TSPE16050-018-4

-

제 출 문

극지연구소장 귀하

본 보고서를 "서남극 열개구조 진화 연구: Adare Trough, 남극 중앙해령 인근 의 지구조 및 화산활동 성인규명"과제의 위탁연구 "해상 지구물리 자료를 활용한 호주-남극 중앙해령 구간의 상부맨틀 구조연구"과제의 최종보고서로 제출합니다.

2017.1.

- (본과제) 총괄연구책임자 : 홍 종 국
 - 위탁연구기관명 : 충남대학교
 - 위탁연구책임자 : 김 승 섭
 - 위탁참여연구원 : 백 승 호
 - " : 하고 은
 - " : 황 규 하
 - " : 강 두 현

보고서 초록

위탁연구과제명	해상 지구물리 자료를 활용한 호주-남극 중앙해령 구간의 상부맨틀 구조연구							
위탁연구책임자	김 승 섭	해당단계 참여연구원수	5	해당단계 연구비	45	,000,000		
연구기관명 및 소속부서명	충남대학교 지질	실환경과학과	참여기업명					
국제공동연구	상대국명 :		상대국연구기관명 :					
요약(연구결과를 중심으로 개조식 500자이내) 보고서 면수 44						44		

- Balleny 변환단층과 KR1 확장축 주변부에 존재하는 swell의 상호작용을 살펴보기 위하여 변환단층의 seismic coupling coefficient 분포를 살펴보았음. seismic coupling coefficient의 경우 변환단층이 가지 는 thermal structure의 영역에 의해 많은 영향을 받게 됨. 이 thermal structure의 영역은 판의 속도에 반비례하지만 변환단층의 길이에는 비례하는 관계를 보이고 있음. Balleny 변환단층의 길이는 지자기 역전띠의 위치를 바탕으로 약 360 km이므로 새로운 수치를 적용 시에는 기존 연구보다 thermal structure의 영역이 감소하는 경향을 보임

- 변환단층과 swell 혹은 열점 사이의 상호작용을 확인하기 위하여 주요 열점들과 그 주변 변환단층들 이 가지는 seismic coupling coefficient의 분포를 서로 비교 분석하였음. 분석 결과 열점에서 가까운 변 환단층들의 경우 seismic coupling coefficient가 증가하는 경향을 보이고 있었음. Balleny 변환단층의 경 우 인접한 Tasman 변환단층의 seismic coupling coefficient보다 약 3배 높은 계수를 보이고 있음. 이를 바탕으로 Balleny 변환단층이 다른 주변 변환단층보다 뜨거운 맨틀 구조에 의한 thermal structure의 변 화가 있었을 것으로 추정됨. 보다 세밀한 연구를 위한 기초 수치 모델링 연구 기반을 조성하였음
- 2015년 KR1 지역에서 측정된 500 km에 달하는 2개의 선상자력측선 자료를 바탕으로 정의된 맥쿼리-남극 판운동 모델을 활용하여 맥쿼리 판의 영역 및 경계를 재정의하였음. Hellinger 프로그램을 사용하 여 호주-맥쿼리-남극 판운동 복원에 필요한 회전벡터 계산하였고 이를 바탕으로 맥쿼리 판의 서쪽 경계 는 Tasman 변환단층까지만 미침을 확인하였음. 맥쿼리 판의 북쪽 경계의 경우, 기존 연구는 판 내부 지 진의 분포에 집중하여 정의하였지만 이 연구는 판운동 모델에 근거하여 북쪽에서 일어나는 판 내부 지 진을 호주 판과 맥쿼리 판 사이의 diffuse deformation boundary로 정의하였음

색 인 어 (각 5개 이상)	한	그리	남극, 중앙해령, 해양 지구물리, 중력, 자력
	ශ්	어	Antarctica, Mid-ocean ridge, Marine geophysics, Gravity, Magnetics

요 약 문

I.제 목

해상 지구물리 자료를 활용한 호주-남극 중앙해령 구간의 상부맨틀 구조연구

Ⅱ. 연구개발의 목적 및 필요성

호주-남극 중앙해령은 남극판을 둘러싼 발산형 판경계 중 하나로 전 지구적 중앙 해령 시스템에서 가장 적게 연구된 지역이다. 이러한 특이성은 남극판의 지구조 적 움직임이 주변판과의 움직임과 밀접하게 관련이 있음에도 그 역할 및 영향이 적절하게 평가되지 못했다. 본 연구는 호주-남극 중앙해령 구간의 과거 확장 역 사를 선상자력자료를 활용하여 규명 및 재구성하고자 한다. 또한 호주-남극 중앙 해령의 지구조적 특성을 갖게 하는 상부맨틀 구조를 함께 고찰하고자 한다.

Ⅲ. 연구개발의 내용

KR1 및 KR2가 보이는 지구물리적 특성은 이 지역에 thermal anomaly가 존재하 고 있음을 지시한다. 만일 thermal anomaly가 광범위한 영역에 걸쳐 분포한다면 KR1과 KR2 중앙해령 구간에 존재하는 Balleny 변환단층도 함께 영향을 받았을 것이다. 이 연구에서는 Balleny 변환단층의 thermal structure가 영향을 받게 되었 을 경우 생길 수 있는 변화를 고찰해보고자 한다. 그리고 새롭게 정의된 맥쿼리-남극 판운동 모델을 활용하여 맥쿼리 판의 경계를 재정의하고자 한다.

Balleny 변환단층과 KR1 확장축 주변부에 존재하는 swell의 상호작용을 살펴보 기 위하여 변환단층의 seismic coupling coefficient 분포를 살펴보았다. seismic coupling coefficient의 경우 변환단층이 가지는 thermal structure의 영역에 의해 많은 영향을 받게 되는데, 이 thermal structure의 영역은 판의 속도에 반비례하 지만 변환단층의 길이에는 비례하는 특성을 가진다. Balleny 변환단층의 길이는 지자기 역전띠의 위치를 바탕으로 약 360 km로 정의되었으며 새로운 지구조 수 치를 적용 시에는 기존 연구보다 thermal structure의 영역이 감소하는 경향을 보 였다. 변환단층과 swell 혹은 열점 사이의 상호작용을 확인하기 위하여 주요 열 점들과 그 주변 변환단층들이 가지는 seismic coupling coefficient의 분포를 서로 비교 분석하였다. 그 결과는 열점에서 가까운 변환단층들의 경우 seismic coupling coefficient가 증가하는 경향을 보임을 확인하였다. 선상자력측선 자료를 바탕으로 정의된 맥쿼리-남극 판운동 모델을 활용하여 맥쿼리 판의 영역 및 경계 를 재정의하였다. 맥쿼리 판의 서쪽 경계는 Tasman 변환단층까지만 미침을 확인 하였고, 맥쿼리 판의 북쪽 경계의 경우, 기존 연구는 판 내부 지진의 분포에 집중 하여 정의하였지만 이 연구에서는 판운동 모델에 근거하여 북쪽에서 일어나는 판 내부 지진을 호주 판과 맥쿼리 판 사이의 diffuse deformation boundary로 정의 하였다.

V. 연구개발결과의 활용계획

KR1과 KR2 지역에서 채취된 암석 샘플의 지구화학적 조성 분석 결과는 인도양 맨틀과 태평양 맨틀의 경계를 구분짓는 기존 연구들과는 다른 증거를 제시한다. KR1과 KR2에서 채취한 샘플들의 화학 조성은 Cretaceous 기간에 뉴질랜드, 호주 남단, 그리고 Balleny 지역 등에서 광범위하게 일어난 화산활동에 의해 생성된 암석들의 화학 조성과 매우 유사함이 나타났다. 이는 이 지역에 하부맨틀 기원의 plume이 아닌, 상부맨틀 기원의 swell이 광범위한 지역에 걸쳐 생성되어 마그마 공급원으로의 역할을 하였고 그 영향이 아직 상부맨틀에 남아 있는 것으로 해석 할 수 있다. 광역적인 지역에 걸쳐 나타는 지구물리 이상치를 활용하여 swell에 의해 영향을 받은 지역을 규명하기 위하여 본 연구의 연구결과를 활용하고자 한 다. 또한 Balleny 화산활동과 중앙해령, 그리고 중앙해령 변환단층 사이의 상호작 용이 존재하였을 가능성이 높다. 또한 2016-2017년 새롭게 획득된 선상 지구물리 자료를 활용하여, 이러한 상호관계에 대한 보다 정량적인 연구를 수행하고자 한 다.

S U M M A R Y (영 문 요 약 문)

I. Title

Geophysical investigation on upper-mantle structures of Australian-Antarctic Ridge

II. Purpose and Necessity of R&D

Australian-Antarctic Ridge is one of divergent plate boundaries defining the Antarctic plate and remains poorly understood. Although the Antarctic plate can affect neighboring plates in various tectonic events, its tectonic roles have not been properly evaluated because of its remoteness. Here we aim to reconstruct the tectonics of Australian-Antarctic ridge using the recently acquired shipboard magnetics. In addition, we aim to characterize the upper mantle of the ridge system, which may have resulted in the distinct tectonics of the Australian-Antarctic ridges.(The title may be changed if necessary.)

III. Contents of R&D

There are clear indications that KR1 and KR2 ridge segments have been thermally affected. If a broad thermal anomaly were present over KR1 and KR2, the Balleny transform between KR1 and KR2 would be affected. In this study, we aim to infer what geophysical aspects of Balleny transform would been influenced and their manifestation. In addition, we aim to draw the dimension of Macquarie plate based on the new finite rotation model.

IV. R&D Results

We compared seismic coupling coefficients of various transforms located near hotspots. In this analysis, the ridge transforms close to the hostpots have higher coefficents than the others. It implies that the upwelling materials could change the thermal structure of transforms, which would lead to alter seismic couling along the given transforms. For Balleny transform, we identified its thermal structure can be smaller than the previous study. The more detailed numerical validation is necessary to determine the plume-transform interactions. The Macquarie plate has been identified by the wide spread intraplate earthquakes. However, the new finite rotation model indicates that such seismic zone may be the diffuse deformation boundary between the Australian and Macquarie plates.

V. Application Plans of R&D Results

The geochemical results based on the samples from the KR1 and KR2 segments indicate that the Cretaceous volcanic activities of New Zealnad, southern Australia, and Balleny Island show the same characteristics with the ridge samples. This might lead to swell hypothesis rather than mantle plume that a swell arising from the upper mantle would cause wide spread volcanism in this area. Its residual components may still remain in the upper mantle. To evaluate such hypothesis, we need to identify the spatial limit of the swell using the current research results. In addition, we aim to build computational geodynamic model linking the Balleny transform faults, KR1 segment, and Balleny volcanism.

목 차

제 1 장 서론

제 1 절 연구개발의 목적 및 필요성

제 2 장 국내외 기술개발 현황

제 3 장 연구개발수행 내용 및 결과

제 1 절 연구내용 및 결과

제 4 장 연구개발목표 달성도 및 대외기여도

제 1 절 연구개발목표 달성도 제 2 절 대외기여도

제 5 장 연구개발결과의 활용계획

제 6 장 참고문헌

제 1 장 서론

제 1 절 연구개발의 목적 및 필요성

중앙해령(mid-ocean ridge)은 판구조 운동(plate tectonics)에 의해 형성 된 해저 화산 시스템을 지칭한다. 해저확장축(oceanic spreading center)이라고도 알려진 이 지역에서는 상부맨틀의 감압용융(decompressional melting)에 의해 발생하는 마그마의 용승 작용이 활발하게 일어나며, 결과적으로 해양지각의 깨 진 틈으로 분출하는 마그마가 새로운 해양지각을 생성하게 된다. 지구 표면적 중 바다가 차지하는 부분을 고려한다면 지구표면의 약 2/3이 중앙해령에서 생성 되는 것이다. 또한 중앙해령은 지구 전체 규모로 연결되어 있으며, 그 총 길이가 대략 80,000 km로 지구둘레를 2번 정도 감쌀 수 있다. 이러한 중앙해령을 하나 의 화산 시스템으로 고려하여 본다면, 현생 지구의 환경 변화와 과거 지구의 진 화과정을 이해하는 데 있어서 중앙해령은 매우 중요한 지질학적 증거들을 함유 하고 있음을 알 수 있다. 특히 남극판의 경우 인접 지각판들과 모두 발산경계, 즉 중앙해령으로 연결되어 있는 지구조적 특이성을 가지고 있다(그림 1). 이러한 특이성으로 인해 남극판의 지구조적 움직임은 주변 판으로 손쉽게 전달될 수 있 다. 그러므로 남극 중앙해령은 과거 남극판의 운동을 정량적으로 규명하는 데 중요한 역할을 할 뿐 아니라 현재 남극판의 지구조운동의 변화로 일어날 수 있 는 자연변화에 대한 이해를 연구하는 데에도 매우 적절한 지역이라고 할 수 있 다.

중앙해령에서의 일어나는 확장방식의 특징은 다양한 지구물리학적 특성 들과 상관관계가 있는 것으로 밝혀져 있다(Shaw and Lin, 1996). 예를 들면 동 태평양 중앙해령과 같이 빠른 속도로 확장하는 지역과 대서양 중앙해령과 같이 느린 속도로 확장하는 지역의 경우를 end-member로 고려할 수 있을 것이다. 그 러나 중간속도로 확장하는 중앙해령의 경우에는 이러한 end-member들이 가지 는 특징들과 달리 다소 복잡한 상관관계가 존재한다(Chen and Lin, 2004). 마그 마의 공급과 확장속도, 마그마 렌즈의 깊이, 상부맨틀의 thermal structure, 해양 지각의 두께변화 등이 서로 연관되어 있기 때문이다. 이러한 지구물리학적 변수 들 중에서 가장 중요한 역할을 차지하는 요소를 규명하게 되면 연구지역에 위치 한 중앙해령의 지구조적 특성도 함께 규명할 수 있게 된다.



그림 1 남극판 주변부의 중력이상도(Sandwell and Smith, 2009). 각 지각판의 이름은 다음과 같다: ANT = Antarctic plate, AUS = Australian plate, PAC = Pacific plate, NAZ = Nazca plate, SAM = South American Plate, AFR =African plate.

특히 호주-남극 중앙해령의 KR1 구간에서는 중간속도로 확장하는 중앙해 령임에도 매우 활발한 열수 분출 활동의 증거가 포착된 바 있다(Hahm et al, 2015). 이러한 열수 분출 활동의 경우, 해양 지각의 깨진 틈의 발달 정도와 심부 마 그마의 열용량에 의해 많은 영향을 받게 된다. KR1의 경우 활발한 마그마 활동 및 분출의 증거를 보이는 axial mound 근처에 군집하여 있는 것을 확인할 수 있다(그 림 2). 이렇게 화산 작용 혹은 열수 분출 활동이 활발하게 일어나기 위해서는 마그 마의 공급이 원활하게 이루어져야 한다. 중간 속도로 확장하는 중앙해령의 경우 마 그마의 공급 정도는 빠른 속도로 확장하는 중앙해령에 비해 보다 passive하게 이루 어진다. 그러나 KR1의 경우를 보더라도 기존에 알려준 중간속도 중앙해령에 비해 보다 active한 마그마의 공급이 이루어짐을 유추해 볼 수 있다. 이러한 원인으로 이 연구에서는 KR1 주변부로 넓게 분포 하고 있는 swell의 존재 가능성을 살펴보고자 한다. 이를 좀 더 세부적으로 확인하기 위하여 Balleny 열점의 영향과 함께 Balleny 변환단층의 변형정도를 살펴보고자 한다.



그림 2 호주-남극 중앙해령 지역에서 발견된 무진 열수 분출구 시스템 (Hahm et al., 2015)

제 2 장 국내외 기술개발 현황

중앙해령 지구물리 분야에서의 국내 연구 집중도 및 개발현황은 여전히 많은 투자와 개발이 필요한 수준이다. 우선 중앙해령에 대한 연구는 연구선 운 영이 가능한 정부출연연구소의 주도하에 이루어져야 한다. 현재 혹은 과거 진행 되었던 연구에는 대표적으로 극지연구소가 주도하는 남극 중앙해령 연구 프로그 램과 한국해양과학기술원이 주도하는 인도양 중앙해령 연구 프로그램이 있다. 각각의 특성을 고려한 프로그램의 운영을 통해 양질의 자료(암석시료 및 해수채 취 등)들을 획득한 바 있다. 그러나 이러한 프로그램들이 해외 선진국들과 같이 장기 연구 프로그램으로는 발전하지 못한 상황이다. 더욱이 지구물리 분야의 경 우 중앙해령에서의 국내 연구개발 현황은 더욱 열악하여진다. 중앙해령 지역에 서 지구물리 연구를 수행하기 위해서 계획되는 연구선 운영안과 지구화학 및 열 수분출구 연구를 위해 필요한 연구선 운영안이 서로 상충되는 측면이 존재한다. 이는 해당 연구과제의 우선순위에 의해 합리적으로 결정되는 사안이지만, 제한 된 연구선 운영시간과 연구비로 인하여 종종 지구물리 연구를 위한 장비 확충과 연구선 운영안은 후순위로 밀리게 된다.

국외의 경우 중앙해령에서 지구물리 연구는 판구조론이 태동되었던 1960 년대부터 지속적으로 이루어져왔다(Dickson et al., 1968; Honsho et al., 2009). 특히 본 연구과제 관련분야의 국외 기술 축적도는 매우 높다. 예를 들면, 해저 수심자료를 바탕으로 단층활동의 종류와 공간적 분포를 규명하고 중앙해령에서 의 맨틀 용승작용과의 연관성이 연구된 바 있으며(Shaw and Lin, 1993), 수심 자료와 중력 자료를 활용하여 계산된 맨틀 부게 중력 이상도를 바탕으로 중앙해 령의 지각두께 이상 지역 혹은 밀도 이상 지역을 규명하는 연구(Kuo and Forsyth, 1988) 등이 진행되었다. 이러한 연구 방법은 다양한 지구조 환경에 위 치한 중앙해령들에 적용되어 있으며, 특히 중간속도로 확장하는 중앙해령의 맨 틀 구조를 연구하는 데 적용되었다. 그 대표적인 지역들에는 Juan de Fuca Ridge (Hooft and Detrick, 1995), Galapagos Spreading Center (Detrick et al., 2002), 그리고 Southeast Indian Ridge (Scheirer et al., 2000) 등이 있다. 축적된 지구물리 자료와 비교 해석을 통하여 중앙해령에 위치한 magma lens까지의 깊 이 및 상부 맨틀의 열구조(thermal structure) 등을 살펴본 연구 뿐 아니라(Chen and Lin, 2004), 용융체의 공간적 분포(melt distribution)과 해양지각의 변형 사 이의 관계성을 고찰하는 연구(Shaw and Lin, 1996)도 진행된 바 있다.

중앙해령에서의 국내외 연구 개발 현황 차이는 매우 극명하다. 그러나 달리 살펴보면 중앙해령 연구에 대한 방향성을 설정하고 검증된 연구방법을 적 용하기에는 매우 적합하다. 기존의 선행연구들이 존재하고 또한 국외 연구자들 과의 공동연구를 통해 부족한 부분들을 채워나갈 수 있기 때문이다. 이러한 측 면과 국내 중앙해령 연구현황을 함께 고려하면 본 연구개발 과제가 차지하는 의 의는 매우 중요하다. 우선 연구지역이 가지는 제한된 접근성으로 인해 아직 다 른 해외기관들에 의해 정밀하게 조사되지 않았다는 점이다. 그러므로 미지의 지 역에서 검증된 지구물리 해석법을 활용하여 의미 있는 연구결과를 생산하고 더 나아가서 새로운 연구기법도 개발할 수 있다는 이점이 함께 존재한다. 이러한 노력은 중앙해령 연구에 대하여 국내 연구자들의 관심도 유도가 가능하며, 관련 분야에서 미래 핵심 인력의 양성도 도모할 수 있다.

최근 주목할 만한 국내 동향은 새롭게 건조되는 5000톤급 대형과학조사 선 이사부호의 공동 활용 방안이 관련 정부부처의 행정적 뒷받침을 바탕으로 현 실화 되고 있다는 것이다. 국내의 경우 연구선 사용료를 연구과제에서 부담해야 상황이므로, 일반 연구자가 쉽게 연구선을 사용할 수 없었다. 국책사업과 같은 큰 규모의 연구 사업 이외에는 연구선 사용료를 감당할 수 있는 연구과제가 국 내에는 전무하다고 할 수 있다. 이런 의미에서 대형과학조사선 이사부호의 공동 활용 현실화는 중앙해령 연구의 다양성을 유도할 수 있고, 더 나아가 인력 양성 측면에서 효과가 높을 것으로 기대된다. 또한 연구선 공동 활용이 좀 더 산학연 기관들의 연구 밀착화를 유도하여 건실한 공동연구들이 많이 일어날 수 있도록 힘을 모아야 하겠다.

또 다른 국외 동향 중 하나는 미국에서 찾아볼 수 있다. 미국과학재단 NSF에서 National Research Council (NRC)에 연구비 운영 방안에 대하여 컨설 팅을 의뢰하였고 그 결과가 최근 Science Magazine을 통하여 공개되었다. 주목 할 만한 사안은 해양학 분야에 할당된 총 연구비의 57%가 연구 infrastructure 를 구성하는 데 사용되고 있기 때문에, 50% 이내로 줄이지 않으면 다른 해양학 연구가 살아나지 못할 것이라고 제안한 것이다. 이와 같은 예산안 변경이 실행 되면, NSF의 대표적 프로그램 중 하나인 Ocean Observing Initiative (OOI)는 20%, 해저 시추 연구 프로그램은 10%, 새로운 연구선 건조 사업은 5%의 예산 삭감을 감행해야 한다. 하지만 예산 삭감 상황에도 해저 시추 연구 프로그램과 연구선 건조 사업은 계속해서 꾸준히 이루어지고 있다.

제 3 장 연구개발수행 내용 및 결과

제 1 절 연구내용 및 결과

호주-남극 중앙해령의 특성을 파악하기 위해서는 중앙해령 변환단층의 특 성도 함께 이해할 필요가 있다. 중앙해령의 마그마 공급 및 확장속도의 변화에 따 라 변환단층의 지진 특성도 민감하게 반응하기 때문이다. Boettcher and Jordan (2004)는 중앙해령 변환단층의 길이(L), slip rate (V), moment release rate (M)이 seismic coupling coefficient (χ)로 표현될 수 있음을 밝혔다. 여기서 $\chi = A_E/A_T$ 로 정의된다. $A_E \sim \dot{M}/V$ 와 유사하며 변환단층이 가지는 effective seismic area를 결 정한다. $A_T \propto L^{3/2} V^{-1/2}$ 로 기준이 되는 isotherm 상부에 위치하는 변환단층 내부의 면적을 의미한다(그림 3). 변환단층의 slip이 대부분 600℃ 상부에서 발생하므로 기 준 isotherm은 600℃가 된다.

여기서 A_T 는 변환단층의 brittle behavior, temperature-dependent rheology, shear heating, hydrothermal cooling에 의해 전혀 영향을 받지 않음이 많 은 연구에서 밝혀졌다(Behn et al., 2007; Roland et al., 2010). 그 대신에 A_T 가 가 지는 면적은 중앙해령의 확장속도와 길이에 가장 큰 영향을 받게 된다. 그림 4에서 와 같이 A_T 의 면적이 확장속도에 따라 변화하는 반면에 단층의 다른 물리적 특성 에 변화에는 크게 영향을 받지 않음을 확인할 수 있다. 그러므로 변환단층의 전체 길이와 thermal structure가 중앙해령 변환단층의 지진 특성을 결정하는 주요 인자 임을 알 수 있다.

이 연구의 연구지역에는 Balleny 변환단층이 존재한다. Boettcher and Jordan (2004) 연구에 따르면 Balleny 변환단층의 길이는 350 km이며 확장속도는 69 mm./yr로 결정되었다. 이 변수를 적용하였을 경우의 χ는 0.25로 다른 지역에 비해 상대적으로 높은 seismic coupling coefficient를 갖게 된다. 이러한 영향이 기 존의 thermal structure에 광범위한 swell 작용에 의해 영향을 받게 되었을 경우, 혹은 Balleny 주변에서 상승하는 맨틀의 영향을 받아 물리적으로 좀 더 coupling 작용이 증대되었을 가능성이 있다. 이를 위하여 다른 지역에서의 변환단층과 열점 사이의 상관관계를 살펴보았다.



그림 3 변환단층의 thermal structure 예측 모델. Half-space cooling model을 활용 하게 되면, 특정한 isotherm 상부에 위치한 변환단층의 면적, $A_T = L^{3/2}V^{-1/2}$ 에 비례하게 된다.



그림 4 A_T 는 변환단층의 brittle behavior, temperature-dependent rheology, shear heating, hydrothermal cooling에 의해 전혀 영향을 받지 않음을 보인다(Behn et al., 2007; Roland et al., 2010).



그림 5 Balleny 변환단층의 길이는 360 km로 자기 역전띠를 사용하여 정밀하게 정의하였다(Choi et al., in prep).

그림 5는 Balleny 변환단층의 주변에서 정의된 지자기 역전띠들의 위치를 보여준다. Balleny 변환단층은 KR1과 KR2 중앙해령 구간 사이에 존재하므로 이들 중앙해령 구간에 공통으로 존재하는 역전띠 사이의 거리를 측정하게 되면 Balleny 변환단층의 길이를 보다 정확하게 규명이 가능하게 된다. 그림 5에서와 같이 C2Ay 의 역전 현상의 위치를 기준으로 길이를 측정하게 되면 Balleny 변환단층의 총 길 이는 약 360 km가 된다. 이는 기존의 Boettcher and Jordan (2004) 연구보다 약 10 km 연장된 길이로 환산된다. 또한 KR1과 KR2에서 새롭게 정의된 중앙해령의 확 장속도는 각각 65 mm/yr와 68 mm/yr가 된다. 이러한 수치를 대입하여 A_T 를 계산 하면 그림 6과 같이 얻어진다. 기존 연구의 경우 A_T 는 3275 km²이지만, 이 연구에 서 계산된 값은 3176 km²로 다소 감소되었다.

그림 7은 Boettcher and Jordan (2004)이 살펴본 65개의 중앙해령 변환단층 들의 위치를 보여준다. 그들은 A_T 가 350 km²이상이며 단층의 길이가 75 km 이상 인 변환단층들만을 선택하여 seismic coupling coefficient를 계산하였다. 하지만, 변 환단층 주변으로 분포하고 있는 열점들에 대한 영향은 고려하지 않았다. 이 연구에 서는 Boettcher and Jordan (2004)이 계산한 변환단층들의 seismic coupling coefficient와 주변에 존재하는 열점들 사이의 공간상 상관분포를 우선 살펴보았다.

그림 8에서 그림 11까지는 FER, GM, MAR, SHO 열점들 주변에 분포하는 변환단층들이 가지는 seismic coupling coefficient의 변화를 도시하였다. 그림 8과 그림 10과 같이 열점 주변에서 seismic coupling coefficient가 크게 상승하는 경우 를 확인할 수 있는 반면에 그림 9와 그림 11에서는 특별한 변화가 관찰되지 않는 다. 이것은 열점에서 상승하는 뜨거운 맨틀 물질이 변환단층을 따라 이동하거나 영 향을 주지 않았기 때문으로 우선 생각해 볼 수 있다. 그리고 열점에서 얼마나 떨어 져 있느냐에 따라서도 seismic coupling coefficient의 변화 양상이 다르게 나타남을 알 수 있다. 이를 위하여 보다 광범위한 지역에 대하여 열점과 변환단층 사이의 상 관관계를 살펴보았다.



그림 6 재계산된 Balleny 변환단층의 thermal structure. 600℃ isotherm은 굵은 선으로 표시되어 있다.



그림 7 65개의 중앙해령 변환단층들의 위치. 단층의 길이가 75 km 이상이고 A_T 가 350 km² 이상인 단층들만 선택되었다(Boettcher and Jordan, 2004)



그림 8 Fernan Do Norona (FER) 열점 주변에 위치한 변환단층이 가지는 seismic coupling coefficient 변화



그림 9 Great Meteor (GM) 열점 주변의 변환단층들이 가지는 seismic coupling coefficient 변화



그림 10 Marion (MAR) 열점 주변의 변환단층들이 가지는 seismic coupling coefficient 변화



그림 11 Shona (SHO) 열점 주변의 변환단층들이 가지는 seismic coupling coefficient 변화

그림 12에서 그림 18까지는 주요 열점들의 주변에 분포하고 있는 변환단층 들이 가지는 seismic coupling coefficient 변화를 보여준다. 앞서 언급한 바와 같이 변환단층과 열점 사이의 공간 거리에 의한 영향이 상대적으로 강하게 작용하고 있 음을 알 수 있다. 만약 열점에서 상승하는 뜨거운 맨틀 물질이 중앙해령 변환단층 의 thermal structure에 영향을 주게 된다면 600℃ isotherm의 위치를 보다 해저면 에 근접하게 위치시키게 될 것이다. 이 경우 결과적으로 thermal structure의 면적 을 감소시키게 되므로 seismic coupling coefficient을 증가시킬 수 있게 된다. 이것 은 새롭게 정의된 물리 조건을 활용하여 재계산된 Balleny 변환단층의 thermal structure 변화에서도 확인하였다.

변환단층의 thermal structure 뿐 아니라 뜨거운 열점 물질이 이동하면서 해 양 지각판을 물리적으로 융기시킬 경우에는 변환단층에 보다 강한 마찰력을 주게 될 것이다. 동일한 thermal structure와 중앙해령 확장속도를 가지고 있을 경우에는 이러한 마찰력은 seismic coupling coefficient를 증가시킬 수 있는 물리적 요인이 될 수 있다.

이와 같이 중앙해령 변환단층과 열점사이의 상호작용에 대한 고찰은 아직 많은 연구가 이루어져 있지 않다. 반면에 중앙해령과 열점 사이의 상호작용에 대한 연구는 많이 이루어져 있기는 하지만, 변환단층의 역할은 극히 제한적으로만 다루 어져 왔다. Balleny 변환단층의 seismic coupling coefficient가 인접한 Tasman 변 환단층의 seismic coupling coefficient보다 3배가 더 큰 것을 고려하여 보면 Balleny 변환단층이 가지고 있는 thermal structure 혹은 mechanical coupling의 규 모가 판운동 및 용승하는 뜨거운 맨틀 물질에 의한 영향을 받았을 것으로 예측해 볼 수 있다. 이러한 연구 활동을 위하여 향후 연구에서는 기존에 수행되었던 seismic coupling coefficient 계산을 재수행하고 필요한 수치 모델링을 개발하여 적 용하고자 한다.





그림 12 Amsterdam-St. Paul (AMS) 열점 주변의 변환단층들이 가지는 seismic coupling coefficient 변화



그림 13 Azores (AZO) 열점 주변의 변환단층들이 가지는 seismic coupling coefficient 변화



그림 14 Bouvet (BOU) 열점 주변의 변환단층들이 가지는 seismic coupling coefficient 변화



그림 15 Conrad (CON) 열점 주변의 변환단층들이 가지는 seismic coupling coefficient 변화



그림 16 Crozet (CRO) 열점 주변의 변환단층들이 가지는 seismic coupling coefficient 변화



그림 17 Louisville (LOU) 열점 주변의 변환단층들이 가지는 seismic coupling coefficient 변화



그림 18 Socorro (SCR) 열점 주변의 변환단층들이 가지는 seismic coupling coefficient 변화

마지막으로 호주-맥쿼리 판운동을 정량적으로 정의하기 위하여 선상자력자 료에서 정의된 자기 역전띠의 위치와 Balleny 균열대의 정보를 Hellinger 프로그램 에 입력하여 회전벡터를 계산하였다. 통계적 검증을 기반으로 한 이 계산 방법은 중앙해령을 중심으로 자기 역전띠의 상호 대칭 되는 지점들이 하나의 선을 이루도 록 조정한다. 하나의 대원(great circle) 상에 자기 역전 띠들이 서로 배열되면 오차 가 최소화되므로 회전벡터의 중심위치를 계산 가능하다. 하지만, 대원 상의 배열만 을 보기 때문에 정확한 위치를 결정하기에는 무리가 있다. 회전벡터의 위치를 공간 상에서 좀 더 제약하기 위해서 균열대의 위치 정보를 활용해야만 한다.

맥쿼리 판의 생성 및 운동에 대한 기존 연구(Cande and Stock, 2004)는 제 한된 그리고 오래된 선상자력자료를 활용하였기 때문에 그 정확도가 다소 떨어진 다. 2015년 측정된 자력자료는 최신 항법장치와 함께 측정된 선상자력자료로서 기 존 연구보다 좀 더 직접적인 역전 정보 및 공간 정보를 제공한다. 그러므로 맥쿼리 판의 생성 및 과거 운동을 좀 더 명확하게 규명할 수 있었다.

새롭게 정의된 판운동 회전벡터를 활용하여 맥쿼리 판의 경계 및 과거 운 동 방향을 복원하였다(그림 19). 맥쿼리 판의 생성은 600만 년 전에 발생하였음을 선상자력자료를 통해 확인할 수 있었다. 새롭게 정의한 판운동 회전운동 모델을 활 용하여 KR1과 KR2 주변부에 위치한 변환단층들의 trace를 가상으로 계산하였다. 만약 판운동 복원 모델이 정확하다면 실제 변환단층들의 이동경로와 동일한 경로가 계산이 될 것이다. 그림 19를 살펴보면 KR1과 KR2에 인접한 Balleny 그리고 Tasman 변환단층만이 새롭게 정의된 맥쿼리-남극 판운동 모델(적색 실선)과 일치 한다. 호주-남극 판운동 모델에 의해 계산된 단층 이동경로(녹색 실선)은 이들 변환 단층의 위치와는 매우 다르다. 반면에 KR2 서쪽에 위치한 변환단층들의 경우 맥쿼 리-남극 판운동 모델에 의하여 계산된 결과와 상이한 변환단층 구조를 보인다. 이 는 맥쿼리-남극 판운동 모델이 KR1과 KR2 지역에만 제한적으로 작용한다는 것을 의미한다. 달리 말하면 맥쿼리 판은 KR2 서쪽 지역으로 확장되어 있지 않고 Tasman 변환단층을 서쪽 경계로 한다는 것을 의미한다.



맥쿼리-남극 판운동 모델에 의하여 정의되는 맥쿼리 판의 영역을 살펴보면 남쪽 경계는 KR1과 KR2의 중앙해령이 자리잡고 있고, 서쪽 경계는 Tasman 변환 단층이 그리고 동쪽 경계는 Hjort 섭입대가 위치한다. 그러나 북쪽 경계의 경우에 는 특별한 지구조가 존재하지 않는다. 혹은 아직 맥쿼리 판이 호주 판으로부터 완 전히 독립하지 않은 단계이므로 지구조선의 초기 발달 단계일 수도 있다. 어느 경 우에 해당하던지, 맥쿼리 판의 북쪽 경계는 KR2 구간의 6 Ma 연령보다 오래된 지 각판 이상을 벗어날 수 없다. 이는 그림 19에서 남위 59도 위도선에 위치한 회색 실선의 위치로 표시되어 있다. 기존에 여구는 남위 50도 위도선 아래에서 관찰되는 판 내부 지진활동을 바탕으로 맥쿼리 판의 경계가 상부에 위치하고 있음을 제시하 였다. 그러나 해상 지자기 자료를 바탕으로 재정의된 맥쿼리 판의 경계는 이러한 기존 연구 결과와는 상의된 결과를 보여준다. 그 대신에 판 내부 지진이 일어나는 구간이 맥쿼리 판과 호주 판의 diffuse deformation boundary일 가능성이 더 높다 고 판단된다. 맥쿼리 판이 호주 판과 분리되는 과정 속에 있다고 하지만, 맥쿼리 판 이 호주 판과 변환단층으로 완전히 분리가 되지 않은 단계에 있다. 더욱이 판의 이 동방향이 매우 유사하기 때문에 주어진 넓은 영역에 걸쳐 판 내부 지진들이 발생하 고 있는 것으로 추정된다.

제 4 장 연구개발목표 달성도 및 대외기여도

제 1 절 연구개발목표 달성도

성과목표	세부목표		달성 주요내용	달성도(%)
1 호주-남 극 중앙해 령 지역 swell 현상 규명	1-1	광역 지구물리자 료 분석	 위성 중력 자료를 활용하여 광역 Mantle Bouguer Anomaly 계산 AAD에서 KR1 구간까지의 지구물리량 변화량 산출 	100%
	1-2	상부맨틀 swell 지역 규명	- 지구물리량 이상치가 나타나는 구간과 swell 간의 연관성 검토 - 과거 판운동과 swell 작용과의 상관성 분석	100%
2 중앙해령 -변환단층 상관관계 수치연구	2-1	중앙해령-변 환단층 수치연구	 호주-남극 중앙해령의 지구조 특징을 반영한 수치모델 구성 온도 조건 변화를 통한 상부맨틀 특성 변화 연구 Balleny 화산활동이 KR1 구간에 미치는 영향 분석 미국 아이다호 대학 방문연구를 통한 수치모델링 연구 기반 조성 	100%
3 호주-남극 중앙해령 구 간 지구물리 자료 추가 확보 노력	3-1	아라온 현장탐사 참여	- 2016.12에 실행 예정인 아라온 중앙해령 탐사 참여 (연구책임자 외 연구인력 3인)	100%

제 2 절 대외기여도

대외적으로는 연구 기간 동안에 2016 미 대학원생 하계연수사업(EASPI)을 유치하였다. 이 연수사업은 미국과학재단과 한국연구재단이 함께 공동 추진하는 사 업으로 University of Idaho의 Thomas Morrow 박사과정생을 유치하였다. 연구주 제는 Quantifying Tectonic Controls on Changing Segmentation of Oceanic Transform Faults로 남극 중앙해령에 적용할 수치모델링 기반이 되는 연구 활동이 다. 또한 Thomas Morrow는 중앙해령 변환단층과 열점 사이의 상호작용에 대한 국제 공동연구를 함께 수행 중인 Mittelstaedt 교수의 대학원생으로서 국제 공동연 구가 좀 더 실제화 될 수 있는 기초를 만들었다고 생각한다.



그림 20 EASPI 연수 사업의 일환으로 개최된 세미나 사진



그림 21 EASPI 연수 사업의 일환으로 개최된 세미나의 참석자 단체 사진

제 5 장 연구개발결과의 활용계획

제 1 절 향후 연구 계획

호주-남극 중앙해령의 KR1과 KR2 지역에서 채취된 암석 샘플의 지구화 학적 조성 분석 결과(Park et al., in prep.)는 인도양 맨틀과 태평양 맨틀의 경계 를 구분짓는 기존 연구(Hannan et al., 2004)와는 다른 증거를 제시한다. KR1 서쪽에 위치한 AAD(Australian-Antarctic Discordance) 지역은 비슷한 속도로 확장하는 다른 지역의 중앙해령들에 비해 낮은 수심을 가지고 있다. 또한 해저 면 암석 샘플을 활용한 지구화학 조성 연구는 태평양 맨틀과 유사성을 보이고 있음을 제시하여 AAD를 태평양 맨틀과 인도양 맨틀의 경계로 고려하여 왔다. 그렇다면 KR1과 KR2에서 채취된 암석 샘플은 태평양 맨틀 기원을 지시해야 하 지만, 그와 같은 뚜렷한 유사성이 본 과제의 연구결과에서 발견되지 않았다. 더 욱이 KR1과 KR2의 화학 조성은 Cretaceous 기간에 뉴질랜드, 호주 남단, 그리 고 Balleny 지역 등에서 광범위하게 일어난 화산활동에 의해 생성된 암석들의 화학 조성과 매우 유사함이 나타났다. 이는 이 지역에 하부맨틀 기원의 plume이 아닌, 상부맨틀 기원의 swell이 광범위하 지역에 걸쳐 생성되어 마그마 공급원 으로의 역할을 하였고 그 영향이 아직 상부맨틀에 남아 있는 것으로 해석할 수 있다. 이런 원인으로 KR1과 KR2 지역의 수심 또한 다른 지역에 비해 낮은 것 으로 해석할 수 있다. 지금까지는 KR1과 KR2 지역에 연구지역을 국한하여 지 구물리 자료 분석을 수행하였지만, 본 연구과제의 지구화학 연구결과는 좀 더 광역적인 지역에 대한 지구물리 연구가 필요함을 지시한다. 향후 광역적인 지 역에 걸쳐 나타나는 지구물리 이상치를 규명하고 swell에 의해 영향을 받은 지 역을 규명할 필요가 있다.

이러한 상부맨틀의 thermal anomaly가 Balleny 변환단층에 미치는 영향 을 함께 살펴보고자 한다. 이 연구에서 진행되었던 것과 같이 thermal anomaly 에 의한 변환단층의 thermal structure 변화를 보다 정량적으로 분석하고자 한 다. 이를 통해 Balleny 변환단층이 가지고 있는 seismic coupling coefficient에 어떠한 영향을 미치고 있는 지를 수치적으로 분석하고자 한다. 이러한 분석 기 법은 향후 열점과 중앙해령 변환단층 사이의 상호관계 연구에도 큰 기여를 할 것으로 기대한다.

추가적으로 살펴볼 내용은 다음과 같다. 상부맨틀의 swell 현상이 있을 경우 동일한 연령을 가지는 해양지각이 가지는 수심보다 수심이 얕아지게 된다. 이와 같은 해저면의 지형 변화는 위성 중력 자료에서 규명이 가능하다. 그러나 지형에 의한 영향도 중력에 영향을 미치므로 지형에 의한 영향과 해양지각과 상 부맨틀의 밀도 차이에 의한 영향을 중력에서 제거하여야 상부맨틀의 밀도구조 혹은 열적상태에 대한 변화를 정량적으로 규명할 수 있다. 이를 mantle bouguer anomalv라고 한다. 호주-남극 중앙해령 지역에서 swell 작용이 가장 활발했던 시기는 주변 화산활동을 기초로 Cretaceous 기간으로 볼 수 있지만, 현재도 그 영향이 KR1과 KR2 지역의 지구화학 조성에서 나타나고 있으므로 swell에 의한 영향이 현재도 존재하고 있음을 추정할 수 있다. 이러한 지구화학 연구결과를 기반으로 하여 호주-남극 중앙해령에 광역적으로 존재하는 지구물리 이상치를 정량적으로 살펴보고자 한다. 호주-남극 중앙해령의 KR1과 KR2 구간은 Ballenv Transform Fault로 서로 약 300 km 가량 떨어져 있다. 또한 남쪽으로 는 Balleny 화산이 위치하고 있으며 short-lived hotspot 활동이 있었음을 지시 하고 있다. Balleny 화산활동과 중앙해령 사이의 상호작용(ridge-plume interaction)은 20 Ma 근처에 존재하였을 가능성이 높다(Mittelstaedt and Ito, 2005). 현재 호주-남극 중앙해령의 상부맨틀 구조는 Cretaceous 기간의 swell 현 상과 더불어 이러한 열점-중앙해령 사이의 상호작용의 결과로 고려해 볼 수 있 다.

앞서 언급하였듯이 열점과 중앙해령 그리고 중앙해령 사이의 변환단층 사이의 상호작용 대한 연구가 많이 수행되어 왔다(Georgen et al., 2001; Georgen 2014). 특히 호주-남극 중앙해령의 남쪽에는 short-lived Balleny 열점 이 존재하고, KR1과 KR2 사이에는 360 km 정도의 변환단층이 존재하고 있다. 이러한 열점, 변환단층, 그리고 중앙해령 사이의 상관관계 분석을 위해서는 전산 지구동역학적 접근방법을 모색해야 한다. 상대적으로 광역적인 지역에 대한 정 밀 지구물리 자료획득이 짧은 시간 동안에 이루어질 수 없으므로 간접적인 연구 방법을 통해 상호작용에 대한 검증작업을 수행해 볼 필요가 있다. 또한 2016-2017년에 걸쳐 아라온호를 활용하여 수행된 실해역 탐사자료를 활용하여 이러한 연구 수행을 위한 기초자료로 활용하고자 한다.

제 6 장 참고문헌

- Boettcher, M. S., and T. H. Jordan (2004), Earthquake scaling relations for mid-ocean ridge transform faults, J. Geophys. Res., 109, B12302, doi:10.1029/2004JB003110.
- DeMets, C., R. G. Gordon, D. F. Argus, and S. Stein (1994), Effect of recent revisions to the geomagnetic reversal time scale on estimates of current plate motions, Geophys. Res. Lett., 21(20), 2191–2194.
- Detrick, R. S., J. M. Sinton, G. Ito, J. P. Canales, M. Behn, T. Blacic, B. Cushman, J. E. Dixon, D. W. Graham, and J. Mahoney (2002), Correlated geophysical, geochemical and volcanological manifestations of plume-ridge interaction along the Galapagos Spreading Center, Geochem. Geophys. Geosyst., 3(10), 8501.
- Dickson, G. O., W. C. Pitman, and J. R. Heirtzler (1968), Magnetic anomalies in the South Atlantic and ocean floor spreading, J. Geophys. Res., 73(6), 2087–2100.
- French, S. W., and B. Romanowicz (2015), Broad plumes rooted at the base of the Earth's mantle beneath major hotspots, Nature, 525(7567), 95–99, doi:10.1038/nature14876.
- Gale, A., C. A. Dalton, C. H. Langmuir, Y. Su, and J.-G. Schilling (2013), The mean composition of ocean ridge basalts, Geochem. Geophys. Geosyst., 14.
- Georgen, J. E. (2014), Interaction of a mantle plume and a segmented mid-ocean ridge: Results from numerical modeling, Earth Planet. Sci. Lett., *392*, 113–120.
- Georgen, J. E., J. Lin, and H. J. B. Dick (2001), Evidence from gravity anomalies for interactions of the Marion and Bouvet hotspots with the Southwest Indian Ridge: effects of transform offsets, Earth Planet. Sci. Lett., 187, 283–300.
- Hanan, B. B. et al. (2013), Pb, and Hf isotope variations along the Southeast Indian Ridge and the dynamic distribution of MORB source domains in the upper mantle. Earth Planet. Sci. Lett. 375, 196–208.
- Honsho, C., J. Dyment, K. Tamaki, M. Ravilly, H. Horen, and P. Gente (2009), Magnetic structure of a slow spreading ridge segment: Insights from

near-bottom magnetic measurements on board a submersible, J. Geophys. Res., 114, B05101.

- Hooft, E. E., and R. S. Detrick (1995), Relationship between axial morphology, crustal thickness and mantle temperature along the Juan de Fuca and Gorda Ridges, J. Geophys. Res., 100, 22,499–22,508.
- Ito, G., and M. D. Behn (2008), Magmatic and tectonic extension at mid-ocean ridges: 2. Origin of axial morphology, Geochem. Geophys. Geosyst., 9(9), Q09012.
- Kim, S.-S., and P. Wessel (2010), Flexure modelling at seamounts with dense cores, Geophys. J. Int., 182, 583–598.
- Kuo, B.-Y., and D. W. Forsyth (1988), Gravity anomalies of the ridge-transform system in the South Atlantic between 31 and 34.5° S: Upwelling centers and variations in crustal thickness, Mar. Geophys. Res., 10, 205–232.
- Langmuir, C. H., and W. Broecker (2012), How to Build a Habitable Planet: The Story of Earth from the Big Bang to Humankind, Princeton University Press.
- Lin, J., G. M. Purdy, H. Schouten, J.-C. Sempere, and C. Zervas (1990), Evidence from gravity data for focused magmatic accretion along the Mid-Atlantic Ridge, Nature, 344, 627–632.
- McNutt, M. (1986), Nonuniform magnetization of seamounts: a least squares approach, J. Geophys. Res., 91, 3686–3700.
- Mendel, V., M. Munschy, and D. Sauter (2005), MODMAG, a MATLAB program to model marine magnetic anomalies, Computers & Geosciences, 31(5), 589–597.
- Mittelstaedt, E., and G. Ito (2005), Plume-ridge interaction, lithospheric stresses, and the origin of near-ridge volcanic lineaments, *Geochem. Geophys. Geosyst.*, *6*, Q06002.
- Muller, R. D., M. Sdrolias, C. Gaina, and W. R. Roest (2008), Age, spreading rates, and spreading asymmetry of the world's ocean crust, Geochem. Geophys. Geosyst., 9(4), Q04006.
- Parker, R. L. (1991), A theory of ideal bodies for seamount magnetism, J. Geophys. Res., 96, 16101–16112.

- Pitman, W. C., E. M. Herron, and J. R. Heirtzler (1968), Magnetic anomalies in the Pacific and sea floor spreading, J. Geophys. Res., 73(6), 2069–2085.
- Rogers, A. D., P. A. Tyler, D. P. Connelly, J. T. Copley, R. James et al. (2012), The Discovery of New Deep-Sea Hydrothermal Vent Communities in the Southern Ocean and Implications for Biogeography, PLoS Biol 10(1): e1001234.
- Sager, W. W., A. J. Lamarche, and C. Kopp (2005), Paleomagnetic modeling of seamounts near the Hawaiian-Emperor bend, Tectonophysics, 405, 121-140.
- Sandwell, D. T., and W. H. F. Smith (1997), Marine gravity anomaly from Geosat and ERS-1 satellite altimetry, J. Geophys. Res., 102(B5), 10,039-10,054.
- Sandwell, D. T., and W. H. F. Smith (2009), Global marine gravity from retracked Geosat and ERS-1 altimetry: Ridge segmentation versus spreading rate, J. Geophys. Res., 114, B01411.
- Sandwell, D., E. Garcia, P. Wessel, M. Chandler, and W. H. F. Smith (2013), Toward 1-mGal accuracy in global marine gravity from CryoSat-2, Envisat, and Jason-1, The Leading Edge, 32(8), 892–899.
- Scheirer, D. S., D. W. Forsyth, J. A. Conder, M. A. Eberle, S.-H. Hun, K. T. M. Johnson, and D. W. Graham (2000), Anomalous seafloor spreading of the Southeast Indian Ridge near the Amsterdam–St. Paul Plateau, J. Geophys. Res., 105(B4), 8243–8262.
- Shaw, P. R., and J. Lin (1993), Causes and consequences of variations in faulting style at the Mid-Atlantic Ridge, J. Geophys. Res., 98(B12), 21,839–21,851.
- Shaw, W. J., and J. Lin (1996), Models of ocean ridge lithospheric deformation: Dependence on crustal thickness, spreading rate, and segmentation, J. Geophys. Res., 101(B8), 17,977–17,993.
- Staudigel, H., and D. A. Clague (2010), The geological history of deep-sea volcanoes: Biosphere, hydrosphere, and lithosphere interactions, Oceanography, 23(1), 58–71.
- Vine, F. J., and D. H. Matthews (1963), Magnetic anomalies over oceanic ridges, Nature, 199(4897), 947–949.

Wessel, P., and W. H. F. Smith (1998), New, improved version of Generic Mapping Tools released, Eos Trans., AGU, 79(47), 579.

