇄설성 각력 암층의 두께도 40 m 이상으로 주변 시추공들의 약 2 배 정도로 발달되어 있다. 이는 과거 HW3호공이 위 치한 곳은 상대적으로 주변보다 저지대를 이루고 있 었으며 이로 인해 용암 삼각주의 형성 또한 다소 상 이하게 나타났던 것으로 보인다.

6. 결 론

제주도 동북부 구좌읍 월정리-행원리 해안저지대 에 위치한 7개의 시추공에서 얻어진 시추코어 상에 서 유리질 각력암층은 다양한 크기의 분리된 각력으 로 구성되어 있으며, 각력은 기공이 결핍된 치밀한 조 직을 보이고 외곽부에는 화산유리가 변질된 팔라고 나이트가 얇게 피복되어 있다. OTV 검층 자료에서 유리질 각력암 구간은 각력뿐만 아니라 기질도 함께 관찰되는데, 조직과 구조 특징에 따라 반파쇄 현무 암(SFB), 역지지 각력암(CSB), 기질지지 각력암(MSB) 등 3개의 암상으로 구분된다. 유리질 조직이 우세한 각력들의 직소퍼즐과 같은 배열형태와 팔라고나이 트 기질의 발달은 용암류와 해수와의 접촉으로 비롯 된 급랭 파쇄작용에 의해 발생되는 유리쇄설성 각력 암의 특징으로 해석된다. 육상 용암류의 유입에 따 라 만들어진 유리쇄설성 각력들을 비롯한 유리질 파 편들이 해저에 쌓이면서 용암 삼각주가 형성되었으 며, 반파쇄 현무암, 역지지 각력암, 기질지지 각력암 은 각각 표면층, 전면층, 기저층을 대표하는 것으로 해석된다. 용암 삼각주는 형성초기에 현재 해안선 보다 약 1~1.5 km 이상 내륙 쪽에 위치한 HW4호공 과 WI2호공 부근에 전면층을 형성하고 있었으며, 이후 지속적인 용암류의 유입이 일어나면서 최소 현 재 해안선 근방까지 용암 삼각주가 전진하였던 것으 로 보인다.

감사의 글

본 연구는 국토교통부 국토교통기술지역특성화 사업「제주권 국토교통기술지역거점센터」연구과제 (20RDRP-B076272-07)의 연구비 지원에 의해 수행 되었습니다.

REFERENCES

- Abdelmalak, M.M., Planke, S., Faleide, J.I., Jerram, D.A., Zastrozhnov, D., Eide, S. and Myklebust, R., 2016, The development of volcanic sequences at rifted margins: New insights from the structure and morphology of the Vøring Escarpment, mid-Norwegian Margin. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 121, 5212-5236.
- Brenna, M., Cronin, S.J., Kereszturi, G., Sohn, Y.K., Smith, I.E. and Wijbrans, J., 2015, Intraplate volcanism influenced by distal subduction tectonics at Jeju Island, Republic of Korea. Bulletin of volcanology, 77, 1-16.
- Cas, R.A.F. and Wright, J.V., 1987, Volcanic Successions, Modern and Ancient: A Geological Approach to Processes. Products and Successions, 528 p.
- Colella, A. and Prior, D.B., 2009, Coarse-grained deltas. London: Blackwell Scientific Publications, 3-27.
- Honnorez, J. and Kirst, P., 1975, Submarine basaltic volcanism: morphometric parameters for discriminating hyaloclastites from hyalotuffs. Bulletin of volcanology, 39, 441-465.
- Jeong, J.O., Yoon, S.H., Koh, G.W., Joe, Y.J., Hong, J.G. and Kim, J.J., 2016, Mineralogical and sedimentological characteristics of the U Formation underlying the volcanic strata in Jeju Island, Korea. Journal of the Geological Society of Korea, 52, 389-403 (in Korean with English abstract).
- Kawachi, Y., Pringle, I.J. and Coombs, D.S., 1983, Pillow lavas of the Eocene Oamaru Volcano. In North Otago: Pacific Science Congress, Dunedin, New Zealand, Guidebook for Excursion Bh, 3, 18 p.
- Kim, I.S. and Lee, D., 2000, Magnetostratigraphy and AMS of the Seoguipo Formation and Seoguipo Trachyte of Jeju Island. Journal of the Geological Society of Korea, 36, 163-180 (in Korean with English abstract).
- Koh, C.S., Yoon, S.H., Hong, J.G., Jeong, J.O. and Kim, J.J., 2019, Stratigraphic analysis of the drilling core in Woljong-ri coastal area, Jeju Island. Journal of the Geological Society of Korea, 55, 1-20 (in Korean with English abstract).
- Koh, G.W., 1997, Characteristics of the groundwater and hydrogeologic implications of the Seoguipo Formationin Cheju Island. Ph.D. thesis, Pusan National University, Pusan, 326 p (in Korean with English abstract).
- Koh, G.W. and Park, J.B., 2010, The Study on Geology and Volcanism in Jeju Island (III): Early Lava Effusion Records in Jeju Island on the Basis of ⁴⁰Ar/³⁹Ar Absolute Ages of Lava Samples. Economic and Environmental Geology, 43, 163-176 (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, G.W., Park, J.B. and Park, Y.S., 2008, The Study on Geology and Volcanism in Jeju Island (I): Petrochemistry and ⁴⁰Ar/³⁹Ar Absolute ages of the Subsurface Volcanic Rock Cores from Boreholes in the Eastern Lowland of Jeiu Island. Economic and Environmental Geology, 41, 93-113 (in Korean with English abstract).
- Koh, G.W., Park, J.B., Shon, Y.G. and Yoon, S.H., 2017, Geologic logging guidebook of drilling core of Jeju Island. Jeju province development cooperation, 293 p.
- Long, P.E. and Wood, B.J., 1986, Structures, textures, and cooling histories of Columbia River basalt flows. Geological Society of America Bulletin, 97, 1144-1155.
- Mattox, T.N., 1993, Where lava meets the sea; Kilauea Volcano, Hawaii. Earthquakes & Volcanoes (USGS), 24, 160-177.
- McPhie, J., Doyle, M. and Allen, R., 1993, Volcanic textures: A guide to the interpretation of textures in volcanic rocks. CODES Key Centre, University of Tasmania, Australia.
- Moore, J.G., Phillips, R.L., Grigg, R.W., Peterson, D.W. and Swanson, D.A., 1973, Flow of lava into the sea, 1969-1971, Kilauea Volcano, Hawaii. Geological Society of America Bulletin, 84, 537-546.
- Nehyba, S. and Nývlt, D., 2015, "Bottomsets" of the lavafed delta of James Ross Island Volcanic Group, Ulu Peninsula, James Ross Island, Antarctica. Polish Polar Research, 36, 1-24.
- Park, K.H., Lee, B.J., Cho, D.L., Kim, J.C., Lee, S.R., Choi, H.I., Hwang, J.H., Song, G.Y., Choi, B.Y., Cho, B.U. and Kim, Y.B., 1998, Geologic report of the Jeju-Aewol Sheet (1:50,000). Korea Institute Geology, Mining and Materials, Taejon, 290 p (in Korean with English abstract).
- Pichler, H., 1965, Acid hyaloclastites. Bulletin of volcanology, 28, 293-310.
- Rittmann, A., 1962, Volcanoes and their activity. John

Wiley and Sons, New York, 305 p.

Silvestri, S.C., 1963, Proposal for a genetic classification of hyaloclastites. Bulletin of volcanology, 25, 315-321.

- Skilling, I.P., 2002, Basaltic pahoehoe lava-fed deltas: large-scale characteristics, clast generation, emplacement processes and environmental discrimination. Geological Society, London, Special Publications, 202 and sedimentation of Jeju Island revealed by the Sagye borehole, SW Jeju Island, Korea. Geosciences Journal, 8, 73-84.
- Son, I.S. and Lee, M.W., 1998, The Subsurface Stratigraphy of Cheju Volcanic Island, Korea. Journal of the Korean earth science society, 19, 581-581 (in Korean with English abstract).
- Tamanyu, S., 1990, The K-Ar ages and their stratigraphic interpretation of the Cheju Island volcanics, Korea. Chishitsu Chosajo Geppo, 41, 527-537.
- Watton, T.J., Jerram, D.A., Thordarson, T. and Davies, R.J., 2013, Three-dimensional lithofacies variations in hyaloclastite deposits. Journal of Volcanology and Geothermal Research, 250, 19-33.
- Yamagishi, H., 1979, Classification and features of subaqueous volcaniclastic rocks of Neogene age in southwest Hokkaido. Geological survey of Hokkaido, Report, 51, 1-20.
- Yi, S., Yun, H. and Yoon, S., 1995, Late Quaternary calcareous nannofossils from the Sinyangri Formation of Cheju (Jeju) Island. Korea. Journal of the Paleontological Society of Korea, 11, 146-158 (in Korean with English abstract).
- Yoon, S., Yi, S., Bak, Y.S., Jung, C.Y. and Lee, E.H., 2004, Calcareous annofossils and diatoms from the goundwater monitoring wells in the eastern part of Jeju sland. Journal of Paleontological Society of Korea, 20, 99-119 (in Korean with English abstract).

Received	:	Janurary	14,	2020
Revised	:	February	17,	2020
Accepted	:	February	19,	2020