

BSPE16160-078-12

로스해 북부 서남극 열개구조의
지체구조 연구를 위한 기획연구



한국해양과학기술원
부설극지연구소

제 출 문

극지연구소장 귀하

본 보고서를 “로스해 북부 서남극 열개구조의 지체구조 연구를 위한 기획연구” 과제의 최종보고서로 제출합니다.



참 여 연 구 원 : 진 영 근, 강 승 구,

박 용 철, 윤 숙 영,

김 영 균, 김 형 준,

서 나 리, 이 임 교,

이 지 연

충 남 대 학 교 : 유 용 재

공 주 대 학 교 : 김 형 래

보고서 초록

과제관리번호	PE16160	해당단계 연구기간	2016.2.19.~5.31	단계 구분	(1단계) / (총1단계)
연구사업명	증 사업 명				
	세부사업명	기본연구사업(연구정책지원사업)			
연구과제명	증 과 제 명				
	세부(단위)과제명	로스해 북부 서남극 열개구조의 지체구조 연구를 위한 기획연구			
연구책임자	홍종국	해당단계 참여연구원수	총 : 12명 내부 : 5명 외부 : 7명	해당단계 연구비	정부: 5,000천 원 기업: 0천 원 계: 5,000천 원
연구기관명 및 소속부서명	극지연구소/지구시스템연구부	참여기업명			
국제공동연구	상대국명 :	상대국연구기관명 :			
위탁 연구	연구기관명 :	연구책임자 :			
요약(연구결과를 중심으로 개조식 500자이내)				보고서 면수	

- 서남극 열개구조는 남극대륙에서 가장 중요한 지체구조로서 로스해의 경계부는 서남극 열개구조의 시발점이자 남극횡단산맥과 접하고 있는 경계부
- 로스해 주변의 서남극 열개구조를 정확하게 이해하기 다양한 방법의 지질·지구물리 조사를 통하여 광역 지체구조, 상세한 지각구조 및 지각활동, 이들에 야기시키는 지하물질에 대한 물성 등 종합적인 연구가 필요
- 이를 위하여 설정한 세부연구 목표와 연구방법은 다음과 같다.

- 
- 1) 로스해 인근 서남극 열개구조의 광역 지체구조 연구
 - 항공-해상-인공위성 중력자료를 이용한 빅토리아랜드 및 로스해 지각의 두께 및 내부구조 연구
 - 서남극 경계대의 자력이상값을 통한 지구조 연구 : 빅토리아랜드와 월크스분지
 - 2) 심부 지각구조 및 지각활동성 연구
 - 해저면 지진계 (OBS) 탐사를 이용한 Terror Rift 구조연구
 - 수중음향데이터 분석을 통한 서남극 발레니군도 주변 화산활동 관측
 - 탄성파 탐사자료를 이용한 남극 로스해 외대륙경계부 지체구조 연구
 - 지구물리 관측망을 이용한 맨틀구조 및 지각활동성 연구
 - 3) 열개구조에서의 지질학적인 물성연구
 - 서남극 Adare Trough 주변의 지열특성 연구
 - 맨틀포획암의 미세구조 및 화학성분 분석을 통한 서남극 열개구조 진화의 이해
 - 서남극 열개구조의 화성암과 퇴적물에 내재된 Spinel 광물의 자화특성 규명 연구

색 인 어 (각 5개 이상)	한 글	서남극 열개구조, 로스해, 지체구조, 해저면 지진계, 지열
	영 어	West Antarctic Rift System, Ross Sea, Tectonic structure, Ocean Bottom Seismometer, geothermal

요약문

I. 제목

로스해 북부 서남극 열개구조의 지체구조 연구를 위한 기획연구

II. 연구개발의 목적 및 필요성

1. 배경

- 서남극 열개구조는 남극대륙의 진화과정을 이해하는데 가장 중요한 지체구조이나 대부분 빙상, 해빙으로 덮여있어 연구활동에 많은 제약
- 로스해 주변은 서남극 열개구조의 시발점이자 남극횡단산맥과 접하고 있는 경계부로 빙상에 덮여있는 육상 지역에 비하여 서남극 열개구조를 진화과정을 이해하는데 적합한 위치
- 극지연구소가 운영하고 있는 쇄빙선 아라온호, 장보고 과학기지 등의 인프라를 활용하여 연구를 수행하기에 유리한 위치

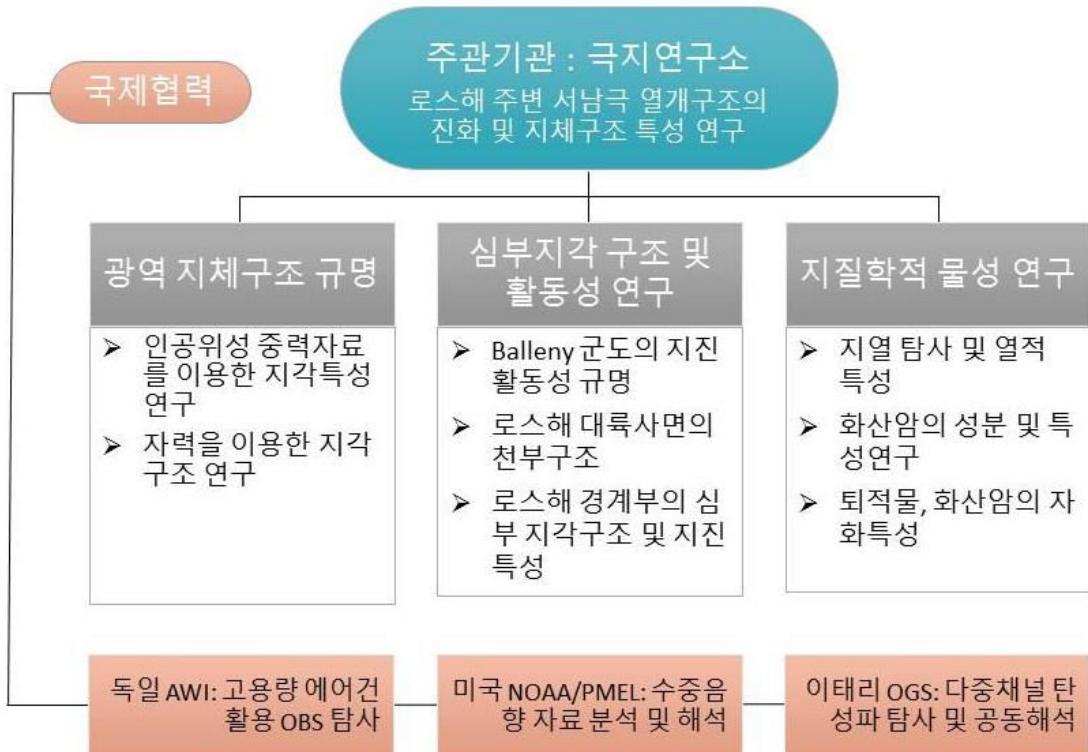
2. 필요성

- 서남극 열개구조를 정확하게 이해하기 위하여서는 일부 지각구조의 기하학적인 형상, 열개구조 주변에서 발생하고 있는 지각활동, 그리고 지질학적인 물성에 대한 전반적인 이해가 부족하여 열개구조에 대한 논란이 가중되고 있음
- 기기주변의 지진안정성을 확보하고 극각의 기본계획에 부합하기 위하여 남극 지각연구에 대한 수요 발생
- 국제적인 남극프로그램과 연계하여 적극적인 연구활동을 수행함으로써 남극연구에서의 수월성 및 주도권 확보

3. 비전 및 목표

- 남극 로스해의 주요 지체구조인 서남극 열개구조의 특성을 파악함으로써 장보고 기지 주변의 연구활동의 국제적인 수월성 확보와 타국과의 국제협력 연구를 통하여 남극연구의 주도권 확보
- 로스해 주변 서남극 열개구조, 발레니 군도 인근의 해양지질·지구물리 자료를 획득·분석을 수행하고 다양한 연구방법을 활용하여 열개구조의 지체구조의 형태, 신기지체구조 활동성, 지질학적인 물성에 대한 심도있는 연구를 통하여 서남극 열개구조의 특성과 진화과정을 이해
- 이를 수행하기 위한 추진체계로는 1) 열개구조의 기하학적인 형태를 주로 연구하는 지각 및 지체구조, 2) 현재 및 과거의 활동성을 연구하는 신기지체구조 활동성, 3) 열개구조에서의 지질학적인 물성연구 등 3개 핵심 연구분야를 설정하고 분야별 주된 연구활동 분야를 설정하고 각각의 연구방향을 설정

- 추진체계



III. 연구개발의 내용 및 범위

1. 로스해 인근 서남극 열개구조 광역지체구조 연구

- 중자력 탐사자료는 인공위성, 해상, 육상, 그리고 항공에서 자료를 확보가 가능하므로 남극에서는 다른 탐사방법에 비하여 많은 양의 자료확보가 가능함. 외국 등지에서 이미 확보된 자료를 이용하여 광역적인 지체구조 연구에 활용
- 아라온 중력계 자료의 검교정 및 정확도 기법 연구, 로스해-빅토리아랜드 중력이상도 작성, 중력 이상을 이용한 지각 두께 산출 그리고 Terror Rift 횡단 측선을 따른 선상-항공 중력 탐사 자료 역산을 통하여 빅토리아랜드 및 로스해 지각의 두께 및 내부구조 연구 수행
- ADMAP-2 자료를 이용하여 지구조 파악, Swarm자료를 이용하여 남극 위성 자기이상도 제작, 위성자기이상도를 통한 항공 자기이상 보완하여 Marie Byrd Land 지역과 Victoria Land 지역의 지구물리 두께를 연구하고 서남극주변의 지구물리자료의 고지형 복원 및 해석에 활용

2. 로스해 인근 경계면에서의 지각 구조 및 활동성 연구

- OBS, 수중음향, 탄성파 탐사, 해저면 지진계, 육상 지진계 등을 활용하여 연구수행
- 독일 AWI와 공동으로 대용량 에어건을 이용한 해저면 지진계 탐사를 수행하여 Terror Rift의 심부구조를 밝히고 지진파 속도모델을 규명
- 기존에 확보한 수중음향데이터를 분석하고 이를 통하여 서남극 발레니군도 주변 화산활동 관측함. 또한 서남극 Balleny 군도 인근에서의 상세지진활동성 분석하고 추적이 가능한 다

각적인 음원분석하여 빙권 및 해양생물의 거동 관찰

- 이탈리아 연구선 OGS Explora)을 이용한 2016-2017 남극 로스해 탐사에 참여하여 탄성파 탐사자료 획득하고 탄성파 단면상에 나타나는 음향기반암을 규정하고, 기존 연구결과와 결합하여 남극 로스해 외대륙경계부에 대한 지체구조도 작성. 이를 이용하여 서남극 열개구조의 특성과 발달과정 유추
- 광대역 해저면 지진관측망을 구축하여 획득한 자료를 활용하여 지각 및 맨틀의 속도구조 규명함. 또한 지진발생 현황분석을 이용한 서남극 열개구조의 지진활동성 양상을 파악

3. 서남극 열개구조의 지질학적 물성연구

- 기준에 획득한 서남극 열개구조 인근 지역에서 획득한 지열 자료와 추가로 지열자료를 확보하여 Adare Trough 및 로스해 북부의 지열 특성을 밝힘. 또한 이들을 이용하여 지각의 발달과정 이해
- 로스해 북부 신생대 해저화산활동으로 형성된 화산암에 존재하는 맨틀포획암의 미세구조 및 화학성분 분석을 수행. 특히, 감람석과 다른 광물들 간의 위상관계 규명하고 암석의 변성 및 변형온도, 광물의 CPO 연구하며 CPO의 미세구조 지수각도(Fabric Index Angle) 측정하여 맨틀의 진화과정 연구
- 연구지역내 화성암과 퇴적물을 확보하여 내재된 Spinel 광물의 자화특성을 분석하여 퇴적당시의 자기장 특성에 따른 지각의 확장 및 화성암 형성당시의 암석학적인 환경을 규명

IV. 연구개발 기대효과

- 서남극 열개구조를 포함한 지역에 광역지체구조 특성연구를 통하여 고지형 복원을 함으로써 열개구조 진화를 밝히는데 활용
- 장보고 과학기지가 위치한 로스해 연안에서의 지각활동성에 대한 연구결과는 지진, 화산폭발, 해일 등의 자연재해로부터 안전하게 기지를 운영하는데 유용한 기초자료로서 활용됨
- OBS탐사를 통하여 높은 S/N비의 신호와 모드전환파(S파)를 기록할 수 있으므로 암상의 규명, 공극내 유체의 판별 및 크랙의 분포 규명 등과 같은 대상 지역에 대한 보다 심화된 지체구조의 연구가 가능하며 일반적인 다중채널 탐사자료보다 깊은 (모호면 인근까지) 지역에 대한 정보 제공
- 서남극 열개구조의 연장선에 대한 이견이 많이 있으나, OBS를 이용한 심부지각 연구로 서남극 열개구조에 대한 정확한 이해 가능
- 지각 지자기 이상을 통한 발달과정이 알려져 있으나, 지각 하부의 열구조가 규명된 적은 없음. 지열구조를 분석하여 알려진 확장시기 이후 지각 하부 거동을 규명할 중요한 자료를 제시할 수 있음
- 화산암에 대한 새로운 분석기법을 적용함으로써 맨틀의 기원 및 형성당시의 상태를 파악

V. 연구개발결과의 활용계획

1. 연구성과 확산

- 연구결과를 저명 학술지(SCI/SCIE급)에 연평균 5편의 논문을 생산
- 국제공동 연구기관과 공동 연구, 인적 교류를 통하여 성과물 양산체계 구축

2. 빙권변화 및 기후변화 예측에 활용

- 연구자료를 활용하여 로스해 인근의 빙권변화 연구에 필요한 지각활동성 자료 제공
- 탄성파 탐사자료를 이용한 퇴적층 연구결과를 제공하여 로스해에서 추진하고 2018 IODP 시추시 보다 정밀한 분석결과 도출에 활용



목 차

제 1 장 서론	8
1-1. 연구개발 목적 및 필요성	8
1-2. 연구개발 내용 및 범위	14
제 2 장 국내외 기술개발 현황	30
2-1. 국내동향	30
2-2. 국외동향	36
제 3 장 연구개발수행 내용 및 결과	44
3-1. 연구개발 목표 및 내용	44
3-2. 연구개발 수행결과	59
제 4 장 연구개발결과의 활용계획	62
4-1. 향후 연구방향	62
4-2. 국·내외 공동연구 추진계획	66
4-3. 연구개발 사업규모	67
4-4. 총 연구기간 로드맵	67
4-5. 인프라 활용 로드맵	68
제 5 장 연구개발과정에서 수집한 해외과학기술정보	69
제 6 장 참고문헌	72

본 문

제 1 장 서론

1-1. 연구개발 목적 및 필요성

1. 배경

가. 서남극 열개구조의 중요성

- 남극 대륙을 동남극 대륙과 서남극 대륙으로 구분하는 지구상에 가장 큰 구조중의 하나로 남극에서 가장 중요한 지체구조임. 그러나 대부분의 지역이 빙상과 해빙으로 덮여 있어 정확한 구조나 특성에 대한 연구가 미흡
- 서남극열개구조의 로스해 부분에서는 주로 남-북 방향 주향의 분지들과 단층이 발견된다 (Granot et al., 2010). 로스해 북쪽의 Adare Trough와 Central Basin 또한 같은 지형학적 요인을 가지고 있으며, 아직 그 열개구조가 알려진 바 없음
- 서남극 열개구조 (the West Antarctica Rift System)는 Cretaceous 이후로 확장하여 동, 서남극의 경계가 되었으며(Behrendt et al., 1991), 남극의 빙상의 성장, Transantarctic Mountains의 삭박, 그리고 전지구적인 판구조 활동 복원을 이해하는데 있어 아주 중요한 부분을 차지 함(그림 1)
- 로스해는 서남극열개구조의 서북극 부분에 해당하며, 대체적으로 남-북 방향의 주향을 갖는 몇 개의 해양지각분지와 신장된 대륙지각분지로 구성되며 분지들은 좁은 대륙 지각 고지대로 구분됨

나. 주요 과학적인 이슈

- 열개구조내의 확장은 Transantarctic Mountains을 향한 서쪽 방향으로의 연속된 열개구조로 채워졌으며, 주로 Cenozoic동안 진행(Wilson, 1995; Cande et al., 2000, Granot et al., 2013)중이며, 열개 시스템의 서쪽 경계는 50-40 Ma에 용기된 Transantarctic Mountain (Fitzgerald, 2002)임
- 지자기 이상을 바탕으로 밝혀진 Adare Trough의 확장을 고려하면, 전지구 판구조 활동 복원과정에서 지자기 아노말리 200 (~43Ma)시기에 존재하던 태평양판-호주판 사이의 150 km정도의 간격이 사라짐(Cande et al., 2000).

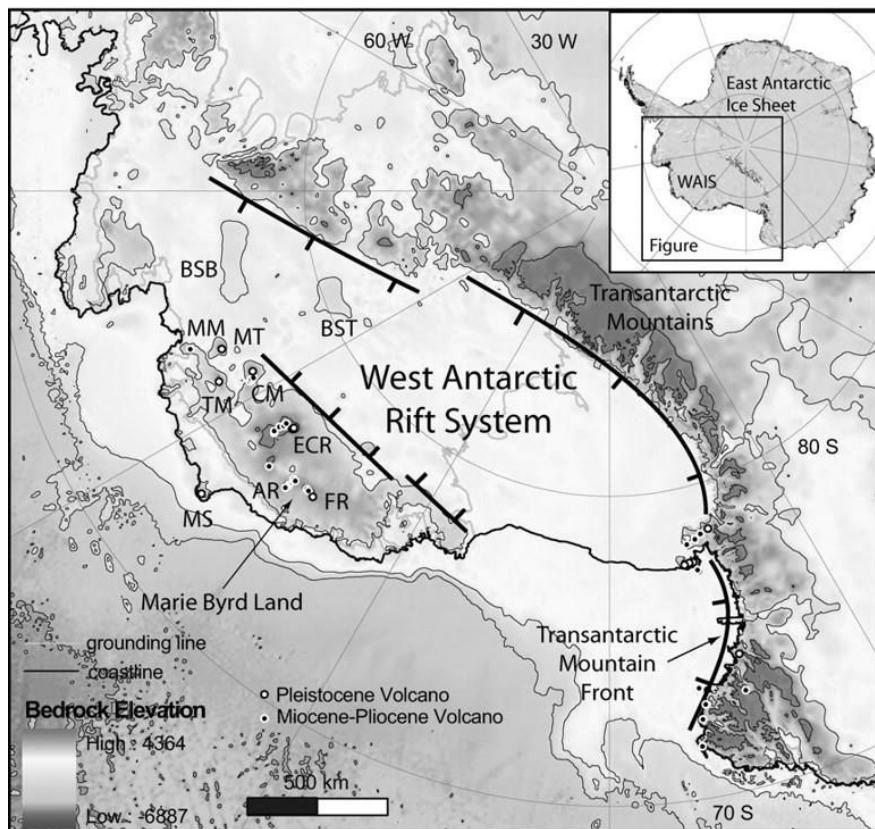


그림 1. 서남극 열개구조 (T. Paulsen and T. Wilson, 2010)

- Adare Trough가 Cenozoic 동안의 전지구조 적인 판구조 복원과 서남극 열개구조의 이해에 있어 중요한 고려점임을 시사하지만 Adare Trough의 지각구조를 비롯하여, 열구조, 비대칭 확장속도 등에 대해서는 밝혀진 바가 없음.
- 서남극 열개구조 중 남위74 이하의 지각구조는 심부 탄성파, 중력, 지형 자료들로써 모호면 깊이(지하 약 20 km)와 기반암의 깊이(지하 15~10 km)가 밝혀졌으나, Adare Trough부터 남위 74까지의 지각구조는 충분히 밝혀져 있지 않았음(Busetti et al., 1999; Dietmar et al., 2005).
- 남극 로스해 외대륙 경계부의 Central Basin과 Hillary Canyon 지역은 서남극 열개구조 (WARS)의 진화와 관련하여 대륙지각이 분리된 시기를 규정해 줄 수 있는 주요한 지역이며, 서남극 열개구조의 진화 연구를 통해 신생대 남극 대륙빙상의 성장과의 연관성을 이해하고, 전지구적인 판구조 운동에 대한 이해에 기여할 수 있을 것으로 기대(Civile, 2016).

다. 로스해 주변 연구의 용이성

- 2014년 장보고 기지 건설 이후 기지의 연구 및 보급지원을 위하여 쇄빙선 아라온호가 매년 2회 이상 방문하고 있음
- 2009년 쇄빙선의 건조 이후, 쇄빙선을 이용한 연구소의 남극 연구 프로그램은 어느 정도 정착되어 격년으로 로스해 주변 연구 활동을 하고 있음

- 쇄빙선 아라온호는 탄성파 탐사장비를 비롯한 다양한 지구물리 연구장비를 비롯하여 해양자료를 획득할 수 있는 시설이 장착되어있어 로스해를 기반으로한 지질지구물리 연구를 지원할 수 있는 체계가 이루어져 있음

2. 연구의 필요성

가. 과학적 측면

1) 열개구조 주변 지체구조의 기하학적인 형태

- 로스해에 대한 지각구조 연구는 주로 대륙붕에 국한되어 많은 탄성파 탐사가 이루어져 왔으며 Adare Trough 주변의 지각구조에 대한 연구도 이루어진 바 있음
- 그러나 심부에서 열개구조의 구조선이 정확하게 어디에 위치하는지, 지각의 형태가 어떻게 존재하는지는 아직까지도 많은 논란이 있어왔음. 또한 열개구조의 북쪽 경계에 해당하는 판의 접경부에서 생성되고 소멸되는 지각판의 상호관계가 아직까지 명확하게 규명되지 않았음
- 남극판과 호주판 중간지역, 로스해의 지각 구조는 중력자료를 이용하여 연구된바 있으나 아직 논란의 여지가 많음. 그러나, 중력을 이용한 방법은 심부지각 2차원 단면을 정확히 알아내기에는 부족하므로 새로운 방법의 적용이 필요함

- OBS 탐사는 굴절파를 이용하여 지각구조를 밝히는 것으로 심부의 속도구조를 밝히는 가장 효과적인 방법중의 하나임

2) 열개구조 주변 신기지체구조 활동성

- 판의 경계부에서 현재 또는 신생대에 발생하고 있는 지진, 단층의 기록은 열개구조의 활동성을 보여주므로 미래 어떠한 방향으로 진화할수 있는지에 정도를 제공함. 기존연구를 통하여 빌레니군도에서 획득한 수중음향자료를 확보하였으며 자료 분석을 통하여 다양한 지각활동 연구 가능
- 장보고 기지건설 이후 기지 주변에 설치된 지진계에 많은 지진이 기록되고 있음. 이들 자료 중에서 열개구조 경계부에서 발생하고 있는 자료를 확보하여 현재의 지진활동성 파악 가능. 또한 해저면 지진계를 열개구조 인근에 설치하여 열개구조 주변에서 발생하고 있는 지진활동 모니터링 필요
- 서남극 열개구조를 덮고 있는 로스해에서 발생하는 지진은 탄성파 자료에 작은 단층들로 기록되고 있음. 로스해에서 확보한 탄성파 자료를 이용하면 지질시대의 지질활동성을 연구할 수 있음

3) 열개구조 주변 지질학적 물성 파악

- 서남극 열개구조는 대부분 빙상 또는 퇴적물로 덮여있어 그 물성을 파악하는데 어려움이 많음

- 열개구조 활동시 하부에서 생성되는 암석의 조성을 파악하는 것은 열개구조의 진화를 연구하는데 필수적임. 이를 위하여 암석을 채취하고 분석하는 것이 필요
- 열개구조의 열적 특성은 판의 확장과 암석학적인 특성을 모두 반영함. 그러므로 열개구조 주변에 지열값을 측정하여 지각판의 확장과 진화 연구 가능. 그러나 이와 같은 지열연구를 수행할 수 있는 기관이 많지 않으나, 극지연구소는 지열측정 장비 및 관련 노하우를 갖추고 있어 지열연구에 유리한 상황

나. 사회·문화적 측면

1) 기지활동시 안전확보

- Balleny 군도 인근은 매년 규모 5.0 이상의 지진이 10개 이상 발생하는 지역으로 거대 규모의 지진발생시 남극 해안가에 위치한 남극 장보고 기지에 해일 등에 재해발생 가능성이 있으므로 이에 대한 관측 및 대비 필요
- 수중음향 자료를 이용하여 미세한 지진활동까지 밝힘으로써 이 지역의 상세한 지진위험성을 밝히고자 함

2) 국가 기본계획 부합

- 「제2차 남극연구활동진흥기본계획」/(국토해양부,'12.12월)의 세부목표 “남극연구활동의 글로벌수준 도약”을 위한 8대 중점과제중 “극지연구영역 다변화를 위한 남극대륙 연구”, ”실용 가능한 응용연구 및 미답지 조사(2-3)”에 부합하는 성과목표

3) 국제 남극프로그램 연계성

- 남극의 지체구조 규명과 지진활동성 연구를 위한 SCAR 산하 SERCE 프로그램과 연계되며, 남극 지각의 구조 및 지구조 활동 연구와 연관
- SCAR에서 제시한 7개 주제중 “Dynamic Earth - Probing beneath Antarctic Ice”的 소주제 37의 남극해의 지각 및 맨틀구조에 부합함

3. 연구의 목표

가. 비전

- 남극 로스해의 주요 지체구조인 서남극 열개구조의 특성을 파악함으로써 장보고 기지 주변의 연구활동의 국제적인 수월성 확보와 타국과의 국제협력 연구를 통하여 남극연구의 주도권 확보

나. 목표

- 로스해 주변 서남극 열개구조, 빌레니 군도 인근의 해양지질·지구물리 자료를 획득·분석을 수행
- 다양한 연구방법을 활용하여 열개구조의 지체구조의 형태, 신기지체구조 활동성, 지질학

적인 물성에 대한 심도있는 연구 수행

- 이를 통하여 서남극 열개구조의 특성과 진화과정을 이해

다. 추진체계

- 서남극 열개구조의 연구를 위하여 1) 열개구조의 기하학적인 형태를 주로 연구하는 지각 및 지체구조, 2) 현재 및 과거의 활동성을 연구하는 신기지체구조 활동성, 3) 열개구조에 서의 지질학적인 물성연구 등 3개 핵심 연구분야를 설정
- 분야별 주된 연구활동 분야를 설정하고 각각의 연구방향을 설정

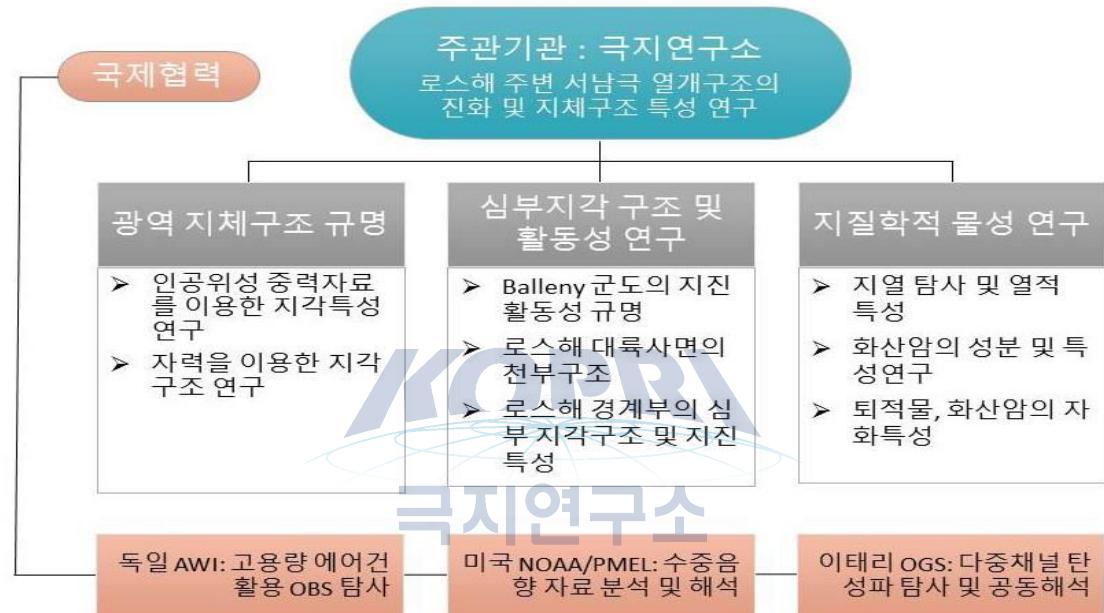


그림 2. 과제 추진 전략

- SWOT 분석

강점 (Strength)	약점 (Weakness)
<ul style="list-style-type: none"> • 지난 3년간의 연구를 통하여 관련기술 축적 • 쇄빙연구선 아라온 및 장보고 기지 건설 등 연구 인프라 확보 • 국제공동 협력을 통하여 탐사계획 및 연구준비 완료 <ul style="list-style-type: none"> - OBS탐사 - 독일 AWI - 탄성파 탐사 - 이태리 OGS - 수중음향 탐사 - 자료 기획보 	<ul style="list-style-type: none"> • 한정된 재원으로 연구를 수행할 경우, 연구활동의 효율성 저하 우려 • 남극의 특수성으로 극지연구의 국내영향력과 효과가 제한적 • 극지연구의 장기적인 연구추진의 중요성과 시급성에 대한 인식 부족
기회 (Opportunities)	위협 (Threats)
<ul style="list-style-type: none"> • 로스해에서의 꾸준히 연구를 수행한 결과, 국제협력활동이 강화되고 선진 각국과 공동연구 기회 증가 • 극지활동진흥법 제정에 따른 체계적인 연구 수행 가능 • 쇄빙선의 로스해 방문이 정기화됨에 따라 로스해에 대한 연구활동 기회 증가 	<ul style="list-style-type: none"> • 기상, 해빙 등 자연환경 변화에 따른 탐사 수행의 불확실성 상존 • 정해진 기간에 탐사 수행 불가시 대체 가능한 자료 확보의 어려움 • 쇄빙선 아라온에 대한 수요 증가로 용선일수 확보의 어려움

표 1. SWOT 분석표

극지연구소

1-2. 연구개발 내용 및 범위

1. 로스해 인근 서남극 열개구조의 광역 지체구조 연구

가. 항공-해상-인공위성 중력자료를 이용한 빅토리아랜드 및 로스해 지각의 두께 및 내부구조 연구

- 남극에서의 중력자료 관련 지구 내부 구조 연구는 크게 인공위성 중력 자료를 기반으로 하는 광역적인 연구와 육상-해상-항공 중력 탐사 자료를 이용한 지각 혹은 분지 규모의 연구로 나뉨.
- 남극의 특수성으로 인해 현장 중력 탐사 자료가 희박하거나 불규칙하여 인공위성 (GRACE, GOCE, LAGEOS) 기술을 이용한 범지구 중력 모델을 이용하여 남극의 모호 면 깊이 (Block et al., 2009), 지각 탄성 두께(McKenzie et al., 2015) 등을 추정.
- 일반적으로 GRACE 인공위성 중력 자료는 ~115–125km의 해상도를 가지며 GOCE 위성 중력자료는 ~70–80 km의 해상도로 나타낼 수 있으며, 이는 약 5–8km의 해상도인 항공 중력 자료에 비하여 해상도가 낮기 때문에 지각 내부 지체 구조를 연구하는데는 어려움이 있음.
- 최근 여러 위성 자료의 복합 처리를 통해 약 10km 해상도의 범지구 중력 모델들이 산출되고 있으며(Forste et al., 2015, Hirt et al., 2016) 이러한 결과의 활용을 통해 보다 세밀한 지각구조 해석이 시도되고 있는 상황임.

나. 서남극 경계대의 자력이상값을 통한 지구조 연구 : 빅토리아랜드와 월크스분지

- 서남극 지역의 항공 및 위성 자력이상값 연구를 통하여 복잡하고 풀리지 않은 서남극의 열개구조 해석을 위한 실마리를 제공.
- 대부분 두꺼운 빙하로 덮여있는 남극지역에서 자력자료는 빙하 밑 지각의 특징을 파악하는 중요한 자료이며 위성자료를 통해 광역적 해석을 가능케 함.
- 새로 획득한 항공자력자료 및 위성자력자료를 이용한 서남극지역 자력 이상 연구가 가능하게 되어 이에 대한 연구 필요.
- 특히, 항공자료가 부족한 Marie Byrd Land 지역과 상대적으로 많은 지질자료가 있는 Victoria Land 지역의 자력이상과 지각두께와의 관계를 통해 지구조 연구가 요구됨.
- 새로운 지구물리 자료를 이용하여 남극 지각 자기 연구의 선점을 차지할 수 있음.

- 연구방법 :

- (1) **파워스펙트럼분석**은 모든 주파수에서 일정한 파워를 갖는 백색광의 스펙트럼원리를 이용하여 자료의 일부 혹은 전체를 푸리에 급수로 전개하여 파워스펙트럼을 구한 후, 자료의 주파수 특성을 분석하여 지하 물성변화가 존재하는 경계면의 평균심도를 구하는 방법으로, 지하에 존재하는 물성의 차이를 가정하지 않고도 심도계산이 가능.
- (2) **Werner deconvolution** 방법은 최초에 Werner에 의해 매우 얕은 판(thin dike)상의 구조 경우에 대해 심도를 계산하는 방법으로 사용되었으며, Ku와 Sharp(1983)에 의해 항공자력탐사를 이용하여 복잡한 지질구조에도 적용가능함을 보여 주어, 자력 이상값을 통한 큐리 등온깊이나 기반암까지의 퇴적두께를 예측하는 데 사용.
- (3) **위성자료처리는** 위성으로 획득한 자료는 궤도역학을 고려한 자료의 재배치 및 (파동수) 필터링과 지각성분만 추출된 자료에서 여러 구면좌표계의 지역화된 모델링(i.e., slepian 함수) 및 지사의 항공자료의 빈 부분을 채우기 위한 결합역산(joint inversion, Kim et al., 2004)을 활용하여 ADMAP-2에서 이상값이 비어있는 지역들을 위성자료를 통해 채워 넣을 수 있음.
- (4) **스레피안 모델링** 기법은 Slepian 구면함수(e.g., Simons et al, 2006)에서 일종의 공간 및 스펙트럼을 제한시킨 구면조화함수의 변형으로써 주어진 지역의 경계조건 안에서 그 신호가 최대가 되고 그 경계조건 밖에서는 신호가 최소가 되도록 하게 하는 다중원도우 필터기능의 함수임.

자력이상을 표현하는 평면 함수를 $f(\theta, \phi)$ 라 하고, θ 와 ϕ 를 위도 및 경도라 하면,

$$f(\theta, \phi) = \sum_{n=0}^N \sum_{m=-m}^n g_{nm} Y_{nm}(\theta, \phi)$$

(1)

로 표현되며 이 때 $Y_{nm}(\theta, \phi)$ 는 구면조화함수(spherical harmonic functions)이고, g_{nm} 은 조화함수의 계수(coefficient)라 할 수 있다. 이 때 조화함수의 차수(degree)와 계수(order)를 각각, n, m 으로 표시한다. 수치적으로 표현하기 위해 최대 차수는 N 으로 제한한다.

이러한 구면조화함수는 전지구를 경계조건으로 하며 다음과 같이 표현된다.

$$Y_{nm}(\theta, \phi) = C_{nm} P_{nm}(\cos\theta) e^{im\phi} \quad (2)$$

C_{nm} 은 정규화상수(normalization)이며, $P_{nm}(\cos\theta)$ 는 부르장드르 다항식(associated Legendre polynomials)이며, $e^{im\phi}$ 는 삼각함수의 오일러 표현이다. 이러한 구면조화함수는 라플라스 방정식의 구면좌표계에서의 일반해의 표현으로 자기장 역시 라플라스방정식을 만족함으로써 자기장의 표현식으로 사용된다.

이러한 식은 또한

$$\sum_{n=0}^N \sum_{m=-m}^n g_{nm} Y_{nm}(\theta, \phi) = \sum_{k=0}^{(N+1)^2} d_k s_k \quad (3)$$

으로 표현할 수 있는 데 이 때 사용되는 s_k, d_k 를 각각 구면 스페리안함수 (spherical slepian function)와 slepian 계수로 명명되며, slepian 함수의 경우 구면조화함수들의 선형 결합(linear combination)의 일종으로

$$s_k(\theta, \phi) = \sum_{n=0}^N \sum_{m=-m}^n s_{k,nm} Y_{nm}(\theta, \phi) \quad (4)$$

기준의 구면조화함수들을 새로이 조합하게 할 행렬인 $s_{k,lm}$ 을 적절히 구하여 표현한다. 이 행렬은 전체의 구면조합함수의 에너지와 원하는 지역(여기서는 Θ_0 을 반경으로 하는 구면캡 지역)에서의 에너지의 비(ratio)를 고유치(eigenvalue)로 하는 λ_k 를 다음과 같이 계산하여 구한다.

$$\lambda_k = \int_0^{2\pi} \int_0^{\theta_0} s_k^2(\theta, \phi) \sin \theta d\theta d\phi / \int_0^{2\pi} \int_0^{\pi} s_k^2(\theta, \phi) \sin \theta d\theta d\phi \quad (5)$$

즉, λ_k 를 고유치로 하는 고유벡터(eigenvector)들이 기저(basis)를 이루는 기저함수의 역할을 하며 $s_{k,lm}$ 를 형성한다. 따라서, 원하는 지역을 최대한 표현할 수 있는 기저함수의 개수는 λ_k 가 1에 가까운 숫자들을 보이는 고유벡터들의 개수를 통해 표현된다.

2. 심부 지각구조 및 지각활동성 연구

가. 해저면 지진계 (OBS) 탐사를 이용한 Terror Rift 구조연구

- 이번 연구에서는 스트리머를 이용한 다중채널 탄성파 탐사 뿐 아니라 해저면 지진계 (OBS)와 대용량 에어건을 활용하여 (그림 3) 탐사 측선 (그림 4) 내 심부 지층구조에 대한 연구를 수행할 수 있는 데이터 획득을 위한 탄성파 탐사를 수행하고자 함.
- 이를 통해 획득한 데이터는 신호처리 및 수치모델링 기법에 기반한 다양한 분석 알고리즘을 적용하여 분석함으로써 서남극 로스해 북부지역에서의 심부지각구조 (심부 해양지각의 경계 및 두께, 모호면의 깊이 등)를 규명하고, 심부지각구조에 대한 지구물리학적 정보를 제시함으로써 많은 이견이 있는 서남극 열개구조에 대한 정확한 이해가 가능할 것으로 기대.

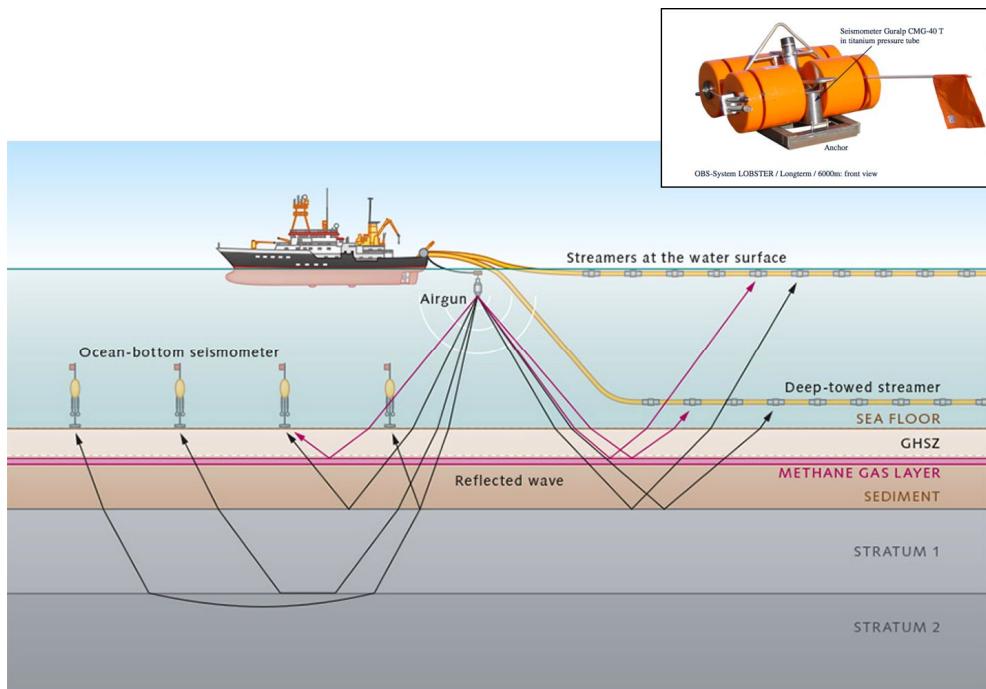


그림 3. 해저면 지진계 (OBS) 탐사 모식도

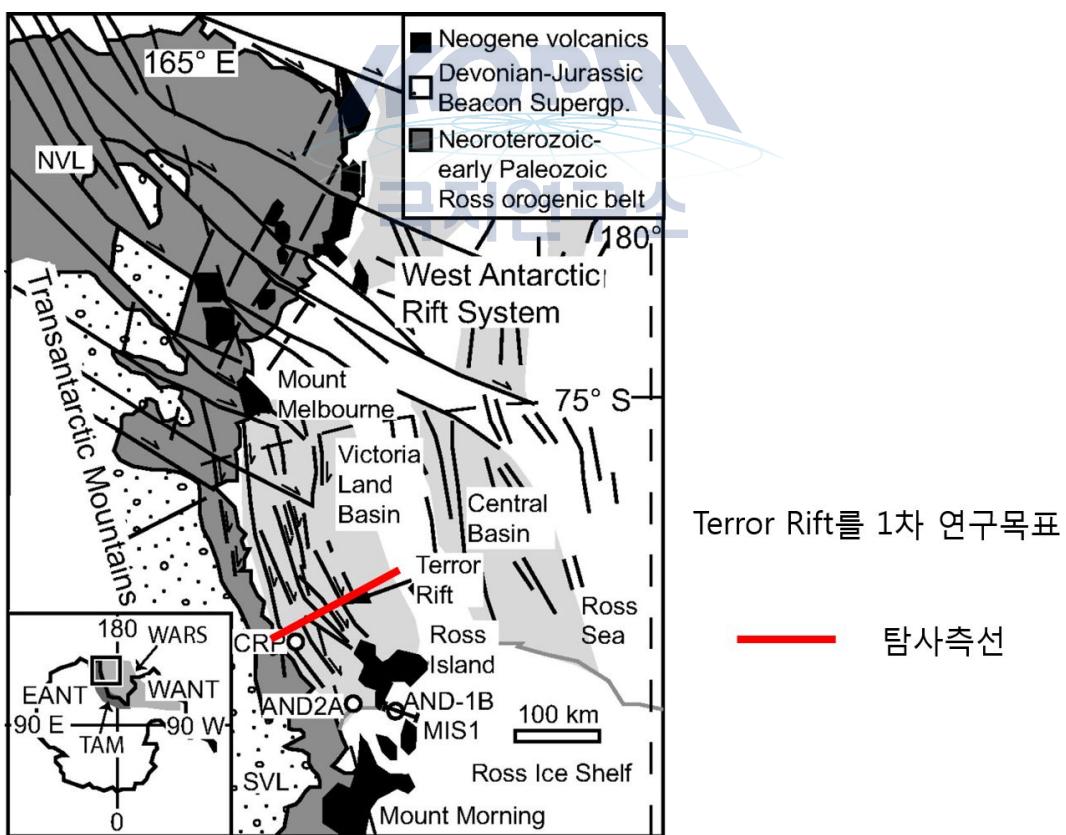


그림 4. 해저면 지진계를 이용한 탄성파 탐사 측선

- 독일 AWI와 국제공동연구 수행을 통해 해저면지진계 및 대용량 에어건 확보.
- 아라온호를 활용하여 로스해 북부 지역의 대륙붕을 확단하는 측선(그림 4)에서 해저면

지진계 및 다중채널 탄성파 탐사 수행.

- 획득한 데이터는 데이터처리(신호처리 및 굴절파 토모그래피)과정을 거쳐 해당 지역의 모호면 및 심부지각 지체구조에 대한 지구물리학적 정보 및 탄성파 단면 제공 (그림 4).
- 해저면 지진계 데이터는 수치해석학적 파동전파 모델링 기법과 파형역산 알고리즘에 적용하여 심부지체구조에 대한 고해상도 탄성파 속도모델 구축.

나. 수중음향데이터 분석을 통한 서남극 발레니군도 주변 화산활동 관측

- 남극 로스해 Balleny 군도 인근에서는 활발한 지진활동이 관측됨에 따라 서남극 열개구조 및 신기지체구조의 활동성의 관측을 위해 해당 지역에 대한 미세지진의 정밀한 관측이 필요
- 서남극 Adare Trough 주변에서 활발한 지진활동이 관측되고 있지만, 지역의 특성상 열악한 접근성 문제로 정밀한 지진활동 관측을 위한 연구활동이 아직 이루어지고 있지 않은 상황.
- 선행 연구과제 (서남극 열개구조 진화연구)에서는 지역의 특성상 접근이 열악한 서남극 Adare Trough 인근에서 쇄빙연구선 아라온호와 NOAA/PMEL에서 대여한 수중음향장비를 활용하여 해당지역 수중음향 데이터를 습득하였으며 (2016년 3월), 수중음향데이터의 분석을 위한 시스템 인프라를 구축함.

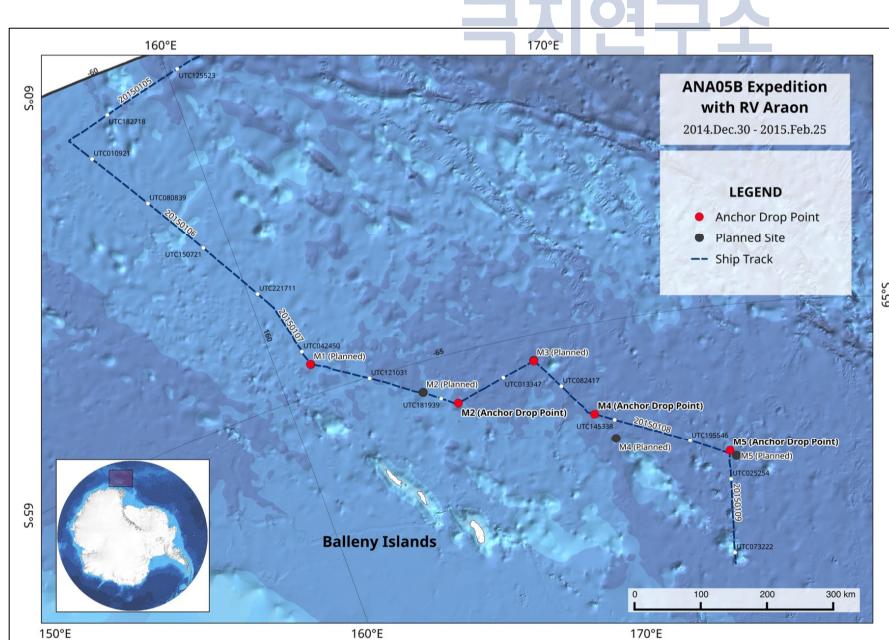


그림 5. 수중음향 장비 계류 위치

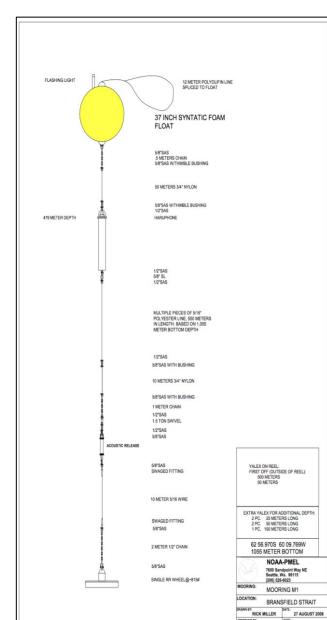


그림 6. 수중음향 장비

- 습득한 데이터를 성공적으로 분석해낸다면, 해당지역 신기지체구조활동의 패턴, 지각구조의 진화, 화산활동의 변화에 대한 정밀한 관측이 가능 함.
- 전 세계적으로 최고의 기술력과 연구경험을 보유한 미국 NOAA/PMEL과 수중음향 데이

터 분석에 대한 국제공동연구 진행을 통해 양질의 연구결과를 구축하고, 해당 분야에 대한 연구경험과 기술력을 습득할 수 있으며, 세계 최초로 서남극 열개구조에 대한 수중음향 모니터링 데이터를 보유할 수 있으며, 흥미로운 연구결과의 제시가 가능.

- 음향신호에 대한 주파수 특성 분석

- 관찰지역 미세지진에 대한 메커니즘을 바탕으로 에너지 방사량을 계산하고 이로 인한 수중음향과 발생에 관한 수치모델링 기법 적용

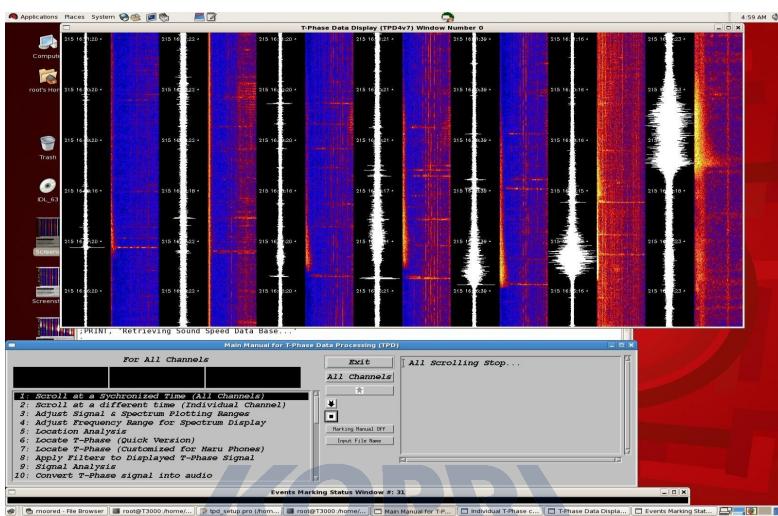


그림 7. 수중음향 데이터 처리과정

- 분석결과를 바탕으로 Balleny 군도 주변 상세지진활동성 규명

- 음향 신호를 활용하여 지진활동성 외 추적이 가능한 다양한 음원에 대한 추가분석 수행

다. 탄성파 탐사자료를 이용한 남극 로스해 외대륙경계부 지체구조 연구

- 이탈리아 남극연구프로그램(PNRA)과의 공동연구를 추진하고, 2016-2017 남극 로스해 외대륙경계부의 Central Basin과 Hillary Canyon에서 수행될 이탈리아 연구선 OGS Explora를 이용한 다채널 탄성파 탐사에 참여하여, 이를 통해 자료를 습득하고 이를 분석하여, 서남극 열개구조의 진화에 따라 형성된 것으로 추정되는 지체구조를 해석함으로써 궁극적으로 서남극 열개구조의 특성 및 발달시기를 규정하기 위한 연구를 수행하고자 함.
- 일반적인 다중채널 탄성파 탐사를 통해 획득한 탄성파 데이터는 해저 퇴적지층에 대한 연구에 중요한 정보를 제공할 수는 있지만 모호면과 같은 심부지층구조의 이해를 위한 연구에 사용하기에는 한계가 있음.
- 로스해 외대륙경계부 다채널 탄성파 탐사자료 획득 및 처리기술 습득 : 이탈리아 연구선(OGS Explora)을 이용한 2016-2017 남극 로스해 탐사 및 자료취득, 공동 연구를 통한 탐사자료 획득 및 자료처리 기술 습득

- 획득 자료 및 기존 탄성파 탐사자료를 이용한 지체구조도 작성 : 남극 외대륙경계부의 Central Basin, Hillary Canyon에 대한 지체구조도 작성
- 서남극 열개구조의 특성 및 발달시기 규정 및 로스해 외대륙 경계부의 지체구조 종합

라. 지구물리 관측망을 이용한 맨틀구조 및 지각활동성 연구

- 서남극 열개구조는 서남극지역인 Marie Byrd Land (MBL)와 동남극 지역인 Ross Island (RI) 지역의 상부 맨틀에서 매우 느린 지진파 속도 구조를 가지고 있음 (그림 8과 9).

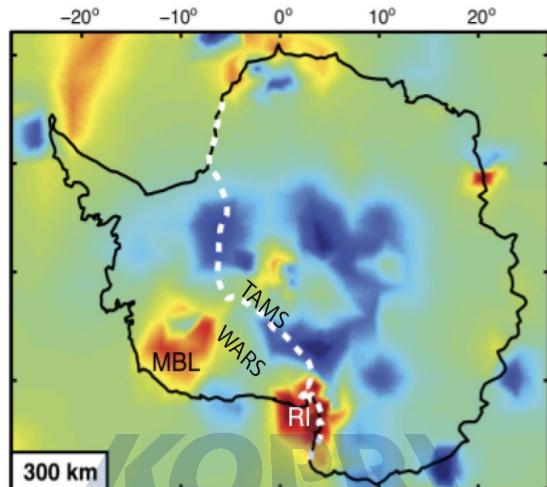


그림 8. 원격지진을 이용한 P파의 맨틀속도 구조 모델 (modified from Hansen et al., 2014). 붉은 색과 파란색은 각각 $\delta V_p - 1\% \sim 1\%$ 의 상대적인 속도 차이를 나타냄. MBL: Marie Byrd Land, RI: Ross Island, TAMS: Transantarctic Mountains, WARS: West Antarctic Rift System.

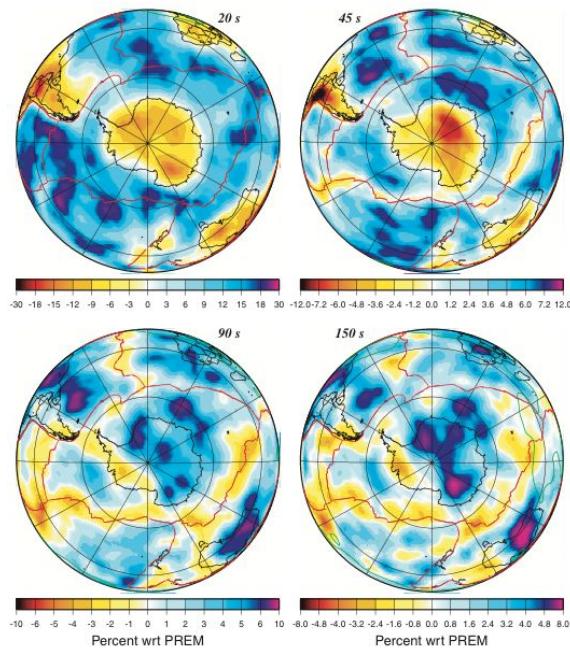


그림 9. 표면파를 이용한 대륙스케일의 맨틀 속도 구조 (Ritzwoller et al., 2001).

- MBL에 존재하는 저속도 구조는 하부맨틀 ($>660\text{km}$)이하에서 형성되어 상부맨틀까지 상승한 것으로 보이나 RI에서 관측되는 저속도 구조는 200km 이상의 깊이에서부터 형성된 것으로 해석됨.
- 맨틀속도구조 연구에서 밝혀진 것처럼 서남극 열개구조는 동남극과 서남극에서 각각 다른 지체구조에 의해서 형성된 것을 알 수 있음. 하지만 RI 하부에 존재하는 저속도 구조가 북쪽으로 펼쳐져 있는지, 그리고 로스해 북부에 존재하는 열개구조에 어떻게 영향을 주었는가는 아직까지 명확하게 규명되어 있지 않음.
- 극지연구소의 멜번화산 지진관측망 자료를 이용하여 수행된 연구결과는 얇은 암석권 (thin lithosphere)의 로스해 하부에서부터 두꺼운 암석권인 동남극 대륙쪽으로 맨틀 물질이 움직이며, 이로 인한 맨틀 용융이 발생한 결과를 보여주고 있음 (그림 10) (Park et al., 2015).

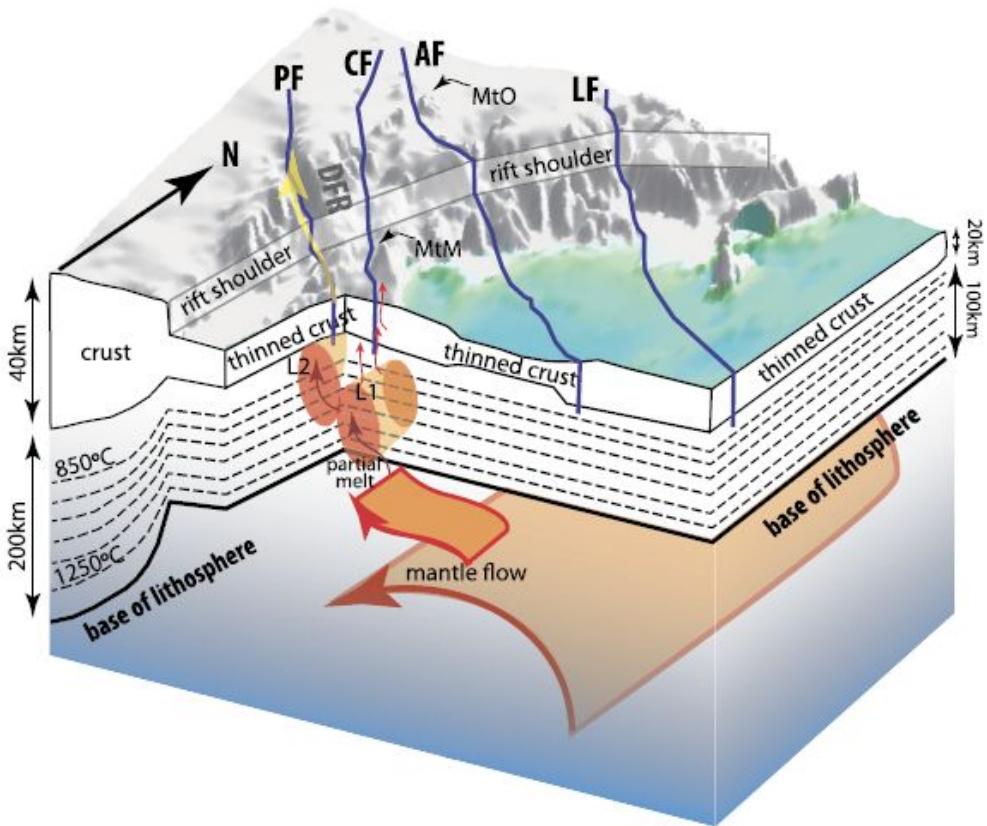


그림 10. 원격지진을 이용한 장보고 기지 주변 멜번화산 지역의 상부맨틀 구조에서 해석된 지체구조 (from Park et al, 2015). DFR: Deep Freeze Range; PF: Priestley Fault; CF: Campbell Fault; AF: Aviator Fault; LF: Lanteman Fault; MtM: Mt. Melbourne; and MtO: Mt. Overlord. Decompressional melt과 암석권의 두께 변화에 의해서 형성된 맨틀 흐름(mantle flow)에 의해서 형성된 부분용융된 맨틀 물질(주황색)이 멜번화산 형성을 주도하고 30km 깊이에서 PF에 갇혀진 용융된 맨틀 물질이 단층선을 따라서 북동쪽으로 이동.

- 현재까지 연구된 서남극 열개구조에 대한 맨틀 모델링 연구는 육상에서 관측하고 있는 광대역 지진자료만을 사용하고 있기 때문에 로스해에 존재하는 열개구조에 대한 명확한 맨틀의 속도 구조와 지체구조연구에는 한계성이 있음.
- 로스해에서 일어나는 열개현상을 유발하는 맨틀의 열역학적 구조를 연구하기 위해서는 로스해에 해저면 지진계를 설치하여 육상 지진관측망의 자료와 연계하여 로스해에 대한 명확한 맨틀구조 모델링 연구가 필요함.
- 로스해에 발달된 Terror Rift는 장보고 기지에서 가장 가까운 곳에 위치하고 동남극에서 서남극 열개구조를 이루는 큰 열개구조로 육상 지진관측망에 지속적으로 중규모 이상의 지진이 관측됨 (그림 11과 12).
- Terror Rift 북부 지역에서 관측되고 있는 지진은 KPSN 관측망 밖에서 발생한 지진으로 정확한 진원의 위치와 진원 정보를 알기 위해서는 해저면 지진계 관측소가 필수임.

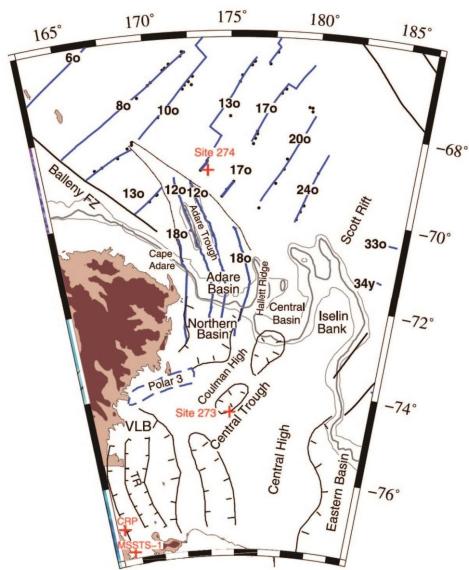


그림 11. 로스해 서부지역의 구조도 (Granot et al., 2010)

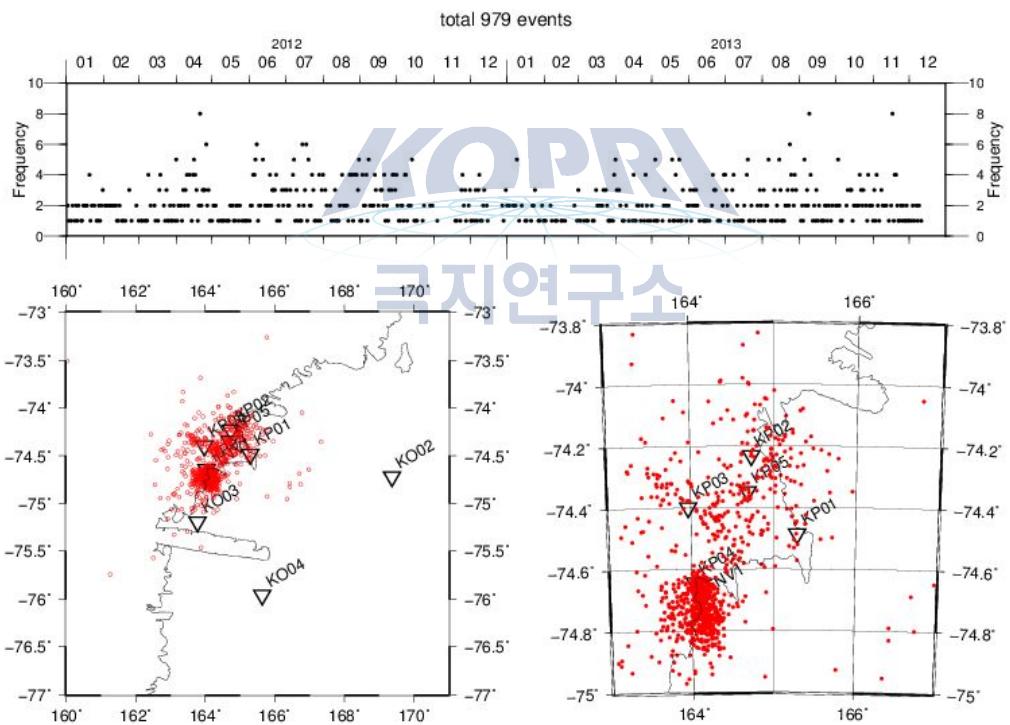


그림 12. 2012년부터 2013년동안 KPSN 육상 광대역 지진관측망에 관측된 지진원 위치. Terror Rift 북부에 300개 이상의 지진이 밀집되어 있음. (위) 2012-13년에 발생한 지진원의 일변화. (아래) 장보고 기지 주변, 멜번화산을 중심으로 설치되어 있는 육장 지진관측망의 위치와 진원의 위치.

- Terror Rift의 발생원인을 규명하기 위한 해저 지진관측망 구축.
- 원격지진의 표면파와 분산을 이용한 Terror Rift 하부 지각 및 맨틀의 속도 구조 모델링.
- 정확한 지진원의 위치와 발생 메카니즘 분석을 통한 Terror Rift의 활동도 규명.

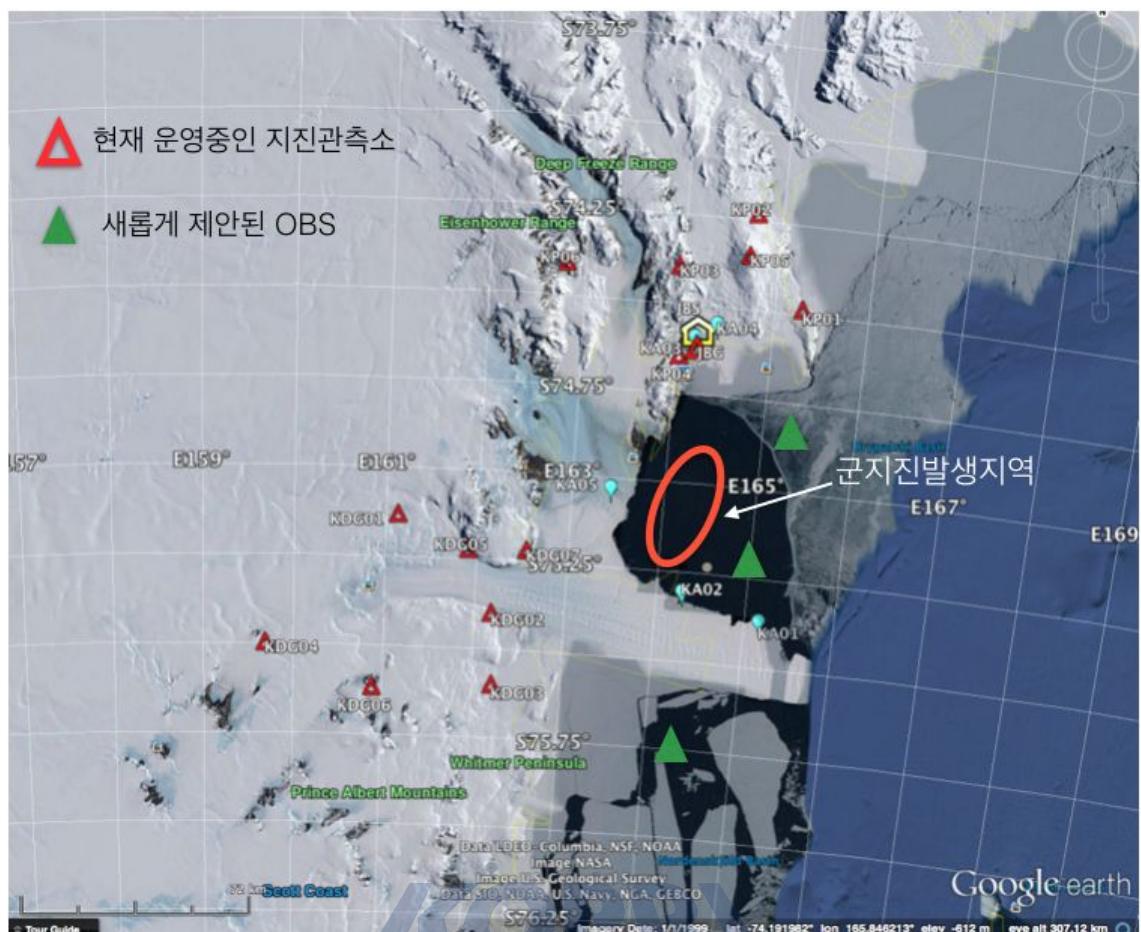


그림 13. 현재 극지연구소에서 운영중인 광대역 지진관측망 현황 (붉은 삼각형), 로스해 Terror Rift의 지각과 맨틀 속도구조, 그리고 군지진 발생 원인을 규명하기 위한 해저지진계 (OBS: Ocean Bottom Seismometer) 설치 제안 위치 (초록색 삼각형).

3. 열개구조에서의 지질학적인 물성연구

가. 서남극 Adare Trough 주변의 지열특성 연구

- 아직 밝혀지지 않은 Adare Trough와 Central Basin의 열구조를 밝혀 지각구조를 추정함으로써, 학계가 서남극열개구조 발달사 이해를 증진시키는 연구를 수행

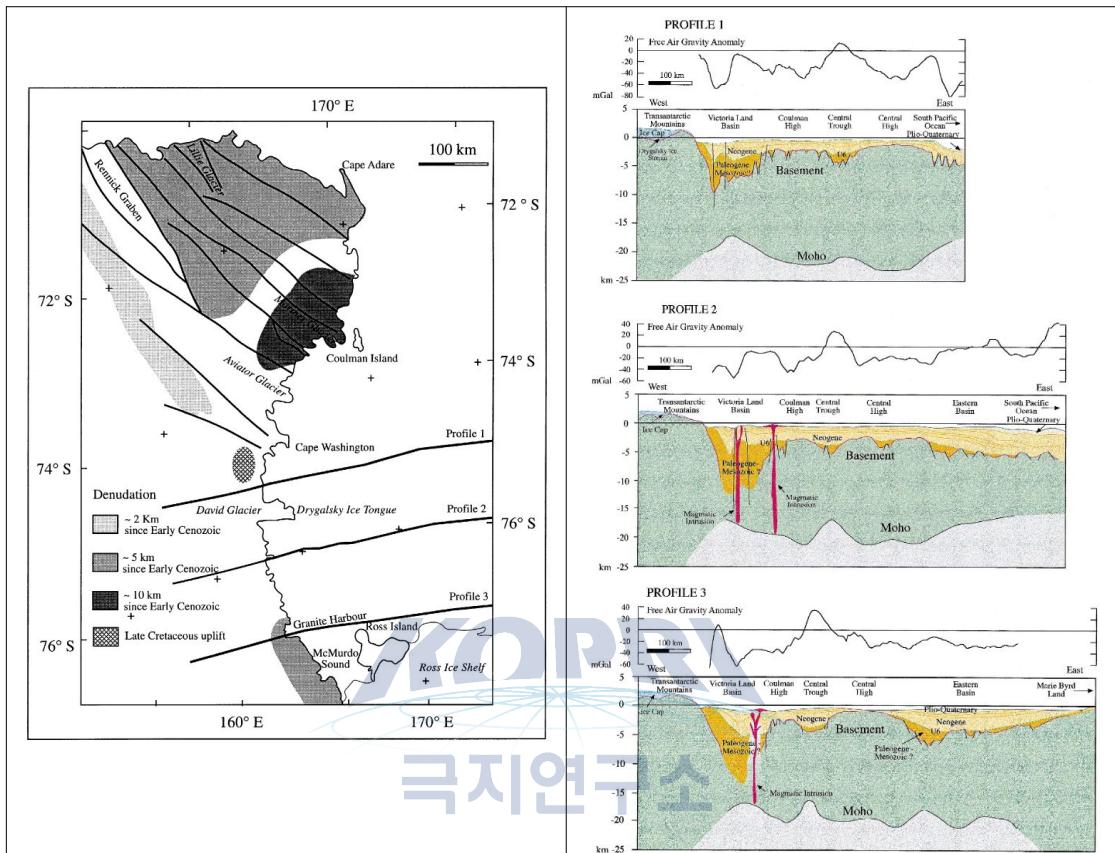


그림 14. 남위 74° 이하 빅토리아 랜드의 지구조 모식도 (Busetti et al., 1999)

나. 맨틀포획암의 미세구조 및 화학성분 분석을 통한 서남극 열개구조 진화의 이해

- 지금까지 암석학적 관점에서 맨틀진화 연구의 주된 축은 암석권 맨틀에 기록된 지질학적 사건을 지구화학적 접근법을 통해 암석권 맨틀의 생성시기 및 맨틀 내 변성교대작용 특성을 규명하고 이를 통한 지체구조 환경복원 연구가 주를 이루고 있었음.
- 이러한 기존의 지구화학적 연구방법과 더불어 최근에는 구조지질학에 기반을 둔 맨틀암 식변형양상 연구를 통한 판의 이동과 지체구조운동을 이해하는 연구가 활발히 진행되고 있음.
- 암석의 변형을 연구하기 위한 미구조(microstructure) 분석기술, 특히 후방산란전자회절(electron backscatter diffraction, EBSD) 장치는 1999년 처음으로 지질학에 응용되어 암석학 및 구조지질학적으로 많은 문제(예, 석류석의 회전여부, 지진파 이동방성 계산에 유용)를 해결하였음(예, Whitney et al., 2011; Satsukawa et al., 2011)(그림 15).

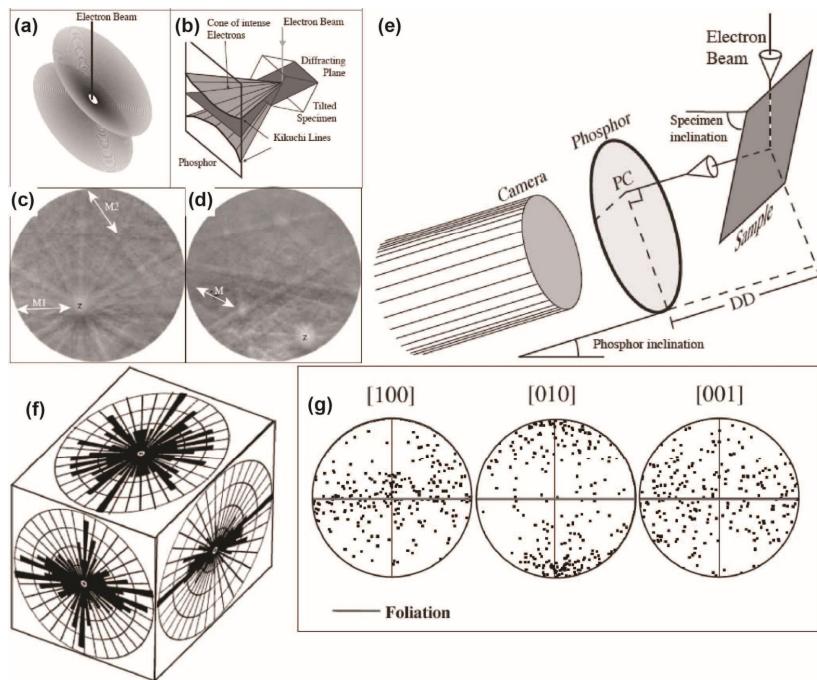


그림 15. 최초로 지질학적으로 응용된 EBSD기술의 원리(a, b)와 사장석(c) 및 석류석(d)의 EBSD 패턴, EBSD 기기장치의 셋업(e), 세 면에서 측정한 감람석 모양의 분포(f)와 EBSD에서 측정한 감람석의 CPO. (Prior et al., 1999)

- 따라서 기존의 화학분석적 방법과 미구조 분석기술법이 동시에 이뤄진다면 좀더 자세한 연구결과를 얻을 수 있을 것임.
- 본 연구에서는 로스해북부 약 20.000 km^2 이상의 지역에 광범위하게 분포하는 해저화산암과 함께 산출되는 멘틀 페리도타이트를 대상으로(그림 16) 기존의 지구화학적 접근법과 미구조 분석기술법을 동시에 적용하여 서남극 열개구조발달에 따른 지체구조환경 진화과정을 추적하고자 함.

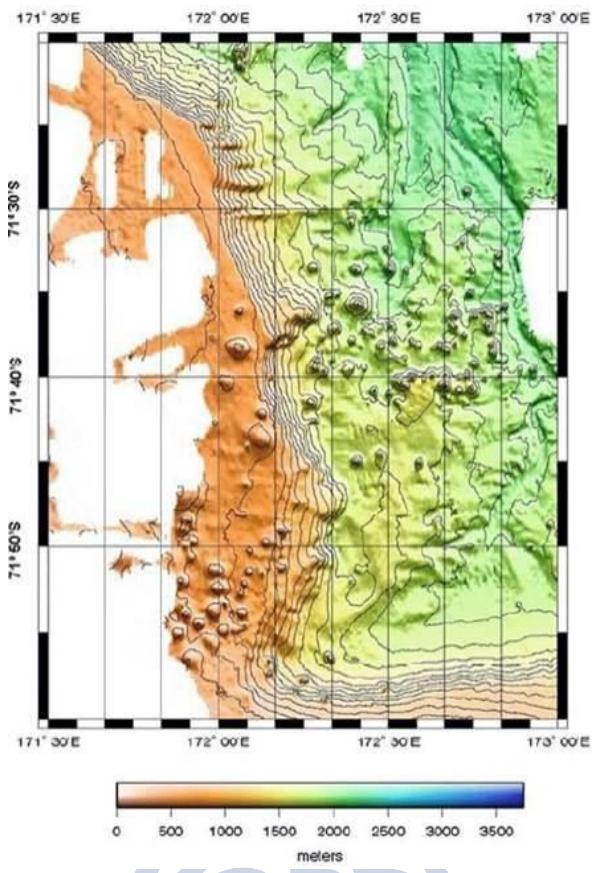


그림 16. 로스해 Adare Basin에서 산출된 해저화산
암 분포도

- EPMA, XRF 등의 화학적 분석방법을 이용하여 화산암을 암석학적, 광물학적으로 분석하고 화산암의 형성조건 및 진화환경 유추할 예정임.
- EBSD 기술을 이용해 감람석의 결정방향성을 측정하고 이를 토대로 맨틀의 진화과정을 규명할 것임.

다. 서남극 열개구조의 화성암과 퇴적물에 내재된 Spinel 광물의 자화특성 규명 연구

- 남극은 Pangea 분리 이후 위도 변화가 가장 적은 지판이며, 로스해 북부 서남극 열개구조는 고생대 이전의 대륙형성을 보여주는 동남극지괴와 신생대 이후의 대륙성장을 보여주는 서남극지괴의 경계부인 중부남극산맥 (Transantarctic Mountains)이 연장된 해양지각 연결부에 해당.
- 지구의 표면을 구성하는 화성암이나 퇴적물의 Spinel 광물 성인 연구는 대부분 대륙내부에서 수행되었으며, Spinel 광물 성인 연구가 고위도 지역에서 미진한 이유는 시료 채취의 상대적 어려우며, 이는 또한 고위도에서 정향 시료의 획득이 나침반의 오작동으로 인해 난해하다는 단점 존재함.
- 남위 60도 이상의 고위도에서 수행된 지자기관련 연구는, 화산암류의 지자기 방향 해석이 유일하며, 특히 화성암이나 퇴적물의 Spinel 광물 성인 연구는 수행된 전례가 없음.

- 최근 실험 기기의 발달과 통계적인 해석 방법의 진화로, 단일 Spinel 광물 연구가 시도되고 있으며, 과거에는 암석에 함유된 spinel의 평균적인 기여도가 측정되었지만, 최근에는 개개의 결정 혹은 이와 비견될 매우 작은 규모에서의 spinel 분포 연구가 개발되고 있는 실정임.
- 화성암이나 퇴적물의 특정 Spinel 분포를 지구물리학적 측정 자료인 자력 이상 (magnetic anomalies)과 대비시키려는 시도가 선진국에서 시도되고 있으며, 금번 연구에서는 Spinel의 성인 및 분포와 자력이상간의 상관관계 규명을 정량적으로 시도하고자 함.
- 서남극 열개구조의 화성암과 퇴적물 내재 Spinel 광물의 자화특성 규명을 통해 남극판의 분리와 성장에 관한 기초적인 자료를 제공.
- 추후 금속을 함유한 지구형 spinel과 외계기원 운석이 함유한 spinel의 자화 특성 차이 연구의 가능성 탐진.

- 연구방법

(1) Alternating-field Demagnetization of Natural Remanent Magnetization :

모든 시료를 표준 시편의 형태인 1인치 코어암석시편이나 1인치 퇴적물큐브시편으로 만든다. 각 시편들의 자연잔류자화를 자력계를 이용하여 측정. 암석에 기록된 점성잔류자화 혹은 2차잔류자화를 제거하기 위하여 모든 시편에 대하여 단계별 교류소자 실험을 교류소자기를 이용하여 수행한 후, 각 단계별 잔류자화를 측정한다. 또한 비자기이력자화의 이방성을 정량적으로 규명하여 비자기이력자화가 대자율이방성과 유사한 결과를 나타내는지를 확인. 만약, 실험 결과가 일치하지 않으면, 비자기이력자화와 대자율이방성 실험에서 자기장에 반응한 광물의 분포가 상이함을 감지.

(2) Magnetic Hysteresis Analysis :

교류소자와 비자기이력자화 실험을 완료한 후, 전자석 및 자력계를 이용하여 상온에서 단계별 여러 강도의 자기장 내에서 등온잔류자화 획득 실험을 수행하여, 자성광물의 종류 등의 특성을 규명. 진동시료자력계를 이용하여 대표 시료들의 자기이력특성을 측정하여, 잔류자화를 기록하는 자성 광물의 종류, 입자크기, 자기 안정성 등의 특성을 규명.

(3) Thermal Demagnetization of Natural Remanent Magnetization :

대표적인 암석시편들의 자연잔류자화를 자력계를 이용하여 측정. 암석에 기록된 점성잔류자화 혹은 2차잔류자화를 제거하기 위하여 모든 시편에 대하여 단계별 열소자 실험을 열소자기를 이용하여 수행한 후, 각 단계별 잔류자화를 측정한다. 단계별 열소자는 국제적으로 통용되는 최소 12단계 이상의 온도 구간에서 수행.

(4) Thermomagnetic Curves :

다양한 암상을 구성하는 상이한 광물 조성으로 인해 발생할 수 있는 암석의 석리를 판별하기 위해 대자율이방성을 측정 (Gattaccecca et al., 2003). 대자율이방성 측정은 암석 내에 존재하는 자화를 왜곡시키거나 광물의 변질을 유발할 우려가 전혀 없기에,

전 시료를 대상으로 수행. 이전 실험에 사용되지 않은 새로운 시료를 고온 대자율 측정기를 이용하여 잔류자화를 기록하는 자성 광물의 자기상실온도(큐리온도)를 측정. 이를 토대로 자성 광물의 종류 및 온도 변화에 따른 자성 광물의 변질 상태를 규명.

(5) Mineral Identification :

이전 단계에서 사용했던 모든 시료를 수집하여 이들을 대상으로 연마편을 제작한 후, 광석 현미경을 이용하여 자성 광물을 관찰함으로써 자성 광물의 종류, 입자크기 및 변질 상태를 규명. 또한, 미세한 자성 광물의 확인, 주변 광물과의 공생관계 및 변질상태 규명을 위하여 전자 현미경(Scanning Electron Microscopy) 관찰도 병행. 좀 더 정량적인 성분 분석을 위해 전자탐침미세분석기(Electron Probe Micro Analyzer) 분석 병행.

- Spinel의 자화특성은 남극의 광개아관련 진화사를 밝혀내 줄 과학적 단서로, Spinel의 자화특성과 금속함유량을 측정하고 Spinel 시공간 분포도를 작성하여 해양지각의 냉각에 관한 지체구조학적 지시자로 활용.
- 체계적인 자기특성 규명 연구을 시도하여 Spinel과 지권사이의 상관관계를 규명하여, 지질 및 지구물리학계가 아직까지 해결하지 못한 Gondwanaland 분리의 정량적 기초자료 제공.

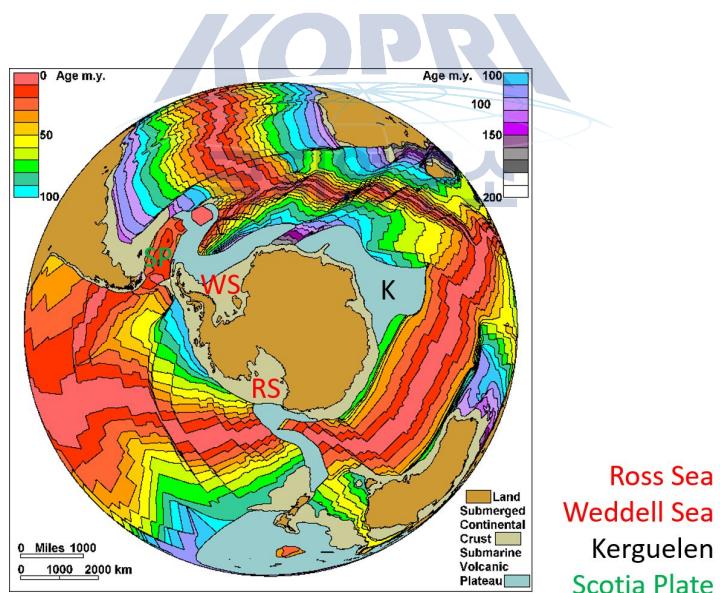


그림 17. 남극주변 자화특성 분석결과

제 2 장 국내외 기술개발 현황

2-1. 국내 동향

1. 로스해 인근 서남극 열개구조의 광역 지체구조 연구

가. 서남극 경계대의 자력이상값을 통한 지구조 연구 : 빅토리아랜드와 월크스분지

- 2013년 극지연구소에서 남극연구위원회가 후원하는 국제 공동 프로젝트인 ADMAP을 2년 동안 지원하기로 결정하며 남극 지구물리 연구에 중요한 자료로 활용될 지각 자기이상지도 제작의 업데이트에 획기적 계기 마련.
- 대부분 빙하로 덮여있는 남극에 이러한 빙하 밑 지각의 구조를 파악할 수 있는 ADMAP 자료는 앞으로 많은 연구에 활용될 것이라 기대됨.

2. 심부 지각구조 및 지각활동성 연구

가. 해저면 지진계 (OBS) 탐사를 이용한 Terror Rift 구조연구

- 한국지질자원연구원에서 탐사선 탐해2호를 이용하여 2005년부터 동해 심부 지체구조 규명 및 가스하이드레이트 탐사를 위해 다중채널 탄성파 탐사와 함께 해저면 지진계를 이용한 탐사를 병행하여 해당지역에 대한 지각구조를 연구.
- 극지연구소에서는 2013년 북극 보퍼트해에서 캐나다와 공동으로 쇄빙연구선 아라온호를 이용하여 해저면지진계를 활용한 탐사를 수행하였고, 탄성파 주시 토모그래피 기법을 적용하여 대상 지역에 대한 속도구조를 규명하는 연구를 진행.

나. 수중음향데이터 분석을 통한 서남극 말레니군도 주변 화산활동 관측

- 수중음향분야는 국내에서 유일하게 극지연구소에서 남극을 대상으로 미국 NOAA/PMEL 연구그룹과 공동연구 수행.



그림 18. 아라온호를 이용한 수중음향 장비 회수

다. 탄성파 탐사자료를 이용한 남극 로스해 외대륙경계부 지체구조 연구

- 한국해양과학기술원 부설 극지연구소에서는 2016년 5월까지 해양수산부 연구개발(R&D)

사업으로 수행된 “양극해 환경변화 이해 및 활용연구(K-PORT: Korea-Polar Oceans in Rapid Transition, 연구책임자: 강성호)” 사업을 통해 2013년 2월, 2015년 2월에 남극 로스해 Central Basin에서 다채널 탄성파 탐사자료를 획득.

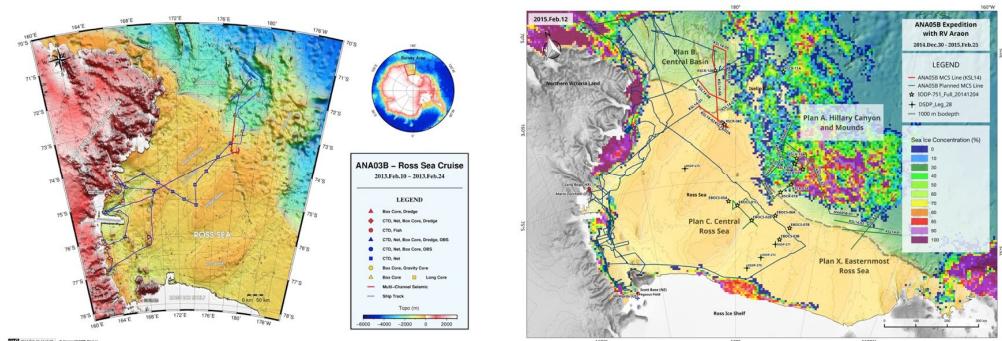


그림 19. 2012-2013, 2014-2015 남극하게탐사기간 중 쇄빙연구선 아라온을 이용하여 획득한 다채널 탄성파 탐사측선도.

- 이탈리아 연구진과의 국제공동연구의 일환으로 획득한 탄성파 탐사자료를 이용하여 탄성파 충서분석을 시도하였고, 이를 통해 퇴적기록에 남아있는 남극빙상의 발달사와 저층류의 기작에 대한 연구를 수행 중.
- 해당연구에 나타나는 로스해 북서부 대륙경계부에 위치한 Adare Basin과 Central Basin에서의 퇴적양상의 차이를 설명하기 위한 지체구조분석도 함께 수행 중.

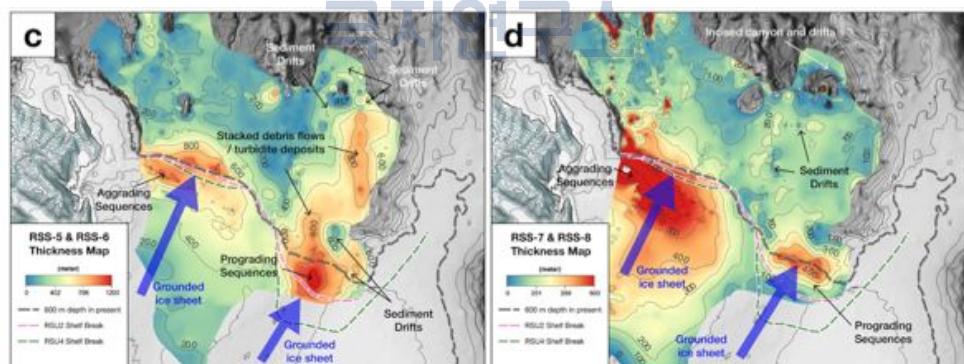


그림 20. 지체구조의 발달에 따른 퇴적양상 변화.

- 해당 연구를 통해 북서부 로스해에 위치한 Central Basin 지역의 전반적인 지체구조 및 퇴적구조를 파악할 수 있었고, Salvini et al.(1997)에 의해 규정된 지체구조를 확인하여 해석을 연장할 수 있었으며, 이러한 연구결과를 종합하여 2회의 국제 학술대회 발표, 1건의 음향기반암(acoustic basement) 구조도를 작성.

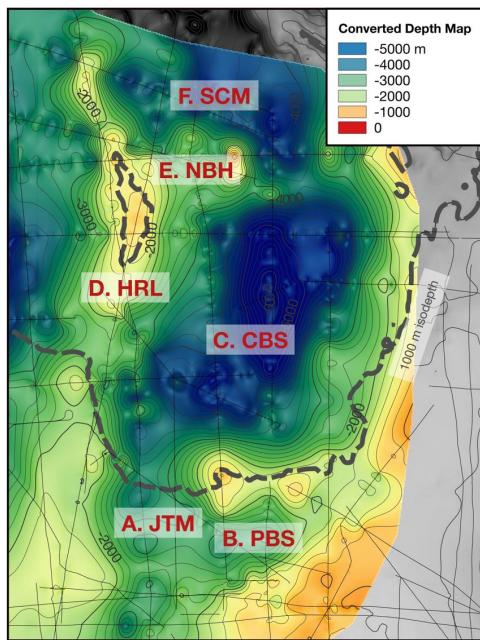


그림 21. 북서부 로스해 음향기반암 구조도.

3. 열개구조에서의 지질학적인 물성연구

가. 서남극 Adare Trough 주변의 지열특성 연구

- 남극해에서 종합해양탐사를 수행하며 해양지열연구를 수행중인 연구기관은 극지연구소가 유일함.
- “서남극 열개구조 진화 연구: Adare Trough, 남극중앙해령 인근의 지구조 및 화산활동 성인규명 (홍중국)”을 통해 ANA05B와 ANA06C 두 번의 아래온 남극탐사동안 NBP9702 다채널 탄성파 측선 중 Adare Trough를 지나는 측선을 따라 총 9개 정점에서 지열관측을 시도 (그림 22과 23).
- NBP9702 측선을 따라 지자기 이상과 다채널 탄성파 탐사가 이루어졌다 (Cande et al., 2000)을 이용하여 비대칭적인 해저확장 속도를 밝히고, 탄성파 탐사 결과를 이용해 퇴적체/화산암체의 구분과 퇴적층의 연대/지질이 밝혀지열구조를 파악하기 위해 해저면 하부의 지질구조를 이해하는 것이 중요하기 때문에, 알려진 탄성파 탐사 측선 중 해석(화산암체와 퇴적층의 구분, 퇴적층의 연대와 지질)까지 이루어진 NBP9702 측선 중 6ab를 선택하였다.
- Adare Trough에서 일반 해저면확장이 일어났다면, 알려진 생성연대-지열류량 관계식을 따르는 지열류량이 예상되나 ANA05B의 관측 결과는 예상값보다 상당히 높은 값을 보이며, 현장의 해빙상황과 연구항해시간 문제로 관측정점이 3정점에만 이루어짐. 이에 따라, Adare Trough의 현재 열구조를 파악하기 위해서는 추가적인 지열 관측이 필요함.
- 부족한 정점 수를 보충하기 위해 ANA06C 동안 5정점에서 추가적인 지열정점을 선택하여 관측을 하였다. 현재는 관측된 자료를 분석, 보정중에 있음.



그림 22. Adare Trough 지열연구를 위해 ANA05B, ANA06C 정점들 (Sts. 43~46: ANA05B, St. 11~15: ANA06C. 별: 해양지열탐침, 원/오각형: CTD, 점있는 사각형: 중력 코어러). 청색/적색 실선: ANA05B/ANA06C 항로. 살구색 실선: NBP9702 line B-B' (Dietmar et al., 2005).

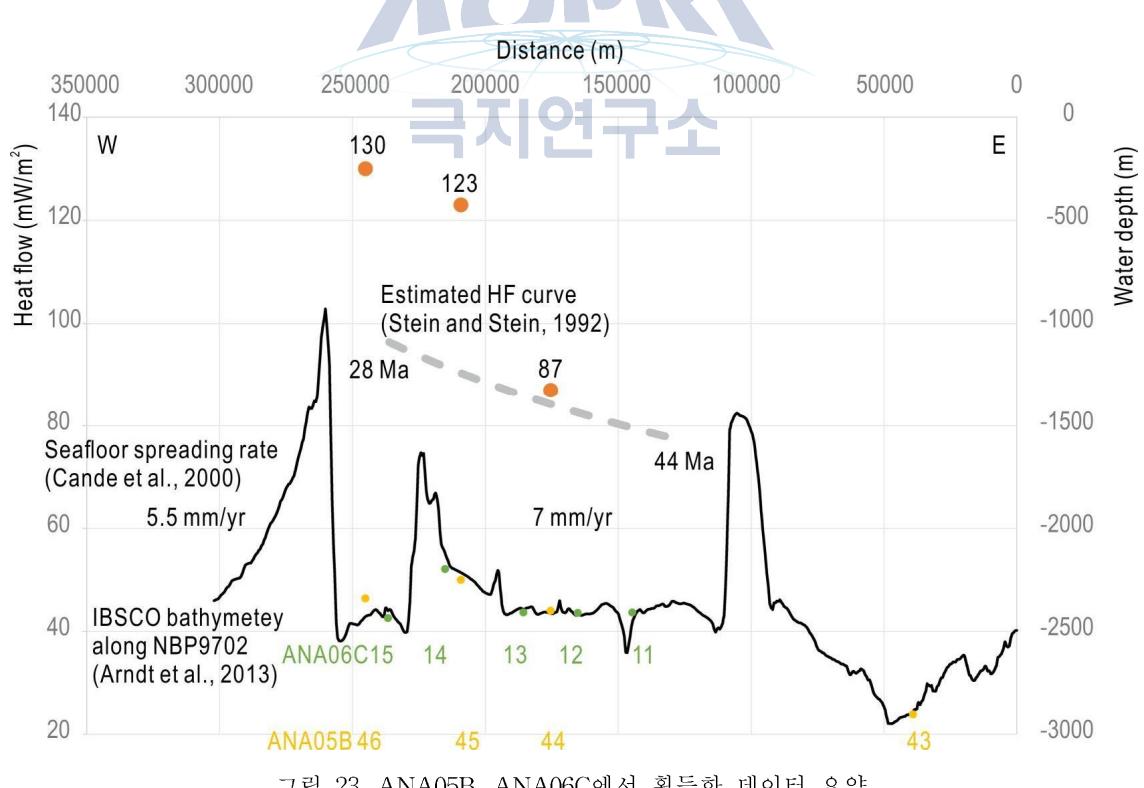


그림 23. ANA05B, ANA06C에서 획득한 데이터 요약.

나. 맨틀포획암의 미세구조 및 화학성분 분석을 통한 서남극 열개구조 진화의 이해

- 국내에서는 서울대학교 정해명 교수 연구팀에서 맨틀의 구조 및 진화에 대해서 연구하고 있음.

- 국내에서 연구하고 있는 광물의 CPO는 주로 광물에서 결정 하나하나의 방향성에 대해서 측정하고 그 결과를 요약한 것으로, 결정방향성 지도(orientation map)을 획득하고 분석한 연구결과는 전무한 상황임.

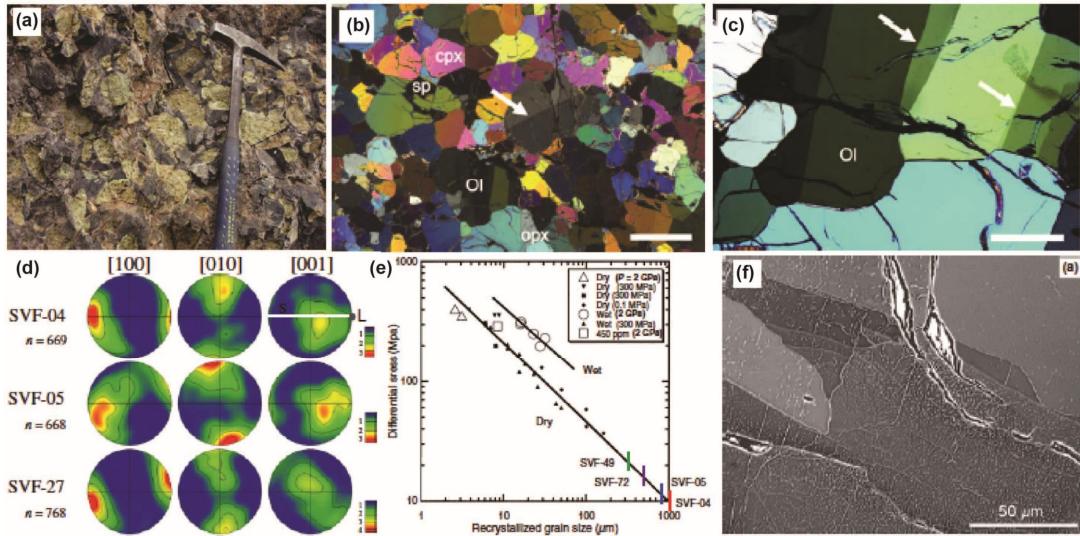


그림 24. 북극의 Svalbard 지역에서 채취한 감람암의 노두(a)와 박편(b, c) 상태에서의 모습, CPO(d), 입자크기 피에조미터(grain-size piezometer)를 사용한 차동응력(differential stress) 측정 (e) 및 변위의 미구조(dislocation microstructure)(f). Jung et al. (2009)에서 발췌.

- 연구소 내 “지구맨틀의 진화과정 연구(2009, PE09100)” 프로젝트에서 최성희 박사(당시 극지연), 정해명 교수(서울대) 등에 의해서 Svalbard에서 채취한 감람암(peridotite) 내 감람석이 A 또는 D 타입의 CPO를 가지고 있다고 보고된 적이 있으나(Jung et al., 2009) (그림 24), 판구조 및 맨틀의 진화를 유추하는데 응용하지는 못했고, 많은 지질학적 정보를 담고있는 결정방향성 지도(orientation map)를 획득하지는 못했음.

다. 서남극 열개구조의 화성암과 퇴적물에 내재된 Spinel 광물의 자화특성 규명 연구

- 지구형 화성기원 (terrestrial igneous origin) Fe-Ti-spinel, 지구형 화성기원 Mg-spinel, 지구형 퇴적기원 (terrestrial sedimentary origin) Mn-spinel, 지구형 화성기원 Cr-spinel, 지구형 화성기원 Fe-spinel, 지구형 변성기원 (terrestrial metamorphic origin) Fe-spinel, 화성운석내재 (Martian meteorite) Cr-Fe-Ti spinel, 미분화운석내재 (undifferentiated chondrite) Fe-Ni spinel등이 과학적으로 구분됨.
- 지구형 화성기원 Fe-Ti-spinel로 대부분의 심성암과 일부 화산암에 존재하며 알갱이가 거의 100 μm 이상으로 정형의 팔면체 형태

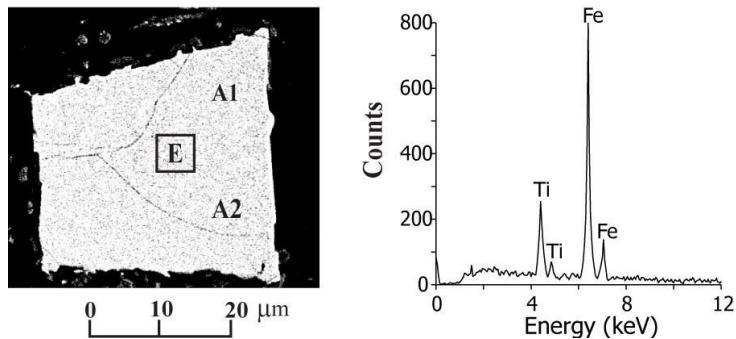


그림 25. 지구형 화성기원 Mg-Spinel 분석 결과

- 외계기원 (Martian meteorite) spinel은 지구형 spinel과 달리 Cr, Fe, Ti가 혼합되어 존재. 생성의 깊이 (압력조건을 결정)와 응력의 분포 같은 지구물리학적 요인에 의해 각기 다른 의해 매우 다양한 spinel의 조합이 나타나는데, 이들 조합은 Spinel을 포함하는 암석의 물리/화학적인 특징을 결정.

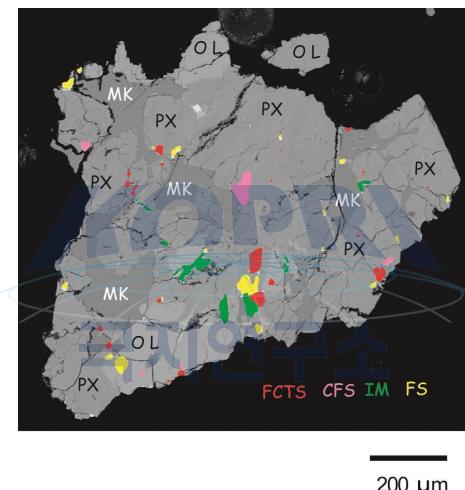


그림 26. 외계기원 Spinel

2-2. 국외 동향

1. 로스해 인근 서남극 열개구조의 광역 지체구조 연구

가. 항공-해상-인공위성 중력자료를 이용한 빅토리아랜드 및 로스해 지각의 두께 및 내부구조 연구

- Hirt et al. (2016)은 GRACE, GOCE 중력자료와 Bedmap2 자료로부터의 지형/빙산두께/기반암 모델을 이용하여 약 10 km 해상도의 중력 이상도를 작성 (그림 27).

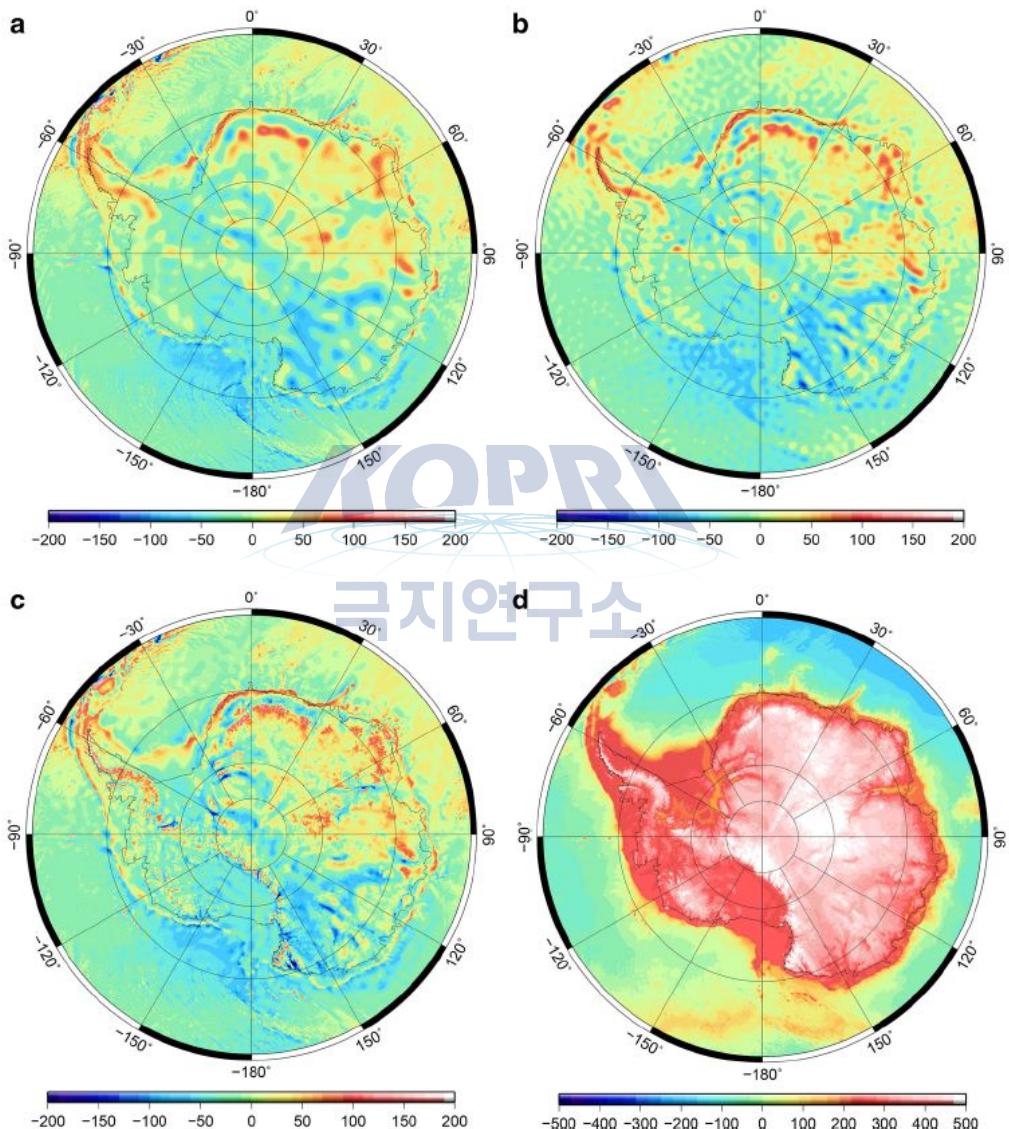


그림 27. 남극의 중력 분포 (a) EGM2008, (b) GOCE-TIM5, (c) SatGravRET2014_A, (d) 포텐셜 모델 dV_ELL_RET2014. 단위는 mGal. Hirt et al. (2016)

- 고해상도의 GOCE 자료와 Beemap2의 정확성 향상으로 인해 기존 지구 중력 모델 EGM2008에 비하여 그 해상도가 크게 향상된 것을 확인할 수 있으며, AntGG 데이터베이스의 육상 중력 자료를 이용한 검증을 통해 9-75%의 정확성 향상이 이루어졌다고 제시, Beemap2와 같은 보다 향상된 지표고도, 빙산 두께, 기반암모델이 인공위성 자료의

해상도 향상에 결정적인 영향을 주고 있음을 확인.

- Block et al. (2009)은 GRACE(Gravity Recovery and Climate Experiment) 위성자료를 이용한 역산을 이용하여 남극의 모호면 깊이를 추정.
- 모호면 깊이와 지형 자료를 이용하여 지각 두께를 결정한 결과, 남극 종단 산맥의 지각 두께는 남극점 근처에서 최대 46km이며, 북빅토리아 랜드와 웬사콜라 산맥에서는 약 40 km임을 밝혀냄(그림 28).
- 장보고기지가 위치한 북빅토리아 랜드에서는 남극 종단 산맥을 따라 약 40km의 지각 두께를 가지고 있으나 인접한 Wilkes 분지에서는 약 5km 얇은 지각두께를 나타내며, 데이비드 빙하를 따라서도 주변보다 1-2km 더 얇은 지각 두께를 보임.
- McKenzie et al. (2015)은 고해상도 인공위성 중력자료인 GOCE(Gravity field and steady state Ocean Circulation Explorer) 자료를 이용하여 각 대륙의 유효 탄성 두께 (effective elastic thickness)를 산출하였으며, 남극 종단산맥을 기준으로 서남극과 동남극의 탄성 두께가 뚜렷하게 차이가 나는 것을 확인.

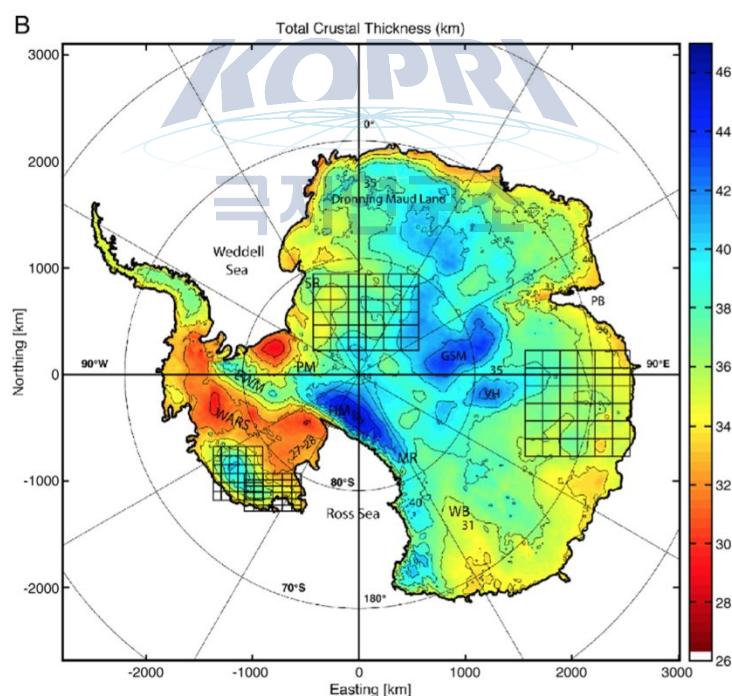


그림 28. GRACE 중력 자료와 BEDMAP2 지형 자료로부터 추정된 남극 지각 두께 (Block et al., 2009)

- Wilkes 분지에서의 항공 중력 탐사 결과는 남극 종단 산맥 하부의 지각이 Wilkes 분지에 비해 5-8km 더 두껍다는 것을 보여줌(Jordan et al., 2012).
- 지각의 만곡 과정(flexural process)이 신생대의 남극 종단 산맥 융기에 있어 중요한

역할한 것으로 보이나 산맥하부의 두꺼운 지각 구조는 Ross-age의 조산운동에 의해 형성되었을지도 모른다는 것을 지시함.

- 남부에 비해 약 5km Wilkes 분지 북부의 지각두께는 후열도 분지(back-arc basin)의 존재 혹은 쥬라기/백악기의 지각 확장 과정과 신생대 빙하의 침식에 의한 결과일 수 있다(그림 29).

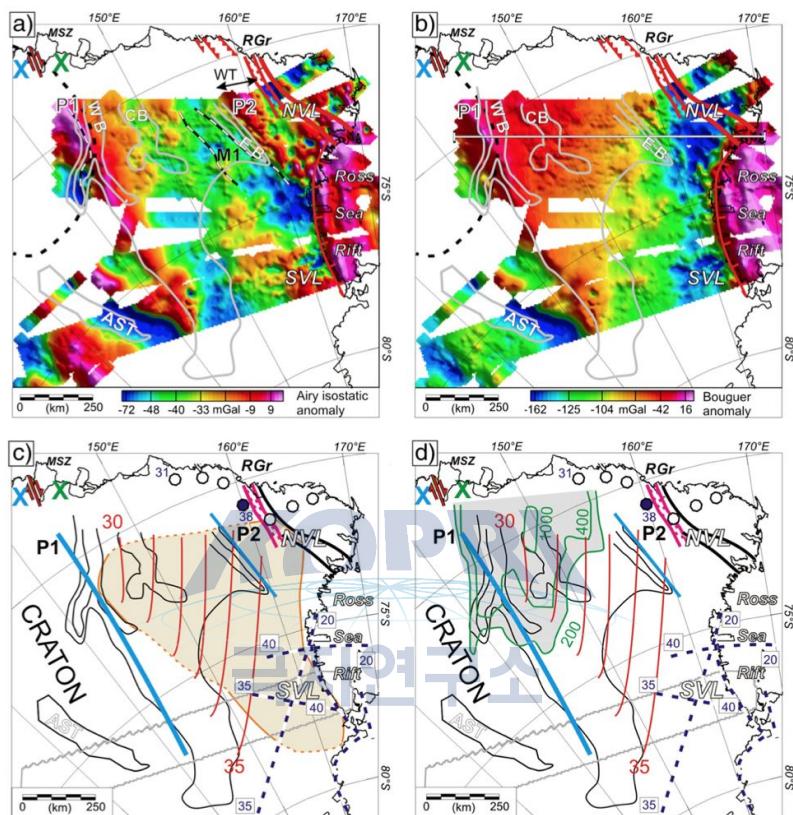


그림 29. Wilkes 분지의 중력 이상. (a) 에어리 지각 평형 이상, (b) 부계 이상, (c) 지각 두께(적색) 및 쥬라기 암석 추정 지역(오렌지색), (d) 지각 두께(적색) 및 빙하 침식 추정 지역(녹색).
Jordan et al. (2012)

나. 서남극 경계대의 자력이상값을 통한 지구조 연구 : 빅토리아랜드와 월크스분지

- 유럽에서 2013년 발사한 유럽 항공우주국의 자력 전문 위성 Swarm은 계속해서 지구의 자기장 관측을 수행하고 있으나 과학적 연구는 대부분 수학적 모델을 제작하는 연구가 우선이 되고 있으며 구체적인 지구과학적 연구는 이루어지고 있지 않음.

2. 심부 지각구조 및 지각활동성 연구

가. 해저면 지진계 (OBS) 탐사를 이용한 Terror Rift 구조연구

- 다중채널 탄성파탐사 데이터는 모호면과 같이 깊은 심도에 위치한 해저반사면을 확인하는데 한계가 있기 때문에 해상에서 대용량 에어건과 해저면 지진계를 이용하여 데이터를 획득하고, 획득한 데이터는 굴절파 토모그래피 기법을 통해 대상지역에 대한 속도구

조를 규명하는 연구가 진행되었음.

나. 수중음향테이터 분석을 통한 서남극 빌레니군도 주변 화산활동 관측

- 미국 NOAA/PMEL 연구그룹은 수중음향 장비개발 및 분석 분야에 있어 세계 최고수준의 기술과 연구능력을 보유중이며, 현재까지 태평양 및 대서양에서 해당분야에 대한 다양한 연구를 진행 중에 있으며(그림 30), 이전부터 극지연구소와 협력하여 남극해 전역을 대상으로 수중음향장비를 이용한 연구를 수행 중에 있음.

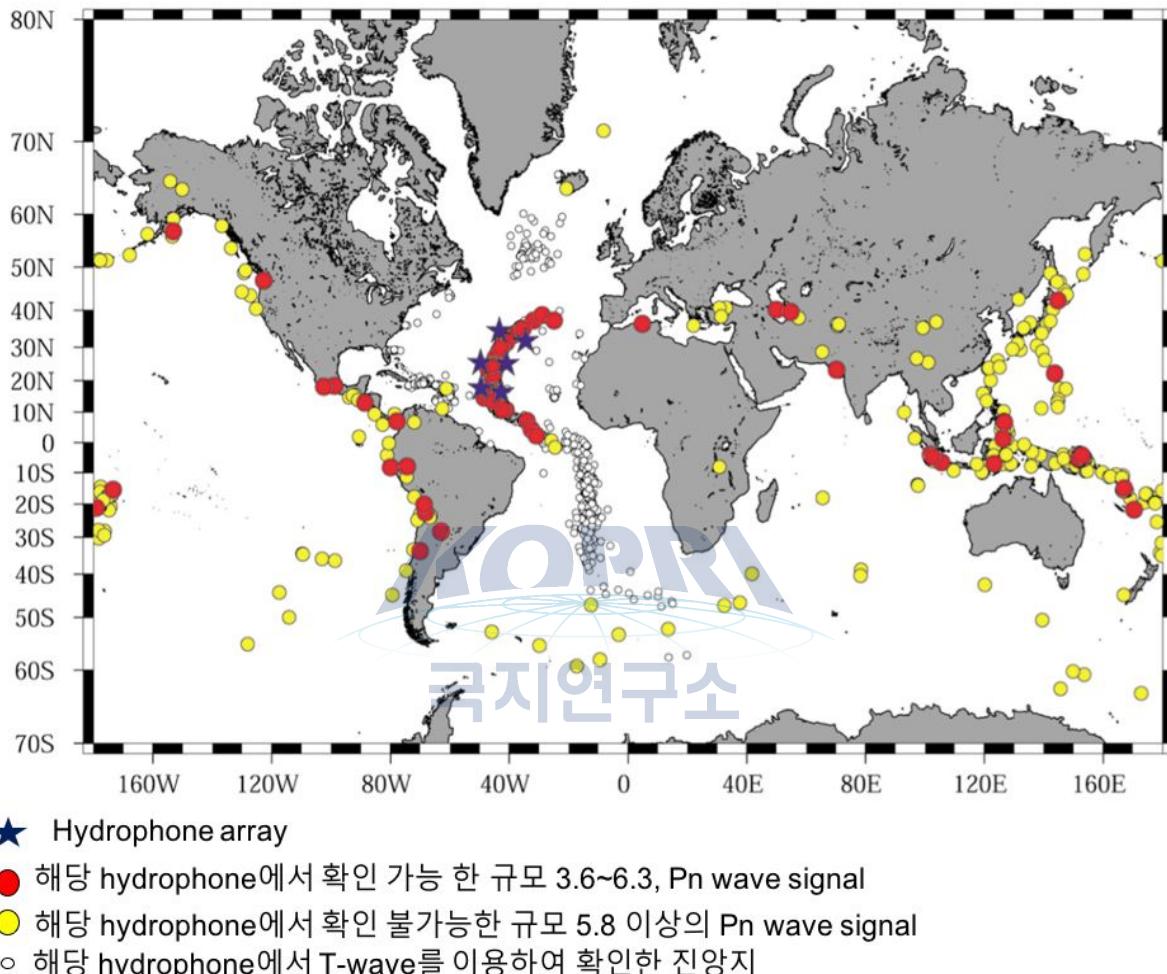


그림 30. 수중음향 장비를 통해 파악한 지진분포도 (Dziak et al., 2004)

다. 탄성파 탐사자료를 이용한 남극 로스해 외대륙경계부 지체구조 연구

- 1980년대 이후 로스해에 남극 연구기지를 보유한 이탈리아, 미국, 뉴질랜드 등을 중심으로 로스해 대륙붕지역에 대한 해양지구물리탐사를 수행하였고, 최근에는 아직 많은 연구가 이루어지지 않은 외대륙붕, 대륙사면, 대륙대 및 심해저에 대한 연구를 수행하기 위한 국제공동연구제안서가 제출되고 있음(그림 31).
- 특히 남극 로스해 연구경험이 풍부한 이탈리아는 남극연구프로그램 공모를 통해 자국 연구선 OGS Explora를 이용한 2016–2017 남극하계 해양지구물리탐사를 수행할 예정임.
- 예정된 해양지구물리탐사를 통해 로스해 외대륙경계부에서 다채널 탄성파 탐사, 중자력,

다중빔 해저지형, 천부지층 탐사자료 등을 획득하고, 이를 분석하여 연구지역에 대한 지체구조 및 퇴적구조를 파악한 후, 서남극 열개구조의 발달 및 남극 빙상의 발달사를 규명하는 연구 진행 예정.

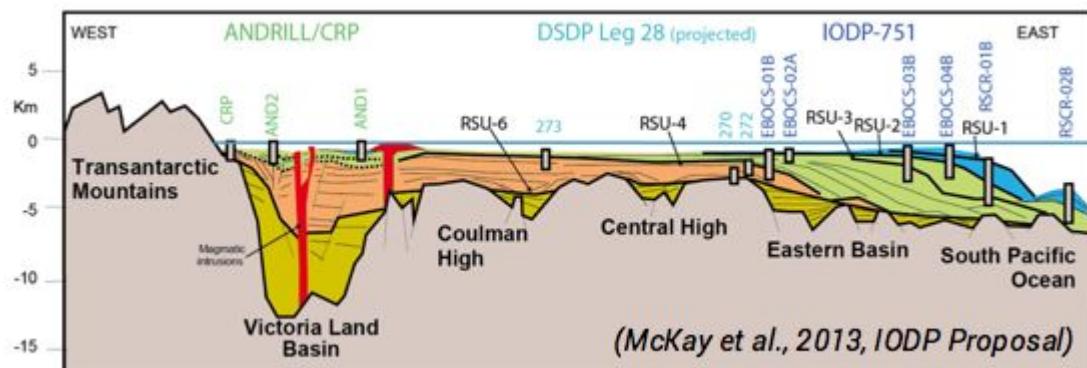


그림 31. 로스해 외대륙경계부를 연구하기 위한 심해시추프로그램 IODP-751 제안지침(McKay et al., 2013)

라. 지구물리 관측망을 이용한 맨틀구조 및 지각활동성 연구

- 미국을 중심으로 남극 대륙 전역에 지진관측망과 GPS 관측망을 설치/운영하던 POLENET Program이 종료되어 현재에는 대단위 지구물리 관측망 연구는 수행되고 있지 않음.
- 특히, 남극 지역에 1년 이상 연속해서 해저지진관측망 구축과 운영은 아직까지 수행된 사례가 없음.

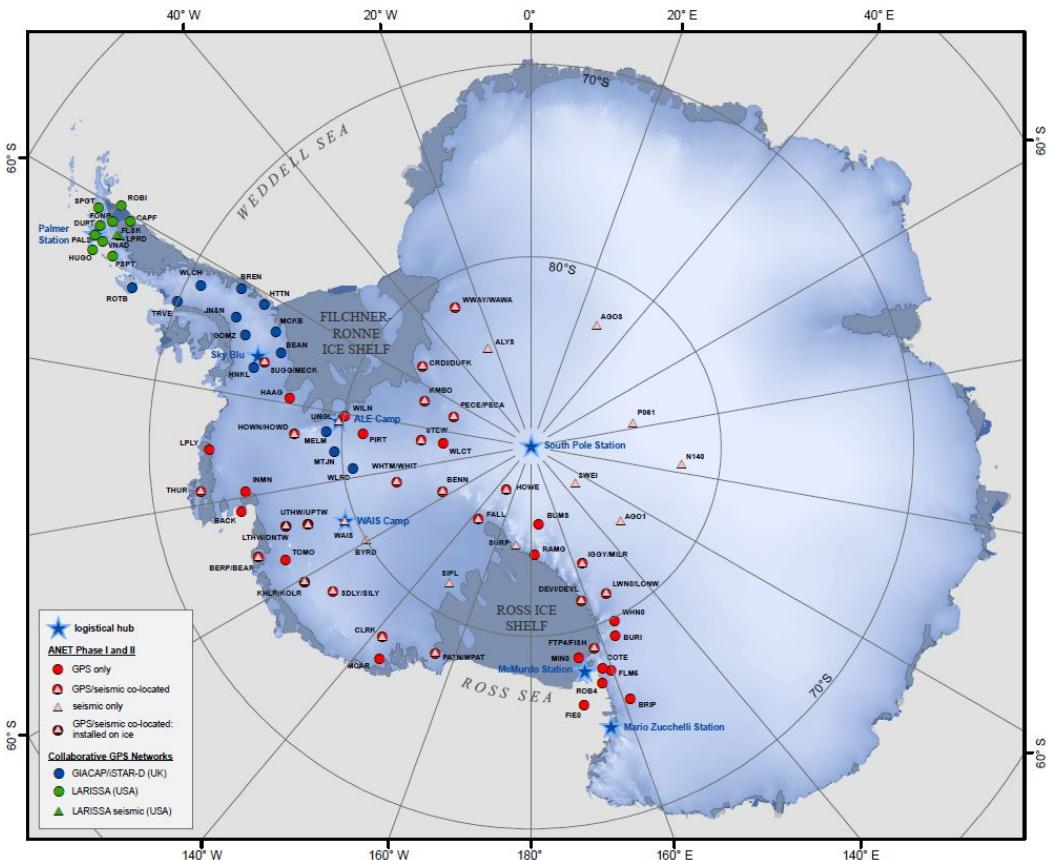


그림 32. 현재 운영되고 있는 POLENET 지구물리 관측망. 장보고 기지 주변과 해양에는 지구 물리 관측소가 없음.

3. 열개구조에서의 지질학적인 물성연구

가. 서남극 Adare Trough 주변의 지열특성 연구

- Adare Trough는 수 차례의 미국 해양탐사 결과 (NBP 9702 등)를 바탕으로, 그 확장 시기, 단층의 활동 시기, 화산활동, 탄성파충서 등이 이스라엘(Ben-Gurion University of the Negev), 미국 (Scripps Institution of Oceanography, U.S. Geological Survey), 호주 (University of Sydney) 연구기관들에 의해 연구됨 (Cande et al., 2000, Finn et al., 2005; Dietmar et al., 2005; Granot et al., 2010).
- 이탈리아 OGS에서 서남극 열개구조의 북동쪽 부분에 해당하는 Central Basin 대한 조사를 준비중이며, 책임자는 Dario Civile이고, 프로젝트의 이름은 “CEBA-Crustal nature, structural setting and tectonic evolution of the Central Basin (north-western Ross Sea) in the framework of the geodynamic genesis of the West Antarctica Rift System”.
- 이 프로젝트는 앞으로 2년동안 Central Basin내에서 다채널탄성파 탐사 프로파일, chirp 프로파일, 중력, 자력, 멀티빔 데이터를 획득/분석하여 Central Basin의 지구조, 지각의 성격과 연대, 서남극열개구조 발달 과정 속 Central Basin의 역할 등을 규명하고자 함 (그림 33).

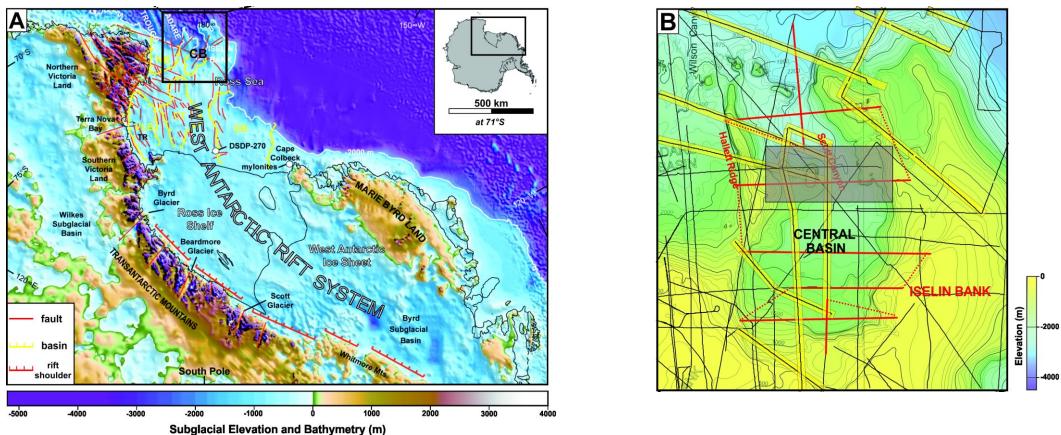


그림 33. CEBA의 제안축선(붉은실선)과 기준 다준채널 탄성파 축선(검은축선)

나. 맨틀포획암의 미세구조 및 화학성분 분석을 통한 서남극 열개구조 진화의 이해

- 감람석(olivine)에 대한 변형실험 및 미구조 연구는 1980년대부터 미국 예일대학교 Shun-ichiro Karato 교수에 의해서 진행되었고, Jung and Karato(2001)에 의해서 감람석의 결정배열 방향성(CPO)이 응력(Stress)과 물의 함량(Water contents)에 따라서 결정된다고 요약 보고되었음(그림 34). 프랑스 몽펠리에 대학교의 David Mainprice 교수가 개발한, CPO를 바탕으로 지진파 특성을 계산하는 프로그램과 현재 관측된 지진파 이동 방성(seismic anisotropy)을 이용해서 맨틀 내 감람석의 배열 및 맨틀의 이동을 설명하는 등 많은 후속연구들이 뒤잇고 있음(예, Ben-Ismail et al., 2001).
- 뒤이어 많은 연구자들에 의해서 자연적으로 산출하는 감람석이 연구되어, 3가지 패턴이 추가된 총 6개 CPO를 가지는 것을 발표하고, 실험적 방법으로 입자크기-응력의 상관관계를 나타내는 piezometer를 보고하는 등 감람석을 이용한 맨틀의 구조 및 진화에 대한 연구가 비교적 잘 진행되어 있음.
- 극지방에서 채취한 맨틀암석에 대한 미구조 연구는 상대적으로 부족한 상황임.
- 특히 최근에는 EBSD를 이용해서 결정방향성 지도를 획득하고, 그 결과를 바탕으로 많은 미구조 연구가 진행되고 있음.

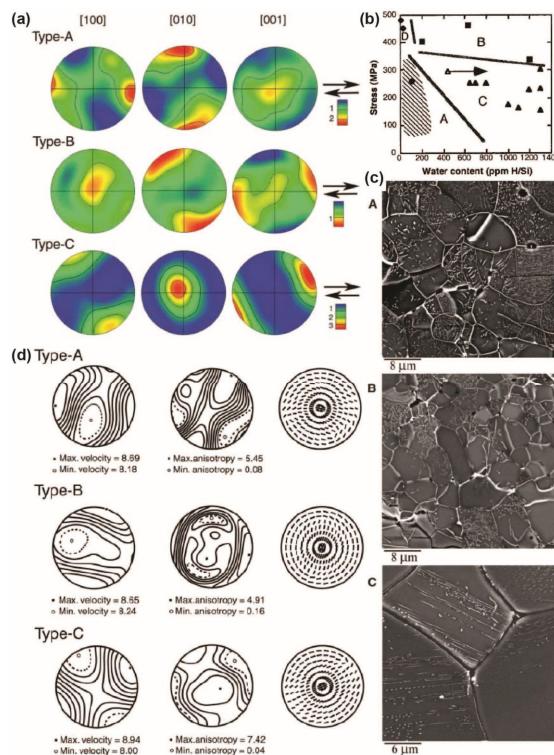


그림 34. 최초로 보고된 감람석의 CPO 타입(a)과 각 타입에 따른 응력, 수분 함유량(b), 변위의 미구조(c), 및 지진이방성 발생양상(d). Jung & Karato (2001)에서 발췌.

다. 서남극 열개구조의 화성암과 퇴적물에 내재된 Spinel 광물의 자화특성 규명 연구

- 화성암과 퇴적물 내재 Spinel 광물의 자화특성 규명 연구를 독자적으로 수행할 장비를 완벽히 갖춘 선진국의 실험실 보유기관은 미국의 Scripps Institution of Oceanography, Massachusetts Institute of Technology, University of Minnesota, 프랑스의 Institut de Physique du Globe de Paris, 중국 Chinese Academy of Science의 해양지질/지구물리 연구소 (Center of Marine Geology and Geophysics), 캐나다의 University of Toronto, 일본의 Kochi Core Center의 7곳이며, 이들 연구 기관은 5기 이상의 다른 종류의 개별 자화특성 규명 실험 기기를 보유하여 외부 실험실의 도움 없이 독자적인 연구를 완수할 능력을 보유함.
- 국제공인 수준의 연구 결과가 부족한 이유는 국내연구자들의 역량부족 문제라기보다 충분한 양의 시료 확보와 실험장비 부재 등의 연구인프라 장애 때문인 것으로 판단됨.
- 화성암과 퇴적물 내재 Spinel 광물의 자화특성 규명 연구 분야에서 세계 최고 수준과의 기술 격차는 10년정도라 진단할 수 있으며, 따라서 연구비와 장비 부문에 대한 현실적인 지원이 뒷받침된다면, 소행성체 진화규명 분야에서 10여년 안에 세계적인 저명 연구팀으로 성장이 가능.

제 3 장 연구개발수행 내용 및 결과

3-1. 연구개발 목표 및 내용

연구개발 목표	내용
	<p>항공-해상-인공위성 중력자료를 이용한 빅토리아랜드 및 로스해 지각의 두께 및 내부구조 연구</p> <ul style="list-style-type: none">○ 아라온 중력계 자료의 검교정 및 정확도 기법 연구○ 로스해-빅토리아 랜드 중력이상도 작성○ 중력 이상을 이용한 지각 두께 산출○ Terror Rift 횡단 측선을 따른 선상-항공 중력 탐사 자료 역산
로스해 인근 서남극 열개구조의 광역 지체구조 연구	<p>서남극 경계대의 자력이상값을 통한 지구조 연구 : 빅토리아랜드와 월크스분지</p> <ul style="list-style-type: none">○ 항공 및 위성자력 자료를 이용한 연구 지역 자력 이상 연구 : ADMAP-2 자료를 이용하여 지구조 파악, Swarm자료를 이용하여 남극 위성 자기이상도 제작, 위성자기이상도를 통한 항공 자기 이상 보완○ Marie Byrd Land 지역과 Victoria Land 지역의 지구물리 두께 연구 : 메리버드랜드지역의 병합(Joint) 지각이상 모델 제작 및 자력 지각두께 파악○ 지구물리자료를 이용한 고지형 복원 연구 : 다른 지구물리 지각두께와 비교 및 서남극주변의 지구물리자료의 고지형 복원 및 해석
심부 지각구조 및 지각활동성 연구	<p>해저면 지진계 (OBS) 탐사를 이용한 Terror Rift 구조연구</p> <ul style="list-style-type: none">○ 국제공동연구를 통한 해저면 지진계 데이터 획득 : 독일 AWI에서 대용량 에어건, 해저면지진계 대여 및 이를 활용하여 남극 로스해 북부지역 OBS 데이터 획득○ 모호면 반사파 및 심부지각 구조 규명 : 데이터처리를 통한 심부 탄성파 단면도 작성 및 해석○ 수치해석학적 기법을 이용한 속도모델 구축 : 파동전파 모델링 및 파형역산 알고리즘을 통한 해당지역 심부 지층구조에 대한 속도 모델 구축 및 해석
	<p>수중음향데이터 분석을 통한 서남극 발렌니군도 주변 화산 활동 관측</p> <ul style="list-style-type: none">○ 이전 과제를 통해 획득한 수중음향 데이터 처리 : 주파수 특성분석 및 에너지 방사량 계산을 통한 수중음향 발생관련 메커니즘 모델링 연구○ 자료분석 및 해석 : 서남극 Balleny 군도 인근에서의 상세지진활동성 분석○ 수중음향신호를 통해 추적이 가능한 다각적인 음원분석 : 해당 지역에서 발생하는 빙권 및 해양생물의 거동 관찰

	<p>탄성파 탐사자료를 이용한 남극 로스해 외대륙경계부 지체구조 연구</p> <ul style="list-style-type: none"> ○ 탄성파 탐사자료 획득 및 처리기술 습득 : 이탈리아 연구선(OGS Explora)을 이용한 2016-2017 남극 로스해 탐사에 참여하여 탄성파 탐사자료 획득 및 처리기술 습득 ○ 남극 로스해 외대륙경계부 지체구조도 작성 : 탄성파 단면상에 나타나는 음향기반암을 규정하고, 기존 연구결과와 결합하여 남극 로스해 외대륙경계부에 대한 지체구조도 작성 ○ 서남극 열개구조의 특성 및 발달시기 규정 : 탄성파 탐사자료를 이용한 지체구조 분석을 바탕으로 중자력 탐사 및 기존 연구결과를 종합하여 서남극 열개구조의 특성과 발달과정 유추
	<p>지구물리 관측망을 이용한 맨틀구조 및 지각활동성 연구</p> <ul style="list-style-type: none"> ○ 광대역 해저면 지진관측망 구축과 남극 열개구조의 생성과 진화 연구 : 육상 및 해상에서의 광대역 지진관측망을 이용한 지각 및 맨틀속도구조 규명 ○ 지진발생 현황분석을 이용한 서남극 열개구조 활동성 규명
	<p>서남극 Adare Trough 주변의 지열특성 연구</p> <ul style="list-style-type: none"> ○ 기존 과제에서 현장탐사를 통해 Adare Trough에서 획득한 ANA06C의 결과를 분석 ○ Central Basin에서는 SDLS에 공개된 다중 탄성파 측선 중 동-서 방향의 IT91-AR88B 측선을 따라 해양지열 정점을 선택하여 관측 ○ 지열결과를 바탕으로 Adare Trough의 열구조 규명
<p>열개구조에서의 지질학적인 물성연구</p>	<p>로스해 북부 신생대 해저화산활동: 맨틀포획암의 미세구조 및 화학성분 분석을 통한 서남극 열개구조 진화의 이해</p> <ul style="list-style-type: none"> ○ 감람석과 다른 광물들 간의 위상관계 규명 ○ 암석의 변성 및 변형온도, 광물의 CPO 연구 ○ CPO의 미세구조 지수각도(Fabric Index Angle) 측정 <p>서남극 열개구조의 화성암과 퇴적물에 내재된 Spinel 광물의 자화특성 규명 연구</p> <ul style="list-style-type: none"> ○ Spinel 자화분석기법 개발 ○ 퇴적물 코어 자기특성 분석 ○ 해저 암석샘플 자기특성 분석

1. 로스해 인근 서남극 열개구조의 광역 지체구조 연구

가. 항공-해상-인공위성 중력자료를 이용한 빅토리아랜드 및 로스해 지각의 두께 및 내부구조 연구

- 아라온 중력계 데이터의 검교정 및 정확도 기법 연구 :
 - (1) 아라온에 장착된 선상 중력계를 통해 로스해 지역에서 중력자료가 획득되어 왔으나 중력계의 노후화가 진행되고 있어 보다 정밀한 자료 획득을 위하여 중력계의 검교정 작업이 필요,
 - (2) 극지연구소에서 보유하고 있는 지구 조석 중력계(Earth Tide Meter, gPhone), 절대 중력계(absolute gravimeter), 초전도 중력계(superconducting gravimeter)를 이용하여 아라온의 정박시 혹은 시험항해 시기에 동시 측정을 수행하여 중력계들의 상호 검증을 통해 중력계의 정확도 및 잡음 분석을 수행하고자 함,
 - (3) 표 2은 극지연구소가 보유하고 있는 중력계의 현황과 정확도 특성을 나타내며, 아라온의 정박 상태에서 지구조석 중력계와의 동시 측정을 통해 선상 중력계의 정확도를 비교 검증할 수 있고 상대 중력계의 중요한 특성 중 하나인 스프링의 드리프트 현상은 시험 항해 혹은 남극 하계 탐사 기간 중 정박지(남극 기지 등)에서의 절대 중력 관측을 통해 평가 가능,
 - (4) 특히, 남극 장보고 기지를 중심으로 하는 로스해 연구 항차 기간에는 현재 장보고기지에서 운영중인 초전도 중력계를 이용하여 매우 정밀하게 정확도와 드리프트를 평가할 수 있을 것으로 예상됨,
 - (5) 기존 중력 관측 자료의 정확도 평가를 위해서는 최근 GOCE 인공위성 중력자료를 이용하여 제작되고 있는 10km 해상도의 지구 중력 모델(Forste et al, 2015, Hirt et al., 2016)을 활용 기대.

극지연구소

중력계 타입	모델	정확도(prcision)	드리프트(drift)
아라온 선상중력계	Air-Sea II	1.0 mGal	3.0 mGal/month
지구 조석 중력계	gPhone	1.0 μ Gal	0.5–1.5 mGal/month
절대중력계	A10	5–10 μ Gal	—
초전도 중력계	iGrav	0.05 μ Gal	0.5 μ Gal/month
항공 중력계(임대)	GT-2A	0.6 mGal	3.0 mGal/month

표 2. 보유한 중력계 운영계획 및 특징

- 로스해-빅토리아 랜드 중력이상도 작성 :

- (1) 최근 GOCE 인공위성을 이용한 약 10km 해상도(2190 degree 조화 함수)의 범지구 중력모델이 개발되고 있으며(Forste et al, 2015, Hirt et al., 2016), GOCE는 2009년 발사되어 2013년까지 관측을 수행하였음,
- (2) 이 시기에 로스해에서 아라온 중력계를 통해 관측된 중력 측정치는 로스해에서의 GOCE 중력모델의 정확성을 평가하는 좋은 자료로 이용이 가능,
- (3) 남극 육상에서는 오래전부터 주로 항공 중력 탐사가 수행되어 왔으며 Scheinert et al. (2016)은 최근 과거의 많은 항공 및 육상 중력 탐사 자료를 취합하여 남극 대륙내의 중력이상도를 제작한 바 있음,
- (4) 이 연구에서는 로스해-빅토리아랜드를 중심으로한 서남극 열개구조의 연구를 위하여 GOCE 중력 모델과 남극 육상 중력 이상도, 로스해에서의 선상 중력 자료를 취합하여

10 km 해상도의 중력이상도를 제작하고 이를 이용하여 지각 두께 및 지체 구조 연구에 활용하고자 함,

- (5) 프리에어 이상으로부터 부계 이상을 산출하기 위해서는 정밀한 육상 및 해저 지형 자료가 요구되며, 남극 육상의 정밀 DEM자료는 BEDMAP2 혹은 Cryosat-2 인공위성 고도계 자료가 활용될 수 있고, 육상의 기반암 고도 자료는 BEDMAP2 자료를 기반으로 연구소 타과제의 항공 레이더 탐사 수행을 통해 산출되는 현장자료(레이비드 빙하 지역)가 활용됨,
- (6) 정밀 해저 지형 자료는 기존 해저 지형 자료와 아라온 멀티빔 자료의 합성을 통해 획득이 가능.

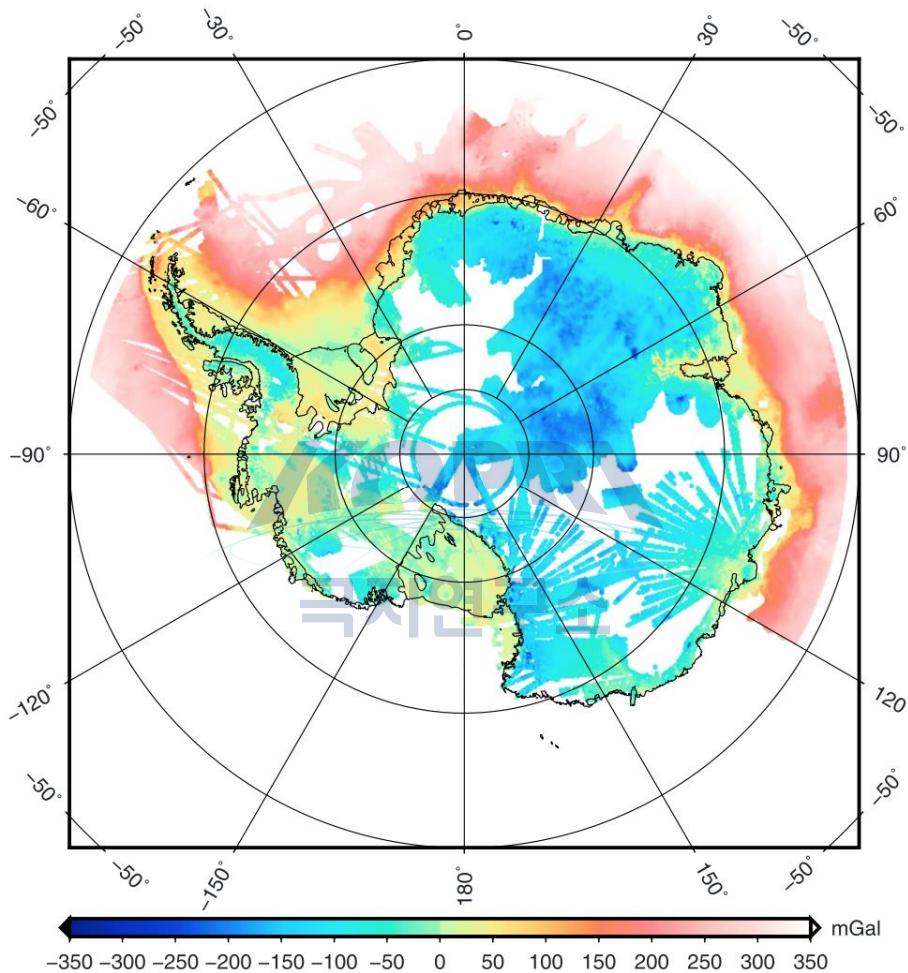


그림 35. 남극 대륙에서 육상 및 항공 중력 탐사에 의해 관측된 부계 중력 이상도
(Scheinert et al., 2016)

- 중력 이상을 이용한 지각두께 산출 :

- (1) 지형 기복에 따른 중력 이상은 Parker (1973)의 알고리즘을 통해 계산할 수 있으며, 중력 이상으로부터 지형 기복을 추정하기 위해서는 Oldenbourg (1974)의 역산 알고리즘을 이용할 수 있음,
- (2) 역산 알고리즘을 이용하여 모호면의 기복을 추정하기 위해서는 부계 이상에 대한 적절한 필터링이 필요하며 약 200-1000km의 파장대에서 모호면 기복의 영향이 가장 큰 것으로 알려짐 (Block et al., 2009),
- (3) 역산에 있어 중요한 또 다른 파라미터들은 모호면의 평균 깊이와 지각-멘틀 간의 밀도차이이며 따라서, 필터링 기법, 모호면의 평균 깊이, 밀도차에 따라서 무수히 많은 역

산해가 존재할 수 있으며 가장 적절한 파라미터의 선정이 무엇보다 중요,

- (4) 많은 역산해 중 최적해를 선택하는데는 장보고 기지 인근에서 운영 중인 지진 관측소에서 산출할 수 있는 receiver function 해 혹은 Terror Rift 측선을 따라 수행될 탄성파 굴절법 실험을 통해 얻어진 모호면의 깊이가 제한 조건으로 이용될 수 있음,
(5) 필터링을 위해서는 웨이블릿 등 다양한 필터링 기법이 적용 가능하며, 지각-맨틀간의 밀도차는 지진파 혹은 탄성파 실험 자료로부터의 획득되는 지각-맨틀간 탄성파 속도차를 이용하여 속도-밀도차 변환 계수(velocity-density conversion factor)의 최적화를 통해 보다 타당한 추정이 가능할 것으로 사려됨.

- Terror Rift 횡단 측선을 따른 선상-항공 중력 탐사 자료 역산 :

- (1) 이번 연구과제에서는 Terror Rift를 가로지르는 약 200km 측선을 따라 OBS 및 육상 지진계를 설치하고 액티브 소스를 이용한 굴절법 탄성파 실험이 수행될 예정,
(2) 이 측선을 따라 선상중력계 자료와 항공 중력 탐사 자료를 획득하여 탄성파 단면 영상화의 보조 자료로서 2차원 중력 역산을 수행하고자 함,
(3) 선상 중력 측정은 아라온의 Air-Sea II 중력계에 의해 이루어지며 육상에서는 헬리콥터에 탑재된 GT-2A 항공 중력계가 이용될 예정임,
(4) 각각의 중력계는 장보고기지에 설치된 초전도 중력계와 절대 중력계를 통해 정밀 보정을 수행하며, 아라온의 멀티빔 자료와 항공 레이더 탐사를 통한 기반암 기복 정보를 이용하여 정밀한 부계 이상을 산출이 가능,
(5) 2차원 모호면 역산, 탄성파 단면을 이용한 순산 모델링 혹은 밀도 역산 등을 통해 지각내 밀도 구조 및 지각-맨틀 경계 구조를 추정할 수 있음.

나. 서남극 경계대의 자력이상값을 통한 지구조 연구 : 빅토리아랜드와 월크스분지

- 항공 및 위성 자력자료를 통한 연구 (1차 년도) :

- (1) 항공 자력이상 자료는 선구조 (단층 및 관입암상) 등을 파악하는 데 효과적이며 암맥 및 화산관입 (volcanic intrusive)을 찾아내는 데 활용할 수 있으며, 이는 연구지역이 신생대 이후 많이 발생된 여러 화산활동 지역을 찾아 내며 이에 관련된 지구조를 밝히는 데 활용될 수 있음,
(2) 높아진 해상도를 갖는 위성 자력 이상 지도를 통해 상대적으로 낮은 자력 이상값을 갖는 지역은 맨틀이나 고온의 마그마의 상승이나 주변부 보다 얕은 지각 두께를 의미하며 이러한 특징은 광역적인 자력 위성자료가 더 효율적으로 판단할 수 있음,
(3) 위성 고도에서 얻은 자력 이상값을 활용하여 항공 고도에서 탐사가 이루어지지 않은 지역의 이상값을 예측하면 연속적인 지구조 특징을 파악할 수 있음.

- 연구지역의 자력 두께 연구 (2차 년도) :

- (1) 병합한 지각 자력 이상 모델링 - 항공 고도와 위성 고도 모두에 일치하는 지각 이상 자력 모델을 제작하여 이를 통해 고도에 따른 자력 이상의 변화 양상을 파악 즉, 자력 이상체의 심도를 파악할 수 있으며 지구조의 연속성 및 특징을 파악할 수 있음,
(2) 자력두께 연구 - 획득한 자력모델을 통한 자력이 유효한 쿼리온도까지의 등온깊이 파악.

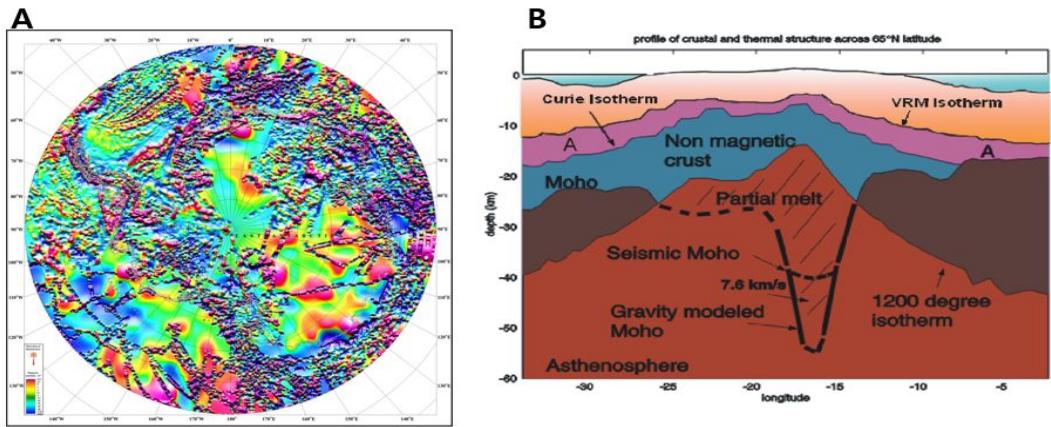


그림 36. (A) Gap-filled Antarctic magnetic anomaly map (ADMAP-1) with Orsted satellite observations (B) Different Moho depth profiles (such as gravity-derived, magnetic-derived and seismic derived) over Iceland due to the hotspot environments in the Mid-Atlantic ocean ridge.

- 지구물리 지각 두께 비교 및 고지형 복원 (3차 년도) :

- (1) 구해진 자력 두께 및 중력이상을 통해 얻은 두께와 지진파를 이용한 지각 두께를 파악하여 상대적으로 맨틀이 상승되어 있는 지역 및 열점(hotspot)에서의 지구조를 파악함 (Winberry and Anandankrishnan, 2004),
- (2) 해양 자력이상에서 얻어진 회전각(rotation angle)을 이용하여 과거의 지각대륙등의 위치를 파악하고 이에 여러 지구물리 자료등을 획득하여 그 시대의 고지형을 복원 (reconstruction)하고 이에 대한 지구조 해석을 시도 (그림 37)하여 맨틀의 구조와 이와 관련된 판구조적 특징을 파악 가능.

극지연구소

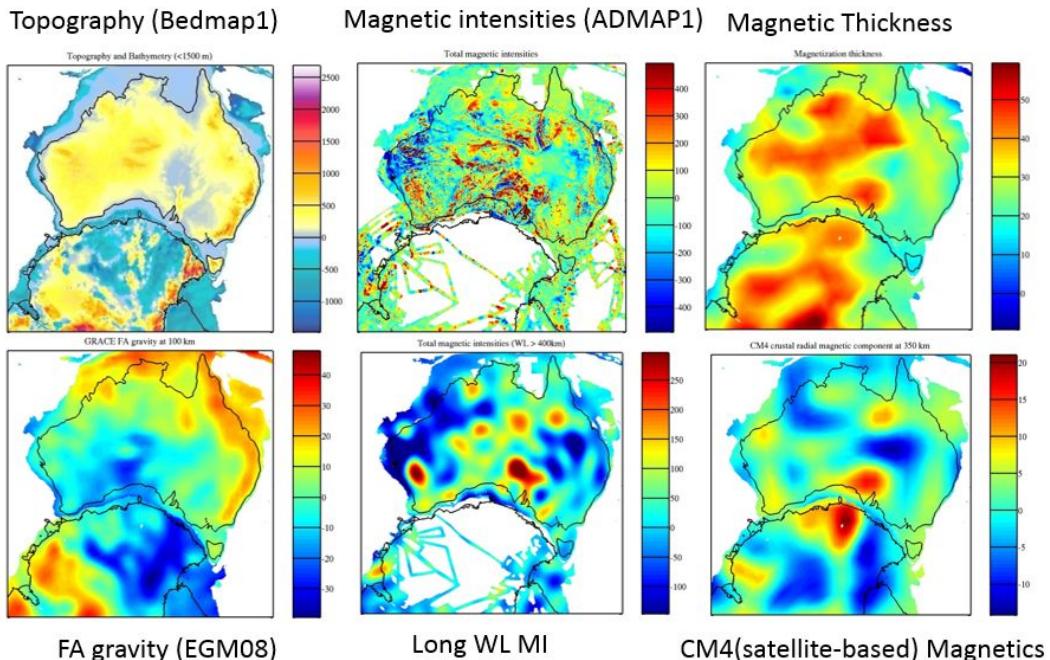


그림 37. Plate reconstruction about Mesozoic era (Gondwana breakup) when the Australia was detached from East Antarctica, with different geophysical information to support the correlative features between two continents

2. 심부 지각구조 및 지각활동성 연구

가. 해저면 지진계 (OBS) 탐사를 이용한 Terror Rift 구조연구

- 데이터취득 :

- (1) 독일 AWI와 공동연구를 수행하여 OBS 장비 및 대용량 에어컨 확보,
- (2) 쇄빙연구선 아라온호를 이용하여 로스해 북부 지역 대륙붕을 횡단하는 축선에서 OBS설치 및 다중채널 탄성파 탐사 수행,
- (3) 해저 심부지층규명을 위한 OBS 데이터 및 퇴적지층 규명을 위한 탄성파데이터 획득.

- 데이터처리 및 해석 :

- (1) 신호처리기법 및 굴절파 신호를 이용한 데이터처리 수행,
- (2) 굴절파 토모그래피 기법을 이용한 심부 속도구조 및 탄성파 단면도 작성,
- (3) 파형역산 알고리즘을 활용하여 대상 지역에 대한 고해상도의 속도모델 구축,
- (4) 자료처리 결과 및 속도모델을 바탕으로 탐사지역 심부지각구조 및 해양지각 특성규명.

나. 수중음향데이터 분석을 통한 서남극 발레니군도 주변 화산활동 관측

- 이전 연구과제를 통해 쇄빙연구선 아라온호와 NOAA/PMEL에서 대여한 수중음향장비를 활용하여 지역의 특성상 접근이 열악한 서남극 Adare Trough 인근 신기지체구조활동에 대한 수중음향데이터 습득 완료.

- NOAA/PMEL과 데이터에 대한 분석 수행 및 해석에 대한 국제공동연구 진행 예정

- 분석결과를 바탕으로 서남극 발레니 군도 인근 화산활동 및 신기지체구조 활동성 규명

- 수중음향 데이터를 바탕으로 빙권 및 해양생물의 거동을 관찰할 수 있는 기초자료 구축

다. 탄성파 탐사자료를 이용한 남극 로스해 외대륙경계부 지체구조 연구

- 2016-2017 남극하게탐사기간 중 이탈리아 남극연구프로그램(PNRA)의 일환으로 수행될 다채널 탄성파 탐사자료 획득에 참여하고, 자료처리 기술을 습득.
- 해당 탐사는 이탈리아 연구선 OGS Explora를 이용하여 동부 로스해의 Hillary Canyon and Mounds, 북서부 로스해의 Central Basin 인근에서 수행될 예정.
- 탐사자료는 국제심부시추프로그램(IODP-751; McKay et al., 2013)을 위한 정점확인 및 연구가 부족한 지역에 대한 기존 탐사축선을 연장하는 방식으로 수행될 예정.
- 탐사자료 획득에 참여함으로써 탐사자료를 서남극 열개구조의 발달과 관련된 남극 로스 해 외대륙경계부의 지체구조 파악에 대한 공동연구를 수행할 수 있을 것으로 기대되며, 승선기간 중, 현장탐사자료 처리 기법을 습득하여 향후 쇄빙연구선 아라온을 이용한 탄성파 탐사자료 현장처리에 적용 가능하도록 할 예정.

- 남극 로스해 외대륙경계부는 1980년대 이후 많은 해양지구물리 탐사가 수행된 내대륙붕과 달리 탐사자료가 부족함.
- 1995년 국제공동연구로 수행된 남극대륙경계부 지질·탄성파 층서 연구(ANTOSTRAT; Brancolini et al., 1995; Cooper et al., 1995; De Santis et al., 1995)는 로스해에서 수행된 탄성파 탐사자료를 종합하여 음향기반암을 규정하고, 로스해 전체에 대한 지체구조도를 작성하였지만 탐사자료가 부족한 외대륙경계부에 대한 지체구조에 대한 연구는 최근 북빅토리아랜드 인근 Adare Basin, Adare Trough 지역에 대한 연구 (Granot et al. 2010, 2013; Selvans et al., 2012, 2014) 외에는 많이 이루어지지 않은 상황임.
- 연구자료가 부족한 Hillary Canyon and Mounds, Central Basin 지역에서 획득한 탄성파 탐사자료를 기반으로 기존 ANTOSTRAT 프로젝트 이후 수행된 탐사자료 등을 결합하여 기존 지체구조도를 외대륙경계부로 확장하고, 이를 통해 서남극 열개구조의 발달의 이해에 기여하고자 함.
- 기존 탄성파 탐사자료 및 새롭게 획득될 탐사자료를 결합하여 로스해 외대륙경계부에 대한 지체구조도를 작성하고, 중·자력 탐사자료 결과와 비교하여 Hillary Canyon and Mounds, Central Basin의 확장형태, 확장시기, 기반암구조 등을 기준 연구결과와 비교 분석할 예정.

- 서남극 열개구조의 확장 시기를 규정하고, 발달 순서를 분석하여 서남극 열개구조의 발달에 따른 남극 빙상발달과의 연관성 (Wilson and Luyendyk, 2009; Wilson et al., 2012), 남극-오스트리아-뉴질랜드의 분리와 발달사 (Cande et al., 2000; Cande and Stock, 2004), 신생대 남극빙상 모델링 (Golledge et al., 2015; DeConto and Pollard, 2016; McKay et al., 2016) 등에 기여할 수 있을 것으로 사려됨.

라. 지구물리 관측망을 이용한 맨틀구조 및 지각활동성 연구

- 원격지진의 실체파와 표면파 경로와 주행시간을 이용하여 지각과 맨틀의 속도 구조를 모델링을 수행.
- 개발된 속도 모델은 지구 내부 지각과 맨틀의 밀도 혹은 온도로 환산이 가능하고, 이 결과를 이용하여 연구지역의 서남극 열개구조의 형성 원인을 유추할 수 있을 것으로 기대.
- 실체파을 이용한 3차원 속도 모델링 기법은 그림 38에서 보여주는 것과 같이 지진파의 전파 경로와 관측소간의 간격, 그리고 관측망의 크기에 따라 역산할 수 있는 최상 해상도의 모델 크기가 정해짐.
- 관측소간의 간격이 조밀할수록 모델링할 수 있는 깊이는 얕아지며 관측망의 크기가 클수록 최적 해상도의 깊이는 깊지며, 원격 지진의 실체파는 관측망 지역에서 수직으로 입사하기 때문에 수평으로 좋은 해상도를 가지고 있으나, 수직으로는 실체파의 전파경로

를 따라 실제 이상 속도 구조들이 늘어지는 현상이 있어서 수직 해상도는 좋지 않음.

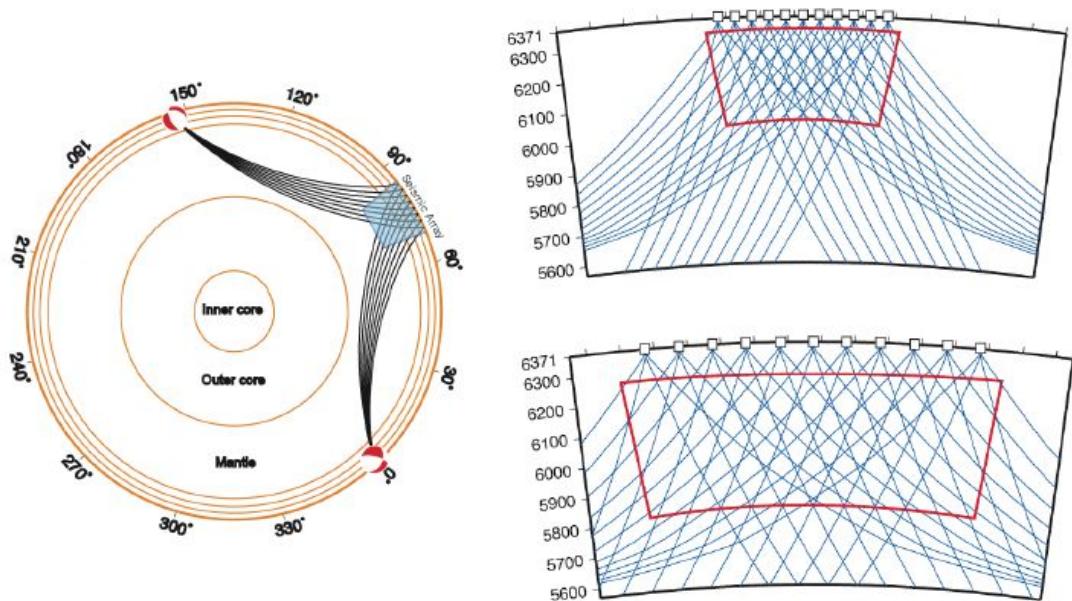


그림 38. 원격 지진 실체파의 전파경로 예시. 진원거리가 30° ($\sim 3336\text{km}$)와 90° ($\sim 10,007\text{km}$) 사이에서 발생한 원격 지진(우)이 관측소간의 거리와 관측망의 크기에 따른 최적의 해상도를 보이는 모델링 구간 (우: 붉은선 지역).

- 실체파를 이용한 3차원 속도구조 모델링 기법이 가지는 수직 해상도의 한계를 보완하기 위하여 표면파를 이용한 3차원 모델링 기법을 수행.
- 표면파는 매질의 표면을 따라 각 주파수가 다른 속도로 전파되는 현상인 표면파 분산이 발생하는데 (그림 39), 이 특성을 이용하여 지각과 맨틀의 속도구조를 3차원으로 모델링을 실시.
- 표면파는 매질의 표면을 수평으로 이동하고 각 주파수는 특정 깊이를 따라 이동하기 때문에 실체파 모델링과는 반대로 매우 우수한 수직해상도를 보이고 비교적 낮은 수평해상도를 갖는다. 따라서 실체파 모델링과 표면파 모델링을 수행하면 높은 수평/수직 해상도를 갖는 지각과 맨틀의 3차원 속도구조 연구 가능.
- 현재 장보고 기지에서 남쪽으로 20~80km 떨어진 지역에서 다수의 지진들이 관측(그림 39)되고 있으며, 이 지역은 선마극 열개구조를 이루고 있는 Terror Rift가 존재하는 지역임.
- 관측된 지진은 아마도 열개구조 활동으로 발생하는 것으로 추측되며, 이를 뒷받침할 수 있는 지진원의 위치, 특히 정확한 깊이를 결정하기 위해서는 많은 양의 관측자료가 필요함.
- 진원의 위치 결정의 경우 일반적으로 지진파의 관측시간을 역산하여 추정하며, 이에 따라 정확한 위치와 진원시를 알기 위해서는 반드시 진원 주변에 지진관측소가 존재하여

야 하며, 진원에 가까운 곳에 관측소가 위치할수록 정확한 진원의 깊이 추정이 가능함.

- 본 연구에서는 관측된 지진파 자료를 바탕으로 해당 지진 이벤트에 대한 위치 결정을 위해 초동 P파와 정화한 S파, 즉 관측 가능한 Sg 파를 보완 인자로 사용하는 주행시간 역산법(Travel-time inversion)을 활용하고자 함.

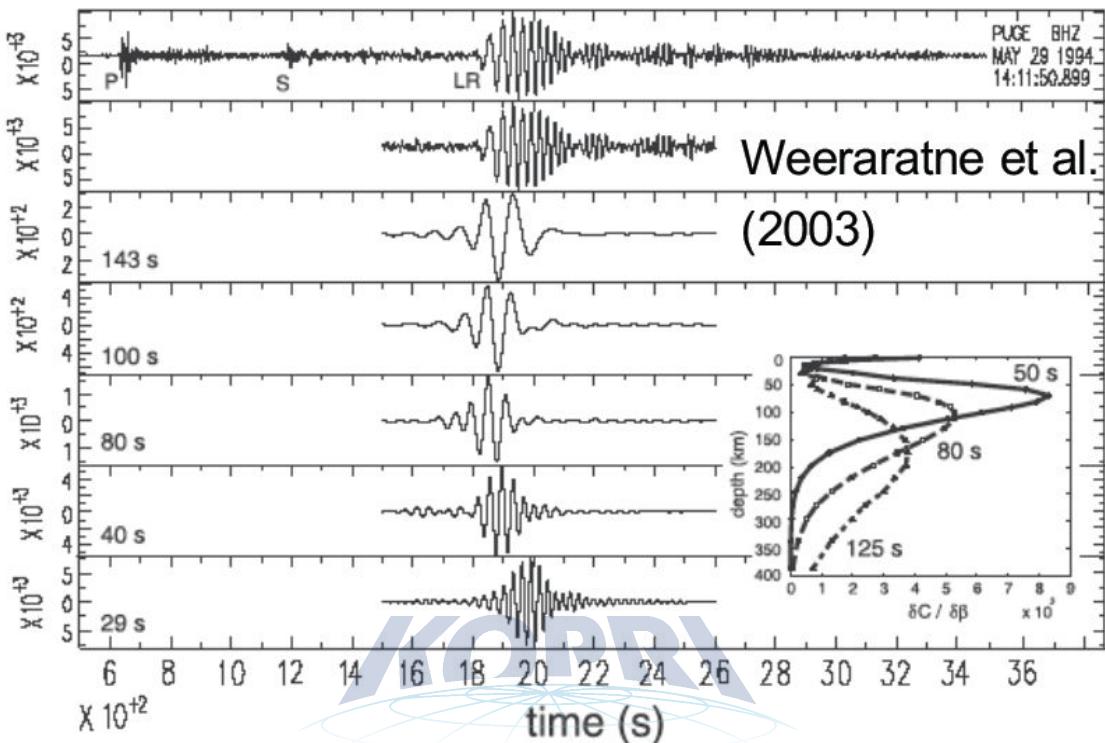


그림 39. 표면파의 주파수와 전파 깊이의 관계: 주기가 긴 표면파일수록 깊은 지역의 속도를 나타냄.

3. 열개구조에서의 지질학적인 물성연구

가. 서남극 Adare Trough 주변의 지열특성 연구

- 이미 탄성파 프로파일 해석이 완료된 Adare Trough와 Central Basin의 동-서 방향 탄성파 측선을 따라 해양지열류량을 관측하고자 하며, 이를 통해, 확장 방향을 따른 2차원적 지열분포를 알 수 있고, 특정한 경향성 혹은 값이 관측이 되는 경우 열개구조 하부의 연약권 온도 내지는 지각의 두께, 종류 등을 추정이 가능.
- 세부적인 해양지열연구 진행방향 :
 - (1) SDLS에서 공개된 동-서 방향의 탄성파 측선 중 해석이 완료된 측선을 선택. Adare Trough에서는 NBP9702, Central Basin에서는 IT91-AR88B,
 - (2) 알려진 탄성파 해석결과, 다중빔 결과, 천부지층 결과를 바탕으로 지열관측에 유리한 지점을 선택. 일정간격 (~10 km)이 떨어지도록 선택지점을 조정. 해빙상황, 할당된 연구 항해시간에 따라 간격은 현장에서 조정 가능,
 - (3) 지역당 1~2개의 해양지열 관측정점에서 중력코어링과 CTD캐스팅을 수행하여, 퇴적물 코어와 해수 온도 프로파일링 획득. 퇴적물 코어에 대해서는 추가적으로 퇴적물의 물성 분석, 열전도도 관측을 수행,

- (4) 선택된 탄성파 축선을 따라 수심 단면도를 작성하고 해양지열관측 정점 도시 후 해양 지열관측 결과 도시,
- (5) 수온, 지형 등 해양지열류량에 영향을 줄 수 있는 요인들에 대한 보정 수행,
- (6) 알려진 지각 종류-연대-지열류량 관계를 바탕으로 해당 지역의 해양지열류량을 비교 분석하여 열구조에 대한 추정.

나. 맨틀포획암의 미세구조 및 화학성분 분석을 통한 서남극 열개구조 진화의 이해

- 현무암 내 맨틀포획암의 화학성분 및 미구조 연구는 크게 세가지 방향으로 요약
- 첫 번째는 감람석과 다른 광물들 간의 위상관계(topotactic relation)에 대한 연구로, 각 광물의 결정배열 방향성(CPO) 비교를 통해서 본 연구를 진행할 계획임. 예를 들면, 일반적으로 감람석이 B형(B-type) CPO를 가지는 경우에 감람석의 소성변형(plastic deformation)에 의해 형성된다고 알려져 있음. 하지만 Nagaya et al. (2014)은 이것이 감람석 이전의 광물형태(precursor mineral)인 사문석(serpentine, 이 경우에는 antigorite)의 CPO 때문에 형성된다고 보고했음(그림 40). 우리는 이 연구결과를 바탕으로 감람석과 다른 함수광물들의 CPO 관계에 대해서 연구할 것임.
- 두 번째는 총괄적인 암석학적 연구로, 암석의 변성 및 변형온도, 광물의 CPO 연구 등이 주요타겟임. 지난 10여년 간, 광물의 CPO 연구는 구조지질학적인 면으로 치우쳐왔고, 최근들어 변성암석학적 측면이 강조되고 있음(예, 그림 41). 이런 연구를 통해서 좀더 자세한 미구조의 형성과정을 밝히게 되고, 큰 규모로 본다면 판의 구조 및 변화역사에 대해서 자세한 과정을 규명할 수 있음.

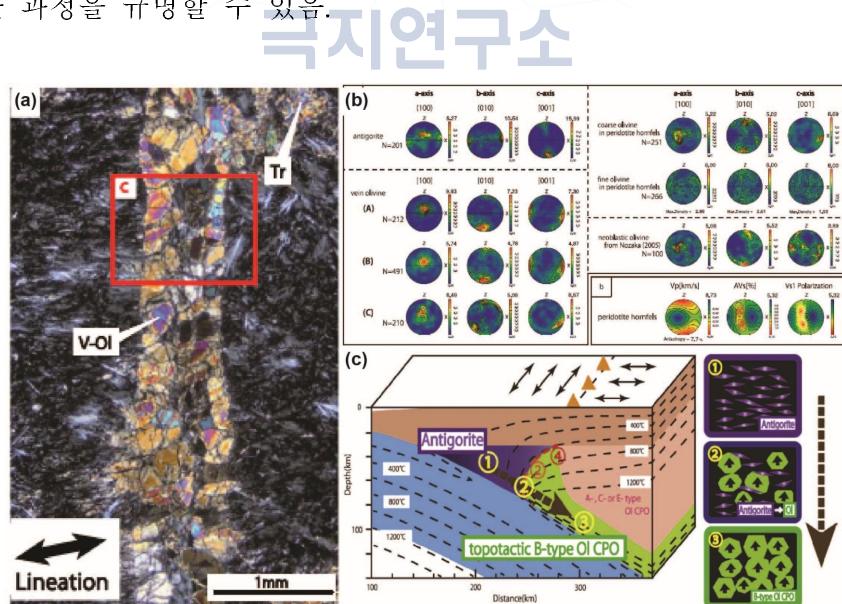


그림 40. 사문석으로부터 탈수변성을 겪어 형성된 감람석의 박편사진(a), CPO(b), 및 위상관계(Topotactic relation)(c). Nagaya et al. (2014)에서 발췌.

- 세 번째는 최근에 발표된 CPO의 미세구조 지수각도(Fabric Index Angle, FIA)에 대한 연구로, 새로운 개념인 FIA의 의미와 그 효용성에 대한 것이 주요목표임(e.g., Michibayashi et al., 2016)(그림 41). 위의 세가지 연구를 통해서 로스해 북부 서남극 열

개구조의 지체구조에 FIA와 CPO가 지시하는 환경을 연구하고 이를 바탕으로 지체구조 변화에 대한 정보를 획득할 예정임.

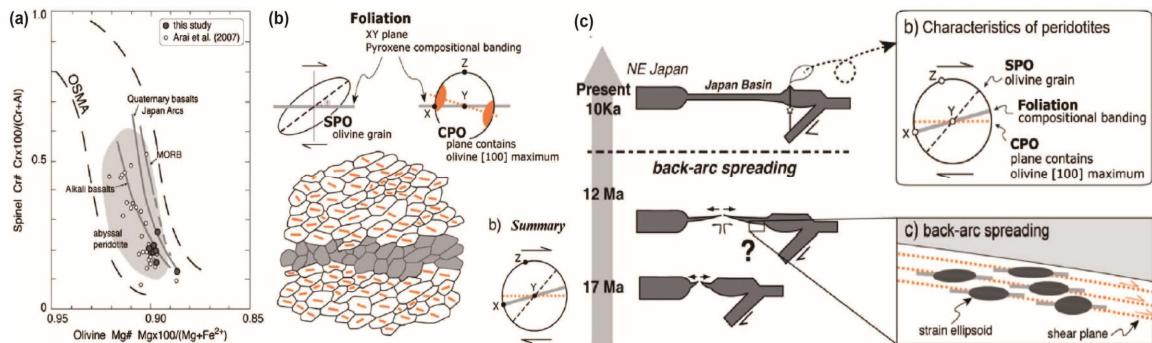


그림 41. 첨정석(spinel)의 Cr과 감람석의 Mg와의 관계(a), CPO와 SPO(shape preferred orientation)의 관계(b), 및 Ichinomegato Volcano의 맨틀진화 모델(c). Satsukawa & Michibayashi (2014)에서 발췌.

- 위 연구들은 드레지지를 통해서 바다 속의 맨틀포획암을 주요 타깃으로 함.
- 화학성분 분석법(XRF, EPMA)과 미구조분석법(EBSD)을 바탕으로 실시하고, 국내 대학(서울대), 연구소(KITEC) 및 국외대학(뉴질랜드 오타고대학교 Prior교수, 일본 나고야대학교 Wallis교수 등)들과 연계해서 진행할 예정임.

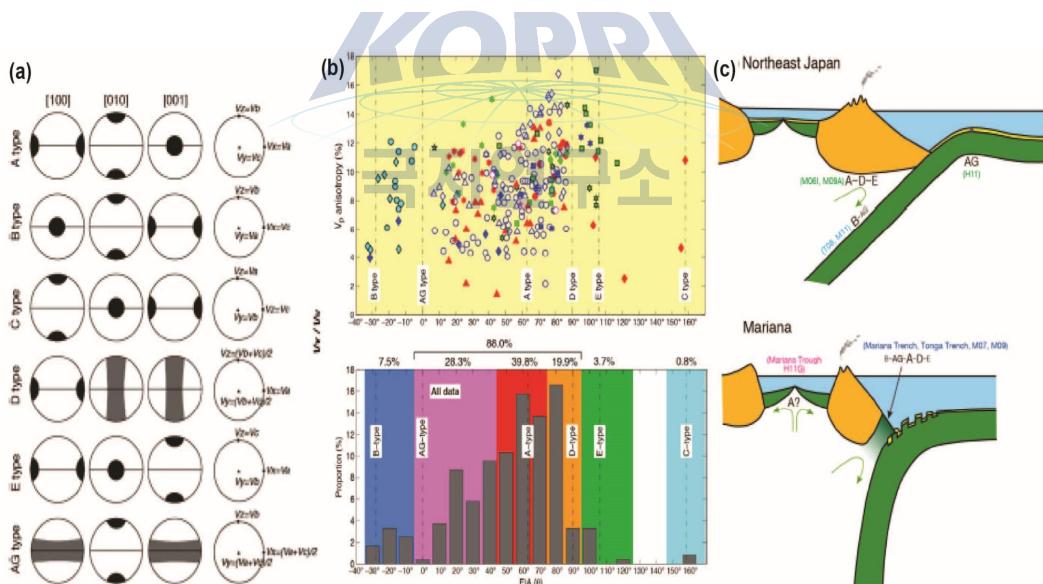


그림 42. 감람석의 CPO에 따른 분류(a), FIA와 P파 이동방성, 6가지 CPO의 분포(b) 및 태평양 서부 섭입대에 감람석의 CPO를 적용시킨 모델(c). Michibayashi et al. (2016)에서 발췌.

- 맨틀포획암 내 감람석의 CPO는 감람석이 맨틀 내 존재할 때 변형작용에 의해서 형성된 것으로, 화학적으로 간단하고 비교적 연구가 잘 되어 있는 감람석은 CPO 패턴에 따라 광물이 변형될 때의 응력 및 물의 함량을 지시함.

다. 서남극 열개구조의 화성암과 퇴적물에 내재된 Spinel 광물의 자화특성 규명 연구
 - 퇴적물 Spinel 분석

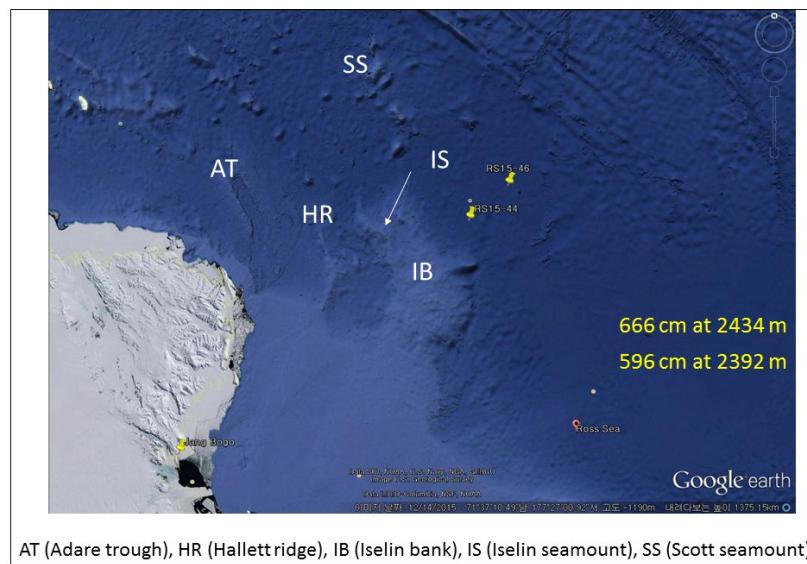


그림 43. 수심 2434 m에서 획득한 RC15-GC44 피스톤 코어와 수심 2392 m에서 획득한 RC15-GC46 피스톤 코어에서 채취한 퇴적물 시료를 사용, 국제협력을 통하여 시료 확보-이태리 OGS로부터 시료확보 추진

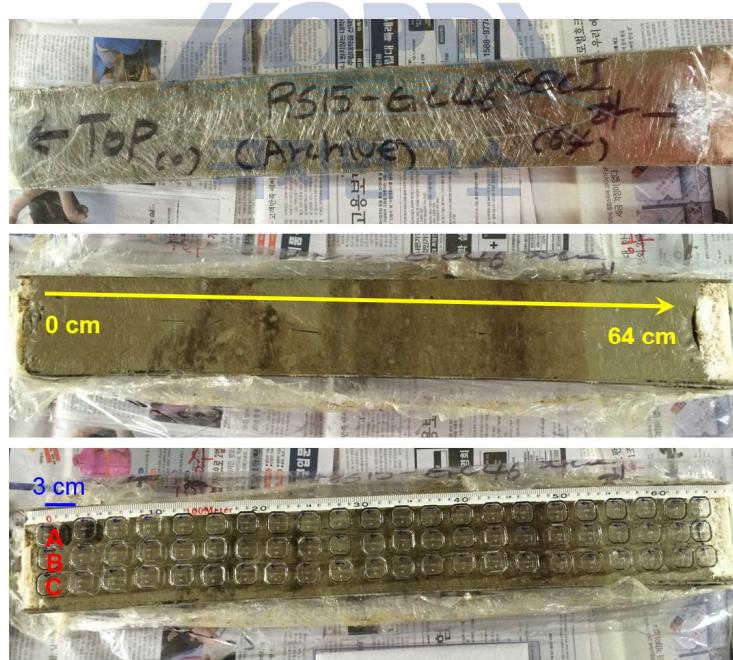


그림 44. 코어 샘플

- 자화도 분석

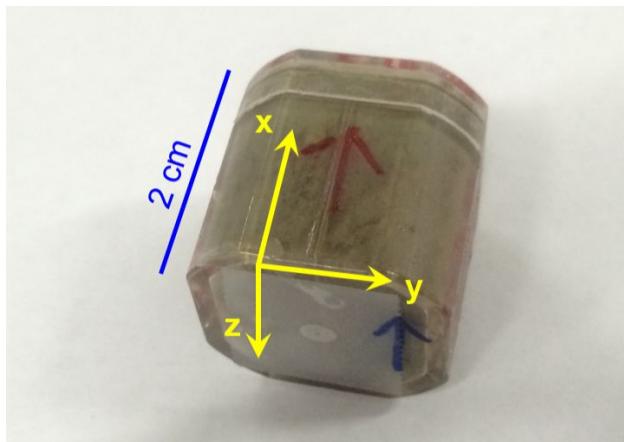


그림 45. Sediment core specimen



그림 46. Spinner magnetometer

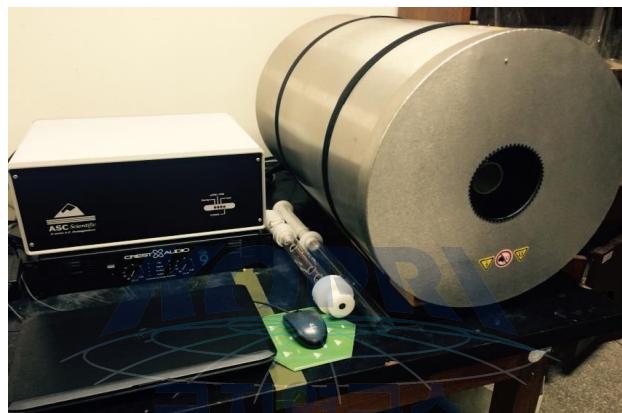


그림 47. Alternating-field demagnetizer

- 해저퇴적물 코어의 깊이에 따른 자기특성 비교

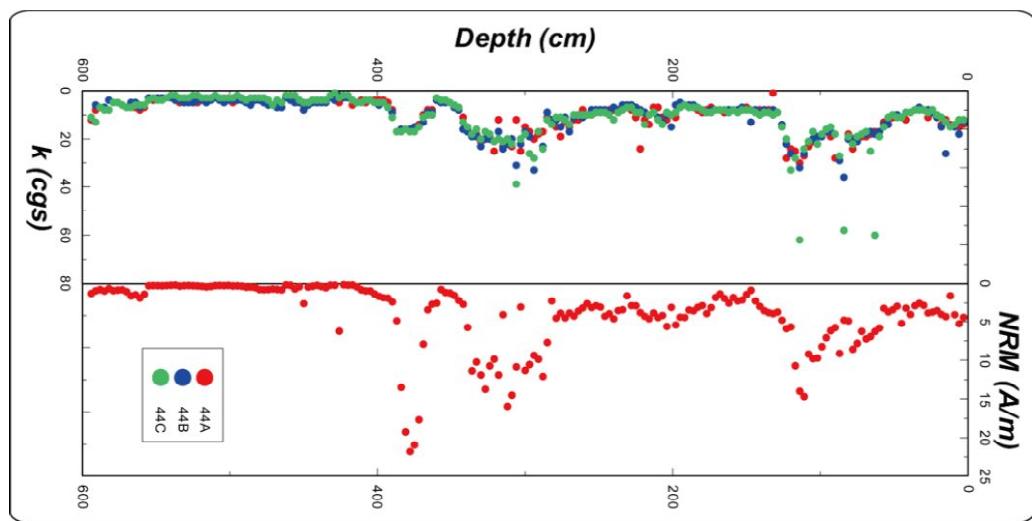
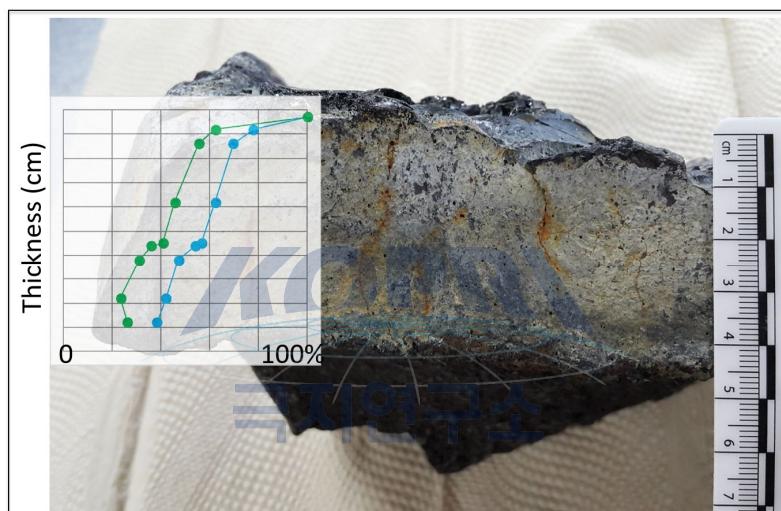
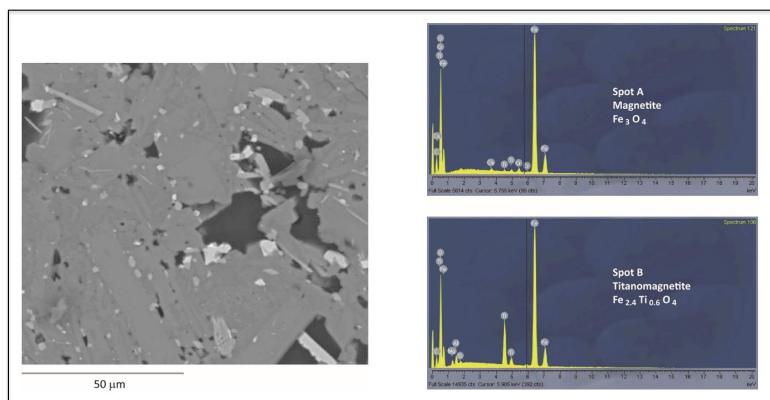


그림 48. 퇴적물 시료의 대자율과 3축 NRM k : Magnetic susceptibility NRM: Natural remanent magnetization (1: x축을 위로, 2: x축을 아래로, 3: 무작위)

- 해양지각의 Spinel 분석 : 해저암석 샘플에 대한 자기특성 비교



3-2. 연구개발 수행결과

1. 로스해 인근 서남극 열개구조의 광역 지체구조 연구

가. 항공-해상-인공위성 중력자료를 이용한 빅토리아랜드 및 로스해 지각의 두께 및 내부구조 연구

- 아라온 중력계 데이터의 검교정 및 정확도 향상기법 개발
- 로스해-빅토리아랜드 중력이상도 작성
- 중력이상을 이용한 지각두께 산출
- Terror Rift 횡당축선을 따르는 선상-항공 중력탐사 자료 역산 : 중력밀도 구조 및 지각멘틀 경계 구조 파악

나. 서남극 경계대의 자력이상값을 통한 지구조 연구 : 빅토리아랜드와 월크스분지

- 항공 및 위성자력이상 자료를 이용하여 단층 및 관입암상 파악, 맨틀 지각의 두께 결정
- 지각이상 자력모델을 제작하여 자력두께 산출
- 지구물리 지각두께 비교 및 고지형 복원

2. 심부 지각구조 및 지각활동성 연구

가. 해저면 지진계 (OBS) 탐사를 이용한 Terror Rift 구조연구

- 독일 AWI와의 국제공동연구 수행을 통한 해저면 지진계 OBS 및 대용량 에어건 확보 :
- (1) 자료획득을 위해 우리 연구소에서 보유하고 있지 않은 해저면 지진계 및 대용량 에어건을 독일 AWI와의 국제공동연구 진행을 통해 확보
- (2) 쇄빙연구선 아라온호와 해당 탐사장비를 활용하여 2017년 2월 서남극 로스해 Terror Rift에서 심부 지체구조 규명을 위한 탐사 진행 예정

- (3) 해저면 지진계와 더불어 아라온에 탑재된 다중채널 스트리머를 활용하여 해상탄성파 탐사자료 획득

- 신호처리 기반 자료처리 및 수치해석학적 분석 수행 :

- (1) 탐사지역 지하 심부지체구조 확인을 위한 신호처리 기반 자료처리 수행
- (2) 굴절파 분석을 통한 심부 속도구조 확인
- (3) 수치해석학적 기반 완전파형역산 적용을 통해 고해상도 속도모델 구축

- 자료처리 결과 분석 : 지질학적 해석 및 지각 활동성 규명

나. 수중음향데이터 분석을 통한 서남극 밸레니군도 주변 화산활동 관측

- 본 연구를 통해 해당분야에서 세계 최고 수준의 기술과 연구경험을 보유하고 있는 미국 NOAA/PMEL과 수중음향 데이터분석 및 해석에 대한 국제공동연구를 진행함으로써, 서남극 열개구조의 형성과 지구조의 진화 그리고 변화 뿐 아니라 해빙, 빙산의 활동에 의한 빙권모니터링에 대한 흥미로운 연구결과 도출 가능.

다. 탄성파 탐사자료를 이용한 남극 로스해 외대륙경계부 지체구조 연구

- 한-이태리 공동연구 수행 :
 - (1) 계획된 연구일정에 따라 2016-2017 남극 하계 탐사기간 동안 쇄빙연구선 아라온을 이용한 다채널 탄성파 탐사자료 획득 불가능,
 - (2) 한-이태리 공동연구를 통해 이태리 남극연구프로그램에 참여하여 연구선 OGS Explora를 이용한 다채널 탄성파 탐사자료 획득에 참여,
 - (3) 남극 로스해 연구경험이 풍부한 이태리 연구진과 함께 탄성파 탐사자료 획득, 처리 및 분석과정에 참여하여 연구능력 향상 및 국제협력 강화.
- 로스해 외대륙경계부에 대한 지체구조도를 작성함으로써 많은 연구가 수행된 내대륙붕에 비해 탐사자료가 부족한 외대륙경계부는 서남극 열개구조의 특성 및 발달시기, 남극 대륙빙상의 진화, 해류 변화 등에 대한 새로운 시각을 제공해 줄 수 있을 것으로 기대됨.
- 서남극 열개구조의 특성 및 발달시기 규정 :
 - (1) 탄성파 탐사자료를 이용한 지체구조 분석을 통해 기존 연구결과를 확장,
 - (2) 중자력 탐사결과와 결합하여 서남극 열개구조의 발달시기를 규정하고, 전지구적 판구 조운동에 대한 연구에 기여.

라. 지구물리 관측망을 이용한 맨틀구조 및 지각활동성 연구

- 해저면 지진관측망 구축 :
 - (1) 극지역 해저면 지진관측망 설치 및 운영 기술 개발,
 - (2) 육상 광대역 지진관측망과 연계하여 로스해에 존재하는 서남극 열개구조, 특히 Terror Rift의 생성 원인과 진화를 규명할 수 있는 자료 축적,
 - (3) Terror Rift 부근에서 발생하고 있는 지진원의 정확한 위치와 메카니즘 규명.

3. 열개구조에서의 지질학적인 물성연구

가. 서남극 Adare Trough 주변의 지열특성 연구

- 국내외적으로 해당 지역에서의 해양지열연구를 수행하는 곳이 없기 때문에, 극지연구소가 연구를 진행하여 의미있는 성과를 만들어낸다면 학계, 사회, 그리고 국가에 커다란 공헌을 하는 기회가 될 것.
 - (1) 정책적 기대효과: 해양지열연구는 국제적으로는 SCAR Horizon Scan의 “3항. Reveal Antarctica's history (Kennicutt et al., 2014)”에 해당되며, 국내적으로는 해양수산 R&D 중장기 계획 (2014년 4월 22일)의 “2항. 극한 공간 활용 및 국제협력 확대”와 “1항. 해양 과학조사 및 예보 역량 강화”에 해당,
 - (2) 기술적 기대효과: 반복적인 해양지열류량 관측을 통해 해양지열탐침 운용능력의 고도화 및 새로운 해양지온경사도 장비(Minaturized Temperature Logger) 도입으로 효율성 증진,
 - (3) 사회적 기대효과: 아라온을 이용한 도전적인 남극 연구를 수행하여 국민적 성취감 고취,
 - (4) 정성적 기대효과: 극지연구소의 남극 연구능력 배양과 함께 성공적인 OGS와의 국제

공동연구 수행으로 대외적인 인지도 증가.

- 연구영역을 넓혀 서남극열개구조의 로스해 지역에서 해양분지 별로 추가적인 해양지열 연구 수행하여 열개구조 북부의 지역적인 열구조 규명하고, 분지 사이의 구조적 고지대 (structural highs)에서 해양지열판축하여 빅토리아랜드의 배경지열류량 규명하기 위한 연구로 진행 가능.

나. 맨틀포획암의 미세구조 및 화학성분 분석을 통한 서남극 열개구조 진화의 이해

- 감람석의 입자크기-응력(grain-size piezometer)를 바탕으로 이 광물이 변형된 깊이를 유추할 수 있음. 이를 이용하면 맨틀의 구조를 밝힐 수 있고, 여러 가지 패턴이 나타나게 된다면 맨틀 및 지각의 진화에 대해서 규명할 수 있음(그림 51). 바다 속 화산암(현무암) 속에는 맨틀포획암이 충분히 존재하며 드레지를 통해서 이를 확보할 예정임.

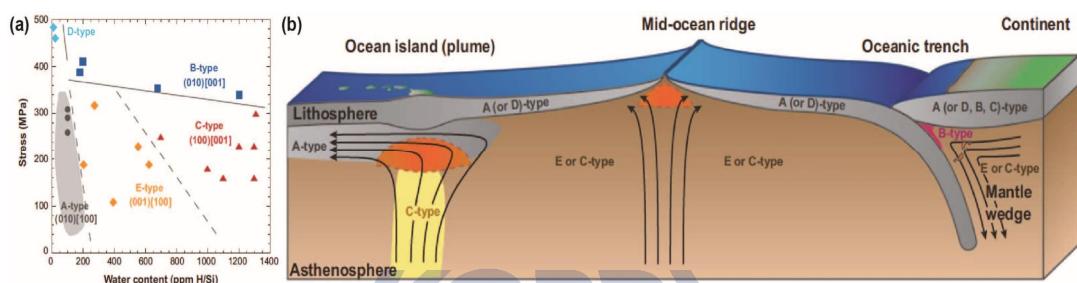


그림 51. 감람석의 CPO 타입에 따른 응력 및 물의 함량(a)과 맨틀 및 암석권 내 발견될 수 있는 감람석의 CPO 타입(b). Karato et al. (2008)에서 발췌.

다. 서남극 열개구조의 화성암과 퇴적물에 내재된 Spinel 광물의 자화특성 규명 연구

- 퇴적물 자화특성을 이용하여 지각화장속도 산출
- 화성암 자화특성을 이용하여 맨틀성인 규명

제 4 장 연구개발결과의 활용계획

4-1. 향후 연구방향

1. 정성적 목표

구분	년도	세부연구목표	연구내용
1차년도	2017	로스해 인근 서남극 열개구조의 광역 지체구조 연구	<p>중력탐사 및 검교정 기법 연구 - 선상 및 항공 중력계 자료의 검교정 및 정확도 기법 연구 ADMAP-2 자료를 이용한 지구조 파악 - 선구조 및 화산활동 지도 제작 Swarm 자료를 이용하여 남극 위성 자기이상도 제작 - 위성고도의 지각자기 이상지도 제작 위성자기이상도를 통한 항공 자기이상 보완 - 위성자료로 보완된 지상 지각자기 이상지도 제작</p>
		심부 지각구조 및 지각활동성 연구	<p>해저면지진계 (OBS) 및 다중채널 스트리머를 이용한 탄성파 탐사 수행 - 국제 공동연구를 통해 AWI에서 보유한 해저면지진계 (OBS) 및 대용량 에어건 확보 - 아라온호를 이용하여 서남극 북부 지역에서 OBS를 설치하고 대용량 에어건을 이용하여 탐사 수행 수중음향 자료처리 - 하이드로폰을 이용하여 기록한 음향신호에 대한 주파수 특성 분석 - 해당 지역의 미세지진에 대한 메커니즘을 바탕으로에너지 방사량을 계산하여 이로 인한 수중음향파 발생 수치모델링 기법 적용 다중채널 탄성파 탐사 : 자료획득, 처리 및 해석 - 이탈리아 연구선 OGS Explora를 이용한 2016-2017 남극 하계 탐사에 참여하여, 로스해 외대륙 경계부에 대한 다채널 탄성파 탐사 자료 획득 - 획득한 탄성파 탐사 자료를 처리한 후 이탈리아 연구진의 결과와 비교 분석 - 세롭게 획득한 탄성파 탐사 자료에 나타나는 음향기반암의 구조를 분석하고 기존 탄성파 탐사 자료에 나타나는 결과와 결합하여 음향기반암 구조도 및 단층 해석도 작성 서남극 열개구조 및 지체구조 연구 - 해저면 광대역 지진판측 기술 개발</p>

		<p>기준에 획득한 해양지열 결과 분석</p> <ul style="list-style-type: none"> - 기준 과제에서 현장탐사를 통해 Adare Trough에서 획득한 ANA06C의 결과 분석 <p>Central Basin에서 해양지열류량 관측</p> <ul style="list-style-type: none"> - Central Basin에서는 SDLS에 공개된 다중 탄성파 측선 중 동-서 방향의 IT91-AR88B 측선을 따라 해양지열 정점을 선택하여 관측 - 5정점/년 관측 결과 (만 24시간 연구항해 시간 해당) <p>감람식과 다른 광물들 간의 위상관계 규명</p> <ul style="list-style-type: none"> - 감람식과 같이 존재하는 합수광물들 간의 위상관계를 밝히고, 섭입대 또는 특수한 지각구조 내에서 발생하는 지진과 이동방성의 특징을 이해 <p>시료에 대한 대자율 비교</p> <ul style="list-style-type: none"> - 대자율이방성 측정 - 저온 대자율이방성 측정 <p>짙은 및 고온 자화특성 분석</p> <ul style="list-style-type: none"> - 소자 및 자화이방성 - 등온잔류자화 - 열처리잔류자화 소자 - 고온 대자율 변화 <p>광물판독 및 지자기 변동 연구</p> <ul style="list-style-type: none"> - 전자현미경 관찰 - 미세탐침성분분석 - 지자기강도결정 - 지자기변동의 시공간적 분포
2차년도	2018	<p>로스해 인근 서남극 열개구조의 광역 지체구조 연구</p> <p>남극 종단 산맥 횡단 2차원 중력 역산</p> <ul style="list-style-type: none"> - Terror Rift 횡단 측선 중력 탐사 자료 지각 구조 2차원 역산 <p>메리버드랜드지역의 병합(Joint) 지각이상 모델 제작</p> <ul style="list-style-type: none"> - 병합 모델 제작 <p>자력 지각두께 파악</p> <ul style="list-style-type: none"> - 자력 지각두께 지도 제작
		<p>심부 지각구조 및 지각활동성 연구</p> <p>OBS 및 다중채널 탄성파 탐사자료 처리 및 폴리역산 수행</p> <ul style="list-style-type: none"> - 굴절파 토모그래피 및 신호처리 기법을 이용한 OBS 및 스트리머 데이터 처리 및 탄성파 지하영상단면 구축 - 폴리역산 알고리즘에 적용하여 해당 지역에 대한 심부 속도모델 구축 <p>수중음향 자료분석 및 해석</p> <ul style="list-style-type: none"> - Balleny 군도 인근 상세지진 활동성 해석 <p>Central Basin지역 해석결과 비교분석</p> <ul style="list-style-type: none"> - 공동연구를 수행하는 이탈리아 연구진과 Central Basin에서 획득한 다채널 탄성파 탐사자료 해석결과 비교 분석 및 논문 작성 논의 <p>서남극 열개구조 및 지체구조 연구</p> <ul style="list-style-type: none"> - 해저면 광대역 지진관측망 구축

		<p>Central Basin에서 해양지열류량 관측</p> <ul style="list-style-type: none"> - Central Basin에서 추가 해양지열 관측. 5정점/년 관측 결과 (만 24시간 연구향해 시간 해당) <p>Adare Trough 열구조 분석 결과 도출</p> <ul style="list-style-type: none"> - ANA05B, ANA06C 획득한 지열결과를 바탕으로 Adare Trough의 열구조 규명 <p>암석의 변성 및 변형온도, 광물의 CPO 연구</p> <ul style="list-style-type: none"> - 암석의 변성 및 변형온도를 화학적 분석법을 통해서 추정하고, 광물의 CPO를 측정해 지각 및 맨틀의 변화 양상을 추정. <p>대자율 비교</p> <ul style="list-style-type: none"> - 대자율이방성 측정 - 저온 대자율이방성 측정 <p>실온 및 고온 자화특성 분석</p> <ul style="list-style-type: none"> - 소자 및 자화이방성 - 등온잔류자화 - 열처리잔류자화 소자 - 고온 대자율 변화 <p>광물판독 및 지자기 변동 연구</p> <ul style="list-style-type: none"> - 전자현미경 관찰 - 미세탐침성분분석 - 지자기강도결정 - 지자기변동의 시공간적 분포
3차년도	2019	<p>로스해-빅토리아랜드 모호면 기복 규명</p> <ul style="list-style-type: none"> - 로스해-빅토리아랜드 중력이상도 작성 - 중력 자료를 이용한 지각 두께에 역산 <p>다른 지구물리 지각두께와 비교</p> <ul style="list-style-type: none"> - 평균 두께 비교 <p>서남극주변의 지구물리자료의 고지형 복원 및 해석</p> <ul style="list-style-type: none"> - 타 연구와의 해석 비교
		<p>OBS 데이터 분석 및 심부 지체구조 해석</p> <ul style="list-style-type: none"> - 다중채널 탄성파 단면을 이용한 퇴적구조 규명 - OBS 데이터에 대해 파형역산 알고리즘 및 굴절파 토모그래피를 이용하여 구축한 속도모델 분석을 통한 탐사지역 심부 지체구조 해석 <p>지진활동성의 수중음향 자료로부터 추적이 가능한 음원에 대한 분석 수행</p> <ul style="list-style-type: none"> - 해당지역에서 발생하는 빙권 및 해양생물 거동 규명을 위한 기초자료 제시 <p>로스해 외대륙경계부 연구결과 종합</p> <ul style="list-style-type: none"> - 본 사업기간 중 획득된 탄성파 탐사자료와 기존 연구 결과를 결합하여 로스해 외대륙경계부의 전반적인 지체구조를 분석하고, 서남극열개구조와의 관련성에 대한 연구결과 종합 <p>서남극 열개구조 및 지체구조 연구</p> <ul style="list-style-type: none"> - Terror Rift 지역의 지각 및 맨틀구조 모델링 및 진원 분석

		<p>Central Basin 열구조분석 결과 도출</p> <ul style="list-style-type: none"> - 2017, 2018년 결과를 바탕으로 Central Basin 열구조 규명 <p>CPO의 미세구조지수각도 (Fabric Index Angle)측정</p> <ul style="list-style-type: none"> - CPO의 미세구조 지수각도(Fabric Index Angle)를 측정하고, 기존에 존재하는 CPO패턴에 따른 감람석의 변형조건과 비교. <p>시료에 대한 대자율 비교</p> <ul style="list-style-type: none"> - 대자율이방성 측정 - 저온 대자율이방성 측정 <p>실온 및 고온 자화특성 분석</p> <ul style="list-style-type: none"> - 소자 및 자화이방성 - 동온잔류자화 - 열처리잔류자화 소자 - 고온 대자율 변화 <p>광물판독 및 지자기 변동 연구</p> <ul style="list-style-type: none"> - 전자현미경 관찰 - 미세탐침성분분석 - 지자기강도결정 - 지자기변동의 시공간적 분포
--	--	---

2. 정량적 목표

구분	국외논문		국내논문		특허출원		기술이전
	SCI* (1저자/공동)	기타	SCI (1저자/공동)	기타	국외	국내	
1차년도 (2017)	4 (2/2)	-	-	1	-	-	-
2차년도 (2018)	5 (3/2)	-	-	1	-	-	-
3차년도 (2019)	6 (3/3)	-	-	1	-	-	-
합 계	15 (8/7)	-	-	3	-	-	-

* 제1저자 및 공동저자(제2저자까지) 기재

4-2. 국·내외 공동연구 추진 계획

- 이탈리아 OGS와 Central Basin의 지구조를 밝히기 위해 공동연구 추진할 계획이다. OGS의 CEBA프로젝트에서 각각의 성격을 한정하기 위해 해양지질연구결과가 필요한 상황이다. 아라온 남극 탐사동안 지구물리팀이 Central Basin에서 해양지질 연구를 수행하고 그 결과를 공유하는 방식을 제안.
- 본 연구과제와 이탈리아 남극 연구프로그램에서 추진하는 남극 로스해 해양지구물리탐사와의 공동연구를 통해 2016-2017 하계 탐사기간 동안 이탈리아 연구선 OGS Explora를 이용한 다채널 탄성파 탐사자료 및 기타 해양지구물리 탐사에 참여하여 연구과제에 필요한 자료 획득.
- 이후 서북부 로스해 Central Basin에서 획득된 다채널 탄성파 탐사자료 KSL12와 KSL14, 그리고 남극 탄성파 탐사자료 공유시스템인 SDLS에서 공유되는 탄성파 탐사자료를 기반으로 새롭게 획득한 자료를 결합하여 로스해 외대륙경계부의 기반 암구조 및 퇴적구조를 파악한다. 그리고 선행 연구결과인 ANTOSTRAT 해석을 결합된 탄성파 탐사자료를 이용하여 로스해 외대륙경계부로 연장한다. 또한 신생대로스해 지체구조를 분석한 Salvini et al. (1997)의 연구결과를 새롭게 획득한 다채널 탄성파 단면을 이용하여 검증 후 연구가 이루어지지 않은 지역으로 확장.
- 남극 로스해 지체구조 및 탄성파 층서에 대한 연구경험이 풍부한 이탈리아 연구진과의 국제공동연구를 통해 아직 많은 연구가 이루어지지 않은 외대륙경계부에 대한 탄성파탐사자료 획득, 처리 및 해석기술을 습득할 수 있다. 이러한 기술습득을 통해 남극빙상의 발달사 유추, 빙상의 발달에 따른 지형 및 해류의 변화, 복원된 해저지형을 이용한 과거 남극빙상 모델링 등에 참여하여 해당분야에 대한 지식을 심화.
- 독일 AWI와 국제공동연구 진행을 통해 우리연구소에서 보유하고 있지 않는 해저면 지진계와 대용량 에어건을 사용할 수 있음.
- 해당 연구분야에 대해 풍부한 연구경험을 가진 독일의 AWI의 탐사기법 및 데이터 처리에 대한 기술과 노하우를 습득할 수 있음.
- 미국 NOAA/PMEL과의 공동연구를 통해 해당 기관에서 보유한 수중음향 장비 활용
- 연구소에서 보유하고 있지 않은 EBSD 장비의 활용을 위해 국내 대학 및 연구소와의 연계(서울대 or KITEC).
- 국제공동연구를 통한 세계 유수의 연구자들과 의견교환 및 연구개발에 주력하기 위해 국외대학과(뉴질랜드 오타고대학교, 일본 나고야대학교)의 공동연구 추진 예정.
- 남극 Ross Sea 북부 서남극 열개구조를 규명하기 위해, Ross Sea 인근 해역에서 확보된 다른 시료와 연구 결과를 대비하는 과정이 필요.
- International Ocean Drilling Program (<http://www.odplegacy.org/>)이 보유하는 남극 로스해 인근 해역의 화성암과 퇴적물 시료 사용을 신청할 예정.
- IODP 시료 대여를 통해 남극 로스해 인근 해역의 광범위한 시료확보가 가능하여 보다 완성도 높은 심화 연구 가능.
- 총괄과제 PI 혹은 위탁과제 PI가 직접 시료 대여 신청 가능.

4-3. 연구개발 사업 규모

연구기간(년)	연구개발비(백만원)		
	2017	2018	2019
2017~2019 (3년간)	1,500	1,000	1,000

4-4. 총 연구기간 로드맵



4-5. 인프라 활용 로드맵

인프라명	연도	1월	2월	3월	4월	5월	6월	7월	8월	9월	10월	11월	12월
남극 세종과학기지	2017												
	2018												
	2019												
남극 장보고과학기지	2017											4일	
	2018											5일	
	2019												
북극 다산과학기지	2017												
	2018												
	2019												
쇄빙연구선 아라온	2017		5일										
	2018	2일											
	2019		5일										

* 활용 시기에 음영표시 및 활용일수 작성



제 5 장 연구개발과정에서 수집한 해외과학기술정보

- 남극을 둘러싼 주요지체구조 중 가장 큰 규모인 서남극 열개구조(West Antarctic Rift System)는 후기 중생대 이후 발달을 시작하여 서남극과 동남극 사이에 주요 퇴적분지로 구성된 로스해를 형성(그림 52).
- 서남극 열개구조에 의해 형성된 로스해의 지체구조를 이해하기 위한 연구는 1970년대 이후 중력, 자력, 해저지형, 지진파, 탄성파탐사 등 종합지구물리탐사를 통해 수행되어 왔으며, 자력탐사자료를 이용한 서남극 열개구조의 발달에 대한 연구가 활발히 수행(Cande et al., 2000; Granot et al., 2013).
- 해저면 하부 퇴적층 및 기반암구조에 대한 연구는 1980년대 이후로 활발히 수행된 로스해 내대륙붕에 대한 탄성파 탐사를 통해 수행되어 왔으며, 1995년 국제공동연구의 일환으로 수행된 ANTOSTRAT(Antarctic Offshore Stratigraphy, Cooper et al., 1995) 프로젝트를 통해 남극 로스해 대륙붕의 기반암에 대한 지체구조 및 퇴적층에 대한 전반적인 분석이 이루어짐(그림 53).
- 이후 내대륙붕에 집중되었던 탄성파탐사연구는 2000년대 중반을 기점으로 외대륙 경계부인 대륙사면, 대양저 등으로 확장되고 있는 추세이며, Granot et al. (2010)의 연구에 의해 북서 로스해의 Adare Trough, Adare Basin, Northern Basin에 대한 지체구조분석 및 퇴적층에 대한 분석이 수행됨.
- 현재, 로스해 내대륙붕에 비해 획득된 해양지구물리 탐사자료가 부족하여 많은 연구가 수행되지 않은 외대륙경계부에는 아직 밝혀지지 않은 서남극 열개구조와 남극빙상의 발달에 대한 증거들이 남아있을 것으로 추정.
- 이탈리아 국립해양지구물리연구소의 Dario Civile 박사는 남극 로스해의 지체구조 연구를 위해 이탈리아 남극연구프로그램에 제안서를 제출한 상태이며, 극지연구소와의 협력을 통해 북서부로스해 Central Basin에 대한 지체구조연구를 수행하고자 한함.
- 이탈리아 국립해양지구물리연구소의 Laura De Santis 박사는 동부로스해 외대륙붕의 퇴적구조분석을 수행하기 위한 제안서를 제출한 상태이며, 이때 획득되는 자료를 통해 남극로스해 외대륙경계부의 지체구조를 분석하여 서남극 열개구조분석에 활용할 수 있을 것으로 사려됨(그림 54).

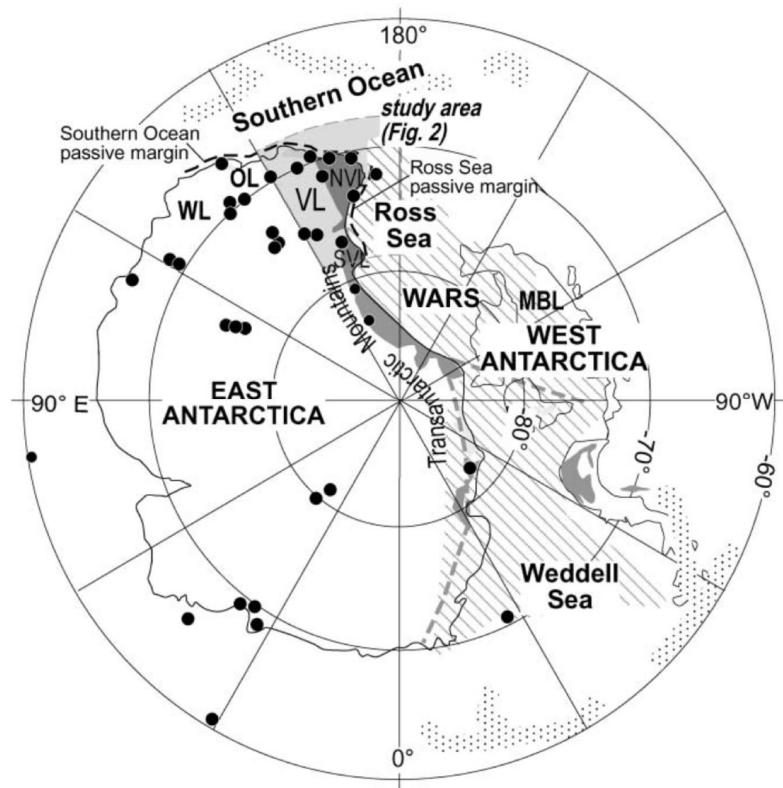


그림 52. 남극대륙과 서남극 열개구조(Rossetti et al., 2006).

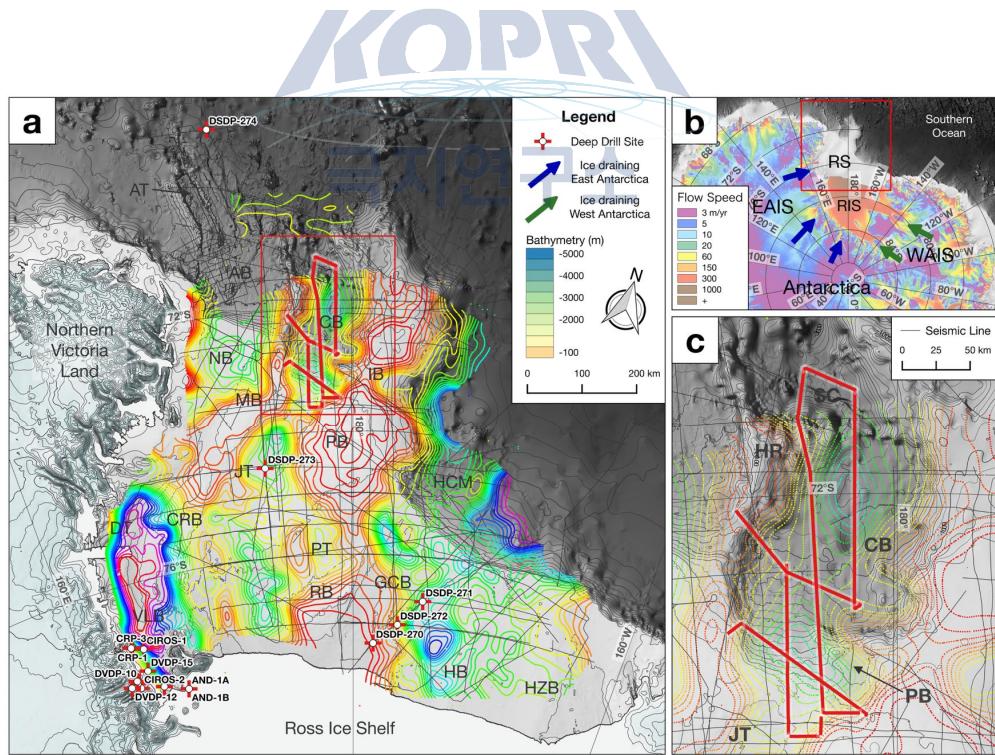


그림 53. 탄성파 탐사자료를 이용하여 작성된 로스해 탄성파 기반암의 전반적인 구조도 (Cooper et al., 1995)와 한-이태리 공동연구의 일환으로 아라온을 이용하여 획득한 다채널 탄성파 탐사자료 KSL12, KSL14를 이용하여 작성한 Central Basin지역의 탄성파 기반암 구조도.

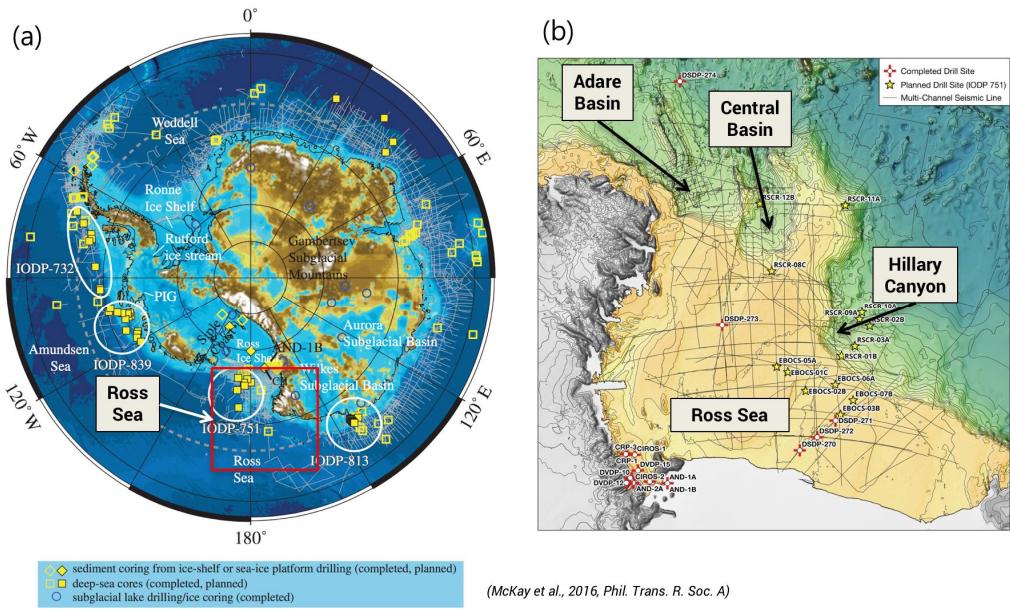


그림 54. (a) 남극대륙경계부에서 수행된 탄성파 탐사 및 심해시추지점을 나타내는 지도 (McKay et al., 2016), 경도 180도 부근에 위치한 로스해 (빨간 사각형) (b) 연구지역인 Central Basin, Hillary Canyon의 로스해에서의 위치.

- 마그마가 열개구조를 통해 분출하며 해양지각이 냉각되는 과정에서 형성되는 Spinel에 대한 자화 특성 연구가 중요 : 연구관련 논문: Selkin et al., 2002; Titus et al., 2002, 2007; Toy et al., 2009; Tikoff et al., 2010
- 곤드와나의 분리와 관련되어 남극 대륙판의 위/경도 변화에 관한 연구 : 연구관련 논문: Mankinen and Cox, 1988; Baraldo et al., 2003; Tauxe et al., 2004; Lawrence et al., 2009
- 최근 기기의 발달과 통계적인 해석 방법의 진화로, 단일 Spinel 광물 연구가 시도. 과거에는 암석에 함유된 spinel의 평균적인 기여도가 측정되었지만, 최근에는 개개의 결정 혹은 이와 비견될 매우 작은 규모에서의 spinel 분포 연구가 개발 : 논문: Dunlop and Prevot, 1982, O'Neill et al., 1992, Hounslow, 1996, Titus et al., 2002

제 6 장 참고문헌

- Arndt, J.E., Schenke, H.W., Jakobsson, M., Nitsche, F.O., Buys, G., Goleby, B., Rebesco, M., Bohoyo, F., Hong, J., Black, J., Greku, R., Udintsev, G., Barrios, F., Reynoso-Peralta, W., Taisei, M. and Wigley, R., 2013, The International Bathymetric Chart of the Southern Ocean (IBCSO) Version 1.0—A new bathymetric compilation covering circum-Antarctic waters, *Geophysical Research Letters*, **40**, p. 3111–3117.
- Baraldo, A., A. E. Rapalini, H. Bohnel, and M. Mena, 2003, Paleomagnetic study of Deception Island, South Shetland Islands, Antarctica, *Geophysical Journal International*, **153**, p. 333–343.
- Behrendt, J.C., LeMasurier, W.E., Cooper, A.K., Tessensohn, F., Tréhu, A. and Damaske, D., 1991, Geophysical studies of the West Antarctic Rift System. *Tectonics*, **10**, p. 1257–1273.
- Block, A. E., Bell, R. E., and Studinger, M., 2009, Antarctic crustal thickness from satellite gravity: Implications for the Transantarctic and Gamburtsev Subglacial Mountains, *Earth and Planetary Science Letters*, **288**, 194–203.
- Busetti, M., Spadini, G., Van der Wateren, F.M., Cloetingh, S. and Zanolla, C., 1999, Kinematic modelling of the West Antarctic Rift System, Ross Sea, Antarctica, *Global and Planetary Change*, **23**, p. 79–103.
- Cande, S.C., Stock, J.M., Müller, R.D. and Ishihara, T., 2000. Cenozoic motion between east and west Antarctica, *Nature*, **404**, p. 145 - 150.
- Cooper, A.K., Barker, P.F. and Brancolini, G., 1995. ANTOSTRAT Project: Geology and Seismic Stratigraphy of the Antarctic Margin, *Antarctic Research Series*. American Geophysical Union.
- Dunlop, D. J., and M. Prevot, 1982, Magnetic properties and opaque mineralogy of drilled submarine intrusive rocks, *Geophysical Journal of Royal Astronomical Society*, **69**, p. 763–802.
- Finn, C.A., Müller, R.D. and Panter, K.S., 2005, A Cenozoic diffuse alkaline magmatic province (DAMP) in the southwest Pacific without rift or plume origin. *Geochemistry Geophysics Geosystems*, **6**, p. 1–26.

Fitzgerald, P., 2002, Tectonics and landscape evolution of the Antarctic plate since the breakup of Gondwana, with an emphasis on the West Antarctic Rift System and the Transantarctic Mountains. Royal Society of New Zealand Bulletin, **35**, p. 453–469.

Förste, Christoph; Bruinsma, Sean.L.; Abrikosov, Oleg; Lemoine, Jean-Michel; Marty, Jean Charles; Flechtner, Frank; Balmino, G.; Barthelmes, F.; Biancale, R. (2014): EIGEN-6C4 The latest combined global gravity field model including GOCE data up to degree and order 2190 of GFZ Potsdam and GRGS Toulouse. GFZ Data Services. <http://doi.org/10.5880/icgem.2015.1>

Golynsky, A., M. Chiappini, D. Damaske, F. Ferraccioli, J. Ferris, C. Finn, M. Ghidella, T. Isihara, A. Johnson, H.R. Kim, L. Kovacs, J. LaBrecque, V. Masolov, Y. Nogi, M. Purucker, P. Taylor and M. Torta, ADMAP—magnetic anomaly map of the Antarctic, 1: 10000000 scale map, 10, British Antarctic Survey, 2001.

Granot, R., Cande, S.C., Stock, J.M. and Damaske, D., 2013, Revised Eocene–Oligocene kinematics for the West Antarctic rift system, Geophysical Research Letters, **40**, p. 279–284.

Granot, R., Cande, S.C., Stock, J.M., Davey, F.J. and Clayton, R.W., 2010, Postspringing rifting in the Adare Basin, Antarctica: Regional tectonic consequences, Geochemistry Geophysics Geosystems, **11**, p. 1–29.

Hounslow, M. W., 1996, Ferrimagnetic Cr and Mn spinels in sediments: residual magentic minerals after diagenetic dissolution, Geophysical Research Letters, **23**, p. 2823–2826.

Hansen, S.E., Graw, J.H., Kenyon, L.M., Nyblade, A.A., Wiens, D.A., Aster, R.C., Huerta, A.D., Anandakrishnan, S. and Wilson, T., 2014, Imaging the Antarctic mantle using adaptively parameterized P-wave tomography: Evidence for heterogeneous structure beneath West Antarctica, Earth and Planetary Science Letters, **408**, p. 66–78.

Hirt, C., Rexer, M., Scheinert, M., Pail, R., Claessens, S., Holmes, S., 2016, A new degree-2190 (10 km resolution) gravity field model for Antarctica developed from GRACE, GOCE and Bedmap2 data, Journal of Geodesy, **90**, 105–127.

Jung, H. and Karato, S., 2001, Water-induced fabric transitions in olivine. Science, **293**, p. 1460–1463.

Jordan, T. A., Ferraccioli, F., Armadillo, E., Bozzo, E., 2012, Crustal architecture of the Wilkes Subglacial Basin in East Antarctica, as revealed from airborne gravity data, *Tectonophysics*, **585**, 196–206.

Jung, H., Mo, W. and Choi, S.H., 2009. Deformation microstructures of olivine in peridotite from Spitsbergen, Svalbard and implications for seismic anisotropy. *J. Metamorph. Geol.*, **27**, p. 707–720.

Karato, S., Jung, H., Katayama, I. and Skemer, P., 2008. Geodynamic significance of seismic anisotropy of upper mantle: New insight from laboratory studies. *Annu. Rev. Earth Planet. Sci.*, **36**, p. 59–95.

Michibayashi, K., Mainprice, D., Fujii, A., Uehara, S., Shinkai, Y., Kondo, Y., Ohara, Y., Ishii, T., Fryer, P., Bloomer, S.H., Ishiwatari, A., Hawkins, J. and Ji, S., 2016. Natural olivine crystal-fabrics in the western Pacific convergence region: A new method to identify fabric type. *Earth Planet. Sc. Lett.*, **443**, p. 70–80.

Nagaya, T., Wallis, S.R., Kobayashi, H., Michibayashi, K., Mizukami, T., Seto, Y. and Matsumoto, M., 2014. Dehydration breakdown of antigorite and the formation of B-type olivine CPO. *Earth Planet. Sc. Lett.*, **387**, p. 67–76.

Kennicutt, M.C., Chown, S.L., Cassano, J.J., Liggett, D., Massom, R., Peck, L.S., Rintoul, S.R., Storey, J.W.V., Vaughan, D.G., Wilson, T.J. and Sutherland, W.J., 2014, Polar research: Six priorities for Antarctic science, *Nature*, **512**, p. 23–25.

Ku, C. C. and J. Sharp, 1983, Werner deconvolution for automated magnetic interpretation and its refinement using Marquardt's inverse modeling, *Geophysics*, **48**, p. 754–774.

Lawrence, K. P., L. Tauxe, H. Staudigel, C. G. Constable, A. Koppers, W. McIntosh, and C. L. Johnson, 2009, Paleomagnetic field properties at high southern latitude, *Geochemistry Geophysics Geosystems*, **10**, pp. Q01005.

Mankinen, E. A., and A. Cox, 1988, Paleomagnetic investigation of some volcanic rocks from the McMurdo volcanic province, Antarctica, *Journal of Geophysical Research*, **93**, p. 11599 – 11612.

McKay, R., De Santis, L., Bart, P.J., Shevenell, A., Levy, R., Bartek, L., Sjunneskog, C., Orsi, A.H., Warny, S., DeConto, R.M., Pollard, D., Suganuma, Y., Hong, J.K., 2013. Ocean–ice sheet interactions and West Antarctic Ice Sheet vulnerability: clues from the Neogene and Quaternary record of the outer Ross Sea continental

margin, IODP, Texas, USA.

McKay, R.M., Barrett, P.J., Levy, R.S., Naish, T.R., Golledge, N.R., Pyne, A., 2016. Antarctic Cenozoic climate history from sedimentary records: ANDRILL and beyond, Philos. Trans. R. Soc. A Math. Phys. Eng. Sci., **374**, pp. 20140301.

O'Neill, H. S. C., H. Annersten, and D. Virgo, 1992, The temperature dependence of the cation distribution in magnesioferrite from powder XRD structural refinements and Mossbauer spectroscopy, American Mineralogist, **77**, p. 725–740.

Park, Y., Yoo, H.J., Lee, W.S., Lee, C., Lee, J., Park, H., Kim, J. and Kim, Y., 2015, P-wave velocity structure beneath Mt. Melbourne in northern Victoria Land, Antarctica: Evidence of partial melting and volcanic magma sources, Earth and Planetary Science Letters, **432**, p. 293–299.

Prior, D.J., Boyle, A.P., Brenker, F., Cheadle, M.C., Day, A., Lopez, G., Peruzzo, L., Potts, G.J., Reddy, S., Spiess, R., Timms, N.E., Trimby, P., Wheeler, J. and Zetterström, L., 1999. The application of electron backscatter diffraction and orientation contrast imagin in the SEM to textural problems in rocks, Am. Mineral., **84**, p. 1741–1759.

Rossetti, F., Storti, F., Busetti, M., Lisker, F., Di Vincenzo, G., Läufer, A.L., Rocchi, S. and Salvini, F., 2006. Eocene initiation of Ross Sea dextral faulting and implications for East Antarctic neotectonics. J. Geol. Soc. **163**, p. 119 - 126.

Rtzwoller, M.H., Shapiro, N.M., Levshin, A.L. and Leahy, G.M., 2001, Crustal and upper mantle structure beneath Antarctica and surrounding oceans." Journal of Geophysical Research: Solid Earth, **106**, p. 30645–30670.

Salvini, F., Brancolini, G., Busetti, M., Storti, F., Mazzarini, F. and Coren, F., 1997. Cenozoic geodynamics of the Ross Sea region, Antarctica: Crustal extension, intraplate strike-slip faulting, and tectonic inheritance. J. Geophys. Res. Solid Earth, **102**, p. 24669 - 24696.

Satsukawa, T., Michibayashi, K., Anthony, E.Y., Stern, R.J., Gao, S.S. and Liu, K.H., 2011. Seismic anisotropy of the uppermost mantle beneath the Rio Grande rift: Evidence from Kilbourne Hole peridotite xenoliths, New Mexico. Earth Planet. Sc. Lett., **311**, p. 172–181.

Satsukawa, T. and Michibayashi, K., 2014. Flow in the uppermost mantle during back-arc spreading revealed by Ichinomegata peridotite xenoliths, NE Japan. Lithos, **189**, p. 89–104.

Selkin, P. A., J. S. Gee, W. P. Meurer and S. R. Hemming, 2009, Paleointensity record from the 2.7 Ga Stillwater Complex, Montana, *Geochemistry Geophysics Geosystems*, **9**, pp. Q12023.

Simon, F. J., F. A. Dahlen and Mark A. Wieczorek, 2006, Spatiospectral concentration ons a sphere , *SIAM Review*, **48**, p. 504–536.

Stein, C.A. and Stein, S., 1992, A model for the global variation in oceanic depth and heat flow with lithospheric age, *Nature*, **359**, p. 123–129.

Tauxe, L., P. Gans, and E. A. Mankinen, 2004, Paleomagnetism and $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ ages from volcanics extruded during the Matuyama and Brunhes chrons near McMurdo Sound, Antarctica, *Geochemistry Geophysics Geosystems*, **5**, pp. Q06H12.

Tikoff, B., C. E. Larson, J. Newman, and T. Little, 2010, Field-based constraints on rheology of the lithospheric mantle, Twin Sisters, Washington, *Lithosphere*, **23**, p. 35–51.

Titus, S. J., H. Fossen, R. B. Pedersen, J. L. Vigneresse, and B. Tikoff, 2002, Formation of a pull-apart structure during post-orogenic faulting, Leka Ophiolite, Norway, *Tectonophysics*, **354**, p. 101 - 119.

Titus, S. J., L. G. Medaris Jr., H. F. Wang, and B. Tikoff, B. 2007, Continuation of the San Andreas fault system into the upper mantle: Evidence from spinel peridotite xenoliths in the Coyote Lake basalt, central California, *Tectonophysics*, **429**, p. 1 - 20.

Toy, V. G., J. Newman, W. Lamb, and B. Tikoff, 2010, The role of pyroxenites in formation of shear instabilities in the mantle: Evidence from an ultramafic ultramylonite, Twin Sisters massif, Washington, *Journal of Petrology*, **51**, p. 55–80.

Ben-Ismail, W., Barruol, G. and Mainprice, D., 2001. The Kaapvaal craton seismic anisotropy: Petrophysical analyses of upper mantle kimberlite nodules. *Geophys. Res. Lett.*, **28**, p. 2497–2500.

Whitney, D.L., Teyssier, C., Toranman, E., Seaton, N.C.A. and Fayon, A.K., 2011. Metamorphic and tectonic evolution of a structurally continuous blueschist-to-Barrovian terrane, Sivrihisar Massif, Turkey. *J. Metamorph. Geol.*, **29**, p. 193–212.

Winberry, J. P. and S. Anandakrishnan, 2004, Crustal structure of the West Antarctic rift system and Marie Byrd Land hotspot, **32**, p. 977–980.



주 의

1. 이 보고서는 극지연구소에서 수행한 기본연구사업의 연구결과보고서입니다.
2. 이 보고서 내용을 발표할 때에는 반드시 극지연구소에서 수행한 기본연구사업의 연구결과임을 밝혀야 합니다.
3. 국가과학기술 기밀유지에 필요한 내용은 대외적으로 발표 또는 공개하여서는 안 됩니다.

극지연구소