

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

지질학회지 제 55권 제 1호, p. 1-20, (2019년 2월) J. Geol. Soc. Korea, v. 55, no. 1, p. 1-20, (February 2019) DOI http://dx.doi.org/10.14770/jgsk.2019.55.1.1

제주도 월정리 해안 시추공의 층서분석

고창성 $^{1} \cdot 윤석 \hat{e}^{1, \dagger} \cdot 홍정 \overline{u}^{1} \cdot 정 \widetilde{s}$ $^{2} \cdot 1 \widetilde{U} \widetilde{c}^{3}$

¹제주대학교 지구해양과학과 ²경상대학교 공동실험실습관 ³경상대학교 지질과학과

요 약

제주도는 약 180만 년 전 플라이스토세부터 홀로세까지 이어진 화산활동을 통해 형성된 화산체로서, 수성분 출 기원의 화산쇄설층-해성층(서귀포층) 상부에 수많은 용암류 화산암층이 집적되어 있다. 이 연구에서는 제주 도 북동부 월정리 해안지역의 상세 지하층서와 구성 암석의 특성을 밝히기 위하여, 길이 130 m의 시추코어를 대상으로 암상, 조직, 그리고 구조에 대한 육안기재와 함께 XRF, XRD, SEM 및 물리검층자료 분석을 통해 광 물학적, 지화학적, 지구물리학적 특성을 조사하였다. 코어 육안기재 결과, 지표면 하 0~98.7 m 심도(MD)에 화 산암(침상장석감람석현무암)이 분포하는데, 심도 65.7~67.6 m 사이에 협재하는 패각편을 다량 포함하는 사질 퇴적층(퇴적암층 I)을 경계로 하여 상부의 화산암층 I과 하부의 화산암층 II로 구분된다. 화산암층 II의 하부에 는 부분적으로 패각편을 포함하는 사질 또는 실트질의 퇴적층(퇴적암층 II)이 시추 종결심도까지 두껍게 발달 한다. 화산암층에서는 기공의 함량 및 발달양상, 광물조성, 색상 등에 따라 기공이 매우 풍부한 현무암(HPB), 기공이 풍부한 현무암(MPB), 기공이 결핍된 현무암(PPB), 유리질 현무암(GLB), 파쇄 현무암(FRB) 등 5개의 암상이 분류되며, 이들의 변화를 기준으로 34매의 용암류 유동단위(두께 0.2~20 m)가 구별된다. 대부분의 용 암류 유동단위 내에서는 하부에서 상부로 가면서 GLB-MPB-PPB-HPB-GLB로 이어지는 암상변화가 나타나 며, 이는 전형적인 육상 파호이호이 용암류의 특징으로 해석된다. 그러나, 20매의 용암류 유동단위에 대한 XRF 분석 결과, 현무암과 현무암질안산암 영역 사이에 고르게 산재하는 분포를 보이고 있어서 용암류의 지화학적 특성만으로 화산활동 시기 및 용암류 기원을 추정하기에는 곤란하다. 화산암층 I의 최하부(심도 48.7~65.7 m) 에서는 파쇄현무암(암상 FRB)이 특징적으로 나타는데, 이는 육상 용암류가 해수층과 접촉하여 형성된 유리쇄 설성각력암층을 지시하는 것으로 해석되며, 그 하부에 협재하는 퇴적암층 I에서는 석영, 장석, 탄산염 입자(패 각편)를 포함하는 해양기원 퇴적물이 우세하게 나타난다. 이와 같은 해성퇴적층과 유리쇄설성각력암은 상대적 인 해수면 상승을 반영하며, 암상이 육상 용암류층과 뚜렷하게 구별되기 때문에 제주도 해안지역의 지하층서 대비에 유용한 기준층(key bed)이 될 수 있다.

주요어: 제주도 월정리, 층서, XRF, 물리검층, 유리쇄설성각력암

Chang-Seong Koh, Seok-Hoon Yoon, Jeong-Gyun Hong, Jong-Ok Jeong and Jin-Ju Kim, 2019, Stratigraphic analysis of the drilling core in Woljong-ri coastal area, Jeju Island. Journal of the Geological Society of Korea. v. 55, no. 1, p. 1-20

ABSTRACT: Jeju Island has been formed by repeated volcanic eruptions from Pleistocene (about 1.8 Ma) to Holocene, which resulted in extensive accumulations of lava flow units overlying hydrovolcanic and marine deposits (Seogwipo Formation). This study focuses on the subsurface stratigraphy and lithological characteristics of volcanic successions in the northeastern coastal area (Woljeong-ri) of Jeju Island. The main material is a 130 m long, borehole core, which was described in terms of lithofacies, texture, structure, and further analyzed by XRF, XRD, SEM, and well-logging. Major lithological units are acicular feldspar olivine basalts (Volcanic rocks I and II above 98.7 m in core depth (MD)) and fossiliferous sandy to silty sedimentary deposits (Sedimentary rock I between 65.7 and 67.7 m, and Sedimentary rock II below 98.7 m in core depth). In the volcanic successions, 34 lava flow units (0.2 to 20 m in thickness) are recognized by abrupt changes in lithofacies which classified into 5 types based on vesicle occurrence, mineral composition and rock color: highly porous basalt (HPB), moderately porous basalt (MPB), poorly porous basalt (PPB), glassy basalt (GLB), and fractured basalt (FRB). Individual lava

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

flow unit generally has a lithofacies change of GLB-MPB-PPB-HPB-GLB in ascending order, suggesting the subaerial pahoehoe lavas. However, the result of XRF analysis on rock samples from 20 different lava flow units shows a scattered distribution over the ranges of basalt and basaltic andesite without clear differentiation among the flow units. In the lowermost part of Volcanic rock I (48.7~65.7 m in core depth), a hyaloclastite unit of FRB resulting from lava-seawater interaction occurs overlying the sedimentary unit with abundant marine shell fragments, which is strongly suggestive of a relative sea-level rise or marine transgression. They can be used as key beds for regional stratigraphic correlation in coastal area of Jeju Island.

Key words: Woljong-ri, stratigraphy, XRF, well logging, hyaloclastite

(Chang-Seong Koh, Seok-Hoon Yoon and Jeong-Gyun Hong, Department of Earth and Marine Sciences, Jeju National University, Jeju Special Self-Governing Province 63243, Republic of Korea; Jong-Ok Jeong, Center for Research Facilities, Gyeongsang National University, Jinju 52828, Republic of Korea; Jin-Ju Kim, Department of Geological Sciences, Gyeongsang National University, Jinju 52828, Republic of Korea)

1. 서 론

제주도의 화산활동사는 크게 수성분출과 관련된 서귀포층 형성시기와 그 이후 육상분출시기로 구분 된다(Koh et al., 2013). 서귀포층은 이 층에서 산출 되는 고생물 연구와 더불어 상위에 발달된 용암류에 대한 절대연대 및 고지자기 분석을 종합하여 약 1.88 ~0.4 Ma에 형성된 것으로 연구된 바 있다(Yi et al., 1995; Kim and Lee, 2000). 아울러 육상분출은 최근 연구에서 화산분출물 하부의 고토양을 대상으로 방 사선탄소연대 및 광여기루미네선스연대 분석을 수행 하여 3.8 ka까지 일어났던 것으로 밝혀졌다(Ahn, 2016). 이러한 화산활동 과정에서 수많은 분화구로부터 화 산분출물이 방출되었으며, 화산활동 휴지기 동안에 는 침식과 퇴적에 의한 퇴적층과 고토양층 등이 화 산분출물 사이에 협재되었다(Jeong et al., 2015; Koh et al., 2017). 특히, 제주도를 구성하는 용암류의 대 부분은 현무암질 용암류로서, 대체로 평균 2~3 m의 두께로 누층구조를 이룬다(Koh et al., 2017). 따라서 제주도의 형성과정에서 분출된 용암류를 비롯한 화 산분출물의 상당 부분은 지하에 존재하고 있기 때문 에, 제주도의 화산활동에 관한 연구는 지하의 구성 암석과 지층에 대한 연구가 포함되어야 한다(Koh et al., 2005). 그러나 초창기에 수행된 제주도의 화산층 서, 암상분포 등에 관한 연구(Haraguchi, 1931; Lee, 1982; Park, 1994; Park et al., 1998, 2000a, 2000b, 2000c)의 대부분은 지표에 노출된 노두를 중심으로 이루어졌거나, 시추코어의 분석 기준이 다소 객관적 이지 못한 상태로 수행됨으로서, 지하의 지질현상을 제대로 반영하지 못한 한계를 내재하고 있다.

한편, 제주도 시추코어에 대한 지질주상도 작성은

1970년 농업진흥공사의 제주도 지하수 조사사업에 서부터 이루어지기 시작하였으나, 시추심도의 부족 으로 인하여 지하지질을 파악하는데 어려움이 있었 다(Oh et al., 2000). 1980년대 말부터 제주도의 일부 지역에서 온천탐사 심부시추가 진행되면서 화산암체 하부의 심부지질 구조가 새롭게 밝혀지는 계기가 되 었으며(Koh, 1997), 2001년도부터 제주특별자치도에 서 제주도 일원 50여개 지점을 대상으로 해수침투 감 시관측망 구축사업의 일환으로 해수면 하 150 m까 지 시추가 진행됨으로써, 천부의 화산암뿐만 아니라 화산암 하부에 발달된 서귀포층과 U층에 대한 보다 많은 지질학적 정보가 축적되었다(Sohn et al., 2008; Jeon et al., 2013; Koh et al., 2013; Jeong et al., 2016). 그러나 그동안 진행된 시추코어에 대한 연구의 대부 분은 구성 암석을 화산암과 퇴적암으로 단순 구분함 과 아울러, 용암류 사이에 분포하는 퇴적층 또는 퇴 적물에 대한 퇴적학적 연구가 미흡하여 전반적인 환 경변화와 이에 접목된 화산활동 및 퇴적활동 특징의 규명이 다소 미진한 실정이다.

이 연구에서는 제주도 동부지역의 광역지하지질 구조 해석을 위한 시작 단계로 최근에 월정리 해안 지역에서 회수된 시추코어를 대상으로 육안관찰, 광 물분석, 암석화학분석, 물리검층자료 대비 등 다양한 분석을 수행하였고, 도출된 분석결과들을 통해 시추 코어 기반의 지하층서체계가 어떻게 설정될 수 있는 지를 확인하기 위한 선행연구를 수행하였다.

2. 제주도 지질 개요

제주도의 지형은 해발 1,950 m 높이의 한라산이 섬의 중앙에 위치하고 있으며, 정상부를 기준으로 남-북 사면은 경사가 급한 반면 동-서 사면은 상대적 으로 완만한 경사를 이루고 있다. 이 같은 지형의 발 달은 구성 암석의 물리적 특성의 차이로부터 비롯된 것으로서, 남-북 사면은 주로 점성이 높은 아아 용암 류가 주를 이루는 반면, 동-서 사면은 점성이 낮은 파호이호이 유형의 용암류가 지배적으로 분포하는 데서 비롯되었다(Park *et al.*, 1998).

제주도의 지질층서는 Haraguchi (1931)를 시작으 로 Won (1976), Lee (1982), Lee and Kim (1991), Koh (1997), Park *et al.* (1998, 2000a, 2000b, 2000c), Oh *et al.* (2000), Sohn and Park (2004), Yoon and Chough (2006), Sohn *et al.* (2008), Sohn and Yoon (2010), Koh *et al.* (2013) 등 여러 연구자들에 의해서 연구가 수행되었다. 이전의 연구들을 종합하면, 제주도의 기 반암은 해수면 하 155~312 m 깊이에서 발견되고 있 으며, 화강암류와 화산쇄설암류로 구성되어 있다. 그 위를 미고결 퇴적층인 U층이 평균 150 m 두께로 피 복하고 있는데, U층은 제주도 화산활동이 일어나기 이전에 퇴적된 것으로 해석되고 있으며, 대부분이 점토와 세립질 모래로 이루어져 있고 굳어있지 않은 상태이다. U층 시료에 대한 점토광물 분석연구에 따

르면, U층은 대부분 석영과 장석으로 이루어져 있고 교결물질인 스멕타이트(smectite)가 다소 결여된 것 으로 보고되었다(Koh, 1997). 그러나 최근 연구에 따르면(Jeong et al., 2016), 화산유리와 스멕타이트 는 서귀포층 노두의 일부 구간에서도 결핍된 특징을 보이기 때문에 단순히 해당 물질의 유무만으로 U층 을 정의하는 것은 신중을 기할 필요가 있다고 보고 있다. U층의 상부는 천해환경에서 일어난 화산활동 으로부터 기원된 화산쇄설물과 화산활동 휴지기에 쌓인 해양퇴적물로 이루어진 서귀포층이 놓여 있으 며, 이 층의 지질시대는 1.88~0.4 Ma로 알려져 있다 (Yi et al., 1995; Kim and Lee, 2000; Sohn and Park, 2004). 서귀포층은 제주도 화산활동의 초기단계를 반 영하는 지층으로 간주되고 있으며, 퇴적기간 동안 알 칼리 현무암 및 조면암질 용암류를 분출시킨 화산활 동이 국지적으로 진행된 것으로 보고되었다(Brenna et al., 2012; Koh et al., 2013). 서귀포층 상부를 덮고 있는 용암류는 대체로 40만 년 이내의 절대연대를 나타내나, 서귀포층 직상부의 용암류 연대는 대체로 북부와 서부지역은 30~40만 년, 동부지역은 10~20 만 년의 연대를 갖는다(Koh et al., 2013). 이들 용암



Fig. 1. Location of study area and drilling sites. White star is analyzed in this study and white circles are drilling sites where OPTV logging data are collected.

류는 45~66 wt.%의 SiO₂ 함량 범위를 갖는 알칼리 현무암, 조면현무암, 현무암질 조면안산암, 조면안산 암, 조면암의 알칼리 계열의 암류와 전이질 현무암과 비알칼리암류인 톨레이아이트질 현무암과 톨레이아 이트질 안산암으로 구성된다(Park and Kwon, 1993; 1996; Tatumi *et al.*, 2004; Chang *et al.*, 2006; Koh *et al.*, 2017). 아울러 화산활동이 일시적으로 중단된 시기에 침식과 퇴적작용이 국지적으로 진행되면서, 용암류 사이에는 퇴적층 또는 고토양층이 다양한 깊 이에서 발견된다(Son and Lee, 1998; Brenna *et al.*, 2015; Ahn and Hong, 2017; Koh *et al.*, 2017).

한편, 제주도에는 약 370여개의 소화산체들이 산 재되어 있는데, 이들의 대부분은 분석구(scoria cone) 이고 성산 일출봉, 수월봉, 당산봉 등은 응회구(tuff cone) 로서 해안을 따라 분포한다. 송악산을 비롯한 몇 개 의 소화산체는 응회환(tuff ring)과 분석구가 공존하



Fig. 2. Simplified lithostratigraphy of drilling core.

는 복합화산체(complex volcano)의 형태로 나타나 기도 한다(Sohn *et al.,* 2003).

3. 연구자료 및 분석 방법

연구대상 시추코어는 제주도 동부지역 월정리 해 안에서 남서쪽으로 약 150 m 떨어진 지점(표고 5 m) 에서 97 mm 구경으로 심도 130.5 m까지 회수되었 다(그림 1, 2). 실제 얻어진 코어의 길이는 약 97 m로 총 굴착구간에 대해 75% 정도의 코어 회수율(test core recovery)를 보인다. 시추가 종료된 이후에는 한국 지질자원연구원(Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources, KIGAM)에서 물리검층을 실 시하여 2~101 m 구간에 대한 감마선(gamma-ray), 전기전도도(conductivity)자료가 취득되었다.

획득된 시추코어는 1차적으로 육안관찰을 실시하 여 암상(화산암-퇴적암)의 변화가 나타나는 구간을 구 분하였다. 그리고 화산암이 나타나는 구간에서는 기 공의 발달양상(크기, 형태, 함량의 변화), 색상, 불연 속면과 같은 세부적인 암상특성을 관찰하여 이들의 공통된 변화 양상을 파악하고 이를 근거로 용암류 유 동단위를 세분하였다. 또한 시추공 물리검층 자료(감 마선, 전기전도도)는 구분된 암상 또는 세부 유동단 위와의 상관관계를 파악하기 위해 비교 분석하였다.

이와 더불어 구분된 세부 유동단위들의 암석화학적, 광물학적 특징을 살펴보기 위해 18개의 용암류 유동 단위 시료에 대해 경상대학교 공동실험실습관에서 보 유하고 있는 Bruker사의 S8 Tiger모델을 사용하여 X-선 형광(X-ray fluorescence, XRF)분석을 수행하 였다. 이를 통해 얻어진 10개의 주원소(major element) 함량값은 IUGS (International Union of Geological Sciences)에서 제안된 실리카(SiO₂)대 알칼리(Na₂O + K₂O) 함량 분류도인 TAS 다이어그램(Le Bas *et al.,* 1986)에 도시하여 용암류 유동단위들의 지화학적 특 성을 파악하였다. 아울러 특징적인 조직이 나타나는 구간에서는 추가적으로 박편(thin section)을 제작 하고 편광현미경을 통해 관찰하였다.

용암류 사이에 협재된 퇴적암 구간에서는 퇴적물의 입자조성 및 상대적 함량을 확인하기 위해 경상대학교 공동실험실습관에서 보유중인 Bruker사 D8 Advance A25 모델을 이용하여 X-선 회절(X-ray diffraction, XRD)분석을 수행하였다. 얻어진 X-선 회절 자료는

Lithofacies of volcanic rocks	Description	Interpretation
Facies HPB; Higly porous basalt	More than 50% vesicle contents; composed mainly of rounded and/or subrounded vesicles (<5 mm) in upper part; characterized by irregular shapes of vesicles (<40 mm) in middle part; rounded vesicles (<5 mm) in lower part; 1~2 mm acicular feldspar and olivine (<10%, acicular feldspar olivine basalt, AFOB); high to moderate degree of weath- ering; reddish or medium to dark gray colors	Upper part of thick pahoehoe lava flow; inner part of thin pa- hoehoe lava flow
Facies MPB; Moderately porous basalt	$30 \sim 50\%$ vesicle contents; composed mostly of rounded and/or sub- rounded vesicles (<5 mm); few pipe vesicles (>10 mm); 1~2 mm acic- ular feldspar and olivine (<10%, acicular feldspar olivine basalt, AFOB); low degree of weathering; medium to dark gray color	Lower part of pahoehoe lava flow
Facies PPB; Poorly porous basalt	Less than 30% vesicles; sporadic distribution of a few rounded and/or subrounded vesicles (<5 mm); partially arranged in band form; 1~2 mm feldspar (<10%, feldspar basalt, FB); very low degree of weath- ering; light gray colors	Core of pahoehoe lava flow
Facies GLB; Glassy basalt	Less than 10% vesicles; a few rounded vesicles (<3 mm); dis- continuity surface in uppermost or lowermost parts; light brown mate- rial (palagonite?) developed on the surface; $1\sim2$ mm acicular feldspar and olivine (<5%, acicular feldspar olivine basalt, AFOB); high de- gree of weathering; very dark gray to black colors	Boundary of pahoehoe lava flow
Facies FRB; Fractured basalt	Zone of volcanic fragments; various sizes of fragments $(1\sim20 \text{ cm})$; less than 20% vesicle contents; rounded vesicles (<5 mm); no phenoc- rysts (aphyric basalt, ApB); dark gray to black colors inside, light brown color outside of the fragments	Hyaloclastite

Table 1. Summary of the lithofacies of volcanic rocks.

EVA V3.1 프로그램을 사용하여 광물조성 및 상대 적 함량을 추정하였다. 또한 X-선 회절분석에 사용 된 동일한 시료를 연마편으로 제작하고 이를 경상 대학교 공동실험실습관에서 보유하고 있는 Jeol사의 JSM-7610F 모델의 전계방출형 주사전자현미경(scanning electron microscope, SEM)과 X-선 에너지 분광기 (EDS)를 이용하여 조직관찰과 광물동정을 실시하 였다. 다만 하부에 발달된 퇴적암 구간에 대해서는 현재 분석이 완료되지 못한 관계로 육안관찰된 내용 만 서술하였다.

4. 연구결과

4.1 화산암 암상

월정리 시추코어에서 화산암층은 지표에서부터 지 하 98.7 m 깊이까지 나타나는데, 깊이 65.7~67.6 m 사이에 협재하는 사질퇴적층에 의해 상부(화산암층 I)와 하부(화산암층 II)로 2개의 층단위가 구분된다 (그림 2). 그러나 세부구간에 따라 기공의 함량 및 발 달양상, 암석의 형태, 색상, 광물조성 등이 변화를 보 이며, 이들 특성을 고려한다면 다음과 같이 5개의 세 부 암상으로 구분할 수 있다(표 1).

4.1.1 기공이 매우 풍부한 현무암(HPB: highly porous basalt)

기공이 매우 풍부한 현무암(HPB)은 기공의 함량 이 50% 이상으로 다공질 특성을 보인다(표 1). 상부 에서는 5 mm 이하의 원형 또는 아원형의 기공들이 우세하지만하부로로 갈수록 크기가 점차 증가(최대 40 mm)하며 불규칙한 형태의 기공들이 다수로 나타 난다(그림 3, 4). 또한 화산암 색상은 옅은 적색(pale red, 5R 6/2) 내지 회색 빛 적색(grayish red, 5R 4/2) 또는 짙은 회색(medium gray, N5) 내지 다소 밝은 회색(med. light gray, N6)이 우세한데(그림 3, 4), 특히 적색계열의 색을 띠는 경우에는 대부분 표면 기복이 심하거나 블록 형태로 회수되어 있는 등 코 어의 형태가 온전하지 못한 특징을 보인다. 또한 화 산암의 광물조성은 감람석(olivine)과 침상의 장석 (acicular feldspar)이 1 mm 이상의 반정크기로 나 타나며, 1~10% 미만으로 소량 함유되어 있어서 침 상장석감람석현무암(acicular feldspar olivine basalt, AFOB)으로 분류될 수 있다(Koh *et al.*, 2017) (그림 5a). 화산암층 I에서는 이러한 암상을 보이는 구간이 27곳으로 0.3~1.5 m 사이의 두께범위를 갖 는다(그림 3). 화산암층 II에서는 7곳으로 확인되며 두께는 1.0~4.0 m로 화산암층 I에서보다 더 두껍게 발달되어 있는 경향을 보인다(그림 3). 전반적으로 암상 HPB는 상부로는 암상 GLB로, 하부로는 암상 PPB로 전이되는 양상을 보이며(그림 3, 4), 일부 구 간에서는 상하부 모두 암상 GLB와 접하여 나타나기 도 한다(그림 3). 이들 암상 사이의 경계부에서는 대 체로 점이적인 상변화 특성을 보인다.

4.1.2 기공이 풍부한 현무암(MPB: moderately porous basalt)

기공이 30~50%로 발달된 구간은 기공이 풍부한



Fig. 3. Detailed columnar section (1:20 scale) of drilling core showing lava flow units based on the lithofacies of volcanic rocks. HPB: higly porous basalt, MPB: moderatly prous basalt, PPB: poorly porous basalt, GLB: glassy basalt, FRB: fragmented basalt.

된다(그림 5b). 암상 MPB는 화산암층 I에서는 19곳 에서 0.2~1.0 m 두께로 발달되어 있으며, 화산암층 II에서는 0.2~0.7 m 두께로 7곳에서 관찰된다(그림 3). 또한 해당 암상은 모든 층에서 상부에는 암상 PPB, 하 부는 암상GLB로의 점진적인 상변화를 보인다(그림 3).

4.1.3 기공이 결핍된 현무암(PPB: poorly porous basalt)

현무암(MPB)으로 구분되었다(표 1). 이 구간에 해 당되는 암상은 대체로 5 mm 이하의 원형 또는 아원 형 기공이 우세하나 특징적으로 수평 또는 수직적으 로 신장(보통 10 mm 이상)된 파이프 형태의 기공이 관찰된다(그림 3, 4). 아울러 화산암 표면은 대체로 신선한 상태를 유지하고 있어 온전한 코어의 형태를 보이며 그 색은 암상 HPB에서 보이는 회색 계열을 보인다(그림 3, 4). 광물조성 또한 암상 HPB와 동일 한 특징을 보이며 침상장석감람석 현무암으로 구분



기공의 함량이 상당히 미미한 구간은 기공이 결

7





Fig. 4. Columnar section and photos of lava flow units 7 and 8 showing the characteristics of lithofacies depend on vesicles distribution and rock color changes.



Fig. 5. Photos showing the petrographic features of lithofacies HPB (a), lithofacies MPB (b), lithofacies PPB (c), lithofacies FRB (d), and sedimentary rock I (e). (a) \sim (d) are scanned thin-section photos which show volcanic rock textures. (c) is a sample photo of sediments which composed of sand grains, shell fragments, and lithic fragments. Fsp: feldspar, Ol: olivine, Ag: augite.

핍된 현무암(PPB)으로 암상이 구분되었고(표 1), 대 체로 30% 이하의 함량을 보인다. 일부 나타나는 기 공들은 대부분 원형 또는 아원형으로 산발적인 분포 양상을 보인다. 다만 일부 구간에서는 이러한 기공 들 모여 띠 형태를 이루고 있는 모습도 관찰된다(그 림 3, 4). 화산암의 표면상태는 풍화의 흔적이 거의 나타나지 않으며 코어 또한 대부분이 온전한 형태를 갖추고 있다. 아울러 색상은 밝은 회색(light gray, N7) 내지 매우 밝은 회색(very light gray, N8)으로 암상 HPB과 MPB 보다 색이 밝은 특징을 보인다. 광물조 성은 다른 암상들과는 달리 장석과 휘석이 주로 관 찰되나, 장석만이 반정크기에 해당되고 1~10% 함량 을 보여 장석현무암(feldspar basalt, FB)으로 구분



Fig. 6. Photos of lava flow units 7 and 8 and their thin-section photomicrographs of unit 7 (a), unit 8 (c), and their boundary under closed nicols (b). The proportion of microcrystalline and/or glassy matrix gradually increases toward the boundary of lava flow unit. Fsp: feldspar, OI: olivine.

된다(그림 5c). 화산암층 I에서는 해당 암상이 30곳 에서 0.1~3.0 m 정도의 두께로 나타나며, 화산암층 II에서는 7곳에서 1.0~5.0 m로 더 두껍게 발달되어 있다(그림 3). 또한 상부로는 암상 HPB, 하부로는 암 상 MPB로 변화되는 양상을 보이지만, 특징적으로 화산암층 I의 하부구간에서는 상·하부가 암상 FRB 로 이어진다(그림 3).

4.1.4 유리질 현무암(GLB: glassy basalt)

유리질 현무암(GLB)은 기공함량이 10%이하, 크 기는 3 mm 이하로 주변부보다 급격하게 감소함과 더불어 주변보다 어두운 검정 계열의 색상이 나타나 유리질 조직과 같이 관찰되는 구간에 해당된다(표 1). 이러한 암상은 주로 화산암 사이에 발달된 불연 속면의 상부와 하부에서 관찰되며, 대체로 주변보다 어둡게 나타난다(그림 6). 일부는 그 표면에 풍화산 물로 추정되는 어두운 노란빛의 오렌지색(dark yellowish orange, 10YR 6/6) 내지 중간 정도의 담황 갈색(moderate yellowish brown, 10YR 5/4)의 물 질이 얇게 발달되어 있다(그림 6). 아울러 광물은 암 상 HPB, MPB와 마찬가지로 침상의 장석과 감람석 반정이 주로 확인되어 침상장석감람석현무암으로 구 분되지만, 그 함량이 1~5%로 상대적으로 적다(그림 6). 암상 GLB는 화산암층 I에서는 26곳, 화산암층 II 에서는 6곳에서 관찰되며 대부분 0.2 m 이하로 얇은 두께를 갖는다(그림 3).

4.1.5 파쇄 현무암(FRB: fractured basalt)

파편화된 현무암(FRB)은 파편화된 현무암 블록들 로 구성된 구간으로(표 1), 블록들은 최대 20 cm까지 다양한 크기로 이루어져 있다(그림 7). 또한 대체로 기공의 함량이 20% 이하로 매우 치밀하고 특히, 몇몇 블록의 단면에서는 내부가 다소 짙은 회색(Med. dark gray, N4) 내지 짙은 회색(dark gray, N3)을 취하는 반면, 가장자리에서는 회색 빛 검정색(grayish black, N2)에서 검정색(black, N1)으로 더 어두운 색상이 어 느 정도 경계를 이루며 발달되어 있다. 또한 암상 GLB 에서와 마찬가지로 표면에서는 풍화산물로 추정되 는 물질이 관찰된다(그림 7). 광물조성은 주로 침상 의 장석으로 확인되나, 모두 1 mm 이하의 크기로 발 달되어 있어 비반상현무암(aphyric basalt, ApB)으 로 분류된다(그림 5). 특징적으로 암상 FRB는 화산암 층 I의 하부구간(49.9~65.7 m)에서만 관찰되며, 11곳 에 걸쳐 0.1~2.5 m의 두께로 발달되어 있다. 아울러 상부와 하부에는 암상 PPB와 접하고 있는 특징을 보 인다(그림 3).

4.2 화산암 암상해석

화산암층 I하부에 발달된 블록구간을 제외한 나 머지 화산암들에서 관찰된 암상들은 파호이호이 용 암류에서 나타나는 특징으로 확인된다. 일반적으로 파호이호이 용암류는 기공의 발달양상, 광물조성 및 분포, 색상 등 내부 암상특성에 따라 경계면, 상부, 중부, 하부로 구분된다(Wilmoth and Walker, 1993; Self *et al.*, 1998).

대기와 지면에 접했던 경계부는 빠른 냉각으로 인 해 표면에 유리질 껍질(glassy rind)이 형성되는데, 여 기서는 기공 함량이 매우 낮음과 더불어 그 크기 또 한 작은 특징을 보인다(McPhie *et al.*, 1993; Wilmoth and Walker, 1993; Oze and Winter, 2005). 이러한 유리질 껍질은 보편적으로 검정색을 취하나 이후 유 리질 물질의 팔라고나이트화로 인해 그 표면이 갈색 계열의 색상으로 나타나기도 한다(McPhie et al., 1993) (그림 6). 이러한 내용은 암상 GLB에서 관찰된 것과 동일하며, 이는 파호이호이 용암류의 경계부로 해석 가능하다. 유리질 껍질 형성 이후, 상승하던 버블들이 이에 가로막혀 정체함에 따라 상부에는 다공질 조직 특성이 발달하게 된다(Self et al., 1998). 또한 상대적 으로 느린 냉각속도를 가져, 장석이나 감람석과 같 은 광물들이 발달됨에 따라 색상이 경계부보다 밝아 지는 특징을 보인다(Oze and Winter, 2005). 그러 나 색상은 열 산화(thermal oxidation)로 인해 적색 내지 분홍색 계열로 나타날 수 있다(McPhie et al., 1993). 이와 같은 내용은 암상 HPB에서 관찰될 뿐만 아니라 암상 HPB이 암상 GLB 직하부(그림 4, 5)에 서 나타나기 때문에 이러한 점진적인 변화 양상과 잘



Fig. 7. Columnar section and drilling cores of units 27 and sedimentary rock I.

부합하는 것으로 판단된다. 중부는 대부분의 버블들 이 상승됨에 따라 기공의 발달이 미약한 치밀질 화 산암이 만들어진다(Self et al., 1998; Oze and Winter, 2005). 그러나 때때로 하부로부터 상승된 기공들이 먼 저 굳어진 용암류 상부의 경계를 따라 선형의 띠 형 태로 배열된 구조를 보이기도 한다(Goff, 1996; Self et al., 1998). 아울러 다른 구간들보다 상대적으로 느 린 냉각속도로 인해 장석과 같은 무색광물이 다량으 로 정출됨에 따라 용암류 구간 중 가장 밝은색을 띤 다(Oze and Winter, 2005). 이러한 특징은 암상 PPB 에서 기술된 내용과 동일하며 대부분 암상 HPB의 하부에서 관찰되는 것으로 볼 때 암상 PPB파호이호 이 용암류의 중부구간으로 해석이 가능하다(그림 3, 4). 하부는 상부와 유사하게 다소 기공의 함량이 높 고 색상이 어둡게 나타나는 양상을 보인다. 그러나 특 징적으로 수직 상승된 형태의 파이프 기공(pipe vesicle) 들이 나타나는데 이는 파호이호이 용암류의 하부에 서 전형적으로 관찰되는 구조로 알려져 있다(McPhie et al., 1993). 이와 같은 내용은 암상 MPB에서 나타 나는 특징과 동일하며 이를 기준으로 암상 MPB는

50 cm

날하며 이를 기준으로 암상 MPB는 워져 있는 조직이 확인된다(그림 8) WJ1 (70~75 m, MD) OPTV Drilling cores OPTV Drilling cores 이 TV Drilling cores Drilling cores

Fig. 8. Photos of drilling cores and OPTV (optical televiewer) logging data which similar to lithofacies GLB in this study. For location of the drilling core sites, see Fig. 1.

50 cm

10 cm

10 cm

파호이호이 용암류의 하부 구간으로 해석된다(그림 3, 4). 다만 두께가 다소 얇은 (<1 m) 파호이호이 용 암류에서는 중부(암상 PPB)와 하부(암상 MPB)의 특징이 나타나지 않고 상부 암상(암상 HPB)만으로 구성될 수 있다(Wilmoth and Walker, 1993).

블록들로 구성된 암상 FRB는 형태적으로 보았을 때, 아아 용암류(aa flow)의 클링커(clinker)로 해석 될 여지가 다분하다(그림 7). 그러나 일반적으로 클 링커 블록들은 파호이호이 용암류보다 기공의 크기 가 상대적으로 크고 그 형태 또한 불규칙한 특징을 갖는데(McPhie *et al.*, 1993) 반해, 해당 블록들은 대 체로 기공이 함량이 20% 이하로 치밀하며 일부 발 달된 기공들 또한 원형으로 관찰된다(그림 7). 또한 주변 2 km 이내에 위치한 시추공들(그림 1)의 시추 코어에서도 암상 FRB와 동일한 특징을 보이는 구간 이 나타나며, 해당 구간의 시추공벽을 OPTV(optical televiewer) 검층을 통해 얻어진 사진을 살펴보면(그 림 8), 다양한 크기의 화산암 블록들 사이가 팔라고 나이트로 추정되는 갈색내지 밝은 갈색의 기질로 채 워져 있는 조직이 확인된다(그림 8). 이러한 내부 조 직특성은 유리쇄설성각력암(hyaloclastite)에서 대표 적으로 나타나는 특징으로 확인된다(Cas and Waright, 1987; McPhie *et al.*, 1993).

4.3 화산암 암상특성에 따른 용암류 유동단위 구분

화산암들에서 구분된 암상특성에 따라 총 34개의 용암류 유동단위(lava flow unit)가 구분되었다(그 림 3, 9). 용암류 유동단위의 경계는 파호이호이 용 암류의 경계를 지시하는 암상 GLB를 기준으로 하였 고, 일부 구간에서는 화산암 색상의 급격한 변화를 동반하기도 한다. 화산암 구간에 따라 화산암층 I은 유동단위 1~27, 화산암층 II는 유동단위 28~34로 구 성된다(그림 3, 9).

대부분의 유동단위는 상부로부터 파호이호이 용 암류 경계부(암상 GLB)-파호이호이 용암류 상부(암 상 HPB)-파호이호이 용암류 중부(암상 PPB)-파호이 호이 용암류 하부(암상 MPB)-파호이호이 용암류 경 계부(암상 GLB)로 이어지는 암상변화를 보인다(그 림 3, 4). 다만 일부 두께가 약 1 m 이하로 얇게 발달 된 파호이호이 용암류(유동단위 1, 5, 15, 24)에서는 상부로부터 암상 GLB-암상 HPB-암상 GLB로 다소 상이한 암상변화를 갖는 것으로 확인된다(그림 3). 추가적으로 유동단위 2, 3, 4, 5, 6, 8, 10, 11, 20, 21, 30, 31, 32, 33, 34에서는 용암류의 상부의 색상이 적 색 계열을 띤다(그림 3).

대부분의 화산암 구간은 위와 같은 방법을 통해 세 부 용암류 유동단위로 나눌 수 있었으나 유동단위 27 (48.7~65.7 m)은 다른 구간들과는 다른 암상의 조합 으로 구분된다. 유동단위 27은 유리쇄설성각력암(암 상 FRB) 구간과 파호이호이 용암류 중부(암상 PPB) 의 암상을 갖는 구간이 교대로 나타나는데, 암상 PPB 로 확인되는 구간은 전체 구간의 30% 이하로 그 또



Fig. 9. Subdivision of volcanic rocks into lava flow units (1 to 34) based on the lithofacies of the volcanic rocks, and correlation with well-logs (gamma-ray, conductivity) of the drilling core, and TAS diagram based on the chemical composition of the volcanic rocks.

한 두께가 최대 1 m를 넘지 못한다(그림 3, 7). 암상 의 변화만을 놓고 보면 암상 FRB의 특징을 보이는 구간과 암상 PPB 구간을 각각의 유동단위로 구분해 야 하지만, 이들 사이에 뚜렷한 경계특성과 구간별 실제 발달심도나 두께의 확인이 불가해 구분하는데 어려움이 있다. 이러한 유동단위 27의 하부는 퇴적 암이 발달되어 있어 그 경계가 구분된다(그림 3, 7).

4.4 퇴적암 암상

퇴적암이 관찰되는 2개의 구간에서 관찰되며(퇴 적암층 I, 퇴적암층 II), 퇴적암층 I은 화산암층 I과 화산암층 II 사이(65.7~67.6 m), 퇴적암층 II는 화산 암층 II의 최하부로부터 시추종결 심도(98.7~130.5 m) 까지 발달되어 있다(그림 2). 전반적으로 퇴적암은 주 로 사질의 쇄설 입자들과 다량의 패각편을 포함하고 있는 해양기원의 퇴적물로 구성된다.

화산암 사이에 발달된 퇴적암(퇴적암층 I)의 두께 는 약 2 m로 시추과정에서 기록되었으나, 실제 회수 된 길이는 약 0.3 m정도로 코어 회수율은 약 15%이 다. 뿐만 아니라 해당 구간은 온전한 코어의 형태를 취하고 있지 않고 대부분 부스러져 교란된 상태로 회 수되어 있으며, 전반적으로 퇴적물 입자들은 주로 세 립모래(fine sand)내지 중립모래(medium sand)의 입도를 갖고 석회질 패각편들을 포함하고 있는 것으 로 확인된다(그림 5). 그러나 일부 1~3 cm의 각진 암 편을 포함하기도 하는데, 이는 시추과정에서 상부 또 는 하부의 화산암편들이 함께 혼재된 것으로 판단된 다(그림 3). 색상은 담황갈색(pale yellowish brown, 10YR 6/2)내지 매우 옅은 오렌지색(very pale orange, 10YR 8/2)을 띠고 있다(그림 5). 그러나 퇴적층이 교 란된 상태로 회수되었기 때문에 여기서는 특징적인 퇴적구조의 관찰이 불가하다.

시추코어의 최하부에 나타나는 퇴적암(퇴적암층 II) 은 전반적으로 상부는 황회색(yellowish gray, 5Y 8/1) 과 담황갈색(pale yellowish brown, 10YR 6/2)이 불 규칙한 간격으로 섞여 나타나지만 그 외에는 대체로 황회색(yellowish gray, 5Y 8/1)과 같은 회색계열 의 색상을 띤다. 또한 전반적으로 조립모래(coarse sand)에서 조립질 실트(coarse silt)까지의 입자들로 구성되어 있으며 패각편은 주로 구간의 하부(104~ 130.5 m)에서만 관찰된다. 층리(bedding) 또는 엽층 리(lamination)와 같은 퇴적구조는 뚜렷하게 관찰되 지 않고 대체로 괴상으로 나타나지만 일부 구간에서 는 주변과 입도, 색상 차이를 보이는 렌즈형태 혹은 이차적으로 변형된 구조들이 발달되어 있다.

4.5 시추코어 화산암의 지화학적 분석 및 광물학 적 분석

4.5.1 화산암의 지화학적 분류

용암류 유동단위들에 포함된 실리카의 함량은 48.77 ~52.79 wt.%의 범위를 가지며, 알칼리 함량은 3.32~ 3.99 wt.%의 범위로 확인된다(표 2; 그림 9). 이러한 값으로만 볼 때, 이는 TAS 다이어그램 상에서 현무 암질안산암(basaltic andesite)과 현무암(basalt)으로 양분되는 것처럼 보인다. 이를 적용해보면 유동단위 1~9 (0~14.6 m)는 현무암질안산암, 유동단위 10, 11 (14.6~18.7 m)은 현무암, 유동단위 12 (18.7~21.5 m) 는 현무암질안산암, 유동단위 13~27 (21.5~65.7 m), 28~34 (67.6~98.7 m)은 다시 현무암으로 분류된다. 그러나 분석된 모든 유동단위들의 실리카의 함량은 현무암질안산암과 현무암의 경계(52 wt.%)에서 크 게 벗어나지 않는 범위를 가지고 있을 뿐만 아니라, 하나의 유동단위(표 2; 샘플 7과 7B) 내에서도 위치 에 따라 서로 다른 암석으로 구분되는 양상을 보이 기 때문에(그림 9), 지화학적으로 유동단위들을 구분 하기 위해서는 추가적인 분석방법이 필요할 것으로 판단된다.

4.5.2 화산암의 광물 특성

화산암의 광물조성은 대부분의 유동단위에서 육 안상 확인된 것처럼 장석과 감람석 반정이 주로 관 찰된다(그림 5). 그러나 용암류 유동단위의 경계에 해 당되는 불연속면인 경우(시료 7-8B), 1 mm 이상의 반 상 광물의 함량이 점차 감소하고 미정질 또는 유리질 의 기질부가 차지하는 비율이 증가하는 경향을 보인 다(그림 6).

그러나 다수의 화산암 블록들로 구성된 유동단위 27인 경우에는 박편관찰 결과, 다른 유동단위에서 나 타나는 조직들과는 다소 차이를 보인다. 먼저, 암석 내의 기질은 블록의 바깥쪽과 안쪽의 색상이 서로 다 르게 나타난다(그림 10). 블록 바깥쪽은 밝은 갈색을 띠며 명확하지는 않지만 일정 부근을 기점으로 서서 히 불투명한 검정색으로 바뀌는 양상을 보인다(그림 10). 이 중 밝은 갈색 부분은 팔라고나이트(palagonite) 추정되며, 이는 주로 화산유리가 물과 반응하여 칼 슘과 나트륨의 손실이 일어날 때 만들어지는 변질된 화산유리로 알려져 있다(Bunsen, 1847; Fisher and Schmincke, 1984).

4.6 화산암 사이에 발달된 퇴적암의 광물학적 특징

X-선 회절분석 결과, 모든 구간에서 공통적으로 일라이트(illite), 녹니석(chlorite), 석영(quartz), 사 장석(plagioclase), 방해석(calcite)을 지시하는 피크 들이 확인되었으며, 이 중에서도 특히 결정질 규산 염 광물인 석영과 사장석이 가장 큰 수치를 갖는다 (그림 11). 또한 방해석은 구간에 따라 그 수치가 상 부에서는 가장 낮고 중부, 하부에서는 상대적으로 높은 수치를 보인다.

위와 같은 퇴적물의 광물조성 및 상대적인 함량 을 좀 더 정밀하게 분석하기 위해 동일한 시료를 연 마편으로 제작하여 주사전자현미경으로 관찰하였 다. 그러나 관찰된 내용은 X-선 회절분석 결과와는 다소 차이를 보이는데, X-선 회절분석 결과에서 낮 은 방해석 수치를 갖는 상부 구간에서는 패각편과 같은 다수의 탄산염 물질들이 관찰되고 오히려 높은 수치를 보인 중부에서는 이와 같은 탄산염 물질들이

Table 2. Contents of major elements (wt.%) of the lava flow units from the drilling core. 7B: lower boundary of lava flow unit 7, 27H: a hyaloclastite in lava flow unit 27, 27P: Pahoehoe lava flow in lava flow unit 27.

Lava flow units	2	3	4	7	7B	8	10	11	12	18	19	20	26	27H	27P	28	30	34
SiO ₂	52.79	52.80	52.38	52.10	51.52	52.11	49.97	51.89	52.41	51.92	51.21	50.44	49.70	48.77	49.57	51.45	49.94	50.80
TiO_2	1.92	1.88	1.88	1.86	1.88	1.89	1.82	1.90	1.94	1.87	1.89	2.00	2.09	2.10	2.09	1.97	1.91	2.53
Al_2O_3	14.86	14.95	14.78	14.94	14.60	14.68	14.22	14.64	14.55	14.78	14.59	14.69	14.70	14.92	14.69	14.50	14.20	13.84
MgO	6.61	6.62	6.89	6.82	6.57	6.86	6.53	6.76	6.66	7.57	7.48	7.79	8.70	8.81	8.63	7.50	7.81	7.12
Fe ₂ O ₃	12.05	11.73	12.02	11.54	11.80	12.13	11.42	12.02	11.96	11.97	11.91	11.8	12.01	12.22	11.95	12.02	12.02	12.54
MnO	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	0.16	0.15	0.16	0.16	0.16	0.16	0.16	0.16	0.15	0.16	0.17
CaO	8.25	8.28	8.23	8.43	8.21	8.13	7.91	8.31	8.15	8.19	8.24	8.46	8.78	7.96	8.81	8.68	8.53	8.61
Na ₂ O	3.03	2.90	2.99	2.96	2.97	2.96	2.78	2.97	3.00	2.99	3.00	3.01	2.94	2.73	2.92	2.99	2.85	3.06
K_2O	0.69	0.74	0.70	0.74	0.66	0.69	0.54	0.63	0.67	0.76	0.77	0.94	1.03	0.99	1.07	0.58	0.55	0.86
P_2O_5	0.25	0.24	0.24	0.24	0.24	0.25	0.23	0.23	0.24	0.25	0.25	0.29	0.33	0.29	0.33	0.23	0.22	0.34
Total	100.60	100.29	100.26	99.79	98.60	99.85	95.57	99.51	99.73	100.46	99.50	99.58	100.44	98.95	100.22	100.07	98.19	99.87
LOI1	0.01	0.07	0.08	0.17	0.07	0.35	4.82	0.03	0.26	0.02	0.21	0.25	0.19	1.48	0.07	0.06	0.10	0.16

¹Loss of ignition



Fig. 10. (a) Photos of a volcanic block in lava flow unit 27 and (b) thin-section photomicrograph under open nicols show two types of matrix. Fsp: feldspar.

거의 확인되지 않는다(그림 11). 하부는 X-선 회절분 석 결과와 동일하게 매우 많은 탄산염 물질들을 포 함하는 것으로 관찰되었다. 이들 분석결과 간의 불 일치함은 퇴적암층 I이 시추코어 회수과정에서 교란 이 일어남으로서 동일한 깊이에서도 퇴적물 특성이 다르게 나타날 수 있는 것으로 판단된다.

4.7 시추코어 암상과 물리검층자료 대비

해당 시추공에서 취득된 물리검층자료를 회수된 시추코어와 대비하여 상호 연관성 및 상관관계를 찾 고자 하였다. 대비에 사용된 물리검층자료는 감마선 와 전기전도도이고 대비가 이루어진 구간은 물리검 층 자료가 취득된 2~101 m로 해당 범위는 화산암층 I에서부터 퇴적암층 II의 최상부를 포함한다(그림 9).

대비에 사용된 감마선 자료는 그 값이 최저 9.7 API 에서 최대 127.7 API 범위를 가지는데 최저값을 갖 는 구간은 화산암층 II, 최대값을 보이는 곳은 퇴적 암층 II로 확인되었다(그림 2). 전반적으로 감마선 값은 화산암 구간에서 최대 40 API까지 관찰되지만 대부분 20~30 API 사이의 값을 갖는다. 또한 이 값 들은 구분된 상세 용암류 유동단위별로 뚜렷한 차이 를 보이지 않아 일련의 규칙성을 찾기는 어렵다. 또 한 퇴적암층 I의 경우에도 화산암 구간과 유사한 값 을 보이고 있어 감마선 값만으로는 퇴적암과 화산암 구간들을 서로 구분하기가 어려울 것으로 생각된다. 이는 퇴적암층 I이 실트나 점토와 같은 세립질 퇴적 물로 구성된 것이 아닌 주로 모래와 탄산염 물질로 구성되어 있어 암상이 다르게 나타남에도 불구하고 유사한 수치를 보일 수 있는 것으로 해석된다. 다만, 퇴적암층 II의 경우에는 급격하게 그 값이 증가해 100 API 이상으로 높다. 이와 같은 차이는 퇴적암층 II를 구성하고 있는 퇴적물들이 퇴적암층 I보다 상대 적으로 더 세립한 입자들로 구성되어 있음을 지시한 다. 즉, 감마선 자료는 시추공의 암상 변화를 지시할 수도 있으나 여기에는 다소 주의가 필요할 것으로 보이며, 퇴적암의 조직적 차이를 확인하는데 사용하 는 것이 더 적합할 것으로 판단된다.

시추코어에서 측정된 전기전도도의 범위는 최상 부에서는 1,700 µs/cm를 가지며 하부로 갈수록 점 점 증가하여 최하부에서는 46,000 µs/cm로 나타난 다(그림 2). Rotzoll (2010)에서는 지하수와 해수의 혼 합이 일어나는 연안지역에서 전기전도도 값을 통해 담수, 전이구간, 해수의 수직적 분포상태를 구분하였 다. 담수는 1,000 µs/cm까지의 전기전도도를 가지는 구간이며 1,000~25,000 µs/cm까지는 전이구간, 25,000 ~55,000 µs/cm까지를 해수에 해당되는 값을 보인다. 대상 시추코어에서는 최상부에서 약 37 m까지는 전 이구간에 해당되고 그 아래로는 모두 해수에 해당되 는 값을 보인다. 또한 전기전도도 값의 수직적 변화 양상은 특히, 30~45 m 구간에서 급격하게 증가하는 것을 보이는데, 해당 구간은 화산암층 I에서 크고 작 은 절리가 다수로 발달되어 있는 것이 특징적인 것



Fig. 11. X-ray diffraction pattern of samples from sedimentary rock I.

으로 확인된다.

5. 토 의

5.1 시추코어 암상 분석을 통한 고환경 해석

화산암과 퇴적암의 변화가 나타나는 구간을 경계 로 구분된 암상기준 층서(그림 2)는 가장 단순하게 시 추코어를 구분한 것으로 특히, 제주도와 같은 화산섬 인 경우에 지역의 화산활동과 및 고환경 변화가 직접 적으로 암상의 변화로 이어지기 때문에 지질학적으 로 중요한 의미를 갖는다고 볼 수 있다(Jeju Provincial Government, 2005; Koh *et al.*, 2008).

연구대상 시추코어는 암상의 수직적 변화가 상부 에서부터 화산암층 I-퇴적암층 I-화산암층 II-퇴적암 층 II 순으로 나타나며(그림 2), 이는 1차적으로 이 지 역에서는 적어도 두 번의 화산물질의 공급과 두 번 의 물질 공급의 중단이 있었음을 추정할 수 있다. 아 울러 각 구간들이 형성된 시기에 발달되었던 고환경 은 화산암 구간을 상세 유동단위로 구분한 화산암 암상기반의 층서체계를 살펴보면(그림 3, 9) 파악할 수 있는 증거를 찾을 수 있다. 암상조합을 통해 확인 된 화산암들은 유동단위 27을 제외하고는 모두 육상 에서 분출된 파호이호이 용암류의 특징을 갖는 것으 로 확인되었다(그림 3, 4). 그러나 유동단위 27(그림 3, 7, 8)은 다른 유동단위들과는 달리 거의 대부분의 구간이 유리쇄설성각력암으로 구성되어 있으며, 또 한 일부 구간에서는 각력암층 사이에 파호이호이 형 태의 용암류가 발달되어 있기도 한다(그림 3, 7). 일 반적으로 유리쇄설성각력암은 용암의 급격한 냉각으 로 발생된 증기폭발로 인해 파편화된 화산 쇄설물을 말하며(Rittmann, 1962; Pichler, 1965; Honnorez and Kirst, 1975), 용암이 물속이나 상당히 많은 양의 수 분을 포함하는 퇴적물로 흐르는 과정에서 형성될 수 있으며, 그 외에 수성분출로도 발생될 수 있는 것으 로 알려져 있다(Fuller, 1931; Waters, 1960; Pichler, 1965). 이런 다양한 형성기구 중 용암이 수분을 포함 하는 퇴적물 위로 흘러감에 따라 만들어졌다고 보기 에는 유동단위 27에서 퇴적물의 흔적이 나타나지 않 아 어렵다. 다만 시추코어 회수과정에서 퇴적물 부 분의 회수가 제대로 이루어지지 않았을 가능성도 있 기 때문에 해당 과정에 대한 논의를 위해서는 추가 적인 증거들이 더 필요할 것으로 판단된다. 수성분 출의 가능성 또한 해당 구간에서는 응회암(tuff)이 나타나지 않아 극히 낮은 것으로 판단된다. 일반적 으로 육상에서 분출된 용암이 용암수로(lava channel) 또는 용암동굴(lava cave)을 통해 해안으로 지 속적인 공급이 이루어지는 경우에는 형성된 유리쇄 설성각력암들이 전진퇴적(progradation)하며 삼각주 의 형태로 퍼져나가게 된다. 또한 이 과정에서 단순 히 파편형태의 화산쇄설물만이 형성되어 퇴적되는 것이 아니라 물이 차단된 각력암층 사이로 용암류가 유입되기도 한다. 이러한 사실은 기존 연구들(Jurado-Chichay et al., 1996; Umino et al., 2006; Garcia et al., 2007)에서 화산지형의 육지부가 성장해 나가는 주요 과정으로 연구된 바 있다. 뿐만 아니라, 현재까 지 화산활동이 관찰되는 하와이에서는 이와 같은 유 리쇄설성각력암이 대륙 주변부로부터 외해까지 발달 되어 있는 것으로 알려져 있다(Mattox and Mangan, 1997; Garcia and Davis, 2001). 즉, 유동단위 27이 형성된 시기에 해당 지역은 온전히 육상환경이 아닌 해수의 영향이 미치는 해안환경(coastal environment) 이 발달되었던 것으로 보는 것이 가장 타당하다.

또한 유동단위 27 직하부에 발달된 퇴적암층 I은 패각편들이 포함되어 있을 뿐만 아니라 퇴적물 XRD, SEM 분석에서도 결정질의 규산염 광물(석영, 장석) 및 탄산염 물질이 주로 나타나는 것으로 확인된다 (그림 5, 11, 12). 아울러 화산기원의 물질들이 일부 포함되어 있기는 하지만 그 양이 극히 소수로 나타 나는 것으로(그림 11, 12) 볼 때, 퇴적물 기원은 주로 외해로부터 공급되어 형성된 해성 퇴적층으로 보인 다. 따라서 퇴적암층 I과 유동단위 27 사이에는 시기 적으로 큰 공백기가 없었을 것으로 생각되며, 퇴적암 층 I은 용암류가 해당지역을 덮으면서 육지부가 성 장해 나감에 따라 퇴적이 중단된 것으로 해석된다. 그러나 화산암층 II에서는 이와 같은 유리쇄설성각 력암이 관찰되지 않으며 일반적인 파호이호이 형태 의 육상 용암류 형태만이 관찰된다. 따라서 이 구간 은 형성시기에 있어서 하부에 위치하고 있는 퇴적암 층 Ⅱ와는 어느 정도 공백이 존재하였던 것으로 해석 된다. 즉, 화산암층 II는 해수면이 높았던 상태에서 퇴적암층 II가 형성되고 난 뒤 해수면이 하강하여 완 전히 육상환경으로 바뀐 이후에 발생된 화산분출을 통해 형성된 것으로 보인다. 퇴적암층 II는 제주도의 층서단위 중 서귀포층(Seoguipo Formation)에 해당

되는 것으로 판단되는데, 이는 제주도 동부지역의 분 포되어 있는 시추공들을 분석한 연구(Koh *et al.*, 2008) 에서 서귀포층이 해수면 하 약 100 m내외의 심도에 서부터 관찰된다는 것을 통해 추정될 수 있다. 그러 나 이를 입증하기 위해서는 보다 정밀한 퇴적학적인 분석과 해석이 동반되어야 할 것으로 생각된다.

5.2 화산암 지화학 분석에 따른 화산활동 시기 및 용암류 기원 추정

위와 같이 암상기반에 따른 층서체계와 이를 조



Fig. 12. SEM photography of samples from sedimentary rock I. Qz: quartz, Sid: sideromelane, Pl: plagioclase, Ol: olivine, Ca: carbonate.

직특성에 따라 보다 세부적으로 구분한 층서체계는 해당 지역에서 나타난 고환경의 변화가 어느 유동단 위까지 영향을 미쳤는지 상호 상관관계를 파악하는 데 유용할 것으로 보인다. 그러나 이것만으로는 상 세 유동단위들을 화산분출 이벤트에 따라 구분하기 에는 무리가 있다. 이는 퇴적암층 I 외에 화산암 구 간 내에 고토양과 같은 시기적으로 화산활동의 공백 기를 지시할 수 있는 특징이 관찰되지 않을 뿐만 아 니라, 이 지역은 지형이 대체로 평탄한 해안 저지대 이기 때문에 내륙 쪽에서 분출된 용암류의 말단부분 에 해당되므로 여러 근원지로부터 용암이 혼재되어 있을 가능성이 높아 정확한 근원지를 밝히기는 어려 울 것으로 보인다. 이 같은 문제점을 보완하고자 유 동단위들에 대한 지화학적 분석을 수행하였지만, TAS 다이어그램 상에서는 유동단위들이 현무암과 현무 암질 안산암 영역 사이에서 큰 차이 없이 연속적인 선형의 조성분포 특성만을 보일 뿐, 뚜렷한 차이를 보이면서 그룹화가 이루어지지 않는다(그림 9). 따 라서 단순히 화학조성 변화의 추이만으로는 용암류 의 근원지를 파악하기에 무리가 있다. 따라서 용암 류의 근원지를 논의하기 위해서는 보다 다각적인 지 화학적 분석방법이 동원되어야 할 것으로 판단된다. 다만 모든 용암류 유동단위들이 유사한 화학조성을 갖더라도 대략적인 화산활동 시기는 추정해 볼 수 있다. Koh et al. (2008)에서는 서귀포층 형성 이후 제주도 동부지역의 화산활동 이벤트를 크게 2번(I: 200~100 Ka, II: 100 Ka 이후)으로 구분하고 있으며, 이 사이에는 한번의 해수면이 상승시기(120~140 Ka, Alverson et al., 2002)가 존재하는 것으로 보고 있 다. 이를 시추코어 분석결과와 비교해 보면 화산암 층 II는 화산활동기 I에 해당되며, 중간에 협재된 퇴 적암층 I은 해수면 상승시기에 만들어졌으며, 이후 화산활동기 II 동안에는 화산암층 I이 형성된 것으로 볼 수 있다.

5.3 시추코어와 물리검층 자료간의 상관관계

시추코어 분석에 있어서 물리검층 자료 중 감마선 인 경우 세립질 입자로 구성된 퇴적암층 II에서 높은 값을 보이는 것을 확인하였다(그림 4). 그러나 동일 하게 퇴적암으로 구분된 퇴적암 구간1에서는 이러 한 값은 확인되지 않았고 일반 화산암 구간과 유사 함을 보였다(그림 9). 이러한 양상은 해당 구간이 상 대적으로 조립질 퇴적물 입자들로 구성되어 있기 때 문으로 해석된다. 감마선 자료만으로 시추코어의 암 상을 구분하는데 주의가 필요할 것으로 보인다. 따 라서 감마선 자료는 시추코어의 회수과정에서 손실 이 많은 퇴적암 구간의 심도를 보완하는 것을 목적으 로 사용되는 것이 권고되고 있다(Hwang et al., 2006). 그리고 전기전도도의 경우에는 현재 제주도 동부지 역에서 문제되고 있는 해수침투와 연관지어 볼 수 있다. 전기전도도는 30~40 m에서 급격하게 증가하 여 온전히 해수에서 관측되는 값을 보인다(그림 9). 아울러 이 구간은 시추코어 상에서 다수의 절리가 발달되어 있는 것으로 확인되었고, 즉 이 지역의 해 수침투가 이와 같은 절리대의 틈을 따라 이루어지고 있다고 유추될 수 있다.

6. 결 론

제주도 동부의 해안지역에서 회수된 시추코어의 지 질검층 결과, 암상은 크게 화산암과 퇴적암으로 구분 되며 상부로부터 화산암층 I-퇴적암층 I-화산암층 II-퇴적암층 II의 순으로 발달되어 있다. 화산암은 모든 구간이 침상장석감람석현무암이고, 중간에 협재된 퇴 적암층 I은 패각편을 다량 포함하는 사질 퇴적암층 이고, 퇴적암층 II는 대체로 조립질 모래 내지 조립질 실트까지의 입자들로 구성되어 있으며 패각편은 주 로 하부구간에서만 나타나는 것으로 확인된다.

화산암 구간은 세부 암상에 따라 34개의 유동으로 구분되는데, 유동단위 1~26, 28~34는 파호이호이 용 암류의 형태로 발달되어 있으나, 유동단위 27은 용암 류가 해양으로 유입될 때 만들어지는 유리쇄설성각 력암으로 구성되어 있는 것으로 관찰되었다. 또한, 직하부에 발달된 퇴적암층 I은 XRD, SEM 분석을 통해 주로 규산염 광물(석영, 장석) 및 탄산염 물질 로 이루어진 해성 퇴적층으로 해석되었다. 즉, 두 구 간은 육상환경이 아닌 해수면 상승으로 인해 해수의 영향이 미치던 환경 하에 시기적으로 큰 공백기 없 이 순차적으로 발달된 것으로 해석된다. 반면, 퇴적 암층 II의 직상부에 발달된 유동단위 34는 전형적인 육상 용암류의 형태를 취하고 있어 서로 발달환경의 차이를 보이고 있다.

또한 용암류 유동단위에서의 X-선 형광분석 결과, 해당 시추코어를 구성하고 있는 화산암들은 지

화학적으로 큰 조성의 차이를 보이지 않는 것으로 확인되었다. 다만 제주도 동부지역의 화산활동 이벤 트를 구분한 기존연구와 비교해 보면 화산암층 II는 화산활동기 I (200~100 Ka), 화산암층 I은 화산활동 기 II (100 Ka 이후)와 대비된다.

추가적으로 지질검충결과와 물리검충자료를 대 비한 결과, 감마선 자료는 화산암 구간에서 20~30 API를 보이고, 최하부 퇴적암 구간에서는 100 API 이상으로 나타난다. 그러나 중간에 협재된 퇴적암 구간에서는 그 값이 화산암 구간과 큰 차이가 없는 데 이는, 해당 구간의 실트나 점토함량이 낮기 때문 에 나타난 결과로 해석된다. 따라서 감마선 자료는 화산암과 퇴적암을 구분하는데 쓰일 수 있으나, 이 보다는 퇴적암의 조직적 차이를 확인하는데 더 유용 할 것으로 생각된다. 또한 전기전도도 자료는 30~40 m에서 급격하게 증가하여 해수에서 나타나는 값을 보이는데, 해당 구간은 시추코어 상에서 다수의 절 리가 발달된 화산암 구간으로 확인되었으며 이를 통 해 해수가 침투되는 구간을 추정해 볼 수 있을 것으 로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 국토교통부 국토교통기술지역특성화 사업「제주권 국토교통기술지역거점센터」연구과제 (19RDRP-B076272-06)의 연구비 지원에 의해 수행 되었습니다.

REFERENCES

- Ahn, U.S., 2016, Study of the last volcanic activity on historical records on Jeju Island, Korea. The Journal of the Petrological Society of Korea, 25, 69-83 (in Korean with English abstract).
- Ahn, U.S. and Hong, S.S., 2017, Volcanological History of the Baengnokdam Summit Crater Area, Mt. Halla in Jeju Island, Korea. The Journal of the Petrological Society of Korea, 26, 1-14 (in Korean with English abstract).
- Alverson, K.D., Bradley, R.S. and Pedersen, T.F., 2002, Paleoclimate, Global Change and the Future, Springer, 37 p.
- 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, 7.
- Brenna, M., Cronin, S.J., Smith, I.E., Sohn, Y.K. and Maas,

R., 2012, Spatio-temporal evolution of a dispersed magmatic system and its implications for volcano growth, Jeju Island Volcanic Field, Korea. Lithos, 148, 337-352.

- Bunsen, R., 1847, Beitrag zur Kenntnis des isliindischen Tuffgebirges. Annal. Chern. Pharm., 61, 265-279.
- Cas, R.A.F. and Wright, J.V., 1987, Volcanic Successions Modern and Ancient: A Geological Approach to Processes, Products and Successions. 528 p.
- Chang, K.H., Park, J.B. and Kwon, S.T., 2006, Geochemical characteristics of trachytes in Jeju Island. Journal of the Geological Society of Korea, 42, 235-252 (in Korean with English abstract).
- Fisher, R.V. and Schmincke, H.U., 1984, Pyroclastic rocks. Springer, Berlin, 472 p.
- Fuller, R.E., 1931, The aqueous chilling of basaltic lava on the Columbia River Plateau. American Journal of Science, 124, 281-300.
- Goff, F., 1996, Vesicle cylinders in vapor-differentiated basalt flows. Journal of Volcanology and Geothermal Research, 71, 167-185.
- Garcia, M.O. and Davis, M.G., 2001, Submarine growth and internal structure of ocean island volcanoes based on submarine observations of Mauna Loa volcano, Hawaii. Geology, 29, 163-166.
- Garcia, M.O., Haskins, E.H., Stolper, E.M. and Baker, M., 2007, Stratigraphy of the Hawai 'i Scientific Drilling Project core (HSDP2): Anatomy of a Hawaiian shield volcano. Geochemistry, Geophysics, Geosystems, 8, 2.
- Haraguchi, K., 1931, Geology of Saishu (Jeju) Island. Bulletin of Geological Survey of Korea, 10, 1-34 (in Japanese).
- Honnorez, J. and Kirst, P., 1975, Submarine basaltic volcanism: Morphometric parameters for discriminating hyaloclastites from hyalotuffs. Bulletin of Volcanology, 39, 441-465.
- Hwang, S.H., Shin, J.H., Park, K.H., Park, I.H. and Koh, G.W., 2006, Geophysical well logs in basaltic volcanic area, Jeju Island. Geophysics and Geophysical Exploration, 9, 231-240.
- Jeju Provincial Government, 2005, Collection of abstracts from references of geology and water resources in Jeju Island. Jeju Provincial Water Resource Management Office, 436 p (title translated).
- Jeon, Y., Ryu, C.K., Yoon, W., Kang, S. and Song, S., 2013, Characteristics and interpretation of subsurface diatreme deposits from western Jeju Island. Journal of the Geological Society of Korea, 49, 537-551 (in Korean with English abstract).
- Jeong, G.Y., Han, A., Cho, M., Park, M., Kwak, T. and Ahn, U.S., 2015, Mineralogical and geochemical study on the origin of paleosols in Jeju Island. 2015 Fall Joint Conference of Geological Science of Korea (Abstracts), Jeju, 68 p (in Korean).

- 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).
- Jurado-Chichay, Z., Rowland, S.K. and Walker, G.P., 1996, The formation of circular littoral cones from tube-fed pāhoehoe: Mauna Loa, Hawai'i. Bulletin of Volcanology, 57, 471-482.
- 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, G.W., 1997, Characteristics of the groundwater and hydrogeologic implications of the Seoguipo Formation in Cheju Island. Ph.D. thesis, Pusan National University, Pusan, 326 p (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.
- Koh, G.W., Park, Y.S., Kang, B.R. and Kim, B.S., 2005, Subsurface geology and volcanic activities in the eastern area of Jeju Island. Symposium of the 13th World Water Day, Jeju Provincial Government, 3-44 (title translated).
- Le Bas, M.J., Le Maitre, R.W., Streckeisen, A. and Zanettin, B., 1986, A chemical classification of volcanic rocks based on the total alkali-silica diagram. Journal of Petrology, 27, 745-750.
- Lee, D.Y. and Kim, J.Y., 1991, Review on volcanic history and stratigrahy of Jeju Island. Conference of the Geological Society of Korea (Abstracts), Seoul, November 8-9, 538 p (in Korean).
- Lee, M.W., 1982, Petrology and Petrochemistry of Jeju volcanic island, Korea. Sci Rep., Tohoku Univ., Ser., 315, 521-541.
- Mattox, T.N. and Mangan, M.T., 1997, Littoral hydrovolcanic explosions: a case study of lava-seawater interaction at Kilauea Volcano. Journal of Volcanology and Geothermal Research, 75, 1-17.
- 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, Hobart, 198 p.

- Oh, J., Yi, S., Yoon, S., Koh, G.W., Yun, H. and Lee, J.-D., 2000, Subsurface stratigraphy of Jeju Island. Journal of the Geological Society of Korea, 36, 181-194 (in Korean with English abstract).
- Oze, C. and Winter, J.D., 2005, The occurrence, vesiculation, and solidification of dense blue glassy pahoehoe. Journal of Volcanology and Geothermal Research, 142, 285-301.
- Park, J.B., 1994, Geochemical Evolution of the Cheju Volcanic Island, Korea. Ph.D. Thesis, Yonsei University, Seoul, 303 p.
- Park, J.B. and Kwon, S.T., 1993, Geochemical evolution of the Cheju volcanic island: petrography and major element chemistry for stratigraphically-controlled lavas from the northern part of Cheju Island. Journal of the Geological Society of Korea, 29, 39-60 (in Korean with English abstract).
- Park, J.B. and Kwon, S.T., 1996, Tholeiitic volcanism in Cheju Island, Korea. The Journal of the Petrological Society of Korea, 5, 66-83 (in Korean with English abstract).
- Park, K.H., Cho, D.L. and Kim, J.C., 2000a, Geologic report of the Mosulpo-Hanrim Sheet (1:50,000). Korea Institute Geology, Mining and Materials, Taejon, 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 Segwipo-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, Taejon, 290 p (in Korean with English abstract).
- Park, K.H., Lee, B.J., Kim, J.C., Cho, D.L., Lee, S.R., Park, D.W., Lee, S.R., Choi, Y.S., Yeum, D.Y., Kim, J.Y., Seo, J.Y. and Shin, H.M., 2000c, Geologic report of the Jeju (including Baekado-Jinnampo) Sheet (1:250,000). Korea Institute Geology, Mining and Materials, Taejon, 59 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, 1-305.
- Rotzoll, K., 2010, Effects of groundwater withdrawal on borehole flow and salinity measured in deep monitor wells in Hawaii: implications for groundwater management. USGS Scientific Investigations Report, 2010-5058.
- Self, S., Keszthelyi, L. and Thordarson, T., 1998, The importance of pāhoehoe. Annual Review of Earth and Planetary Sciences, 26, 81-110.

- Sohn, Y.K., Park, J.B., Khim, B.K., Park, K.H. and Koh, G.W., 2003, Stratigraphy, petrochemistry and Quaternary depositional record of the Songaksan tuff ring, Jeju Island, Korea. Journal of Volcanology and Geothermal Research, 119, 1-20.
- Sohn, Y.K. and Park, K.H., 2004, Early-stage volcanism and sedimentation of Jeju Island revealed by the Sagye borehole, SW Jeju Island, Korea. Geosciences Journal, 8, 73-84.
- Sohn, Y.K., Park, K. H. and Yoon, S.H., 2008, Primary versus secondary and subaerial versus submarine hydrovolcanic deposits in the subsurface of Jeju Island, Korea. Sedimentology, 55, 899-924.
- Sohn, Y.K. and Yoon, S.H., 2010, Shallow-marine records of pyroclastic surges and fallouts over water in Jeju Island, Korea, and their stratigraphic implications. Geology, 38, 763-766.
- 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).
- Tatsumi, Y., Shukuno, H., Yoshikawa, M., Chang, Q., Sato, K. and Lee, M.W., 2004, The petrology and geochemistry of volcanic rocks on Jeju Island: plume magmatism along the Asian continental margin. Journal of Petrology, 46, 523-553.
- Umino, S., Nonaka, M. and Kauahikaua, J., 2006, Emplacement of subaerial pahoehoe lava sheet flows into water: 1990 Kūpaianaha flow of Kilauea volcano at Kaimū Bay, Hawaii. Bulletin of Volcanology, 69, 125-139.
- Waters, A.C., 1960, Determining direction of flow in basalts. American Journal of Science, 258, 350-366.
- 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., 1976, Study of Petro-chemistry of Volcanic Rocks in Jeju Island. Journal of the Geological Society of Korea, 12, 207-226 (in Korean with English abstract).
- 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.
- Yoon, S.H. and Chough, S.K., 2006, Sedimentary facies and depositional environment of the Seoguipo Formation, Jeju Island. Journal of the Geological Society of Korea, 42, 1-17 (in Korean with English abstract).

Received	:	August	24,	2018
Revised	:	November	27,	2018
Accepted	:	December	5,	2018