

제주도 서부 지하 화도층전암(Diatreme)의 특징과 해석

전용문^{1,*} · 류춘길² · 윤우석³ · 강순석⁴ · 송시태⁵

¹제주특별자치도 세계자연유산관리단

²한국지질환경연구소

³제주대학교 지구해양학과

⁴제주지질연구소

⁵제주서중학교

요 약

수월봉 인근 서귀포시 대정읍 신도리에서 시추작업이 이루어졌다. 시추는 U층에 도달하면 종료될 예정이었으며, 굴착심도는 약 150 m로 추정하였다. 그러나 총 310 m를 굴착하였으나 U층에 도달하지 못하였고, 시추과정에서 독특한 암상이 나타났다. 코어는 160 m 두께의 용암류와 150 m 두께의 화산쇄설암(서귀포층)으로 구성되며, 화산쇄설암은 암상에 따라 퇴적단위 I, II, III으로 구분된다. 퇴적단위 I은 15 m 두께로 층리가 발달되어 있고, 다양한 크기, 형태, 조성, 색깔, 원마도를 보이는 암편들이 기질 또는 역지되어 있으며 간헐적인 지표류 등에 의해 화산쇄설층이 재퇴적된 것으로 해석된다. 퇴적단위 II는 60 m 두께로 층리가 발달한 현무암질(화산력) 응회암(LJTs), 사층리가 발달한(화산력) 응회암(LJTcs), 그리고 괴상의 화산력 응회암(LTm)으로 구분되며, 탄낭구조와 부가화산력, 암편의 퍼즐구조 등이 나타나 수성화산분출에 의해 형성된 것으로 해석된다. 퇴적단위 III은 70 m 두께로 현무암질(화산력) 응회암이 급경사(30-60°)의 층리를 보이는 퇴적상(LJTis)과 현무암질(화산력) 응회암이 수평 또는 저각도로 쌓인 퇴적상(LJTis), 괴상 현무암질(화산력) 응회암(LJTm), 그리고 층리가 휘어진 퇴적상(Tc)으로 구분된다. 퇴적단위 III의 대부분을 차지하는 퇴적상 [LJTis]는 층리의 각도가 안식각 보다 급하고, 경사방향이 짧은 범위에서 반대로 엇갈리는 형태가 반복된다. 퇴적단위 III은 화도 주변에 불안정하게 쌓여있던 화구벽 또는 화구륜의 일부가 화산분출 충격 또는 사면불안정에 의해 분화구 내부로 붕괴되면서 거대암편 형태로 퇴적된 다이아트림으로 해석된다. 또한, 퇴적단위 III이 주변지역 서귀포층의 평균두께 20-50 m에 비해 130 m 이상으로 두꺼운 원인은 분화구와 같이 아래로 오펜한 깔대기 모양의 공간에 지층들이 붕괴되어 불규칙하게 쌓인 결과로 해석된다. 따라서 신도코어는 분화구를 직접 관통한 자료로서 분화구 내부를 이해하고 제주도의 형성과정을 유추하는데 있어 중요한 의미를 지닌 것이라 할 수 있다.

주요어: 신도코어, 다이아트림, 서귀포층, 제주도

Yongmun Jeon, Choon Kil Ryu, Wooseok Yoon, Soonseok Kang and Shitae Song, 2013, Characteristics and interpretation of subsurface diatreme deposits from western Jeju Island. Journal of the Geological Society of Korea. v. 49, no. 5, p. 537-551

ABSTRACT: Boring for groundwater development was carried out at a site in Sindo-ri, Daejeong-eup, Jeju Island. The boring was initially planned to reach the U Formation supposed to be located at about 150 m below the surface. The U Formation was not, however, recovered although the bore hole reached a depth of 310 m. Instead, a core, named the Sindo core, showing unique lithology, was acquired, which is composed of lava flows (ca. 160 m thick) and volcanoclastic deposits (ca. 150 m thick). The volcanoclastic deposits are divided into three depositional units I, II, and III. Unit I (ca. 15 m thick) comprises well bedded and clast- or matrix-supported reworked volcanoclastic deposits, in which the clasts have different shapes, compositions, colors and roundness. This unit is interpreted to have been deposited by surface runoff and intermittent floods. Unit II (ca. 60 m thick) consists of bedded basaltic (lapilli) tuff ([LJTs), cross-bedded (lapilli) tuff ([LJTcs), and massive lapilli tuff (LTm). This unit has bomb-sags, accretionary lapilli, and jigsaw-fit structures of lithic clasts, and is interpreted to have formed by hydrovolcanic activity. Unit III (ca. 70 m thick) is composed of steeply inclined (30-60°) ([LJTis), horizontal or low-angle stratified

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

([L]Ts), massive ([L]Tm) and disturbed basaltic (lapilli) tuff (Tc). The facies [L]Tis constituting the majority of Unit III has stratification that dips in excess of the angle of repose and in opposite directions within short core depths repeatedly. This unit is thus interpreted as diatreme deposits produced by collapse of unstable materials from the vent walls and crater rims into the volcanic conduit probably caused by volcanic tremors or shockwaves. The thickness of Units II and III (totally ca. 130 m) is much larger than the average thickness (generally 20-40 m) of the volcanoclastic deposits (Seoguipo Formation) in the nearby area because Unit III was deposited in the deeply excavated, funnel-like structure inside a crater, i.e., a volcanic conduit. The Sindo core is therefore interpreted to have penetrated the inner part of a hydrovolcanic crater and may provide a glimpse into the subvolcanic structures of hydromagmatic volcanoes in the subsurface of Jeju Island and help understand the volcanic history of Jeju Island.

Key words: Sindo core, Diatreme, Seoguipo Formation, Jeju Island

(Yongmun Jeon, Jeju World Natural Heritage Department, Jeju Special Self-Governing Provincial Government, Jeju 690-700, Korea; Choon kil Ryu, Korea Institute of Geological Environments, Busan 617-731, Korea; Wooseok Yoon, Department of Earth and Marine Sciences, Jeju National University, Jeju 690-756, Korea; Soonseok Kang, Jeju Geological Institute, Jeju 690-825, Korea; Shitae Song, Jeju seo middle school, Jeju 690-818, Korea)

1. 서론

제주도는 우리나라 제4기 화산활동을 대표하는 지역으로 많은 지질학적 연구가 이루어져 왔으며, 특히 지하수 개발을 위한 광범위한 시추조사를 통해 지하지질에 대한 자료가 오래 전부터 얻어져 왔다 (Koh, 1997; Sohn and Park, 2004, 2005). 시추조사는 제주도 지하수의 부존 특성에 대한 정보뿐만 아니라 상세한 지하지질에 대한 연구를 수행할 수 있다는 장점이 있는데, 이번 조사에서는 지금까지 알려져 있지 않은 독특한 암상의 시추코어를 관찰하고 그 특징과 형성과정을 살펴보았다.

연구대상 시추코어는 2013년 수월봉 인근 서귀포시 대정읍 신도리에서 얻어졌으며, 신도코어로 명명하였다. 신도코어의 총 길이는 310 m이며, 160 m 두께의 용암층과 150 m 두께의 화산쇄설암(서귀포층)으로 구성되어 있다. 신도코어는 시추작업 당시 용암층과 서귀포층을 관통하고 U층에 도달하면 작업을 완료할 예정이었으며, 예상 굴착심도는 인근 무릉리와 용수리 지역의 시추코어(용암 약 100 m, 서귀포층 약 50 m 두께)를 바탕으로 약 150 m 내외로 추정하였다(e.g., Koh *et al.*, 2008; Koh and Park, 2010a, 2010b). 그러나 시추과정에서 예상심도 150 m에서 U층이 출현하지 않았고, 160 m를 추가로 굴착하였으나 끝내 U층에 도달하지 못하고 작업이 종료되었다.

이번 신도코어 시추작업에서는 비록 예상했던 U층에 도달하지는 못했지만 추가 굴착 과정에서 지금까지 제주도에서 알려지지 않은 독특한 암상의 서귀포층이 관찰되었다. 신도코어의 서귀포층은 제주도

서부지역(용수리, 무릉리)의 평균 두께 약 50 m에 비해 약 100 m 이상 두껍고 지층의 경사각이 45° 이상으로 매우 급하며, 지층의 경사 방향이 매우 짧은 범위에서 급변하는 형태를 보이고 있다. 따라서 본 논문에서는 시추작업이 예상심도를 160 m 초과했음에도 불구하고 U층에 도달하지 못한 이유와 서귀포층의 두께가 비정상적으로 두껍고 암상이 독특한 원인이 무엇인가를 규명하고자 한다. 그리고 이 시추코어가 제주도 형성과정에서 어떤 의미를 지니고 있는지 논의하였다.

2. 지질 개요

제주도는 신생대 후기부터 역사시대까지 발생한 현무암질-조면암질 화산활동에 의해 형성된 화산섬으로 용암과 화산쇄설암(응회암) 및 퇴적암으로 구성되어 있다(Lee *et al.*, 1994; Park *et al.*, 2000a, 2000b). 제주도 전역에서 이루어진 시추자료에 따르면 제주도의 지하는 최하부에 기반암이 분포하고, 그 상부에 U층과 서귀포층 그리고 용암류가 피복하는 형태로 구성된다(Koh, 1997; Park *et al.*, 2000a, 2000b; 그림 1).

제주도의 기반암은 주로 중생대 및 신생대 제3기 화강암류와 화산암류로 구성되며, 이들은 심부 시추코어를 비롯한 화산암류 내 암편으로 확인된다(Jeon, 2009). 기반암의 상부에는 분급이 양호한 세립의 석영질 모래와 이질 퇴적물로 구성된 미고결 퇴적층인 U층이 70-250 m 두께로 분포한다(Koh, 1997). U층의 상부에는 현무암질 화산쇄설물과 해양생물의 화석

을 포함한 서귀포층이 평균 100 m 두께로 제주도 지하 전역에 분포한다(Koh, 1997; Koh *et al.*, 2013). 서귀포층은 U층이 쌓이던 천해 대륙붕 환경에서 수성 화산활동의 직·간접적인 결과에 의한 것으로, 성인에 따라 일차 퇴적상과 이차 또는 재동 퇴적상으로 구분되며, 퇴적환경에 따라 육성과 해성 환경으로 구분된다. 서귀포층의 일차 퇴적상은 주로 화쇄난류와 낙하에 의해 육성환경에서 응회환과 응회구를 형성한 퇴적상이며, 이차 퇴적상은 육상 또는 수중에 쌓인 화산물질이 육성 또는 해성환경에서 재퇴적되어 만들어진 퇴적상이다(Yoon and Chough, 2006; Sohn *et al.*, 2008; Jeon, 2009; Sohn and Yoon, 2010). 서귀포층의 상부에는 현무암질에서 조면암질에 이르는 다양한 조성의 용암류가 피복하고 있다. 시추조사 결과에 따르면, 해수면 하부에 존재하는 용암류의 깊이는 동부지역이 해수면 하 100-150 m 내외, 서부와 북부지역이 50-70 m 내외, 그리고 남부지역은 10-80 m 범위에 분포하는 것으로 알려져 있다(Park *et al.*, 2000a, 2000b; Koh *et al.*, 2008).

최근 Koh *et al.* (2013)은 제주도가 한라산을 중심으로 한 전형적인 순상화산체가 아니라 한라산체를 중심으로 하는 복성 복합화산체(polygenetic composite volcano)와 수많은 단성화산(monogenetic vol-

cano)들로부터 분출한 용암류와 화산쇄설물이 합쳐지고 층상으로 누적되어 형성된 것으로 해석하였다.

3. 암상 기재 및 해석

신도코어의 총 길이는 310 m이며, 코어가 회수된 지점의 해발고도는 33.2 m이다(그림 1). 용암류의 두께는 160 m이며, 두껍고 괴상인 용암류와 얇은 판상의 용암류가 교호하는 형태로 나타난다(그림 2). 용암류 사이에는 고토양층(paleosol)과 다공질이며 불규칙한 형태로 각진 암괴층이 협재되기도 한다. 용암류의 하부에는 약 150 m 두께의 서귀포층이 분포하고 있으며, 지하로 더 연장 분포하는 것으로 추정된다. 서귀포층은 입자크기, 퇴적구조, 역의 크기와 종류, 기질의 특징 등에 따라 크게 세 개의 퇴적단위로 구분되며, 상부로부터 각각 퇴적단위 I, II, III으로 구분된다(그림 2).

3.1 용암류

용암류의 두께는 약 160 m이며, 지하 2-162 m까지 분포하고 있다. 용암류는 두께, 암상을 비롯하여 조직, 상·하부의 특징, 기공 분포 등에 따라 아아 용암류, 파호이호이 용암류, 괴상 무구조 용암류로 구

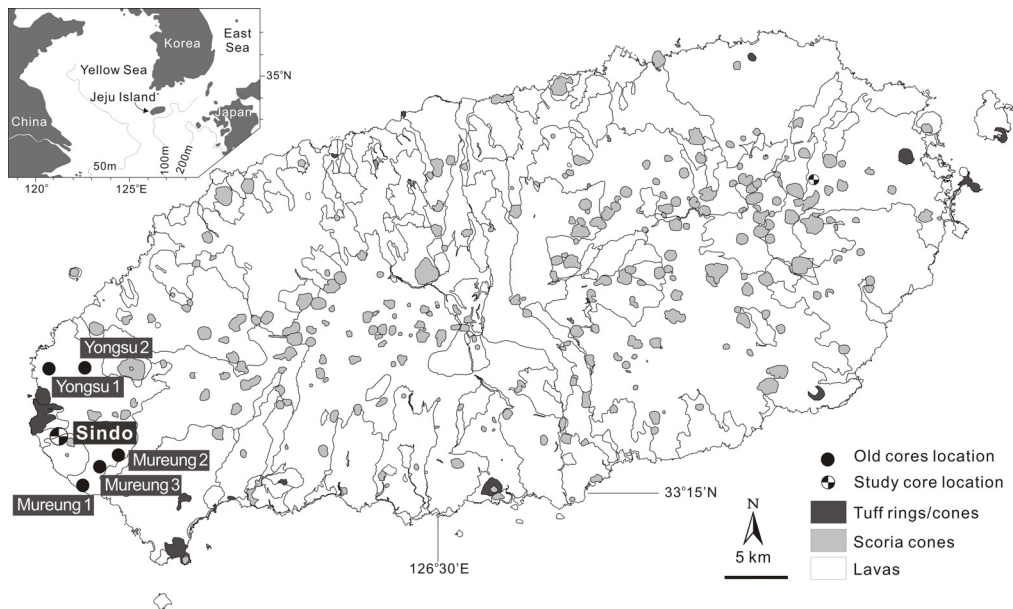


Fig. 1. Simplified geological map of Jeju Island with the outlines of lava flows and monogenetic volcanic cones and the locations of the cores (modified after Sohn and Park, 2005). Inset map shows the location of the island.

분된다(그림 3A).

심도 2-54 m 사이에 분포하는 용암류는 두께가 3 m에서 최대 13 m이며, 상부와 하부에 불규칙한 형태로 각진 다공질 현무암편이 협재되어 있다(그림

3B). 각 용암류에 포함된 기공은 주로 상부와 하부에 많고 중간 부분은 기공이 거의 없는 특징을 보인다. 기공의 형태는 불규칙하게 측방으로 늘어나거나 휘어져 있으며, 일부 기공은 수평의 시트(sheet)상 배

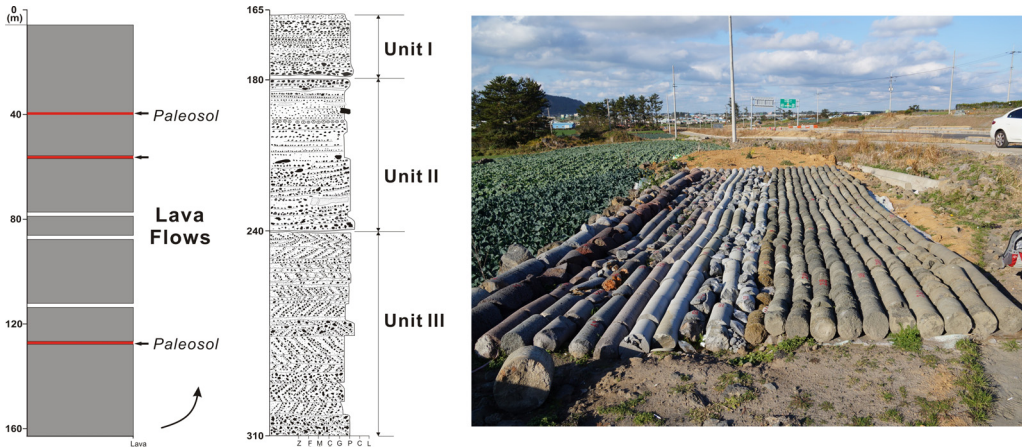


Fig. 2. Simplified columnar log and overview of the 310 m-long Sindo core consisting of lava flows in the upper part and three volcaniclastic units in the lower part.

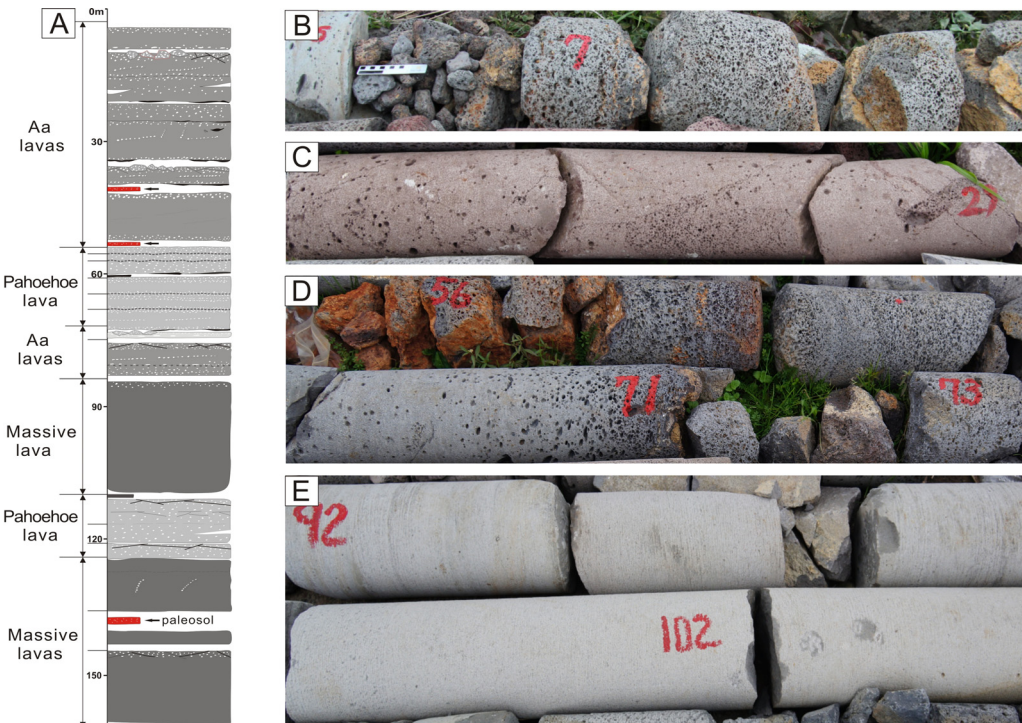


Fig. 3. A) Columnar log of the lava flow units in the 160 m-long upper part of the Sindo core. B) Rough and rubbly surface of highly vesicular clinker occurs at the top of aa lava flow. C) Vertical coalescence of pipe vesicles developed in aa lava flow. D) Thin pahohoe lava flows with vesicular top and bottom. E) Massive, dense and thick lava flows with rare vesicles.

열을 보이거나 수직으로 연장된 파이프(pipe) 형태를 띤다(그림 3C). 이 용암류는 점성이 높은 용암류가 지표를 흐를 때 지면과 대기중에 노출된 표면은 빨리 굳고 내부는 계속 유동하면서 표면이 깨지는 자가-각력화작용(auto-brecciation)으로 용암류 상하부에 클링커(clinker)가 형성된 아아 용암류로 해석된다(Macdonald, 1953; Cas and Wright, 1987).

심도 56-74 m 사이에는 1 m에서 최대 3 m 두께의 비교적 얇은 용암류가 3-4매 누적되어 나타난다(그림 3A). 각각의 용암류는 두께가 얇을 뿐만 아니라 전체적으로 기공의 함량이 높은 특징을 보인다(그림 3D). 기공은 대체로 둥근 형태이며, 크기는 대부분 1 cm 미만이다. 클링커가 발달하지 않고 얇은 용암류가 중첩되어 나타나는 특징은 점성이 낮은 파호이호이 용암류에 의해 정지되었음을 지시한다(Cas and Wright, 1987; Self *et al.*, 1998).

심도 74-82 m 구간에는 3-5 m 두께의 용암류가 분포하는데, 용암류의 상부와 하부에는 다공질이며 적갈색으로 산화된 암편들이 분포하고 있다. 각각의 용암류는 상부와 하부에 기공함량이 높고, 기공은 길쭉하게 늘어난 형태를 띠고 있다. 이 용암류는 점성이 높은 아아 용암류에 의해 형성된 것으로 해석된다.

심도 82-164 m 구간에는 각각 29 m, 13 m, 29 m 두

께의 두꺼운 용암류 3매가 분포하고 있다. 이 용암류는 암회색을 띠고 기공이 거의 없는 치밀한 괴상의 형태를 보이며, 침상의 사장석 반정이 전 구간에 걸쳐 관찰된다(그림 3E). 이 용암은 점성이 높아 잘 흘러가지 못하는 용암류에 의해 형성된 것으로 해석된다.

한편, 용암층 사이의 심도 39-40.5 m, 53.5-56 m, 136-139 m 구간에는 미고화된 토양층이 협재되어 있다(그림 3A). 토양층은 적색에서 황갈색을 띠며, 왕모래-잔자갈 크기의 암편들이 분급이 불량한 세립질 입자들과 섞여 있다. 이 토양층은 화산활동 휴지기 동안 용암류 상부에 퇴적되어 토양화작용(pedogenic alteration)을 받은 고토양층으로 해석된다(e.g., Jeon, 2009).

3.2 서귀포층

3.2.1 퇴적단위 I

1) 암상

퇴적단위 I은 15 m (심도 165-180 m) 두께이며, 상부에 3 m 두께의 괴상 사질 퇴적상(Sm: massive sandstone)과 하부에 약 8 m 두께로 층리가 잘 발달된 사질 및 역질 퇴적상(Sh: horizontally stratified sandstone)으로 구성되어 있다(그림 4A). 퇴적상 Sm은 심도 167-170 m에서 나타나며, 분급이 불량한 갈색의 사질 입자로 구성되어 있고, 왕모래-잔자갈 크

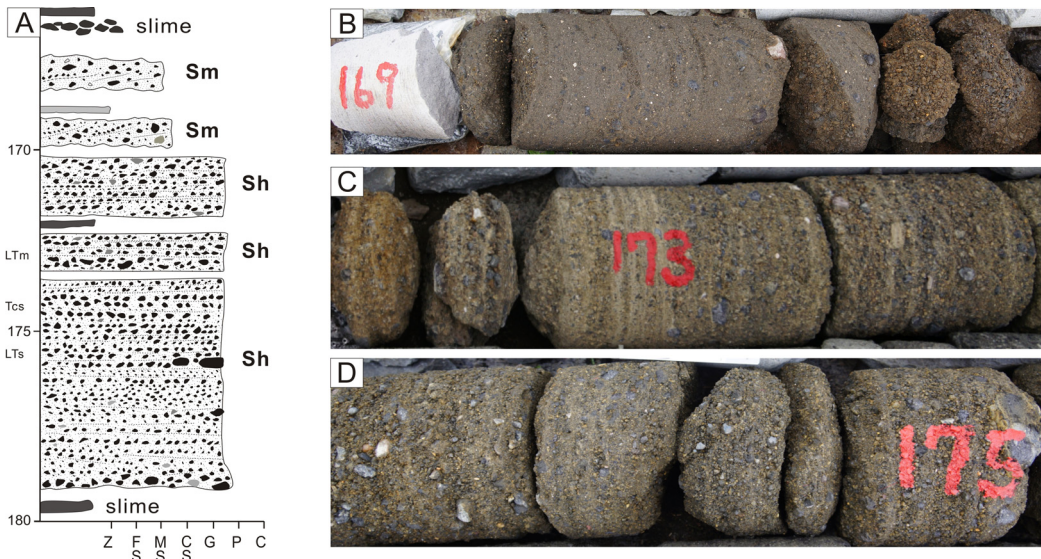


Fig. 4. Lithofacies characteristics of depositional unit I. A) Columnar log of the 15 m-long unit I. B) A massive, volcanoclastic pebbly sandstone. (C, D) Stratified and poorly sorted volcanoclastic pebbly sandstone characterized alternating coarse-grained and fine-grained layer. Clasts are polymictic (basalt, mudstone and acidic volcanic rocks) and mostly subrounded to rounded.

기의 역을 소량 포함한다(그림 4B). 반면, 퇴적상 Sh는 심도 170-178 m 구간에서 나타나며, 층리가 잘 발달되어 있다. 또한, 이 퇴적상은 왕모래-잔자갈 크기의 입자들이 분급이 불량한 사질 입자에 기질 또는 역 지지되어 있고 교호하는 형태를 보인다(그림 4C). 역들은 부분적으로 비늘배열을 보이며, 역의 종류는 현무암이 우세하고 이암, 사암 및 산성질 화산암도 소량 포함되어 있다. 현무암질 암편은 기공도가 다공질에서 치밀한 것까지 다양하며, 암색도 회색, 흑색, 적색의 여러가지 색조를 띠고 원마도가 양호하다(그림 4D). 사암편과 이암편은 왕모래-잔자갈 크기이며, 원마도가 양호하고 가장자리는 적갈색으로 산화되어 있다.

2) 해석

퇴적단위 I은 다양한 조성, 형태(암상), 색조, 양호한 원마도를 보이는 암편들을 포함하고 있어 재퇴적에 의해 형성되었으며, 내부에 해양화석이 포함되어 있지 않아 육성환경에서 형성된 것으로 추정된다. 특히, 퇴적상 Sm은 지표류(하천류 또는 홍수류 등)에 의해 뜬짐으로 운반되던 다량의 퇴적물이 급격히 퇴적되면서 형성된 것으로 해석된다(Miall, 1977; Smith, 1987; Kwon *et al.*, 2011). 반면, 세립질층과 조립질층이 교호하고 층리가 발달된 퇴적상 Sh는 지표류가 약해지는 과정에서 뜬짐으로부터 모래가 퇴적되고, 밀집 이동에 의해 잔자갈 크기의 역들이 퇴적되는 과정이 반복되면서 형성된 것으로 해석된다(Miall, 1977; Jo *et al.*, 1997). 특히, 층리가 발달된 부분은 유수의 의한 견인작용으로 형성되었으며, 역 지지된 특징은 부유된 사질 입자들이 선택 제거되는 키질작용(winnowing)에 의한 잔류 퇴적층으로 해석된다(Sohn and Chough, 1992).

3.2.2 퇴적단위 II

1) 암상

퇴적단위 II는 약 60 m 두께로 심도 180-240 m 사이에 분포하고 있다. 퇴적단위 II는 암상에 따라 평행층리가 발달한 현무암질 화산력 응회암과 화산회 응회암(LTs & Ts: stratified [lapilli] tuff), 사층리가 발달한 화산력 응회암 및 화산회 응회암(LTcs & Tcs: cross stratified [lapilli] tuff), 그리고 괴상의 화산력 및 화산회 응회암(LTm & Tm: massive [lapilli]

tuff)으로 구분된다(그림 5A).

퇴적단위 II는 각각의 암상이 뚜렷하게 구분되지 않고 혼재되어 나타나는 경우가 많아 심도별로 특징적인 부분에 대해 간략히 정리하면 다음과 같다. 심도 180-184 m 구간은 퇴적상 LTm과 Ts, Tcs, LTcs가 불규칙하게 교호하는 형태를 보이는데, 퇴적상 Tcs에서는 층리가 아래로 오목하게 휘어진 탄낭구조가 관찰된다(그림 5B). 또한, 퇴적상 LTcs 내에는 왕모래 크기의 다공질 현무암편과 이암편 및 사암편들도 포함되어 있다. 한편 184 m 구간에는 직경이 약 2-4 mm 크기를 갖는 원형의 부가화산력(accretionary lapilli)이 집중된 구간도 나타난다(그림 5A).

심도 184-209 m 구간은 퇴적상 (L)Tm과 퇴적상 (L)Tcs 및 LTs로 구성되며, 주로 분급이 불량한 중립사에서 왕모래 크기의 기질에 다양한 크기의 암편들이 기질 지지되어 있다. 암편의 종류는 유리질 현무암, 다공질 현무암, 이암 등이며 특히, 이암편은 가장자리가 매끄럽고 유체처럼 늘어나 휘어진 유동형의 형태를 띠는 경우도 있다(그림 5C). 현무암편은 가장자리가 누더기처럼 울퉁불퉁한 꽃양배추(cauliflower) 형태를 띠는 경우도 있고, 암편들이 각진 형태로 깨져 있으며 깨진 가장자리 형태가 이웃한 현무암편과 서로 일치하는 퍼즐구조(jigsaw-fit texture)가 나타나기도 한다(그림 5D).

심도 210-239 m 구간은 퇴적상 LTcs와 LTs로 구성되어 있으며, 왕모래-잔자갈 크기의 입자들이 층리 또는 사층리를 발달시키며 불규칙하게 교호하는 양상을 보인다. 사층리의 각도는 약 10° 미만이며 부분적으로 사층리의 방향이 서로 반대로 교차하는 형태도 관찰된다(그림 5F). 암편의 종류는 다공질 현무암이 우세하고, 세립질 이암과 유리질 현무암도 소량 포함되어 있다. 다공질 현무암편은 대부분 잔자갈-왕자갈 크기로 일정한 반면, 이암편은 수 mm에서 20 cm 정도의 크기 분포를 보이며 가장자리가 매끄럽고 형태가 서로 일치하는 퍼즐구조가 발달해 있다(그림 5E).

2) 해석

퇴적단위 II에 포함된 누더기 및 꽃양배추 형태의 현무암편과 퍼즐구조가 발달한 현무암편 및 이암편은 상승하던 마그마가 물을 함유한 미고결 퇴적층(U층)을 만나 수분이 급격히 끓어오르면서 수증기성 폭발(steam explosion)과 급냉으로 인해 마그마 기원 암

석의 파쇄작용에 의해 형성되었음을 지시한다(Busby-Spera and White, 1987; Skilling *et al.*, 2002). 그리고 이 과정에서 퇴적물 속 부분의 부피가 급격히 팽창하면서 퇴적물은 유체화작용(fluidization)을 받아 불규칙한 유동형의 이암편을 형성한 것으로 해석된다(Wohletz and Sheridan, 1983; Wohletz, 2002).

한편, 괴상이거나 희미한 층리가 발달한 퇴적상 (L)Tm은 응회구 사면에서 화산쇄설물이 급격히 낙하하여 퇴적되거나 낙하 직후 짧은 거리를 이동하면서 퇴적된 것으로 해석된다(Sohn and Chough, 1989). 그리고 퇴적상 (L)Tm이 분급이 불량하고, 층간 경계가 불명확하며, 역점이가 잘 발달하지 않는 특징은 화산쇄설물이 운반 및 퇴적되는 동안 수력학적 분급작용(hydrodynamic sorting)이 미약하였음을

지시한다(Kokelaar, 1986; Sohn *et al.*, 2008; Kwon *et al.*, 2011). 따라서 퇴적단위 II는 전형적인 수성화산분출에 의해 형성되었으며, 지층의 경사각이 대체로 완만한 특징을 보이고 있어 응회환의 일부였던 것으로 해석된다. 그리고 층 내에 포함된 회색의 이암편은 기반암 상부에 존재하는 U층에서 유래된 것으로 추정된다.

3.2.3 퇴적단위 III

1) 암상

퇴적단위 III은 심도 240 m에서 시추가 종료된 310 m까지 총 70 m 두께로 나타나며, 지하로 더 연장될 것으로 추정된다(그림 6A). 퇴적단위 III은 현무암질 화산력 응회암 및 화산회 응회암이 급경사의 층리를 보이는 퇴적상(LTis & Tis: inclined strati-

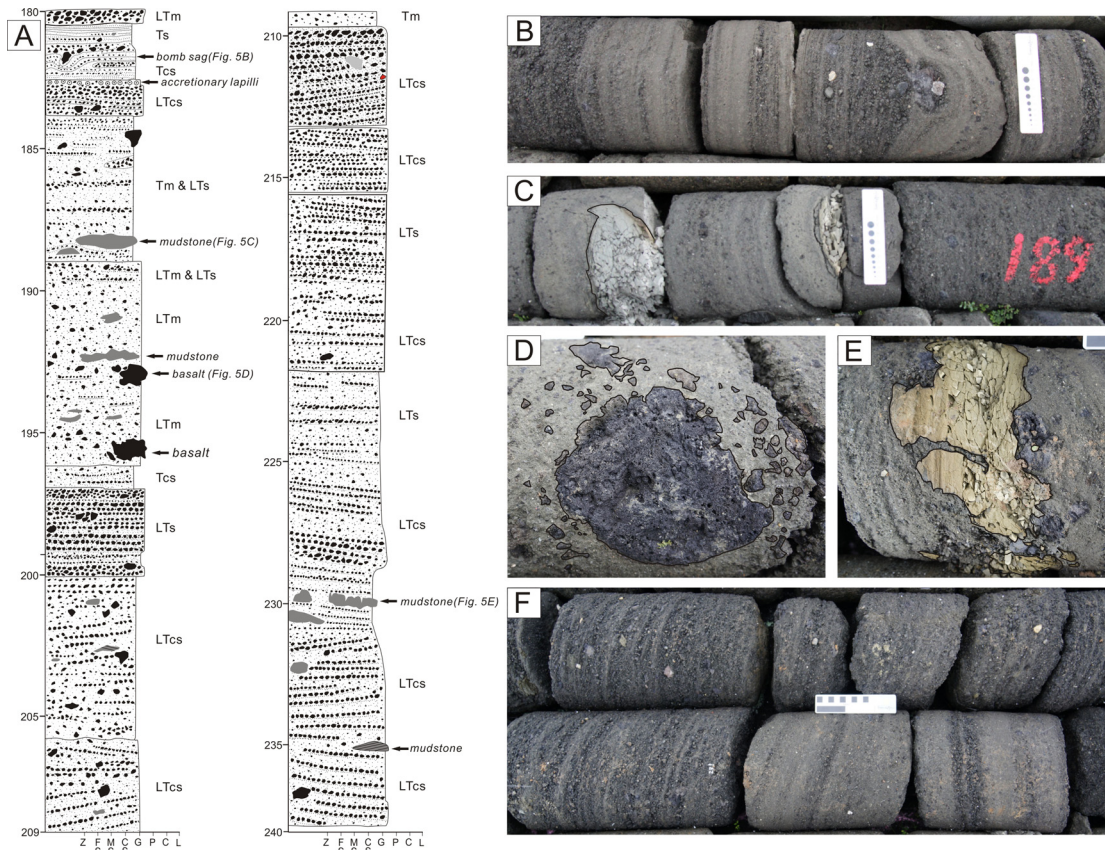


Fig. 5. A) Columnar log of the 60 m-long unit II. B) Well stratified tuff and bomb sag structure in the middle part of Ts. C) Partly laminated mudstone clasts with fluidal margin in LTm. D) Detailed view of the irregular jigsaw-fitted vesicular basalt clasts. Irregular clasts with ragged margin. E) Irregular mudstone clasts have jigsaw-fit margins and are set in greenish gray tuff matrix. F) Low angle cross-stratified tuff deposit.

fied [lapilli] tuff)과 화산력 응회암 및 화산회 응회암이 수평 또는 저각도로 쌓인 퇴적상(LTs & Ts: stratified [lapilli] tuff), 괴상 화산력 응회암 및 화산회 응회암 퇴적상(LTm & Tm: massive [lapilli] tuff), 그리고 층리가 휘어진 응회암 퇴적상(Tc: convoluted tuff)으로 구분된다(그림 6A).

퇴적상 LTis와 Tis는 퇴적단위 III의 대부분을 차지하고 있으며, 주로 세립질과 조립질 퇴적층이 교호하고 층리의 각도는 30-60° 내외로 안식각 보다 급하게 경사져 있다(그림 6B). 특히, 경사의 방향이 왼쪽에서 오른쪽으로 급하게 기울어진 상태에서 곧바로 오른쪽에서 왼쪽으로 방향이 바뀌는 형태가 반복되면서 나타나는 경우가 대부분이다. 그리고 경사의 방향이 급변하는 부분의 경계면은 시추코어 상에서 불확실하거나 나타나지 않는 경우가 많다(그림 6C-6E). 퇴적상 LTis와 Tis에는 왕모래-왕자갈 크기

의 다공질의 흑색 현무암편이 우세하고 소량의 이암편 및 화산암편이 포함되어 있다. 현무암편은 가장자리가 누더기처럼 울퉁불퉁한 꽃양배추 형태를 보이기도 하고 깨진 암편들의 형태가 서로 일치하는 퍼즐구조가 나타나기도 한다. 이암편은 회색을 띠고 부분적으로 엽층리가 발달하고 있으며, 가장자리는 매끄럽고, 유체처럼 휘어진 유동형을 보이거나 부분적으로 퍼즐구조가 나타나기도 한다.

퇴적상 LTs와 Ts는 두께가 수 cm-수십 cm 내외로 얇고 왕모래-잔자갈 크기의 다공질 흑색 현무암편과 소량의 이암편이 수평 또는 저각도의 층리를 보이는 퇴적상으로 퇴적상 LTis와 Tis 사이에 불규칙하게 협재되어 있다.

퇴적상 LTm과 Tm은 괴상의 화산력 및 화산회 응회암으로 두께는 수 cm-5 m이며 퇴적상 LTis와 Tis 사이에 부분적으로 협재되어 나타난다(그림 6A).

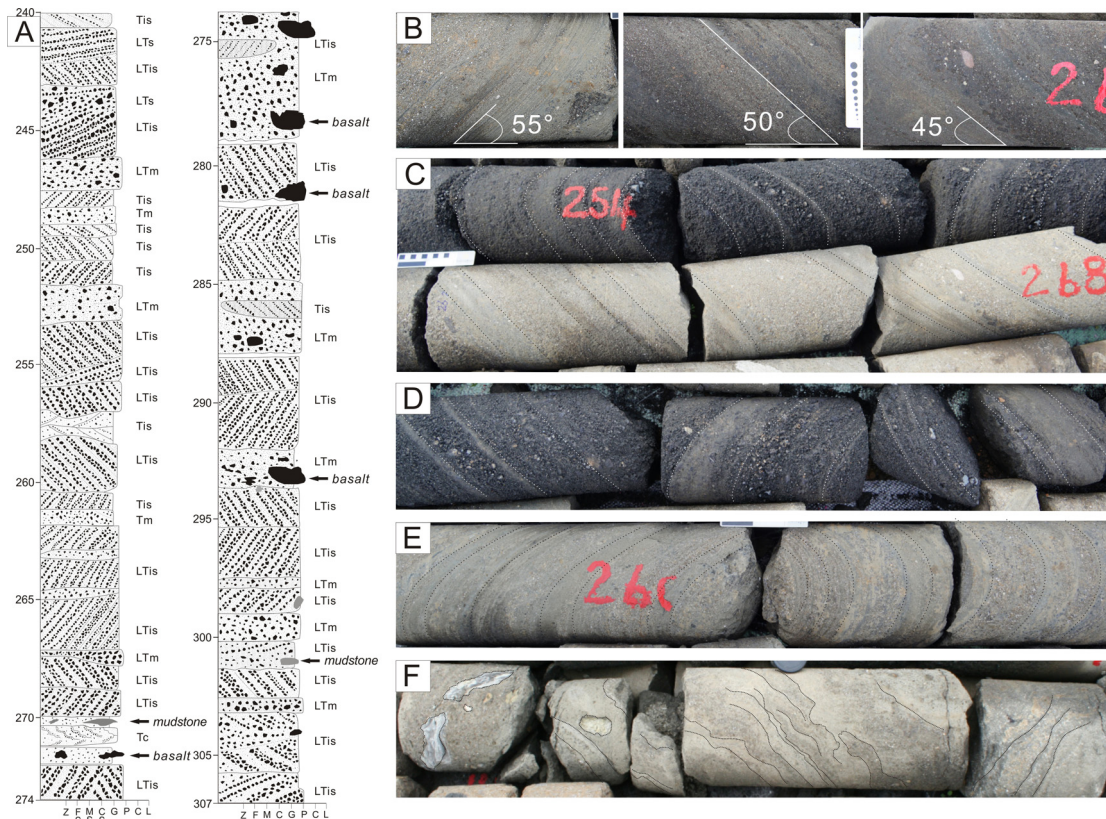


Fig. 6. A) Columnar log of the 70 m-long unit III. B) Detailed view of steep-inclined, stratified (lapilli) tuff, which commonly has an internal bedding inclined at an angle of 45° to 55°. (C to E) Steep-inclined, stratified lapilli tuff and tuff, consisting of alternations of cm-thick, basaltic lapilli-rich and lapilli-poor layers with steep bedding inclined at an angle of 50° to 60°. F) Steep-inclined, convoluted tuff layer in 270 to 272 m.

퇴적상 LTm과 Tm의 구성 입자는 다공질의 현무암편이 대부분을 차지하고 일부 이암편과 화산암편이 포함되어 있다. 이암편의 경우는 왕모래-거력 크기이며 주로 회색을 띠고 엽층리가 발달되어 있다.

퇴적상 Tc는 심도 271-273 m 구간에서 나타나며(그림 6A), 층리가 약 40-50°로 기울어져 있으며, 층리는 불규칙한 파동 형태를 보인다(그림 6F). 이 퇴적상은 주로 세립질-왕모래 크기의 입자들로 구성되며, 심도 272 m 구간에서는 불규칙한 파동 형태로 휘어진 층리가 서로 반대로 경사져 나타나기도 한다.

2) 해석

퇴적단위 III의 층리가 잘 발달된 퇴적상 LTis와 Tis는 서귀포층에서 흔히 관찰되는 화쇄난류에 의한 부유와 견인 및 낙하에 의해 형성된 퇴적상과 유사한 특징을 보인다(Sohn and Chough, 1992; Branney and Kokelaar, 2002; Dellino *et al.*, 2004). 그러나 안식각 이상의 급경사(30-60°)를 보이며 서로 완전히 다른 방향으로 경사져 있는 퇴적상은 지금까지 보고된 화쇄난류 퇴적상과는 다르다. 특히 지금까지 수성화산 분출에서 형성될 수 있는 수분을 많이 함유한 상태의 층리 각도가 최대 45° 내외임을 고려할 때(e.g., Sohn and Chough, 1992), 퇴적상 (L)Tis는 수성화산체 바깥의 쇄설물층(rim beds)을 구성하던 지층에서 기원된 것이 아니라 분화구 안쪽에 불안정하게 쌓여있던 화구벽(crater sidewall) 또는 화구륜(crater rim)의 일부가 화산분출에 의한 충격 또는 사면불안정(slope instability)에 의해 분화구 내부로 거대암편(mega-block) 형태로 붕괴된 다이아트림(diatreme) 퇴적상으로 해석된다(Lorenz *et al.*, 2002; McClintock and White, 2006). 다이아트림 내에는 화구벽 등의 붕괴와 화산분출물의 재유입 등에 의해 매우 복잡하고 다양한 퇴적구조가 형성되는 것으로 알려져 있다(Lorenz, 1986; Lorenz and Kurszlauskis, 2007). 이와 같이 화도 내부에서 발생하는 충격 또는 진동에 대한 연구는 마그마가 물 또는 물을 함유한 미고화 퇴적물과의 폭발적인 상호작용(thermohydraulic explosive interaction)에 의해 매우 강력한 에너지 충격파(energetic shock waves)를 발생시킨다는 이론이며, 실험적으로 증명되었다(Houghton and Smith, 1993; Zimanowski *et al.*, 1997; Zimanowski and Buttner, 2002; McClintock

and White, 2006).

퇴적상 (L)Ts 및 LTm은 퇴적상 II와 마찬가지로 다공질이며, 유리질 현무암편과 퍼즐구조 및 유동형의 형태를 띠는 이암편 등이 포함된 특징으로 볼 때 일차적인 수증기성 폭발과 급냉에 의해 형성된 것으로 생각된다(Hooten and Ort, 2002; Skilling *et al.*, 2002). 그러나 상하부에 급경사 퇴적상 (L)Tis 사이에서 불규칙하게 협재되어 나타나는 것으로 미루어 화도 주변에 불안정하게 쌓여있던 화구벽 등의 일부가 블록형태로 분화구 내부로 무너져 내릴 때 완만하게 기울어진 결과로 해석된다. 그리고 퇴적상 (L)Tm 또한 화쇄난류의 급격한 낙하에 의해 화구륜 주변에 쌓여 있다가 분화구 내부로 봉락된 결과로 해석된다.

한편, 퇴적상 Tc는 지층의 경사각이 약 40° 내외로 급하고 층리가 파동형태로 휘어진 특징은 퇴적상 (L)Tis와 같이 분화구 내부에 가파르게 쌓여 있던 지층의 일부가 무너지고 서로 부딪히면서 발생한 충격에 의해 층리가 파동모양으로 휘어진 결과로 생각된다. 그리고 퇴적상 Tc는 성산일출봉 사면에서 퇴적과 동시에 가파른 사면을 따라 미끄러져 내리면서 형성된 교란된 층리구조와 유사한 모양을 보이지만 상하부에 안식각 이상으로 쌓인 퇴적상 (L)Tis가 분포하는 것으로 볼 때 분화구 내부로 쏟아져 내리면서 발생한 충격에 따른 유체화 작용에 의해 층리가 휘어진 것으로 해석된다(Moretti *et al.*, 1999). 따라서 퇴적단위 III은 수성화산 분출과정에서 분화구 주변에 가파르게 쌓여있던 지층들이 분출과정에서 발생한 충격파 등에 의해 분화구 내부로 밀려들어와 급격히 퇴적되는 과정에서 형성된 것으로 해석할 수 있다(White, 1996; Zimanowski *et al.*, 1997; Neuwerth *et al.*, 2006).

4. 토의 및 고찰

4.1 화도충전 퇴적체의 형성과정

지금까지 제주도 전역에서 수많은 시추조사가 수행되었으며, 이를 바탕으로 제주도 지하의 상세한 지질학적 연구가 진행되어 왔다(Koh, 1997; Park *et al.*, 2000a, 2000b; Sohn and Park, 2004; Koh *et al.*, 2013). 최근 연구결과에 따르면 제주도는 약 180만 년 전 대륙붕 또는 얇은 해저에서 물과 마그마의 폭발

적인 반응에 의한 수성화산 분출로 응회환과 응회구가 만들어지고, 재퇴적과정을 거치면서 평균 약 100 m 두께의 서귀포층이 형성되었다(Yoon and Chough, 2006; Sohn and Yoon, 2010). 서귀포층 퇴적 이후 제주도 전역에서 스트롬볼리형 분출이 발생하여 단성화산이 만들어지고 많은 양의 용암류가 분출하여 지표를 피복하였다. 이들 용암류는 점차 누적되어 높은 지형을 만들었고 이후 한라산을 중심으로 순상화산 분출이 발생하여 현재와 같은 제주도의 형태가 만들어지게 되었다(Koh *et al.*, 2013). 이와 같은 과정을 거치면서 제주도 지표에는 약 370여개의 단성화산이 형성되었고, 지하에도 수많은 화산들이 존재하게 되었다. 이처럼 제주도 지하 전역에는 수많은 화산들이 존재함에도 불구하고 지금까지 시추과정에서 분화구 자체를 관통한 경우는 거의 알려지지 않았다(e.g., Jeon, 2009).

연구 대상인 신도코어는 지금까지 제주도 전역에서 얻어진 시추자료와 큰 차이를 보이는데, 신도코어가 분화구를 관통한 화도 충전퇴적체 또는 다이아트림 기원으로 해석하는 근거는 다음과 같다. 먼저 신도코어의 최하부 퇴적단위 III에서 안식각 이상으로 쌓인 퇴적상 (L)Tis가 존재하며, 이 지층들의 경사방향이 서로 수없이 엇갈리는 형태로 나타난다. 일반적으로 응회구의 최대 경사각이 45°이며, 응회환의 경우 훨씬 낮은 경사각을 지니고 있다. 퇴적상 (L)Tis는 30-60°의 경사를 보이고 있어 화쇄난류 또

는 일반적인 지표 퇴적과정에서는 형성될 수 없는 지층이다. 따라서 퇴적단위 III은 화산분출 과정에서 비어있던 깔대기 모양의 분화구 내부에 가파르게 쌓여있던 화구벽 또는 화구륜의 일부가 화산분출 충격(일종의 shockwave) 및 사면불안정에 의해 무너져 내리면서 형성된 것으로 해석할 수 있다(Lorenz, 1986; Houghton and Smith, 1993). 그리고 퇴적단위 III의 두께가 70 m로 비정상적으로 두꺼운 원인은 무너져 내린 지형의 깊이를 간접적으로 반영하는데, 유사한 암상의 지층 두께가 70 m라는 것은 지하로 오목한 공간의 깊이가 그 이상이라는 것을 지시한다.

그리고 퇴적단위 III의 퇴적상 Tc는 분화구 주변에 미고화된 상태로 쌓인 지층이 분화구 내부로 봉락되는 과정에서 발생한 충격으로 인해 층리가 휘어진 독특한 분화구 내부 퇴적상이라 할 수 있다(Owen, 1996; Neuwerth *et al.*, 2006).

한편 신도코어 인근에 위치한 무릉과 용수지역 시추코어의 서귀포층 두께가 20-50 m에 불과한데 비해 신도코어 서귀포층의 두께가 150 m(퇴적단위 I 20 m + 퇴적단위 II 60 m + 퇴적단위 III 70 m)로 비정상적으로 두꺼운 원인은 퇴적단위 III이 아래로 오목한 깔대기 모양의 분화구 내부를 채운 결과였음을 뒷받침한다(그림 7). 결국, 신도코어는 주변 지역과 달리 두꺼운 다이아트림 퇴적체가 존재하는 분화구 내부를 직접 관통함으로써 직접적으로 U층과 접촉하지 못한 것으로 해석된다.

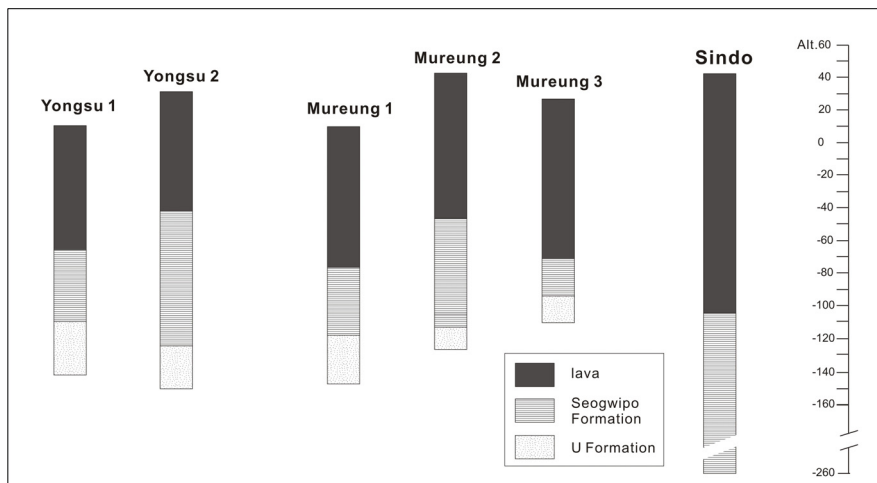


Fig. 7. Distribution of the Seogwipo Formation in the subsurface of western Jeju Island. The Seogwipo Formation is anomalously thick in the Sindo core in contrast to the other cores.

4.2 화도 이동

퇴적단위 III을 정합적으로 피복하는 퇴적단위 II는 수성화산 분출로 지표면에서 응회환/응회구를 형성한 화쇄난류 퇴적상으로서 일반적인 다이아트림 퇴적상과 함께 동일한 코어에서 나타나기 어렵다. 왜냐하면 폭발적인 분출로 형성된 화산쇄설성 물질은 대부분 분화구의 바깥쪽에 쌓이게 되어 분화구 내부의 수직 단면상에서 두 퇴적상이 함께 나타날 수 없다(e.g., Vespermann and Schmincke, 2000; Schmincke, 2004; Lorenz, 2006). 따라서 퇴적단위 III과 II 사이가 단절면 또는 부정합면 없이 연속적으로 쌓여 있는 원인은 폭발적인 수성화산분출이 일어나 분화구 내부로 지층의 붕괴가 발생하여 화도충전 퇴적층(퇴적단의 III)이 형성되고, 이 과정에서 분화구가 막히면서 화도가 이동한 것으로 추정된다(e.g., Sohn, 1995). 그리고 이동된 화도에서 다시 수성화산분출이 발생하여 인접해 있던 기존 분화구 내부에 퇴적단위 II가 쌓인 것으로 해석된다.

지금까지 알려진 분화구 내부 퇴적상에 대한 연구결과를 살펴보면 분화구 내부는 폭발에 의한 하부 지층의 굴착(explosive excavation)과 함몰로 인해 주변보다 오목한 지형이 만들어지고 이차적으로 분화구에 물이 고이면서 화구호 등이 형성되는 것으로 알려져 있다(Lorenz, 1986; Lorenz and Kurszlauskis, 2007). 그러나 신도코어의 경우 화도충전 퇴적체 위에 화구호 기원의 호성퇴적층이 쌓이지 않고 곧바로 일차 화산쇄설성 지층이 출현한다는 것은 분화구 붕괴 이후 연이어 화산분출이 있었음을 지시한다. 따라서 신도코어는 초기 수성화산분출로 화산체가 형성되고(그림 8A) 동시에 화산분출 충격 또는 사면불안정 등으로 인해 붕괴가 발생하여 분화구가 막히는 현상이 발생하였다(그림 8B). 그리고 분화구가 막힘에 따라 화도가 이동하여 근처에서 다시 폭발하여 화산재(퇴적단위 II)를 쌓고(그림 8C), 이후 육성환경에서 두꺼운 용암류가 그 위를 피복한 것으로 요약할 수 있다(그림 8D). 본 연구를 통해 관찰된 시추결과를 단면상에 도시해보면, 주변지역 용수와 무릉지역의 시추자료와 달리 신도코어는 용암류와 서귀포층의 다이아트림을 관통하였으나 하부에 위치한 U층까지는 관통하지 못한 것으로 해석된다(그림 8D).

4.3 신도코어의 의미

지금까지 제주도에서는 수많은 시추자료들이 얻어져 왔고, 이를 바탕으로 제주도 지하구조에 대한 많은 이해가 이루어져 왔다. 그러나 신도코어와 같이 분화구를 직접 관통한 자료는 거의 알려진 바가 없다. 신도코어는 제주도가 한라산을 중심으로 한 번의 분출로 형성된 전형적인 순상화산이 아니라 수많은 단성(드물게 복성) 화산들로부터 분출한 용암류와 화산쇄설물이 합쳐지고 층상으로 누적되어 형성되었으며, 제주도 지하에도 수많은 화산들이 존재하고 있음을 뒷받침하는 자료라 할 수 있다(e.g., Koh *et al.*, 2013). 또한 신도코어는 제주도 형성과정은 물론 서귀포층 형성 당시 수성화산활동에 의해 형성된 분화구 내부를 이해하는데 있어 중요한 의미를 지닌 것이라 할 수 있다. 특히 신도코어는 시추코어의 수직적 암상변화로부터 화도이동(vent migration)을 추정할 수 있는 최초의 사례를 제시한 것으로 보인다. 지금까지 수성화산에서 화도이동은 화산의 지형 분석과 분화구 바깥에 쌓인 화산쇄설층의 지층형태, 퇴적상 그리고 고유향 분석을 통해 추정되어 왔으나(e.g., Sohn, 1995; Sohn and Park, 2005; Sohn *et al.*, 2012) 신도코어는 시추코어의 수직적 암상변화로부터도 화도 이동의 증거를 찾을 수 있음을 보여주어 수성화산의 성장과정 연구와 관련하여 새로운 시사점을 던져주고 있다. 또한 이와 같이 독특한 화도충전 퇴적체의 시추결과를 보고함으로써 보다 정밀한 제주도 지하지질의 구조를 파악하고 제주도 형성 초기의 화산활동사를 해석하는데 도움이 될 수 있을 것이라 생각된다.

5. 결론

제주도 서부 지역에 위치한 서귀포시 대정읍 신도리에서 주변 지역보다 서귀포층이 비이상적으로 두껍고 특이한 퇴적구조를 가진 시추코어(신도코어)가 획득되었다. 신도코어의 총 길이는 310 m이며, 상부의 160 m 두께의 용암류와 하부의 150 m 두께의 화산쇄설암으로 구성된다. 용암류는 두꺼운 아아 용암류와 무구조 피상 용암류가 우세하고, 복합 파호이호기 용암류가 소규모로 협재되며, 용암류 사이에는 수 매의 고토양층이 발달한다. 서귀포층에 해당되는 화산쇄설암은 입자 크기, 퇴적구조, 역의

크기와 종류, 기질의 특징 등에 따라 크게 세 개의 퇴적단위로 구분되며, 상부로부터 각각 퇴적단위 I, II, III으로 구성된다.

퇴적단위 I은 괴상 사암 퇴적상(Sm)과 수평층리가 발달한 역질 사암(Sh)으로 구성되며 화산쇄설층의 재동층으로서 지표류(하천류 또는 홍수류)에 의해 형성되었다. 퇴적단위 II는 수평층리가 발달한 현무암질 화산력 응회암과 화산회 응회암(LTs & Ts), 사층리가 발달한 화산력 응회암 및 화산회 응회암(LTcs & Tcs), 그리고 괴상 화산력 응회암(LTm)으로 구분된다. 이 퇴적단위는 전형적인 수성화산분출에 의해 형성되었으며, 지층의 경사각이 대체로 완만한 특징을 보이고 있어 응회환의 일부였던 것으로

해석된다. 퇴적단위 III은 현무암질 화산력 응회암 및 화산회 응회암이 급경사의 층리를 보이는 퇴적상(LTis & Tis)과 화산력 응회암 및 화산회 응회암이 수평 또는 저각도로 쌓인 퇴적상(LTs & Ts), 괴상 화산력 응회암 및 화산회 응회암 퇴적상(LTm & Tm), 그리고 층리가 휘어진 응회암 퇴적상(Tc)으로 구분된다. 이 퇴적단위는 수성화산 분출과정에서 분화구 주변에 가파르고 불안정하게 쌓여있던 지층들이 분출과정에서 발생한 충격과 등에 의해 분화구 내부로 붕괴되어 형성된 것으로 해석된다. 퇴적단위 III과 II가 단절면 없이 연속적으로 산출되는 것은 폭발적인 수성화산분출이 일어나고 분화구 내부로 지층의 붕괴가 발생하여 화도충전 퇴적층(퇴적단위 III)이 형

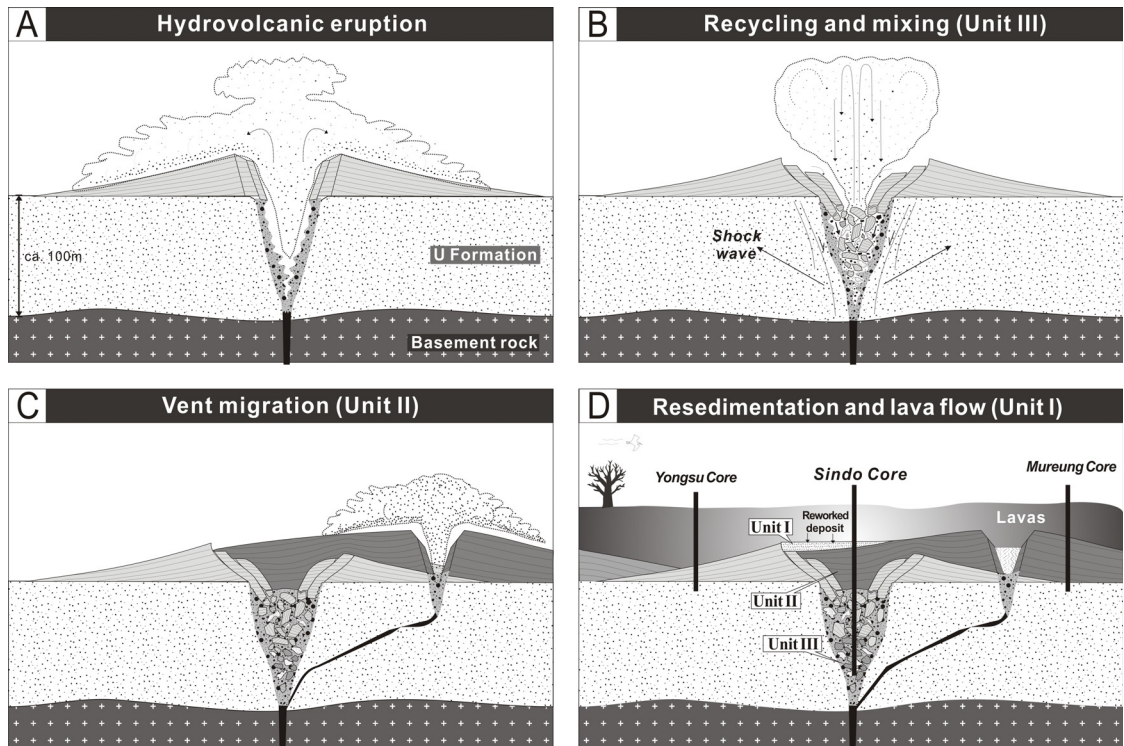


Fig. 8. Cartoons illustrating the hydrovolcanic activity and diatreme formation in the Sindo core site. (A) Explosive hydrovolcanic activity caused by the interaction of basaltic magma with the unconsolidated and probably water-saturated U Formation produces a tuff ring, which probably had a root zone near the base of the formation. An initial primary diatreme was formed by the partial collapse of the conduit wall and the mixing of magma and wet sediment, resulting in a complex zone of breccia composed of irregularly shaped basalt and mudstone clasts. (B) Large-scale collapse of the rim deposits and conduit wall rocks, triggered by slope instability and volcanic shockwaves, resulted in the formation of depositional unit III and the clogging of the vent. (C) The clogging of the vent made the ascending magma to follow a new route and erupt at a new vent site, resulting in a new tuff ring at a nearby vent site. (D) Part of the rim beds of the new tuff ring accumulated inside the crater of the older tuff ring, producing depositional unit II. Afterwards, reworked volcanoclastic deposits (unit I) and lava flows were superposed above the hydrovolcanic deposits.

성되고, 이 과정에서 분화구가 막히면서 화도의 이동이 일어나 주변 지역에서 다시 수성화산분출이 발생하여 퇴적단위 II가 쌓인 결과로 해석된다.

신도코어의 화산활동사를 요약하면, 최초로 수성화산분출로 화산체가 형성되고 동시에 분출 충격 또는 사면불안정 등으로 인해 분화구 내부로 붕괴가 발생하여 화도가 막히게 되었다. 화도의 이동으로 마그마가 근처에서 다시 폭발하여 수성화산체를 형성하고 기존의 수성화산을 피복하였다. 분출 종료 후 화산쇄설층의 일부는 지표류(하천류 또는 홍수류) 등에 의해 재동되었고, 이후 두꺼운 용암류가 그 위를 피복하였다.

지금까지 제주도에서는 수많은 시추자료들이 얻어져 왔고, 이를 바탕으로 지하구조에 대한 정밀한 이해가 이루어져 왔지만 신도코어의 경우와 같이 수성화산체의 분화구를 직접 관통한 자료는 보고된 사례가 없다. 따라서 신도코어는 수성화산 분화구의 내부구조를 이해하는데 있어 중요한 의미를 지닌 것이라 할 수 있다. 특히, 신도코어는 시추코어의 수식 단면상에서 수식적인 암상변화로부터 화도이동을 추정할 최초의 사례이며, 수성화산의 성장과정 연구에 새로운 의미가 될 것으로 생각된다.

사 사

논문작성에 많은 조언과 도움을 주신 손영관 교수님과 고기원 박사님 그리고 고수연 학우에게 감사드리며, 시추코어를 활용할 수 있도록 배려해 주신 제주특별자치도 수자원본부에도 고마운 마음을 전합니다. 그리고 논문에 건설적인 조언을 주신 황상구 교수님과 정공수 교수님께 깊은 감사를 드립니다.

REFERENCES

Branney, M.J. and Kokelaar, B.P., 2002, Pyroclastic Density Currents and the Sedimentation of Ignimbrites. Geological Society Memoir 27. The Geological Society, London, 143 p.
 Busby-Spera, C.J. and White, J.D.L., 1987, Variation in peperite textures associated with differing host-sediment properties. Bulletin of Volcanology, 49, 765-775.
 Cas, R.A.F. and Wright, J.V., 1987, Volcanic Successions Modern and Ancient: A geological approach to proc-

esses, products and successions. Allen & Unwin Ltd., London, 528 p.
 Dellino, P., Isaia, R., La Volpe, L. and Orsi, G., 2004, Interaction between particles transported by fallout and surge in the deposits of the Agnano-Monte Spina eruption (Campi Flegrei, Southern Italy). Journal of Volcanology and Geothermal Research, 133, 193-210.
 Hooten, J.A. and Ort, M.H., 2002, Peperite as a record of early-stage phreatomagmatic fragmentation processes: an example from the Hopi Buttes volcanic field, Navajo Nation, Arizona, USA. In: I.P. Skilling, J.D.L. White and J. McPhie (Editors), Peperite: Processes and Products of Magma-Sediment Mingling. Journal of Volcanology and Geothermal Research, 114, 95-106.
 Houghton, B.F. and Smith, R.T., 1993, Recycling of magmatic clasts during explosive eruptions: estimating the true juvenile content of phreatomagmatic volcanic deposits. Bulletin of Volcanology, 55, 414-420.
 Jeon, Y.M., 2009, Lithofacies and emplacement processes of the volcanogenic rocks in the Cretaceous Gyeongsang Basin and Quaternary Jeju Island, Korea. Ph.D. Thesis, Gyeongsang National University, Korea, 165 p (in Korean with English abstract).
 Jo, H.R., Rhee, C.W. and Chough, S.K., 1997, Distinctive characteristics of a streamflow-dominated alluvial fan deposit: Sanghori area, Kyeongsang Basin (Early Cretaceous), southeastern Korea. Sedimentary Geology, 110, 51-79.
 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. and Park, J.-B., 2010a, The Study on Geology and Volcanism in Jeju Island (II): Petrochemistry and ⁴⁰Ar/³⁹Ar Absolute ages of the Volcanic Rocks in Gapado-Marado, Jeju Island. Economic and Environmental Geology, 43, 53-66 (in Korean with English abstract).
 Koh, G.W. and Park, J.-B., 2010b, 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 Jeju Island. Economic and Environmental Geology,

- 41, 93-113 (in Korean with English abstract).
- Kokelaar, P., 1986, Magma-water interactions in subaqueous and emergent basaltic volcanism. *Bulletin of Volcanology*, 48, 275-289.
- Kwon, C.W., Jeon, Y.M., Ki, J.S., Jeong, J.O. and Sohn, Y.K., 2011, Eruption and depositional processes of the Jeonchon tuff cone in the Miocene Eoil Basin, SE Korea. *Journal of the Geological Society of Korea*, 47, 325-341 (in Korean with English abstract).
- Lee, M.W., Won, C.K., Lee, D.Y. and Park, G.H., 1994, Stratigraphy and petrology of volcanic rocks in southern Cheju Island, Korea. *Journal of the Geological Society of Korea*, 30, 521-541 (in Korean with English abstract).
- Lorenz, V., 1986, On the growth of maars and diatremes and its relevance to the formation of tuff rings. *Bulletin of Volcanology*, 48, 265-274.
- Lorenz, V. and Kurszlaukis, S., 2007, Root zone processes in the phreatomagmatic pipe emplacement model and consequences for the evolution of maar-diatreme volcanoes. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 159, 4-32.
- Lorenz, V., Zimanowski, B. and Buettner, R., 2002, On the formation of deep-seated subterranean peperite-like magma-sediment mixtures. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 114, 107-118.
- MacDonald, G.A., 1953, Paheohoe, aa, and block lava. *American Journal of Science*, 251, 169-191.
- McClintock, M. and White, J.D.L., 2006, Large phreatomagmatic vent complex at Coombs Hills, Antarctica: Wet, explosive initiation of flood basalt volcanism in the Ferrar-Karoo LIP. *Bulletin of Volcanology*, 68, 215-239.
- Miall, A.D., 1977, A review of the braided river depositional environment. *Earth Science Reviews*, 13, 1-62.
- Moretti, M., Alfaro, P., Caselles, O. and Canas, J.A., 1999, Modelling seismites with a digital shaking table. *Tectonophysics*, 304, 369-383.
- Neuwerth, R., Suter, F., Guzman, C.A. and Gorin, G.E., 2006, Soft-sediment deformation in a tectonically active area: The Plio-Pleistocene Zarzal Formation in the Cauca Valley (Western Colombia). *Sedimentary Geology*, 186, 67-88.
- Owen, G., 1996, Experimental soft-sediment deformation: structures formed by the liquefaction of unconsolidated sands and some ancient examples. *Sedimentology*, 43, 279.
- Park, K.H., Cho, D.L. and Kim, J.C., 2000a, Geological report of the Moseulpo-Hanlim sheet (1:50,000). Korea Institute of Geology, Mining and Materials, 56 p (in Korean with English abstract).
- Park, K.H., 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).
- Self, S., Keszthelyi, L. and Thordarson, T., 1998, The importance of pahoehoe. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 26, 81-110.
- Schmincke, H.U., 2004, *Volcanism*. Springer, Berlin. 324 p.
- Skilling, I.P., White, J.D.L. and McPhie, J., 2002, Introduction. In: I.P. Skilling, J.D.L. White and J. McPhie (Editors), *Peperite: Processes and Products of Magma-Sediment Mingling*. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 114, 7.
- Smith, G.A., 1987, The influence of explosive volcanism on fluvial sedimentation: The Deschutes Formation (Neogene) in central Oregon. *Journal of Sedimentary Petrology*, 57, 613-629.
- Sohn, Y.K., 1995, Structures and sequences of the Yongmeori tuff ring, Cheju Island, Korea: sequential deposition from shifting vents. *Journal of the Geological Society of Korea*, 31, 57-71.
- Sohn, Y.K. and Chough, S.K., 1989, Depositional processes of the Suwobong tuff ring, Cheju Island (Korea). *Sedimentology*, 36, 837-855.
- Sohn, Y.K. and Chough, S.K., 1992, The Ilchulbong tuff cone, Cheju Island, South Korea: depositional processes and evolution of an emergent, Surtseyan-type tuff cone. *Sedimentology*, 39, 523-544.
- Sohn, Y.K. and Chough, S.K., 1993, The Udo tuff cone, Cheju Island, South Korea: transformation of pyroclastic fall into debris fall and grain flow on a steep volcanic cone slope. *Sedimentology*, 40, 769-786.
- 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. *Geoscience Journal*, 8, 73-84.
- Sohn, Y.K. and Park, K.H., 2005, Composite tuff ring/cone complexes in Jeju Island, Korea: possible consequences of substrate collapse and vent migration. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 141, 157-175.
- Sohn, Y.K., 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.
- Sohn, Y.K., Cronin, S.J., Brenna, M., Smith, I.E.M., Németh, K., White, J.D.L., Murtagh, R.M., Jeon, Y.M. and

- Kwon, C.W., 2012, Ilchulbong tuff cone, Jeju Island, Korea, revisited: A compound monogenetic volcano involving multiple magma pulses, shifting vents, and discrete eruptive phases. *Geological Society of America Bulletin*, 124, 259-274.
- Vespermann, D. and Schmincke, H.-U., 2000, Scoria cones and tuff rings. In: H. Sigurdsson, B.F. Houghton, S.R. McNutt, H. Rymer and J. Stix (Editors), *Encyclopedia of Volcanoes*. Academic Press, San Diego, 683-694.
- White, J.D.L., 1996, Impure coolants and interaction dynamics of phreatomagmatic eruptions. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 74, 155-170.
- Wohletz, K., 2002, Water/magma interaction: some theory and experiments on peperite formation. In: I.P. Skilling, J.D.L. White and J. McPhie (Editors), *Peperite: Processes and Products of Magma-Sediment Mingling*. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 114, 19-35.
- Wohletz, K. and Sheridan, M., 1983, Hydrovolcanic eruptions II. Evolution of basaltic tuff rings and tuff cones. *American Journal of Science*, 283, 385-413.
- 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).
- Zimanowski, B. and Buttner, R., 2002, Dynamic mingling of magma and liquefied sediments. In: I.P. Skilling, J.D.L. White and J. McPhie (Editors), *Peperite: Processes and Products of Magma-Sediment Mingling*. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 114, 37-44.
- Zimanowski, B., Buttner, R. and Lorenz, V., 1997, Premixing of magma and water in MFCI experiments. *Bulletin of Volcanology*, 58, 491-495.

투 고 일 : 2013년 10월 17일

심 사 일 : 2013년 10월 18일

심사완료일 : 2013년 10월 31일