

제 출 문

극지연구소장 귀하

본 보고서를 “질란디아-남극 맨틀의 특성 및 기원 규명에 관한 연구” 과제의 위탁연구
“질란디아-남극 맨틀의 지구물리적 특성 규명에 관한 연구” 과제의 최종보고서로 제출합니다.



2026. 01.

(본과제) 총괄연구책임자 : 박 승 현

위탁연구기관명 : 충남대학교

위탁연구책임자 : 김 승 섭

위탁참여연구원 : 송 지 현

“ : 이 학 민

“ : 하 연 철

“ : BEBIN Alysse

“ : 장 본

“ : 김 지 윤

“ : 최 세 은

보고서 초록

위탁연구과제명	질란디아-남극 맨틀의 지구물리적 특성 규명에 관한 연구				
위탁연구책임자	김 승 섭	해당단계 참여연구원수	23명	해당단계 연구비	150백만원
연구기관명 및 소속부서명	충남대학교 지질환경과학과		참여기업명		
국제공동연구	상대국명 : 상대국연구기관명 :				
요약(연구결과를 중심으로 개조식 500자이내)				보고서 면수	38
○ 본 연구는 질란디아-남극 맨틀의 지구물리적 특성을 중력, 자력, 지체구조, 시공간 진화 측면에서 종합적으로 규명하였음 ○ 1차년도(2023): 호주-남극 중앙해령 확장균열대의 지구조 특성을 규명하고, 선상 삼성분 자력계 자료의 유효성을 검증하여 ESCI 논문 1편 게재. Ayu Trough 지역 비교 연구를 통해 중간속도 확장 환경의 공통적 지구조 특성 규명(SCIE 논문 1편) ○ 2차년도(2024): GPlates 기반 질란디아-남극 맨틀 중심의 디지털 판운동 복원 모델을 개선하고, 맨틀 온도 분포도 분석을 통해 질란디아-남극 맨틀의 열적 구조 특성 확인 ○ 3차년도(2025): 지오이드-지진파 속도 모델 통합 역산을 통해 맨틀 밀도 분포를 3차원적으로 역산하고, 북서 로스해 Central Basin의 신규 해양 자기 탐사 자료 분석을 통해 동-서 남극 분리 시기를 기존보다 약 1,000만 년 앞당기는 결정적 증거 확보(Nature Communications 투고 심사 중)					
색 인 어 (각 5개 이상)	한 글	질란디아-남극 맨틀, 호주-남극 중앙해령, 확장균열대, 판운동 복원, 해양 지자기			
	영 어	Zealandia-Antarctic mantle, Australian-Antarctic Ridge, propagating rift, plate reconstruction, marine magnetics			

요 약 문

I. 제 목

질란디아-남극 맨틀의 지구물리적 특성 규명에 관한 연구

II. 연구개발의 목적 및 필요성

질란디아-남극 맨틀(Zealandia-Antarctic mantle) 규명은 극지연구소가 2011년부터 주도한 국내외 공동연구의 결과로서, 기존에 알려지지 않았던 새로운 맨틀 영역을 세계 최초로 규명했다는 데 그 의의가 있다(Park et al., 2019). 그러나 새로운 맨틀이 존재함만을 제시하였을 뿐, 후속연구를 통하여 이러한 맨틀 영역이 지질학적 시간과 공간상에서 어떠한 방식으로 진화하였고, 그 진화과정이 중앙해령 및 해양지각의 진화, 해저화산 생성 등과 어떠한 인과관계를 하는지, 그리고 어떠한 상호작용을 하였는지는 아직 밝혀진 바가 없었다.

본 연구는 본과제 "질란디아-남극 맨틀의 특성 및 기원 규명" 연구의 위탁연구로서, 질란디아-남극 맨틀의 동편 및 서편 경계 추정, 맨틀의 불균질성, 지구동역학적 특성과 기원 규명에 필요한 지구물리학적 연구결과를 제공하는 것을 목적으로 한다.

III. 연구개발의 내용 및 범위

본 2단계 연구(2023-2025)는 다음과 같은 범위로 수행되었다.

1차년도(2023): 호주-남극 중앙해령의 확장균열대 진화 연구로서, 호주-남극 중앙해령 확장균열대의 지구조 특성 규명 및 확장균열대 생성과 질란디아-남극 맨틀의 공진화 특성 규명을 위한 수치 모델 연구를 수행하였다.

2차년도(2024): 질란디아-남극 맨틀 심부구조 연구 1로서, 판운동 모델 개선을 통한 질란디아-남극 맨틀 생성 환경 복원 및 판운동 복원 모델과 맨틀 진화 특성 사이의 상관관계를 도출하고 분석하였다.

3차년도(2025): 질란디아-남극 맨틀 심부구조 연구 2로서, 질란디아-남극 맨틀의 밀도 분포 특성 연구 및 질란디아-남극 맨틀의 지구물리적 특성 경계를 규명하였다.

IV. 연구개발결과

1) 새로운 맨틀 영역의 지구물리적 특성 종합 규명: 질란디아-남극 맨틀의 중력 이상, 밀도 분포, 지구물리적 경계 등을 종합적으로 규명하였다. 본 연구를 통해 질란디아-남극 맨틀이 동경 150°에서 서경 170° 사이, 남위 58°에서 65° 사이의 영역에 분포하며, 주변 맨틀과 구별되는 고유한 지구물리적 특성을 보유하고 있음을 정량적으로 입증하였다.

2) 해저화산 연대측정 신기법 개발 및 학계 인정: 해상 지자기를 활용한 해저화산체의 연대측정 기법은 기존 연구들과 차별화되는 혁신적인 접근법으로 평가받고 있다. 이 기법을 적용한 논문은 2021년 해당 저널에서 가장 많이 다운로드된 논문으로 선정되어 국제 학계의 큰 주목을 받았다.

3) 마이크로플레이트 형성의 전 지구적 임계조건 제시: 전 세계 마이크로플레이트들의 생성 환경 및 진화 특성을 체계적으로 비교 분석하여, 마이크로플레이트 형성의 역학적 조건을 최초로 정량화하였다. 연구 결과, 마이크로플레이트는 전체 확장 속도가 약 60 mm/yr 이상인 환경에서만 형성 및 진화할 수 있음을 규명하였다.

4) 동-서 남극 분리 시기의 재정립: 북서 로스해 Central Basin에서 획득한 신규 해양 자기 자료 분석을 통해, 동-서 남극 분리의 시작 시점을 기존에 알려진 Chron 20 (~43 Ma)에서 Chron 24 (~53 Ma)로 약 1,000만 년 앞당기는 결정적 증거를 제시하였다. 이 연구 결과는 Nature Communications에 투고되어 심사 중에 있다.

V. 연구개발결과의 활용계획

1) 추가연구의 필요성: 확장균열대 진화 메커니즘 심화 연구, 질란디아-남극 맨틀의 시간적 진화 연구, Central Basin 및 로스해 추가 탐사가 필요하다.

2) 타연구에의 응용: 본 연구의 결과는 본과제인 "질란디아-남극 맨틀의 특성 및 기원 규명" 연구에 핵심적인 지구물리학적 기반을 제공한다. 또한 해상 지자기 연대측정 기법, 수치 모델링 프레임워크, 판운동 복원 방법론, 맨틀 밀도 역산 기법 등은 다른 극지 해양지구과학 연구에 광범위하게 응용될 수 있다.

3) 학술적 파급효과: 새롭게 정의된 맨틀 영역 연구의 패러다임 제시, 중앙해령-맨틀 상호작용 이해의 심화, 판구조 복원 정확도 향상에 기여할 것으로 기대된다.

S U M M A R Y

(영 문 요 약 문)

I. Title

Geophysical Characterization of Zealandia-Antarctic Mantle

II. Purpose and Necessity of R&D

The identification of the Zealandia-Antarctic mantle represents a significant scientific achievement from international collaborative research led by the Korea Polar Research Institute since 2011, marking the world's first discovery of a previously unknown mantle domain (Park et al., 2019). However, while the existence of this new mantle domain was demonstrated, subsequent research was needed to understand how this mantle region evolved through geological time and space, its causal relationships with mid-ocean ridge and oceanic crust evolution, seamount formation, and its interactions with surrounding geological features.

This research, as a commissioned study under the main project "Characterization and Origin of Zealandia-Antarctic Mantle," aims to provide geophysical research results necessary for estimating the eastern and western boundaries of the Zealandia-Antarctic mantle, understanding mantle heterogeneity, and characterizing geodynamic properties and origins.

III. Contents and Extent of R&D

This Phase 2 research (2023-2025) was conducted with the following scope:

Year 1 (2023): Evolution study of the Australian-Antarctic Ridge propagating rift system, including characterization of tectonic features and numerical modeling for understanding co-evolution between propagating rifts and the Zealandia-Antarctic mantle.

Year 2 (2024): Deep structure study of the Zealandia-Antarctic mantle (Part 1), including improvement of plate motion reconstruction models and analysis of correlations between plate motion reconstruction and mantle evolution characteristics.

Year 3 (2025): Deep structure study of the Zealandia-Antarctic mantle (Part 2), including density distribution characteristics and geophysical boundary delineation of the Zealandia-Antarctic mantle.

IV. R&D Results

1) Comprehensive Geophysical Characterization of a New Mantle Domain: The gravity anomalies, density distribution, and geophysical boundaries of the Zealandia-Antarctic mantle were comprehensively characterized. This research quantitatively demonstrated that the Zealandia-Antarctic mantle is distributed between 150°E and 170°W longitude and between 58°S and 65°S latitude, possessing unique geophysical characteristics distinct from surrounding mantle regions.

2) Development of Novel Dating Technique for Submarine Volcanoes: A new dating technique using marine magnetic data for submarine volcanic edifices was developed and internationally recognized as an innovative approach. The paper applying this technique was selected as the most downloaded paper of 2021 in the respective journal.

3) Global Threshold Conditions for Microplate Formation: Through systematic comparative analysis of microplate formation environments and evolution characteristics worldwide, the mechanical conditions for microplate formation were quantified for the first time. Results showed that microplates can only form and evolve in environments where the full spreading rate exceeds approximately 60 mm/yr.

4) Redefinition of East-West Antarctic Separation Timing: Analysis of newly acquired marine magnetic data from the Central Basin in the northwestern Ross Sea provided decisive evidence advancing the initiation of East-West Antarctic separation from the previously known Chron 20 (~43 Ma) to Chron 24 (~53 Ma), approximately 10 million years earlier. These results have been submitted to Nature Communications and are currently under review.

V. Application Plans of R&D Results

1) Need for Additional Research: Further research is needed on propagating rift evolution mechanisms, temporal evolution of the Zealandia-Antarctic mantle, and additional exploration of Central Basin and the Ross Sea.

2) Application to Other Research: The results directly contribute to the main project "Characterization and Origin of Zealandia-Antarctic Mantle." Additionally, the marine magnetic dating techniques, numerical modeling frameworks, plate reconstruction methodologies, and mantle density inversion methods can be broadly applied to other polar marine geoscience research.

3) Academic Impact: This research is expected to contribute to establishing new paradigms for studying newly defined mantle domains, deepening understanding of mid-ocean ridge-mantle interactions, and improving plate reconstruction accuracy.



목 차

제 1 장 서론

- * 연구개발의 목적,필요성 및 범위 등을 기술

제 2 장 국내외 기술개발 현황

- * 국·내외 관련분야에 대한 기술개발현황과 연구결과가 국·내외 기술개발현황에서 차지하는 위치 등을 기술

제 3 장 연구개발수행 내용 및 결과

- * 이론적, 실험적 접근방법, 연구내용, 연구결과를 기술

제 4장 연구개발목표 달성도 및 대외기여도

- * 연도별 연구목표 및 평가착안점에 입각한 연구개발목표의 달성도 및 관련분야의 기술발전예의 기여도 등을 기술

제 5 장 연구개발결과의 활용계획

- * 추가연구의 필요성, 타연구에의 응용, 기업화 추진방안을 기술
- * 연구기획사업 등 사업별 특성에 따라 목차는 변경 가능함.

제 6 장 참고문헌

- * 보고서 작성시 인용된 모든 참고 문헌을 열거한다.

제 1 장 서론

1.1 연구개발의 목적

본 위탁연구의 최종 목표는 질란디아-남극 맨틀 중력, 자력, 지구조적 특성 연구를 통해 확장균열대를 포함한 호주-남극 중앙해령 해양지각의 진화 양상을 규명하는 것이다. 이 연구는 극지연구소가 주도하는 본과제 "질란디아-남극 맨틀의 특성 및 기원 규명" 연구의 위탁연구로서, 질란디아-남극 맨틀의 동편 및 서편 경계 추정, 맨틀의 불균질성, 지구동역학적 특성과 기원 규명에 필요한 지구물리학적 연구결과를 제공하는 것을 목적으로 한다.

특히 본 연구는 기존에 알려지지 않았던 새로운 맨틀 영역인 질란디아-남극 맨틀의 공간적 범위와 경계를 정밀하게 규명하고, 이 맨틀 영역이 상부의 중앙해령 및 해양지각 생성에 미치는 영향을 정량적으로 분석하고자 한다. 또한 수치 모델링을 통해 맨틀 온도 분포와 확장균열대 발달 양상 사이의 역학적 상관관계를 규명함으로써, 해당 지역의 지구동역학적 진화 과정을 심층적으로 이해하는 것을 목표로 한다.

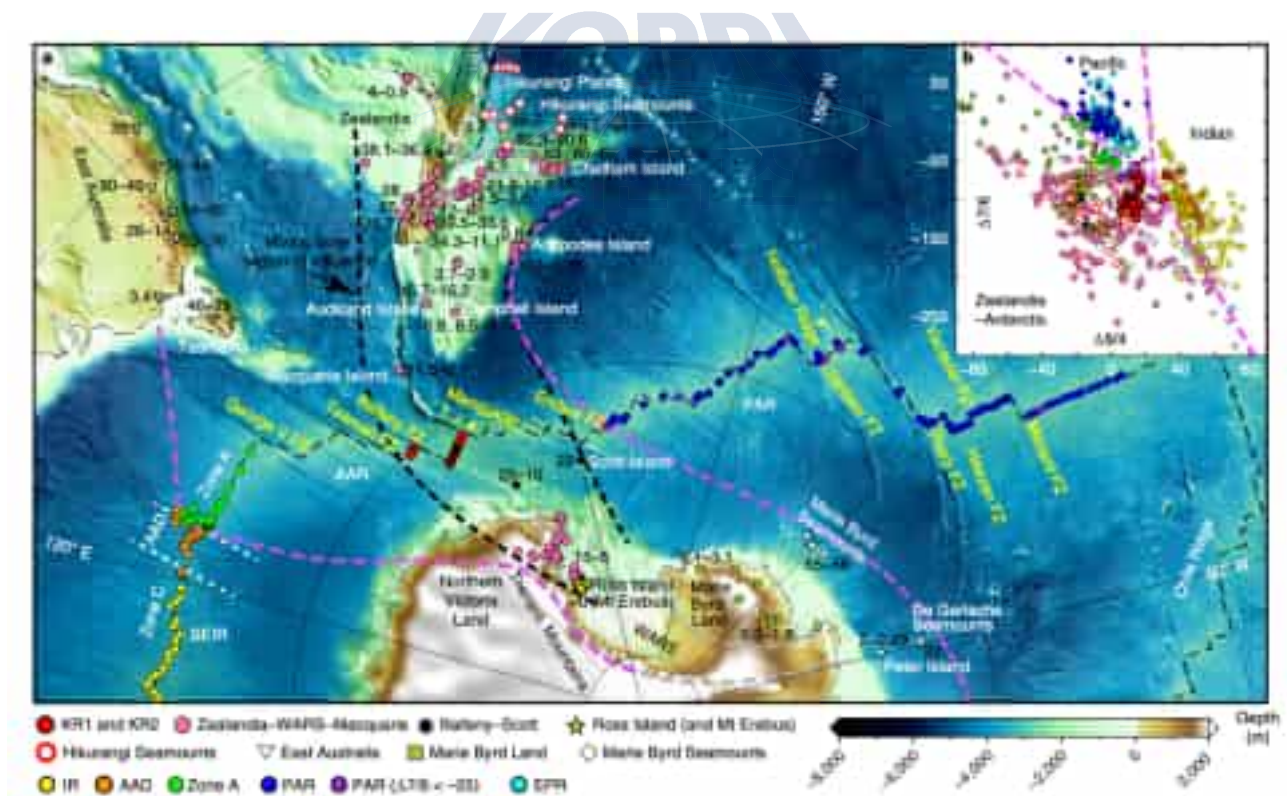


그림 1 질란디아-남극 맨틀 경계(Park et al., 2019)

1.2 연구개발의 필요성

질란디아-남극 맨틀(Zealandia-Antarctic mantle) 규명은 극지연구소가 지난 2011년부터 주도한 국내외 공동연구의 결과로서, 기존에 알려지지 않았던 새로운 맨틀 영역을 세계 최초로 규명했다는 데 그 의의가 있다(Park et al., 2019). 그러나 새로운 맨틀이 존재함만을 제시하였을 뿐, 후속연구를 통하여 이러한 맨틀 영역이 지질학적 시간과 공간상에서 어떠한 방식으로 진화하였고, 그 진화과정이 중앙해령 및 해양지각의 진화, 해저화산 생성 등과 어떠한 인과관계를 하는지, 그리고 어떠한 상호작용을 하였는지는 아직 밝혀진 바가 없었다.

질란디아-남극 맨틀의 경우 주변 맨틀보다 상대적으로 뜨거운 것으로 기존 연구에서 언급된 바 있다. 이러한 맨틀의 지구화학적 특성이 동일 지역에서 지구물리적 특성(밀도, 해양지각 두께, 지진파 속도 등)과 어떠한 상관관계를 가지는지에 대한 연구가 지속적으로 진행되어야 한다. 특히 대규모 확장균열대와 그 하부 맨틀과의 공진화 양상 규명이 우선적으로 수행될 필요가 있다.

남극 중앙해령은 국내 학계뿐만 아니라 국외 학계도 쉽게 접근할 수 없는 두 가지 중요한 연구 주제들을 제공하고 있다. 하나는 '극지'이며, 또 다른 하나는 '아직 연구되지 않은 중앙해령'이다. 전 세계 중앙해령 시스템 중에서 가장 연구가 미진했던 지역에 위치한 이 연구 대상은, 2011년부터 제약적으로나마 지속적으로 이루어진 아라온호 실험역 탐사를 통해 새로운 맨틀 영역의 존재가 밝혀짐으로써 국제 학계의 주목을 받게 되었다.

1.3 연구개발의 범위

본 위탁과제는 1단계 연구에 이어 2단계 연구기간(2023-2025)에 걸쳐 아래와 같은 연구 범위를 가지고 체계적으로 수행되었다.

- 1차년도(2023): 호주-남극 중앙해령의 확장균열대 진화 연구
 - 호주-남극 중앙해령 확장균열대의 지구조 특성 규명
 - 확장균열대 생성과 질란디아-남극 맨틀의 공진화 특성 규명을 위한 수치 모델 연구 수행
- 2차년도(2024): 질란디아-남극 맨틀 심부구조 연구 1
 - 판운동 모델 개선을 통한 질란디아-남극 맨틀 생성 환경 복원
 - 판운동 복원 모델과 맨틀 진화 특성 사이의 상관관계 도출 및 분석
- 3차년도(2025): 질란디아-남극 맨틀 심부구조 연구 2
 - 질란디아-남극 맨틀의 밀도 분포 특성 연구
 - 질란디아-남극 맨틀의 지구물리 특성 경계 규명

본 연구는 본과제 연구가 추진하는 질란디아-남극 맨틀의 동편 및 서편 경계 추정, 맨틀의 불균질성, 지구동역학적 특성과 기원 규명에 필요한 지구물리학 연구결과를 제공하는 동시에, 질란디아-남극 맨틀의 지구물리학적 특성을 중력, 자력, 지체구조, 시공간 진화 측면에서 종합적으로 살펴보고자 하였다.



제 2 장 국내외 기술개발 현황

2.1 국외 기술개발 현황

2.1.1 중양해령 연구 동향

전 세계 중양해령 시스템에 대한 연구는 지난 수십 년간 활발하게 진행되어 왔으나, 남극 중양해령 구간은 접근성의 제약으로 인해 상대적으로 연구가 미진한 실정이다. 특히 호주-남극 중양해령(Australian-Antarctic Ridge, AAR)과 태평양-남극 중양해령(Pacific-Antarctic Ridge, PAR) 구간은 해양과학 선두주자들조차도 연구 활동을 위해 조사선을 쉽게 보낼 수 없었던 지역으로 남아 있다.

미국 우즈홀해양연구소(WHOI)는 2003년 연구에서 초저속 확장 해령(ultraslow spreading ridge)이라는 새로운 유형의 중양해령을 규명하였다(Dick et al., 2003). 이 연구에 따르면, 연간 1인치 미만의 매우 느린 속도로 확장하는 해령에서는 화산 활동이 최소화 발생하며, 지구의 맨틀이 대규모 암석 슬래브 형태로 해저에 직접 노출된다. 이러한 발견은 전 세계 해저의 최대 40%가 기존에 알려진 것과 다른 방식으로 형성되었을 수 있음을 시사하며, 맨틀 암석이 지각이 거의 없거나 전혀 없는 넓은 해저 지역에 블록 형태로 배치되는 것으로 나타났다.

미국 스크립스해양연구소(Scripps Institution of Oceanography)를 비롯한 여러 연구기관에서는 대서양 중양해령, 동태평양 해령 등을 중심으로 해저확장 기작 및 맨틀 용승 과정에 대한 연구를 수행하고 있으며, 지진과 토모그래피, 중력 모델링, 지자기 이상 분석 등의 기법을 활용하고 있다. 최근 연구에서는 기계학습(machine learning) 기법을 활용하여 상부 맨틀 온도로부터 중양해령의 지리적 위치를 예측하는 새로운 접근법이 제시되었다(Bao et al., 2024). 이 연구에 따르면, 용융대 하부(260-600 km 깊이)의 지진과 유추 상부 맨틀 온도만을 사용하여 최대 90%의 정확도로 전 지구적 중양해령의 위치를 예측할 수 있으며, 이는 수억 년에 걸친 장기적인 지구조 및 대류 과정이 맨틀에 뚜렷한 지문을 남긴다는 것을 의미한다.

2024년 Science Advances에 발표된 연구에서는 대서양 중양해령 적도 부근의 Romanche 변환단층 동부에서 맨틀 불균질성에 대한 새로운 통찰을 제공하였다(Brunelli et al., 2025). 이 연구는 저온 중양해령 구간이 맨틀의 조성적 복잡성과 진화를 이해하는 데 독특한 관점을 제공한다는 것을 보여주었으며, 두꺼운 저온 암석권이 따뜻한 해령 구간에 면하여 해령 끝을 효율적으로 냉각시킴으로써 용융과 혼합을 감소시키고, 뚜렷한 단거리 암석학적 특성을 샘플링할 수 있게 한다는 것을 발견하였다.

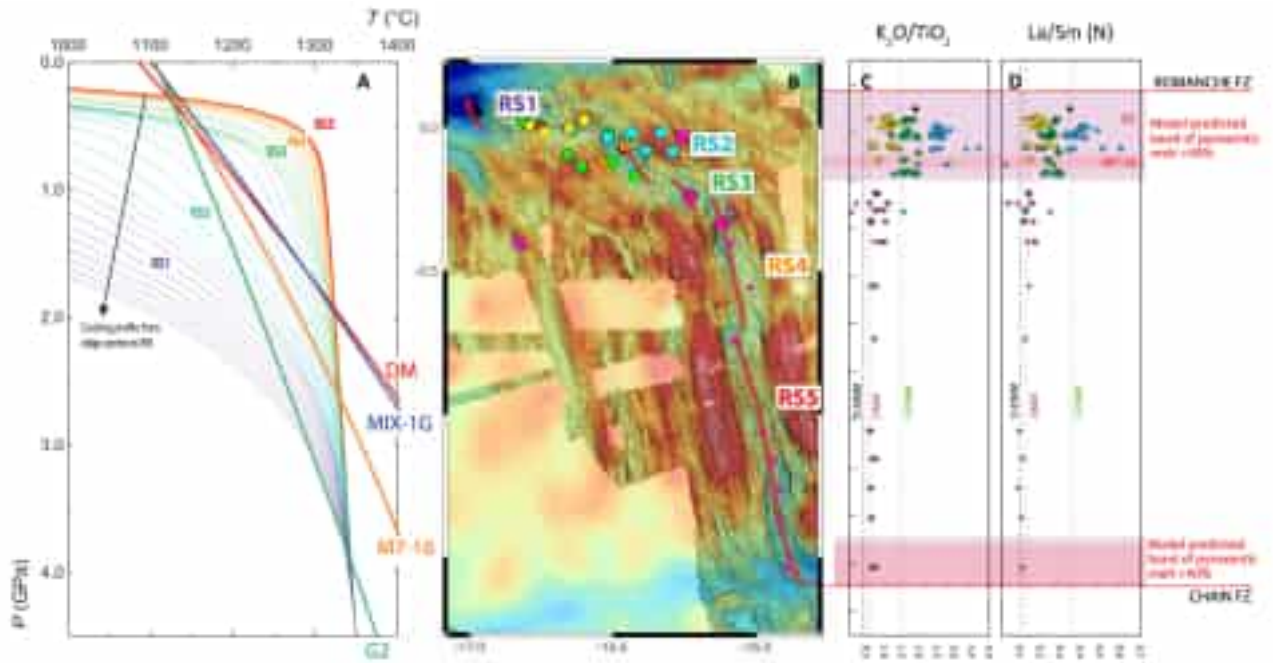


그림 2 중앙해령 구간의 맨틀 조성의 복잡성과 온도 특성(Brunelli et al., 2025)

태평양-남극 중앙해령의 Foundation Segment에서 수행된 2024년 연구에서는 맨틀 플룸과 빠른 확장 중앙해령의 상호작용에 대한 종합적인 분석이 이루어졌다(Brandl et al., 2024). Foundation 플룸과 태평양-남극 해령의 교차점은 맨틀 플룸이 빠른 확장 중앙해령에 접근하고 상호작용하는 전 지구적 지구동역학의 핵심 위치로서, 이 지역에서의 연구는 플룸-해령 상호작용 메커니즘을 이해하는 데 중요한 기여를 하고 있다.

2.1.2 맨틀 불균질성 연구 동향

맨틀 플룸(mantle plume) 및 열점(hot spot) 연구는 지구내부 역학 이해에 핵심적인 분야이다. 최근 지판 하부에 부분용융의 정도를 계산한 논문(Debayle et al., 2020)이 발표되었는데, 상부 맨틀 150km 깊이까지도 부분용융체가 존재하는 것으로 영상화가 되었다. 특히 호주-남극 중앙해령 하부의 맨틀 구조는 다른 중앙해령과 차별화되는 특성을 보이고 있어, 질란디아-남극 맨틀의 존재를 뒷받침하고 있다.

2024년 PNAS에 발표된 연구에서는 전파형 지진 토모그래피를 사용하여 남대서양과 중앙대서양 하부에서 주기적으로 배열된 연약권 '손가락(finger)' 구조를 발견하였다(Munch et al., 2024). 이 연구는 중앙해령 양측에서 약 1,800-2,000km 간격으로 발달한 저속 전단파 채널들이 절대 관운동 방향으로 확장되어 있으며, 각각의 핑거가 핵-맨틀 경계의 별개 패치에 뿌리를 둔 개별적인 맨틀 플룸 그룹과 연관되어 있음을 보여주었다. 이러한 발견은 대규모 저속 전단파 영역(LLSVP)이 핵-맨틀 경계 위로 높이 솟아오른 균일하고 연속적인 고밀도 물질 더미가 아니라, 오히려 별개의 조성을 가진 패치에 뿌리를 둔 맨틀 플룸의 집합체임을 시사한다.

2025년 초 발표된 연구에서는 대서양 중앙해령 하부에서 발생하는 깊은 지진(10-20km 깊이)이 CO₂ 탈가스와 관련되어 있음이 밝혀졌다(Yu et al., 2025). 이 연구는 상승하는 용융체로부터의 CO₂ 탈가스가 부피 변화를 일으키고, 이것이 신장 응력 환경에서 국부적으로 높은 변형률을 생성하여 맨틀에서 깊은 지진을 유발한다는 것을 제안하였다. 원시 용융체에서 비정상적으로 높은 CO₂ 농도(약 0.4-3.0 wt%)가 확인되었으며, 이는 중앙해령 하부의 맨틀 동역학과 용융 이동 과정을 이해하는 데 새로운 관점을 제공한다.

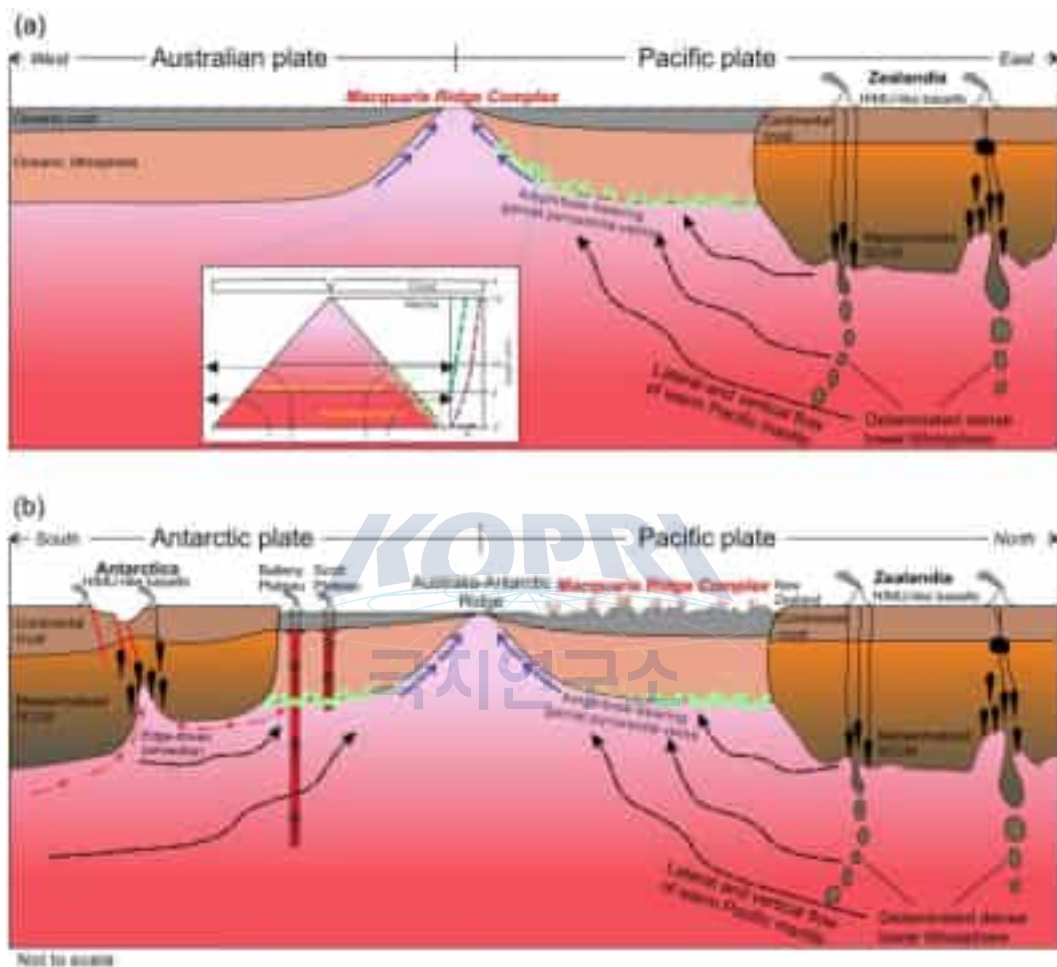


그림 3 맥쿼리 해령 복합체(Macquarie Ridge Complex)의 맨틀 불균질 모델(Jiang et al., 2021)

2.1.3 마이크로플레이트 연구 동향

중앙해령 확장축에서 형성되는 마이크로플레이트(microplate)에 대한 연구는 판구조론의 발전에 중요한 기여를 해왔다. 갈라파고스(Galapagos), 이스터(Easter), 후안 페르난데스(Juan Fernandez) 등의 마이크로플레이트에 대한 연구가 활발히 진행되어 왔으며, 최근에는 호주-남극 중앙해령의 맥쿼리(Macquarie) 마이크로플레이트에 대한 관심이 증가하고 있다.

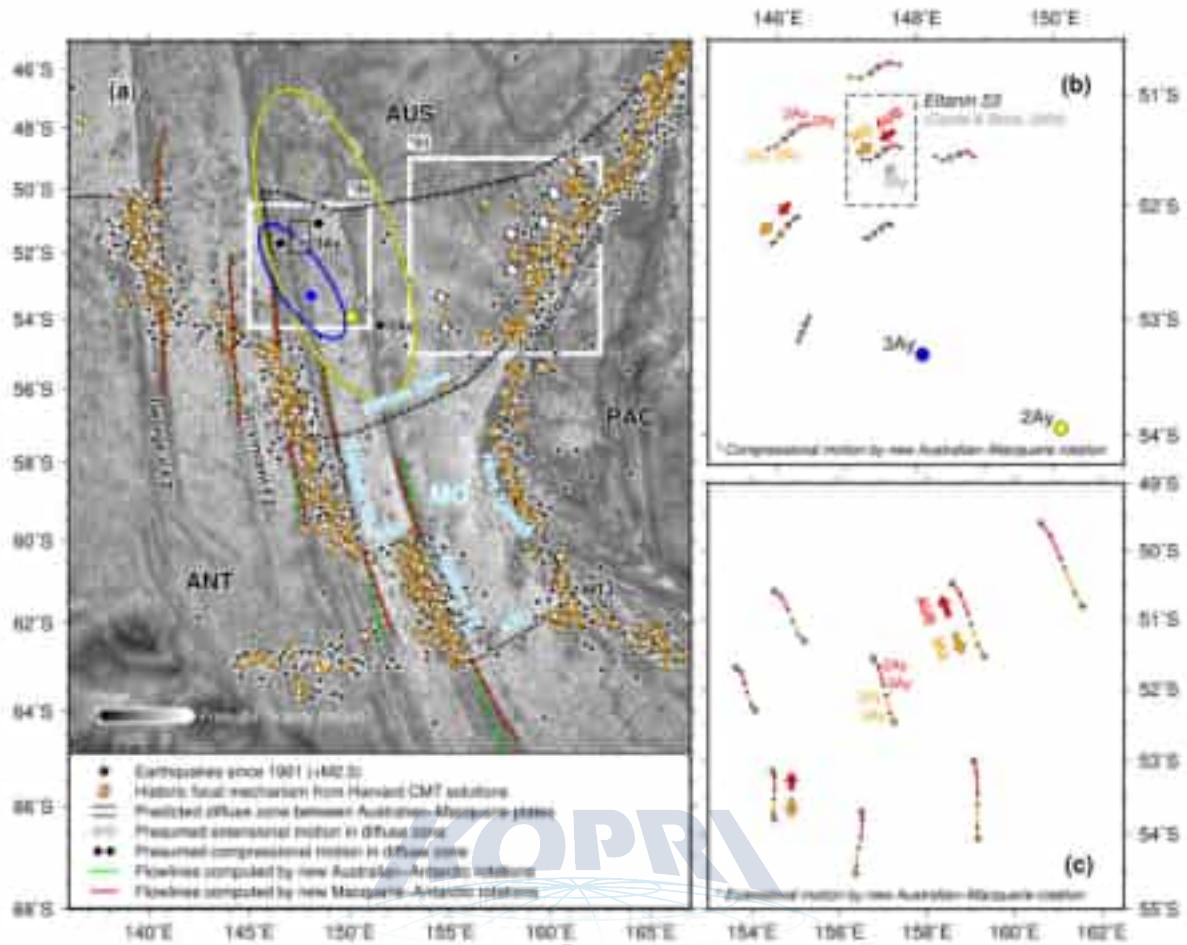


그림 4 맥쿼리 플레이트의 독립 운동을 지시하는 판운동 모델(Choi et al., 2017)

맥쿼리 플레이트는 인도-호주판의 또 다른 구성요소로서, 대략 동경 145° 동쪽, 남위 52° 남쪽 지역을 차지하는 소규모 강체판으로 확인되었다. 동남인도양 중앙해령(SEIR)의 자기 이상과 파쇄대 자료 분석 결과, 맥쿼리 플레이트 지역은 지난 약 600만 년 동안 독립적인 강체판으로 거동해 왔으며, 이는 인도-호주판이 실제로 Capricorn, 인도, 호주의 세 개의 작은 강체판으로 구성되어 넓은 확산 변형대로 분리되어 있다는 연구 결과와 일치한다(Choi et al., 2017).

2020년 연구에서는 맥쿼리 해령 복합체(Macquarie Ridge Complex)의 해산에서 채취한 암석과 맥쿼리 섬에서 새롭게 수집된 암석 시료에 대한 지구화학적 분석이 수행되었다. 이 연구는 뉴질랜드 남단에서 호주-태평양-남극 삼중점까지 이어지는 맥쿼리 해령 복합체가 네 개의 구간(Hjort, Macquarie, McDougall, Puysegur)으로 나뉘며, 각 구간이 불연속면과 방향 변화로 분리되어 있음을 보여주었다. 특히 이 지역의 현무암은 지구화학적으로 불균질한 특성을 보이며, 이는 하부 맨틀의 복잡한 조성 and 열적 구조를 반영한다(Jiang et al., 2021).

2.1.4 지구동역학 수치모델링 연구 동향

지구동역학 수치모델링 분야는 최근 급격한 발전을 이루고 있으며, 섭입 개시, 중앙해령 확장, 맨틀 대류 등 다양한 지구동역학적 과정을 시뮬레이션하는 데 활용되고 있다. 2022년 Geosphere에 발표된 종합 리뷰 논문에서는 섭입 수치모델링의 현황과 미래 방향에 대해 체계적으로 정리하였다(Gerya, 2022). 이 연구에 따르면, 3D 수치모델은 slab 분리, 찢김 등 복잡한 지구동역학 과정을 시뮬레이션하는 데 점점 더 많이 활용되고 있으며, 특히 중앙해령-해구 충돌(ridge-trench collision)과 같은 복잡한 판 경계 상호작용을 이해하는 데 중요한 역할을 하고 있다.

중앙해령 섭입에 대한 연구는 칠레 삼중점(Chile Triple Junction)을 사례로 활발히 진행되고 있다. 2023년 Geochemistry, Geophysics, Geosystems에 발표된 연구에서는 2D 암석학-열역학적 수치모델링을 통해 중앙해령 섭입 과정에서 발생하는 slab 분리, slab window 개방, 부분 용융체 이동 등의 과정을 상세히 분석하였다(Sanhueza et al., 2023). 이 연구는 slab window가 개방되는 동안 확장 중심부로부터의 부분용융체가 아대륙 맨틀 방향으로 이동하며, forearc 지역에서 고온이 예측됨을 보여주었다.

2023년 Gondwana Research에 발표된 연구에서는 멸종한 중앙해령과 약화된 수동 대륙연변부에서의 섭입 발달에 대한 수치모델링이 수행되었다(Wu et al., 2023). 이 연구는 세 가지 유형의 해양판 섭입(대륙연변부 섭입, 해령 역전 섭입, 이중 섭입)을 확인하였으며, 중앙해령과 수동 대륙연변부가 병존하는 환경에서 섭입 개시의 역학적 조건을 체계적으로 분석하였다. 연구 결과, 젊은 냉각 연령, 해양판으로부터의 압축력, 짧은 해령-연변부 거리, 강한 대륙연변부가 해령 역전 섭입을 선호하는 반면, 반대 조건들은 대륙연변부 섭입을 촉진하는 것으로 나타났다.

2.1.5 LaMEM 수치모델 개발 및 활용 동향

LaMEM(Lithosphere and Mantle Evolution Model)은 독일 마인츠 요하네스 구텐베르크 대학교에서 개발된 3D 병렬 수치 코드로서, 점탄소성(visco-elasto-plastic) 유변학적 특성을 가진 암석의 다양한 열역학적 지구동역학 과정을 시뮬레이션할 수 있다(<https://github.com/UniMainzGeo/LaMEM>). LaMEM은 지각과 암석권의 동역학 및 맨틀과의 상호작용을 이해하기 위해 개발되었으며, 지구역학적 문제 해결, 압축성 다공탄성(poroelasticity), 중력 슬버, 역산 프레임워크 등 다양한 기능을 포함하고 있다.

LaMEM은 marker-in-cell 접근법과 엇갈린 유한 차분 이산화(staggered finite difference discretization)를 사용하며, PETSc 기반으로 구축되어 노트북에서부터 대규모 병렬 슈퍼컴퓨터까지 다양한 환경에서 실행될 수 있다. 코드는 100,000개 이상의 코어에서도 확장 가능하도

록 최적화되어 있으며, 선형 및 비선형 유변학을 위한 다양한 멀티그리드 및 반복 솔버를 제공한다. 또한 Julia 언어 인터페이스(LaMEM.jl)가 개발되어 사용 편의성이 크게 향상되었다.

LaMEM의 주요 활용 분야는 다음과 같다. 첫째, 판 충돌과 조산운동 연구에서 대만 지역의 암석권-맨틀 상호작용 사례 연구와 미국 서부의 변형 구조에 대한 예비 연구가 수행되었다. 둘째, 지각 규모의 습곡과 단층 발달 물리학 연구에서 지표 과정이 맨틀과 지각 변형에 미치는 영향을 분석하였다. 셋째, 대륙 충돌에 의한 산맥과 고원 형성 메커니즘을 이해하기 위한 모델링이 수행되었다(Collignon et al., 2014; Püsök and Kaus, 2015). 또한 2023년 Nature Communications에 발표된 연구에서는 LaMEM을 사용하여 섭입 개시가 카리브해 대규모 화성암 지역(Caribbean Large Igneous Province)을 촉발했음을 보여주었다 (Riel et al., 2023).

LaMEM은 ChEESE(Centre of Excellence for Exascale in Solid Earth) 프로젝트의 일부로서 유럽 연구 협력 네트워크에서 적극 활용되고 있다. 이 프로젝트에서 LaMEM은 판 충돌, 조산운동, 리프팅, 맨틀 흐름 등 대규모 지구동역학 과정을 탐구하는 데 사용되며, 느린 크리프 흐름에서 취성 파괴에 이르는 다양한 암석 거동을 표현할 수 있어 지구동역학과 지구역학 연구 모두에 유용하다. 또한 해양 고원 부가에 의한 유도 섭입 개시 연구(2023년)에서 LaMEM을 사용하여 얇은 해양 고원은 연속적인 섭입을 유발하는 반면, 두꺼운 고원은 해구를 막고 새로운 섭입대를 형성한다는 것을 발견하였다(Sun et al., 2023).

2.1.6 GPlates 판구조 복원 연구 동향

GPlates는 호주 시드니대학교 EarthByte 그룹이 주도하여 개발한 오픈소스 판구조 복원 소프트웨어로, 지질학적 시간에 걸쳐 판구조 복원의 대화형 조작과 지구과학 데이터의 시각화를 가능하게 한다. 2024년 10월 30일에 GPlates 소프트웨어 개발 21주년을 맞이하였으며, 지속적인 업데이트를 통해 기능이 확장되고 있다. 최신 버전인 GPlates 2.5에서는 섭입대 이빨(subduction zone teeth) 표시 기능이 추가되어 복잡한 판 경계를 보다 정확하게 시각화할 수 있게 되었다(Boyden et al., 2011).

GPlates의 주요 기능과 활용 분야는 다음과 같다. 첫째, 판구조 복원을 위한 유한 회전(finite rotation) 계산과 시각화가 가능하다. 이를 통해 수억 년에 걸친 판의 이동 경로와 상호작용을 분석할 수 있다. 둘째, 다양한 지질학적, 지구물리학적 데이터를 판구조 복원과 연동하여 분석할 수 있다. 셋째, 맨틀 대류 모델과의 연동을 통해 지구동역학 컴퓨팅 서비스를 제공한다. 넷째, 고지리학(paleogeography) 및 고수심학(paleobathymetry) 시각화에 활용된다.

최근 GPlates 기반 연구 동향을 살펴보면, Müller et al. (2019)은 삼기(Triassic) 이후 주요 리프트와 조산대를 따른 암석권 변형을 포함하는 전 지구적 판모델을 발표하였다. 이 모델은 하이브리드 절대 기준 틀을 사용하며, 지난 1억 년 동안은 이동 열점 모델을, 2억 년에서 1억

년 사이에는 진극운동(true-polar wander) 보정 고지자기 모델을 적용하였다. 또한 GPlately 2.0.0이 발표되어 Python을 통한 판구조 복원의 프로그래밍적 접근이 크게 개선되었으며, 웹 서비스와 포털을 통해 100만 회 이상의 조회수를 기록하는 등 널리 활용되고 있다.

GPlates Web Service는 다양한 판구조 복원 모델을 제공하며, ZAHIROVIC2022가 기본 모델로 설정되어 있다. 사용 가능한 모델들은 Seton et al. (2012)의 첫 번째 위상학적 판 경계를 포함한 전 지구 모델부터 Clennett et al. (2020)의 북미 코딜레라 상세 모델까지 다양하다. 최신 모델인 MERDITH2021은 상대적 판운동과 맨틀 기준 틀을 결합하여 지구동역학적으로 불합리한 판운동을 배제하는 규칙을 적용하였다(Merdith et al., 2021).

2.2 국내 기술개발 현황

국내에서는 극지연구소를 중심으로 남극 중앙해령에 대한 연구가 진행되고 있다. 2011년부터 아라온호를 활용한 실패역 탐사를 통해 호주-남극 중앙해령의 KR1, KR2, KR3, KR4 구간에서 고해상도 지구물리 자료를 취득하였으며, 이를 바탕으로 질란디아-남극 맨틀의 존재를 세계 최초로 규명하였다(Park et al., 2019). 이 연구는 Nature Geoscience에 발표되어 국제 학계에서 큰 주목을 받았다.

아라온호를 활용한 탐사에서는 다중빔 음향측심기(multibeam echo sounder)를 사용하여 KR3, KR4 구간의 고해상도 수심 자료를 취득하였다. 이 자료 분석 결과, 호주-남극 해령의 축부 지형이 축부 고지(axial high)와 축부 열곡(axial rift) 사이에서 변화하며, 이는 일반적으로 빠른 확장 해령과 느린 확장 해령에서 각각 나타나는 특성이다. 특히 KR3 구간은 서쪽에서 동쪽으로 축부 고지, 축부 좁은 열곡, 축부 넓은 열곡, 축부 넓고 깊은 열곡으로 연속적으로 변화하는 것으로 확인되었다.

충남대학교 지질환경과학과에서는 본 위탁연구를 통해 해양 지구물리 자료 처리 및 해석, 판운동 복원 모델링, 지구동역학적 수치 모사 등의 연구를 수행해 왔으며, 국제지명학술지에 다수의 논문을 게재하는 성과를 거두었다. 특히 해상 지자기 자료를 활용한 해저화산체의 연대 측정 기법 개발(Choi et al., 2021)과 맥쿼리 플레이트의 운동학적 진화 규명(Choi et al., 2017) 등의 연구가 높은 평가를 받았다.

국내 연구기관들 간의 협력도 활발히 이루어지고 있다. 한국해양과학기술원(KIOST), 한국지질자원연구원(KIGAM) 등에서도 해양 지구물리 연구를 수행하고 있으며, 해외 연구기관과의 국제 공동연구도 확대되고 있다. 특히 미국 WHOI, 프랑스 IPGP 등과의 공동연구를 통해 연구 결과의 국제적 검증과 확산이 이루어지고 있다.

2.3 연구결과가 국내외 기술개발현황에서 차지하는 위치

본 연구는 전 세계적으로도 연구가 미진했던 남극 중앙해령 지역에서의 지구물리학적 연구로서, 다음과 같은 측면에서 중요한 위치를 차지한다.

새로운 맨틀 영역 규명 분야: 질란디아-남극 맨틀은 기존에 알려지지 않았던 새로운 맨틀 영역으로, 본 연구를 통해 그 지구물리적 특성과 경계가 보다 명확하게 규명되었다. 이는 전 지구적 맨틀 불균질성 연구에 새로운 사례를 제공하며, 특히 중앙해령 하부의 맨틀 구조가 해양지각 생성에 미치는 영향을 이해하는 데 중요한 기여를 한다.

해저화산 연대측정 기법 개발 분야: 해상 지자기 자료를 활용한 해저화산체의 연대측정 기법은 기존 연구들과 차별화되는 새로운 접근법으로, 국제학계에서 인정받았다. 이 기법은 향후 다른 중앙해령 지역의 해저화산 연구에도 적용될 수 있어, 방법론적으로 중요한 의미를 가진다.

마이크로플레이트 생성 조건 규명 분야: 전 세계 마이크로플레이트들의 생성 환경 및 진화 특성을 종합적으로 비교 분석함으로써, 마이크로플레이트 형성의 임계 조건을 제시하였다. 특히 확장 속도가 약 60 mm/yr 이상일 때에만 마이크로플레이트가 형성 및 진화할 수 있다는 정량적 기준을 도출하였다.

극지연구소

제 3 장 연구개발수행 내용 및 결과

3.1 1단계 연구(2020-2022) 주요 성과 요약

1단계 연구에서는 질란디아-남극 맨틀의 중력 이상 연구(1차년도), 해양지각의 시공간적 진화 연구(2차년도), 지구동역학적 진화 연구(3차년도)가 수행되었다. 특히 아라온호의 선상 정밀 수심자료와 인공위성 기반 예측 수심자료를 병합하여 잔여 맨틀 부게 중력 이상을 도출하였으며, 해양 지자기 자료를 활용하여 해양지각의 시공간적 변화 모델 변수를 추출하고 Emerald 균열대의 진화 과정을 규명하였다.

1단계 연구의 주요 성과로는 KR1 지역 해저화산의 지형적 특징 분석 연구(Choi et al., 2021), 자력 자료를 활용한 해저화산 연대 추정 연구(Choi et al., 2021) 등이 있다. 특히 해저 화산 연대측정 연구는 Geochemistry, Geophysics, Geosystems 저널의 2021년 가장 많이 다운로드된 논문으로 선정되는 성과를 거두었다.

3.2 2단계 연구(2023-2025) 수행 내용 및 결과

3.2.1 1차년도(2023): 호주-남극 중앙해령의 확장균열대 진화 연구

선상 지구물리 자료 수집 및 분석

남극 중앙해령 지역에서 아라온호를 활용하여 취득한 선상 삼성분 지자기 자료를 수집하고 체계적으로 분석하였다. 삼성분 자력계는 자기장의 세 방향 성분(X, Y, Z)을 동시에 측정하여 자기 벡터의 완전한 정보를 제공한다. 본 연구에서는 각기 다른 선상 자력계에서 측정한 자료의 정합성을 분석하여 선상에 부착하여 측정하는 삼성분 자력 자료의 유효성을 검증하였다. 선상 삼성분 자료와 총자력계 측정 자료 사이에 높은 정합성을 확인하였으며, 향후 이동간 탐사 시 선상 삼성분 자력계의 활용도를 확인할 수 있었다. 이 연구 결과는 자료의 중요성을 바탕으로 ESCI 논문 1편으로 게재되었다.

질란디아-남극 주변 지자기 자료의 정량적·정성적 자료 분석

질란디아-남극 주변 해역에서 측정된 지자기 자료에 대한 정량적·정성적 분석을 수행하였다. 해양지각의 생성 연대와 확장률 변화를 도출하여 확장균열대의 시공간적 진화 특성을 규명하였다. 특히 지자기 이상 패턴 분석을 통해 해저 확장 속도의 시간적 변화를 추적하였으며, 이를 통해 질란디아-남극 맨틀 상부의 해양지각이 주변 지역과 차별화되는 진화 경로를 거쳤음을 확인하였다.

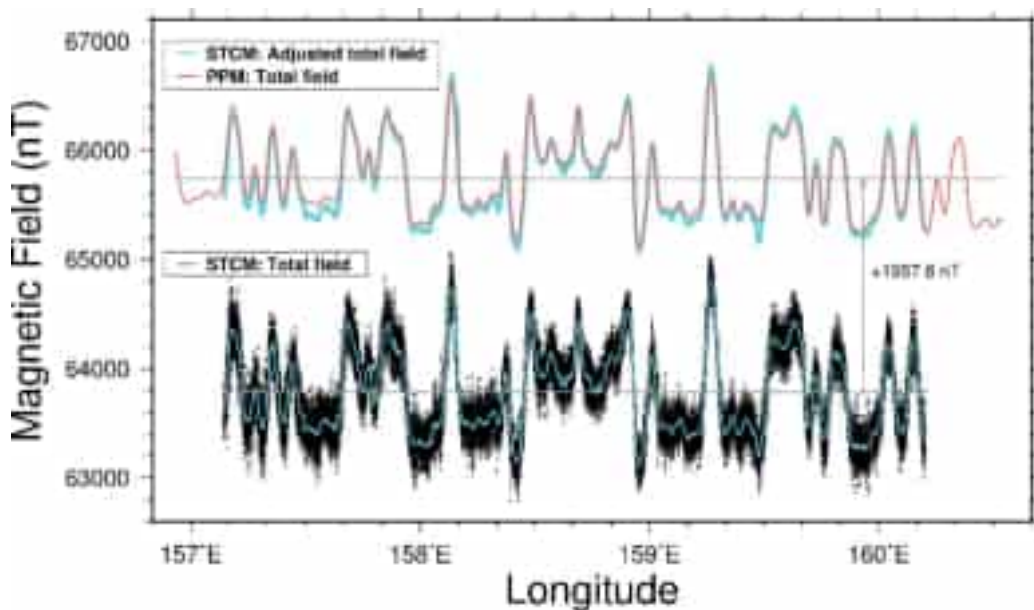


그림 5 호주-남극 중앙해령 지역의 자력계 취득 결과 비교(Choi et al., 2023)

유사 확장 구조 지역에 대한 비교 연구

비슷한 속도로 확장하는 유사 확장 구조인 Ayu Trough 지역에 대한 지구물리 자료 분석 및 지구조 결정인자 분석을 수행하였다(Choi et al., 2023). Ayu Trough는 필리핀해 판과 캐롤라인 판 사이에 위치한 확장 구조로서, 호주-남극 중앙해령과 유사한 중간 속도의 확장 환경을 가진다. 이 연구를 통해 중간속도로 확장하는 해양지각 생성 환경에서 나타나는 공통적인 지구조적 특성을 파악할 수 있었으며, 양 지역에서 관찰되는 축부 지형의 변화 양상과 마그마 공급의 불균질성이 확장 속도뿐만 아니라 하부 맨틀의 온도 분포와도 밀접한 관련이 있음을 확인하였다. 이 연구는 SCIE 논문 1편으로 발표되었다.

확장균열대 수치 모델 개발을 위한 문헌 분석

확장균열대 지구조 특성을 반영하는 수치 모델 연구를 위한 문헌 분석을 수행하였다. Schierjott et al. (2023) 연구에서 제시된 중앙해령-변환단층-중앙해령 지역에서의 변형 구조와 detachment 단층 구조의 발달 과정 수치 모사 환경 및 모델 변수를 분석하였다. 이 연구는 변환단층 주변에서의 암석권 변형 특성과 해양지각 생성 기작을 수치적으로 재현하는 방법론을 제시하였으며, 본 연구의 수치 모델 개발에 중요한 참고 자료로 활용되었다.

LaMEM(Lithosphere and Mantle Evolution Model) 수치 모델 모사 환경을 분석하였다. LaMEM은 마인츠 요하네스 구텐베르크 대학교에서 개발된 3D 병렬 지구동역학 수치 코드로서, 점탄소성 유변학적 특성을 가진 암석의 맨틀-암석권 상호작용을 시뮬레이션할 수 있다. 본 연구에서는 LaMEM의 marker-in-cell 접근법, 엇갈린 유한 차분 이산화 방법, 멀티그리드 솔버 등 핵심 알고리즘을 검토하고, 확장균열대 발달 양상과 맨틀 온도 분포의 상관관계를 분석하는 데 적합한 것으로 판단하였다.

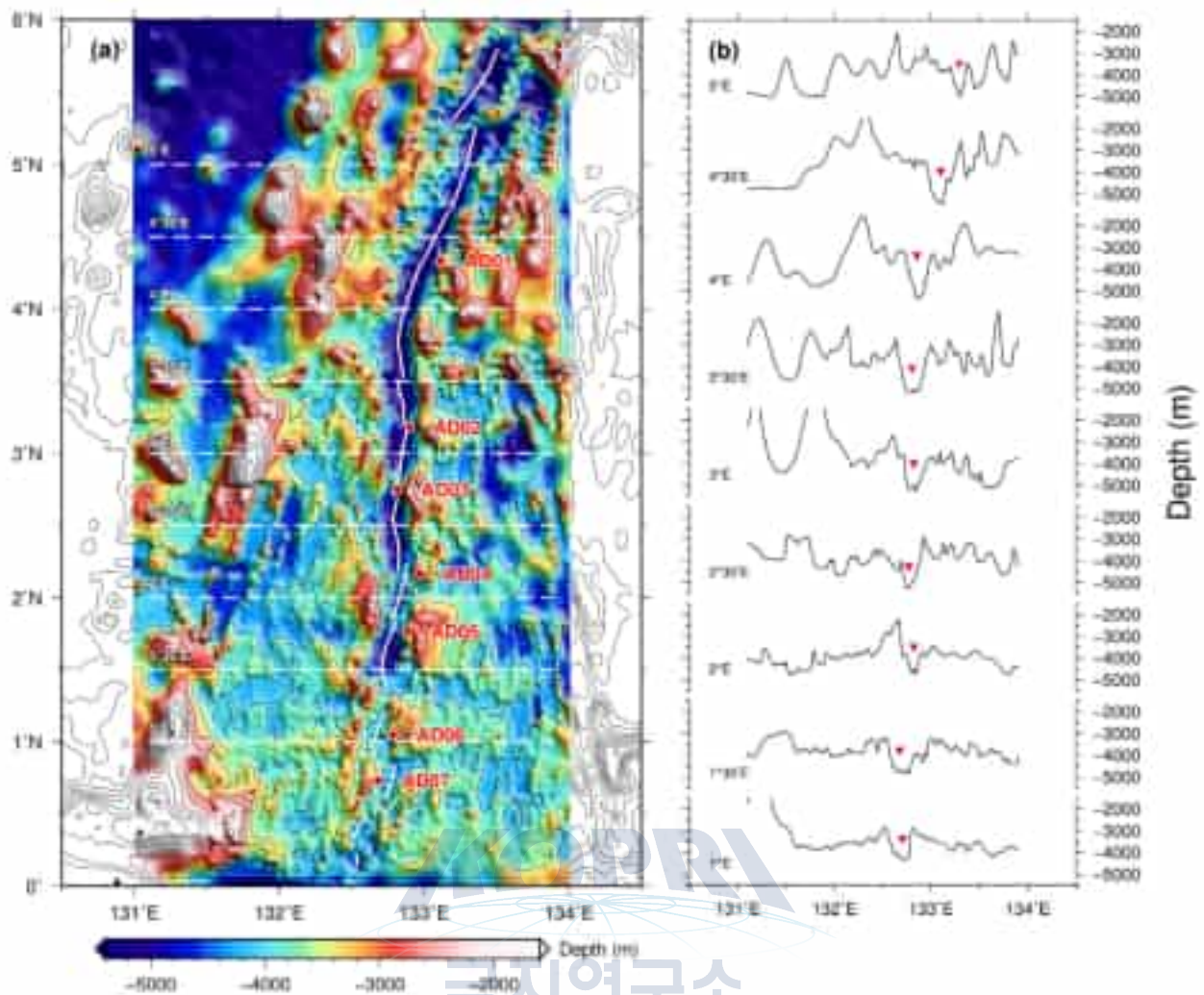


그림 6 Ayu Trough 지역의 수심변화 특징 분석(Choi et al., 2023)

3.2.2 2차년도(2024): 질란디아-남극 맨틀 심부구조 연구 1

판운동 복원 모델 수집 및 분석

질란디아-남극 맨틀 상부에 위치한 해양지판은 호주판, 남극판, 맥쿼리판, 그리고 태평양판이 상호 공진화 과정을 거치면서 발달하여 왔다. 본 연구에서는 연구지역 동편 태평양-남극 중앙 해령 구간에서 아라온호 및 기존에 취득된 선상 자력 자료를 확보하여 맥쿼리 판 이외의 Leaky Transform Fault 주변에서의 판운동 변화를 함께 정의하였다.

판운동 복원 도출을 위한 spreading rate 및 spreading asymmetry 등의 변수를 추출하였다. 해저 확장 속도는 지자기 이상 패턴의 연대 결정을 통해 계산되었으며, 확장 비대칭성은 해령 축 양측에서의 지각 폭 차이를 분석하여 도출되었다. 이러한 변수들이 주변 판 움직임과 어떠한 상호작용을 가지는지를 분석하였으며, 특히 맥쿼리 삼중점의 이동과 관련된 판운동 변화를 추적하였다.

GPlates를 활용하여 질란디아-남극 맨틀 중심의 디지털 판운동 복원 모델을 개선하였다. GPlates는 판구조 복원의 대화형 조작과 지질학적 시간에 걸친 지구과학 데이터 시각화를 가능하게 하는 소프트웨어로서, 본 연구에서는 Müller et al. (2019) 모델을 기반으로 질란디아-남극 지역에 특화된 상세 복원 모델을 구축하였다. 이 모델은 지난 수천만 년 동안의 판 경계 진화와 맨틀 구조의 상관관계를 분석하는 데 활용되었다.

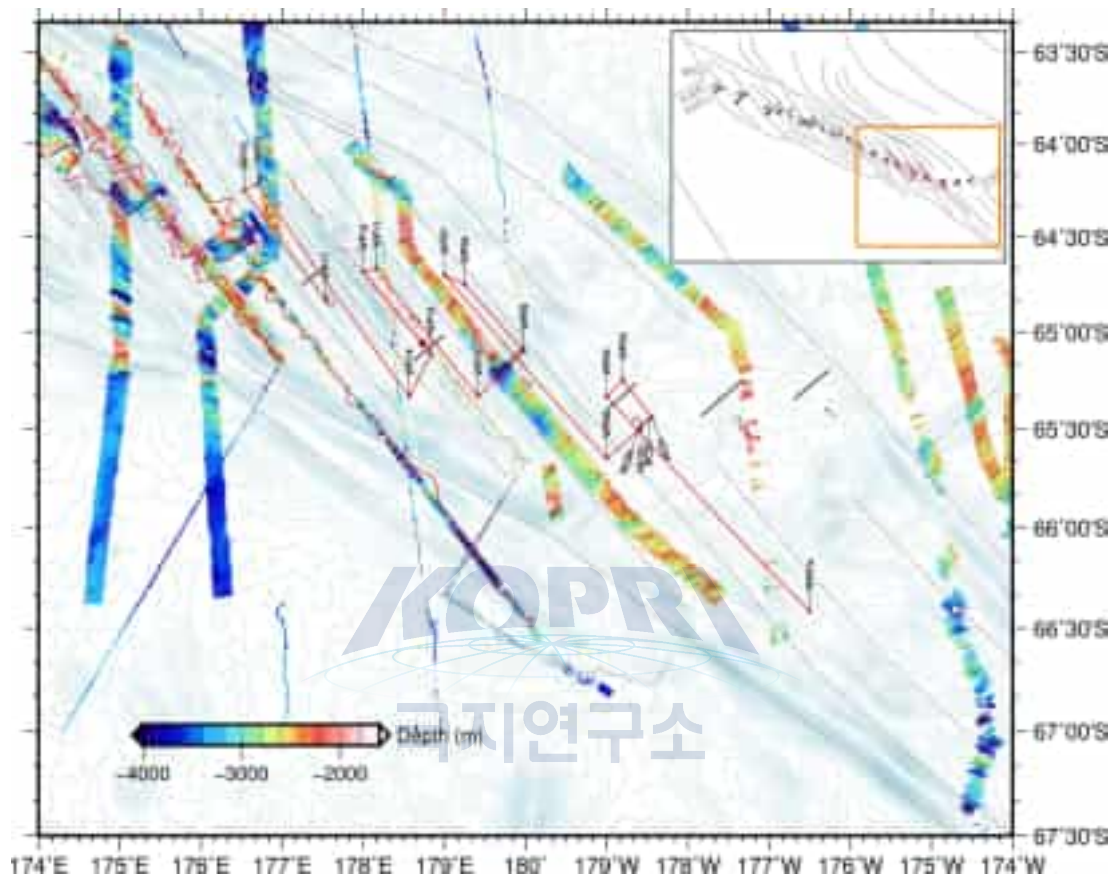


그림 7

판운동과 맨틀의 공진화 양상 규명

판운동 복원 환경에서 나타나는 맨틀 진화 양상을 연구하였다. 맨틀 온도 분포도를 작성하여 질란디아-남극 맨틀이 주변 맨틀보다 상대적으로 뜨거운 특성을 확인하였다. 이러한 온도 이상은 상부 맨틀의 지진파 속도 이상과도 일치하며, 질란디아-남극 맨틀 영역이 독특한 열적 구조를 가지고 있음을 지시한다.

지판 하부에 위치한 부분 용융의 공간 분포를 분석하였으며(Debayle et al., 2020 자료 활용), 그 중심이 KR1 지역에 위치하지 않고 현재 확장균열대 상에 위치하는 것을 확인하였다. 이것은 해양지각의 두께 이상치 분포와도 상호 연관성이 높은 것으로 판단되었다. 부분용융의 존재는 맨틀의 점성도를 감소시키고 용융체 이동을 촉진하여, 상부의 해양지각 생성에 직접적인 영향을 미친다.

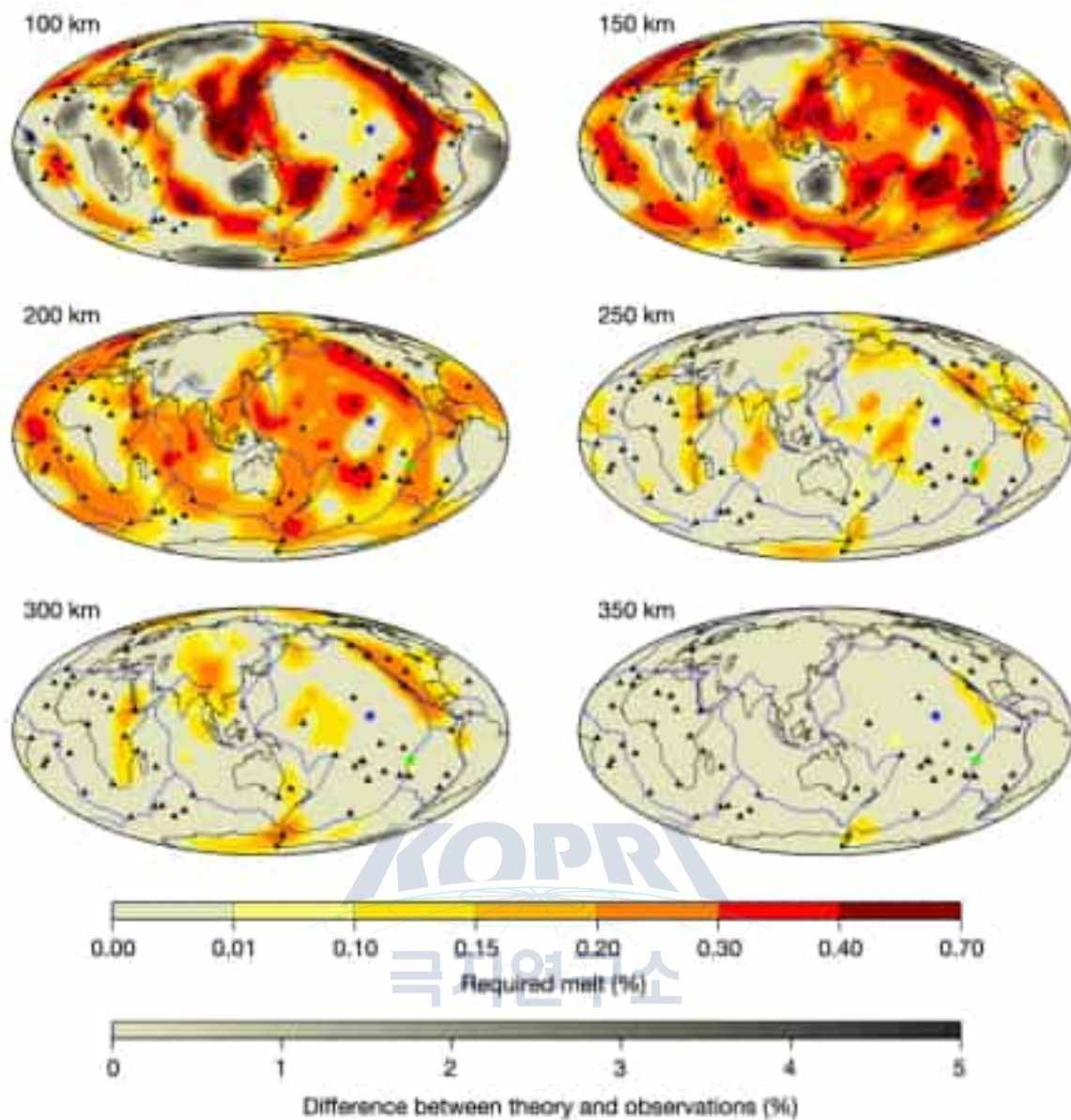


그림 8 연구지역의 맨틀 특성도(Debayle et al., 2020)

3.2.3 3차년도(2025): 질란디아-남극 맨틀 심부구조 연구 2

지오이드와 상부 맨틀 밀도 구조 상관관계 분석

지오이드, 지진파 속도 모델 등을 활용하여 질란디아-남극 맨틀의 밀도 분포를 역산하였다. 지오이드는 중력 퍼텐셜이 일정한 등퍼텐셜면으로서, 지구 내부의 밀도 분포를 반영한다. Salajegheh and Afonso (2023)에서 제시된 방법론을 참고하여, 전 지구적 맨틀 밀도 분포 모델에서 질란디아-남극 지역의 특성을 추출하고자 하였다.

분석 결과, 질란디아-남극 맨틀 지역은 주변 맨틀에 비해 상대적으로 낮은 밀도를 보이며, 이는 높은 맨틀 온도와 부분용융의 존재를 지시한다. 낮은 밀도는 맨틀 물질의 열팽창과 부분용융체의 존재에 기인하며, 이는 해당 지역의 동적 지형(dynamic topography)에도 영향을 미친다. 맨틀 밀도 분포도를 작성하여 질란디아-남극 맨틀의 공간적 범위를 정량화하였다.

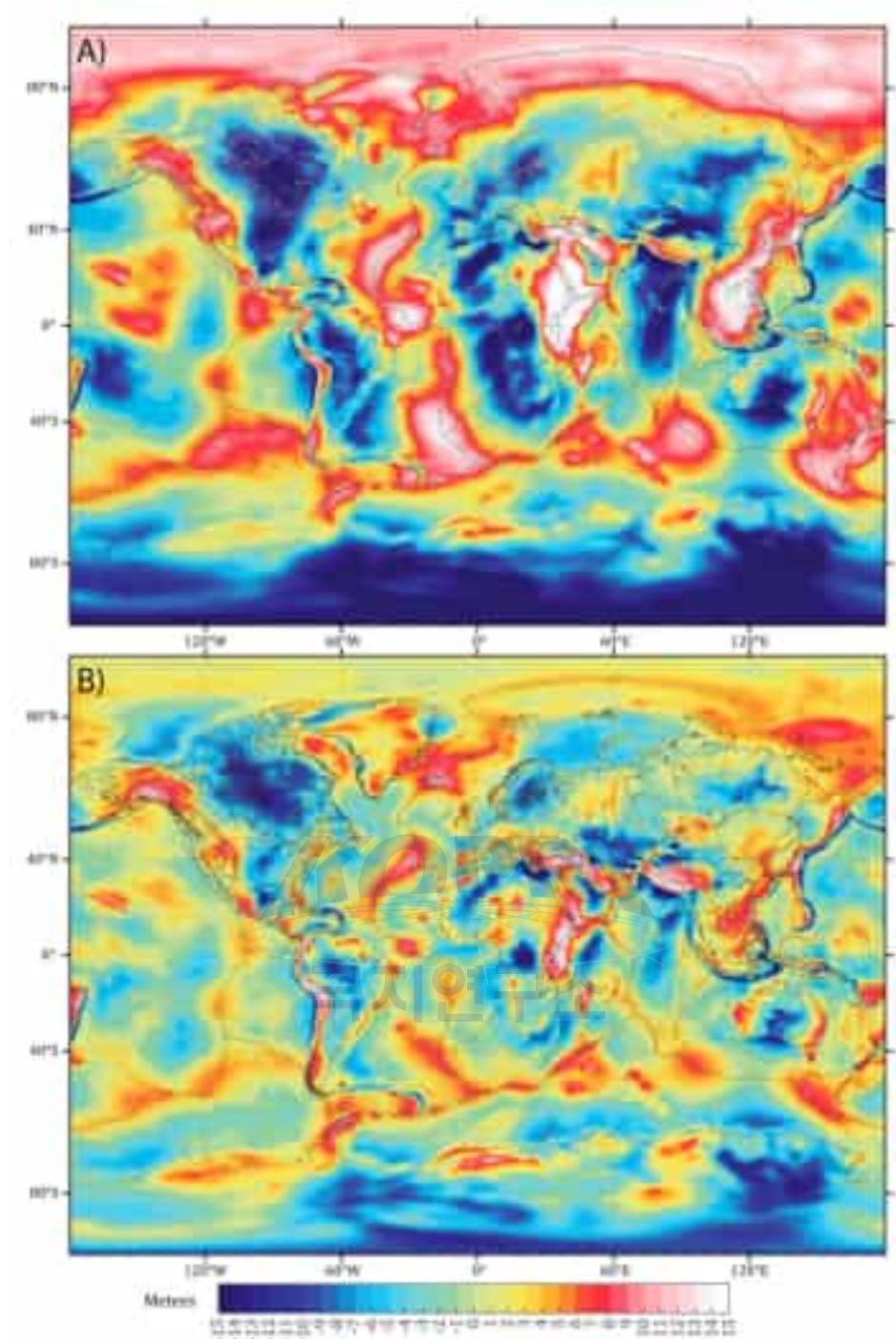


그림 9 전지구적 상부 맨틀 밀도구조 분포도(Salajegheh and Afonso, 2023)

동-서 남극 분리 시기 재정립 및 남서태평양 판구조 진화 모델 수립

3차년도 연구의 핵심 성과 중 하나로, 쇄빙연구선 아라온호를 이용하여 북서 로스해 Central Basin에서 획득한 신규 해양 자기 탐사 자료 분석을 통해 동-서 남극 분리의 시작 시점을 기존에 알려진 것보다 약 1,000만 년 앞당기는 결정적 증거를 확보하였다. 본 연구 결과는 국제 학술지 Nature Communications에 투고되어 심사 중에 있다 (Choi et al., under review).

남극판은 전 지구적 판구조 복원에서 핵심적인 기준 틀(reference frame)로 기능하며, 동남극과 서남극 두 지질학적으로 구분되는 지역 간의 상호작용은 남서태평양 판운동과 동곤드와나

분리 연대기를 이해하는 데 직접적인 영향을 미친다. 기존 연구에서는 로스해 서부의 Adare Trough 주변 해양 자기 이상 분석을 통해 동-서 남극 분리가 약 43~11 Ma 동안 진행되었음을 확인하였다. 그러나 빅토리아 랜드 융기 시기(~55-50 Ma), 신생대 두꺼운 퇴적층의 존재, Lord Howe Rise와 Campbell Plateau 간 판복원 모델의 공간적 불일치 등 여러 증거들은 더 이른 시기의 신장운동을 시사해왔다.

2019년 채빙연구선 아라온호를 이용하여 북서 로스해 Hallett Ridge와 Iselin Bank 사이에 위치한 Central Basin을 가로지르는 해양 자기 및 다중빔 수심 측량 탐사를 수행하였다. 취득된 자기 자료는 국제지자기기준장(IGRF) 모델 12를 적용하여 자기 이상을 분리하였으며, 전방 자기 모델링을 통해 이상대를 동정하였다. 기존 NBP9702 항차 자료를 포함한 모든 가용 자기 자료를 통합 분석하여 해석의 신뢰성을 검증하였다.

판운동학적 분석을 위해 Hellinger 프로그램을 활용하여 유한회전극(finite rotation pole)과 신뢰 타원을 산출하였다. 동남극-호주-서남극판을 연결하는 전 지구적 판회로(plate circuit)를 통해 Chron 24-20 구간의 새로운 회전 매개변수를 도출하였다.

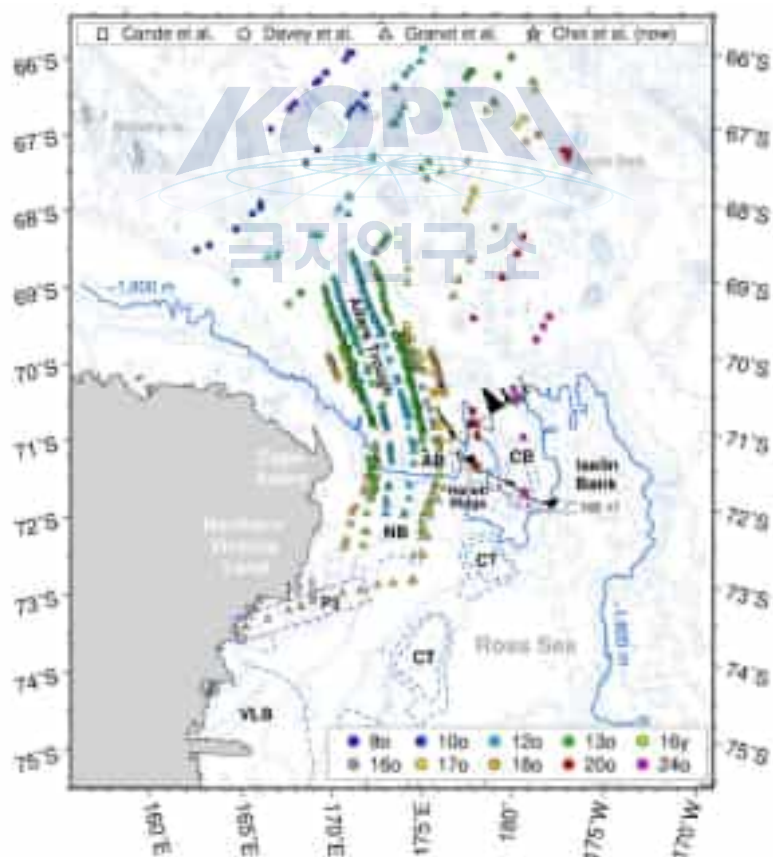


그림 10 Central Basin 지역의 지자기 자료 분포(Choi et al., under review)

Central Basin 해양지각 형성 시기 확정: Central Basin을 횡단하는 신규 측선(Line-N, Line-S)에서 뚜렷한 자기 극성 반전 패턴이 확인되어 해양지각의 존재가 입증되었다. 전방 모델링 결과, Chron 24-20 (~53-43 Ma) 동안의 해저확장 모델이 기존에 선호되던 Chron 27-24 (~61-53 Ma) 모델에 비해 관측 자료와 현저히 높은 적합도를 보였다. Line-N의 평균 반확장률은 7.2 mm/yr, Line-S는 8.2 mm/yr로 산출되었으며, 이는 동시기 인근 확장축의 확장률과 유사한 수준이다.

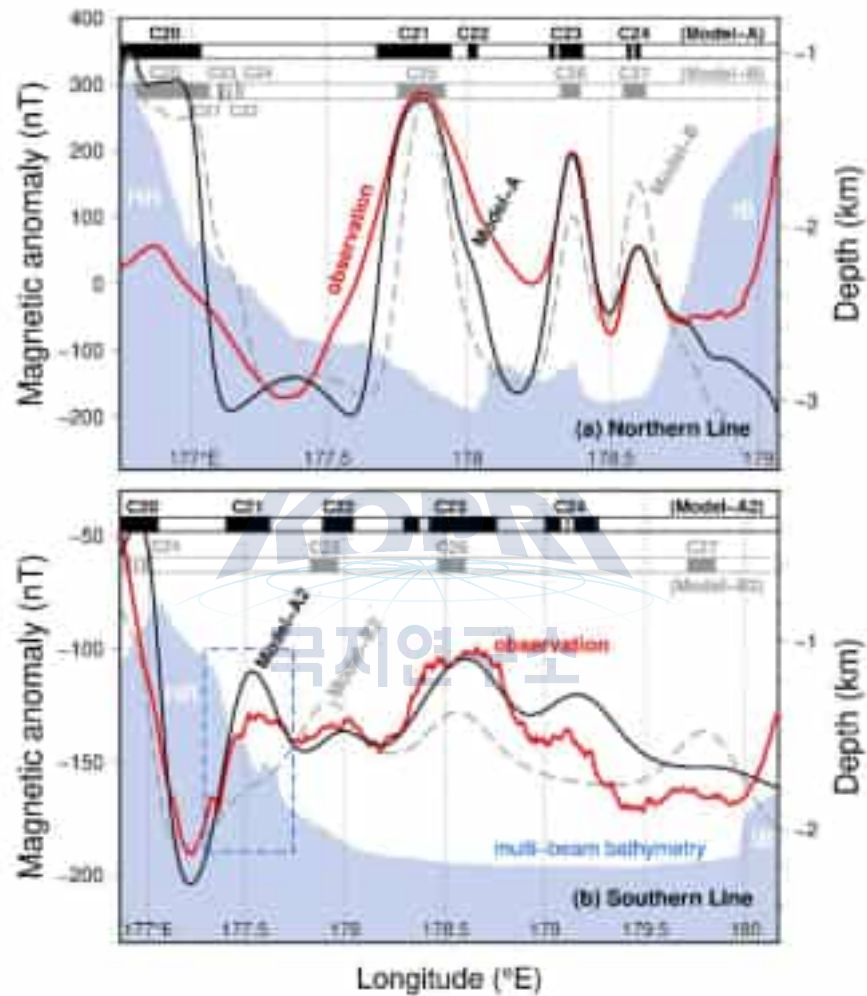


그림 11 Central Basin 횡단 선상 지자기 측선에 대한 지자기 모델링 결과(Choi et al., under review)

비대칭 확장 메커니즘 규명: Central Basin은 서남극 측에만 자기 이상이 보존된 고도로 비대칭적인 확장 양상을 보인다. 확장 경계는 동남극 대륙 암석권에 구조적으로 고정(pinned)되어 새로운 해양지각이 대칭적으로 양측에 부가되지 않고 주로 서남극 방향으로 부가되었다. 이러한 비대칭 해양지각 부가와 대륙연변부 융기의 결합은 해령 점프(ridge jump)나 공액 지각 소실 없이 판 발산을 수용하는 대안적 메커니즘을 제공한다.

로스해 복원 모델 수립: Chron 24 (~53 Ma) 시점에 Iselin Bank는 Central Basin 형성 직전 Hallett Ridge에 인접하여 위치하였으며, 이후 Cape Adare 북서쪽에 위치한 단계극(stage pole)을 중심으로 ESE 방향으로 이동하였다. Chron 20 (~43 Ma)까지 Iselin Bank는 서남극판의 일부로서 Hallett Ridge로부터 약 80 km 분리되어 Central Basin을 형성하였다. 이 ~80 km 신장은 동시에 Central Trough의 형성을 개시한 것으로 제안된다.

Chron 24-20 단계극은 164.674°E, 68.880°S에 위치하며, 동남극은 서남극 고정 기준으로 7.196° 시계방향 회전하였다. Chron 20 이후 회전극이 서남극 열개대(WARS) 중심부로 점진적으로 남하하면서 신장 방향이 ENE-WSW로 변화하여 Adare Basin, Northern Basin, Victoria Land Basin이 순차적으로 형성되었다.

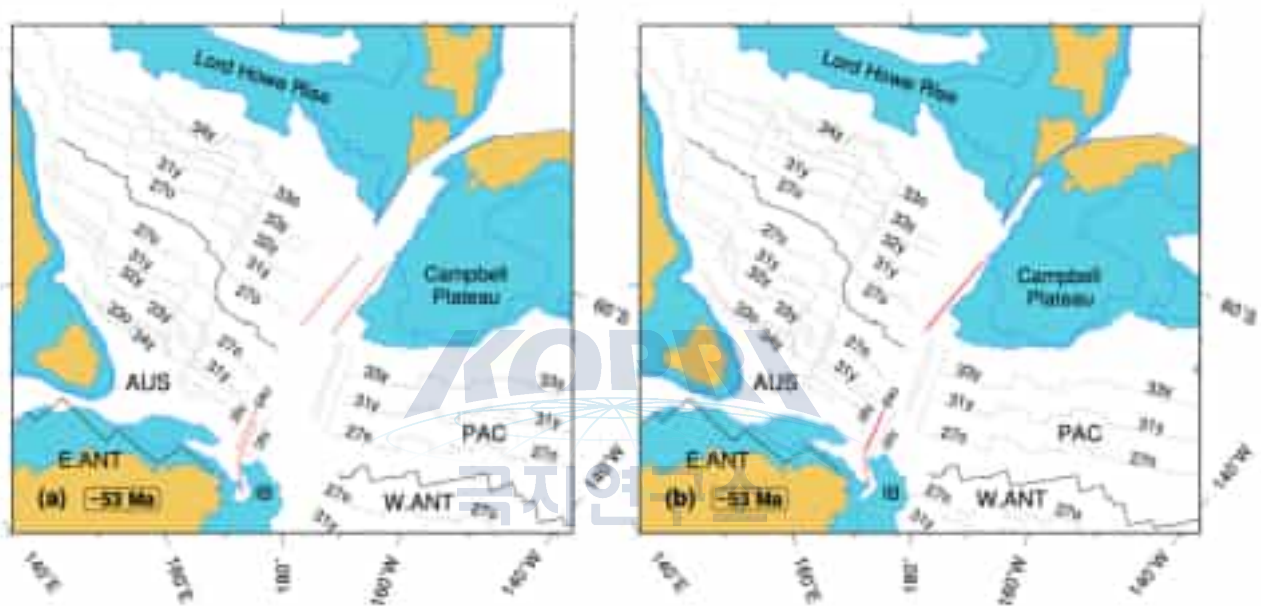


그림 12 개선된 서남극-동남극간 판운동 변화 비교(Choi et al., under review)

Balleny 단열대의 판운동 이력 보존: Balleny 단열대 동측 SEIR의 해저확장률이 Chron 8 (~26 Ma) 이전 시기에 호주-동남극 간 확장률을 초과한다는 기존 관측은 동-서 남극 간 추가적인 운동에 기인한 것으로 해석되어왔다. 본 연구에서는 호주-동남극 및 호주-서남극 회전 매개변수를 적용하여 합성 유선(synthetic flowline)을 생성한 결과, Balleny 단열대를 따라 유의미한 오프셋이 관찰되어 지속적인 차별적 판운동의 증거를 제공하였다.

Chron 24-20 동안 동-서 남극 운동의 단계극이 Balleny 단열대 유선 자체를 따라 위치하여 ESE-WNW 신장이 단열대와 거의 평행하게 발생하였다. 이 기하학적 배치로 인해 지속적인 신장에도 불구하고 불일치가 축적되지 않았음이 설명된다.

남서태평양 신생대 복원 모델 개선: 기존 연구에서 Chron 20에 동-서 남극 운동을 반영할 경우 Lord Howe Rise와 Campbell Plateau 간 거리 격차가 약 250 km에서 약 120 km로 감소됨이 확인되었으나, Chron 24에서는 여전히 약 150 km의 상당한 불일치가 존재하였다. 본 연

구에서 새로이 확인된 Chron 24까지 거슬러 올라가는 동-서 남극 분리를 반영하고, 비대칭 변형을 보정하기 위해 회전각을 2배로 적용할 경우, 이 잔여 불일치가 거의 해소되어 보다 정합적인 남서태평양 복원이 가능해졌다.

삼중점(Triple Junction) 역학과 지역 구조 진화: 본 연구는 삼중점의 형성, 이동, 소멸이 남서태평양 전역의 구조적 진화를 제어하는 근본적 메커니즘으로 작용하였음을 규명하였다. Chron 27 (~61 Ma)에는 두 개의 중요한 삼중점이 존재하였으며, Chron 24 (~53 Ma)의 전 지구적 판 재배열 시 남부 삼중점이 복잡한 4판 교차점(호주, 동남극, 서남극, 태평양)으로 진화하여 신장력이 삼중점 연결선을 따라 남하하며 로스해 지역에 전파되어 Central Basin의 해저 확장을 유발하였다.

본 연구는 다음과 같은 중대한 학술적 의의를 가진다:

- Central Basin의 해양 자기 증거를 통해 동-서 남극 운동이 기존에 인식된 Chron 20 (~43 Ma)가 아닌 Chron 24 (~53 Ma)에 시작되었음을 밝혀 남극판 분리의 기록된 역사를 약 1,000만 년 확장하였다.
- 이 발견은 기록된 남획단산맥 융기 시기(~55-50 Ma)와 기존 해저확장 시기 간의 시간적 불일치를 해소하는 동시에, 신생대 판모델에서 Lord Howe Rise와 Campbell Plateau 간 복원 격차를 제거하였다.
- 본 연구 결과를 바탕으로 Chron 24 이래 북부 로스해에서 약 230 km의 분리가 발생한 것으로 추정되며, 이는 동-서 남극 간 변위 이력에 대한 보다 완전한 설명을 제공한다.
- 백악기 후기 동곤드와나 분리부터 신생대 전 기간에 걸친 질란디아-남극 판경계의 완전한 구조 진화 모델을 최초로 제시함으로써, 남빙양을 형성하고 남극을 고립시킨 힘에 대한 새로운 통찰을 제공하였다.

제 4 장 연구개발목표 달성도 및 대외기여도

4.1 연구개발목표 달성도

성과목표	세부목표		달성 주요내용	달성도(%)
1차년도 (2023) 호주-남극 중앙해령의 확장균열대 진화 연구	1-1	확장균열대 지구조 특성 규명	- 선상 지구물리 자료 수집 - 질란디아-남극 주변 지자기 자료의 정량적 정성적 자료 분석 (SCIE 논문 1편 발표) - 비슷한 속도로 확장하는 유사 확장 구조인 Ayu Trough 지역에 대한 지구물리 자료 분석 및 지구조 결정인자 분석(SCIE 논문 1편 발표)	- 분석결과 제시 - SCI(E)논문 2편 발표 - 달성도: 100%
	1-2	확장균열대 수치 모델 개발	- 확장균열대 지구조 특성을 반영하는 수치 모델 연구를 위한 문헌 분석 - LaMEM (Lithosphere and Mantle Evolution Model) 수치 모델 모사 환경 분석 - 확장균열대 지구조 연구에 집중되어 2차년도에 추가 연구 수행 필요	- 2차년도에 추가 진행 - 달성도: 50%
2차년도 (2024) 질란디아-남극 맨틀 심부구조 연구 1	2-1	질란디아-남 극 중심의 판운동 복원 모델 개선	- 선상 지구물리 자료 수집 - 해저 지형 및 지자기 자료 분석 수행	- 분석결과 제시 - 달성도: 100%
	2-2	판운동과 맨틀의 공진화 양상 규명	- 전지구적 규모에서의 판운동 모델 인자 분석 - 확장균열대 생성과정에서의 판운동 변화 요소 분석	- 분석결과 제시 - 논문투고 준비 - 달성도: 100%
3차년도 (2025) 질란디아-남극 맨틀 심부구조 연구 2	3-1	Central Basin 지구조 분석	- 연구지역 및 주변 지역에 측정된 지자기 자료 및 문헌 자료 취합 및 분석 - Central Basin의 확장 변수 결정 및 판운동 복원 모델 확장에 필요한 변수 추출	- 분석결과 제시 - 논문투고 준비 - 달성도: 100%
	3-2	질란디아-남극 맨틀 밀도 분 포 특성 규명	- 지오이드, 지진파 속도 모델 등을 활용한 밀도 분포 역산 - 다양한 물리량 분포를 활용하여 질란디아 남극 맨틀의 지역적 특성 분석	- 분석결과 제시 - 달성도: 100%

4.2 대외기여도

4.2.1 학술적 기여도

새로운 맨틀 영역의 지구물리적 특성 종합 규명: 질란디아-남극 맨틀의 중력 이상, 지자기 이상, 밀도 분포, 지구물리적 경계 등을 종합적으로 규명함으로써, 2019년 Nature Geoscience에 처음 보고된 이 새로운 맨틀 영역에 대한 이해를 획기적으로 향상시켰다. 본 연구를 통해 질란디아-남극 맨틀이 동경 150°에서 서경 170° 사이, 남위 58°에서 65° 사이의 영역에 분포하며, 주변 맨틀과 구별되는 고유한 지구물리적 특성을 보유하고 있음을 정량적으로 입증하였다. 특히 지오이드, 지진파 속도 모델, 중력 자료를 통합 분석하여 맨틀 밀도 분포를 3차원적으로 역산한 결과는 전 지구적 맨틀 불균질성 연구에 새로운 사례를 제공하였다.

해저화산 연대측정 신기법 개발 및 학계 인정: 해상 지자기를 활용한 해저화산체의 연대측정 기법은 기존 연구들과 차별화되는 혁신적인 접근법으로 평가받고 있다. 기존 연구에서는 해저화산의 지자기 측정 시 측선 설계가 해저 확장 방향과 특별한 방향성 없이 설정되는 것이 일반적이었으나, 본 연구에서는 측선을 해저 확장 방향과 평행하게 설정함으로써 해양 지각의 지자기 역전 양상과 효과적인 비교가 가능해졌다. 이 기법을 적용한 G3 논문은 2021년 해당 저널에서 가장 많이 다운로드된 논문으로 선정되어 국제 학계의 큰 주목을 받았으며, 후속 연구들에서 인용되며 새로운 연구 방법론으로 자리매김하고 있다.

마이크로플레이트 형성의 전 지구적 임계조건 제시: 전 세계 마이크로플레이트들의 생성 환경 및 진화 특성을 체계적으로 비교 분석하여, 마이크로플레이트 형성의 역학적 조건을 최초로 정량화하였다. 연구 결과, 마이크로플레이트는 전체 확장 속도가 약 60 mm/yr 이상인 환경에서만 형성 및 진화할 수 있음을 규명하였으며, 지판 영역 확장을 유지하기 위한 중앙해령의 임계 길이가 약 500 km임을 제시하였다. 이러한 정량적 기준은 전 지구적 판구조 연구에서 마이크로플레이트 발달 가능성을 예측하는 데 활용될 수 있는 중요한 지표를 제공한다.

동-서 남극 분리 시기의 재정립: 북서 로스해 Central Basin에서 획득한 신규 해양 자기 자료 분석을 통해, 동-서 남극 분리의 시작 시점을 기존에 알려진 Chron 20 (~43 Ma)에서 Chron 24 (~53 Ma)로 약 1,000만 년 앞당기는 결정적 증거를 제시하였다. 이 발견은 기존에 해결되지 않았던 남횡단산맥 융기 시기(~55-50 Ma)와 해저확장 기록 간의 시간적 불일치를 해소하였으며, Lord Howe Rise와 Campbell Plateau 간 신생대 판복원 모델의 공간적 불일치(~150 km)를 거의 제거하는 데 기여하였다. 이 연구 결과는 Nature Communications에 투고되어 심사 중이며, 남극 및 남서태평양 판구조 연구 분야에 중대한 학술적 기여를 할 것으로 기대된다.

제 5 장 연구개발결과의 활용계획

5.1 추가연구의 필요성

[확장균열대 진화 메커니즘 심화 연구]

호주-남극 중앙해령 중앙부 확장축 동쪽에 위치한 확장균열대는 약 200 km 거리에 걸쳐 100 km 이내의 짧은 확장축이 변환단층 및 균열대로 분리되어 촘촘히 분포하고 있다. 이러한 지질구조의 특성은 고해상도 선상 지구물리 탐사에 의해 아직까지 조사되지 않았던 지역이 많기 때문에 구체적인 지형적 특성이 규명되지 못하였다.

본 연구에서 개발한 LaMEM 기반 수치 모델은 상대적으로 뜨거운 맨틀이 존재하는 경우 확장균열대 내부에 더 많은 수의 짧은 확장축이 발달할 수 있음을 예측하였으나, 이 모델의 현장 검증이 필요하다. 향후 아라온호의 추가 탐사를 통해 확장균열대 내부의 상세한 해저 지형, 지자기 이상, 중력 이상 분포를 규명하고, 수치 모델 모사 결과를 검증하는 연구가 요구된다. 특히 확장균열대 내 개별 확장축의 마그마 공급 특성과 분절화(segmentation) 패턴을 분석하여 질란디아-남극 맨틀의 열적 영향을 정량화할 필요가 있다.

[질란디아-남극 맨틀의 시간적 진화 연구]

본 연구에서는 현재 시점의 질란디아-남극 맨틀의 지구물리적 특성을 규명하였으나, 이 맨틀 영역이 지질학적 시간에 따라 어떻게 진화해 왔는지에 대한 연구가 추가로 필요하다. 동-서 남극 분리 연구에서 확인된 바와 같이, 남서태평양의 판구조 환경은 신생대 동안 급격한 변화를 겪어왔으며, 이러한 판운동 변화가 맨틀 대류 패턴과 열적 구조에 미친 영향을 규명해야 한다.

GPlates 기반 판운동 복원 모델과 맨틀 대류 수치 모사를 결합하여 과거 수천만 년 동안의 맨틀 진화 과정을 복원하는 연구가 필요하다. 특히 Chron 24 (~53 Ma) 시점의 전 지구적 판 재배열이 질란디아-남극 맨틀의 형성 및 진화에 미친 영향을 규명하는 것이 중요하다.

[Central Basin 및 로스해 추가 탐사]

본 연구에서 동-서 남극 분리의 초기 증거를 확인한 Central Basin 지역에 대한 추가적인 고해상도 탐사가 필요하다. 현재까지 확인된 자기 이상대는 서남극 측에만 보존되어 있어 비대칭 확장 메커니즘에 대한 추가 검증이 요구된다. 특히 다음과 같은 추가 연구가 필요하다:

- Central Basin의 퇴적층 하부 기반암 구조 규명을 위한 다중채널 탄성과 탐사
- Hallett Ridge의 해양지각 기원 확인을 위한 암석 시료 채취 및 연대측정
- 동남극 대륙연변부의 구조적 특성 규명을 통한 비대칭 확장 모델 검증
- Adare Trough 북부 지역의 상세 자기 탐사를 통한 확장축 이동 이력 복원

[열수분출구 탐사 및 생태계 연구]

호주-남극 중앙해령의 동쪽 끝에 위치한 KR1 구간에서 무진 열수분출구가 발견된 바 있으며, 본 연구의 결과를 바탕으로 추가적인 열수분출구 탐사가 가능하다. 질란디아-남극 맨틀의 상대적으로 높은 열류량이 열수 활동의 분포와 강도에 미치는 영향을 규명하고, 다음과 같은 후속 연구를 추진할 필요가 있다:

- 해저 지형 및 지구물리 특성을 기반으로 한 열수분출구 후보지 선정
- AUV/ROV를 활용한 열수분출구 정밀 탐사 및 영상 촬영
- 열수분출구 주변 극한 환경 생태계 조사
- 열수 퇴적물 및 황화물 시료 채취를 통한 광물자원 잠재력 평가

[삼중점 진화와 분지 형성 메커니즘 연구]

본 연구에서 제시한 삼중점 역학 모델을 보다 정밀하게 검증하기 위해, Macquarie Triple Junction 주변 지역에 대한 추가 연구가 필요하다. 현재 활동 중인 이 삼중점의 지구물리적 특성을 분석하여, 과거 삼중점의 이동 및 소멸 과정을 유추하는 현재론적 접근(actualistic approach)이 가능하다. 또한 Emerald Basin의 확장 이력을 재검토하여 호주-서남극-태평양 판간 상호작용의 시공간적 변화를 정밀하게 복원할 필요가 있다.

5.2 타연구에의 응용

[본과제 연구에의 직접적 기여]

본 위탁연구의 결과는 본과제인 "질란디아-남극 맨틀의 특성 및 기원 규명" 연구에 핵심적인 지구물리학적 기반을 제공한다. 구체적인 기여 내용은 다음과 같다:

- **맨틀 경계 규명:** 중력 이상, 지자기 이상, 밀도 분포 분석을 통해 정의된 질란디아-남극 맨틀의 공간적 경계는 본과제의 지구화학적 시료 채취 위치 선정에 직접 활용
- **맨틀 열적 구조:** 지진파 토모그래피 및 지오이드 역산을 통해 추정된 맨틀 온도 분포는 본과제의 현무암 지구화학 해석에 필수적인 배경 정보 제공
- **해양지각 두께 분포:** 중력 역산을 통해 산출된 해양지각 두께 변화는 맨틀 용융도 및 마그마 생산량 추정의 독립적 검증 자료로 활용

- **판운동 복원 모델:** GPlates 기반 디지털 복원 모델은 본과제에서 채취한 암석 시료의 고지리적 맥락 해석에 필수적

[극지 해양지구과학 연구에의 응용]

본 연구에서 개발한 방법론과 분석 기법은 다른 극지 해양지구과학 연구에 광범위하게 응용될 수 있다:

- **해상 지자기 연대측정 기법:** 북극해 Gakkel Ridge, 남서인도양해령 등 다른 초저속 확장해령의 해저화산 연대측정에 적용 가능
- **수치 모델링 프레임워크:** LaMEM 기반 확장균열대 수치 모델은 다른 중앙해령 시스템의 분절화 연구에 활용 가능
- **판운동 복원 방법론:** Hellinger 프로그램을 활용한 유한회전극 산출 기법은 북극해 판구조 연구 등에 적용 가능
- **맨틀 밀도 역산 기법:** 지오이드-지진파 토모그래피 통합 역산 기법은 다른 해양 맨틀 영역 연구에 활용 가능

[광역적 지구조 해석 연구에의 응용]

본 연구에서 수행한 마이크로플레이트 비교 분석, 확장균열대 진화 연구, 삼중점 역학 모델은 전 세계 다른 판경계 지역의 지구조 해석 연구에 응용될 수 있다:

- **마이크로플레이트 형성 조건:** 확장 속도 60 mm/yr 이상의 임계조건은 전 지구적 마이크로플레이트 발달 예측에 적용 가능
- **삼중점 진화 모델:** 남서태평양에서 규명된 삼중점 이동 메커니즘은 인도양, 카리브해 등 유사한 지구조 환경의 해석에 참고 가능
- **비대칭 확장 모델:** Central Basin에서 확인된 비대칭 해양지각 부가 메커니즘은 다른 대륙-해양 전이대 연구에 비교 사례로 활용 가능

[기후변화 연구에의 간접적 기여]

남극의 고립과 빙하 발달은 남극 주변 해류 시스템의 확립과 밀접한 관련이 있으며, 이는 판구조적 변화에 의해 제어되었다. 본 연구에서 확립된 동-서 남극 분리 연대기와 남서태평양 판구조 진화 모델은 다음과 같은 기후변화 연구에 간접적으로 기여할 수 있다:

- 남극 순환류(Antarctic Circumpolar Current) 확립 시기와 판구조적 배경의 연계
- 신생대 전 지구적 냉각화와 남극 고립화의 상관관계 규명
- 과거 해양 관문(gateway) 개폐가 해양 순환에 미친 영향 평가

5.3 학술적 파급효과

[새롭게 정의된 맨틀 영역 연구의 패러다임 제시]

질란디아-남극 맨틀은 기존에 알려진 대규모 저속도 영역(LLSVP)이나 맨틀 플룸과는 구별되는 새로운 유형의 맨틀 불균질성을 대표한다. 본 연구에서 확립된 지구물리적 특성 규명 방법론은 전 지구적으로 유사한 맨틀 영역을 탐색하고 특성화하는 연구의 패러다임을 제시한다. 특히 지구화학적 동위원소 특성과 지구물리적 특성을 통합하여 맨틀 영역을 정의하는 다학제적 접근법은 향후 맨틀 불균질성 연구의 표준적 방법론으로 자리매김할 수 있다.

[중양해령-맨틀 상호작용 이해의 심화]

본 연구는 질란디아-남극 맨틀과 그 상부에 위치한 호주-남극 중양해령의 공진화 관계를 규명함으로써, 중양해령 시스템이 하부 맨틀의 특성에 의해 어떻게 영향받는지에 대한 새로운 관점을 제시하였다. 수치 모델을 통해 맨틀 온도가 확장균열대의 분절화 패턴에 미치는 영향을 정량화한 것은 전 지구적 중양해령 연구에 중요한 함의를 가진다.

[판구조 복원 정확도 향상]

동-서 남극 분리 시기의 재정립은 전 지구적 판구조 복원 모델의 정확도를 향상시키는 데 직접적으로 기여한다. 남극판은 전 지구적 판회로(plate circuit)에서 핵심적인 역할을 하므로, 남극 내부의 상대운동 이력에 대한 정밀한 제약조건은 다른 판들의 절대운동 복원에도 영향을 미친다. 본 연구에서 산출된 새로운 유한회전 매개변수는 국제적으로 공유되어 후속 연구에 활용될 것이다.

제 6 장 참고문헌

- Bao, X., Mittal, T., & Lithgow-Bertelloni, C. R. (2024). Determining mid-ocean ridge geography from upper mantle temperature. *Earth and Planetary Science Letters*, 641, 118823. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2024.118823>
- Boyden, J. A., Müller, R. D., Gurnis, M., Torsvik, T. H., Clark, J. A., Turner, M., Ivey-Law, H., Watson, R. J., & Cannon, J. S. (2011). Next-generation plate-tectonic reconstructions using GPlates. In G. R. Keller & C. Baru (Eds.), *Geoinformatics* (1st ed., pp. 95-114). Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/CBO9780511976308.008>
- Brandl, P. A., Beier, C., Haase, K. M., Genske, F. S., Hauff, F., Regelous, M., Devey, C. W., & Rüpke, L. H. (2024). The geodynamics of plume-influenced mid-ocean ridges: Insights from the Foundation Segment of the Pacific-Antarctic Ridge. *Frontiers in Earth Science*, 12, 1456429. <https://doi.org/10.3389/feart.2024.1456429>
- Brunelli, D., Verhoest, L., Ligi, M., Hemond, C., Maia, M., Soltanmohammadi, A., Lugli, F., Nonnotte, P., & Cipriani, A. (2025). Large melt diversity at a mid-ocean ridge thermal low. *Science Advances*, 11(18), eadv4654. <https://doi.org/10.1126/sciadv.adv4654>
- Choi, H., Kim, S., & Park, S. (2021). Magnetic Constraints on Off-Axis Seamount Volcanism in the Easternmost Segment of the Australian-Antarctic Ridge. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 22(9). <https://doi.org/10.1029/2020GC009576>
- Choi, H., Kim, S.-S., & Park, S.-H. (2021). Tectonic constraints on formation and evolution of microplates in the Indian and Pacific Oceans: Reviews and statistical inferences. *Geosciences Journal*, 25(6), 799-811. <https://doi.org/10.1007/s12303-021-0005-7>
- Choi, H., Kim, S.-S., Park, S.-H., & Kim, H. J. (2021). Geomorphological and Spatial Characteristics of Underwater Volcanoes in the Easternmost Australian-Antarctic Ridge. *Remote Sensing*, 13(5), 997. <https://doi.org/10.3390/rs13050997>
- Choi, H., Kim, S.-S., & Park, S.-H. (2023). Comparative analysis of shipboard three-component magnetometer (STCM) and proton precession magnetometer (PPM) datasets in the Australian-Antarctic Ridge. *Data in Brief*, 49, 109351. <https://doi.org/10.1016/j.dib.2023.109351>
- Choi, H., Kim, S.-S., Park, S.-H., & Lee, S.-M. (2023). Spreading rate, opening time, and kinematic history of the Ayu Trough. *Geosciences Journal*, 27(5), 553-561. <https://doi.org/10.1007/s12303-023-0021-x>
- Clennett, E. J., Sigloch, K., Mihalynuk, M. G., Seton, M., Henderson, M. A., Hosseini, K., Mohammadzaheri, A., Johnston, S. T., & Müller, R. D. (2020). A Quantitative Tomotectonic Plate Reconstruction of Western North America and the Eastern Pacific Basin. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 21(8), e2020GC009117.

<https://doi.org/10.1029/2020GC009117>

- Collignon, M., Kaus, B. J. P., May, D. A., & Fernandez, N. (2014). Influences of surface processes on fold growth during 3-D detachment folding. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 15(8), 3281–3303. <https://doi.org/10.1002/2014GC005450>
- Collins, A. S., & Pisarevsky, S. A. (2005). Amalgamating eastern Gondwana: The evolution of the Circum-Indian Orogens. *Earth-Science Reviews*, 71(3-4), 229–270. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2005.02.004>
- Debayle, E., Bodin, T., Durand, S., & Ricard, Y. (2020). Seismic evidence for partial melt below tectonic plates. *Nature*, 586(7830), 555–559. <https://doi.org/10.1038/s41586-020-2809-4>
- DeConto, R. M., & Pollard, D. (2003). Rapid Cenozoic glaciation of Antarctica induced by declining atmospheric CO₂. *Nature*, 421(6920), 245–249. <https://doi.org/10.1038/nature01290>
- Gerya, T. (2022). Numerical modeling of subduction: State of the art and future directions. *Geosphere*, 18(2), 503–561. <https://doi.org/10.1130/GES02416.1>
- Japsen, P., Green, P. F., & Chalmers, J. A. (2023). Synchronous exhumation episodes across Arctic Canada, North Greenland and Svalbard in relation to the Eurekan Orogeny. *Gondwana Research*, 117, 207–229. <https://doi.org/10.1016/j.gr.2023.01.011>
- Ji, F., Wu, L., & Zhang, Q. (2022). Gravity-Derived Antarctic Crustal Thickness Based on the Gauss-FFT Method. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 23(8). <https://doi.org/10.1029/2022GC010555>
- Jiang, Q., Merle, R. E., Jourdan, F., Olierook, H. K. H., Chiaradia, M., Evans, K. A., Wang, X.-C., Conway, C. E., Bostock, H. C., & Wysoczanski, R. J. (2021). Origin of geochemically heterogeneous mid-ocean ridge basalts from the Macquarie Ridge Complex, SW Pacific. *Lithos*, 380–381, 105893. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2020.105893>
- Merdith, A. S., Williams, S. E., Collins, A. S., Tetley, M. G., Mulder, J. A., Blades, M. L., Young, A., Armistead, S. E., Cannon, J., Zahirovic, S., & Müller, R. D. (2021). Extending full-plate tectonic models into deep time: Linking the Neoproterozoic and the Phanerozoic. *Earth-Science Reviews*, 214, 103477. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2020.103477>
- Munch, F. D., Romanowicz, B., Mukhopadhyay, S., & Rudolph, M. L. (2024). Deep mantle plumes feeding periodic alignments of asthenospheric fingers beneath the central and southern Atlantic Ocean. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 121(46), e2407543121. <https://doi.org/10.1073/pnas.2407543121>
- Pusok, A. E., & Kaus, B. J. P. (2015). Development of topography in 3-D continental-collision models. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 16(5), 1378–1400. <https://doi.org/10.1002/2015GC005732>
- Riel, N., Duarte, J. C., Almeida, J., Kaus, B. J. P., Rosas, F., Rojas-Agramonte, Y., &

- Popov, A. (2023). Subduction initiation triggered the Caribbean large igneous province. *Nature Communications*, 14(1), 786. <https://doi.org/10.1038/s41467-023-36419-x>
- Sanhueza, J., Yáñez, G., Buck, W. R., Araya Vargas, J., & Veloso, E. (2023). Ridge Subduction: Unraveling the Consequences Linked to a Slab Window Development Beneath South America at the Chile Triple Junction. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 24(9), e2023GC010977. <https://doi.org/10.1029/2023GC010977>
- Spasojevic, S., Gurnis, M., & Sutherland, R. (2010). Mantle upwellings above slab graveyards linked to the global geoid lows. *Nature Geoscience*, 3(6), 435-438. <https://doi.org/10.1038/ngeo855>
- Sun, B., Yang, J., Lu, G., Wang, X., Wang, K., & Zhao, L. (2023). Numerical modeling of induced subduction initiation: Insights from the oceanic plateau accretion. *Tectonophysics*, 868, 230108. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2023.230108>
- Wu, Y., Liao, J., Qing, J., & Shen, Y. (2023). Subduction development along extinct mid-ocean ridges versus weakened passive continental margins. *Gondwana Research*, 117, 243-260. <https://doi.org/10.1016/j.gr.2023.02.001>
- Yu, Z., Singh, S. C., Hamelin, C., Grenet, L., Maia, M., Briaies, A., Petracchini, L., & Brunelli, D. (2025). Deep mantle earthquakes linked to CO₂ degassing at the Mid-Atlantic Ridge. *Nature Communications*, 16(1), 563. <https://doi.org/10.1038/s41467-024-55792-9>

극지연구소