

서남극해 온난화에 따른 탄소흡수력 변동
및 생태계 반응 연구

Carbon cycle change and ecosystem response
under the Southern Ocean warming



한국해양과학기술원
부설 극지연구소

제 출 문

극지연구소장 귀하

본 보고서를 “서남극해 온난화에 따른 탄소흡수력 변동 및 생태계 반응 연구”과제의 (단계)보고서로 제출합니다.

2023. 02. 28

연구책임자 : 박 지 수

참여 연구원 :

김태완, 하선용, 박기홍, 이영주, 정진영, 양은진, 나형술, 박태욱, 신형철, 조경호, 김지훈, 최한구, 주형민, 유재일, 최정욱, 이보연, 심초롬, 이지란, 문종국, 이성재, 고은호, 갈종구, 김보경, 모아라, 김보미나, 한동균, 고영욱, 양희원, 김영기, 전미혜, 손우주, 손주영, 전미사, 민준오, 김정현, 주재민, 김민중

위탁연구기관 1 : 인하대학교

위탁연구책임자 : 박 재 훈

위탁연구기관 2 : 고려대학교

위탁연구책임자 : 김 태 욱

위탁연구기관 3 : 서울대학교

위탁연구책임자 : 황 점 식

위탁연구기관 4 : 부산대학교

위탁연구책임자 : 이 상 현

위탁연구기관 5 : 인천대학교

위탁연구책임자 : 김 승 규

위탁연구기관 6 : 부산대학교

위탁연구책임자 : 함 도 식

위탁연구기관 7 : 부경대학교

위탁연구책임자 : 김 태 진

위탁연구기관 8 : 인하대학교

위탁연구책임자 : 김 태 원

해외공동연구기관 : 미국 로드아일랜드 대학교

위탁연구책임자 : D. Randolph Watts



보고서 초록

| | | | | | |
|---|---------------|---|------------------------------------|-------------|---|
| 과제관리번호 | | 해당단계 연구기간 | 2020.01.01. ~ 2022.12.31 | 단계 구분 | 1단계 / 2단계 |
| 연구사업명 | 중 사업명 | 기관목적사업 | | | |
| | 세부사업명 | 기관고유사업 | | | |
| 연구과제명 | 중 과제명 | 기후변화에 의한 극지환경변화 감시와 원인 규명 | | | |
| | 세부(단위)과제명 | 서남극해 온난화에 따른 탄소흡수력 변동 및 생태계 반응 연구 | | | |
| 연구책임자 | 박 지 수 | 해당단계 참여연구원수 | 총 : 88 명 내부 : 42 명 외부 : 46 명 | 해당단계 연구비 | 정부: 6,341,000 천원 기업: 천원 계: 6,341,000 천원 |
| 연구기관명 및 소속부서명 | 극지연구소 해양연구본부 | | 참여기업명 | | |
| 국제공동연구 | 상대국명 : 미국 | 상대국연구기관명 : 로드아일랜드 대학교 (URI) | | | |
| | 상대국명 : 중국 | 상대국연구기관명 : 제3 해양연구소 (TIO) | | | |
| | 상대국명 : 미국 | 상대국연구기관명 : 럿거스 대학교 (Rutgers) | | | |
| | 상대국명 : 일본 | 상대국연구기관명 : 홋카이도대학 저온연구소 | | | |
| | 상대국명 : 영국 | 상대국연구기관명 : British Antarctic Survey | | | |
| | 상대국명 : 독일 | 상대국연구기관명 : Alfred Wegener Institute | | | |
| | 상대국명 : 칠레 | 상대국연구기관명 : Univeridad Austral de Chile | | | |
| 위 탁 연 구 | 연구기관명 : 인하대학교 | 연구책임자 : 박재훈 | | | |
| | 연구기관명 : 고려대학교 | 연구책임자 : 김태욱 | | | |
| | 연구기관명 : 서울대학교 | 연구책임자 : 황점식 | | | |
| | 연구기관명 : 부산대학교 | 연구책임자 : 이상현 | | | |
| | 연구기관명 : 인천대학교 | 연구책임자 : 김승규 | | | |
| | 연구기관명 : 부산대학교 | 연구책임자 : 함도식 | | | |
| | 연구기관명 : 부경대학교 | 연구책임자 : 김태진 | | | |
| 연구기관명 : 인하대학교 | 연구책임자 : 김태원 | | | | |
| 요약(연구결과를 중심으로 개조식 500자 이내) | | | | 보고서 면수 | 139 |
| <ul style="list-style-type: none"> ○ 남극해는 인간 활동에 따른 지구 온난화로 인해 증가한 열과 대기중 온실기체(이산화탄소 등)의 핵심 흡수원으로서 사실상 지구기후시스템의 핵심 조절자 역할을 하고 있음. 남극해는 인간이 대기로 배출하는 이산화탄소 중 전 지구 해양으로 흡수되는 양의 절반에 가까운 이산화탄소와 전 지구 해양으로 흡수되는 열의 약 4분의 3이 차가운 남극해로 흡수되고 있음 ○ 본 과제에서는 열과 탄소흡수 시스템으로서 서남극해의 현재 수준을 진단하고, 외양-연안 관측을 통한 물질순환 변동성과 해양생태계 반응을 규명하고자 하였음. 기존 관측자료 등을 활용하여 남극환류의 변동성을 분석하였고, 서남극 연안 남극순환수 유입과정 및 변동성 파악을 위해 장기관측거점을 선정하여 아라온을 활용해 로스해 폴리나 동남부 대륙사면 해역에 네 개의 해양계류라인을 성공적으로 설치하였음 ○ 2차년도에는 저위도 해역에서 남극해로 유입되는 열속의 전달을 확인하기 위하여 남극환류가 강하게 흐르는 남동인디아해령 부근 극전선 해역에서 쇄빙연구선 아라온호를 활용하여 중규모와류에 의한 열전달을 직접 관측할 수 있는 총 16대의 무인해류계(PDS-CPIES)를 성공적으로 설치하였음 ○ 또한 세종기지 기반의 연안 환경변화를 지속적으로 모니터링하고, 아라온으로 서남극해 태평양 전체 해역의 무기탄소 분포를 정밀 관측하여 로스해로 유입되는 인간기원 무기탄소의 양도 산정할 수 있었음 | | | | | |
| 색 인 어 (각 5개 이상) | 한 글 | 서남극해, 지구 온난화, 탄소흡수력, 생태계 반응, 용빙수 배출, 수층/해저 탄소교환 | | | |
| | 영 어 | West Antarctic Sea, Global warming, Carbon absorption rate, Ecological response Meltwater discharge, Benthic-pelagic coupling | | | |

요 약 문

I. 제 목

서남극해 온난화에 따른 탄소흡수력 변동 및 생태계 반응 연구

II. 연구개발의 목적 및 필요성

- 서남극해를 중심으로 한 종합 해양관측 수행 ⇨ 남극해에 장기 관측 거점 구축
- 남극해 열과 탄소의 이동을 파악 (길목 관측) ⇨ 외양에서 남극 연안으로 유입되는 열과 탄소교환량/탄소유입량의 거동 추적 ⇨ 남극연안 대륙사면, 로스해 폴리냐, 마리안 소만 등지에서 탄소 변동성의 현황 파악과 생물학적 탄소펌프의 중요성 규명 ⇨ (다음 단계) 미래 예측으로 연구범위 확대
- 정밀 관측을 통한 현황 파악과 단기 변화 추적 ⇨ 중단기 변동성 규명으로 확대
- 국내 최초의 남극해 대양을 대상으로 하는 다학제 연구협력 프로젝트로 추진
- 남극해 외양부터(남극심층수의 거동 등) 연안까지(용빙수의 영향으로 인한 미량금속 공급 기작과 이에 따른 생물량 변동) 연결되는 열과 탄소펌프(물리적, 화학적, 생물학적 탄소펌프)의 종합적인 관측으로 지구 온난화에 따른 열 축적과 (인류기원) 이산화탄소 증가가 남극해의 지구 기후조절자로서의 남극해 역할 변화에 어떤 영향을 주고 받고 있는지에 대한 다각적인 접근 시도
- 세종기지 앞 마리안소만은 최근 빙붕이 급격히 감소하고 있음에 따라 해양생태계가 받는 영향도 매우 빠르고 뚜렷하게 나타나는 해역으로서 온난화에 따른 극지해역의 변화와 그에 속한 해양생태계의 반응을 살피는데 더없이 좋은 조건을 갖추고 있어(극지해양변화가 바로 나타나는 미니어처), 해양생태계 반응 및 피드백 등을 살필 수 있는 실험 등을 병행할 수 있는 테스트베드로서 활용 가치가 매우 큼
- 본 과제에서는 뉴질랜드-로스해 종단 관측, 극전선 길목해역 장기 계류, 남극 연안 대륙사면에서 용빙수 증가에 따른 영양염류 공급과 생물량 변동, 세종기지 연안 미니어처 해역에서의 실험과 가설 검증 등 남극해에서 벌어지고 있는 물리-생지화학적 현상 파악과 그에 따른 영향 추적 등 종합적인 목표를 지향하고 있음
- 남극해의 가장 중요한 지구시스템으로서의 기능은 남극해의 찬 바다가 적도의 열을 식혀 주고, 대기 중의 온실기체(이산화탄소 등)를 흡수하는 기후변화 조절 역할임
- 인간이 배출하는 이산화탄소의 바다 흡수 중 거의 절반과, 바다로 흡수되는 열의 약 4분의 3을, 바다 20% 면적에 불과한 차가운 남극해가 담당함
- 전 지구 컨베이어벨트 해류 순환을 포함한 열 수송 및 온실기체의 해양으로의 흡수는 상호 연결되어 있으며, 해수의 온도가 높아질 경우, ①“중위도→남극” 열전달, ②남극순환 심층수 연안 유입, ③남극해 수온 상승, ④남극해 탄소흡수력 저하, ⑤이로 인한 해양환

경으로의 영향으로 이어지므로 각각의 현상에 대한 관측 및 예측이 필요함

- 아울러, 해양연구 분야의 특성상 최고 수준의 연구결과를 얻기 위해선 장기 시계열자료 획득이 가능한 특정한 사이트 선정이 필수적임. 따라서 한국이 주도할 수 있는 남극해 해양 장기관측 거점의 선정은 선진국 수준 연구의 초석이 될 것임
- 지속적인 온실기체 배출에 따른 지구 온난화는 남반구 극진동(Southern Annular Mode)을 강화하여, 남극순환수(Circumpolar Deep Water)의 연안 유입량 증대와 빙봉 하부용해를 가속시킴
- 특히, 남극환류(Antarctic Circumpolar Current)의 남쪽경계가 육지와 가까운 서남극 연안에서 남극순환수 유입에 따른 급속한 빙봉소멸이 일어남. 이에 따라 다량의 용빙수가 주변 해역으로 배출됨
- 빙봉 용빙수의 배출은 주변 해역 해수 수괴와 밀도구조를 변화시켜 해양순환에 영향을 미침. 또한, 남극해에서 식물플랑크톤의 생산량을 제한하는 미량금속은 빙봉 용빙수에 다량으로 포함되어 있어 주변 해역 생물생산량, 중조성과 생지화학순환에 영향을 미침
- 용빙수는 남극 연안 해류를 따라 로스해로 유입되어 표층 저염화를 초래하며, 이는 남극 저층수(Antarctic Bottom Water)의 형성과 전 지구 열 균형의 안정성에 영향을 미칠 가능성이 큼
- 따라서, 서남극 연안에서 용빙수 거동과 해양순환변화를 파악하는 연구는 남극해 온난화에 따른 해양환경변화뿐 아니라 전 지구적 규모의 기후 변동성을 이해하는데 필수적인 정보를 제공함
- 킹조지섬은 기후변화 연구의 과학적(기후변화의 'hot spot'인 남극반도 끝자락에 위치, 다양한 해양생물의 보고), 전략적(상주국 최다) 요충지임
- 연안역은 육상 빙상 후퇴와 용빙수 및 육상기원물질 유입 등으로 환경변화의 폭과 생태계 반응 강도가 대양에 비해 훨씬 크게 나타나 기후변화 영향을 신뢰도 높게(reliable) 감지하고, 정량적으로(quantitative) 분석할 수 있는 최적의 연구대상 지역임

III. 연구개발의 내용 및 범위

- 서남극해 열 수송과 해양-대기 탄소교환량 파악
 - 남극순환심층수(CDW) 거동 관측을 위한 종합해양관측망 구축 및 열 수송 과정 이해
 - 서남극해 해양-대기 이산화탄소 교환에 따른 표층무기탄소 분포 특성 파악
 - 지구시스템 모델 및 재분석장에서의 해수 및 탄소 순환 변동성과 추세 파악
- 빙권수축(온난화)에 따른 (연안) 생지화학 물질순환 변동 과정 규명
 - 서남극 연안 빙하기원 용빙수의 공간분포 및 확산·혼합 과정의 이해
 - 서남극 화학적 생물생산 조절인자(영양염, 미량금속)의 시기별/공간적 분포 특성 이해
 - 서남극 연안해역의 수층 내 탄소(유기+무기) 순환 규모 및 해양-대기 유기탄소 교환 특성 파악
- 생물생산력 변동과 해양생태계 반응 추적
 - 해양환경 변화에 따른 서남극해 지표생물군집(식물, 동물, 저서생물) 분포 특성 파악
 - 온난화에 따른 서남극해 생물생산력(일차, 이차)의 변동성 및 변화방향 추적
 - 서남극해 생물기원 유기물 순환과 해양 하위 영양단계의 분포 특성 파악

IV. 연구개발결과

- 1. 해양물리 관측과 열 수송** : 서남극해 해수 수괴 및 해류관측을 통한 환남극심층수의 거동을 추적하고 열 수송량을 산정하기 위해 연구과제의 수행 기간인 2020년 1월부터 2022년 12월까지, 세차레 아라온을 활용한 현장 관측이 이루어졌다. 2020년 1월 수행된 첫 번째 항해기간 동안 서남극 연안에서 해수의 물리적 특성 관측을 통해 빙봉 기원 용빙수의 공간분포 특성과 해류의 영향을 밝혔다. 2020년 12월 두 번째 해양조사에는 서남극 동 로스해, 리틀아메리카 분지 인근 해역의 대륙사면에 남극 연안으로 공급되는 열수송의 시계열 변동성 파악을 위해 4기의 장기해류관측시스템을 설치하였으며, 동시에 11개 정점에서 수직 수온·염분 및 해류를 관측하여 남극경사전선 및 해류의 공간분포와 환남극심층수 연안 공급에 미치는 영향을 조사하였다. 마지막 현장 조사는 2021년 11월 서남극해 극전선 통과 해역중 하나인 남동인디아해령 인근 해역 20개 정점에서 해양조사를 수행하였으며, 열수송의 공간분포를 확인하였다. 또한, 극전선을 통과하여 남극해로의 열 수송과정을 규명하고자 1기 장기해류관측시스템과 16개의 Current and Pressure Recording inverted Echo Sounder를 성공적으로 설치하였다.
- 2. 기후모델을 활용한 온난화에 따른 열 순환 변화 이해** : 남극 연안 해역은 남빙양 중층에 위치한 고온의 환남극 심층수가 유입하여 빙상을 녹이고, 그 결과 해양순환과 해수 특성 변화가 나타나는 미래 해양기후 예측에 있어 중요한 해역이다. 본 연구에서는 지구온난화에 따른 남극 연안 해역의 해수 특성과 해양순환 변화를 공간해상도 $1/10^\circ$ 의 고해상도 기후모형(Community Earth System Model, CESM)으로 수행된 현재기후 및 이산화탄소배출 미래기후 실험 모의 자료를 분석하였다. 현재기후 실험에서는 아문젠해와 베링스하우젠해에서 로스해에 비해 더 뚜렷한 십년 내외 규모의 해수 특성과 순환 변동이 나타났고, 이것은 대륙붕 내 환남극 심층수 변동에 대한 관측 기반의 선행 연구 결과와 일관된 특징을 보인다. 현재기후 실험의 남극 연안 해역 환남극 심층수 수온은 아문젠해와 베링스하우젠해에서 0°C 이상, 로스해와 웨델해를 비롯한 동남극 연안 해역에서는 0°C 이하로 나타나서 기존 연구를 통해 알려진 결과와 일관된 것으로 모의되었다. 미래기후 실험에서는 서부 베링스하우젠해에서부터 동부 로스해에 이르는 서남극 해역 전반에서 현재기후 실험 대비 환남극 심층수 수온이 $0.43\pm 0.16^\circ\text{C}$ 상승되는 온난화 추세를 확인했다. 서남극 대륙붕 연안 해역의 물리 환경 변동을 지배하는 주요 기작 조사를 통해 미래 온난화 과정을 파악하기 위한 분석은 향후 전지구 해양기후 변화 이해와 예측에도 중요한 시사점을 남긴다.
- 3. 무기탄소 시스템** : 본 연구는 연구기간인 2020년 1월부터 2022년 12월말까지 3년 동안 수행되었으며, 로스해의 현장 관측은 covid-19로 인하여 제한적이었다. 하지만, 현장 시료의 채집 이외에도 인공지능 및 지구시스템 모델을 활용한 연구 분석, 또한 세종기지 기반의 남극 연안 환경의 연구는 계획대로 수행되었다. 연구의 주제는 크게 4가지의 세부 항목으로 진행되었다. 먼저 해수중의 용존 무기탄소내의 탄소안정동위원소(DI13C) 분석 시스템

을 구축하고, 이를 통해 남극해 및 로스해에서 인간 기원의 이산화탄소의 분포를 파악해 오고 있다. 그리고, 인공지능을 이용하여 기존의 이산화탄소 관측 DB 및 해양환경 변수들을 활용하여 로스해에서 과거 20년간의 용존이산화탄소의 분포를 재현하여, 그 변동성에 관한 연구를 수행하였다. 또한, 지구시스템 모델을 활용하여 남극해 이산화탄소 및 무기탄소의 과거, 현재, 미래를 추정하고, 이를 관측과 비교함으로써 개선하는 작업을 하였다. 마지막으로, 온난화로 급격히 환경이 변화하고 있는 세종과학기지를 기반으로 한 탄소순환 연구 또한 수행하였다.

4. 남극해에서의 용존 유기탄소화합물의 거동 및 환경변수 (영양염, 미량금속 등) 분포 특성

파악 : 본 연구사업 1단계 연구기간(2020년 1월부터 2022년 12월말) 동안, 쇄빙 연구선 아라온을 활용한 두 차례의 남극해 현장관측을 수행하였고, 해수 시료내의 용존 유기탄소화합물, 영양염을 분석하여 남극해 해양 탄소순환 이해 증진을 위한 자료를 획득하였고, 대기 에어로졸 내의 수용성 유기탄소화합물 분석도 병행하여 해양-대기간 탄소순환에 대한 이해의 폭을 넓혔다. 또한 남극해의 일차생산량의 제한요소로 알려져 있는 미량금속 철 성분에 대한 연구를 수행하기 위해 미량금속 관측을 위한 청정 해수시료 채수시스템 구축 및 고도화를 진행하여 남극해에서의 미량금속 연구를 가능하게 할 바탕을 마련하였다. 뿐만 아니라, 연구해역의 문헌 및 기존 연구결과 조사를 통해 남극 로스해 해역에서 약 48.8 Tg의 탄소가 식물플랑크톤에 의해 생산되고 약 39 Tg의 탄소와 3 Tg의 탄소가 각각 입자상과 용존 유기탄소화합물 형태로 유광층 내에 존재하고 있음이 확인되었다. 또한 남극 로스해 수층내에서는 식물플랑크톤에 의해 생산된 39 Tg의 입자상 유기탄소화합물 중 약 15-20 Tg의 탄소가 심층으로 수송 및 저장되고 있으며, 용존 유기탄소화합물의 형태로는 약 4 Tg C이 저장되고 있다는 것을 알 수 있었다. 또한 아문젠 해역 닷슨 빙봉 앞에서는 빙봉 용빙수에 의한 영향으로 고농도의 철 성분이 표층으로 공급되고 있음을 확인하였고, 향후 체계적인 미량금속 자료 확보와 유기탄소화합물 자료와 연계한 자료 해석을 통해 남극해 탄소순환에 대해 심도있는 해석이 진행될 것으로 기대된다.

5. 탄소 및 질소 흡수율과 빙하후퇴속도 산정

산정 : 고위도 연안 시스템의 급격한 환경변화는 생지화학적 순환에 상당한 영향을 미칠 수 있다. 특히 빙하의 용빙수나 육지의 하천에서 배출되는 담수에 의해 강하게 영향을 받기 때문이다. 일반적으로 남극 해안 지역은 다양한 환경 조건(예: 해양 및 기상 조건)에서 식물플랑크톤의 생산성이 높은 지역으로 간주된다. 본 과제 1단계 연구기간인 2020년 1월부터 2022년 12월 말까지, 세종기지 인근 해역인 마리안 소만(Marian Cove) 및 맥스웰 만(Maxwell Bay)에서 현장 배양을 통한 식물플랑크톤의 탄소 및 질소 섭취율 현장 조사가 총 세 차례 수행되었다. 그 결과 식물플랑크톤의 성장 시기 동안(12월~1월)에 탄소 및 질소 섭취율은 넓은 범위를 보였으며 광투과율의 차이(유광층 수심) 및 선호하는 영양염류에 의해 조절됨을 확인하였다. 또한 세종기지 인근 연안빙하 관측 목적으로 구축한 인공위성 광학/영상레이더 자료 통해 마리안 소만의 연안빙하는 1956/1957~ 2021/2022년의 66년 기간 동안 약 1900 m 변화하였으며, 연간 31.71 m 후퇴속도가 산정되었다. 최근 1년 사이에도 수십미터 규모로 불규칙한 경계변화를 확인하였다.

6. **서남극해 식물플랑크톤 군집 공간 분포** : 서남극해에서 환경변화에 따른 식물플랑크톤 군집의 시공간 분포 변동 양상을 파악하기 위하여 현장조사가 이루어졌다. 서남극 연안에서는 착편모류 *Phaeocystis antarctica*와 규조류가 주로 우점하며 이 두 그룹은 먹이망 구조와 생지화학 순환에 다른 역할을 한다. 2020년 1월 Imaging FlowCytobot을 활용한 연속관측 결과 아문젠 폴리니아와 Wrigley Gulf 폴리니아에서 식물플랑크톤 군집구조의 공간적 변동 양상이 다소 다르게 나타났으며 이는 빙봉의 급격한 후퇴와 용빙수 유입, 해수순환 변동 등의 환경 변화에 대한 식물플랑크톤 군집의 불안정한 반응을 나타내는 것으로 판단된다. 서남극 연안의 리틀 아메리카 베이진, 아문젠 폴리니아, 리글리 만 폴리니아와 외양의 남동인디아해령에서 식물플랑크톤 생물량은 각각 평균 4.55 ug/L와 0.40 ug/L를 보였으며 연안역에서 *P. antarctica*가, 외양역에서 규조류가 우점하는 양상을 나타냈다. 연안역에서도 해역간 우점종이 다소 차이를 보여 남극 하계 식물플랑크톤 대번성 시기에 식물플랑크톤 생물량과 군집구조는 시공간적 변동이 크게 나타나는 것으로 판단된다.
7. **해양 생태계 및 생지화학 모델** : 남빙양은 지구 기후와 생지화학 순환에 강하게 영향을 미친다. 남극환류 이남의 남극해 발산 지역에서 심층의 물은 표층으로 용승 되며 아남극 모드수와 남극 중층수는 북쪽으로 이동, 표층 수괴가 가라앉고 중간 깊이에서 북쪽으로 계속해서 이동하며 형성되어 저위도의 수온약층으로 영양염을 수송하는 역할을 한다. 또한 상대적으로 따뜻한 환남극 심층수는 깊은 곳에서부터 로스해와 같은 남극 연안 표층으로 용승 되면서 빙봉을 녹이고 이 지역에 철을 공급하는 역할을 한다. 남빙양은 점점 강한 기후 온난화로 인해 중위도 편서풍대의 극이동과 강화로 열과 이산화탄소의 흡수를 지배적으로 수행하고 있다. 남극 대륙붕지역에서 고정된 유기물질의 생물학적 침강 및 입자들의 분해과정을 통해 영양염은 수직적으로 이동된 후 다시 북쪽 해역으로 이동하여 표층 가까이로 공급된다. 반면 일부 유기물질과 영양염은 심층에 머물러 있기도 한다. 기후변화는 이러한 남극해에서의 침강 입자들에 의한 하부로의 이동에 대한 시간 규모와 각 수괴의 순환속도를 변화시키게 될 것으로 예측되며, 이는 결국 고위도뿐만 아니라 저위도의 생산성과 이산화탄소 흡수 기작에도 영향을 미치게 될 것이다. 그러나 거대한 규모의 복잡한 환경변화와 함께 그 안의 여러 조절 요인들에 의한 메커니즘을 관측만으로 완벽히 이해하는 것은 어렵다. 본 연구에서는 모델링 연구를 통해 남극해 일차생산성과 생지화학 순환의 지리적 차이와 변화 원인을 이해하고자 한다.
8. **마리안 소만 식물플랑크톤의 시공간 분포** : 서남극해 환경변화에 따른 하계 식물플랑크톤 군집의 시공간 분포 변동 양상을 파악하기 위하여 마리안소만의 5개 정점, 3개 수층에서 2019년 여름에 4회 현장조사가 이루어졌다. 마리안소만 식물플랑크톤의 carbon biomass는 평균 $86.93 \pm 138.34 \text{ ug L}^{-1}$ 이었다. 조사기간 중 carbon biomass가 높았던 첫 번째 조사 시기에는 diatom이 전 정점에서 우점하였으며 micro size diatom의 비율이 더 높았다. 나머지 조사시기에서는 nano size diatom과 nanophytoflagellate가 높은 비율을 차지하였으며 내만 보다 마리안소만 입구인 외만에서 carbon biomass가 높은 경향을 나타내었다. 조사 정점에 따라 식물플랑크톤 우점 그룹의 비율에는 차이가 있었으며 빙봉의 변화에 따른 해양 환경변화와 식물플랑크톤의 군집 변화 패턴을 이해하기 위해서는 보다 장기적인 조사가 진행되어야 한다.

9. 서남극해 동물플랑크톤 공간 분포 : 서남극해 중형동물플랑크톤의 군집 분포를 파악하기 위하여 2020년 12월 로스해 연안의 리틀 아메리카 분지 해역의 10개 정점과 2021년 11월 외양의 남동 인디아 해령 해역의 12개 정점에서 쇄빙연구선 아라온을 이용한 채집이 수행되었다. 모든 정점에서 330 μm 망목 크기를 가진 봉고 넷(Bongo net)를 200 m 수심으로부터 표층까지 수직 인양하여 수층내 동물플랑크톤의 종조성을 파악하였다. 서남극해 연안과 외양의 중형동물플랑크톤 군집은 생물량과 종조성에서 뚜렷한 차이를 보였다. 로스해 연안의 리틀 아메리카 분지 해역에서는 평균 17.40 ind. m^{-3} 의 생물량을 보였으며, 갑각류 노플리우스 유생, *Metridia gerlachei* 및 *Calanoides acutus* 등이 우점하였다. 외양의 남동 인디아 해령 해역에서는 284.02 ind. m^{-3} 의 상대적으로 높은 평균 생물량을 보였으며, 척삭동물과 크기가 작은 *Calanoida* spp. 등이 우점하였다.

10. 해조군집 변동 및 천이양상 : 남극 킹조지섬 바톤반도에서 조간대 해조류 군집의 단기 변동과 수직분포를 조사하였다. 조사는 2016년 11월부터 2019년 1월까지 두 번의 여름동안 수행되었으며, 단기변동성에 대한 조사는 1-2개월 간격으로 조사되었다. 조사기간 동안 총 15종의 해조류가 출현하였고, 최우점종인 홍조류 *Iridaea cordata*와 *Phaeurus antarcticus*의 상대피도는 75.5%에 달하였다. 여름동안의 풍부도의 변화는 *I. Ccordata*에서 *P. antarcticus*로의 변화하는 것으로 요약할 수 있으며, 연안에서 관찰되는 우점 해조류에 의한 조간대 군집의 변화를 본 연구에서 처음 시도한 등고선 그래프를 통해 직관적으로 유추할 수 있었다. 우점종 두 종에 의해 지배되는 바톤반도 조간대 지역은 향후 두 종에 대한 장기 모니터링과 상호작용을 통해 온난화에 의한 해조군집의 반응을 이해하는데 중요한 단서를 제공할 것으로 판단된다. 한편, 남극 킹조지섬 마리안소만에서는 빙하후퇴 이후 60여년의 시간이 경과했음에도 “새로이 형성된 얼음이 없는 지역(newly ice-free areas)”에서 해조류 군집의 생태학적 천이가 초기정착단계에 머물러 있었다. 이 연구에서는 마리안소만의 6개 정점에서 수심 25 m까지의 해조군집 조사하여 공간 및 수직분포를 파악하였다. 마리안소만의 빙하후퇴 기록에 따르면 빙하로부터 0.2, 0.8, 1.2, 2.2, 3.6, 4.1 km 떨어진 6개 정점에 대한 해조군집의 구조를 분석하였다. 또한 melting water의 영향을 알아보기 위하여 빙하로부터 0.4, 0.9, 3.0, 4.0, 5.0 km 떨어진 5개의 정점에서 수집된 자료를 바탕으로 해양환경의 차이를 분석하였다. 해조군집과 해양환경 모두 빙하로부터 2-3 km 떨어진 지역을 기준으로 만 안쪽과 바깥쪽의 2개 그룹으로 구분되어 유의한 차이를 보였다. 이 연구는 남극 피오르드형 소만에서의 빙하 영향에 대한 해조군집의 반응을 보여주었으며, 향후 남극에서의 해조군집의 천이를 이해하는데 가치있는 연구가 될 것으로 기대한다.

V. 연구개발결과의 활용계획

- 극지해양 과학기술, 기후변화 관련 국가 중장기계획의 수립 및 이행을 위한 국가정책의 근거자료 확보. 정부의 정책 문서(position statement, policy paper)로 활용
- 신기후체계(2020~) 시대의 기후변화 대응에 대한 국제적 논의에 학술적 근거 제공
- 중장기적으로는 미래 기후변화로 인한 먹이생물 변동 예측 등의 연구에 활용, 식량자원

확보 및 대응체계 확립에 이바지할 수 있음

- 수치모델의 정확성 개선에 활용: 미답지 축적 자료로부터 미래의 기후 및 해양환경 예측 모델의 입력, 검증 자료로 활용하여 모델 정확성 개선 및 정교화에 기여
- 남극해 해양생태환경의 변동성 예측에 기여: 용빙수 배출에 따른 해양생태계의 변동성을 파악함으로써 남극 연안해역 해양 먹이 망 구조의 미래 예측에 활용
- 상주국 최다지역인 남극반도 연구 주도권 확보



S U M M A R Y

(영 문 요 약 문)

I. Title

Carbon cycle change and ecosystem response under the Southern Ocean warming

II. Purpose and Necessity of R&D

- Understand current status of heat and carbon uptake capacity in the West Antarctic region and investigate the variability of material cycle and marine ecosystem response
 - Analyze the variability of oceanic factors controlling global climate including heat exchange, carbon uptake, and material cycle in the Southern Ocean through monitoring physical, chemical, and biological parameters in West Antarctic region where experiencing rapid temperature increase
 - Tracing coastal environment change and low-trophic marine ecosystem change under the rapid glacier retreat and glacier meltwater intrusion

III. Contents and Extent of R&D

- Assessment of heat transport change and carbon uptake evolution in the Southern Ocean
- Understand the variability of biogeochemical cycles in the Southern Ocean coastal region under shrinking cryosphere (global warming)
- Detect biological production change and tracing marine ecosystem response
- Establish an optimal site for the Southern Ocean long-term monitoring research station through the domestic and international research collaboration

IV. R&D Results

1. **Physical properties of seawater and heat transport in West Antarctica** : From January 2020 to December 2022, during the research project period, three field expeditions were conducted using Araon to track the behavior of Circumpolar Deep Water and calculate poleward heat transport from observation of water mass and current in the Southern Ocean. During the first expedition conducted in January 2020, the physical properties of seawater were measured on the continental shelf of West Antarctica to reveal the spatial distribution

characteristics of glacier meltwater and the influence of ocean circulation. In the second expedition in December 2020, four long-term ocean moorings were installed on the shelf break in the Little America Basin in West Antarctica to identify the time-series variability of heat transport supplied to the continental shelf. In addition, the vertical temperature, salinity, and currents were observed at each station to investigate the spatial distribution of the Antarctic slope front and currents and their effects on the CDW's intrusion onto the continental shelf. The most recent field expedition was conducted in November 2021 at 20 stations near the Southeast Indian Ridge, one of the areas where the polar front passes, and the spatial distribution of heat transport was confirmed. In addition, one long-term ocean mooring and 16 current and pressure recording inverted echo sounders were successfully installed to investigate the heat transport process through the polar front to the Southern Ocean.

2. **Characteristics of water mass properties and future changes in the Antarctic marginal seas** : The Antarctic marginal seas are an important area in predicting future marine climate because the inflow of high-temperature Circumpolar Deep Water (CDW) located in the middle layer of the Southern Ocean causes ice shelf melting and dispersion of melt water, affecting ocean circulation and water mass properties. In this study, the water mass properties and the future changes in Antarctic marginal seas due to global warming were analyzed using the results of simulations of the present-day climate (PD) and the future climate of carbon dioxide doubling (2xCO₂) based on a high-resolution climate model (Community Earth System Model, CESM) with a spatial resolution of 1/10°. In PD experiment, the Amundsen and the Bellingshausen Seas showed more distinct decadal-scale variability compared to the Ross Sea, which is consistent with the results of previous observational-based studies on CDW fluctuations within the continental shelf. The CDW temperature in the Antarctic marginal seas in PD experiment was above 0°C in the Amundsen and Bellingshausen Seas and below 0°C in the East Antarctic coastal waters as well as the Ross and Weddell Seas, consistent with the results known in the previous studies. In the future climate (2xCO₂) experiment, we showed that the Antarctic shelf bottom water increased by 0.43±0.16°C in the entire western Antarctic seas, from the Bellingshausen Sea to the Ross Sea, compared to PD experiment. The analysis to identify the main mechanisms occurring in the future in the west Antarctic continental shelf through the investigation of the main mechanisms governing the changes in the physical environment leaves important implications for understanding and prediction of global ocean climate change.
3. **Characteristics of inorganic carbon system in the West Antarctic Ocean** : This study was conducted for three years of research period, from January 2020 to the end of December 2022. During the period, field observations in the Ross Sea were limited due to covid-19. However, in addition to the collection of sea water samples, research and analysis using artificial intelligence and Earth

system models, as well as research on the Antarctic coastal environment based on the King Sejong Station were conducted. The subject of the study was largely divided into four sub-items. First, a carbon stable isotope ($\delta^{13}\text{C}$) analysis system in dissolved inorganic carbon in seawater was established, and through this, the distribution of anthropogenic carbon dioxide in the Southern Ocean and the Ross Sea has been estimated. Also, using an artificial intelligence, the distribution of dissolved carbon dioxide over the past 21 years was reconstructed in the Ross Sea using the existing carbon dioxide observation data base data and marine environmental variables. This enables us to understand a long-term spatio-temporal distribution of $f\text{CO}_2$ in the Ross Sea. In addition, the Earth system model was used to estimate the past, present, and future of carbon dioxide and inorganic carbon in the Southern Ocean. The inorganic carbon cycle study was also conducted based on the King Sejong Station, King George Island, where the environment is rapidly changing due to the global warming.

4. **Characteristics of dissolved organic carbon and environmental variables (nutrient and trace metal) in the Southern Ocean** : To investigate the characteristics of dissolved organic carbon and nutrient in the Southern Ocean, seawater samples were collected during the research period (January 2020 to the end of December 2022) on board the Korean icebreaker R/V Araon. In addition, the concentration of water-soluble organic carbon in marine aerosols was investigated to improve the understanding of the sea-air interaction in terms of the carbon cycle. Furthermore, we established a clean seawater sample collection system for trace metal observation in the study area and upgraded it, which enables us to fill the data gap in the knowledge of trace metals, including iron, a limiting factor for phytoplankton growth. A survey of literature and existing research results in the study area revealed that about 48.8 Tg of carbon is produced by primary production in the Ross Sea, and that about 39 Tg of carbon and 3 Tg of carbon existed in the form of particulate and dissolved organic carbon, respectively. It also revealed that about 15-20 Tg and about 4 Tg C of particulate and dissolved organic carbon are transported to and stored in the deep layer. In addition, previous studies reported a high concentration of iron in front of the Dotson Ice Shelf in the Amundsen Sea, which was supplied to the surface layer due to the influence of ice shelf melting water. Based on the results obtained during this project, we will conduct a more thorough assessment of the carbon budget by connecting organic carbon data to environmental variables, including the nutrient and trace metal datasets.

5. **A study on variability in phytoplankton carbon and nitrogen uptake rates and glacial retreat rates in Maxwell Bay and Marian Bay, near King Sejong Station** : Rapidly changing conditions in high-latitude coastal systems can significantly impact biogeochemical cycles because these systems are strongly influenced by freshwater discharged from melting glaciers and streams on land. Generally, Antarctic coastal areas are considered high-productivity areas in which

phytoplankton growth prevails under various environmental conditions (e.g., oceanographic and meteorological conditions). A total of three investigations were in situ carbon and nitrogen uptake of phytoplankton during the Marian Cove and Maxwell Bay from January 2020 to the end of December 2022. As a result, during the phytoplankton growth period (December-January), carbon and nitrogen uptake rates showed a wide range, and it was confirmed that they were controlled by differences in light transmittance (euphotic depth) and preferred nutrients. In addition, through satellite optical/imaging radar data built for the purpose of observing coastal glaciers near the King Sejong Station, the coastal glacier of Marian Cove changed by about 1900 m over the 66-year period from 1956/1957 to 2021/2022, and the retreat rate of 31.71 m per year was calculated. Even within a year, irregular boundary changes were observed on fluctuations of several meters.

6. Environmental factor controlling phytoplankton community structure in the west

Antarctica : To understand the distribution of phytoplankton community and the influential environmental factors in the West Antarctic Ocean, three field surveys were conducted during the austral summer in Antarctica. Phytoplankton community dominated by *Phaeocystis antarctica* (Prymnesiophytes) and/or diatoms during the bloom periods, and they play different roles in the ecosystems and biogeochemical cycle in this area. In January 2020, phytoplankton species abundance was investigated using an automated continuous observation instrument, the Imaging FlowCytobot. The spatial variations of the phytoplankton community structure were slightly different in the Amundsen Sea Polynya and Wrigley Gulf Polynya, indicating an unstable response of the phytoplankton to environmental changes such as rapidly thinning ice shelves in West Antarctica. Phytoplankton biomass averaged 4.55 ug/L and 0.40 ug/L, respectively, in the coastal areas (the Amundsen and the Ross seas) and the Southeast Indian Ridge area. Although *P. antarctica* was dominant in the coastal areas and diatoms were dominant in the oceanic area, there were some differences between the dominant species in the coastal areas as well, indicating that the phytoplankton biomass and community structure during the bloom period showed large spatial variations.

7. Marine Biogeochemical and Ecosystem modeling : The Southern Ocean strongly influences global climate and biogeochemical cycles. In the Antarctic Ocean divergence region south of the Antarctic gyre, water from the deep layer upwells to the surface layer, and Subantarctic Mode Water and Antarctic Intermediate Water move northward, and the surface water mass sinks and continues to move northward at intermediate depths, transporting nutrients to the thermocline at the lower latitudes. In addition, the relatively warm Circumpolar Deep Water upwells from the depths to the Antarctic coastal surface layer such as the Ross Sea, melting the ice shelf and supplying iron to the region. The Southern Ocean dominates the absorption of heat and carbon dioxide due to the southward shift

and strengthening of the mid-latitude westerlies by increasingly strong climate warming. Through the biological sedimentation of fixed organic matter and the decomposition of particles in the Antarctic continental shelf, nutrients are vertically transported and then migrated back to the northern waters, where they are supplied close to the surface layer. On the other hand, some organic matter and nutrients remain in the deep layer. Climate change is predicted to change the time scale for the movement of sedimentary particles to the bottom in the Antarctic Ocean and the circulation rate of each water mass, which in turn affects productivity and carbon dioxide absorption mechanisms in the low latitudes as well as the high latitudes. However, it is difficult to fully understand the mechanism by various regulatory factors in a large-scale complex environment change only through observation. Thus, this study aims to help understanding the geographical differences and causes of change in primary productivity and biogeochemical cycles in the Southern Ocean through one-dimensional modeling studies.

8. Observations of phytoplankton community structure under the influence of glacial meltwater at Marian Cove in the West Antarctic Peninsula in summer 2019 :

Four summertime field surveys were conducted at 5 stations and 3 water depths from January to February 2019 in Marian Cove to identify the temporal and spatial distribution patterns of the summer phytoplankton community due to environmental changes in the West Antarctic Sea. The mean carbon biomass of Marian Cove was $86.93 \pm 138.34 \mu\text{g L}^{-1}$. The first field survey showed the highest carbon biomass during the survey period. Moreover, at the first field survey, diatoms were dominant at all stations, and the proportion of micro size diatoms was higher. The proportions of nano-size diatom and nanophytoflagellate were higher in the other field surveys. Carbon biomass tended to be higher in the outer cove, the entrance to Marian Cove, than in the inner cove. The proportions of dominant phytoplankton groups varied depending on the locations of the survey stations. It is necessary to conduct a long-term study to understand the changes in the marine environment and the patterns of phytoplankton community changes caused by variations in the ice shelf.

9. The spatial distribution of mesozooplankton community in the west Antarctica :

To understand the spatial distribution of mesozooplankton community in the west Antarctica, field observations using the icebreaker R/V ARAON were conducted at 10 stations in the coastal areas in the Little America Basin in December 2020 and at 12 stations in the oceanic areas in the Southeast Indian Ridge. All samples were vertically collected from 200 m depth using a Bongo net (330 μm mesh size), and composition and abundances were analyzed. Mesozooplankton community structures between coastal and oceanic areas presented distinct characteristics. In the Little America Basin, the mean abundances averaged $17.40 \text{ ind. m}^{-3}$, and crustacean nauplius, *Metridia gerlachei*, and *Calanoides acutus* were dominated. In contrast, in the Southeast Indian

Ridge, the mean abundances averaged 284.02 ind. m⁻³, and chordata and small calanoida spp. were dominated.

10. Variability of macroalgal assemblage and macroalgal succession in King George Island, Antarctica : Temporal variability and vertical distribution of a intertidal macroalgal assemblage has been investigated in Barton Peninsula, Maxwell Bay, King George Island of the Antarctic coast. Sampling was performed during the two seasons of austral summer from November 2016 to January 2019. Sampling for short-term variability had an interval time of 1-2 months. 15 algal species were identified, and relative coverage of the predominant red *Iridaea cordata* and endemic brown *Phaeurus antarcticus* reached 75.5%. The change of abundance in summer can be summarized as a shift from *I. cordata* (season responder) to *P. antarcticus* (season anticipator) and the change in color can be intuitively inferred through the contour plot that was first attempted in this study. This study area, which is dominated by two species, should investigate the effects of global warming on macroalgal assemblage by studying long-term monitoring and interactions between the two species. Meanwhile, ecological macroalgal succession in newly free areas remained at the pioneer seral stage, despite six decade of glacial retreat history in Marian Cove, King George Island, Antarctica. In this study, spatial and vertical distributions were identified by examining subtidal macroalgal assemblage from six sites of Marian Cove to a depth of 25 m. The structure of macroalgal assemblage was analyzed for six sites 0.2, 0.8, 1.2, 2.2, 3.6, and 4.1 km away from the glacier. To investigate the effect of melting water, differences in the coastal environment were analyzed based on data collected from 5 sites 0.4, 0.9, 3.0, 4.0, and 5.0 km away from the glacier. Both macroalgal assemblage and marine environment were divided into two groups, inside and outside the cove, based on the region 2-3 km away (ice free since 1956) from the glacier, showing significant differences. This study showed that macroalgal assemblage in the Antarctic fjord-like cove responded to the glacier retreat, and is a valuable study for understanding macroalgal succession in Antarctica for the future.

V. Application Plans of R&D Results

- Obtain observation-based scientific outcomes to evaluate the Southern Ocean regulation of climate
- Estimate carbon uptake capacity of Pacific sector of the Southern Ocean
- Establish an integrated long-term monitoring observation network for investigating the Southern Ocean heat transport variability, carbon sink change, and material cycle
- Contribution to highly impact scientific research publications and provide scientific background for coming IPCC reports
- Understand the distribution and concentration of glacier meltwater and its mixing and dispersing processes in the West Antarctic coastal region

- Identify the influence of glacier meltwater discharge on water mass property and current circulation
- Quantify the trace metal supply and its variability from the glacier meltwater in the West Antarctic coastal region
- Detect a link between trace metal supply and phytoplankton distribution
- Develop an ocean circulation model for Marian Cove, Antarctica under rapid glacier retreat environment
- Suggest indicator species and long-term monitoring of their variability
- Assessment of perturbation and adaptation of the benthic-pelagic ecosystem under glacier melting in the Marian Cove
- Exhibit a schematic of the benthic-pelagic coupling and trophic relationships in the Marian Cove



C O N T E N T S

(영 문 목 차)

| | |
|---|-----|
| Summary (Korean) | v |
| Summary (English) | xii |
| Contents (English) | xix |
| Contents (Korean) | xx |
| | |
| Chapter 1 Introduction | 1 |
| | |
| Chapter 2 Current standing and state of the art | 2 |
| | |
| Chapter 3 Content and results of the study | 5 |
| 1. Physical properties of seawater and heat transport in West Antarctica | 5 |
| 2. Characteristics of water mass properties and future changes in the Antarctic marginal seas | 17 |
| 3. Characteristics of inorganic carbon system in the West Antarctic Ocean | 27 |
| 4. Characteristics of dissolved organic carbon and environmental variables (nutrient and trace metal) in the Southern Ocean | 40 |
| 5. A study on variability in phytoplankton carbon and nitrogen uptake rates and glacial retreat rates in Maxwell Bay and Marian Bay, near King Sejong Station | 52 |
| 6. Environmental factor controlling phytoplankton community structure in the west Antarctica | 66 |
| 7. Marine Biogeochemical and Ecosystem modeling | 76 |
| 8. Observations of phytoplankton community structure under the influence of glacial meltwater at Marian Cove in the West Antarctic Peninsula in summer 2019 | 87 |
| 9. The spatial distribution of mesozooplankton community in the west Antarctica | 96 |
| 10. Variability of macroalgal assemblage and macroalgal succession in King George Island, Antarctica | 107 |
| | |
| Chapter 4 Research goal attained | 117 |
| | |
| Chapter 5 Future directions | 125 |
| | |
| Chapter 6 Contemporary trend | 126 |
| | |
| Chapter 7 References | 129 |

목 차

| | |
|--|-----|
| 한글 요약 | v |
| 영문 요약 | xii |
| 영문 목차 | xix |
| 한글 목차 | xx |
| | |
| 제 1 장 서론 | 1 |
| | |
| 제 2 장 국내외 기술개발 현황 | 2 |
| | |
| 제 3 장 연구개발수행 내용 및 결과 | 5 |
| 제 1 절 해양물리 관측과 열 수송 | 5 |
| 제 2 절 기후모델을 활용한 온난화에 따른 열 순환 변화 이해 | 17 |
| 제 3 절 무기탄소 시스템 | 27 |
| 제 4 절 남극해에서의 용존 유기탄소화합물의 거동 및 환경변수 (영양염, 미량금속 등) 분포 특성 파악 | 40 |
| 제 5 절 탄소 및 질소 흡수율과 빙하후퇴속도 산정 | 52 |
| 제 6 절 서남극해 식물플랑크톤 군집 공간 분포 | 66 |
| 제 7 절 해양 생태계 및 생지화학 모델 | 76 |
| 제 8 절 마리안 소만 식물플랑크톤의 시공간 분포 | 87 |
| 제 9 절 서남극해 동물플랑크톤 공간 분포 | 96 |
| 제 10 절 해조군집 변동 및 천이양상 | 107 |
| | |
| 제 4장 연구개발목표 달성도 및 대외기여도 | 117 |
| | |
| 제 5 장 연구개발결과의 활용계획 | 125 |
| | |
| 제 6 장 연구개발과정에서 수집한 해외과학기술정보 | 126 |
| | |
| 제 7 장 참고문헌 | 129 |

제 1 장 서론

최근 뉴스에서 자주 언급되는 기후변화는 더 이상 학문의 영역에만 머무를 수 없이 우리의 생활에 큰 영향을 끼치고 있으며, 앞으로 기후변화의 영향이 더 심해지는 방향으로 진행될 가능성이 크다고 예상된다. 우리나라와는 멀리 떨어져 있으나 남극해는 인간 활동에 따른 지구 온난화로 인해 증가한 열과 대기중 온실기체(이산화탄소 등)의 핵심 흡수원으로서 사실상 지구 기후시스템의 핵심 조절자 역할을 하고 있다. 남극해 면적은 전 지구 바다 면적의 약 20%에 불과하지만, 인간이 대기로 배출하는 이산화탄소 중 전 지구 해양으로 흡수되는 양의 절반에 가까운 이산화탄소와 전 지구 해양으로 흡수되는 열의 약 4분의 3이 차가운 남극해로 흡수되고 있다. 이러한 남극해양의 중요성을 파악하기 위해 극지연구소 해양연구팀은 아라온을 활용해 종합적인 해양 관측을 수행해 왔다.

남극 대륙 주변의 기온과 바다 수온도 서남극을 중심으로 점점 더 높아지고 있다. 본 과제에서는 열과 탄소흡수 시스템으로서 서남극해의 현재 수준을 진단하고, 외양-연안 관측을 통한 물질순환 변동성과 해양생태계 반응을 규명하고자 하였다. 이를 위해, (1) 온난화가 가장 급격한 서남극해의 물리, 화학, 생물학적 해양환경 모니터링을 통해 지구 기후조절자인 남극해에서의 해양 열 교환, 탄소흡수 및 방출, 물질순환의 변동성을 파악하며, (2) 용빙수 거동과 빙하후퇴에 따른 연안환경 변화 추적 및 해양 하위 영양단계 생태계의 반응을 추적하였다.

이를 위해 과제수행의 1차년도에는 우선 기존 관측자료 등을 활용하여 남극환류의 변동성을 분석하였고, 서남극 연안 남극순환수 유입과정 및 변동성 파악을 위해 장기관측거점을 선정하여 아라온을 활용해 로스해 폴리나 동남부 대륙사면 해역에 네 개의 해양계류라인을 성공적으로 설치하였다. 또한, 코로나로 인해 크게 제약받을 수밖에 없었던 현장 정선 관측을 보완하고자 연구선 이동시 해양 표층 물리, 화학, 생물학적 해양환경 인자들의 연속관측을 수행하기 위한 여러 시스템을 보완하여, 선상에서 자동으로 무기탄소 동위원소의 연속 관측이 가능한 시스템도 갖추게 되었다.

2차년도에는 저위도 해역에서 남극해로 유입되는 열속의 전달을 확인하기 위하여 남극환류가 강하게 흐르는 남동인디아해령 부근 극전선 해역에서 쇠빙연구선 아라온호를 활용하여 중규모와류에 의한 열전달을 직접 관측할 수 있는 총 16대의 무인해류계(PDS-CPIES)를 성공적으로 설치하였다. 계류된 장비를 이용해 앞으로 약 3년간 남극으로 유입되는 열속의 총량에 대한 시공간적 변동 특성을 파악할 수 있는 장기 모니터링이 가능하게 되었다.

1단계 연구수행 중 대표적인 연구성과로 서남극 아문젠해역의 대표적인 빙봉중 하나인 닷슨 빙봉 앞에서 장기 관측한 자료의 분석을 통해 빙봉 하부로 유입된 열에 의해 녹은 물이 시간 차를 두고 가을철 가장 많이 배출됨을 밝혀 관련분야 최우수 논문인 네이처 커뮤니케이션지에 실렸다. 또한 세종기지 기반의 연안 환경변화를 지속적으로 모니터링하고, 아라온으로 서남극해 태평양 전체 해역의 무기탄소 분포를 정밀 관측하여 로스해로 유입되는 인간기원 무기탄소의 양도 산정할 수 있었다.

제 2 장 국내외 기술개발 현황

제 1 절 국내 기술개발 현황

1. 남극 대양을 대상으로 하는 탄소시스템 변동성에 관한 연구는 전무한 실정임
 - 탄소시스템의 4요소(pCO₂, DIC, TA, pH)에 대한 남극 일부 연안해역과 이동항로 상의 표층 관측으로 제한되었음
 - 관측기간도 남반구의 여름철 몇 개월로 제한됨. 최근 해외 연구를 통해 밝혀진 대로 겨울철엔 오히려 남극해가 지역에 따라선 탄소를 흡수하는 시스템이 아닌 방출하는 시스템으로 작용하기도 한다는 연구결과와 이에 따른 후속 연구의 필요성이 강조되고 있으나 이를 뒷받침할 수 있는 국내 주도의 연구는 이루어지지 않고 있는 실정임
2. 극지연구소에서는 서남극 온난화에 따른 남극 결빙해역 생태계와 해양 순환 변동 연구(2013-2016)과제를 통해 남극 아문젠해에서 불활성기체(Noble Gas)를 활용한 용빙수의 공간적 분포 관측함
3. 또한, 아문젠 빙붕소멸 속도와 해양변동 추세 연구(2017-2019) 과제에서 아문젠해 산소안정동위원소 비율로부터 용빙수 공간분포를 관측함
4. 과거 극지연구소 선행연구를 통해 용빙수의 정밀관측 가능성을 확인함. 하지만, 기존 관측이 아문젠해로 제한되어 용빙수 배출 및 확산이 주변 해역 해양환경변화에 미치는 영향에 대한 이해가 부족함
5. (1990년대 초~2016) 세종기지를 중심으로 개인별, 연구팀별 관심사 위주로 개별적으로 수행. 통합적 해양연구 수행 체제 부재
 - 인근해 마리아소만과 맥스웰만 장기 시계열 수괴 특성(수온, 염분, 해류) 및 해양순환 관측자료, 크릴, 저서생물 등 key species의 생물량 관측자료 매우 빈약. 특히 기후변화 영향 관련 연구 거의 없음
6. 2017-2019 세종기지 최초 다학제 연안해양연구과제(과제명: 남극반도 연안해양시스템 2050 전망 연구, PI: 안인영) 수행. 아래와 같은 좋은 성과를 도출한 바 있음
 - 통적합 연안해양연구 기초 확립, 마리아소만의 기후변화 모델생태계로서의 가치 정립
 - 마리아소만 해수순환/ 수괴 변동 장기관측 무인계류시스템 구축 및 자료 관측 시작
 - 세종기지 해양모니터링(1996~현재) 장기자료 축적, 식물플랑크톤 군집의 하계 대증식 단주기 변동 원인 분석, 식물플랑크톤의 장기 변동 패턴과 기후요인(수온, 바람, 염분등)과의 상관성 분석
 - 세종기지 마리아소만 저서생물군집분포 특성과 먹이망 기본 구조 규명. 특히 마리아소만의 빙하후퇴에 따른 마리아소만의 뚜렷한 환경변화와 저서무척추동물 군집의 반응 측정(Moon et al. 2015, Ahn et al. 2016, Ha et al. 2019). IPCC SROCC (2019)에 마리아소만 연구성과가 인용됨.
 - 마리아소만 하계 조수빙하후퇴와 용빙수 유입으로 인한 해양산성화 영향을 모의실험(조

간대 우점종 단각류 대상으로 치사율과 행동패턴 측정)으로 증명함(위탁연구: 인하대)
(Park et al. accepted: Mar. Eniv Res.)

- 마리안소만 하계 조수빙하와 육상기원 물질(식물플랑크톤 증식유발요인) 유입량과 분포 특성 분석

제 2 절 국외 기술개발 현황

1. 기후변화와 지구온난화에 따른 남극해의 지구 기후시스템 조절자로서의 역할이 기존에 알려진바 보다 최근 더욱 중요함이 밝혀짐에 따라서 남극해의 열 이동과 탄소흡수력 변동에 대한 연구의 필요성이 강조되고 있으며, 특히 남극 연안해역 뿐만 아니라 외양에서의 물리, 화학, 생물학적 작용의 중요성이 새롭게 인식되면서 기존 연안 중심의 연구를 벗어나 남극해 외양을 대상으로 한 해양 연구가 강하게 요구되고 있음
2. 미국은 NSF 지원으로 2014년 8월부터 Southern Ocean Carbon and Climate Observation and Modeling (SOCCOM) 프로그램을 6년간 총 190억원 규모로 시작함. 남극해 전체를 대상으로 삼으며, 주 내용은 BGC-Argo를 활용한 무인관측과 모델분야 두 개로 크게 구성됨, 연구기간 동안 약 200기의 BGC-Argo 남극해 투입을 목표로 함
3. BGC-Argo의 평균 운용 가능 연한이 4~5년에 불과해 매년 40~50여기의 남극해 투입이 이루어져야만 남극해 전체해역에서 목표로 삼은 200여기의 현상유지가 가능하기 때문에 국제공동연구 및 투자를 적극 요청하고 있음. BGC-Argo 뿐만 아니라 이들 자료를 검보정할 수 있는 연구선에 의한 현장관측 자료 수집 등 역할 분담에 의한 공동연구의 요구와 가능성이 매우 큼
4. 영국 BAS는 2016년 4월부터 Ocean Regulation of Climate by Heat and Carbon Sequestration and Transports (ORCHESTRA) 프로그램을 5년간 총 120억원 규모로 시작함. 남극 웨델해 중심의 해양 계류 및 글라이더 등의 관측기법을 보조적으로 활용하여 남극해의 기후조절력 규명을 위한 연구를 활발히 추진 중에 있음
5. Earth.com 최신 뉴스로 소개된 Science Advances (MacGilchrist et al. 2019) 연구결과와 Nature Climate Change (Brown et al. 2019)에 실린 최근의 연구결과도 환경변화와 탄소흡수력 변동과 관련된 최신연구 결과를 다루고 있음
6. 미국 NSF로부터 지원받는 INSPIRE (Investigating the Role of Mesoscale Processes and Ice Dynamics in Carbon and Iron Fluxes in a Changing Amundsen Sea) 프로그램에서는 남극 연안 특히, 아문젠해와 같이 용빙수 공급이 활발한 해역에서 탄소 플럭스 및 용빙수 기반 철 공급이 주변 해역 생태계 및 생지화학순환에 미치는 영향 규명을 시도함. 하지만 연구해역이 아문젠해로 제한되어, 아문젠해 기원 용빙수의 거동에 따른 서남극 연안 해양환경변화에 대해서는 다루지 못함
7. 최근 수치모델 활용 서남극 급속 용빙 해역 기원 용빙수 배출에 대한 연구결과가 다수 보고됨. 이러한 수치모델은 다량의 용빙수가 로스해까지 유입되어 남극저층수 형성해역 표층

저염화에 영향을 미칠 수 있음을 보임. 하지만, 이러한 수치모델 결과는 아직 현장관측을 통해 검증되지 않음

8. 남극 과학위원회(SCAR)에서 선정한 주요 해결 과제(Horizon Scan, 2017)의 “남극 연안 저염수 유입이 해양순환 및 생태계에 미치는 영향”은 서남극 연안 용빙수 배출에 따른 주변 해역 해수 수괴 및 해양순환 변화와 미량금속이 해양생태계에 미치는 영향 연구의 중요성을 언급함. 또한 “남극 저층수 수괴량 및 특성 변화가 전 세계 해양순환 및 기후에 미치는 영향”은 상대적으로 저염인 용빙수가 로스해로 유입되어 남극 저층수 수괴량과 특성 변화에 영향을 미침으로 본 연구의 중요성을 언급함
9. 서남극반도 피요르드 연안지역이 기후변화 연구 최적지로 관심이 커지고 있으며 최근 영국에서 ICEBERG-(2017-2020)(BAS 등 주도)란 프로젝트에서 빙하후퇴관련 연안해양환경과 생태계 변화 연구 수행 중
10. IPCC 5차보고서(2014)에서 기후변화(남극의 경우 빙권, 해빙, 연안빙하 감소)로 인한 해양생태계 주요생물군집(식물/동물플랑크톤, 저서생물군집)이 실제 영향을 받고 변화하고 있는지에 대한 충분한 증거자료 부족(WGII report chapter 28. Polar Regions, 2014)으로 이에 대한 연구 필요성 강조
11. IPCC Special Report on Ocean and Cryosphere (SROCC, 2019. 9): 주요(key) 생물군 분포량, 변동량 및 이들 key community가 얼마나 생리적, 행동적으로 잘 적응 하는지, 먹이망 구조 유연성과 물질(에너지순환)의 변동 여부 등에 대한 자료 매우 미흡하다고 보고, 이에 대한 연구 필요성을 다시 강조함

극지연구소

제 3 장 연구개발수행 내용 및 결과

제 1 절 해양물리 관측과 열 수송 (김태완)

요약: 서남극해 해수 수괴 및 해류관측을 통한 환남극심층수의 거동을 추적하고 열 수송량을 산정하기 위해 연구과제의 수행 기간인 2020년 1월부터 2022년 12월까지, 세 차례 아라온을 활용한 현장 관측이 이루어졌다. 2020년 1월 수행된 첫 번째 항해기간 동안 서남극 연안에서 해수의 물리적 특성 관측을 통해 빙봉 기원 용빙수의 공간분포 특성과 해류의 영향을 밝혔다. 2020년 12월 두 번째 해양조사에는 서남극 동 로스해, 리틀아메리카 분지 인근 해역의 대륙사면에 남극 연안으로 공급되는 열수송의 시계열 변동성 파악을 위해 4기의 장기해류관측시스템을 설치하였으며, 동시에 11개 정점에서 수직 수온·염분 및 해류를 관측하여 남극경사전선 및 해류의 공간분포와 환남극심층수 연안 공급에 미치는 영향을 조사하였다. 마지막 현장 조사는 2021년 11월 서남극해 극전선 통과 해역중 하나인 남동인디아해령 인근 해역 20개 정점에서 해양조사를 수행하였으며, 열수송의 공간분포를 확인하였다. 또한, 극전선을 통과하여 남극해로의 열 수송과정을 규명하고자 1기 장기해류관측시스템과 16개의 Current and Pressure Recording inverted Echo Sounder를 성공적으로 설치하였다.

1. 서론

남극 빙상(Antarctic ice sheet)은 남극 대륙의 98%를 차지하는 지구상에서 가장 큰 얼음덩어리로 평균 두께는 약 2.16km로, 이들이 모두 용해된다면 전 지구 해수면을 약 58m 높일 수 있다(Fretwell, P. et al., 2013). 남극 연안의 빙봉(ice shelf)은 빙상이 중력에 의해 연안으로 흘러 바다 위에 띄워진 형태로, 이들 하부로 유입되는 상대적 고온의 해수로 인해 용해되거나, 붕괴하게 된다. 지구 온난화로 인한 남극 연안 빙봉 소멸의 가속화는 이들 빙봉을 얇아지게 하고 대륙으로 후퇴시켜, 남극 빙상의 감소를 초래하고 있다. 최근 인공위성을 통해 관측한 결과 1992년부터 2017년까지 25년 동안 남극 대륙 전체에서 109 ± 56 Gt/year 속도로 빙상이 감소하였으며 특히, 2012년부터 2017까지는 그 속도가 219 ± 43 Gt/year로 더욱 가속화 되었다(IMBIE, 2018). 지난 25년 동안 서남극과 남극반도에서는 빙상은 각각 94 ± 27 Gt/year와 20 ± 15 Gt/year의 속도로 감소하였지만, 동남극에서는 5 ± 46 Gt/year의 속도로 증가하였다. 남극 연안에서 빙봉의 변동성 또한 지역적으로 큰 차이를 보여(Paolo, F. S. et al., 2015), 주로 동남극에 비해 서남극에서 빙봉의 감소가 컸다. 남극 연안에서의 빙봉의 감소는 고온·고염의 환남극심층수가 대륙사면을 넘어 빙봉 하부로 유입되어 빙봉 하부를 용해시키기 때문이다(Depoorter et al., 2013; Wåhlin et al., 2010). 최근 성층권 오존의 감소와 온실가스 증가에 의한 지구 온난화는 기후변화를 초래하며, 특히 남반구 극 진동(Southern Annular Mode)을 양의 방향으로 증폭시키고 있다(Thompson et al., 2011). 양의 남반구 극 진동 때문에 약화된 남극 연안의 동풍은 남극 연안과 남극해 사이의 해수면의 높이차는 줄여, 대륙사면의 남극경사전선 및 해류를 약화시키며, 결국 고온의 환남극심층수 연안 유입을 더욱 원활하게 할 것이다. 본

연구에서는 관측 자료를 기반으로 하여, 남극 극전선에서의 열의 수송과정과 남극 연안의 해양 물리적 환경변화를 파악하고자 한다.

2. 재료 및 방법

본 연구 기간인 2020년 1월부터 2022년 12월 말까지, 아라온을 활용한 세 차례의 현장 관측이 이루어졌다. 첫 번째 항해는 2020년 1월 6일부터 2020년 2월 16일까지의 아라온호의 연구 항해 중 총 29개 정점에서 SeaBird 사의 SBE 911+ CTD (Conductivity, Temperature and Depth)와 Teledyne Marine RD Instruments의 300kHz LADCP (Lowered Acoustic Doppler Current Profiler)를 이용하여 수직 수온·염분 및 유속자료를 획득하였다(Fig. 3.1.1). 두 번째 항해는 2020년 10월부터 3월까지의 아라온호 남극해 연구 항해 기간 중 서남극 로스해 Little America Basin (LAB) 해역에서 총 4일간 수행했으며, 11개 정점에서 수직 수온·염분 및 유속을 관측하였다(Fig. 3.1.2). 가장 최근 2021년 11월 14일부터 21일까지 6일 동안 남동인디아해령 인근 해역에서 환남극심층수의 거동 추적 및 열 수송량 산출을 위해 20개 정점에서 수온·염분 및 유속자료를 획득하였다(Fig. 3.1.3). 연구정점들에서 CTD로부터 획득한 모든 수직 수온·염분 자료 중 CTD가 표층에서 해저로 하강하는 동안 관측된 자료만을 선택하여 Seabird사에서 제공하는 통계프로그램을 활용해 일차적 Quality Control 후 1m 간격으로 평균하여 분석에 활용하였다. 또한, 수직 5m bin 간격으로 최대 20 bin까지 CTD 운영시 연속적으로 관측된 유속자료는 미국 컬럼비아 대학의 LDEO에서 개발된 LADCP 자료처리 프로그램을 이용해 분석되었으며, CAST2008b 남극해 조석 모델을 활용해 조석을 제거하여 이후 분석에 활용되었다.

3. 결과 및 고찰

가. 서남극 연안 환남극심층수와 빙하 기원 용빙수의 공간적 분포

2020년 1월 Land bay, Hull Bay 및 Wrigley gulf의 총 24개의 정점에서 CTD를 활용한 환남극심층수의 공간적 변동성과 빙하 기원 용빙수의 수평 분포를 관측했다(Fig. 3.1.1). 그리고 Dotson-Getz trough 및 Polynya의 5개 장기해류관측시스템 계류정점에서 CTD를 활용해 수직 수온·염분 자료를 획득하였으며, 이는 회수된 계류 장비로부터 획득한 2년 계류자료를 보정하는데 활용되었다. 아문젠해 서쪽 연안 해역에서 획득한 자료로부터 도시된 T-S diagram은 세 가지 뚜렷한 수괴의 분포를 보여준다: (1) 환남극심층수(Circumpolar Deep Water:CDW); (2) 남극겨울수(Winter Water:WW); (3) 남극표층수(Antarctic Surface Water:AASW)(Fig. 3.1.4). 이 그림에서 색상이 다른 점들은 각 정점의 경도를 나타내고 회색 실선은 각 수괴(환남극심층수, 남극겨울수, 빙하 용빙수)의 end-member의 연결선을 나타낸다. 환남극심층수의 빙봉 하부 유입으로 높은 열 수송을 보이는 Dotson 빙봉 근처에서 상대적으로 다량의 용빙수가 나타났다. 반면 수층 내 용빙수의 비율은 서쪽으로 갈수록 현저하게 감소하였다. Land Bay(St. 1) 인근 대륙사면 북쪽 해역에서 환남극심층수는 1.6 °C 이상이었으며, 염분은 34.7이었다. 환남극심층수가 대륙사면을 넘어 대륙붕으로 유입되는 과정에서 남극표층수 및 남극겨울수와 혼합되어

변형된 환남극심층수(MCDW)를 형성하며, 이는 환남극심층수에 비해 상대적으로 수온과 염분이 낮았다. 대륙붕에서 MCDW의 최고 수온과 염분은 Wrigley만 동쪽 사면 (St. 23)에서 각각 1.32°C, 34.701이었다.

Land Bay(Fig 3.1.5와 3.1.6의 Section 01)와 Hull Bay(Fig 3.1.5와 3.1.6의 Section 02)에서 최고 수온과 염도는 Wrigley Gulf(Fig 3.1.5와 3.1.6의 Section 03과 05)에 비해 상대적으로 낮았다. 수치모델을 활용한 이전 연구에서 아문젠해의 주요 빙붕(Pine Island Glacier, Thwaites Glacier, Dotson Ice Shelf, Getz Ice Shelf)으로부터 기원한 용빙수가 남극연안해류를 따라 서쪽으로 확산되어짐을 보고하였다(Nakayama, et al., 2014). 그러므로 Wrigley Gulf의 서쪽 해역 중층에서 발견된 용빙수는 다양한 빙하 기원의 용빙수들의 혼합수일 가능성이 매우 높다. 또한 상대적으로 염분이 낮은 이들 혼합수가 연안 해류를 따라 남극저층수가 형성되는 로스해로 공급된다면, 로스해 수괴의 변동성을 초래할 것으로 추정된다. 따라서 지구 온난화에 따른 남극 연안 열 수송증가가 남극 연안 용빙수의 시·공간분포에 미치는 영향과 서남극 연안, 특히 로스해에서 용빙수의 기원 빙하를 밝히는 연구가 필요하다.

나. 서남극 로스해 리틀아메리카 분지에서의 열 수송 및 해류의 공간분포

2020년 12월 남극전선을 통과해 남쪽으로 전달된 열이 남극 연안으로 전달되는 과정과 이에 따른 연안 해양환경 변동성을 파악하고자 쇄빙연구선 아라온호를 활용해 로스해 연안 해양 조사를 실시하였다(Fig. 3.1.2). 해양조사중 남극 연안 열 수송량과 연안해류(Antarctic Slope Front Current; ASFC, Antarctic Coastal Current; AACC)의 시공간 변동성을 관측하고 그 변동 원인을 파악하고자 4기의 장기해류관측시스템을 2020년 12월 19과 20일 Little America Basin 북쪽 로스환류(Ross Gyre)에 설치하였다 (Fig. 3.1.7). 4개의 장기관측거점에서는 수직 유속 관측을 위한 다수의 해류계 (75kHz, 150kHz×4, 300kHz×3)와 층별 수괴 관측을 위한 수온·염분계 (SBE37SM×30), 생지화학적 과정을 관측하기 위한 퇴적물 트랩 (MK7-21 Sediment Trap×3)을 포함하도록 구성하였다.

2020년 12월 남극해 현장 조사시 총 11개 정점에서 아라온호 장착 CTD를 활용하여 수직 수온 염분을 관측하였으며, 동시에 LADCP로부터 수직 유속을 관측하였다. 연구해역에서 수괴 분포는 환남극심층수와 변형된 환남극심층수, 남극표층수, 심층얼음대륙붕수(Deep Ice Shelf Water: DISW)가 관측되었다(Fig. 3.1.8). 상대적 고온·고염의 환남극심층수는 대륙사면의 북쪽에서 주로 발견되었으며, 여름철 대륙사면을 넘어 대륙붕으로 유입되는 환남극심층수 및 변형된 환남극심층수는 발견되지 않았다. 대륙붕의 해저 근처에서는 수온이 해수의 어는점에 가까우며, 남극겨울수에 비해 염분이 높은 심층얼음대륙붕수가 일부 정점에서 관측되었다.

11개 지점에서 관측된 수직 유속자료의 분석 결과, 대륙사면과 빙붕 인접 해역에서는 남극 경사해류라 판단되는 강한 서향류가 우세하였으며, 대륙붕과 대륙사면의 북쪽에서는 동향류가 관측되었다(Fig. 3.1.9). 한편, 대륙사면 인근에서 남북방향의 해류는 북향류가 우세하여 관측 시기에 강한 남극경사전선의 영향으로 환남극심층수가 대륙사면을 넘어 연안으로 유입되지 않는 것으로 사료된다. 이는 추후 장기계류시스템의 회수 후 연속자료 분석을 통해 남극경사전선 및 해류의 시계열 변동성 확인으로부터 파악이 가능하다.

1976년 USCGC (United States Coast Guard Cutter)는 아라운의 2020년 Little America Basin에서의 정선관측 정점과 유사한 관측선의 12개 정점에서 수직 수온 및 염분을 관측하였다(Fig. 3.1.10). 1976년 환남극심층수는 대륙사면 북쪽 해역에서 수심 200-300 m 층 아래에 분포하여 2020년 동일지역 관측 결과에 비해 상층경계가 좀 더 얇은 것으로 나타났다(Fig. 3.1.11. 3.1.9). 그러나, 1976년과 2020년 관측 결과 모두에서 환남극심층수가 대륙사면을 넘어 대륙붕으로 유입되지 않은 것으로 확인되어 여름철 대륙사면을 넘어 연안으로 공급되는 열량은 극히 작아, 이들 열 수송량의 연간변동성보다는 계절변동성과 같은 좀 더 짧은 주기의 변동성이 우세할 것으로 예상된다. 한편, 관측된 수직 수온·염분을 이용 계산된 지형류의 수직 분포는 LADCP로부터 관측된 수직 유속 분포와 유사하였으며, 1976년과 2020년 두 관측시기 Baroclinic velocity의 공간분포 경향이 유사하였다(Fig. 3.1.12).

다. 남동인디아해령 인근해역 남극전선 종단면에서 열 수송

남극해 남극전선 종단면 해수 수괴 및 해류 관측 공간적 분포 및 환남극심층수의 거동을 추적하고 이에 따른 남극해로의 열 수송량 산출을 위해 2021년 11월 14일부터 21일까지 남동인디아해령(Southeast Indian Ridge; SEIR) 인근해역의 20개 정점에서 CTD와 LADCP를 활용한 수직 수온·염분 및 해류를 관측하였다. 또한, 다수의 해류계와 수온염분계로 구성된 장기해류관측시스템 1기와 PDS-CPIES (Popup Data Shuttle-Current and Pressure Recording inverted Echo Sounder) 16기(로드아일랜드 대학 12 + 극지연 4) 연구해역에 설치하여 향후 3년간 연속관측을 수행한다. 이들 관측자료는 향후 자료 획득후 극전선 통과해역 열속 및 열 수송량의 변동성을 추정하는데 활용될 것이다. 2021년 11월 남동인디아해령 인근 해역 20개 정점에서 관측된 수직 수온·염분 자료를 활용해 T-S Diagram을 활용 수괴분포를 분석하였다(Fig. 3.1.13). 연구 해역에서 수직 수온은 약 200m 수심에서 1.8°C 이상의 최대를 보였으며, 아래로 갈수록 수온은 감소하고 염분은 증가하였다. 즉, 수심 200m 아래에 남극순환수 (CDW)가 두껍게 차지하고있어 전체 볼륨의 약 95%를 차지하였다. 한편, 200m 상층에서는 남극순환수에 비해 상대적으로 저온·저염의 남극중층수 (Antarctic Intermediate Water)가 발견되었지만, 이들 수괴의 수온은 각 정점의 위도에 따라 차이를 보였다.

PDS-CPIES 설치정점에서 CTD와 LADCP를 활용해 16개 정점에서의 수직 수온·염분 및 유속을 관측하였으며, 이들 자료를 활용하여 열 수송량을 계산하였다. 극전선에서의 열 수송량 계산을 위해 먼저 수온의 공간분포로부터 등 수온선의 공간 변동성을 산출한다(Fig. 3.1.14). 이후 등 수온선의 연직 방향으로 향하는 유속 성분과 등 수온선의 연직 방향 수온의 공간 기울기로부터 열의 극 수송을 계산한다 (Sekma, et al., 2013). 열의 극 수송은 연구해역의 북쪽에서 양으로 남쪽에서는 음으로 나타났으며, 수심 평균된 극 방향으로 최대 열 수송은 약 1.9 W m⁻²로 나타났(Fig. 3.1.15). 반면 남쪽 연구해역에서 열은 등 수온선을 가로지르는 북향의 흐름으로 적도 수송이 나타났으며, 수심 평균된 적도방향 최대 열 수송은 1.4 W m⁻²로 나타났다.

Physical properties of seawater and heat transport in West Antarctica

Tae-Wan Kim

Division of Ocean Sciences, KOPRI

Abstract: From January 2020 to December 2022, during the research project period, three field expeditions were conducted using Araon to track the behavior of Circumpolar Deep Water and calculate poleward heat transport from observation of water mass and current in the Southern Ocean. During the first expedition conducted in January 2020, the physical properties of seawater were measured on the continental shelf of West Antarctica to reveal the spatial distribution characteristics of glacier meltwater and the influence of ocean circulation. In the second expedition in December 2020, four long-term ocean moorings were installed on the shelf break in the Little America Basin in West Antarctica to identify the time-series variability of heat transport supplied to the continental shelf. In addition, the vertical temperature, salinity, and currents were observed at each station to investigate the spatial distribution of the Antarctic slope front and currents and their effects on the CDW's intrusion onto the continental shelf. The most recent field expedition was conducted in November 2021 at 20 stations near the Southeast Indian Ridge, one of the areas where the polar front passes, and the spatial distribution of heat transport was confirmed. In addition, one long-term ocean mooring and 16 current and pressure recording inverted echo sounders were successfully installed to investigate the heat transport process through the polar front to the Southern Ocean.

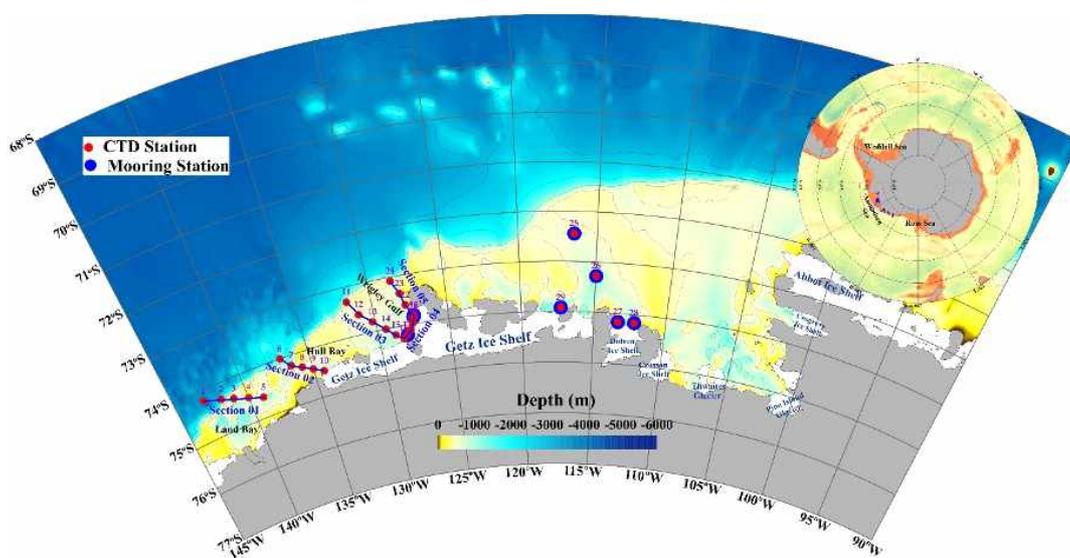


Figure 3.1.1. Map of study area. Red dots and Blue dots denote the CTD and mooring stations visited during ANA10B expedition.

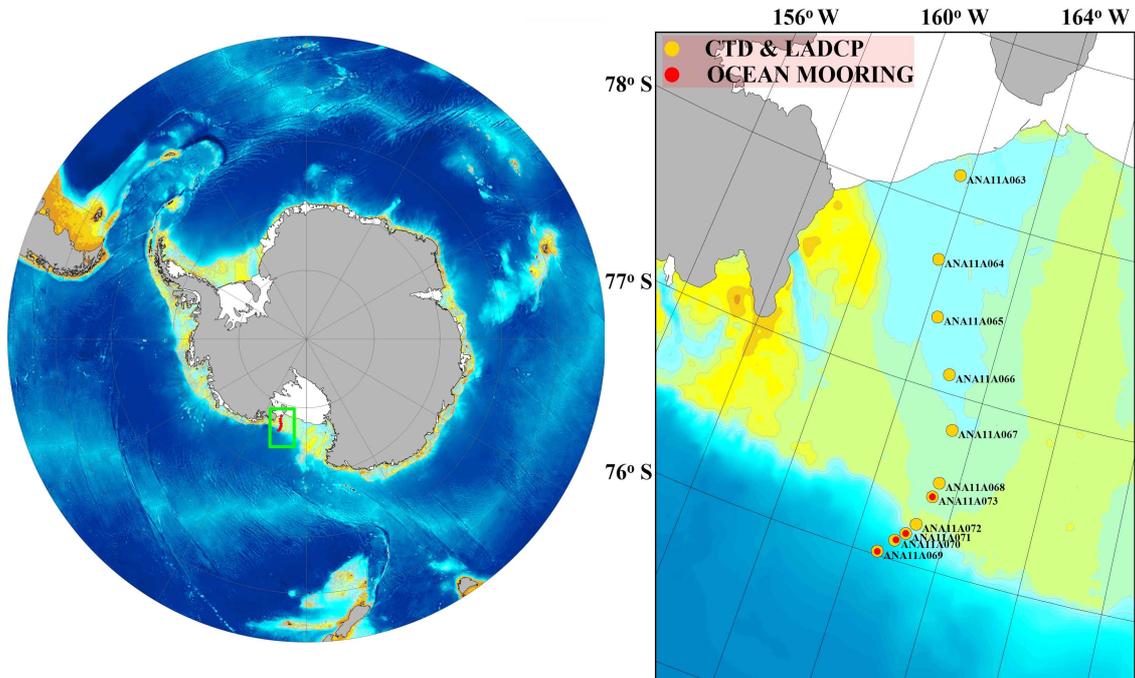


Figure 3.1.2. Map of study area. Orange dots and Red dots denote the CTD and mooring stations visited during ANA11A expedition.

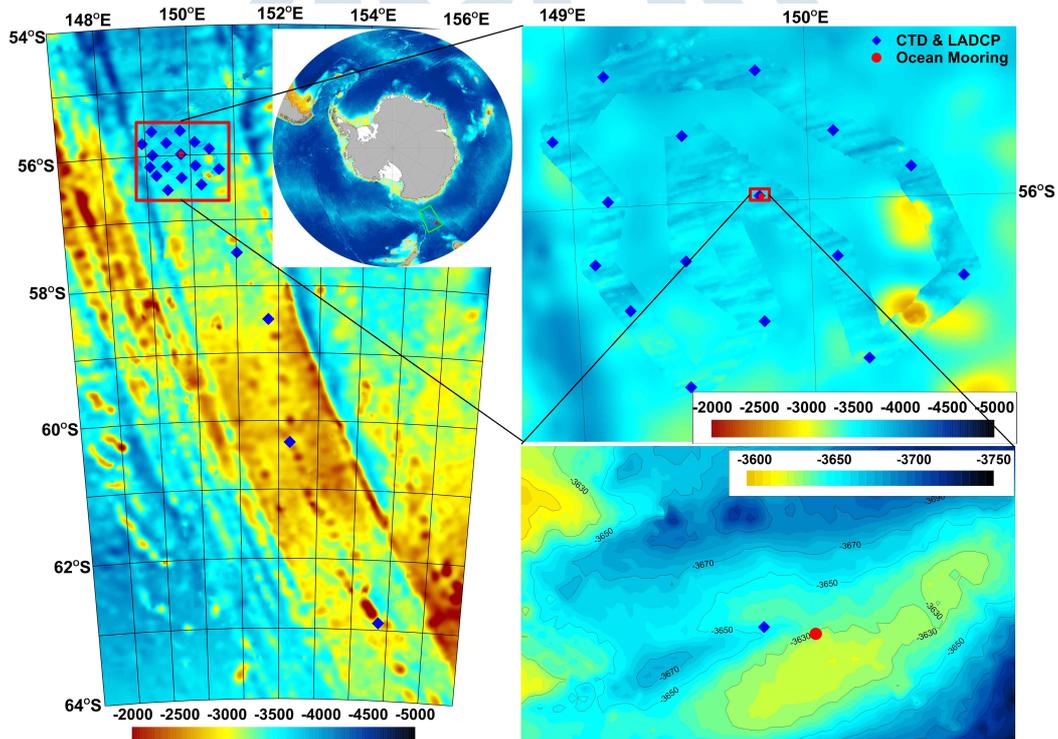


Figure 3.1.3. Map of study area. Blue diamonds and Red dots denote the CTD & C-PIES and mooring station visited during ANA12A expedition.

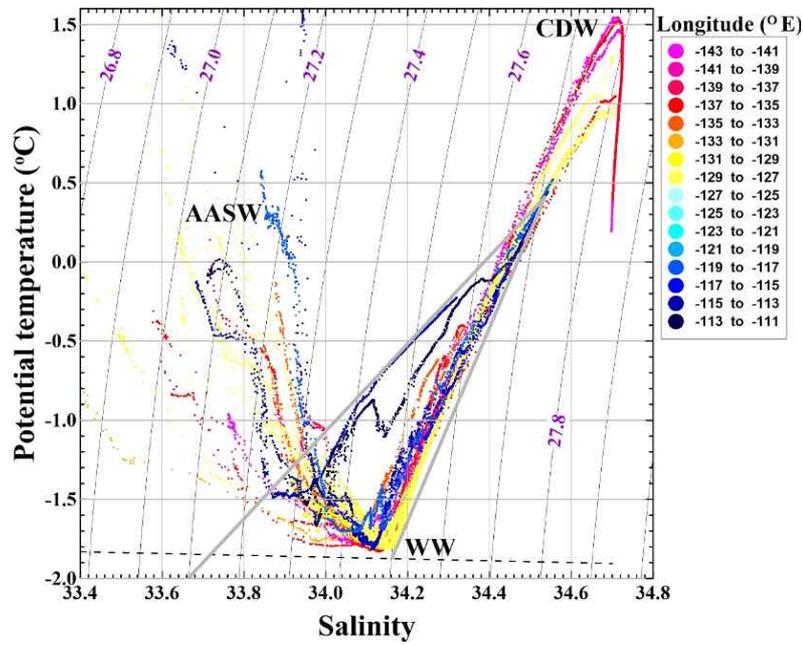


Figure 3.1.4. Potential temperature–salinity diagram at 29 stations. The color code indicate the longitude of each stations and gray solid line indicated the connection line of endmember of each water mass (CDW, WW, GMW).

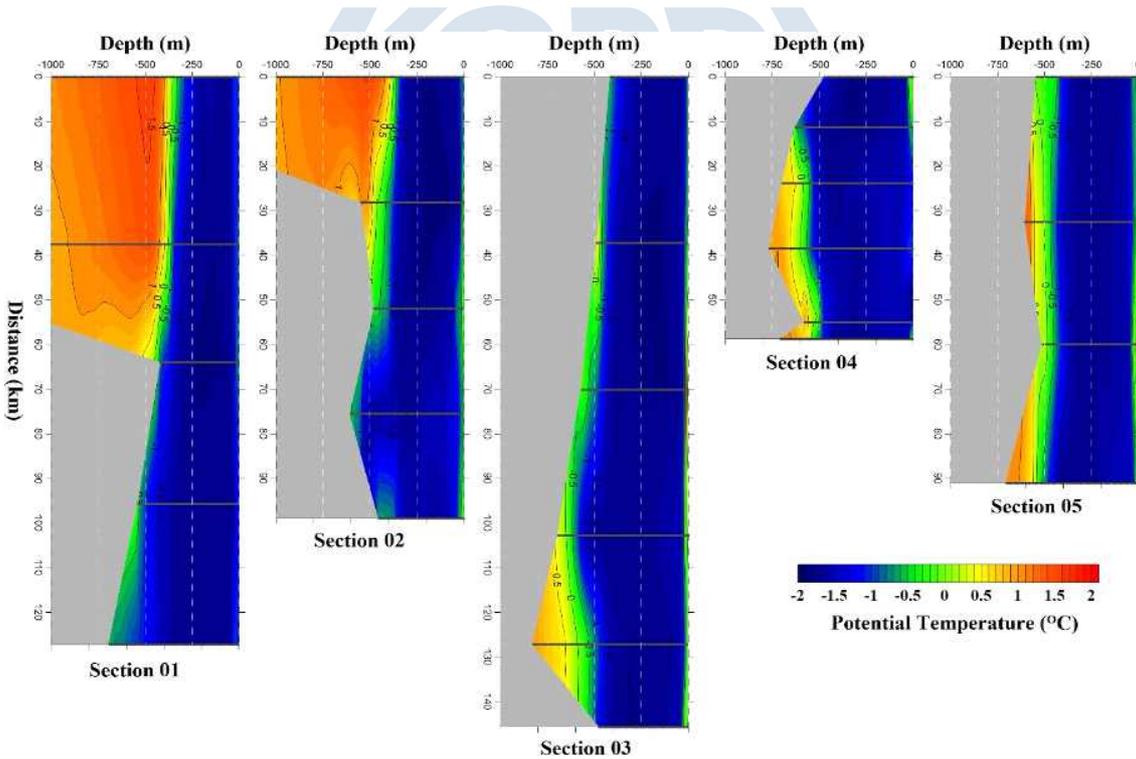


Figure 3.1.5. Vertical distribution of potential temperature at five sections. The distance is from the northernmost station.

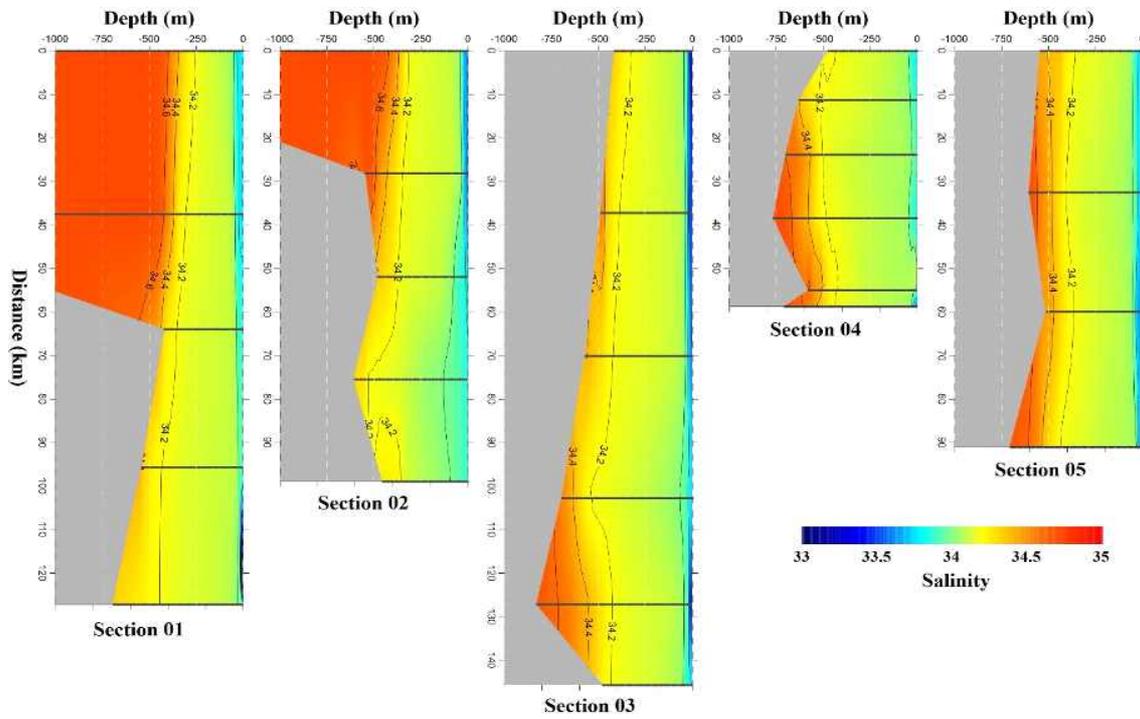


Figure 3.1.6. Vertical distribution of salinity at five sections. The distance is from the northernmost station.

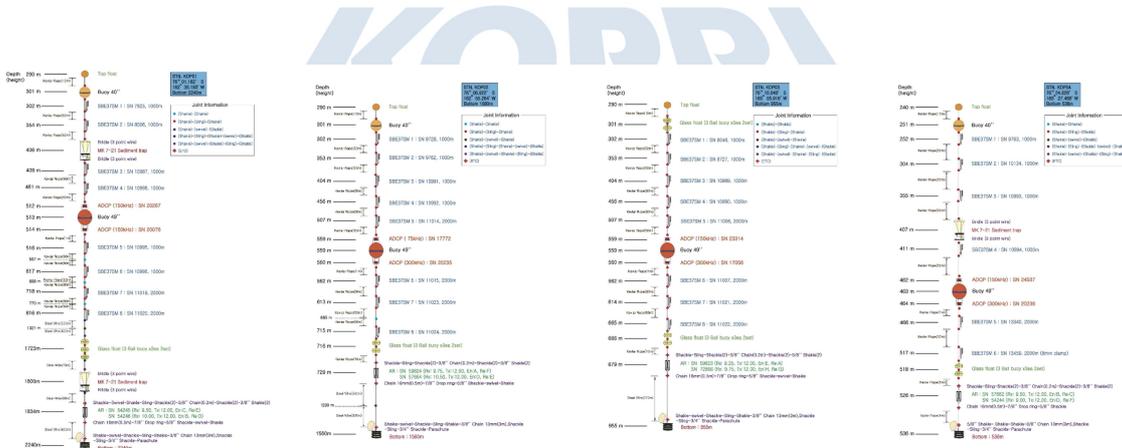


Figure 3.1.7. Schematic diagram of four long-term mooring systems installed at shelf break near the Little America Basin in December 2020.

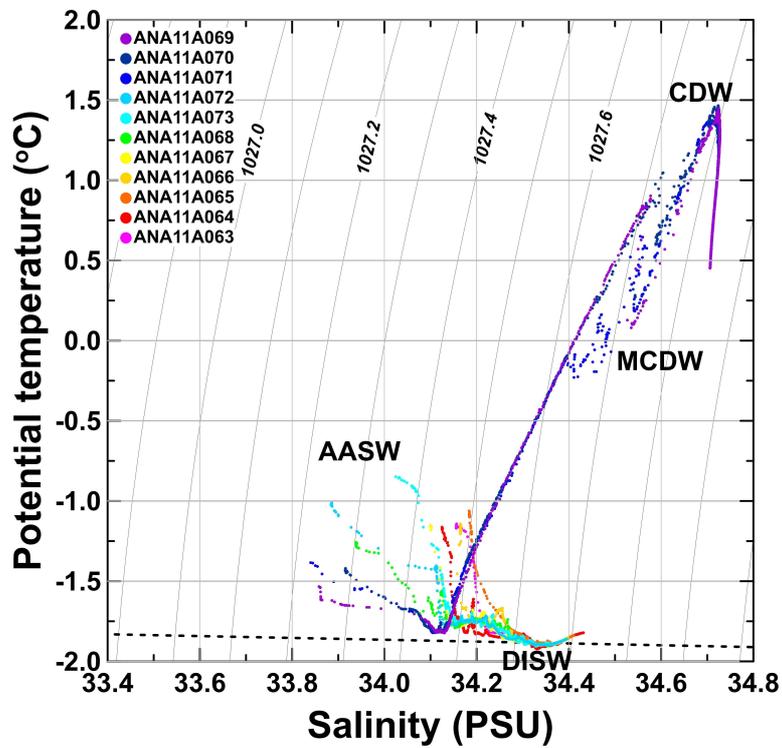


Figure 3.1.8. Potential temperature-Salinity diagram across the Little America Basin to confirm the water mass in December 2020.

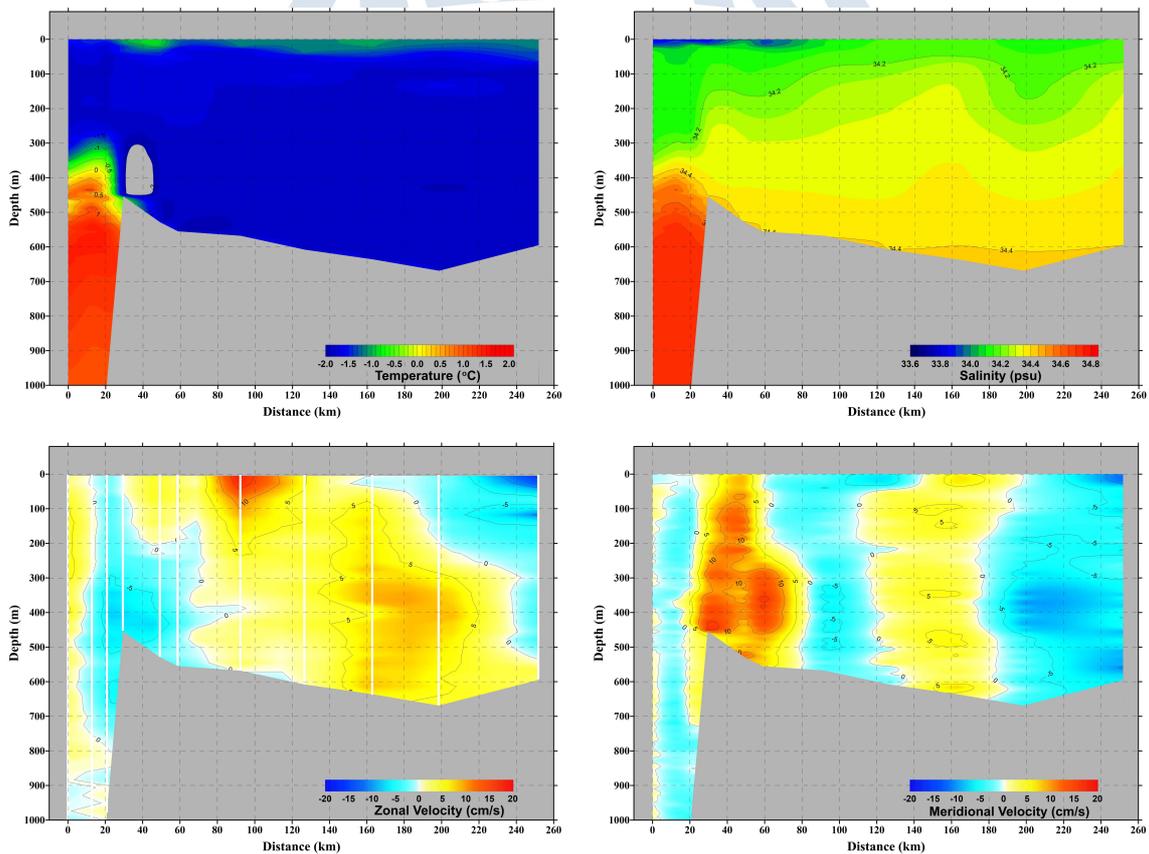


Figure 3.1.9. Vertical temperature (upper left), salinity (upper right) and current (lower left: zonal velocity, lower right: meridional velocity) observed at 11 stations across the Little America Basin in December 2020.

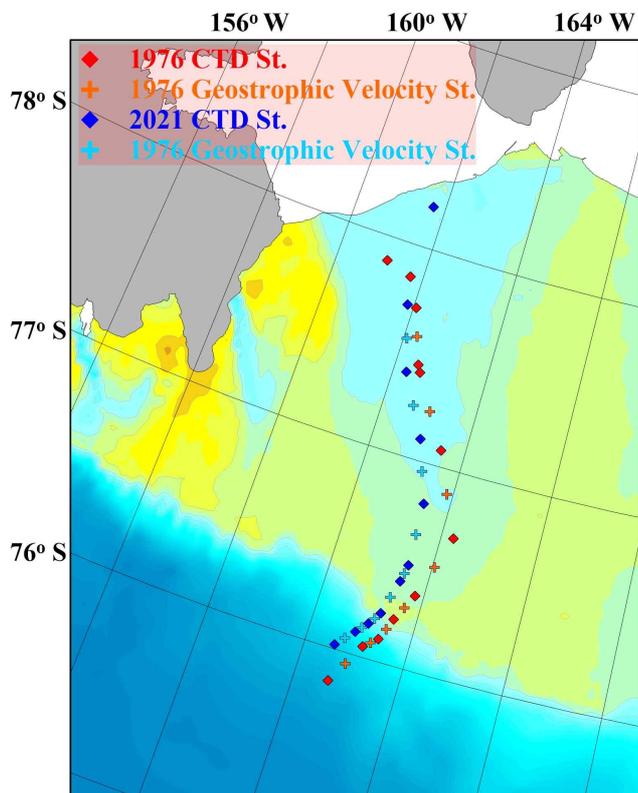


Figure 3.1.10. 12 CTD stations of Little America Basin conducted by USCGC in 1976 and 11 CTD stations conducted by Araon in 2020 and geostrophic velocity calculation points.

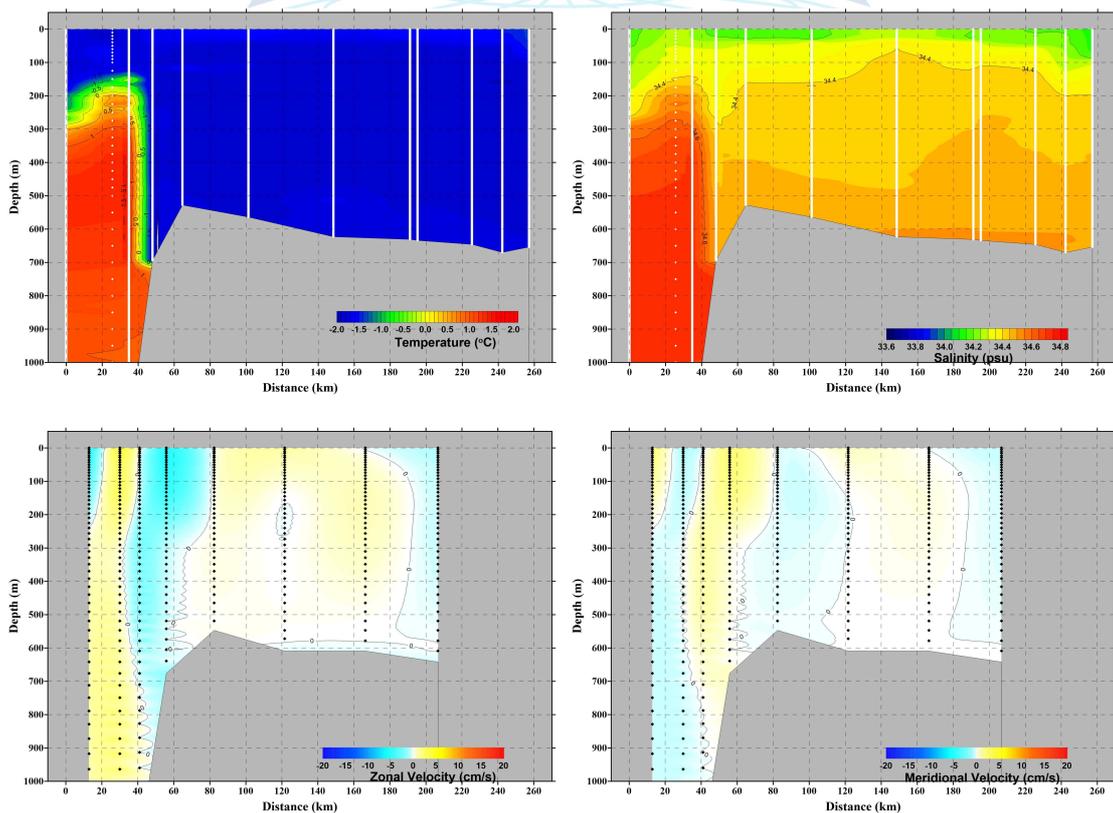


Figure 3.1.11. Spatial distribution of vertical temperature and salinity along the Little America Basin observed in 1976 (top) and calculated geostrophic velocity (bottom)

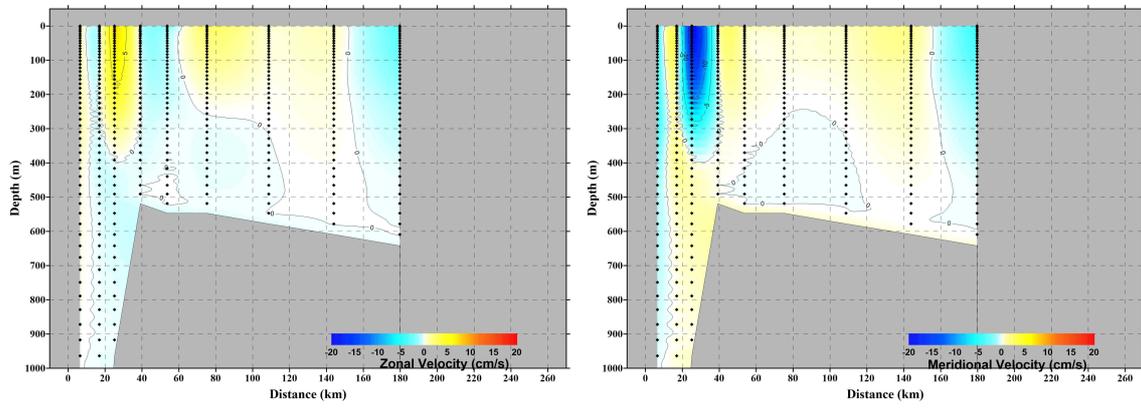


Figure 3.1.12. Spatial distribution of calculated geostrophic velocity along the Little America Basin observed in 2020.

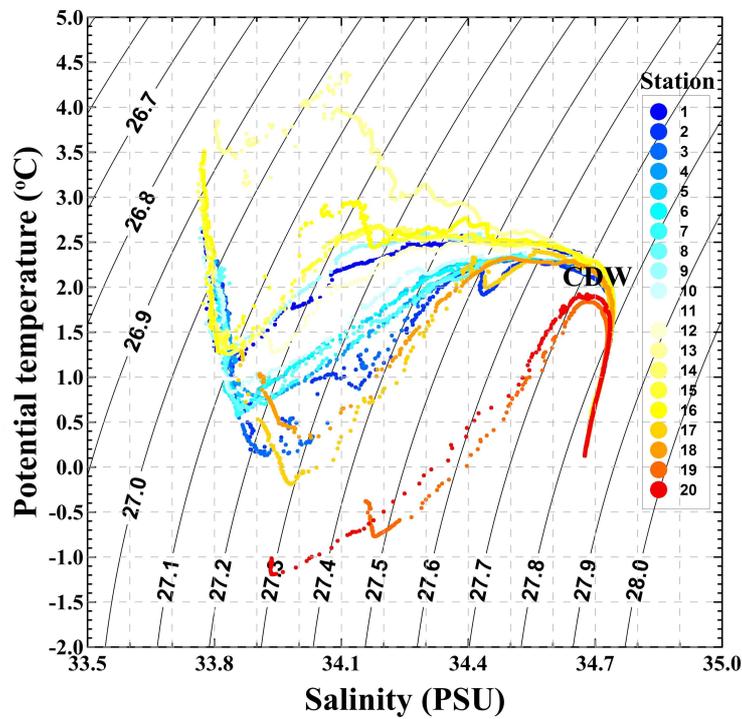


Figure 3.1.13. Potential temperature–salinity diagram at 20 stations. The color code indicate the station numbers.

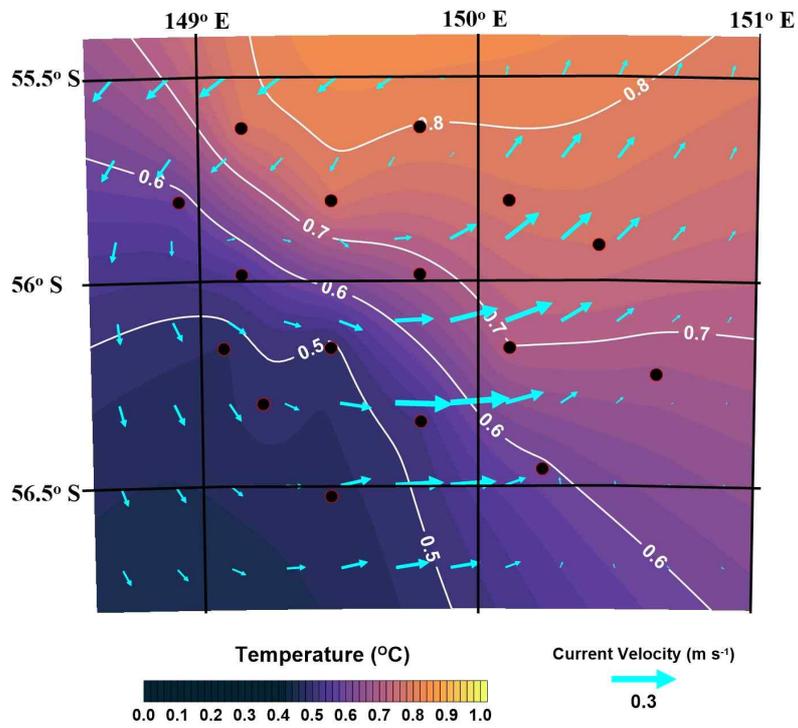


Figure 3.1.14. Spatial distribution of depth-averaged temperature and current near the Southeast Indian Ridge.

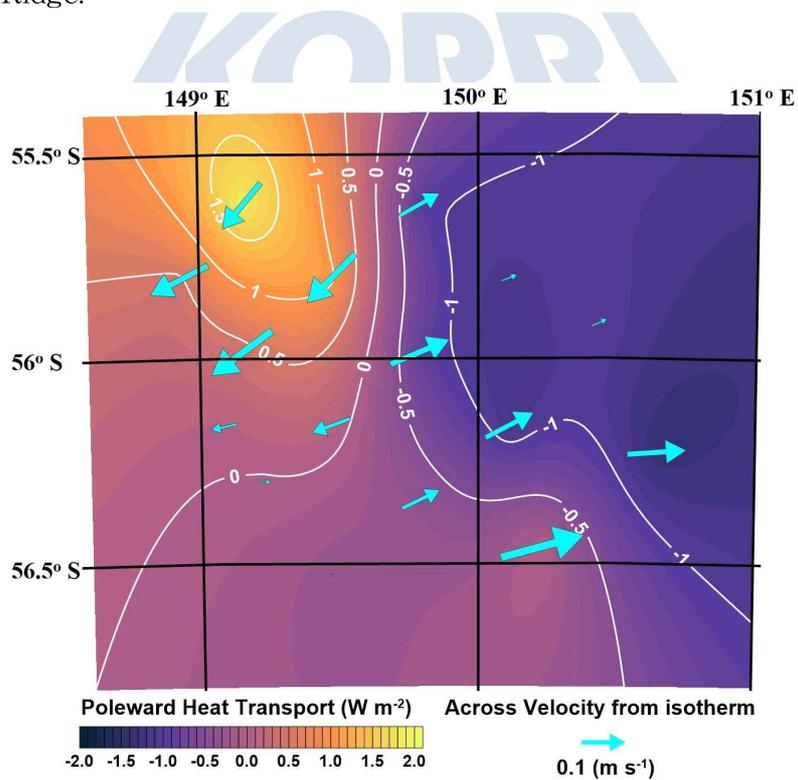


Figure 3.1.15. Spatial distribution of depth-averaged poleward heat transport and velocity components perpendicular to the isotherm near the Southeast Indian Ridge.

제 2 절 기후모델을 활용한 온난화에 따른 열 순환 변화 이해 (박태욱)

요약: 남극 연안 해역은 남빙양 중층에 위치한 고온의 환남극 심층수가 유입하여 빙상을 녹이고, 그 결과 해양순환과 해수 특성 변화가 나타나는 미래 해양기후 예측에 있어 중요한 해역이다. 본 연구에서는 지구온난화에 따른 남극 연안 해역의 해수 특성과 해양순환 변화를 공간해상도 1/10°의 고해상도 기후모형 (Community Earth System Model, CESM)으로 수행된 현재 기후 및 이산화탄소 배증 미래기후 실험 모의 자료를 분석하였다. 현재기후 실험에서는 아문젠해와 베링스하우젠해에서 로스해에 비해 더 뚜렷한 십년 내외 규모의 해수 특성과 순환 변동이 나타났고, 이것은 대륙붕 내 환남극 심층수 변동에 대한 관측 기반의 선행 연구 결과와 일관된 특징을 보인다. 현재기후 실험의 남극 연안 해역 환남극 심층수 수온은 아문젠해와 베링스하우젠해에서 0°C 이상, 로스해와 웨델해를 비롯한 동남극 연안 해역에서는 0°C 이하로 나타나서 기존 연구를 통해 알려진 결과와 일관된 것으로 모의되었다. 미래기후 실험에서는 서부 베링스하우젠해에서부터 동부 로스해에 이르는 서남극 해역 전반에서 현재기후 실험 대비 환남극 심층수 수온이 $0.43 \pm 0.16^\circ\text{C}$ 상승되는 온난화 추세를 확인했다. 서남극 대륙붕 연안 해역의 물리 환경 변동을 지배하는 주요 기작 조사를 통해 미래 온난화 과정을 파악하기 위한 분석은 향후 전지구 해양기후 변화 이해와 예측에도 중요한 시사점을 남긴다.

1. 서론

남극 대륙 연안의 해양순환은 남극 용융률의 변화뿐만 아니라 기후 시스템에도 영향을 미치는 중요한 물리 과정이다. 남극 연안에서 생성되는 것으로 알려진 남극 저층수(Antarctic Bottom Water)는 해양에서 가장 무거운 수괴로 전지구 해양순환에서 중요한 역할을 한다. 즉 기후 변화로 인해 이러한 남극 저층수의 생성률 및 생성 해역의 변화, 물성의 변화는 전지구 해양순환에 영향을 미치는 것으로 알려져 있다. 남극 연안은 남극 대륙붕수와 환남극 심층수의 분포에 따라 남극 대륙사면에서의 물리적인 특성이 서로 다르게 나타나며 이러한 특징은 대륙붕과 대륙사면 사이의 열과 물질 순환에 크게 영향을 미치게 된다. 남극 대륙붕은 이러한 특성에 따라 고온(Warm), 저염(Fresh), 고염(Dense) 대륙붕 유형이 Tompson et al. (2018)에 의해 제안된 후, 저온(Cool) 대륙붕 유형이 Moorman et al. (2020)에 의해 추가로 제안되어 크게 네 가지 유형으로 분류할 수 있다(Fig. 3.2.1). 본 연구에서는 고해상도 전지구 기후모형의 현재기후 및 이산화탄소 배증 미래기후 모의 결과로부터 남극연안의 해수 특성이 남극 대륙붕 저층수(Antarctic Shelf Bottom Water, ASBW)가 기후 변화에 따라 어떻게 변동하는지를 살펴보고 남빙양 고위도 태평양에서의 열 수송량 변화에 대해서도 알아보고자 한다.

2. 재료 및 방법

부산대학교 기초과학연구소 기후물리센터에서 Community Earth System Model version 1.2.2 (CESM1.2.2)로 모의한 기후실험 결과를 분석에 사용하였다. 대기 모형은 수평해상도 0.25°와 연직방향 30개 층의 Community Atmospheric Model version 5 (CAM5), 해양모형은

수평해상도 0.1°와 연직방향 62개 층의 Parallel Ocean Program version 2 (POP2), 지면과 해빙 모형은 각각 Community Land Model version 4 (CLM4)와 Community Ice Code version 4 (CICE4)를 사용하였다. 현재기후 실험(Present Day, 이산화탄소 농도 367 ppm)은 선행 고해상도 기후모형 실험 결과로부터 140년 동안 모형적분을, 미래기후 실험(Doubled CO₂, 이산화탄소 농도 734 ppm)은 현재기후 실험의 71년 적분결과에서부터 대기 중 이산화탄소 농도를 2배로 고정하여 100년 동안 모형적분이 수행되었다. 모형 안정화 기간을 고려하여 각 실험의 마지막 20년을 평균하여 분석에 사용하였다.

현재기후 실험에서 모의된 남극 대륙붕수의 분포가 네 가지 대륙붕 유형 분류에 따라 분류되는지 확인하였다. 남극 대륙붕 저층수는 환남극 1500 m 보다 수심이 얇은 해역의 해저면 수온으로 정의하였다(Schmidtke et al., 2014).

열 수송량 계산은 해양순환에 의한 것과 해양-대기 상호작용에 의한 것으로 구분하기 위해서 해류에 의한 열 수송량과 해면 열속을 계산하였다. 인도양과 태평양 경계에 해당하는 단면을 서쪽 경계, 드레이크 해협을 동쪽 경계로 하였고, 위도 30°S를 가로지르는 남북 방향 수송량을 저위도 태평양과 교환되는 열 수송으로 구분하여, 각각의 열 수송량을 계산하였다.

3. 결과 및 고찰

가. 남극 대륙붕 저층수 특성 및 미래 변화

현재기후 실험 분석에서 베링스하우젠해에서부터 동부 로스해에 이르는 서남극 해역 전반에서 0°C 이상의 고온의 남극 대륙붕 저층수 분포가 잘 나타나고(Fig. 3.2.2), 미래기후 실험 결과에서 남극반도 및 서부 로스해 등을 제외한 대부분 남극 대륙붕 저층수에서 고온화, 남극 전반에서 저염화가 잘 모의된다. 서남극해의 아문젠해, 베링스하우젠해, 로스해, 서남극 반도로 구분하여 각각의 해역에 대해 남극 대륙붕 저층수를 영역 평균한 시계열을 현재와 미래기후에 대해 비교한 결과(Fig. 3.2.3), 현재기후에서 아문젠해와 베링스하우젠해는 로스해에 비해서 십년 변동이 크게 나타나는데 관측에서도 이러한 변동을 대륙붕 내 환남극 심층수와 관련하여 설명된 바 있다(Jenkins et al., 2016). 서남극 반도를 제외하고는 아문젠해, 베링스하우젠해, 로스해에서 이산화탄소 농도가 2배, 4배 되는 경우에 남극 대륙붕 저층수 수온이 증가하고, 특히 로스해는 다른 해역에 비해 수온의 증가 폭이 크게 나타나며 이는 미래 온난화 환경에서 빙권이 겪을 변화가 더 클 수 있음을 의미한다.

현재기후 실험에서 남극 저층수의 기원이 되는 해수를 생성하는 대표적인 연안 중 웨델해, 로스해, 아델리만(Adelie Coast)에서 0°C 이하의 저온 대륙붕 저층수가 대륙사면을 따라 침강하는 형태가 모의되었으나, 단리 콧(Cape Darnley)에서는 이러한 특징이 나타나지 않았다(Fig. 3.2.5). 또 미래기후 실험의 경우 현재기후 실험에서 모의된 대륙 사면 침강류가 존재하지 않는 것으로 나타났고, 이는 대륙붕단 외해의 수온과 염분이 증가하고 대륙붕수의 염분이 감소하여 밀도차가 커져 성층이 강화된 영향을 받은 것으로 보인다(Fig. 3.2.6).

요약하면, 남극 대륙붕 저층수는 전체적으로 저염화, 남극 반도 및 로스해 서부를 제외한

대부분의 해역에서 고온화 경향이 모의되었다(Fig. 3.2.4). 온난화의 영향으로 남극 저층수가 생성되는 해역에서 환남극 심층수의 수온이 남극 대륙붕 저층수 대비 크게 증가하는 것으로 모의되어, 남극 대륙사면 전선(Antarctic slope front)이 강화되어 침강류가 약화된 것으로 판단된다.

나. 남극순환류 및 해양-대기 열 교환에 의한 열 수송

남빙양 태평양 고위도 해역에서 해류에 의한 열 수송량과 해양-대기 상호작용에 의한 열속의 미래변화를 파악하였다. 현재기후 실험 결과를 검증하기 위해 해류 수송량을 기존 문헌 자료와 비교하였다. 1993년부터 2016년까지 수송량을 제시한 GLORYS12 분석 결과와 다중 모형 결과를 합성하여 1993년부터 2014년까지 산정한 Lumpkin and Speer (2008) 분석 결과를 비교에 이용하였다. 인도양에서부터 서남극 태평양으로 유입되는 수송량, 드레이크 해협을 통해 서남극해에서 대서양으로 유출되는 수송량, 그리고 태평양 저위도 해역으로 유출되는 수송량을 계산하였고 재분석자료와 비교하였다(Table 3.2.1). 모형이 모의한 서남극해 수송량을 문헌에서 제시된 값과 비교한 결과 기존 연구가 제시한 값의 범위 내에서 비교적 잘 모의하는 것으로 나타났다.

모형이 모의한 현재기후 실험과 이산화탄소 배증 실험에서의 열 수송량을 해류에 의한 수송과 해양-대기 상호작용에 의한 열 교환량으로 구분하였다(Fig. 3.2.7b). 인도양에서 태평양으로 유입된 열은 드레이크 해협과 태평양 저위도 해역으로 빠져 나가는데, 현재기후에서는 인도양에서 유입된 2.29 PW의 열이 해류를 통해 총 2.22 PW 빠져나가 0.07 PW 덜 빠져나가고, 미래기후 실험에서는 인도양에서 유입된 2.37 PW의 열이 해류를 통해 총 2.41 PW 빠져나가서 0.04 PW 만큼 더 유출되는 것으로 나타났다. 대기와의 열 교환을 살펴보면, 남빙양 고위도 태평양 해역은 현재기후와 미래기후 모두 평균적으로 열을 대기로 잃는 것으로 나타났다. 현재기후에서 0.19 PW 해양이 대기로 열을 잃는 반면 미래기후에서는 0.07 PW의 열을 일어서, 해면을 통한 열 교환이 해류에 의한 열 수송에 비해 현재기후와 미래기후 간 차이가 크음을 알 수 있다.

요약하면, 현재기후와 이산화탄소 배증 미래기후를 모의한 모델 실험에서 인도양에서 서남극해로 유입된 열은 해류를 통해 드레이크해협과 태평양 중위도 해역으로 빠져 나가고 대기로도 열을 잃는데, 현재에 비해 미래기후에서는 인도양에서 해류를 통해 유입된 열이 태평양 중위도와 대서양으로 더 많이 빠져나가기 때문에 해류를 통한 열 수송 측면에서는 서남극해는 열을 잃지만 대기로 빼앗기는 열이 줄어들기 때문에 전체적인 열수지로 봤을 때는 열을 더 얻는 것으로 파악되었다.

Characteristics of water mass properties and future changes in the Antarctic marginal seas

Taewook Park

Division of Ocean Sciences, KOPRI

Abstract: The Antarctic marginal seas are an important area in predicting future marine climate because the inflow of high-temperature Circumpolar Deep Water (CDW) located in the middle layer of the Southern Ocean causes ice shelf melting and dispersion of melt water, affecting ocean circulation and water mass properties. In this study, the water mass properties and the future changes in Antarctic marginal seas due to global warming were analyzed using the results of simulations of the present-day climate (PD) and the future climate of carbon dioxide doubling (2xCO₂) based on a high-resolution climate model (Community Earth System Model, CESM) with a spatial resolution of 1/10°. In PD experiment, the Amundsen and the Bellingshausen Seas showed more distinct decadal-scale variability compared to the Ross Sea, which is consistent with the results of previous observational-based studies on CDW fluctuations within the continental shelf. The CDW temperature in the Antarctic marginal seas in PD experiment was above 0°C in the Amundsen and Bellingshausen Seas and below 0°C in the East Antarctic coastal waters as well as the Ross and Weddell Seas, consistent with the results known in the previous studies. In the future climate (2xCO₂) experiment, we showed that the Antarctic shelf bottom water increased by $0.43 \pm 0.16^\circ\text{C}$ in the entire western Antarctic seas, from the Bellingshausen Sea to the Ross Sea, compared to PD experiment. The analysis to identify the main mechanisms occurring in the future in the west Antarctic continental shelf through the investigation of the main mechanisms governing the changes in the physical environment leaves important implications for understanding and prediction of global ocean climate change.

Table 3.2.1. Comparison of mean (standard deviation in parentheses) volume transport across the sections (Indo-Pacific section, Drake Passage, and 30°S section) in unit of Sv (1 Sv = 10^6 m³/s) based on CESM and ocean model reanalysis dataset

| | CESM (Present Day) | GLORYS12 | Ensemble reanalysis (Lumpkin and Speer) |
|----------------------|--------------------|-------------|---|
| Indo-Pacific section | 162.90 (2.25) | 175.0 (4.4) | 141.50 (11.40) |
| Drake Passage | 147.76 (4.26) | 156.9 (4.5) | 129.70 (6.80) |
| 30°S section | 13.82 (1.41) | 19.0 (2.7) | 14.30 (3.40) |

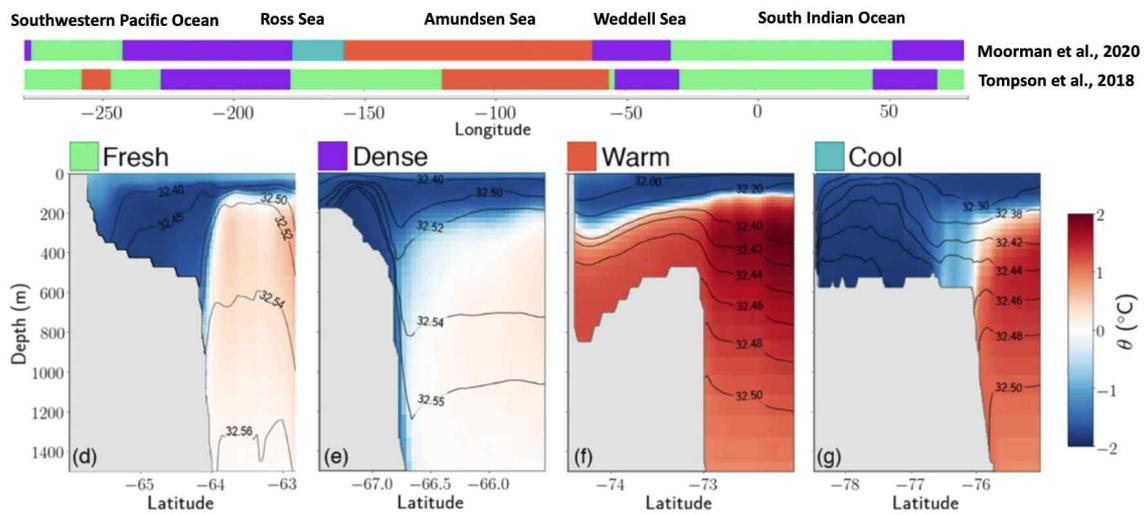


Fig. 3.2.1. Classification of cross-slope profiles into Fresh (green), Cool (blue), Warm (red), and Dense (purple) shelf and transections (Moorman et al., 2020).

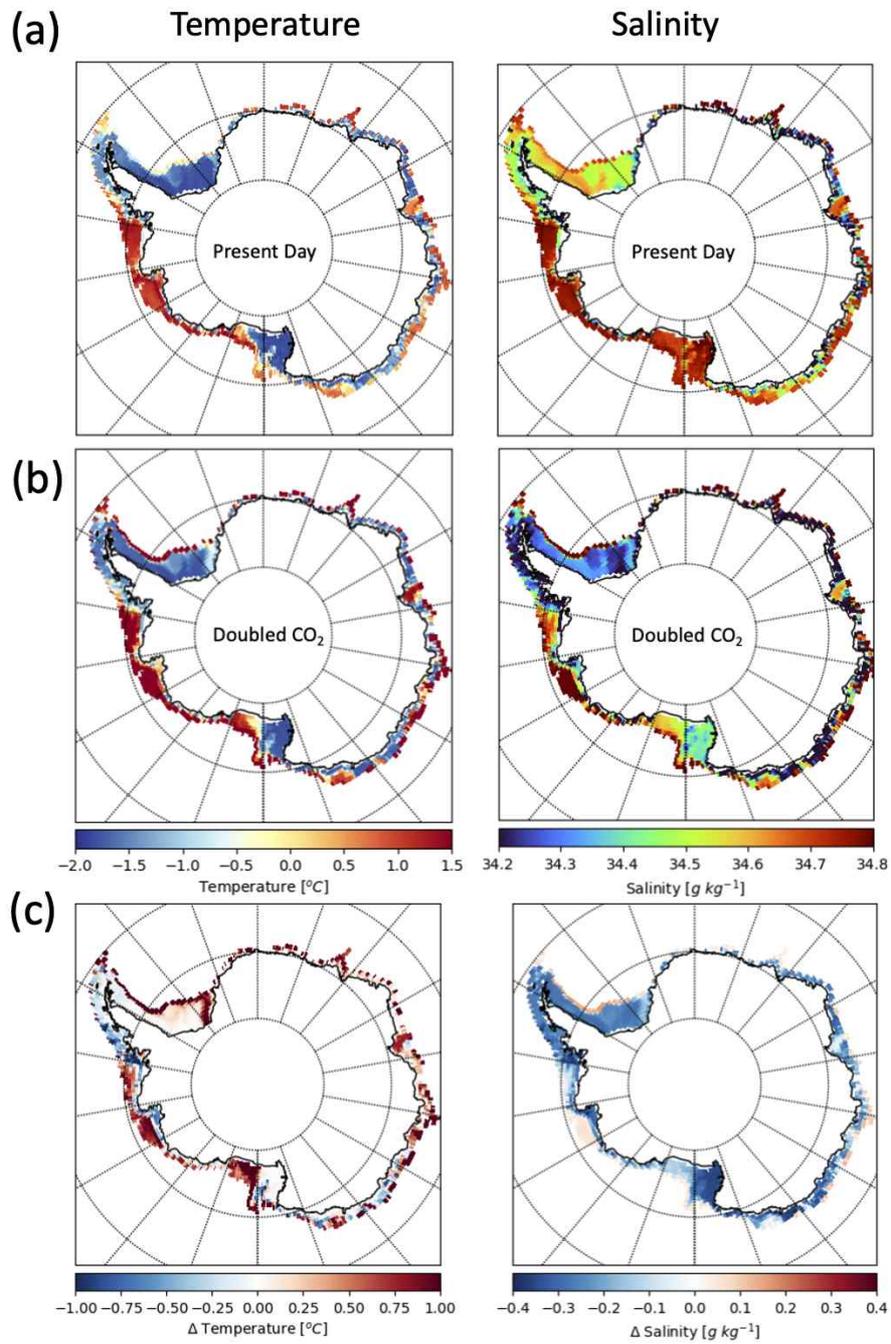


Fig. 3.2.2. Mean temperature and salinity of ASBW in the simulation of (a) Present Day (b) Doubled CO₂ experiment, and (c) difference between Doubled CO₂ and Present Day simulation.

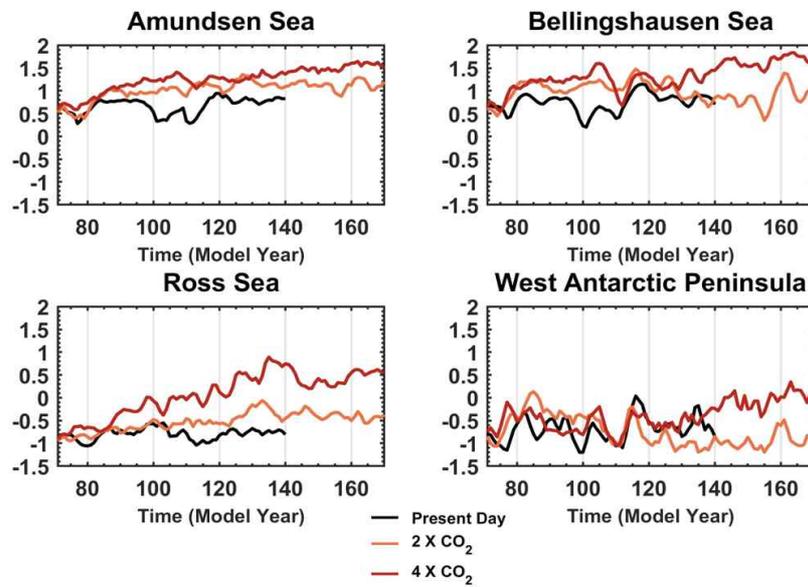


Fig. 3.2.3. Comparisons of ASBW temperature in Present Day, and Doubled and Quadrupled CO₂ experiments.

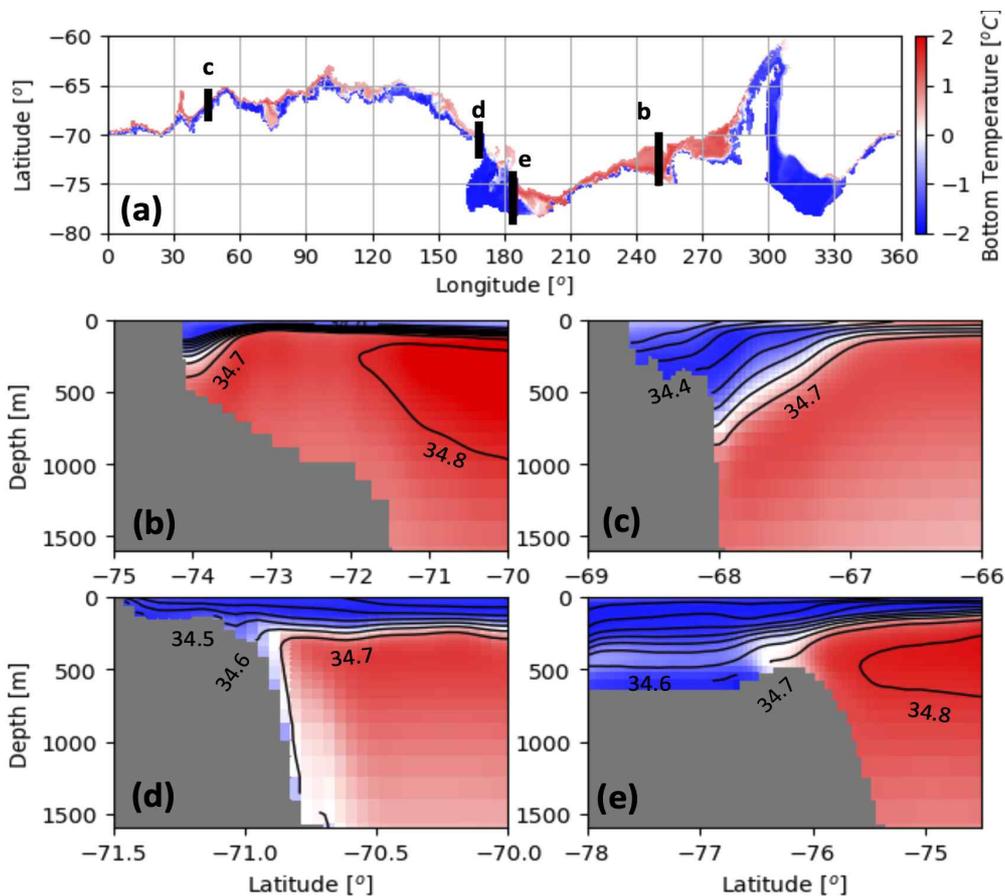


Fig. 3.2.4. (a) Distribution of ASBW temperature. (b)-(e) Cross-slope transects simulated by Present Day experiment. Contours indicate the absolute salinity, and shading denotes potential temperature with the same scaling as in (a). Each location is marked in (a). (b) Warm, (c) Fresh, (d) Dense, and (e) Cool shelf.

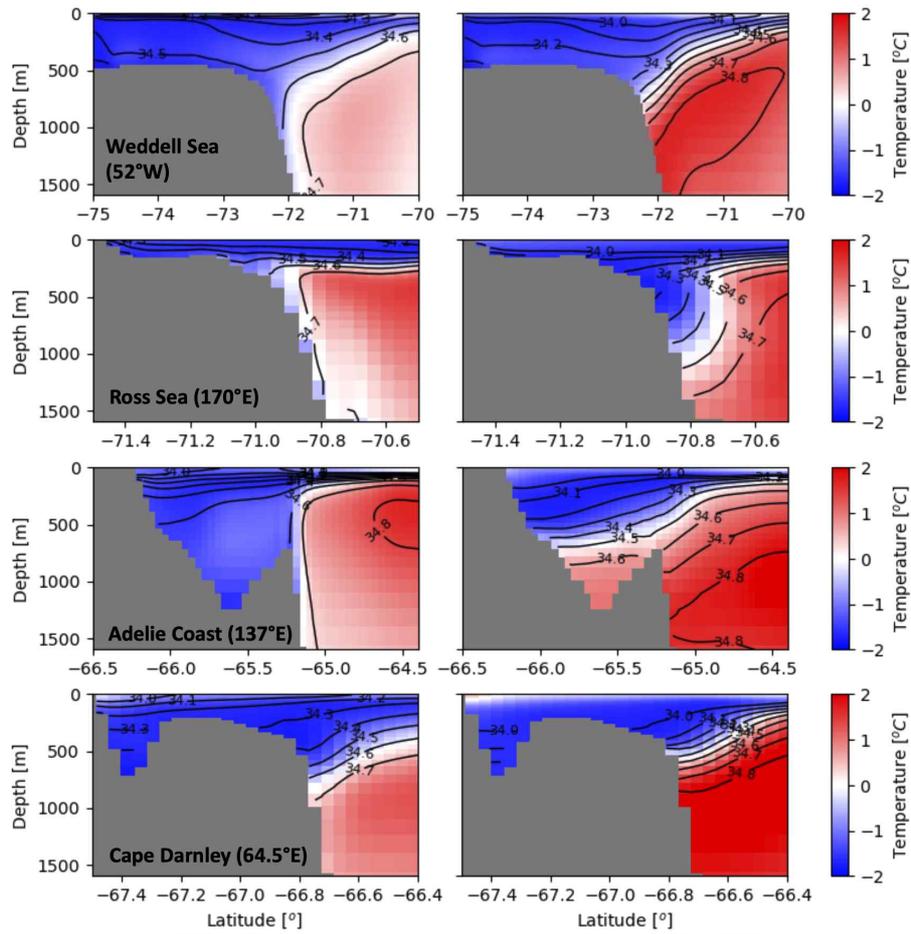


Fig. 3.2.5. Cross-slope transects at the referenced dense water formation regions (Tompson et al., 2018; Choi and Nam, 2022) simulated by Present Day (left) and Doubled CO_2 (right) experiment. From the top to bottom, Weddell Sea, western Ross Sea, Adelie Coast, and Cape Darnley.

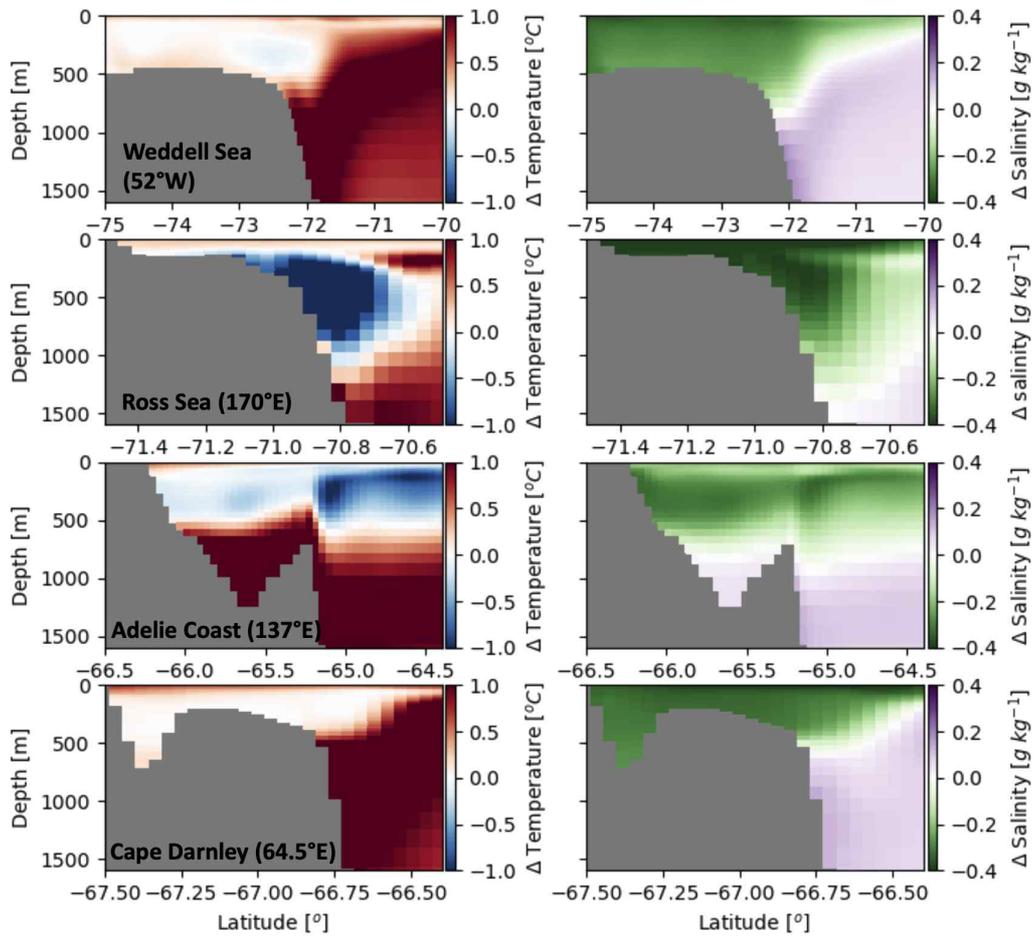


Fig. 3.2.6. Cross-slope transects at the same region as in figure 3.2.5. Temperature (left) and salinity (right) differences between Doubled CO_2 and Present Day (right) experiment.

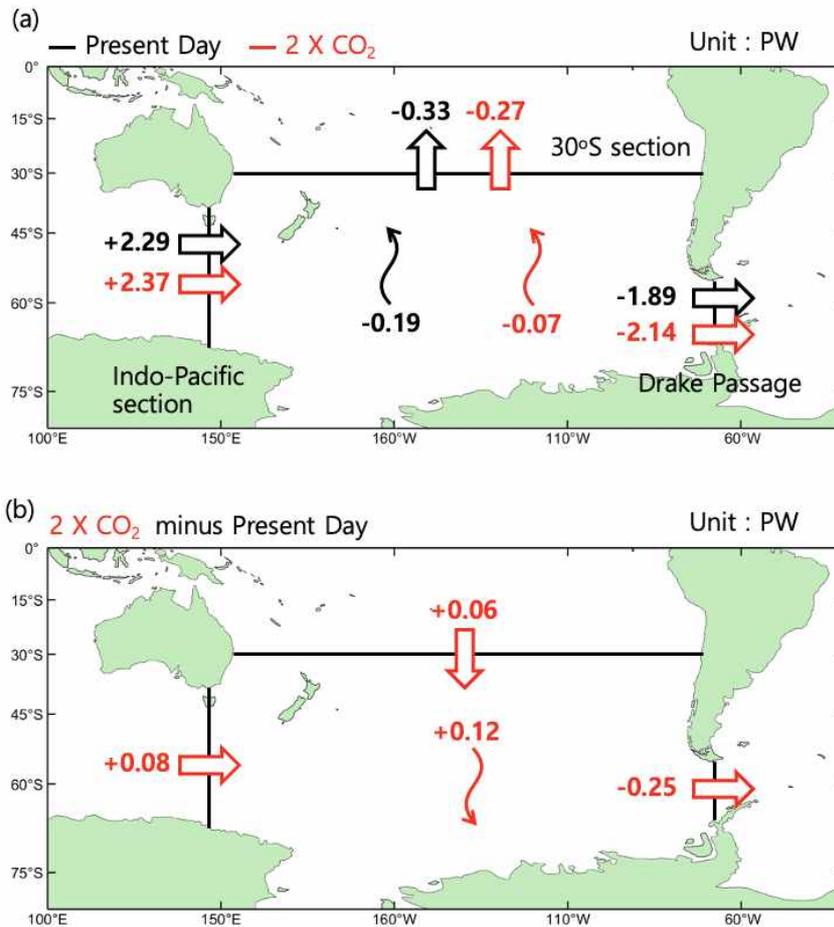


Fig. 3.2.7. Mean heat transport across western, eastern, and northern sections, and surface heat exchange in (a) Present day and Doubled CO₂ experiment and (b) difference between Doubled CO₂ and Present day experiment. Positive (negative) values denote oceanic heat gain (loss) inside the box.

제 3 절 무기탄소 시스템 (박기홍)

요약: 본 연구는 연구기간인 2020년 1월부터 2022년 12월말까지 3년 동안 수행되었으며, 로스해의 현장 관측은 covid-19로 인하여 제한적이었다. 하지만, 현장 시료의 채집 이외에도 인공지능 및 지구시스템 모델을 활용한 연구 분석, 또한 세종기지 기반의 남극 연안 환경의 연구는 계획대로 수행되었다. 연구의 주제는 크게 4가지의 세부 항목으로 진행되었다. 먼저 해수중의 용존 무기탄소내의 탄소안정동위원소(DI13C) 분석 시스템을 구축하고, 이를 통해 남극해 및 로스해에서 인간 기원의 이산화탄소의 분포를 파악해오고 있다. 그리고, 인공지능을 이용하여 기존의 이산화탄소 관측 DB 및 해양환경 변수들을 활용하여 로스해에서 과거 20년간의 용존이산화탄소의 분포를 재현하여, 그 변동성에 관한 연구를 수행하였다. 또한, 지구시스템 모델을 활용하여 남극해 이산화탄소 및 무기탄소의 과거, 현재, 미래를 추정하고, 이를 관측과 비교함으로써 개선하는 작업을 하였다. 마지막으로, 온난화로 급격히 환경이 변화하고있는 세종과학기지를 기반으로 한 탄소순환 연구 또한 수행하였다.

1. 서론

해양은 인간활동으로 발생된 이산화탄소를 흡수하는 탄소 저장고로서, 2021년 글로벌 탄소수지보고서(Global Carbon Budget)에 따르면 지난 10년 동안 발생한 인간기원 이산화탄소의 약 30%가 해양으로 흡수된 것으로 보고되었다(Friedlingstein et al., 2022). 남극해의 면적은 전체 해양 면적의 약 20%를 차지하고 있지만, 전체 해양에서 흡수되는 인간기원 이산화탄소의 약 40%를 흡수하는 중요한 해역이다(Orr et al., 2001; DeVries 2014). 특히, 본 연구가 수행된 남극 로스해(Ross Sea) 해역은 대기중의 이산화탄소를 강하게 흡수하는 해역으로, 연간 약 7.5~13 Tg의 탄소가 흡수되는 것으로 보고된 바 있다(Arrigo et. al., 2008; DeJong and Dunbar, 2017). 해양에서 흡수되는 탄소의 양을 추정하기 위해서는 현장 관측이나 모델에서 모의된 표층 이산화탄소 분압 자료가 요구된다. 해양의 표층 이산화탄소 분압은 이산화탄소의 몰분율(mole fraction; $x(\text{CO}_2)$)에 총압력을 곱한 $p\text{CO}_2$ 로 표현하거나, 실제 환경에서의 비이상적 거동을 고려한 플레시티(fugacity of CO_2 ; $f\text{CO}_2$)로 표현할 수 있다.

남극해는 지리적인 특수성으로 인해 타 해역에 비해 $f\text{CO}_2$ (또는 $p\text{CO}_2$)의 현장 관측 자료가 부족한 해역으로, 특히 여름철을 제외한 나머지 계절의 현장 관측자료가 매우 부족하다(Fay et al., 2018). 이러한 현장 관측 자료의 부족은 모델을 통해 모의된 결과의 정확성을 감소시키는 주요 요인으로 작용한다. 최근 무인 관측 장비(무인선, 관측 부이 등)의 개발로 계절에 상관없이 지속적인 남극해 현장 관측 수행이 가능해 졌지만, 해류의 영향으로 관측자료의 지역적인 편향이 생길 수 있다(Sutton et al., 2021; Williams et al., 2017). 현재까지 보고된 각 플랫폼별 남극해 $p\text{CO}_2$ 관측치(혹은 추정치)의 불확실도는 현장 관측과 관측 부이에서 각각 2 μatm , 11 μatm 으로 보고되었다(Bakker et al., 2016; Williams et al., 2017).

Breiman (2001)의 연구에서 제시된 랜덤 포레스트는 기계학습의 한 종류로, 다수의 결정 트리(decision tree)들을 학습하는 앙상블 방법이다. 이 알고리즘은 트리 수와 학습집합의 크기 등에 의해 랜덤 포레스트의 성능과 예측 결과의 정확성이 결정되기 때문에 최적의 트리 수와 학습집합의 크기를 결정하는 것이 중요하다(Ma & Fan, 2017). 현재까지 이 알고리즘은 과학 분야를 포함한 모든 연구분야에서 널리 활용되고 있다. 그중 현장 관측자료와 인공위성 자료를 랜덤 포레스트에 학습시켜 멕시코 만의 표층 pCO₂를 추정한 Chen et al. (2019)의 연구에서 예측 결과의 불확실도는 10 μatm 이하로 보고되었다. 또한 랜덤 포레스트와 신경망 모델(Self-organizing maps-feed forward network; SOM-FFN)을 사용하여 추정된 남극해 pCO₂의 평균 제공근 편차가 각각 14.84 μatm, 16.45 μatm으로, 랜덤 포레스트의 예측 결과가 SOM-FFN의 그것과 크게 다르지 않음이 확인되었다(Gregor et al., 2017).

로스해와 남극해의 확인된 용존이산화탄소의 분포 및 그 시공간적 변동성은 기후변화와 밀접한 관련을 가지고 있으며, 이는 인간기원 이산화탄소의 주 흡수원인 남극해 역할의 변화와도 밀접한 연관을 가지고 있다. 따라서, 인간기원탄소의 추적자인 탄소안정동위원소비를 관측시스템을 구축 및 현장시료를 분석하여 이에 대한 모니터링을 수행하였다. 또한 지구시스템 모델을 활용하여, 이러한 관측 결과를 모델을 통한 현재의 상태를 이해하고, 미래의 남극해의 탄소흡수력 변동 예측에 활용하였다.

2. 재료 및 방법

가. 용존무기탄소 및 탄소안정동위원소의 분석

남극해의 용존 무기탄소 내에 인간 기원의 무기탄소의 비율을 분석하기 위해 Cavity Ring-Dwon Spectroscopy (CRDS)를 이용한 DI13C 분석 시스템을 구성하였다. 시스템은 무기탄소에 산을 주입하여 무기탄소를 이산화탄소로 변환하는 전처리 시스템 (APOLLO 사의 AS-D1 모델)을 PICARRO사의 CRDS인 G2131i에 연결하여 구성하였다(Fig.3.3.1). 표준물질 분석 및 Isotope Ratio Mass Spectrometry의 분석 결과와 비교를 통해 장비의 정밀도와 정확도를 분석하였으며, 그 결과 R²=1로 안정적인 결과를 내고있음을 확인하였다(Fig.3.3.2).

세종과학기지에서는 시료를 연구소의 실험실로 운송한 후 상기의 CRDS 시스템을 이용하여 무기탄소 및 동위원소비를 분석함과 동시에, 마리안 소만의 무기탄소 변동의 고해상도 관측을 위해 현장에 pCO₂ 시스템과 (Fig.3.3.3) 동시에 AIRICA (Automated Infra-Red Inorganic Carbon Analyzer)를 기지내에 설치하여 현장에서 마리안소만의 용존 무기탄소의 분석을 가능하게 하였다. AIRICA는 5ml의 소량의 시료로 15분당 하나의 시료의 분석이 가능하여 준실시간 모니터링이 가능하다. 현재 장비의 분석은 LI-800 이산화탄소 분석기를 통해 이루어지고 있으며 해상도는 ±2 μmol/kg, 정확도는 ±4 μmol/kg이다.

나. 인공지능을 활용한 로스해 표층이산화탄소의 분포 재현

ㄱ) 격자데이터

연구에서 사용된 데이터는 주로 원격감지데이터를 사용하였다. 표층 혼합층의 깊이(mixed

layer depth; MLD)는 동화모델(GLORYS12V1; Ferry et al., 2010)의 산출물을 사용하였으며, 데이터의 시간적 범위는 1998년부터 2018년까지이다. 데이터의 공간분해능은 동일한 0.25°로 재격자화하였으며, 시간분해능은 모델 훈련 및 검증의 경우엔 8 days, 모델 예측의 경우엔 1 month로 평균을 취하였다. 또한, 모델 훈련을 위해 SOCAT v3 fCO₂ 자료가 사용되었다 (Bakker et al., 2016).

ㄴ) 입력데이터의 변환과 변수추가

모델 개발에 앞서 원시 데이터의 누락된 값을 처리하고 데이터를 변환하여 얻은 데이터셋을 모델의 입력변수(feature)로 사용하였다. 자료의 비대칭도(skewness)가 큰 MLD와 클로로필(Chl-a)은 정규분포에 가까워지도록 상용로그 변환을 하였다(Nakaoka et al., 2013; Landshuster et al., 2014; Gregor et al., 2017). 자료의 계절변화를 표현하기 위하여 날짜 순서(day of year)를 변수로 활용한 연구(Zeng et al., 2014; Gregor et al. 2017)가 있으나 본 연구에서는 월(month)의 사인함수(sin_t)와 코사인함수(cos_t)를 추가변수로 활용하였다: $\cos_t = \cos(2\pi \times \text{month} / 12)$, $\sin_t = \sin(2\pi \times \text{month} / 12)$.

최종적인 입력변수는 총 구름의 양(total cloud cover; TCC), 해빙 농도(sea ice concentration; SIC), 표층수온(sea surface temperature; SST), 풍속(Wind), 해양 Nino 인덱스(oceanic Nino index; ONI), cos_t, sin_t, log₁₀(Chl-a), log₁₀(MLD)이며, 출력변수(label)는 fCO₂이다. 이 데이터를 분할하여 80%는 모델의 훈련에, 20%는 모델 테스트에 이용하였다. 본 연구에서는 난수의 시드(random seed)를 달리하여 10가지 서로 다른 분할된 훈련-테스트 데이터셋을 준비하였다.

ㄷ) 랜덤 포레스트 회귀

배깅(bagging)은 부트스트랩 집합체(bootstrap aggregation)로부터 온 말이다. 랜덤 포레스트는 의사결정나무(decision tree)에 배깅(bagging)을 적용한 모델이다(Breiman, 2001). 개별나무의 예측 값의 평균을 취하여 실제 값을 예측한다. 데이터 탐색과 모델 개발은 주로 파이썬(Python) 언어를 사용하여 수행하였다. Scikit-learn 패키지와 함께 여러 다른 add-on 패키지를 이용하여 모델 구축 및 튜닝 그리고 정확도 평가를 하였다. 랜덤 포레스트 회귀모델구축을 위해 의사결정나무의 개수는 500으로 설정하였으며, 랜덤 포레스트의 다른 파라미터들은 파이썬에서 제공되는 RandomForestRegressor 함수의 기본 설정 값을 사용하였다. 또한, 최적의 분할을 위해 고려할 최대 입력변수의 개수를 전체특성의 수로 하여 모든 특성을 고려하도록 설정하였지만, 동시에 bootstrap sampling을 하도록 설정하였기 때문에 여전히 무작위성은 존재한다.

3. 결과 및 고찰

가. 용존무기탄소 및 탄소안정동위원소의 분석

2020년 남극항해시 채집한 해수 시료를 이용하여 남극해의 용존 무기탄소 및 그 동위원소비를 측정하였다 (Fig. 3.3.4). 이를 통하여 남극해 표층의 용존무기탄소와 그 동위원소비의 공간적인 분포를 이해할 수 있었다. 또한 탄소동위원소비는 화석연료 기원의 이산화탄소는 다른 자연의 이산화탄소 소스와 확연히 구분이 되는 특성으로 인해 이를 활용하여 인간기원(화석

연료 기원)의 이산화탄소가 남극해에 흡수되는 양을 추정하는데 활용된다.

아래의 현장관측자료와 기존의 연구자들의 관측결과를 저장한 데이터베이스 (GLODAP)의 자료를 통하여 로스해에서 인간기원 이산화탄소 흡수력을 추정하였다. 그 결과 주로 100m 이상의 수심에서 인간기원탄소가 분포하고 있음을 알 수 있었다 (Fig. 3.3.5). 또한 로스해 서편보다 동편으로 갈수록 인간기원 이산화탄소의 양이 더 많이 존재함을 알 수 있었다.

우선 로스해의 인간기원 이산화탄소의 정량화를 위해 2011년의 GLODAP 관측 자료와 2020년 아래관측 탄소안정동위원소비($\delta^{13}\text{C}$)의 자료를 비교하였다. 인간기원 이산화탄소의 $\delta^{13}\text{C}$ 은 자연상태의 $\delta^{13}\text{C}$ 보다 뚜렷히 낮은 값을 가지고 있기 때문에, 인간기원 이산화탄소의 유입은 해양의 $\delta^{13}\text{C}$ 값을 감소시키는 요인이 된다. 이를 Suess effect라고 하며 이를 확인하기 위해서 multiple linear regression을 활용하여 과거와 현재의 $\delta^{13}\text{C}$ 을 추정하였다. multiple linear regression에는 수온, 염분, 산소, 그리고 총 알칼리도가 독립적으로 활용되었다 (Fig. 3.3.5). 그 결과 로스해의 대부분 해역의 100m이내의 수층에서는 과거에 비해 현재의 $\delta^{13}\text{C}$ 가 높은 값을 가지고 있음이 확인 되었다. 이는 표층에서는 생물활동에 의해 (식물 플랑크톤의 광합성 활동은 해수 중 $\delta^{13}\text{C}$ 를 높임) 영향을 받고 있음을 알 수 있었다. 100m 이하의 수심에서는 과거의 $\delta^{13}\text{C}$ 가 현재보다 높은 것으로 확인이 되었으며, 이는 100m보다 깊은 수심에서는 인간기원 이산화탄소의 시그널을 볼 수 있는 증거라고 보여진다. 특히 로스해의 동쪽으로 갈수록 인간기원 이산화탄소의 유입량이 서편에 비해 상대적으로 더 많은 것으로 확인이 되었다.

Suess effect를 활용하여 이산화탄소의 유입량을 도출해보면 (Fig. 3.3.6) 인간기원 이산화탄소의 분포를 관찰할 수 있는 100m이상의 수층에서 약 10년 동안 평균 $11 \pm 6 \text{ umol/kg}$ 의 인간기원의 이산화탄소가 유입되어오고 있음을 확인하였다. 이를 로스해에서 매년 약 1 umol/kg 의 인간기원 이산화탄소가 유입되고 있음을 알 수 있다.

남극 세종과학기지의 마리안소만은 빙하의 후퇴가 급격히 일어나는 지역으로 현장조사를 통해 4정점에서 용존무기탄소의 농도와 그 탄소안정동위원소비를 측정하였다. 각 정점별 표면미세층과 표층 두 곳의 수심에서 해수를 채집하였으며 용존무기탄소의 농도 및 $\delta^{13}\text{C}$ 는 Fig. 3.3.7과 같았다. 모든 관측 정점에서 표면미세층의 무기탄소의 농도가 표층보다 높은 것으로 확인이 되었고, $\delta^{13}\text{C}$ 은 오차범위 내에서 일정한 값을 보이고 있었다.

나. 인공지능을 활용한 로스해 표층이산화탄소의 분포 재현

인공지능 기법을 이용하여 서남극해 용존무기탄소 분포의 시공간적인 특성을 재현하고 연구하였다. 이는 SOCAT의 1998년부터 2018년까지 21년간의 남극해 $f\text{CO}_2$ 의 분포자료를 활용하였으며, 제한된 관측자료의 한계로 인한 탄소의 변동성 이해의 제한을 기계학습을 이용하여 활용하는 연구다. 21년간의 서남극해 및 로스해의 월별 표층이산화탄소의 평균적인 분포의 재현 결과는 Fig. 3.3.8에 도시하였다. 이를통해 로스해는 해빙이 열리는 12월부터 2월까지 하계기간 동안 자료의 재현이 가능하였으며, 12월에 식물플랑크톤의 blooms을 통해 낮은 $f\text{CO}_2$ 가 전역에 분포함을 알 수 있었고, 이후 급격히 이산화탄소의 농도가 증가하였다. 12월은 해빙 주변에서 특히 낮은 $f\text{CO}_2$ 가 분포함을 알 수 있었고, 1월에는 로스해의 동편에 낮은 이산화탄소가 분포함을 추정할 수 있었다.

표층 이산화탄소의 분포에 가장 큰 영향을 미치는 인자는 클로로필 농도임을 RF분석의 결과 알 수 있었으며, 해빙의 영향은 지역적으로는 중요할 수 있으나, 로스해 전역의 연간 분포의 변동성에는 다른 수온, 풍속, 운량, 혼합층 깊이 등 다른 변수에 비해 가장 적음을 알 수 있었다(Fig. 3.3.9).

로스해의 21년간 하계기간의 표층이산화탄소의 시공간 분포를 들여다보면, 12월 - 3월의 하계기간 중 1월에 이산화탄소의 흡수가 강하고 광범위하게 일어나고 있음을 확인할 수 있었다. 또한 2월부터는 그 농도가 다시 증가하기 시작하였다. 로스해의 동편과 서편 양 연안에서 다른 해역보다 눈에 띄는 낮은 이산화탄소가 분포함을 알 수 있으며, 특히 3월에는 남극의 가을 철임에도 불구하고 테라노바만 주변에 상당히 낮은 이산화탄소의 농도가 지속되고 있음을 알 수 있다(Fig. 3.3.10).



Characteristics of inorganic carbon system in the West Antarctic Ocean

Keyhong Park

Division of Ocean Sciences, KOPRI

Abstract: This study was conducted for three years of research period, from January 2020 to the end of December 2022. During the period, field observations in the Ross Sea were limited due to covid-19. However, in addition to the collection of sea water samples, research and analysis using artificial intelligence and Earth system models, as well as research on the Antarctic coastal environment based on the King Sejong Station were conducted. The subject of the study was largely divided into four sub-items. First, a carbon stable isotope ($\delta^{13}\text{C}$) analysis system in dissolved inorganic carbon in seawater was established, and through this, the distribution of anthropogenic carbon dioxide in the Southern Ocean and the Ross Sea has been estimated. Also, using an artificial intelligence, the distribution of dissolved carbon dioxide over the past 21 years was reconstructed in the Ross Sea using the existing carbon dioxide observation data base data and marine environmental variables. This enables us to understand a long-term spatio-temporal distribution of CO_2 in the Ross Sea. In addition, the Earth system model was used to estimate the past, present, and future of carbon dioxide and inorganic carbon in the Southern Ocean. The inorganic carbon cycle study was also conducted based on the King Sejong Station, King George Island, where the environment is rapidly changing due to the global warming.



Fig. 3.3.1 Measurement system for dissolved inorganic carbon and d13C analysis.

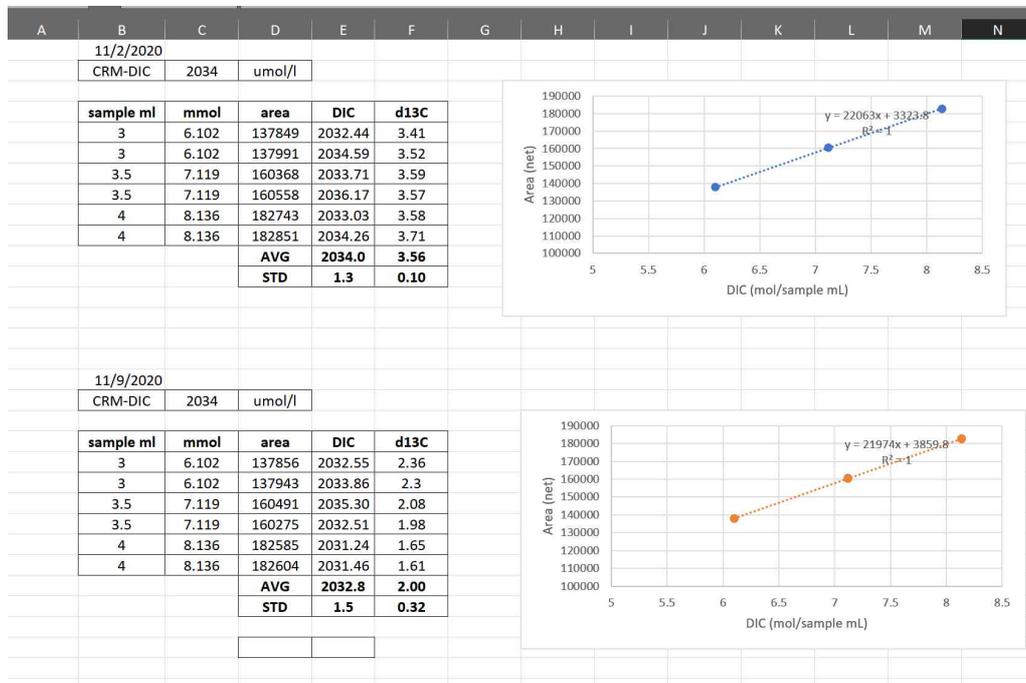


Fig. 3.3.2. A robust calibration result of DIC and d13C using the in-house ASD1-CRDS measurement system.

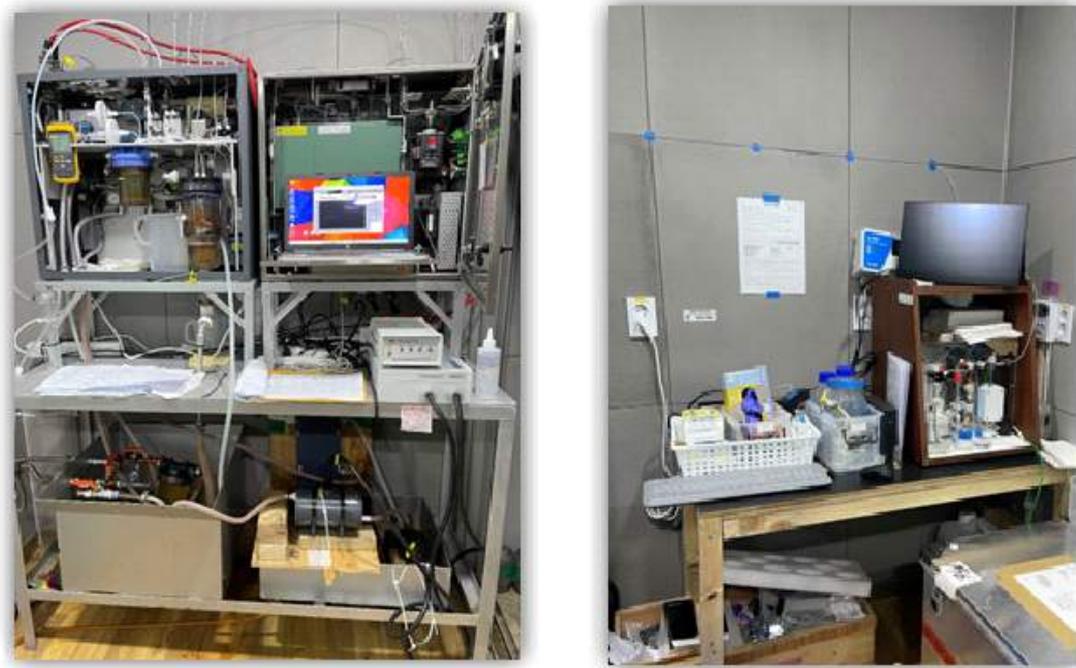


Fig. 3.3.3. Carbon dioxide continuous observation system (left) and semi-realtime dissolved inorganic carbon observation system (right) installed in King Sejong Station.



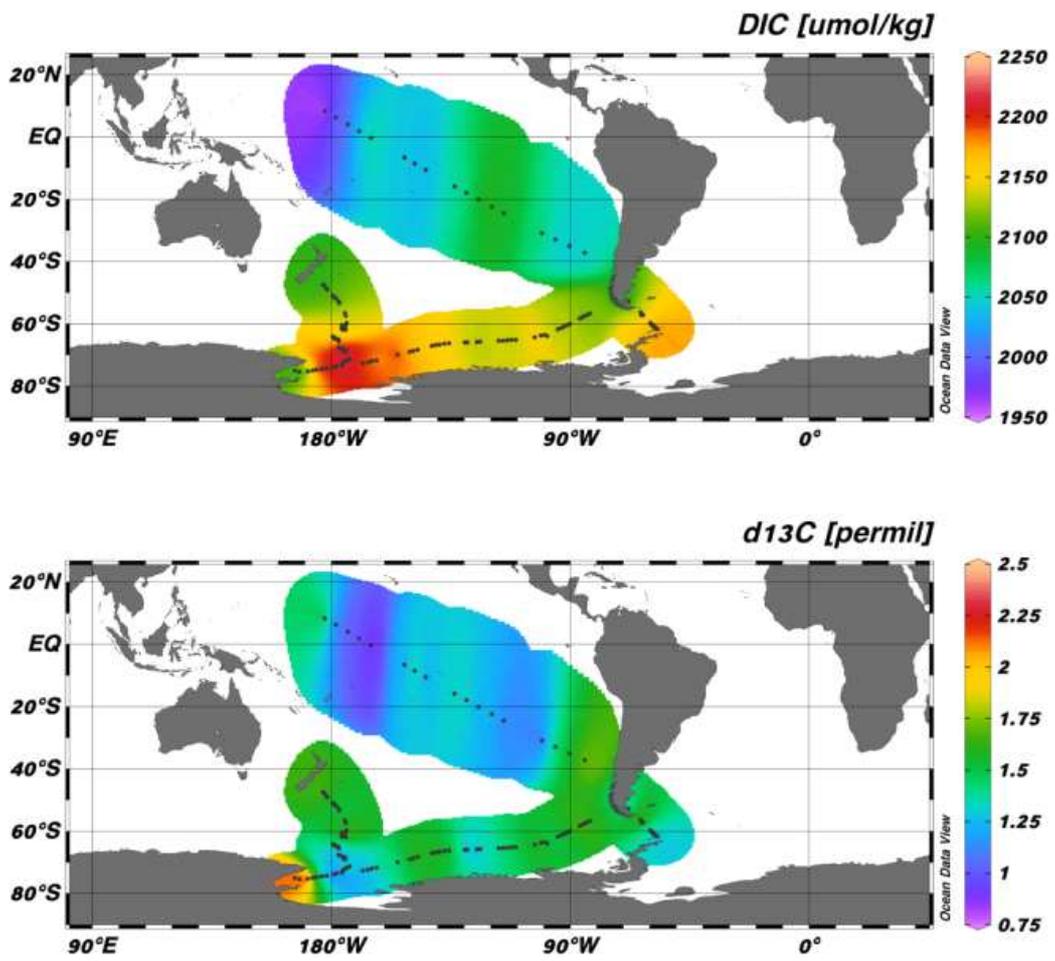


Fig. 3.3.4. Spatial distribution of DIC and d13C measured from R/V Araon's research cruise.

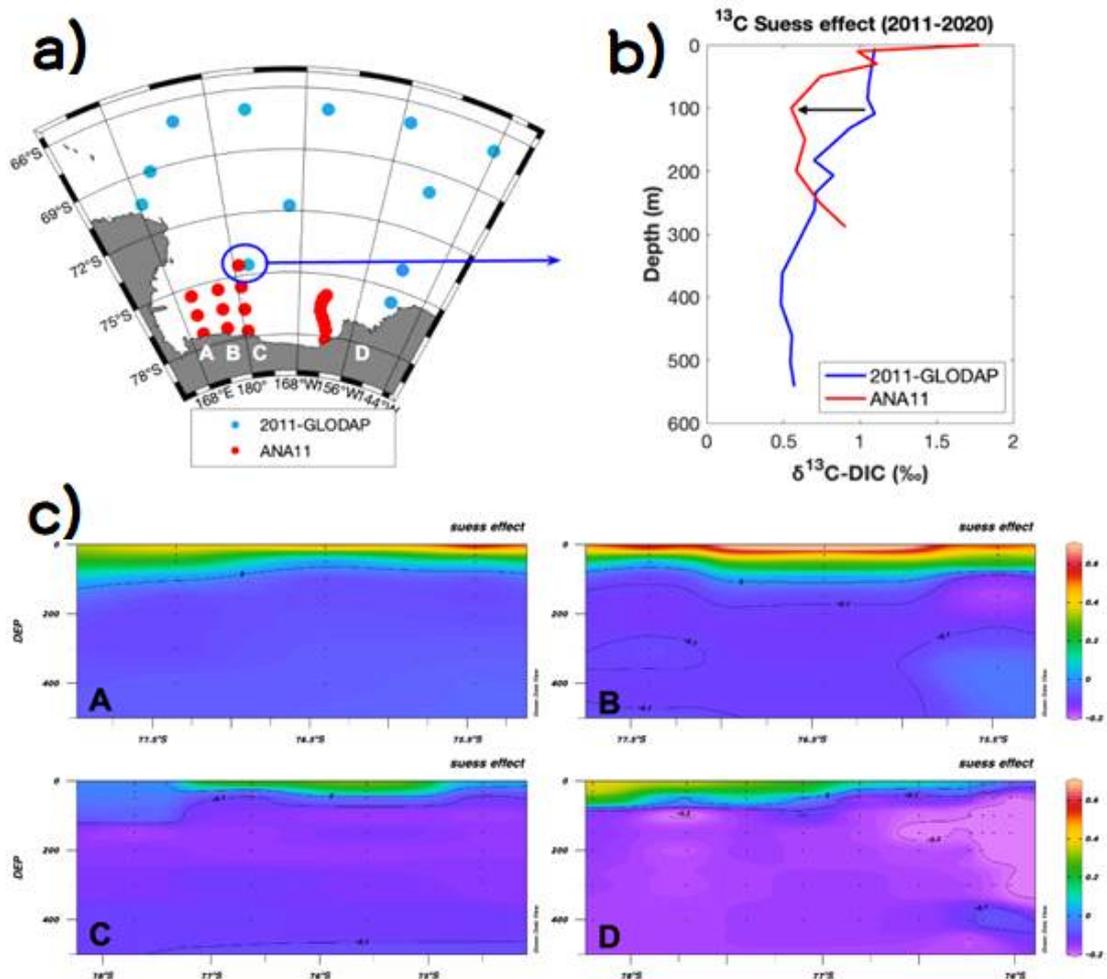


Fig. 3.3.5. (a) sea water sampling stations in the Ross Sea. (b) A comparison of vertical distribution of $\delta^{13}\text{C}$ between 2011 GLODAP data and Araon's 2020 cruise data. (c) Calculated vertical distribution of Suess effect in the Ross Sea. There is a noticeable intrusion of anthropogenic carbon is estimated below the 100 m.

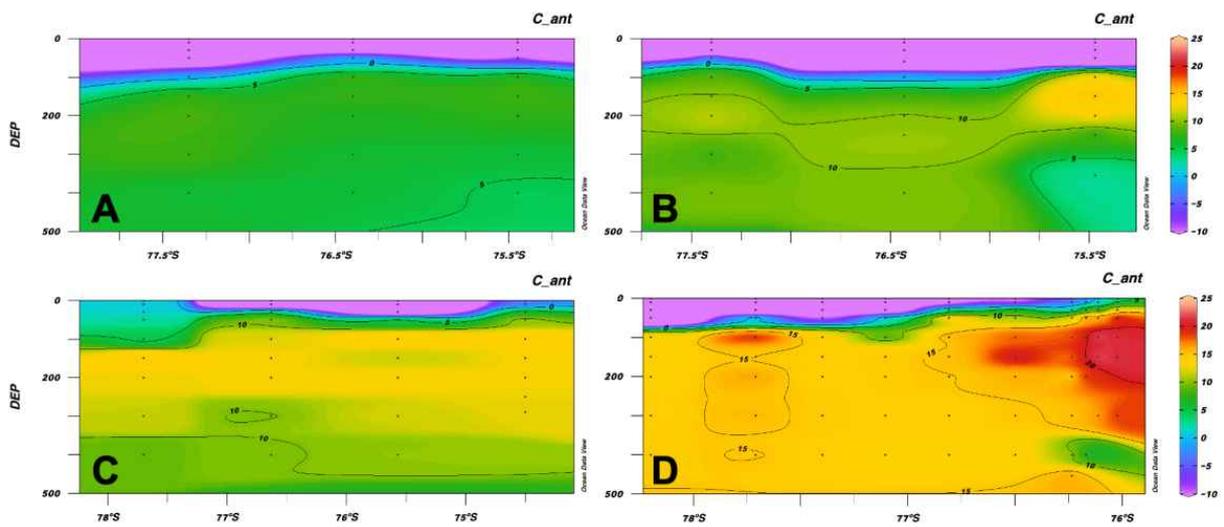


Fig. 3.3.6. Estimated anthropogenic carbon dioxide distribution in the Ross Sea.

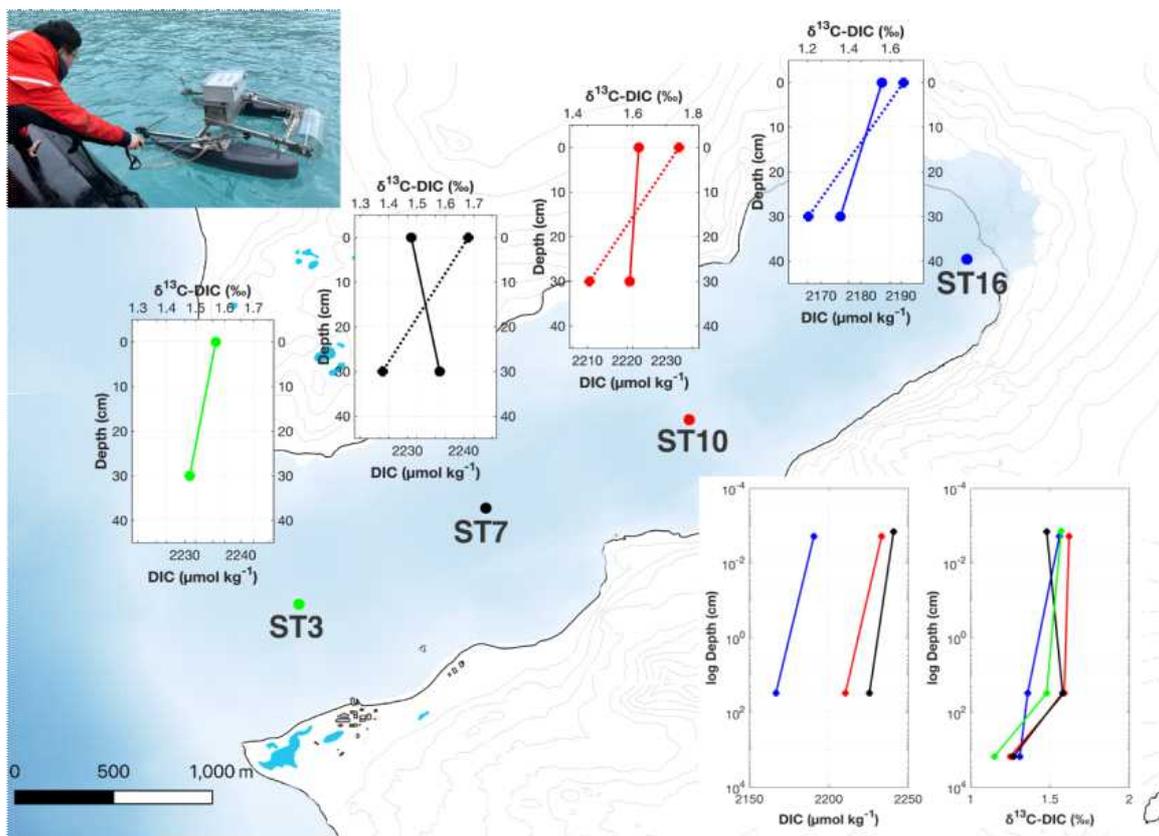


Fig. 3.3.7. Observation results of DIC and d13C measured in the 4 stations in Marine Cove, King George Island.

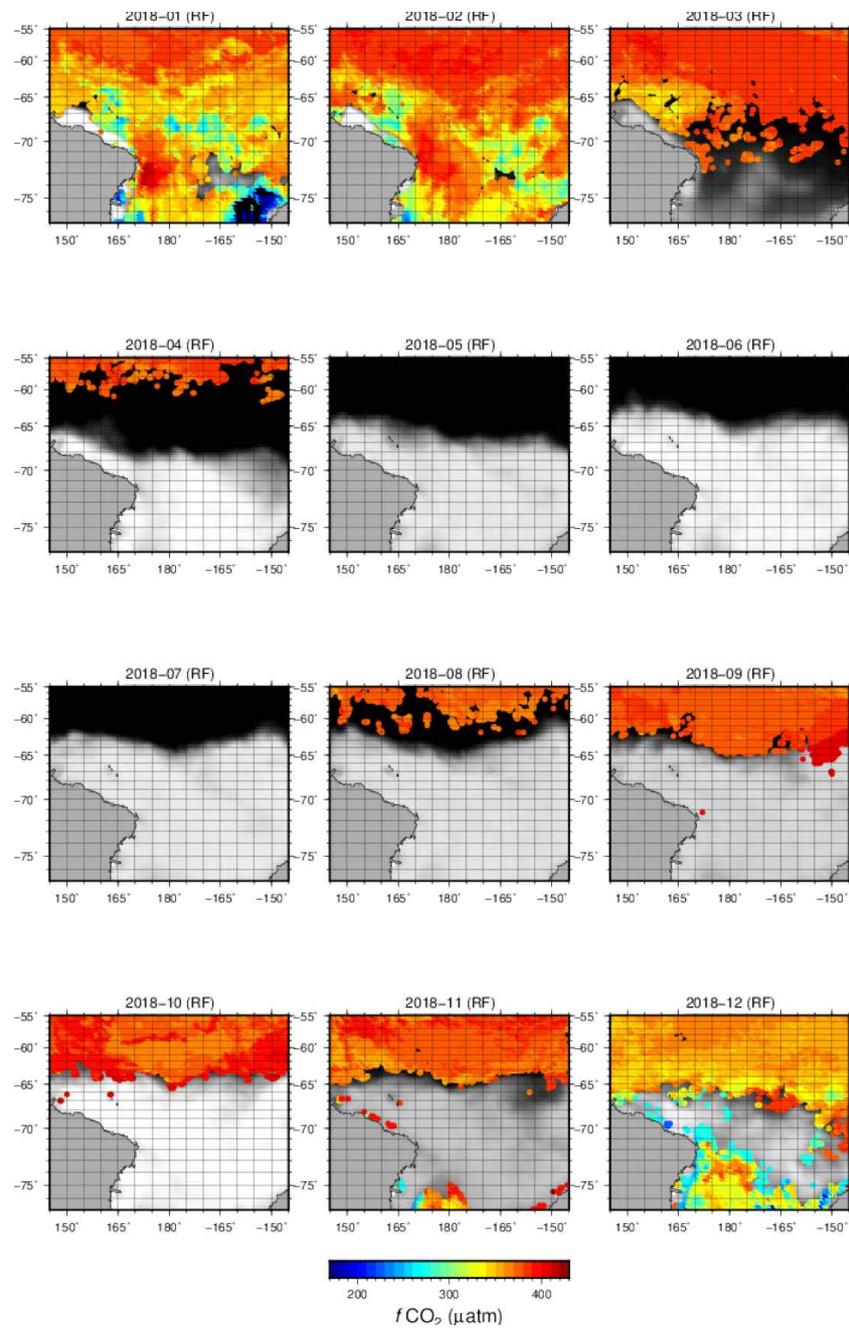


Fig. 3.3.8. Reconstruction of monthly surface $f\text{CO}_2$ distribution in the Ross Sea using a machine learning technique. (a result of 2018).

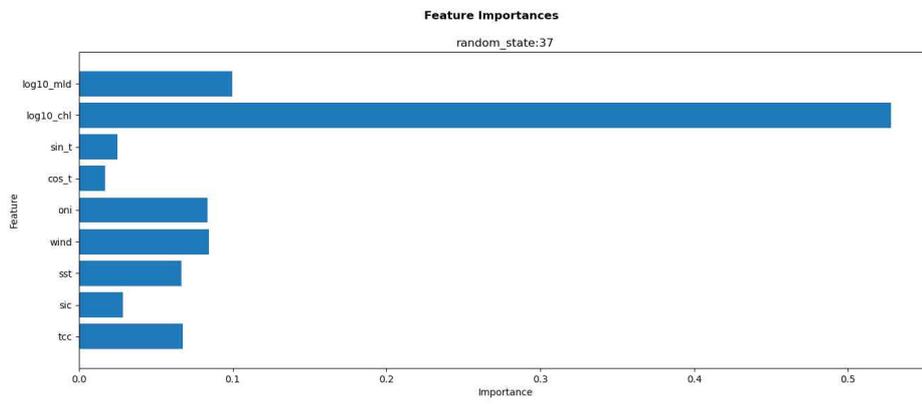


Fig. 3.3.9. Relative importance of environmental variables used in fCO₂ estimate.

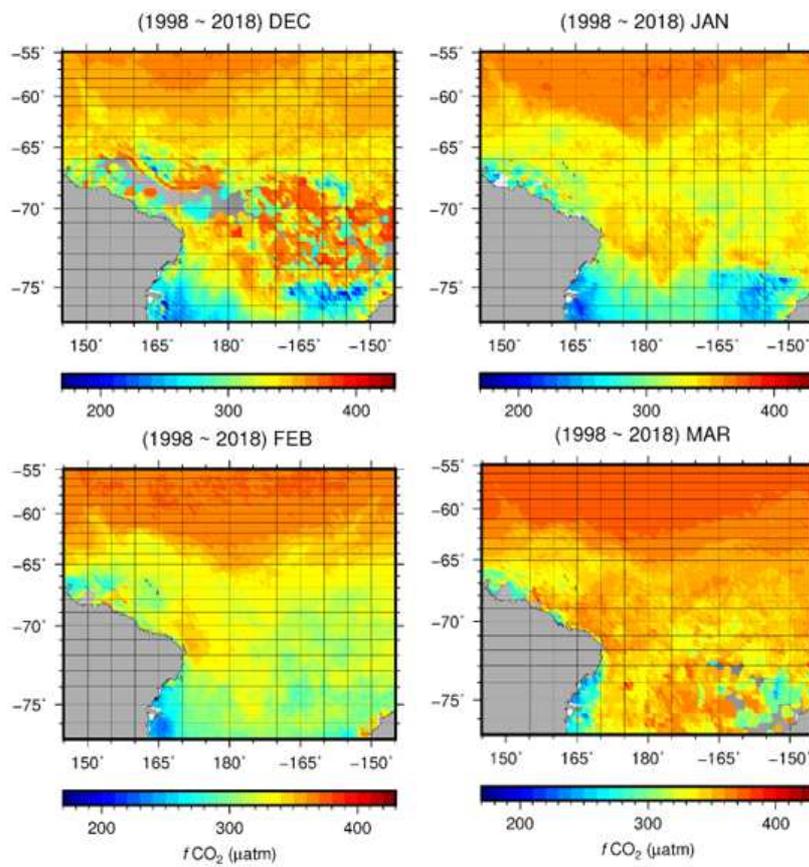


Fig. 3.3.10 Monthly surface CO₂ distribution in the Ross Sea reconstructed from random forest technique. The results are 21-year mean distribution.

제 4 절 남극해에서의 용존 유기탄소화합물의 거동 및 환경변수 (영양염, 미량금속 등) 분포 특성 파악 (정진영)

요약: 본 연구사업 1단계 연구기간(2020년 1월부터 2022년 12월말) 동안, 쇄빙 연구선 아라온을 활용한 두 차례의 남극해 현장관측을 수행하였고, 해수 시료내의 용존 유기탄소화합물, 영양염을 분석하여 남극해 해양 탄소순환 이해 증진을 위한 자료를 획득하였고, 대기 에어로졸 내의 수용성 유기탄소화합물 분석도 병행하여 해양-대기간 탄소순환에 대한 이해의 폭을 넓혔다. 또한 남극해의 일차생산량의 제한요소로 알려져 있는 미량금속 철 성분에 대한 연구를 수행하기 위해 미량금속 관측을 위한 청정 해수시료 채수시스템 구축 및 고도화를 진행하여 남극해에서의 미량금속 연구를 가능하게 할 바탕을 마련하였다. 뿐만 아니라, 연구해역의 문헌 및 기존 연구결과 조사를 통해 남극 로스해 해역에서 약 48.8 Tg의 탄소가 식물플랑크톤에 의해 생산되고 약 39 Tg의 탄소와 3 Tg의 탄소가 각각 입자상과 용존 유기탄소화합물 형태로 유광층 내에 존재하고 있음이 확인되었다. 또한 남극 로스해 수층내에서는 식물플랑크톤에 의해 생산된 39 Tg의 입자상 유기탄소화합물 중 약 15-20 Tg의 탄소가 심층으로 수송 및 저장되고 있으며, 용존 유기탄소화합물의 형태로는 약 4 Tg C이 저장되고 있다는 것을 알 수 있었다. 또한 아문젠 해역 닛슨 빙봉 앞에서는 빙봉 용빙수에 의한 영향으로 고농도의 철 성분이 표층으로 공급되고 있음을 확인하였고, 향후 체계적인 미량금속 자료 확보와 유기탄소화합물 자료와 연계한 자료 해석을 통해 남극해 탄소순환에 대해 심도있는 해석이 진행될 것으로 기대된다.

1. 서론

남극해는 세계 해양 심층수의 주요 공급원이며, 남극대륙 주변의 강한 바람에 의한 용승작용을 통해 심층수가 해수표면으로 돌아오는 주요 경로를 제공한다(Marshall and Speer, 2012). 이렇게 용승된 심층수는 수세기 동안 대기와의 접촉하지 않았기 때문에 많은 양의 대기 이산화탄소를 흡수할 수 있다(Khatriwala et al., 2009). 또한 남극해에서 용승된 심층수에는 수세기 동안 유기물이 분해되어 심층에 축적된 많은 양의 영양염을 포함하고 있기 때문에, 전지구적 해양 측면에서 생물학적 생산의 대부분을 결정할 수 있는 영양염의 공급원으로도 잘 알려져 있다(Sarmiento et al., 2004). 기후 시스템에서 남극해의 이러한 핵심적인 역할을 고려할 때 남극해 연구의 중요성은 더욱 증대되고 있다.

고위도 지역에서 해빙으로 둘러싸인 개방해역, 즉 폴리냐는 증가하는 봄철 태양 복사에 노출되는 최초의 극지 해양시스템이기 때문에 높은 일차 생산력을 보인다(Arrigo et al., 2003, 2012; Yager et al., 2012). 남극 대륙 주변의 폴리냐는 남반구 여름철(12월~2월)에 강한 일차 생산력을 보이며, 대부분 1월에 절정을 이룬다. 생물학적 생산량이 높은 폴리냐는 로스해와 아문젠 해에 위치한 반면, 동남극에 위치한 폴리냐의 연간 일차생산력은 일반적으로 낮다(Arrigo and van Dijken, 2003). 서남극에 위치한 아문젠 폴리냐는 좋은 광조건(Park et al., 2017), 고온, 고염, 영양염이 풍부한 남극순환심층수(Circumpolar Deep Water)의 유입에서 기인한 퇴적

물과 빙하 용빙수에서 공급된 철(Fe)성분과 질산염 등 다른 영양염의 공급으로 인해 남극대륙 주변에서 확인된 37개의 폴리나 중에서 가장 높은 일차생산력을 보이는 폴리나이다(Arrigo et al., 2012; Dutrieux et al., 2014; Sherrell et al., 2015, Manen et al., 2022). 따라서 아문젠 해는 인위적인 활동의 영향을 적게 받을 뿐만 아니라 계절적인 일차생산력이 높은 해역이기 때문에 생물학적 생산과 유기탄소화합물의 직접적인 연관성을 모니터링하기에 이상적인 조건을 가지고 있는 해역이다. 그럼에도 불구하고 이 해역에서의 유기탄소화합물의 연구는 극히 제한적인 실정이다(Jeon et al., 2021). 본 연구의 목적은 남극해 해수 및 대기 에어로졸에 존재하는 용존 유기탄소화합물의 분포 특성을 이해하고 그 분포에 영향을 미치는 환경변수(영양염, 철 성분 등)와의 연관성을 조사하여 남극해의 용존 유기탄소화합물의 거동을 파악하고자 하였다.

2. 재료 및 방법

가. 시료채취

(1) 해수 시료

남극해에서의 해수시료 채취는 쇄빙연구선 아라온을 활용하여 2020년에는 ANA11B 항해(2020년 12월 18일~2020년 12월 20일, 10개의 정점), 2021년에는 ANA12A 항해(2021년 11월 13일~2021년 11월 20일, 20개의 정점) 기간에 걸쳐 실시하였으며, 각 항해의 연구정점들에서 10L 니스킨 채수기 24개를 탑재한 CTD 로켓 시스템(SeaBird Electronics, SBE 911 plus)을 이용하여 실시하였다. 영양염 분석을 위한 해수시료는 니스킨 채수기에서 50ml 코니칼 튜브에 채취 후 바로 영상 4°C의 냉장고에 넣어 보관하였으며 모든 영양염 시료는 선상에서 3일 이내에 분석하였다. 산소동위원소 분석을 위한 해수시료는 니스킨 채수기에서 중력여과를 통해 여과한 해수 시료를 20 ml 유리병에 채취 후 4°C의 냉장고에 넣어 보관 하였다. 입자상 유기탄소 화합물의 시료채취는 니스킨 채수기에서 폴리에틸렌 채수병에 2 L의 해수를 채취 후, 550°C에서 6시간 동안 구운 GF/F 필터를 여과장치에 장착하고 0.1 MPa의 낮은 압력상태에서 여과하여 입자상 물질의 파괴를 최소화하였다. GF/F 필터에 포집된 입자상 유기물질 시료는 분석 전까지 -24°C 냉동고에 보관하였다. 용존 유기탄소 화합물 분석을 위한 시료는 0.1M의 염산으로 산세척한 47 mm 폴리카보네이트 필터 홀더 (PP-47, ADVANTEC)에 유기물 제거를 위해 550°C에서 6시간 동안 구운 GF/F 필터를 탑재하고, 필터홀더를 니스킨 채수기에 직접 연결하여 중력을 이용하여 여과하였다. 이렇게 여과된 해수는 산세척 한 유리병에 채취하였고 이를 550°C에서 6시간 동안 구운 20 ml 유리앰플에 멸균 피펫을 이용하여 분취였다. 그 후 시료의 대기와의 접촉 및 생물생산활동을 억제하기 위해 유리앰플을 토치를 이용하여 봉하였고 분석 전까지 -24°C 냉동고에 보관하였다.

(2) 대기 에어로졸 시료

대기 에어로졸 시료는 쇄빙연구선 아라온의 컴퍼스텍에 하이볼륨 에어로졸 샘플러를 설치하여 포집하였고, 필터는 550°C에서 6시간 동안 구워 유기물을 사전에 제거한 석영필터를 사용하였다. 대기 에어로졸 시료는 2번의 항해기간 동안 수행되었으며, 2020/21 남극항해 기간(2020

년 11월 1일~2021년 3월 19일)에 51개의 시료를 포집하였고, 2021/22 항해 기간(2021년 10월 26일~2021년 11월 26일)에 15개의 시료를 포집하였다.

나. 시료 분석

(1) 해수시료 분석

(가) 영양염

영양염 시료의 분석은 아라온호에 설치되어 있는 4 채널 영양염 분석기(QuAAtro, Seal Analytical)를 이용하여 질산염(NO_3) + 아질산염(NO_2), 암모늄(NH_4), 인산염(PO_4), 규산염($\text{Si}(\text{OH})_4$)을 분석하였다. 검량선 작성을 위한 표준용액은 시료 분석 전에 제조하였고 각 항목의 모든 검량선은 $r^2 = 0.99$ 이상의 것을 사용하였다.

(나) 산소동위원소 분석

산소 안정동위원소비 분석은 일본 홋카이도대학 저온연구소 Shigeru Aoki 교수와의 공동연구를 통해 이루어졌으며 저온연구소의 원소분석기(Elemental Analyzer, Pyrogenic EA, Elementar, U.K)와 연동된 안정동위원소 질량분석기(Isotope Ratio Mass Spectrometer, Isoprime 100, Isoprim, U.K)를 이용하여 분석하였다.

(다) 입자상 유기탄소화합물

입자상 유기탄소 화합물을 분석하기 전에 2 L의 해수시료를 여과시킨 GF/F 필터를 동결 건조기로 건조시키고 데시케이터 안에서 염산과 수산화나트륨에 각각 24시간동안 노출시켜 입자상 무기탄소화합물을 모두 제거한 후 원소분석기(vario Macro cube, Elementar)를 이용하여 분석하였다.

(라) 용존 유기탄소화합물

용존 유기탄소 화합물의 분석은 Shimadzu사의 TOC-L 분석기를 이용하여 분석하였다. 이 분석기는 시료와 염산을 반응기 내에서 폭기시켜 용존무기탄소를 제거한 후 고온 연소방식을 이용하여 용존 유기화합물을 이산화탄소로 전환시켜 이산화탄소의 농도를 측정하여 용존 유기화합물의 농도를 정량화하였다.

(2) 대기시료 분석

에어로졸을 포집한 석영 필터를 4개의 동등한 하위 샘플로 나눈 후, 그 중 하나의 하위 샘플을 산 세척된 폴리프로필렌 병에 넣고, 50mL의 초순수 증류수를 채워 30분 동안 초음파 처리하여 수용성 성분들을 추출하였다. 이어서 추출 용액을 직경 13mm, 공극 크기 $0.45\mu\text{m}$ 멤브레인 필터 (PTFE 실린지 필터, Millipore Co.)를 통해 여과하였고, 여과한 추출 용액을 용존 유기탄소화합물과 동일한 분석기로 분석하여 대기 에어로졸 내의 수용성 유기탄소화합물을 정량화 하였다.

3. 결과 및 고찰

가. 사전연구 및 기존 연구를 통한 남극해 수층 탄소순환 구조 및 용빙수 공간분포 파악

기존 문헌자료를 이용하여 남극 로스해 수층내 탄소순환 모식도를 작성하여 Fig. 3.4.1에 나타내었다. 남극 로스해 해역에서 약 48.8 Tg의 탄소가 식물플랑크톤에 의해 생산되고 약 39 Tg의 탄소와 3 Tg의 탄소가 각각 입자상과 용존 유기탄소화합물 형태로 유광층 내에 존재하고 있음이 확인되었다. 또한 남극 로스해 수층내에서는 식물플랑크톤에 의해 생산된 39 Tg의 입자상 유기탄소화합물 중 약 15-20 Tg의 탄소가 심층으로 수송 및 저장되고 있으며, 용존 유기탄소화합물의 형태로는 약 4 Tg C이 저장되고 있다는 것을 알 수 있었다.

2015/16, 2017/18 시즌 서남극 아문젠 해역에서 관측된 산소동위원소 해석을 통해 측정된 빙봉 및 해빙 용빙수 분포 변화 특성을 Fig. 3.4.2에 나타내었다. 빙봉 용빙수는 남극순환심층수의 유입 경로를 잘 반영해주는 결과를 보였고, 빙봉 앞과 폴리나에서는 높은 빙봉 용빙수 비율을 보였고, 해빙이 분포해 있는 외해 지역에서 낮은 수치를 보였다. 특히 닷슨 빙봉 우측에서 가장 높은 빙봉 용빙수의 비율이 관측되었는데 이는 닷슨 골(trough)을 따라 유입된 남극순환심층수(Circumpolar Deep Water)가 닷슨 빙봉 앞쪽에서 상승되어 빙봉을 녹였기 때문으로 판단되며, 닷슨 빙봉 뿐만 아니라 갯츠 빙봉 앞쪽에서 전반적으로 높은 수치를 보였다. 한편 해빙 용빙수는 해빙 분포와 일치하는 결과를 보였고 폴리나 해역에서는 낮은 값을, 해빙이 분포해 있던 외해 해역에서는 높은 값을 보여, 폴리나 내부의 대부분은 해빙 용빙수가 아닌 빙봉 용빙수의 영향을 강하게 받는 것으로 나타났다.

나. 미량금속 관측을 위한 청정 해수시료 채수시스템 구축 및 고도화

2020년에 Go-Flo 채수기와 비교하여 구조가 단순하여 유지관리가 쉽고 상대적으로 저렴하여 국외 여러 연구기관에서 청정 해수시료 채수시스템에 활용중인 Teflon coated Niskin-X 채수기를 이용한 채수시스템 도입하였다(Fig. 3.4.3). 본 시스템은 오염을 배제한 청정 해수시료를 채수하기 위해서 가장 근본적으로 구비되어야 할 장비이며, 채수기에 테플론 코팅을 실시하고 산세척을 통해 해수 시료의 오염이 일어날 가능성을 배제하였다.

2021년에는 기존 청정청정해수 시료 채수시스템을 검증하고 문제점을 개선하여 청정해수 시료 채수시스템을 확립하였다. 이를 확인하기 위해 기 구축 완료된 청정해수 시료 채수시스템을 이용하여 채수한 해수 시료와 일반 채수시스템을 이용하여 채수한 해수 시료 내의 미량금속의 한 성분이 철(Fe) 농도를 분석, 비교하였고 그 결과를 Fig. 3.4.4에 나타내었다. 분석 결과에서 알 수 있듯이 청정해수 시료 채수시스템을 이용하여 채수한 시료보다 일반 채수시스템을 이용하여 채수한 시료에서 상당히 높은 값의 철 농도가 관측되었음을 확인 할 수 있었고, 본 결과를 통해 일반 채수시스템으로는 미량금속 농도가 극히 낮은 남극해에서 신뢰성 있는 미량금속 데이터 생산이 어렵다는 것을 확인하였다. 또한 이 결과를 토대로 청정해수 시료 채수시스템의 고도화가 성공적으로 이루어졌음을 확인하였다. 향후 본 시스템을 이용하여 남극해 연구해역에서 미량금속의 공간 분포 특성 및 탄소시스템과의 연계를 통해 연구를 진행할 예정이다.

다. 로스해 수층에서의 영양염과 유기탄소화합물의 공간적 분포 특성

2020년 현장조사시 10개 정점에서 획득한 해수시료 내의 용존 유기탄소화합물, 영양염을 측정하여 이들 화합물의 공간적 분포특성 분석을 Fig. 3.4.5에 나타내었다. 용존 유기탄소화합물의 농도는 전반적으로 식물플랑크톤 형광값이 낮은 정점에서 상대적으로 높은 용존 유기탄소화합물이 관측되어 식물플랑크톤의 박테리아에 의한 분해에 의해 생성됨을 시사하였다. 영양염은 식물플랑크톤 형광값이 높은 표층과 수심 100 m 사이에서는 상대적으로 낮은 농도값을 보였으며 겨울수가 존재하는 100 m 이하 수심에서는 높은 농도값을 보였다.

라. 남극해 대기 에어로졸 중에 존재하는 유기탄소화합물 분포 및 농도 특성 파악

2020/21 남극항해 기간(2020년 11월 1일~2021년 3월 19일) 동안 관측된 대기 에어로졸 미세입자 (PM2.5) 중 존재하는 수용성 유기탄소화합물의 농도는 30~878 ngC/m³의 범위를 보였으며 봄철(아라온 귀항 경로) 북반구에서 가장 높은 농도가 관측되어 계절적 변동을 확인하였다 (Fig. 3.4.6). 또한 수용성 유기탄소화합물의 형광특성을 분석한 결과, 해양기원 휴믹계 물질, 육상기원 휴믹계 물질, 트립토판 단백질계 물질, 타이로신 단백질계 물질이 관측되었으며 대부분의 시료에서 높은 단백질계 물질의 기여도가 관측되어 해양 생물활동이 대기 수용성 유기탄소화합물의 주요 기원이라는 것이 파악되었다.

2021년 10월 26일~2021년 11월 26일까지 남극항해 기간 동안 관측된 대기 에어로졸 미세입자 (PM2.5) 중 존재하는 수용성 유기탄소화합물의 농도는 40~466 ngC/m³의 범위를 보였으며 북반구에서 상대적으로 높은 농도, 남반구에서 낮은 농도가 관측되었다 (Fig. 3.4.7). 대기 에어로졸 내의 수용성 유기탄소화합물 형광특성을 분석한 결과, 휴믹계 물질과 단백질계 물질이 관측되었으며 남극해 주변에서 높은 단백질계 물질의 기여도가 관측되어 북반구보다 인위적 기원의 영향을 적게 받았으며, 해양 생물활동이 대기 수용성 유기탄소화합물의 주요 기원이라는 것이 파악되었다.

마. 서남극 연안 미량금속(철) 농도의 공간적 변동성 파악

서남극 아문젠 해역 닷슨 골(trough)를 따라 관측한 용존 철과 입자상 철의 공간적 분포를 Fig. 3.4.8에 나타내었다. 전반적으로 용존 철의 농도는 표층 근처에서 가장 낮은 농도값을 보였으며 수심이 깊어질수록 증가하는 경향을 보였다. 또한 남극순환심층류에 포함되어 있는 용존 철의 농도는 약 0.3-0.4 nM의 수준이었으며, 가장 높은 용존 철의 농도는 해저와 남극순환심층수에 의한 빙붕 용빙수의 용승지역으로 알려져 있는 닷슨 빙붕의 서쪽지역(즉 정점 36, 34)에서 관측되었다. 입자상 철의 분포특성은 용존 철과 유사한 경향을 보였고, 용존 철보다 더 높은 농도수준을 보였다. 본 연구결과는 남극순환심층수의 빙붕용빙이 해수밀도를 변화시켜 용존 철과 입자상 철을 상대적으로 낮은 수심까지 공급하고 있음을 보여준다.

서남극 아문젠 폴리나 중앙 표층에서 용존 철, 입자상 철 농도 분포는 산소동위원소를 활용하여 산정된 빙붕 용빙수 분포와 유의할 만한 상관성을 보이지 않았다 (Fig. 3.4.9). 이 결과는 빙붕 용빙수에서 기인한 철 화합물이 폴리나 중앙까지 수송되지 않고 식물플랑크톤에게 소비됨을 의미한다. 본 결과로 미루어 보아 아문젠 해역에서는 빙붕용빙수에 의한 직접적인 철 공급 보다는 빙붕 용빙수에 의한 해수밀도 변화가 남극순환심층수 및 퇴적물에서 기인한 용존 철과 입자상 철을 공급하는 주요 기작으로 판단된다.

Characteristics of dissolved organic carbon and environmental variables (nutrient and trace metal) in the Southern Ocean

Jinyoung Jung

Division of Polar Ocean Sciences, KOPRI

Abstract: To investigate the characteristics of dissolved organic carbon and nutrient in the Southern Ocean, seawater samples were collected during the research period (January 2020 to the end of December 2022) on board the Korean icebreaker R/V Araon. In addition, the concentration of water-soluble organic carbon in marine aerosols was investigated to improve the understanding of the sea-air interaction in terms of the carbon cycle. Furthermore, we established a clean seawater sample collection system for trace metal observation in the study area and upgraded it, which enables us to fill the data gap in the knowledge of trace metals, including iron, a limiting factor for phytoplankton growth. A survey of literature and existing research results in the study area revealed that about 48.8 Tg of carbon is produced by primary production in the Ross Sea, and that about 39 Tg of carbon and 3 Tg of carbon existed in the form of particulate and dissolved organic carbon, respectively. It also revealed that about 15–20 Tg and about 4 Tg C of particulate and dissolved organic carbon are transported to and stored in the deep layer. In addition, previous studies reported a high concentration of iron in front of the Dotson Ice Shelf in the Amundsen Sea, which was supplied to the surface layer due to the influence of ice shelf melting water. Based on the results obtained during this project, we will conduct a more thorough assessment of the carbon budget by connecting organic carbon data to environmental variables, including the nutrient and trace metal datasets.

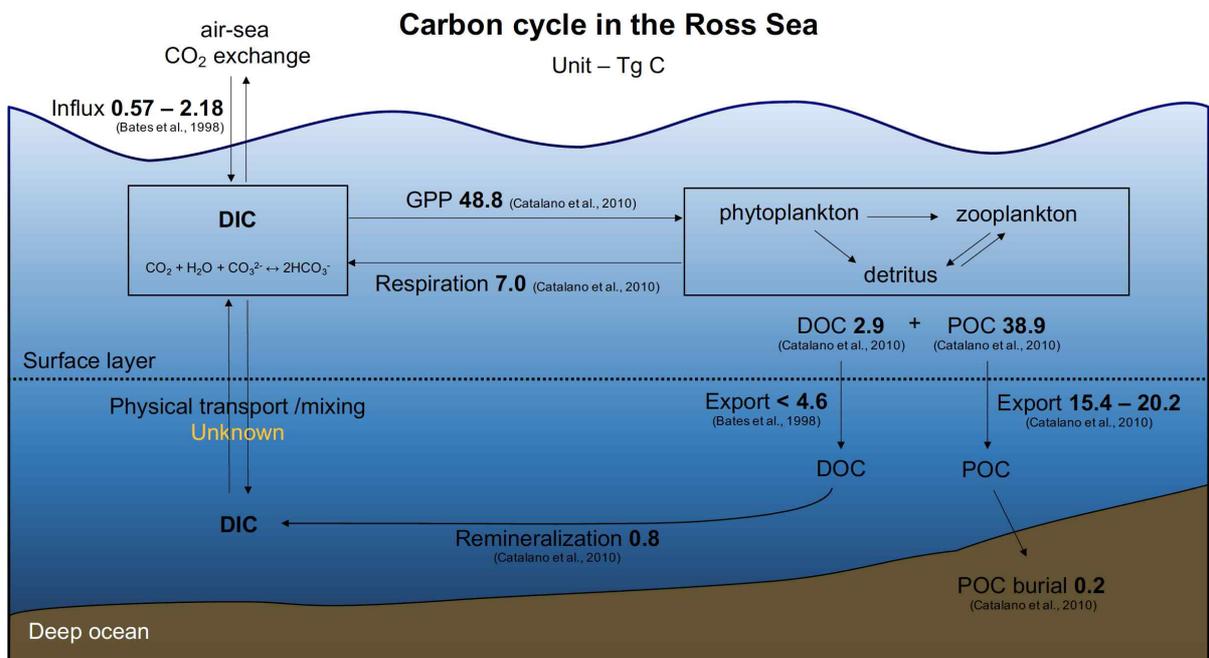


Fig. 3.4.1. Schematic illustration showing the carbon cycle in the Ross Sea. Data were obtained from Bates et al. (1998) and Catalano et al. (2010).

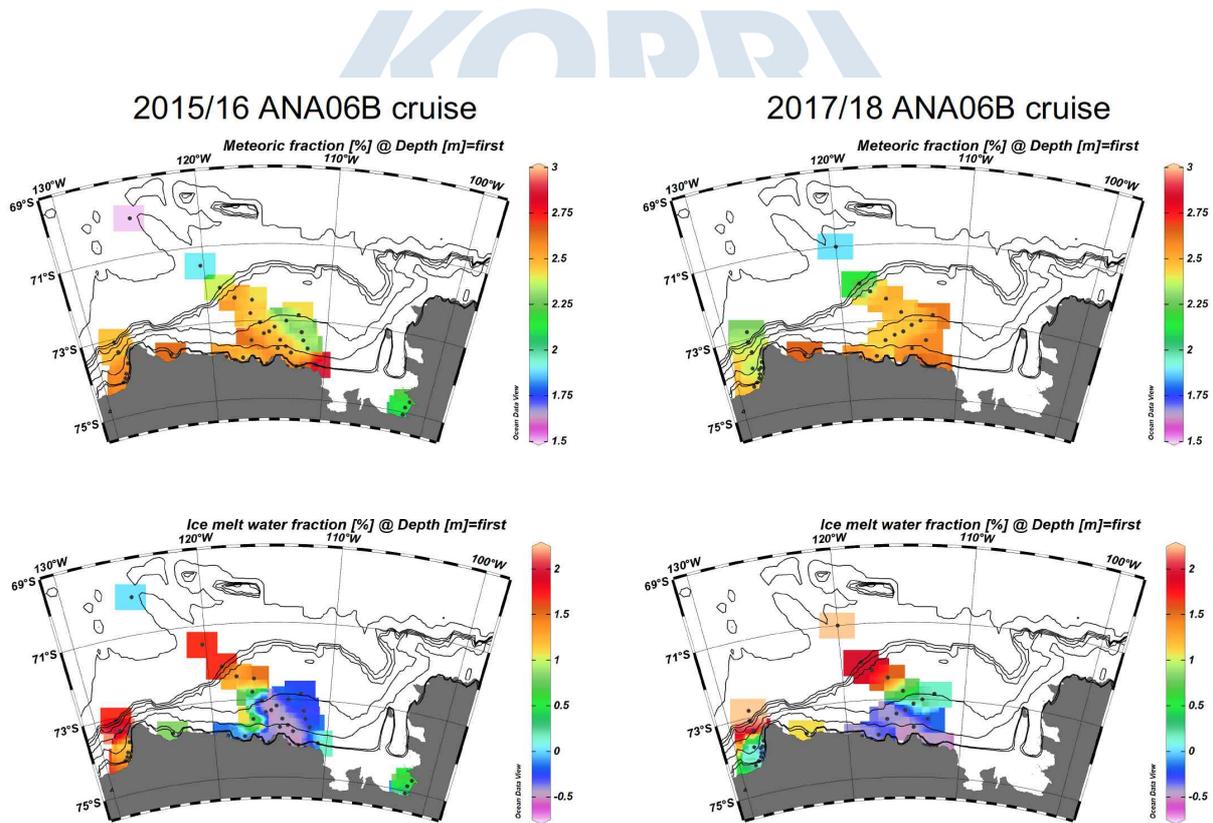


Fig. 3.4.2. Spatial distributions of meteoric water and sea ice melt water fractions observed during the 2015/16 ANA06B and 2017/18 ANA08B cruises.

Conceptual diagram of clean seawater sampling system

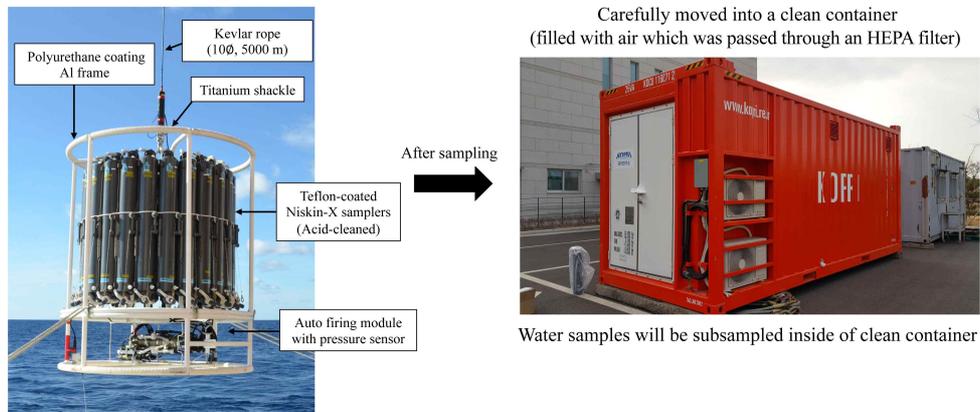


Fig. 3.4.3. A picture showing the Niskin-X rosette sampling system and clean container for trace metal measurement.

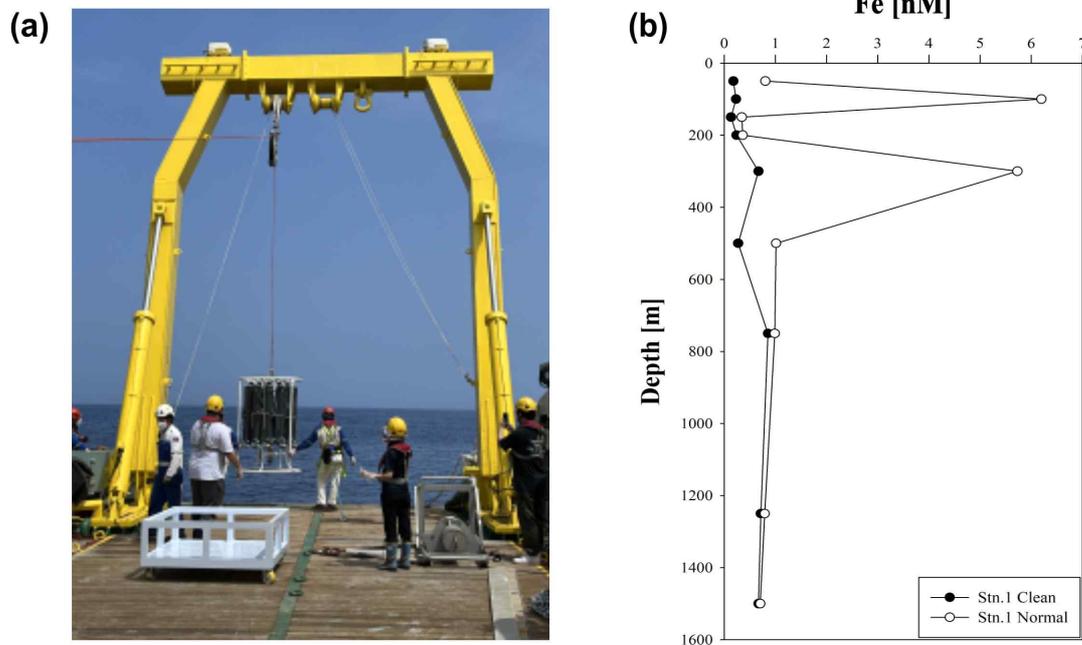


Fig. 3.4.4. (a) A picture showing testing the Niskin-X rosette sampling system for trace metal measurement. (b) vertical profiles of iron (Fe) concentrations in seawater collected from the Niskin-X rosette sampling system (closed circles) and normal rosette sampling system (opened circles).

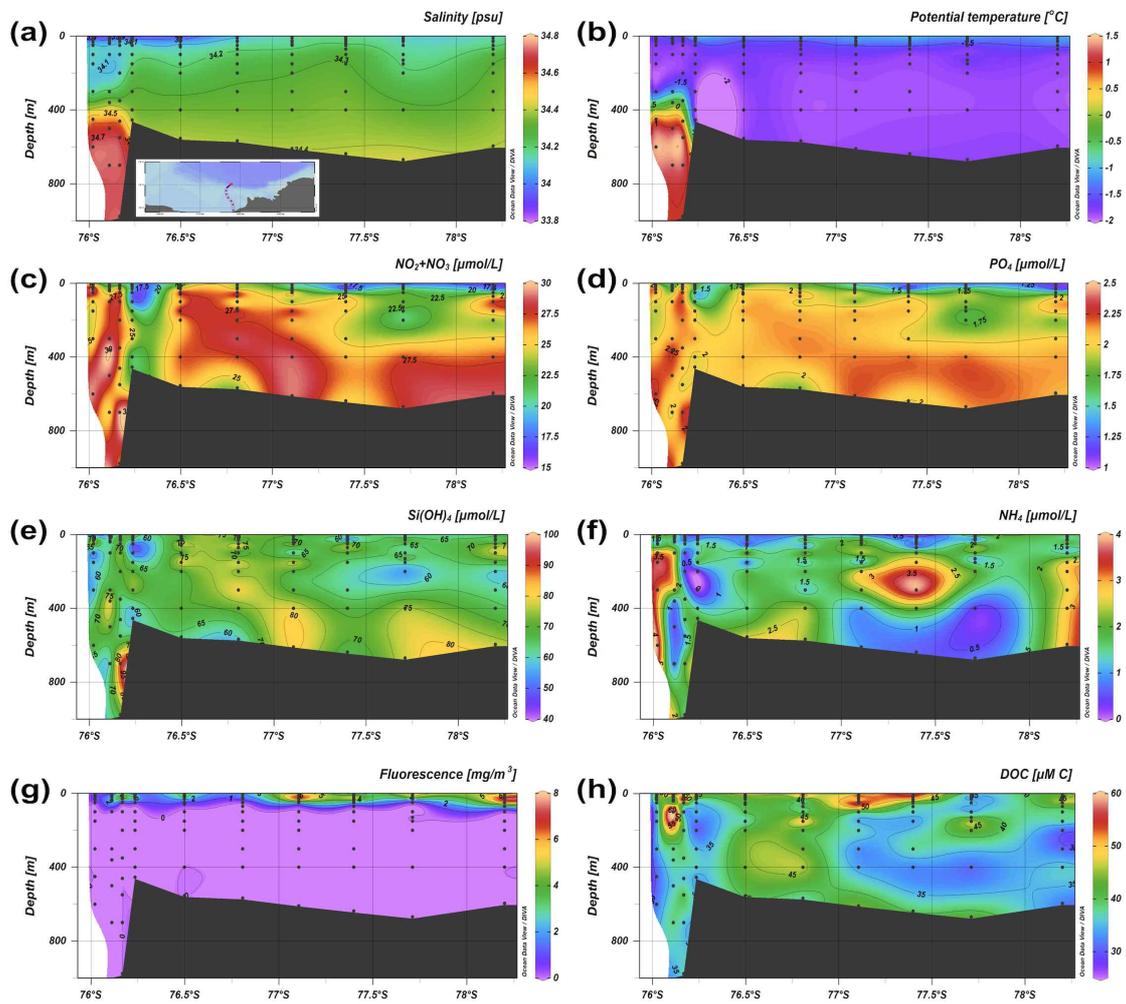


Fig. 3.4.5. Vertical sections of (a) salinity, (b) potential temperature, (c) nitrite + nitrate ($\text{NO}_2 + \text{NO}_3$) ($\mu\text{mol/L}$), (d) phosphate (PO_4) ($\mu\text{mol/L}$), (e) silicic acid ($\text{Si}(\text{OH})_4$) ($\mu\text{mol/L}$), (f) ammonium (NH_4) ($\mu\text{mol/L}$), (g) fluorescence (mg/m^3), and (h) dissolved organic carbon (DOC) ($\mu\text{M C}$) in the Ross Sea observed in the summer of 2020.

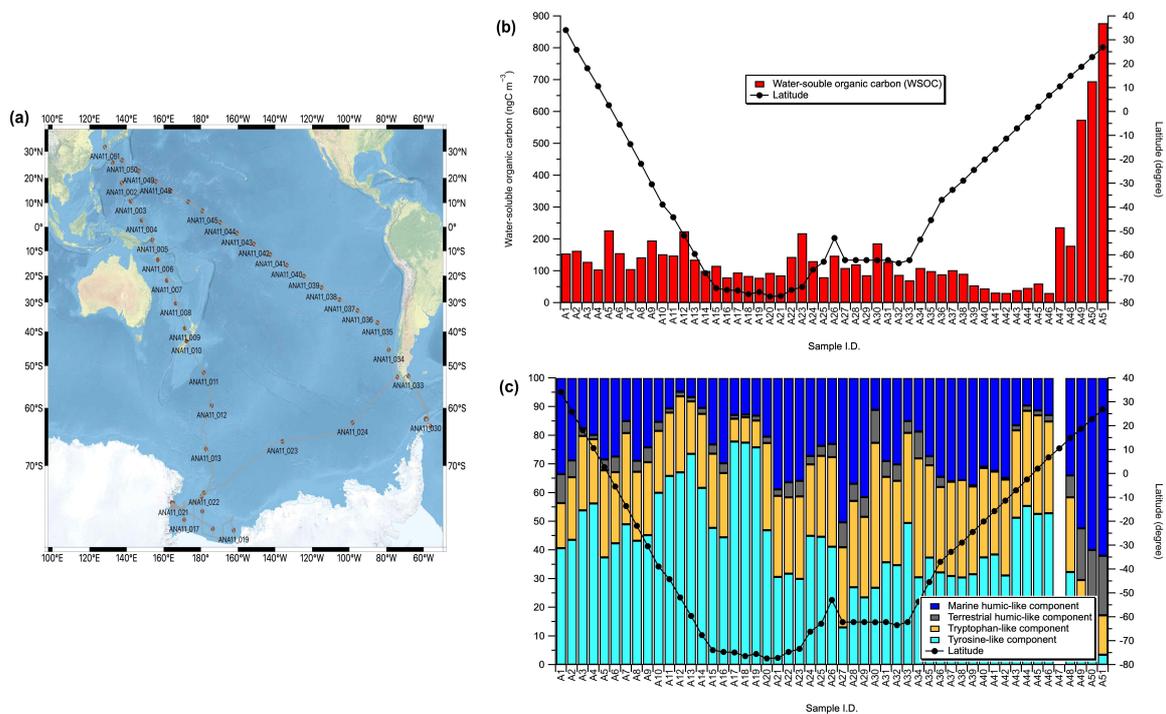


Fig. 3.4.6. (a) The entire cruise track with aerosol sampling location (orange circles). Each aerosol sampling start points represent the end of the previous sampling period. (b) Concentration of water-soluble organic carbon (WSOC) against sample ID. (c) Variations of relative contributions of marine humic-like (blue), terrestrial humic-like (gray), tryptophan-like (orange) and tyrosine-like (cyan) components in the fine-mode aerosol particle (PM_{2.5}). Black solid lines with circles in (b) and (c) indicate the latitude of the halfway point between each aerosol sampling point and endpoint.

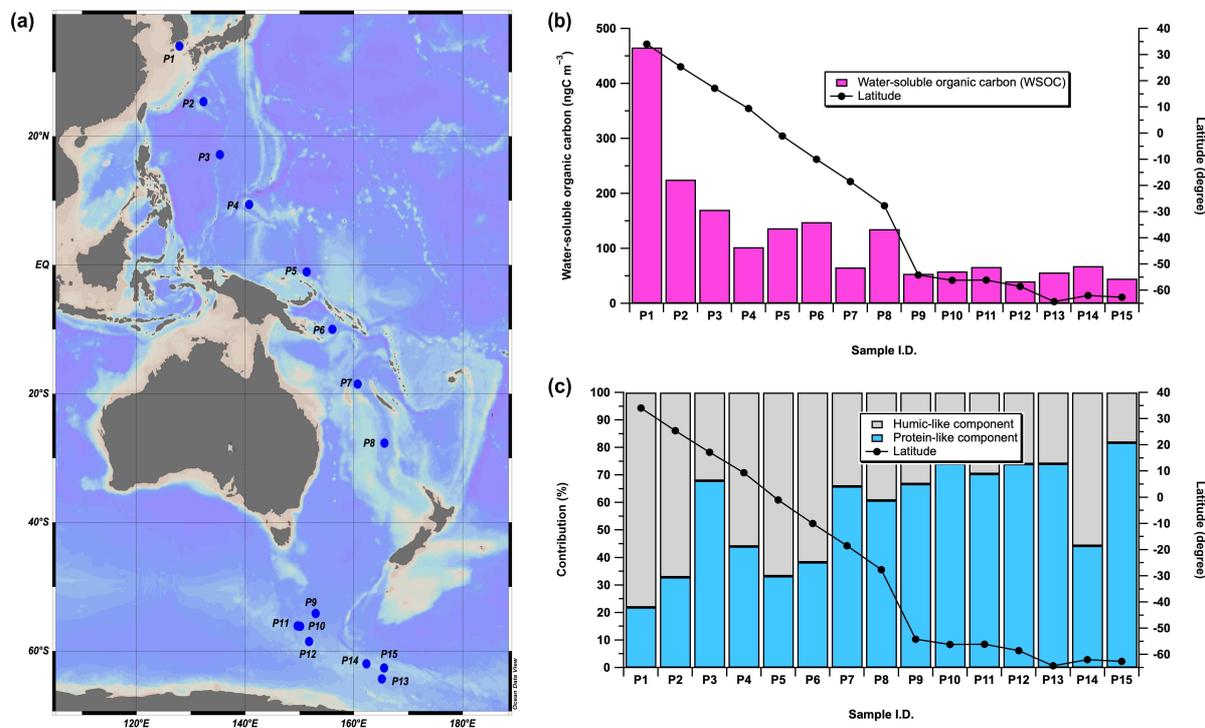


Fig. 3.4.7. (a) The aerosol sampling location (blue circles). Each aerosol sampling start points represent the end of the previous sampling period. (b) Concentration of water-soluble organic carbon (WSOC) against sample ID. (c) Variations of relative contributions of humic-like (gray) and protein-like (blue) components in the fine-mode aerosol particle (PM_{2.5}). Black solid lines with circles in (b) and (c) indicate the latitude of the halfway point between each aerosol sampling point and endpoint.

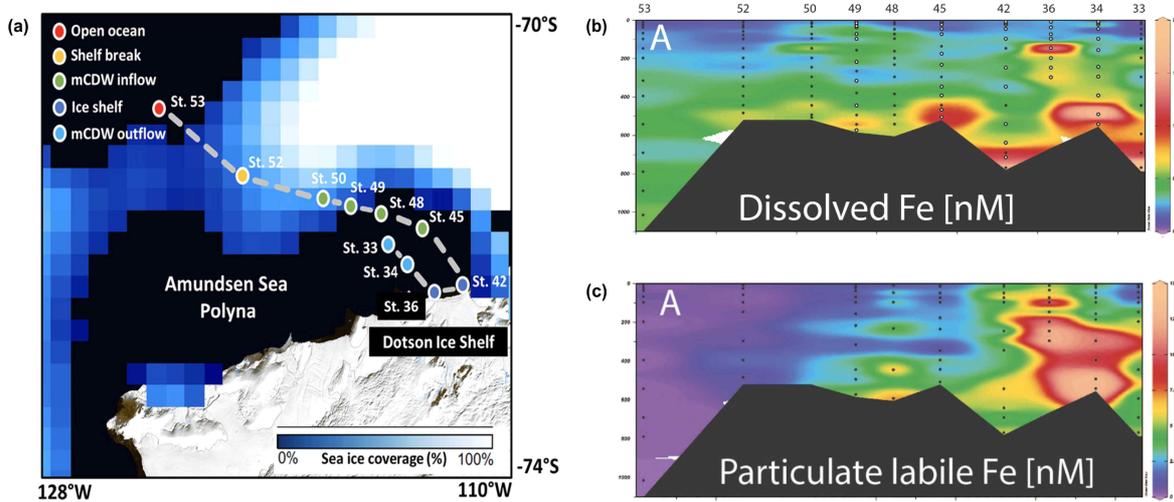


Fig. 3.4.8. (a) Map of the study area with the cruise transect (gray dashed line), trace metal sampled stations (colored dots) and approximate outline with use of percentage sea ice coverage at the end of sampling (30th January 2018); 12 km spatial resolution (AMSR-E/AMSR2) images (source: NASA Worldview). Transect plots of (b) dissolved iron and (c) particulate iron along the sampled transect in the Amundsen Sea Polynya.

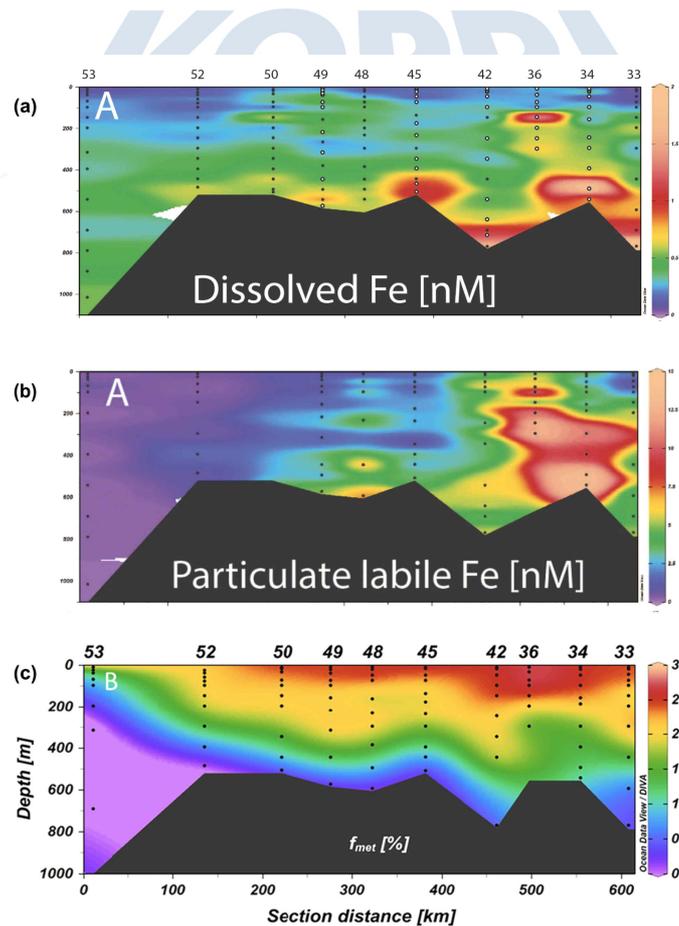


Fig. 3.4.9. Transect plots of (a) dissolved iron, (b) particulate iron concentrations and (c) meteoric water fraction obtained from oxygen isotopes ratio along the sampled transect in the Amundsen Sea Polynya.

제 5 절 탄소 및 질소 흡수율과 빙하후퇴속도 산정 (하선용)

요약: 고위도 연안 시스템의 급격한 환경변화는 생지화학적 순환에 상당한 영향을 미칠 수 있다. 특히 빙하의 용빙수나 육지의 하천에서 배출되는 담수에 의해 강하게 영향을 받기 때문이다. 일반적으로 남극 해안 지역은 다양한 환경 조건(예: 해양 및 기상 조건)에서 식물플랑크톤의 생산성이 높은 지역으로 간주된다. 본 과제 1단계 연구기간인 2020년 1월부터 2022년 12월 말까지, 세종기지 인근 해역인 마리안 소만(Marian Cove) 및 맥스웰 만(Maxwell Bay)에서 현장 배양을 통한 식물플랑크톤의 탄소 및 질소 섭취율 현장 조사가 총 세 차례 수행되었다. 그 결과 식물플랑크톤의 성장 시기 동안(12월~1월)에 탄소 및 질소 섭취율은 넓은 범위를 보였으며 광투과율의 차이(유광층 수심) 및 선호하는 영양염류에 의해 조절됨을 확인하였다. 또한 세종기지 인근 연안 빙하 관측 목적으로 구축한 인공위성 광학/영상레이더 자료 통해 마리안 소만의 연안빙하는 1956/1957~ 2021/2022년의 66년 기간 동안 약 1900m 변화하였으며, 연간 31.71 m 후퇴속도가 산정되었다. 최근 1년사이에도 수십미터 규모로 불규칙한 경계변화를 확인하였다.

1. 서론

고위도 극지방은 다른 지역보다 기후변화에 더 취약하다. 서남극반도(WAP)는 전 지구적으로 가장 온난화가 심각한 지역 중 하나로(Vaughan et al., 2003; Meredith and King, 2005; Turner et al., 2005), WAP의 일부 지역에서 10년당 평균 0.5도의 온도상승(Vaughan et al., 2003; Oliva et al., 2017) 뿐 아니라, 풍속 및 바람 방향의 변화 패턴, 해빙과 빙봉의 감소, 빙하 후퇴가 관찰되었다(Cook et al., 2005, 2016; Marshall et al., 2006; Stammerjohn et al., 2008; Montes-Hugo et al., 2009; Ruckamp et al., 2011; Rignot et al., 2013; Turner et al., 2013). WAP의 남극 연안 역시 다양한 환경변화를 겪고 있으며(eg. 영양소, 온도 및 염분의 구배, 계절별 담수 플럭스, Circumpolar Deep Water (UCDW) 유입 및 해빙 변화)(Prezelin et al., 2000; Martinson et al., 2008; Annett et al., 2015; Cook et al., 2016; Llanillo et al., 2019). 이러한 변화는 연안 수생태계에서 직접적으로 영향을 주고 있다(Atkinson et al., 2004; Moline et al., 2004; Arrigo et al., 2017; Gutt et al., 2021). 마리안 소만은 서남극지역에서도 빙하후퇴가 빠른 지역 중 하나로 다양한 생물상을 연구함에 있어 핫스팟 지역으로 볼 수 있다(Gutt et al., 2021). 따라서, 마리안 소만 등 바톤반도 연안 빙하후퇴의 장기 시계열 모니터링을 위해서는 인공위성 광학영상 및 영상레이더 자료를 구축하고 각각의 데이터셋에 맞는 전처리 수행이 필요하다. 광학영상은 구름 등 기상의 영향을 많이 받기 때문에 기상에 상관없이 밤, 낮 모든 시각에 획득이 가능한 장점이 있는 영상레이더 자료는 빙하후퇴 탐지에 효과적이다. 최근 연구들은 주로 저서생물, 박테리아, 해조류와 관련된 연구 결과들이 발표된 바 있으나 식물플랑크톤의 생산력에 관련된 연구들은 거의 전무한 실정이다. 따라서 이 연구에서 목표는 급격히 변화하는 바톤반도 연안 빙하후퇴 경향성을 분석하고 맥스웰 만과 마리안 소만에서 하계기간동안 식물플랑크톤의 시공간 일차생산력 값을 추정을 통해 이들에 영향을 주는 환경요인을 찾고자 하였다.

2. 재료 및 방법

가. 연구지역

세종기지가 있는 바튼(Barton)반도는 서남극 남셰틀랜드 군도에서 가장 큰 킹조지섬의 남서쪽에 위치하고 있다. 바튼반도의 북쪽연안에는 마리안소만(Marian cove)이 있고, 남서쪽연안에는 맥스웰만(Maxwell bay)으로 둘러싸여있다. 식물플랑크톤 탄소 및 질소섭취율을 확인하기 위해 마리안 소만 6정점(MC19, MC3, MC7, MC10, MC13, MC16), 맥스웰 만 5정점(MB29, MB36, MB44, MB46, MB47) 총 11개의 정점에서 세 차례 조사가 수행되었다(Fig. 3.5.1). 첫 번째 조사는 2020년 1월 4일부터 2020년 1월 23일, 두 번째 조사는 2021년 1월 4일부터 1월 23일, 세 번째 조사는 2021년 12월 30일부터 2022년 1월 25일까지 각각 수행되었다. 세 번째 조사에서는 마리안 소만내에서만 연구가 수행되었다. 연구지역에서 샘플링은 소형선박 및 아라운에 장착된 5L Niskin 바틀이 장착된 로제트 샘플러를 사용하여 수행했다.

나. 탄소 및 질산염 섭취율 실험

식물플랑크톤의 탄소 및 질산염 섭취율은 11개의 생산성 정점에서 빛 투과에 따른 3개의 수심 (100, 30, 1%)으로부터 ^{13}C - ^{15}N 안정동위원소 추적자를 이용하여 분석하였다. 각각의 수심은 표층으로 Secchi disk를 이용하여 결정하였고, 각기 수심에서 얻어진 해수는 1L polycarbonate병에 넣어 $\text{H}^{13}\text{CCO}_3$, $^{15}\text{KNO}_3$, $^{15}\text{NH}_4\text{Cl}$ 을 넣어 현장에서 3~5시간동안 배양하였다(Fig. 3.5.2). 동위원소는 주변 해수 영양염 농도의 약 5~10%를 넣었으며, 수온을 유지하기 위해 배양기에 계속해서 해수를 흘려주었다. 배양이 끝난 뒤 즉시 실험실로 와서 25 mm GF/F (Whatman, $0.7\mu\text{m}$) 필터지로 여과하였고, picophytoplankton ($<2\mu\text{m}$) 기여율을 파악하고자 47 mm $2\mu\text{m}$ 멤브레인 필터로 거른 후에 25 mm GF/F 필터로 여과하였다. 얻어진 여과지는 분석 전까지 -80°C 에 보관하였다. 탄소 및 질소 동위원소 양을 측정하기 위해 염산으로 산처리 한 후 알래스카 대학교 안정동위원소 실험실에서 Finnigan Delta + XL을 사용하여 값을 얻었다. 탄소 및 질소 섭취율 계산을 위해 Hama et al. (1983)과 Dugdale and Georeing (1967)의 방법에 따라 수행하였다. 또한, 100%에서 1 %로 값들을 integrated 하여 수괴 내 유광층의 탄소 및 질소 면적 시간당 섭취율을 얻었다.

다. 빙하후퇴의 시계열 모니터링을 위한 인공위성 광학/영상레이더 자료 구축 및 분석

연구에 활용한 자료는 유럽우주국(European Space Agency, EAS)에서 운용 중인 Sentinel-1A와 Sentinel-1B의 두 위성으로 구성된 Sentinel-1 자료를 조회 후 남극 하계시기(12월-2월) 동안 구축을 수행하였다. 구축된 Sentinel-1 자료는 Level 1 Detected High-res Single-Pol (GRD-HS) 자료로 연안 빙하 변화 분석 전 전처리 수행이 필요하여 ESA에서 제공하는 Sentinel Application Platform (SNAP) 소프트웨어를 이용하여 다음과 같은 순서로 단계별 전처리 과정을 수행하였다(Fig. 3.5.3). 처리 과정 중 Speckle noise removal 과정에서는 7 x 7 Lee 필터를 적용하였으며, 전처리 결과로 광역의 킹조지섬 전체를 포함하는 UTM 21S 좌

표계로 투영된 후방산란 계수(Backscatter coefficient(dB)) 영상을 획득하였으며, 광학 및 레이더 원격탐사 자료 융합분석을 통해 빙하 후퇴 탐지를 수행하였다. 또한, 시계열 빙하 경계의 정밀 비교를 위하여 영상 사이의 위치를 정합하는 전처리 수행 후 불규칙한 연안빙하 경계에 대한 후퇴속도 산정을 위하여 연안빙하 경계 및 임의로 정의된 상류의 빙하 경계 평행 기준선을 활용하여 빙하 경계의 평균 후퇴속도를 계산하는 USGS의 DSAS(Digital shoreline Analysis System) 분석 기법을 적용하였다.

3. 결과 및 고찰

가. 맥스웰 만 및 마리안 소만 내 식물플랑크톤 탄소 및 질소섭취율 시공간 변동

2020년 현장조사시 마리안 소만에서 두 차례, 맥스웰 만에서는 한 차례 연구가 각각 수행되었다. 식물플랑크톤의 성장시기 동안(12월~1월)에 세종기지 인근해역에서의 시간당 탄소 및 질소 섭취율은 각각 $1.2\sim 37.4 \text{ mg C m}^{-2} \text{ h}^{-1}$, $0.3\sim 12.7 \text{ mg N m}^{-2} \text{ h}^{-1}$, 넓은 범위를 보였다. 마리안 소만내 시기적인 특성으로는 1월 4일에 비해 1월 23일에 수행된 연구에서 상대적으로 총 탄소 및 질소 섭취율이 높았으나, 질산염 섭취율에 비해 암모늄의 섭취율이 시기에 관계없이 우세함에 따라 식물플랑크톤이 하계기간 동안 재생산 기반의 생산을 하는 것으로 판단된다. 맥스웰 만과 마리안 소만의 지역적으로 비교 했을 때 평균 시간당 탄소 섭취율은 맥스웰 만($27.7\pm 7.4 \text{ mg C m}^{-2} \text{ h}^{-1}$)이 마리안 소만($7.8\pm 6.7 \text{ mg C m}^{-2} \text{ h}^{-1}$)에 비해 상대적으로 높았으나 질소 섭취율(맥스웰 만; $3.5\pm 1.7 \text{ mg N m}^{-2} \text{ h}^{-1}$, 마리안 소만; $4.6\pm 4.7 \text{ mg N m}^{-2} \text{ h}^{-1}$)은 반대의 경향을 보였다(Fig. 3.5.4). 하지만 샘플링 시기가 각각 다르기 때문에 지역적 차이를 논하기 앞서 시간적 변동성을 고려해야 할 것으로 사료된다.

2021년 현장조사에서는 마리안 소만과 맥스웰 만에서 각각 한 차례 연구가 각각 수행되었다. 이전연도 연구와 동일하게 공간분포에 따른 식물플랑크톤의 총 탄소 및 질소 섭취율 값은 $2.3\sim 31.4 \text{ mg C m}^{-2} \text{ h}^{-1}$, $0.03\sim 1.53 \text{ mg N m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ 으로 정점간의 차이가 크게 나타났다. 특히, Picophytoplankton ($< 2\mu\text{m}$)은 총 탄소 섭취율의 약 10% 수준을 보인 반면 질소 섭취율은 약 20~84% 범위로 마리안 소만이 맥스웰 만에 비해 상대적으로 높았다(Fig. 3.5.5). 질소 섭취율은 식물플랑크톤 크기와 상관없이 맥스웰 만 일부 정점 (MB29)을 제외하고 전반적으로 암모늄 기반의 재생산이 우세하는 것으로 나타났다.

2022년 현장조사에서는 마리안 소만 내 6개 정점(MC19, MC3, MC7, MC10, MC13, MC16)에서 군집의 시공간에 따른 탄소 및 질소 흡수율 측정이 12월30일, 1월 13일, 1월 25일 세 차례 이루어졌으며 하계동안 관찰된 값들은 시간당 탄소섭취율의 경우 최소 $1.0 \text{ mg C m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ 최대 $43.2 \text{ mg C m}^{-2} \text{ h}^{-1}$, 질소섭취율의 경우 $0.4 \sim 9.4 \text{ mg N m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ 값의 범위를 보였다(Fig. 3.5.6). 하계기간 동안 1월 13일 조사($12.8\pm 17.0 \text{ mg C m}^{-2} \text{ h}^{-1}$)에서 상대적으로 12월 30일 ($3.7\pm 1.5 \text{ mg C m}^{-2} \text{ h}^{-1}$) 및 1월 25일($2.4\pm 2.4 \text{ mg C m}^{-2} \text{ h}^{-1}$)에 비해 높은 탄소 섭취율 보였다(Fig. 3.5.6). 질소 섭취율 역시 탄소 섭취율과 유사한 경향을 보였다. 12월에 측정된 값은 전반적으로 내만에서 외만과 값의 유의미한 차이를 보이지 않으나, 1월에는 빙벽에 가까울수록 상대적으로 탄소 및 질소 섭취율 값이 낮아지는 경향을 보였다. Picophytoplankton ($< 2\mu\text{m}$)은

총 탄소 및 질소 섭취율의 0.7~35.9%, 4.6~40.4%로 각각 나타났으며, 하계기간동안 맥스웰만과 인접해있는 마리안소만 입구정점인 MC19에서 가장 높은 기여도를 보였다. 전반적으로 picophytoplankton 기여율 (<math><2\mu\text{m}</math>)은 1월보다 12월에 상대적으로 높았으나 12월에는 MC19(총 탄소의 33.0%, 총 질소의 37.7%), 1월에는 MC13에서 가장 높은 값(총 탄소의 35.9%, 총 질소의 40.4%)을 보임에 따라 시기에 따른 해양환경변화가 다름을 유추할 수 있었다(Fig. 3.5.6).

나. 광학/레이더 원격탐사 자료 융합 분석을 통한 빙하후퇴 경향 분석

유럽우주국 (European Space Agency, EAS)의 Sentinel-1 자료를 조회 후 2016-2021년 남극 하계시기 (12월-2월) 동안 총 37개 시점에 대해서 구축을 수행하였고(Table 3.5.1), 공간해상도가 10m급인 영상레이더를 이용하여 연안 빙하의 상태는 저해상도로 구분할 수 있으나 날씨와 상관없이 다양한 시기의 영상을 확보할 수 있어 빙하의 후퇴를 모니터링하기에는 유용할 것으로 판단된다. 광학 위성자료는 세종기지 인근 연안빙하 관측 목적으로 기존에 구축한 마리안 소만 1956/1957 ~ 2019/2020년 시기 시계열 원격탐사 자료 데이터셋에 2020년 12월-2021년 3월 아리랑위성 3호와 3A호 위성에서 획득한 영상자료를 추가 구축하였다. 2016-2021년 시계열 영상레이더 활용 마리안 소만 연안 빙하 경계 매핑 결과는 Fig. 3.5.7과 같다. 연간변화율 추정방법을 적용한 결과 마리안 소만의 연안빙하는 적용한 결과 마리안 소만의 연안빙하는 1956/1957 ~ 2020/2021년의 64년 기간 동안 약 27.2 m y^{-1} 후퇴속도가 산정되었으나(Fig. 3.5.8), 1956/1957 ~ 2021/2022년의 66년 기간 동안 약 1900 m 변화하였으며, 31.7 m y^{-1} 후퇴속도가 산정되었다(Fig. 3.5.9). 이것은 2020-2022년 사이에서 연안빙하의 급격한 후퇴를 지시한다. 가장 최근의 1년간 변화인 2021년 3월 3일과 2022년 3월 29일 획득 영상에서 추출된 경계를 비교해보았을 때 1년 사이에도 수십 m 규모로 불규칙한 경계 변화가 관찰되었으며, 2021년 11월에서 2022년 3월의 약 4개월 사이에도 위치에 따라 수 m의 변화가 발생함을 확인하였다(Table 3.5.2).

A study on variability in phytoplankton carbon and nitrogen uptake rates and glacial retreat rates in Maxwell Bay and Marian Bay, near King Sejong Station

Sun-Yong Ha

Division of Ocean Sciences, KOPRI

Abstract: Rapidly changing conditions in high-latitude coastal systems can significantly impact biogeochemical cycles because these systems are strongly influenced by freshwater discharged from melting glaciers and streams on land. Generally, Antarctic coastal areas are considered high-productivity areas in which phytoplankton growth prevails under various environmental conditions (e.g., oceanographic and meteorological conditions). A total of three investigations were *in situ* carbon and nitrogen uptake of phytoplankton during the Marian Cove and Maxwell Bay from January 2020 to the end of December 2022. As a result, during the phytoplankton growth period (December–January), carbon and nitrogen uptake rates showed a wide range, and it was confirmed that they were controlled by differences in light transmittance (euphotic depth) and preferred nutrients. In addition, through satellite optical/imaging radar data built for the purpose of observing coastal glaciers near the King Sejong Station, the coastal glacier of Marian Cove changed by about 1900 m over the 66-year period from 1956/1957 to 2021/2022, and the retreat rate of 31.71 m per year was calculated. Even within a year, irregular boundary changes were observed on fluctuations of several meters.

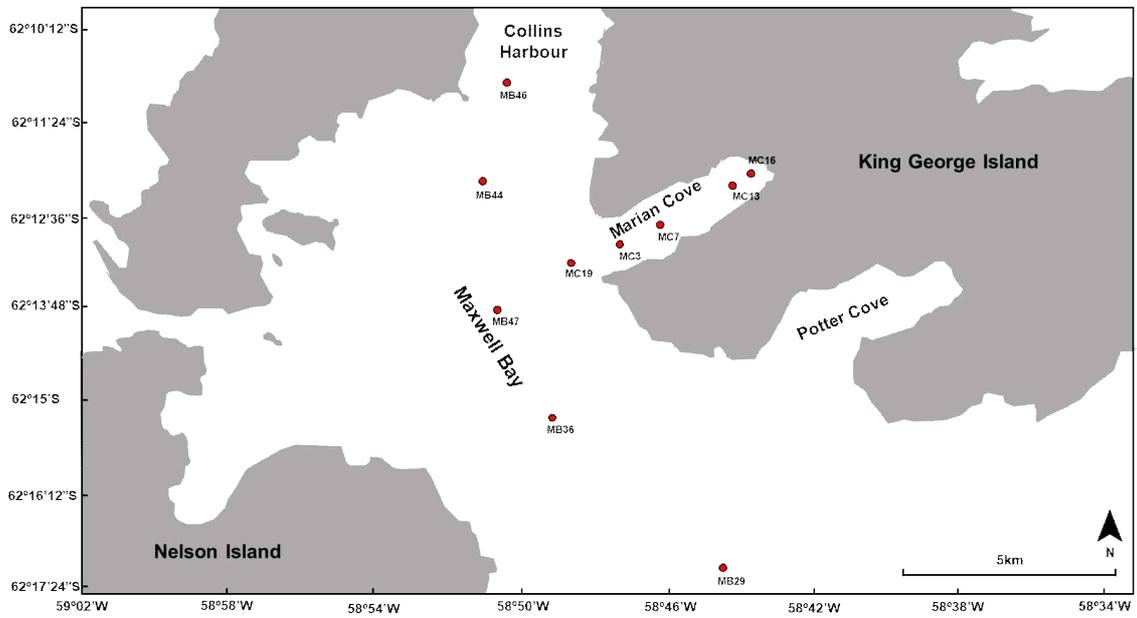


Fig. 3.5.1. Sampling site of study area.

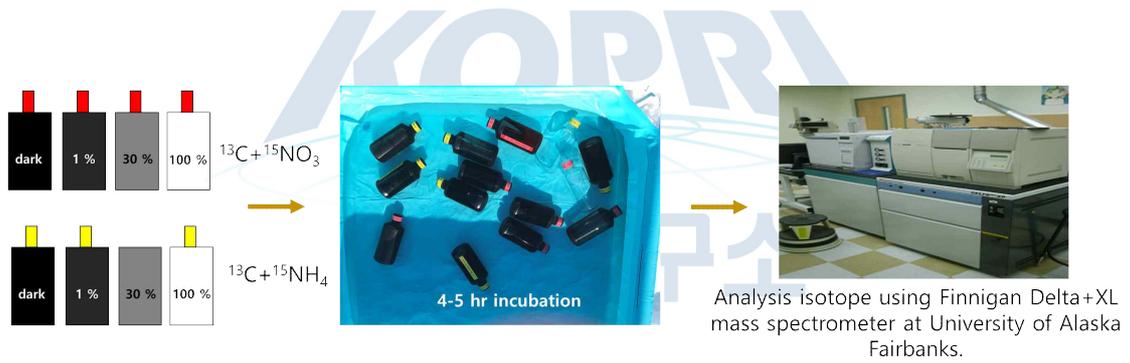


Fig. 3.5.2. Diagrams of measurements for carbon and nitrogen uptake of phytoplankton.

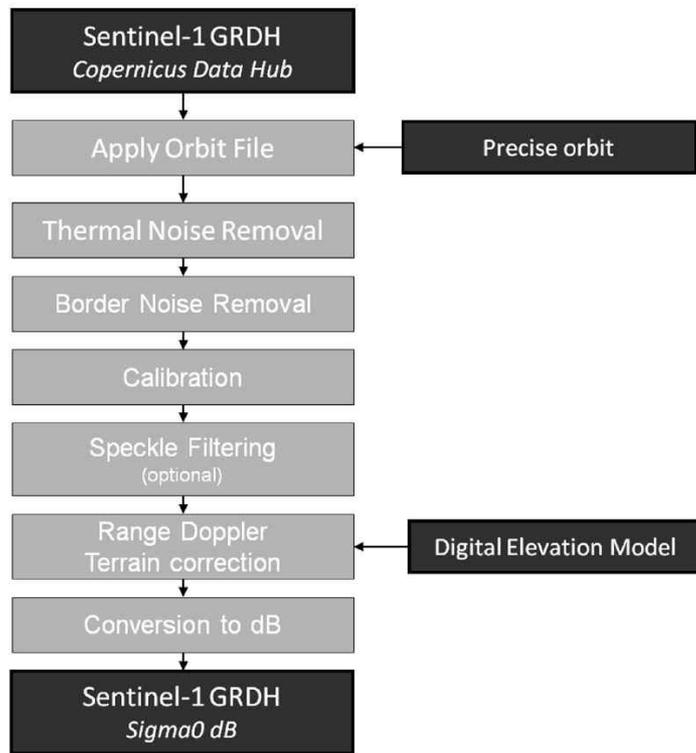


Fig. 3.5.3. Sentinel-1 GRD preprocessing workflow (Filipponi, 2019).



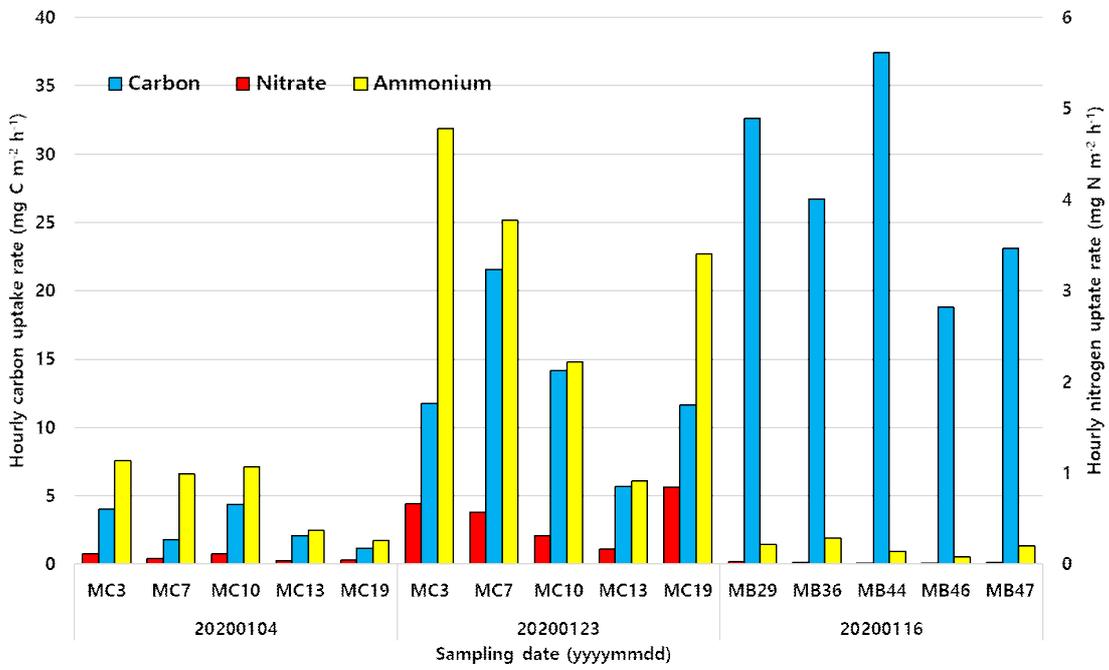


Fig. 3.5.4. Daily integrated carbon, nitrate, and ammonium uptake rates of phytoplankton in Marian Cove and Maxwell Bay, 2020.



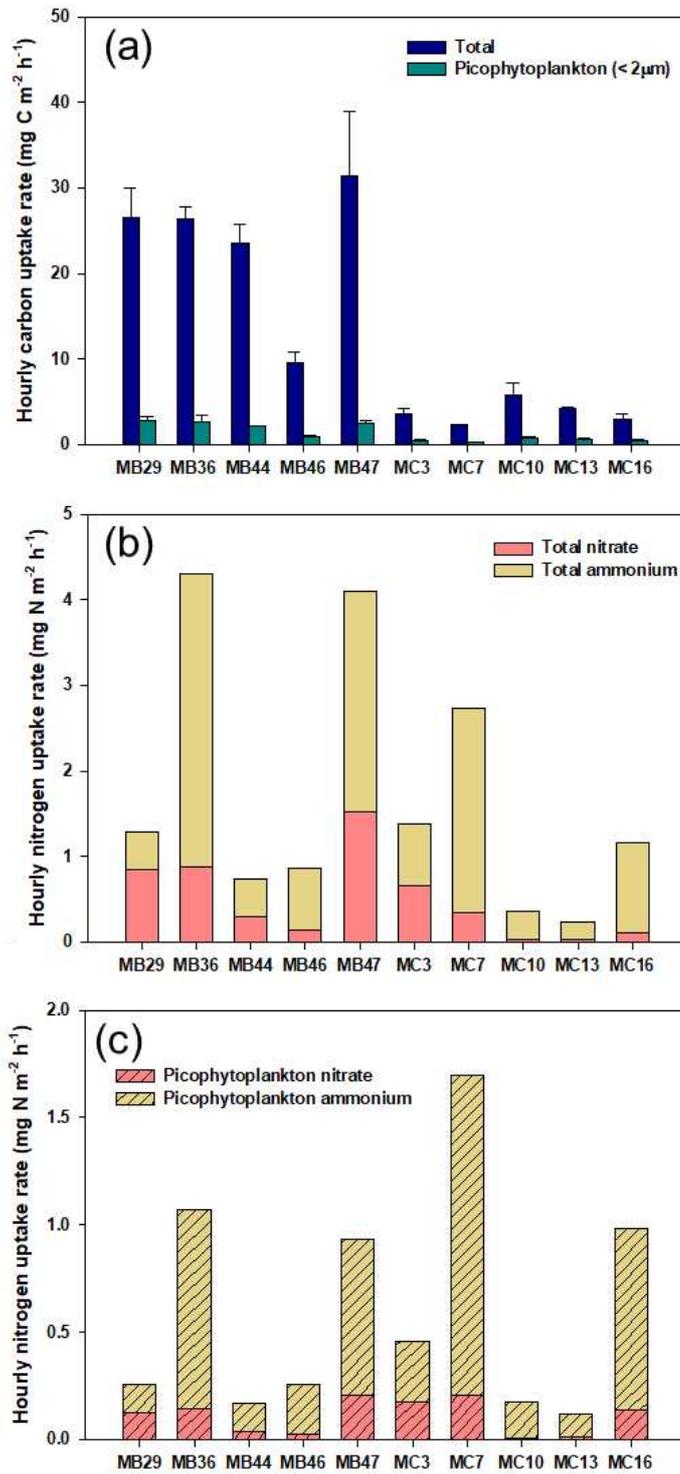


Fig. 3.5.5. Hourly (a) carbon, (b) nitrogen uptake rates of phytoplankton for total, and (c) picophytoplankton in 2020/2021, integrated from the surface to 1% light depth.

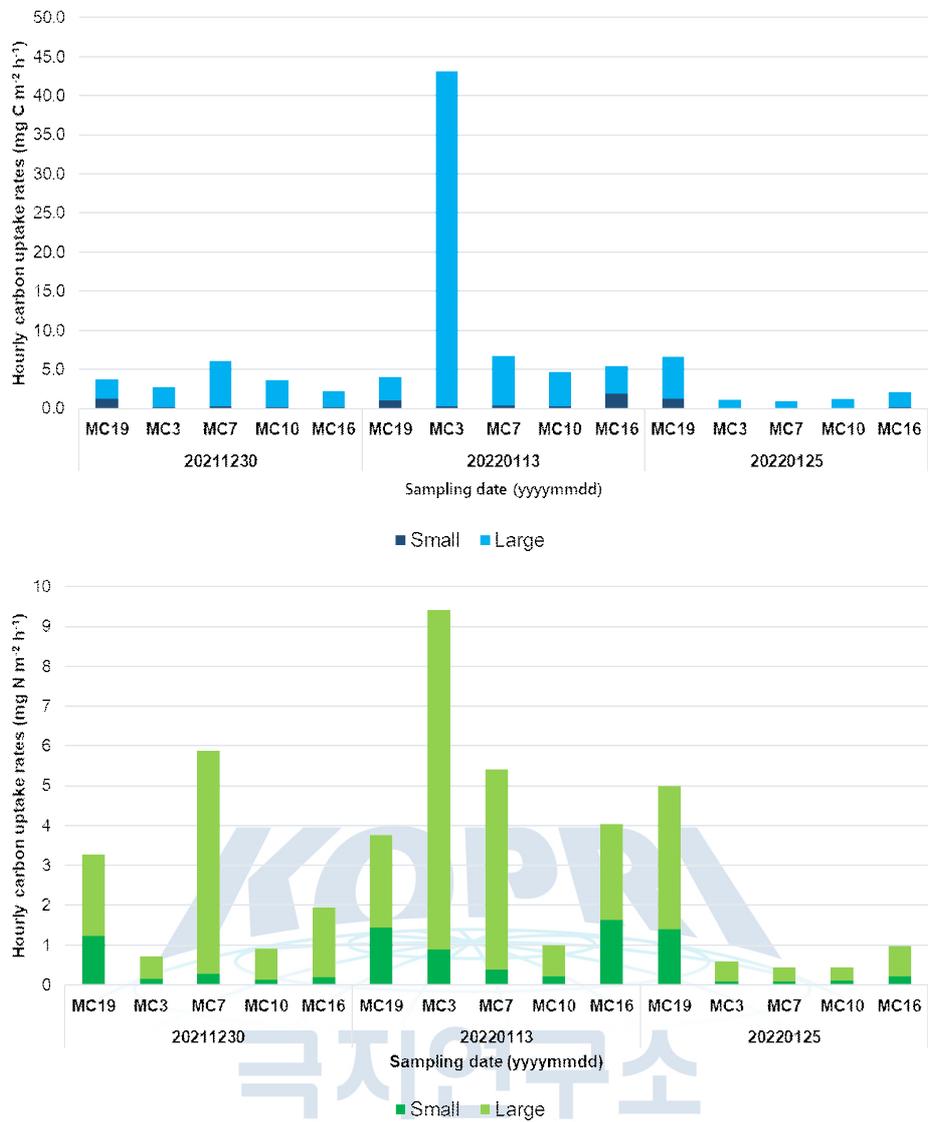


Fig. 3.5.6. Hourly carbon and nitrogen uptake of phytoplankton integrated from the surface to 1% light depth in Marian Cove.

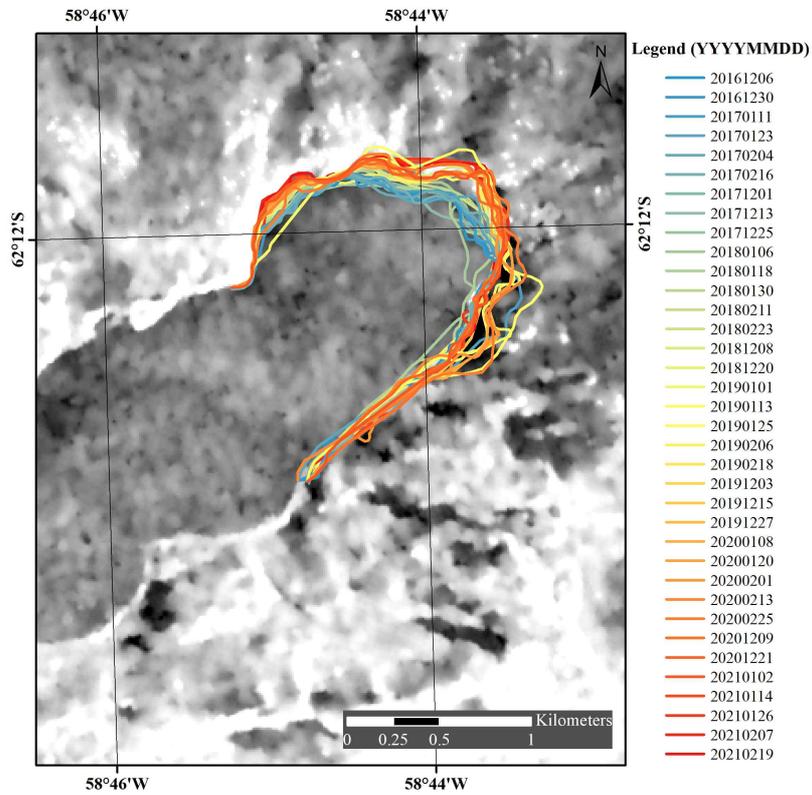


Fig. 3.5.7. Glacier retreat mapping using imaging radar from 2016 to 2021.

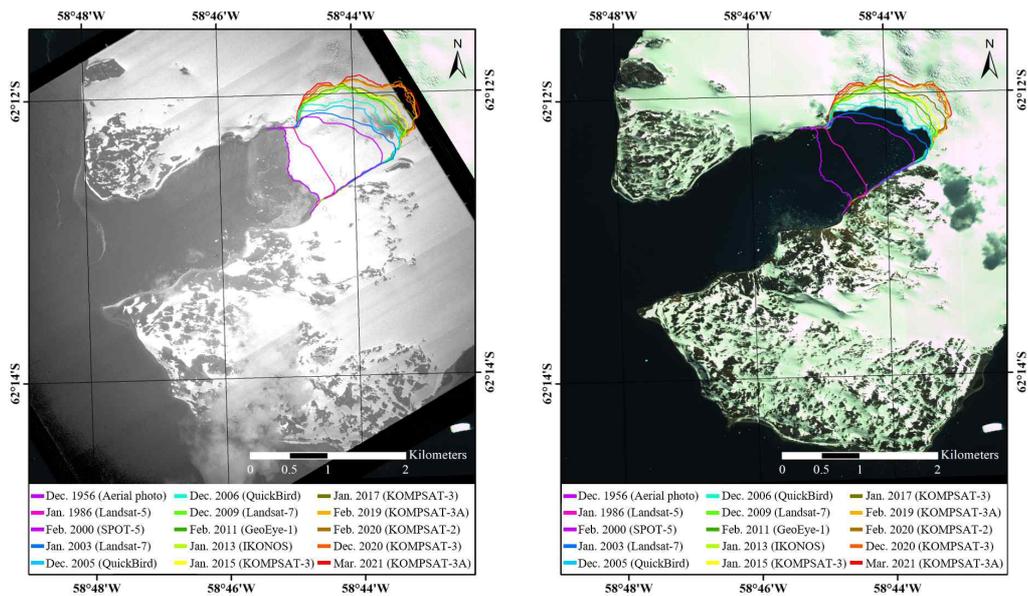


Fig. 3.5.8. Coastal glacier boundary mapping result using time series aerial and satellite data from 1956/1957 to 2020/2021.

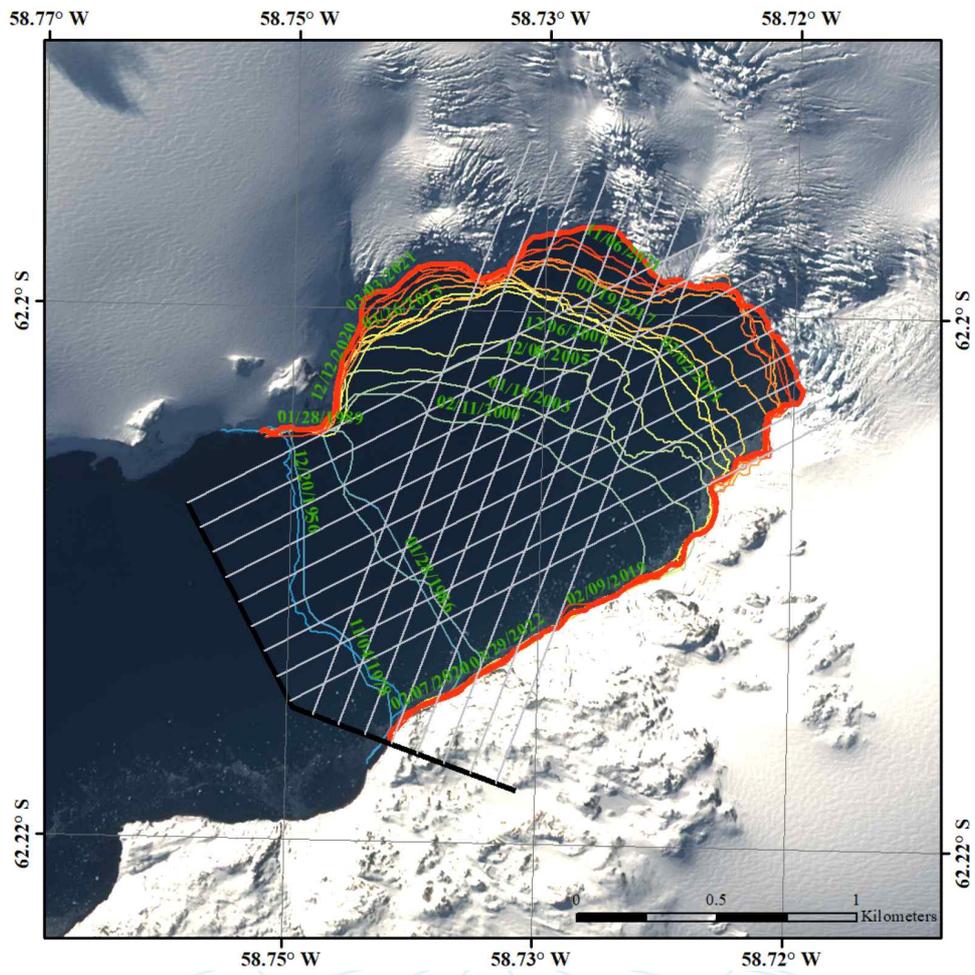


Fig. 3.5.9. Glacier retreat detected at Marian Cove from DSAS analysis.

극지연구소

Table 3.5.1. Sentinel-1 imaging radar data

| No. | Acquisition date | No. | Acquisition date |
|-----|------------------|-----|------------------|
| 1 | 06 Dec 2016 | 20 | 25 Jan 2019 |
| 2 | 18 Dec 2016 | 21 | 06 Feb 2019 |
| 3 | 30 Dec 2016 | 22 | 18 Feb 2019 |
| 4 | 11 Jan 2017 | 23 | 03 Dec 2019 |
| 5 | 23 Jan 2017 | 24 | 15 Dec 2019 |
| 6 | 04 Feb 2017 | 25 | 27 Dec 2019 |
| 7 | 16 Feb 2017 | 26 | 08 Jan 2020 |
| 8 | 01 Dec 2017 | 27 | 20 Jan 2020 |
| 9 | 13 Dec 2017 | 28 | 01 Feb 2020 |
| 10 | 25 Dec 2017 | 29 | 13 Feb 2020 |
| 11 | 06 Jan 2018 | 30 | 25 Feb 2020 |
| 12 | 18 Jan 2018 | 31 | 09 Dec 2020 |
| 13 | 30 Jan 2018 | 32 | 21 Dec 2020 |
| 14 | 11 Feb 2018 | 33 | 2 Jan 2021 |
| 15 | 23 Feb 2018 | 34 | 14 Jan 2021 |
| 16 | 08 Dec 2018 | 35 | 26 Jan 2021 |
| 17 | 20 Dec 2018 | 36 | 07 Feb 2021 |
| 18 | 01 Jan 2019 | 37 | 19 Feb 2021 |
| 19 | 13 Jan 2019 | | |

극지연구소

Table 3.5.2. Coastal glacier change and velocity estimated from optical satellite imagery (The IDs are in order from top to bottom in Fig. 3.5.9.)

| ID | NSM(m) | SCE(m) | EPR(m/year) | LRR(m/year) |
|----|---------|---------|-------------|-------------|
| 1 | 1434.99 | 1434.99 | 21.97 | 26.65 |
| 2 | 1573.46 | 1573.46 | 24.09 | 29.49 |
| 3 | 1726.27 | 1746.49 | 26.43 | 33.58 |
| 4 | 1830.11 | 1830.11 | 28.02 | 34.97 |
| 5 | 1902.41 | 1902.41 | 29.13 | 35.66 |
| 6 | 1971.63 | 1971.63 | 30.19 | 36.39 |
| 7 | 1952.11 | 1952.11 | 29.89 | 35.70 |
| 8 | 1695.53 | 1705.61 | 25.96 | 32.67 |
| 9 | 1482.94 | 1663.83 | 22.70 | 30.26 |
| 10 | 1397.90 | 1397.90 | 21.40 | 25.81 |
| 11 | 1547.95 | 1579.99 | 23.70 | 29.20 |
| 12 | 1718.81 | 1750.69 | 26.32 | 31.61 |
| 13 | 1500.29 | 1500.29 | 41.46 | 39.27 |
| 14 | 1610.59 | 1610.59 | 44.50 | 40.73 |
| 15 | 1581.63 | 1581.63 | 47.66 | 39.16 |
| 16 | 759.06 | 759.06 | 34.28 | 29.49 |
| 17 | 783.05 | 783.05 | 35.36 | 35.51 |



제 6 절 서남극해 식물플랑크톤 군집 공간 분포 (이영주)

요약: 서남극해에서 환경변화에 따른 식물플랑크톤 군집의 시공간 분포 변동 양상을 파악하기 위하여 현장조사가 이루어졌다. 서남극 연안에서는 착편모류 *Phaeocystis antarctica*와 규조류가 주로 우점하며 이 두 그룹은 먹이망 구조와 생지화학 순환에 다른 역할을 한다. 2020년 1월 Imaging FlowCytobot을 활용한 연속관측 결과 아문젠 폴리니아와 Wrigley Gulf 폴리니아에서 식물플랑크톤 군집구조의 공간적 변동 양상이 다소 다르게 나타났으며 이는 빙붕의 급격한 후퇴와 용빙수 유입, 해수순환 변동 등의 환경 변화에 대한 식물플랑크톤 군집의 불안정한 반응을 나타내는 것으로 판단된다. 서남극 연안의 리틀 아메리카 베이진, 아문젠 폴리니아, 리글리만 폴리니아와 외양의 남동인디아해령에서 식물플랑크톤 생물량은 각각 평균 4.55 ug/L와 0.40 ug/L를 보였으며 연안역에서 *P. antarctica*가, 외양역에서 규조류가 우점하는 양상을 나타냈다. 연안에서도 해역간 우점종이 다소 차이를 보여 남극 하계 식물플랑크톤 대번성 시기에 식물플랑크톤 생물량과 군집구조는 시공간적 변동이 크게 나타나는 것으로 판단된다.

1. 서론

식물플랑크톤은 해양생태계에서 일차생산자로서 중요한 역할을 한다. 식물플랑크톤의 생물량과 생산력은 해양의 물리, 화학적 환경 요인과 상위 포식자인 동물플랑크톤의 섭식에 의하여 영향 받는다. 남극은 높은 일차생산으로 전 지구 탄소흡수율의 20 %를 차지하는 해역이다 (Takahashi et al., 2009). 남극의 하계에는 일조량이 증가하고 기온이 증가하여 해빙이 녹기 시작하는데 활강바람이 해빙을 바깥해역으로 밀어내어 대륙붕 해역에 폴리니아 (polynya)가 형성되며 식물플랑크톤은 폴리니아에서 대증식을 일으킨다 (Tremblay and Smith, 2007). 서남극 폴리니아에서는 하계 식물플랑크톤 대증식에 착편모류 *Phaeocystis antarctica*와 규조류가 크게 우점하여 나타나며, 시공간적으로 다른 분포특성을 보인다 (Lee et al., 2016; Smith et al., 2010). 이 두 우점 그룹은 탄소 흡수율, 영양염 이용률이 다르게 나타날 뿐 아니라 크릴에 의한 먹이 선호도 또한 차이를 보여 남극 연안해역에서 생지화학 순환과 해양 먹이망에 직접적인 영향을 미친다. 식물플랑크톤 그룹의 분포에 대한 많은 연구가 이루어져 있으며 이들은 표층혼합층 (Mixed Layer Depth, MLD), 수온, 광량, 해빙으로부터의 seeding, 용승, 포식압 등 다양한 환경요인에 의해 영향 받는 것으로 알려져 있다. 서남극 아문젠해에서 빙붕의 기저부 용빙은 온난화 기후에서 증가할 것으로 예상되며 최근에는 스웨이트즈 빙하의 붕괴 위험이 높아지는 것으로 보고되어 있다. 빙붕의 기저부 손실 증가로 인하여 해수순환, 용승, 철 공급 등 연안환경 변화가 가속화될 것으로 예상되지만 이러한 환경변화에 의한 식물플랑크톤 군집구조 및 생물량 변동에 대한 연구는 매우 부족하다. 본 연구에서는 급격한 환경변화를 보이는 서남극해에서 식물플랑크톤 군집 변동과 이에 영향을 미치는 환경요인을 파악하고자 하였다.

2. 재료 및 방법

서남극해에서의 해양조사는 2020년 1월 아문젠 연안해역, 2020년 12월 로스해 리틀 아메리

카 베이진 해역, 2021년 11월 외양의 남동 인디아 해령 주변해역에서 쇄빙연구선 아라온 (ARAON)을 활용하여 이루어졌다(Fig. 3.6.1). 식물플랑크톤 분석을 위한 해수는 CTD 채수시스템을 이용하여 4-6개 수심에서 채집하였다. 크기별 chl-a 농도를 측정하기 위하여 해수 500 mL를 20 μ m, 3 μ m, GF/F 필터로 연속하여 여과하였고, 총 chl-a 농도는 해수를 GF/F에 여과하였다. 추출을 위해 90% 아세톤에 여과지를 넣어 냉암소에서 보관하였고, 24시간 후 형광광도계 (Trilogy, Turner Designs)를 이용하여 흡광도를 측정하여 계산하였다. 색소분석을 위하여 채집된 해수 1L를 직경 47 mm GF/F에 여과하여 분석 전까지 -80°C에 보관하였다. 여과지는 100% 아세톤 3 mL에 넣고 30초 동안 초음파처리 되었으며 냉암소에서 15시간 추출되었다. 고성능 액체 크로마토그래피 (HPLC, Agilent series 1200)는 21개의 표준색소를 이용하여 보정하였고 색소분석은 Zapata et al. (2000)의 방법을 따랐다. 각 피크의 머무름 시간은 표준색소의 머무름 시간과 비교하여 구분하였고 response factor는 표준색소의 주입량과 피크 면적의 비율로 계산하였으며 표준색소의 농도는 분광광도계로 측정된 최대흡광도 파장과 알려져 있는 각 표준색소의 흡광계수를 이용하여 보정되었다. 전체 식물플랑크톤 군집연구를 위하여 CHEMTAX (CHEMical TAXonomy) 프로그램 1.95가 사용되었다. 연구해역에서의 기존 연구와 본 연구의 현미경 관찰 결과에 기초하여 7개의 식물플랑크톤 그룹이 CHEMTAX 분석에 선택되었고 초기색소비율은 Wright et al. (2010)를 따랐다. 식물플랑크톤 중 현존량 분석을 위하여 슬라이드를 제작하였다. 채집된 해수 200 mL를 글루타알데히드 (최종농도 1%)로 고정한 후 30 - 100 mL를 0.8 μ m 필터에 여과하여 슬라이드글라스 위에 필터지를 올리고 이물질 오일을 묻힌 커버글라스로 덮어 냉동보관 하였다. 식물플랑크톤 정량분석을 위하여 blue excitation filter가 장착된 형광현미경 (Olympus, BX51) 하에서 400 - 1600배의 배율로 계수하였으며 탄소생물량 계산을 위해 각 개체의 크기를 측정하였다. 규조류 및 편모조류의 각 개체는 적절한 도형에 적용시켜 세포의 부피를 계산하였고, 계산된 부피로부터 Menden-Deuer and Lessard (2000)의 방정식을 이용하여 규조류와 편모조류의 탄소생물량을 계산하였다. *P. antarctica*는 단독 유영세포에 대한 전환상수 3.33 pgC/cell을 이용하였다 (Mathot et al., 2000). 연구선의 운항 항로상에서 해수공급시스템을 활용하여 연속변수를 측정하였다. 해수의 온도와 염분은 열염분계 (SBE45)를 이용하였고, 연속관측 큐벳이 장착된 Turner Designs 10-AU를 사용하여 엽록소 형광을 측정하였다. 엽록소 형광을 포함하는 입자의 이미지를 수집하는 Imaging FlowCytobot (IFCB)를 사용하여 식물플랑크톤 중의 현존량을 측정하였다. 모든 디지털 이미지는 기계학습을 사용하여 자동으로 분류되었다.

3. 결과 및 고찰

가. 아문젠해 연안해역에서 식물플랑크톤 종조성 및 군집분포

용빙수 분포에 따른 식물플랑크톤 군집구조 및 생물량의 공간적 변동성을 파악하기 위하여 2020년 1월 아문젠 폴리니아와 Wrigley Gulf를 포함하는 서남극해 연안해역의 아라온 운항항로에서 연속관측 장비를 활용하여 관측 시스템을 셋업하였고 underway로부터 공급되는 표층해수의 식물플랑크톤 군집구조 및 생물량의 정밀 공간분포를 관측하였다 (Fig. 3.6.2). 연구해역

의 식물플랑크톤 생물량 (chl-a)은 남대양 외해역의 표층에서 전반적으로 1 ug/L 이하의 낮은 농도를 나타냈으나 극전선 해역에서 상대적으로 높은 생물량을 보였다. 서남극 연안해역에서는 약 5 ug/L 이상의 식물플랑크톤 생물량으로 대변성을 나타냈다. IFCB로 관측된 식물플랑크톤 군집구조는 Wrigley Gulf에서 전반적으로 *P. antarctica*가 식물플랑크톤 현존량에 크게 우점하여 나타났다 (>80%). 외해쪽의 해빙 주변부에서는 *P. antarctica*의 우점율이 급격하게 감소하였고 (<20%), 규조류의 우점율이 높게 나타났으나 (>50%) 아문젠 폴리니아에서는 외해쪽에서 닷슨빙봉 앞 해역까지 규조류 우점 군집에서 *P. antarctica* 우점 군집으로의 점진적인 식물플랑크톤 군집구조 변동이 나타났다. 이는 해역 전반에서 *P. antarctica*가 식물플랑크톤 군집에 최우점종으로 나타났던 Wrigley Gulf에서와는 다른 양상으로, 해빙, 수괴분포, 용빙수 분포 등의 환경 요인에 의해 두 인접해역간 식물플랑크톤 군집의 공간분포 양상이 다르게 나타날 수 있는 것으로 판단된다. 특히 아문젠 폴리니아의 닷슨 빙봉, 스웨이츠 빙봉 등은 서남극해에서 가장 빠르게 빙봉이 녹고있는 해역으로 알려져 있어 본 해역에서의 지속적인 관측이 필요한 것으로 사료된다.

나. 아문젠 연안해역에서 미량금속 농도와 식물플랑크톤 군집구조의 공간 변동

아문젠해에서 2018년 1월 미량금속 농도가 관측되었으며 식물플랑크톤 생물량 및 군집구조와 비교하였다 (Fig. 3.6.3). CDW 유입경로로 추정되는 흐름을 따라 아문젠 외해쪽에서 닷슨곶을 따라 아문젠 폴리니아로 들어와 닷슨빙봉 동측에서 빙봉 앞을 거쳐 서측으로 빠져나가는 경로에서 철 농도와 엽록소-a 농도분포는 밀접한 공간분포 변동 양상을 보였다. 철 농도는 아문젠 외해뿐 아니라 폴리니아의 표층부터 저층까지 전체 해역에서 매우 낮은 값을 보였고 닷슨빙봉 앞에서도 동측보다 서측에서 높은 값을 나타냈다. 빙봉 앞 서측해역으로부터 벗어나 바로 인접한 정점의 표층에서 철 농도는 다시 매우 낮은 값을 보였다. 엽록소-a 농도는 외해에서 낮고 아문젠 폴리니아에서 높은 값을 보여 아문젠 연안해역에서 하계의 전형적인 식물플랑크톤 분포 경향을 나타냈다. 그러나 닷슨빙봉 앞의 서측해역에서 낮은 농도를 보였고 빙봉 앞을 벗어나 인접 정점부터 다시 높은 엽록소-a 농도를 보였다. 이는 철 농도분포와 음의 상관관계를 보이는 결과로 아문젠 연안해역에서 철은 식물플랑크톤에 의한 uptake로 고갈되어있는 상태이며 용빙수로부터 닷슨빙봉 앞으로 공급되나 이 또한 빠른 속도로 uptake되는 것으로 판단된다. 식물플랑크톤 군집은 대륙붕단의 해빙 주변부에서 규조류가 우점하는 낮은 생물량을 보였고, 아문젠 폴리니아에서 *P. antarctica*가 크게 우점하여 높은 생물량으로 식물플랑크톤 대변성을 보였다. 빙봉 앞 정점에서는 규조류의 우점율이 다소 증가하여 *P. antarctica*와 혼재되어 분포하였다. 아문젠 연안해역 식물플랑크톤 군집은 해빙농도, 표층혼합층 수심, 광량, 철 농도 등의 환경요인에 의하여 영향 받으며 용빙수에 의한 미량금속 공급은 아문젠 폴리니아의 일차 생산을 증가시킬 수 있는 가능성이 있는 것으로 판단된다.

다. 서남극해 식물플랑크톤 생물량과 군집 분포

(1) 로스해 리틀아메리카 베이진 해역에서 식물플랑크톤 정밀 공간분포

2020년 12월 로스해 연안의 동쪽인 리틀 아메리카 베이진 연안해역에서 엽록소-a 농도와

식물플랑크톤 군집구조의 연속공간분포 및 10개 정점조사가 수행되었다 (Fig. 3.6.4). 연구해역은 표층으로부터 수심 20-50미터까지 높은 엽록소-a 농도를 나타내 표층혼합층 내에서 비교적 유사한 식물플랑크톤 생물량 분포를 보였다. 연안쪽에 위치한 정점에서 5 ug/L 이상으로 높은 식물플랑크톤 생물량을 보였고, 외해쪽으로 갈수록 생물량이 감소하였으나 일부 정점에서는 상대적으로 높은 생물량이 불규칙적으로 나타났다. HPLC를 활용한 광합성 색소분석 결과 연구해역에서 가장 연안쪽에 위치한 정점 63과 64에서 착편모조류의 지시색소인 Hex-fuco 농도가 높은 값을 보여 *P. antarctica*가 식물플랑크톤 생물량에 우점함을 나타내었다. 규조류의 지시색소인 Fuco의 농도 또한 연안쪽에서 상대적으로 높았고 외해로 갈수록 광합성 색소 농도가 급격하게 감소하여 식물플랑크톤 생물량의 감소 경향과 일치하는 결과를 보였다. 대륙붕단 인근에 위치한 일부 정점에서 주변해역보다 다소 높은 광합성 색소 농도를 보여 연구해역에서 식물플랑크톤 군집구조에 해빙, 수괴, 해류 등의 영향이 복잡하게 나타나는 것으로 판단된다.

(2) 서남극해 해역별 식물플랑크톤 군집구조 비교

서남극해 연안 (아문젠해, 로스해) 및 외해역 (남동인디아해령 주변해역)에서 식물플랑크톤 생물량 및 군집구조를 파악하기 위하여 서남극 연안해역인 아문젠해의 리글리만 폴리니아 (WGP; 2020년 1월), 아문젠해 폴리니아 (ASP; 2020년 1월), 로스해 폴리니아 (리틀 아메리카 베이진 해역; 2020년 12월)와 외양해역인 남동 인디아해령 (SEIR; 2021년 11월)에서 현장조사가 수행되었다 (Fig. 3.6.5). 식물플랑크톤 생물량 (엽록소-a 농도)은 외양역에서 평균 0.40 μ g/L로 낮았고 연안역에서 평균 4.55 μ g/L로 10배 이상 높은 값을 보였으며, 연안역에서도 해역별 평균 엽록소-a 농도가 3.24 - 5.34 μ g/L의 범위로 공간변이를 보였다. 서남극해 해역별 식물플랑크톤 군집구조를 비교한 결과 서남극 연안은 Hex-fuco를 지시색소로 가지는 *P. antarctica*가 가장 우점하며 외양에서는 Fuco를 지시색소로 가지는 규조류가 우점하여 나타났다. 연안해역에서도 아문젠해와 로스해 폴리니아에서 *P. antarctica*와 규조류의 우점율은 뚜렷한 차이를 보여 남극 하계 식물플랑크톤 대번성 기간에 식물플랑크톤 생물량과 군집구조는 시공간적 변동이 크게 나타나는 것으로 판단된다.

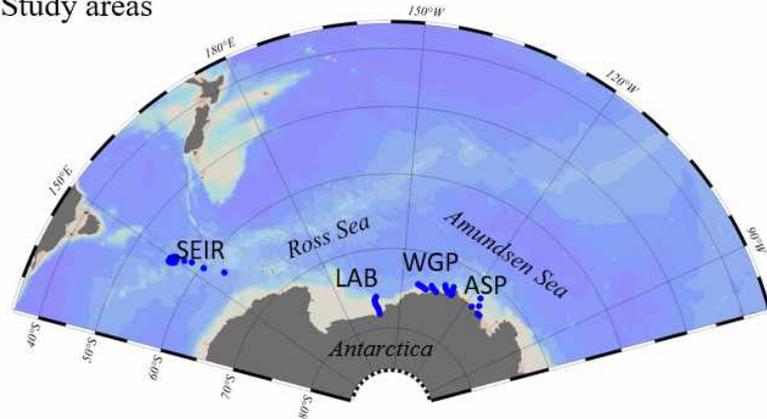
Environmental factor controlling phytoplankton community structure in the west Antarctica

Youngju Lee

Department of Ocean Sciences, KOPRI

Abstract: To understand the distribution of phytoplankton community and the influential environmental factors in the West Antarctic Ocean, three field surveys were conducted during the austral summer in Antarctica. Phytoplankton community dominated by *Phaeocystis antarctica* (Prymnesiophytes) and/or diatoms during the bloom periods, and they play different roles in the ecosystems and biogeochemical cycle in this area. In January 2020, phytoplankton species abundance was investigated using an automated continuous observation instrument, the Imaging FlowCytobot. The spatial variations of the phytoplankton community structure were slightly different in the Amundsen Sea Polynya and Wrigley Gulf Polynya, indicating an unstable response of the phytoplankton to environmental changes such as rapidly thinning ice shelves in West Antarctica. Phytoplankton biomass averaged 4.55 ug/L and 0.40 ug/L, respectively, in the coastal areas (the Amundsen and the Ross seas) and the Southeast Indian Ridge area. Although *P. antarctica* was dominant in the coastal areas and diatoms were dominant in the oceanic area, there were some differences between the dominant species in the coastal areas as well, indicating that the phytoplankton biomass and community structure during the bloom period showed large spatial variations.

(a) Study areas



(b) Phytoplankton biomass

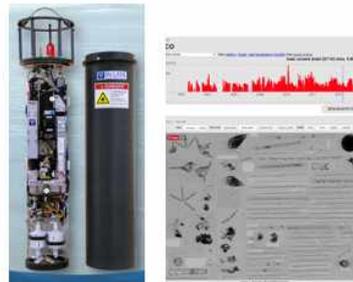


(c) Photosynthetic pigments



HPLC

(d) Phytoplankton abundance



Imaging FlowCytobot

Fig. 3.6.1. (a) Study areas and sampling stations in the Amundsen Sea Polynya (ASP, Wrigly Gulf Polynya (WGP), the Little American Basin (LAB), and the Southeast Indian Ridge (SEIR) in the Amundsen and Ross seas, west Antarctica. (b-d) Analytical methods for phytoplankton biomass, photosynthetic pigments, and phytoplankton species abundance.

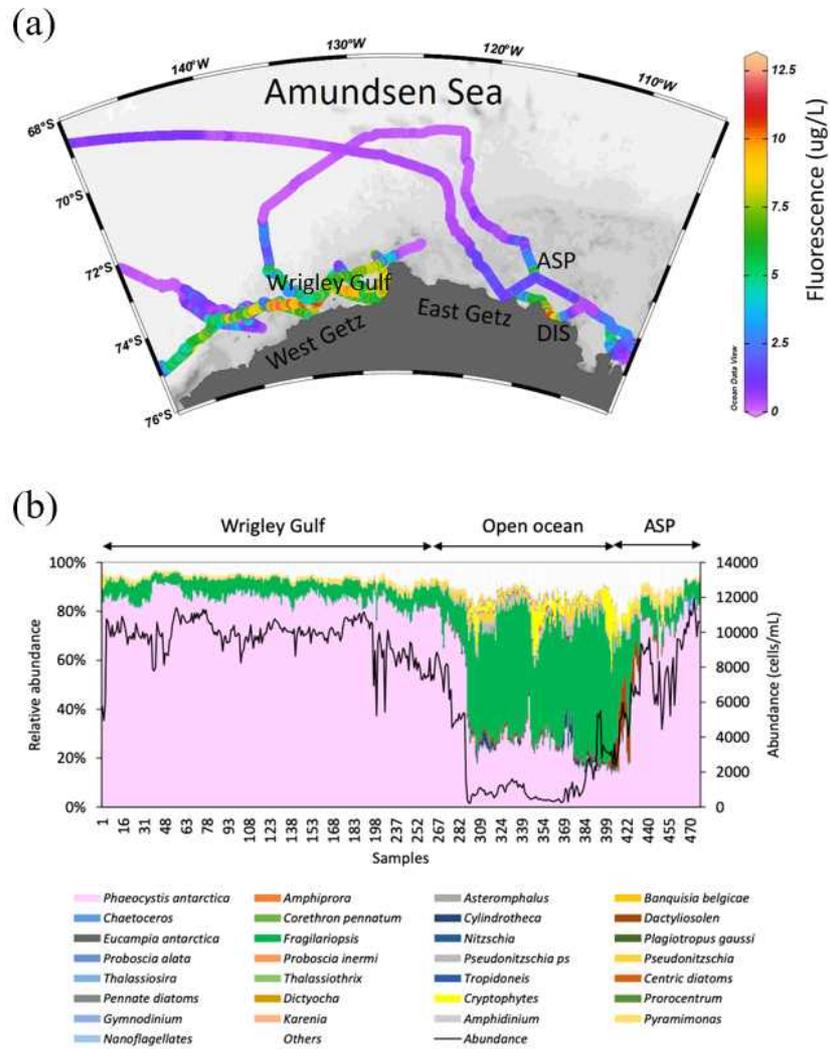


Fig. 3.6.2. High-resolution spatial distributions of phytoplankton biomass and community structures in the coastal waters of the Amundsen Sea, West Antarctica in January 2020.

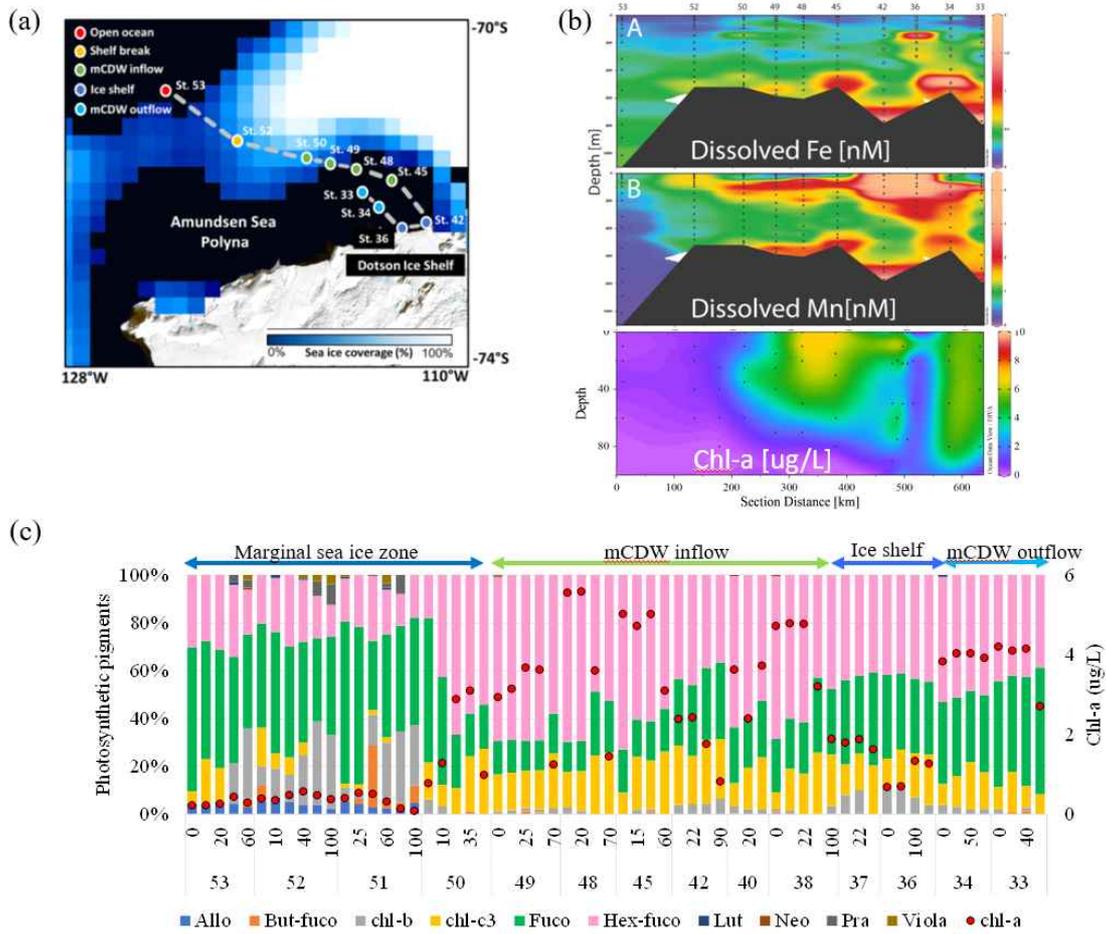


Fig. 3.6.3. Spatial distributions of trace metal (Van Manen et al., 2022) and chl-a concentrations and phytoplankton community structures in the mCDW inflow and outflow along the Dotson through in the Amundsen Sea, West Antarctica in January 2018.

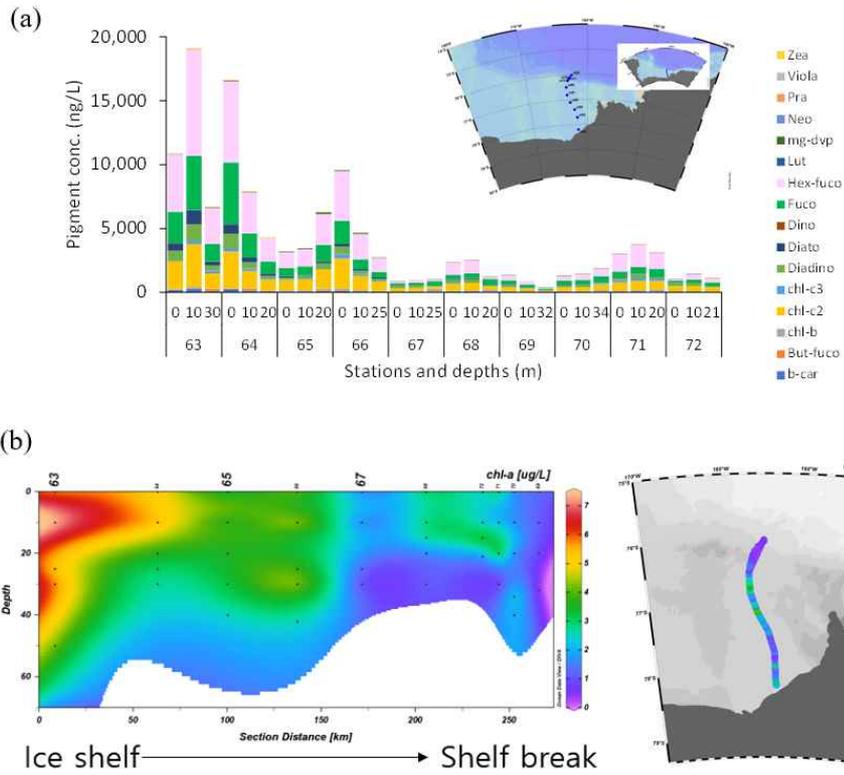


Fig. 3.6.4. Spatial distributions of phytoplankton biomass and community structure in the Little America Basin area of the Ross Sea in December 2020.



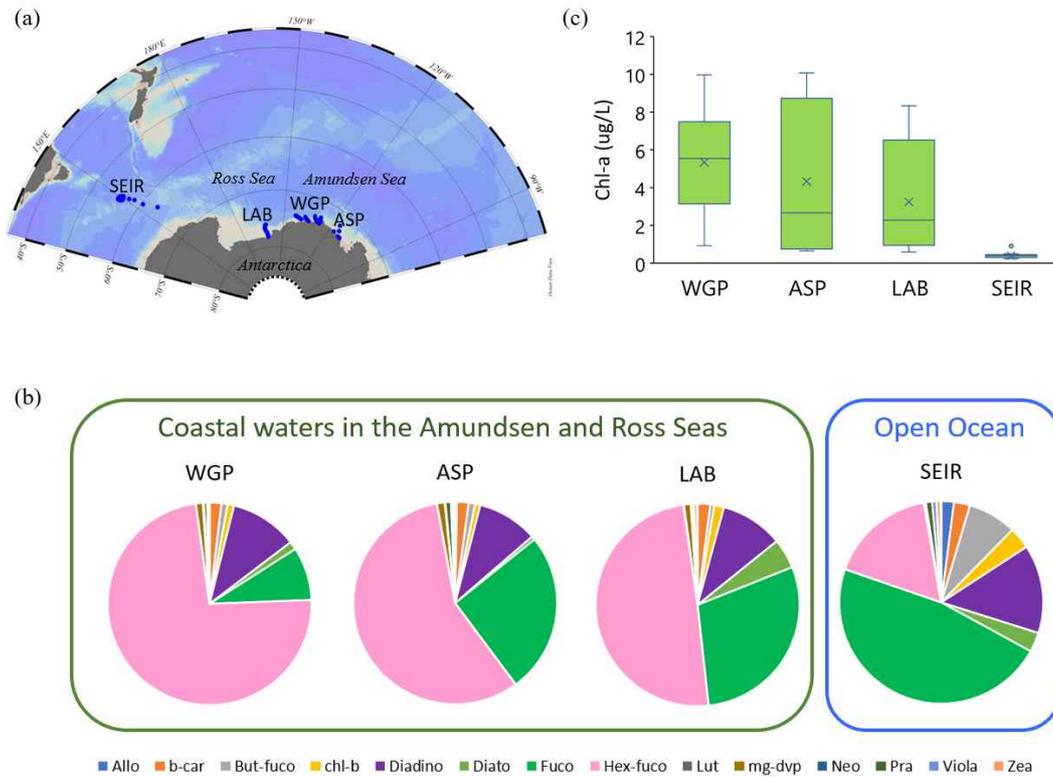
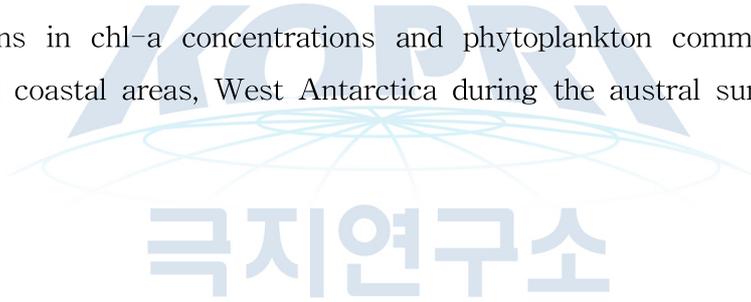


Fig. 3.6.5. Variations in chl-a concentrations and phytoplankton community structures in the open ocean and coastal areas, West Antarctica during the austral summer.



제 7 절 해양 생태계 및 생지화학 모델 (나형술)

요약: 남빙양은 지구 기후와 생지화학 순환에 강하게 영향을 미친다. 남극환류 이남의 남극해 발산 지역에서 심층의 물은 표층으로 용승되며 아남극 모드수와 남극 중층수는 북쪽으로 이동, 표층 수괴가 가라앉고 중간 깊이에서 북쪽으로 계속해서 이동하며 형성되어 저위도의 수온 약층으로 영양염을 수송하는 역할을 한다. 또한 상대적으로 따뜻한 환남극 심층수는 깊은 곳에서부터 로스해와 같은 남극 연안 표층으로 용승되면서 빙봉을 녹이고 이 지역에 철을 공급하는 역할을 한다. 남빙양은 점점 강한 기후 온난화로 인해 중위도 편서풍대의 극이동과 강화로 열과 이산화탄소의 흡수를 지배적으로 수행하고 있다. 남극 대륙붕지역에서 고정된 유기물질의 생물학적 침강 및 입자들의 분해과정을 통해 영양염은 수직적으로 이동된 후 다시 북쪽 해역으로 이동하여 표층 가까이로 공급된다. 반면 일부 유기물들과 영양염은 심층에 머물러 있기도 한다. 기후변화는 이러한 남극해에서의 침강 입자들에 의한 하부로의 이동에 대한 시간 규모와 각 수괴의 순환속도를 변화시키게 될 것으로 예측되며, 이는 결국 고위도뿐만 아니라 저위도의 생산성과 이산화탄소 흡수 기작에도 영향을 미치게 될 것이다. 그러나 거대한 규모의 복잡한 환경 변화와 함께 그 안의 여러 조절 요인들에 의한 메커니즘을 관측만으로 완벽히 이해하는 것은 어렵다. 본 연구에서는 모델링 연구를 통해 남극해 일차생산성과 생지화학 순환의 지리적 차이와 변화 원인을 이해하고자 한다.

1. 서론

ERSEM-GOTM (European Regional Seas Ecosystem Model-General Ocean Circulation Model)을 사용하여 두 개의 대표 정점에 대해 일차원 모델을 셋업 하였다. ERSEM은 해양 생지화학, 표영 환경 플랑크톤, 저서생물들을 위한 생태계 모델로 영국 폴리머스에서 최초로 개발되었다. ERSEM의 생물 기능군들은 종보다는 생태계내의 거시적인 역할에 기반을 두고 있으며, 상태변수들은 각 기능군들의 주요 화학적 원소들 (탄소, 엽록소a, 질소, 인, 규소, 철)로 표현 된다 (Fig. 3.7.1). ERSEM은 주변 수괴의 환경 조건, 물리적 과정, 먹이-포식자간 관계들을 고려하여 상태변수들의 시간 변화율을 계산하는 일련의 모듈들로 구성되어 있다. 가장 단순한 경우, 환경 인자들은 오프라인 혹은 은 단순한 0차원의 박스모델로서 제공될 수 있다. 하지만, 수평/수직적인 혼합과 생지화학적 피드백, 물리적 인자들에의 직접적인 결합 등이 더 실제적인 재현을 위해 필요하다. 모델의 생물들은 표영 환경의 일차 생산자, 소비자, 박테리아 분해자, 입자상 및 용존상 유기탄소, 그리고 저서 환경의 박테리아분해자. 유기 탄소들의 생태계기능의 주요 강 (Class) 들을 따라 분류된다. 이러한 강들의 대부분은 아강 (sub-type) 로 심화되어 분류되며 이는 기존의 NPZD 형태 모델들 보다 환경 조건들에 대한 생태계 반응을 환경 조건들에 대해 적응시키는데 있어 시스템의 유연성을 강화해준다. 생물 기능군 들의 모델 역학은 일반적으로 흡수와 소멸 과정 (호흡, 포식, 사멸, 용출 등)들에 의한 탄소 및 영양염 유기화합물로의 합성에 따른 영향을 받는 표준적인 생물에 기반을 두고 있다. ERSEM은 해양 하위 생태계 모델 중 가장 복잡한 형태 중 하나이다. 즉 생태계 역학에 영향을 주는 모든 주요한

과정들을 전부 포함하는 것이 그 철학이며, 충분한 기능군들로 생태계를 분류하여 그러한 과정들이 합리적으로 정의될 수 있도록 한다. 모델의 주요 특성은 탄소와 영양염의 역학을 분해하고 있다는 점으로 탄소순환을 이해하는데 있어 매우 적합한 도구가 될 수 있다. 영국에서 최초 개발되었기 때문에 애초에는 북해 연안의 생태계를 타겟으로 구성되었지만 많은 연구들을 통해 지금까지 여러 해역에 적용 및 개성되어 왔다. 이번 연구에서 ERSEM은 GOTM이라는 일차원 수층 혼합 모델과 결합되어 고정된 한 지점에서의 생지화학적 프로세스에 초점을 두었다.

2. 재료 및 방법

모델을 위한 연구 지역은 남빙양의 세 지역인 남극 환류 지역 (Antarctic Circumpolar Current; ACC; 60°S/180°E), 로스해 북서 해역 (NWR; Northwestern Ross Sea; 72°S/172°E), 테라노바만 폴리냐 지역 (TNB; Terra Nova Bay; 74.5°S, 165°E)에 대해 일차원 프레임을 적용하였다 (Fig. 3.7.2). 모델 총 수심은 500미터로 40개의 불규칙한 층으로 구성되어 있다. 모델 내 역학을 표현하는 수식들을 위한 여러 생지화학 파라미터 들이 존재하는데, 기본적으로 Butenschön et al. (2016) 버전의 파라미터 셋을 사용하되 몇 가지 주요 파라미터들에 대해서는 남극해에 최적화된 파라미터 셋을 이용하였으며 기본 파라미터들에 대해서는 Butenschön et al. (2016) 제시한 값을 사용하였다. 모델에 입력된 대기 강제력은 풍속과 표층 대기압, 해발 2m 기온과 이슬점, 총 운량 등으로 ECMWF (European Centre for Medium-Range Weather Forecasts)의 가장 최신 재분석 자료인 ERA5를 사용하였다 (1시간 간격 제공). 모델의 스핀업을 위해 재분석자료의 가장 초기 연도인 1979년도의 자료를 반복적으로 200년 간 입력하여 상태 변수들이 거의 완전한 평형상태에 이르도록 만들어 주었다. 수온과 염분의 Relaxation을 위해 the Met Office Hadley Centre의 관측 재분석 자료 (Ver. EN4.2.1; Good et al., 2013)가 사용되었으며 대기 강제력과 같이 1979년 자료를 1달 간격으로 매달 15일 입력하였으며 relaxation time scale은 24 시간으로 지정하였다. 스핀업을 위한 영양염 (인산염, 질산염, 규산염)의 초기 값은 WOA18 (World Ocean Atlas 2018)에서 제공된 해당 정점에서의 climatology의 1월 자료를 사용하였다. 철농도의 경우, Boyd and Ellwood (2010)에 따르면 남위 60도 부근 ACC 해역의 표층 여름철 철 농도가 0.1 nM 이하이고, 스핀업 기간 동안 철의 표층 농도가 점차 감소함을 고려하여 전 수층에 대해 0.29 nM의 일정한 값을 입력하였다. 그 외에 모든 상태변수들에 대한 초기 값은 역시 Butenschön et al. (2016)을 따랐다.

3. 결과 및 고찰

가. 일차 생산 및 식물플랑크톤 군집 구조

WOA18의 영양염 및 관측 엽록소 농도와 모형 결과를 비교 검증하였다 (Fig. 3.7.3-Fig. 3.7.5). ACC 정점에서는 연중 일사량이 세 정점 중 가장 높으나 여름철 엽록소 농도와 순 일차 생산량 (NPP)는 가장 낮았다 ($\sim 1 \text{ mg Chl m}^{-3}$, $1.2 \text{ g C m}^{-2} \text{ d}^{-1}$). 질산염은 약 24-27 μM 인산염은 약 1.0-1.7 μM 의 변화를 보이는 것으로 모의 되었으며 WOA18 자료와 비슷한 범위 었

으며 규산염의 경우 극전선 지역에서의 시공간적 변동성이 크다는 것을 감안할 때, 모형의 결과가 이 지역을 대표할 수 있다고 판단된다. 여름철 일사량이 300 Wm^{-2} 이상이며 질산염과 인산염의 농도가 충분함에도 1월 이후 식물플랑크톤 번성이 급격히 종료되는 현상은 매우 고갈되어있는 용존 철 때문으로 판단된다. NWR 정점에서 연중 해빙 증감에 따라 ACC 정점에 비해 다소 낮은 표층 입사광이 보인다. 최대 번성 시기인 2 월달 엽록소 농도 및 순 일차생산량은 $\sim 2 \text{ mg Chl m}^{-3}$ 와 $\sim 1.6 \text{ g C m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ 로, 이는 ACC 정점보다 다소 높았으며 질산염은 약 $25\text{-}30 \text{ }\mu\text{M}$, 인산염은 약 $1.2\text{-}2.0 \text{ }\mu\text{M}$, 규산염은 약 $52\text{-}70 \text{ }\mu\text{M}$ 의 범위로 재현되었다. 이 지역의 철 농도 또한 매우 고갈되어있는 편으로, 일차 생산 최대 시기의 결정 요인으로 판단된다. TNB 정점에서는 높은 위도와 해빙 농도로 표층 입사광은 세 정점 중 최저이나, 최대 번성 시기 (1월-2월) 엽록소 농도 및 순 일차생산량은 각각 약 $3.5 \text{ mg Chl m}^{-3}$ 와 약 $2 \text{ g C m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ 로 가장 높았으며 번성 이전 시기 용존 철 농도는 약 0.6 nM 로 가장 높게 나타났다. 높은 생산성은 영양염들의 변화폭 또한 크게 만드는 원인으로 판단된다 (인산염은 약 $0.5\text{-}2.0$, 질산염은 약 $15\text{-}30$, 규산염은 약 $40\text{-}70 \text{ }\mu\text{M}$).

나. 남극해 탄소 흡수율 및 탄소 수지 변화 전망

미래 탄소 흡수 및 수지 변화를 추정하기 위해 모형 결과들을 기반으로 논의하였다. Fig. 3.7.6과 같이 현재 ACC, NWR, TNB 정점 모두 최대 번성 시기 우점종은 pennate diatoms 로 이는 관측과도 부합한다. 수온, 각 영양염, 입사광에 대한 제한 인자 (limitation factor; L) 와 g_{max} 계수의 곱으로 계산되는 식물플랑크톤의 성장률을 보면, 여름철 세 지역 모두 철에 의한 제한이 가장 강하게 작용하였다. 세 지역 모두 질산염 및 인산염에 의한 제한은 연중 거의 일정하였으며 여름철 순 일차생산량은 ACC에서 TNB로 갈수록 위도에 따라 증가. 이는 철에 의한 제한의 중요성을 재차 시사한다. ACC 정점은 수온이 다른 정점이 비해 높은 편으로 LT가 다른 두 지역에 비해 50% 정도 높음. 다음 세기 약 $1\text{-}3 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 수온 증가가 예측됨을 고려하면 (Alley et al., 2007) 이러한 결과는 단순 수온 증가만을 고려했을 때, 현재보다 약 23% 까지의 생산성, 즉, 탄소 흡수율 증가가 예측된다. ACC 정점의 경우 Li가 다른 지역들에 비해 낮게 나타나기 때문에 이 지역의 입사광이 다른 두 지역에 비해 훨씬 높음을 고려하면, 이는 광량이 적어서가 아니라 오히려 광저해에 의한 결과임을 알 수 있다. 특히 Phaeocystis의 Li 값은 규조류의 값보다 크게 낮았는데 이는 Phaeocystis β 값이 커서 광저해에 더 취약했기 때문으로 판단된다. Phaeocystis는 규조류보다 높은 kFe 값을 갖고 있어 광저해와 철 고갈에 상대적으로 더 취약 하다(Kwon et al. 2021). TNB 정점에서는 비교적 철 농도가 높은 최대 번성기 이전, 다른 지역보다 Phaeocystis가 생체량 조성을 선점할 수 있었으며 이는 Mangoni et al. (2019) 의 관측과도 부합한다. 이 결과들을 종합하면 전반적으로 남빙양에서 두 종의 경쟁을 조절하는데 있어 kFe 값이 매우 주요 요인임을 시사한다. 미래 극전선 지역 (ACC 정점)은 편서풍 강화로 인한 혼합층 증가, dust 유입 증가 및 저층수 유입 증가에 따른 철 농도의 증가의 큰 2가지 변화가 예측된다. 따라서 혼합층 증가는 식물플랑크톤이 가용할 수 있는 빛의 크기를 전반적으로 감소시키는 역할을 하여 현재 광저해 영향을 받는 Phaeocystis에게 유리한 환경이 될 수 있다. 철 농도의 증가 또한 Phaeocystis가 성장이 유리해지는 방향으로 유도할 수 있다. 즉

미래에 규조류에 비교해 Phaeocystis의 성장이 좀 더 증가할 수 있다면 Phaeocystis 셀 내 탄소의 비중이 높은 만큼 단기간의 탄소 흡수율은 증가할 수 있다. 로스해 내부에 있는 NWR 및 TNB 정점은 수온 증가에 따른 해빙 및 빙봉의 감소, 이산화탄소 증가에 따른 빠른 산성화, 빙봉으로부터의 철 유입 증가의 큰 세 가지 변화가 예측된다. 따라서 두 정점에서 얼음층의 감소는 표층으로의 입사광 크기 자체를 증가시키는 데다가 혼합층의 감소 또한 식물플랑크톤을 알은 표층에 가두는 역할을 하여 이는 α 값이 작은 규조류에게 더욱 유리한 방향으로의 변화가 될 수 있다. 규조류의 우세는 앞선 변화와 반대로 단기간 탄소 흡수효율을 떨어뜨릴 수 있다. 반면 빙봉에서 유입되는 철 농도의 증가는 Phaeocystis가 성장하기에 좋은 조건이 될 수 있으며 단기간 측면의 탄소 흡수율은 증가할 수 있다. 위와 같은 서로 상반되는 방향의 변화가 전망되므로, 순 영향의 결과는 좀 더 심화된 형태의 모형실험이 요구된다. 다만 유기탄소로의 고정 증가한다 해도 이들을 분해하는 박테리아의 역할 변화에 대한 이해가 추가로 요구된다.

다. 남극해 해역 간 탄소 교환량 변동 전망

남극해 내부에서 탄소의 교환은 물리적인 해수 순환에 따라 이루어지며 그 대표적인 수괴들은 남극 저층수, 남극 중층수와 아남극 모드수, 그리고 환남극 심층수 로, 이들의 변화와 함께 각 지역에서의 탄소 흡수율 및 침강률 변화를 예측하여 탄소의 교환 변화를 정성적으로 추정해 볼 수 있다. 본 연구에서의 모형은 생지화학 과정에 초점을 둔 1차원 연직 혼합 모형이므로, 3차원적인 순환 변화는 예측하기 어려우나, 대체로 미래 남극 저층수의 형성은 표층의 담수화로 인해 감소 되고 북쪽에서의 중층수 이동은 좀 더 남쪽에서 이루어지게 될 것으로 보인다. 또한 편서풍의 강화는 환남극 심층수의 연안으로의 침투를 강화시킬 것으로 예측된다. POC 침강 효율에 영향을 미치는 것은 표층의 식물플랑크톤의 우점종에 따라 달라지며 대체로 극전선/연안 모두에서 Phaeocystis에게 좀 더 유리한 환경으로 변화하게 된다면 표층에서의 유기탄소의 형성은 증가하게 될 것으로 판단된다. 이때 철 농도가 증가하면 Kwon et al. (2021)의 모형 결과 분석에 따라 DOC로의 용출이 POC 형성보다 더 증가할 수 있다. 즉 가라앉은 입자보다 표층에서 머무르거나 혼합에 의해서만 수동적으로 저층으로 이동하는 DOC가 더 우세해 질 수 있음. 표층에서 머무는 유기탄소의 양이 입자상보다 우세해진다면 결국 중층수에 의해 북쪽 즉 전선 지역으로 이끌려 나가는 유기탄소의 양이 증가할 수 있다. 가라앉은 입자상 탄소가 적어지면 해양 저층에서 재광물화되어 축적되는 용존 무기 탄소 (DIC)의 양도 적어져 남극 연안으로 저층에서부터 공급되는 DIC의 양은 감소할 수 있다. 연안 DIC의 감소는 결국 해양-대기 간 이산화탄소의 흡수효율을 증가시킬 수 있다. 만약 해수의 산성화, 철농도 증가 등으로 규조류의 성장이 불리해진다면 규산염의 소모 또한 감소하여 극전선 지역에서 남극 연안으로 공급되는 규산염의 양을 감소시키게 될 수 있다. 위와 같은 플럭스의 변화는 한 방향으로 귀결되는 결과를 보일 것이 아니라 복합적으로 해석되어야 할 문제이므로 계속해서 심화된 형태의 모형 연구가 필요하다.

Marine Biogeochemical and Ecosystem modeling

Hyoung Sul La

Department of Ocean Sciences, KOPRI

Abstract: The Southern Ocean strongly influences global climate and biogeochemical cycles. In the Antarctic Ocean divergence region south of the Antarctic gyre, water from the deep layer upwells to the surface layer, and Subantarctic Mode Water and Antarctic Intermediate Water move northward, and the surface water mass sinks and continues to move northward at intermediate depths, transporting nutrients to the thermocline at the lower latitudes. In addition, the relatively warm Circumpolar Deep Water upwells from the depths to the Antarctic coastal surface layer such as the Ross Sea, melting the ice shelf and supplying iron to the region. The Southern Ocean dominates the absorption of heat and carbon dioxide due to the southward shift and strengthening of the mid-latitude westerlies by increasingly strong climate warming. Through the biological sedimentation of fixed organic matter and the decomposition of particles in the Antarctic continental shelf, nutrients are vertically transported and then migrated back to the northern waters, where they are supplied close to the surface layer. On the other hand, some organic matter and nutrients remain in the deep layer. Climate change is predicted to change the time scale for the movement of sedimentary particles to the bottom in the Antarctic Ocean and the circulation rate of each water mass, which in turn affects productivity and carbon dioxide absorption mechanisms in the low latitudes as well as the high latitudes. However, it is difficult to fully understand the mechanism by various regulatory factors in a large-scale complex environment change only through observation. Thus, this study aims to help understanding the geographical differences and causes of change in primary productivity and biogeochemical cycles in the Southern Ocean through one-dimensional modeling studies.

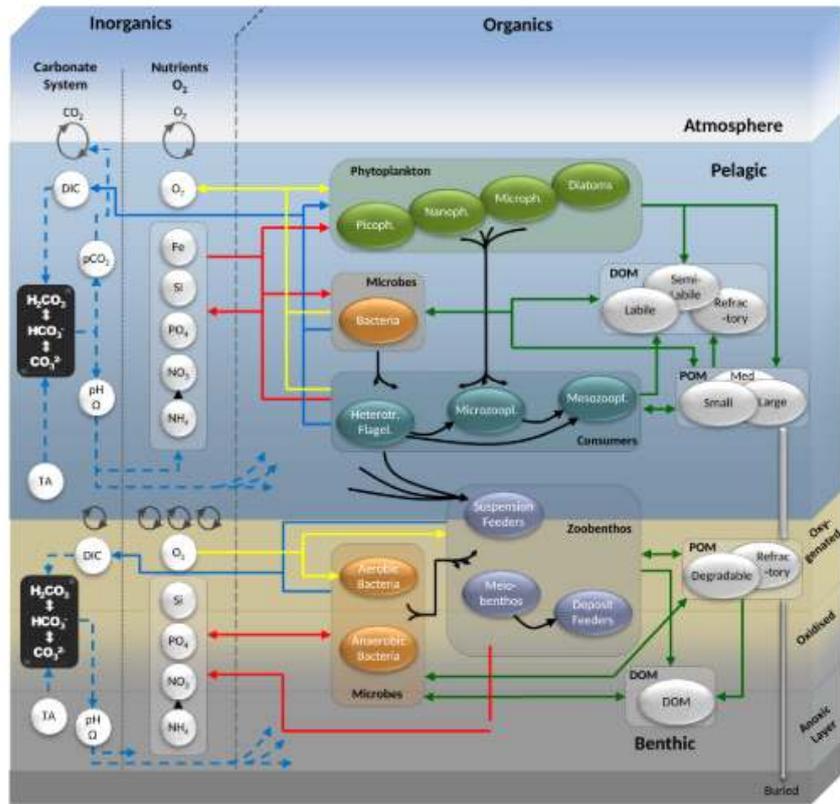


Fig. 3.7.1. ERSEM 1-D 생지화학 모델의 구조 모식도 (Butenschön et al. (2016)).



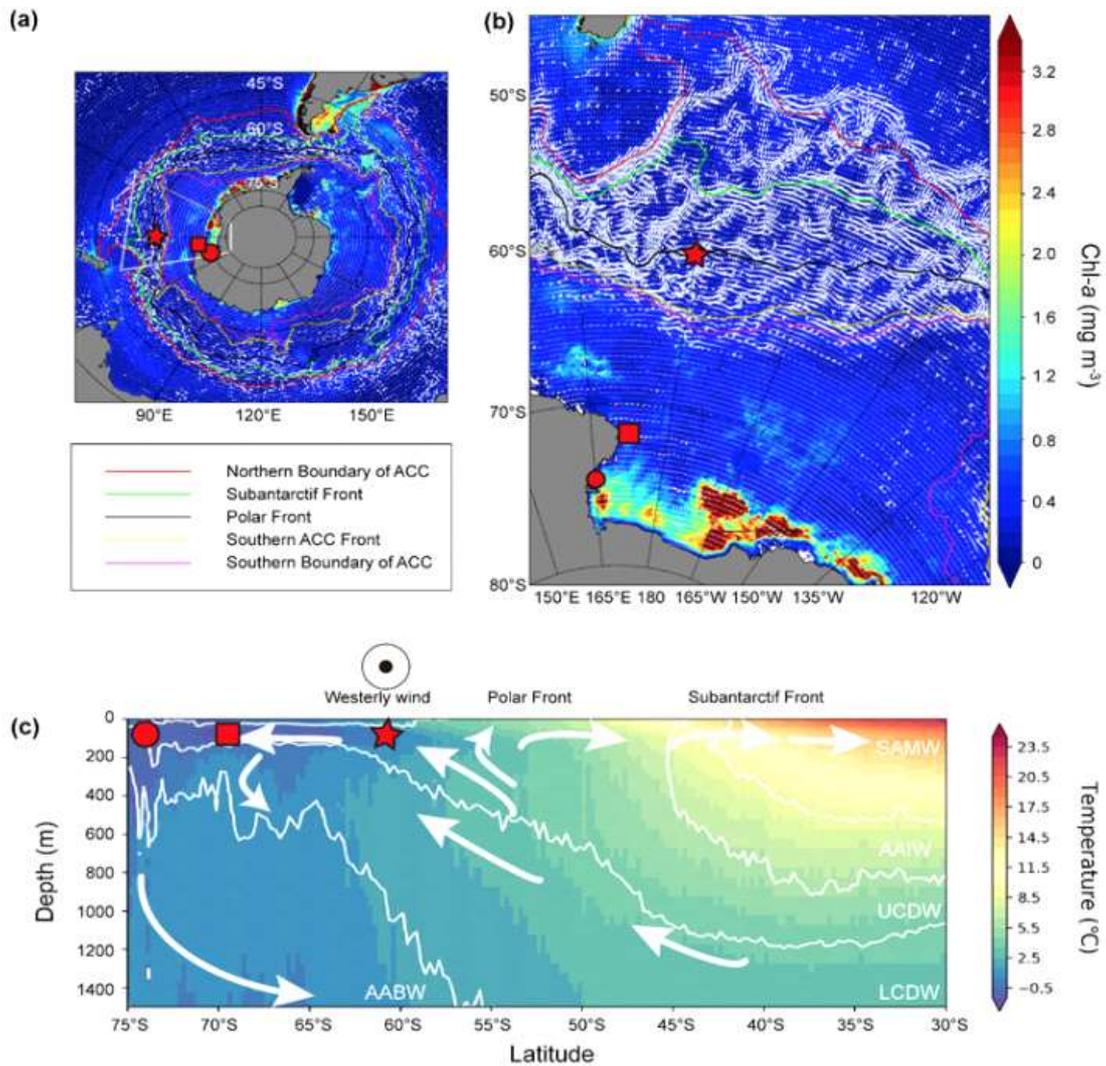


Fig. 3.7.2. 연구 해역 및 모델링 연구 정점. (a), (b) 남극해의 표층 엽록소 농도 및 각 전선의 위치. 엽록소 농도는 2002년부터 2020년까지의 MODIS-Aqua 의 평균자료임. 백색 화살표는 OSCAR 위성 해류 평균 속도를 나타냄. 환남극해류 전선 5가지의 지형학적 위치는 SEANOE (<https://doi.org/10.17882/59800>) 에서 얻은 자료를 활용하여 표시. (c) 남빙양의 대순환 구조. 주요 수괴들은 Rinoutl et al. (2001)의 기준을 따라 나타냄. WAO18에서 얻은 수온 구조의 평균값을 색으로 표시. 환남극 심층수 (CDW) 는 upper-CDW와 lower-CDW 의 두가지로 나뉨. 그림 (a,c)에서 1차원 모형을 적용한 세 정점의 위치를 적색 원 (TNB), 정사각형 (NWR), 별표 (ACC) 로 표시.

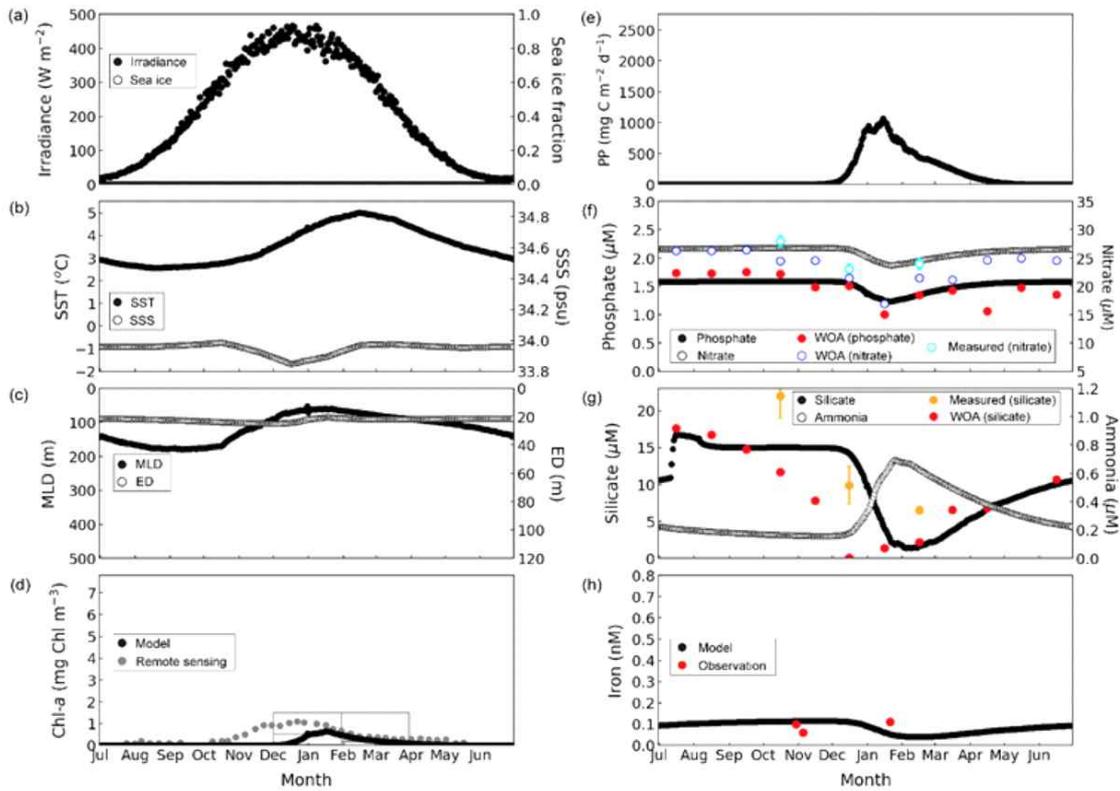


Fig. 3.7.3. ACC 정점에서의 모의 결과의 월평균. (a) 표층 입사광, 해빙 농도, (b) SST 와 SSS, (c) 혼합층 및 유광대 깊이, (d) 표층 엽록소 농도, (e) 수층 적분 일차생산량, (f,g,h) 영양염 농도. 그림 a에서 해빙 농도는 ECMWF의 재분석 자료임. 그림 d의 위성 관측자료는 Rembauville et al. (2015)에서 얻음. 그림 f와 g에서 Hiscock et al. (2003)에서 얻은 질산염과 규산염 관측값을 사용. 그림 h에서 관측 철 농도는 Coale et al. (2003)에서 얻음.

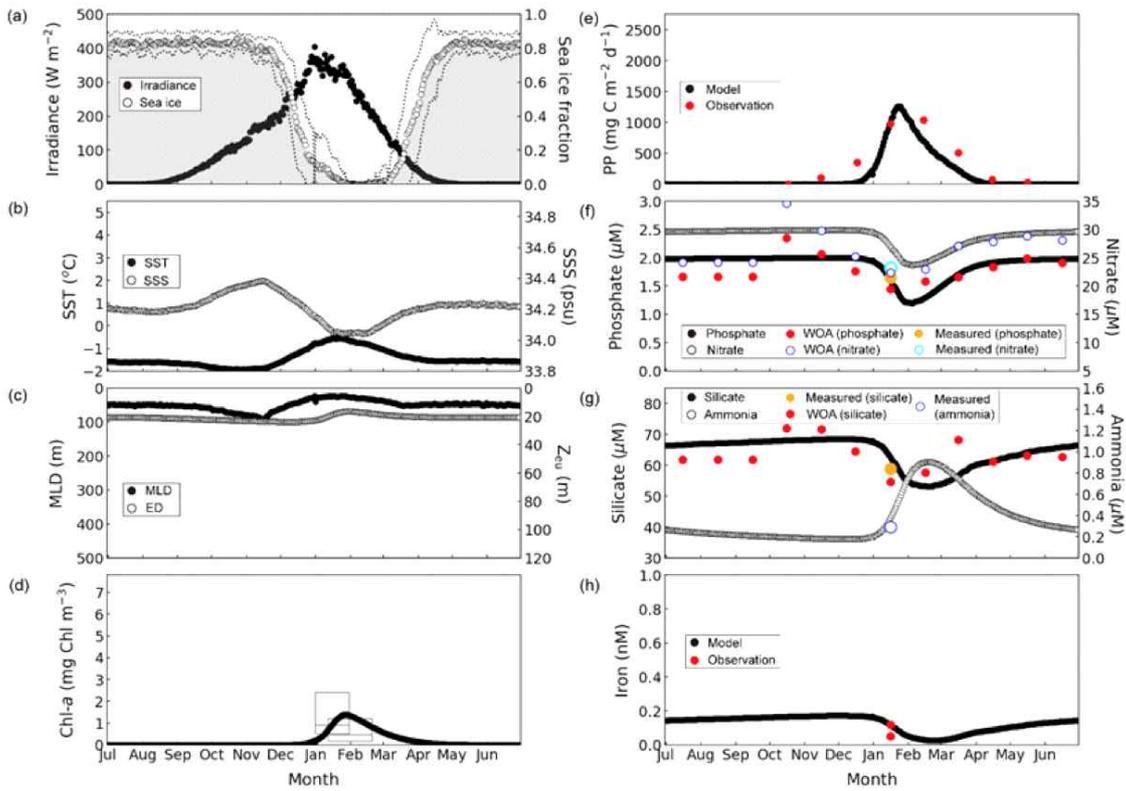


Fig. 3.7.4. NWR 정점에서의 모의 결과의 월평균. (a) 표층 입사광, 해빙 농도, (b) SST 와 SSS, (c) 혼합층 및 유광대 깊이, (d) 표층 엽록소 농도, (e) 수층 적분 일차생산량, (f,g,h) 영양염 농도. 그림 a에서 해빙 농도는 ECMWF 의 재분석 자료임. 그림 d의 위성 관측자료는 Rembauville et al. (2015)에서 얻음. 그림 e에서 관측값은 Nelson et al. (1996) 에서 얻음. 그림 f와 g에서 극지연구소의 2019년 1월 현장 관측자료에서 얻은 질산염과 규산염값을 사용. 그림 h에서 관측 철 농도는 Hatta et al. (2017) 와 Fitzwater et al. (2000)에서 얻음.

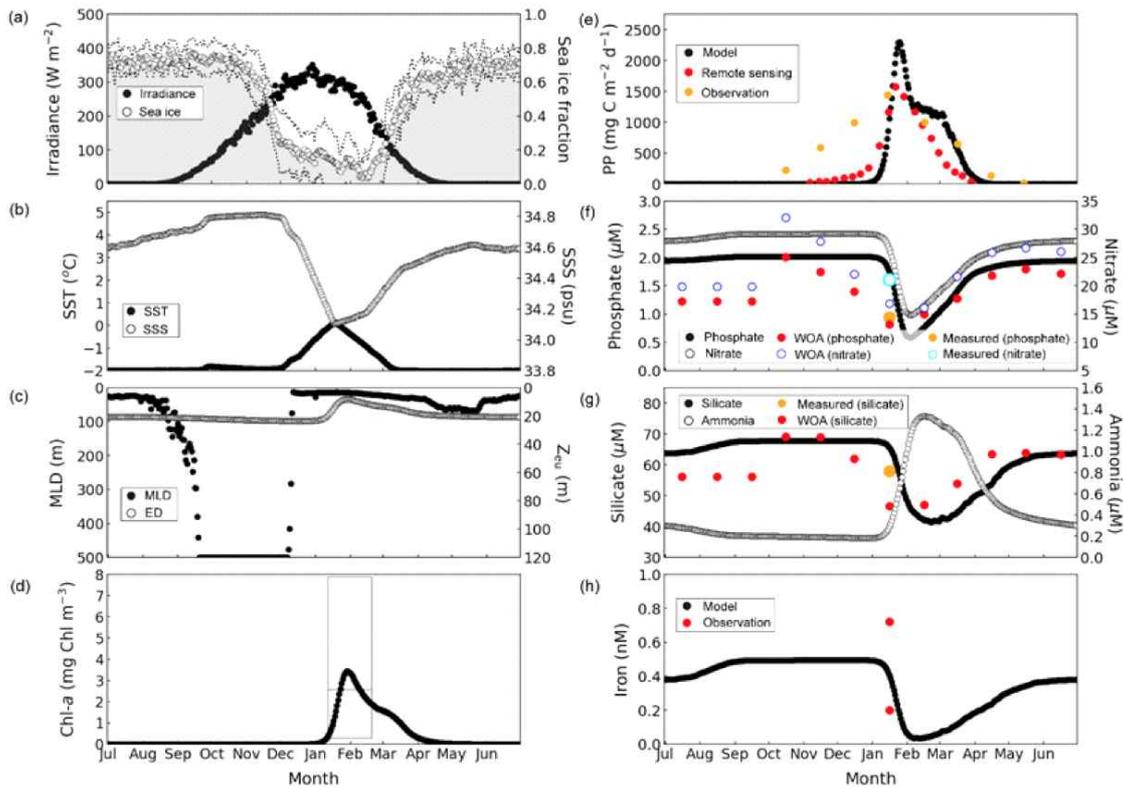


Fig. 3.7.5. TNB 정점에서의 모의 결과의 월평균. (a) 표층 입사광, 해빙 농도, (b) SST 와 SSS, (c) 혼합층 및 유광대 깊이, (d) 표층 엽록소 농도, (e) 수층 적분 일차생산량, (f,g,h) 영양염 농도. 그림 a에서 해빙 농도는 ECMWF 의 재분석 자료임. 그림 d의 위성 관측자료는 Rembauville et al. (2015)에서 얻음. 그림 e에서 관측값은 Nelson et al. (1996)와 Arrigo et al. (2003)에서 얻음. 그림 f와 g에서 Rivaro et al. (2011)에서 얻은 질산염과 규산염 관측값을 사용. 그림 h에서 관측 철 농도는 Rivaro et al. (2011)와 Sedwick et al. (2000)에서 얻음.

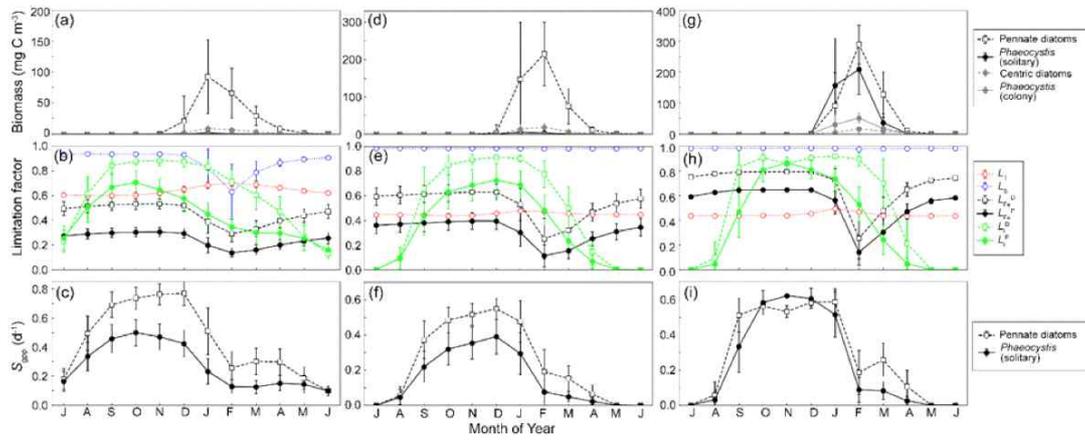


Fig. 3.7.6. ACC (a-c), NWR (d-f), TNB (h-i) 정점에 대한 모의 결과의 월평균. 그림 a,d,g는 식물플랑크톤의 생체량, b,e,f는 제한 인자, c,f,i는 규조류와 Phaeocystis 의 성장 속도를 나타냄. 그림 b,e,h에서 온도, 규산염, 철농도, 입사광에 대한 제한 인자 (차례대로 LT, LS, LFe, Li)를 규조류 (위 첨자 D)와 Phaeocystis (위 첨자 P)에 대해 각각 나타냄.



제 8 절 마리안 소만 식물플랑크톤의 시공간 분포 (전미사, 양은진)

요약: 서남극해 환경변화에 따른 하계 식물플랑크톤 군집의 시공간 분포 변동 양상을 파악하기 위하여 마리안소만의 5개 정점, 3개 수층에서 2019년 여름에 4회 현장조사가 이루어졌다. 마리안소만 식물플랑크톤의 carbon biomass는 평균 $86.93 \pm 138.34 \text{ ug L}^{-1}$ 이었다. 조사기간 중 carbon biomass가 높았던 첫 번째 조사 시기에는 diatom이 전 정점에서 우점하였으며 micro size diatom의 비율이 더 높았다. 나머지 조사시기에서는 nano size diatom과 nanophytoflagellate가 높은 비율을 차지하였으며 내만 보다 마리안소만 입구인 외만에서 carbon biomass가 높은 경향을 나타내었다. 조사 정점에 따라 식물플랑크톤 우점 그룹의 비율에는 차이가 있었으며 빙빙의 변화에 따른 해양 환경변화와 식물플랑크톤의 군집 변화 패턴을 이해하기 위해서는 보다 장기적인 조사가 진행되어야 한다.

1. 서론

남극 해양생태계는 대기 중 이산화탄소 증가로 인한 지구 온난화, 오존층 파괴에 의한 자외선 증가 등 전 지구적 환경변화에 노출되어 있다 (Kang et al., 1997; Ruckamp et al., 2011; Lee et al., 2015). 오랜기간 물리적으로 안정된 남극 환경에 적응하여 진화한 남극 생물은 작은 지구환경의 변화에도 민감하게 영향을 받을 수 있다. 지난 50년 동안 지구 대기온도는 평균 0.6°C 증가한 반면 같은 기간 동안 WAP 대기온도는 1.5°C 상승하였다 (Clarke et al., 2007; Cook et al., 2016). 킹조지섬의 남극세종과학기지가 위치한 서남극반도 (Western Antarctic Penins; WAP) 해역은 수십년 동안 온난화와 해빙의 변화가 빠르게 진행되고 있는 지역중 하나이다 (Hansen et al., 1999; Vaughan et al., 2003; Ducklow et al., 2006; Turner et al., 2016; Cook et al., 2016; Rignot et al., 2019). 킹조지섬은 거대한 만년설의 영향을 받고 있으며 섬의 90% 이상이 빙하로 덮여있다 (Park et al., 1998; Simoes et al., 1999). 마리안소만은 지난 50년 동안 유동선을 따라 $\sim 1.7\text{km}$ 의 빙하가 후퇴하였고 (Park et al., 1998; Lee et al., 2008; Ruckamp et al., 2011) 최근 빙하의 후퇴속도는 약 27.2 m y^{-1} 이었다 (Kim et al., 2022). 남극 해양생태계는 다른 지역과 달리 계절에 따른 생태계의 변화가 뚜렷하게 나타난다. 남극 연안 생태계를 구성하고 있는 생지화학적 시스템이 지속되기 위해서는 일차생산자의 역할이 매우 중요하다 (Clake and Leaky, 1996). 일반적으로 해양에서 일차생산은 식물플랑크톤 군집 중 크기가 비교적 큰 규조류와 와편모조류가 우점하여 출현하지만 남극해에서는 크기가 작은 식물플랑크톤이 우세하게 나타난다 (Moline et al., 2004; Lee et al., 2015; Schofield et al., 2017; Mascioni et al., 2019). 남극의 해양 생태계는 계절적으로 해빙과 결빙에 의한 영향이 크며 (Sakshaug and Holm-Hansen, 1984), 영양염은 심층수로부터 충분히 공급되지만 부족한 일사량과 낮은 수온으로 식물플랑크톤의 생물량은 낮은 편이다. 하지만 하계에는 일사량의 증가와 해빙의 용빙수로 인한 안정된 밀도를 유지하여 식물플랑크톤의 생산력이 비교적 높다 (Smith, 1987). 이는 수온이나 광조건이 열악한 곳에서 식물플랑크톤이 적응하는 것으로 이해된다. 또한, 빙하의 후퇴는 Nano-size의 식물플랑크톤 생물량을 증가시켰고 (Moline et al., 2004) 식물

플랑크톤의 군집구조를 변화시켜 해양생태계에 영향을 미칠 가능성이 크다 (Clarke et al., 2007; Meredith et al., 2017). 본 연구는 마리안소만 빙하 후퇴로 인한 식물플랑크톤의 군집구조를 분석하여 빙하 후퇴에 따른 생물 반응을 파악하고자 하였다.

2. 재료 및 방법

마리안소만의 5개의 정점 3개의 수심에서 2019년 1월 14일부터 2월 25일까지 4회 현장 관측이 이루어졌다 (Fig. 3.8.1). 모든 샘플은 5L Niskin 병이 장착된 Rosette samples로 채수되었다. 수층별 수온과 염분은 SBE 10 plus V2 CTD를 이용하여 측정하였다. 총 Chl-a 농도를 분석하기 위해 GF/F 필터를 사용하여 해수를 여과하였다. Chl-a의 크기별 농도를 분석하기 위해 20 μm , 2 μm , GF/F 필터를 연속하여 여과하였다. 필터는 90% 아세톤을 첨가하여 냉암소에 보관하였고 12시간 추출 후 형광광도계 (Trilogy, Turner Designs)를 이용하여 흡광도를 측정하였다. 식물플랑크톤 군집 분석을 위하여 HPMA(N-(2-hydroxypropyl)methacrylamide) 슬라이드를 제작하였다. HMPA 슬라이드는 침전 방법인 Utermohl method와 유사하다(Crumpto, 1987; Kang et al., 2002; Jeon et al., 2021). 최소 10개의 fields 이상 또는 300개 이상의 세포를 Zeiss Axiophot Microscope로 광학과 형광을 통하여 계수하였고 200배와 400배에서는 micro-size를 1000배에서는 nano-size와 pico-size를 계수하였다. 구조류는 가능한 한중 또는 한속 수준으로 동정하였고 20 μm 보다 크기가 크거나 작은 flagellates는 Haptophyceae, Prasinophyceae, Cryptophyceae 수준으로 계산되었다. 식물플랑크톤의 carbon biomass는 광학 현미경 (Axio)을 이용하여 각 분류군의 세포 길이 (분류군당 최소 20개 이상)를 측정하여 추정하였다. 평균 세포 부피는 appropriate geometrical shapes을 사용하여 계산하였고 carbon biomass는 수정 된 Strathmann equations을 사용하여 계산하였다(Smayda, 1978).

3. 결과 및 고찰

가. 마리안소만의 시공간적 특성

마리안소만의 전체 평균 수온은 $0.99 \pm 0.34^\circ\text{C}$ 로 관측되었다. 시기별 평균 수온은 1월 14일에 $0.79 \pm 0.39^\circ\text{C}$, 1월 31일 $0.97 \pm 0.33^\circ\text{C}$, 2월 8일 $1.11 \pm 0.28^\circ\text{C}$, 2월 25일 $1.08 \pm 0.27^\circ\text{C}$ 로 관측되었다 (Fig. 3.8.2). 전체 조사 기간 중 2월 8일 MC19의 표층에서 1.61°C 로 가장 높게 관측되었으며 1월 14일 MC16의 표층에서 0.31°C 로 가장 낮게 관측되었다. 각 시기별 수온은 빙봉 내만 정점에서 낮았으며 외만에서 높았다. 전체 평균 염분은 34.12 ± 0.15 psu로 관측되었다. 전체 조사 기간 중 2월 25일에 MC7의 102m에서 34.29 psu로 가장 높게 관측되었으며 1월 31일 MC16의 표층에서 33.51 psu로 가장 낮게 나타났다. 시기별 평균 염분은 1월 14일에 34.16 ± 0.10 psu, 1월 31일 34.08 ± 0.20 psu, 2월 8일 34.09 ± 1.14 psu, 2월 25일 34.14 ± 0.13 psu로 관측되었다. 각 시기별 빙봉 앞 정점인 MC16의 표층에서 가장 낮은 염분이 관찰되었고 중간 지점인 MC7의 102m에서 가장 높은 염분이 관측되었다. 이 지점은 빙봉의 영향과 육상에서의 담수 영향을 다른 정점의 수심보다 현저히 덜 받아 염분의 밀도 약층이 형성되었을 것이다. 마리안소만의 수

은 및 염분은 마리안소만 내 빙봉 앞 정점 (MC16)에서부터 소만 입구 정점 (MC19)으로 갈수록 높아지는 경향을 보였다.

나. 마리안소만 식물플랑크톤의 시공간 특성

(1) 식물플랑크톤의 엽록소-a 농도

조사 기간 중 마리안소만의 total chl-a의 평균 농도는 $0.796 \pm 1.346 \mu\text{g L}^{-1}$ 로 분석되었다 (Fig. 3.8.3). 시기별 평균 농도는 1월 14일에 $2.208 \pm 2.210 \mu\text{g L}^{-1}$, 1월 31일 $0.261 \pm 0.227 \mu\text{g L}^{-1}$, 2월 8일 $0.388 \pm 0.377 \mu\text{g L}^{-1}$, 2월 25일 $0.327 \pm 0.292 \mu\text{g L}^{-1}$ 로 분석되었다. 전체 조사 기간 중 1월 15일 MC19의 15m에서 $5.500 \mu\text{g L}^{-1}$ 로 가장 높게 분석되었으며 2월 8일 MC13의 95m에서 $0.013 \mu\text{g L}^{-1}$ 로 가장 낮게 분석되었다. Micro chl-a의 농도는 $0.428 \pm 1.012 \mu\text{g L}^{-1}$ 로 분석되었다. 시기별 평균 농도는 1월 14일에 $1.610 \pm 1.521 \mu\text{g L}^{-1}$, 1월 31일 $0.024 \pm 0.016 \mu\text{g L}^{-1}$, 2월 8일 $0.023 \pm 0.017 \mu\text{g L}^{-1}$, 2월 25일 $0.056 \pm 0.045 \mu\text{g L}^{-1}$ 로 분석되었다. Nano chl-a의 농도는 평균 $0.160 \pm 0.132 \mu\text{g L}^{-1}$ 로 분석되었다. 시기별 평균 농도는 1월 14일에 $0.126 \pm 0.072 \mu\text{g L}^{-1}$, 1월 31일 $0.147 \pm 0.109 \mu\text{g L}^{-1}$, 2월 8일 $0.205 \pm 0.171 \mu\text{g L}^{-1}$, 2월 25일 $0.162 \pm 0.152 \mu\text{g L}^{-1}$ 로 분석되었다. Pico chl-a의 평균 농도는 $0.128 \pm 0.150 \mu\text{g L}^{-1}$ 로 분석되었다. 시기별 평균 농도는 1월 14일에 $0.199 \pm 0.225 \mu\text{g L}^{-1}$, 1월 31일 $0.096 \pm 0.114 \mu\text{g L}^{-1}$, 2월 8일 $0.129 \pm 0.136 \mu\text{g L}^{-1}$, 2월 25일 $0.087 \pm 0.069 \mu\text{g L}^{-1}$ 로 분석되었다. 식물플랑크톤 blooming 이 있었던 1월 14일에 micro chl-a가 총 엽록소 농도의 80% 이상을 차지한 것을 제외한다면 nano chl-a에 우점하였다. 공간적인 분포특성을 보면, 시기와 관련 없이 빙봉 내만에서 외만으로 갈수록 chl-a의 농도가 높아지는 양상을 보였다.

(2) 식물플랑크톤의 carbon biomass

마리안소만의 식물플랑크톤 carbon biomass는 평균 $32.590 \pm 43.565 \mu\text{g C L}^{-1}$ 로 분석되었다. 시기별 평균 농도는 1월 14일에 $75.352 \pm 66.964 \mu\text{g C L}^{-1}$, 1월 31일 $17.404 \pm 12.730 \mu\text{g C L}^{-1}$, 2월 8일 $15.357 \pm 14.075 \mu\text{g C L}^{-1}$, 2월 25일 $21.234 \pm 19.587 \mu\text{g C L}^{-1}$ 로 분석되었다. 전체 조사 기간 중 1월 14일 MC19의 15m에서 $194.254 \mu\text{g C L}^{-1}$ 로 가장 높게 분석되었으며 2월 25일 MC7의 102m에서 $\mu\text{g C L}^{-1}$ 로 가장 낮게 분석되었다. 식물플랑크톤의 carbon biomass는 chl-a 농도의 변화와 유사한 패턴을 보였으며, 빙봉 내만에서 마리안소만 입구인 외만으로 갈수록 점차 증가하는 경향을 나타내었다. 대증식기인 1월 중순에는 diatom이 전 정점에서 우점하였으며 micro size diatom의 비율이 더 높았고 대증식기 이후에는 nano size diatom과 nanophytoplankton이 높은 비율을 차지하였다. 모든 시기에서 빙봉 내만의 정점인 MC13과 MC16의 표층에서 nanophytoplankton의 비율이 높은 것으로 관찰되었다 (Fig. 3.8.4).

(3) 식물플랑크톤의 군집구조

식물플랑크톤의 대증식기인 1월 14일에는 *Thalassiosira* spp., *Pseudo-nitzschia lineola*, *Pseudo-nitzschia heimii*, *Pseudogomphonema* sp. *Pseudo-nitzschia prolongatoides*, *Actinocyclus divisus*, *Fragilariopsis* spp. 가 우점하였으며 수층에 서식하는 다양한 크기의

Thalassiosira spp.가 전체 정점과 수심에서 크게 우점하였다. 빙벽 외만의 정점 (MC19, MC3, MC7) 표층에서 micro size diatom의 비율 (79% 이상)이 높았으며 내만 정점 (MC13, MC16)의 표층에서 nanophytoflagellate가 28% 이상 우점하였다. 대증식 이후에는 주로 nano size diatom과 nanophytoflagellate가 우점하였으며 빙벽의 내만에서 외만으로 갈수록 nanophytoflagellate의 비율은 줄어들었다. 전체 시기에 *Minidiscus* spp.와 *Thalassiosira* spp., *Fragilariopsis* spp., *Pseudo-nitzschia* spp.가 우점하였다 (Table 3.8.1). Unidentified nanoflagellate, *Phaeocystis* sp., *Cryptomonas* sp., *Pyramimonas* sp.는 외만의 표층에 분포하였으며 picophytoplankton은 모든 정점에서 낮은 기여를 보였다. 마리안소만 식물플랑크톤의 군집구조는 용빙수의 유입으로 인하여 공간적 변동이 크게 나타나는 것으로 판단된다.



Observations of phytoplankton community structure under the influence of glacial meltwater at Marian Cove in the West Antarctic Peninsula in summer 2019

Misa Jeon and Eun-Jin Yang

Department of Ocean Sciences, KOPRI

Abstract: Four summertime field surveys were conducted at 5 stations and 3 water depths from January to February 2019 in Marian Cove to identify the temporal and spatial distribution patterns of the summer phytoplankton community due to environmental changes in the West Antarctic Sea. The mean carbon biomass of Marian Cove was $86.93 \pm 138.34 \mu\text{g L}^{-1}$. The first field survey showed the highest carbon biomass during the survey period. Moreover, at the first field survey, diatoms were dominant at all stations, and the proportion of micro size diatoms was higher. The proportions of nano-size diatom and nanophytoplankton were higher in the other field surveys. Carbon biomass tended to be higher in the outer cove, the entrance to Marian Cove, than in the inner cove. The proportions of dominant phytoplankton groups varied depending on the locations of the survey stations. It is necessary to conduct a long-term study to understand the changes in the marine environment and the patterns of phytoplankton community changes caused by variations in the ice shelf.

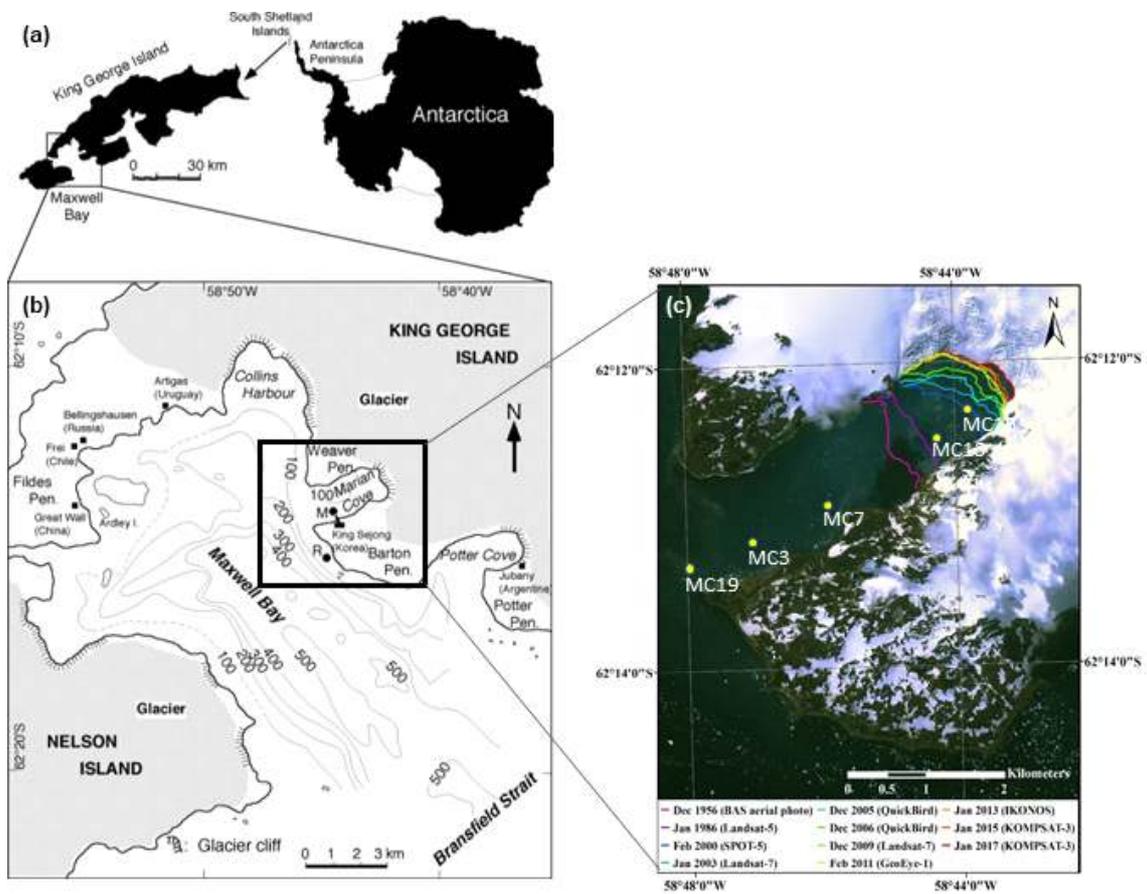


Fig. 3.8.1. Map of the King George Island in Southern Shetland Island (a), showing Maxwell Bay, (b) showing Marian Cove fjord and (c) Marian Cove.

극지연구소

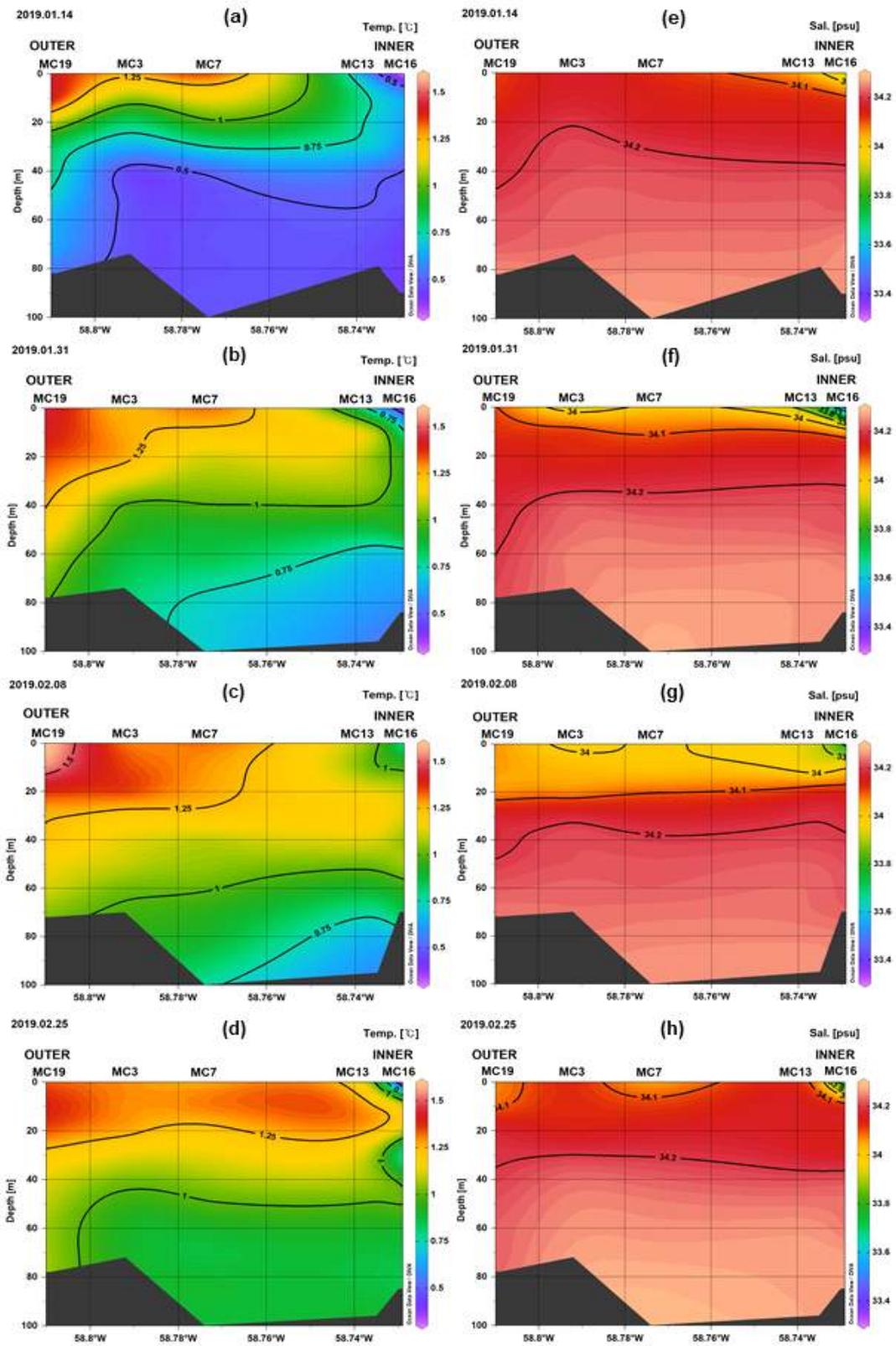


Fig. 3.8.2. Vertical distribution of water Temperature (a-b-c-d) and Salinity (e-f-g-f), along the Marian Cove fjord transect, during summer 2019.

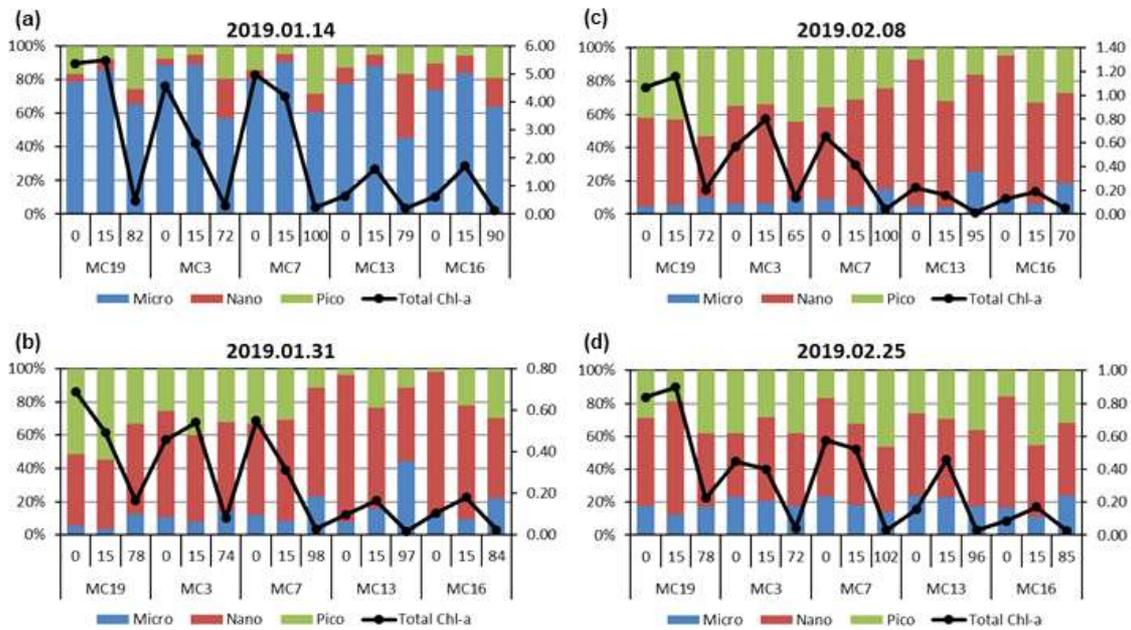


Fig. 3.8.3. Spatial distributions of total chl-a and size-fractionated chl-a concentration Marian Cove fjord transect, during summer 2019.

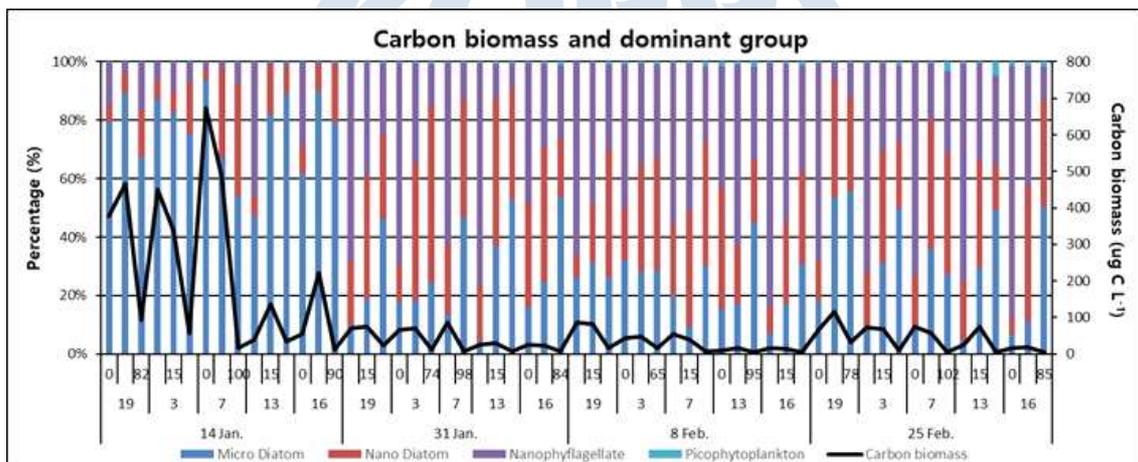


Fig. 3.8.4. Temporal distribution of cell size carbon biomass of micro diatom, nano diatom, nanophytoplankton and picophytoplankton along the Marian Cove fjord transect, during summer 2019.

Table 3.8.1. Broad ranking of most abundant (>90% of total cells abundance) and most recurrent (>50% total samples) phytoplankton taxa at the sites of Marian Cove

| Group | Type | Species | Outer | Inner | |
|--|---------|---------------------------------------|--|---------------------|---------------------|
| Micro Diatoms | Centric | <i>Thalassiosira</i> spp. (20<A<40) | 3.3.E+03 - 3.5.E+05 | 6.7.E+02 - 7.9.E+04 | |
| | | <i>Actinocyclus divinus</i> | 1.2.E+04 | 1.3.E+03 | |
| | | <i>Thalassiosira</i> spp. (>40) | 1.3.E+03 | 6.7.E+02 - 3.6.E+04 | |
| | | <i>Odontella</i> sp. | | 5.5.E+01 | |
| | | <i>Chaetoceros dichæta</i> | | 4.0.E+03 | |
| | | <i>Corethron pennatum</i> | | 3.7.E+01 | |
| | | | <i>Dactyliosolen</i> spp. | 4.0.E+03 | |
| | | | <i>Pseudo-nitzschia lineola</i> | 9.2.E+04 - 3.5.E+05 | 2.1.E+04 - 3.4.E+04 |
| | | | <i>Pseudo-nitzschia heimii</i> | 2.9.E+04 - 2.2.E+05 | 3.3.E+03 - 1.4.E+04 |
| | | | <i>Pseudogomphonema</i> sp. | 2.7.E+03 - 2.3.E+04 | 1.7.E+03 - 4.7.E+03 |
| | | | <i>Pseudo-nitzschia prolongatoides</i> | 4.0.E+03 - 2.1.E+04 | 3.3.E+02 - 7.3.E+03 |
| | | | <i>Fragilariopsis</i> spp. (20<A<40) | 2.0.E+03 - 1.2.E+04 | 4.0.E+03 - 1.2.E+04 |
| | | | <i>Cocconeis costata</i> | 4.0.E+03 - 3.3.E+04 | 4.0.E+03 - 1.2.E+04 |
| | | | <i>Liomphora gracilis</i> | 1.3.E+03 - 6.7.E+03 | 2.0.E+03 - 3.3.E+03 |
| | | | <i>Nitzschia acicularis</i> | 1.3.E+03 - 4.0.E+03 | |
| | | Pennate | <i>Fragilariopsis</i> spp. (>40) | 1.3.E+03 - 2.7.E+03 | 6.7.E+02 |
| | | | <i>Synedropsis fragilis</i> | 6.0.E+03 | |
| | | | <i>Navicula glaciei</i> | 2.0.E+03 | 6.7.E+02 |
| | | | <i>Cocconeis fasciolata</i> | 1.3.E+03 | |
| | | | <i>Fragilariopsis rhombica</i> | | 6.7.E+02 |
| | | <i>Gyrosigma fasciola</i> | | 4.6.E+02 | |
| | | <i>Manguinea fusiformis</i> | | 5.5.E+01 - 7.4.E+01 | |
| | | <i>Pleurosigma directum</i> | | 3.7.E+01 | |
| | | <i>Haslea troyii</i> | | 1.8.E+01 | |
| Nano Diatoms | Centric | <i>Minidiscus</i> s pp. | 1.8.E+06 - 5.6.E+06 | 2.7.E+05 - 1.0.E+06 | |
| | | <i>Thalassiosira</i> s pp. (<10) | 2.3.E+05 - 8.7.E+05 | 5.8.E+04 - 1.8.E+05 | |
| | | <i>Thalassiosira</i> s pp. (<20) | 3.6.E+04 - 2.3.E+05 | 6.3.E+03 - 6.1.E+04 | |
| | | | <i>Chaetoceros socialis</i> | | 4.7.E+04 |
| | Pennate | <i>Fragilariopsis</i> spp. (<10) | 7.5.E+04 - 4.7.E+05 | 3.3.E+04 - 1.5.E+05 | |
| | | <i>Fragilariopsis cylindrus</i> (<10) | 2.2.E+05 - 4.5.E+05 | 6.7.E+04 - 1.9.E+05 | |
| <i>Fragilariopsis pseudonana</i> (<10) | | 1.7.E+04 - 2.5.E+04 | | | |
| | | <i>Fragilariopsis</i> spp. (<20) | | 4.0.E+03 - 5.3.E+03 | |
| Nanophyflagellates | | <i>Nano flagellates</i> | 3.6.E+06 - 4.6.E+06 | 8.2.E+05 - 1.4.E+06 | |
| | | <i>Phaeocystis</i> sp. | 3.2.E+05 - 2.9.E+06 | 3.3.E+04 - 1.4.E+06 | |
| | | <i>Cryptomonas</i> sp. | 2.5.E+04 - 1.3.E+06 | 8.3.E+03+5.0.E+04 | |
| | | <i>Pyramimonas</i> sp. | 4.2.E+04 5.0.E+04 | 1.7.E+04 - 3.3.E+04 | |
| Picophytoplankton | | Picophytoplankton | 5.0.E+06 - 7.1.E+06 | 2.2.E+06 - 5.0.E+06 | |

제 9 절 서남극해 동물플랑크톤 공간 분포 (김정현, 양은진)

요약: 서남극해 중형동물플랑크톤의 군집 분포를 파악하기 위하여 2020년 12월 로스해 연안의 리틀 아메리카 분지 해역의 10개 정점과 2021년 11월 외양의 남동 인디아 해령 해역의 12개 정점에서 쇄빙연구선 아라온을 이용한 채집이 수행되었다. 모든 정점에서 330 μm 망목 크기를 가진 봉고 네트 (Bongo net)를 200 m 수심으로부터 표층까지 수직 인양하여 수층내 동물플랑크톤의 종조성을 파악하였다. 서남극해 연안과 외양의 중형동물플랑크톤 군집은 생물량과 종조성에서 뚜렷한 차이를 보였다. 로스해 연안의 리틀 아메리카 분지 해역에서는 평균 17.40 ind. m^{-3} 의 생물량을 보였으며, 갑각류 노플리우스 유생, *Metridia gerlachei* 및 *Calanoides acutus* 등이 우점하였다. 외양의 남동 인디아 해령 해역에서는 284.02 ind. m^{-3} 의 상대적으로 높은 평균 생물량을 보였으며, 척삭동물과 크기가 작은 Calanoida spp. 등이 우점하였다.

1. 서론

최근 남극해는 급격한 환경변화와 선박 평형수로부터 외래종 유입, 무분별한 어획 등 인류의 활동으로 인하여 수산 자원량 감소와 생태계 구조 변화에 직면하고 있으며, 급격한 수온 상승과 산성화 등 환경변화가 극지 해양생물의 군집변화와 생리/생태변화를 야기하여 해양 생태계 구조와 기능에 직접적인 영향을 미치고 있다 (Convey and Peck, 2019). 특히, 서남극해는 급격한 기후변화로 인한 고온 고염의 남극순환심층수 (Circumpolar deep water) 유입으로 빙방이 빠르게 소멸되고 있는 해역으로 알려져 있다 (Jenkins et al., 2010; Rignot et al., 2013). 따라서, 서남극해는 커다란 해양 환경변화가 예상되는 해역으로써 해양 생태계 연구의 중요성이 대두되고 있다.

남극 해양 생태계에서 동물플랑크톤은 일차 생산자와 상위 영양단계를 연결하는 Keystone 그룹이며, 다양한 환경변화에 예민하게 반응하는 환경변화 지시자 (Indicator) 역할을 수행하고 있다 (Hays et al., 2005). 따라서 동물플랑크톤의 분포와 종조성 변화에 대한 연구는 기후변화의 영향을 파악하기 위해 중요한 자료가 된다. 하지만 이러한 환경변화와 생태학적 중요성에도 불구하고, 서남극해 동물플랑크톤 분포에 대한 연구는 현재까지 활발하게 진행되고 있지 않으며, 특히, 로스해를 비롯한 일부 해역에서는 매우 미흡한 실정이다. 그러므로, 본 연구에서는 하계 기간 로스해 연안의 리틀 아메리카 분지와 서남극해 열 수송으로 이어지는 남동 인디아 해령의 극전선 밀집 해역에서 중형동물플랑크톤 군집 분포의 공간적 변동성을 이해하고자 한다.

2. 재료 및 방법

서남극해에서 중형동물플랑크톤의 채집은 2020년 12월 로스해 연안의 리틀 아메리카 분지 해역의 10개 정점 (ANA11A)과 2021년 11월 외양의 남동 인디아 해령 해역의 12개 정점 (ANA12A)에서 쇄빙연구선 아라온을 이용하여 수행하였다 (Table 3.8.1 & Fig. 3.8.1). 모든 정점에서 330 μm 망목 크기를 가진 봉고 네트 (Bongo net)를 표층에서부터 200 m 수심까지 분당 30 m의 속도로 수직 하강하였고, 30 초 대기 후에 분당 60 m의 속도로 수직 인양하였다.

정량분석을 위한 유량계 (Flowmeter)를 네트 틀의 입구 중앙부에 부착하여 수직 인양 동안 여과된 해수의 양을 각각의 채집마다 측정할 수 있도록 하였다. 채집된 동물플랑크톤 시료는 즉시 선내 웨트 랩 (Wet lab)으로 운반하여 최종 농도 5 %가 되도록 중성 포르말린 용액으로 고정 및 보관하였다. 이후, 연구소 실험실로 운반하여 해부 현미경 (OLYMPUS SZX16) 하에 가능한 수준까지 형태 동정하고 계수하였다. 종별 개체수는 여과된 해수의 양을 고려하여 해당 정점의 생물량 (ind. m⁻³)으로 계산하였다.

3. 결과 및 고찰

가. 리틀 아메리카 분지 해역의 중형동물플랑크톤 군집 분포

2020년 12월 로스해 연안 동쪽의 리틀 아메리카 분지 해역에 서식하는 중형동물플랑크톤 종조성 및 생물량을 분석하였다 (Table 3.8.2 & Fig. 3.8.2). 조사 정점에서 관찰된 동물플랑크톤은 6.59-31.81 ind. m⁻³ 로 비교적 낮은 생물량을 보였다. 동물플랑크톤의 우점 그룹은 대부분 요각류 그룹으로 나타났다. 총 생물량과 우점 분류군인 요각류의 생물량은 연안에서 외해역으로 갈수록 감소하다가 다시 증가하는 경향을 보였다. 분류군을 살펴보았을 때, 연안에 인접한 정점에서는 갑각류 노플리우스 유생이 최우점 혹은 차우점하는 것을 확인할 수 있었다. 이는 연안에 가까워질수록 증가하는 총 생물량이 노플리우스 유생의 번성으로부터 기인되었을 수 있음을 암시한다. 요각류 내 세부적인 종을 살펴보았을 때, 수심이 급격하게 증가하기 시작하는 71, 70, 69번 정점에서 크기가 작은 *Oithona* spp.가 감소하고, 상대적으로 크기가 큰 *Calanoides acutus*와 *Rhincalanus gigas*가 우점하는 모습을 보였다. 이는 연안으로부터 멀어질수록 증가하는 총 생물량이 커다란 칼라노이드 요각류에 의하여 영향을 받을 수 있음을 시사한다. 하지만, 본 연구해역에서 생물량의 변동폭이 크지 않기 때문에 이러한 증가와 감소의 경향이 단순한 오차인지에 대한 확인을 위해서 추후의 지속적인 시료 채집 및 분석이 요구된다.

나. 남동 인디아 해령 해역의 중형동물플랑크톤 군집 분포

2021년 11월 남극 순환류가 흐르는 극전선의 남동 인디아 해령 해역의 중형동물플랑크톤 종조성 및 생물량을 분석하였다 (Table 3.8.2 & Fig. 3.8.3). 조사기간 동안 관찰된 동물플랑크톤은 39.65-448.36 ind. m⁻³의 분포로 공간적으로 큰 변화를 보였다. 동물플랑크톤 분류군은 대부분 요각류가 우점하였으며, 일부 정점들에서 척삭동물이 차우점하는 경향을 보였다. 척삭동물에는 작은 크기의 유형류가 대부분을 차지하였다. 남향의 위도 증가를 따르는 정선 (정점 1, 9, 11, 12, 17, 18, 19, 20 정점순)에서 일부 정점에서 생물량이 급격하게 증가하였으나 전반적으로 감소하는 경향이 나타났다. 흥미롭게도, 19번 정점에서 448.36 ind. m⁻³의 가장 높은 생물량이 확인되었으며, *Oithona* spp.의 급격한 증가를 확인할 수 있었다. 이는 해당 정점에서 채집 당시 발견된 높은 식물플랑크톤 생물량과 관련이 있을 것으로 보인다. 또한, 20번 정점에서 39.65 ind. m⁻³의 매우 급격한 생물량 감소와 함께 커다란 *C. acutus*와 *R. gigas*가 증가하기 시작함으로써 상대적으로 낮은 위도의 정점들과 구별되는 특징을 보였다. 그러나, 본 연구해역에서 동정하지 못한 작은 크기의 Calanoida spp. 생물량은 적지 않았다. 따라서 해당 종에 대한 더 높은 수준의 동정이 수행되어야 보다 정확한 분포 해석을 제시할 수 있을 것으로 판단된다.

다. 서남극해 연안과 외양의 중형동물플랑크톤 종조성 비교

서남극해 연안의 리틀 아메리카 분지 해역과 외양의 남동 인디아 해령 해역에서 채집된 중형동물플랑크톤의 평균 종조성을 비교하였다 (Table 3.9.2 & Fig. 3.9.4). 두 해역의 평균 생물량은 각각 $17.40 \text{ ind. m}^{-3}$ 와 $284.02 \text{ ind. m}^{-3}$ 로 매우 큰 차이를 보였고, 요각류가 가장 우점하는 분류군으로 나타났다. 두 해역의 군집은 리틀 아메리카 분지 해역에서는 갑각류 노플리우스 유생, 남동 인디아 해령 해역에서는 척삭동물이 주로 출현하는 차이가 있었다. 가장 우점하는 요각류 종조성의 경우, 리틀 아메리카 분지 해역에서는 남극해 우점종으로 알려진 *M. gerlachei*와 *C. acutus* 등이 높은 비율을 차지하였으며, 남동 인디아 해령 해역에서는 크기가 작은 칼라노이드 요각류가 높은 비율로 나타났다. 전 지구적으로 분포하는 Cosmopolitan 종인 *Oithona* spp.는 모든 해역에서 높은 비중으로 관찰되었다. 비록 정점별 주요 우점종에는 차이를 보였으나, 서남극해 연안과 외양에서 중형동물플랑크톤의 군집은 뚜렷한 차이를 보여 공간적으로 변동성이 큰 것으로 나타났다.



The spatial distribution of mesozooplankton community in the west Antarctica

Jeong-Hyun Kim and Eun-Jin Yang

Division of Ocean Science, KOPRI

Abstract: To understand the spatial distribution of mesozooplankton community in the west Antarctica, field observations using the icebreaker R/V ARAON were conducted at 10 stations in the coastal areas in the Little America Basin in December 2020 and at 12 stations in the oceanic areas in the Southeast Indian Ridge. All samples were vertically collected from 200 m depth using a Bongo net (330 μm mesh size), and composition and abundances were analyzed. Mesozooplankton community structures between coastal and oceanic areas presented distinct characteristics. In the Little America Basin, the mean abundances averaged 17.40 ind. m^{-3} , and crustacean nauplius, *Metridia gerlachei*, and *Calanoides acutus* were dominated. In contrast, in the Southeast Indian Ridge, the mean abundances averaged 284.02 ind. m^{-3} , and chordata and small calanoida spp. were dominated.

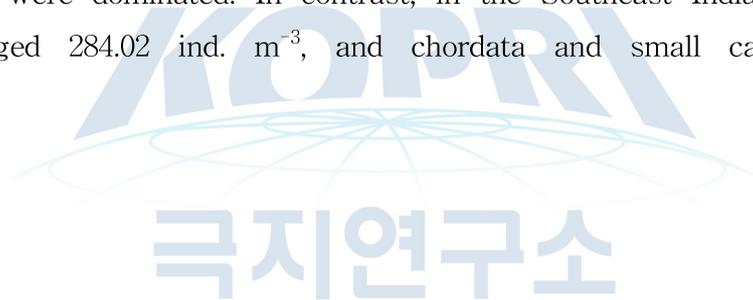
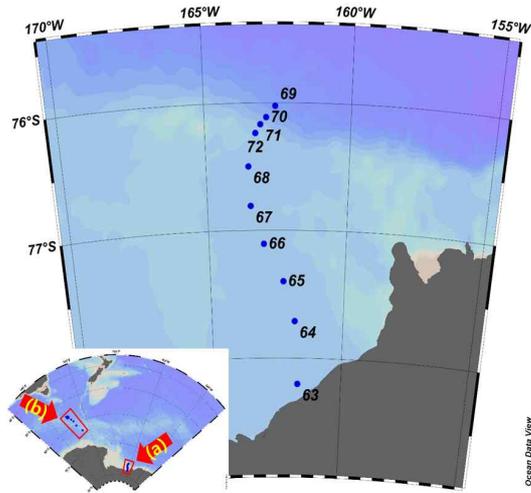


Table 3.9.1. General informations about zooplankton sampling

| Cruise | Station | Date | Time | Latitude | Longitude | Sampling Depth (m) | Flowmeter |
|--------|-------------------|-----------------------|-----------------------|---------------|---------------|--------------------|---------------|
| ANA11A | 63 | 2020.12.17(UTC) | 13:53 - 14:04 (UTC) | 78°11.988'S | 161°43.404'W | 200 | 90865 - 91469 |
| | 64 | 2020.12.17(UTC) | 20:14 - 20:26 (UTC) | 77°42.632'S | 161°51.184'W | 200 | 91469 - 92084 |
| | 65 | 2020.12.18(UTC) | 03:03 - 03:16 (UTC) | 77°23.868'S | 162°17.331'W | 200 | 92084 - 92738 |
| | 66 | 2020.12.18(UTC) | 07:11 - 07:22 (UTC) | 77°06.315'S | 163°00.381'W | 200 | 92738 - 93464 |
| | 67 | 2020.12.18(UTC) | 11:00 - 11:12 (UTC) | 76°48.420'S | 163°27.813'W | 200 | 93464 - 94396 |
| | 68 | 2020.12.18(UTC) | 15:24 - 15:36 (UTC) | 76°29.863'S | 163°31.547'W | 200 | 94396 - 95032 |
| | 69 | 2020.12.19(UTC) | 02:11 - 02:24 (UTC) | 76°01.298'S | 162°35.064'W | 200 | 95032 - 95661 |
| | 70 | 2020.12.19(UTC) | 11:58 - 12:11 (UTC) | 76°06.699'S | 162°53.855'W | 200 | 95661 - 96298 |
| | 71 | 2020.12.19(UTC) | 22:57 - 23:10 (UTC) | 76°10.046'S | 163°05.740'W | 200 | 96300 - 96938 |
| | 72 | 2020.12.20(UTC) | 03:06 - 03:18 (UTC) | 76°14.075'S | 163°15.984'W | 200 | 96938 - 97574 |
| ANA12A | 05 | 2021.11.14(Local) | 17:05 - 17:18 (Local) | 56°18.0810'S | 149°13.3682'E | 200 | 38386 - 39603 |
| | 08 | 2021.11.15(Local) | 02:16 - 02:45 (Local) | 56°09.9637'S | 149°28.0963'E | 200 | 40809 - 43525 |
| | 10 | 2021.11.15(Local) | 10:57 - 11:09 (Local) | 55°59.2203'S | 149°47.4419'E | 200 | 43526 - 45156 |
| | 15 | 2021.11.16(Local) | 09:46 - 09:58 (Local) | 55°48.3621'S | 150°06.6347'E | 200 | 46787 - 48075 |
| | 01 | 2021.11.16(Local) | 20:20 - 20:32 (Local) | 55°37.5854'S | 149°09.3539'E | 200 | 49370 - 50940 |
| | 09 | 2021.11.17(Local) | 22:17 - 22:29 (Local) | 55°48.3738'S | 149°28.4034'E | 200 | 52516 - 54079 |
| | 11 | 2021.11.18(Local) | 05:27 - 05:41 (Local) | 56°09.9573'S | 150°06.7765'E | 200 | 54087 - 55949 |
| | 12 | 2021.11.18(Local) | 10:14 - 10:25 (Local) | 56°27.6387'S | 150°14.0216'E | 200 | 55950 - 57752 |
| | 17 | 2021.11.19(Local) | 07:21 - 07:34 (Local) | 57°30.0006'S | 151°00.9919'E | 200 | 59598 - 60977 |
| | 18 | 2021.11.19(Local) | 16:14 - 16:27 (Local) | 58°29.9990'S | 151°45.0030'E | 200 | 62352 - 63360 |
| 19 | 2021.11.20(Local) | 07:55 - 08:07 (Local) | 60°18.9065'S | 152°16.9300'E | 200 | 64335 - 65617 | |
| 20 | 2021.11.21(Local) | 05:38 - 05:50 (Local) | 62°53.9963'S | 154°44.9944'E | 200 | 66931 - 68112 | |



(a) Little America Basin (LAB)



(b) Southeast Indian Ridge (SEIR)

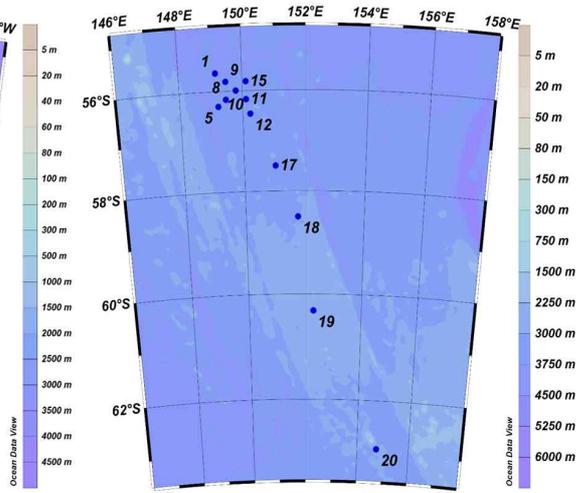


Fig. 3.9.1. Station maps during (a) ANA11A and (b) ANA12A cruises.



Table 3.9.2. Species list and abundances of mesozooplankton in the Little America Basin and the Southeast Indian Ridge

| Station | Little America Basin (ANA11A) | | | | | | | | | |
|--|-------------------------------|-------|-------|-------|------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | 63 | 64 | 65 | 66 | 67 | 68 | 72 | 71 | 70 | 69 |
| Water depth (m) | 604 | 679 | 647 | 618 | 575 | 565 | 464 | 987 | 1607 | 2247 |
| Amphipoda | | | | | | | | | | |
| Unidentified Gammaridea | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.02 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| Unidentified Hyperiidea | 0.00 | 0.04 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.02 | 0.00 | 0.06 | 0.02 |
| Chaetognatha | | | | | | | | | | |
| Unidentified Chaetognatha | 0.06 | 0.06 | 0.07 | 0.24 | 0.24 | 0.11 | 0.20 | 0.87 | 0.78 | 0.21 |
| Chordata | | | | | | | | | | |
| Fish larvae | 0.39 | 0.06 | 0.02 | 0.02 | 0.00 | 0.02 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| <i>Salpa thompsoni</i> | 0.00 | 0.00 | 0.07 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| Unidentified Appendicularia | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.26 | 0.00 |
| Cnidaria | | | | | | | | | | |
| Unidentified Cnidaria | 0.10 | 0.00 | 0.07 | 0.00 | 0.09 | 0.19 | 0.00 | 0.24 | 0.31 | 0.09 |
| Copepoda | | | | | | | | | | |
| <i>Calanoida</i> spp. | 4.59 | 2.17 | 1.08 | 2.27 | 1.35 | 2.91 | 3.62 | 0.74 | 2.31 | 0.94 |
| <i>Calanoides acutus</i> | 0.78 | 0.45 | 0.42 | 0.49 | 0.30 | 0.56 | 1.02 | 8.87 | 8.15 | 6.84 |
| <i>Calanus propinquus</i> | 0.00 | 0.06 | 0.12 | 0.00 | 0.17 | 0.00 | 0.28 | 0.83 | 1.76 | 0.94 |
| <i>Calanus similimus</i> | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| <i>Haloptilus oxycephalus</i> | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.26 | 0.00 |
| <i>Metridia</i> spp. | 4.98 | 1.41 | 3.01 | 2.84 | 1.56 | 1.42 | 6.03 | 3.42 | 6.30 | 0.94 |
| <i>Oithona</i> spp. | 2.54 | 3.07 | 2.40 | 1.95 | 1.90 | 4.27 | 5.93 | 0.55 | 1.11 | 0.56 |
| <i>Oncaea</i> spp. | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.09 | 0.18 | 0.00 | 0.19 |
| <i>Paraeuchaeta</i> spp. | 0.59 | 0.38 | 0.18 | 0.49 | 0.46 | 0.74 | 0.83 | 3.33 | 3.33 | 2.34 |
| <i>Rhincalanus gigas</i> | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.02 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| Crustacean nauplius | 16.70 | 5.75 | 5.29 | 3.74 | 0.25 | 0.43 | 1.95 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| Euphausia | | | | | | | | | | |
| Euphausia larvae | 0.20 | 0.02 | 0.00 | 0.02 | 0.03 | 0.00 | 0.00 | 0.55 | 0.28 | 0.00 |
| Ostracoda | | | | | | | | | | |
| Unidentified Ostracoda | 0.59 | 0.00 | 0.07 | 0.10 | 0.14 | 0.04 | 0.02 | 2.87 | 1.20 | 0.58 |
| Polychaeta | | | | | | | | | | |
| Unidentified Polychaeta | 0.10 | 0.00 | 0.00 | 0.02 | 0.00 | 0.02 | 0.04 | 0.96 | 0.67 | 0.49 |
| Pteropoda | | | | | | | | | | |
| <i>Clione</i> spp. | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.02 | 0.00 | 0.00 |
| <i>Limacina</i> spp. | 0.20 | 0.45 | 0.09 | 0.29 | 0.08 | 0.26 | 0.24 | 0.28 | 0.09 | 0.15 |
| Total abundances (ind. m ⁻³) | 31.81 | 13.98 | 12.96 | 12.49 | 6.59 | 10.97 | 20.29 | 23.72 | 26.90 | 14.29 |
| Mean abundances (ind. m ⁻³) | | | | | | 17.40 | | | | |
| Number of species | 14 | 13 | 14 | 13 | 13 | 14 | 15 | 15 | 16 | 14 |

Table 3.9.2. continued

| Station | Southeast Indian Ridge (ANA12A) | | | | | | | | | | | |
|--|---------------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|-------|
| | 05 | 08 | 10 | 15 | 01 | 09 | 11 | 12 | 17 | 18 | 19 | 20 |
| Water depth (m) | 3701 | 3624 | 3617 | 3727 | 3737 | 3685 | 3627 | 3393 | 3346 | 3614 | 2384 | 2983 |
| Amphipoda | | | | | | | | | | | | |
| Unidentified Gammaridea | 0.00 | 0.03 | 0.00 | 0.01 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.19 | 0.00 | 0.00 |
| Unidentified Hyperiidea | 0.00 | 0.00 | 0.06 | 0.00 | 0.00 | 0.79 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.60 | 0.00 | 0.33 |
| Chaetognatha | | | | | | | | | | | | |
| Unidentified Chaetognatha | 4.58 | 6.16 | 4.22 | 4.31 | 5.18 | 10.44 | 12.78 | 4.19 | 3.46 | 2.40 | 3.98 | 3.54 |
| Chordata | | | | | | | | | | | | |
| Fish larvae | 0.00 | 0.07 | 0.01 | 0.03 | 1.99 | 0.10 | 0.11 | 0.11 | 0.03 | 0.00 | 0.02 | 0.00 |
| <i>Salpa thompsoni</i> | 0.00 | 0.31 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.21 | 0.08 | 0.00 | 0.00 |
| Unidentified Appendicularia | 1.02 | 1.12 | 45.64 | 89.21 | 88.40 | 37.72 | 62.78 | 62.45 | 50.97 | 9.55 | 11.87 | 0.64 |
| Cnidaria | | | | | | | | | | | | |
| Unidentified Cnidaria | 0.00 | 0.02 | 0.01 | 0.47 | 0.00 | 0.38 | 0.00 | 0.01 | 0.02 | 0.00 | 0.00 | 0.38 |
| Copepoda | | | | | | | | | | | | |
| Calanoida spp. | 107.87 | 53.22 | 88.21 | 131.71 | 119.06 | 197.44 | 158.80 | 207.46 | 90.71 | 124.13 | 138.47 | 11.83 |
| <i>Calanoides acutus</i> | 5.09 | 2.80 | 6.52 | 2.80 | 1.19 | 0.38 | 0.34 | 4.16 | 5.18 | 5.97 | 5.93 | 8.63 |
| <i>Calanus propinquus</i> | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| <i>Calanus similimus</i> | 4.58 | 2.43 | 1.92 | 1.40 | 3.98 | 0.38 | 1.68 | 0.00 | 0.00 | 0.60 | 0.00 | 0.00 |
| <i>Haloptilus oxycephalus</i> | 1.02 | 0.93 | 1.53 | 0.93 | 0.80 | 2.31 | 1.68 | 0.00 | 0.86 | 1.79 | 0.00 | 1.60 |
| <i>Metridia</i> spp. | 0.00 | 2.61 | 0.77 | 0.00 | 0.40 | 2.31 | 2.69 | 0.00 | 1.73 | 0.00 | 0.99 | 0.32 |
| <i>Oithona</i> spp. | 45.29 | 15.50 | 65.58 | 73.33 | 105.92 | 75.44 | 43.31 | 94.36 | 47.51 | 7.16 | 190.89 | 1.92 |
| <i>Oncaea</i> spp. | 4.07 | 8.96 | 6.52 | 12.61 | 7.96 | 6.93 | 9.06 | 14.57 | 2.59 | 0.60 | 16.81 | 0.32 |
| <i>Paraeuchaeta</i> spp. | 8.14 | 2.80 | 5.37 | 5.60 | 5.97 | 4.23 | 7.72 | 7.63 | 1.73 | 4.18 | 0.99 | 1.60 |
| <i>Rhincalanus gigas</i> | 7.12 | 2.80 | 7.29 | 10.28 | 9.95 | 19.63 | 9.40 | 9.71 | 5.18 | 5.97 | 4.95 | 4.15 |
| Crustacean nauplius | 2.54 | 1.31 | 16.11 | 5.14 | 9.56 | 5.00 | 4.70 | 2.78 | 10.37 | 9.55 | 62.31 | 0.00 |
| Euphausia | | | | | | | | | | | | |
| Euphausia larvae | 9.16 | 6.29 | 6.58 | 8.43 | 14.73 | 7.33 | 8.26 | 7.64 | 12.98 | 22.68 | 7.97 | 1.30 |
| Ostracoda | | | | | | | | | | | | |
| Unidentified Ostracoda | 3.05 | 2.61 | 2.68 | 3.27 | 2.79 | 5.77 | 2.01 | 6.24 | 0.00 | 0.60 | 0.00 | 1.92 |
| Polychaeta | | | | | | | | | | | | |
| Unidentified Polychaeta | 3.05 | 2.24 | 2.50 | 9.04 | 8.83 | 3.12 | 4.76 | 16.72 | 2.66 | 7.28 | 3.00 | 0.68 |
| Pteropoda | | | | | | | | | | | | |
| <i>Clione</i> spp. | 0.00 | 0.01 | 0.00 | 0.00 | 0.05 | 0.01 | 0.03 | 0.01 | 0.01 | 0.04 | 0.02 | 0.40 |
| <i>Limacina</i> spp. | 0.51 | 0.19 | 0.06 | 0.00 | 0.11 | 0.11 | 0.01 | 0.69 | 0.07 | 0.44 | 0.16 | 0.11 |
| Total abundances (ind. m ⁻³) | 207.10 | 112.42 | 261.57 | 358.55 | 386.86 | 384.83 | 350.13 | 438.73 | 236.29 | 203.78 | 448.36 | 39.65 |
| Mean abundances (ind. m ⁻³) | 284.02 | | | | | | | | | | | |
| Number of species | 16 | 23 | 20 | 18 | 19 | 21 | 20 | 18 | 20 | 20 | 16 | 18 |

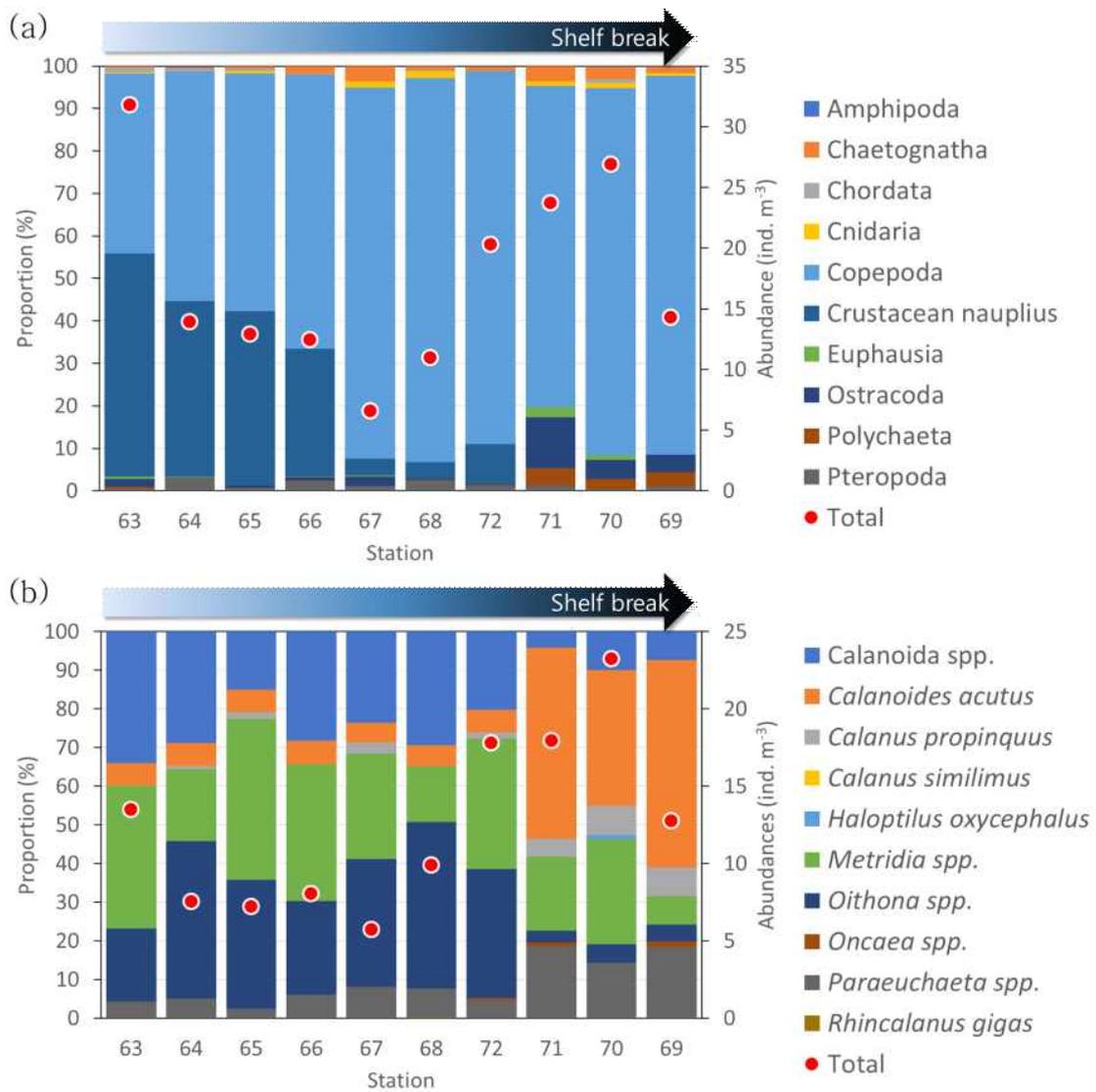


Fig. 3.9.2. Relative proportions and total abundances of (a) zooplankton taxa and (b) copepod species in the Little America Basin.

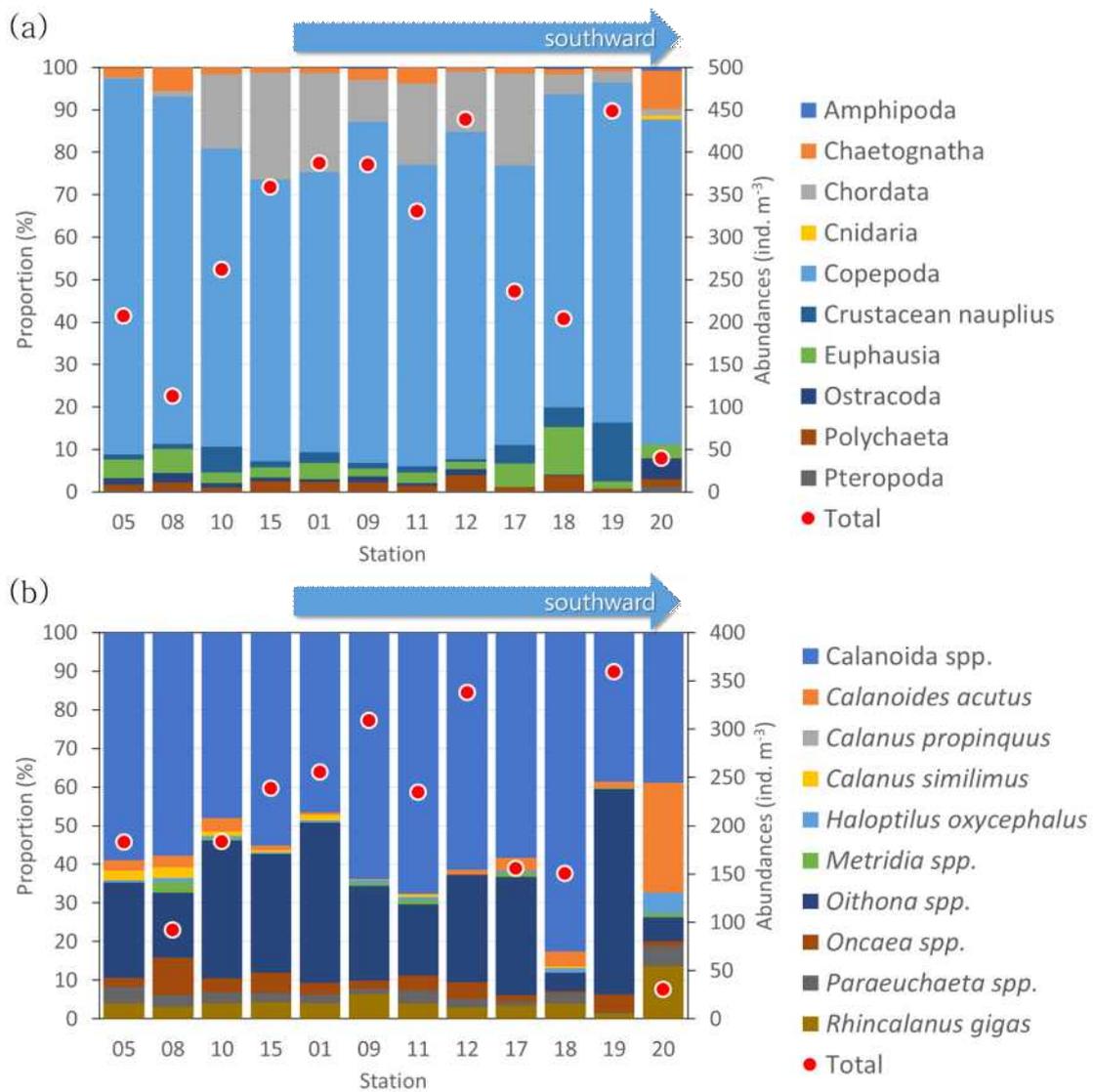
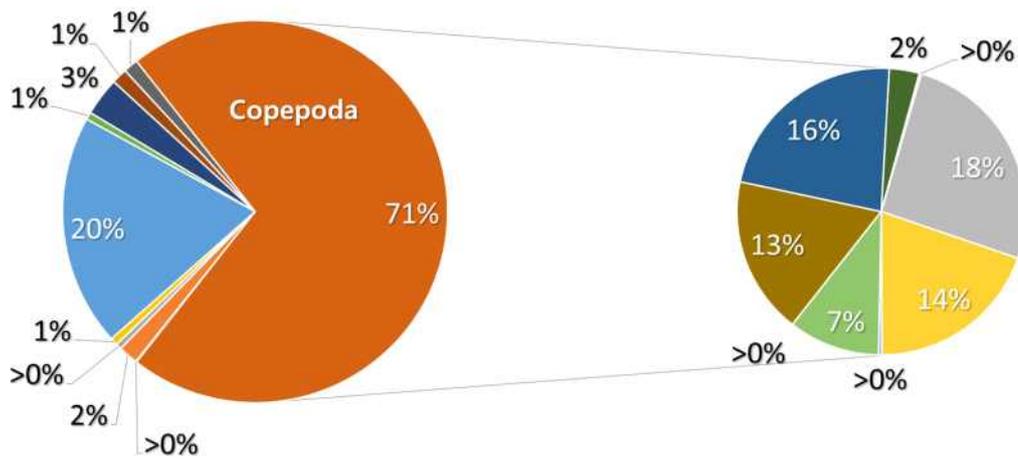


Fig. 3.9.3. Relative proportions and total abundances of (a) zooplankton taxa and (b) copepods species in the Southeast Indian Ridge.

(a) Little American Basin (LAB)



(b) Southeast Indian Ridge (SEIR)

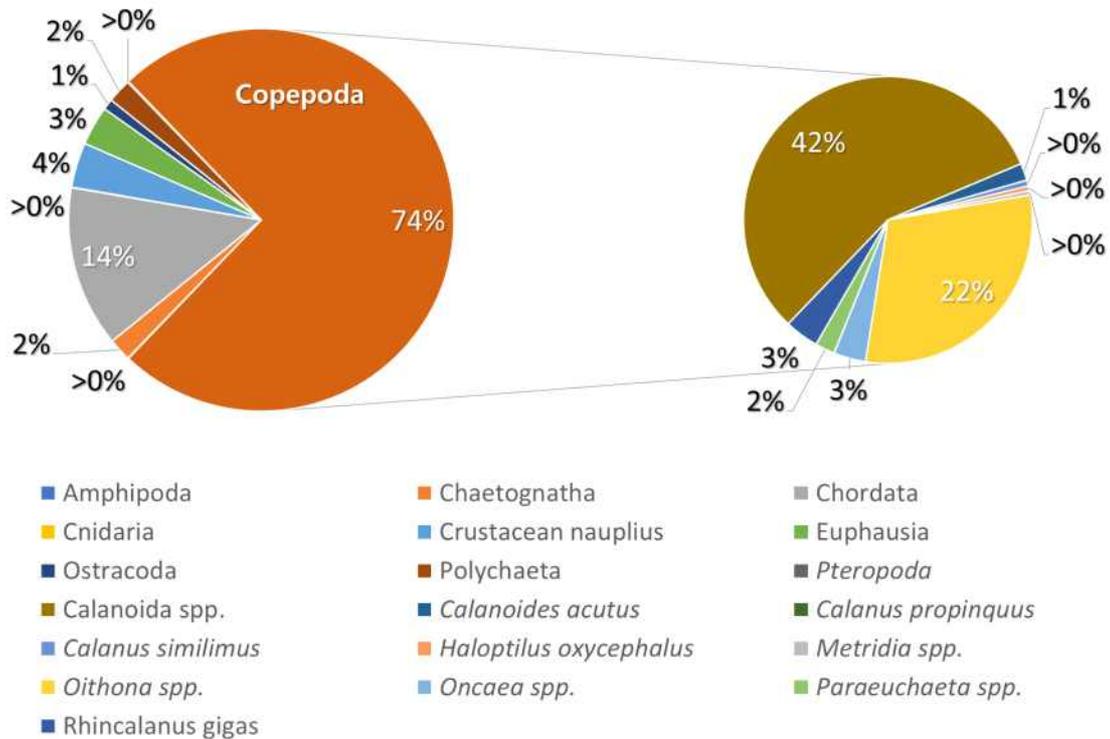


Fig. 3.9.4. Mean relative proportions of zooplankton in the (a) Little America Basin and (b) Southeast Indian Ridge.

제 10 절 해조군집 변동 및 천이양상 (고영욱·최한구)

요약: 남극 킹조지섬 바톤반도에서 조간대 해조류 군집의 단기 변동과 수직분포를 조사하였다. 조사는 2016년 11월부터 2019년 1월까지 두 번의 여름동안 수행되었으며, 단기변동성에 대한 조사는 1-2개월 간격으로 조사되었다. 조사기간 동안 총 15종의 해조류가 출현하였고, 최우점 종인 홍조류 *Iridaea cordata*와 *Phaeurus antarcticus*의 상대피도는 75.5%에 달하였다. 여름동안의 풍부도의 변화는 *I. cordata*에서 *P. antarcticus*로 변화하는 것으로 요약할 수 있으며, 연안에서 관찰되는 우점 해조류에 의한 조간대 군집의 변화를 본 연구에서 처음 시도한 등고선 그래프를 통해 직관적으로 유추할 수 있었다. 우점종 두 종에 의해 지배되는 바톤반도 조간대 지역은 향후 두 종에 대한 장기 모니터링과 상호작용을 통해 온난화에 의한 해조군집의 반응을 이해하는데 중요한 단서를 제공할 것으로 판단된다. 한편, 남극 킹조지섬 마리안소만에서는 빙하후퇴 이후 60여년의 시간이 경과했음에도 “새로이 형성된 얼음이 없는 지역(newly ice-free areas)”에서 해조류 군집의 생태학적 천이가 초기정착단계에 머물러 있었다. 이 연구에서는 마리안소만의 6개 정점에서 수심 25 m까지의 해조군집 조사하여 공간 및 수직분포를 파악하였다. 마리안소만의 빙하후퇴 기록에 따르면 빙하로부터 0.2, 0.8, 1.2, 2.2, 3.6, 4.1 km 떨어진 6개 정점에 대한 해조군집의 구조를 분석하였다. 또한 melting water의 영향을 알아보기 위하여 빙하로부터 0.4, 0.9, 3.0, 4.0, 5.0 km 떨어진 5개의 정점에서 수집된 자료를 바탕으로 해양환경의 차이를 분석하였다. 해조군집과 해양환경 모두 빙하로부터 2-3 km 떨어진 지역을 기준으로 만 안쪽과 바깥쪽의 2개 그룹으로 구분되어 유의한 차이를 보였다. 이 연구는 남극 피오르드형 소만에서의 빙하 영향에 대한 해조군집의 반응을 보여주었으며, 향후 남극에서의 해조군집의 천이를 이해하는데 가치있는 연구가 될 것으로 기대한다.

1. 서론

남극은 1850년 이래 전 지구적 평균보다 2배 이상 따뜻해졌으며, 특히 서남극반도에서의 지역적 온난화현상이 두드러졌다(Turner *et al.*, 2013). 서남극반도에서 온난화로 인한 빙하후퇴는 비단 용융수의 유입으로 수온, 염분, 탁도와 같은 해양환경에 영향을 주고 있을 뿐만 아니라 얼음의 유입으로 물리적 교란현상까지 발생시키고 있다(Dierssen *et al.*, 2002; Yoo *et al.*, 1999; Yoon *et al.*, 1998; Lagger *et al.*, 2021; Sahade *et al.*, 2015). 조간대는 가장 많은 연구가 진행된 해양서식처이기 때문에 매우 잘 연구된 생태계이다(Underwood, 2000). 그러나 남극에서의 조간대는 얼음 교란현상(ice disturbance)의 심각한 영향으로 조하대에 비해 생물학적 종 다양성이 낮기 때문에 접근성이 뛰어난 장점에도 불구하고 연구사례가 많지 않은 실정이다(Wiencke *et al.*, 2007). 해조류에 대한 남극 조간대 연구는 분류학적 기재와 수직분포 관련 연구를 시작으로 군집의 구조에 관한 연구와 환경 또는 생물과의 상호작용에 관한 연구까지 수행되어왔다(Kim, 2001; Marcías *et al.*, 2017; Valdivia *et al.*, 2014; Zacher *et al.*, 2007). 대부분의 연구들이 남쉐틀랜드군도의 킹조지섬에서 수행되었으며 최근 사례로는 시공간 변동에 관한 연구도 진행되었다(Marcías *et al.*, 2017; Valdivia *et al.*, 2014). 한편 빙하후퇴는 “새로이

형성된 얼음이 없는 지역(newly ice-free areas)”를 제공함으로써 육상과 해양 저서환경에 새로운 서식공간이 제공되고 초기정착종들이 정착하여 생태학적 천이과정이 진행된다(Deregibus *et al.*, 2016; Quartino *et al.*, 2020; Quartino *et al.*, 2013). 최근에는 빙하후퇴에 의해 발생하는 물리화학적 과정과 생물학적인 상호작용과 영향에 관한 연구가 저서무척추동물, 해조류, 저서규조류 등에서 이루어지고 있다(Lagger *et al.*, 2018; Lagger *et al.*, 2021; Sahade *et al.*, 2015; Weber, 2017; Sahade *et al.*, 2015; Pasotti *et al.*, 2015; Bae *et al.*, 2021; Quartino *et al.*, 2013). 마리안 소만은 서남극반도 끝에 위치한 남쉐틀랜드 군도 킹조지섬에 위치하고 있으며, 확인가능한 빙하후퇴 기록에 따르면 1956년 이래 약 1.9 km의 빙하가 후퇴하였다(Kim *et al.*, 2021; Ko *et al.*, 2020). 빙하후퇴는 대량으로 유입되는 용융수에 의해 부유 퇴적물이 증가하고 이로 인한 생산자의 광합성이 감소된다(Jerosch *et al.*, 2019; Kim *et al.*, 2021; Yoo *et al.*, 1999; Yoo *et al.*, 2015). 또한 수온과 염도를 하강시키며, 떨어져 나온 빙하는 유빙으로써 연안 기질에 물리적 교란을 유발한다(Deregibus *et al.*, 2017; Gutt, 2001; Karsten *et al.*, 1991; Wiencke *et al.*, 1993). 해조류는 1차 생산자로서 남극 연안환경에서 중요한 생태학적 지위를 차지하고 있으며 빙하후퇴로 인해 유발되는 다양한 해양환경 요인에 반응하고 있다(Navarro *et al.*, 2020). 따라서 본 연구에서는 킹조지섬에 위치한 마리안소만과 조하대와 바톤반도 조간대에 서식하는 해조군집의 공간분포를 알아보려고 하였다.

2. 재료 및 방법

가. 조간대 해조군집 변동

본 연구는 세종과학기지에서 약 3.5 km 떨어진 킹조지섬 바톤반도 남측 해안 조간대에서 수행되었다(Fig. 3.10.1). 조간대는 길이 1 km, 폭 100 m의 규모로 형성되어 있으며 이 지역의 조수간만의 차이는 최대 185 cm이었다. 해조군집의 단기 시간변동 양상을 파악하기 위하여 2016년 11월부터 2017년 1월까지 2개월, 2018년 12월부터 2019년 1월까지 1개월간의 해조군집의 변화를 조사하였다. 해조군집조사는 해안선에 수직방향으로 라인을 설치하고 5 m 간격으로 방형구 2개씩 사진촬영 후 방형구내 해조군집을 분석하였다. 해조군집의 수직분포와 시간변동(1, 2개월) 양상을 시각화하기 위하여 Surfer 9 (Golden Software, Inc.) 프로그램을 활용하여 등고선 그래프를 생성하였다. 등고선 그래프는 조사기간 동안 출현한 해조류 중 주요 5종의 피도를 바탕으로 각 종의 분포를 고유한 패턴의 등고선 그래프를 작성하였으며, 최종적으로는 총 5종류의 등고선 그래프와 총 피도 등고선 그래프를 겹쳐서 하나의 그래프로 통합하였다.

나. 조하대 해조군집 변동과 천이

본 연구는 세종과학기지가 위치한 킹조지섬 마리안소만 내의 6개 정점(MC1, MC2, WP, MC3, MC4, MC5)에서 해조군집의 변동과 천이를 조사하였다(Fig. 3.10.3). 각 정점은 마리안소만 빙하로부터 각각 0.2, 0.8, 1.2, 2.2, 3.6, 4.1 km 떨어진 지점으로 빙하후퇴에 의한 천이시간에 따른 해조군집의 차이점을 보고자하였다. 또한 세종과학기지에서 수행된 장기해양환경 모니터링 자료(수온, 염분, 탁도)를 통해 마리안소만내 빙하로부터 거리에 따른 하계 해양환경 구배를 비교하였다. 해조군집조사를 위해 각 정점별 수심 1, 5, 15, 25 m에서 약 2 m 씩 이격된 방형구 5개의 사진촬영을 실시하였다. 이후 실험실에서 영상분석을 통해 해조류의 종별 피도를

분석하였다. 각 정점별 주요종 해조류의 수직분포와 정점간 해조류 분포의 차이점을 시각화하기 위하여 Surfer 9 프로그램을 활용하여 등고선 그래프를 생성하였다. 등고선 그래프는 앞서 언급한 조간대 연구와 동일한 방법으로 작성되었으며 주요 7종의 해조류의 피도로 표현되었다. 마리인소만 빙하로부터의 거리별 해조군집의 변화양상과 해양환경 요소의 구배의 차이는 one-way ANOVA를 통해 분석하였다. 해조군집의 변화양상은 정점별 출현종의 수, 다양도 지수, 그리고 해조류 피복도(%)를 비교하였으며, 해양환경은 빙하로부터 거리별 수온, 염분, 탁도를 비교하였다. 해양환경 자료의 분석은 해조류 서식환경과의 상관성을 위해 표층부터 30 m까지의 자료를 바탕으로 실시되었다.

3. 결과 및 고찰

가. 조간대 해조군집 변동

킹조지섬 바톤반도 조간대에서 수행된 해조군집 변동 조사 결과, 녹조류 2종(*Monostroma hariotii*, *Ulva hookeriana*), 갈조류 7종(*Phaeurus antarcticus*, *Desmarestia anceps*, *Adenocystis utricularis*, *Ascoseira mirabilis*, *Desmarestia antarctica*, *Desmarestia menziesii*, *Halopteris obovata*), 홍조류 6종(*Iridaea cordata*, *Palmaria decipiens*, Crustose coralline algae, *Plocamium cartilagineum*, *Phycodrys antarctica*, *Geogiella confluens*)으로 총 15종의 해조류가 출현하였다(Table 3.10.1). 이는 기존 킹조지섬에서 수행된 조간대 연구에 비해 종 다양도가 높은 것으로 나타나 바톤반도 조간대가 킹조지섬에서 중요한 해조류 서식처인 것으로 확인되었다. 이 지역에서 가장 우점하는 종은 *I. cordata*와 *P. antarcticus*로 피도가 40-60%인 것으로 나타났으며, 하계 기간동안 *I. cordata*는 감소하고 *P. antarcticus*는 증가하는 양상을 보였다(Fig. 3.10.2.). 이는 계절반응종(season responder)인 *I. cordata*가 먼저 성장 및 생식을 하게 되고, 계절참여종(season anticipator)인 *P. antarcticus*는 비교적 늦은 성장 및 생식의 과정이 진행되기 때문으로 해석되었다. 이는 조간대 해조류의 생활사 패턴에 따른 해조군집의 우점도가 변동되는 것으로 향후 남극 조간대 해조류의 생물량 변동 및 개체군 변동을 이해하는데 기초가 되는 결과이다. 하계기간 해조군집의 단기 변동 양상을 살펴보면 1개월(12월-1월)동안 해조류의 총 피도는 13.39% (1.19배) 증가하였고, 군집유사도는 78.35%로 나타났다. 한편 2개월(11월-1월)동안 해조류의 총 피도는 18.59% (1.39배) 증가하였고, 군집유사도는 64.61%로 나타났다(Table 3.10.1). 이는 남극 조간대에 서식하는 해조류는 짧은 하계기간 성장 및 생식이 이루어지는 생활사를 반영하는 것으로 1-2개월 동안 각 해조류의 상이한 생활사가 진행됨에 따라 경쟁보다는 상이한 생태적 지위를 활용하는 방식으로 진화되어온 결과로 해석할 수 있다. 이와 같은 결과는 생활사 및 진화적 관점에서의 해조류 생태적 지위의 결정에 관한 연구에 기초자료로써 중요한 의미를 갖고 있다. 본 연구는 남극 조간대 해조군집의 공간분포를 정량적으로 시각화한 최초의 사례로써 해조군집의 시간적 변동에 대한 직관적 이해를 돕는 방법론으로 중요한 의미를 갖는다.

나. 조하대 해조군집 변동과 천이

킹조지섬 마리안소만 조하대에서 수행된 해조군집 변동 조사 결과, 녹조류 1종(*Ulva hookeriana*), 갈조류 5종(*Adenocystis utricularis*, *Ascoseira mirabilis*, *Desmarestia* spp., *Himantothallus grandifolius*, *Phaeurus antarcticus*), 홍조류 11종(*Delisea pulchra*, *Gigartina skottsbergii*, *Iridaea cordata*, *Melobesioidea*, *Notophycus fimbriatus*, *Palmaria decipiens*, *Pantoneura plocamioides*, *Phycodrys antarctica*, *Picconiella plumosa*, *Plocamium cartilagineum*, *Trematocarpus antarcticus*)으로 총 17종의 해조류가 출현하였다(Table 3.10.2). 마리안소만 내 해조군집의 수직분포 및 공간변동을 살펴보면, 빙하에 가까울수록 해조군집의 풍부도, 다양도, 출현종의 수가 낮아지는 경향을 보였으며, 정점간 통계적으로 유의한 차이를 보였다(Fig. 3.10.4). 한편, 마리안소만내 해양환경의 구배는 하계 동안 빙하 근처의 수온과 염분은 낮은 분포를 보이고 탁도는 높게 나타났으며 정점간 통계적으로 유의한 차이를 보였다. 결과적으로 해조군집과 해양환경의 변화를 바탕으로 MC1-MC2, WP, MC3-MC4-MC5의 3개의 그룹으로 구분 가능하며, 이는 마리안소만 내 “새로이 형성된 얼음이 없는 지역”에서 해조군집의 천이 과정이 3개의 구분된 공간적 차이를 보이고 있음으로 해석되었다. 확인가능한 마리안소만 빙하후퇴 기록에 따르면 MC1에서 WP정점은 빙하후퇴 이후 63년 이상 천이과정이 진행되었으며, MC3는 33년 이상, MC4는 19년 이상, MC5는 6년 이상의 천이가 이루어졌을 것으로 예상된다. 그럼에도 불구하고 MC3-MC4-MC5가 하나의 그룹으로 묶이게 된 것은 33년 이상의 해조군집의 천이에도 불구하고 천이단계가 초기단계를 벗어나지 못하고 있을 보여주었다. 또한 MC1과 MC2는 마리안소만 바깥의 잘 발달된 해조군집과 유사한 수준의 군집이 형성되었기 때문에 해조군집 천이의 후기단계로 천이가 이행되었음을 알 수 있었다. 한편, WP 정점의 경우 MC1-MC2와 MC3-MC4-MC5 그룹의 중간형태의 천이단계를 보여주고 있었다. 이는 온난화에 기인하는 빙하후퇴는 높은 탁도를 유발함으로써 해조류의 광합성을 직접적으로 저해하기 때문에 해조류의 분포 수심 제한하고 약한 빛에 적응할 수 있는 소수의 종만이 서식할 수 있다. 또한 빙하후퇴로 발생하는 얼음덩어리(growler)는 해조류의 서식공간에 직접적인 물리적 교란을 주기 때문에 빙하에 가까운 곳일수록 해조군집의 발달에 부정적인 영향을 주게 된다. 한편, 빙하에서 기인하는 용융수는 하계의 수온과 염분을 낮추고 있으나 해조군집에 미치는 영향은 매우 제한적일 것으로 판단된다. 결과적으로 남극 킹조지섬 마리안소만에서 나타난 해조군집의 천이는 빙하후퇴로 인한 새로운 서식공간에 초기정착자의 가입이 빠르게 이루어짐에도 불구하고 천이의 진행과 다양성의 증가에는 최소 50여년 이상의 시간이 소요될 수 있음을 보여주고 있다. 이와 같은 결과는 조만간 국제학술지에 투고할 예정이며, 향후 킹조지섬에 위치한 포터소만, 콜린스하버, 장군만 등에서 나타나는 해조군집 연구를 통해 남극 해조군집의 천이양상에 대한 이해를 높여야 할 것으로 판단된다.

Variability of macroalgal assemblage and macroalgal succession in King George Island, Antarctica

Young Wook Ko · Han-Gu Choi

Division of Life Sciences, KOPRI

Abstract: Temporal variability and vertical distribution of a intertidal macroalgal assemblage has been investigated in Barton Peninsula, Maxwell Bay, King George Island of the Antarctic coast. Sampling was performed during the two seasons of austral summer from November 2016 to January 2019. Sampling for short-term variability had an interval time of 1-2 months. 15 algal species were identified, and relative coverage of the predominant red *Iridaea cordata* and endemic brown *Phaeurus antarcticus* reached 75.5%. The change of abundance in summer can be summarized as a shift from *I. cordata* (season responder) to *P. antarcticus* (season anticipator) and the change in color can be intuitively inferred through the contour plot that was first attempted in this study. This study area, which is dominated by two species, should investigate the effects of global warming on macroalgal assemblage by studying long-term monitoring and interactions between the two species. Meanwhile, ecological macroalgal succession in newly free areas remained at the pioneer seral stage, despite six decade of glacial retreat history in Marian Cove, King George Island, Antarctica. In this study, spatial and vertical distributions were identified by examining subtidal macroalgal assemblage from six sites of Marian Cove to a depth of 25 m. The structure of macroalgal assemblage was analyzed for six sites 0.2, 0.8, 1.2, 2.2, 3.6, and 4.1 km away from the glacier. To investigate the effect of melting water, differences in the coastal environment were analyzed based on data collected from 5 sites 0.4, 0.9, 3.0, 4.0, and 5.0 km away from the glacier. Both macroalgal assemblage and marine environment were divided into two groups, inside and outside the cove, based on the region 2-3 km away (ice free since 1956) from the glacier, showing significant differences. This study showed that macroalgal assemblage in the Antarctic fjord-like cove responded to the glacier retreat, and is a valuable study for understanding macroalgal succession in Antarctica for the future.

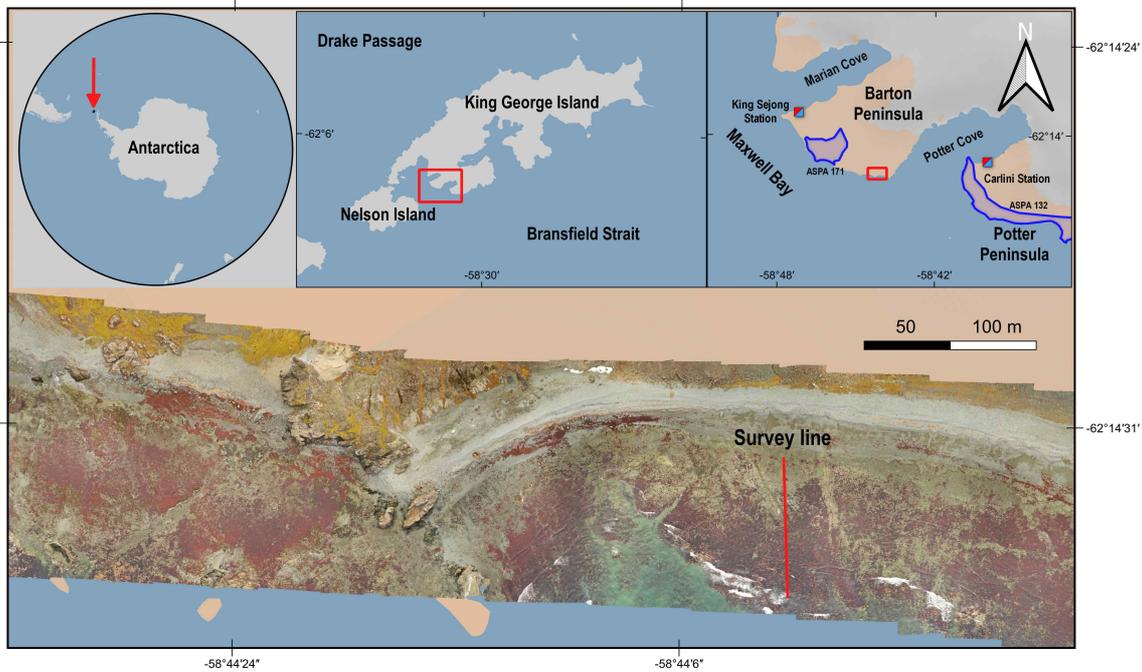


Fig. 3.10.1. Sampling site at Barton Peninsula, King George Island.

Table 3.10.1. Short-term variation in the mean cover of all species in the macroalgal assemblage

| Species | Sampling season | | | |
|--------------------------------|-----------------|------------|------------|------------|
| | 2018–19 | | 2016–17 | |
| | Sampling time | | | |
| | Dec. | Jan. | Nov. | Jan. |
| <i>Iridaea cordata</i> | 34.07±6.67 | 25.54±6.12 | 34.96±4.65 | 18.69±7.20 |
| <i>Phaeurus antarcticus</i> | 14.07±3.85 | 21.93±5.93 | 5.43±2.28 | 41.38±10.9 |
| <i>Palmaria decipiens</i> | 14.43±4.46 | 14.54±3.58 | 0.04±0.04 | 0.38±0.26 |
| <i>Desmarestia anceps</i> | 0.50±0.36 | 9.75±3.79 | 0.62±0.48 | 1.06±1.06 |
| Crustose coralline algae | 2.50±0.73 | 1.43±0.34 | 4.26±0.84 | 0.94±0.30 |
| <i>Adenocystis utricularis</i> | 0.93±0.38 | 0.54±0.23 | 1.02±0.21 | 3.81±2.03 |
| <i>Ascoseira mirabilis</i> | 1.68±1.04 | 3.39±1.42 | 1.02±1.02 | - |
| <i>Desmarestia antarctica</i> | - | 3.11±1.64 | 0.09±0.09 | 0.13±0.13 |
| <i>Desmarestia menziesii</i> | 0.11±0.11 | 2.11±1.85 | - | - |
| <i>Monostroma hariotii</i> | 1.00±0.50 | 0.29±0.25 | 0.09±0.04 | - |
| <i>Plocamium cartilagineum</i> | - | 0.14±0.14 | - | - |
| <i>Halopteris obovata</i> | - | - | 0.11±0.05 | - |
| <i>Phycodryx antarctica</i> | - | - | 0.11±0.11 | - |
| <i>Ulva hookeriana</i> | 0.07±0.07 | - | 0.02±0.02 | - |
| <i>Geigiella confluens</i> | - | - | 0.04±0.04 | - |
| Sum | 69.36±6.41 | 82.75±5.59 | 47.79±5.05 | 66.38±9.84 |
| Richness (<i>S</i>) | 10 | 11 | 13 | 7 |
| Diversity (<i>H'</i>) | 1.381 | 1.753 | 0.979 | 0.984 |
| Evenness (<i>J'</i>) | 0.6 | 0.731 | 0.382 | 0.555 |
| Dissimilarity | 21.65 | | 35.39 | |

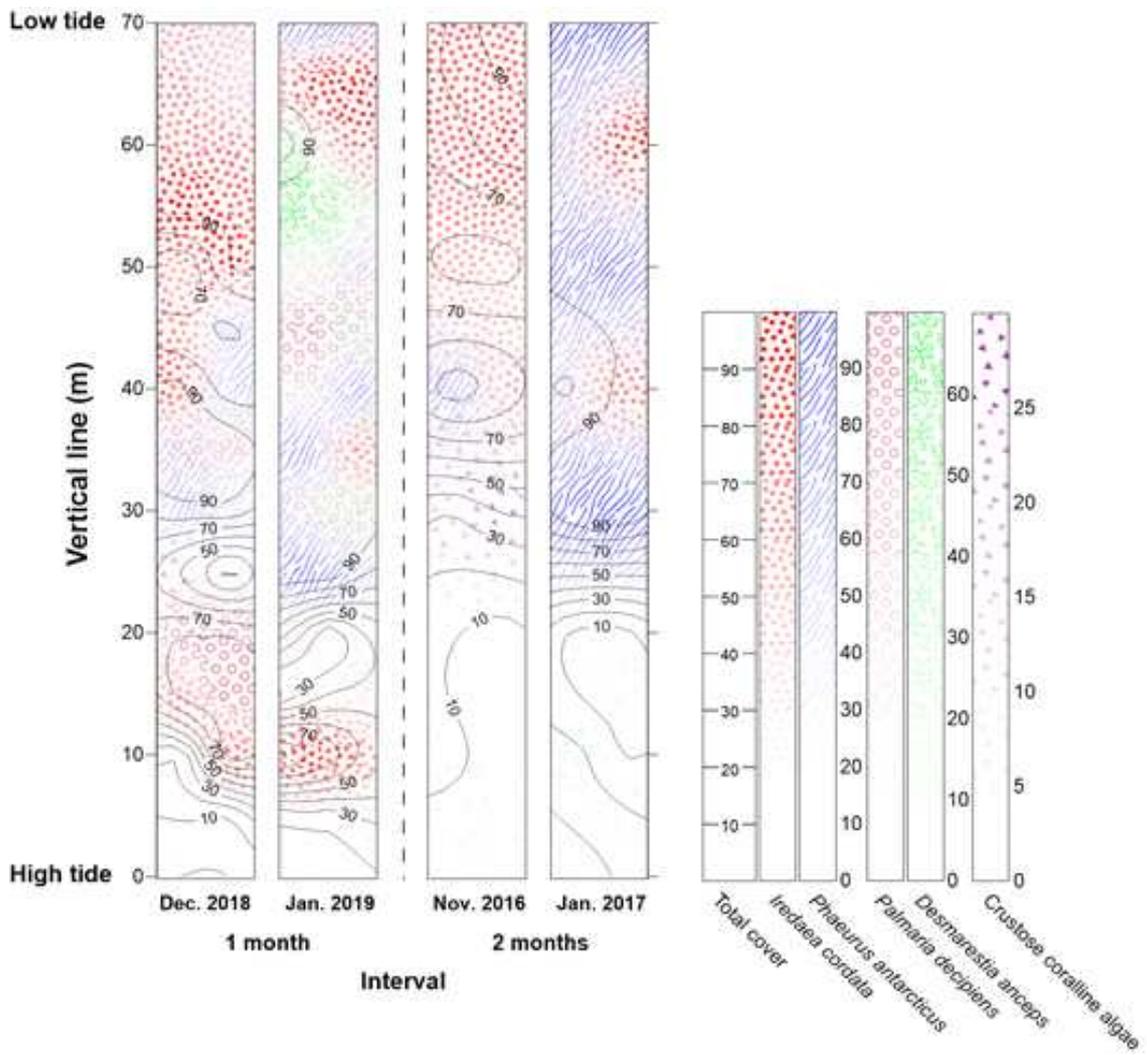


Fig. 3.10.2. Contour plots of total algal cover and major species cover from the high tidal level to low tidal level between the sampling intervals.

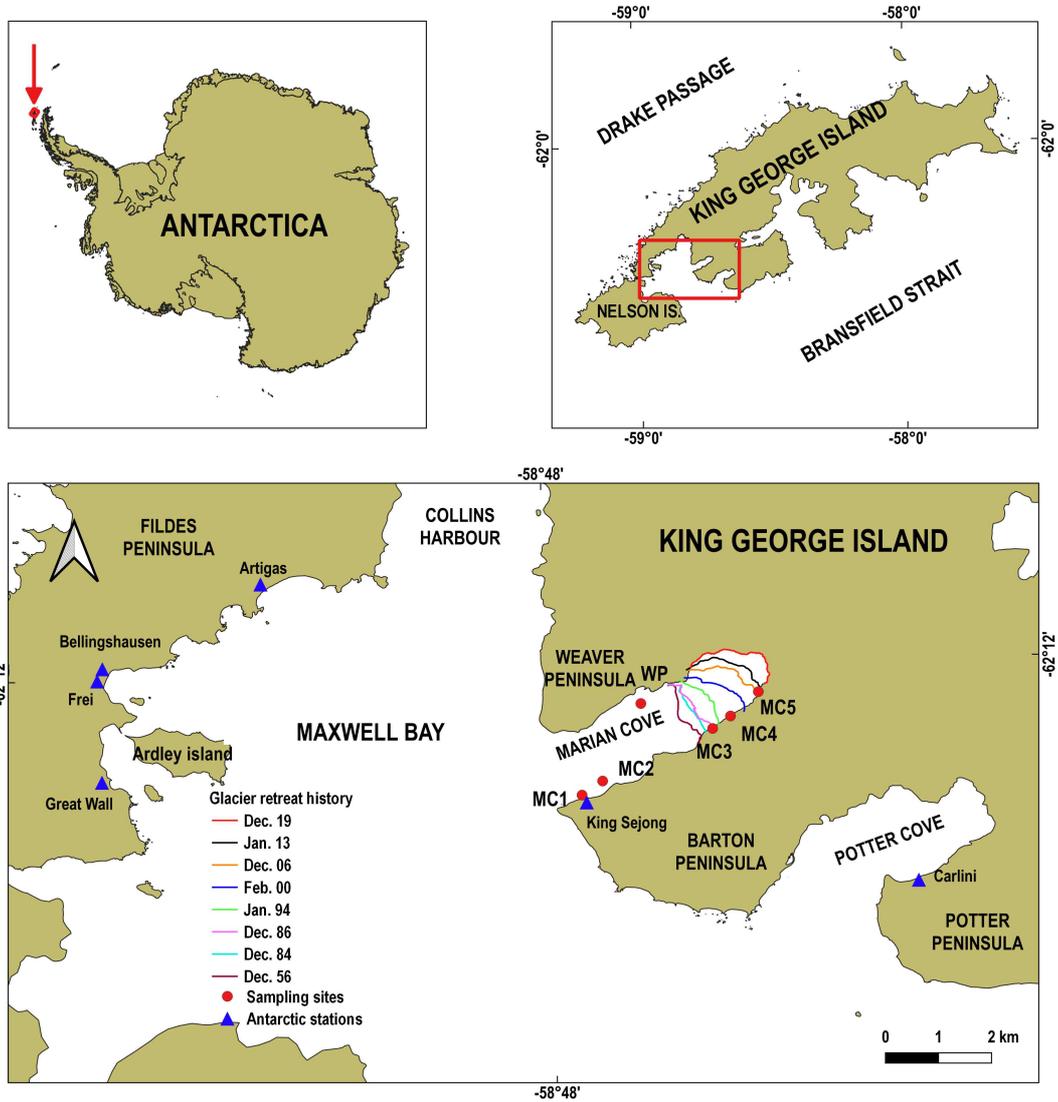


Fig. 3.10.3. Survey sites located in Maxwell Bay, King George Island, Antarctica.

Table 3.10.2. List and coverage of macroalgal species in Marian Cove, King George Island, Antarctica (mean \pm s.e.)

| Species | MC1 | MC2 | WP | MC3 | MC4 | MC5 |
|------------------------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|
| <i>Adenocystis utricularis</i> | | 0.05 \pm 0.05 | | | | |
| <i>Ascoseira mirabilis</i> | | 0.25 \pm 0.25 | | | | |
| <i>Delisea pulchra</i> | | 0.05 \pm 0.05 | | | | |
| <i>Desmarestia</i> spp. | 0.55 \pm 0.31 | 7.80 \pm 5.26 | 11.47 \pm 5.64 | 0.75 \pm 0.46 | 6.50 \pm 4.77 | 5.80 \pm 3.30 |
| <i>Gigartina skottsbergii</i> | | 3.95 \pm 2.10 | | | | |
| <i>Himantothallus grandifolius</i> | 15.9 \pm 7.05 | 23.55 \pm 6.83 | 6.53 \pm 4.45 | | | |
| <i>Iridaea cordata</i> | | 0.50 \pm 0.50 | | | | |
| Melobesioideae | 4.30 \pm 1.51 | 14.5 \pm 5.09 | 1.20 \pm 0.66 | 3.10 \pm 1.42 | | |
| <i>Notophycus fimbriatus</i> | | 3.25 \pm 1.46 | | | | |
| <i>Palmaria decipiens</i> | 2.60 \pm 1.08 | 14.60 \pm 5.30 | 33.87 \pm 7.05 | 47.00 \pm 6.90 | 22.80 \pm 5.96 | 11.40 \pm 2.21 |
| <i>Pantoneura plocamioides</i> | 0.20 \pm 0.14 | | | | | |
| <i>Phaeurus antarcticus</i> | | 0.35 \pm 0.35 | | | | 0.07 \pm 0.07 |
| <i>Phycodryx antarctica</i> | 1.00 \pm 0.57 | | | | | |
| <i>Picconiella plumosa</i> | 3.30 \pm 2.33 | 2.10 \pm 1.02 | | | | |
| <i>Plocamium cartilagineum</i> | 19.75 \pm 8.02 | 10.90 \pm 5.04 | 19.20 \pm 6.35 | | | |
| <i>Trematocarpus antarcticus</i> | | 0.45 \pm 0.36 | | | | |
| <i>Ulva hookeriana</i> | 0.60 \pm 0.26 | | 0.20 \pm 0.14 | 2.05 \pm 1.60 | 2.55 \pm 0.68 | 0.60 \pm 0.47 |
| Total cover | 48.20 \pm 8.46 | 82.3 \pm 4.44 | 72.47 \pm 4.39 | 52.90 \pm 7.68 | 31.85 \pm 7.30 | 17.87 \pm 4.63 |

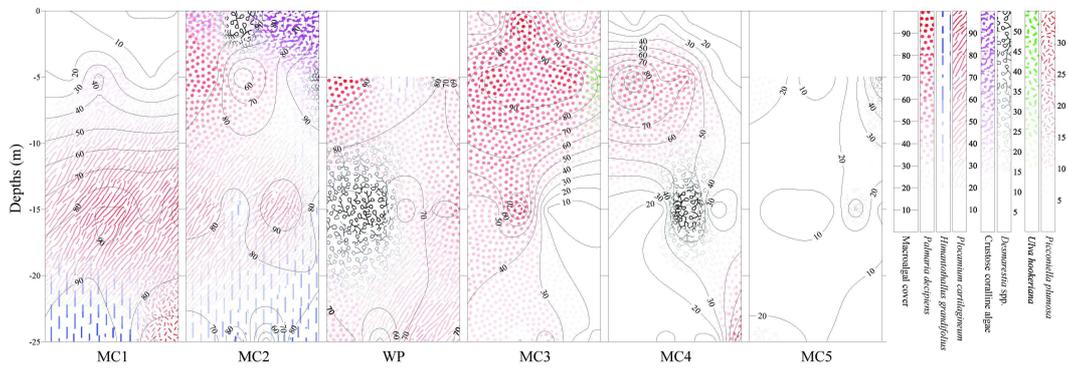


Fig. 3.10.4. Contour plots of total macroalgal coverage and major species coverage from surface to 25 m depth.



제 4 장 연구개발목표 달성도 및 대외기여도

제 1 절 연구개발목표

| |
|---|
| <ul style="list-style-type: none"> ○ 서남극해 열 수송과 해양-대기 탄소교환량 파악 <ul style="list-style-type: none"> - 남극순환심층수(CDW) 거동 관측을 위한 종합해양관측망 구축 및 열 수송 과정 이해 - 서남극해 해양-대기 이산화탄소 교환에 따른 표층무기탄소 분포 특성 파악 - 지구시스템 모델 및 재분석장에서의 해수 및 탄소 순환 변동성과 추세 파악 ○ 빙권수축(온난화)에 따른 (연안) 생지화학 물질순환 변동 과정 규명 <ul style="list-style-type: none"> - 서남극 연안 빙하기원 용빙수의 공간분포 및 확산·혼합 과정의 이해 - 서남극 화학적 생물생산 조절인자(영양염, 미량금속)의 시기별/공간적 분포 특성 이해 - 서남극 연안해역의 수층 내 탄소(유기+무기) 순환 규모 및 해양-대기 유기탄소 교환 특성 파악 ○ 생물생산력 변동과 해양생태계 반응 추적 <ul style="list-style-type: none"> - 해양환경 변화에 따른 서남극해 지표생물군집(식물, 동물, 저서생물) 분포 특성 파악 - 온난화에 따른 서남극해 생물생산력(일차, 이차)의 변동성 및 변화방향 추적 - 서남극해 생물기원 유기물 순환과 해양 하위 영양단계의 분포 특성 파악 |
|---|

제 2 절 연구개발목표 대비 달성도

| 구분 | 연구목표 달성내용 | | | 계획대비 연구실적 달성율(B) (%) | |
|------------|--------------------------------|---|---------|--|-----|
| | 세부연구 목표 | 연구내용 | 가중치 (A) | | |
| 1년차 (2020) | 남극해 온난화 과정과 남극순환 심층수 거동의 현황 파악 | 남극해 과거자료를 수집, 분석하여 해양수온, 염분의 공간 구조에 대한 사전 연구 및 계획 수립 위성자료 중 남극환류 변동 관련 표층수온, 해수면 높이 과거 30년 자료 분석 | 0.15 | <ul style="list-style-type: none"> - 서남극해 Little America Basin과 주변 해역에서 과거 관측된 수괴 자료 확보 및 분석 - 서남극 연안 남극순환수 유입과정 및 변동성 파악을 위한 4개의 장기관측 거점 선정 및 계류선 모식도 설계 - 과거 26년 인공위성 관측 해수면 높이(1993~2018) 자료 확보 후 이를 활용한 남극환류 변동성 분석 - 과거 38년 (1982~2019년) 인공위성 및 재분석 표층 수온 자료 확보 후 이를 활용한 남극해 표층 수온 변동성 파악 | 100 |
| | 남극해 생지화학적 환경변화와 탄소흡수력 현황 파악 | 남극해 용존무기탄소 분포 및 변동 연구를 위한 시스템 구축과 인공지능 분석 기법 사전 연구 남극해 이산화탄소 흡수력과 환경 변동 데이터 기존관측 자료 정리 및 데이터베이스화 | 0.15 | <ul style="list-style-type: none"> - DIC 및 13C 분석을 위한 AS-D1과 CRDS 연동 시스템 제작 및 테스트 완료 - 인공지능 기법 사전 연구 및 기존 관측 자료를 활용한 해양변수 재현 완료 - 기존 DB 정리 완료 및 인공지능 분석을 통한 pCO₂ 추정 계산 중이며, 완료후 인공지능 기반 pCO₂값을 포함한 보고서 작성 | 100 |
| | 남극해 물질순환 | 사전연구를 통한 남극해 수층 유기탄소순환 구조 파악 | 0.15 | <ul style="list-style-type: none"> - 기존 문헌자료를 이용하여 남극 로스해 수층내 탄소순환 모식도 작성 | 100 |

| | | | | |
|---------------------------------------|---|------|--|-----|
| 과 해양 하위 영양단계 구조 파악 | 수층내 탄소플럭스와 해양 하위 영양단계의 기존확보자료 분석과 물리-생지화학모델 셋업 해색 위성자료를 활용한 서남극해 과거 20년 엽록소농도, 일차생산력 매핑과 변동성 파악 | | - 퇴적물트랩 자료를 이용한 남극해 수층내 탄소플럭스의 해역별 비교분석 - 1차원 생지화학-생태계 모델 기반 구축 - 과거 23년 기간의 위성자료를 활용한 서남극해 엽록소농도와 일차생산력 매핑 완성 | |
| 서남극 연안 빙하기원 용빙수 농도 및 분포 현장실측 | 기존 관측자료를 활용한 빙봉 하부 열 유입량과 용빙수 배출량 변동성 파악 물리(수온, 염분, 용존산소) 및 화학적 기법(산소동위원소 비율, 불활성기체)를 활용한 빙봉 주변 해역 용빙수 농도 및 분포 현장실측 | 0.1 | - 2007, 2009, 2011, 2012, 2014, 2016, 2018년 닷슨골 및 닷슨 빙봉 전면에서 관측된 기존 수리 물리 자료 확보 및 분석 완료 - 2020년 서남극 연안 29개 정점에서 해수 물리적 특성(수온, 염분, 용존산소 등) 및 해류 관측 및 분석 완료 - 2020년 서남극 연안 27개 정점에서 해수 화학적 특성(산소동위원소 비율 27개 정점, 불활성기체 19개 정점) 관측 완료 | 100 |
| 수층생물 분포 현장실측 및 미량금속 관측 시스템 구축 | 용빙수 확산에 따른 식물플랑크톤 군집구조 및 생물량의 공간적 변동성 현장실측 미량금속 관측을 위한 청정해수시료채수시스템 구축 | 0.15 | - 2020년 서남극 연안 24개 정점에서 식물플랑크톤 현존량 관측 - 현장관측 시료로부터 정점별 식물플랑크톤 농도 및 공간분포 파악 - 미량금속 전용 채수기, 채수 시스템 도입 완료 - 기존 클린컨테이너 및 원치 개보수 완료 - 미량금속 관측 전용 원치의 5000m급 케이ابل 도입 | 100 |
| 빙권 해양 순환 분석을 위한 자료 구축 및 기후기체 분포 특성 관측 | 해양환경 내 유기무기 화합물의 공간 분포 확인 빙하후퇴 탐지를 위한 광학레이더 원격탐사 자료 구축 기존 장기계류관측자료(해수 수괴, 순환) 분석 마리안소만 정점 관측(해수특성: 10 이상) 과거 해양환경모의 실험 마리안소만 용존무기탄소 분석 시스템 구축 남극연안환경(세종기지) 배출 기후기체 분석 | 0.1 | - 정점별 무기영양염, 미량금속 및 유기화합물 분석 자료 제시 - 2016~2020년 남극 하계시기(12월~2월) 동안 총 30개 시점에 대해 구축을 수행함 - 현장에 설치한 장기관측시스템을 재회수하여 19개월간의 자료획득, 동일관측시스템 재설치 및 유지중 - 10개 정점에서 총 3회의 정선조사 실시 완료 - 수치모델(FVCOM)을 활용 2017년까지의 과거 결과를 생산 및 해수순환 구조를 모의함 - 장비의 제작 완료/2021년에 도입 - 기후관련 휘발성 유기화합물의 분석 자료 제시 | 100 |
| 남극연안 빙하후퇴 지역 해양환경과 생태계 특성 분석 | 마리안소만 및 맥스웰만 서식 식물플랑크톤 지표종의 공간적 변동양상 파악 식물플랑크톤 군집의 장기변동(1996-2018) 패턴 분석 동물플랑크톤 생물량 및 군집구조의 공간 분포 특성 분석 마리안소만 저서생물군집 공간분포 및 빙하후퇴에 따른 천이 양상 파악 | 0.1 | - 마리안소만 5개, 맥스웰만 5개 정점에서의 식물플랑크톤 군집조성 파악 및 KPDC 자료 등록 완료 - 식물플랑크톤(1996-2019)과 환경 패턴 비교자료 제시 - light-trap을 이용 3회, 10시간동안의 동물플랑크톤 출현빈도 조사 - 빙벽으로부터 거리 및 수심에 따른 분포 양상(종조성, 다양성, 밀도 등) 분석 완료 및 종 리스트 1건 작성 - 빙벽후퇴에 따른 지표군집 천이과정 모식도 1건 도출 | 100 |
| 연안 해양생태계 | 식물플랑크톤의 유기물 조성 및 해양환경 비교를 통한 주요 환경 인자 파악 | 0.1 | - 마리안 소만 내 CDOM, DOC, TDN 수직적 분포 자료 제시 | 100 |

| | | | | | |
|---|---|--|--|---|-----|
| | 탄소순환 주요 환경인자 파악 및 기초생산 측정 | 해양생태계 기초 생산 측정 | | - 마리아나소만에서 두차례에 걸쳐 탄소 및 질소 흡수율 조사자료 제시 | |
| | 계 | | 1.0 | | 100 |
| 2년차 (2021) | 1. 서남극해 열 수송과 해양대 기 탄소 교환량 파악 | 남극 극전선 Antarctic Circumpolar Current (ACC) 해역을 가로지르는 열 수송량 실관측 시스템 구축 | 0.3 | - 남극전선 심층수렴대 장기 해양관측을 위해 장기해류관측시스템을 설계 및 도입완료하였으며, 2021년 11월 현장 설치 | 100 |
| | | 장기계류와 아라온 정선관측을 통한 남극해 열 수송 관측, 자료분석 | | - 로스환류 해역 대륙사면에 해양계류 시스템 4기 설치 완료 | |
| | | 현장관측과 인공지능 기법을 활용한 용존탄소의 분포 및 현황 파악 | | - 11개 정점 해양조사를 실시, 과거 자료(1976년)와 비교 분석함 | |
| | | 정점별 수층 및 아라온 이동항로상 표층 연속관측 수행 | | - 인공지능 (Random forest) 기법을 통해 로스해 지역 20년간 fCO2 분포도 작성 완료 | |
| | | 고해상도 해양모델 재분석자료 및 지구시스템 모델을 이용한 서남극해 전선해역 장기변동 파악 - 모델이 모의하는 남극해 수괴 및 해류 구조에 대한 평가와 변동성 분석 | | - 2020- 21 아라온 남극항해를 통해 해수 샘플링 완료 및 DIC 와 δ ¹³ C 분석 | |
| | 지구시스템 모델 다중 앙상블 자료 분석으로 용존 이산화탄소 변동성 파악 - 남극해 온난화 과정에 대한 지구시스템 모델 내의 용존 이산화탄소 분포특성과 시공간적 변동성 분석 | - 해양재분석, 모델 온난화 실험 및 관측 자료 수집 및 평가 완료 | - 서남극 해류 및 전선 변동 기작 제시 및 미래 기후에서 남극 연안 수 장기변화 파악 | | |
| | 2. 빙권수축 (온난화) 에 따른 (연안) 생지화학 물질순환 변동 과정 규명 | 저온 저염의 빙봉 용빙수의 서남극 연안해역으로의 확산 혼합되는 과정 파악 | 0.3 | - 2014-2016년, 2018-2020년 빙봉전면 용빙수 배출구에서 용빙수 혼합 계량화와 확산경로 추정 및 용빙수량 공간변동성 파악 | 100 |
| | | 남극연안해류의 시공간 변동성과 용빙수의 거동과의 관계 규명 | | - 단기 연속자료(2년 계류자료)와 장기 여름 관측자료 (2007-2018)를 활용해 빙봉전면 용빙수 배출에 따른 해수 밀도구조 변화 및 연안해류에 미치는 영향파악 | |
| | | 정점별, 수심별 유기탄소화합물, 영양염, 오염물질 등 관측 수행 | | - 2020/21 남극해 현장 조사시 획득한 해수 시료 내의 용존유기탄소화합물과 영양염 공간분포 특성 분석 | |
| | | 기 구축 완료된 청정해수시료채수시스템의 고도화 | | - 시험항해를 활용한 채수시스템 검증과 클린컨테이너 개선작업 수행 | |
| 수층내 탄소플럭스의 현황 파악을 위한 아라온 관측 (정선 및 표층연속 관측) 및 자료분석 | | - 남극해 퇴적물 트랩 2 set 계류 (2022/2023 관측시 회수 예정) | | | |
| 마리아나소만 용존무기탄소 분석시스템 설치 및 관측 | - 용존무기탄소 분석 시스템 도입 및 테스트 완료, 코로나로 인해 20-21 남극세종기지 하계연구시 설치 및 관측 수행 | - 20-21 아라온 남극항해 중 시료채집 및 분석 | | | |
| 남극연안환경 (세종기지) 배출 기후기체 분석 | | | | | |

| | | | | |
|---|---|-----|---|-----|
| | 아래온 현장관측을 통한 남극해 대기 에어로졸 중에 존재하는 유기탄소 화합물 분포 및 농도 특성 파악 | | - 현재 2020/21 남극해 현장 조사시 획득한 에어로졸 시료 유기탄소화합물 분석 | |
| 3. 생물생산력 변동과 해양생태계 반응 추적 | 용빙수 분포에 따른 식물플랑크톤 군집구조 및 생물량의 공간적 변동성 파악 | 0.4 | - 아문젠해 연안해역에서 식물플랑크톤 군집의 정밀공간분포 파악 | 100 |
| | 마리안소만 정점관측 (해수특성: 10 이상, 해류: 2개 이상 측선 관측) | | - 2021년 마리안소만과 인근 맥스웰만의 27개 정점에서 수직 수온염분 및 해류를 관측함 - 맥스웰만 2개 측선에서 수직 수온, 염분 및 해류를 관측하였으며, 초기 분석 완료 | |
| | 현재 해양환경 모의실험 및 남극반도 과거 해양환경 재현 | | - 기 구축완료된 해양수치모델에 관측자료 활용 모델을 안정화(3년간 Spin-Up)하여 초기자료 생산 - 1988년부터 2017년까지 30년간 모델 수행 및 해양환경 재현함 - 서남극해 1-D 해양생태계 모델 구축 | |
| | 식물플랑크톤 군집의 장기변동 (1996-2018) 패턴 분석 | | - 생물생산력 변동과 해양생태계 반응 추적을 위한 식물플랑크톤 장기 연속데이터 획득 및 분석 | |
| | 동물플랑크톤 우점종의 시공간분포 특성 비교 분석 | | - 하위영양단계 파악을 위한 동물플랑크톤 분포 특성 조사 | |
| | 장기관측자료 및 하계현장관측자료 분석을 통한 지표종과 환경요인과의 상관관계 분석 | | - 남극계절변화에 따른 조간대 우점 단각류의 섭식패턴의 변동 (동위원소와 지방산 trophic marker 분석) | |
| | 마리안소만 저서 군집 변동 장기모니터링 지점 설정 및 영상 관측 | | - 최근 노출 빙벽 근접 지역 포함 3개 모니터링 정점 전수심 저서생물군집 ROV 정량자료 확보 | |
| | 마리안소만 주요 저서 생물 군집 공간분포 및 천이 양상 규명 | | - 빙하후퇴로 인한 멩게군집 공간분포 특성 및 추동 용인 규명 (논문 1편 게재완료 SCIE IF 4.958, mirIF 73.9%) - 빙하후퇴로 인한 서식지 환경변화에 따른 주요 저서생물군집 기능적, 분류적 다양성 변화 분석 - 세종과학기지 주변 해역 내 해조류 다양성과 군집구조 변동 및 천이 분석 | |
| | 마리안소만/맥스웰만 우점 저서생물군집 분포 비교 | | - 2018 아래온 획득 마리안소만&맥스웰만 저서동물군집 분류생태적 특성 연구 (브라질과 공동 연구) | |
| | 광학/레이더 원격탐사 자료 융합 분석을 통한 빙하후퇴 탐지 | | - 광학/레이더 원격탐사 융합분석을 통해 불규칙한 연안빙하 경계에 대한 후퇴속도 산정 | |
| | 해양환경 내 유기/무기 화합물의 공간 분포 모니터링 | | - 2021년 현장관측 수행을 통해 수층 내 유기/무기 탄소 및 질소, 용존무기영양염류 수심별 관측 | |
| | 연안생태계 탄소순환 지역별 특성 비교 분석 | | - 맥스웰만 및 마리안소만내 10개 정점에서 식물플랑크톤 크기별 탄소 및 질소 섭취율 분석 | |
| 수층 및 저서생물의 시료 및 지표생물종의 탄소 및 질소 안정동위원소비 분석 자료 획득 | - 저서생물 및 지표생물 15종의 탄소 및 질소 안정동위원소비 분석 | | | |
| 지표생물종 대상의 먹이망 구조 파악 | - 저서생물의 지표 생물종의 섭식형태 파악 | | | |

| | | | | | |
|--|--|---|---|---|-----|
| | <p>수층내 해양 하위 영양단계 (식물플랑크톤, 동물플랑크톤 등)의 현황 파악을 위한 이라온 관측 (정선 및 표층연속 관측) 및 자료분석 - 생물학적 탄소흡수와 해양 하위 영양단계 구조 파악을 위한 이라온 관측</p> <p>정점별, 수심별 엽록소농도 등 관측 수행 - 서남극해 식물플랑크톤 정밀 공간분포 파악</p> | | <ul style="list-style-type: none"> - 2020년 12월 리틀 아메리칸 베이진 해역 10개 정점에서 수심별 시료채집 및 식물플랑크톤 군집구조 분석 - 생물음향시스템 활용 남극 크릴과 아이스 크릴 생물량 분포 파악 - 2020년 12월 리틀 아메리칸 베이진 해역 엽록소 농도의 연속공간분포 관측 및 10개 정점의 수심별 엽록소 농도 분석 | | |
| | 계 | 1.0 | | 100 | |
| 3년차 (2022) | 1. 서남극해 열 수송과 해양대기 탄소 교환량 파악 | ACC 해역, 로스환류 해역, 남극연안류 접경 대륙사면해역을 아우르는 종단면 관측자료 분석 | 0.3 | <ul style="list-style-type: none"> - 2021년 11월 남동인디아해령(SEIR) 인근해역에 장기해류관측시스템과 PDS-CPIES (로드아일랜드 대학 12기 + 극지연 4기)를 설치 완료하였으며, 인근해역 20개 정점에서 수직 수온·염분 및 유속을 관측하여 분석함 | 100 |
| | | 관측자료 분석을 통한 해류의 공간변동성과 열의 극 수송량 산출 | | <ul style="list-style-type: none"> - 남동인디아해령(SEIR) 인근해역에서 관측한 자료 분석을 통해 남극전선역 해류의 공간변동성과 열수지의 공간분포를 파악함 | |
| | | 인공지능 기법을 활용한 서남극해 용존무기탄소 분포 및 단기 변동성 분석 | | <ul style="list-style-type: none"> - 인공지능을 활용한 과거 21년간의 월별 로스해 fCO₂ 분포 재현결과 데이터를 Geo Data journal 에 제출 | |
| | | 인간활동 기원 탄소 분포의 정량화 | | <ul style="list-style-type: none"> - 서남극해 무기탄소 및 탄소안정동위원소 분석 결과와 GLODAP 자료를 활용해 로스해의 인간기원이산화탄소의 흡수력을 1 μmol kg⁻¹yr⁻¹로 추정함 | |
| | | 서남극해 온난화에 따른 열 유입 및 남극해 수괴의 미래변화에 대한 물리과정 파악 | | <ul style="list-style-type: none"> - 지구온난화에 따른 서남극해 심층수 수온의 해역별 변화 특성 분석. 해류에 의한 열 수송량과 해양-대기 열교환량의 미래변화 파악 | |
| | | 현장 관측 자료와 지구시스템 모델 분석으로 용존 이산화탄소 변동 추세 파악 | | <ul style="list-style-type: none"> - CESM-LE 자료 분석을 통해 산업혁명 이후 2100년까지의 서남극해 무기탄소와 인간기원 이산화탄소의 변동 추세 제시 | |
| 2. 빙권수축(온난화)에 따른(연안)생지화학물질순환변동과정 규명 | 과거 2007년부터 2018년까지 10년 이상 관측자료를 활용한 서남극 연안 남극순환심층수의 경년변동성 및 그 원인 파악 | 0.3 | <ul style="list-style-type: none"> - 2007년부터 2018년까지 서남극 아문젠해 닷슨-갯즈골에서 7번 관측된 과거 관측자료를 활용 환남극심층수의 경년변동성과 그 원인을 규명함 | 100 | |
| | 남극순환심층수의 경년변화가 용빙수량 변동성 및 남극연안해류 미치는 영향 파악 | | <ul style="list-style-type: none"> - 2011년부터 2018년까지 서남극 아문젠해 닷슨빙봉전면에서 관측된 자료들을 활용 남극연안해류의 변동성과 용빙수 및 바람이 미치는 영향 파악 | | |
| | 기존 획득자료 분석을 통한 서남극 연안 미량금속(철) 농도의 공간적 변동성 파악 | | <ul style="list-style-type: none"> - 2017/18 서남극 아문젠 해역에서 관측한 미량금속 자료를 활용하여 용존 및 입자상 철 농도의 공간 분포 특성 파악 | | |
| | 용빙수와 미량금속(철) 자료를 연계한 서남극 연안 미량금속의 기원 추적 | | <ul style="list-style-type: none"> - 2017/18 서남극 아문젠 해역에서 관측한 용존 및 입자상 철 농도분포와 산소동위원소비를 활용하여 산정된 빙봉용빙수의 공간분포 특성 분석 | | |
| 마리안소만 탄소시스템 (pCO ₂ , DIC)관측 자료 분석 | | <ul style="list-style-type: none"> - 세종기지 무기탄소 분석 시스템 설치 완료 및 마리안소만의 무기탄소 변동 관측 완료 | | | |

| | | | | |
|--------------------------------|--|-----|---|----|
| | 아래온 현장관측을 통한 남극해 대기 에어로졸 중에 존재하는 유기탄소 화합물 분포 및 농도 특성 파악과 대기 에어로졸 수용성 유기탄소 화합물 형광분석을 통한 기원 파악 | | - 2021/22 남극항해 기간에 관측한 대기 에어로졸 수용성 유기탄소화합물의 농도 측정 및 기원 파악 | |
| 3. 생물생산력 변동과 해양생태계 반응 추적 | 기존 획득자료 분석을 통하여 서남극 연안 미량금속 농도와 식물플랑크톤 군집구조의 공간 변동성 파악 | 0.4 | - 서남극 아문젠해 연안해역에서 미량 금속 농도와 식물플랑크톤 군집구조의 공간 변동성 비교 | 97 |
| | 마리안소만 정점관측(해수특성: 10 이상, 해류: 2개 이상 측선 관측) | | - 2022년 하계 현장관측시 소형선박을 활용한 마리안소만 해수특성 관측 수행 - 장기계류시스템의 해류계를 활용한 해류관측을 계획하였으나, 장비파손으로 인해 해류관측 달성완료 못함 | |
| | 빙붕후퇴에 따른 해양환경(1950과 2020년) 모의 실험 | | - 기 구축된 고해상도 광역수치모델을 활용하여, 빙붕 후퇴에 따른 해안선 변화가 해수순환에 미치는 영향 파악(1950년과 2020년 해수순환 비교) | |
| | 연안 식물플랑크톤 군집의 장기변동(1996-2021) 패턴과 환경과의 연관성 파악 | | - 해양생태계 반응 추적을 위한 식물플랑크톤 장기분포 패턴과 환경과의 상관성 분석 | |
| | 일차생산자 조절 기작 규명 | | - 과거에 획득했던 자료를 기반으로 식물플랑크톤 일차생산력과 환경요인들간의 상관성 분석 | |
| | 생지화학모델을 활용한 연구해역 환경요인이 탄소순환 변동성에 미치는 영향 분석 | | - 로스해 1-D 해양생태계 모델 최적화 | |
| | 해양환경 내 유기/무기 화합물의 시공간 분포 확인 | | - 남극전선 심층수 수렴대 해역 유기탄소 화합물 공간분포 특성 분석 | |
| | 광학/레이더 원격탐사 자료 융합 분석을 통한 빙하후퇴 경향 분석 | | - 광학/레이더 원격탐사 융합분석을 통해 불규칙한 연안빙하 경계에 대한 후퇴 경향 분석 | |
| | 조수빙하후퇴와 용빙수 유입으로 인한 지표생물군 분포/먹이망 변동과 관련 환경요인 분석 | | - 빙하후퇴에 따른 benthic megafauna 군집 분포 확인 및 멍게 주요 먹이원 변화 분석 | |
| | 식물플랑크톤 탄소 및 질소 흡수율을 통한 환경모니터링 구축 | | - 마리안소만 내 5개 정점에서 식물플랑크톤 탄소 및 질소섭취율 측정 - 크기별 식물플랑크톤 기여도 확인 | |
| | 동위원소 모델링 구현을 통한 유기물 기여도 파악 | | - 동위원소 모델을 통한 유기물 흐름 이해 - 유기물 기여도 모식도 완성 | |
| | 안정동위원소의 장기 변동과 환경변화 이해 | | - 마리안소만 지표생물 3종(멍게)의 시공간 C, N 안정동위원소 변동 및 빙하후퇴지역 환경요인(수층 부유물 및 Chl-a 농도, 저서미세조류, 퇴적물 내 유기물 함량) 분석 | |
| | 서남극해 해역별 식물플랑크톤 군집구조 비교 | | - 서남극 연안(아문젠해, 로스해)과 외양(남동인디아해령 해역)의 식물플랑크톤 군집구조 비교 | |
| 동물플랑크톤 분포와 생물량 변동성, 군집구조 변화 분석 | - 로스해-아문젠 대륙붕해역에서 동물플랑크톤 군집구조 분석 | | | |
| 계 | 1.0 | | 99 | |

제 3 절 연차별 성과 및 의의

| | |
|--|--|
| <p>단계 종합</p> | <ul style="list-style-type: none"> ○ 실질적인 국제공동관측과 협력 연구를 주도적으로 이끌어내어 무인해류 관측분야의 최우수 전문 기관인 미국 로드아일랜드대학과의 국제공동연구를 시작하였으며, 본 과제를 기반으로 미국 연구팀도 추가로 NSF fund (약 200만불)를 추가 확보하게 되었고, 지난 2021년 11월 국내위탁연구를 수행중인 인하대 연구팀과 세 팀이 함께 극전선 해역에 매우 성공적으로 장기 무인해류 관측시스템 및 관측거점 구축을 완성할 수 있었음 ○ 과제 3차년도에 이르러선 그간의 꾸준한 노력과 투자의 결실로 최상위 논문중 하나인 NSC 자매지 Nature Communication에 극지연구소 연구원이 제1저자 논문을 발표함 |
| <p>1차년 (2020년) 성과 및 의의</p> | <ul style="list-style-type: none"> ○ 본 과제의 1차년도 연구는 다음과 같은 3가지 세부과제로 수행되었음 ○ 세부과제 1. 남극해 탄소펌프와 기후조절력 변동 연구 ○ 세부과제 2. 화학 추적자를 활용한 서남극 용빙수 거동과 해양순환 변동 연구 ○ 세부과제 3. 급속한 빙하감소에 따른 세종과학기지 기반 연안해양(수층-저층) 생태계 적응과 영향 평가 ○ 세부과제 2의 경우, 2020/2021년 서남극 닛슨빙봉, 갯츠빙봉 전면에 설치하였던 장기해양관측시스템을 성공회수하여 2년간의 연속 관측 자료를 확보하였음 ○ 하지만, 2020년 초 발생한 전 세계 COVID-19 사태로 인한 해외로의 이동 차단으로 세부과제 1의 경우 1차년도말 계획한 첫 현장관측 계획이 대폭 수정될 수 밖에 없는 상황에 처함 ○ 그럼에도 불구하고, 남극 세종기지와 장보고기지 두 기지의 월동대원을 포함해 17명의 하계 연구원이 매우 어려운 상황속에서도 147일간의 교대 없는 남극 특별 항해를 수행하여, 2020년 12월 로스해 동남부 리틀아메리칸 분지에 장기해양관측시스템 계류라인 4기를 계획대로 설치할 수 있게 되었음 ○ 2023년 1월 현장 제방문시 이들 계류시스템으로부터 자료를 확보 할 계획이며, 확보된 자료는 남극연안 열 수송을 좌우하는 남극경사전선 및 해류의 변동성을 확인하고 그 원인을 규명을 가능하게 할 것으로 예상됨 ○ 동 시기에 아라온이 세종기지도 방문하여 약 2주간의 현장관측을 통해 세부과제 3의 계획을 충족할 수 있었음 ○ 이러한 어려운 여건과 신규과제 시작에도 불구하고 활발한 국제 파트너 협력 등을 통해 관련분야 최우수 논문 다수를 포함한 총 12편의 SCI(E) 저널이 출간됨 ○ 국제협력의 원활한 수행을 위해 중국 제3해양연구소와 일본 홋카이도대학 저온연구소와 각각 LOU를 체결함으로써 향후 지속적인 연구협력 기반을 마련함 ○ 또한, 명분만 내세우지 않는 실질적인 국제협력/국제공동연구를 과제 준비시부터 추진하여 미국 로드아일랜드대학 전문가 그룹의 최신 연구방법을 도입함과 더불어 미국 연구팀의 연구비 신청에도 본 과제와의 협력을 근거로 활용해 NSF 200만불 규모의 국제협력 예산을 추가로 확보하는 쾌거를 이루어 낼 수 있었음 |

| | |
|--|--|
| <p>2차년 (2021년) 성과 및 의의</p> | <ul style="list-style-type: none"> ○ 과제 1단계 수행중 2차년도(2021년도)부터 세 개의 남극해 해양연구 과제가 하나로 통합됨에 따라 기존 3개의 세부과제의 성과목표들의 단순 모음이 아닌 서남극해에서 벌어지고 있는 기후·해양학적 현상들(온난화와 탄소흡수력 변동)의 현황과악과 그에 따른 생태계로의 영향과 반응을 새로 통합된 과제내에 모두 아울러 실질적인 남극 해양 연구의 목표 및 주제를 도출하였음 ○ 미국 로드아일랜드대학과의 사전 교류를 통해 남극 남동인디아해령(Southeastern Indian Ridge; SEIR) 부근 남극 극전선 통과해역에 광역 국제공동 관측망 구축을 위한 계획을 수립하였고, 2021년 11월 연구해역에 극지연구소와 인하대학교, 그리고 로드아일랜드대학교 연구팀이 함께 방문하여 남극의 험한 기상과 해상조건을 모두 극복하고 PDS-CPIES 16기(로드아일랜드 대학 12 + 극지연 4)와 장기 해양계류라인 1기로 구성된 광역 국제공동 관측망을 성공적으로 구축하였음 ○ 이들 관측지점으로부터 향후 3년 이상 고해상도 연속 관측 자료를 획득할 예정임. 이들 자료는 기후변화에 따른 남극해 온난화와 이에 따른 환경변화를 파악하는데 필수적인 남극환류를 가로질러 남극해로 유입되는 열 수송량을 정량적 평가 및 이들의 변동성 파악하는데 매우 폭넓게 활용될 예정임 ○ 2년차에도 관련분야 최우수 논문 다수를 포함한 총 17편의 SCI(E) 저널을 출간함. 이중 많은 논문들은 신진과학자들이 주저자로 참여한 논문으로서, 향후 국내 극지해양연구 분야의 미래를 위한 초석을 착실히 쌓아올리고 있음 |
| <p>3차년 (2022년) 성과 및 의의</p> | <ul style="list-style-type: none"> ○ 3차년도에는 극지연구소 해양연구분야 연구팀이 지난 십여년 간 멀리 남극에 일년에 두달씩 현장관측을 떠나야 하는 등의 어려움에도 불구하고 꾸준히 수행해온 연구들이 밑바탕이 되어 비로소 극지연구소가 앞서 나갈 수 있는 세계 초일류 연구결과를 얻을 수 있게됨 ○ 과거 서남극해 연안에서 획득한 다년간의 여름철 자료와 연속 관측 자료를 활용하여 복수의 우수성과를 창출하였음. 특히, 아문젠해 닷슨 빙봉 전면에서 획득한 2년간의 연속자료를 활용해 해수 순환의 계절적 변동성과 그 원인을 규명하여 2022년 3월 Nature Communications에 주저자로 논문을 출간하였음. 더불어, 닷슨-갯즈골에서 과거 7번 (2007-2018) 해양조사를 통해 획득한 수괴 자료를 분석하여, 환남극심층수의 경년변동성과 그 원인을 규명하였으며, 그 연구 결과는 2021년 12월 Journal of Geophysical Research에 주저자로 출간되었음 ○ 이 외에도 3년차에는 9월말 현재 짧은 연구기간에도 불구하고 총 9편의 SCI(E) 저널이 출간 완료 되었는데, 이 9편 모두 상위 20%(7편이 10% 이내)로서 이젠 극지해양연구 분야에서 양적 성장만이 아닌 질적 성장을 동시에 이루어 냈음을 증명함 ○ 3차년도말 남극 현장관측 일정이 잡혀, 최대한의 연구향차를 활용해 낼 수 있는 철저한 현장 관측계획을 수립중이며, 과제 2단계로의 진행을 위해 세부 연구목표와 분야별 핵심 목표를 다듬고 모델을 활용한 연구분야로 연구영역을 확장하는 계획 등을 수립함 |

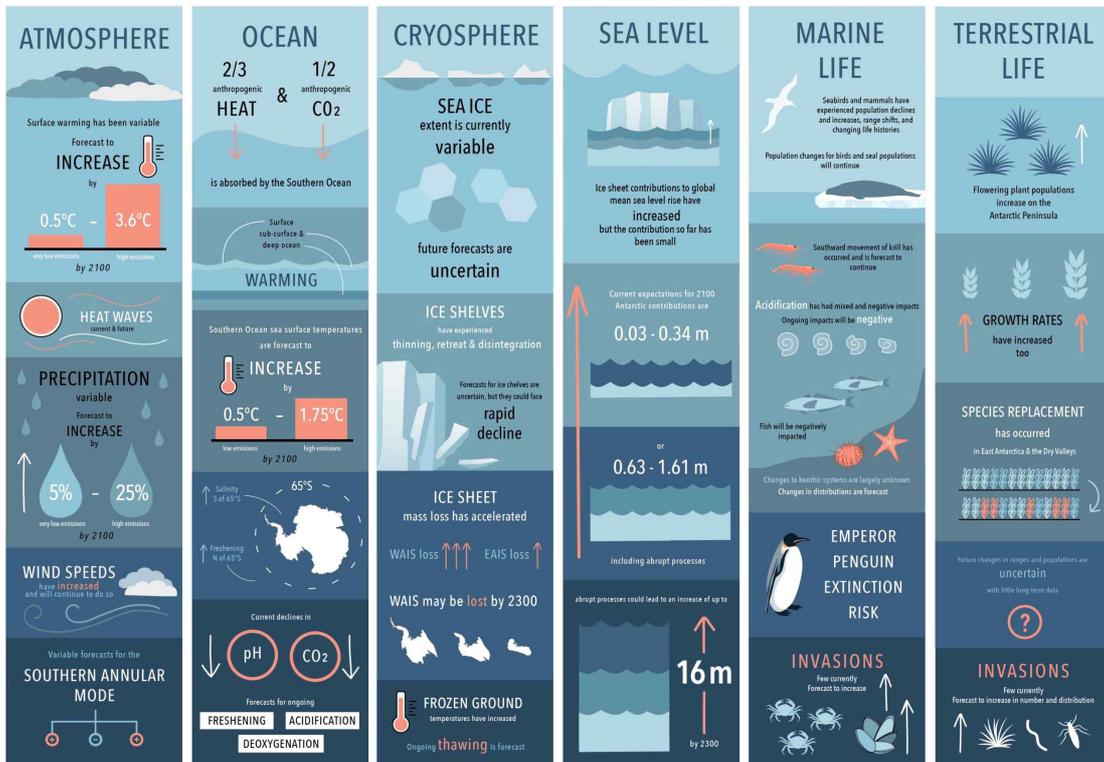
제 5 장 연구개발결과의 활용계획

- 극지해양 과학기술, 기후변화 관련 국가 중장기계획의 수립 및 이행을 위한 국가정책의 근거자료 확보. 정부의 정책 문서(position statement, policy paper)로 활용
- 신기후체계(2020~) 시대의 기후변화 대응에 대한 국제적 논의에 학술적 근거 제공
- 중장기적으로는 미래 기후변화로 인한 먹이생물 변동 예측 등의 연구에 활용, 식량자원 확보 및 대응체계 확립에 이바지할 수 있음
- 수치모델의 정확성 개선에 활용: 미답지 축적 자료로부터 미래의 기후 및 해양환경 예측 모델의 입력, 검증 자료로 활용하여 모델 정확성 개선 및 정교화에 기여
- 남극해 해양생태환경의 변동성 예측에 기여: 용빙수 배출에 따른 해양생태계의 변동성을 파악함으로써 남극 연안해역 해양 먹이망 구조의 미래 예측에 활용
- 상주국 최다지역인 남극반도 연구 주도권 확보



제 6 장 연구개발과정에서 수집한 해외과학기술정보

- 2022년 5월, 남극의 공동 관심사에 대해 협의하기 위한 연례 회의인 남극 조약 자문 회의(ATCM)가 베를린에서 개최되었으며, 남극의 기후 변화에 관한 남극 연구 과학 위원회(SCAR) 보고서가 발표되었음. 보고서에 따르면, 남극 빙상의 급격한 용해는 남극해 연안 및 대륙의 기후를 변화시켜, 해양 생태계에 영향을 미치고 남극해를 최대 1.75°C 가열하여 산성화를 촉발, 산소를 고갈시킬 것이라 지적하였음. 또한, 남극에서의 변화가 남극에 국한되지 않고 전 세계에 영향을 미친다고 밝혔음. 전 지구 평균 해수면 상승에 빙상의 기여는 이번 세기말까지 약 2m 상승에 달하며, 약 10억 명의 인구가 해안 홍수로 인한 위험에 빠질 것이며, 일부 대륙에서는 그 위험이 매우 극단적일 것임. 지역적으로는, 기후변화에 의한 생태계의 변화는 이미 다양하게 표출되고 있음. 크릴새우를 먹이로 하는 고래, 물개, 펭귄 등의 개체수는 급격히 감소하고 있으며, 특히 황제펭귄은 긴급한 조치가 취해지지 않는 한 금세기 말에 거의 사라질 수 있음



남극 연구 과학 위원회 보고서의 주요 결과를 표시하는 인포그래픽.

- Southern Ocean Observing System (SOOS)에서는 남극해의 지속적인 이산화탄소의 흡수에 따른 산성화를 모니터링하고 연구하기 위하여, Global Ocean Acidification Observing Network (GOA-ON)과 공동으로 현재 남극해를 제외한 전지구의 해양에서의 산성화 감시 및 연구를 남극해까지 확장하기로함. 기존의 GOA-ON에서는 전지구를 9개 해역으로 나누어 (북극, 남미해역, 지중해, 북미해역, 북동대서양, 아프리카해역, 태평양도서지역, 남아시아해

역, 서태평양) 각각 regional hub를 두고있음. 이에 2023년에는 남극해를 10번째 regional hub로 추가할 예정이며, SOOS에서는 working group으로 위치할 예정임

3. 유럽 EU 지원을 받는 SO-CHIC (Southern Ocean Carbon and Heat Impact on Climate) 프로젝트는 남빙양 열과 탄소 연구를 위해 2019년부터 시작된 모델링 및 관측 프로그램임. 기후변화 연구에 있어서 남빙양 해양이 갖는 중요성 때문에 남빙양의 해양 변화를 진단하고 예측하기 위해 10개 국가 총 16개 이상 기관이 참여하는 국제 공동연구 프로젝트임
4. 일본 해양연구개발기구(Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology; JAMSTEC)에서 1.2 m의 해빙을 약 3노트의 속도로 쇄빙할 수 있는 쇄빙연구선을 현재 건조중이며 2026년에 건조가 완료될 것으로 발표함. 현재 계획단계에서는 일본 쇄빙연구선은 북극해 연구를 우선적으로 수행할 것으로 보이나, 향후 남극 해양 연구에도 적극적으로 투입할 가능성이 있음
5. 서남극 로스해에서는 2000년대 중반까지 활발한 해양학적 연구가 이루어져 왔고, 2016년 로스해 해양보호구역 지정 이후 이탈리아(P-POSE), 뉴질랜드(Ross_RAMP), 미국(PIPERS) 등 로스해 과학기지 운용국가 중심으로 다시금 다양한 연구가 수행되고 있음
6. 2020년 2월 Ocean Science Meeting에서의 논의에 따라 생물학적 탄소펌프를 정량화 하기 위한 13개의 국제 프로젝트를 모은 ZETZON이 출범하였고 남대양 연구로서는 SOLACE 과제가 포함되어 최첨단 관측장비들을 활용한 연구를 수행하고 있으며 특히 UVP6가 장착된 BGC-Argo를 활용하여 박테리아부터 동물플랑크톤에 이르는 유기체를 측정함으로써 관측방법의 발전이 어떻게 기존의 플랫폼을 보완하고 우리의 이해에 발전을 가져올 수 있는지에 대한 기대가 높아지는 상황임
7. 2022년 한-아르헨티나간 공동연구 탐색을 위한 온라인 워크숍을 통해 킹조지섬 기반 아르헨티나 해조류 연구진의 연구현황 및 관심주제 공유. 빙하후퇴로 새롭게 형성된 공간에서의 해조군집 천이, 극지역 조간대 및 조하대 해조류 시공간 변동 등의 연구가 수행되었으며, 향후 남극 블루카본(Antarctic blue carbon)으로써의 해조류, 남극환경변화에 따른 해조류의 적응에 대해 새로운 연구를 준비중임
8. IMCONet은 서남극 연안에서 기후변화에 따른 결과를 이해하기위한 다학제 국제연구네트워크로 유럽연합의 7th European framework program의 Marie Curie Action IRSES (International Research Staff Exchange Scheme)의 자금지원을 받고 13개국 팀이 참여하고 있으며, IMCOAST 국제 연구프로그램을 통해 지난 십 수년 동안 King George Island(South Shetland Archipelago)의 Potter Cove 지역에서 육상 빙하 및 퇴적유출수 변

화가 저서 및 연안생태계 미치는 영향에 대한 연구가 수행되어왔음

9. Palmer LTER는 NSF가 후원하는 장기 생태 연구 사이트 중 하나로 NSF 극지 프로그램에서 자금을 지원받고 있으며, 서남극 반도의 해양 생태계와 다양한 영양 수준의 생물을 이해하기 위한 장기 프로그램 LTER 시계열 자료를 운영중임. 영국 또한 남극반도 Rothera 기지에서 Rothera Time Series(RaTS)을 자료를 운영중임



제 7 장 참고문헌

- Alley, R., Berntsen, T., Bindoff, N. L., Chen, Z., Chidthaisong, A., Friedlingstein, P., Gregory, J., Hegerl, G., Heimann, M., Hewitson, B. J. S.f. p., 2007. Intergovernmental panel on climate change. In: Climate Change 2007. The physical science basis, Geneva.
- Annett, A. L., Skiba, M., Henley, S. F., Venables, H. J., Meredith, M. P., Statham, P. J., et al. 2015. Comparative roles of upwelling and glacial iron sources in Ryder Bay, coastal western Antarctic Peninsula. *Marine Chemistry*, 176:21–33. doi: 10.1016/j.marchem.2015.06.017.
- Arrigo K. R., van Dijken G., Long M. 2008. Coastal Southern Ocean: A strong anthropogenic CO₂ sink. *Geophysical Research Letters*. 35(21) doi.org/10.1029/2008GL035624.
- Arrigo, K. R. 2003. A coupled ocean–ecosystem model of the Ross Sea: 2. Iron regulation of phytoplankton taxonomic variability and primary production. *Journal of Geophysical Research*, 108:3231. doi.org/10.1029/2001jc000856.
- Arrigo, K. R., and van Dijken, G. L. 2003. Phytoplankton dynamics within 37 Antarctic coastal polynya systems. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 108, 3271. doi.org/10.1029/2002jc001739.
- Arrigo, K. R., Lowry, K. E., and van Dijken, G. L. 2012. Annual changes in sea ice and phytoplankton in polynyas of the Amundsen Sea, Antarctica. *Deep-Sea Research Part II*, 71–76:5–15. doi.org/10.1016/j.dsr2.2012.03.006.
- Arrigo, K. R., van Dijken, G. L., Alderkamp, A-C., Erickson, Z. K., Lewis, K. M., Lowry, K. E., et al. 2017. Early Spring Phytoplankton Dynamics in the Western Antarctic Peninsula. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 122:9350–9369. doi:10.1002/2017JC013281.
- Arrigo, K. R., Worthen, D. L., Robinson, D. H. 2003. A coupled ocean–ecosystem model of the Ross Sea: 2. Iron regulation of phytoplankton taxonomic variability and primary production. *Journal of Geophysical Research*. 108 (C7), 3231, doi:10.1029/2001JC000856.
- Atkinson, A., Siegel, V., Pakhomov, E., and Rothery, P. 2004. Long-term decline in krill stock and increase in salps within the Southern Ocean. *Nature*, 432:100–103. doi:10.1038/nature02996.
- Bae, H., Ahn, I.-Y., Park, J., et al., 2021. Shift in polar benthic community structure in a fast retreating glacial area of Marian Cove, West Antarctica. *Scientific Reports*, 11:241, doi:10.1038/s41598-020-80636-z.
- Bakker D. C. et al. 2016. A multi-decade record of high-quality fCO₂ data in version 3 of the Surface Ocean CO₂ Atlas (SOCAT). *Earth System Science Data* 8(2): 383–413.
- Bartsch, I., Paar, M., Fredriksen, S., et al. 2016. Changes in kelp forest biomass and depth distribution in Kongsfjorden, Svalbard, between 1996 - 1998 and 2012 - 2014 reflect Arctic warming. *Polar Biology*, 39:2021–2036, doi:10.1007/s00300-015-1870-1.

- Bates, N. R., Hansell, D. A., Carlson, C. A., and Gordon, L. I. 1998. Distribution of CO₂ species, estimates of net community production, and air-sea CO₂ exchange in the Ross Sea polynya. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 103:2883-2896. doi.org/10.1029/97jc02473.
- Boyd, P. W., and Ellwood, M. J. 2010. The biogeochemical cycle of iron in the ocean, *Nature Geoscience*, 3(10), 675-682.
- Breiman, L. 2001. Random forests. *Mach Learn* 45(1): 5-32. doi.org/10.1023/1010933404324.
- Butenschön, M., et al. 2016. ERSEM 15.06: a generic model for marine biogeochemistry and the ecosystem dynamics of the lower trophic levels, *Geoscientific Model Development*, 9(4), 1293-1339.
- Catalano, G., Budillon, G., La Ferla, R., Povero, P., Ravaioli, M., Saggiomo, V., et al. 2010. "The Ross Sea," in *Carbon and Nutrient Fluxes in Continental Margins: A Global Synthesis. Part II (Global Change: The IGBP Series)*, eds K.-K. Liu, L. Atkinson, R. Quinones, and L. Talaue-McManus, (Berlin: Springer Verlag), 303 - 318.
- Chen, S. et al. 2019. A machine learning approach to estimate surface ocean pCO₂ from satellite measurements. *Remote Sensing of Environment*, 228: 203-226. doi.org/10.1016/j.rse.2019.04.019.
- Choi, Y. and Nam, S. 2022. East-west contrasting changes in Southern Indian Ocean Antarctic Bottom Water salinity over three decades. *Scientific Report*, 12:12175.
- Clarke, A., and Leakey, R. J. G. 1996. The seasonal cycle of phytoplankton, macronutrients, and the microbial community in a nearshore Antarctic marine ecosystem. *Limnology and Oceanography*, 41:1281-1294.
- Clarke, A., Murphy, E. J., Meredith, M. P., King, J. C., Peck, L. S., Barnes, D. K. A., Smith, R. C. 2007. Climate change and the marine ecosystem of the western Antarctic Peninsula. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 362:149-166.
- Coale, K. H., Wang, X., Tanner, S. J., Johnson, K. S. 2003. Phytoplankton growth and biological response to iron and zinc addition in the Ross Sea and Antarctic Circumpolar Current along 170°W. *Deep-Sea Research. Part II*. 50(3), 635 - 653.
- Comiso and Nishio. 2008. Trends in the sea ice cover using enhanced and compatible AMSR-E, SSM/I, and SMMR data. *J Geophys Res* 113: C02S07. doi.org/10.1029/2007JC004257.
- Convey, P., Peck, L. S. 2019. Antarctic environmental change and biological responses. *Science Advances*, 5(11), doi:10.1126/sciadv.aaz0888.
- Cook, A. J., Fox, A. J., Vaughan, D. G., and Ferrigno, J. G. 2005. Retreating Glacier Fronts on the Antarctic Peninsula over the Past Half-Century. *Science*, 308:541-544. doi:10.1126/science.1104235.
- Cook, A. J., Holland, P. R., Meredith, M. P., Murray, T., Luckman, A., and Vaughan, D. G. 2016. Ocean forcing of glacier retreat in the western Antarctic Peninsula. *Science*, 353:283-286. doi:10.1126/science.aae0017.
- Crumpto, W. G. 1987. A simple and reliable method for making permanent mounts of

- phytoplankton for light and fluorescence microscopy. *Limnology and Oceanography*, 32:1154–1159.
- DeJong H. B, and Dunbar R. B. 2017. Air sea CO₂ exchange in the Ross Sea, Antarctica. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 122(10):8167–8181. doi.org/10.1002/2017JC012853.
- Depoorter, M. A., Bamber, J. L., Griggs, J. A., Lenaerts, J. T., Ligtenberg, S. R., van den Broeke, M. R. 2013. Calving fluxes and basal melt rates of Antarctic ice shelves. *Nature*, 502(7469), 89–92.
- Deregibus, D., Quartino, M. L., Campana, G. L., et al. 2016. Photosynthetic light requirements and vertical distribution of macroalgae in newly ice-free areas in Potter Cove, South Shetland Islands, Antarctica. *Polar Biology*, 39:153–166, doi:10.1007/s00300-015-1679-y.
- Deregibus, D., Quartino, M. L., Zacher, K., et al. 2017. Understanding the link between sea ice, ice scour and Antarctic benthic biodiversity - the need for cross-station and international collaboration. *Polar Record*, 53:143–152, doi:10.1017/S0032247416000875.
- Dierssen, H. M., Smith, R. C., Vernet, M., 2002. Glacial meltwater dynamics in coastal waters west of the Antarctic peninsula. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 99:1790–1795.
- Ducklow, H. W., Baker, K., Martinson, D. G., Quetin, L. B., Ross, R. M., Smith, R. C., Stammerjohn, S. E., Vernet, M., Fraser, W. 2006. Marine pelagic ecosystems: the west Antarctic Peninsula. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 362:67–94.
- Dugdale, R. C., and Goering, J. J. 1967. Uptake of new and regenerated forms of nitrogen in primary productivity. *Limnology and Oceanography*, 12:196–206. doi:10.4319/lo.1967.12.2.0196.
- Dutrieux, P., Rydt, J. D., Jenkins, A., Holland, P. R., Ha, H. K., Lee, S. H., et al. 2014. Strong Sensitivity of Pine Island Ice-Shelf Melting to Climatic Variability. *Science*, 343:174–178. https://doi.org/10.1126/science.1244341.
- Fay A. R. et al. 2018. Utilizing the Drake Passage Time-series to understand variability and change in subpolar Southern Ocean pCO₂. *Biogeosciences* 15(12): 3841–3855 https://doi.org/10.5194/bg-15-3841-2018.
- Ferry et al. 2012. GLORYS2V1 global ocean reanalysis of the altimetric era (1993–2009) at meso scale. *Mercator Ocean Newsletter* 44:28–39.
- Filipponi, F. 2019. Sentinel-1 GRD Preprocessing Workflow. *Proceedings*, 18:11. doi:10.3390/ECRS-3-06201.
- Fitzwater, S. E., Johnson, K. S., Gordon, R. M., Coale, K. H., Smith, W. O. 2000. Trace metal concentrations in the Ross Sea and their relationship with nutrients and phytoplankton growth. *Deep-Sea Research II*. 47(15 - 16), 3159 - 3179.
- Fretwell, P. et al. 2013. Bedmap2: improved ice bed, surface and thickness datasets for Antarctica. *Cryosphere* 7, 375 - 393.
- Friedlingstein, P. et al. 2022. Global carbon budget 2021. *Earth Syst Sci Data* 14(4):

1917-2005.

- Gregor, L, Kok, S., Monteiro, P. 2017. Empirical methods for the estimation of Southern Ocean CO₂: support vector and random forest regression. *Biogeosciences* 14(23): 5551-5569. doi.org/10.5194/bg-14-5551-2017.
- Gutt, J., 2001. On the direct impact of ice on marine benthic communities, a review. *Polar Biology*, 24:553-564, doi:10.1007/s003000100262.
- Gutt, J., Isla, E., Xavier J. C., Adams, B. J., Ahn, I-Y., Cheng, C.-H. C., et al. 2021. Antarctic ecosystems in transition - life between stresses and opportunities. *Biological Reviews*, 96:798-821. doi:10.1111/brv.12679.
- Hama, T., Miyazaki, T., Ogawa, Y., Iwakuma, T., and Takahashi, M. 1983. Measurement of Photosynthetic Production of a Marine Phytoplankton Population Using a Stable ¹³C Isotope. *Marine Biology*, 73:31-36. doi:10.1007/BF00396282.
- Hansen, J., Ruedy, R., Sato, M. 1999. GISS analysis of surface temperature change. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 104:30997-31022.
- Hatta, M., Measures, C. I., Lam, P. J., Ohnemus, D. C., Auro, M. E., Grand, M. M., Selph, K. E., 2017. The relative roles of modified circumpolar deep water and benthic sources in supplying iron to the recurrent phytoplankton blooms above Pennell and Mawson Banks, Ross Sea, Antarctica. *Journal of Marine System*. 166, 61 - 72.
- Hays, G. C., Richardson, A. J., Robinson, C. 2005. Climate change and marine plankton. *Trends in ecology & evolution*, 20: 337-344.
- Hersbach et al. 2017. Complete ERA5 from 1979: Fifth generation of ECMWF atmospheric reanalysis of the global climate. Copernicus Climate Change Service (C3S) Data Store (CDS).
- Hiscock, M. R., Marra, J., Smith, W. O., Goericke, R., Measures, C., Vink, S., Olson, R. J., Sosik, H. M., Barber, R. T. 2003. Primary productivity and its regulation in the pacific sector of the Southern Ocean. *Deep-Sea Research. Part II*. 50(3), 533 - 558.
- Huang et al. 2017. Extended reconstructed sea surface temperature version 5 (ERSSTv5): upgrades, validations, and intercomparisons. *Journal of Climate*, 30: 8179-8205. doi.org/10.1175/JCLI-D-16-0836.1.
- Jenkins, A., Dutrieux, P., Jacobs, S. S., McPhail, S. D., Perrett, J. R., Webb, A. T., White, D. 2010. Observations beneath Pine Island Glacier in West Antarctica and implications for its retreat. *Nature Geoscience*, 3: 68-472.
- Jenkins, A., Dutrieux, P., Jacobs, S. Steig, E. J., Gudmundsson, G. H., Smith, J. and Heywood, K. J. 2016. Decadal ocean forcing and Antarctic ice sheet response: Lessons from the Amundsen Sea. *Oceanography*, 29(4):106 - 117.
- Jeon, M. H., Jung, J., Park, M. O., Aoki, S., Kim, T. W., and Kim, S.-K. 2021. Tracing Circumpolar Deep Water and glacial meltwater using humic-like fluorescent dissolved organic matter in the Amundsen Sea, Antarctica. *Marine Chemistry*, 235:104008. doi.org/10.1016/j.marchem.2021.104008.
- Jeon, M., Iriarte, J. L., Yang, E. J., Kang, S-H., Lee, Y., Joo, H. M., Ahn, I-Y., Park, J., Min, G-S., Park, S-J. 2021. Phytoplankton succession during a massive coastal

- diatom bloom at Marian Cove, King George Island, Antarctica. *Polar Biology*, 44:1993–2010.
- Jerosch, K., Scharf, F. K., Deregibus, D., et al., 2019. Ensemble Modeling of Antarctic Macroalgal Habitats Exposed to Glacial Melt in a Polar Fjord. *Frontiers in Ecology and Evolution*, 7:207, doi:10.3389/fevo.2019.00207.
- Kang, J. S., Kang, S. H., Lee, J. H., Lee, S. H. 2002. Seasonal variation of microalgal assemblages at a fixed station in King George Island, Antarctica, 1996. *Marine Ecology Progress Series*, 229:19–32.
- Kang, S-H., Kang, J-S., Chung, K-H., Lee, B-Y., Chung, H., Kim, Y. and Kim, D-Y. 1997. Seasonal Variation of Nearshore Antarctic Microalgae and Environmental Factors in Marian Cove, King George Island, 1996. [Korea] *Journal of Polar Research*, 8, 9–27.
- Karsten, U., Wiencke, C., KIRST, G. O. 1991. The effect of salinity changes upon the physiology of eulittoral green macroalgae from Antarctica and southern Chile: II intracellular inorganic ions and organic compounds. *Journal of Experimental Botany*, 42:1533–1539.
- Khatiwala, S., Primeau, F., and Hall, T. 2009. Reconstruction of the history of anthropogenic CO₂ concentrations in the ocean. *Nature*, 462: 346–349. doi.org/10.1038/nature08526.
- Kim, B. K., Jeon, M., Park, S-J., Kim, H-C., Min, J-O., Park, J., Ha, S-Y. 2022. Variability in the Carbon and Nitrogen Uptake Rates of Phytoplankton Associated With Wind Speed and Direction in the Marian Cove, Antarctica. *Frontiers in Marine Science*, 9:887909.
- Kim, D. 2001. Seasonality of marine algae and grazers of an Antarctic rocky intertidal, with emphasis on the role of the limpet *Nacella concinna* Strebel (Gastropoda: Patellidae). *Berichte zur Polar-und Meeresforschung* (Reports on Polar and Marine Research), 397.
- Kim, D.-U., Khim, J. S., Ahn, I.-Y., 2021. Patterns, drivers and implications of ascidian distributions in a rapidly deglaciating fjord, King George Island, West Antarctic Peninsula. *Ecological Indicators*, 125:107467.
- Ko, Y. W., Choi, H.-G., Lee, D. S., et al. 2020. 30 years revisit survey for long-term changes in the Antarctic subtidal algal assemblage. *Scientific Reports*, 10:1–11
- Lagger, C., Neder, C., Merlo, P., et al. 2021. Tidewater glacier retreat in Antarctica: The table is set for fast-growing opportunistic species, is it? *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 260:107447, doi:10.1016/j.ecss.2021.107447.
- Lagger, C., Nime, M., Torre, L., et al. 2018. Climate change, glacier retreat and a new ice free Island offer new insights on Antarctic benthic responses. *Ecography*, 41:579–591, doi:10.1111/ecog.03018.
- Landshuster et al. 2014. Recent variability of the global ocean carbon sink. *Global Biogeochemical Cycles*, 28(9): 927–949. doi.org/10.1002/2014GB004853.
- Lee, J., Jin, Y. K., Hong, J. K., Yoo, H. J., and Shon, H. 2008. Simulation of a tidewater glacier evolution in Marian Cove, King George Island, Antarctica. *Geosciences Journal*, 12, 33–39.

- Lee, S. H., Joo, H. M., Joo, H. T., Kim, B. K., Jeon, M. S., Kang, S. H. 2015. Large contribution of small phytoplankton at Marian Cove, King George Island, Antarctica, based on long-term monitoring from 1996 to 2008. *Polar Biology*, 38, 207–220.
- Lee, Y., Yang, E. J., Park, J., Jung, J., Kim, T. W., Lee, S. 2016. Physical-biological coupling in the Amundsen Sea, Antarctica: Influence of physical factors on phytoplankton community structure and biomass. *Deep-Sea Research Part I*, 117:51–60. doi:10.1016/j.dsr.2016.10.001.
- Llanillo, P. J., Aiken, C. M., Cordero, R. R., Damiani, A., Sepúlveda, E., and Fernández-Gómez, B. 2019. Oceanographic Variability induced by Tides, the Intraseasonal Cycle and Warm Subsurface Water intrusions in Maxwell Bay, King George Island (West-Antarctica). *Scientific Report* 9:18571. doi:10.1038/s41598-019-54875-8.
- Lumpkin, R., Speer, K. and Koltermann, K. 2008. Transport across 48°N in the Atlantic Ocean. *Journal of Physical Oceanography*, 38:733 - 752. <https://doi.org/10.1175/2007JPO3636.1>.
- Ma, L., and Fan, S. 2017. CURE-SMOTE algorithm and hybrid algorithm for feature selection and parameter optimization based on random forests. *BMC Bioinform*, 18(1): 1–18. doi.org/10.1186/s12859-017-1578-z pubmed id:28292263 PMC5351181.
- Manen, M., van, Aoki, S., Brussaard, C. P. D., Conway, T. M., Eich, C., Gerringa, L., et al. 2022. The role of the Dotson Ice Shelf and circumpolar deep water as driver and source of dissolved and particulate iron and manganese in the Amundsen Sea polynya, Southern Ocean. *Marine Chemistry*, 246:104161. doi.org/10.1016/j.marchem.2022.104161.
- Mangoni, O., Saggiomo, M., Bolinesi, F., Castellano, M., Povero, P., Saggiomo, V., DiTullio, G. R., 2019. Phaeocystis Antarctica unusual summer bloom in stratified antarctic coastal waters (Terra Nova Bay, Ross Sea). *Marine Environmental Research*. 151, 104733.
- Marcías, M. L., Deregibus, D., Saravia, L. A., et al. 2017. Life between tides: spatial and temporal variations of an intertidal macroalgal community at Potter Peninsula, South Shetland Islands, Antarctica. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 187:193–203.
- Maritorena, Siegel 2005. Consistent merging of satellite ocean color data sets using a bio-optical model. *Remote Sensing Environment*. 94:429–440. doi.org/10.1016/j.rse.2004.08.014.
- Marshall, G. J., Orr, A., van Lipzig, N. P. M., and King, J. C. 2006. The Impact of a Changing Southern Hemisphere Annular Mode on Antarctic Peninsula Summer Temperatures. *Journal of Climate*, 19:5388–5404. doi:10.1175/JCLI3844.1.
- Marshall, J., and Speer, K. 2012. Closure of the meridional overturning circulation through Southern Ocean upwelling. *Nature Geoscience*, 5:171–180. doi.org/10.1038/ngeo1391.
- Martinson, D. G., Stammerjohn, S. E., Iannuzzi, R. A., Smith, R. C., and Vernet, M. 2008. Western Antarctic Peninsula physical oceanography and spatio-temporal variability. *Deep Sea Research Part I*, 55:18–19. doi:10.1016/j.dsr2.2008.04.038.

- Mascioni, M., Almandoz, G. D., Cefarelli, A. O., Cusick, A., Ferrario, M. E. 2019. Phytoplankton composition and bloom formation in unexplored nearshore waters of the western Antarctic Peninsula. *Polar Biology*, 42, 1859–1872.
- Mathot, S., Smith, W. O., Carlson, C. A., Garrison, D. L., Gowing, M. M., Vickers, C. L. 2000. Carbon partitioning within *Phaeocystis antarctica* (Prymnesiophyceae) colonies in the Ross Sea, Antarctica. *Journal of Phycology*, 36:1049–1056. doi:10.1046/j.1529-8817.2000.99078.x.
- Menden-Deuer, S., Lessard, E. J. 2000. Carbon to volume relationships for dinoflagellates, diatoms, and other protist plankton. *Limnology and Oceanography*, 45(3):569–579. doi:10.4319/lo.2000.45.3.0569.
- Meredith, M. P., and King, J. C. 2005. Rapid climate change in the ocean west of the Antarctic Peninsula during the second half of the 20th century. *Geophysical Research Letters*, 32:L19604. doi:10.1029/2005GL024042.
- Meredith, M. P., Stammerjohn, S. E., Venables, H. J., Ducklow, H. W., Martinson, D. G., Iannuzzi, R. A., Wessem, J. M. V., Reijmer, C. H., Barrand, N. E. 2017. Changing distributions of sea ice melt and meteoric water west of the Antarctic Peninsula. *Deep Sea Research Part II*, 139:40–57.
- Moline, M. A., Claustre, H., Frazer, T. K., Schofield, O., and Vernet, M. 2004. Alteration of the food web along the Antarctic Peninsula in response to a regional warming trend. *Global Change Biology*, 10:1973–1980. doi:10.1111/j.1365-2486.2004.00825.x.
- Montes-Hugo, M., Doney, S. C., Ducklow, H. W., Fraser, W., Martinson, D., Stammerjohn, S. E., et al. 2009. Recent changes in phytoplankton communities associated with rapid regional climate change along the western Antarctic Peninsula. *Science*, 323:1470–1473. doi:10.1126/science.1164533.
- Moorman, R., Morrison, A. K. and Hogg, A. McC. 2020. Thermal responses to Antarctic ice shelf melt in an eddy-rich global ocean-sea ice model. *Journal of Climate*, 33(15):6599–6620.
- Nakaoka et al. 2013. Estimating temporal and spatial variation of ocean surface pCO₂ in the North Pacific using a self-organizing map neural network technique. *Biogeosciences* 10(9): 6093–6106. doi.org/10.5194/bg-10-6093-2013.
- Nakayama, Y., Timmermann, R., Rodehacke, C. B., Schröder, M., & Hellmer, H. H. 2014. Modeling the spreading of glacial meltwater from the Amundsen and Bellingshausen Seas. *Geophysical Research Letters*, 41, 7942–7949.
- Navarro, N., Huovinen, P., Gómez, I. 2020. Life History Strategies, Photosynthesis, and Stress Tolerance in Propagules of Antarctic Seaweeds. In: Gómez, I., Huovinen, P.(Ed.), *Antarctic Seaweeds*, Springer, pp. 193–216.
- Nelson, D. M., DeMaster, D. J., Dunbar, R. B., Smith Jr., W.O. 1996. Cycling of organic carbon and biogenic silica in the Southern Ocean. Estimates of water-column and sedimentary fluxes on the Ross Sea continental shelf 101(C8), 18519 - 18532.
- Oliva, M., Navarro, F., Hrbáček, F., Hernández, A., Nývlt, D., Pereira, P., et al. 2017. Recent regional climate cooling on the Antarctic Peninsula and associated impacts

- on the cryosphere. *Science of The Total Environment*, 580:210–223. doi:10.1016/j.scitotenv.2016.12.030.
- Paolo, F. S., Fricker, H. A., & Padman, L. 2015. Volume loss from Antarctic ice shelves is accelerating. *Science*, 348(6232), 327–331.
- Park, B-K., Chang, S-K., Yoon, H. I., and Chung, H. 1998. Recent retreat of ice cliffs, King George Island, South Shetland Island, Antarctic Peninsula. *Annals of Glaciology*, 27, 207–220.
- Pasotti, F., Saravia, L. A., De Troch, M., et al. 2015. Benthic trophic interactions in an Antarctic shallow water ecosystem affected by recent glacier retreat. *PLoS One*, 10:e0141742.
- Petty, A. A., Feltham, D. L., & Holland, P. R. 2013. Impact of atmospheric forcing on Antarctic continental shelf water masses. *Journal of Physical Oceanography*, 43(5), 920–940.
- Prézelin, B. B., Hofmann, E. E., Mengelt C., and Klinck, J. M. 2000. The linkage between Upper Circumpolar Deep Water (UCDW) and phytoplankton assemblages on the west Antarctic Peninsula continental shelf. *Journal of Marine Research*, 58:165–202. doi:10.1357/002224000321511133.
- Quartino, M. L., Deregibus, D., Campana, G. L., et al. 2013. Evidence of Macroalgal Colonization on Newly Ice-Free Areas following Glacial Retreat in Potter Cove (South Shetland Islands), Antarctica. *PLoS One*, 8:e58223, doi:10.1371/journal.pone.0058223.
- Quartino, M. L., Saravia, L. A., Campana, G. L., et al. 2020. Production and biomass of seaweeds in newly ice-free areas: implications for coastal processes in a changing Antarctic environment. In: Gómez, I., Huovinen, P.(Ed.), *Antarctic seaweeds*, Springer, pp. 155–171.
- Rembauville, M., Salter, I., Leblond, N., Gueneugues, A., Blain, S. 2015. Export fluxes in a naturally iron-fertilized area of the Southern Ocean - Part 1: seasonal dynamics of particulate organic carbon export from a moored sediment trap. *Biogeosciences*. 12(11), 3153 - 3170.
- Reynolds et al. 2008. NOAA optimum interpolation 1/4 degree daily sea surface temperature (OISST) analysis, version 2. NOAA National Centers for Environmental Information.
- Rignot, E., Jacobs, S., Mouginot, J., Scheuchl, B. 2013. Ice-shelf melting around Antarctica. *Science*, 341: 266–270.
- Rignot, E., Mouginot, J., Scheuchl, B., Broeke, M., Wessem, M. J., Morlighem, M. 2019. Four decades of Antarctic Ice Sheet mass balance from 1979–2017. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 116:1095–1103.
- Rintoul, S., Hughes, C., Olbers, D., 2001. The Antarctic circumpolar current system. In: Siedler, G., Church, J., Gould, J. (Eds.), *Ocean Circulation and Climate*/. Academic Press, New York, pp. 271 - 302.
- Rivaró, P., Ianni, C., Massolo, S., Abelloschi, M. L., De Vitor, C., Frache, R., 2011. Distribution of dissolved labile and particulate iron and copper in Terra Nova Bay

- polynya (Ross Sea, Antarctica) surface waters in relation to nutrients and phytoplankton growth. *Continental Shelf Research*. 31(7 - 8), 879 - 889.
- Rückamp, M., Braun, M., Suckro, S., and Blindow, N. 2011. Observed glacial changes on the King George Island ice cap, Antarctica, in the last decade. *Global and Planetary Change*, 79:99-109. doi:10.1016/j.gloplacha.2011.06.009.
- Sahade, R., Lagger, C., Torre, L., et al. 2015. Climate change and glacier retreat drive shifts in an Antarctic benthic ecosystem. *Science Advances*, 1:e1500050.
- Sakshaug, E., Holm-Hansen. 1984. Factors governing pelagic production in polar ocean. In: Holm Hansen, O., L. Bolis and R. Gills (eds.): *Marine Phytoplankton and Productivity*-Springer-Verlag. Berlin, 125-126.
- Sarmiento, J. L., Gruber, N., Brzezinski, M. A., and Dunne, J. P. 2004. High-latitude controls of thermocline nutrients and low latitude biological productivity. *Nature*, 427:56-60. doi.org/10.1038/nature02127.
- Schmidtko, S., Heywood, K. J., Thompson, A. F. and Aoki, S. 2014. Multidecadal warming of Antarctic waters. *Science*, 346(6214):1227-1231.
- Schofield, O., Saba, G., Coleman, K., Carvalho, F., Couto, N., Ducklow, H., Finkel, F., Irwin, A., Kahl, A., Montes-Hugo, M., Stammerjohn, S., Waite, N. 2017. Decadal variability in coastal phytoplankton community composition in a changing West Antarctic Peninsula. *Deep Sea Research Part I*, 124, 42-54.
- Sedwick, P. N., DiTullio, G. R., Mackey, D. J. 2000. Iron and manganese in the Ross Sea, Antarctica: seasonal iron limitation in Antarctic shelf waters. *Journal of Geophysical Research-Oceans*. 105(C5), 11321 - 11336.
- Sekma, H., Park, Y. H., & Vivier, F. 2013. Time-mean flow as the prevailing contribution to the poleward heat flux across the southern flank of the Antarctic Circumpolar Current: A case study in the Fawn Trough, Kerguelen Plateau. *Journal of physical oceanography*, 43(3), 583-601.
- Sherrell, R. M., Lagerström, M. E., Forsch, K. O., Stammerjohn, S. E., and Yager, P. L. 2015. Dynamics of dissolved iron and other bioactive trace metals (Mn, Ni, Cu, Zn) in the Amundsen Sea Polynya, Antarctica. *Elementa: Science of the Anthropocene*, 3:000071. doi.org/10.12952/journal.elementa.000071.
- Smayda, T. J. 1978. From phytoplankton to biomass, In Sournia, A. (ed.), *Phytoplankton Manual*, Monographs on Oceanographic 6. UNESCO, Paris, pp. 273-279.
- Smith, W. O. J. 1987. Phytoplankton dynamics in marginal ice zones. *Oceanography and Marine Biology*, 25:11-38.
- Stammerjohn, S. E., Martinson, D. G., Smith, R. C., Yuan, X., and Rind, D. 2008. Trends in Antarctic annual sea ice retreat and advance and their relation to El Niño-Southern Oscillation and Southern Annular Mode variability. *Journal of Geophysical Research*, 113:C3. doi:10.1029/2007JC004269.
- Sutton, A. J., Williams, N. L., Tilbrook, B. 2021. Constraining Southern Ocean CO₂ flux uncertainty using uncrewed surface vehicle observations. *Geophysical Research Letters* 48(3):e2020GL091748 doi.org/10.1029/2020GL091748 pubmed id:34230713

PMC8250381.

- Takahashi, T., Sutherland, S. C., Wanninkhof, R., Sweeney, C., Feely, R. A., Chipman, D. W., Hales, B., Friederich, G., Chavez, F., Sabine, C. 2009. Climatological mean and decadal change in surface ocean pCO₂, and net sea-air CO₂ flux over the global oceans. *Deep-Sea Research Part II*, 56(8):554-577. doi:10.1016/j.dsr2.2008.12.009.
- Team, IMBIE. 2018. Mass balance of the Antarctic Ice Sheet from 1992 to 2017. *Nature*, 558, 212-222.
- Thompson, A. F., Stewart, A. L., Spence, P., & Heywood, K. J. 2018. The Antarctic Slope Current in a changing climate. *Reviews of Geophysics*, 56(4), 741-770.
- Thompson, D. W., Solomon, S., Kushner, P. J., England, M. H., Grise, K. M., & Karoly, D. J. 2011. Signatures of the Antarctic ozone hole in Southern Hemisphere surface climate change. *Nature geoscience*, 4(11), 741-749.
- Tremblay, J.-É., Smith, W. 2007. Primary production and nutrient dynamics in polynyas. *Elsevier Oceanography Series*, 74:239-269. doi:10.1016/S0422-9894(06)74008-9.
- Turner, J., Barrand, N. E., Bracegirdle, T. J., et al. 2013. Antarctic climate change and the environment: an update. *Polar Record*, 50:237-259.
- Turner, J., Colwell, S. R., Marshall, G. J., Lachlan-Cope, T. A., Carleton, A. M., Jones, P. D., et al. 2005. Antarctic climate change during the last 50 years. *International Journal of Climatology*, 25:279-294. doi:10.1002/joc.1130.
- Turner, J., Hosking, J. S., Phillips, T., and Marshall, G. J. 2013. Temporal and spatial evolution of the Antarctic sea ice prior to the September 2012 record maximum extent. *Geophysical Research Letters*, 40:5894-5898. doi:10.1002/2013GL058371.
- Turner, J., Lu, W., White, I., King, J. C., Phillips, T., Hosking, S. J., Bracegirdle, T. J., Marshall, G. J., Mulvaney, R., Deb, P. 2016. Absence of 21st century warming on Antarctic Peninsula consistent with natural variability. *Nature*, 535:441-415.
- Underwood, A. J., 2000. Experimental ecology of rocky intertidal habitats: what are we learning? *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 250:51-76, doi:10.1016/S0022-0981(00)00179-9.
- Valdivia, N., Díaz, M. J., Holtheuer, J., et al. 2014. Up, down, and all around: scale-dependent spatial variation in rocky-shore communities of Fildes Peninsula, King George Island, Antarctica. *PLoS One*, 9:e100714, doi:10.1371/journal.pone.0100714.
- Van Manen, M., Aoki, S., Brussaard, C. P., Conway, T. M., Eich, C., Gerringa, L. J., ..., Middag, R. 2022. The role of the Dotson Ice Shelf and Circumpolar Deep Water as driver and source of dissolved and particulate iron and manganese in the Amundsen Sea polynya, Southern Ocean. *Marine Chemistry*, 246:104161. doi:10.1016/j.marchem.2022.104161.
- Vaughan, D. G., Marshall, G. J., Connolley, W. M., Parkinson, C., Mulvaney, R., Hodgson, D. A., et al. 2003. Recent Rapid Regional Climate Warming on the Antarctic Peninsula. *Climatic Change*, 60:243-274. doi:10.1023/A:1026021217991.
- Wählin, A. K., Yuan, X., Björk, G., and Nohr, C. 2010. Inflow of warm circumpolar deep

- water in the central Amundsen shelf. *Journal of Physical Oceanography*, 40(6), 1427-1434.
- Weber, L., 2017. Macroalgal distribution shifts during the climate change induced glacier retreat in Potter Cove, West Antarctic Peninsula, 1993-2016. Faculty of Information Management and Media, Vol. Bachelor. Hochschule Karlsruhe, pp. 52.
- Wiencke, C., Clayton, M. N., Gómez, I., et al. 2007. Life strategy, ecophysiology and ecology of seaweeds in polar waters. *Reviews in Environmental Science and Bio/Technology*, 6:95-126.
- Wiencke, C., Rahmel, J., Karsten, U., et al. 1993. Photosynthesis of Marine Macroalgae from Antarctica: Light and Temperature Requirements. *Botanica Acta*, 106:78-87, doi:10.1111/j.1438-8677.1993.tb00341.x.
- Williams, N. L. et al. 2017. Calculating surface ocean pCO₂ from biogeochemical Argo floats equipped with pH: An uncertainty analysis. *Global Biogeochemical Cycles*, 31(3):591-604. doi.org/10.1002/2016GB005541.
- Wright, S. W., van den Enden, R. L., Pearce, I., Davidson, A. T., Scott, F. J., Westwood, K. J. 2010. Phytoplankton community structure and stocks in the Southern Ocean (30-80°E) determined by CHEMTAX analysis of HPLC pigment signatures. *Deep-Sea Research Part II*, 57(9-10):758-778. doi:10.1016/j.dsr2.2009.06.015.
- Yager, P., Sherrell, R., Stammerjohn, S., Alderkamp, A.-C., Schofield, O., Abrahamsen, P., et al. 2012. ASPIRE: The Amundsen Sea Polynya International Research Expedition. *Oceanography*, 25:40-53. doi.org/ 10.5670/oceanog.2012.73.
- Yoo, K.-C., Kyung Lee, M., Il Yoon, H., et al., 2015. Hydrography of Marian Cove, King George Island, West Antarctica: implications for ice-proximal sedimentation during summer. *Antarctic Science*, 27:185-196, doi:10.1017/S095410201400056X.
- Yoo, K.-C., Yoon, H.-I., Oh, J.-K., et al. 1999. Water column properties and dispersal pattern of suspended particulate matter (SPM) of Marian Cove during austral summer, King George Island, West Antarctica. *The Sea: Journal of the Korean Society of Oceanography*, 4:266-274.
- Yoon, H., Park, B.-K., Domack, E., et al., 1998. Distribution and dispersal pattern of suspended particulate matter in Maxwell Bay and its tributary, Marian Cove, in the South Shetland Islands, West Antarctica. *Marine Geology*, 152:261-275.
- Zacher, K., Wulff, A., Molis, M., et al. 2007. Ultraviolet radiation and consumer effects on a field grown intertidal macroalgal assemblage in Antarctica. *Global Change Biology*, 13:1201-1215, doi:10.1111/j.1365-2486.2007.01349.x.
- Zapata, M., Rodríguez, F., Garrido, J. L. 2000. Separation of chlorophylls and carotenoids from marine phytoplankton: A new HPLC method using a reversed phase C8 column and pyridine-containing mobile phases. *Marine Ecology Progress Series*, 195:29-45. doi:10.3354/meps195029.
- Zeng et al. 2014. A global surface ocean fCO₂ climatology based on a feed-forward neural network. *J Atmos Ocean Technol* 31(8): 1838-1849 <https://doi.org/10.1175/JTECH-D-13-00137.1>.

뒷 면

(국내 과제용)

주 의

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