



Article

제주도 성산일출봉의 다단계 화산분출

기진석^{1,2}, 윤우석¹, 고선영³, 손영관⁴, 윤석훈^{1,*}

¹제주대학교 지구해양학과

²제주특별자치도 세계유산본부

³한국지질자원연구원 지질재해연구본부 화산연구단

⁴경상국립대학교 지질학과

Multi-stage volcanic eruption of Seongsan Ilchulbong tuff cone, Jeju Island

Jin Seok Ki^{1,2}, Woo Seok Yoon¹, Sun Young Go³, Young Kwan Sohn⁴, Seok Hoon Yoon^{1,*}

¹Department of Earth and Marine Sciences, Jeju National University, Jeju 63243, Republic of Korea

²World Heritage Office, Jeju Special Self-Governing Province, Jeju 63341, Republic of Korea

³Volcano Research Group, Geologic Hazards Research Division, Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources, Daejeon 34132, Republic of Korea

⁴Department of Geology, Gyeongsang National University, Jinju 52828, Republic of Korea

Received: July 9, 2024 / Revised: August 19, 2024 / Accepted: August 21, 2024

*Corresponding author: +82-64-754-3436 / E-mail: shyoon@jejunu.ac.kr

요약: 성산일출봉은 천해역에서 상승하는 마그마가 바닷물과 만나 폭발적으로 분출하면서 만들어진 섯치형(Surtseyan) 응회구로서, 오랜 기간 파도에 의해 침식되어 현재의 형태를 갖게 되었다. 기존에는 일회성 분출로 형성된 단성화산체로 알려졌으나, 최근 연구결과 응회구 내부의 층리방향, 불연속면, 침식구조, 화학 성분변화 등을 근거로 성산일출봉 분출 이전에 또 다른 화산활동이 있었을 것으로 제기되고 있다. 이러한 화산활동의 추가 증거를 찾고 형성과정을 재구성하기 위하여 이 연구에서는 성산일출봉 주변 해역의 다중빔 음향측심을 통한 해저지형 분석, 스파커(Sparker) 탄성파 지층탐사 자료에 대한 층서분석, 그리고 해상시추 코어 시료에 대한 화학조성 및 연대분석을 실시하였다. 해저지형 분석 결과 성산일출봉에서 동남쪽으로 약 600 m 떨어진 해저에서 원탁형의 돌출지형이 확인되는데, 해상시추를 통해 이곳에서는 응회암, 스크리아, 용암 등 다양한 화산 기원의 암석이 회수되었다. 이러한 지형의 층서와 지형적 특징은 이것이 성산일출봉보다 먼저 형성된 화산분화구의 잔재이며, 일련의 화산활동 과정에서 마그마 공급 화도가 서쪽으로 이동되면서 현재의 일출봉은 두 개의 중첩된 분화구로 이루어지게 되었음을 지시한다. 이와 같은 해석 결과에 기초하여 성산일출봉의 형성 과정을 재구성해 보면 다음과 같다. 지금으로부터 약 6,700년 전 이후에 동일 화도를 통해 일어난 두 번의 연안역 수성 분출로 초기 화산체가 형성되었다(Stage I, II). 점차 초기 분화구 주위에 화산분출물이 두껍게 집적되면서 분화 양상은 수성 분출에서 마그마성 분출로 전이되었으며, 그 결과 분화구 내부에 분석구와 용암연이 발달하였다(Stage III). 이후 마그마는 북서쪽의 새로 형성된 화도를 따라 상승하여 기존 화산체의 측면에 새로운 응회구가 형성되면서 3개의 화산체가 중첩된 복합 화산체가 지금으로부터 5,000년 전 이전에 완성되었다(Stage IV). 마지막 분출 이후, 외해 쪽에 놓인 화산체의 상당 부분은 파도에 의해 침식되어 버리고 화산체는 축소되어 현재의 성산일출봉으로 남게 되었다(Stage V).

주요어: 성산일출봉, 해저 화산탐사, 수성화산활동, 섯치형 분화, 응회구 복합체, 화도이동

ABSTRACT: Seongsan Ilchulbong is a Surtseyan-type tuff cone that was created by explosive interactions of ascending magma and shallow seawater. Its current form is the result of erosion by waves for a long period of time. Previously, it was presumed to be a monogenetic volcano created by a single eruption, but recent research shows that there might have been earlier volcanic activity whose eruptive products have been removed by wave erosion, based on the bed attitude, unconformity or erosion surface, and chemical composition changes in the tuff cone. In order to find additional evidence of these volcanic activities and reconstruct the formation process, this study conducted an analysis of seafloor topography using multibeam echosounder, seismic stratigraphy using Sparker subbottom profiler, and chemical analysis and age dating of the core samples obtained through offshore drilling. A circular and flat terrace-like terrain was found by precise seafloor topographical exploration approximately 600 meters southeast of Seongsan Ilchulbong Peak. Diverse volcanic rocks such as tuff, scoria, and lava were

retrieved by offshore drilling. The submarine topography and volcanic stratigraphy of the terrain suggest that the terrain is the remnant of a volcanic crater that formed earlier than the current Seongsan Ilchulbong, and that Ilchulbong comprises two superposed craters, of which the vents migrated westward during the eruption. Based on the above interpretations, the formation of Seongsan Ilchulbong can be reconstructed as follows. First, an earlier volcanic edifice was produced by hydrovolcanic activity through the same vent after about 6,700 years ago (Stage I, II). As thick volcanic products accumulated around the initial vent, the eruption style transitioned from hydrovolcanic to magmatic activity, forming a scoria cone and lava pond inside the crater (Stage III). Afterwards, magma rose through a new conduit to the northwest of the earlier crater and formed a new tuff cone on the flank of the earlier volcanic edifice, forming a composite tuff cone with three overlapping volcanic bodies prior to about 5,000 years ago (Stage IV). After the last eruption, a significant part of the volcanic edifice was removed by wave erosion, resulting in the current Seongsan Ilchulbong (Stage V).

Key words: Seongsan Ilchulbong, submarine volcanic exploration, Surtseyan eruption, hydrovolcanism, composite tuff cone, vent migration

1. 서언

제주도는 약 180만 년 전부터 한라산의 돌오름이 분출한 2,600년 전까지 수많은 화산활동이 있었으며, 그동안 여러 차례의 해수면 변동도 함께 일어났다. 마지막 최대 빙하기 (Last Glacial Maximum)를 기준으로 지금의 해저등심선을 고려했을 때 과거 제주도의 면적은 지금보다 훨씬 더 넓었을 것이며, 따라서 과거 화산활동의 흔적이 해저에 존재하고 있을 것으로 추정할 수 있다. 실제로 최근 제주도 연안을 중심으로 다양한 연구를 통해 해저에 숨겨져 있던 과거 화산활동의 흔적들이 보고되고 있다(Jeon *et al.*, 2019; Chang

et al., 2020; Koh *et al.*, 2020).

제주도 동편에 위치한 성산일출봉은 지하에서 상승하던 현무암질 마그마가 바닷물을 만나 수성화산활동을 일으키면서 만들어진 섯치형(Surtseyan) 응회구로서 화산체가 파도에 의해 침식되어 분화구 내부의 모습이 해안을 따라 잘 노출되어 있다(그림 1). 응회구 내부에는 다량의 화산재와 함께 화산암괴들이 포함되어 있으며, 최대 45°에 이르는 고각의 지층 경사, 부가화산력 그리고 점착성 연흔(adhesion ripple) 등을 근거로 축축하고 끈끈한 상태의 화산쇄설물이 퇴적된 것으로 보고된 바 있다(Sohn and Chough, 1992; Sohn, 1996; Murtagh *et al.*, 2011). 또한 화산재 지층의 단면에서

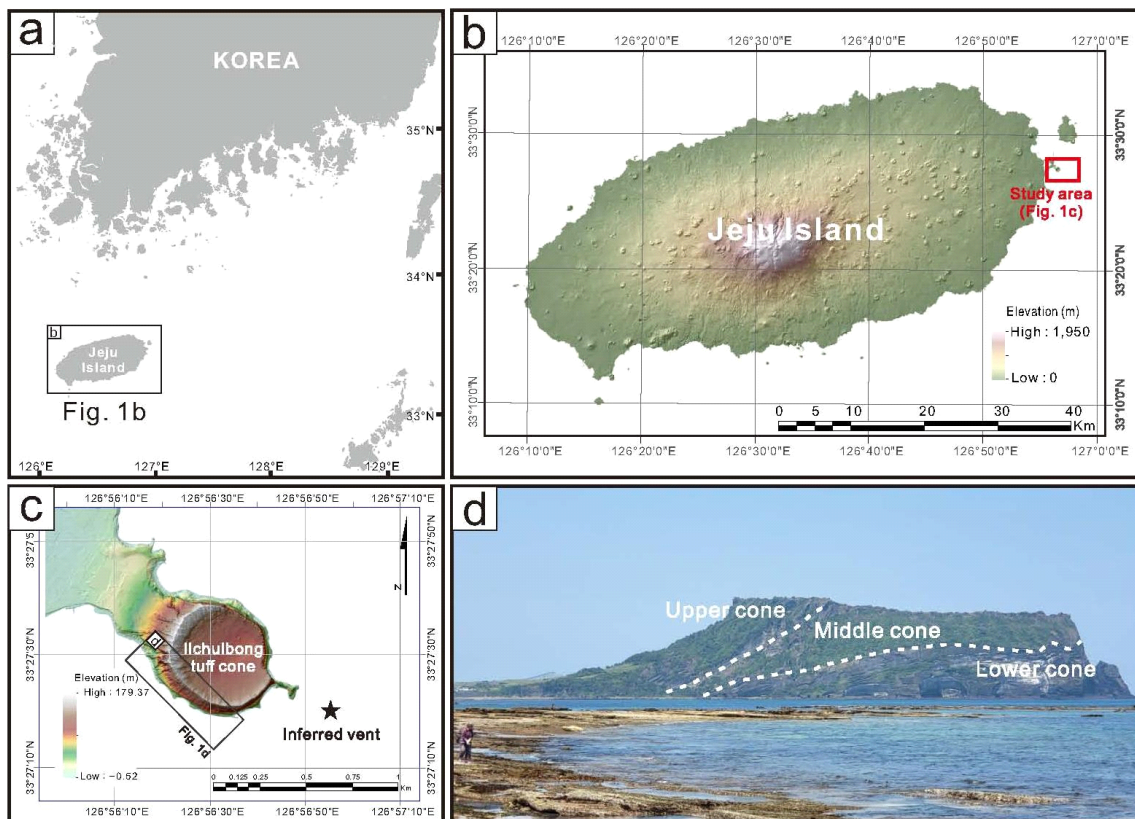


Fig. 1. Location (a, b), digital elevation model (c), and stratigraphic division (d) of Seongsan Ilchulbong tuff cone. Modified from Sohn *et al.* (2012).

당시 해수면을 지지하는 퇴적구조와 연대분석 자료(Sameshima *et al.*, 1988; Kim *et al.*, 1999; Cheong *et al.*, 2006; Ahn, 2016)를 종합했을 때 일출봉은 현재 해수면과 유사한 환경에서 분출하고 퇴적된 것으로 해석되고 있다(Sohn and Chough, 1992). 최근 성산일출봉 해안 절벽 화산재 지층의 단면에서 내부의 층리방향, 불연속면, 침식구조, 지화학 성분변화 등을 근거로 일출봉이 한 번의 분출에 의해 만들어진 것이 아니라 화구 이동을 동반한 3번의 수성화산 활동에 의해 형성되었음이 밝혀졌다(Sohn *et al.*, 2012). 최초 분화구의 위치는 성산일출봉 동남쪽 약 600 m 지점이며 분화구와 화산체는 현재 파도에 의해 침식된 것으로 제시되었다(Sohn *et al.*, 2012)(그림 1c).

따라서 이 연구에서는 선행연구에서 제기된 성산일출봉 응회구 이전의 초기 분화구의 존재 여부를 확인하고, 나아가 성산일출봉과의 관계 및 화산체 발달과정을 복원하고자 한다. 이를 위해서 성산일출봉 주변 해역을 대상으로 정밀 해저지형 탐사와 탄성파 지층탐사를 실시하였다. 그리고 분화구로 추정되는 해저와 주변 테프라층에서 4공의 해상 시추를 통해 암석 시료를 획득하여 지하의 지질 및 층서를 분석하였다. 또한 해저의 분화구와 현재 성산일출봉과의 관계를 규명하고 형성 시기를 파악하기 위해서 지화학 분석과 연대분석도 실시하였다. 이러한 연구는 해양지질학을 바탕으로 화산학, 퇴적학, 층서학, 암석학, 지화학 등 여러 분야의 다학제적 연구를 통해 진행되었다는 점에서 의의가 있으며, 연안에 위치한 화산지질유산(volcanic geoheritage)의 관리는 물론 수성화산 연구의 좋은 사례가 될 수 있을 것으로 기대된다.

2. 지질 개요

성산일출봉은 해발고도 179 m, 비고 174 m, 기저 직경 693 m, 둘레 2,927 m, 면적 453,030 m²의 화산체이다(그림 1). 성산일출봉은 다양한 퇴적상의 응회암과 화산력응회암으로 구성되어 있는데 화산쇄설층의 주향은 등고선과 대체로 평행하며, 경사는 평균 20~30°로 화구 중심으로부터 방사상으로 분포하고 있다(Sohn and Chough, 1992). 사면의 최대 경사가 45°에 달하는 성산일출봉은 수성화산체의 일종인 응회구(tuff cone)에 해당하며, 천해역에서 분출하여 해수면 위로 성장한 전형적인 섯치형 화산체이다. 성산일출봉 응회구는 주로 화산쇄설물의 낙하와 드물게 화쇄난류에 의해 수직적으로 성장하였고, 습한 화산쇄설물은 안식각을 상회하는 급경사의 지층을 이룰 수 있었다(Sohn and Chough, 1992; Murtagh *et al.*, 2011). 급경사의 응회구 퇴적층은 종종 붕괴되면서 사태 또는 암설류에 의해 재퇴적되거나, 간헐적으로 발생하는 더욱 폭발적인 분화에 의해 화쇄난류가 발생하면서 측방으로 성장하였다. 분출이 끝난

이후에는 급경사를 이루던 화산쇄설물의 침식작용이 활발하게 일어나 암설류 및 지표류가 발생하여 응회구 말단부에 퇴적되었다.

Sohn *et al.* (2012)은 야외에서 관찰된 두 개의 부정합을 기준으로 성산일출봉을 하부(lower), 중부(middle), 상부(upper) 응회구로 구분하였는데(그림 1d), 현재의 성산일출봉은 대부분 중부 및 상부 응회구층으로 구성되며 하부 응회구층은 동쪽 해안절벽을 따라 배사형 층리를 보이며 노출되어 있다. 한편, 하부, 중부, 상부 응회구로부터 각각 채취한 초생 암편(juvenile fragment)의 지화학 분석 결과는 3개의 상이한 마그마 뱃치(batch)에서 기원한 알카리 계열 현무암질 마그마의 분출을 지지한다(Sohn *et al.*, 2012). 특히, 하부 및 상부 응회구를 형성한 마그마 1과 3은 서로 유사한 조성을 보이며 천부에서 상대적으로 긴 분별 작용을 겪은 것으로 해석되었다. 반면, 중부 응회구를 형성한 마그마 2는 비슷한 심도이지만 불균질한 맨틀의 다른 영역에서부터 기원하여 다른 조성을 갖게 된 것으로 보고 있다.

성산일출봉의 형성 시기는 성산일출봉 응회암층 하부에 있는 고토양층과 일출봉 응회암층이 재퇴적되어 형성된 신양리층에서 얻어진 연대분석 결과 약 5000~7800년 사이에 형성된 것으로 추정되어 왔다(Ahn, 2016; Cheong *et al.*, 2006; Kim *et al.*, 1999; Sameshima *et al.*, 1988).

3. 연구 재료 및 방법

성산일출봉 주변 해저의 정밀 지형 탐사를 위해 일출봉의 중심을 기점으로 반경 약 3 km 범위에서 다중빔(multi-beam) 음향측심조사를 실시하였다(그림 2). 조위 산출은 대기압의 영향을 제거하여 해수면의 압력값으로 환산하였으며, 성산포 조위관측소로부터 해수면 기압 자료를 취합하여 대기압 보정을 실시하였다. 다중빔 음향측심 자료는 전용 프로그램(PDS2000, CARIS 등)을 활용하였고, 획득된 다중빔 음향측심 자료는 산출된 조위 자료를 통해 조위 보정을 실시하여 기준 수심 자료로 변환하였다. 이를 통해 일출봉 주변 해저의 3차원 정밀 해저지형도가 제작되었다.

해저 정밀 지형분석과 더불어 성산일출봉 주변 해저의 지층 형태와 구조를 파악하기 위해 탄성파 탐사를 실시하였다. 다중빔 음향측심조사 범위와 동일한 구역에서 약 400 m 간격의 남북방향 측선과 약 200 m 간격의 동서방향 측선을 설정하여 스파커(Sparker) 지층탐사기를 이용하였다(그림 2). 현장에서 취득된 단면에 대해서는 이득 조절 변수, 필터링 변수, 디컨볼루션 변수를 결정 및 적용하고 너울 효과를 보정하였다. Sparker 장비는 SIG (France)사의 SIG Pulse M2/EDL1020 모델을 사용하였으며, 출력 범위는 100~2000J, 주파수 범위는 0.9~1.4 kHz, 음원 수준은 1,500 J에서 220 dB이다.

탄성과 탐사를 통해 분석된 해저 지층의 암상을 직접 확인하기 위해 총 4곳에서 해상시추를 실시하였다(그림 2). 취득된 암석코어에 대해서는 퇴적구조, 색상, 조직, 입도 등을 기재하고 주상도를 작성하였다. 아울러 구성물질들의 화학 조성을 파악하기 위해 총 15개의 시료를 대상으로 경

상국립대학교 Bruker AXSS8 TIGER 기종의 X-선 형광분석기(X-ray Fluorescence Spectrometer)를 이용하여 지화학 분석을 실시하였다. 아울러 해저 분화구의 형성 시기를 알아보기 위해 2곳의 해상 시추공에서 확인된 폐각을 미국의 Beta Analytic Inc.에 의뢰하여 방사성탄소연대 분석을 실

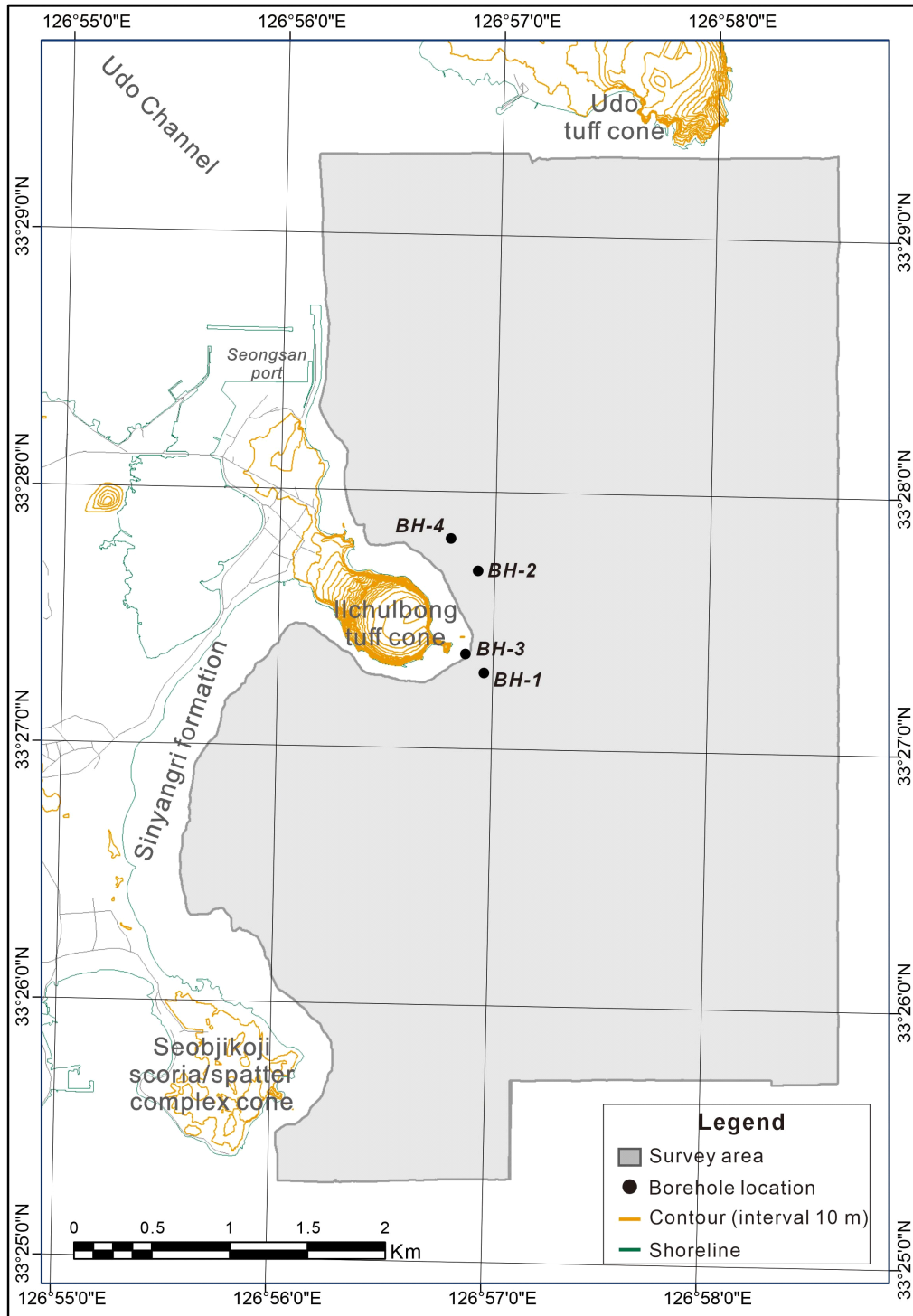


Fig. 2. Location of drilling wells (dots) and survey range of multi-beam echo sounding and Sparker seismic subbottom profiling.

시하였다.

4. 연구 결과

4.1. 해저 정밀 지형탐사

다중빔 음향측심조사 결과, 성산일출봉 주변의 해저지

형은 전반적으로 동남동쪽으로 완만하게 경사져 있는 특징을 보이며 성산일출봉 동쪽 해역에서 수심이 약 100 m에 이른다(그림 3). 성산일출봉 연안을 따라 복잡하고 불규칙한 형태의 해저지형이 확인되는데, 이는 용암류의 흔적으로 추정된다. 일출봉 남쪽에도 섭지코지를 중심으로 용암

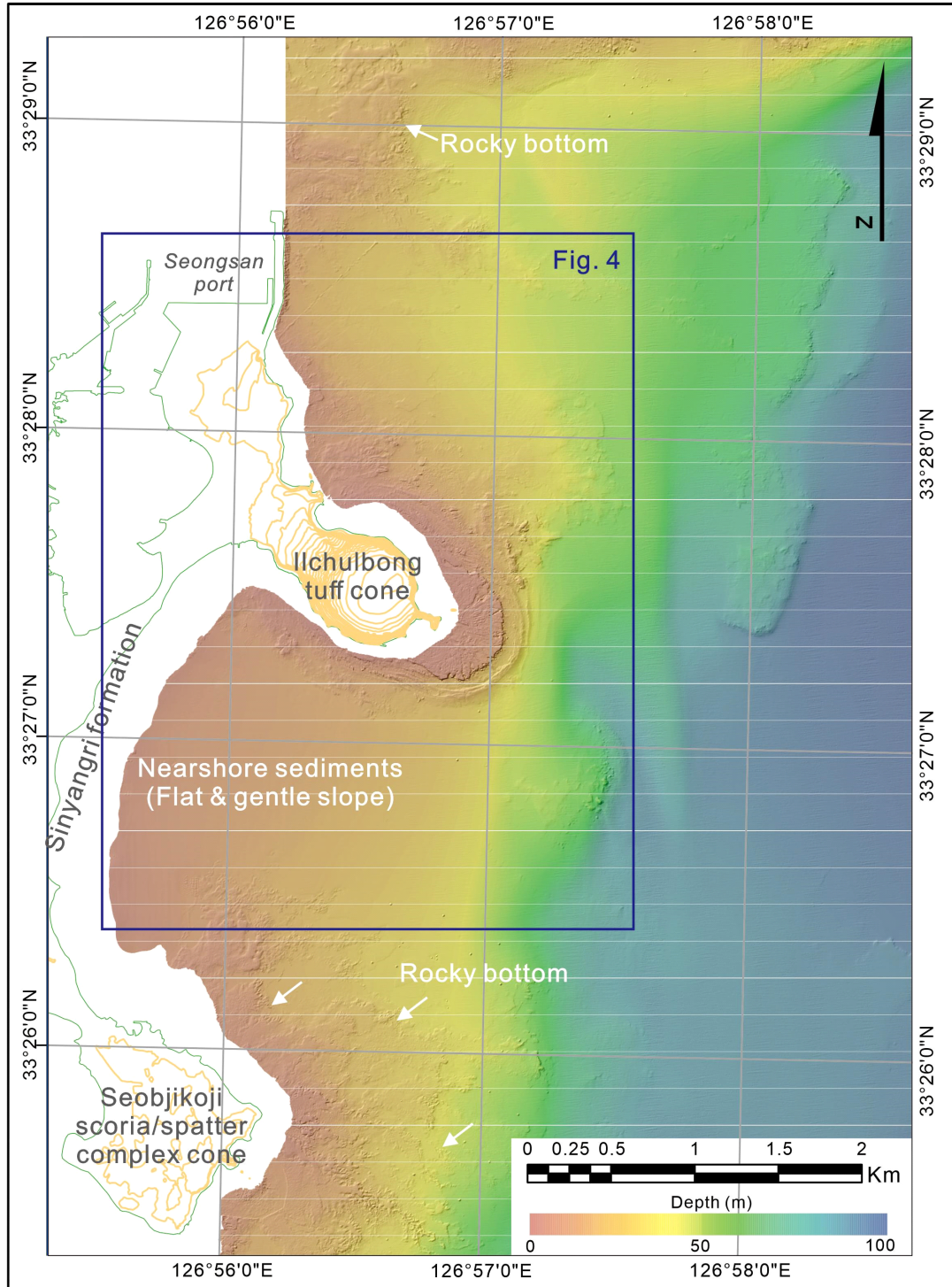


Fig. 3. Seafloor topography of the study area by a multi-beam echo sounding system.

류가 흘렀던 흔적들이 뚜렷하게 관찰된다. 과거 해수면이 지금보다 더 낮았을 당시 점성이 낮은 용암류가 지금의 해안선보다 더 멀리까지 이동하였음을 지시한다. 일출봉과 섭지코지 사이에는 평탄하고 완만한 지형이 분포하는데, 이는 용암류와 용암류 사이의 저지대를 해양 퇴적물이 피

복하고 있는 것으로 추정된다. 40~80 m 수심의 해역에서는 상대적으로 경사가 급해지다가 80 m 이후 다시 완만해지는 특징을 보인다. 경사가 상대적으로 급한 지역은 용암류의 말단부로 해석되며, 이는 과거 해안선의 경계로 추정할 수 있다(Koh *et al.*, 2020).

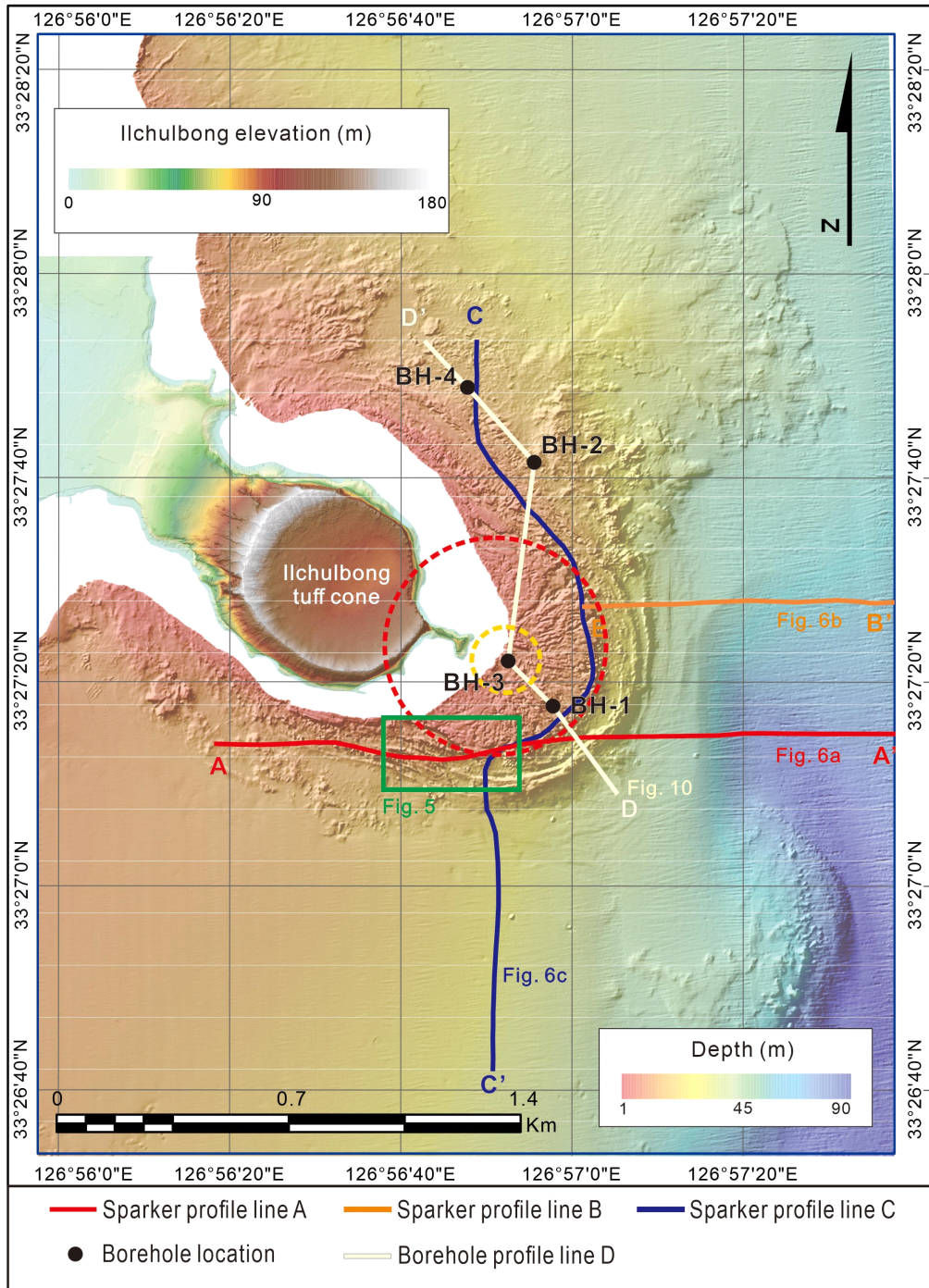


Fig. 4. Multi-beam echo sounding image showing detailed seafloor topography including a remnant of another volcanic crater (red circle) to the southeast of Ilchulbong tuff cone. The center of crater (yellow circle) is generally 1~2 m deeper than the surrounding area.

한편, 성산일출봉 분화구 중심을 기준으로 남동쪽으로 약 600 m 떨어진 지점에서 주변 해저보다 약 30~35 m 높이로 돌출된 원탁형의 평탄한 해저지형이 확인된다(그림 4). 서북쪽 일부가 성산일출봉과 일부 겹치는 이 돌출부의 지름은 약 600 m로 해수면 위로 드러나 있는 성산일출봉 분화구의 지름과 거의 동일하며, 정상부의 수심은 3~10 m이다. 원형 해저대지의 표면은 불규칙한 기복을 보이며, 중심부에는 주변 해저보다 1~2 m 정도 깊은 직경 약 100 m의 저지대가 특징적으로 나타난다(그림 4). 원탁형 돌출부의 가장자리는 최대 70°에 이르는 급격한 경사를 이루고 있으며 그 주변으로 10~20 m 폭을 가지는 띠 모양의 능(ridge)이 수심 20~30 m 해저에 원형의 돌출부 주변을 감싸고 있다(그림 4). 잠수조사 결과, 돌출대 주변의 능은 대부분 화산력응회암으로 구성되어 있으며 평행한 층리가 확인된다(그림 5).

4.2. 스파커 지층탐사

연구지역에서 취득된 스파커 탄성과 탐사단면에서 음향 신호의 투과 깊이는 두꺼운 해저퇴적층이 분포하는 외해역에서는 0.3 sec 이상으로, 연안역에서는 고밀도의 용암류 화산암이 분포하고 있는 곳은 0.1~0.2 sec 정도이다(그림 6). 탄성과 탐사단면에서 용암류 화산암층은 대체로 내부 층리의 발달이 미약한 무작위(random) 혹은 혼돈(chaotic) 반사의 특성을 보이며, 응회암층과 퇴적층은 특유의 퇴적 층리 발달로 인해 음향학적으로도 평행한 반사면이 특징적으로 나타난다. 이러한 반사특성의 차이에 따른 암상의 구분과 강한 반사도를 보이는 주요 음향반사면(reflector)을 기준으로 할 때, 연구지역에서는 U1~U4 등 4개의 층단위로 구성된 층서체계를 제시할 수 있다(그림 6).

층단위 U1은 반사면의 표면이 거칠고 내부에 층리 발달이 미약하고 불규칙한 특성으로 볼 때 용암류를 지시하는 것으로 추정된다. 층단위 U2는 반사면의 표면이 매끈하고 완만하게 경사져 있으며 양호한 연장성을 보이는 특징으로

보아 용암류를 덮고 있는 해성 퇴적물을 지시하는 것으로 추정된다. 층단위 U3는 해저 정밀지형탐사를 통해 해저 분화구로 추정되는 지형을 반영하여 나타나는 것으로 보아 해저 분화구를 형성한 응회암층을 지시하는 것으로 판단된다. 마지막으로 층단위 U4는 사구의 형태를 보이며 내부에 사층리가 잘 발달해 있으며 연장성이 불량한 특징을 보이는데, 이는 일출봉의 초기 분화구의 응회암이 파도에 의해 침식되는 과정에서 재이동되어 쌓인 퇴적층으로 추정된다.

4.3. 시추코어 암상

해상시추는 퇴적상의 층서 확인 및 구조파악, 기반암의 심도 확인, 분출 당시의 환경 해석, 샘플 채취 등을 위해 총 4곳에서 실시하였다(그림 2, 4). 해상시추를 통해 얻어진 암상은 크게 분출 당시 만들어진 일차 화산쇄설물과 분출 이후 재이동 등에 의해 만들어진 이차 화산쇄설물로 구분된다(그림 7). 일차 화산쇄설물은 응회암(T), 용암류(L), 스크리아(S)로 크게 구분된다. 응회암은 괴상이며 기질 혹은 역지지되어 있고 부분적으로 층리 및 점이층리를 보이기도 한다. 응회암은 황갈색 내지 흑갈색을 띠며 분급은 대체로 불량하다. 용암류는 전체적으로 암회색을 띠며 치밀하며 원형 내지 타원형의 기공이 관찰되며, 중립 내지 세립의 맨틀포획암을 포함하고 있다. 다공질의 스크리아는 흑갈색 내지 적갈색을 띠며 아각형의 가장자리를 갖고 있다. 이차 화산쇄설물은 괴상 머드(Mm), 괴상 모래(Sm), 층상 모래(Ss), 점이층리 모래(Sg), 입자지지 자갈(Gc), 기질지지 자갈(Gm)로 이루어져 있다.

BH-1은 28.2 m 깊이의 시추공으로 괴상 또는 층리를 보이는 응회암으로 이루어져 있다. BH-1은 응회암과 다이아트립을 관통하여 기반암에 도달하는 분화구의 가장자리로 추정하여 시추를 하였으나 응회암층 외에 다이아트립의 외벽을 구성하는 기반암은 확인되지 않았다. 이는 다이아트립의 폭이 원뿔형처럼 지하로 갈수록 일정하게 줄어드는 것이 아니라 툴립처럼 심도가 깊어지더라도 화구의 폭이

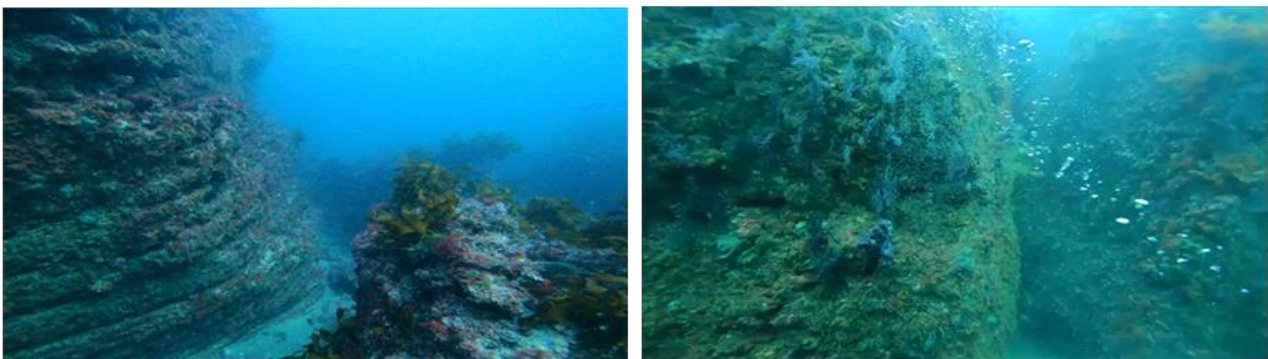


Fig. 5. Photos of stratified lapilli tuff outcrops on the seafloor. For locations, see Fig. 4.

어느 정도 유지되었기 때문에 시추공에서 기반암이 확인되지 않은 것으로 추정된다.

BH-3의 시추 심도는 30.5 m로 4곳 가운데 시추 심도가 가장 깊다. 표면에서 약 5 m까지는 입자지지 또는 기질지지된 화산력 응회암이 나타나며 그 아래에 4개의 시추공 중 유일하게 약 1 m 두께의 스킨리아층이 관찰되었다. 그 하부로 약 4 m 두께의 용암류가 지하 10 m까지 분포하며, 그

밑으로 괴상 또는 층리를 보이는 응회암층이 나타났다. BH-3는 분화구의 중심으로 추정되는 곳을 시추하였기 때문에 분출암맥(feeder dike), 그리고 기반암까지 시추하여 분화구 내부의 지질특성을 파악하고자 하였으나 시추 심도가 얕아 이를 확인하지는 못했다. 그러나 스킨리아층과 용암류의 존재를 확인하였는데, 수성화산활동에 의해 화산체가 성장을 하는 과정에서 외부 바닷물의 유입이 차단됨에

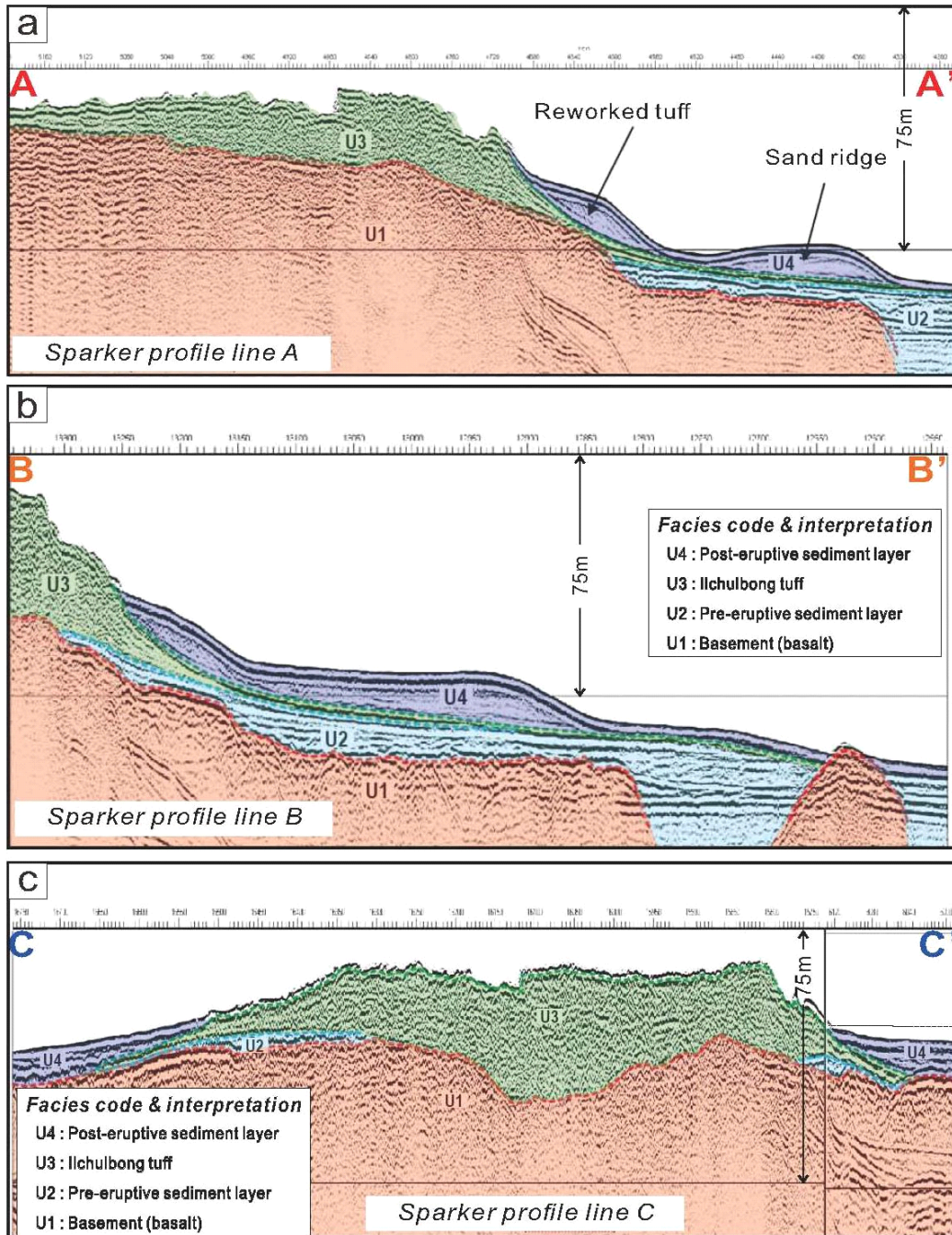


Fig. 6. Sparker seismic sections and their stratigraphic interpretation showing lava-flow basement (U1), Ilchulbong tuff (U3), and two units of sedimentary deposits (U2 and U4). For locations, see Fig. 4.

따라 마그마가 가진 자체 폭발력으로 스트롬볼리안 분출이 일어나 소규모의 분석구를 형성하였고 그 이후 용암이 분

출하여 분화구 내부를 채운 결과로 추정된다(Houghton and Hackett, 1984; Lorenz, 1986; Cas and Wright, 1987;

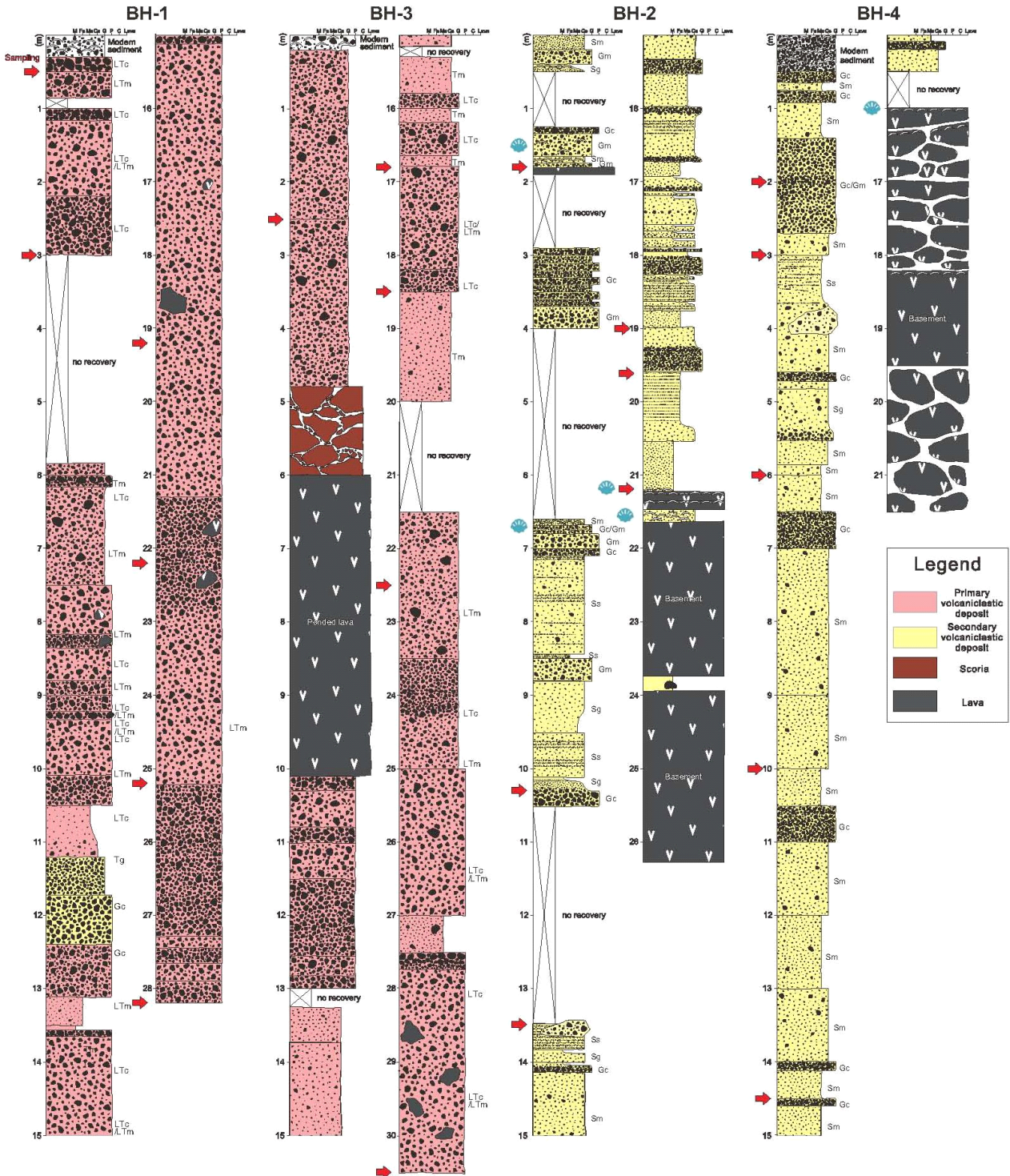


Fig. 7. Columnar sections of rock cores from 4 drilling wells. Codes denote lithologic facies including massive tuff (Tm), graded tuff (Tg), clast-supported lapilli tuff (LT-c), matrix-supported lapilli tuff (LT-m), scoria (S), lava flow (L), mass mud (Mm), massive sand (Sm), stratified sand (Ss), graded sand (Sg), clast-supported gravel (Gc), and matrix-supported gravel (Gm). For well locations, see Figs. 2 and 4.

Head III and Wilson, 1989). 이러한 분출 양상은 제주도 내 송악산이나 하논, 당산봉, 형제섬 등에서 일어난 분출과도 유사한 특징을 보인다(Chough and Sohn, 1990; Hwang, 1998; Yoon *et al.*, 2006; Park *et al.*, 2021).

BH-2와 BH-4는 각각 26.2 m와 21.5 m 깊이로 시추를 하였는데, BH-2는 하부 21.2 m, BH4호공은 16 m 지점에서 기반암이 확인되었고 그 상부에는 주로 괴상 또는 층상의 모래, 입자 또는 기질 지지된 자갈로 구성된 해성 퇴적물이 두껍게 쌓여 있는 양상을 보인다. 이는 수성화산활동에 의해 만들어진 테프라들이 고화되기 전에 파도에 의해 상당 부분이 침식되어 많은 양의 퇴적물을 주변으로 공급한 것을 알 수 있다. BH-2에서는 깊이 1.8 m, 6.8 m, 21.2 m, 21.6 m에서, BH-4에서는 깊이 16 m에서 패각이 확인되었다.

4.4. 시추공어의 지화학적 특성

시추공에서 채취한 응회암, 스킨리아, 기반암, 그리고 수중에서 채취한 용암류 등 총 15개 시료에 대한 X-선 형광분석(XRF) 결과 SiO_2 는 47.7~50.5%, $\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}$ 는 3.8~5.3% 사이의 값을 보였다. 전암분석 결과를 TAS 다이어그램에 도시해 보면 현무암 내지 조면현무암에 해당하는 것을 알 수 있다(그림 8). 육상 응회암층과 비교를 위해 현재 성산일출봉을 구성하고 있는 하부층(lower cone), 중부층(middle cone), 상부층(upper cone)에서 채취한 화산력의 전암분석 결과도 TAS 다이어그램에 함께 도시한 결과 육상 시료도 현무암 내지 조면현무암에 해당하는 것으로 나타났다(그림 8). 기존 연구에서는 하부층, 중부층 및 상부층을 형성한 마

그마가 상호 혼합 없이 3번의 펄스에 의해 형성된 것으로 해석하였다(Sohn *et al.*, 2012). 해저 분화구와 기존 성산일출봉의 지화학 조성 비교를 위해 X축은 MgO , Y축은 SiO_2 , TiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , CaO , K_2O 로 하는 Hacker 다이어그램을 도시하였다(그림 9). 해저 분화구에서 얻어진 화학분석 결과를 현재 성산일출봉과 비교해보면 마그마-2와 가장 유사한 분포를 보였으며, 마그마-1과도 일부 겹치는 특징을 보였다. 따라서 해저 분화구를 형성한 마그마는 마그마-1과 마그마-2 조성의 마그마로부터 기원한 것으로 해석된다.

4.5. 연대분석

BH-2와 BH-4에서 확인된 패각을 대상으로 탄소동위원소법을 이용하여 연대분석을 실시하였다. BH-2 지하 1.8 m와 6.8 m에서 각각 480 ± 30 yr BP와 450 ± 30 yr BP의 분석값을 얻었다(표 1). 연구측정 결과 상층과 하층에서 연대 역전이 확인되는데, 이는 화산쇄설물이 퇴적된 후 여러 차례 재이동 되고 폭풍 등에 의해 서로 교란되면서 연대 역전 현상이 나타난 것으로 추정된다. 반면 BH-2 지하 21.2 m와 21.6 m, 그리고 BH-4 지하 16 m에서 측정된 연대분석 결과는 $6,650 \pm 30$ yr BP에서 $6,710 \pm 30$ yr BP 사이로 서로 유사한 연대를 보였다. 이는 일출봉 응회암층 하부의 고토양층에서 측정된 광여기루미네선스 측정값인 6.7 ± 0.6 ka와 거의 일치한다(Ahn, 2016). 성산일출봉의 기반암 상부와 응회암층 하부 고토양층의 연대가 서로 통일된 값을 보이는 것으로 미루어 성산일출봉 해역에서 최초로 화산활동이 시작된 시기는 약 6,700년 전 이후로 추정된다.

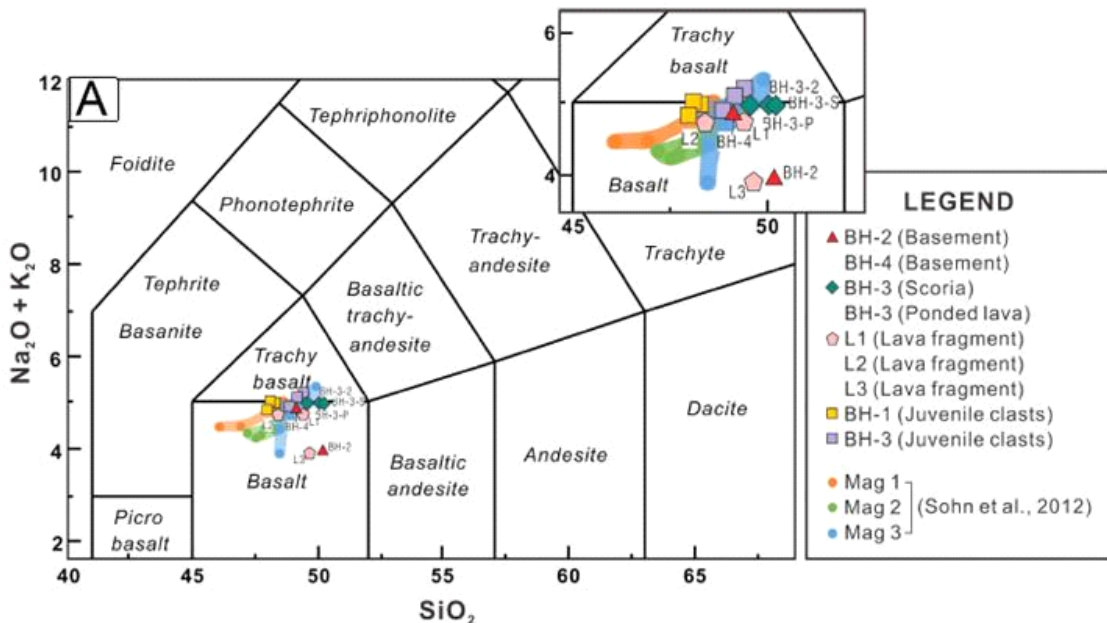


Fig. 8. TAS diagram of whole-rock analysis for rock samples from drilling wells.

5. 토 의

5.1. 성산일출봉 해저 분화구의 실체

성산일출봉과 같은 응회구는 저온의 화산재가 층층이 쌓여 이루어진 미고결 혹은 반고결의 응회암으로 주로 구성되어 있는데, 용암류와는 달리 구성입자 간의 결집력이 낮기 때문에 형성 후 단기간 내에 파도나 해류에 의해 삭박

되어 버리는 경우가 많다. 성산일출봉의 지층구조와 화산쇄설물에 대한 지화학적 분석에 따르면 화구이동과 마그마 성분 변화를 동반하는 3회의 수성분출로 형성되었으며 초기 분화구가 현 분화구의 남동쪽 해저에 있었으나 해식작용으로 거의 파괴되어 버린 것으로 추정되었다(Sohn *et al.*, 2012). 정밀 해저지형 자료에서 보면, 성산일출봉 응회구의 남동쪽에 원형의 파식대지가 확인되는데, 중심부가 성산일

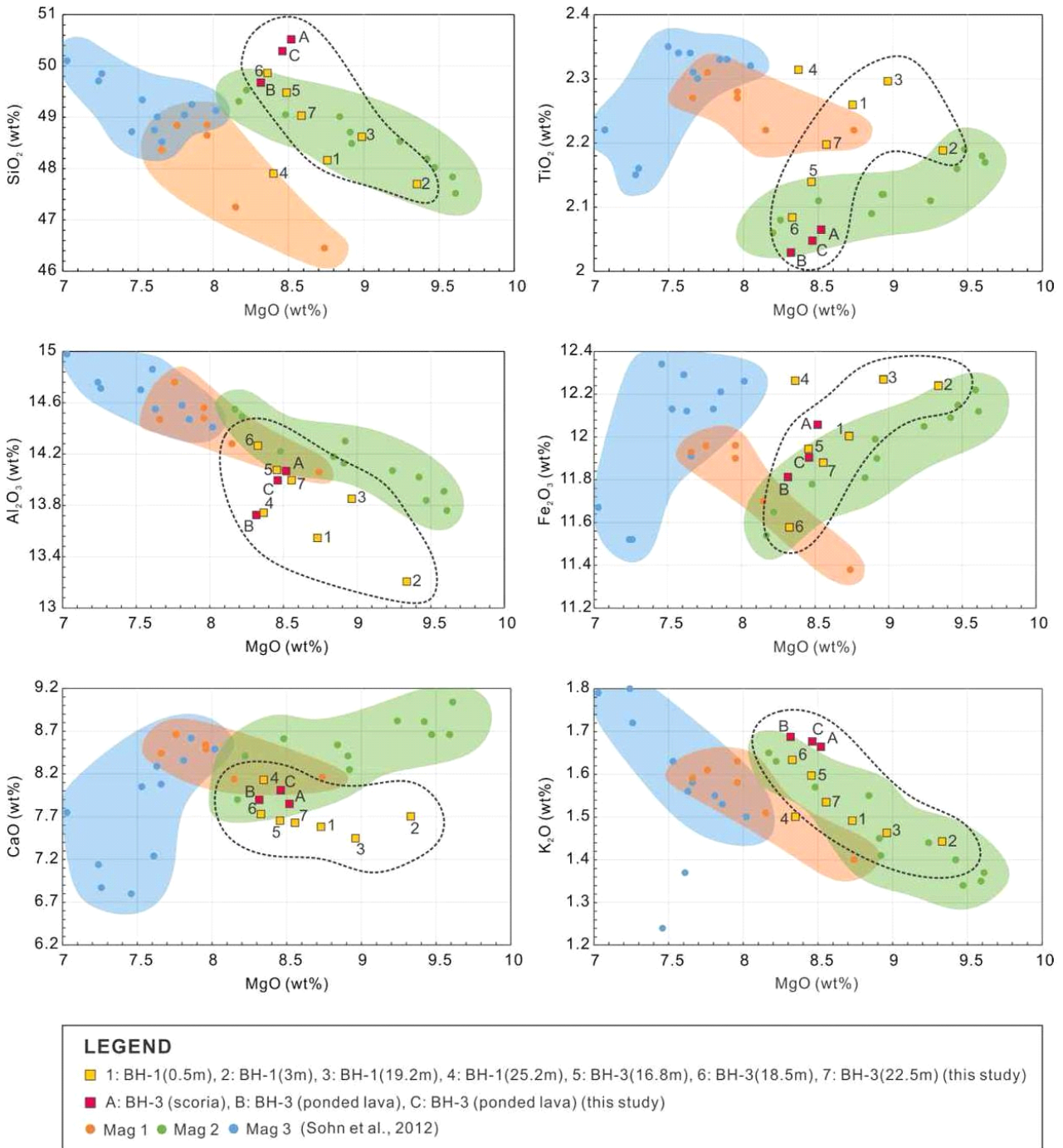


Fig. 9. Hacker diagrams of whole-rock analysis for rock samples from drilling wells.

출봉 중심과 약 600 m 이격되어 있으며, 파식대지의 북서쪽 일부가 성산일출봉과 겹쳐 분포한다. 해저 분화구 지형은 주변 해저에서 30~35 m 정도 높이로 돌출된 원형의 파식대지로 나타나는데, 분화구로 추정되는 지역에서 해상시추를 통해 해저면 하의 응회암층과 소량의 스크리아 및 용암류 등 화산기원 암석으로 구성되어 있음이 확인되었다(그림 10). 원형의 돌출지형 주변으로는 10~20 m 폭을 갖는 능(ridge)이 동심원 띠모양으로 분화구 중심부를 둘러싸고 있는데(그림 4), 잠수조사를 통해 확인한 결과 대부분 층상 응회암으로 이루어져 있다(그림 5). 이는 응회구의 화구륜을 포함하여 분화구 외곽을 구성하고 있는 층상의 화구륜 응회암층이 삭박과정에서 서로 다른 높이로 차별침식을 받은 것으로 해석된다. 따라서 성산일출봉의 남동쪽에 발달하는 원형의 해저대지는 지형 및 구성물질 등을 고려할 때 응회암 화산체의 잔재로 해석되며, 지형적으로 성산

일출봉 응회구와 화도를 달리하는 별개의 화산체로 볼 수 있다.

5.2. 해저 분화구의 분출양상 및 형성과정

해저 분화구는 초기에 수성분출을 통해 응회암을 집적시켰다. 하지만 분화구 중심부에서 회수된 시추코어에서 스크리아와 용암류가 확인되는 것으로 보아 후기 단계에는 물과의 접촉이 차단되어 마그마성 화산분출로 전환되었음을 추정할 수 있다(Wohletz and Sheridan, 1983; Houghton and Hackett, 1984; Lorenz, 1986; Cas and Wright, 1987; Head III and Wilson, 1989). 즉 응회구가 점차 성장함에 따라 분화구 내부로 유입되는 해수를 차단할 수 있을 정도로 해수면 위로 화구륜이 드러나 있었으며, 이후 삭박되어 해수로 잠기게 된 것이다. 스크리아층의 두께는 1 m 정도 밖에 되지 않은데, 이는 분석구의 규모 자체가 크지 않았으

Table 1. Radiocarbon ages of the shell fragments from the drilling wells.

Sample Number	Core	Depth (m)	$\delta^{13}C$ (‰)	^{14}C age yr BP	Calibrated age (2 σ range) Cal yr BP
1	BH-2	1.8	1.8	480 ± 30	1407-1456 (OxCal)
2		6.8	1.5	450 ± 30	1413-1480 (OxCal)
3		21.2	2.9	6650 ± 30	7136-6781 (Marine20)
4		21.6	2.6	6710 ± 30	7174-6837 (Marine20)
5	BH-4	16	1.4	6650 ± 30	7136-6781 (Marine20)

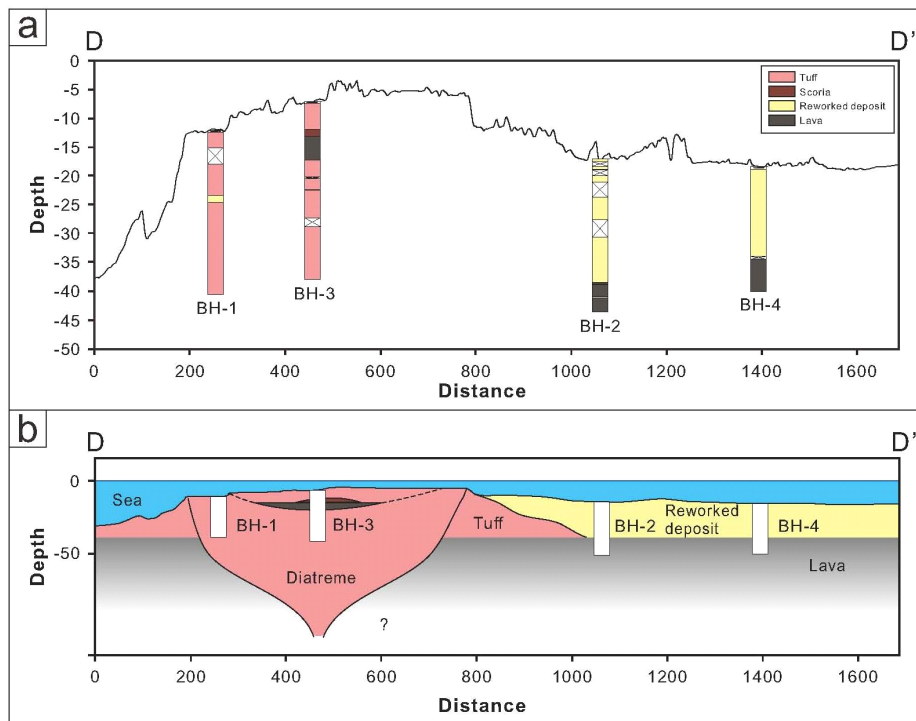


Fig. 10. Topographic (a) and geological (b) sections of the remnant volcanic crater.

며 시추코어가 분석구의 중심부가 아닌 외사면의 말단부 근처를 관통했기 때문에 추정된다. 스크리아층 하부에 있는 4 m 두께의 용암류는 분석구가 형성될 때 분출한 용암이 분화구 내부를 채운 용암연으로 추정되는데, 시추코어가 분화구의 중심부를 뚫었기 때문에 용암류의 두께는 용암연의 최대 수심을 반영한다고 볼 수 있다.

5.3. 성산일출봉과 해저 분화구의 관계

Sohn *et al.* (2012)은 성산일출봉의 하부, 중부, 상부 부분을 형성한 마그마를 각각 마그마 뱃치 1, 2, 3으로 구분한 바 있다. 이번에 발견된 해저 분화구를 구성하는 화산기원 입자의 지화학 조성은 마그마 뱃치 중 1, 2와 유사하다. 마그마 뱃치 1, 2에서 각각 기원하는 하부와 중부 부분은 지층의 주향과 경사가 현재 성산일출봉 분화구를 이루는 상부 부분과 차이가 있다. 이는 성산일출봉의 하부와 중부 부분은 해저 분화구의 서측에 해당하는 화구륜층으로 해석하는 것이 더 타당해 보인다. 따라서 해저 분화구는 마그마 3의 상부 응회구까지 포함하는 성산일출봉보다 먼저 형성된 것이며, 성산일출봉의 하부에 나타나는 하부와 중부 응회구는 해저 분화구 주변의 화구륜층에 해당하는 것으로 추정된다. 즉, 마그마 1, 2의 화산활동에 의해 하부와 중부 응

회구를 구성하는 하나의 화산체가 만들어졌으며, 화구가 이동하여 마그마 3의 화산활동에 의해 상부 응회구를 구성하는 또 다른 화산체(현재의 성산일출봉)를 형성하였다.

해저 분화구의 분출시기는 시추코어 BH-2와 BH-4에서 기반암 직상부에서 회수된 패각편의 탄소연대측정 결과 약 6,700년 전 이후로 추정된다. 성산일출봉의 재동충인 신양리층의 탄소연대는 5,000년 전으로 보고된 바 있다(Sameshima *et al.*, 1988; Cheong *et al.*, 2006). 즉 두 화산체의 최장 형성기간은 1,700년 정도로 짧고 성산일출봉과 해저 분화구의 경계에 해당하는 middle cone과 upper cone 경계면에서 장기간의 휴지기를 지시할만한 고토양층이나 대규모 대기 중 삭박면이 나타나지 않는 것을 고려하면, 해저 분화구와 성산일출봉 응회구는 연속된 일련의 화산 분화과정에서 화도이동으로 인해 형성된 복합 화산체로 해석된다.

해저 분화구와 성산일출봉이 형성연대 차이가 크지 않음에도 해저 분화구는 해수면 아래로 거의 완전히 삭박된 반면, 성산일출봉은 분화구 형태를 상당부분 유지하고 있다. 이는 초기 화산분화로 인해 방출된 화산쇄설물 대부분이 해수면 아래에 쌓여 조류와 파도에 의해 급격히 재동되었으며, 이후에 해수면 위로 드러난 화구륜층도 점차 파도에 의해 삭박되었음을 지시한다(Moore and Jackson, 2020;

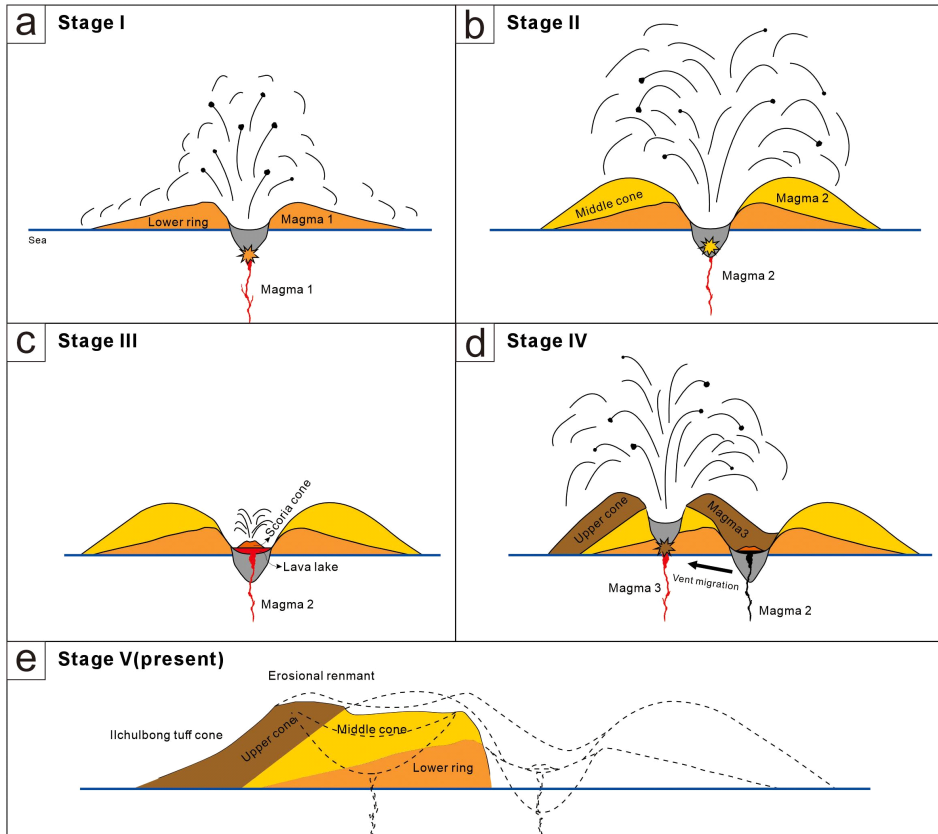


Fig. 11. Simplified reconstruction of eruption history for Ilchulbong tuff cone.

Brenna *et al.*, 2022). 특히 초기 분화구는 해저면의 경사가 급격히 증가하기 시작하는 해저에서 분출하여 외해로부터 유입되는 파도가 강하게 작용하였던 것으로 추정된다. 이에 비해 후기에 형성된 성산일출봉 응회구는 화도이동으로 인해 친해 평탄한 해저 위에 형성되었으며 바다쪽 전면에 초기 분화구가 방파제 역할을 하여 상대적으로 침식이 느리게 진행되었고 그 결과 화산체의 형태가 비교적 온전하게 남아있는 것으로 해석된다.

단성화산체는 짧은 시간 동안 한 번의 분출이나 단일한 분출양상에 의해 만들어진 화산으로 정의되어 왔으나(Cas and Wright, 1987; Walker, 1993), 다양한 분출 활동에 의해 기존 화산체들이 채워지고 덮이면서 처음과 다른 분출 양상과 형태의 화산체로 변하기도 한다(Lorenz, 1986; Houghton and Schmincke, 1989; White, 1991; White and Ross, 2011; Foote *et al.*, 2023). 성산일출봉도 처음에는 한 번의 수성 화산활동에 의해 만들어진 전형적인 응회구로 알려졌으나, 화구의 이동을 동반한 3차례의 화산활동 통해 서로 중첩된 후 침식되어 현재의 모습으로 남게 되었다.

5.4. 성산일출봉의 형성사 복원

성산일출봉의 해저 화산활동의 흔적을 확인하기 위해 해저 정밀 지형탐사, 탄성파 탐사, 해상시추, 지하화 및 연대분석 등을 수행하였으며, 그 결과를 바탕으로 다음과 같이 성산일출봉의 형성사를 5단계로 재구성하였다(그림 11). 첫 번째 단계에서는 약 6,700년 이후 현재 일출봉의 중심에서 동남쪽으로 약 600 m 떨어진 얇은 바다에서 마그마 뱃치 1이 상승하여 수성화산활동이 일어났으며 폭발적인 분출에 의해 소규모의 응회환과 다이어트림을 형성하였다. 두 번째 단계에서는 물의 공급이 충분히 이루어지는 환경에서 마그마 뱃치 2가 상승하여 물과 마그마 비율(Water/Magma ratio)이 높아짐에 따라 섯치형 분출에 의해 초기 화산체 위에 응회구를 형성하였다. 세 번째 단계에서는 응회구가 점차 성장함에 따라 바닷물의 공급이 차단되어 분출 양상이 수성화산활동에서 마그마성 분출로 바뀌었으며, 그 결과 분화구 내부에 분석구와 용암연을 형성하였다. 네 번째 단계에서는 화도가 현재 성산일출봉이 위치한 곳으로 이동하여 기존 화산체의 측면에서 수성화산활동에 의해 새로운 응회구가 만들어져 세 개의 화산체가 중첩된 복합 응회암 화산체를 형성하였다. 마지막으로 다섯 번째 단계에서는 파도에 의한 침식으로 인해 초기 화산체는 상대적으로 빠르게 침식되어 현재의 성산일출봉을 형성하였다.

6. 결론

성산일출봉 주변 해역을 대상으로 해저 지질탐사를 수행한 결과 성산일출봉 응회구의 중심으로부터 남동쪽으로

약 600 m 이격된 해저에서 성산일출봉과 화도를 달리하는 별개의 응회암 화산체가 확인되었다. 이 화산체는 지금으로부터 약 6,700년 전 이후에 연안역에서 일어난 수성분출을 통해 형성되었으며 후기에는 물과의 접촉이 제한되어 일시적인 스코리아와 용암이 분화구 내에 집적되었다. 현재는 원지형이 대부분 침식되어 분화구가 원형의 파식대지로 해수면 아래에 잠겨 있지만, 북서쪽 화구륜의 일부는 성산일출봉의 하부구간에 나타나는 하부와 중부 응회구로서 남아있다. 해저 분화구와 성산일출봉 응회구 화산분출 사이에 장기간의 휴지기는 없었던 것으로 추정되며 이들은 일련의 화산 분화과정에서 화도이동으로 인해 형성된 복합 화산체로 해석된다. 제주도 해저에는 아직 알려지지 않은 많은 화산활동의 흔적들이 산재해 있을 것으로 추정되는데, 이번 연구가 해저 지질탐사의 중요성을 알리고 제주도 오름들의 다양한 분출 역사를 이해하는데 중요한 역할을 할 것으로 기대된다.

감사의 글

이 논문은 2024학년도 제주대학교 교원성과지원사업에 의하여 연구되었습니다. 논문 심사 과정에서 생산적인 비평과 세심한 검토 의견을 주신 두 분의 심사위원님들과 편집위원님께 깊이 감사드립니다.

REFERENCES

- Ahn, U.S., 2016, Study of the last volcanic activity on historical records on Jeju Island, Korea. *Journal of the Petrological Society of Korea*, 25, 69-83 (in Korean with English abstract).
- Brenna, M., Cronin, S.J., Smith, I.E., Pontesilli, A., Tost, M., Barker, S., Tonga'onevai, S., Kula, T. and Vaioumounga, R., 2022, Post-caldera volcanism reveals shallow priming of an intra-ocean arc andesitic caldera: Hunga volcano Tonga, SW Pacific. *Lithos*, 412, 106614.
- Cas, R.A.F. and Wright, J.V., 1987, Volcanic Successions Modern and Ancient: a geological approach to processes, products and successions. In *Volcanic Successions Modern and Ancient: a geological approach to processes, products and successions*. Chapman & Hall, , DOI: 10.1007/978-0-412-44640-5.
- Chang, T.S., Jeong, J.O., Lee, E., Byun, D.S., Lee, H. and Son, C.S., 2020, Distribution Patterns and Provenance of Surficial Sediments from Jeodo and Adjacent Sea. *Journal of the Korean earth science society*, 41, 588-598 (in Korean with English abstract).
- Cheong, C.-S., Choi, M.S., Khim, B.K., Sohn, Y.K. and Kwon, S.-T., 2006, ²³⁰Th/²³⁴U dating of Holocene mollusk shells from Jeju Island, Korea, by multiple collectors inductively coupled plasma mass spectrometry. *Geosciences Journal*, 10, 67-74.
- Chough, S.K. and Sohn, Y.K., 1990, Depositional mechanics and sequences of base surges, Songaksan tuff ring, Cheju Island, Korea. *Sedimentology*, 37, 1115-1135.
- Foote, A., Handley, H., Németh, K., Didonna, R., McGee, L., Griffis,

- R. and Clerke, L., 2023, The role of phreatomagmatism in the formation of complex monogenetic volcanic systems in a low-lying coastal plain. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 442, 107899.
- Head III, J.W. and Wilson, L., 1989, Basaltic pyroclastic eruptions: influence of gas-release patterns and volume fluxes on fountain structure, and the formation of cinder cones, spatter cones, rootless flows, lava ponds and lava flows. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 37, 261-271.
- Houghton, B.F. and Hackett, W.R., 1984, Strombolian and phreatomagmatic deposits of Ohakune Craters, Ruapehu, New Zealand: a complex interaction between external water and rising basaltic magma. *Journal of volcanology and geothermal research*, 21, 207-231.
- Houghton, B.F. and Schmincke, H.U., 1989, Rothenberg scoria cone, East Eifel: a complex Strombolian and phreatomagmatic volcano. *Bulletin of Volcanology*, 52, 28-48.
- Hwang, S.K., 1998, Volcanic processes of dangsanbong volcano, Cheju Island, *The Journal of the Petrological Society of Korea*, 7, 1-14 (in Korean with English abstract).
- Jeon, Y., Koh, G.W., Park, J.B., Moon, D.C., Kim, G.P. and Ryu, C.K., 2019, Geology and volcanic activities of Biyangdo volcano, the northwestern part of Jeju Island, Korea. *Journal of the Geological Society of Korea*, 55, 291-313 (in Korean with English abstract).
- Kim, K.H., Tanaka, T., Nakamura, T., Nagao, K., Youn, J.S., Kim, K.R. and Yun, M.Y., 1999, Paleoclimatic and chronostratigraphic interpretations from strontium, carbon and oxygen isotopic ratios in molluscan fossils of Quaternary Seoguipo and Shinyangri Formations, Cheju Island, Korea. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 154, 219-235.
- Koh, C.-S., Yoon, S.-H., Hwang, S. and Shin, J., 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*, 56, 17-29 (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.
- Moore, J.G. and Jackson, M.D., 2020, Observations on the structure of Surtsey. *Surtsey Research*, 14, 33-45.
- Murtagh, R.M., White, J.D. and Sohn, Y.K., 2011, Pyroclast textures of the Ilchulbong 'wet' tuff cone, Jeju Island, South Korea. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 201, 385-396.
- Park, J.B., Koh, G.W., Jeon, Y., Park, W.B., Moon, S.H. and Moon, D.C., 2021, Geology and volcanism of hyeongjeseom (islet) volcano, Jeju island. *Economic and Environmental Geology*, 54, 187-197 (in Korean with English abstract).
- Sameshima, T., Ogawa, T. and Kashima, N., 1988, 5th Int. Symp. Vulcanospeleology, Cheju Island (Korea), Excursion Guide Book, p. 30-36.
- Sohn, Y.K., 1996, Hydrovolcanic processes forming basaltic tuff rings and cones on Cheju Island, Korea. *Geological Society of America Bulletin*, 108, 1199-1211.
- Sohn, Y.K. and Chough, S.K., 1992, The Ilchulbongtuff cone, Cheju Island, South Korea. *Sedimentology* 39, 523-544.
- 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.
- Walker, G.P., 1993, Basaltic-volcano systems. *Geological Society, London, Special Publications*, 76, 3-38.
- White, J.D., 1991, Maar-diatreme phreatomagmatism at Hopi Buttes, Navajo Nation (Arizona), USA. *Bulletin of Volcanology*, 53, 239-258.
- White, J.D. and Ross, P.S., 2011, Maar-diatreme volcanoes: a review. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 201, 1-29.
- Wohletz, K.H. and Sheridan, M.F., 1983, Hydrovolcanic explosions; II, Evolution of basaltic tuff rings and tuff cones. *American Journal of Science*, 283, 385-413.
- Yoon, S.-H., Lee, B.-G. and Sohn, Y.K., 2006, Geomorphologic and geological characteristics and eruption process of the Hanon volcano, Jeju Island. *Journal of the Geological Society of Korea*, 42, 19-30 (in Korean with English abstract).