

지구내부물질, 기반암, 화산을 통한
남극종단산맥의 형성과 진화 연구

Formation and evolution of Transantarctic Mountains
through the studies for extraterrestrial/terrestrial rocks and
volcanoes



2019. 12.

한국해양과학기술원
부설 극지연구소

제 출 문

극지연구소장 귀하

본 보고서를 “지구내부물질, 기반암, 화산을 통한 남극중단산맥의 형성과 진화 연구” 과제의 최종보고서로 제출합니다.

2019. 12.

연구책임자 : 이 미 정

참여연구원 : 박 창 근, 김 대 영, 박 태 운,
최 문 영, 이 춘 기, 유 인 성,
이 종 익, 진 영 근, 홍 종 국,
박 용 철, 우 주 선, 이 주 한,
백 종 민, 박 상 범, 강 필 모,
한 승 회, 김 지 훈, 오 재 룡,
김 진 석, 이 민 규, 안 인 혜,
정 진 훈, 주 현 태, 최 지 수,
김 화 영, 김 관 수, 김 낙 규,
박 선 영, 이 상 봉, 이 승 호,
김 태 환, 서 나 리, 박 미 은,
이 미 리 내

보고서 초록

과제관리번호	PE19230	해당단계 연구기간	2019. 1. 1. ~ 2019. 12. 31.	단계 구분	2 / 3
연구사업명	중 사업명	기관 목적사업			
	세부사업명				
연구과제명	중 과제명				
	세부(단위)과제명	지구내부물질, 기반암, 화산을 통한 남극중단산맥의 형성과 진화 연구			
연구책임자	이미정	해당단계 참여연구원수	총 : 56 명 내부 : 15 명 외부 : 41 명	해당단계 연구비	정부 : 1,006,000 천원 기업 : - 천원 계 : 1,006,000 천원
연구기관명 및 소속부서명	극지연구소 극지지구시스템연구부		참여기업명	-	
국제공동연구	상대국명 : 일본, 이태리, 미국, 뉴질랜드		상대국연구기관명 : 나고야대, 시에나대, UC Riverside, LLNL, 북해도대, 동북대, JAXA, NMT, GNS		
위탁연구	연구기관명 : 경상대, 충북대, 서울대, 연세대 연구책임자 : 손영관, 김윤섭, 박정우, 이용재				
요약				보고서 면수	100
연구개발 결과 <ul style="list-style-type: none"> ◦ 남극중단산맥 지질·운석 기초자료 획득 <ul style="list-style-type: none"> - 터레인 경계부 고압변성암의 야외산상, 광물화학, 변성상, 변형온도, 연령 자료 획득 - 중생대 화산암 목재화석 상세 동정 및 온난-습윤 고기후 추정 - 국내 유일의 산소동위원소/불활성기체 동위원소 분석시스템 구축 및 세계 최고 수준 분석 개발 ◦ 활화산 모니터링 관측망 설계 <ul style="list-style-type: none"> - 멜버른과 리트만 활화산의 화산가스 성분 모니터링 계획 수립 및 분화 예측기술 개발 준비 - 이들 화산의 최근 분화산물에 대한 테프라 층서 및 지구화학 특성 연구, 홀로세 이후 수차례의 폭발적 화산분화 입증 ◦ 남극 지질·운석 데이터베이스 구축 <ul style="list-style-type: none"> - 암석 시료의 체계적 분류로 공동연구 및 추후 활용기반 마련 - 연구 가치가 높은 운석 10개에 대해 고해상도 X-ray 원소 맵 제작 및 남극운석 큐레이션 홈페이지에 공개, 국내외 공동연구 모색 					
색인어 (각 5개 이상)	한글	남극중단산맥, 남극대륙 형성과 진화, 태양계 진화, 빅토리아랜드 신생대화산, 활화산 모니터링, 남극지질·운석정보			
	영어	Transantarctic Mountains, Formation and evolution of Antarctica, Solar system evolution, Cenozoic volcanoes in Victoria Land, Monitoring of active volcanoes, Antarctic geology and meteorite information			

요 약 문

I. 제 목

지구 내부물질, 기반암, 화산을 통한 남극중단산맥의 형성과 진화 연구

II. 연구개발의 목적 및 필요성

- 남극에 대한 발언권, 영유권, 미래 자원개발 등 경제·산업적 측면에서 지질정보 확보와 시스템 구축이라는 과학 활동이 필수적
- 남극대륙 내 과거 지질 활동 산물인 암석의 형성과정을 밝혀 기초 지질자료를 획득
- 남극 운석과 혜성 기원 우주먼지 등을 통한 지구의 형성과 분화과정 이해
- 신생대 활화산의 분화과정과 빙권-수권과의 상호작용을 밝힘
- 지질·운석 정보 데이터베이스화 및 활용기반 구축

III. 연구개발의 내용 및 범위

1. 남극 지질·운석 연구를 통한 남극대륙 형성·분리 진화사 및 행성 형성과정 규명

- 로디니아 초대륙 분열, 고태평양 섭입대 및 대륙지각 진화모델 수립
- 고생대 분지 진화와 중생대 화산활동 연구를 통한 지체구조 및 고환경 변화 연구
- 시원 운석과 우주먼지 연구로 태양계 초기 진화 규명

2. 빅토리아랜드 활화산 모니터링과 분출사 규명

- 멜버른, 리트만 화산활동도 관측을 위한 화산 가스성분, 지진파, GPS 자료 획득
- 신생대 화산분출 메커니즘과 분화역사 복원을 위한 지구화학/화산 층서 연구

3. 남극 지질·운석 정보 활용기반 구축

- 남극 암석 시료 큐레이션 데이터베이스 구축
- 남극 운석 X-ray 데이터 확보 및 큐레이션 홈페이지에 공개
- 원격지질정보(3D 지형모델) 아카이브 구축

IV. 연구개발결과

1. 남극중단산맥 지질·운석 기초자료 획득

- 터레인 경계부 고압변성암의 야외 산상, 광물화학, 변성상, 변형온도, 연령 자료 획득
- 고생대 화성암류의 지화학 분석, 용융물 조성 계산 및 지구조 환경 해석
- 중생대 화산암 목재화석 상세 동정 및 온난-습윤 고기후 추정
- 미국 연구소(PPR)에 생물초 암석 시료 대여 신청, 해당 기관 전문가들과 협의
- 세계 최초의 pallasite 철-니켈 합금물질에 대한 충격 실험 및 초고압 상변이 관찰
- 국내 유일의 산소 동위원소/불활성기체 동위원소 분석시스템 구축 및 세계최고수준 분석 개발

2. 활화산 모니터링 관측망 설계

- 멜버른과 리트만 활화산의 화산가스 성분 모니터링 계획 수립 및 분화 예측기술 개발 준비
- 이들 화산의 최근 분화산물에 대한 테프라 층서 및 지구화학 특성 연구, 홀로세 이후 수차례의 폭발적 화산분화 입증
- 멜버른 화산 주변 빙저화산(셴드 누나탁)의 화산물질의 운반/퇴적 작용 특성 파악

3. 남극 지질·운석 데이터베이스 구축

- 암석 시료의 체계적 분류로 공동연구 및 추후 활용기반 마련
- 연구 가치가 높은 운석 10개에 대해 고해상도 X-ray 원소 맵 제작 및 남극운석 큐레이션 홈페이지에 공개, 국내외 공동연구 모색

V. 연구개발결과의 활용계획

- 남극 내륙 거점 확보로 다학제 국제 공동연구 주도
- 남극에서 획득한 우주물질을 이용하여 향후 행성 탐사에 활용
- 장보고 기지 주변 화산분화 예측 및 방재 매뉴얼의 기초자료로 활용
- 향후 남극대륙 내 기득권 확보를 위한 종합 지질정보 획득 및 국가 자원전략 수립 기초자료 제공

※본 과제는 당초 2019.01~2023.12까지 5개년 계획으로 계획되었으나 극지연구소 제5기 주요사업 재편과정에서 1차년도 과제 수행(2019.01~2019.12) 후 종료하는 것으로 결정됨에 따라 1차년도 연구수행결과에 대한 보고서를 작성함. 최초 연구계획서에 명시되었던 연구개발 목표와 연구개발범위는 수정하지 않았음.

S U M M A R Y

I. Title

Formation and evolution of Transantarctic Mountains through the studies for extraterrestrial/terrestrial rocks and volcanoes

II. Purpose and necessity of R&D

- Essential scientific activities including acquisition of geologic information and platform building for the economic-industrial aspects of the right to voice, sovereignty, and future resource development
- Acquisition of basic geologic information on the petrogenesis of rocks; the product of past geologic activities in the Antarctic continent
- Understanding of Earth formation and differentiation process with Antarctic meteorite and cosmic dust
- Unraveling the interaction between the eruption of the Cenozoic active volcanoes and Cryo-hydrospheres
- Building a platform for Antarctic geology and meteorite information

III. Contents and Extent of R&D

1. Revealing of formation and evolution of the Antarctic continent and formation of planets through geological and meteoritical investigations in Antarctica
 - Establishment of evolution models on break up of Rodinia, paleo-Pacific subduction and continental crust evolution
 - Understanding of tectonic and paleoenvironmental change of the Antarctica through the Paleozoic basin evolution and Mesozoic volcanism
 - Evolution of early solar system and differentiation of asteroids and planets
2. Monitoring of active volcanoes in northern Victoria Land and investigation of their eruption history
 - Monitoring of volcanic activities of the Mts. Melbourne and Rittmann using volcanic gas chemistry, seismic signals and GPS data

- Study of geochemistry and stratigraphy of volcanoes for clarifying the eruption mechanisms of the Cenozoic volcanoes and reconstruction of eruption history
3. Building a platform for Antarctic geology and meteorite information
- Building database and curation system for Antarctic rock samples
 - X-ray elemental maps of Antarctic meteorites and releasing to web
 - Establishment of archive for remote geologic information (3-D geological outcrops)

IV. Results

1. Geologic and meteorite datasets of the Transantarctic Mountains
- Field relationships, mineral chemistry, metamorphic facies, deformation temperatures, and age data of high-pressure metamorphic rocks along the terrane boundary
 - Geochemistry, melt composition, and tectonic interpretation on the Paleozoic igneous rocks
 - Detailed characterization of the Mesozoic wood fossils and estimation of humid paleo-climate
 - Lending of reef samples to PPR and discussion for co-work
 - For the first time in the world, laser impact experiments on Fe-Ni alloys of pallasite meteorite and observation of phase transition at ultrahigh-pressure conditions
 - Establishment of top-level isotopic analysis lab for oxygen and noble gas
2. Design of monitoring system on active volcanoes
- Monitoring plan for gas chemistry of the Mts. Melbourne and Rittmann, and development of eruption prediction technique
 - Tephrostratigraphy and geochemistry of recent eruption products, and demonstration of post-Holocene multiple explosive eruption events
 - Transportation and sedimentation processes of volcanics from sub-glacial volcanoes around the Mt. Melbourne

3. Construction of the Antarctic geology-meteorite database

- Systematic classification of rock samples and plan for future study
- For the 10 meteorites of high scientific values, releasing of high-resolution X-ray elemental maps for future co-work

V. Application plans

- Leading multi-disciplinary international co-work based on the Antarctic inland hub
- Applications of Antarctic meteorites to future planet exploration
- Applications to predicting volcanic eruption and hazard prevention manual
- Integration of geological information and resource strategic management for future initiatives in Antarctica



C O N T E N T S

Presentation Letter	1
Report Abstract	3
Summary	5
Chapter 1 Introduction	16
1. Background and Necessity	16
2. Objective and Content	20
Chapter 2 Current R&D Status in Korea and Other Nations	21
1. Skills and Industrial Trends in Other Nations	21
Chapter 3 R&D Implementation Contents and Results	30
1. Revealing of formation of Transantarctic Mountains through geological and meteoritical investigations	30
2. Monitoring of active volcanoes and Investigation of their eruption history	59
3. Building a platform for Antarctic geology and meteorite information	67
Chapter 4 Degree of R&D Goal Achievement	88
Chapter 5 Application Plans of R&D Results	92
Chapter 6 References	94
Appendix Performance Results of KPDC Registration	98

목 차

제출문	1
보고서 초록	3
요약문	5
제 1 장 서론	16
제 1 절 배경 및 필요성	16
제 2 절 연구목표 및 내용	20
제 2 장 국내외 기술개발 현황	21
제 1 절 국외 기술, 산업 동향	21
제 3 장 연구개발수행 내용 및 결과	30
제 1 절 지질·운석탐사 및 연구를 통한 남극중단산맥 형성과정 규명	30
제 2 절 활화산 모니터링과 분출사 복원	59
제 3 절 남극 지질·운석 정보 활용기반 구축	67
제 4 장 연구개발목표 달성도	88
제 5 장 연구개발결과의 활용계획	92
제 6 장 참고문헌	94
부록 KPDC 등록 이행실적	98

그림 목차

그림 1 (왼쪽) 남극조약서명국 (오른쪽) 남극영유권을 주장하는 7개 국가와 그 범위	16
그림 2 남극중단산맥의 지형적 특성과 지질학적 특징	17
그림 3 남극에 기록된 지구나 남극대륙의 역사	18
그림 4 지체구조, 화산활동, 지구내부물질, 기후, 빙권과의 상호작용 보여주는 모식도	19
그림 5 남극중단산맥 주변에서의 연구 활동을 표시한 모식도	19
그림 6 남극대륙과 주변대륙의 주요 자원 분포	22
그림 7 (위쪽) 남극 대륙자원 관련 보고서를 종합한 광물자원 분포 및 석탄 분포 (아래쪽) 최근 발견된 금(빅토리아랜드)과 다이아몬드(동남극) 광상	23
그림 8 남극에 설치된 남극기지 위치와 빅토리아랜드에 지어질 제5기지 예정지	24
그림 9 (왼쪽) 중국 제5기지의 위치 (오른쪽) 2017-18 남극 하계에 진행된 중국의 남극기지 건설을 보도한 신화통신 사진	25
그림 10 남극에서의 중국 영향력 확대 및 중국의 남극 지하자원을 개발할지 모른다는 우려를 나타내는 언론 보도와 이에 대한 주요 남극 활동국들의 전략 보고서	25
그림 11 남극중단산맥에 대한 국내외 운석/지질 연구 현황을 정리한 표	26
그림 12 TAM Science 웹페이지	26
그림 13 남극반도와 로스해 주변에서 새롭게 발견된 91개의 빙저화산 위치	27
그림 14 장보고기주변 활화산과 신생대화산을 표시한 남극 빅토리아랜드의 위성사진	28
그림 15 (a) 랜터만 산맥 지질도와 시료 위치(빨간 별) (b) 고철질-석영장석질 편암-편마암류와 교호하여 산출하는 함망간규암 (c) 함망간규암 내 석류석(Grt)과 펜자이트(Ph)	31
그림 16 함망간규암 시료(151223-1F)의 편광현미경 사진(직교니콜)	31
그림 17 EBSD를 이용해 획득한 맵 데이터(law data, a), 상 맵(phase map, b), 석영광물의 오일러 맵(c)	32
그림 18 암석 내 석영의 결정 방향성(CPO) 측정 결과	32
그림 19 석영 c-축의 열림각도(opening angle)을 이용한 암석변형온도 추정	33
그림 20 디센트릿지와 주변 암체에서 확인되는 전기 고생대 변성-변형 작용 양상	33
그림 21 디센트릿지 압쇄 각섬암(SB176)의 변형구조	34
그림 22 시료가 채취된 지역의 항공사진을 바탕으로 한 맵핑 원본자료 (왼쪽) Heiser Ridge (오른쪽) Ramsey Cliff	42
그림 23 미생물초 퇴적구조가 남아있는 남극중단산맥 캠브리아기 석회암	43

그림 24 미생물초 퇴적구조 또는 생쇄설성 석회암에서 산출되는 생물초형성 동물화석들 (화살표)	44
그림 25 물 시료 분해장치	47
그림 26 물 시료 분해장치 모식도	47
그림 27 표준 광물 시료들의 산소동위원소 분석 결과	48
그림 28 유크라이트 운석 분석 결과	49
그림 29 유크라이트(TIL 07014, EET 14049, EET 14056)의 산소동위원소 조성	50
그림 30 남극 HED 운석의 네온 동위원소 비	51
그림 31 DEW 12007 내 부분적으로 비결정질화된 사장석 결정의 편광현미경 (a) 개방니콜 (b) 직교니콜 (c) 전자현미경 후방산란전자(BSE) 사진 (d) BSE 사진의 흰색 사각 형 영역을 확대한 사진	54
그림 32 DEW 12007 내 부분적으로 비결정질화된 사장석 결정의 (a) 편광현미경 직교니콜 (b) 전자현미경 후방산란전자 사진 (c) 빨간색 화살표를 따라 결정질 영역에서 비 결정질 영역의 방향으로 측정된 라만 스펙트럼	55
그림 33 DEW 12007내 부분적으로 비결정질화된 사장석 결정을 각각 편광현미경 직교니콜 (XPL), 전자현미경 후방산란전자(BSE), 음극선 발광(CL), 라만 맵핑(Raman)으로 비교한 사진	55
그림 34 DEW 12007 내 부분적으로 비결정질화된 사장석 결정을 (위) 전자현미경 후방산 란전자(BSE) 영상과 (아래) 전자현미경 음극선발광(CL) 영상으로 비교한 사진 ...	56
그림 35 DEW 12007 내 부분적으로 비결정질화된 사장석 결정에서 (a) Ca K α (b) Na K α 의 X-선을 측정하여 정량화한 질량 백분율(wt%) 값을 도시한 그림	57
그림 36 부분적으로 비결정질화된 사장석 결정에서 결정질 영역에서 비결정질 영역으로 이 동하며 측정한 조성의 프로파일	58
그림 37 화산 주변의 CO ₂ Flux 측정을 위한 장비와 CO ₂ 측정 장비 모식도	59
그림 38 화산가스 샘플링을 위한 가스 컨테이너와 장치들	60
그림 39 멜버른 정상부와 동쪽 사면에 산출되는 테프라층	61
그림 40 에드몬슨 포인트 일대에 산출되는 테프라 층(EPTep1, EPTep2, EPTep3, EPTep4, EPTep5)	62
그림 41 멜버른 정상부(MMSPUM)와 동쪽 사면, 에드몬슨 포인트 일대 테프라층들의 TAS 조성	63
그림 42 멜버른 정상부(MMSPUM)와 동쪽 사면, 에드몬슨 포인트 일대 테프라층들의 미량 원소 조성	64
그림 43 리트만 칼데라 전경과 리트만 부석시료의 샘플링 위치	65

그림 44 리트만 화산 부서들과 폭발적 분화에 따른 화산쇄설물 산출상태	65
그림 45 리트만화산의 부서시료들의 TAS 조성	66
그림 46 리트만화산의 부서시료들의 미량원소 조성	66
그림 47 Mesa Range의 3D 모델	67
그림 48 KOREAMET 홈페이지에 공개된 달운석 DEW 12007의 X-ray 원소 맵(예시) ...	69
그림 49 DEW 12007(달운석)의 X-ray 원소 맵 1	70
그림 50 DEW 12007(달운석)의 X-ray 원소 맵 2	71
그림 51 EET 13018 (LL3)의 X-ray 원소 맵 1	72
그림 52 EET 13018 (LL3)의 X-ray 원소 맵 2	73
그림 53 TIL 07009 (EL6)의 X-ray 원소 맵	74
그림 54 FRO 10102 (LL3)의 X-ray 원소 맵 1	75
그림 55 FRO 10102 (LL3)의 X-ray 원소 맵 2	76
그림 56 FRO 10097 (LL3)의 X-ray 원소 맵 1	77
그림 57 FRO 10097 (LL3)의 X-ray 원소 맵 2	78
그림 58 EET 14017 (LL3)의 X-ray 원소 맵 1	79
그림 59 EET 14017 (LL3)의 X-ray 원소 맵 2	80
그림 60 RKP 14005(CM2)의 X-ray 원소 맵	81
그림 61 RKP 14003(H3)의 X-ray 원소 맵 1	82
그림 62 RKP 14003(H3)의 X-ray 원소 맵 2	83
그림 63 EET 14074(아카폴코아이트)의 X-ray 원소 맵 1	84
그림 64 EET 14074(아카폴코아이트)의 X-ray 원소 맵 2	85
그림 65 EET 14013(CM2)의 X-ray 원소 맵 1	86
그림 66 EET 14013(CM2)의 X-ray 원소 맵 2	87

표 목차

표 1	엽리상 토날라이트(SB1713A)의 SHRIMP U-Pb 저어콘 연대분석 결과	36
표 2	거정질 각섬석 반려암(M1719)의 SHRIMP U-Pb 저어콘 연대분석 결과	37
표 3	거정질 각섬석 반려암(M1722)의 SHRIMP U-Pb 저어콘 연대분석 결과	38
표 4	남극 HED 운석의 우주선기원 및 방사성기원 불활성기체 동위원소의 분석 결과	51
표 5	남극 HED 운석의 우주선 노출연대 (T3, T21)와 가스보존연대 (T4, T40)	52



제 1 장 서론

1.1. 배경 및 필요성

1.1.1. 남극대륙 연구 일반적 측면

남극대륙은 남극조약 서명국들에 의해 기후변화대응, 미래자원 확보 등 당면한 지구적 문제 해결을 위한 연구가 활발히 이루어지고 있으며, 한편 남극 얼음 밑에 숨겨진 미지의 환경과 지질에 대한 순수한 지적 호기심을 기반으로 한 연구도 선진국 중심으로 수행 중이다. 지금 남극에서 가장 영향력이 있고 각종 이슈에 대해 리더십을 발휘하고 큰 목소리를 내는 국가는 이와 같은 과학 활동, 특히 국제 공동연구를 활발하게 수행하거나 이를 지원하는 대규모 지원 시스템을 구축한 나라들로써, 과학 활동만이 유일하게 남극에서의 발언권과 영향력을 확대하게 하는 수단임을 그들이 증명하고 있다. 과거 7개국(칠레, 아르헨티나, 영국, 노르웨이, 호주, 프랑스, 뉴질랜드)이 주장하던 남극대륙에 대한 영유권은 남극조약(1959)으로 유보된 상태이지만 이 국가들은 여전히 자신들의 영유권을 주장하는 지역에서 주로 활동하며 보이지 않게 존재감을 나타내고 있다(그림 1).

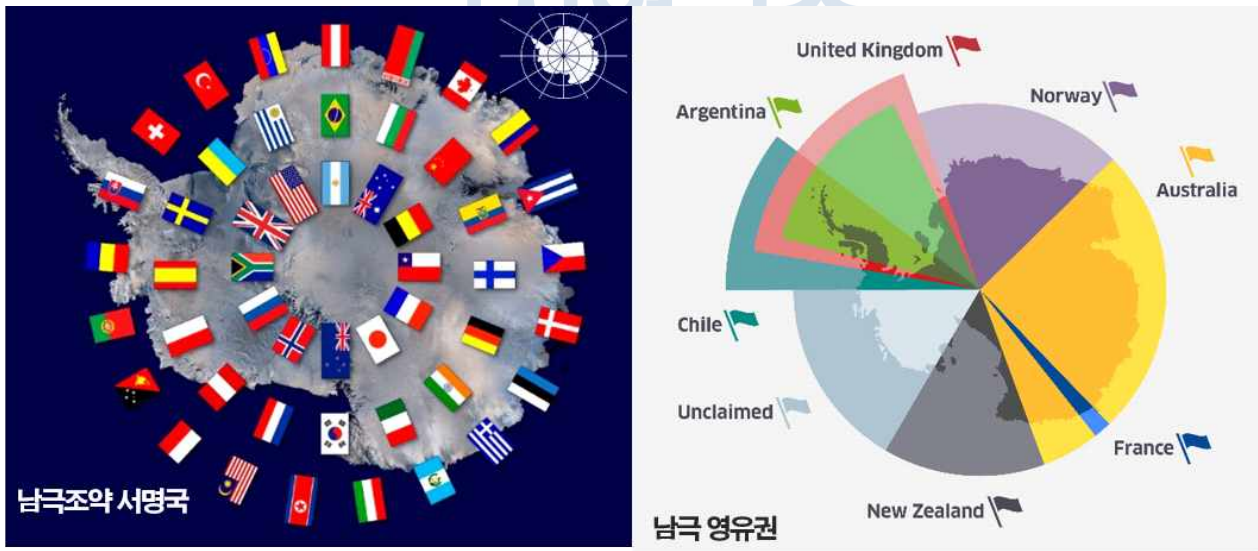


그림 1 (왼쪽) 남극조약서명국, 원으로 배열한 국기들 중 가장 안쪽의 12 국가가 최초 서명국가임.
(오른쪽) 남극영유권을 주장하는 7개 국가와 그 범위

남극대륙의 면적은 약 14,000,000 km²로 한반도 면적의 약 62배에 달하며, 눈과 얼음으로 덮이지 않은 암석 노출지 비율은 2%(약 280,000 km²)에 지나지 않는다. 이 중 70%가 남극종단산맥에 집중적으로 분포한다. 남극종단산맥은 남극대륙을 남북으로 가로지르며 발달한 총 길이 3,000km의 산맥으로 대서양 쪽 끝은 펜사콜라 산맥에 해당하며 태평양 쪽 끝은 빅토리아랜드이다. 로스해에 인접한 해안지형, 험준한 산악지형, 드라이밸리와 같은 사막지대, 화산지대 등 다양한 지형을 보여주며 과거와 현재의 지질 현상에 의해 다양한 암석(광상, 석탄 등 포함)이 노출되어있어 남극대륙 지질연구의 최적지이며, 노출 면적, 바다로부터의 접근성 등을 고려할 때 미래 남극 자원개발의 중심지의 역할을 하게 될 것이다(그림 2).



그림 2 남극종단산맥의 지형적 특성과 지질학적 특성

1.1.2. 경제·산업적 측면

미래 남극대륙에서 가장 큰 경제·산업적 이슈는 남극대륙에 존재하는 자원을 개발할지에 대한 논의이다. 자원을 개발한다면 천연의 남극 자연환경을 어떻게 보존하면서 지속 가능한 개발을 할 것인지가 가장 큰 논점이 될 것인데, 그 이후에 이루어질 어떤 자원을 누가 어떻게 개발할 것인지에 대비하는 가치 있는 지질정보 확보와 이를 활용할 수 있는 시스템구축이 필요하다. 이와 같이 남극대륙의 미래를 대비하기 위한 정보를 수집하는 데에는 남극의 과거와 현재 지질 현상에 대한 이해가 필수적으로 이루어져야 한다(그림 3).

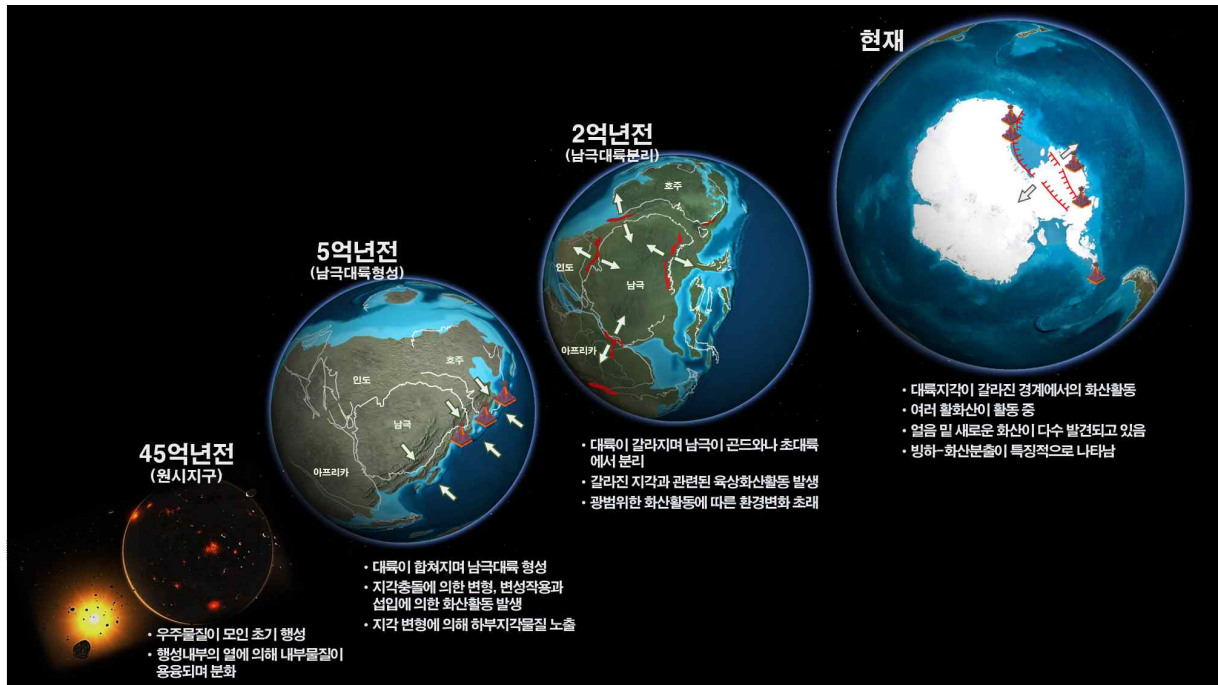


그림 3 남극에 기록된 지구나 남극대륙의 역사. 남극대륙 운석은 태양계와 지구의 초기 조건을 기록하고 있으며 남극중단산맥의 여러 암석은 남극대륙의 형성에 대한 기록을 가지고 있음. 그 중심에는 지질시대에 걸친 화산활동기록이 있고 현재 남극은 활발한 화산활동이 일어나는 지역 중 하나임



1.1.3. 과학적 측면

앞에서 살펴본 바와 같이 남극대륙 지질학 연구는 그 활동영역과 결과를 통해 미래 남극대륙에 대한 발언권을 확보케 하는 국가적으로 중요한 과제이다. 이전 과제에서 다양한 지질학 분야의 기초연구를 통해 남극대륙 지질연구의 가능성을 타진해 봤다면, 다음 단계에서는 다양한 연구주제들을 하나의 줄기로 엮는 것이 필요하다. 남극은 운석의 대부분(약 80%)과 혜성 기원의 우주먼지가 발견되는 우주물질의 보고로써 지구의 기원과 진화는 물론 미래 우주탐사의 기반 연구를 위한 필수 지역이다. 남극대륙이 겪어온 과거 지질 활동의 결과로 남극대륙에 기록된 지질구조와 암석의 형성과정을 밝히는 것은 남극대륙 땅덩어리를 이해하는 가장 밑거름이 된다. 현재 남극에서 일어나고 있는 가장 눈에 띄는 지질 현상은 화산활동이며, 눈, 얼음, 빙상 등 빙권과의 상호작용은 초미의 관심사인 남극 빙상의 거동과 해수면 변동에 영향을 끼치는 주요 요소 중 하나로서 중요하다(그림 4, 5).

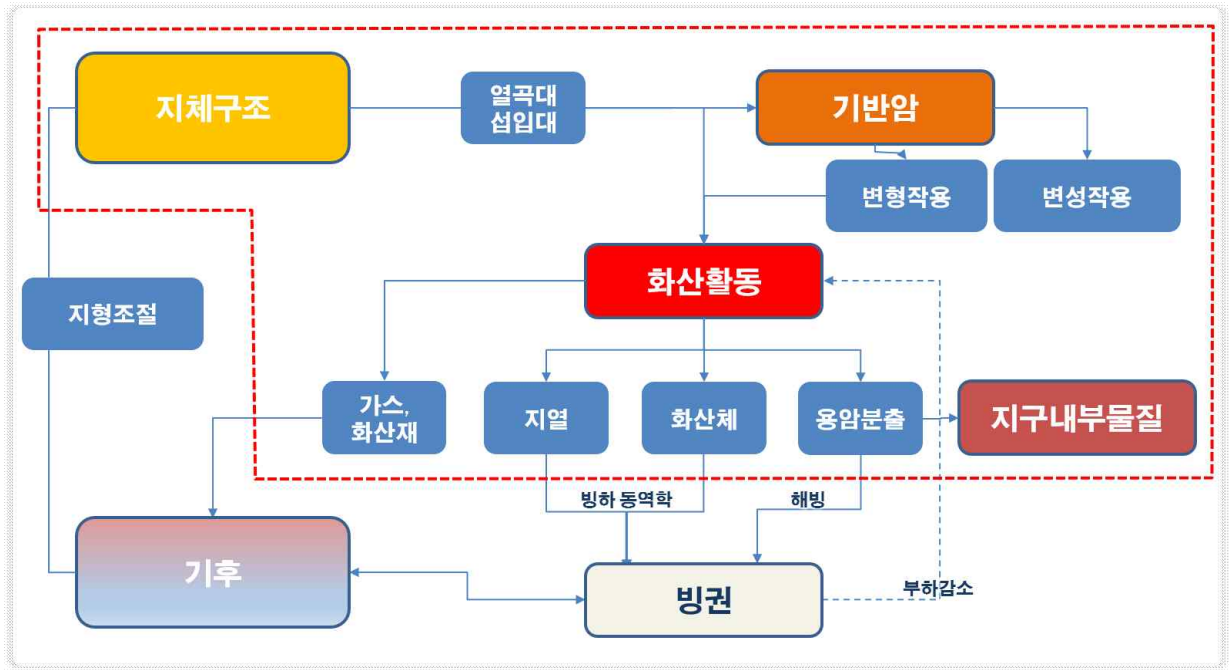


그림 4 지체구조, 화산활동, 지구내부물질, 기후, 빙권과의 상호작용 보여주는 모식도. 붉은 점선이 이 과제에서 수행하고자 하는 연구 범위임

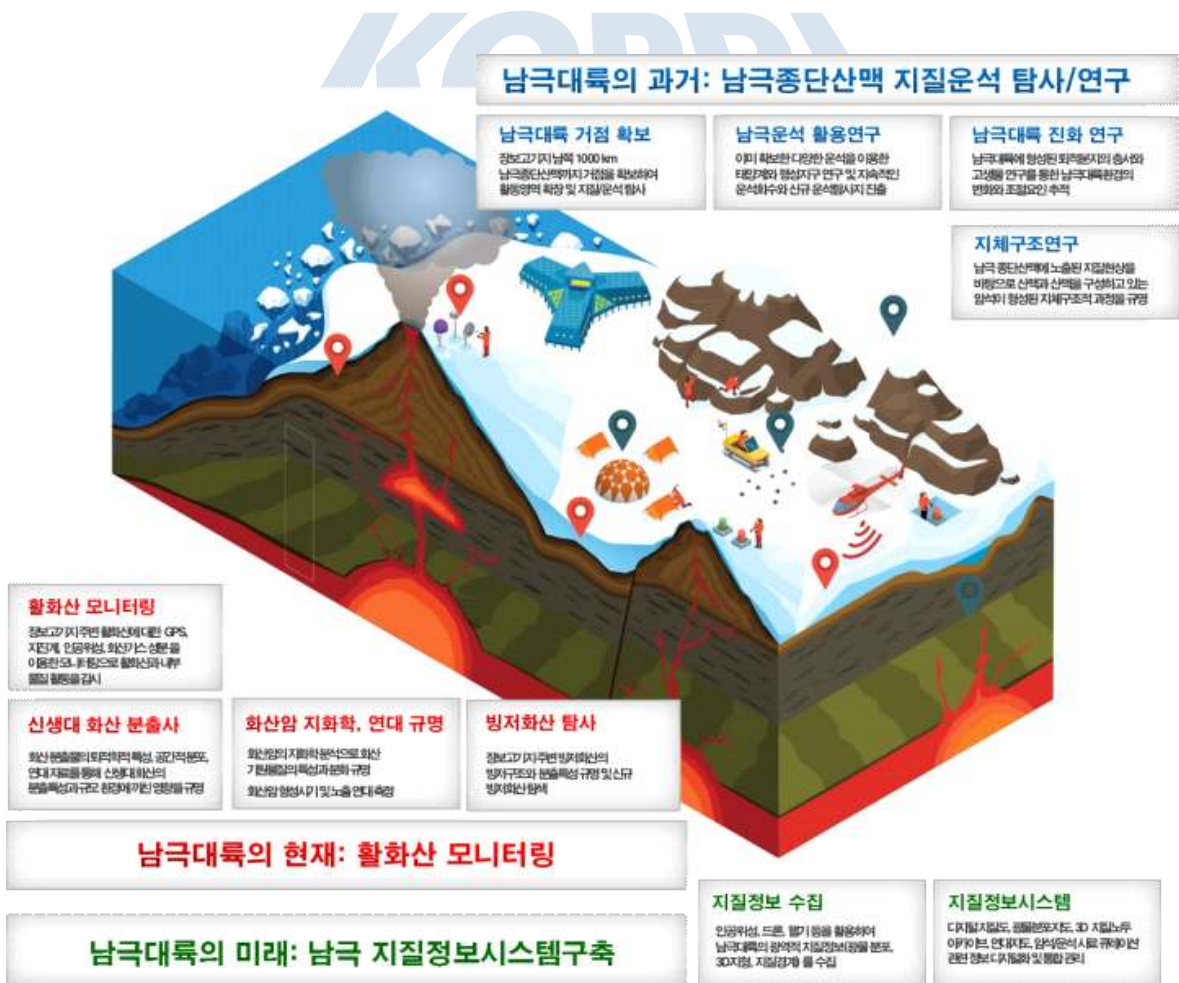


그림 5 남극중단산맥 주변에서의 연구 활동을 표시한 모식도

1.2. 연구목표 및 내용

본 연구의 최종목표는 남극대륙에서 산출되는 암석과 운석, 화산연구를 통해 남극중단산맥을 비롯한 남극 형성 역사를 규명하고, 그 결과를 종합적으로 활용할 수 있는 남극 지질·운석 정보 활용 기반을 구축하는 것이다.

2019년 연구목표와 연구내용을 요약하면 다음과 같다.

○ 남극중단산맥 지질·운석 기초자료 획득

- 윌슨-마리너 봉합대 (랜터만 레인지) 고압변성암 변성 조건 열역학적 계산
- 데쌍트 릿지 전단대의 암석학적 기초정보 수집
- 나이가라아이스폴 고철질-초고철질 암석의 전암 지구화학 특성연구
- 중부 남극중단산맥 생물초 시료 확보(미국, 이태리) 기초연구
- 중생대 화산암(Gair Mesa) 산출 화석 동정
- 미분화 운석 구성물질의 초고압/고온 실험
- HED 운석의 산소/불활성기체 동위원소 연구 1

○ 빅토리아랜드 활화산 모니터링 관측망 설계

- 리트만 활화산 활동도 모니터링을 위한 관측시스템 구축준비(지진계, GPS 설계, 설치장소 조사)
- 멜버른, 리트만 활화산의 분석/테프라 지구화학 특성연구
- 소형 단성화산 분화특성 연구를 위한 예비조사

○ 남극 지질·운석 데이터베이스 구축

- 남극 암석시료 큐레이션 데이터베이스 구축
- 중생대 화산암 3D모델 제작 (Gair Mesa)
- 남극운석 X-ray 데이터 확보 및 큐레이션 홈페이지에 공개

제 2 장 국내외 기술개발 현황

2.1. 국외 기술, 산업 동향

2.1.1. 남극대륙 지질 일반 및 지하자원 관련 연구 동향

남극 환경보호에 관한 의정서 이후 표면적으로 남극 지하자원에 대한 조사를 실시하는 국가는 없지만, 일반지질학 및 개발 가능성을 포함한 특이한 광상의 보고 및 그 성인에 대한 기초 지질학적인 연구는 수행되고 있다. 미래자원 확보에 관한 연구는 두 가지 방향으로 이루어지고 있는데, 먼저 비광물자원은 크릴, 메로 등이 한정적으로 개발되며 남극해양생물자원보존위원회(CCAMLR: Commission for the Conservation of Antarctic Marine Living Resources)에 의해 보존과 합리적 활용이 이루어지도록 관리되고 있으며, 회원국들의 남극 생태에 대한 과학적 조사가 관리의 기반이 되는 데이터로 사용되고 있다. 해양과 육상의 탄화수소와 광물을 포함하는 남극 지하자원의 개발은 남극 환경보호 의정서(1998-2048)로 전면 금지되어 있고, 기초과학연구(지질학)만 허용되고 있으며, 협정 이후 어떤 국가도 자원분포, 매장량 등을 파악하기 위한 연구를 노골적으로 수행하고 있지는 않고 있다. 남극 환경보호 의정서 이전에 남극대륙의 자원에 가장 큰 관심을 가지고 조사를 수행한 국가는 미국인데 대규모 현장조사와 과거 자료 리뷰를 통해 남극해 주변 석유자원, 남극대륙의 석탄, 남극대륙의 광물자원에 대한 보고서를 미국 내무부 지질조사소(US Geological Survey, Department of the Interior)에서 발간한 바 있다. 호주도 남극대륙의 석탄개발 가능성에 대한 보고서(1987년)를 발간하였다.

남극대륙 자원에 대한 보고서 (출간 순)

- Mineral Resources of Antarctica (United States Geological Survey, 1974)
- Petroleum and Mineral Resources of Antarctica (United States Geological Survey, 1983)
- Coal potential of Antarctica (Bureau of Mineral Resources, Geology and Geophysics, Australia, 1987)
- Studies of the Geological and Mineral Resources of the Southern Antarctic Peninsula and Eastern Ellsworth Land, Antarctica (United States Geological Survey, 1988)
- The Undiscovered Oil and Gas of Antarctica (United States Geological Survey, 1991)
- Explanatory Notes for the Mineral-Resources Map of the Circum-Pacific Region Antarctic Sheet (United States Geological Survey, 1998)

- GIS Representation of Coal-Bearing Areas in Antarctica (United States Geological Survey, 2016)

이들 보고서는 남극해와 남극대륙 전역에 대한 기초조사와 과거 연결되어있어 지질구조가 남극으로 연장되어 있으리라고 생각되는 남반구 주변 대륙들의 자원분포를 바탕으로 남극대륙의 자원분포를 파악하고자 한 것이다(그림 6). 하지만 모든 보고서에서 개발 가능성은 남극의 혹독한 환경과 인프라의 부족으로 당시에는 경제성이 없는 것으로 판단하였다.



그림 6 남극대륙과 주변대륙의 주요 자원 분포

최근 발표된 남극대륙 특이광상에 대한 논문

- **다이아몬드:** The discovery of kimberlites in Antarctica extends the vast Gondwana Cretaceous province (Australia, Nature Communications, 2013)
- **금:** The Dorn gold deposit in northern Victoria Land, Antarctica: Structure, hydrothermal alteration, and implications for the Gondwana Pacific margin (Italy, Gondwana Research, 2011)
- **붕소(prismatine):** A treasure trove of mineral discovered in the Larsmann Hills (Australia, Australian Antarctic Magazine, 2007)

미국, 영국, 호주, 칠레 등 전통적인 남극연구 중심국가가 남극기지를 기반으로 조사 및 연구를 수행하고 있는 가운데(그림 7) 최근에는 중국의 부상이 눈에 띈다. 2014년 장보고 기지 남쪽 인익스프레서블 섬에 제5기지 건설계획을 발표하였고 남극반도, 동남극, 남극 고원, 남극 내륙에 이어 남극중단산맥에 진출하게 됨으로 남극 전역에 거점을 확보하였다(그림 8). 이를 기반으로 독자적인 항공망을 구축하여 중국판 GPS 시스템인 Bei Dou 위성 관제 시스템구축 등 남극을 전략적으로 활용하기 위한 공격적인 투자를 시작하였다.

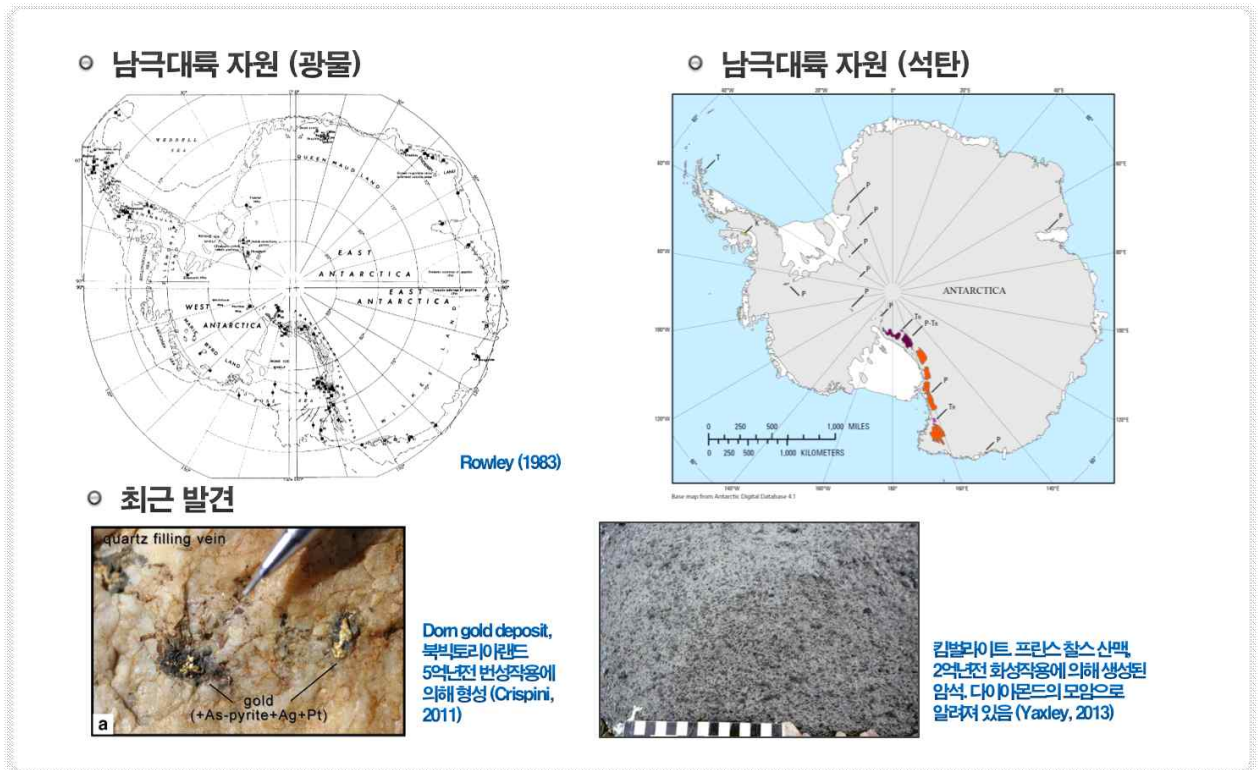


그림 7 (위쪽) 남극 대륙자원 관련 보고서를 종합한 광물자원 분포 및 석탄 분포 (아래쪽) 최근 발견된 금(빅토리아랜드)과 다이아몬드(동남극) 광상. 성인에 대한 과학적 연구가 출판됨

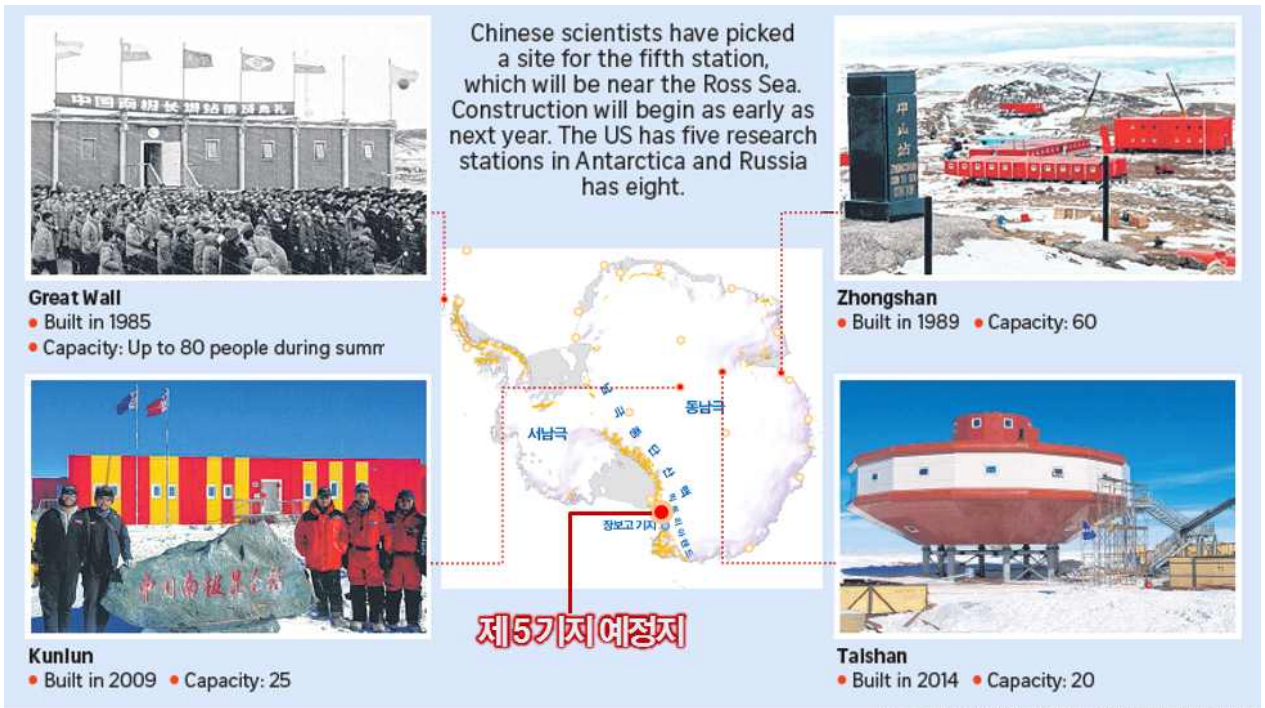
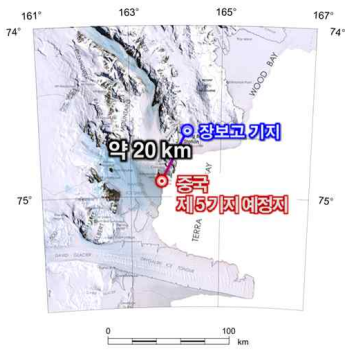


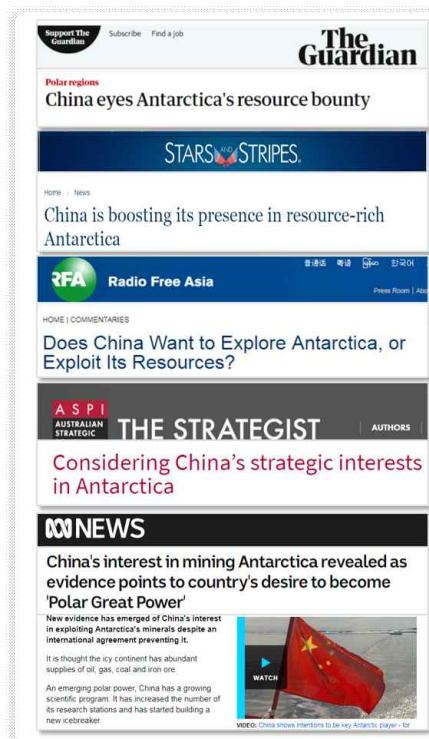
그림 8 남극에 설치된 남극기지 위치와 빅토리아랜드에 지어질 제5기지 예정지

현재 중국기지가 위치한 남극반도와 동남극은 인근 지역의 암석 노출지가 제한적이어서 광역적인 지질연구는 어렵지만, 남극대륙에서 가장 넓은 암석 노출지인 남극종단산맥에 대한 접근성이 좋은 제5기지를 기반으로 본격적인 광물자원에 대한 조사와 연구를 수행할 것으로 예상된다(그림 9). 중국 제5기지의 CEE에 제시된 기지기반 연구내용에는 남극종단산맥의 기반암의 지질학적 연구가 주요 주제로 나타나 있고, 지질학적 연구 부분에 있어 우리나라가 수행하고 있는 부분과 많은 부분 중복될 것으로 예상되나 이에 대한 협의 논의는 이루어지지 않고 있다. 지역을 기반으로 하는 지질연구의 경우 연구 장소와 거점을 먼저 선점하는 것이 연구 주도권을 확보하는 데에 매우 중요하므로, 중국이 기지를 완공하는 2022년까지 우리나라의 보다 공격적인 지질학 연구가 필요할 것으로 생각된다. 중국, 인도 등 신흥 남극 연구국들의 남극대륙 지질연구에 대해 우리나라가 대응하기 위한 정책적 준비는, 제3차 남극 연구 활동 진흥 기본계획(2017-2022), 제4차 과학기술 기본계획(2018-2022)을 통해 근거가 마련되어있으므로 이를 실천할 구체적인 전략과 과학적 연구 과제 도출로 남극대륙 지질연구의 지속적 수행 및 지질학을 비롯한 다양한 연구 분야의 활동영역확대가 필요하다. 남극종단산맥에는 맥머도(미국), 스콧(뉴질랜드), 마리오주젤리(이태리), 곤드와나(독일), 장보고(한국) 기지가 위치하고 있으며, 많은 부분이 뉴질랜드의 영유권 주장지역에 속한다. 남극 종단산맥 주변에 대해 남극 연구 주요 국가들은 지속적인 연구를 수행하고 있으며(그림 11) 학술적인 연구 외에도 맵핑, 빙저 기반암 시료확보 등 기초적인 지질연구도 진행 중이고 이를 위한 인프라 투자도 병행해 이루어지고 있다.



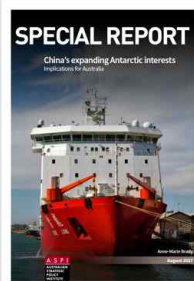
Inexpressible Island에 하역한 기지 건설물자 (2018.2.8 신화통신)

그림 9 (왼쪽) 중국 제5기지의 위치. 장보고 기지에서 남쪽으로 20 km 지점임. (오른쪽) 2017-18 남극 하계에 진행된 중국의 남극기지 건설을 보도한 신화통신 사진

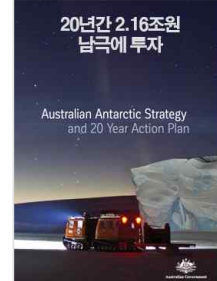


남극 연구 국가들의 반응

- 중국, 2014년 제 5기지 건설 계획 이후, 남극대륙 자원에 대한 관심 직간접적 표명
- 서구권 국가들 지속적인 언론보도로 견제
- 정부차원의 전략 보고서 (호주, 뉴질랜드)
- 남극연구 및 인프라 투자 확대로 남극 주도권 유지 노력 (호주, 2016 이후 20년간 2.16조원)



중국의 남극활동 대응 전략 보고서(호주, 뉴질랜드)



호주남극투자계획(2016)

그림 10 남극에서의 중국 영향력 확대 및 중국의 남극 지하자원을 개발할지 모른다는 우려를 나타내는 언론 보도와 이에 대한 주요 남극 활동국들의 전략 보고서

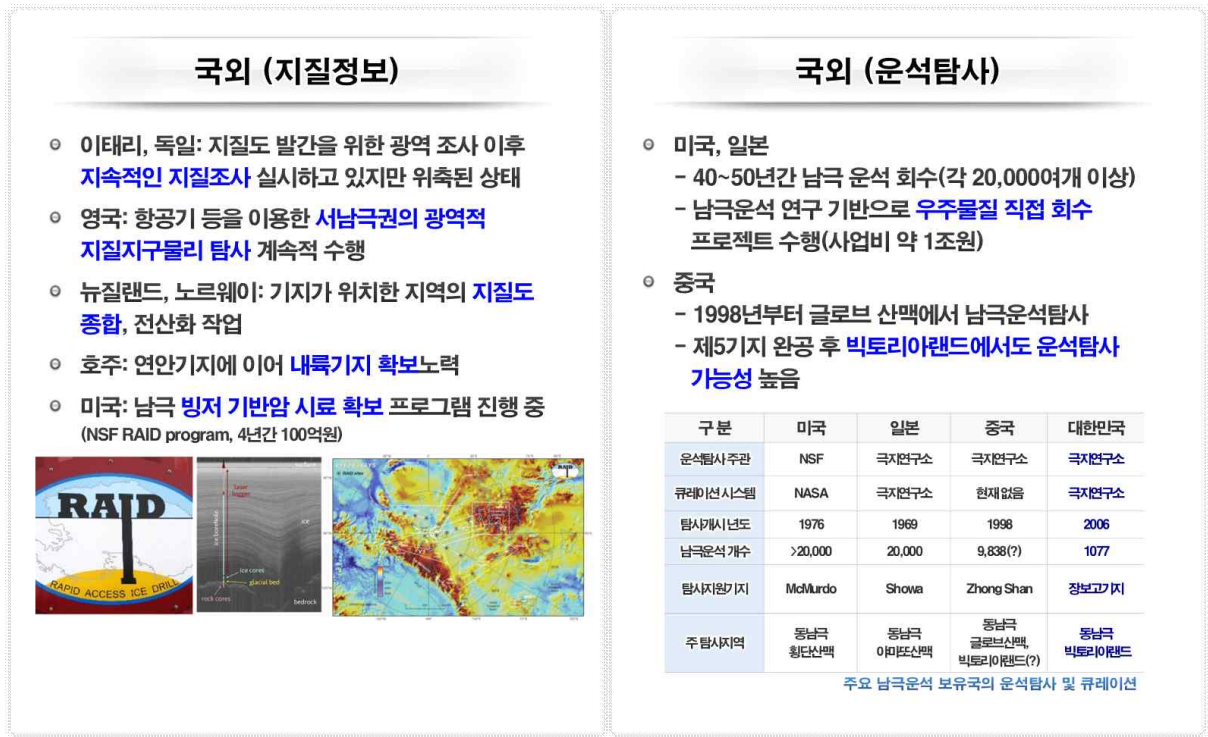


그림 11 남극종단산맥에 대한 국내외 운석/지질 연구 현황을 정리한 표

남극종단산맥 국제공동연구를 위해 미국 연구자들 중심의 비공식적인 모임인 TAM Science가 운영되고 있다. 주요 연구책임자와 NSF Antarctic Program과의 협의를 통해 남극 종단산맥 거점캠프를 정하고 항공기, 헬기 등 대형 로지스틱스를 공동 활용하고 있다(그림 12).



그림 12 TAM Science 웹페이지. 2013년 공동 캠프 전경을 보여주고 있음

남극대륙 활화산연구

최근 영국 에딘버러 연구팀에 의해서 빙하를 관통하는 레이더 항공탐사와 육상에서의 지하 레이더 탐사(GPR, Ground Penetrating radar)를 통해 남극 빙봉 아래에 존재하는 새로운 화산 91개가 발견되었다(그림 13, Vries et al. 2017).



그림 13 남극반도와 로스해 주변에서 새롭게 발견된 91개의 빙저화산 위치

현존하는 최고의 화산분포지역인 동아프리카 열곡대의 신생대 화산대(60여 개의 활화산과 아프리카 대륙 내에 40여 개의 화산 분포)보다 남극의 서남극 열개구조대에 더 많은 화산이 분포한다(그림 14). 이들 빙봉 아래 화산 중 몇몇 활화산이 분화할 경우 서남극 대륙의 빙상을 불안정하게 만들고 빙봉의 붕괴 속도를 가속화시킬 수 있기 때문에 결과적으로 해수면 상승을 초래할 것으로 예상된다. 지구에서 최근 화산활동이 활발한 지역 중 많은 곳이 마지막 빙하기 이후 덮여 있던 빙하가 점차 녹으면서 지표면의 압력이 낮아진 지역이라는 학설이 남극에 적용될 경우 이들 화산의 미래 분화 가능성은 매우 높을 것으로 예상된다. 전 지구적 기후변화, 이에 연동되는 해수면 변동 그리고 이러한 순환 시스템에 남극 빙봉 아래 존재하는 화산의 분화 가능성이 또 하나의 중요한 변수로 부각되고 있다. 따라서, 이러한 화산의 과거 분출 기록을 복원하고 화산들의 미래 분화 가능성을 예측하는 연구가 매우 중요하겠다.



그림 14 장보고기지주변 활화산과 신생대 화산을 표시한 남극 빅토리아랜드의 위성사진

남극지질·운석정보 활용기반

미국은 Byrd Polar Rock Repository에 과거 수행한 남극 지질탐사에서 획득한 암석시료 데이터베이스를 구축 운영하고 있는데 암석의 분류, 사진, 질량, 연대, 위치 등 기본 정보 외에, 획득 당시 연구자의 야장 또는 지질도도 제공하여 시료를 기반으로 한 후속연구를 권장하고 있다. 영국은 BAS의 Geological Collection project를 수행하여 남극 탐사를 통해 획득한 200,000점 시료의 데이터베이스를 구축하고 이중 화석 데이터베이스만 공개하여 온라인으로 접근가능하다. 이태리(Siena Antarctic Museum)와 독일(BGR)도 기본적인 남극 암석시료 데이터베이스를 운영하고 있다. 노르웨이 NPI는 북극 스발바르 지형도, 지질도 지질 주제도를 제공하는 웹 기반 시스템구축을 운영 중인데, 웹기반 시스템으로 사용자가 편하게 활용할 수 있지만, 오프라인에서 활용 불가능한 한계를 지니고 있다. 노르웨이 NPI는 Quantatica라는 GIS프로그램을 개발하였으며 공개된 다양한 남극 관련 관측 자료들을 위치기반으로 제공하나 남극지질도는 빠져있다. 미국 NASA의 Johnson Space Center (JSC)에서는 (1) 아폴로 탐사로 획득한 달 시료, (2) 남극 운석, (3) 성층권에서 채집한 우주먼지, (4) 제네시스 미션으로 획득한 태양풍 시료, (5) 스타더스트 미션으로 획득한 혜성과 행성 간 우주먼지 시료를 큐레이션 하고 있다(Allen et al., 2011). 남극운석의 경우, 탐사(NSF), 큐레이션(NASA JSC), 장기 보관(Smithsonian Institution)이 모두 분리되어 운영되고 있으며, 운석은 종류에 따라 각기 전공 분

야가 다른 여러 명의 큐레이터가 담당하고 있다. 일본은 극지연구소(NIPR)에서 남극운석 탐사를 담당하고 있으며 현재까지 약 20,000여 개의 남극운석을 보유하고 있다(Kojima, 2006). 일본의 항공우주연구원(JAXA)에서는 2011년 첫 번째 소행성 물질 회수 프로젝트(Hayabusa 1)를 성공적으로 수행하였고 그 시료들을 국내외 연구자들에게 대여도 하고 있다. 중국도 남극운석 탐사를 시작하고 한동안 시료 공개를 하지 않았으나 최근 들어 큐레이션 시스템을 구축, 운영하고 있다.



제 3 장 연구개발 수행 내용 및 결과

3.1. 지질·운석탐사/연구를 통한 남극종단산맥 형성과정 규명

3.1.1. 함투회석 암석의 변형미구조를 통한 온도조건 계산

석영은 지각에 가장 많이 존재하는 광물 중 하나로, 지표상에서 쉽게 관찰할 수 있다. 석영은 특히 낮은 온도에서 쉽게 소성을 띄는 광물로 이에 대한 실험, 모델링, 자연관찰 등을 통한 연구가 활발하다. 대부분 석영은 중-상부지각의 녹색편암-각섬암의 조건에서 기저(basal), 마름모(rhomb), 각기둥(prism) <a>-미끌어짐(slip)을 보여준다(Schmid and Casey, 1986; Schmid, 1994). 각기둥 [c]-미끌어짐은 몇몇 경우에만 600-700 °C의 고온 조건에서 관찰되었다(Lister and Domsiepen, 1982; Blumenfeld et al., 1986; Mainprice et al., 1986; Kruhl and Huntemann, 1991). 기저 <a>-에서 각기둥 [c]-미끌어짐으로 바뀔때의 온도 및 기존의 석영 변형특성을 고려해 만든 것이 석영 지온계로 특히 석영을 많이 함유하고 있는 암석의 변형온도를 측정하는데 유용하게 사용된다(Kruhl, 1996, 1998; Morgan and Law, 2004; Faleiros et al., 2016).

본 연구의 함망간규암 시료(151223-1F)는 북빅토리아랜드 윌슨-바위스 터레인 경계부의 랜터만 산맥에서 채취하였다(그림 15). 함망간규암의 광물조합은 피몬타이트/녹렴석 + 석류석 + 자철석 + 펜자이트 + 석영으로 대표된다(그림 16). 피몬타이트-테프로이트-스페서틴 석류석-금홍석 등의 광물조합은 녹색편암 내지 청색편암상을 지시한다(Reinecke, 1986; Martin and Lombardo, 1995; Abs-Wurmbach and Peters, 1999). 한국생산기술원 부설 희소금속분석센터에 설치된 EBSD 장비를 이용해 미구조분석을 실시하였다. 박편은 암석을 석영, 펜자이트에 의해 잘 정의된 면구조(엽리)와 수직, 선구조와 평행하게 잘라 준비하였다. 기계연마(mechanical polishing)를 거친 샘플을 화학연마(chemical polishing)를 실시하였다. EBSD 분석은 15 kV 가속전압, 10 nA 빔 전류, 5 µm 빔 지름, 50 µm의 스텝사이즈를 이용해 데이터를 획득하였다(그림 17). 폴피겨(pole figure)는 Matlab의 툴박스(toolbox)인 MTEX를 이용해 도시하였다.

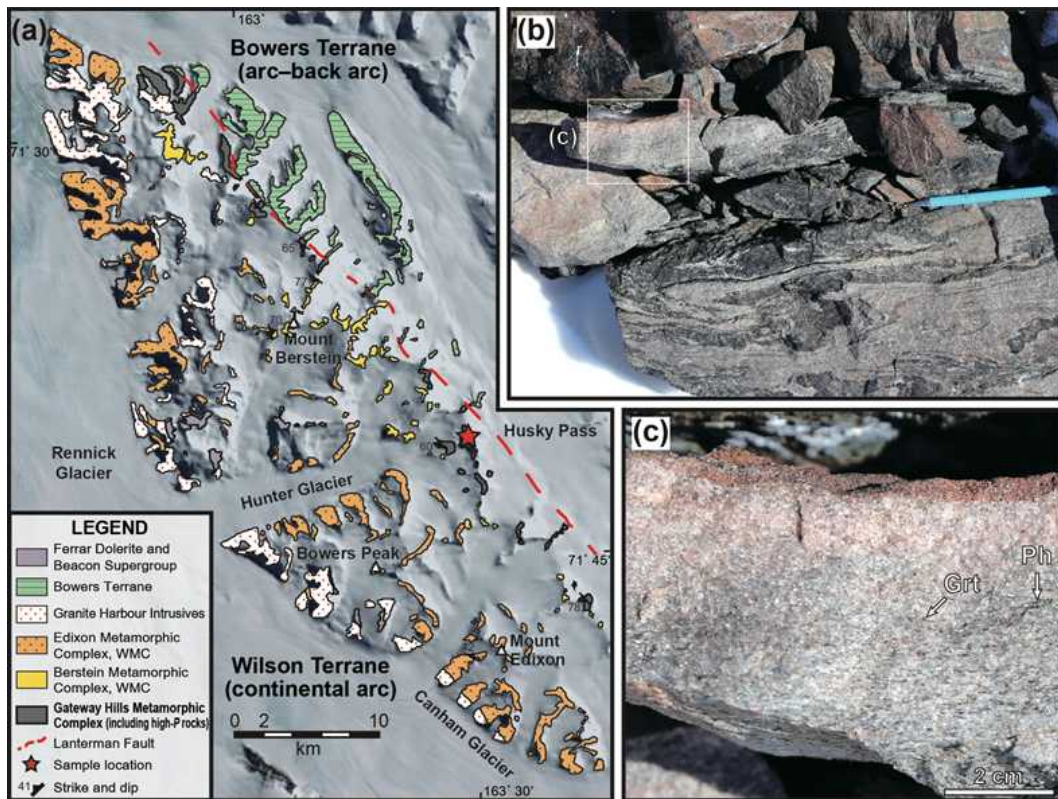


그림 15 (a) 랜터만 산맥 지질도와 시료 위치(빨간 별) (b) 고철질-석영장석질 편암-편마암류와 교호하여 산출하는 함망간규암 (c) 함망간규암 내 석류석(Grt)과 펜자이트(Ph)

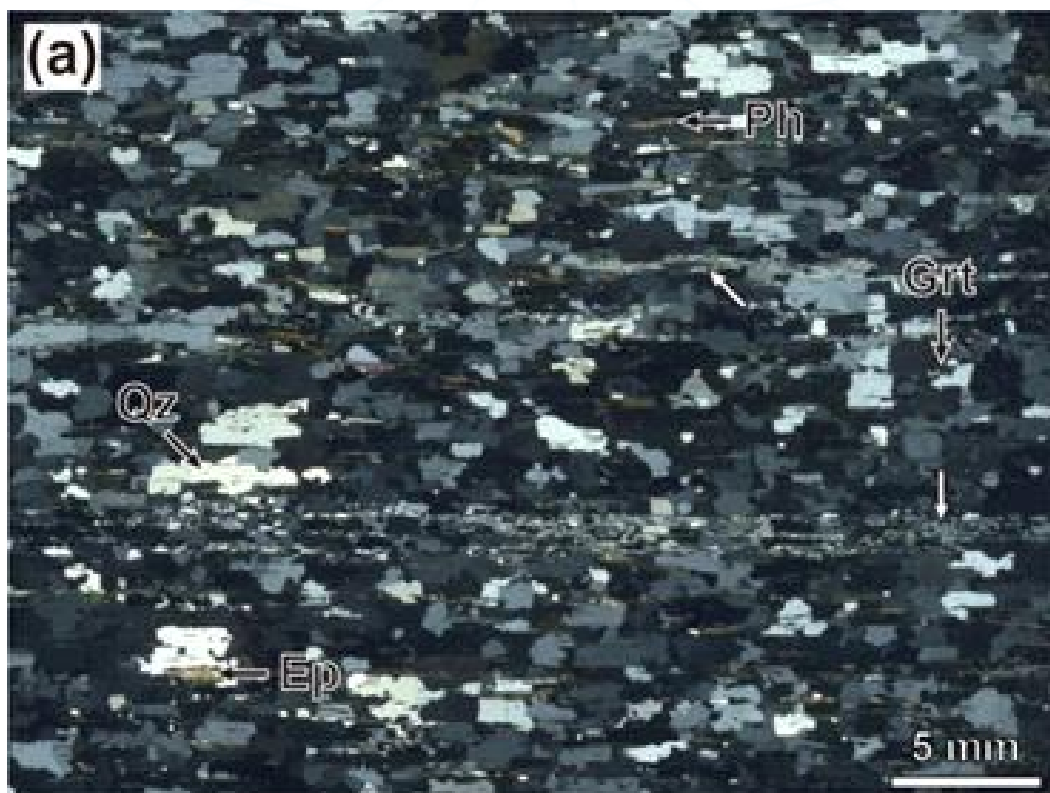


그림 16 함망간규암 시료(151223-1F)의 편광현미경 사진(직교니콜). 주구성광물은 석류석(Grt), 펜자이트(Ph), 녹립석(Ep), 자철석, 석영(Qz) 등

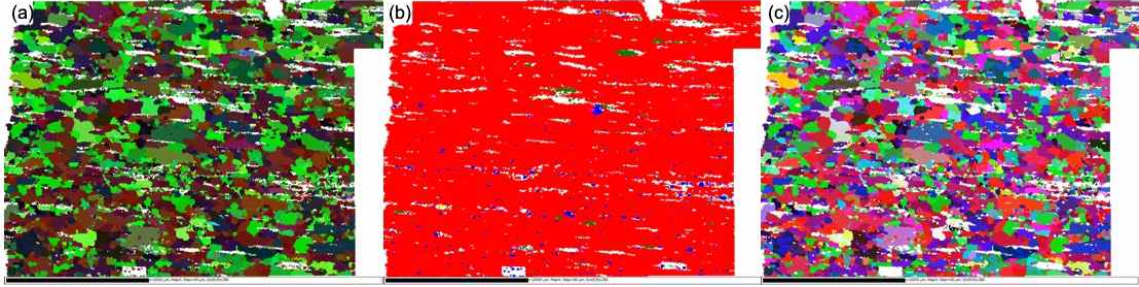


그림 17 EBSD를 이용해 획득한 맵 데이터(law data, a), 상 맵(phase map, b), 석영 광물의 오일러 맵(c). 그림 (b)에서 붉은색은 석영, 노란색은 녹립석, 녹색은 펜자이트, 주홍색은 자철석, 아쿠아색은 녹니석을 나타냄. Channel 5 프로그램을 이용해 도시함

석영의 c-축은 면구조와 평행하고 선구조와 수직하게 배열되고 이는 대표적인 중온형(400-500 °C)의 폴피겨를 보여준다(e.g., Law, 2014; 그림 18). 석영 c-축의 열림각도(opening-angle)는 약 141-145°로, 경험적인 석영지온계에 의하면 약 750-900 °C의 변형온도를 추정할 수 있다(그림 18, 19). 이 온도는 석류석-녹니석 지온계와 중온형 폴피겨의 모양을 이용해 유추한 온도에 비해 상대적으로 높기 때문에, 물의 함량 등 다른 요소가 작용해 석영의 변형작용에 영향을 미쳤기 때문이라 사료된다.

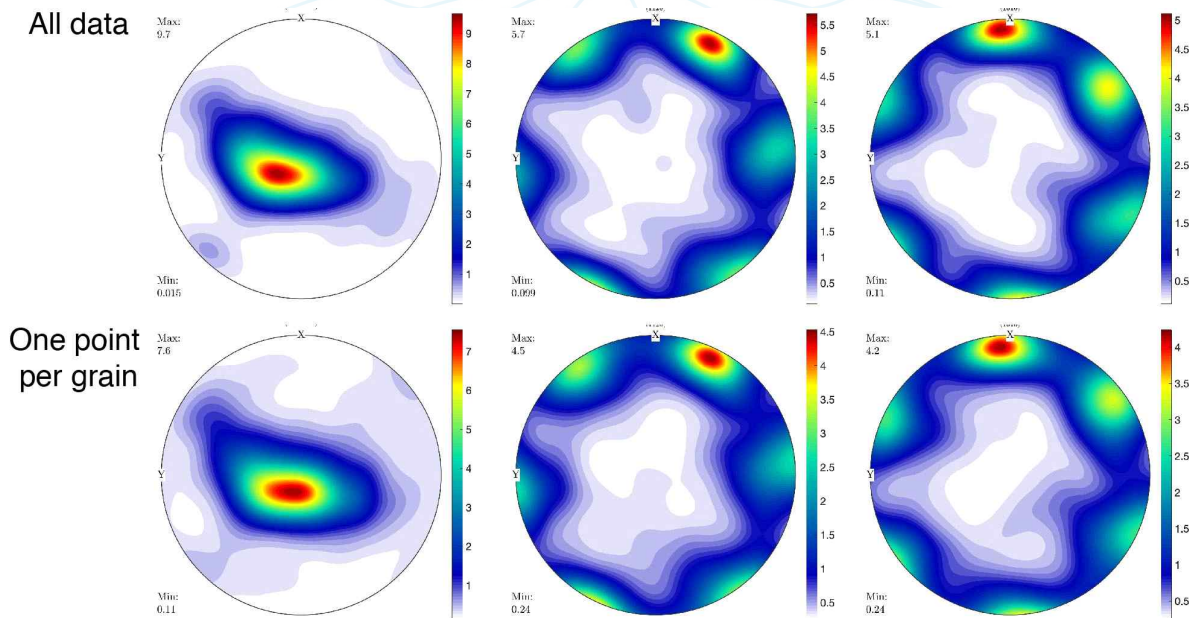


그림 18 암석 내 석영의 결정방향성(Crystallographic preferred orientation, CPO) 측정 결과 두 방향으로 c축의 미끌림이 관찰됨

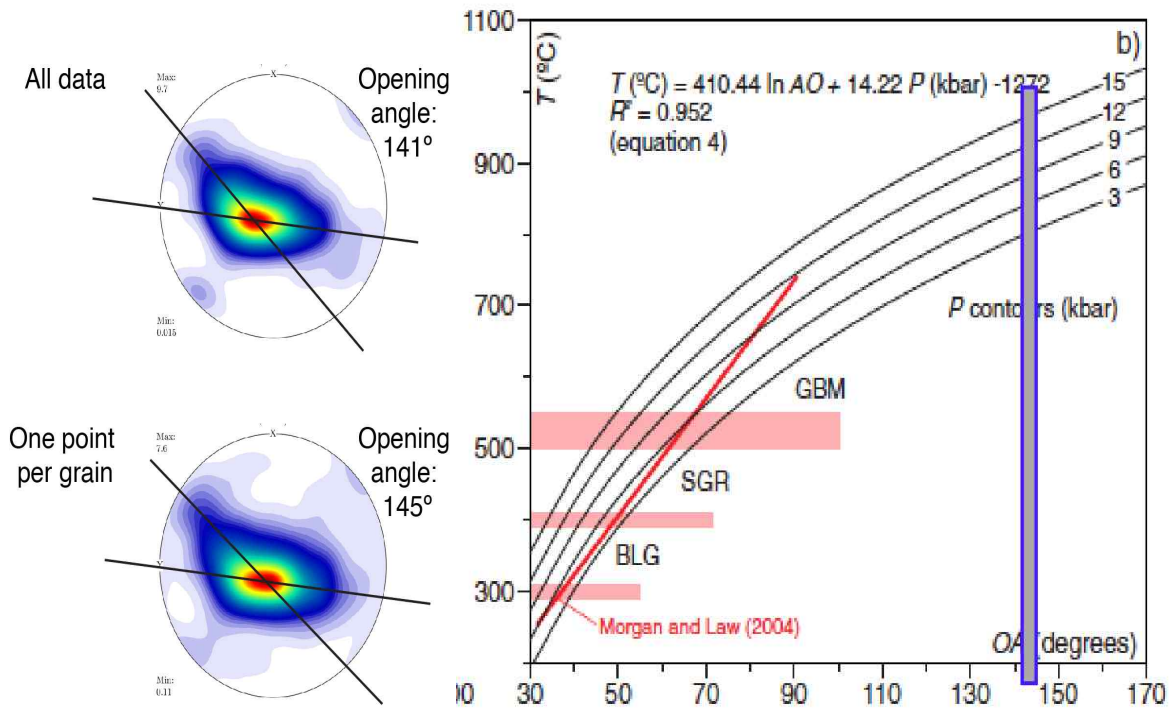


그림 19 석영 c-축의 열림각도(opening angle)를 이용한 암석변형온도 추정

3.1.2. 디센트릿지 전단대의 암석학적 기초정보 수집

3.1.2.1. 디센트릿지 전단대에서 확인되는 전기 고생대 변성작용

디센트릿지 암체는 주로 각섬암으로 구성되고 소규모의 석회규산염암이 각섬암에 협재된다(Palmeri et al., 2012). 이 암체는 NE-SW 방향의 광역 압축력에 의해 전단변형 및 압쇄암화되었고, 압쇄각섬암에서 나타나는 각섬석의 신장 선구조는 $\sim 60^\circ/220-230^\circ$ (plunge/direction) 방향을 보인다(그림 20). 각섬암의 보통각섬석, 사장석, 석류석, 흑운모는 주로 전진변성작용의 변형구조를 반영하고, 녹니석, 커밍토나이트 각섬석, 십자석은 후퇴변성작용과 관련되어 산출된다(그림 21). 보통각섬석은 신장 선구조를 형성하고, 석류석 반상 변형은 변형과 동시기적 성장 양상을 보인다. SHRIMP U-Pb 저어콘 연대분석을 통해 각섬암(SB176)은 514.6 ± 2.0 Ma에 원암이 형성된 것으로 해석된다(Yi et al., 2019, 그림 20). 각섬암의 변성 시기는 불명확하나, 디센트릿지 주변에서 확인되는 뚜렷한 c. 500 Ma 변성·화성연령은 각섬암의 변성 시기가 약 500 Ma 이후인 것을 간접지시한다.

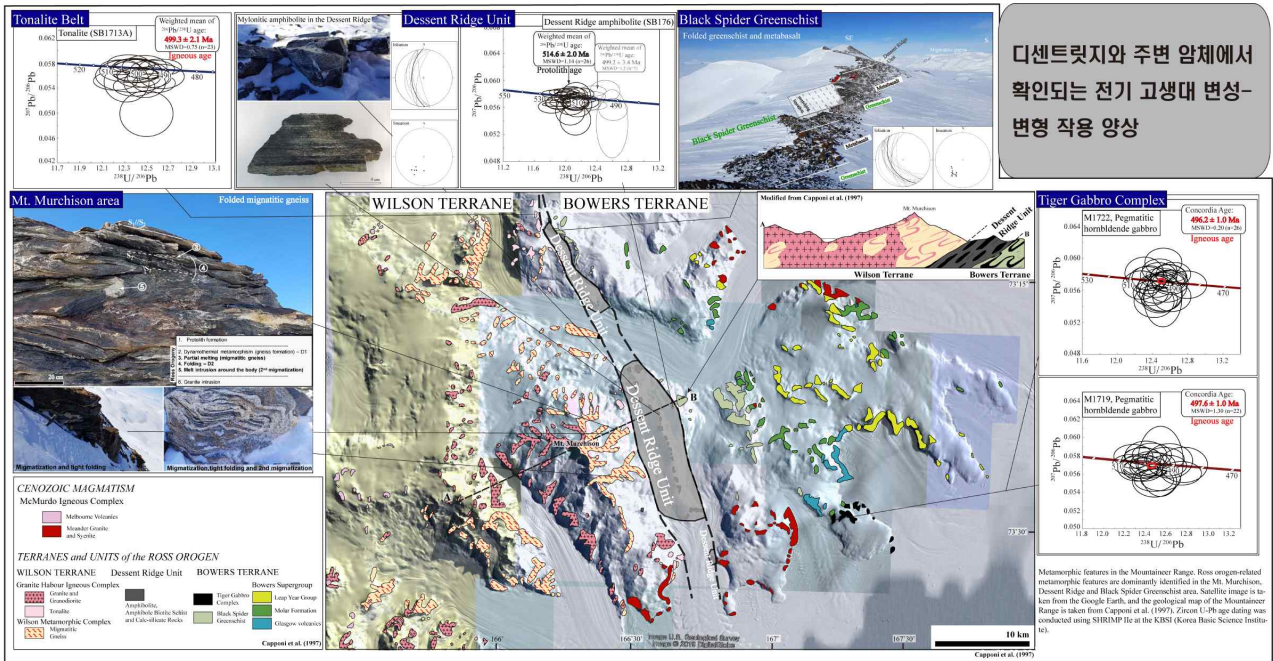


그림 20 디센트릿지와 주변 암체에서 확인되는 전기 고생대 변성-변형 작용 양상. 윌슨 터레인 혼성암질 편마암, 디센트릿지 각섬암, 블랙스파이더 편암, 타이거 반려암 복합체; Capponi et al. (1997) 지질도를 편집

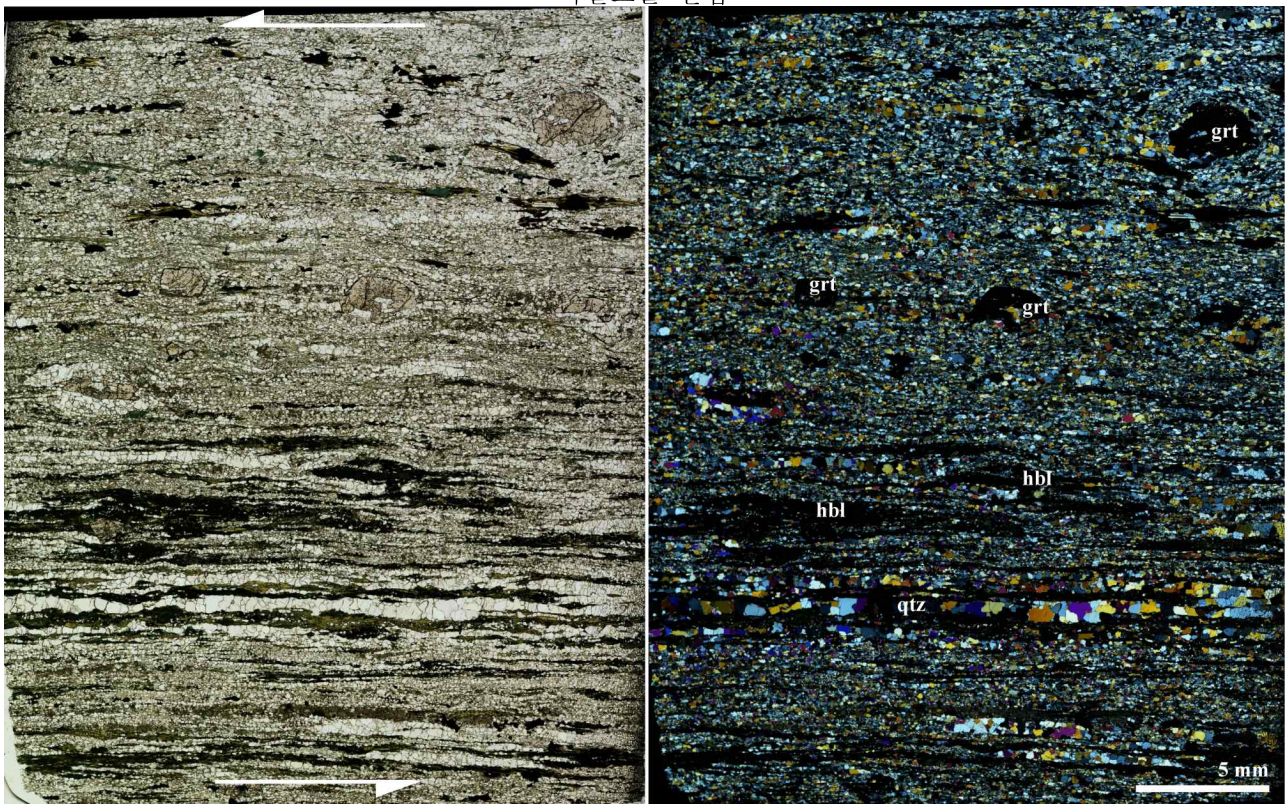


그림 21 디센트릿지 암체 각섬암(SB176)의 변형구조. 보통각섬석(hbl)의 신장 선구조와 석류석(grt) 반상 변정의 발달

3.1.2.2. 디센트릿지 전단대 주변 지역의 전기 고생대 변성작용과 화성작용

편마암류(혼성암질 편마암)는 디센트릿지 서쪽의 머치슨산 일대(윌슨 터레인)에 발달한

다. 혼성암질 편마암은 원암형성 이후 광역변성작용(편마암 형성, D1), 부분용융(혼성암질 편마암 형성), 습곡(D2), 2차 부분용융의 변성-변형 진화과정을 거친 후 최종적으로는 화강암에 의해 관입된다(그림 20). 혼성암질 편마암의 용융부(leucosome)는 황와습곡으로 변형되어 나타나는데, 이것은 머치슨산 일대가 백립암상의 변성작용 동안 광역적인 압축력에 의해 변형되었음을 지시한다. 편마암 황와습곡의 습곡축면이 보이는 주향은 NW-SE 방향으로 랜터만 단층(디센트릿지 전단대)의 주향과 일치하고 이것은 머치슨산과 주변부가 로스조산운동 시기(c. 500 Ma)에 NE-SW 방향의 광역적인 압축력 하에 놓여 있었음을 지시한다. 토날라이트는 머치슨 편마암과 디센트릿지 사이를 관입한다. 엽리상 토날라이트에서 확인되는 SHRIMP U-Pb 저어콘 연령은 499.3 ± 2.1 Ma ($^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 가중평균, 그림 20, 표 1)로 토날라이트 관입연령에 해당된다. 블랙스파이더 편암류는 디센트릿지 동쪽에 발달한다. 이 암체는 녹색편암과 변성현무암으로 구성되고 두 암층이 교호하며 반복되어 나타난다. 편암의 주 엽리 주향은 랜터만 단층(디센트릿지 전단대)의 주향과 평행(NW-SE)하거나 아평행(N-S)하며 광물 신장 선구조는 엽리의 경사 방향에 근접한 방향성 $\sim 55^\circ/220-230^\circ$ (plunge/direction)을 보인다(그림 20). 블랙스파이더 편암류는 편암/변성화산암층이 습곡(tight fold) 되어 나타나는 암체로 판단된다. 이 암체는 광역 압축력(광역변성작용)이 발생하는 동안 습곡되고 습곡축면의 경사 방향으로 전단되었을 것으로 추정된다.

타이거 반려암 복합체는 휘석류와 사장석의 누적작용으로 형성된 여러 종류의 화성누적암으로서 휘석 반려암(휘석-사장석 누적), 반려암(사장석-휘석 누적), 휘석암(휘석 누적), 각섬석 반려암(멜트: 거정질 반려암)으로 구성된다. 타이거 반려암 복합체의 화성 층리(igneous bedding)는 NW-SE의 주향을 나타내고 복합체 주변으로 발달한 변성암의 변형구조와 달리 타이거 반려암 복합체는 변형구조를 보이지 않는다. 복합체 내 거정질 반려암(각섬석 반려암)에서 497.6 ± 1.0 Ma(일치연대, M1719)와 496.2 ± 1.0 Ma(일치연대, M1722)의 SHRIMP U-Pb 저어콘 연령을 획득하였다(그림 20, 표 2, 3). 이들 거정질 반려암 멜트는 로스조산운동기 동안 타이거 반려암 복합체를 관입한 것으로 판단된다.

종합하면 머치슨 혼성암질 편마암, 디센트릿지 각섬암, 블랙스파이더 편암류는 동일한 압축력(광역변성작용)에 의해 변형되었고, 그 중 디센트릿지 지역은 압축력에 동반된 전단작용에 의해 크게 변형되었음을 알 수 있다. 광역변성작용과 전단작용을 경험한 디센트릿지 및 그 주변지역의 암체와 달리 타이거 반려암 복합체의 암석은 변형되지 않았다. 타이거 반려암 복합체의 형성 시기에 대한 추가적인 연구가 필요하다.

표 1 엽리상 토날라이트(SB1713A)의 SHRIMP U-Pb 저어콘 연대분석 결과

Spot	% 206Pb _c	ppm U	ppm Th	232Th /238U ±%	(1) 206Pb /238U Age	(1) 207Pb /206Pb Age	(1) 208Pb /232Th Age	% Dis- cor- dant	7corr 208Pb /232Th ±%	(1) 238U /206Pb* ±%	(1) 207Pb* /206Pb* ±%	(1) 207Pb* /235U ±%	(1) 206Pb* /238U ±%	err corr
SB13A-01	0.09	168	68	0.42	502 ±5	488 ±44	461 ±18	-3	0.02327	12.36	0.0569	0.635	0.0809	0.5
SB13A-02	--	96	44	0.47	500 ±6	481 ±48	490 ±15	-4	0.02477	12.40	0.0567	0.631	0.0806	0.5
SB13A-03	--	159	62	0.41	501 ±8	454 ±70	500 ±15	-11	0.02570	12.36	0.0560	0.625	0.0809	0.5
SB13A-04	--	235	156	0.69	497 ±5	404 ±63	496 ±10	-24	0.02554	12.47	0.0548	0.606	0.0802	0.3
SB13A-05	0.10	155	60	0.40	492 ±5	447 ±51	477 ±15	-10	0.02448	12.62	0.0559	0.610	0.0792	0.4
SB13A-07	--	188	69	0.38	497 ±5	506 ±48	515 ±16	+2	0.02569	12.47	0.0574	0.634	0.0802	0.4
SB13A-08	0.09	139	47	0.35	503 ±5	412 ±86	438 ±19	-23	0.02334	12.31	0.0550	0.616	0.0812	0.3
SB13A-10	0.00	302	191	0.66	500 ±5	457 ±32	487 ±8	-10	0.02476	12.40	0.0561	0.624	0.0806	0.5
SB13A-11	--	239	69	0.30	501 ±5	383 ±43	472 ±15	-32	0.02573	12.38	0.0543	0.605	0.0808	0.5
SB13A-12	--	170	70	0.42	496 ±5	442 ±45	494 ±21	-13	0.02540	12.51	0.0557	0.614	0.0799	0.5
SB13A-13	0.05	282	35	0.13	506 ±5	505 ±31	487 ±32	-0	0.02443	12.26	0.0574	0.645	0.0816	0.6
SB13A-14	--	217	63	0.30	494 ±5	405 ±42	475 ±14	-23	0.02538	12.56	0.0548	0.602	0.0796	0.5
SB13A-15	--	74	22	0.31	497 ±6	192 ±113	466 ±32	-165	0.02823	12.49	0.0499	0.551	0.0801	0.2
SB13A-16	0.01	232	92	0.41	492 ±5	505 ±34	486 ±11	+3	0.02415	12.61	0.0574	0.627	0.0793	0.5
SB13A-19	0.18	238	120	0.52	503 ±5	529 ±35	499 ±16	+5	0.02472	12.33	0.0580	0.648	0.0811	0.5
SB13A-20	--	269	58	0.22	507 ±5	420 ±40	467 ±17	-22	0.02553	12.21	0.0552	0.623	0.0819	0.5
SB13A-21	0.06	131	37	0.29	500 ±8	483 ±49	481 ±19	-4	0.02441	12.39	0.0568	0.632	0.0807	0.6
SB13A-22	--	200	70	0.36	499 ±5	439 ±40	503 ±13	-14	0.02609	12.42	0.0557	0.618	0.0805	0.5
SB13A-24	0.07	189	81	0.44	494 ±5	493 ±37	501 ±12	-0	0.02513	12.54	0.0570	0.627	0.0797	0.5
SB13A-26	0.14	841	770	0.95	503 ±4	511 ±18	490 ±6	+2	0.02450	12.32	0.0575	0.643	0.0811	0.7
SB13A-27	0.06	305	129	0.44	501 ±5	520 ±27	497 ±28	+4	0.02466	12.38	0.0577	0.643	0.0808	0.6
SB13A-28	0.03	339	215	0.66	504 ±5	492 ±28	499 ±8	-2	0.02508	12.30	0.0570	0.639	0.0813	0.6

Errors are 1-sigma; Pb_c and Pb* indicate the common and radiogenic portions, respectively.

(1) Common Pb corrected using measured 204Pb.

표 2 거정질 각섬석 반려암(M1719)의 SHRIMP U-Pb
저어콘 연대분석 결과

Spot	% 206Pb _c	ppm U	ppm Th	232Th /238U ±%	(1) 206Pb /238U Age	(1) 207Pb /206Pb Age	(1) 208Pb /232Th Age	% Dis- cor- dant	7corr 208Pb /232Th ±%	Total 238U /206Pb ±%	Total 207Pb /206Pb ±%	(1) 238U /206Pb* ±%	(1) 207Pb* /206Pb* ±%	(1) 207Pb* /235U ±%	(1) 206Pb* /238U ±%	err corr
M19-01	--	109	45	0.43	496 ±5	372 ±62	477 ±17	-34	0.02541	12.48	0.05528	12.50	0.0540	0.596	0.0800	0.4
M19-02	--	174	79	0.47	498 ±5	442 ±45	487 ±18	-13	0.02503	12.44	0.05711	12.46	0.0557	0.617	0.0802	0.4
M19-03	--	205	135	0.68	496 ±5	438 ±42	482 ±10	-14	0.02461	12.49	0.05711	12.51	0.0556	0.613	0.0799	0.5
M19-04	--	244	170	0.72	501 ±5	483 ±31	487 ±8	-4	0.02452	12.36	0.05702	12.36	0.0568	0.633	0.0809	0.6
M19-05	--	113	50	0.45	503 ±5	580 ±57	511 ±17	+14	0.02465	12.37	0.05721	12.33	0.0594	0.663	0.0811	0.4
M19-06	--	180	114	0.65	503 ±5	489 ±37	514 ±30	-3	0.02588	12.32	0.05659	12.31	0.0569	0.637	0.0812	0.5
M19-07	--	286	194	0.70	493 ±5	442 ±36	499 ±9	-15	0.02549	12.26	0.05705	12.28	0.0557	0.626	0.0815	0.5
M19-08	0.08	226	117	0.53	493 ±5	517 ±31	499 ±10	+5	0.02477	12.58	0.05765	12.58	0.0577	0.632	0.0795	0.6
M19-09	0.10	129	65	0.52	500 ±5	512 ±44	509 ±13	+3	0.02538	12.40	0.05801	12.41	0.0575	0.640	0.0806	1.1
M19-10	--	246	180	0.76	491 ±5	431 ±39	486 ±9	-15	0.02477	12.60	0.05693	12.63	0.0555	0.606	0.0792	0.5
M19-11	0.02	88	61	0.71	544 ±6	571 ±64	512 ±15	+15	0.02502	12.76	0.05702	12.73	0.0591	0.640	0.0786	1.2
M19-12	--	336	209	0.64	502 ±5	494 ±28	516 ±8	-2	0.02592	12.34	0.05651	12.34	0.0571	0.638	0.0811	0.9
M19-13	--	5610	159	0.03	492 ±5	504 ±7	576 ±9	-18	0.04848	10.46	0.05734	10.46	0.0573	0.755	0.0956	0.9
M19-14	0.12	205	124	0.63	497 ±5	489 ±40	484 ±10	-2	0.02432	12.46	0.05810	12.47	0.0569	0.629	0.0802	1.0
M19-15	0.09	419	126	0.31	502 ±4	571 ±26	511 ±11	+13	0.02433	12.37	0.05796	12.35	0.0591	0.660	0.0810	0.9
M19-16	--	203	103	0.52	494 ±5	381 ±42	474 ±11	-31	0.02484	12.54	0.05544	12.56	0.0542	0.596	0.0796	1.0
M19-17	--	200	81	0.42	500 ±5	373 ±50	484 ±14	-35	0.02582	12.37	0.05649	12.41	0.0541	0.600	0.0806	1.0
M19-18	--	239	130	0.56	499 ±5	471 ±32	498 ±9	-6	0.02519	12.43	0.05673	12.43	0.0565	0.626	0.0804	1.0
M19-19	0.06	94	40	0.44	491 ±5	483 ±55	503 ±16	-2	0.02531	12.62	0.05744	12.63	0.0568	0.620	0.0792	1.2
M19-20	--	211	125	0.61	497 ±5	403 ±37	465 ±9	-24	0.02408	12.48	0.05533	12.48	0.0548	0.605	0.0801	1.0
M19-21	0.04	97	72	0.77	495 ±5	530 ±98	477 ±12	+7	0.02361	12.54	0.05739	12.53	0.0580	0.638	0.0798	1.1
M19-22	--	63	32	0.53	501 ±6	137 ±130	431 ±23	-275	0.02494	12.31	0.05377	12.38	0.0488	0.543	0.0808	1.3
M19-23	0.08	194	126	0.67	505 ±5	540 ±34	490 ±15	+7	0.02423	12.28	0.05795	12.28	0.0583	0.654	0.0815	1.0
M19-24	--	255	195	0.79	494 ±5	477 ±35	511 ±9	-7	0.02583	12.17	0.05737	12.18	0.0566	0.641	0.0821	1.0
M19-25	0.15	182	69	0.39	483 ±5	564 ±37	476 ±12	+15	0.02275	12.86	0.05798	12.84	0.0589	0.633	0.0779	1.0
M19-26	--	112	46	0.43	483 ±9	401 ±57	493 ±17	-21	0.02570	12.83	0.05577	12.85	0.0547	0.587	0.0778	1.9
M19-27	--	183	88	0.50	487 ±5	456 ±34	485 ±10	-7	0.02461	12.74	0.05609	12.74	0.0561	0.607	0.0785	1.0
M19-28	--	170	122	0.74	481 ±5	375 ±54	462 ±10	-29	0.02386	12.86	0.05678	12.90	0.0541	0.578	0.0775	1.0

Errors are 1-σ_{int}; Pb_c and Pb* indicate the common and radiogenic portions, respectively.

(1) Common Pb corrected using measured 204Pb.

표 3 거정질 각섬석 반러암(M1722)의 SHRIMP U-Pb 저어콘 연대분석 결과

Spot	% 206Pb _c	ppm U	ppm Th	232Th /238U ±%	(1) 206Pb /238U ±%	(1) 207Pb /206Pb Age	(1) 208Pb /232Th Age	% Dis- cord- ant	7corr 208Pb [*] /232Th ±%	Total 238U /206Pb ±%	Total 207Pb /206Pb ±%	(1) 238U /206Pb [*] ±%	(1) 207Pb [*] /206Pb [*] ±%	(1) 207Pb [*] /235U ±%	(1) 206Pb [*] /235U ±%	err corr
M1722-01	--	145	59	0.42 ± 0.53	492 ± 5	459 ± 45	469 ± 13	-7	0.02388	12.60	0.05699	12.61	0.0562	0.614	2.3	0.5
M1722-02	0.04	138	57	0.43 ± 0.54	500 ± 5	407 ± 61	461 ± 16	-24	0.02422	12.37	0.05756	12.41	0.0549	0.610	2.9	0.4
M1722-03	0.10	88	43	0.50 ± 0.59	501 ± 6	358 ± 96	457 ± 21	-42	0.02436	12.31	0.05815	12.37	0.0537	0.598	4.4	0.3
M1722-04	0.31	116	74	0.66 ± 0.52	495 ± 5	588 ± 42	481 ± 12	+16	0.02328	12.52	0.05956	12.52	0.0596	0.656	2.2	0.5
M1722-05	--	2094	326	0.16 ± 0.42	523 ± 4	485 ± 11	505 ± 7	-8	0.02668	11.83	0.05722	11.84	0.0568	0.662	1.0	0.9
M1722-06	--	87	40	0.48 ± 0.59	495 ± 6	397 ± 60	478 ± 16	-26	0.02499	12.51	0.05534	12.53	0.0546	0.601	2.9	0.4
M1722-07	0.09	127	56	0.46 ± 0.55	496 ± 5	428 ± 62	473 ± 25	-16	0.02448	12.47	0.05785	12.51	0.0554	0.611	3.0	0.4
M1722-08	0.10	497	77	0.16 ± 0.50	496 ± 4	513 ± 23	492 ± 12	+4	0.02406	12.50	0.05795	12.51	0.0576	0.634	1.4	0.7
M1722-09	--	111	49	0.45 ± 0.56	484 ± 5	437 ± 55	485 ± 22	-11	0.02481	12.80	0.05673	12.81	0.0556	0.598	2.7	0.4
M1722-10	--	93	46	0.51 ± 0.58	493 ± 6	416 ± 64	481 ± 23	-19	0.02488	12.56	0.05643	12.58	0.0551	0.604	3.1	0.4
M1722-11	0.06	121	80	0.68 ± 0.51	493 ± 5	491 ± 48	505 ± 12	-0	0.02532	12.58	0.05752	12.59	0.0570	0.624	2.4	0.5
M1722-12	--	107	71	0.68 ± 0.53	504 ± 6	408 ± 64	498 ± 14	-24	0.02572	12.27	0.05669	12.30	0.0549	0.616	3.1	0.4
M1722-13	0.00	120	52	0.45 ± 0.56	500 ± 5	327 ± 82	462 ± 19	-55	0.02511	12.34	0.05729	12.40	0.0530	0.589	3.8	0.3
M1722-14	0.10	875	78	0.09 ± 0.54	522 ± 5	373 ± 35	393 ± 34	-42	0.02868	11.79	0.05864	11.86	0.0540	0.628	1.8	0.5
M1722-15	--	110	55	0.51 ± 0.55	499 ± 5	435 ± 51	493 ± 14	-15	0.02536	12.43	0.05614	12.44	0.0556	0.616	2.5	0.4
M1722-16	0.02	342	3	0.01 ± 1.41	496 ± 5	497 ± 26	447 ± 81	+0	0.02220	12.49	0.05730	12.49	0.0571	0.630	1.5	0.6
M1722-17	--	166	102	0.64 ± 0.49	498 ± 5	414 ± 51	482 ± 18	-21	0.02484	12.43	0.05660	12.46	0.0550	0.609	2.5	0.4
M1722-18	0.10	596	115	0.20 ± 0.46	492 ± 4	496 ± 22	471 ± 11	+1	0.02348	12.60	0.05783	12.61	0.0571	0.624	1.4	0.7
M1722-19	--	65	25	0.40 ± 0.69	494 ± 6	274 ± 112	446 ± 27	-84	0.02509	12.49	0.05570	12.56	0.0517	0.568	5.0	0.3
M1722-20	--	116	50	0.45 ± 0.57	495 ± 5	407 ± 92	458 ± 13	-23	0.02399	12.52	0.05487	12.52	0.0549	0.604	4.3	0.3
M1722-21	0.17	172	57	0.34 ± 0.53	497 ± 5	535 ± 39	500 ± 14	+7	0.02442	12.48	0.05852	12.49	0.0581	0.642	2.0	0.5
M1722-22	0.02	213	81	0.39 ± 0.50	493 ± 5	454 ± 41	477 ± 20	-9	0.02441	12.57	0.05723	12.59	0.0560	0.614	2.1	0.5
M1722-23	--	78	41	0.54 ± 0.59	498 ± 6	297 ± 83	475 ± 18	-70	0.02567	12.42	0.05463	12.45	0.0523	0.579	3.9	0.3
M1722-24	0.09	159	109	0.70 ± 0.48	493 ± 5	521 ± 37	488 ± 11	+6	0.02423	12.58	0.05778	12.58	0.0578	0.633	2.0	0.5
M1722-25	--	85	42	0.51 ± 0.56	491 ± 5	394 ± 58	492 ± 15	-25	0.02564	12.62	0.05523	12.63	0.0546	0.596	2.8	0.4
M1722-26	--	107	49	0.47 ± 0.53	498 ± 5	489 ± 58	509 ± 16	-2	0.02560	12.48	0.05485	12.45	0.0569	0.631	2.9	0.4
M1722-27	--	129	94	0.76 ± 0.48	500 ± 5	383 ± 54	478 ± 11	-32	0.02478	12.38	0.05566	12.40	0.0543	0.604	2.6	0.4
M1722-28	0.13	145	92	0.66 ± 0.48	490 ± 5	437 ± 56	484 ± 12	-12	0.02468	12.64	0.05804	12.67	0.0556	0.605	2.7	0.4

Errors are 1-σ; Pb_c and Pb^{*} indicate the common and radiogenic portions, respectively.

(1) Common Pb corrected using measured 204Pb.

3.1.3. 중부 남극 종단산맥 생물초 시료 확보(미국, 이태리) 기초연구

- PRR 데이터베이스를 통해 획득한 시료 정보

Repository #	Rock Name	Sample Description	Region	Period	Formation
PRR-6339	Limestone	Black limestone with Archaeocyatha?	Central Transantarctic Mountains		
PRR-10001	Limestone	Archaeocyathids from limestone	Pensacola Mountains	Cambrian	
PRR-11769	Limestone	Algal reef? silicified. Lowest [?? see note] bed of tillite	Southern Transantarctic Mountains		
PRR-14133	Marble	Weathered trilobite coquina in gray marble. Archaeocyathids present in 3" band.	Ellsworth-Whitmore Mountains	Cambrian	Minaret Formation
PRR-14134	Marble	Weathered coquina. Archaeocyathids and trilobites dominant. Mollusks present.	Ellsworth-Whitmore Mountains	Cambrian	Minaret Formation
PRR-14135	Marble	Weathered trilobite and Archaeocyathid coquina. Oncolites common	Ellsworth-Whitmore Mountains	Cambrian	Minaret Formation
PRR-14139	Limestone	Limestone clast, in place in Whiteout Conglomerate-contains large (1'diameter) and small Archaeocyathids (?). [Ripplemarks and trace fossils?]. Bulk rock mudstone W-79-46A	Ellsworth-Whitmore Mountains	Cambrian	
PRR-14226	Limestone	About 20-40' below base of highest limestone bench get several limestone outcrops. These are rich in trilobites. 2 different but close by to each other limestone. Trilobites, matherella an Archaeocyathids.	Ellsworth-Whitmore Mountains	Cambrian	Springer Peak Formation
PRR-14299	Limestone	Tanlimestone. Oriented cores for paleomagnetism.	Pensacola Mountains	Cambrian	Nelson Limestone

PRR-14300	Limestone	Dark limestone. Oriented cores for paleomagnetism.	Pensacola Mountains	Cambrian	Nelson Limestone
PRR-16421	Limestone	Local float containing calc-algal plates or trash?	Pensacola Mountains	Cambrian	Patuxent Formation
PRR-16422	Limestone	Rock is still massive to top, becomes somewhat more bedded near top. Only one or two black units on up. Check for Archaeocyathids	Pensacola Mountains	Cambrian	Nelson Limestone
PRR-16544	Limestone	Typical black Archaeocyathid bearing limestone; massive	Pensacola Mountains	Cambrian	Schneider Hills Limestone
PRR-17104	Limestone	1/2" inch algae?	Pensacola Mountains	Cambrian	Nelson Limestone
PRR-17103	Limestone	Contact limestone with Patuxent sandstone.	Pensacola Mountains	Cambrian (Middle)	Nelson Limestone
PRR-17112	Limestone	Archaeocyathid limestone bed at least 10' thick.	Pensacola Mountains	Cambrian	Schneider Hills Limestone
PRR-17286	Limestone	Archae[ocyathid] limestone	Pensacola Mountains	Cambrian	Nelson Limestone
PRR-18006	Diamictite	Moraine. Tillite source. Archaeocyathids limestone inclusion in tillite (4"-5" diameter).	Pensacola Mountains	Permian	Gale Mudstone
PRR-18869	Limestone	Archaeocyathid-bearing limestones in Permian tillite. Limestone clast in [Permian] tillite that looks like an Archaeo?	Pensacola Mountains		
PRR-22376	Limestone	Possible Archaeocyathid	Ellsworth-Whitmore Mountains	Cambrian	Minaret Formation
PRR-23379	Limestone	15m beyond [ES-124]; finely laminated, light gray to tan limestone, perhaps algal.	Southern Transantarctic Mountains	Cambrian	Taylor Formation
PRR-23381	Limestone	Limestone here somewhat mixed lithology. Some chert and sandy layers. Algal fossils better seen.	Southern Transantarctic Mountains	Cambrian	Taylor Formation
PRR-23472	Limestone	Lower interval	Southern Transantarctic Mountains		La Gorce Formation

PRR-23473	Limestone	Middle interval	Southern Transantarctic Mountains		La Gorce Formation
PRR-23474	Limestone	upper interval	Southern Transantarctic Mountains		La Gorce Formation
PRR-36391	Limestone	Dark gray mottled limestone. Archaeocyathids ~1.5cm diameter. Micritic limestone with irregular cleavage filled with spar calcite? [Gootee Field NB]. Highly fractured at low angle, some veining; bedding not well shown [Stump Field NB]	Central Transantarctic Mountains	Cambrian	Shackleton Limestone
PRR-36434	Limestone	Limestone: medium to dark gray weathered; lacking bedding; slightly recrystallized, grain supported ooid (sub mm) matrix with hash of rounded, spherical ooid grainstone intraclasts (2-5mm) (15%-20%) and two 1.2 cm diameter Archaeocyathids intraclasts filled inside with ooids; broadly cleaved (10cm); Archaeocyathids and ooid intraclastic ooid grainstone.	Central Transantarctic Mountains	Cambrian	Shackleton Limestone
PRR-36721	Limestone	Micro bial limestone, cleavage. [gray and light brown, cross bedded calcareous siltstone]	Central Transantarctic Mountains	Cambrian	Shackleton Limestone
PRR-39850	Limestone	Algal zone	Ellsworth-Whitmore Mountains	Cambrian	Minaret Formation
PRR-39851	Limestone	Algal zone	Ellsworth-Whitmore Mountains	Cambrian	Minaret Formation



그림 22 시료가 채취된 지역의 항공사진을 바탕으로 한 맵핑 원본자료 (왼쪽) Heiser Ridge (오른쪽) Ramsey Cliff. PRR은 시료와 관련된 사진, 지도, 주상도 등을 시료와 함께 체계적으로 큐레이션하고 있음

획득한 정보를 바탕으로 30개의 석회암에 대한 예비조사를 실시한 결과, 10개의 시료에서 스트로마톨라이트, 쓰롬블라이트 등 미생물초에서 나타나는 구조가 관찰되었으며(그림 23), 중복되지 않는 6개의 시료에서 고배류, 해면동물 등 동물이 포함된 생물초 구조가 관찰되었다. 스트로마톨라이트는 불균일한 얇은 엽리가 구불거리며 발달하는 특징을 보이며, 주변 암석을 피복하는 형태로 발달함. 엽리를 구성하는 화석생물이 남아있는지에 대한 세부적인 조사가 필요하다. 쓰롬블라이트는 전형적인 덩어리구조(clotted structure)를 보이는데 덩어리를 구성하는 미생물화석이 보존되어 있는지는 현재 확인 불가하다. 이들은 곤드와나 다른 지역에 나타나는 동시대 미생물초의 중규모 구조와 매우 비슷한 특징을 가지고 있어, 그 양상이 잘 알려져 있지 않은 남극대륙의 미생물 생물초의 진화가 곤드와나 대륙의 전반적인 패턴을 따를 것이라는 힌트를 제공한다.



그림 23 미생물초 퇴적구조가 남아있는 남극종단산맥 캄브리아기 석회암. PRR-14139 왼쪽의 어두운 암석은 과량연흔에 건열구조가 함께 남아있어 매우 얇은 퇴적환경을 지시함. 오른쪽 석회암에는 얇고 구불구불한 엽리가 발달하여서 스트로마톨라이트로 생각됨(검은 화살표). PRR-39850은 회색의 석회암으로 약 1 cm 반지름을 가지는 어두운 부분(흰 화살표)과 주변의 밝은 부분으로 구별되는 쓰름볼라이트 구조를 보임

석회암에 나타나는 화석은 주로 원통 형태를 가지고 있는데(그림 24) 이전 연구에 의하면 이들은 고배류로 분류되어왔다. 하지만 시료의 보존 상태가 좋지 않아 고배류와 외관이 유사한 해면동물일 가능성을 배제할 수 없다. 중기 캄브리아기는 고배류가 멸종되어 거의 남지 않았으며 고배류가 차지하던 생태적 지위를 해면동물이 차지하고 있었다고 알려지지만 남극에서 보고된 중기 캄브리아기 고배류는 그 예외에 해당되는 것으로 알려져 왔다. 이들 시료에 대한 보다 정밀한 동정을 통해 고배류인지 아니면 유사한 환경에서 살던 해면동물인지를 명확히 하여 (1) 만약 고배류라면 이들이 고배류 멸종에서 벗어나 남극에만 특별히 남아서 번성할 수 있었던 이유는 무엇인지를 밝혀야 한다 (2) 해면동물이라면, 고배류 멸종 이후에 곤드와나대륙 전역에서 해면동물이 그 생태적 지위를 차지하였음을 밝힐 수 있다. 이는 약 6억 년의 생물초 역사에서 빈칸으로 남아있는 중기 캄브리아기 생물초를 구성하는 생물을 밝히고, 그 지역적 분포를 밝히는데 중요한 연구결과가 될 것이다.



그림 24 미생물초 퇴적구조 또는 생쇄설성 석회암에서 산출되는 생물초형성 동물화석들(화살표). 지름 1-2 cm의 원형 단면을 가지는 신장된 원통 모양의 화석이 관찰됨. 대부분 고배류로 인지되었지만 상세한 구조분석이 필요함

3.1.4. 중생대 화산암(Gair Mesa) 산출 화석 동정

3.1.4.1. Mesa Range Mt. Fazio의 중생대 화산암 목재화석 동정

Protocupressinoxylon type wood (KOPRIF 20022): 횡단면-나이테는 존재하지만 미약하고 그 폭은 넓고 춘재에서 추재료의 전이는 다소 급격하거나 부분적으로 완만하다. 춘재가도관의 형태는 다각형에서 원형의 다양한 모습을 보이며 변형을 받아 뒤틀린 모습도 보인다. 다수의 주축유조직이 횡단면상에서 흩어져서 존재한다. 주축유조직의 벽은 부드럽거나 두껍다. 방사단면-가도관 방사벽공은 주로 1열, 또는 2열이며, 2열일 때는 교호 또는 대생하고 벽공간이 서로 이어져 있거나 떨어져 있는 혼합형(mixed-type)의 모습을 보인다. 교차역벽공은 보존상태가 나빠 뚜렷하지 않지만 교차역당 1개, 또는 2개가 존재하며 교차역벽공은 삼나무형 또는 낙

우송형이다. 접선단면-방사계는 주로 단열이고 세포고는 약 1-15 높이이다.

Sahanioxylon type wood (KOPRIF 20023, 20024, 20027, 20028): 횡단면(transverse section)-육안으로는 나이테와 유사한 띠가 횡단면 상에서 관찰되지만, 현미경 관찰 시에는 나이테가 뚜렷하지 않고 폭이 매우 넓다. 나이테가 존재하는 경우, 춘재에서 추재로의 전이는 다소 급격한 편이고 춘재가도관의 형태는 사각형, 다각형, 타원형 등이 존재하고 경우에 따라 압축되고 뒤틀려있다. 추재가도관의 경우 대체로 방사 방향으로 납작하고 세포벽이 다소 두꺼우며 방사유조직의 수평벽에서 작은 벽공 형태의 구조들이 존재하며 수지도는 존재하지 않는다. 방사단면(radial section)-1열, 2열, 또는 드물게 3열의 가도관 방사벽공이 존재하며 1열시 벽공들은 서로 접촉하거나 부분적으로 떨어져서 존재한다. 2열 이상 시에는 상호 교호(alternate), 대생(opposite), 반대생(sub-opposite)을 보이며 가도관 방사벽공의 형태는 원형, 타원형, 눌린 장방형, 육각형, 그리고 사다리꼴(scalariform) 형태의 매우 다양한 모습을 보인다. 교차벽벽공은 낙우송형(taxodioid-type), 삼나무형(cupressoid-type), 또는 남양삼나무형(araucarioid-type)이고, 교차역당 주로 1-3개, 많은 경우 5개까지 존재한다. 방사유조직의 수평벽과 접선벽에 마디모양(nodular)의 구조가 존재하며 방사가도관(ray tracheid)은 확인되지 않는다. 접선단면(tangential section)-방사계는 단열, 양열 또는 부분적 양열이 존재하며 세포고의 높이는 1-48 정도이다. 방사계 세포의 형태는 타원형에서 장방형의 모습을 가지고 방사계의 접선벽에 원형 및 사다리꼴 모양의 벽공 구조(Abietineentüpfelung, Juniperustüpfelung)가 존재하며 가도관의 접선벽공의 유무는 확인되지 않았다.

Agathoxylon type wood (KOPRIF 20121, 20122, 20126): 횡단면(transverse section)-나이테가 존재하며, 뚜렷한 경우와 미약한 경우가 혼재하며 춘재에서 추재로의 이행은 주로 급격한 편이지만 경우에 따라 다소 점진적인 경우도 있다. 추재가도관의 경우 대체적으로 춘재가도관에 비해 작고 납작하며 정상수지도는 존재하지 않으며 상처수지도 또한 확인되지 않고 주축유조직은 확인되지 않는다. 방사단면(radial section)-주로 1열의 가도관 방사벽공이 존재하며 대부분 밀착되어 분포하지만 부분적으로 서로 떨어져서 존재하는 경우도 있다. 가도관 방사벽공이 2열시에는 주로 교호(alternate)하며, 부분적으로 대생(opposite), 또는 반대생(sub-opposite)의 모습을 보인다. 교차벽벽공은 전형적인 남양삼나무형의 교차벽 벽공으로, 교차역당 주로 4~6개, 많게는 9개 이상이 존재하며 방사유조직의 수평벽과 접선벽은 평활(smooth)하다. 방사가도관은 확인되지 않고 접선 단면(tangential section)-방사계는 주로 단열이며 방사계 세포의 형태는 타원형에서 장방형의 모습을 보이며 방사계의 접선벽에 원형 및 사다리꼴 형태의 벽공 구조는 존재하지 않는다.

3.1.4.2. Mesa Range Mt. Fazio의 중생대 화산암 목재 화석 동정에 대한 고찰

Mesa Range의 Mt. Fazio에서 산출된 목재화석들의 해부학적 구조를 관찰한 결과, 현재까지 크게 3개의 분류군이 확인되었다(Protocupressinoxylon, Sahnioxylon, and Agathoxylon type woods). 흥미로운 점은 Kirkpatrick Basalts의 하부층인 Section Peak 층에서 주로 산출되던 Kykloxylon 목재화석들이 Mt. Fazio의 화산암층에서는 전혀 확인되지 않았다는 사실이다(Oh et al., 2016, 2019; 우주선 외, 2017). 이는 Mt. Fazio의 화산암층이 중생대 트라이아스기 이후의 쥐라기라는 사실을 확인시켜주는 결과이다. 중생대 트라이아스기 남극대륙의 식물상, 특히 목재식물상의 경우 현재까지 확인된 사실로는 종자고사리 Dicroidium의 목재분류군인 Kykloxylon이 당시 숲을 우점하던 시기였다. 하지만 쥐라기로 넘어가면서 남극대륙 숲의 구성식물들에 큰 변화가 있었고, 우점종이었던 Kykloxylon이 사라진 자리를 구과류(conifers)와 원시소철류(bennettitales)가 대신 차지하였으며, 이들이 쥐라기 숲의 상층림을 구성하였던 것을 알 수 있다. 그리고 쥐라기의 목재식물상은 트라이아스기에 비해 그 다양성도 다소 높아진 것으로 보인다. 이와 같은 식생의 변화는 일부 트라이아스기의 기후에 비해 좀 더 온화하고 습한 기후로 변한 쥐라기의 기후에 영향을 받았던 것으로 추정된다.

3.1.5. HED 운석의 산소/불활성기체 동위원소 연구

3.1.5.1. HED 운석의 산소동위원소 연구

산소동위원소 분석 결과의 정확도를 높이기 위한 표준 물 시료 분석 및 보정방법을 적용하였다. 동위원소 실험실들에서는 국제원자력기구(IAEA: International Atomic Energy Agency) 또는 미국국가표준기관(NIST: National Institute of Standards and Technology)에서 판매 및 배포하는 국제표준물질을 이용하여 이를 기준으로 측정대상의 동위원소비를 보고하고 있다.

국제표준물질 수급 어려움과 반복분석의 고충으로 인해 각 실험실에는 자체 표준물질(laboratory standard) 혹은 작업용 표준물질(working standard)을 국제표준물질로 보정하여 이를 통해 측정대상의 안정동위원소 비를 계산한다. 산소동위원소 비는 전통적으로 표준평균해수(VSMOW: Vienna Standard Mean Ocean Water)를 기준으로 측정 시료의 상대적인 동위원소비 차이를 보고하고 있지만, 광물 및 암석의 산소동위원소 분석을 실시할 때 동시에 표준평균해수의 산소동위원소를 측정하여 직접 비교하는 것은 기술적으로 매우 어렵다. 실험실에서 자체적으로 사용하는 작업용 표준산소기체(working standard O₂)를 표준평균해수에 대해 보정하여 이를 측정대상의 산소동위원소에 대해 비교한 후 다시 표준평균해수에 대한 상대적인 비로 계산하는 방법이 산소동위원소 분석 결과의 정확도 향상을 위해 필수적이다. 암석 및 광물에 최적화된 산소동위원소 분석시스템을 일부 수정하여 표준평균해수의 산소동위원소 비

측정을 통해 작업용 표준산소기체를 보정하였다. 실험실 간 측정된 동위원소비를 비교하기 위해 두 번째 표준 물(SLAP: Standard Light Antarctic Precipitation)을 분석함으로써 실험실 간 차이를 보정하기 위한 변환 상수를 얻어 산소동위원소 비 계산과정에 적용하였다.



그림 25 물 시료 분해장치

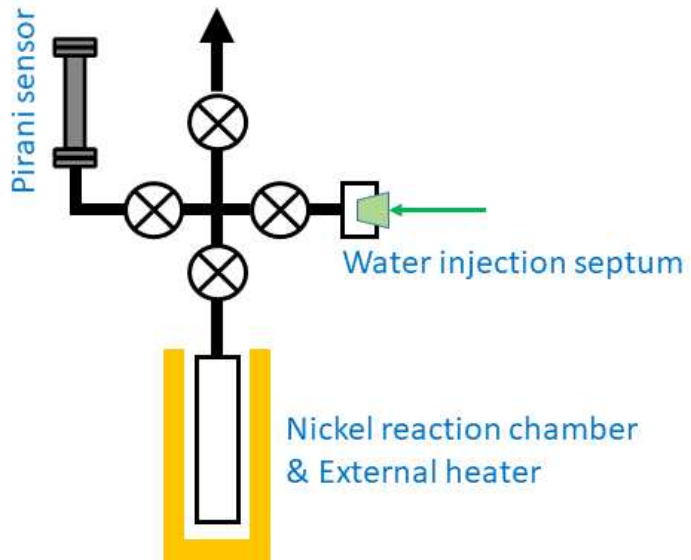


그림 26 물 시료 분해장치 모식도

약 2 μ l 물을 반응용기에 주입하여 약 한 시간 동안 오블화브롬과 함께 가열함으로써 분해하였고(그림 25, 26) 추출된 산소는 기구축되어 있는 정제라인을 통해 순수한 산소만을 포집하여 질량분석기로 분석하였다. 표준평균해수의 $\delta^{17}\text{O}$ 와 $\delta^{18}\text{O}$ 는 각각 0‰로 정의되며 이를 통해 작업용 표준산소기체의 산소동위원소 값을 결정하였다. 두 번째 표준 물 시료의 분석 결과 $\delta^{17}\text{O}$ 와 $\delta^{18}\text{O}$ 는 각각 $-29.15 \pm 0.08(1\sigma)\%$, $-54.48 \pm 0.15(1\sigma)\%$ 로 나타났으며, 인증값인 -55.5% 을 이용해 변환 상수(1.019)를 얻었다. 표준 물 시료(VSMOW, SLAP) 분석을 통해 얻은 변환 상수를 적용한 표준광물시료의 산소동위원소 비는 다른 실험실에서 보고한 값과 유사한 수준으로 나타났으며, 분석 정밀도는 기존 연구결과(Kim et al., 2019 and refereneces therein)보다 개선되었다(그림 27).

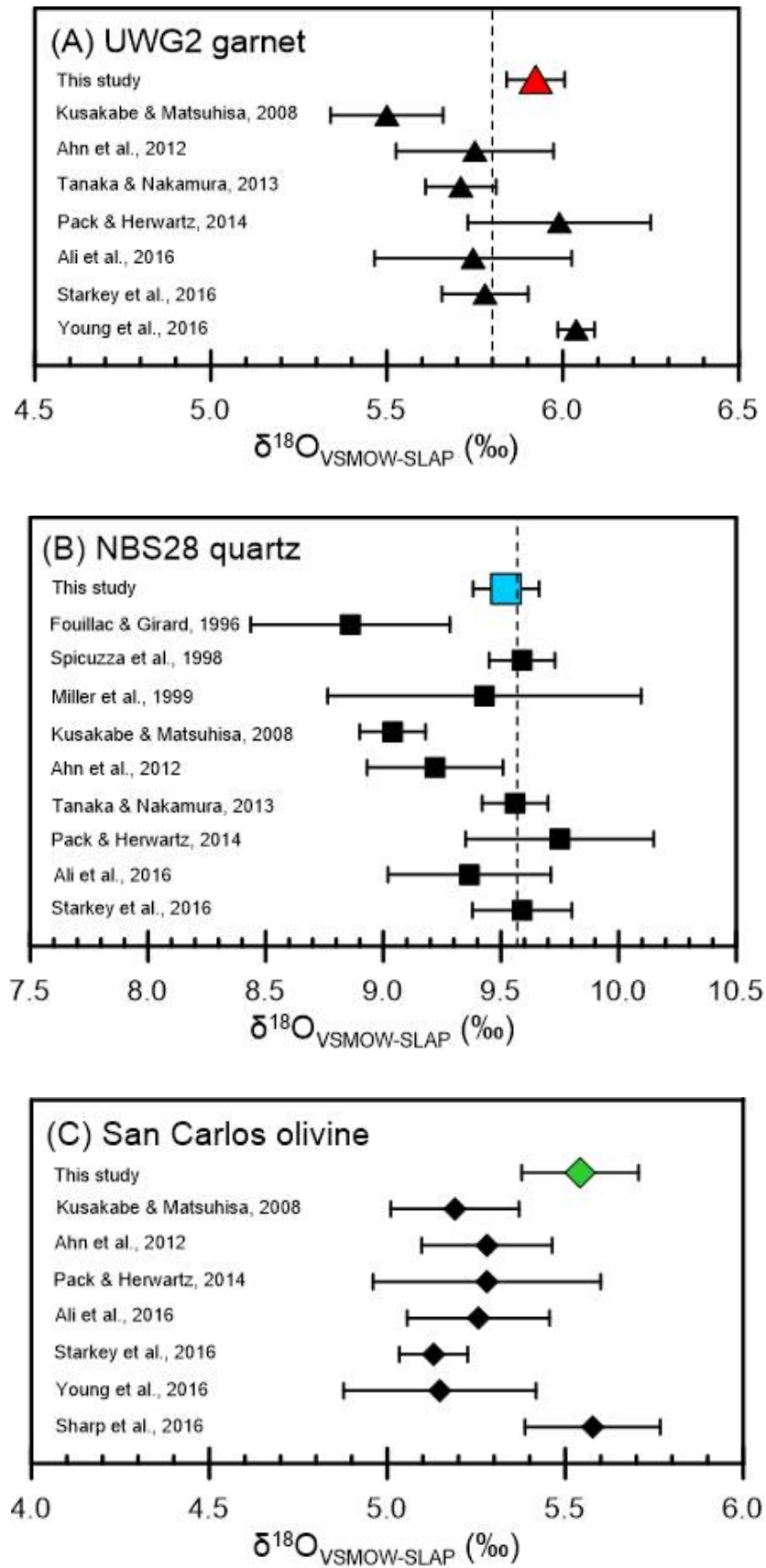


그림 27 표준 광물 시료들의 산소동위원소 분석 결과

3.1.5.2. 개선된 산소동위원소 분석시스템을 이용한 HED 운석 분석

HED 운석은 분화된 석질운석(achondrite)의 일종으로 그 모체가 같은 소행성(Vesta)으로 추정되며, HED 운석은 하워드다이트(howardite), 유크라이트(eucrite), 디오제나이트(diogenite)로 구성된다. 운석의 산소동위원소 비는 지구 암석과 달리 조성이 매우 불균질하며 특히 ^{17}O 의 상대적 함량에 따라 그 기원이 추정가능하다. 지구의 질량분별선으로부터 $^{17}\text{O}/^{16}\text{O}$ 비의 차이를 나타내는 $\Delta^{17}\text{O}$ 값은 운석의 종류를 구분하고 그 기원을 연구하는데 있어 매우 유용한 정보이며, 특히 HED의 $\Delta^{17}\text{O}$ 값은 약 -0.24% 로써 지구물질의 산소동위원소 조성과의 뚜렷한 차이를 나타낸다. 남극에서 수집한 유크라이트를 분석하여 개선된 산소동위원소 분석시스템의 정밀도 및 정확도를 확인하였고 이전 시스템에서 분석한 유크라이트의 분석 결과(붉은색)에 비해 개선된 분석시스템의 분석 결과(파란색)는 향상된 정밀도를 나타내었다(그림 28).

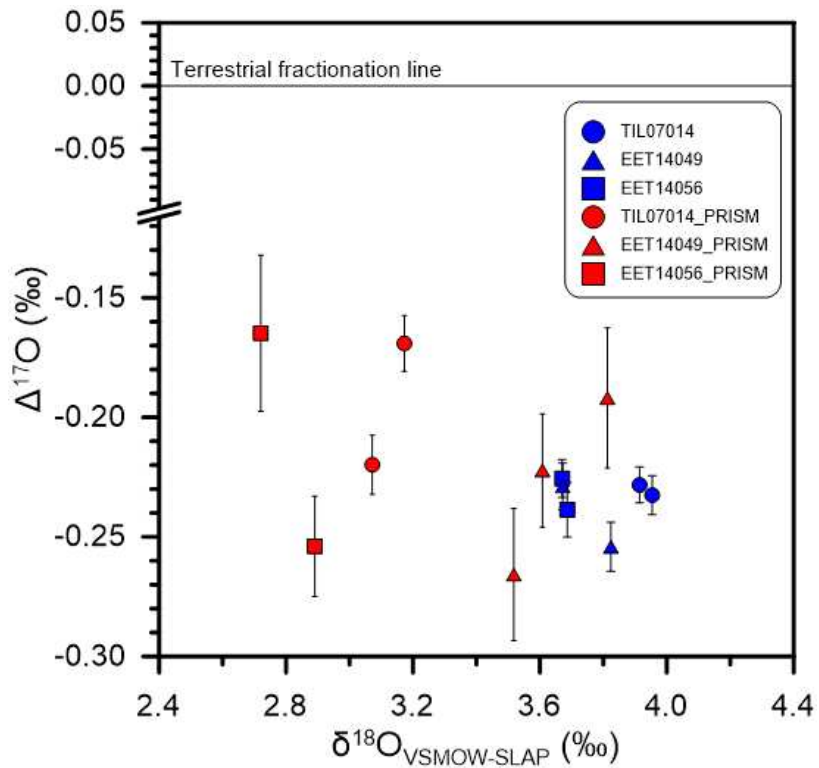


그림 28 유크라이트 운석 분석 결과

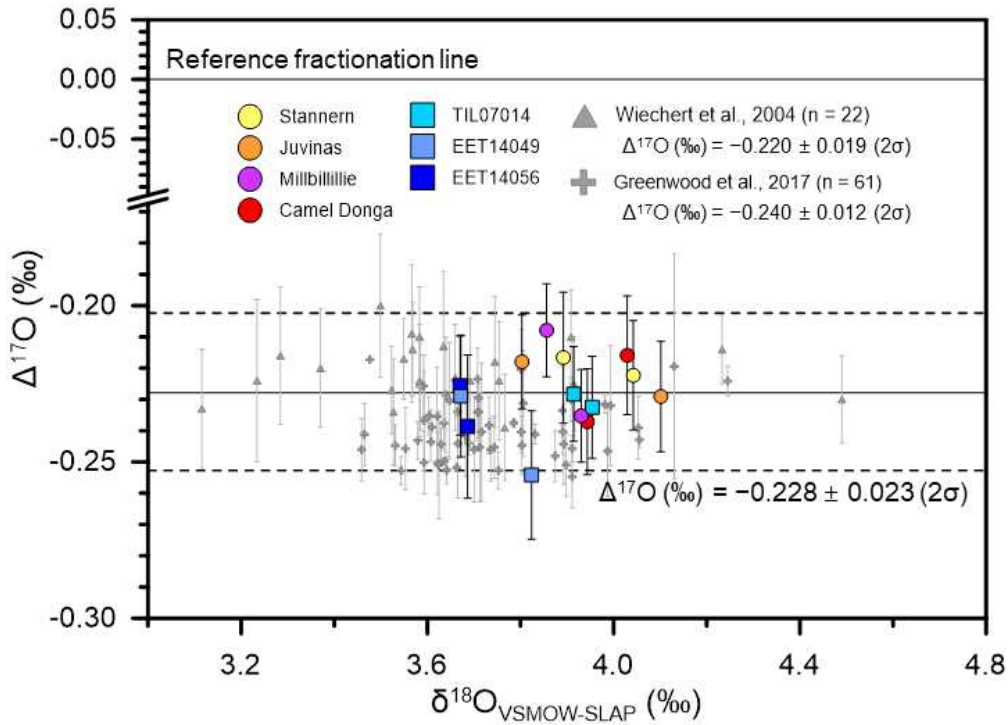


그림 29 유크라이트(TIL 07014, EET 14049, EET 14056)의 산소동위원소 조성

HED 운석은 다른 분화운석에 비해 그 발견빈도가 매우 높기 때문에 산소동위원소 분석 결과 역시 상당히 많이 보고되어있다. 잘 알려진 유크라이트 운석들과 남극에서 수집한 유크라이트 운석을 분석하여 그 결과를 타 실험실과 비교하였을 때 매우 유사한 산소동위원소 비를 나타내었고 분석 정밀도 역시 높은 수준을 보였다(그림 29; Greenwood et al., 2017, Wiechert et al., 2004). 현재 구축된 레이저 불화방식 산소동위원소 분석시스템은 지구 물질뿐만 아니라 운석과 같은 우주 물질의 산소동위원소 비를 정확하고 정밀하게 측정할 수 있다.

3.1.5.3. HED 운석의 불활성기체 동위원소 연구

HED 운석은 소행성 Vesta와 V타입 소행성에서 기원했을 것으로 여겨지는 분화운석이다. 운석이 지구에 도달하기 위해서는 모천체에 충돌작용이 일어나야 하며, 불활성기체 안정동위원소 분석을 통해 충돌작용의 단계 및 충돌 이후의 우주선 노출과 같은 운석의 열 역사를 규명할 수 있다. 남극 HED 운석 EET 14049, 14056, 15119, LOP NVR 011, MAC 02666의 우주선 노출연대와 열 역사 연구를 위해 불활성기체 분석을 진행하였고 분석 결과는 아래 표와 같다(표 4).

표 4 남극 HED 운석의 우주선기원 및 방사성기원 불활성기체 동위원소의 분석 결과

Meteorite	$^3\text{He}_{\text{cos}}$		$^4\text{He}_{\text{rad}}$		$^{21}\text{Ne}_{\text{cos}}$		$^{40}\text{Ar}_{\text{rad}}$	
Type	10^{-9}cc/g				10^{-9}cc/g			
MAC 02666*		243				22		
How	±	19			±	2		
EET 14049		451		44890		73		13704
Euc	±	45	±	4720	±	7	±	1372
EET 14056		529		2154		68		2102
Euc	±	53	±	548	±	7	±	259
LOP NVR 011		561		0**		74		60
Dio	±	61	±		±	7	±	48
EET 15119		47		0**		119		-10
Dio	±	3	±		±	9	±	161

* Howardite MAC 02666은 태양가스를 포함하여 방사성 기원 동위원소 $^4\text{He}_{\text{rad}}$, $^{40}\text{Ar}_{\text{rad}}$ 를 구할 수 없음

**Diogenite LOP NVR 011과 EET 15119는 He의 동위원소 비가 우주선기원의 값을 가져 방사성 기원 동위원소 $^4\text{He}_{\text{rad}}$ 는 0으로 표기

Howardite MAC 02666과 EET 14049는 태양가스 성분을 포함하고 있으며, 나머지 운석은 우주선 기원 불활성기체만을 포함하는데 이는 네온동위원소 비에서 뚜렷이 나타난다(그림 30).

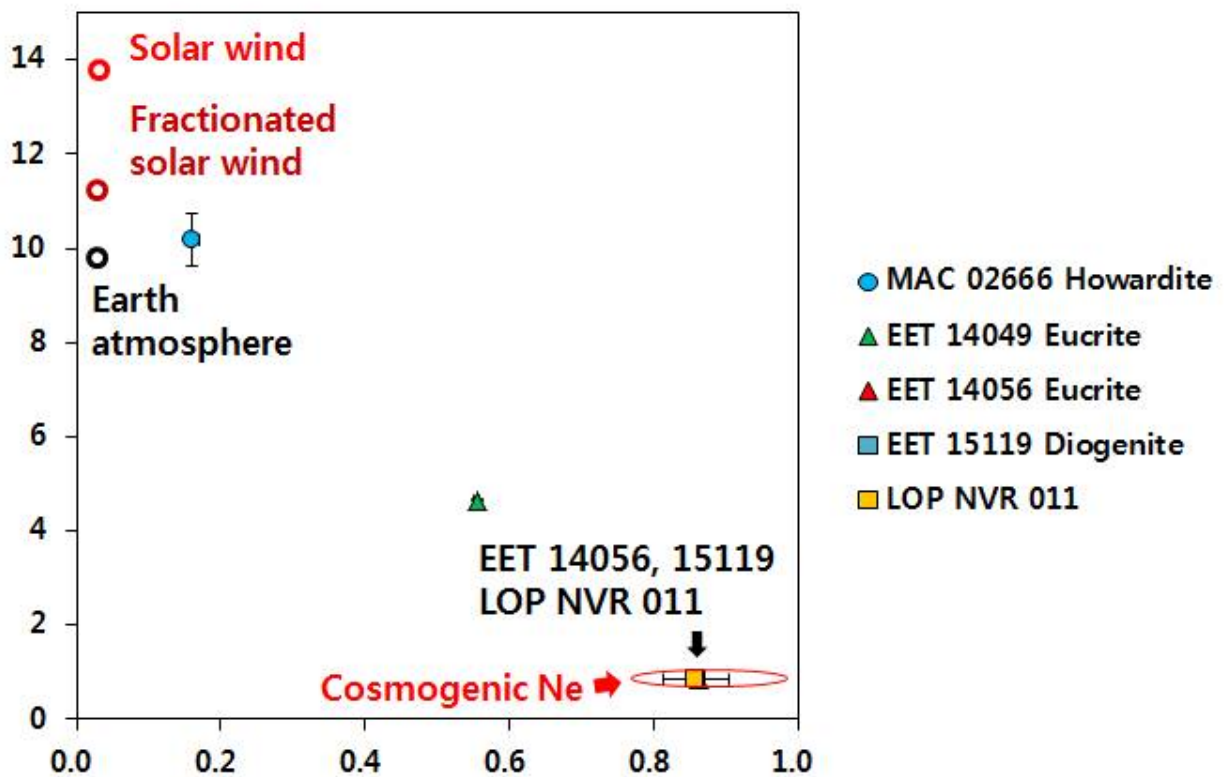


그림 30 남극 HED 운석의 네온 동위원소 비

태양가스의 포함 여부를 통해 MAC 02666과 EET 14049는 모천체의 표면에서 태양풍의 주입이 이루어졌으며, EET 14056, 15119, LOP NVR 011은 심부에 위치하여 충돌작용 이후 우주선 노출의 영향만 받았음을 알 수 있었다. 많은 양의 태양가스를 포함하는 MAC 02666의 경우, 방사성 기원 동위원소와 태양가스 성분을 분리하기 어려우며, 이를 제외한 나머지에 대하여 우주선 노출연대(T3, T21)와 가스보존연대(T4, T40)를 구하였다(표 5).

표 5 남극 HED 운석의 우주선 노출연대 (T3, T21)와 가스보존연대 (T4, T40)

Meteorite		T ₃		T ₂₁		T ₄		T ₄₀	
Type		Ma							
						Ga			
MAC 02666		15		9					
How	±	1	±	1					
EET 14049		28		37		1.7		3.5	
Euc	±	3	±	4	±	0.2	±	0.2	
EET 14056		33		35		0.7		3.0	
Euc	±	3	±	3	±	0.2	±	0.2	
LOP NVR 011		34		28		0		0.5	
Dio	±	4	±	3	±		±	0.4	
EET 15119		3		44		0		0	
Dio	±	0	±	3	±		±		

우주선 노출연대 T3와 T21의 차이는 모천체 탈출 이후의 우주선 노출 중의 열 역사를 지시할 수 있으며, EET 15119의 경우 T3가 T21비해 낮아 태양궤도의 공전 중 He의 손실이 있었음을 알 수 있었고 유크라이트와 디오제나이트의 그룹 간 가스보존연대에서 뚜렷한 차이가 나타났다. 유크라이트의 경우 최소 두 단계의 충돌을 겪었으며, 모천체 탈출 이후 지구에 도달하기까지 불활성기체는 보존된다. EET 14049와 14056의 우주선 노출연대는 28-37 Ma에서 나타나는데 이는 기존에 보고된 유크라이트의 20-28 Ma, 40 Ma 클러스터(cluster)의 징검다리 에 해당하여, 두 운석의 노출연대는 6-80 Ma에서 고르게 나타나는 유크라이트의 우주선 노출 연대 분포를 보다 연속적으로 만든다. 기존 보고된 하위다이트의 경우 50 Ma 이내에서 연속적인 분포를 보이며, 상대적으로 심부에 위치하는 디오제나이트는 22 Ma에서 주요 클러스터를 형성한다. 디오제나이트의 경우 마지막 충돌에 의해 He과 Ar 시스템이 재시작되었으며, 지질학적으로 최근에 일어난 사건이다. 우주선 노출연대 결과를 통해 같은 그룹의 LOP NVR 011과 EET 15119는 서로 다른 과정을 통해 지구에 도달하였음을 알 수 있다. 5개의 남극 HED 운석의 불활성기체 분석을 통해 각 운석이 겪은 충돌 사건과 우주선 노출 등 지구에 도달하기까지의 운석의 열 역사를 규명하였다. 이번 연구는 향후 연구를 위한 기초자료의 측면으로 보다 과학적으로 의미 있는 결론을 도출하기 위해서는 추가적인 HED 운석의 분석과 함께 Ar-Ar 연대측정이나 불활성기체 이외의 다른 동위원소계 분석과의 접목 등이 필요하다.

3.1.5.4. 남극 달운석 DEW 12007에 존재하는 마스크엘리나이트의 형성 기작 연구

운석에 흔하게 산출하는 마스크엘리나이트(Maskelynite)는 고압의 충격변성에 의해 생성되는 사장석 조성의 유리(glass)로 운석이 경험한 충격변성의 온도, 압력 조건을 추정하는 연구에 많이 이용되고 있다. 마스크엘리나이트는 사장석이 충격(shock)을 받아 고체상태에서 그대로 상전이 하여 생성되거나(diaplectic glass), 충격에 의해 녹은 사장석 조성의 용융액(melt)이 급랭(quench)하여 만들어질 수도 있다(melt-quenched glass). 마스크엘리나이트를 운석이 경험한 열, 충격 역사 규명에 사용하기 위해서는 마스크엘리나이트가 어떻게 생성되었는지를 먼저 밝힐 필요가 있다. 본 연구에서는 남극에서 발견된 달운석 DEW 12007의 마스크엘리나이트를 편광현미경, 전자현미경의 후방산란전자(BSE) 영상과 음극선발광(CL) 영상, 라만(Raman) 분광분석법, 전자현미분석기(EPMA)를 이용해 관찰, 분석하여 서로 다른 기원으로 생성된 마스크엘리나이트를 어떻게 구별할 수 있는지 밝히려고 한다. DEW 12007의 마스크엘리나이트는 사장석 결정이 부분적으로 비정질화(amorphized)되어 생성되었음을 편광현미경 직교니콜 사진에서 쉽게 확인할 수 있다(그림 31b). DEW 12007 마스크엘리나이트의 특징은 사장석 결정 내에서 부분적으로 마스크엘리나이트로 변화한 영역들이 일정한 방향성을 가지는 것으로 보이는데 그 기원은 아직 확실치 않지만 마스크엘리나이트로의 상전이를 일으킨 충격 변성의 방향성과 관련되었을 것으로 예상된다. 전자현미경 후방산란전자 영상에서는 마스크엘리나이트로 변화한 영역에서 기존 사장석에 존재하던 크랙이 사라져 매끈한 조직을 보이며(그림 31c), 마스크엘리나이트와 주변 기질과의 경계를 따라 마이크로플로우(microflow) 구조가 발견된다(그림 31d). 이러한 특징은 마스크엘리나이트가 용융체로부터 고체화(solidified) 되었을 가능성을 시사한다.

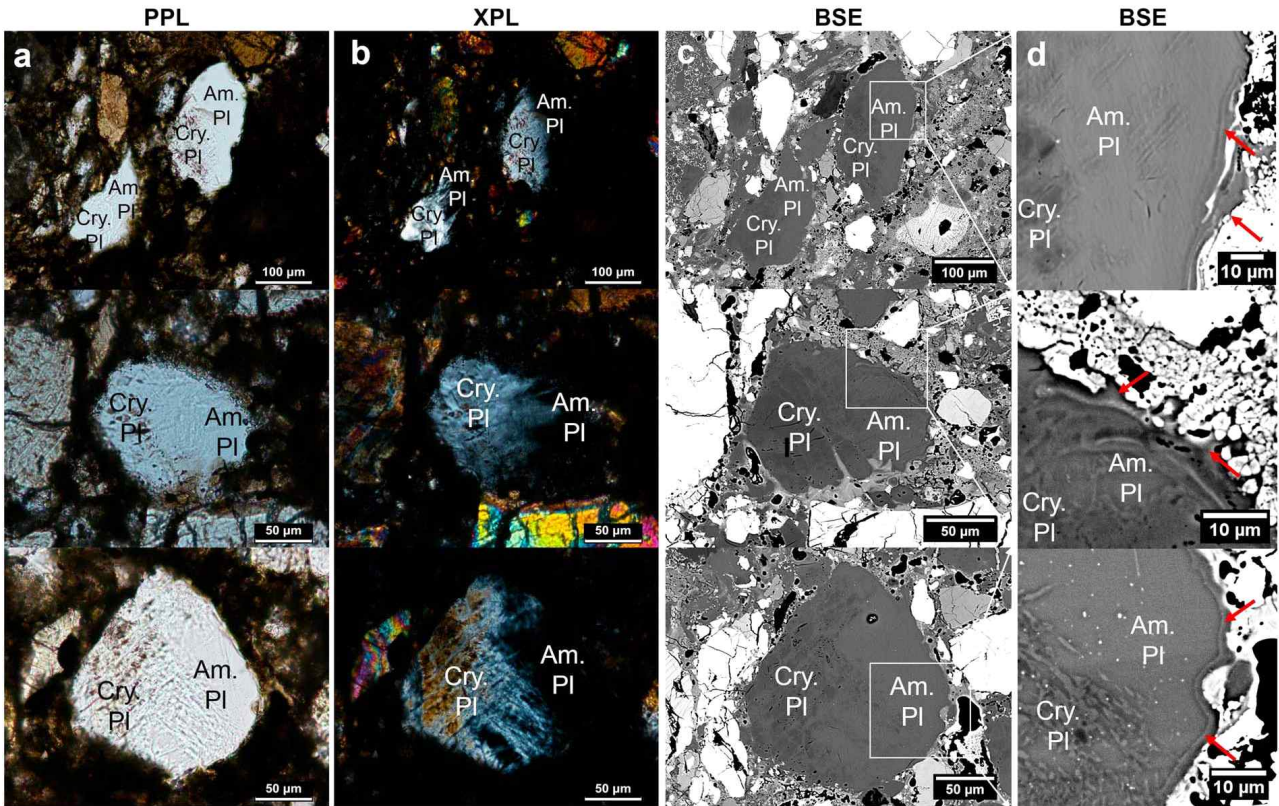


그림 31 DEW 12007내 부분적으로 비결정질화된 사장석 결정의 편광현미경 (a) 개방니콜 (b) 직교니콜 (c) 전자현미경 후방산란전자(BSE) 사진 (d) BSE 사진의 흰색 사각형 영역을 확대한 사진. 빨간색 화살표로 표시된 부분에서 마이크로플로우 조직이 관찰됨. Cry. Pl : 결정질 사장석 (Crystalline plagioclase), Am. Pl : 비결정질 사장석 조성의 마스켈리나이트 (Amorphous plagioclase)

라만 분광분석기를 이용해 사장석 영역에서 마스켈리나이트 영역으로 가로지르며 스펙트럼을 획득하였다(그림 32). 사장석의 결정질 영역에서는 $390, 480, 500, 550 \text{ cm}^{-1}$ 위치에 강한 라만 피크를 보이며, 이 피크들은 충격변성을 받은 사장석 결정에서 보이는 피크의 위치와 매우 잘 일치한다. 반면 비결정질 영역으로 갈수록 원자 구조가 무질서해짐에 따라 피크가 400 에서 600 cm^{-1} 구간으로 점차 넓어지다가 궁극에는 사라지는 것을 확인하였다. 이러한 라만 스펙트럼의 공간분포를 확인하기 위해 2차원 맵핑을 실시하여, 420 에서 600 cm^{-1} 사이의 라만 스펙트럼 면적을 최대값을 1, 최소값을 0으로 정규화하여 도시하였다(그림 33). 값이 낮은 영역일수록 원자 구조 (T-O-T, T = Si 또는 Al)의 무질서도가 높음을 의미하는데, 비결정질 영역의 분포가 편광현미경이나 전자현미경에서 보이는 특징의 분포와 잘 일치함을 확인할 수 있었다.

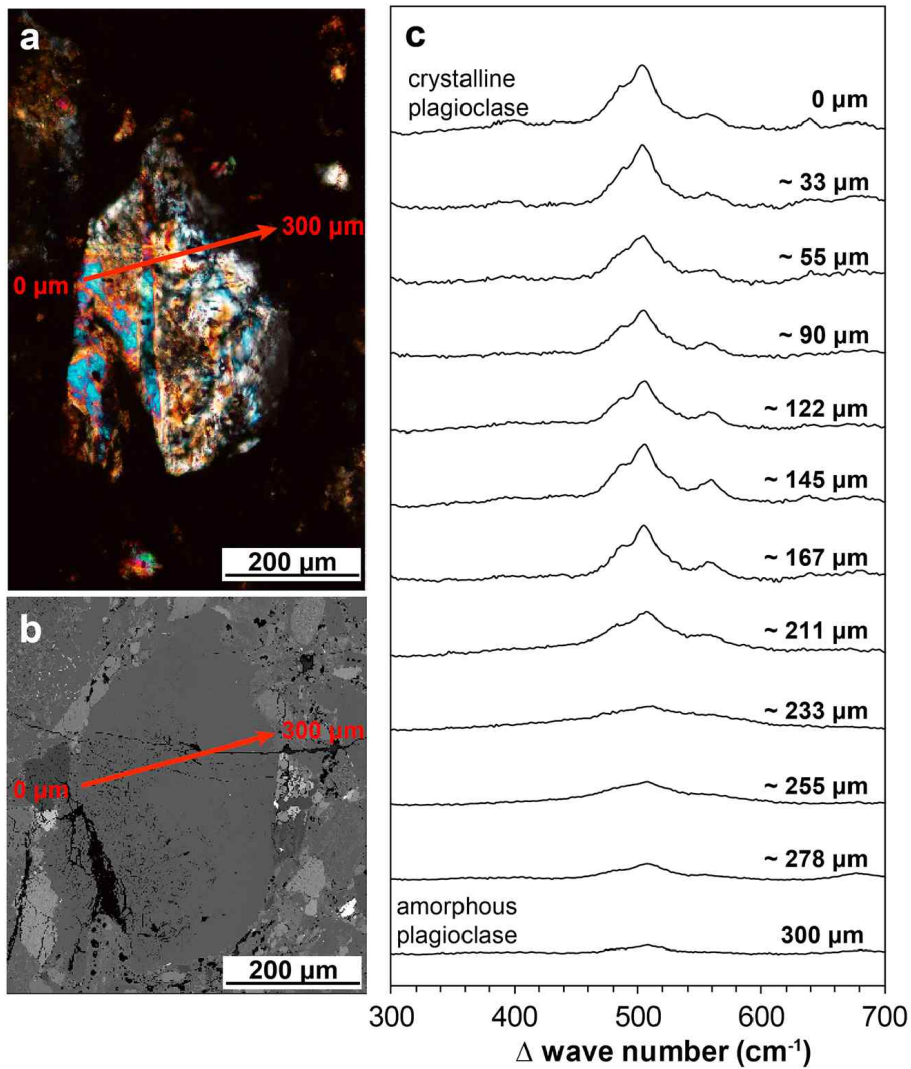


그림 32 DEW 12007 내 부분적으로 비결정질화된 사장석 결정의 (a) 편광현미경 직교니콜 (b) 전자현미경 후방산란전자 사진 (c) 빨간색 화살표를 따라 결정질 영역에서 비결정질 영역의 방향으로 측정된 라만 스펙트럼

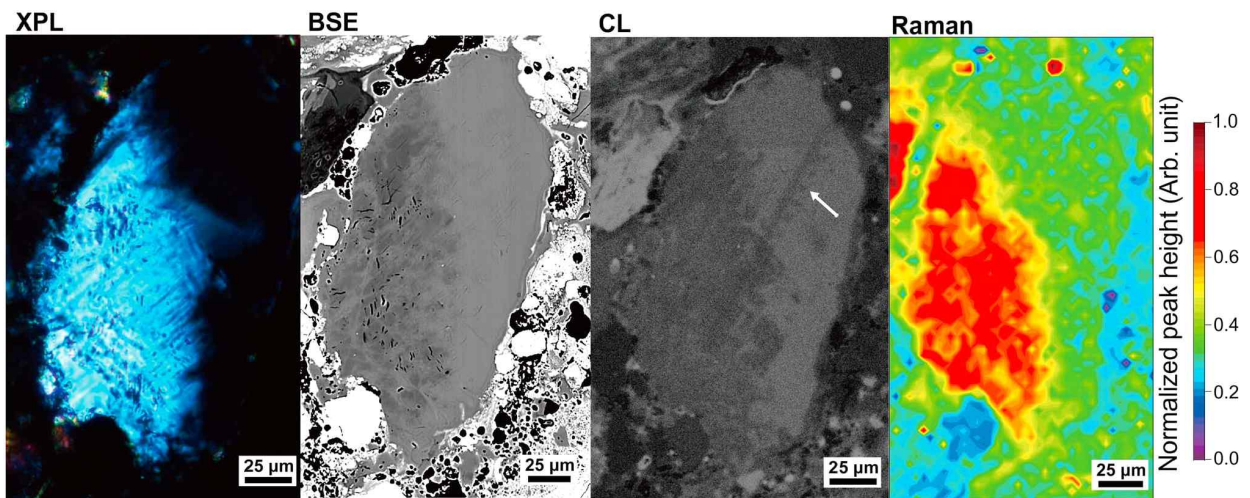


그림 33 DEW 12007 내 부분적으로 비결정질화된 사장석 결정을 각각 편광현미경 직교니콜(XPL), 전자현미경 후방산란전자(BSE), 음극선 발광(CL), 라만 맵핑(Raman)으로 비교한 사진. 하얀색 화살표는 전자현미분석기 분석으로 생긴 흔적임

음극선발광 사진(그림 33c, 그림 34)에서는 비결정질 마스켈리나이트 영역이 사장석 결정 영역에 비해 더 밝게 나타난다. 그 분포는 후방산란전자(BSE) 사진의 밝기 분포와 매우 일치하며, 특히 사장석 영역의 크랙 사이에서 더 밝은 음극선 발광을 보이는 것을 확인하였다. 사장석의 용융이 사장석 결정의 표면과 크랙에서부터 시작된다는 기존 연구에 비추어볼 때 위와 같은 음극선발광의 분포는 DEW 12007의 마스켈리나이트가 용융을 경험하였음을 지시한다.

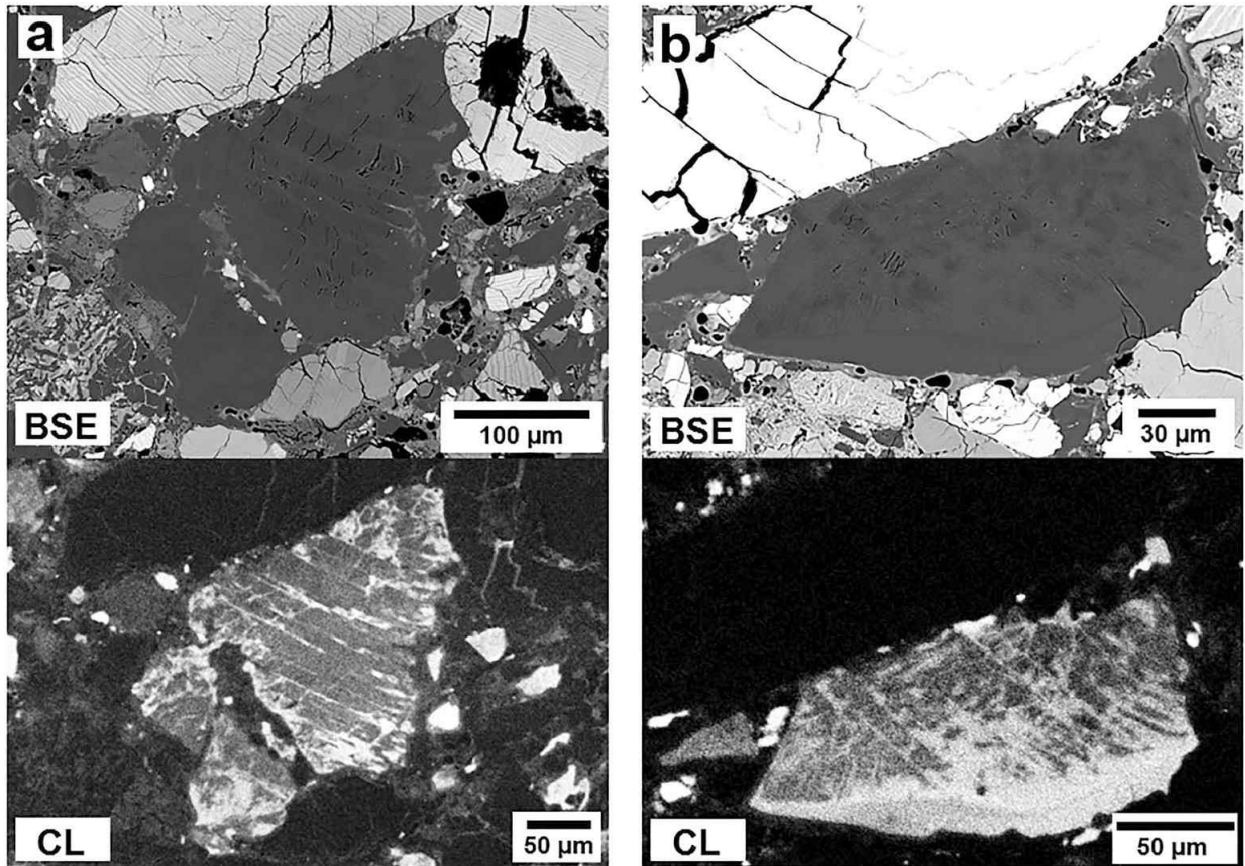


그림 34 DEW 12007내 부분적으로 비결정질화된 사장석 결정을 (위) 전자현미경 후방산란전자(BSE) 영상과 (아래) 전자현미경 음극선발광(CL) 영상으로 비교한 사진. BSE 사진에서 매끄러운 조직을 보이는 비결정질 마스켈리나이트 영역이 CL 사진에서 더 밝게 나타나는 것을 볼 수 있음

사장석과 마스켈리나이트의 주구성원소 화학조성은 서로 다른 차이를 보이는데, 전자현미 분석기를 이용해 얻은 X선 세기 분포를 CaO와 Na₂O의 질량 백분율(wt%)로 환산하였다(그림 35). 사장석 영역에서 마스켈리나이트 영역으로 갈수록 CaO의 함량은 낮아지고 Na₂O의 함량은 높아지는 것을 뚜렷이 확인할 수 있으며, 그림에는 도시되어 있지 않지만, K₂O의 함량은 Na₂O와 유사하게 비결정질 마스켈리나이트 영역으로 갈수록 높아진다. 사장석의 조성은 기존에 보고되었던 DEW 12007의 사장석의 조성(An₉₂)과 유사하였으며, 마스켈리나이트는 입자마다 차이를 보이기는 했지만 모두 인접한 사장석보다는 높은 Na 함량을 보였다.

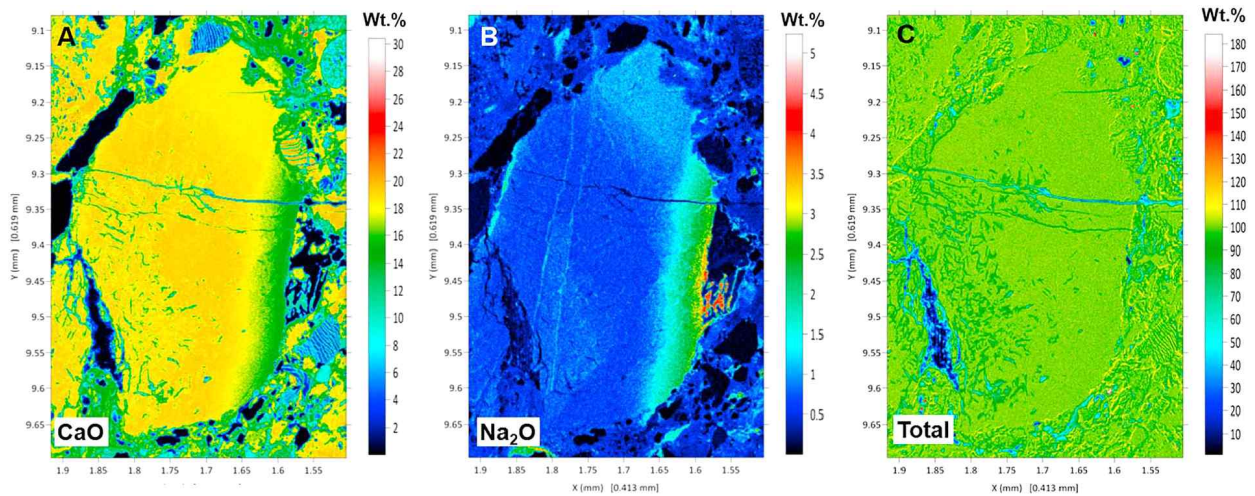


그림 35 DEW 12007 내 부분적으로 비결정질화된 사장석 결정에서 (a) Ca K α (b) Na K α 의 X-선을 측정하여 정량화한 질량 백분율(wt%) 값을 도시한 그림 (c) 정량분석 결과 모든 원소의 합이 100 wt%에 가까운 좋은 결과를 보여줌

사장석 결정 부분에서 마스크리나이트 비결정질 영역으로 가로지르며 측정한 주구성원소의 함량을 산소 원자 8개당 양이온의 수로 도시하였다(그림 36). 마스크리나이트 영역으로 이동할수록 점차 Na와 K의 함량은 높아지고, Ca의 함량은 낮아지는 것을 볼 수 있다. 사장석 결정 내에서 Na, K와 함께 치환되는 Si, Ca와 함께 치환되는 Al의 함량 역시 유사한 경향을 보인다. 이러한 다른 운석(Peace River, Tenham, Dar ar Gani 355, Yamato 790729)에서 연구된 용융 후 급랭하여 생성된 마스크리나이트가 사장석에 비해 Na의 함량은 낮고 K의 함량이 높은 것과는 다른 결과임을 알 수 있다. 기존에 연구되었던 다른 마스크리나이트들은 사장석에서 마스크리나이트로 변화함에 따라 산소 원자 8개당 전체 양이온 수의 합이 5로부터 떨어져 non-stoichiometric 해지는 것이 흔하게 보고되었지만, DEW 12007의 마스크리나이트는 양이온 수의 합이 사장석과 마스크리나이트가 동일하게 5에 근사한 것 또한 특징적이다. DEW 12007이 충격변성 과정에서 경험했을 것으로 생각되는 고압 환경($\sim 5\text{-}32$ GPa)에서 사장석의 부분용융에 따른 조성의 변화는 아직 실험결과가 존재하지는 않는다. 하지만 현재까지 존재하는 약 $\sim 1\text{-}3$ GPa에서의 실험결과와 대기압에서의 실험결과에서는 사장석이 부분용융하면 더 An 함량(Ca)이 용융액과 더 Ab 함량(Na)이 높은 잔류 결정이 관찰되는 것은 매우 잘 알려져 있다. 이런 특징이 DEW 12007의 충격변성 과정에서도 동일했을 것으로 가정한다면 비결정질 마스크리나이트로 갈수록 Ca 함량이 더 낮아지는 것은 DEW 12007의 마스크리나이트가 부분적으로 녹은 사장석 조성의 용융액으로부터 만들어졌다고 가정하면 매우 잘 설명된다.

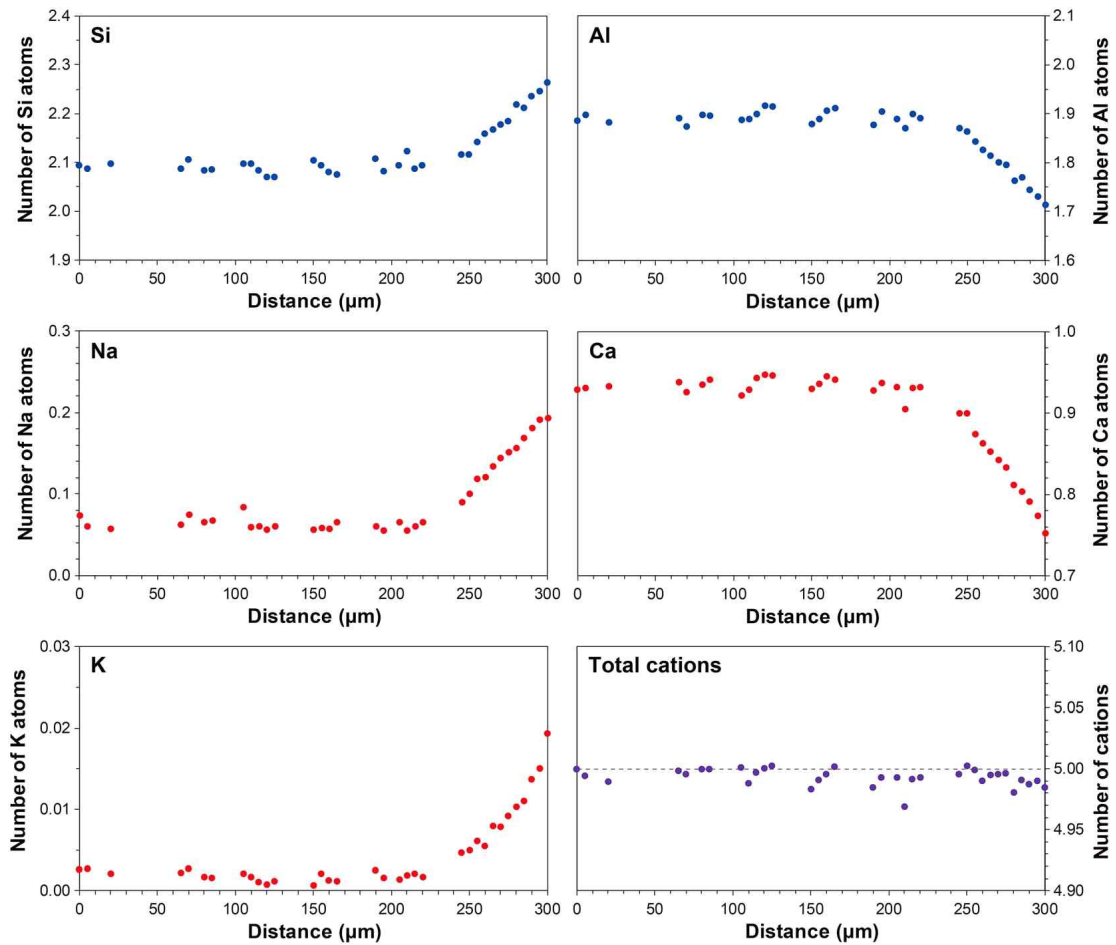


그림 36 부분적으로 비결정질화된 사장석 결정에서 결정질 영역에서 비결정질 영역으로 이동하며 측정된 조성의 프로파일. Y축은 사장석 조성에 기초해 산소 원자 8개당 해당 원소의 양이온 수를 나타냄

극지연구소

사장석 내 결정질 영역과 비결정질 마스켈리나이트 영역은 Na, K, Ca, Si, Al 등 주구성 원소 조성에서 뚜렷한 차이를 보였으며 이를 토대로 마스켈리나이트의 생성에 대한 두 가지 가능성을 고려할 수 있다. 첫 번째는 사장석 결정 내에 이미 존재하던 화학조성의 불균질로 인해 충격변성 과정에서 일부는 마스켈리나이트로 전이하고 일부는 사장석 결정으로 그대로 남았을 가능성이고 사장석의 An 함량이 높을수록 비결정질화에 요구되는 압력이 낮다고 알려져 있으므로, 특정 압력 하에서 상대적으로 Ab 함량이 높은 사장석과 An 함량이 높은 마스켈리나이트가 공존가능하다. 사장석이 고체상태에서 곧바로 비결정질로 전이하는 경우 화학조성의 변화를 유발할 메커니즘이 알려져 있지 않으므로, 마스켈리나이트의 화학조성은 전이 전 사장석 결정의 조성과 유사할 것이나, DEW 12007의 사장석과 마스켈리나이트의 조성은 반대의 경향을 보이므로 이 시나리오로는 설명되지 않는다. 두 번째 가능성은 균질한 조성의 사장석 결정이 부분용융에 의해 일부만 녹았다가 급랭하여 마스켈리나이트로 전이하는 경우인데 이 경우 DEW 12007의 마스켈리나이트에서 관찰된 것과 같이 잔류 사장석에 비해 마스켈리나이트의 An 함량은 낮아지고, 잔류 사장석은 반대로 Ab 함량이 높은 경향을 보일 것이다. 이

시나리오는 전자현미경의 후방산란전자(BSE), 음극선 발광(CL) 사진에서 관찰된 마이크로플로우 조직, 비결정질 영역이 잔류 사장석의 크랙 사이에 존재하는 분포 등 DEW 12007의 마스크리나이트가 용융액으로부터 만들어졌음을 뒷받침하는 관찰 사실과도 잘 일치한다. 따라서, DEW 12007의 마스크리나이트는 운석 충돌로 야기된 부분용융과 그에 뒤따른 급랭으로 형성되었음을 규명한다(Kim et al., 2019).

3.2. 활화산 모니터링과 분출사 복원

3.2.1. 리트만 활화산 활동도 모니터링

3.2.1.1. 리트만 활화산 모니터링을 위한 지구물리 관측장비 구축과 화산가스 채취를 위한 장비설계

지진계 1set, GPS 1set 설계 및 구입

- 멜버른과 리트만 화산가스 CO₂ 플럭스 측정과 샘플링을 위한 키트 설계(그림 37, 38)

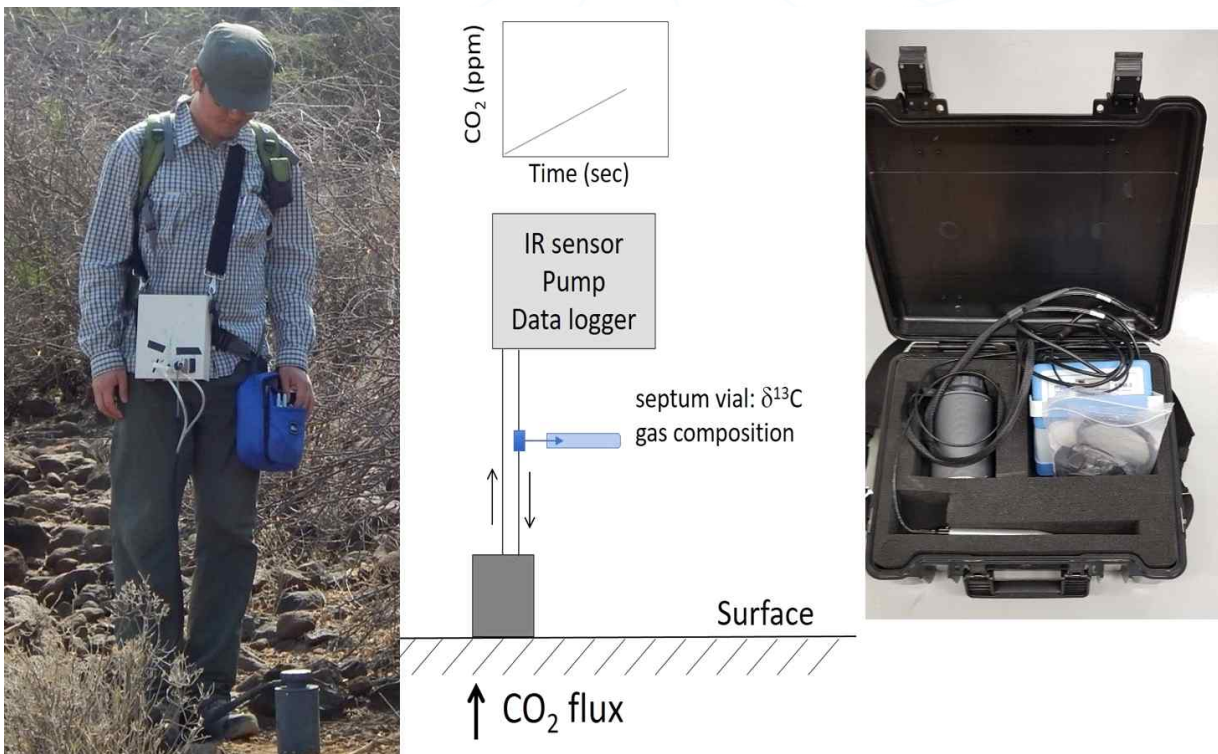


그림 37 화산 주변의 CO₂ Flux 측정을 위한 장비와 CO₂ 측정 장비 모식도



그림 38 화산가스 샘플링을 위한 가스 컨테이너와 장치들

3.2.2. 멜버른, 리트만 활화산의 부석/테프라 지구화학 특성연구

3.2.2.1. 멜버른 화산 부석/테프라 지구화학 특성 연구

멜버른 화산(74.35°S 164.7°E)은 해발 2,730m 높이의 성층화산으로 대한민국 남극대륙 장보고 과학기지에서 북쪽으로 약 30km 떨어진 곳에 위치한다. 화산 정상부 주변에서 최근까지 분기공 가스분출이 주기적으로 관찰되고 있으며, 화산가스가 그대로 얼어붙어 만들어진 많은 얼음 굴뚝들이 발견된다. 또한, 활발한 분기공 가스분출과 더불어 화산체 동쪽 사면 눈 위에 그대로 노출되어 있는 두꺼운 테프라 층을 고려할 때 마지막 화산분출이 수백 년 이내의 최근의 사건일 것이라 추정되고 있다(Lyon, 1986). 멜버른 화산의 경우 1985년부터 테라노바 베이(Terra Nova Bay)에 마리오쥬첼리 기지(Mario Zucchelli station)를 운영하고 있는 이태리 연구팀과 곤드와나 하계기지(Gondwana station)를 가지고 있는 독일 연구팀에 의해 멜버른 성층화산을 포함한 주변 화산암류에 대한 지구화학적 특성 및 성인에 대한 많은 연구 결과가 보고된 바 있으나(Armienti and Tripodo, 1991; Rocholl et al., 1995; Wöner and Orsi, 1990; Wöner and Viereck, 1989, 1990; Wöner et al., 1989; Nardini et al., 2009), 최근 분출역사와 층서 복원을 위한 연구결과는 매우 드물다. 지금까지 보고된 멜버른 화산의 가장 젊은 암상에 대한 절대 연대측정 결과는 0.01 ± 0.02 Ma(K/Ar dating, Armstrong, 1978)과 35 ± 22 ka(Ar-Ar dating, Giordano et al., 2012)이다. 멜버른 화산 분출사 복원을 위해 멜버른 정상부,

동쪽 사면(그림 39), 에드몬슨 포인트 일대에 산출되는 테프라 층(그림 40)의 층서와 화산유리 물질들의 주성분, 미량원소, 동위원소 분석을 실시하였다. 지구화학 특성을 바탕으로 멜버른산과 에드몬슨 포인트 테프라 층의 층서 대비를 통해 최근 분화산물들의 시간에 따른 분화의 경향성을 해석하였다.

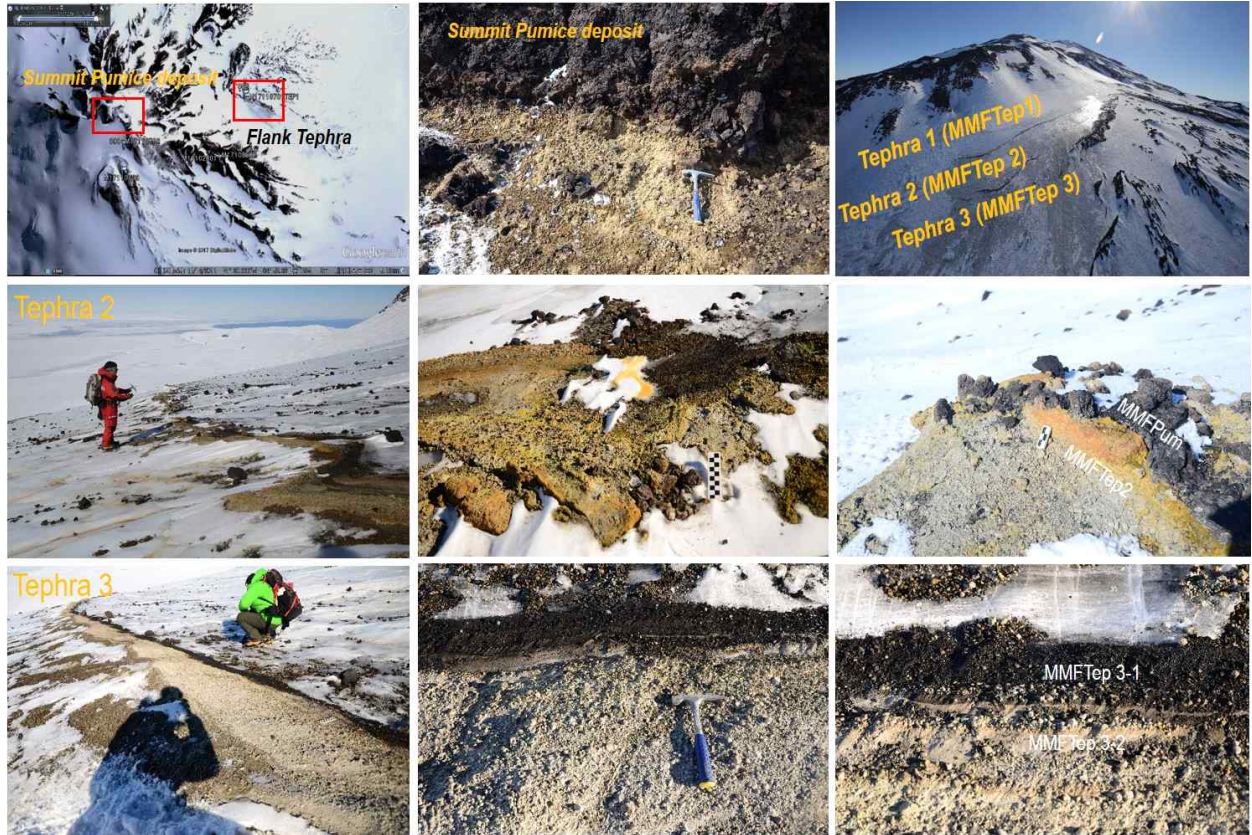


그림 39 멜버른 정상부와 동쪽 사면에 산출되는 테프라 층

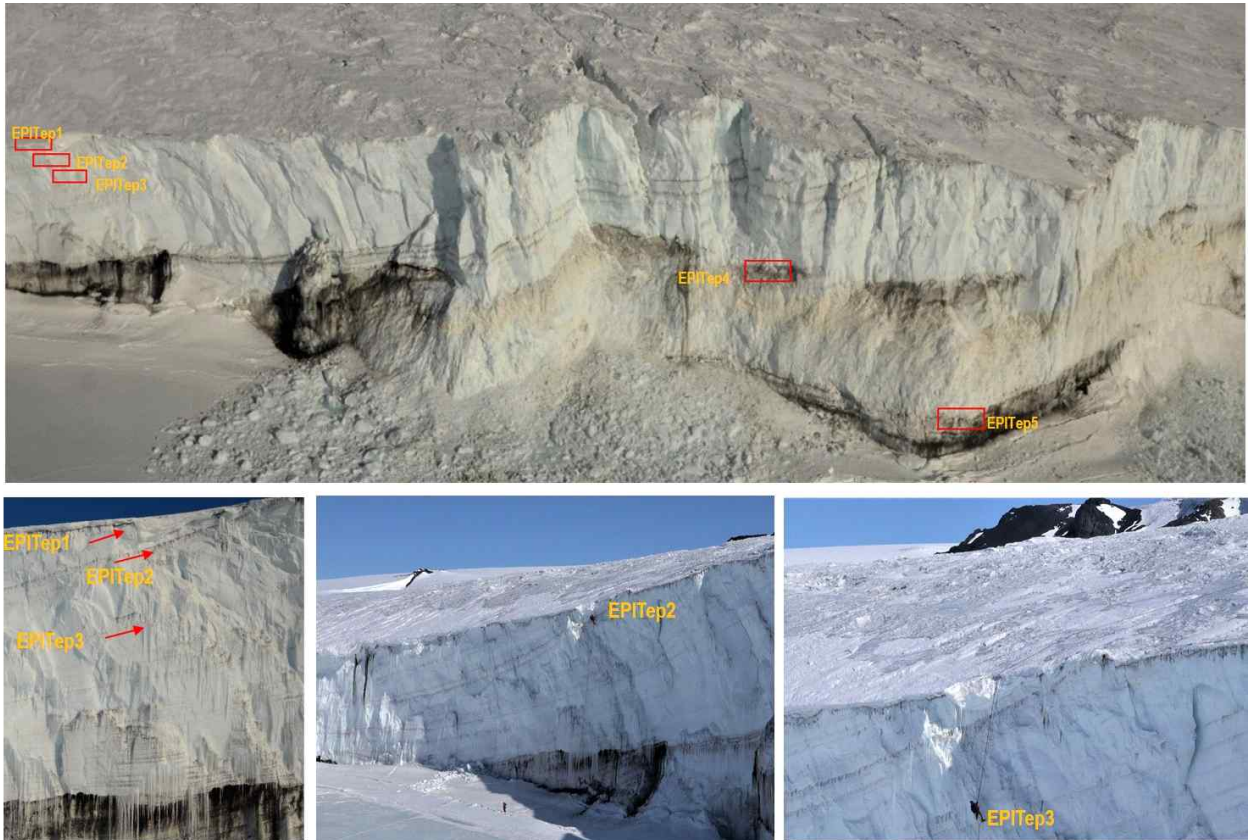


그림 40 에드몬슨 포인트 일대에 산출되는 테프라 층(EPTep1, EPTep2, EPTep3, EPTep4, EPTep5)

멜버른 정상부(MMSPUM), 동쪽 사면(MMFTep), 그리고 에드몬슨 포인트(EPtep) 일대의 테프라층에서 확인된 조면암 조성의 화산분화 산물들은 모두 공통적으로 오래된 층부터 최근 분화로 갈수록 SiO_2 함량이 적어지면서 알칼리함량은 높아졌다가(group 2) 다시 SiO_2 함량과 알칼리함량이 낮아지는 쪽으로(group3) 진화한 테프라가 산출되는 특징을 보인다. 서로 다른 3가지 타입의 조면암 성분과 조면 안산암질 조성의 테프라 층들이 확인되었으며, 멜버른산 MMFTep1, MMFTep2, MMFtep3-2 테프라 층들과 에드몬슨 포인트 EPTep1, EPTep2, EPTep3과 4 테프라층들이 각각 동일한 분화산물에서 유래된 것으로 해석된다(그림 41).

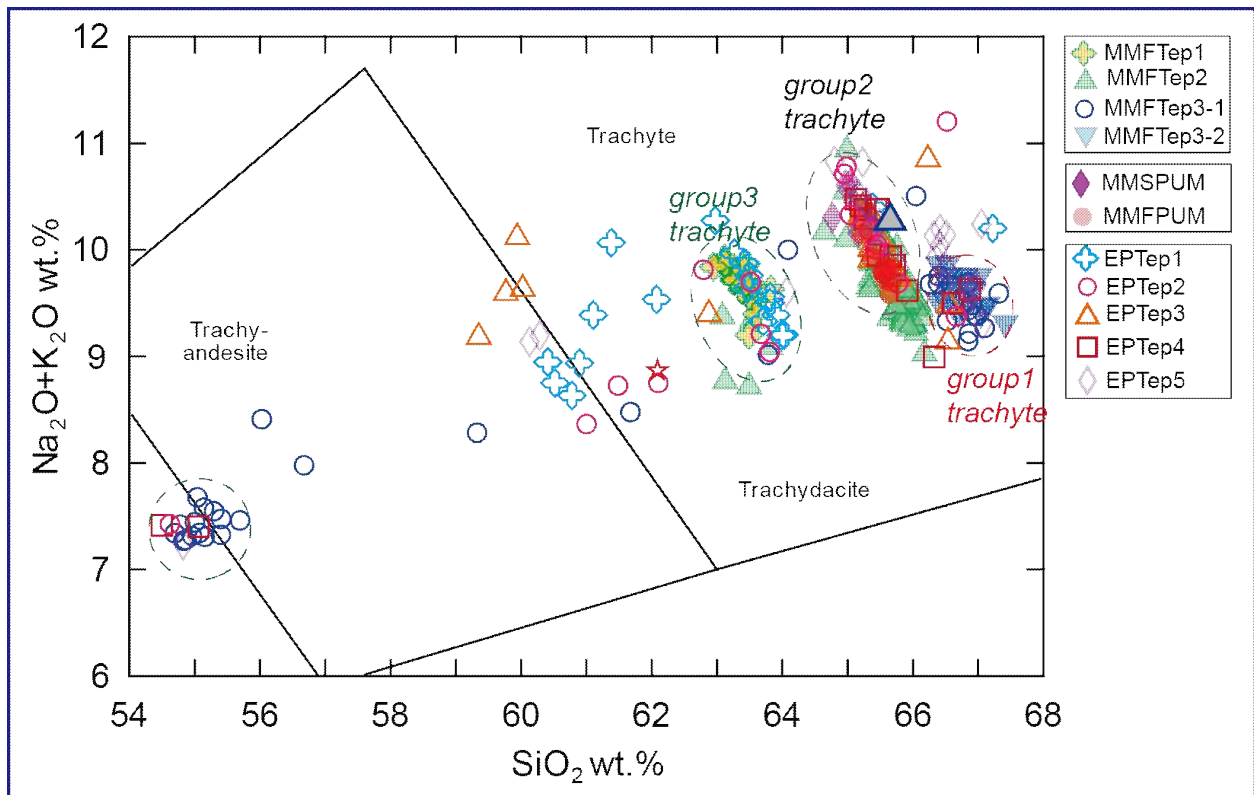


그림 41 멜버른 정상부(MMSPUM)와 동쪽 사면, 에드몬슨 포인트 일대 테프라층들의 TAS 조성. 서로 다른 3가지 타입의 조면암 성분과 조면안산암질 조성의 테프라층들이 확인됨. 멜버른산 MMFTep1, MMFTep2, MMFTep3-2 테프라 층들과 에드몬슨 포인트 EPTep1, EPTep2, EPTep3과 4 테프라층들이 각각 동일한 분화산물에서 유래된 것으로 해석됨

미량원소 조성에서도 3가지 타입의 조면암류가 서로 다른 지구화학적 특성을 보인다(그림 42). 향후 좀 더 많은 시료에 대한 Sr-Nd-Pb 동위원소 조성 분석을 통해 3가지 타입 조면암류의 마그마 성인과 분화과정에 대해 연구를 진행할 예정이다.

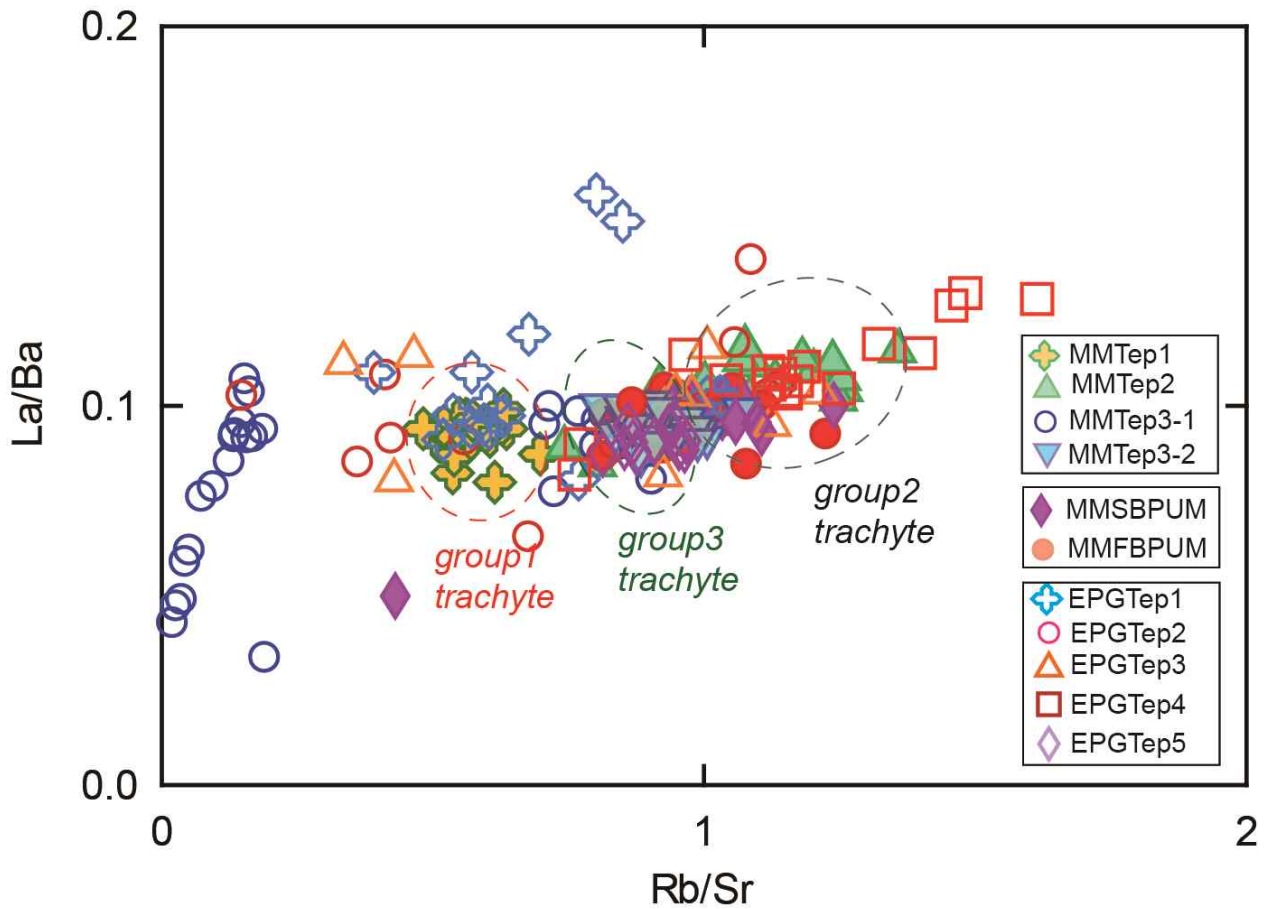


그림 42 멜버른 정상부(MMSPUM)와 동쪽 사면, 에드몬슨 포인트 일대 테프라층들의 미량원소 조성. TAS 다이어그램에서 보여준 바와 같이 서로 다른 3가지 타입의 조면암 성분이 미량원소 조성에서도 뚜렷이 구분됨

극지연구소

3.2.2.2. 리트만 화산 테프라 지구화학 특성

리트만 화산은 장보고 기지로부터 북서쪽으로 약 150km 떨어진 곳에 위치하며, 해발 약 3,000m 정상부에 직경 약 4km의 거대한 칼데라를 포함하는 분기공 가스분출이 활발한 활화산이다(Armienti and Tripodo, 1991; Lee et al., 2019). 화산암류와 폭발적 화산분화로 유래된 화산쇄설성 퇴적물, 부석들이 칼데라 가장자리에 일부 노출된 누나탁들 위에서 산출된다(그림 43, 44).



그림 43 리트만 칼데라 전경과 리트만 부석시료의 샘플링 위치

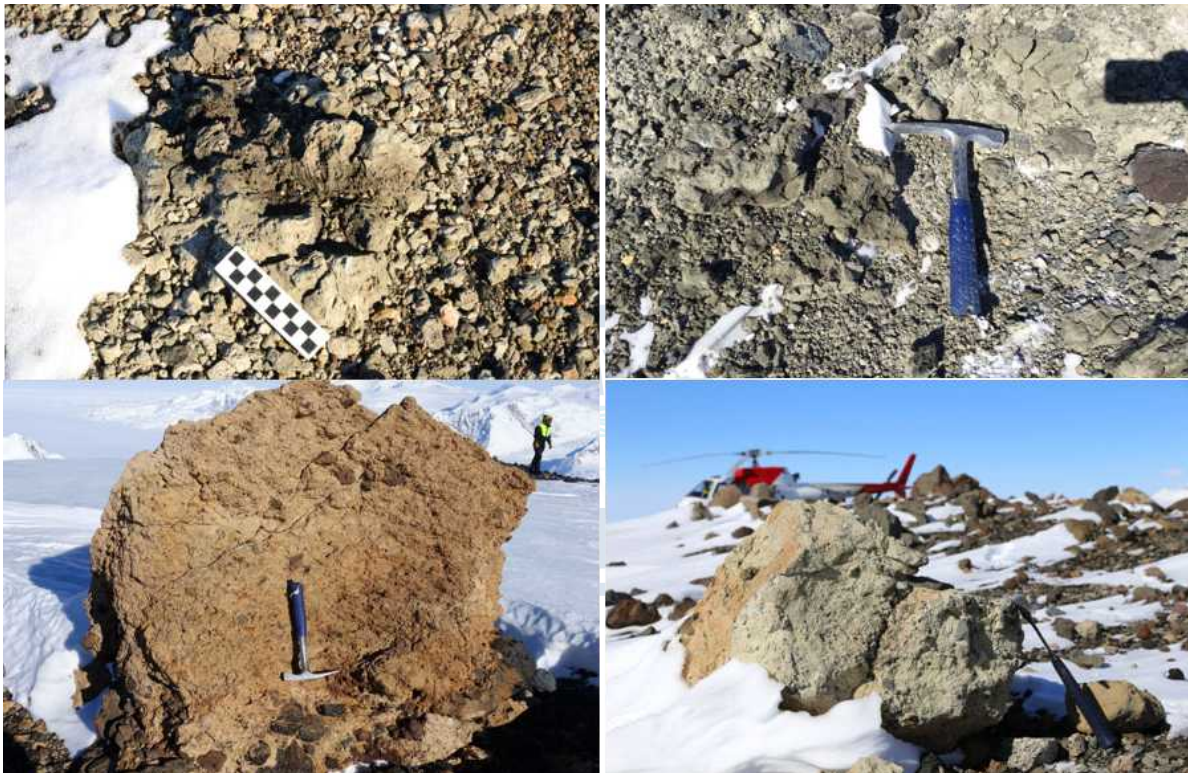


그림 44 리트만 화산 부석들과 폭발적 분화에 따른 화산쇄설물 산출상태

가장 최근의 화산 분화로 만들어진 마그마의 조성을 추적하기 위해 리트만 칼데라 주변 3 곳에서 10개의 부석시료를 채취해 주성분원소, 미량원소, Sr-Nd-Pb동위원소 분석을 실시하였다(그림 45, 46). 샘플링 위치에 따라 부석들의 주성분 미량원소 조성의 차이를 보이는데 RitPUM11 부석들의 조성은 포놀라이트 조성에 해당한다. 1252 화산분화 산물들의 주성분 원소 특성은 RitPUM1 그룹 조면암과 유사한 특성을 보인다. 남극 6개 빙하코어와 블루아이스 지역 테프라에서 발견되는 1252 테프라의 미량원소 조성 분석을 통해 리트만 기원화산에서 산출되는 부석들의 미량원소 조성과 비교연구가 필요하다. 리트만 부석과 리트만 화산암류의 주성분, 미량원소, 동위원소 조성 연구를 종합하여 리트만 화산 마그마 조성의 분화과정 규명 연구를 진행 중이다.

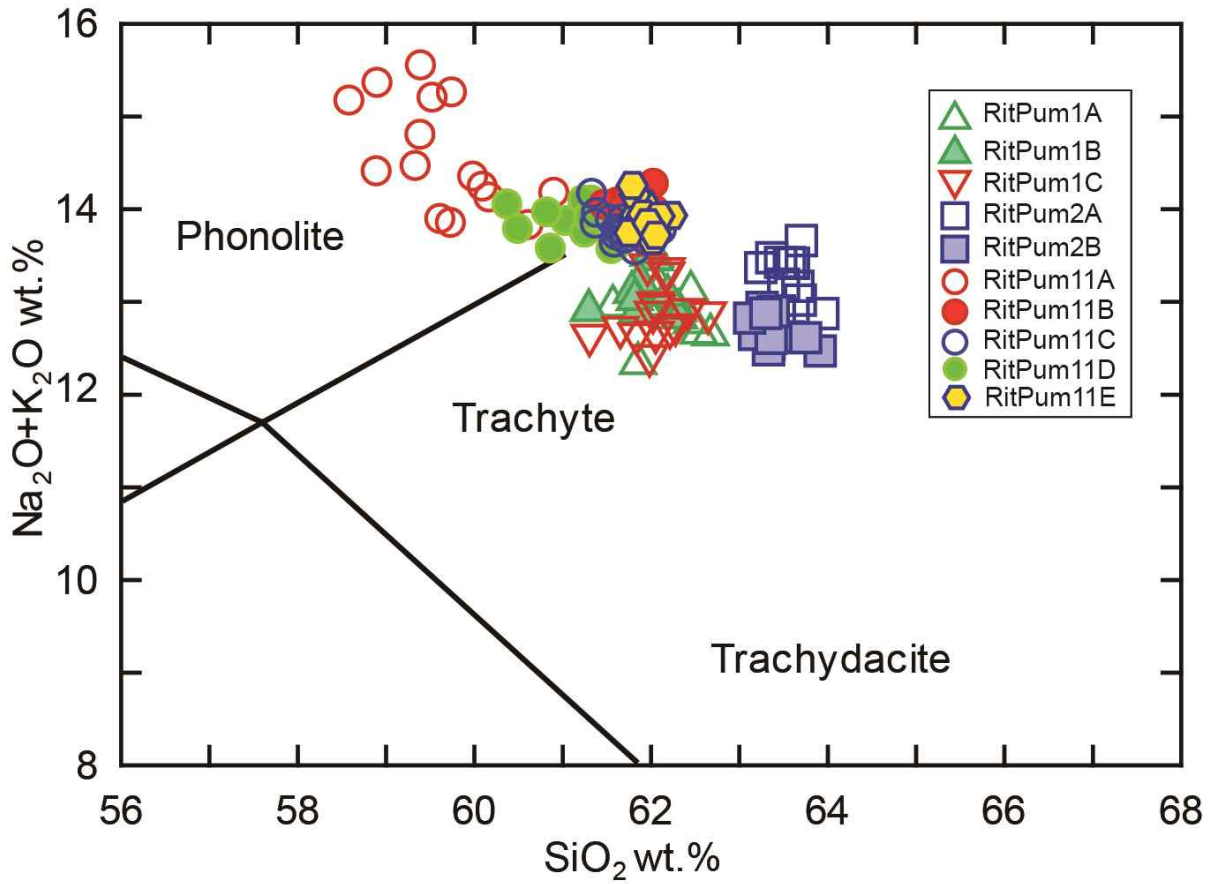


그림 45 리트만화산의 부서시료들의 TAS 조성

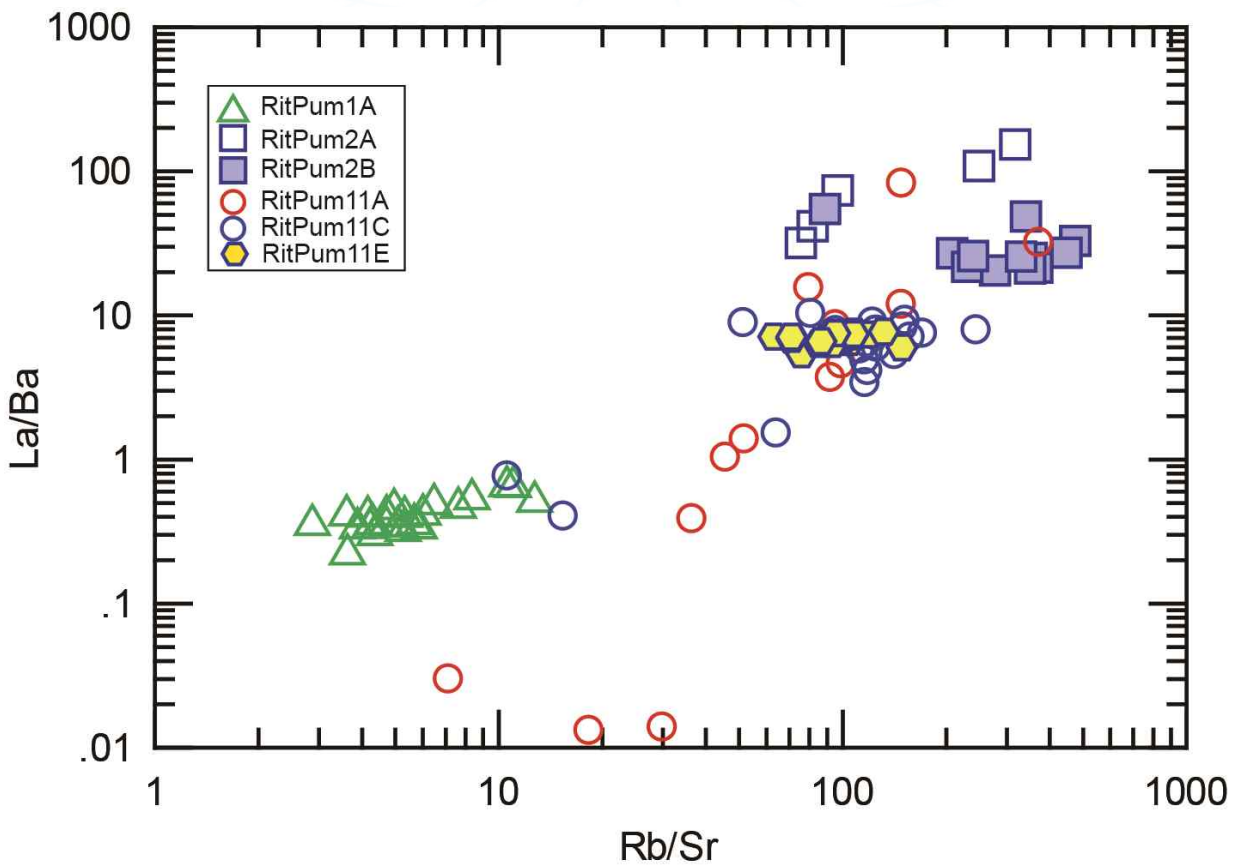


그림 46 리트만화산의 부서시료들의 미량원소 조성

3.3. 남극 지질·운석 정보 활용기반 구축

3.3.1. 남극 암석시료 큐레이션 데이터베이스 구축

다년간 획득한 암석시료의 데이터 입력 및 서랍 별로 정리하여 서랍장마다 QR코드를 작성하여 부착함으로써, 암석시료 보관실에서 샘플을 쉽게 찾을 수 있게 하였다.

3.3.2. 중생대 화산암 3D모델 제작(Gair Mesa)

Mesa Range의 남쪽 부분인 중생대 화산암인 Gair Mesa의 3D 모델(그림 47)을 제작하고 웹 페이지에 게재하였다.

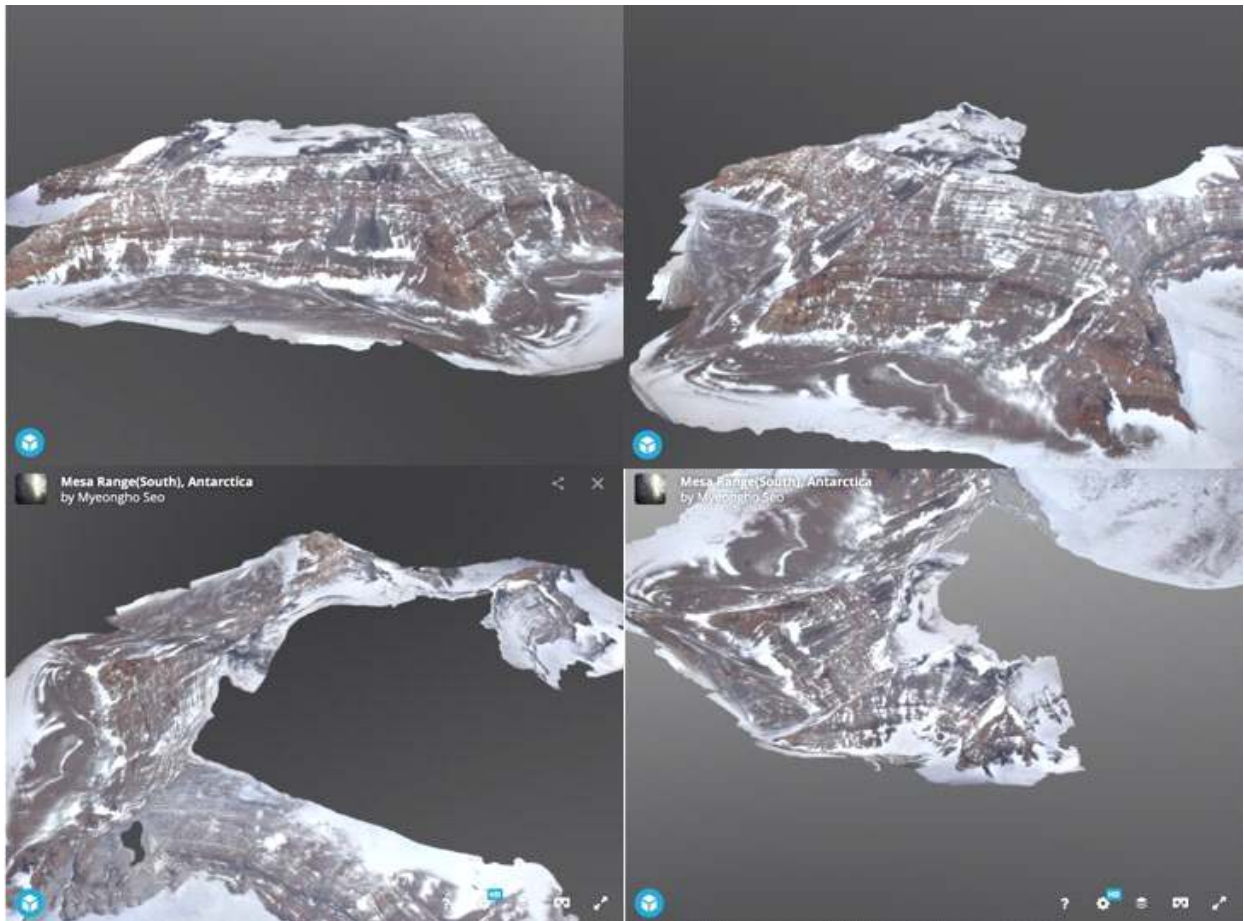


그림 47 Mesa Range의 3D 모델

3.3.3. 남극운석 X-ray 데이터 확보 및 큐레이션 홈페이지에 공개

남극에서 회수된 운석들은 광학현미경 관찰 및 전자현미경 촬영과 X-ray 원소 맵핑을 위하여 박편 제작을 하며 제작된 박편 중 연구 가치가 높은 시료를 대상으로 X-ray mapping data 획득을 진행하였다. 운석 박편의 X-ray mapping 분석 조건은 가속전압 15 kV, 전류 100 nA에서 분석하였으며 영역지정은 샘플의 왼쪽 상단과 오른쪽 하단의 각 좌표를 지정하여 샘플이 지정한 영역 안에 모두 들어올 수 있도록 하였다. 추출된 데이터들은 'Image J' 프로그램을 사용하여 brightness/contrast 조정 후, 현재까지 총 10개의 (DEW 12007(달운석), EET 13018(LL3), TIL 07009(EL6), FRO 10102(LL3), FRO 10097(LL3), EET 14017(LL3), RKP 14005 (CM2), RKP 14003(H3), EET 14074(apatite), EET 14013(CM2)) 운석 박편에 대한 X-ray mapping 데이터를 업로드하였다(그림 48-66).



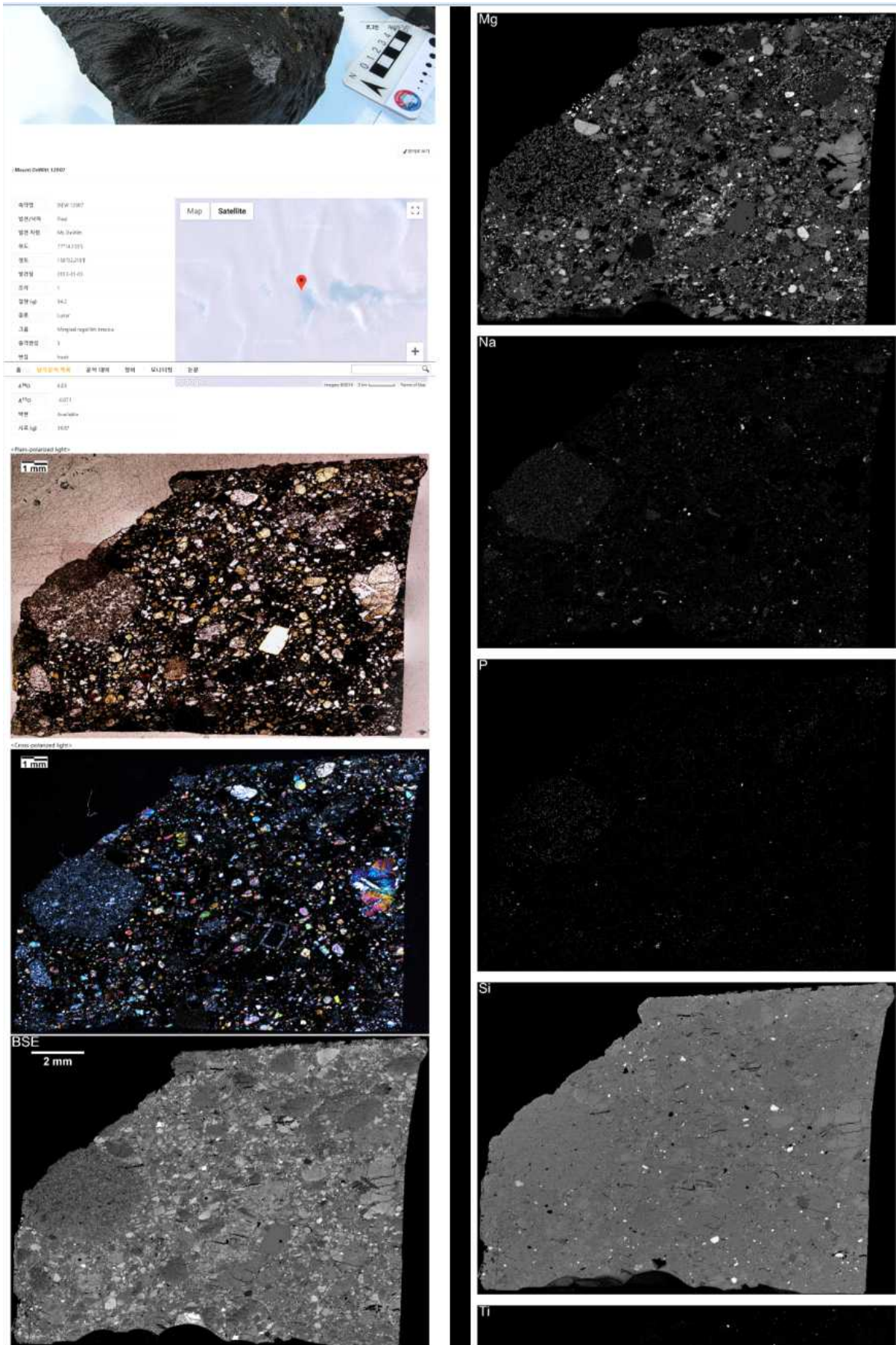


그림 48 KOREAMET 홈페이지에 공개된 달운석 DEW 12007의 X-ray 원소 맵(예시)

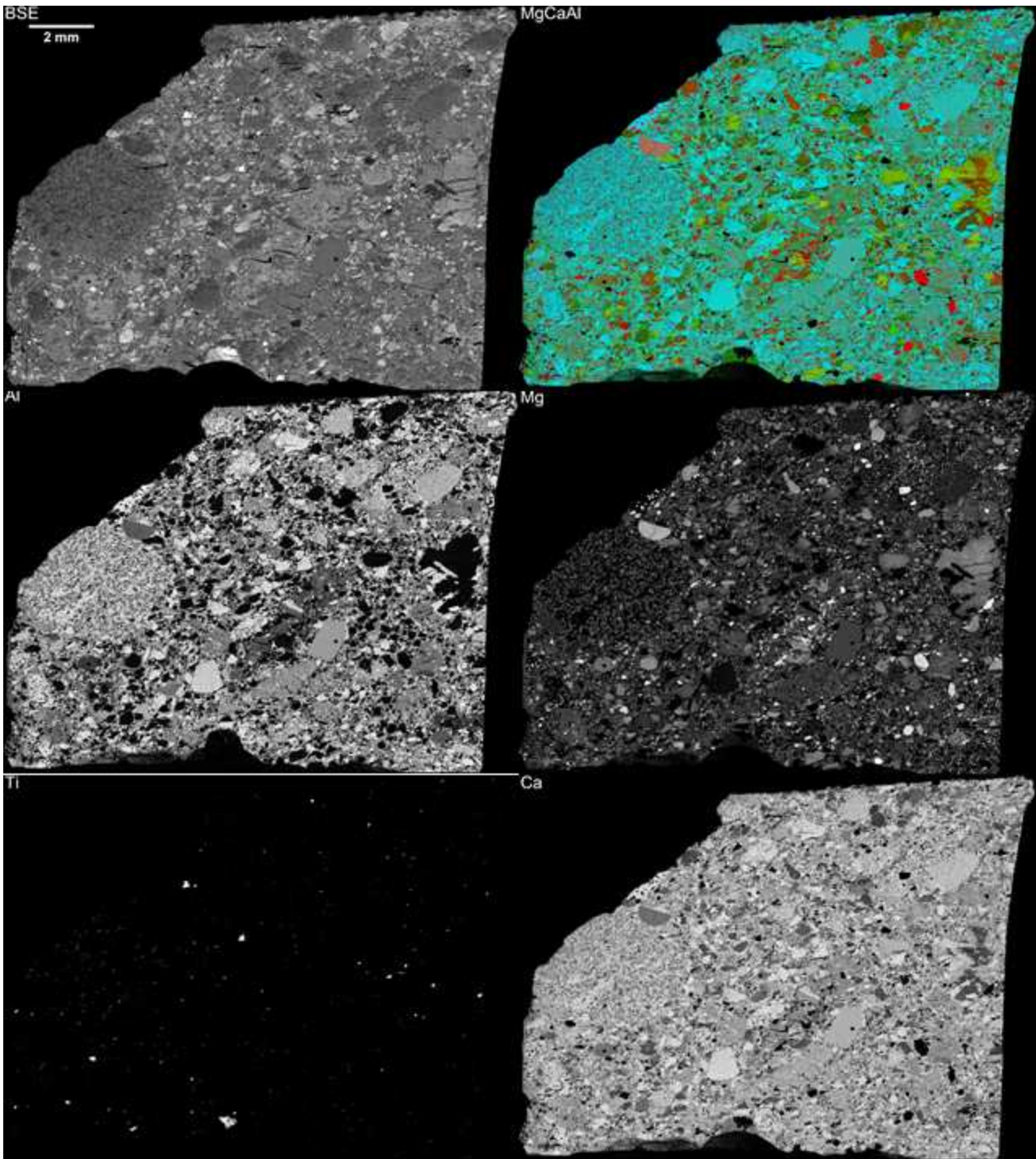


그림 49 DEW 12007(달운석)의 X-ray 원소 맵 1

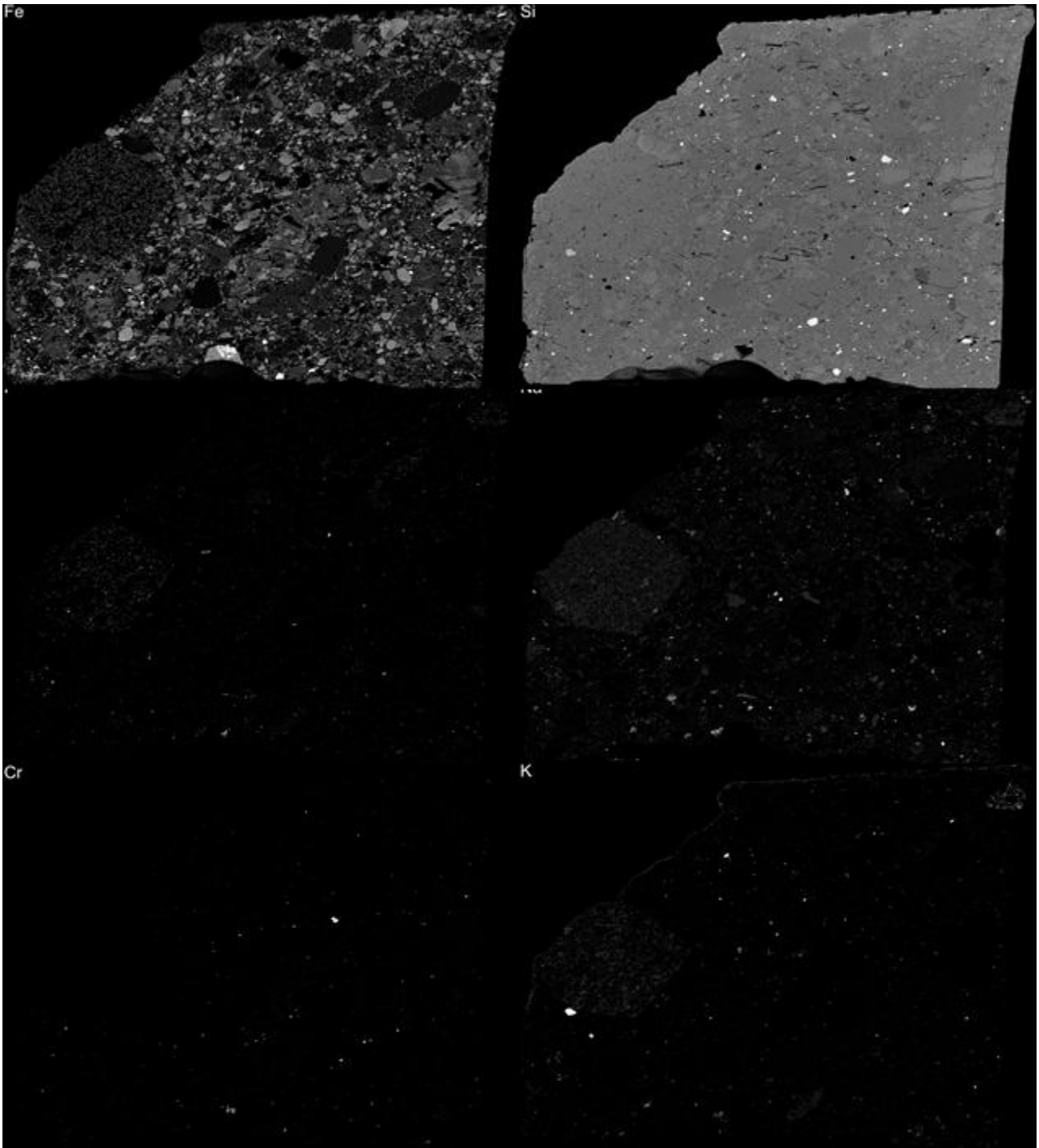


그림 50 DEW 12007(달운석)의 X-ray 원소 맵 2

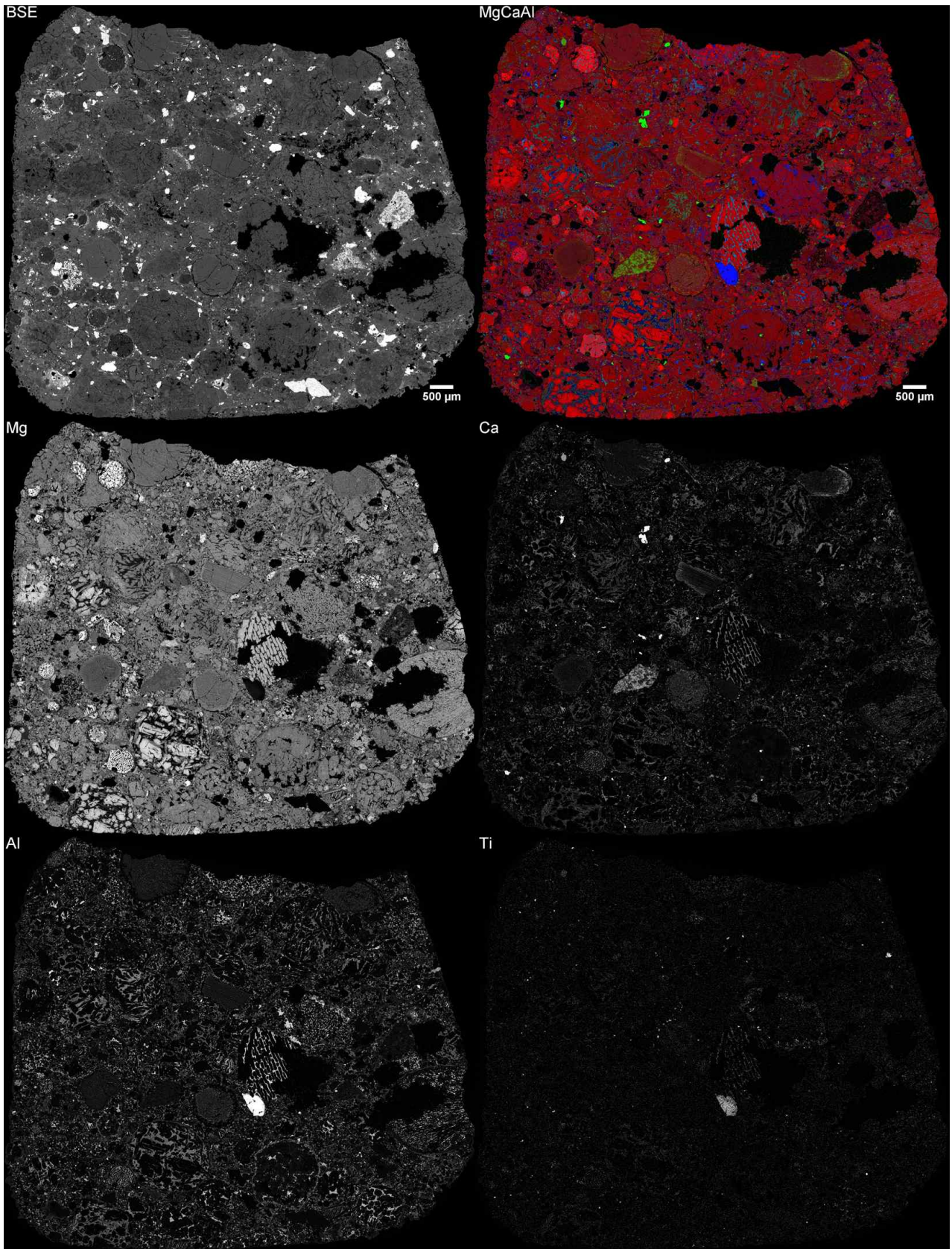


그림 51 EET 13018 (LL3)의 X-ray 원소 맵 1

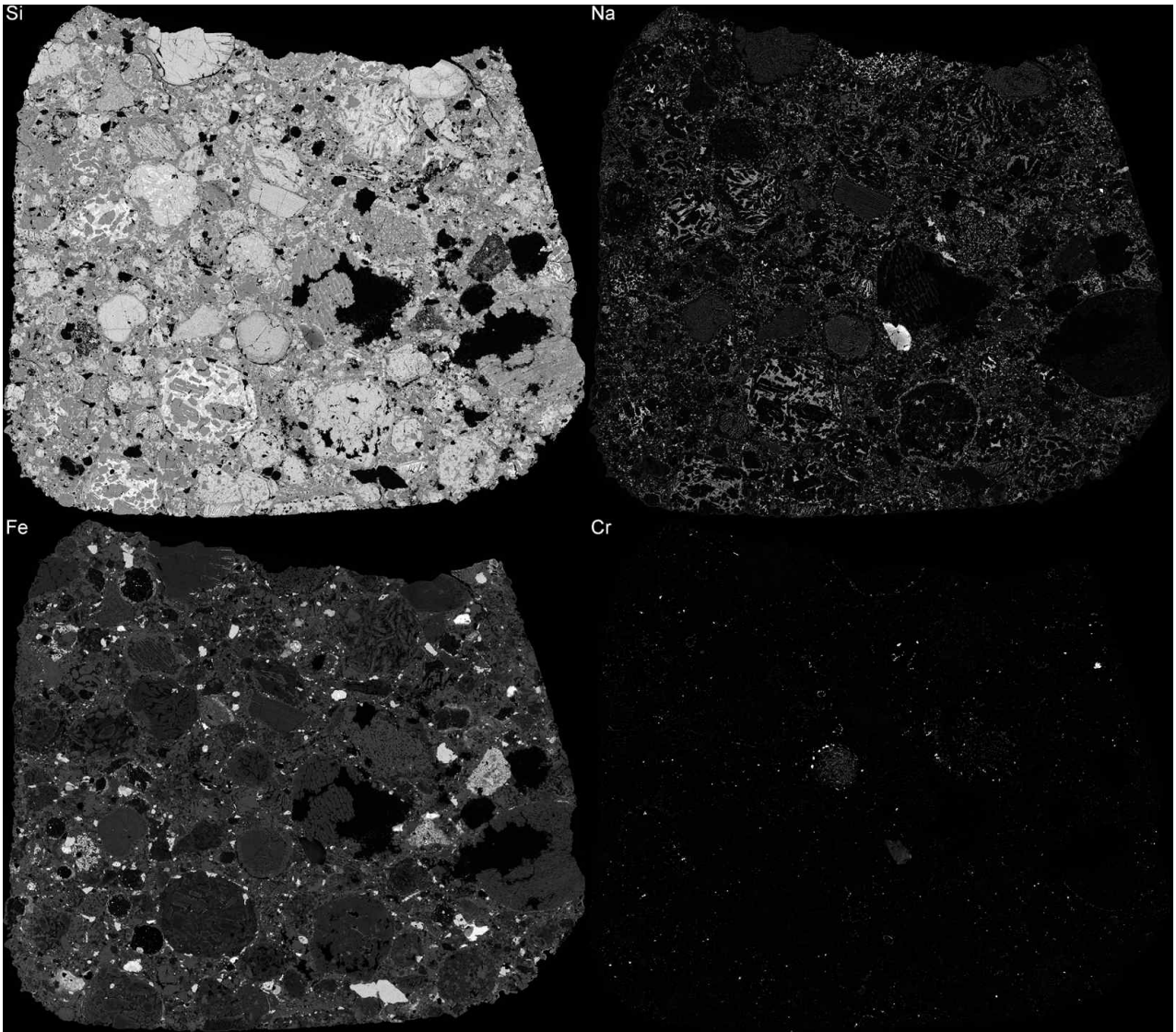


그림 52 EET 13018 (LL3)의 X-ray 원소 맵 2

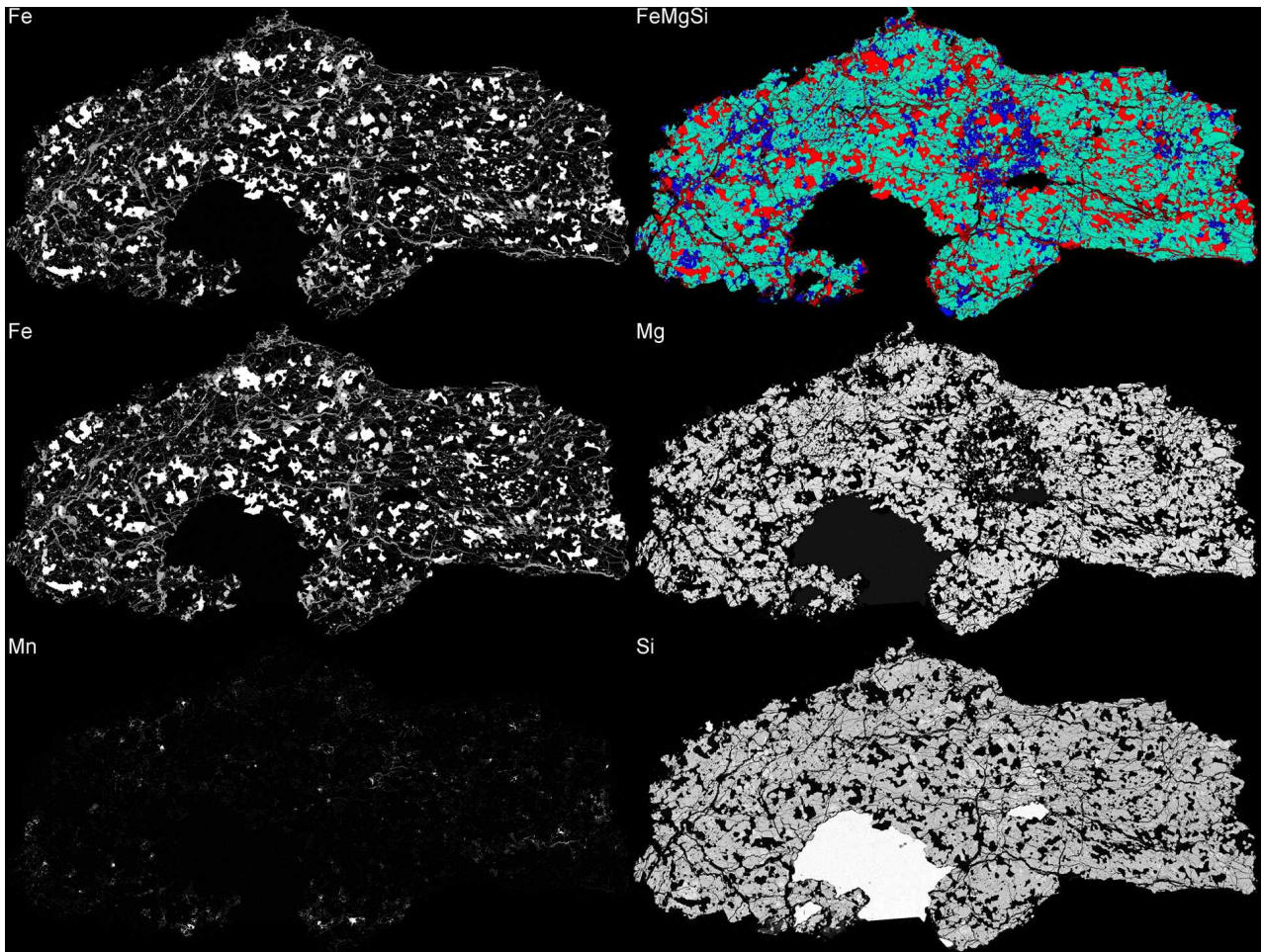


그림 53 TIL 07009 (EL6)의 X-ray 원소 맵

극지연구소

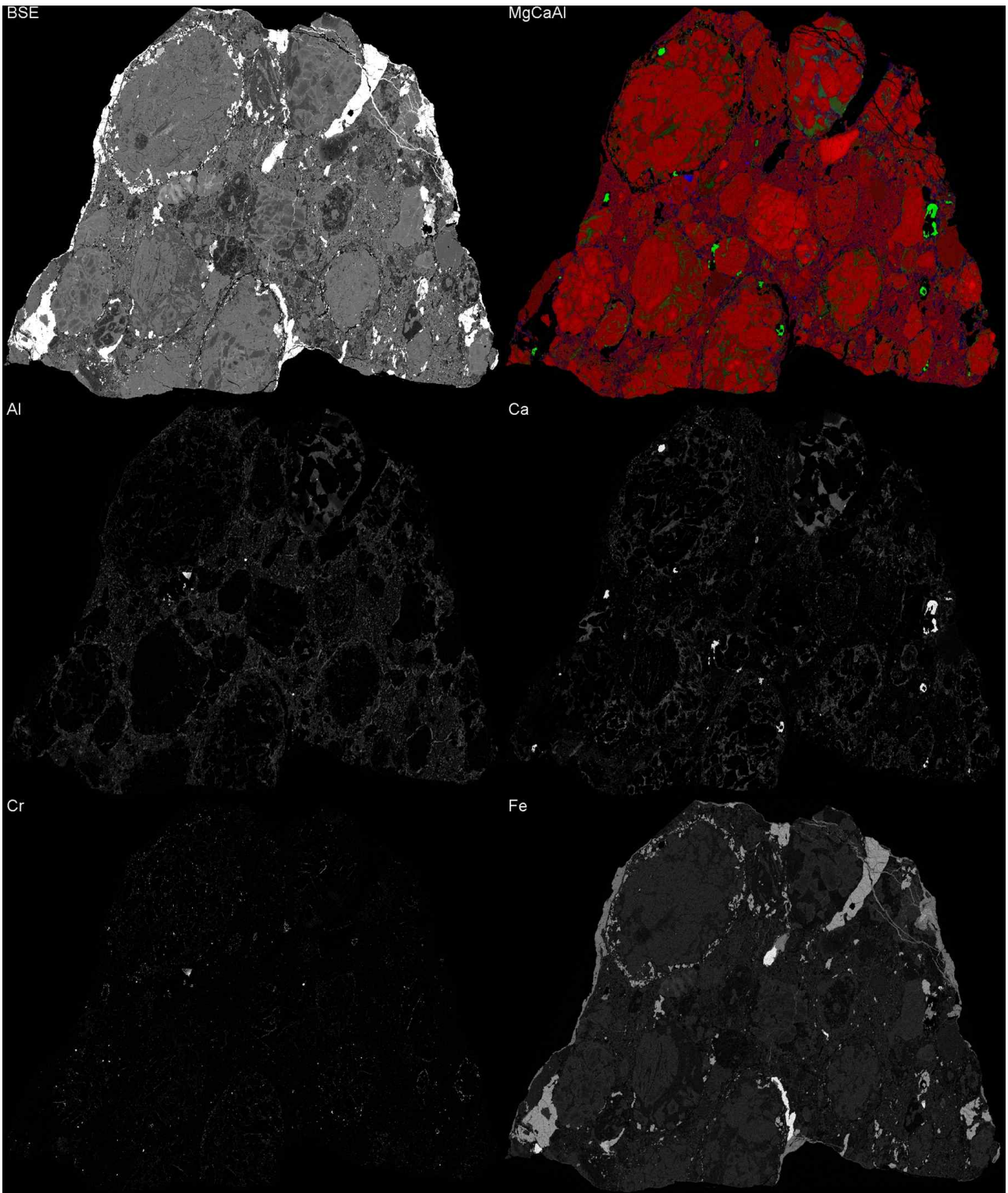


그림 54 FRO 10102 (LL3)의 X-ray 원소 맵 1

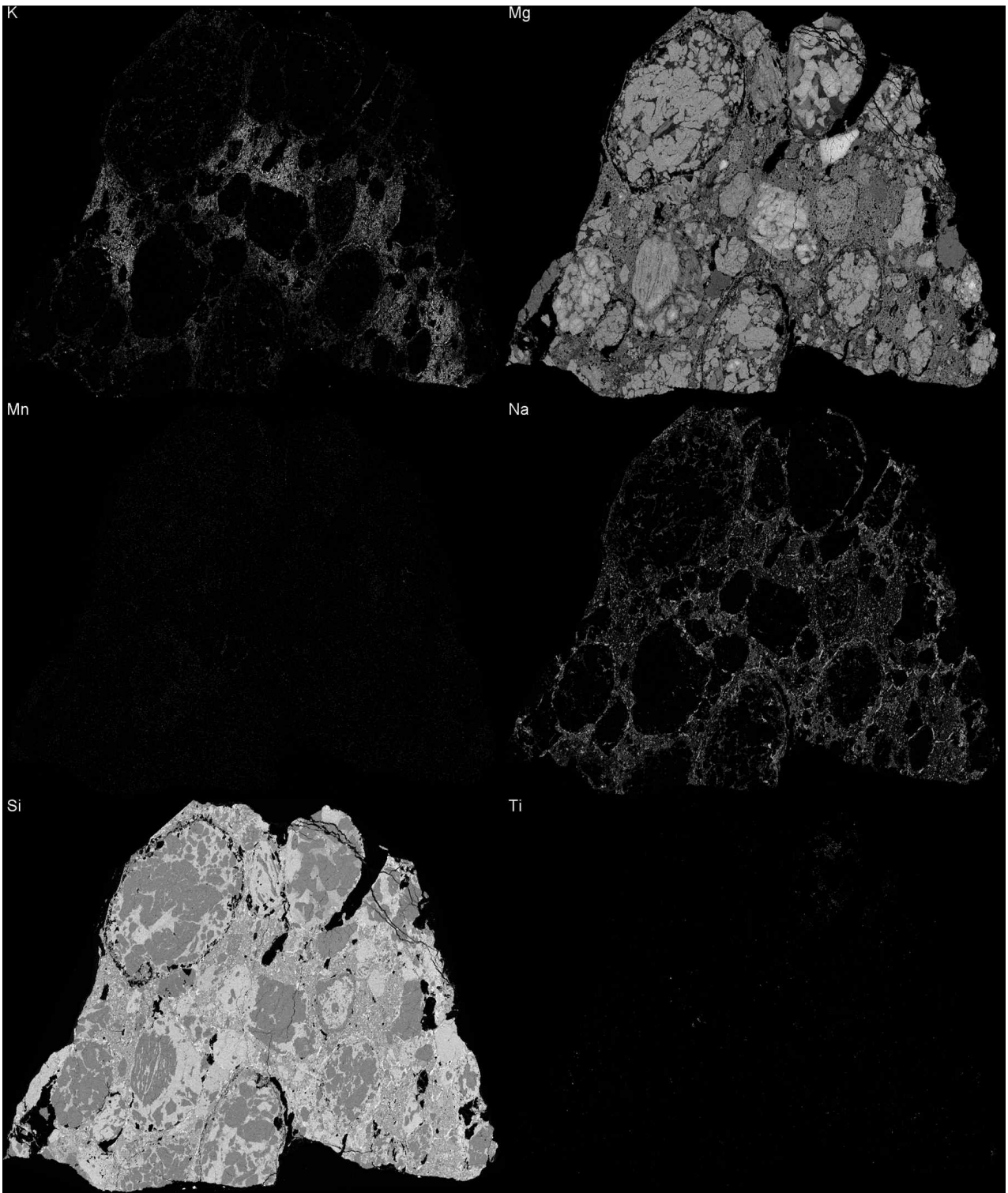


그림 55 FRO 10102 (LL3)의 X-ray 원소 맵 2

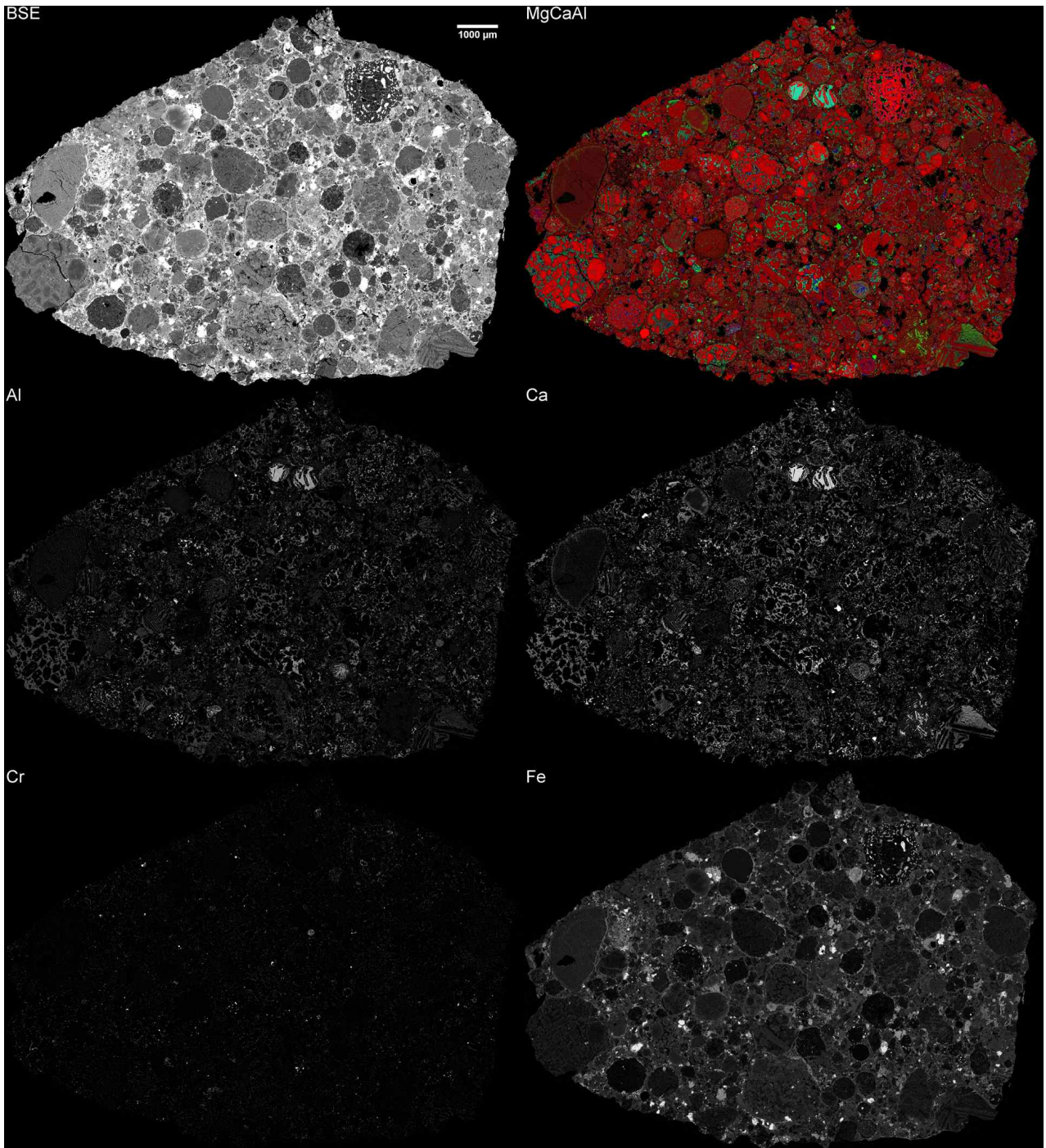


그림 56 FRO 10097 (LL3)의 X-ray 원소 맵 1

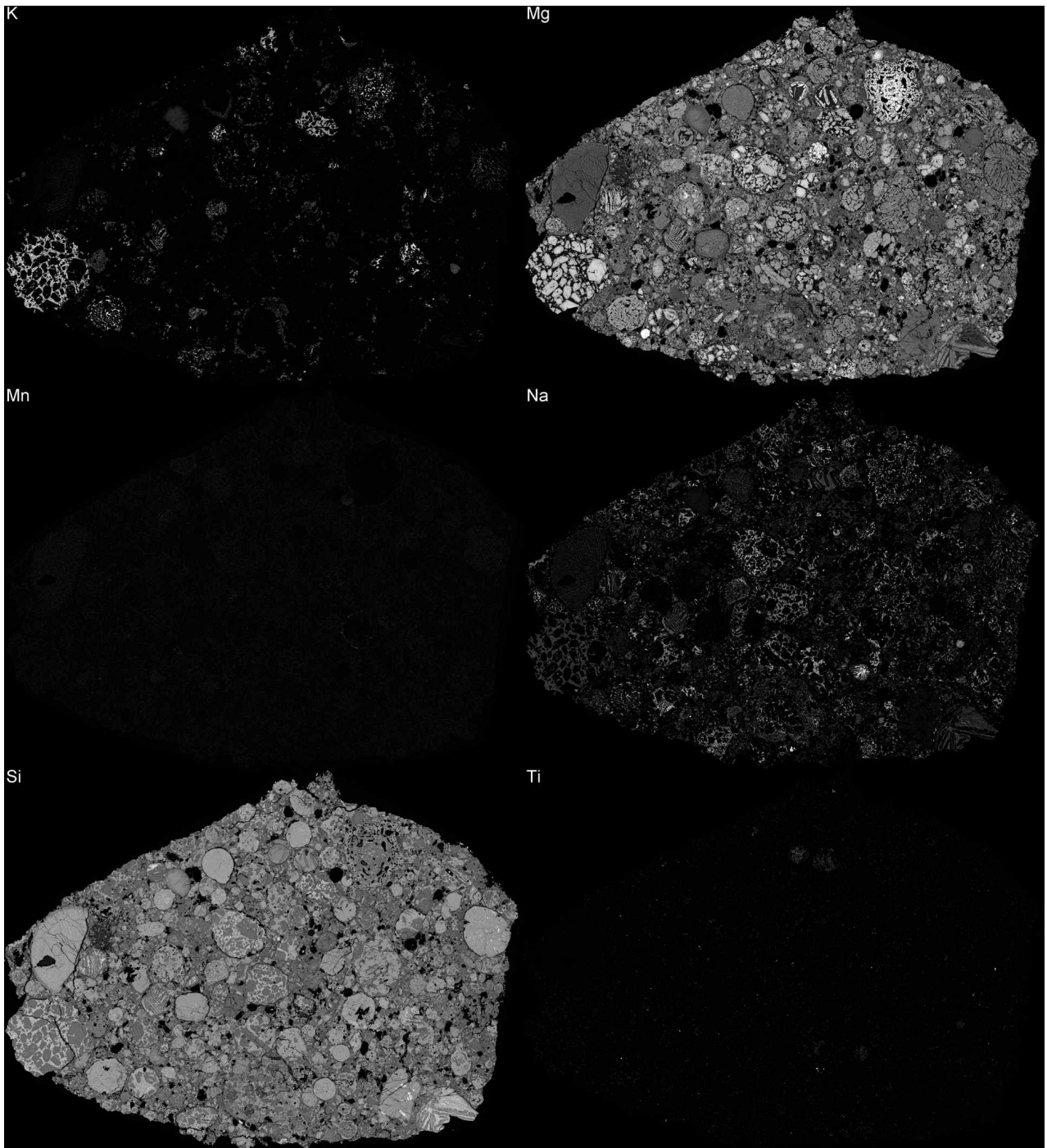


그림 57 FRO 10097 (LL3)의 X-ray 원소 맵 2

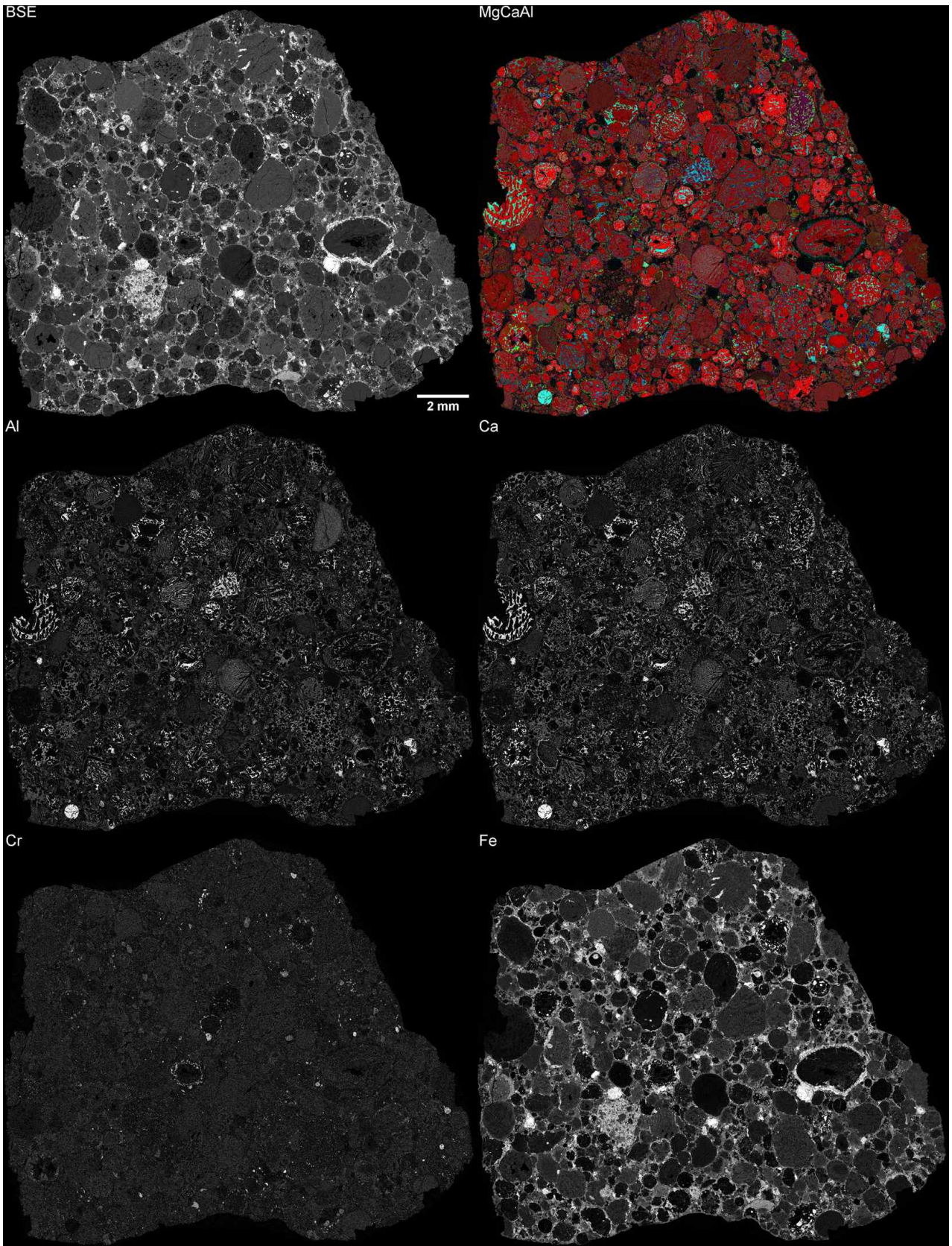


그림 58 EET 14017 (LL3)의 X-ray 원소 맵 1

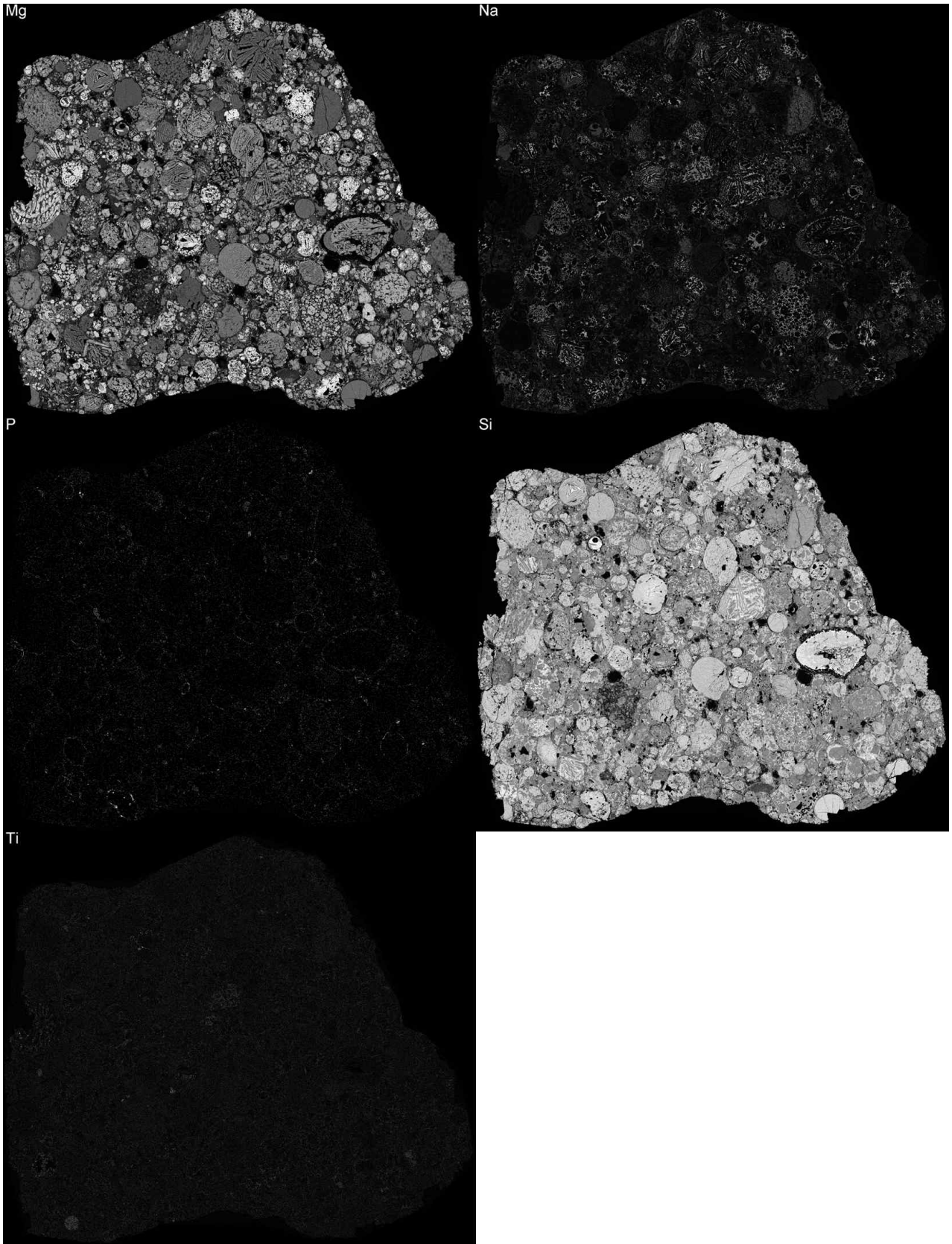


그림 59 EET 14017 (LL3)의 X-ray 원소 맵 2

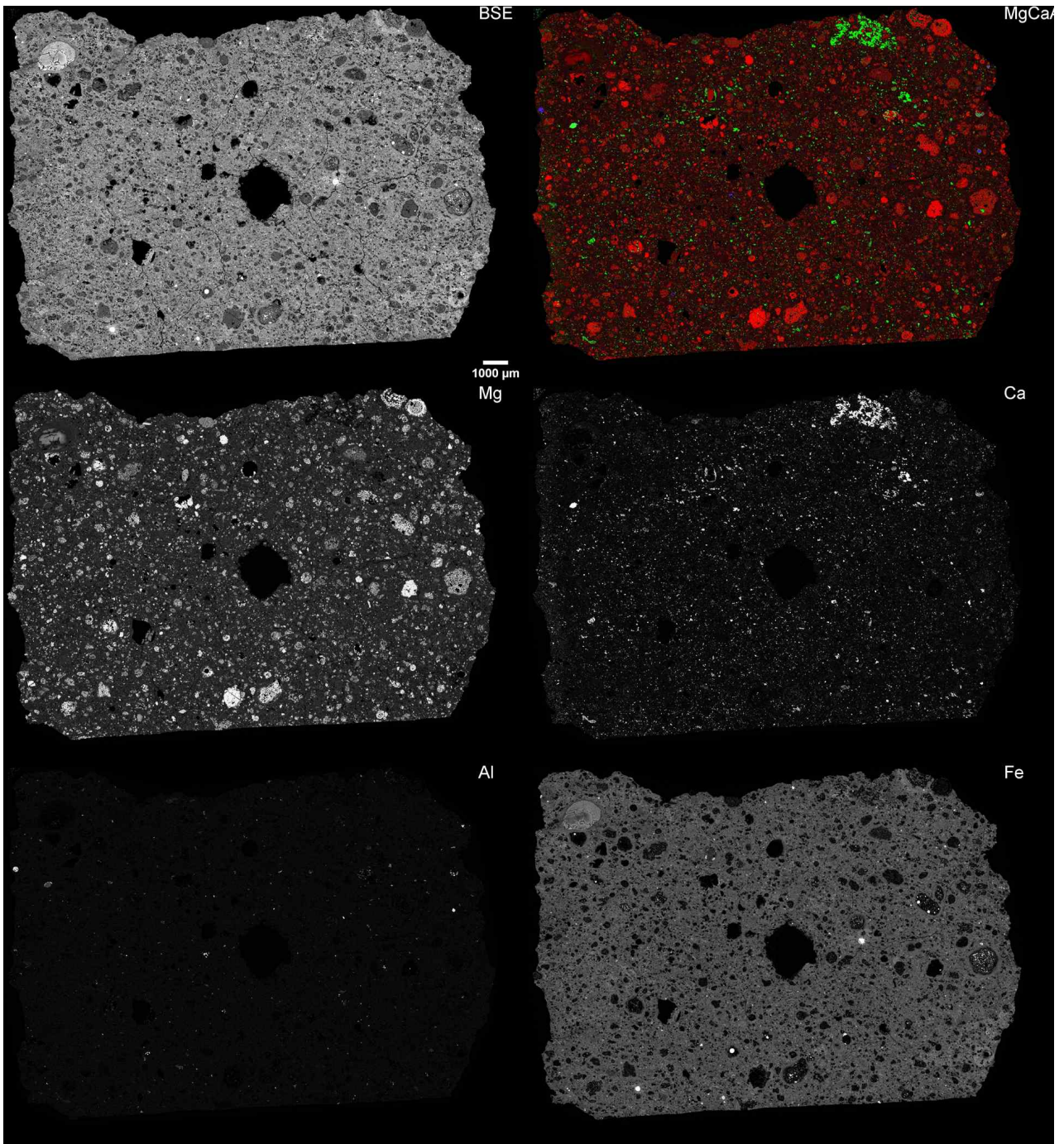


그림 60 RKP 14005(CM2)의 X-ray 원소 맵

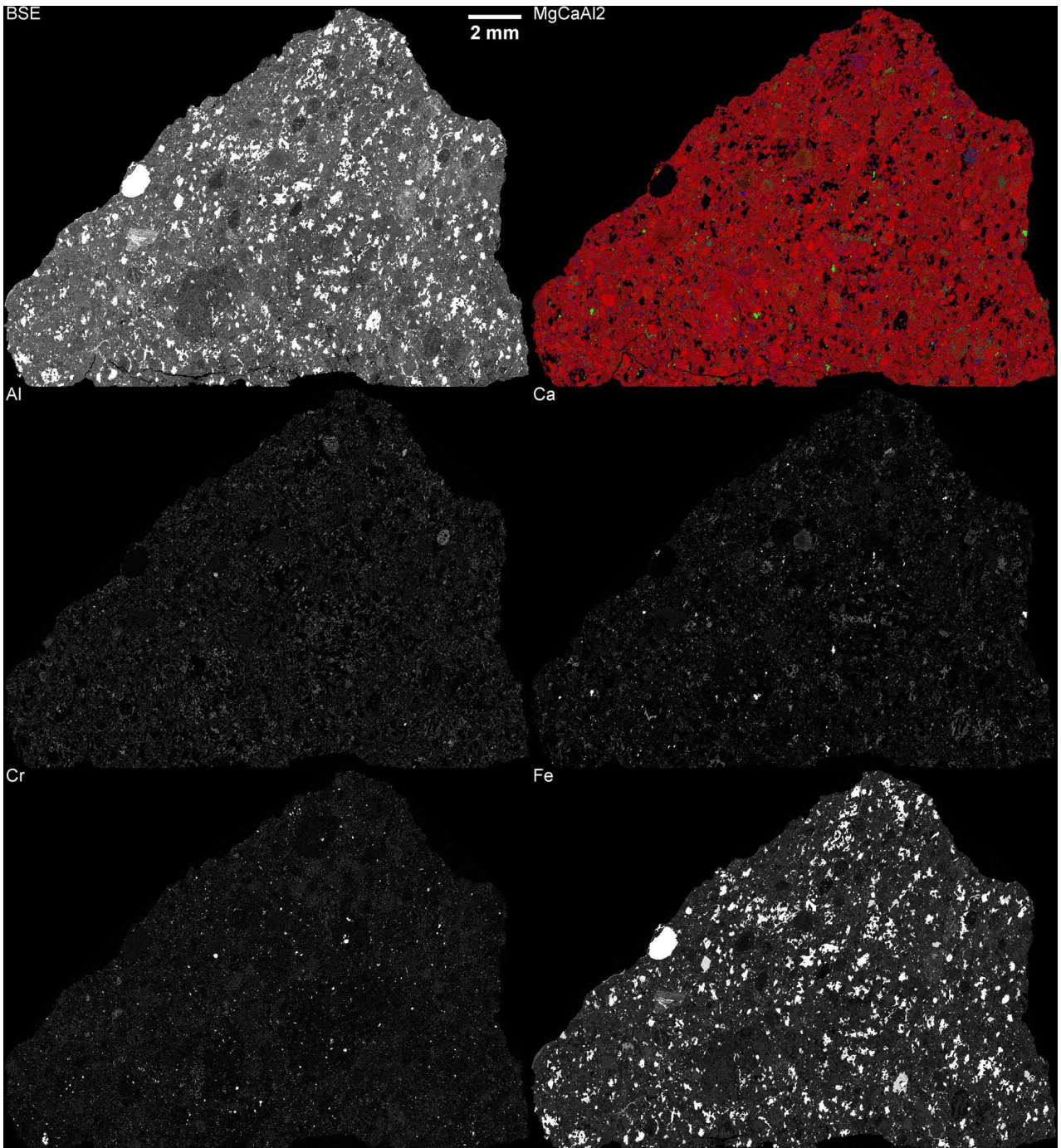


그림 61 RKP 14003(H3)의 X-ray 원소 맵 1

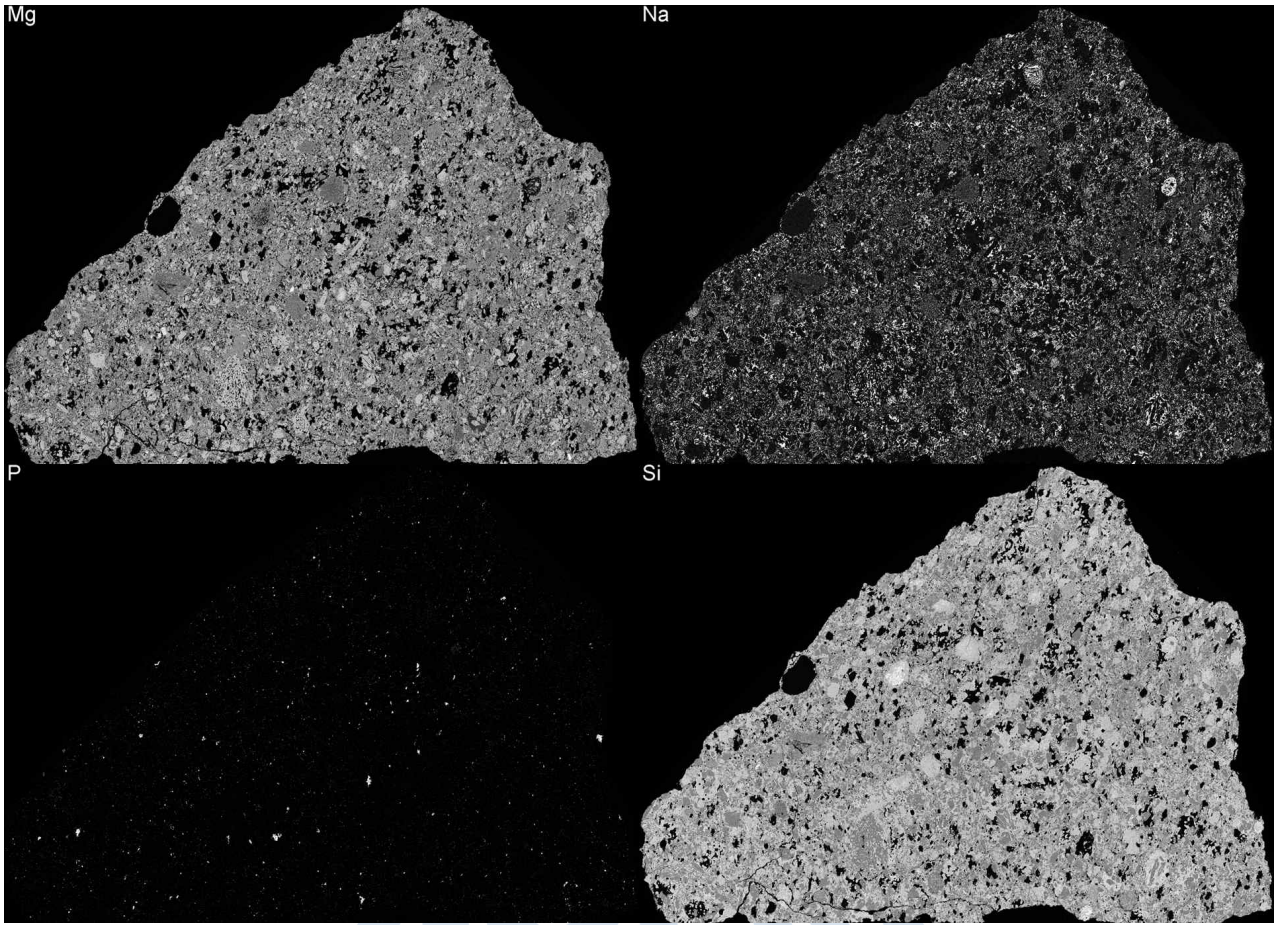


그림 62 RKP 14003(H3)의 X-ray 원소 맵 2

극지연구소

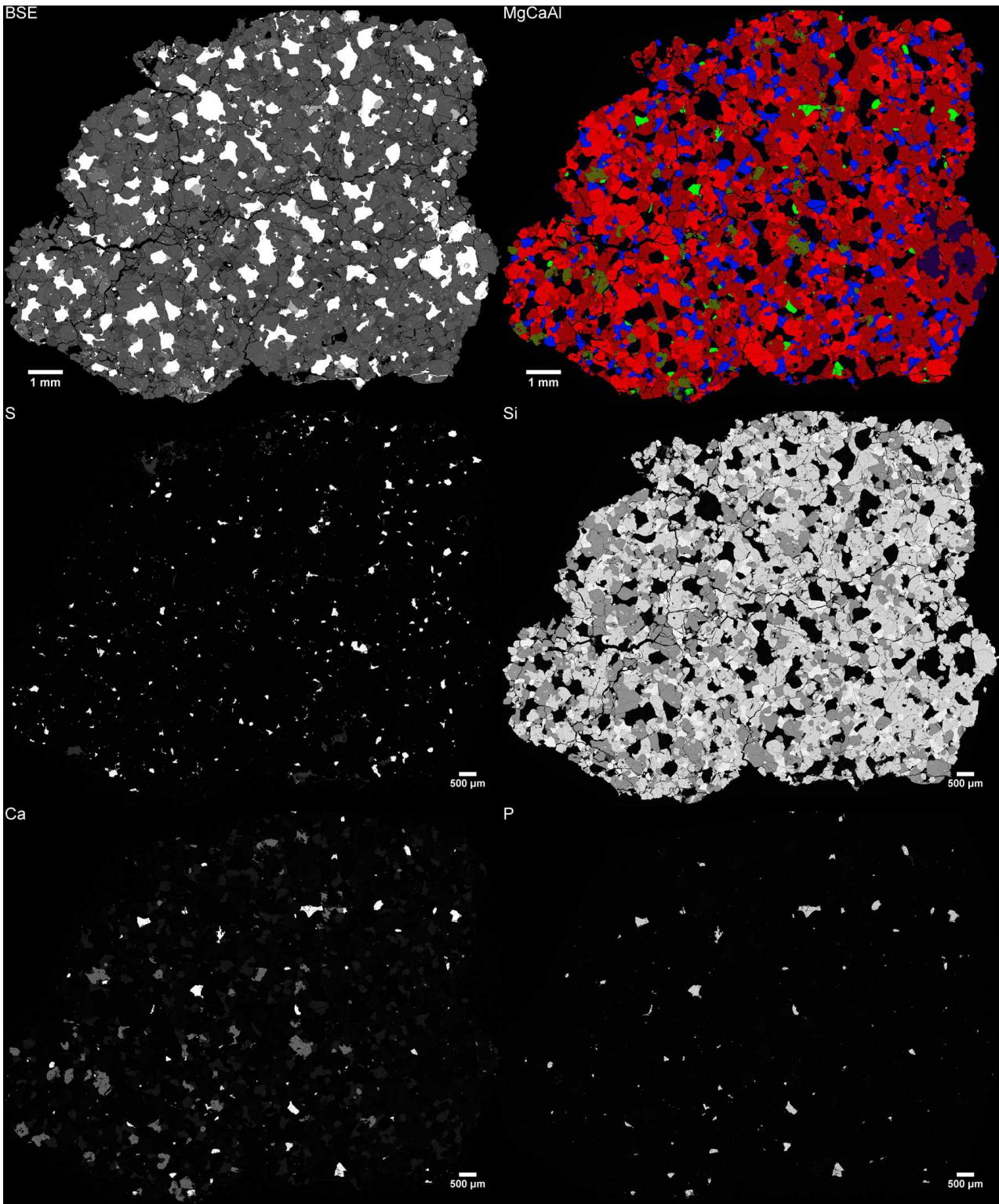


그림 63 EET 14074(아카폴코아이트)의 X-ray 원소 맵 1

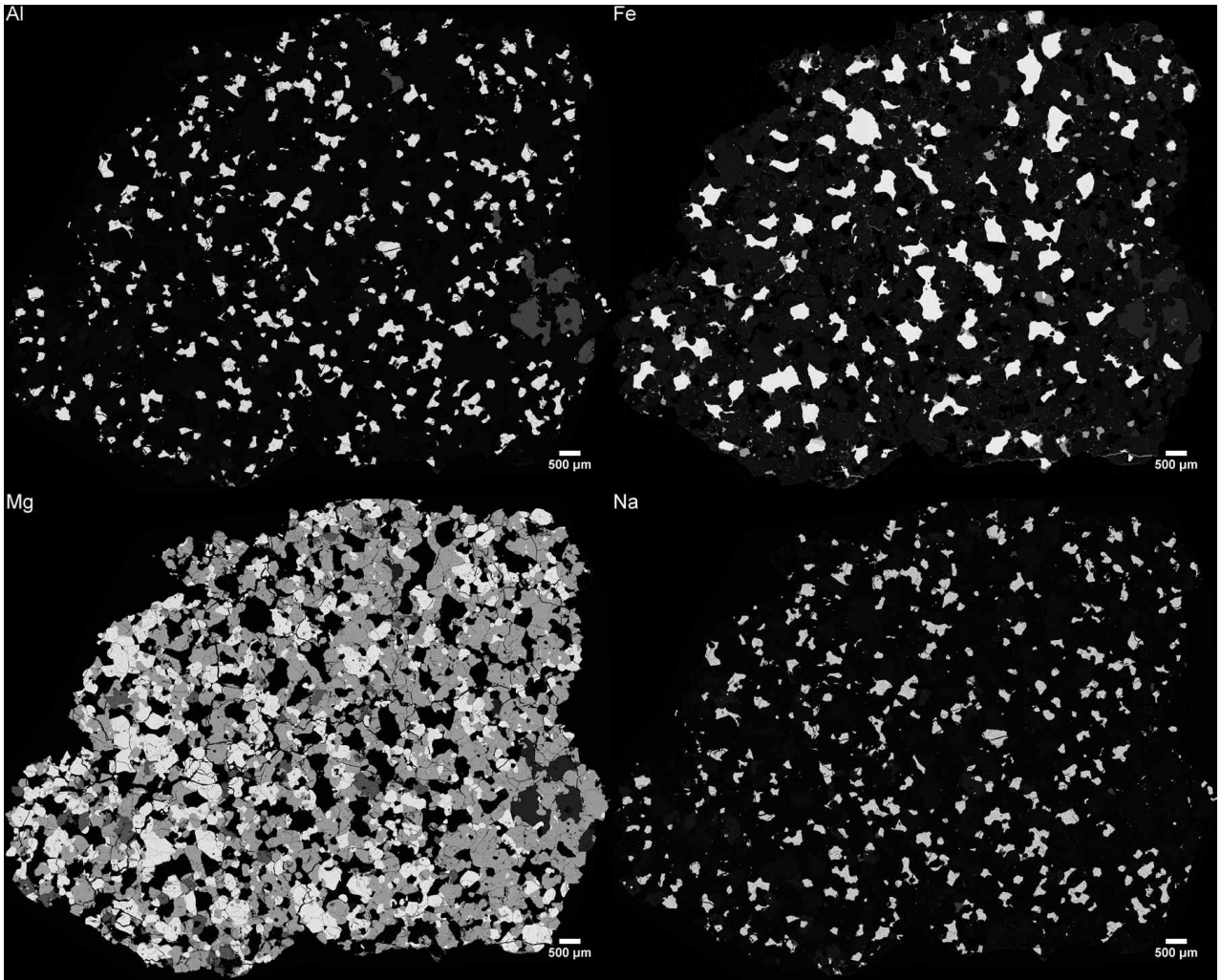


그림 64 EET 14074(아카폴코아이트)의 X-ray 원소 맵 2

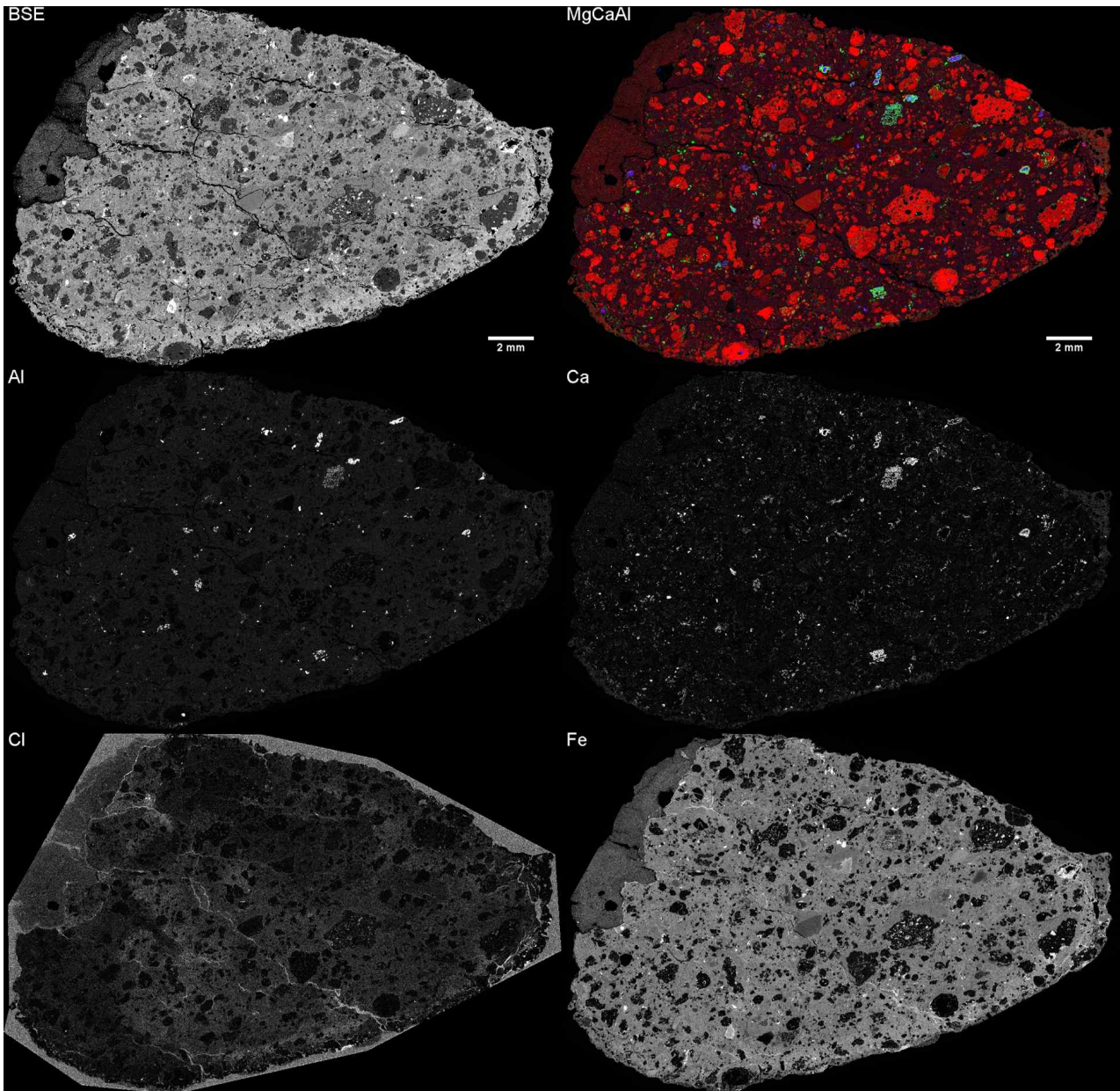


그림 65 EET 14013(CM2)의 X-ray 원소 맵 1

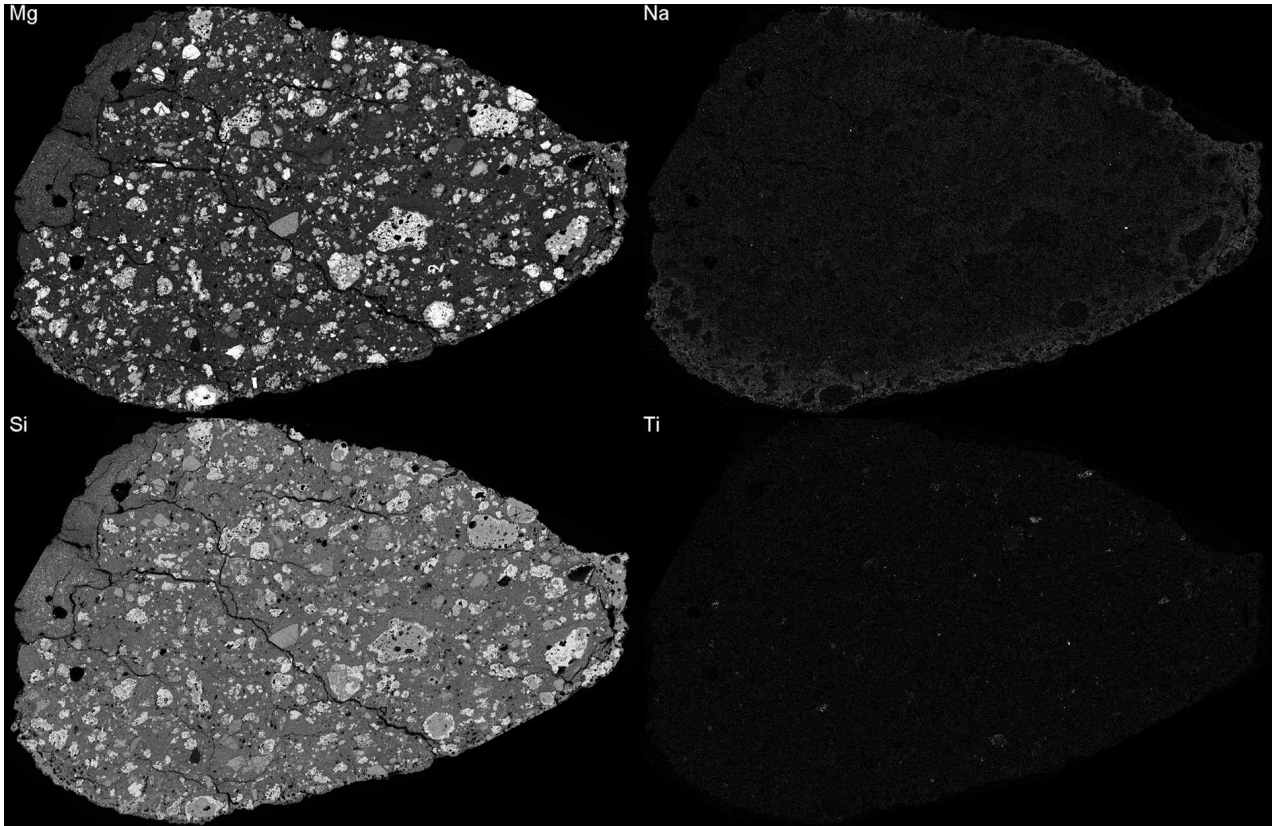
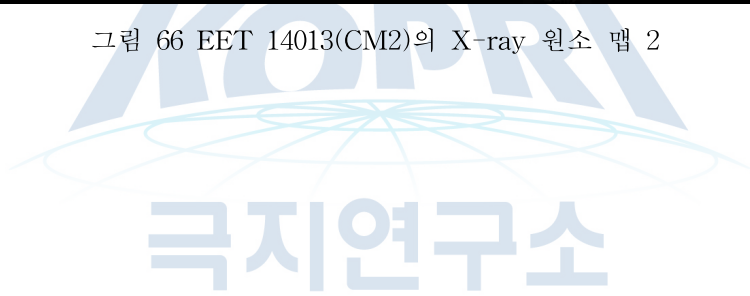


그림 66 EET 14013(CM2)의 X-ray 원소 맵 2



제 4 장 연구개발목표 달성도 및 대외기여도

본 과제 수행기간 동안 다음과 같은 정성적 및 정량적 목표를 달성하였다.

○ 남극중단산맥 지질·운석 기초자료 획득

- 랜터만 산맥 함망간규암의 광물조합과 변성상을 특정하고 광물화학 분석함
- 열역학적으로 해결할 수 없는 합투회석 암석의 변형온도를 석영 열림각도로 획득함으로써 고압암석의 열변성 역사 추정
- 디센트릿지 전단대와 주변 지역 암체들의 분포를 확인하고 이들의 형성 연령 및 변성·변형작용 대한 기초정보를 획득함
- 고생대 화성암류로부터 전암 및 광물 지화학 분석을 통해 멜트 조성 계산 및 지구조환경 해석 등 정량적 자료 획득에 성공
- 중생대(쥐라기) 화산암 목재화석을 상세히 동정하는데 성공, 온화하고 습윤한 고기후 추정
- 미국 연구소의 암석보관소(PPR)에 생물초 암석 시료를 대여 신청하고, 해당 기관 전문가들과 협의함
- 남극운석 pallasite에 포함된 철-니켈 합금 물질에 대해 레이저 충격으로 초고압에 의한 상변이 관찰
- 세계적으로 최초로 수행되고 있는 실험으로 레이저 미세 조정 등 해결 과제가 남아있지만, 실험을 통해 행성의 핵이 분화되는 기작을 설명할 수 있을 것으로 기대
- 국내 유일의 산소동위원소/불활성기체 동위원소 분석시스템을 구축하여 세계 최고 수준의 분석을 진행하고 있음

○ 활화산 모니터링 관측망 설계

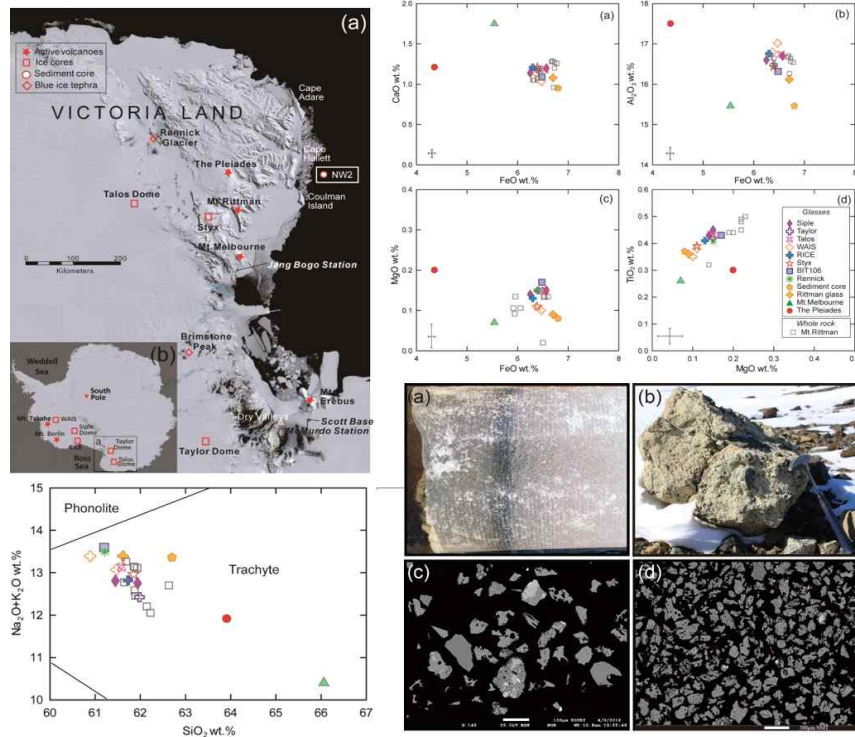
- 멜버른과 리트만 활화산에 대한 화산가스 성분 모니터링 연구계획 수립과 야외 현장조사 준비를 통해 멜버른과 리트만 활화산 화산분화 감시를 위한 화산가스 조성변화 추적 연구와 화산분화 예측기술 개발을 위한 바탕을 마련함
- 멜버른과 리트만 화산 최근 분화산물인 테프라와 부석의 테프라 층서 및 지구화학특성 연구를 통해 장보고 기지 주변에 위치하고 있는 북빅토리아랜드 대표적인 두 활화산으로부터 홀로세 이후 수차례의 폭발적 화산분화에 대한 정보를 획득함
- 멜버른화산 주변 빙하저화산(셴드 누나탁)의 화산물질의 운반/퇴적 작용 특성 파악

○ 남극 지질·운석 데이터베이스 구축

- 암석 샘플의 체계적 분류 및 정리로 공동연구 및 추후 활용
- 연구 가치가 높은 남극운석 10개에 대해 고해상도 X-ray 원소 맵 제작 및 남극운석 큐레이션 홈페이지에 공개하여 국내외 공동연구로 이어질 수 있도록 적극 활용

본 과제 수행 기간(2019.1~2019.12) 동안 달성한 우수성과는 아래와 같이 요약할 수 있다.

우수성과 - 1.	남극 전역에서 발견되는 1252 테프라의 기원화산 규명
성과 내용	<ul style="list-style-type: none"> ○ 남극 전역에서 발견되는 1252 테프라의 소스화산 규명 <ul style="list-style-type: none"> - 남극 빙하코어(Siple, Talyor, Talos, WAIS, RICE, Styx)에서 공통적으로 발견되는 1252 테프라들의 물리·화학적 특성 분석을 통해 동일한 화산분화로 유래된 화산분출물임을 규명. - 남극 블루아이스지역(브림스톤 피크, 레닉빙하)에서 채취한 테프라와 남극 전역에서 시추된 빙하코어에서 채취한 1252 테프라들의 물리·화학적 특성 대비를 통해 이들의 기원화산이 동일함을 규명 - 리트만 화산암의 지구화학적 특성, 화산쇄설물에 대한 정밀조사를 통한 분화기작 연구 등을 통해 남극전역에서 발견되는 1252 테프라의 기원화산임을 규명 - 기원화산으로부터 2000 km 이상까지 화산분출물을 퇴적시킨 1252년 화산분화는 홀로세 이후의 남극 로스해 주변에서 발생한 화산분화 중 가장 폭발력이 큰 화산분화로 평가될 수 있으며, 향후 이러한 화산폭발로 인한 재해 발생을 대비할 필요성과 북빅토리아랜드 활화산에 대한 화산분화 모니터링 필요성을 제기함
성과의 우수성	<ul style="list-style-type: none"> ○ 세계 최초로 1252 남극 테프라의 기원화산 규명 <ul style="list-style-type: none"> - 지난 30년간 밝혀지 못했던 남극의 13세기 가장 큰 폭발적 분화로 평가할 수 있는 1252년 화산분화의 기원화산이 리트만 화산임을 규명함 ○ 극지연구소의 장비 활용 <ul style="list-style-type: none"> - 테프라 유리질 시료의 정밀 전자현미분석기 분석기술 개발을 통해 지구 화학 특성 규명



남극 6개 빙하코어(Siple, Taylor, Talos, WAIS, RICE, Styx)와 블루아이스 두 곳(브림스톤 피크, 레너빙하)으로부터 회수한 테프라와 리트만 화산분출물과의 대비를 통해 남극 전역에서 발견되는 1252년 분출 화산재의 소스화산이 리트만 화산임을 규명함.

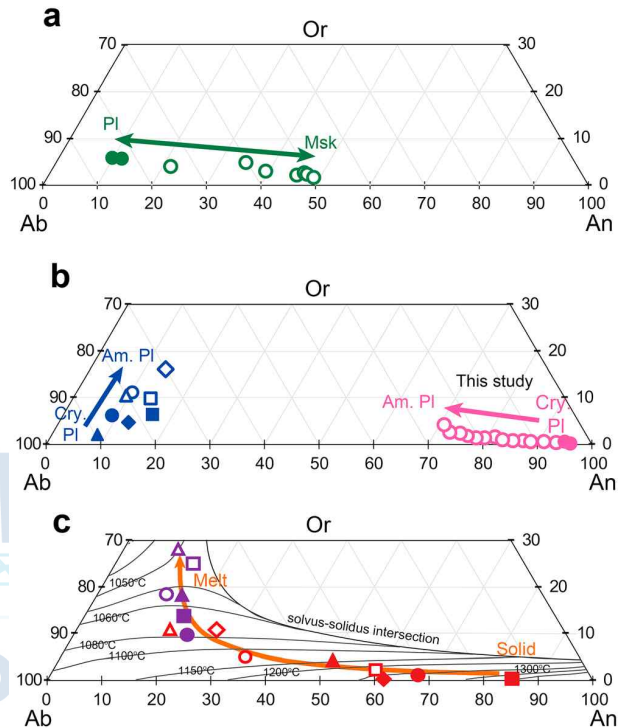
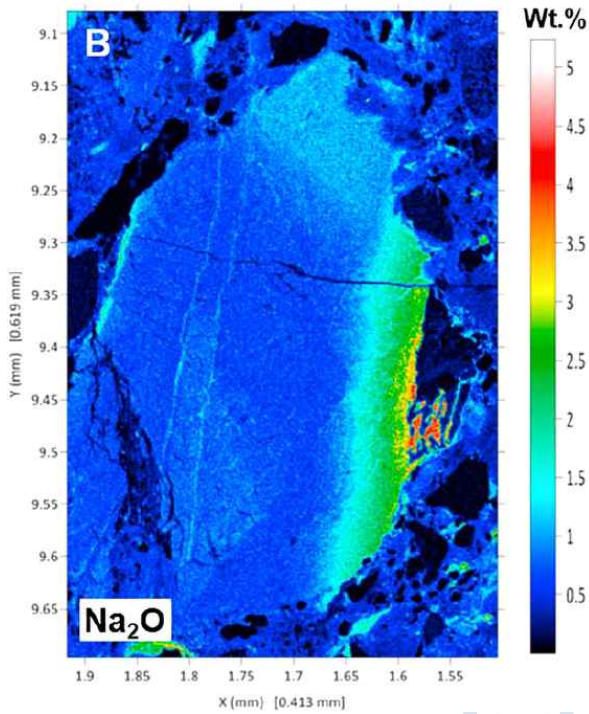
증빙자료	<ul style="list-style-type: none"> ○ <u>Lee M. J., Kyle, R.P., Iversen, A. N. Lee, J.I., and Han, Y. (2019) Rittmann volcano, Antarctica as the source of a wide spread 1252±2 CE tephra layer in Antarctica ice (Earth and Planetary Science Letters, 게재일:19.09.01, mrnIF 91.62)</u>
------	------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

우수성과 - 2.	운석 충돌에 의한 달 표면 물질의 상변이 규명 (JGR-Planets 게재)
성과 내용	<ul style="list-style-type: none"> ○ 달운석의 비정질 마스켈리나이트가 생성되는 기작 규명 <ul style="list-style-type: none"> - 남극 달운석 DEW 12007 연구를 통해 사장석이 비정질 마스켈리나이트로 상변이 되는 기작이 부분용융에 이은 급랭임을 규명 - 다양한 분석방법(광학현미경, Cathodoluminescence 관찰, 전자현미분석, 라만 분석)을 융합하여 부분용융에 의한 화학조성 변화를 최초로 규명 ○ 상변이 기작을 설명할 때 화학조성 변화가 매우 중요한 키가 될 수 있음을 제시
성과의 우수성	<ul style="list-style-type: none"> ○ 학계의 오랜 논쟁 종식 <ul style="list-style-type: none"> - 결정질 사장석이 비정질화 되는 매커니즘으로 “고체 상태에서의 상변이”와 “부분용융 후 급랭”이 오랜 논쟁거리였음.

- 이번 연구에서 상변이에 따라 Na과 K의 함량이 비정질 부분에 상대적으로 농집됨을 밝힘으로써 “부분용융 후 급랭”이 비정질 마스켈리나이트의 생성 기작임을 규명함.

○ 극지연구소의 장비를 주로 활용

- 광학현미경, Cathodoluminescence, 전자현미분석기 분석기술을 융합하여 새로운 해석 가능했음.



전자현미분석을 통해 부분용융에 의한 화학조성 변화 확인(좌), 운석 충돌에 의한 달표면 물질의 상변이 규명(우).

증빙자료

○ Kim H. N., Park C., Park S. Y., Kim H., and Kim M. S. (2019) Partial melting-induced chemical evolution in shocked crystalline and amorphous plagioclase from the lunar meteorite Mount DeWitt 12007. Journal of Geophysical Research: Planets 124, 1852-1863. (게재일 19.07.01, mrrIF 83.1)

제 5 장 연구개발결과의 활용계획

향후 연구 방향은 크게 세 가지로 나눌 수 있다.

○ 남극중단산맥 지질·운석 기초자료 획득

- 지속적인 야외조사 및 연구주제 개발
- 터레인경계부 변성암류의 변성작용 특성연구 및 저어콘 동위원소 성분 분석
- 고온고압 암석 등 특수한 지구조 환경에서 형성된 암석에 특화된 연구
- 북빅토리아랜드 윌슨터레인-바워스터레인 주요 암체에 대한 연대분석과 변성진화과정 연구 수행
- 중생대 화산암층에서 새로 확인한 목재 화석을 통해 쥐라기 고기후에 대한 새로운 해석 도출
- 외국 연구기관에 대여 신청한 생물초 시료에 대해 연구
- 포항 4세대 가속기를 활용, 레이저 미세 조정을 통해 지구 내부 압력까지 압력을 상승시켜, 남극운석의 철과 감람석에 초고압 실험을 수행하여 행성의 핵과 맨틀 구성물질 특성 규명
- 소행성 직접 회수 시료 분석을 대비하여 수십 마이크로미터 크기 시료의 산소동위원소와 불활성기체 동위원소 분석기술 개발

○ 활화산 모니터링 관측망 설계

- 멜버른, 리트만 화산가스 성분 분석과 성분변화 추적연구를 통해 화산분화 예측기술개발
- 멜버른, 리트만 화산의 최후기 폭발성 분화 활동으로부터 기원된 화산쇄설물의 광역 층서 체계를 구축하고, 화산물질의 운반/퇴적 기작을 이해하기 위한 광범위한 테프라층 대비 연구가 필요함
- 화산의 미래 분화 가능성 및 화산 재해의 범위를 예측하기 위해 화산쇄설물 층서체계 확립 및 운반/퇴적기작 규명 연구 수행
- 멜버른 화산지대를 구성하는 단성화산들은 분화 당시에 존재하던 빙하로 인해 중·저위도 지역 화산들과는 극도로 이질적인 분화 특성 및 화산물질 운반/퇴적 프로세스를 보임
- 이러한 이질성으로 인해 남극의 단성화산들은 그 연구 가치가 매우 높지만, 제한적 접근성으로 인해 심도 있는 연구가 드문 실정임
- 남극환경에서의 화산물질과 빙하의 상호작용에 대한 연구결과를 북반구 아이슬란드 및 캐나다 브리티시 콜롬비아 지역의 다양한 빙하화산체(glaciovolcanic edifice)들을 대상으로 수행된 연구들(예: Russel et al., 2014)과 비교해석을 통한 새로운 빙저화산 분출과

화산쇄설물 퇴적기작 모델 제시

○ 남극 지질·운석 데이터베이스 구축

- 지속적인 데이터 축적
- 남극운석의 전암화학/동위원소 조성, 광물화학 조성 및 구조를 분석하여 데이터베이스 구축
- 연구에 즉각 활용 가능한 고품질의 데이터를 축적하여 국내외 공동연구 증진

또한, 성과 활용 계획은 다음과 같다.

○ 남극중단산맥 지질·운석 기초자료 획득

- 남극중단산맥의 주 구성암체의 지질역사 해석
- 변성·화성 기반암 연구를 통해 초대륙 분열, 고태평양 섭입대, 고생대 섭입대 형성 이후의 대륙지각 진화에 대한 종합적 모델 제시
- 국내외 주요 조산대 연구에 필요한 사례 연구로써 세부 내용이 활용될 수 있음
- 쥐라기 고기후에 대한 기초적 및 새로운 자료 제공
- 빅토리아랜드 내 암석 및 운석의 심화연구 기초자료로 활용
- 극한 환경(초고압, 고온) 실험 노하우 획득으로 이후 다양한 종류의 시료에 적용
- 극미량 초고정밀 분석기술을 지구물질 연구에 활용

○ 활화산 모니터링 관측망 설계

- 극한 환경에서 화산가스 샘플 및 현장분석 노하우 축적
- 화산분화 예측기술개발을 통해 장보고 기지 주변 멜버른 화산 분화감시 및 방재 매뉴얼의 기초자료로 활용
- 남극 심부 빙하코어에서 발견되는 화산재층과 멜버른, 리트만 최근 분화 산물들에 대한 지구화학특성 대비 연구를 통해 북빅토리아랜드 활화산 최근 분화역사 복원

○ 남극 지질·운석 데이터베이스 구축

- 극지방 탐사 시 3D 모델을 이용한 노두 탐색
- 실험실에서 이용한 노두 탐색
- 남극 암석 및 운석의 공동연구 제안 수용
- 고해상도 X-ray 원소 맵을 지속 확보하여 국내외 공동연구자들에게 우선 공개 후 순차적으로 전면 공개하여 새로운 연구주제 발굴에 활용

제 6 장 참고문헌

- Abs-Wurmbach, I. & Peters, T., 1999, The Mn - Al - Si - O system: an experimental study of phase relations applied to parageneses in manganese-rich ores and rocks. *European Journal of Mineralogy*, 11, 45 - 68.
- Allen C., Allton J., Lofgren G., Righter K., and Zolensky M. (2011) Curating NASA's extraterrestrial samples—Past, present, and future. *Chemie der Erde - Geochemistry* 71, 1-20.
- Armstrong, R.L., 1978, K-Ar dating: Late Cenozoic McMurdo Volcanic Group and dry valley glacial history, Victoria Land, Antarctica: New Zealand. *Journal of Geology & Geophysics*, 21, 685 - 698.
- Armienti, P. and Tripodo, A., 1991, Petrography and chemistry of lavas and comagmatic xenoliths of Mount Rittmann, a volcano discovered during the IV Italian expedition in northern Victoria Land (Antarctica). *Memorie Della Società Geologica Italiana*, 46, 427-451.
- Blumenfeld, P., Mainprice, D., Bouchez, J.L., 1986. C-slip in quartz from subsolidus deformation granite. *Tectonophysics* 127, 97-115.
- Capponi, G., Meccheri, M., Pertusati, P.C., Castelli, D., Crispini, L., Kleinschmidt, G., Lombardo, B., Montrasio, A., Musumeci, G., Oggiano, G., Ricci, C.A., Roland, N.W., Salvini, F., Skinner, D.N.B., Tessensohn, F., 1997, Antarctic geological 1:250,000 map series, Mount Murchison quadrangle (Victoria Land). Museo Nazionale dell'Antartide, Sezione di Scienze della Terra, Siena, Italy.
- Faleiros, F.M., Moraes, R., Pavan, M., Campanha, G.A.C., 2016. A new empirical calibration of the quartz c-axis fabric opening-angle deformation thermometer. *Tectonophysics* 671, 173-182.
- Giordano, G., Lucci, F., Phillips, D., Cozzupoli, D. and Runci, V., 2012, Stratigraphy, Geochronology and evolution of the Mt. Melbourne volcanic field (North Victoria Land, Antarctica). *Bulletin of Volcanology*, 74, 1985-2005, doi: 10.1007/s00445-012-0643-8.
- Greenwood R. C., Burbine T. H., Miller M. F., and Franchi I. A. (2017) Melting and differentiation of early-formed asteroids: The perspective from high precision oxygen isotope studies. *Geochemistry* 77, 1-43.
- Kim N. K., Kusakabe M., Park C., Lee J. I., Nagao K., Enokido Y., Yamashita S., and Park

- S. Y. (2019) An automated laser fluorination technique for high-precision analysis of three oxygen isotopes in silicates. *Rapid Communications in Mass Spectrometry* 33, 641-649.
- Kim H. N., Park C., Park S. Y., Kim H., and Kim M. S. (2019) Partial melting-induced chemical evolution in shocked crystalline and amorphous plagioclase from the lunar meteorite Mount DeWitt 12007. *Journal of Geophysical Research: Planets* 124, 1852-1863.
- Kojima H. (2006) The history of Japanese Antarctic meteorites. Geological Society, London, Special Publications 256, 291-303.
- Kruhl, J.H., 1996. Prism- and basal-plane parallel subgrain boundaries in quartz: a microstructural geothermobarometer. *J. Metamorph. Geol.* 14, 581-589.
- Kruhl, J.H., 1998. Reply: prism- and basal-plane parallel subgrain boundaries in quartz: a microstructural geothermobarometer. *J. Metamorph. Geol.* 16, 142-146.
- Kruhl, J.H., Huntemann, T., 1991. The structural state of the lower continental crust in Calabria (S. Italy). *Geol. Rundsch.* 80, 289-302.
- Law, R.D., 2014. Deformation thermometry based on quartz c-axis fabrics and recrystallization microstructures: a review. *J. Struct. Geol.* 66, 129-161.
- Le Bas, M.J., Le Maitre, R.W., Streckeisen, A. and Zanettin, B., 1986, A Chemical classification of volcanic rocks based on the Total Alkali-Silica diagram. *Journal of Petrology*, 27, 745-750.
- Lee, M.J., Kyle, P.R. Iverson, N.A., Lee, J.I. and Han, Y., 2019. Rittmann volcano, Antarctica as the source of a widespread 1252 ±2CE tephra layer in Antarctica ice. *Earth and Planetary Science Letters*, 521, 169-176.
- Lister, G.S., Dornsiepen, U.F., 1982. Fabric transitions in the Saxony granulite terrain. *J. Struct. Geol.* 4, 81-92.
- Lyon, G.L., 1986, Stable isotope stratigraphy of ice cores and the age of the last eruption at Mt. Melbourne, Antarctica. *New Zealand Journal of Geology and Geophysics*, 29(1), 135 - 138.
- Mainprice, D., Bouchez, J.-L., Blumenfeld, P., Tubia, J.M., 1986. Dominant c slip in naturally deformed quartz: implications for dramatic plastic softening at high temperature. *Geology* 14, 819-822.
- Martin, S. & Lombardo, B., 1995, Sursassite, spessartine, piemontite in Fe-Mn metacherts from Lago Bleu, upper Val Varaita (western Alps), in B. Lombardo (ed.), *Studies on metamorphic rocks and minerals of the western Alps. A Volume in Memory of Ugo*

- Pognante. *Boll. Museo Regionale Scienze Naturali*. Torino, 13/2, 103-130.
- Morgan, S.S., Law, R.D., 2004. Unusual transition in quartzite dislocation creep regimes and crystal slip systems in the aureole of the Eureka Vally-Joshua Flat-Beer Creek plúton, California: a case for anhydrous conditions created by decarbonation reactions. *Tectonophysics* 384, 209-231.
- Nardini, I., Armienti, P., Rocchi, S., Dallai, L. and 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.
- Nathan, S. and Schulte, F.J., 1967, Recent thermal and volcanic activity on Mount Melbourne, Northern Victoria Land, Antarctica. *New Zealand Journal of Geology and Geophysics*, 10:2, 422-430, doi: 10.1080/00288306.1967.10426746.
- Palmeri, R., Sandroni, S., Ricci, C.A., 2012. Boninite-derived amphibolites from the Lanterman-Mariner suture (northern Victoria Land, Antarctica): New geochemical and petrological data. *Lithos* 140-141, 200-223.
- Reinecke, T., 1986, Phase relationships of sursassite and other Mn-silicates in highly oxidized low-grade, high-pressure metamorphic rocks from Evvia and Andros Islands, Greece. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 94, 110 - 126.
- Rocholl, A., Stein, M., Molzahn, M., Hart, S. R., & Wörner, G. (1995). Geochemical evolution of rift magmas by progressive tapping of a stratified mantle source beneath the Ross Sea Rift, Northern Victoria Land, Antarctica. *Earth and Planetary Science Letters*, 131(3-4), 207-224.
- Schmid, S.M., 1994. Textures of geological materials: computer model predictions versus empirical interpretations based on rock deformation experiments and field studies. In: Bunge, H.J., Siegesmund, S., Skrotzki, W., Weber, K. (Eds.), *Textures of Geological Materials*. DGM Informationsgesellschaft, Verlag, pp. 279-301.
- Schmid. S.M., Casey, M., 1986. Complete texture analysis of commonly observed quartz c-axis patterns. *Am. Geophys. Union Geophys. Monogr.* 36, 263-286.
- Vries, M.W., Bingham, R.G. and Hein, A.S., 2017, A new volcanic province : an inventory of subglacial volcanoes in West Antarctica. *Geological Society, London, Special Publications*, 461, 231-248.
- Wiechert, U.H., Halliday, A.N., Palme, H., Rumble, D., 2004. Oxygen isotope evidence for rapid mixing of the HED meteorite parent body. *Earth Planet. Sci.Lett.* 221, 373 - 382.
- Wörner, G. and Orsi, G., 1990, Volcanic geology of Edmonson Point, Mt. Melbourne

- Volcanic Field, North Victoria Land, Antarctica. Polarforschung, 60(2), 84 - 86.
- Wörner, G., and Viereck, L., 1989, The Mt. Melbourne volcanic field (Victoria Land, Antarctica). I. Field observations. Geologisches Jahrbuch, E38, 369 - 393.
- Wörner, G., and Viereck, L., 1990, Mount Melbourne. In: LeMasurier WE and Thomson, J.W., (eds), 1990, Volcanoes of the Antarctic Plate and Southern Oceans. American Geophysical Union, Antarctic Research Series 48, 72 - 78.
- Wörner, G., Viereck, L., Hertogen, J. and Niephaus, H., 1989, The Mt. Melbourne Field (Victoria Land, Antarctica) II. Geochemistry and magma genesis. Geologisches Jahrbuch, E38, 395 - 433.
- Yi, S.-B., Lee, M.J., Han, S., 2019, Paleozoic metamorphism identified in the Mountaineer Range of northern Victoria Land, Antarctica. Proceedings of the International Symposium on Antarctica Earth Sciences 13, A251.



부록 1. KPDC 등록 이행실적

데이터 이름 ¹⁾	메터데이터 ID ²⁾	메터데이터 제목 ³⁾	원시데이터 등록여부 ⁴⁾
남극암석	KOPRI-ROCK-0 0001825	20171112-01	등록
남극암석	KOPRI-ROCK-0 0001826	20171112-02	등록
남극암석	KOPRI-ROCK-0 0001827	20171112-03	등록
남극암석	KOPRI-ROCK-0 0001828	20171112-04	등록
남극암석	KOPRI-ROCK-0 0001829	20171113-01	등록
남극암석	KOPRI-ROCK-0 0001830	20171113-02	등록
남극암석	KOPRI-ROCK-0 0001831	20171113-03	등록
남극암석	KOPRI-ROCK-0 0001832	20171113-03-1	등록
남극암석	KOPRI-ROCK-0 0001833	20171113-04	등록
남극암석	KOPRI-ROCK-0 0001834	20171113-05	등록
남극암석	KOPRI-ROCK-0 0001835	20171113-06	등록
남극암석	KOPRI-ROCK-0 0001836	20171113-07	등록
남극암석	KOPRI-ROCK-0 0001837	20171113-08	등록
남극암석	KOPRI-ROCK-0 0001838	20171113-09	등록
남극암석	KOPRI-ROCK-0 0001839	20171114-01	등록
남극암석	KOPRI-ROCK-0 0001840	20171114-02	등록
남극암석	KOPRI-ROCK-0 0001841	20171114-03	등록
남극암석	KOPRI-ROCK-0 0001842	20171114-04	등록
남극암석	KOPRI-ROCK-0 0001843	20171114-05	등록
남극암석	KOPRI-ROCK-0 0001844	20171114-06	등록
남극암석	KOPRI-ROCK-0 0001845	20171117-01	등록
남극암석	KOPRI-ROCK-0 0001846	20171117-01-1	등록

남극암석	KOPRI-ROCK-0 0001847	20171117-01-2	등록
남극암석	KOPRI-ROCK-0 0001848	20171121-01	등록
남극암석	KOPRI-ROCK-0 0001849	20171121-02	등록
남극암석	KOPRI-ROCK-0 0001850	20171121-03	등록
남극암석	KOPRI-ROCK-0 0001856	Clast5-1	등록
남극암석	KOPRI-ROCK-0 0001857	Clast5-2	등록
남극암석	KOPRI-ROCK-0 0001858	Clast5-3	등록
남극암석	KOPRI-ROCK-0 0001859	Clast5-4	등록
남극암석	KOPRI-ROCK-0 0001963	M171029-1	등록
남극암석	KOPRI-ROCK-0 0001972	M171029-10	등록
남극암석	KOPRI-ROCK-0 0001973	M171029-11	등록
남극암석	KOPRI-ROCK-0 0001974	M171029-12	등록
남극암석	KOPRI-ROCK-0 0001975	M171029-13	등록
남극암석	KOPRI-ROCK-0 0001976	M171029-14	등록
남극암석	KOPRI-ROCK-0 0001977	M171029-15	등록
남극암석	KOPRI-ROCK-0 0001978	M171029-16	등록
남극암석	KOPRI-ROCK-0 0001979	M171029-17	등록
남극암석	KOPRI-ROCK-0 0001980	M171029-18	등록
남극암석	KOPRI-ROCK-0 0001981	M171029-19	등록
남극암석	KOPRI-ROCK-0 0001955	SB171028-1A	등록
남극암석	KOPRI-ROCK-0 0001956	SB171028-1B	등록
남극암석	KOPRI-ROCK-0 0001957	SB171028-2	등록
남극암석	KOPRI-ROCK-0 0001958	SB171028-3	등록
남극암석	KOPRI-ROCK-0 0001959	SB171028-4A	등록
남극암석	KOPRI-ROCK-0 0001960	SB171028-4B	등록
남극암석	KOPRI-ROCK-0 0001961	SB171028-4C	등록

남극암석	KOPRI-ROCK-0 0001962	SB171029-1	등록
남극암석	KOPRI-ROCK-0 0001992	SB171030-1A	등록
남극암석	KOPRI-ROCK-0 0001993	SB171030-1B	등록
남극암석	KOPRI-ROCK-0 0001873	NC10	등록
남극암석	KOPRI-ROCK-0 0001874	NC11	등록
남극운석	KOPRI-KOREA MET-00000066	Mount DeWitt 12007	등록
남극운석	KOPRI-KOREA MET-00000084	Elephant Moraine 13018	등록
남극운석	KOPRI-KOREA MET-00000014	Thiel Mountains 07009	등록
남극운석	KOPRI-KOREA MET-00000060	Frontier Mountain 10102	등록
남극운석	KOPRI-KOREA MET-00000057	Frontier Mountain 10097	등록
남극운석	KOPRI-KOREA MET-00000149	Elephant Moraine 14017	등록
남극운석	KOPRI-KOREA MET-00000206	Elephant Moraine 14074	등록
남극운석	KOPRI-KOREA MET-00000145	Elephant Moraine 14013	등록
남극운석	KOPRI-KOREA MET-00000129	Reckling Peak 14003	등록
남극운석	KOPRI-KOREA MET-00000131	Reckling Peak 14005	등록
원시데이터 등록률 ⁵⁾			100 %

(국내 과제용)

주 의

1. 이 보고서는 극지연구소에서 수행한 기본연구사업의 연구결과보고서입니다.
2. 이 보고서 내용을 발표할 때에는 반드시 극지연구소에서 수행한 기본연구사업의 연구결과임을 밝혀야 합니다.
3. 국가과학기술 기밀유지에 필요한 내용은 대외적으로 발표 또는 공개하여서는 안 됩니다.