

제 출 문

극지연구소장 귀하

본 보고서를 “남극권 맨틀활동과 지체구조진화 연구” 과제의 위탁연구 “남극권 중앙해령 MORB glass의 휘발성 성분, 친동성 원소 지화학 및 해저 열수 광상의 마그마-열수 연구” 과제의 최종보고서로 제출합니다.



2025. 12. 31

(본과제) 총괄연구책임자 : 박 송 현

위탁연구기관명 : 서 울 대 학 교

위탁연구책임자 : 이 현 우

위탁참여연구원 : 박 정 우

“ : 서 정 훈

보고서 초록

위탁연구과제명		남극권 중앙해령 MORB glass의 휘발성 성분, 친동성 원소 지화학 및 해저 열수 광상의 마그마-열수 연구				
위탁연구책임자		이 현 우	해당단계 참여연구원수	17	해당단계 연구비	420,000,000원
연구기관명 및 소속부서명		서울대학교 지구환경과학부		참여기업명		
국제공동연구		상대국명 : 상대국연구기관명 :				
요약(연구결과를 중심으로 개조식 500자이내)					보고서 면수	
본 연구에서는 3개의 세부 연구로 구성되어 중앙해령 및 해저 열수 활동에 대한 종합적인 지화학 연구를 수행하였음. - 남극권 중앙해령의 MORB glass 시료를 이용하여 헬륨, 네온, 아르곤 등의 비활성기체의 동위원소 성분을 분석하였음. 헬륨 동위원소 비율은 지속적인 지역적 변화를 나타내며, 이는 상승하는 뜨거운 맨틀 내에 높은 헬륨 동위원소 비율을 가진 풍부한 성분이 존재함을 규명함. 네온 동위원소 분석결과 맨틀 소스에 소량의 원시 Ne 성분을 확인함 - 맥쿼리 섬의 화산유리와 피크라이트 시료의 백금족 원소 조성과 열역학 모델링 결과는 맨틀 용융 과정 중 액체상 황화물과 Ru이 부화된 광물 상이 공존하여야 함을 지시함. 맥쿼리 섬 피크라이트 내 황화물 포함 감람석의 조성은 중앙해령 마그마의 황화물 포화가 매우 이른 시기에 발생하였음을 제시하며, 해령과 맨틀 플룸의 상호작용에 의한 국지적 변화가 일어날 수 있음을 보여줌. 맥쿼리 섬 피크라이트의 백금족 원소 조성에 대한 중복 분석은 마그마 분화 중 황화물 포화 전에 특정 백금족 원소만을 선택적으로 함유하는 백금족 광물의 존재를 지시함. 호주-남극 중앙해령 화산유리 시료의 구리와 은 함량 및 비율 값은 중앙해령 마그마의 분화 중 최후기 단계에서 황화물의 상 전이가 일어남을 지시함. 전세계 중앙해령현무암의 친동성 원소 지화학과의 비교연구를 통하여 중앙해령 맨틀의 상이한 친석성 원소 조성에도 불구하고 맨틀 용융 및 마그마 분별 결정 과정에서 친동성 원소의 거동을 일관적임을 확인함 - Higashi-Aogashima Knoll Caldera 해저열수광상에서 확보된 총 53점의 시료에 대해 유체포유물 분석 수행. 연구 대상 암석은 침니, 마운드 황화물, 변질된 화산암으로 구분되며, 다양한 황화물·황산화물 및 비정질 실리카 광물 조합 확인. 유체포유물은 중정석, 경석고, 섬아연석, 비정질 실리카에서 산출되며, 모두 액체상이 우세한 1차 유체포유물의 특징을 보임. Microthermometry 및 라만 분광 분석 결과, 열수 유체는 기체가 결핍된 환경에서 형성되었으며 비등(boiling) 현상이 발생하였음을 확인함. 유체포유물 미량원소 분석을 통해 금 및 알칼리 원소, Bi, Sb, As, Pb 등이 현저히 부화되어 있음을 확인함						
색 인 어 (각 5개 이상)	한 글	남극권 중앙해령, 휘발성 성분, 친동성 원소, 해저 열수 광장, 마그마, 맨틀 지화학				
	영 어	Antarctic MORB, volatiles, chalcophile elements, seafloor hydrothermal deposit, magma, mantle geochemistry				

요 약 문

I. 남극권 중양해령 MORB glass의 휘발성 성분, 친동성 원소 지화학 및 해저 열수 광상의 마그마-열수 연구

II. 연구개발의 목적 및 필요성

- 남극권 중양해령은 동태평양, 중앙 대서양, 인도양과 더불어 지구 표면의 주요한 발산 경계의 하나로 분포함.. 그러나, 이 지역은 위의 세 지역에 비해 암석에 대한 지화학적 연구가 미비한 편임.. 특히, 헬륨동위원소 성분은 연구지역인 남극권 중양해령에서 보고된 사례가 거의 없는 편임. 따라서, 본 연구를 통해 헬륨을 포함한 네온, 아르곤 등의 비활성기체 동위원소 분석을 수행하여 전 지구적인 중양해령의 비활성기체 성분들에 대한 마지막 퍼즐을 완성하고자 하였음.

- 중양해령현무암 내 친동성 원소 함량은 맨틀 부분 용융 및 마그마 분별 결정 과정에서 액체상 황화물의 거동에 의해 조절된다고 알려져 있음. 하지만 분화 극초기 및 최후기 단계 시료의 희소성에 의해 몇 가지 핵심 의문점들이 남아있음. 1) 맨틀 용융 및 황화물 분화 당시 황화물 이외의 친동성 원소를 함유하는 광물의 존재, 2) 황화물의 포화 시점, 3) 황화물의 상전이 시점. 마그마 분화의 산물인 피크라이트와 마그마인 화산유리가 함께 산출되는 맥쿼리섬과 넓은 범위의 분화 정도를 보이는 화산유리가 산출되는 호주-남극 중양해령은 이러한 의문점을 해결하기에 가장 적합한 연구 지역임.

- 해저열수광상은 Pb, Zn, Cu, Au, Ag 등 금속이 고품위로 부존하는 자원으로, 해양 금속 순환 및 극한 환경 생태계 형성에 중요한 역할을 함. 남극권 중양해령은 열수 발생 가능성이 높으나, 혹독한 환경과 탐사 장비 제약으로 인해 정밀 연구가 제한되어 왔음. 본 연구는 향후 남극권 중양해령 해저열수 시스템 연구를 위한 비교 분석 모델 및 연구 역량 확보를 목적으로 수행됨. 이를 위해 일본 Izu arc의 Higashi-Aogashima Knoll Caldera 해저열수광상 시료를 활용한 유체포유물 분석을 수행함

III. 연구개발의 내용 및 범위

- KR1 세그먼트의 헬륨동위원소 분석을 통하여 맨틀 소스의 깊이를 제시

- 네온 동위원소 분석을 통한 원시성분의 잔류를 확인

- 질소와 같은 안정동위원소 성분 및 기존에 보고된 방사성 동위원소 값들과 비교하여 과거에 섭입으로 유입된 지각물질의 영향도 평가

- 맥쿼리 섬 화산암 시료의 백금족 원소 지화학을 바탕으로 중양해령 환경에서 맨틀 용융 당시 및 마그마 분화 극초기 단계에서 친동성 원소의 거동을 제시

- 호주-남극 중앙해령 화산유리 시료의 친동성 원소 지화학을 근거로 중앙해령 마그마의 분화 최후기 단계에서의 친동성 원소의 거동을 제시
- 전세계 중앙해령현무암의 친동성 원소 조성과의 비교 분석을 통하여 중앙해령 마그마의 형성 및 진화 과정에서 친동성 원소 거동의 보편성을 점검
- Higashi-Aogashima Knoll Caldera 해저열수광상 시료를 대상으로 유체포유물 분석 수행. 유체포유물의 petrography 관찰, microthermometry를 통한 온도·염도 산정, 라만 분광 분석을 통한 유체 성분 분석 수행. 해저열수 유체의 진화 과정과 금속(특히 금) 부화 특성 규명. 연구 결과를 바탕으로 해저열수 시스템의 형성 과정 및 금 부화 메커니즘에 대한 개념적 모델 제시.
- 실험실 기반 분석 및 기존 확보 시료에 대한 정밀 해석에 한정. 현장 탐사, 시추, 자원량 평가 및 상업적 개발 타당성 분석은 연구 범위에 포함하지 않음.

IV. 연구개발결과

- 헬륨 동위원소 비율은 지속적인 지역적 변화를 나타내며, 이는 상승하는 뜨거운 맨틀 내에 높은 헬륨 동위원소 비율을 가진 풍부한 성분이 존재함을 규명
- 네온 동위원소 분석결과 맨틀 소스에 소량의 원시 Ne 성분을 확인함.
- KR1 세그먼트의 HIMU 유사 성분은 약380~430 Ma에 걸쳐 진화한 재활용된 섭입 슬랩에서 파생된 $(U+Th)/^3He$ 비율이 높은 풍부한 맨틀 소스를 반영함을 나타냅니다. 연구지역 맨틀과 관련된 신생대 화산은 헬륨 및 방사성 물질이 유사한 특징을 가지고 있음.
- 맥쿼리 섬의 화산유리와 피크라이트 시료의 백금족 원소 조성 및 열역학 모델링 결과는 맨틀 용융 과정 중 액체상 황화물과 Ru이 부화된 광물 상이 공존하여야 함을 지시함
- 맥쿼리 섬 피크라이트 내 황화물 포함 감람석의 조성은 중앙해령 마그마의 황화물 포화가 매우 이른 시기에 발생하였음을 제시하며, 해령과 맨틀 플룸의 상호작용에 의한 국지적 변화가 일어날 수 있음을 보여줌
- 맥쿼리 섬 피크라이트의 백금족 원소 조성에 대한 중복 분석은 마그마 분화 중 황화물 포화 전에 특정 백금족 원소만을 선택적으로 함유하는 백금족 광물의 존재를 지시함
- 호주-남극 중앙해령 화산유리 시료의 구리와 은 함량 및 비율 값은 중앙해령 마그마의 분화 중 최후기 단계에서 황화물의 상 전이가 일어남을 지시함
- 전세계 중앙해령현무암의 친동성 원소 지화학과 비교연구를 통하여 중앙해령 맨틀의 상이한 친석성 원소 조성에도 불구하고 맨틀 용융 및 마그마 분별 결정 과정에서 친동성 원소의 거동을 일관적임을 확인함
- Higashi-Aogashima Knoll Caldera 해저열수광상에서 확보된 총 53점의 시료에 대해 유체포유물 분석 수행. 연구 대상 암석은 침니, 마운드 황화물, 변질된 화산암으로 구분되며, 다양한 황화물·황산화물 및 비정질 실리카 광물 조합 확인.
- 유체포유물은 중정석, 경석고, 섬아연석, 비정질 실리카에서 산출되며, 모두 액체상이 우세한 1차 유체포유물의 특징을 보임. Microthermometry 및 라만 분광 분석 결과, 열수 유체는 기체가 결핍된 환경에서 형성되었으며 비등(boiling) 현상이 발생하였음을 확인.
- 유체포유물 미량원소 분석을 통해 금 및 알칼리 원소, Bi, Sb, As, Pb 등이 현저히 부화되어 있음을 확인함

V. 연구개발결과의 활용계획

- 본 연구에서 확보한 휘발성 성분 및 친동성 원소 지화학 분석 결과는 남극 및 질란디아 맨틀 연구에 있어 기초 배경 자료로 활용될 예정
- 향후 다양한 해저열수광상 연구에 적용될 수 있는 기반을 제공한다. 또한 본 연구를 통해 확보된 유체포유물의 미량원소 조성, 온도 및 염도 자료는 중앙해령, 배호분지 및 섭입대 환경의 열수계와 비교 가능한 기준 데이터셋으로 활용될 수 있을 것으로 예상함
- 본 연구를 통하여, 3명 이상의 남극 중앙해령 및 해저열수 광상의 전문지식을 보유한 박사 배출이 예상되며, 향후 관련 학문 분야에 중요한 역할을 할 것이라 기대함



S U M M A R Y

(영 문 요 약 문)

I. Geochemistry of volatiles and chalcophile elements in MORB glasses and magmatic-hydrothermal fluid processes in seafloor hydrothermal deposit in the Antarctic ridge

II. Purpose and Necessity of R&D

- Along with the Eastern Pacific Rise, the Mid Atlantic Ridge, and the Indian Ocean Ridge, the Antarctic ocean ridge is distributed as one of the major divergent boundaries of the Earth's surface. However, compared to the above three regions, geochemical studies on rocks in this region are insufficient. In particular, helium isotope components are rarely reported in the study area. Therefore, this study attempted to complete the final puzzle on the components of noble gases in mid ocean ridges by performing the analysis of isotopes of neon and argon including helium.

- The chalcophile element compositions of mid-ocean ridge basalt (MORB) is known to be controlled by the behavior of sulfide liquid during mantle melting and magma differentiation. However, the uniqueness of the primitive samples and highly evolved samples hinders to solve the critical questions, such as 1) the presence of additional phases hosting chalcophile elements during mantle melting and differentiation, 2) the sulfide saturation point, 3) the onset of sulfide phase transition during magma differentiation. The Antarctic mid-ocean ridge is the most suitable region to study these topics because in Macquarie Island, picrites, containing fractionated minerals, are collected together with MORBs, the residual melt, and in the Australian-Antarctic Ridge, where the MORB glasses with a wide range of magma differentiation, are recovered.

- Seafloor hydrothermal deposits are high-grade resources enriched in metals such as Pb, Zn, Cu, Au, and Ag, and play an important role in marine metal cycling and the formation of ecosystems in extreme environments. Although the Antarctic mid-ocean ridge has a high potential for hydrothermal activity, detailed investigations have been limited due to harsh environmental conditions and logistical constraints. This study aims to establish research capacity and a comparative framework for future studies of seafloor hydrothermal systems along the Antarctic mid-ocean

ridge. To achieve this objective, fluid inclusion analyses were conducted on samples from the Higashi-Aogashima Knoll Caldera hydrothermal field in the Izu arc, Japan.

III. Contents and Extent of R&D

- The depth of the mantle source is presented through helium isotope analysis of the KR1 segment
- Confirmation of the residue of primordial components through neon isotope analysis
- Evaluate the influence of subducted materials through stable isotopes such as nitrogen and previously reported radiogenic isotope values
- Propose the behavior of chalcophile elements during the mantle melting process and the early stages of magma differentiation at mid-ocean ridge (MOR) settings based on the platinum-group element (PGE) geochemistry of the Macquarie Island volcanic samples
- Propose the behavior of chalcophile elements during the late stages of magma differentiation at MOR settings based on the Cu-Ag systematics of the Australian-Antractic Ridge volcanic glasses
- Examine whether aforementioned proposed behavior of chalcophile elements during the generation and evolution of MORB magma by comparing with the global MORB samples
- Fluid inclusion analyses were conducted on samples collected from the Higashi-Aogashima Knoll Caldera seafloor hydrothermal deposit. Petrographic observations of fluid inclusions, microthermometric analyses to determine temperature and salinity, and Raman spectroscopic analyses to characterize fluid compositions were performed. The evolution of hydrothermal fluids and metal (particularly gold) enrichment processes was investigated. Based on the results, a conceptual model for the formation of the seafloor hydrothermal system and gold enrichment was proposed.
- The scope of this research is limited to laboratory-based analyses and detailed interpretations of previously collected samples. Field exploration, drilling, resource estimation, and assessments of commercial feasibility are beyond the scope of this study.

IV. R&D Results

- The helium isotope ratio shows a continuous regional variation, which reveals the presence of an enriched component with a high helium isotope ratio within the rising hot mantle
- Neon isotope analysis confirms a small amount of primordial Ne components in the mantle source.

- The HIMU-like components of the KR1 segment indicate that the (U+Th)/³He ratio derived from recycled subducted slabs that evolved over approximately 380 to 430 Ma reflects enriched mantle sources. The Cenozoic volcanoes associated with the mantle underneath the study area have similar characteristics of helium and radiogenic isotopes.
- The PGE composition of volcanic glasses and picrites from the Macquarie Island and the result of thermodynamic modelling for dynamic mantle melting indicate the coexistence of sulfide liquid and Ru-rich phases in the residual mantle. The composition of sulfide-hosting olivine in Macquarie Island picrites suggests that the sulfide saturation occurs at the very early stages of magma differentiation and that the saturation point can locally vary due to the influence of adjacent mantle plume. The results of duplicate PGE analyses on some Macquarie Island picrites indicates that the platinum group minerals have crystallized before the sulfide saturation. The Cu-Ag systematics of Australian-Antarctic Ridge MORB glasses indicates the sulfide phase transition from liquid to crystal occurred at the late stages of MORB magma differentiation. The comparison with the chalcophile element compositions of global MORB samples supports the suggested behavior of chalcophile elements during MORB magma generation and evolution to be typical of MORB magma.
- Fluid inclusion analyses were performed on a total of 53 samples from the Higashi-Aogashima Knoll Caldera hydrothermal field. The samples were classified into chimney structures, mound sulfides, and altered volcanic rocks, characterized by diverse assemblages of sulfide, sulfate, and amorphous silica minerals. Fluid inclusions hosted in barite, anhydrite, sphalerite, and amorphous silica are predominantly liquid-rich and interpreted as primary inclusions. Microthermometric and Raman spectroscopic analyses indicate that the hydrothermal fluids formed in a gas-depleted environment and experienced boiling. Trace element analyses of fluid inclusions reveal significant enrichment of gold, alkali elements, and chalcophile elements such as Bi, Sb, As, and Pb. The hydrothermal system is interpreted to have formed through mixing of magmatic-derived fluids and seawater, with boiling playing a key role in gold precipitation as nanoparticles. These characteristics distinguish the studied system from mid-ocean ridge-type and ultramafic-hosted seafloor hydrothermal deposits and reflect features typical of subduction-related hydrothermal systems.

V. Application Plans of R&D Results

- The results of the analysis of volatiles and chalcophile elements obtained in this study will be used as basic background data for the study of Antarctic and Zealandia mantle domains.
- It provides a foundation that can be applied to various submarine

hydrothermal deposit studies in the future. In addition, the trace element composition, temperature, and salinity data of fluid inclusions sampled through this study are expected to be used as a reference data set comparable to the hydrothermal system of mid ocean ridges, backarc basins, and subduction zone environments.

- Through this study, it is expected that more than three people with Ph.D. degrees with expertise in the Antarctic mid ocean ridge and submarine hydrothermal deposits will graduate and will play an important role in related academic fields in the future.



목 차

제 1 장 서론

제 2 장 국내외 기술개발 현황

제 3 장 연구개발수행 내용 및 결과

제 1절 휘발성 성분 지화학

제 2절 친동성 원소 지화학

제 3절 해저열수광상 연구

1. 시료 획득 및 유체포유물 분석에 대한 체계 구축
2. 유체포유물에 대한 microthermometry, 상 분석 결과 확보 및 해석
3. 해저열수 시료 내 유체포유물 미량원소 분석 및 종합 해석

제 4장 연구개발목표 달성도 및 대외기여도

제 5 장 연구개발결과의 활용계획

제 6 장 연구개발과정에서 수집한 해외과학기술정보

제 7 장 참고문헌

제 1 장 서론

현재 맨틀은 태평양과 아프리카 영역으로 나뉘며, 각각 다른 진화 역사를 반영하는 독특한 지구화학적 및 동위원소적 특성을 보인다(Christie et al., 1998; Doucet et al., 2020). 이러한 맨틀 영역은 대규모 저속도 영역(LLSVP)과 관련된 심부 맨틀 프로세스와 초대륙 생성 중 대륙 암석권의 섭입으로 인해 발생할 수 있다고 제안되었다(de Sampaio et al., 2024; Doucet et al., 2020). 호주-남극 중앙해령은 이러한 영역 간의 경계를 나타낸다(Christie et al., 1998). 한 때 태평양 영역의 일부로 여겨졌던 호주-남극 능선(AAR)은 현재 Sr, Nd, Hf 및 Pb 동위원소 구성을 기반으로 뉴질랜드-남극 맨틀 영역(ZAMD)으로 분류된다(Park et al., 2019).

ZAMD 내의 화산 시스템들, AAR, 질란디아 판내부 화산 활동, 서남극 열곡대 시스템, 마리 버드 랜드, 그리고 발레니 섬을 포함하여, 일반적으로 HIMU와 유사한 지구화학적 특징을 보인다 (Park et al., 2019). 질란디아와 서남극의 화산 시스템에 대한 이전 연구들은 HIMU와 유사한 풍부한 구성 요소들을 다양한 기원으로 보고 있다. 여기에는 과거의 맨틀 플룸(Hart et al., 1997; Hoernle et al., 2020), 메타소마화된 대륙 암석권 맨틀(SCLM, Aviado et al., 2015; Nardini et al., 2009; Panter et al., 2018), 그리고 섭입된 해양지각(Durkin et al., 2023; Timm et al., 2010)이 포함된다. 또한, 발레니 제도와 맥쿼리 릿지 복합대(Jiang et al., 2021)에서 볼 수 있듯이, 부화된 지화학적 특성의 기원은 특정 화산이나 지역에 따라 달라진다고 제시되었다. 하지만, 수많은 가설에도 불구하고, ZAMD 내의 HIMU와 유사한 원천의 기원은 아직 밝혀지지 않았다.

뉴질랜드와 서남극 사이에 위치한 AAR의 KR1 구간(그림 1-1)은 약 300km에 걸쳐 있으며, 넓은 지역에 걸친 맨틀 구성 변화를 조사할 수 있는 기회를 제공한다. 중앙해령 현무암(MORB) 샘플은 SCLM이나 대륙 지각의 영향을 받지 않기 때문에, 맨틀 영역에 기여하는 부화된 성분을 직접적으로 조사할 수 있는 방법을 제공한다 맨틀 역학을 더 이해하기 위해, 본 연구에서는 주로 ZAMD의 중심인 AAR의 KR1 구간에서 헬륨, 네온, 아르곤, 질소 동위원소에 초점을 맞춘 휘발성 물질에 대한 결과를 제공하고자 한다.

휘발성 성분은 해양 지각 재활용과 맨틀 플룸의 영향을 추적하는 유용한 물질로, 맨틀 이질성에 대한 정보를 제공한다. 특히, 헬륨 동위원소 비율($^4\text{He}/^3\text{He}$ 또는 $^3\text{He}/^4\text{He}$)은 마그마 소스를 구별하는 데 사용됩니다(예: Kurz et al., 1982); 전형적인 MORB($^4\text{He}/^3\text{He}$: 80,000~103,000; $^3\text{He}/^4\text{He}$: 7~9 Ra; Ra는 공기 중 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 비율로 정규화된 값; Graham, 2002), SCLM($^4\text{He}/^3\text{He}$: 103,000~131,000; $^3\text{He}/^4\text{He}$: 5.2~7.0 Ra; Gautheron 및 Moreira, 2002), 그리고 하부 맨틀 플룸과 관련된 해양도 현무암(OIB)($4\text{He}/3\text{He}$: 14,400 낮은; $^3\text{He}/^4\text{He}$: 최대 50 Ra; Jackson et al., 2020). 플룸에서 유래한 OIB는 EM1, EM2, FOZO 특성과 관련하여 낮은 $^4\text{He}/^3\text{He}$ 비율을 보이는 반면(Jackson et al., 2014), HIMU는 높은 $^4\text{He}/^3\text{He}$ 비율로 구분된다($^4\text{He}/^3\text{He}$: 106,000~122,000; $^3\text{He}/^4\text{He}$: 6.8 ± 0.9 Ra; Hanyu et al., 2014; Parai et al., 2009).

중앙해령현무암(MORB) 내 친동성 원소 함량은 맨틀 부분 용융과 마그마 분별 결정 작용에 의해 결정된다. 현재까지 연구 결과에 따르면 MORB 마그마의 생성 및 진화 과정에서 이들 원소를 함유하는 주된 상은 액체상 황화물로 알려져 있다(Keith et al., 2017; Mathez, 1976). 그러나 분화 극초기 및 최후기 단계 시료의 희소성에 의해 다음과 같은 핵심적인 의문점들이 남아있다. 먼저, 맨틀 용융 당시 황화물 이외의 친동성 원소를 함유하는 미지의 광물상은 어떤

것인가? 다음으로, 마그마 분화 과정 중 황화물 포화 이전에 친동성 원소를 함유하는 광물상이 존재하는가? 마지막으로, 황화물 포화 시점과 상전이 시점은 언제인가?

남극권 중앙해령 시료들은 이러한 의문점을 해결할 실마리를 제공한다. 남극권 중앙해령 오피올라이트인 맥쿼리 섬에서는 near-primitive MORB 유리질 시료 뿐만 아니라(Kamenetsky and Eggins, 2012; Kamenetsky et al., 2000; Kamenetsky and Maas, 2002) 분화 광물을 포함하는 피크라이트가 함께 산출되기 때문에(Husen et al., 2016) 맨틀 용융 과정과 마그마 분화 초기의 친동성 원소 지화학의 변화를 추정하기에 적합한 연구 지역이다. 또한, 남극권 중앙해령 중 KR1 세그먼트에서는 MgO 함량이 1.68 wt.%에 이르는 마그마 분화 최후기의 MORB 유리질 시료들이 산출되기 때문에 마그마 분화 후기에서의 친동성 원소 지화학을 추적하기에 적합하다.

따라서 본 연구는 MORB 마그마의 생성 및 진화 과정에서 친동성 원소의 거동을 규명하기 위해 남극권 중앙해령 시료인 KR1과 맥쿼리 섬 지역의 시료들에 대해 각각 구리와 은, 그리고 백금족 원소 지화학 분석을 수행하여 친동성 원소의 거동을 규명하고자 하였다. 그리고 해당 연구 결과가 전지구적으로 보편적인 현상임을 점검하기 위해서 전세계 MORB 시료의 백금족 원소 지화학과의 동태평양 중앙해령 시료의 구리와 은 지화학을 남극권 중앙해령 시료의 연구 결과와 비교 분석하였다.

해저열수광상은 다양한 금속 원소 (Pb, Zn, Cu, Au, Ag)의 높은 품위의 자원으로 평가되고 있다 (Hannington et al., 2005; 2011). 미래 광상으로써의 역할 뿐만 아니라 해저 열수광상은 해양의 주된 금속 공급원으로써 해양의 20-70%의 금속을 공급하는 것으로 알려지며 자연 순환의 균형을 맞추는 역할을 가지고 있다 (Syverson et al., 2023). 또한 생태학적으로도 산소가 없는 극한 환경에서 생태계가 구성되어 있음이 알려지기도 하며 다양한 연구들이 진행되고 있다 (Boschen et al., 2013).

이러한 해저열수광상은 중앙해령, 섭입대 호상환경, 배호분지 확장 등 다양한 지구조적 환경에서 수반되는 것으로 알려져 있으며 전 세계적으로 수백 개의 해저 열수 광상이 발견되어 보고되었다 (그림 1-2; Hannington et al., 2005; Beaulieu et al., 2013; Beaulieu and Szanfranski, 2020). 남극권 중앙해령은 다른 중앙해령과 마찬가지로 열수의 발생 가능성이 매우 높지만, 탐사의 난이도 및 날씨의 영향으로 그간 탐사가 이루어지지 못해 전 세계적으로 보고가 되지 않고 남아있는 지역이다 (Tivey, 2007). 극지연구소의 탐사로 KR1과 KR2에서 열수탐지 (무인 열수공)가 이루어지기도 했다 (Hahm et al., 2015). 하지만 원격조정 무인 잠수정 (Remotely Operated Vehicle (ROV)) 등 장비의 부재 및 남극해의 혹독한 환경으로 해당 지역에 대한 정밀 탐사가 제한되어 해당 지역의 연구가 이루어지는데 큰 어려움이 있다.

본 연구팀은 추후 발견될 남극권 중앙해령의 열수공 연구에 대한 연구 역량 확보 및 비교 모델을 구축하기 위해 서울대학교 서정훈 교수 연구팀에서 기존 확보 중인 일본의 Izu arc의 Higashi-Aogashima Knoll Caldera의 해저열수광상 시료를 이용하여 유체포유물 분석을 진행했다. 이를 통해 해당 해저열수 시스템의 형성 원리 및 금 부화에 대해 논의하고 추후 남극권에서 발견될 해저 열수 시스템의 주요 광물 광화 작용 및 생성 메커니즘에 대한 비교 모델을 구축하고자 한다.

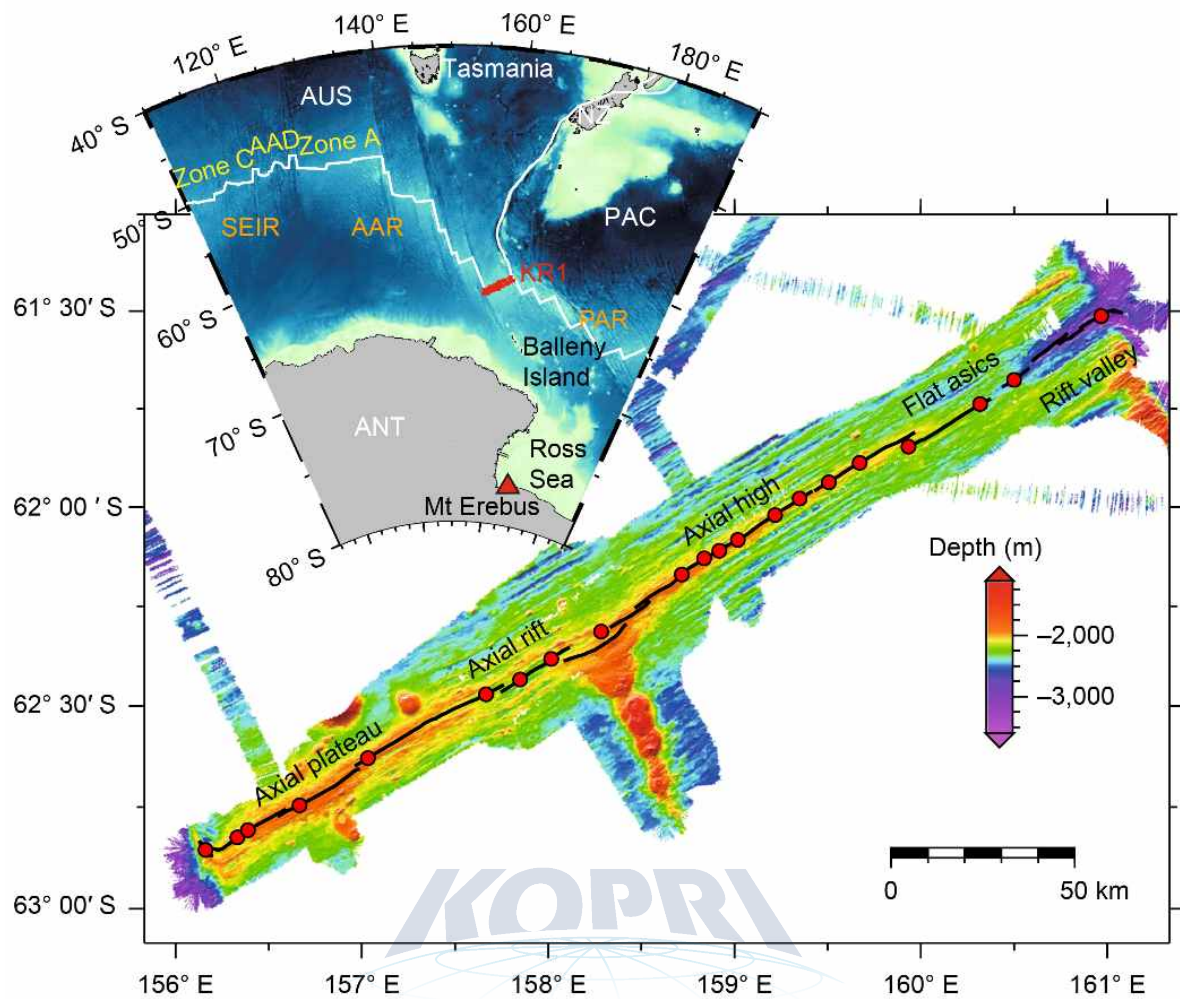


그림 1-1. AAR을 따라 KR1 구간의 수심도. 수심도는 Park et al.(2019)의 자료를 참고하였으며, 붉은 점은 왁스 코어를 통해 채취한 현무암질 유리 시료의 위치를 나타낸뿔채꼴 모양의 지도에는 주변 해령과 판 경계의 위치가 표시되어 있다.

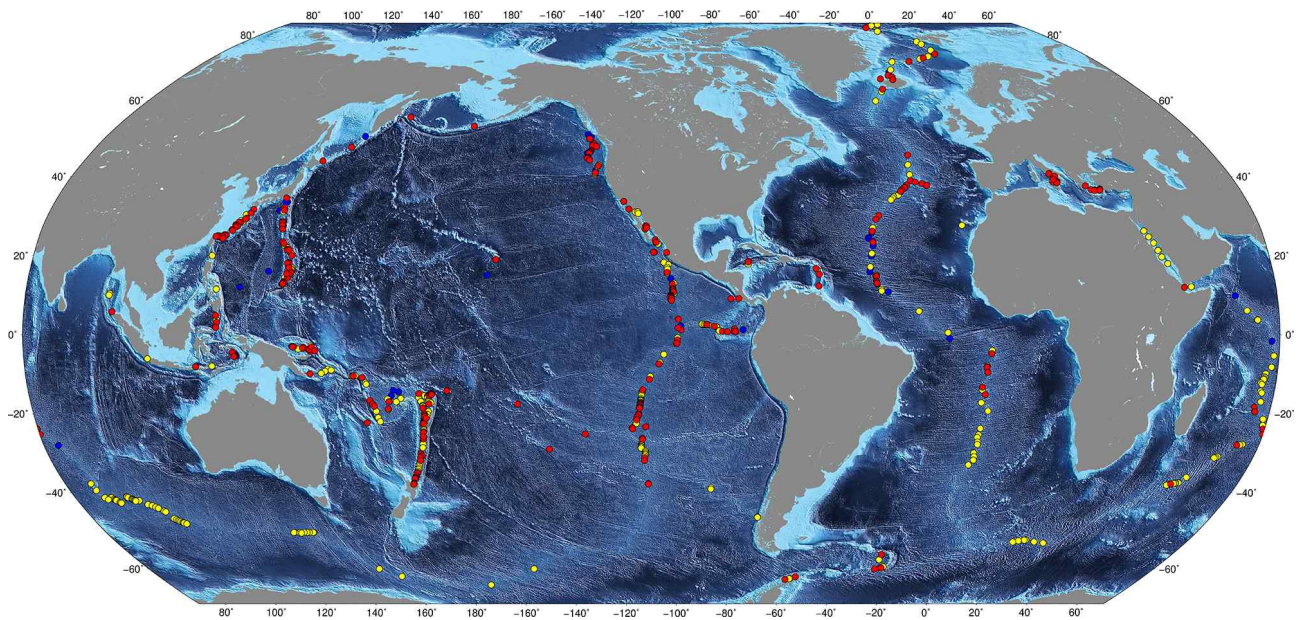


그림 1-2. 해저 열수 시스템 분포 (Beaulieu and Szanfranski, 2020). 활성 분출공 (active vent; red dots), 비활성 분출공 (inactive vent; blue dots), 분출공 추정체 (inferred vent; yellow dots)의 분포를 나타내며 주로 중앙해령, 섭입대 호상환경, 배호분지 확장과 수반되어 나타난다.



제 2 장 국내외 기술개발 현황

남극 권역의 휘발성 성분 및 친동성 원소 지화학 분야에 대한 연구는 국내에서는 한국해양과학기술원 부설 극지연구소 주도로 이루어지고 있다. 남극 중앙해령은 태평양, 대서양, 인도양 중앙해령과 모두 연결되어 있어서 지구 맨틀의 지화학적 이질성을 규명하기 위하여 매우 중요한 지역에 속한다. 남극 중앙해령의 시료의 확보는 극지연구소의 채빙선인 아라온 호를 이용하여 수행될 수 있다. 국내에서는 한국해양과학기술원의 이사부호 탐사를 통하여 중앙 인도양 해령에서 분출하는 열수에 용존된 휘발성 성분 지화학 연구를 서울대학교 화산학/휘발성 성분 연구실과 함께 수행한 사례가 있다(Kim et al., 2025). 또한, 극지연구소와 서울대학교 화산학/휘발성 성분 연구실의 공동연구로 남극 대륙의 멜버른 화산에서 배출되는 화산가스의 기원 규명에 대한 연구가 이루어지기도 했다(Lee et al., 2025).

중앙해령의 글래스 시료들에 대한 비활성 기체 동위원소 분석은 국내에서는 거의 이루어지지 않았으며, 주로 미국의 WHOI, 이탈리아의 INGV-Palermo, 프랑스의 CRPG-Nancy, 일본의 University of Tokyo 등의 기관에서 수행되고 있다. 최근에는 북극항로의 개척으로 인하여, Gakkel ridge의 연구가 활발하게 진행 중인데, 우리나라에서도 이 지역에 대한 중앙해령의 암석, 열수 연구가 시급하다.

대부분의 해저열수광상 탐사의 경우 크게 3단계로 나뉘어 진행된다. 먼저 열수 플룸(hydrothermal plume)을 탐사한다. Ship-towed CTD 등을 통해 온도, 탁도 (Turbidity)등을 찾아 후보지를 탐사한다 (Baker et al., 1995). 두 번째 단계로 플룸이 확인된 지역을 유인 잠수정(AUV) 등을 통해 고해상도 멀티빔 지형도 1m 그리드 사이즈로 생성한다 (Nakamura et al., 2013). 마지막으로 ROV를 이용해 암석 샘플링 등을 통해 열수공의 존재를 확인하는 과정을 거친다. 하지만 이러한 탐사의 경우 많은 연구비의 투입이 필수적이며, Ship-towed CTD, AUV, ROV등 다양한 탐사 장비가 있어야만 수행할 수 있는 한계가 있다.

국내외의 다양한 기관에서 이러한 해저 열수 광상 탐사가 진행되고 있다. 국내의 경우 한국해양과학기술원 (KIOST)에서 진행 중인 남인도양 중앙해령 지역, 통가 및 피지 해역 일대의 탐사권을 확보하여 해당 지역에서 다량의 열수 분출구를 발견 및 연구를 진행 중에 있다 (Kim et al., 2020; Choi et al., 2021; 2023). 한국해양과학기술원의 경우 캐나다의 ROPOS사의 ROV를 이용해 해양 탐사를 진행하고 있다.

국외의 다양한 기관에서도 해저열수광상에 대한 연구 및 탐사를 진행하고 있다. 대표적인 기관으로는 미국의 National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA)와 United States Geological Survey (USGS), 일본의 Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology (JEMSTEC), 독일의 GEOMAR-Helmholtz Centre for Ocean Research Kiel (GEOMAR) 등이 있다. 일본의 경우 일본의 배타적 경제 수역 (Exclusive Economic Zone; EEZ)이 Izu-Bonin arc를 따라 분포하고 있어 해당 지역에 수반되는 해저열수광상을 탐사하고 있으며, 미국의 경우 미국의 배타적 경제수역 (EEZ) 뿐만 아니라 태평양과 대서양 일대에서 해저 열수 광상 탐사를 진행 중에 있다.

제 3 장 연구개발수행 내용 및 결과

제 1절 휘발성 성분 지화학

KR1-MORB 클래스 시료의 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 비율은 대부분 일반적인 MORB 범위 내에 있다. 헬륨 농도는 4.3×10^{-8} 에서 6.7×10^{-6} ccSTP/g까지 다양하며, 모든 샘플의 $^4\text{He}/^3\text{He}$ 비율은 88,000에서 131,000까지 다양하게 나타나며, $^3\text{He}/^4\text{He}$ 비율은 5.5에서 8.2 Ra까지의 범위를 보인다(Ra는 공기의 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 비율로, 1.39×10^{-6} 과 같다). 두 샘플 KRR1-RC06과 KRR1-RC05는 다른 샘플에 비해 더 높은 $^4\text{He}/^3\text{He}$ 비율을 보이며, 더 높은 $^4\text{He}/^3\text{He}$ 비율(120,000에서 130,000)과 더 낮은 $^4\text{He}/^{40}\text{Ar}$ 비율(0.03에서 0.14)을 보여 확산 동위원소 분류의 영향을 나타낸다(그림 3-1). 이 두 샘플을 제외한 $^4\text{He}/^3\text{He}$ 비율은 88,000에서 103,000 사이로, 일반적인 MORB 범위인 80,000에서 103,000 사이에 속한다(Graham, 2002). KR1 세그먼트는 서쪽으로 갈수록 $^4\text{He}/^3\text{He}$ 비율이 증가하는 지역적 변화를 보이며, 능선 깊이가 증가한다(그림 3-2). 이 지역적 변화는 유사하게 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 비율(Park et al., 2019)에도 반영된다.

KR1-MORB 클래스의 삼중 neon 동위원소 조성은 $^{21}\text{Ne}/^{22}\text{Ne} - ^{20}\text{Ne}/^{22}\text{Ne}$ 다이어그램(그림 3-3)에서 MORB 선을 따라 또는 약간 위에 위치한다. 측정된 $^{21}\text{Ne}/^{22}\text{Ne}$ 비율은 0.031에서 0.036 사이이며, $^{20}\text{Ne}/^{22}\text{Ne}$ 비율은 10.05에서 10.46 사이로 나타난다. 이 값들은 공기 조성($^{21}\text{Ne}/^{22}\text{Ne} = 0.029$; $^{20}\text{Ne}/^{22}\text{Ne} = 9.8$)과 구별되며, 질량 의존적 분별선(Mass dependent fractionation line)을 따르지 않는다. 네온 동위원소 비율과 탈가스 지표 $^4\text{He}/^{40}\text{Ar}^*$ 사이에는 체계적인 관계가 관찰되지 않았으며, 이는 Ne 동위원소의 변화가 동위원소 분획 과정에 의해 제어되지 않음을 나타낸다. 대기 오염을 보정하기 위해, 우리는 태양의 $^{20}\text{Ne}/^{22}\text{Ne}$ 값 13.8을 향해 공기 샘플 혼합선을 외삽하였다(Benkert et al., 1993). 외삽된 $^{21}\text{Ne}/^{22}\text{Ne}$ 값($^{21}\text{Ne}/^{22}\text{Ne}_{\text{Extrap}}$)은 0.053에서 0.075 사이로, 일반적인 MORB 외삽 값 0.075와 비슷하거나 낮다.

대기 성분의 오염의 영향을 평가하고 탈기를 위한 원소 비율을 수정하기 위해 아르곤 동위원소를 조사하고 탈기 지표로 He/Ar^* 비율을 사용하였다. $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$ 비율은 297에서 8970까지 다양하며 대부분의 샘플은 대기 성분의 오염의 영향을 받는다. $^4\text{He}/^{40}\text{Ar}^*$ 비율은 0.3에서 39까지 다양하며, 이는 주로 부분 탈기를 나타낸다(그림 3-1). 원소 비율은 $^4\text{He}/^{40}\text{Ar}^*$ 비율을 사용하여 수정되었으며, 이는 마그마 탈기 중에 이러한 비율을 수정할 수 있기 때문이다. $\text{N}_2/^{36}\text{Ar}$ 및 탈기를 수정한 $\text{N}_2/^3\text{He}$ 비율은 각각 1.5×10^4 에서 1.9×10^6 까지, 3.1×10^6 에서 7.8×10^7 까지이며, DMM 값($\text{N}_2/^3\text{He}$: 2.5×10^6 에서 4.9×10^6 까지, $\text{N}_2/^{36}\text{Ar}$: 5.3×10^6 까지, (Labidi, 2022) (그림 3-4)와 비교하여 공기와 퇴적물의 영향을 시사한다. 탈기를 수정한 $\text{CO}_2/^3\text{He}$ 비율은 1.0×10^9 에서 4.7×10^9 까지이며, 이는 N-MORB(0.86×10^9 에서 1.36×10^9)보다 높으며 대부분 E-MORB(3.3×10^9 에서 4.5×10^9)에 가깝게 나타난다(Marty 및 Tolstikhin, 1998)(그림 3-4).

이 연구는 ZAMD 내 중앙에 위치한 AAR의 KR1 세그먼트에서 휘발성 성분(He, Ne, Ar, N_2)을 보고한다. KR1-MORB의 헬륨 동위원소 체계는 맨틀 과정과 소스 이질성에 대한 중요한 의의를 지닌다. KR1 샘플의 $^4\text{He}/^3\text{He}$ 비율(88,000에서 103,000; $^3\text{He}/^4\text{He}$: 7.0 - 8.2 Ra)은 MORB 범위에 속하며, 이는 깊은 맨틀 플룸에서 유의미한 기여가 없음을 지시한다. 대신, 관측된 헬륨 동위원소 특성은 대규모 변동과 방사성 동위원소와의 명확한 상관관계를 강조하며, 이는 상당한 맨틀 이질성을 나타낸다.

질소 농도는 8.7×10^{-7} 에서 3.6×10^{-4} ccSTP/g까지 다양하며, 모든 샘플의 질소 동위원소 조성(δ

$^{15}\text{N}-\text{N}_2$)은 -6.0에서 2.6 ‰까지 다양하며, 이는 DMM 값인 -5 ‰보다 대부분 무겁다(그림 3-5). 질소 동위원소와 헬륨 및 기타 방사성 동위원소 또는 원소 비율 사이에는 명확한 상관관계가 관찰되지 않았다.

KR-1의 서쪽 지역의 높은 $^4\text{He}/^3\text{He}$ 비율은 동쪽 지역의 깊은 균열 계곡에서 낮은 $^4\text{He}/^3\text{He}$ 비율과 대조적이며, 이는 높은 $^4\text{He}/^3\text{He}$ 가 지배하는 뜨거운 맨틀 상승의 영향을 시사한다. 동위원소 변화는 DMM과 부화된 소스 간의 단순한 두 성분 혼합에 기인하며, 이는 $^4\text{He}/^3\text{He}$ 비율과 Sr-Nd-Pb 동위원소 간의 강한 상관관계에서 알 수 있다. $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 및 $^4\text{He}/^3\text{He}$ 차이의 예상 생산 시간은 380에서 430Ma 범위로, KR1 세그먼트 아래에서 맨틀 소스의 시간적 진화에 대한 추가적인 제약을 제공한다.

네온 동위원소는 맨틀 소스에 소량의 원시 성분이 존재함을 나타내며, 지역적 열 이상과 과거 플룸 활동의 잔해와 관련된 깊은 맨틀 용기가 원시 네온을 KR1 연약권 지역에 기여했음을 시사한다. KR1 샘플은 또한 넓은 $\delta^{15}\text{N}$ 범위(-6에서 +1.5 ‰)를 나타내며, 이는 일반적인 DMM 값을 넘어서며 대부분의 샘플은 탈기 및 해수 혼합에 의해 잠재적으로 영향을 받는 것을 보여준다. 높은 $\text{N}_2/^{36}\text{Ar}$ ($>10^5$) 및 $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$ ($>10^3$) 비율을 가진 샘플은 최소한의 대기 오염을 나타내며, 이는 최근 섭입에서 나온 퇴적물 유래 질소의 존재를 뒷받침한다.

$^4\text{He}/^3\text{He}$ 비율과 KR1 및 동일한 맨틀 영역의 다른 화산 시스템의 Sr-Nd-Pb 동위원소는 강한 상관관계를 보이며, 이는 공통된 부화된 소스의 영향을 시사한다. 이는 HIMU와 유사한 높은 $^4\text{He}/^3\text{He}$ 비율과 높은 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 값으로 구별되며, 섭입된 슬랩의 기여를 반영한다. ZAMD의 풍부한 성분은 섭입된 해양지각에서 유래했을 가능성이 있으며, 이 지각은 맨틀 전이 구역에서 고립된 상태로 정체되었다가, 나중에 곤드와나의 확장과 관련된 용융을 통해 상부 맨틀로 운반되었다는 것으로 본 연구에서는 제안한다.

극지연구소

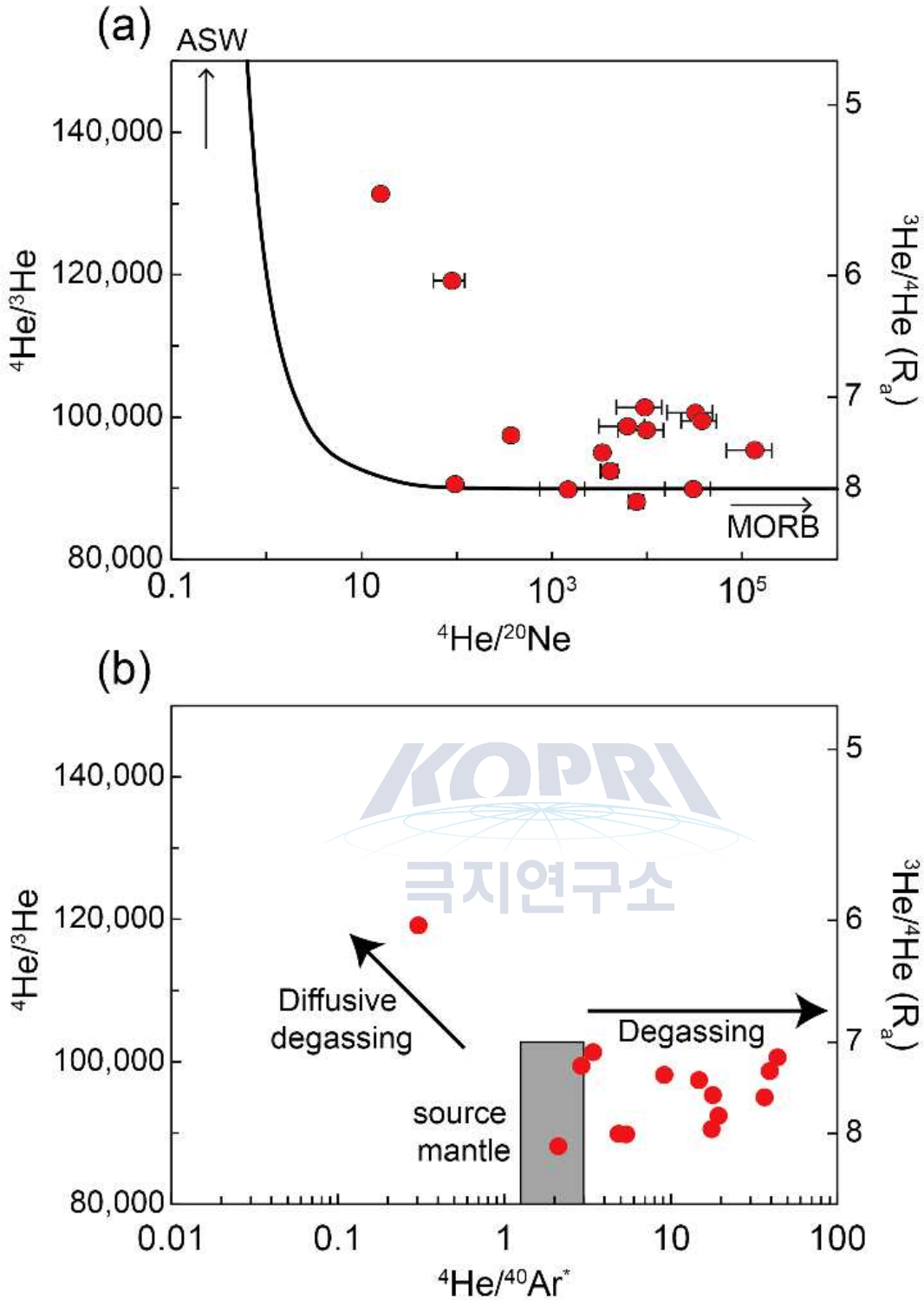


그림 3-1. 확산 손실로 인한 대기 오염 및 헬륨 동위원소 분류를 평가하기 위한 $^4\text{He}/^3\text{He}$ 대 $^4\text{He}/^{20}\text{Ne}$ 및 $^4\text{He}/^{40}\text{Ar}^*$ 도표. (a) $^4\text{He}/^3\text{He}$ 대 $^4\text{He}/^{20}\text{Ne}$. ASW: 공기 포화 상태의 물로, $^4\text{He}/^3\text{He} = 720,000$ 및 $^4\text{He}/^{20}\text{Ne} = 0.318$ (Ozima and Podosek, 2002); MORB: $^4\text{He}/^3\text{He} = 90,000$ 및 $^4\text{He}/^{20}\text{Ne} = 105$. 실선은 MORB와 공기 사이의 혼합선을 나타낸다. (b) $^4\text{He}/^3\text{He}$ 대 $^4\text{He}/^{40}\text{Ar}^*$ 플롯. 소스 맨틀은 $^4\text{He}/^3\text{He} = 80,000$ 에서 $103,000$ (Graham, 2002) 및 $^4\text{He}/^{40}\text{Ar}^* = 1.5$ (Moreira et al., 1998)를 가진다. 점선은 (Yamamoto et al., 2009)에서 $D^3\text{He}/D^4\text{He} = 1.05$ (D = 확산 계수)로 확산 곡선을 나타낸다. 샘플에서 $^4\text{He}/^{40}\text{Ar}^*$ 비율이 높아진 것은 분출 중 가스 배출로 인한 것으로 추정된다.

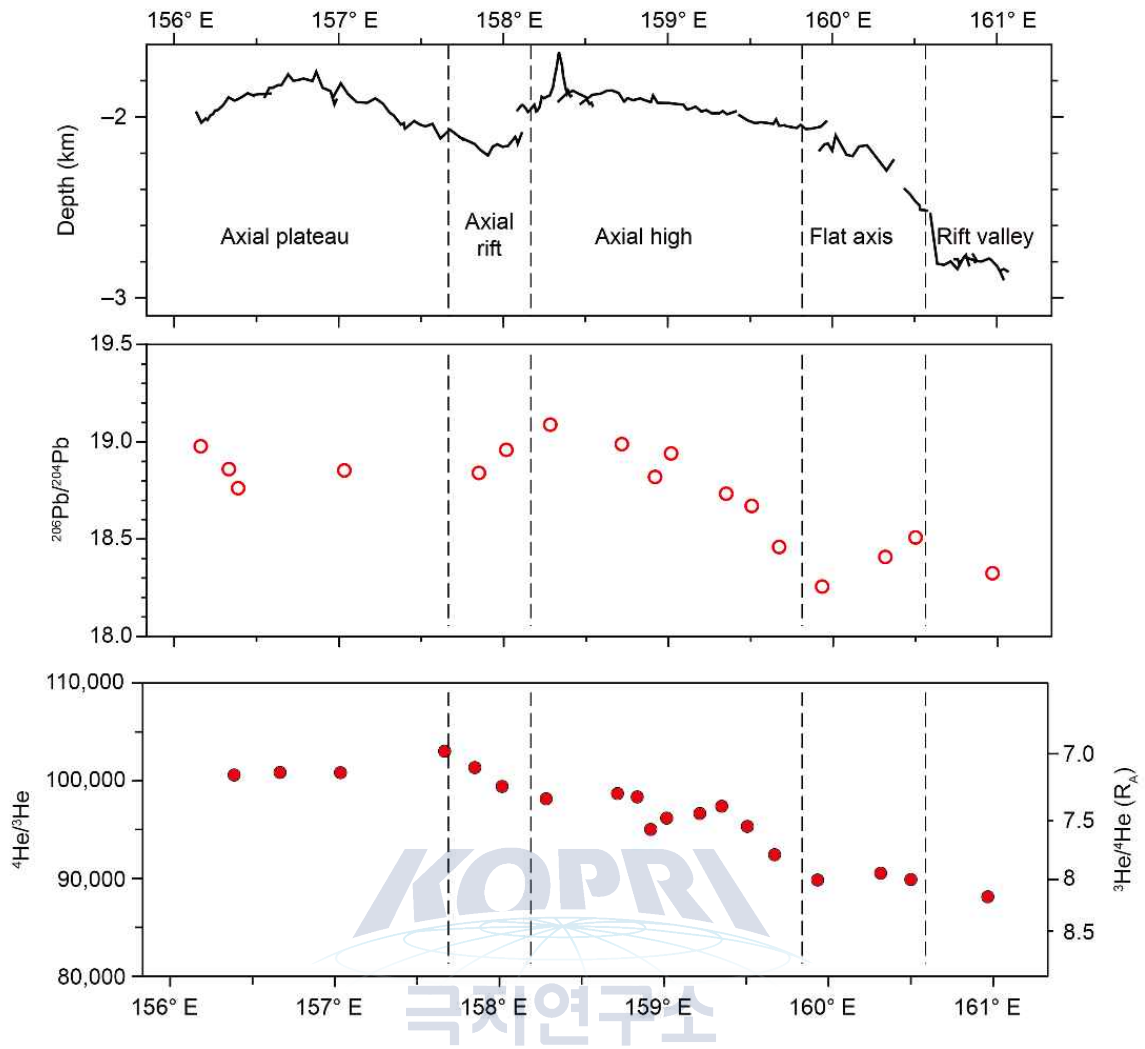


그림 3-2. KR1 세그먼트의 지형과 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 및 $^4\text{He}/^3\text{He}$ (R_a) 비율의 변화. KR1 세그먼트는 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 및 $^4\text{He}/^3\text{He}$ 비율의 상당한 지역적 변화뿐만 아니라 능선 깊이의 변화도 나타낸다. KR1 세그먼트의 지형 및 Pb 동위원소 데이터는 Park et al. (2019)에서 참조하였다.

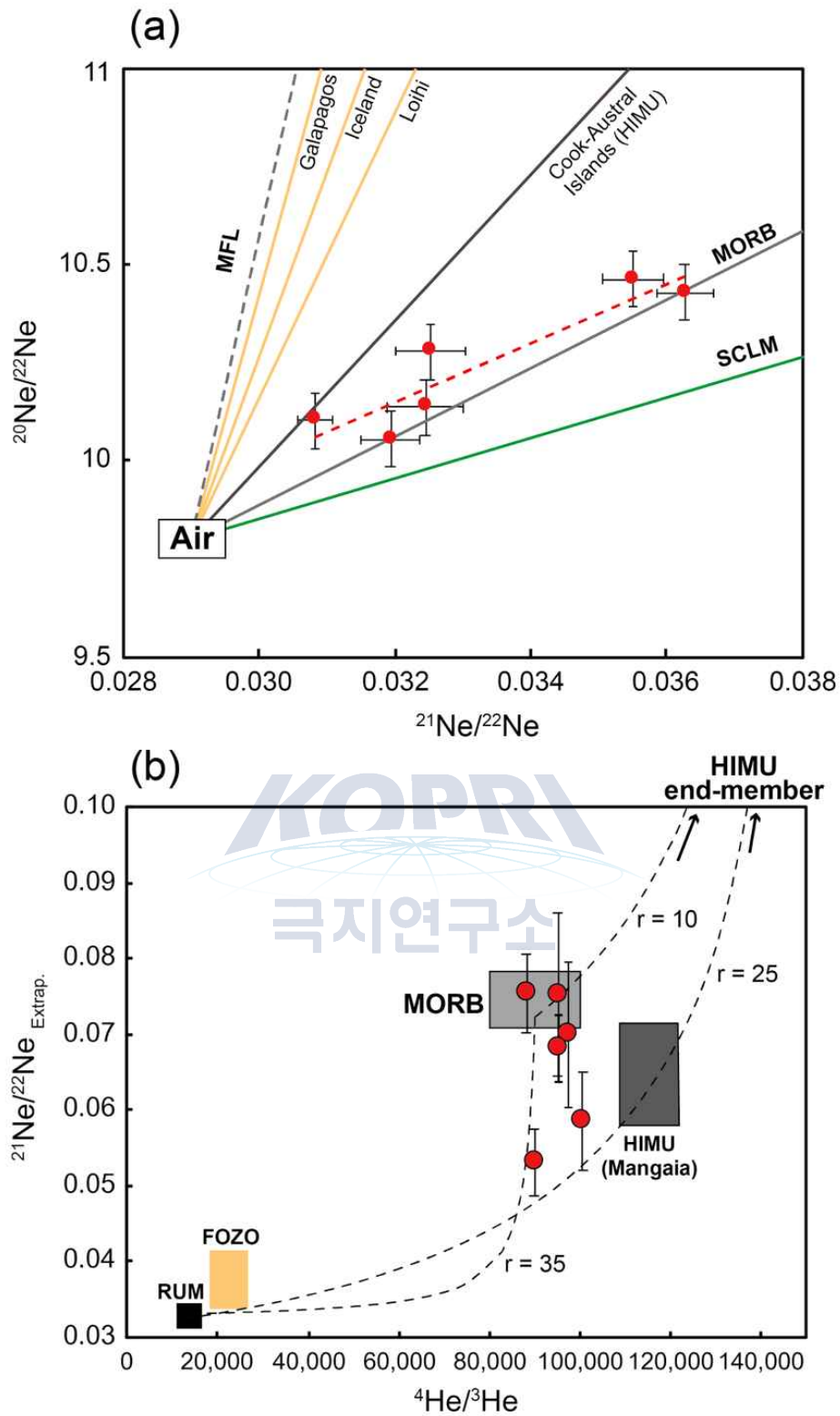


그림 3-3. KR1-MORB의 삼중 네온 동위원소 다이어그램

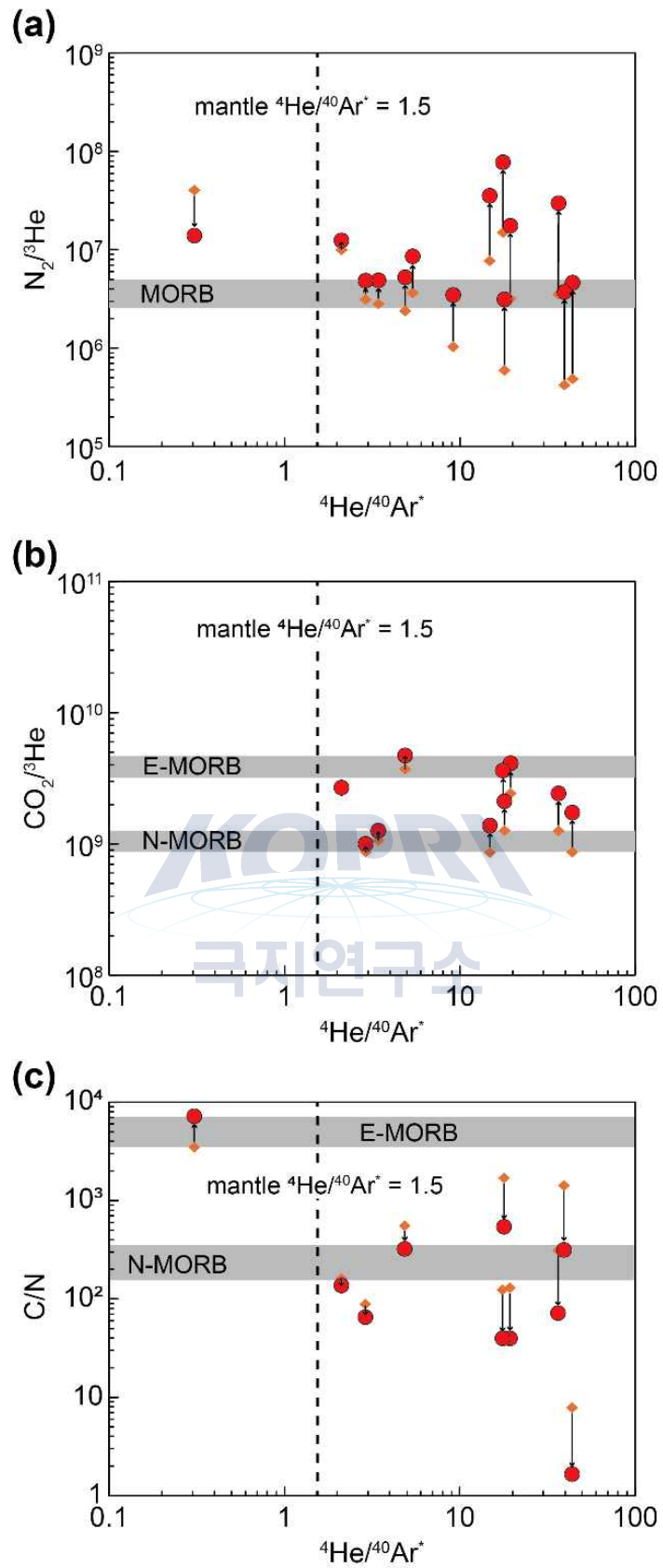


그림 3-4. KR1 샘플의 $N_2/{}^3\text{He}$, $\text{CO}_2/{}^3\text{He}$ 및 C/N 비

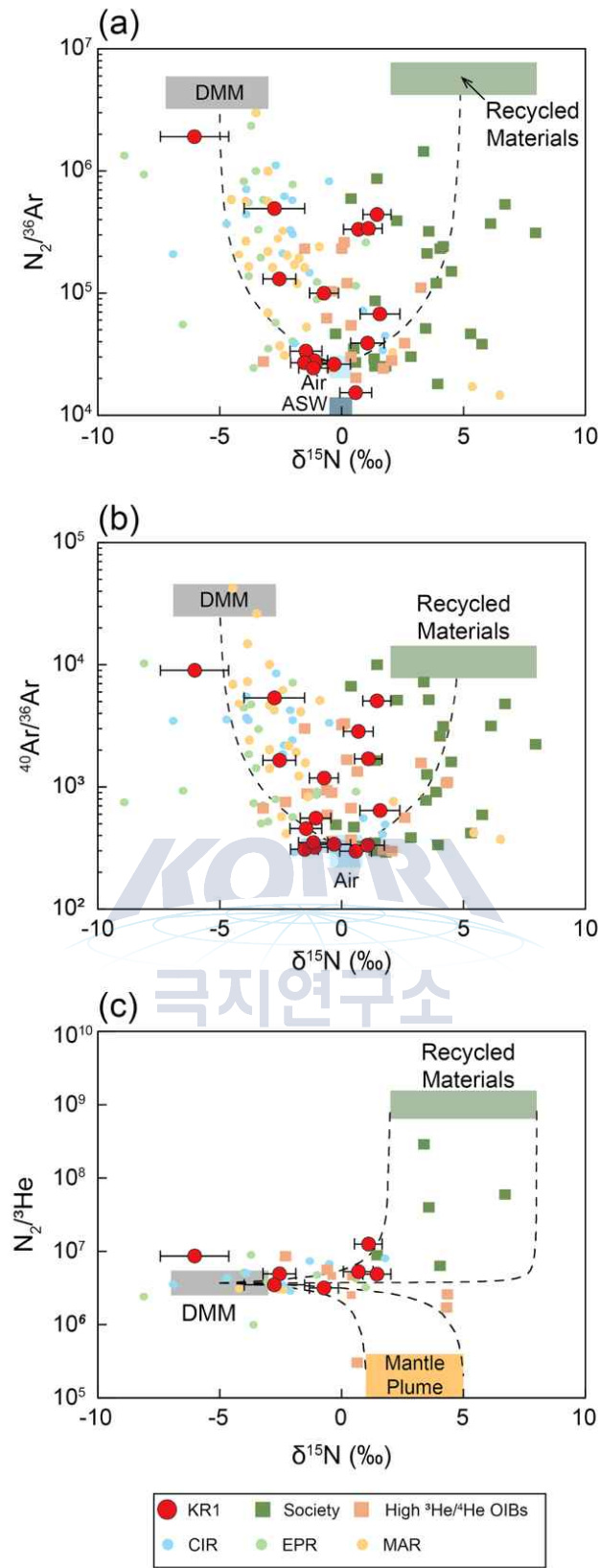


그림 3-5. KR1-MORB의 질소 동위원소; $\delta^{15}N$ 대 (a) $N_2/^{36}Ar$, (b) $^{40}Ar/^{36}Ar$, 그리고 (c) $N_2/^3He$ 비율.

제 2절 친동성 원소 지화학

1차년도와 2차년도에서 수행한 KR1 지역과 맥쿼리 섬 지역의 MORB 시료에 대한 친동성 원소 지화학 연구는 맨틀 부분 용융부터 마그마 분화 후기에 이르는 MORB 마그마 형성 과정에서의 친동성 원소의 거동을 구체적으로 규명하였다. 맥쿼리 섬 시료의 백금족 원소 지화학을 분석하고 열역학 모델링을 수행함으로써 맨틀 용융 과정 중 액체상 황화물과 Ru이 부화된 광물 상의 공존이 필요함을 제시하였다. 또한, 맥쿼리 섬 피크라이트의 전암과 황화물의 백금족 원소 지화학 성분을 근거로 마그마 분화 초기, 황화물 포화 이전에 또는 국부적인 과정으로 인하여 백금족 원소 광물이 정출될 수 있음을 확인하였다. 마지막으로 KR1 지역 MORB 시료에 대한 은 함량 분석 결과를 통해 MORB 마그마의 분화 후기(MgO=4 wt.%)에서 분화되는 황화물의 상이 액체상에서 고체로 전환됨을 밝혔다.

3차년도에는 앞서 규명한 MORB 마그마의 형성 및 진화 과정 중의 친동성 원소의 거동이 전세계 중앙해령 환경에서 적용되는지 점검하였다. 먼저, 맨틀 부분 용융 과정 중 액체상 황화물과 Ru이 부화된 광물 상의 공존의 보편성을 점검하기 위해 전세계 MORB 시료의 Ru/Pd 비율을 맥쿼리 섬 시료와 비교하였다(그림 3-6). 전세계 MORB 시료는 맥쿼리 섬 시료와 비교하여 낮은 La/Sm 비율을 가지지만 맥쿼리 섬 시료와 유사한 범위의 Ru/Pd 비율을 보인다(그림 1; Fischer-Gödde et al., 2011). 이를 재현한 부분 용융 모델링 결과는 Ru이 부화된 광물 상이 맨틀 용융 초기부터 액체상 황화물과 공존해야함을 지시한다(그림 3-6). 다만, 선행 연구 결과에 따르면 황화물에 대한 백금족 원소의 높은 용해도에 의해 두 광물 상은 공존할 수 없다(Fonseca et al., 2011; Mungall and Brennan, 2014). 따라서 본 연구는 맨틀 용융이 황화물과 백금족원소 광물 상이 공존하는 비평형 상태에서 이루어졌을 것임을 제시한다. 실제로 맥쿼리 섬 맨틀 암석에서 백금족원소 광물이 보고된 바가 있으며(Evans et al., 2023), 다른 지역의 부화된(fertile) 맨틀 암석에서도 백금족원소 광물이 발견되었다(Kogiso et al., 2008; Lorand et al., 2010). 이러한 관찰 결과는 이전 맨틀 용융 사건에서 형성된 백금족원소 광물이 감람석이나 침정석과 같은 refractory한 광물에 포획되어 이후에 형성된 마그마의 백금족 원소 지화학에 영향을 미쳤을 가능성을 보여준다.

다음으로 KR1 시료에서 확인된 황화물의 상전이 현상과 그 시기(MgO=4 wt.%)가 전세계 중앙해령 마그마의 일반적인 현상임을 확인하기 위해 동태평양 중앙해령 MORB 시료들에 대해 유사한 연구를 수행하였다. 동태평양 중앙해령 MORB 시료들은 주원소와 미량원소, 동위원소에 대해 연구된 바가 있으며(Hao et al., 2021; Perfit et al., 1994; Perfit et al., 1996), KR1 시료와 유사하게 넓은 범위의 분화 정도(MgO=0.63–9.58 wt.%; Hao et al., 2021)를 보인다. 따라서 해당 시료들에 대해 He 충돌 모드 레이저 삭박 유도 결합 플라즈마 질량 분석기를 활용하여 은 함량 분석만을 추가적으로 수행하였다.

KR1 지역과 동태평양 지역의 맨틀 도메인은 상이함에도 불구하고(Park et al., 2019), 동태평양 시료들은 KR1 시료와 잘 일치하는 구리와 은의 거동을 보여준다. MgO 함량이 4 wt.%에 이를 때까지 구리와 은의 함량은 감소하고, 구리와 은의 비율은 일정하게 유지된다. 선행 연구의 전세계 MORB 시료들의 분석 결과와 잘 상응한다(그림 3-7; Jenner and O'Neill, 2012; Reekie et al., 2019; Yang et al., 2018). 반면, MgO 함량이 4 wt.% 미만에서는 구리 함량은 감소하지만 은 함량은 증가하며, 이에 따라 구리와 은의 비율은 감소한다. 이러한 관찰 결과는 MgO 함량 4 wt.%에서의 황화물 상전이가 전세계적으로 보편적인 현상임을 지시한다.

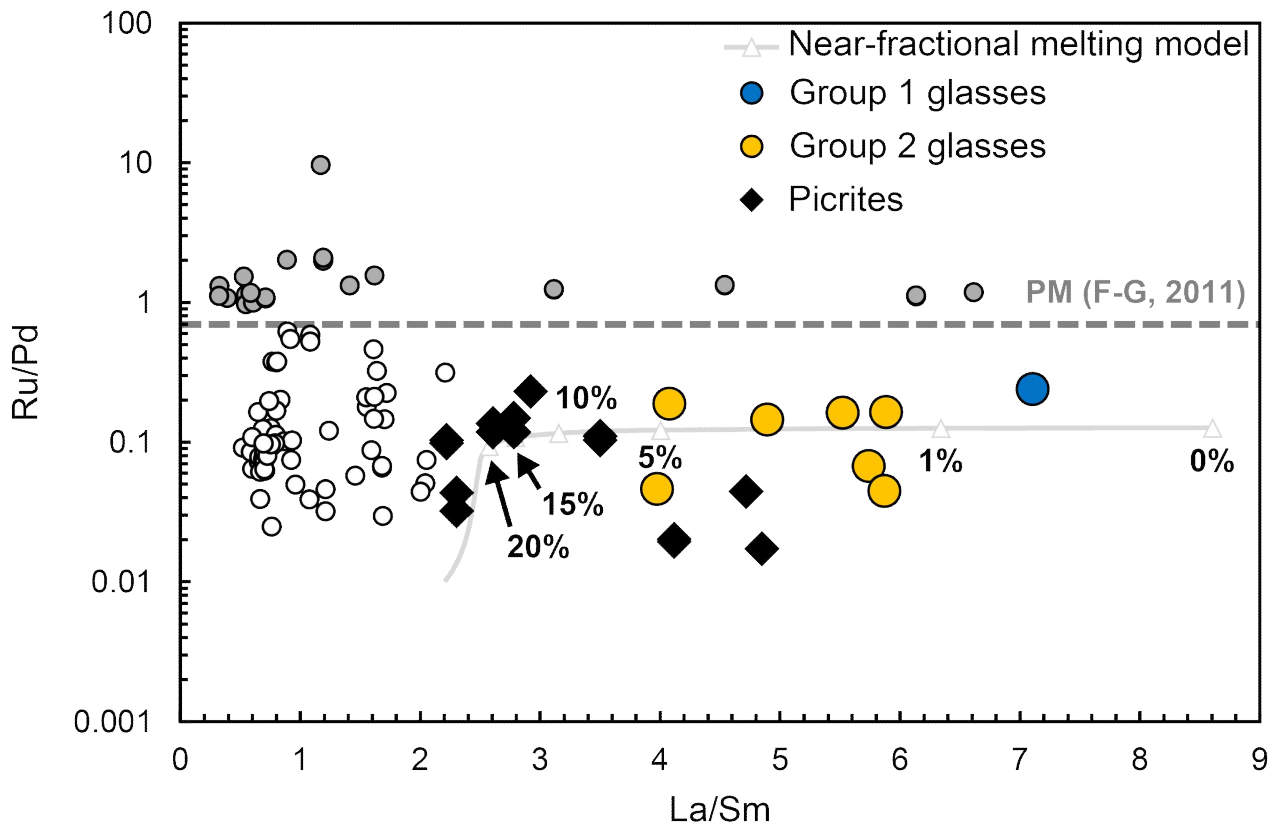


그림 3-6. MORB 유리와 피크라이트의 전암 Ru/Pd 비율과 La/Sm 비율 도표. 맥쿼리 섬 시료들 중 백금족원소 광물의 영향을 받은 시료들은 제외하였다. 흰색 원형 표식은 전세계 MORB 시료 자료이며(Bézoe et al., 2005; Lissner et al., 2014; Rehkämper et al., 1999; Tatsumi et al., 1999; Yang et al., 2014), 회색 원형 표식은 부분 용융을 겪은 맨틀 암석 자료이다(Fischer-Gödde et al., 2011). 열은 회색 실선은 맨틀 부분 용융 모델링 결과이다. 삼각형 표식과 숫자는 부분 용융 정도를 나타낸다. 짙은 회색 점선은 초생 맨틀 성분으로 Fischer-Gödde et al. (2011)가 보고한 값을 차용하였다.

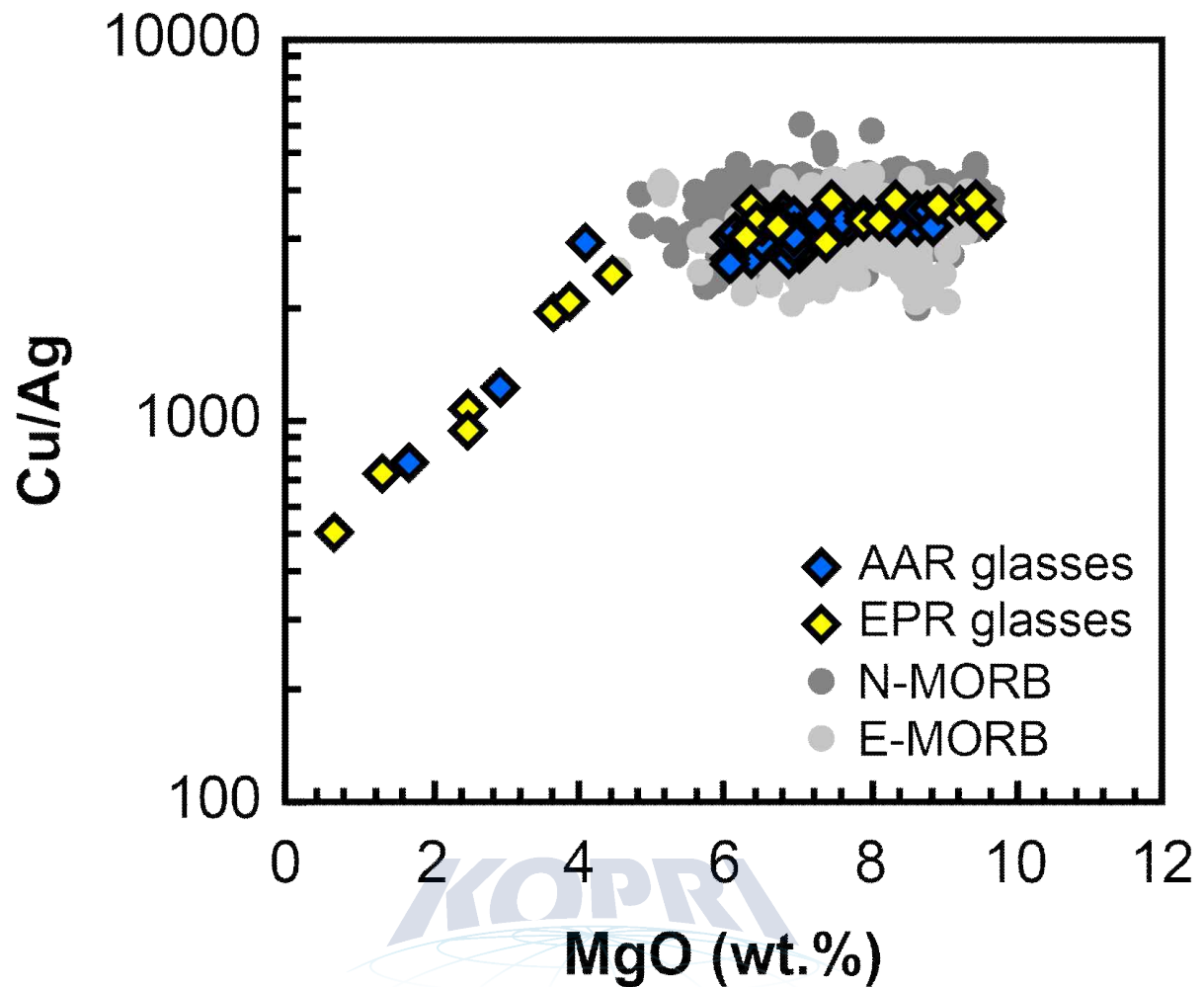


그림 3-8. 중양해령현무암 시료의 Cu/Ag 비와 MgO 함량 도표. 동태평양 시료의 구리 함량은 Hao et al. (2021)에서 보고된 값을 활용하였다. 짙은 회색과 밝은 회색으로 도시된 전지구 MORB 시료의 자료는 Jenner and O'Neill (2012)와 Reekie et al. (2019), Yang et al. (2018)에서 발췌하였다. 플룸과 인접하여 이상적으로 높은 구리 함량을 보이는 일부 시료들은 도표에서 제외하였다. AAR – Australian-Antractic Ridge. EPR – East Pacific Rise.

제 3절 해저열수광상 연구

1. 시료 획득 및 유체포유물 분석에 대한 체계 구축

2023년 6~7월 일본 JAMSTEC의 지원으로 ROV를 통해 해저열수 시료 및 화산 쇄설물 등 1차적으로 총 26개의 암석시료를 확보했다. 이후 2024년 8~9월 동일한 방법으로 총 27개의 암석시료를 확보했다. 해당 암석을 서울대학교 지구환경과학부에 보유중인 실체 현미경, 편광 반사 현미경을 통해 암석을 기재하고, 전자현미경 (SEM-EDS; JEOL JSM-7100F)을 통해 암석의 금 광물 부존 및 암석 기재를 수행하였다. 또한 해당 암석을 양면 연마 박편 (double polished section)을 만들어 유체포유물 기재를 수행하였다.

암석기재 결과 해당 열수 필드의 암석은 침니 (chimney), 마운드 황화물(mound sulfide), 변질된 화산암 (altered volcanic rock) 으로 크게 3가지로 구분된다. 침니 (그림 3-7 3-9)의 경우 3개의 광물 그룹으로 구분할 수 있다. 첫 그룹의 경우 황화물 띠 (sulfide lining) 그룹으로 분출공이 지나다니는 통로의 벽이다. 이 그룹은 주로 섬아연석, 황동석으로 구성되어 있으며 해수의 영향이 적고 열수의 영향이 큰 특징이 있다. 두 번째 그룹은 황화물-황산화물 혼합 그룹으로 주로 황산화물 (중정석, 경석고)과 황화물 (섬아연석, 황철석, 황동석)으로 주로 구성되어 있다. 뿐만 아니라, 방연석(galena), 코벨라이트(covellite), 안사면동광 (tetrahedrite) 등 저온 고황 환경에서 산출되는 황화물도 산출되고 있다. 마지막으로 바깥 껍질부분은 주로 자형의 황산화물이 산출되며 철-망간 산화물과 비소 광물 (웅황(orpiment), 계관석(realgar) 등)이 산출된다.

마운드 황화물(그림 3-7 a,b)의 경우 침니의 황화물-황산화물 혼합 그룹과 매우 유사한 광물군을 가지고 있다. 광물군의 경우 섬아연석과 황산화물이 주를 이루며, 황철석, 황동석, 안사면동광, 방연석이 나타난다. 침니와 구별되는 광물로는 휘안석(stibnite)이 있으며 E Site에서만 발견된다. Iizasa et al. (2019)에 따르면, 황비동광(enargite)와 헤사이트(hessite)가 산출된다고 알려져 있다. 마운드 황화물의 경우 ~ 20 μm 크기의 호박금(electrum)이 암석 내의 공동(void)에서 산출된다 (그림 3-8c).

변질된 화산암(그림 3-7 f-h)은 주로 사장석 반정이 포함된 화산 쇄설물이다. 해당 화산 쇄설물은 스코리아와 부석 모두 발견되어 해당 지역에 두 가지 시스템의 화산 분화가 있었음을 추정하였다. 또한 이 화산 쇄설물에는 황철석과 중정석, 비정질의 실리카가 함께 수반되어 있다. 또한 암석의 절면에는 빨간 철-망간 산화물과 비소 광물 또한 함께 산출된다. 특히 비정질의 실리카의 경우 육상의 천열수(epithermal) 금광상에서 비등 현상에 의해 형성되는 광물로 널리 알려져 있다.

유체포유물(그림 3-9)의 경우 중정석, 경석고, 섬아연석, 비정질 실리카에서 산출된다. 모든 유체포유물이 액체상이 우세한 유체포유물(liquid-rich inclusion; 기체상 < 40 vol.%)로 산출된다. 평균 크기는 30 μm 이고, 최대 크기는 150 μm 이다. 마그마-열수 광상에서 주로 관찰되는 자생 광물(daughter mineral)이나 기체상이 우세한 유체포유물은 산출되지 않는 특징을 가지고 있다. 광물별 특징은 아래와 같다. 중정석의 경우 주로 자형 ~ 반자형의 결정에 산출되며 유체포유물의 모양은 타원형 ~ 물방울 모양을 보인다. 경석고의 경우 주로 자형의 결정에서 산출되며 유체포유물 모양은 정사각형 ~ 직사각형 모양을 보이는데, 음형 결정 형태(negative crystal shape)을 보이며, 이들은 1차 유체포유물(광물의 성장존과 함께 나타나는 유체포유물, 광물의 1차 성장과 직접적인 관계가 있는 유체의 포유물)로 추정된다. 섬아연석의 경우 주로 섬아연석

띠에서 유체포유물이 산출되며 유체포유물 모양은 중정석과 유사한 특징을 가지고 있다. 비정질 실리카의 유체포유물의 경우 주로 변질된 화산암에 산출되는 비정질 실리카에서 발견되며, 모양의 경우 불규칙한(irregular) 형태를 지닌다.

2. 유체포유물에 대한 microthermometry, 상 분석 결과 확보 및 해석

해당 해저열수광상의 유체 진화 프로세스 및 금 부화 과정을 위해 유체포유물군(fluid inclusion assemblage)을 확보하고, 분석을 진행하였다. 총 154개의 유체포유물군 총 598개의 개별 유체포유물에 대해 가열-냉각 실험을 진행했다. 실험은 서울대학교 에너지/광물자원 연구실에 보유 중인 Linkam사의 THMS 600 가열-냉각 스테이지를 사용했다. 이 스테이지의 칼리브레이션을 위해 합성된 유체포유물을 표준물질로 사용하였다. 합성된 유체포유물은 순수한 물과 물-이산화탄소가 포함된 석영에 포획된 유체포유물을 사용하였다. 물의 경우 순수한 물의 녹는점인 0.0 °C와 임계점인 374.1 °C를 기준으로 칼리브레이션을 진행했고, 이산화탄소의 경우 물-이산화탄소 삼중점의 온도인 -56.6 °C를 기준으로 온도 조정을 시행해 해당 기기의 온도 칼리브레이션을 진행했다.

이를 통해 유체포유물의 녹는점과 균질화 온도(homogenization temperature: Th: °C)를 측정하였고, 획득된 온도를 통해 유체포유물의 밀도와 염도를 Steele-MacInnis et al. (2012)에 보고된 HokieFlincs 유체포유물 계산 엑셀을 사용하여 계산하였다. 균질화 온도와 암석이 수집된 깊이 정보를 이용하여 유체포유물의 포획온도(trapping temperature: °C)를 동일한 프로그램을 사용하여 계산하였다.

먼저 황산화물에 포함된 유체포유물의 염도(wt.%: NaCl equivalent)와 균질화 온도(°C: Th)는 각각 4.47 ± 0.54 wt.%와 211.8 ± 48.9 °C로 총 103개의 유체포유물군의 실험을 통해 얻어졌다. 이 황산화물은 염도와 균질화 온도간의 양의 상관성이 있는 것으로 미루어 해수와 열수의 혼합에 의해 형성된 것으로 추정된다. 점아연석에 포함된 유체포유물의 염도와 균질화 온도는 각각 4.09 ± 0.55 wt.%와 253.4 ± 16.1 °C로 총 33개의 유체포유물군에서 측정되었다. 비정질 실리카의 경우 총 18개의 유체포유물군에서 염도 4.75 ± 0.64 wt.%와 균질화 온도 290.1 ± 26.7 °C로 측정되었다 (그림 3-10).

또한 유체포유물 내에 기체 버블에 포함된 기체상을 분석하기 위해 서울대학교 에너지/광물자원 연구실에 보유 중인 HORIBA사의 XploRA Plus confocal Raman microscope를 사용했다. 해당 장비는 532 nm의 녹색 레이저를 주사하여 시료를 분석하는 특징을 가지고 있다. 이를 통해 약 200회 이상의 유체포유물 기체상 분석을 시행했으나 기체 검출이 되지 않았고, 따라서 검출한계 아래의 상대적으로 기체가 결핍된 환경의 유체인 것으로 고찰된다.

이를 종합하여 해당 지역은 비등현상(boiling)이 발생한 유체에 의해 형성된 것으로 생각된다. 유체가 비등현상이 발생하면 염도가 다양한 범위로 나타나는데, 해당 지역의 유체포유물 염도 결과(3.0 - 6.5 wt.%)로 미루어 보아 해당 지역의 유체에 비등현상이 있었음이 시사된다. 또한 유체 비등현상이 발생할 경우, 유체는 기체가 결핍된 상대적으로 염도가 높은 액체상이 우세한 유체와 기체가 부화된 상대적으로 염도가 낮은 기체상이 우세한 유체로 나뉜다. 유체포유물 버블 분석 결과 해당 지역의 유체포유물에서는 기체가 검출되지 않았고, 이를 통해 해당 지역의 유체가 기체가 결핍된 유체임으로 미루어 보아 비등현상을 뒷받침하는 증거로 해석된다. 또한 10개 이상의 유체포유물의 포획온도가 해수비등곡선에 비해 높은 포획온도를 보이는 것 역시 해당 지역의 유체의 비등현상을 지시한다(그림 3-11).

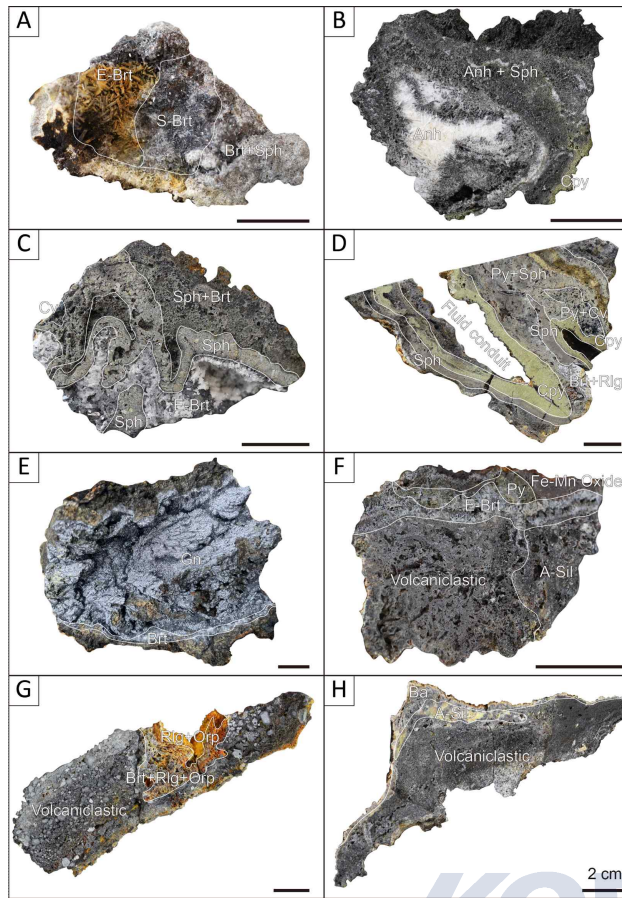


그림 3-7. Higashi-Aogashima Knoll Caldera 열수 지역에서 채취한 대표적인 시료. (a-b) 마운드 황화물, (c-e) 침니 시료, (f-h) 변질된 화산암. 모든 스케일 바 = 2 cm. 약어: Anh = 경석고(anhydrite), A-Sil = 비정질 실리카(amorphous silica), Brt = 중정석(barite; E- = 자형, S- = 반자형), Cpy = 황동석(chalcopyrite), Cv = 코벨라이트(covellite), Gn = 방연석(galena), Orp = 응황(orpiment), Py = 황철석(pyrite), Rlg = 계관석(realgar), Sph = 섬아연석(sphalerite).

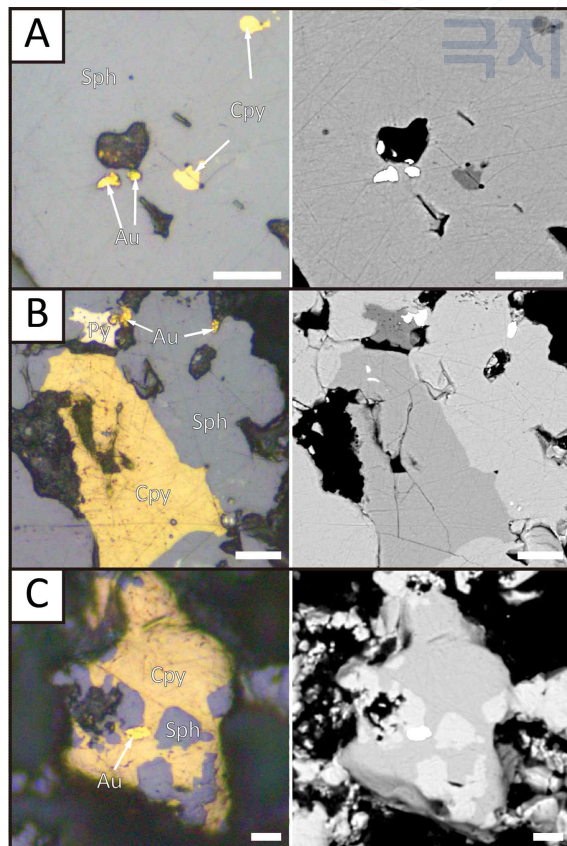


그림 3-8. Higashi-Aogashima Knoll Caldera Central Cone 지역에서 획득한 마운드 황화물 (HPD#2132 R11)에 산출되는 금 입자의 반사광 (좌) 및 전자현미경 BSE 이미지 (우). (a) 섬아연석 내부의 공극에 산출되는 금 입자. (b) 황철석, 섬아연석과 공존하는 금. (c) 황동석, 섬아연석과 상호 성장한 20 μm 크기의 금 입자 모든 스케일 바 = 2 μm . 약어: Au = 호박금 (electrum), Cpy = 황동석, Py = 황철석(pyrite), Sph = 섬아연석(sphalerite).

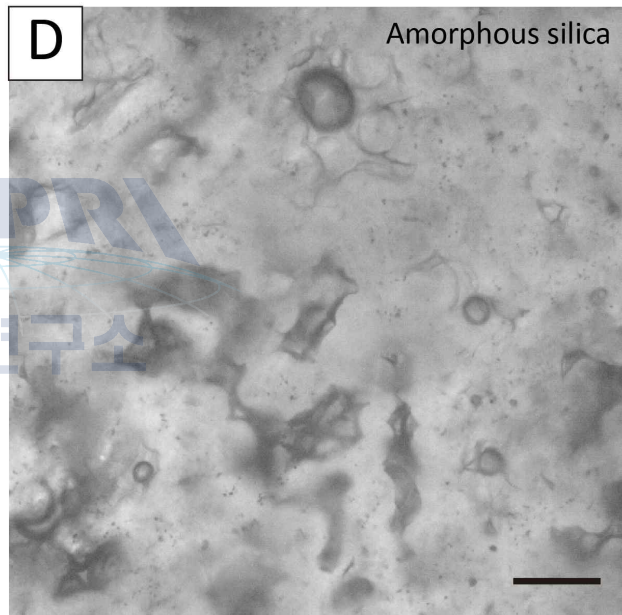
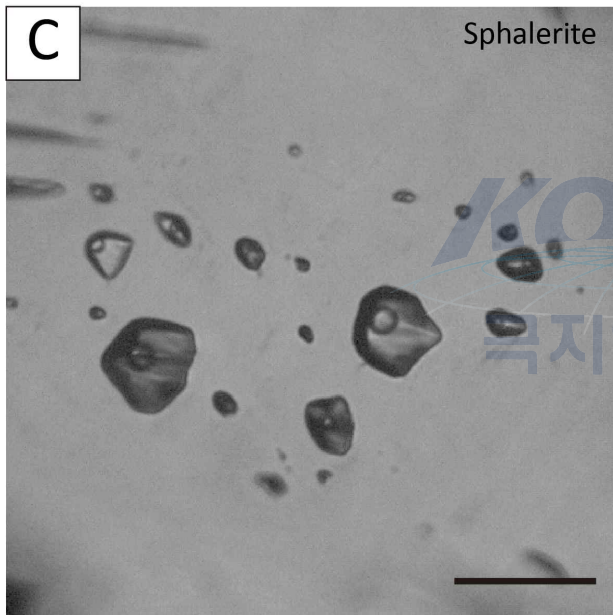
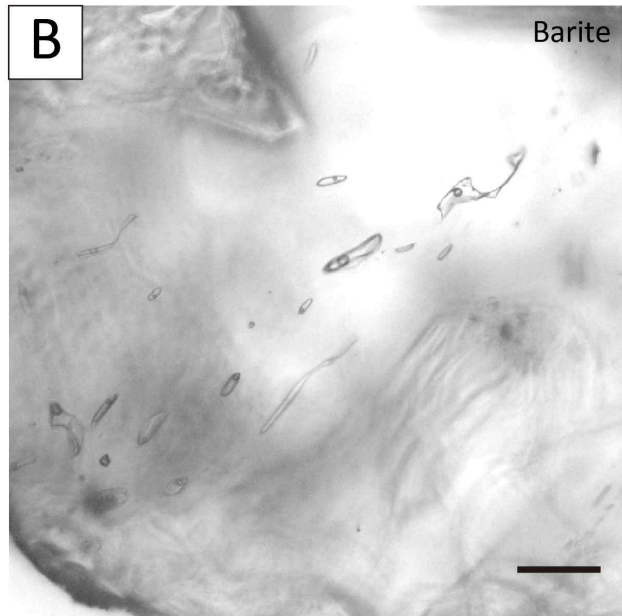
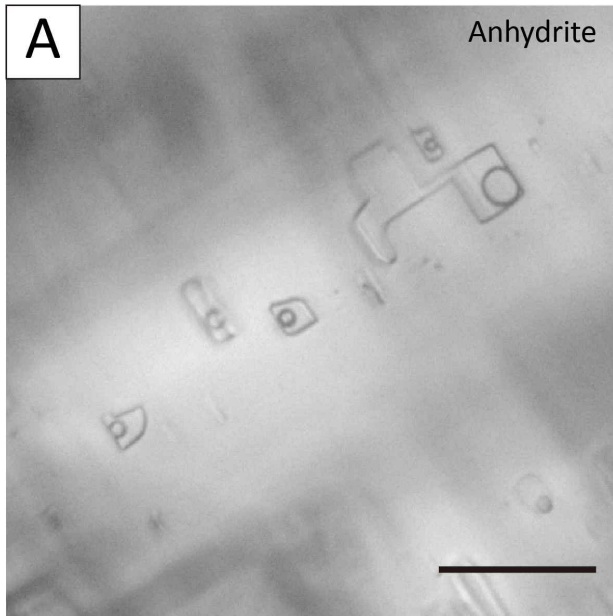


그림 3-9. Higashi-Aogashima Knoll Caldera에서 산출되는 대표적인 유체포유물. (a) 경석고에 수반되는 유체포유물, (b) 중정석에 수반되는 유체포유물, (c) 섬아연석에 수반되는 유체포유물, (d) 비정질 실리카에 수반되는 유체포유물.

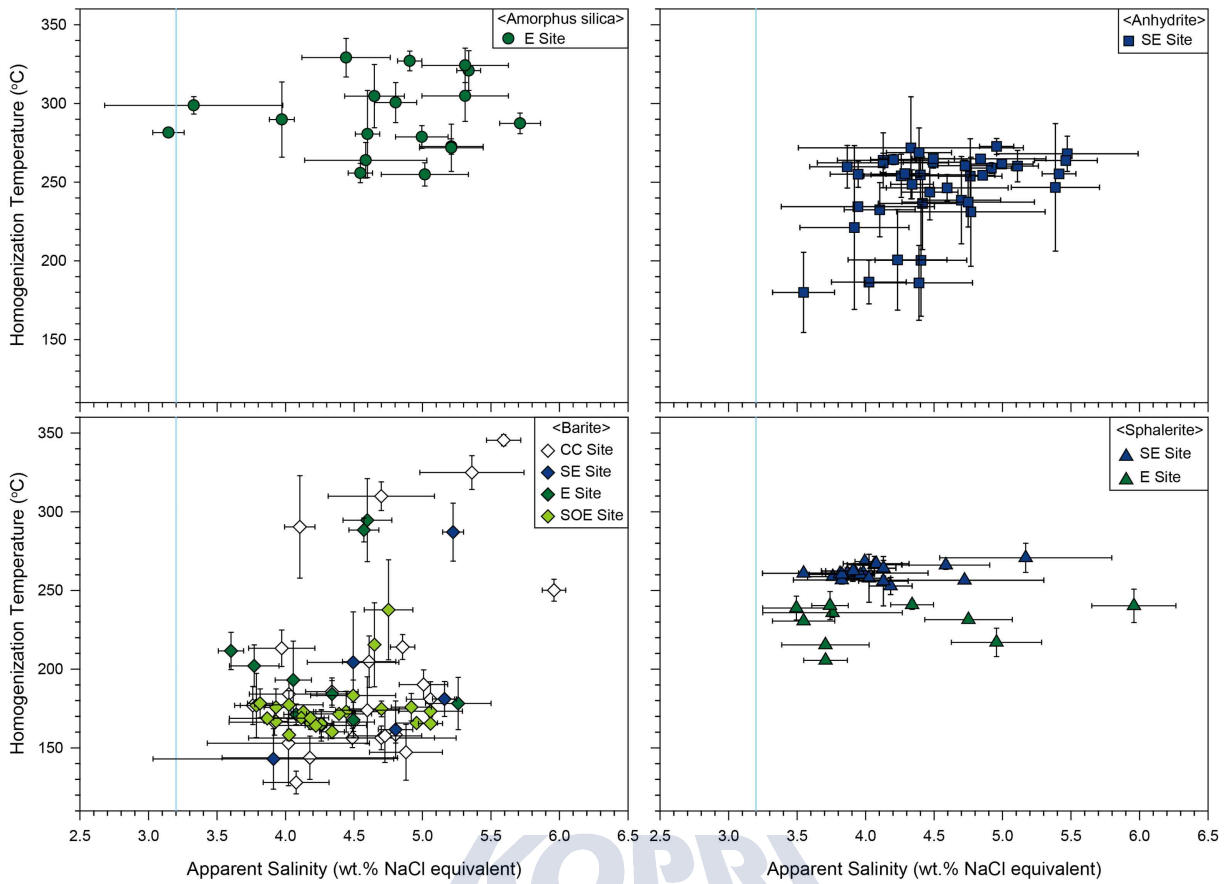


그림 3-10. 유체 포유물 균질화온도, 염도 비교 그래프. 파란선은 해수의 염도 (3.2 wt.%)를 나타낸다.

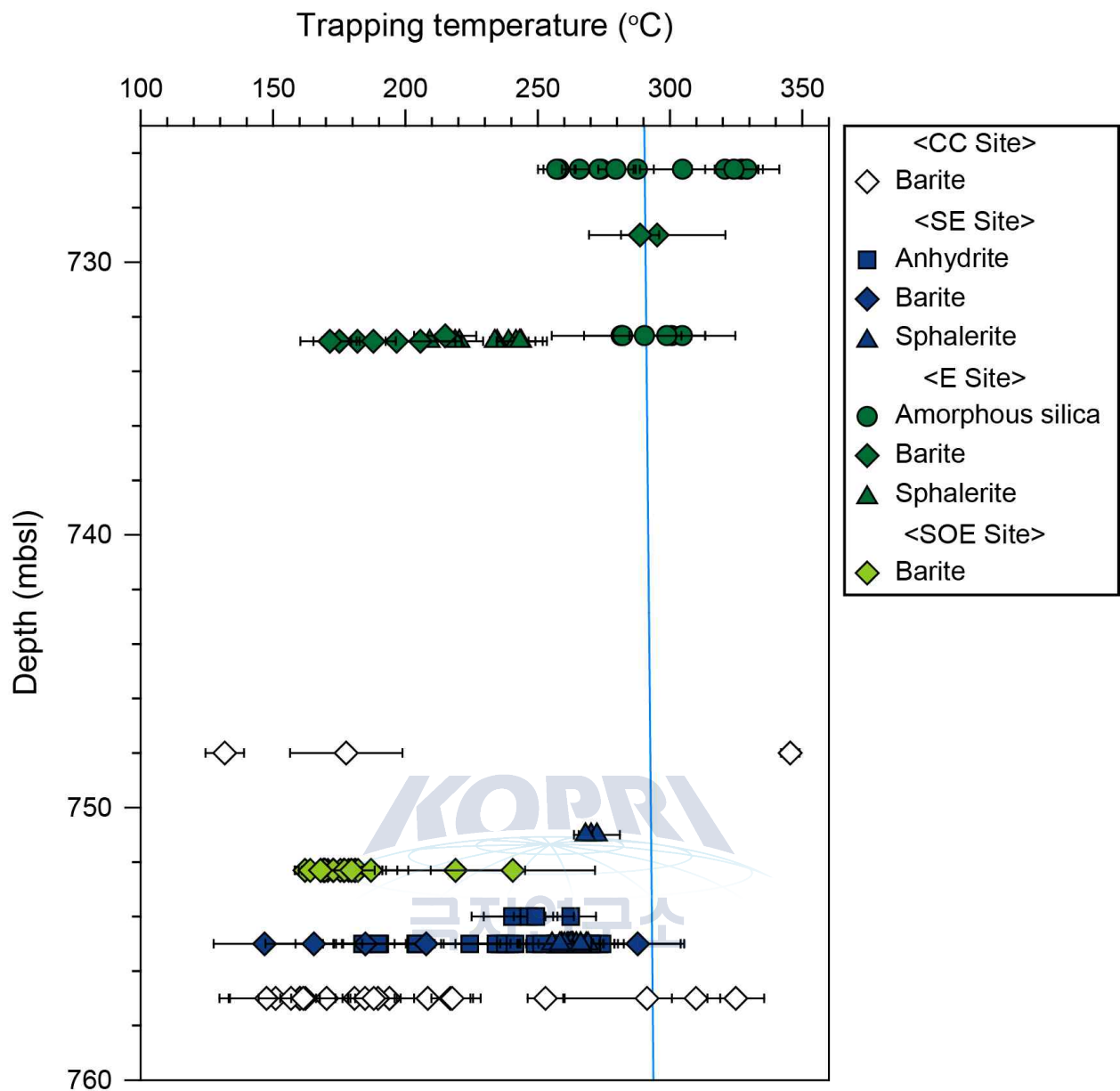


그림 3-11. 유체포유물 포획온도 그래프. 파란선은 해수비등곡선 (Bischoff and Rosenbauer, 1984)을 나타낸다.

3. 해저열수 시료 내 유체포유물 미량원소 분석 및 종합 해석

해당 지역의 열수에 대한 성분적 이해를 위하여 유체포유물 내의 미량원소 분석을 진행했다. 이 분석은 스위스 ETH Zurich의 Department of Earth Sciences에서 보유 중인 GeoLas 193 nm ArF excimer laser와 PerkinElmer NexION 2000 Quadrupole ICP-MS 장비가 결합된 유체포유물 전용 LA-ICP-MS 시스템을 사용했다. 황과 할로젠 원소를 제외한 대부분의 원소의 경우 NIST SRM 610 glass(Jochum et al., 2011)을 황과 할로젠 원소는 Sca17(Guillong et al., 2008a; Seo et al., 2011)을 외부 표준 물질로 사용했다.

Na 함량을 내부 표준물질로 사용했으며, 이 값은 유체포유물 가열-냉각 실험에 의해 구해진 염도를 통해 Heinrich et al. (2003)에 보고된 식을 사용해 계산했다. 모든 신호처리와 정량화는 SILLS software(Guillong et al., 2008b)를 사용해 진행되었다. 모든 시그널 중 표면 근처에서 나오는 유체포유물 신호의 경우 표면 오염에 의해 시그널이 중첩된 가능성이 있기에 표면 인근의 시그널은 제외하고 사용했다 (Schloglova et al., 2017).

금 분석의 경우 유체포유물의 대표적인 신호인 Na 신호와 함께 나오는 신호만을 사용했으며, 순간적인 스파이크 신호만 검출되는 경우 제외하였다(그림 3-12).

계산 결과 금 함량의 경우 최대 168 ppm까지 유체포유물 내에 포함되어 있으며, 평균값의 경우 53 ppm으로 굉장히 높은 양이 유체내에 포함되어 있음을 알 수 있다. 이를 통해 해당 지역에 연구된 유체포유물이 금을 이동하였음을 알 수 있었다.

유체의 기원을 알아보기 위해 알칼리 원소(K, Rb, Cs)을 분석했는데(그림 3-13), 해수에 비해 최대 10만배 이상 부화되어 있고, 마그마 열수에 의해 형성되는 반암형 동광상과 비슷한 값을 보인다. 또한 Bi, Sb, As, Pb등의 원소도 부화가 되는 것으로 분석되었는데(그림 3-14), 이러한 원소들 또한 해수에 비해 최대 100만배 부화되고 반암형 동광상에 비해 높거나 비슷한 값을 보이는 것으로 분석되었다. 특히 Bi, Sb, Pb, As은 금과 함께 부화되는 것으로 분석되었다. 이로 미루어보아 연구된 지역의 유체포유물에 포함된 유체는 마그마 기원을 강력히 지시하며, 이 마그마 기원 유체가 금을 함께 부화시킬 가능성을 확인할 수 있었다.

이러한 모든 데이터를 종합하여 해당 지역의 유체 진화 과정 및 금 부화 과정을 해석한 결과 해당 지역의 열수 시스템은 주로 마그마 기원 유체와 해수에 의해 형성되었음을 알 수 있다. 침니 시료의 경우, 특히 중심부에 가까울수록, 즉, 열수공에 가까울수록 마그마 기원 유체가 영향을 더 많이 끼치고, 해수와 접하는 부분인 겹질 부분엔(주로 황산화물이 산출되는 경우) 해수의 영향이 커지는 것을 알 수 있다. 해당 지역의 유체엔 전반적으로 다양한 비등 현상(①기체상 우세 유체포유물의 부재, ②기체 탐지 불가, ③포획온도, ④넓은 염도 범위, ⑤비정질 실리카의 존재 등)의 증거가 발견된다. 미량원소 분석 결과 해당 지역의 열수는 다른 중앙해령이나 초고철질 암체에 수반되는 해저열수광상과는 달리 마그마 기원 유체의 영향을 받았음을 알 수 있다. 이는 최근 섭입대에서 수반되는 열수 시스템에서 많이 보고되고 있는데, 해당 지역도 이와 동일하게 마그마 기원 유체의 영향이 있었음을 통해 중앙해령과 초고철질 암체와 수반되는 해저열수광상과는 차이점으로 해석된다.

금의 경우 마그마 기원 유체에 의해 부화되는 것으로 해석된다. 특히 해양-해양지각 섭입대에 수반되는 해저열수광상의 경우 얇은 지각 두께에 따라 상대적으로 낮은 황화물 포화(sulfide saturation)에 의해 금이 부화된다는 최근 연구들의 결과처럼 해당 지역의 마그마가 낮은 황 포화에 의해 마그마 내에 높은 금 함량을 야기하였을 가능성이 제시된다(Park et al., 2015). 이렇게 금이 부화된 마그마 및 배출된 마그마기원 유체가 비등 현상에 따라 금이 침전되는데, 금 침전 깊이에 따라 일부의 유체는 나노 입자의 금(nanoparticle Au)을 이동 시키며

침전시킬 가능성이 제시되었다(Gartman et al., 2018). 이에따라 나노 입자의 금을 포함한 유체의 경우 순수한 용해도 보다 많은 양의 금을(~168 ppm) 함유할 가능성이 높다. 이러한 나노 입자의 금의 경우 해당 지역의 선행연구에서도 발견된 선례도 존재한다(Okada et al., 2025).



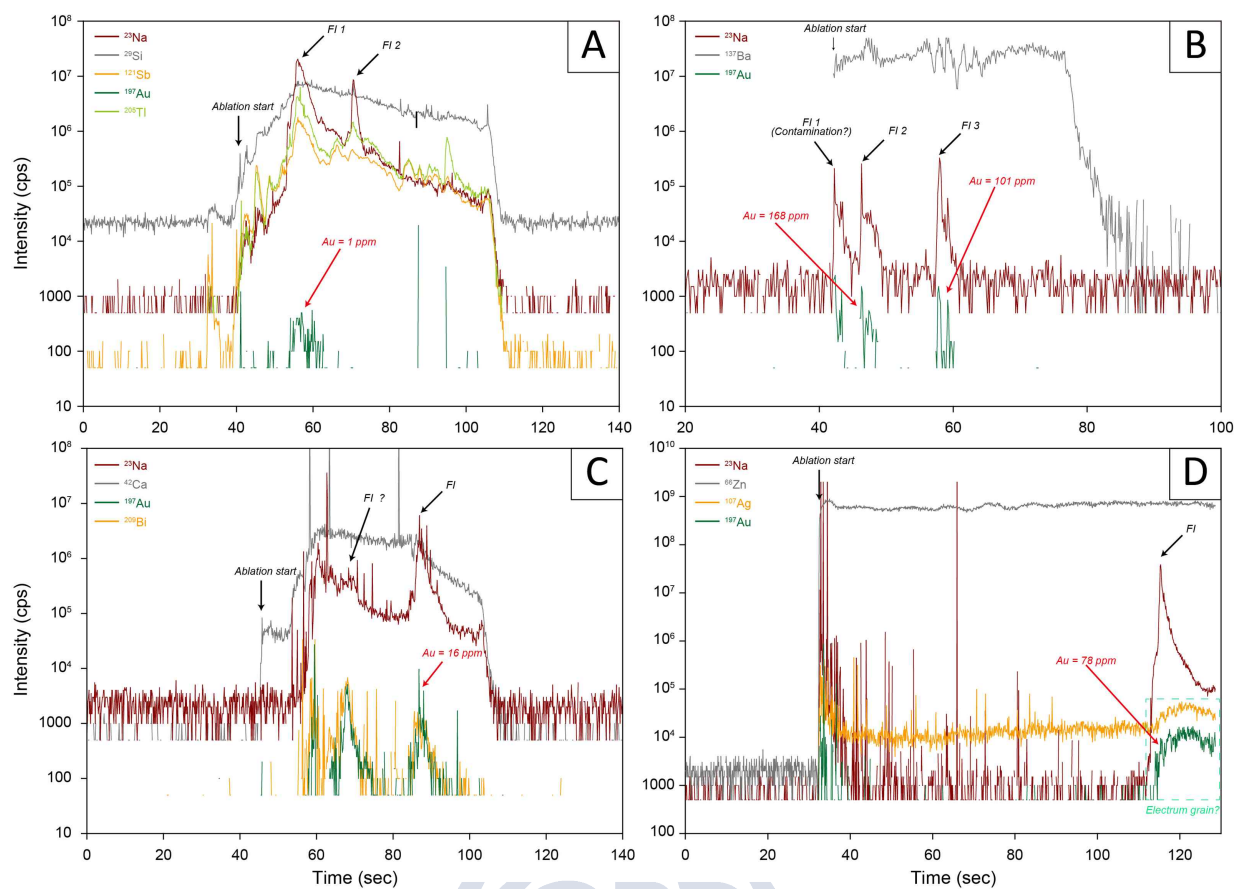


그림 3-12. Higashi-Aogashima Knoll Caldera에 수반되는 유체 포유물 LA-ICP-MS 신호. (a) 비정질 실리카, (b) 중정석, (c) 경석고, (d) 섬아연석.

극지연구소

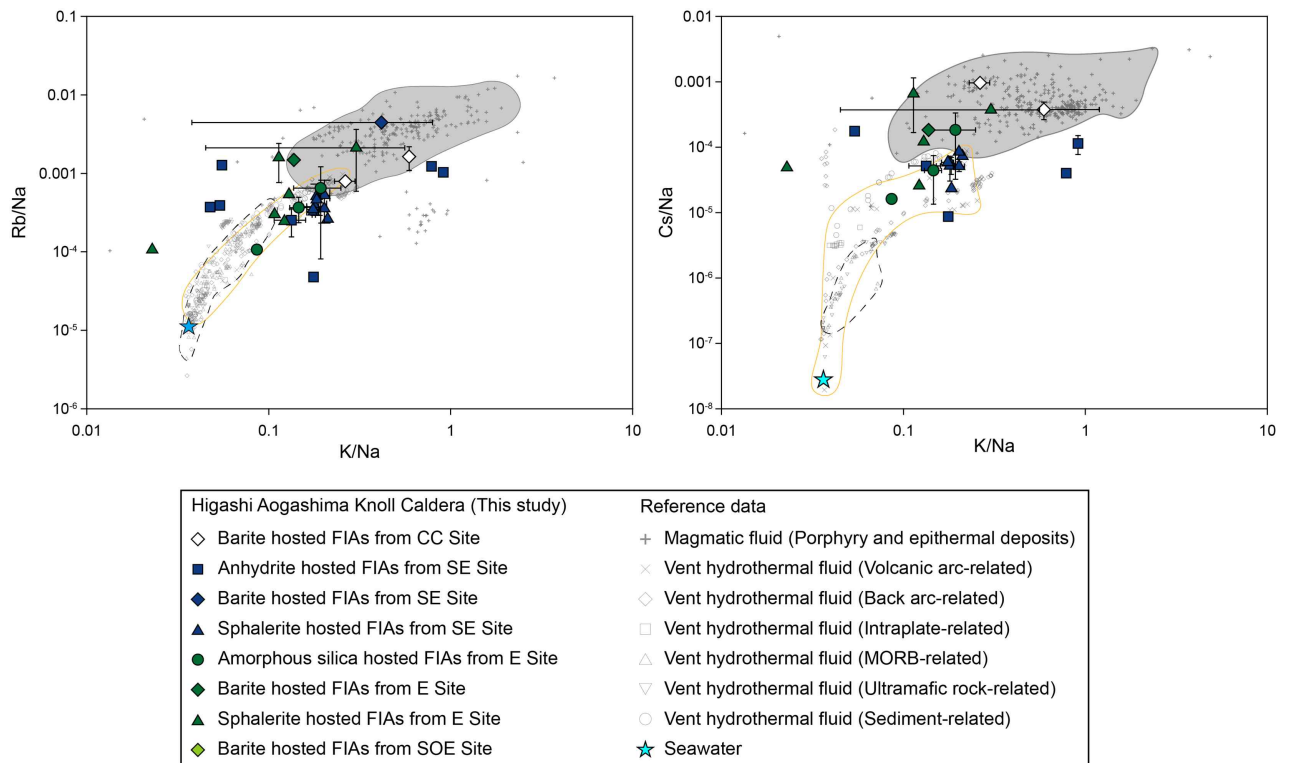


그림 3-13.알칼리 원소 (K, Rb, Cs)/Na 비교 그래프. 회색 영역 = 마그마 유체 기원 광상 유체포유물 데이터, 점선 = 중앙해령 해저 열수 데이터, 노란 선 = 섭입대 해저 열수 데이터. 유체포유물의 염도 영향을 줄이기 위해 모든 원소의 경우 Na으로 정규화하여 사용함 (Audetat.,2019).



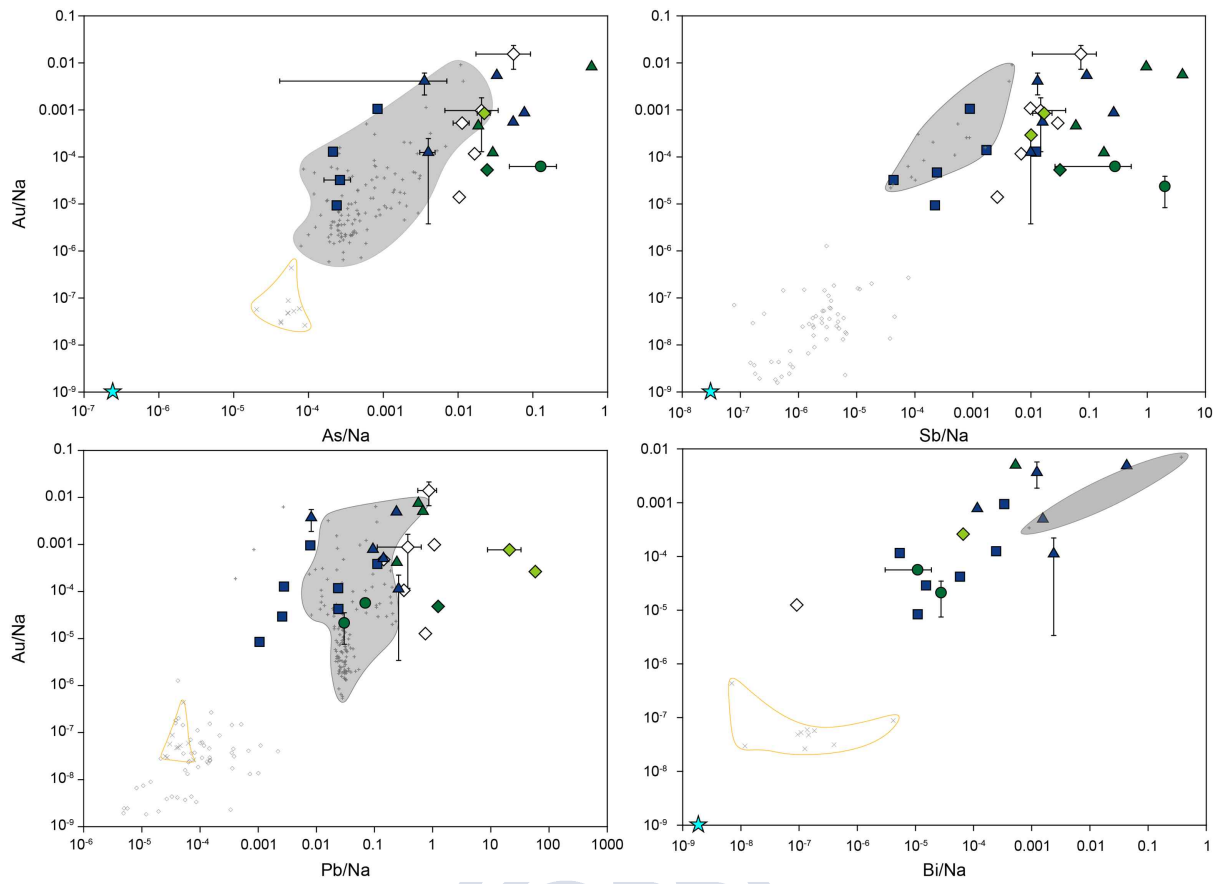
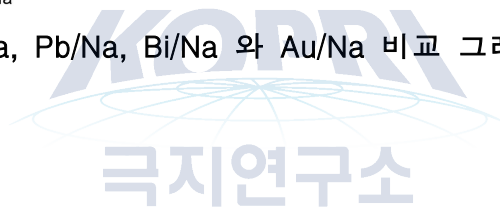


그림 3-14. As/Na, Sb/Na, Pb/Na, Bi/Na 와 Au/Na 비교 그래프. 범례의 경우 그림 h와 동일함.



제 4장 연구개발목표 달성도 및 대외기여도

□ 성과목표 1: 남극권 중앙해령 MORB glass의 물의 기원 규명

○ 세부목표 1-1: 남극 중앙해령 마그마의 물의 정량평가

연구 내용	연구 결과
물 함량 측정	SIMS 분석을 통한 물의 농도 분석 결과 확보
이산화탄소 및 황 함량 측정	SIMS 분석을 통한 이산화탄소 및 황의 농도 값 확보
할로젠 및 기타 휘발성 성분 측정	SIMS 분석을 통한 Cl, F, P 함량 값 확보

○ 세부목표 1-2: 남극 중앙해령 맨틀의 H₂O 기원 규명

연구 내용	연구 결과
Glass 시료의 수소동위원소 분석	수소동위원소 분석을 통한 KR 1 및 2 지역의 물의 기원지 추적
Glass 시료의 탄소, 질소, 비활성기체 분석	탄소, 질소, 헬륨, 아르곤 분석결과 확보

○ 세부목표 1-3: 홍가 화산 폭발성 분화의 물의 역할 규명

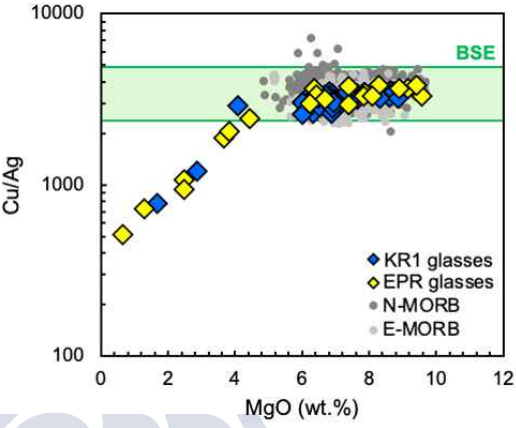
연구 내용	연구 결과
화산암의 물 함량 측정	SIMS 분석을 통해 glass, 부석, 멜트 포유물에 대한 물 함량 결과 확보. 홍가 화산분화에 대해 마그마 내에서 물의 함량이 약 5 wt% 이상이라고 판단함.
수소동위원소 분석	SIMS 분석을 통해 물의 수소동위원소 결과 확보. 홍가 화산활동 동안에 대량의 물의 degassing이 발생하였음을 지시함

- 성과목표 2: 남극권 중앙해령 화산암과 황화물의 친동성원소 지구화학적 특징 규명
- 세부목표 2-1: KR1과 맥쿼리 섬 지역의 MORB 친동성원소 지구화학 데이터 해석

연구 내용	연구 결과
맥쿼리 섬 피크라이트의 황화물 백금족 원소 성분과 전암 성분 간의 관계 분석을 통한 초기 마그마 성분 추정	- 황화물의 백금족 원소 함량이 전암보다 약 1000 배 높으며, 맨틀로 표준화한 패턴이 모암 피크라이트의 백금족 원소 패턴과 동일함을 확인함. - Fo가 높은 감람석의 황화물 포유물, 강한 호정성을 보이는 백금족 원소 함량 변화와 황화물이 농집된 백금족 원소는 MORB 마그마 분화 시 황화물의 분별이 백금족 원소 지구화학을 조절하는 주요 원인임을 확인함. - 일부 전암의 중복 분석에서 확인한 백금족 원소의 불균질성은 마그마가 황화물로 포화되기 전에 백금족 원소 합금이 존재했음을 의미함.
전세계 MORB의 백금족 원소 조성과의 비교 분석을 통한 맨틀 조성에 따른 백금족 원소의 거동 변화 규명	- 맥쿼리 섬 시료의 Ru/Pd 비가 부분 용융의 정도에 따라서 크게 변하지 않는 것에 근거할 때 맨틀의 부분 용융 시 Ru를 비롯한 IPGE를 함유하는 잔여 광물이 존재했을 것으로 생각됨. - 전세계 MORB 시료의, 맥쿼리 섬 시료와 상응하는, Ru/Pd 비를 통해 부분 용융 정도뿐만 아니라 맨틀 불균질성 또한 백금족 원소의 거동에 적은 영향을 가짐을 밝혀냄.

극지연구소

○ 세부목표 2-2: 동태평양 지역의 MORB의 친동성원소 함량 비교 분석

연구 내용	연구 결과
KED 모드 LA-ICP-MS를 활용한 동태평양 MORB 시료의 은 함량 분석 및 KR1 지역 MORB 자료와의 비교 분석	- 남극해 KR1 지역의 MORB와 북위 $\sim 8^{\circ}$ - 10°에서 채취된 동태평양 지역 MORB 시료의 은 함량을 극지연구소의 KED 모드 LA-ICP-MS를 활용하여 측정함. - 두 지역에서 동일하게 마그마 분화 과정 중 MgO 함량 ~ 4 wt.%에서 액체상에서 고체상으로 황화물의 상이 변화한다는 사실을 확인함.  그림 18 MORB 마그마 분화에 따른 Cu/Ag의 변화. Cu/Ag가 급격하게 떨어지는 시점에 분별하는 황화물이 액상에서 고상으로 전환되었다.
전세계 MORB 자료와의 친동성원소 거동 비교 분석을 통한 MORB 마그마 형성 과정 중 친동성 원소 거동의 전세계적 일관성 규명	- KR1 지역과 동태평양 지역을 포함한 전세계 MORB의 동과 은 함량비는 ~ 4 wt.% 이상의 MgO에서 일정한 범위를 가짐. 따라서 황화물이 고상에서 액상으로 변화하는 구간은 전세계적으로 유사할 것으로 생각됨. - MORB에서 발생하는 이른 황화물 포화와 늦은 액상-고상 전이는 빠른 확장대의 상부지각에 Au함량을 급격히 낮출 것으로 예상됨. 이 같은 특징이 해저황화물 광상의 낮은 Au함량을 설명함.

□ 성과목표 3: 해저 열수 광상 시료 연구

○ 세부목표 3-1: 유체포유물 분석에 대한 체계 구축

연구 내용	연구 결과
해저 열수 시료 획득	- 2023년 6~7월 중 일본 JAMSTEC의 지원으로 ROV를 통해 해저 열수 시료 및 화산 쇄설물 등 총 26개 암석 시료 획득 - 2024년 8~9월 중 ROV를 통해 해저 열수 시료 및 기반암 추정 화산암 등 총 27개 암석 시료 획득
해저 열수 시료 암석 기재	- 해당 지역의 암석은 주로 섬아연석과 황산화물 (중정석, 경석고)로 이루어져 있음 - 소량의 황동석, 황철석, 코벨라이트, 방연석 등이 함께 산출됨 - 금은 주로 섬아연석의 빈 공간을 채우는 형태로 평균적으로 20 μm 크기로 산출됨
시료 내의 유체포유물 확인 및 육안 관찰	- 시료 외곽부에 자형으로 자란 중정석, 경석고에 유체포유물이 존재함을 확인 - 섬아연석과 비결정질 실리카 내에 유체포유물이 존재함을 박편을 통해 확인 - 모든 유체포유물이 액체상이 우세한 유체포유물임을 확인



○ 세부목표 3-2: 유체포유물에 대한 Microthermometry, phase 분석 결과 확보 및 해석

연 구 내 용	연 구 결 과
유체포유물 균질화 온도 및 염도 측정	- 모든 광물 내의 유체포유물의 염도가 다양한 값 (3.0 - 6.5 wt.% NaCl equiv.)로 측정됨으로 보아 비등 현상이 해당 열수광상의 형성에 영향을 주었다고 해석됨 - 황산화물 내의 유체포유물의 균질화 온도와 염도가 양의 상관관계가 있음으로 보아 열수와 해수의 혼합이 있었다고 해석됨 - 섬아연석 내의 유체포유물 균질화 온도가 다른 광물들과 비교해 상대적으로 좁은 범위에서 나타남으로 미루어 보아 해당 광물 형성시 해수의 영향이 적고 열수의 온도 범위임이 확인됨
유체포유물 포획온도 복원	- Steele-MacInnis et al. (2012) 논문에 의해 보고된 유체포유물 포획온도 복원 프로그램을 사용하여 해당 열수광상의 생성 심도를 통해 유체포유물 포획온도를 복원함 - 10개 이상의 유체포유물의 균질화 온도가 해수 비등곡선에 비해 높은 포획온도를 가짐으로 미루어 보아 해당 지역에 비등 현상이 있었음이 확인됨
유체포유물 내의 기체 조성 파악	- 유체포유물의 기체 조성을 파악하기 위해 기체 부분에 대하여 Raman spectroscopy 시행 - 모든 유체포유물에서 기체가 검출되지 않은 점으로 미루어 보아 해당 지역에 비등 현상에 의해 모든 기체가 바다로 용해되어 검출되지 않은 것으로 해석됨

○ 세부목표 3-3: 해저 열수 시료 내 유체포유물 미량원소 분석 및 종합 해석

연 구 내 용	연 구 결 과
유체포유물 미량원소 분석	- ETH Zurich의 유체포유물 미량원소 분석용 LA-ICP-MS를 이용하여 금, 알칼리원소, 휘발성 원소를 분석함 - 유체포유물 내의 금의 부화 (~168 ppm)이 해당 지역의 유체 내에 금이 부화되어 있음으로 해석됨 - 알칼리 원소 (K, Rb, Cs)와 휘발성 원소 (Bi, Sb, As)의 양이 해수의 양에 비해 최대 10만배 이상 높고 마그마 열수에 의해 형성되는 반암형 동광상과 비슷한 값을 보이는 것으로 미루어 보아 해당 지역의 유체는 마그마 기원 유체의 영향을 받았음으로 해석됨
종합 해석 및 논문 작성	- 해당 지역의 열수 시스템에 형성은 열수와 바닷물의 혼합으로 형성됨 - 해당 지역에 다양한 비등현상의 증거 (기체상 우세 유체포유물의 부재, 기체 탐지 불가, 포획온도 등)이 나타남으로 미루어 보아 해당 열수 시스템에 활발한 비등현상이 있었음으로 해석됨 - 금의 부화는 비등현상에 의해 일어난 현상으로 해석됨 - 해당 유체는 중앙해령에서 발달하는 해저 열수 시스템과 달리 마그마 기원 유체의 영향을 받은 것으로 해석됨

본 연구를 통해, 남극권 중앙해령의 비활성 기체 및 질소 동위원소 결과를 체계적으로 획득할 수 있었다. 이를 통해, 기존에 미량원소 및 방사성 동위원소에서 뚜렷하게 제시되지 않았던 상부-하부 맨틀의 기여도를 헬륨, 네온 동위원소를 이용하여 비교적 명확하게 규명할 수 있었다. 또한, 중앙해령 클래스 시료에 대한 질소동위원소 분석결과는 과거에 섭입으로 유입된 지각물질을 보다 직관적으로 추적할 수 있는 단서를 제공하였다. 이를 통해, 남극 및 질란디아 지역 하부에 분포하는 맨틀을 지화학적 관점에서 특성화 할 수 있으며 지구물질의 심부 순환에 대한 중요한 배경지식을 제공할 것이다. 다만, 연구기간 내에 획득한 분석결과에 대하여 비활성 기체 지화학 분야 및 물의 기원지 규명에 관련된 내용의 국제학술논문 2건에 대한 투고는 곧 이루어질 예정이다.

3차년도에 수행한 맥쿼리 섬 지역의 MORB 백금족 원소 자료와 다른 지역 MORB와의 비교 분석 결과는 맨틀 용융 과정에서 백금족원소 광물의 기원과 영향에 대한 구체적인 평가를 가능하게 하였다. 또한, 해당 현상이 맥쿼리 섬 지역의 국지적인 현상이 아닌 전지구적으로 보편적인 현상임을 보여주었다. 맥쿼리 섬 시료의 백금족 원소 연구 결과는 친동성 원소 지화학 연구에서의 피크라이트 시료의 중요성을 제시하며, 현재까지 불분명했던 맨틀 용융 과정 및 마그마 분화 초기 단계에서의 친동성 원소의 거동을 구체화하였다는 점에서 중요점을 갖는다.

동태평양 지역 시료에 대한 구리와 은 추가 분석과 KR1 시료와의 비교 연구는 MORB 마그마의 분화 과정 중 황화물의 상전이 현상이 일반적인 현상임을 밝혔다. 해당 연구 결과는 단순히 마그마의 진화 과정 중 친동성 원소의 거동에 대한 이해를 증진시킬 뿐 아니라 해양지각 내 친동성 원소의 분포를 이해하는데에도 활용될 수 있다. 이는 나아가 해양지각을 금속의 기원으로 하는 해저열수광상의 금속 농집 기작을 이해하고, 채산성을 판단하는데에 중요한 배경지식을 제공할 것으로 기대된다.

해저열수광상 분야에서 유체포유물을 이용한 열수 유체의 진화 연구는, 투명한 광물의 제한적인 산출이라는 근본적인 제약으로 인해 오랫동안 수행에 어려움이 있었다. 특히 구리 우세형 블랙 스모커 환경에서는 황동석 및 반동석(bornite)과 같은 불투명 황화물이 주를 이루어, 열수 유체의 직접적인 유체포유물 분석이 사실상 제한되어 왔다. 해저열수광상에서 비교적 흔히 산출되는 투명 광물인 황산염 광물(중정석, 경석고)의 경우에도, 낮은 경도와 열에 의한 변형 특성으로 인해 microthermometry 과정에서 신뢰도 높은 자료 획득이 어려운 한계를 지닌다.

본 연구에서도 유체포유물 microthermometry 과정에서 일부 중정석 및 경석고 시료에서 가열 중 광물 입자의 열팽창으로 인한 열과열(decrepitation)이 빈번하게 관찰되었으며, 포획 이후 열에 의해 유체의 성분이 변형되는 포획 후 변형(post-entrapment modification) 현상이 염도 및 균질화 온도 산정에 영향을 미치는 사례가 확인되었다. 이러한 점은 해저열수광상에서 황산염 광물을 유체포유물 분석에 적용하는 데 있어 주요 기술적 난제로 작용해 왔다.

그럼에도 불구하고 본 연구를 통해 중정석 및 경석고 내 유체포유물 분석에 대한 실험적 노하우를 체계적으로 축적하였으며, 해당 광물들이 열수 유체의 화학적 성분을 최대 약 90%까지 보존할 수 있다는 기존 연구 결과를 실험적으로 검증하였다. 이를 통해 해저열수계에서 열수 유체의 end-member를 추정할 수 있는 이론적 근거뿐만 아니라 실험적 근거를 함께 제시함으로써, 당초 설정한 연구 목표인 해저열수 유체 진화의 정량적 해석을 성공적으로 달성하였다.

또한 본 연구에서는 기존에 주로 육상 반암형 동광상 및 천열수 광상 연구에 한정적으로 활용되어 왔던 유체포유물 분석 기법을 해저열수광상 환경에 적용하여, 공동연구자인 서정훈 교수 연구실에서 다수의 성공적인 분석 사례를 확보하였다. 이는 해저열수광상에서의 유체 진화 및 광물 침전 메커니즘 규명에 있어 분석 기술의 적용 범위를 확장한 성과로 평가된다.

아울러 본 연구는 전 세계적으로 가장 금이 부화된 해저열수광상의 금 부화 기작을 규명함으로써, 최근 금 가격 상승과 함께 주목받고 있는 해저열수광상의 잠재적 자원 가치에 대한 과학적 이해를 심화하는 데 기여하였다. 이러한 연구 성과를 종합하여 현재 전예찬 박사과정 학생이 제1저자로 논문을 작성 및 수정 중에 있으며, 2026년 상반기 중 광상학 분야의 국제 고영향력 학술지(SCI급, $mnIF > 80$)에 투고할 예정이다.



제 5 장 연구개발결과의 활용계획

본 연구에서 확보한 휘발성 성분 및 친동성 원소 지화학 분석 결과는 남극 및 질란디아 맨틀 연구에 있어 기초 배경 자료로 활용될 예정이다. 남극 권역에서 축적한 노하우는 향후 남극의 대륙 연구 외에도 중앙해령 및 다양한 해저 마그마 활동의 연구에 활용될 수 있다. 또한, 북극 항로의 개척에 따라 주목받고 있는 Gakkel Ridge에 대한 연구에 진입할 수 있는 중요한 밑거름이 되었다고 판단한다.

본 연구에서 구축된 유체포유물 분석 기법은 해저열수광상에서도 유체 진화 해석이 가능함을 실험적으로 입증한 선례로, 향후 다양한 해저열수광상 연구에 적용될 수 있는 기반을 제공한다. 또한 본 연구를 통해 확보된 유체포유물의 미량원소 조성, 온도 및 염도 자료는 중앙해령, 배호분지 및 섭입대 환경의 열수계와 비교 가능한 기준 데이터셋으로 활용될 수 있을 것으로 기대된다. 본 연구 결과는 SCI급 국제 학술지에 게재하여 학계에 공유하고, 향후 남극권 중앙해령 해저열수 시스템 연구에서 비교 분석 모델로 활용될 예정이다. 아울러 본 연구 성과는 해저열수광상의 자원 잠재성 평가와 탐사 전략 수립을 위한 기초 자료로 활용될 수 있으며, 국내 해저열수광상 연구를 주도할 수 있는 전문 인력 양성에도 기여할 것으로 기대된다.

본 연구에서 구축된 유체포유물 분석 기법은 기존에 육상의 반암형 동광상 및 천열수 금광상에서 주로 활용되던 방법으로, 해저열수광상의 경우 투명 광물의 제한적인 산출과 황산염 광물의 열적·기계적 불안정성 등으로 인해 적용에 많은 제약이 있었다. 본 연구는 이러한 기술적 한계를 극복하고 해저열수광상에서도 유체포유물 기반 유체 진화 해석이 가능함을 실험적으로 입증한 선례를 제시하였으며, 향후 다양한 해저열수광상 연구에 해당 분석 기법이 활용될 수 있는 기반을 마련하였다.

또한 본 연구를 통해 구축된 해저열수광상 유체포유물의 미량원소 조성, 온도 및 염도 자료는 다른 해저 열수계 및 육상 열수광상과의 비교 분석이 가능한 데이터셋으로 활용될 예정이다. 이는 중앙해령, 초고철질 암체, 배호분지 및 섭입대 환경에서 형성되는 열수계의 유체 진화 특성을 정량적으로 비교·평가하는 데 중요한 기준 자료로 활용될 수 있다.

본 연구를 통하여, 3명 이상의 남극 중앙해령 및 해저열수 광상의 전문지식을 보유한 박사 배출이 예상되며, 향후 관련 학문 분야에 중요한 역할을 할 것이라 기대한다.

제 6 장 연구개발과정에서 수집한 해외과학기술정보

헬륨 동위원소 분석 시스템을 사용하여 AAR의 KR1 세그먼트에서 21개의 샘플을 대상으로 동위원소 분석을 수행하였다. 이탈리아의 INGV-팔레르모 연구소에서 6개의 샘플을 대상으로 네온 동위원소를 분석하였다. 질소 동위원소 분석은 일본의 University of Tokyo의 대기해양 연구소에서 독립적인 분석 시스템을 사용하여 16개의 샘플을 대상으로 수행되었으며, 별도로 아르곤 동위원소와 희귀 가스(He, Ne, Ar) 조성을 다른 분석 시스템에서 분석하였다. 헬륨 동위원소 분석을 위해 유리 샘플은 Parai 등(2009)의 방법에 따라 Nu Noblesse 비활성 기체 질량 분석기를 이용하여 분석하였다.

백금족 원소 지화학 분석은 중국(Wang et al., 2020), 호주(Hao et al., 2021) 등 전세계에서 수행되고 있다. PGE 함량을 결정하기 위해서 동위원소 희석법을 사용하는 것은 유사하지만 국가별로 암석을 산성 용액에 용해시키고, 백금족 원소를 농집 및 추출하는 방법은 상이하다. 중국(Wang et al., 2020)은 역왕수를 이용한 카리우스관(Carius tube) 용해법을 이용해서 암석 분말을 용해시키고, 크로마토그래피 분리법을 활용하여 백금족원소를 추출한다. 반면, 호주(Hao et al., 2021)에서는 한국(Park et al., 2012)과 동일하게 황화니켈 시금법을 활용하여 암석에서 백금족원소를 추출하고 산성 용액에 용해시키는 방법을 활용한다. 해당 분석법은 카리우스관 용해법과 비교하여 분석 과정 중 오염될 가능성이 높지만, 더 많은 양의 암석 분말(최대 5 g)을 분석에 활용할 수 있다는 점에서 이점을 갖는다.

은 함량 분석은 중국(Wang and Becker, 2015)과 영국(Jenner and O'Neill, 2012)에서 수행되고 있다. 중국(Wang and Becker, 2015)은 PFA 비이커를 사용한 압력 폭발 용기(pressure bomb) 내 HF-HNO₃ 용해법과 고압 애셔(HPA-S)의 유리탄소 용기 용해법을 활용하여 암석 분말을 용액화하고, 동위원소 희석법을 활용하여 암석 내 은 함량을 분석한다. 반면, 영국(Jenner and O'Neill, 2012)은 레이저 삭박 유도 결합 플라즈마 질량 분석기를 활용해서 유리질 시료에 대해 *in situ* 분석을 수행한다. 해당 분석법은 균질한 시료에 대해 높은 분석 효율을 자랑하지만, 유도 결합 플라즈마 질량 분석기의 한계점 중 하나인 높은 자료 후처리 보정률에 의해 정확도가 낮다는 단점이 있다. 본 연구에서는 이를 개선한 He 충돌 모드를 활용하여 은 함량 분석을 수행하였다.

세계적으로 해저열수광상 개발과 관련된 연구를 활발히 수행하고 있는 일본의 경우, 해저열수광상 탐사 및 연구를 위한 다양한 연구 인프라가 구축되어 있는 것으로 조사되었다. 일본 JAMSTEC은 3척의 연구선, 1척의 지원선, 1척의 해양 연구선, 1척의 시추선, 그리고 1척의 쇄빙선을 보유하고 있으며, 유인 잠수정 1기, 무인 잠수정 1기, ROV 3기 등을 다양한 해저 탐사 장비를 운영하고 있다.

해당 연구선에는 ROV가 장착되어 있으며, 본 연구 지역의 암석 샘플링에 활용된 KAIMEI호의 경우 다수의 ROV 조종수가 탑승하여 ROV를 운영하고 있다. 기관부, 갑판부 및 ROV 운영 인력이 협업하여 탐사가 수행되고 있으며, 이러한 운영 방식은 해저 탐사 수행 과정에서 참고할 수 있는 사례로 확인되었다. 또한 해당 연구선은 일본 내 대학 연구진에게도 개방되어 있어, 연구제안서가 채택될 경우 특정 연구 목적에 따라 활용이 가능한 것으로 조사되었다.

아울러 해저 관측을 위한 OBS 장비 또한 다수 운용되고 있어, 이를 활용한 대규모 해양 관

측 연구가 수행되고 있는 것으로 확인되었다. 이러한 연구 인프라를 기반으로 일본에서는 해저 열수광상과 관련된 다양한 연구가 진행되고 있다.

한편, 유체포유물 연구와 관련하여 서울대학교 에너지·광물자원 연구실에는 유체포유물 가열-냉각 장치 및 라만 분광기 등 정밀 분석 장비가 구축되어 있으나, 유체포유물의 미량원소 분석을 위한 LA-ICP-MS 장비는 스위스 ETH Zurich 및 중국 난징대학교 등 해외 일부 기관에서만 운영되고 있는 것으로 조사되었다.



제 7 장 참고문헌

- Audetat, A. (2019). The metal content of magmatic-hydrothermal fluids and its relationship to mineralization potential. *Economic Geology*, 114, 1033 - 1056.
- Aviado, K.B., Rilling Hall, S., Bryce, J.G., Mukasa, S.B., 2015. Submarine and subaerial lavas in the West Antarctic Rift System: Temporal record of shifting magma source components from the lithosphere and asthenosphere. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems* 16, 4344 - 4361. <https://doi.org/10.1002/2015gc006076>
- Baker, E. T., German, C. R., and Elderfield, H. (1995). Hydrothermal plumes over spreading-center axes: Global distributions and geological inferences. *Geophysical Monograph Series*, 91, 47 - 47.
- Barry, P.H., Hilton, D.R., 2016. Release of subducted sedimentary nitrogen throughout Earth's mantle. *Geochem Perspect Lett* 148 - 159. <https://doi.org/10.7185/geochemlet.1615>
- Beaulieu, S. E., and Szafranski, K. M. (2020). InterRidge Global Database of Active Submarine Hydrothermal Vent Fields Version 3.4 [dataset]. PANGAEA.
- Bekaert, D. V, Barry, P.H., Curtice, J., Blusztajn, J., Hudak, M., Seltzer, A., Broadley, M.W., Krantz, J.A., Wanless, V.D., Soule, S.A., Mittelstaedt, E., Kurz, M.D., 2024. A carbon, nitrogen, and multi-isotope study of basalt glasses near 14°N on the Mid-Atlantic Ridge. Part A: Degassing processes. *Geochim Cosmochim Acta* 369, 160 - 178. <https://doi.org/10.1016/j.gca.2023.12.015>
- Bekaert, D. V, Turner, S.J., Broadley, M.W., Barnes, J.D., Halldórsson, S.A., Labidi, J., Wade, J., Walowski, K.J., Barry, P.H., 2021. Subduction-Driven Volatile Recycling: A Global Mass Balance. *Annu Rev Earth Planet Sci* 49, 37 - 70. <https://doi.org/10.1146/annurev-earth-071620-055024>
- Benkert, J.P., Baur, H., Signer, P., Wieler, R., 1993. He, Ne, and Ar from the solar wind and solar energetic particles in lunar ilmenites and pyroxenes. *J Geophys Res Planets* 98, 13147 - 13162. <https://doi.org/10.1029/93JE01460>
- Bézos, A., Lorand, J.-P., Humler, E., and Gros, M., 2005, Platinum-group element systematics in Mid-Oceanic Ridge basaltic glasses from the Pacific, Atlantic, and Indian Oceans: *Geochimica et Cosmochimica Acta*, v. 69, p. 2613 - 2627, <https://doi.org/10.1016/j.gca.2004.10.023>.
- Bischoff, J. L., and Rosenbauer, R. J. (1984). The critical point and two-phase boundary of seawater, 200 - 500 °C. *Earth and Planetary Science Letters*, 68, 172 - 180.
- Boschen, R. E., Rowden, A. A., Clark, M. R., and Gardner, J. P. A. (2013). Mining of deep-sea seafloor massive sulfides: A review of the deposits, their benthic communities, impacts from mining, regulatory frameworks and management strategies. *Ocean & Coastal Management*, 84, 54 - 67.
- Cartigny, P., Jendrykowski, N., Pineau, F., Petit, E., Javoy, M., 2001. Volatile (C, N, Ar) variability in MORB and the respective roles of mantle source heterogeneity and degassing: the case of the Southwest Indian Ridge. *Earth Planet Sci Lett* 194, 241 - 257. [https://doi.org/10.1016/S0012-821X\(01\)00540-4](https://doi.org/10.1016/S0012-821X(01)00540-4)
- Cartigny, P., Marty, B., 2013. Nitrogen Isotopes and Mantle Geodynamics: The Emergence of Life and the Atmosphere-Crust-Mantle Connection. *Elements* 9, 359 - 366. <https://doi.org/10.2113/gselements.9.5.359>
- Choi, H., Kim, S.-S., Dymant, J., Granot, R., Park, S.-H., Hong, J.K., 2017. The kinematic evolution of the Macquarie Plate: A case study for the fragmentation of oceanic lithosphere. *Earth*

- Planet Sci Lett 478, 132 - 142. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2017.08.035>
- Choi, H., Kim, S.-S., Park, S.-H., 2021. Magnetic Constraints on Off-Axis Seamount Volcanism in the Easternmost Segment of the Australian-Antarctic Ridge. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems* 22, e2020GC009576. <https://doi.org/10.1029/2020GC009576>
- Choi, S. K., Pak, S. J., Kim, J., Park, J.-W., and Son, S.-K. (2021). Gold and tin mineralisation in the ultramafic-hosted Cheoeum vent field, Central Indian Ridge. *Mineralium Deposita*, 56, 885 - 906.
- Choi, S. K., Pak, S. J., Park, J.-W., Kim, H.-S., Kim, J., and Choi, S.-H. (2023). Trace-element distribution and ore-forming processes in Au - Ag-rich hydrothermal chimneys and mounds in the TA25 West vent field of the Tonga Arc. *Mineralium Deposita*, 58, 135 - 160.
- Christie, D.M., West, B.P., Pyle, D.G., Hanan, B.B., 1998. Chaotic topography, mantle flow and mantle migration in the Australian - Antarctic discordance. *Nature* 394, 637 - 644. <https://doi.org/10.1038/29226>
- Dauphas, N., Marty, B., 1999. Heavy nitrogen in carbonatites of the kola peninsula: A possible signature of the deep mantle. *Science* (1979) 286, 2488 - 2490. <https://doi.org/10.1126/science.286.5449.2488>
- de Sampaio, P.A.B., Li, Z.-X., Doucet, L.S., 2024. Global mantle isotopic anomalies linked to supercontinent-superocean evolution for the past 700 million years. *Commun Earth Environ* 5. <https://doi.org/10.1038/s43247-024-01627-w>
- Doucet, L.S., Li, Z.-X., Gamal El Dien, H., Pourteau, A., Murphy, J.B., Collins, W.J., Mattielli, N., Olierook, H.K.H., Spencer, C.J., Mitchell, R.N., 2020. Distinct formation history for deep-mantle domains reflected in geochemical differences. *Nat Geosci* 13, 511 - 515. <https://doi.org/10.1038/s41561-020-0599-9>
- Durkin, K., Day, J.M.D., Panter, K.S., Xu, J.F., Castillo, P.R., 2023. Petrogenesis of alkaline magmas across a continent to ocean transect, northern Ross Sea, Antarctica. *Chem Geol* 641. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2023.121780>
- Evans, K., Reddy, S.M., Merle, R., Fougereuse, D., Rickard, W.D.A., Saxey, D.W., Park, J.-W., Doucet, L., and Jourdan, F., 2023, The origin of platinum group minerals in oceanic crust: *Geology*, v. 51, p. 554 - 558, <https://doi.org/10.1130/G50927.1>.
- Farley, K.A., Poreda, R.J., 1993. Mantle neon and atmospheric contamination. *Earth Planet Sci Lett* 114, 325 - 339. [https://doi.org/10.1016/0012-821X\(93\)90034-7](https://doi.org/10.1016/0012-821X(93)90034-7)
- Fischer-Gödde, M., Becker, H., and Wombacher, F., 2011, Rhodium, gold and other highly siderophile elements in orogenic peridotites and peridotite xenoliths: *Chemical Geology*, v. 280, p. 365 - 383, <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2010.11.024>.
- Fonseca, R.O.C., Mallmann, G., O'Neill, H.S.C., Campbell, I.H., and Laurenz, V., 2011, Solubility of Os and Ir in sulfide melt: Implications for Re/Os fractionation during mantle melting: *Earth and Planetary Science Letters*, v. 311, p. 339 - 350, <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2011.09.035>.
- Gartman, A., Hannington, M., Jamieson, J. W., Peterkin, B., Garbe-Schönberg, D., Findlay, A. J., Fuchs, S., and Kwasnitschka, T. (2018). Boiling-induced formation of colloidal gold in black smoker hydrothermal fluids. *Geology*, 46, 39 - 42.
- Gautheron, C., Moreira, M., 2002. Helium signature of the subcontinental lithospheric mantle. *Earth Planet Sci Lett* 199, 39 - 47.
- Gautheron, C., Moreira, M., Allègre, C., 2005. He, Ne and Ar composition of the European lithospheric mantle. *Chem Geol* 217, 97 - 112. <https://doi.org/10.1016/J.CHEMGEO.2004.12.009>
- Guillong, M., Latkoczy, C., Seo, J. H., Gunther, D., and Heinrich, C. A. (2008a).

- Graham, D.W., 2002. Noble Gas Isotope Geochemistry of Mid-Ocean Ridge and Ocean Island Basalts: Characterization of Mantle Source Reservoirs. *Rev Mineral Geochem* 47, 247 - 317. <https://doi.org/10.2138/RMG.2002.47.8>
- Graham, D.W., Hanan, B.B., Hémond, C., Blichert Toft, J., Albarède, F., 2014. Helium isotopic textures in Earth's upper mantle. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems* 15, 2048 - 2074. <https://doi.org/10.1002/2014gc005264>
- Graham, D.W., Jenkins, W.J., Schilling, J.-G., Thompson, G., Kurz, M.D., Humphris, S.E., 1992. Helium isotope geochemistry of mid-ocean ridge basalts from the South Atlantic. *Earth Planet Sci Lett* 110, 133 - 147. [https://doi.org/10.1016/0012-821X\(92\)90044-V](https://doi.org/10.1016/0012-821X(92)90044-V)
- Graham, D.W., Lupton, J.E., Spera, F.J., Christie, D.M., 2001. Upper-mantle dynamics revealed by helium isotope variations along the southeast Indian ridge. *Nature* 409, 701 - 703. <https://doi.org/10.1038/35055529>
- Determination of sulfur in fluid inclusions by laser ablation ICP-MS. *Journal of Analytical Atomic Spectrometry*, 23, 1581 - 1589.
- Guillong, M., Meier, D., Allan, M., Heinrich, C. A., and Yardley, B. (2008b). Appendix A6: SILLS: A MATLAB-based program for the reduction of laser ablation ICP-MS data of homogeneous materials and inclusions. *Mineralogical Association of Canada Short Course*, 40, 328 - 333.
- Hahm, D., Baker, E. T., Rhee, Y.-J., Won, Y. J., Resing, J. A., Lupton, J. E., Lee, W.-K., Kim, M., and Park, S.-H. (2015). First hydrothermal discoveries on the Australian - Antarctic Ridge: Discharge sites, plume chemistry, and vent organisms. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 16, 3061 - 3075.
- Hamelin, C., Dosso, L., Hanan, B.B., Moreira, M., Kositsky, A.P., Thomas, M.Y., 2011. Geochemical portray of the Pacific Ridge: New isotopic data and statistical techniques. *Earth Planet Sci Lett* 302, 154 - 162. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2010.12.007>
- Hanan, B., Blichert-Toft, J., Pyle, D., Christie, D., 2004. Contrasting origins of the upper mantle MORB source revealed by Hf and Pb isotopes from the Australian-Antarctic Discordance, in: *GEOCHIMICA ET COSMOCHIMICA ACTA*. PERGAMON-ELSEVIER SCIENCE LTD THE BOULEVARD, LANGFORD LANE, KIDLINGTON ..., pp. A553 - A553.
- Hannington, M. D., De Ronde, C. E. J., and Petersen, S. (2005). Sea-floor tectonics and submarine hydrothermal systems. *Economic Geology 100th Anniversary Volume*, 100, 111 - 141.
- Hannington, M., Jamieson, J., Monecke, T., Petersen, S., and Beaulieu, S. (2011). The abundance of seafloor massive sulfide deposits. *Geology*, 39, 1155 - 1158.
- Hao, H., Campbell, I.H., Arculus, R.J., and Perfit, M.R., 2021, Using precious metal probes to quantify mid-ocean ridge magmatic processes: *Earth and Planetary Science Letters*, v. 553, <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2020.116603>.
- Hanyu, T., Kawabata, H., Tatsumi, Y., Kimura, J.-I., Hyodo, H., Sato, K., Miyazaki, T., Chang, Q., Hirahara, Y., Takahashi, T., 2014. Isotope evolution in the HIMU reservoir beneath St. Helena: Implications for the mantle recycling of U and Th. *Geochim Cosmochim Acta* 143, 232 - 252.
- Hart, S.R., Blusztajn, J., LeMasurier, W.E., Rex, D.C., 1997. Hobbs Coast Cenozoic volcanism: Implications for the West Antarctic rift system. *Chem Geol* 139, 223 - 248. [https://doi.org/10.1016/S0009-2541\(97\)00037-5](https://doi.org/10.1016/S0009-2541(97)00037-5)
- Hart, S.R., Kurz, M.D., Wang, Z., 2008. Scale length of mantle heterogeneities: Constraints from helium diffusion. *Earth Planet Sci Lett* 269, 508 - 517. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2008.03.010>
- Heinrich, C. A., Pettke, T., Halter, W. E., Aigner-Torres, M., Audétat, A., Günther, D., Hattendorf, B., Bleiner, D., Guillong, M., and Horn, I. (2003). Quantitative multi-element analysis of

- minerals, fluid and melt inclusions by laser-ablation inductively-coupled-plasma mass-spectrometry. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 67, 3473 - 3497.
- Hoernle, K., Timm, C., Hauff, F., Tappenden, V., Werner, R., Jolis, E.M., Mortimer, N., Weaver, S., Riefstahl, F., Gohl, K., 2020. Late Cretaceous (99–69 Ma) basaltic intraplate volcanism on and around Zealandia: Tracing upper mantle geodynamics from Hikurangi Plateau collision to Gondwana breakup and beyond. *Earth Planet Sci Lett* 529. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2019.115864>
- Huang, W., Yang, Y., Li, Y., Xu, Z., Yang, S., Guo, S., Xia, Q., 2024. Inefficient nitrogen transport to the lower mantle by sediment subduction. *Nat Commun* 15, 6998. <https://doi.org/10.1038/s41467-024-51524-1>
- Husen, A., Kamenetsky, V.S., Everard, J.L., and Kamenetsky, M.B., 2016, Transition from ultra-enriched to ultra-depleted primary MORB melts in a single volcanic suite (Macquarie Island, SW Pacific): Implications for mantle source, melting process and plumbing system: *Geochimica et Cosmochimica Acta*, v. 185, p. 112 - 128, <https://doi.org/10.1016/j.gca.2016.02.031>.
- Iizasa, K., Asada, A., Mizuno, K., Katase, F., Lee, S., Kojima, M., and Ogawa, N. (2019). Native gold and gold-rich sulfide deposits in a submarine basaltic caldera, Higashi-Aogashima hydrothermal field, Izu - Ogasawara frontal arc, Japan. *Mineralium Deposita*, 54, 117 - 132.
- Jackson, M.G., Blichert-Toft, J., Halldórsson, S.A., Mundl-Petermeier, A., Bizimis, M., Kurz, M.D., Price, A.A., Harðardóttir, S., Willhite, L.N., Breddam, K., Becker, T.W., Fischer, R.A., 2020. Ancient helium and tungsten isotopic signatures preserved in mantle domains least modified by crustal recycling. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 117, 30993 - 31001. <https://doi.org/10.1073/pnas.2009663117>
- Jackson, M.G., Hart, S.R., Konter, J.G., Kurz, M.D., Blusztajn, J., Farley, K.A., 2014. Helium and lead isotopes reveal the geochemical geometry of the Samoan plume. *Nature* 514, 355 - 358. <https://doi.org/10.1038/nature13794>
- Jenner, F.E., and O'Neill, H.S.C., 2012, Analysis of 60 elements in 616 ocean floor basaltic glasses: *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, v. 13, <https://doi.org/10.1029/2011GC004009>.
- Jiang, Q., Merle, R.E., Jourdan, F., Olierook, H.K.H., Chiaradia, M., Evans, K.A., Wang, X.-C., Conway, C.E., Bostock, H.C., Wysoczanski, R.J., 2021. Origin of geochemically heterogeneous mid-ocean ridge basalts from the Macquarie Ridge Complex, SW Pacific. *Lithos* 380 - 381. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2020.105893>
- Jochum, K. P., Weis, U., Stoll, B., Kuzmin, D., Yang, Q., Raczek, I., Jacob, D. E., Stracke, A., Birbaum, K., Frick, D. A., Günther, D., and Enzweiler, J. (2011). Determination of reference values for NIST SRM 610 - 617 glasses following ISO guidelines. *Geostandards and Geoanalytical Research*, 35, 397 - 429.
- Kamenetsky, V.S., and Eggins, S.M., 2012, Systematics of metals, metalloids, and volatiles in MORB melts: Effects of partial melting, crystal fractionation and degassing (a case study of Macquarie Island glasses): *Chemical Geology*, v. 302 - 303, p. 76 - 86, <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2011.04.008>.
- Kamenetsky, V.S., Everard, J.L., Crawford, A.J., Varne, R., Eggins, S.M., and Lanyon, R., 2000, Enriched end-member of primitive MORB melts: Petrology and geochemistry of glasses from Macquarie Island (SW Pacific): *Journal of Petrology*, v. 41, p. 411 - 430.
- Kamenetsky, V.S., and Maas, R., 2002, Mantle - melt evolution (dynamic source) in the origin of a single MORB suite: A perspective from magnesian glasses of Macquarie Island: *Journal of Petrology*, v. 43, p. 1909 - 1922.

- Keith, M., Haase, K.M., Klemm, R., Schwarz-Schampera, U., and Franke, H., 2017, Systematic variations in magmatic sulphide chemistry from mid-ocean ridges, back-arc basins and island arcs: *Chemical Geology*, v. 451, p. 67 - 77, <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2016.12.028>.
- Kim, J., Son, S.-K., Kim, D., Pak, S.-J., Yu, O. H., Walker, S. L., Oh, J., Choi, S. K., Ra, K., Ko, Y., Kim, K.-H., Lee, J.-H., and Son, J. (2020). Discovery of active hydrothermal vent fields along the Central Indian Ridge, 8 - 12°S. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 21, e2020GC009058.
- Klein, E.M., Langmuir, C.H., 1987. Global correlations of ocean ridge basalt chemistry with axial depth and crustal thickness. *J Geophys Res Solid Earth* 92, 8089 - 8115. <https://doi.org/10.1029/JB092iB08p08089>
- Kogiso, T., Suzuki, K., Suzuki, T., Shinotsuka, K., Uesugi, K., Takeuchi, A., and Suzuki, Y., 2008, Detecting micrometer-scale platinum-group minerals in mantle peridotite with microbeam synchrotron radiation X-ray fluorescence analysis: *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, v. 9, <https://doi.org/10.1029/2007GC001888>.
- Kurz, M.D., Curtice, J., Fornari, D., Geist, D., Moreira, M., 2009. Primitive neon from the center of the Galápagos hotspot. *Earth Planet Sci Lett* 286, 23 - 34. <https://doi.org/10.1016/J.EPSL.2009.06.008>
- Kurz, M.D., Jenkins, W.J., Hart, S.R., 1982. Helium isotopic systematics of oceanic islands and mantle heterogeneity. *Nature* 297, 43 - 47. <https://doi.org/10.1038/297043a0>
- Kurz, M.D., Moreira, M., Curtice, J., Lott, D.E., Mahoney, J.J., Sinton, J.M., 2005. Correlated helium, neon, and melt production on the super-fast spreading East Pacific Rise near 17°S. *Earth Planet Sci Lett* 232, 125 - 142. <https://doi.org/10.1016/J.EPSL.2005.01.005>
- Labidi, J., 2022. The origin of nitrogen in Earth's mantle: Constraints from basalts 15N/14N and N2/3He ratios. *Chem Geol* 597. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2022.120780>
- Lanyon, R., Varne, R., Crawford, A.J., 1993. Tasmanian Tertiary basalts, the Balleny plume, and opening of the Tasman Sea (southwest Pacific Ocean). *Geology* 21, 555 - 558. [https://doi.org/10.1130/0091-7613\(1993\)021<0555:Ttbtbp>2.3.Co;2](https://doi.org/10.1130/0091-7613(1993)021<0555:Ttbtbp>2.3.Co;2)
- Lee, J.-Y., Marti, K., Severinghaus, J.P., Kawamura, K., Yoo, H.-S., Lee, J.B., Kim, J.S., 2006. A redetermination of the isotopic abundances of atmospheric Ar. *Geochim Cosmochim Acta* 70, 4507 - 4512. <https://doi.org/10.1016/j.gca.2006.06.1563>
- Li, K., Hudak, M.R., Broadley, M.W., Anderson, M.K., Bekaert, D. V., Krantz, J.A., Kumar, N., Silva, M.P., Hahn, D., Curtice, J.M., Kurz, M.D., Barry, P.H., 2025. Hybrid mantle plumes with recycled and primordial nitrogen: Insights from plume-influenced basaltic glasses from Reykjanes Ridge and Rochambeau Bank. *Earth Planet Sci Lett* 667, 119538. <https://doi.org/10.1016/J.EPSL.2025.119538>
- Li, K., Yu, A.J., Barry, P.H., Li, L., 2023. Oceanic serpentinites: A potentially critical reservoir for deep nitrogen recycling. *Geology* 51, 1096 - 1100. <https://doi.org/10.1130/g51464.1>
- Li, L., Zheng, Y.-F., Cartigny, P., Li, J., 2014. Anomalous nitrogen isotopes in ultrahigh-pressure metamorphic rocks from the Sulu orogenic belt: Effect of abiotic nitrogen reduction during fluid - rock interaction. *Earth Planet Sci Lett* 403, 67 - 78. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2014.06.029>
- Lissner, M., König, S., Luguet, A., Le Roux, P.J., Schuth, S., Heuser, A., and Le Roex, A.P., 2014, Selenium and tellurium systematics in MORBs from the southern Mid-Atlantic Ridge (47 - 50°S): *Geochimica et Cosmochimica Acta*, v. 144, p. 379 - 402, <https://doi.org/10.1016/j.gca.2014.08.023>.
- Lorand, J.-P., Alard, O., and Luguet, A., 2010, Platinum-group element micronuggets and

- refertilization process in Lherz orogenic peridotite (northeastern Pyrenees, France): *Earth and Planetary Science Letters*, v. 289, p. 298 - 310.
- Marty, B., 1995. Nitrogen content of the mantle inferred from N₂ - Ar correlation in oceanic basalts. *Nature* 377, 326 - 329. <https://doi.org/10.1038/377326a0>
- Marty, B., Almayrac, M., Barry, P.H., Bekaert, D. V., Broadley, M.W., Byrne, D.J., Ballentine, C.J., Caracausi, A., 2020. An evaluation of the C/N ratio of the mantle from natural CO₂-rich gas analysis: Geochemical and cosmochemical implications. *Earth Planet Sci Lett* 551. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2020.116574>
- Marty, B., Dauphas, N., 2003. The nitrogen record of crust - mantle interaction and mantle convection from Archean to Present. *Earth Planet Sci Lett* 206, 397 - 410. [https://doi.org/10.1016/s0012-821x\(02\)01108-1](https://doi.org/10.1016/s0012-821x(02)01108-1)
- Marty, B., Tolstikhin, I.N., 1998. CO₂ fluxes from mid-ocean ridges, arcs and plumes. *Chem Geol* 145, 233 - 248. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0009-2541\(97\)00145-9](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0009-2541(97)00145-9)
- Marty, B., Zimmermann, L., 1999. Volatiles (He, C, N, Ar) in mid-ocean ridge basalts: Assessment of shallow-level fractionation and characterization of source composition. *Geochim Cosmochim Acta* 63, 3619 - 3633.
- Mathez, E.A., 1976, Sulfur solubility and magmatic sulfides in submarine basalt glass: *Journal of Geophysical Research*, v. 81, p. 4269 - 4276.
- Mazza, S.E., Gazel, E., Bizimis, M., Moucha, R., Béguelin, P., Johnson, E.A., McAleer, R.J., Sobolev, A. V., 2019. Sampling the volatile-rich transition zone beneath Bermuda. *Nature* 569, 398 - 403. <https://doi.org/10.1038/s41586-019-1183-6>
- McCoy-West, A.J., Bennett, V.C., Amelin, Y., 2016. Rapid Cenozoic ingrowth of isotopic signatures simulating “HIMU” in ancient lithospheric mantle: Distinguishing source from process. *Geochim Cosmochim Acta* 187, 79 - 101. <https://doi.org/10.1016/j.gca.2016.05.013>
- McGee, L.E., Smith, I.E.M., Millet, M. A., Handley, H.K., Lindsay, J.M., 2013. Asthenospheric Control of Melting Processes in a Monogenetic Basaltic System: a Case Study of the Auckland Volcanic Field, New Zealand. *Journal of Petrology* 54, 2125 - 2153. <https://doi.org/10.1093/petrology/egt043>
- Merle, R.E., Jiang, Q., Jourdan, F., Olierook, H., 2022. The age and origin of the Balleny and Scott volcanic provinces, Ross Sea, Antarctica. *Geochemistry* 82. <https://doi.org/10.1016/j.chemer.2022.125904>
- Mitchell, E.C., Fischer, T.P., Hilton, D.R., Hauri, E.H., Shaw, A.M., de Moor, J.M., Sharp, Z.D., Kazahaya, K., 2010. Nitrogen sources and recycling at subduction zones: Insights from the Izu Bonin Mariana arc. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems* 11. <https://doi.org/10.1029/2009gc002783>
- Moreira, M., Kunz, J., Allègre, C., 1998. Rare gas systematics in popping rock: Isotopic and elemental compositions in the upper mantle. *Science* (1979) 279, 1178 - 1181. <https://doi.org/10.1126/SCIENCE.279.5354.1178;WEBSITE:WEBSITE:AAAS-SITE;JOURNAL:JOURNAL:SCIENCE;WGROU:STRING:PUBLICATION>
- Mortimer, N., van den Bogaard, P., Hoernle, K., Timm, C., Gans, P.B., Werner, R., Riefstahl, F., 2019. Late Cretaceous oceanic plate reorganization and the breakup of Zealandia and Gondwana. *Gondwana Research* 65, 31 - 42. <https://doi.org/10.1016/j.gr.2018.07.010>
- Mungall, J.E., and Brenan, J.M., 2014, Partitioning of platinum-group elements and Au between sulfide liquid and basalt and the origins of mantle - crust fractionation of the chalcophile elements: *Geochimica et Cosmochimica Acta*, v. 125, p. 265 - 289,

<https://doi.org/10.1016/j.gca.2013.10.002>.

- Nakamura, K., Toki, T., Mochizuki, N., Asada, M., Ishibashi, J.-i., Nogi, Y., Yoshikawa, S., Miyazaki, J.-i., and Okino, K. (2013). Discovery of a new hydrothermal vent based on an underwater, high-resolution geophysical survey. *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*, 74, 1 - 10.
- Nardini, I., Armienti, P., Rocchi, S., Dallai, L., Harrison, D., 2009. Sr - Nd - Pb - He - O Isotope and Geochemical Constraints on the Genesis of Cenozoic Magmas from the West Antarctic Rift. *Journal of Petrology* 50, 1359 - 1375. <https://doi.org/10.1093/petrology/egn082>
- Okada, S., Torimoto, J., Kuribayashi, T., Nagase, T., Owada, A., Ishibashi, J.-i., Makabe, A., Takaya, Y., and Nozaki, T. (2025). Microscopic evidence for nanoparticle-mediated growth of native gold in sulfide deposits at the Higashi - Aogashima Knoll Caldera hydrothermal field. *PLOS ONE*, 20, e0317220.
- Panter, K.S., Castillo, P., Krans, S., Deering, C., McIntosh, W., Valley, J.W., Kitajima, K., Kyle, P., Hart, S., Blusztajn, J., 2018. Melt Origin across a Rifted Continental Margin: a Case for Subduction-related Metasomatic Agents in the Lithospheric Source of Alkaline Basalt, NW Ross Sea, Antarctica. *Journal of Petrology* 59, 517 - 558. <https://doi.org/10.1093/petrology/egy036>
- Parai, R., Mukhopadhyay, S., 2021. Heavy noble gas signatures of the North Atlantic Popping Rock 2IID43: Implications for mantle noble gas heterogeneity. *Geochim Cosmochim Acta* 294, 89 - 105. <https://doi.org/10.1016/J.GCA.2020.11.011>
- Parai, R., Mukhopadhyay, S., Lassiter, J.C., 2009. New constraints on the HIMU mantle from neon and helium isotopic compositions of basalts from the Cook - Austral Islands. *Earth Planet Sci Lett* 277, 253 - 261. <https://doi.org/10.1016/J.EPSL.2008.10.014>
- Park, J.-W., Campbell, I.H., and Eggins, S.M., 2012, Enrichment of Rh, Ru, Ir and Os in Cr spinels from oxidized magmas: Evidence from the Ambae volcano, Vanuatu [unpublished or incomplete citation, journal not listed].
- Park, J.-W., Campbell, I. H., Kim, J., and Moon, J.-W. (2015). The role of late sulfide saturation in the formation of a Cu- and Au-rich magma: Insights from the platinum group element geochemistry of Niutahi - Motutahi lavas, Tonga rear arc. *Journal of Petrology*, 56, 59 - 81.
- Park, S.-H., Langmuir, C.H., Sims, K.W.W., Blichert-Toft, J., Kim, S.-S., Scott, S.R., Lin, J., Choi, H., Yang, Y.-S., Michael, P.J., 2019. An isotopically distinct Zealandia - Antarctic mantle domain in the Southern Ocean. *Nat Geosci* 12, 206 - 214. <https://doi.org/10.1038/s41561-018-0292-4>
- Perfit, M.R., Fornari, D.J., Ridley, W.I., Kirk, P.D., Casey, J.F., Kastens, K.A., Reynolds, J.R., Edwards, M.H., Desonie, D., and Shuster, R., 1996, Recent volcanism in the Siqueiros Transform Fault: Picritic basalts and implications for MORB magma genesis: *Earth and Planetary Science Letters*, v. 141, p. 91 - 108.
- Perfit, M.R., Fornari, D.J., Smith, M.C., Bender, J.F., Langmuir, C.H., and Haymon, R.M., 1994, Small-scale spatial and temporal variations in mid-ocean ridge crest magmatic processes: *Geology*, v. 22, p. 375 - 379, [https://doi.org/10.1130/0091-7613\(1994\)022<0375:SSSATV>2.3.CO;2](https://doi.org/10.1130/0091-7613(1994)022<0375:SSSATV>2.3.CO;2).
- Phillips, E.H., Sims, K.W.W., Blichert-Toft, J., Aster, R.C., Gaetani, G.A., Kyle, P.R., Wallace, P.J., Rasmussen, D.J., 2018. The nature and evolution of mantle upwelling at Ross Island, Antarctica, with implications for the source of HIMU lavas. *Earth Planet Sci Lett* 498, 38 - 53. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2018.05.049>
- Reekie, C.D.J., Jenner, F.E., Smythe, D.J., Hauri, E.H., Bullock, E.S., and Williams, H.M., 2019,

- Sulfide resorption during crustal ascent and degassing of oceanic plateau basalts: *Nature Communications*, v. 10, <https://doi.org/10.1038/s41467-018-08001-3>.
- Rehkämper, M., Halliday, A.N., Fitton, J.G., Lee, D.-C., Wieneke, M., and Arndt, N.T., 1999, Ir, Ru, Pt, and Pd in basalts and komatiites: New constraints for the geochemical behavior of the platinum-group elements in the mantle: *Geochimica et Cosmochimica Acta*, v. 63, p. 3915 - 3934.
- Riefstahl, F., Gohl, K., Davy, B., Hoernle, K., Mortimer, N., Timm, C., Werner, R., Hochmuth, K., 2020. Cretaceous intracontinental rifting at the southern Chatham Rise margin and initialisation of seafloor spreading between Zealandia and Antarctica. *Tectonophysics* 776, 228298. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2019.228298>
- Rizzo, A.L., Pelorosso, B., Coltorti, M., Ntaflou, T., Bonadiman, C., Matusiak-Malek, M., Italiano, F., Bergonzoni, G., 2018. Geochemistry of noble gases and CO₂ in fluid inclusions from lithospheric mantle beneath Wilcza Góra (Lower Silesia, Southwest Poland). *Front Earth Sci (Lausanne)* 6, 215.
- Rowe, M.C., Graham, D.W., Smid, E., McGee, L., 2020. Unusually homogeneous helium isotope composition of the Auckland Volcanic Field and its implications for the underlying mantle. *Chem Geol* 545. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2020.119639>
- Sano, Y., Takahata, N., Nishio, Y., Marty, B., 1998. Nitrogen recycling in subduction zones. *Geophys Res Lett* 25, 2289 - 2292.
- Schlöglöva, K., Wälle, M., and Heinrich, C. A. (2017). LA-ICP-MS analysis of fluid inclusions: Contamination effects challenging micro-analysis of elements close to their detection limit. *Journal of Analytical Atomic Spectrometry*, 32, 1052 - 1063.
- Steele-MacInnis, M., Lecumberri-Sanchez, P., and Bodnar, R. J. (2012). HokieFlinx_H₂O - NaCl: A Microsoft Excel spreadsheet for interpreting microthermometric data from fluid inclusions based on the PVTX properties of H₂O - NaCl. *Computers & Geosciences*, 49, 334 - 337.
- Stracke, A., Bizimis, M., Salters, V.J.M., 2003. Recycling oceanic crust: Quantitative constraints. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems* 4. <https://doi.org/10.1029/2001gc000223>
- Stroncik, N.A., Niedermann, S., Haase, K.M., 2007. Neon and helium isotopes as tracers of mantle reservoirs and mantle dynamics. *Earth Planet Sci Lett* 258, 334 - 344. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2007.03.046>
- Syverson, D. D., Awolayo, A. N., and Tutolo, B. M. (2023). Seafloor spreading and the delivery of sulfur and metals to Earth's oceans. *Geology*, 51, 1168 - 1172.
- Takahata, N., Nishio, Y., Yoshida, N., Sano, Y., 1998. Precise Isotopic Measurements of Nitrogen at the Sub-Nanomole Level. *Analytical Sciences* 14, 485 - 491. <https://doi.org/10.2116/analsci.14.485>
- Tatsumi, Y., Oguri, K., and Shimoda, G., 1999, The behaviour of platinum-group elements during magmatic differentiation in Hawaiian tholeiites: *Geochemical Journal*, v. 33, p. 237 - 247.
- Timm, C., Hoernle, K., Werner, R., Hauff, F., den Bogaard, P. van, White, J., Mortimer, N., Garbe-Schönberg, D., 2010. Temporal and geochemical evolution of the Cenozoic intraplate volcanism of Zealandia. *Earth Sci Rev* 98, 38 - 64. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2009.10.002>
- Tivey, M. K. (2007). Generation of seafloor hydrothermal vent fluids and associated mineral deposits. *Oceanography*, 20, 50 - 65.
- Wang, Z., and Becker, H., 2015, Abundances of Ag and Cu in mantle peridotites and the implications for the behavior of chalcophile elements in the mantle: *Geochimica et Cosmochimica Acta*, v. 160, p. 209 - 226, <https://doi.org/10.1016/j.gca.2015.04.006>.
- Wang, Z., Cheng, H., Zong, K., Geng, X., Liu, Y., Yang, J., Wu, F., Becker, H., Foley, S., and Wang,

- C.Y., 2019, Metasomatized lithospheric mantle for Mesozoic giant gold deposits in the North China craton: *Geology*, v. 48, p. 169 - 173, <https://doi.org/10.1130/G46662.1>.
- Williams, C.D., Mukhopadhyay, S., Rudolph, M.L., Romanowicz, B., 2019. Primitive Helium Is Sourced From Seismically Slow Regions in the Lowermost Mantle. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems* 20, 4130 - 4145. <https://doi.org/10.1029/2019gc008437>
- Yang, S., Humayun, M., and Salters, V.J.M., 2018, Elemental systematics in MORB glasses from the Mid-Atlantic Ridge: *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, v. 19, p. 4236 - 4259, <https://doi.org/10.1029/2018GC007593>.
- Yang, A.Y., Zhou, M.-F., Zhao, T.-P., Deng, X.-G., Qi, L., and Xu, J.-F., 2014, Chalcophile elemental compositions of MORBs from the ultraslow-spreading Southwest Indian Ridge and controls of lithospheric structure on S-saturated differentiation: *Chemical Geology*, v. 382, p. 1 - 13, <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2014.05.019>.
- Yi, S.-B., Lee, M.J., Park, S.-H., Nagao, K., Han, S., Yang, Y.S., Choi, H., Baek, J., Sumino, H., 2020. Alkaline to tholeiitic magmatism near a mid-ocean ridge: petrogenesis of the KR1 Seamount Trail adjacent to the Australian-Antarctic Ridge. *Int Geol Rev* 63, 1215 - 1235. <https://doi.org/10.1080/00206814.2020.1756002>
- Zhang, X.J., Parai, R., Lassiter, J.C., 2024. Primordial and recycled noble gases in the Cook-Austral HIMU mantle: Insights into the onset of volatile subduction. *Earth Planet Sci Lett* 629, 118591. <https://doi.org/10.1016/J.EPSL.2024.118591>



본 문

(작 성 요 령)

1. 본문의 순서는 장, 절, 1, 가, (1), (가), ①, ㉠, 등으로 하고,
 - 장은 17 포인트 중고딕체
 - 절은 15 포인트 명조체
 - 본문은 11 포인트 신명조체로 한다.단, 본문의 내용중 중요부분은 중고딕체로 사용할 수 있다.
2. 장은 원칙적으로 페이지를 바꾸어 시작한다.
3. 페이지 번호는 하단 중앙 끝에 11 포인트로 한다.
4. 각주는 해당 페이지 하단에 8포인트 활자로 표기하며, 본문과 구분토록 한다.
5. 페이지수는 편집순서 2의 제출문부터 시작한다.
단, 삽입물이 있을 때는 그 삽입물의 크기에 불문하고 1면을 한 페이지로 하여 일련번호를 붙인다.
6. 한글, 한문, 영문을 혼용할 수 있다.
7. 뒷면지에 주의문을 넣는다.
- 8.참고문헌(reference) 인용의 경우 본문 중에 사용처를 반드시 표시한다.