

제 출 문

극지연구소장 귀하

본 보고서를 “질란디아-남극 맨틀의 특성 및 기원 규명” 과제의 위탁연구 “질란디아-남극 맨틀의 지구물리적 특성 규명” 과제의 단계보고서로 제출합니다.



(본과제) 총괄연구책임자 : 박 송 현

위탁연구기관명 : 충남대학교

위탁연구책임자 : 김 승 섭

위탁참여연구원 : 송 지 현

“ : 이 응 상

“ : Bebin, Alysse

“ : 하 연 철

보고서 초록

위탁연구과제명	질란디아-남극 맨틀의 지구물리적 특성 규명				
위탁연구책임자	김 승 섭	해당단계 참여연구원수	5	해당단계 연구비	90,000,000원
연구기관명 및 소속부서명	충남대학교 지질환경과학과		참여기업명		
국제공동연구	상대국명 :		상대국연구기관명 :		
요약(연구결과를 중심으로 개조식 500자 이내)				보고서 면수	40
<p>‘질란디아-남극 맨틀 규명’은 극지연구소가 지난 2011년부터 주도한 국내외 공동연구의 결과로서 기존에 알려지지 않았던 새로운 맨틀 영역을 세계 최초로 규명했다는 데 그 의의가 있음. 그러나 새로운 맨틀이 존재함을 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 없음</p> <p>이 연구에서는 연구지역에서 아라온호로 측정된 다중빔 멀티빔 자료를 사용하여 호주-남극 중앙해령의 가장 동쪽 부분인 KR1의 해산화산에 대한 형태학적 분석을 수행하여 중앙해령 부근에서 생성된 해저화산에 대한 형태학적 연구는 해양 암석권에서 일어나는 지질학적 과정 및 마그마 공급 구조 등 지구 내부 물질 이동에 대한 연구를 수행하였음</p> <p>또한 KR1 확장축 주변에서 발견된 해저화산의 생성시기를 지자기 자료를 활용하여 정량적으로 추정하였음. 해저화산의 생성 시기를 결정하는 전통적인 방법은 화산체에서 얻은 암석 샘플의 지구 화학적 연대 측정을 통해 결정되지만, 이것은 최근의 일어난 해저화산의 분출 시기만을 나타내는 경향이 있음. 이 연구는 2-D 자기 모델링 접근법을 사용하여 해저화산의 생성 시기와 그 하부의 해양지각의 생성 시기가 서로 다름으로 인해 관찰된 해저 자기 이상과 예측된 해저 자기 이상 사이의 불일치를 활용하여 해저화산의 생성연대를 계산 하였음</p> <p>중앙해령과 같이 좁은 영역을 가지는 지판 경계 이외에도 지판 사이의 운동 차이를 내부 변형을 통해 수용하는 확산형 지판 경계가 존재함. 특히 호주-남극 중앙해령의 Macquarie 마이크로 지판이 대표적인 예로 확산형 경계를 가지고 있으며, 인도-호주 지판의 경우도 여러 개의 마이크로 지판으로 분할이 되었음. 이러한 마이크로 지판의 지구물리적 특성을 분석하기 위하여 수심, 중력, 해상 지자기 자료, 판운동 모델, 그리고 지진파 모델을 사용하여 연구를 수행하였음</p>					
색 인 어 (각 5개 이상)	한 글	호주-남극 중앙해령, 해저화산, 해상 지자기, 판운동 복원, 해양 지구물리			
	영 어	Australia-Antarctic Ridge, seamount, marine magnetics, plate reconstruction, marine geophysics			

요 약 문

I. 제 목

질란디아-남극 맨틀의 지구물리적 특성 규명

II. 연구개발의 목적 및 필요성

‘질란디아-남극 맨틀 규명’은 극지연구소가 지난 2011년부터 주도한 국내외 공동연구의 결과로서 기존에 알려지지 않았던 새로운 맨틀 영역을 세계 최초로 규명했다는 데 그 의의가 있음. 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 없음

이 연구는 본과제 연구가 추진하는 질란디아-남극 맨틀의 동편 및 서편 경계 추정, 맨틀의 불균질성, 지구동역학적 특성과 기원 규명에 필요한 지구물리학 연구결과를 제공하는 동시에 중앙해령의 화산활동 및 판구조 운동 복원을 통해 질란디아-남극 맨틀의 지구물리학적 특성을 중력, 자력, 지체구조 시공간 진화 측면에서 살펴보고자 함

III. 연구개발의 내용 및 범위

연구지역에서 아라온호로 측정된 다중빔 멀티빔 자료를 사용하여 호주-남극 중앙해령의 가장 동쪽 부분인 KR1의 해산화산에 대한 형태학적 분석을 수행하여 중앙해령 부근에서 생성된 해저화산에 대한 형태학적 연구는 해양 암석권에서 일어나는 지질학적 과정 및 마그마 공급 구조 등 지구 내부 물질 이동에 대한 연구를 수행하고자 함

KR1 확장축 주변에서 발견된 해저화산의 생성시기를 지자기 자료를 활용하여 정량적으로 추정하였음. 해저화산의 생성 시기를 결정하는 전통적인 방법은 화산체에서 얻은 암석 샘플의 지구 화학적 연대 측정을 통해 결정되지만, 이것은 최근의 일어난 해저화산의 분출 시기만을 나타내는 경향이 있음. 이 연구는 2-D 자기 모델링 접근법을 사용하여 해저화산의 생성 시기와 그 하부의 해양지각의 생성 시기가 서로 다름으로 인해 관찰된 해저 자기 이상과 예측된 해저 자기 이상 사이의 불일치를 활용하여 해저화산의 생성연대를 추정하고자 함

중앙해령과 같이 좁은 영역을 가지는 지판 경계 이외에도 지판 사이의 운동 차이를 내부 변형을 통해 수용하는 확산형 지판 경계가 존재함. 특히 호주-남극 중앙해령의

Macquarie 마이크로 지판이 대표적인 예로 확산형 경계를 가지고 있으며, 인도-호주 지판의 경우도 여러 개의 마이크로 지판으로 분할이 되었음. 이러한 마이크로 지판의 지구 물리적 특성을 분석하기 위하여 수심, 중력, 해상 지자기 자료, 판운동 모델, 그리고 지진 파 모델을 사용하여 연구를 수행하고자 함

IV. 연구개발결과

KR1 중앙해령 지역에 분포하는 해저화산들의 공간적 분포는 동부, 중부, 서부의 세 지역으로 구분될 수 있음. 특히 연구 지역에서는 총 20개의 해저화산이 특정화되었으며, 해저화산 크기와 중앙해령 확장축과의 거리에 따라 두 가지 범주로 분류할 수 있었음. 또한 해저화산대를 구성하는 해저화산은 높이, 기저 면적, 부피 등에서 큰 값을 가지고 있으며, 이러한 해저화산들은 연약권에서 발생한 맨틀 비균일성으로 인해 발생한 소규모 용융체가 상승하여 생성되었을 가능성이 높은 것으로 판단되었으며, 해저화산의 부피는 기저부 면적이 증가함에 따라 높이가 ~520m로 증가하는 경향이 있음을 발견하였음. 이와 달리 KR1의 서쪽에 위치한 일련의 작은 해저화산들은 기저 면적이 증가함에 따라 ~150m 높이의 계수가 증가하는 경향성을 보이고 있으며, 해저확장축 하부의 마그마 공급구조의 시간에 따른 변화와 관련이 있을 것으로 추정됨

위 해저화산들에 지자기 모델링을 수행하여 각 해저화산체의 생성시기를 결정하였음. 해양 지각의 생성시기와 동일한 시기에 생성된 해저화산체도 존재하지만, 해양 지각과 다른 양상의 지자기 역전띠를 가진 해저화산체도 정량적으로 결정되었기 때문에, 이는 KR1 확장축의 마그마 공급이 시간과 공간 상에서 다양한 변화를 거쳐왔다는 것을 시사함

이 연구에서 제시한 해상 지자기를 활용한 해저 화산체의 연령측정 기법은 과거 다른 연구 방법과는 다른 방식을 취하였는데, 이것은 자료 취득의 방식이 달랐기 때문에 가능했음. 기존 연구들의 경우에는 해저화산에서 지자기 측정 시 측선 설계가 해저 확장 방향과 평행하게 설정되기 보다는 수직하게 또는 특별한 방향성을 가지지 않으며 측정되는 것이 일반적이었음. 그러나 본 연구의 경우 해상 지자기 측선이 해저 확장 방향과 평행하게 설정되었기 때문에 해양 지각의 지자기 역전 양상과 효과적인 비교가 가능했다는 이점이 있었음

마이크로 지판의 형성은 중앙해령에서 일어나는 propagation rifts와 overlapping spreading center와 같은 판운동 변화에 반응하는 확장축의 지형 변화를 수반하는 것으로 나타났음. 이러한 확장축의 총 길이는 마이크로 지판의 영역 확장을 결정하는 요소로 고려할 수 있음. 이전 연구에서는 중요한 판과 구별되는 작은 지판의 임계 크기가 약 107.5 km²라고 제시한바 있음. 그러나 이러한 작은 판들의 수와 공간 분포에는 명확한 패턴이 보이지 않았음. 이 연구에서는 마이크로 지판의 면적을 계산하여 이전에 제시된 관계를 따르는지 확인하였음. 마이크로 지판의 표면적을 비교한 결과, 가장 큰 크기를 갖는 Capricorn 마이크로 지판 (~2.5×10⁶ km²)과 Bauer 마이크로 지판 (~8.5 × 10⁵ km²)이 인도양과 태평양에서 정의되었음. 다른 대부분의 마이크로 지판은 훨씬 작은 크기로, 약

$\sim 3.0 \times 10^6 \text{ km}^2$ 이하로 나타났음. 따라서 새롭게 형성되는 마이크로 플레이트는 $\sim 10^{5.5} \text{ km}^2$ 의 범위 내에서 주변에 위치한 기존 지판들과의 영역 성장을 위해 경쟁해야 함을 시사함. 이와 같이 판운동 변화 등에 대한 중앙해령 시스템의 반응은 마이크로 지판의 형성 과정에서 결정적인 역할을 하는데, 분석 결과 지판이 영역 확장을 유지하기 위한 중앙해령의 임계 길이는 약 600 km인 것으로 판단됨

또한 이 연구에서 조사된 마이크로 지판의 전체 확장 속도는 일관적으로 $\sim 70\text{-}80 \text{ mm/yr}$ 보다 빠른 것으로 나타났으며, 특히, Mammerickx 마이크로 지판은 인도-남극 지판 간의 확장 속도가 $75\text{-}105 \text{ mm/yr}$ 인 경우에 형성되었음. 이러한 결과는 마이크로 지판이 확장 속도가 약 70 mm/yr 이상일 때에만 형성 및 진화할 수 있음을 시사함

V. 연구개발결과의 활용계획

호주-남극 중앙해령 중앙부, KR1 확장축 동쪽에 위치한 확장균열대는 약 1000 km 거리에 걸쳐 30 km 이내의 짧은 확장축이 변환단층 및 균열대로 분리되어 촘촘히 분포하고 있음. 이러한 지질구조의 특성은 고해상도 선상 지구물리 탐사에 의해 아직까지 조사되지 않았던 지역이 많기 때문에 구체적인 지형적 특성이 규명되지 못했음. 아라온호의 선상 지구물리 자료를 포함하여 기존에 공개된 지구물리 자료를 취합하여 해저 지형의 특성을 우선적으로 정의하고자 함. 또한 확장균열대의 생성 환경 및 진화를 복원하기 위한 판운동 복원 모델을 문헌 및 선상 자력 자료를 활용하여 정의하고자 함. 정의된 자료는 후속으로 진행될 수치 모델 모사 결과를 제약 또는 검증하는 데 활용하고자 함

또한 호주-남극 중앙해령의 확장균열대는 내부에 15개 이상의 짧은 확장축들이 분포하고 있다는 것과 상대적으로 수심이 얕다는 특성을 보이고 있는 데 이러한 지형적 그리고 지구조적 특성은 다른 중앙해령의 확장균열대와 다른 특성임. 확장균열대는 판운동의 변화로 인해 변환단층(transform fault)이 확장되면서 생겨지는 빈 공간에 새로운 해양지각이 생성되는 형태로 단순화된 지구조 모델로 제시되어 왔음. 하지만 확장균열대를 생성하는 판운동 변화가 발생하였을 경우 해양지각의 하부 맨틀의 지구물리적 특성이 확장균열대 내부의 해양지각 생성에 어떠한 방식으로 기여하는지는 아직 논의된 바 없음. 특히 호주-남극 중앙해령의 확장 균열대는 다른 지역에 비해 2~3배에 달하는 짧은 확장 경계들이 존재하는 데, 이러한 특성이 하부의 맨틀 구조와 어떠한 상관관계를 가지는지 살펴보는 것은 질란디아-남극 맨틀의 지구조적 특성을 규명하는 것과 매우 밀접한 관계가 있음

S U M M A R Y

(영 문 요 약 문)

I. Title

Geophysical Characteristics of Zealandia-Antarctic Mantle

II. Purpose and Necessity of R&D

Identification of the Zealandia-Antarctic Mantle Domain is the result of a joint international research project led by the Korea Polar Research Institute since 2011, and is significant in that it is the world's first to identify a new mantle domain that was previously unknown. However, it only suggested the existence of a new mantle domain, but subsequent studies have not yet revealed how this mantle domain has evolved in geologic time and space, and how the evolutionary process has been causally related to and interacted with the evolution of the mid-ocean ridge and oceanic crust, and submarine volcanism.

This study aims to provide geophysical constraints to characterize the eastern and western boundaries of the Zealandia-Antarctic Mantle Domain by determining mantle inhomogeneities, geodynamic properties and origin of the mantle domain. Thus, we explore the geophysical properties of the Zealandia-Antarctic Mantle Domain in terms of gravity, magnetism, and tectonical evolution through reconstructions of volcanism and plate tectonic motions in the vicinity of Australia-Antarctic Ridge.

III. Contents and Extent of R&D

Morphological analysis of seamounts in KR1 segment, the easternmost part of the Australia-Antarctic Ridge, is carried out using the shipboard multibeam data from the IBRV Araon. Such morphologic characteristics of seamount may provide insights into the movement of material within the Earth, including geologic processes occurring in the oceanic lithosphere and the structure of magma supplies.

Using the shipboard magnetic data, we constrain the ages of off-axis seamounts found around the KR1 segments. The traditional method for determining the age of a submarine volcano is through geochemical dating of rock samples obtained from the volcanic body, but this tends to only indicate the age of recent eruptions. Using a 2-D magnetic modeling approach, we seek to determine the age of submarine volcanoes by exploiting the discrepancy between the observed and predicted seafloor magnetic anomalies due to the different formation timings of the submarine volcanoes and their underlying oceanic crust.

In addition to plate boundaries with relatively narrow areas, such as the mid-ocean ridge, there are also diffuse plate boundaries that accommodate kinematic differences between plates through internal deformation. The Macquarie Microplate in the Australia-Antarctic Ridge is a prime example of diffuse boundary. Similarly, the Indo-Australian Plate has also been split into multiple microplates. To analyze the geophysical properties of these microplates, we use bathymetry, gravity, magnetics, plate motion models, and seismic tomography models.

IV. R&D Results

The spatial distribution of seamounts found in the KR1 segment can be categorized into three regions: eastern, central, and western. In particular, a total of 20 seamounts have been characterized in the study area, and they can be classified into two categories according to the size of the seamounts and the distance from the ridge axis. We also found that the seamount that comprise the seamount chains have large values for height, base area, and volume. Such seamounts might be likely created by the upwelling of small-scale melts caused by mantle inhomogeneities in the asthenosphere. The volume of the submarine volcanoes tends to increase with increasing base area to ~520 m in height. In contrast, a series of smaller submarine volcanoes to the west of KR1 show an increasing factor of ~150 m height with increasing base area, possibly related to temporal changes in the structure of the magma supply beneath the ridge axis.

Geomagnetic modeling was performed on the above seamount to determine the age of each volcanic edifice. While some of the seamounts were created at the same time as the oceanic crust, others exhibits the geomagnetic reversal patterns that differ from the oceanic crust. Such time difference between the seamounts and their underlying seafloor indicates that the magma supply along the KR1 extension axis has varied in time and space.

The methodology presented in this study to date seamounts using shipboard magnetic data is different from previous studies because of the way the data were acquired. In previous studies, shipboard magnetics has typically been measured perpendicular to the seafloor spreading, rather than parallel to it, or with no particular orientation. In this study, however, the marine magnetic survey lines were set parallel to the seafloor spreading, which had the advantage of allowing for effective comparisons with geomagnetic reversals in the oceanic crust.

The formation of microplates has been shown to be accompanied by changes in axial morphology in response to plate motion changes, such as propagation rifts and overlapping spreading centers in the mid-ocean ridge. The total length of these ridge axes can be considered a factor in determining the regional extension of microplates. Previous studies have suggested that the threshold size for microplates to be distinguished from major plates is about 107.5 km². However, there was no clear pattern in the number and spatial distribution of these small plates. In this study, we calculated the area of microplates to see if they follow the previously proposed relationship. Comparing the surface areas of the microplates, the Capricorn microplate ($\sim 2.5 \times 10^6$ km²) and the Bauer microplate ($\sim 8.5 \times 10^5$ km²), which are the largest in size, were defined in the Indian and Pacific oceans. Most other microplates were found to be much smaller, around $\sim 3.0 \times 10^5$ km² or less. This suggests that newly forming microplates must compete for area growth with existing plates located in the vicinity within a range of $\sim 10^{5.5}$ km². The response of the mid-ocean ridge system to changes in plate motion plays a crucial role in the formation of microplates. Our analysis suggests that the critical length of the mid-ocean ridge for a plate to maintain its territorial expansion is about 600 km.

We also find that the overall spreading rates of the microplates examined in this study are consistently faster than ~ 70 - 80 mm/yr, and in particular, the Mammerrickx Microplate formed when the spreading rate between the Indo-Antarctic Plate was 75-105 mm/yr. These results suggest that microplates can only form and evolve at spreading rates of ~ 70 mm/yr or higher.

V. Application Plans of R&D Results

The intra-transform spreading zone, located east of the Australia-Antarctic Ridge, is a dense network of short ridge axes of 30 km or less separated by transform faults and rift zones over a distance of approximately 1000 km. The nature of these geologic structures has not been characterized by

high-resolution shipboard geophysical surveys, as many areas have not yet been surveyed. By compiling previously published geophysical data, including shipboard geophysical data from IBRV Araon, we aim to first define the characteristics of the seafloor morphology. In addition, we plan to define a plate motion reconstruction model to reconstruct the formation environment and evolution of the intra-transform spreading zone using literature and shipboard magnetic data. The defined data will be used to constrain or validate the results of subsequent numerical model simulations.

These geomorphic and tectonic characteristics of the intra-transform spreading zone, which has more than 15 short ridge axes within its interior and is characterized by relatively shallow water depths, make it different from other intra-transform spreading zones. Extensional rifting has been proposed as a simplified tectonic model in which new oceanic crust is created in the void created by the extension of transform faults due to changes in plate motion. However, how the geophysical properties of the underlying mantle contribute to the creation of oceanic crust within an extensional rift has not been discussed in the literature. In particular, the sutdy area is characterized by short extensional boundaries that are two to three orders of magnitude shorter than in other regions, and understanding how these characteristics correlate with the structure of the underlying mantle is of great relevance to characterizing the Zealandia-Antarctic Mantle Domain.

극지연구소

목 차

제 1 장 서론

제 2 장 국내외 기술개발 현황

제 3 장 연구개발수행 내용 및 결과

제 4 장 연구개발목표 달성도 및 대외기여도

제 5 장 연구개발결과의 활용계획

제 6 장 참고문헌



제 1 장 서론

- ‘질란디아-남극 맨틀 규명’은 극지연구소가 지난 2011년부터 주도한 국내외 공동연구의 결과로서 기존에 알려지지 않았던 새로운 맨틀 영역을 세계 최초로 규명했다는 데 그 의의가 있음. 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 없음

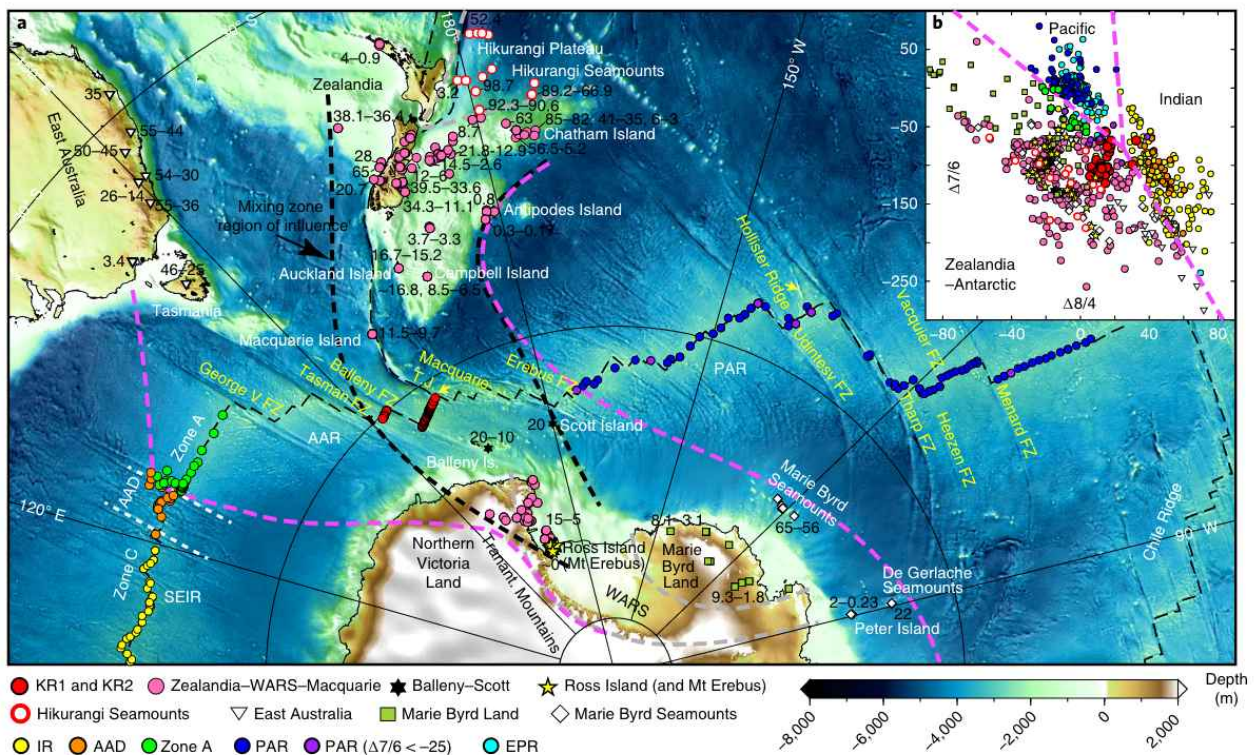


그림 1 질란디아-남극 맨틀 경계(Park et al., 2019)

- 이 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 살펴보고자 함
- 질란디아-남극 맨틀의 경우 주변 맨틀보다 상대적으로 뜨거운 것으로 기존 연구(Park et al., 2019)에서 언급된 바 있음. 이러한 온도 특성은 맨틀 부계 중력 및 잔여 맨틀 부계 중력 이상에서 나타날 수 있으며 동시에 해양 지각의 두께 변화와도 높은 상관관계를 가질 수 있음. 1차년도 연구에서는 중력 자료 기반의 변화특성을 정량화하여 질란디아-남극 맨틀이 호주-남극 중앙해령 및 이들 중앙해령에서 생성된 해양지각에 미친 영향을 구명하고자 함

- 우선, 연구지역에서 아라온호로 측정된 다중빔 멀티빔 자료를 사용하여 호주-남극 중앙해령의 가장 동쪽 부분인 KR1의 해산화산에 대한 형태학적 분석을 수행하여 중앙해령 부근에서 생성된 해저화산에 대한 형태학적 연구는 해양 암석권에서 일어나는 지질학적 과정 및 마그마 공급 구조 등 지구 내부 물질 이동에 대한 연구를 수행하였음
- 다음으로 KR1 확장축 주변에서 발견된 해저화산의 생성시기를 지자기 자료를 활용하여 정량적으로 추정하였음. 해저화산의 생성 시기를 결정하는 전통적인 방법은 화산체에서 얻은 암석 샘플의 지구 화학적 연대 측정을 통해 결정되지만, 이것은 최근의 일어난 해저화산의 분출 시기만을 나타내는 경향이 있음. 이 연구는 2-D 자기 모델링 접근법을 사용하여 해저화산의 생성 시기와 그 하부의 해양지각의 생성 시기가 서로 다름으로 인해 관찰된 해저 자기 이상과 예측된 해저 자기 이상 사이의 불일치를 활용하여 해저화산의 생성연대를 측정하고자 함
- 중앙해령과 같이 좁은 영역을 가지는 지판 경계 이외에도 지판 사이의 운동 차이를 내부 변형을 통해 수용하는 확산형 지판 경계가 존재함. 특히 호주-남극 중앙해령의 Macquarie 마이크로 지판이 대표적인 예로 확산형 경계를 가지고 있으며, 인도-호주 지판의 경우도 여러 개의 마이크로 지판으로 분할이 되었음. 이러한 마이크로 지판의 지구 물리적 특성을 분석하기 위하여 수심, 중력, 해상 지자기 자료, 판운동 모델, 그리고 지진 파 모델을 사용하여 연구를 수행하였음



제 2 장 국내외 기술개발 현황

- 호주-남극 중앙해령 지역은 여전히 연구선의 접근이 제약적인 상황이기 때문에 극지연구소 아라온호 탐사 활동 이외에 특별한 연구 활동이 진행되지 못하는 상황임. 이러한 측면에서 연구지역에 대한 우수 연구 논문 성과를 지속적으로 만들어내고 동시에 국내외 연구 활동을 선도할 필요가 있다고 판단됨
- 본 연구과제의 1단계 사업 기간에 SCI(E) 논문 3편을 게재 완료 하였으며, 그 중 1편은 해당 저널에서 가장 많이 다운로드된 논문으로 선정되었음. 연구지역에서 취득된 고해상도 지구물리 자료의 가치도 높으며 동시에 자료 해석 방법에 대한 국내 연구 인력의 경험과 접근법이 국제 과학계에 인정받고 있다는 것을 시사한다고 볼 수 있음
- 본 1단계 연구과정에서 KRI 중앙해령에 위치한 해저 화산체에 대한 연구가 집중되어 진행되었음. 이러한 해령 근처에서 생성되는 해저 화산의 연령 측정과 생성 기작에 대한 연구는 다른 중앙해령 지역에서도 활발하게 수행되고 있음

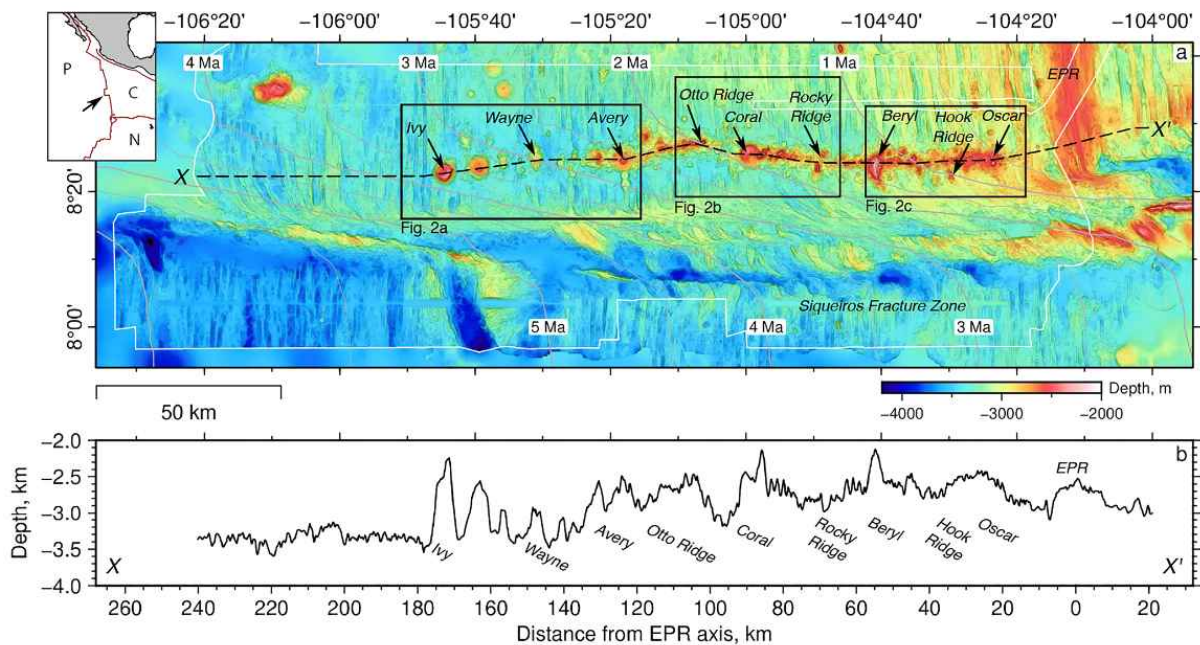


그림 2 동태평양 중앙해령 서쪽에 분포하는 해저 화산체(Fabbrizzi et al., 2022)

- Fabbrizzi et al. (2022)는 동태평양 중앙해령 지역에 위치한 해저 화산대에서 취득한 천부 지층탐사기(sub-bottom profiler) 자료를 활용하여 해저 화산 정상부의 퇴적층 두께를 활용하여 해저 화산의 상대적 생성 시기를 결정하고자 하였음. 그러나 상부 퇴적층의 두께가 모든 정상부에서 동일하게 관찰되지 않았기 때문에 대푯값을 결정하는 과정에서 심해류 및 지형 변화 등 2차 과정의 영향도 함께 고려할 수 밖에 없었음

- 그러함에도 중앙해령 확장축으로부터 멀어지면서 해저 화산 정상부의 퇴적층이 일관되게 증가하지 않았으며, 오히려 해저화산대의 중심부에 있는 해저화산 정상부의 퇴적층이 가장 두껍게 나타남을 확인할 수 있었음. 이는 동태평양 중앙해령 부근에서 일어나는 해저 화산 활동이 시공간에서 다르게 나타났음을 시사하는 것임

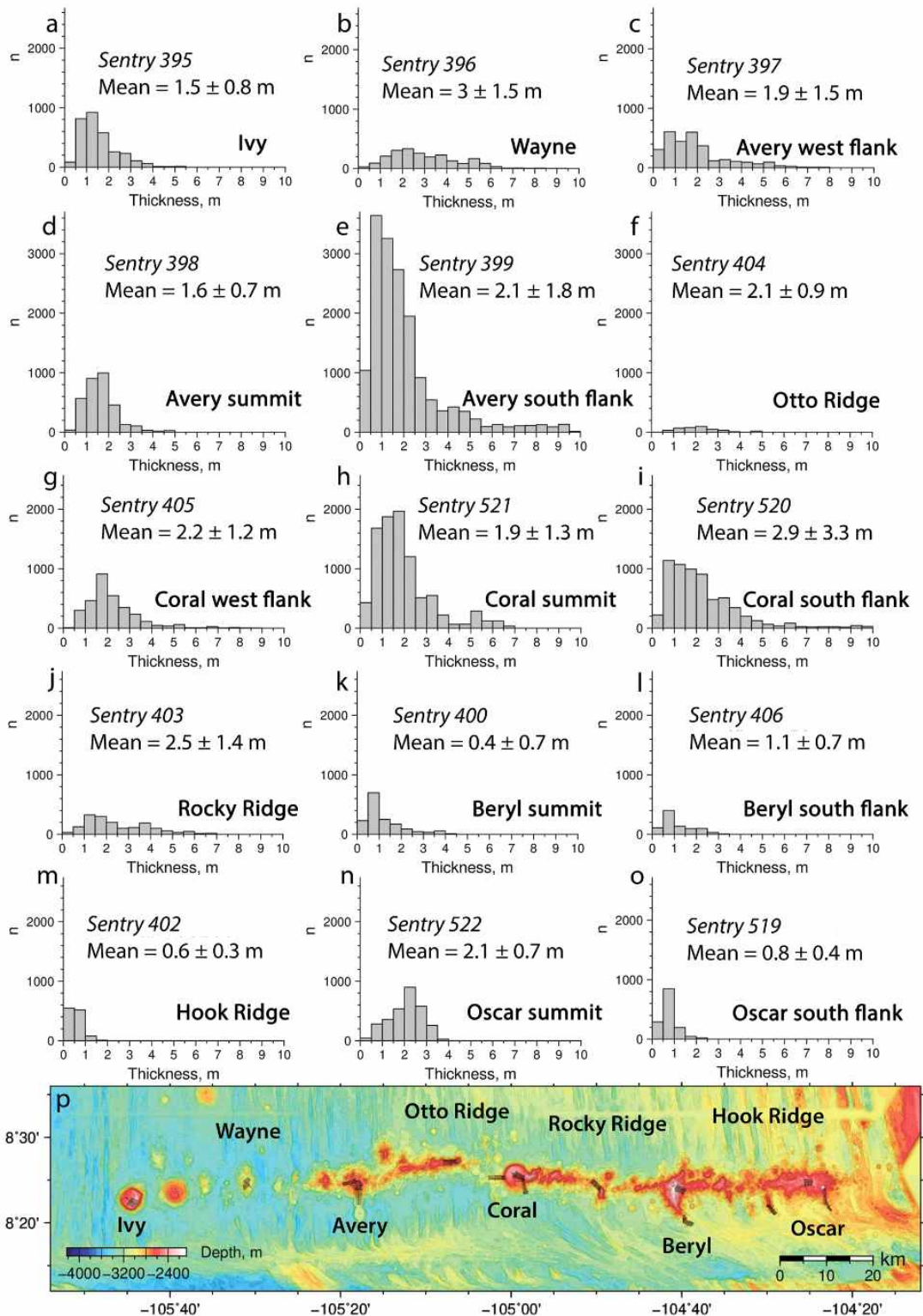


그림 3 동태평양 중앙해령에 위치한 해저 화산체 상부의 퇴적층 분포(Fabbrizzi et al., 2022)

제 3 장 연구개발수행 내용 및 결과

* 1단계 연구기간 동안 SCI(E) 논문으로 게재된 내용 중심으로 기술하였음

제 1 절 질란디아-남극 중앙해령 해저화산 지형 분석 연구

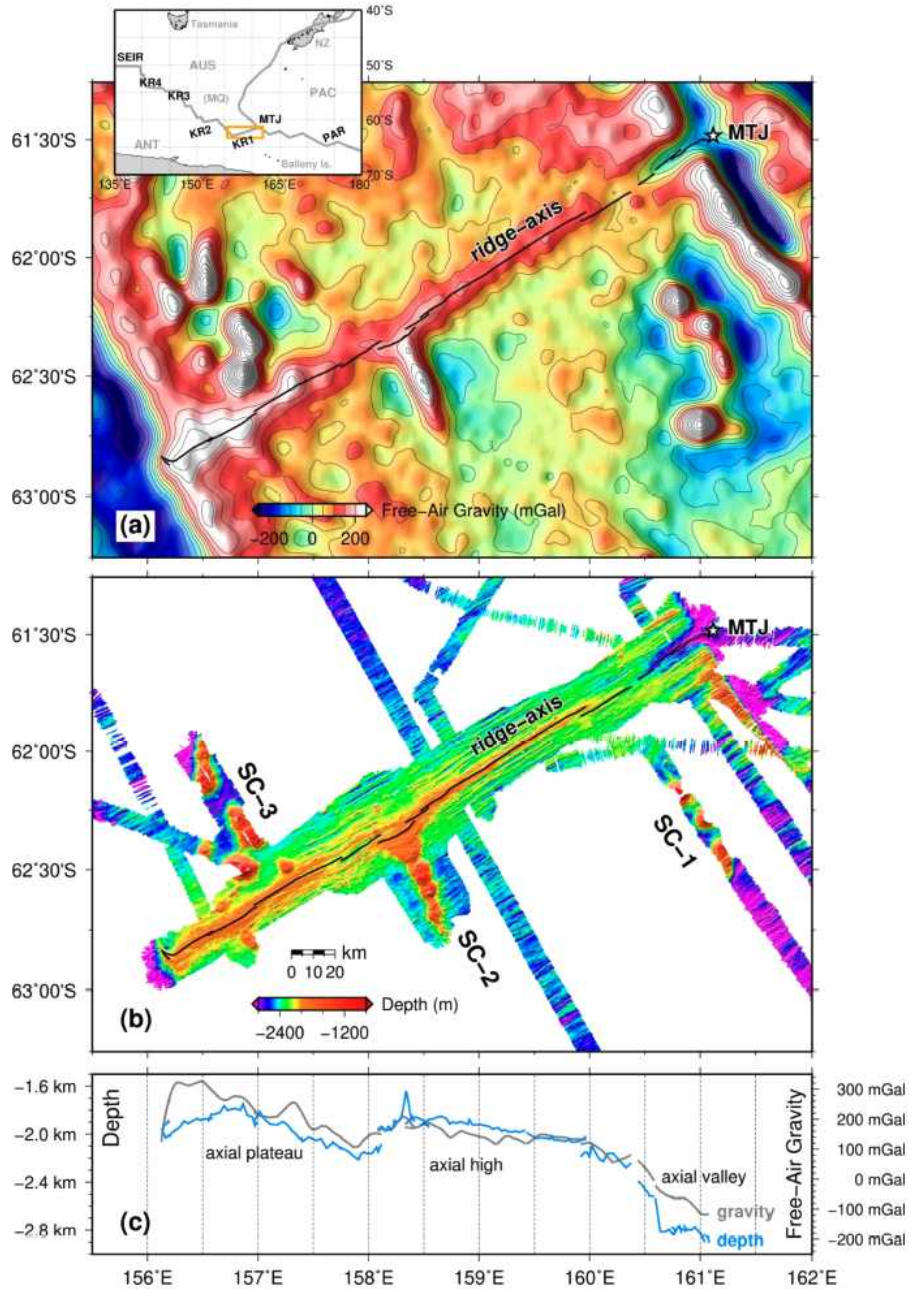


그림 4 KR1 확장축 지역의 위성 중력 자료(a), 아라온 선상 수심 자료(b), 그리고 확장축 수심 변화(c) (Choi et al., 2021)

□ 연구 배경

- 연구지역에서 아라온호로 측정된 다중빔 멀티빔 자료를 사용하여 호주-남극 중앙해령의 가장 동쪽 부분인 KR1의 해산화산에 대한 형태학적 분석을 수행하였음

- 중앙해령 부근에서 생성된 해저화산에 대한 형태학적 연구는 해양 암석권에서 일어나는 지질학적 과정 및 마그마 공급 구조 등 지구 내부 물질 이동에 대한 중요한 정보를 제공한다. 이를 위해 해저화산의 기저 면적, 부피, 높이와 같은 기하학적 매개 변수를 식별하고 추정하면 해산의 형성과 진화에 대한 정보를 계산할 수 있으며, 해저화산의 정상부 형태 또한 분화구/칼데라, 봉우리, 평평한 정상으로 분류할 수 있음
- 해저화산의 형태학적 정보는 해양 지각에 확장에 따른 시공간적 변화와 연동하여 해저화산의 생성 환경을 추정할 수 있는 1차적인 기초 연구자료로 활용할 수 있음

□ 연구 방법

- 2013년과 2017년 초에 수행된 아라온호의 고해상도 선상 수심 자료를 활용하여 지형 구조를 분석하였음. 탐사 측선은 KR1 축의 확장 방향과 평행하도록 설계되었으며, 다중빔 음향 측심기 EM122를 사용하여 데이터를 수집하였음
- 해저화산은 주변 해저면에서 100m 이상 솟아 있는 고립된 지형 구조물을 화산으로 정의하였음(Kim and Wessel, 2011). 후처리 보정된 수심 자료에서 해저화산의 기준을 만족하는 지형을 식별한 후 기저 면적, 부피 및 높이 등의 지형 정보를 계산하였음

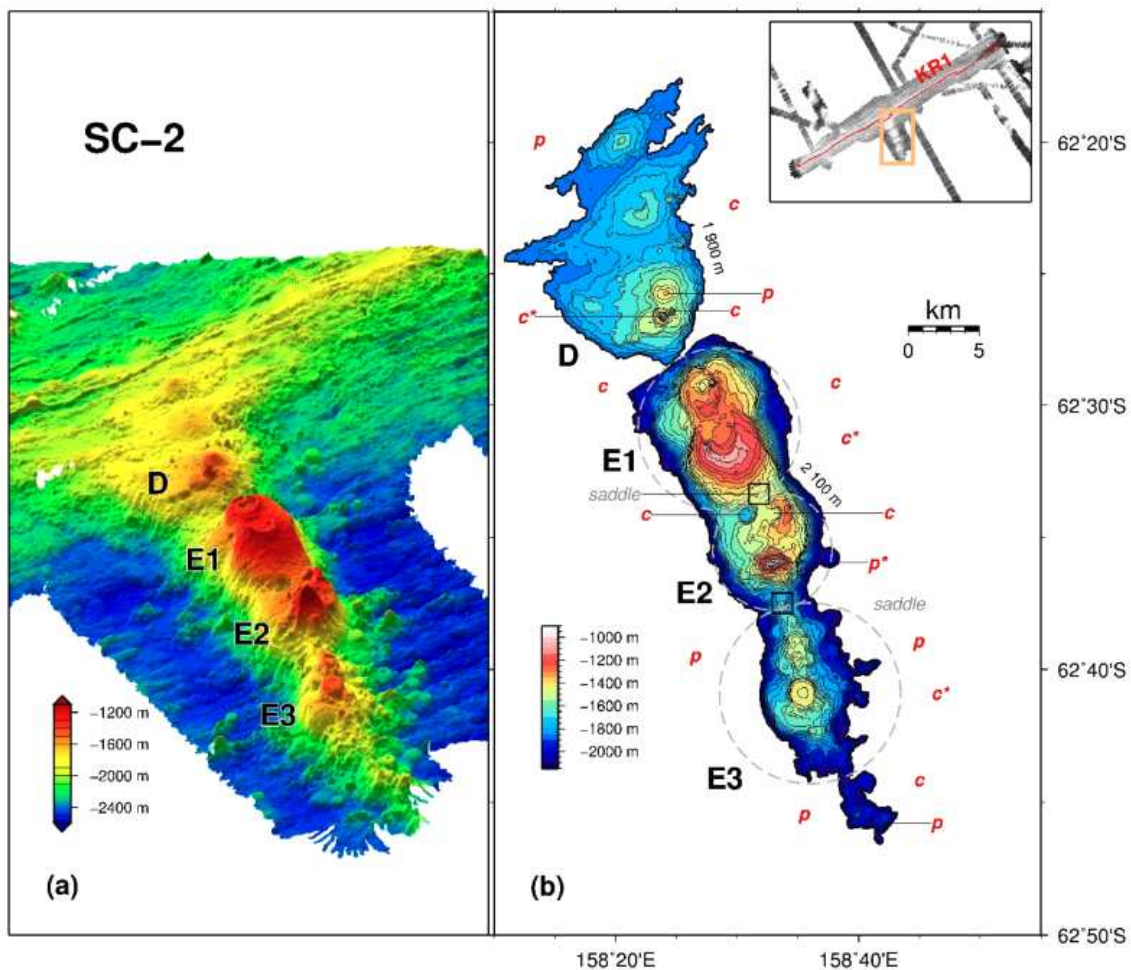


그림 5 KR1 확장축에서 발견된 해저화산대 중 SC-2의 해저화산들에 대한 지형 분석 결과(Choi et al. 2021)

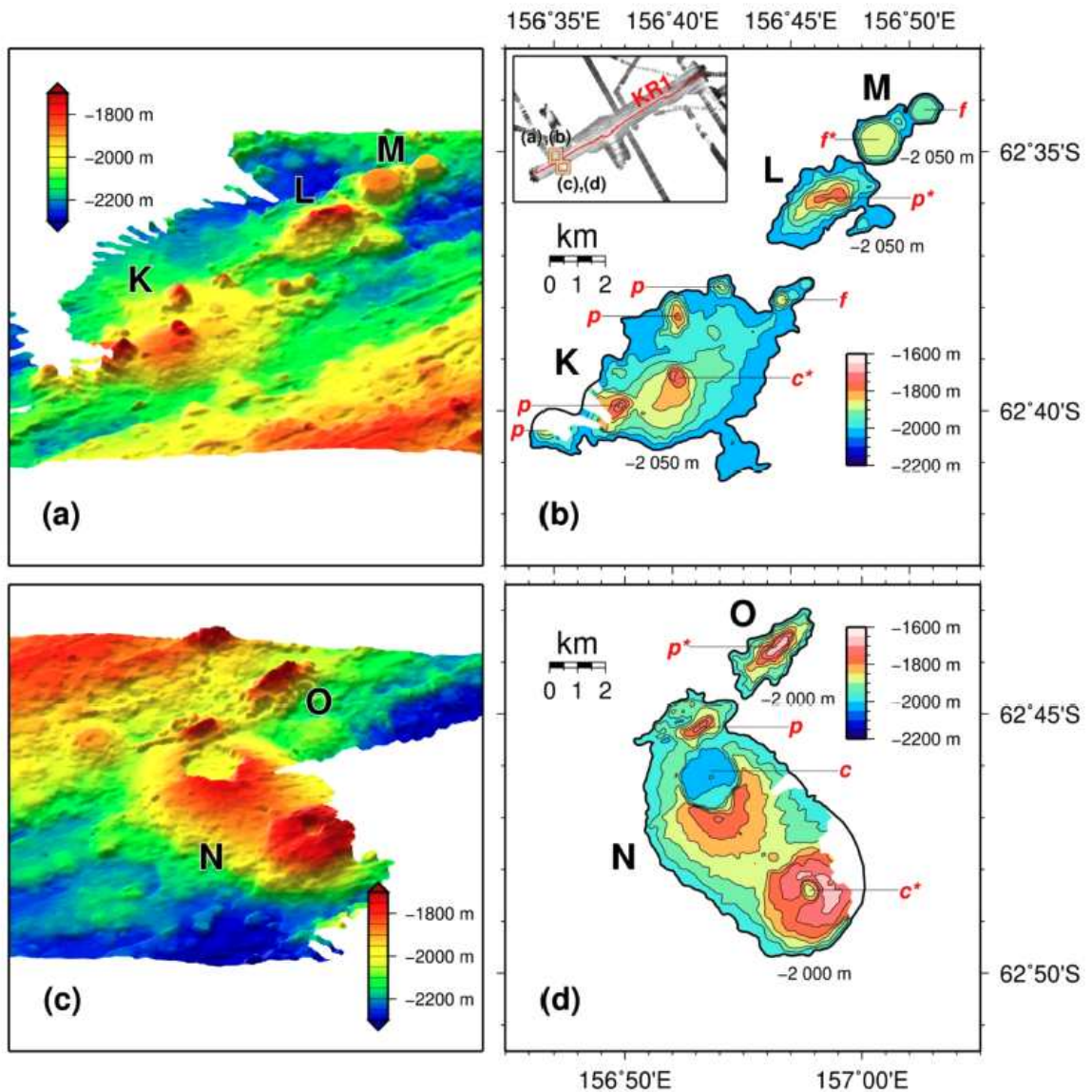


그림 6 KR1 확장축의 서쪽 지역에서 발견된 해저화산들에 대한 지형 분석 결과(Choi et al., 2021)

- 해저화산들의 형태학적 특성을 정량적으로 분석하기 위해 산 정상부의 지형을 분화구/칼데라(c), 봉우리(p), 그리고 평평한 정상(f)으로 분류하였음. 각 해산별 대표적인 정상부의 지형 정보를 활용하여 해수면으로부터 해저산 정상부까지의 깊이와 KR1 확장축으로부터 거리를 계산하였음. 해저화산의 기저 면적과 부피를 계산하기 위해 GMT의 grdvolume 프로그램을 활용하였음(Wessel et al., 2013).

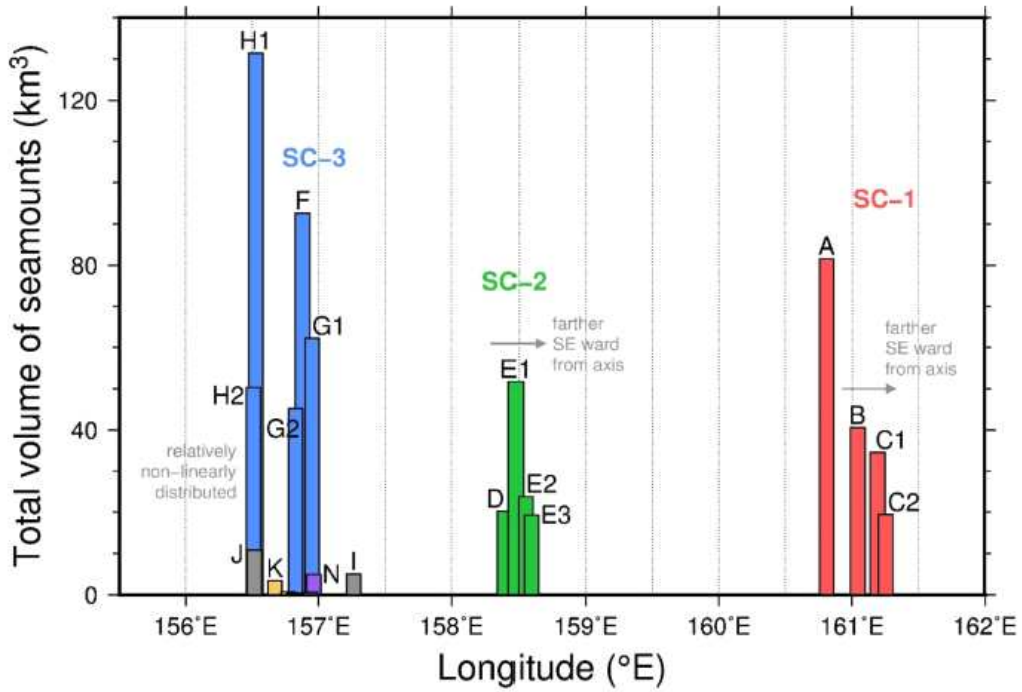


그림 7 KR1 확장축 지역에서 정의된 해저화산들의 부피 변화 비교

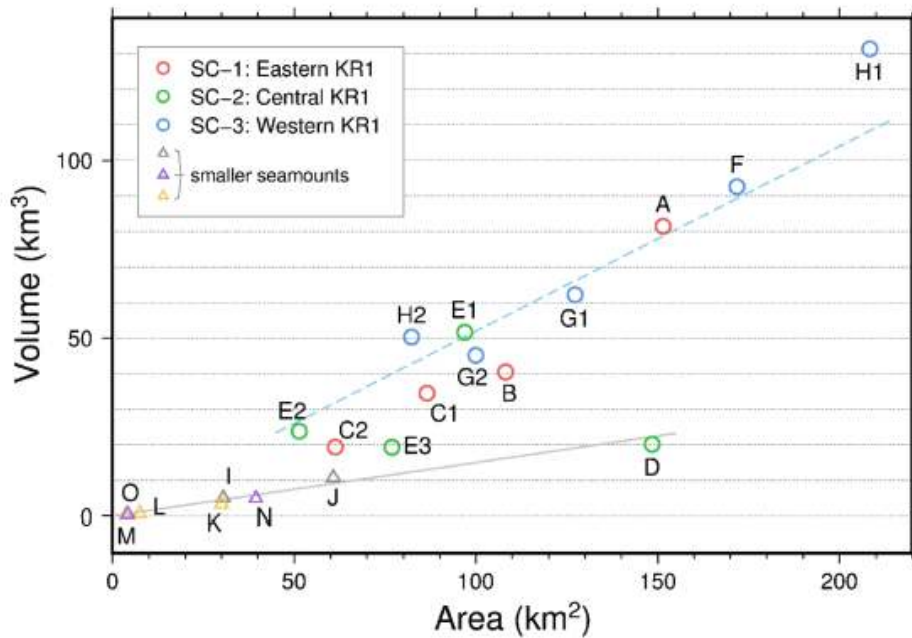


그림 8 KR1 확장축 지역의 해저화산들이 가지는 기저 면적과 부피 사이의 상관관계 비교

□ 연구 결과

- KR1 중앙해령 지역에 분포하는 해저화산들의 공간적 분포는 동부, 중부, 서부의 세 지역으로 구분될 수 있음. 특히 연구 지역에서는 총 20개의 해저화산이 특정화되었으며, 해저화산 크기와 중앙해령 확장축과의 거리에 따라 두 가지 범주로 분류 할 수 있었음
- 또한 해저화산대를 구성하는 해저화산은 높이, 기저 면적, 부피 등에서 큰 값을 가지고 있으며, 이러한 해저화산들은 연약권에서 발생한 맨틀 비균일성으로 인해 발생한 소규모 용융체가 상승하여 생성되었을 가능성이 높은 것으로 판단되었으며, 해저화산의 부피는 기저부 면적이 증가함에 따라 높이가 ~520m로 증가하는 경향이 있음을 발견하였음
- 이와 달리 KR1의 서쪽에 위치한 일련의 작은 해저화산들은 기저 면적이 증가함에 따라 ~150m 높이의 계수가 증가하는 경향성을 보이고 있으며, 해저확장축 하부의 마그마 공급 구조의 시간에 따른 변화와 관련이 있을 것으로 추정됨
- KR1 해저확장축의 지형 변화를 보면 동부 지역의 경우 axial valley 형태를 보이고 있어 현재는 마그마 공급이 부족함을 지시함. 그러나 동부 지역에 분포하는 해저화산들의 부피를 바탕으로 추정하였을 때, 동부 지역 또한 과거 과도한 마그마 공급이 가능했을 것으로 추정됨



제 2 절 선상 지자기 자료를 활용한 질란디아-남극 중앙해령 주변 해저화산 생성 시기 연구

□ 연구 배경

- 해저화산의 생성 시기를 결정하는 전통적인 방법은 화산체에서 얻은 암석 샘플의 지구 화학적 연대 측정을 통해 결정되지만, 이것은 최근의 일어난 해저화산의 분출 시기만을 나타내는 경향이 있음. 이 연구는 2-D 자기 모델링 접근법을 사용하여 해저화산의 생성 시기와 그 하부의 해양지각의 생성 시기가 서로 다름으로 인해 관찰된 해저 자기 이상과 예측된 해저 자기 이상 사이의 불일치를 활용하여 해저화산의 생성연대를 측정하고자 함. 이러한 해양지각과 해저화산 사이의 자화 극성의 차이는 해저확장축 주변에서 생성된 해저화산 생성 시기를 결정하는데 활용이 가능함
- 이 연구의 대상이 되는 KR1 해저화산의 경우 확장축에 인접하여 분포하기 때문에 지난 300만 년 내에 모든 해저화산이 형성되었다고 가정할 수 있으며, 동시에 각각의 해산은 100만 년 미만의 기간에 걸쳐 형성되었다고 추정하였음. 해저화산의 생성시기를 결정하기 위하여 기존 해양 지각에서 관찰된 자기 이상 현상에 대한 기여를 정량적으로 분석하고 해저화산의 형성 기간을 제한하기 위해 해저화산에 대한 지자기 역전 시퀀스를 조정하는 방법을 고안하였음. 이를 통해 해저화산의 나이를 추정하고 해저화산이 지자기 정상 또는 역전 시기 동안 형성되었는지 여부를 결정할 수 있게 됨

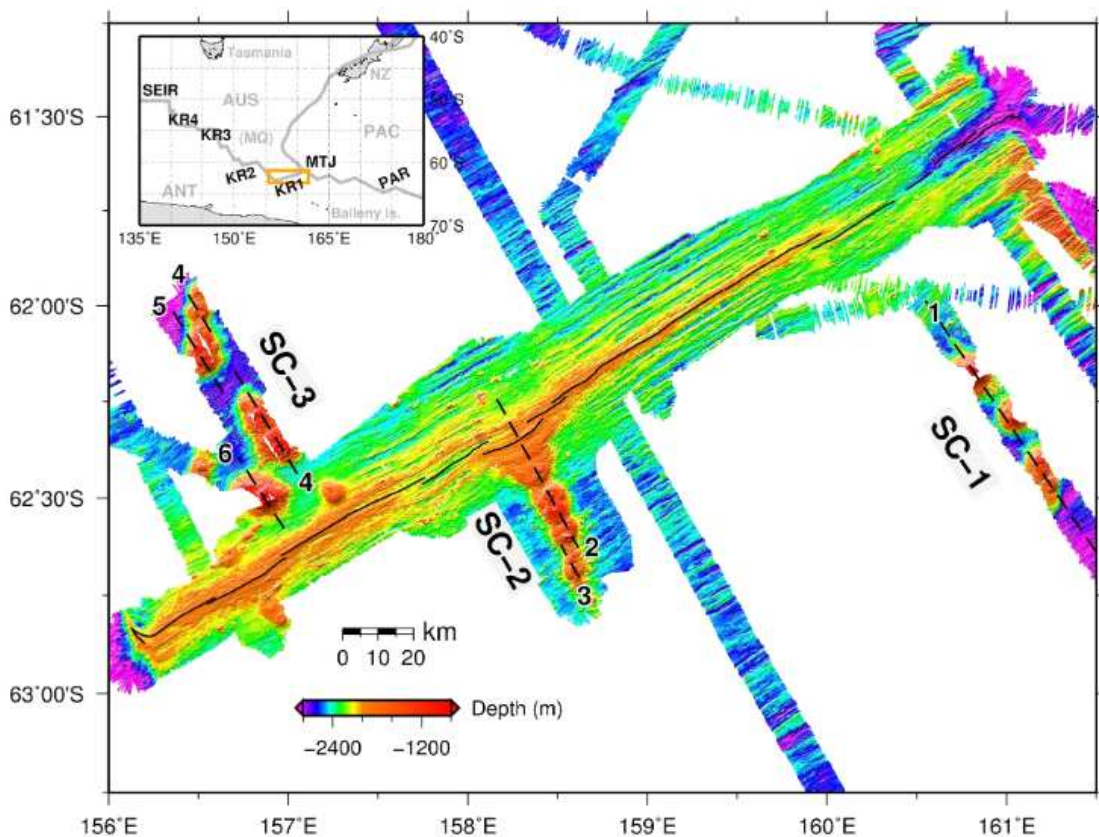


그림 9 KR1 중앙해령 지역에서 측정된 선상 지자기 측선 분포(Choi et al., 2021)

□ 연구 방법

- KR1 중앙해령 지역에서 취득한 해상 지자기 자료에 대한 탐색적 자료 분석을 통해 해저 화산 정상부를 지나는 지자기 축선의 경우 해양 지각의 지자기 역전에 의한 지자기 분포와 일치하지 않음을 발견하였음
- 이러한 특성을 정량적으로 확인하기 위하여 지자기 정모델링(magnetic forward modeling)을 수행하였음. 이 모델링에서는 KR1의 확장속도를 가지는 가상의 해양 지각을 고려하여 해저 지자기 역전때 분포를 결정하였고, 해저확장축에 어느 정도 떨어진 거리에 가상의 해저화산을 위치시켰음. 이 해저화산이 해양 지각과 같은 지자기 역전 경향을 가질 때와 그렇지 않을 때를 각각 고려하여 지자기 모델링을 수행하였음

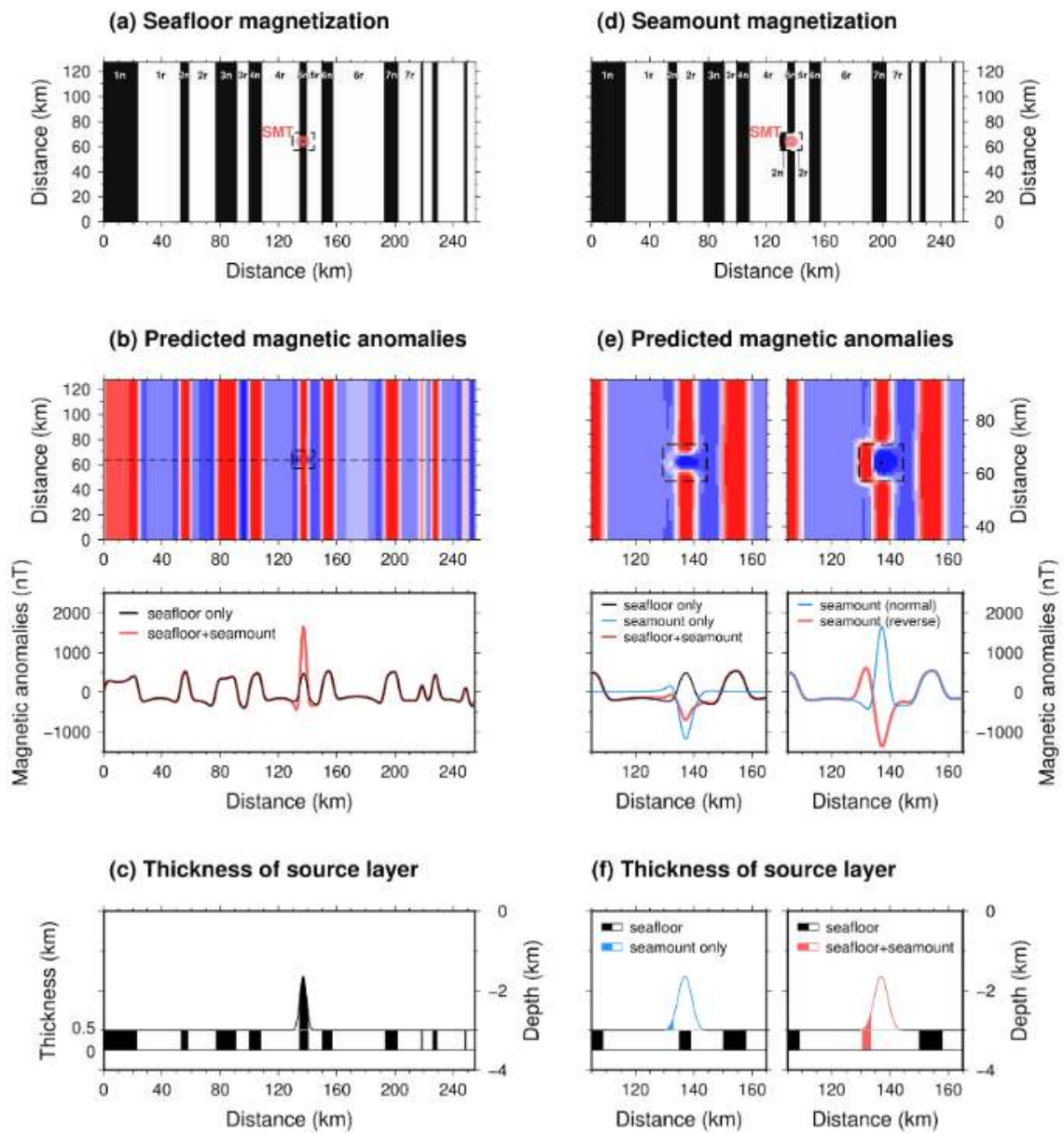


그림 10 해양지각과 해저화산의 생성 시기 변화에 따른 지자기 이상치 변화 정모델링 결과 비교(Choi et al., 2021)

- 지자기 정모델링 결과, 해저화산이 해양 지각의 생성시기와 일치한다면, 즉 해저화산이 해양지각의 역전띠와 일치한다면 해양 지자기 이상치는 보다 강화되는 방향으로 계산이 되었음. 이와 달리 해저화산과 해양 지각이 서로 상이한 지자기 역전띠를 가진다면, 즉 해저화산이 해양 지각의 생성 시기보다 더 젊은 연령을 가진다면 해저화산 정상부의 지자기 이상치는 그 경향을 달리함을 보여줌. 특히 해저화산의 영향만을 고려한 경우에도 이러한 지자기 이상치 분포의 변화는 뚜렷하게 나타남을 확인할 수 있었음

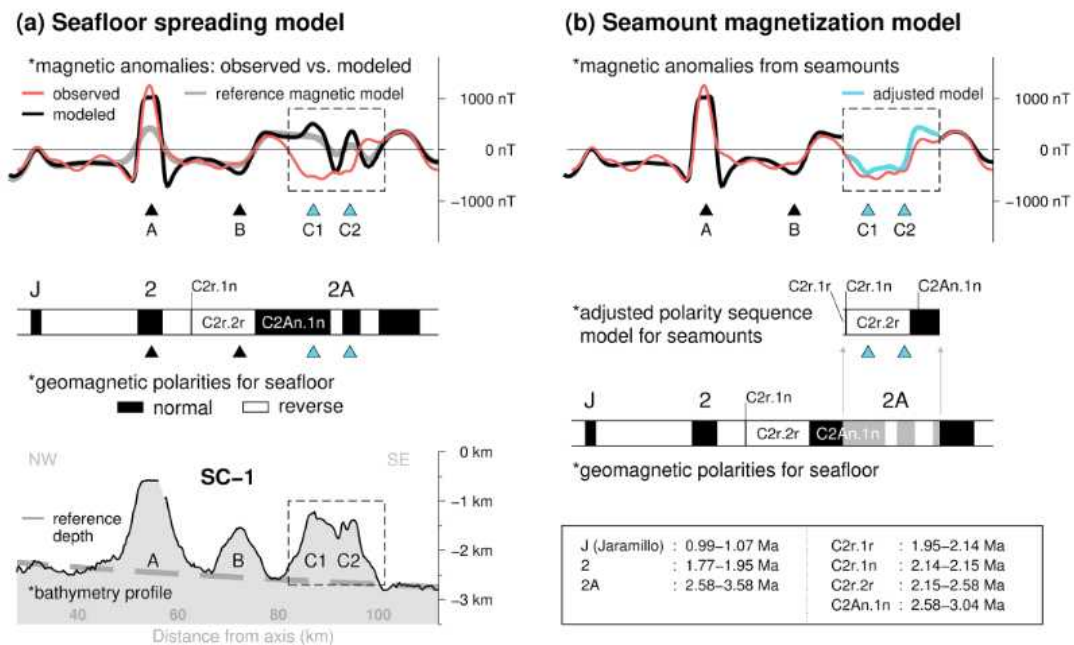


그림 11 SC-1 해저화산에 적용된 해저화산 역전띠 모델링(Choi et al., 2021)

- 지자기 정모델링 결과를 바탕으로 KR1 해저화산의 정상부를 지나는 지자기 측선 자료에 대하여 탐색적 분석을 수행하였음. 대표적으로 SC-1 해저화산대에서 측정한 지자기 이상치 자료를 살펴보면, 해저화산 A와 B 지역에서는 해양 지각의 역전띠 분포와 일치하는 해양 지자기 이상치가 관찰된 반면, 해저화산 C1과 C2에서는 해양 지각의 역전띠 분포에 의한 해양 지자기 이상치와 다른 경향을 가지는 자료가 관측되었음을 확인하였음
- 이러한 불일치는 앞선 가상의 해양 지각과 해저화산을 활용한 지자기 정모델링 결과에서 확인한 바와 같이 해저화산의 생성 시기가 해양 지각의 생성 시기와는 다르다는 것을 보여줌
- 이러한 불일치 경향성을 일치시켜주기 위한 가장 간단한 방법은 해저 화산체에 적용된 해양 지자기 역전띠를 해양 지각의 역전띠보다 더 젊은 역전띠를 적용시키는 것임. 해저화산에 적용된 지자기 역전띠와 해양 지각의 역전띠 사이의 시간 간격은 해저화산의 생성 시기를 결정하는 데 중요한 정량적 지표가 됨

□ 연구 결과

- KR1 확장축에 분포하고 있는 총 3개의 해저화산대에서 13개의 해저화산체에 대한 지자기 모델링을 수행하여 각 해저화산체의 생성시기를 결정하였음
- 해양 지각의 생성시기와 동일한 시기에 생성된 해저화산체도 존재하지만, 해양 지각과 다른 양상의 지자기 역전띠를 가진 해저화산체도 정량적으로 결정되었기 때문에, 이는 KR1 확장축의 마그마 공급이 시간과 공간 상에서 다양한 변화를 거쳐왔다는 것을 지시함

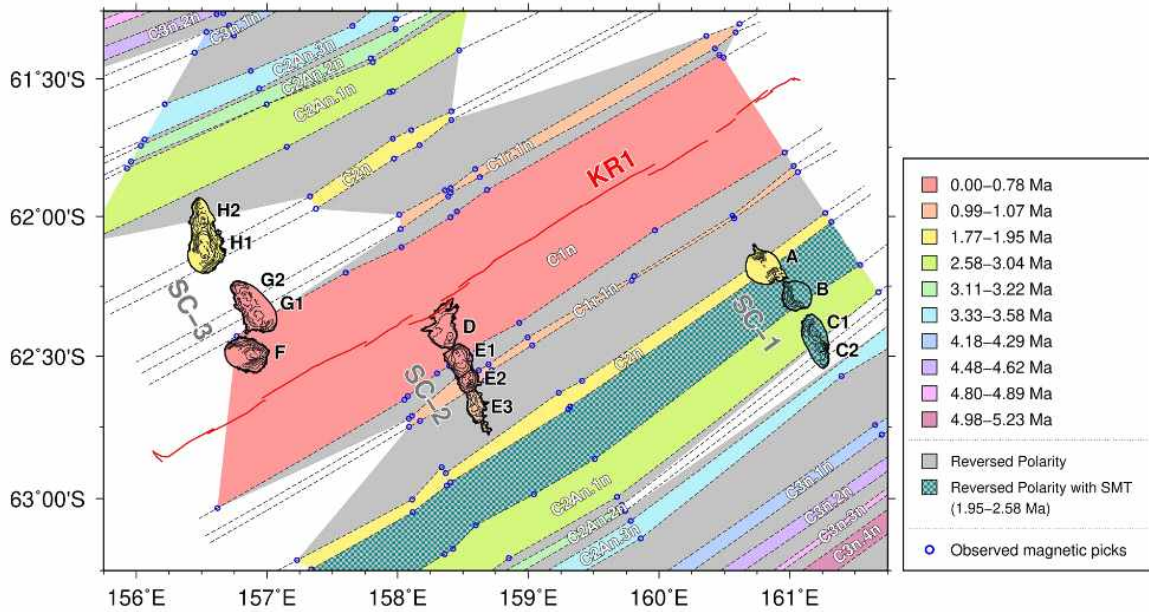


그림 12 KR1 확장축 주변에서 관찰된 해저화산들의 생성시기 예측 결과(Choi et al., 2021)

- 이 연구에서 제시한 해상 지자기를 활용한 해저 화산체의 연령측정 기법은 과거 다른 연구 방법과는 다른 방식을 취하였는데, 이것은 자료 취득의 방식이 달랐기 때문에 가능했음. 기존 연구들의 경우에는 해저화산에서 지자기 측정 시 측선 설계가 해저 확장 방향과 평행하게 설정되기 보다는 수직하게 또는 특별한 방향성을 가지지 않으며 측정되는 것이 일반적이었음. 그러나 본 연구의 경우 해상 지자기 측선이 해저 확장 방향과 평행하게 설정되었기 때문에 해양 지각의 지자기 역전 양상과 효과적인 비교가 가능했다는 이점이 있었음
- 다만, 해저화산의 중심부를 벗어난 측선에서 측정된 지자기 자료의 경우 해저화산에 의한 지자기 효과 보다는 해양 지각에 의한 영향이 더 크게 기여하는 것으로 나타났으며, 이 경우 해저화산의 연대 측정은 해양 지각의 생성시기와 동일한 것으로 가정하여 해석하였음
- KR1 해저화산체에서 채취된 일부 암석 시료에 대한 지구화학적 연대 측정 연구가 수행된 바 있는데(Yi et al., 2020), 동일 해저화산체에 대한 지자기 연대 측정 결과와 매우 유사함을 확인할 수 있었음

- 중앙해령 주변부에서 생성되는 해저화산체의 경우 중앙해령 하부의 마그마 공급이 충분할 경우 그 여유분의 여부에 따라 해저화산이 생성되는 경우가 있으며, 확장축에서 공간상 거리를 두며 생성된 해저화산의 경우 확장축 하부의 마그마가 직접적으로 마그마를 공급할 수 없기 때문에 다른 마그마 공급 구조가 존재하였음을 시사함. 이러한 해저화산체에 대한 지구화학적 고찰들을 살펴보면 맨틀 내부의 비균질성을 주요 인자로 고려하는데, 이러한 맨틀 비균질성의 공간적 분포에 대해서는 정량적으로 언급되지 않아왔음. 그 이유는 해저화산체의 생성 시기를 특정하지 않고 연구가 진행되어 왔기 때문임. 이 연구에서 제시한 지자기 모델링 기법의 경우 효율적인 해상 지자기 측선 설정을 통해 해저화산의 연대 측정이 가능함을 밝혔으며 동시에 해저화산의 생성 메커니즘을 시공간적으로 특정할 수 있다는 이점이 있음

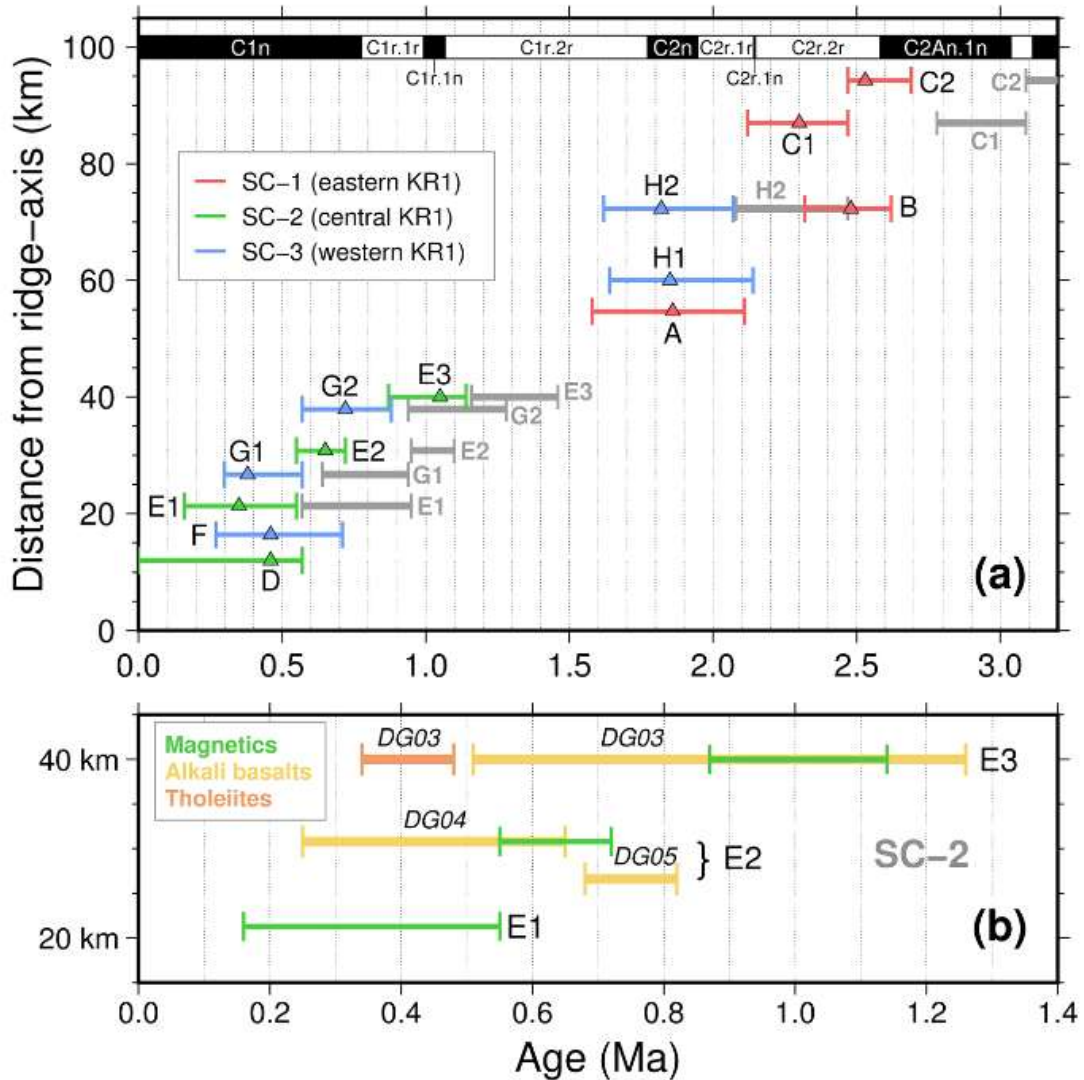


그림 13 지자기 모델링 결과를 바탕으로 예측된 KR1 해저화산들의 생성 연대 비교(Choi et al., 2021)

제 3 절 질란디아-남극 지판 운동 연구

□ 연구 배경

- KR1 확장축을 경계로 하는 Macquarie plate의 판운동은 인접한 호주, 남극, 태평양 지판처럼 대규모 지판과는 다른 독립적인 운동 방향을 가지고 있음. 이러한 지판들을 특징적으로 마이크로 지판(microplate)으로 규정하고 있으며, 호주-남극 중앙해령에 위치한 맥쿼리 마이크로 지판 이외에도 Capricorn, Galapagos, Easter 등 마이크로 지판들은 전 지구적으로 분포하고 있음
- 이러한 마이크로 지판이 생성되는 조건과 진화 과정을 규명하기 위하여, 수심, 중력, 해상 지자기 자료, 판운동 모델, 그리고 지진파 모델을 사용하여 연구를 수행하였음
- 이 연구에서 살펴본 마이크로 지판은 인도양 중앙해령에 위치한 카프리카, 맥쿼리 마이크로 지판, 태평양에 위치한 갈라파고스, 이스터, 후안 페르난데즈 마이크로 지판이 있음. 또한 현재는 소멸된 마이크로 지판, 즉 더이상 주변 지판과는 독립적인 판 운동을 하지 않는 지판으로 매머릭스, 바우어, 프라이데이, 셀키르크 마이크로 지판을 살펴 보았음

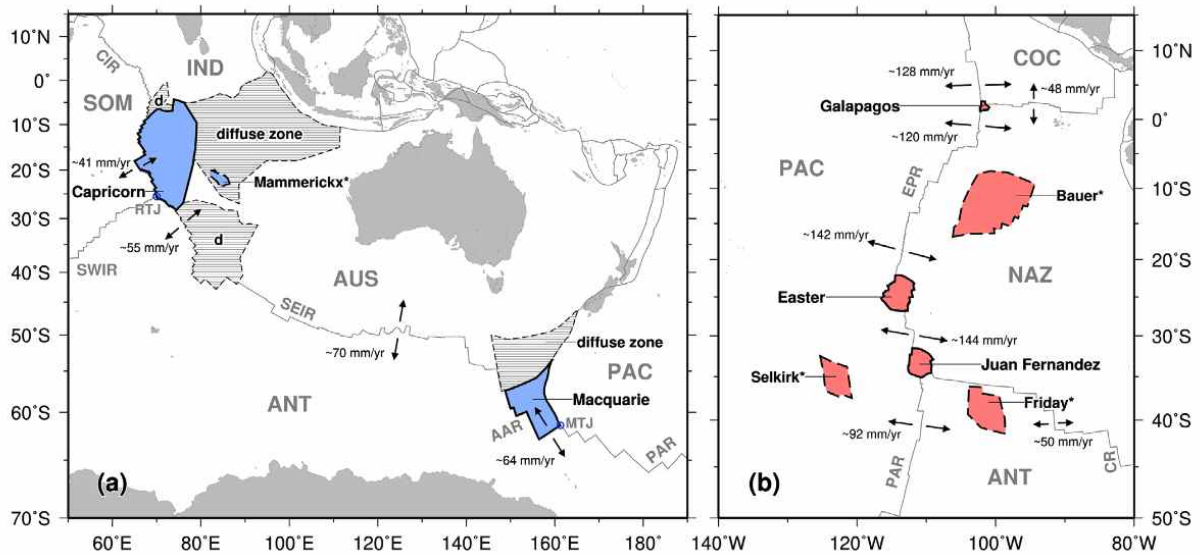


그림 14 남극 및 태평양 중앙해령 지역에 발달된 마이크로 지판의 분포(Choi et al., 2021)

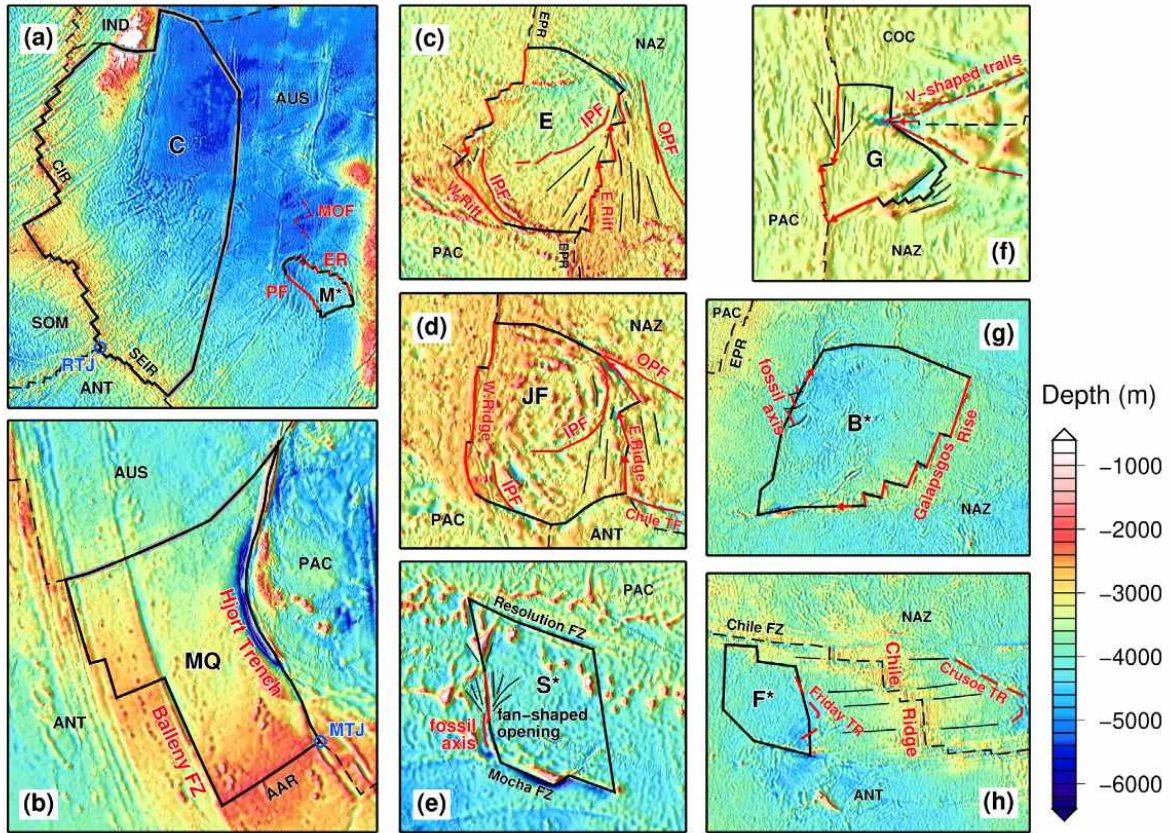


그림 15 마이크로 지판들의 수심 분포 및 주요 지구조 특징들(Choi et al., 2021)

□ 주요 마이크로 지판별 특징 분석

- Galapagos Microplate: 갈라파고스 마이크로 지판은 동태평양 중앙해령에 위치하고 있으며, 태평양, 코코스, 나즈카 지판에 둘러싸여 있음. 이 마이크로 지판은 약 100만 년 전, ridge-ridge-ridge 또는 ridge-ridge-fault 유형의 삼중합점에서 기원하여 형성되었음. 주변 지판간의 확산 속도가 다르며, 태평양과 코코스 지판 사이에서 가장 높은 확장 속도 (~128 mm/yr)를 보였고, 이어 태평양과 나즈카 지판(~114-123 mm/yr), 그리고 코코스과 나즈카 지판 사이의 순으로 확장 속도(~48 mm/yr)가 낮아졌음. 이후 판구조 운동의 변화가 일어나면서 열개 구조가 이동하며 갈라파고스 마이크로 지판의 동쪽 가장자리에 V자형 흔적을 남겼으며, 이는 복잡한 변형이 발생했음을 지시하는 증거임. 또한 갈라파고스 마이크로 지판은 약 5-10°의 시계 방향으로 회전하였음
- Easter Microplate: 이스터 마이크로 지판은 태평양판과 나즈카판 사이, 이스터 섬 근처에 위치하고 있음. 이 지역의 동태평양 중앙해령은 이스터 마이크로 지판 북쪽에서는 약 142-143 mm/yr, 남쪽에서는 약 144-149 mm/yr의 속도로 확장하고 있음. 이스터 마이크로 지판은 약 5-6백만년 전에 형성되기 시작하였으며, 현재 마이크로 지판 남쪽 경계 위치에서 북쪽으로 빠르게 전파되는 대규모 열개 시스템으로부터 시작되었음. 이후 동태평양 중앙해령을 따라 해양 암석권의 현저한 변형을 유발하였고, 약 3백만년 전부터 약 45° 정도 시계 방향으로 회전하기 시작하였음. 5-6백만년 전 기간 동안, 전 세계 판운동이 태평양판을 중심으로 재정립되며, 동태평양 중앙해령과 태평양-남극 중앙해령의 확장 방

향이 갑작스럽게 바뀌게 되었음. 동일 기간에 남동 인도양 중앙해령에서도 시계 방향으로 약 20° 회전과 확장 속도의 증가가 발생하였음. 이전 연구들은 이러한 주요 판운동 변화가 이스터와 후안 페르난데스 등의 마이크로 지판 형성을 일으킨 요인으로 고려하였음

- Juan Fernandez Microplate: 후안 페르난데스 마이크로 지판은 동태평양 중앙해령과 태평양-남극 중앙해령이 연결되는 약 33°S 지점에 위치해 있음. 여기서 동태평양 중앙해령은 태평양판과 나즈카판 사이의 확장 경계로 작용하며, 태평양-남극 중앙해령은 태평양판과 남극판 사이의 확산 경계로 정의됨. 따라서 후안 페르난데스 마이크로 지판은 태평양, 남극, 나즈카판으로 둘러싸여 있는 지구조적 특징을 가지고 있음. 동태평양 중앙해령의 확장 속도가 태평양-남극 중앙해령보다 빠르기 때문에 마이크로 지판의 북쪽과 남쪽 사이의 확장 속도 차이가 크게 나타남. 후안 페르난데스 마이크로 지판 북쪽의 추정 확장 속도는 약 142-149mm/yr이며, 남쪽에서는 약 94-95mm/yr에 이룸. 후안 페르난데스 마이크로 지판의 형성은 자기 이상 3A 부근에서 시작되었으며, 주로 열개 전과와 intra-transform 확장이 특징적임. 이러한 과정은 6백만년 전의 판운동 재조직과 함께 태평양-남극-나즈카 삼중합점의 이동에 의해 유발된 것이며, 마이크로 지판의 판운동학적 진화는 중앙해령의 성장과 변형을 포함하여 회전 속도에 상당한 변화를 일으켰으며, 이는 7에서 29°/myr의 변화로 기록되었음
- Macquarie Microplate: 호주 지판과 남극 지판 사이의 판 운동이 Balleny 균열대 동쪽에서 불일치함을 정량화하면서, 150-160°E와 60°S 근처에 있는 Macquarie 마이크로 지판의 독립적 운동이 제안되었음. Macquarie 마이크로 지판은 남쪽으로 호주-남극 중앙해령(AAR)이 북쪽으로는 광범위한 지진 활동이 일어나는 확산적 경계(diffuse boundary)가 자리 잡고 있음. 고해상도 해상 지자기 분석을 통해, Macquarie 마이크로 지판의 운동은 여덟 개의 자기 이상(1o, 2, 2Ay, 2Ao, 3y, 3o, 3Ay, 3Ao)을 기반으로 재정의되었음. 이러한 보다 세분화된 지자기 연구는, Macquarie 마이크로 지판 동쪽의 MTJ(Macquarie Triple Junction) 근처에서 linear trough의 형태로 비대칭적인 pseudofault가 형성되었음을 밝혀내었음. 마이크로 지판 형성 시점에서 호주-남극 중앙해령에서 형성된 상대적으로 젊은 해양 암석권이 Hjort 해구에 가라앉기에는 너무 부력이 강해, 호주-남극 중앙해령 확장 방향에서 약 10°의 반시계 방향 회전을 유발한 것으로 보임. 마지막으로, Macquarie 마이크로 지판은 호주 지판의 운동과 독립적으로 변경된 북북서-남남동 확장 방향으로 계속해서 운동하고 있으며, 호주-남극 중앙해령에서 새로운 해양 암석권이 지속적으로 생성되면서 그 크기(면적)도 함께 확장하고 있음
- Capricorn Microplate: 인도-호주 판은 초기에는 하나의 큰 지판으로 간주되었으나, 넓은 확산 판 경계로 구성된 여러 개의 지판으로 나누어 재정의되었음. 이 판 경계는 내부 구조적 변동을 겪어 광범위한 판 내 지진을 유발하는 것이 특징적임. 로드리게스 삼중합점(RTJ) 근처에 위치한 Capricorn 마이크로 지판은 호주 지판과 경계를 이루는 판 경계와 인도 판과의 작은 판 경계를 가지며, 이 마이크로 지판 주변에는 마이크로 지판 자체와 비슷하거나 더 큰 광범위한 확산 경계가 존재함. 주요 지판들과 경계하는 넓은 확산 구역이 상대적으로 넓기때문에 이 마이크로 지판의 독립적인 운동은 지난 1100만년 동안 호

주 판과의 상대적 회전은 1° 미만, 인도 판과의 상대적 회전은 3° 미만으로 매우 소규모 임

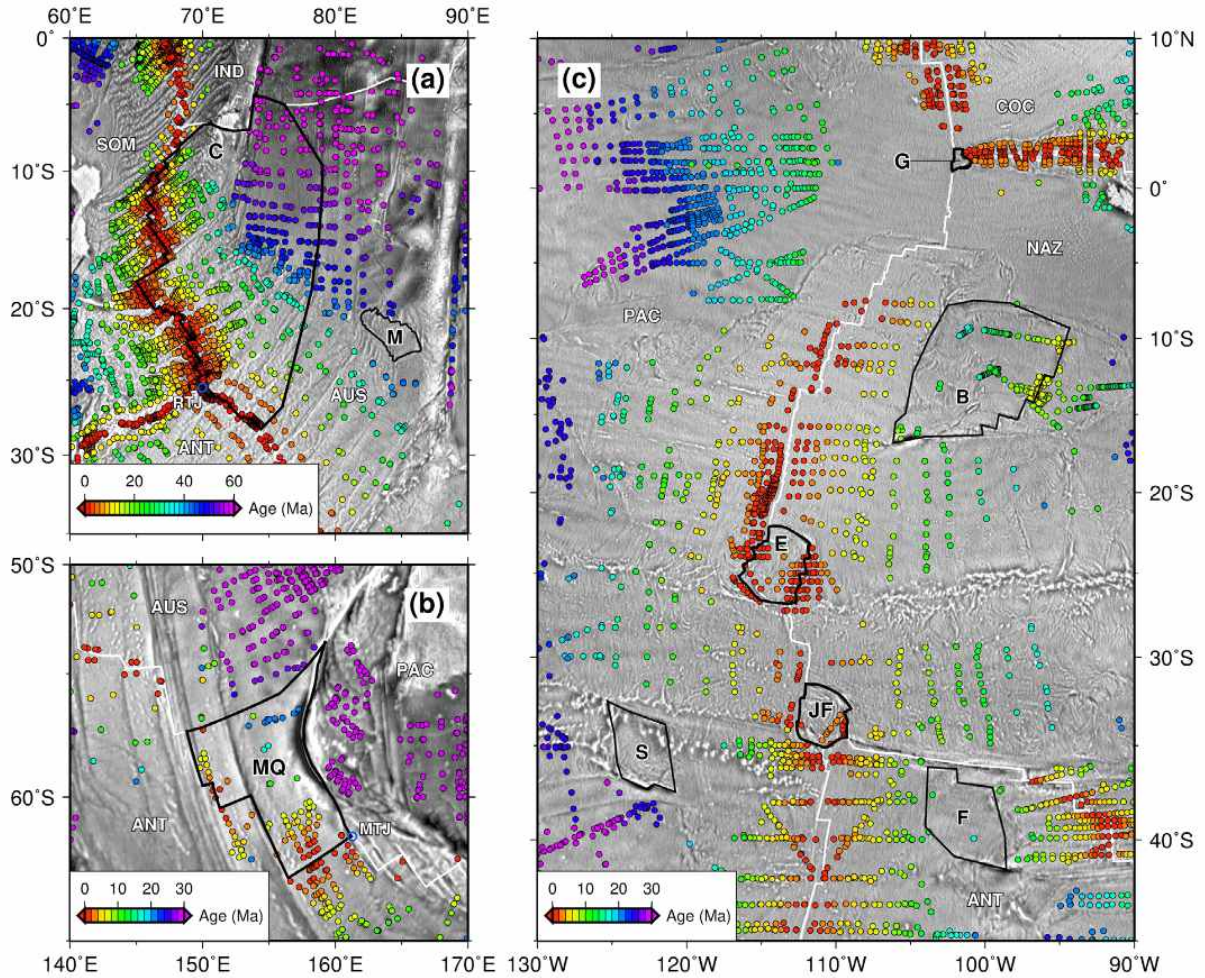


그림 16 마이크로 지판의 판운동 비교 분석을 위한 지자기 이상치 분포(Choi et al., 2021)

□ 연구 결과

- 마이크로 지판의 형성은 중앙해령에서 일어나는 propagation rifts와 overlapping spreading center와 같은 판운동 변화에 반응하는 확장축의 지형 변화를 수반하는 것으로 나타났음. 이러한 확장축의 총 길이는 마이크로 지판의 영역 확장을 결정하는 요소로 고려할 수 있음. 이전 연구에서는 중요한 판과 구별되는 작은 지판의 임계 크기가 약 $10^{7.5}$ km^2 라고 제시한바 있음. 그러나 이러한 작은 판들의 수와 공간 분포에는 명확한 패턴이 보이지 않았음. 이 연구에서는 마이크로 지판의 면적을 계산하여 이전에 제시된 관계를 따르는지 확인하였음. 마이크로 지판의 표면적을 비교한 결과, 가장 큰 크기를 갖는 Capricorn 마이크로 지판 ($\sim 2.5 \times 10^6$ km^2)과 Bauer 마이크로 지판 ($\sim 8.5 \times 10^5$ km^2)이 인도양과 태평양에서 정의되었음. 다른 대부분의 마이크로 지판은 훨씬 작은 크기로, 약 $\sim 3.0 \times 10^5$ km^2 이하로 나타났음. 따라서 새롭게 형성되는 마이크로 플레이트는 $\sim 10^{5.5}$ km^2 의 범위 내에서 주변에 위치한 기존 지판들과의 영역 성장을 위해 경쟁해야 함을 시

사함. 이와 같이 판운동 변화 등에 대한 중앙해령 시스템의 반응은 마이크로 지판의 형성 과정에서 결정적인 역할을 하는데, 분석 결과 지판이 영역 확장을 유지하기 위한 중앙해령의 임계 길이는 약 600 km인 것으로 판단됨

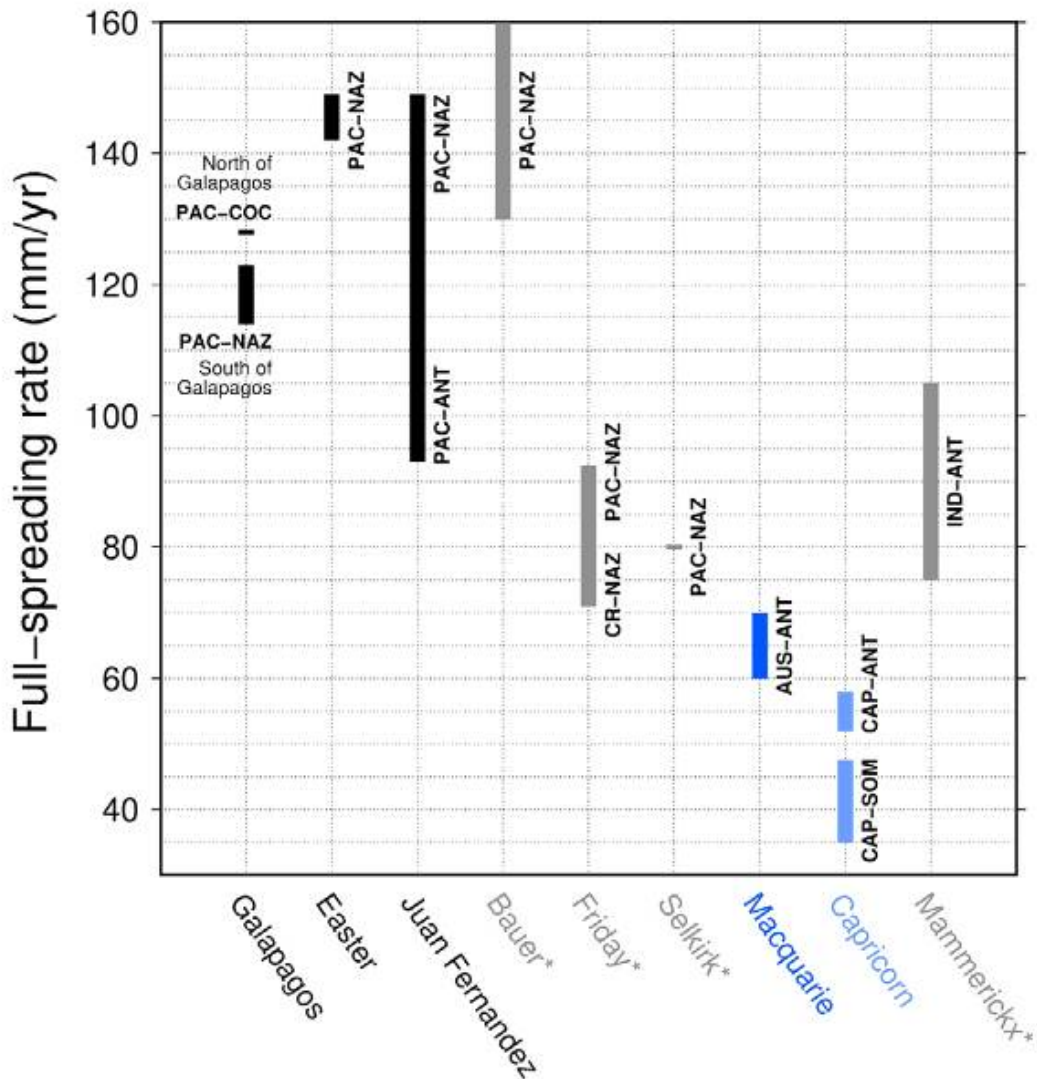


그림 17 마이크로 지판의 확장 속도 비교 (Choi et al., 2021)

- 또한 이 연구에서는 마이크로 지판의 확장 속도에 상당한 차이가 있음을 확인할 수 있었음. 중앙해령 확장 시스템은 그 속도에 따라 여러 시스템으로 분류되며, 이는 매우 느린 확장부터 초고속 확장까지 다양하게 분류됨. 느린 확장 시스템 (예: 대서양)의 암석권 두께는 일반적으로 약 4 km로, 빠른 확장 시스템 (예: 동태평양)의 암석권 두께는 약 1 km로 얇음. 지판 강도는 암석권 두께의 제곱에 비례하므로, 지판을 파괴하기 위해서는 느린 확장 시스템에서는 빠른 해저 확장 시스템보다 훨씬 큰 힘을 필요로 하게 됨.
- 이 연구에서 조사된 마이크로 지판의 전체 확장 속도는 일관적으로 ~70-80 mm/yr보다 빠른 것으로 나타났으며, 특히, Mammerickx 마이크로 지판은 인도-남극 지판 간의 확장 속도가 75-105 mm/yr인 경우에 형성되었음. 이러한 결과는 마이크로 지판이 확장 속도

가 약 70 mm/yr 이상일 때에만 형성 및 진화할 수 있음을 시사함

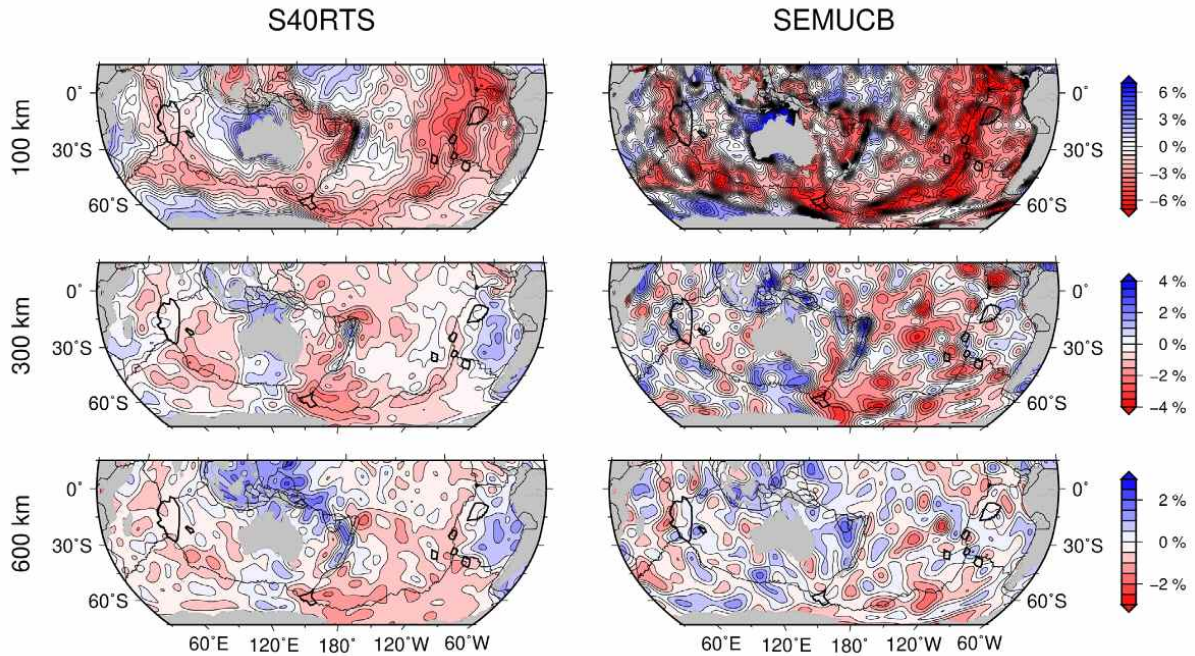


그림 18 마이크로 지판 하부의 지진파 속도 비교(Choi et al., 2021)

- 지판의 강도는 두께 외에도 외부 힘에 대항하고 지판의 안정성을 결정하는 데 영향을 미치는 요소 중 하나로 고려할 수 있음. 확장축 근처에서 암석권의 열적 특성은 이러한 강도에 변화를 주는 지구물리적 인자로 살펴볼 필요가 있음. 특히 빠른 속도로 확장하는 암석권의 경우 상대적으로 얇고 약한 암석권이 rift propagation이 수반될 경우 마이크로 지판의 생성으로 연결될 수 있기 때문임
- 이러한 영향을 살펴보기 위하여 마이크로 지판 하부의 지진파 속도 구조를 분석하였음. 100 km 깊이에서 S파의 저속도 구역은 중앙해령의 분포와 일관되게 분포되어 있으며, 이는 중앙해령 하부에 안정된 upwelling 시스템이 존재한다는 것을 보여줌. 그러나 마이크로 지판의 형성 및 현재 위치에서의 지진파 속도 구조와의 뚜렷한 상관관계는 나타나지 않는 것으로 보임. 이러한 마이크로 지판의 형성과 맨틀의 열 구조 간의 상관 관계를 정량화하기 위해 추가 연구가 필요한 것으로 판단됨

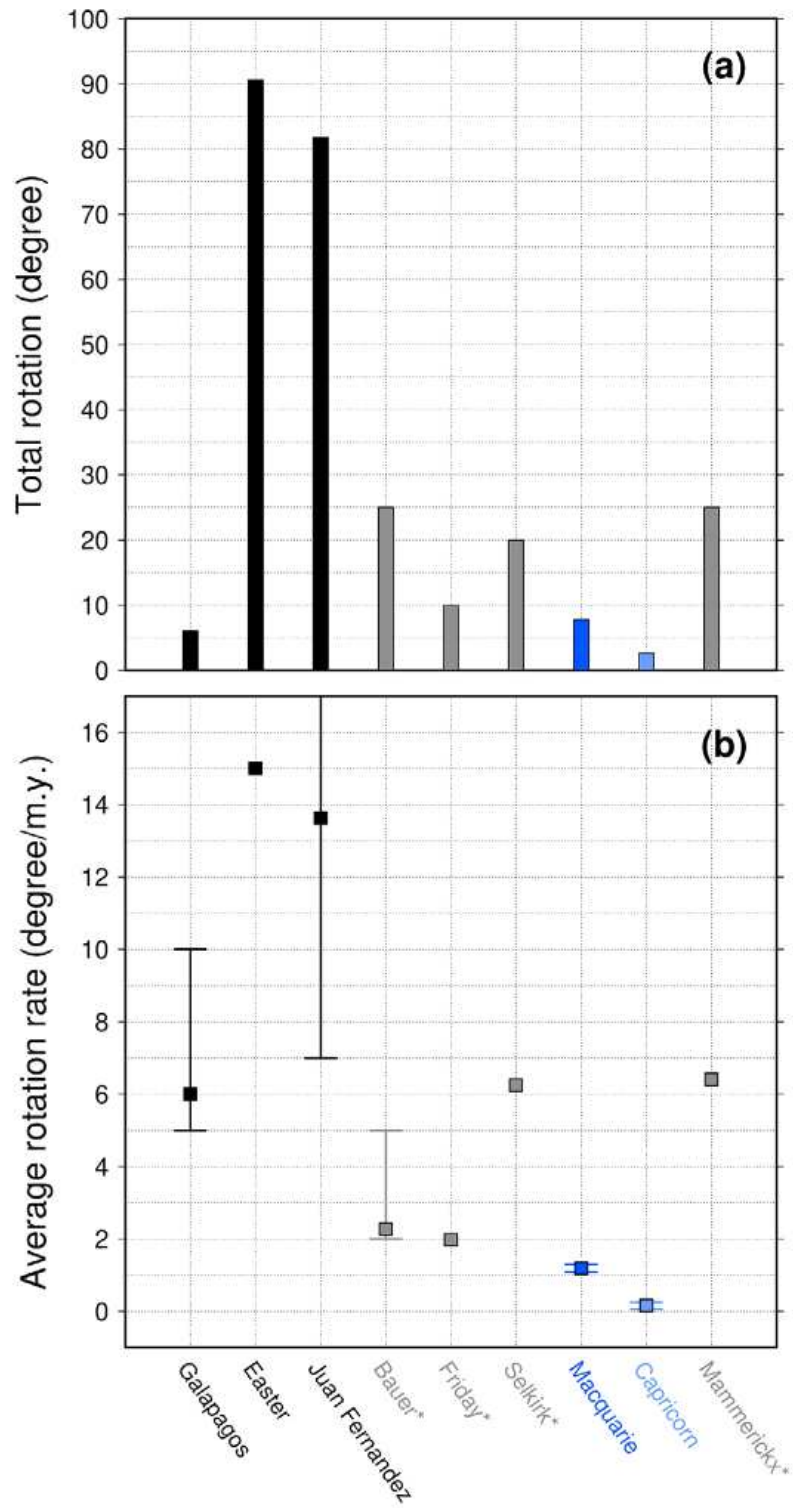


그림 19 마이크로 지판의 판운동 각속도 비교 (Choi et al., 2021)

제 4 장 연구개발목표 달성도 및 대외기여도

□ 연구개발목표 및 달성도

성과목표	세부목표		달성 주요내용	달성도(%)
1단계 1차년도 (2020) 질란디아-남극 맨틀에 의한 중력 이상 연구	1-1	질란디아-남극 맨틀 상부 중양해령 중력 분석	<ul style="list-style-type: none"> - 선상 지구물리 자료 수집 - 질란디아-남극 맨틀 상부의 중양해령 구간 전반에 걸친 중력 이상 계산 	<ul style="list-style-type: none"> - 분석결과 제시 - 중력이상도 생성 - 달성도: 100%
	1-2	해양 지각 두께 변화 계산 및 비교	<ul style="list-style-type: none"> - 잔여 맨틀 부계 중력 이상으로부터 해양 지각 두께를 역산하여 계산 - 계산된 해양지각 두께의 보정 및 다른 지구물리량과의 비교 	<ul style="list-style-type: none"> - 분석결과 제시 - 해양 지각 두께 분포도 생성 - 달성도: 100%
1단계 2차년도 (2021) 질란디아-남극 해양지각의 시공간적 진화 연구	2-1	질란디아-남극 맨틀 주변의 지구조 운동 복원	<ul style="list-style-type: none"> - 이전 아라온 실패역 탐사에서 획득된 지구물리 자료 및 공개 지구물리 자료 취합 - 태평양-남극 중양해령 구간에서 기존에 취득된 선상 자력 자료를 확보하여 맥쿼리 관 이외의 leaky transform fault 주변에서의 판운동 변화 정의 - 맥쿼리 지판 운동의 생성 환경 및 진화 특성을 다른 지역의 해양지판 생성 환경 및 진화 특성 상호 비교(Geosciences Journal 게재 완료) - KR1 지역에서 측정된 수심 자료를 활용하여 해저화산의 지형적 특징 분석 연구 수행(Remote Sensing 게재 완료) - KR1 지역에서 측정된 자력 자료를 활용하여 해저화산의 생성 연대 및 환경 추정 연구 수행(Geochemistry, Geophysics, Geosystems 게재 완료) 	<ul style="list-style-type: none"> - 분석결과 제시 - SCI(E) 논문 3편 게재 완료 - 달성도: 100%

	2-2	균열대 및 변환단층의 지구조 운동 복원	- 기존 지구물리 자료 분석 수행 - 판구조 복원 모델 생성 및 주변 지판과의 상호작용 연구를 위한 Gplates 모델링 기초 자료 수집	- 분석 자료 수집 - 국제공동연구 기반 조성 - 달성도: 100%
1단계 3차년도 (2022) 질란디아-남극 맨틀의 지구동역학적 진화 연구	3-1	질란디아-남극 맨틀과 Leaky Transform Fault와의 공진화 과정 모사를 위한 지구조 변수 추출	- 기존 지구물리 자료 분석 수행 - 아라온 선상 지구물리 자료를 활용하여 확장 균열대 내부의 확장축 구별 - 주변 판의 과거 운동 방향 판구조 운동 모델을 통해 정의 및 분류	- 분석결과 제시 - 달성도: 100%
	3-2	Leaky Transform Fault 생성에 의한 해양지각 생성 기작 지구동역학적 수치 모델 모사 연구	- 확장균열대 혹은 leaky transform fault 생성에 기여하는 주요 지구물리 변수의 기여도 평가를 위한 수치모델링 수행 준비 중 - LaMEM (Lithosphere and Mantle Evolution Model) 등을 포함한 여러 수치 모델 모사 환경 분석 중	- 수치 모델 모사 환경 분석 중 - 달성도: 70%

□ 대외기여도


- 연구 지역에서 취득한 양질의 지구물리 자료를 활용하여 SCI(E) 논문 3편 게재 완료

Choi, H., **Kim, S.-S.**, & Park, S.-H. (2021). Magnetic Constraints on Off-axis Seamount Volcanism in the Easternmost Segment of the Australian - Antarctic Ridge. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 22, e2020GC009576. <https://doi.org/10.1029/2020GC009576> (IF: 4.48)

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, 799 - 811. <https://doi.org/10.1007/s12303-021-0005-7> (IF: 1.439)

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> (IF: 5.349)

- 이 중 Geochemistry, Geophysics, Geosystems에 게재된 논문은 2021년에 동 저널에 게재된 논문들 중에서 게재 이후 12개월 동안 가장 많이 다운로드된 논문으로 선정되었음



WILEY

Top Downloaded Article

Congratulations to:

 **Seung-Sep Kim**

Whose paper was one of the most downloaded* during its first 12 months of publication in:

GEOCHEMISTRY, GEOPHYSICS, GEOSYSTEMS

Magnetic Constraints on Off-Axis Seamount Volcanism in the Easternmost Segment of the Australian-Antarctic Ridge

*Among work published in an issue between 1 January 2021 - 31 December 2021.

그림 20 국제저명학술지에 2021년 게재된 논문 중 가장 많이 다운로드된 논문으로 선정됨

제 5 장 연구개발결과의 활용계획

□ 2단계 후속 연구 계획

- 1단계 연구 결과를 바탕으로 다음의 연구를 2단계에서 이어서 수행하고자 함

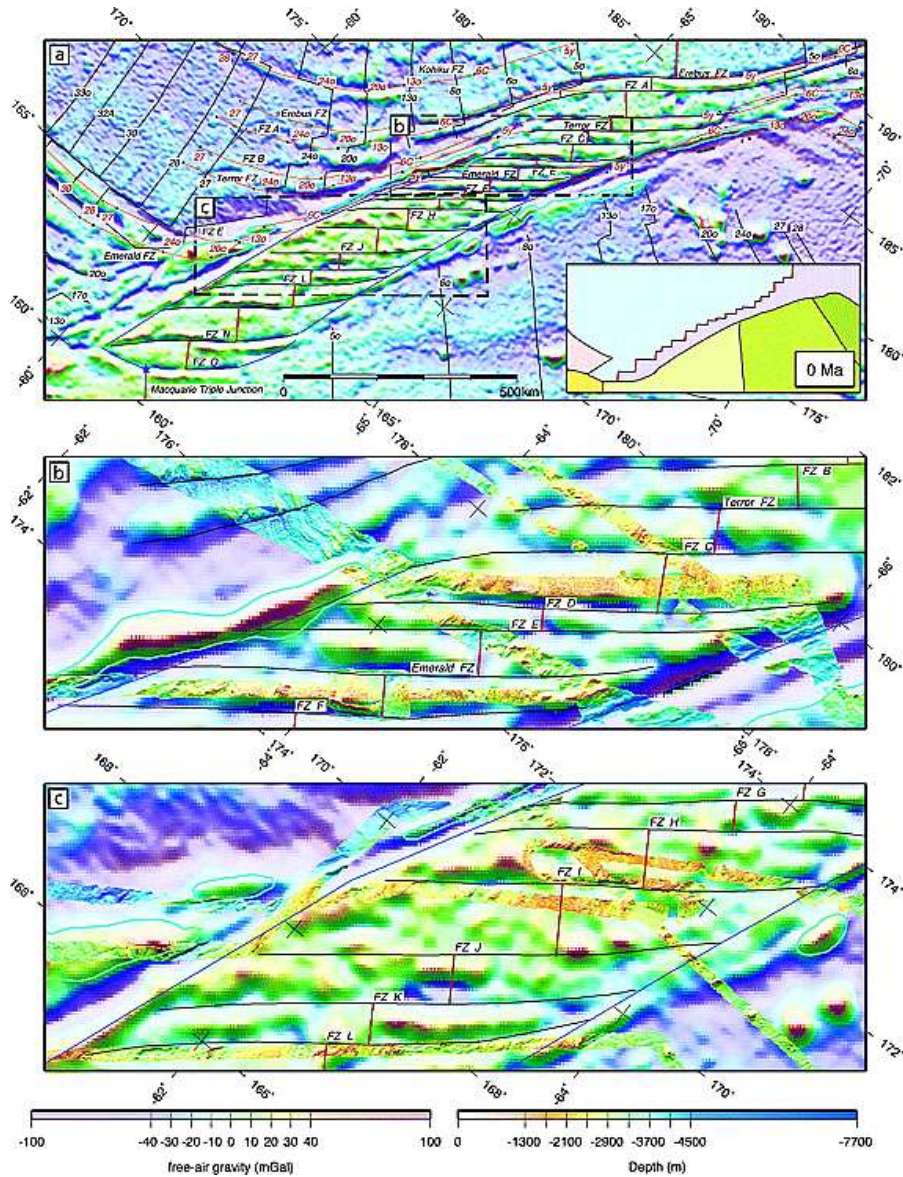


그림 21 [확장균열대의 제한적 내부 구조(Croon et al., 2008)]

• 호주-남극 중앙해령 확장균열대 지구조 특성 규명

호주-남극 중앙해령 중앙부, KR1 확장축 동쪽에 위치한 확장균열대는 약 1000 km 거리에 걸쳐 30 km 이내의 짧은 확장축이 변환단층 및 균열대로 분리되어 촘촘히 분포하고 있음. 이러한 지질구조의 특성은 고해상도 선상 지구물리 탐사에 의해 아직까지 조사되지 않았던 지역이 많기 때문에 구체적인 지형적 특성이 규명되지 못했음. 지난 1단계 사업 기간에 해당 구간에 대한 지구물리 자료가 측정되어 확장균열대 내부에 분포하는 확장축의 지형적 특성이 구체적으로 드러난 바 있음. 그러나 전체 구간에 대한 지구조적 특성을

규정하기에는 연구 지역이 광범위하기 하기 때문에 주어진 탐사 일정으로 모든 지역을 조사할 수 없다는 현실적 어려움이 존재함. 이러한 제약을 극복하기 위하여 아라온호의 선상 지구물리 자료를 포함하여 기존에 공개된 지구물리 자료를 취합하여 해저 지형의 특성을 우선적으로 정의하고자 함. 또한 확장균열대의 생성 환경 및 진화를 복원하기 위한 판운동 복원 모델을 문헌 및 선상 자력 자료를 활용하여 정의하고자 함. 정의된 자료는 후속으로 진행될 수치 모델 모사 결과를 제약 또는 검증하는 데 활용될 예정임

• 호주-남극 중앙해령 확장균열대 수치 모델 개발

호주-남극 중앙해령의 확장균열대는 내부에 15개 이상의 짧은 확장축들이 분포하고 있다는 것과 상대적으로 수심이 얕다는 특성을 보이고 있는 데 이러한 지형적 그리고 지구조적 특성은 다른 중앙해령의 확장균열대와 다른 특성임. 확장균열대는 판운동의 변화로 인해 변환단층(transform fault)이 확장되면서 생겨지는 빈 공간에 새로운 해양지각이 생성되는 형태로 단순화된 지구조 모델로 제시되어 왔음. 하지만 확장균열대를 생성하는 판운동 변화가 발생하였을 경우 해양지각의 하부 맨틀의 지구물리적 특성이 확장균열대 내부의 해양지각 생성에 어떠한 방식으로 기여하는 지는 아직 논의된 바 없음. 특히 호주-남극 중앙해령의 확장 균열대는 다른 지역에 비해 2~3배에 달하는 짧은 확장 경계들이 존재하는 데, 이러한 특성이 하부의 맨틀 구조와 어떠한 상관관계를 가지는 지 살펴보는 것은 질란디아-남극 맨틀의 지구조적 특성을 규명하는 것과 매우 밀접한 관계가 있음. 이를 위해 LaMEM (Lithosphere and Mantle Evolution Model) 수치 모사 환경(Pusok and Kaus, 2015)을 적용하고자 함. 2차원 및 3차원 환경에서 지각구조의 변화 양상(strain)을 수치 모사 할 수 있다는 것과 컴퓨팅 환경에 크게 제약되지 않는다는 장점을 가지고 있음. 각기 다른 맨틀 온도를 고려하였을 때 확장균열대의 발달 양상과 그 결과 구조를 분석함으로써 호주-남극 중앙해령의 확장균열대의 특성을 규명하고자 함

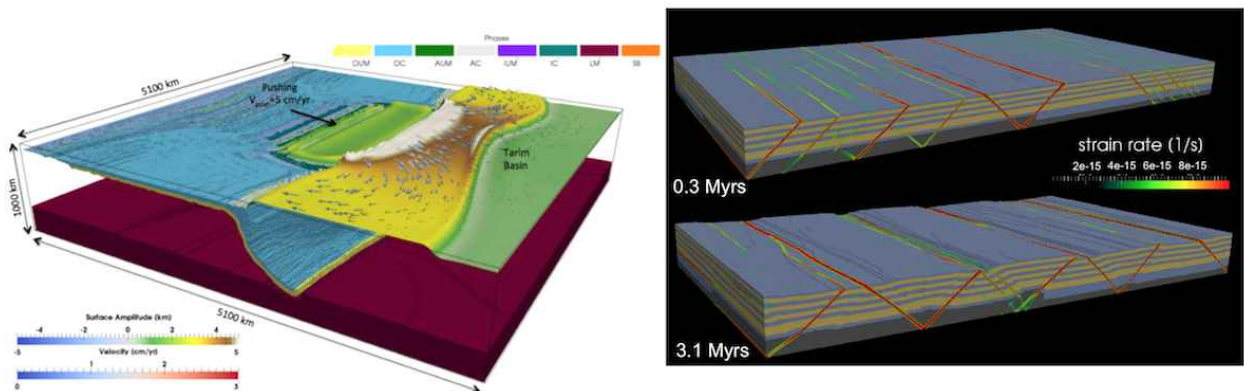


그림 22 LaMEM 수치모사 예시

[LaMEM 수치모사 예시]

□ 2단계 정성적 성과 목표

성과목표	세부목표		평가지표(핵심성과 스펙)	검증방법	가중치 (%)
1차년도(2023) 호주-남극 중앙해령의 확장균열대 진화 연구	1-1	확장균열대 지구조 특성 규명	- 선상 지구물리 자료 수집 - 호주-남극 중앙해령의 확장균열대 지구조 특성 규명(판운동 방향, 지각두께 등)	지구조 해석도 1건	40%
	1-2	확장균열대 수치 모델 개발	- LaMEM을 적용한 확장균열대 수치 모델 개발	수치모델 1건	60%
2차년도(2024) 질란디아-남극 맨틀 심부구조 연구 1	2-1	질란디아-남 극 중심의 판운동 복원 모델 개선	- 질란디아-남극 맨틀 중심의 디지털 판운동 복원 모델 개선	판운동 복원도 1건	50%
	2-2	판운동과 맨틀의 공진화 양상 규명	- 판운동 복원 환경에서 나타나는 맨틀 진화 양상 연구	맨틀 온도 분포도 1건	50%
3차년도(2025) 질란디아-남극 맨틀 심부구조 연구 2	3-1	질란디아-남 극 맨틀 밀도 분포 특성 규명	- 지오이드, 지진파 속도 모델 등을 활용하여 밀도 분포 역산	맨틀 밀도 분포도 1건	40%
	3-2	질란디아-남 극 맨틀의 지구물리적 경계 규명	- 판운동 복원과 맨틀 진화의 결과로 나타난 질란디아-남극 맨틀의 지구물리적 특성 규명	질란디아-남 극 맨틀 경계도 1건	60%

제 6 장 참고문헌

- Choi, H., Kim, S., & Park, S. (2021a). 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. (2021b). 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>
- Croon, M. B., Cande, S. C., & Stock, J. M. (2008). Revised Pacific-Antarctic plate motions and geophysics of the Menard Fracture Zone: REVISED PACIFIC-ANTARCTIC PLATE MOTIONS. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 9(7). <https://doi.org/10.1029/2008GC002019>
- Fabbrizzi, A., Parnell Turner, R., Gregg, P. M., Fornari, D. J., Perfit, M. R., Wanless, V. D., & Anderson, M. (2022). Relative Timing of Off Axis Volcanism From Sediment Thickness Estimates on the 8°20'N Seamount Chain, East Pacific Rise. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 23(9). <https://doi.org/10.1029/2022GC010335>
- Kim, S.-S., & Wessel, P. (2011). New global seamount census from altimetry-derived gravity data: New global seamount census. *Geophysical Journal International*, 186(2), 615 - 631. <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.2011.05076.x>
- Park, S.-H., Langmuir, C. H., Sims, K. W. W., Blichert-Toft, J., Kim, S.-S., Scott, S. R., et al. (2019). An isotopically distinct Zealandia - Antarctic mantle domain in the Southern Ocean. *Nature Geoscience*, 12(3), 206 - 214. <https://doi.org/10.1038/s41561-018-0292-4>
- Pusok, A. E., & Kaus, B. J. P. (2015). Development of topography in 3-D continental-collision models: Topography in 3D collision models. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 16(5), 1378 - 1400. <https://doi.org/10.1002/2015GC005732>
- Wessel, P., Smith, W. H. F., Scharroo, R., Luis, J., & Wobbe, F. (2013). Generic Mapping Tools: Improved Version Released. *Eos, Transactions American Geophysical Union*, 94(45), 409 - 410. <https://doi.org/10.1002/2013EO450001>
- Yi, S.-B., Lee, M. J., Park, S.-H., Nagao, K., Han, S., Yang, Y. S., et al. (2020). Alkalic to tholeiitic magmatism near a mid-ocean ridge: petrogenesis of the KR1 Seamount Trail adjacent to the Australian-Antarctic Ridge. *International Geology Review*, 1 - 21. <https://doi.org/10.1080/00206814.2020.1756002>



주 의

1. 이 보고서는 극지연구소 위탁과제 연구결과보고서입니다.
2. 이 보고서 내용을 발표할 때에는 반드시 극지연구소에서 위탁연구과제로 수행한 연구결과임을 밝혀야 합니다.
3. 국가과학기술 기밀유지에 필요한 내용은 대외적으로 발표 또는 공개하여서는 안됩니다.