

표 지(주요사업)

(뒷면)

(측면)

(앞면)

<p style="text-align: center;">주 의</p>	<p style="writing-mode: vertical-rl;">BSPE19050-105-12</p> <p style="writing-mode: vertical-rl;">서남극 열개구조와 남극 중앙해령 하부의 맨틀 상호 연관성 규명</p> <p style="writing-mode: vertical-rl;">한국해양과학기술원 부설극지연구소</p>	<p style="text-align: right;">BSPE19050-105-12</p> <p style="text-align: center;">서남극 열개구조와 남극 중앙해령 하부의 맨틀 상호 연관성 규명</p> <p style="text-align: center;">Characterizing mantle domain beneath West Antarctic Rift System and Antarctic mid-ocean ridges</p> <p style="text-align: center;">2019. 12. 27</p> <p style="text-align: center;">한 국 해 양 과 학 기 술 원 부 설 극 지 연 구 소</p>
--	---	---

제 출 문

극지연구소장 귀하

본 보고서를 “서남극 열개구조와 남극 중앙해령 하부의 맨틀 상호 연관성 규명” 과제의 최종보고서로 제출합니다.



참 여 연 구 원 : 강 승 구, 이미정, 박승현,
홍종국, 진영근, 이춘기, 윤숙영, 이종익,
황청연, 이주한, 김예동, 이원상, 김대영,
박상범, 유인성, 백종민, 최문영, 박창근,
김수관, 김관수, 김형준, 박시원, 이민규,
장우근, 정진훈, 주현태, 최연진, 김태균,
나지성, 한승희, 김진석, 박인우,
윤승태, 이지연, 최학겸, 양윤석, 이상봉,
박선영, Amin Beiranvand, 김영균

충남대학교 : 김 승 섭
최정열, 송지현, Bebin Alysse, 이학민,
이응상, 이병우, 양수민, 이수현

인하대학교 : 서 정 훈
이준희, 이동하, 박 솔, 이현주

보고서 초록

과제관리번호		해당단계 연구기간	2017.1.1.~2019.12.31	단계 구분	2 / 2
연구사업명	중 사업명	기관목적사업			
	세부사업명				
연구과제명	중 과제명	미래탐구과제			
	세부(단위)과제명	서남극 열개구조와 남극 중앙해령 하부의 맨틀 상호 연관성 규명			
연구책임자	박 용 철	해당단계 참여연구원수	총 : 51 명 내부 : 45 명 외부 : 5 명	해당단계 연구비	정부: 2,550,000천원 기업: 천원 계: 2,550,000천원
연구기관명 및 소속부서명	극지연구소 극지지구시스템연구부		참여기업명		
국제공동연구	상대국명 : 미국, 이태리		상대국연구기관명 : NOAA, 하바드대, 와이오밍대, OGS		
위탁연구	연구기관명 : 충남대 연구기관명 : 인하대		연구책임자 : 김승섭 연구책임자 : 서정훈		
요약(연구결과를 중심으로 개조식 500자 이내)				보고서 면수	276
<p>1. 연구 목표</p> <ul style="list-style-type: none"> ○ 서남극 열개구조에서 활동성이 큰 Terror Rift 맨틀 구조 연구를 통한 지각 운동 특성과 형성 원인 규명 ○ 남극 중앙해령 KR3 구간 탐사와 연구를 통해 남극권 고유 맨틀 서쪽 경계 규명 ○ 이를 통한 연구지역 하부의 맨틀 상호 연관성 이해 <p>2. 연구 내용 및 결과</p> <ul style="list-style-type: none"> ○ Terror Rift 주변 지진활동 및 북빅토리아랜드 지체구조와 확장·형성과정연구 - Terror Rift 진화에 따른 지체구조 및 퇴적구조의 변화 - 서남극 열개구조의 신생대 진화과정 및 신기지체구조 활동성 규명 ○ KR3의 지각 형성 과정과 맨틀 특성 규명 - KR3 지형도 작성 및 주변 자력 분포자료 획득 - KR3 중앙해령 현무암의 지구화학적 특성 연구 - KR3에서의 열수 분출구 분포 파악 ○ 서남극 열개구조와 중앙해령 주변의 해저화산암과 포획암 연구 - 로스해와 남극중앙해령 주변 해저 화산암의 지구화학 특성 및 성인연구 - 맨틀 및 지각물질 포획암의 미세구조 연구 <p>3. 기대효과</p> <ul style="list-style-type: none"> ○ 장보고 기지 주변지역 지구과학 연구 집중을 통한 주도권 확보 ○ SCAR SERCE steering committee로서 지구물리 연구 선도 ○ 로스해 층서와 지체구조 매핑을 위한 국제공동 연구(ROSSMAP Project) 주도 ○ 중앙해령 국제 공동연구 협력기구인 INTERIDGE에서 주도적 역할 수행 ○ 남극 중앙해령 유용 광물 및 고온성 미생물 자원 활용성 평가 					
색인어 (각 5개 이상)	한 글	지각/맨틀 구조, 남극 종단 산맥, 남극 중앙해령, 해저화산, 남극권 고유 맨틀, 서남극 열개구조			
	영 어	crustal/mantle structure, Transantarctic mountains, Antarctic mid-ocean ridge, submarine volcano, West Antarctic Rift System			

요 약 문

I. 제 목

서남극 열개구조와 남극 중앙해령 하부의 맨틀 상호 연관성 규명

II. 연구개발의 목적 및 필요성

1. 연구개발의 목표

- 서남극 열개구조 중에서 가장 활동성이 큰 Terror rift 북부지역 주변의 지각 운동과 형성 원인 규명
- KR3의 지각 형성 과정과 맨틀 특성 규명
- 서남극 열개구조 신기지각활동과 관련된 해저화산암과 지각 및 맨틀 포획암 연구

2. 연구개발의 필요성

- 서남극 열개구조는 넓이가 750 km에 달하는 복잡한 열개구조의 집합체로 남극에서 볼 수 있는 가장 큰 지체구조중 하나임
- 서남극 열개구조의 서쪽 경계면은 남극을 남-북 방향으로 가르는 남극종단 산맥이 존재하며 서남극 열개구조에서 발견되는 저속도 구조는 길이 4,000 km 이상, 최대높이 ~4,500 m에 달하는 남극종단산맥의 형성에 직접적인 영향을 주었을 것으로 알려져 있으나, 대부분의 연구는 에레부스(Erebus) 화산 지역에서 연구된 결과로 서남극 열개구조와 남극종단산맥 북부에서의 연구는 전무한 상황임
- 남극중앙해령 탐사 지역인 호주-남극 중앙해령의 KR1과 KR2는 태평양형 맨틀 영역상에 위치하지만 1단계 탐사 및 연구 결과 인도양형은 물론 태평양형 과도 다른 맨틀 영역이 그 아래 분포함이 확인되었음. 이 발견은 상부 맨틀이 태평양형과 인도양형 두 가지만 존재한다는 가설은 물론 이 두 맨틀이 AAD에서 만난다는 맨틀 대류 모델에도 수정을 요구할 정도로 중대한 발견임
- 남극고유맨틀은 남극-뉴질랜드-호주 대륙이 하나로 되어있던 곤드와나 대륙의 균열을 가져온 초대형 플룸에서 기원했을 것으로 사료됨. 맨틀 플룸은 상대적으로 온도가 높고 유동성이 크기 때문에 잘 흐르며 대륙의 Rifting을 가져올 수 있음
- 남극지역 맨틀 속도 모델은 서남극 열개구조를 따라 두 개의 저속도 구조가 서남극과 동남극에 분포하는 것을 보여주며, 전지구 맨틀 속도 모델은 남극 중앙해령과 동남극에 분포하는 서남극 열개구조에서 나타나는 저속도 이상이 연결되어 있는 것으로 보임
- 이번 단계의 연구를 통해 ‘남극 고유 맨틀’의 서쪽 경계가 분포할 것으로 예상되는 남극 중앙해령 구간 KR3에 대한 지구물리 탐사와 시료채취를 수행하고 그 아래 분포하는 맨틀의 특성, 그리고 아직까지 연구되지 않았던 서남극 열개구조의 명확한 구조와 형성원인, 그리고 열개구조에 의하여 발생하고 있는 지각활동을 규명하고자 함

III. 연구개발의 내용 및 범위

1. Terror Rift 주변 지진활동 및 북빅토리아랜드 지체구조와 확장·형성과정연구
 - Terror Rift 진화에 따른 지체구조 및 퇴적구조의 변화
 - 서남극 열개구조의 신생대 진화과정 및 신기지체구조 활동성 규명
2. KR3의 지각 형성 과정과 맨틀 특성 규명
 - KR3 지형도 작성 및 주변 자력 분포자료 획득
 - KR3 중앙해령 현무암의 지구화학적 특성 연구
 - KR3에서의 열수 분출구 분포 파악
3. 서남극 열개구조 신기지각활동과 관련된 해저화산암과 지각 및 맨틀 포획암 연구
 - 로스해와 남극 중앙해령 주변 해저 화산암의 지구화학 특성 및 성인연구: 암석권맨틀과 연약권 규명맨틀 상호작용
 - 서남극 열개구조 일부분(멜버른 화산대)에서 산출하는 맨틀암석의 지화학 및 미구조 분석
 - 맨틀 및 지각물질 포획암의 미세구조 연구를 통한 신기지각활동으로 인한 변형과정(응력장/방향) 연구

IV. 연구개발결과

1. Terror Rift 주변 지진활동 및 북빅토리아랜드 지체구조와 확장·형성과정연구
 - Terror Rift 경계부의 지각/맨틀 속도 구조
 - 초기 모델은 드라이갈스키 빙설 남쪽 로스해 연안의 Terror Rift 부근이 100 km 깊이까지 속도가 매우 낮은 것을 보여주고, 북쪽 지역은 반대로 남극중단산맥 아래 육상에 저속도 층의 존재를 밝혀냄
 - 미국 알라바마대학에서 2014-2016년간 TAMNNET (the Transantarctic Mountain Northern Network) 광대역 지진관측망 MOU 체결로 연속 지진자료 공유를 통한 연구지역의 모델 영역을 육상쪽으로 확대)
 - 육상 지진관측망 자료와 해저면 지진관측망 자료를 종합한 3차원 맨틀 속도 구조 모델 개발
 - Terror Rift 하부에서 깊이 150~300 km에 걸쳐진 강한 저속도의 맨틀 발견
 - 발견된 저속도의 맨틀의 깊이와 형태를 분석한 결과 Terror Rift는 대륙지각이 갈라지면서 형성되는 passive rift로 판명됨
 - 2016년도 연속지진자료에서 2,000개 이상의 지진원 위치와 규모 결정
 - 다채널 탄성파탐사를 통한 하부구조 규명
 - 2018-2019 남극 로스해 하계탐사 기간 동안 총 2차례에 걸쳐 탄성파 탐사(스파커 및 다중채널 탐사) 수행
 - 2019년 1월 7일 부터 1월 10일까지 약 4일간 아라온 남극 2항차를 통해 남극 로스해 빅토리아랜드 분지에 위치한 Terror Rift구조를 대상으로 총 9개의 스파커 탐사측선 구성, 이동측선 포함 약 400 L-km 자료획득
 - 획득한 자료는 자료해석 소프트웨어를 활용하여 해저지형자료와 함께 3차원으로 도시하고 이를 바탕으로 해당 연구지역 내 리프트 구조의 분포와 특성에 대한 종합적인 천부 지층해석을 수행
 - 2019-2019 남극 하계탐사 3항차 기간 동안 로스해 북서부 외대륙경계부에서 심부지체구조 파악을 위한 다중채널 탄성파 탐사를 수행하여 3개 측

선, 340 L-km의 자료 획득

- 기존 탐사자료가 부족한 로스해 북서부 외대륙경계부에서 서남극 열개구조의 확장축으로 추정되는 방향과 직교하는 긴 탐사측선을 확보하였으며, 같은 지역에서 획득한 자력탐사자료와 결합하여 서남극 열개구조 진화과정에서 형성된 퇴적분지의 발달 특성 분석 수행
- 기존 탐사자료와의 결합을 통해 북서부 외대륙 경계부의 심부 지체구조 및 발달 특성 분석 수행
- 서남극 열개구조의 신생대 진화과정 및 신기지체구조 활동성 규명
 - 아데어 분지 (아데어 트러프)에서 해양지열 관측, 탐사 현장상황에 따라 형성연대 및 지체구조를 특정할 수 있는 해양지열관측 시도
 - 해양지열: 연대관계 분석을 통한 형성 연대 분석 및 지각구조 예측
 - 열기계적 지구구조 모델링을 통한 서남극 열개구조 끝단인 아데어 분지의 생성과정 모사

2. KR1, KR2, KR3 구간 해저환경 및 중앙해령현무암 지구화학특성 비교

연구를 통한 남극권 고유맨틀 특성규명

- KR1 동쪽에 분포하는 태평양-남극 균열대 지각 형성 과정과 맨틀 특성 규명
 - 멀티빔을 활용, KR3와 KR4에 대해 세계 최초로 해저면 정밀수심자료 획득
 - 연구항해 수행 전의 예상과 달리, KR3 지역 일대는 크게 분절된 2개의 중앙해령으로 구성되어 있음을 확인, 각각 KR3와 KR4로 명명하였음 (KR1, KR2에 이어서 서북쪽 방향으로 순차적으로 KR3, KR4로 명명)
 - KR3 확장축의 정확한 위치를 알아내기 위하여 확장축을 지나는 방향으로 해상자력 자료 획득
 - 기존에 탐사가 이루어지지 않았던 KR1과 KR2 일부지역에서 정밀수심자료 및 자력자료 획득
 - 획득된 자력자료들을 이용하여, KR1~KR3의 확장속도 비교 분석 및 일대에 분포하고 있는 해저산의 연령과 발달에 대한 연구 진행 중
- KR3 중앙해령 현무암 할로겐과 불활성기체 동위원소분석
 - KR3와 KR4 지역은 전체적으로 퇴적물로 덮여 있었으며, KR4 지역에서의 해저 확장이 KR3에 비해 더 활발한 것으로 사료됨
 - KR3 중앙해령의 해저면에서 채취한 현무암질 글라스 시료에 대해서 할로겐원소 F, Cl 분석 완료
 - 남극 중앙해령의 현무암질 글라스를 선별하여 불활성기체인 He 동위원소 분석을 미국 UC Davis에 의뢰, 현재 진행 중에 있음
- 남극 중앙해령의 지구조적 특성 및 맨틀 특성 규명
 - 남극 중앙해령 KR3 및 KR4에 대한 최초의 탐사를 통해 해저 지형도 작성 및 해양자력탐사를 통한 KR3 중심 확장축의 위치 확인 및 확장 속도 계산
 - 해양자력탐사를 통한 KR1 일대의 해저면, 해저산맥 및 화산체의 형성 시기 추정
 - KR1 및 KR2를 지판의 남쪽 경계로 하며 호주판 내부의 동남쪽 끝에 위치하고 있는 소형 지각판, 맥쿼리판의 형성 시기, 판구조적 운동 및 진화과정 규명
 - 남극 중앙해령 KR1과 KR2로부터 채취한 암석들에 대한 지화학적 분석을 통해, “질란디아-남극 맨틀”이라는 새로운 맨틀 영역을 세계 최초로 밝혀냄
 - KR3로부터의 해저면 암석 채취 및 지화학적 분석을 통해 KR3 암석의 지화학 조성도 KR1 및 질란디아-남극 맨틀의 특성을 가지는 것으로 확인
 - KR3 및 KR4에서는 다수의 탐사에도 불구하고 열수분출구의 증거를 아직 찾지 못함

3. 서남극 열개구조와 중앙해령 주변의 해저화산활동 성인규명 및 맨틀포획암에 대한 기초지질정보 획득

- Hf 동위원소 분리 시스템 구축
 - 해저화산암 및 포획암 Hf 동위원소분석 및 Hf 원소분리 시스템 구축 완료
 - 2단계 컬럼분리방식을 이용한 암석시료 Hf 원소 분리 프로토콜 개발. Hf 회수율 80% 이상, Blank level 50 pg 이하 달성
 - MC-ICP-MS를 이용한 표준 용액·암석시료 분석에서 추천값 1% 이내의 결과를 획득. 미지 암석 시료에 대한 Hf 동위원소 분석 시스템 완성
 - 1-2차년 전암화학분석치와 불활성기체 동위원소 자료를 이용하여 KR1 해저화산산맥(KR1 해산열) 암석 10개 시료에 대한 (U-Th)/He, K-Ar 연대 획득
 - 동위원소 분석치를 종합하여 KR1 중앙해령, KR1 해산열, 로스해 화산암의 근원맨틀 특성 비교
- 맨틀포획암의 미구조를 이용한 지구조 모델 수립
 - 맨틀포획암 6개 시료에 대한 지진파특성 계산. ANISctf 소프트웨어를 이용하여 분석
 - Mainprice의 소프트웨어 ANISctf를 이용해 남반구(lower hemisphere)에 결과 도출
 - 서남극 열개구조 관련 지구조모델 작성. S파분열(S-wave splitting)과 감람석 결정축을 이용하여 암석이 형성될 당시의 방향성 재연
- 남극 로스해 해저화산암 및 중앙해령 주변 해저화산열 암석 동위원소 지구화학 분석 및 연대 측정
 - 남극 로스해와 호주-남극해령 KR1 하부의 연약권 맨틀은 Sr-Nd-Pb 동위원소 특징에서 상호 유사성을 가짐
 - KR1 해산열의 PREMA(FOZO) 동위원소 특징은 호주-남극 KR1 해령 맨틀 순환에 오래된 해양암석권이 주요 성분으로 기여하고 있음을 지지

V. 연구개발결과의 활용계획

1. Terror Rift와 Northern Victoria Land의 상호 발달과정 및 연관성 규명

- 해저면 지진관측망을 북쪽으로 이동하여 Victoria Land Basin과 Northern Basin에 있는 열개구조의 확장 및 발달 과정 규명
- 북빅토리아 지역에 존재하는 화산활동과 서남극 열개구조의 관계 규명
- 지진파 파형 분석과 다채널 탄성과 탐사를 수행하여 Polar 3 지자기 이상의 물리적인 특성 규명
- 획득된 다채널 탄성과 탐사자료 및 남극 탄성과 탐사자료 공유시스템(SDLS)의 기존 자료를 결합하여, 음향기반암 및 심부/천부 지체구조 분석을 통해 Terror Rift 북단 경계를 규명하고, 해당 지질구조로 인한 층서 및 지층의 변동성, 열개구조 진화와 남극빙상의 발달과정 및 퇴적환경 변화 연구 수행
- 2단계 연구기간 동안 추가 획득된 탄성과 탐사자료분석 결과는 로스해 북서부 외대륙 경계부 지체구조도 및 층서분석도에 반영하여 서남극 열개구조의 진화와 남극빙상의 발달 및 해류순환 변동에 따른 퇴적환경 변화 연구 수행
- 서남극 열개구조의 진화에 따른 지체구조 및 퇴적구조의 변화 연구
 - 지진현상과 남극빙권변화의 관계에 대한 분석
 - 퇴적층서 분석결과와 결합하여 Terror Rift의 광역적 분포와 발달 특성 규명 연구
 - Central Basin 지역에서의 탄성과 탐사자료를 통해 퇴적층서 및 지체구조 특성 규명

2. 남극 중앙해령의 지구조적 특성 및 맨틀 특성 규명

- 해양자력탐사를 통해 남극 중앙해령 주변의 판구조적 운동에 대한 심화 연구
- 지화학적 연구를 통한 질란디아-남극 맨틀의 특성 및 분포, 맨틀 진화 과정 연구
- 남극권 고유 맨틀 특성 규명을 위한 서남극 열개 해저화산암 및 남극대륙 암석에 대한 Hf 동위원소 분석 자료 확보
- 새로 발견한 질란디아-남극 맨틀 영역 내에는 수 많은 해저산들이 분포하고 있는데, 남극권의 지형 변화와 판구조적 진화에 큰 영향을 미치고 있는 것으로 판단됨. 추후 지형 및 지자기 탐사와 더불어 해저면 암석 시료 채취 작업과 지화학적 분석을 동원하여 맨틀의 구조와 기원, 진화과정에 대한 자료를 확보하고자 함
- 현재까지 탐사 및 연구가 질란디아-남극 맨틀 영역의 중앙부에 한정되어 있었기 때문에, 이 맨틀의 동편 및 서편 경계는 여전히 모호한 상태로 남아 있는 상황이므로 추가적이고 체계적인 탐사를 계획 중
- 질란디아-남극 맨틀 고유의 지화학적 특성과 중앙해령의 판구조적 진화과정에 대한 이해를 바탕으로 질란디아-남극 맨틀의 영역과 기원에 대해서 규명하고, 인도양 중앙해령 및 태평양 중앙해령에 의해서 설명되었던 기존의 맨틀 대류 모델을 수정하여 맨틀에 대한 새로운 이해를 기대함
- 질란디아-남극 맨틀의 활동이 남극권 및 전지구적 환경에 미치는 영향 규명

3. 해저화산암과 포획암 연구

- 중규모 해저화산암의 형성과 발전에 대한 화산학적 연구
- 초대륙 분열, 대륙열개구조 형성과 관련된 맨틀 성분 변화 양상 연구
- 포획암의 미량원소, 동위원소 등 화학분석과 지질학적 의의 연구
- KR1 해산열 화산암 동위원소, 연대분석 자료를 정리. 해저화산암 형성 과정과 진화에 대한 논문 투고
- 맨틀포획암의 미구조, 결정방향성, 지진파비등방성, 지구조모델 정리 후 논문투고

극지연구소

S U M M A R Y

I. Title

Characterizing mantle domain beneath West Antarctic Rift System and Antarctic mid-ocean ridges

II. Purpose and Necessity of R&D

1. Goal of R & D

- Identify the causes of crustal movement and formation around the northern region of Terror Rift, the most active of the West Antarctic Rift System
- The crust formation process and mantle characteristics of KR3
- Studies on subsea volcanic rocks, tectonic and mantle xenolith related to new crustal activities in the West Antarctic Rift System

2. Necessity of R & D

- The West Antarctic Rift System is a complex of complex rift structures spanning 750 km and is one of the most massive tectonic structures found in Antarctica.
- The western boundary of the West Antarctic Rift System has the Transantarctic Mountains that divide Antarctica in the south-north direction. Although most studies have been conducted in the Erebus volcanic region, few studies have been done in the West Antarctic Tendon structure and northern Antarctic Mountains
- KR1 and KR2 of the Antarctic mid-ocean Ridge are located in the Pacific Mantle region, but the first phase of exploration and research confirmed that the mantle is not the same as neither the Indian Ocean nor the Pacific Ocean Mantle below it. The findings are significant enough to require modifications to the hypothesis that the upper mantle has only two Pacific and Indian Oceans, as well as a mantle convection model where the two mantles meet at the AAD
- The Zealandia mantle is believed to originate in the extra-large plume that led to the cracking of the Gondwana continent, where the Antarctic-New Zealand-Australian continents were united. Mantle plume flows well due to its relatively high temperature and high fluidity, which can lead to continental rifting
- This phase of the study carried out geophysical exploration and sampling of the Antarctic Mid-Ocean Ridge, KR3, where the western boundary of the Zealandia mantle is expected to be distributed, and the characteristics of the mantle distributed below it. The purpose of this study is to clarify the structure and causes of the formation of the West Antarctic Rift System and the perceptual activity caused by the rift system

III. Contents and Extent of R&D

1. Investigation of tectonics in the vicinity of Terror Rift and Victoria Land Basin
 - Tectonics and sedimentary variations from the evolution of Terror Rift
 - Neotectonic activities and Cenozoic evolution of West Antarctic Rift System
2. Investigation of crustal processes and mantle source characteristics beneath KR3
 - Mapping and sampling on KR3 segment
 - Geochemical analysis on volcanic rocks recovered from KR3 segment
 - Specifying location of hydrothermal vents in KR3
3. Investigation on igneous and volcanic rocks from Ross Sea and KR1 Seamounts (RRS and KR1S) and associated xenoliths related with the West Antarctic Rift System(WARS)
 - Geochemistry of lavas from Ross Sea and KR1 Seamounts: Role of lithosphere–asthenosphere interaction in the genesis of TSRS and KR1S
 - Microstructural investigations on xenolithes: Implications to mantle geometry and deformation behaviors

IV. R&D Results

1. Investigation of tectonics in the vicinity of Terror Rift and Victoria
 - Crust/mantle velocity structure of the Terror Rift boundary
 - Early models show very low velocities near the Terror Rift on the southern coast of the Drygalsky Ice Tongue, up to 100 km deep, while the northern region, on the contrary, reveals the presence of low-velocity zone on land below the Mt. Melbourne
 - Signed MOU of the Transantarctic Mountain Northern Network (TAMNNET) broadband earthquake observation network for 2014–2016 at the University of Alabama, USA, to extend the model area of the research area to the land through continuous seismic data sharing
 - Development of 3D mantle velocity model combining the data observed on land-based seismic observation network and ocean bottom seismographs
 - Strong low-velocity zone spanning 150–300 km in depth beneath the Terror Rift
 - Analysis of the depth and shape of the low-velocity zone reveals that the Terror Rift is a passive rift formed by the spreading of the continental crust.
 - Determination of location and magnitude of more than 2,000 earthquake sources from the continuous seismic data observed in 2016
 - Identification of substructure through multi-channel seismic survey
 - Two seismic (sparker and multi-channel exploration) surveys during the 2018–2019 Antarctic summer field season
 - 400 L-km seismic data was acquired for nine sparker exploration lines, and the structure of the Terror Rift in the Victoria Land Basin was constructed

- The acquired data are shown three-dimensionally along with the bathymetry using a data analysis software and based on this, comprehensive topographical analysis of the distribution and characteristics of the rift structure in the study area is performed
- During the 3rd phase of 2019-2019 Antarctic Summer Exploration, 340 L-km data from three lines were obtained by conducting multi-channel seismic surveys to investigate the deep retardation structure in the Northwestern Continental Border of the Ross Sea.
- In the Northwestern outer continental border of the Ross Sea, which lacks the existing exploration data, a long exploration line orthogonal to the direction estimated as the expansion axis of the West Antarctic Rift System was collected
- Analyzes the tectonics and development characteristics of the northwestern outer continental boundary by combining with existing exploration data.
- Identifying the evolutionary process of the Neo-tectonic structure of the West Antarctic Rift System and activity of the new tectonic structure.
 - Ocean geothermal observations in the Adair Basin (Adair Trough), attempts at ocean geothermal observations to specify formation ages and tectonic structures depending on the site of the exploration.
 - Ocean geothermal: formation age analysis and tectonic prediction through solidarity analysis.
 - Simulation of the formation of Adair Basin, the end of the West Antarctic decay structure through thermomechanical tectonic modeling.

2. Investigation of crustal processes and mantle source characteristics

- Characterization of the formation process and mantle characteristics of the Pacific-Antarctic spread zone in the east of KR1
 - Acquired the world's first submarine depth data for KR3 and KR4 using multi-beam
 - Contrary to expectations before conducting the study, the KR3 region was composed of two largely divided mid-ocean ridges, named KR3 and KR4, respectively
 - Acquisition of geomagnetic data in the direction passing through the expansion axis to find the exact position of the KR3 expansion axis
 - Acquisition of precision bathymetry and geomagnetic data from some areas of KR1 and KR2
 - Using the acquired geomagnetic data, comparative analysis of the expansion rate of KR1 ~ KR3 and the study of age and development of the seabed in the area
- Examination of the characteristics of the geodynamics and mantle
 - The first exploration of the Antarctic mid-ocean ridge KR3 and KR4 through the high-resolution bathymetry and ocean geomagnetic exploration to determine the location of the KR3 central expansion axis and calculate the expansion rate
 - Estimation of the formation time of the seafloor, subsea mountain range and volcanic body of KR1 area through ocean magnetic exploration
 - Identify the small tectonic plates located at the southeast end of the Australian plate with the KR1 and KR2 as the southern boundary of the plate, the timing of the formation of the Macquarie plate, plate

- structural motion, and evolution
- Geochemical analysis of rocks taken from the Antarctic mid-ocean ridge KR1 and KR2 reveals the world's first new mantle zone, "Zealandia-Antarctic Mantle."
- The geological composition of KR3 rocks confirmed by KR1 and Zealandia-Antarctic mantle through seabed rock extraction and geochemical analysis from KR3
- KR3 and KR4 have not yet found evidence of hydrothermal vents despite numerous explorations

3. Investigation on igneous and volcanic rocks from Ross Sea and KR1 Seamounts (RRS and KR1S) and associated xenoliths related with the West Antarctic Rift System(WARS)

- Construction of Hf isotope separation system.
 - Completed Hf isotope analysis and Hf element separation system for subsea volcanic and captured rocks.
 - Development of rock sample Hf element separation protocol using a two-step column separation method. Hf recovery above 80%, the blank level below 50 pg.
 - Results within 1% of the recommended value were obtained from standard solution/rock sample analysis using MC-ICP-MS. Complete Hf isotope analysis system for unknown rock samples.
 - Obtained (U-Th) / He, K-Ar ages for ten samples of KR1 subsea volcanic mountain range (KR1 dissolved heat) rocks using inert gas isotope data for 1-2 years.
 - Comprehensive analysis of the isotope analysis, the source mantle characteristics of KR1 mid-ocean ridge, KR1 dissolution heat, and Ross sea volcanic rock.
- Establish a tectonic model using mantle xenolith
 - Calculation of seismic wave characteristics for six samples of mantle xenolith. Analysis using ANISctf software.
 - Show results in the lower hemisphere using Mainprice's software ANISctf.
 - Create a tectonic model for the West Antarctic Rift System.
- Geochemical analysis and dating of the Ross Sea undersea volcanic rocks and subsea volcanic rock formations around the Central Ridge.
 - The asthenospheric mantles under the Ross Sea and the Australia-Antarctic Ocean KR1 have similarities in their Sr-Nd-Pb isotope characteristics.
 - The PREMA (FOZO) isotope characteristic of KR1 indicates that the old marine rock zone is a major component of the Australian-Antarctic KR1 mantle cycle.

V. Application Plans of R&D Results

1. Investigation of tectonics in the vicinity of Terror Rift and Victoria

- Move the ocean bottom seismic network to the north to investigate the expansion and development of rift structures in Victoria Land Basin and

Northern Basin.

- Investigate the relationship between volcanic activity and the West Antarctic Rift System in the northern Victoria region.
 - To analyze the physical characteristics of Polar 3 geomagnetic anomaly by analyzing seismic waveform and multi-channel seismic survey.
 - By combining the acquired multi-channel seismic survey data and existing data of the Antarctic seismic data sharing system (SDLS), the northern boundary of the Terror Rift is identified through the analysis of the acoustic bedrock and the deep and shallow tectonic structure. Research on the volatility, evolution of rift system, development of Antarctic ice sheet, and changes in the sedimentary environment.
 - The results of seismic survey data obtained during the second phase of the study are further reflected in the lattice structure and strata analysis of the Northwestern outer continental border of the Ross Sea. Conduct environmental change studies.
 - Changes in the tectonic and sedimentary structures of the West Antarctic Rift System.
 - Analysis of the relationship between seismic events and changes in the Antarctic Ice Sheet.
 - Investigation of regional distribution and developmental characteristics of Terror Rift combined with sedimentary stratification results.
 - Sedimentary strata and tectonic structure characteristics from seismic survey data in the Central Basin region.
2. Investigation of crustal processes and mantle source characteristics
- Further study of plate-structured movement around Antarctic mid-ocean ridge through ocean magnetic exploration.
 - Geochemical studies on the properties and distribution of the Zealandia–Antarctic mantle and the evolution of the mantle.
 - Obtain Hf isotope analysis data for 10 Antarctic subsea volcanic rocks and Antarctica rocks to characterize mantle indigenous mantle.
 - In the newly discovered Zealandia–Antarctic mantle, there are numerous seamounts, which are thought to have a significant influence on the topographical changes and plate-structure evolution of Antarctica. In the future, we will use geological and geologic exploration, seabed rock sampling, and geochemical analysis to obtain data on the structure, origin, and evolution of the mantle.
 - Because investigation and research to date have been confined to the central part of the region of the Zealandia–Antarctic mantle, the eastern and western boundaries of this mantle remain vague, so additional and systematic exploration is planned.
 - Based on the intrinsic geochemical characteristics of the Zealandia–Antarctic mantle and the understanding of the plate tectonic evolution of the mid-ocean ridge, the area and origin of the Zealandia–Antarctic Mantle were explained and explained by the Indian Ocean Central Rim and the Pacific Rim. Expect a new understanding of the mantle by modifying the existing mantle convection model.
 - Investigate the effects of the Zealandia–Antarctic mantle on the Antarctic and the global environment.

3. Investigation on igneous and volcanic rocks from Ross Sea and KR1 Seamounts (RRS and KR1S) and associated xenoliths related with the West Antarctic Rift System(WARS)

- Volcanic studies on the formation and development of submarine volcanic rocks.
- A study on the change of mantle component related to supercontinental splitting and continental dehiscence.
- Chemical analysis and geological significance of trace elements and isotopes of mantle xenolith.
- Submitting a paper after the structure of the mantle xenolith, crystal orientation, seismic anisotropy, and tectonic model.



C O N T E N T S

Chapter 1 Introduction	19
1. Research Goal	19
2. Research Background	19
3. Research Objectives	21
4. Research Scope	22
5. Research promotion system	23
Chapter 2 Current R&D Status in Korea and Other Nations	25
1. Domestic Research Trend	25
2. International Research Trends	26
Chapter 3 R&D Implementation Contents and Results	27
1. Introduction	27
2. Antarctic summer field exploration	29
2-1. 2016-2017 Antarctic summer field exploration	29
2-2. 2017-2018 Antarctic summer field exploration	34
2-3. 2018-2019 Antarctic summer field exploration	49
3. Terror rift and Northern Victoria Land and tectonic research	67
3-1. Geophysical study of the West Antarctic Rift System	67
3-2. Changes in Retardation and Sedimentation Structures According to the Evolution of West Antarctic Rift System	73
3-3. Geomagnetic anomalies in the Terror Rift and Central Basin	81
3-4. Simulation of the formation process at the end of WARS based on ocean geothermal observation and modeling	84
4. Research in Antarctica mid-ocean ridge	88
4-1. Bathymetry and Marine Geomagnetic Exploration for Antarctic Mid-ocean Ridge	88
4-2. Age analysis of geomagnetic around underwater volcanoes and mid-ocean ridge KR1	90

4-3. Identification plate structural movement and evolution of Macquarie plate	91
4-4. Geochemical Characteristics of KR3 Mid-ocean Ridge Basalt	93
4-5. Identifying the distribution of hydrothermal vents	99
4-6. Isolation and Characterization of Hydrothermal Microorganisms in Antarctic Mid-ocean Ridge	100
4-7. Survey of large fracture zone consisting of multiple mid-ocean ridge segments	101

5. Study submarine volcanoes and crust and mantle xenoliths **103**

5-1. Submarine volcanic geochemistry	103
5-2. Microstructure Study of Mantle Xenolith	115

Chapter 4 Degree of R&D Goal Achievement and Degree of Contribution to Outside Research Institute **120**

1. Achievement of R & D Goal **120**

1-1. Research Goal Achievement	120
1-2. Achievement Details	123

2. External contribution in technological development **129**

2-1. Seismic network for the Terror Rift and the Northern Victoria Land	129
2-2. Research on Antarctic Mid-ocean ridge and undersea volcanic rocks and mantle xenoliths	131

Chapter 5 Application Plans of R&D Results **132**

1. Expected performance **132**

2. Research and utilization plan **133**

3. Future research direction **135**

3-1. A Study on the Formation of the West Antarctic Rift System and Polar 3 Geomagnetic Anomalies	135
3-2. Research on Antarctic Mid-ocean Ridge and volcanic rocks	137

Chapter 6 Overseas Science and Technology Information Collected in the R & D Process **139**

Chapter 7 References	142
Appendix 1. List of teleseismic earthquakes used in modeling tectonic/mantle structures	147
Appendix 2. Expedition logs of the Fieldwork for Antarctic Mid-ocean Ridge	159



목 차

제 1 장 서론	19
제 1 절 연구개발 목표	19
제 2 절 연구개발 배경	19
제 3 절 연구 목적	21
제 4 절 연구 범위	22
제 5 절 연구 추진 체계	23
제 2 장 국내외 기술개발 현황	25
제 1 절 국내 연구 동향 분석	25
제 2 절 국제 연구 동향 분석	26
제 3 장 연구개발수행 내용 및 결과	27
제 1 절 서론	27
제 2 절 남극하계 현장 탐사	29
1. 2016-2017 남극 하계 현장 탐사	29
2. 2017-2018 남극 하계 현장 탐사	34
3. 2018-2019 남극 하계 현장 탐사	49
제 3 절 Terror rift 및 북빅토리아랜드 지체구조와 연구	67
1. 서남극 열개구조 지구물리 연구	67
2. 서남극 열개구조의 진화에 따른 지체구조 및 퇴적구조의 변화 연구	73
3. Terror Rift 및 Central Basin에서의 지자기 이상 규명	81
4. 해양지열관측과 모델링을 바탕으로 한 WARS의 끝단 형성 과정 모사	84
제 4 절 남극 중앙해령 연구	88
1. 남극 중앙해령에 대한 해저면 지형조사 및 해양자력탐사	88
2. 중앙해령 KR1 및 주변 해저화산들의 지자기 연령 분석	90
3. 맥쿼리판의 판구조적 운동 및 진화과정 규명	91
4. KR3 중앙해령 현무암의 지화학 특성 연구	93
5. 열수 분출구 분포 파악	99
6. 남극 중앙해령 열수 미생물의 분리 및 특성 연구	100
7. 다수의 중앙해령 분절들로 이루어진 대형 균열대 조사	101

제 5 절	해저화산과 맨틀 포획암 연구	103
1.	해저화산암 지구화학	103
2.	맨틀포획암 미구조 연구	115
제 4 장	연구개발목표 달성도 및 대외기여도	120
제 1 절	연구개발 목표 달성도	120
1.	연구 목표 달성도	120
2.	연구성과 세부내용	123
제 2 절	기술발전에서의 대외기여도	129
1.	Terror Rift와 Nerthern Victoria Land 지역 지진관측망 구축	129
2.	남극 중앙해령 및 해저화산암과 포획암 연구	131
제 5 장	연구개발결과의 활용계획	132
제 1 절	기대 성과	132
제 2 절	연구성과 활용계획	133
제 3 절	향후 연구 방향	135
1.	서남극 열개구조와 Polar 3 지자기이상의 형성과정 연구	135
2.	남극 중앙해령 및 화산암 연구	137
제 6 장	연구개발과정에서 수집한 해외과학기술정보	139
제 7 장	참고문헌	142
부록 1.	지각/맨틀 구조 모델링에 사용된 원격지진 목록	147
부록 2.	남극 중앙해령 맨틀성인규명 향차별 탐사일지	159

제 1 장 서론

제 1 절 연구개발 목표

서남극 열개구조에서 활동성이 큰 Terror Rift 맨틀 구조 연구를 통한 지각 운동 특성과 형성원인을 규명하고, 남극 중앙해령 KR3 구간 탐사와 연구를 통해 남극권 고유 맨틀 서쪽 경계 규명하고자 함

제 2 절 연구개발 배경

○ 맨틀은 태평양형과 인도양형 두 개의 영역으로 구분되어 있고 이 두 맨틀 영역이 호주와 남극 사이에 존재하는 호주-남극 불연속면(AAD, Australian-Antarctic Discordance)에서 만난다는 발견은 지구 맨틀의 대류와 진화를 이해하는데 중요한 정보를 제공하기 때문에 지구과학계의 중대한 발견 중의 하나임 (Dupre & Allegre, 1983; Hart, 1984; Hamelin & Allegre, 1985; Klein et al., 1988)

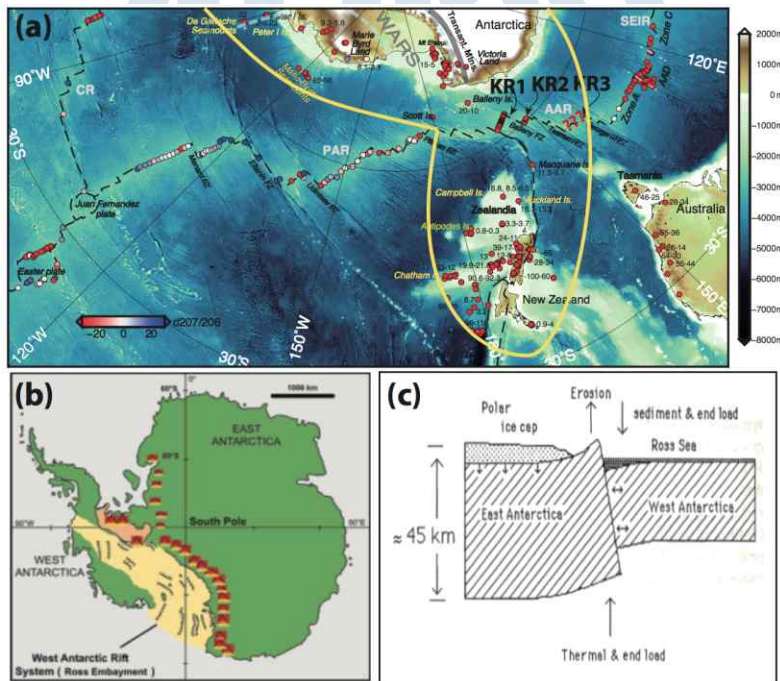


그림 1.1. (a) 남극권 맨틀 화학 분석 위치와 특성 분포. (b) 서남극 열개구조와 주변에 발달한 TAMs. (c) 남극종단산맥의 요곡용기모델 (flexural uplift)[after Stern and ten Brink, 1989]: 고온의 상부맨틀의 영향으로 동남극 끝단이 융기된 가설이며 뜨거운 상부맨틀은 서남극 열개구조하부에서 형성된 것으로 해석됨.

○ 남극중앙해령 탐사 지역인 호주-남극 중앙해령의 KR1과 KR2는 태평양형 맨틀 영역상에 위치하지만 1단계 탐사 및 연구 결과 인도양형은 물론 태평양형과도 다른 맨틀 영역이 그 아래 분포함이 확인되었음. 이 발견은 상부 맨틀이 태평양형과 인도양형 두

가지만 존재한다는 가설은 물론 이 두 맨틀이 AAD에서 만난다는 맨틀 대류 모델에도 수정을 요구할 정도로 중대한 발견임

○ 최근 “질란디아-남극 맨틀”로 명명된 이 맨틀 영역의 분포 범위를 확정하는 것은 맨틀 대류와 진화를 연구하는데 매우 중요한 작업으로 사료되며, 최근 연구 결과에 따르면 이 맨틀의 영역은 북쪽으로는 뉴질랜드, 남쪽으로는 남극열개구조까지 확인되고 있음. 그러나 “질란디아-남극 맨틀”의 동쪽 경계와 서쪽 경계는 아직 밝혀지지 않았으며, 이러한 동-서 경계를 확인하고 특성을 규명하는 작업이 “질란디아-남극 맨틀”의 성인과 동력학적 흐름을 이해하기 위해 필수적으로 요청됨

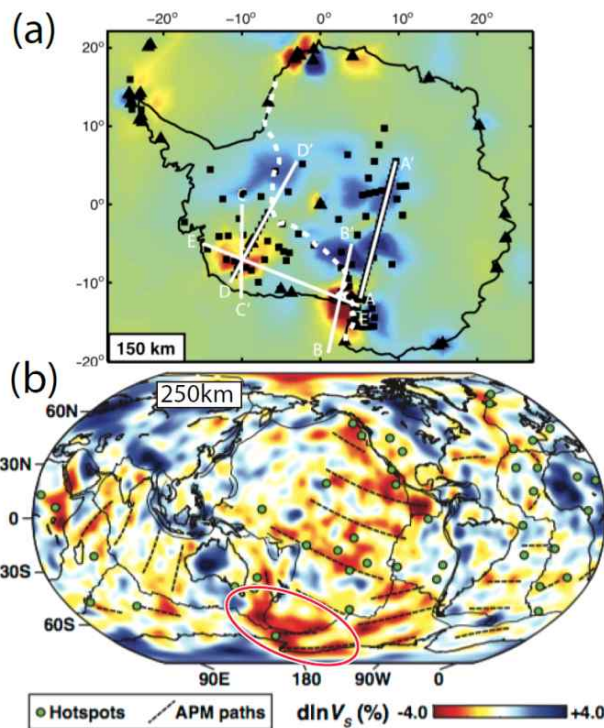


그림 1.2. (a) 남극 지역 깊이 150 km 맨틀 속도 구조 분포 [Hansen et al., 2014]. (b) 전지구 250 km 깊이의 맨틀 속도 구조 모델 [French, 2014]: 남극 중앙해령과 서남극 열개구조 아래 저속도 이상이 연결된 것처럼 관찰됨.

○ “질란디아-남극 맨틀”은 남극-뉴질랜드-호주 대륙이 하나로 되어있던 곤드와나 대륙의 균열을 가져온 초대형 플룸에서 기원했을 것으로 사료됨. 맨틀 플룸은 상대적으로 온도가 높고 유동성이 크기 때문에 잘 흐르며 대륙의 rifting을 가져올 수 있음

○ 남극지역 맨틀 속도 모델은 서남극 열개구조를 따라 두 개의 저속도 구조가 서남극과 동남극에 분포하는 것을 보여주며, 전지구 맨틀 속도 모델은 남극중앙해령과 동남극에 분포하는 서남극 열개구조에서 나타나는 저속도 이상이 연결되어 있는 것으로 보임

○ 하지만 현재 현재까지 제안된 맨틀 속도 모델은 해상도가 ~300 km 급으로 명확하게 이 저속도 이상이 연결되어 있는지 여부는 판단할 수 없음

○ 또한 서남극 열개구조에서 발견되는 저속도 구조는 길이 ~4,000 km 최대높이 ~4,500 m에 달하는 남극 종단산맥의 형성에 직접적인 영향을 주었을 것으로 알려져 있으나, 대부분의 연구는 에레부스(Erebus) 화산지역에서 연구된 결과로 서남극 열개구조와 남극종단산맥 북부에서의 연구는 전무한 상황임

○ 따라서 이번 단계의 연구를 통해 ‘남극 고유 맨틀’의 서쪽 경계가 분포할 것으로 예상되는 남극 중앙해령 구간 KR3에 대한 지구물리 탐사와 시료채취를 수행하고 그 아래 분포하는 맨틀의 특성, 그리고 아직까지 연구되지 않았던 서남극 열개구조의 명확한 구조와 형성원인, 그리고 열개구조에 의하여 발생하고 있는 지각활동을 규명하고자 함

제 3 절 연구 목적

서남극 열개구조의 형성과 진화를 이해하기 위하여 서남극 열개구조 중에서 가장 최근까지 확장된 것으로 보고된 Terror Rift의 형성과정을 규명하고, 남극 중앙해령 중 KR3 지역을 중점으로 지각 형성 과정과 맨틀의 특성을 규명하고자 한다. 이번 단계에서 주요 연구 지역인 Terror Rift와 남극 중앙해령 KR3는 지역적으로 2,000 km이상 떨어져 있고 각각 독립적인 연구방법으로 연구를 수행하였다. 하지만, 두 지역의 맨틀은 지화학적으로 매우 유사한 성분으로 구성되어 있는 특징을 가지고 있고 지구물리 연구방법을 남극 중앙해령까지 확대하여 수행할 계획이다.

Terror Rift는 장보고 기지에서 가까운 Terra Nova 만에 위치하며 장보고 기지 기반으로 빙하(David Glacier와 Nasen Glacier)의 흐름을 연구하기 위한 지진관측망, 멜번화산의 활동 감시를 위한 지진관측망, 그리고 관측범위를 Terra Nova 만과 Terror Rift까지 확장하기 위하여 해저면 지진관측망(5대)를 구축하였다. 육상과 해저면 지진관측망을 이용하여 Terror Rift 하부의 지각과 맨틀의 속도 구조를 연구 할 수 있는 기반을 마련하였고, 1단계에서 완전하게 수행되지 못했던 Adare 분지(basin)의 지열 연구, 남극 중앙해령 KR3 해저지형도와 현무암 지구화학 분석 및 해저화산암과 포획암 연구를 진행하였다.

본 연구 사업의 목적은 첫 번째 Terror Rift 주변 지진활동 및 북빅토리아랜드 지체구조와 확장/형성과정연구, 두 번째 KR3의 지각 형성 과정과 맨틀 특성 규명, 그리고 마지막 세 번째는 Terror Rift와 남극 중앙해령의 화강암과 맨틀 포획암의 화학 특성을 분석하여 두 지역의 암석 조성의 특성을 비교하는 것이다. 따라서 본 연구의 주요 목적은 아래와 같이 정리할 수 있다.

- Terror Rift 주변 지진활동 및 북빅토리아랜드 지체구조와 확장·형성과정연구
 - Terror Rift 진화에 따른 지체구조 및 퇴적구조의 변화

- 서남극 열개구조의 신생대 진화과정 및 신기지체구조 활동성 규명
- KR3의 지각 형성 과정과 맨틀 특성 규명
 - KR3 지형도 작성 및 주변 자력 분포자료 획득
 - KR3 중앙해령 현무암의 지구화학적 특성 연구
 - KR3에서의 열수 분출구 분포 파악
- 서남극 열개구조 신기지각활동과 관련된 해저화산암과 지각 및 맨틀 포획암 연구
 - 로스해와 남극 중앙해령 주변 해저 화산암의 지구화학 특성 및 성인연구: 암석권 맨틀과 연약권 규명맨틀 상호작용
 - 맨틀 및 지각물질 포획암의 미세구조 연구를 통한 신기지각활동으로 인한 변형 과정(응력장/방향) 연구

제 4 절 연구 범위

연구목적에 기술되어 있듯이 이번 연구는 서남극 열개구조 중에서 가장 최근에 발달된 Terror Rift와 남극 중앙해령 KR1~KR4로 지리적으로 떨어져 있는 두 지역을 연구하는 것과 두 지역에서 채취된 화산암과 맨틀 포획암의 화학 분석을 통한 비교 연구로 이루어져 있다.

1. Terror Rift 주변 지진활동 및 북빅토리아랜드 지체구조와 확장·형성과정연구

- Terror Rift 진화에 따른 지체구조 및 퇴적구조의 변화
 - 육상 지진관측망과 연계한 해저면 지지관측망 구축 및 운영 방법 개발
 - Terror Rift 경계부의 3차원 지각/맨틀 속도구조 모델링
 - 다채널 탄성과 탐사를 통한 하부구조 규명
- 서남극 열개구조의 신생대 진화과정 및 신기지체구조 활동성 규명
 - 자력, 지열 탐사를 통한 지각의 활동도 유추
 - 지진관측망 연속 자료를 이용하여 지진활동도 연구
 - 보유중인 수중음향 자료 처리 및 분석을 통한 화산활동성 분석

2. KR3의 지각 형성 과정과 맨틀 특성 규명

- KR3 지형도 작성 및 주변 자력 분포자료 획득
 - 멀티빔을 이용한 정밀 해저지형도 작성
 - 해상 자력탐사를 수행하여 해저지형 확장 속도 계산
- KR3 중앙해령 현무암의 지구화학적 특성 연구

- 드렛지(Dredge)를 이용한 화산암 시료 획득
- Hf, He 동위 원소 분석
- KR3에서의 열수 분출구 분포 파악
 - 열수 탐지기(MAPR)를 이용한 열수 분출 장소 파악

3. 해저화산암과 포획암 연구

- 서남극 열개구조 신기지각활동과 관련된 해저화산암과 지각 및 맨틀 포획암 연구
 - 로스해와 남극 중앙해령 주변 해저 화산암의 지구화학 특성 및 성인연구: 암석권 맨틀과 연약권 규명맨틀 상호작용
 - 맨틀 및 지각물질 포획암의 미세구조 연구를 통한 신기지각활동으로 인한 변형 과정(응력장/방향) 연구

제 5 절 연구 추진 체계

1. 연구 사업 추진방법

- 본 연구의 주된 주체는 극지연구소로서 연구기획, 현장조사, 지구물리자료 처리, 암석 시료 채취 및 분석을 수행함
- 국내의 충남대학교와 인하대학교 연구자들에게 중앙해령 구조의 위탁연구를 통하여 일부 연구를 수행함.

2. 국제 공동 연구

- Terror Rift 인근 지각 및 상부 맨틀 구조 연구와 Ross 해 신기 지체구조 활동에 관한 국제공동 연구
 - Terror Rift의 3차원 지각/상부 맨틀 속도 구조 연구를 장보고 기반 육상 지진관측망과 해저면 지진관측망을 구축하여 신기 지체구조 활동 및 빙권활동 모니터링 수행
 - 미국 알라바마 대학과 공동연구를 진행하여 TAMNNET 지진관측망 자료를 추가하여 광역적인 지각/상부맨틀 3차원 속도 모델 개발
 - SCAR의 Scientific committee이며 Horizon Scan의 7대 중요 남극 연구 테마 중 하나인 Solid Earth Response and influence on Cryospheric Evolution (SERCE)의 Steering committee로 활용하며 연구에 참여함
 - 신기 지체구조 활동성 규명을 위하여 미국 NOAA/PMEL과 수중음향 자료처리 및 해석
 - Terror Rift 진화에 따른 지체구조 및 퇴적구조 변화 연구를 위하여 이태리 해양 지질조사원(OGS)와 탄성과 층서 해석 및 지체구조 규명
- 중앙해령 및 맨틀 성인 규명을 위한 국제 공동 연구

- 본 연구에서 수행한 남극 중앙해령 탐사자료와 프랑스 CNRS에서 탐사중인 중앙해령 자료와 공유 및 공동연구 진행
- 남극 중앙해령 지구화학 연구를 위하여 미국 하버드대학 및 와이오밍대학과 중앙해령 현무암 시료 분석 기술 상호 공유 및 공동 연구 진행
- 중앙해령 국제 공동 연구 협력기구인 INTERIDGE에서 주도적인 역할 수행

○ 각각의 연구과정에 대한 연구 추진 체계는 그림 1.1에 제시되어 있음

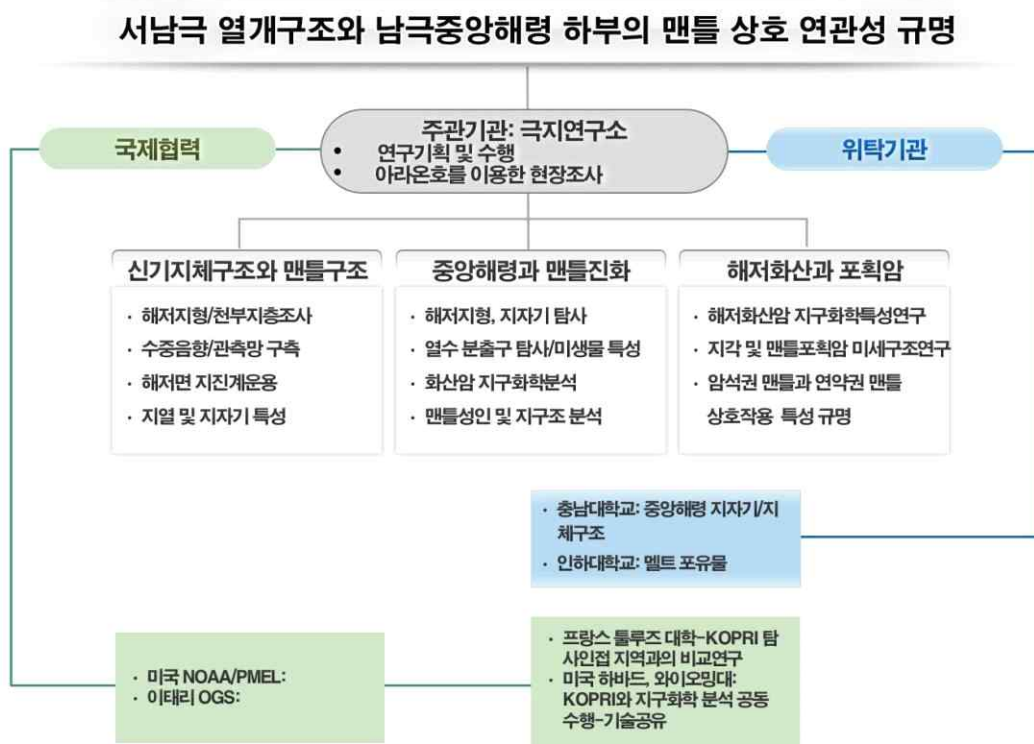


그림 1.3. 서남극 열개구조와 남극중앙해령 연구 추진 체계

제 2 장 국내외 기술개발 현황

제 1 절 국내 연구 동향 분석

○ 극지연구소에서는 2013, 2015년 두 차례에 걸친 탐사를 통해 다채널 탄성과 탐사자료를 로스해 북서부 대륙사면, 대륙대에 위치한 센트럴분지에서 획득하였고, 획득된 탄성과 자료는 자료처리 및 해석을 실시하여 기후변화에 따른 남극빙상의 발달 및 저층해류의 변화를 탄성과 증거를 통해 분석 중이며, 서남극 열개구조의 진화에 따른 분지확장에 대한 연구를 수행할 예정임

○ 극지연구소에서는 호주-남극 중앙해령 및 남극 로스해 센트럴분지에서 해상 자력탐사를 수행, 자료 획득, 처리 및 분석을 진행하여 중앙해령 및 주변 일대에 분포한 해저산, 센트럴분지의 지자기 연령과 판구조적 진화과정 규명 등의 연구를 진행 중에 있음

○ 국내에서 해양지열관측을 단독으로 수행 가능한 곳은 극지연구소가 유일하며, ANA05B, ANA06C 항해기간 중 Adare Trough 인근에서 지열자료 획득하였으며 현재 분석 중임

○ 수중음향분야는 국내에서 유일하게 극지연구소에서 남극을 대상으로 미국 NOAA/PMEL 연구그룹과 공동연구를 수행하고 있음. 서남극 Balleny 군도 주변에 5기의 수중음향 장비를 1년간 계류하고 회수하여 자료를 분석 중임

○ 극지연구소에서는 호주-남극 중앙해령을 탐사하여 지형과 빙하기-간빙기 주기와의 관련성을 규명하였고, 이 지역에서 최초로 열수 분출구(“무진 열수 분출구”)를 발견하였으며 남극권 중앙해령에서는 최초로 열수 생물 채취에 성공하였음

○ 극지연구소에서 장보고 기지 인근에 다수의 지진계를 설치하여 빙권변화를 모니터링하고 있으며, Melbourne 화산 주변에 설치된 지진관측망 자료를 이용하여 화산의 분출경로를 연구 중임

○ 2016년 5월까지 해양수산부 연구개발(R&D)사업으로 수행된 “양극해 환경변화 이해 및 활용연구”사업을 통해 2013년 2월, 2015년 2월에 남극 로스해 Central Basin에서 다중채널 탄성과 탐사자료를 획득

○ 이탈리아 연구진과의 국제공동연구로 퇴적기록에 남아있는 남극빙상의 발달사와 저층류의 기작에 대한 연구를 수행함

제 2 절 국제 연구 동향 분석

○ SCAR SRPs 중 하나인 SERCE (Solid Earth Response and influence on Cryosphere Evolution)은 지구 내부 구조의 특징이 빙하권에 미치는 영향 연구를 목적으로 하고 있으며, 극지연구소는 steering committee member로 연구에 동참하고 있음

○ 수중음향 자료 분석 및 해석은 공동연구 파트너인 NOAA/PMEL이 세계 최고수준의 기술력과 경험을 보유중에 있으며, 남극 로스해에서는 현재 극지연구소와 협력하여 연구를 진행 중에 있음

○ 미국 하버드 대학교에서는 2014년에 수행된, 호주-남극 중앙해령과 비슷한 확장 속도를 보이고 있는 동태평양의 후안데 푸카 해령(Juan de Fuca Ridge)에 대한 탐사를 통해 유의미한 지구물리/지화학적 결과를 얻었으며, 극지연구소의 호주-남극 중앙해령 연구 결과와 비교 연구 계획 중

○ 프랑스 툴루즈 대학에서는 2015년, 극지연구소 탐사 지역인 호주-남극 중앙해령의 서편에 위치한 중앙해령과 중심축 주변에 분포한 해저산들에 대한 탐사를 수행하였으며, 이 탐사를 통하여 열수 분출구의 징후를 확인하였음 (극지연구소 연구원 2명이 이 탐사에 참여함)

○ 1980년대 이후 로스해에 남극 연구기지를 보유한 이탈리아, 미국, 뉴질랜드 등을 중심으로 로스해 대륙붕지역에 대한 해양지구물리탐사를 수행하였고, 최근 이탈리아는 남극연구프로그램 공모를 통해 자국 연구선 OGS Explora를 이용한 2016-2017 남극하계 해양지구물리탐사를 계획

○ Adare Trough는 수 차례의 미국 해양탐사 결과(NBP 9702 등)를 바탕으로, 그 확장 시기, 단층의 활동 시기, 화산활동, 탄성파층서 등이 연구됨 (Cande et al., 2000, Finn et al., 2005; Dietmar et al., 2005; Granot et al., 2010)

○ 미국을 중심으로 남극 대륙 전역에 지진관측망과 GPS 관측망을 설치/운영하던 POLENET Program이 종료되었으며, 현재 대단위 지구물리 관측망 연구는 수행되고 있지 않음

○ 감람석(olivine)에 대한 변형실험 및 미구조 연구는 1980년대부터 진행되었으며 지진파 이등방성(seismic anisotropy)을 이용해서 맨틀 내 감람석의 배열 및 맨틀의 이동을 설명하고 있음. 감람석을 이용한 맨틀의 구조 및 진화에 대한 연구가 활발히 진행 중

제 3 장 연구개발수행 내용 및 결과

제 1 절 서론

지구의 맨틀은 인도양형과 태평양형, 두 개의 타입으로 구분되고, 이 두 맨틀 간의 경계는 호주판과 남극판 사이의 120~130°E 구간에 존재하는 호주-남극 불연속면 (Australian-Antarctic Discordance, AAD)에서 만난다는 발견은 지구 맨틀의 대류와 진화를 이해하는데 있어서 중요한 정보를 제공하기 때문에 지구과학계의 중대한 발견들 중의 하나이다 (Dupre & Allegre, 1983; Hart, 1984; Hamelin & Allegre, 1985; Klein et al., 1988). 남극 중앙해령 탐사의 타겟이 된 호주-남극 중앙해령 KR1과 KR2는 태평양형 맨틀의 영역 내에 위치하고 있지만, 1단계 탐사와 그에 따른 연구결과는 KR1 및 KR2가 인도양형은 물론, 태평양형 맨틀과도 다른 특성을 보여주었다 (그림 3.1a). 즉, 인도양형 및 태평양형 맨틀과 구분되는 또 다른 맨틀 영역이 KR1 및 KR2 아래에 분포하고 있음을 확인시켜 주었다. 이러한 발견은 상부 맨틀이 인도양형과 태평양형, 두 가지만 존재한다는 기존의 가설을 뒤엎는 것은 물론이며, 이 두 타입의 맨틀이 AAD에서 만난다는 맨틀 대류 모델에도 수정을 요구할 정도로 중대한 새로운 발견이 되었다.

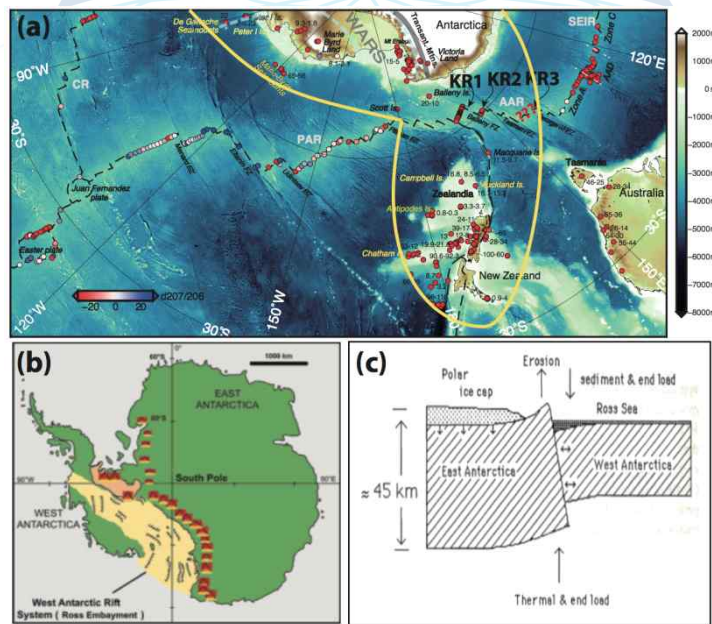


그림 3.1. (a) 남극권 맨틀 화학 분석 위치와 특성 분포. (b) 서남극 열개구조와 주변에 발달한 TAMs. (c) 남극중단산맥의 요곡응기모델 (flexural uplift)[after Stern and ten Brink, 1989]: 고온의 상부맨틀의 영향으로 동남극 끝단이 융기된 가설이며 뜨거운 상부맨틀은 서남극 열개구조하부에서 형성된 것으로 해석됨.

최근 “질란디아-남극 맨틀”로 명명된 이 맨틀 영역의 분포 범위를 확정하는 것은 맨틀 대류와 진화를 연구하는데 매우 중요한 작업으로 사료되며, 최근 연구 결과에 따르면 이 맨틀의 영역은 북쪽으로는 뉴질랜드, 남쪽으로는 남극열개구조까지 보고되고 있다(그림

3.1.b와 3.2.b). 그러나 “질란디아-남극 맨틀”의 동쪽 경계와 서쪽 경계는 아직 밝혀지지 않았으며, 이러한 동-서 경계를 확인하고 특성을 규명하는 작업이 “질란디아-남극 맨틀”의 성인과 동력학적 흐름을 이해하기 위해 필수적으로 요청되고 있다.

“질란디아-남극 맨틀”은 남극-뉴질랜드-호주 대륙이 하나로 되어있던 곤드와나 대륙의 균열을 가져온 초대형 맨틀 플룸에서 기원했을 것으로 사료되고, 맨틀 플룸은 상대적으로 온도가 높고 유동성이 크기 때문에 잘 흐르며 대륙의 rifting을 가져올 수 있다. 남극지역 맨틀 속도 모델은 서남극 열개구조를 따라 두 개의 저속도 구조가 서남극과 동남극에 분포하는 것을 보여주며 (그림 3.2a), 전지구 맨틀 속도 모델은 남극중앙해령과 동남극에 분포하는 서남극 열개구조에서 나타나는 저속도 이상이 연결되어 있는 것으로 보여진다 (그림 3.2b). 하지만 현재 현재까지 제안된 맨틀 속도 모델은 해상도가 ~300 km 급으로 명확하게 이 저속도 이상이 연결되어 있는지 여부는 판단할 수 없다.

또한 서남극 열개구조에서 발견되는 저속도 구조는 길이 ~4,000 km 최대높이 ~4,500 m에 달하는 남극 종단산맥의 형성에 직접적인 영향을 주었을 것으로 알려져 있으나, 대부분의 연구는 에레부스(Erebus) 화산지역에서 연구된 결과로 서남극 열개구조와 남극종단산맥 북부에서의 연구는 전무한 상황이다.

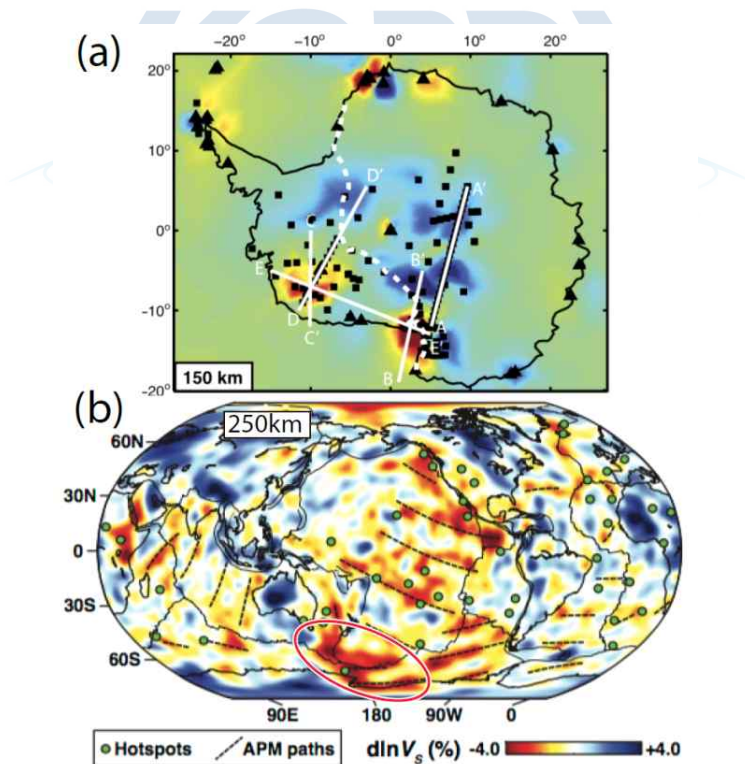


그림 3.2. (a) 남극 지역 깊이 150 km 맨틀 속도 구조 분포 [Hansen et al., 2014] (b) 전지구 250 km 깊이의 맨틀 속도 구조 모델 [French, 2014]: 남극 중앙해령과 서남극 열개구조 아래 저속도 이상이 연결된 것처럼 관찰됨.

따라서 이번 단계의 연구를 통해 ‘남극 고유 맨틀’의 서쪽 경계가 분포할 것으로 예상되는 남극 중앙해령 구간 KR3에 대한 지구물리 탐사와 시료채취를 수행하고 그 아래 분포하는 맨틀의 특성, 그리고 아직까지 연구되지 않았던 서남극 열개구조의 명확한 구조와 형성원인, 그리고 열개구조에 의하여 발생하고 있는 지각활동을 규명하고자 한다.

제 2 절 남극하계 현장 탐사

1. 2016-2017 남극 하계 현장 탐사

가. 다중채널 탄성과 탐사

(1) 다중채널 탄성과 탐사 개요

- Victoria Land Basin내에 발달한 것으로 추정되는 Terror Rift 지역에 대한 심부 지체구조 및 퇴적층서 규명을 위한 다중채널 탄성과 탐사 수행(그림 3.3.)
- 쇄빙연구선 아라온호에 장착된 다중채널 탄성과 탐사 시스템을 구성하는 120채널 스트리머, 총 볼륨 500 cu·in 에어건(Sercel G-Gun II) 2정, 컴프레서, 선내 제어시스템을 활용하여 총 120 L-km의 탐사자료 획득

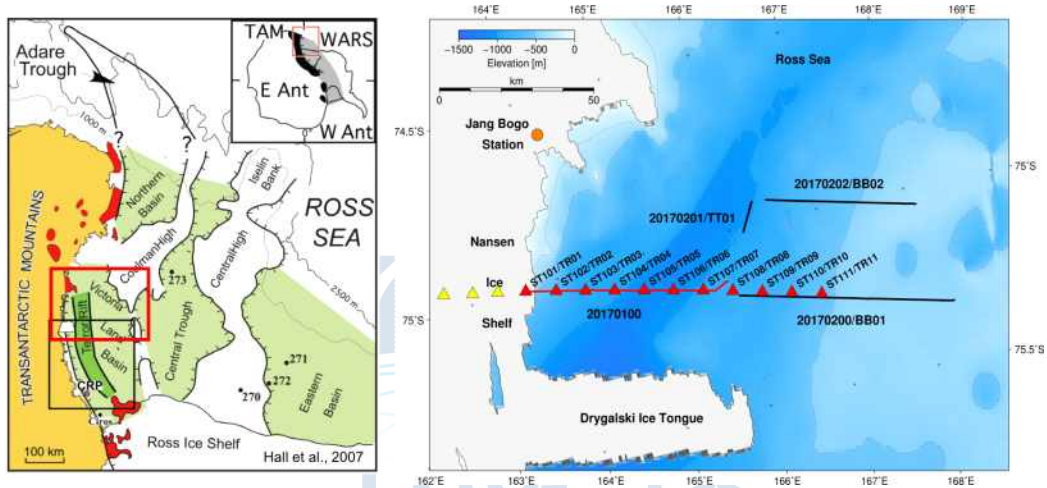
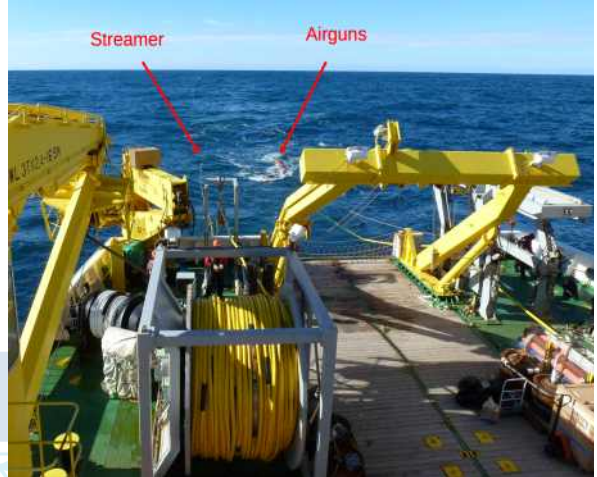


그림 3.3. 다중채널 탄성과 탐사 지역(검은실선 : 탄성과 탐사 축선).

- 다중채널 탄성과 탐사지역에 대한 지질환경(수심 500-800 m) 및 탐사목적(심부 지체구조 및 퇴적층서)을 고려하여, 고해상도 탄성과 단면획득이 가능한 저용량 고주파 에어건을 활용
- 탄성과 탐사자료 품질 향상을 위해, 15 fold로 자료처리가 가능하도록 에어건 발파간격을 50 m로 설정하여 음원을 발생시킴
- 음원 발생을 위한 압축공기를 생성하는 컴프레서 압력은 120 bar로 설정하였으며, 에어건과 스트리머 설치 수심은 6 m로 동일하게 설정



<다중채널 탄성과 탐사자료 획득을 위한 에어건 장착 및 설치>

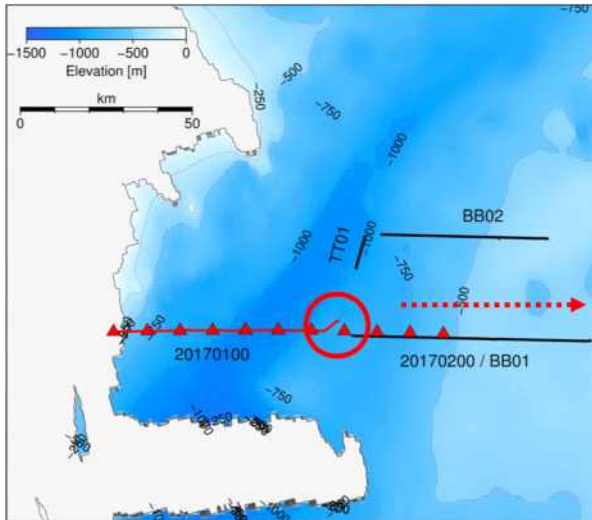


<스트리머 (Streamer) 설치>

<다중채널 탄성과 탐사 진행>

그림 3.4. 다중채널 탄성과 탐사자료 획득을 위한 에어건(airgun) 및 스트리머(streamer) 설치 및 탐사과정

- 다중채널 탄성과 탐사 수행 시, 탐사지역에 존재하는 해빙을 피하기 위해 탐사측선 변경
- OBS 측선과 동일한 150 km의 다중채널 탄성과 탐사 측선을 계획하였으나 해빙의 출몰로 인해 기존의 측선에서 30 km 떨어진 위치로 탐사계획을 변경하였으며, 기존의 탐사라인과 평행한 BB02 측선을 추가하여 탐사 진행(그림 3.5.)
- 총 150 km 측선을 계획하였으나 탐사계획 변경으로 70 km (BB01), 50 km (BB02) 측선 2개 획득
- 다중채널 탄성과 탐사 장비를 활용하여 OBS 탐사(wide angle seismic survey) 수행
- OBS 정점을 직선으로 연결한 측선을 설정하고, 해당 측선을 따라 100초 간격으로 대용량 에어건 발파
- OBS 정점 1번부터 11번을 지나 총 150 km의 탐사측선을 계획하였으나, OBS 정점 8번 부근에 해빙이 관측되어 에어건 시스템 회수
- 에어건 회수를 위해 연구선이 감속하는 과정에서 에어건이 연구선 후미로 빨려 들어감에 따라 에어건을 연결하는 움빌리컬 케이블 파손(그림 3.5.)
- 해빙 지역을 지나 다시 탐사를 수행할 계획이었으나 장비의 파손으로 인해 OBS 정점 7번 지역에서 탐사 종료



<OBS 탐사 측선(붉은색 원 : 해빙출몰지역, 붉은색 화살표 : 탐사진행방향)>



<파손된 벨 하우스 케이블 사진 (1)>



<파손된 벨 하우스 케이블 사진 (2)>



<탐사종료 후 8번 정점에서 회수한 OBS 사진>

그림 3.5. 다중채널 탄성파 탐사 측선변경 및 해빙상황

(2) 현장 탐사자료 처리

- 연구선 내 구축된 탄성파 탐사 자료처리 소프트웨어(GEDCO VISTA 10.0)를 활용하여 획득한 탄성파 탐사자료 120 L-km에 대한 자료처리 수행
- Butterworth band pass filter를 적용하여 획득한 자료에 기록된 저주파 및 고주파 잡음 제거
- Geometry setting 과정을 통해 탐사 시 설정한 자료획득 배열을 입력하고, 이에 해당하는 다양한 변수를 설정하여 데이터 헤더값을 작성 및 수정
- F-K domain filter: 시간영역의 원시데이터(raw data)를 F-K 도메인으로 변환하여 반복적으로 나타나는 잡음 제거
- Velocity analysis를 통해 해당 자료로부터 탐사지역에 대한 개략적인 해저속도구조를 규명하고, 이와 동시에 공중점 중합(common mid-point stacking) 및 구조

보정(migration)에 쓰일 속도 모델 구축

- Surface related multiple elimination(SRME)과정에서는 초기 중합단면에서 나타나는 해저면과 관련된 겹반사파(multiple)을 제거
- Post stack finite difference time migration 과정을 통해 급격한 기울기를 가진 지층 및 굴절면과 같은 복잡한 지층구조에 대한 구조보정을 수행함으로써 최종적인 탄성과 탐사단면(그림 3.6.) 작성

표 3.1. 자료처리 시퀀스

Flow	Processing Index	Data Processing Parameters
1	Seg-D input	
2	Butterworth Band pass filter	frequency trapezoid : 6-10-120-150 Hz
3	Station Correction	-90 ms
4	Geometry	shot interval : 50 distance of shot to near trace : 130 No. channel : 120 group interval : 12.5 Resampling : 2ms, minimum phase smoothed Anti-alias filter
5	F-K domain filter	
6	Velocity analysis	100 shot interval
7	Brute stack	CMP stack
8	Surface related multiple elimination (SRME)	
9	Butterworth Band pass filter	frequency trapezoid : 10-20-90-120 Hz
10	Velocity analysis	100 shot interval
11	Brute stack	CMP stack
12	Post stack finite difference time migration	post stack time migration

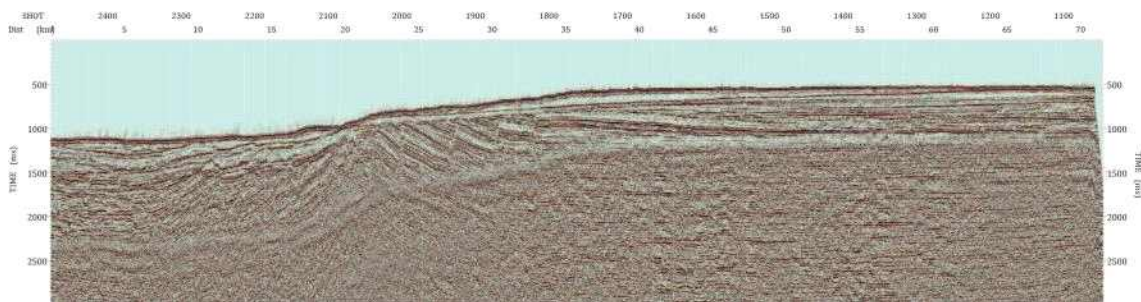


그림 3.6. 현장 자료처리 후 탄성파 단면(Line BB01). 빙하 침식면 하부로 잘 발달 된 정단층 구조가 관찰 됨.

나. 남극 중앙해령 연구

- (1) 연구목적: 호주-남극 중앙해령 KR1~KR4의 지각활동, 맨틀 및 열수 환경 특성, 중앙해령 일대의 지구조적 특성과 중앙해령의 기원이 되는 맨틀의 성분 분석 등을 위해 해저면 지형조사 및 락코어, 드렛지를 활용한 해저면 암석시료 채취, 중자력 탐사, 휴대용 수중카메라를 활용한 해

저면 촬영 등의 다양한 선상 현장조사 수행

(2) 탐사기간: 2016.12.29. ~ 2017.01.09. (11일간, 전체 항해일정: 2016.12.17. ~ 2017.01.14.)

(3) 연구지역: 남극 중앙해령 KR1~KR4

- 뉴질랜드 리틀턴에서 출항, 남극 장보고과학기지를 경유하여 다시 리틀턴으로 귀항하는 경로 중에 남극 중앙해령 KR1, KR2, KR3, KR4에 대해 순차적으로 탐사 진행 (그림 3.7.)

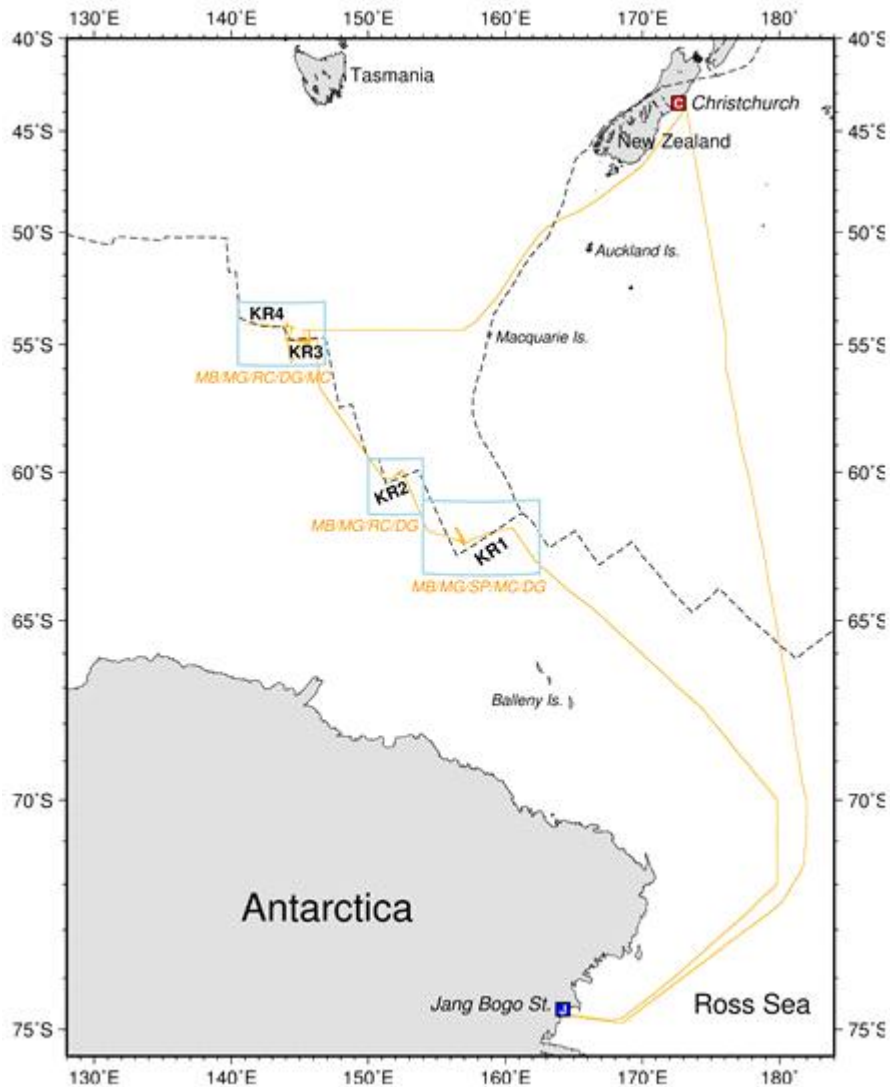


그림 3.7. 2016-2017 연구항해의 항적도 및 구간별 탐사 항목 (MB: 멀티빔 지형조사, MG: 자력탐사, RC: 락코어, DG: 드래지, SP: 스파커, MC: 멀티플 코어)

(4) 연구방법

- 멀티빔(Multi-Beam echo sounder)을 활용한 해저면 지형조사
- 총자력계 및 중력계를 활용한 선상 자력 및 중력 탐사
- 락코어 및 드래지를 활용한 중앙해령 및 주변 해저화산에 대한 암석시료 채취
- 멀티플코어를 활용한 해저면 퇴적물 및 미생물 시료 채취

- 스파커(Sparker)를 활용한 해저 천부지층 탐사
- MAPR(Miniature Autonomous Plume Recorder)를 활용한 열수 탐사
- 소형 수중카메라를 활용한 해저면 영상 자료 획득

(5) 주요 연구성과

- 중앙해령 KR1으로부터 뻗어 나온 주요 해저산맥에 대한 해저 지형 및 자력자료 획득
- KR3 및 KR4에 대한 정밀 지형조사를 통해 전체적인 지형자료 획득
- KR3에 대한 지형 및 자력자료 획득으로 KR3 중심 확장축의 정확한 위치 파악
- KR1~KR2 중심 확장축 인근에 분포하는 해저화산에 대한 암석시료 채취
- KR3~KR4 중심 확장축에서의 해저면 암석시료 채취

2. 2017-2018 남극 하계 현장 탐사

가. 해양자력탐사

(1) 탐사 개요

- 로스해 북서부 외대륙 주변부에서 서남극 열개구조 발달과정에서 형성된 것으로 추정되는 Central Basin에 대하여 약 200 km 길이의 자력탐사 측선을 계획하였으나, 당시 아라온 선내에서의 화재 발생에 따라 해상 자력탐사를 위한 시간이 배정되지 않음
- 따라서 로스해 장보고 과학기지 인근의 Terror Rift 북부해역에서 약 55 km 길이의 측선에 대하여 자력탐사를 수행하였음(그림 3.8.).

(2) 탐사지역에서의 음의 자기이상대

- 획득된 자력탐사 측선에 대해서 데이터 보정 및 지자기 이상을 계산 완료하였으며, 계산된 값에 따르면 전 지역에 걸쳐 음의 지자기 이상을 띄고 있음(그림 3.9.).
- 하지만 작은 영역 내에서의 지자기 변화라는 한계를 가지고 있기 때문에 지질학적 의미를 분석하기 위해 보다 광역적인 데이터의 획득이 필요

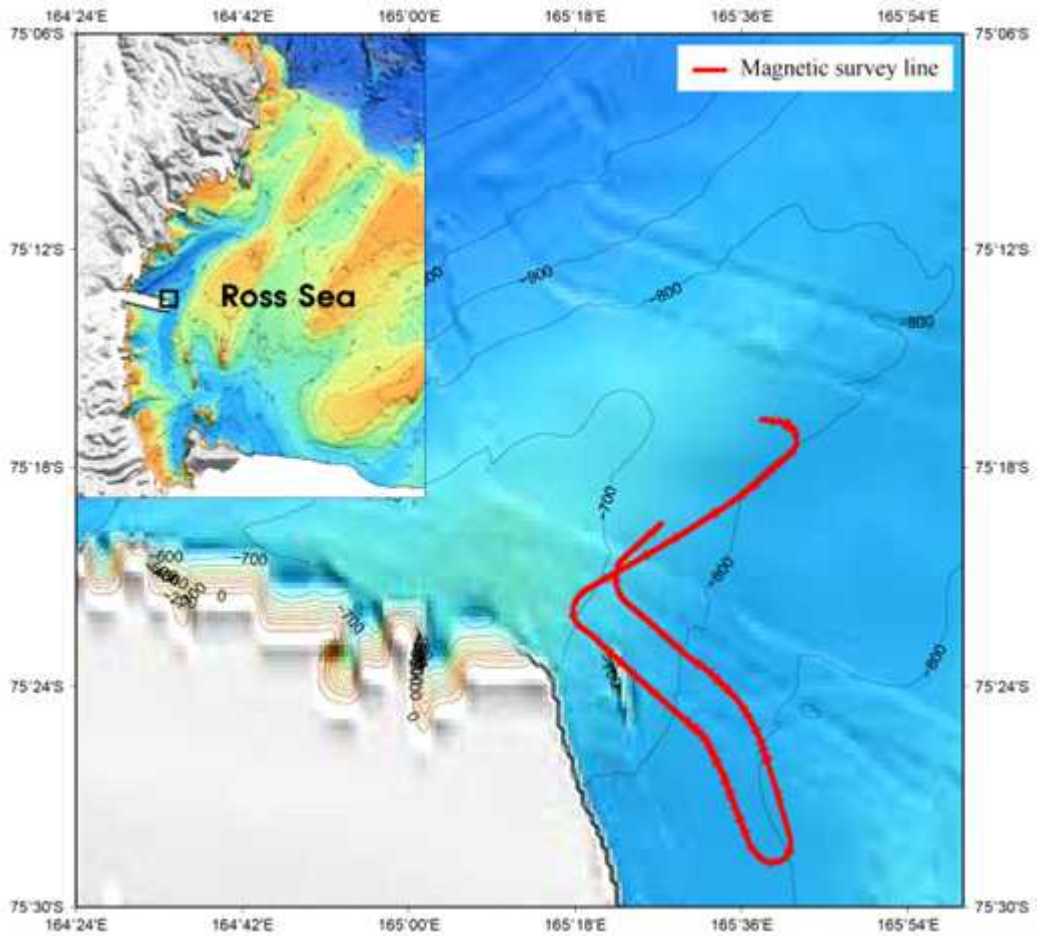


그림 3.8. 2018년 3월, ANA08C 항차에서 수행한 해상 자력탐사 측선(빨간선). 장보고 과학기지 근처의 해역에 해당함

크티여크스

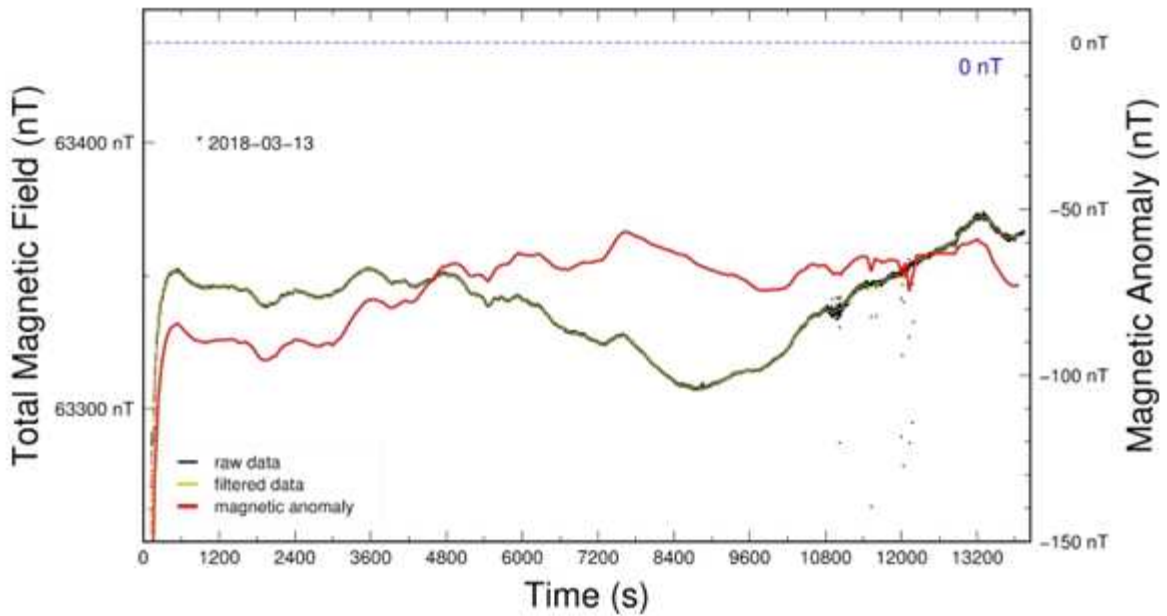


그림 3.9. 장보고 과학기지 인근 해역에서 획득한 해상 지자기 자료의 처리. 음의 지자기 이상(빨간선)이 전 지역에 걸쳐 나타남

나. 해양지열관측

(1) 탐사 개요

- 1단계 해양지열 획득자료 분석을 위해 분석용역을 발주함. 1 단계 자료는 ANA05B (2014.12.29.-2015.02.25.)와 ANA06C (2016.02.15.-2016.03.14.)동안 NBP9702 MCS Line06 선상에서 획득된 것임 (그림 3.10).
- 분석용역 (과업명: 아라온으로 획득한 해양지열 자료처리 및 해석, 용역수행책임자: 서울대 해양연구소 객원연구원 김영균 박사, 용역기간: 2017.04.12.-06.30)을 통해 도출된 결론은 Adare Trough에서 관측된 해양지열은 57-133 mW/m²이며, 이 범위는 생성연대 (44-28 Ma)로 예측되는 해양지열보다 높고 (그림 3.11.), 이 현상을 설명하기 위한 네 가지 가설이 제시됨. 그 네 가지 가설은 다음과 같음: 1) Adare Trough 하부에 보통보다 더 높은 온도를 갖는 연약권이 존재, 2) 트러프 형성이 종료된 이후 퇴적층내 관입한 화산관입체로가 추가적인 열원으로 기능, 3) 단층대를 따라흐르는 유체가 추가적인 열원으로 기능, 4) 관측 오류.
- 가설 검증을 위해서는 하부 퇴적구조가 해석된 NBP9702를 따라 좀 더 좁은 간격으로, 더 넓은 지역에 걸친 후속 관측을 통해 부족한 자료수를 증가시키는 것이 유일한 방법으로 제시됨.

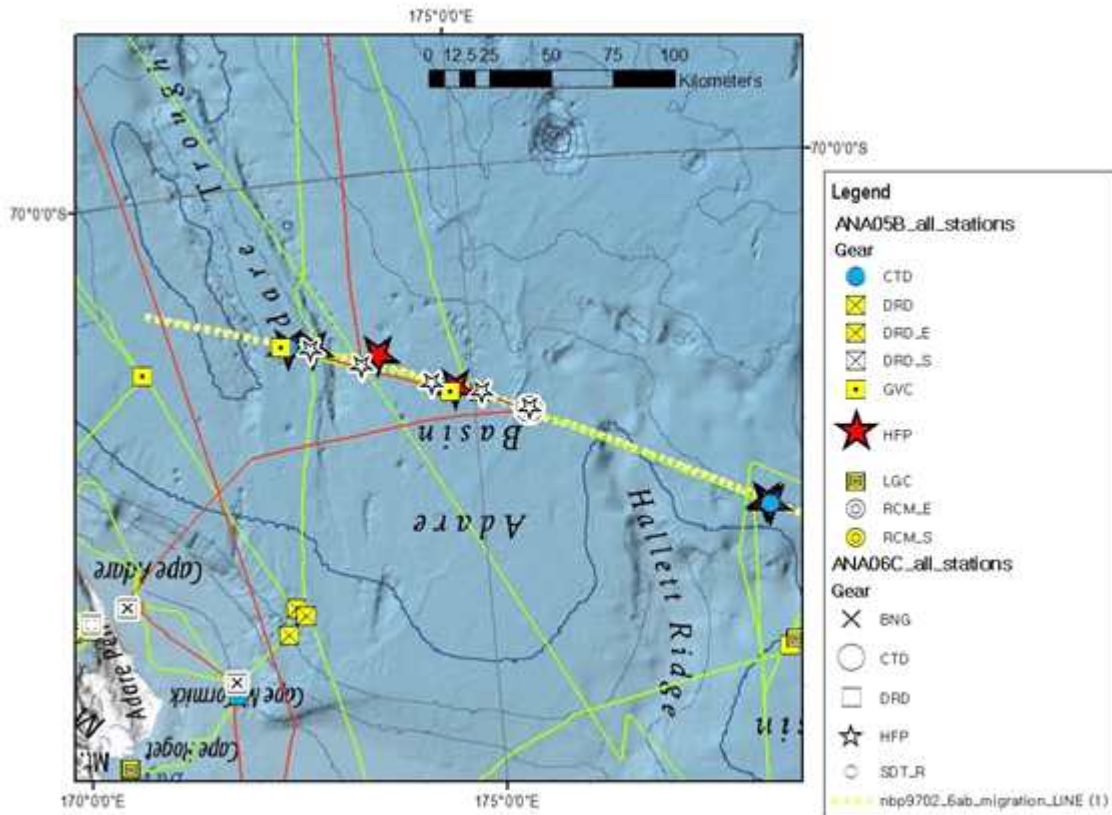


그림 3.10. ANA05B와 ANA06C에서 관측수행한 해양지열 정점. 빨강: ANA05B, 하양: ANA06C

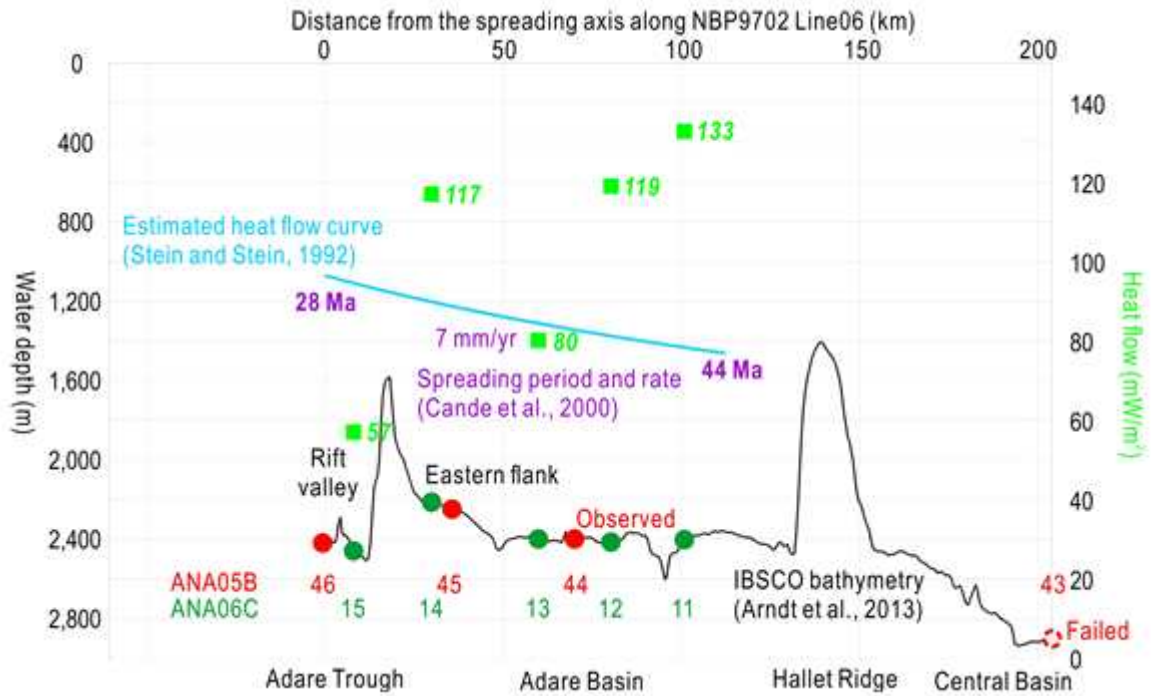


그림 3.11. 관측값(초록 사각형과 숫자)과 생성연대로(보라색 숫자)부터 추정된 예측값(파란 곡선)

- Adare Basin의 해양지열 자료는 서남극 리프팅 시스템 (WARS)의 한쪽 끝부분인 Adare Basin의 형성과정 및 인접한 Northern Basin과의 형성시기가 같은 이유를 규명하는데 중요한 자료가 될 것임. 이에 Adare Basin에서 1단계 사업동안 관측한 해양지열 외에, 추가적인 해양지열 관측을 2018-2019년 남극 3항차 (ANA09C)동안 수행할 계획을 수립함.

(2) 관측수행인원

- (가) 김영균 박사 (강원대 지구자원연구소 선임연구원)를 외부참여연구원으로 참여시켜, ANA09C 동안 아라온 승선하여 해양지열 관측을 수행하도록 함.

(3) 관측지역

- (가) Adare Trough의 동쪽 플랭크(flank)에서 탄성과 탐사측선 NBP9702을 따라, 기존 정점 사이에서 관측시도함 (그림 3.12., 13.; 표 3.2.).

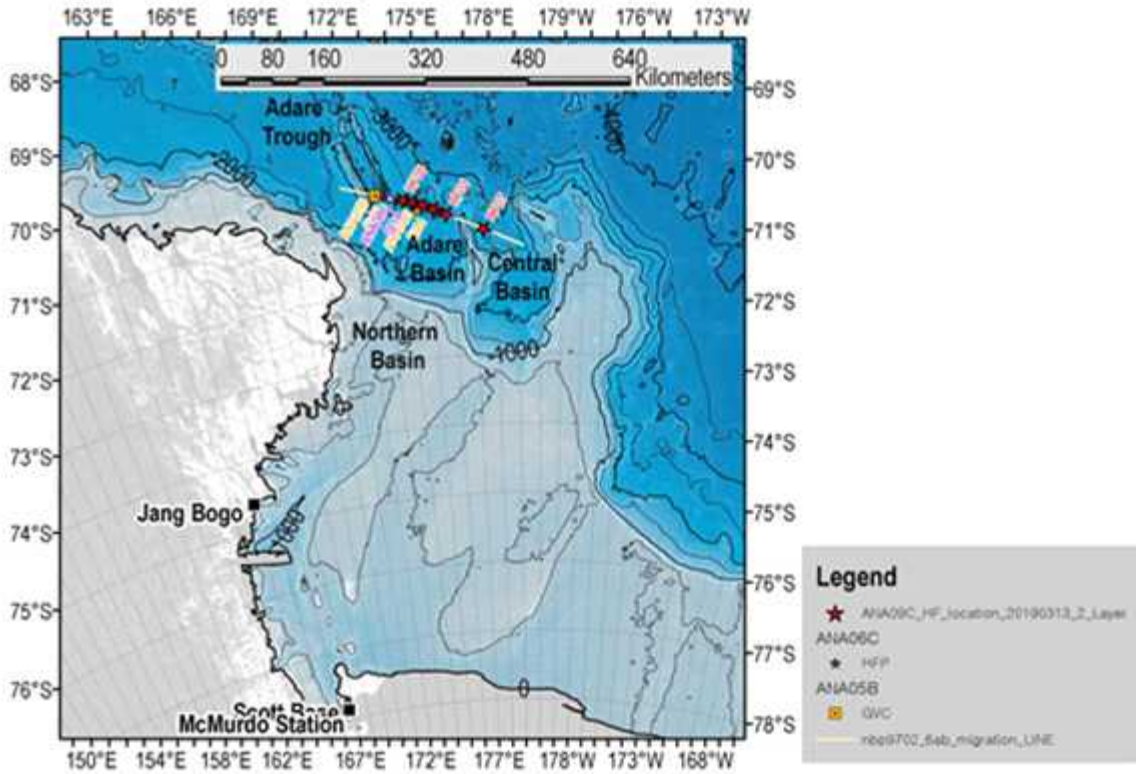


그림 3.12. ANA09C동안 아데어 곡(Adare Trough)의 동쪽 플랭크(flank)와 센트럴 분지(Central Basin)에서 관측한 해양지 열 6 정점 (붉은 별). 확대한 연구지역은 그림 3.13 참조

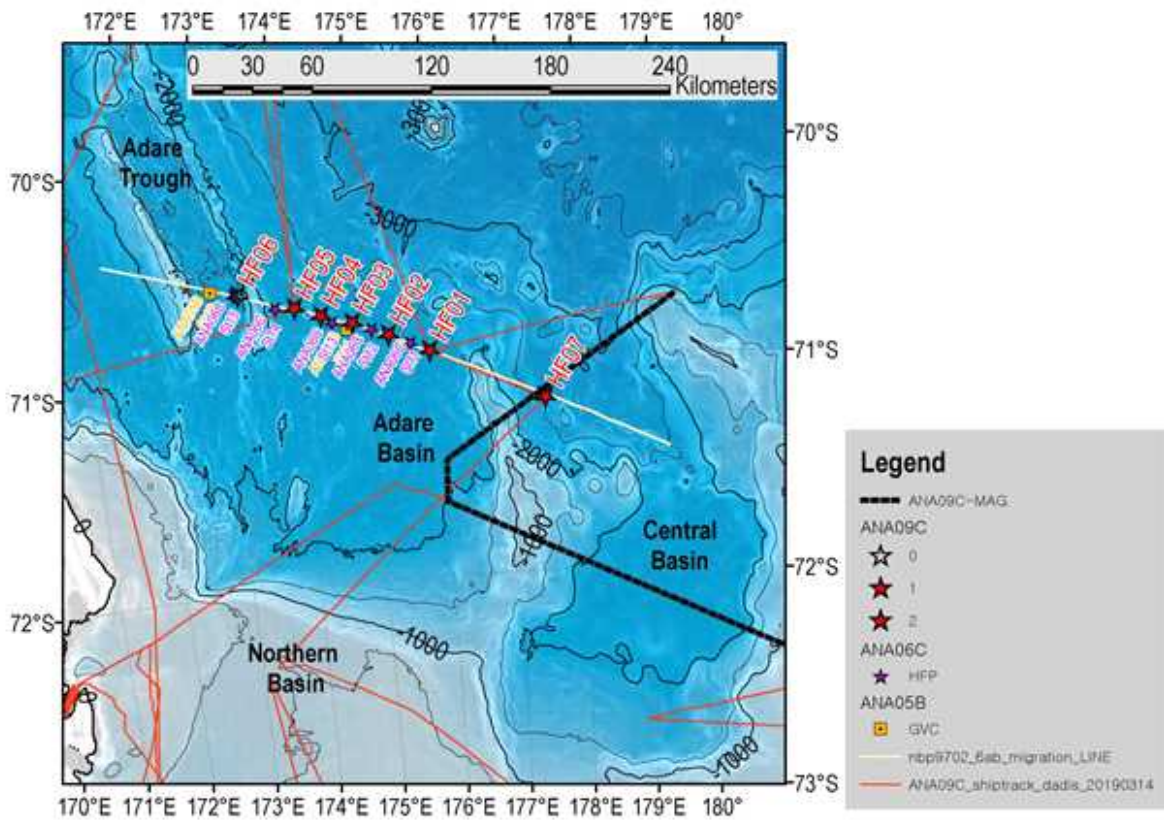


그림 3.13. ANA09C동안 아데어 곡(Adare Trough)의 동쪽 플랭크(flank)와 센트럴 분지(Central Basin)에서 관측한 해양지 열 6 정점 (붉은 별: HF01~05, 07)과 계획되었으나 방문하지 않은 1 정점 (색 없는 별: HF06). HF07은 Central Basin에서 수행된 다채널탄성파 측선에 가깝게 선정되었음

표 3.2. ANA09C 해양지열 정점 목록

정점 이름	동경		남위		수심 (m)	관 측 횟 수	부착한 독립형 온도 센서 숫자	기울기 정보	배럴 길이 (이용길이 m/전체길 이m)	연구 지역 ¹	비고
	(도)	(분)	(도)	(분)							
HF01	175	51.9600	70	57.9660	2376	2	7	0	6/6	AT, EF	독립형 기울기 센서 망 실
HF02	175	18.3540	70	52.7220	2397	2	6	0	6/6	AT, EF	독립형 기울기 센서 자 료 저장 안됨
HF03	174	48.7500	70	48.6960	2392	2	6	1	6/6	AT, EF	
HF04	174	23.1300	70	46.0500	2409	2	6	1	6/6	AT, EF	
HF05	174	1.7280	70	43.1280	2304	2	6	1	6/6	AT, EF	
HF06	173	15.7020	70	38.0100	2480	0	-	-	-	AT, RV	방문하 지 않음
HF07	177	28.2817	71	12.4886	2595	1	6	1	상부 6/9	CB, WS	중력코 어링과 동시에 이루어 져 관측 은 1회 만 수행

*1. AT: 아데어 곡, CB: 센트럴 분지, EF: 동쪽 플랭크, RV: 리프트 계곡(rift valley), WS: 서쪽사면

(4) 관측장비

- (가) 중력코어러에 독립형 기울기 측정장치와 독립형 온도 측정장치를 부착 (표 3.2; 그림 3.14가)
- (나) 독립형 기울기 측정장치 (표 3.3)는 하우징을 이용해 헤드(head) 상단 혹은 하단에 1개 부착 (그림 3.14.가). 헤드 상단에 부착해 망실되어 (그림 3.14.가, 나) 이후 하단에 부착 (그림 3.14.다.)
- (다) 독립형 온도 측정장치 (표 3.4.)는 서포터를 이용해 배럴(barrel)에 일정한 간격을 두고 여러개 부착 (그림 3.14.가, 라). 단단한 지면과 자갈 때문에 온도 측정장치가 물리적으로 부서지거나 (그림 3.14.마), 내부 충격으로 고장 (그림 3.14.바)나는 경우가 종종 발생함.
- (라) 퇴적물 시료를 획득하지 않을 계획이었기 때문에, 선상에서 캐처엔드 (catcher end)를 용접으로 막은 채 사용 (그림 3.14.라)

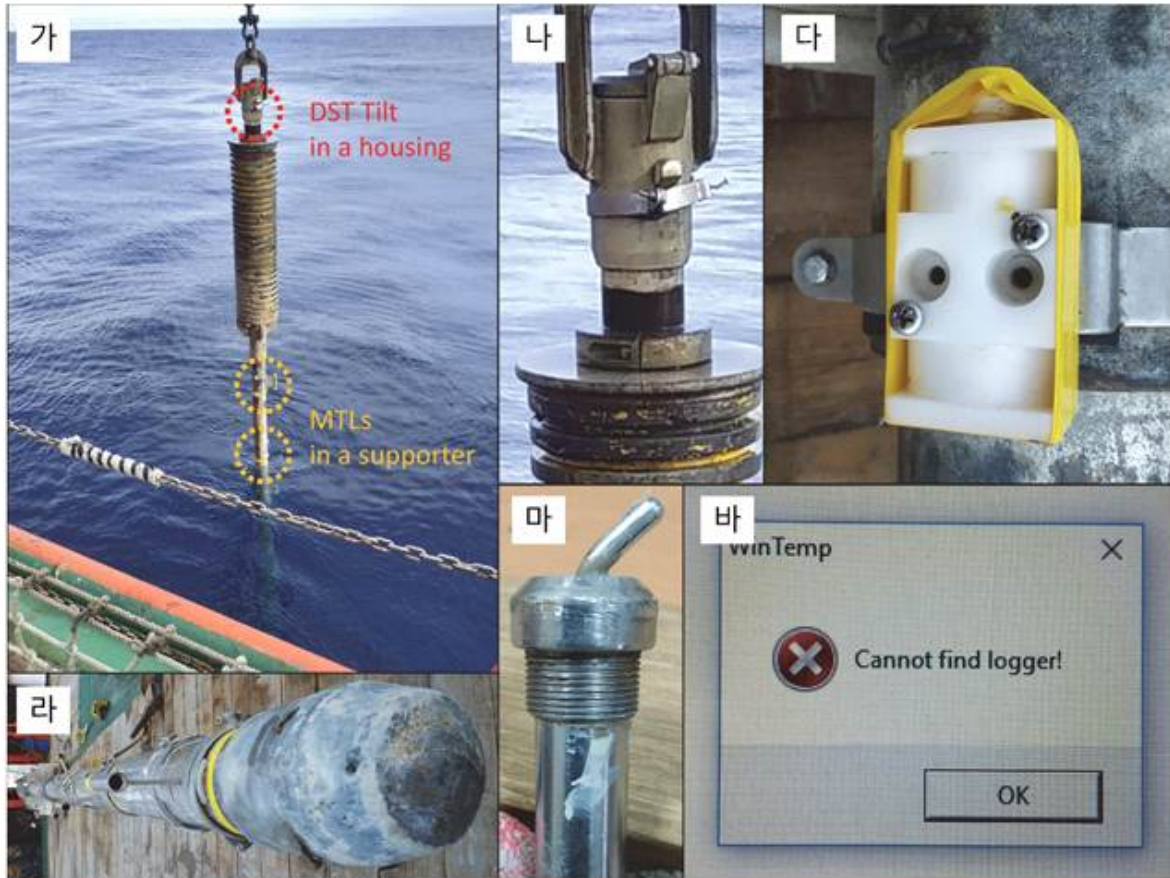


그림 3.14. (가) 중력코어러를 이용해 독립형 기울기 및 온도 측정 장치를 부착 (나) 배럴 상단에 부착했던 독립형 기울기 측정장치와 하우징 망실 (다) 하우징을 이용해 배럴 하단에 부착한 독립형 기울기 측정장치 (라) 입구를 막은 캐치엔드 (마) 구부러진 독립형 온도 측정장치 (바) 인식되지 않는 독립형 온도측정장치를 나타내는 에러화면

표 3.3. 독립형 기울기 측정장치의 제원

Sensors	Tilt (3-D), temperature, pressure (depth)
Size (diameter * length)	15 mm * 46 mm
Weight (in air / in water)	19 g / 12 g
Battery type	4 years for a sampling interval of 10 min
Memory type	Non-volatile EEPROM
Memory capacity	261,564 bytes
/ size of one measurement (bytes)	/ temperature-pressure 3bytes, tilt 6 bytes
Data resolution	12 bits
Temperature range	-1 to 40°C
Temperature resolution	0.032°C
Temperature accuracy	±0.1°C
Temperature response time	Time constant (63%) reached in 20 sec
Standard depth/pressure ranges	30, 50, 100, 270, 800, 1500, 2000, 3000 m
Depth/pressure resolution	0.03% of selected range
Depth/pressure accuracy	±0.4% of selected range for 30-270 m ±0.6% of selected range for 800-3000 m
Depth/pressure response time	immediate
Tilt resolution	0.2°
Tilt accuracy	±3°
Tilt range	360°

표 3.4. 독립형 온도 측정장치의 제원

Type	Antares 1854
Length	160 mm
Weight	120 g
Chassis	Stainless steel
Battery	3 VDC type DL1/3N (soldered)
Maximum pressure	60 MPa
Measuring range	-5 to 50°C
Resolution	0.001°C
Accuracy	< ±0.1°C
Maximum operating time per battery	300,000 samples or 1 year standby
Programmable measure intervals	1 sec till 255 min
Starting time	Immediately or programmable with Date and Time up to 30 days in advance
Read-out type	Galvanic coupling (without cable)

(5) 관측방법

- (가) 한 정점에서 2회의 측정 시도하며, 측정 1회당 25분 소요됨 (그림 3.15). 연구지역처럼 수심이 깊은 곳에서는 한 정점에서 소요되는 시간은 윈치 케이블의 작동 속도가 한정되어있어 수심에 상당히 영향을 받음.
- (나) 코어러를 해저면으로 침투 전 일정시간의 대기시간 필요 (5~10분)
- (다) 해저면으로 코어러를 침투시키기 위해 윈치 케이블을 푸는 속도와 지점 (해저면 위 높이)는 해저면 지질과 경험적으로 결정됨. 연구지역에서는 해저면 100 m위에서 30 m/분의 윈치스피드로 낙하시킴
- (라) 연구지역은 대략 수심 2,500 m 정도로써, 정점작업에 3시간 정도 소요됨.

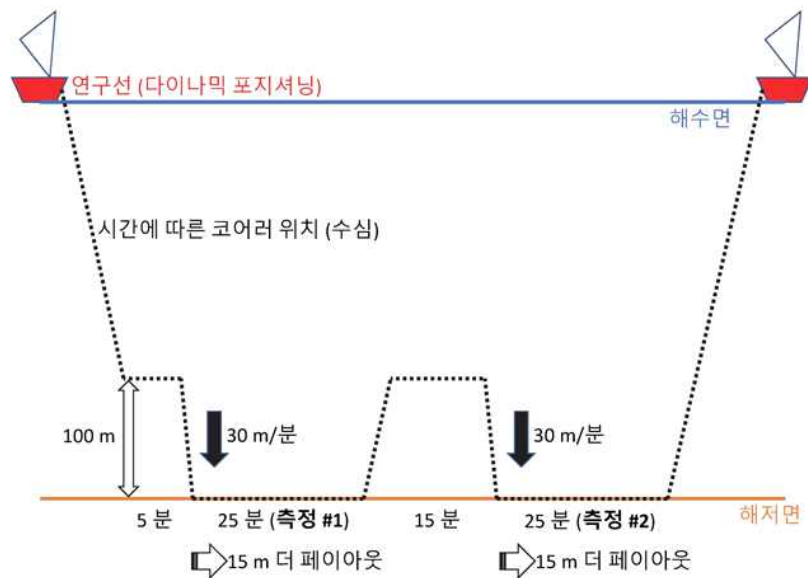


그림 3.15. 정점에서 이루어지는 해양지열 관측 모식도

(6) 관측결과

- (가) Adare Trough에서 총 6개의 정점 (HF01~06)을 계획하였고, 그 중 5개의 정점에서 관측을 성공함 (HF01~05). 해양지열 관측에 주어진 관측시간이 한정적(24시간)이라 HF06에서의 관측은 시간부족으로 취소됨 (표 3.2.; 그림 3.12, 13).
- (나) Central Basin에서 하부 지각구조와 빙하기 동안 퇴적층의 발달사를 확인하기 위해 자력탐사와 다채널 탄성파탐사를 수행하였는데, 이 때 하부 지각구조 규명을 위해 사용할 수 있는 해양지열을 관측하기로 하였고, 이에 HF07에서 1회의 관측이 시도됨 (표 3.2.; 그림 3.12, 13).
- (다) 관측된 지온경사도의 범위는 77.5~104.6 mK/m를 보임 (그림 3.16~26) 각 정점당 2회의 관측을 시도하였고 (HF07제외), 두 회(M1 및 M2) 관측결과 유사함 및 지온경사도의 직선도가 높은 것으로 판단하건데 관측은 높은 신뢰성을 가짐.

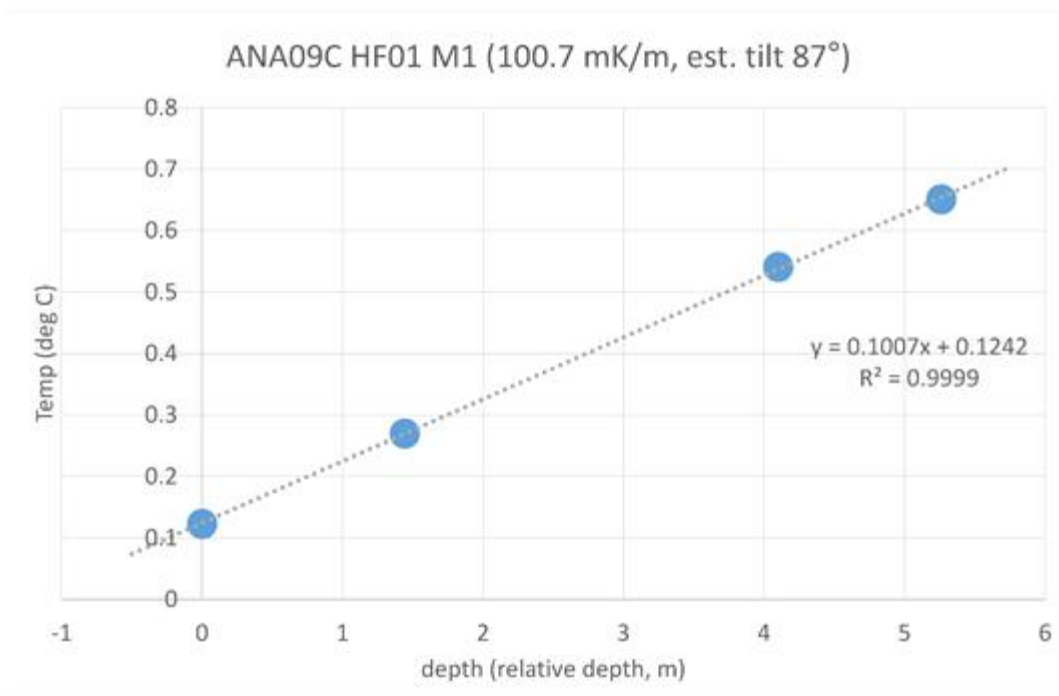


그림 3.16. ANA09C HF01 M1 관측결과 및 지온경사도

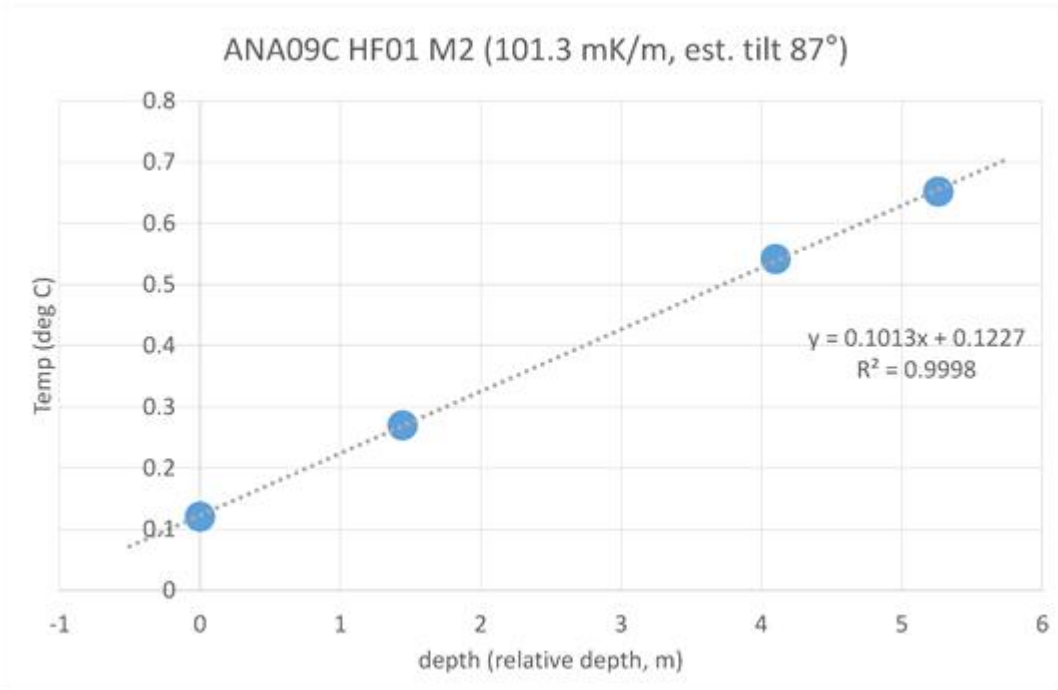


그림 3.17. ANA09C HF01 M2 관측결과 및 지온경사도

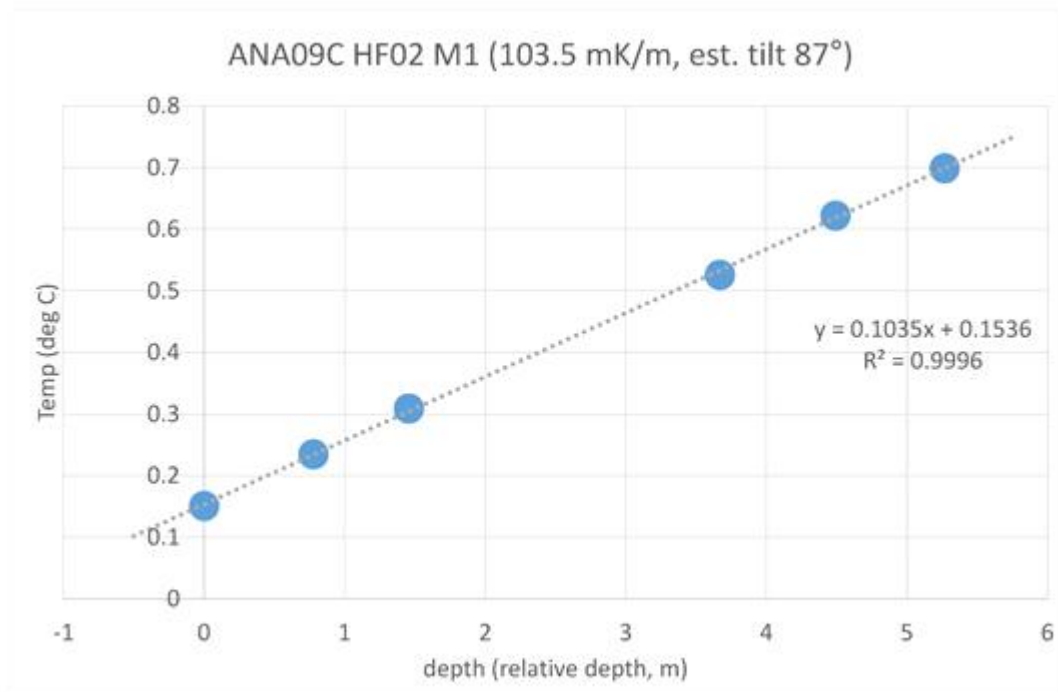


그림 3.18. ANA09C HF02 M1 관측결과 및 지온경사도

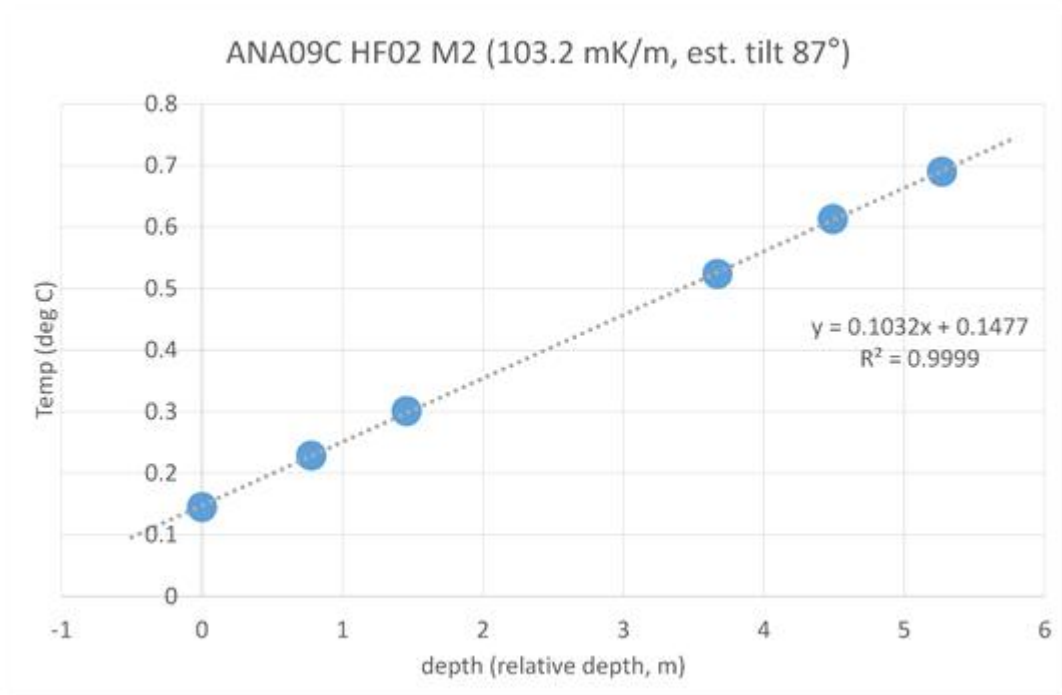


그림 3.19. ANA09C HF02 M2 관측결과 및 지온경사도

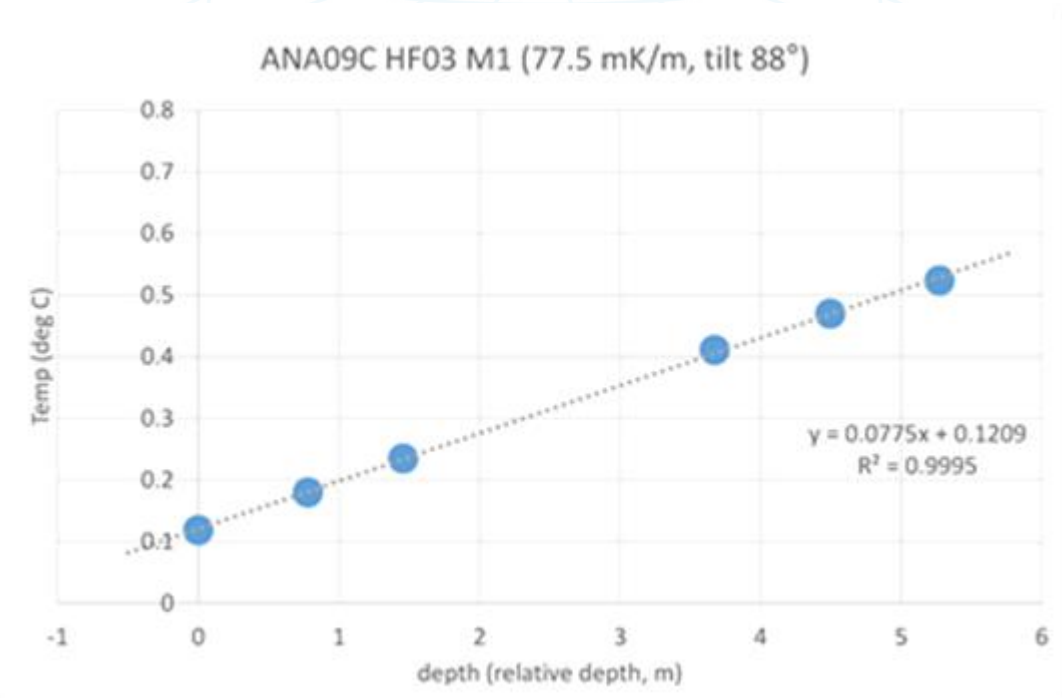


그림 3.20. ANA09C HF03 M1 관측결과 및 지온경사도

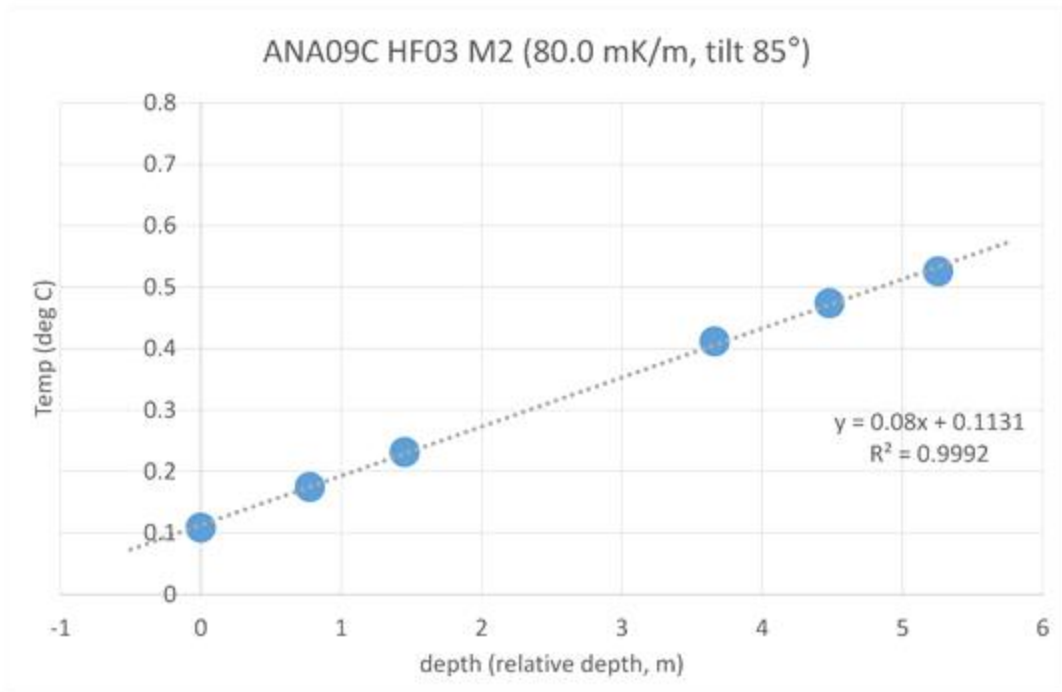


그림 3.21. ANA09C HF03 M2 관측결과 및 지온경사도

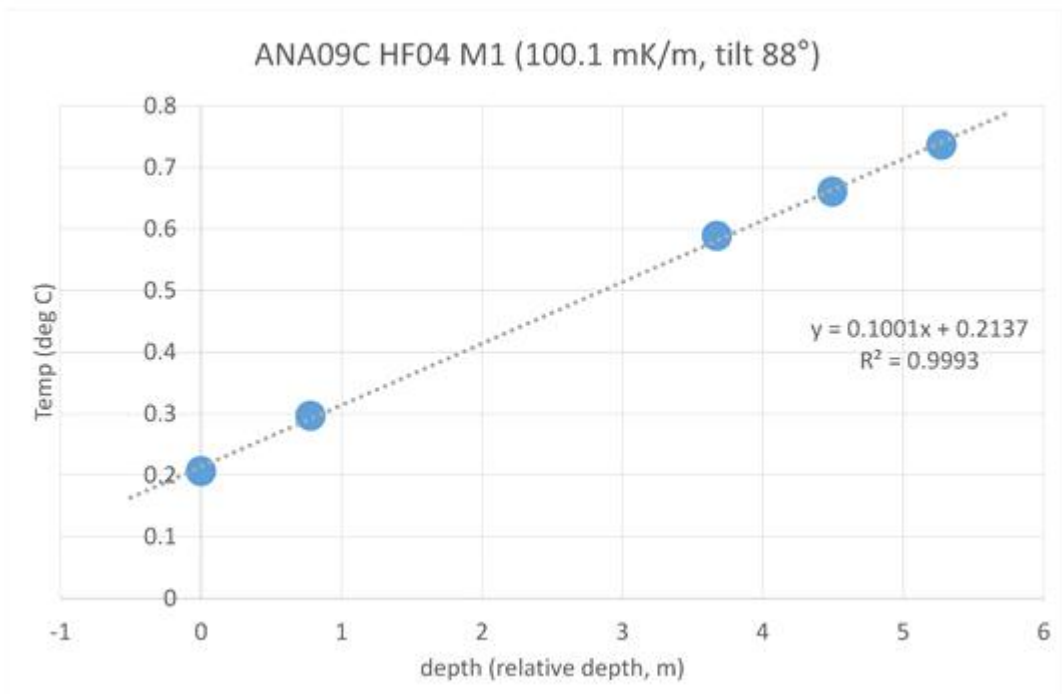


그림 3.22. ANA09C HF04 M1 관측결과 및 지온경사도

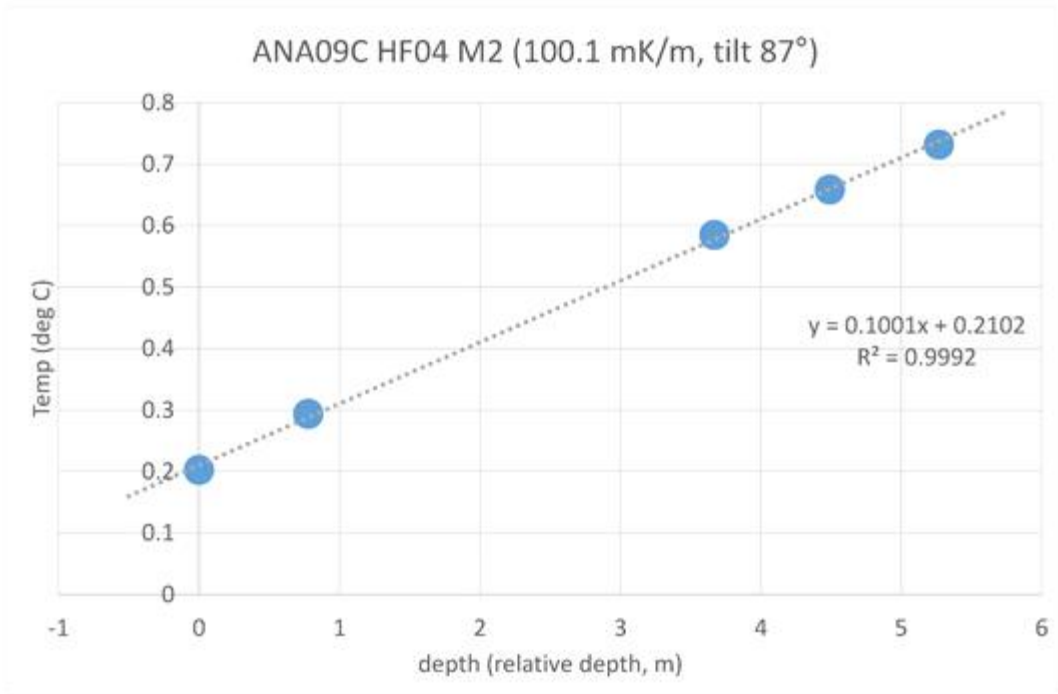


그림 3.23. ANA09C HF04 M2 관측결과 및 지온경사도

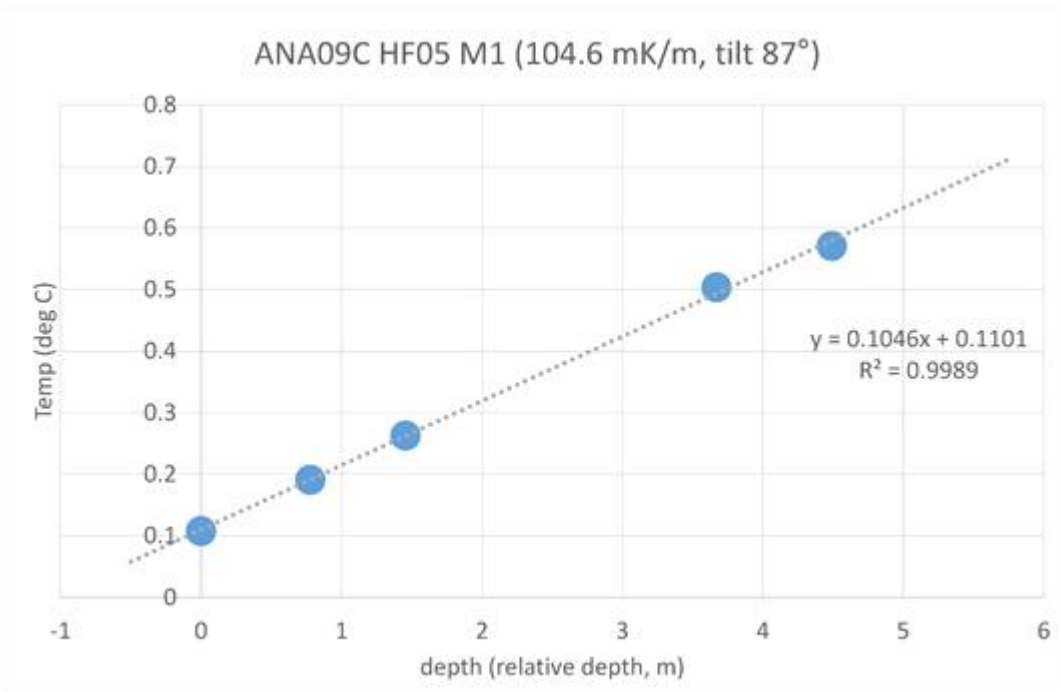


그림 3.24. ANA09C HF05 M1 관측결과 및 지온경사도

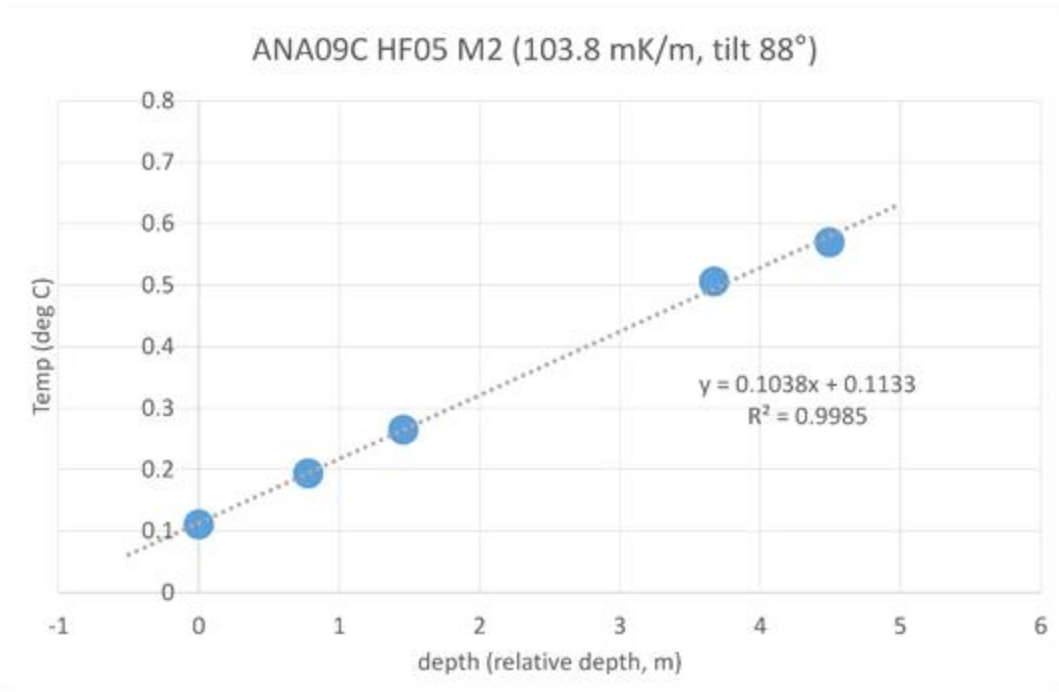


그림 3.25. ANA09C HF05 M2 관측결과 및 지온경사도

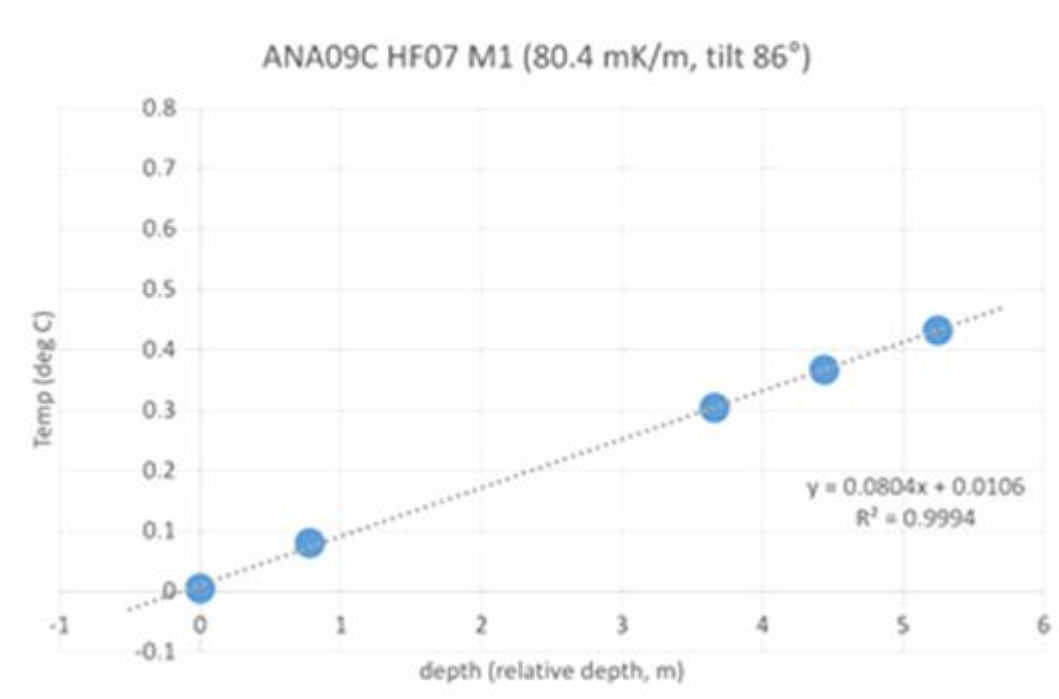


그림 3.26. ANA09C HF07 M1 관측결과 및 지온경사도

(라) ANA09C의 관측결과를 추가하여, Adare Trough 동쪽 플랭크의 해양지열과 지형을 도시해보면 생성연대로 추정된 해양지열보다 이 지역의 관측된 해양지열이 상당히 높음을 확인할 수 있음 (그림 3.27.). 이 때 기존의 신뢰도 낮은 관측값은 제거하였고, 퇴적물의 열전도도는 1단계 사업으로 관측된 값(ANA05B St44; 0.981 W/m/k)을 원용함.

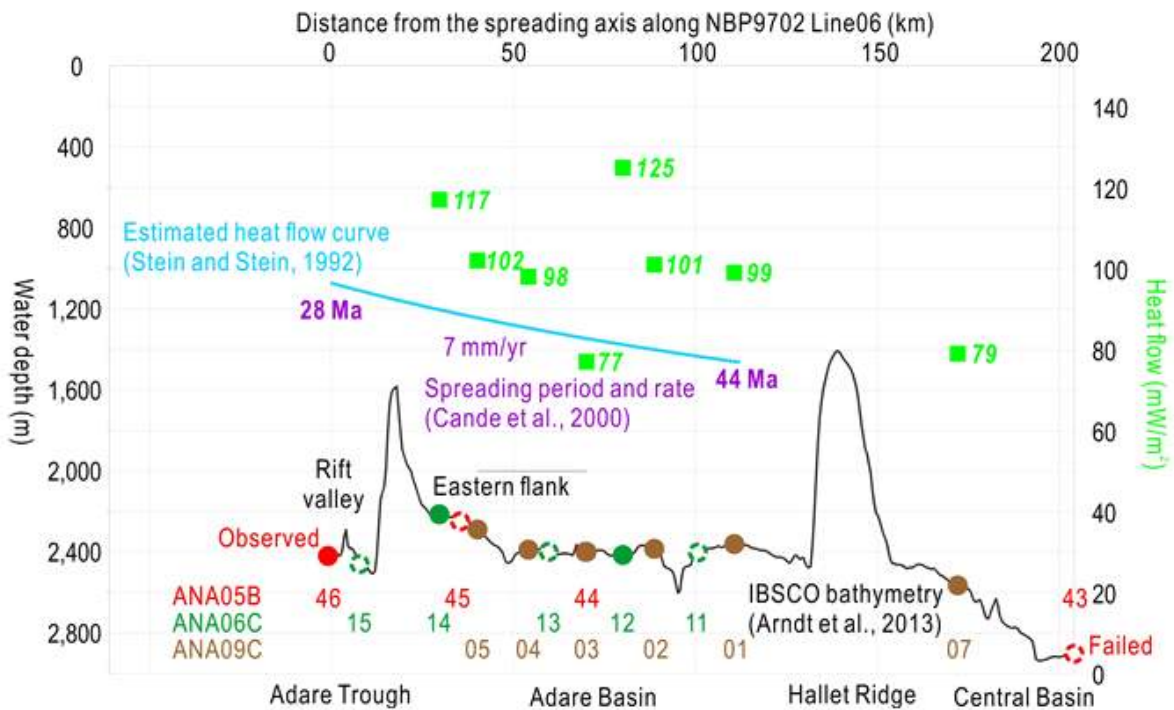


그림 3.27. Adare Trough의 동쪽플랭크에서 관측한 해양지열 (사각형)과 생성연대로 추정된 해양지열 (파란 곡선)의 비교. 검은 선: 지형, 원형: 해양지열 정점.

(마) 동쪽 플랭크 전 지역에 걸쳐 추정된 해양지열보다 높은 해양지열이 관측된 점은 4가지 가설 중 단층대를 따라 흐르는 유체의 영향 및 관측 오류일 가능성이 낮음을 시사함. 이 지역은 post-rifting 화산활동이 알려진 곳이지만 (Granot et al., 2010), 최신의 연구결과를 따르면 채취된 해저면 화산암중 가장 최근의 암석역의 연대가 2 Ma 이상임 (Panter et al., 2018). 관입한 암석의 규모에 따라 달라지겠지만, 시기상으로는 퇴적층 내부의 관입압이 표층 해저면 열류량에 큰 영향을 주지 않음.

(바) 현재로서 연구지역에서 높은 지열은 지각 하부에 평균보다 높은 온도를 갖는 연약권 때문에 발생하는 현상이라는 가설이 가장 유력함.

3. 2018-2019 남극 하계 현장 탐사

가. 해저면지진계(OBS) 회수 및 설치

(1) 작업 개요

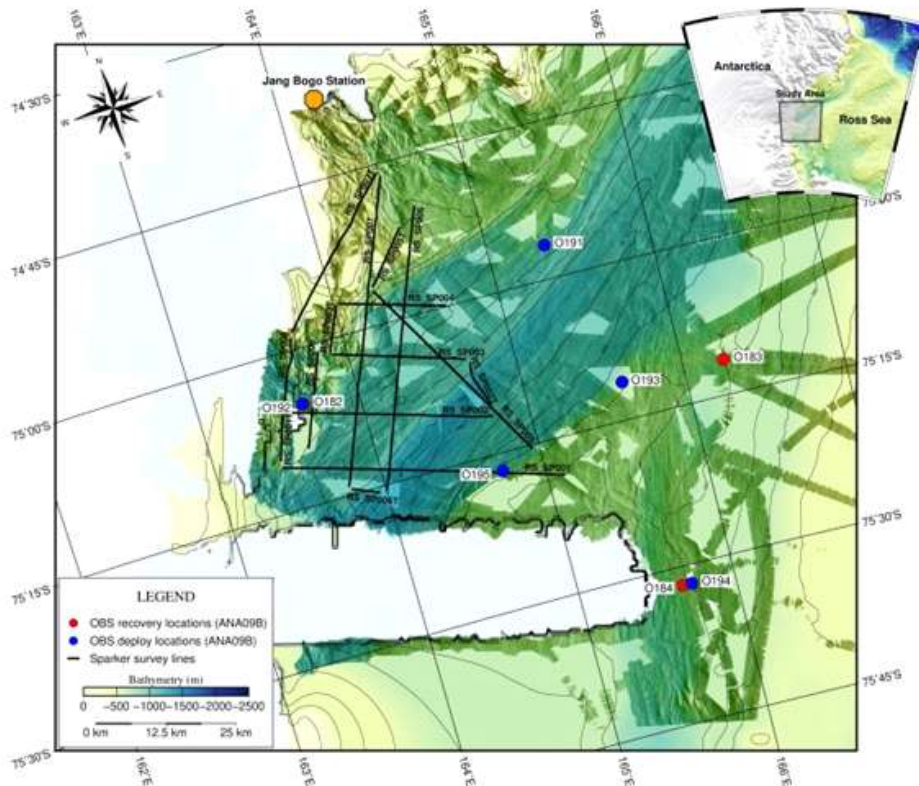


그림 3.28. OBS 현장작업 지도. 빨간점과 파란점은 2018-2019 하계탐사기간 중 각각 회수 및 신규 설치된 OBS 정점을 의미함.

- 2017-2018 남극 3항차를 통해 설치한 3개의 OBS 회수(그림 3.28.의 적색점, 정점번호 O182, O183, O184), 기록된 자료 회수 후 재설치(청색점, 정점번호 : O192, O193, O194)
- O193의 경우 O183의 위치에 설치할 계획이었으나, 계획지점에 해빙이 두껍게 분포하여 재설치 위치를 변경함
- 신규 도입한 2대의 OBS를 추가 설치(청색점, 정점번호 : O191, O195)
- 본 연구항차를 통해 기존에 설치된 3개의 OBS 회수를 회수하여 자료를 획득한 후 재설치, 신규도입 OBS 2개를 포함 총 5개 OBS 설치(표 3.5.)

표 3.5. OBS 정점위치 및 정보

Station	Work	Date (UTC)	Time (UTC)	Latitude	Longitude	Depth (m)
O182	Recovery	2019.01.04.	01:34:00	75° 05.3242'S	163° 39.1187'E	1395
O183	Recovery	2019.01.11.	06:23:00	75° 11.5912'S	166° 15.8790'E	795
O184	Recovery	2019.01.03.	05:54:00	75° 31.7880'S	165° 39.5370'E	880
O191	Deploy	2019.01.02.	01:03:00	74° 56.7228'S	165° 21.0343'E	982
O192	Deploy	2019.01.04.	15:18:00	75° 05.2483'S	163° 38.5372'E	896
O193	Deploy	2019.01.12.	16:31:00	75° 11.3635'S	165° 36.2812'E	820
O194	Deploy	2019.01.03.	07:50:00	75° 31.8029'S	165° 43.0986'E	795
O195	Deploy	2019.01.09.	02:58:00	75° 16.6982'S	164° 44.2204'E	862

(2) 현장작업사진



Acoustic Release Test



Preparation for deployment



OBS Deployment



OBS Deployment



Finding the OBS



OBS Recovery

그림 3.29. 현장 작업사진

(3) 현장 기록지

- OBS 회수(적색점, 정점번호 O182, O183, O184)

NAMMU STATION PROTOCOL			
- Cruise: <u>AMC</u>		- Date and Time: <u>2019.01.09 09:42:40</u>	
- Station No: <u>O182 (CORB182)</u>		- SOCR: <u>25 AMR 208 11:42:18</u>	
- Project: <u>PE182P (WFFZ)</u>			
Operator: <u>Joyon Park</u>			
Instrumentation			
Seismometer SN: <u>127022</u>	Acoustic Release SN: <u>127022</u>	Frame SN: <u>127022</u>	
Hydrophone SN: <u>20005</u>	Flasher SN, tested: <u>F05-03</u>	Anchor type: <u>ANMM-1Y-Bag-440</u>	
406 Receiver SN: <u>1160105</u>	Beacon SN, tested: <u>F05-032</u>	Anchor added weight: <u>ANW1</u>	
Receiver Tube SN: <u>1201003</u>	Beacon Channel: <u>160, 725</u>		
Acoustic Release			
Release Coding/ing tested: <u>304878</u>	ST date (ddmm/yyyy): <u>06 AMR 2018</u>	ST time (hh:mm:ss): <u>07:17:30</u>	UTC
Enable Coding/ing tested: <u>304880</u>	RT date (ddmm/yyyy): <u>06 AMR 2018</u>	RT time (hh:mm:ss): <u>06:00:00</u>	UTC
Disable Coding/ing tested: <u>304884</u>	Battery 1: <u>9.78 / 9.01</u>	Battery 2: <u>9.78 / 9.01</u>	Volts
Disabled? <u>W</u>			
Programming			
Battery: <u>50</u> cells of Alkaline or Lithium at <u>17.5</u> Volts	Sealing area checked: <u>W</u>		
SD card: <u>SUN-128GB</u>	Capacity / Format: <u>128GB FAT32</u>		
GPS connection: <u>1</u> Serial / <u>128000</u> Sync date (ddmm/yyyy): <u>06 AMR 2018</u>	Sync time (hh:mm:ss): <u>07:17:30</u>		
Setting (vehicle 10001): Channels No.: <u>4</u>	Channels signal checked: <u>W</u>		
Sampling rate: <u>200 SPS</u>	Gain checked: <u>W</u>		
Recorder SN, hydrophone signal checked: <u>W</u>	Humidity/temperature: <u>19.5 / 25.5</u>		
Comments: <u>AMC-CORB182-170907-06AMR2018-ANW1-1120M</u>			
Recorder SDS Firmware: <u>1.0.3 (2017-01-27)</u>	Start Date (ddmm/yyyy): <u>06 AMR 2018</u>	Start Time (hh:mm:ss): <u>07:17:30</u>	UTC
Recording started: <u>W</u>			
Check on Deck			
Hydrophone fixed: <u>W</u>	Flg fixed: <u>W</u>	Handy stopper removed: <u>W</u>	
Seismometer fixed: <u>W</u>	Flash light on: <u>W</u>	Weight of ball (flotation adjusted) checked: <u>W</u>	
Release fixed: <u>W</u>	Radio beacon on: <u>W</u>	A-frame E3 3-bars status: <u>W</u>	
All clamps fixed: <u>W</u>	Anchor fastened with (30m max): <u>W</u>		
Deployment			
Date (ddmm/yyyy): <u>06 AMR 2018</u>	Time (hh:mm:ss): <u>07:21:00</u>	Water Depth: <u>075</u>	m
Coordination: Latitude: <u>32° 51' 42" N</u>	Longitude: <u>116° 25' 42" E</u>		
Recovery			
Release (10 min): Date (ddmm/yyyy): <u>06 AMR 2018</u>	Time (hh:mm:ss): <u>07:11:13</u>	2nd after: <u>115</u>	min
Time on surface: <u>06:51:20</u>	Time on deck: <u>06:23:00</u>	Water Depth: <u>875</u>	m
Coordination: Latitude: <u>32° 51' 33" N</u>	Longitude: <u>116° 25' 11" E</u>		
Data read out			
Slow (connected) GPS: <u>W</u>	Date (ddmm/yyyy): <u>2019.01.09</u>	Time (hh:mm:ss): <u>07:21:00</u>	UTC
Recorded data: <u>O182</u>	Downloaded to: <u>SD CARD</u>	Time (hh:mm:ss): <u>07:15:30</u>	UTC
No errors: <u>W</u>			
TH: 12.21 75° 11.2603'S, 166° 17.8922'E Tr: 231085 95° 11.8564'S, 166° 17.2093'E Tr: 3: 1135 95° 11.6535'S, 166° 14.8013'E TH: 14: 1337 95° 11.0367'S, 166° 15.7831'E			
* Record Pressure Tube Ratering 관상: 16.9V			

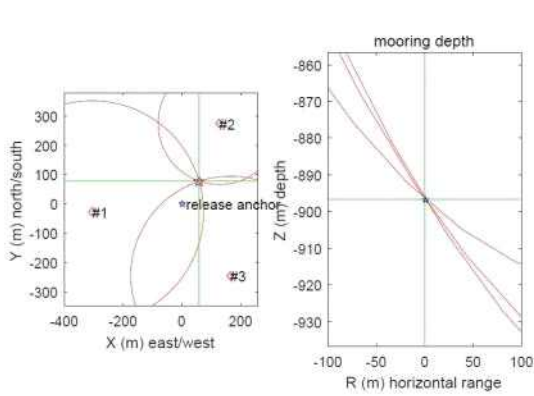
그림 3.30. OBS 회수 필드로그 (O182)

NAMMU STATION PROTOCOL			
- Cruise: <u>AMC</u>		- Date and Time: <u>2019.01.09 09:42:40</u>	
- Station No: <u>O183 (CORB183)</u>		- SOCR: <u>25 AMR 208 11:42:18</u>	
- Project: <u>PE183P (WFFZ)</u>			
Operator: <u>Joyon Park</u>			
Instrumentation			
Seismometer SN: <u>127022</u>	Acoustic Release SN: <u>127022</u>	Frame SN: <u>127022</u>	
Hydrophone SN: <u>20005</u>	Flasher SN, tested: <u>F05-03</u>	Anchor type: <u>ANMM-1Y-Bag-440</u>	
406 Receiver SN: <u>1160105</u>	Beacon SN, tested: <u>F05-032</u>	Anchor added weight: <u>ANW1</u>	
Receiver Tube SN: <u>1201003</u>	Beacon Channel: <u>160, 725</u>		
Acoustic Release			
Release Coding/ing tested: <u>304878</u>	ST date (ddmm/yyyy): <u>06 AMR 2018</u>	ST time (hh:mm:ss): <u>07:17:30</u>	UTC
Enable Coding/ing tested: <u>304880</u>	RT date (ddmm/yyyy): <u>06 AMR 2018</u>	RT time (hh:mm:ss): <u>06:00:00</u>	UTC
Disable Coding/ing tested: <u>304884</u>	Battery 1: <u>9.78 / 9.01</u>	Battery 2: <u>9.78 / 9.01</u>	Volts
Disabled? <u>W</u>			
Programming			
Battery: <u>50</u> cells of Alkaline or Lithium at <u>17.5</u> Volts	Sealing area checked: <u>W</u>		
SD card: <u>SUN-128GB</u>	Capacity / Format: <u>128GB FAT32</u>		
GPS connection: <u>1</u> Serial / <u>128000</u> Sync date (ddmm/yyyy): <u>06 AMR 2018</u>	Sync time (hh:mm:ss): <u>07:17:30</u>		
Setting (vehicle 10001): Channels No.: <u>4</u>	Channels signal checked: <u>W</u>		
Sampling rate: <u>200 SPS</u>	Gain checked: <u>W</u>		
Recorder SN, hydrophone signal checked: <u>W</u>	Humidity/temperature: <u>19.5 / 25.5</u>		
Comments: <u>AMC-CORB183-170907-06AMR2018-ANW1-1120M</u>			
Recorder SDS Firmware: <u>1.0.3 (2017-01-27)</u>	Start Date (ddmm/yyyy): <u>06 AMR 2018</u>	Start Time (hh:mm:ss): <u>07:17:30</u>	UTC
Recording started: <u>W</u>			
Check on Deck			
Hydrophone fixed: <u>W</u>	Flg fixed: <u>W</u>	Handy stopper removed: <u>W</u>	
Seismometer fixed: <u>W</u>	Flash light on: <u>W</u>	Weight of ball (flotation adjusted) checked: <u>W</u>	
Release fixed: <u>W</u>	Radio beacon on: <u>W</u>	A-frame E3 3-bars status: <u>W</u>	
All clamps fixed: <u>W</u>	Anchor fastened with (30m max): <u>W</u>		
Deployment			
Date (ddmm/yyyy): <u>06 AMR 2018</u>	Time (hh:mm:ss): <u>07:21:00</u>	Water Depth: <u>075</u>	m
Coordination: Latitude: <u>32° 51' 42" N</u>	Longitude: <u>116° 25' 42" E</u>		
Recovery			
Release (10 min): Date (ddmm/yyyy): <u>06 AMR 2018</u>	Time (hh:mm:ss): <u>07:11:13</u>	2nd after: <u>115</u>	min
Time on surface: <u>06:51:20</u>	Time on deck: <u>06:23:00</u>	Water Depth: <u>875</u>	m
Coordination: Latitude: <u>32° 51' 33" N</u>	Longitude: <u>116° 25' 11" E</u>		
Data read out			
Slow (connected) GPS: <u>W</u>	Date (ddmm/yyyy): <u>2019.01.09</u>	Time (hh:mm:ss): <u>07:21:00</u>	UTC
Recorded data: <u>O183</u>	Downloaded to: <u>SD CARD</u>	Time (hh:mm:ss): <u>07:15:30</u>	UTC
No errors: <u>W</u>			
TH: 12.21 75° 11.2603'S, 166° 17.8922'E Tr: 231085 95° 11.8564'S, 166° 17.2093'E Tr: 3: 1135 95° 11.6535'S, 166° 14.8013'E TH: 14: 1337 95° 11.0367'S, 166° 15.7831'E			
* Record Pressure Tube Ratering 관상: 16.9V			

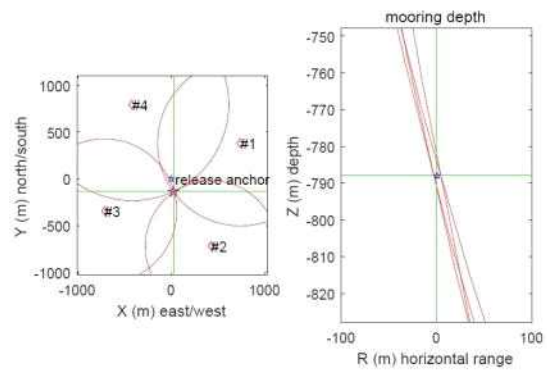
그림 3.31. OBS 회수 필드로그 (O183)

NAMMU STATION PROTOCOL			
- Cruise: <u>AMC</u>		- Date and Time: <u>2019.01.09 09:42:40</u>	
- Station No: <u>O184 (CORB184)</u>		- SOCR: <u>25 AMR 208 11:42:18</u>	
- Project: <u>PE184P (WFFZ)</u>			
Operator: <u>Joyon Park</u>			
Instrumentation			
Seismometer SN: <u>127022</u>	Acoustic Release SN: <u>127022</u>	Frame SN: <u>127022</u>	
Hydrophone SN: <u>20005</u>	Flasher SN, tested: <u>F05-03</u>	Anchor type: <u>ANMM-1Y-Bag-440</u>	
406 Receiver SN: <u>1160105</u>	Beacon SN, tested: <u>F05-032</u>	Anchor added weight: <u>ANW1</u>	
Receiver Tube SN: <u>1201003</u>	Beacon Channel: <u>160, 725</u>		
Acoustic Release			
Release Coding/ing tested: <u>304878</u>	ST date (ddmm/yyyy): <u>06 AMR 2018</u>	ST time (hh:mm:ss): <u>07:17:30</u>	UTC
Enable Coding/ing tested: <u>304880</u>	RT date (ddmm/yyyy): <u>06 AMR 2018</u>	RT time (hh:mm:ss): <u>06:00:00</u>	UTC
Disable Coding/ing tested: <u>304884</u>	Battery 1: <u>9.78 / 9.01</u>	Battery 2: <u>9.78 / 9.01</u>	Volts
Disabled? <u>W</u>			
Programming			
Battery: <u>50</u> cells of Alkaline or Lithium at <u>17.5</u> Volts	Sealing area checked: <u>W</u>		
SD card: <u>SUN-128GB</u>	Capacity / Format: <u>128GB FAT32</u>		
GPS connection: <u>1</u> Serial / <u>128000</u> Sync date (ddmm/yyyy): <u>06 AMR 2018</u>	Sync time (hh:mm:ss): <u>07:17:30</u>		
Setting (vehicle 10001): Channels No.: <u>4</u>	Channels signal checked: <u>W</u>		
Sampling rate: <u>200 SPS</u>	Gain checked: <u>W</u>		
Recorder SN, hydrophone signal checked: <u>W</u>	Humidity/temperature: <u>19.5 / 25.5</u>		
Comments: <u>AMC-CORB184-170907-06AMR2018-ANW1-1120M</u>			
Recorder SDS Firmware: <u>1.0.3 (2017-01-27)</u>	Start Date (ddmm/yyyy): <u>06 AMR 2018</u>	Start Time (hh:mm:ss): <u>07:17:30</u>	UTC
Recording started: <u>W</u>			
Check on Deck			
Hydrophone fixed: <u>W</u>	Flg fixed: <u>W</u>	Handy stopper removed: <u>W</u>	
Seismometer fixed: <u>W</u>	Flash light on: <u>W</u>	Weight of ball (flotation adjusted) checked: <u>W</u>	
Release fixed: <u>W</u>	Radio beacon on: <u>W</u>	A-frame E3 3-bars status: <u>W</u>	
All clamps fixed: <u>W</u>	Anchor fastened with (30m max): <u>W</u>		
Deployment			
Date (ddmm/yyyy): <u>06 AMR 2018</u>	Time (hh:mm:ss): <u>07:21:00</u>	Water Depth: <u>075</u>	m
Coordination: Latitude: <u>32° 51' 42" N</u>	Longitude: <u>116° 25' 42" E</u>		
Recovery			
Release (10 min): Date (ddmm/yyyy): <u>2019.01.09</u>	Time (hh:mm:ss): <u>07:11:13</u>	2nd after: <u>115</u>	min
Time on surface: <u>06:51:20</u>	Time on deck: <u>06:23:00</u>	Water Depth: <u>875</u>	m
Coordination: Latitude: <u>32° 51' 33" N</u>	Longitude: <u>116° 25' 11" E</u>		
Data read out			
Slow (connected) GPS: <u>W</u>	Date (ddmm/yyyy): <u>2019.01.09</u>	Time (hh:mm:ss): <u>07:21:00</u>	UTC
Recorded data: <u>O184</u>	Downloaded to: <u>SD CARD</u>	Time (hh:mm:ss): <u>07:15:30</u>	UTC
No errors: <u>W</u>			
* Acoustic Release Test Comments (Dry Lab) When showing the pag to AR, AR reply 15 pag to both wings, vertical and horizontal wing but the laser changes normally. * TH: 12.21 : 75° 11.2603'S, 166° 17.8922'E → 112.0m Trayulation 1: 136.0m 2: 120.0m			

그림 3.32. OBS 회수 필드로그 (O182)



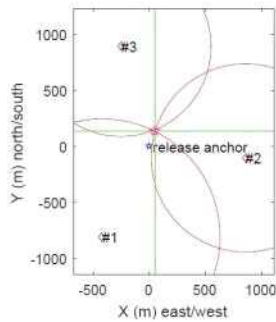
anchor release position: 75°S 5.245' 163°E 38.571'; depth: 895 m
 3D mooring position: 75°S 5.203' 163°E 38.693'
 drift: 97 m; direction: 37°
 mooring depth: 897 m; slant error: 0 m
 2D mooring position: 75°S 5.202' 163°E 38.697'
 drift: 99 m; direction: 37°
 horizontal error: 1 m
 sound speed at site: 1445 m/s
 #1 pos: 75°S 5.260' 163°E 37.928' range: 959 m range soundspeed 1500
 #2 pos: 75°S 5.087' 163°E 38.837' range: 906 m range soundspeed 1500
 #3 pos: 75°S 5.377' 163°E 38.915' range: 944 m range soundspeed 1500



anchor release position: 75°S 11.467' 166°E 16.310'; depth: 808 m
 3D mooring position: 75°S 11.541' 166°E 16.366'
 drift: 140 m; direction: 169°
 mooring depth: 788 m; slant error: 3 m
 2D mooring position: 75°S 11.539' 166°E 16.366'
 drift: 137 m; direction: 169°
 horizontal error: 13 m
 sound speed at site: 1445 m/s
 #1 pos: 75°S 11.260' 166°E 17.872' range: 1176 m range soundspeed 1500
 #2 pos: 75°S 11.856' 166°E 17.208' range: 1045 m range soundspeed 1500
 #3 pos: 75°S 11.654' 166°E 14.801' range: 1093 m range soundspeed 1500
 #4 pos: 75°S 11.037' 166°E 15.433' range: 1288 m range soundspeed 1500

그림 3.33. OBS 회수 삼각측량 (정점번호 O182)

그림 3.34. OBS 회수 삼각측량 (정점번호 O183)



anchor release position: 75°S 31.863' 165°E 39.430'; depth: 809 m
 2D mooring position: 75°S 31.788' 165°E 39.537'
 drift: 148 m; direction: 20°
 horizontal error: 4 m
 sound speed at site: 1445 m/s

#1 pos: 75°S 32.299' 165°E 38.525' range: 1318 m range soundspeed 1500
 #2 pos: 75°S 31.919' 165°E 41.288' range: 1156 m range soundspeed 1500
 #3 pos: 75°S 31.382' 165°E 38.888' range: 1129 m range soundspeed 1500

그림 3.35. OBS 회수 삼각측량 (정점번호 O184)

NAMMU STATION PROTOCOL V 1.0

Crane: ANA099 Station No: 0191 (OBS 191) Date and Time: 2019. 1. 21 16:00 (UTC) / 2019. 01. 21. 11:16:00 (LOCAL)
 Hook: PE 15000 (20000)

INSTRUMENTATION Operator: _____

Schrenmeter S/N: 170029 AS S/N: 170029 Frame S/N: 170029
 Hydrophone S/N: 700079 Fisher S/N, Tested: 700079 Anchor Type: _____
 ADC Receiver S/N: 6160719 Beacon S/N, Tested: 6160719 Anchor Add Weigh: _____
 Recorder Tube S/N: 170029 Beacon Channel: B Beacon Model: 159-15000 MSA

ACUSTIC RELEASER (AR) Operator: _____

Releaser Code/Type: 252066 ST Disabled (yyyyyy): 01. 01. 2019 ST Time Interval: 31.16.31
 Enable Code/Type: 252075 ST Disabled (yyyyyy): 01. 01. 2019 ST Time Interval: 1.00.00
 Disable Code/Type: 252075 Battery 1: 9.21 / 9.78 Distance Meter / Lead Distance: _____
 Battery 2: 9.00 / 9.69 _____

PROGRAMMING Operator: _____

Battery: 80 vol of: ANALOG Lithium: 15.0 Days: _____
 SD card: 512 Capacity / Format: 128GB NTFS
 GPS Connection: 1 Time Synchronization: 1 Sync Disabled (yyyyyy): 01. 01. 2019 Sync Time Interval (min): 15 UTC
 Setting (Default 10.00.00): Channels Rx: 4 Channels Signal Check: 1 H/W X/Y/Z: 1.0
 Sampling Rate: 100 Gain Check: 1 H/W X/Y/Z: 1.0
 ADC Firmware Version: 1.2.0 ADC Firmware Upgrade: NONE
 Comments: ANA099 OBS 0191 (OBS 191)
 (Example: "NAMMU OceanObs-01, 02, 03, 04, 05, 06, 07, 08, 09, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20, 21, 22, 23, 24, 25, 26, 27, 28, 29, 30, 31, 32, 33, 34, 35, 36, 37, 38, 39, 40, 41, 42, 43, 44, 45, 46, 47, 48, 49, 50, 51, 52, 53, 54, 55, 56, 57, 58, 59, 60, 61, 62, 63, 64, 65, 66, 67, 68, 69, 70, 71, 72, 73, 74, 75, 76, 77, 78, 79, 80, 81, 82, 83, 84, 85, 86, 87, 88, 89, 90, 91, 92, 93, 94, 95, 96, 97, 98, 99, 100")
 Recording Started: 1 Start Date (yyyyyy): 01. 01. 2019 UTC Start Date (mm/dd/yyyy): 01/01/19 UTC

CHECK ON DECK Operator: _____

Hydrophone Fixed: Flag Fixed: Hoistway stopper removed:
 Schrenometer Tube Fixed: Fisher Active: Weight of fish checked (Korean algorithm REC):
 Releaser Fixed: Radio Beacon Active: Deploy By A-frame: Win-Cure
 All Checks Fixed: Anchor fastened with 60% load:

DEPLOYMENT Operator: _____

Depth (m): 01. 01. 2019 UTC Time (mm/dd/yyyy): 01. 01. 2019 UTC Water Depth: 820 m
 Latitude: 34° 45' 72.0" Longitude: 126° 21' 03.0"
 Acoustic Releaser DISABLE: NONE Check Deploy: → 0

RECOVERY Operator: _____

Releaser (No. Test): 0191 Disabled (yyyyyy): _____ UTC Time (mm/dd/yyyy): _____ UTC End after: min
 Time on surface: _____ UTC Time on Deck: _____ UTC Water Depth: _____ m

DATA READ OUT Operator: _____

Stream-connected GPS: Downloaded to: _____ UTC Time (mm/dd/yyyy): _____ UTC
 Recorded Data: No Error:

그림 3.36. OBS 설치 필드로그(O191)

NAMMU STATION PROTOCOL V 1.0

Crane: ANA 099 Station No: 0191 (OBS 191) Date and Time: 04 JAN 2019 / 19. 1. 04
 Hook: PE 15000

INSTRUMENTATION Operator: _____

Schrenmeter S/N: 61603104 AS S/N: 170029 Frame S/N: 170029
 Hydrophone S/N: 700079 Fisher S/N, Tested: 700079 Anchor Type: _____
 ADC Receiver S/N: 61603104 Beacon S/N, Tested: 700079 Anchor Add Weigh: _____
 Recorder Tube S/N: 170029 Beacon Channel: _____

ACUSTIC RELEASER (AR) Operator: _____

Releaser Code/Type: 252075 ST Disabled (yyyyyy): 04 JAN 2019 ST Time Interval: 11.25.10
 Enable Code/Type: 252075 ST Disabled (yyyyyy): 04 JAN 2019 ST Time Interval: 1.00.00
 Disable Code/Type: 252075 Battery 1: 9.00 / 9.68 Distance Meter / Lead Distance: _____
 Battery 2: 8.92 / 9.68 _____

PROGRAMMING Operator: _____

Battery: 80 vol of: ANALOG Lithium: 15.0 Days: _____
 SD card: 512 Capacity / Format: 128GB NTFS
 GPS Connection: 1 Time Synchronization: 1 Sync Disabled (yyyyyy): 04 JAN 2019 Sync Time Interval (min): 15 UTC
 Setting (Default 10.00.00): Channels Rx: 4 Channels Signal Check: 1 H/W X/Y/Z: 1.0
 Sampling Rate: 100 Gain Check: 1 H/W X/Y/Z: 1.0
 ADC Firmware Version: 1.2.0 (2019-12-20) ADC Firmware Upgrade: NONE
 Comments: ANA 099 OBS 0191 (OBS 191) 04 JAN 2019 ANKHYU JYUN JIN
 (Example: "NAMMU OceanObs-01, 02, 03, 04, 05, 06, 07, 08, 09, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20, 21, 22, 23, 24, 25, 26, 27, 28, 29, 30, 31, 32, 33, 34, 35, 36, 37, 38, 39, 40, 41, 42, 43, 44, 45, 46, 47, 48, 49, 50, 51, 52, 53, 54, 55, 56, 57, 58, 59, 60, 61, 62, 63, 64, 65, 66, 67, 68, 69, 70, 71, 72, 73, 74, 75, 76, 77, 78, 79, 80, 81, 82, 83, 84, 85, 86, 87, 88, 89, 90, 91, 92, 93, 94, 95, 96, 97, 98, 99, 100")
 Recording Started: Start Date (yyyyyy): 04 JAN 2019 UTC Start Date (mm/dd/yyyy): 04/01/19 UTC

CHECK ON DECK Operator: _____

Hydrophone Fixed: Flag Fixed: Hoistway stopper removed:
 Schrenometer Tube Fixed: Fisher Active: Weight of fish checked (Korean algorithm REC):
 Releaser Fixed: Radio Beacon Active: Deploy By A-frame: Win-Cure
 All Checks Fixed: Anchor fastened with 60% load:

DEPLOYMENT Operator: _____

Depth (m): 04 JAN 2019 UTC Time (mm/dd/yyyy): 04 JAN 2019 UTC Water Depth: 876 m
 Latitude: 34° 05' 24.0" Longitude: 126° 20' 59.2"
 Acoustic Releaser DISABLE: NONE Check Deploy: → 0

RECOVERY Operator: _____

Releaser (No. Test): 0191 Disabled (yyyyyy): _____ UTC Time (mm/dd/yyyy): _____ UTC End after: min
 Time on surface: _____ UTC Time on Deck: _____ UTC Water Depth: _____ m

DATA READ OUT Operator: _____

Stream-connected GPS: Downloaded to: _____ UTC Time (mm/dd/yyyy): _____ UTC
 Recorded Data: No Error:

그림 3.37. OBS 설치 필드로그(O192)



NAMMU STATION PROTOCOL V 1.0

Crane: ANA099 Station No: 0193 Date and Time: 12 Jan 2019 16:31:00 (UTC) / 18 Jan 2019 05:31:00 (LOCAL)
 Hook: PE 15000

INSTRUMENTATION Operator: _____

Schrenmeter S/N: 170029 AS S/N: 170029 Frame S/N: 170030
 Hydrophone S/N: 700079 Fisher S/N, Tested: 700079 Anchor Type: _____
 ADC Receiver S/N: 61607103 Beacon S/N, Tested: 700079 Anchor Add Weigh: _____
 Recorder Tube S/N: 170029 Beacon Channel: B Beacon Model: 159-15000 MSA

ACUSTIC RELEASER (AR) Operator: _____

Releaser Code/Type: 252075 ST Disabled (yyyyyy): 11 Jan 2019 ST Time Interval: 31.56.54
 Enable Code/Type: 252075 ST Disabled (yyyyyy): 20 Jan 2019 ST Time Interval: 12.00.00
 Disable Code/Type: 252075 Battery 1: 9.46 / 9.96 Distance Meter / Lead Distance: _____
 Battery 2: 9.01 / 9.67 _____

PROGRAMMING Operator: _____

Battery: 80 vol of: ANALOG Lithium: 15.0 Days: _____
 SD card: 170074 Capacity / Format: 128GB NTFS
 GPS Connection: 1 Time Synchronization: 1 Sync Disabled (yyyyyy): 12 Jan 2019 Sync Time Interval (min): 14:29:52 UTC
 Setting (Default 10.00.00): Channels Rx: 4 Channels Signal Check: 1 H/W X/Y/Z: 1.0
 Sampling Rate: 250 SPS Gain Check: 1 H/W X/Y/Z: 1.0
 ADC Firmware Version: 1.2.2 (2019-12-20) ADC Firmware Upgrade: NONE
 Comments: ANA099-O193-61607103-170074-12 Jan 2019 ANKHYU JYUN JIN
 (Example: "NAMMU OceanObs-01, 02, 03, 04, 05, 06, 07, 08, 09, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20, 21, 22, 23, 24, 25, 26, 27, 28, 29, 30, 31, 32, 33, 34, 35, 36, 37, 38, 39, 40, 41, 42, 43, 44, 45, 46, 47, 48, 49, 50, 51, 52, 53, 54, 55, 56, 57, 58, 59, 60, 61, 62, 63, 64, 65, 66, 67, 68, 69, 70, 71, 72, 73, 74, 75, 76, 77, 78, 79, 80, 81, 82, 83, 84, 85, 86, 87, 88, 89, 90, 91, 92, 93, 94, 95, 96, 97, 98, 99, 100")
 Recording Started: Start Date (yyyyyy): 12 Jan 2019 UTC Start Date (mm/dd/yyyy): 14:28:32 UTC

CHECK ON DECK Operator: _____

Hydrophone Fixed: Flag Fixed: Hoistway stopper removed:
 Schrenometer Tube Fixed: Fisher Active: Weight of fish checked (Korean algorithm REC):
 Releaser Fixed: Radio Beacon Active: Deploy By A-frame: Win-Cure
 All Checks Fixed: Anchor fastened with 60% load:

DEPLOYMENT Operator: _____

Depth (m): 12 Jan 2019 UTC Time (mm/dd/yyyy): 16:31:00 UTC Water Depth: 820 m
 Latitude: 35° 11' 36.246" Longitude: 126° 26' 28.724"
 Acoustic Releaser DISABLE: NONE Check Deploy: → 0
 Tri 1: 35° 11.4929 S, 126° 26.4815 E, 1162 m
 Tri 2: 35° 10.9020 S, 126° 26.8292 E, 1201 m
 Tri 3: 35° 11.1991 S, 126° 26.0892 E, 1200 m
 Tri 4: 35° 11.0915 S, 126° 26.9162 E, 1218 m

RECOVERY Operator: _____

Releaser (No. Test): 0193 Disabled (yyyyyy): _____ UTC Time (mm/dd/yyyy): _____ UTC End after: min
 Time on surface: _____ UTC Time on Deck: _____ UTC Water Depth: _____ m

DATA READ OUT Operator: _____

Stream-connected GPS: Downloaded to: _____ UTC Time (mm/dd/yyyy): _____ UTC
 Recorded Data: No Error:

그림 3.38. OBS 설치 필드로그(O193)

NAMMU STATION PROTOCOL V 1.0

Date: ANA09B Date and Time: (UTC) 2019.1.03 04:25
 Station No: 6194 (LOCAL) 2019.1.03 12:25
 Project: DEMO50

INSTRUMENTATION

Operator: _____

Salinometer S/N	180060	AR S/N	180749-21202	Frame S/N	186081
Hydrophone S/N	200100	Factor S/N, Tested	504-013	Anchor Type	
ROM Recorder S/N	61807104	Reason S/N, Tested	428-005	Anchor Add Weight	
Recorder Tube S/N	180080	Reason Channel	6159-4800		

ACOUSTIC RELEASER (AR)

Operator: _____

Release Code/Failed	22203	ST (DataS/n/yyyy)	2019.01.03	ST Time (P/M/Sec)	02:25:00
Enable Code/Failed	205242	AT (DataS/n/yyyy)	2019.01.03	AT Time (P/M/Sec)	12:00:00
Disable Code/Failed	205241	Battery 1	4.08 / 4.93	Voltage (V)	12.0
		Battery 2	4.08 / 4.59	Voltage (V)	12.0
			4.98		

PROGRAMMING

Operator: _____

Battery	80	Volts of	Abuse ()	Checksum	4183	Volts	
SD card	SW 70100	Capacity / Format	128 GB				
GPS Correction	STN Station (yyyyyy)	STN Date (yyyyyy)	2019-01-03	UTC	STN Toward (yyyyyy)	01:48:10	UTC
Setting (MAGNETIC ROSS II)	Channel No	4	Channel Signal Checked	1.0	1.0	1.0	1.0
	Sampling Rate	280 SPS	Gain Checked	1.0	1.0	1.0	1.0
	HEK Firmware Version	1.3.0 (2018.09)	Humidity/Temperature				
	Comments:	ANA09B-0194-MANNU (1860)-SD(20100)-2019.01.03 12:25					
	Recording Started	Start Date (yyyyyy)	03.2019	UTC	Start Depth (mm)	06:25:00	UTC

CHECK ON DECK

Operator: _____

Hydrophone Field	<input checked="" type="checkbox"/>	Flag Field	<input checked="" type="checkbox"/>	Headbody (dropper removed)	<input checked="" type="checkbox"/>
Salinometer Tube Field	<input checked="" type="checkbox"/>	Factor Activate	<input checked="" type="checkbox"/>	Weight of Bob checked (Reason: 800000) (MAG)	<input checked="" type="checkbox"/>
Release Field	<input checked="" type="checkbox"/>	Radio Beacon Activate	<input checked="" type="checkbox"/>	Deploy by A Frame () Win Curve	<input checked="" type="checkbox"/>
All Checks Field	<input checked="" type="checkbox"/>	Anchor Released with (30m head)	<input checked="" type="checkbox"/>		

EMPLOYMENT

Operator: _____

DataS/n/yyyy	03.2019	Time (P/M/Sec)	02:25:00	UTC	Water Depth	705	m
Latitude	75° 21.8029	Long	165° 43.0986				03m
Acoustic Releaser DISABLE	Tri-angulation Range			Anchor Range, Releaser Disable Completed			
Pos 1: 1218m	Pos 2: 1235m	Pos 3: 129m	Pos 4: 1290m				

RECOVERY

Operator: _____

Release (at Time)	DataS/n/yyyy	UTC	Time (P/M/Sec)	UTC	2nd after	min
Time on surface		UTC	Time on Deck	UTC	Water Depth	m

DATA READ-OUT

Operator: _____

Stream-connected (GPS)	<input checked="" type="checkbox"/>	Download (yyyyyy)	UTC	Transfer (mm)	UTC
Recorded Data	<input checked="" type="checkbox"/>	Downloaded to			
No Errors	<input checked="" type="checkbox"/>	Errors			

그림 3.39. OBS 설치 필드로그(O194)

NAMMU STATION PROTOCOL V 1.0

Date: ANA09B Date and Time: 2019.01.03 02:25:00 (UTC)
 Station No: 6194 (LOCAL) 2019.1.03 12:25:00 (Local)
 Project: DEMO50

INSTRUMENTATION

Operator: _____

Salinometer S/N	180060	AR S/N	180749-21202	Frame S/N	186081
Hydrophone S/N	200100	Factor S/N, Tested	504-013	Anchor Type	
ROM Recorder S/N	61807104	Reason S/N, Tested	428-005	Anchor Add Weight	
Recorder Tube S/N	180080	Reason Channel	6159-4800		

ACOUSTIC RELEASER (AR)

Operator: _____

Release Code/Failed	224531	ST (DataS/n/yyyy)	03.2019	ST Time (P/M/Sec)	02:25:00
Enable Code/Failed	205242	AT (DataS/n/yyyy)	2019.01.03	AT Time (P/M/Sec)	12:00:00
Disable Code/Failed	205241	Battery 1	4.08 / 4.93	Voltage (V)	12.0
		Battery 2	4.08 / 4.59	Voltage (V)	12.0
			4.98		

PROGRAMMING

Operator: _____

Battery	80	Volts of	Abuse ()	Checksum	4183	Volts	
SD card	SW 100100	Capacity / Format	128 GB				
GPS Correction	STN Station (yyyyyy)	STN Date (yyyyyy)	2019-01-03	UTC	STN Toward (yyyyyy)	01:23:13	UTC
Setting (MAGNETIC ROSS II)	Channel No	4	Channel Signal Checked	1.0	1.0	1.0	1.0
	Sampling Rate	280 SPS	Gain Checked	1.0	1.0	1.0	1.0
	HEK Firmware Version	1.3.0	Humidity/Temperature				
	Comments:	ANA09B-0194-116988-1860-03.2019-MANNU-JV (1860)-210					
	Recording Started	Start Date (yyyyyy)	03.2019	UTC	Start Depth (mm)	01:25:24	UTC

CHECK ON DECK

Operator: _____

Hydrophone Field	<input checked="" type="checkbox"/>	Flag Field	<input checked="" type="checkbox"/>	Headbody (dropper removed)	<input checked="" type="checkbox"/>
Salinometer Tube Field	<input checked="" type="checkbox"/>	Factor Activate	<input checked="" type="checkbox"/>	Weight of Bob checked (Reason: 800000) (MAG)	<input checked="" type="checkbox"/>
Release Field	<input checked="" type="checkbox"/>	Radio Beacon Activate	<input checked="" type="checkbox"/>	Deploy by A Frame () Win Curve	<input checked="" type="checkbox"/>
All Checks Field	<input checked="" type="checkbox"/>	Anchor Released with (30m head)	<input checked="" type="checkbox"/>		

EMPLOYMENT

Operator: _____

DataS/n/yyyy	03.2019	Time (P/M/Sec)	02:25:00	UTC	Water Depth	864	m
Latitude	75° 16.1793	Long	164° 24.2206				03m
Acoustic Releaser DISABLE	Tri-angulation Range			Anchor Range, Releaser Disable Completed			
T1: 1343	T2: 1342	T3: 1341	T4: 1348				

RECOVERY

Operator: _____

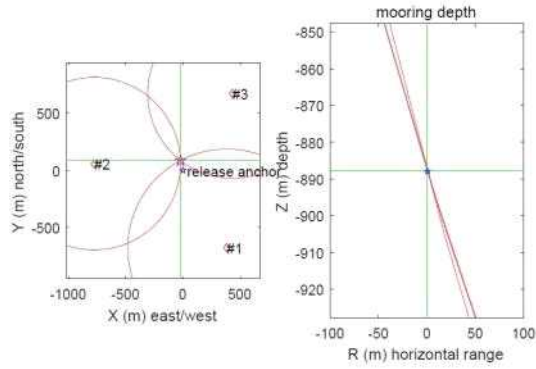
Release (at Time)	DataS/n/yyyy	UTC	Time (P/M/Sec)	UTC	2nd after	min
Time on surface		UTC	Time on Deck	UTC	Water Depth	m

DATA READ-OUT

Operator: _____

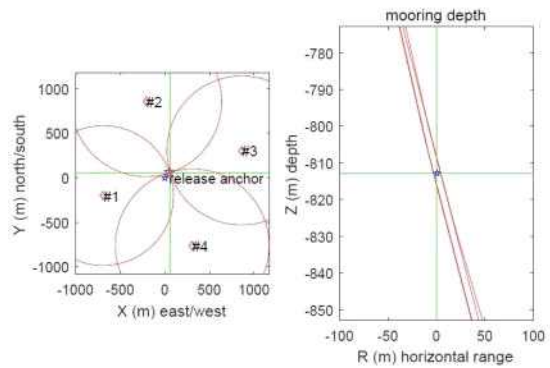
Stream-connected (GPS)	<input checked="" type="checkbox"/>	Download (yyyyyy)	UTC	Transfer (mm)	UTC
Recorded Data	<input checked="" type="checkbox"/>	Downloaded to			
No Errors	<input checked="" type="checkbox"/>	Errors			

그림 3.40. OBS 설치 필드로그(O195)



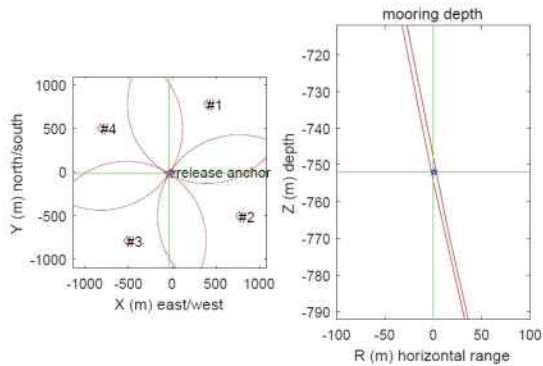
anchor release position: 75°S 5.249' 163°E 38.539'; depth: 896 m
 3D mooring position: 75°S 5.202' 163°E 38.492'
 drift: 90 m; direction: 346°
 mooring depth: 888 m; slant error: 0 m
 2D mooring position: 75°S 5.203' 163°E 38.484'
 drift: 89 m; direction: 346°
 horizontal error: 6 m
 sound speed at site: 1445 m/s
 #1 pos: 75°S 5.615' 163°E 39.340' range: 1228 m range soundspeed 1500
 #2 pos: 75°S 5.217' 163°E 36.911' range: 1153 m range soundspeed 1500
 #3 pos: 75°S 4.886' 163°E 39.445' range: 1144 m range soundspeed 1500

그림 3.41. OBS 설치 삼각측량
(정점번호 O192)



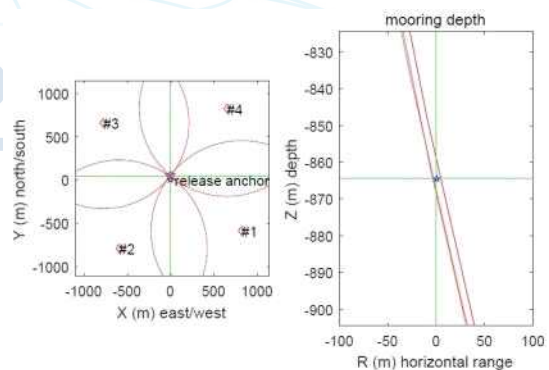
anchor release position: 75°S 11.364' 165°E 36.273'; depth: 820 m
 3D mooring position: 75°S 11.333' 165°E 36.389'
 drift: 80 m; direction: 44°
 mooring depth: 813 m; slant error: 3 m
 2D mooring position: 75°S 11.333' 165°E 36.389'
 drift: 80 m; direction: 44°
 horizontal error: 5 m
 sound speed at site: 1446 m/s
 #1 pos: 75°S 11.473' 165°E 34.812' range: 1120 m range soundspeed 1500
 #2 pos: 75°S 10.902' 165°E 35.829' range: 1162 m range soundspeed 1500
 #3 pos: 75°S 11.199' 165°E 38.087' range: 1157 m range soundspeed 1500
 #4 pos: 75°S 11.776' 165°E 36.916' range: 1174 m range soundspeed 1500

그림 3.42. OBS 설치 삼각측량
(정점번호 O193)



anchor release position: 75°S 31.803' 165°E 43.099'; depth: 795 m
 3D mooring position: 75°S 31.815' 165°E 43.018'
 drift: 43 m; direction: 239°
 mooring depth: 752 m; slant error: 2 m
 2D mooring position: 75°S 31.814' 165°E 43.017'
 drift: 43 m; direction: 241°
 horizontal error: 27 m
 sound speed at site: 1445 m/s
 #1 pos: 75°S 31.382' 165°E 43.955' range: 1173 m range soundspeed 1500
 #2 pos: 75°S 32.077' 165°E 44.748' range: 1190 m range soundspeed 1500
 #3 pos: 75°S 32.230' 165°E 41.966' range: 1172 m range soundspeed 1500
 #4 pos: 75°S 31.533' 165°E 41.322' range: 1195 m range soundspeed 1500

그림 3.43. OBS 설치 삼각측량
(정점번호 O194)



anchor release position: 75°S 16.698' 164°E 44.220'; depth: 862 m
 3D mooring position: 75°S 16.674' 164°E 44.207'
 drift: 45 m; direction: 352°
 mooring depth: 864 m; slant error: 3 m
 2D mooring position: 75°S 16.674' 164°E 44.207'
 drift: 46 m; direction: 352°
 horizontal error: 3 m
 sound speed at site: 1460 m/s
 #1 pos: 75°S 17.017' 164°E 45.957' range: 1346 m range soundspeed 1500
 #2 pos: 75°S 17.124' 164°E 42.953' range: 1326 m range soundspeed 1500
 #3 pos: 75°S 16.343' 164°E 42.565' range: 1305 m range soundspeed 1500
 #4 pos: 75°S 16.254' 164°E 45.599' range: 1322 m range soundspeed 1500

그림 3.44. OBS 설치 삼각측량
(정점번호 O195)

나. 스파커 탄성과 탐사(sparker seismic survey)

(1) 탐사 개요

- 2019년 1월 7일 부터 1월 10일까지 약 4일간 아라온 남극 2항차를 통해 남극 로스해 빅토리아랜드 분지에 위치한 Terror Rift 구조를 대상으로 총 9개의 측선, 약 400 L-km 탐사자료 획득(그림 3.45., 표 3.6.)
- 남극 로스해 Victoria Land 분지에 위치한 Terror Rift 구조를 동-서로 가로지르는 100 L-km 길이의 측선 4개를 계획하였으나, 탐사지역의 동쪽에 분포된 해빙(그림 3.45.)으로 인해 탐사가 가능한 지역이 절반 이상으로 축소
- 해빙분포에 따라 현장에서 변경된 탄성과 탐사 측선은 Terra Nova Bay 서쪽에 분포하고 있는 Terror Rift 구조를 탐사할 수 있는 측선과 Nansen 빙봉 인근에서의 빙권 거동을 추적해 낼 수 있는 측선으로 구성하여 탐사를 수행
- 유빙에 의해 다중채널 탄성과 탐사 장비의 손상이 우려되어 해빙이 존재하는 해상에서도 운용이 가능한 스파커 탐사장비와 단일채널 스트리머를 사용하여 자료를 획득
- 단일채널로 획득된 자료는 다채널 탐사자료와 달리 속도분석, 중합 및 구조보정이 불가함
- 이에 따라 탐사 직후, 선내 구축된 GEDCO Vista 10.0 소프트웨어를 이용하여 주파수 필터링(band-pass filtering) 및 직접파 뮤우팅(muting for direct wave) 절차만을 거쳐 잡음을 최소화한 탄성과 단면을 구축
- 선내 구축된 정밀 탄성과 탐사자료 처리 소프트웨어 Schlumberger Omega II를 이용하여 정확한 좌표정보 보정 및 추가적인 신호처리 기법을 적용 수행
- 자료해석 소프트웨어 SeisWare를 활용하여 해저지형자료와 함께 3차원적으로 도시하여 종합적인 해석 수행 가능

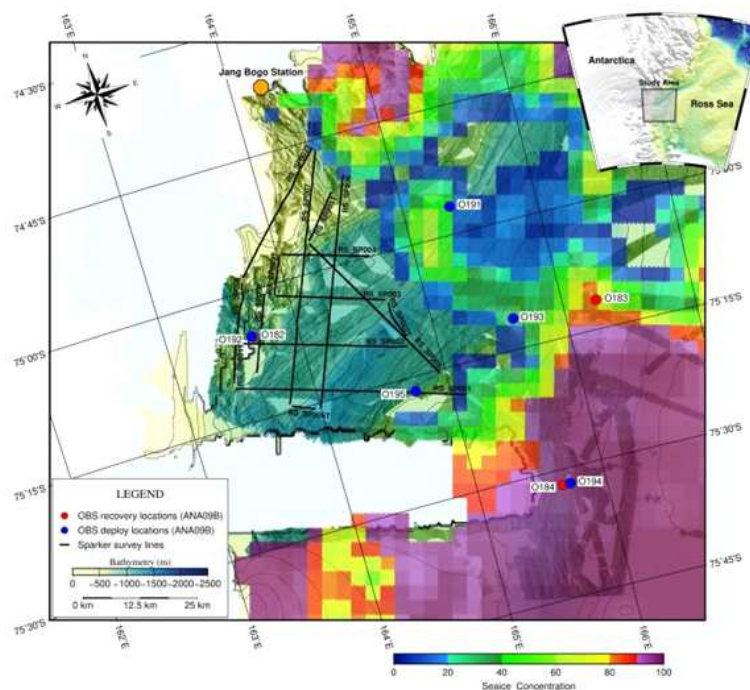


그림 3.45. 스파커 탄성파탐사 측선, OBS 정점위치 및 탐사 당시 해빙분포 현황

표 3.6. 현장탐사 측선정보

Line Name	Start of Line			End of Line			No. Shots	Length (km)
	Date/Time (UTC)	Latitude	Longitude	Date/Time (UTC)	Latitude	Longitude		
RS_SP001	2019.01.07. 03:30:00	75°18.5976'S	165°06.4344'E	2019.01.07. 09:00:00	75°10.5966'S	163°24.6234'E	6621	51.10
RS_SP001T	2019.01.07. 09:14:00	75°09.9540'S	163°24.7992'E	2019.01.07. 10:08:30	75°05.6694'S	163°30.3270'E	1093	8.49
RS_SP002	2019.01.07. 10:12:56	75°05.5164'S	163°31.1478'E	2019.01.07. 14:14:41	75°11.3412'S	164°46.0746'E	4835	37.84
RS_SP002T	2019.01.07. 14:35:50	75°10.2480'S	164°46.5624'E	2019.01.07. 15:46:57	75°05.7750'S	164°43.1376'E	1420	8.75
RS_SP003	2019.01.07. 15:56:49	75°05.3556'S	164°41.7120'E	2019.01.07. 19:12:27	75°01.4328'S	163°43.9748'E	3914	24.40
RS_SP003T	2019.01.07. 19:15:48	75°01.2762'S	163°53.8914'E	2019.01.07. 20:25:10	74°57.0204'S	164°00.9540'E	1388	8.72
RS_SP004	2019.01.07. 20:29:33	74°56.9274'S	164°01.7628'E	2019.01.07. 23:10:00	74°59.9448'S	164°40.2576'E	3210	19.70
RS_SP005	2019.01.09. 07:30:10	75°15.3498'S	164°57.2196'E	2019.01.09. 13:03:23	74°56.6490'S	164°15.4098'E	6663	40.63
RS_SP005T	2019.01.09. 13:01:38	74°56.2656'S	164°15.7236'E	2019.01.09. 14:42:16	74°51.4608'S	164°31.2420'E	1832	11.85
RS_SP006	2019.01.09. 15:32:17	74°49.8300'S	164°38.4930'E	2019.01.09. 22:30:40	75°15.6024'S	163°59.9784'E	8365	52.10
RS_SP006T	2019.01.09. 22:44:30	75°15.5154'S	163°57.5424'E	2019.01.09. 23:26:00	75°14.4252'S	163°47.3640'E	848	5.31
RS_SP007	2019.01.09. 23:32:58	75°14.1150'S	163°46.7406'E	2019.01.10. 06:59:00	74°46.2642'S	164°29.3196'E	8923	56.47
RS_SP007T	2019.01.10. 07:19:10	74°45.8238'S	164°28.4028'E	2019.01.10. 11:42:08	74°58.3242'S	163°42.2514'E	5257	32.78
RS_SP008	2019.01.10. 11:50:50	74°58.8630'S	163°41.3982'E	2019.01.10. 14:32:05	75°08.4966'S	163°26.8014'E	2600	19.60
RS_SP009	2019.01.10. 15:20:20	75°09.5376'S	163°36.0954'E	2019.01.10. 17:41:00	75°00.8304'S	163°49.7424'E	2821	17.69

(2) 탐사장비 및 자료획득 정보

- 스파커 탄성과 탐사장비: 스파커 탄성과 탐사장비는 스파커 음원발생기(SIG-Pulse L5, sparker electrode로 구성), 스트리머 케이블(48개 하이드로폰으로 구성된 단일 채널 수신기) 그리고 위치정보 및 획득자료 확인, 탐사 진행에 대한 전반적인 제어를 위한 컴퓨터(laptop)로 구성(그림 3.46.)

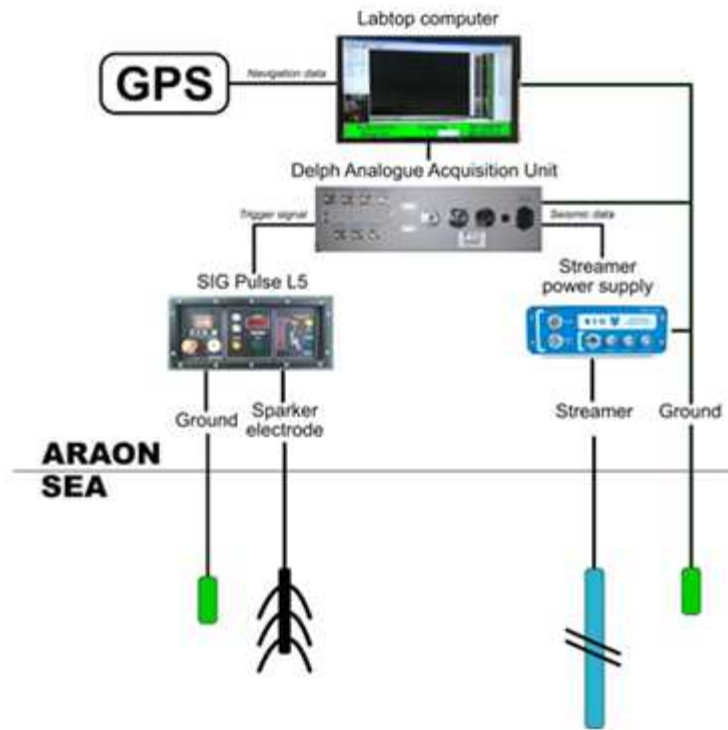


그림 3.46. 스파커 탄성과 탐사장비 개요도

- 이번 탐사에서는 에너지레벨 5,000 J을 발생시킬 수 있는 electrode ELP100a 모델을 사용하여 전기 에너지를 이용한 탄성파 음원을 발생시켜 탐사 진행(표 3.7.)
- 음원을 통해 발생된 탄성파는 수층을 거쳐 해저면 아래로 전파하고, 해저면 아래 지층에 의해 반사되어 48개의 하이드로폰으로 구성된 단일채널 수신기에 신호가 기록
- 수신기가 기록하는 신호는 10-800 Hz 사이의 주파수 대역을 가짐

표 3.7. 스파커 탄성파 자료획득 설정

Shot Interval	3.0 sec
Channel Number	Single channel / 48 hydrophones
Hydrophone Interval	1 m
Electronical power	5000 Jules
Recording Length	2.5 sec
Sample Rate	0.025 ms
Tape Format	SEG-Y

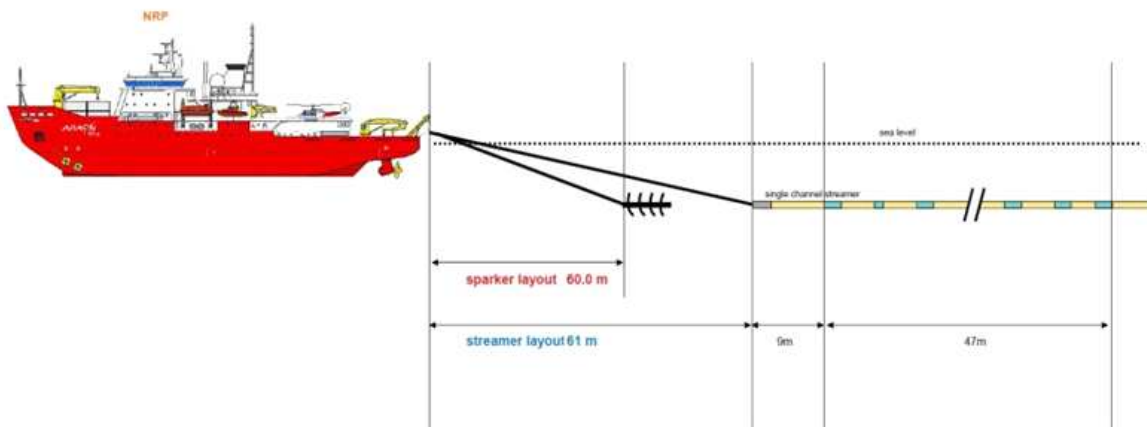


그림 3.47. 스파커 탄성파 탐사자료 Geometry 정보

- 후미갑판을 기준으로 음원 부분(electrode)의 lead-in 케이블은 60 m, 수신기 부분(단일채널 스트리머)의 lead-in 케이블은 61 m로 설정, 음원과 수신기와의 간격은 10 m로 설정하여 자료획득(그림 3.47.)
- 자료획득은 선속 4노트를 유지한 상태로 진행

(3) 선내 자료처리 결과(onboard processing image)



그림 3.48. 자료처리된 스파커 탐사 측선 RS_SP001



그림 3.49. 자료처리된 스파커 탐사 측선 RS_SP002

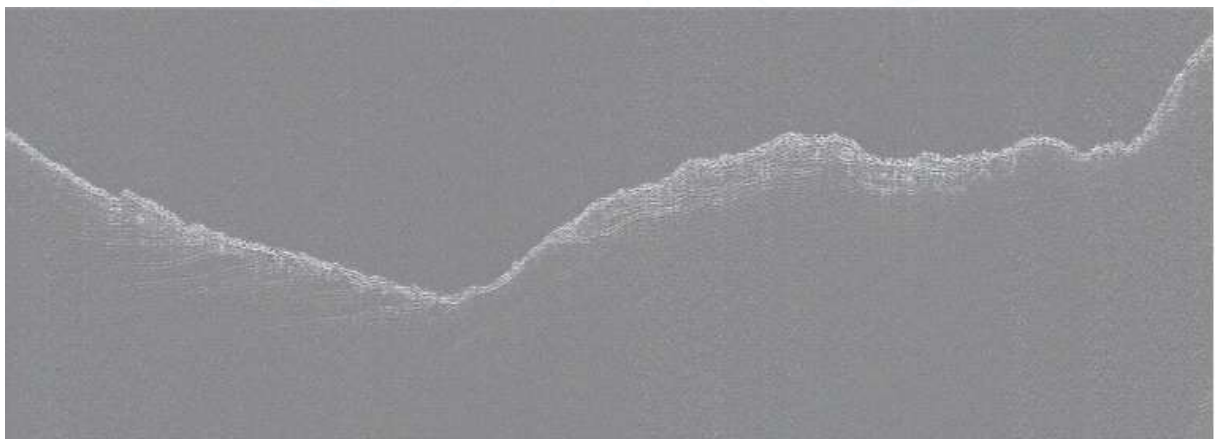


그림 3.50. 자료처리된 스파커 탐사 측선 RS_SP005

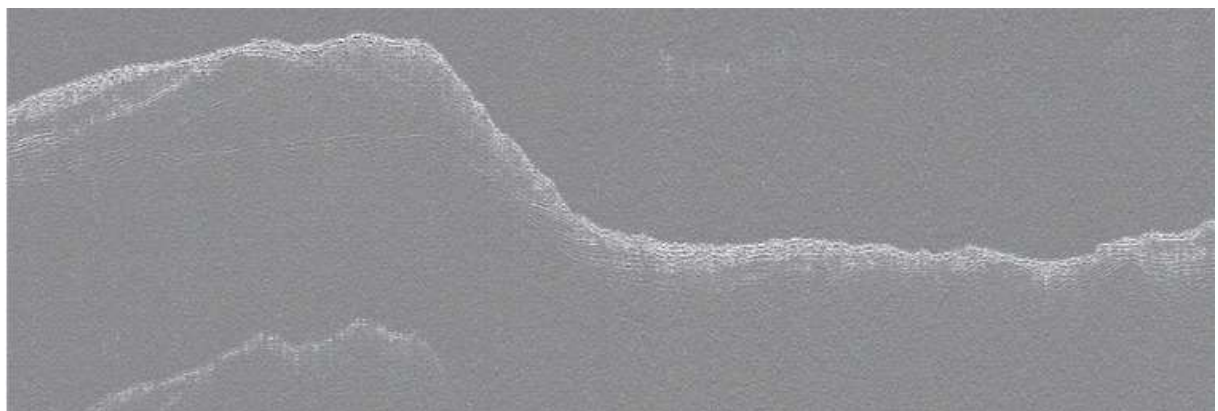


그림 3.51. 자료처리된 스파커 탐사 측선 RS_SP006

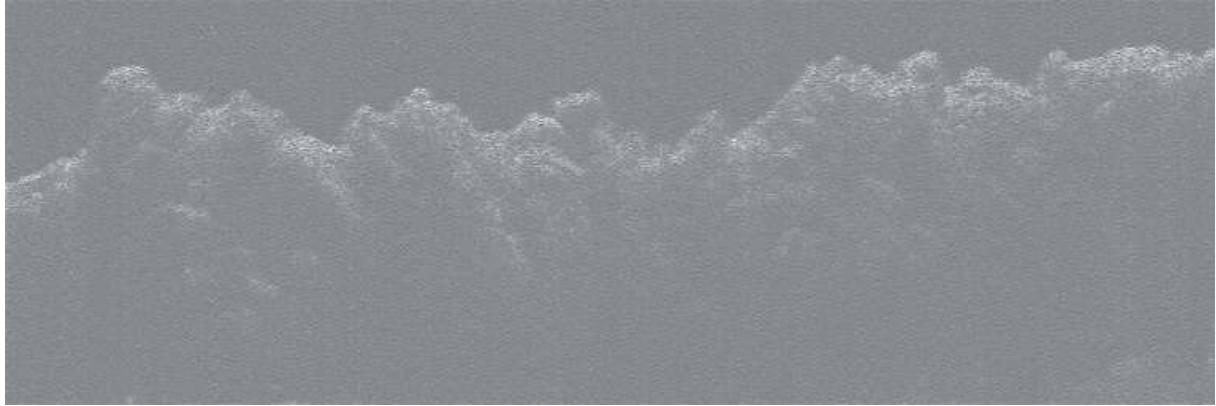


그림 3.52. 자료처리된 스파커 탐사 축선 RS_SP009

(4) 스파커 탄성과 자료처리 및 초기 해석

- 신호처리 기법을 이용한 노이즈 제거, 정확한 좌표보정 수행
- 해당 연구지역에 분포하는 Terror Rift구조 규명과 Nansen 빙붕지역 인근에서 나타나고 있는 빙권거동의 이해를 목표로 해저지형정보와 함께 자료해석 소프트웨어를 활용한 3차원적 해석 수행

다. 다중채널 탄성과, 해양자력 탐사자료 획득

(1) 탐사 개요

- 2019-2019 남극 하계탐사 3항차 기간 동안 2019년 2월 25일부터 2019년 2월 28일까지 로스해 북서부 외대륙 주변부에서 서남극 열개구조 진화에 따라 형성된 것으로 추정되는 심부지체구조 파악을 위한 다중채널 탄성과 탐사 및 해양자력탐사 수행
- 탐사기간 중 다중채널 탄성과 탐사자료는 3개 축선, 340 L-km, 해양자력 탐사자료 2개 축선 395 L-km를 획득
- 연구지역에서의 수층구조 파악을 위한 XCTD 15개 정점자료 획득 및 탐사 축선과 동일한 구간에서 멀티빔 해저지형탐사자료, 천부지층탐사자료(SBP) 동시 획득
- 선상 중력계 고장으로 인한 중력 탐사자료 미확보

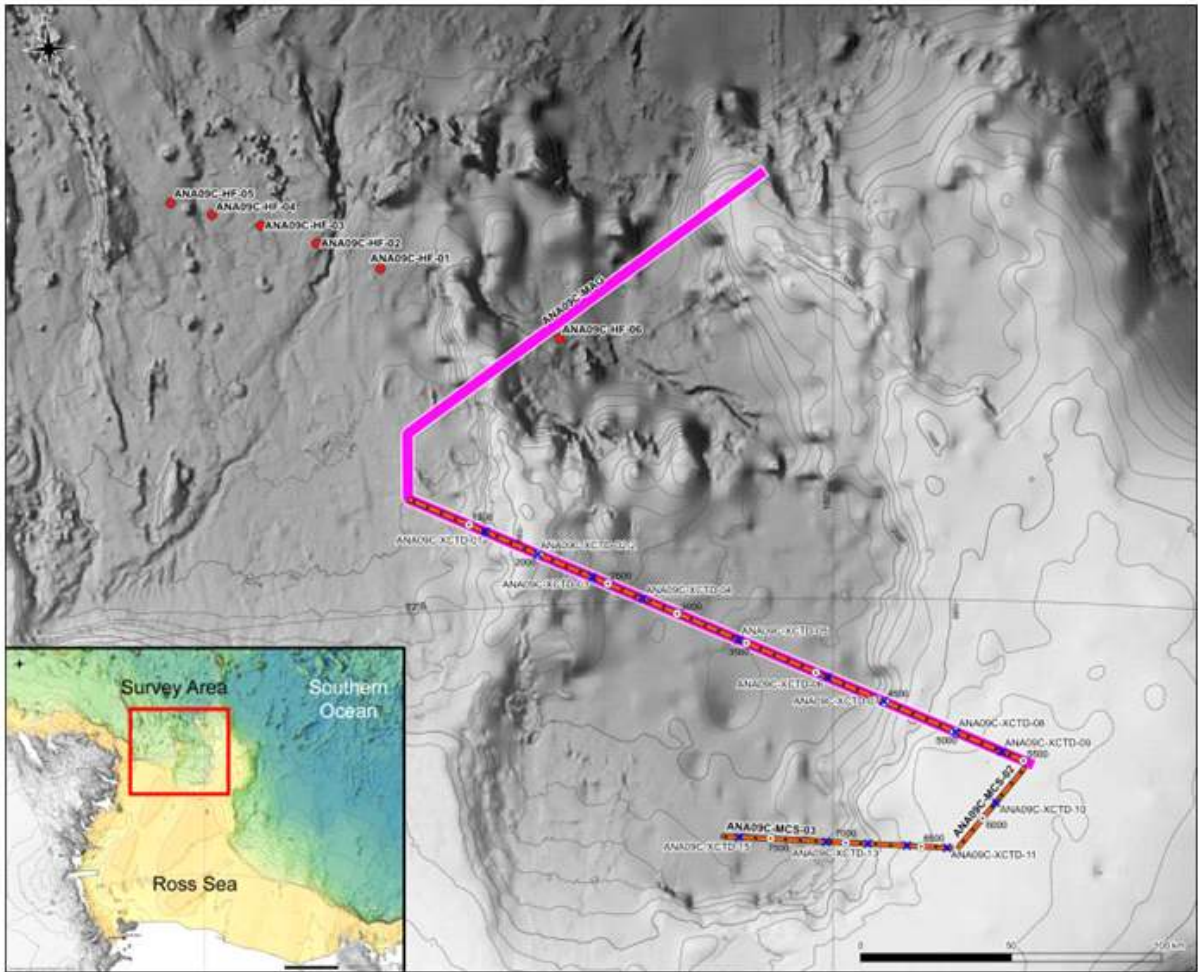


그림 3.53 연구지역 및 탐사측선도. 오렌지색 실선: 다채널 탄성파 탐사 측선, 보라색 두꺼운 실선: 자력탐사 측선, 파란색 X 표시: XCTD 투하 지점, 빨간색 원: 지열측정 정점

극지연구소

(2) 탐사장비 및 자료획득 정보

- 다채널 탄성파 탐사장비: 탄성파 탐사장비는 탄성파 신호 생성을 위한 airgun array (Sercel G.Gun II 8개로 구성), 반사파 신호 수신을 위한 streamer(Sercel Sentinel, 120 channels, 1.5-km length), 압축공기 생성을 위한 compressor, 그리고 선내 탐사장비 제어시스템으로 구성
- 심부지층 및 음향기반암 구조 확인을 위해 전체 압축공기 용량을 1,200 in³, 압력은 138 bar(약 2,000 psi)로 설정하였음
- 자료획득 시, 선속은 4.5-5.0 노트를 유지하였으며, 탐사 중 에어건 및 컴프레서 시스템에 문제없이 탐사를 완료함

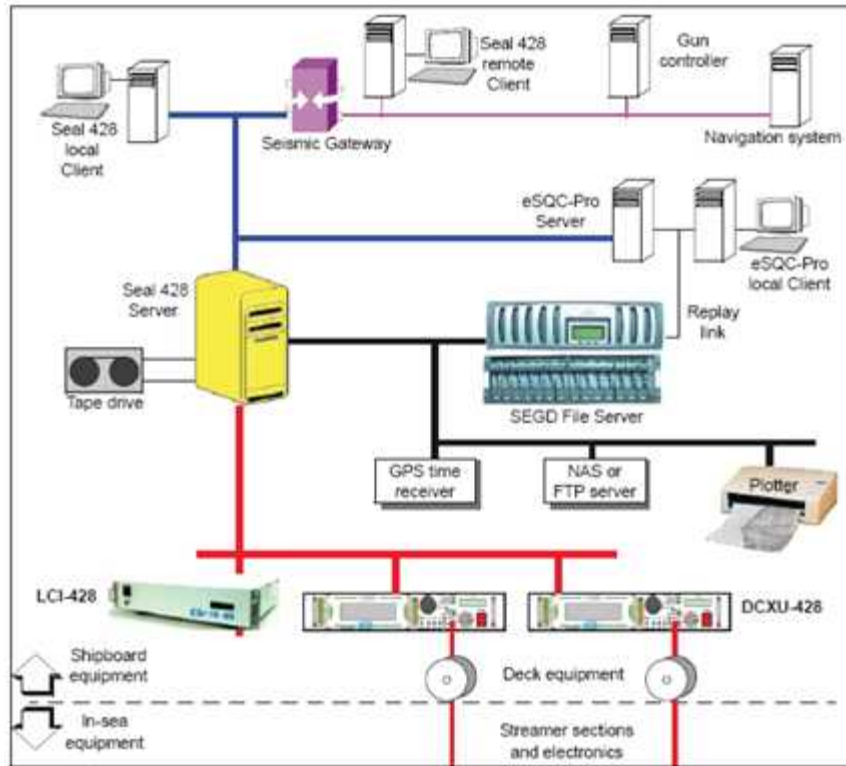


그림 3.54. 아라온 다채널 탄성파 탐사 시스템 개념도

크지연구소

표 3.8. 다채널 탄성파 탐사 자료획득 설정

Shot Interval	50 m
Channel Number	120 channels
Group Interval	12.5 m
Source Depth	6 m
Streamer Depth	6 m
Fold of Coverage	15
Work Pressure	138 bar (2,000 psi)
Recording Length	10.0 sec
Sample Rate	1 ms
Tape Format	SEGD

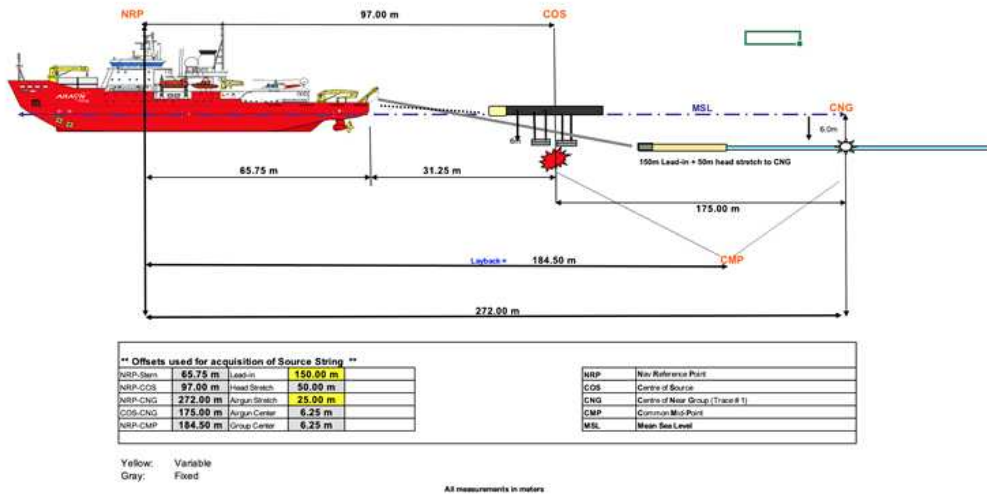


그림 3.55. 다채널 탄성파 탐사자료 획득을 위한 offset 정보

- 해양 자력 탐사장비: 자력계(SeaSpy)는 연구선 후미 갑판에 위치한 자력계 원치 케이블에 연결되어 연구선에서 300-400 후방에서 자료 획득. 자료 획득 시, 선속은 8노트를 유지하였으며, 선내 연구실의 제어시스템(SeaLink)를 이용하여 자료 획득 및 실시간 품질 확인.

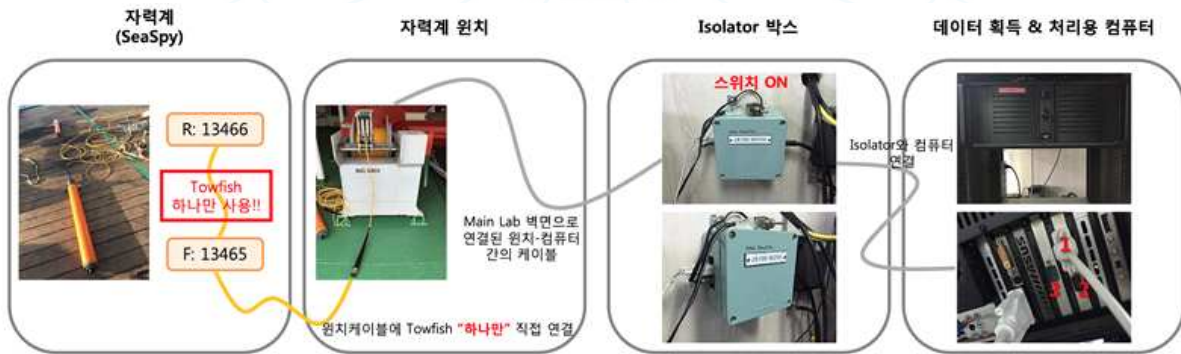


그림 3.56. 해양자력 탐사장비 개념도.

(3) 선내 탐사자료처리

- 연구지역인 Central Basin을 동-서로 가로지르는 탄성파 탐사 측선 및 자력탐사 측선 확보
- Central Basin을 경계짓는 Hallett Ridge와 Iselin Bank의 음향기반암 확인 및 Central Basin 중심부에서 해저면 하부 약 3 km에 위치한 심부 퇴적구조 및 음향기반암 확인
- Central Basin 북부에서 자력탐사 1개 측선 확보 및 탐사자료가 부족한 Iselin Bank 서부 사면에 대한 추가 탄성파 탐사자료, 천부지층탐사자료 및 다중빔 해저지형 탐사자료 확보

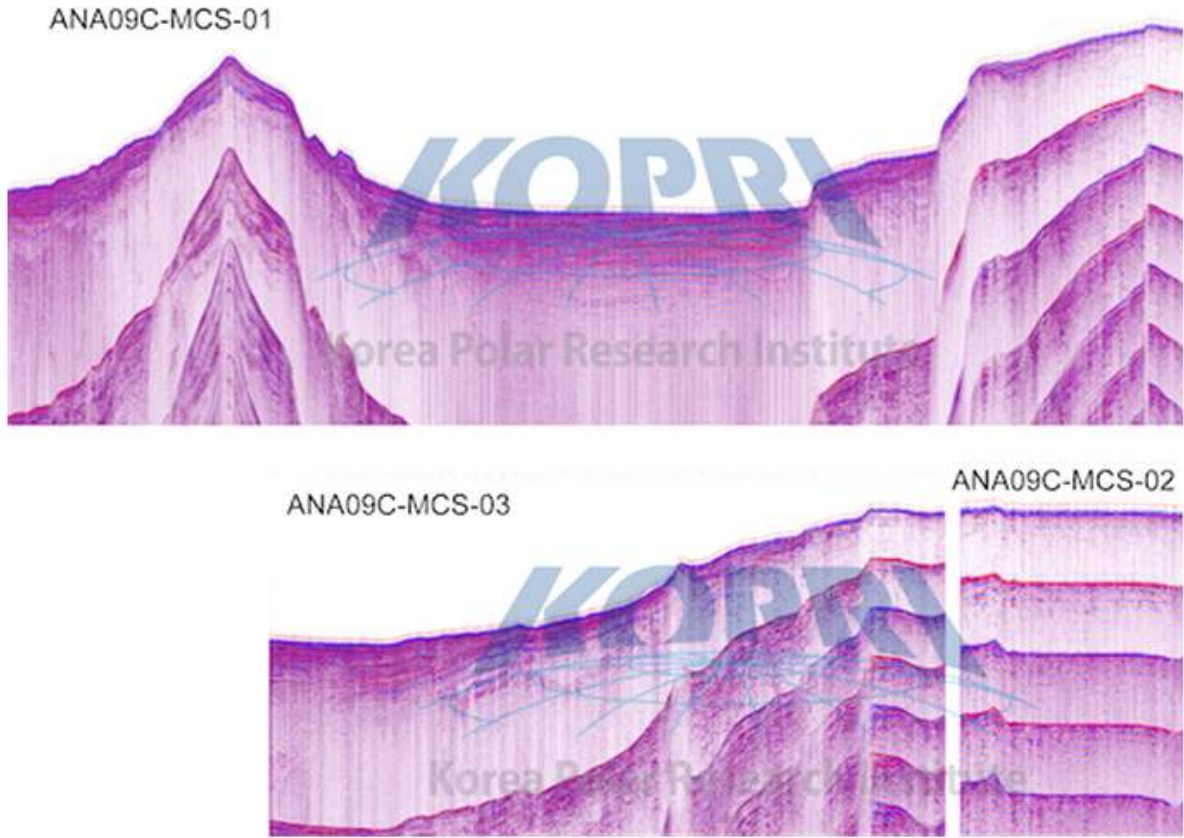


그림 3.57. 획득된 다채널 탄성과 탐사자료 축선 ANA09C-MCS-01, -02, -03.

(4) 후속연구 수행

- 다채널 탄성과 탐사 자료처리 및 분석: 다채널 탄성과 탐사 단면의 품질 향상을 위해 소내 구축된 탄성과 탐사자료 처리 소프트웨어 VISTA 10.0과 Schlumberger Omega II 등을 이용하여 deconvolution, dip-moveout, post-stack migration 등을 수행
- 처리된 탄성과 단면은 기존 탐사자료 및 자력탐사 자료 분석 결과와 결합되어 Central Basin에 대한 지체구조 분석, 분지 해석 및 퇴적 프로세스, 퇴적환경 변화 및 복원 연구에 활용
- 자력 탐사자료 처리 및 분석: 획득된 탐사자료는 소내에서 자료처리를 거쳐 Central Basin의 형성 및 지체구조 진화에 대한 연구에 활용
- XCTD 탐사자료 처리 및 분석: 항차 이후 소내에서 자료 처리 후, 탄성과 단면에서 관찰되는 수층 경계면과 비교 분석을 위한 자료로 활용
- SBP, 멀티빔 탐사자료 처리 및 분석: 항차 이후 소내에서 자료처리 과정을 거친 후, 다채널 탄성과 탐사자료와 결합되어 최근의 퇴적환경 및 해저지형 분석

나. 중앙해령 연구항해 (ANA10A)

(1) 연구목적: 호주-남극 중앙해령 KR1 및 맥쿼리 삼중점을 기준으로 동남쪽으로 뻗어 있으며, 태평양-남극 중앙해령(Pacific-Antarctic Ridge, PAR)의 서편에 위치하고 있는 대형 균열대의 지형 및 지구조적 진화 과정, 암석의 기원 및 맨틀 특성 규명을 위한 기초적인 연구조사

(2) 탐사기간: 2019.12.12. ~ 2019.12.19. (7일간, 전체 항해일정: 2019.11.25. ~ 2019.12.22.)

(3) 연구지역:

- 뉴질랜드 리틀턴에서 출항, 남극 장보고과학기지를 경유하여 다시 리틀턴으로 귀항하는 경로 중에 AAR 및 PAR 사이에 위치하는 대형 균열대에서 탐사 진행 (그림 3.58.)

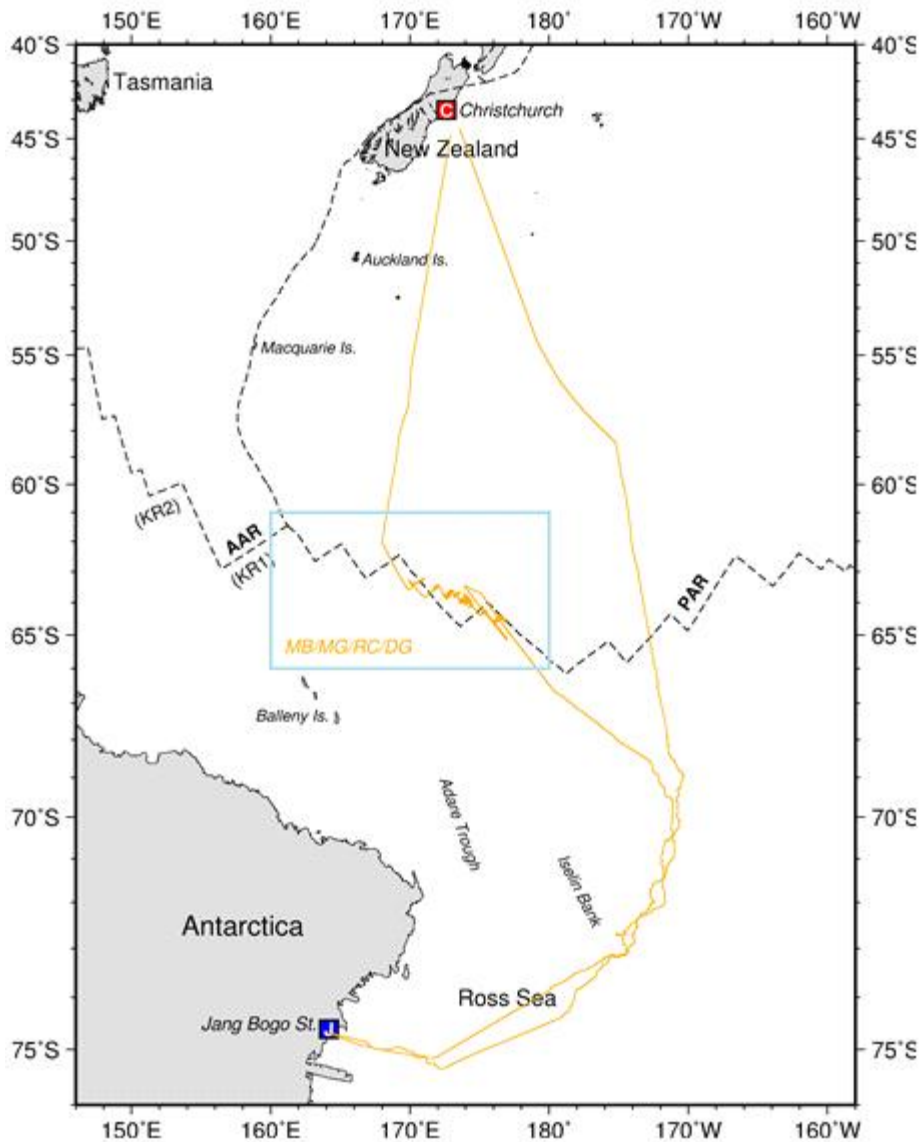


그림 3.58. 2019 연구항해의 항적도 및 탐사 항목 (MB: 멀티빔 지형조사, MG: 자력탐사, RC: 락코어, DG: 드렛지)

(4) 연구방법

- 멀티빔(Multi-Beam echo sounder)을 활용한 해저면 지형조사
- 총자력계를 활용한 선상 자력 탐사
- 락코어 및 드렛지를 활용한 균열대 내의 중앙해령 및 해저화산에 대한 암석시료 채취

(5) 주요 연구성과

- AAR 및 PAR 사이의 대형 균열대를 구성하는 중앙해령 분절들에 대한 지형구조 파악
- 균열대 내의 중앙해령들에 대한 지형 및 자력자료 획득으로 중심 확장축의 위치 파악
- 균열대 내의 중심 확장축 및 해저화산에 대한 암석시료 채취
- 향후 추진될 대형 균열대 연구를 위한 기초자료 확보



제 3 절 Terror rift 및 북빅토리아랜드 지체구조와 연구

1. 서남극 열개구조 지구물리 연구

가. Terror Rift 경계부의 지각/맨틀 3차원 속도 구조

(1) 자료처리 및 해석

- 장보고 기지 부근 해역에서 해저지진관측망 구축
- 육상/해저지진관측망에서 1년 이상의 연속 지진관측자료 취득

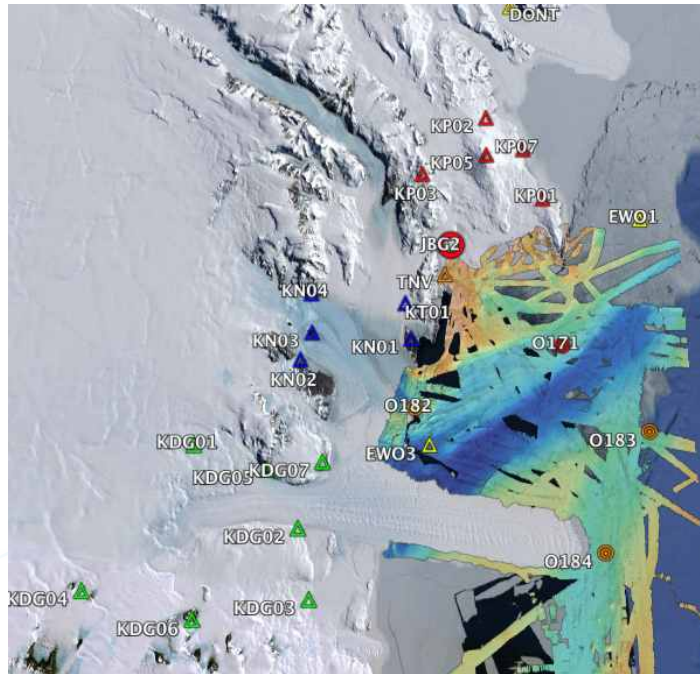


그림 3.59. 새롭게 추가된 해저지진관측망(O182, O183, O184)과 기 취득된 해저지진계(O171) 위치

- 장보고 기지 기반 육상 광대역 지진관측망과 해저면 지진계에서 관측된 원격지진을 이용한 3차원 맨틀 속도 구조 모델 개발
- 극지연구소 광대역 지진관측망 자료만을 이용한 초기 모델 제시
- 초기 모델은 드라이갈스키 빙설 남쪽 로스해 연안의 테라 리프트 부근이 100km 길이까지 속도가 매우 낮은 것을 보여주고, 북쪽 지역은 반대로 남극종단산맥 아래 육상에 저속도 층의 존재를 밝혀냄
- 미국 알라바마대학에서 2014-2016년간 TAMMNET (the Transantarctic Mountain Northern Network) 광대역 지진관측망 MOU 체결로 연속 지진자료 공유를 통한 연구지역의 모델 영역을 육상쪽으로 확대)
- Terror Rift 부분과 육상 내륙쪽으로 모델 영역 확대 (그림 3.61.)
- Terror Rift 하부 100 km 깊이 이하에서 저속도 구조 발견 (그림 3.62.)
- 장보고 기지 북쪽으로는 육상쪽으로 넓게 저속도 층 구조 발견 (그림 3.62.)
- 북 빅토리아 지역의 남극 종단산맥은 지역적으로 넓게 저속도 층이 분포할 가능성이 있음

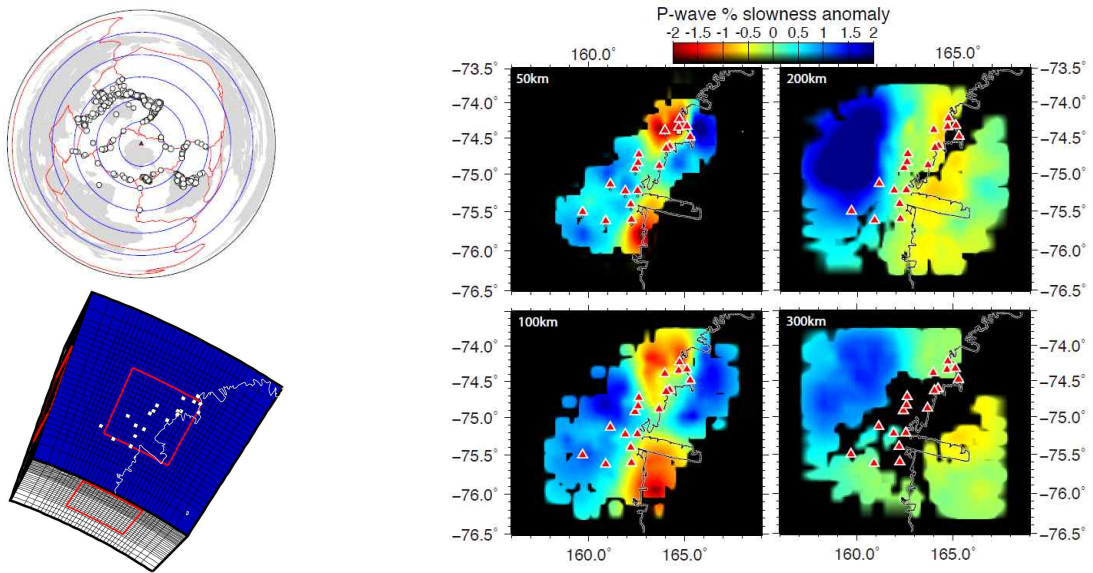


그림 3.60. 현재 극지연구소에서 운영중인 광대역 지진관측망과 과거 OBS 자료만을 이용한 Terror Rift 경계부의 P파의 3차원 속도 구조 모델링에 사용된 원격지진 위치(좌상), 모델 파라미터 (좌하), 3차원 모델링 결과 (우).

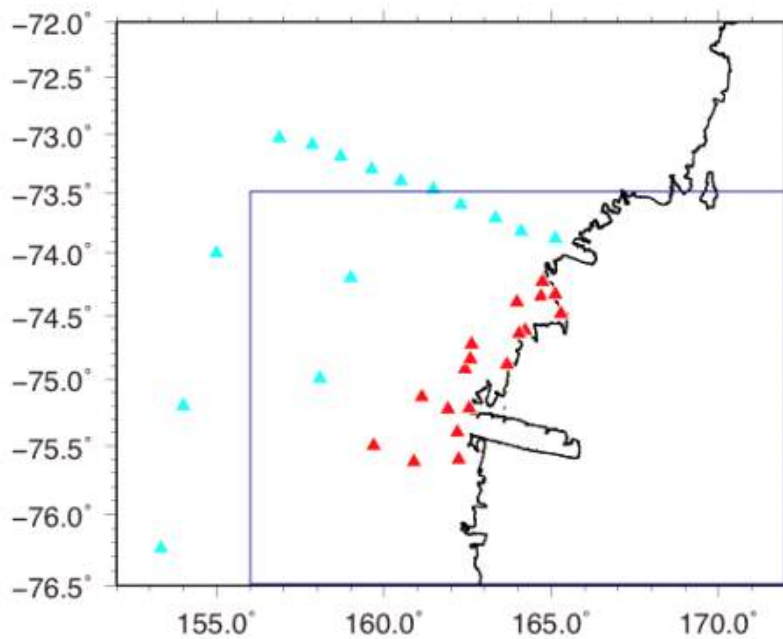


그림 3.61. TAMNNET 광대역 지진관측망 위치(하늘색 삼각형)와 극지연구소 지진관측망 위치 (붉은 삼각형).

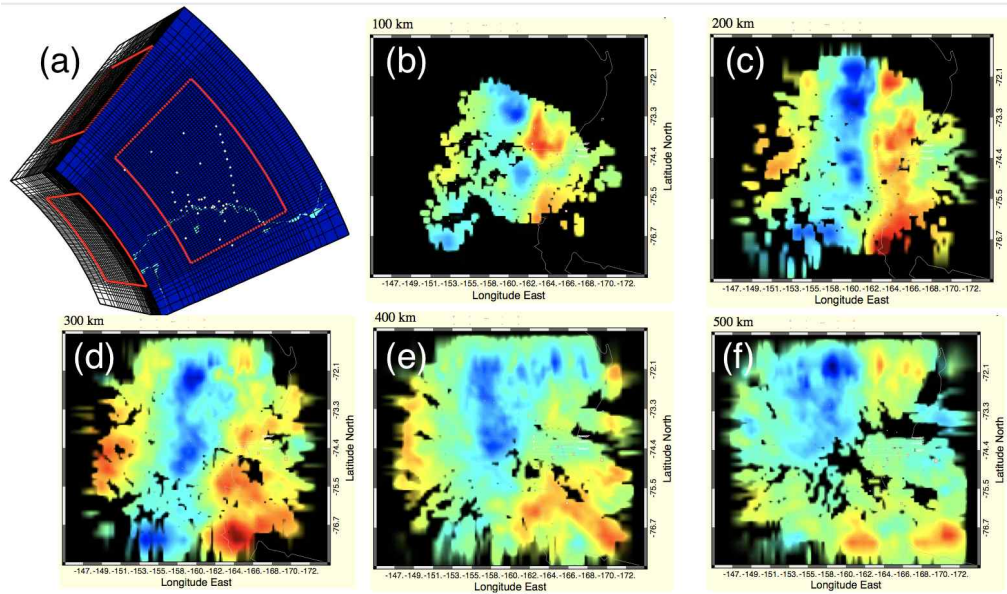


그림 3.62. 극지연구소 자료와 TAMNNET 자료를 합하여 동시에 3차원 모델링 수행을 위한 격자구조 (a)와 모델링 결과 (b-f).

- 2017-18 남극 하계현장조사기간 중에 해저면 지진관측망 자료를 회수하여 3차원 속도 구조 모델을 Terror Rift 지역확장하여 광역적인 모델링 결과 도출 (그림 3.63)
- 멜번화산과 리트만화산 지역에 100 km 깊이에서 강한 저속도층 발견하였고, 이는 화산활동의 열원으로 추정됨
- Terror Rift 하부에서 깊이 200km까지 강한 저속도이 존재하고 이는 열개구조에 의한 맨틀의 decompressional melting에 의한것으로 사료됨
- Terror Rift는 하부 맨틀에서 형성된 플룸에 의해 형성(active rift)된 것이 아니라 지각의 운동, 즉 판이 동-서 방향으로 갈라지면서 상부맨틀의 물질이 얇아진 지각으로 움직이면서 압력이 작아져서 맨틀물질이 용융되어 형성된 수동적인 열개구조(passive rift)로 사료됨 (그림 3.64.)

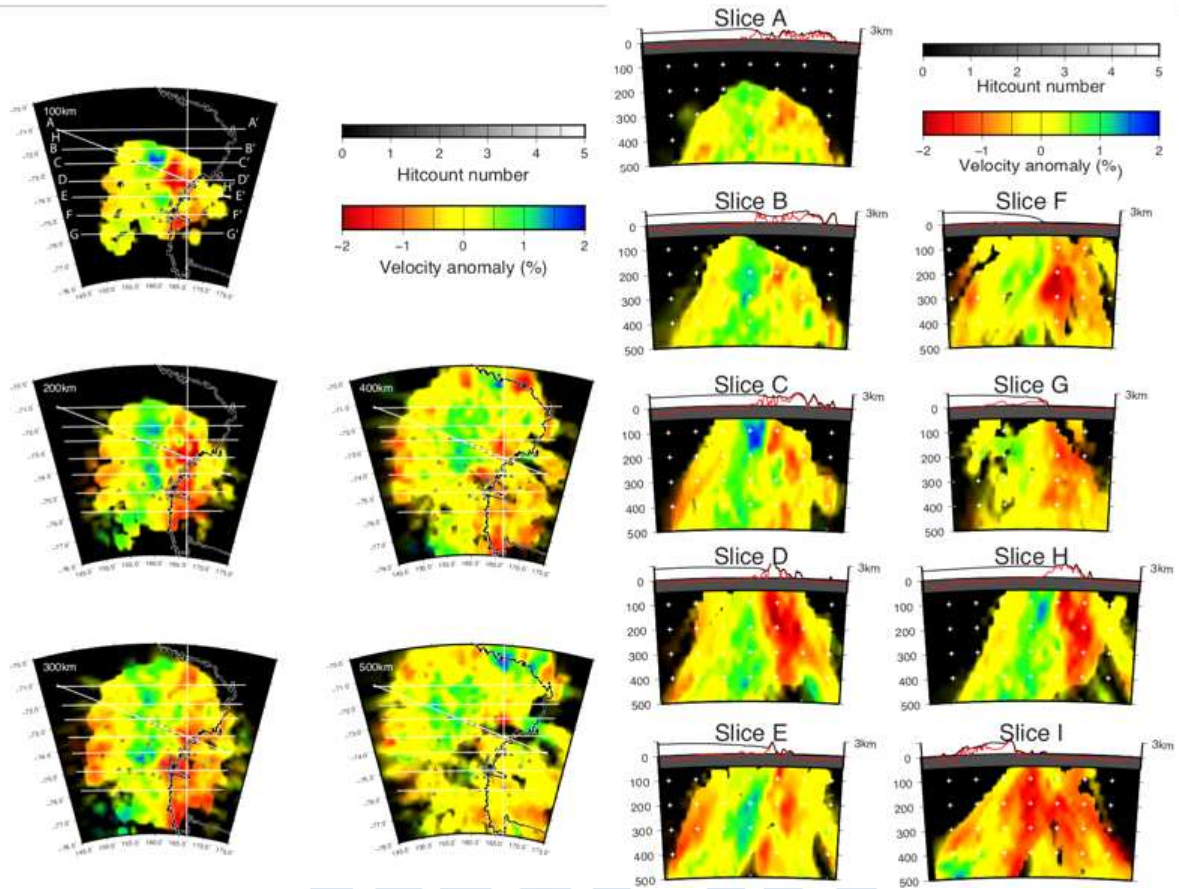


그림 3.63. 장보고 기지 기반 육상 지진관측망, 새롭게 설치된 해저면 지진관측망, 그리고 미국 TAMMNET 자료를 함께 사용한 최종적인 3차원 속도 모델. (왼쪽) 100~500km까지 100km 간격으로 수평으로 자른 속도 구조 모델. (오른쪽) 북에서 남으로 속도 모델을 수직으로 자른 단면의 속도 구조.

극지연구소

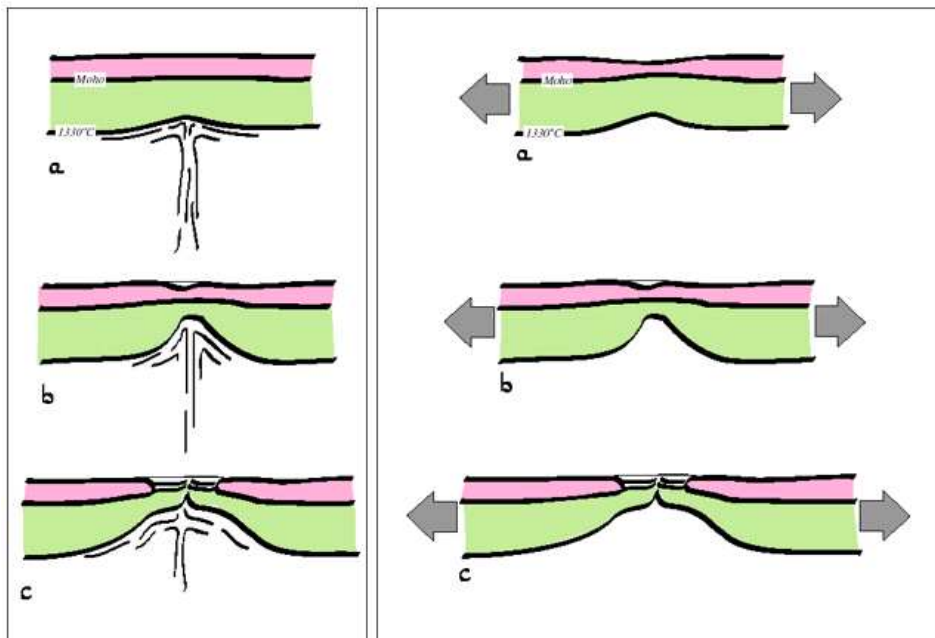


그림 3.64. (좌) 맨틀 플룸에 의한 능동적 열개구조(active rift)와 (우)판의 벌어짐에 의해서 형성되는 수동적 열개구조(passive rift)의 모식도

나. 장보고 기지 주변 지진발생도 분석

(1) 자료처리 및 해석

- 육상지진관측망에서 기록된 연속 지진자료 중에서 2016년도에 관측된 자료를 이용하여 자동 국지 지진(local earthquake) 추출
- 자동으로 국지 지진을 추출하기 위하여 파형의 진폭 Short Term Average와 Long Term Average의 비(STA/LTA)를 이용하였음
- 자동으로 추출한 지진자료를 눈으로 확인하여 다시 초동 P파의 도달 시간을 픽킹하여 진원의 위치와 규모 산정
- 규모식은 리히터 국지 규모식(Richter local magnitude: ML)를 사용하여 산정하였음
- 진원의 위치는 NonLinLoc software에서 제공하는 Metropolis-Gibbs Sampling Algorithm를 사용하였음

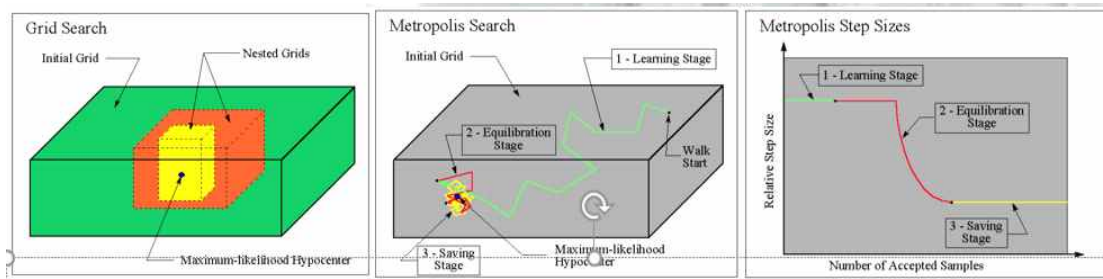


그림 3.65. 설정된 Grid에서 Metropolis search를 사용하여 진원이 결정되는 모식도

- 자동으로 결정된 9,000여개의 지진원들은 manual picking을 통하여 최종적으로 2,699개의 지진원을 결정하였음
- 지진원의 위치에 따라 데이비드 빙하(David Glacier)와 멜번화산(Mt. Melbourne)으로 나누어 지진발생도 분석 수행

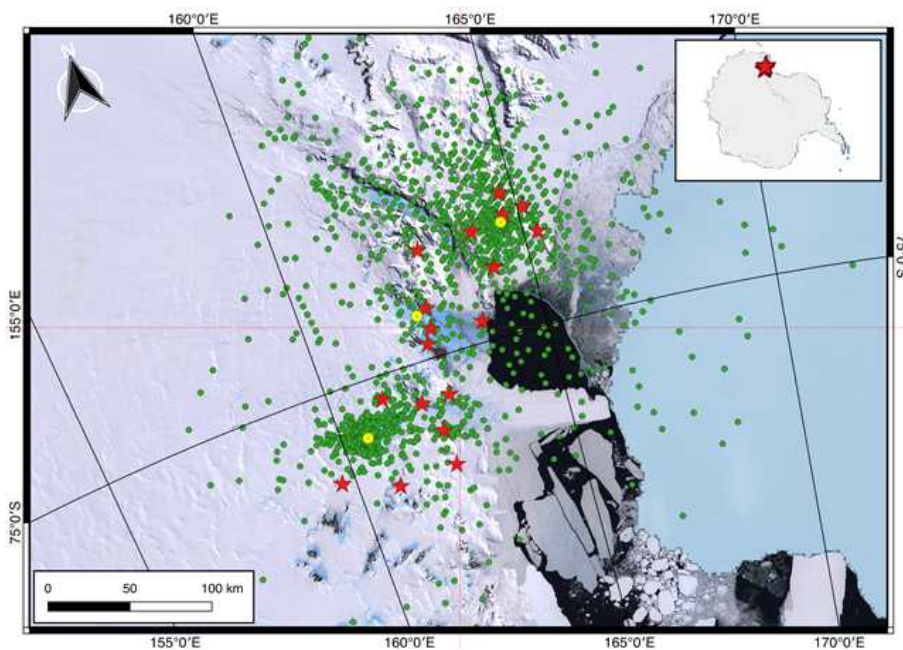


그림 3.66. 2016년도에 관측된 자료중 manual picking으로 진원의 위치가 결정된 2,699개의 지진 발생도(초록색 원)와 지진 관측망 위치(붉은 별)

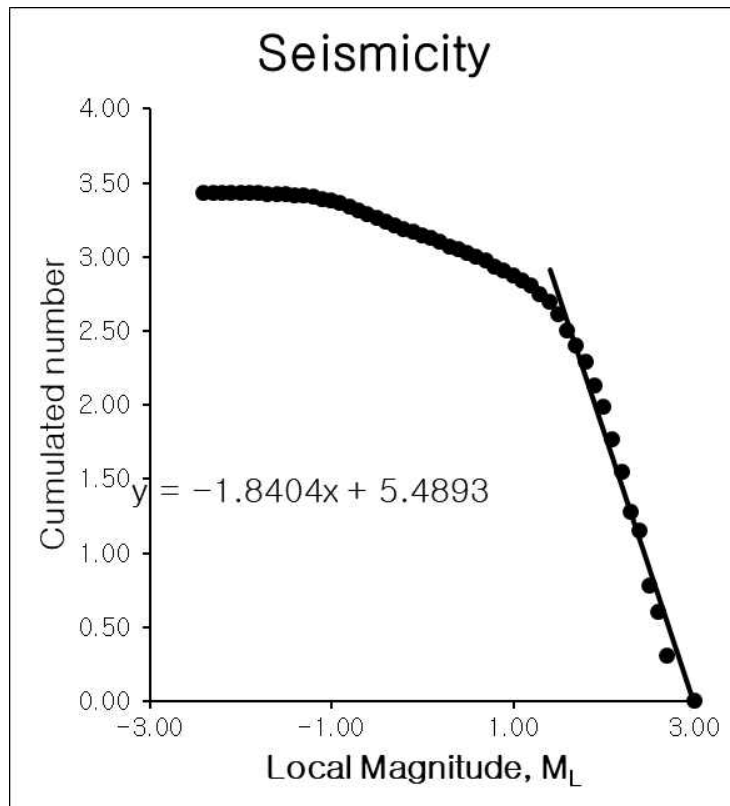


그림 3.67. 모든 지진자료에 대한 Gutenberg-Richter 식. 지진목록의 완성도 규모는 1.5이며 일반적인 b값(~1)보다는 큰 1.84의 값을 보임

- 데이비드 빙하에서 발생한 지진은 대부분 빙하 상류에서 빙하의 흐름이 끊어지는 곳에서 관측됨 (그림 3.68.)
- 이는 데이비드 빙하의 흐름이 기하학적으로 끊어지면서 빙하와 지표가 접촉하는 부분에서 지진파를 발생하는 것으로 사료됨

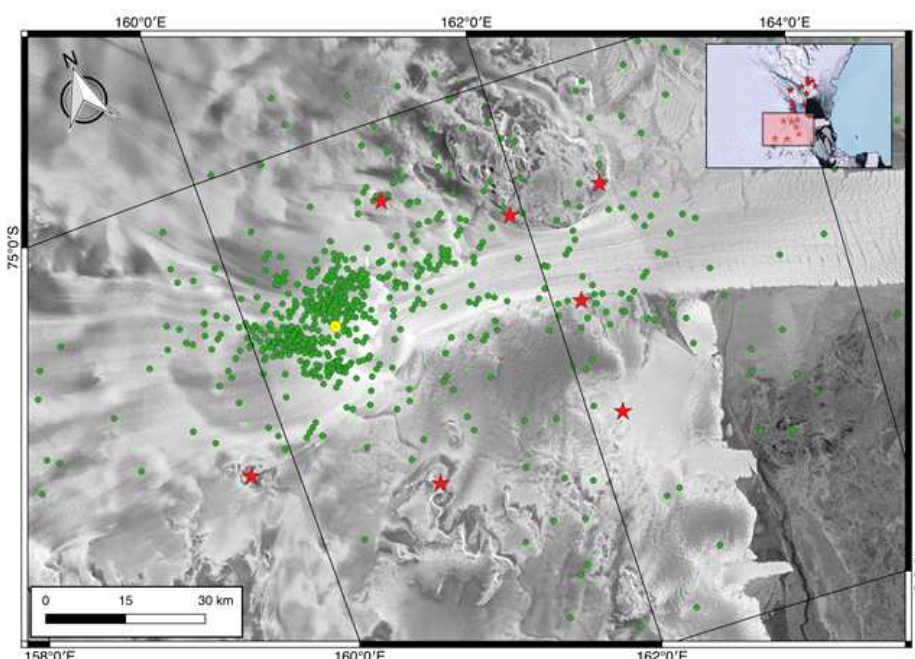


그림 3.68. 데이비드 빙하에서 발생하는 지진원의 위치

- 멜번화산에서 발생하는 지진은 대체로 10Hz이하의 저주파의 지폭이 크게 나타남
- 이는 일반적인 단층에 의한 지진과 발생이 아닌 멜번화산 하부에 존재하는 마그마의 이동으로 발생하는 저주파수 지진원인 것으로 판단됨 (그림 3.69.)

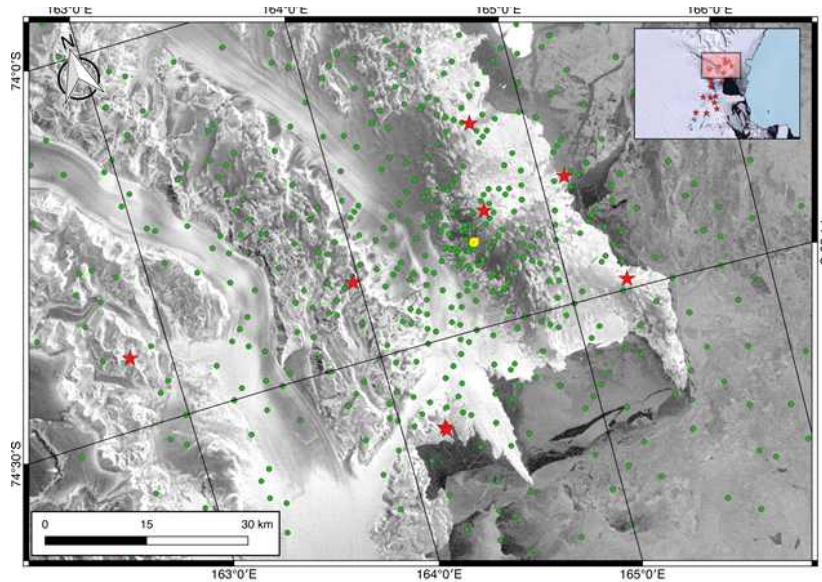


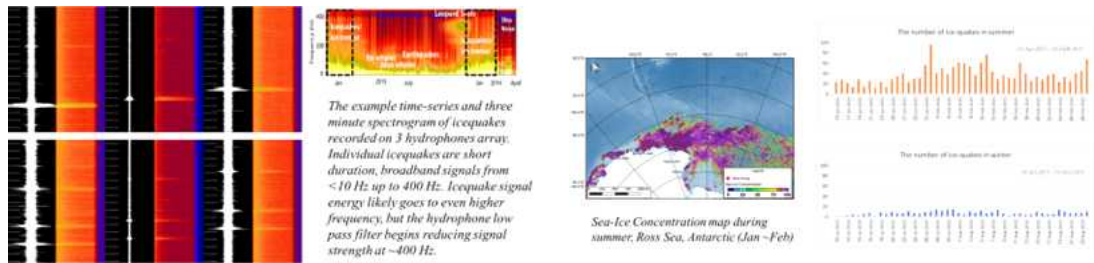
그림 3.69. 멜번화산 주변에서 발생하는 지진원의 위치

2. 서남극 열개구조의 진화에 따른 지체구조 및 퇴적구조의 변화 연구

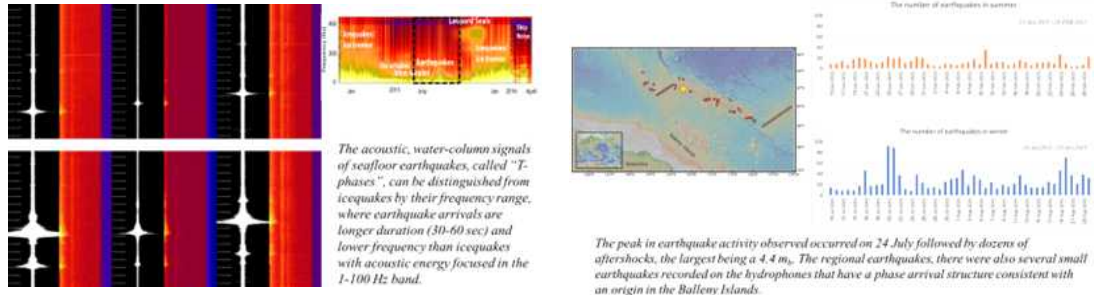
가. 발레니 군도 인근 해역에서의 지진활동성 및 빙권거동 관측

(1) 자료처리 및 해석

- 이전 단계 과제수행을 통해 2016년 획득한 3개 채널에 대한 수중음향 자료분석 수행
- 해당 자료는 2015년 1월에서 2016년 2월까지 약 1년간 로스해 북서부에 위치한 발레니 군도(Balleny Islands) 인근에서 발생한 빙권의 거동과 중앙해령인근에서 발생하는 미세지진에 대한 기록을 포함함
- 획득된 자료에 대한 주파수 스펙트럼 분석을 통해 해당지역에서의 지진활동성 및 빙권거동 관측
- 빙권의 거동이 활발한 남극의 여름에 해당하는 2월에 가장 활발한 icequake 활동성을 보여주고 있으며, 중앙해령 인근에서의 화산활동에 의한 다양한 지진현상이 보고된 지진 발생시간 전후로 수중음향에서도 관측되고 있음을 확인(그림 3.70.)
- 분석결과는 2017년 6월 '17 Ocean MTS/IEEE' 학회에서 발표되었으며, 이는 해당 저널에서 논문으로 발간
- 2015년 9월 16일 칠레 인근 해상에서 발생한 대규모 8.3 쓰나미에 대한 수중음향 신호 분석을 수행하고 대규모 쓰나미 혹은 지진현상이 남극빙권에 어떠한 영향을 미치는지에 대한 분석 수행 중



<계절별 빙권거동 및 Ice-Quake 발생 특성 분석>



<대규모 지진 관측 및 T-phase 신호분석 수행>

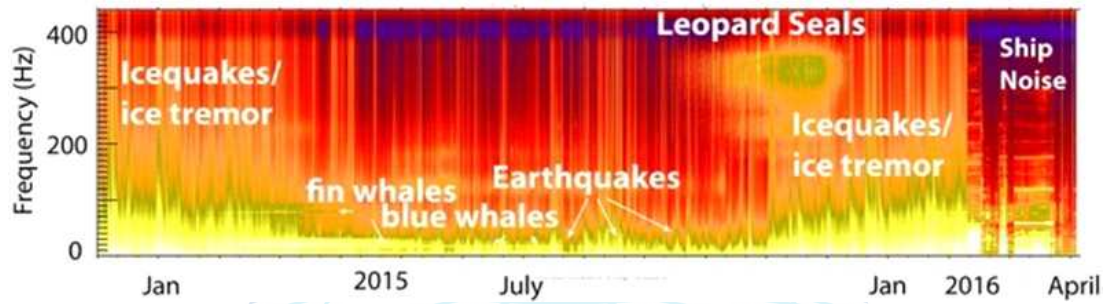


그림 3.70. 발레니 군도 인근에서 획득한 3개 채널 수중음향 자료 분석 (주파수 스펙트럼)

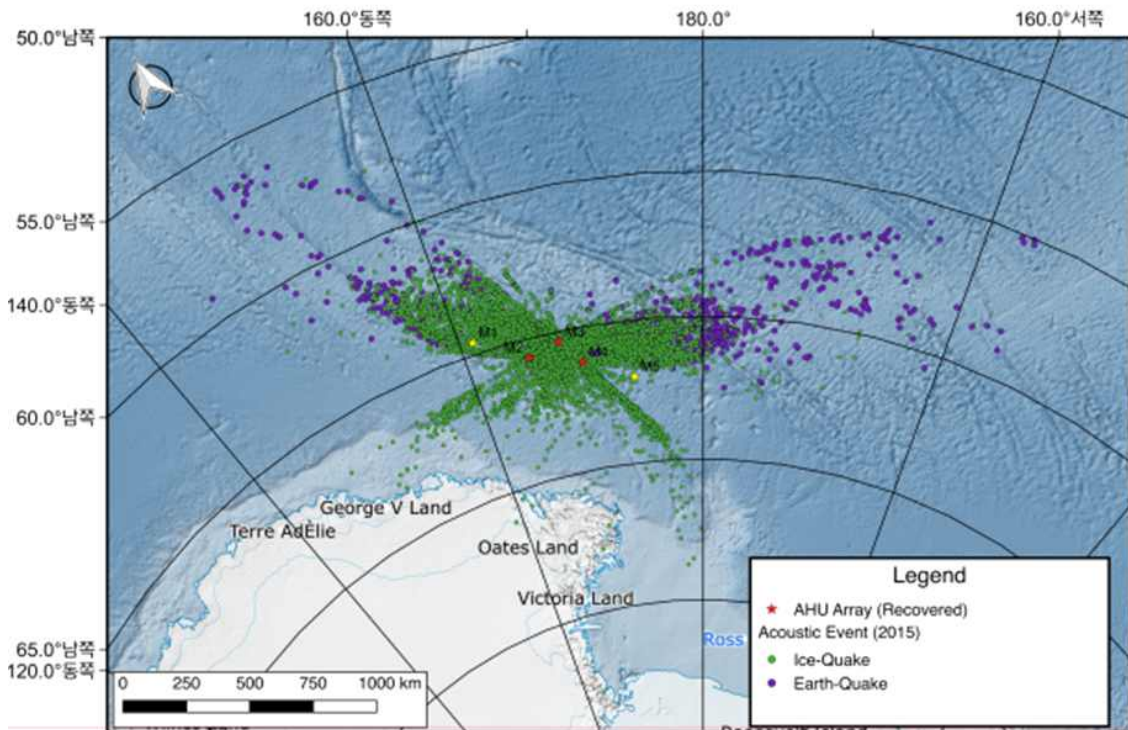


그림 3.71. 수중음파 관측망에서 관측된 빙하와 지진신호 위치(총 14,182개 신호관측: 빙하신호 13,466개, 지진신호: 711개, 알 수 없는 음원: 5개)

나. Terror Rift 심부 지체구조 규명

(1) 다중채널 탄성과 탐사자료 해석

- 획득한 자료는 서남극 로스해 서쪽 끝에 위치한 Terror Rift를 가로지르는 2개의 라인으로 구성되며, 1번 측선에 대한 층서 및 지층구조에 대한 해석을 수행
- 탄성과 탐사자료를 통해 해당 지역에 분포하고 있는 다중 단층지역과 Rift구조를 확인할 수 있었으며, 층서해석을 통해 해당지역에 나타나는 지층의 연대와 서남극 열개구조활동에 의해 변형된 지층구조를 규명하는 연구 수행
- 단층지역에서는 대부분 정단층이 나타나며 단층각은 60-90°로 arc구조에 집중되어 분포됨을 확인할 수 있음
- 현재까지 총 1개 라인에 대한 분석을 완료한 상태이며 이를 통해 해당지역에 분포하는 Terror Rift, Lee Arc 구조를 확인하였고, 이에 수반되는 정단층과 퇴적층서를 규명
- 해당 지역 인근에서 획득된 추가 스파커 탄성과 탐사자료를 결합하여 Terror Rift 구조의 광역적인 분포와 양상을 규명하는 연구 수행

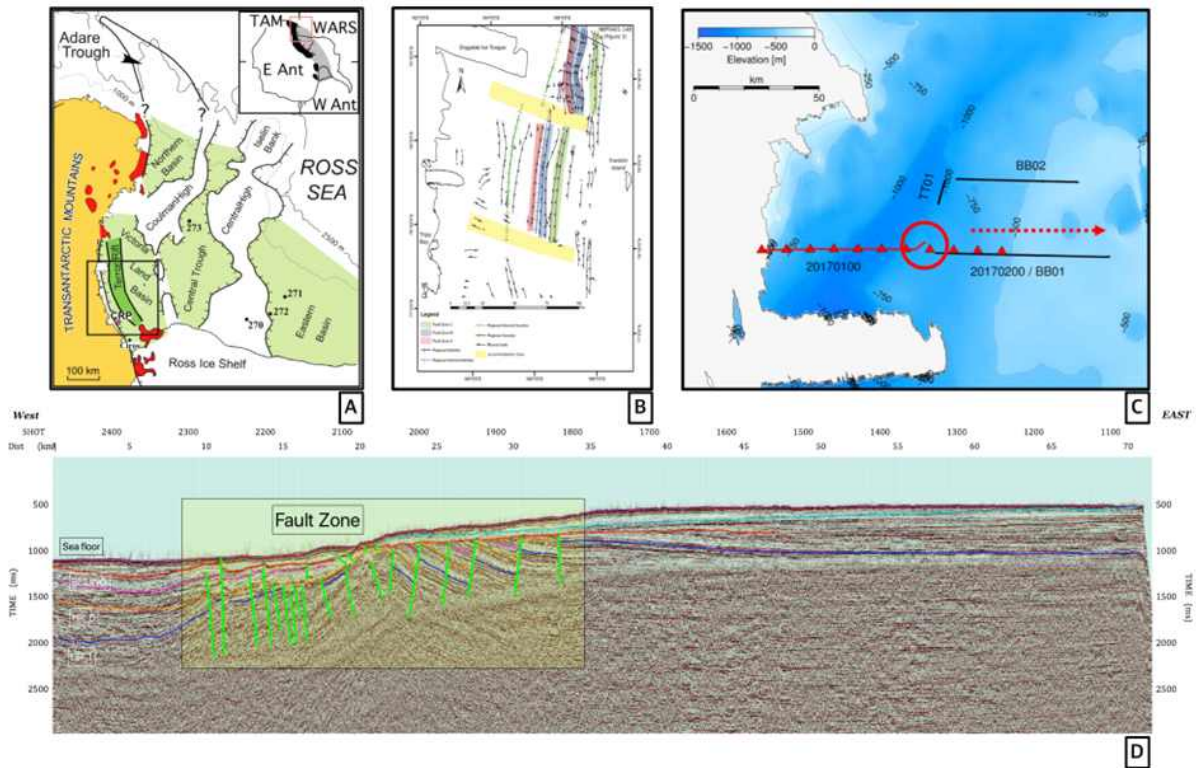


그림 3.72. 서남극 Terror Rift 지역 지질도(Cooper et al., 1987; Hall et al., 2007) 및 탄성파 기초 해석도

(2) 단일채널 탄성과 탐사자료 해석

- 남극 로스해 Victoria Land 분지에 위치한 Terror Rift 구조를 대상으로 총 9개 측선(남극 장보고 기지와 Drygalski Ice Tongue 사이 지역 서쪽에 분포하고 있는 Terror Rift 구조를 탐사할 수 있는 측선과 Nansen 빙봉 인근에서의 빙권 거동을 추적해 낼 수 있는 측선으로 구성), 약 400 L-km의 단일채널 스파커 탐사자료 획득

- 남극 로스해 Victoria Land 분지에 위치한 Terror Rift 구조를 대상으로 획득한 단일채널 탄성과 탐사자료는 탐사장비의 특성상 속도분석 및 중합 그리고 구조 보정 등 일반적인 자료처리 기법을 적용하여 고해상도 단면의 구성이 불가함에 따라 기본적인 주파수 필터링과 노이즈 뮤팅을 통해 단면을 구축
- 스파커 자료의 특성상 천부지층 정보(해저면 아래 최대 400 m)에 해당하는 퇴적층서 및 지체구조 확인

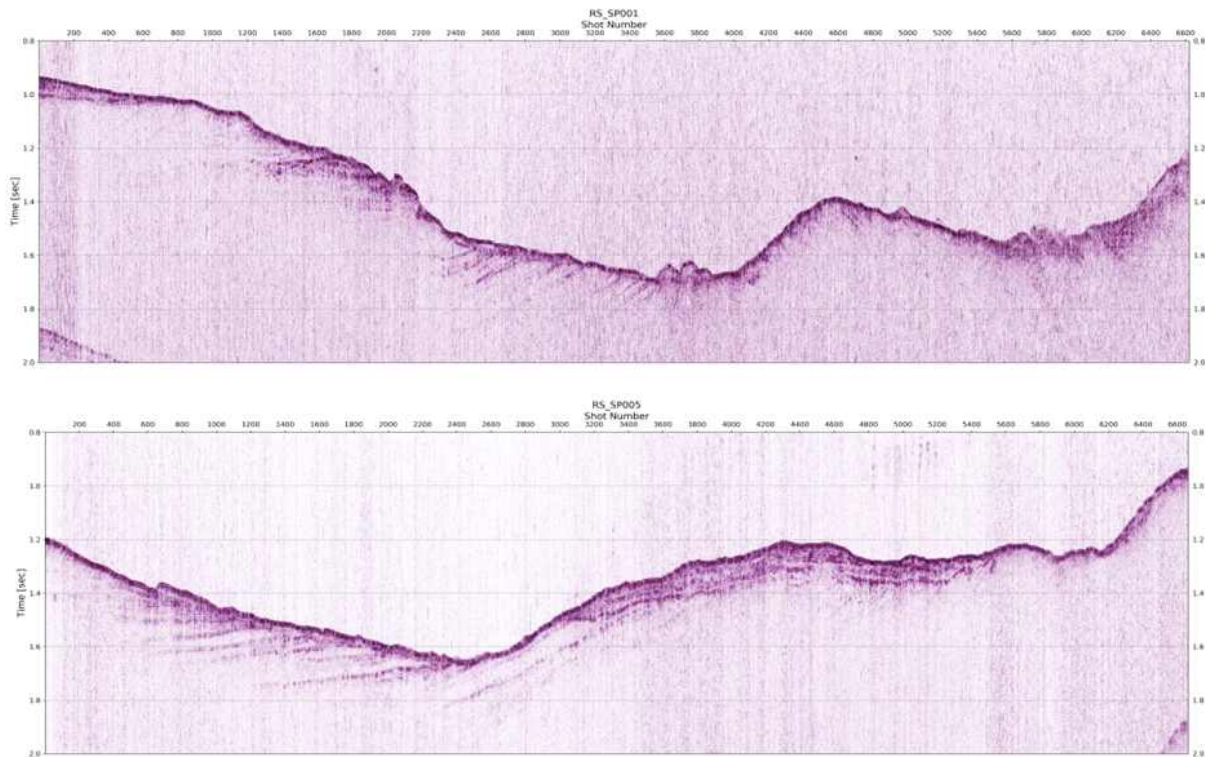


그림 3.73. Terror Rift의 서편에서 획득된 스파커 탄성파 단면도. (위) RS_SP001 (아래) RS_SP001 탐사측선

다. 북서부 로스해 외대륙 주변부의 심부지체구조 및 퇴적층서 분석

(1) Central Basin의 지체구조도 및 탄성과층서분석도 작성

- 쇄빙연구선 아라온을 이용하여 로스해 북서부 대륙사면에 위치한 Central Basin 인근해역에서 다채널 탄성과 탐사자료를 획득 후, 연구협력을 통해 기존 신생대 탄성과 층서분석 결과(ANTOSTRAT Project)를 Cental Basin으로 연장
- 남극 로스해 외대륙 경계부 중 기존 연구가 수행되지 않은 북서부 외대륙 주변부의 Central Basin 인근 해역에 대한 층서 분석을 수행
- 탄성과 층서 분석을 통해 복원한 고해저지형 및 퇴적층 분포에서 북서부 로스해의 주요 빙하 침식곡인 Joides Basin과 Drygalski Basin사이에서의 대륙붕단의 변화 및 퇴적중심부의 이동경향의 차이가 관찰 됨
- 북서부 로스해 대륙경계부에 위치한 JOIDES Basin에서는 중기 마이오세 이후 형성된 전진구축 퇴적체(그림 3.74.)와 대륙붕단의 진출 및 대륙붕단의 전방에 위치한 퇴적중심부가 관찰됨(그림 3.75.)

- 반면 인근에 위치한 Drygalski Basin-Adare Basin 지역에서는 대륙붕단의 진출이 상대적으로 적고, 퇴적중심부가 대륙붕단의 후방에 위치함
- 이를 통해 JOIDES Basin에 진출한 빙상은 빙하기-간빙기 시기에 Drygalski Basin에서 보다 안정적이었던 것으로 추정
- Joides Basin과 Drygalski Basin에서 나타나는 퇴적경향의 차이는 침식곡을 따라 진출과 후퇴를 반복하였던 빙하의 발달 특성을 반영한 것으로 추정되며, 이는 두 침식곡의 고해저지형, 빙하하부 퇴적층의 지질, 퇴적물 공급 및 서남극 열개구조의 진화과정에서 Joides Basin과 Drygalski Basin의 순차적인 형성에 의한 열적 침강률의 차이 등 복합적인 요인에 영향을 받은 것으로 추정 됨
- 탄성과 탐사자료에서 관찰되는 음향기반암을 기존 자료와 결합하여 보다 자세한 지체구조도를 작성함(그림 3.76.)
- 추가 탄성과 탐사자료 및 중·자력탐사자료 획득을 통해 아직 연구가 부족한 서남극 열개구조 진화과정 중 Central Basin의 발달 특성 및 시기에 대한 연구 수행에 기여할 수 있음

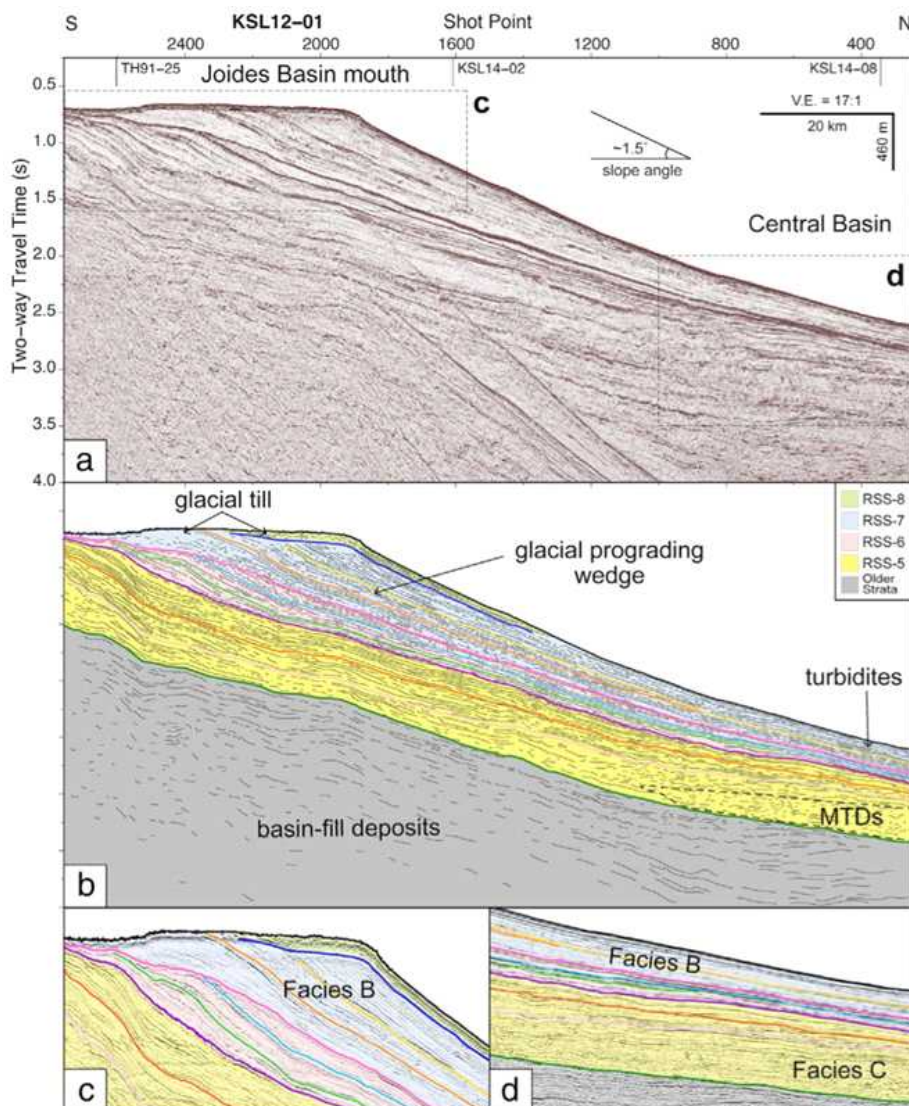


그림 3.74. 북서부 로스해 JOIDES Trough에 형성된 전진구축 퇴적체(Kim et al., 2018).

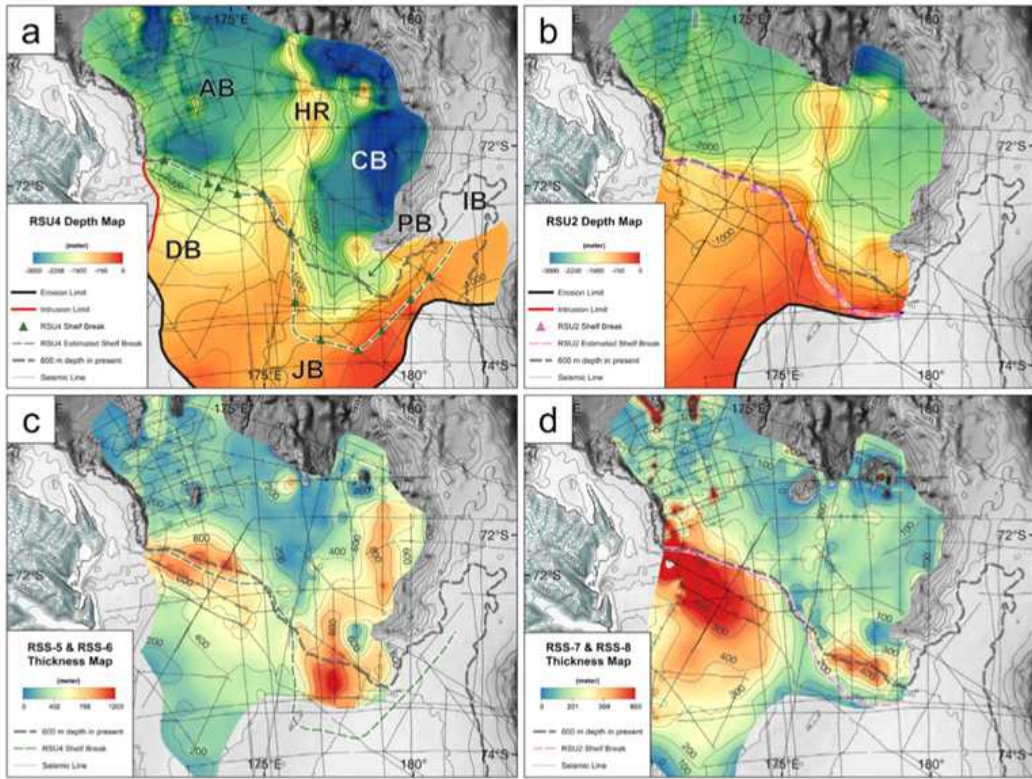


그림 3.75. 남극 로스해 북서부 (a) 중기 마이오세, (b) 후기 플라이오세 고해저지형도. (c) 후기 마이오세-초기 플라이오세, (d) 플라이오세-4기 퇴적물 분포도(Kim et al., 2018).

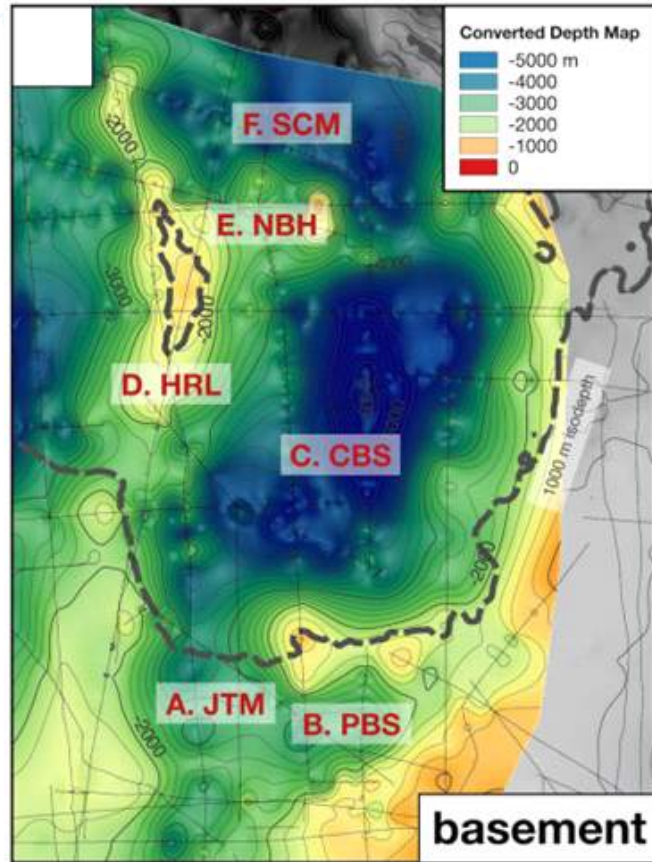


그림 3.76. 남극 북서부 로스해 대륙경계부 Central Basin의 음향기반암 구조도(Kim et al., unpublished).

- (2) ANA09C 다중채널 탄성과 자료처리(다중반사파 및 잡음 제거) 및 구조보정 단면획득
- 로스해 북서부 외대륙 주변부에서 수행된 탄성과 층서 및 심부지체 구조 연구결과를 보강하기 위해 2018-2019 남극 하계탐사기간 동안 획득된 ANA09C 탄성과 탐사자료에 대한 정밀 자료처리 수행
 - 소내 구축된 Schlumberger Omega II 시스템을 활용하여 탐사자료에 기록된 다중반사파 및 주기적으로 존재하는 고진폭의 잡음 제거 수행
 - 2018-2019 남극 3항차에서 획득한 탄성과 탐사자료의 경우 아래 그림과 같이 주기적인 약한 진폭이 기록됨을 확인

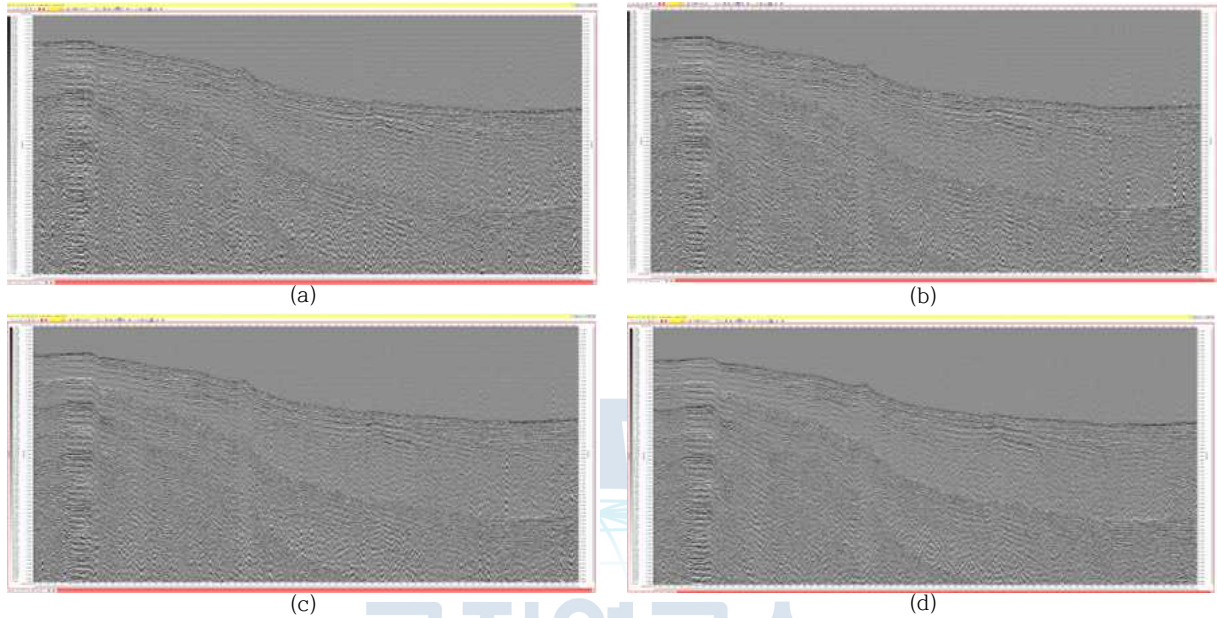


그림 3.77. ANA09C 탄성과 공통채널 모음 자료 (a) 채널 #1, (b) 채널 #10, (c) 채널 #20, (d) 채널 #50.

- 전처리 과정에서 확인한 약한 진폭구간을 보정하기 위해 탄성과 자료에 순간 진폭보정 기법을 적용하여 모든 트레이스를 같은 진폭으로 보정
- 보정승수에 Trim mean 필터를 적용하여 정상적인 진폭의 보정 승수와 맞도록 수정
- 전용 소프트웨어인 Omega II에 탑재된 AAA모듈을 이용하여 잡음제거 및 속도 분석-중합단면 구축(그림 3.78.)

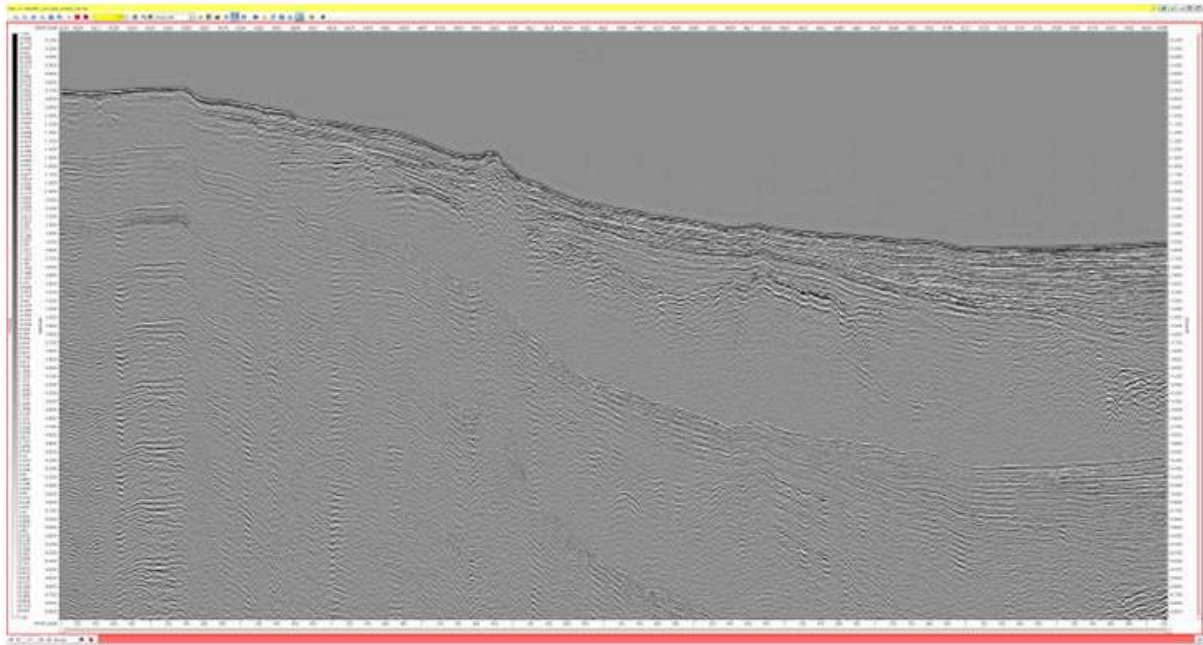


그림 3.78. 진폭보정 후 정밀 속도분석 및 중합을 통해 획득한 탄성파 단면

- 정확한 해저지층 및 지구조 해석이 가능하도록 중합단면상에 나타나는 겹반사파 이벤트를 제거 및 구조보정 단면 구축(Seismic Omega2에 탑재된 SRME, 라돈 겹반사파 제거, Mazap을 적용하여 겹반사파를 제거, Kirchhoff 중합 전 구조보정 모듈을 통한 구조보정)

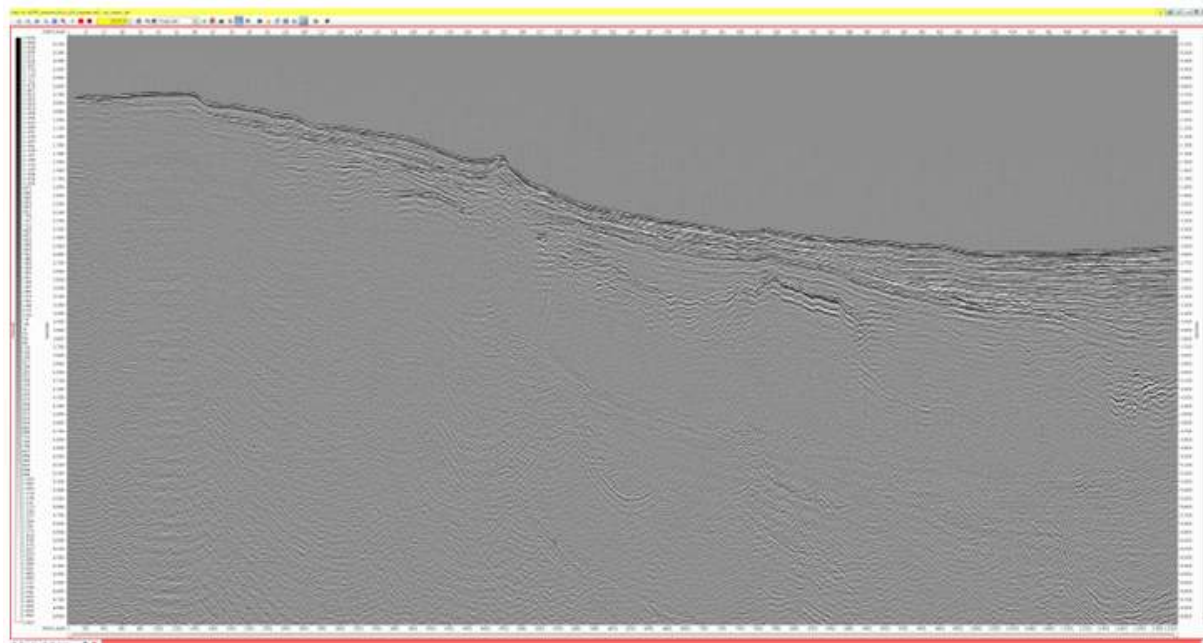


그림 3.79. 최종 구조보정 단면도

(3) ANA09C 다채널 탄성파 탐사자료 분석

- Central Basin을 경계짓는 Hallett Ridge와 Iselin Bank의 음향기반암 확인 및 Central Basin 중심부에서 해저면 하부 약 3 km에 위치한 심부 퇴적구조 및 음향기반암 확인

- Central Basin 북부에서 자력탐사 1개 측선 확보 및 탐사자료가 부족한 Iselin Bank 서부 사면에 대한 추가 탄성과 탐사자료, 천부지층탐사자료 및 다중빔 해저지형 탐사자료 확보
- 탄성과 단면을 기존 탐사자료 및 자력탐사 자료 분석 결과와 결합하여, Central Basin에 대한 지체구조 분석, 분지 해석 및 퇴적 프로세스, 퇴적환경 변화 및 복원 연구수행

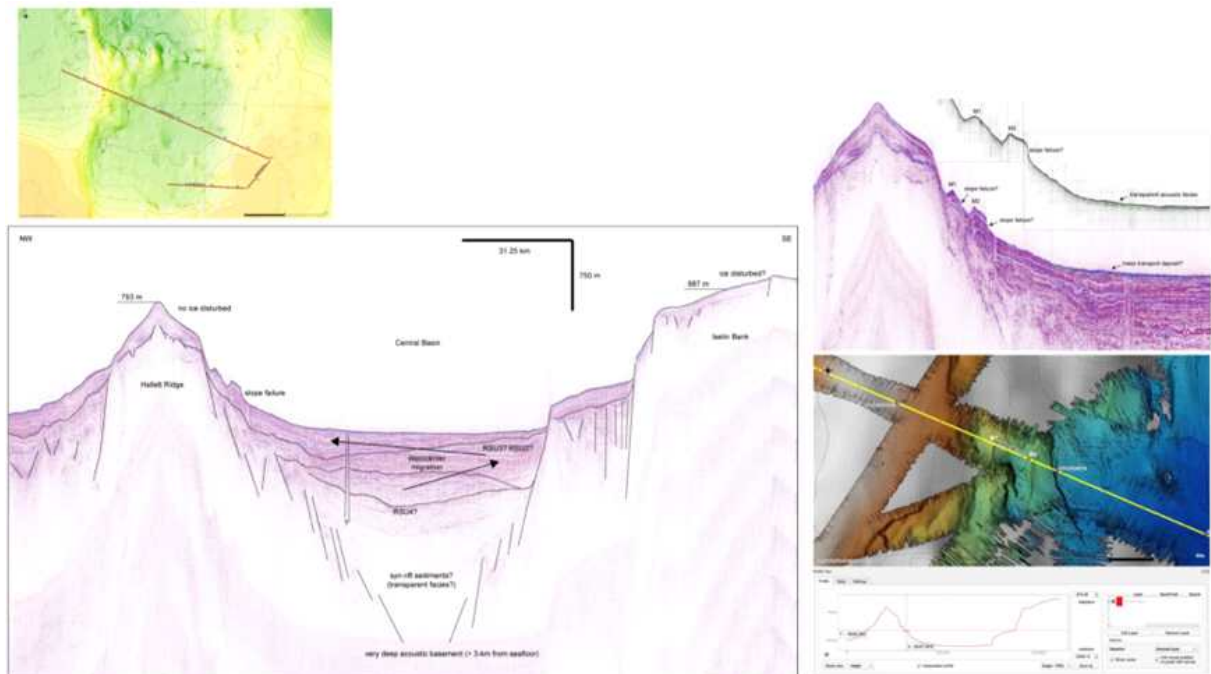


그림 3.80. ANA09C 탄성과 탐사자료에서 관찰되는 음향기반암, 심부지체구조 및 퇴적층서의 발달 경향

3. Terror Rift 및 Central Basin에서의 지자기 이상 규명

가. 남극 로스해 Terror Rift 북부에서의 해양자력탐사 수행 (ANA08C)

- (1) 연구지역: 남극 로스해, 장보고 과학기지 인근의 Terror Rift 북부 해역에서 약 55 km 길이의 측선에 대하여 해양자력탐사를 수행하였음 (그림 3.81.)

* 최초로 계획하였던 남극 로스해 북부, Central Basin에 대한 측선 길이 약 200 km의 해양자력탐사는 아라온 선내에서의 환자 발생 등 예기치 못한 변수에 의해 충분한 시간을 확보하지 못하였음

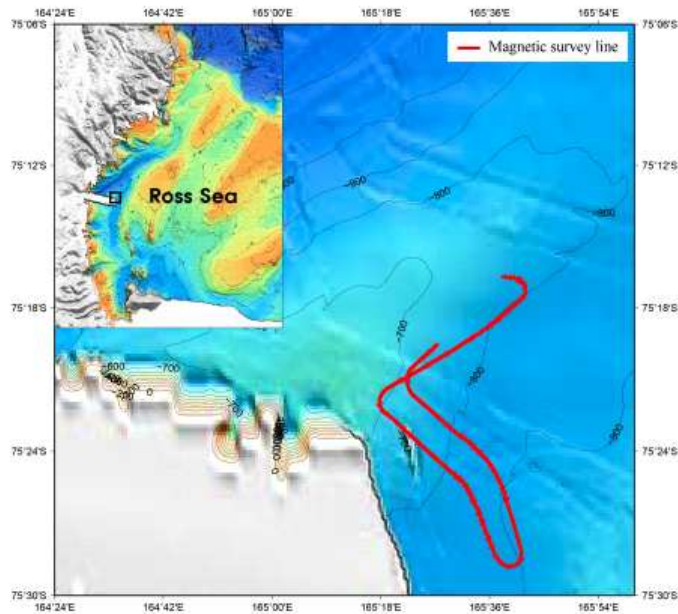


그림 3.81. ANA08C 항차(2018.03)에서 남극 장보고 과학기지 인근 해역에 대해 수행한 해양자력탐사의 측선(red line).

(2) 연구결과

- 획득된 자력데이터는 데이터 보정 등의 작업을 거쳐 지자기 이상으로 계산되었으며, 계산된 값에 따르면 탐사지역 전체는 음의 지자기 이상을 띄고 있음을 확인함 (그림 3.82.)
- 하지만 좁은 구간 내에서의 지자기 변화라는 한계를 가지고 있기 때문에 지구조적·지질학적 의미를 부여하기 위해서는 보다 광역적인 데이터의 획득이 필요할 것으로 생각됨
- 탐사지역 전체에서 보이는 음의 지자기 이상의 변화폭(amplitude)은 약 20~40 nT로써, 일반적인 해양지각에서의 지자기 이상 변화에 비해 상대적으로 매우 작는데, 이는 이 지역을 구성하는 지각의 많은 부분이 맨틀로부터 기원한 해양지각이 아닌 대륙지각으로 추정할 수 있으며, 이 또한 광역적인 지자기 데이터의 확보를 통해서 보다 정확한 분석이 가능해질 것으로 보임

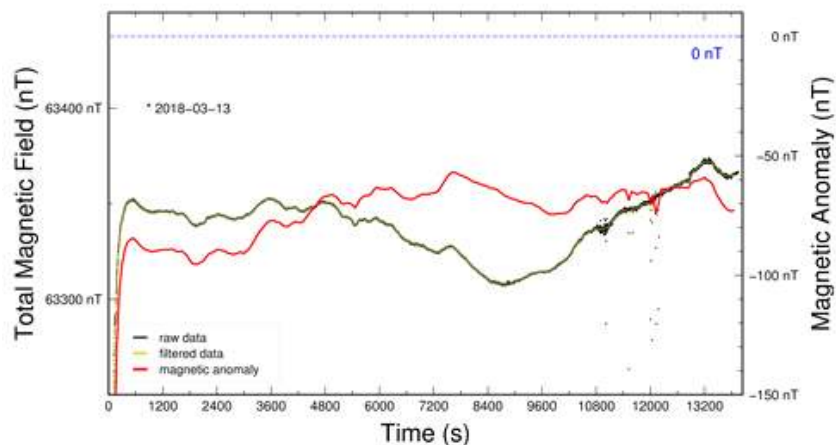


그림 3.82. 남극 장보고 과학기지 인근 해역에서 획득한 해상 지자기 데이터의 처리. 탐사지역 전체에서 음의 지자기 이상 (red line)이 나타나고 있음

나. 남극 로스해 북부 Central Basin에서의 해양자력탐사 수행 (ANA09C)

(1) 연구지역: 남극 로스해 북부, Central Basin에서 서남극 열개구조의 확장축으로 추정되는 방향과 직교(=Adare Trough 등 북부 로스해의 확장 방향)하는 긴 탐사축선에 대해 탄성과 탐사와 함께 해양자력탐사를 수행하였음 (그림 3.83.)

(2) 연구결과

- 남극 로스해 북부, Iselin Bank의 서편에 위치한 Central Basin에 대해서 정밀 해저면 지형자료와 함께 세계 최초의 지자기 이상 데이터를 확보하였음 (그림 3.83.)

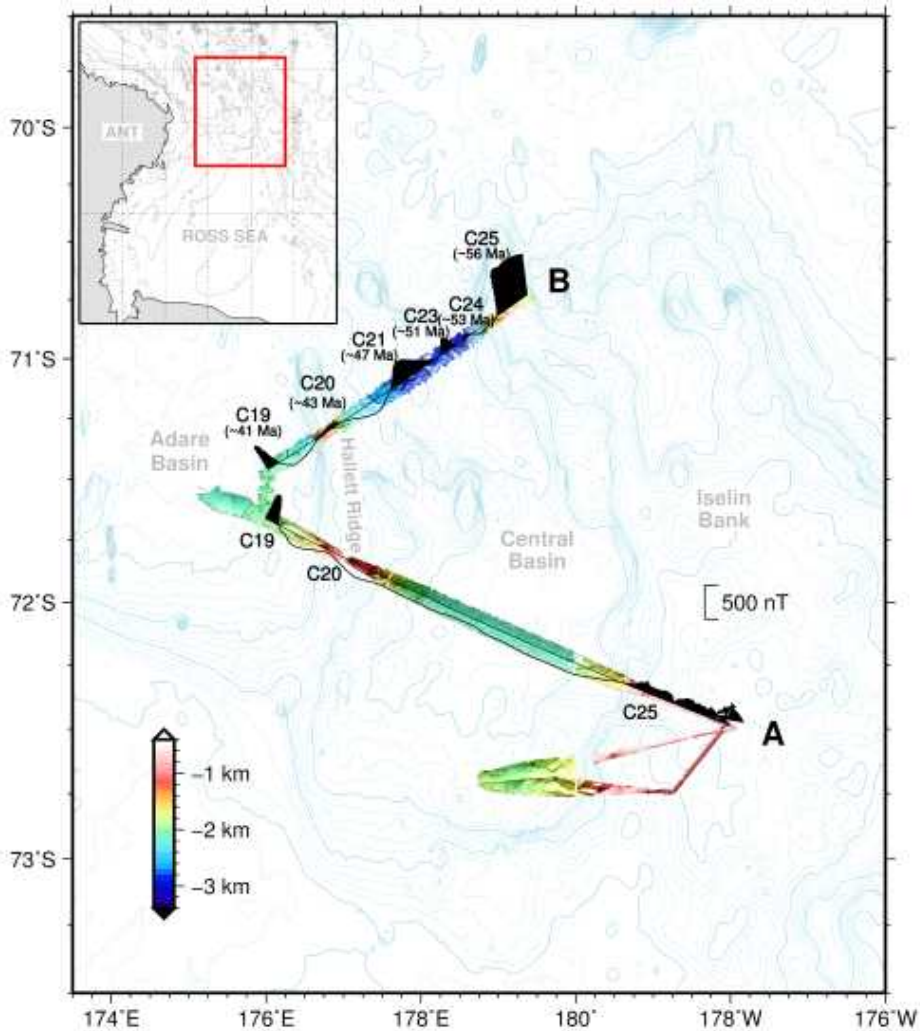


그림 3.83. ANA09C 항차를 통해 Central Basin 일대에서 획득한 지형 및 해양 지자기 이상(black lines)

- 지자기 데이터가 없었던 Central Basin의 생성 및 확장 시기는 주변의 지자기 데이터 분포와 글로벌 판구조 모델 등을 통해 대략 61~53 Ma 시기로 추정되어 왔으나 (Cande et al., 2000; Cande and Stock, 2004; Wilson and Luyendyk, 2009), 축선 B를 따라 획득한 지자기 데이터에 대한 모델링 결과, 그보다 이른 시기인 약 53~43 Ma 시기에 Central Basin이 생성된 것으로 추정됨 (그림 3.84.)

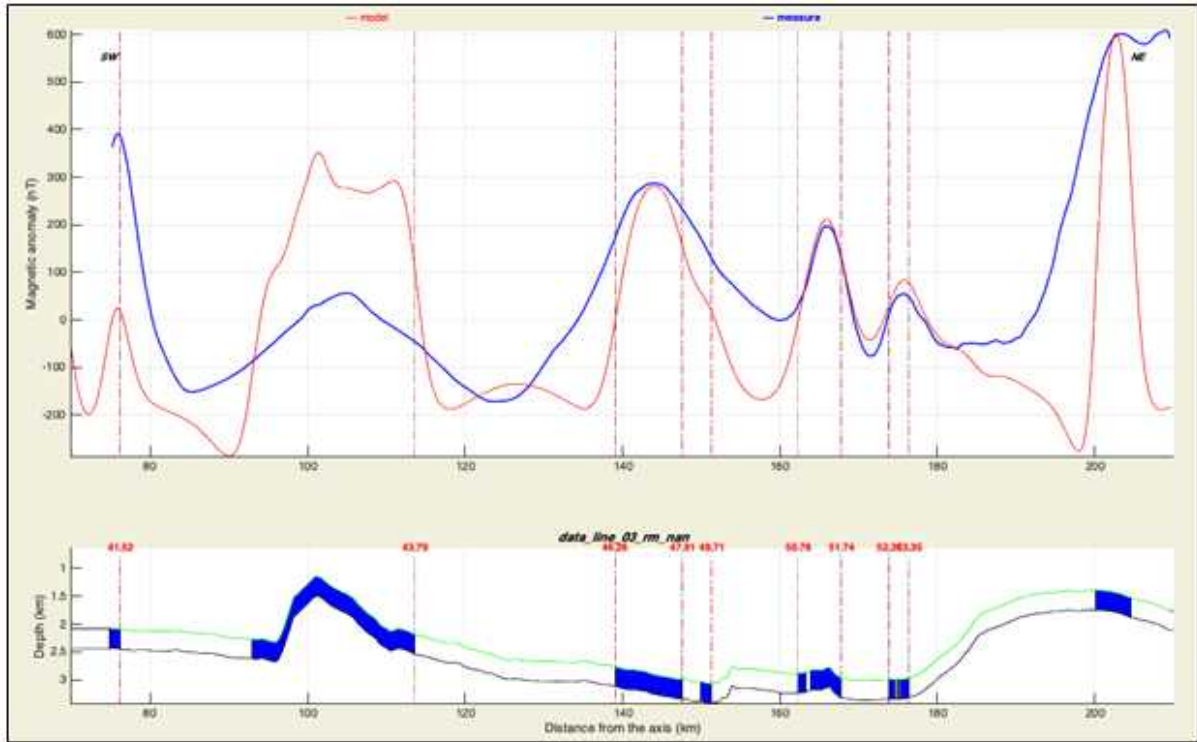


그림 3.84. ANA09C 항차에서 탐사 측선 B를 따라서 획득한 지자기 데이터에 대한 모델링. Central Basin의 북부 지역은 약 53~43 Ma 시기에 생성 및 확장된 것으로 추정됨

- Central Basin 남부의 탐사 측선 A에 대한 지자기 데이터에서는 Central Basin 북부의 측선 B에서의 데이터와 비교해 볼 때, 해양지각의 대표적인 특성인 지자기 이상 변화가 Central Basin 내부에서 거의 관측되지 않으며, 이는 측선 A가 위치한 Central Basin의 남쪽 지역은 해양지각이 아닌 것으로 추정됨. 즉, 측선 A와 B 사이에 대륙지각 및 해양지각의 경계가 있을 것으로 생각되며, Central Basin 북부의 해양지각이 생성되면서 남부의 대륙지각에 균열(rift)이 생기면서 함께 확장이 이루어진 것으로 추정함
- 위의 지자기 이상 및 모델링 결과를 바탕으로 동남극 및 서남극 간의 상대적인 운동과 북부 로스해의 판구조적 진화과정에 대한 연구를 계속해서 진행중

4. 해양지열관측과 모델링을 바탕으로 한 WARS의 끝단 형성 과정 모사

가. Adare Basin 해양 지열 자료를 이용한 열개구조 모델링

(1) 연구의 중요성

- 신생대 동안 동-서남극 판이 리프팅(rifting)되며 해양지각이 만들어진 유일한 지역이 Adare Basin (Cande et al., 2000). Adare Basin이 WARS의 북쪽 끝단이며, 그 남쪽으로 역시 WARS에 해당하는 Terror Rift와 Transantarctic Mountain도 형성되었음.
- WARS의 형성에 대해서 확실한 시기가 정립된 것은 아니지만, 전통적인 지질학 시각에서는 Adare Trough(Basin)의 형성이 동남극판이 Transantarctic

Mountain이 생성되게 하는 플렉서 용기를 발동시켰다는 주장도 있음 (Fitzgerald, 2002)

- Adare Basin는 인접하여 남쪽에 있는 Northern Basin과 형성시기가 동일함이 밝혀짐. 두 분지의 큰 차이점은 Adare Basin은 해양지각이 확장되어, 그리고 Northern Basin은 육상지각이 확장하여 형성된 점임 (Davey et al., 2016). 즉 이 사실은 proto-Adare Basin과 proto-Northern Basin사이에 대륙-해양 경계 (continental-ocean boundary)가 존재했음을 의미함.
- 육상지각과 해양지각이 대륙해양경계를 가로지르는 확장축을 공유하여 동시에 확장한 예는 현재의 지구상에서 발생하고 있지 않음. 일반적으로 수백만년 이상된 해양지각과 육상지각의 깊이로 총합된 강도(depth-integrated strength)를 비교하면 해양지각이 육상지각보다 더 큰 강도를 갖게 되므로, 이론적으로 같은 장력을 받는 경우 육상지각이 먼저 확장하게 됨 (Leroy et al., 2004).
- 종합하면, Adare Basin은 WARS의 한쪽 끝에 위치하여 WARS 형성 혹은 종료 지점임이 분명하나 그 시기가 지각이 정확히 밝혀지지 않는 등 WARS를 이해하는데 중요한 지역이며, 또한 대륙해양지각을 가로질러 대륙지각과 해양지각이 동시에 갈라지는 특이한 지사를 보여 대륙 갈라짐 (continental breakup)의 기작 혹은 upside-down/bottom-up 지구구조를 규명하는 데에 있어 비교할 수 없는 예제 역할을 함.

(2) 연구방법

- Adare Trough 동쪽 플랭크에서 관측한 해양지열을 바탕으로, 관측된 높은 해양지열이 하부 맨틀의 이상 고온으로 인한 것이라는 가설을 세움
- 열기계적인 3D FEM 모델을 이용하여 북쪽의 해양지각 기원의 proto-Adare Basin과 인접하여 남쪽에 위치한 대륙지각 기원의 proto-Northern Basin의 형성 과정을 모사함. 모델링의 변수는 proto-Adare Basin 하부의 맨틀 온도임 (그림 3.85.의 좌상단 모델 모식도)
- 현재의 Adare Basin 형성 기간 (20 Myrs)동안, 알려진 확장속도(5.5~7 mm/yr)와 유사한 10 mm/yr의 속도를 갖는, 대륙해양지각경계의 수직방향인 확장축을 고려함 (그림 3.85.의 좌상단 모델 모식도)
- 형성 기간 이후에 확장축을 수직으로 가로지르는 축선을 따라 해양지각쪽과 대륙지각쪽의 해양지열을 계산하여, 관측한 해양지열과 비교함.

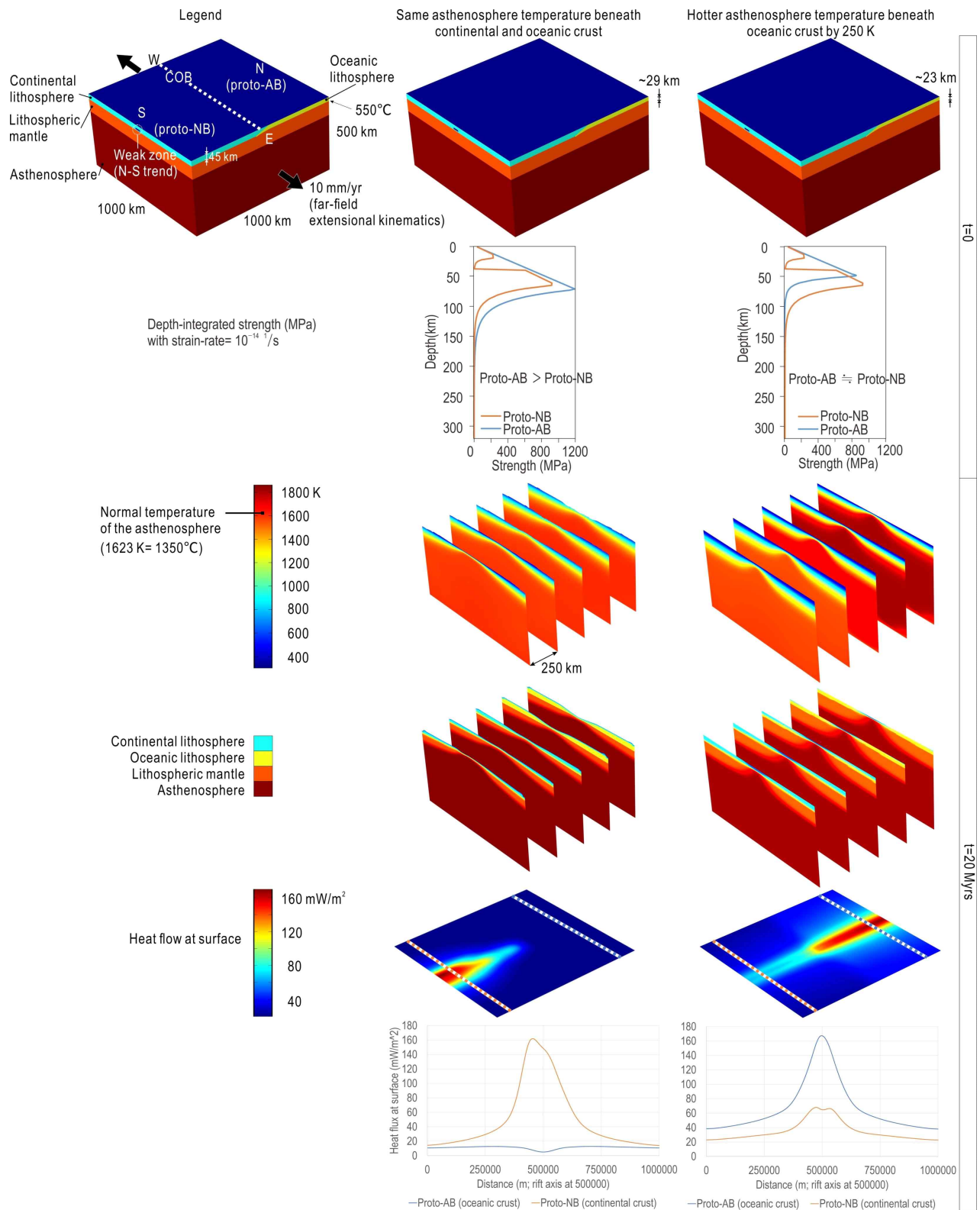


그림 3.85. 북쪽 분지(Northern Basin)과 아데어 분지가 동시 확장된 것을 모사하는 열기계적인 모델링. 두 번째 열은 하부가 일반적인 해양맨틀 온도인 경우, 세 번째 열은 하부가 200°C 정도 일반적인 해양맨틀 온도보다 높은 경우인데, 세 번째 경우가 더 실제와 부합함.

(3) 연구결과

- Adare Trough의 동쪽 플랭크에서 형성된 시기로 추산한 해양지열보다 관측한 해양지열이 20%정도 높음이 확인됨
- 해양지각인 proto-Adare Basin의 맨틀 온도가 일반적인 경우보다 200℃ 높은 경우에, 대륙지각과 해양지각이 동시에 확장되었으며, 그때 확장축을 가로지르는 측선을 따라 이론 해양지열값과 관측한 해양지열값이 비교할만큼 유사함을 확인 (그림 3.85.의 세 번째 열). proto-AB의 맨틀 온도가 250℃보다 낮은 경우에는 육상지각만 확장이 되었고, 해양지각에서 해저확장이 발생하지 않음 (그림 3.85.의 두 번째 열)

(4) 연구결론

- Adare Trough에서 형성시기보다 약 20% 높은 해양지열이 관측되었고, 이는 맨틀의 온도로 인한 현상일 가능성이 높음.
- proto-Adare Basin하부에 따뜻한 맨틀이 Late Cretaceous부터 존재하게 되었고 (Finn et al., 2005), 이로 인해 해양지각의 depth-integrated strength가 줄어들어 육상지각과 해양지각의 강도 차이가 상당히 줄어들었음.
- proto-Adare Basin하부에 일반적인 경우보다 약 200℃ 높은 경우에 실제 현상과 비슷한 동시성 해양지각-육상지각 확장이 발생하였으며, 그 외의 온도조건에서는 실제 현상과 다른 모습들이 재현되었음.
- 현재 지구상에서는 육상해양지각경계를 가로질러 동시성 확장이 발생하는 경우가 없기 때문에, 연구지역은 대륙 분리(continental breakup) 기작을 연구하는데 있어 중요하며, bottom-up 지구조 현상의 한 예제가 될 수 있음.

제 4 절 남극 중앙해령 연구

1. 남극 중앙해령에 대한 해저면 지형조사 및 해양자력탐사

○ 남극 장보고 과학기지를 경유하여 뉴질랜드로 귀항하는 경로 중에 가장 남쪽에 위치한 중앙해령 KR1을 시작으로 KR2, KR3, KR4까지 순차적으로 탐사를 진행하였음 (그림 3.86.)

○ 극지연구소의 주도로 지난 2011년부터 호주-남극 중앙해령 KR1에 대해서는 집중적으로 몇 차례의 탐사가 진행된 바 있으나, 여전히 미답 지역으로 남아 있는 구간이 많기 때문에, 기존에 탐사가 이루어지지 않았던 KR1 및 KR2의 일부 지역에 대해서 우선적으로 정밀 수심자료를 획득하였으며, 중앙해령 중심 확장축으로부터 뺀어 나온 몇 개의 해저산맥에 대해서는 해양자력탐사도 함께 수행하였음 (그림 3.86.)

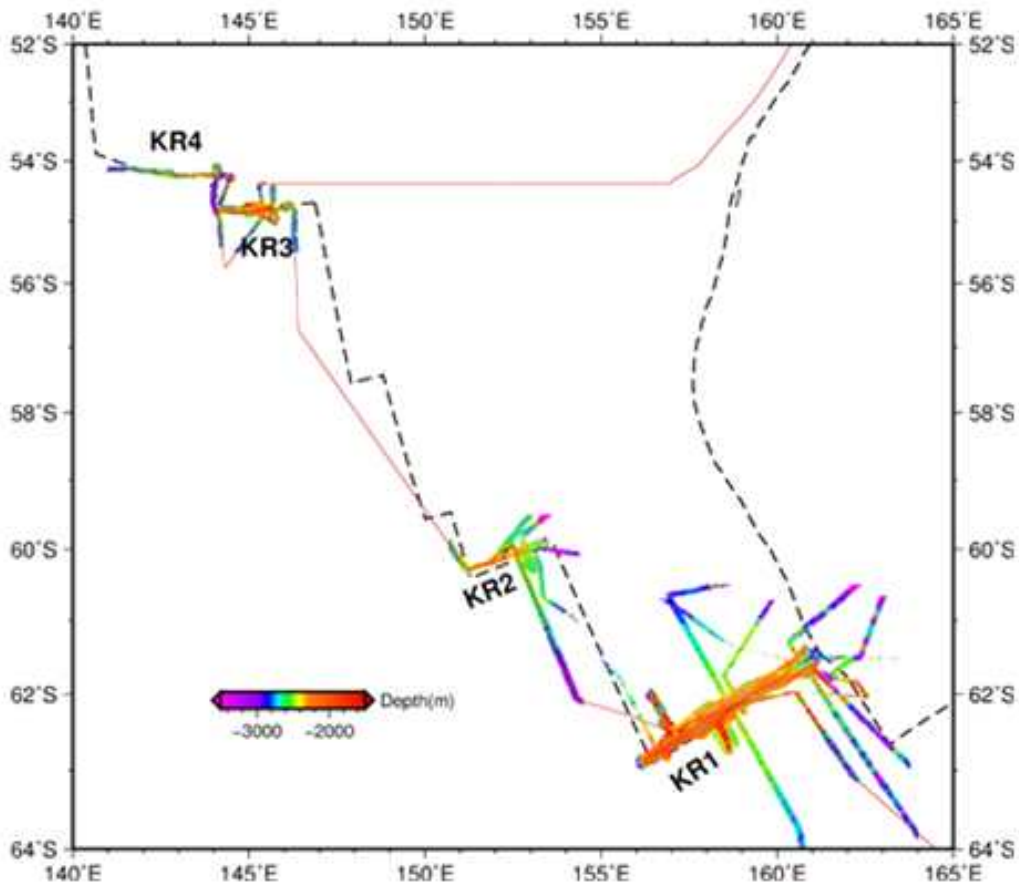


그림 3.86. 호주-남극 중앙해령을 연구 타겟으로 한 ANA07B의 항적도(red line) 및 탐사 측선을 따라 새로 획득된 지형자료까지 포함된 지형도

○ 고해상도의 수심자료가 전혀 존재하지 않았던 호주-남극 중앙해령 KR3 및 KR4에 대해서는 세계 최초로 해저면 지형조사가 수행되었고, 이를 통해 중앙해령의 확장축을 기준으로 KR3과 KR4의 전체 구간에 대한 지형도를 작성할 수 있었음 (그림 3.86., 90.)

○ 연구항해 수행 전까지, 중앙해령 KR3는 중심부에 다소 큰 규모의 급격한 만곡(offset)을 가진 하나의 큰 분절로써 파악되었으나, 탐사를 통해 경도 144°E 부근에서 남북 방향으로 길게 뻗은 변환단층(St. Vincent Fracture Zone)을 기준으로 크게 분절된 2개의 중앙해령으로 구성되어 있음을 확인할 수 있었으며, 각각 KR3와 KR4로 명명하였음 (KR1, KR2에 이어서 서북쪽 방향으로 순차적으로 KR3, KR4로 명명) (그림 3.86., 90.)

○ KR3 중심 확장축의 정확한 위치를 알아내기 위하여 확장축을 지나는 방향으로 1회의 해양자력탐사를 수행하였으며, 이를 통해 측정된 중앙해령 KR3의 확장속도는 약 66 mm/yr로써, 약 64 mm/yr의 KR1 동편에 비해서는 약간 빠른 편이며 약 70 mm/yr의 KR2 서편보다는 약간 느린 편임 (그림 3.87.). 즉, Balleny Fracture Zone을 마주하는 KR1 서편 및 KR2 동편의 확장속도와 비슷하며, 이는 호주판과 남극판 간의 로테이션 중심축으로부터의 거리에 따른 함수 관계에 따라 KR3의 확장속도를 KR2의 서편과 비슷하거나 더 빠를 것으로 예측한 글로벌 모델(DeMets et al., 2010)과는 약간의 차이가 있다고 볼 수 있음. 이는 마치 느린 확장속도의 중앙해령 확장축과 유사한 형태의 KR3의 확장축 지형과도 연관이 있을 수 있다고 생각됨 (그림 3.86., 90.)

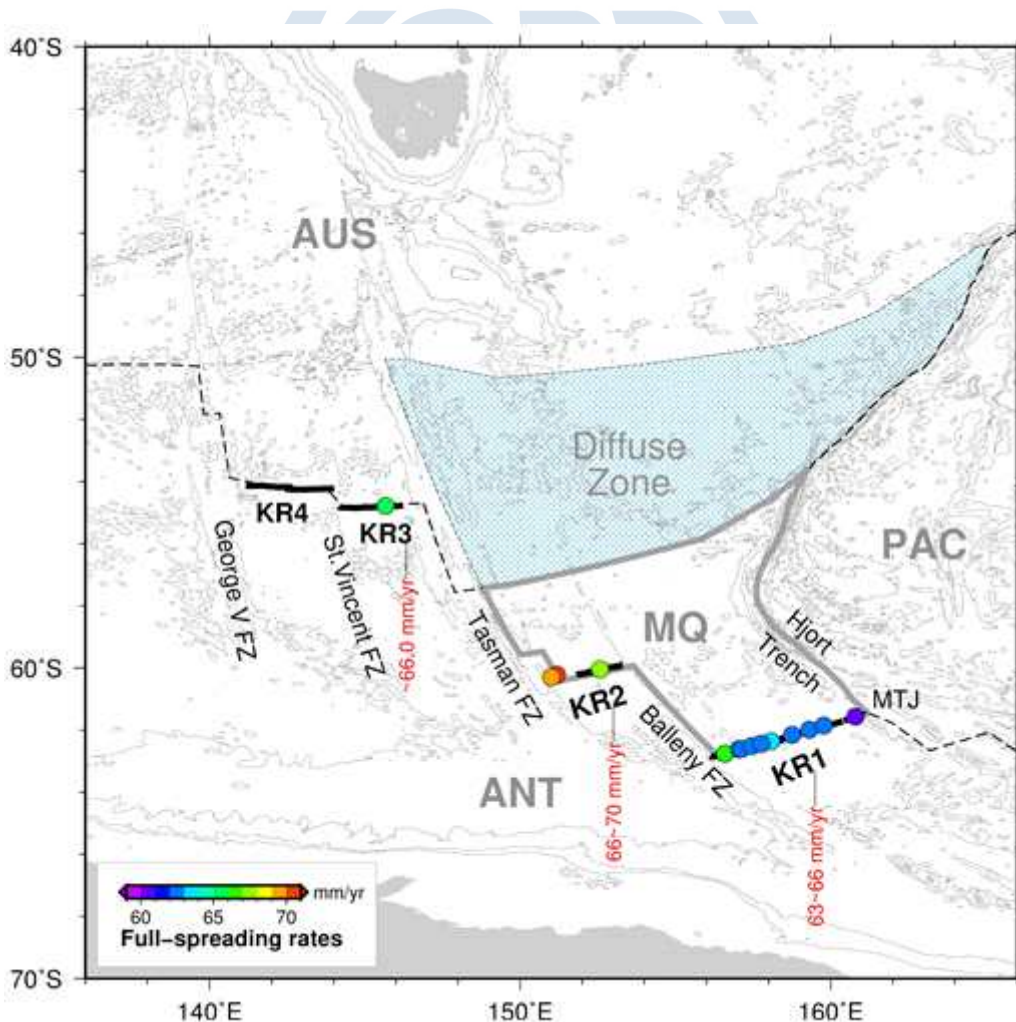


그림 3.87. 호주-남극 중앙해령 KR1~KR4 주변의 지판구조 및 해양자력탐사를 통해 측정된 각 중앙해령 분절들의 확장속도 분포

2. 중앙해령 KR1 및 주변 해저화산들의 지자기 연령 분석

○ 중앙해령 KR1~KR4 일대의 지각연령 분포 및 진화과정 규명을 위한 연구의 일환으로써, 고해상도 해저면 지형자료와 해양 지자기 자료가 상대적으로 많이 획득되었던 KR1 주변의 해저면 및 해저화산의 지자기적 특성, 공간적인 분포와 형태 등에 대한 연구를 수행함

○ 일반적으로 중앙해령 주변에 형성되는 해저화산은 약 1백만년 미만의 비교적 짧은 생성시간을 가지게 되고, 따라서 해저화산의 지자기 이상과 주변에 먼저 생성된 해저면의 지자기 이상의 패턴을 비교하게 되면, 해저면 위에 형성된 해저화산의 연령을 대략적으로 계산할 수 있음 (Maia et al., 2005).

○ 이러한 원리를 이용하여 중앙해령 KR1 주변의 해저산맥들을 구성하고 있는 각각의 화산체들에 대해 지자기 연령을 측정하였고, 이미 가지고 있는 KR1 주변의 해저면 연령(Choi et al., 2017)과 결합하여 KR1 주변 일대의 해저면 및 해저화산의 연령 분포에 대한 지도를 작성함 (그림 3.88)

○ KR1 주변의 해저화산들은 모두 최근 3백만년 내의 시기, 특히 0.3~0.8 Ma, 0.9~1.1 Ma, 1.6~2.1 Ma, 2.2~2.7 Ma 시기에 집중적으로 발생한 막대한 양의 화산 분출로 형성된 것으로 추정되며, 각각의 화산체들은 형성되는 데에 약 60만년 이내의 시간이 소요된 것으로 추정됨 (그림 3.89)

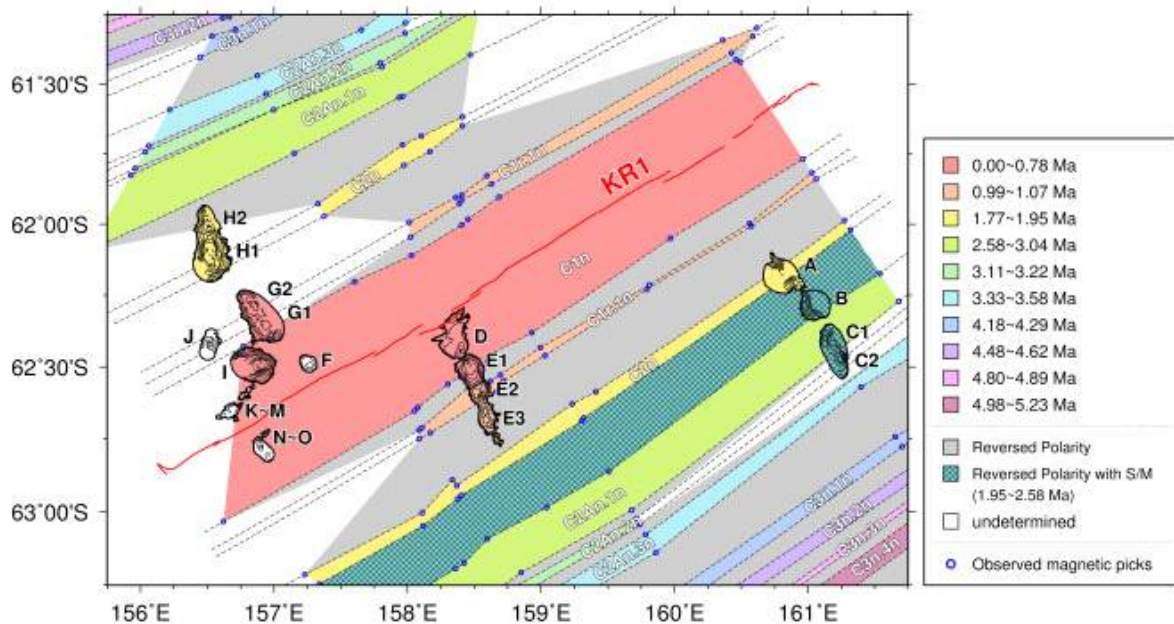


그림 3.88. 남극 중앙해령 KR1 확장축(red lines)을 중심으로 주변의 해저면 및 해저화산의 지자기 연령 분포도

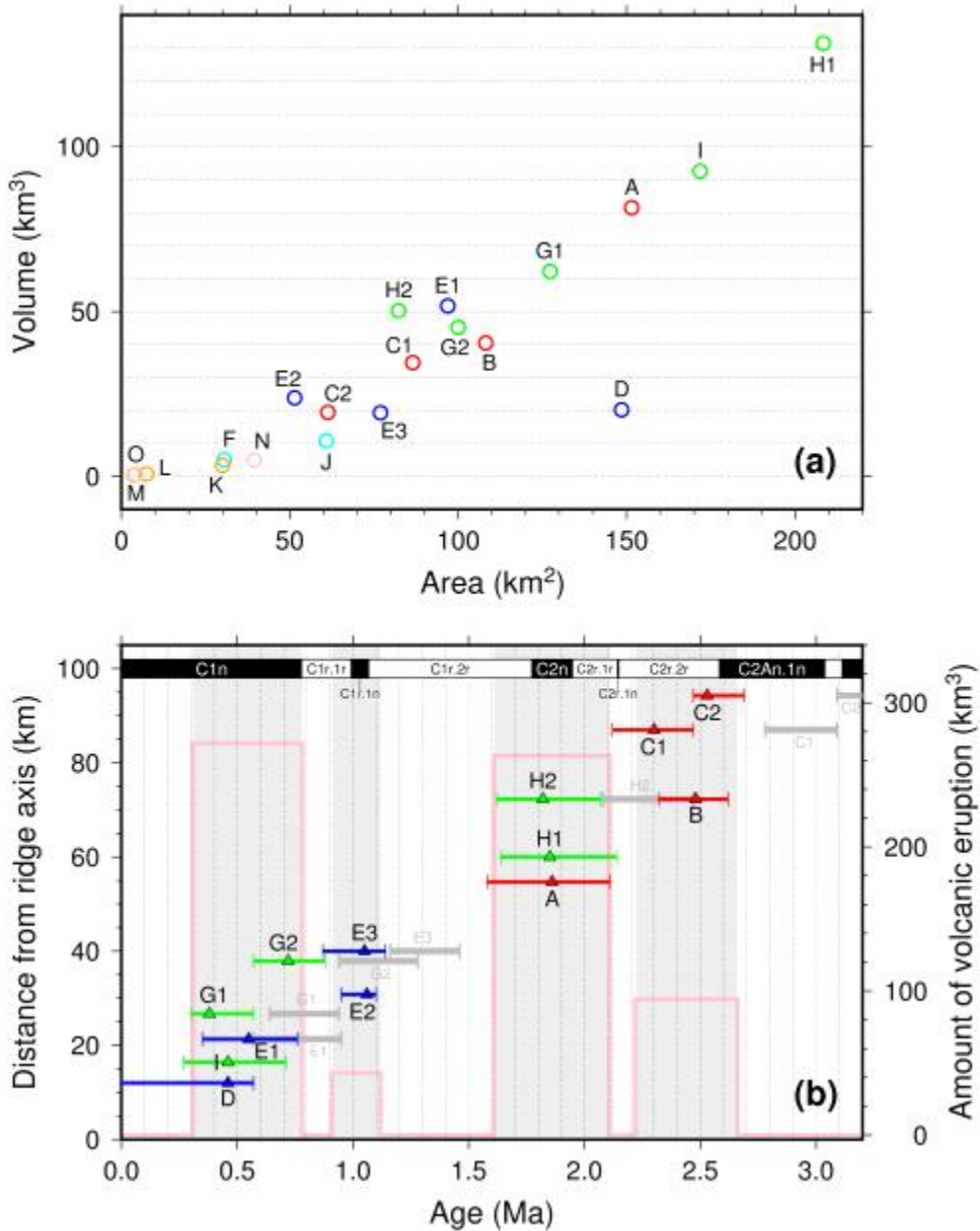


그림 3.89. (a) KR1 주변 해저화산들의 부피와 단면적 비교 (b) 해저화산체들의 형성 시기 및 형성 소요시간, 시기별 화산분출의 양

3. 맥쿼리판의 판구조적 운동 및 진화과정 규명

○ 호주-남극 중앙해령 KR1, KR2 일대에서 획득한 해상자력자료를 활용, KR1 및 KR2를 남쪽 경계로 하여 호주판 내부의 동남쪽 끝에 위치하고 있는 소형 지각판인 맥쿼리판(Macquarie Plate)의 형성시기와 주변의 대형 지각판(호주판, 남극판, 태평양판 등)에 대한 상대적인 운동, 진화과정 등을 규명하였음 (Choi et al., 2017)

○ 지자기 자료에 대한 모델링에 따르면 맥쿼리판의 구체적인 생성 연령은 약 6.24 Ma 경으로 추정되며 (그림 3.90.), KR1 확장축의 방향도 거의 같은 시기에 큰 변화를 겪은 것으로 드러남. 또한 맥쿼리판의 주변 판들에 대한 상대운동을 지질학적 시간에 따라 세부적으로 밝혀냄 (그림 3.91.).

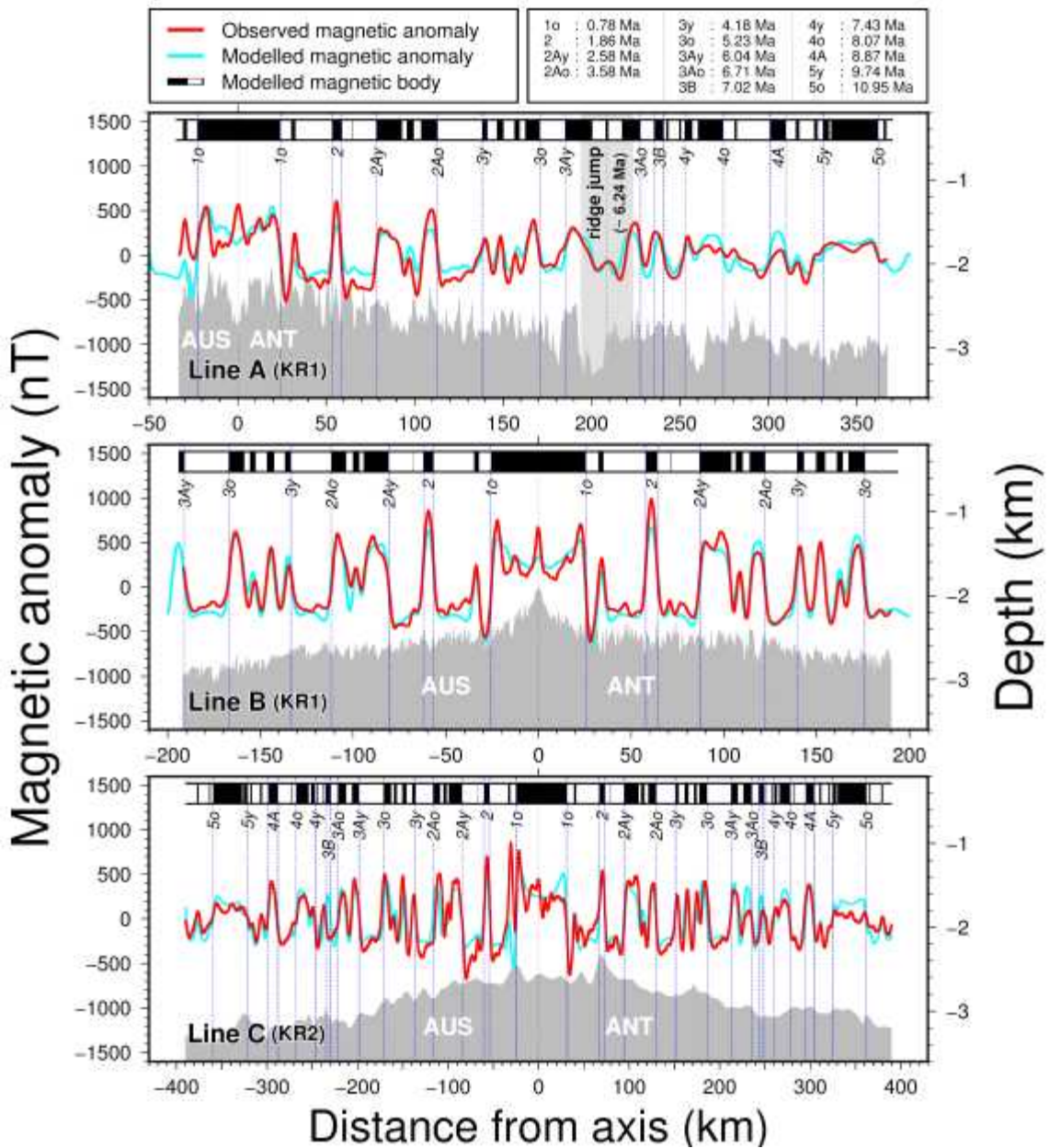


그림 3.90. KR1 확장축을 가로지르는 자력암사 측선에 대한 지자기 모델링 결과

○ 맥쿼리판의 생성 및 진화과정은 태평양판 등에 존재하는 마이크로판(microplates)의 생성조건 및 진화, 대륙의 균열(continental breakup) 과정과 유사함을 밝혀내었고, 이러한 해양 지각판의 진화과정에는 지각판들간의 상대적인 운동 변화가 반영되고 있음을 보여줌

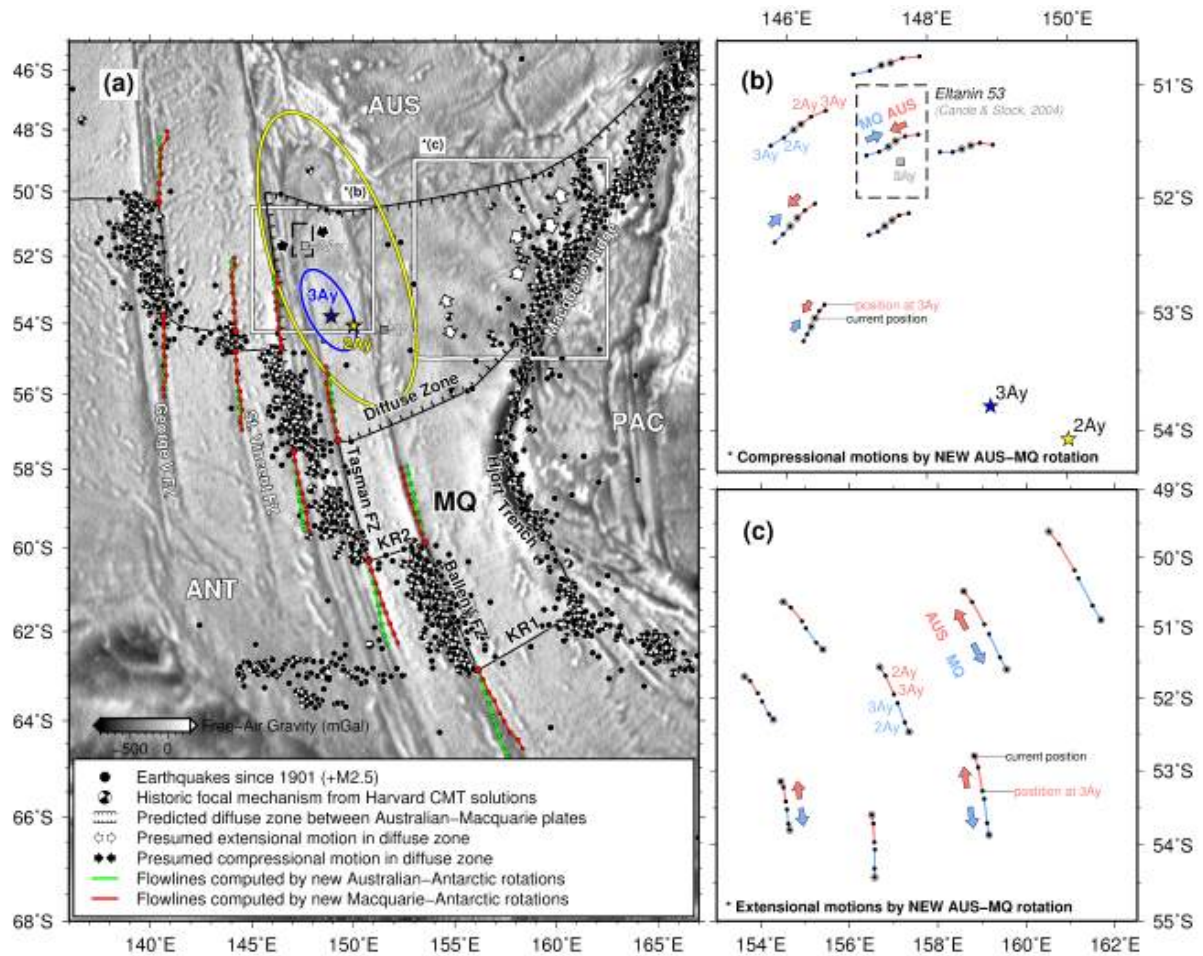


그림 3.91. (a) 새롭게 정의된 맥쿼리판-남극판(red lines)과 호주판-남극판(green lines) 로테이션 파라미터에 의해 묘사되는 맥쿼리판 주변 판의 움직임 및 맥쿼리판의 경계 (b) 3Ay(~6.04 Ma)로부터 2Ay(~2.58 Ma)와 현재에 이르기까지의 시간동안 판운동 복원 모델을 통한 호주판과 맥쿼리판 간의 압축 모션과 (c) 확장 모션이 생기는 구간

4. KR3 중앙해령 현무암의 지화학 특성 연구

가. 남극 중앙해령 암석 채취

- 2016-17 남극 중앙해령 탐사 시에 KR2, KR3, KR4 지역에서 총 30회의 락코어를 이용하여 현무암질 글라스의 채취에 성공하였다 (그림 3.92, 93). 그리고 KR1, KR2, KR3, KR4, 각 지역에서 총 4회의 드렛지 탐사를 수행하여 화산암 시료들도 채취에 성공하였다 (그림 3.92, 94).
- 중앙해령 KR3와 KR4 지역은 전체적으로 퇴적물로 덮여 있었으며, KR4 지역에서의 해저 확장이 KR3에 비해 더 활발한 것으로 사료된다. KR3 지역은 slow-spreading 중앙해령으로 생각되며, 락코어 및 드렛지를 이용한 암석 채취 시에 많은 퇴적물도 같이 채취되었다.
- 중앙해령 KR1에서 수심 약 800 m인 DG01 지점에서 드렛지 탐사를 통해 신선한 화산암들과 해양생물 채취를 할 수 있었다. 여러 드렛지 시료들에 대해 크기에 따라 번호를 부여하고, 박편 제작을 통해 암석학적 관찰을 하였으며, 파우더를 제작하여 지화학적 분석을 위한 전처리 과정을 수행하였다.

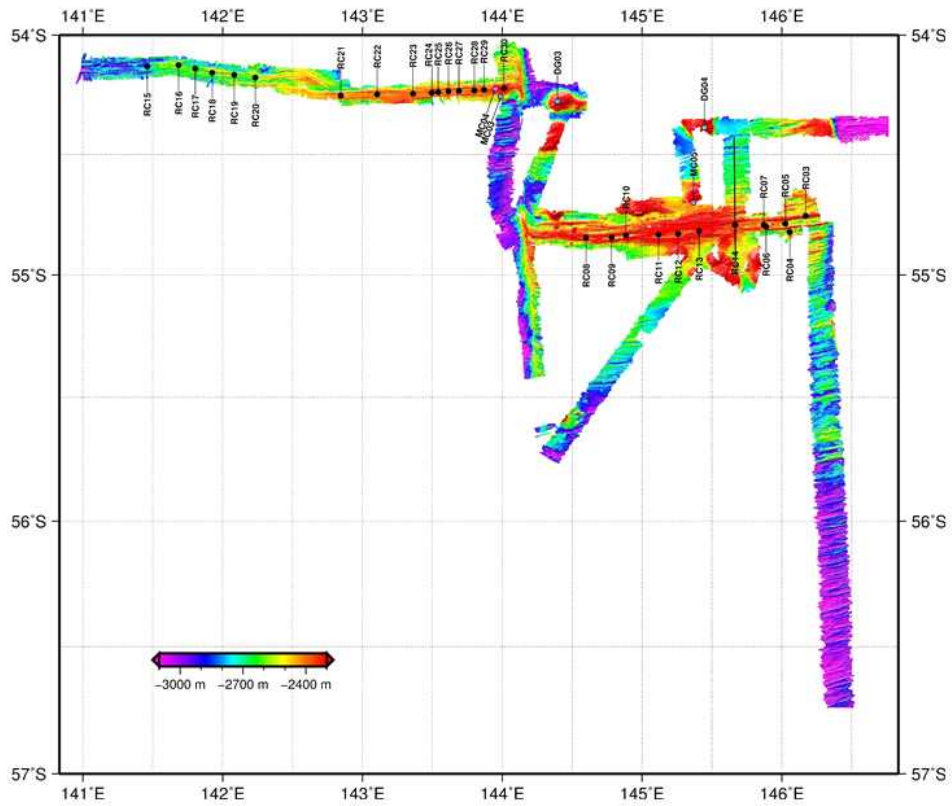


그림 3.92. 중앙해령 KR3(동편) 및 KR4(서편)에 대한 정밀 해저지형도, 락코어 및 드렛지 정점 위치



그림 3.93. 락코어를 활용하여 중앙해령 KR3, KR4에서 채취한 현무암질 글라스 시료



그림 3.94. 드렛지를 활용하여 중앙해령 KR3, KR4에서 채취한 화산암

나. 주원소와 F, Cl, S

- 락코어 및 드렛지를 통해 채취한 유리질 현무암에 대해서 hand picking 후 에폭시 마운트로 제작하였다. 제작한 에폭시 마운트를 탄소코팅을 하여 EPMA(Electron Probe Micro-Analyser)를 이용하여 주원소 분석을 수행하였다. EPMA 분석 조건은 15 kV, 10 nA, 20 μ m이며, JEOL oxide와 Smithsonian glass standard mineral을 위주로 standardization을 실시하였다. F는 flurite를 이용하였으며, Cl은 scapolite를 이용하였으며, S는 pyrite를 이용하였다. Na 원소에서 migration 현상이 나타나므로 되도록 짧은 시간에 분석을 실시하였다. 암석을 분류할 수 있는 TAS diagram에 도시한 결과 대부분은 현무암으로 나타났고 한 개의 시료에서 tephriphonolite로 나타났다. 그리고 각 현무암질 글라스 내에는 F=100~1000 ppm, Cl=100~21000 ppm 의 할로겐 원소가 내포되어 있었고, 특히 Cl의 경우에는 비록 하나의 시료이지만 다른 지역의 중앙해령 현무암질 글라스에 비해 매우 높은 값을 가지는 것으로 파악된다.

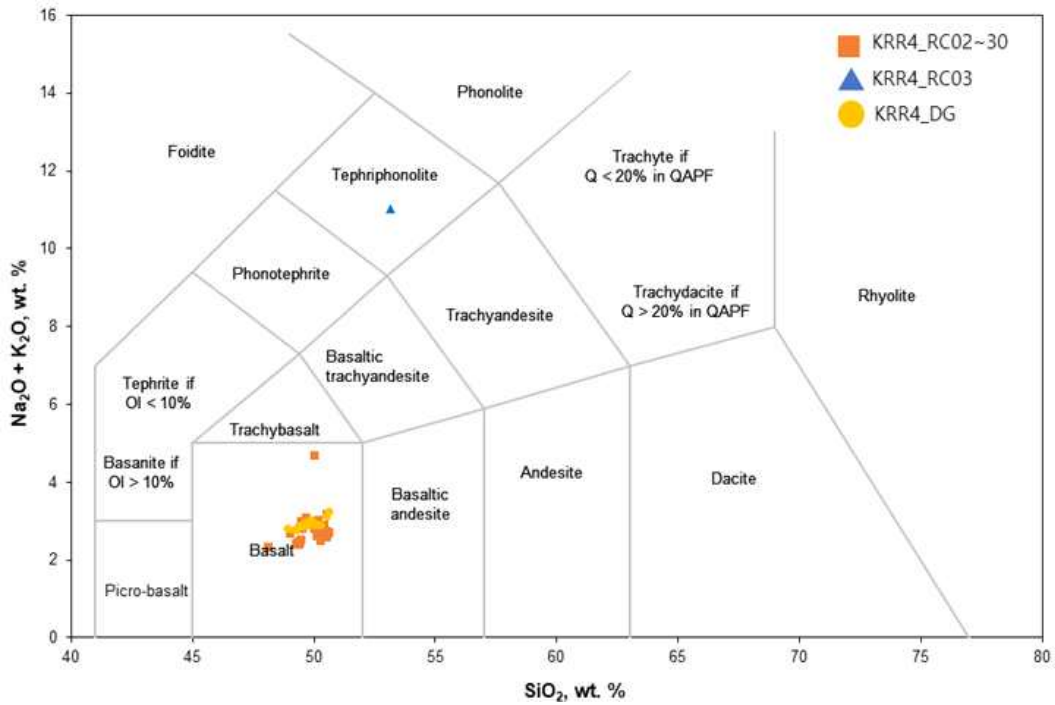


그림 3.95. KR3, KR4에서 채취한 현무암 및 현무암질 글라스 주원소 분석 결과를 이용한 TAS diagram

표 3.9. KR3, KR4 현무암질 글라스 및 화산암에 대한 주원소 및 휘발성 원소 분석 결과

Sample	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	FeO	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅	F	Cl	SO ₃	Total
KRR4_RC_02	49.97	2.03	16.03	8.91	0.16	5.97	10.51	3.68	1.03	0.42	0.07	0.08	0.25	99.11
KRR4_RC_03	53.16	0.56	12.69	13.45	0.25	4.10	0.41	3.59	7.43	0.49	0.10	2.31	0.31	98.85
KRR4_RC_05	50.33	1.47	15.07	9.65	0.19	7.76	11.93	2.77	0.12	0.13	0.07	0.01	0.29	99.79
KRR4_RC_06	50.38	1.75	14.66	10.90	0.21	7.30	11.52	2.79	0.12	0.11	0.00	0.01	0.34	100.10
KRR4_RC_07	50.01	1.53	14.69	10.13	0.20	7.40	11.71	2.70	0.11	0.12	0.01	0.01	0.31	98.93
KRR4_RC_08	49.40	1.29	15.41	9.38	0.18	8.37	12.16	2.41	0.08	0.14	0.05	0.01	0.28	99.17
KRR4_RC_09	50.49	1.95	14.56	11.13	0.21	6.98	11.14	3.07	0.14	0.19	0.05	0.02	0.33	100.25
KRR4_RC_10	50.24	1.31	15.13	9.96	0.19	8.03	12.32	2.43	0.08	0.10	0.06	0.00	0.27	100.12
KRR4_RC_11	50.16	1.62	14.90	10.14	0.19	7.46	11.70	2.90	0.14	0.16	0.07	0.01	0.32	99.77
KRR4_RC_12	49.42	1.53	15.75	9.48	0.17	7.88	11.63	2.83	0.19	0.13	0.04	0.01	0.27	99.33
KRR4_RC_13	49.62	1.69	14.13	11.31	0.21	6.68	10.76	2.93	0.18	0.22	0.06	0.01	0.34	98.14
KRR4_RC_14	49.55	1.55	14.72	10.33	0.20	7.46	11.64	2.85	0.11	0.17	0.05	0.01	0.29	98.93
KRR4_RC_15	49.36	1.51	14.76	10.46	0.19	7.85	11.63	2.34	0.07	0.15	0.05	0.02	0.29	98.69
KRR4_RC_16	49.23	1.05	16.90	8.78	0.16	9.18	12.04	2.38	0.05	0.09	0.02	0.01	0.26	100.14
KRR4_RC_17	50.56	1.25	16.04	8.98	0.18	8.50	12.12	2.62	0.08	0.11	0.03	0.00	0.28	100.75
KRR4_RC_18	49.47	2.41	13.63	12.61	0.23	6.48	10.28	2.67	0.15	0.21	0.07	0.01	0.37	98.60
KRR4_RC_19	50.26	1.64	14.79	11.05	0.20	7.55	11.24	2.59	0.11	0.19	0.04	0.01	0.32	99.98
KRR4_RC_20	50.50	1.43	14.10	11.25	0.20	7.17	11.26	2.48	0.13	0.16	0.05	0.01	0.33	99.05
KRR4_RC_22	49.35	1.14	16.59	8.97	0.16	8.99	12.35	2.43	0.04	0.07	0.02	0.01	0.26	100.38
KRR4_RC_23	50.07	1.37	16.18	9.91	0.20	8.44	11.76	2.56	0.08	0.11	0.02	0.01	0.29	100.97
KRR4_RC_24	49.41	1.22	16.54	9.22	0.17	9.01	12.12	2.40	0.06	0.10	0.00	0.01	0.25	100.51
KRR4_RC_25	48.97	1.32	16.02	9.24	0.17	8.69	11.71	2.63	0.07	0.10	0.08	0.00	0.28	99.28
KRR4_RC_26	49.46	1.36	15.51	9.78	0.20	8.39	11.89	2.46	0.08	0.09	0.12	0.00	0.28	99.61
KRR4_RC_27	48.09	1.07	15.09	7.95	0.15	8.48	11.13	2.29	0.06	0.11	0.04	0.01	0.26	94.72
KRR4_RC_28	50.35	1.71	14.18	11.27	0.20	7.35	11.30	2.64	0.10	0.14	0.04	0.01	0.33	99.61
KRR4_RC_29	50.60	1.67	14.48	11.05	0.20	7.32	11.36	2.62	0.10	0.16	0.06	0.02	0.33	99.97
KRR4_RC_30	50.48	1.67	14.49	10.87	0.22	7.44	11.34	2.64	0.10	0.15	0.06	0.01	0.32	99.80
KRR4_DG_01_A1	49.34	1.38	15.65	9.19	0.18	8.06	12.18	2.72	0.18	0.14	0.04	0.02	0.26	99.34
KRR4_DG_01_A2	49.64	1.35	15.56	9.23	0.18	8.14	12.17	2.75	0.19	0.11	0.01	0.01	0.26	99.61
KRR4_DG_01_A3	49.46	1.28	15.61	9.21	0.18	8.09	12.14	2.71	0.18	0.14	0.03	0.02	0.26	99.31
KRR4_DG_01_A4	49.55	1.34	15.64	9.26	0.17	8.06	12.23	2.69	0.19	0.14	0.02	0.01	0.26	99.57
KRR4_DG_01_A5	49.57	1.29	15.74	9.15	0.17	8.13	12.15	2.80	0.18	0.13	0.03	0.01	0.27	99.64
KRR4_DG_01_A6	49.95	1.32	15.82	9.13	0.16	8.11	12.17	2.74	0.19	0.14	0.08	0.03	0.27	100.11
KRR4_DG_01_B1	49.81	1.31	15.80	9.06	0.17	8.43	12.01	2.78	0.18	0.14	0.04	0.01	0.27	100.01
KRR4_DG_01_B2	49.97	1.36	16.00	9.18	0.16	7.97	12.18	2.74	0.20	0.15	0.07	0.02	0.28	100.26
KRR4_DG_01_C1	49.23	1.20	16.24	9.05	0.18	8.56	12.29	2.67	0.10	0.09	0.10	0.01	0.28	100.00
KRR4_DG_01_C2	49.18	1.20	15.91	9.19	0.18	8.48	12.34	2.68	0.11	0.11	0.01	0.01	0.28	99.68
KRR4_DG_01_C3	48.87	1.25	16.01	9.16	0.17	8.53	12.25	2.71	0.10	0.11	0.08	0.01	0.28	99.54
KRR4_DG_01_D1	49.83	1.39	15.61	9.33	0.17	7.66	12.28	2.85	0.19	0.15	n.d.	0.02	0.29	99.77
KRR4_DG_01_D2	49.65	1.36	15.84	9.24	0.17	7.66	12.32	2.71	0.18	0.16	0.12	0.03	0.28	99.71
KRR4_DG_02_A1	50.10	1.21	15.62	9.10	0.15	8.18	12.21	2.75	0.15	0.10	0.04	0.04	0.27	99.94
KRR4_DG_02_A2	50.05	1.24	15.50	9.06	0.17	8.21	12.21	2.76	0.15	0.09	0.05	0.03	0.28	99.81
KRR4_DG_02_B	50.61	1.39	15.58	9.19	0.16	6.88	11.78	3.03	0.23	0.14	0.08	0.03	0.26	99.37
KRR4_DG_02_C	50.25	1.21	15.68	8.93	0.17	7.86	12.30	2.75	0.16	0.11	0.04	0.04	0.26	99.76
KRR4_DG_02_D	50.04	1.19	15.55	8.88	0.17	7.94	12.30	2.74	0.16	0.14	0.10	0.04	0.28	99.52
KRR4_DG_02_E	50.48	1.34	14.90	9.52	0.16	7.50	11.87	2.94	0.18	0.14	0.04	0.02	0.28	99.37
KRR4_DG_02_F	49.97	1.21	15.61	8.97	0.16	7.89	12.30	2.78	0.15	0.11	0.05	0.04	0.27	99.51

다. 미량원소

- 현무암질 글라스를 이용하여 제작한 에폭시 마운트를 이용하여 극지연구소에 설치되어 있는 LA-ICP-MS를 이용하여 미량원소 분석을 수행하였다. 미량원소 중 희토류 원소 분석 결과는 대부분 N-MORB에 가까운 조성을 보였다. KR3에서 채취한 현무암질 글라스는 LREE가 KR4에 채취한 현무암질 글라스에 비해 부하게 나타났다. 그리고 KR1 지역에서 채취한 DG1 시료들과 KR2 지역에서 채취한 DG2 시료들은 E-MORB와 유사하게 나타났다. 이는 off-axis에 위치한 해저산에 채취한 드렛지 시료들로 in-axis에 비해 지각물질이 혼화된 특징을 보여준다.

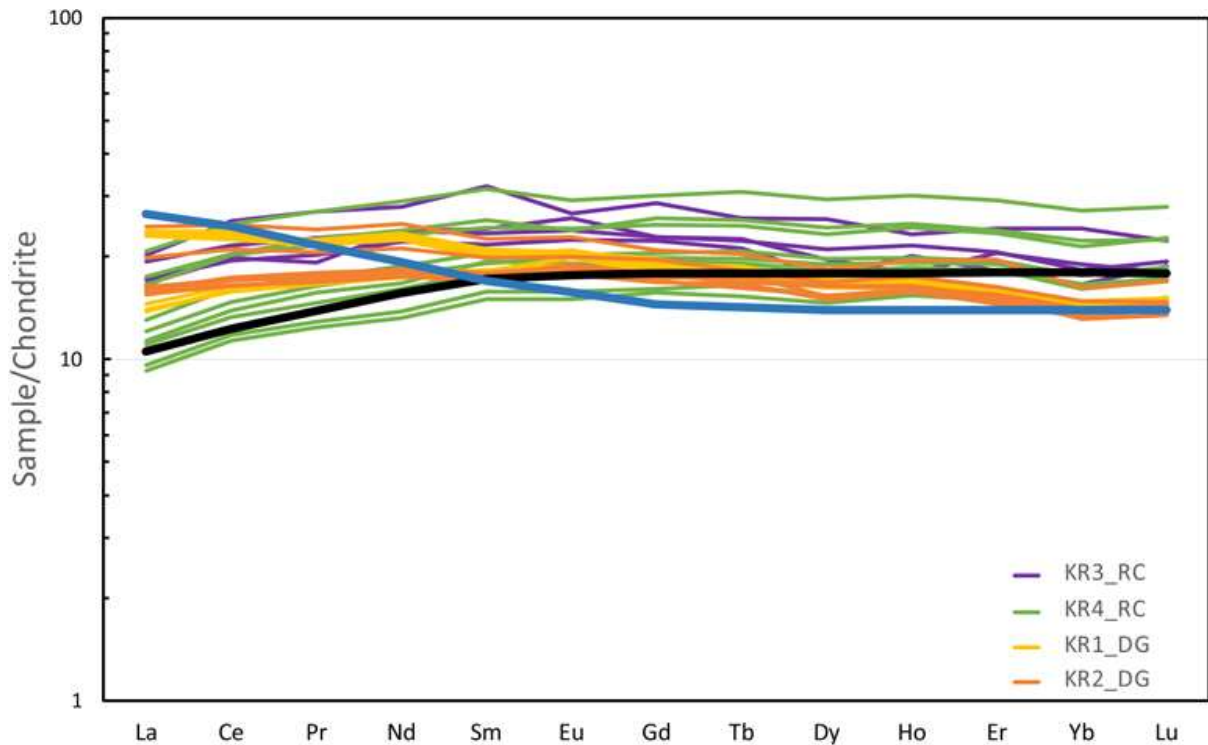


그림 3.96. KR3, KR4 지역에서 채취한 암석 및 현무암질 글라스에 대한 REE diagram

라. Sr-Nd-Hf-Pb 동위원소

- Sr-Nd-Hf-Pb 동위원소 분석을 통하여 호주-남극 중앙해령 KR1, KR2 일대의 맨틀 조성이 인도양 중앙해령 및 태평양 중앙해령과는 독립적으로 구분되는 특징을 보이고 있는 것으로 확인되었으며 이는 호주-남극 중앙해령보다 서쪽에 위치하고 있는 호주-남극 불연속면을 인도양형 및 태평양형의 상부 맨틀 경계로 생각해 온 기존의 학설을 뒤집은 새로운 발견이다. KR3 및 KR4 중앙해령 in-axis에서는 락코어를 이용하여 현무암질 글라스를 채취하였으며, off-axis에서는 드렛지를 이용하여 화산암을 채취하여 Sr-Nd-Pb 동위원소를 분석하여 현재 분석한 자료들을 해석 중에 있다. Hf 동위원소 분석은 현재 미국 와이오밍 대학교 공동연구를 진행 중에 있으며, 분석 일정 문제로 내년 초까지 분석을 완료할 예정이다. 추후에 KR1, KR2 지역과 비교하여 연구를 진행할 예정이다.

표 3.10. KR3, KR4 현무암질 글라스 및 화산암에 대한 Sr-Nd-Pb 분석 결과

Sample	$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$	2 σ	$^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$	2 σ	$^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	2 σ	$^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	2 σ	$^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	2 σ
KRR4-RC05	0.702480	0.000005	0.513088	0.000007	18.7810	0.000014	15.5101	0.000013	38.2539	0.000041
KRR4-RC07	0.702473	0.000005	0.513105	0.000006	18.5188	0.000025	15.3255	0.000023	37.5501	0.000072
KRR4-RC09	0.702476	0.000006	0.513096	0.000007	19.1564	0.000016	15.7368	0.000015	39.0848	0.000046
KRR4-RC11	0.702561	0.000007	0.513082	0.000007	18.8101	0.000012	15.5233	0.000011	38.2867	0.000034
KRR4-RC23	0.702455	0.000007	0.513105	0.000008	18.5895	0.000021	15.4773	0.00002	38.0594	0.000061
KRR4-RC24	0.702446	0.000005	0.513100	0.000004	18.5749	0.000017	15.4975	0.000015	38.0830	0.000048
KRR4-RC25	0.702461	0.000005	0.513094	0.000005	18.3674	0.000015	15.5283	0.000014	37.9990	0.000043
KRR4-RC26	0.702446	0.000006	0.513096	0.000006	18.5578	0.000033	15.4551	0.00003	38.0094	0.000094
KRR4-RC27	0.702391	0.000007	0.513102	0.000006	18.6476	0.000024	15.4856	0.000023	38.0729	0.00007
KRR4-RC28	0.702456	0.000006	0.513088	0.000006	18.6950	0.000017	15.4804	0.000016	38.1034	0.000049
KRR4-RC29	0.702468	0.000007	0.513074	0.000007	18.8233	0.000018	15.4718	0.000016	38.3429	0.000051
KRR4-RC30	0.702466	0.000005	0.513091	0.000008	18.7221	0.000017	15.5149	0.000016	38.2007	0.00005
KRR4-DG1A1	0.702787	0.000006	0.513033	0.000008	18.8680	0.000014	15.5249	0.000013	38.5243	0.00004
KRR4-DG1A2	0.702784	0.000004	0.513027	0.000007	18.8866	0.000015	15.5288	0.000014	38.5479	0.000044
KRR4-DG1A3	0.702768	0.000006	0.513025	0.000009	18.8725	0.000015	15.5267	0.000014	38.5371	0.000043
KRR4-DG1A4	0.702785	0.000004	0.513033	0.000006	18.8718	0.000012	15.5291	0.000011	38.5344	0.000034
KRR4-DG1A5	0.702787	0.000006	0.513030	0.000006	18.8613	0.000019	15.5204	0.000017	38.5160	0.000053
KRR4-DG1A6	0.702775	0.000007	0.513035	0.000005	18.8744	0.000012	15.5347	0.000011	38.5501	0.000035
KRR4_DG1B1	0.702782	0.000007	0.513035	0.000005	18.9182	0.000023	15.5667	0.000021	38.6409	0.000065
KRR4_DG1B2	0.702787	0.000008	0.513029	0.000007	18.8646	0.000019	15.5129	0.000017	38.5182	0.000053
KRR4_DG2A1	0.702593	0.000008	0.513119	0.000008	18.3072	0.000023	15.4792	0.000022	37.8630	0.000068
KRR4_DG2A2	0.702593	0.000007	0.513124	0.000007	18.3068	0.000016	15.4772	0.000015	37.8642	0.000047
KRR4_DG2B	0.702569	0.000006	0.513103	0.000005	18.4516	0.000021	15.5103	0.00002	38.0286	0.000061
KRR4_DG2C	0.702604	0.000007	0.513109	0.000007	18.3226	0.000017	15.4931	0.000016	37.8929	0.000048
KRR4_DG2D	0.702601	0.000007	0.513131	0.000006	18.3156	0.000014	15.4939	0.000013	37.8878	0.000041
KRR4_DG2E	0.702553	0.000006	0.513120	0.000005	18.3855	0.000026	15.4120	0.000024	37.7581	0.000076
KRR4_DG2F	0.702592	0.000007	0.513126	0.000007	18.2919	0.000018	15.4626	0.000017	37.8338	0.000052

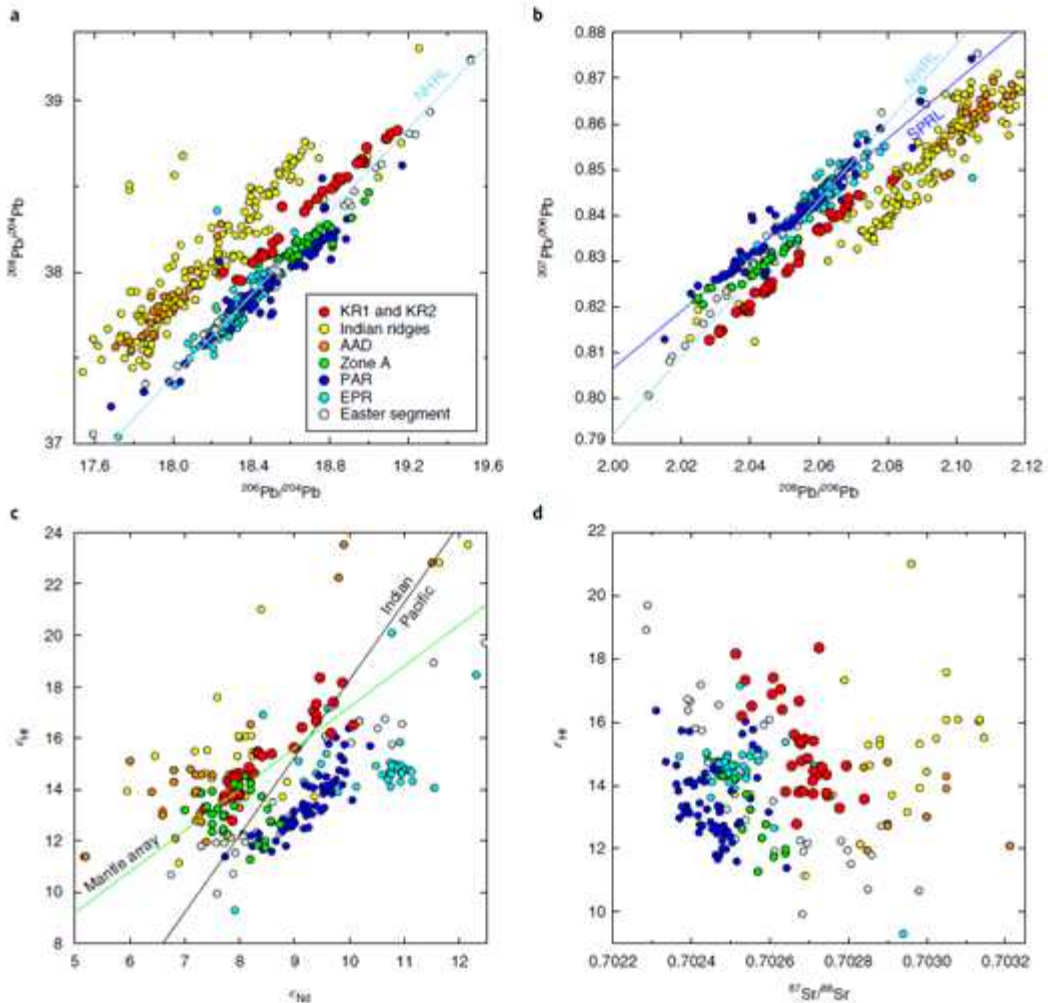


그림 3.97. Pb-Hf-Nd-Sr 동위원소 분석을 통한 맨틀의 화학적 조성 비교. 호주-남극 중앙해령 KR1과 KR2(red circles)의 MORB 동위원소 조성은 인도양 및 태평양 중앙해령들과 구분되는 고유의 특성을 보여주고 있음 (Park et al., 2019)

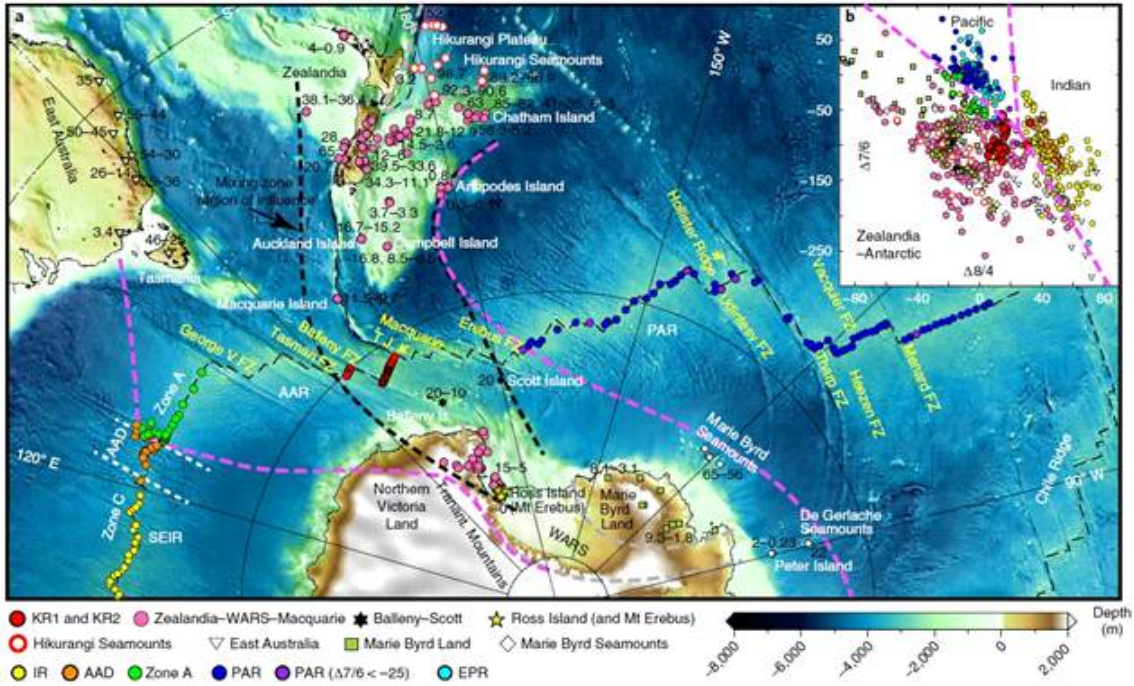


그림 3.98. (a) 독립적인 맨틀 조성을 가지는 “질란디아-남극 맨틀”의 영역(pink dashed lines) (b) 인도양 및 태평양 타입의 맨틀과 구분되는 고유의 지화학적 특성 (Park, et al., 2019)

5. 열수 분출구 분포 파악

- 미국 NOAA(PMEL)로부터 해저 열수 탐사장비인 MAPR(Miniature Autonomous Plume Recorder)를 대여하여 2016-17 연구항해 당시, 중앙해령 KR3 및 KR4 중심 확장축을 따라서 30 차례의 열수탐사를 수행하였지만, 탐사 구간 전 지역에서 ORP(Oxidation-Reduction Potential; 산화-환원 전위) 등의 수치에서 뚜렷한 이상치를 보이지 못하면서 결국 KR3 및 KR4 구간에서는 열수 분포의 증거를 아직 발견하지 못하고 있음 (그림 3.99)

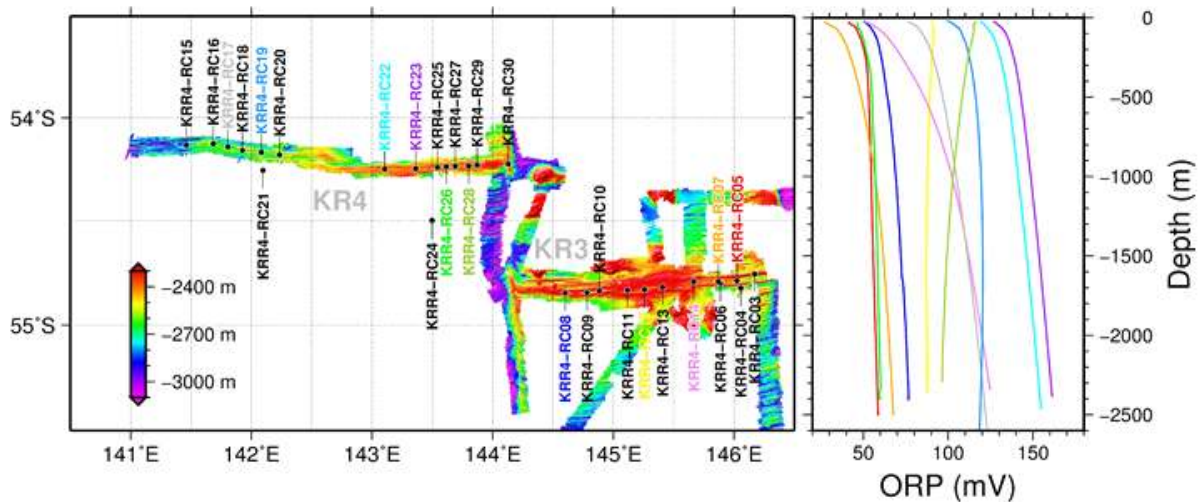


그림 3.99. 중앙해령 KR3, KR4의 지형도 및 MAPR(Miniature Autonomous Plume Recorder)를 활용한 열수탐사 수행 지점(left)과 열수탐사 수행 정점별 수심에 따른 ORP(Oxidation-Reduction Potential) 수치 변화 그래프(right)

6. 남극 중앙해령 열수 미생물의 분리 및 특성 연구

- 2016-17 연구항해 중, 중앙해령 KR1의 드렛지 정점 DG01로부터 새로운 종으로 보이는 심해저 생물 시료 확보 (그림 3.100.)

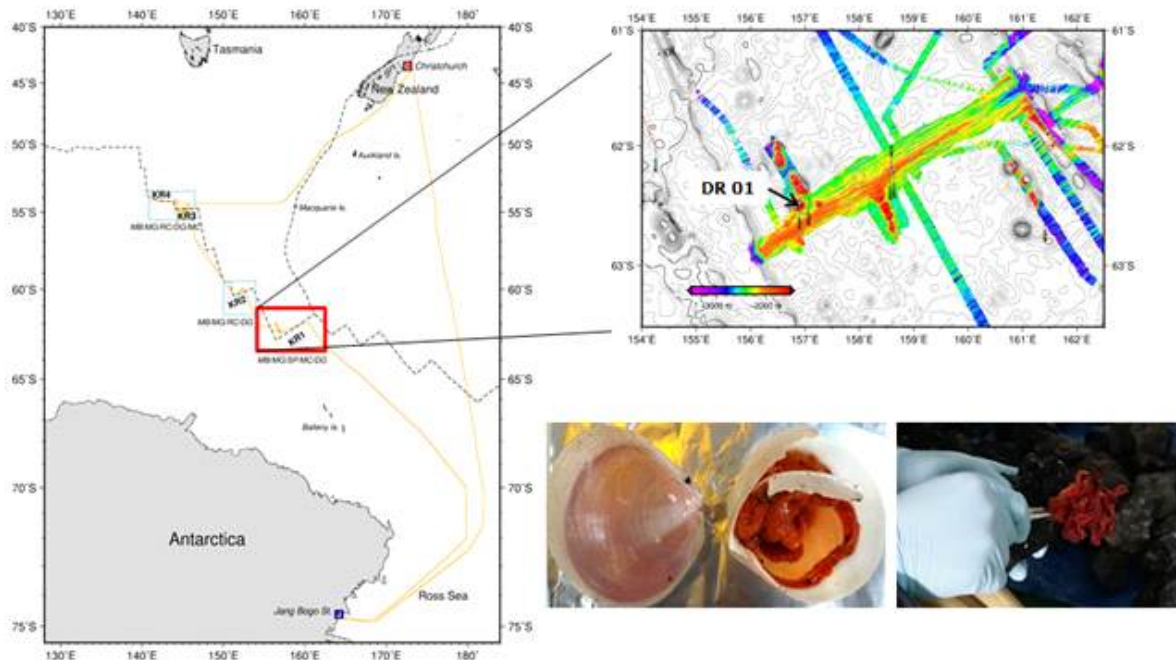


그림 3.100. 남극 중앙해령 KR1의 연구정점 DG01로부터 획득한 저서 생물 시료

- 2016-17 연구항해 중, KR2에서는 락코어를 활용하여 표층의 퇴적물 시료 확보 (그림 3.101.)

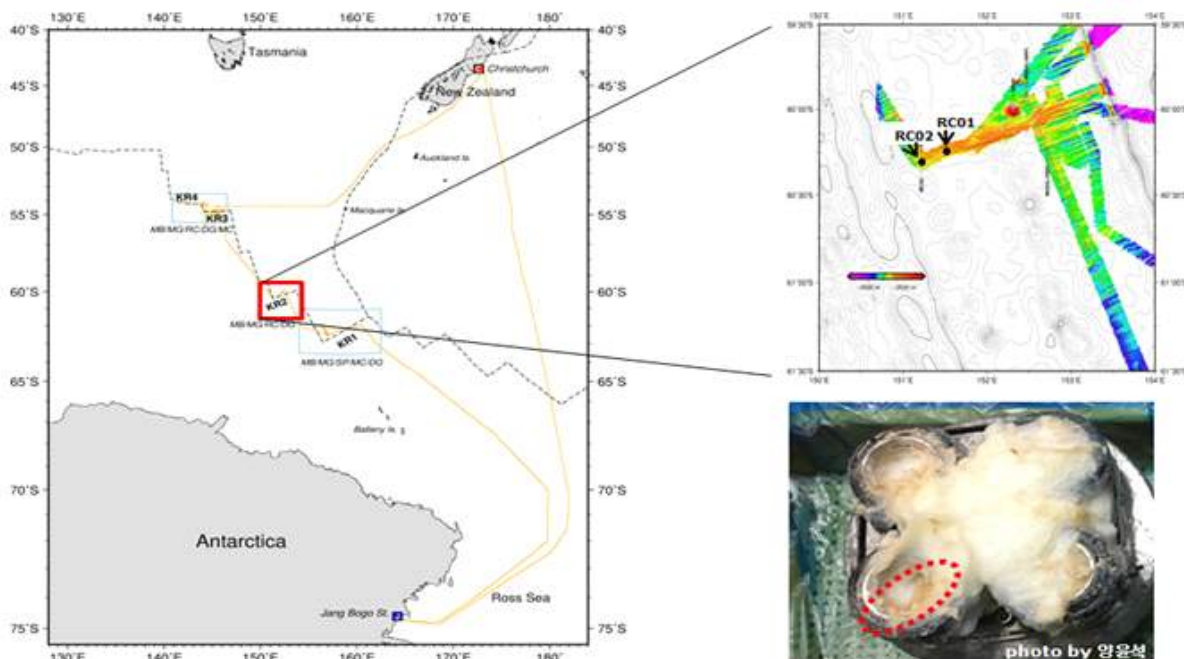


그림 3.101. 남극 중앙해령 KR2 연구지역의 표층 퇴적물 시료

- 열수 plume에서 분리한 균주(7A)의 16S rRNA 유전자 서열을 이용하여 계통분류학적 분석을 수행한 결과, Oceanobacillus 속(genus)에 포함되는 신종 세균으로 여겨짐
- 신종 세균임을 밝히기 위해 근연종들(O. locisalsi와 O. gochujangensis)의 생리, 생화학, 화학분류학적(chemotaxonomy) 특성을 비교·분석하였고, 성장 온도 및 지방산 함량에서 구별되는 특성을 분석함
- 유전체의 특성 비교를 위해 균주 7A와 근연종인 O. locisalsi 그리고 O. gochujangensis의 전체 유전체에 대한 draft genome을 분석한 결과 각각 95 contigs, 60 contigs 그리고 89 contigs를 획득하였으며 genome의 길이는 4.1-4.4Mb 정도 되었음
- 균주 7A와 근연종인 O. locisalsi 그리고 O. gochujangensis간의 전체 염기서열에 대하여 ANI (average nucleotide identity) 와 in silico DDH (DNA-DNA hybridization) 분석한 결과, 균주 7A는 신종 세균의 기준인 ANI (<95%)와 DDH (<70%)를 충족하며 근연종들과 구별되는 종 수준의 차이를 보였음

표 3.11. 균주 7A와 근연종 간의 유전체 비교

	ANI (%)			DDH (%)		
	7A	O. locisalsi	O. gochujangensis	7A	O. locisalsi	O. gochujangensis
7A	-	87.3	79.8	-	50.9	25.7
O. locisalsi	-	-	77.5	-	-	24.1
O. gochujangensis	-	-	-	-	-	-

7. 다수의 중앙해령 분절들로 이루어진 대형 균열대 조사

- 호주-남극 중앙해령(AAR)과 태평양-남극 중앙해령(PAR) 사이의 구간에는 최소 10개 이상의 작은 중앙해령 형태의 분절들과 여러 개의 변환단층(leaky transform fault) 및 신생 화산지대(Neo-volcanic zone)로 이루어진 대형 균열대가 존재하고 있으며, 이는 이 지역 일대에서 남북 방향으로 길게 뻗은 Emerald Fracture Zone이 태평양판과 남극판 간의 상대적인 움직임에 큰 변화가 생기면서 파쇄된 지역으로 추정되고 있음 (그림 3.102, 103.)
- 대형 균열대는 아주 규모가 크고 광역적인 지역으로써, 이 균열대를 구성하는 맨틀의 기원 및 특성, 균열대의 전체적인 지형 및 판구조적 진화과정 규명을 위해서는 상당한 시간과 노력이 소요될 것으로 예상되며 현재 기초적인 조사를 진행하고 있음 (그림 3.102, 103.)

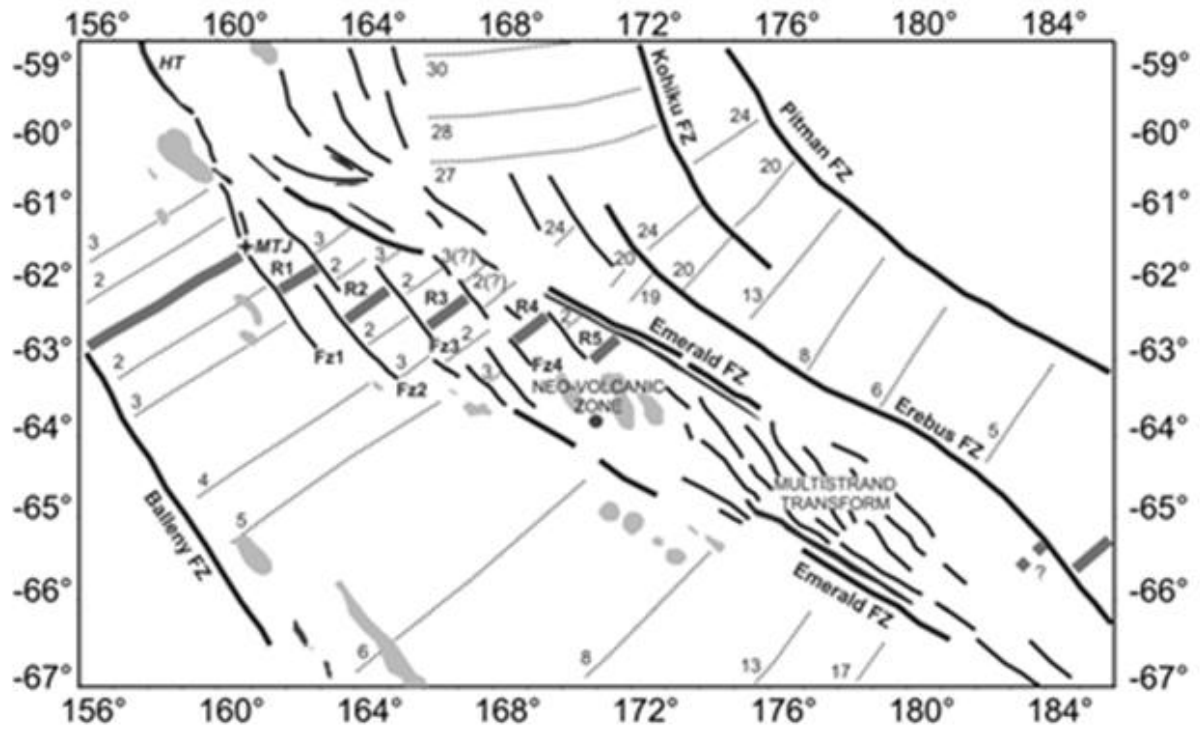


그림 3.102. 호주-남극 중앙해령과 태평양-남극 중앙해령 사이에 위치하는 대형 균열대에 대한 모식도 (Lodolo et al., 2013)

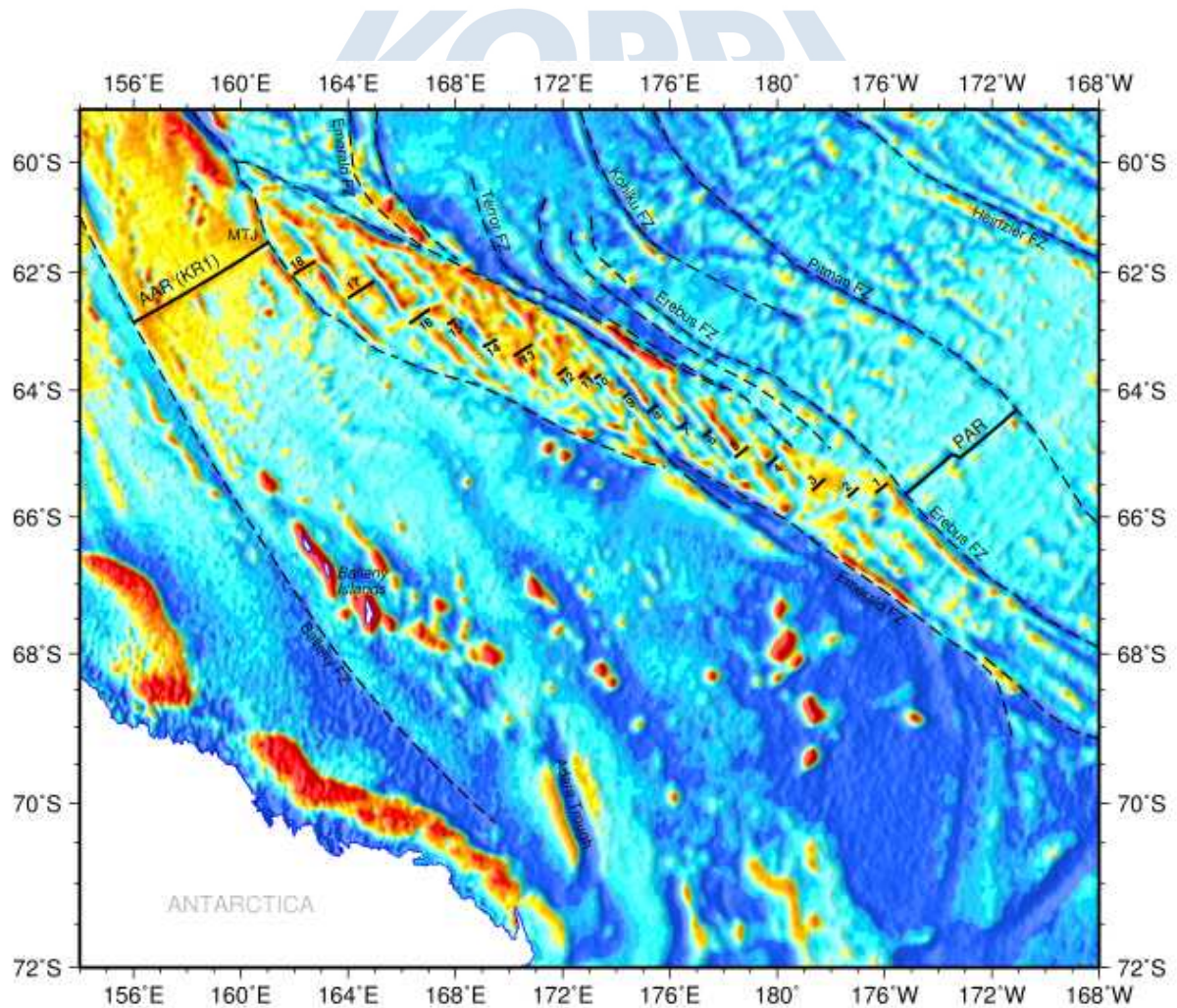


그림 3.103. 10개 이상의 작은 중앙해령 분절들로 구성되어 있는 대형 균열대의 위치 및 주변의 중력 이상 분포

제 5 절 해저화산과 지각 및 맨틀 포획암 연구

1. 해저화산암 지구화학

가. 호주-남극해령 해저화산암 지구화학

- 호주-남극해령(Australian-Antarctic Ridge)은 호주판과 남극판의 경계 짓는 해저 화산산맥이다. 호주-남극해령의 여러 세그먼트 중 가장 동쪽에 위치하는 KR1 세그먼트는 맥쿼리 삼중점(Macquarie Triple Junction)에서 태평양-남극해령(Pacific-Antarctic Ridge)과 요르트 해구(Hjort trench)로 연결된다(그림 3.104a). KR1 세그먼트 확장축은 맥쿼리 삼중점 부근인 북동부에서는 수심이 깊은 함몰지(-2,800 m)로 나타나나 세그먼트 중앙부를 향하여 수심이 얕아진다. KR1 확장축의 수심은 KR1 해산열(KR1 Seamount Trail)과 남서 해산군(Southwestern seamount province) 인근에서 가장 얕아진다(-1,750~-1,850 m; 그림 3.104b).
- KR1 해산열은 쏘레아이트와 알칼리 현무암으로 이루어진 현무암질 해저화산산맥이다. KR1 해산열은 KR1 확장축으로부터 다소 떨어진 위치에서 KR1 세그먼트의 남동 확장 방향(남극 방향)으로 약 60 km 길이로 확장방향과 평행하게 발달하였고 최대 높이는 1,600 m에 달한다(그림 3.104c). 3개의 드렛지 지점(DG03, DG04, DG05)에서 쏘레아이트와 알칼리 현무암이 획득되었고 화산 분화구로 추정되는 DG05 지역의 함몰지에서는 다량의 빙하(유빙)이동물질이 확인 되었다. KR1 해산열 현무암에 대한 (U-Th)/He 연대측정 결과는 DG03 알칼리 현무암(0.5~1.7 Ma), DG03 쏘레아이트(0.2~0.3 Ma), DG04 알칼리 현무암(0.1~0.2 Ma); DG05 알칼리 현무암(~0.6 Ma)로 매우 젊은 연령을 지시한다. KR1 해산열 현무암에 대한 K-Ar 연대측정 결과는 DG03 알칼리 현무암(< 1.4 Ma), DG03 쏘레아이트(< 0.4 Ma), DG04 알칼리 현무암(< 0.5 Ma), DG05 알칼리 현무암(< 1.3 Ma), DG05 쏘레아이트(< 1.6 Ma)로 (U-Th)/He 연대 보다 오래된 연령이 나타난다(그림 3.104c, 표 3.12.). 이러한 연령 불일치는 해저현무암이 가지는 근원 맨틀의 He-Ar 성분에 기인하는 것으로 추정된다.
- KR1 해산열 알칼리 현무암은 TAS(Total alkalis vs silica)그림에서 현무암-조면현무암-바사나이트 영역에 도시되고 쏘레아이트는 비알칼리계 현무암 영역에 도시된다(그림 3.105a, 표 3.13.). 원시맨틀표준화 미량원소변화그림에서 알칼리 현무암은 LILE(Rb, Ba, Sr)와 HFSE(Th, U, Nb, Ta, Zr, Ti)가 부화된 양상을 보이고 또한 Nb-Ta 양(+)의 이상치와 Pb 음(-)의 이상치를 보이는 독특한 특징을 가진다. 이에 반해 쏘레아이트는 원시맨틀표준화 미량원소변화그림에서 LILE-HFSE 부화의 정도가 미약하게 나타난다(그림 3.105b). KR1 해산열 알칼리 현무암의 지구화학적 특징은 해양도(ocean island) 현무암에서 나타나는 지화학 특징과 유사하다.
- KR1 해산열 하부 맨틀의 지구화학 특징을 파악하기 위하여 KR1 해산열 현무암의 Sr-Nd-Pb 동위원소비를 획득하고(표 3.14.), 이 값을 KR1-KR2 해령(확장축) 현무암과 남극해 주요 해양도 현무암의 동위원소비와 비교하였다. KR1 해산열 알

칼리 현무암은 KR1-KR2 해령현무암에 비해 부화된 Sr-Nd-Pb 동위원소 특징을 보인다. KR1 해산열 알칼리 현무암은 발레니섬 지역(Balleney province; 남극해)과 루루투 화산(Rurutu young volcanoes; 남태평양)의 현무암과 유사한 Sr-Nd-Pb 동위원소 특징을 보인다(그림 3.106, 107.). 즉 KR1 해산열의 알칼리 현무암은 대양저 현무암과는 양상이 다른 해양도 현무암의 특징을 보인다. KR1 해산열 알칼리 현무암은 PREMA(FOZO) 맨틀의 특징을 보이므로 이들 현무암의 근원물질을 오래된 해양암석권으로 유추할 수 있다. 원시맨틀표준화 미량원소변화그림에서 보이는 KR1 해산열 알칼리 현무암의 Nb-Ta 양(+)의 이상치와 Pb 음(-)의 이상치는 이들의 근원물질이 오래전 섭입작용을 경험한 해양암석권(해양지각+해양암권 맨틀)일 가능성을 지시한다. KR1 해산열의 쏘레아이트는 KR1-KR2 해령 현무암과 유사한 Sr-Nd-Pb 동위원소비를 보인다(그림 3.106, 107.). 이러한 동위원소-미량원소 지구화학 특징은 오래된 해양암석권의 순환과 상승, 호주-남극 해령의 형성, KR1 해산열 형성 기작에 대한 지구물리학적 연구 필요성을 제기한다.

- KR1 해산열 근원 물질의 특성을 파악하기 위해 KR1 해산열 현무암에 대한 비활성 기체 동위원소분석을 수행하였다(표 3.15.). 알칼리 현무암과 쏘레아이트의 $^3\text{He}/^4\text{He}(R/R_A)$ 값은 각각 0.09~0.67와 2.28~7.64로 나타난다. 6개 분석 시료 중 5개 시료가 대기 중 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 과 비슷하거나 더 낮은 수치를 보인다. 알칼리 현무암과 쏘레아이트의 $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$ 값은 297~357, $^{20}\text{Ne}/^{22}\text{Ne}$ 값은 9.90~9.99로 대기 값과 유사한 수치를 보인다(그림 3.108.). KR1 해산열 현무암의 불활성기체 동위원소비는 이들의 근원 맨틀 값을 나타내지 않고 화산분출 이후의 2차적인 평형작용의 결과를 보이는 것으로 생각된다. 이것은 화산분출 시 용암이 해수와 반응하고, 이후 1 Ma(백만년) 내외의 시간 동안 현무암의 U-Th이 방사성 붕괴하며 현무암의 비활성기체 동위원소 비를 변화시킨 결과로 추정된다.
- KR1 해산열 DG05 함몰지에서 획득된 대륙기원물질의 기원지를 추정하였다. 남극 대륙 주변의 해류와 유빙의 이동 방향, KR1 해산열과 남극대륙과의 인접성을 고려할 때, DG05 함몰지에서 획득된 대륙기원물질은 남극대륙에서 기원한 빙하이동물질임이 확인된다. 빙하의 유출, 해류와 유빙의 이동 방향을 고려할 때 빙하이동물질의 주 산출지는 로스해 인접 지역으로 추정된다(황색 표시 지역, 그림 3.110.). 빙하이동물질의 기원지를 추정하기 위하여 이들 암석의 형성 연대에 대한 전암 K-Ar 연대분석과 저어콘 U-Pb 연대분석을 실시하였다(표 3.16., 17.). DG05 지역 6개의 빙하이동물질의 암석형성연대는 336 Ma(U-Pb; 반려암질 섬록암), 298 Ma(U-Pb; 화강암), 291 Ma(K-Ar; 유문암), 228 Ma(U-Pb; 화강암), 150 Ma(K-Ar; 조면암), 100 Ma(U-Pb; 화강섬록암)로 확인된다(표 3.16., 그림 3.109.). 이들 암석의 연대를 남극대륙 내 노출지 연대와 비교하면, 이들 암석의 기원지는 주로 서남극의 서측 노출지에 대비된다. 이것은 서남극 서쪽 지역(남극반도 포함)에서 기원한 다량의 대륙 암석이 빙하이동물질에 포함되었을 가능성을 시사하고, 이들 유빙은 로스해와 서남극 서측부로 유출된 빙하가 그 모체임을 지시한다.

나. 로스해 해저화산암 지구화학

- 서남극 열개구조 하부 맨틀의 지구화학 특성과 호주-남극해령 하부 맨틀 특성을 비교하기 위하여 2015년 확보된 남극 로스해 해저화산암 드렛지(75°49'S/165°42'E; Drygalski Ice Tongue 인근 해역; 그림 3.104a) 시료(해저 화산암) 7점에 대한 전암 Sr-Nd-Pb 동위원소 분석을 실시하였다. 로스해 해저화산암의 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 값은 ~ 0.7029 , $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ 값은 주로 $0.51291\sim 0.51297$ 로 나타난다. 로스해 해저화산암의 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 값은 $18.12\sim 19.26$, $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 값은 주로 $15.51\sim 15.55$,

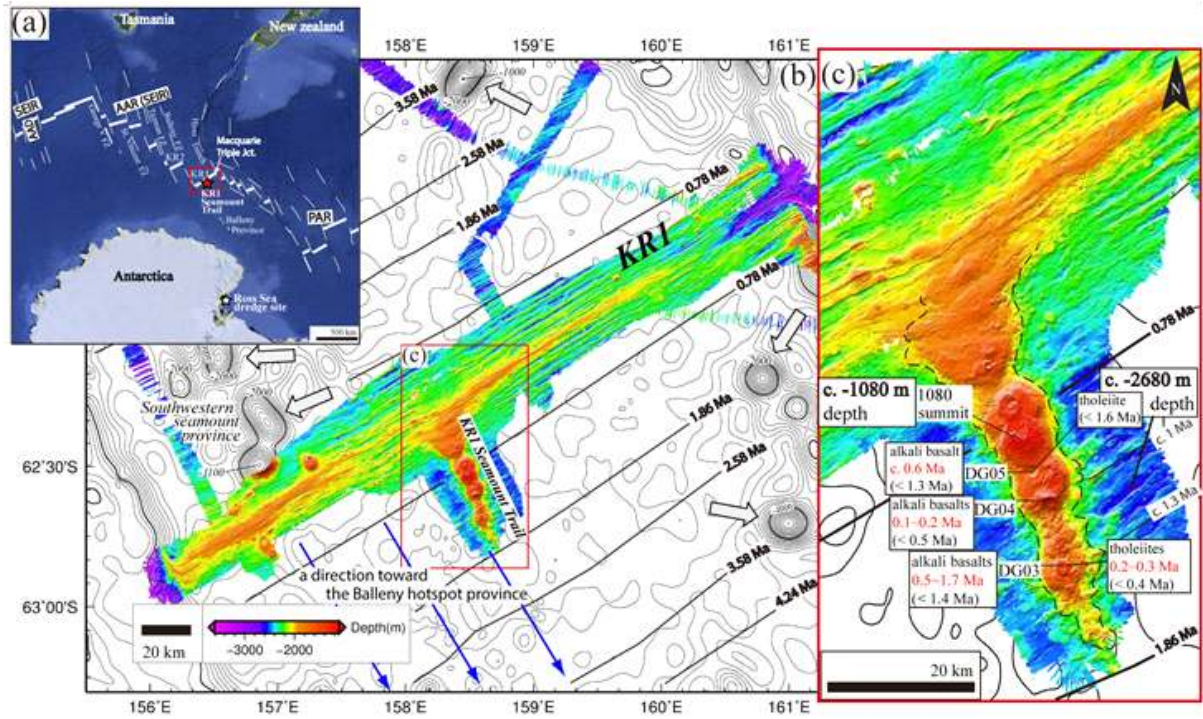


그림 3.104. 호주-남극해령(Australian-Antarctic Ridge: AAR) KR1 세그먼트, KR1 해산열(KR1 Seamount Trail). (a) 호주-남극해령, KR1 세그먼트, 로스해 드렛지 위치, (b) KR1 세그먼트 음향측심지형과 KR1 해산열(KR1 Seamount Trail), 남서 해산군(Southwestern seamount province); KR1 대양저의 자기이상연대(magnetic anomaly age: Choi et al., 2017); 높이 1,000 m 이상의 해산은 확산표로 표시, (c) KR1 해산열의 음향측심 지형, 드렛지 현무암의 (U-Th)/He 연대(빨간색)와 K-Ar(검은색) 연대. 약어: SEIR(Southeast Indian Ridge, 남동인도양해령); AAD(Australian-Antarctic discordance); PAR(Pacific-Antarctic Ridge, 태평양-남극해령)

표 3.12. KR1 해산열 드렛지 현무암 시료에 대한 전암 (U-Th)/He 연대와 K-Ar 연대

Sample	Rock type	U	Th	$^4\text{He}^{(1)}$	(U-Th)/He age	K	Rad. $^{40}\text{Ar}^{(2)}$	^{36}Ar	K-Ar age	Air fraction
		ppm	ppm	$10^{-9}\text{cm}^3\text{STP/g}$	Ma	wt. %	$10^{-9}\text{cm}^3\text{STP/g}$		Ma	%
DG03-1	alkaline basalt	0.60	2.9	69.4 ± 7.2	0.45 ± 0.50	0.822 ± 0.001	448.8 ± 4.9	0.74 ± 0.08	1.41 ± 0.15	82.9
DG03-3		1.40	4.8	53.4 ± 5.4	1.74 ± 0.18	0.581 ± 0.001	933.8 ± 9.7	1.48 ± 0.15	4.14 ± 0.43	82.5
DG03-5		2.90	10.0	747 ± 75	1.17 ± 0.12	1.718 ± 0.001	2141.7 ± 3.8	1.70 ± 0.18	3.21 ± 0.33	70.2
DG04-1		1.50	5.2	29.7 ± 3.4	0.09 ± 0.01	0.963 ± 0.029	303.5 ± 6.4	12.30 ± 1.24	0.81 ± 0.17	99.2
DG04-2		1.27	4.6	28.0 ± 3.7	0.10 ± 0.01	0.979 ± 0.029	221.3 ± 14.0	37.88 ± 3.80	0.58 ± 0.37	99.8
DG04-3	0.98	3.5	53.4 ± 5.8	0.24 ± 0.03	0.971 ± 0.024	169.0 ± 7.7	17.29 ± 1.74	0.45 ± 0.20	99.7	
DG05A	0.76	3.3	116 ± 12	0.62 ± 0.07	0.706 ± 0.001	357.6 ± 3.8	0.92 ± 0.10	1.30 ± 0.14	88.4	
DG03-2	tholeiite	0.30	0.9	17.3 ± 2.2	0.28 ± 0.04	0.241 ± 0.005	38.4 ± 0.7	1.13 ± 0.12	0.41 ± 0.07	98.9
DG03-4		0.30	0.9	10.5 ± 1.5	0.17 ± 0.02	0.315 ± 0.001	123.6 ± 1.4	0.55 ± 0.06	1.01 ± 0.12	92.9
DG05-1		0.13	0.5	-	-	0.216 ± 0.001	132.5 ± 1.5	0.70 ± 0.08	1.58 ± 0.18	94.0

Uncertainties for the gas concentrations are given as 1σ . The U, Th and K concentration values of the KR1 ST basalts are taken from Yi et al. (2019).

(1) Measured ^4He is assumed as radiogenic ^4He .

Radiogenic- ^4He concentration of the DG05-1 can not be estimated due to a presence of mantle-He.

(2) Radiogenic ^{40}Ar concentration was calculated as $^{40}\text{Ar} = [(^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar})_{\text{measured}} - 296] \times [^{36}\text{Ar}]$, where $(^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar})_{\text{atm}} = 296$.

사용장비: 비활성기체 질량분석 시스템(modified-VG5400, MS-IV; 일본 동경대학교)

표 3.13. KR1 해산열 현무암(알칼리 현무암, 솔레아이트)과 DG05 지역 빙하이동물질(화강암류, 반러암질 섬록암, 조면암, 유문암)에 대한 전암 지화학 분석 결과

Sample Rock type	DG05A	DG04-1	DG04-2	alkaline basalt		DG04-3	DG04-4	DG03-1	DG03-3	DG03-5	tholeiite		DG03-2	DG03-4	DG05J	DG05I	DG05R	DG05S	DG05W	DG05X	DG05O
	crystallized	glassy*			crystallized	crystallized	crystallized	crystallized	glass*	crystallized	glass*	crystallized	crystallized	crystallized	granitoids			gabbroic diorite	trachyte	rhyolite	
		crystallized	crystallized	crystallized											crystallized	crystallized	crystallized				crystallized
<i>Major elements (wt.%)</i>																					
SiO ₂	46.48	50.03	49.76	50.3	46.95	44.51	42.64	44.41	51.66	51.56	52.17	51.52	48.82	48.58	66.01	74.99	68.12	73.07	53.35	60.34	74.98
Al ₂ O ₃	14.46	17.66	17.86	18.17	15.54	13.17	11.11	15.30	14.73	14.6	15.25	14.58	15.87	16.12	15.96	14.15	17.60	14.97	17.12	19.03	14.57
FeO ^T	11.5	8.33	8.31	8.33	10.68	11.08	12.89	12.98	8.4	10.27	7.71	10.26	9.23	8.98	4.05	1.47	2.36	1.75	8.08	0.91	0.93
Na ₂ O	3.19	4.13	4.16	3.37	2.89	2.64	2.81	4.61	2.58	2.79	2.68	2.81	2.97	3.00	4.36	4.22	5.61	3.45	1.70	1.77	2.95
MgO	9.33	6.07	6.07	6.16	5.77	10.14	11.50	3.99	7.08	7.20	7.09	7.28	8.17	7.67	1.50	0.39	0.67	0.50	6.48	0.58	0.16
P ₂ O ₅	0.34	0.51	0.59	0.58	0.34	0.33	0.53	0.91	0.06	n.a.	0.09	n.a.	0.16	0.18	0.15	0.06	0.12	0.07	0.06	0.02	0.01
K ₂ O	0.85	1.16	1.18	1.17	0.84	0.99	0.70	2.07	0.26	0.19	0.26	0.19	0.29	0.38	4.01	4.18	2.04	4.01	0.64	8.22	4.56
CaO	9.12	9.38	9.30	9.43	11.39	10.72	9.90	8.32	12.33	12.16	12.71	12.11	11.19	11.24	2.41	0.83	2.90	2.01	12.00	3.65	1.29
TiO ₂	2.31	2.16	2.15	2.17	2.56	2.73	3.72	3.45	1.09	1.38	1.00	1.42	1.62	1.61	0.76	0.26	0.39	0.27	0.46	0.21	0.10
MnO	0.18	0.20	0.03	0.04	0.31	0.16	0.17	0.21	0.17	n.a.	0.18	0.18	0.17	0.17	0.12	0.06	0.07	0.05	0.16	0.08	0.03
LOI	0.59	n.a.	n.a.	n.a.	0.35	0.38	1.22	0.45	0.63	n.a.	0.29	n.a.	-0.47	0.03	1.04	0.82	0.56	0.63	0.28	6.11	1.90
Total	99.05	99.65	99.42	99.74	98.48	96.86	98.6	98.15	99.3	100.17	99.99	100.38	99.04	98.96	100.82	101.58	100.70	100.96	101.22	101.00	101.57
<i>Trace elements (ppm)</i>																					
Cr	318	209	219	125	189	347	558	7	136		134		283	314	10	5	2	2	64	2	1
Co	51	101	66	58	57	64	74	57	41		60		63	81	36	51	62	78	74	25	52
Ni	212	155	164	104	125	213	290	24	54		51		113	113	8	3	2	1	74	2	1
Cu	55	41	35	26	84	76	62	43	46		41		51	48	34	4	2	1	66	2	8
Zn	107	81	78	54	134	96	142	190	76		89		84	97	103	51	80	60	75	58	58
Rb	16	27	22	18	16	20	6	53	6		5		4	5	165	319	50	137	24	337	203
Sr	480	485	450	325	506	480	715	1070	148		149		218	233	359	224	715	427	120	106	171
Y	20.5	27.7	24.0	19.0	23.5	19.7	24.3	38.7	23.1		22.2		25.1	26.6	21.0	7.8	6.7	12.3	17.1	25.1	0.6
Zr	162	238	215	156	196	103	293	538	80		62		73	125	51	84	11	135	69	151	60
Nb	39.9	61.9	55.9	40.7	42.6	17.1	73.0	127.5	8.1		5.8		7.2	12.8	12.8	32.3	5.8	9.1	3.8	18.8	11.2
Cs	0.3	0.3	0.3	0.2	0.2	0.3	0.4	0.6	0.2		0.1		0.1	0.1	5.8	18.4	0.6	3.7	0.7	14.3	4.8
Ba	237	277	270	195	248	232	374	536	43		38		57	60	500	241	749	1064	141	1550	508
La	23.3	34.7	31.5	24.4	22.7	20.7	41.0	78.2	3.7		3.9		7.7	9.0	30.8	30.2	34.3	26.7	8.7	59.2	17.6
Ce	47	65	60	46	50	43	82	151	9		9		18	20	68	59	63	49	19	113	33
Pr	5.8	8.3	7.5	5.9	6.0	5.4	10.5	17.7	1.5		1.4		2.7	2.8	8.0	6.5	7.4	5.4	2.3	12.1	4.0
Nd	23.9	32.0	28.6	21.8	25.2	23.7	43.0	70.8	7.5		7.5		12.7	14.0	29.9	20.4	25.8	18.7	9.9	40.3	14.2
Sm	5.0	6.5	5.8	4.6	5.6	5.1	8.5	13.0	2.5		2.3		3.5	3.7	5.6	3.0	3.9	3.0	2.3	6.5	2.7
Eu	1.76	2.18	1.99	1.50	1.90	1.80	2.70	4.10	1.10		1.10		1.40	1.40	0.98	0.51	0.92	0.96	0.72	1.02	0.74
Gd	5.3	7.0	6.3	4.8	6.1	5.4	8.0	12.2	3.7		3.4		4.3	4.6	5.1	2.4	3.0	2.9	2.8	6.1	1.5
Tb	0.72	0.92	0.83	0.63	0.80	0.70	1.00	1.40	0.62		0.60		0.70	0.70	0.65	0.25	0.30	0.36	0.44	0.73	0.09
Dy	4.00	5.52	4.94	3.78	4.50	4.10	5.20	8.00	4.03		3.70		4.40	4.80	3.82	1.25	1.36	2.01	2.90	4.17	0.19
Ho	0.72	1.09	0.98	0.76	0.80	0.70	0.90	1.40	0.86		0.80		0.90	0.90	0.66	0.16	0.16	0.32	0.53	0.79	0.00
Er	2.02	3.07	2.74	2.11	2.20	2.00	2.40	3.70	2.46		2.40		2.70	2.80	2.08	0.66	0.54	1.02	1.83	2.53	0.03
Tm	0.28	0.42	0.39	0.28	0.30	0.30	0.30	0.50	0.37		0.30		0.40	0.40	0.31	0.11	0.07	0.14	0.26	0.39	0.00
Yb	1.75	2.64	2.44	1.84	1.80	1.60	1.70	2.90	2.42		2.20		2.40	2.60	1.98	0.71	0.46	0.88	1.78	2.71	0.00
Lu	0.27	0.40	0.37	0.28	0.30	0.20	0.20	0.40	0.37		0.30		0.40	0.40	0.30	0.12	0.08	0.14	0.28	0.43	0.01
Hf	3.9	6.4	5.8	4.3	4.4	2.8	6.6	10.9	2.3		1.8		2.3	3.7	2.8	3.6	1.1	4.6	2.3	5.4	3.7
Ta	2.7	4.1	3.6	2.5	3.0	1.2	4.1	10.4	0.5		0.4		0.2	1.0	0.9	2.6	0.4	0.8	0.2	1.5	0.7
Pb	1.7	2.9	2.0	1.6	5.4	1.5	2.0	4.1	0.5		0.5		0.8	0.8	54.7	19.1	18.6	31.1	3.9	22.0	30.9
Th	3.3	5.2	4.6	3.5	2.9	2.9	4.8	10.0	0.5		0.5		0.9	0.9	26.6	22.8	5.8	8.7	2.4	26.9	9.4
U	0.76	1.50	1.27	0.98	0.70	0.60	1.40	2.90	0.13		0.20		0.30	0.30	5.13	13.20	0.38	1.81	0.60	3.05	3.30

Note: Major elements of glasses (asterisked samples) were determined using FE-EPMA; n.a. (not analysed).
The FeO^T concentration (XRF data) of each sample except for that of glasses was recalculated from the Fe₂O₃^T contents.

사용장비: X선 형광분석기(PANalytical Axios Max; 극지연구소), 유도결합 플라즈마 질량분석기(iCAP Q, Thermo Scientific, 극지연구소), 전계방사 전자현미경(JEOL JXA-8530F; 극지연구소)

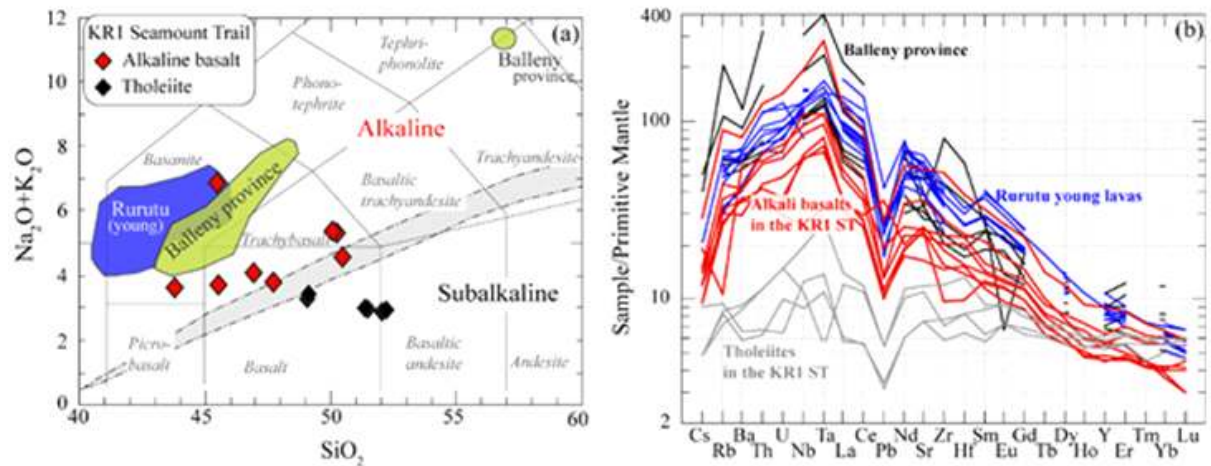


그림 3.105. KR1 해산열 현무암, 발레니섬 지역(Balleny province; 남극해) 현무암, 루루투 화산(Rurutu young volcanoes; 남태평양) 현무암 성분 비교: (a) TAS(Total alkalis vs silica)그림, (b) 원시맨틀표준화 미량원소변화그림; 발레니 지역 현무암 성분(Lanyon, 1994), 루루투 화산 현무암 성분(Chauvel et al., 1997), 원시맨틀성분(McDonough and Sun, 1995)

표 3.14. KR1 해산열 현무암에 대한 전암 Sr-Nd-Pb 동위원소 분석 결과

Sample	Rock type	$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$	2 σ	$^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$	2 σ	$^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	2 σ	$^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	2 σ	$^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	2 σ
DG03-1		0.703257	0.000005	0.512903	0.000005	19.5162	0.0013	15.6045	0.0011	39.3785	0.0035
DG03-3		0.703090	0.000006	0.512915	0.000004	19.7880	0.0015	15.6292	0.0013	39.3388	0.0043
DG03-5		0.703108	0.000006	0.512846	0.000005	19.9104	0.0008	15.6378	0.0008	39.4534	0.0024
DG04-1	alkaline	0.703017	0.000005	0.512958	0.000004	19.5236	0.0009	15.6033	0.0008	39.1849	0.0025
DG04-2	basalt	0.703021	0.000005	0.512939	0.000008	19.5166	0.0008	15.5928	0.0007	39.1646	0.0024
DG04-3		0.703004	0.000005	0.512947	0.000004	19.5275	0.0017	15.6038	0.0015	39.1935	0.0047
DG04-4		0.703252	0.000005	0.512856	0.000005	-	-	-	-	-	-
DG05A		0.703035	0.000006	0.512932	0.000008	19.7400	0.0009	15.6121	0.0008	39.4785	0.0025
DG03-2		0.702854	0.000006	0.512980	0.000006	18.9289	0.0015	15.5309	0.0014	38.5920	0.0044
DG03-4	tholeiite	0.702856	0.000006	0.513017	0.000006	18.8888	0.0012	15.5363	0.0011	38.5644	0.0034
DG05-1		0.702760	0.000006	0.513033	0.000006	18.9059	0.0020	15.4203	0.0018	38.4661	0.0058

분석장비: 열이온화 질량분석기(TRITON, Thermo Scientific, 극지연구소)

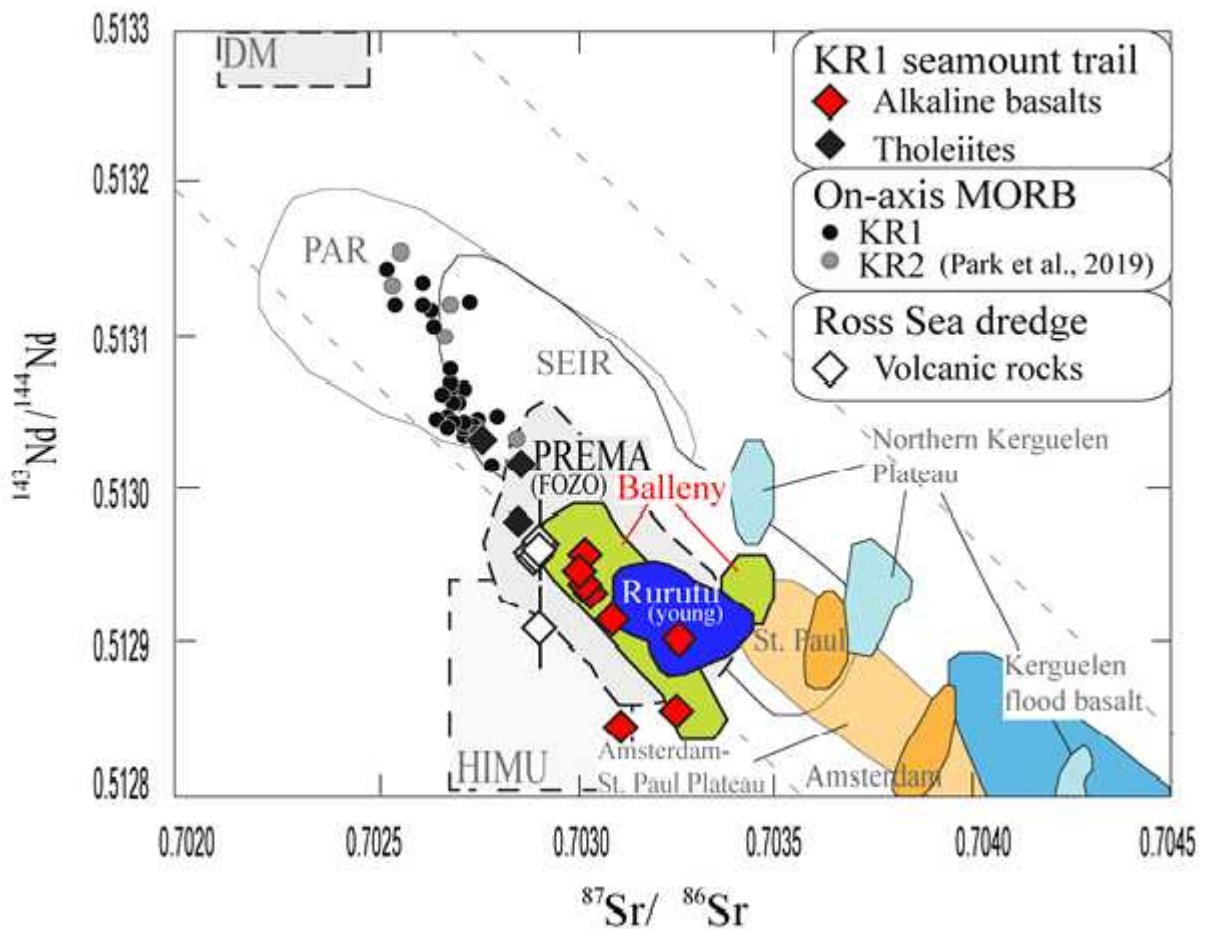


그림 3.106. KR1 해산열 현무암, KR1-KR2 해령 현무암(on-axis MORB: Park et al., 2019), 로스해 화산암 Sr-Nd 동위원소비 비교.

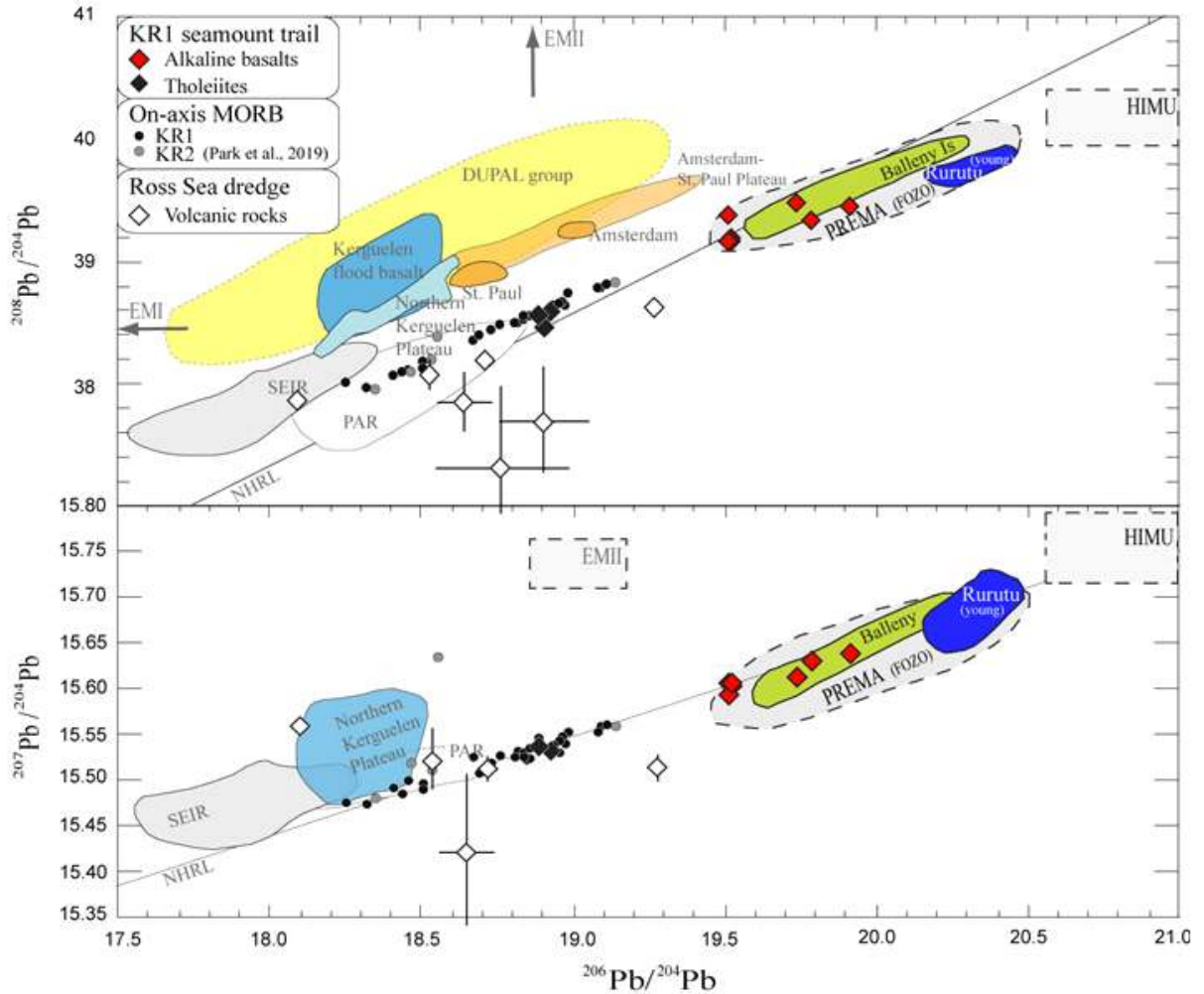


그림 3.107. KR1 해산열 현무암, KR1-KR2 해령 현무암(on-axis MORB; Park et al., 2019), 로스해 화산암 Pb 동위원소비 비교

표 3.15. KR1 해산열 현무암에 대한 전암 비활성동위원소(He-Ne-Ar-Kr-Xe) 분석 결과

sample	Rock type	$^3\text{He}/^4\text{He}$ ($\times 10^{-6}$)	$^3\text{He}/^4\text{He}$ (R/R_A)	$^{20}\text{Ne}/^{22}\text{Ne}$	$^{21}\text{Ne}/^{22}\text{Ne}$	$^{38}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$	$^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$	$^{84}\text{Kr}/^{132}\text{Xe}$
DG04-1	Alkaline basalt	0.927 ± 0.122	0.67 ± 0.09	9.900 ± 0.008	0.02943 ± 0.00025	0.18846 ± 0.00055	298.47 ± 0.46	25.84 ± 3.71
DG04-3		0.501 ± 0.065	0.36 ± 0.05	9.920 ± 0.009	0.02949 ± 0.00010	0.18752 ± 0.00072	296.98 ± 0.43	25.98 ± 3.72
DG03-1		0.129 ± 0.035	0.09 ± 0.03	9.909 ± 0.095	0.02941 ± 0.00542	0.18827 ± 0.00075	357.00 ± 1.24	3.12 ± 0.45
DG05A		0.226 ± 0.026	0.16 ± 0.02	9.920 ± 0.047	0.02981 ± 0.00155	0.18780 ± 0.00069	334.75 ± 0.73	7.29 ± 1.06
DG03-4	Tholeiite	3.165 ± 0.370	2.28 ± 0.27	9.998 ± 0.016	0.02972 ± 0.00025	0.18851 ± 0.00070	318.63 ± 0.74	20.28 ± 3.76
DG05-1B		10.617 ± 0.179	7.64 ± 0.13	9.967 ± 0.017	0.02959 ± 0.00026	0.18790 ± 0.00053	315.01 ± 0.68	18.50 ± 3.30

R_A 값은 대기 중 $^3\text{He}/^4\text{He}$ ($= 1.39 \times 10^{-6}$)를 나타냄

사용장비: 비활성기체 질량분석 시스템(modified-VG5400, MS-IV; 일본 동경대학교)

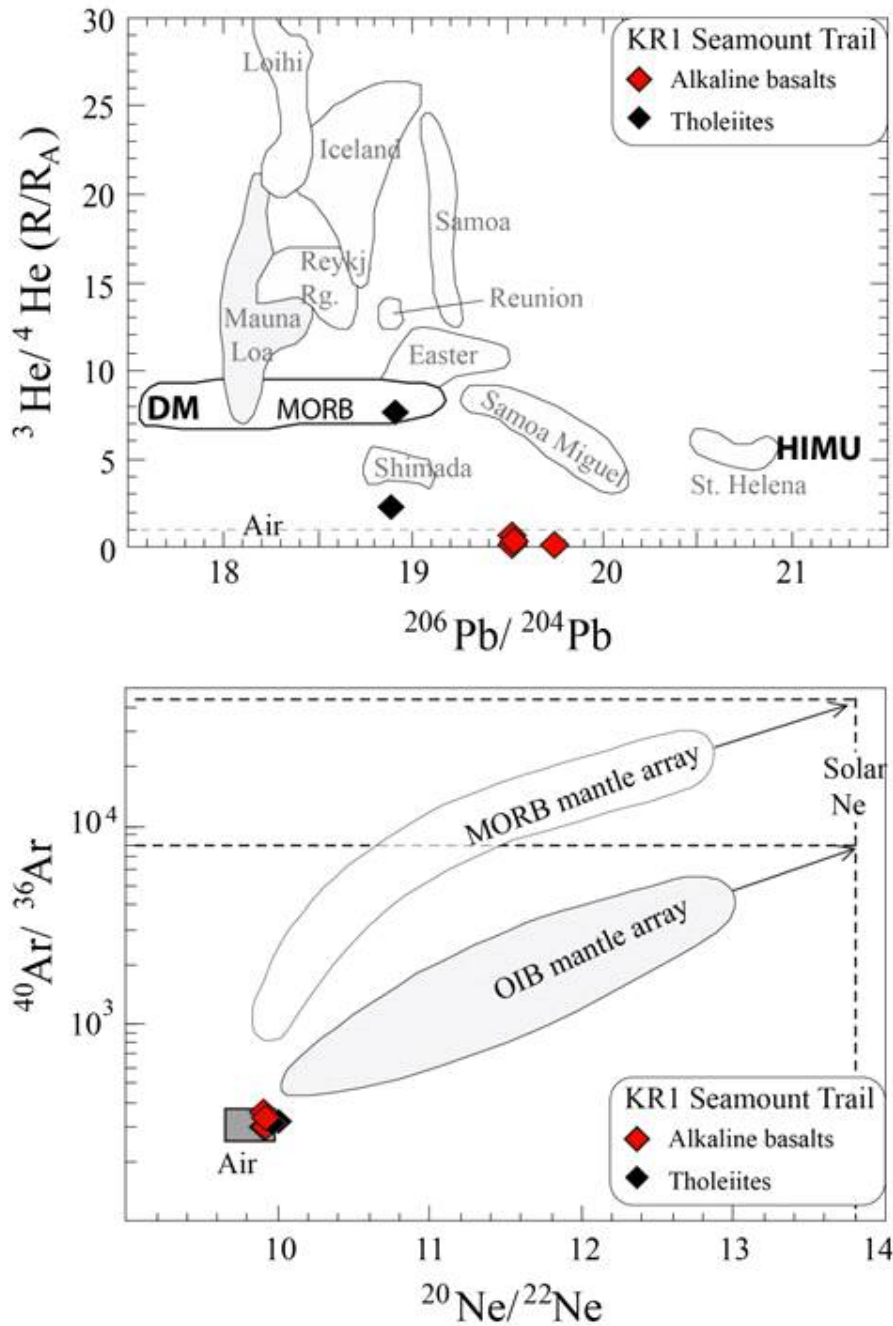


그림 3.108. KR1 해산열 현무암에서 획득된 $^3\text{He}/^4\text{He}$, $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$, $^{20}\text{Ne}/^{22}\text{Ne}$ 동위원소 비

표 3.16. KR1 해산열 DG05 함몰지에서 획득된 대륙 기원 화성암(빙하이동물질)의 전암 K-Ar 연대 분석 결과

Sample	K (wt. %) \pm		Sample weight (g)	Rad. ^{40}Ar ($10^{-8} \text{ cm}^3/\text{g}$) \pm		^{36}Ar ($10^{-10} \text{ cm}^3/\text{g}$) \pm		K-Ar age (Ma) \pm		Air fraction (%)
DG05O, rhyolite	3.796	0.076	0.00345	4663.38	17.18	283.21	2.48	291.6	5.5	15.2
DG05X, trachyte	7.362	0.147	0.00343	4497.60	51.04	212.89	7.94	150.9	3.3	12.3

사용장비: 비활성기체 질량분석기(VF5400, static vacuum mass spectrometer; 한국기초과학지원연구원), 원자흡수분광계 (Unicam 989, 한국기초과학지원연구원)

표 3.17. KR1 해산열 DG05 함몰지에서 획득된 대륙 기원 화성암(빙하이동물질)의 저어콘 U-Pb 연대 분석 결과

Spot	U (ppm)	Th (ppm)	Pb (ppm)	Th/U	$\frac{^{238}\text{U}}{^{206}\text{Pb}^*}$	\pm	$\frac{^{207}\text{Pb}^*}{^{206}\text{Pb}^*}$	\pm	$\frac{^{207}\text{Pb}^*}{^{235}\text{U}}$	\pm	$\frac{^{206}\text{Pb}^*}{^{238}\text{U}}$	\pm	err corr	$\frac{^{206}\text{Pb}}{^{238}\text{U}}$ Age $\pm 2\sigma$ (Ma)	$\frac{^{207}\text{Pb}}{^{206}\text{Pb}}$ Age $\pm 2\sigma$ (Ma)	$\frac{^{207}\text{Pb}}{^{235}\text{U}}$ Age $\pm 2\sigma$ (Ma)			
DG05W (Gabbroic diorite)																			
01	195	94	13.1	0.49	18.76	0.19	0.054	0.002	0.39	0.01	0.053	0.001	0.19	335	9.2	366	38	336	8.8
02	114	42	6.2	0.37	18.75	0.21	0.056	0.002	0.41	0.02	0.053	0.001	0.07	335	13.0	422	42	345	12.0
04	292	163	23.3	0.56	18.49	0.25	0.054	0.002	0.40	0.01	0.054	0.001	0.09	340	4.8	384	14	339	9.6
05	101	38	6.3	0.38	18.47	0.27	0.056	0.002	0.42	0.02	0.054	0.001	0.22	340	14.0	444	63	353	11.0
07	584	465	68.0	0.80	18.73	0.19	0.055	0.001	0.40	0.01	0.053	0.001	0.72	335	5.0	406	28	341	6.9
08	746	624	92.3	0.81	18.81	0.12	0.053	0.000	0.39	0.00	0.053	0.000	0.75	334	3.0	345	7	333	2.6
09	657	484	73.2	0.74	18.45	0.37	0.057	0.001	0.42	0.01	0.054	0.001	0.94	341	11.0	468	13	355	4.5
12	385	227	35.0	0.59	18.59	0.20	0.054	0.001	0.40	0.01	0.054	0.001	0.57	338	5.3	374	14	339	4.3
13	176	71	11.3	0.41	18.83	0.24	0.054	0.002	0.39	0.01	0.053	0.001	0.02	334	14.0	342	60	335	8.4
14	90	28	4.1	0.30	18.82	0.23	0.053	0.001	0.38	0.01	0.053	0.001	0.37	334	11.0	326	32	328	7.9
15	161	63	11.0	0.40	18.48	0.16	0.056	0.001	0.41	0.01	0.054	0.000	0.07	340	7.1	422	26	348	5.7
DG05R (Granodiorite)																			
01	418	320	15.4	0.79	62.97	1.23	0.061	0.004	0.13	0.01	0.016	0.000	0.66	102	8.4	680	150	128	8.0
03	394	403	20.8	0.93	66.01	1.22	0.067	0.006	0.14	0.02	0.015	0.000	0.78	97	13.0	830	170	133	13.0
06	131	100	4.6	0.77	64.06	0.62	0.048	0.001	0.10	0.00	0.016	0.000	0.17	100	1.5	190	37	98	2.9
07	382	339	14.4	0.85	63.94	0.82	0.048	0.002	0.10	0.00	0.016	0.000	0.08	100	1.6	172	44	100	3.2
08	247	62	3.3	0.26	65.10	0.42	0.058	0.002	0.12	0.01	0.015	0.000	0.32	98	4.0	532	61	117	4.9
10	158	109	5.1	0.68	63.25	1.24	0.047	0.003	0.10	0.01	0.016	0.000	-0.04	101	4.8	165	66	97	5.1
11	513	41	6.6	0.08	60.42	1.72	0.077	0.003	0.18	0.01	0.017	0.000	0.73	106	24.0	1185	55	164	7.3
12	422	504	19.8	1.18	62.93	0.87	0.052	0.003	0.11	0.01	0.016	0.000	0.50	102	2.5	321	89	108	5.5
13	435	716	27.7	1.63	63.29	0.88	0.051	0.003	0.11	0.01	0.016	0.000	0.90	101	1.9	241	99	107	7.1
14	229	289	14.0	1.23	59.07	0.63	0.075	0.003	0.17	0.01	0.017	0.000	0.12	108	4.2	1073	62	163	5.5
15	688	850	35.4	1.15	63.82	0.57	0.047	0.001	0.10	0.00	0.016	0.000	0.33	100	2.5	90	21	99	1.8
16	419	330	13.8	0.77	62.27	1.20	0.063	0.005	0.14	0.01	0.016	0.000	0.67	103	4.6	790	170	133	12.0
17	208	40	1.9	0.19	64.35	0.54	0.047	0.002	0.10	0.00	0.016	0.000	-0.30	99	4.9	163	41	99	3.6
18	702	926	36.9	1.30	64.27	0.66	0.049	0.001	0.10	0.00	0.016	0.000	0.94	100	1.2	138	30	100	1.7
19	397	323	13.4	0.81	63.53	0.89	0.053	0.002	0.12	0.01	0.016	0.000	0.74	101	2.4	360	89	112	6.2
20	665	704	30.0	1.08	63.69	0.77	0.048	0.001	0.10	0.00	0.016	0.000	0.65	100	1.2	105	16	100	2.4
21	631	892	38.2	1.42	63.49	0.44	0.052	0.001	0.11	0.00	0.016	0.000	0.53	101	1.3	316	22	110	2.2
22	1263	2170	84.8	1.72	62.93	1.78	0.049	0.002	0.11	0.00	0.016	0.000	0.95	102	2.0	160	28	105	4.1
23	399	94	6.0	0.23	59.38	0.81	0.052	0.004	0.12	0.01	0.017	0.000	0.19	108	11.0	240	110	114	6.4
25	344	442	19.2	1.22	62.27	0.78	0.059	0.002	0.13	0.00	0.016	0.000	-0.46	103	2.9	580	55	126	3.4
DG05H (Granite)																			
01	175	56	9.2	0.32	20.42	0.16	0.060	0.002	0.41	0.01	0.049	0.000	0.23	308	16.0	584	52	347	9.2
02	158	82	11.2	0.52	21.28	0.21	0.053	0.001	0.34	0.01	0.047	0.000	0.52	296	5.0	326	22	299	5.9
03	239	116	15.2	0.49	21.06	0.11	0.053	0.001	0.35	0.01	0.047	0.000	0.05	299	4.3	349	28	305	6.6
04	181	108	15.9	0.60	21.08	0.16	0.053	0.001	0.34	0.00	0.047	0.000	0.11	299	3.7	309	21	298	2.9
05	136	74	11.0	0.53	20.99	0.19	0.052	0.001	0.34	0.01	0.048	0.000	0.30	300	4.4	301	25	300	5.1
07	117	37	5.5	0.32	21.47	0.23	0.053	0.001	0.34	0.01	0.047	0.000	0.36	294	9.5	325	28	296	6.0
09	214	96	12.1	0.45	20.86	0.21	0.052	0.001	0.35	0.01	0.048	0.000	0.38	302	6.6	289	21	302	3.7
10	153	69	10.1	0.47	21.17	0.18	0.053	0.001	0.34	0.01	0.047	0.000	0.39	298	3.9	306	24	297	4.5
11	410	192	23.1	0.47	21.89	0.41	0.053	0.001	0.34	0.01	0.046	0.001	0.54	288	6.1	336	56	294	6.3
12	210	117	16.8	0.56	21.35	0.15	0.053	0.001	0.34	0.01	0.047	0.000	0.27	295	3.6	325	35	296	5.9
13	99	35	5.3	0.36	21.01	0.27	0.054	0.002	0.35	0.01	0.048	0.001	0.41	300	15.0	339	42	304	8.5
15	142	88	13.2	0.62	21.00	0.23	0.054	0.003	0.35	0.02	0.048	0.001	-0.21	300	5.0	346	65	302	11.0
16	240	141	19.7	0.58	21.06	0.19	0.053	0.001	0.34	0.00	0.047	0.000	0.45	299	4.8	303	16	300	3.7
17	232	126	17.4	0.54	21.16	0.16	0.053	0.001	0.35	0.00	0.047	0.000	0.28	298	3.6	319	15	301	3.2
18	357	191	23.9	0.54	20.97	0.26	0.052	0.001	0.35	0.01	0.048	0.001	0.90	300	4.2	286	26	301	7.5
22	160	96	14.4	0.59	21.04	0.41	0.053	0.001	0.34	0.01	0.048	0.001	0.74	299	7.4	308	44	300	9.4
24	69	39	5.9	0.57	20.93	0.39	0.053	0.002	0.34	0.01	0.048	0.001	0.35	301	13.0	312	34	300	6.0
26	338	102	16.6	0.30	21.07	0.21	0.054	0.001	0.36	0.01	0.047	0.000	0.81	299	7.2	377	23	309	5.8
27	138	48	7.2	0.34	20.67	0.25	0.057	0.001	0.38	0.01	0.048	0.001	0.62	305	12.0	511	33	330	9.2
29	106	67	9.6	0.61	21.09	0.19	0.052	0.001	0.34	0.01	0.047	0.000	0.35	299	6.0	303	25	297	5.9

표 3.17. (계속)

Spot	U (ppm)	Th (ppm)	Pb (ppm)	Th/U	$^{238}\text{U}/^{206}\text{Pb}^*$	\pm	$^{207}\text{Pb}^*/^{206}\text{Pb}^*$	\pm	$^{207}\text{Pb}^*/^{235}\text{U}$	\pm	$^{206}\text{Pb}^*/^{238}\text{U}$	\pm	err corr	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ Age $\pm 2\sigma$ (Ma)	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ Age $\pm 2\sigma$ (Ma)	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$ Age $\pm 2\sigma$ (Ma)			
DG05I (Granite)																			
01	388	272	28.4	0.70	28.53	0.11	0.051	0.001	0.25	0.00	0.035	0.000	0.28	222	1.8	248	27	225	3.2
02	896	753	77.6	0.84	28.28	0.17	0.051	0.000	0.25	0.00	0.035	0.000	0.46	224	1.5	209	11	223	2.3
03	574	472	49.1	0.82	28.47	0.20	0.051	0.000	0.25	0.00	0.035	0.000	0.72	223	1.8	224	11	224	2.7
04	407	321	34.6	0.79	28.27	0.23	0.051	0.001	0.25	0.00	0.035	0.000	0.50	224	2.3	236	17	226	2.2
05	488	281	30.6	0.58	28.62	0.39	0.051	0.001	0.25	0.00	0.035	0.000	0.65	221	2.0	219	15	223	2.9
06	336	330	34.5	0.98	28.45	0.17	0.052	0.001	0.25	0.00	0.035	0.000	0.31	223	1.8	294	18	230	2.5
08	772	710	69.8	0.92	27.89	0.16	0.051	0.000	0.25	0.00	0.036	0.000	0.58	227	1.4	235	9	227	2.1
10	818	721	75.0	0.88	28.56	0.24	0.053	0.000	0.25	0.00	0.035	0.000	0.75	222	2.4	307	8	229	2.2
11	851	1210	117.6	1.42	28.41	0.16	0.051	0.000	0.24	0.00	0.035	0.000	0.49	223	1.7	224	12	222	2.1
13	321	245	26.0	0.76	28.46	0.21	0.050	0.001	0.24	0.00	0.035	0.000	0.60	223	2.1	207	15	222	2.4
15	398	271	28.2	0.68	28.46	0.39	0.050	0.001	0.24	0.00	0.035	0.000	0.76	223	4.1	201	11	221	3.3
16	798	733	77.8	0.92	28.40	0.23	0.058	0.001	0.28	0.01	0.035	0.000	0.76	223	2.9	538	18	249	4.1
17	690	629	67.6	0.92	27.89	0.23	0.055	0.001	0.27	0.00	0.036	0.000	0.74	227	1.8	393	12	244	3.1
18	983	753	70.8	0.72	28.22	0.33	0.056	0.000	0.27	0.00	0.035	0.000	0.68	225	3.7	454	12	241	2.3
19	337	285	31.0	0.84	28.24	0.69	0.054	0.001	0.26	0.01	0.035	0.001	0.72	224	11.0	385	34	235	4.4
20	520	348	34.6	0.68	28.26	0.24	0.050	0.001	0.24	0.00	0.035	0.000	0.92	224	1.7	214	12	220	2.3
21	688	522	50.7	0.77	28.32	0.23	0.051	0.001	0.24	0.00	0.035	0.000	0.41	224	2.4	225	12	220	2.6
22	650	751	77.0	1.13	28.43	0.27	0.051	0.000	0.25	0.00	0.035	0.000	0.83	223	2.4	214	11	223	2.6
23	1502	2300	220.9	1.56	28.59	0.15	0.050	0.000	0.24	0.00	0.035	0.000	0.53	222	1.2	203	7	218	1.5

Errors are 2-sigma; Pb* indicates the radiogenic portion.

사용장비: 레이저작마 다중검출기 유도결합 플라즈마 질량분석기(NWR193UC, ESI: Nu Plasma II, Nu Instruments; 한국기초과학지원연구원)

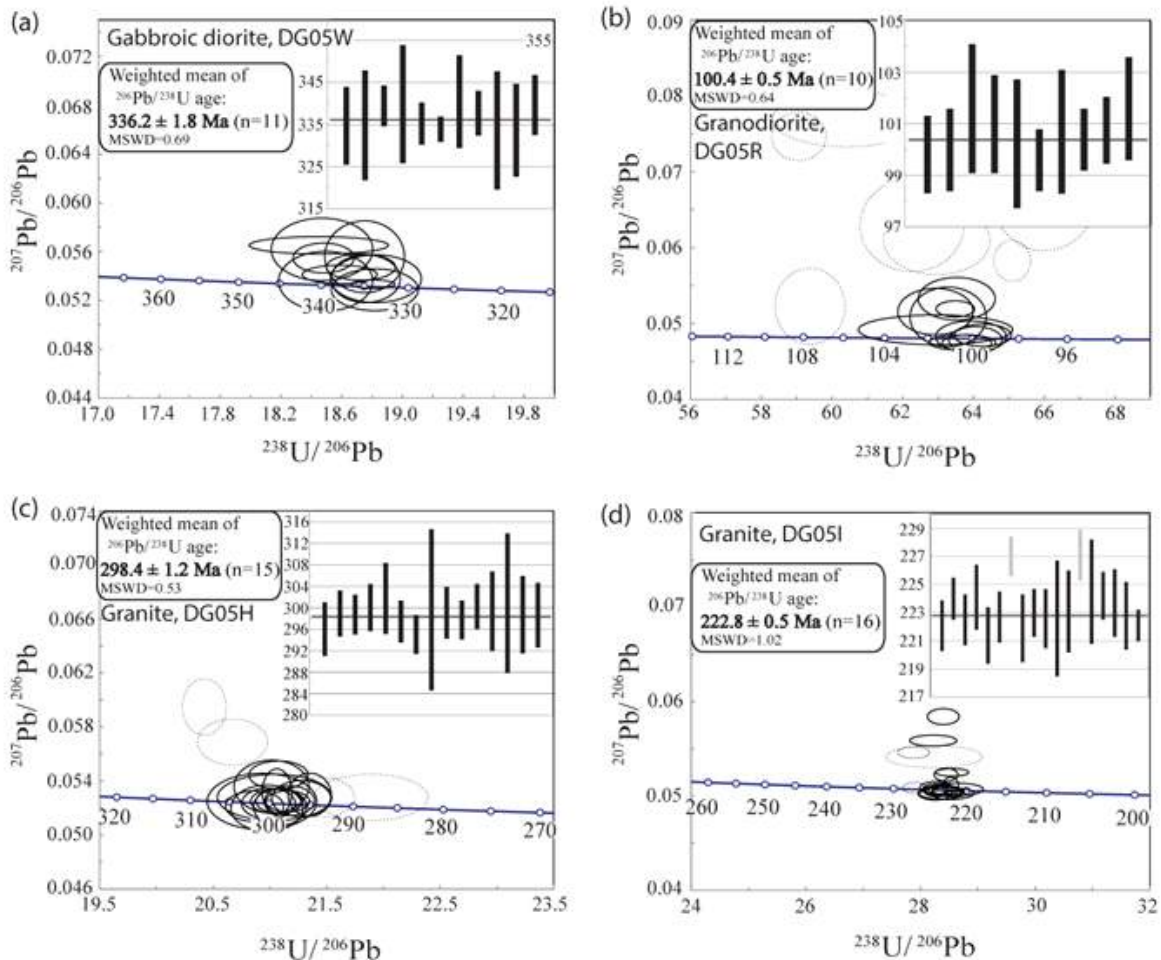


그림 3.109. KR1 해산열 DG05 함몰지에서 획득된 대륙 기원 화성암(빙하이동물질)의 저어콘 U-Pb 연대

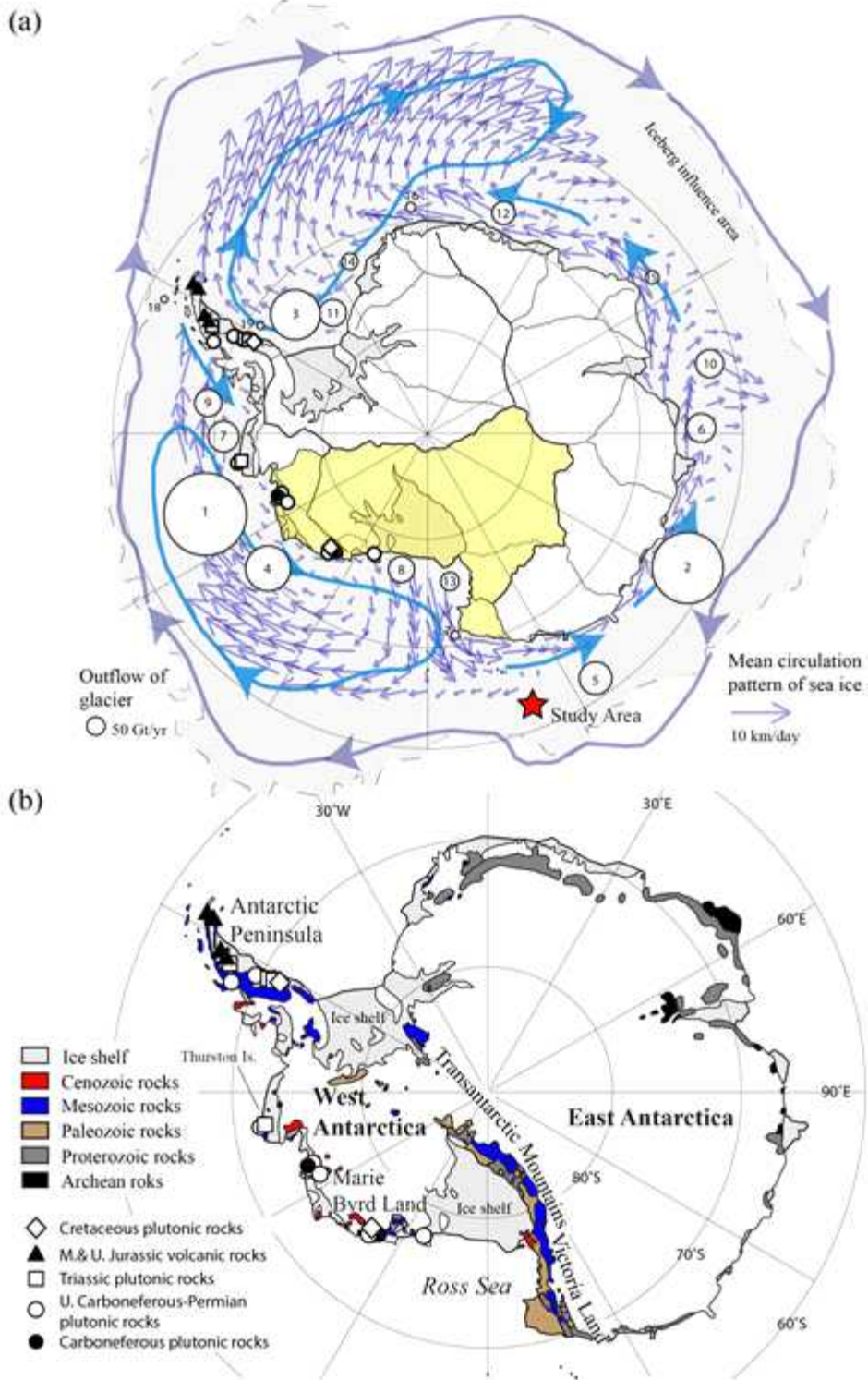


그림 3.110. 남극대륙 빙하의 유출량(Rignot *et al.*, 2008), 남극대륙 주변 해류와 유빙의 이동 방향(Colling, 2001; Vaughan *et al.*, 2013). 남극대륙의 지질, 호주-남극해령 KR1 DG05 함몰지에서 획득된 빙하이동물질의 연대와 남극대륙 내 예상 산출지 비교.

- $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 값은 37.37~38.63으로 나타난다(표 3.18.). 로스해 해저화산암의 동위원소비는 부화된 중앙해령현무암과 유사한 수치를 보인다. 이것은 로스해 드렛지 지점 해저화산의 근원 물질이 천부 연약권 맨틀일 가능성을 지시한다. 로스해 화산암은 KR1-KR2 중앙해령현무암과 KR1 해산열 쏘레아이트 보다 Sr-Nd 동위원소비가 다소 부화된 특징을 보이지만, Pb 동위원소비에서 로스해 화산암은 KR1-KR2해령현무암과 KR1 해산열 쏘레아이트와 유사한 동위원소 특징을 보인다(그림 3.106, 107.). 이것은 로스해 화산암(로스해 기저부), KR1-KR2해령 쏘레아이트, KR1 해산열 쏘레아이트(해산열 기저부)가 모두 유사한 종류의 천부 연약권 맨틀을 근원물질로 가질 가능성을 시사한다. 이에 반해 KR1 해산열의 알칼리 현무암은 쏘레아이트와는 양상이 다른 해양도 현무암 PREMA(FOZO)의 특징을 보인다.
- 로스해 화산암, KR1-KR2해령 쏘레아이트, KR1 해산열 쏘레아이트의 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 값은 주로 18.3~19.2의 범위를 보인다. 이 값은 KR1 해산열 알칼리 현무암이 가지는 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 값(19.5~19.9)에 비해 낮은 수치이긴 하지만 쏘레아이트 생성에 PREMA(FOZO) 성분이 부분적으로 기여됨을 지시하기도 한다. 따라서, 로스해, KR1-KR2 해령, KR1 해산열 형성이 서로 관련성 있는 맨틀 진화와 마그마 생성 매커니즘 하에 있었을 가능성에서 추가적인 연구가 더 진행되어야 한다.

표 3.18. 남극 로스해 해저화산암 드렛지 시료의 전암 Sr-Nd-Pb 동위원소 분석 결과

Sample	Rock type	$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$	2 σ	$^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$	2 σ	$^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	2 σ	$^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	2 σ	$^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	2 σ
DR1-B	volcanic rocks	0.702908	0.000007	0.512965	0.000014	18.7673	0.2171	15.1977	0.1972	37.3700	0.6180
DR1-C		0.702881	0.000005	0.512959	0.000006	18.1201	0.0044	15.5566	0.0042	37.8984	0.0129
DR1-D		0.702888	0.000006	0.512956	0.000013	19.2636	0.0163	15.5129	0.0146	38.6371	0.0460
DR1-E		0.702893	0.000008	0.512957	0.000009	18.7217	0.0153	15.5119	0.0147	38.2167	0.0455
DR1-G		0.702899	0.000005	0.512910	0.000022	18.6563	0.0927	15.4229	0.0857	37.8955	0.2664
DR2-A	volcanic rocks	0.702899	0.000007	0.512967	0.000024	18.9108	0.1429	15.3158	0.1297	37.7342	0.4067
DR2-C		0.702903	0.000006	0.512961	0.000013	18.5418	0.0391	15.5195	0.0366	38.1038	0.1133

분석장비: 열이온화 질량분석기(TRITON, Thermo Scientific, 극지연구소)

다. Hf 동위원소분리 시스템 구축

- 해저화산암 및 포획암 Hf 동위원소 분석을 위하여 Hf 원소 분리 및 질량분석 시스템을 구축하였다. 암석시료로부터 순수한 Hf을 분리하기 위해 두 차례의 이온교환 컬럼을 이용한 분리를 실시하였으며(그림 3.111.), 다음과 같은 컬럼분리 프로토콜을 완성하였다(표 3.19.).
- 양에 따른 회수율을 정확히 파악하기 위하여 Hf 양 차이가 큰 서로 다른 종류의 암석으로 실험하여 결과를 비교하였다. 이번 실험에서는 현무암(JB-2, Hf 30.59 ng)과 유문암(JR-3, Hf 852 ng) 표준시료를 이용하였으며, 단계별로 다음과 같은 회수율을 얻었다(JB-2: 1단계 89 %, 2단계 83 %; JR-3: 1단계 92 %, 2단계 87 %). 동위원소 분리를 위한 컬럼분리 실험을 진행하면서 chemical blank는 30 pg 미만으로 유지하였다.
- 이렇게 분리한 표준암석시료의 순수한 Hf과 Hf 표준용액시료는 3 % HNO₃로 희

석하였으며, 다중검출기 유도결합 플라즈마 질량분석기(MC-ICP-MS, NEPTUNE, Thermo Scientific; 극지연구소)를 이용하여 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 값을 측정하였다(표 3.20). 다중검출기 유도결합 플라즈마 질량분석기를 이용한 표준 용액·암석시료 분석에서 추천값 1 % 이내의 결과를 획득하였고, 이를 통해 미지 암석시료에 대한 Hf 동위원소 분석 시스템 완성하였다.

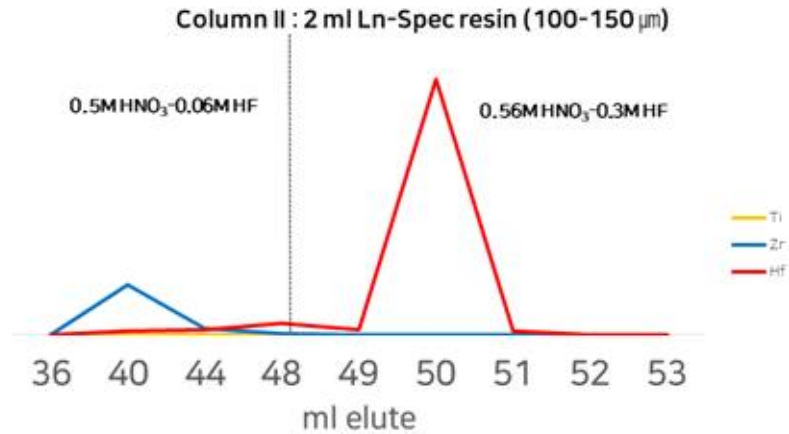


그림 3.111. 이온교환 컬럼을 이용한 Hf 용해 곡선. 피크 모양은 동일한 최댓값으로 표준화됨.

표 3.19. 2단계 Hf 이온 교환 컬럼 분리 과정

Step	Acid
Column I: 2 ml AG 50W-X8 (200-400 mesh)	
Preparation	12 ml 6M HCl 5 ml MQ H ₂ O 12 ml 2M HF 24 ml 6M HCl 5 ml MQ H ₂ O
Condition	2 ml 1M HCl - 0.1M HF
Load sample, collect HFSE (Hf)	2 ml 1M HCl - 0.1M HF
Collect HFSE (Hf)	0.5 ml 1M HCl - 0.1M HF
Collect HFSE (Hf)	2 ml 1M HCl - 0.1M HF
Column II: 2 ml Ln-Spec resin (100-150 mm)	
Preparation	12 ml 6M HCl 12 ml 2M HF 12 ml 6M HCl 12 ml 2M HF 2 ml MQ H ₂ O
Condition	0.2 ml 0.56M HNO ₃ - 0.3M HF - 4% H ₂ O ₂ 2 x 2 ml 3M HNO ₃ - 1% H ₂ O ₂
Load HFSE cut from column I	2 ml 3M HNO ₃ - 1% H ₂ O ₂
Elute Ti	6 x 2 ml 3M HNO ₃ - 1% H ₂ O ₂
Wash off H ₂ O ₂	2 ml 0.1M HNO ₃
Elute Zr	8 x 4 ml 0.5M HNO ₃ - 0.06M HF 1 ml 0.56M HNO ₃ - 0.3M HF
Collect Hf	1 ml 0.56M HNO ₃ - 0.3M HF

분석장비: 다중검출기 유도결합 플라즈마 질량분석기(NEPTUNE PLUS, Thermo Scientific, 극지연구소)

표 3.20. 다중검출기 유도결합 플라즈마 질량분석기를 이용하여 표준용액 및 표준암석시료의 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 동위원소 비 측정값. N(반복 분석 개수)

Date	Sample(N=10)	concentration (ppb)	sample cone	skimmer cone	AridusII	data	177Hf (V)	176/177Hf	StdDev (%)	StdDev (abs)	SD (ppm)	2sd	Reference	measured-Ref.
20180920	tune solution	200	N	H	no	100	2.469	0.282162	0.0053	0.000015	53	30	0.282160	2
	tune solution	200	N	H	no	20	2.432	0.282153	0.0059	0.000017	59	33	0.282160	-7
20180921	tune solution	200	N	X	no	20	4.403	0.282224	0.0042	0.000012	42	24	0.282160	64
	tune solution	200	N	X	no	20	4.835	0.282184	0.0050	0.000012	50	24	0.282160	24
20181011	tune solution	200	N	H	no	20	1.974	0.282153	0.0077	0.000022	77	44	0.282160	-7
20181109	AMES_Hf	20	N	X	use	20	5.146	0.282157	0.0044	0.000012	44	25	0.282160	-3
	JB-2	25	N	X	use	20	6.573	0.283236	0.0038	0.000011	38	21	0.283235	1
	JB-2	20	N	X	use	20	4.536	0.283253	0.0037	0.000011	37	21	0.283235	18
	JR-3	25	N	X	use	20	5.473	0.282850	0.0061	0.000017	61	34	0.282889	-39
	JR-3	20	N	X	use	20	5.052	0.282856	0.0049	0.000014	49	28	0.282889	-33
20181113	AMES_Hf	25	N	X	use	20	4.520	0.282135	0.0038	0.000011	38	21	0.282160	-25
20181114	AMES_Hf	25	Jet	X	use	20	8.339	0.282172	0.0034	0.000010	34	19	0.282160	12
	JB-2	25	Jet	X	use	20	9.848	0.283227	0.0036	0.000011	36	21	0.283235	-8
	JB-2	20	Jet	X	use	20	6.796	0.283210	0.0032	0.000013	32	25	0.283235	-25
	JR-3	25	Jet	X	use	20	7.233	0.282873	0.0055	0.000016	55	31	0.282889	-16
	JR-3	20	Jet	X	use	20	6.709	0.282869	0.0037	0.000010	37	21	0.282889	-20

2. 맨틀포획암 미구조 연구

가. 멜버른 화산암대 맨틀포획암

- 맥머도 화산그룹의 한 부분인 멜버른지역은 북빅토리아랜드 내 활화산인 멜버른 화산, 리트만 화산을 포함한다. 이 화산들은 후기 백악기동안 발달한 서남극 지구계(West Antarctic Rift System) 내 신장 알칼리 마그마활동(extensional alkalic magmatism)과 연관이 있는 것으로 간주된다(DiVenere *et al.*, 1994; Luyendyk *et al.*, 1996). 멜버른 화산은 북동으로 발달한 성층화산으로, 장보고기 지로부터 약 30 km 떨어진 곳에 위치하고 있다. 가장 최근 분출된 것은 얼음 절벽에서 채취한 화산재의 깊이와 눈 축적률에 따라 약 1862-1922 CE (Lyon, 1986), 얼음코어 내 테프라 층의 주성분원소 분석에 따라 약 10,000 yrs (Lee and Lee, 2017)로 보고되었다. 최근 지진과 관찰에 의해 NE-SW 방향의 빠른 S-파 비등방성이 보고되었다(Barklage *et al.*, 2009; Graw and Hansen, 2017; Pondrelli *et al.*, 2006; Salimbeni *et al.*, 2010). 절대 조구조판 이동은 NNW-SSE 방향으로 보고되었다(Gripp and Gordon, 2002).
- 본 과제에서 분석한 맨틀포획암은 총 6종으로, 2012-2013 극지연구소 남극미션에서 채취하였다. 박편 사이즈 이상의 샘플만을 추려 분석하였다(그림 3.112.). 암석은 감람석, 사방휘석, 단사휘석의 광물분포에 의해 레조라이트, 하쯔버가이트, 더 나이트로 정의되었다. 관찰한 암석들은 주로 반상조직을(porphyroclastic) 보이는 감람석, 사방휘석과, 사이를 채우고 있는(interstitial) 단사휘석, 침정석으로 이루어져 있다. 샘플은 암석 단계의 사이즈에서 어떤 면구조, 선구조도 관찰되지 않으며, 따라서 랜덤한 방향으로 박편을 제작하였다.

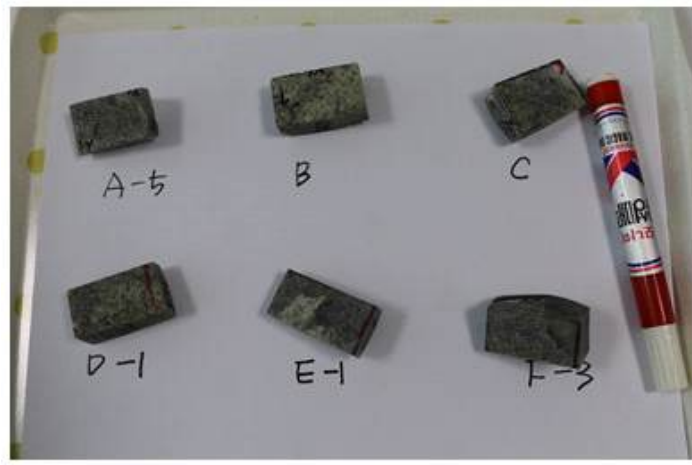


그림 3.112. 멜버른화산암대에서 기확보된 맨틀포획암 샘플 6종

나. 맨틀포획암 열평형 온도 추정

- 확보된 맨틀포획암 시료 6종에 대해 극지연구소에 설치된 EPMA를 이용해 화학 성분 분석을 실시하였다. 감람석은 89-91, 사방휘석은 90-92, 단사휘석은 93-95의 높은 Mg#값($100 \times \text{atomic Mg}/(\text{Mg} + \text{Fe}^{2+})$)을 보인다. 침정석은 Cr#에 대해 레조라이트에서는 16-24, 하즈버가이트에서는 32-34, 더나이트에서는 24-28의 중간값 결핍(depletion)을 보인다(그림 3.113a). 침정석 내 아주 낮은 TiO_2 와 Cr# 성분은 중앙해령 현물암을 지시하고, 침정석 내 낮은 Cr# 성분과 감람석 내 낮은 Fo# 성분은 심연감람암의 약 10% 내외의 용융을 지시한다(그림 3.113b). 사방휘석 내 칼슘지온계(Brey and Köhler, 1990)를 이용해 구한 열평형온도는 860-920 $^{\circ}\text{C}$ 를 나타내고 이는 얇은 깊이의 변형을 뜻한다.

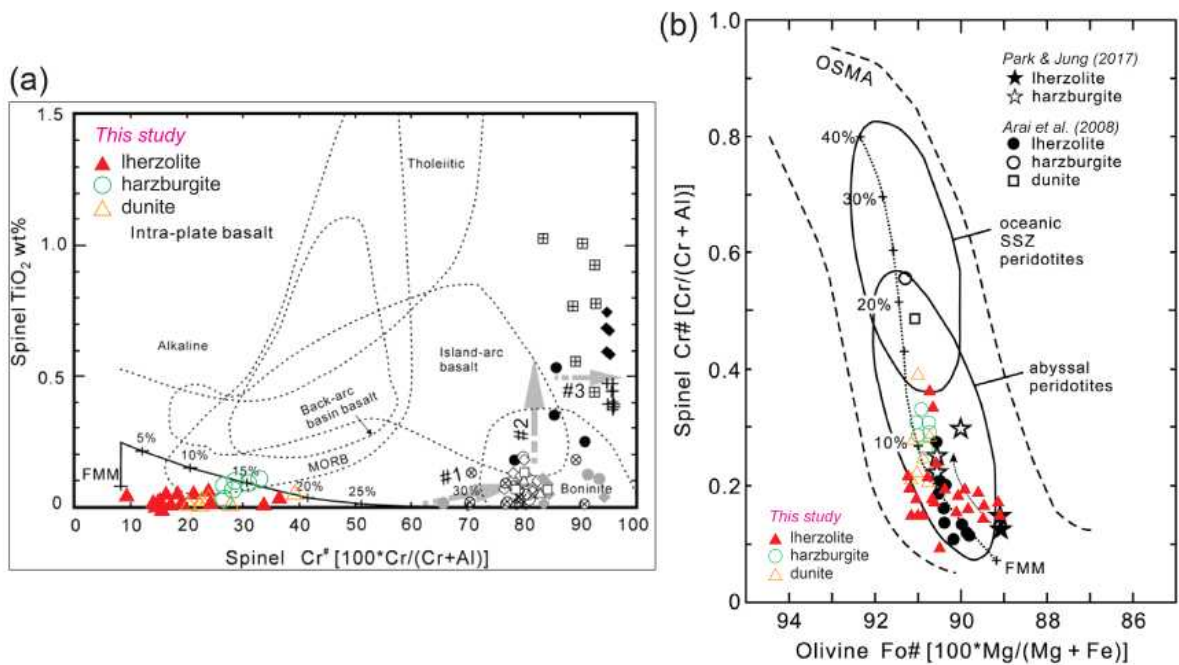


그림 3.113. 침정석 내 TiO_2 와 Cr# 성분을 도시한 그림(a)과 침정석 내 Cr# 성분과 감람석 내 Fo# 성분의 상관관계를 도시한 그림. 기본이 되는 그림은 Choi (2012)에서 가져옴

다. 맨틀포획암 미구조

- 맨틀포획암 미구조를 분석하기 위해 샘플의 물리적, 화학적 연마(mechanical and chemical polishing)한 후, 약 10nm 두께로 탄소코팅을 실시하였다. 한국생산기술연구원 부속 희소금속분석센터에 설치된 HKL-EBSD 장비를 이용해 가속전압 20 kV, 샘플거리 약 20 mm의 조건에서 광물방향성 데이터를 획득하였다(그림 3.114).
- 분석한 데이터는 기준축(reference frame)이 없기 때문에 (100) Michibayashi *et al.* (2016)의 방법을 이용해 감람석의 종류를 구분하였다(그림 3.115). 감람석 결정방향성(crystallographic preferred orientation, CPO)은 5개의 샘플에서 D-type으로, 1개의 샘플에서 A-type으로 분류되었다(그림 3.115a). D-type, A-type 감람석은 물의 함량이 낮고 응력의 범위가 다양한 조건에서 형성됨을 의미한다 (Karato *et al.*, 2008, 그림 3.115b).

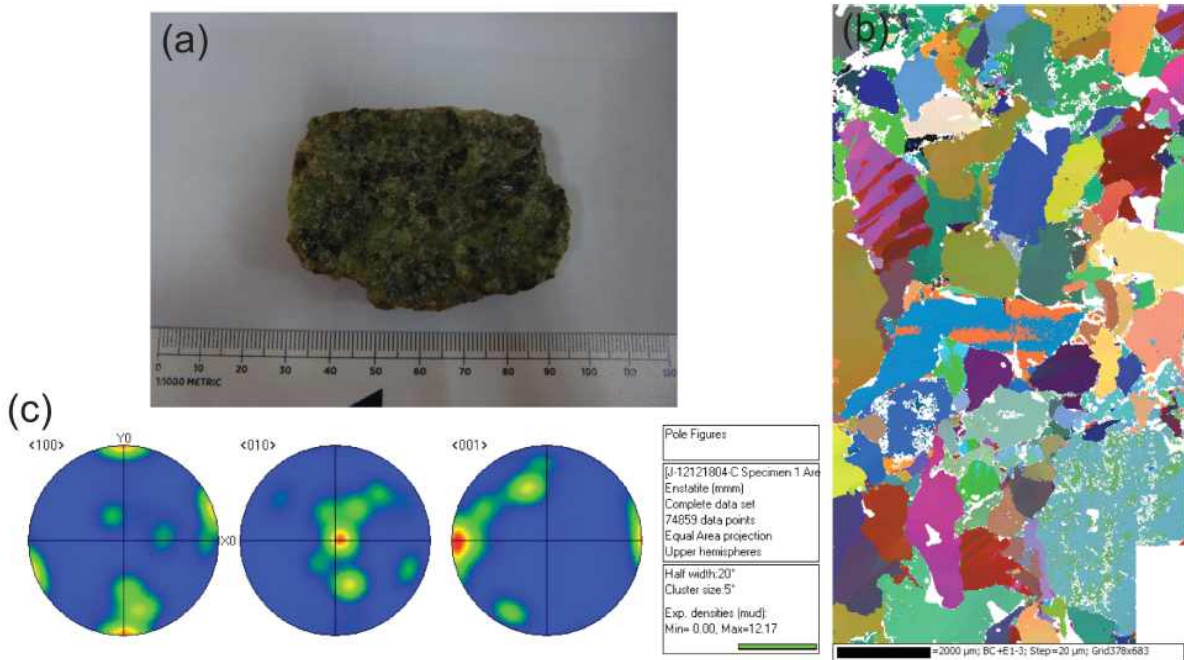


그림 3.114. 1종의 샘플에 대한 EBSD 분석결과. (a) 샘플사진, (b) 결정방향성 지도, (c) 폴피겨. 한국생산기술연구원 부설 희소금속분석센터 내 HKL-EBSD 장비를 이용해 결정방향성 데이터를 획득하고, Channel 5 프로그램을 이용해 결정방향성 지도 및 폴피겨 그림을 제작함

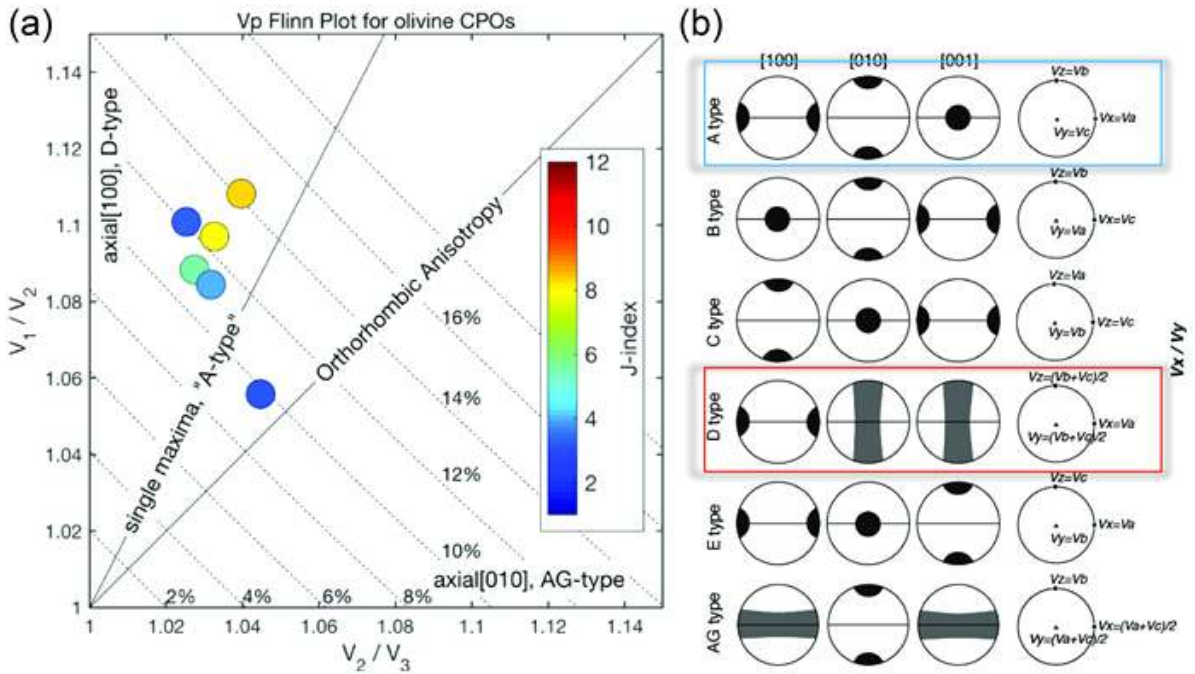


그림 3.115. 6가지 맨틀포획암의 결정방향성 분석결과(a)와 감람석의 CPO 분류(b) 결과. (a) 매텔랩(Matlab)의 툴박스(toolbox)인 MTEX를 이용해 제작. (b) Karato *et al.* (2007)에 수록된 감람석 CPO 분류

라. 지구조 모델 수립

- 분석한 맨틀포획암의 결정방향성 데이터로 프로그램 ANISctf(Mainprice, 1990)를 이용해 암석의 지진파특성을 계산하였다. 암석의 지진파특성 계산에는 암석이 감람석, 사방휘석, 단사휘석으로만 구성되어 있다는 가정 하에서, 각 광물의 단결정 탄성계수(감람석, Abramson *et al.*, 1997; 사방휘석, Duffy and Vaughan, 1988; 단사휘석 Collins and Brown, 1998)를 이용하였다. 암석의 P파와 S파 분열은 감람석 a-축과 같은 방향으로 발달한다(그림 3.116). 암석의 P파 비등방성은 8.6-8.9 %, S파 비등방성은 5.3-8.0 %를 보이며, V_P/V_S 는 1.62-1.83을 나타낸다(그림 3.116).
- 본 연구지역에서 암석권맨틀이 영향을 받을 수 있는 지질학적 사건은 섭입대(약 500 Ma)와 서남극 열개구조(West Antarctic Rift System, 약 120 Ma)의 형성으로 추정할 수 있다. 신선한 암석 미구조를 생각했을 때, 암석권맨틀에 대규모 교란이 일어날 수 있는 조건은 섭입대 형성 및 진화라고 생각된다. 따라서 암석에 의해 형성되는 지진파 비등방성은 섭입대 형성 및 진화와 관련있다고 사료된다(그림 3.117.a). 서남극 열 개구조가 형성되고 진행되는 과정 중 멜트포켓이 형성되었고, 이것이 북빅토리아랜드에서 관찰되는 지진파 비등방성의 주요원인이라 설명하는 논문들이 많다. 하지만 본 연구를 통해서 암석과 멜트포켓이 모두 지진파 비등방성을 발생시키는 원인임을 규명하였다(그림 3.117.b).

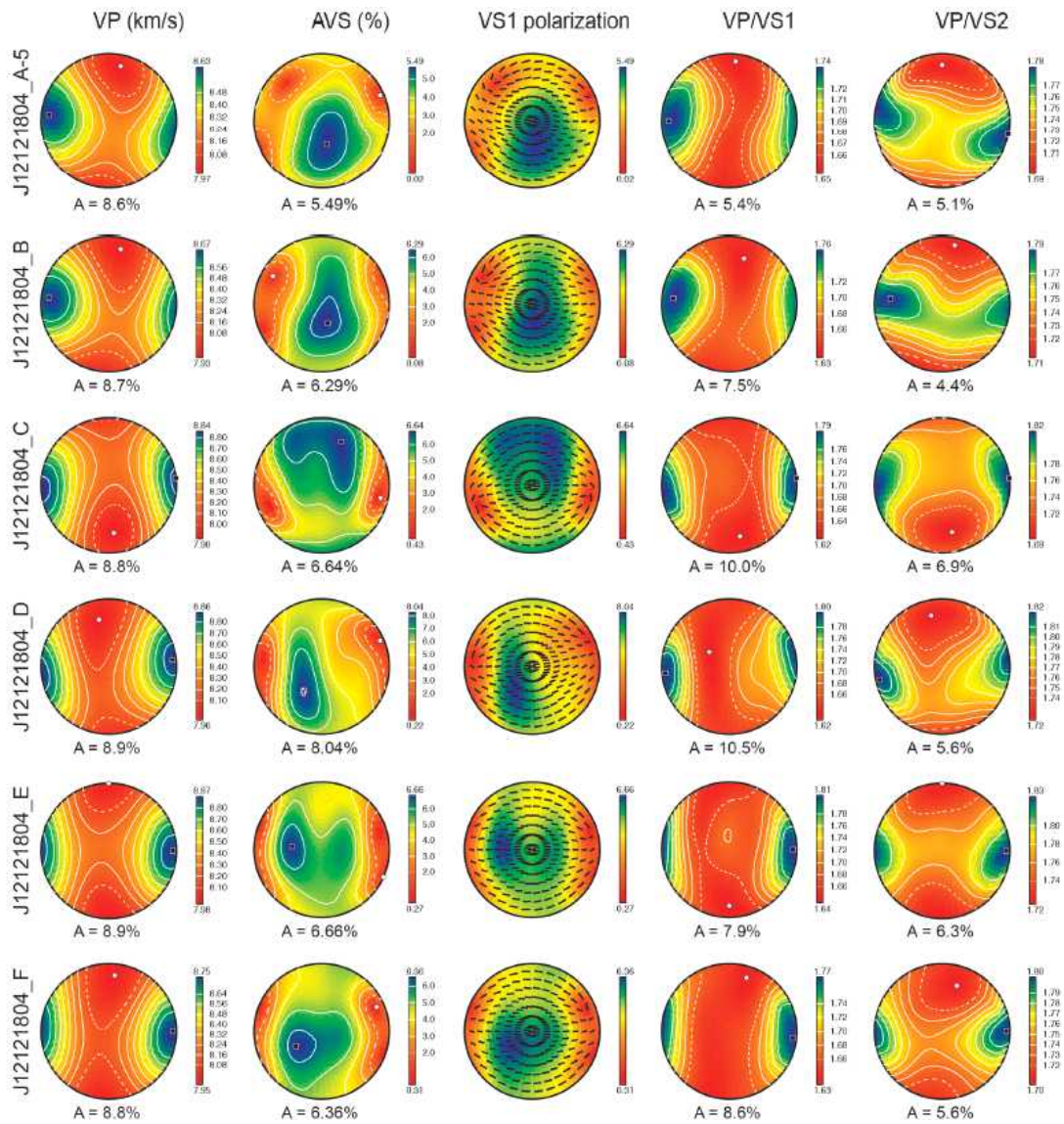
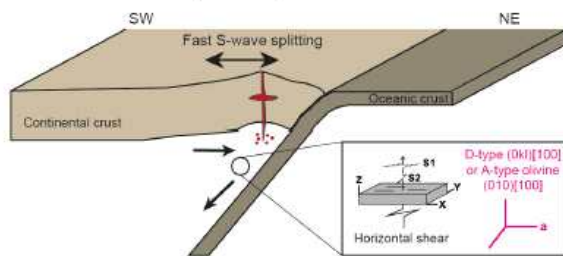


그림 3.116. 분석한 암석의 지진파 특성 계산결과. 소프트웨어 ANISctf를 이용해 남반구에 도시함. 암석은 감람석, 사방휘석, 단사휘석 세 광물로만 이루어져 있다는 가정 하에, 각 광물의 단결정 탄성계수(감람석, Abramson *et al.*, 1997; 사방휘석, Duffy and Vaughan, 1988; 단사휘석 Collins and Brown, 1998)를 이용함. A=anisotropy.

(a) 암석에 의해 형성되는 지진파비등방성
섭입대 형성 및 진화 (>130 Ma)



(b) 멜트포켓에 의해 형성되는 지진파비등방성
서남극열개구조의 형성 및 진화(<30 Ma)

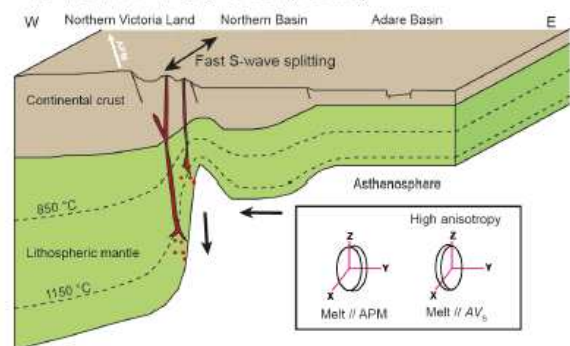


그림 3.117. 지진파 비등방성 발생을 유추한 지구구조 모델들. (a) 암석에 의해 (b) 멜트포켓에 의해 형성되는 지진파 비등방성

제 4 장 연구개발목표 달성도 및 대외기여도

제 1 절 연구개발 목표 달성도

1. 연구 목표 달성도

총연구기간내 연차별 목표 대비 달성율(%)						
구분	연차별 달성내용				연차별 계획대비 연구실적 달성율(B) (%)	
	세부연구목표	연구내용	가중치 (A)	달성실적		
1년차 (2017)	1.Terror Rift와 Northern Victoria Land 상호 발달과정 및 연관성 규명	1-1. Terror Rift 경계부의 지각/맨틀 속도 구조	0.16	원격지진을 이용한 3차원 모델 자성 (100%)	100 (2018-19, 2019-20 현장조사에서 수행)	
		1-2. 다채널 탄성파탐사를 통한 하부구조 규명	0.11	150L-km (해빙에 의하여 에어건 부품 파손)(80%)		
		1-3. 서남극 열 개구조의 신생대 진화과정 및 활동성 규명	0.06	분석도 (100%)		
	2. 중앙해령연구	2-1. KR3 해저지형도 작성 및 주변 자력 분포 자료 획득	0.08	KR3 & KR4 지형도 작성 및 확장속도 분석, KR1 해저산 지형 및 자력자료 분석(100%)	100	
		2-2. KR3 중앙해령 현무암 시료채취, 지구화학 분석 (동위원소 3종포함 전암성분)	0.13	시료획득과 분석 완료 (100%)		
		2-3. KR3에서의 열수 분출구 분포 파악	0.04	KR3 열수 분출구 발견 여부 (100%)		
	3. 해저화산암과 포획암연구	3-1. KR1 해저화산암, 지각 물질포획암 지구화학분석(동위원소 3종 포함 전암성분)	0.04	동위원소 3종 포함 10 set 자료 획득 (100%)	100	
		3-2. 맨틀포획암 확보 및 지질학적 기재	0.03	맨틀포획암 6종 확보 (100%)		
	공통	논문게재	0.3	2/2 (100% 달성)	100	
		학술발표	0.05	7/5 (100% 달성)	100	
	계			1.0		1.0

총연구기간내 연차별 목표 대비 달성율(%)					
구분	연차별 달성내용				연차별 계획대비 연구실적 달성율(B) (%)
	세부연구목표	연구내용	가중치 (A)	달성실적	
2년차 (2018)	1.Terror Rift와 Northern Victoria Land 상호 발달과정 및 연관성 규명	1-1. Terror Rift 경계부의 지각/맨틀 속도 구조	0.13	원격지진을 이용한 3차원 모델 자성 (100%)	100% (2019-20 현장조사에 서 수행)
		1-2. 해양자력탐사를 통한 자력 이상 규명	0.08	55.8 L-km 획득 (목표치 200 L-km) (28%)	
		1-3. 서남극 열개구조 진화에 따른 북서부 로스해 지체구조 및 퇴적층, 남극빙상 발달과정 분석	0.04	분석도 (100%)	
	2. 중앙해령연구	2-1. KR3 지각구조 해석도 작성	0.12	KR3 & KR4 지형도 작성 및 확장속도 분석, KR1 해저산 지형 및 자력자료 분석(100%)	90.43
		2-2. KR3 중앙해령 현무암 Hf, He 동위원소분석	0.11	KR3 중앙해령 현무암 Hf, He 동위원소 분석/산소 동위원소 및 할로젠 원소 분석 완료 (80%)	
	3. 해저화산암과 포획암연구	3-1. 로스해 해저화산암 지구화학분석(동위원소 3종 포함 전암성분)	0.04	Nd-Sr-Pb 동위원소 3종 7 set 분석 완료	100
		3-2. 맨틀포획암 광물화학성분 및 EBSD패턴 측정	0.03	맨틀포획암 6종 박편제작 및 EBSD 분석 완료	
	계	논문게재	0.4	7/4	100
		학술발표	0.05	7/5	100
		계	1.0		1.0

총연구기간내 연차별 목표 대비 달성율(%)					
구분	연차별 달성내용				연차별 계획대비 연구실적 달성율(B) (%)
	세부연구목표	연구내용	가중치 (A)	달성실적	
3년차 (2019)	1. Terror Rift 주변 지진활동 및 북빅토리아랜드 지체구조와 확장·형성과정연구	1-1. Terror Rift 경계부의 지각/맨틀 속도 구조	0.13	3차원 맨틀 속도 모델 제시 (150*200km 이상 100%달성)	100
		1-2. 다채널 탄성파탐사를 통한 하부구조 규명	0.08	자료취득 여부 (500L-km 100%이상)	
		1-3. 서남극 열개구조의 신생대 진화과정 및 신기 지체구조 활동성 규명	0.04	자료취득 여부 (지열관측 5정점 이상(6) 관측 100%)	
	2. KR1, KR2, KR3 구간 해저환경 및 중앙해령현무암 지구화학특성 비교 연구를 통한 남극권 고유맨틀 특성규명	2-1. KR3 중앙해령현무암 할로젠과 불활성기체 동위원소 분석	0.15	KR3 중앙해령 현무암질 글라스에 대한 할로젠원소 F, Cl 분석 완료 및 불활성기체 동위원소 분석 진행 중	100
	3. 서남극 열개구조와 중앙해령 주변의 해저화산활동 성인규명 및 맨틀포획암에 대한 기초지질정보 획득	3-1. Hf 동위원소 분리 시스템 구축	0.03	동위원소 회수율 80%, Blank level 50 pg 이하 달성	100
		3-2. 맨틀포획암의 미구조를 이용한 지구조 모델 수립	0.03	진과 비등방성 계산 및 조구조 모델 수립	
	공통	논문게재	0.2	4/5 (최소1 mrnIF > 60)	80 (0.16)
		상위수준 논문	0.3	5/3 (2단계합산 mrnIF>80)	100
		학술발표	0.05	12/5	100
		계	1.00		0.96

2. 연구성과 세부내용

가. 논문 목록

순서	해당 년도	논문제목	학술지명	게재일	저자명 / 소속						
					제1저자		교신저자		공동저자		
					성명	소속	성명	소속	성명	소속	
1	2017	Mapping alteration mineral zones and lithological units in Antarctic regions using spectral bands of ASTER remote sensing data	Geocarto International	2017.06	BEIRANVAN D POURAMIN	극지	BEIRANVAN D POURAMIN	극지	M. Hashim	홍종국 박용철	
2	2017	The kinematic evolution of the Macquarie Plate: A case study for the fragmentation of oceanic lithosphere	Earth and Planetary Science Letters 478, 132-142	17.09.19	최학겸	극지	김승섭	충남대	박승현	홍종국	극지
3	2018	Seismic stratigraphy of the Central Basin in northwestern Ross Sea slope and rise, Antarctica: Clues to the late Cenozoic ice-sheet dynamics and bottomcurrent activity	Marine Geology 395, 363-379	18.01.01	김수관	극지	홍종국	극지	L. De Santis	OGS (Italy)	
4	2018	Evaluation of ICA and CEM algorithms with Landsat-8/ASTER data for geological mapping in inaccessible regions	Geocarto International	18.02	BEIRANVAN D POURAMIN	극지	BEIRANVAN D POURAMIN	극지	박용철	박태운	홍종국
5	2018	Gondwana-Derived Terranes Structural Mapping Using PALSAR Remote Sensing Data	Journal of the Indian Society of Remote Sensing	18.02	BEIRANVAN D POURAMIN	극지	BEIRANVAN D POURAMIN	극지	M. Hashim	박용철	
6	2018	Regional geology mapping using satellite-based remote sensing approach inNorthern Victoria Land, Antarctica	POLAR SCIENCE 16(1) 23-46	18.06.01	BEIRANVAN D POURAMIN	극지	BEIRANVAN D POURAMIN	극지	박용철	박태운	홍종국
7	2018	New Magnetic Anomaly Map of the Antarctic	Geophysical Research Letters	18.06	A.V. Golynsky		홍종국	극지	외 32인		
8	2018	Petrogenesis of basalts along the eastern Woodlark spreading centers, equatorial western Pacific	Lithos 316-317, 122-136	18.07.06	박승현	극지	박승현	극지			

9	2018	Application of Multi-Sensor Satellite Data for Exploration of Zn-Pb Sulfide Mineralization in the Franklinian Basin, North Greenland	Remote Sensing	18.08.01	BEIRANVAN D POURAMIN	극지	BEIRANVAN D POURAMIN	극지	박태윤 박용철 홍종국	극지
10	2019	An isotopically distinct Zealandia-Antarctic mantle domain in the Southern Ocean	Nature Geoscience	19.01.28	박승현	극지	박승현	극지	최학겸 양윤석	극지
11	2019	Lithological and alteration mineral mapping in poorly exposed lithologies using Landsat-8 and ASTER satellite data: North-eastern Graham Land, Antarctic Peninsula	Ore Geology Reveiws	19.05.01	BEIRANVAN D POURAMIN	극지	BEIRANVAN D POURAMIN	극지	Hashim 홍종국 박용철	
12	2019	Mapping Listvenite Occurrences in the Damage Zones of Northern Victoria Land, Antarctica Using ASTER Satellite Remote Sensing Data	Remote Sensing	19.06.13	BEIRANVAN D POURAMIN	극지	BEIRANVAN D POURAMIN	극지	박용철 홍종국 박태윤	극지
13	2019	Occurrence of ice-rafted erratics and the petrology of the KR1 seamount trail from the Australian-Antarctic Ridge	International Geology Review 61(12), 1429-1445	19.06.17	이상봉	극지	이미정	극지	박승현 한승희 양윤석 최학겸	극지

나. 학술대회 발표

순서	해당년도	제 목	회의명	발표자	발표일자	국가명
1	2017	Geophysical investigation of upper mantle anomalies of the Australian-Antarctic Ridge	AGU Fall Meeting 2017	박승현	2017.12.13	미국
2	2017	Isotopic evidence for a large-scale plume-derived mantle domain between the Indian and Pacific mantles beneath the Southern Ocean	AGU Fall Meeting 2017	박승현	2017.12.	미국
3	2017	Morpho-tectonic characteristics of Australian-Antarctic Ridge	AGU Fall Meeting 2017	박승현	2017.12.	미국
4	2018	해상자력자료를 활용한 남극중앙해령 주변 지각판의 상대운동 복원	2018 한국지구물리·물리탐사 학회 봄 학술대회	최학겸	2018.05.10	대한민국
5	2018	Newly discovered mantle province beneath the Southern Ocean	제24차 국제 극지과학 심포지엄	박승현	2018.05.	대한민국
6	2018	P-wave velocity structure beneath the northern victoria land, antarctica: two separate mantle heat sources	제24차 국제 극지과학 심포지엄	박용철	2018.05.	대한민국
7	2018	Lower mantle-sourced hotspot trail within the Australian-Antarctic Rift system	Asia Oceania Geosciences Society	이상봉, 이미정, 박승현 등	2018.06.05	미국
8	2018	Microfabrics of Peridotites from the Mount Melbourne, Antarctica	Asia Oceania Geosciences Society	김대영 외	2018.06	미국
9	2018	Upper Mantle P-wave Velocity Structure Beneath the Terra Nova Bay, Antarctica	POLAR2018 SCAR/IASC Open Science Conference	박용철 외	2018. 6. 18.	스위스
10	2018	Clues to glacial regime and bottom-current changes in the northwestern Ross Sea	POLAR2018 SCAR/IASC Open Science Conference	김수관 외	2018. 6. 19	스위스
11	2018	Regional Geology Mapping Using Satellite-Based Remote Sensing Data in Antarctica	POLAR2018 SCAR/IASC Open Science Conference	Amin Beiranvand Pour 외	2018. 6. 20.	스위스
12	2018	Landsat-8 satellite remote sensing data for lithological mapping and mineral exploration in poorly mapped regions in the northern Greenland	POLAR2018 SCAR/IASC Open Science Conference	Amin Beiranvand Pour 외	2018. 6. 20.	스위스
13	2018	Newly discovered mantle province between the Indian and Pacific domains beneath the Southern Ocean	Goldschmidt 2018	박승현	2018.08.	미국
14	2018	Morphological characteristics of off-axis volcanism in the vicinity of the easternmost segment of the Australian-Antarctic Ridge	AGU Fall Meeting 2018	최학겸	2018.12.13	미국
15	2019	A preliminary analysis on the seismicity in Terror Rift using seismic data of KPSN	2019 Korean Society of Earth and Exploration Geophysicists	정진훈, 박용철	2019.04.25.	대한민국
16	2019	Geochemistry of basalt from the super-segment of the Australian-Antarctic Ridge	제25차 국제 극지과학 심포지엄	박승현	2019.05.14	대한민국
17	2019	Marine magnetic investigation on the Australian-Antarctic Ridge	제25차 국제 극지과학 심포지엄	최학겸	2019.05.14	대한민국

18	2019	P-wave velocity structure beneath the northern Victoria Land: the possible heat source of the volcanos	XIII International Symposium on Antarctic Earth Sciences	박용철 외	2019.07.24	대한민국
19	2019	Seismic image for water column in the Ross Sea from multi-channel seismic data using the frequency domain reverse time migration based on analytic Green's function	XIII International Symposium on Antarctic Earth Sciences	강승구 외	2019.07.24.-25.	대한민국
20	2019	Antarctic ice-sheet behavior in the Ross Sea outer continental margin in the late Miocene to early Pliocene from preliminary results of regional seismic stratigraphy and IODP Site U1522	XIII International Symposium on Antarctic Earth Sciences	김수관 외	2019.07.22.	대한민국
21	2019	THE PRELIMINARY RESULTS OF THE SEISMICITY IN THE VICINITY OF THE JANG BOGO STATION OBSERVED ON THE KOREA POLAR SEISMIC NETWORK	XIII International Symposium on Antarctic Earth Sciences	정진훈, 박용철	2019.07.24.-25.	대한민국
22	2019	High mantle temperature beneath the proto-Adare Basin, Ross Sea, Antarctica, as the possible cause of synchronous rifting across the continental-ocean boundary	XIII International Symposium on Antarctic Earth Sciences	김영균 외	2019.07.24.-25.	대한민국
23	2019	Microstructures of peridotites from the Mt. Melbourne, Antarctica	XIII International Symposium on Antarctic Earth Sciences	김대영 외	2019.07.25	대한민국
24	2019	High Mantle Temperature Beneath the Proto-adare Basin, Antarctica: the Possible Cause of Synchronous Rifting Across the Continental-ocean Boundary	16th Annual Meeting Asia Ocenia Geosciences Society	김영균 외	2019.08.01	싱가포르
25	2019	Major, trace element and isotope variations along the super-segment of the Australian-Antarctic Ridge	Goldschmidt 2019	박승현	2019.08.21	스페인
26	2019	Microstructures of mantle xenoliths from the Mt. Melbourne, northern Victoria Land, Antarctica	2019 추계지질과학연합학술대회	김대영 외	2019.10.23	대한민국

다. 국내·외 공동 연구협력

연구협력 파트너	수행 형태	연구협력 내용(목표)	수행 결과 및 우수성
○ 강원대학교	공동/협동	○ 아테어 트러프 해양지열 관측 및 해석	○ 아테어 트러프의 지구동역학 열기계모델링을 수행하여 논문 작성 중 (2019년 10월 투고 예정)
○ 미국 하버드대	공동	○ ICP-MS를 활용한 미량원소 공동분석 및 해석	○ 논문출판 (Nature Geoscience)
○ 미국 와이오밍대	공동	○ MC-ICP-MS를 활용한 Hf 동위원소 공동분석 및 해석	○ 논문출판 (Nature Geoscience)
○ 미국 UC Davis	공동	○ He 동위원소 공동분석 및 해석	

라. 인력양성 성과

지원 총인원	지원 대상 (학위별, 취득자)				성별		지역별		
	박사	석사	학사	기타	남	여	수도권	대전	기타지역
	2				2			1	1

마. KPDC 등록 이행실적

(1) 2017

데이터 이름 ¹⁾	메타데이터 ID ²⁾	메타데이터 제목 ³⁾	원시데이터 등록여부 ⁴⁾
Terror Rift 다채널 탄성파 탐사자료	KPDC_MCS_ANT ARCTIC_2016	ANA07C Multi-Channel Seismic Survey Lines	등록
동부 로스해 대륙사면 탄성파 탐사자료	KPDC_MCS_ANT ARCTIC_IT_2017	Italian Seismic Line 2017	등록
남극중앙해령 암석시료	KPDC_2017_0075	Rock samples of Australian-Antarctic Ridge, 2016-17 season	등록
남극중앙해령 Multi-beam 데이터_2항차	KPDC_MB_KOPRI dge-Leg04_Antarct ic_2016/17	Multibeam data of around KOPRI Antarctic ocean. Dec~Jan, 2016/17	등록
남극로스해 Multi-beam 데이터_3항차	KPDC_MB_RossSe a_Antarctic_2017	Bathymetry data, Ross Sea (2017)	등록
원시데이터 등록률 ⁵⁾			100 %

(2) 2018

데이터 이름 ¹⁾	메타데이터 ID ²⁾	메타데이터 제목 ³⁾	원시데이터 등록여부 ⁴⁾
해상자력탐사자 료	KPDC_MAG_ANT ARCTIC_2018	ANA08C Marine Magnetic Data	등록
다중빔해저지형 탐사자료	KPDC_MB_Ross_S ea_Antarctic_2018	2018 Multibeam bathymetry data in the Ross Sea, Antarctica	등록
천부지층탐사자 료	KPDC_SBP_Antar ctic_2018	Sub-bottom profile data in the Ross Sea, Antarctica	등록
원시데이터 등록률 ⁵⁾			100 %

(3) 2019

데이터 이름 ¹⁾	메타데이터 ID ²⁾	메타데이터 제목 ³⁾	원시데이터 등록여부 ⁴⁾
단일채널 스파커 탄성파자료	KOPRI-KPDC-000 01224	ANA09B Seismic Sparker Survey Lines	등록
해양다중채널탄 성파탐사자료	KOPRI-KPDC-000 01170	ANA09C Multichannel Seismic Data	등록
해양자력탐사자 료	KOPRI-KPDC-000 01209	ANA09C Marine Magnetic Data	등록
해양지열탐사자 료	KOPRI-KPDC-000 01208	Marine heat flow around Adare Trough	등록
XCTD탐사자료	KOPRI-KPDC-000 01206	ANA09C XCTD data in the Central Basin, Ross Sea, Antarctica	등록
천부지층탐사자 료	KOPRI-KPDC-000 01207	ANA09C sub-bottom profile data in the Ross Sea, Antarctica	등록
원시데이터 등록률 ⁵⁾			100 %



제 2 절 기술발전에서의 대외기여도

1. Terror Rift와 Northern Victoria Land 지역 지진관측망 구축

- 남극 유일의 육상 및 해저 지진관측망 구축
- 장보고 기지 기반의 육상 지진관측망의 관측영역을 Terror Rift 지역까지 확대
- 육상/해저 지진관측망에 관측된 원격 지진을 이용하여 100km 급의 고해상도 3차원 속도 모델 개발하여 Terror Rift의 형성 원인 규명
- 또한 장보고 기지 주변에서 발생하는 미소지진의 위치와 규모를 산정하여 지진위험도 평가를 위한 기초 자료를 생성함
- 기존 연구가 부족한 Terror Rift 북부 경계부에 대한 심부구조를 명확히 규명하고, 해당 지체구조의 분포를 확인
- 탄성과 탐사자료에 대한 그린함수 기반 역시간 구조보정 기술을 적용함으로써 Terror Rift 분포 지역에 대한 수층의 거동을 연속적인 이미지로 구축해 낼 수 있고, 동시에 획득한 XCTD자료를 바탕으로 이를 검증, 이로써 수층의 거동과 해양물리적 특성 및 천부 퇴적구조와의 상호 연관성 이해
- Central Basin의 형성과정에 대한 이해를 바탕으로 Adare Basin/Adare Trough와의 연관성 및 서남극 열개구조의 순차적인 진화에 따른 북서부 로스해 발달과정 이해
- 연구 결과 저널 게재 후, 획득된 자료를 남극 탐사자료 공유시스템(SDLS, ADMAP) 등에 제출하여 국제기구(SCAR) 및 국제공동연구에 기여
- 서남극 열개구조 끝단에 위치한 북쪽 분지와 아데어 분지는 서남극 분지에 걸친 열개구조가 시작되며 생성된 지구조적인 구조들으로써 이스라엘, 호주, 뉴질랜드, 미국 등이 자력, 탄성과 탐사를 수행하여 그 생성시기에 대해서만 밝혀졌을 뿐, 그 외의 연구가 이루어지지 않았음. 해양지열 관측을 통해 하부의 열구조 차이로 인해 두 분지가 동시에 확장했음을 규명
- 서남극 열개구조가 발달하기 이전 서남극에서 연속적인 분지 확장이 동에서 서로 발생하였는데, 아데어 분지 서쪽의 센트럴 분지가 아데어 분지 이전에 확장했을 것이라 여겨지며 그 근거를 찾는 연구가 뉴질랜드, 이탈리아에서 진행중임. 해양지열 관측이 센트럴 분지에서 수행된다면 센트럴 분지의 하부 지각 구조 및 그 형성시기에 대한 추가적인 자료를 제공
- 해저면 지진관측 기술을 획득함으로써 현재까지 규명되지 않았던 Polar 3 지자기 이상 연구의 기반 마련
- Polar 3 지자기 이상 연구를 국제공동 연구인 POLENET program의 일환으로 미국 펜실베이니아 주립대와 공동연구 수행의 기틀 마련 (그림 4.1.)



The Pennsylvania State University
Department of Geosciences
503 Deike Building
University Park, PA 16802-2714

Phone: (814) 865-6711
Fax: (814) 863-7823

Dr. Yongcheol Park
Korea Polar Research Institute
Incheon 21990m South Korea

October 10, 2019

Dear Dr. Park:

I am pleased to write this letter of collaboration to work with you on an exciting new project to investigate the nature and origin of the Polar 3 magnetic anomaly and associated volcanic activity in Northern Victoria Land using seismological data and analyses. As we have discussed, I will write a proposal to the U.S. National Science Foundation in the coming months to collaborate with you on this project. In my proposal, I will request funding to install and operate a land seismic network that will complement the marine seismic data that you are proposing to collect.

As you know, I am one of the principal investigators for the POLENET project in Antarctica. The broad goals of POLENET include improving our understanding of rifting and volcanism along the entire West Antarctica Rift System, and in particular how crust and upper mantle structure is influencing ice sheet dynamics through glacial isostatic adjustment and basal heat flow. The project you are proposing focusing on the Northern Victoria Land sector of the West Antarctic Rift System directly addresses these goals, and therefore we would very much welcome making your project part of POLENET.

I look forward to working with you on this project.

Sincerely,

Andrew A. Nyblade,
Professor of Geosciences and Department Head
503 Deike Building
Department of Geosciences
Pennsylvania State University
University Park, PA 16802
U.S.A.

Phone: 814-863-8341
Email: nyblade@psu.edu

Equal Opportunity University

그림 4.1. POLENET program의 일환으로 Polar 3 지자기이상 연구주제 발굴과 공동 연구를 위한 Prof. Andrew Nyblade의 서신 사본

2. 남극 중앙해령 및 해저화산암과 포획암 연구

- 질란디아-남극 맨틀 고유의 지화학적 특성과 중앙해령의 판구조적 진화과정에 대한 이해를 바탕으로 질란디아-남극 맨틀의 영역과 기원에 대해서 규명
- 인도양 중앙해령 및 태평양 중앙해령에 의해서 설명되었던 기존의 맨틀 대류 모델을 수정하여 맨틀에 대한 새로운 모델을 도출할 수 있는 근거 마련
- 질란디아-남극 맨틀의 활동이 남극권 및 전지구적 환경에 미치는 영향 규명
- 호주-남극 중앙해령 KR1~KR4에서 채취한 현무암질 시료에 대한 지화학적 분석은 새로 발견한 질란디아-남극 맨틀의 공간적 분포, 기원 및 특성 규명에 기여
- 중앙해령 KR1~KR4 및 주변 해저산들 간의 지구조적 연관성 및 상호작용에 대한 지구물리적 연구는 지화학적 분석과 함께 수행되어 중앙해령의 진화과정 규명에 중요한 정보 제공
- KR1 해산열의 형성 연령((U-Th)/He, K-Ar 연대) 획득
- KR1 중앙해령, KR1 해산열, 로스해 화산암의 기원적 유사상과 차이점 파악
- 화산암 Hf 동위원소 분리 시스템 구축
- 북빅토리아랜드에서 최초로 맨틀암석을 이용해 지진파비등방성을 계산하고, 조구조 모델에 응용



제 5 장 연구개발결과의 활용계획

제 1 절 기대 성과

1. 기술적인 측면

- 서남극 열개구조에 대한 육상 지진관측망과 연계한 해저면 지진관측망 연구를 세계 최초로 수행함으로써 이 분야 연구를 선도
- 해저면 지진관측망 운영기술과 분석 기술 습득 및 개발
- 서남극 열개구조에서 가장 최근까지 갈라짐이 발생한 Terro Rift에 대한 형성 원리, 지구조 진화 그리고 변화를 정확히 이해하는 중요한 단서제공
- 전지구적 맨틀순환과 남극관 진화의 역할에 대한 국제적 관심 해소에 기여
- 서남극 열개구조와 Australia-Antarctic 중앙해령과의 상호작용을 규명함으로써 전 지구적 지각판의 움직임에 대한 정밀한 정보 제공

2. 경제·사회적 측면

- 기존의 국제협력 네트워크를 활용하여 향후 국제공동 대형프로그램을 기획할 수 있는 기틀을 마련하고, 세계 최고수준의 연구성과 생산 기반 확보
- 다음 단계에 POLENET program과 연계하여 국제공동 연구의 기틀 마련
- 열수 분출구 분포를 통해 열수 광상 분포를 추정할 수 있으므로 잠재적인 경제 가치 파악

제 2 절 연구성과 활용계획

- 장보고 기지 기반의 육상지진관측망과 해저면 지진관측망은 서남극 열개구조 중에서 빅토리아 분지(Victoria Basin)에서 발달된 Terror Rift 하부와 멜번화산을 포함하는 광역적인 3차원 지각/맨틀 속도구조를 제공함
- 이 결과로 Terror Rift 하부에 얇은 곳에서 저속도 층이 있음을 발견하였고 이는 지각이 동-서 방향으로 벌어지면서 형성됨을 밝힘
- 본 연구에서 규명한 Terror Rift의 형성원인과 3차원 속도 모델은 북 분지(Northern Basin)에서 발달해 있는 서남극 열개구조의 형성원인을 규명할 수 있는 기초 자료를 제공할 것으로 기대됨
- 획득된 다채널 탄성과 탐사자료 및 남극 탄성과 탐사자료 공유시스템(SDLS)의 기존 자료를 결합하여, 음향기반암 및 심부/천부 지체구조 분석을 통해 Terror Rift 북단 경계를 규명하고, 해당 지질구조로 인한 층서 및 지층의 변동성, 열개구조 진화와 남극빙상의 발달과정 및 퇴적환경 변화 연구 수행
- 2단계 연구기간 동안 추가 획득한 탄성과 탐사자료분석 결과는 로스해 북서부 외대륙 경계부 지체구조도 및 층서분석도에 반영하여 서남극 열개구조의 진화와 남극빙상의 발달 및 해류순환 변동에 따른 퇴적환경 변화 연구 수행
- 탄성과 탐사자료와 함께 획득된 수층염분, 온도자료(XCTD)를 결합하여 수층구조를 확인하고, 현재 퇴적환경과의 비교분석을 통해 고퇴적환경 유추
- 2018-2019 하계탐사기간 동안 탄성과 탐사자료와 함께 획득된 자력탐사자료는 광역 자기이상도(EMAG2, ADMAP)와 결합하여 비교분석 수행 및 서남극 열개구조 진화에 따른 Central Basin 형성에 대한 연구 수행
- 서남극 열개구조의 끝단에 위치한 북쪽 분지(Northern Basin)와 아데어 분지(Adare Basin)의 동시성 확장이 발생한 것은 아데어 분지 하부의 뜨거운 맨틀의 영향이었음을 규명함 (논문 투고 예정)
- 아데어 분지 비대칭적인 해양지각확장의 원인 역시 맨틀 내 온도 분포의 불균일성에 의한 것이라는 가설을 가지고 있으며, 서쪽 플랭크에서 해양지열 관측을 수행한다면 이 가설을 증명할 수 있을 것임
- 센트럴 분지의 하부 지각구조를 규명하기 위해 자력탐사를 수행하고, 마그네틱 이상대 확인을 통해 해양지각 여부와 형성시기를 확인함에 있어, 해양지열 관측을 수행한다면 그 두 가지를 지지하는 자료를 추가로 확보 가능함. 현재의 한 정점 해양지열결과로써, 센트럴 분지의 하부 지각은 대륙지각이 아닐 가능성이 높음.
- 심부 맨틀의 이상 온도, 혹은 이상 분포를 확인하기 위해서는, 지진파/탄성과 탐사 외에 해양지열자료가 유용하게 사용될 수 있음.
- 새로 발견한 질란디아-남극 맨틀 영역 내에는 수 많은 해저산들이 분포하고 있는데, 남극권의 지형 변화와 판구조적 진화에 큰 영향을 미치고 있는 것으로 판단됨. 추후 지형 및 지자기 탐사와 더불어 해저면 암석 시료 채취 작업과 지화학적 분석을 동원하여 맨틀의 구조와 기원, 진화과정에 대한 자료를 확보하고자 함

- 지금까지 탐사 및 연구는 질란디아-남극 맨틀 영역의 중앙부에 한정되어 있었기 때문에, 이 맨틀의 동편 및 서편 경계는 여전히 모호한 상태로 남아 있는 상황이므로 추가적이고 체계적인 탐사를 계획 중
- 수중카메라를 이용한 해저지형의 탐사 시에도 많은 퇴적물이 해령에 퇴적되었음을 확인할 수 있었고 퇴적물도 채취하였으며, 수중 생명체도 채취할 수 있었음
- 이러한 수중 생명체에 대한 연구도 이전에 KR1에서 세계 최초로 발견한 생명체도 있었고, 아직 많은 탐사가 이루어지지 않은 Australian-Antarctic Ridge에서 채취하는 생명체에 대한 연구가 필요하고 이에 큰 도움이 될 것임
- KR1 해산열은 중앙해령 인근에 형성된 해저화산산맥으로 상당한 연장성을 가지고 일렬로 발달
- 해산열의 발달은 열점분출양상과 중앙해령의 발달 및 대양저 확장의 양상과 밀접히 관련되므로, KR1 해산열에서 획득된 암석동위원소 자료와 연대분석 자료는 호주-남극해령의 발달뿐만 아니라 해저화산활동 전반에 걸친 일반론적 연구에 기초자료로 사용됨
- KR1 해산열과 로스해 화산암 지구화학 및 지구연대학 자료는 학술 논문으로 발표될 예정
- 해저 현무암 시료에 대한 Hf 동위원소 연구는 근원 맨틀 특성 규명을 위해 그 중요도가 높음
- 이번 연구를 통해 개발된 Hf 원소분리와 다중검출기 유도결합 플라즈마 질량분석기 (MC-ICP-MS)를 통한 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 동위원소 분석 기술은 해저 화산암뿐만 아니라 남극대륙 화성암과 변성암 성인연구에도 직접적으로 활용될 수 있음 (그림 5.1.)



그림 5.1. 극지연구소 청정 실험실 내 Hf 원소 분리 실험. 극지연구소 다중검출기 유도결합 플라즈마 질량분석기(NEPTUNE PLUS, Thermo Scientific)

- 맨틀포획암 연구는 지표상에서 드물게 산출하는 맨틀암의 화학성분, 구조 등에 대한 직접적인 정보를 제공해 줄 수 있으므로 필수적으로 수행되어야 함
- 북빅토리아랜드에서 맨틀포획암의 주성분분석, 희토류 및 미량원소를 이용한 암석의 성인에 대한 연구는 많지만, 미구조를 활용한 연구는 전무상태임
- NE-SW 방향의 빠른 S파 비등방성의 원인에 대해 많은 지진학자들이 암석권맨틀 내 암석 또는 멜트포켓의 영향이라 유추만 하고, 실질적인 데이터는 전무하기 때문에 본 연구자료는 논문으로 투고할 예정임

제 3 절 향후 연구 방향

1. 서남극 열개구조와 Polar 3 지자기이상의 형성과정 연구

- 본 연구에서는 서남극 열개구조 중 가장 최근까지 활동 중인 Terror rift를 중심으로 수행되었음
- 서남극 열개구조는 길이 ~3,000 km, 폭 ~700 km에 달하는 남극에서 가장 큰 지체구조 중 하나이며, 서남극 열개구조의 서쪽 측면으로는 남극 종단산맥이 발달하고 있음. 또한 테라노바만을 기점으로 남쪽으로는 빅토리아 랜드 분지(VLB in 그림 5.2.a), 북쪽으로는 북 분지(NB in Fig. 1a)지역에 복잡한 형태의 정단층 계(system)를 이루고 있음 (그림 5.2a)

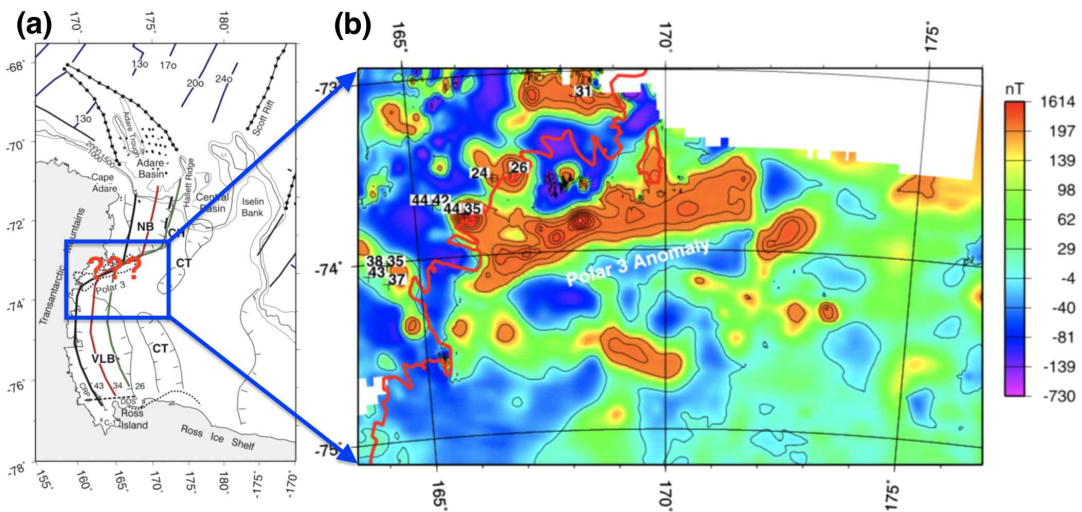


그림 5.2. (a) 서남극 열개구조의 서쪽 측면 시간적 위치 모델(서쪽부터 42, 34, 28 Ma) [Davey et al., 2006]과 Polar 3 자기 이상 위치 (NB: Northern Basin; VLB: Victoria Land Basin; CT: Central Trough). (b) 로스해 지역 자기 이상도 [Bosum et al, 1989]. 관입암의 연대는 Ma 단위임 [Rocchi et al, 2002].

- 하지만, 빅토리아 랜드 분지와 북분의 경계에서 어떻게 서남극 열개구조가 발달되어 연결되어 있는지는 아직까지도 명확하게 밝혀지지 않았고, 그 경계에서 Polar 3라는 1,000nT이상의 자력이상(magnetic anomaly)이 발견됨 (그림 5.2b). Polar 3 자력 이상 또한 어떻게 형성되었는지, 그리고 남과 북에 발달된 서남극 열개구조의 형성과 진화에 어떠한 영향을 주었는지 명확하지 않음
- 연구 수행 중에 획득된 해저면 지진관측망 운영 기술과 육상지진관측망 확대를 통하여 남위 74도에서 동-서로 관측되는 Polar 3 지자기 이상 연구를 진행할 예정임

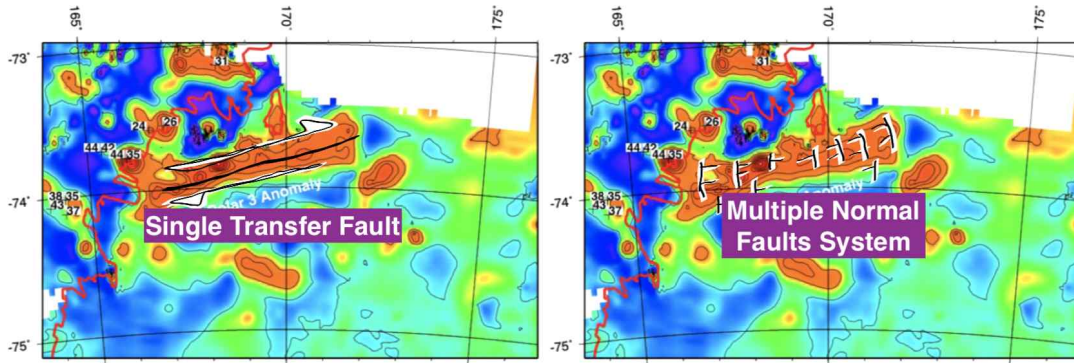


그림 5.3. Polar 3 자기이상의 형성 원인과 테라노바만을 경계로 남·북으로 이어지는 서남극 열개구조의 연결 모델: 중앙 해령과 흡사한 하나의 변환단층(Transfer fault) 모델(a)과 여러 개의 정단층 시스템 모델 (b).

- 현재까지의 Polar 3 자기이상의 결과로는 Figure 2와 같이 두 개의 모델을 제안할 수 있음. 하나는 중앙해령과 흡사한 변환단층에 의한 마그마의 관입과 분출에 의한 모델(그림 5.3a), 그리고 여러 개의 정단층들로 이루어진 모델임
- Polar 3의 마그마 관입의 깊이는 대략 12km [Davey et al., 2006]으로 유추되고 있으나, 이 두께 또한 다른 연구지역(로스섬)의 결과를 인용함
- 정확한 Polar 3의 형성 원인과 발달 과정의 규명은 서남극 열개구조의 진화 과정과 동남극 대륙의 지체구조 해석에 반드시 필요함
- 현재 아라온호에는 2차원 다중채널 반사법 탄성과 탐사장비가 구축되어 있지만, 상대적으로 짧은 스트리머의 길이(1.5 km)로 인해 심부지층 및 하부지각의 속도 정보를 제공할 수 있는 굴절법의 탐지가 어려움
- 짧은 스트리머를 보완할 수 있는 소노부이 굴절법 탄성과 탐사시스템을 도입하여 다중채널 반사법 탄성과 탐사 시, 굴절법 탄성과 탐사자료를 동시에 획득 예정
- 2020년 상반기까지 소노부이 굴절법 탄성과 탐사장비를 아라온호에 설치하여 2020년 5월 말~6월 초에 예정된 동해 시험항차를 통해 시험자료 확보

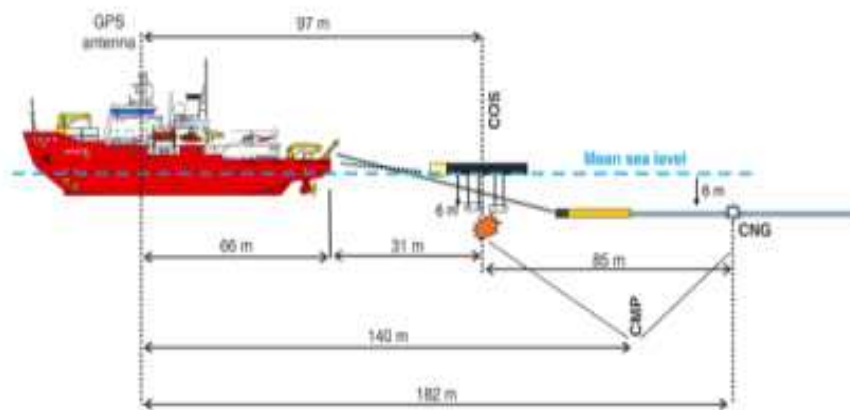


그림 5.4. 쇄빙연구선 아라온호에 장착된 다중채널 반사법 탄성과 탐사시스템의 에어건, 스트리머 전개도



그림 5.5. 소노부이 굴절법 탄성과 탐사자료 기록계(좌) 및 탐사 시 투하장면(우)

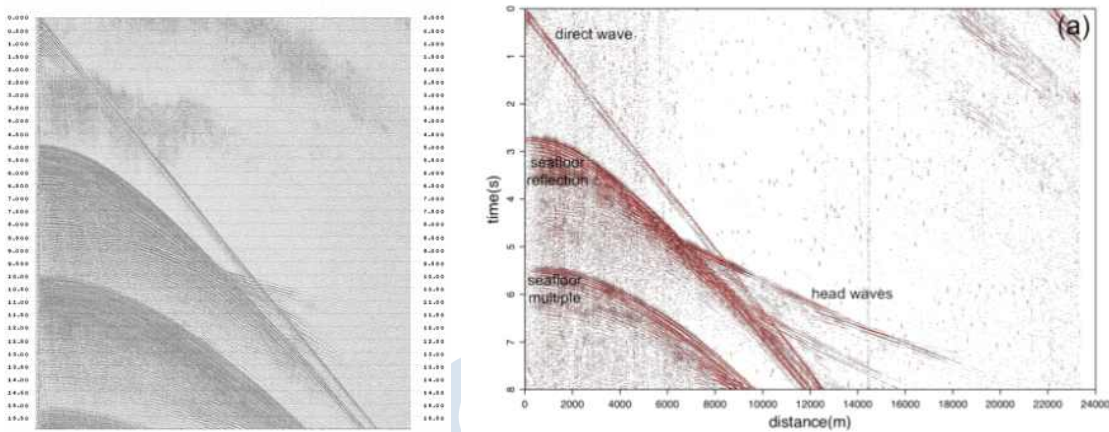


그림 5.6. 소노부이 굴절법 탄성과 탐사자료 예시

- 소노부이 굴절법 탄성과 탐사자료 처리 및 분석 기법 개발
- 아라온호에 장착된 장비를 이용하여 동해 시험항차에서 획득된 굴절법 탄성과 탐사자료를 선상에서 처리할 수 있는 현장자료 처리기법 개발
- 안정적인 운용이 가능한 GI Gun을 이용하여 굴절법 탐사자료를 획득하여 탐사자료의 품질을 검증하고, 남극현장에서의 탐사에 적용가능한 최적의 자료획득 변수 및 장비 운용기법 확인

2. 남극 중앙해령 및 화산암 연구

- 호주-남극 중앙해령 KR3에서 획득한 지구물리학적, 지구화학적 그리고 심해생명체에 대한 연구 내용을 인근에 위치한 여러 중앙해령과 비교하여 질란디아-남극 맨틀에 대한 성인 및 특성에 대한 연구, 그리고 질란디아-남극 맨틀의 명확한 경계를 찾는 연구 예정
- KR1 해산열과 남극 로스해 해저화산 연구 내용을 바탕으로 중규모 해저화산암의 형성과 발전, 초대륙 분열, 대륙열개구조 형성 및 이와 관련된 맨틀 성분 변화 양상 대한 연구 예정
- 북빅토리아랜드에서 큰 사이즈의 맨틀포획암이 산출한 경우는 아주 드물다. 따라서 본 연구에서 사용된 맨틀포획암의 화학성분을 분석해 암석의 기원에 대한 연구를 추가 수행 예정

- 극지연구소 불활성기체(He-Ne-Ar) 동위원소 질량분석시스템을 이용한 화산암 (U-Th)/He 연대 측정
- 한국기초과학지원연구원 다중검출기 불활성기체 질량분석기를 활용한 암석 및 광물 ^{40}Ar - ^{39}Ar 연대 측정
- 화산암 형성 연대(화산분출 시기) 획득



그림 5.7. 화산암 전암-광물 연대 분석: (좌) 불활성기체(He-Ne-Ar) 동위원소 질량분석 시스템(극지연구소), (우) 다검출기 불활성기체질량분석기(^{40}Ar - ^{39}Ar) 연대분석(한국기초과학지원연구원)

- 화산암 전암 성분 및 동위원소 질량 분석
- 극지연구소 XRF, ICP-MS를 이용하여 채취된 화산암 시료에 대해 전암 주원소-미량원소 성분 분석
- 극지연구소 TIMS, MC-ICP-MS를 이용한 동위원소(Sr-Nd-Pb-Hf) 질량 분석
- 화산암 마그마의 근원물질과 생성 지구조환경 해석

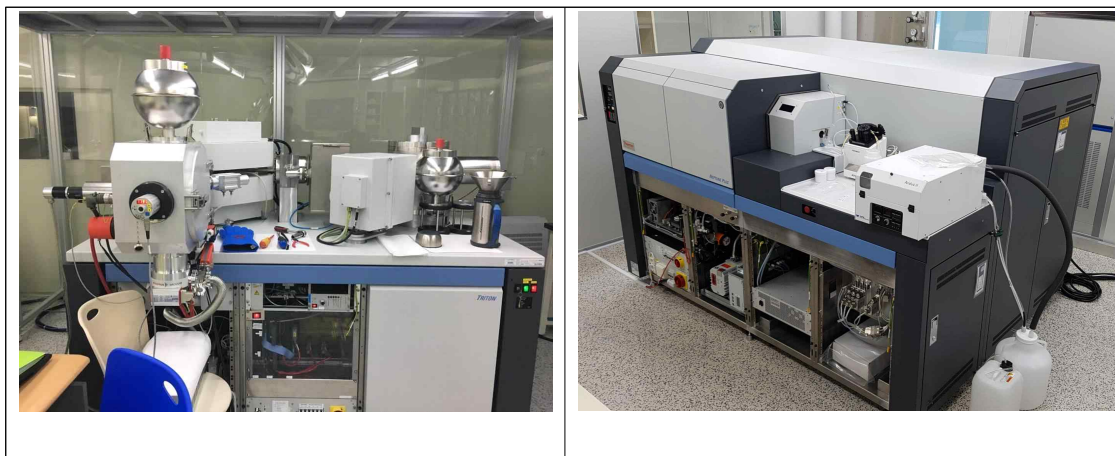


그림 5.8. 화산암 동위원소 분석: (좌) Sr-Nd-Pb 동위원소분석을 위한 열이온화 질량분석기(TIMs, 극지연구소), (우) Hf 동위원소분석을 위한 다중검출기 유도결합플라즈마 질량분석기(MS-ICP-MS, 극지연구소)

제 6 장 연구개발과정에서 수집한 해외과학기술정보

1. 해저면 지진관측망 운영 및 자료 보정 기술

○ 해저면 설치를 위한 장비 교육 참여 및 실습 (2017)

	AM	PM	Needs
First day (July. 24th)	Arrival, go to site, get familiar with participants and their position /education (technician, scientist ...)	New: - Show different types of NAMMU and weights (geophone vs. seismometer, alkaline vs. lithium)	Different NAMMU types, anchor and batteries
Second day (July. 25th)	Repetition: - Show different types of NAMMU and weights New: - Handling Instructions acoustic release and its timing programming	New: - Handling instructions anchor, torsion measurement	decks unit 8011M K.U.M.-handheld
Third day (July. 26th)	New: - Offshore/Ships day - HSE-training (Health, Safety, Environment) - go to side	New: - deploy NAMMU, recover NAMMU and anchor	Possible offshore training if needed, otherwise crane training bay of Kiel (or on site)
Fourth day (July. 27th)	Repetition: - NAMMU deployment/recovery - HSE-training - safe recovery of data in wet environment	New: - Data display, very(!) rough(!) introduction into data processing (SeismicUnix, PQL). Introduction to data processing is just „first steps“ as the training course is technical, not geophysical. The job of technicians normally ends after data download.	this would be alternative day of offshore training/crane training
Fifth day (July. 28th)	Complete Repetition of all items - solving remaining questions - spare time for upcoming misunderstandings - etc	spare time	

그림 6.1. 해저면 지진계 교육 및 실습 일정

- 최적의 해저면 지진계와 해저면의 커플링 위한 추(weight)와 acoustic releaser의 볼트 조임 설정 (5 Newton)
- 해저면 지진계 회수 후 기록 시간 보정(time drift) 방법

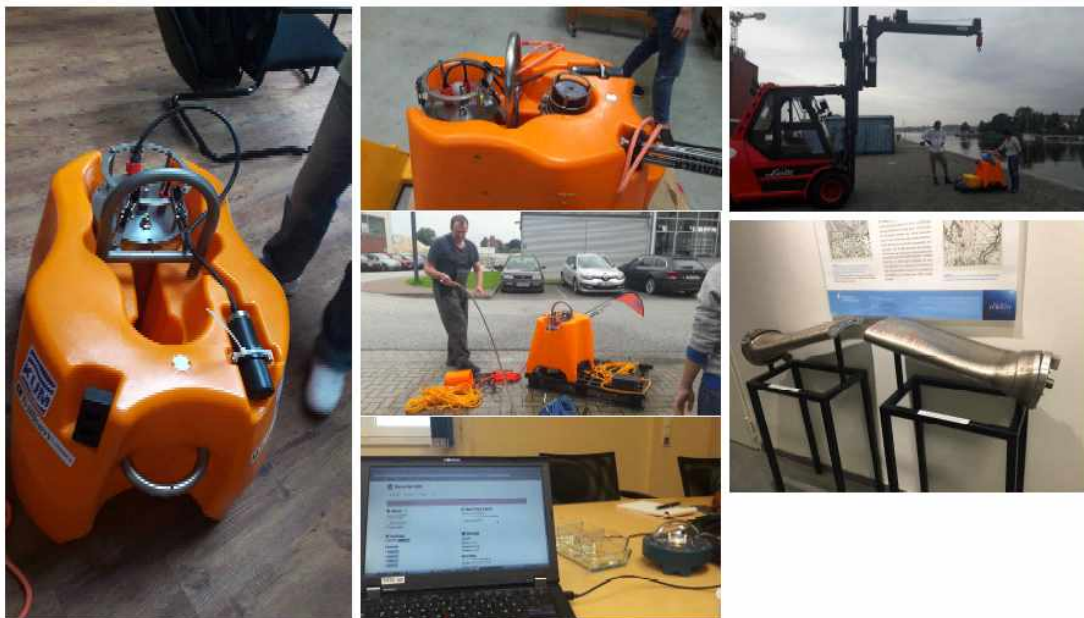


그림 6.2. 해저면 지진계 교육 현장 및 GPS 시간 설정 사진

- Deck unit를 사용하여 해저면 지진계 회수 방법 교육
- 정확한 해저면 지진계 설치 장소(위/경도) 확인을 위한 삼각법 교육

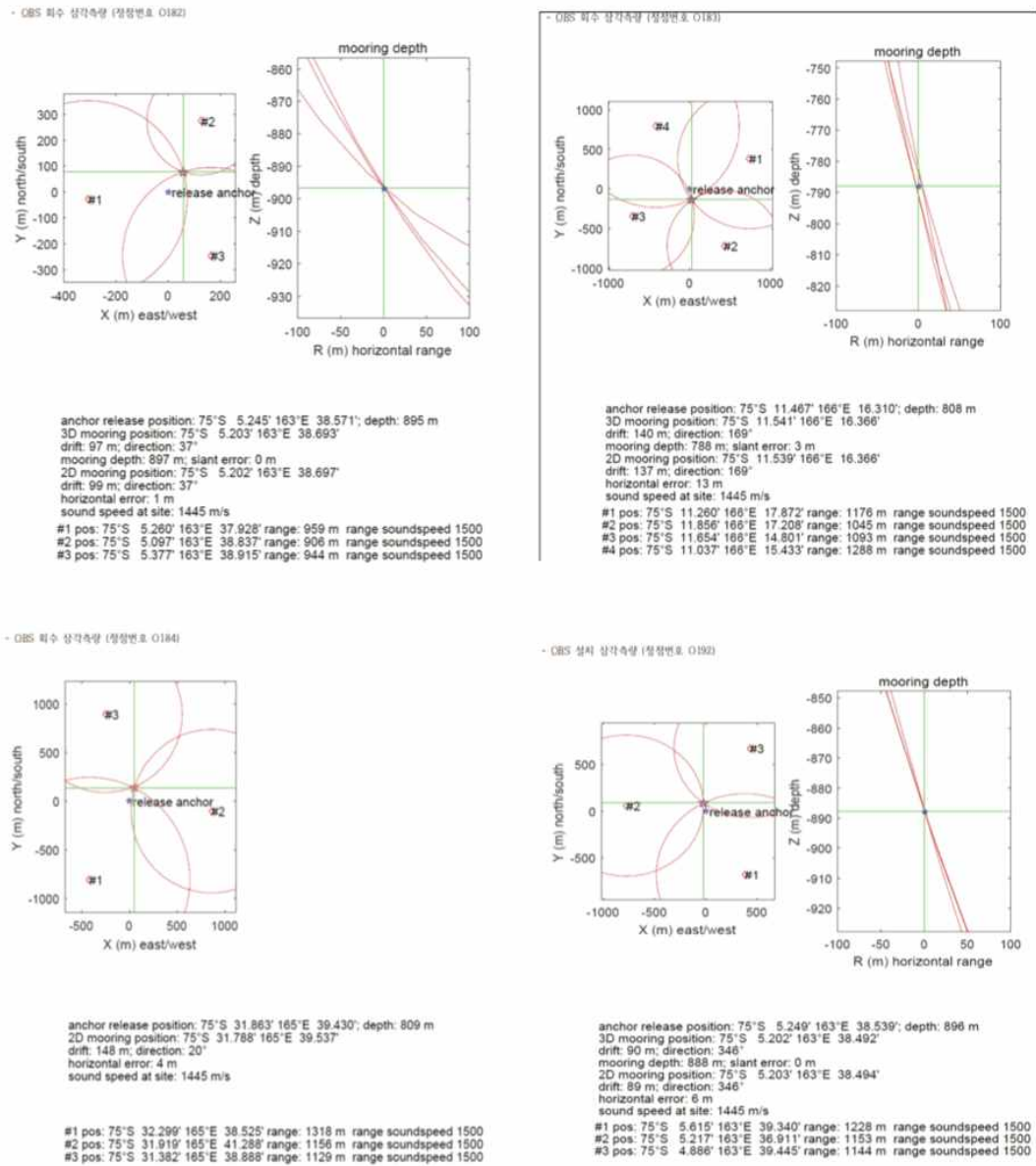


그림 6.3. 정확한 해저면 지진계 위치 보정을 위한 삼각 음파 분석 결과

- Python을 기본으로 프로그램된 DLOPy_v1.0를 이용하여 원격지진의 표면파의 파티클 모션을 이용한 수평성분 보정
- 수평성분 방위각을 결정하고(그림 6.4) 그 정보를 각 관측소별 연속지진자료의 헤더 정보에 입력
- 정확한 지진의 진원 인자 결정을 위하여 정확한 수평성분 정보 교정

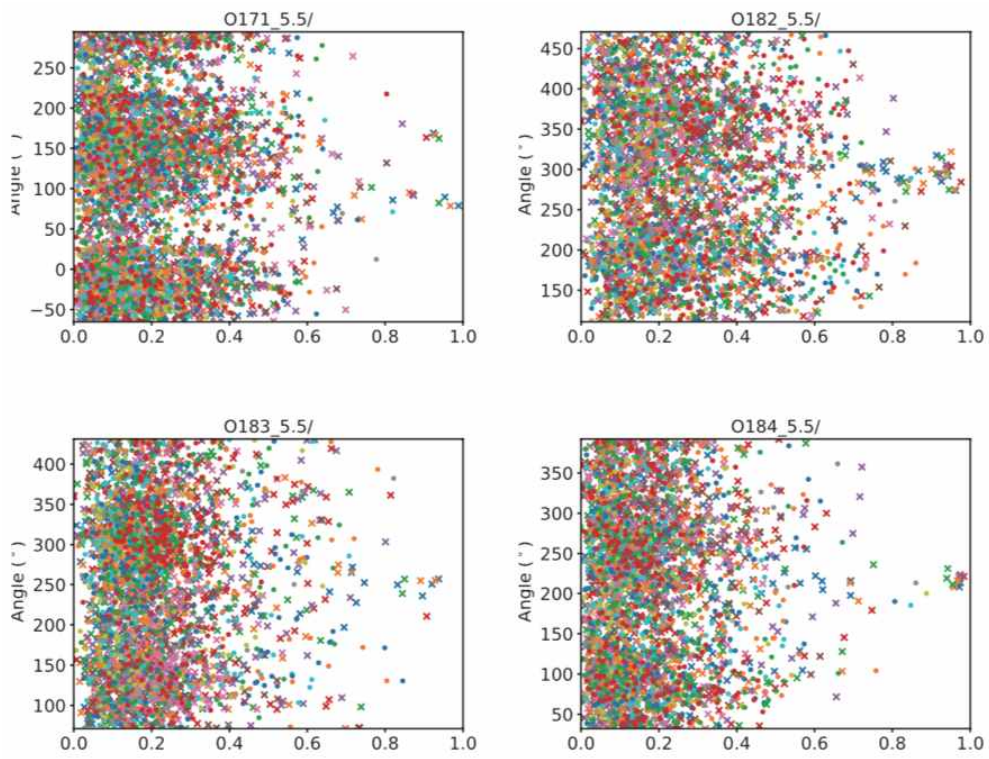


그림 6.4. 레일리파(Rayleigh wave)를 이용하여 해저면 지지관측소별로 결정된 수평성분 방위각 결과

제 7 장 참고문헌

- Abramson, E.H., Brown, J.M., Slutsky, L.J., Zaug, J., 1997. The elastic constants of San Carlos olivine to 17 GPa. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth* 102, 12253-12263.
- Armienti, P., and C. Perinelli (2010), Cenozoic thermal evolution of lithospheric mantle in northern Victoria Land (Antarctica): Evidence from mantle xenoliths, *Tectonophysics*, 486(1-4), 28-35, doi:10.1016/j.tecto.2010.02.006.
- Bamber, J. L., J.L. Gomez-Dans, and J. A. Griggs (2009), A new 1 km digital elevation model of the Antarctic derived from combined satellite radar and laser data - Part 1: Data and methods, *The Cryosphere*, 3(1), 101-111, doi:10.5194/tc-3-101-2009.
- Bannister, S., R.K. Snieder, and M. L. Passier (2000), Shear-wave velocities under the Transantarctic Mountains and Terror rift from surface wave inversion, *Geophys. Res. Lett.*, 27(2), 281-284, doi:10.1029/1999gl010866.
- Bannister, S., J. Yu, B. Leitner, and B. L. N. Kennett (2003), Variations in crustal structure across the transition from West to East Antarctica, Southern Victoria Land, *Geophysical Journal International*, 155(3), 870-880, doi:10.1111/j.1365-246X.2003.02094.x.
- Barklage, M., Wiens, D.A., Nyblade, A., Anandakrishnan, S., 2009. Upper mantle seismic anisotropy of South Victoria Land the Ross Sea coast, Antarctica from SKS and SKKS splitting analysis. *Geophysical Journal International* 178, 729-741.
- Becker, T. W., and L. Boschi (2002), A comparison of tomographic and geodynamic mantle models, *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 3(1), 1003, doi:10.1029/2001GC000168.
- Behrendt, J. C. (1999), Crustal and lithospheric structure of the West Antarctic Rift System from geophysical investigations - a review, *Global and Planetary Change*, 23, 25-44.
- Behrendt, J. C., D.D. Blankenship, C. A. Finn, R. E. Bell, R. E. Sweeney, S. M. Hodge, and J. M. Brozena (1994), CASERTZ aeromagnetic data reveal late Cenozoic flood basalts(?) in the West Antarctic rift system, *Geology*, 22(6), 527-530.
- Behrendt, J. C., and A. Cooper (1991), Evidence of rapid Cenozoic uplift of the shoulder escarpment of the Cenozoic West Antarctic rift system and a speculation on possible climate forcing, *Geology*, 19(4), 315-319, doi:10.1130/0091-7613(1991)019<0315:eorcuo>2.3.co;2.
- Bosum, W. (1989), GANOVEX IV Victoria Land/Ross Sea aeromagnetic survey: interpretation of anomalies, 153 pp.
- Bozzo, E., F. Ferraccioli, M. Gambetta, G. Caneva, M. Spano, M. Chiappini, and D. Damaske (1999), Recent progress in magnetic anomaly mapping over Victoria

- Land(Antarctica) and the GITARA 5 survey, *AntarcticScience*, 11(2), 209-216,doi:10.1017/S0954102099000279.
- Brey, G.P., Köhler, T., 1990. Geothermobarometry in four-phase lherzolites II. New thermobarometers, and practical assessment of existing thermobarometers. *Journal of Petrology* 31, 1353-1378.
- Cande, S. C., and D. V. Kent (1995), Revised calibration of the geomagnetic polarity timescale for the Late Cretaceous and Cenozoic, *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 100(B4), 6093-6095, doi:10.1029/94JB03098.
- Cande, S.C., Stock, J.M., Müller, R.D., Ishihara, T., 2000, Cenozoic motion between East and West Antarctica. *Nature*, 404, 145-150.
- Cande, S.C., Stock, J.M., 2004. Cenozoic reconstruction of the Australia-New Zealand-South Pacific sector of Antarctica. In: Exon, N.F., Kennett, J.K., Malone, M.J. (Eds.), *The Cenozoic Southern Ocean: Tectonics, Sedimentation and Climate Change Between Australia and Antarctica*. AGU, Washington DC, 5-15.
- Chauvel, C., McDonough, W., Guille, G., Maury, R., Duncan, R., 1997, Contrasting old and young volcanism in Rurutu Island, Austral chain. *Chemical Geology*, 139, 125-143.
- Choi, S.H., 2012. Lithospheric mantle beneath the Korean Peninsula: Implications from peridotite xenoliths in alkali basalts. *Journal of Petrological Society, Korea* 21, 235-247.
- Choi, H., Kim, S.-S., Dymant, J., Granot, R., Park, S.-H., Hong, J.K., 2017, The kinematic evolution of the Macquarie Plate: A case study for the fragmentation of ocean lithosphere. *Earth and Planetary Science Letter*, 478, 132-142.
- Collins, M.D., Brown, J.M., 1998. Elasticity of an upper mantle clinopyroxene. *Physics and Chemistry of Minerals* 26, 7-13.
- Colling, A., 2001, *Ocean circulation*. Boston-Johannesburg-Melbourn-New Delhi-Oxford, The Open University, 2nd edition, 286 p.
- Dalziel, I. W. D.(1992), ANTARCTICA; A TALE OF TWO SUPERCONTINENTS?, *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 20(1), 501-526, doi:10.1146/annurev.earth.20.050192.002441.
- Davey, F. J., and G. Brancolini (1997), The Late Mesozoic and Cenozoic Structural Setting of the Ross Sea Region, in *Geology and Seismic Stratigraphy of the Antarctic Margin*, edited, pp. 167-182, American Geophysical Union, doi:10.1029/AR068p0167.
- Davey, F. J., S. C. Cande, and J. M. Stock (2006), Extension in the western Ross Sea region—links between Adare Basin and Victoria Land Basin, *Geophysical Research Letters*, 33(20), doi:10.1029/2006gl027383.
- Davey, F. J., et al. (2016). "Synchronous oceanic spreading and continental rifting in West Antarctica." *Geophysical Research Letters* 43(12): 6162-6169.

- DeMets, C., Gordon, R.G., Argus, D.F., 2010. Geologically current plate motions. *Geophysical Journal International*, 181, 1–80.
- DiVenere, V.J., Kent, D.V., Dalziel, I.W.D., 1994. Mid-Cretaceous paleomagnetic results from Marie Byrd Land, West Antarctica: A test of post-100 Ma relative motion between East and West Antarctica. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth* 99, 15115–15139.
- Cooper, A. K., Davey, F. J., and Behrendt, J. C., 1987. Seismic stratigraphy and structure of the Victoria Land basin, western Ross Sea, Antarctica. In: Cooper A.K. and Davey F.J. eds., *The Antarctic Continental Margin: Geology and Geophysics of the western Ross Sea*. Published by the Circum-Pacific Council for Energy and Mineral Resources, Houston, Texas, 5B, 27–66.
- Duffy, T.S., Vaughan, M.T., 1988. Elasticity of enstatite and its relationship to crystal structure. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth* 93, 383–391.
- Dupré, B., Allègre, C.J., 1983. Pb–Sr isotope variation in Indian Ocean basalts and mixing phenomena. *Nature*, 303, 142–146.
- Finn, C. A., et al. (2005). "A Cenozoic diffuse alkaline magmatic province (DAMP) in the southwest Pacific without rift or plume origin." *Geochemistry, Geophysics, Geosystems* 6(2): Q02005, doi:02010.01029/02004GC000723.
- 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: 453–469.
- Granot, R., et al. (2010). "Postspreading rifting in the Adare Basin, Antarctica: Regional tectonic consequences." *Geochemistry, Geophysics, Geosystems* 11(8): 10.1029/2010GC003105.
- Graw, J.H., Hansen, S.E., 2017. Upper mantle seismic anisotropy beneath the Northern Transantarctic Mountains, Antarctica from PKS, SKS, and SKKS splitting analysis. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems* 18, 544–557.
- Gripp, A.E., Gordon, R.G., 2002. Young tracks of hotspots and current plate velocities. *Geophysical Journal International* 150, 321–361.
- Hall, J., Wilson, T., and Henrys, S., 2007. Structure of the central Terror Rift, western Ross Sea, Antarctica. *Antarctica: A Keystone in a Changing World—Online Proceedings of the 10th ISAES: USGS Open-File Report*, 1047.
- Hart, S.R., 1984. A large-scale isotope anomaly in the Southern Hemisphere mantle. *Nature*, 309, 753–757.
- Hamelin, B., Allègre, C.J., 1985. Large-scale regional units in the depleted upper mantle revealed by an isotope study of the South-West Indian Ridge. *Nature*, 315, 196–199.

- Karato, S.-i., Jung, H., Katayama, I., Skemer, P., 2008. Geodynamic significance of seismic anisotropy of the upper mantle: New insights from laboratory studies. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences* 36, 59–95.
- Kim, S., De Santis, L., Hong, J. K., Cottlerle, D., Petronio, L., Colizza, E., ... and Wardell, N., 2018. Seismic stratigraphy of the Central Basin in northwestern Ross Sea slope and rise, Antarctica: Clues to the late Cenozoic ice-sheet dynamics and bottom-current activity. *Marine Geology*, 395, 363–379.
- Klein, E.M., Langmuir, C.H., Zindler, A., Staudigel, H., Hamelin, B., 1988. Isotope evidence of a mantle convection boundary at the Australian–Antarctic Discordance. *Nature*, 333, 623–629.
- Lanyon, R., 1994, Mantle reservoirs and mafic magmatism associated with the break-up of Gondwana—the Balleny plume and the Australian–Antarctic Discordance. U–Pb zircon dating of a Proterozoic mafic dyke swarm in the Vestfold Hills, East Antarctica. [Ph.D. thesis], Hobart, Tasmania, University of Tasmania, 402 p.
- Lee, M.J., Lee, J.I., 2017. Holocene eruptive history of Mt. Melbourne volcano, Antarctica: insights from tephra layers recorded from Talos Dome ice core. *Journal of the Geological Society of Korea* 53, 509–519.
- Leroy, M., et al. (2004). "Incipient shortening of a passive margin: the mechanical roles of continental and oceanic lithospheres." *Geophysical Journal International* 159(1): 400–411.
- Lodolo, E., Coren, F., Ben-Avraham, Z., 2013. How do long-offset oceanic transforms adapt to plate motion changes? The example of the Western Pacific–Antarctic plate boundary. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 118, 1186–1202.
- Luyendyk, B., Cisowski, S., Smith, C., Richard, S., Kimbrough, D., 1996. Paleomagnetic study of the northern Ford Ranges, western Marie Byrd Land, West Antarctica: Motion between West and East Antarctica. *Tectonics* 15, 122–141.
- Lyon, G.L., 1986. Stable isotope stratigraphy of ice cores and the age of the last eruption at Mount Melbourne, Antarctica. *New Zealand Journal of Geology and Geophysics* 29, 135–138.
- Maia, M., Dymant, J., Jouannetaud, D., 2005. Constraints on age and construction process of the Foundation chain submarine volcanoes from magnetic modeling. *Earth and Planetary Science Letters*, 235, 183–199.
- Mainprice, D., 1990. A FORTRAN program to calculate seismic anisotropy from the lattice preferred orientation of minerals. *Computers & Geosciences* 16, 385–393.
- McDonough, W., Sun, S.S., 1995, The composition of the Earth. *Chemical Geology*, 120, 223–253.

- 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.W., Ji, S., 2016. Natural olivine crystal-fabrics in the western Pacific convergence region: A new method to identify fabric type. *Earth and Planetary Science Letters* 443, 70–80.
- Panter, K. S., et al. (2018). "Melt origin across a rifted continental margin: a case for subduction-related metasomatic agents in the lithospheric source of alkaline basalt, northwest Ross Sea, Antarctica." *Journal of Petrology*: egy036–egy036.
- Park, S.-H., Langmuir, C.H., Sims, K.W.W., Blichert-Toft, J., Kim, S.-S., Scott, S.R., Lin, J., Choi, H., Yang, Y.-S., Michael, P.J., 2019. An isotopically distinct Zealandia–Antarctic mantle domain in the Southern Ocean. *Nature Geoscience*, 12, 206–214.
- Pondrelli, S., Margheriti, L., Danesi, S., 2006. Seismic anisotropy beneath Northern Victoria Land from SKS splitting analysis, in Fütterer, D.K., Damaske, D., Kleinschmidt, G., Miller, H., Tessensohn, F.(Eds.), *Antarctica: Contributions to Global Earth Sciences*. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, pp. 155–161.
- Rignot, E., Bamber, J.L., van den Broeke, M.R., Davis, C., Li, Y., van de Berg, W.J., van Meijgaard, E., 2008. Recent Antarctic ice mass loss from radar interferometry and regional climate modelling. *Nature Geoscience*, 1, 106–110.
- Salimbeni, S., Pondrelli, S., Danesi, S., Morelli, A., 2010. Seismic anisotropy of the Victoria Land region, Antarctica. *Geophysical Journal International* 182, 421–432.
- Stern, T.A., ten Brink, U.S., 1989. Flexural uplift of the Transantarctic Mountains. *Journal of Geophysical Research*, 94, 10,315–10,330.
- Vaughan, D.G., Comiso, J.C., Allison, I., Carrasco, J., Kaser, G., Kwok, R., Mote, P., Murray, T., Paul, F., Ren, J., Rignot, E., Solomina, O., Steffen, K., Zhang, T., 2013. Observations: Cryosphere, in Stocker, T.F., Qin, D., Plattner, G.-K., Tignor, M., Allen, S.K., Boschung, J., Nauels, A., Xia, Y., Bex, V., Midgley, P.M., eds., *Climate change 2013. The physical science basis: Contribution of working group I to the fifth assessment report of the intergovernmental panel on climate change*. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- Wilson, D.S., Luyendyk, B.P., 2009. West Antarctic paleotopography estimated at the Eocene–Oligocene climate transition. *Geophysical Research Letters*, 36, 1–4.
- Yi, S.-B., Lee, M.J., Park, S.-H., Han, S., Yang, Y.S., Choi, H., 2019. Occurrence of ice-rafted erratics and the petrology of the KR1 seamount trail from the Australian–Antarctic Ridge. *International Geology Review*, 61, 1429–1445.

부록 1. 지각/맨틀 구조 모델링에 사용된 원격지진 목록

Year	Julian day	hr	min	sec	milisec	latitude	longitude	depth	Mw	phase
2013	351	12	29	50	0	-25.5090	-70.5210	71.5	6	P
2013	351	17	1	51	797	-20.7074	-178.6610	602.0	6	P
2013	353	21	34	2	613	-6.9084	128.3230	10.6	6	P
2013	355	6	38	19	10	-22.2795	171.7310	122.0	6	P
2013	356	7	28	53	928	-46.4494	96.1330	9.9	6	P
2013	356	10	2	59	758	-46.4386	96.0153	10.0	6	P
2013	357	9	12	17	149	12.7711	143.0360	92.0	6	P
2013	362	6	43	27	368	-56.4333	-142.5410	10.0	6	P
2013	362	19	6	6	792	-18.2012	-174.3200	95.8	6	P
2013	363	12	49	6	729	-5.6050	153.9860	24.0	6	P
2013	363	15	37	28	69	1.2996	126.2450	42.9	6	P
2014	1	16	3	19	8	-13.8633	167.2490	187.0	7	P
2014	4	0	11	37	999	-20.6870	-70.7950	26.1	6	P
2014	8	4	22	0	179	-20.7495	-70.6330	20.0	6	P
2014	9	6	39	23	448	-11.5917	166.5230	58.0	6	P
2014	10	2	22	45	929	-31.3131	-179.5730	211.0	6	P
2014	20	2	52	34	349	-40.6595	175.8140	28.0	6	P
2014	25	5	14	8	509	-7.9855	109.2650	66.0	6	P
2014	32	3	58	33	988	-56.8269	-27.3391	130.0	6	P
2014	33	9	26	27	821	-32.9076	-177.8810	44.3	7	P
2014	37	5	46	52	489	-11.5493	166.4020	50.2	6	P
2014	38	8	40	3	548	-15.0691	167.3720	122.0	7	P
2014	39	19	50	26	421	-60.4256	-45.1914	23.9	6	P
2014	43	11	43	0	5	-22.3540	-68.8130	99.9	6	P
2014	49	10	12	5	640	-4.9229	153.7760	112.2	6	P
2014	49	23	35	48	262	-14.1648	-75.5997	57.0	6	P
2014	53	22	39	22	222	-60.2444	-47.2746	10.0	6	P
2014	64	9	56	47	841	-14.7378	169.8230	638.0	6	P
2014	64	17	34	9	598	-14.7947	167.2550	109.6	6	P
2014	66	10	4	42	738	-28.1520	-176.6440	27.0	6	P
2014	69	17	33	18	999	-5.4804	147.9550	260.0	6	P
2014	70	2	43	55	829	-60.8623	-19.9775	10.0	6	P
2014	70	22	2	59	820	-3.0856	148.5530	7.0	6	P
2014	73	13	37	56	205	7.7631	94.3128	10.0	6	P
2014	73	20	31	59	627	-53.5105	25.2378	11.3	6	P
2014	74	23	51	22	974	-5.5745	-80.9709	29.0	6	P
2014	75	21	16	19	611	-19.9807	-70.7022	20.0	7	P
2014	76	13	24	38	909	-53.1677	-32.3157	6.0	6	P
2014	77	21	26	35	400	-19.9262	-70.7961	3.3	6	P
2014	78	16	0	13	169	-27.8839	-177.1290	30.7	6	P
2014	78	20	17	33	540	-60.7310	-25.3287	10.0	6	P
2014	80	13	40	59	478	7.7448	94.3342	21.5	6	P
2014	80	14	11	3	889	7.5417	94.2698	10.0	6	P
2014	82	4	30	51	619	-20.6741	-178.8110	606.9	6	P
2014	82	18	19	51	929	-19.6899	-70.8538	21.0	6	P
2014	85	3	29	25	719	-26.1692	179.2880	495.0	6	P
2014	86	3	49	32	709	-12.0989	166.5890	98.0	6	P
2014	86	23	50	42	188	-29.1646	-68.7459	10.0	6	P

2014	90	12	52	56	0	-19.5110	-69.1740	114.5	6	P
2014	92	0	3	3	709	-19.7831	-70.7190	20.7	6	P
2014	92	0	4	40	929	-19.5480	-70.7269	10.0	6	P
2014	92	4	46	8	769	-20.0759	-70.8325	16.5	6	P
2014	93	1	58	20	529	-20.3113	-70.5756	24.1	7	P
2014	93	2	43	3	108	-20.5709	-70.4931	22.4	8	P
2014	93	2	55	55	59	-20.7468	-70.5310	10.0	6	P
2014	93	5	26	5	698	-20.7969	-70.5865	25.0	6	P
2014	94	1	37	40	570	-20.6426	-70.6540	13.7	6	P
2014	94	11	40	22	0	-10.5365	161.7030	57.0	6	P
2014	95	2	22	28	968	-32.7997	-71.5803	40.2	6	P
2014	97	13	43	11	19	-20.1273	-70.8513	8.0	6	P
2014	98	10	14	21	580	-20.5124	-70.9226	6.0	6	P
2014	101	0	1	35	209	-20.6590	-70.6472	13.8	6	P
2014	101	7	7	13	128	-6.5858	155.0480	60.5	7	P
2014	101	8	16	35	660	-6.7878	154.9500	20.0	7	P
2014	101	12	55	7	800	-6.8795	154.9750	9.6	6	P
2014	101	14	33	33	179	-6.7203	154.9630	20.1	6	P
2014	102	20	14	29	298	-11.2701	162.1480	22.6	8	P
2014	102	20	24	36	627	-11.3677	162.2370	31.7	6	P
2014	103	12	11	20	79	-20.5664	-70.7470	13.4	6	P
2014	103	12	36	9	231	-11.4633	162.0510	39.0	7	P
2014	103	13	12	7	739	-11.2100	161.9280	10.0	6	P
2014	103	13	24	49	720	-11.1284	162.0520	10.0	7	P
2014	104	6	29	37	758	-11.2397	161.8760	20.0	6	P
2014	105	3	56	51	369	-53.4967	8.7220	11.2	7	P
2014	107	4	38	7	697	4.5162	122.9350	572.9	6	P
2014	108	4	13	2	39	-11.1387	164.8140	10.0	6	P
2014	109	1	3	53	819	-6.6558	155.0870	29.0	7	P
2014	109	13	27	50	819	-6.7547	155.0240	43.4	8	P
2014	109	13	47	37	248	-6.9524	154.8130	35.0	6	P
2014	109	23	6	7	268	-6.9778	155.0120	40.6	6	P
2014	110	0	15	48	99	-7.1646	155.3350	20.0	6	P
2014	111	9	4	11	638	-6.2237	154.4350	27.0	6	P
2014	111	21	58	51	970	-6.6311	154.7470	13.9	6	P
2014	114	19	51	48	640	-24.0058	-176.6670	63.1	6	P
2014	116	6	2	10	999	-20.7520	-174.7070	45.0	6	P
2014	121	6	36	25	548	-21.4542	170.3550	106.0	7	P
2014	121	14	35	27	69	1.9623	97.9671	37.0	6	P
2014	122	7	45	54	307	-18.6007	-175.3950	13.0	6	P
2014	122	8	43	26	499	-3.8148	127.4010	46.6	6	P
2014	124	9	15	42	879	-24.6108	179.0860	527.0	7	P
2014	124	9	25	5	961	-25.8072	178.2400	634.2	6	P
2014	126	20	52	18	331	-36.1703	-97.0540	16.8	6	P
2014	127	4	20	23	869	-6.9599	154.9010	10.0	6	P
2014	129	10	32	12	186	-18.9616	-175.5360	192.3	6	P
2014	131	20	42	20	367	-13.8826	167.2400	189.1	6	P
2014	132	18	38	26	698	-49.9403	-114.7990	10.5	7	P
2014	134	3	38	11	249	-22.7239	-66.4407	213.1	6	P
2014	134	20	56	3	222	6.4507	144.9240	10.0	6	P
2014	135	8	16	24	439	6.4264	144.9360	11.0	6	P
2014	135	10	16	32	19	9.3832	122.0600	15.5	6	P
2014	136	0	40	5	699	-22.5327	172.9980	9.0	6	P

2014	136	17	8	22	358	-23.4456	-68.5388	105.0	6	P
2014	137	9	10	55	390	-19.9874	-70.8968	5.6	6	P
2014	137	12	13	17	730	-54.2473	-146.6850	5.0	6	P
2014	137	21	28	6	839	-56.2451	-27.5340	90.0	6	P
2014	138	0	58	17	720	-14.6681	-175.5300	10.0	6	P
2014	138	1	2	22	610	4.2485	92.7574	35.0	6	P
2014	138	4	19	7	560	-21.3041	169.8450	62.0	6	P
2014	138	6	38	30	71	-14.8047	-175.9030	10.0	6	P
2014	142	8	37	46	580	-55.3968	-28.2771	7.0	6	P
2014	150	15	32	17	0	-21.3020	-69.9990	59.6	6	P
2014	156	17	21	55	420	-29.1504	-112.4830	10.0	6	P
2014	157	23	6	42	263	-14.8641	-175.0010	15.3	6	P
2014	164	19	30	19	622	-46.0293	-13.8844	6.4	6	P
2014	165	11	10	49	847	-10.1229	91.0921	4.0	7	P
2014	170	9	38	26	77	-19.9749	-70.9451	11.3	6	P
2014	170	10	17	45	518	-13.5585	166.8280	36.0	6	P
2014	174	20	6	10	721	-29.9414	-177.6070	26.6	7	P
2014	174	22	15	39	49	-30.1522	-177.5730	10.0	6	P
2014	180	7	52	45	169	-55.4703	-28.3669	8.0	7	P
2014	180	14	20	27	179	-55.4067	-28.1060	10.0	6	P
2014	180	14	32	39	429	-55.3584	-28.1075	10.0	6	P
2014	180	15	52	13	58	-14.7798	-175.2590	9.0	6	P
2014	180	17	14	59	339	-14.9831	-175.5100	18.0	7	P
2014	180	18	24	22	371	-15.3533	-175.6600	10.0	6	P
2014	184	19	49	57	299	-30.4601	-176.4450	35.0	6	P
2014	185	13	12	7	666	-7.0168	155.9040	38.8	6	P
2014	185	15	0	17	865	-6.2304	152.8070	20.0	7	P
2014	187	22	11	19	790	-21.1445	173.9520	8.0	6	P
2014	189	12	56	15	929	-17.6864	168.3980	110.2	6	P
2014	193	17	49	7	150	-55.4163	-27.9709	6.0	6	P
2014	193	18	20	27	669	-55.3411	-27.9186	10.0	6	P
2014	194	20	0	26	940	-4.0484	151.2700	10.0	6	P
2014	194	20	54	4	557	-20.2585	-70.3475	33.1	6	P
2014	195	5	4	53	200	-8.8188	111.2530	52.5	6	P
2014	195	7	59	47	290	5.7144	126.4780	20.0	6	P
2014	196	9	44	48	891	-4.1115	151.3870	10.0	6	P
2014	196	10	30	20	278	-4.1972	151.3850	10.0	6	P
2014	200	12	27	0	41	-15.8239	-174.4520	227.3	6	P
2014	202	14	54	31	1	-19.8015	-178.4000	615.4	7	P
2014	204	21	38	58	472	-20.2267	-68.6776	118.7	6	P
2014	207	11	13	38	110	-60.0379	-18.6749	10.0	6	P
2014	209	3	36	36	19	7.5014	136.7690	5.0	6	P
2014	209	23	0	38	148	-6.9216	143.8730	10.0	6	P
2014	210	13	27	30	89	-3.4220	146.7690	9.8	6	P
2014	214	14	2	8	769	-55.4278	-28.3088	7.2	6	P
2014	215	0	21	53	680	0.8295	146.1690	13.0	7	P
2014	218	11	45	12	685	-7.2741	128.0360	10.0	6	P
2014	222	13	33	11	27	5.8688	127.1350	78.0	6	P
2014	223	10	7	23	341	-29.9735	-176.0960	10.0	6	P
2014	225	0	30	37	209	13.9091	144.9760	98.0	6	P
2014	233	2	11	21	39	-5.2854	150.6890	8.0	6	P
2014	234	14	29	40	270	-6.5859	146.8180	10.0	6	P
2014	235	4	45	22	670	-20.1745	-69.0385	100.0	6	P

2014	235	22	32	13	321	-32.6953	-71.4416	32.0	6	P
2014	236	20	21	13	548	-55.3230	-28.5152	10.5	6	P
2014	236	23	21	35	517	-14.5980	-73.5714	101.0	7	P
2014	237	14	31	27	278	-16.1260	-73.1133	62.0	6	P
2014	239	23	11	24	209	-15.0455	167.3910	115.3	6	P
2014	246	20	33	49	300	-26.6424	-114.7390	10.0	6	P
2014	247	5	33	40	348	-21.3869	-173.3230	35.0	6	P
2014	248	19	36	21	29	-26.7080	-114.2500	14.0	6	P
2014	249	6	53	1	758	-26.6478	-114.5000	7.0	6	P
2014	253	2	45	56	429	-0.2422	125.1040	35.0	6	P
2014	253	5	16	43	208	-0.1835	125.1250	30.0	6	P
2014	259	2	35	8	459	-6.3080	151.7170	28.1	6	P
2014	260	6	14	35	409	13.7641	144.4290	130.0	7	P
2014	263	18	27	3	709	-0.7667	134.3000	11.8	6	P
2014	265	16	1	32	229	-56.0228	-27.7792	109.3	6	P
2014	266	15	23	50	538	-5.3952	151.7370	57.2	6	P
2014	267	11	16	5	6	-23.8009	-66.6321	224.0	6	P
2014	268	9	13	40	0	-9.4618	156.4120	4.0	6	P
2014	271	6	23	25	749	-19.1319	-176.3430	10.0	6	P
2014	273	16	45	46	229	1.6025	67.7354	10.0	6	P
2014	273	22	34	17	29	-17.8303	-178.5950	572.2	6	P
2014	274	3	38	41	759	-6.0706	149.5330	42.0	6	P
2014	276	8	5	34	268	11.3267	122.1190	19.5	6	P
2014	278	7	24	33	268	-49.7979	125.7690	10.0	6	P
2014	279	14	3	55	570	15.4121	147.2270	4.0	6	P
2014	282	2	14	21	439	-32.1082	-110.8110	16.5	7	P
2014	282	2	31	55	139	-32.0953	-110.8650	10.0	7	P
2014	282	8	14	13	678	-32.6135	-111.6560	10.0	6	P
2014	282	20	59	49	612	-31.9909	-111.1950	10.0	6	P
2014	287	4	12	17	39	-34.8164	179.8640	14.2	6	P
2014	299	10	45	21	840	-10.5571	-74.0836	125.0	6	P
2014	303	12	11	25	659	-6.9881	117.5890	535.0	6	P
2014	305	10	5	33	549	-31.9202	-111.1070	10.0	6	P
2014	305	10	59	44	616	-31.8520	-111.2440	10.0	6	P
2014	305	18	57	12	389	-19.6903	-177.7590	434.0	7	P
2014	307	8	48	19	739	-41.7317	79.9602	10.0	6	P
2014	311	0	20	37	169	4.7800	95.0654	39.0	6	P
2014	311	3	33	45	279	-5.9873	148.2320	53.2	7	P
2014	314	10	4	11	148	-22.7730	171.4530	7.0	6	P
2014	314	11	38	48	999	-21.6310	-68.7250	111.3	6	P
2014	314	21	37	50	827	-30.0426	-177.8550	29.0	6	P
2014	317	10	24	8	267	-15.2155	173.0850	10.0	6	P
2014	317	12	20	56	115	-18.4981	169.1150	211.0	6	P
2014	319	2	31	31	720	1.8929	126.5220	45.0	7	P
2014	319	3	7	54	590	-0.1448	123.8890	90.3	6	P
2014	319	9	47	47	847	1.7859	126.5630	35.0	6	P
2014	320	22	33	10	460	-37.6478	179.6620	22.0	7	P
2014	321	1	5	47	679	-9.5484	155.1390	10.0	6	P
2014	321	11	26	56	978	-36.0008	-102.1970	19.1	6	P
2014	321	16	52	36	845	-46.3484	33.8037	10.0	6	P
2014	322	3	25	27	489	7.4840	94.3590	6.6	6	P
2014	322	4	47	6	628	1.8693	126.4750	30.0	6	P
2014	325	10	10	9	627	2.2999	127.0560	35.0	7	P

2014	328	21	2	9	458	-5.9626	154.9620	170.0	6	P
2014	330	14	33	33	639	1.9604	126.5750	39.0	7	P
2014	330	14	49	39	616	1.8122	126.4580	30.4	6	P
2014	336	5	11	20	998	6.1572	123.1260	614.0	7	P
2014	337	0	26	54	430	-2.9324	122.4230	10.0	6	P
2014	340	22	5	0	731	-6.1100	130.4830	116.0	6	P
2014	341	1	21	52	179	-6.5108	154.4600	23.0	7	P
2014	343	3	9	12	519	1.5378	126.2320	40.7	6	P
2014	345	13	53	19	359	-56.7511	-25.4248	10.0	6	P
2014	346	20	22	25	350	-18.9043	-176.4440	316.4	6	P
2014	352	20	10	43	408	-56.6279	-25.3698	10.0	6	P
2014	355	11	34	3	568	2.0892	126.6480	41.0	6	P
2014	356	7	19	31	228	-54.1054	-146.0940	14.0	6	P
2014	361	18	53	37	220	-17.9261	-179.4900	621.8	6	P
2014	363	17	41	39	467	-56.6590	-24.8509	19.0	6	P
2014	364	21	17	13	930	-20.3263	-178.5640	599.3	6	P
2014	365	1	37	23	930	-4.4378	144.0020	123.0	6	P
2014	365	9	26	12	449	13.7483	120.6670	110.0	6	P
2015	5	17	48	32	488	-43.0546	171.2360	8.1	6	P
2015	10	2	5	36	270	-5.6550	68.3613	10.0	6	P
2015	10	17	54	52	629	-21.6328	-68.5339	108.8	6	P
2015	12	20	25	4	180	-5.5870	133.9220	20.9	6	P
2015	17	18	41	32	766	-22.2370	-63.1461	557.2	6	P
2015	19	17	19	35	648	4.6079	119.7570	11.0	6	P
2015	21	20	8	23	609	-5.6549	146.3280	49.0	6	P
2015	23	3	47	17	50	-17.0309	168.5200	220.0	7	P
2015	28	2	43	9	350	-20.9665	-178.3030	484.1	6	P
2015	29	3	49	25	189	-19.2852	-174.1710	39.8	6	P
2015	30	17	57	46	449	-21.2452	170.1580	7.1	6	P
2015	31	12	29	20	617	15.2410	147.1240	5.0	6	P
2015	32	11	41	36	488	-12.3801	166.7540	176.7	6	P
2015	32	13	33	52	980	-21.2735	170.2650	7.6	6	P
2015	33	10	49	38	527	-32.7183	-67.1231	172.0	6	P
2015	42	13	1	5	809	-23.5605	-66.7204	202.5	6	P
2015	42	18	57	12	461	-23.1125	-66.6880	223.0	7	P
2015	47	22	0	43	602	-55.5200	-28.2591	13.0	6	P
2015	49	9	32	16	770	-10.7598	164.1220	10.0	6	P
2015	50	13	18	22	809	-16.4311	168.1480	10.0	6	P
2015	58	13	44	55	367	-7.2968	122.5350	552.1	7	P
2015	65	8	22	8	959	-41.3157	80.6046	10.0	6	P
2015	66	22	18	47	500	-6.5331	151.7340	22.0	6	P
2015	75	2	59	55	950	-4.0737	152.0290	196.0	6	P
2015	76	20	16	9	78	-17.8236	-178.5650	555.9	6	P
2015	76	22	12	18	938	1.6686	126.5220	44.0	6	P
2015	77	18	27	19	500	-36.1167	-73.5219	13.0	6	P
2015	87	16	36	43	859	-22.2167	-68.6175	112.0	6	P
2015	87	19	16	23	117	-18.2822	176.7930	8.0	6	P
2015	87	22	28	40	789	0.4002	121.9900	118.0	6	P
2015	88	7	50	44	289	1.6535	126.4850	45.1	6	P
2015	88	23	48	21	8	-4.7294	152.5620	41.0	8	P
2015	89	0	15	21	410	-5.2049	152.6040	42.1	6	P
2015	89	7	56	43	229	-15.4296	-173.0490	10.0	6	P
2015	89	8	17	51	340	-15.3920	-172.9410	14.5	6	P

2015	89	8	48	15	340	-15.4994	-173.0290	11.0	7	P
2015	89	10	34	43	59	-39.2859	78.0903	10.0	6	P
2015	89	18	2	0	789	-15.4261	-172.8630	9.6	6	P
2015	90	12	10	30	539	-10.9590	162.4860	26.0	6	P
2015	90	12	18	14	199	-4.8946	152.4900	39.0	6	P
2015	91	11	6	25	789	-16.0213	-172.8350	10.0	6	P
2015	92	4	10	0	0	-17.8607	-178.5830	560.0	6	P
2015	93	12	32	28	668	-23.0158	-176.3460	59.2	6	P
2015	93	21	17	44	781	-6.2934	147.7520	30.0	6	P
2015	95	20	51	29	727	-5.5476	152.7220	8.0	6	P
2015	97	0	46	11	830	-15.1676	-173.2250	30.0	6	P
2015	100	16	22	54	78	-13.7935	65.8580	10.0	6	P
2015	101	5	0	32	480	2.1173	126.6950	50.0	6	P
2015	107	15	52	41	480	-15.8815	-178.6000	10.0	7	P
2015	112	22	57	5	648	-12.0390	166.4320	72.0	6	P
2015	114	3	36	32	399	-42.0602	173.0070	48.0	6	P
2015	116	23	35	19	727	-8.3237	-79.8322	22.0	6	P
2015	118	16	39	29	199	-20.8865	-178.6330	581.0	6	P
2015	120	10	18	58	199	-60.3933	-26.9077	10.0	6	P
2015	120	10	44	52	930	-5.3750	151.7710	31.0	7	P
2015	121	8	5	53	479	-5.2005	151.7770	44.0	7	P
2015	123	22	32	29	8	-5.6314	151.6760	24.0	6	P
2015	123	23	40	46	656	-5.5385	151.9260	35.0	6	P
2015	124	2	29	1	420	-44.5226	168.8830	10.0	6	P
2015	125	20	53	10	977	-15.3785	67.2078	10.0	6	P
2015	127	7	10	9	590	-7.2175	154.5570	10.0	7	P
2015	128	3	12	11	520	1.5404	97.9026	36.0	6	P
2015	128	7	51	56	139	-6.1204	149.8230	35.0	6	P
2015	135	20	26	46	867	-2.5420	102.2190	151.0	6	P
2015	137	8	52	27	119	-12.0807	165.8100	9.0	6	P
2015	138	4	2	36	580	-41.5553	80.3254	9.0	6	P
2015	138	17	4	43	648	-7.1480	154.4420	10.0	6	P
2015	139	13	54	46	469	-18.6153	168.5850	50.0	6	P
2015	140	0	30	44	700	-19.3021	-175.5250	203.0	6	P
2015	140	22	48	43	430	-10.8759	164.1690	11.0	7	P
2015	141	19	32	47	727	-9.8042	160.3340	5.0	6	P
2015	142	23	59	23	781	-11.1093	163.2150	10.0	7	P
2015	143	19	28	7	391	-4.7846	152.5910	31.8	6	P
2015	144	4	53	13	629	-16.8550	-14.1708	10.0	6	P
2015	144	14	38	49	520	-19.3933	-175.9630	10.0	6	P
2015	144	21	6	31	141	-59.6530	-26.4546	34.0	6	P
2015	146	10	31	53	348	-22.0570	-68.5076	124.0	6	P
2015	146	16	42	23	39	-0.3277	135.7340	15.0	6	P
2015	146	23	41	30	797	-58.7355	-25.2138	35.0	6	P
2015	149	8	40	3	229	-47.3578	99.9237	10.0	6	P
2015	150	17	18	25	39	-15.7216	-173.3820	10.0	6	P
2015	155	23	15	33	906	5.9867	116.5410	10.0	6	P
2015	156	14	53	50	969	-37.1708	78.1817	10.0	6	P
2015	161	13	51	59	770	-22.4000	-68.4323	124.0	6	P
2015	163	11	6	58	39	-15.6758	-173.0100	48.0	6	P
2015	164	3	17	14	80	-24.5961	-176.1590	22.0	6	P
2015	166	17	40	43	930	-9.7420	125.2520	20.0	6	P
2015	166	21	4	14	680	4.1537	125.8450	136.0	6	P

2015	167	6	16	51	180	-20.3944	-179.0020	656.0	6	P
2015	171	2	9	57	100	-36.3601	-73.8120	11.0	6	P
2015	171	5	31	58	809	-59.6293	-26.5027	50.1	6	P
2015	171	23	38	59	508	-23.5295	-177.0850	151.0	6	P
2015	172	21	28	6	281	-20.4307	-178.3280	562.6	6	P
2015	174	8	59	45	770	-19.5686	-175.0400	138.0	6	P
2015	180	9	9	6	98	-16.0251	-74.2558	28.0	6	P
2015	181	3	39	19	410	-5.4513	151.5460	43.0	6	P
2015	182	19	35	11	461	-10.9911	162.5560	12.0	6	P
2015	184	6	43	11	539	10.1691	125.8910	32.0	6	P
2015	187	12	23	58	559	-20.7139	-174.5000	44.0	6	P
2015	188	6	20	52	229	-35.4058	-179.7240	10.0	6	P
2015	188	16	7	53	641	-13.3864	-111.3020	10.0	6	P
2015	188	20	3	9	117	-22.9379	-177.1330	169.6	6	P
2015	191	4	12	32	540	-9.3070	158.4030	12.0	7	P
2015	193	4	37	21	330	2.9918	128.1870	115.0	6	P
2015	198	18	49	43	719	-18.1214	-178.1890	536.1	6	P
2015	199	2	27	23	819	-10.4012	165.1410	11.0	7	P
2015	201	11	8	9	430	-35.5251	-105.0840	14.0	6	P
2015	205	21	44	28	930	-8.2477	108.9160	48.0	6	P
2015	207	7	5	0	129	-9.2585	112.6700	52.0	6	P
2015	207	22	42	3	211	-18.0240	-174.0680	7.3	6	P
2015	208	21	41	11	719	-2.6286	138.5280	48.0	7	P
2015	210	23	41	30	430	-25.3727	154.2280	9.0	6	P
2015	211	7	42	15	379	-27.0321	-176.0470	10.0	6	P
2015	215	14	1	42	680	-16.4701	-174.3560	176.0	6	P
2015	218	23	59	36	289	-26.4576	-178.2510	269.0	6	P
2015	219	14	22	4	367	-18.0441	-174.1410	28.5	6	P
2015	221	4	46	10	709	-27.4539	-176.2460	10.0	6	P
2015	222	4	12	5	810	-9.3438	158.0530	22.0	7	P
2015	222	4	24	21	199	-9.2998	157.9540	10.0	6	P
2015	222	7	43	27	270	-19.6389	-174.8530	46.3	6	P
2015	222	19	19	22	391	-27.0812	-176.2400	6.7	6	P
2015	223	13	35	39	410	-27.0523	-176.2730	10.0	6	P
2015	224	0	14	30	320	-31.6968	-71.6227	30.0	6	P
2015	224	18	19	6	16	-9.3286	157.8420	4.2	6	P
2015	224	18	49	14	78	-9.3293	157.8770	6.4	7	P
2015	225	10	39	43	840	-37.0152	78.0623	10.0	6	P
2015	225	14	4	47	738	-3.9835	152.8910	135.0	6	P
2015	226	13	27	50	559	-27.3150	-176.0530	11.2	6	P
2015	227	7	46	56	500	-10.8968	163.8230	8.0	6	P
2015	232	10	59	59	719	0.4854	126.5890	46.1	6	P
2015	232	13	28	58	879	-8.0603	149.5530	52.4	6	P
2015	235	23	9	54	430	-29.7191	-71.2958	31.1	6	P
2015	236	9	41	16	629	-30.6502	-178.7300	228.0	6	P
2015	238	13	51	25	570	-57.4999	-25.8754	32.0	6	P
2015	245	1	18	19	70	4.4132	124.6310	296.0	6	P
2015	246	13	23	50	688	2.0551	126.6820	53.0	6	P
2015	250	8	45	59	49	-24.2427	179.1280	535.0	6	P
2015	251	6	48	22	869	-33.0304	-178.5340	10.0	6	P
2015	251	8	19	43	789	-33.1147	-178.2050	12.8	6	P
2015	254	21	19	8	656	-5.9797	146.6560	26.0	6	P
2015	255	20	32	17	0	-32.6066	-178.0290	8.0	6	P

2015	255	20	32	17	0	-32.6100	-178.0300	8.0	6	P
2015	255	22	15	58	141	-6.1236	147.3660	27.0	6	P
2015	256	1	13	4	0	0.0400	123.4500	143.0	6	P
2015	259	7	40	48	689	1.8841	126.4290	41.6	6	P
2015	259	14	3	12	109	-6.0114	151.4770	6.0	6	P
2015	259	22	54	22	859	-31.5729	-71.6744	22.4	8	P
2015	259	23	3	46	570	-31.7502	-71.7425	19.1	6	P
2015	259	23	18	31	859	-31.5622	-71.4262	28.4	7	P
2015	259	23	37	51	648	-31.7842	-72.0222	12.5	6	P
2015	260	1	32	52	640	-31.7363	-72.0265	9.3	6	P
2015	260	1	40	55	870	-31.1043	-71.6504	42.3	6	P
2015	260	2	59	19	69	-30.9669	-71.5398	35.0	6	P
2015	260	3	55	5	430	-31.4244	-71.6876	27.0	7	P
2015	260	4	2	0	20	-31.2244	-71.9260	16.0	6	P
2015	260	4	26	28	970	-31.4167	-71.9800	17.6	6	P
2015	260	5	44	29	959	-31.8011	-72.1309	10.0	6	P
2015	260	12	14	24	910	-32.9149	-71.6064	10.0	6	P
2015	260	13	32	16	51	-32.1432	-72.3779	10.0	6	P
2015	260	14	19	5	969	-30.9102	-71.9829	10.0	6	P
2015	260	20	40	21	750	-29.9614	-71.8851	5.7	6	P
2015	262	5	6	37	500	-29.6411	-72.0770	6.0	6	P
2015	262	9	6	59	551	-31.0999	-71.5902	28.0	6	P
2015	262	12	52	10	930	-32.3335	-72.0629	18.0	6	P
2015	262	13	8	47	770	-30.5256	-72.1984	10.0	6	P
2015	264	5	39	24	910	-31.5757	-71.7431	30.0	6	P
2015	264	17	39	50	59	-31.7275	-71.3792	35.0	7	P
2015	264	18	36	43	516	-31.0458	-71.8200	27.0	6	P
2015	264	19	55	58	688	-31.7819	-71.6407	28.4	6	P
2015	265	7	12	50	520	-31.4441	-71.2653	58.0	6	P
2015	267	15	53	17	738	-0.6212	131.2620	18.0	7	P
2015	269	2	51	8	830	-30.8148	-71.3217	46.0	6	P
2015	269	17	23	16	828	5.2649	123.7970	516.0	6	P
2015	269	18	17	14	867	-6.2780	151.6660	2.9	6	P
2015	270	2	56	3	740	-7.1772	129.6050	107.0	6	P
2015	271	15	27	55	789	-23.8028	-66.6126	219.0	6	P
2015	273	16	6	42	320	-56.1948	-27.7153	101.0	6	P
2015	276	6	3	32	80	-37.4557	-73.6761	14.5	6	P
2015	276	6	26	45	779	-30.3010	-71.5510	38.0	6	P
2015	278	16	33	16	789	-30.3035	-71.5318	34.0	6	P
2015	282	18	27	26	648	-31.7323	-71.7325	35.0	6	P
2015	283	8	55	55	410	-60.7167	-20.8492	10.0	6	P
2015	290	11	32	58	949	-25.4674	-64.4839	17.0	6	P
2015	291	16	18	25	520	-16.2018	-173.2610	12.0	6	P
2015	292	13	50	31	617	13.8654	120.6170	106.0	6	P
2015	293	20	33	2	70	-57.4332	-65.8872	9.1	6	P
2015	293	21	51	52	570	-14.8595	167.3030	135.0	7	P
2015	296	1	39	56	320	-54.2258	6.1653	11.0	6	P
2015	296	4	4	8	140	-45.8146	37.1711	10.0	6	P
2015	296	22	3	12	852	-2.1661	138.2670	8.0	6	P
2015	298	14	58	47	680	-29.3334	-177.7960	10.0	6	P
2015	301	20	46	30	359	-10.9788	166.3800	141.0	6	P
2015	305	15	16	7	480	-23.2468	-68.4169	111.0	6	P
2015	308	3	44	5	189	-8.3381	124.8750	20.0	7	P

2015	309	16	32	28	750	-3.7259	150.9040	10.0	6	P
2015	311	7	31	33	869	-30.8796	-71.4519	46.0	7	P
2015	311	10	53	34	160	-30.7227	-71.3904	42.0	6	P
2015	312	8	13	27	359	-17.3194	-69.4287	159.9	6	P
2015	312	9	34	47	309	0.7863	98.8905	69.0	6	P
2015	312	16	46	52	160	6.8431	94.6480	10.0	7	P
2015	315	0	26	47	760	6.2386	147.6440	13.0	6	P
2015	315	1	54	28	570	-29.5067	-72.0068	12.0	7	P
2015	315	2	46	9	830	-29.5097	-72.0585	10.0	7	P
2015	315	11	45	13	891	-8.9416	110.2190	83.0	6	P
2015	315	23	36	9	211	-7.2493	128.9300	126.0	6	P
2015	317	6	4	7	180	-29.8492	-64.4985	27.0	6	P
2015	322	18	30	54	570	-8.8994	158.4220	12.6	7	P
2015	325	9	6	3	459	-7.1484	129.9380	82.0	6	P
2015	325	23	5	20	648	-30.5754	-71.7676	27.0	6	P
2015	328	22	45	28	891	-10.5372	-70.9437	606.2	8	P
2015	328	22	50	44	367	-10.0598	-71.0184	620.6	8	P
2015	329	18	57	31	586	1.4305	126.2900	33.2	6	P
2015	330	5	45	8	400	-9.1825	-71.2574	602.8	7	P
2015	333	18	52	39	492	-23.5597	-64.6521	11.0	6	P
2015	338	22	24	50	109	-47.6165	85.0913	35.0	7	P
2015	340	17	9	19	328	-18.1602	-178.6940	547.0	6	P
2015	341	7	51	1	428	-31.3985	-71.2624	49.5	6	P
2015	342	12	55	57	420	-30.8096	-71.7519	25.0	6	P
2015	343	10	21	38	525	-4.1064	129.5080	21.0	7	P
2015	343	12	57	51	775	-16.7374	175.2470	10.0	6	P
2015	344	0	9	22	809	-35.8838	-73.2763	10.0	6	P
2015	344	12	5	4	730	-58.8800	-23.9062	10.0	6	P
2015	353	2	10	43	360	-18.3819	169.3860	10.0	6	P
2015	353	15	3	26	20	-8.3684	107.0220	27.0	6	P
2015	353	19	24	55	570	-30.6053	-71.3057	48.3	6	P
2015	354	18	47	26	609	3.6455	117.6360	14.0	6	P
2015	355	15	43	54	828	-4.4354	151.9780	162.0	6	P
2015	358	19	43	53	141	-55.7550	-123.1160	12.3	6	P
2015	358	23	10	48	180	-7.2182	128.9770	119.0	6	P
2016	1	15	2	6	738	-28.6278	-177.2810	34.0	6	P
2016	8	1	11	51	20	-30.6635	-71.6407	24.2	6	P
2016	11	16	37	55	910	3.8966	126.8570	13.0	7	P
2016	12	9	45	1	430	-31.3385	58.1916	10.0	6	P
2016	13	5	55	52	189	-15.1703	-174.8750	263.0	6	P
2016	14	3	25	18	270	-19.7597	-63.3288	582.6	6	P
2016	14	11	4	8	777	-15.6408	-177.1560	10.0	6	P
2016	14	13	14	39	148	9.6862	126.3100	35.0	6	P
2016	18	18	24	8	445	-21.4088	176.1240	7.1	6	P
2016	21	8	26	11	580	-30.8890	-178.5870	123.2	6	P
2016	25	0	0	1	130	-19.5324	-173.3830	53.0	6	P
2016	25	9	17	40	801	3.1858	128.3680	52.2	6	P
2016	26	3	10	13	479	-5.3308	153.1680	43.9	6	P
2016	31	2	49	55	569	-2.8756	147.1270	10.0	6	P
2016	32	19	0	36	266	-30.7636	-179.9560	391.0	6	P
2016	38	2	3	30	400	-15.2157	-173.4000	51.0	6	P
2016	39	16	19	3	90	-6.6214	154.7070	31.6	6	P
2016	41	0	32	55	340	-30.5723	-71.5838	29.0	6	P

2016	43	10	2	14	51	-9.6338	119.4010	28.0	6	P
2016	45	0	13	33	380	-43.5026	172.8430	8.2	6	P
2016	49	1	7	4	70	-56.2123	-27.6226	119.3	6	P
2016	51	15	51	12	809	-21.9139	-179.3590	579.4	6	P
2016	59	9	6	15	648	5.2757	125.3320	175.4	6	P
2016	62	12	49	38	109	-4.9521	94.3299	24.0	8	P
2016	63	0	10	40	390	-4.7940	94.4101	10.0	6	P
2016	63	8	36	22	648	-9.7645	125.3160	29.5	6	P
2016	68	5	36	18	410	-15.1081	-173.4280	33.0	6	P
2016	74	7	26	30	609	-56.4283	-27.0089	84.0	6	P
2016	74	23	25	29	977	-52.6136	18.7984	10.0	6	P
2016	78	0	31	15	880	-4.5473	153.0960	34.9	6	P
2016	78	12	49	2	910	-12.5112	166.6210	29.0	6	P
2016	79	8	51	14	920	-5.5662	129.4920	269.8	6	P
2016	86	3	24	14	109	-2.6503	68.0253	10.0	6	P
2016	88	19	6	58	750	-56.2536	-27.6408	29.7	6	P
2016	89	9	18	1	250	2.3874	126.1020	55.0	6	P
2016	92	19	24	45	367	-3.3585	144.8870	6.0	6	P
2016	94	8	23	42	318	-14.3235	166.8550	26.0	7	P
2016	96	8	29	10	949	4.2073	126.6510	35.0	6	P
2016	97	6	54	43	389	-14.1516	166.7010	35.0	6	P
2016	97	6	58	38	209	-14.0683	166.6240	24.0	7	P
2016	97	7	57	27	570	-14.2026	166.6390	35.0	6	P
2016	97	14	45	19	617	-8.2036	107.3860	29.0	6	P
2016	97	20	35	4	570	-6.0292	130.4300	118.0	6	P
2016	98	3	32	43	500	-13.9805	166.5940	27.6	7	P
2016	101	2	14	24	590	-4.1489	102.2110	41.0	6	P
2016	103	3	22	37	710	-3.7568	-103.9370	10.0	6	P
2016	104	18	21	42	727	7.7917	122.0230	17.0	6	P
2016	105	12	16	55	160	-14.4907	166.5030	7.5	6	P
2016	105	21	50	17	680	-14.5284	166.4330	16.0	6	P
2016	105	23	14	57	906	-7.4590	128.1240	136.8	6	P
2016	106	4	50	1	410	2.0125	127.0000	90.0	6	P
2016	107	7	34	10	500	-29.5755	-111.5740	10.0	6	P
2016	108	7	30	50	29	-23.4947	-174.2470	10.0	6	P
2016	109	13	6	0	891	-19.4920	169.0930	76.0	6	P
2016	110	5	25	29	939	-55.7283	-27.2307	14.0	6	P
2016	115	8	37	49	850	-59.3074	-27.0270	10.0	6	P
2016	115	22	24	26	461	-17.6976	-173.2030	27.2	6	P
2016	117	4	19	45	409	-4.5105	140.1920	107.0	6	P
2016	119	19	33	14	70	-16.0429	167.3790	24.0	7	P
2016	121	8	35	32	139	-16.3487	167.2000	3.0	6	P
2016	123	4	21	14	710	-5.0262	104.6270	117.0	6	P
2016	125	14	36	13	770	-14.8550	166.9340	26.0	6	P
2016	126	11	1	36	789	-8.9416	-108.2390	10.0	6	P
2016	134	12	57	17	320	-25.4822	179.3400	506.4	6	P
2016	137	0	41	43	270	-22.5170	172.9880	10.0	6	P
2016	141	18	13	54	680	-25.5655	129.8840	10.0	6	P
2016	148	4	8	33	949	-20.8101	-178.6480	567.5	6	P
2016	149	5	38	40	549	-21.9724	-178.2040	405.7	7	P
2016	149	9	46	49	777	-56.2409	-26.9353	78.0	7	P
2016	151	7	14	8	619	-30.2689	-177.9790	47.0	6	P
2016	153	15	37	13	277	-30.2228	-177.9540	43.9	6	P

2016	153	22	55	50	797	-2.0967	100.6650	50.0	7	P
2016	157	5	51	1	549	-29.3424	-71.8594	28.0	6	P
2016	157	16	25	23	539	-4.5870	125.6260	429.6	6	P
2016	157	22	33	39	367	-17.6471	-172.6320	10.0	6	P
2016	158	2	35	22	390	-30.0235	-177.8360	43.8	6	P
2016	158	13	15	52	219	-30.0433	-71.4636	28.3	6	P
2016	159	2	55	13	920	-45.1528	166.8280	39.7	6	P
2016	159	19	15	5	328	1.2789	126.3710	31.0	6	P
2016	161	4	12	58	130	-11.2487	116.2670	19.0	6	P
2016	162	4	17	34	840	-8.6757	160.5590	30.4	6	P
2016	165	0	59	29	890	-4.4284	-104.8110	10.0	6	P
2016	166	13	49	12	629	-18.7609	168.8280	111.0	6	P
2016	169	21	26	7	656	-11.6148	166.3700	45.6	6	P
2016	170	17	29	36	457	-24.1467	-67.1526	186.0	6	P
2016	172	3	50	45	239	-20.2072	168.7600	15.0	6	P
2016	173	17	11	57	367	-3.4199	151.8800	354.0	6	P
2016	176	21	29	9	31	-25.7705	-69.3417	119.0	6	P
2016	180	22	46	36	609	-14.6436	166.4580	9.0	6	P
2016	182	11	30	23	51	-16.0558	167.4700	27.0	6	P
2016	186	9	25	29	461	-10.6273	164.9680	44.0	6	P
2016	192	13	41	43	328	-15.0284	-172.8760	8.0	6	P
2016	192	16	32	39	738	-14.6192	167.3860	164.8	6	P
2016	194	8	48	34	100	-6.4391	147.4610	43.3	6	P
2016	195	11	56	48	277	-28.0101	-176.4140	10.0	6	P
2016	195	12	11	2	828	-28.0052	-176.4430	12.0	6	P
2016	195	13	4	15	480	-27.9244	-176.5250	10.0	6	P
2016	201	5	18	30	260	-30.2523	-71.9722	8.0	6	P
2016	202	15	13	6	520	-18.9285	169.0550	167.0	6	P
2016	205	7	41	34	699	-6.7596	101.2170	9.0	6	P
2016	205	20	9	13	500	-15.1308	-173.6730	37.0	6	P
2016	207	8	58	20	789	-49.4848	126.2660	10.0	6	P
2016	207	17	26	40	219	-26.1049	-70.5074	72.0	6	P
2016	207	19	38	35	570	-2.9690	148.0350	14.0	6	P
2016	208	8	4	10	309	-16.0357	167.4490	31.0	6	P
2016	212	13	18	58	141	-6.9223	155.7930	37.0	6	P
2016	213	11	33	10	570	-56.2550	-27.5494	98.2	6	P
2016	213	23	39	51	891	-8.1940	117.8140	21.0	6	P
2016	214	7	42	41	250	-23.9646	82.5565	10.0	6	P
2016	215	7	32	19	490	-58.7240	-25.6076	35.0	6	P
2016	217	14	15	3	90	-22.3087	-66.0261	270.0	6	P
2016	218	12	34	5	289	-23.9450	82.4330	10.0	6	P
2016	225	1	26	26	290	-22.4778	173.1110	16.4	7	P
2016	225	3	29	22	850	-25.1679	-177.3440	114.1	6	P
2016	228	2	58	50	850	-15.6569	-72.0174	20.0	6	P
2016	231	4	29	58	750	-19.8593	148.7250	7.8	6	P
2016	231	18	9	33	0	-55.9195	-123.1970	4.6	6	P
2016	232	7	32	12	729	-55.2793	-31.8740	10.0	7	P
2016	232	17	33	30	520	-55.2088	-32.0731	4.3	6	P
2016	232	20	37	6	859	-55.2031	-32.1207	13.9	6	P
2016	234	3	45	13	739	-55.2775	-31.7546	10.0	6	P
2016	236	19	39	34	656	-7.2805	122.4250	532.4	6	P
2016	236	19	40	36	227	-7.2081	122.5410	514.3	6	P
2016	237	13	48	34	379	-2.9567	100.0550	17.2	6	P

2016	241	7	23	40	809	-2.8041	138.4430	28.3	6	P
2016	243	8	8	59	830	-34.8983	-72.5297	19.2	6	P
2016	243	15	45	52	270	-55.3018	-30.3648	10.0	6	P
2016	244	3	11	26	60	-3.6914	152.7880	499.1	7	P
2016	244	22	4	25	148	-37.2078	179.1250	22.4	6	P
2016	245	17	13	55	898	-37.0443	179.0060	13.8	6	P
2016	245	17	35	50	559	-37.1775	179.0770	10.0	6	P
2016	245	19	18	22	328	-37.2249	178.7070	10.0	6	P
2016	245	20	4	5	789	0.5795	98.5337	24.3	6	P
2016	248	2	38	2	290	8.3822	125.9140	12.4	6	P
2016	249	15	18	53	809	-37.1374	178.6590	27.6	6	P
2016	250	4	13	25	159	-10.9588	165.9890	73.3	6	P
2016	253	0	3	35	90	-31.3743	-65.8031	156.8	6	P
2016	258	7	24	50	70	-9.3290	159.1670	14.0	6	P
2016	261	1	20	8	120	-2.1156	140.5720	10.0	6	P
2016	261	2	31	49	899	-16.0130	167.4310	36.8	6	P
2016	262	7	17	26	729	-2.0179	140.4710	10.0	6	P
2016	266	16	7	17	109	-59.4526	-27.3555	8.0	6	P
2016	266	20	6	1	969	-21.5120	33.3301	10.0	6	P
2016	267	22	53	0	398	6.5720	126.4920	65.0	6	P
2016	268	11	4	19	910	-1.8951	140.6280	10.0	6	P
2016	268	11	9	33	898	-1.8489	140.5580	14.1	6	P
2016	268	21	7	5	789	-18.1706	-174.9840	202.0	6	P
2016	268	21	28	31	711	-19.7819	-178.2440	596.4	7	P
2016	275	0	32	50	660	-23.6951	-174.9150	10.0	6	P
2016	282	19	41	11	359	-37.0997	178.6550	35.0	6	P
2016	283	14	46	16	719	1.7839	127.4300	128.0	6	P
2016	286	3	21	16	239	-5.3711	153.4720	21.9	6	P
2016	286	4	16	14	109	-20.9122	-178.5690	574.6	6	P
2016	289	8	3	28	139	-4.2701	150.3610	442.0	6	P
2016	291	6	14	48	369	-6.0526	148.8620	35.0	7	P
2016	292	16	36	31	770	-23.3265	-179.8430	540.0	6	P
2016	293	0	25	51	90	-4.8626	108.1630	614.0	7	P
2016	298	1	54	56	710	-36.0015	-102.6870	10.0	6	P
2016	299	16	9	51	648	-15.3871	-174.8270	10.0	6	P
2016	300	5	19	40	510	-15.5400	-174.8720	10.0	6	P
2016	301	8	17	39	660	1.3287	125.7930	56.1	6	P
2016	301	20	32	45	719	-33.7647	-72.5338	14.8	6	P
2016	302	5	26	45	910	-4.6721	153.2160	45.2	6	P

부록2. 남극 중앙해령 맨틀성인규명 항차별 탐사일지

1. 2016-17 연구항해 (ANA07B)

Voy. No.	Date / Time(UTC)	위치	연구 작업 지원 사항	비고
	2016/ 12/ 29 / 09:44	62° 12.21'S 158° 35.31'E	멀티코어 시작 (KRR4-MC01)	
	2016/ 12/ 30 00:37	62° 12.21'S 158° 35.31'E	멀티코어 종료	
	04:47	62° 28.04'S 156° 49.58'E	드렛지 시작 (KRR4-DG00)	
	06:01	62° 28.13'S 156° 48.98'E	드렛지 종료	
	06:49	62° 28.81'S 156° 54.28'E	드렛지 시작 (KRR4-DG01)	투명 조개 채취
	07:53	62° 28.95'S 156° 53.74'E	드렛지 종료	
	12/31 / 08:49	59° 03.05'S 152° 18.91'E	드렛지 시작 (KRR4-DG02)	
	12:34	59° 59.26'S 152° 18.69'E	드렛지 종료	
	16:19	60° 14.69'S 151° 29.99'E	락코어 (KRR4-RC01)	
	19:45	60° 18.61'S 151° 12.99'E	락코어 (KRR4-RC02)	
	22:23	60° 18.61'S 151° 13.00'E	멀티코어 시작 (KRR4-MC02)	
	2017/ 01/ 01 00:17	60° 18.61'S 151° 13.00'E	멀티코어 종료 후 line survey	
	01/02 / 04:49	54° 45.36'S 146° 10.28'E	락코어 (KRR4-RC03)	
	08:36	54° 49.36'S 146° 03.40'E	락코어 (KRR4-RC04)	
	11:25	54° 47.30'S 146° 01.52'E	락코어 (KRR4-RC05)	

Voy. No.	Date / Time(LT)	위치	연구 작업 지원 사항	비고
	14:24	54° 47.99'S 145° 53.21'E	락코어 (KRR4-RC06)	
	16:30	54° 47.59'S 145° 52.21'E	락코어 (KRR4-RC07)	
	01/03 / 03:34	54° 50.74'S 144° 35.99'E	락코어 (KRR4-RC08)	
	06:06	54° 50.67'S 144° 46.95'E	락코어 (KRR4-RC09)	
	08:25	54° 50.21'S 144° 53.08'E	락코어 (KRR4-RC10)	
	11:07	54° 49.96'S 145° 07.05'E	락코어 (KRR4-RC11)	
	13:28	54° 49.79'S 145° 15.50'E	락코어 (KRR4-RC12)	
	16:14	54° 49.08'S 145° 24.52'E	락코어 (KRR4-RC13)	
	18:50	54° 47.57'S 145° 39.92'E	락코어 (KRR4-RC14)	종료 후 line survey
	01/06 / 09:02	54° 07.95'S 141° 27.65'E	락코어 (KRR4-RC15)	
	12:07	54° 07.60'S 141° 41.11'E	락코어 (KRR4-RC16)	
	14:38	54° 08.47'S 141° 48.30'E	락코어 (KRR4-RC17)	
	17:10	54° 09.52'S 141° 55.53'E	락코어 (KRR4-RC18)	
	19:34	54° 10.06'S 142° 05.01'E	락코어 (KRR4-RC19)	
	22:05	54° 10.74'S 142° 14.07'E	락코어 (KRR4-RC20)	

Voy. No.	Date / Time(LT)	위치	연구 작업 지원 사항	비고
	01/07 / 02:03	54° 15.30'S 142° 50.74'E	락코어 (KRR4-RC21)	
	04:40	54° 14.96'S 143° 06.33'E	락코어 (KRR4-RC22)	
	07:17	54° 14.80'S 142° 21.70'E	락코어 (KRR4-RC23)	
	09:30	54° 14.57'S 143° 29.85'E	락코어 (KRR4-RC24)	
	11:30	54° 14.44'S 143° 32.48'E	락코어 (KRR4-RC25)	
	13:42	54° 14.20'S 143° 36.94'E	락코어 (KRR4-RC26)	
	15:47	54° 14.11'S 143° 41.40'E	락코어 (KRR4-RC27)	
	18:30	54° 13.99'S 143° 48.03'E	락코어 (KRR4-RC28)	
	20:00	54° 13.80'S 143° 52.22'E	락코어 (KRR4-RC29)	
	22:00	54° 13.44'S 144° 00.74'E	락코어 (KRR4-RC30)	
	01/08 / 01:04	54° 15.58'S 143° 51.33'E	멀티코어 시작 (KRR4-MC03)	
	02:55	54° 15.58'S 143° 51.33'E	멀티코어 종료	
	03:21	54° 13.65'S 143° 57.08'E	멀티코어 시작 (KRR4-MC04)	
	05:14	54° 13.65'S 143° 57.08'E	멀티코어 종료	
	08:43	54° 16.65'S 144° 23.68'E	드렛지 시작 (KRR4-DG03)	

Voy. No.	Date / Time(LT)	위치	연구 작업 지원 사항	비고
	10:42	54° 16.65'S 144° 24.52'E	드렛지 종료 (KRR4-DG03)	
	01/09 / 01:37	54° 42.00'S 145° 22.07'E	멀티코어 시작 (KRR4-MC03)	종료 후 line survey
	03:39	54° 41.99'S 145° 22.07'E	멀티코어 종료	
	06:55	54° 23.24'S 145° 26.75'E	드렛지 시작 (KRR4-DG04)	
	09:19	54° 22.87'S 145° 26.14'E	드렛지 종료	



2. 2019 연구항해 (ANA10A)

Voy. No.	Date / Time(UTC)	위치	연구 작업 지원 사항	비고
	2019/ 12/ 11 / 21:00		자력계 TEST	5 Knot
	23:00		자력계 탐사 및 line survey	10 Knot에서 8 Knot로 변경
	12/14 / 11:30	64° 31.73'S 176° 27.40'E	락코어 (KRR5-RC01)	
	15:00	64° 29.36'S 176° 34.10'E	락코어 (KRR5-RC02)	종료 후 line survey
	19:45		자력계 탐사 및 line survey	
	12/15 / 02:03	64° 17.75'S 175° 21.47'E	락코어 (KRR5-RC03)	
	04:39	64° 16.06'S 175° 26.58'E	락코어 (KRR5-RC04)	종료 후 line survey
	09:30		자력계 탐사 및 line survey	
	12/16 / 08:38	63° 52.93'S 173° 45.30'E	드렛지 시작 (KRR5-DG01)	
	10:30	63° 53.20'S 173° 44.91'E	드렛지 종료 후 line survey	
	19:50	63° 46.64'S 173° 16.45'E	락코어 (KRR5-RC05)	
	19:50	63° 43.58'S 173° 26.27'E	락코어 (KRR5-RC06)	종료 후 line survey
	12/17 / 06:32	63° 46.62'S 172° 43.58'E	드렛지 시작 (KRR5-DG01)	
	08:22	63° 46.22'S 172° 43.73'E	드렛지 종료 후 자력 탐사 및 line survey	

Voy. No.	Date / Time(LT)	위치	연구 작업 지원 사항	비고
	12/18 / 06:30	63° 17.75'S 170° 48.07'E	락코어 (KRR5-RC07)	
	09:32	63° 24.16'S 170° 23.92'E	락코어 (KRR5-RC08)	종료 후 자력 탐사 및 line survey



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.