지질학회지 제62권 제2호, p. 235-246 (2026년 6월)
J. Geol. Soc. Korea, v. 62, no. 2, p. 235-246 (June 2026)
DOI http://dx.doi.org/10.14770/jgsk.2026.021

Check for updates

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

Article

전북 부안군 솔섬 석포응회암 내 파이프와 구상체 복합구조: 가스 탈출/분리구조와 구별 및 열수작용 해석

권창우[1], 이홍진[2], 정종옥[3], 신승원[4,‡]

[1]한국지질자원연구원 지질연구본부
[2]한국지질자원연구원 지질자원융합지식본부
[3]경상국립대학교 공동실험실습관
[4]대구대학교 지구과학교육과

Pipe-globule complex in the Seokpo Tuff on Solseom Island, Buan-gun, Jeollabuk-do, Korea: Discrimination from gas-escape/segregation structures and a hydrothermal interpretation

Chang Woo Kwon[1], Hong Jin Lee[2], Jong Ok Jeong[3], Seungwon Shin[4,‡]

[1]Geological Survey Division, Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources, Dajeon 34132, Republic of Korea
[2]Geo-Resource Convergence Knowledge Division, Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources, Dajeon 34132, Republic of Korea
[3]Center for Research Facilities, Gyeongsang National University, Jinju 52828, Republic of Korea
[4]Department of Earth Science Education, Daegu University, Gyeongsangbuk-do 38453, Republic of Korea

Received: February 27, 2026 / **Revised:** March 15, 2026 / **Accepted:** March 18, 2026
‡**Corresponding author:** +82-53-850-6951 / **E-mail:** seungwon@daegu.ac.kr

요약: 이 연구는 전라북도 부안군 솔섬에서 발견된 부안화산체 석포응회암(함부석 용결 화산력응회암)의 하부에 형성된 파이프와 구상체 복합구조(Pipe-globule complex; PGC)의 산상, 미세조직, 광물학적 특성을 분석하고 형성기작을 해석하고자 한다. 야외조사에서 PGC는 석포응회암 기저부 약 0-20 m 구간에 집중되며, 약 5 m 두께의 군집층을 형성하고, 측방으로는 대체로 20 m 이내에서 연속적으로 발달한다. 이 구조는 모암과 유사한 구성 입자를 갖지만, 결핍된 암편과 세립 화산회 기질이 우세하여 뚜렷한 입도 차이를 보이며, 모암과 뚜렷한 경계, 절단 모습, 주변 적색 변색대가 관찰된다. SEM-EDS 분석에서 PGC는 치밀화와 교결이 뚜렷하며, 알칼리장석 필름과 내부 석영 조직, 자철석·적철석 등의 철산화광물이 특징적이다. XRD 분석 결과, 모암과 PGC 모두 석영, 사장석, 알칼리장석이 주요 광물임을 보여주며, PGC에서는 점토광물(일라이트와 녹니석)과 철산화광물도 확인된다. XRF 분석에서, PGC 기질은 모암보다 SiO_2와 K_2O 함량이 높고 Al_2O_3가 낮아 규산염 재조직과 교결 과정이 진행되었음을 시사한다. 종합하면, 솔섬의 PGC는 화쇄류암의 전형적인 가스 탈출/분리구조라기보다, 화산 활동 이후 열수에 의한 유체의 상승·집중, 유체와 암석의 반응(침전·치환·교결), 그리고 국지적 변형이 복합적으로 작용하여 형성된 2차 구조로 해석할 수 있다. 이 연구는 화쇄류암 내 유사 구조의 성인을 구별하는 데 산상, 미세조직, 광물학 지시자가 유용함을 보여주며, 천연기념물인 솔섬의 지질유산 해설과 지질교육에 활용할 수 있는 현장 판별 방법을 제공한다.

주요어: 화쇄류암, 석포응회암, 파이프와 구상체 복합구조, 열수 변질, 솔섬

ABSTRACT: This study aims to characterize and interpret the occurrence, microtextures, and mineralogical/geochemical features of a pipe-globule complex (PGC) developed in the lower Seokpo Tuff of the Buan Volcanics, exposed on Solseom Island, Buan-gun, Korea. Field observations show the PGC is concentrated within the bottom 0-20 m of the Seokpo Tuff, forming a ~5 m thick clustered horizon that extends less than 20 m laterally. While containing clasts similar to those in the host deposit, it is marked by fewer lithic clasts and more fine ash matrix, creating a clear grain-size contrast with the host. The structures often have sharp boundaries relative to the host, exhibit cross-cutting relationships, and are surrounded by reddish alteration. SEM-EDS analyses reveal that the PGC is dense, cemented, with alkali feldspar films, internal quartz infill textures, and abundant Fe-oxide minerals like magnetite and hematite. X-ray diffraction indicates that both the host and the PGC are mainly quartz, plagioclase, and alkali feldspar; the PGC also contains clay minerals (illite and chlorite) and Fe oxides. XRF

Copyright © The Geological Society of Korea 2026

analyses indicate the PGC matrix is enriched in SiO_2 and K_2O and depleted in Al_2O_3 compared to the host, implying localized silicate reorganization and cementation. Overall, these findings suggest the Sol Island PGC is a secondary structure formed by post-emplacement hydrothermal processes, involving fluid ascent, fluid-rock interactions (precipitation, replacement, cementation), and localized deformation, rather than a primary gas-escape or segregation feature in ignimbrites. This research emphasizes the importance of combining field observations, microtextures, and mineralogical data to identify the origins of similar structures in ignimbrites, and offers practical criteria for geoheritage interpretation and geoscience education at Sol Island, a designated Natural Monument.

Key words: ignimbrite, Seokpo Tuff, pipe-globule complex (PGC), hydrothermal alteration, Solseom Island

1. 서 론

화쇄류암(ignimbrite)은 폭발적 분화로 형성된 화산쇄설성 밀도류(pyroclastic density current)가 이동, 퇴적, 정치되는 과정에서 형성되는 대표적인 화산쇄설암이다(Branney and Kokelaar, 2002). 이 과정에서 화산쇄설물의 탈가스화(degassing), 내부 공극 유체 압력 변화, 입자의 재배열과 분리 현상이 복합적으로 일어나면서 다양한 가스 탈출 구조(gas-escape structure)와 분리구조(segregation structure)가 형성된다(Brown and Andrews, 2015; Pacheco-Hoyos *et al*., 2020; Scarpati *et al*., 2020; Pimentel *et al*., 2021; Walding *et al*., 2025). 특히, 화쇄류암에서 관찰되는 파이프와 구상체 구조는 퇴적 직후 또는 부분 교결 과정 중 유체-입자 상호작용과 화산쇄설물 내부 유동의 흔적으로 해석되어 왔으며, 최근에는 관련 개념, 용어, 형성 메커니즘에 관한 재정리 연구도 활발히 진행되고 있다(Pacheco-Hoyos *et al*., 2020; Walding *et al*., 2025).

한편 활화산과 고지열 환경에서는 마그마의 열원에 의해 가열된 유체가 화산체 내부와 외부를 순환하며 균열과 파쇄대를 따라 유체의 경로를 형성하거나 광맥과 세맥을 발달시키며, 모암의 변질과 물성(공극률, 투수성, 강도 등)에 변화가 생기는 현상이 관찰된다(Bons *et al*., 2022; Pereira *et al*., 2024). 특히, 응회암이나 화쇄류암과 같이 공극이 발달한 화산쇄설물은 지역적 유체 집중과 이차 광물 침전으로 인해 파이프 모양 또는 기둥 모양의 변질대가 형성될 수 있으며(Self *et al*., 2022), 관입체(예: 암맥) 및 그 열변질대는 국지적으로 용해, 파쇄, 변질을 유도하여 수직 유체 흐름의 통로를 제공하는 동시에 일부 구간에서는 유체 흐름을 구획하는 역할도 한다(Kennedy *et al*., 2022).

이처럼 화쇄류암 내 파이프와 구상체 구조는 주로 퇴적 직후 가스의 배출과 분리 과정으로 설명되어 왔으나, 정치 이후 열수의 주입, 순환, 침전으로 인해 표면상 유사한 구조가 형성될 가능성도 배제하기 어렵다. 그럼에도 일차 구조(퇴적 또는 정치와 동시에 또는 직후)와 이차 구조(열수, 변질, 교결)를 산상 관찰, 미세조직 분석, 암석·광물 특성과 결합하여 구분하는 연구는 충분히 정리되지 않았으며, 특히 파이프 또는 구상 집합체형 구조의 형성과정에 대한 비교 연구는 제한적이다(Pacheco-Hoyos *et al*., 2020; Scarpati *et al*., 2020; Walding *et al*., 2025). 따라서 구조의 형태적 유사성만으로 성인을 구별하기보다는 산상, 조직, 암상 정보를 종합하여 성인을 구별하는 연구가 필요하다.

부안군 변산면 도청리 해상에 위치한 솔섬은 부안화산체에 속하는 석포응회암(함부석 용결 화산력응회암)이 잘 노출되어 있다(Kwon *et al*., 2017). 솔섬의 석포응회암은 약 60 m 두께로, 하부(기저부에서 약 0-20 m)에는 파이프와 구상체 구조가 군집하여 산출된다(Cho *et al*., 2016). 솔섬은 지질명소로 활용되고 2025년 천연기념물로 지정되었으며, 학술적 및 교육적 가치가 매우 높다. 이러한 구조의 형성 기작을 규명하는 것은 지질학적 연구뿐만 아니라 대중을 위한 지질교육에도 매우 중요하다. 한편 솔섬의 파이프와 구상체 구조는 화쇄류암에서 볼 수 있는 가스 배출 구조와 유사해 보이지만, 산출 층준과 내부 충전 그리고 변질 양상을 고려할 때 단순한 가스 탈출로 설명하기 어렵다. 더불어, 미세조직과 광물 분석(예: 기질부의 변형 조직과 철산화 광물 산출)은 퇴적 후 유체의 작용이 개입됐을 가능성을 시사한다.

이 연구의 목표는 솔섬에 분포하는 석포응회암 내 파이프와 구상체 구조의(1) 산상 및 기하학적 특징(형태, 분포, 층준)을 기술하고, (2) 모암과 구조부의 암석학적·광물학적 특성을 비교하며, (3) 기존 화쇄류암의 가스 탈출 구조 또는 분리구조 모델과의 연관성을 평가하고, (4) 열수작용과 유동화 또는 주입 과정에 의해 형성된 이차 구조의 가능성과 그 지질학적 의미를 제시하는데 있다. 또한, 본 연구는 솔섬 사례를 통해 화쇄류암 내 유사 구조가 성인(일차 또는 이차) 인지를 구별하는 데 유효한 산상·암석학적 판단 기준을 제안하고자 한다.

2. 지질개요

백악기 동안 한반도를 비롯한 동아시아 지역은 유라시아판 아래로 사각섭입하는 이자나기판의 영향으로 광범위한 지각 변형이 일어났으며(Klimetz, 1983; Engebretson *et al*., 1984; Watson *et al*., 1987), 그 결과 다양한 크기와 조성을 지닌 퇴적분지들과 화산활동이 나타났다. 한반도 백악기 퇴적분지의 분지충전물에 대한 암상, 퇴적환경, 지질연대, 충전양상, 구조, 화산분출 및 분지진화에 대한 연구들

은 백악기 한반도 및 동북아시아의 지각구조진화와 조구조 운동 특성을 이해하는 데 중요한 자료로 활용되고 있다 (Chough and Sohn, 2010; Chough, 2013 and references therein).

부안화산체(Buan Volcanics)는 백악기 화산-화산퇴적암 연속체의 하나로, 타원형 또는 난원형으로 분포하며(최대 직경 약 20 km)(그림 1a), 유문암질 응회암과 유문암(용암 및 관입암 포함)이 우세하고 일부 구간에는 쇄설성 퇴적층이 협재되어 전체 층후가 1 km 이상에 이르는 것으로 보고된다(Koh *et al*., 2013; Kwon *et al*., 2017). 부안화산체의 층서는 암상(쇄설성 또는 화산쇄설성), 분화 양상(폭발적 또는 분출성), 입도, 구성 광물 및 암편 조성 등을 기준으로 9개 층서 단위(분출 단위)로 구분되며, 하위에서 상위로 천

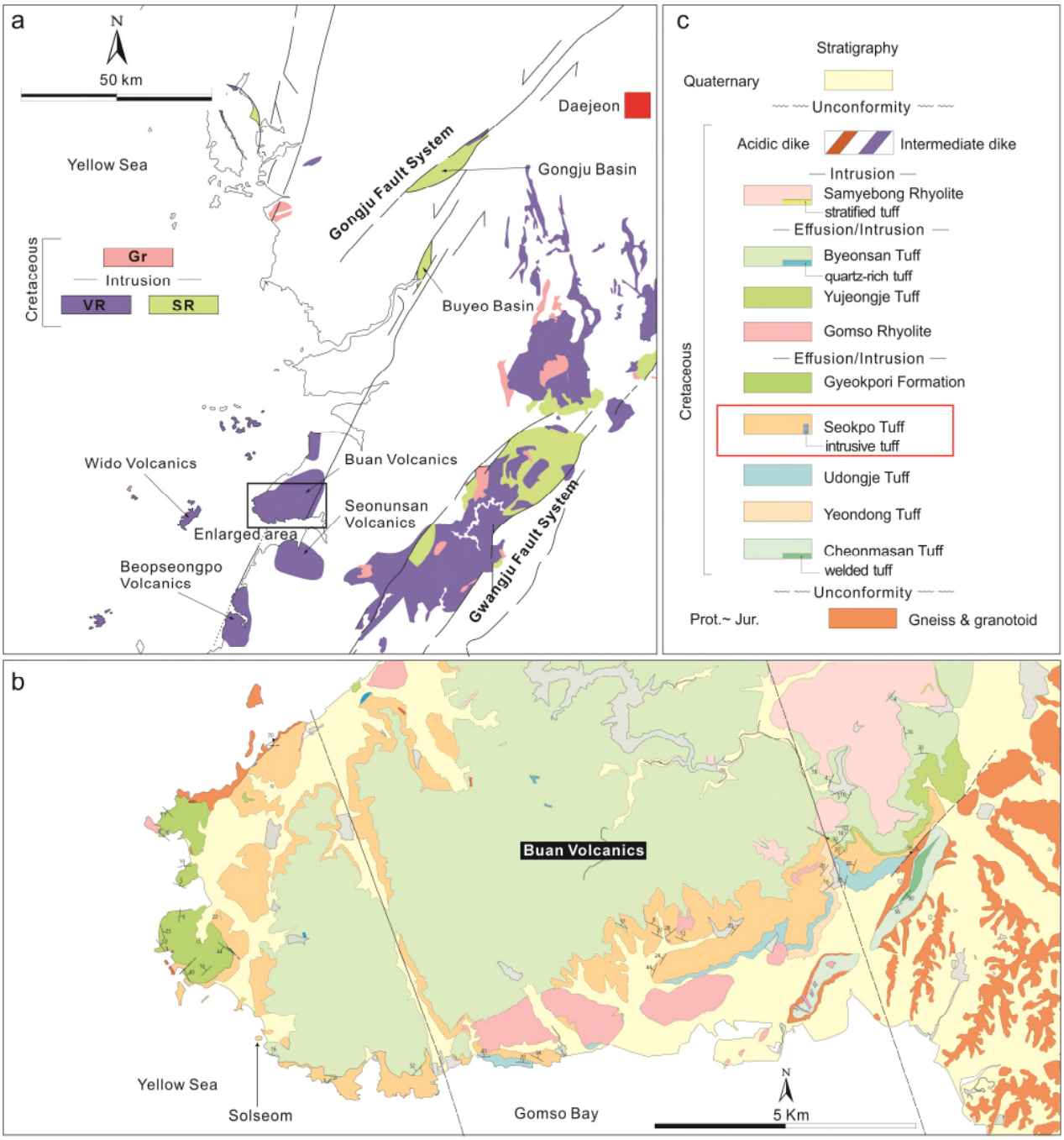

Fig. 1. (a) Distribution of Cretaceous rocks on the southwestern Korean Peninsula. The Buan Volcanics occur along a NE-SW trending fault system. (b, c) Geological map of the Buan Volcanics (modified from Kwon *et al*., 2017), subdivided into nine lithostratigraphic units (formations). Solseom is located in the southwestern part of the Buan Volcanics.

마산응회암, 연동응회암, 우동제응회암, 석포응회암, 격포리층, 곰소유문암, 유정제응회암, 변산응회암, 삼예봉유문암으로 명명된다(Koh *et al*., 2013; Kwon *et al*., 2017)(그림 1b, 1c). Kwon *et al*. (2017)은 각 층서 단위가 칼테라 형성 분출작용의 산물로 해석하였으며, 다양한 암상과 분포 변화는 부안화산체를 형성한 칼테라가 복잡한 화산진화 과정을 겪었음을 보여준다(Gottsmann and Marti, 2011; Cas and Wright, 2012; Self, 2025). 또한, 석포응회암에서 분리된 저어콘의 SHRIMP U-Pb 연령은 약 88.7 Ma로 보고되어, 부안화산체의 분출 시기는 후기 백악기임을 지시한다(Kwon *et al*., 2017).

이번 연구 대상인 솔섬(부안군 변산면 도청리 인근 해상)은 부안화산체 남서부에 위치하며, 석포응회암 노두를 쉽게 관찰할 수 있다(그림 1b, 1c, 2). 솔섬의 석포응회암은 다량의 부석편을 함유하는 함부석 용결 화산력응회암으로, 폭발적 분화로 형성된 화산쇄설성 밀도류에 의해 운반된 화산쇄설물이 퇴적·정치되어 형성되었다(Kwon *et al*., 2017).

3. 솔섬 암상 특성

연구지역인 솔섬은 부안화산체 층서 단위 중 석포응회암이 잘 노출된 대표적인 장소이다(그림 1, 2). 솔섬에서는 석포응회암의 하부 구간에 파이프와 구상체가 집중적으로 발달하여(그림 3a), 화쇄류암 내 다양한 구조와 형성 과정을 관찰하고 기록하기에 적합하다.

솔섬의 파이프와 구상체 구조는 겉보기에는 독립적인 구조로 보이지만, 야외에서는 서로 연결되거나(파이프와 구상체), 파이프 구조를 통해 인접 구조와 연결되어 군집을 이룬다(그림 3a). 이번 연구에서는 이러한 군집을 성인(일차/이차) 해석과 구별하기 위해 '파이프와 구상체 복합구조(pipe-globule complex; PGC)'라는 용어를 사용하고자 한다. PGC는 모암과 구성 입자(암편, 부석편, 결정편)의 종류가 대체로 유사하지만, 야외에서는 세립 화산회가 더 많고 조립 암편이 적게 나타나는 특징이 있다. 또 일부 산출지점에서는 구조 주변의 적색 변색대, 뚜렷한 구조 경계, 그리고 모암 절단 양상이 관찰된다.

3.1. 모암(석포응회암) 암상

솔섬 석포응회암의 총 두께는 약 60 m이며(그림 2a), PGC가 발달하는 구간의 모암은 함부석 용결 화산력응회암으로 대표된다. 모암은 괴상이나 부분적으로 희미한 층상 구조를 보이며, 중립 화산회에서 중립 화산력(일부 조립 화산력

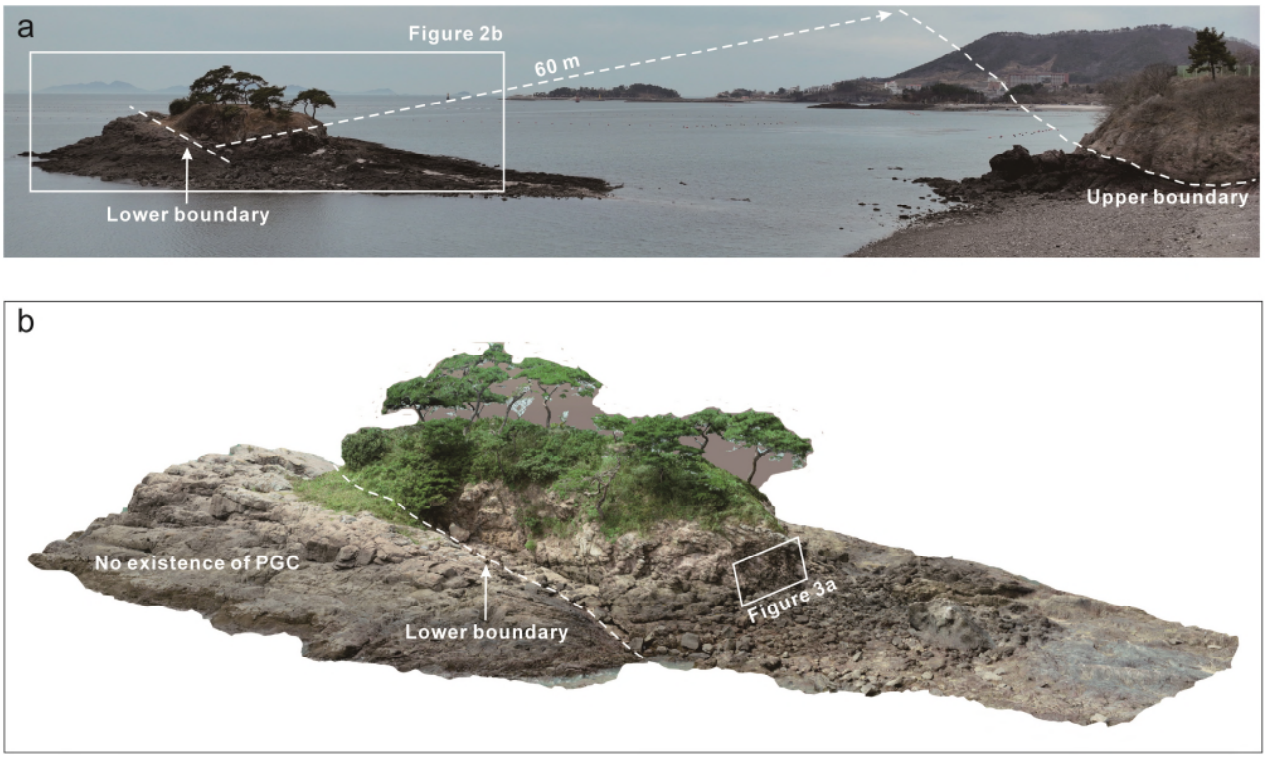

Fig. 2. Overview of Solseom and the occurrence of the pipe-globule complex (PGC) in the Seokpo Tuff. (a) The Seokpo Tuff exposed on Solseom is -60 m thick; the PGC is concentrated in the lower part of the tuff, 0-20 m above the basal contact. (b) Outcrop view showing the PGC horizon. A lithologic boundary (white dotted line) within the Seokpo Tuff is visible, and the PGC is developed mainly above this boundary.

에서 화산괴) 크기의 암편, 부석편, 결정편이 세립 화산회에 기질에 지지되어 있으며, 분급이 불량하다(그림 3b). 암편들은 각형에서 아원형까지 다양하며, 유문암, 응회암, 안산암, 화강암 등 다양한 조성으로 구성된다. 특히 부석편은 녹니석화되어 암녹색 또는 연녹색을 띤다(그림 3c). 측방으로 신장된 부석편과 잎사귀 모양의 암편들은 층리면에 대체로 평행하게 배열되어 있다. 주 결정편은 사장석이며, 소량의 흑운모, 석영, 그리고 불투명 광물이 관찰된다.

3.2. 파이프와 구상체 복합구조(pipe-globule complex; PGC)

3.2.1. 산상 및 층준

PGC는 석포응회암의 하부, 특히 기저부에서 약 0-20 m 범위에 집중되며 상부에서는 거의 관찰되지 않는다(그림 2a). PGC는 측방으로 대체로 20 m 이내 범위에서 연속성을 갖고 군집을 이루며, 군집층 두께는 약 5 m 내외이다. 군집층 상부에는 파이프와 구상체가 급격히 소멸하는 수직적 분포가 특징적이다. PGC는 모암과 유사한 입자 유형을 갖지만, 모암에 비해 화산력에서 화산괴 크기의 암편이 적고, 세립 화산회가 상대적으로 풍부하여 야외에서 뚜렷한 입도 대비를 보인다. 또한, 구조부는 모암보다 용결도/치밀도가 상대적으로 높아 풍화와 침식에 대한 저항성 차이를 보인다(그림 2b). 일부 구간에서는 PGC 주변 모암의 적색 변색대가 나타난다.

3.2.2. 형태별 구분과 특성

솔섬 PGC는 형태, 장·단축비, 그리고 연결 관계에 따라 파이프와 구상체로 구분하여 기술하였다. 각 요소는 단독

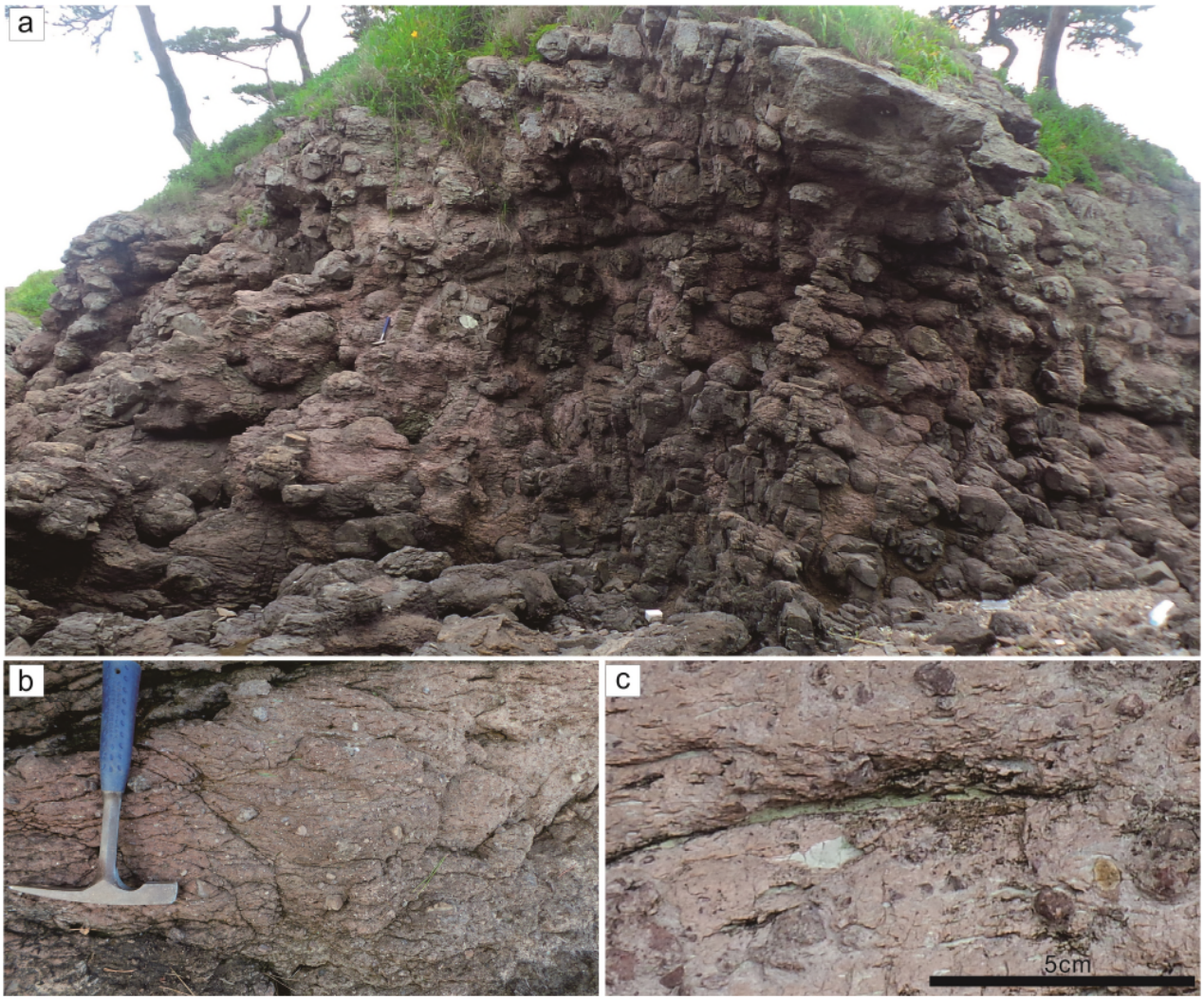

Fig. 3. Field occurrence and lithofacies of the Seokpo Tuff on Solseom. (a) Occurrence of the PGC, where pipes and globules are interconnected, forming clustered assemblages. (b) Host rock: pumiceous welded lapilli tuff (Seokpo Tuff). (c) Elongated pumice clasts are laterally stretched, subparallel to bedding, and commonly chloritized, producing dark- and pale-green colors.

으로 산출되기도 하지만, 현장에서는 파이프 상단 또는 중간에 구상체가 발달하거나 파이프를 통해 인접 구상체와 연결되는 등 복합적인 연결 구조가 나타난다.

PGC-파이프는 폭 0.1-0.5 m, 높이는 2-4 m 범위를 보인다. 내부는 매우 세립에서 세립 화산회 기질이 우세하며, 조립 화산회에서 중립 화산력 크기의 암편이 산재한다. 내부는 대체로 괴상이며 신장 입자(예: 장축이 긴 암편)의 우세 방향성은 뚜렷하지 않다. 파이프는 모암을 수직 또는 고각으로 절단하는 형태를 띠며, 그 가장자리에 구상체가 연속적으로 결합해 포도송이와 유사한 배열을 나타내기도 한다(그림 4a). 이러한 배열은 PGC의 구성요소가 독립적으로 존재하기보다는 동일은 층준 내에서 공간적으로 결합·연결된 복합체로 발달했음을 시사한다.

PGC-구상체는 평면에서 원형-아원형 또는 반원형, 단면에서는 타원형 형태를 보이고, 직경 또는 장축은 0.15-1.4 m 범위를 보인다(그림 4a). 타원형 구상체의 장축은 대체로 층리면과 평행하다. 단면에서는 고립된 구상체가 흔하지만, 연속 노출된 노두에서는 파이프를 통해 이웃 구상체와 연결된다. 이러한 구상체의 입자 구성은 파이프와 유사하지만, 암편과 부석편이 상대적으로 풍부하며, 신장된 부석편의 방향은 모암의 신장된 부석편 방향과 대체로 일치한다(그림 4b). 일부 조립 화산력 또는 중립 화산력 크기의 암편은 가장자리에 세립 화산회가 피복된 화산력(armored lapilli)을 보인다. 구상체 내부는 겉보기에 괴상이나, 자세히 보면 구상체 가장자리에는 암편이 풍부하고 중심부로 갈수록 암편의 크기와 함량이 감소하는 경향이 나타난다(그림 4c). 일부 구상체의 중심에는 조립질 화산력 크기의 암편(쥐라기 화강암, 백악기 화산암)이 산출되기도 하며, 내면에는 타원형 또는 선형의 공극이 발달하고 석영맥으로 충전된 사례도 확인된다(그림 4d).

4. 미세구조 및 광물특성

4.1. 시료 채취 및 전처리

솔섬 석포응회암(모암)과 PGC 구상체의 색상과 치밀도 차이를 보이는 곳에서 총 3점의 시료를 채취하였다. 시료는 구상체 내부의 치밀한 자색, 자색과 접하는 담자색 전이대(모암), 그리고 녹회색 함부석 용결 화산력응회암(모암)으로 각각 구성된다. 시료는 X-선 회절분석(XRD), X-선 형광분석(XRF), 그리고 주사전자현미경(SEM) 관찰을 위해 분말 및 박편 제작 등 전처리 과정을 거쳤다.

조직 관찰과 광물 분석은 경상국립대학교 첨단소재분석

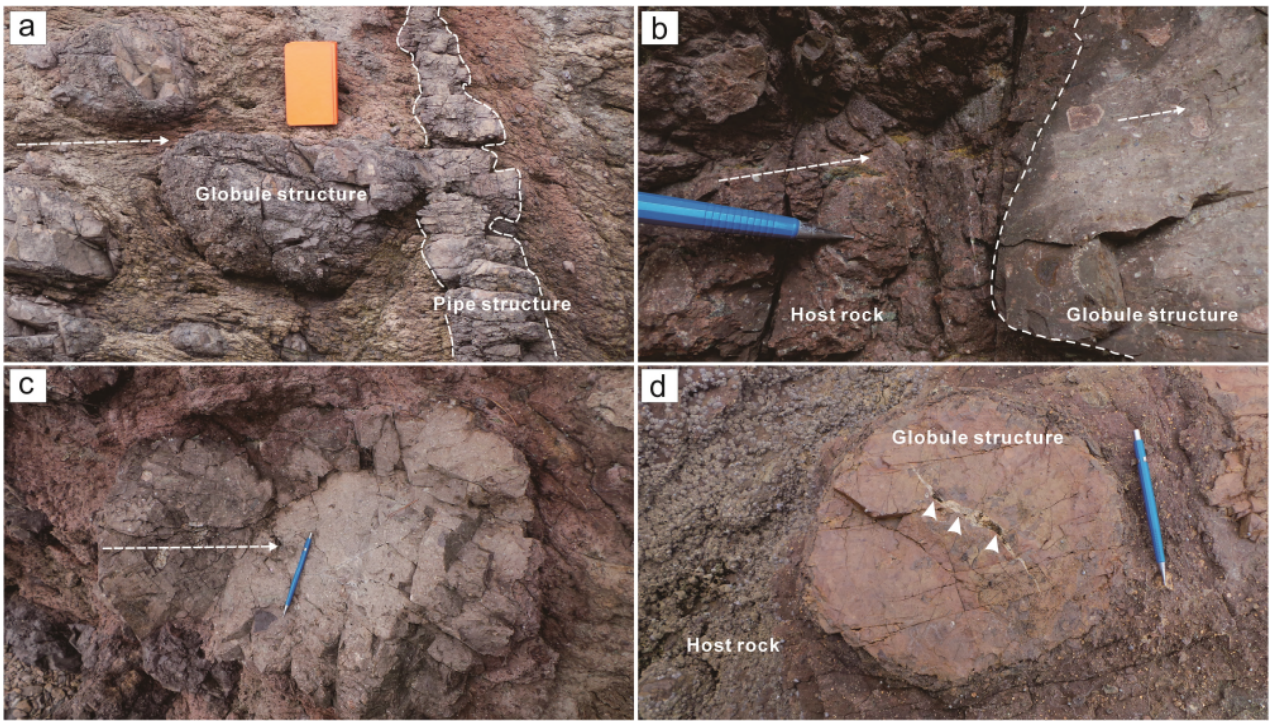

Fig. 4. Representative field characteristics of the PGC. (a) Globules connected to a pipe; the pipe cuts bedding (white arrow) at a high angle. A reddish discoloration/alternation is present on the right side of the pipe. (b) Contact between the host rock and a globule. The elongation direction of pumice clasts within the globule is nearly identical to that in the host (white arrow). (c) Clast size and abundance decrease from the globule margin toward the center (white arrow). (d) Quartz vein infilling a linear void within a globule.

지원센터에 설치된 전계방사 주사전자현미경(FE-SEM; JEOL JSM-7610F, NFEC-2015-01-195394)과 에너지분산형 X-선 분광기(EDS)를 이용하여 수행하였다. 분석 조건은 가속전압 15 kV, 빔 전류 1 nA, 초점 거리 15 mm이다.

XRD 분석을 위해 시료를 화산력 크기로 파쇄한 후, 큰 암편과 일부 변질부를 제거하고 볼밀을 사용하여 분말로 제작하였다. XRD 분석은 Bruker D8 Advance A25 장비로 수행하였고, 광물 동정을 위해 EVA v3.1 프로그램을 사용하였다. 분석 조건은 Cu-Kα(니켈 필터) X-선으로 40 kV, 40 mA에서 2θ = 4-70° 범위, 0.02° 간격, 57.3초/스텝으로 측정하였다. 철산화광물의 종류를 확인하기 위해, 2 g의 분말 시료를 증류수 200 mL와 혼합하여 10분간 초음파 세척 후 1시간 동안 자석 교반하였다. 자석에 부착된 입자를 회수·건조하여 실리콘 단결정 홀더에 올리고 XRD 분석을 진행했으며, 자성광물 분석은 40 kV, 40 mA 조건에서 2θ = 20-80° 범위, 0.02° 간격, 93초/스텝으로 측정하였다.

주성분 원소 조성 비교를 위하여 3개 시료의 기질부에 대해 XRF 분석을 수행하였다. 분석에 앞서 1 mm 이상의 결정편과 암편을 제거하고 시료를 분말화하였다. 분말 시료로 가압 펠렛을 제작하여 반정량 분석을 실시하였다. 분석은 경상국립대학교 첨단소재분석지원센터에 설치된 Bruker S8 TIGER (NFEC-2019-03-255225)을 이용하여 수행하였다.

4.2. SEM-EDS 관찰

4.2.1. 모암(석포응회암)

모암은 분급이 불량한 기질지지 조직을 가지며, 결정편은 주로 알칼리장석, 사장석, 석영으로 구성된다(그림 5a). 장석은 파각상이 우세하나 일부는 자형을 보이며 석영은

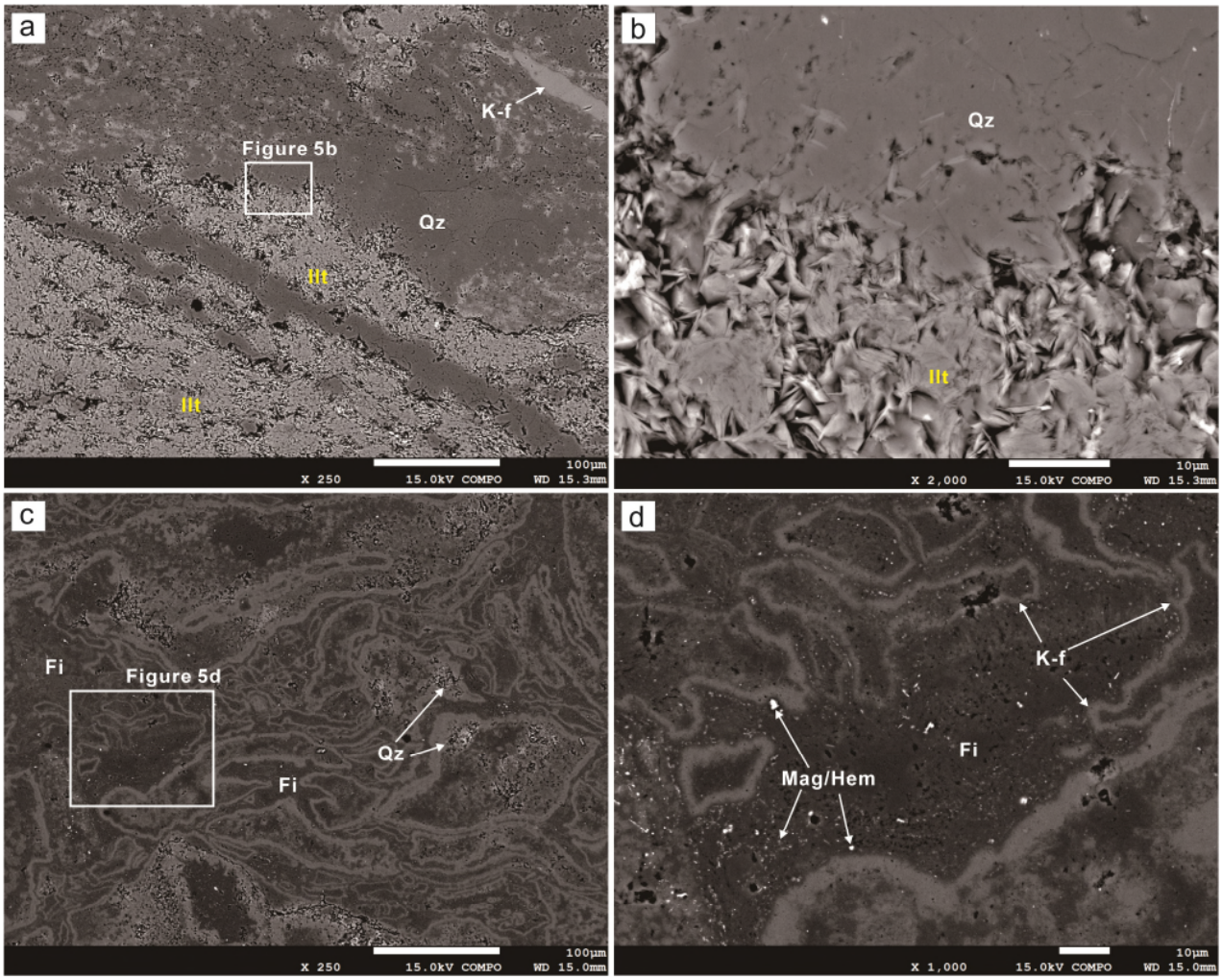

Fig. 5. Backscattered election (BSE) images of the host rocks (a,b) and a globule (c, d) from Solseom. Quartz crystal fragments in the host rock show embayed/corroded textures, and pumice clasts are commonly altered to clay minerals (illite). In the globule, the matrix exhibits an irregularly deformed microtexture; Alkali fedlspar occurs as thin films along fiamme margins, and Fe-oxide minerals are also present. Abbreviations: K-f, Alkali feldspar; Qz, quartx; Mag, mganetite; Hem, hematite; Ilt, illite; Fi, fiamme.

주로 융식된 모습으로 산출된다(그림 5a). 암편은 소량 관찰되고 골격 입자 사이 기질은 재결정된 미세 석영, 점토광물, 장석질 미세 입자들이 혼재하며, 입자 경계는 대체로 불규칙하다(그림 5a, 5b). 점토광물은 1 μm 이하의 세립 입자로 이루어져 있으며 길게 신장되어 나타난다. 이러한 특성은 매몰·속성과정 동안 피아메(fiamme)의 탈유리화작용과 수화작용에 의해 화산유리가 일라이트로 교대된 것으로 추정된다(그림 5a).

4.2.2. 구상체(자색 시료)

구상체는 주변 암석과 유사한 결정편과 암편으로 구성되나, 골격입자 사이 기질은 더 치밀하고 강하게 교결된 양상이 뚜렷하다(그림 5c). 내부에서는 모암에서 관찰되는 점토광물 및 일부 기질 성분이 석영과 알칼리장석으로 치환된 조직이 관찰된다. 알칼리장석은 피아메 가장자리를 따라 얇은 필름처럼 산출되고, 석영은 피아메 내부를 충전하는 양상을 보인다(그림 5c, 5d). 구상체의 기질부에는 불규칙한 변형 조직이 나타나며, 수 십에서 수 백 nm 크기의 철산화광물도 관찰된다(그림 5c, 5d). 일부는 알칼리장석 필름과 평행하게 배열된 모습도 확인된다(그림 5d).

4.3. XRD 및 XRF 분석

XRD 분석 결과 모암과 구상체 모두 석영, 사장석, 알칼리장석이 주요 구성광물로 확인된다(그림 6a). 구상체의 자

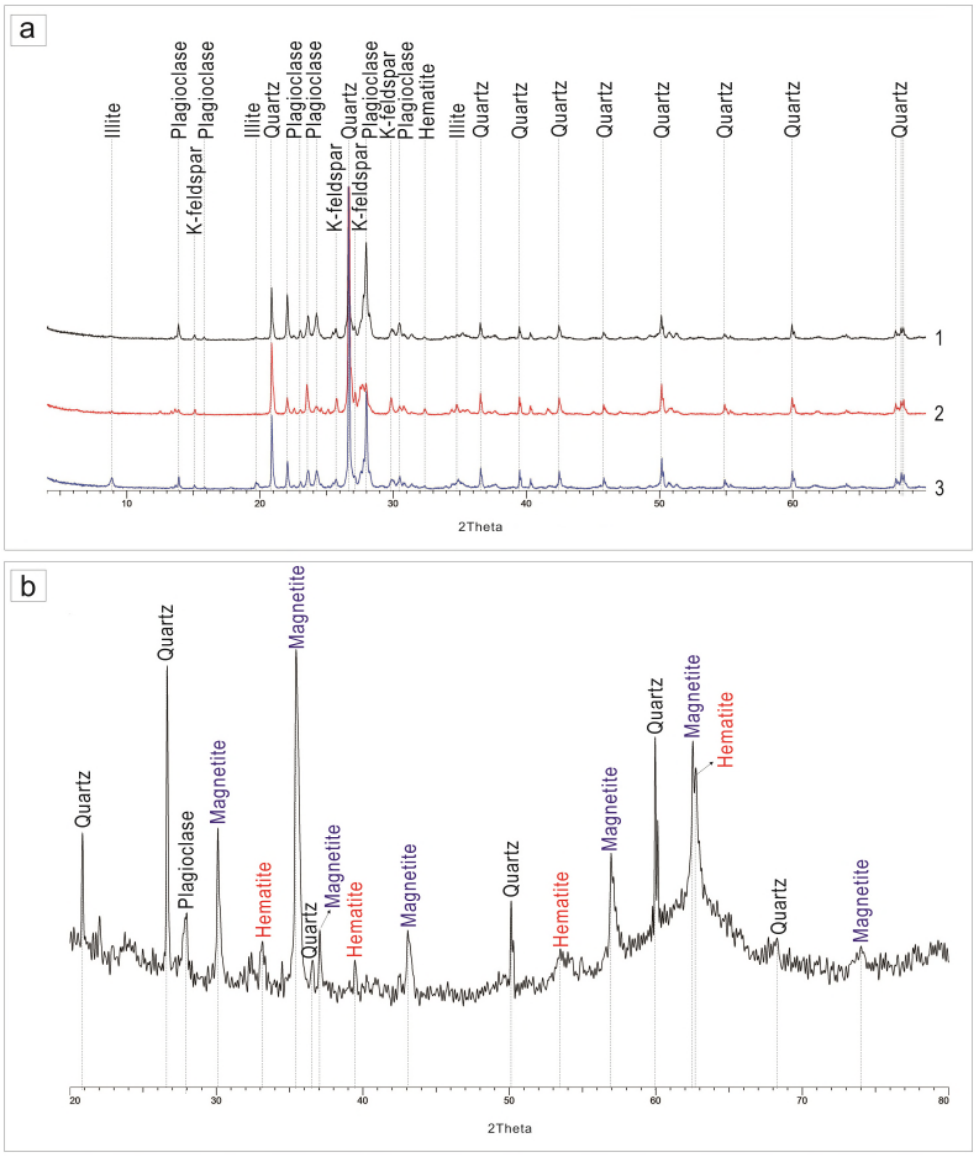

Fig. 6. X-ray diffraction (XRD) patterns of samples from Solseom. (a) XRD patterns of bulk samples: Sample 1, host rock; Sample 2, globule; Sample 3, pale-purple transition zone. (b) XRD pattern of the magnetic fraction seperated from Sample 2.

Table 1. Major element oxides (wt.%) of the Solseom.

Sample	1	2	3
SiO_2	70.88	76.28	72.62
TiO_2	0.14	0.14	0.12
Al_2O_3	16.03	12.32	15.67
Fe_2O_3	1.38	1.23	1.25
MnO	0.05	0.05	0.05
MgO	0.34	0.18	0.49
CaO	0.30	0.27	0.36
Na_2O	7.11	3.10	4.22
K_2O	3.30	6.09	4.47
P_2O_5	0.04	0.04	0.03
SO_3	0.03	0.02	0.10
Cl	0.17	0.04	0.42
BaO	0.09	0.13	0.09
SrO	0.02	0.01	0.02
WO_3	0.03	0.04	0.02
Rb_2O	0.01	0.02	0.02
ZrO_2	0.01	0.01	0.01
Cr_2O_3	0.02	0.02	0.01
ZnO	0.01	0.00	0.01
CeO_2	0.04	0.00	0.00

석 교반한 시료에서는 모암에 비해 점토광물(일라이트와 녹니석)과 철산화광물(자철석 우세, 적철석 소량)이 특징적이다(그림 6b).

XRF 분석은 모암과 구상체의 조성을 비교하기 위해 수행하였다(표 1). 분석 결과, 모암 기질의 SiO_2 함량은 70.88에서 72.62 wt.%이며, 구상체 기질은 76.28 wt.% 이다. 또한 구상체는 모암에 비해 Al_2O_3가 상대적으로 낮고 K_2O가 상대적으로 높은 경향을 보인다(표 1). 이러한 조성 차이는 SEM에서 관찰되는 구상체에서 관찰되는 알칼리장석 필름 및 석영 충전 조직과 조화를 이루며, 구상체 내부에서 규산염 상의 재조직 및 교결이 진행되었을 가능성을 시사한다(표 1; 그림 5d).

5. 토 의

5.1. 솔섬 PGC 형성 기작

화쇄류암 내 가스 탈출 및 분리구조는 화산쇄설성 밀도류가 퇴적되고 정치되는 동안 흐름 하부와 퇴적체 상부가 맞닿는 흐름-경계대(flow-boundary zone)에서 퇴적 압밀과 탈가스화에 의해 간극 유체가 상향 배출되면서 형성될 수 있다(Branney and Kokelaar, 2002). 특히 유체 탈출이 지배적인 흐름-경계대에서는 퇴적 과정에서 배제된 간극 유체(dusty gas)의 상향 플럭스가 유지되고, 유체 배출이 국지적으로 채널화될 경우 세립질이 제거된 파이프형 구조 등 다양한 유체-탈출 구조가 발달할 수 있다(Branney and Kokelaar, 2002; Pacheco-Hoyos *et al*., 2020)(그림 7). 이러한 일차 구조는 대체로 퇴적·정치 직후의 탈가스 및 입자 재배열·분급 과정으로 설명되며, 구조의 내부 충전 특성과 층준 분포는 퇴적체의 교결/용결 및 유체 이동 조건을 반영한다(Brown and Andrews, 2015; Pacheco-Hoyos *et al*., 2020).

솔섬 석포응회암 하부에 발달하는 PGC는 외관상 화쇄류암의 가스 탈출 구조와 유사하나, 본 연구의 산상·미세조직·광물학적 결과는 퇴적·정치 이후 열수(혹은 열수에 의해 이동하는 유체)의 상승과 유체-암석 반응이 결합된 형성 과정을 지지한다. 화산쇄설물이 퇴적·교결된 이후 냉각 및 초기 용결·교결 과정에서 용결도 차이, 암편의 불균일한 분포, 층리, 미세 균열 등에 의해 투수성이 공간적으로 이질화될 수 있으며, 이러한 조건은 유체가 특정 구간으로 집중되는 통로를 제공할 수 있다(Cavazos-Álvarez *et al*., 2020; Heled *et al*., 2022; Kennedy *et al*., 2022; Pereira *et al*., 2024). 한편, PGC 내부가 모암에 비해 암편이 적고 화산회 기질이 주를 이루는 조직 특성은, 정치 이후 유체의 흐름 과정에서 입자, 특히 세립질의 선택적 이동이나 재배치와 같은 기계적 분리(segregation)가 일부 발생할 수 있음을 시사한다. 그러나 현재 노두와 절단면, 그리고 SEM-EDS에서 관찰에서는 입자들의 뚜렷한 이동이나 재퇴적을 보여주는 이차 퇴적 구조(예: 점이층리, 내부 층리 등)가 PGC 내부에 명확하게 나타나지 않는다. 이는 열수(유체)에 의한 기계적 분리 작용이 존재했더라도, 그것이 장거리 운반이나 강한 재퇴적을 일으킬 만큼 지배적이지 않았음을 의미하며, 오히려 국지적이었을 가능성을 시사한다. 또한 칼데라 환경에서는 마그마방 또는 관입체의 잔열이 열원으로 작동하여 지열 대류 순환을 유도할 수 있고, 이때 화산쇄설물의 이방성 투수성, 층간 경계(또는 암상 경계), 균열대와 같은 구조적 불연속이 유체 유로를 제어하여 유체 흐름이 특정 고투수성 구간으로 채널화될 가능성이 크다(Andersen and Weis, 2020; Tescione *et al*., 2021; Dambly *et al*., 2024; Pereira *et al*., 2024). 솔섬 PGC가 석포응회암 하부(0-20 m) 특정 층준에 군집층으로 집중되는 점은 유체가 동일 층준 내에서 반복적으로 집중·상승했음을 시사하는 산상적 단서로 해석할 수 있다(그림 7). 또한 PGC가 단순히 암상 경계에 국한되지 않고 상부 화쇄류암 내부에서 발달하는 사실은 유체가 층간 경계를 따라 이동한 뒤 국지적으로 채널화되어 화산쇄설물 내부로 유입됐을 가능성을 지시한다(그림 7). 유체의 상승이 지표까지 완전히 관통하지 못하고 하부 층준에 머무르는 양상은, 유체의 구동력이 상부에 축적된 화산쇄설물의 하중(유효응력)과 투수성 조건을 극복

하기에는 제한적이었거나 층간 경계에서의 투수성 대비로 인해 유체가 특정 구간에서 정체·집중되었음을 시사한다.

이러한 유체의 상승과 집중은 단순히 통과에 그치지 않고, 용질 운반과 온도·압력·산화·환원 조건 변화 과정에서 구조 내부에 광물이 침전·치환되며 기질이 재조직되는 결과를 초래할 수 있다(Self *et al*., 2022; Pereira *et al*., 2024). 실제로 PGC-구상체에서는 피아메 가장자리의 알칼리장석 필름, 내부 석영 충전, 그리고 철산화광물(자철석·적철석)의 산출이 확인되며, 이는 구조 내부에서 유체-암석 반응과 침전이 일어났음을 시사한다(Bons *et al*., 2022; Pereira *et al*., 2024). 세립 화산회 기질이 우세한 구간은 미세한 공극과 넓은 비표면적 때문에 유체가 통과할 때 용질의 흡착, 침전, 교결이 상대적으로 더 용이하게 발생할 수 있다(Pereira *et al*., 2024). 따라서 세립질이 많은 통로는 선택적으로 치밀화된 후 교결되어 구조를 이룬 가능성이 높다. 석영, 알칼리장석 및 철산화광물의 침전/치환은 구조부 기질을 치밀하게 만들고 결합시켜 모암보다 더 견고한 물성을 형성할 수 있으며, 내부의 공극압 변화와 함께 선택적 변형이 촉진될 수 있다. 일부 구상체에서 관찰되는 공극의 석영맥 충전은 유체 이동과 침전이 구조 내부에서 실제로 작동했음을 의미한다(Park and Kwon, 2014). 따라서 솔섬 PGC는 화산쇄설물 퇴적·정치 직후의 물리적 분리만으로 설명되기보다, 정치 이후 열수 유체의 상승·집중과 광물 침전·교결, 그리고 국지적 변형이 결합하여 형성된 이차 구조로 해석하는 것이 타당하다(그림 7).

5.2. PGC와 가스 탈출 구조/분리구조 및 페퍼라이트 구별 그리고 차이점

솔섬 PGC는 겉보기에는 가스 탈출 파이프와 유사해 보일 수 있으나, PGC가 보여주는 입도, 조직, 광물학적 특성은 전형적인 가스 탈출 구조 또는 분리구조 모델과 중요한 차이를 보인다. 화쇄류암에서 가스 탈출 구조와 분리구조는 보통 퇴적·정치 직후의 탈가스화와 입자 재배열 및 분급 과정으로 설명되며(Brown and Andrews, 2015; Pacheco-

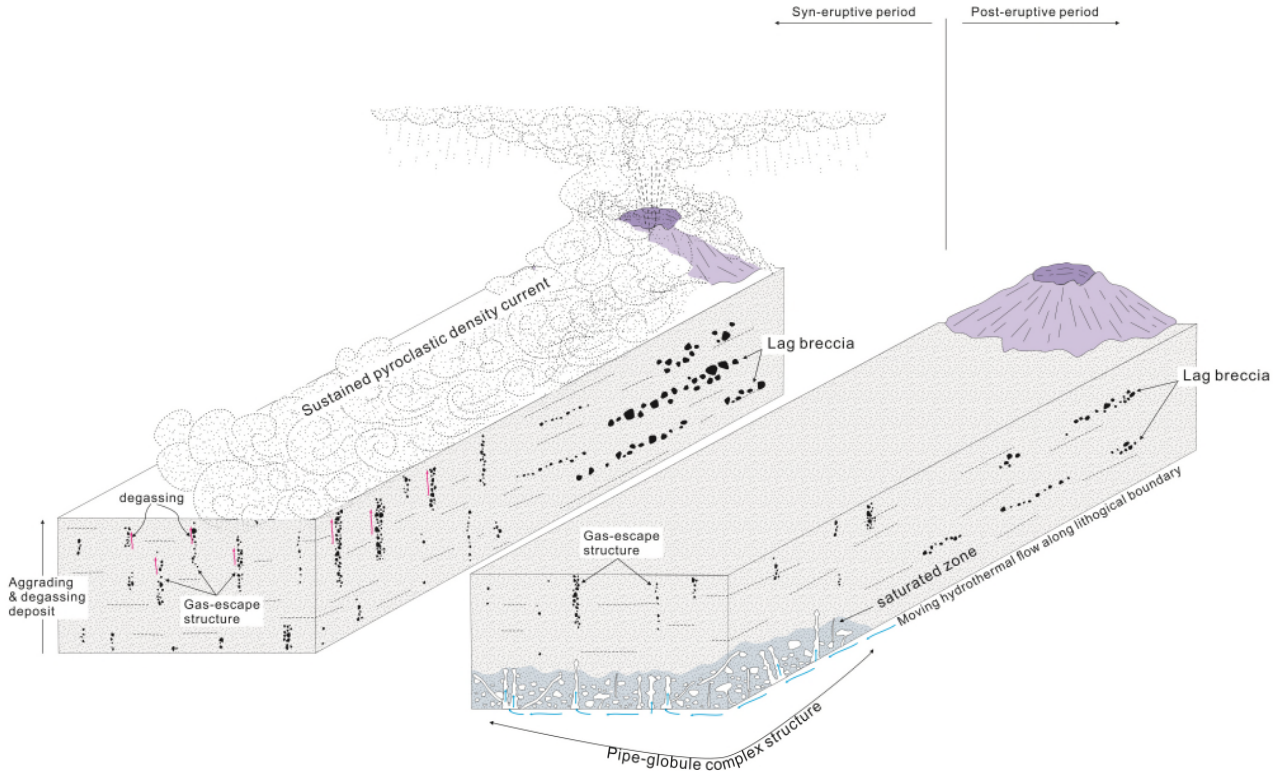

Fig. 7. Schematic diagram comparing primary ignimbrite structures (gas-escape/segregation structures; left) and secondary structures formed by hydrothermal processes (PGC; right). Primary structures develop during the deposition and emplacement of sustained pyroclastic density currents in the flow-boundary zone, where compaction-driven degassing induces upward escape of pore fluids, resulting pipes are typically subvertical, commonly enriched in coarse or denser components, and may occur at various stratigraphic levels. In contrast, the PGC on Solseom is concentrated in the lower part of the ignimbrite, where fluids are repeatedly focused and ascend along a basal horizon; fluid transport and subsequent mineral precipitation/replacement reorganize and cement the matrix. As a result, the PGC becomes denser and more strongly welded/cemented than the host rock, producing greater resistance to weathering and erosion and leaving distinct morphological features.

Hoyos *et al*., 2020; Scarpati *et al*., 2020; Walding *et al*., 2025), 파이프형 가스 탈출 구조는 세립 성분이 제거되어 상대적으로 조립질 또는 고밀도 성분이 잔류·집중되는 경향이 있다(Branney and Kokelaar, 2002; Pacheco-Hoyos *et al*., 2020)(그림 7). 반면 솔섬 PGC는 모암과 구성 성분 종류는 유사하지만, 조립 암편이 결핍되고 세립 화산회 기질이 우세한 '세립질-풍부(화산회 우세/충전)' 양상이 반복적으로 나타나며, 이는 전형적인 세립 성분 제거 후 상대적 조립화 방향성과 뚜렷이 대비된다. 또한, 솔섬 PGC는 석포응회암 상부가 아닌 하부(0-20 m)에 집중되어 군집층을 이루며 상부로 급격히 소멸하는데(그림 7), 이러한 층전 제약은 퇴적 직후 탈가스만으로 설명하기는 어렵다.

미세조직과 광물학적 특성에서도 차별성이 명확하다. 솔섬 PGC는 구상체 내부에서 기질의 불규칙한 변형이 집중적으로 나타나고, 피아메 가장자리의 알칼리장석 필름과 내부 석영 충전 등 치환과 교결 조직이 관찰된다. 또한 자철석과 적철석 같은 철산화광물이 구조부에서 특이하게 확인된다. 이러한 조합은 단순한 입자 분리나 재배열로만 환원하기 어렵고, 유체에 의한 용질 공급, 침전, 치환, 교결 강화가 동반했음을 시사한다. 더불어 구조 경계가 뚜렷하게 보이거나, 모암 절단 양상, 주변 적색 변색대의 동반, 그리고 구상체 내부의 공극의 석영맥 충전은 유체 통로의 발달과 그에 따른 변질과 침전 과정을 뒷받침한다.

한편, 솔섬 PGC 구상체는 외관상 혼합 양상을 띠기 때문에 페퍼라이트와 명확히 구별하는 것이 필요하다. 페퍼라이트는 습윤한 미결 퇴적물과 마그마(용암 또는 관입체)의 직접적 상호작용 및 혼합으로 형성되며, 용암/관입체와의 경계, 마그마 파편의 급냉 흔적, 그리고 혼합대 내 조직적 특징(예: 마그마 파편 형태 변화, 국지적 파쇄, 혼합 조직)이 중요한 식별 기준이다(Skilling *et al*., 2002; White and Houghton, 2006). 하지만 솔섬 PGC는 모암과 동일한 화산쇄설물 성분을 유지하면서도 야외에서 마그마와의 직접 혼합 또는 급냉·혼합을 증명하는 산상·조직적 증거가 명확하지 않다. 그러므로 이를 페퍼라이트로 간주하기는 어렵다.

따라서 솔섬 PGC는 외견상 유사성에도 불구하고, 전형적인 가스 탈출 및 분리구조 그리고 페퍼라이트와는 구별되는 특징들을 동시에 나타나는 사례로 평가된다.

5.3. 솔섬 PGC의 지질학적 가치 및 지질교육적 활용

솔섬 PGC는 화쇄류암 내 파이프 및 구상체 구조를 형태적 유사성만으로 일차(가스 탈출/분리) 구조로 해석하는 접근이 갖는 한계를 보여주는 사례이며, 정치 이후 열수작용에 의해 유사 형태의 이차 구조가 형설될 수 있음을 야외-미세조직-광물학 자료로 제시한다는 점에서 지질학적 의미가 크다. 솔섬 PGC는 (1) 하부 특정 층준(0-20 m) 집중과 군집층 발달, (2) 세립 기질 우세와 조립 암편 결핍이라는 입도 대비, (3) 뚜렷한 경계부의 발달과 변색대, (4) 구조 내부의 선택적 재조직과 교결(알칼리장석 필름, 석영 충전), (5) 철산화광물 및 석영맥과 같은 침전·충전 산물이 함께 나타나는 특징을 보인다. 이 조합은 전통적인 입자 분리 기반 가스 탈출/분리구조 모델과 정합성이 낮고, 오히려 열수 유체의 상승과 집중, 그리고 유체와 암석 간의 반응(침전, 치환, 교결)이 구조 형성에 중요한 역할을 했음을 보여준다.

솔섬은 유네스코 전북서해안권 세계지질공원의 지질명소이자 천연기념물로서 현장 접근성이 좋으며 파이프와 구상체 구조가 집단적으로 발달하여 3차원적 관찰이 가능하다. 이로 인해 화쇄류암 내 유사 구조의 성인(일차와 이차) 판별에 필요한 실질적 기준을 제시하기에 적합하다. 본 연구는 솔섬 PGC를 통해 층준 분포와 경계 관계, 입도 대비 방향성, 변질 및 맥 충전과 같은 유체 이동 지시자, 미세조직 및 광물 조합(철산화광물 등)을 결합하여 성인을 판별하는 접근이 필요함을 보여준다. 이러한 결과는 화쇄류암 구조 해석에서 '형태 중심 분류' 를 넘어 '과정(유체 작용) 중심 해석'도 필요함을 보여주며, 이는 지질유산 해설 및 지질교육에서도 '겉모양은 같아도 형성과정과 지질학적 의미는 달라질 수 있다'는 메시지를 구체적 현장 사례로 제공할 수 있을 것으로 기대된다.

6. 결 론

솔섬 석포응회암 하부에 발달하는 파이프와 구상체 복합구조(PGC)는 기저부로부터 약 0-20 m 범위에 집중되어 약 5 m 두께의 군집층을 이루며, 측방으로는 대체로 20 m 이내에서 연속적으로 발달한다. PGC는 모암과 구성 입자 종류는 유사하지만 조립 암편이 결핍되고 세립 화산회 기질이 우세하여 뚜렷한 입도 대비를 보이고, 뚜렷한 경계, 모암 절단 양상 및 주변 적색 변질대가 동반된다. SEM-EDS 관찰에서 구상체 내부에는 알칼리장석 필름(피아메 가장자리)과 석영 충전(피아메 내부) 등 치환·교결 조직이 발달하며, 자철석·적철석 등 철산화광물이 구조부에서 특징적으로 산출된다. XRD 및 XRF 분석 결과는 구조 내부에서 규산염 상의 재조직과 교결화가 진행되었을 가능성을 지시한다. 이러한 산상-미세조직-광물학적 지시자를 종합할 때, 솔섬 PGC는 전형적인 가스 탈출/분리구조(퇴적·정치 직후 탈가스 및 입자 재배열)만으로 설명되기보다, 정치 이후 열수(또는 열수에 의해 구동된 유체)의 상승·집중과 유체-암석 반응(침전·치환·교결) 및 국지적 변형이 결합하여 형성된 이차 구조로 해석하는 것이 타당하다. 본 연구는 화쇄류암 내 유사 구조 해석에서 일차/이차 구조를 형태만으로 구분하기 어렵다는 점을 제시하며, 솔섬 사례를 통해 현장 및

교육 현장에서 적용 가능한 판별 기준(층준 분포, 입도 대비 방향, 변질, 교결·침전 지시자)을 제안한다.

감사의 글

이 연구는 한국지질자원연구원(주요 연구 과제 GP2025-035)의 지원을 받아 수행되었습니다. 그리고 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단 세종과학펠오우십(국내트랙)의 지원을 받아 수행된 연구(RS-2023-00211265) 입니다. 건설적인 비평과 조언으로 논문의 완성도 향상에 도움을 주신 부산대학교 김기범 교수님과 익명의 심사위원께도 감사의 인사를 드립니다.

REFERENCES

Andersen, C. and Weis, P., 2020, Heat transfer from convecting magma reservoirs to hydrothermal fluid flow systems constrained by coupled numerical modeling. Geophysical Research Letters, 47, e2020GL089463.

Bons, P.D., Cao, D., de Riese, T., González-Esvertit, E., Koehn, D., Naaman, I., Sachau, T., Tian, H. and Gomez-Rivas, E., 2022, A review of natural hydrofractures in rocks. Geological Magazine, 159, 1952-1977.

Branney, M.J. and Kokelaar, B.P., 2002, Pyroclastic density currents and the sedimentation of ignimbrites. Geological Society, London, 143 p.

Brown, R.J. and Andrews, G.D.M., 2015, Deposits of Pyroclastic Density Currents. In: Sigurdsson, H. (ed.), The Encyclopedia of Volcanoes (Second Edition). Academic Press, Amsterdam, 631-648.

Cas, R. and Wright, J., 2012, Volcanic successions modern and ancient: A geological approach to processes, products and successions. Springer, Dordrecht, 528 p.

Cavazos-Álvarez, J.A., Carrasco-Núñez, G., Dávila-Harris, P., Peña, D., Jáquez, A. and Arteaga, D., 2020, Facies variations and permeability of ignimbrites in active geothermal systems; case study of the Xáltipan ignimbrite at Los Humeros Volcanic Complex. Journal of South American Earth Sciences, 104, 102810.

Cho, K.S., Kim, C.B., Cho, S.W., Ryang, W.H., Chung, D.H., Kwon, C.W., Park, K.J. and Hong, D.P., 2016, Geoheritages and geosites of the Gochang-gun and the Buan-gun areas, Korea. Journal of the Geological Society of Korea, 52, 691-707 (in Korean with English abstract).

Chough, S.K., 2013, Geology and sedimentology of the Korean Peninsula. Newnes, Amsterdam, 363 p.

Chough, S.K. and Sohn, Y.K., 2010, Tectonic and sedimentary evolution of a Cretaceous continental arc-backarc system in the Korean peninsula: New view. Earth-Science Reviews, 101, 225-249.

Dambly, M.L., Samrock, F., Grayver, A., Eysteinsson, H. and Saar, M.O., 2024, Geophysical imaging of the active magmatic intrusion and geothermal reservoir formation beneath the Corbetti prospect, Main Ethiopian Rift. Geophysical Journal International, 236, 1764-1781.

Engebretson, D.C., Cox, A. and Gordon, R.G., 1984, Relative motions between oceanic plates of the Pacific Basin. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 89, 10291-10310.

Gottsmann, J. and Martí, J. (eds.), 2011, Caldera volcanism: Analysis, modelling and response. Elsevier, Amsterdam, 516 p.

Heled, Y., Rowe, M.C., Chambefort, I. and Wilson, C.J.N., 2022, Significance of tridymite distribution during cooling and vapor-phase alteration of ignimbrites. American Mineralogist, 107, 460-475.

Kennedy, B., Heap, M., Burchardt, S., Villeneuve, M., Tuffen, H., Gilg, H.A., Davidson, J., Duncan, N., Saubin, E., Gestsson, E.B., Anjomrouz, M. and Butler, P., 2022, Thermal impact of dykes on ignimbrite and implications for fluid flow compartmentalisation in calderas. Volcanica, 5, 75-93.

Klimetz, M.P., 1983, Speculations on the Mesozoic Plate tectonic evolution of eastern China. Tectonics, 2, 139-166.

Koh, H.J., Kwon, C.W., Park, S.-I. and Kee, W.S., 2013, Geological Report of the Julpo and Wido-Hawangdeungdo sheets (1:50,000). Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources, 81 p (in Korean with English abstract).

Kwon, C.W., Ko, K., Gihm, Y.S., Koh, H.J. and Kim, H., 2017, Late Cretaceous volcanic arc system in southwest Korea: Distribution, lithology, age, and tectonic implications. Cretaceous Research, 75, 125-140.

Pacheco-Hoyos, J.G., Aguirre-Díaz, G.J. and Dávila-Harris, P., 2020, Elutriation pipes in ignimbrites: An analysis of concepts based on the Huichapan Ignimbrite, Mexico. Journal of Volcanology and Geothermal Research, 403, 107026.

Park, S.-I. and Kwon, C.W., 2014, A model of the formation of fish-bone vein system in the Buan area. Journal of the Geological Society of Korea, 50, 723-734 (in Korean with English abstract).

Pereira, M.L., Zanon, V., Fernandes, I., Pappalardo, L. and Viveiros, F., 2024, Hydrothermal alteration and physical and mechanical properties of rocks in a volcanic environment: A review. Earth-Science Reviews, 252, 104754.

Pimentel, A., Self, S., Pacheco, J.M., Jeffery, A.J. and Gertisser, R., 2021, Eruption Style, Emplacement Dynamics and Geometry of Peralkaline Ignimbrites: Insights From the Lajes-Angra Ignimbrite Formation, Terceira Island, Azores. Frontiers in Earth Science, 9, 673686.

Scarpati, C., Sparice, D. and Perrotta, A., 2020, Dynamics of large pyroclastic currents inferred by the internal architecture of the Campanian Ignimbrite. Scientific Reports, 10, 22230.

Self, S., 2025, Volcanology- processes, deposits, geology and resources. Bulletin of Volcanology, 87, 26.

Self, S., Randolph-Flagg, N., Bailey, J.E. and Manga, M., 2022, Exposed columns in the Valles Caldera ignimbrites as records of hydrothermal cooling, Jemez Mountains, New Mexico, USA. Journal of Volcanology and Geothermal Research, 426, 107536.

Skilling, I.P., White, J.D.L. and McPhie, J., 2002, Peperite: a review of magma-sediment mingling. Journal of Volcanology and Geothermal Research, 114, 1-17.

Tescione, I., Todesco, M. and Giordano, G., 2021, Geothermal fluid circulation in a caldera setting: The Torre Alfina medium enthalpy system (Italy). Geothermics, 89, 101947.

Walding, N., Williams, R., Dowey, N., Rowley, P., Thomas, M., Osman, S., Johnson, M. and Parsons, D.R., 2025, The influence of moisture on ash strength: implications for understanding volcanic stratigraphy. Bulletin of Volcanology, 87, 39.

Watson, M.P., Hayward, A.B., Parkinson, D.N. and Zhang, Z.M., 1987, Plate tectonic history, basin development and petroleum source rock deposition onshore China. Marine and Petroleum Geology, 4, 205-225.

White, J.D. and Houghton, B., 2006, Primary volcaniclastic rocks. Geology, 34, 677-680.