

중자력을 이용한 지체구조 및 지판 상대운동 연구

Investigating tectonic structure and relative plate motion
of the Australian–Antarctic Ridge using shipboard gravity
and magnetic data



충남대학교 산학협력단

제 출 문

극지연구소장 귀하

본 보고서를 “서남극 열개구조와 남극 중앙해령 하부의 맨틀 상호 연관성 규명” 과제의 위탁연구 “중자력을 이용한 지체구조 및 지판 상대운동 연구” 과제의 최종보고서로 제출합니다.

2019. 01.

(본과제) 총괄연구책임자 : 박 용 철

위탁연구기관명 : 충남대학교
산학협력단

위탁연구책임자 : 김 승 섭

위탁참여연구원 : 최 정 열
“ : 송 지 현
“ : BEBIN Alysse
“ : 이 학 민
“ : 이 응 상
“ : 이 병 우
“ : 양 수 민
“ : 이 수 현

보고서 초록

위탁연구과제명	중자력을 이용한 지체구조 및 지판 상대운동 연구				
위탁연구책임자	김 승 섭	해당단계 참여연구원수	9	해당단계 연구비	30,000,000원
연구기관명 및 소속부서명	충남대학교 산학협력단		참여기업명		
국제공동연구	상대국명 :		상대국연구기관명 :		
요약(연구결과를 중심으로 개조식 500자이내)				보고서 면수	
<ul style="list-style-type: none"> - 맥쿼리 지판의 과거 판운동 역사를 재구성하기 위해서 아라온호에서 측정된 고해상도 선상 자력 자료를 활용하여 8 가지 자기 이상 시기(1o, 2, 2Ay, 2Ao, 3y, 3o, 3Ay 및 3Ao)에 대한 판운동 회전 매개 변수를 계산하였음. 아라온호를 사용하여 148E와 166E 구간 사이에서 측정된 선상 자기 자력을 후처리 보정하였고, 이 자료를 활용하여 South East Indian Ridge (SEIR) 동쪽 지판에서 자기 이상띠의 위치를 정의 하였음. 이러한 자료 해석 결과는 최근 7 백만년 동안의 맥쿼리-남극 지판 사이의 상대 움직임을 정의하는 데 활용되었으며, 호주-맥쿼리 및 맥쿼리-태평양 지판 사이의 상대 운동을 결정하기 위해, 위에서 언급한 8 가지 자기 이상 시기에 대하여 호주-남극 판운동 회전 매개 변수를 추가적으로 계산하였음 - 일반적으로 해저화산에서 채취한 암석 샘플에 대한 지구화학적 연대 분석을 통하여 해산화산의 생성 연대를 결정하는 것이 가장 전통적인 방법이나 이러한 연대 측정은 가장 최근의 화산 분화 시기를 반영하는 경향성이 있음. 이 연구에서는 해저화산 상부에서 측정한 지구 자기장 자료를 사용하여 전체 화산체 형성 시기를 결정하는 연구를 수행하였음. 일반적으로 중앙해령 주변에 생성된 작은 규모의 해저화산은 상대적으로 빠른 생성시간 소요됨. 이러한 해저화산과 해양지각의 생성 시기가 차이가 나게 된다면 자기 이상 역전에서도 불일치 현상이 발견됨. 이러한 차이를 활용하여 KR1 중앙해령에서 발견된 해저 화산의 연대를 해양 자기 이상치를 활용하여 추정하였음 					
색 인 어 (각 5개 이상)	한 글	중앙해령, 해저화산, 판운동 복원, 해상 중력, 해상 자력			
	영 어	mid-ocean ridge, seamount, plate reconstruction, marine gravity, marine magnetics			

요 약 문

I. 제 목

중자력을 이용한 지체구조 및 지판 상대운동 연구

II. 연구개발의 목적 및 필요성

맥쿼리 지판의 과거 판운동 역사를 재구성하기 위해서 아라온호에서 측정된 고해상도 선상 자력 자료를 활용하여 8 가지 자기 이상 시기(1o, 2, 2Ay, 2Ao, 3y, 3o, 3Ay 및 3Ao)에 대한 판운동 회전 매개 변수를 계산하고자 함. 아라온호를 사용하여 148E와 166E 구간 사이에서 측정된 선상 자기 자력을 후처리 보정하고 이 자료를 활용하여 South East Indian Ridge (SEIR) 동쪽 지판에서 자기 이상띠의 위치를 정의하고자 함. 이러한 자료 해석 수행은 최근 7 백만년 동안의 맥쿼리-남극 지판 사이의 상대 움직임을 정의하는 데 필수적임

일반적으로 해저화산에서 채취한 암석 샘플에 대한 지구화학적 연대 분석을 통하여 해산화산의 생성 연대를 결정하는 것이 가장 전통적인 방법이나 이러한 연대 측정은 가장 최근의 화산 분화 시기를 반영하는 경향성이 있음. 이 연구에서는 해저화산 상부에서 측정한 지구 자기장 자료를 사용하여 전체 화산체 형성 시기를 결정하는 연구를 수행하여 KR1 중앙해령에서 발견된 해저 화산의 연대를 해양 자기 이상치를 활용하여 추정하고자 함

III. 연구개발의 내용 및 결과

아라온호를 활용하여 새롭게 측정한 지자기 자료를 사용하여 맥쿼리-남극 지판 상대 운동에 대한 8 가지 자기 이상 시기(1o, 2, 2Ay, 2Ao, 3y, 3o, 3Ay 및 3Ao)에 대한 판운동 복원을 계산하였음. 그리고 지자기 자료의 시간적 그리고 공간적 해상도를 높이기 위해서 과거에 측정된 지자기 자료를 사용하였음. 그러나 과거에 측정된 지자기 자료의 경우에는 위치 정보 등이 부정확할 수 있기 때문에 이에 대한 자료 품질 조사도 함께 수행하였음

이 연구에서 개정된 맥쿼리 지판 주변의 판운동 복원 모델 중에서 가장 눈에 띄는 변화는 호주-맥쿼리 판운동에 대한 회전축으로 이전 연구에서는 2Ay (2.58 Ma)와 3Ay (6.04 Ma) 시기에 호주-맥쿼리 판운동 회전축의 위치가 서로 겹치지 않았지만, 이 연구에서 계산된 회전축은 해당 시기에 서로 밀접하게 위치하고 있음을 보여줌

해저 화산 상부의 해양 지자기 자료를 살펴본 결과 절반 정도의 해저화산에서 해저 화산 정상부의 지자기 역전과 주변부 해양 지각의 지자기 역전과 유사함이 나타났으며 다른 해저 화산에서는 주변부 해양 지각과 지자기 역전 양상이 서로 상이하게 나타났음. 이 연구에서는 지자기 정모델링을 사용하여 해저 화산 전체에 걸쳐 지자기 특성을 평가한 후 해양 지각의 지자기 극성과 뚜렷한 차이를 보이는 해저화산 C1, C2, E1, E3, G1, G2 및 H2에 대하여 추가 모델링을 수행하여 각 해저화산의 생성 연대를 계산하였음

IV. 연구개발결과의 활용계획

호주-남극 중앙해령 지역은 다른 중앙해령 지역에 비하여 지리적으로 접근성이 매우 낮고 해양 탐사를 수행하기에 적합한 해황을 확보할 수 있는 시기도 상대적으로 짧기 때문에 현재까지도 많은 지역에 대한 정밀 지구물리 탐사가 수행되지 못했음. 극지연구소 주도의 중앙해령 사업을 통하여 해당 지역에서 획득된 다학제간 지구과학 자료는 호주-남극 중앙해령에 대한 지역적인 지체구조적 특성을 이해하는 데에도 중요하게 사용될 뿐 아니라 전지구적 규모의 중앙해령 시스템을 이해하는 데에도 매우 중요한 역할을 할 수 있음

이 연구에서 수행된 연구결과들은 추후에 준비 중인 호주-남극 중앙해령 연구사업에 기반 자료로서 활용도가 높음. 특히 남극-질란디아 맨틀 도메인이 결정되면서, 맨틀 도메인의 지리적 위치를 결정하고 맨틀 도메인의 생성에 따라 발생한 여러 지질구조의 변형 등을 살펴볼 필요가 있음. 이 연구에서 수행된 지구 자기장 및 중력 자료를 활용한 지체 구조 연구 기법은 추후 연구될 지역에도 동일하게 적용이 가능하며 동시에 새로운 자료가 누적되면서 상부 맨틀 구조에 대한 보다 심도 있는 분석이 가능할 것임



S U M M A R Y

(영 문 요 약 문)

I. Title

Investigating tectonic structure and relative plate motion of the Australian-Antarctic Ridge using shipboard gravity and magnetic data

II. Purpose and Necessity of R&D

To reconstruct Macquarie Plate's past plate motion, finite rotation parameters for 8 different magnetic isochrons (1o, 2, 2Ay, 2Ao, 3y, 3o, 3Ay and 3Ao) are to be estimated from high-resolution shipboard magnetic data obtained using IBRV Araon. We utilize these shipboard measurements after conducting proper post-processing to locate magnetic reversals on the eastern parts of South East Indian Ridge (SEIR). Interpretation on these data is essential to compute relative plate motions between Macquarie-Antarctic plates over the last 7 million years.

Geochemical dating on rock samples taken from seamounts is the most traditional method for determining the age of seamounts. However, such rock-based dating tends to reflect the most recent volcanic eruption. In this study, we determine the seamount formation time using shipboard magnetic data.

III. R&D Results

Finite rotation parameters for eight different magnetic isochrons (1o, 2, 2Ay, 2Ao, 3y, 3o, 3Ay, and 3Ao) for Macquarie-Antarctic Plate were computed using the newly measured geomagnetic data from IBRV Araon. In order to increase the temporal and spatial resolution of geomagnetic data, we also utilized the archived geomagnetic data. However, in the case of such archived data, the location information may be inaccurate. So, we performed additional quality control processes on such archival datasets.

The most noticeable change in the revised plate reconstruction models is the location of rotation poles for the Australia-Macquarie plate motion. Whereas the previous study predicted the poles for 2Ay (2.58 Ma) and 3Ay (6.04 Ma) were tightly located, this study illustrated that these poles do not overlap each other.

The shipboard geomagnetic data collected over the seamounts in the study area showed that half of the seamounts exhibits similar geomagnetic reversal patterns with those of the seafloor nearby them, where the other half does not. In this study, we used geomagnetic forward modeling to evaluate seamount formation time for C1, C2, E1, E3, G1, G2, and H2 seamounts, where we found significant differences between geomagnetic polarities between seamounts and oceanic crust.

IV. Application Plans of R&D Results

The Australia-Antarctic Ridge is relatively geographically less accessible than other ridge system and has a relatively short time window to obtain a suitable ocean for seagoing explorations. Therefore, the interdisciplinary geoscience data acquired in the region through the Korea Polar Research Institute-led project is not only important for understanding the regional tectonic characteristics of the Australia-Antarctic Ridge, but also can play a very important role in understanding global mid-ocean ridge systems.

The findings of this study are highly useful as the basis for future Australian-Antarctic Ridge research projects. In particular, with the new determination of the Antarctic-Zealandia mantle domain, it is necessary to determine the geographic location of this mantle domain and examine the various geologic manifestations that have occurred as a result of the creation and evolution of the mantle domain. The tectonic studies using the Earth's magnetic field and gravity data can be directly applicable to the future study area. As the new data will accumulate, more in-depth analysis on the upper mantle structure can be conducted.

목 차

제 1 장 서론	8
제 2 장 연구개발수행 내용 및 결과	12
제 3 장 연구개발목표 달성도 및 대외기여도	35
제 4 장 연구개발결과의 활용계획	38
제 5 장 참고문헌	39



제 1 장 서론

호주 지판(Australian Plate)의 남동쪽 끝단은 맥쿼리 지판(Macquarie Plate)의 형성 등을 포함하여 복잡한 판운동 과정을 경험하였다(Cande and Stock, 2004a; DeMets et al., 1988). 맥쿼리 지판이 약 6 백만년 전에 생성되었다는 것을 지시하는 주요 증거는 Southeast Indian Ridge (SEIR)의 과거 판운동이 SEIR의 동쪽 끝단, 즉 George V Fracture Zone (FZ)의 동쪽에 위치한 호주-남극 지판의 상대운동 설명하지 못한다는 것이다(Cande and Stock, 2004a). 특히 Cande and Stock (2004a)은 George V FZ 동쪽에 위치한 자기 이상띠를 활용하여 호주-남극 지판의 상대운동 만으로는 관찰된 자기 이상띠를 위치를 정확히 추정하지 못한다는 것을 발견하였으며 이러한 불일치를 해소하기 위해서는 맥쿼리 지판이 존재해야 함을 최초로 제시하였다. 그들은 맥쿼리 지판이 6 백만년 전부터 독립적인 지판으로 생성되어 현재까지 유지되고 있다고 결론지었는데, 맥쿼리 지판의 형성은 호주 지판과 태평양 지판 사이의 상대 운동 방향의 변화로 인해 젊고 부력이 높은 해양 지각이 Hjort Trench에서 섭입되어야 하는데, 그 섭입이 주어진 지판의 물리적 환경으로는 가능하지 않았기 때문인 것으로 설명되었다(Cande and Stock, 2004a, Hayes et al., 2009).

맥쿼리 지판의 과거 판운동 역사를 재구성하기 위해서는 현재 고해상도 선상 자력 자료가 거의 존재하지 않는 SEIR의 동쪽에서 자료를 획득하는 것이 매우 중요하다(Seton et al., 2014). 이 연구에서는 먼저 8 가지 자기 이상 시기(1o, 2, 2Ay, 2Ao, 3y, 3o, 3Ay 및 3Ao)에 대한 판운동 회전 매개 변수를 추정하고자 하였다. 여기서 'y'는 정상 자기 극성(normal polarity) 시기에 중 젊은 끝단을, 그리고 'o'는 동일 시기서의 오래된 끝단을 지시한다. 대한민국 쇄빙선 아라온호를 사용하여 148E와 166E 사이에서 선상 자기 자력을 측정하였고, 이 자료를 활용하여 SEIR 동쪽 지판에서 자기 이상띠의 위치를 판별하였다(그림 1). 이러한 자료 해석 결과는 최근 7 백만년 동안의 맥쿼리-남극 지판 사이의 상대 움직임을 정의하는 데 활용되었다. 호주-맥쿼리 및 맥쿼리-태평양 지판 사이의 상대 운동을 결정하기 위해, 위에서 언급한 8 가지 자기 이상 시기에 대하여 호주-남극 판운동 회전 매개 변수를 추가적으로 계산하였다.

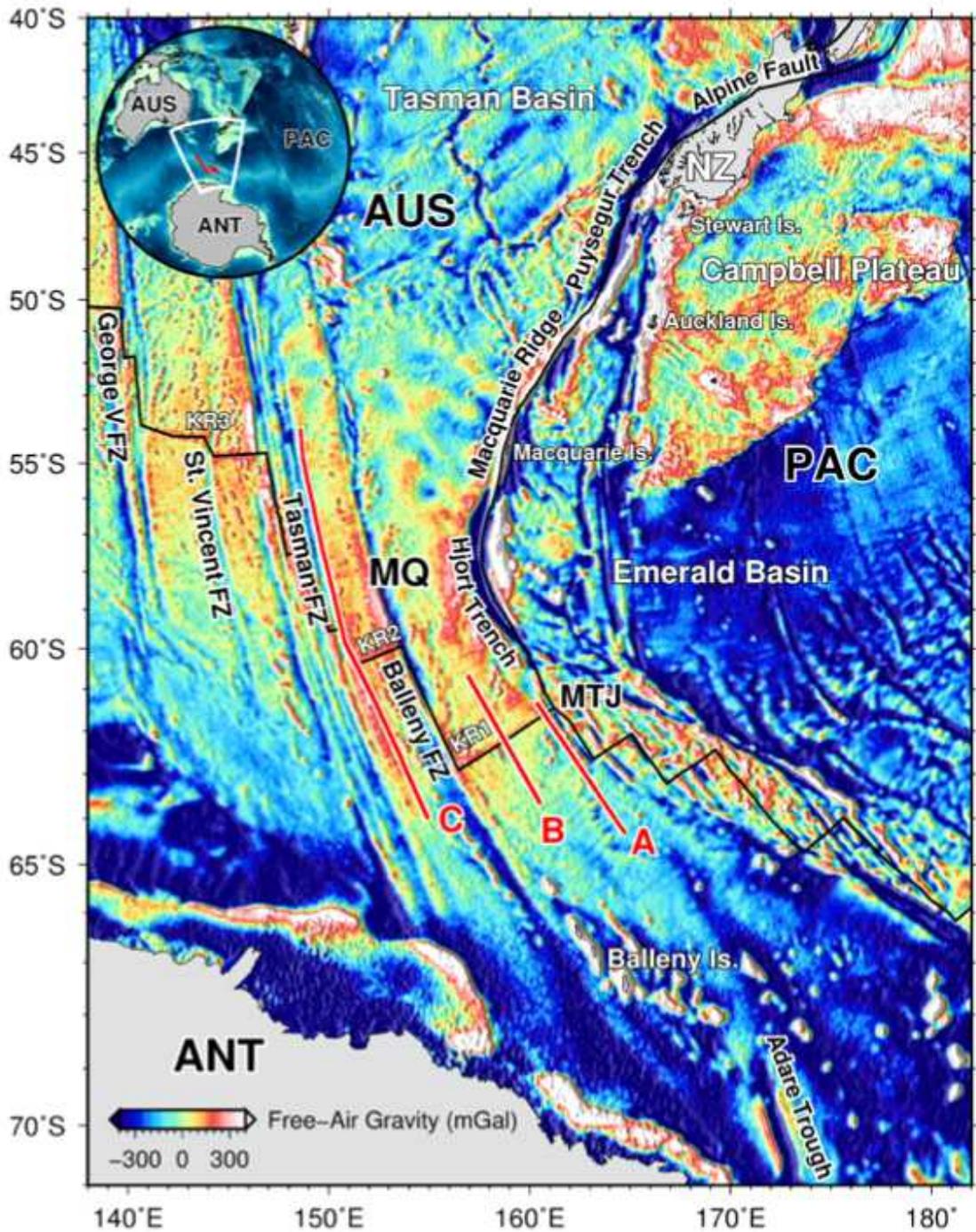


그림 1 호주-남극 중앙해령 및 맥쿼리 지판 주변에 위치한 주요 판구조 요소들: PAC = Pacific Plate; AUS = Australian Plate; ANT = Antarctic Plate; NZ = New Zealand. 배경 지도는 프리에어 중력이상도이다(Sandwell et al., 2014). 해당 그림은 Choi et al., (2017) 논문에서 취하였다.

또한 이 연구에서는 호주-남극 중앙해령의 KR1 확장축 주변에 위치한 해저화산의 공간 분포, 형태 및 지자기 특성을 연구하였다. 해저화산은 일반적으로 주변 해저면 보다 위로 50-100 m 이상 상승한 독립적인 지질구조체로 정의된(Kim and Wessel, 2011). 그러나 많은 경우 해저화산은 높이와 지형은 뚜렷하나 선형의 해저화산대(chain)로 존재하기도 한다(Rappaport et al, 1997). 이 연구에서는 연구지역에서 측정된 고분해능 선상 다중빔 수심자료에서 주변 해저면보다 100 m 이상 높은 지형 구조를 해저화산으로 정의하였다(그림 2).

일반적으로 해저화산에서 채취한 암석 샘플에 대한 지구화학적 연대 분석을 통하여 해산화산의 생성 연대를 결정하는 것이 가장 전통적인 연구방법이다. 그러나 그러한 연대 측정은 가장 최근의 화산 분화 시기를 반영하는 경향성이 있다(Maia et al., 2005; Hwang et al., 2016). 이에 대한 대안으로는 해저화산 상부에서 측정된 지구 자기장 자료를 사용하여 전체 화산체 형성 시기를 결정할 수 있다(Sager and Pringle, 1987; Maia et al., 2005). 일반적으로 중앙해령 주변에 생성된 작은 규모의 해저화산은 상대적으로 빠른 생성시간(~ 약 1 백만년 미만)이 걸린다(Jackson et al., 1972; Maia et al., 2005). 그러므로 해저화산의 자기이상과와 주변 해저면의 자기이상치를 비교하면 화산 형성 시기를 확인할 수 있다(Maia et al., 2005). 이 연구에서 KR1 중앙해령에서 발견된 해저 화산의 연대를 해양 자기 이상치를 활용하여 추정하고자 한다.

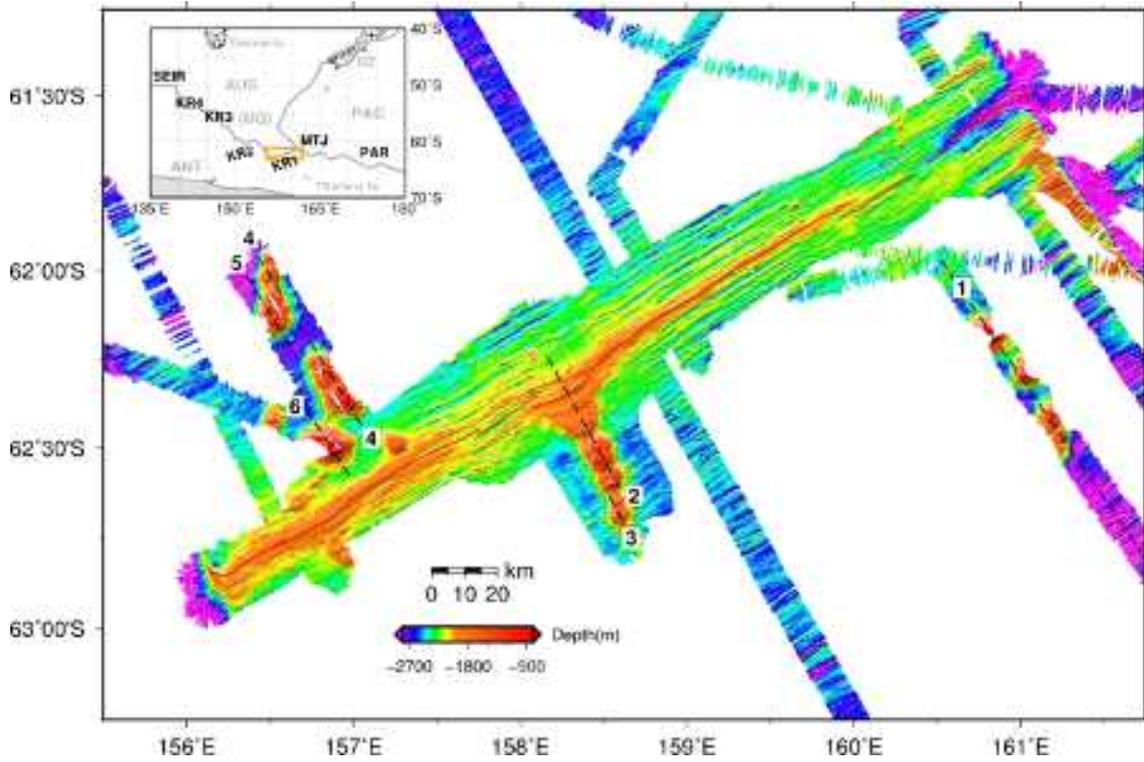


그림 2 호주-남극 중앙해령에서 측정된 선상 다중빔 수심자료: AUS=Australian Plate; ANT=Antarctic Plate; PAC=Pacific Plate; MQ=Macquarie Plate; SEIR=Southeast Indian Ridge; PAR=Pacific-Antarctic Ridge; MTJ=Macquarie Triple Junction; NZ=New Zealand. 해당 그림은 Choi et al. (in prep.) 에서 취하였다.

제 2 장 연구개발수행 내용 및 결과

제 1 절 맥쿼리 지판 판운동 복원 연구

이 연구에서는 2011~2015년 사이에 대한민국 쇄빙선 아라온호를 이용하여 SEIR 동쪽에 위치한 호주-남극 중앙해령 구간에 수행된 다학제간 조사 활동에서 얻어진 선상 지구물리 자료를 활용하였다. 해당 구간에서의 열수 및 생물학적 발견은 Hahm et al. (2015) 논문을 통하여 세상에 알려졌다. 맥쿼리 지판의 생성 및 진화 과정을 정의하기 위한 판운동 복원 연구를 위해 2015년 KR1 확장축을 가로지르는 약 400 km 길이에 달하는 2개의 해상 자력 측선(그림 1의 측선 A 및 B)을 따라서 해상 지자기 자료를 측정하였다. 주어진 측선의 길이와 호주-남극 중앙해령의 확장 속도를 고려하면 최소 1천만년 기간 동안의 지자기 변화 기록을 얻을 수 있다. KR1의 서쪽에 위치한 KR2 확장축의 경우 프랑스 남극기지 보급선인 M/V L'Astrolabe를 사용하여 해양 지자기 자료를 획득하였으며, 해당 자료는 TACT (Tasmania-Adelie land Corridor Transect) 프로그램의 일부(그림 1의 측선 C)로 2012년 남극 하계 때 측정되었다.

우선 측정된 해상 지자기 자료에서 IGRF (International Geomagnetic Reference Field) 모델 12를 사용하여 자기 이상치를 계산하였다(Thebault et al., 2015). 중앙해령 지역에서의 정방향 자기 모델 프로그램인 MODMAG (Mendel et al., 2005)을 사용하여 지자기 역전 시기를 결정하였고, 중앙해령 확장 구간에서의 확장 속도를 정의하였다(그림 3). SEIR 동쪽 지역과 태평양-남극 중앙해령 지역에서 연구를 진행했던 Cande and Stock (2004a)와 Croon et al. (2008) 연구 방법을 적용하여 Cande와 Kent (1995)의 지자기 연대표를 사용하였다. 단 C3Ay 및 C3Ao의 지자기 연대는 Krijgsman et al. (1999)에서 제시한 연대를 사용하였다.

그림 3은 연구지역에서 측정된 해양 선상 지자기 자료와 측정 자료를 바탕으로 계산된 지자기 역전의 변화를 보여준다. 측선 A는 KR1 확장축의 남쪽 부분에 위치하고 있어 남극 지판 상에 걸쳐 있으며 측선 A를 따라 정의된 자기 역전은 남쪽으로는 5o (10.95 Ma) 시기와 북쪽으로는 1o (0.78 Ma) 시기까지를 포함한다. 해당 측선 A를 따라 계산된 평균 전체 확장 속도는 63~65 mm/yr로 계산되었다.

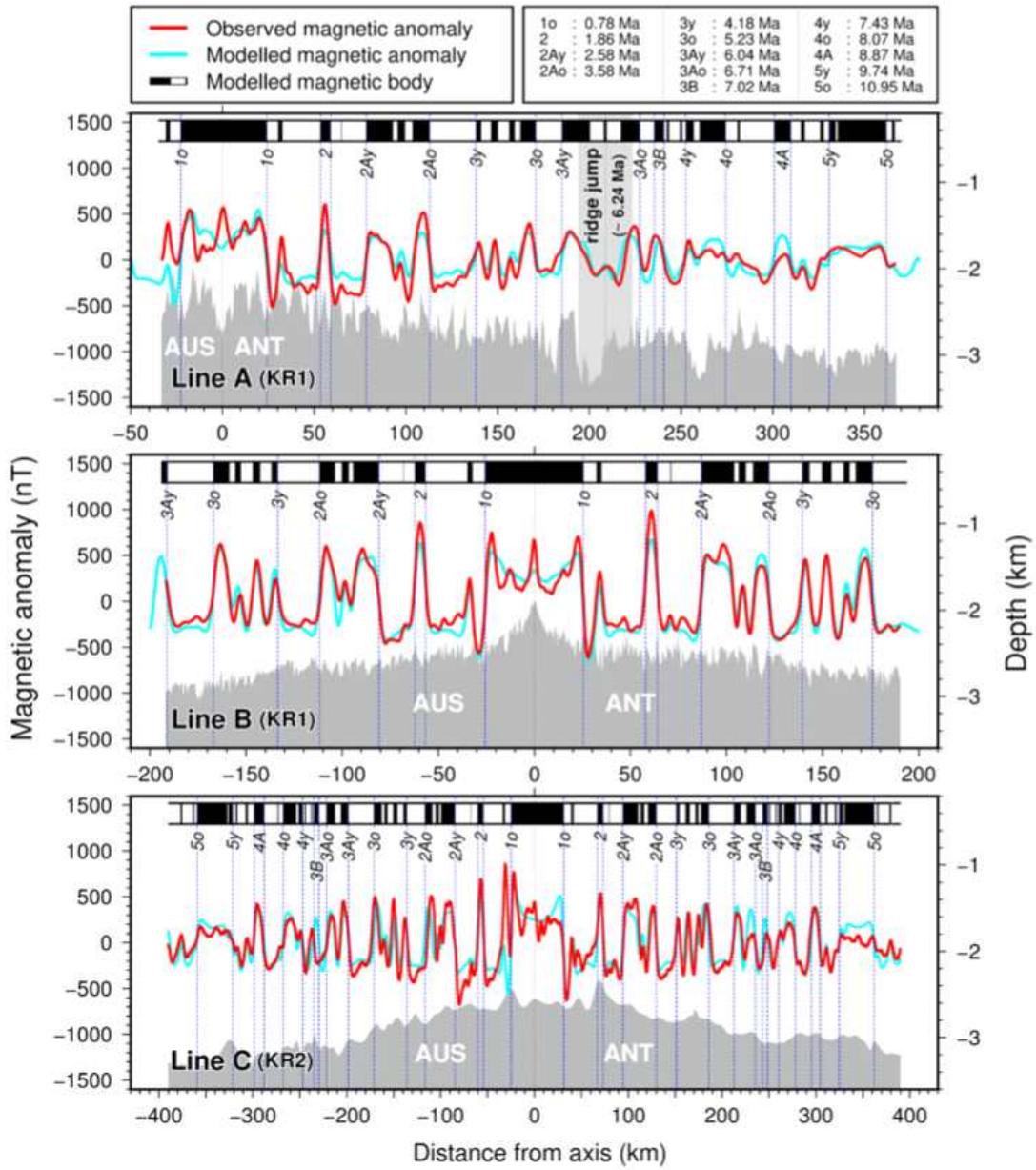


그림 3 KR1 확장축을 가로지르는 지자기 측선에 대한 자기 정모델링 결과. 해당 그림은 Choi et al., (2017) 논문에서 취하였다.

또한 확장축 도약(ridge jump) 현상이 KR1 에서 발견되었는데, 이 시기가 ~6.24 Ma이다. 이 시기는 맥쿼리 지판이 형성되어 독립적인 상대 지판 운동을 시작한 때와 일치한다(Cande and Stock, 2004a).

측선 B는 활동성 열수 분출 현상이 보고된 바 있는 KR1 확장축의 중앙 부분을 교차하며 지나간다(Hahm et al., 2015). 측선 B의 자료를 활용하여 계산된 전체 확장 속도는 측선 A와 유사하게 64~66 mm/yr로 계산되었다. 측선 B의 지자기 역전은 확장축에 대하여 서로 대칭이므로 존재하며 남쪽으로는 3o (5.23 Ma) 시기까지, 북쪽으로는 3Ay (6.04 Ma) 시기까지의 자기 역전을 포함한다. 측선 C는 KR2 확장축의 서쪽 지역을 가로지르는 방향으로 측정되었으며, 북쪽과 남쪽으로 각각 5o (10.95 Ma) 시기까지의 지자기 역전 현상을 포함한다. 측선 C에서는 측선 A와 같이 확장축 도약과 같은 복잡한 변화가 필요하지 않다.

이와 같이 아라온호를 활용하여 새롭게 측정한 지자기 자료를 사용하여 맥쿼리-남극 지판 상대 운동에 대한 8 가지 자기 이상 시기(1o, 2, 2Ay, 2Ao, 3y, 3o, 3Ay 및 3Ao)에 대한 판운동 복원을 계산하였다. 판운동 복원을 위해 필요한 균열대(fracture zone) 위치는 Sandwell et al. (2014) 논문이 제시한 위성 해수면 높이 자료 기반의 해상 중력 자료(버전 23)를 활용하여 정의하였다. 그리고 지자기 자료의 시간적 그리고 공간적 해상도를 높이기 위해서 과거에 측정된 지자기 자료를 사용하였다. 그러나 과거에 측정된 지자기 자료의 경우에는 위치 정보 등이 부정확할 수 있기 때문에 이에 대한 자료 품질 조사도 함께 수행하였다.

선상 지자기 자료에서 정의된 자기 이상의 위치와 균열대 위치 정보를 Hellinger 방법에 적용하여 남극 지판에 대한 맥쿼리 지판의 판운동 복원 회전 변수들을 계산하였다(Hellinger, 1981; Kirkwood et al., 1999; Royer and Chang, 1991). 이 계산 과정은 한 쪽 해양 지각 위에서 측정된 자기 역전 위치를 중앙해령 확장축에 대하여 다른 쪽 해양 지각 위로 회전 투영하여 두 자기 역전 위치, 즉 회전 투영된 자기 역전 위치와 회전 되지 않은 자기 역전 위치 사이의 공간적 오차를 줄이는 최적의 회전축의 위치와 회전 각도를 결정하게 된다. 이 때 투영된 역전 위치가 다른 확장 구간으로 넘어가지 않도록 공간적 제약을 제한하는 요소가 균열대의 위치이다.

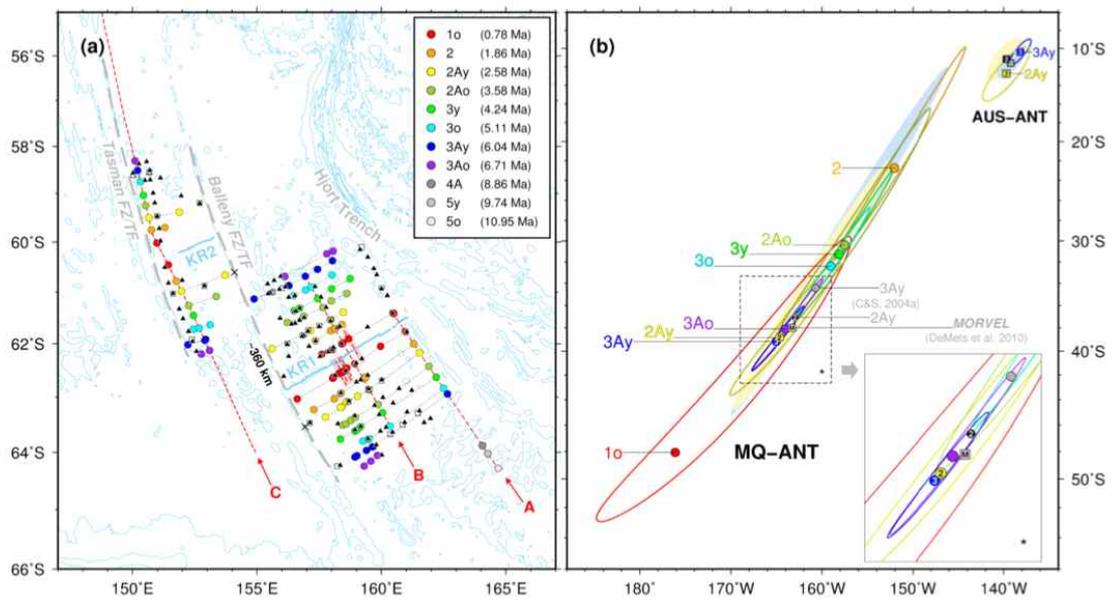


그림 4 맥쿼리-남극 지판의 상대 운동을 정의하는 지자기 역전 위치(a)와 사용된 역전 위치를 가장 잘 설명하는 회전축의 시기별 위치(b). 해당 그림은 Choi et al., (2017) 논문에서 취하였다.

아라운호와 같이 최근에 측정된 지자기 자료에서 정의된 자기 역전 자료에 대하여는 그 역전 위치에 대하여 1 km의 불확실성을 할당, 지자기 자료의 측정이 90년대 이전에 이루어진 자료에는 4 km의 위치 불확실성을 할당하였다. 균열대의 경우에는 수백만 년에 걸쳐 일어난 장기 지체 변형에 의해 영향을 받을 수 있기 때문에 (Lonsdale, 1994), 균열대 위치에 대한 오차로는 5 km 이상의 불확실성을 할당하였다.

그림 4a는 연구지역에서 정의된 지자기 역전 띠의 위치와 회전 투영된 결과를 비교하여 보여준다. 이 연구에서 최적화 모델로 정의된 회전축 위치에서 투영된 자기 역전 띠의 위치는 회전되지 않은 자기 역전 띠와 평균적으로 0.30 km의 거리 오차를 보이고 있으며 최대 오차는 2.50 km이었다. 이는 선상 지자기 측정 자료에 의해 정의된 판운동 복원 모델의 정확도가 높다는 것을 지시한다고 볼 수 있다. 그림 4b에서는 새롭게 정의된 맥쿼리-남극 판운동 복원 모델의 시기별 회전축의 위치와 신뢰구간(타원)을 보여준다. 또한 이전에 정의되었던 판운동 복원 모델(Cande and Stock, 2004a)과도 함께 비교하고 있다. 회전축이 NE-SW 방향으로 길게 퍼져 있지만 신뢰구간의 타원이 서로 겹치게 분포하기 때문에, 주어진 95 % 신뢰 수준에서 회전축의 위치를 유의미하게 구별 할 수 없음을 보여준다. 또한 이러한 결과는 맥쿼리 지판이 생성된 이후 현재까지 판운동의 방향이 상대적으로 일정했음을 지시한다. 이 연구에서 2Ay (2.58 Ma) 및 3Ay (6.04 Ma) 시기에 정의된 맥쿼리-남극 지판 상대운동 회전축의 신뢰구간은 Cande and Stock (2004a)의 신뢰 영역과 겹치게 분포하고 있으며, 지판들의 현재 움직임을 계산하는 MORVEL (DeMets et al., 2010) 모델의 회전축 또한 이 연구에서 정의된 회전축의 불확실성 타원 내에 위치하고 있다(그림 4b의 문자 'M'참조).

맥쿼리 지판 운동과 함께, 이 연구에서는 SEIR 중앙 구간에서 측정된 해양 지자기 자료를 활용하여 호주-남극 지판의 판운동 복원 모델을 계산하였다. 미국 국립 환경 정보 센터 (National Centers for Environmental Information)에 저장되어 있는 지구물리 자료 중 88E 동쪽에 위치한 Geelvinck FZ와 140E에 위치한 George V FZ(그림 5a) 사이에 존재하는 자료를 추출하여 사용하였다.

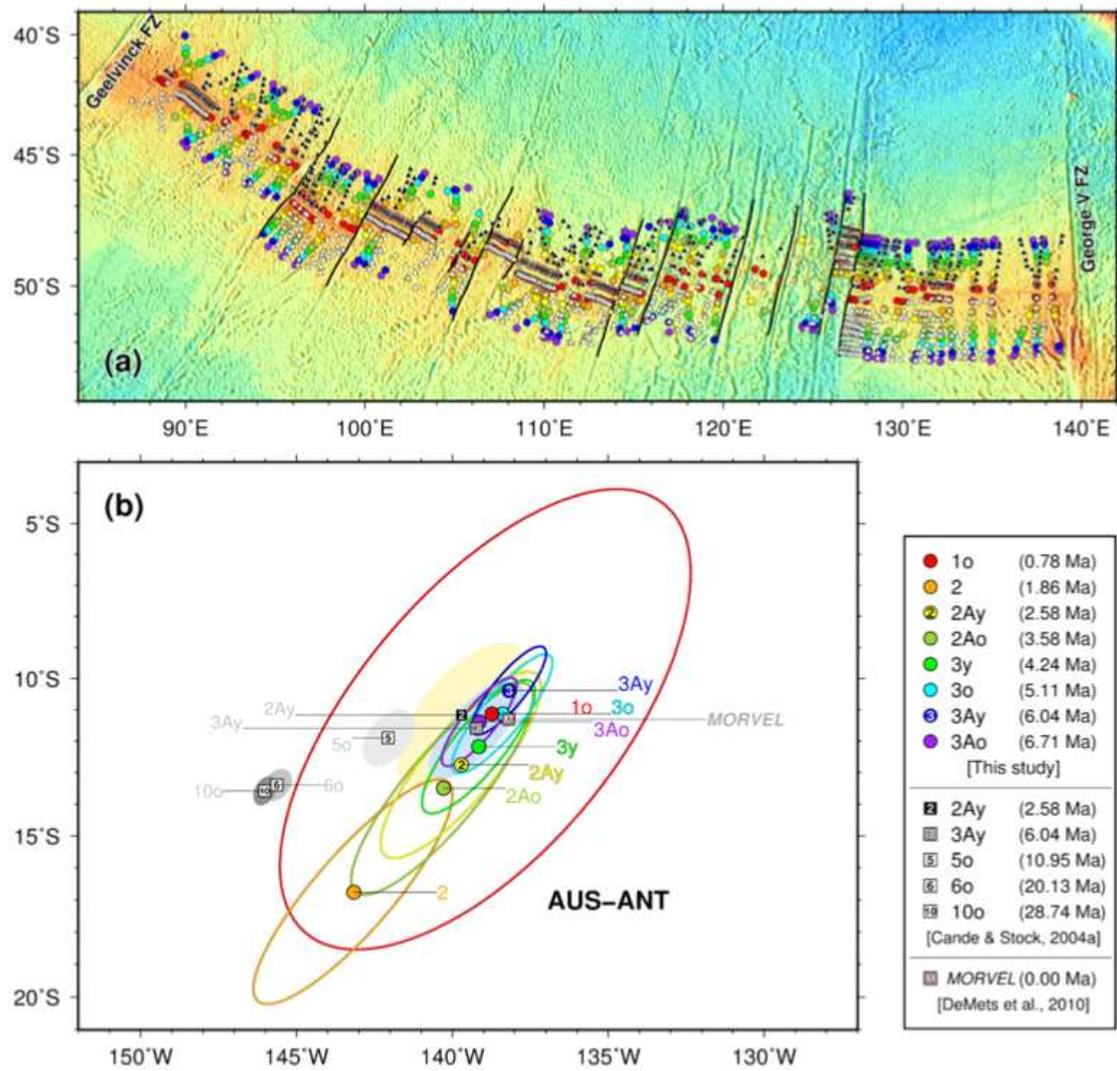


그림 5 호주-남극 지판의 상대 운동을 정의하는 지자기 역전 위치(a)와 사용된 역전 위치를 가장 잘 설명하는 회전축의 시기별 위치(b). 해당 그림은 Choi et al., (2017) 논문에서 취하였다.

해당 지역의 경우에는 Capricorn-Australian 지판 (Cande and Stock, 2004a; Gordon et al., 2008; Royer and Gordon, 1997) 및 Australian-Macquarie 지판 (Cande and Stock, 2004a; DeMetset al., 2010; Hayes et al., 2009)의 확산형 판경계에 영향을 받지 않기 때문에, 이 구간의 지자기 역전 띠를 사용하여 계산된 판운동 복원 변수는 호주-남극 지판의 상대 판운동만을 반영한다고 가정할 수 있다. 그림 5는 호주-남극 판운동 복원 과정에서 해당 구간에서 정의된 자기 역전 띠의 회전 투영 오차를 가장 최소화하는 회전축의 위치를 시기 별로 보여준다.

최종적으로 이 연구에서 정의된 판운동 복원 변수를 사용하여 맥쿼리 지판에 인접한 지판들에 대한 판운동 변수를 재계산하였다. 재계산된 지판들은 Australian-Macquarie, Macquarie-Pacific 및 Australian-Pacific 지판들이다. 맥쿼리 지판의 경우 Hjort Trench에서 태평양 지판과 상호 작용하기 때문에 Macquarie-Antarctic-Pacific 지판 연결 고리를 사용하여 Croon et al. (2008)이 제시한 태평양-남극 지판 판운동 복원 모델과 결합할 수 있었다. 맥쿼리-태평양 지판 상대 운동은 새롭게 정의된 맥쿼리-남극 지판 판운동 복원 모델을 활용하여 재계산되었다. 그림 6은 이 연구에서 재계산된 시기별 회전축의 위치와 불확실성 타원을 보여준다. 일반적으로 Cande and Stock (2004a)에 비해 이 연구에서 정의된 2Ay 및 3Ay 시기에의 회전축 신뢰 영역이 훨씬 더 작고 좁다.

모든 개정된 판운동 복원 모델 중에서 가장 눈에 띄는 변화를 보이는 것은 호주-맥쿼리 판운동에 대한 회전축이다(그림 6a). 이전 연구에서는 2Ay (2.58 Ma)와 3Ay (6.04 Ma) 시기에 호주-맥쿼리 판운동 회전축의 위치가 서로 겹치지 않았다 (Cande and Stock, 2004a). 그러나 이 연구에서 계산된 회전축은 해당 시기에 서로 밀접하게 위치하고 있다. 또한 이전 연구의 판운동 복원 추정치와 비교할 때 해당 신뢰 영역이 상대적으로 더 잘 제한되어 있음을 알 수 있다.

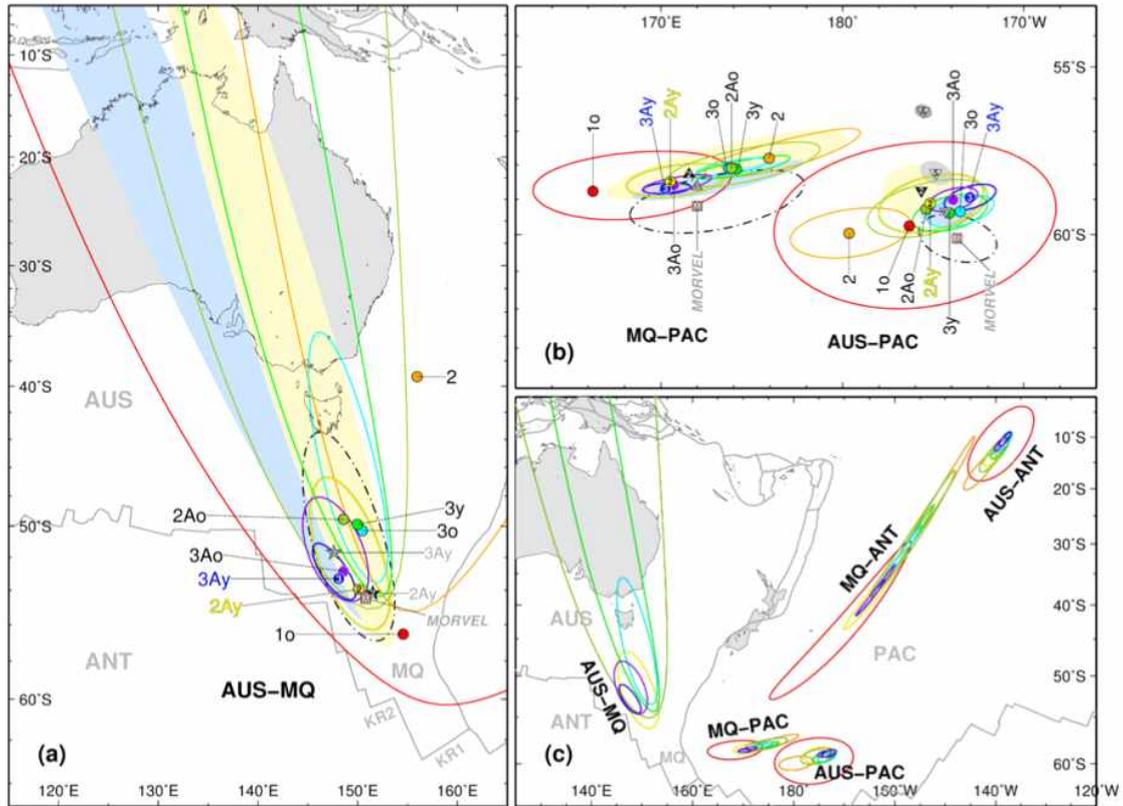


그림 6 호주-맥쿼리 지판(a), 맥쿼리-태평양, 호주-태평양 지판(b), 그리고 호주-맥쿼리, 맥쿼리-태평양, 호주-태평양, 맥쿼리-남극, 호주-남극 지판(c)들의 판운동 복원 회전축의 시기별 위치. 해당 그림은 Choi et al., (2017) 논문에서 취하였다.

맥쿼리 지판의 동쪽 경계는 Hjort Trech를 따라 잘 정의되어 진다(그림 7a). 맥쿼리 지판의 서쪽 경계를 정의하기 위하여 맥쿼리-남극 판운동 복원 모델을 사용하여 여러 FZ에 대한 가상의 판운동 변화 선구조를 계산하여 보았다. 호주-남극 지판의 판운동 복원 모델로 계산된 판운동 변화 선구조는 기존 연구들(Cande and Stock, 2004a; Hayes et al., 2009)에서 언급했듯이 Balleny 및 Tasman FZ (그림 7a의 녹색 실선)과 일치하지 않는다. 이를 통하여 지판의 서쪽 경계는 Tasman FZ 서쪽에 위치하고 있음을 추정할 수 있다. 마찬가지로 맥쿼리-남극 지판의 판운동 복원 모델을 사용하여 계산된 판운동 변화 선구조는 St. Vincent 및 George V FZ와 일치하지 않는다. 이는 맥쿼리 지판의 서쪽 경계가 St. Vincent FZ의 동쪽에 있음을 지시한다.

맥쿼리 지판의 남쪽 경계는 KR1 및 KR2 중앙해령 확장축과 일치하는 반면에 북쪽 경계는 확산형 판경계(diffuse plate boundary)로 판 내부 지진이 널리 퍼져 발생하는 50S와 55S 사이의 위치하는 것으로 보인다(Cande and Stock, 2004a). 1901년 이후의 역사 지진 자료(미국 지질 조사국)와 1976년 이후의 단층면해(전지구적 CMT해; Dziewonski et al., 1981) 자료를 사용하여 이 연구에서는 호주와 맥쿼리 지판 사이의 확산형 판경계 영역을 50S와 58S 사이 구간으로 정의하였다(그림 7a).

이 연구에서 제시하는 맥쿼리 지판의 판운동은 호주 지판에 대하여 시계 방향으로 회전하였음을 보여준다. 그러나 호주-맥쿼리 운동의 회전축은 두 지판 사이의 확산 경계 구역 내에 존재한다. 그렇기 때문에 회전축 서쪽의 암석권은 서로 수렴(그림 7a의 검은색 화살표)하는 반면 회전축 동쪽의 암석권은 서로 발산(그림 7a의 흰색 화살표)하게 된다. 이러한 변형 양상은 확산 판경계에서 흔히 관찰된다(Gordon et al., 2008; Royer and Gordon, 1997). 수렴 지역에서 Cande and Stock (2004a)은 Eltanin cruise 53에서 측정된 싱글 채널 탄성과 탐사자료부터 해저퇴적물이 수렴 작용에 의해 압축 변형을 받고 있음을 보여주었다(그림 6a의 검은색 박스 위치). 판운동에 의하여 발산하는 지역에 대해서는, Valenzuela and Wysession (1993)은 맥쿼리 산맥 부근의 위치한 단층면해가 맥쿼리 산맥 서쪽의 중력 고지대와 일치함을 발견하고, 이 부근이 발산에 의하여 지각이 확장되고 있는 구간일 수 있음을 제시하였다. 이러한 기존 연구들의 내용은 모두 이 연구에서 계산된 판운동 복원 모델과 일치한다.

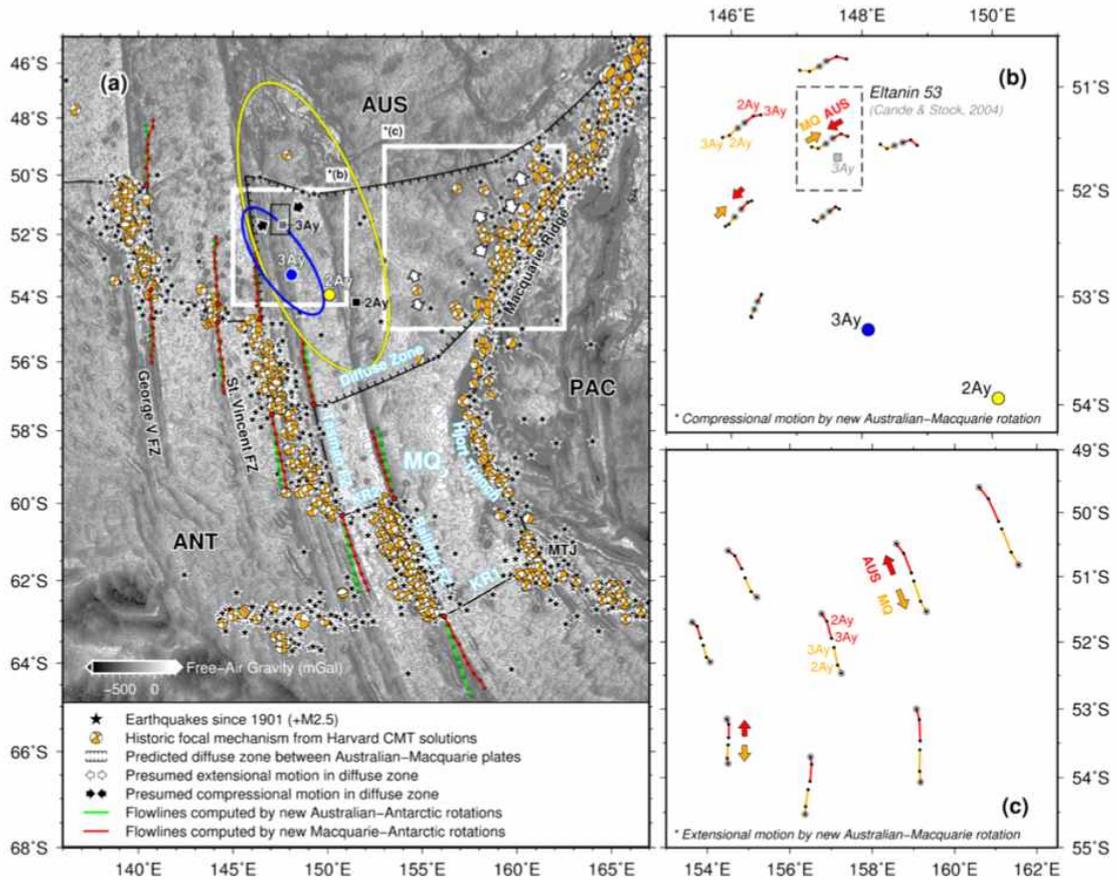


그림 7 맥쿼리 지판의 주요 경계면(a)과 2Ay와 3Ay 시기의 지판 사이의 압축(b)과 확장(c)이 생기는 구간을 판운동 복원 모델을 통하여 도시 하였음. 해당 그림은 Choi et al., (2017) 논문에서 취하였다.

호주 판과 맥쿼리 판 사이의 새로운 판운동 복원 모델을 사용하여 3Ay 및 2Ay 시기에서 현재까지의 확산 영역에서의 상대 운동을 복원하였다(그림 7b-c). 호주 지판과 맥쿼리 지판 사이의 계산된 움직임은 확산 구역에서 회전축 서쪽 영역이 압축 환경에 있음을 보여준다(그림 7b). 반면 확산 영역의 동쪽 영역은 확장 환경에 있음을 지시하고 있다(그림 7c). 특히 확산 구역의 북동부 지역은 뉴질랜드 남서부에서 뺏어나가는 파열과 관련이 있을 수 있음이 다른 연구들에서 제시된 바 있다 (Hayes et al., 2009; Malservisi et al., 2003).

그림 8a는 이 연구에서 계산된 맥쿼리-남극 판운동 복원 모델을 활용하여 KR1 확장축을 기준으로 ~10 Myr 기간의 지자기 역전띠를 회전 투영한 결과를 보여준다. 계산된 지자기 역전 띠는 검은선으로 도시하였고, 관찰된 지자기 역전띠는 파란선으로 도시하였다. 보다 연대가 오래된 지자기 역전띠(4A, 5y 및 5o)의 경우, 3Ao 시기의 판운동 복원 변수를 사용하여 추정하였다(그림 8a의 빨간색 선 참조). 계산 및 관찰된 지자기 역전띠 사이의 비교를 통해 KR1 확장축 구간에서 4A (8.86 Ma)와 3Ay (6.04 Ma) 시기 사이에 확장축 방향의 급격한 변화가 일어났음을 알 수 있다. ~6 Ma 시기까지는 관찰된 지자기 역전띠는 회전 투영된 지자기 역전띠와 비슷한 위치에 존재하지만, 4A, 5y 및 5o 시기에 대해서 회전 투영된 지자기 역전띠는 관찰된 위치로부터 큰 격차를 보이며 추정되었다. 이것은 맥쿼리-남극 지판 판운동 복원 모델이 오래된 시기의 지자기 역전띠를 예측하기 적합하지 않다는 것을 의미한다. 더 나아가서는 맥쿼리 지판이 ~6 Ma 시기에 독립적인 지판으로 형성되었음을 증명하는 것이다. ~6 Ma 이전에는 북쪽 방향으로 해저 확장이 일어났지만, 연령이 적은 해양 지각이 Hjort Trench 근처에서 섭입되지 못함으로 인해 확장이 방해받기 시작한 것으로 추정된다(Cande and Stock, 2004a; Hayes et al., 2009). 이러한 장애를 해소하기 위하여 KR1 확장축에서 해저 확장의 방향이 현재의 방향으로 바뀌게 되는데, 그 기작이 확장축 도약(ridge jump)에 의해 발생했을 가능성이 있다. 이는 축선 A에서 관찰되었던 지자기 자료와도 일치하며 동시에 고해상도 다중빔 수심자료와 및 중력 자료(그림 8a의 삽입 참조)에서 확인할 수 있다(Miller and Hey, 1986).

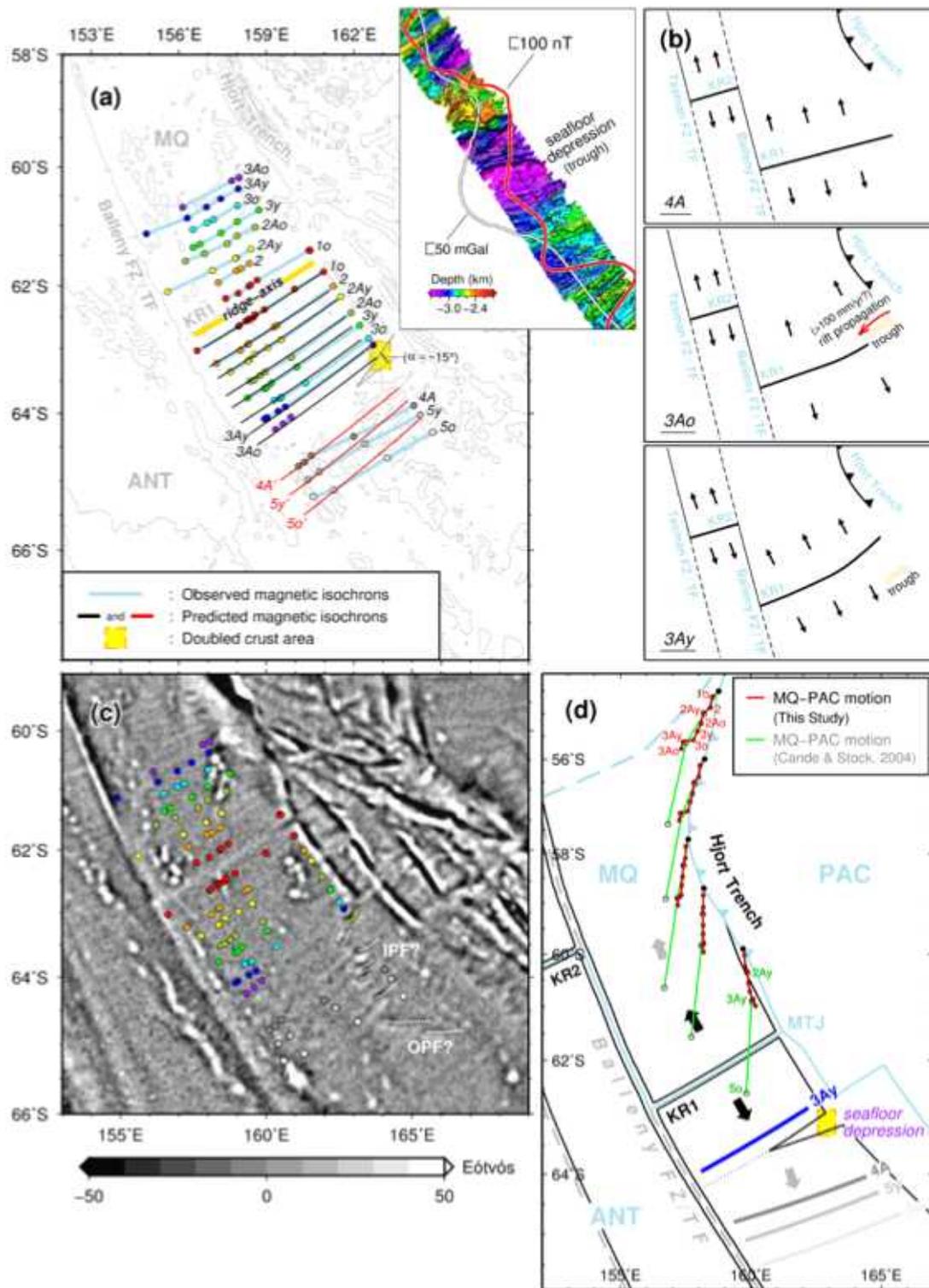


그림 8 KR1 확장축 지역에서 측정된 지자기 역전띠와 계산된 지자기 역전 띠의 비교(a), 비대칭적 열곡 이동(rift propagation) 가설에 대한 모식도(b), 중력 자료 상에서 나타나는 가단층의 경향성 해석도(c), 그리고 맥쿼리-태평양 판운동 모델에 의한 판운동 변화 선구조 비교(d).

대안 적으로, 해상 지자기 자료에서 관찰된 확장축 도약은 맥쿼리 삼중점의 일시적인 이동과 관련 될 수 있다. 그림 8c를 보면 수직 중력 구배(Vertical Gravity Gradient) (버전 23; Sandwell et al., 2014) 자료에서 대략 V 자형 구조선 (파선)을 살펴볼 수 있다. 여기서 남쪽의 직선형 구조선들은 외부 pseudofault (OPF)로 고려할 수 있을 것이다. 그렇다면 OPF는 지자기 5 시기 이전에는 맥쿼리 삼중점 근처에서 확장축이 WSW 방향으로 이동했음을 지시할 수 있다. 그리고 지자기 5 시기부터 이전에 만들어진 확장축을 소멸시켜 ENE 방향으로 이동하였고, 이 흔적은 내부 pseudofault (IPF)로 남겨졌을 수 있다. 이러한 IPF의 흔적은 지자기 역전 3A 시기에 사라지게 된다(그림 8c의 노란색 점선). 이러한 측면은 맥쿼리 삼중점의 이동이 맥쿼리 지판의 형성에 기여했을 가능성이 있음을 지시한다고 볼 수 있다(Hey, 2004; Tebbens et al., 1997; Tebbens and Cande, 1997).

그러나 현재 활용 가능한 자료는 이러한 모델들을 검증하거나 맥쿼리 삼중점의 이동과 맥쿼리 지판 형성 사이의 상호 작용을 결정하기에 충분하지 않다. 게다가 해저확장 방향에 의한 변화가 대부분 Balleny 및 Tasman FZ에서 그 변화량을 수용한 것으로 보인다. 따라서 향후 연구 활동에서 보다 많은 양의 지구물리자료 취득 및 해석작업이 필요하다고 판단된다.

극지연구소

제 2 절 KR1 확장축 주변 해저화산 생성 시기 연구

이 연구에서는 아라온호에 부착된 Kongsberg 사의 다중빔 에코 사운더 EM122를 사용한 측정된 고분해능 수심 측정 자료를 활용하였다. 동시에 해양 자력계 Marine Magnetism Corp 사의 SeaSpy 기기를 사용하여 동일한 구간에서 지구자기장의 변화를 측정하였다. 자기장 자료는 지구 자기장 모델(IGRF) (Thebault et al., 2015)을 사용하여 자기 이상치로 변환하였고, 해당 구간의 지자기 역전은 자기 정모델 모델링 프로그램인 MODMAG을 사용하여 계산하였다(Mendel et al., 2005). 지자기 역전 연대표는 Choi et al. (2017)에서 사용한 방법대로 동일하게 적용하였다.

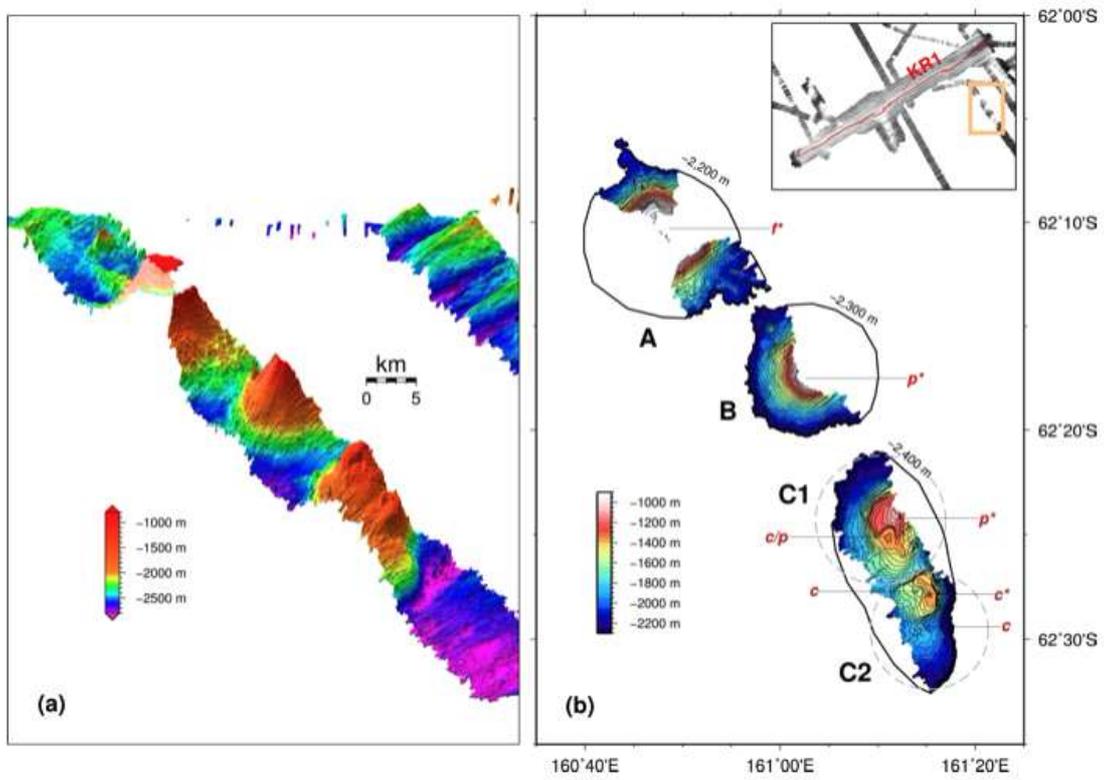


그림 9 측선 1(그림 2 참조)의 수심자료를 바탕으로 구성된 3차원 해저 수심도(a)와 수심자료를 바탕으로 결정된 해저 화산체, A, B, 그리고 C. 해당 그림은 Choi et al. (in prep.) 에서 취하였다.

중앙해령 KR1 주변에 위치한 해저화산에 대한 첫 번째 수심 및 해양 지자기 측정은 2013년에 수행되었으며, 특히 해저 확장축에서 남동쪽 방향으로 해저화산을 이루고 있다(측선 2 및 3, 그림 2). 상대적으로 규모가 큰 해저화산으로 구성된 2개의 해저화산 산맥에 대하여 2017년에 추가적 지구물리 조사가 수행되었다. 이 해저화산들은 KR1 확장축의 동쪽 부분에 위치하고 있으며 해저 확장축에서 남동쪽으로 약 40~100 km의 거리에 정렬되어 있다 (그림 2의 측선 1). KR1 확장축 서쪽 부분에 위치한 또 다른 해산화산 산맥은 확장축에서 북서쪽으로 뻗어 있으며 상대적으로 독립적인 그 규모가 큰 해저화산들로 구성되어 있다(그림 2의 측선 4, 5, 6).

수심 자료에서 확인된 해저 화산의 기저 면적, 높이 및 부피를 계산하기 위해 고해상도 수심 측정 데이터를 수동으로 확인하였다. 또한, 주어진 해저화산에서 정상부의 개수와 형태적 유형을 식별하였다. 만약 해저화산 정상부가 칼데라가 있다면 'c'로, 뾰족한 정상부라면 'p', 평평한 정상부라면 'f'로 각각 분류하였다. 선상 수심 자료에서 측정되지 못한 해저화산 지역에 대하여 위성 중력 자료에서 예측된 수심 자료(Smith and Sandwell, 1997)를 보완적으로 사용하였다.

해저화산에서 측정된 해양 지자기장을 활용하여 해저 화산의 생성 시기를 추정하기 위해 해저화산체 상부 및 주변부에서 측정된 자기 이상치를 살펴보았다. 해양 지각의 연령은 확장축에 대하여 대칭적으로 증가하며, 지구 자기장 역전에 의하여 고유의 지자기 역전띠가 해양 지각에서 관찰된다. 그러므로 해양 지각에서 관찰되는 해양 지자기 역전 띠를 정모델링을 통하여 계산하면 해양 지각의 생성 시기가 추정된다.

열점 위를 움직이는 지판 상부에 화산이 생성되는 과정(Jackson et al., 1972)가 유사하게, 해저 확장축에서도 화산이 생성된다. 해양 지각이 확장축에서 생성된 후 해저 확장에 의하여 이동하게 되고, 이러한 이동 과정 속에서 해저 화산이 기존 해양 지각 위에 생성되기 때문이다. 즉, 해저 화산의 생성 시기는 해양 지각의 생성시기보다 더 오래될 수 없으며, 거의 동시에 생성되었거나 혹은 해양 지각보다 더 젊은 생성 연대를 가지게 될 것이다.

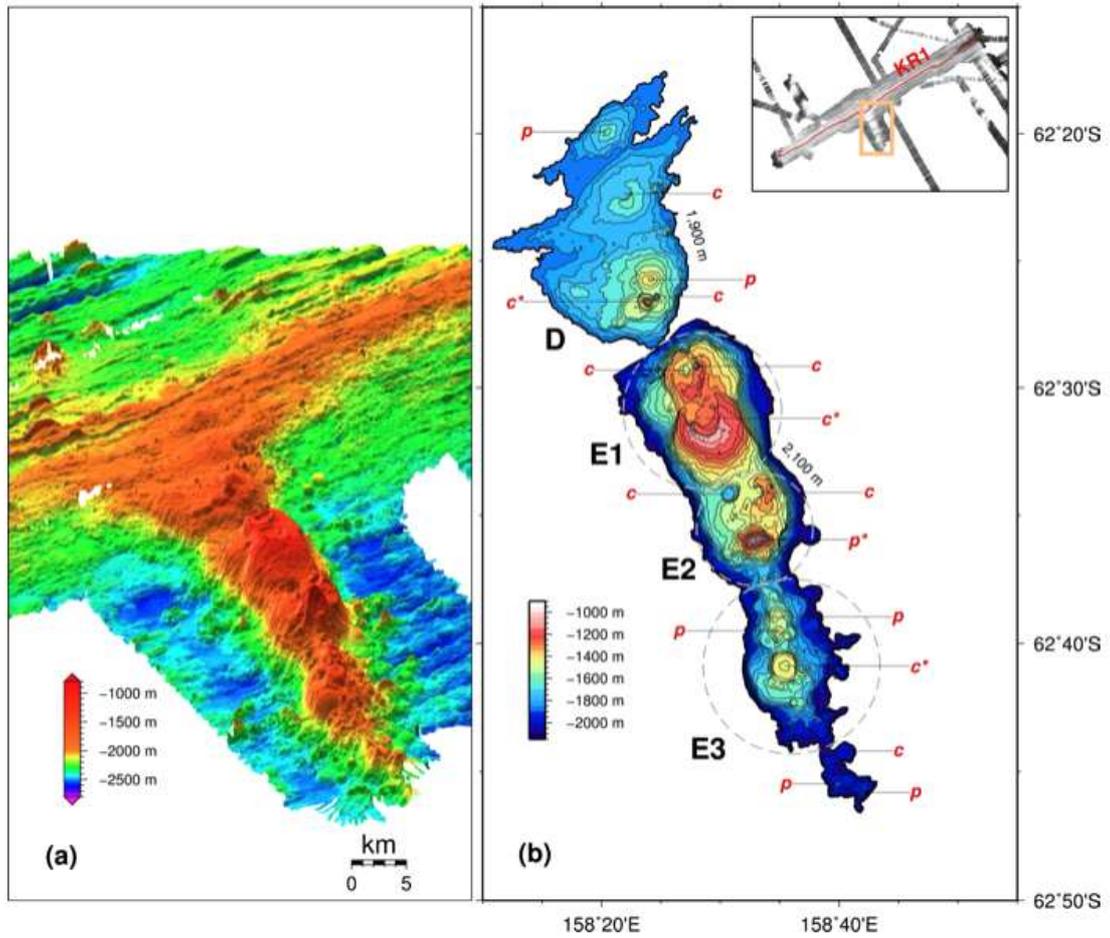


그림 10 측선 2와 3(그림 2 참조)의 수심자료를 바탕으로 구성된 3차원 해저 수심도(a)와 수심자료를 바탕으로 결정된 해저 화산체, D와 E. 해당 그림은 Choi et al. (in prep.) 에서 취하였다.

그러므로 해저화산 지자기 극성과 해저 화산 주변에 위치한 해양 지각의 지자기 극성을 서로 비교하면 해저 화산의 생성 시기를 추정할 수 있게 된다. 만약 해저 화산이 해양 지각의 생성과 거의 동시에 이루어졌다면 해저 화산의 지자기 극성과 주변부 해양 지각의 지자기 극성과 서로 유사할 것이다. 그러나, 해저 화산이 해양 지각의 생성된 이후 오랜 기간이 지난 후 생성되었다면, 해저 화산의 지자기 극성과 해양 지각의 지자기 극성은 서로 상이하게 될 것이다. 이러한 오차를 줄이는 과정을 통하여 해저 화산을 구성하는 데 가장 많은 해저 화산 분출 활동이 있었던 시기를 추정할 수 있게 된다(Maia et al., 2005).

우선 KR1 확장축에 위치한 화산들의 지형적 특징을 살펴보고자 한다. 가장 동쪽에 위치하고 남쪽으로 뻗어있는 해저 화산 산맥은 크게 3개의 화산체로 구성되어 있다(그림 9). 측선 1을 따라 발견된 이 해저 화산 산맥은 경사면이 상당히 가파르고, 기저 면적에 비하여 높이가 높다. 화산 구조체 A, B 및 C (= C1 + C2)는 평균적으로 기저 면적이 $\sim 150 \text{ km}^2$ 이하이고, 부피는 약 $40\sim 80 \text{ km}^3$ 이지만 그 높이는 1,300m가 넘는다. 해저화산 A는 한 개의 평평한 정상부를 가지고 있는 것으로 보이며, KR1 확장축 주변에서 발견된 해저 화산 중 가장 높은 해저산 중 하나이다.

KR1 중앙부에 위치한 해저 화산 산맥은 해저 확장축에 직접 연결되어 있으며 확장축에서 남쪽으로 이어진다. 이 해저 화산의 경우 크게 2 개의 화산 구조로 나뉘게 된다: D와 E(E는 E1~E3으로 구성). 해저 화산 산맥의 전체 높이와 크기는 다른 해저 화산 산맥에 비해 상대적으로 작다 (그림 10). 해저화산 D와 E에서 특징적으로 많은 분화구나 칼데라가 발견되었으며, 전체 지역에 걸쳐 봉우리로 연결되어 있다. 해저 확장축과 맞닿은 부분을 고려하였을 때 이 해저 산맥을 따라서 해저 화산 활동이 지속되고 있는 것으로 추정해 볼 수 있을 것이다.

KR1 확장축 서쪽 부분에는 큰 규모의 화산 분출 작용이 있었음을 지시하듯이 기저 면적과 부피가 큰 해저 화산들이 분포하고 있다(그림 11). 중앙해령 사면에 주로 화산체들이 불규칙적으로 분포하고 있으며, 이 연구에서는 총 5 개의 화산체 F, G (=G1+G2), H (=H1+H2), I 및 J로 구분하였다. 이 중 G, H 및 I는 KR1 확장축에서 발견된 해저 화산들보다 기저 면적과 부피가 압도적으로 크다.

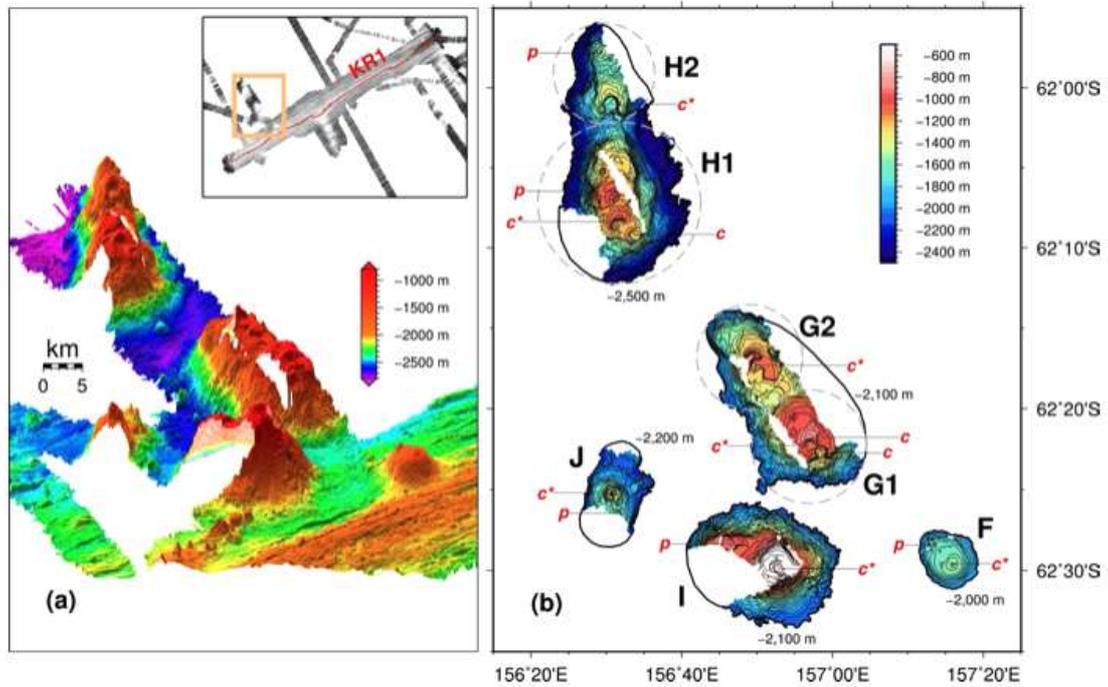


그림 11 측선 4, 5, 6(그림 2 참조)의 수심자료를 바탕으로 구성된 3차원 해저 수심도(a)와 수심자료를 바탕으로 결정된 해저 화산체, F, G, H, I, 그리고 J. 해당 그림은 Choi et al. (in prep.) 에서 취하였다.

해저 화산 H (특히 H1)는 전체 KR1 시스템에서 가장 큰 화산이며, 약 300 km² (H1의 경우 ~ 200 km²)의 기저 면적과 ~180 km³ (H1의 경우 ~ 130 km³)의 부피를 가지고 있다. 또한 다수의 소규모 해저 화산들(K, L, M, N 및 O)이 축선 4~6 근처에 분포되어 있다(그림 12). 이들 해저 화산들의 높이는 400 m 미만이고 부피는 5 km³ 미만으로 추정되었다. KR1 확장축의 서쪽에 이러한 화산 구조들이 많은 것은 이 중앙해령 하부 구간에 상당한 양의 마그마가 과거 공급되었음을 지시한다고 볼 수 있다.

해양 지자기 자료를 살펴본 결과 절반 정도의 해저화산에서 해저 화산 정상부의 지자기 역전과 주변부 해양 지각의 지자기 역전과 유사함이 나타났으며 다른 해저 화산에서는 주변부 해양 지각과 지자기 역전 양상이 서로 상이하게 나타났다. 예를 들어, 그림 13a에서, 해저화산 C가 주변 해양 지각과 동시에 형성되었다면, 해저화산 C에서 관찰된 자기 이상은 지자기 역전 모델에 의해 계산된 자기 이상과 유사하게 될 것이다. 그러나 해저 화산 C에서 실제 관측된 지자기 이상은 반대 극성을 가지고 있으며, 주변 해양 지각을 기준으로 계산된 지자기 모델과 상당한 불일치가 존재함을 보여준다(그림 13a에서 빨간색과 회색선 사이의 불일치 참조). 관측치와 모델 사이의 불일치하는 지자기 극성이 있는 경우, 비교적 최근의 지자기 역전 현상을 해저화산 지역으로 이동하여 그러한 불일치가 제거 되는 지를 살펴보았다(그림 13a에서 빨간선과 파란선 사이의 비교). 해저 화산이 기존 해양 지각보다 훨씬 젊다는 가정에 근거하여 그림 13에서 파란선으로 수정된 모델을 취하게 된다면, 이러한 조정에 필요한 연대를 활용하면 해저 화산의 분출 및 지속 시기를 결정할 수 있게 된다.

이 연구에서는 지자기 정모델링을 사용하여 해저 화산 전체에 걸쳐 지자기 특성을 평가한 후 해양 지각의 지자기 극성과 뚜렷한 차이를 보이는 해저화산 C1, C2, E1, E3, G1, G2 및 H2에 대하여 추가 모델링을 수행하였다.

해저화산 C(= C1 + C2)의 경우 주변 해양 지각은 ~3 Ma에서 생성되는 것으로 추정되지만(그림 14), 해저화산 C의 해양 지자기는 이러한 해양 지각의 지자기 특성을 따르지 않는다. 그러나 해저 화산이 주변 해양 지각이 형성되고 지자기 역전이 발생한 후 600 kyrs의 시간이 경과 한 후 형성되었다고 가정하면 해저 화산에서 관측된 지자기 변화와 지자기 모델에 의한 지자기 변화가 서로 일치하게 된다. 이 모델에 따르면, 해저화산 C는 대략 2.12 ~ 2.69 Ma에 생성된 것으로 해석된다.

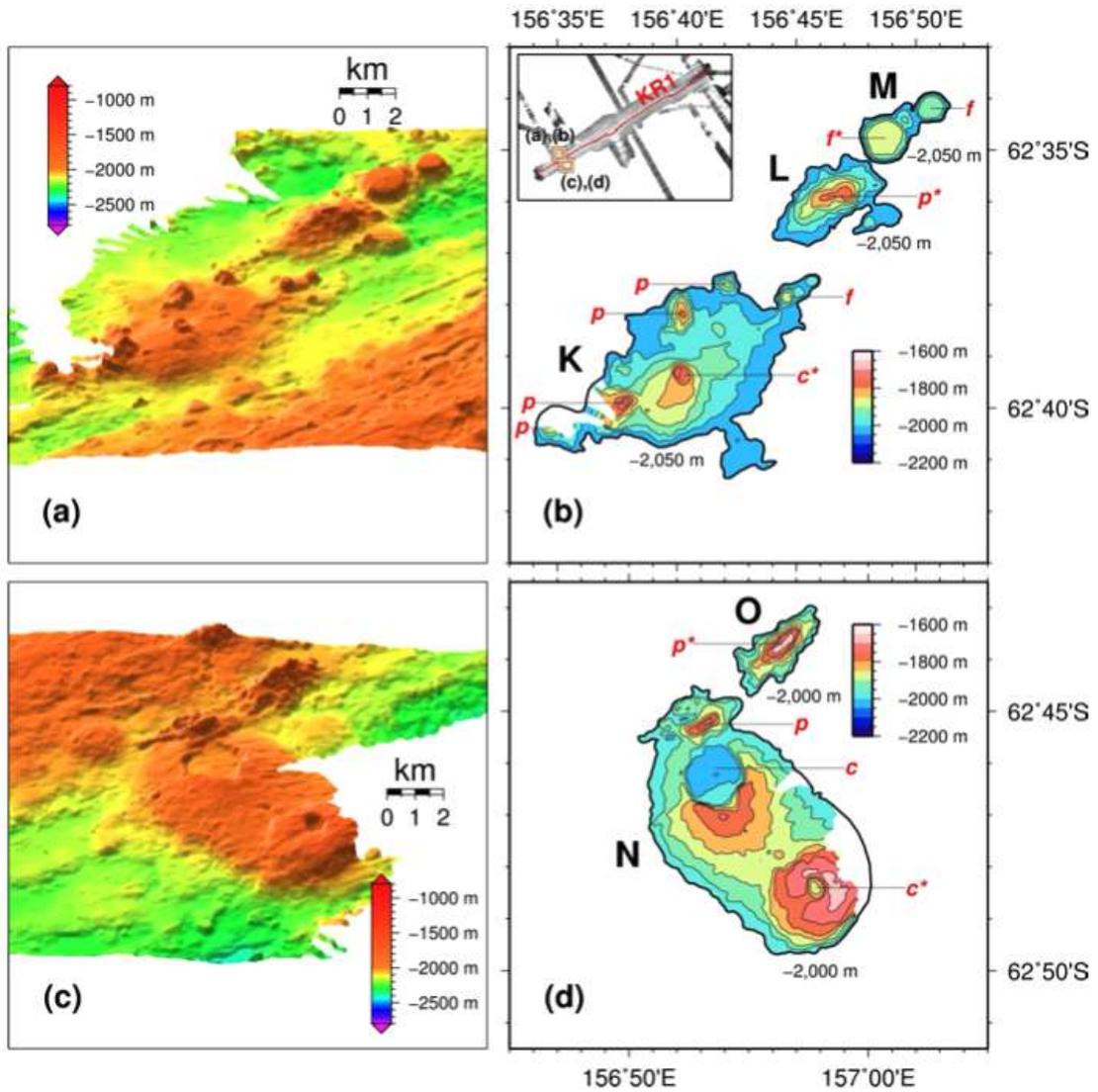
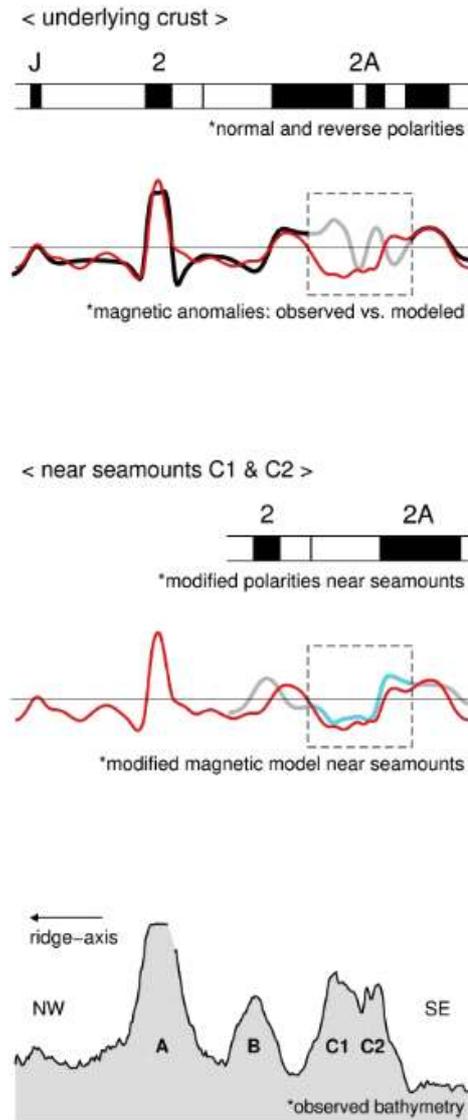


그림 12 측선 4, 5, 6(그림 2 참조)의 수심자료를 바탕으로 구성된 3차원 해저 수심도(a, c)와 수심자료를 바탕으로 결정된 해저 화산체, K, L, M, N, 그리고 O. 해당 그림은 Choi et al. (in prep.) 에서 취하였다.

(a) Schematic diagrams



(b) Comparisons: Obs. vs Mod.

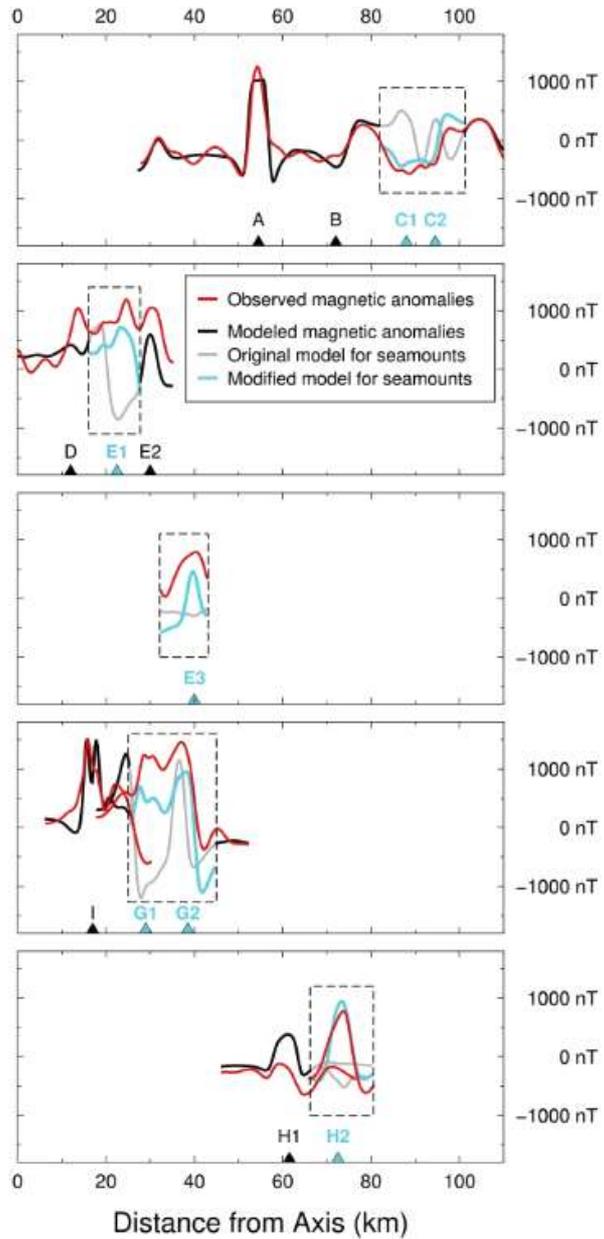


그림 13 해저화산과 해양 지각 사이의 해저 지자기 역전의 차이가 있을 때 보여지는 양상(a) 과 해저 화산들에서 관찰된 해양 지각 및 해저화산의 해양 지자기 불일치 현상(b)

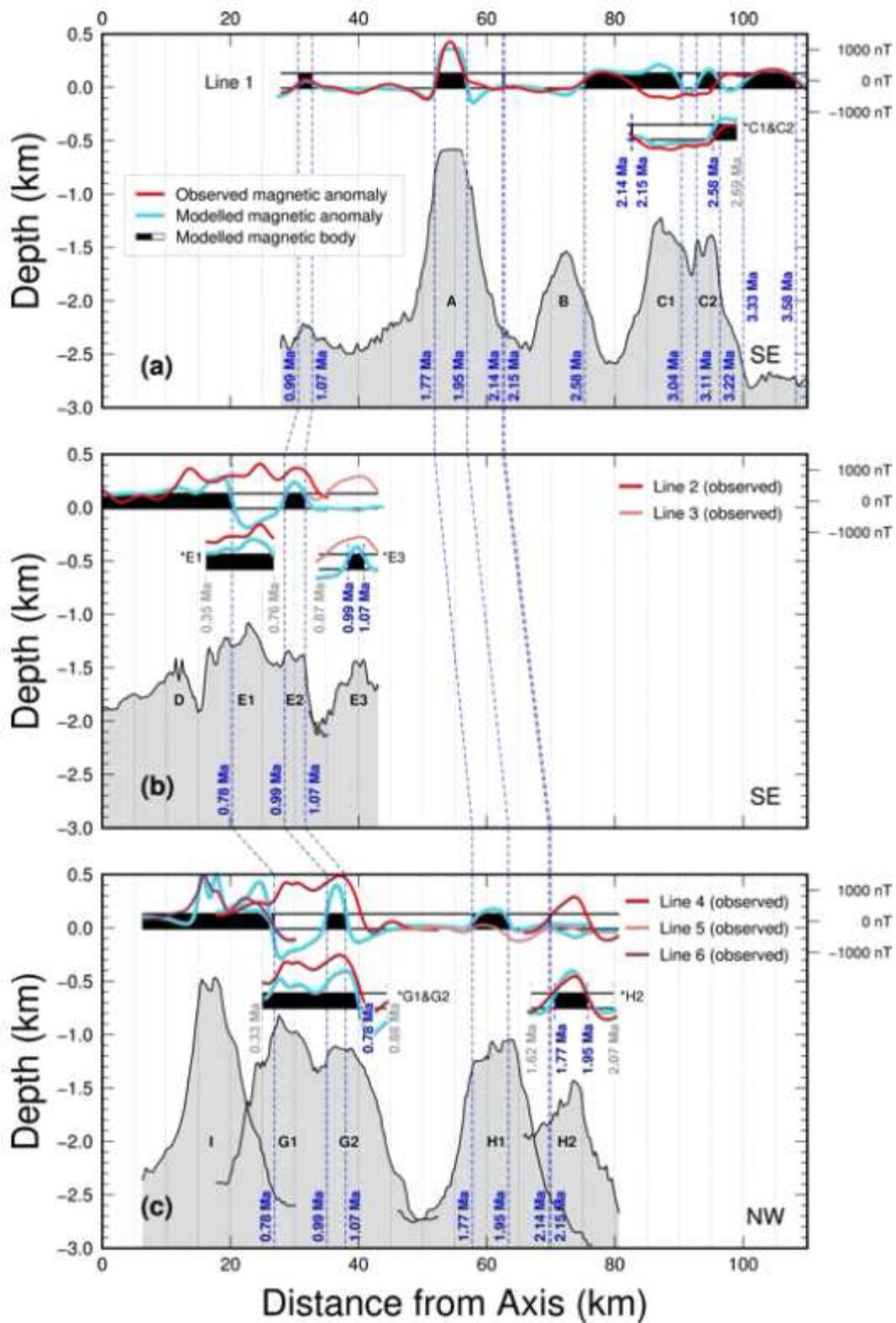


그림 14 각 해저화산에서 수행된 해저 화산 연대 측정 결과 도시

해저화산 E(E1 및 E3)의 경우 E1 주변 해양 지각은 0.57~0.95 Ma, E3 주변 해양 지각은 1.16~1.46 Ma로 형성된 것 계산되었다. 위에서 설명한 수정모델을 적용하게 되면 해저화산 E1은 0.35~0.76 Ma, 해저화산 E3는 0.87~1.14 Ma 시기에 형성된 것으로 판단된다. 이를 통하여 이 해저 화산들은 해양 지각이 생성된 이후 지자기 역전과 함께 200~300 kyr의 시간 간격이 두고 생성된 것이라고 추정할 수 있다. 해저 확장 속도를 고려하였을 때 해저화산 E1과 E3는 해저확장축에서 각각 ~7 km와 ~10 km 떨어진 곳에서 생성된 것으로 추정된다. 해저화산 E2의 경우에는 관측값과 모델 사이의 불일치가 존재하지만 해저화산 E1과 E3 사이의 존재하기 때문에 화산 분화 시기를 결정하는 데 더 큰 불확실성이 발생한다.

또한 화산화산 G(= G1 + G2)는 해양 지각이 생성된 이후 300~400 kyrs의 시간이 경과한 이후에 형성된 것으로 판단된다. 이 시기는 0.30~0.88 Ma로 계산되었다. 해저 화산 H2는 해양 지각과 비교하여 ~400 kyrs의 시간적 차이가 나는 것으로 계산되었으며 이를 바탕으로 생성 시기는 1.62~2.07 Ma인 것으로 보인다. 해저화산 G와 H2는 해저 확장축에서 각각 ~14 km 및 ~13 km 떨어진 지점에서 생성되기 시작한 것으로 해석된다.



제 3 장 연구개발목표 달성도 및 대외기여도

제 1 절 연구개발목표 달성도

연차	연구 목표	연구 내용	달성도(%)
1차년도 (2017)	지체구조연구	<ul style="list-style-type: none"> - 선상 수심 및 중력 자료 후처리 - 맨틀 중력 이상을 활용한 중앙해령 하부 구조 연구 - 2017 추계지질과학연합학술대회 중앙해령 특별세션 주최 및 연구내용 발표 - 2017 AGU 가을학회에서 남극 중앙해령 연구에 대한 special session 주최 및 연구 내용 발표 	100%
	판운동 복원연구	<ul style="list-style-type: none"> - 선상 자력 자료 후처리 - 역전파 분석을 위한 자기장 정모델링 연구 - 호주-남극판 그리고 맥쿼리-남극판의 과거 판운동을 복원하여 맥쿼리 판의 생성 및 발달 양상에 대한 연구를 2017 GSA Cordilleran Section meeting에서 구두 발표 수행 - 호주-남극판 그리고 맥쿼리-남극판의 과거 판운동에 대한 지구조적 의의를 Earth and Planetary Science Letters(Impact factor: 4.409 / 저널랭킹 상위 8%)에 게재 완료함 	100%
2차년도 (2018)	지체구조적 특성규명	<ul style="list-style-type: none"> - 호주-남극 중앙해령 하부의 맨틀 특성 정량적 규명 - 호주-남극 중앙해령 구간의 지체구조적 특성 정량적 규명 - KR2, KR3, KR4 구간의 과거 판운동 복원 및 주변 판들 사이의 상대운동 연구 	100%

3차년도 (2019)	해저화산 성인연구	<ul style="list-style-type: none"> - 호주-남극 그리고 맥쿼리-남극 과거 판운동 복원 파라미터와 전지구적 판운동 복원 파라미터 비교 - 호주-남극 중앙해령 지역의 해저화산체 분포 분석 - 호주-남극 그리고 맥쿼리-남극 과거 판운동 진화과정에 따른 해양지각의 응력분포와 해저화산체 분포와의 상관관계 분석 	100%
----------------	--------------	---	------

제 2 절 대외기여도

해양 지구과학 분야에서 최고의 저널에 다음의 연구 결과들을 게재하였다.



The kinematic evolution of the Macquarie Plate: A case study for the fragmentation of oceanic lithosphere



Hakkyum Choi^{a,b,*}, Seung-Sep Kim^{b,*}, Jérôme Dymant^c, Roi Granot^d, Sung-Hyun Park^a, Jong Kuk Hong^a

^a Korea Polar Research Institute, Incheon 21990, South Korea

^b Department of Astronomy, Space Science and Geology, Chungnam National University, Daejeon 34134, South Korea

^c Institut de Physique du Globe de Paris, CNRS UMR 7154, Sorbonne Paris Cité, Université Paris Diderot, Paris 75005, France

^d Department of Geological and Environmental Sciences, Ben-Gurion University of the Negev, Beer-Sheva 84105, Israel

ARTICLE INFO

Article history:

Received 27 April 2017

Received in revised form 23 August 2017

Accepted 25 August 2017

Available online 19 September 2017

Editor: P. Shearer

Keywords:

marine magnetism

tectonics

plate reconstruction

Macquarie Plate

ABSTRACT

The tectonic evolution of the Southeast Indian Ridge (SEIR), and in particular of its easternmost edge, has not been constrained by high-resolution shipboard data and therefore the kinematic details of its behavior are uncertain. Using new shipboard magnetic data obtained by R/VIB *Araon* and M/V *L'Astrolabe* along the easternmost SEIR and available archived magnetic data, we estimated the finite rotation parameters of the Macquarie–Antarctic and Australian–Antarctic motions for eight anomalies (1o, 2, 2Ay, 2Ao, 3y, 3o, 3Ay, and 3Ao). These new finite rotations indicate that the Macquarie Plate since its creation ~6.24 million years ago behaved as an independent and rigid plate, confirming previous estimates. The change in the Australian–Antarctic spreading direction from N–S to NW–SE appears to coincide with the formation of the Macquarie Plate at ~6.24 Ma. Analysis of the estimated plate motions indicates that the initiation and growth stages of the Macquarie Plate resemble the kinematic evolution of other microplates and continental breakup, whereby a rapid acceleration in angular velocity took place after its initial formation, followed by a slow decay, suggesting that a decrease in the resistive strength force might have played a significant role in the kinematic evolution of the microplate. The motions of the Macquarie Plate during its growth stages may have been further enhanced by the increased subducting rates along the Hjort Trench, while the Macquarie Plate has exhibited constant growth by seafloor spreading.

© 2017 Elsevier B.V. All rights reserved.

An isotopically distinct Zealandia–Antarctic mantle domain in the Southern Ocean

Sung-Hyun Park ^{1*}, Charles H. Langmuir², Kenneth W. W. Sims³, Janne Blichert-Toft⁴, Seung-Sep Kim⁵, Sean R. Scott³, Jian Lin^{6,7}, Hakkyum Choi ¹, Yun-Seok Yang¹ and Peter J. Michael⁸

The mantle sources of mid-ocean ridge basalts beneath the Indian and Pacific oceans have distinct isotopic compositions with a long-accepted boundary at the Australian–Antarctic Discordance along the Southeast Indian Ridge. This boundary has been widely used to place constraints on large-scale patterns of mantle flow and composition in the Earth's upper mantle. Sampling between the Indian and Pacific ridges, however, has been lacking, especially along the remote 2,000 km expanse of the Australian–Antarctic Ridge. Here we present Sr, Nd, Hf and Pb isotope data from this region that show the Australian–Antarctic Ridge has isotopic compositions distinct from both the Pacific and Indian mantle domains. These data define a separate Zealandia–Antarctic domain that appears to have formed in response to the deep mantle upwelling and ensuing volcanism that led to the break-up of Gondwana 90 million years ago, and currently persists at the margins of the Antarctic continent. The relatively shallow depths of the Australian–Antarctic Ridge may be the result of this deep mantle upwelling. Large offset transforms to the east may be the boundary with the Pacific domain.

제 4 장 연구개발결과의 활용계획

호주-남극 중앙해령 지역은 다른 중앙해령 지역에 비하여 지리적으로 접근성이 매우 낮고 해양 탐사를 수행하기에 적합한 해황을 확보할 수 있는 시기도 상대적으로 짧다. 이같은 이유로 현재까지도 많은 지역에 대한 정밀 지구물리 탐사가 수행되지 못했었다. 극지연구소 주도의 중앙해령 사업을 통하여 해당 지역에서 획득된 다학제간 지구과학 자료는 호주-남극 중앙해령에 대한 지역적인 지체구조적 특성을 이해하는 데에도 중요하게 사용될 뿐 아니라 전지구적 규모의 중앙해령 시스템을 이해하는 데에도 매우 중요하다. 향후에도 호주-남극 중앙해령 구간에서의 추가 탐사를 통하여 보다 양질의 자료를 축적하고 이를 바탕으로 우수한 연구 결과를 생성할 필요가 있다고 판단된다.

이 위탁과제에서 수행된 연구결과들은 추후에 준비 중인 호주-남극 중앙해령 연구사업에 기반 자료로서 활용도가 높다고 볼 수 있다. 특히 남극-질란디아 맨틀 도메인이 결정되면서, 맨틀 도메인의 지리적 위치를 결정하고 맨틀 도메인의 생성에 따라 발생한 여러 지질구조의 변형 등을 살펴볼 필요가 있다. 특히 남극-질란디아 맨틀은 주변에 위치한 인도양 타입 맨틀과 태평양 타입 맨틀보다 상대적으로 온도가 더 뜨거운 것으로 판단된다. 이러한 특징은 다수의 화산 작용을 일으킬 수 있는 요인이 될 수 있으며, 동시에 판운동 변화에 따라 더 민감하게 반응할 수 있게 된다. 이 연구에서 수행된 지구 자기장 및 중력 자료를 활용한 지체 구조 연구 기법은 추후 연구될 지역에도 동일하게 적용이 가능하다. 동시에 새로운 자료가 취득되어 누적되면 상부 맨틀 구조에 대한 보다 심도 있는 분석이 가능할 것으로 판단된다.

제 5 장 참고문헌

- Alexander, R.T., MacDonald, K.C., 1996. Small off-axis volcanoes on the East Pacific Rise. *Earth and Planetary Science Letters* 139, 387-394.
- Austermann, J., Ben-Avraham, Z., Bird, P., Heidbach, O., Schubert, G., Stock, J.M., 2011. Quantifying the forces needed for the rapid change of Pacific plate motion at 6 Ma. *Earth Plan. Sc. Lett.* 307, 289 - 297.
- Bird, R.T., Naar, D.F., 1994. Intratransform origins of mid-ocean ridge microplate. *Geology* 22, 987 - 990.
- Bird, R.T., Naar, D.F., Larson, R.L., Searle, R.C., Scotese, C.R., 1998. Plate tectonic reconstructions of the Juan Fernandez microplate: Transformation from internal shear to rigid rotation. *J. Geophys Res.* 103, 7049 - 7067.
- Bird, R.T., Tebbens, S.F., Kleinrock, M.C., Naar, D.F., 1999. Episodic triple-junction migration by rift propagation and microplates. *Geology* 27, 911 - 914.
- Brune, S., Williams, S.E., Butterworth, N.P., Müller, R.D., 2016. Abrupt plate accelerations shape rifted continental margins. *Nature* 536, 201 - 204.
- Cande, S.C., Kent, D.V., 1992. A New Geomagnetic polarity time scale for the Late Cretaceous and Cenozoic. *J. Geophys Res.* 97, 13917 - 13951.
- Cande, S.C., Kent, D.V., 1995. Revised calibration of the geomagnetic polarity timescale for the Late Cretaceous and Cenozoic. *Journal of Geophysical Research* 100, 6093-6095.
- Cande, S.C., Raymond, C.A., Stock, J., Haxby, W.F., 1995. Geophysics of the Pitman Fracture Zone and Pacific - Antarctic plate motions during the Cenozoic. *Science* 270, 947.
- Cande, S.C., Stock, J.M., 2004a. Pacific-Antarctic-Australia motion and the formation of the Macquarie Plate. *Geophys. J. Int.* 157, 399 - 414.

- Cande, S.C., Stock, J.M., 2004b. Cenozoic reconstruction of the Australia - New Zealand - South Pacific sector of Antarctica, in: Exon, N.F., Kennett, J.K., Malone, M.J. (Eds.), *The Cenozoic Southern Ocean: Tectonics, Sedimentation and Climate Change between Australia and Antarctica*. AGU, Washington, DC, pp. 5 - 15.
- Chang, T., 1988. Estimating the relative rotation of two tectonic plates from boundary crossings. *J. Am. Stat. Assoc.* 83, 1178 - 1183.
- Choi, H., Kim, S.-S., Dymen, 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.
- Clague D.A., Reynolds J.R., Davis, A.S., 2000. Near-ridge seamount chains in the northeastern Pacific Ocean. *Journal of Geophysical Research* 105, 16541 - 16561.
- Conder, J.A., Forsyth, D.W., 2000. Do the 1998 Antarctic Plate earthquake and its aftershocks delineate a plate boundary? *Geophys. Res. Lett.* 27: 2309 - 2312.
- Coumans, J.P., Stix, J., Clague, D.A., Minarik, W.G., 2015. The Magmatic Architecture of Taney Seamount-A, NE Pacific Ocean. *Journal of Petrology* 56, 1037-1067.
- Croon, M.B., Cande, S.C., Stock J.M., 2008. Revised Pacific-Antarctic plate motions and geophysics of the Menard Fracture Zone. *Geochem. Geophys. Geosyst.* 9, Q07001.
- Crowley, J.W., Katz, R.F., Huybers, P., Langmuir, C.H., Park, S.-H., 2015. Glacial cycles drive variations in the production of oceanic crust. *Science* 347, 1237 - 1240.
- DeMets, C., Gordon, R.G., Argus, D.F., 1988. Intraplate deformation and closure of the Australia-Antarctica-Africa plate circuit. *J. Geophys Res.* 93, 11877 - 11897.

- DeMets, C., Gordon, R.G., Argus, D.F., 2010. Geologically current plate motions. *Geophysical Journal International* 181, 1 - 80.
- Dick, H.J.B., Lin, J., Schouten, H., 2003. An ultraslow-spreading class of ocean ridge. *Nature* 426.
- Dziewonski, A.M., Chou, T.-A., Woodhouse, J.H., 1981. Determination of earthquake source parameters from waveform data for studies of global and regional seismicity. *J. Geophys Res.* 86, 2825 - 2852.
- Gordon, R.G., Argus, D.F., Royer, J.-Y., 2008. Space geodetic test of kinematic models for the Indo-Australian composite plate. *Geology* 36, 827 - 830.
- Granot, R., Dymant, J., 2015. The Cretaceous opening of the South Atlantic Ocean. *Earth Plan. Sc. Lett.* 414, 156 - 163.
- 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. *Geochem. Geophys. Geosyst.* 16, 3061 - 3075.
- Hayes, G.P., Furlong, K.P., Ammon, C.J., 2009. Intraplate deformation adjacent to the Macquarie Ridge south of New Zealand - The tectonic evolution of a complex plate boundary. *Tectonophysics* 463, 1 - 14.
- Hellinger, S.J., 1981. The uncertainties of finite rotations in plate tectonics. *J. Geophys Res.* 86, 9312 - 9318.
- Hey, R., Martinez, F., Höskuldsson, Á., Eason, D.E., Sleeper, J., Thordarson, S., Benediktsdóttir, Á., Merkurjev, S., 2016. Multibeam investigation of the active North Atlantic plate boundary reorganization tip. *Earth Plan. Sc. Lett.* 435, 115 - 123.
- Hey, R.N., 2004. Propagating rifts and microplates at mid-ocean ridges, in: Selley, R.C. et al. (Eds.), *Encyclopedia of Geology*. Academic Press, London, pp. 396 - 405.

- Jackson, E.D., Silver, E.A., Dalrymple, G.B., 1972. Hawaiian - Emperor chain and its relations to Cenozoic Pacific tectonics. *Geol. Soc. Amer. Bull.* 83, 601 - 618.
- Katz, R.F., Spiegelman, M., Holtzman, B., 2006. The dynamics of melt and shear localization in partially molten aggregates. *Nature* 442, 676-679.
- Kim, S.-S., Wessel, P., 2011. New global seamount census from altimetry-derived gravity data. *Geophysical Journal International* 186, 615-631.
- Kirkwood, B.H., Royer, J.-Y., Chang, T.C., Gordon, R.G., 1999. Statistical tools for estimating and combining finite rotations and their uncertainties. *Geophys. J. Int.* 137, 408 - 428.
- Krijgsman, W., Hilgen, F.J., Raffi, I., Sierro, F.J., Wilson, D.S., 1999. Chronology, causes and progression of the Messinian salinity crisis. *Nature* 400, 652 - 655.
- Lodolo, E., Coren, F., 1997. A Late Miocene plate boundary reorganization along the westernmost Pacific-Antarctic ridge. *Tectonophysics* 274, 295 - 305.
- Lonsdale, P., 1994. Structural geomorphology of the Eltanin fault system and adjacent transform faults of the Pacific-Antarctic plate boundary. *Mar. Geophys. Res.* 16(2), 105-143.
- Macdonald, K.C., 2001. Seafloor Spreading: Mid-Ocean Ridge Tectonics, in *Encyclopedia of Ocean Sciences* (eds. J. Steele, S. Thorpe, K. Turekian), Academic Press.
- Maia, M., Dymant, J., Jouannetaud, D., 2005. Constraints on age and construction process of the Foundation chain submarine volcanoes from magnetic modeling. *Earth and Planetary Science Letters* 235, 183-199.
- Malservisi, R., Furlong, K.P., Anderson, H., 2003. Dynamic uplift in a transpressional regime: numerical model of the subduction area of Fiordland, New Zealand. *Earth Plan. Sc. Lett.* 206, 349 - 364.

- Matthews, K.J., Müller, R.D., Sandwell, D.T., 2016. Oceanic microplate formation records the onset of India-Eurasia collision. *Earth Plan. Sc. Lett.* 433, 204-214.
- Meckel, T.A., Coffin, M.F., Mosher, S., Symonds, P., Bernardel, G., Mann, P., 2003. Underthrusting at the Hjort Trench, Australian-Pacific plate boundary: Incipient subduction? *Geochem. Geophys. Geosyst.* 4(12).
- Mendel, V., Munsch, M., Sauter, D., 2005. MODMAG, a MATLAB program to model marine magnetic anomalies. *Comput. Geosci.* 31, 589 - 597.
- Miller, S.P., Hey, R.N., 1986. Three-dimensional magnetic modeling of a propagating rift, Galapagos 95°30'W. *J. Geophys Res.* 91, 3395 - 3406.
- Naar, D.F., Hey, R.N., 1991. Tectonic evolution of the Easter microplate. *J. Geophys Res.* 96, 7961 - 7993.
- Neves, M.C., Searle, R.C., Bott, M.H.P., 2003. Easter microplate dynamics. *J. Geophys Res.* 108(B4), 2213.
- 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* 1.
- Phipps Morgan, J., Parmentier, E.M., 1985. Causes and rate-limiting mechanisms of ridge propagation: A fracture mechanics model. *J. Geophys. Res.* 90, 8603 - 8612.
- Phipps Morgan, J., Sandwell, D.T., 1994. Systematics of ridge propagation south of 30°S. *Earth Planet. Sci. Lett.* 121, 245 - 258.
- Rappaport, Y., Naar, D.F., Barton, C.C., Liu, Z.J., Hey, R.N., 1997. Morphology and distribution of seamounts surrounding Easter Island. *Journal of Geophysical Research* 102, 24,713-24,728.

- Royer, J.-Y., Chang, T., 1991. Evidence for relative motions between the Indian and Australian Plates during the last 20 m.y. from plate tectonic reconstructions: Implications for the deformation of the Indo-Australian Plate, *J. Geophys Res.* 96, 11779 - 11802.
- Royer, J.-Y., Gordon, R.G., 1997. The motion and boundary between the Capricorn and Australian Plates. *Science* 277, 1268 - 1274.
- Rusby, R.I., Searle, R.C., 1995. A history of the Easter microplate, 5.25 Ma to present. *J. Geophys Res.* 100, 12617 - 12640.
- Sager, W., Pringle, M.S., 1987. Paleomagnetic constraints on the origin and evolution of the Musicians and South Hawaiian seamounts, Central Pacific Ocean. in: Keating, B.H., Fryer, P., Batiza, R., Boehlert, W.W. (Eds.), *Seamounts, Islands and Atolls, Geophysical Monograph, American Geophysical Union* 43, Washington, DC.
- Sandwell, D.T., Müller, D.R., Smith, W.H.F., Garcia, E., Francis, R., 2014. New global marine gravity model from CryoSat-2 and Jason-1 reveals buried tectonic structure. *Science* 346, 65 - 67.
- Scheirer, D.S., Macdonald, K.C., 1995. Near-axis seamounts on the flanks of the East Pacific Rise, 8°N to 17°N, *Journal of Geophysical Research* 100, 2239-2259.
- Searle, R.C., Bird, R.T., Rusby, R.I., Naar, D.F., 1993. The development of two oceanic microplates: Easter and Juan Fernandez microplates, East Pacific Rise. *J. Geol. Soc. Lond.* 150, 965 - 976.
- Seton, M., Whittaker, J.M., Müller, R.D., DeMets, C., Merkouriev, S. Cande, S.C., Gaina, C., Eagles, G., Granot, R., Stock, J., Wright, N., Williams, S., 2014. Community infrastructure and repository for marine magnetic identifications. *Geochem. Geophys. Geosyst.* 15, 1629 - 1641.
- Smith, W.H.F., Sandwell, D.T., 1997. Global seafloor topography from satellite altimetry and ship depth soundings. *Science* 277, 1957 - 1962.

- Supak, S., Carbotte, S.M., Macdonald, K.C., 2007. Influence of ridge migration and proximity to hot spots on the morphology of slow- and intermediate-spreading centers. *Geochemistry Geophysics Geosystems* 8.
- Tebbens, S.F., Cande, S.C., 1997. Southeast Pacific tectonic evolution from Early Oligocene to present. *J. Geophys. Res.* 102, 12061 - 12084.
- Tebbens, S.F., Cande, S.C., Kovacs, L., Parra, J.C., LaBrecque, J.L., Vergara, H., 1997. The Chile ridge: a tectonic framework. *J. Geophys. Res.* 102, 12035 - 12059.
- Thebault, E., Finlay, C.C., Beggan, C.D., Alken, P., Aubert, J., Barrois, O., Bertrand, F., Bondar, T., Boness, A., Brocco, L., Canet, E., Chambodut, A., Chulliat, A., Coisson, P., Civet, F., Du, A., Fournier, A., Fratter, I., Gillet, N., Hamilton, B., Hamoudi, M., Hulot, G., Jager, T., Korte, M., Kuang, W., Lalanne, X., Langlais, B., Leger, J.-M., Lesur, V., Lowes, F.J., et al., 2015. International geomagnetic reference field: The 12th generation. *Earth Planets Space* 67, 79.
- Valenzuela, R.W., Wysession, M.E., 1993. Intraplate earthquakes in the southwest Pacific Ocean basin and the seismotectonics of the Southern Tasman Sea. *Geophys. Res. Lett.* 20, 2467 - 2470.
- Wessel, P., Kroenke, L.W., 2000. Ontong Java Plateau and late Neogene changes in Pacific plate. *J. Geophys Res.* 105, 28255 - 28277.
- Wessel, P., Smith, W.H.F., Scharroo, R., Luis, J.F., Wobbe, F., 2013. Generic mapping tools: Improved version released, *EOS Trans. AGU* 94, 409 - 410.
- Yi, S.-B., Lee, M.-J., Park, S.-H., Han, S.; Yang, Y.-S., Choi, H., 2018. Occurrence of ice-rafted erratics and the petrology of the KR1 seamount trail from the Australian-Antarctic Ridge. *International Geology Review*, 1-17.

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.