

남극권 맨틀활동과 지체구조진화 연구

Mantle dynamics and tectonic evolutions of  
Zealandia-Antarctic domain



한 국 해 양 과 학 기 술 원  
부 설 극 지 연 구 소



# 제 출 문

극지연구소장 귀하

본 보고서를 “남극권 맨틀활동과 지체구조진화 연구” 과제의 1단계 최종보고서로 제출합니다.

2023. 02. 28

연구 책임자 : 박승현

참여 연구원 : 이미정, 박창근, 김대영, 박용철,  
최학겸, 강승구, 진영근, 홍종국,  
이종익, 최문영, 박태운, 이미리내,  
김보미, 양윤석, 김형준, 유인성,  
박상범, 강필모, 한승희, 백종민,  
최연진, 정지웅, 정진훈, 김화영,  
김태환, 김도현, 김지훈, 김이정,  
최산희, 박규리, 박시원

위탁연구기관명 : 충남대학교, 인하대학교

위탁연구책임자 : 김승섭, 서정훈



보고서 초록

과제관리번호	PE22050	해당단계 연구기간	2020.01.01. ~ 2022.12.31.	단계 구분	1단계 / 3단계
연구사업명	중 사업명	기관연구사업			
	세부사업명				
연구과제명	중 과제명				
	세부(단위)과제명	남극권 맨틀활동과 지체구조진화 연구			
연구책임자	박 승 현	해당단계 참여연구원수	총 : 46 명 내부 : 40 명 외부 : 6 명	해당단계 연구비	정부: 11,764,889 천원 기업: 천원 계: 11,764,889 천원
연구기관명 및 소속부서명	극지연구소 / 지권연구본부		참여기업명		
국제공동연구	상대국명 : 미국 상대국연구기관명 : 하버드대학, 와이오밍대학, 펜실베이니아주립대, NASA, NMT				
위탁연구	연구기관명 : 충남대, 인하대 연구책임자 : 김승섭, 서정훈				
요약(연구결과를 중심으로 개조식 500자 이내)				보고서 면수	112 p
<ul style="list-style-type: none"> <li>○ 지각 및 상부맨틀 지구물리적 특성 파악 <ul style="list-style-type: none"> <li>- 질란디아-남극 맨틀의 동편 및 서편 해저지형도 및 지자기이상도 작성</li> <li>- 북부 로스해 및 확장-균열대 지판운동 복원</li> <li>- 육상/해저면 지진관측망 자료 DB 구축 및 Polar 3 형성 원인과 진화 모델 개발</li> <li>- 남극 로스해 서편 빅토리아랜드 분지 지역의 천부 및 심부 탄성과 단면 및 해석도 확보</li> <li>- 탄성과 탐사자료에 대한 수치해석학적 분석을 통한 신기 지체구조 속도모델 제시</li> </ul> </li> <li>○ 남극 맨틀 특성과 화산활동 기록복원 <ul style="list-style-type: none"> <li>- 질란디아-남극 중앙해령, polar 3 지역 암석 및 지구화학 자료 확보</li> <li>- 빅토리아랜드 신생대 화산암류 성인 및 분출사 복원</li> <li>- 남극운석 연구로 달과 소행성의 표면물질 특성 규명</li> </ul> </li> <li>○ 북빅토리아랜드 지체구조 진화 <ul style="list-style-type: none"> <li>- 남극권 맨틀의 기원 및 진화과정 모델 수립</li> <li>- 암석권 맨틀과 지각 메타소마티즘 특성과 주요 지질학적 사건의 변형기록 규명</li> <li>- 남극 빅토리아랜드 기반암 지질 역사 및 고태평양 섭입대 진화과정 규명</li> </ul> </li> </ul>					
색인어 (각 5개 이상)	한글	질란디아-남극 맨틀, 해양 자기이상, 지진관측망, 지각/맨틀 구조, 해저면 지진계, 남극 활화산, 남극 운석, 암석권 맨틀 진화, 빅토리아랜드 지구구조진화			
	영어	Zealandia-Antarctic mantle, Marine magnetic anomalies, Seismic network, Crustal/mantle velocity structure, Ocean bottom seismograph, Active volcanoes in Victoria Land Antarctic meteorites, Lithospheric mantle evolution, Tectonic evolution of Victoria Land			



# 요 약 문

## I. 제 목

남극권 맨틀활동과 지체구조진화 연구

## II. 연구개발의 목적 및 필요성

- 지각 및 상부맨틀 지구물리적 특성 파악
- 남극 맨틀 특성과 화산활동 기록복원
- 북빅토리아랜드 지체구조 진화 규명

## III. 연구개발의 내용 및 범위

- 지각 및 상부맨틀 지구물리적 특성 파악
  - 해저 지형, 지자기 및 탄성과 자료 획득
  - 중앙해령 주변 해저화산 지구물리 자료 분석
  - 관측망 구축 및 연속 지진자료 DB
  - 육상/해저 지진관측소 기본자료 분석
- 남극 맨틀 특성 규명과 화산활동 기록복원
  - 화산암류 지화학 분석
  - 화산분출사 복원모델
  - 해저면 암석시료 획득
  - 소행성에서 일어나는 동위원소 분별 및 화산 기작 규명(동위원소 화산 모델링)
- 북빅토리아랜드 지체구조 진화
  - 판 구조적 속도구조/지자기연대 모델링
  - 포획암의 변형 모델 수립
  - 암석절대연령측정
  - 장보고기지기반 변성·화성기반암과 화산연구를 통한 남극 빅토리아랜드의 형성과 진화사 규명
  - 암석 및 운석 DB 구축, 분류, 등록, 정보공개

## IV. 연구개발결과

- 지각 및 상부맨틀 지구물리적 특성 파악
  - 질란디아-남극 맨틀의 동편 및 서편 해저지형도 및 지자기이상도 작성
  - 북부 로스해 및 확장-균열대 지판운동 복원

- 육상/해저면 지진관측망 자료 DB 구축 및 Polar 3 형성 원인과 진화 모델 개발
- 남극 로스해 서편 빅토리아랜드 분지 지역의 천부 및 심부 탄성과 단면 및 해석도 확보
- 탄성과 탐사자료에 대한 수치해석학적 분석을 통한 신기 지체구조 속도모델 제시
- 남극 맨틀 특성과 화산활동 기록복원
  - 질란디아-남극 중앙해령, polar 3 지역 암석 및 지구화학 자료 확보
  - 빅토리아랜드 신생대 화산암류 성인 및 분출사 복원
  - 남극운석 연구로 달과 소행성의 표면물질 특성 규명
- 북빅토리아랜드 지체구조 진화
  - 남극권 맨틀의 기원 및 진화과정 모델 수립
  - 암석권 맨틀과 지각 메타소마티즘 특성과 주요 지질학적 사건의 변형기록 규명
  - 남극 빅토리아랜드 기반암 지질 역사 및 고태평양 섭입대 진화과정 규명

#### V. 연구개발결과의 활용계획

- 실제 남극환경 형성에 기여한 질란디아-남극 맨틀과 남극환경 간의 상호연관성 규명
- 3차원 속도 구조를 바탕으로 맨틀의 열분포 분석에 활용
- 맨틀의 열분포가 빙권 거동에 미치는 영향의 모델링 입력자료로 활용
- 남극내륙 거점 확보로 다학제 국제 공동연구 주도
- 향후 남극대륙내 기득권 확보를 위한 종합 지질정보(자원분포, 잠재 자원량)확보

극지연구소

# S U M M A R Y

## (영 문 요 약 문)

### I. Title

Mantle dynamics and tectonic evolutions of Zealandia-Antarctic domain

### II. Purpose and Necessity of R&D

- Demarcating the Zealandia-Antarctic mantle domain and investigating the mantle heterogeneity and geodynamic process of the Zealandia-Antarctic mantle
- Finding out the cause of Polar 3 magnetic anomaly and the development and evolution of West Antarctic Rift System in the Victoria Basin and Northern Basin
- Understanding the assembly and evolution history of Victoria Land and characteristics of asteroidal materials through the JangBogo Station-based investigations on rock, volcano, and meteorite of Antarctic continent

### III. Research Contents

- Velocity structure of shallow crust and upper mantle
  - Performing geophysical surveys for mid-ocean ridges and marine volcanoes
  - Deploying land-based seismic and ocean bottom seismographs (OBSs)
  - Building DB for continuous seismic data and analyzing data
- Characteristics of Antarctic mantle and record of volcanic activities
  - Analyzing chemical properties of volcanic rock in Zealandia-Antarctic region
  - Understanding volcanic stratigraphy in order to reconstruct magma genesis, and eruption mechanism and history of Cenozoic volcanoes
  - Acquiring volcanic rock samples
  - Unravelling inter-mineral isotopic fractionation and diffusion modelling of asteroid
- Tectonic evolution of the northern Victoria Land
  - Developing tectonic reconstruction modeling of the Zealandia-Antarctic region using marine magnetic data
  - Establishing deformation history of lithospheric mantle
  - Unravelling metamorphic conditions and its time constraint of terrane boundaries of northern Victoria Land
  - Revealing the formation and evolution history of the Antarctic continent

#### IV. R&D Results

- Velocity structure of shallow crust and upper mantle
  - Production of seafloor bathymetric and geomagnetic maps for the eastern and western sections of the Zealandia–Antarctic mantle domain
  - Reconstruction of tectonic plate motions for the northern Ross Sea and the western Pacific–Antarctic Ridge
  - Establishment of data DB on land/seafloor earthquake observation network and development of model for the origin and evolution of Polar 3 anomaly
  - Production of shallow/deep seismic cross-section profiles for the Victoria Land Basin in the western Ross Sea
  - Seismic velocity modeling for the new tectonic structures in the Ross Sea
- Characteristics of Antarctic mantle and record of volcanic activities
  - Collection of rock and geochemical data from the Antarctic ridge system and Polar 3 region
  - Study on origin of Cenozoic volcanic rocks and reconstruction of volcanic eruption history
  - Characteristics of surface materials of the moon and asteroids through a study on the meteorites from the Antarctica
- Tectonic evolution of the northern Victoria Land
  - Establishment of a model for the origin and evolution of the Zealandia–Antarctic mantle
  - Identification of metasomatism characteristics of lithospheric mantle and crust, and study on deformation records by major geological events
  - Study on the geological history of the bedrock in the Victoria Land and the evolution of the Pacific subduction zone

#### V. Application Plans of R&D Results

- Velocity structure of shallow crust and upper mantle
  - Bathymetry, gravity and marine magnetic map on the eastern and western boundaries of the Zealandia–Antarctic mantle domain
  - Constructing an automatic analysis system of local earthquake
  - Providing input data for modeling the effect of heat distribution in the upper mantle on ice sheet behavior
- Characteristics of Antarctic mantle and record of volcanic activities
  - Geochemical data of volcanic, gabbroic and mantle rocks
  - Reconstruction of Cenozoic volcanic genesis eruption/genesis in Victoria Land
  - Understanding of lunar and asteroidal materials
- Tectonic evolution of the northern Victoria Land
  - Origin and evolution model of the Zealandia–Antarctic mantle
  - Deformation and metasomatism evolution of lithospheric mantle
  - Basement rock geology in Victoria Land and subduction process of the Paleo–Pacific plate

# C O N T E N T S

## (영 문 목 차)

Chapter 1 Introduction	9
Section 1. Objective of the Study	9
Section 2. Necessity of the Study	9
Chapter 2 Current R&D Status in Korea and Other Nations	16
Section 1. Domestic	16
Section 2. Abroad	18
Chapter 3 R&D Implementation Contents and Results	28
Section 1. Research Contents	28
Section 2. Method	38
Section 3. Research Results	42
Section 4. Representative Results	90
Section 5. List of Research Paper	96
Chapter 4 Degree of R&D Goal Achievement	99
Section 1. Research Goal	99
Section 2. Degree of Research Goal Achievement	100
Chapter 5 Application Plans of R&D Results	107
Section 1. Application Plans	107
Section 2. Expected Effect from Research Results	108
Chapter 6 References	110

# 목 차

제 1 장 서론	9
제 1 절 연구개발의 개요	9
제 2 절 연구개발의 필요성	9
제 2 장 국내외 기술개발 현황	16
제 1 절 국내 기술, 산업 동향	16
제 2 절 국외 기술, 산업 동향	18
제 3 장 연구개발수행 내용 및 결과	28
제 1 절 연구내용	28
제 2 절 연구수행방법	38
제 3 절 연구결과 및 달성실적	42
제 4 절 1단계 대표적 우수성과	90
제 5 절 정량적 논문성과	96
제 4 장 연구개발목표 달성도	99
제 1 절 연구개발목표	99
제 2 절 연구개발성과의 달성도	100
제 5 장 연구개발결과의 활용계획	107
제 1 절 연구결과의 활용방안	107
제 2 절 기대성과 및 파급효과	108
제 6 장 참고문헌	110

# 제 1 장 서론

## 제 1 절 연구개발의 개요

- 해양, 육상에서 다양한 지구물리 자료 확보, 해석을 통한 질란디아-남극 맨틀, Polar3 및 북빅토리아랜드의 지각 및 상부맨틀 지구물리적 특성 파악
- 남극대륙의 화산, 운석연구를 통해 남극 맨틀 특성 규명과 화산활동 기록복원
- 남극대륙에 산출되는 암석 연구를 통해 북빅토리아랜드 지체구조 진화 규명

## 제 2 절 연구개발의 필요성

### 1. 남극대륙 연구 일반적 측면

- 남극대륙은 남극조약 서명국들에 의해 기후변화 대응, 미래자원 확보 등 당면한 지구적 문제 해결을 위한 연구가 활발히 이루어지고 있음
- 한편 남극 얼음 밑에 숨겨진 미지의 환경과 지질에 대한 순수한 지적 호기심을 기반으로 한 연구도 선진국 중심으로 수행 중임
- 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 나라들임. 과학 활동만이 유일하게 남극에서의 발언권과 영향력을 확대하게 하는 수단이라 할 수 있음
- 과거 7개국(칠레, 아르헨티나, 영국, 노르웨이, 호주, 프랑스, 뉴질랜드)이 주장하던 남극대륙에 대한 영유권은 남극조약(1959)으로 유보된 상태임. 하지만 이들 국가들은 여전히 자신들의 영유권을 주장하는 지역에서 주로 활동하며 보이지 않게 존재감을 나타내고 있음
- 남극대륙의 면적은 약 14,000,000 km<sup>2</sup>로 한반도 면적의 약 62배에 달함. 이중 눈과 얼음으로 덮이지 않은 암석 노출지 비율은 2%(약 280,000 km<sup>2</sup>)에 지나지 않음. 이 중 70%가 남극종단산맥에 집중적으로 분포함
- 남극종단산맥은 남극대륙을 남북으로 가로지르며 발달한 총 길이 3,000 km의 산맥으로 대서양쪽 끝은 펜사콜라 산맥에 해당하며 태평양쪽 끝은 빅토리아랜드임
- 로스해에 인접한 해안 지형, 험준한 산악 지형, 드라이밸리와 같은 사막 지대, 화산 지대 등 다양한 지형을 보여줌
- 과거와 현재의 지질현상에 의해 다양한 암석(광상, 석탄 등 포함)이 노출되어 있어 남극대륙 지질연구의 최적지이며, 노출면적, 바다로부터의 접근성 등을 고려할 때 미래

남극자원개발의 중심지로서 중요함

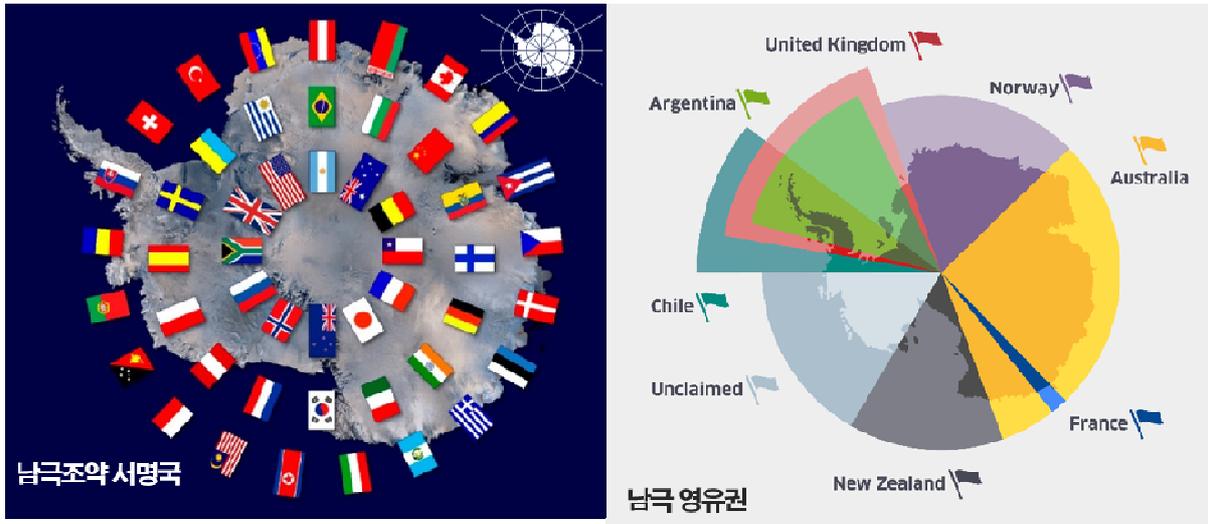


그림 1. (왼쪽) 남극조약 서명국, 원으로 배열한 국기들 중 가장 안쪽의 12 국가가 최초 서명 국가임. (오른쪽) 남극 영유권을 주장하는 7개 국가와 그 범위



그림 2. 남극중단산맥의 지형적 특성과 지질학적 특징

2. 경제·산업적 측면

- 미래 남극대륙에서 가장 큰 경제·산업적 이슈는 남극대륙에 존재하는 자원을 개발할지에 대한 논의임. 자원을 개발한다면 천연의 남극자연환경을 어떻게 보존하면서 지속 가능한 개발을 할 것인지가 가장 큰 논점이 될 것임. 그 이후에 이루어질 어떤 자원을 누가 어떻게 개발할 것인지에 대비하는 가치 있는 지질정보 확보와 이를 활용할 수 있는 시스템구축이 필요함

- 이와 같이 남극대륙의 미래를 대비하기 위한 정보를 수집하는 데에는 남극의 과거와 현재 지질현상에 대한 이해가 필수적으로 이루어져야 함

### 3. 과학적 측면

- 최근 극지연구소 주도의 연구를 통해 새롭게 발견된 “질란디아-남극 맨틀”은 과거 곤드와나 대륙을 균열시키고, 남극대륙을 호주와 질란디아 대륙에서 분리시킴으로써 현재의 남극환경을 만드는 가장 근본적인 원인이 되었음 (그림 3 & 4) [Park et al., 2019, Nature Geoscience]
- 질란디아-남극 맨틀 영역 내의 호주-남극 중앙해령은 해양 및 지질 연구에 선도적인 역할을 해 온 국가들과 지리적으로 먼 거리에 위치하고 있을 뿐 아니라 거친 해황으로 인해 연구수행에 어려움이 많은 지역으로써 그동안 과학적 연구의 미답 지역이었으나, 최근 쇄빙선 아라온호를 활용한 극지연구소 주도의 연구를 통해서 지구물리, 지구화학, 생물학적인 다양한 연구결과들이 보고되고 있으며 향후 추가적인 연구를 통해 보다 체계적이고 수준 높은 성과를 기대하게 함
  - 질란디아-남극 맨틀 영역 내의 호주-남극 중앙해령 주변에서는 남극 해저 환경에 큰 영향을 미칠 것으로 판단되는 “무진 열수 분출구” 등 열수 분출 작용과 함께 새로운 생명체가 발견된 바 있음 [Hahm et al., 2015, G-cubed]
  - 호주-남극 중앙해령 주변의 해저 지형과 빙하주기 및 해수면 변동이 상호 관련되어 있을 가능성이 확인된 바 있음 [Crowley et al., 2015, Science]
  - 호주-남극 중앙해령을 남쪽 경계로 하여 호주판 내부에 위치한 맥쿼리판의 생성 시기 및 주변 지각판들 간의 상대운동과 진화과정의 이해에 기여함으로써 향후 질란디아-남극 맨틀의 판구조적 진화와 관련된 연구에 중요한 자료로 활용될 수 있음 [Choi et al., 2017, EPSL]
  - 질란디아-남극 맨틀 영역 내에는 많은 해저산들이 분포하고 있음이 확인되는데, 남극 주변의 지형과 진화에 큰 영향을 미치고 있는 것으로 판단됨. 또한 해저산에는 다양한 생명체들이 분포하고 있음을 탐사를 통해 확인한 바 있음
- 맨틀의 구조, 대류 및 진화 프로세스는 지각의 이동 및 지구조적 작용의 근원이 되며, 이에 대한 연구는 미래의 기후변화와 자연재해 등을 비롯한 다방면의 지구 변동에 적극적으로 대처할 수 있는 자료를 제공할 수 있음

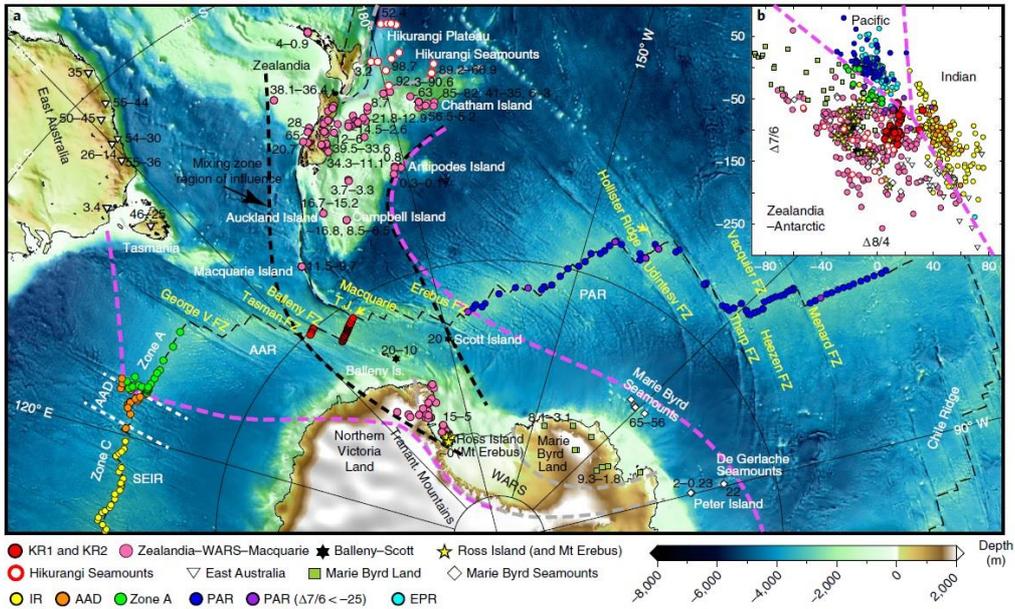


그림 3. (a) 검은색 점선으로 표시된 “질란디아-남극 맨틀”의 대략적인 영역 [Park et al., 2019, Nature Geoscience]. (b) 인도양 및 태평양 타입의 맨틀과 독립적으로 구분되는 “질란디아-남극 맨틀”의 지화학적 특성

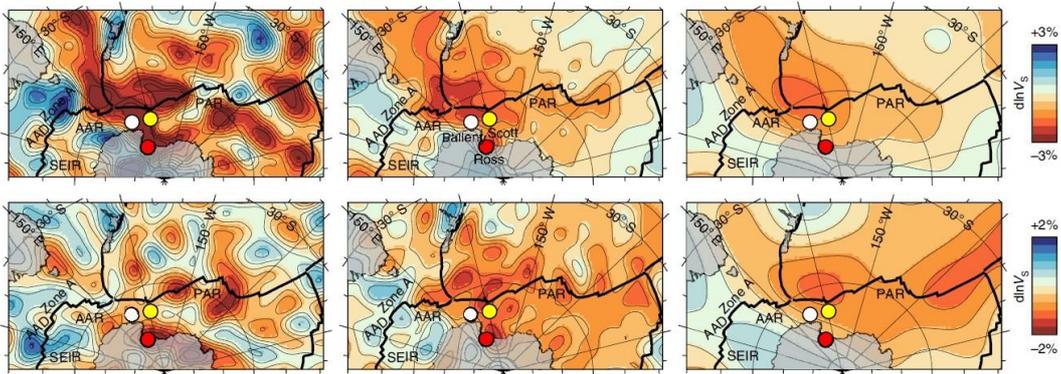


그림 4. 깊이(Top: depths of 250 km, Bottom: 600 km)에 따른 지진과 토모그래피 모델: 태평양과 인도양 사이에 독립적으로 존재하는 질란디아-남극 맨틀은 뉴질랜드-호주-남극이 하나로 이루어져 있었던 곤드와나 대륙의 break-up을 유발한 초대형 플룸에서 기원하였을 것으로 추정하며, 현재에도 상대적으로 온도가 높고 유동성이 크기 때문에 대륙의 rifting에 영향을 주는 것으로 생각됨 [Park et al., 2019, Nature Geoscience]

- 현재까지 수행된 탐사 및 연구는 경제적, 시간적, 환경적 제약으로 질란디아-남극 맨틀 영역의 중앙부에 집중되었기 때문에 이 맨틀의 분포 영역에 대한 이해가 여전히 부족한 실정임. 따라서 새롭게 발견된 질란디아-남극 맨틀의 동편 및 서편 경계를 명확히 규명하고, 맨틀의 특성, 기원 및 운동에 대해 이해하기 위해서는 추가적인 탐사와 함께 다른 지역과의 비교연구가 반드시 필요한 상황임
- 서남극 열개구조는 길이 ~3,000 km, 폭 ~700 km에 달하는 남극에서 가장 큰 지체구조 중 하나이며, 서남극 열개구조의 서쪽 측면으로는 남극 종단산맥이 발달하고 있음. 또한

테라노바만을 기점으로 남쪽으로는 빅토리아랜드 분지(VLB in 그림 5a), 북쪽으로는 북분지(NB in 그림 5a)지역에 복잡한 형태의 정단층 계(system)를 이루고 있음 (그림 5a)

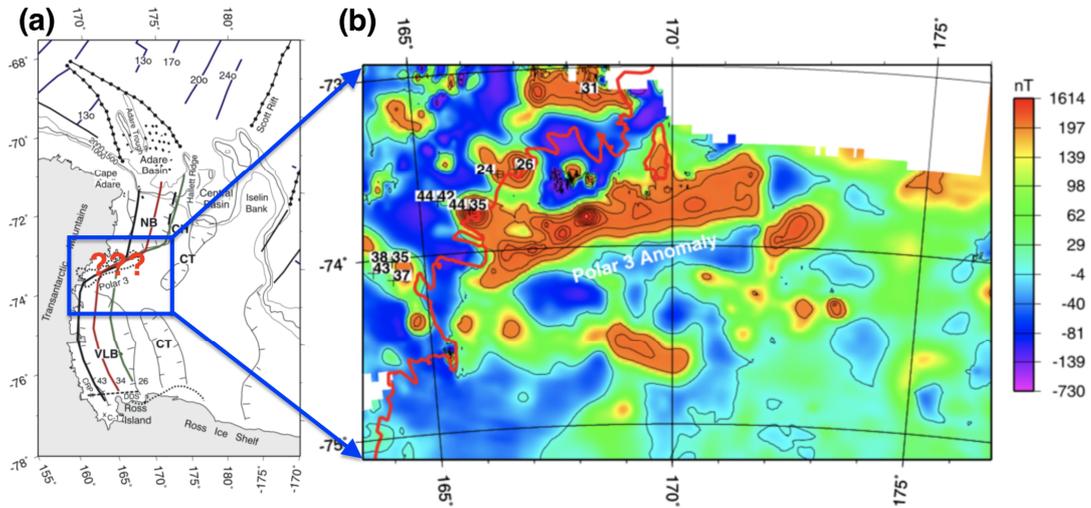


그림 5. (a) 서남극 열개구조의 서쪽 측면 시간적 위치 모델(서쪽부터 42, 34, 28 Ma) [Davey et al., 2006]과 Polar 3 자기이상 위치 (NB: Northern Basin; VLB: Victoria Land Basin; CT: Central Trough). (b) 로스해 지역 자기 이상도 [Bosum et al, 1989]. 관입암의 연대는 Ma 단위임 [Rocchi et al, 2002].

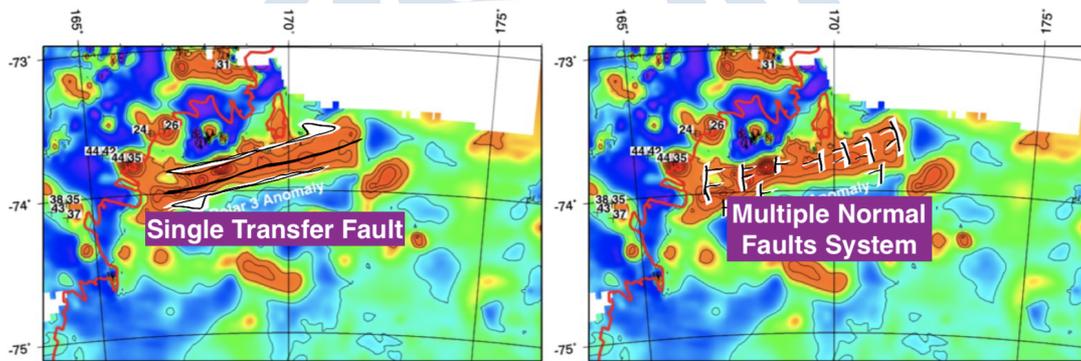


그림 6. Polar 3 자기이상의 형성 원인과 테라노바만을 경계로 남·북으로 이어지는 서남극 열개구조의 연결 모델: 중앙해령과 흡사한 하나의 변환단층(Transfer fault) 모델(a)과 여러 개의 정단층 시스템 모델 (b).

- 하지만, 빅토리아 랜드 분지와 북분의 경계에서 어떻게 서남극 열개구조가 발달되어 연결되어 있는지는 아직까지도 명확하게 밝혀지지 않았고, 그 경계에서 Polar 3라는 1,000 nT 이상의 자력이상(magnetic anomaly)이 발견됨 (그림 5b). Polar 3 자력 이상 또한 어떻게 형성되었는지, 그리고 남과 북에 발달된 서남극 열개구조의 형성과 진화에 어떠한 영향을 주었는지 명확하지 않음
- 현재까지의 Polar 3 자기이상의 결과로는 그림 6과 같이 두 개의 모델을 제안할 수 있음. 하나는 중앙해령과 흡사한 변환단층에 의한 마그마의 관입과 분출에 의한 모델(그림 6a),

그리고 여러 개의 정단층들로 이루어진 모델임(그림 6b)

- Polar 3의 마그마 관입의 깊이는 대략 12 km [Davey et al., 2006]으로 유추되고 있으나, 이 두께 또한 다른 연구지역(로스섬)의 결과를 인용함
- 정확한 Polar 3의 형성 원인과 발달 과정의 규명은 서남극 열개구조의 진화 과정과 동남극 대륙의 지체구조 해석에 반드시 필요함



그림 7. 남극에 기록된 지구나 남극대륙의 역사. 남극대륙 운석은 태양계와 지구의 초기 조건을 기록하고 있음. 남극중단산맥의 여러 암석은 남극대륙의 형성에 대한 기록을 가지고 있음. 그 중심에는 지질시대에 걸친 화산활동기록이 있음. 현재 남극은 활발한 화산활동이 일어나는 지역 중 하나임

- 앞에서 살펴본 바와 같이 남극대륙 지질학 연구는 그 활동영역과 결과를 통해 미래 남극대륙에 대한 발언권을 확보케 하는 국가적으로 중요한 과제임
- 이전 과제에서 다양한 지질학분야의 기초 연구를 통해 남극대륙 지질연구의 가능성을 타진해 봤다면, 그 다음 단계에서는 다양한 연구주제들을 하나의 줄기로 엮는 것이 필요함
- 남극은 운석의 대부분(약 80%)과 혜성 기원의 우주먼지가 발견되는 우주물질의 보고로써 지구의 기원과 진화는 물론 미래 우주탐사의 기반 연구를 위한 필수 지역임
- 남극대륙이 겪어온 과거 지질활동의 결과로 남극대륙에 기록된 지질구조와 암석의 형성과정을 밝히는 것은 남극대륙 땅덩어리를 이해하는 가장 밑거름이 됨

- 현재 남극에서 일어나고 있는 가장 눈에 띄는 지질현상은 화산활동이며, 눈, 얼음, 빙상 등 빙권과의 상호작용은 초미의 관심사인 남극 빙상의 거동과 해수면 변동에 영향을 끼치는 주요 요소 중 하나로서 중요함



## 제 2 장 국내외 기술개발 현황

### 제 1 절 국내 기술, 산업 동향

#### 1. 남극대륙 탐사시스템 구축

- 남극대륙 탐사시스템 구축의 일환으로, 장보고기지를 중심으로 한 빅토리아랜드 4대 거점캠프를 확보하고 거점의 안전, 지원체계에 대한 정보를 획득하였으며, 지질-운석 탐사 수행
- 이를 통해 빅토리아랜드 전역에 대한 현장 활동을 수행할 수 있는 능력을 확보하며 거점별로 탐사 정보 지도를 발간함

#### 2. 남극-질란디아 맨틀 연구

- 호주-남극 중앙해령에 대한 지구물리, 지화학, 생물학적 연구는 지난 2011년 이후 극지연구소의 주도로 충남대, 인하대, 서울대 등과 연구 협업을 이루며 계속적으로 진행해오고 있으며, 최근 호주-남극 중앙해령과 관련된 다양한 연구 결과를 국제학술지에 발표하고 있음
- 국내 맨틀암석(감람암) 산출은 제주, 보은, 아산-평택, 백령도에서만 보고되고 있으며, 맨틀 암석에 대한 화학적 연구는 부경대, 부산대, 충남대를 중심으로, 미구조 연구는 서울대를 중심으로 진행되고 있으나, 화학적-구조적 연구를 모두 수행한 지역은 제주도의 경우만 존재함
- 해양과학기술원에서는 자체 개발한 무인잠수정 및 국외 무인잠수정을 활용, 태평양과 인도양 지역에서 열수분출구 환경 및 생태계 조사를 수행하여 다양한 분류군의 생물을 채집하고 형태적, 분자적 동정을 수행하고 있음

#### 3. Polar 3 지자기 이상 연구

- 국내에서는 대륙스케일(continental scale)의 지체구조 연구를 수행하고 있지 않음
- 다만 기상청에서 주관하고 있는 지진·화산기술 R&D 사업에서 지진관측과 단층면 해 분석, 한반도 속도구조 연구에 관한 연구 사업을 수행 중에 있음
- 현재 국내에서 남극에 관한 지체구조 연구는 소내 지권연구본부에서 유일하게 수행하고 있음
- 본 연구에서 해저면 지진관측망 구축과 자료 획득이 중요한 관측 자료로 국내에서는 부산대학교에서 울진 앞바다에서 발생하는 미소지진 감시를 위하여 단기(6개월)관측을 수행하고 있음

#### 4. 남극빅토리아랜드 지질정보 수집과 지체구조 진화연구

- 남극빅토리아랜드 지질정보 수집과 지체구조 진화연구의 일환으로 5억년전 로스 조산운동과 관련된 빅토리아랜드 기반암의 형성과 변성작용, 조산운동대 주변의 분지진화, 신생대 남극화산활동에 대한 연구를 수행
- 특히 가스분출 탐사를 통해 멜버른 화산의 활동을 15년 만에 관측하였으며, 남극전역 얼음 코어에 나타나는 1252년 화산재 층의 기원화산이 리트만 화산임을 규명하여, 남극활화산 연구를 통해 중요한 결과를 도출할 수 있는 기반을 구축함
- 기초지질정보의 일환으로 광상에 대한 별도의 조사와 타 지질연구 분야의 시료 협조를 통해 빅토리아랜드 전역의 광물 분포와 특성을 파악하고 이를 한눈에 보여주는 광물 핸드북을 2019년도 발간예정
- 장보고기지 주변지역 지질조사를 통해 장보고기지 주변 정밀 지질도를 최초로 발간하여, 남쪽의 이태리 기지 주변 지질도와 연결되는 정밀지질도 완성

#### 5. 운석탐사 및 행성형성과정 연구

- 운석탐사 및 행성형성과정 연구의 일환으로 지속적인 운석탐사와 청정 눈시료 회수를 실시해 1,000개 이상의 다종 다량의 운석과 우주물질을 확보하였으며, 운석의 암석학적 연구, 동위원소 분석, 열역사 규명을 통해 태양계 초기 형성과정과 물질의 특성을 규명함

#### 6. 우주물질 및 지각물질 정밀분석기술

- 우주물질 및 지각물질 정밀분석기술은 ICP-MS, 산소동위원소 분석장비, 불활성기체 분석장치, FE-SEM등 첨단 분석장비를 도입하고 이를 활용한 분석기술을 개발하여 회소성 있는 남극 시료 및 운석시료에 대한 극미량 정밀 분석기술을 확보함

#### 7. 관련기술의 국내연구기관 동향

- 한국지질자원연구원은 백두산 화산 관측을 위한 남북한이 함께 참여하는 대형 연구과제를 기획하고 있음. 남극의 멜버른, 리트만 활화산 관측 및 모니터링 과제 수행을 통해 백두산 관측을 위해 필수적인 마그마 분화 예측 기술 개발 및 화산관련분야 국제 공동연구 네트워크구축 기반을 공고히 할 것으로 예상됨
- 한국기초과학지원연구원(KBSI)에서 2019년 최첨단 동위원소현미경(isotope microscope)을 도입. 우주화학, 지질학, 생물학, 재료과학 등 다양한 분야에서 널리 이용될 것으로 전망됨. 기술 이전 및 공동개발, 기기 공동활용을 위해 극지연구소의 운석 연구진과 긴밀한 협력 예상

- 한국지질자원연구원은 한국지질자원연구원 지질정보활용 기반을 통해 국토의 다양한 지질정보를 제공하고 있음. 디지털 지질도를 비롯, 총 13종의 지질정보를 회원가입 절차를 거쳐 대국민 서비스하고 있음
- 남극에 대한 영유권을 주장하는 일부 국가들(뉴질랜드, 칠레 등)은 국가의 지질조사소격 기관에서 남극에 대한 공식 지형도 및 지질도를 발간하기도 함. 영유권을 인정하지 않는 우리나라는 순수 연구차원에서 지질도와 지질정보를 극지연구전문기관에서 다루는 것이 적절함

## 제 2 절 국외 기술, 산업 동향

### 1. 남극대륙 지질일반 및 지하자원관련 연구 동향

- 남극환경보호에 관한 의정서 이후 표면적으로 남극지하자원에 대한 조사를 실시하는 국가는 없지만, 일반지질학 및 개발 가능성을 포함한 특이한 광상의 보고 및 그 성인에 대한 기초 지질학적 연구는 수행되고 있음
- 미래자원확보에 관한 연구는 두 가지 방향으로 이루어지고 있음. 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 사용됨
- 해양과 육상의 탄화수소와 광물을 포함하는 남극 지하자원의 개발은 남극환경보호 의정서(1998-2048)로 전면 금지되어있으며, 기초과학연구(지질학)만 허용되고 있으며, 협정 이후 어떤 국가도 자원분포, 매장량 등을 파악하기 위한 연구를 노골적으로 수행하고 있지 않음
- 남극환경보호 의정서 이전에 남극대륙의 자원에 가장 큰 관심을 가지고 조사를 수행한 국가는 미국임. 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 발간함
- 호주도 남극대륙의 석탄개발 가능성에 대한 보고서(1987년)를 발간한 바 있음

#### ※ 남극대륙 자원에 대한 보고서 (출간순)

- 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)



그림 8. 남극대륙과 주변 대륙의 주요 자원 분포

- 이들 보고서는 남극해와 남극대륙 전역에 대한 기초조사와 과거 연결되어 있어 지질구조가 남극으로 연장되어 있으리라고 생각되는 남반구 주변 대륙들의 자원분포를 바탕으로 남극대륙의 자원분포를 파악하고자 함
- 하지만 모든 보고서에서 개발 가능성은 남극의 혹독한 환경과 인프라의 부족으로 당시에는 경제성이 없는 것으로 판단하고 있음

※ 최근 발표된 남극대륙 특이광상에 대한 논문

- 다이아몬드: The discovery of kimberlites in Antarctica extends the vast Gondwanan 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)

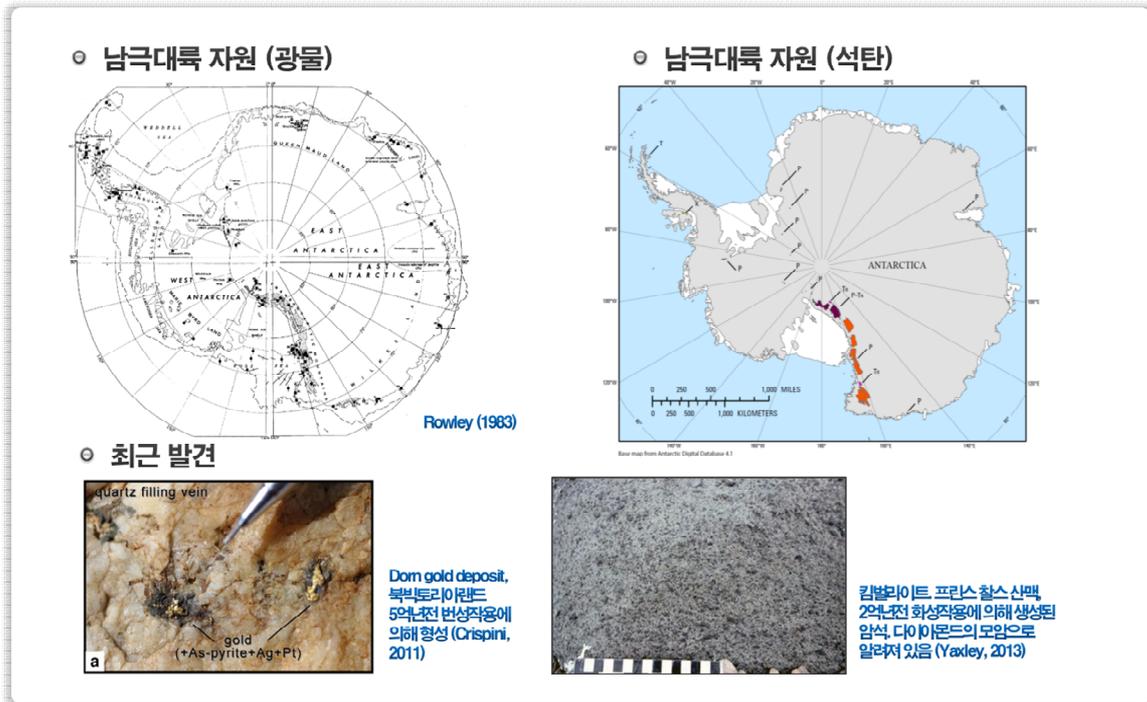


그림 9. (위쪽) 남극대륙자원관련 보고서를 종합한 광물자원 분포 및 석탄 분포. (아래쪽) 최근 발견된 금(빅토리아랜드)과 다이아몬드(동남극) 광상. 성인에 대한 과학적 연구가 출판됨

- 미국, 영국, 호주, 칠레 등 전통적인 남극연구 중심국가가 남극기지를 기반으로 조사 및 연구를 수행하고 있는 가운데 최근에는 중국의 부상이 눈에 띈다
- 2014년 장보고기지 남쪽 인익스프레서블 섬에 제5기지 건설계획 발표함. 중국은 남극반도, 동남극, 남극고원, 남극대륙에 이어 남극중단산맥에 진출하게 됨으로써 남극 전역에 거점을 확보. 이를 기반으로 독자적인 항공망 구축, 중국판 GPS 시스템인 Bei Dou 위성 관제 시스템 구축 등 남극을 전략적으로 활용하기 위한 공격적인 투자를 시작함
- 특히 2014년 제5기지 건설 천명 이후에 국내적으로 남극대륙 지하자원에 대해서도 노골적인 관심을 보이고 있으며, 이를 견제하는 서구 언론의 보도가 최근까지 지속적으로 이루어짐
- 2014년 11월에는 시진핑의 호주 방문시, 호바트를 방문하여 남극항해를 떠나는 실롱호를 격려 방문하였고, 이때 시진핑은 “극지강국(極地強國)”이라는 표현을 사용했는데, 이를 호주 언론은 “China as a Polar Great Power”라고 번역하며, 견제 차원에서 많은 관심을 보임
- 이에 대한 반응으로 뉴질랜드, 호주 등은 중국의 남극에 대한 전략적 접근을 분석하는

보고서를 발간한 바 있음. 이들 보고서에서는 중국이 남극 지원을 위해 인민해방군 자원(인력, 장비)을 일부 사용하는 것, 지하자원에 대한 노골적인 접근, 동남극 에머리 빙봉에서 곤륜기지에 이르는 지역에 대한 영유권 관심에 대한 문제 제기를 하고 이에 대응하기 위한 관련국들의 전략이 필요함을 역설

- 호주는 2016년 발표한 남극연구, 인프라 투자전략에서 20년간 2조원 이상의 투자를 결정하면서 남극대륙에서의 주도권과 존재감을 유지하려는 모습을 보임

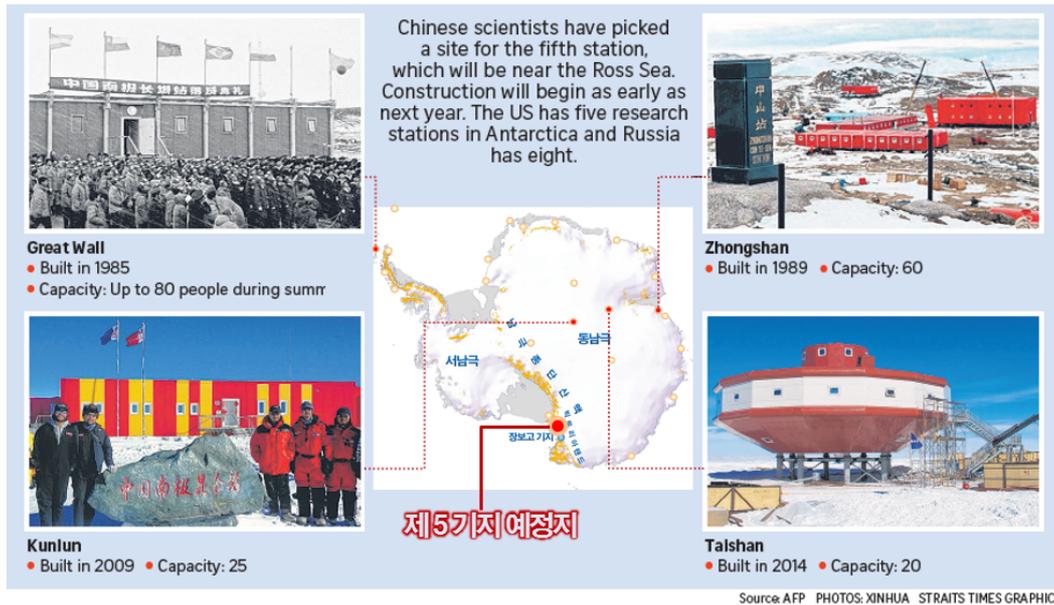


그림 10. 남극에 설치된 남극기지 위치와 빅토리아랜드에 지어질 제5기지 예정지



그림 11. 중국 제5기지의 위치. 장보고기지에서 남쪽으로 20 km 지점임.

(오른쪽) 2017-18 남극 하계에 진행된 중국의 남극기지 건설을 보도한 신화통신 사진

- 현재 중국기지가 위치한 남극 반도와 동남극은 인근 지역의 암석 노출지가 제한적이어서 광역적인 지질연구는 어렵지만, 남극대륙에서 가장 넓은 암석 노출지인 남극중단산맥에 대한 접근성이 좋은 제5기지를 기반으로 본격적인 광물자원에 대한 조사와 연구를 수행할 것으로 예상됨
- 중국 제5기지의 CEE에 제시된 기지기반 연구내용에는 남극중단산맥의 기반암의 지질학적 연구가 주요 주제로 나타나 있음 (그림 12). 지질학적 연구 부분에 있어 우리나라가 수행하고 있는 부분과 많은 부분 중복될 것으로 예상되나 이에 대한 협의

논의는 이루어지지 않고 있음

- 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 생각됨

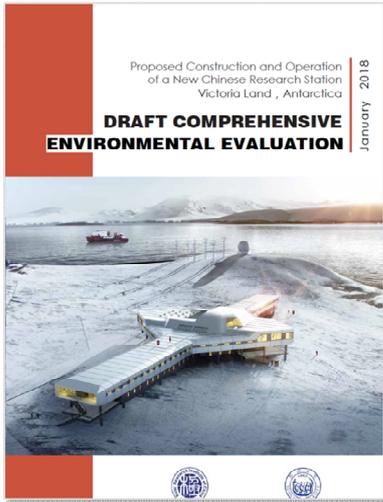


Table 1-1 A list of main research fields of new Chinese station on the Victoria Land, Antarctica

Subject	Content	Equipment	Region	Significance	How to connect with studies of other stations
Physical Oceanography	Observation of polynya	The research vessel, CTD/LADCP, moorings, etc.	Terra Nova Bay	The Terra Nova Bay Polynya keeps open in winter and produces denser shelf water that is an important source of the Antarctic Bottom Water. Additionally, the polynya has essential influences on the local ocean atmosphere exchange and the marine ecosystem in this region.	Most previous research of polynya was based on remote sensing data and <i>in situ</i> observations in summer. As a supplement, moorings will be deployed in the polynya by Chinese expeditions to collect hydrographic data in winter to deepen the understanding of processes in polynya and their contributions to modification of shelf water.
	Interaction between glacier tongue and ocean	The research vessel, CTD/LADCP, turbulence profiler, etc.	Drygalski Glacier Tongue and its surrounding sea waters	Although the Drygalski Glacier Tongue has been monitored and studied for decades, the interaction between the glacier tongue and its surrounding sea waters are still limited.	Measurements will be conducted in the ocean area surrounding the Drygalski Glacier Tongue. These data, as a supplement of remote sensing data, will be used to analyze the stability of the ice tongue and interactions between the ice tongue and the surrounding ocean, sea ice and icebergs.
	Observation in the outflow region of Ross Sea	The research vessel, CTD/LADCP, moorings, etc.	The northwest shelf region, including the Terra Nova Bay, Drygalski Basin, Nordenskjold Basin, Cary Bank and Mawson Bank.	The major circulation in the Ross Sea is a clockwise gyre, the Ross Gyre. The ocean area near the new Chinese Station is the outflow region of the Ross Sea. The surface current in the region of Terra Nova Bay is prevalent northward (Commodari and Perin, 1999; Flocco et al., 2003). However, the circulation patterns in the deeper layer and remote region are more complex. Studying the circulation in this region will help further understanding of the contributions of the Antarctic Bottom Water formed in the Ross Sea.	A comprehensive observation and study have been conducted on the shelf slope exchange in the Ross Sea recently (Gordon et al., 2009). The oceanographic survey on the shelf is still limited.
Geology	1) Accretionary orogenesis of the broadband tectonic margin of Gondwana. 2) Lateral tectonic and lithospheric structures of Pacific margin of Gondwana. 3) Comparative study of orogenic-type and collision-type high-pressure metamorphism.	Geological survey equipment	Northern Victoria Land with an area of 400 × 500 km <sup>2</sup>	The research program will reveal the structural style of Paleozoic Pacific margin of Gondwana and mechanism of subduction and exhumation of oceanic-type high-pressure metamorphic rocks, and provide information for the tectonic model of the oceanic subduction zone.	With the support of Italian and German stations, basic geological investigations on (1) regional geology, Paleozoic metamorphic and igneous rocks and (2) Mesozoic volcanic and strata have been done in Northern Victoria Land. On that basis, we will focus on the accretionary orogenesis of Paleozoic continental margin through combined observations of geology and geophysics and study

그림 12. 2018년 2월 COMNAP 중국 제5기지의 CEE. 주요연구 과제를 정리한 표. 지체구조를 포함한 지질연구가 계획되어 있음

### 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)

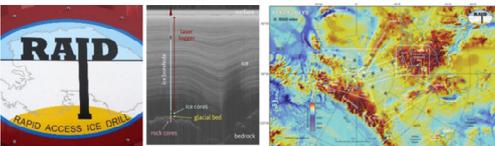
그림 13. 남극에서의 중국 영향력 확대 및 중국의 남극 지하자원을 개발할지 모른다는 우려를 나타내는 언론 보도와 이에 대한 주요 남극활동국들의 전략 보고서

- 중국, 인도 등 신흥 남극연구국들의 남극대륙 지질연구에 대해 우리나라가 대응하기 위한 정책적 준비는, 제3차 남극연구활동진흥기본계획(2017-2022), 제4차 과학기술기본계획(2018-2022)을 통해 근거가 마련되어 있는 편이므로 이를 실천할

구체적인 전략과 과학적 연구 과제 도출로 남극대륙 지질연구의 지속적 수행 및 지질학을 비롯한 다양한 연구 분야의 활동영역확대 필요

### 국외 (지질정보)

- 이태리, 독일: 지질도 발간을 위한 광역 조사 이후 **지속적인 지질조사** 실시하고 있지만 위축된 상태
- 영국: 항공기 등을 이용한 **서남극권의 광역적 지질지구물리 탐사** 계속적 수행
- 뉴질랜드, 노르웨이: 기지가 위치한 지역의 **지질도 종합, 전산화 작업**
- 호주: 연안기지에 이어 **내륙기지 확보노력**
- 미국: 남극 **빙저 기반암 시료 확보 프로그램 진행 중** (NSF RAID program, 4년간 100억원)



### 국외 (운석탐사)

- 미국, 일본
  - 40~50년간 남극 운석 회수(각 20,000여개 이상)
  - 남극운석 연구 기반으로 **우주물질 직접 회수 프로젝트** 수행(사업비 약 1조원)
- 중국
  - 1998년부터 글로브 산맥에서 남극운석탐사
  - 제5기지 완공 후 **빅토리아랜드에서도 운석탐사 가능성 높음**

구분	미국	일본	중국	대한민국
운석탐사 주관	NSF	극지연구소	극지연구소	극지연구소
큐레이션 시스템	NASA	극지연구소	현재 없음	극지연구소
탐사개시년도	1976	1969	1998	2006
남극운석 개수	>20,000	20,000	9,838(?)	1077
탐사지역(기지)	McMurdo	Showa	Zhong Shan	장보고기지
주 탐사지역	동남극 왕단산맥	동남극 아미르산맥	동남극 글로브산맥, 빅토리아랜드(?)	동남극 빅토리아랜드

주요 남극운석 보유국의 운석탐사 및 큐레이션

그림 14. 남극중단산맥에 대한 국내외 운석/지질 연구 현황을 정리한 표

- 남극중단산맥에는 맥머도(미국), 스콧(뉴질랜드), 마리오주젤리(이태리), 곤드와나(독일), 장보고(한국) 기지가 위치하고 있으며, 많은 부분이 뉴질랜드의 영유권 주장지역에 속함.
- 남극중단산맥주변에 대해 남극연구 주요 국가들은 지속적인 연구를 수행 중임. 학술적인 연구 외에도 맵핑, 빙저 기반암 시료 확보 등 기초적인 지질연구도 진행 중. 이를 위한 인프라 투자도 병행해 이루어짐
- 남극중단산맥 국제공동연구를 위해 미국 연구자들 중심의 비공식적인 모임인 TAM Science가 운영되고 있음. 주요 연구책임자와 NSF Antarctic Program과의 협의를 통해 남극중산단맥 거점캠프를 정하고 항공기 헬기 등 대형 로지스틱스를 공동 활용

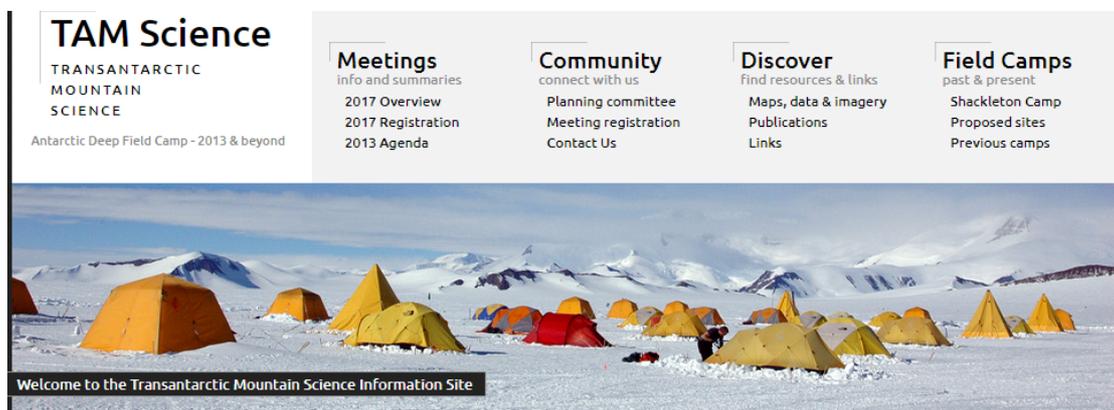


그림 15. TAM Science 웹페이지. 2013년 공동 캠프 전경을 보여주고 있음

## 2. 질란디아-남극 맨틀 연구

- 질란디아-남극 맨틀 지역은 유럽 및 미국으로부터의 접근성이 떨어질 뿐 아니라 거친 해황으로 인해 현재까지 탐사가 많이 이루어지지 않은 상황임
- 호주-남극 중앙해령에 대한 탐사 및 연구, 분석은 극지연구소의 주도 하에 수행되어 오고 있으며, 미국 하버드대(지화학), 와이오밍대(지화학), 우즈홀 해양연구소(지화학 및 지구물리) 등이 공동연구로써 참여하고 있음
- 프랑스에서는 호주 아래에 위치하는 호주-남극 중앙해령의 북서편 중앙해령 구간을 타겟으로 연구(STORM 프로젝트: South Tasmania Ocean Ridge and Mantle)를 수행하고 있으며 우리나라도 이 프로젝트에 참여하고 있음
- 세계적으로 산출하는 맨틀 암석의 미구조-화학적 연구는 활발하지만 [예. 파푸아뉴기니 Rio Grande rift: Satsukawa et al., 2011; Park et al., 2014] 북빅토리아랜드에서 맨틀 암석의 미구조를 활용한 연구는 전무함
- 중앙해령 열수 환경 등 심해 생물에 대한 연구는 무인잠수정을 보유하고 있는 미국, 캐나다, 중국 등에 의해 선도되고 있으며, 심해 생물상 및 생태계 보고, 심해 환경 적응 과정 중 변화된 형태 및 생리를 이해하기 위한 유전체 연구가 수행되고 있음
- 비늘발고둥(Scaly-foot snail)과 심해열수공 홍합, 그리고 5종의 어류 유전체가 시퀀싱되었고, 각 생물 별 유전 정보 기반 심해 환경 적응 및 진화 연구가 수행되고 있음
- 열수구 주변 초고온균의 경우 유기용매 및 고온에서의 안정성이 높아 반응 속도의 증가, 시간 단축, 중온에서의 오염 방지 등의 장점을 가져 다양한 산업분야에서 활용되고 있음

## 3. Polar 3 지역 연구

- POLENET program
  - 미국 NSF의 주도로 일본, 독일, 영국 등이 참여하는 국제 공동연구 프로그램임
  - 4th International Polar Year (IPY) 2007-2008에 시작되어 현재까지 남극과 그린랜드 지역에 지구물리 관측망(GPS와 지진관측망)을 구축하여 남극과 그린랜드의 지체구조와 Glacial Isostatic Adjustment (GIA) 연구를 수행하고 있음
- 2014년에 “Nature”에 실린 Horizon Scan의 6개 대주제 중 “Reveal Antarctica’s history - solid earth, geodynamics, tectonics”으로 분류될 정도로 다른 연구보다 선행되어야 하는 중요한 연구로 선정 (제안한 연구는 남극에서 가장 큰 지체구조(tectonics)인 서남극 열개구조와 남극 종단산맥의 형성과 진화를 알 수 있는 연구 주제로 Horizon Scan에 부합함)
- Horizon Scan의 세분화된 연구주제 24. How does small-scale morphology in subglacial and continental shelf bathymetry affect Antarctic Ice Sheet response to changing environmental conditions? 27. How do the characteristics of the ice sheet bed, such as geothermal heat flux and sediment distribution, affect ice flow and ice sheet stability?

33. How did marine-based Antarctic ice sheets change during previous inter-glacial periods? 36. Do variations in geothermal heat flux in Antarctica provide a diagnostic signature of sub-ice geology? 37. What is the crust and mantle structure of Antarctica and the Southern Ocean, and how do they affect surface motions due to glacial isostatic adjustment? 등으로 분류하여 세계 각국의 남극 연구자에서 선행적으로 연구를 수행할 것을 제안함 [Kennicutt II et al., 2014]

#### 4. 남극대륙 활화산 연구

- 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 발견됨



그림 16. 남극반도와 로스해주변에서 새롭게 발견된 91개의 빙저화산위치

- 현존하는 최고의 화산분포지역인 동아프리카 열곡대의 신생대 화산대(60여개의 활화산과 아프리카 대륙 내에 40여 개의 화산 분포)보다 남극의 서남극 열개구조대에 더 많은 화산이 분포함. 이들 빙봉 아래 화산 중 몇몇 활화산이 분화할 경우 서남극 대륙의 빙상을 불안정하게 만들고 빙봉의 붕괴 속도를 가속화 시킬 수 있기 때문에 결과적으로 해수면 상승을 초래할 것으로 예상됨
- 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 예상됨

- 전 지구적 기후변화, 이에 연동되는 해수면 변동 그리고 이러한 순환 시스템에 남극 빙붕 아래 존재하는 화산의 분화 가능성이 또 하나의 중요한 변수로 부각됨
- 따라서, 이러한 화산의 과거분출 기록을 복원하고 화산들의 미래 분화가능성을 예측하는 연구가 매우 중요

## 5. 남극지질·암석정보활용기반

- 미국은 Byrd Polar Rock Repository에 과거 수행한 남극 지질탐사에서 획득한 암석시료 데이터베이스를 구축 운영하고 있음. 암석의 분류, 사진, 질량, 연대, 위치 등 기본 정보 외에, 획득 당시 연구자의 야장 또는 지질도도 제공하여 시료를 기반으로 한 후속 연구를 권장



그림 17. 장보고기지주변 활화산과 신생대화산을 표시한 남극 빅토리아랜드의 위성사진

- 영국은 BAS의 Geological Collection project를 수행하여 남극 탐사를 통해 획득한 200,000점의 시료 데이터베이스를 구축함. 이중 화석 데이터베이스만 공개되어 온라인으로 접근 가능
- 이태리(Siena Antarctic Museum)와 독일(BGR)도 기본적인 남극암석시료 데이터베이스를 운영하고 있음
- 노르웨이 NPI는 북극 스발바르 지형도, 지질도 지질주제도를 제공하는 웹기반 시스템구축 운영 중. 웹기반 시스템으로 사용자가 편하게 활용할 수 있지만, 오프라인에서 활용 불가능한 한계를 지님
- 노르웨이 NPI는 Quantatica라는 GIS 프로그램을 개발하였으며 공개된 다양한 남극 관련 관측 자료들을 위치기반으로 제공함. 남극지질도는 빠져있음
- 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 행성간 우주먼지 시료를 큐레이션 하고 있음. 남극운석의 경우, 탐사(NSF), 큐레이션(NASA JSC), 장기 보관(Smithsonian Institution)이 모두 분리되어 운영되고 있으며, 운석은 종류에 따라 각기 전공 분야가 다른 여러 명의 큐레이터가 담당하고 있음
- 일본은 극지연구소(NIPR)에서 남극운석 탐사를 담당하고 있으며 현재까지 약 20,000여 개의 남극운석을 보유하고 있음. 일본의 항공우주연구원(JAXA)에서는 2011년 첫 번째 소행성 물질 회수 프로젝트(Hayabusa 1)을 성공적으로 수행하였고 그 시료들을 국내외 연구자들에게 대여도 하고 있음
- 중국도 남극운석 탐사를 시작하고 한동안 시료 공개를 하지 않았으나 최근 들어 큐레이션 시스템을 구축, 운영하고 있음

# 제 3 장 연구개발수행 내용 및 결과

## 제 1 절 연구내용

### 1. 1차년도(2020년)

#### 1.1. 질란디아-남극 맨틀의 동편 경계 규명

- 호주-남극 중앙해령의 동편으로부터 태평양-남극 중앙해령의 서편에 이르는 구간에는 대형 확장-균열대가 중앙해령이 잘게 쪼개어진 형태로 존재하는데, 이 지역은 질란디아-남극 맨틀의 동편 경계로 추정되는 곳으로써, 추후 체계적인 암석시료 채취 등의 탐사를 위해 지형조사 등 기초적인 연구를 우선적으로 수행하고자 함 (그림 18)
- 호주-남극 중앙해령 동편의 확장-균열대에 대한 지형도 및 지자기이상도 작성
- 이미 확보된 2015~2016년의 수중음향자료에 대한 분석을 진행하여 호주-남극 중앙해령 및 동편 확장-균열대 지역의 미세지진 분포 연구

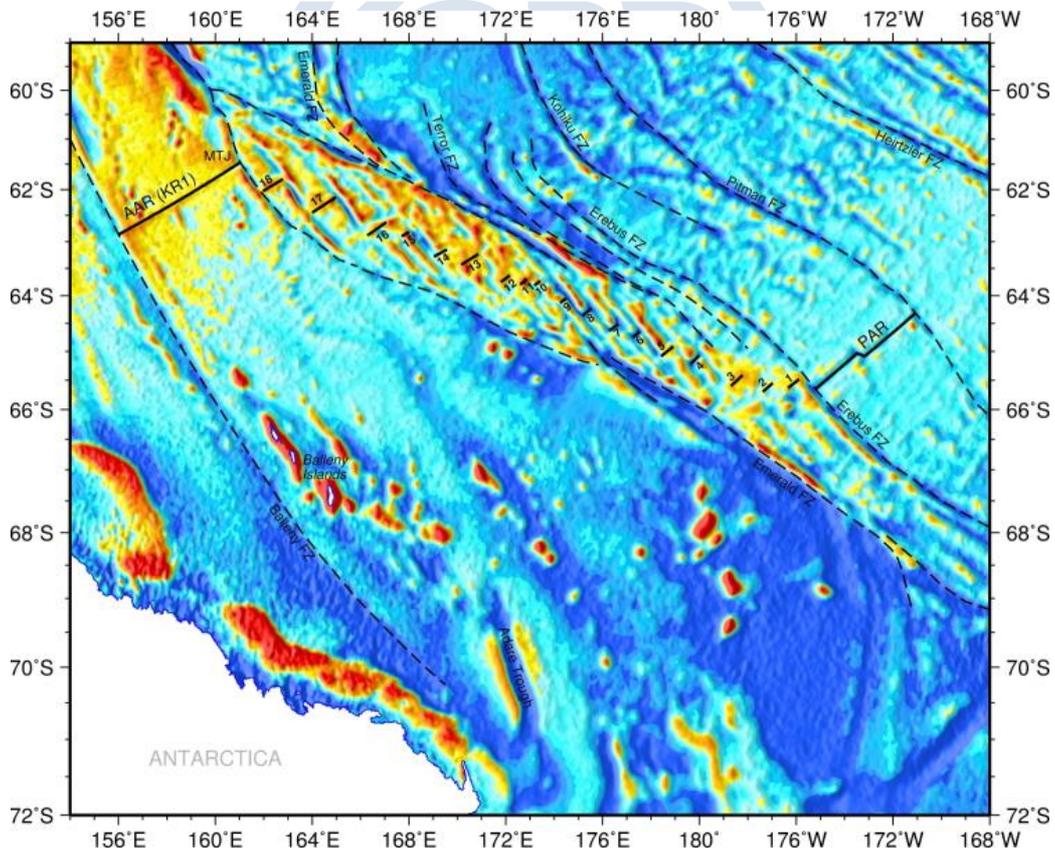


그림 18. 호주-남극 중앙해령(Australian-Antarctic Ridge, AAR)의 동쪽 끝 분절인 KRI(160° E 부근)와 태평양-남극 중앙해령(Pacific-Antarctic Ridge, PAR) 사이의 구간에는 최소 10개 이상의 작은 중앙해령 형태의 분절들을 가진 대형 확장-균열대가 존재하고 있음

- 본 연구의 목표달성을 위해서 데이터의 획득과 분석이 절대적으로 시급하지만, COVID-19 바이러스의 세계적 확산으로 20/21 남극현장조사 계획 중 지구물리탐사 일정이 축소되고, 암석시료 및 맨틀포획암 채취 일정은 취소되어, 19/20 남극현장조사를 통해 기획득한 해저지형 및 해양지자기 데이터, 해저면 암석시료를 최대한 활용하여 기초적인 단계로써의 연구 수행에 집중

### 1.2. 맨틀 고유의 특성 및 기원 규명

- 호주-남극 중앙해령 일대의 해저화산 분포 및 지자기 연대 모델 제시
  - 호주-남극 중앙해령 주변에 분포하는 해저화산의 분포를 나타낸 지도 및 개별 화산체들에 대한 지형도 작성
  - 해저화산체들에 대한 지자기 연대 모델 제시
- 맨틀포획암 획득 및 박편제작 등 연구 기초자료 획득
  - 우즈홀 해양연구원에서 세계 곳곳의 맨틀포획암 암석 획득
  - 박편제작, 편광현미경을 이용한 미구조 관찰 및 광물조합(암석명 정의) 파악
  - COVID-19 바이러스의 세계적 확산으로 맨틀포획암 획득과 관련된 20/21 남극탐사가 취소되어, 기 확보되어 있었던 10개의 맨틀포획암 샘플에 대한 EBSD 데이터 획득을 목표로 연구 진행

### 1.3. 육상/해저면 지진관측망 구축

- Polar 3 지역 육상 지진관측소를 위한 전원 시스템, 단일 하우징 구축 (그림 19 & 20)
- 최적의 지진관측과 속도 모델링을 위한 육상/해저면 지진관측소 위치 선정 (그림 21)
- 해저면 지진계의 수평성분 방위각 보정 방법 개발

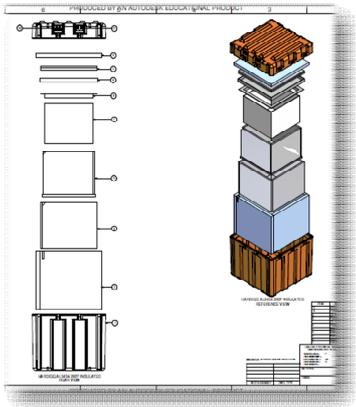


그림 19. 펠리컨 박스, 진공 단열판, 그리고 블루폼을 이용한 단일 하우징 도면

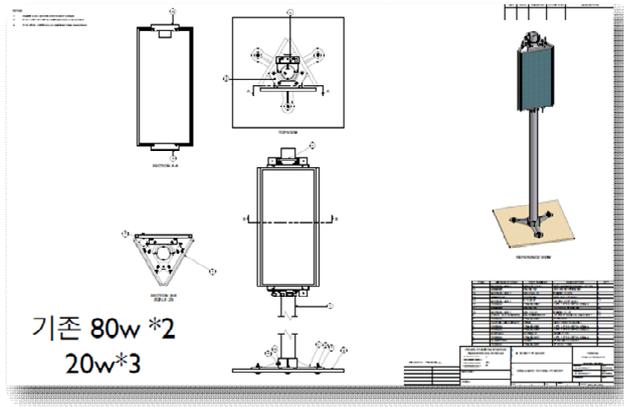


그림 20. 바람에 강한 삼각 램프 모양의 솔라 패널 마운트. 바람이 강한 지역으로 설계도 보다 짧은 (~1.2m) 높이로 제작할 예정임

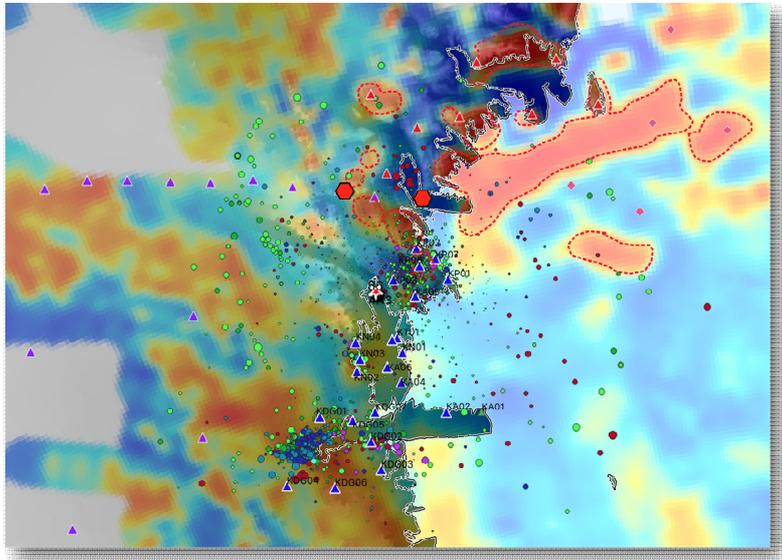


그림 21. 장보기 기지 기반 지진관측망(파란색 삼각형)과 미국 TAMNNET 관측망(2014-16; 보라색 삼각형) 위치, 그리고 본 과제에서 설치할 Polar 3 관측망 (붉은색 삼각형)과 TAMNNET data와 함께 사용할 수 있도록 TAMNNET 관측망과 같은 위치의 Polar 3 관측소(붉은색 육각형)의 위치를 보여 줌. 해저면 관측망은 핑크색 마름모로 표시되어 있음. 그림의 배경은 항공에서 관측한 자력이상도이며 붉은색으로 가장 크게 나타나는 이상도가 Polar 3임

#### 1.4. 지각 및 상부맨틀 속도구조

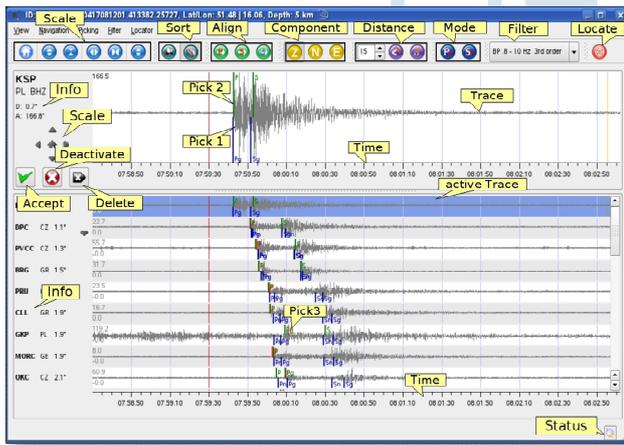


그림 22. SeisComp3의 국지지진 진원 결정을 위한 지진파 도달시간 결정의 예

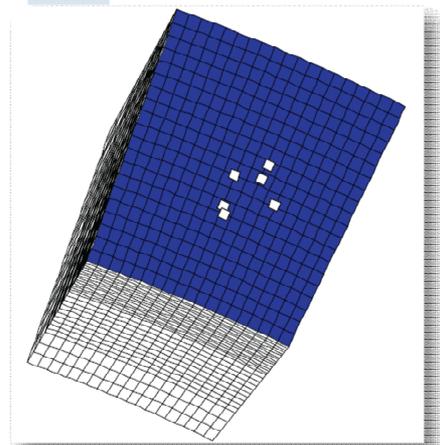


그림 23. 3차원 지각/맨틀 속도구조 모델링을 위한 격자구조의 예

- Seiscomp3를 이용한 지진파형 DB 및 원지진 지진 목록 DB 구축 (그림 22)
- 표면파와 실체파 모델링을 위한 격자 구조 모델 결정 (그림 23)
- Polar 3 주변 정밀 해저 지형도 작성

- 4기 주요관제 연구결과 논문 작성 및 투고
- 쇄빙연구선 아라온호에 소노부이 굴절법 탄성과 탐사시스템(sonobuoy refraction seismic survey system) 구축 및 2020년 동해 시험항차를 통해 장비 운용기술 습득
- 소노부이 굴절법 탄성과 탐사자료 처리 및 분석 기법 개발
- 탄성과 탐사자료와 함께 획득될 중력, 자력 탐사자료 처리 및 모델링 기법 개발

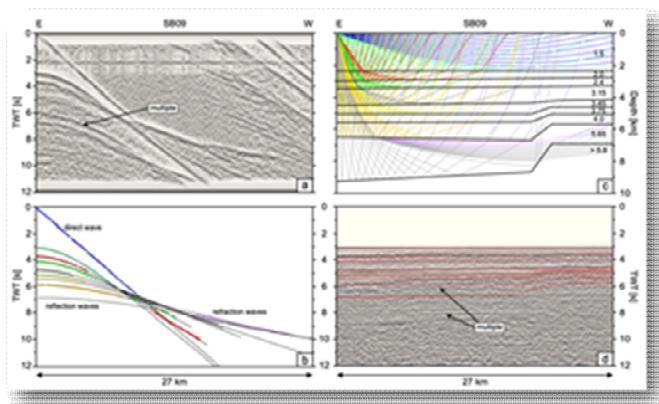


그림 24. 독일의 Polarstern호에서 소노부이를 이용하여 북극 척치 지역에서 수행한 자료와 결과의 예

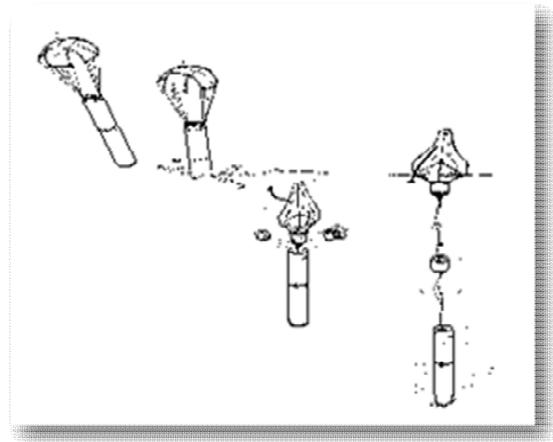


그림 25. 소노부이 전개 후 수면 아래에 부이를 이용한 무어링 과정. 전개 후에 관측된 자료를 무선으로 수신기에 보내줌

### 1.5. 화산암 분석

- Dredge를 이용한 해저 화산암 시료 채취
- Polar 3 주변 화산암 시료 채취 (그림 26)
- 시료의 분출 시기 분석 및 화학 조성 특징 분석

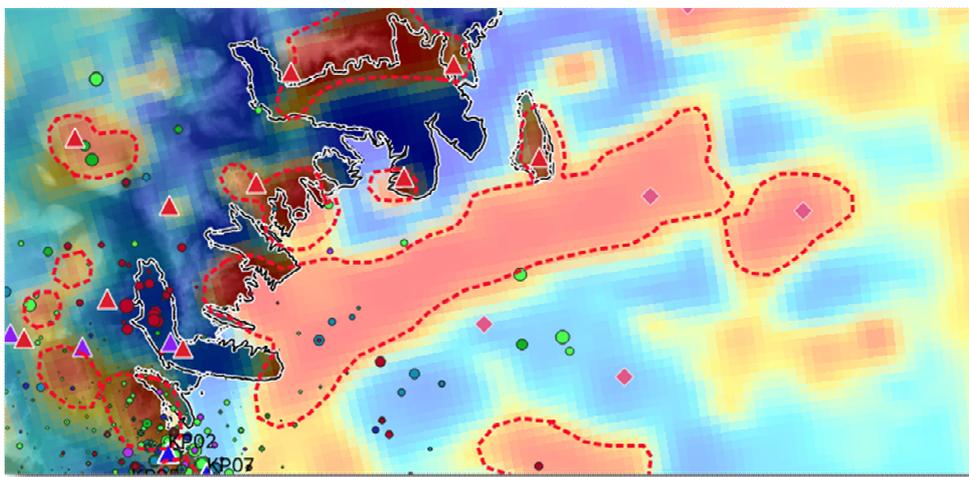


그림 26. Polar 3 동쪽 끝단부터 해빙에 따라 Dredge sample 채취. 지진관측망 주변 화산암 암석 시료를 채취하였음

## 1.6. 남극 북빅토리아랜드 형성과 신생대 화산활동기록 복원

- 주요 변성암/화성암체 절대 연령 분석 및 온도-압력 조건 계산
  - 머치슨산, 블랙스파이더 편암 지역 등 중광물 U-Pb 연대 및 Hf 동위원소 조성 획득
  - 윌슨 터레인 변성퇴적암류 쇄설성 저어콘 연령분포 확인
  - 주요 변성암/화성암 형성 온도-압력 조건 계산
- 멜버른, 리트만 활화산의 부석/테프라 지구화학 특성연구
  - 마그마 분화과정 규명을 위한 부석/테프라 전암 주원소 및 Sr-Nd-Hf-Pb 동위원소 조성 분석(MC-ICP-MS, TIMS, EPMA; 극지연구소)
  - 부석/테프라의 반정광물 지구화학특성 연구
  - 활화산의 최근 분출물 OSL 절대연령 측정(기초과학지원연구원 공동연구)

## 1.7. 소행성에서 일어나는 동위원소 분별 및 확산기작 규명

- 카보네이셔스 콘드라이트의 불활성기체 동위원소 분석
  - 카보네이셔스 콘드라이트의 불활성기체 동위원소 분석
  - 카룬다 타입(CK) 운석의 모천체 물질에 미치는 태양풍, 우주선의 영향 평가
  - 카룬다 타입 운석의  $^3\text{He}$ ,  $^{21}\text{Ne}$ 을 이용한 우주선 노출연대 계산

## 1.8. 남극지질·운석정보 활용기반 구축

- 남극 암석시료 관리 시스템 공개 및 운영
- 미분류된 남극운석의 암석학적, 광물학적 기재를 통한 분류 (20개 이상)
- 연구가치가 높은 남극운석의 초고해상도 이미지 제작 및 공개 (5개)

## 2. 2차년도(2021년)

### 2.1. 지각 및 상부맨틀 지구물리적 특성 파악

- 현장탐사를 통한 지구물리자료 획득
  - 해저면 암석시료 채취, 지형 및 지자기, 탄성파 등 지구물리 자료 확보
  - 확장-균열대 및 중앙해령에 대한 정밀 해저 지형 및 지자기 자료 분석
- 3차원 지각/상부 맨틀 속도 구조 모델 개발
  - 지각 및 상부맨틀 속도 구조
- 원격지진 파형 DB을 이용한 3차원 속도 모델 개발 (200\*150km)
- 해상 자력 탐사를 통한 정밀 자력 프로파일 작성
- 남극 2021/2022 하계 탐사 시즌 다중채널 반사법 탄성파 탐사자료 획득
- 2020/2021 시즌 남극 로스해 지역에서 다중채널 반사법/소노부이 굴절법 탄성파 탐사자료 획득
- 해저 천부 지각 구조 연구
- 해상 자력계 탐사

- 해저면 지진관측망 구축 (Orca 화산 지역)
- 연속지진자료 획득 (남극 반도 지역 및 TAMNET 자료)
- 육상 지진관측망 구축/해저면 지진관측망 유지
  - 육상/해저면 지진관측망 구축
- 지진관측망 자료 획득 및 관측망 유지 보수
- 지진관측소의 온도·전원 상태 분석
- 국지지진 자동 탐지·위치결정 시스템 구축
- 연속지진자료 획득

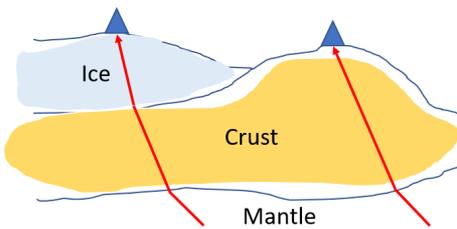


그림 27. 3차원 지각/상부맨틀 속도 모델의 정확성을 높이기 위한 얼음에서의 속도 보정 관정

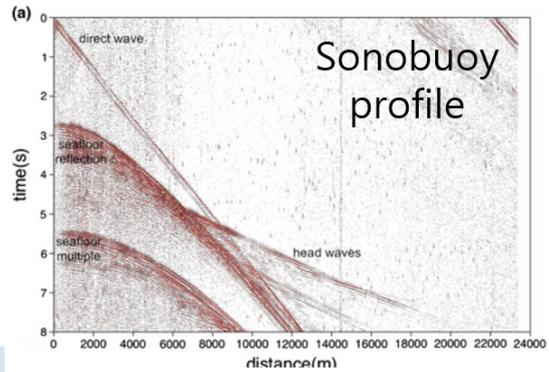


그림 28. 소노부이를 활용하여 남극 로스해에서 얻어진 굴절과 탐사 프로파일 [Selvans et al, 2012]

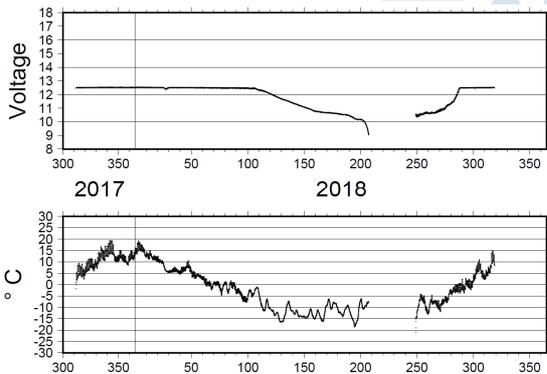


그림 29. 인익스프레스블 섬에 설치되어 있는 KT01의 년가 배터리 전압과 지진계 온도 변화표. 충전용 리튬-이온 배터리 4개 셋트로 겨울철 약 30일 정동 관측이 되지 않음

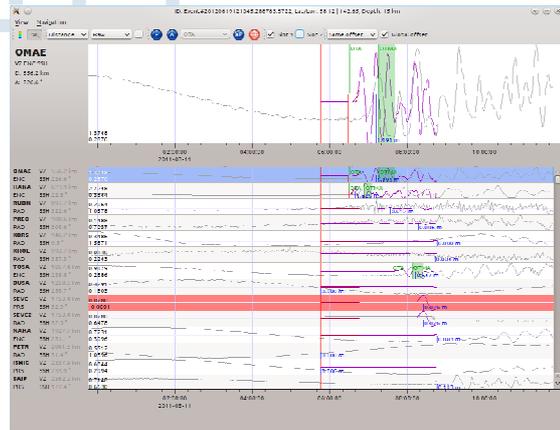


그림 30. Seiscomp3에서 지진과 자동탐지·위치결정을 수행하는 화면 캡처

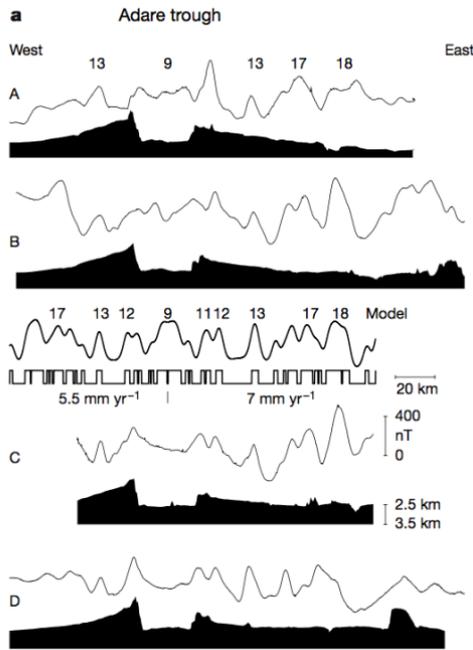


그림 31. 로스해 북서부에 위치한 Adare Trough에서 획득된 해양자력탐사자료와 해저지형을 비교 분석하여 제시한 서남극 열개구조 진화 모델 [Cande et al., 2000]

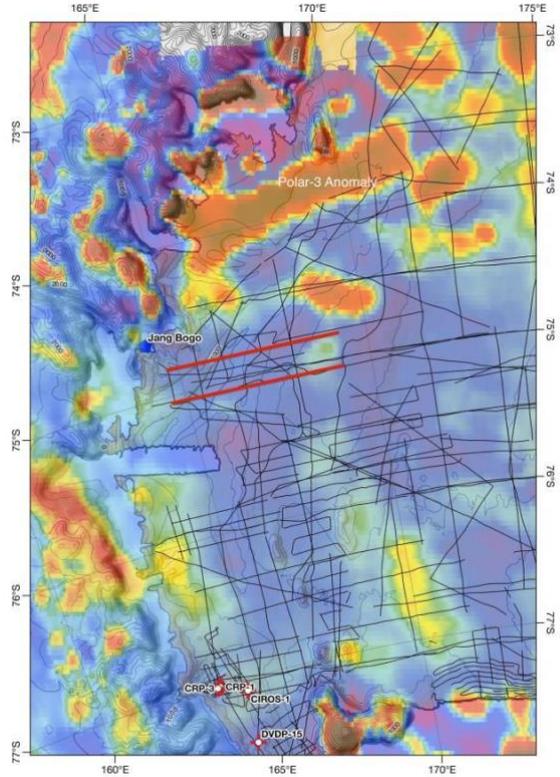


그림 32. 서부 로스해 Terror Rift 인근 광역 자기이상도[Maus et al., 2009]와 자력탐사계 획측선(빨간실선), SDLS에 등록된 다중채널 탐성과 측선(검은실선) 및 로스섬 인근 심부 퇴적물 시추지점(빨간십자)

극지연구소

## 2.2. 남극 맨틀 특성 규명과 화산활동 기록복원

### ○ 소형 단성화산 분화특성 연구

- 쉴드누나탁(Shield Nunatak), 베이커 락(Baker Rock), 해로우 픽(Harrow peak) 화산암체 전암지구화학, Sr-Nd-Pb-Hf 동위원소분석(극지연구소 TIMS, MC-ICPMS)

### ○ 멜버른, 리트만 최근 10만년 이내 화산분화 역사 복원을 위한 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ , OSL 연대 측정

- 최근 분출암상(10만년이내)의 분포특성 기재
- $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  정밀 연대자료획득(미국 NMT 공동연구)
- OSL 정밀 연대자료획득(한국기초과학지원연구원 공동연구)

### ○ 소행성 표면에서 일어나는 동위원소 분별 및 화산 기작 규명

- 오디너리 콘드라이트 구성광물 연구를 통한 소행성 표면물질 특성 규명
- in-situ 정밀 광물화학조성(ppm 수준) 분석
- 라만분광기 등을 활용한 in-situ 광물구조분석
- 열변성에 의한 광물간 원소 이동과 그에 따른 조성 변화 연구

### ○ 중앙해령, 균열대, 해저화산 암석시료 채취

### 2.3. 북빅토리아랜드 지체구조 진화

- 맨틀포획암 암석학적 기재 및 형성 평형온도 계산
  - 암석 내 주구성 광물을 대상으로 EPMA 분석
  - 광물의 주성분 원소의 열평형 모델을 이용한 형성 온도 계산
- 월슨-바워스 터레인 경계부 및 주변 암석 절대 연령 분석(U-Pb 저어콘, 모나자이트 등)
  - 장보고과학기지 권역 4개 암체의 SHRIMP 저어콘 U-Pb 연령 획득
  - 장보고과학기지-젤라쉬내만 지질도 완성
- 연구가치가 높은 남극운석의 초고해상도 이미지 제작 및 공개
  - 남극지질·운석정보 활용기반 구축
  - 주요 암석의 기본 화학분석 및 데이터베이스 기재
  - 미분류 남극운석 중 20개 이상 분류
  - 연구가치가 높은 남극운석의 초고해상도 이미지 제작 및 공개 (5개)

## 3. 3차년도(2022년)

### 3.1. 지각 및 상부맨틀 지구물리적 특성 파악

- 균열대 및 주변의 지형과 판구조적 분포 연구
  - 지형 및 지자기, 탄성과 자료 분석을 통한 균열대와 주변 일대의 지형 및 탄성과 단면도 작성, 판구조적 분포 규명
- 육상/해저면 지진관측망 유지·보수·확장
  - 육상/해저면 지진관측망 구축
  - 지진관측망 자료 획득 및 관측망 유지 보수
  - 지진관측소의 온도·전원 상태 분석
  - 국지지진 목록 작성
  - 관측망의 연간 PDF 작성 및 계절간의 소음 변화 분석

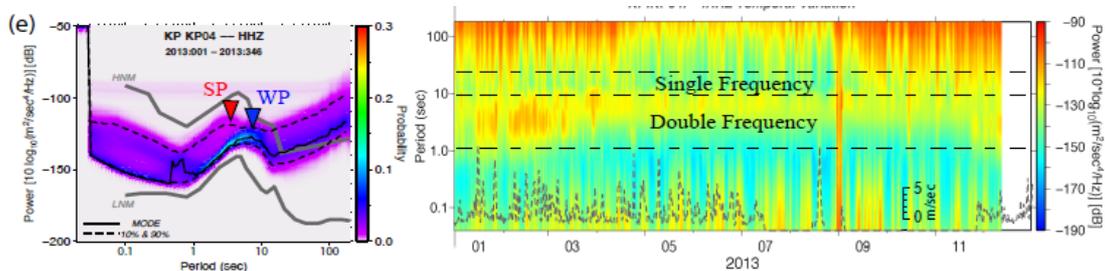


그림 33. KP04 관측소의 Power-spectrum Density Function(PDF, 좌)와 시간당 주파수의 크기 변화(우). 바람과 기압의 변화에 대한 주변 소음의 변화가 뚜렷함 [Park et al, 2014]

- 연속지진자료 획득
- 관측망 주변소음 분석

○ 3차원 지각/상부 맨틀 속도 구조 모델

- 지각 및 상부맨틀 속도 구조

- 원격지진 파형 DB을 이용한 3차원 속도 모델 개발 (200\*200km)
- Sonobuoy/다중채널 탐사를 통한 로스해 지역 정밀 속도 프로파일 작성

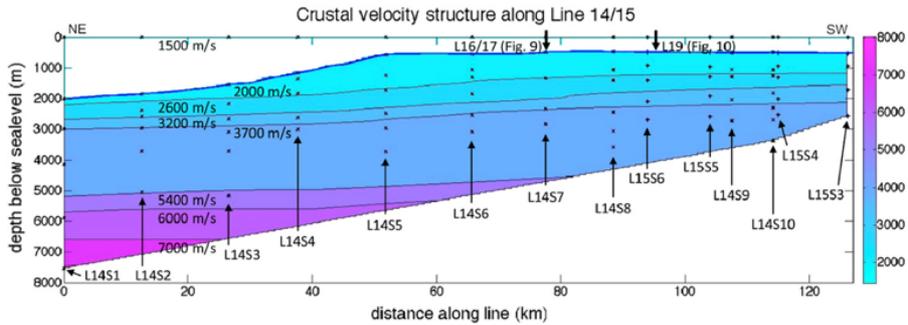


그림 34. 다중채널 자료를 이용하여 모델링된 해저 천부 지각 모델

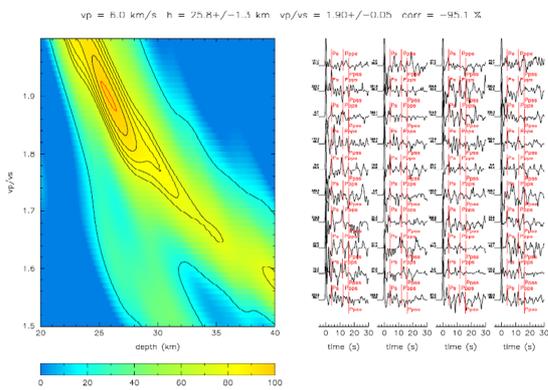


그림 35. KDG06에서 관측된 원격지진으로 수신합수를 만들어 지각의 두께와 평균 속도를 계산한 결과

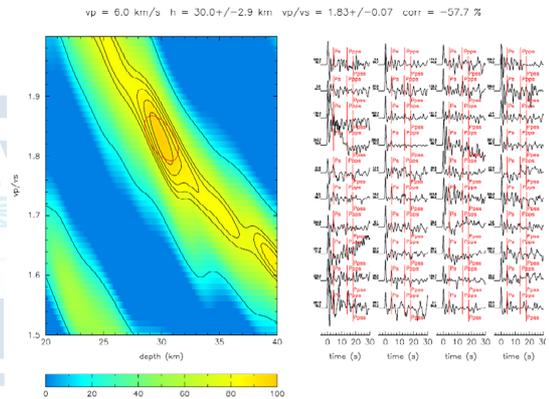


그림 36. KDG02에서 관측된 원격지진으로 수신합수를 만들어 지각의 두께와 평균 속도를 계산한 결과

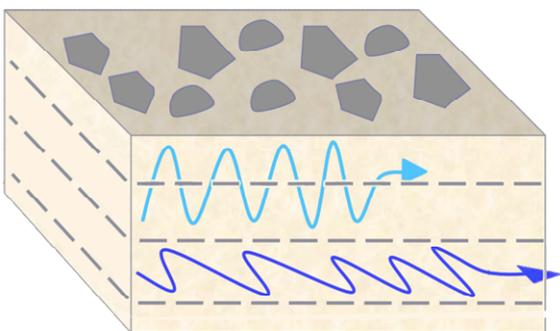


그림 37. 맨틀의 감람암에서 S파의 진행 방향에 대하여 속도가 달라지는 모습을 보여주는 모식도

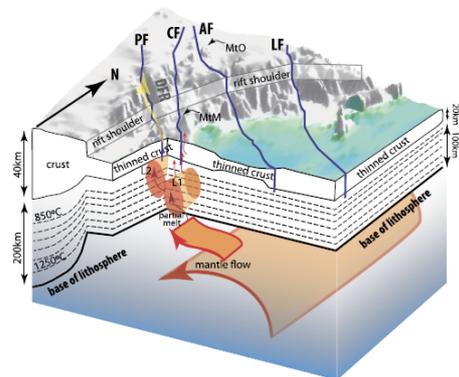


그림 38. 3차원 맨틀 속도구조에서 유추한 남극 멜번화산의 형성 원인 모델 [Park et al., 2015]

- 지진관측소 하부 지각/상부 맨틀 속도 구조 및 지각 두께 결정
- 해상 자력 탐사를 통한 정밀 자력 프로파일 작성
- Polar 3 지역 정밀 해저면 지형도 작성
- 관측소 하부 지각두께와 평균 속도 결정

### 3.2. 남극 맨틀 특성 규명과 화산활동 기록복원

- 멜버른, 리트만 화산분화 예측을 위한 화산가스 성분변화연구(서울대 이현우교수 연구팀과 공동연구)
  - 멜버른, 리트만 화산가스 시료채취 및 성분분석
- 멜버른, 리트만 부석/테프라 분화시기(최근 만년이내) 및 동위원소 연구
  - 부석/테프라 반정광물 분리를 통한  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 연대측정
  - 마그마 성인연구를 위한 부석/테프라의 Sr-Nd-Pb-Hf 동위원소분석 (극지연구소 TIMS, MC-ICPMS)
- 소형 단성화산 마그마 성인 규명
  - 쉴드누나탁(Shield Nunatak), 베이커 락(Baker Rock), 해로우 픽(Harrow peak) 화산암체 지구화학자료해석 및 마그마 성인연구
- 소행성 표면과 우주공간에서 일어나는 동위원소 분별과 화산 모델링
  - 카보네이셔스 콘드라이트 구성광물의 동위원소 분석
  - 우주공간에서 고온에서 단시간에 일어나는 동위원소 분별과 화산 모델링
  - 소행성에서 상대적으로 저온에서 장기간 일어나는 동위원소 화산 모델링
- 중앙해령, 균열대 및 해저화산 암석시료 분석
  - 확장-균열대 및 중앙해령, 해저화산의 암석시료에 대해 주원소, 미량원소 등 지화학 분석 수행: 질란디아-남극 맨틀의 지화학적 특성 및 기원 규명

### 3.3. 북빅토리아랜드 지체구조 진화

- 균열대 및 주변의 지형과 판구조적 분포 연구
- 맨틀포획암 EBSD 분석 및 지구조 모델 기획
  - 분석한 EBSD 데이터를 이용해 광물 및 암석의 지진파 이등방성 특성 파악
  - 기보고된 지진파이등방성과 계산된 광물 및 암석의 지진파 이등방성 특성의 비교 및 맨틀 구조모델 고안
- 장보고 기지 주변 변성암·화성암 시료 절대 연령 분석(U-Pb 저어콘, 모나자이트 등)
- 변성기반암류 온도-압력 조건 계산 및 열역학 모델링
- 로스 조산운동을 전후로 신원생대-고생대 지체구조모델 도출
- 주요 암석의 기본분석 및 데이터베이스 기재
- 미분류된 남극운석의 암석학적, 광물학적 기재를 통한 운석학회 정식 등록
- 연구가치가 높은 남극운석의 초고해상도 이미지 제작 및 공개

- 남극지질·암석정보 활용기반 구축
- 주요 암석의 기본분석 및 데이터베이스 기재
- 미분류된 남극암석의 암석학적, 광물학적 기재를 통한 암석학회 정식 등록 (60개 이상)
- 연구가치가 높은 남극암석의 초고해상도 이미지 제작 및 공개 (5개)

## 제 2 절 연구수행방법

### 1. 1차년도(2020년)

#### 1.1. 지각 및 상부맨틀 지구물리적 특성 파악

- 해저 지형, 지자기 및 탄성과 자료 획득
  - 측선 250 km 이상에 대해 해저 지형, 지자기 및 탄성과 자료 획득
- 관측망 구축 및 연속 지진자료 DB
  - 장보고 기지 기반 멜번화산 지역 지진관측망 자료 획득
  - SeisComp를 기본으로 연속지진자료 DB 서버 구축
  - 재활용이 가능한 리튬-이온 지진관측소 전원 시스템 개발
- 육상/해저 지진관측소 기본자료 분석
  - 해저면 지진계의 수평성분 방위각 보정방법 적용
  - 3차원 모델공간 격자구조 모델 개발
- COVID-19 바이러스의 세계적 확산으로 균열대 지역에서의 지구물리 및 암석시료 획득을 위한 20-21 남극현장조사가 대폭 축소 혹은 취소되었으며, 그에 따라 19-20 현장조사에서 획득한 해저지형 및 해양 지자기 자료, 암석시료를 활용하여 기초적인 연구들을 수행하였음
- 균열대 지역에 대한 지형도 및 수심 프로파일 등 작성, 지자기이상 분석을 통한 해저면의 연령 및 확장속도 추정
- 해상 자력계 탐사
  - 2020-21 남극 하계 시즌 이동항해 중 남극판과 태평양판 간의 대형 확장-균열대 지역에서 측선 ~130 km 구간에 대해 해상 자력탐사를 수행하여 지형 및 지자기자료를 획득하였으며, 지자기이상 프로파일 작성함
- 중앙해령 주변의 해저화산에서 기획득한 해저지형 및 지자기 자료를 바탕으로 해저화산의 분포 및 지자기 연대 모델에 대한 연구 수행

#### 1.2. 남극 맨틀 특성 규명과 화산활동 기록 복원

- 멜버른, 리트만 화산의 최근 분출사 복원
  - 멜버른 정상부 화산 절대연령 자료 획득(OSL 연대)

- 부석/테프라의 glass 조성 및 반정광물 지구화학분석
- 리트만 화산 칼데라 주변 부석시료의 주성분원소, 미량원소 분석 실시
- 화산암시료의 Sr-Nd-Pb-Hf 동위원소 분석
- 주요 암석의 기본 화학분석 및 데이터베이스 기재
  - 2019-20 시즌, 확장-균열대 지역에 대한 탐사를 통해 채취했던 5개의 시료를 이용하여 극지연구소의 EPMA를 활용, 유리질 화산암질 글라스에 대한 주성분 분석 실시
- 균열대 지역에서 채취한 암석 시료를 이용한 암석학적 연구(박편 제작 및 관찰) 및 화산암질 글라스를 이용한 지화학 분석 수행

### 1.3. 북빅토리아랜드 지체구조 진화

- 암석권 맨틀의 기원 및 진화과정 모델 수립
  - 기획특한 맨틀포획암 10점에 대한 EBSD 분석
  - 입자크기, 결정방향성, 편평비 계산
  - 감람석 유형 결정 및 진화과정 고찰
- 주요 변성/화성암체 연대측정 및 온도-압력 조건 계산
  - 마운트니어레인지 시료로부터 저어콘 광물 분리
  - SHRIMP(기초과학지원연구원 오창센터)를 이용한 저어콘의 U-Pb 연대측정 및 LA-MC-ICPMS(극지연구소, 기초과학지원연구원 오창센터)를 이용한 저어콘의 Hf 동위원소 조성 분석
  - 변성퇴적암류 시료의 쇄설성 저어콘 연대분포 획득
  - 전자현미분석기(EPMA, 극지연구소)를 이용해 암석 시료 박편에서 광물 주원소 화학 분석 및 이를 토대로 지온지압계를 적용하여 온도-압력 계산
- 소행성에서 일어나는 동위원소 분별 및 확산 기작 규명
  - 카보네이셔스 콘드라이트의 불활성기체 동위원소 분석
    - 카보네이셔스 콘드라이트의 불활성기체 동위원소 분석
    - 카룬다 타입(CK) 운석의 모천체 물질에 미치는 태양풍, 우주선의 영향 평가
    - 카룬다 타입 운석의  $^3\text{He}$ ,  $^{21}\text{Ne}$ 을 이용한 우주선 노출연대 계산

## 2. 2차년도(2021년)

### 2.1. 지각 및 상부맨틀 지구물리적 특성 파악

- 해상 자력계 탐사
  - 2021년 11-12월, 2021-22 남극하계 연구항해를 통해 남극 중앙해령 및 확장-균열대 지역에서 해상자력탐사를 수행하여, 총 300 km 이상의 측선에 대해 지형 및 지자기 자료를 획득
- 해저 지형, 지자기 및 탄성과 자료 획득
  - 세종기지 Orca 화산 주변 정밀 해저지형 자료 획득

- 측선 250 km 이상 구간에 대해 해저 지형, 지자기 자료 획득
- 관측망 구축 및 연속 지진자료 DB
  - 세종기지 Orca화산 지역 해저면 지진관측망 구축
  - 연속지진파형에서 지진발생 신호 자동 탐지 기법을 적용하여 지진 발생 탐지
- 육상/해저 지진관측소 기본자료 분석
  - 지진관측소의 상시 미동 분석
  - 지진관측소 파워스펙트럼 분석으로 관측소 소음 레벨 분석

## 2.2. 남극 맨틀 특성 규명과 화산활동 기록 복원

- 북빅토리아랜드 화산 분출사 복원
  - 멜버른, 리트만 일대 화산암류 및 부석/테프라 층서 연구
    - 층서 규명과 분출 특성 기재를 위한 야외 조사자료 분석과 전암, 광물분석
  - 마그마 분화과정 규명
    - 부석/테프라의 glass 조성 및 반정광물 지구화학특성 연구: 전암  
주성분분석(극지연구소 FE EPMA, JEOL JXA 8530 F)
    - 극지 연구소의 열이온화 질량분석기(TIMES, TRITON),  
MC-ICPMS(NEPTUNE PLUS)를 이용한 화산암시료의 Sr-Nd-Pb-Hf  
동위원소 분석
  - 지화학자료, 층서 연구 결과를 토대로 멜버른 화산과 주변 단성화산의 분출사 복원  
모델작성
- 해저면 암석시료 채취
  - 2021-22 남극하계 연구항해(2021.11~12)를 통해 남극 중앙해령, 확장-균열대 및 인근  
해저화산 등의 지역에서 암석시료 채취
- 소행성 표면에서 일어나는 동위원소 분별 및 화산 기작 규명
  - 오디너리 콘드라이트 구성광물의 정밀 광물화학조성(ppm 수준) 분석 실시
  - 라만분광기를 활용한 in-situ 광물구조분석 실시
  - 열변성에 의한 광물간 원소 이동과 화산 모델링 개발

## 2.3. 북빅토리아랜드 지체구조 진화

- 암석권 맨틀의 기원 및 진화과정 모델 수립
  - SEM, EPMA 분석으로 광물동정 및 광물화학 데이터 수집
  - 맨틀포획암 암석학적 기재 및 열평형 온도 계산
  - 감람석 유형과 비교 및 진화과정 고찰
- 터레인 경계부 암석 연대측정
  - 장보고기지 권역 암석 시료로부터 저어콘 광물 분리
  - SHRIMP를 이용한 저어콘의 U-Pb 연대측정
  - 장보고기지 권역-젤라쉬내만 지질도 작성

- 광물화학(EPMA)을 이용한 변성기반암류 온도-압력 조건 계산
- 변성암류 전암 주원소 조성 분석(극지연 XRF 이용) 및 열역학 모델링 적용
- 연구가치가 높은 남극운석의 초고해상도 이미지 제작 및 공개
  - 연구가치가 높은 남극운석의 초고해상도 이미지 제작 및 KOREAMET 홈페이지에 공개

### 3. 3차년도(2022년)

#### 3.1. 지각 및 상부맨틀 지구물리적 특성 파악

- 해저 지형, 지자기 및 탄성과 자료 획득
  - Orca화산 군발 지진 발생 이전과 이후의 해저지형도 분석
- 관측망 구축 및 연속 지진자료 DB
  - 2020년도 연속 지진관측자료 획득 및 DB화
  - 북빅토리아 지역 3차원 속도 구조 개발
- 육상/해저 지진관측소 기본자료 분석
  - 세종기지 Orca 화산 주변에서 회수한 해저면 지진계 수평성분 분석 및 보정
  - 해저면 지진계 자료와 기존의 육상 지진자료를 합하여 Orca화산 주변 지진 발생 현황 분석

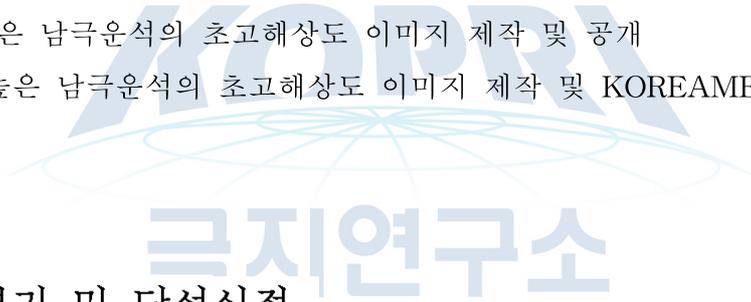
#### 3.2. 남극 맨틀 특성 규명과 화산활동 기록 복원

- 북빅토리아랜드 화산 분출사 복원
  - 멜버른 화산 지대 시료를 포함한 북빅토리아랜드 화산암류 주원소(15점) 및 미량원소(22점) 성분 및 Sr-Nd-Pb 동위원소비(17점) 분석 완료
  - 북빅토리아랜드 화산암류 분출 연대( $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ ) 분석(28점)
  - 리트만 화산 지온, 지압 계산(규장질암 29점 + 고철질암 29점)
- 중앙해령 및 확장-균열대에서의 열수, 해저면, 해저화산 암석시료 분석
  - 중앙해령 및 확장-균열대 지역 내, 열수분출구, 해저면, 해저화산의 암석시료에 대해 주원소, 미량원소 등 지화학 분석을 수행하여 질란디아-남극 맨틀의 지화학적 특성 및 기원 규명
- 소행성에서 일어나는 동위원소 분별 및 화산 기작 규명 (동위원소 화산 모델링)
  - 콘드라이트의 동위원소 분석 및 화산 모델링
    - 일본 북해도 대학과 UCLA 등 해외 대학의 이차이온질량분석기(ims-1280)을 공동활용하여 산소동위원소와 Al-Mg 동위원소 분석
    - 동위원소 분석 결과와 동위원소 분별과 화산 모델링 결과를 비교하여 우주공간에서 고온에서 단시간에 일어나는 상호 작용 연구
    - 소행성에서 상대적으로 저온에서 장기간 진행되는 수성변질과 열변성에 의한 동위원소 화산 모델링을 실제 분석 결과와 비교 연구 수행
- 소행성 류구(Ryugu; Ivuna type 카보네이셔스 콘드라이트 모천체) 시료의 동위원소

분석과 논문 작업에 참여

### 3.3. 북빅토리아랜드 지체구조 진화

- 확장-균열대 지역에 대한 판구조 모델
  - 2021-22 남극하계 연구항해(2021.11~12)를 통해 획득된 해저지형 및 해양지자기 자료 후처리와 분석 진행
  - 판구조 모델 수립을 위해 1단계에서 계획했던 연구항해 기간이나 횡수가 확장-균열대 규모에 비해 부족한 실정
- 장보고기지 권역 변성/화성암 시료 연대측정 및 지구조모델 수립
  - 광물화학(EPMA)을 이용한 변성기반암류 온도-압력 조건 계산
  - 저어콘과 모나자이트 중광물 연대측정(SHRIMP)
  - 로스 조산운동 전후로 신원생대 최후기-고생대 초기 지질도 작성
- 암석권 맨틀의 기원 및 진화과정 모델 수립
  - 맨틀포획암 EBSD 정밀분석
  - 진화과정 속에서 유체-암석 상호반응 고찰
  - 새로운 조구조 모델 기획 및 논문작성 중
- 연구가치가 높은 남극운석의 초고해상도 이미지 제작 및 공개
  - 연구가치가 높은 남극운석의 초고해상도 이미지 제작 및 KOREAMET 홈페이지에 공개 (총 15개)



## 제 3 절 연구결과 및 달성실적

### 1. 지각 및 상부맨틀 지구물리적 특성 파악

#### 1.1. 해저 지형, 지자기 및 탄성과 자료 획득

- 호주-남극 중앙해령 동편의 대형 균열대에 대한 첫 탐사 수행 (2019-2020)
  - 본 연구 진행을 위한 기초자료 확보의 일환으로 수행된 19-20 남극현장조사 당시, 대형 확장-균열대 지역의 중심부 일대에서 해저지형 및 해양지자기 데이터를 처음으로 획득하였음
  - 해저지형 및 해양지자기 기초자료 분석에 따르면 확장-균열대 지역이 다수의 짧은 확장 분절과 변환단층 및 균열대로 구성되어 있고, 확장 분절 내의 짧은 구간에서도 수심 및 지형 변화가 아주 심한 복잡한 구조를 띄고 있음을 확인함
  - 확장-균열대의 확장축(spreading-axis)을 중심으로 대칭적인 지자기 이상을 확인할 수 있었고, 이를 토대로 확장-균열대의 생성 및 확장은 약 6 Ma로부터 시작되어 현재까지

해양지각의 형성과 확장이 계속해서 이루어지고 있음을 밝혀냈음

- 확장-균열대 지역에서 동남쪽 끝 확장 분절 1개에 대한 탐사 수행 (2020-2021)
  - COVID-19 바이러스의 세계적 확산으로 20-21 남극현장조사 계획 중 확장-균열대 지역에 대한 일정이 대폭 축소되었고, 암석시료 채취 일정은 전면 취소되었음
  - 축소된 일정에 따라 이동항해 기간만을 배정받아, 대형 확장-균열대의 동남쪽 끝 지역에서 측선 ~300 km 구간의 해양지자기 탐사를 계획하였으나, 해빙으로 가득한 현지 상황으로 인해 측선 ~130 km 구간에 대해서만 탐사를 수행할 수 있었음 (그림 39 & 40)

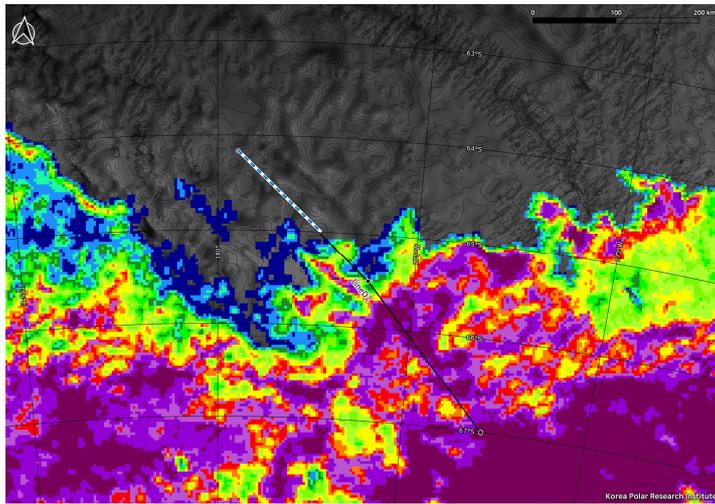


그림 39. 2020-21 남극 하계 시즌, 해상 자력탐사 측선 (흰색선)

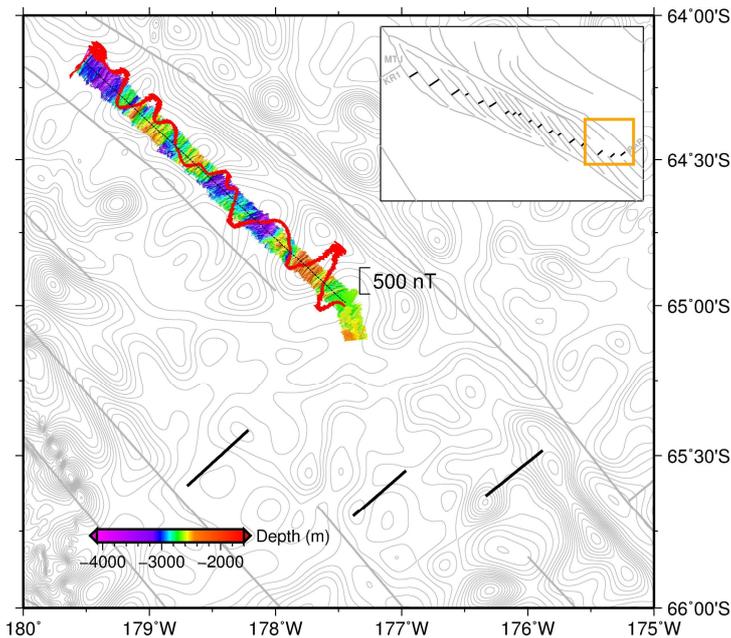


그림 40. 2020-21 시즌에 획득한 해저지형 및 지자기이상 프로파일

○ 확장-균열대 서편에 대한 탐사 수행 (2021-2022)

- 본 연구 진행을 위한 기초자료 확보의 일환으로 수행된 첫 탐사(19-20) 이후, 확장-균열대에 대한 해양지구물리 탐사 및 해저면 암석 채취 탐사가 2021-2022 남극 하계 시즌에 처음으로 수행되었음
- 2019-2020 첫 탐사와 2021-2022 탐사 결과, 확장-균열대 지역 내의 많은 확장 분절(spreading centers)들이 부분적으로 정체를 드러냈으며, 고해상도 멀티빔 지형자료와 해양지자기 자료에 따르면 확장-균열대 지역 내에는 최소 18개의 확장 분절(spreading centers)들과 확장 분절들 간의 변환단층/균열대가 아주 복잡한 형태를 띄고 있음 (short linking spreading centers with transform faults system, 그림 41)
- 확장-균열대의 중심부를 기준으로 동편(즉 177°E 기준 동편) 구간의 확장 분절(spreading centers)들에 대해서는 해저지형 조사가 아직 수행되지 못하였고, 확인된 확장축 또한 부분적으로만 탐사가 진행되었음 (그림 41)
- 또한, 확장-균열대 내 지판운동과 운동역학적 진화과정 규명을 위해서는 한 개의 확장 분절에 대해서 해저면 확장에 수직 방향인 여러 개의 긴 측선을 따라 해양지자기 자료가 획득되어야 하는데, 현재 지자기 자료는 기대하는 연구 성과에 비해 매우 부족한 실정
- 그럼에도 불구하고 이러한 해저지형 및 해양지자기 자료가 충분히 축적되면 확장-균열대의 지각 변형 및 운동역학적 진화, 주변 지판들의 운동 복원에 대한 유의미한 연구 성과를 낼 수 있을 것으로 기대함

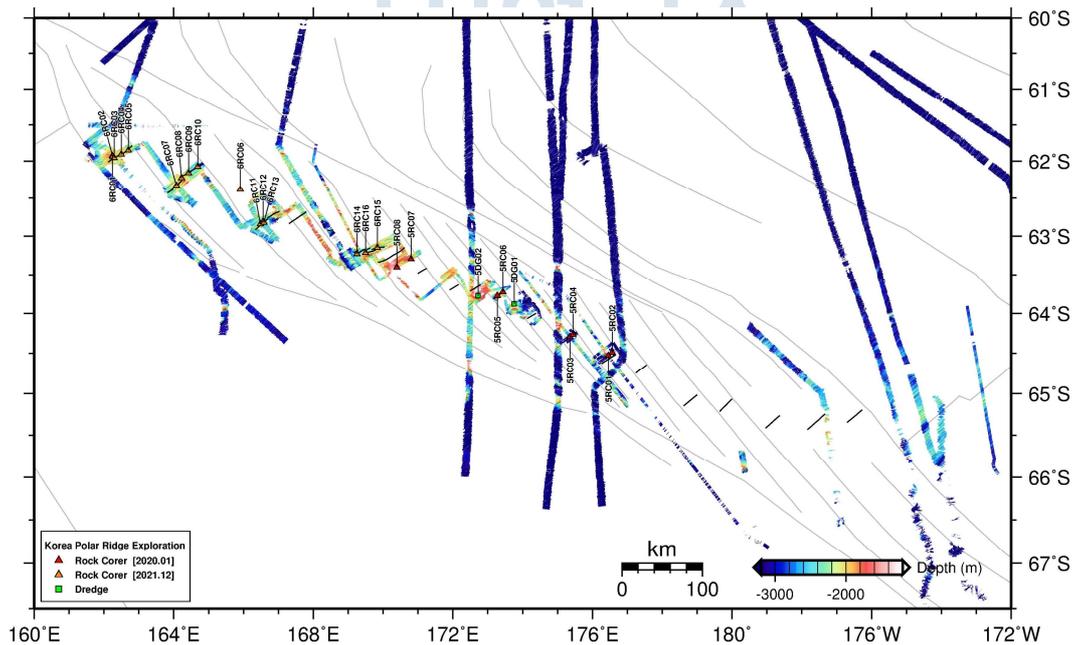


그림 41. 확장-균열대 지역을 지나는 탐사 측선들, 측선을 따라 현재까지 획득된 고해상도 멀티빔 지형자료와 해저면 암석시료 샘플링 위치(삼각형[락코어] 및 사각형[드렛지])가 표시되어 있음

○ 지자기 분석을 통한 중앙해령 KR1 주변 off-axis 해저화산의 연령 추산

- 해저면과 해저화산 간의 지자기 신호의 파장을 비교하는 새로운 방법을 통해, 중앙해령 KR1 주변에 해저면 확장 방향과 평행한 형태로 배열되어 있는 3개의 해저산맥(seamount chain)과 그것을 구성하는 10여 개의 해저화산체들의 생성 시기 및 화산활동 기간을 계산함
- 이러한 새로운 접근법이 중앙해령 해저면의 확장 방향에 평행하는 선형 분포의 해저산맥의 연령과 화산활동 시기 계산에 효과적임을 보여주었음
- 중앙해령 KR1 주변의 해저화산들은 모두 최근 3백만년 내에 형성되었고, 각 개별 화산체들은 보통 60만년 내의 시간에 걸쳐 형성된 것으로 추정함 (그림 42)
- 해저면이 먼저 생성되고 약 20~65만년의 시간 동안의 해저면 확장이 이뤄진 이후, 중앙해령의 확장축으로부터 10~20 km 떨어진 off-axis에서 맨틀 불균질성 등에 의해 대규모의 해저화산들이 생성된 것으로 추정됨

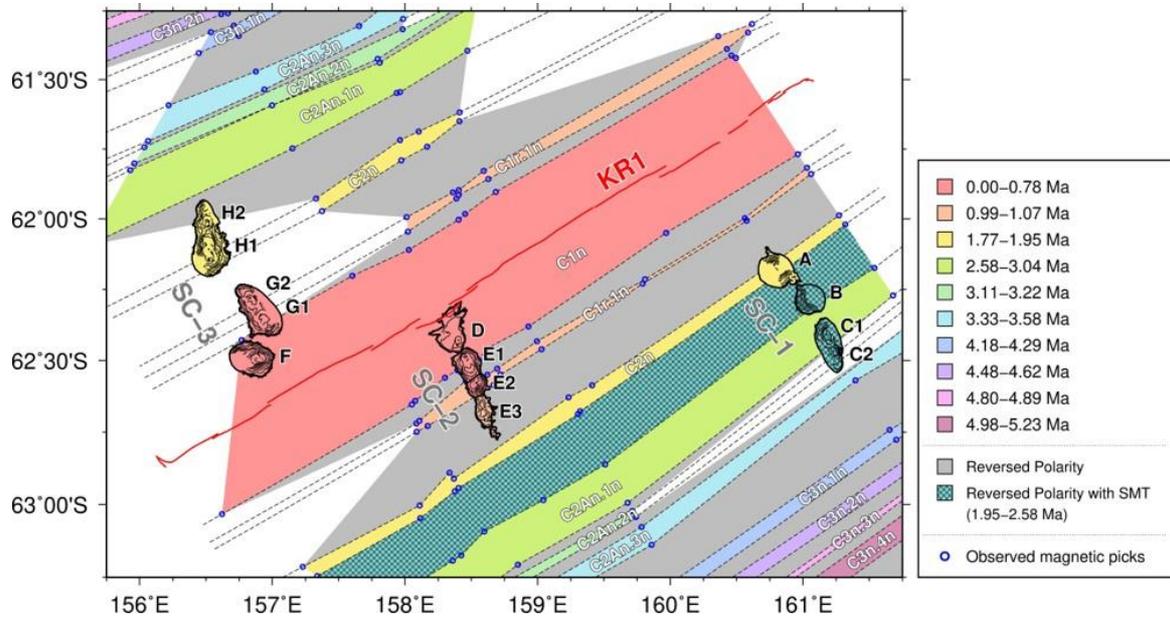


그림 42. 중앙해령 KR1 주변의 해저화산의 분포와 해양지자기 분석을 통해 밝혀진 해저면과 해저화산의 연령 [Choi et al., 2021]

○ 소노부이를 이용한 굴절법 탐사 장비 구축



그림 43. 아라온 드라이랩에 새롭게 설치한 소노부이 기록 시스템

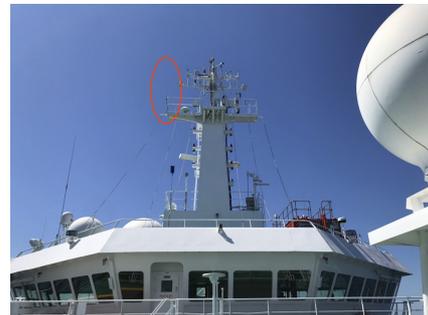


그림 44. 아라온 선교에 설치된 소노부이 수신 안테나 모습

- 미래기술개발부와 함께 굴절법 탐사를 위한 소노부이 (Sonobouy) 시스템 구축
- 아라온 시험 항해 기간중에 테스트를 수행하여 해저면에서 굴절되는 탄성과 관측 성공

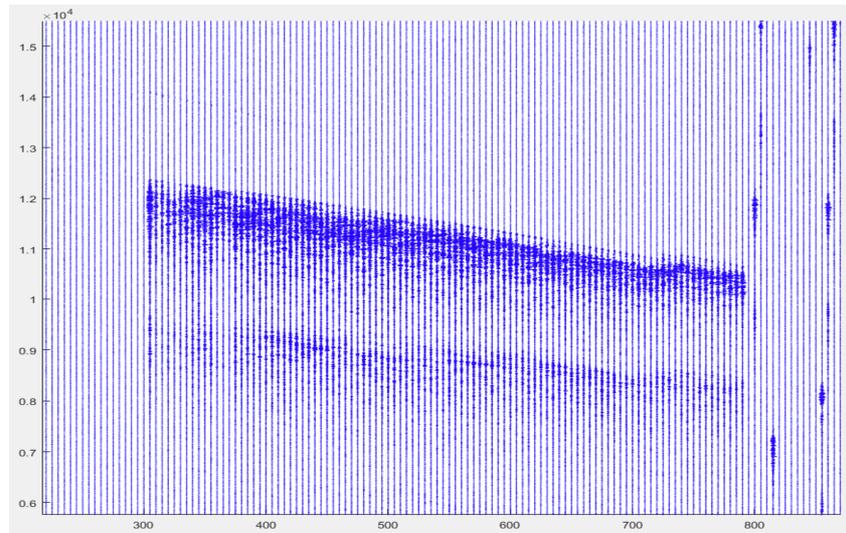
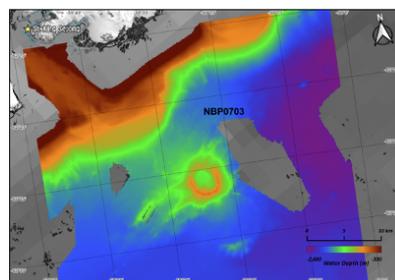


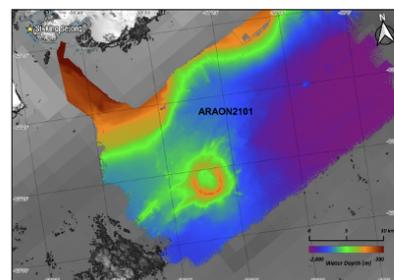
그림 45. 동해안에서 수행된 아라온 시험항해에서 실시한 소노부이 관측 자료. 10-100 Hz 밴드 패스 필터링 적용

○ 세종기지 Orca 화산 지역 정밀 해저지형도 작성

- 2007년 지형도와 2021년 해저지형도 비교분석
- Orca 군발 지진 이후의 지형변화를 찾지 못함



NBP data in Mar. 2007



Araon data in Jan. 2021

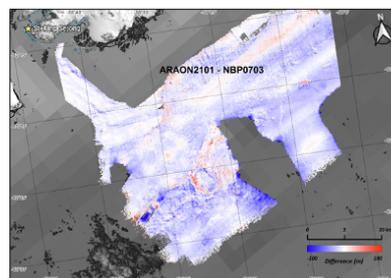


그림 46. 세종기지 남쪽 브랜스 필드 지역 정밀 해저 지형도. 2007년 3월에 미국 남극 프로그램에서 획득한 정밀 해저 지형도 (왼쪽 상단), Orca 화산 군발지진(2020년 8월) 발생 후 2021년 1월에 아라온이 획득한 정밀해저 지형도 (오른쪽 상단), 그리고 2007년 자료에서 2021년 자료의 값을 빼서 계산된 지형 변화 양상 (아래쪽 중앙).

## 1.2. 관측망 구축 및 연속 지진자료 DB

### ○ 해저면 지진관측망 구축

- 세종기지 Orca화산 지역 해저면 지진계 5곳 설치
- 2021-22 현장조사기간에서 스페인 연구선을 이용하여 해저면 지진계 2개 회수
- 재사용이 가능한 리튬-이온 배터리를 이용한 지진관측소 전원공급 시스템 개발

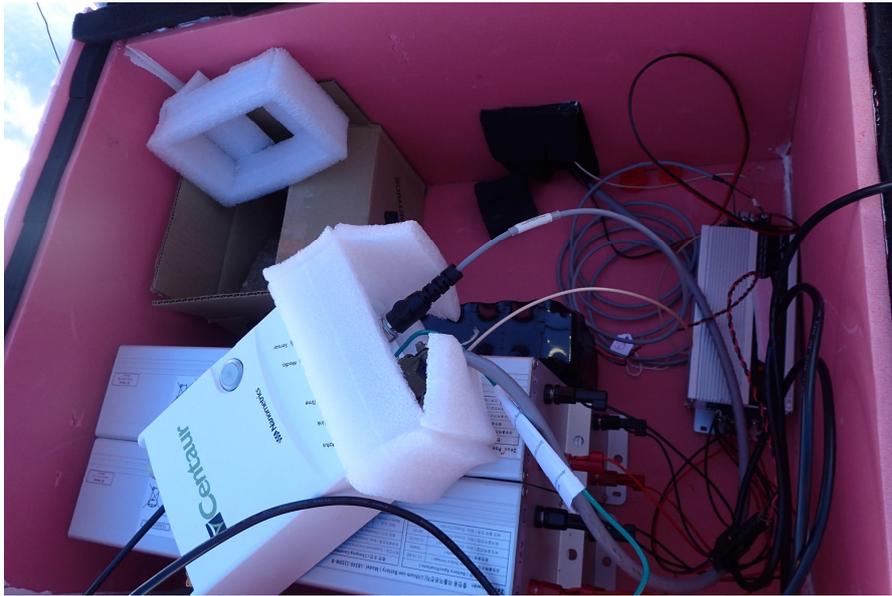


그림 47. 기존의 AGM과 리튬 메탈 배터리가 아닌 재활용이 가능한 리튬 이온 배터리를 사용하여 남극 현장에서 테스트한 관측소

### ○ Seiscomp를 이용한 연속 지진파형 데이터베이스 구축

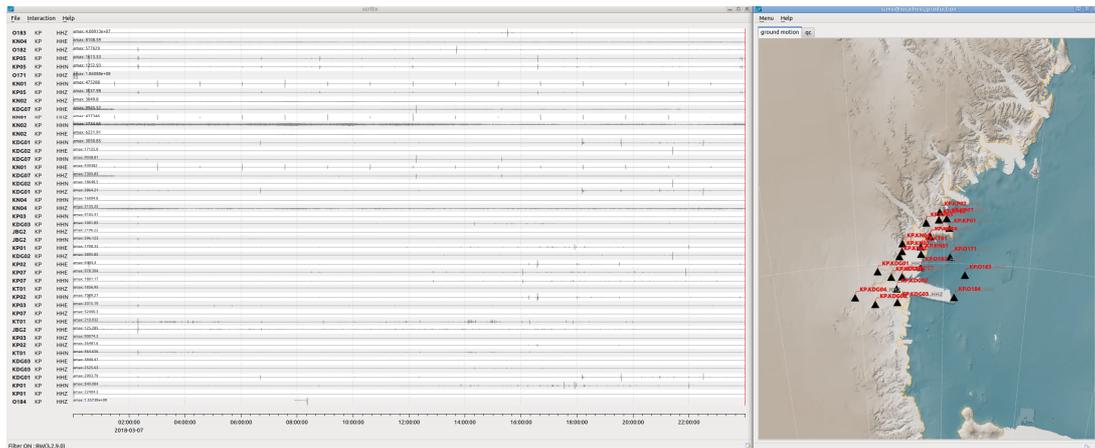


그림 48. Seiscomp를 사용하여 구축된 연속 지진관측 DB. 관측소별로 지진파형을 보여주며, 이를 이용하여 파형 자료 관리

### ○ Seiscomp에서 구축된 연속 지진자료를 활용하여 1차적인 자동 지진원 위치 결정 알고리즘 구축

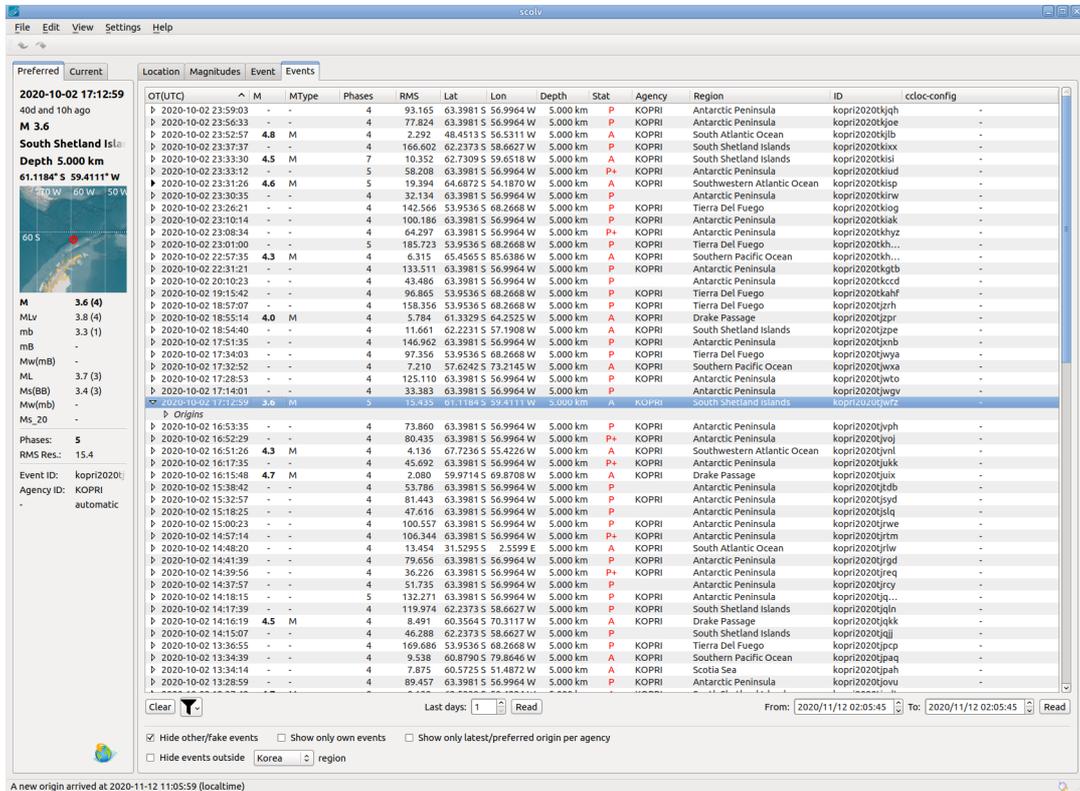


그림 49. 지진파형 자료에서 자동으로 국지/광역 지진을 찾아서 지진원의 위치를 결정한 결과 목록

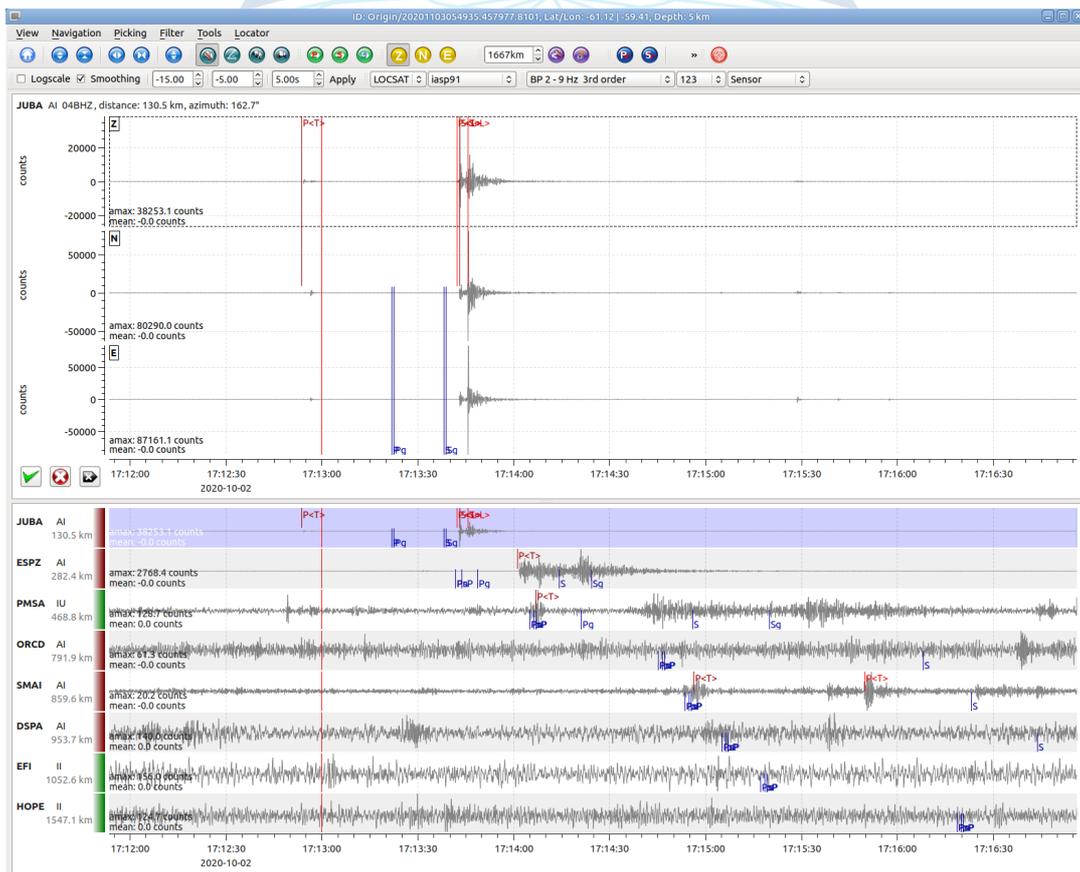


그림 50. 자동으로 관측된 지진원 위치를 정밀하게 재결정하기 위한 repicking 과정

### 1.3. 육상/해저 지진관측소 기본자료 분석

#### ○ 육상지진관측망 연속지진자료 분석

- 관측소 기록계와 센서의 장비특성(instrument response) 보정
- 관측소 상시 잡음 분석

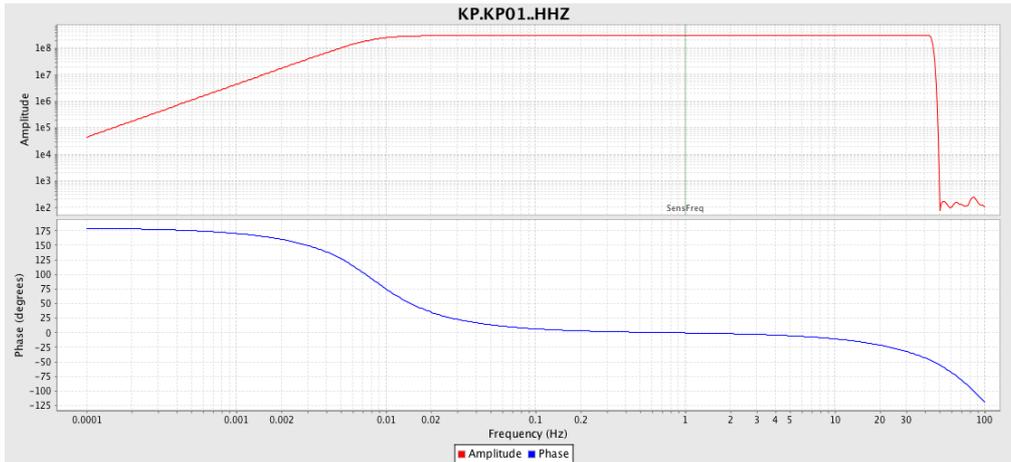


그림 51. 멜번화산 지진관측망에 사용된 T-compact 센서와 Centaur 기록계의 주파수 증폭 스펙트럼

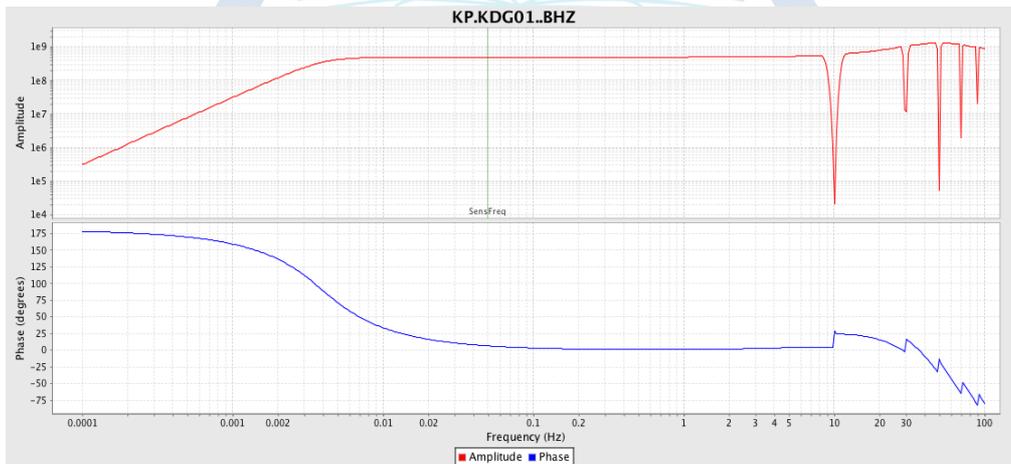


그림 52. 난센 빙붕과 데이비드 빙하 지진관측망에 사용된 T-240 센서와 Q-330 기록계의 주파수 증폭 스펙트럼

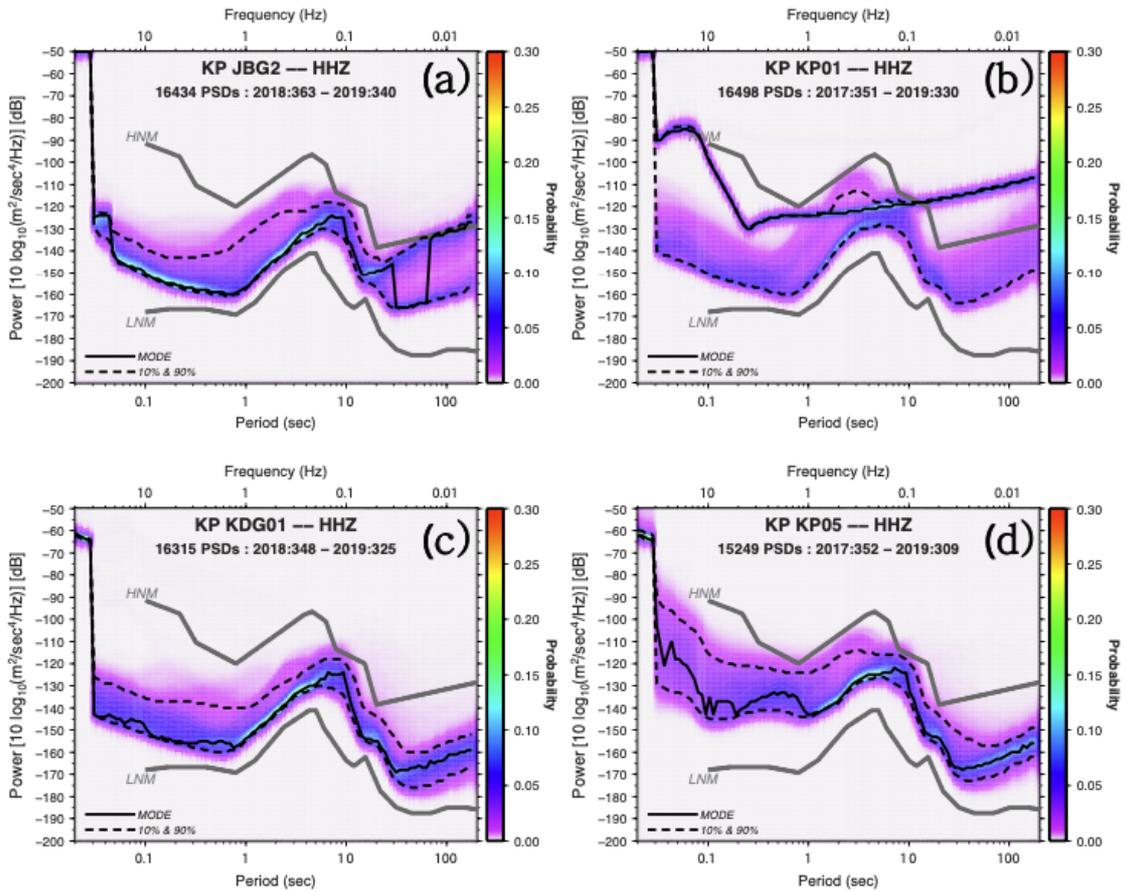
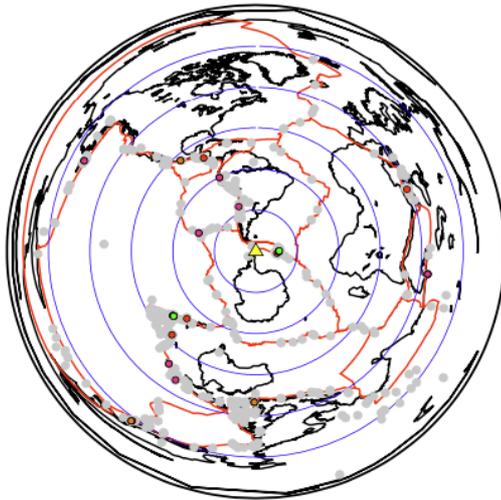


그림 53. 지진관측소의 Power spectrum Density Function (PDF). 장보고 기지 지진관측소(a), 멜번화산 KP01 (b), KP06 (d), 데이비드 빙하 지진관측소 KDG01 (c)

○ 해저면 지진계 방위각 보정

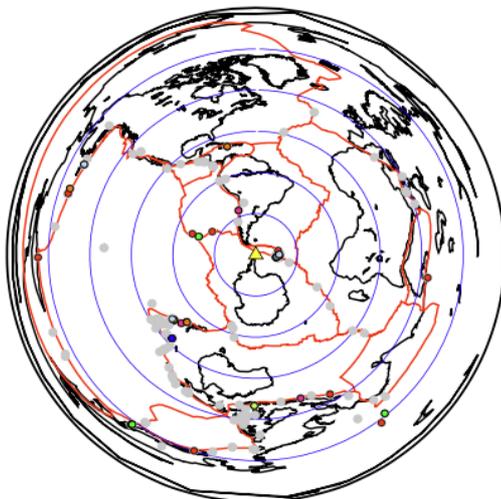
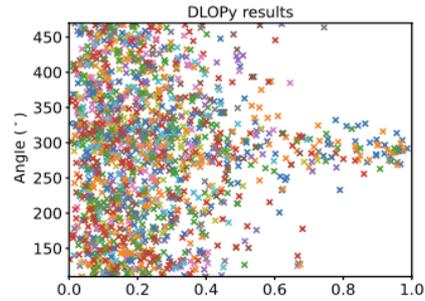
- 기존에 회수된 해저면 지진계의 연속지진자료에서 원격 지진 파형 선별
- 원격 지진의 진원 위치와 레일리파(Rayleigh wave)의 위상 계산
- 위상의 방위각을 기본으로 해저면 지진계 센서 방향을 진북방향 벡터 계산
- 실제 관측된 지진자료를 진북방향(북-남)과 동-서 방향으로 회전한 자료 보정 실시



Red: 40 mHz; Pink: 35 mHz; Orange: 30 mHz;  
 Green : 25 mHz; Light green: 20 mHz;  
 Blue: 15 mHz; Sky blue: 10 mHz;

**Station KO02/**

D-L mean, error, data included, unique events:  
 289.85, 9.23, 46, 22  
 D-L CC level: 0.800000



**Station KO03/**

D-L mean, error, data included, unique events:  
 287.27, 5.79, 74, 27  
 D-L CC level: 0.800000

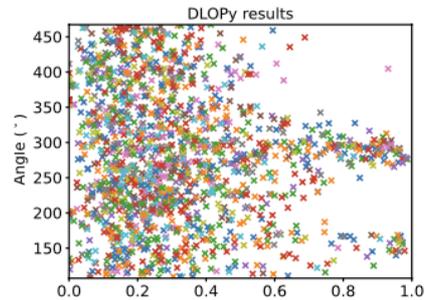


그림 54. 해저면 지진관측소 KO02(위)와 KO03(아래)의 수평성분 보정을 위하여 사용된 지진원의 위치(좌). 지도에서 원의 색깔은 각주파수 대역에서 사용된 지진원의 위치를 나타냄. 최종 결과는 우측의 도표로 x축(Cross-Correlation level)이 0.8 이상의 값의 평균으로 나타냈음.

[표1] 해저면 관측소 KO02와 KO03의 수평성분 H1과 실제 북쪽 방향과의 오차를 방위각으로 나타낸 결과

	D-L Mean	Error	Data	D-L CC level
KO02	289.85	9.23	46	0.8
KO03	287.27	5.79	27	0.8

## 2. 남극 맨틀 특성 규명과 화산활동 기록복원

### 2.1. 화산암류 지화학 분석

- 확장-균열대 화산암질 글라스 시료(19-20시즌 획득)를 이용하여 주원소 자료 획득
- 확장-균열대 화산암질 글라스는 현무암에 속하는 것으로 나타남

	SiO <sub>2</sub>	TiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	FeO	MnO	MgO	CaO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	TOTAL
KRR5-RC01	50.65	1.11	15.96	8.58	0.15	8.41	12.27	2.52	0.10	0.11	100.14
KRR5-RC02	51.31	1.41	14.81	9.93	0.18	7.24	11.21	2.87	0.01	0.11	99.41
KRR5-RC03	51.29	1.39	15.64	8.59	0.15	7.75	11.10	2.90	0.13	0.15	99.37
KRR5-RC04	51.86	1.38	15.47	8.67	0.15	7.53	11.60	2.85	0.13	0.14	100.08
KRR5-RC05	51.67	1.63	14.48	10.56	0.19	6.70	11.29	2.88	0.16	0.18	100.09
KRR5-RC06	51.28	1.32	15.01	9.66	0.17	7.45	12.06	2.72	0.16	0.14	100.27

[표2] 남극 확장-균열대 화산암질 글라스에 대한 주원소 분석 자료

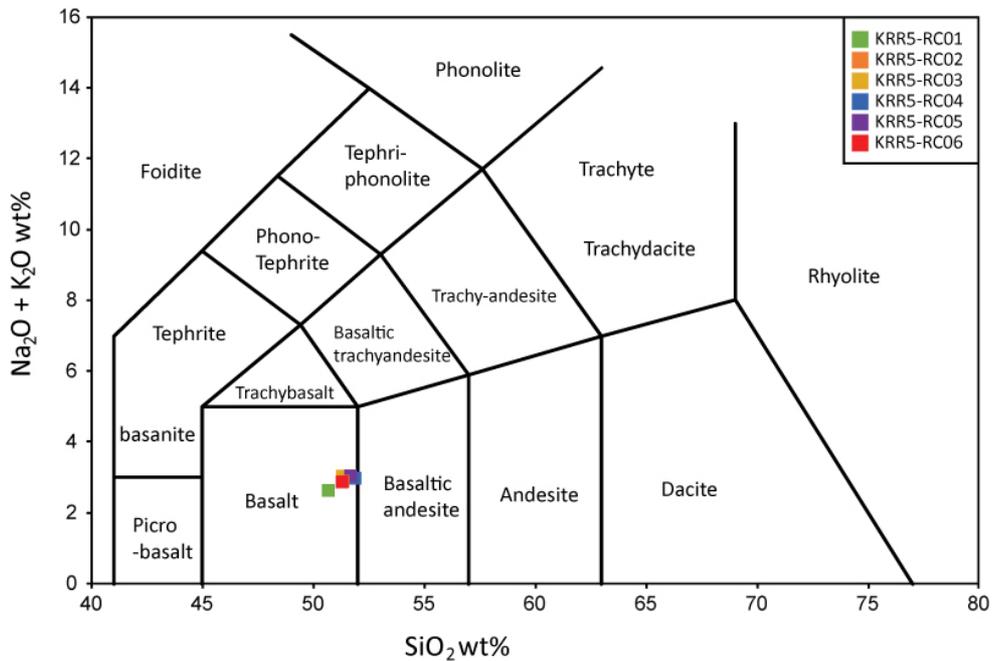


그림 55. 확장-균열대 화산암질 글라스의 성분 분석에 따른 암석 구분

- 21-22 시즌, 남극 확장-균열대 지역에서 자력탐사로 확인한 중앙해령에서 락코어 글라스 샘플 10개와 퇴적물 시료 6개 채취
- 글라스 시료는 마운트로 제작하여 미국 하버드대 LA-ICP-MS 이용한 지화학 분석 수행

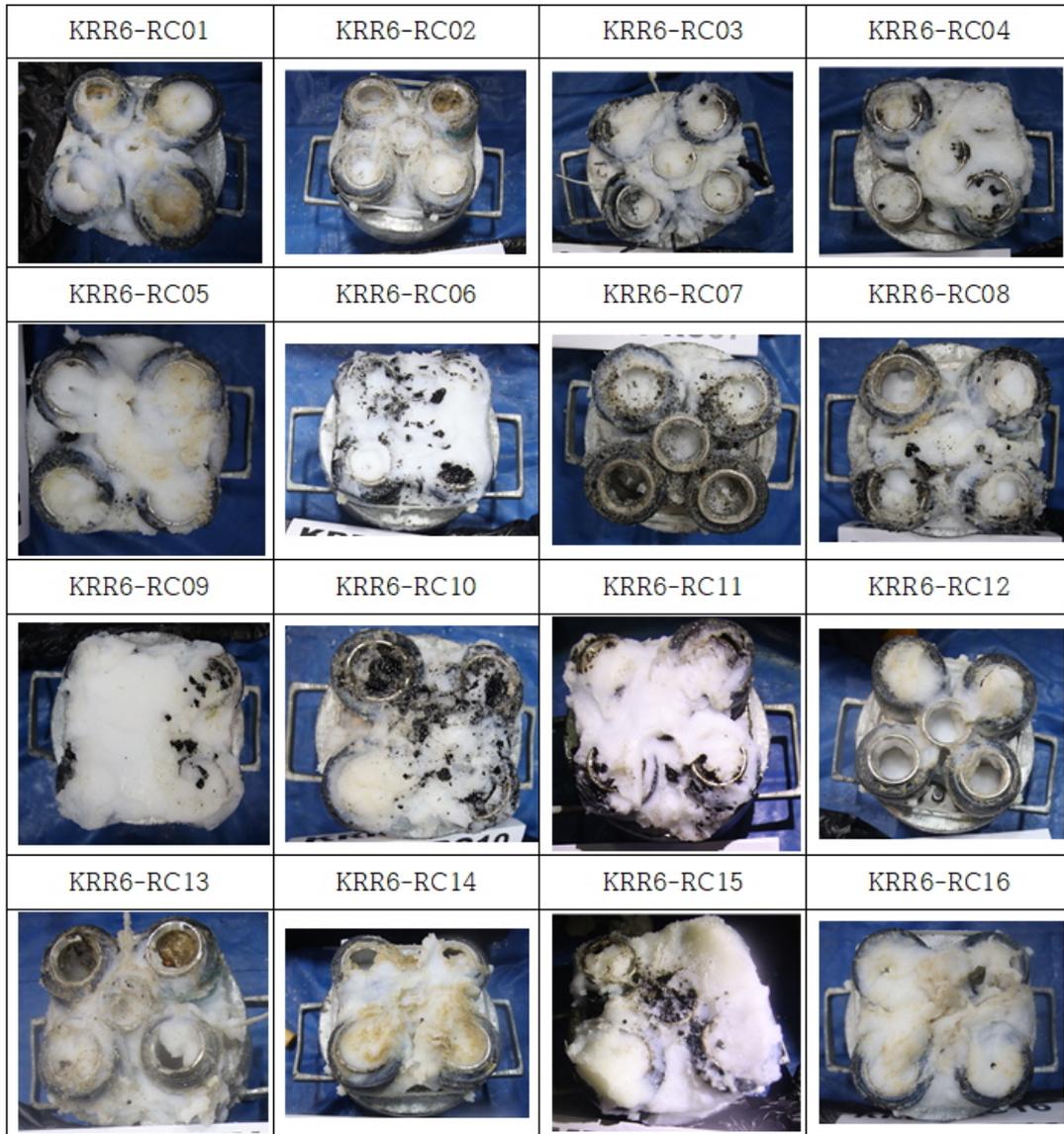


그림 56. 확장-균열대 지역 내 중앙해령 분절의 해저면으로부터 채취한 10개의 글라스 및 6개의 퇴적물 시료

○ 멜버른, 리트만 주요 화산암류 지화학분석

- 멜버른 정상부 최후기 분출물 주성분, 미량원소, 동위원소(Sr-Nd-Pb-Hf) 자료 획득
- 멜버른 화산대 소형 단성화산인 쉴드 누나탁(431±82 ka)과 해로우픽스(745±66 ka)화산암류 주성분, 미량원소, 동위원소(Sr-Nd-Pb-Hf) 자료 획득
- 리트만 화산대 화산암류 주성분, 미량원소, 동위원소(Sr-Nd-Pb-Hf) 자료 획득

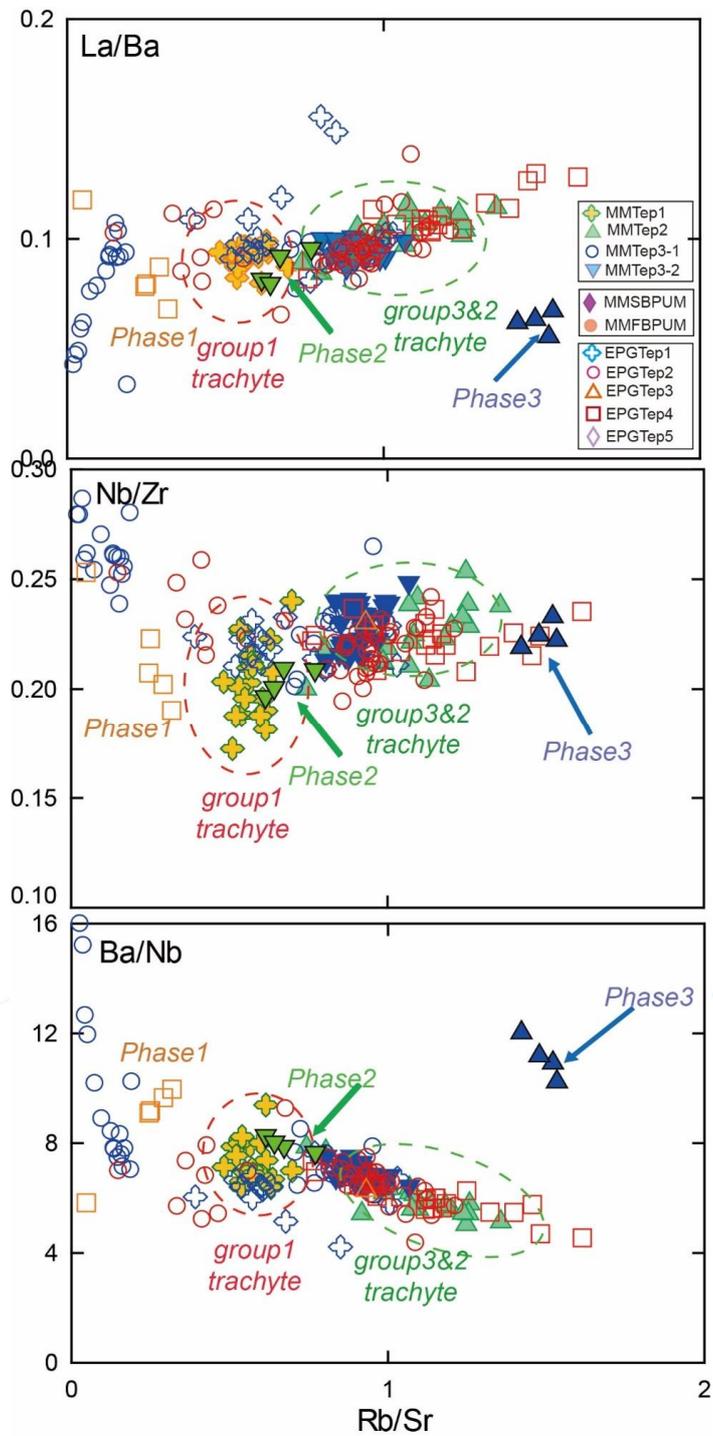


그림 57. 멜버른 정상부 최후기 분출 테프라 미량원소 조성. 분출시기에 따라 특징적인 지구화학조성을 보여줌. 시간에 따라 마그마 조성 진화

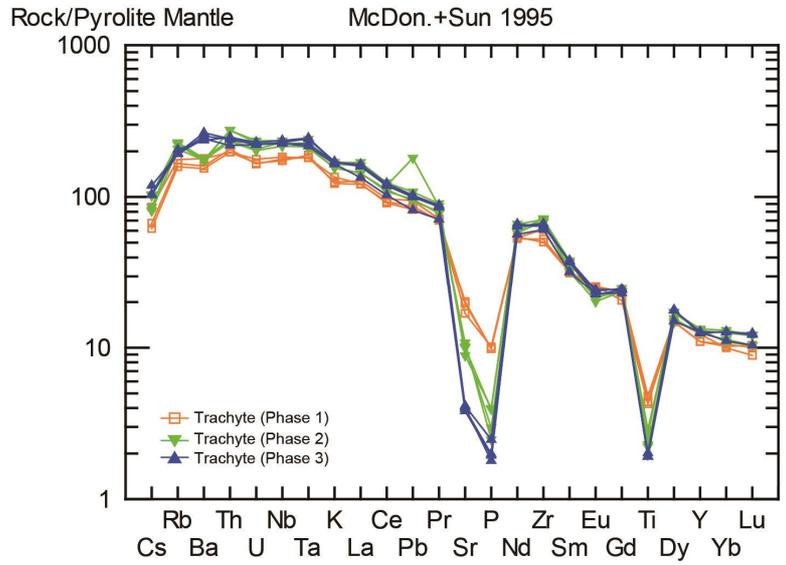


그림 58. 멜버른 정상부 조면암류 미량원소 조성. 분출시기, 암상에 따라 특징적인 지구화학조성을 보여줌

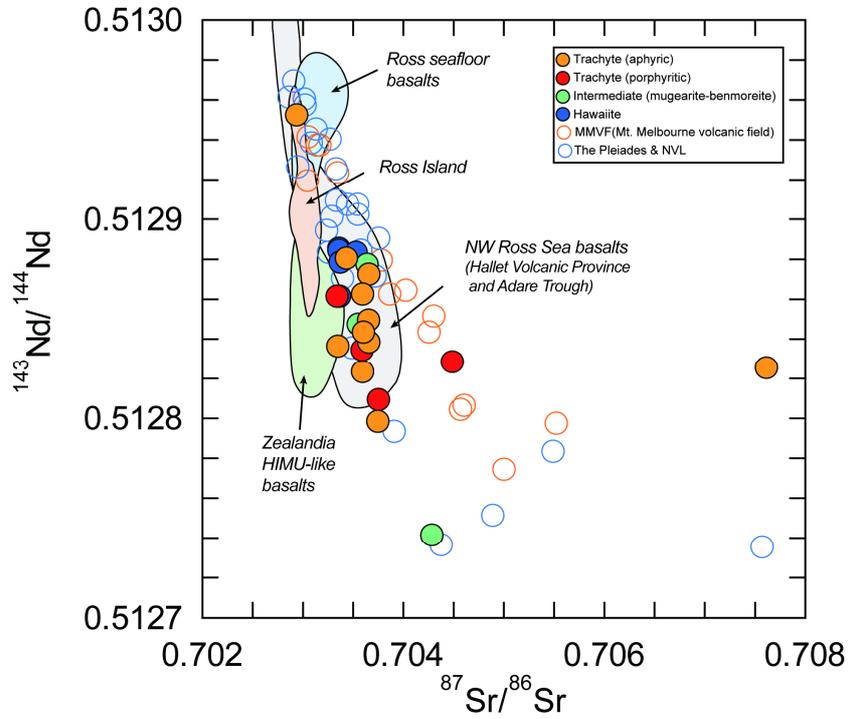


그림 59. 리트만화산과 멜버른, 플레아데스 화산암류의 Sr-Nd 동위원소 조성. closed circle: 리트만화산 조면암류. 리트만화산 조면암류의 Sr 동위원소 조성이 멜버른과 플레아데스 화산암류보다 더 결핍된 제한적인 조성범위를 보여줌

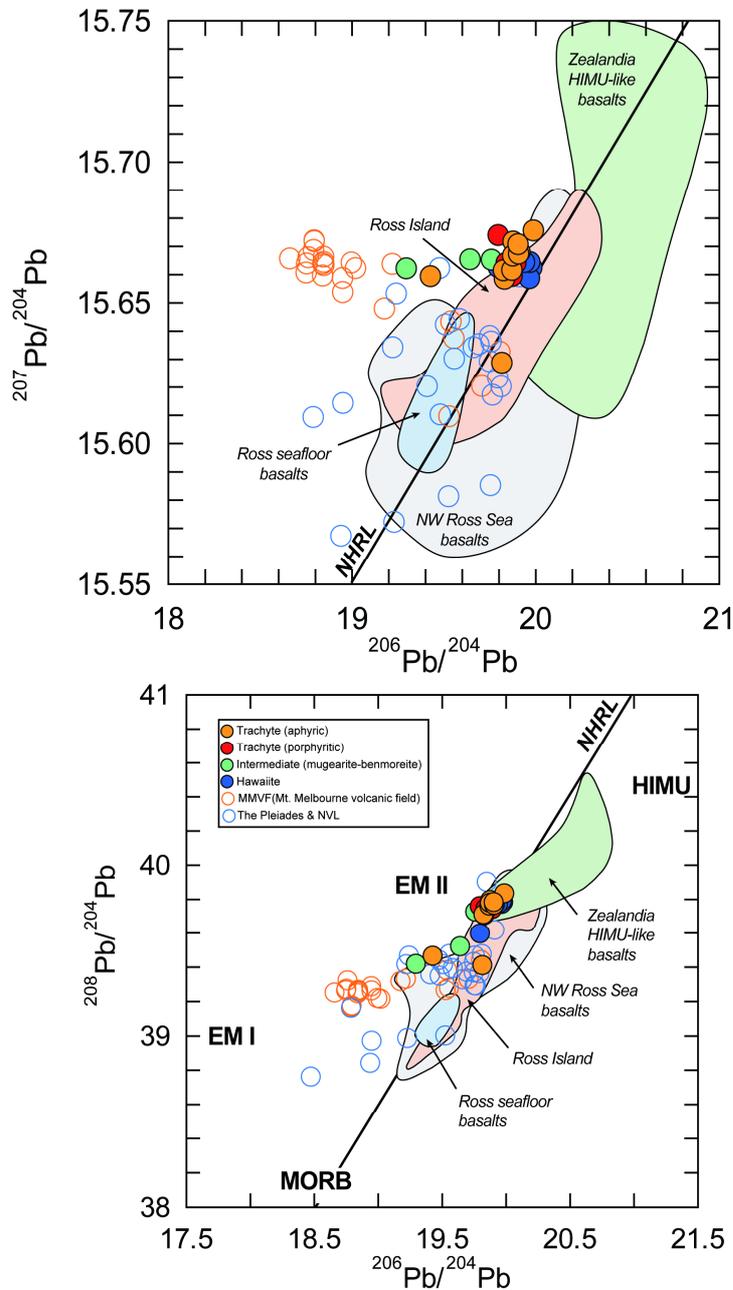


그림 60. 리트만화산과 멜버른, 플레아데스 화산암류의 Pb 동위원소 조성. closed circle: 리트만화산 조면암류. 리트만화산 조면암류의  $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  동위원소 조성이 멜버른과 플레아데스 화산암류보다 매우 부화된 조성범위를 보여줌. HIMU 맨틀 특성이 잘 나타남.

## 2.2. 화산분출사 복원모델

### ○ 소형 단성화산(셴드 누나탁) 분화특성연구

- 퇴적상 분석을 통해 Shield Nunatak을 구성하는 주요 암상(lithofacies)은 총 10개로 용암류 4개(blocky-jointed lava flows, pillow lava, agglutinated lava flows, unconfined lava lobe), 유리쇄설암질 화산력응회암/응회암 2개(massive hyaloclastite lapilli tuff, stratified hyaloclastite lapilli tuff), 화산력응회암/응회암 3개(massive lapilli tuff/tuff,

cross-stratified lapilli tuff/tuff, stratified lapilli tuff/tuff), 관입체 1개(dike-like bodies)로 분류

- Shield Nunatak은 3단계의 화산분화 과정을 통해 형성된 것으로 해석됨
  - Stage 1) 깊은 수심으로 인한 수압의 영향으로 물과 마그마의 혼합 작용이 제어된 상태에서 비폭발적인 용암분출 후 점차 수심이 얕아지면서 호수 환경 하에서 폭발적인 섯치형 화산분화로 전이
  - Stage 2) 폭발적인 화산분화와 비폭발적인 화산분출이 교대로 발생
  - Stage 3) 대기하에서 용암분천(lava fountain)을 형성하는 화산분화와 수증기-마그마성 화산활동으로 종료

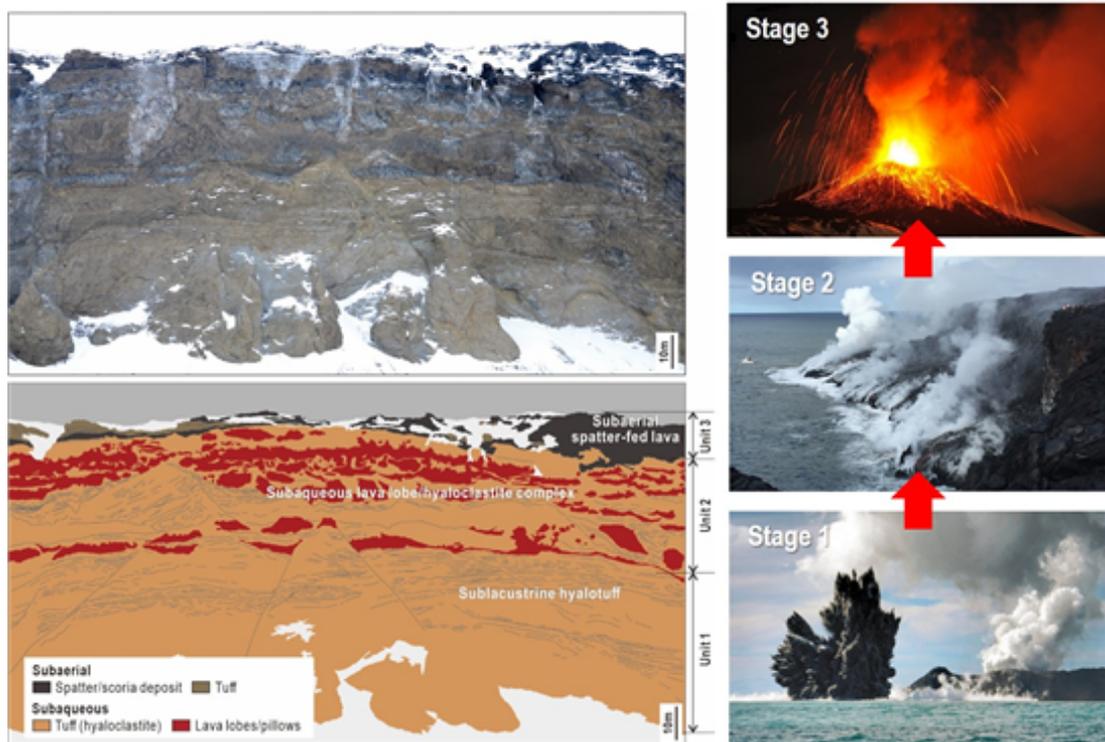


그림 61. 쉴드누나탁의 야외노두는 총 3단계의 층단위로 구분됨. Unit 1: 괴상 호운 층상의 유리쇄설암과 페퍼라이트 외피를 갖는 곡선상의 관입암체; Unit 2: 로브 형태의 용암류와 유리쇄설암의 교호; Unit 3: 용결된 lava spatter, 괴상 혹은 층상의 응회암

○ 화산암류 정밀 연대측정 ( $^{39}\text{Ar}/^{40}\text{Ar}$  연대)

- 뉴멕시코 광산공과대학(NM Institute of Mining and Technology, NMT) 내에 있는 뉴멕시코 지질조사국(NM Bureau of Geology)의 연대 측정 연구실(NM Geochronology Research Laboratory, NMGRL)에 설치된 질량분석기를 통해 현재까지 총 29개 시료에 대해 이중(duplicate) 시료를 포함 총 33점의  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  정밀연대 측정 결과를 획득함
- 홀로세에 근접하여 정확한 규제가 불가능한 매우 젊은 연대(<0.01 Ma)부터 약 30 Ma에 해당하는 다소 오래된 연대까지 다양한 연대 분포가 산출됨
- 불칸 구릉지의 조면암 석기(82021)와 반려암(82042) 내 사장석으로부터 29-31 Ma의 연대값을 획득하였음. 이는 불칸 구릉지에서 획득된 최초의 연대 측정값으로, 이를 통해

- 이 화성암체가 현 분류상 멜버른 화산대 그룹(MVP)에 속하지 않고 미엔더 관입암군(MIG)에 속함을 증명함
- 현재까지 알려진 바에 따르면, 맥머도 화산암그룹(MVG)의 가장 오래된 연대는 약 15 Ma로 알려져 있음. 그러나 본 분석을 통해 네비게이터 누나탁(Navigator Nunatak)의 북쪽 사면 현무암질 용암류에서 20 Ma의 연대값을 획득함. 이를 통해 MVP의 화산 활동이 20 Ma부터 있었음을 확인함
  - 더 나아가, MIG의 가장 젊은 연대는 약 18 Ma에 해당함. 그러므로 2021-2022년도 육상 탐사를 통해 확인한 불칸 구릉지의 화산암류 존재 확인을 함께 고려할 때, 네비게이터 누나탁의 화산암류와 불칸 구릉지 시료의 연대값은 MIG와 MVP가 서로 별개의 것이 아닌, 50 Ma 이전부터 연속적으로 있었던 화성 활동의 기록임을 시사함
  - 베를린 돔(Berlin Dome)과 엘드릿지 단애(Eldridge Bluff) 등 코스모넛(Cosmonaut) 빙하 인근의 화산암류로부터 획득한 3-4 Ma에 집중된 연대, 브라우닝 산곡(Browning Pass) 인근(케이나스 산의 동편 산자락)에서 산출하는 화산암류로부터 획득한 0.75-0.62 Ma 연대, 맥카시 산 부근에서 획득한 0.14 Ma, 그리고 MMVF 곳곳에서 획득한 연대들은 기존에 보고된 연대와 종합할 때 북빅토리아랜드의 화산 분출이 무작위적이지 않고 시기에 따라 주로 분출한 영역이 있었음을 시사함. 특히, 기존에 보고된 플레이아데스 화산 복합체의 연대 자료(Esser & Kyle, 2002)를 함께 고려할 때, 에반스 네베(Evans Névé) 동편(플레이아데스 인근) 내륙 지역은 가장 최근에 화산 활동이 개시된 곳 중 하나임을 시사함

Sample #	Group	Location	Phase	Preferred Age						Isochron Age			Integrated Age						
				Analysis	n	% <sup>39</sup> Ar	MSWD	K/Ca	±2σ	Age (Ma)	±1σ	<sup>40</sup> Ar/ <sup>39</sup> Ar	±2σ	Age (Ma)	±2σ	n	K/Ca	Age (Ma)	±2σ
82021*	Vulcan Hills	Vulcan Hills	gm	Plateau	6	37.0	2.8	4.4	1.0	29.12	0.07	296.1	0.7	29.04	0.11	10	7.1	30.22	0.06
82042*	Vulcan Hills	Vulcan Hills	Plag	Ideogram	8					30.60	0.11								
J14111202	MOVE	Northern crater	gm	Plateau	3	54.5	6.1	0.2	0.1	7.17	0.10	295.7	0.9	6.49	0.20	14	0.2	7.45	0.03
J14111203	MOVE	Northern flank	gm	Plateau	9	44.4	6.2	0.1	0.0	7.21	0.05	286.7	0.7	7.82	0.06	14	0.2	7.35	0.01
J14111204-2	MOVE	Northern flank	gm	Plateau	9	39.3	10.7	0.1	0.0	6.92	0.05	299.6	0.9	6.70	0.03	14	0.2	7.14	0.01
J14120505	MPVE	Malta Plateau	gm	Plateau	4	57.8	3.8	2.7	1.3	7.60	0.01	298.0	1.4	7.58	0.01	12	1.4	7.66	0.01
J14120506	MPVE	Malta Plateau	gm	Plateau	10	89.3	8.1	11.9	5.9	6.52	0.01	294.6	0.7	6.52	0.01	13	9.1	6.46	0.00
J14120506 <sup>d</sup>	MPVE	Malta Plateau	Fsp	Plateau	9	92.4	0.9	5.4	1.3	6.50	0.00	294.6	1.4	6.50	0.00	13	4.6	6.47	0.00
J14111305	MMVE	Burns Glacier	gm	Isochron						12.88	0.01	291.4	0.5	12.88	0.01	13	0.4	12.66	0.01
J14111306	MMVE	Burns Glacier	gm	Plateau	7	68.7	100.7	0.8	0.2	12.67	0.13	295.1	1.9	12.61	0.02	13	0.5	12.54	0.01
J14111308	MMVE	Harrow Peaks	gm	Plateau	7	57.3	8.3	0.3	0.1	0.71	0.01	301.4	0.5	0.71	0.01	11	0.3	0.80	0.00
J14111309	MMVE	Harrow Peaks	gm	Plateau	4	100.0	1.3	0.5	0.3	0.70	0.01	299.6	2.2	0.67	0.02	4	0.4	0.71	0.01
J14111309 <sup>d</sup>	MMVE	Harrow Peaks	gm	Plateau	8	65.7	6.9	0.4	0.2	0.66	0.01	297.1	0.6	0.60	0.01	13	0.4	0.62	0.00
J14111310	MMVE	Random Hills	gm	Isochron						0.58	0.08	298.3	0.4	0.58	0.08	4	0.2	1.53	0.09
J12121806	MMVE	near Willow Nunatak	gm	Plateau	3	94.1	2.8	0.4	0.4	2.02	0.12	297.3	0.8	1.61	0.20	4	0.3	2.05	0.07
J12121806 <sup>d</sup>	MMVE	near Willow Nunatak	gm	Plateau	3	55.3	7.9	0.4	0.3	2.11	0.11	295.5	0.3	2.11	0.07	13	0.3	1.18	0.04
J12121505	MMVE	Cape Washington	gm	Plateau	3	90.3	1.3	0.2	0.1	1.33	0.02	298.2	1.7	1.28	0.04	4	0.2	1.37	0.02
J12121505 <sup>d</sup>	MMVE	Cape Washington	gm	Plateau	7	43.5	2.2	0.1	0.0	1.32	0.02	289.3	0.4	1.37	0.02	13	0.1	1.02	0.01
DY181107-01	MMVE	Cape Washington	gm	Plateau	7	54.1	51.7	0.2	0.0	2.75	0.04	292.2	0.6	2.79	0.01	13	0.2	2.87	0.01
DY181107-02	MMVE	Cape Washington	gm	Plateau	11	77.1	26.2	0.3	0.2	2.07	0.02	280.3	1.3	2.15	0.01	13	0.2	2.00	0.00
MEL16DP01*	MMVE	Melbourne Summit	gm	Total gas						-0.03	0.01					12	1.0	-0.03	0.01
MEL16DP02*	MMVE	Melbourne Summit	gm	Total gas						-0.21	0.01					12	1.0	-0.21	0.01
M19112507	MMVE	Melbourne flank cone	gm	Plateau	2	72.1	4.8	1.8	0.6	-0.01	0.02	295.0	0.7	-0.02	0.00	4	1.9	-0.04	0.01
J13010109	MMVE	Melbourne flank cone	gm	Plateau	2	70.6	9.0	2.8	0.1	0.12	0.07					4	3.1	0.06	0.02
J14111206	NLS	Navigator Nunatak	gm	Plateau	5	68.3	1.0	0.7	0.1	20.19	0.12	292.4	0.3	20.27	0.22	8	0.3	19.70	0.12
K16012714	NLS	Eldridge Bluff	gm	Plateau	2	63.3	0.8	0.0	0.0	4.63	0.12	298.5	6.4	3.94	0.76	3	0.0	7.90	0.20
K16012714 <sup>d</sup>	NLS	Eldridge Bluff	gm	Plateau	8	20.5	4.6	0.0	0.0	4.27	0.20	305.9	2.6	3.07	0.25	14	0.1	21.80	0.40
J14111303	NLS	Eldridge Bluff	gm	Plateau	4	12.6	5.6	0.0	0.0	3.19	0.11	298.0	0.3	3.89	0.03	11	0.1	9.10	0.50
J14111304	NLS	Berlin Dome	gm	Plateau	10	41.3	3.8	0.2	0.1	3.22	0.03	305.4	3.2	2.96	0.07	14	0.3	3.40	0.01
J14113001	NLS	Hades Terrace	gm	Plateau	4	71.2	39.7	0.2	0.1	3.70	0.06	255.8	3.9	3.93	0.03	9	0.1	3.80	0.01
K16011502	NLS	Browning Pass	gm	Plateau	5	69.5	3.3	0.6	0.3	0.619	0.012	293.8	1.5	0.60	0.02	14	0.3	0.67	0.01
J14113003	NLS	Browning Pass	gm	Plateau	3	100.0	1.5	0.2	0.1	0.75	0.07	297.9	5.7	0.47	0.22	3	0.1	0.77	0.08
J14112701	NLS	Mt. McCarthy	gm	Plateau	3	100.0	0.8	0.3	0.2	0.142	0.025	294.0	2.0	0.13	0.03	3	0.2	0.17	0.05

[표3] 북빅토리아랜드 신생대 화성암의 <sup>40</sup>Ar/<sup>39</sup>Ar 정밀연대 측정 결과. \*뉴멕시코 광산공과대학(NM Tech) 소속 시료. d이중 시료. § 확률 분포 해석(ideogram) 연대[표]  
 \*\* Fsp = 장석(feldspar), Plag = 사장석(plagioclase), gm = 전암 석기(groundmass)

Sample #	Location	Phase	Preferred Age								
			Analysis	n	% <sup>39</sup> Ar	MSWD	K/Ca	±1σ	Age(Ma)	±1σ	
82042	Vulcan Hills	Plagioclase	Plateau	3	49.0	2.0	0.05	0.0	30.29	0.06	
82042	Vulcan Hills	Plagioclase	Plateau	5	55.6	1.0	0.03	0.0	30.30	0.09	
82042	Vulcan Hills	Plagioclase	Plateau	5	58.8	2.4	0.10	0.0	30.23	0.05	
82042	Vulcan Hills	Plagioclase	Plateau	5	59.9	25.6	0.05	0.0	31.92	0.25	
82042	Vulcan Hills	Plagioclase	Plateau	3	63.1	2.8	0.06	0.0	29.86	0.04	
82042	Vulcan Hills	Plagioclase	Plateau	3	42.3	3.7	0.05	0.0	30.21	0.08	
82042	Vulcan Hills	Plagioclase	Plateau	3	39.2	7.0	0.04	0.0	30.85	0.16	
82042	Vulcan Hills	Plagioclase	Plateau	3	46.2	9.1	0.05	0.0	31.17	0.15	
									Mean	30.60	0.11
									1SD	0.67	

[표4] 불칸 구릉지(Vulcan Hills)의 반려암 내 사장석의 확률 분포 연대표

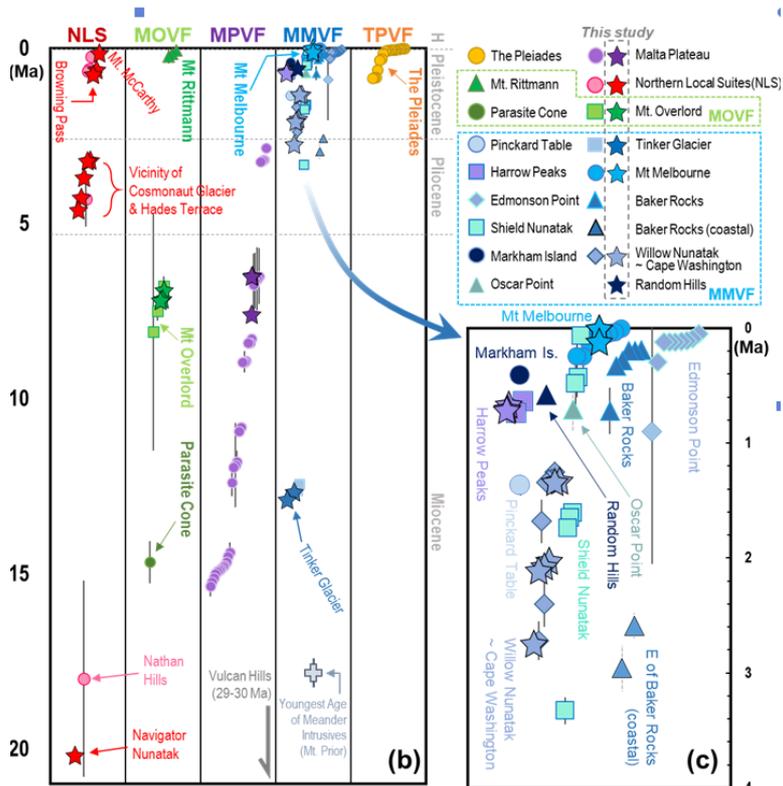


그림 62. 각 화산지대의 연대 자료를 시간 축에 따라 나열한 도표. (c) 멜버른 화산지대 내에서의 연대 변화

### Age-Probability Spectrum for Sample PK-NVL36

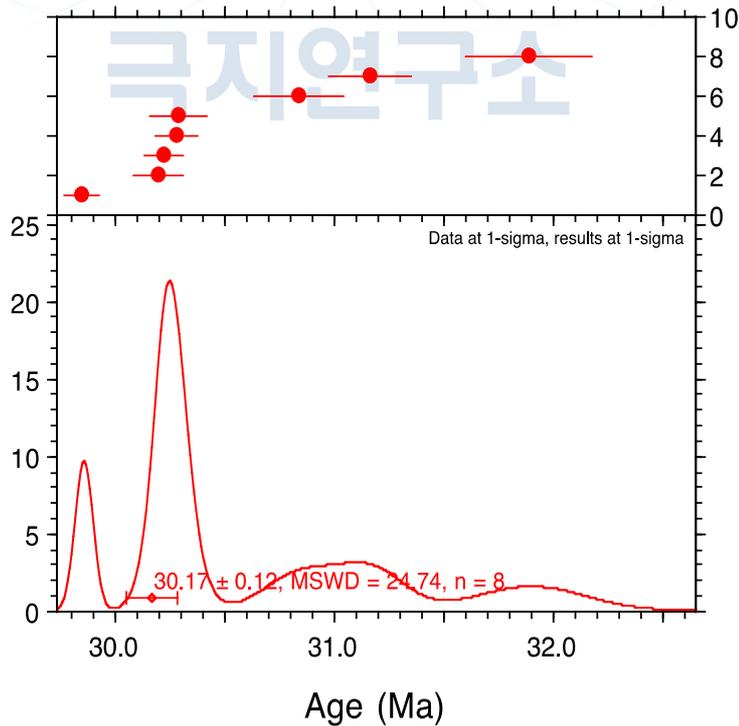


그림 63. 불칸 구릉지(Vulcan Hills)의 반려암 내 사장석으로부터 획득한  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  연대 확률 분포도

### 2.3. 소행성에서 일어나는 동위원소 분별 및 확산 기작 규명

#### ○ 카룬다 타입 남극운석의 불활성기체 동위원소 분석과 노출연대 계산

- 탄소질 운석 중 카룬다 타입 운석은 다른 탄소질 운석에 비해 적은 원시가스 함량으로 인해 우주선 기원 성분, 태양가스와 같은 다른 불활성기체 성분이 두드러지게 나타날 수 있으며, 타입 내에서 헬륨 손실 그룹과 헬륨 보존 그룹이 뚜렷하게 나타남
- 헬륨의 선택적인 손실은 소행성이 태양 근접 궤도를 공전하며 발생하는 복사열로 인해 나타나기 때문에 두 그룹은 서로 다른 거리의 공전 궤도를 가짐
- 헬륨 보존 그룹의 카룬다 타입 운석으로 Karoonda (CK4), Dho 015 (CK3), NWA 4964 (CK3)를 분석하였고 헬륨 손실 그룹에는 CK5의 남극운석 EET 13002, EET 14007, EET 15156, EET 15161, EET 15162를 분석함
- 분석 결과, NWA 4964 운석을 제외한 나머지 카룬다 타입 콘드라이트는 모두 우주선 기원 네온만이 나타났으며, NWA 4964 운석에서도 원시가스 성분인 Q와 HL의 성분만이 나타나 분석한 모든 카룬다 타입 콘드라이트에서 태양가스는 검출되지 않음
- 또한 기존에 보고된 카룬다 타입 콘드라이트 중에서도 태양가스가 검출된 경우는 없었음
- 우주선 기원 네온의 영향으로 NWA 4964를 제외한 나머지 카룬다 타입 콘드라이트의 네온 동위원소에서는 원시가스의 성분을 구분할 수 없었으나, 제논 동위원소 분석을 통해 카룬다 타입 콘드라이트의 불활성기체 성분이 원시가스 Q, HL과 우주선 기원 성분임을 알 수 있었음
- 또한 헬륨 손실 그룹에 속하는 남극운석 (EET 13002, EET 14007, EET 15156, EET 15161, EET 15162)이 오차범위 내에서 동일한 제논 동위원소비를 가짐을 확인
- 헬륨 보존 그룹의 카룬다 타입 콘드라이트는 모두 개별적인 우주선 노출 연대를 가지며, 헬륨 손실 그룹에 속하는 남극운석은 네온-21로부터 계산된 우주선 노출 연대 T21에 의해 23.8 Ma의 EET 14007, EET 15162와 26.8-28.6 Ma의 EET 13002, EET 15156, EET 15161로 구분됨
- 노출연대 26.8-28.6 Ma의 세 카룬다 타입 콘드라이트는 낙하 연대를 통해 EET 13002, EET 15161과 EET 15156이 서로 다른 시기에 지구에 도달하였음을 알 수 있음
- 동일한 동위원소비와 노출연대를 공유하는 세 카룬다 타입 운석이 0.06 Ma와 0.14 Ma의 두 시기의 낙하연대를 보이는 점을 통해 지구 접근 천체로부터의 주기적인 운석 낙하로 카룬다 타입 운석이 지구에 도달하였음을 뒷받침함

### 카룬다 타입 콘드라이트의 네온 동위원소 비

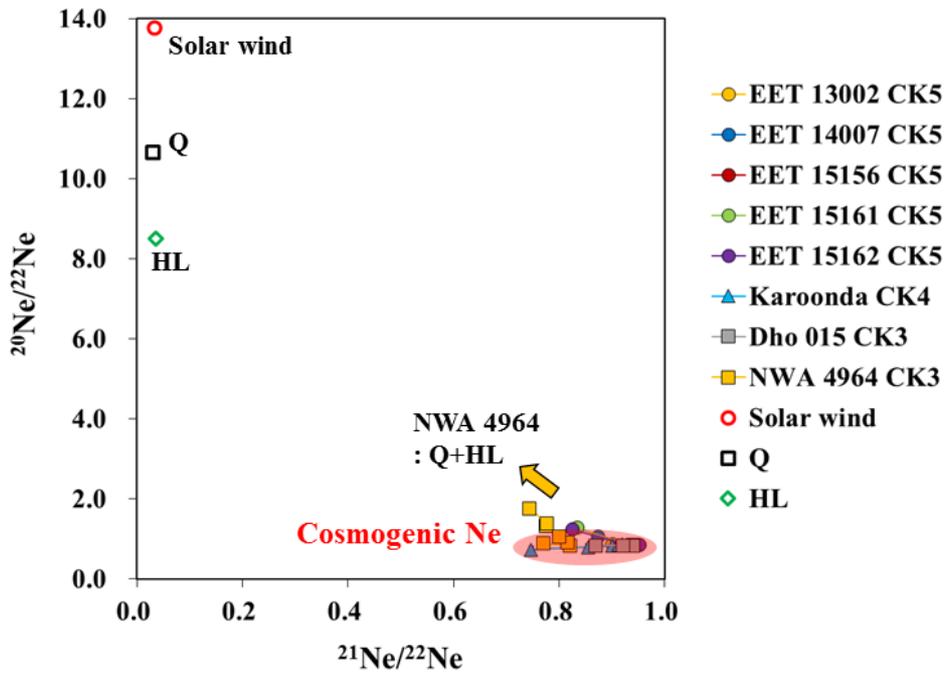


그림 64. 카룬다 타입 콘드라이트의 네온 동위원소 비 그래프

### 카룬다 타입 콘드라이트의 제논 동위원소 비

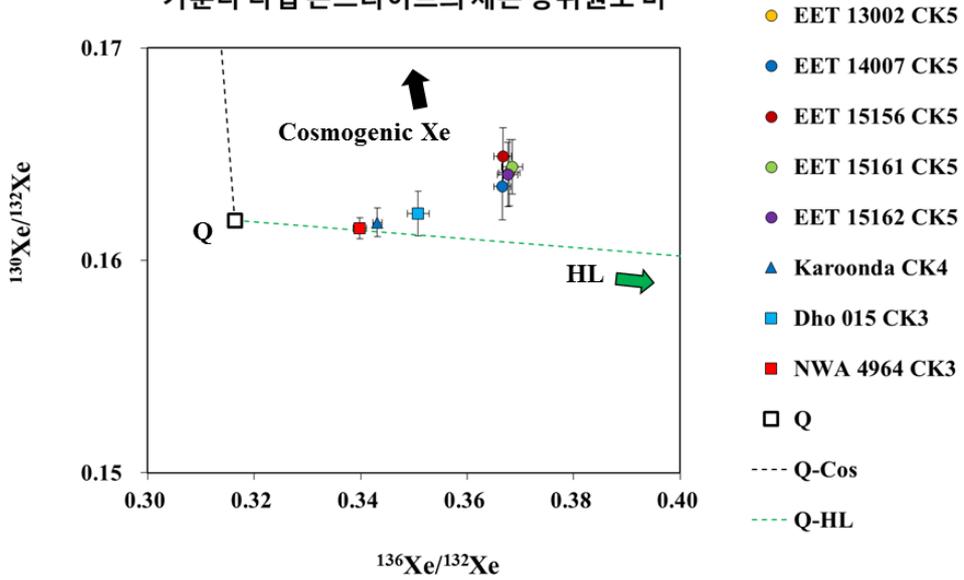


그림 65. 카룬다 타입 콘드라이트의 제논 동위원소 비 그래프

운석	분류	우주선 노출 연대		낙하 연대 [Ma]	참고			
		T <sub>3</sub> [Ma]	T <sub>21</sub> [Ma]					
EET 13002	CK5		10.2		28.6		0.06	헬륨 손실 그룹
		±	0.8	±	2.0	±	0.04	
EET 14007	CK5		5.0		23.8		0.10	
		±	0.4	±	1.7	±	0.03	
EET 15156	CK5		4.8		26.8		0.14	
		±	0.3	±	1.9	±	0.03	
EET 15161	CK5		8.9		27.3		0.06	
		±	0.7	±	1.9	±	0.03	
EET 15162	CK5		4.4		23.8		0.10	
		±	0.3	±	1.7	±	0.03	
Karoonda	CK4		58.3		49.4		0	헬륨 보존 그룹
		±	4.1	±	2.9	(Observed fall)		
Dho 015	CK3		29.9		29.2		0.09	
		±	2.8	±	2.2	±	0.04	
NWA 4964	CK3		13.1		10.4		0.03	
		±	1.0	±	0.7	±	0.24	

[표5] 카룬다 타입 콘드라이트의 우주선 기원 He-Ne 그래프 [Schultz and Franke, 2004]

- 시료에서 태양가스가 검출되기 위해서는 표면에 주입된 태양가스가 보존되어야 하는데, 운석에서 소행성의 태양 궤도 공전 중 주입되는 태양가스의 보존이 힘든 이유는 하야부사 프로젝트에서 확인된 소행성의 우주 풍화작용과 지구 대기와의 마찰 과정에서 표면물질이 타버리기 때문임
  - 반면 우주선은 소행성의 표면 수 미터까지 영향을 미치기에 상대적으로 보존이 쉬운데, 이는 서로 다른 공전궤도를 가지는 두 그룹의 카룬다 타입 콘드라이트의 분석 결과에서도 알 수 있음
  - 향후 소행성 표면 물질의 분석에 있어서 방사성 동위원소 분석을 통한 깊이 측정이 수반되어야 할 것이며, 불활성기체 분석의 측면에서는 단순 태양가스의 검출만이 아닌 태양가스의 포집 시점에 대한 연구가 이루어져야 할 것임
- 오디너리 콘드라이트 구성광물의 정밀 광물화학조성 분석
- EDS와 WDS를 동시 사용하여 주원소(Mg, Si)는 EDS로, 미량원소(Na, Al, K, Ca, P, Fe, Mn, Zn, Ti, Cr, Ni)은 WDS로 분석하는 방법 개발
  - San Carlos olivine을 이용한 정밀도 및 정확도를 측정한 결과 측정한계는 모든 미량원소에서 10 ppm 이하로 나타남
  - 거의 모든 원소에서 ICP-MS로 측정된 값과 일치하여 EPMA 분석으로도 완전한 비파괴로 높은 정확도의 분석이 가능함

Crystal Configuration	1 (TAPH) Na	2 (TAP) Al	3 (PETL) K Ca P	4 (LIF) Fe Mn Zn	5 (LIFH) Ti Cr Ni
Acc. Volt	15kV				
Probe Current	500nA				
Beam Size	3 $\mu$ m				
Measurement Time (EDS)	60s (Si, Mg with EDS)				
Measurement Time (Type I chd)	360/180 for all elements				
Measurement Time (Type II chd)	20 / 10 for Fe, 700/350 for Zn, 360/180 for other elements				
Background position	$\pm$ 2mm for all elements				
Background modeling	Linear for Fe, Expomelements				
Matrix correction	Phi-rho-Z (Pfe default Love-Scott)				

[표6] 감람석의 미량원소 분석을 위한 전자현미분석 조건

	Ti	Al	Cr	Mn	Ni	Ca	Na	K	P	Zn
<b>Mean (n=50)</b>	23	170	103	1057	2886	677	69	4	14	56
<b>2SD</b>	8	7	10	30	42	15	10	4	6	25
<b>2SE</b>	1	1	1	4	6	2	1	1	1	4
<b>Detection Limit (2<math>\sigma</math>)</b>	6	4	6	10	10	2	5	2	4	14
<b>ICP-MS</b>	24,	174,	103,	1057,	2840,	625,	68,		16,	
<b>(DeHoogetal.2010)</b>	25	196	108	1085	2950	665	82		32,	54, 58
									42	

[표7] San Carlos olivine에서 측정된 미량원소 함량과 ICP-MS에서 얻은 값과 비교

- 개발한 정밀분석 방법으로 오디너리 콘드라이트 내 콘드롤 구성광물 중 감람석의 미량원소를 분석함
- 남극운석 EET 14017(오디너리 콘드라이트)에서 콘드롤 타입(type I vs type II)에 따라 Fo#와 원소별 분포의 양상이 다르게 나타남
- 내화성 원소(refractory element)인 Ca, Ti, Al의 함량은 Fo<99에서는 FeO 함량과 같이 증가하고, Fo>99에서는 FeO의 함량과 반비례하는 것으로 나타남
- 내화성 원소의 함량이 Fo>99에 많이 들어 있으며 FeO 함량과 반비례하는 이유는 태양계 성운에서 콘드롤 액(melt)과 가스와의 상호작용에 따른 성장 누대 구조를 반영하는 것으로 판단됨
- 상대적으로 휘발성 원소(volatile element)인 Cr, Mn, Na, P은 type II 콘드롤에 더 많이 농집되어 있고, FeO 함량에 따라 같이 증가함

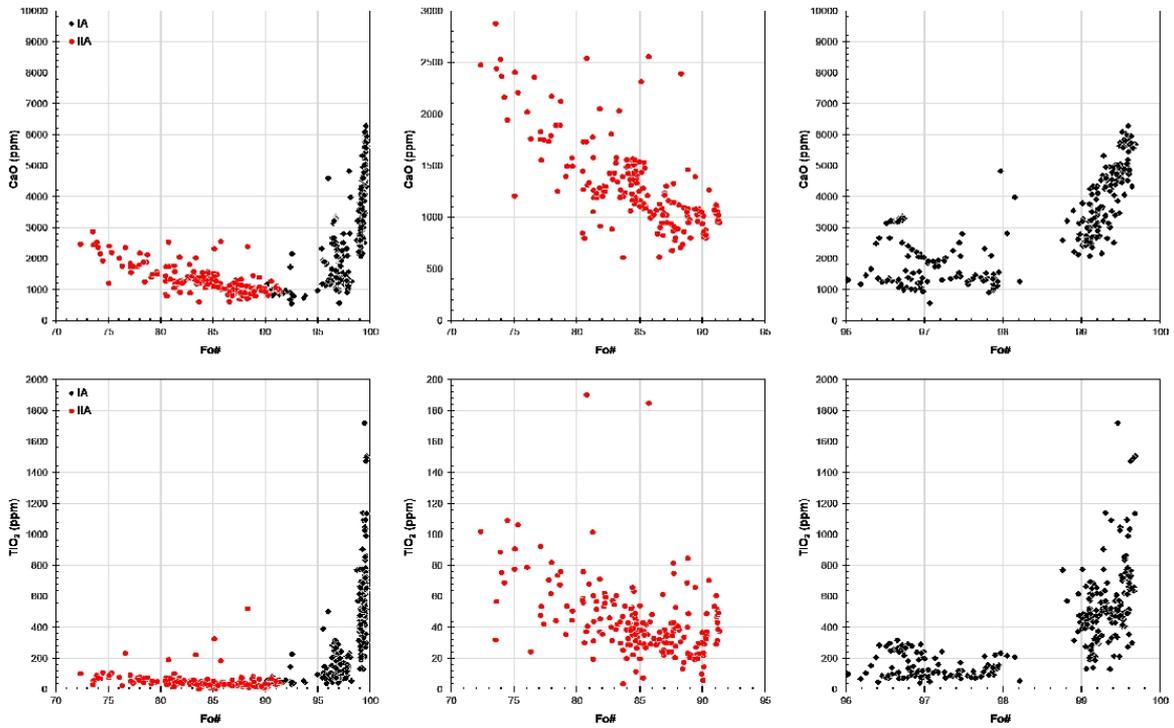


그림 66. 오디너리 콘드라이트 EET 14017의 type I, II 콘드롤 감람석의 미량원소 Ca, Ti 분포

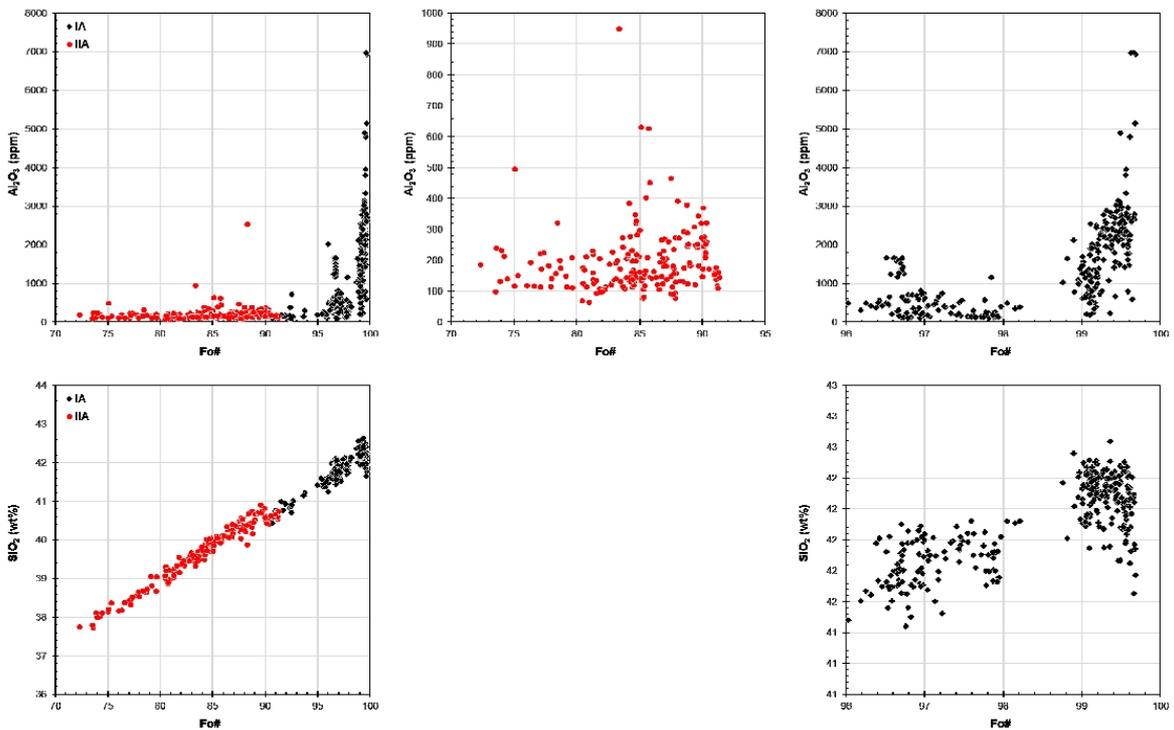


그림 67. 오디너리 콘드라이트 EET 14017의 type I, II 콘드롤 감람석의 미량원소 Al의 분포와 주원소 Mg, Si의 관계

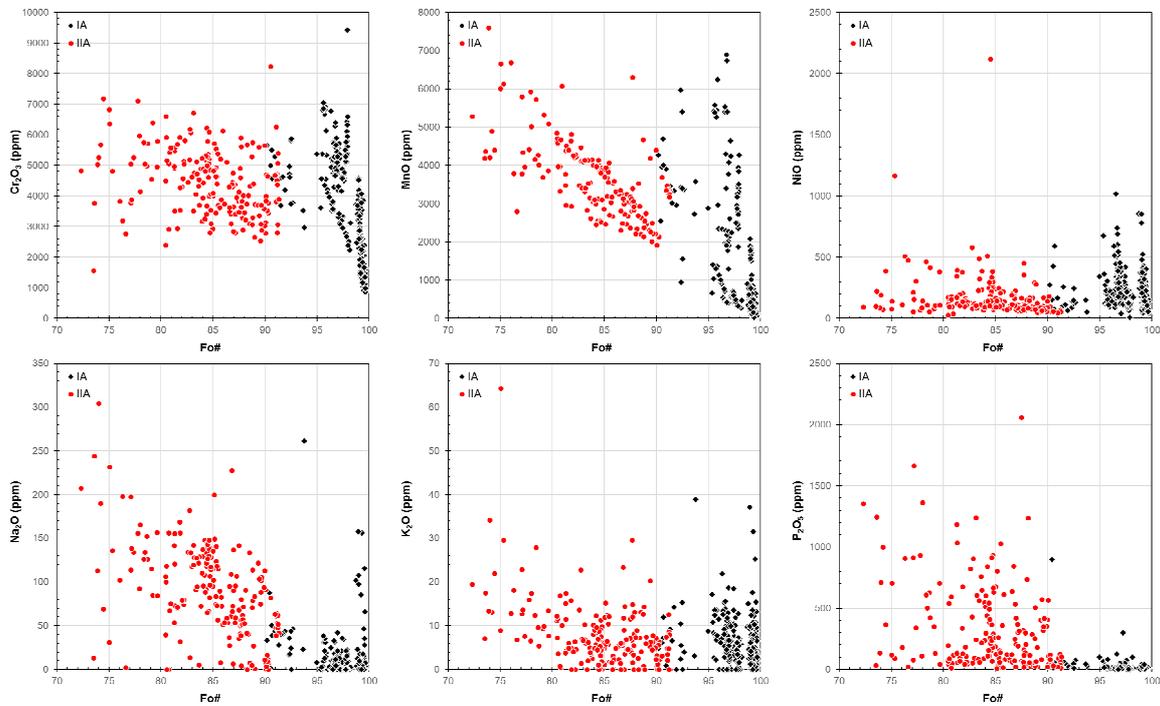


그림 68. 콘드롤 타입에 따른 상대적으로 휘발성 원소인 Cr, Mn, Ni, Na, K, P의 분포

○ in-situ 광물구조분석 실시

- 라만 분광분석(Raman spectroscopy)으로 감람석의 Fo#에 따른 피크 변화에 대한 기존 연구 결과가 있으나 감람석의 미량원소 차이는 라만 피크에 영향이 없는 것을 확인
- 미량원소 차이를 시각적으로 잘 보여주는 cathodoluminescence (CL) 분석을 수행하고 미량원소 분포를 확인하기 위해 정량 x-ray mapping 실시
- type II 콘드롤 감람석의 CL 이미지에서 누대 구조 확인 가능하고 정량 x-ray 맵과 비교한 결과, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>의 분포와 CL 맵의 조직이 일치함을 확인함
- 다른 내화성 원소인 Ti과 Ca에서는 Al과 달리 구조가 명확히 보이지 않는데, Ti의 경우, 감람석 내 함량이 매우 낮아 x-ray mapping으로는 분석이 어려움
- Ca의 경우, 매우 흐릿하게 나타나는데 아마도 확산 속도가 빠르기 때문에 기록이 지워진 것으로 판단됨
- Cr의 경우, 결정 주변부의 누대구조는 잘 드러나 보이나 중심부에서는 잘 나타나지 않음
- Al과 Cr 맵, CL 이미지를 다같이 고려하면 type II 콘드롤 감람석의 중심부는 type I 콘드롤 감람석의 기록을 보존하고 있으며, Fe, Mg, Ca의 경우 type II 콘드롤 감람석 형성 당시 상대적으로 빠른 확산속도로 인해 기록이 지워진 것으로 보임
- Cr은 type II 콘드롤 감람석이 만들어질 때 성장 누대구조를 잘 보여줌

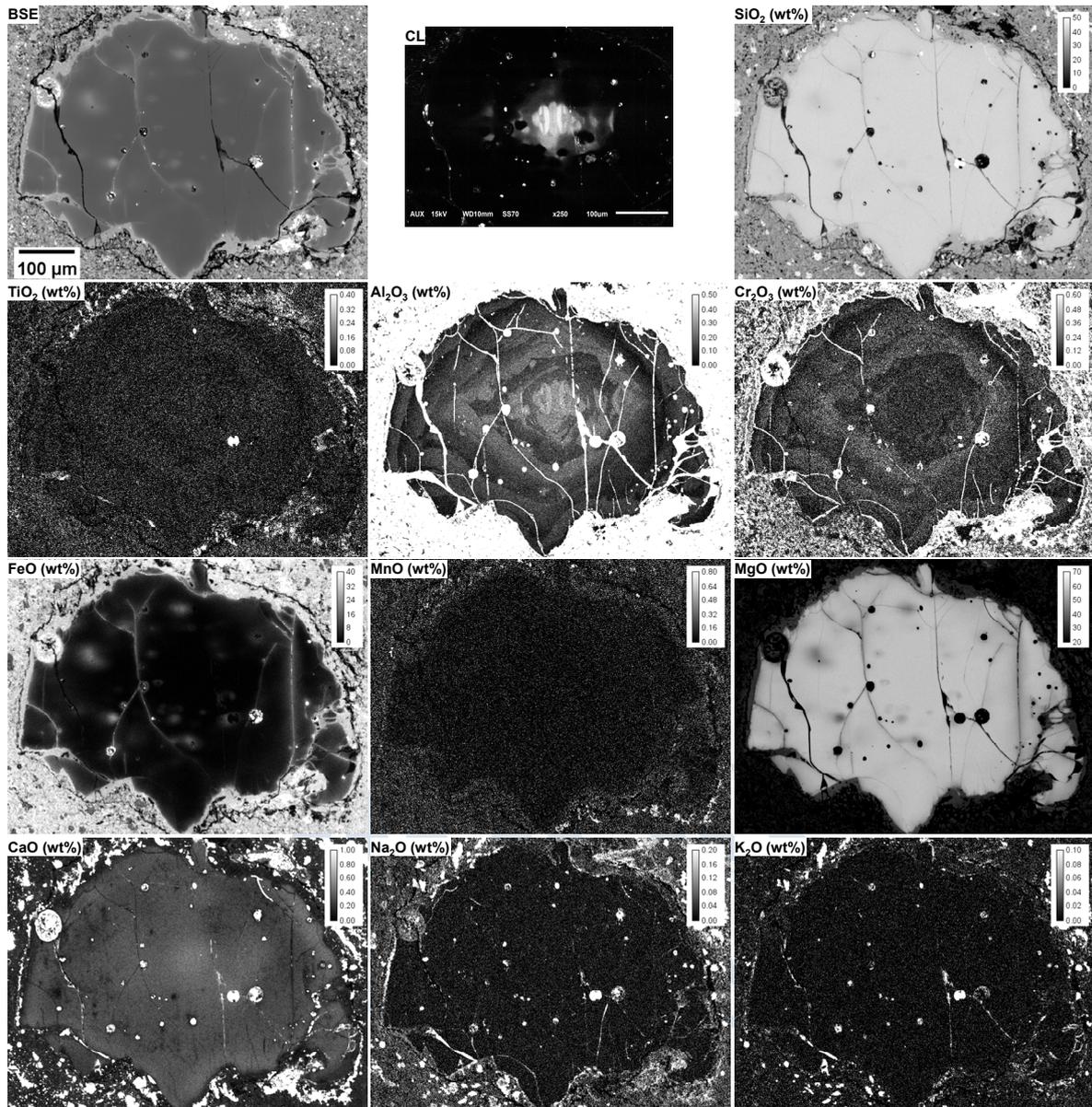


그림 69. Type I 콘드롤 감람석의 미량원소 분포. CL 이미지에서 미량원소 분포에 따라 intensity의 차이가 확연히 나타남. Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 정량 맵에서 CL 이미지와 같은 구조를 확인

○ 열변성에 의한 광물간 원소 이동과 확산 모델링 개발

- 소행성에서 열변성에 따라 콘드라이트의 여러 요소에 존재하는 감람석의 조성 변화를 모델링 (Geochimica et Cosmochimica Acta에 논문 투고하여 심사중)
- type I, II 콘드롤, 기질, AOA(Amoeboid Olivine Aggregates)의 구성광물간 Fe-Mg 교환 및 온도에 따른 확산을 모델링
- 소행성에서의 열변성은 최고 온도 ~500 °C, 시간에 따른 냉각 속도 변화 ( $dT/dt = -kT$ ,  $T = T_{peak} * \exp(-kt)$ )를 가정 (k값은 0.053 사용)
- 모델링 조건

Component	Mode <sup>1)</sup>	Phase <sup>2)</sup> (mode)	Shape	Vol.% <sup>3)</sup>	Radius ( $\mu\text{m}$ )	Initial $X_{\text{Fe}}$ <sup>4)</sup> (Fe/(Mg+Fe))	$dr$ ( $\mu\text{m}$ )
Matrix	22	Ol (100)	sphere	37.92	1	0.58 <sup>5)</sup>	0.2
Type I chd	49	Ol (25)	sphere	21.11	14	0.01	0.02793
		Opx (25)	sphere	21.11	7	0.01	0.00088
Type II chd	18	Ol (60)	sphere	18.61	35	profile <sup>6)</sup>	0.06855
AOA	1	Ol (64)	sphere	1.11	2.3	0.01	0.02793
		Cpx (8)	sphere	0.14	1	0.01	0.00039

1) Mode of each component in primitive CO chondrites (e.g., ALHA77307). Data for matrix and type I and II chondrules from Grossman and Brearley (2005) and for AOAs from Davidson et al. (2019).

2) Volume percentage of each phase in each component. For example, type I chondrules contain olivine (25 vol.%), low-Ca pyroxene (25 vol.%), and glassy mesostasis (50 vol.%). Data for AOAs are from Chizmadia et al. (2002). Abbreviations: Ol = olivine, Opx = low-Ca pyroxene, Cpx = high-Ca pyroxene.

3) Volume percentage of olivine and pyroxene for our modeling, assuming that Fe-Mg interdiffusion occurs between phases listed here.

4) Typical chemical compositions of olivine and pyroxene of type I chondrules and AOAs from ALHA77307.

5)  $X_{\text{Fe}}$  of matrix olivines assuming that the number is equivalent to that of matrix of ALHA77307 (Scott and Jones, 1990).

6) Representative fayalite content profile of type II chondrule olivines from ALHA77307 (Jones and Rubie, 1991).

[표8]

- 모델링 결과 열변성만으로는 AOA 감람석의 실제 분석 프로파일을 재현할 수는 없었음. 그 이유는 AOA 감람석의 크기가 평균적으로 매우 작아(~2.3 마이크로미터) Fe-Mg 확산으로 빠르게 평형화되기 때문임
- 또한 AOA 감람석에서는 결정 주변부에 Fe이 농집되어 나타나는데 이는 열변성만으로 설명할 수 없고 낮은 온도에서 주변부에만 Fe 확산이 일어난 증거임
- 아마도 AOA 감람석에서는 열변성을 받을 때는 Fe-Mg 확산보다 빠르게 fayalite 결정의 overgrowth가 일어난 후 Fa~10 정도에서 평형화가 되었고, 이후 낮은 온도에서 수성변질을 다시 받아 주변부에서 확산이 추가적으로 일어난 것으로 추정

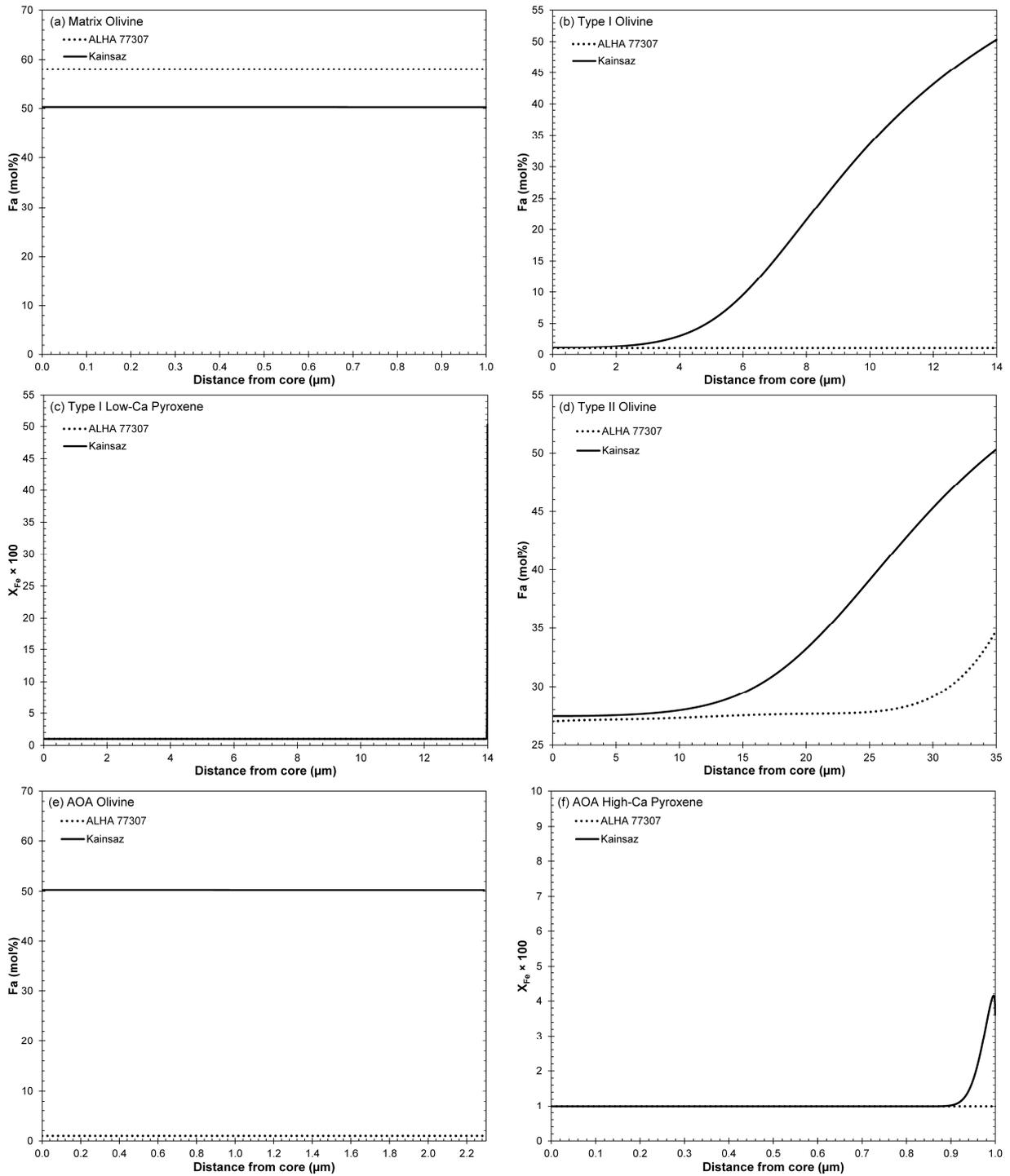


그림 70. 폐쇄계에서 기질, 콘드롤, AOA 광물간 Fe-Mg 교환 및 확산 모델링 프로파일. ALAH 77307의 값을 초기값으로 설정. Type II 콘드롤 감람석의 프로파일은 실제 Kainsaz 운석 데이터와 잘 일치하나 type I 콘드롤 감람석은 경우 실제와 큰 차이를 보임.

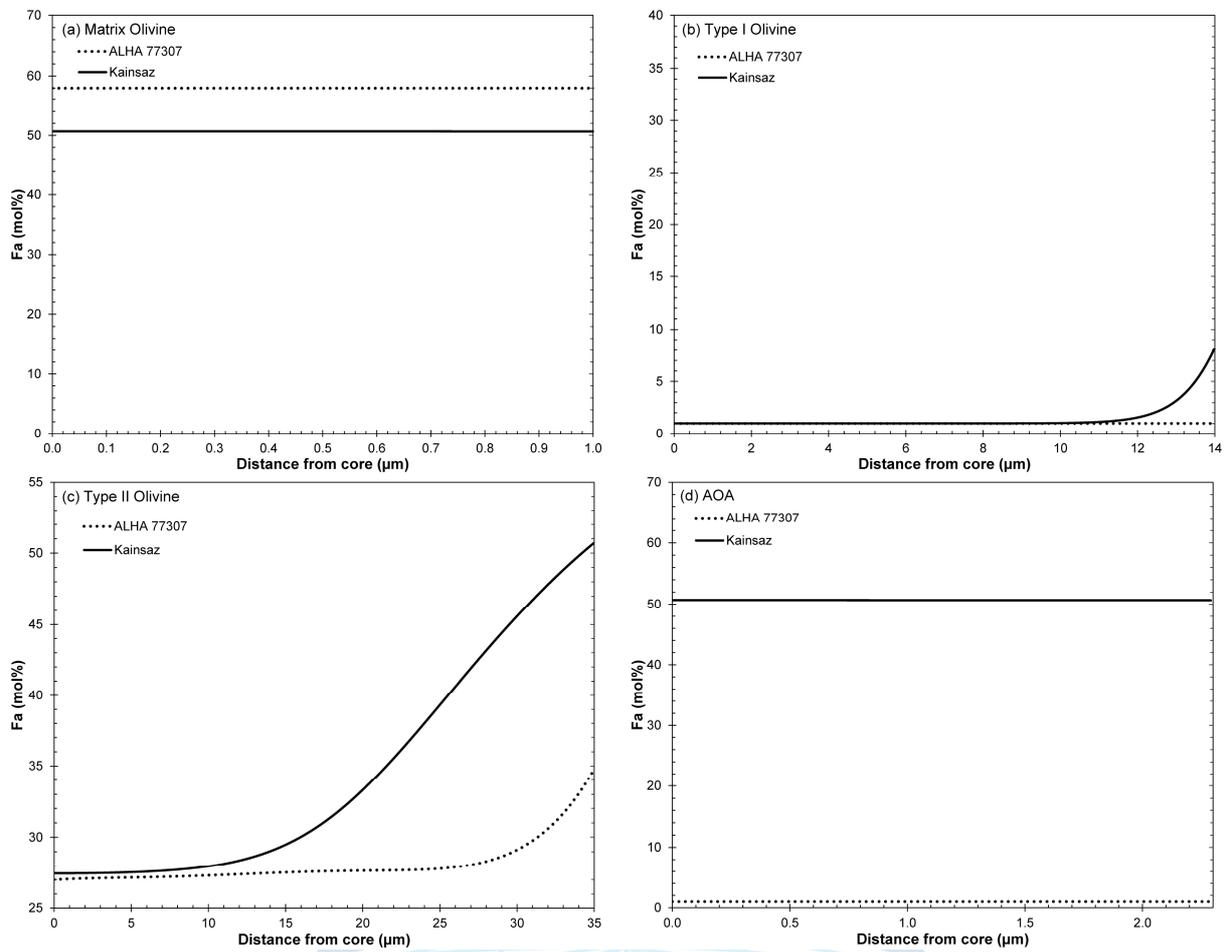


그림 71. Type I 콘드롤 감람석 주변의 사방휘석이 Fe-Mg 교환을 방해할 수 있다는 점에 착안한 수정 모델. Type I 콘드롤 감람석의 프로파일이 Kainsaz의 실제 데이터에 부합하나 AOA 감람석의 경우 Fa값이 여전히 실제 데이터와 맞지 않음

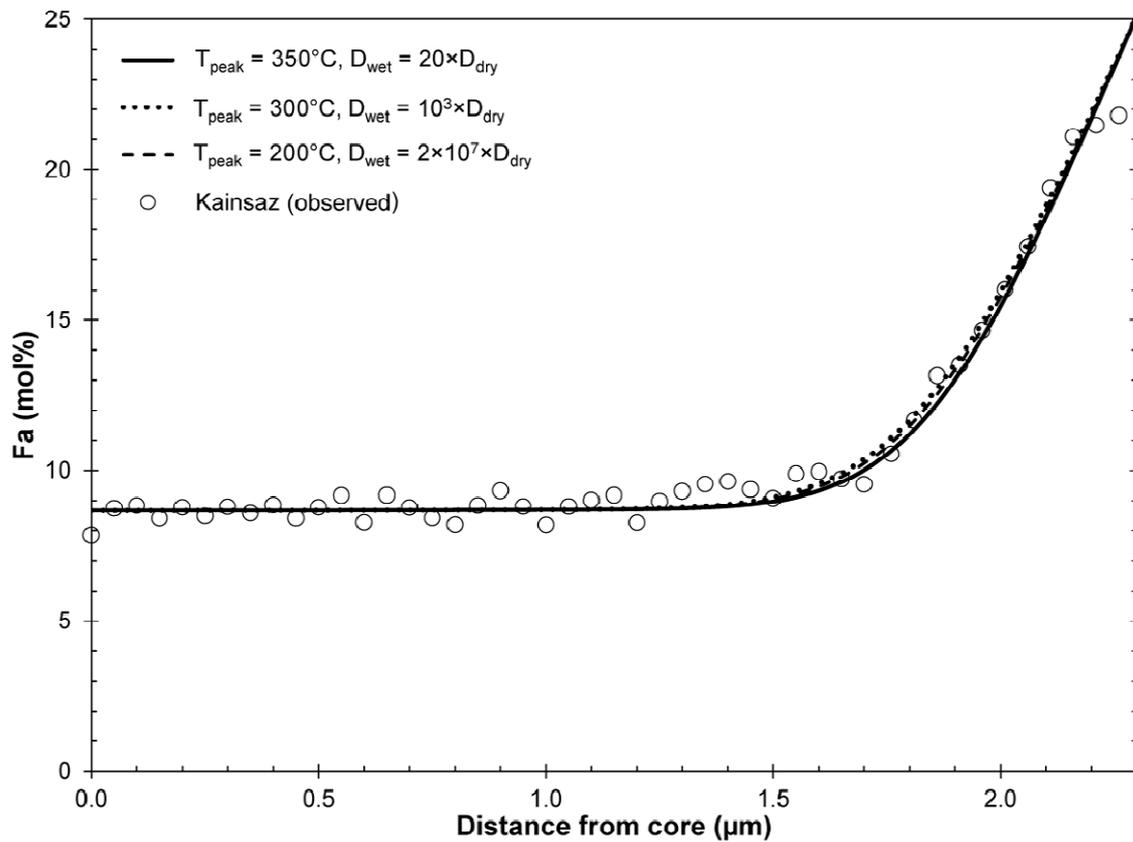
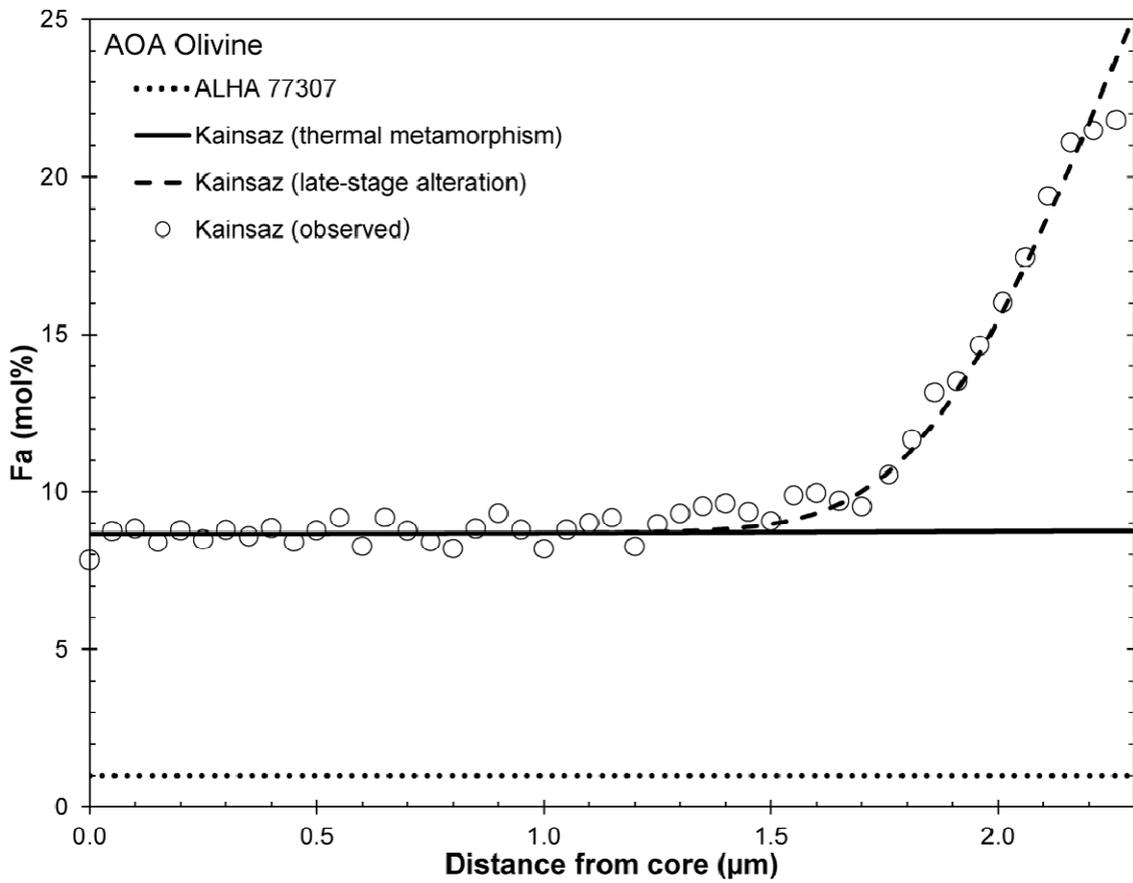


그림 72. AOA 감람석의 분석 데이터를 설명하기 위해서 열변성 후 수성변질을 가정하여 얻은 모델 프로파일(위)과 수성변질 온도에 따른 확산 프로파일(아래). 함수 상태에서의 확산 계수 ( $D_{\text{wet}}$ )가 무수 상태( $D_{\text{dry}}$ )의 약 20배인  $350^{\circ}\text{C}$ 가 가장 적합한 수성변질 온도

○ 카보네이셔스 콘드라이트내 칼슘-알루미늄 부화물의 동위원소 분석

- 남극운석 TIL 07007과 TIL 07003을 포함한 카보네이셔스 콘드라이트내 세립질 칼슘-알루미늄 부화물(fine-grained Ca-Al-rich inclusions; FGIs)에 대한 광물학 및 동위원소 연구를 NASA 연구진과 공동 수행
- 극지연에서 광물화학 분석 및 암석학 연구, NASA에서 광물 미세구조 연구, UCLA와 일본 북해도대학에서 각각 TIL 07003과 TIL 07007의 알루미늄-마그네슘 동위원소 분석 수행
- 광물학적 연구와 열역학 계산을 통해 FGI는 태양계 성운 가스에서 응축(condensation)에 의해 만들어진 것이 명백함
- 알루미늄-마그네슘 동위원소 분석을 통해 초기  $^{26}\text{Al}/^{27}\text{Al}$  동위원소 비가 기존에 알려진 값( $5 \times 10^{-5}$ )의부터 그보다 작은 작은  $(4.1\sim 4.8) \times 10^{-5}$ 의 분포를 보임
- 이는 약 40만년 정도의 차이로 태양계 초기 가스에서 광물이 형성되는 시기가 최소 40만년간 지속되었음을 보여줌

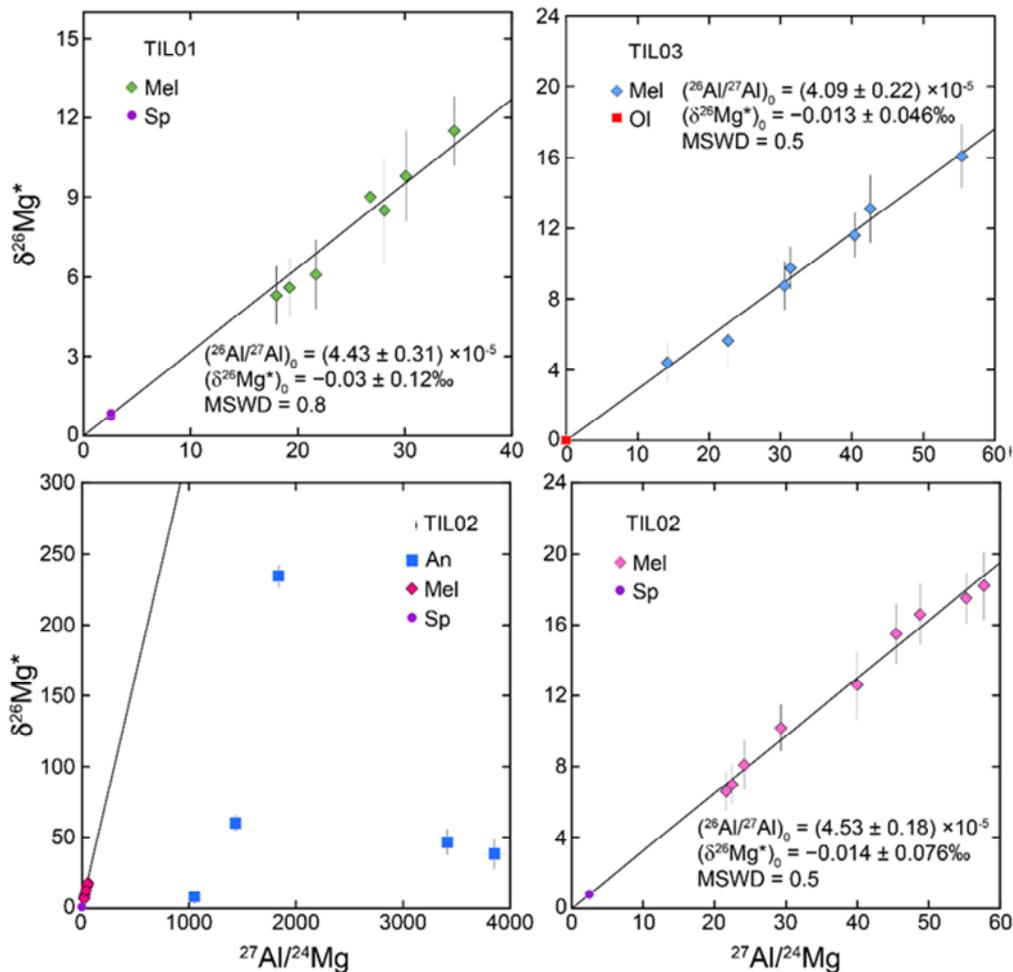


그림 73. 북해도대학에서 분석한 TIL 07007 CV3 콘드라이트내 FGI의 Al-Mg 진화 다이어그램

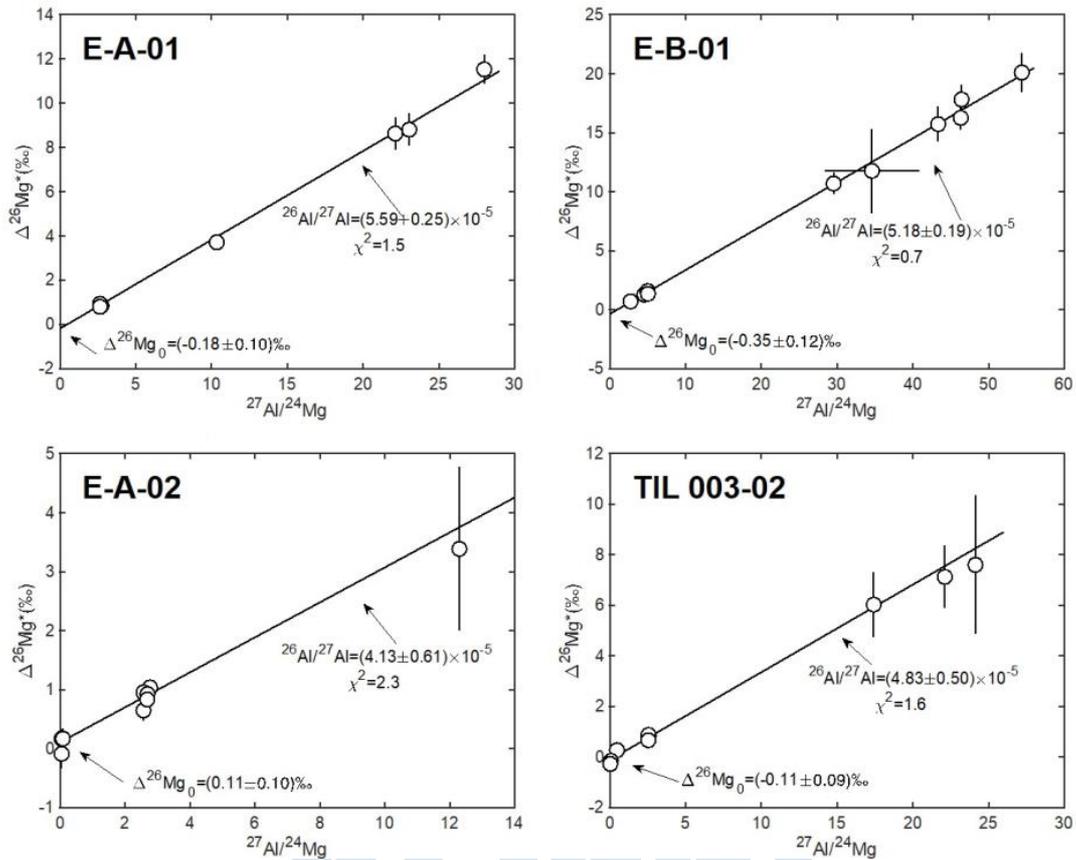


그림 74. UCLA에서 분석한 TIL 07003과 Efremovka CV3 콘드라이트내 FGI의 Al-Mg 진화 다이어그램

○ 태양계 성운에서 일어나는 광물간 동위원소 확산 모델링

- 태양계 성운의 고온에서 단시간에 일어나는 광물간 동위원소 교환 및 확산 수치 모델 개발
- 모델 구현을 위해 1) 산소동위원소 교환 및 확산만 고려, 2) 최고 온도(peak temperature) 이후 냉각에 따른 확산(retrograde diffusion)만 고려, 3) 입자 경계에서의 확산 속도는 충분히 빨라서 경계 어느 지점에서든 산소동위원소 조성은 동일(fast grain-boundary diffusion)함을 가정
- 산소동위원소 조성이 수십 퍼센트까지 변화를 보이는 페로브스카이트(perovskite)를 대상으로 모델링 수행
- 페로브스카이트(perovskite;pv)가 멜릴라이트(melilite) 내부에 존재하고, 멜릴라이트, 페로브스카이트의 초기 산소동위원소 조성은 각각  $\delta^{18}\text{O}_{\text{melt}} = -3 \text{‰}$ ,  $\delta^{18}\text{O}_{\text{pv}} = -45 \text{‰}$ 로 설정함
- 최고 온도 ( $T_{\text{peak}}$ )는 1483K, 냉각속도는 5 K/hr에서 10000 K/hr로 수행하였음
- 모델링 수행 결과, 멜릴라이트 내의 페로브스카이트의 산소동위원소 조성은 냉각속도가 시간당 100~500도로 추정됨 (모델링 코드는 부록 참조)

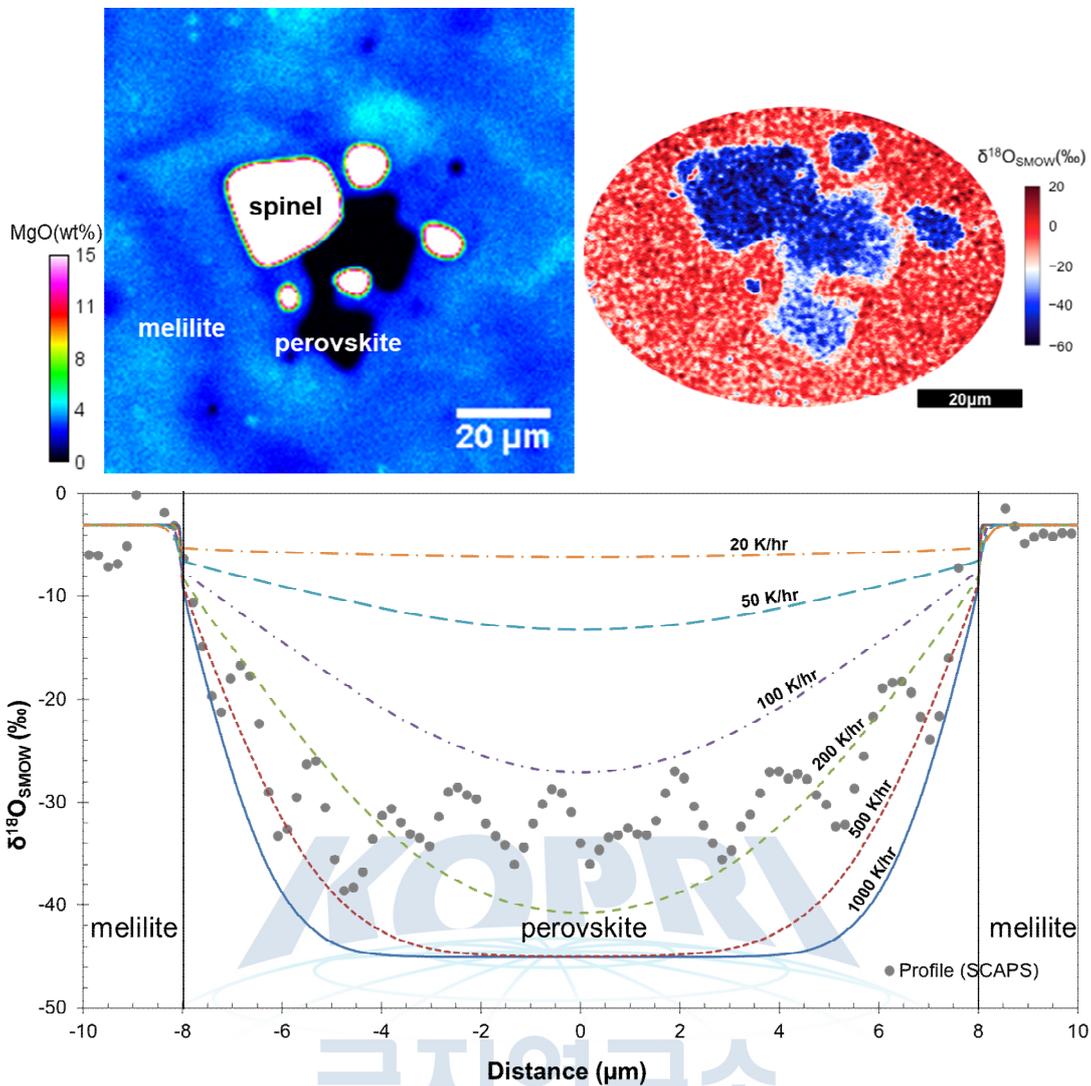


그림 75. 칼슘-알루미늄 부화물(CAO)에서 산출되는 페로브스카이트와 산소동위원소 조성 변화와 확산 모델링 결과

- 소행성에서 열변성에 의한 광물간 마그네슘 동위원소 교환 및 확산 모델링
  - 소행성에서 열변성에 의해 장시간에 걸쳐 일어나는 광물간 마그네슘 동위원소 교환 및 확산 수치 모델 개발
  - 칼슘-알루미늄 부화물의 구성광물인 사장석, 스피넬, 디옵사이드, 멜릴라이트가 최대 열변성이 섭씨 600도에서 10만년간 지속되는 경우를 가정하여 모델링 수행
  - $^{26}\text{Mg}$ 의 초기값은  $^{26}\text{Al}/^{27}\text{Al}$ 의 초기값이  $5.25 \times 10^{-5}$ 임을 가정하고,  $^{27}\text{Al}/^{24}\text{Mg}$ 가 사장석, 스피넬, 디옵사이드, 멜릴라이트가 각각 300, 2.5, 2.6, 18로 가정하여 계산
  - 구성 광물간 동위원소 교환과 확산이 거의 균질화되어  $^{26}\text{Mg}$ 의 값이 거의 완전히 리셋되는 것을 확인할 수 있음
  - 따라서 소행성에서 열변성을 받은 일부 CV 콘드라이트의 경우에는 Al-Mg 시스템을 이용해서 상대연령 측정에 사용해서는 안된다는 것이 확인됨

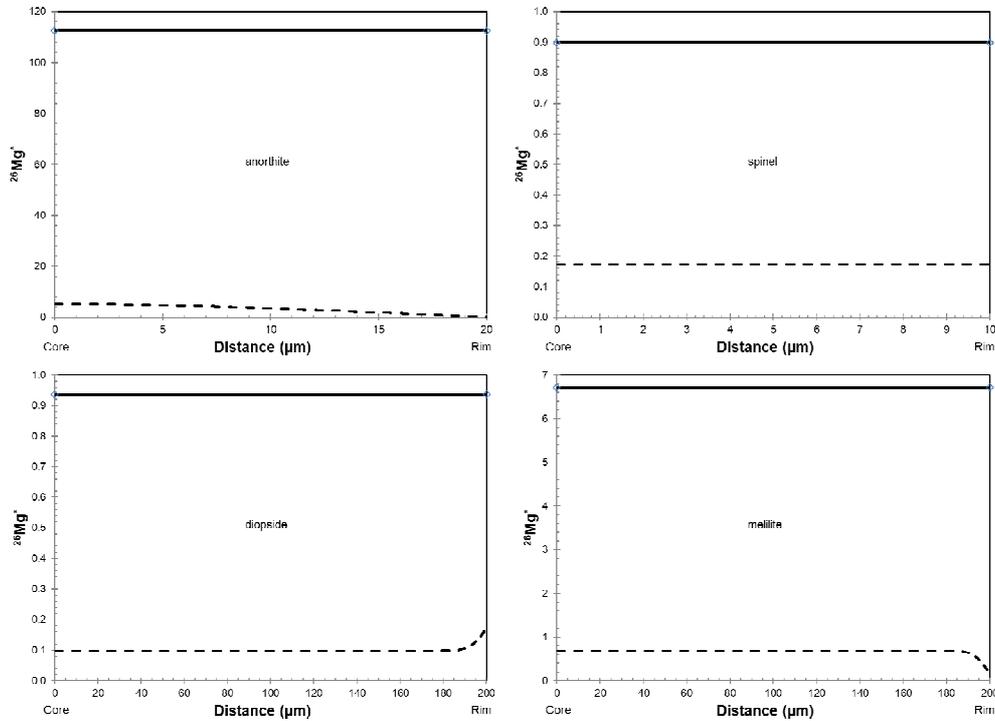


그림 76. 소행성에서 열변성에 의해 사장석, 스피넬, 디옵사이드, 멜릴라이트간 마그네슘 동위원소 교환과 확산 모델링 결과

- 소행성 류구(Ryugu) 회수 시료 국제공동연구 참여
  - 일본 하야부사2 프로젝트(소행성 류구 샘플 리턴 미션)의 국제공동연구팀에 참여하여 태양계 탐사와 우주물질 큐레이션 및 연구에 대한 귀중한 정보 획득
  - 연구 결과는 Science, Science Advances, Astrophysical Journal Letters, Geochemical Perspectives Letters 등에 게재 또는 게재 승인됨

### 3. 북빅토리아랜드 지체구조 진화

#### 3.1. 판구조적 속도구조 및 지자기연대 모델링

- 지각/맨틀 3차원 속도 구조 연구
  - 격자구조를 고려한 가상의 체크보드 속도 분포에 대한 해상도 분석
  - DB로 구축된 원격지진자료를 이용하여 3차원 모델 도출
  - 새롭게 개발된 모델에서는 polar 3지역에 대한 명확한 구조를 볼 수 없음
  - 2단계에서 새롭게 지진관측소가 확충되면 Polar 3 하부의 속도 구조를 알 수 있을 것으로 기대됨

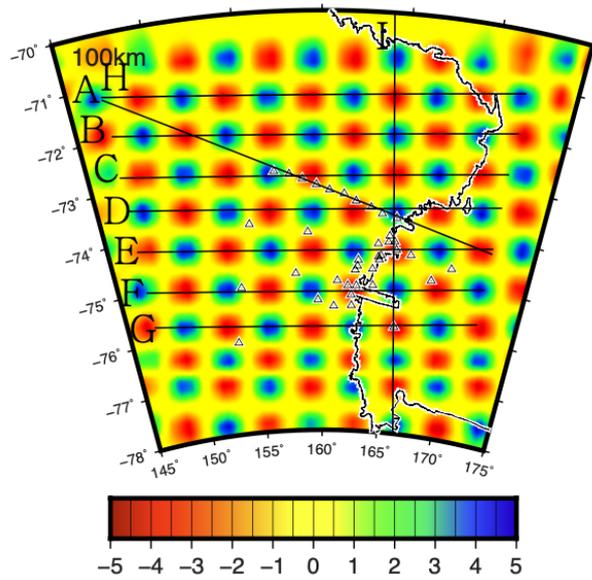


그림 77. 3차원 격자 구조에 인위적인 체크보드 속도 모델을 주어 해상도 테스트를 위한 입력 모델

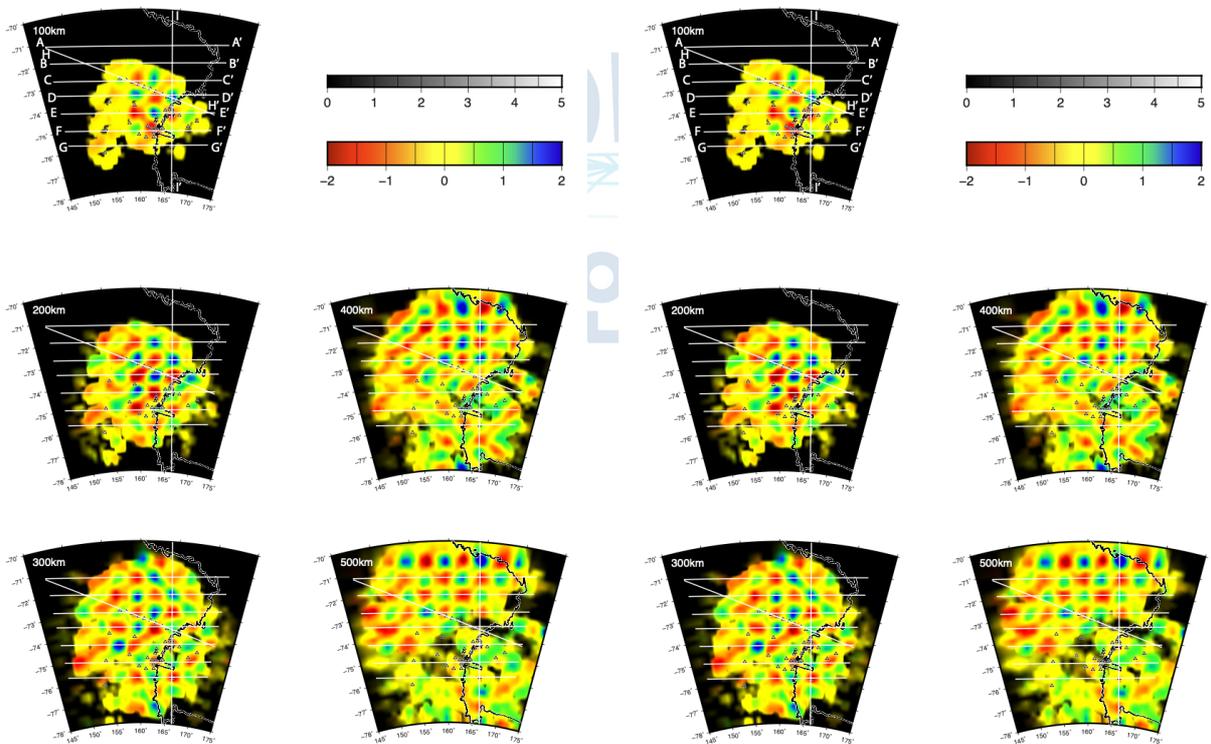


그림 78. 입력 모델과 관측된 지진파형 자료의 지원 위치를 이용하여 시뮬레이션 결과값. 입력 체크보드 모델에 대한 실제 역산 결과. 상대적으로 지진파가 조밀하게 들어오는 100~200km 깊이는 좁은 지역에 대한 최적해상도를 보임. 연구지역의 핵심인 Polar3 지역은 지진관측망이 없어서 깊이 200km에 대한 맨틀 속도구조는 알 수 없음

그림 79. 입력 모델과 관측된 지진파형 자료의 지원 위치를 이용하여 시뮬레이션 결과값. 입력 체크보드 모델에 대한 실제 역산 결과. 상대적으로 지진파가 조밀하게 들어오는 100~200km 깊이는 좁은 지역에 대한 최적해상도를 보임. 연구지역의 핵심인 Polar3 지역은 지진관측망이 없어서 깊이 200km에 대한 맨틀 속도구조는 알 수 없음

○ 북빅토리아 랜드 지역 3차원 속도 구조 모델 개발

- 미국 TAMNNET 연속 지진파형 자료 획득 및 원격지진 신호 분류
- 장보고 기판 관측망 자료와 TAMNNET 관측망(그림 80) 자료를 합하여 3차원 속도 모델 역산 (그림 81)
- 역산된 속도 모델(그림 81)에서 유추할 수 실제 속도 이상 모델을 3차원으로 재현하여 해상도 테스트를 위한 입력 자료 모델링
- 새롭게 개발한 입력모델을 통하여 Terror rift 하부의 맨틀 속도 구조 유추

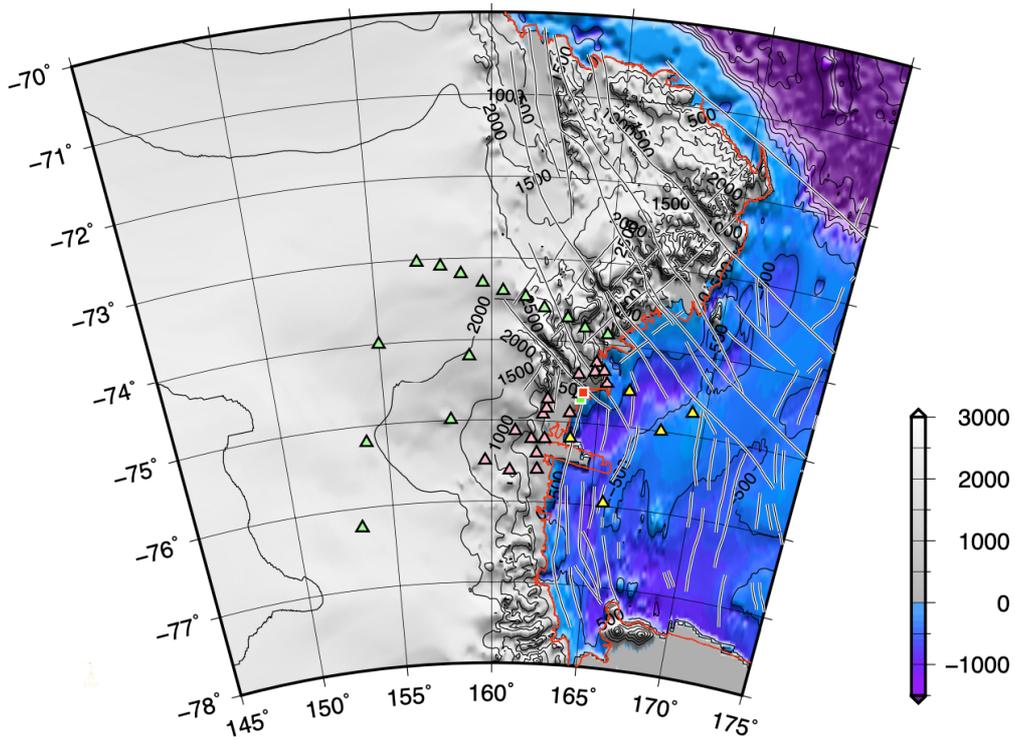


그림 80. 3차원 속도 모델에 사용된 미국 TAMNNET 지진관측망 (초록색 삼각형), 장보고기지 기반 광대역 지진관측망 (분홍색 삼각형), 해저면 지진관측소 (노란색 삼각형) 위치

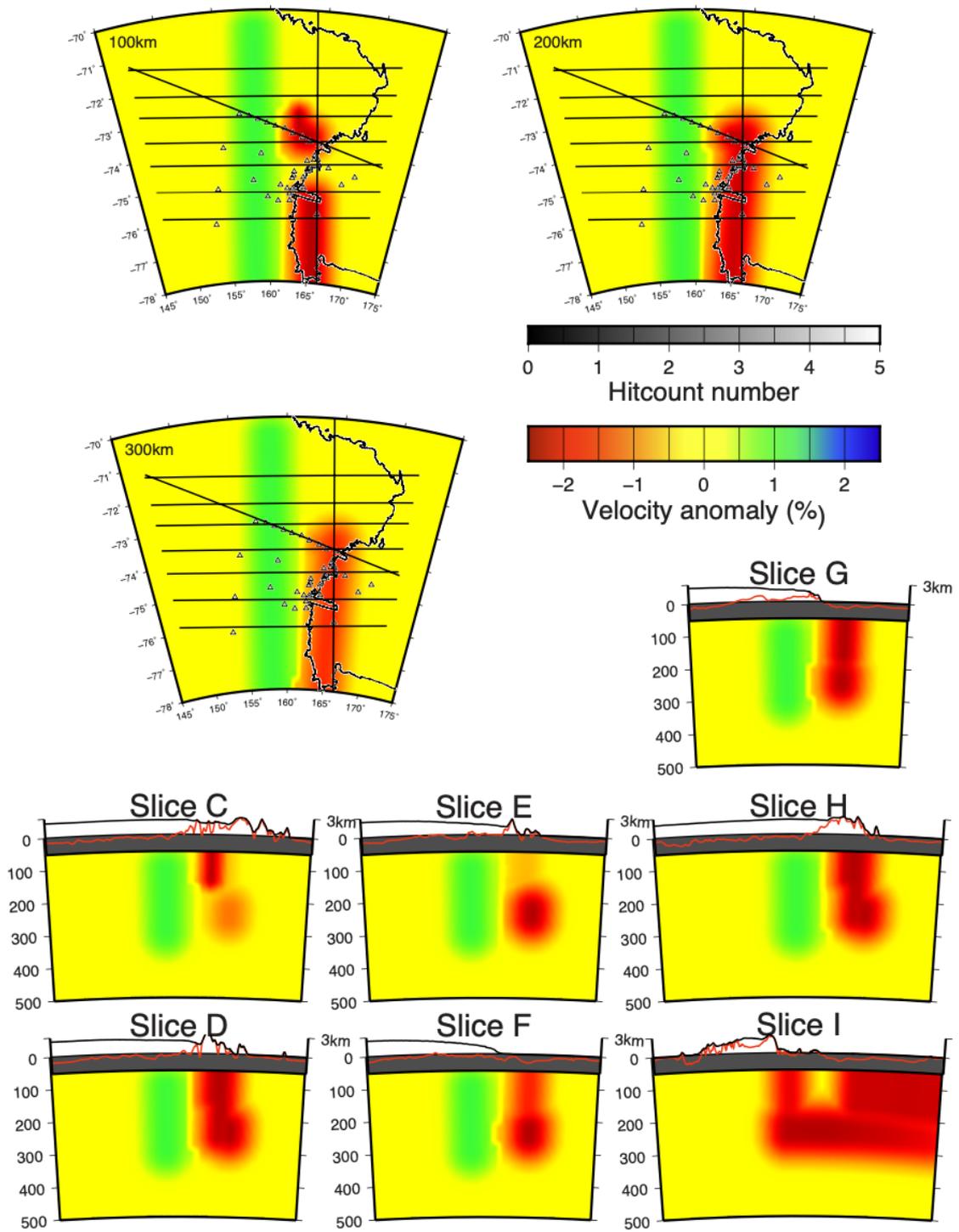


그림 81. 역산된 모델의 해상도 테스트를 실시하기 위하여 고안된 3차원 맨틀 속도 이상 입력 모델

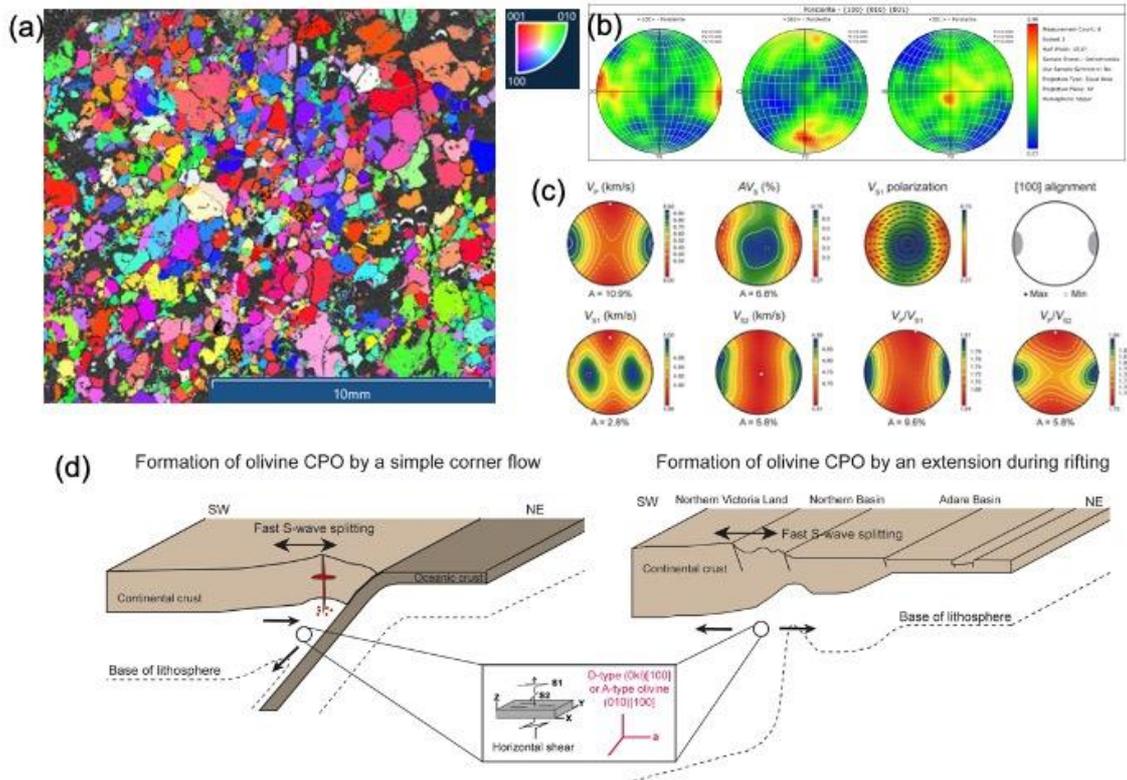


그림 82. 맨틀포획암 분석결과 (a) EBSD 정밀분석 결정방향성 지도: 10  $\mu\text{m}$  step size로 박편 전체를 스캔함, (b) 극점도 다이어그램(pole figure), (c) 지진파 이등방성 계산결과, (d) 맨틀포획암 형성 모델. 지진파 이등방성 계산결과와 맨틀포획암 형성모델은 2022년에 고안되기 전 데이터로 Kim et al. (2021)에서 발췌함

### 3.2. EBSD 데이터 획득 및 변형모델 수립

- 암석의 EBSD 정밀분석 및 결정방향성 도시
  - 정밀 EBSD 결정방향성 지도 (10  $\mu\text{m}$  step size) 제작
  - 광물 및 암석의 지진파 이등방성 특성 파악
  - 기보고된 지진파 이등방성과 계산된 광물 및 암석의 지진파 이등방성 특성의 비교 및 맨틀구조 모델 고안
  - 새롭게 고안된 맨틀구조 모델로 논문 작성 중임

### 3.3. 암석절대연령 측정

- 북빅토리아랜드 주요 기반암 절대 연령 측정(암석 14개 시료 결과 KPDC 등록)

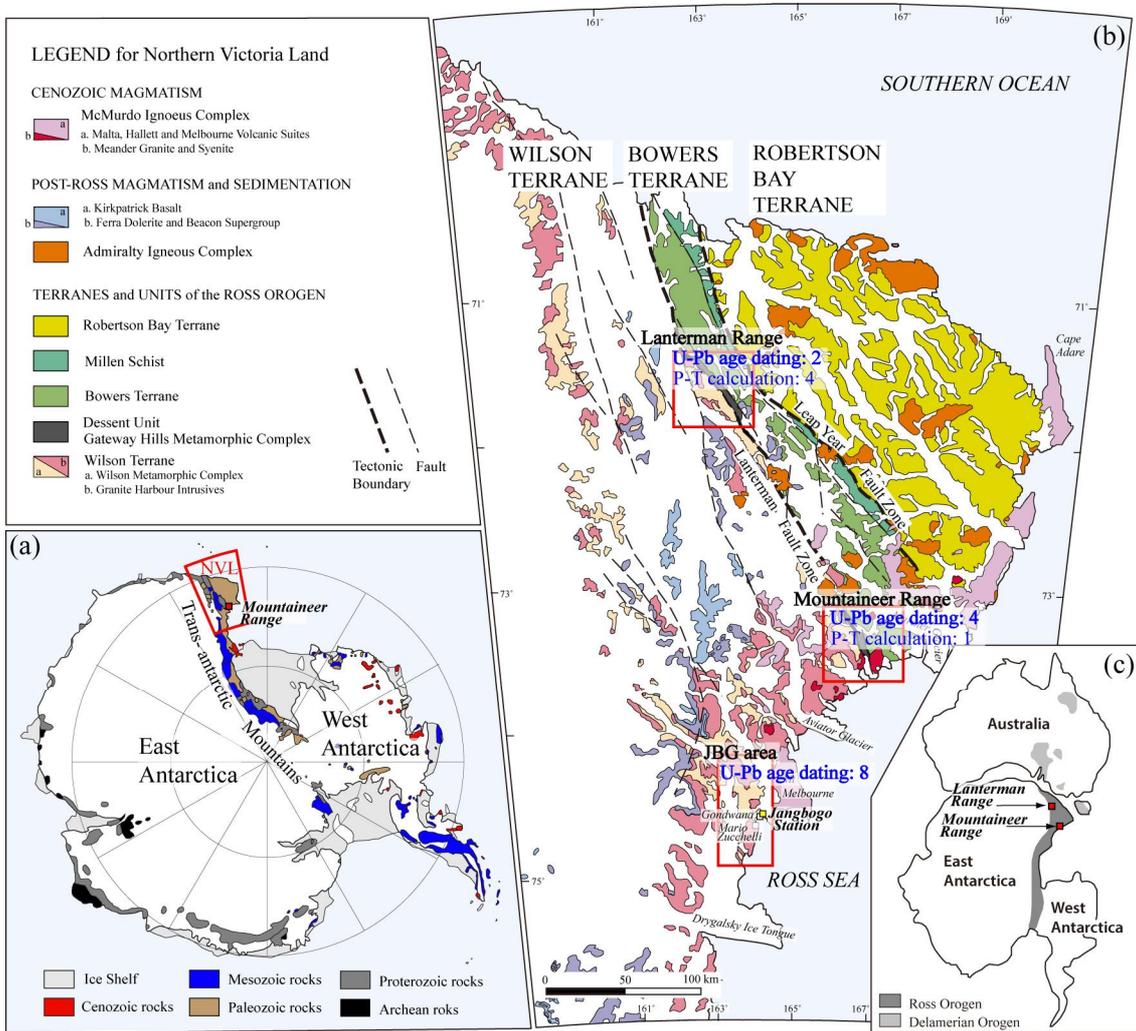


그림 83. 남극대륙과 북빅토리아랜드의 지질 및 북빅토리아랜드 지체구조. (a) 남극대륙의 지질, (b) 북빅토리아랜드 랜터만레인지, 마운트니어레인지, 장보고과학기지(JBG) 권역에서의 연대분석 및 변성 압력(P)-온도(T) 자료 KPDC 등록 실적. (c) 중생대말/신생대초 남극-호주 대륙 위치: 고생대 로스-델라머리안 조산대의 분포. [지질도 출처: Capponi et al., 1997, Yi et al., 2019a]

○ 랜터만레인지 암석 연대분석 결과

- 북빅토리아랜드 윌슨-바워스 테레인 경계부인 랜터만레인지의 에클로자이트(eclogite): Kim et al.(2019)에 의해 시료 E-1a의 변성작용과 시기는 약 515 Ma, 500 Ma로 보고. 저어콘 과성장 외연부와 가장자리로부터 두 차례의 캄브리아기 변성시기 도출. 본 연구에서는 시료 E-1a와 E-1c의 저어콘 핵(core)에 대한 SHRIMP U-Th-Pb 동위원소 분석 결과, 각각  $591 \pm 5$  Ma(n=12; MSWD=0.91;  $t\sigma$ )와  $605 \pm 5$  Ma(n=10; MSWD=1.35;  $t\sigma$ )의 가중평균연령 획득. 신원생대 후기 반려암질 모암의 마그마 정치시기 지시

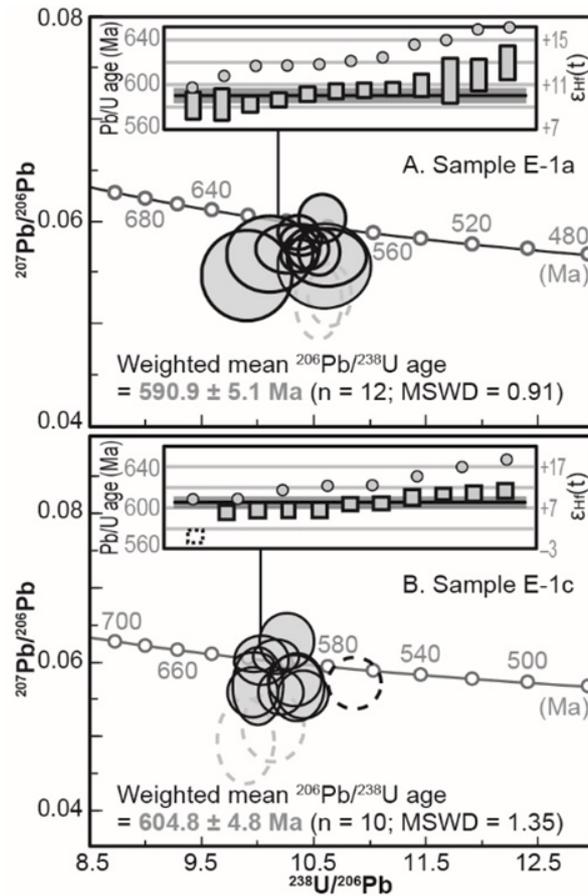


그림 84. 렌터만레인지 에클로자이트 시료 E-1a(A)와 E-1c(B)의 SHRIMP U-Pb 연령

○ 마운트니어레인지 암석 연대분석 결과

- 머치슨 혼성암질 편마암(SB171122-3)은 530~480 Ma 기간 동안 변성작용을 경험하였고 ~500 Ma에 높은 등급의 변성작용(예: 혼성암화)을 경험함. 또한 변성작용의 열적 양상(티타나이트 U-Pb 폐쇄온도)은 470~460 Ma 까지 지속됨
- 머치슨 혼성암질 편마암(SB171122-3)의 쇄설성 저어콘 연령(총 71개 일치 연령): ~2450 Ma(n=2), ~2250 Ma(n=2), ~1670 Ma(n=2), ~1400 Ma(n=1), 1100-1000 Ma(n=19), 950-900 Ma(n=6), ~800 Ma(n=5), 650-600 Ma(n=6), 562.4±6.0 Ma(n=11)
- 즉 머치슨 편마암은 신원생대말(Ediacaran: 560 Ma)-고생대초(early Cambrian: 530 Ma)에 원암(퇴적암)이 형성된 후 중·후기 캄브리아기(500-480 Ma)에 이르러 혼성암질 편마암으로 변성됨

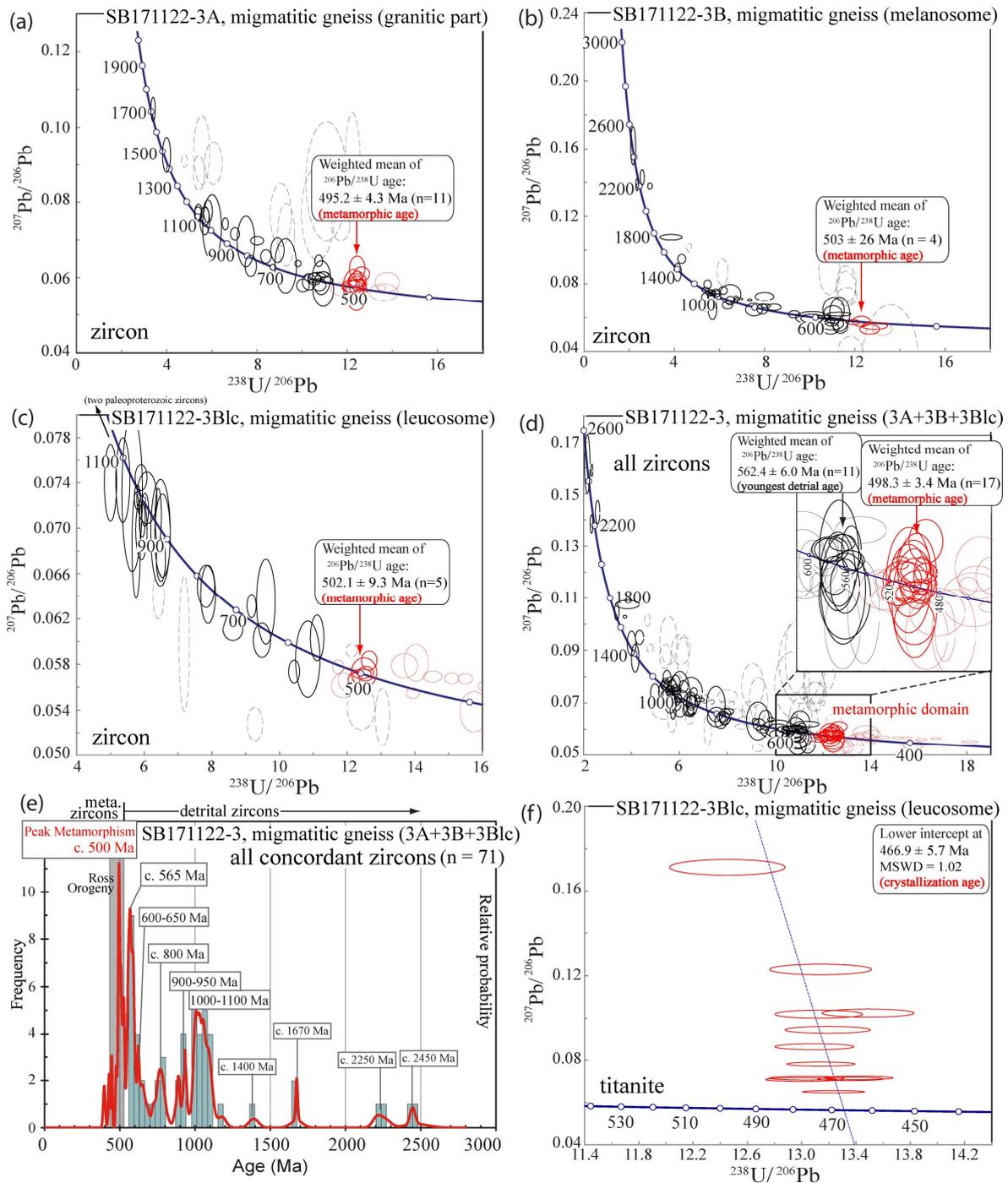


그림 85. 마운티니어레인지 머치슨 편마암에서의 SHRIMP U-Pb 연령. (a) 혼성암질 편마암 (SB171122-3A, 화강암질) 저어콘 연대, (b) 혼성암질 편마암(SB171122-3B, 우흑질부) 저어콘 연대, (c) 혼성암질 편마암(SB171122-3B1c, 우백질부) 저어콘 연대, (d) 혼성암질 편마암 (SB171122-3A+3B+3B1c 전체) 저어콘 연대 종합, (e) 혼성암질 편마암(SB171122-3A+3B+3B1c 전체) 저어콘(쇄설성, 변성 저어콘) 일치 연대 종합, (f) 혼성암질 편마암(SB171122-3B1c, 우백질부) 티타 나이트 연대

○ 장보고기지권역 암석 연대분석 결과

- 장보고기지권역 고생대 로스조산운동 변성암(SB171127-1D, SB171105-2)과 화성암(J-58, SB171116-6C, J-46-1, SB171116-1, 141215-1, 141215-4)의 SHRIMP 저어콘 U-Pb 절대연령을 획득

- 율슨 변성암 복합체:
  - 압쇄질 준편마암(SB171127-1D): <700 Ma(원암형성연령), 530-490 Ma(변성연령)
  - 혼성암질 준편마암(SB171105-2): <560 Ma(원암형성연령), 530-490 Ma(변성연령)
- 테라노바 관입암 복합체:
  - 브라운닝 유닛(~500 Ma), 애봇 유닛(~480 Ma), 캠벨 유닛(485-475 Ma)으로 분류됨
- 장보고기지권역 로스조산운동의 주요 활성화 시기는 530-470 Ma로 확인됨

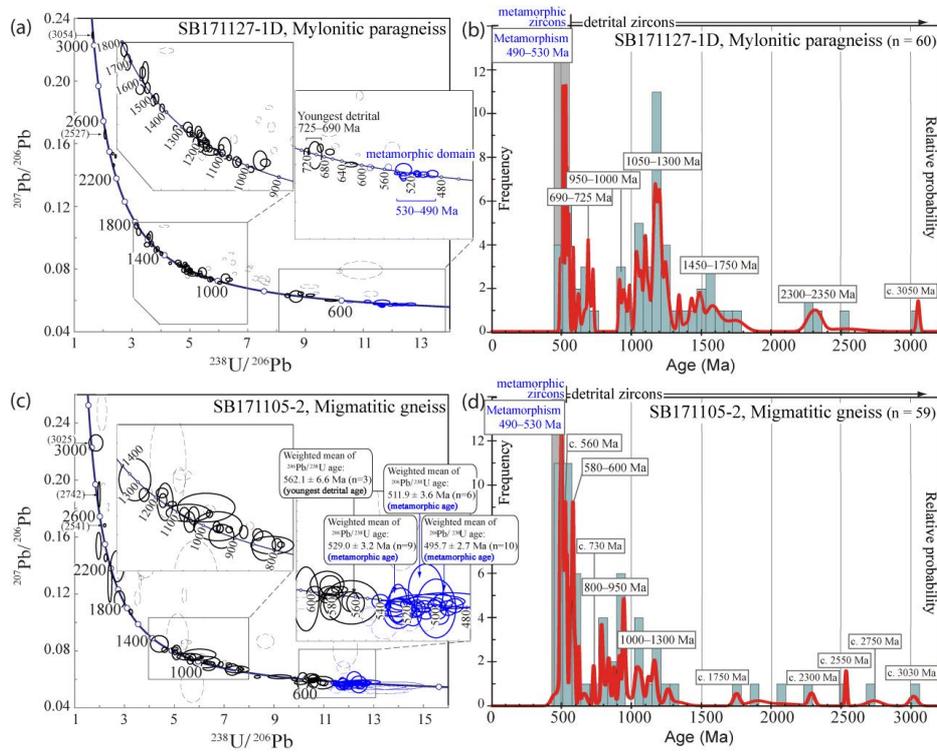


그림 86. 장보고기지권역 편마암류의 SHRIMP 저어콘 U-Pb 연령. (a, b) 압쇄암질 편마암(SB171127-1D), (c, d) 혼성암질 편마암(SB171105-2)

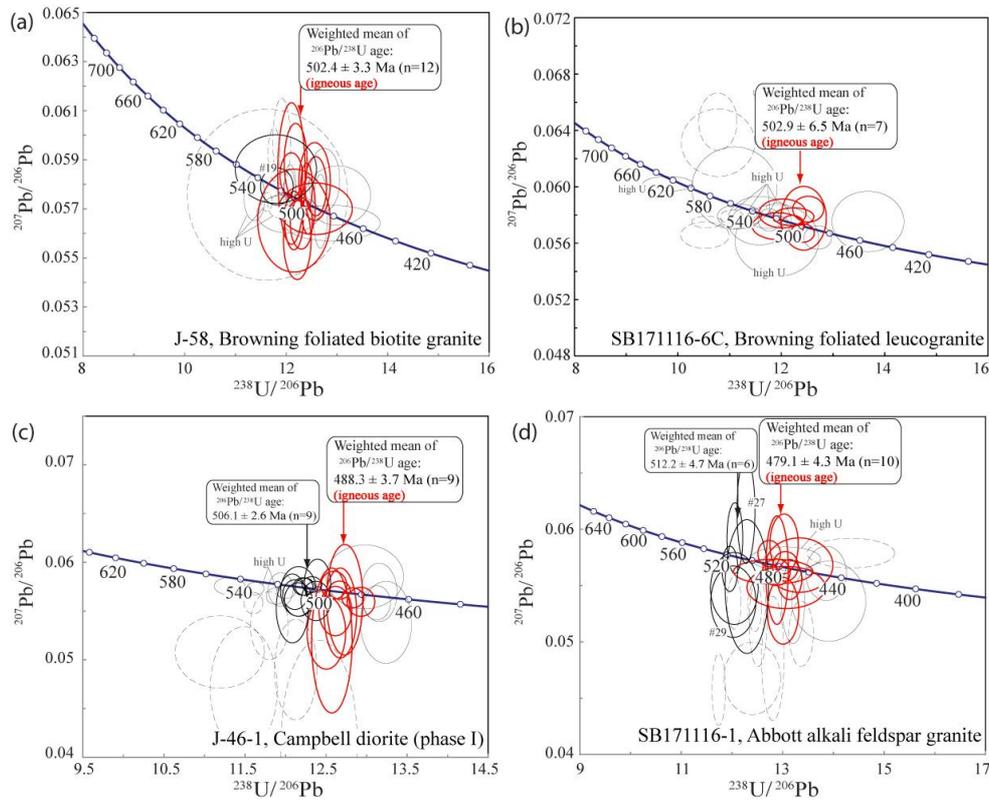


그림 87. 장보고기지권역 관입암류의 SHRIMP 저어콘 U-Pb 연령. (a) 브라운링 엽리상 흑운모 화강암(J-58), (b) 브라운링 엽리상 우백질 화강암(SB211116-6C), (c) 캠벨 섬록암(J-46-1), (d) 애봇 알칼리장석 화강암(SB171116-1)

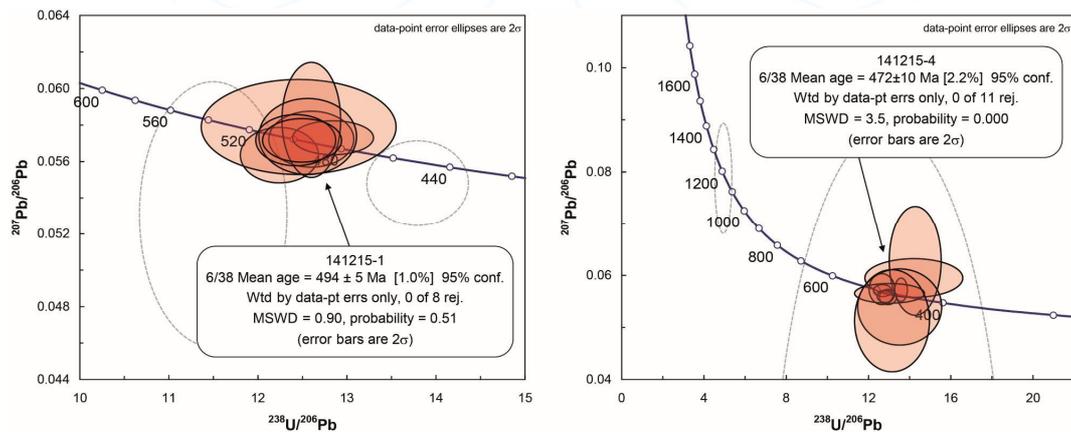


그림 88. 장보고기지권역 관입암맥의 SHRIMP 저어콘 U-Pb 연령. (a) 고철질 암맥 (141215-1), (b) 화강암질 암맥(141215-4)

### 3.4. 지구조형성 모델

- 북빅토리아랜드 형성을 이해하는데 가장 중요한 윌슨-바워스 테레인 경계부 고압 변성암류에 대한 지구화학-지구연대학적 연구결과를 논문으로 작성, 투고하여 게재 승인됨 (Kim et al., accepted, Terra Nova)
- 신원생대 후기 대륙열곡대 발달에서 에디아카라기-캠브리아기 해양지각 섭입과 관련된

로스 조산운동 시작에 이르는 기간 동안의 지구조진화사를 이해하고자 함.

빅토리아랜드의 에클로자이트 내 화성기원 저어콘의 600–590 Ma 연대를 호주 남동부의 600–580 Ma 대륙열곡대 화산암류와 대비함

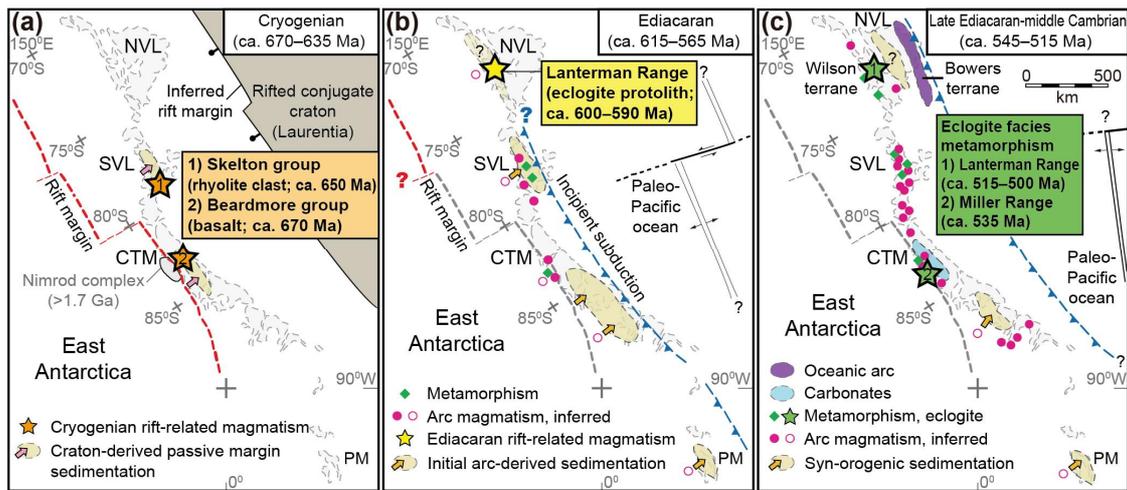


그림 89. 북빅토리아랜드(NVL) 테라인 경계부의 600–590Ma 대륙열곡활동 및 이후의 로스 조산운동을 모식적으로 나타낸 지질도 [Kim et al., accepted]

### 3.5. 암석 및 운석 DB 구축, 분류, 등록, 정보공개

- 암석 데이터베이스(30개 이상) KPDC 등록
  - KOPRI Polar Rock Database 홈페이지(<https://rock.kopri.re.kr>) 통한 암체 주요 정보 DB(샘플위치, 암석명, 지질시대 등) 제공 및 KPDC와의 연동. 지도를 통한 위치 정보 가시화
- 지질노두 3D모델 3건 제작
  - Oscar Pont, Shield Nunatak, Edmonson Point
  - KOPRI Polar Rock Database 홈페이지(<https://rock.kopri.re.kr/3dmodels>)에 공개

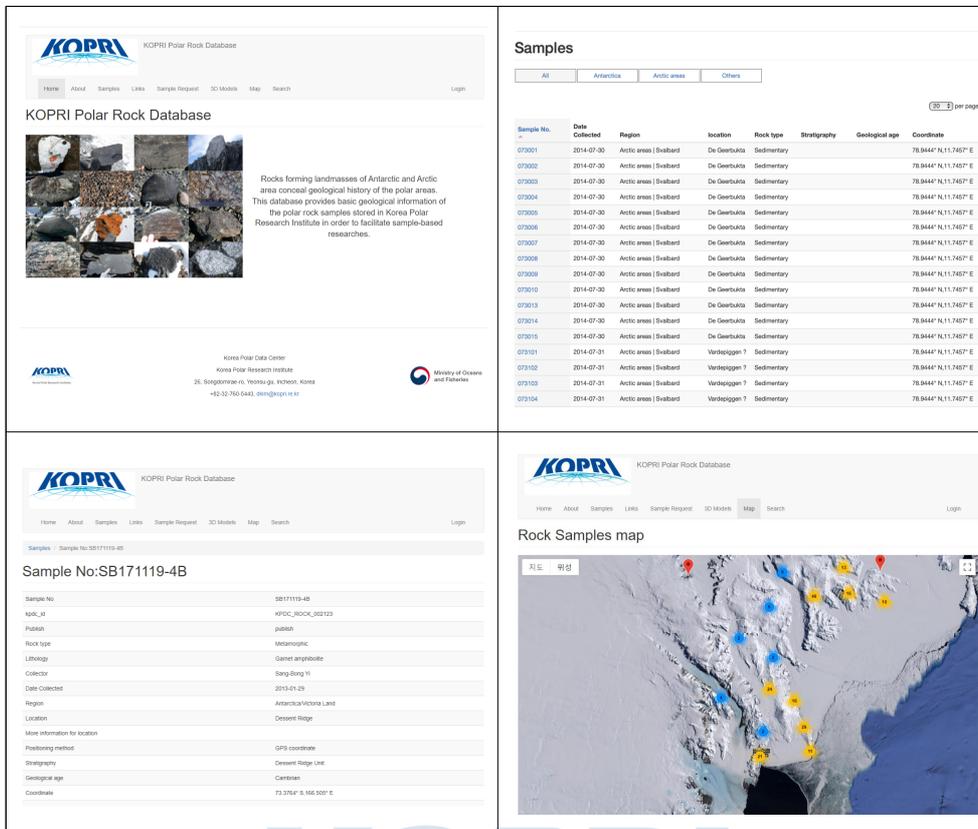


그림 90. KOPRI Polar Rock Database 통한 암체 주요 정보 제공. 지도를 통한 위치 정보 가시화

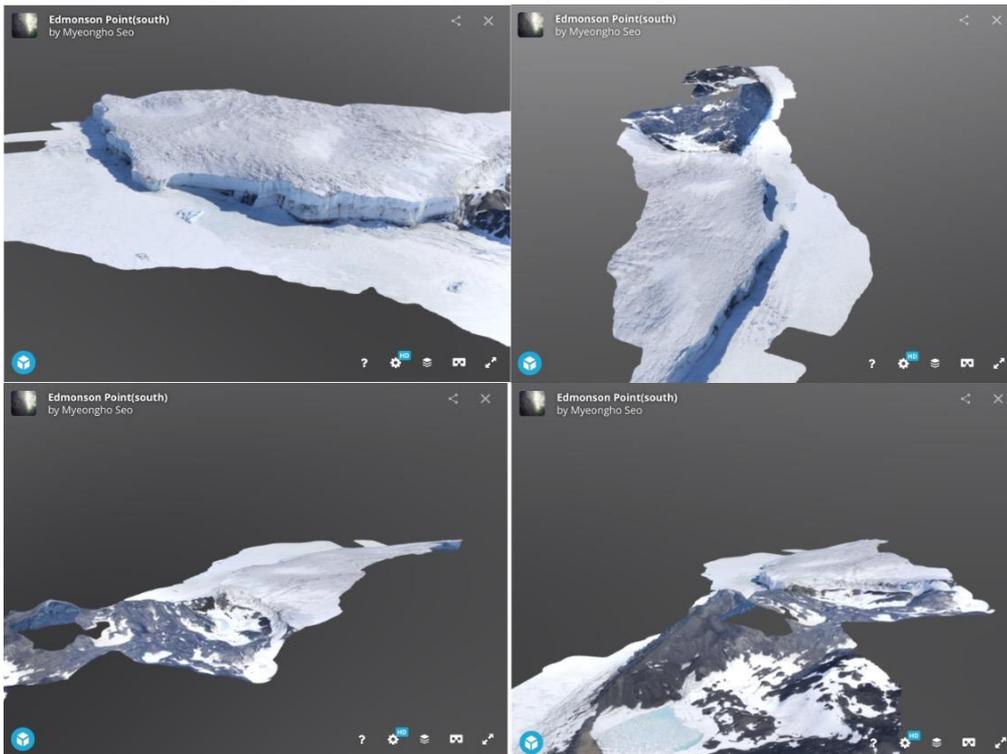


그림 91. 주요노두 3D 지형모델 제작 및 KOPRI Polar Rock Database 홈페이지에 공개

○ 남극운석 분류

- 전자현미경을 이용한 고배율 관찰로 일부 운석에서만 산출되는 특정 광물 탐색
- 전자현미분석기를 이용해 감람석, 휘석, 사장석 등 주요 광물 화학조성을 모든 운석에서 약 20-100개 지점에서 분석 수행
- 2015-16 시즌 남극 빅토리아랜드 운석탐사를 통해서 획득한 시료 166개의 운석 분류 결과와 오디너리 콘드라이트를 제외한 운석들의 암석학적, 광물화학적 분석 결과를 보고서로 작성하여 남극운석 큐레이션 홈페이지에 게시  
([https://koreamet.kopri.re.kr/deepzoom/Classification\\_KOREAMET15.pdf](https://koreamet.kopri.re.kr/deepzoom/Classification_KOREAMET15.pdf))
- 166개의 운석은 각각 오디너리 콘드라이트 143개, 카보네이셔스 콘드라이트 11개, 엔스터타이트 콘드라이트 4개, HED 운석 7개, 철운석 1개로 분류되며 이중 오디너리 콘드라이트를 제외한 23개에 대한 정밀 분류 실시함
- 카보네이셔스 콘드라이트 11개 중 모천체에서 수성 변질을 받은 CM 콘드라이트가 8개, 열변성 정도가 높고 그래파이트가 포함된 CK 콘드라이트가 3개임
- 엔스터타이트 콘드라이트 4개 중 철이 많이 포함된 EH 콘드라이트는 2개, 상대적으로 철이 적은 EL 콘드라이트는 2개임
- HED 운석 7개 중 모천체의 심부 지각에서 기원한 디오제나이트는 3개, 화산암 조성의 유크라이트는 4개임.
- 유크라이트 EET 15101은 내부에 카보네이셔스 콘드라이트 조성의 이물질이 포함되어 있어 태양계 초기 소행성간 충돌과 행성의 형성과정을 이해하는데 도움이 될 것으로 기대
- 철운석은 Ni이 8 wt% 정도 포함되어 있어 운석임이 분명하나 조직이 매우 미세하고 미량원소 함량이 기준에 분류된 철운석들과 일치되지 않아 추가적인 분석이 필요함

Classification of the Antarctic Meteorites

Recovered by KOREAMET  
in 2015-16 Season

Changkim Park and Hwayoung Kim  
Curation of Antarctic Meteorites

Korea Polar Research Institute

Proposed name	Date	Latitude	Longitude	Mass	Class	Shock	Weathering	Fa	Fs	Wo
Elephant Moraine 15001	2015 Nov 23	76°15.390'S	150°36.479E	19.0	H6	S4	W1	19.4±0.33	17.2±0.30	1.3±0.19
Elephant Moraine 15002	2015 Nov 23	76°13.833'S	150°34.746E	11.4	H4	S2	W1	18.2±0.63	16.1±0.27	1.1±0.32
Elephant Moraine 15003	2015 Nov 23	76°13.785'S	150°34.728E	2.6	H5	S3	W1	18.6±0.39	16.3±0.23	1.4±0.19
Elephant Moraine 15004	2015 Nov 23	76°13.759'S	150°34.728E	1.4	LL6	S3	W1	29.4±0.33	20.7±0.39	1.5±0.20
Elephant Moraine 15005	2015 Nov 23	76°13.632'S	150°34.602E	2.0	H6	S1	W1	19.1±0.28	16.8±0.32	1.2±0.22
Elephant Moraine 15006	2015 Nov 23	76°13.406'S	150°34.948E	74.0	Eucrite, breccia					
								19.0±18.11	2.5±1.73	2.6±1.43
								(0.5-40.2)	(1.3-5.5)	(0.8-4.3)
Elephant Moraine 15007	2015 Nov 23	76°14.360'S	150°29.480E	134.6	CM2					
Elephant Moraine 15008	2015 Nov 23	76°14.424'S	150°29.716E	21.6	L3	S4	W1	26.3±2.67	17.5±6.87	1.0±1.14
Elephant Moraine 15009	2015 Nov 23	76°14.473'S	150°28.743E	6.2	H6	S3	W1	19.3±0.58	17.1±0.26	1.5±0.22
Elephant Moraine 15010	2015 Nov 23	76°14.458'S	150°28.713E	2.2	L6	S4	W1	24.6±0.33	20.7±0.51	1.2±0.16
								13.9±13.76	6.7±3.92	1.9±0.68
								(0.5-40.2)	(1.9-10.7)	(1.1-2.5)
Elephant Moraine 15011	2015 Nov 23	76°14.458'S	150°28.975E	0.5	CM2					
Elephant Moraine 15012	2015 Nov 23	76°14.457'S	150°29.265E	2.6	L6	S4	W1	24.6±0.47	20.7±0.18	1.3±0.15
Elephant Moraine 15013	2015 Nov 23	76°15.582'S	150°38.301E	120.4	H5	S2	W1	19.8±0.13	16.9±0.41	1.2±0.19
Elephant Moraine 15014	2015 Nov 23	76°15.378'S	150°38.695E	28.2	EH5					
								0.7±0.41	0.1±0.04	
Elephant Moraine 15015	2015 Nov 23	76°13.454'S	150°38.350E	903.0	L6	S4	W1	24.4±0.41	20.6±0.46	1.3±0.14
Elephant Moraine 15016	2015 Nov 23	76°13.434'S	150°35.170E	82.0	H5	S3	W1	18.5±0.19	16.5±0.10	1.3±0.11
Elephant Moraine 15017	2015 Nov 23	76°13.492'S	150°35.125E	107.0	L6	S4	W1	25.2±0.38	20.8±0.27	1.9±0.09
Elephant Moraine 15018	2015 Nov 23	76°13.982'S	150°28.542E	2253.0	L6	S4	W1	25.2±0.40	20.8±0.14	1.6±0.18
Elephant Moraine 15019	2015 Nov 23	76°14.102'S	150°28.416E	907.8	L6	S4	W1	25.1±0.11	20.9±0.35	1.5±0.25
Elephant Moraine 15020	2015 Nov 23	76°15.952'S	150°36.409E	1.7	H5	S2	W1	19.0±0.20	16.7±0.23	1.7±0.12
Elephant Moraine 15021	2015 Nov 23	76°15.785'S	150°36.484E	1.9	H5	S3	W1	20.0±0.51	17.1±0.22	1.2±0.22
Elephant Moraine 15022	2015 Nov 23	76°14.923'S	150°35.628E	79.1	H5	S4	W1	18.7±0.27	16.3±0.35	1.1±0.15
Elephant Moraine 15023	2015 Nov 23	76°14.205'S	150°34.881E	23.6	H5	S3	W1	19.0±0.38	16.6±0.37	1.2±0.21
Elephant Moraine 15024	2015 Nov 23	76°13.623'S	150°35.230E	1.4	H6	S4	W1	18.8±0.53	16.6±0.28	1.4±0.20
Elephant Moraine 15025	2015 Nov 23	76°13.477'S	150°35.450E	0.4	L6	S4	W3	24.7±0.23	20.9±0.22	1.5±0.22
Elephant Moraine 15026	2015 Nov 23	76°14.392'S	150°29.381E	24.5	L6	S4	W1	24.7±0.27	20.9±0.15	1.3±0.13

1

(2) EET 15084

-Petrography: The meteorite is a polymict breccia that contains fine-grained clasts and coarse-grained clasts. Fine-grained clasts show ophitic texture and coarse-grained clasts show gabbroic texture.  
-Mineral chemistry: low-Ca pyroxene, Fa55.4±3.3970±4.6±0.4, N=6; FeO/MnO mean=28.89; high-Ca pyroxene, Fa42.8±11.470±6.1±1.11 (Fa31.6-45.7)±5.4-7.4, N=3; FeO/MnO mean=29.02; plagioclase, An80.4±1.850±0.5±0.22, N=4



Figure 8. Three photomicro and cross-polarized light images of EET 15084 meteorite. The meteorite is brecciated with gabbroic clasts and fine-grained basaltic clasts.

(4) EET 15143

-Petrography: The rock contains pyroxene, Ni-poor plagioclase, chromite, troilite and ilmenite. Pyroxene grains have fine-grained sizes (<0.5mm in diameter). Sphulphic texture can be seen in this meteorite. Lath-shaped plagioclase grains are surrounded by pyroxene.  
-Mineral chemistry: low-Ca pyroxene, Fa62.1±0.550±5.8±0.29, N=12; FeO/MnO mean=31.94; high-Ca pyroxene, Fa26.4±1.250±4.9±1.14, N=9; FeO/MnO mean=32.66; plagioclase, An88.6±1.420±0.4±0.11, N=8



Figure 9. Three photomicro and cross-polarized light images of EET 15143 meteorite. The meteorite contains dark inclusions (in the middle of the images) that may be fragments of CM chondrites. The rock is basaltic breccia which well shows ophitic texture.

(2) EET 15056(EL6)

-Petrography: Thin section consists of relict pyroxene-bearing chondrules. The meteorite consists of abundant enstatite. Other minerals include feldspar, troilite, metal, magnetite and aluminite. Metal contains 0.89±0.07 wt % Ni.  
-Mineral chemistry: Enstatite, Fo0.5±0.30 Wo1.2±0.07, N=13; Si in metal, 0.93±0.03wt. %, N=9



Figure 10. Photo and BSE image of the EET 15056(EL6) chondrite. The rock is heavily weathered. The weathering products such as iron oxides replace almost all Fe-Ni metal.

8

10

28

그림 92. 2015-16시즌 남극운석의 분류 결과 보고서

○ 연구가치가 높은 남극운석의 초고해상도 이미지 제작 및 공개

- 연구가치가 높은 달운석 등 운석을 선별하여 Giga-pixel 초고해상도 이미지 제작하여 남극운석 큐레이션 홈페이지에 공개
- 전자현미경을 이용해 500배-1000배의 고배율 고해상도 이미지를 약 5000장 촬영
- imageJ 프로그램의 플러그인과 프로그래밍을 통해 약 5000장의 이미지를 자동 합성하여 4~5 Giga-pixel의 초고해상도 이미지 제작
- DeepZoom 기술을 활용하여 실시간 확인할 수 있도록 남극운석 큐레이션 홈페이지(koreamet.kopri.re.kr)에 공개
- 총 15개 운석을 홈페이지(https://koreamet.kopri.re.kr/deep\_zoom)에 공개하여 국내외 공동연구에 활용하고 있음
- 확대 및 축소, 스케일바, 스크린샷, 고정 좌표 제공으로 인터넷을 통해 전세계 어느 곳에서든 동일한 고해상도 운석 이미지를 확인할 가능



### DEW 12007 (Lunar meteorite)

DEW 12007 Backscattered electron image (4 Gigapixel)

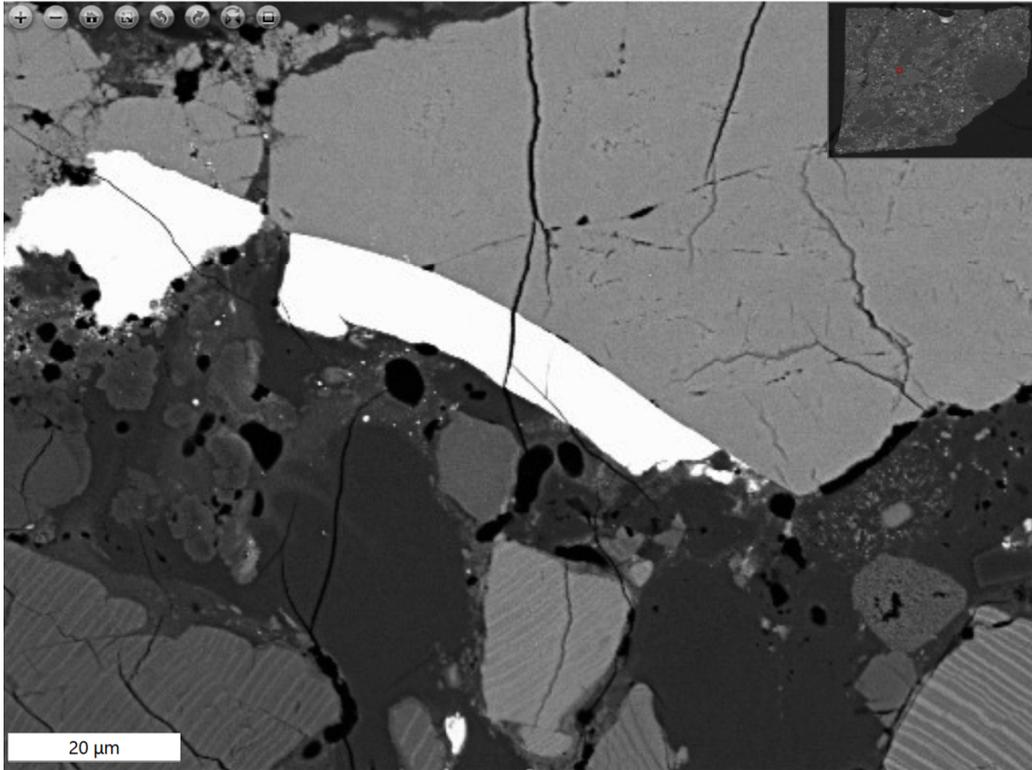


그림 93. 남극운석 큐레이션 홈페이지에 공개한 달운석 DEW 12007의 DeepZoom 이미지. 고정 좌표가 포함된 주소로 원격 관찰을 통한 공동연구가 가능하다.

([https://koreamet.kopri.re.kr/DEW12007\\_deepzoom#zoom=133.28169146634414&x=0.3261563189228926&y=0.3239329419094888](https://koreamet.kopri.re.kr/DEW12007_deepzoom#zoom=133.28169146634414&x=0.3261563189228926&y=0.3239329419094888))

# 제 4 절 1단계 대표적 우수성과

## 1. 남극 북빅토리아랜드 마운티너레인지에서의 고생대 로스조산운동 진화양상 해석 - Minerals 게재 (2020)

### 1.1. 성과내용

- 북빅토리아랜드 마운티너레인지에서의 고생대 로스조산운동 시기 규명
  - 마운티너레인지의 월슨터레인/바워스터레인 경계부에서의 주요 암체 절대연령 측정
  - 디센트유닛 각섬암의 로스조산운동 변성 온도-압력 조건과 변성 연령 획득
  - 마운티너레인지의 광역적인 전단구조 확인 및 변성진화양상 해석
- 북빅토리아랜드 마운티너레인지의 원암 형성 과정 및 이들의 선캠브리아 지질환경 해석
  - 머치슨 편마암에서 획득된 쇄설성 저어콘의 기원지 및 원암의 형성 시기 및 형성 지주조환경을 제시함
  - 호주-인도-남아프리카와의 연관성에서 쇄설물의 기원지 해석
  - 머치슨 편마암의 원암은 주변 대륙에서 확인되는 특징적인 연령을 간직하나 이들 쇄설물이 곧드와나 주변 대륙으로부터 유래되었을 가능성은 낮음
  - 머치슨 편마암의 원암은 후기 신원생대에 발달한 대륙 연변부의 전호(forearc) 분지 퇴적물일 가능성이 높음

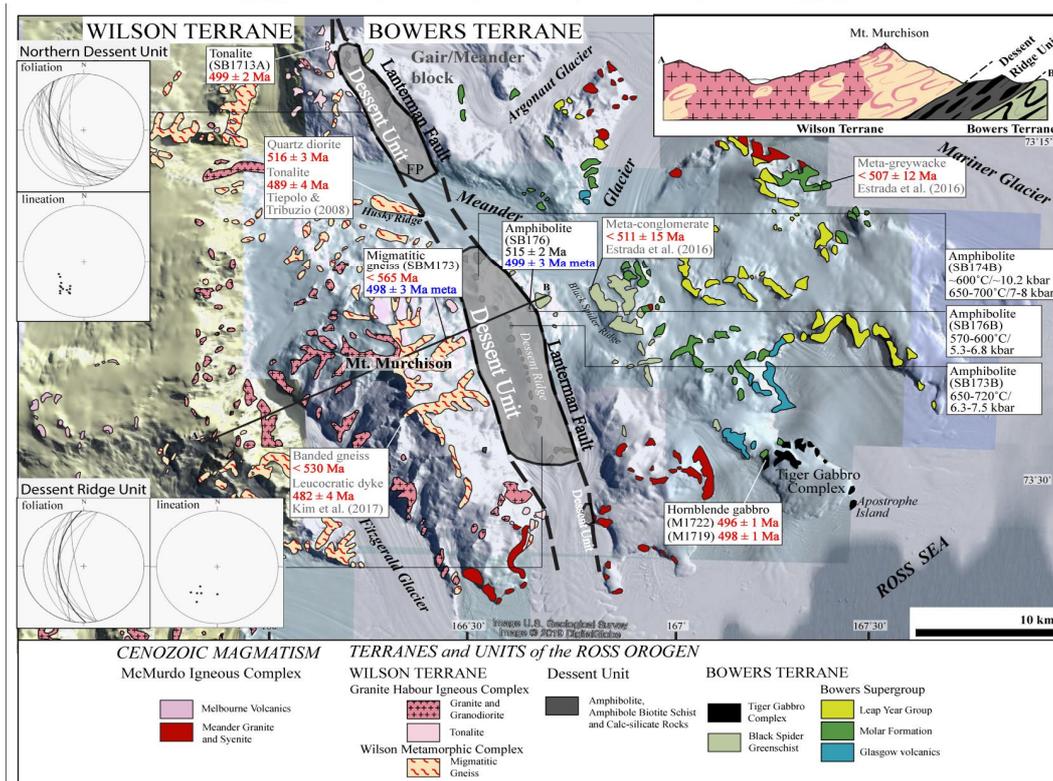


그림 94. 북빅토리아랜드 마운티너레인지 지체구조 및 암체의 변성 시기

## 1.2. 성과우수성

- 북빅토리아랜드 마운티너레인지에서의 고생대 로스조산운동 진화양상 및 주변 대륙과의 관련성 해석
  - 북빅토리아랜드 마운티너레인지에서 확인되는 로스조산운동의 정점 변성시기를 제시함
  - 마운티너레인지 디센트 유닛의 변성 진화 과정을 랜터만 전단대의 주요 암체의 변성 진화과정과 연합하여 해석
  - 로스조산운동의 시기, 변성진화, 범위 등 남극종단산맥권역의 고생대 지구조진화 해석에 중요한 지질 정보를 제공함

## 1.3. 논문성과

- 저자: 이상봉\*, 이미정, 이종익, 김화영
- 논문명: Timing and metamorphic evolution of the Ross Orogeny in and around the Mountaineer Range, northern Victoria Land, Antarctica [*Minerals*, 2020.10.13., mrniF: 72.2]

## 2. 운석 구성물질 조성 합성을 통해 태양계 초기 산소동위원소 변화 기작 제시

### - *Chemical Geology* 게재 (2020)

### 2.1. 성과내용

- 운석에 보존되어 있는 태양계 최초 물질 조성의 물질 합성
  - 미분화 운석에 있는 태양계 최초 물질 중 원시 태양 근처에서 화성 작용에 의해 생성된 물질과 같은 조성의 물질을 합성
  - Ca과 Al 함량이 높은 합성 물질의 고상 핵자기 공명 분광분석(Solid state NMR) 연구를 세계 최초로 실시하여 Al-O-Al 결합 구조를 밝힘
  - 이 구조를 통해 추정되는 액(melt)의 점성도를 이용해 액의 조성 변화에 따른 산소동위원소 조성의 변화 기작을 최초로 제시

### 2.2. 성과우수성

- 운석 모사물질 합성을 통해 태양계의 진화 초기 물질의 동위원소 조성 변화 기작을 새롭게 제시
  - 원시 태양 주변에서 화성 작용으로 생성된 물질 내의 산소동위원소 조성의 불균질성은 아직 명확한 해답이 없음
  - 이번 연구에서 최초로 분별 결정 작용에 따른 액의 조성 변화가 액의 구조 변화(점성도의 변화)를 이끌어 성운 가스와 액의 상호 작용시 동위원소 확산 속도에 영향을 줄 수 있음을 실험적으로 보임

- 이러한 해석은 이번 연구를 통해 최초로 제시한 개념이며 추가 연구를 통해 실제 분석 데이터를 재현하고, 나아가 태양계의 진화 모델 수립에 영향을 줄 수 있을 것으로 예상

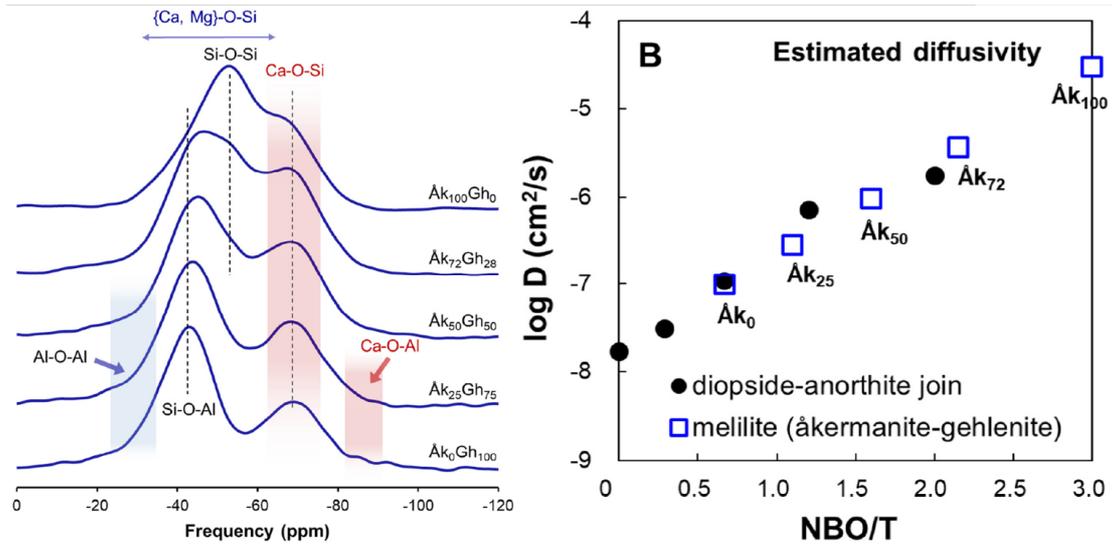


그림 95. 분별 결정 작용에 따른 액(melt)의 조성 및 점섬도 변화와 동위원소 확장속도 간의 관계

### 2.3. 논문성과

- 저자: **박선영\***, 박창근, 김현나, 이서영, 이성근
- 논문명: Structure of type A CAI-like melts: A view from multi-nuclear NMR study of melilite (Ca<sub>2</sub>Al<sub>2</sub>Si<sub>2</sub>O<sub>7</sub>-Ca<sub>2</sub>MgSi<sub>2</sub>O<sub>7</sub>) glasses [Chemical Geology, 2020.12.01., mnrIF: 78.3]

## 3. 남극 북빅토리아랜드 암석권 맨틀 진화 및 지진과 비등방성 해석

- *Journal of Structural Geology* 게재 (2021)

### 3.1. 성과내용

- 북빅토리아랜드 암석권 맨틀의 진화양상 규명
  - 멜버른화산 인근에서 채취한 맨틀포획암 구조 분석 실시
  - 맨틀감람암의 미구조에서 메타소마티즘 양상 확인
  - 암석권 맨틀의 진화 모델 제시
- 북빅토리아랜드 전반에서 관찰되는 지진과 비등방성 원인 규명
  - 기존 연구에서는 지진과 자료로 남극중단산맥 북쪽에서 관찰되는 NW-SE 방향의 우세한 지진과 비등방성을 보고함
  - 관찰된 지진과 비등방성은 암석권 맨틀 또는 NE-SW 방향의 대규모 단층에서 유래한 것이라 추측함

- 암석권 맨틀에서 유래하는 지진파 비등방성을 최초로 계산함

### 3.2. 성과우수성

- 북빅토리아랜드에서 맨틀 암석을 이용한 최초의 연구 성과
  - 기존 연구들은 지진파 자료를 이용해, 북빅토리아랜드 전반에서 우세한 NE-SW 방향의 지진파 비등방성이 암석권 맨틀에서 유래되었거나 NW-SE 방향의 대규모 단층에서 유래되었을 것이라 추측하였으나 직접적 증거가 부족함
  - 맨틀포획암 분석으로 암석권 맨틀의 직접적 분석이 가능하였음
  - 암권 맨틀 진화 모델을 제시함

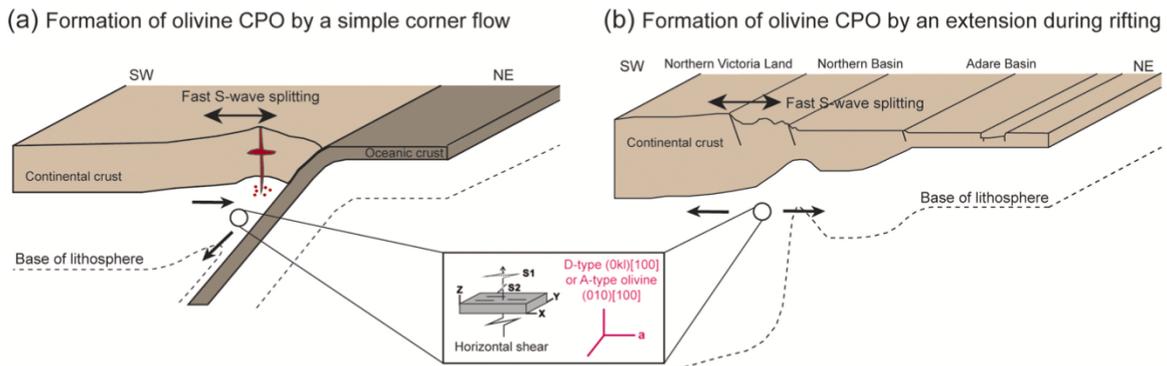


그림 96.

### 3.3. 논문성과

- 저자: 김대영\*, 박문재, 박용철, Chao Qi, 김화영, 이미정, Katsuyoshi Michibayashi
- 논문명: Upper mantle seismic anisotropy beneath the Northern Transantarctic Mountains inferred from peridotite xenoliths near Mt. Melbourne, northern Victoria Land, Antarctica [*Journal of Structural Geology*, 2021.2.1., mriiF: 72.2]

## 4. 남극 중앙해령 KR1 확장축 주변 해저화산들의 지자기연령 추산

- *G-cubed* 게재 (2021)

### 4.1. 성과내용

- 남극 중앙해령 KR1의 확장 축 주변 해저화산과 해저산맥의 연령 및 화산활동기간을 해상 지자기데이터를 기반으로 추산
  - 중앙해령 KR1의 해저면 확장방향과 평행한 형태로 배열되어 있는 대략 3개의 해저산맥과 그것을 구성하는 10여 개의 해저화산체들의 생성 시기 및 화산활동 기간을 지자기 관측 데이터를 기반으로 계산하였음

#### 4.2. 성과우수성

- 중앙해령 확장 축 주변의 해저화산 연령 계산을 위한 새로운 지자기 모델 제시
  - 해양지각이 형성되고 확장되는 중앙해령 주변에 많이 발달하는 해저화산들의 연령 계산을 위해 새로운 접근법 및 지자기 모델링 제시
  - 이러한 접근과 모델링이 확장 방향에 평행하는 선형 분포의 해저산맥의 연령 및 화산활동시기 계산에 효과적임을 보여주었음
- 중앙해령 KR1 주변의 많은 해저화산체들이 해저 확장에 기초가 되는 대규모 맨틀 대류보다는 지화학적으로 불균질한 맨틀소스에서 유발된 소규모 맨틀 대류로부터 기원하였음을 규명함

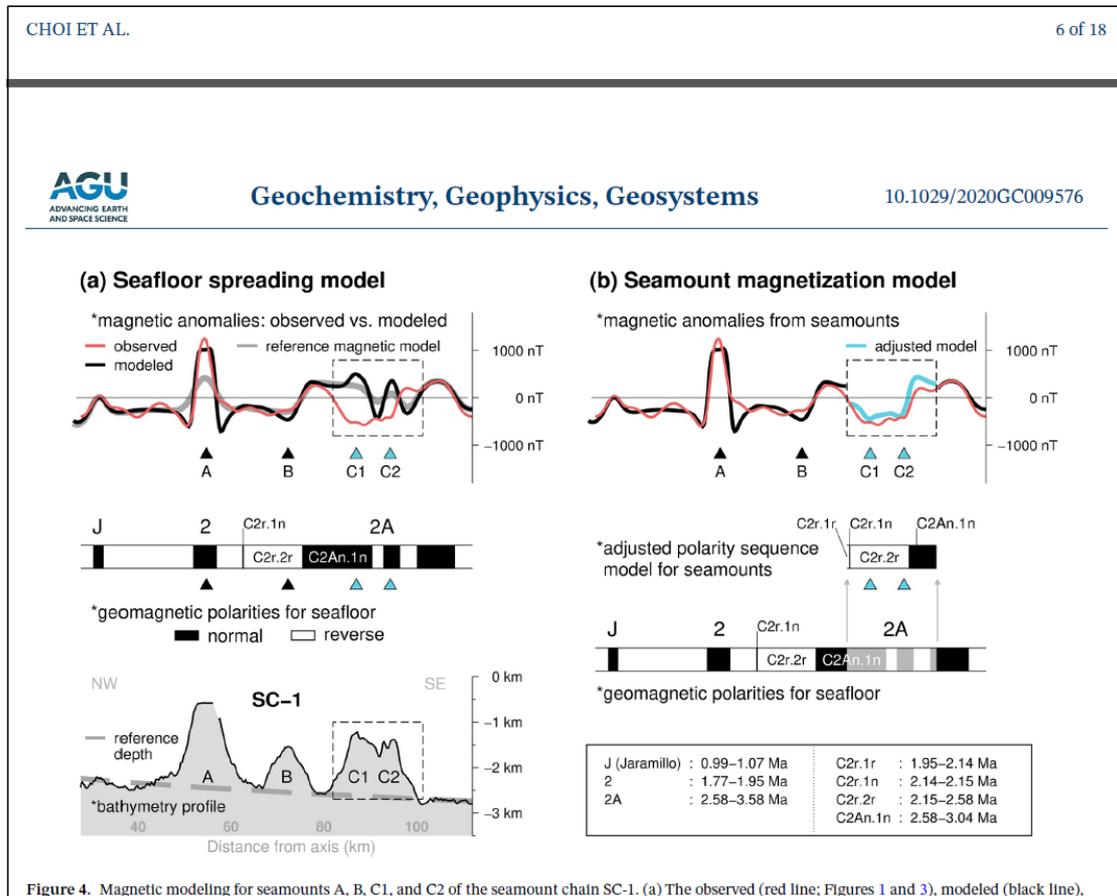


그림 97. 중앙해령 확장 축 주변에 분포하는 해저화산맥의 연령 및 화산활동 시기 추산을 위한 새로운 방법의 지자기 모델 원리

#### 4.3. 논문성과

- 저자: 최학걸, 김승섭\*, 박승현
- 논문명: Magnetic constraints on off-axis seamount volcanism in the easternmost segment of the Australian–Antarctic Ridge [*Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 2021.08.25., mnrIF: 71.4]

## 5. 남극 로스해 외대륙주변부에서 저층해류의 작용에 의한 등수심 퇴적체 발달 특성 규명

### 5.1. 성과내용

- 남극 북서부 로스해에 위치한 센트럴 분지에서 관찰되는 등수심 퇴적체의 발달 특성 규명
  - 다중채널 탄성과 탐사자료에서 관찰되는 등수심 퇴적체의 최상부층을 천부지층 탐사자료, 다중빔 해저지형자료, 퇴적물 코어시료로 분석하고, 저층해류 순환 모델링 및 해양물리 측정 결과와 결합하여 퇴적체의 발달 특성을 규명함

### 5.2. 성과우수성

- 남극 빙상진화에 따른 로스해 대륙붕수의 유출과 남극사면류의 복합적인 작용이 등수심퇴적체의 형성에 미치는 영향 제시
  - 로스해 대륙붕수의 유출로 인한 저층해류의 흐름이 센트럴 분지의 북서부 경계를 따라 등수심퇴적체 형성에 기여하였음을 제시
  - 남극 빙상이 로스해 대륙붕단으로 진출 후 안정화되었던 중-후기 플라이오세 이후 퇴적물 공급이 증가함에 따라 등수심퇴적체의 발달이 가속화되었음을 밝힘

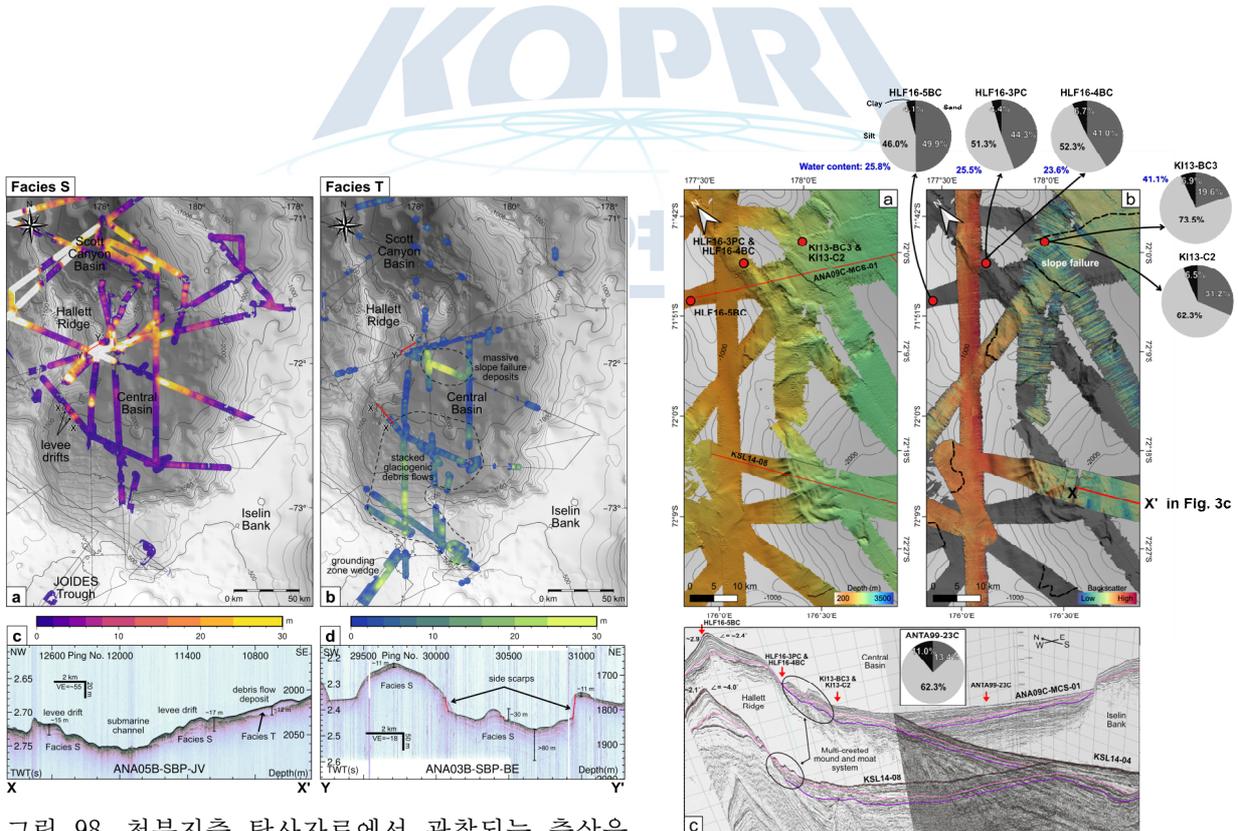


그림 98. 천부지층 탐사자료에서 관찰되는 층상유형상(a)과 투명유형상(b)의 두께분포와 주요 천부지층탐사단면(c, d)

그림 99. 센트럴 분지 서편 경계에서 획득된 다중빔 해저지형 자료에서 관찰되는 등수심 퇴적체(a)와 후방산란강도자료(b). 경사면을 따라 북부로 연장된 등수심 퇴적체(c).

### 5.3. 논문성과

- Influence of Bottom-current-controlled Processes on the Contourite Development in the Northwestern Ross Sea Margin, Antarctica [투고 예정]
- Bottom-current-controlled sedimentary and geomorphic processes in the northwestern Ross Sea margin, Antarctica [26회 극지심포지움 ISPS2021, 2021.09.27.]

## 제 5 절 정량적 논문성과

### 1. mrnIF 95 이상

- Hwang et al., (2020). Subnanosecond phase transition dynamics in laser-shocked iron. *Science Advances*. [mrnIF: 95.6]

### 2. mrnIF 80 이상

- Kawasaki et al., (2020). Variations in initial  $^{26}\text{Al}/^{27}\text{Al}$  ratios among fine-grained Ca-Al-rich inclusions from reduced CV chondrites. *Geochimica et Cosmochimica Acta* [mrnIF: 89.2]
- Wada et al., (2020). Melilite condensed from an  $^{16}\text{O}$ -poor gaseous reservoir: Evidence from a fine-grained Ca-Al-rich inclusion of Northwest Africa 8163. *Geochimica et Cosmochimica Acta* [mrnIF: 89.2]
- Yi et al., (2021). Alkalic to tholeiitic magmatism near a mid-ocean ridge: petrogenesis of the KR1 Seamount Trail adjacent to the Australian-Antarctic Ridge. *International Geology Review* [mrnIF: 93.5]
- Qi et al., (2021). Evolution of Microstructural Properties in Sheared Iron-Rich Olivine. *Journal of Geophysical Research-Solid Earth* [mrnIF: 82.1]
- Obase et al., (2021). Water-susceptible primordial noble gas components in less-altered CR chondrites: A possible link to cometary materials. *Geochimica et Cosmochimica Acta* [mrnIF: 90.5]
- Han et al., (2022). A record of low-temperature asteroidal processes of amoeboid olivine aggregates from the Kainsaz CO3.2 chondrite. *Geochimica et Cosmochimica Acta* [mrnIF: 90.8]

### 3. mrnIF 50 이상

- Sano et al., (2020). Groundwater oxygen anomaly related to the 2016 Kumamoto earthquake in Southwest Japan. *Proceedings of the Japan Academy, Series B* [mrnIF: 52.9]

- Yi et al., (2020). Timing and Metamorphic Evolution of the Ross Orogeny in and around the Mountaineer Range, Northern Victoria Land, Antarctica. *Minerals* [mrnIF: 72.2]
- Park et al., (2020). Structure of Type A CAI-like melts: A view from multi-nuclear NMR study of melilite ( $\text{Ca}_2\text{Al}_2\text{SiO}_7$ - $\text{Ca}_2\text{MgSi}_2\text{O}_7$ ) glasses. *Chemical Geology* [mrnIF: 78.3]
- Pour et al., (2020). Identification of Phyllosilicates in the Antarctic Environment Using ASTER Satellite Data: Case Study from the Mesa Range, Campbell and Priestley Glaciers, Northern Victoria Land. *Remote Sensing* [mrnIF: 79.3]
- Kim et al., (2020). Antarctic ice mass variations from 1979 to 2017 driven by anomalous precipitation accumulation. *Scientific Reports* [mrnIF: 79.4]
- Kim et al., (2021). Upper mantle seismic anisotropy beneath the Northern Transantarctic Mountains inferred from peridotite xenoliths near Mt. Melbourne, northern Victoria Land, Antarctica. *Journal of Structural Geology* [mrnIF: 67.8]
- Choi et al., (2021). Magnetic Constraints of Off-Axis Seamount Volcanism in the Easternmost Segment of the Australian-Antarctic Ridge. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems* [mrnIF: 71.4]
- Choi et al., (2021). Geomorphological and Spatial Characteristics of Underwater Volcanoes in the Easternmost Australian-Antarctic Ridge. *Remote Sensing* [mrnIF: 72.4]
- Kim et al., (2021). Geochemistry and geochronology of Early Paleozoic igneous rocks in the Terra Nova Bay area, northern Victoria Land, Antarctica. *Minerals* [mrnIF: 75.0]
- Lee et al., (2021). Magmatic-Hydrothermal Processes of Vein-Type Haman-Gunbuk-Daejang Copper Deposits in the Gyeongnam Metallogenic Belt in South Korea. *Frontiers in Earth Science* [mrnIF: 62.3]
- Bomfleur et al., (2021). Uncharted Permian to Jurassic continental deposits in the far north of Victoria Land, East Antarctica. *Journal of the Geological Society* [mrnIF: 74.9]
- Miller et al., (2021). An open access dataset for developing automated detectors of Antarctic baleen whale sounds and performance evaluation of two commonly used detectors. *Scientific Reports* [mrnIF: 77.1]
- Hayashi et al., (2022). Unique igneous textures and shock metamorphism of the Northwest Africa 7203 angrite and its implication for the crystallization process and evolutionary history of the angrite parent body. *Meteoritics & Planetary Science* [mrnIF: 51.7]
- Kim et al., (2022). Petrogenesis of the Yeonhwa ultrapotassic intrusions in the

Yeongnam Massif—Evidence for enrichment of the Triassic continental lithospheric mantle beneath the Korean peninsula. *Lithos* [mrnIF: 79.3]

- Kim et al., (2022). Ediacaran mafic magmatism recorded in Cambrian eclogites of the Ross orogen, Antarctica: Implications for the Neoproterozoic rifting episodes along the Pacific–Gondwana margin. *Terra Nova* [mrnIF: 57.3]

#### 4. 기타 참여논문

- Kawasaki et al., (2021). An effect of variations in relative sensitivity factors on Al–Mg systematics of Ca–Al–rich inclusions in meteorites with secondary ion mass spectrometry. *Geochemical Journal* [mrnIF: 21.4]
- Choi et al., (2021). Tectonic constraints on formation and evolution of microplates in the Indian and Pacific Oceans: reviews and statistical inferences. *Geosciences Journal* [mrnIF: 34.7]
- Kim et al., (2021). Oxygen isotope record of magmatic evolution of alkaline volcanic rocks at the Pleiades, northern Victoria Land, Antarctica. *Geosciences Journal* [mrnIF: 34.7]
- Hong et al., (2021). Middle Cambrian slope deposits in northern Victoria Land, Antarctica: Fingerprinting small carbonate platforms dominated by grainy carbonates and microbial reefs. *Episodes* [mrnIF: 23.1]
- Kim et al., (2021). Two–point normalization for reducing inter–laboratory discrepancies in  $\delta^{17}\text{O}$ ,  $\delta^{18}\text{O}$ , and  $\Delta^{17}\text{O}$  of reference silicates. *Journal of Analytical Science and Technology* [mrnIF: 27.7]
- Yokoyama et al., (2022). Samples returned from the asteroid Ryugu are similar to Ivuna–type carbonaceous meteorites. *Science* [NSC]
- Barosh et al., (2022). Presolar Stardust in Asteroid Ryugu. *Astrophysical Journal Letters* [mrnIF: 89.7]
- Hopp et al., (2022). Ryugu’s nucleosynthetic heritage from the outskirts of the Solar System. *Science Advances* [mrnIF: 94.4]
- Moynier et al., (2022). The Solar System calcium isotopic composition inferred from Ryugu samples. *Geochemical Perspective Letters* [mrnIF: 94.3]
- Kim et al., (2022). COM–1 and Hongcheon: New monazite reference materials for the microspot analysis of oxygen isotopic composition. *Journal of Analytical Science and Technology* [mrnIF: 44.2]

## 제 4 장 연구개발목표 달성도

### 제 1 절 연구개발목표

#### 1. 최종목표

- 질란디아-남극권 지각 및 상부맨틀 지구물리적 특성 파악
- 남극 맨틀 특성과 화산활동 기록복원
- 북빅토리아랜드 지체구조 진화 규명

#### 2. 1단계 성과목표 (2020.01.01. ~ 2022.12.31.)

- 지각 및 상부맨틀 지구물리적 특성 파악
  - 해저 지형, 지자기 및 탄성과 자료 획득
  - 중앙해령 주변 해저화산 지구물리 자료 분석
  - 관측망 구축 및 연속 지진자료 DB
  - 육상/해저 지진관측소 기본자료 분석
- 남극 맨틀 특성 규명과 화산활동 기록복원
  - 화산암류 지화학 분석
  - 화산분출사 복원모델
  - 해저면 암석시료 획득
  - 소행성에서 일어나는 동위원소 분별 및 확산 기작 규명(동위원소 확산 모델링)
- 북빅토리아랜드 지체구조 진화
  - 판 구조적 속도구조/지자기연대 모델링
  - 포획암의 변형 모델 수립
  - 암석절대연령측정
  - 장보고기지기반 변성·화성기반암과 화산연구를 통한 남극 빅토리아랜드의 형성과 진화사 규명
  - 암석 및 운석 DB 구축, 분류, 등록, 정보공개

## 제 2 절 연구개발성과의 달성도

### 1. 목표 대비 달성도

구분	연구목표 달성내용				계획대비 연구실적 달성율(B) (%)
	세부연구목표	연구내용	가중치 (A)	달성실적	
1년차 (2020)	1. 질란디아-남극 맨틀의 동편 경계 규명	1-1. 해저 지형 및 지자기 자료 획득	0.15	250 km 이상의 측선에 대해 해저 지형 및 지자기 자료 획득	100
		1-2. 해저면 암석시료 획득	0.15	샘플 정점 5개 이상의 해저면 암석시료 획득	100
	2. 맨틀 고유의 특성 및 기원 규명	2-1. 중앙해령 주변 해저화산 지구물리 자료 분석	0.15	해저화산 지형 및 분포도 작성	100
		2-2. 세계 여러곳의 맨틀포획암 획득 및 박편 제작	0.15	맨틀포획암 시료 및 박편 샘플 10개	100
	(1+2) 공통	논문게재	0.20	SCI(E) ( $50 \leq \text{mrnIF} < 80$ ) 1편	100
		홍보	0.20	신문칼럼 연재 및 도서출판	100
	계			1.0	100
	3. 해저면 지진관측망 구축	3-1. 해저면지진계 5곳 설치	0.25	Orca 화산 지역 설치 예정	100
		3-2. 해저면 지진계 방위각 편차 보정		해저면 지진계에 대한 방위각 보정 완료	100
	4. 지각 및 상부맨틀 속도 구조	4-1. 연속지진자료 및 원격지진자료 DB 구축	0.35	Seiscomp를 이용한 DB 구축 완료	100
		4-2. 관측망 배열에 대한 최적의 모델 격자 구조		3차원 격자 구조 및 잠정적인 해상도 분석 완료	
	5. 화산암 분석	5-1. 19-20 현장조사에서 확보된 화산암 분석	0.1	3 site의 화산암의 화학 조성 특성 분석 완료	100
	(3+4+5) 공통	논문게재	0.1	Scientific report 게재	100
		상위수준논문	0.2		0
	계			1.0	80
	6. 남극 북빅토리아랜드 형성과 신생대 화산활동 기록복원	6-1. 주요 변성암/화성암체 절대 연령 분석 및 온도-압력 조건 계산	0.6	- 중광물의 U-Pb 동위원소 조성 분석치로부터 연령 도출 - 광물 주원소 분석치, 지온지압계, 열역학 모델링을 통해 변성 온도-압력 조건 계산	100
		6-2. 멜버른, 리트만 화산의 최근 분출사 복원을 위한 OSL 절대연령 자료 획득 및 층서 정립		- 전암 주성분, 미량원소, Sr, Nd, Pb, Hf 4종 동위원소 분석 - 멜버른, 리트만 최근 분출물 OSL 연대 측정	100
	7. 소행성에서 일어나는 동위원소 분별 및 확산 기작 규명	7-1. 운석 모천체 물질에 미치는 태양풍, 우주선의 영향 평가 및 노출연대 계산	0.15	- 우주선 기원 핵종 $^3\text{He}$ , $^{21}\text{Ne}$ 로부터 우주선 노출연대 측정	100
	8. 남극지질·운석정보 활용기반 구축	8-1. 남극 암석시료 관리 시스템 공개 및 운영	0.25	- 주요 암석 DB(샘플 위치, 연대, 암석명 등 포함) 구축	100
		8-2. 미분류된 남극운석의 암석학적, 광물학적 기재를 통한 분류		- 남극운석 분류결과 보고서 제시	
8-3. 연구가치가 높은		- 초고해상도 이미지			

		남극운석의 초고해상도 이미지 제작 및 공개		koreamet.kopri.re.kr에 공개	
		<b>계</b>	<b>1.0</b>		<b>100</b>
2년차 (2021)	1. 지각 및 상부맨틀 지구물리적 특성 파악	1-1. 해저 지형, 지자기 및 탄성과 자료 획득	0.23	- 측선 ~647 km 구간에 대해 지형자료 획득 - 측선 ~130 km 구간에 대해 지형 및 지자기자료 획득	100
		1-2. 관측망 구축 및 연속 지진자료 DB		장보고기지 기반 12곳 DB 구축 및 21-22 현장조사 기간 중 자료회수 및 DB 구축 예정 (100% 예정)	
		1-3. 육상/해저 지진관측소 기본자료 분석		기존 12관측소 자료 분석 완료	
	2. 남극 맨틀 특성 규명과 화산활동 기록복원	2-1. 화산암류 지화학 분석	0.23	전암(20개), Sr-Nd-Pb-Hf(15set) 동위원소분석	100
		2-2. 화산분출사 복원모델		북빅토리아랜드 화산암류 <sup>39</sup> Ar/ <sup>40</sup> Ar 연대 측정(12개시료)	
		2-3. 해저면 암석시료 획득		21-22남극하계탐사에서 채취	
		2-4. 소행성에서 일어나는 동위원소 분별 및 확산 기작 규명 (동위원소 확산 모델링)		남극운석의 원소 이동 및 확산 모델링 개발	
	3. 북빅토리아랜드 지체구조 진화	3-1. 3차원 속도구조 모델링	0.23	12건 샘플에 대해 열평형온도 계산 완료	100
		3-2. 암석학적 기재 및 열평형 온도 획득		중광물(저어콘) U-Pb 연령도출	
		3-3. 암석절대연령측정		지온지압계, 열역학모델링 적용	
3-4. 변성암류 온도-압력 조건 계산		남극운석 분류 결과 및 초고해상도 이미지, KOREAMET 홈페이지에 공개 (koreamet.kopri.re.kr)			
3-5. 암석 및 운석 DB 구축, 분류, 등록, 정보공개					
홍보	9회	0.05	5회 달성	56	
논문게재	mrnIF 80 이상 4편	0.20	3편 작성	75	
	mrnIF 50 이상 80미만 2편	0.06	7편 작성	100	
	<b>계</b>	<b>1.0</b>		<b>92.8</b>	
3년차 (2022)	1. 지각 및 상부맨틀 지구물리적 특성 파악	1-1. 해저 지형, 지자기 및 탄성과 자료 획득	0.16	- 250 km 이상의 측선에 대해 지형, 지자기 및 탄성과 자료 획득 완료	95
		1-2. 관측망 구축 및 연속 지진자료 DB		- 육상관측소 5개 신설 - 회수된 연속지진자료는 DB화 중	
		1-3. 육상/해저 지진관측소 기본자료 분석		- 센서 방위각 보정 완료 - 관측소별 배경잡음 분석중	
	2. 남극 맨틀 특성 규명과 화산활동 기록복원	2-1. 화산암류 지화학 분석	0.14	- 육상 화산암류 성분 분석 결과 확보 (주원소 15점, 미량원소 22점, Sr-Nd-Pb 동위원소비 17점).	90
		2-2. 화산분출사 복원모델		- 육상 화산암류 28점에 대한 <sup>40</sup> Ar/ <sup>39</sup> Ar 연대 측정 결과 확보	
		2-3. 소행성에서 일어나는 동위원소 분별 및 확산 기작 규명(동위원소 확산 모델링)		- 카보네이셔스 콘드라이트와 오디너리 콘드라이트에 대한 모델링	
3. 북빅토리아랜드 지체구조 진화	3-1. 판 구조적 속도구조/지자기연대 모델링	0.36	- 판구조 모델링을 위한 지형 및 지자기 데이터 후처리 진행 중, 추가적인 광역데이터 확보 필요	85	

	3-2. EBSD 데이터 획득 및 변형모델 수립		- EBSD 정밀 맵 데이터 20건 완료 - 변형모델 고안하고 논문 작성 중	
	3-3. 암석절대연령측정		- 장보고 기지 주변 변성암 (1건), 화성암 (1건) U-Pb 저어콘 연대분석 완료 - KPDC 등록	
	3-4. 지구조형성 모델 계산		- 로스 조산운동 지체구조 모델 관련 자료 취합 중 - 지질도 및 단면도 작성함	
	3-5. 암석 및 운석 DB 구축, 분류, 등록, 정보공개		- 암석 데이터베이스(10개) KPDC 등록 - 지질노두 3D모델 2건 제작, KOPRI Polar Rock Database 홈페이지에 공개 - 운석 166개 분류 - 운석의 초고해상도 이미지 제작 완료 및 홈페이지 공개	
홍보	9회	0.05	9회 이상	100
논문게재	mrnIF 80 이상 5편	0.23	1편	30
	mrnIF 50 이상 80미만 3편	0.06	3편	100
계		1.0		74.2

## 2. 정량적 연구성과 및 1단계 목표 대비 달성도

년도 (과제연차)	성과목표	지표	목표치(A)	달성(B)	가중치(C)	평가기준	달성도(%)		
							(D=B/A)	(D*A)	
2020 (1차년도)	질란디아-남극 맨틀의 동편 경계 규명	해저 지형 및 지자기 자료 획득	측선 250 km 이상	250 km 이상	15	자료획득 여부	1	15	
		해저면 암석시료 획득	샘플정점 5개 이상	정점 5개 이상	15	자료획득 여부	1	15	
	맨틀 고유의 특성 및 기원 규명	중앙해령 주변 해저화산 지구물리 자료 분석	1건	지형 및 분포도 작성	15	해저화산 지형 및 분포도 작성	1	15	
		세계 여러곳의 맨틀포획암 획득 및 박편 제작	샘플 10개		15	맨틀포획암 시료수 및 박편수	1	15	
	홍보	3회	3회 이상	20	도서 출판, 신문 칼럼 연재	1	20		
		논문게재	SCI(E) 1편	1	20	논문게재	1	20	
	계					100	-	-	100
		해저면 지진관측망 구축	해저면 지진계 5곳 설치 및 새로운 리튬-이온	5개소 및 지진관측 시스템 개발	5/5 리튬이온 전원 시스템	25	해저면 지진계 5개소 구축 및 새로운 전원 시스템 개발	1	25

	전지를 이용한 육상 지진 관측시스템 개발		개발			여부		
지각 및 상부맨틀 속도 구조	3차원 속도 모델링을 위한 지진자료 원격지진파형 및 목록 DB 구축	1 건	1	25	DB 구축 여부 1건	1	25	
	맨틀 3차원 모델링 격자 구축	1건	1	10	모델 격자 구축 1건	1	10	
화산암 분석	화산암 분석	3건	3	10	19-20 시즌 확보된 화산암 분석 3건	1	10	
공동	논문게재	1	1	10	mrnIF 50 이상 80미만	1	10	
	상위수준논문	1	0	20	mrnIF 이상 80	0	0	
<b>계</b>				<b>100</b>	<b>-</b>	<b>-</b>	<b>80</b>	
남극 북빅토리아랜드 형성과 신생대 화산활동 기록복원	암석절대연령 측정	8개	8	11	중광물의 U-Pb 동위원소 조성 분석치로부터 연령 도출, 연령 획득한 시료 개수 (KPDC 등록)	1	11	
	기반암 온도-압력 조건 계산	2개	2	11	광물 주원소 분석치, 지온지압계, 열역학 모델링을 통해 변성 온도-압력 조건을 계산한 시료 개수 (KPDC 등록)	1	11	
	화산분출물 지화학분석 (멜버른, 리트만테프라/ 부석 전암, 동위원소 4종 포함)	10세트	18	11	전암 주성분, 미량원소, Sr, Nd, Pb, Hf 4종 동위원소 분석자료획득 시료 개수 (KPDC 등록)	1	11	
	멜버른, 리트만 OSL 연대 측정	5개	5	11	멜버른, 리트만 최근 분출물 OSL 연대 측정 시료 개수	1	11	
	소행성에서 일어나는 동위원소 분별 및 화산 기작 규명	카보네이셔스 콘드라이트의 불활성기체 동위원소 분석 및 노출연대계산	5건	5	11	우주선 기원 핵종 $^3\text{He}$ , $^{21}\text{Ne}$ 로부터 우주선 노출연대 측정한 운석 수	1	11
남극지질·운석 정보 활용기반 구축	DB 구축	10개	10	5	주요 암석 DB 구축 10개,(지질노두 3D 모델 제작 1건 포함)	1	10	
	분류/등록	20개	23	10	분류결과 보고서	1	10	

						제시 초고해상도 이미지 koreamet.kopri.re .kr에 공개 (5개/년)	1	5
	홍보	대중강연	2회	2	5	연 2회 이상	1	5
	논문	논문게재	mrnIF 50 이상 80 미만 3건	5	10	표준화된 영향력지수	1	10
			mrnIF 80 이상 2건	3	10	표준화된 영향력지수	1	10
	<b>계</b>				<b>100</b>	<b>-</b>	<b>-</b>	<b>100</b>
2021 (2차년도)	지각 및 상부맨틀 지구물리적 특성 파악	해저 지형, 지자기 및 탄성과 자료 획득	측선 250 km 이상	647 +130 km	12	자료획득 여부 (KPDC 등재)	1	12
		관측망 구축 및 연속 지진자료 DB	1건(최소 10관측소, 년간 자료 회수율 ≥ 80%)	1건	7	자료회수율	1	7
		육상/해저 지진관측소 기본자료 분석	관측소당 1건	1건 (관측소 10곳)	4	○센서방향 보정 후 정보 DB화 ○관측소별 배경잡음 분석	1	4
	남극 맨틀 특성 규명과 화산활동 기록복원	화산암류 지화학 분석	중앙해령 5건 빅토리아랜드 15건	5+15건	11	○드렛지 샘플 ○관입연령, 화학특성 분석 ○주성분, 미량원소, 동위원소 분석 ○자료획득 시료 개수 (KPDC 등록)	1	11
		화산분출사 복원모델	3건	12건	3	Ar 연대 측정 시료 개수	1	3
		해저면 암석시료 획득	샘플정점 5개 이상	5개	6	자료획득 여부	1	6
		소행성에서 일어나는 동위원소 분별 및 화산 기작 규명 (동위원소 확산 모델링)	2건	2건	3	화산 모델링 계산 코드와 결과 제시	1	3
	북빅토리아랜드 지체구조 진화	3차원 속도구조 모델링	1건 (3차원모델)	1건	5	기존 지진자료 활용 속도구조 모델링	1	5
		암석학적 기제 및 열평형 온도 획득	10건	12건	4	열평형 온도	1	4
		암석절대연령 측정	4개	4개	4	동위원소 연령 도출 시료 개수 (KPDC 등록)	1	4
		변성암류 온도-압력 조건 계산	3개	3개	4	변성 온도-압력 조건 계산 시료 개수 (KPDC	1	4

		암석 및 운석 DB 구축, 분류, 등록, 정보공개	35개	암석20+ 운석25	6	등록) ○데이터베이스 구축 ○운석학회 및 KPDC 등록 등	1	6
	홍보		9회	5회	5	○도서 출판 ○신문칼럼 연재 ○대중강연 1회	0.56	2.8
	논문게재	mrnIF 80 이상	SCI(E) 4편	3편	20	논문게재(승인)	0.75	15
		mrnIF 50 이상 80 미만	SCI(E) 2편	7편	6	논문게재(승인)	1	6
	<b>계</b>				<b>100</b>			<b>92.8</b>
2022 (3차년도)	지각 및 상부맨틀 지구물리적 특성 파악	해저 지형, 지자기 및 탄성과 자료 획득	측선 250 km 이상	250+ km	7	자료획득 여부 (KPDC 등재)	1	7
		관측망 구축 및 연속 지진자료 DB	1건 (최소 10관측소, 년간 자료 회수율 ≥ 80%)		7	○자료회수율 - 관측소별 회수율은 기록시간/관측기 간으로 계산 - KPDC 자료 업로드 여부	80%	7
		육상/해저 지진관측소 기본자료 분석	관측소당 1건		2	○자료 회수후에 센서 방향 방위각 형태로 보정 후 정보 DB화 ○관측소별로 년단위로 배경잡음을 분석한 Power spectrum density 그림 표출	1	2
	남극 맨틀 특성 규명과 화산활동 기록복원	화산암류 지화학 분석	중앙해령5건 빅토리아랜 드 5건	육상 화산암 류 성분 분석 15 set+28 점 절대연 령측정	7	○샘플에 대한 관입 연령과 화학 특성 분석 ○육상 및 해저 드렛지 샘플 ○샘플에 대한 관입 연령과 화학 특성 분석	1	7
		화산분출사 복원모델	1건	1건	3	○쉴드누나탁 단성화산체 주요 지질 유닛에 대한 화산층서 해석을 포함한 층서 모식도 1건 작성	1	3
		소행성에서 일어나는 동위원소 분별 및 화산 기작 규명(동위원소 화산 모델링)	2건		4	○오디너리 콘드라이트 1건, 카보네이셔스 콘드라이트 1건에 대한 화산 모델링 계산 코드와 결과 제시	1	4

북빅토리아랜드 지체구조 진화	관 구조적 속도구조/지자 기연대 모델링	-관구조 모델링 1건 -3차원 속도 모델링 1건 -면적 200*200km 이상 (누적)		14	○관구조모델링 ○가장 해상도가 높을 것으로 예상되는 깊이에서의 모델 영역이 200km*200km 이상	0.83	11.6
	EBSD 데이터 획득 및 변형모델 수립	EBSD 정밀 맵 데이터 20건 변형모델 1건		10	지구구조 모델 수립	1	10
	암석절대연령 측정	2개		3	○중광물의 U-Pb 동위원소 조성 분석치로부터 연령 도출, 연령 획득한 시료 개수 (KPDC 등록)	1	3
	지구조형성 모델	1건		4	○빅토리아랜드 터레이인과 연령자료가 표시된 지질도 개수	1	4
	암석 및 운석 DB 구축, 분류, 등록, 정보공개	35개		5	○주요 암석 데이터베이스 구축 10개/년 (지질노두 3D 모델제작 1건/년 포함) (KPDC 등록) ○운석학회 Bulletin에 공식 게시 및 KPDC 등록 ○DeepZoom기술 활용 초고해상도 이미지 제작 후 koreamet.kopri.r e.kr에 공개(5개/년) 및 KPDC 등록	2015-16 시즌 남극운석 중 철운석의 분류가 정확히 되지 않아 운석학회 정식 등록을 보류한 상태임	0
	홍보	9회		5	도서 출판, 신문 칼럼 연재, 대중강연 연1회 이상	1	5
논문게재	mrnIF 80 이상	SCI(E) 5편	1	23		0.2	4.6
	mrnIF 50 이상 80미만	SCI(E) 3편	3	6		1	6
<b>계</b>				<b>100</b>			<b>74.2</b>

## 제 5 장 연구개발결과의 활용계획

- 실제 남극환경 형성에 기여한 질란디아-남극 맨틀과 남극환경 간의 상호연관성 규명
- 3차원 속도 구조를 바탕으로 맨틀의 열분포 분석에 활용
- 맨틀의 열분포가 빙권 거동에 미치는 영향의 모델링 입력 자료로 활용
- 남극내륙 거점 확보로 다학제 국제 공동연구 주도
- 향후 남극내륙 내 기득권 확보를 위한 종합 지질정보(자원분포, 잠재 자원량) 확보

### 제 1 절 연구결과의 활용방안 (2단계 종료 후)

- 질란디아-남극 맨틀은 극지연구소에서 세계 최초로 발견한 새로운 타입의 맨틀로서 그 큰 규모로 볼 때 지구 시스템에서 차지하는 비중이 매우 큰 것으로 판단되며 이 맨틀의 기원과 진화 활동에 대한 규명은 지구과학계에 매우 큰 기여로 생각됨
- 호주-남극 중앙해령의 열수 환경은 최근까지도 생물상이 보고되지 않았던 지역으로써, 무인잠수정(ROV)을 활용한 영상 및 생물 시료의 확보를 통해 남극 심해 생태계 및 서식 생물상에 대한 세계 최초의 보고가 가능하게 할 뿐 아니라, 생물 시료에 대한 유전체 정보 분석을 통해 남극 심해 생물들의 진화와 지리적 연결성 이해에 크게 기여할 수 있음
- 최근 진화된 지구물리 탐사 및 자료처리 기법을 활용한 남극 빅토리아랜드 분지 지역 신기 지체구조에 대한 심도있는 지구물리학적 이해와 정밀관측 가능
- 미답해역 지구물리자료 확보를 통한 우리나라 남극해 연구영역 확대 도모
- 지구 온난화에 따른 극지방 해저환경변화 관측자료 제공
- 지각과 상부 맨틀의 3차원 속도/밀도 모델은 서남극 열개구조 연구뿐만 아니라 남극의 화산 활동의 원인을 규명하는데 활용할 수 있음
- 연속 지진관측 자료는 3차원 속도 구조 모델링만이 아니라 열개구조의 갈라짐, 화산 하부 마그마의 움직임에 의한 지진 활동을 모니터링하여 지체구조의 활동도 감시에 활용할 수 있음
- 연구지역에서의 암석권이 빙권에 제공하는 열량을 제공하여 빙하 동역학 모델의 정확성 향상에 활용
- 북빅토리아랜드 전단대/단층 연구를 통해 캄브리아기 섭입대 형성시기 또는 이후의 후퇴변성과정 동안 일어난 응력의 변화 추적
- 북빅토리아랜드 맨틀포획암의 메타소마티즘 연구를 통해 암석권맨틀의 진화과정 규명
- 달운석의 분석 자료로 기초로 다누리에서 얻어질 달의 데이터 해석에 활용
- 남극운석 연구 결과를 소행성 탐사 후보 선정에 활용

## 제 2 절 기대성과 및 파급효과 (2단계 종료 후)

- 질란디아-남극 맨틀의 기원, 진화, 활동 양상 규명은 지구과학계에 매우 큰 기여임
- 남극 확장-균열대 일대 운동역학적 진화 과정과 지판운동 복원에 대한 새로운 모델 제시
  - 호주-남극 중앙해령 동편의 대형 확장-균열대는 태평양판과 남극판 간의 상대적인 운동 변화가 그대로 지각 변형의 형태로 반영된 지역으로써, 이 지역에서의 고해상도 지형 및 지자기 자료 축적은 확장-균열대 내부의 지각 변형과 후기 마이오세 이후 태평양판 및 남극판 간의 상대적인 지판운동에 대한 새로운 모델을 제시할 수 있음
- 남극 대륙 주변부 중앙해령 및 열수 환경, 생태계에 대한 최초의 무인잠수정(ROV) 탐사
  - 극한의 환경인 남극 중앙해령 열수 환경 및 생태계를 영상자료 확보를 통해 시각적으로 확인함으로써 지구과학계에 큰 이슈가 될 것이라 기대함
  - 고위도 지역 심해 환경 및 생물 연구는 접근성 및 기술적 어려움으로 인해 연구 결과가 미미한 편이었으나, 극지연구소의 첨단 쇄빙연구선 인프라와 극지연구소 연구진의 노하우가 더해져 심해 생물 연구 분야의 선도 기관으로 자리매김 할 수 있을 것으로 예상함
  - 남극 심해 생물들의 진화와 지리적 연결성 이해에 크게 기여할 수 있으며, 심해 환경 적응 과정 중 확보 및 변이된 심해 생물 특이적 유전자, 단백질, 대사산물은 다양한 산업분야로의 활용이 가능하고 그 활용 가치가 매우 클 것으로 예상됨
- 북부 로스해 진화 및 동남극-서남극판 간의 지판운동 복원에 대한 새로운 모델 제시
  - 원시 로스해의 진화와 관련된 센트럴분지에서의 지형 및 지자기 자료를 통해서 북부 로스해의 진화와 동남극-서남극판 간의 초기 지판운동에 대한 새로운 모델을 제시할 수 있음
- 남극 로스해 빅토리아 분지에 대한 정확한 해저지질구조 및 신기 지체구조 특성 제시
- 지구 온난화에 따른 남극해 해저환경변화 및 신기 지체구조 변동성 제시
- 남극 대륙 형성의 이해와 지질 환경 변화 예측
  - 서남극 열개구조와 남극 종단 산맥은 남극에서 나타나는 가장 큰 지체구조임
  - 서남극 열개구조는 남극 종단 산맥의 형성 원인과 밀접한 관계가 있는 것으로 현재까지의 연구 결과가 보여줌
  - 하지만 아직까지 이들의 형성원인은 명확하게 규명되지 못했음
  - 본 연구를 통해 제공될 3차원 속도/밀도 모델은 암석권이 빙권에 어떠한 영향을 줄 수 있는 가를 여러 가지 가능성 있는 시나리오를 제공하여 빙권 동역학 모델링의 정확도를 향상 시킬 수 있을 것으로 기대됨
- 2030년 예정된 달 착륙선의 착륙지 선정과 연구 주제 선정에 기여
- 2035년 이후 예정된 대한민국 독자 소행성 탐사에 중추적 역할 수행 기대
- 해양 과학영도 개척으로 세계적 연구 선도
- 남극대륙 활동영역 확대를 통해 남극대륙 이슈(의정서 재논의 등)에 대한 발언권 확대

- 고생대로 한정 되었던 빅토리아랜드 지질역사 연구 영역을 신원생대와 호주대륙 지질연구로 넓힘
- 대한민국 남극내륙진출 정책 수립을 위한 기초 자료 제공
- “뉴 스페이스 시대” 태양계 탐사 대비
- 학문간 융합연구인 우주생물학의 국내 연구 기반 구축
- 우주물질 연구를 통해 물과 생명체의 기원을 논의함으로써 과학, 철학, 종교를 아우르는 문화적 거대담론 형성에 기여



## 제 6 장 참고문헌

- Bosum, W., Damaske, D., Roland, N.W., Behrendt, J.C., Saltus, R., (1989). The GANOVEX IV Victoria Land/Ross Sea aeromagnetic survey: interpretation of the anomalies. *Geologisches Jahrbuch E38*, 153-230.
- Cande, S.C., Stock, J.M., Müller, R.D., Ishihara, T., (2000). Cenozoic motion between East and West Antarctica. *Nature* 404, 145-150.
- Chizmadia, L.J., Rubin, A.E., Wasson, J.T., (2002). Mineralogy and petrology of amoeboid olivine inclusions in CO3 chondrites: Relationship to parent body aqueous alteration. *Meteoritics & Planetary Science*, 38, 1781-1796.
- Choi, H., Kim, S.-S., Dyment, 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 and Planetary Science Letters*, 478, 132-142.
- 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.
- Crowley, J.W., Kats, R.F., Huybers, P., Langmuir, C.H., Park, S.-H., (2015). Glacial cycles drive variations in the production of oceanic crust. *Science*, 347.
- Davey, F.J., Cande, S.C., Stock, J.M., (2006). Extension in the western Ross Sea region-links between the Adare Basin and Victoria Land Basin. *Geophysical Research Letters*, 33.
- Davidson, J., Alexander, C.M.O' D, Stroud, R.M., Busemann, H., Nittler, L.R., (2019). Mineralogy and petrology of Dominion Range 08006: A very primitive CO3 carbonaceous chondrite. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 265, 259-278.
- Grossman, J.N., Brearley, A.J., (2005). The onset of metamorphism in ordinary and carbonaceous chondrites. *Meteoritics & Planetary Science*, 40, 87-122.
- Hahm, D., Baker, E.T., Rhee, T.S., Won, Y.J., Resing, J.A., Lupton, J.E., Lee, W.K., Kim, M., Park, S.-H., (2015). First hydrothermal discoveries on the Australian-Antarctic Ridge: Discharge sites, plume chemistry, and vent organisms. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 16.
- Jones, R.H., Rubie, D.C., (1991). Thermal histories of CO3 chondrites: Application of olivine diffusion modelling to parent body metamorphism. *Earth and Planetary Science Letters*, 106. 73-86.
- Kim, D., Park, M., Park, Y., Qi, C., Kim, H., Lee, M.J., Michibayashi, K., (2021). Upper mantle seismic anisotropy beneath the Northern Transantarctic Mountains inferred from peridotite xenoliths near Mt. Melbourne, northern Victoria Land, Antarctica.

*Journal of Structural Geology*, 143.

- Maus, S., Barckhausen, U., Berkenbosch, H., Bournas, N., Brozena, J., Childers, V., Dostaler, F., Fairhead, J.D., Finn, C., von Frese, R.R.B., Gaina, C., Golynsky, S., Kucks, R., Lühr, H., Milligan, P., Mogren, S., Müller, R.D., Olesen, O., Pilkington, M., Saltus, R., Schreckenberger, B., Thébault, E., Tontini, F.C., (2009). EMAG2: A 2-arc min resolution Earth Magnetic Anomaly Grid compiled from satellite, airborne, and marine magnetic measurements. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 10.
- Park, M., Jung, H., Kil, Y., (2014). Petrofabrics of olivine in a rift axis and rift shoulder and their implications for seismic anisotropy beneath the Rio Grande rift. *Island Arc*, 23.
- 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. *Nature Geoscience*, 12, 206–214.
- Park, S.Y., Park, C., Kim, H.N., Lee, S., Lee, S.K., (2020). Structure of type A CAI-like melts: A view from multi-nuclear NMR study of melilite ( $\text{Ca}_2\text{Al}_2\text{SiO}_7$ – $\text{Ca}_2\text{MgSi}_2\text{O}_7$ ) glasses. *Chemical Geology*, 558.
- Park, Y., Yoo, H.-J., Lee, W.S., Lee, J., Kim, Y., Lee, S.-H., Shin, D., Park, H., (2014). Deployment and Performance of a Broadband Seismic Network near the New Korean Jang Bogo Research Station, Terra Nova Bay, East Antarctica. *Seismological Research Letters*, 85(6), 1341–1347.
- Park, Y., Yoo, H.-J., Lee, W.S., Lee, C.-K., Lee, J., Park, H., Kim, J., Kim, Y., (2015). P-wave velocity structure beneath Mt. Melbourne in northern Victoria Land, Antarctica: Evidence of partial melting and volcanic magma sources. *Earth and Planetary Science Letters*, 432, 293–299.
- Rocchi, S., Armienti, P., D’Orazio, M., Tonarini, S., Wijbrans, J.R., Di Vincenzo, G., (2002). Cenozoic magmatism in the western Ross Embayment: role of mantle plume versus plate dynamics in the development of the West Antarctic Rift System. *Journal of Geophysical Research*, 107.
- Satsukawa, T., Katsuyoshi, M., Anthony, E.Y., Stern, R.J., Gao, S.S., Liu, K.H., (2011). Seismic anisotropy of the uppermost mantle beneath the Rio Grande rift: Evidence from Kilbourne Hole peridotite xenoliths, New Mexico. *Earth and Planetary Science Letters*, 311.
- Scott, E.R.D., Jones, R.H., (1990). Disentangling nebular and asteroidal features of CO<sub>3</sub> carbonaceous chondrite meteorites. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 54, 2485–2502.
- Selvans, M.M., Clayton, R.W., Stock, J.M., Granot, R., (2012). Using overlapping sonobuoy data from the Ross Sea to construct a 2D deep crustal velocity model. *Marine Geophysical Research*, 33 (1), 17–32.

Yi, S.-B., Lee, M.J., Lee, J.I., Kim, H., (2020). Timing and metamorphic evolution of the Ross Orogeny in and around the Mountaineer Range, northern Victoria Land, Antarctica. *Minerals*, 10(10).

