

제 출 문

극지연구소장 귀하

본 보고서를 “온난화 관측 모델 시스템으로 서남극 아문젠해 해빙역 연구”
과제의 위탁연구 “서남극해 결빙해역의 순환 및 하위생태계 특성 분석” 과제의 연
차보고서로 제출합니다.

2014. 1. 15

총괄연구책임자 : 이상훈

위탁연구기관명 : 한국해양과학기술원

위탁연구책임자 : 이재학

위탁참여연구원 : 강돈혁, 고아라, 김경희,
김동선, 박진구, 이형빈,
정진현, 주세중, 최유정,
홍창수, 황상철

보고서 초록

과제관리번호	N65520	해당단계 연구기간	2013.1.1- 2013.12.31	단계 구분	1/1
연구사업명	중 사업명	온난화 관측 모델 시스템으로 서남극 아문젠해 해빙역 연구			
	세부사업명	서남극해 결빙해역의 순환 및 하위생태계 특성 분석			
연구과제명	중 과제명				
	세부(단위)과제명				
연구책임자	이재학	해당단계 참여연구원수	총 : 12 명 내부 : 12 명 외부 : 명	해당단계 연구비	정부: 100,000천원 기업: 천원 계: 100,000천원
연구기관명 및 소속부서명	한국해양과학기술원 해양순환·기후연구부		참여기업명		
국제공동연구	상대국명 :		상대국연구기관명 :		
위탁연구	연구기관명 :		연구책임자 :		
요약 (연구결과를 중심으로 개조식 500자 이내)					보고서 면수
					55
<ul style="list-style-type: none"> • 아문젠해 해류 및 퇴적물트랩 시계열 관측 <ul style="list-style-type: none"> - 3개 지점에 계류, 2012년 2월 이후 계속 • 생기원원소 침강플럭스의 계절변화 파악 <ul style="list-style-type: none"> - 총질량 플럭스: 4.06~515 mg m² day⁻¹의 범위로 여름에 높았고 겨울에 낮았음 - 유기탄소 플럭스: 1.19~36.8 mgC m² day⁻¹의 범위, 유기탄소 함량은 6.6~33.2% - CaCO₃ 플럭스: 0.26~3.15 mg m² day⁻¹의 범위, CaCO₃ 함량은 0.49~13.9% - 생기원규소 플럭스: 1.01~333 mg m² day⁻¹의 범위, 생기원규소 함량은 13.7~68.3% - 쇄설물 플럭스는: 1.04~105 mg m² day⁻¹의 범위, 쇄설물 함량은 17.5~54.0% • 아문젠해 물리환경과 음향자료의 상관성 분석 및 음향자료의 신호 분류 기법 적용 <ul style="list-style-type: none"> - 크릴 분포와 환경자료 중 수온과의 연관성 확인 - 주요 생물(크릴/어류)의 음향특성 파악 및 분류 기법 적용을 통한 크릴 밀도 추정 • 결빙해역 해양생태계 먹이망 구조 및 에너지 흐름 이해 <ul style="list-style-type: none"> - 아문젠해 남극 크릴(<i>Euphausia</i> sp.)은 남극 하계(1-2월)에 월동을 위해 지방을 축적 - 주요 동물플랑크톤의 지방산 및 안정동위원소 비를 통해 서식지역 별 섭식 생태 차이 확인 - 이들의 정확한 먹이원 파악을 위해 채집 당시의 우점 부유 식물플랑크톤(예, <i>Phaeocystis antarctica</i>)과 미세동물플랑크톤의 생화학적 분석이 추가적으로 필요 					
색인어 (각 5개 이상)	한글	아문젠해, 폴리나, 남극순환심층수, 계류, 크릴 음향, 크릴 먹이생태			
	영어	Amundsen Sea, Polynya, Circumpolar Deep Water, Mooring, Krill acoustic, Feeding ecology of Krill			

요 약 문

I. 제목

서남극해 결빙해역의 순환 및 하위생태계 특성 분석

II. 연구개발의 목적

- 아문젠해 결빙해역 해빙(解氷)에 대한 해수순환의 역할 규명
- 아문젠해 생기원원소 침강플럭스의 계절변화 파악
- 아문젠해 물리환경과 음향자료의 상호 비교 및 연안 음향자료의 신호분류 기법 연구
- 생화학지시자를 이용한 결빙해역 동물플랑크톤 섭식생태 및 생태계에서의 역할 이해

III. 연구개발의 내용 및 범위

1. 연구 기간

- 2013년 1월 1일 - 2013년 12월 31일

2. 연구 개발의 내용

- 해류 시계열 자료 분석
 - 아문젠해로의 CDW 유입 기작 관련 분석
- 시계열 퇴적물트랩을 이용하여 생기원원소 침강플럭스 측정
 - 아문젠해 두 지점에 일년동안 계류한 퇴적물트랩 회수 및 재계류
 - 퇴적물트랩 시료에서 유기탄소, 탄산칼슘, 생기원규소, 육상기원 쇄설물 분석
- 아문젠해의 음향자료 분석
 - 환경자료과 음향자료와의 상관성 분석 연구
 - 주요 생물(크릴/어류)의 음향특성 분석 및 신호 분류 기법 적용
- 생화학적 방법(dietary lipid markers, stable isotope ratios)을 활용한 크릴 및 주요 동물플랑크톤(요각류 등)의 생존전략 및 섭식관계 이해

IV. 연구개발결과

1. 해류 및 퇴적물트랩 시계열 자료 분석

- 해류계 및 퇴적물트랩 회수

- 계류지점 K1

관측기간: 2012년 3월 4일 ~

위치: 72° 23.237'S, 117° 42.821'W

설치 장비: 해류계 2, 퇴적물채집기 1, CTD 2

- 계류지점 K2

관측 기간: 2012년 2월 15일 ~

계류 위치: 73° 16.827'S, 114° 57.227'W

설치 장비: 해류계 2, 퇴적물채집기 1, CTD 2

- 계류지점 K2

관측 기간: 2012년 2월 16일 ~

계류 위치: 74° 11.202'S, 112° 31.782'W

설치 장비: 해류계 3, 퇴적물채집기 1, CTD 2

- 생기원원소 침강플럭스의 계절변화 파악

- 총질량 플럭스는 $4.06\sim 515 \text{ mg m}^{-2} \text{ day}^{-1}$ 의 범위를 보였으며, 여름에 높았고 겨울에 낮았음

- 유기탄소 플럭스는 $1.19\sim 36.8 \text{ mgC m}^{-2} \text{ day}^{-1}$ 의 범위를 보였으며, 유기탄소 함량은 6.6~33.2%를 나타냈음

- CaCO_3 플럭스는 $0.26\sim 3.15 \text{ mg m}^{-2} \text{ day}^{-1}$ 의 범위를 보였으며, CaCO_3 함량은 0.49~13.9%를 나타냈음

- 생기원규소 플럭스는 $1.01\sim 333 \text{ mg m}^{-2} \text{ day}^{-1}$ 의 범위를 보였으며, 생기원규소 함량은 13.7~68.3%ff 나타냈음

- 쇄설물 플럭스는 $1.04\sim 105 \text{ mg m}^{-2} \text{ day}^{-1}$ 의 범위를 보였으며, 쇄설물 함량은 17.5~54.0%를 나타냈음

2. 아문젠해 물리환경과 음향자료의 상관성 분석 및 음향자료의 신호 분류 기법 적용

- 아문젠해의 환경자료과 음향자료와의 상관성 분석 연구

- 크릴 분포와 환경자료 중 수온과의 연관성 확인

- 아문젠해에서 획득한 음향자료에 대한 생물분류 기법 적용 및 크릴 밀도 파악

- 크릴 시료의 음향 실험 실시(대형수조)
- 음향 자료와 생물음향 모델과의 비교 및 검증
- 음향 실험 및 생물 음향 모델 결과를 활용한 아문젠 폴리냐 크릴 밀도 추정

3. 결빙해역 해양생태계 주요 동물플랑크톤의 생존 전략 및 섭식 생태 이해

- 남극 해양생태계에서 *Euphausia* sp. 및 *Calanoides acutus*의 역할 이해
 - *Euphausia* sp. 및 *C. acutus*는 환경조건에 따른 생존전략(월동, 산란)의 일환으로 식물플랑크톤이 풍부한 시기(춘, 하계)에 지방을 축적함
- 생화학적 방법을 활용한 남극해 주요 동물플랑크톤의 섭식 생태 파악
 - 먹이 추적 지방산 분석 결과에 따르면 아문젠 해에 서식하는 아이스 크릴(*E. crystallographias*)은 잡식성인 것으로 추정되며, 특히 pine island bay에서 채집된 아이스 크릴의 경우에는 채집 당시 대변성을 일으킨 식물플랑크톤 (*Phaeocystis* sp.)을 주요 먹이원으로 이용한 것으로 추정됨

V. 연구개발결과의 활용계획

- 남극해에서 변화가 가장 급격한 곳인 결빙해역의 해양환경변화의 이해
- 아문젠해 해양 시계열 자료의 국제 학계 제공
- 남극해 해빙 인접지역과 해빙 하부지역에서의 크릴조사를 통한 국제 수준의 연구 노하우 축적
- 남극 해역 해양수산자원 변화 연구 및 개발 활용
- 국내 극지연구(극지 연안순환 및 생태계) 수준 제고를 위한 다학제적 연구 개발
- 남극 아문젠해에서 "Biological pump"에 의해 대기에서 해양으로 유입되는 이산화탄소 양 추정
- 아문젠해 크릴분포 특성에 의한 생태계 구조 파악과 유용 생물자원 개발에 활용

S U M M A R Y

I . Title

Analysis of characteristics of the circulation and lower trophic level ecosystem in the western Antarctic Ocean (Amundsen Sea)

II . Objectives of the study

- Examination of the role of the circulation to melting sea ice in the Polynya area in the Amundsen Sea
- Investigating the seasonal variations in the sinking fluxes of biogenic elements in the Amundsen Sea
- Comparison krill acoustic data with environmental data and estimates densities of ice krill using acoustic classification technique in the Amundsen Sea.
- Understanding the feeding ecology and role of zooplankton using dietary lipid markers in the bay of Amundsen Sea

III . Contents of the study

1. Period of the study

- 2013. 1. 1 - 2013. 12. 31

2. Contents of the study

- Analysis of time series current data
 - Related process for CDW input into the Amundsen Sea
- Estimating sinking fluxes of biogenic elements using time-series sediment traps
 - Recovery and re-deployment of sediment traps at two sites of the Amundsen Sea
 - Analysis of organic carbon, CaCO₃, biogenic Si, and lithogenic material at the sinking particles
- Analysis of acoustic data
 - Comparison krill acoustic data with environmental data in the Amundsen Sea.
 - Based on the acoustic characterization, identification of ice krill using biological acoustic data, Amundsen Sea, Antarctic Ocean.

- Understanding the survival strategy and feeding ecology of dominant zooplankton including Antarctic krill using dietary lipid markers and stable isotope ratios

IV. Results of the study

1. Time series measurements of current and the sinking fluxes of biogenic elements

- Recovery of current meters and sediment traps
 - Mooring station K1
 - Recording period: 2012. 3. 4 ~
 - Location: 72° 23.237'S, 117° 42.821'W
 - Equipments installed: 2 current meters, 1 sediment trap, 2 CTD
 - Mooring station K2
 - Recording period: 2012. 2. 15 ~
 - Location: 73° 16.827'S, 114° 57.227'W
 - Equipments installed: 2 current meters, 1 sediment trap, 2 CTD
 - Mooring station K3
 - Recording period: 2012. 2. 16 ~
 - Location: 74° 11.202'S, 112° 31.782'W
 - Equipments installed: 2 current meters, 1 sediment trap, 2 CTD
- Investigating the seasonal variation in the sinking fluxes of biogenic elements
 - Total mass fluxes range from 4.06 to 515 mg m⁻² day⁻¹, with high values in summer and low values in winter
 - Organic carbon fluxes range from 1.19 to 36.8 mgC m⁻² day⁻¹, and organic carbon contents vary from 6.6 to 33.2%
 - CaCO₃ fluxes range from 0.26 to 3.15 mg m⁻² day⁻¹, and CaCO₃ contents vary from 0.26 to 3.15%
 - Biogenic Si fluxes range from 1.01 to 333 mgC m⁻² day⁻¹, and biogenic Si contents vary from 13.7 to 68.3%
 - Lithogenic fluxes range from 1.04 to 105 mgC m⁻² day⁻¹, and organic carbon contents vary from 17.5 to 54.0%

2. Krill acoustics

- Comparison krill acoustic data with environmental data in Amundsen sea.
 - Relationship between ice krill density and temperature of Antarctic Surface Water

- Applied to krill classification technique using acoustic data/model prediction
 - Acoustic target strength experiment of ice krill (*Euphausia crystallorophias*)
 - Comparisons of measured acoustic data with the model prediction
 - Estimates of ice krill density using acoustic technique used to identify ice krill
3. Understanding the survival strategy and feeding ecology of zooplankton in marine ecosystem of Amudsen Sea
- Understanding the role of *Euphausia* sp. and *Calanoides acutus* in marine ecosystem of Amudsen Sea
 - During the austral summer (December-February), *Euphausia* sp. and *Calanoides acutus* intensively accumulated lipids as an energy storage for overwintering and spawning in the following year.
 - Understanding the feeding ecology of zooplankton through biochemical approaches (dietary lipid markers, stable isotopes)
 - The ice krill (*E. crystallorophias*) from Amudsen Sea appeared to be omnivorous, according to the composition of dietary tracking fatty acids. Especially, ice krill collected from pine island bay mainly fed on phytoplankton (*Phaeocystis* sp.) bloomed at the time of sampling.

V. Application plan of research outputs

- Understanding of the ocean environmental variation in the rapid changing area in the Antarctic Ocean
- Opening time series data in the Amudsen Sea to the international research community
- Accumulated know-how of bioacoustic survey in the Antarctic area.
- Study of the fishery resources change in the Antarctic area.
- Development of multidisciplinary polar study (coastal circulation and ecosystem) to improve the domestic research level
- Estimating the amounts of CO₂ removed into the ocean from atmosphere by "Biological pump" in the Amudsen sea
- Application for understanding ecological function of ice krill and for developing useful biological resources in Amudsen Sea

C O N T E N T S

Summary (Korean)	3
Summary (English)	6
Contents (English)	9
Contents (Korean)	10
Chapter I Introduction	11
Section 1 Objectives of the study	11
Section 2 Scopes of the study	11
Section 3 Propulsive strategies and methods	12
Chapter II Research status	14
Chapter III Results of the study	16
Section 1 Time series measurements of current and sediment	16
Section 2 Characteristics of Antarctic krill acoustics	28
Section 3 Characteristics of low trophic ecosystem	40
Chapter IV Achievements of objectives and contributions to the related area	49
Section 1 Achievements of objectives	49
Section 2 Contributions to the related area	50
Chapter V Application plan of research outputs	51
Chapter VI References	52

목 차

요약문	3
요약문 (영문)	6
목차 (영문)	9
목차	10
제 1 장 서론	11
제 1 절 연구개발 목표	11
제 2 절 연구개발 내용	11
제 3 절 추진전략 및 방법	12
제 2 장 국내외 기술개발 현황	14
제 3 장 연구개발수행 내용 및 결과	16
제 1 절 해류 및 부유퇴적물 시계열 조사	16
제 2 절 생물 음향 특성	28
제 3 절 하위생태계 먹이망 특성	40
제 4 장 연구개발목표 달성도 및 대외기여도	49
제 1 절 연구개발목표 달성도	49
제 2 절 대외기여도	50
제 5 장 연구개발결과의 활용계획	51
제 6 장 참고문헌	52

제 1 장 서론

제 1 절 연구 개발 목표

- 아문젠해 결빙해역 해빙(解氷)에 대한 해수순환의 역할 규명
- 아문젠해 생기원원소 침강플럭스의 계절변화 파악
- 아문젠해 폴리나를 중심으로 한 크릴 분포 특성 파악
- 생화학적 방법을 통한 결빙해역 크릴 및 주요 동물플랑크톤 섭식 생태 및 생태계에서의 역할 이해

제 2 절 연구 개발 내용

- 아문젠해 해수 순환 연구
 - 아문젠해 해류 시계열 관측
 - 아문젠해 외해역 ACC(남극순환류) 국제공동 조사를 위한 실행 계획 작성
- 시계열 퇴적물트랩을 이용하여 생기원원소 침강플럭스 측정
 - 아문젠해에 일 년 동안 계류한 퇴적물트랩 회수 및 재계류
 - 퇴적물트랩 시료에서 유기탄소, 탄산칼슘, 규소 등 생기원원소 분석
- 물리환경과 음향자료의 상호 비교 및 연안 음향자료의 신호분류 기법 연구
 - 물리환경과 음향자료와 상호 비교
 - 아문젠해 주요 생물(크릴 및 어류)의 음향특성 파악
 - 음향자료 분류 기법을 통한 아문젠해 연안의 음향 신호 분리
- 남극 결빙 해역에서 주요 동물플랑크톤(*Euphausia* sp., *Calanoides* sp.)의 역할 및 섭식 생태 이해
 - 생화학적 방법(지방 및 안정동위원소 비)을 통해 크릴을 포함한 주요 동물플랑크톤의 생존 전략 및 섭식 생태 이해

Table 1.2.1 대표적 지방 먹이 추적자의 기원과 응용

지방 바이오마커	기원	응용
Desmosterol, eicosenoic and docosenoic acids	동물플랑크톤	먹이 관계, 유기물 기원 및 순환
Dinosterol, Docosahexaenoic acid (DHA)	적조류 (dinoflagellates)	먹이 관계, 해양환경, 유기물 기원
Brassicasterol, Eicosapentaenoic acid (EPA)	규조류 (diatom)	먹이 관계, 해양환경, 유기물 기원
Fucosterol	갈조류 (brown algae)	먹이 관계, 해양환경, 유기물 기원
Bacteriohopanetetrol (BHT) branched and odd-chain fatty acids	미생물	먹이 관계, 해양환경, 유기물 순환

제 3 절 추진전략 및 방법

1. 추진전략 및 체계

- 다학제적 연구
 - 본과제의 최종 목표 달성을 이룰 수 있도록 생물 및 화학 분야와 관측지점을 결정
 - 해빙 인접 해역과 해빙 하부 해역의 해양환경 특성(생물채집 자료, 환경 관측 자료) 및 음향 자료와의 통합 분석
 - SAM과 같은 기후지수의 자료를 활용하여 대기의 변화 특성과 연계 해석
- 생화학적 분석 체계

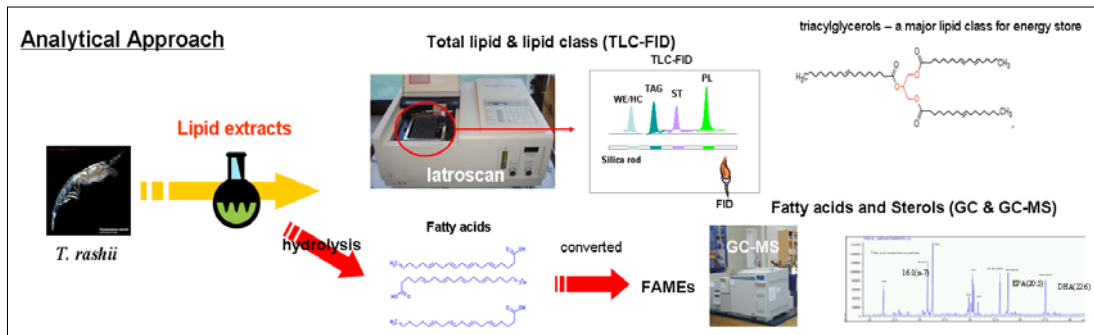


Fig. 1.2.1. Analysis procedure of lipid dietary markers.

- 국제공동 연구의 지속 확대
 - 아문젠해 해류: 스웨덴 고텐버그대, 영국 BAS
 - 아문젠해 퇴적물 트랩: 미국 WHOI
- 국제공동 연구 개발
 - 아문젠해 외해역 순환 연구: 프랑스 파리6대 등, 미국 NOAA
- 1-3차년도 연구의 논문화

2. 목표달성 방법

- 일회적 해역 조사와 정점 시계열 자료의 복합적 해석
- 외국의 선진 연구그룹과 자료 분석 결과의 토의를 통하여 자료 해석의 신뢰성을 제고
- 기존 문헌과 관련 연구 자료 및 정보를 통해 각 분야의 조사 방법 정립
- 초저온 냉동고(-80℃)에 보관되어 있는 주요 동물플랑크톤의 지방 및 안정동위원소 분석을 통해 생존전략, 섭식 생태 및 생태계 구조 파악
- 현장 조사시 측정된 다 분야 학제적 자료를 취합하여 상호 보완적 해석
- 국제 학술발표와 논문화로 연구 결과를 검증

제 2 장 국내외 기술개발 현황

제 1 절 국내의 기술개발 현황

- 국내에서 아문젠해 해양조사는 본 연구 사업이 최초로서 기존 연구가 전무함.
- 한국해양연구원 연구팀은 프랑스 연구팀과 공동으로 드레이크해협을 가로질러 10개 지점에서 2 - 3년간의 해류계 계류 조사를 수행한 바 있음.
- 남극 브란스필드 해협, 두정점에서 2000년부터 2005년까지 6년동안 생기원원소 침강플럭스의 계절 및 연변화를 측정하였는데, 생기원원소 침강플럭스는 주로 여름에 집중되어 일어났으며, 연변화도 크게 관측되어 해빙이 많은 해에는 생기원원소 침강플럭스가 적게 일어났고 해빙이 적은 해에는 많이 일어났음.
- 1998-2000년에 걸쳐 남극 서남극해의 음향 자료 취득 및 자원량 추정과 분포 특성 파악 수행
- 음향 조사 시스템 및 자료 해석 기법은 이미 확보
- 남극해 아문젠해의 경우 2011년 처음으로 음향 조사를 실시하여 자료 확보 및 분석 중이나 조사 정선의 제한으로 자료 해석에 한계가 있음.

제 2 절 국외의 기술개발 현황

- 2003년 3월 영국 조사팀은 RRS JAMES Clark Ross 를 이용하여 아문젠해 폴리냐 해역의 해양 조사를 실시하여 CDW 가 대륙붕해역으로 유입되는 양을 산출하였음.
- 최근 4년동안 영국 BAS 에서는 Global Science in the Antarctic Context (GSAC)의 일환으로 Pine Island Glacier 분지 및 주변해에서 다학제적 연구 수행. 특히, GRADES 및 ACES 프로그램 연구 결과는 이 해역에 대한 영국의 장기 연구계획 (The framework of LWEC, NERC Strategy and the Theme Action Plan) 의 근간이 됨.
- 2008/09년 시기에 스웨덴 쇠빙선 Oden 호를 이용하여 아문젠해 대륙붕역에서 해양조사를 실시하였고, 이 자료로부터 해빙에 대한 CDW의 영향을 정량적으로 산출되었음.

- 미국에서는 남극반도 대륙붕에서 1992년부터 2007년까지 16년 동안 시계열 퇴적물트랩을 이용하여 유기탄소 침강플럭스를 하였는데, 여름에 높은 플럭스를 보였고 겨울에 낮은 플럭스를 나타냈으며, 표층해수에서 생산된 총유기탄소의 4% 가량이 수심 170 m에 침강하였음.
- 미국에서도 2011년에 아문젠해 폴리냐에 시계열 퇴적물트랩을 계류하여 2012년 2월에 회수하였음.
- 남극해 중요 해역에 걸쳐 미국, 일본 및 영국 등에 의해 대규모 크릴 조사 음향 조사를 실시하였으며, CCAMLR를 통해 자료처리 프로토콜 제공 및 자원량 파악
- 크릴 자원량 조사 이외에 남극해 유용생물 자원 개발로 확대하여 다양한 음향 조사를 실시중이며 아문젠해의 크릴 음향 조사는 접근의 제한으로 최근에 연구가 실시되고 있음.
- 영국 남극 조사팀은 1998년 1월에 남극해에서 남극 크릴 *Euphausia superba*의 육식성 지방 마커를 찾아내기 위해 선상 섭식실험을 실시함.
- 캐나다 NSERC(Natural Sciences and Engineering Research Council) 연구팀은 2003-2004년에 아문젠해에서 뷰포트해(Beaufort Sea)까지 저서경계층에 서식하는 동물플랑크톤의 C:N:P와 지방 구성비를 최초로 보고
- 2008년 1-7월에 아문젠해에서 채집한 동물플랑크톤(*Calanus glacialis*)의 알 생산력, 지방 및 안정동위원소 분석을 통해 생존전략과 먹이를 연구하였음.
- 미국 Southern Ocean GLOBEC 연구팀은 2001년 7월 25일부터 8월 20일까지 western Antarctic Peninsula와 Marguerite bay에서 채집된 남극 크릴 *Euphausia superba*, *E. crystallorophias*, 주요 동물플랑크톤의 영양 상태와 먹이 생태를 이해하기 위해 이들의 지방을 분석하였음.
- 1985년 여름, 1986년 겨울, 1986년 겨울/봄, 1992년 가을에 southeastern Weddell Sea에서 채집한 남극 크릴 *E. superba*, *E. crystallorophias*, *Thysanoessa macrura*의 지방 함량 및 class 구성의 계절적 변화를 통해 월동 전략을 연구함.
- 연구팀 ASPIRE(Amundses Sea Polynya International Research Expedition)는 2010-2011년 남극 하계 기간동안 아문젠 해역에서 여러 분야에 걸쳐 연구를 진행하였으며, 특히 식물플랑크톤 *Phaeocystis* sp.의 대번성과 동물플랑크톤과의 상관성에 대해 연구하였음.
- 캐나다, 스웨덴, 노르웨이의 연구팀은 2009년 1-2월에 아문젠해 대륙사면에서 Ice algae에 의한 무기 탄소 이용과 이들의 탄소 안정동위원소의 분별계수를 결정함.

제 3 장 연구개발수행 내용 및 결과

제 1 절 해류 및 부유퇴적물 시계열 조사

1. 조사 개요

2013년도에는 2012년 2월 - 3월 아라온호의 아문젠해 탐사 기간중 3개 정점에 계류하였던 해류계 및 퇴적물수집기의 자료 수집이 계속되었다 (Fig. 3.1.1, Table 3.1.1).

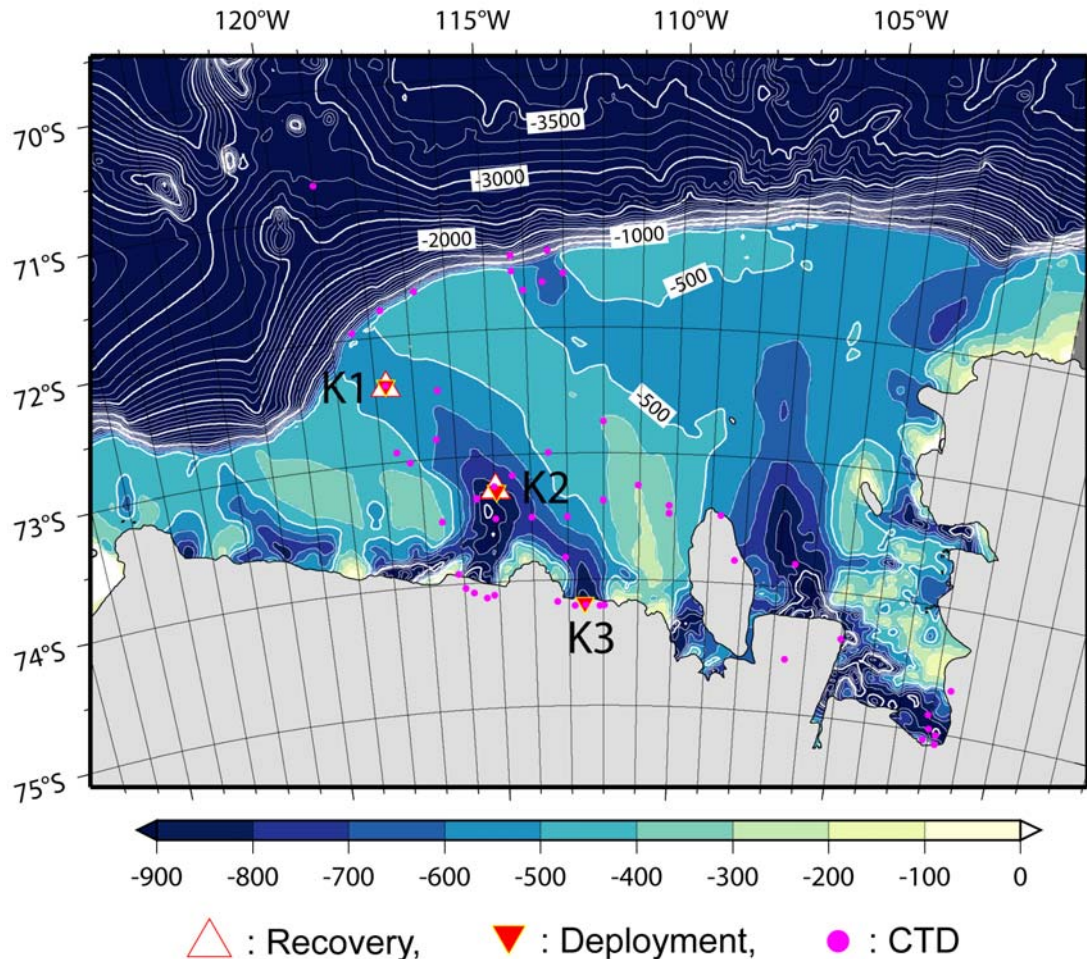


Fig. 3.1.1. Location map of mooring. Pink dots indicate CTD stations in the 2012 survey cruise. Background contours are bottom topography.

아문젠해 외해역으로부터 상대적으로 고온수가 대륙붕 쪽으로 유입된다는 가설 하에 이에 대한 시계열 유속 자료획득을 위한 해류계 계류 지점 2곳 (정점 K1, K2) 은 1차년도와 동일하게 계류 구성을 유지되어 있고 (정점 K2의 200 m 해류계 제외), 정점 K1에서는 300 m 층에 1개, 정점 K2에서는 500-600 m 층에 2개의 수온센서가 추가 설치되어 있다. 정점 K2의 해류계 수심은 회수된 해류계의 자료 및 CTD 관측 결과를 참고하여 해류계 설치 수심이 1차년도에 비해 보다 저층에 설치되어 있다. Dotson 빙벽 앞 (수심 1000m)에 정점 K3에는 3대 해류계 (상,중,하층)가 계류되어 있고 상층과 하층의 해류계 밑에 CTD를 설치되어 있다. 해류계, CTD 및 수온센서는 2년 동안 측정하기 위해 기록 간격을 각각 1시간, 30분 및 30분으로 설정되었다. 모든 정점에 퇴적물채집기를 1개씩 부착하였다. 정점, 계류 환경, 음파분리기, 해류계 및 기타 설치 장비의 정보는 기존 보고서 (극지연구소, 2012)에 기술되어 있다. 계류 장비들의 회수는 2014년 1월 아라온호를 이용한 관측 기간 중 실시할 예정이다.

Table 3.1.1. Location and date at anchor drop on the surface in mooring stations of the central shelf of Amundsen sea

Station Name	Latitude (S)	Longitude (W)	Depth (m)	Date	Time (UTC)	No. deployment
K1	72° 23.2374 ′	117° 42.8214 ′	525	2012/03/04	02:03	2 nd
K2	73° 16.8265 ′	114° 57.2270 ′	823	2012/02/15	07:23	2 nd
K3	74° 11.2019 ′	112° 31.7818 ′	1057	2012/02/16	18:27	1 st

2. 생지화학 원소 침강플럭스 연구

가. 서론

해양에서 생지화학적 원소들의 순환은 해양 표층에서 식물플랑크톤에 의한 유기물 생성과 생성된 유기물이 심해로 침강에 의해 크게 영향을 받는다. 또한 입자 플럭스는 영양염의 재생, 저서생물에 대한 먹이공급, 기후변화에 대한 퇴적물 기록 보존 등에도 영향을 미친다. 전지구 탄소순환의 관점에서 보면, 해양에서의 입자 플럭스는 대기 이산화탄소를 심해로 제거하는 가장 중요한 메카니즘 중 하나이다. 따라서 대기 이산화탄소 농도를 저감하는 해양의 역할을 이해하고 해양에서 탄소의 생지화학적 순환을 파악하기 위해 입자 플럭스에 대한 연구가 활발히 수행되고 있다(Fisher *et al.* 2000)

아열대 수렴대(Subtropical Convergence, *ca* 45°S)의 남쪽에 위치하고 있는 남빙양(Southern Ocean)은 대기 이산화탄소 순환과 전지구 생물기원규소(biogenic silica) 순환에 중요한 역할을 하고 있기 때문에 최근 많은 관심이 집중되는 지역이다(Bakker *et al.* 1997; Rabouille *et al.* 1997). 많은 연구자들이 남빙양에서 시계열 퇴적물 트랩(Time-series sediment trap)을 이용하여 입자 플럭스를 관측한 결과, 입자 플럭스와 그 화학적 조성은 저위도와 중위도 해역에 비해 시·공간적으로 매우 큰 변화양상을 보여준다(Fisher *et al.* 1998; Collier *et al.* 2000; Palanques *et al.* 2002). 남빙양에서 입자 플럭스는 주로 일차생산력에 영향을 주는 바람, 해류순환, 해빙, 구름 등과 같은 기후인자에 의해 좌우된다(Fisher *et al.* 1998; Collier *et al.* 2000). 따라서 남빙양에서 장기간 동안 입자 플럭스를 관측하면 장주기 기후변화 양상을 파악할 수 있다.

아문젠해(Amundsen Sea)는 서남극에 위치하고 있으며 아문젠해 폴리냐(polynya)(~27,000 km²)와 파인아일랜드(Pine Island) 폴리냐(~18,000 km²)가 존재한다. 특히 아문젠해 폴리냐는 남극에서 가장 높은 일차생산력을 보이며 연간변화도 매우 큰 것으로 관측되었다(Arrigo and van Dijken, 2003). 아문젠해 폴리냐에서 관측한 엽록소의 연간평균농도는 2.2 mg m⁻³으로 로스해에서 관측한 값(1.5 mg m⁻³)보다 40% 가량 높았다. Fisher *et al.* (1988)이 웨델해(Weddell Sea)에서 입자플럭스의 계절변화를 관측하였으며, Collier *et al.* (2000)은 로스해(Ross Sea)에서 입자플럭스의 계절 및 연변화를 관측하였다. 하지만 아직까지 아문젠해에서 시계열 퇴적물 트랩(time-series sediment trap)을 이용한 생지화학 원소 침강플럭스에 대한 연구가 전혀 수행되지 않았다. 본 연구에서는 아문젠해 폴리냐와 폴리냐 바깥해역에 퇴적물

트랩을 1년 동안 계류하여 생기원원소 침강플럭스의 계절변화를 파악하고자 한다.

나. 재료 및 방법

시계열 퇴적물 트랩을 2011년 1월 5일부터 2012년 1월 5일까지 아문젠해 폴리나(St. K2)와 폴리나 바깥해역(St. K1), 두 곳에 계류하였다(Fig. 3.1.1). 폴리나 바깥해역, 정점 K1에 퇴적물 트랩을 계류한 곳의 위치는 남위 72° 24.16', 서경 117° 43.34', 수심은 530m이었다. 폴리나, 정점 K2에 퇴적물 트랩을 계류한 곳의 위치는 남위 73° 16.28', 서경 114° 58.23', 수심은 830m이었다. 정점 K1에서는 퇴적물 트랩을 수심 418m에 계류하였고 정점 K2에서는 수심 414m에 계류하였다. 본 연구에 이용한 시계열 퇴적물 트랩은 21개의 시료병을 갖는 McLane PARFLUX Mark 7G 이었고 유속계는 Aanderaa RCM8이었다. 입자 플럭스가 많은 1월, 2월, 12월은 퇴적물 시료를 10일 간격으로 포집하였고 3월과 11월에는 15일, 나머지 계절에는 30/31일 간격으로 포집하였다. 퇴적물 트랩을 계류하기 전에 Na-borate로 중화한 5% 포르말린 용액을 시료병에 넣어 퇴적물 시료가 부패하지 않도록 하였다. 정점 K2에 계류한 퇴적물트랩은 배터리 불량으로 인하여 퇴적물트랩이 작동하지 않아 퇴적물시료를 획득하지 못했다.

퇴적물 시료는 증류수로 3번 세척하고 원심분리한 후에 냉동 건조하였다. 건조된 퇴적물 시료의 무게를 측정하여 총질량 플럭스를 계산하였다. 총탄소/질소 함량은 CNS 원소분석기(Carlo-Erba EA 1112)를 이용하여 측정하였다. 모든 시료를 두 번 분석한 결과, 분석 정밀도는 3%였다. 무기탄소 함량은 coulometrics 탄소분석기(UIC CM5130)를 이용하여 측정하였는데, 분석 정밀도는 2%였다. 유기탄소 함량은 총탄소 함량에서 무기탄소 함량을 빼어 계산하였다. 생기원규소 함량은 시간에 따라 1M Na₂CO₃를 이용하여 추출하여 분석하였다.

다. 결과 및 토의

아문젠해 폴리나 바깥해역에 위치한 정점 K1에서 관측한 총질량 플럭스(total mass flux)는 1월에 515 mg m⁻² day⁻¹으로 가장 큰 값을 보였고 6월에 4.06 mg m⁻² day⁻¹으로 가장 낮았다(Fig. 3.1.2). 총질량 플럭스는 남극 여름철인 1월과 2월에 집중되어, 이 기간 동안 관측된 전체 플럭스의 83%를 차지했다. 해빙(sea ice)가 생성되는 3월부터는 총질량 플럭스가 급격히 감소하여, 표층이 해빙으로 덮히는 4월 이

후에는 $10 \text{ mg m}^{-2} \text{ day}^{-1}$ 이하의 매우 낮은 플럭스를 보였다. 이렇게 총질량 플럭스가 여름철에만 집중되어 일어나는 것은 남극해에서 관측되는 침강입자 플럭스의 일반적인 특징이다(Fisher et al. 1998; Collier et al. 2000; Palanques et al. 2002). 정점 K1에서 1년동안 관측된 총질량 플럭스는 31.0 g m^{-2} 이었다.

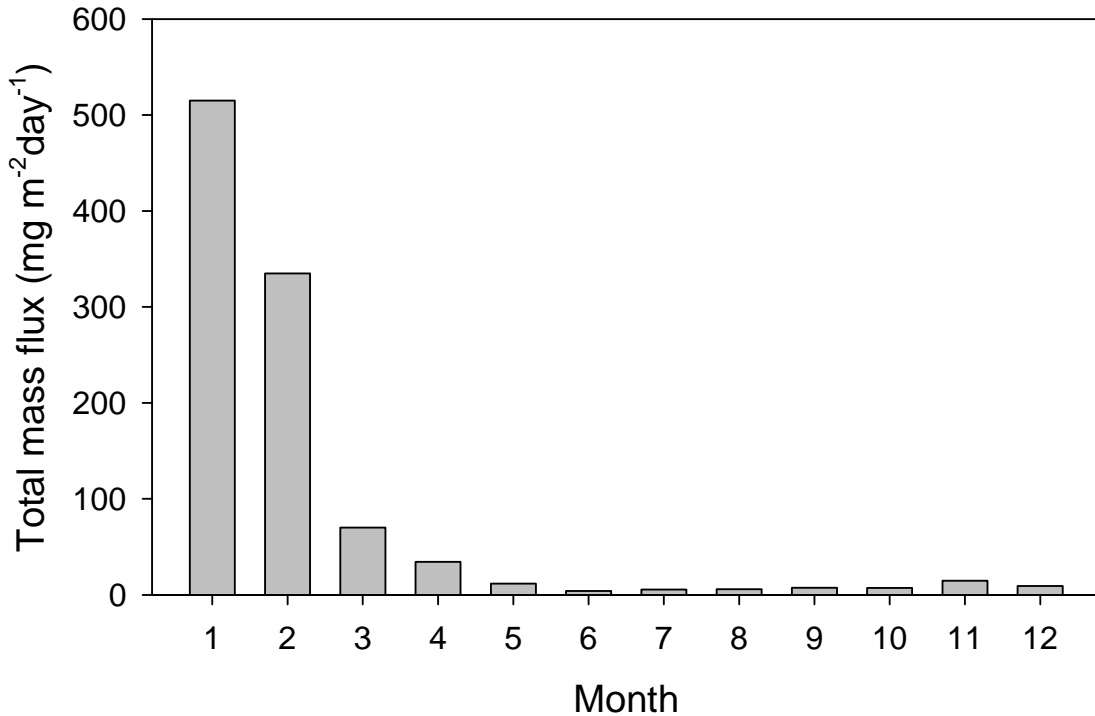


Fig. 3.1.2. Temporal evolution of total mass flux at station K1 in 2011.

유기탄소 플럭스는 전반적으로 총질량 플럭스와 유사한 계절변화를 나타냈다 (Fig. 3.1.3a). 유기탄소 플럭스도 1월에 $36.8 \text{ mgC m}^{-2} \text{ day}^{-1}$ 으로 제일 큰 값을 보였고 10월에 $1.19 \text{ mgC m}^{-2} \text{ day}^{-1}$ 으로 가장 낮았다. 유기탄소 플럭스도 1월과 2월에 집중되어, 이 기간 동안 관측된 플럭스가 1년동안 관측한 총 유기탄소 플럭스의 74%를 차지했다. 정점 K1에서 1년 동안 관측한 총 유기탄소 플럭스는 2.41 gC m^{-2} 이었다. 이 값은 남극 브랜스필드 해협(Bransfield Strait)에서 1년 동안 관측한 유기탄소 플럭스($6.80 \text{ gC m}^{-2} \text{ day}^{-1}$)의 1/3 가량 되었다(Kim et al. 2005). CaCO_3 플럭스는 총질량 플럭스와 약간 다른 계절변화를 나타냈다; 2월에 $3.15 \text{ mg m}^{-2} \text{ day}^{-1}$ 으로 가장 큰 값을 보였고 7월에 $0.26 \text{ mg m}^{-2} \text{ day}^{-1}$ 으로 가장 낮았다(Fig. 3.1.3b). CaCO_3 플럭스는 총질량 플럭스나 유기탄소 플럭스와 달리 11월과 12월에도 비교적 높은

값들을 보였다. 정점 k1에서 1년동안 관측한 총 CaCO_3 플럭스는 0.39 g m^{-2} 이었다.

생기원규소 플럭스는 $1.01\sim 333 \text{ mgC m}^{-2} \text{ day}^{-1}$ 으로 네 가지 구성성분 가운데, 가장 높은 값을 보였다(Fig. 3.1.3c). 생기원규소 플럭스는 전반적으로 유기탄소 플럭스와 유사한 계절변화를 나타냈다. 생기원규소 플럭스도 1월에 $333 \text{ mgC m}^{-2} \text{ day}^{-1}$ 으로 제일 큰 값을 보였으며, 6월과 7월에는 시료부족으로 인해 생기원규소 플럭스를 측정하지 못하였다. 생기원규소 플럭스도 1월과 2월에 집중되어, 이 기간 동안 관측된 플럭스가 1년 동안 관측한 총 생기원규소 플럭스의 88%를 차지했다. 정점 k1에서 1년 동안 관측한 총 생기원규소 플럭스는 12.4 gC m^{-2} 으로, 1년 동안 관측한 총질량 플럭스의 40%를 차지하였다. 쇠설물 플럭스(lithogenic flux)는 $1.04\sim 105 \text{ mgC m}^{-2} \text{ day}^{-1}$ 으로, 생기원규소 플럭스 다음으로 높은 값을 보였다(Fig. 3.1.3d). 쇠설물 플럭스도 유기탄소 플럭스와 유사한 계절변화를 나타냈다. 쇠설물 플럭스도 1월에 $105 \text{ mgC m}^{-2} \text{ day}^{-1}$ 으로 제일 큰 값을 보였고 6월에 $10.4 \text{ mgC m}^{-2} \text{ day}^{-1}$ 으로 가장 낮았다. 쇠설물 플럭스도 1월과 2월에 집중되어, 이 기간 동안 관측된 플럭스가 1년동안 관측한 총 쇠설물 플럭스의 77%를 차지했다. 정점 k1에서 1년 동안 관측한 총 쇠설물 플럭스는 9.58 gC m^{-2} 이었다.

침강입자의 유기탄소 함량은 6월에 33.2%로 가장 높았고 2월에 6.6%로 가장 낮았다(Fig. 3.1.4a). 전반적으로 유기탄소 플럭스가 높은 여름철에 유기탄소 함량은 낮았고 유기탄소 플럭스가 낮은 겨울철에 유기탄소 함량은 높아, 서로 반비례하는 관계를 나타냈다. 일년 평균 유기탄소 함량은 16.5%이었다. CaCO_3 함량은 0.49~13.9%의 범위를 보였으며, 일년 평균 함량은 6.15%이었다 (Fig. 3.1.4b). CaCO_3 함량은 유기탄소 함량과 전혀 다른 변화양상을 보여, 1월부터 12월까지 점차적으로 증가하였다. CaCO_3 함량은 총질량 플럭스와 반비례 관계를 보여, 퇴적물이 많이 유입되는 시기에는 CaCO_3 함량이 낮았고, 퇴적물이 적게 유입되는 시기에는 높았다. 생기원규소 함량은 CaCO_3 함량과 정반대의 계절변화를 보여, 2월에 68.3%로 가장 높았고 9월에 13.7%로 가장 낮았다(Fig. 3.1.4c). 전반적으로 생기원규소 플럭스가 높은 여름철에 함량은 높았고 플럭스가 낮은 여름철에 함량도 낮았다. 생기원규소 함량이 CaCO_3 함량과 정반대의 계절변화를 보인 것은 계절에 따라 우점하는 식물플랑크톤 종조성이 다른다는 것을 지시해준다. 즉, 규소질 플랑크톤이 여름과 가을 동안에 우세한 반면, 석회질 플랑크톤은 겨울과 봄 동안에 우세한 것으로 나타났다. 일년 평균 생기원규소 함량은 40.1%이었다. 쇠설물 함량은 CaCO_3 함량과 유사한 계절변화를 보였다(Fig. 3.1.4d). 쇠설물 함량은 17.5~54.0%의 범위를 보였으며, 일년 평균 함량은 30.9%이었다

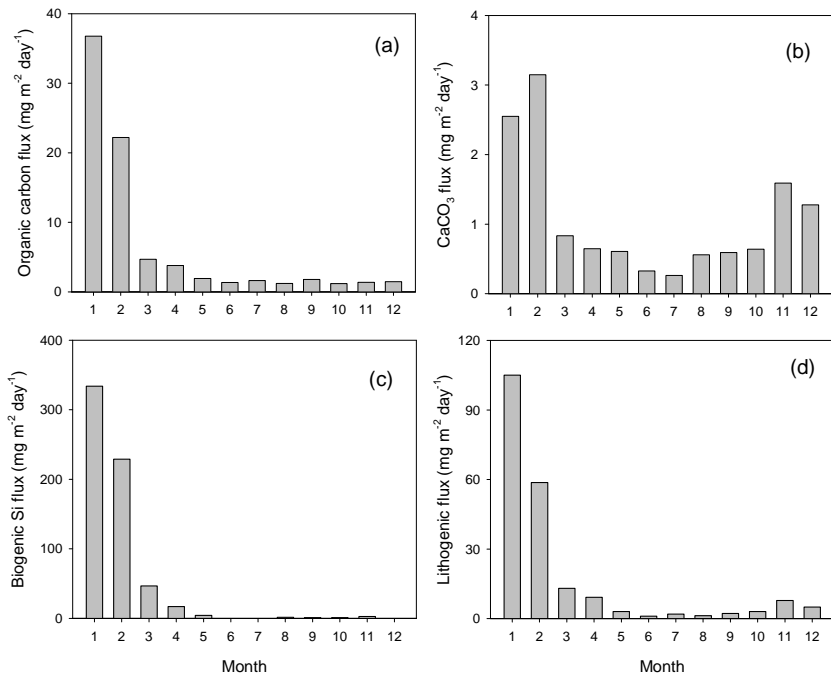


Fig. 3.1.3. Temporal evolution of organic carbon flux (a), CaCO₃ flux (b), and biogenic Si flux (c), and lithogenic flux (d) at station K1 in 2011.

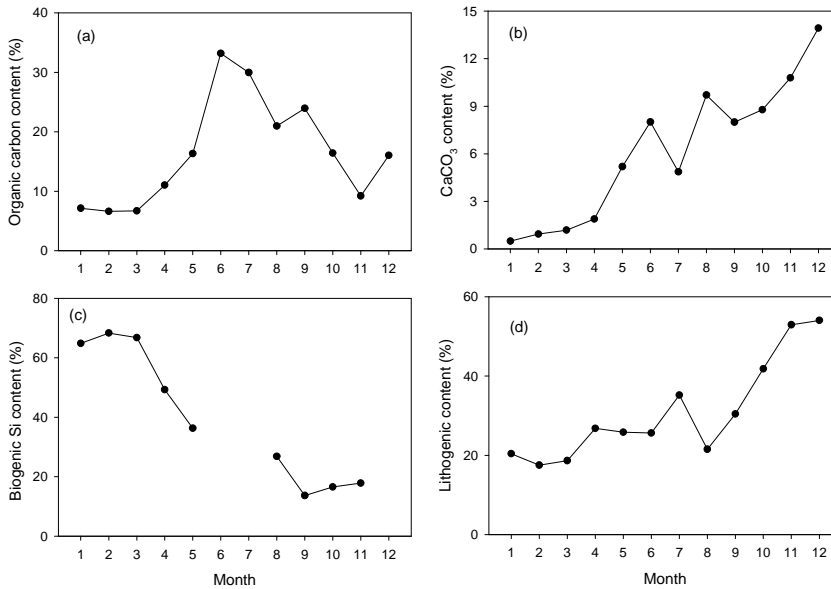


Fig. 3.1.4. Temporal evolution of organic carbon content (a), CaCO₃ content (b), biogenic Si content, and lithogenic content (d) at station K1.

라. 결 론

정점 K1에서 관측한 총질량 플럭스는 남극 여름철인 1월과 2월에 집중되어, 이 기간 동안 관측된 플럭스가 전체 플럭스의 각각 83%를 차지했다. 이렇게 총질량 플럭스 플럭스가 여름철에만 집중되어 일어나는 것은 남극해 다른 해역에도 관측되고 있어, 남극해 침강입자 플럭스의 일반적인 특징으로 판단된다. 유기탄소, 생기원규소, 쇠설물 플럭스도 총질량 플럭스와 마찬가지로 1월과 2월에 집중되어, 각각 전체 플럭스의 74%, 88%, 77%를 차지하였다. 하지만 CaCO_3 플럭스는 총질량 플럭스와 약간 다른 계절변화를 나타내, 11월과 12월에도 비교적 높은 값을 보였다. 아문젠해 폴리나 바깥해역에서 1년 동안 관측된 총질량 플럭스는 31.0 g m^{-2} , 유기탄소 플럭스는 2.41 gC m^{-2} , CaCO_3 플럭스는 0.39 g m^{-2} , 생기원규소 플럭스는 12.4 gC m^{-2} , 쇠설물 플럭스는 9.58 gC m^{-2} 이었다.

3. 극향 열속 기작 연구 기획

가. 배경 및 개요

해양에서의 에너지 수급과 재분배는 전 지구 기후계에 대한 중요한 해양의 역할이다. 북극해의 경우 북대서양과 넓게 연결되어 있고 상대적으로 수온이 높은 난류 세력이 직접 북극해까지 연결되어 해류에 의한 직접적인 열 수송이 가능하고 이에 따른 열속(heat flux)이 중요하다. 반면 남극해에서는 남극순환류가 적도해역에서 남극대륙 쪽으로의 열 수송에 장벽 역할을 한다. 그런데 남극순환류가 통과하는 해역에서 바람은 동풍이 우세하여 해양표층에서의 에크만 수송은 적도방향으로서 이에 따른 차가운 세력의 북향 열속이 나타난다. 장기적으로 평형상태를 유지하려면 이 북향 열속 크기만큼 따뜻한 세력의 남향 열속이 필요하다. 지금까지 관측과 모델링 결과들은 남극순환류의 남북방향 (위치 또는 사행) 이동과 남극순환류 통과 해역에서의 소용돌이(eddy)에 의하여 극향 열속이 유지된다고 제시되어왔다. 그러나 최근 Sekma et al. (2013)의 연구에서는 심층 유속장의 수직 구조 (수심에 따른 유향의 회전)와 관련된 새로운 기작을 제시하였고 특히, 해저 지형의 조절을 받는 남극순환류의 길목에서 이러한 기작이 우세할 것으로 보고하였다.

Udintsev Fracture Zone (UFZ)은 남동태평양의 해령인 East Pacific Rise와 남극해의 해령인 Pacific Antarctic Ridge의 경계에서 형성된 깊은 골이 있는 해역이다 (Fig. 3.1.5). 두 해령의 최저 수심은 2500 m 정도 되기 때문에 이보다 깊은 수심까지 영향을 미치는 남극순환류는 이 지형을 가로질러 통과할 수 없고 UFZ를 통과할 것으로 보고 있으며 남극순환류가 통과할 해역 중 가장 폭이 좁은 길목으로 알려져 있다(Fig. 3.1.6). 본 연구에서는 향후 아문젠해 외해역 연구사업 개발을 목적으로 이 해역에서의 열속 기작 연구를 위한 국제 공동 관측을 기획하였다. 또한, 본 연구사업의 목적인 아문젠해 외해역으로부터 아문젠해 대륙붕 저층으로의 심층남극순환류수 유입 기작 연구과정에서 아문젠해 대륙붕단에서의 해류 구조의 이해가 매우 중요하게 나타나 표층류의 관측을 기획 방향에 고려하였다.

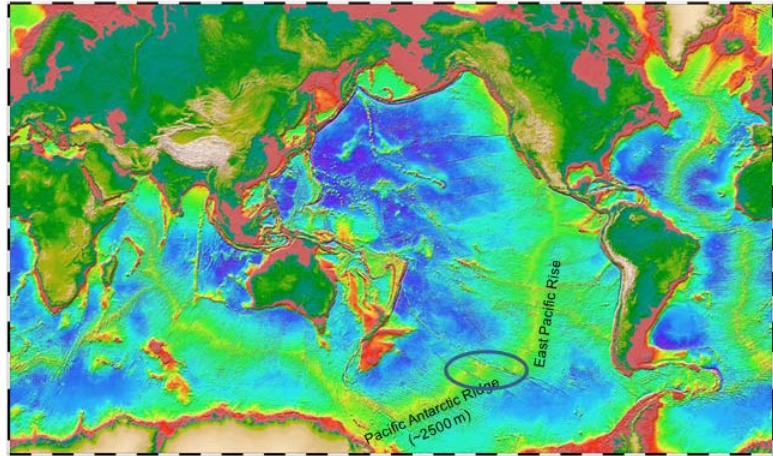


Fig. 3.1.5. The location of the Udintsev Fracture Zone.

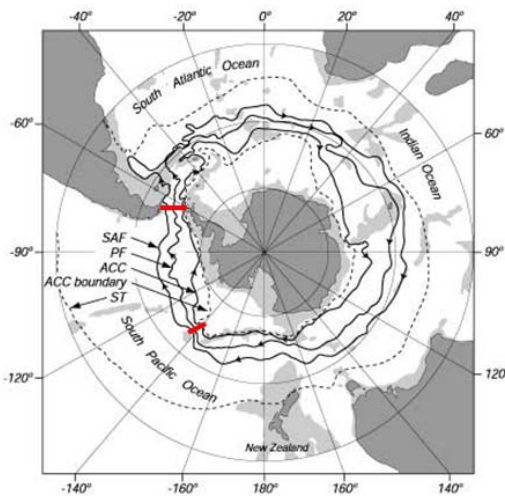


Fig.3.1.6. The schematics of the Antarctic Circumpolar Currents. The red lines indicate the Drake Passage and Udintsev Frature zone (Orsi et al., 1995).

나. 기획 내용

1) 과학적 이슈

- 극향 열속 기작
- 남극순환류 관측 (UFZ에서부터 아문젠해 외해역까지의 표층류 관측): 남극순환류의 관측 자료가 많은 해역은 해류의 모식도가 상대적으로 정교하게 제시되고 있으나 아문젠해 외해역은 계략적으로 제시되어 있음.
- UFZ 통과 남극순환류 수송량 변동성 (드레이크해협에서의 수송량과 비교 및

변동성 기작): 드레이크해협에서의 남극순환류 수송량은 약 136 Sv 정도로 받아들여지고 있으며 호주와 남극대륙 사이에서는 147 Sv 이상으로 보고되어 있다. 약 10 Sv 정도가 태평양으로 유입되는데 UFZ에서의 수송량 산출이 가능하면 남극순환류수의 태평양(동서해역) 으로의 유입의 형태에 대한 기본 자료가 됨

- 남극저층수의 UFZ를 통한 태평양 유입 여부 관측 (OceranSITES 기여): 지형의 특성에 의하여 UFZ는 남극저층수의 태평양 공급 통로일 가능성이 있는 곳으로 제시된바 있어 (Orsi, 2010) 이의 확인이 필요하며 전체 해양의 저층수 수지를 이해하는데 기초 자료가 됨.

2) 관측 요소 및 방법

- 고정점 해류 관측: 해류계, Inverted Echo sounder
- 뜰개 관측: Surface drifter, ARGO float
- 항해 조사: CTD, LADCP
- 인공위성 자료: Sea surface temperature, Sea surface height

3) 현장 실험 기획

- 현장 실험 : 2015년 1-2월중
- 내용: 장비 계류(Fig. 3.1.7), drifter 투하, CTD/LADCP 조사
- 참여 기관: KOPRI (선박, CTD/LADCP), KIOST (해류계 계류, drifter 투하)
LOCEAN/프랑스 (해류계 계류), URI/미국 (IES 계류),
AOML/NOAA/미국 (surface drifter 제공)

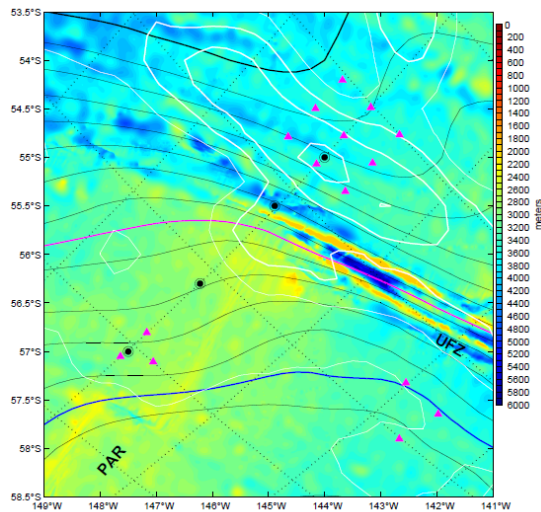


Fig. 3.1.7. Mooring locations of current meters and inverted echo sounders.

다. 선행 연구

표층해류 조사를 위하여 AOML/NOAA에서 제공한 표층 뜰개 30개를 아라온호 항해기간중인 2013년 12월-1월에 Pacific Antarctic Ridge 해역(27개)과 아문젠해 외해역(3개)를 투하하였다. 뜰개 drogue 수심은 50 m이며 자료는 AOML을 통하여 제공될 예정이다. NOAA로부터 뜰개 제공은 해양수산부-NOAA JPA(Joint Project Agreement) 사업의 내용에 의한 것이다. Fig. 3.1.8개 투하 전후의 뜰개 분포도로 본 사업에서 투하한 부분은 그림의 원으로 표시하였다.

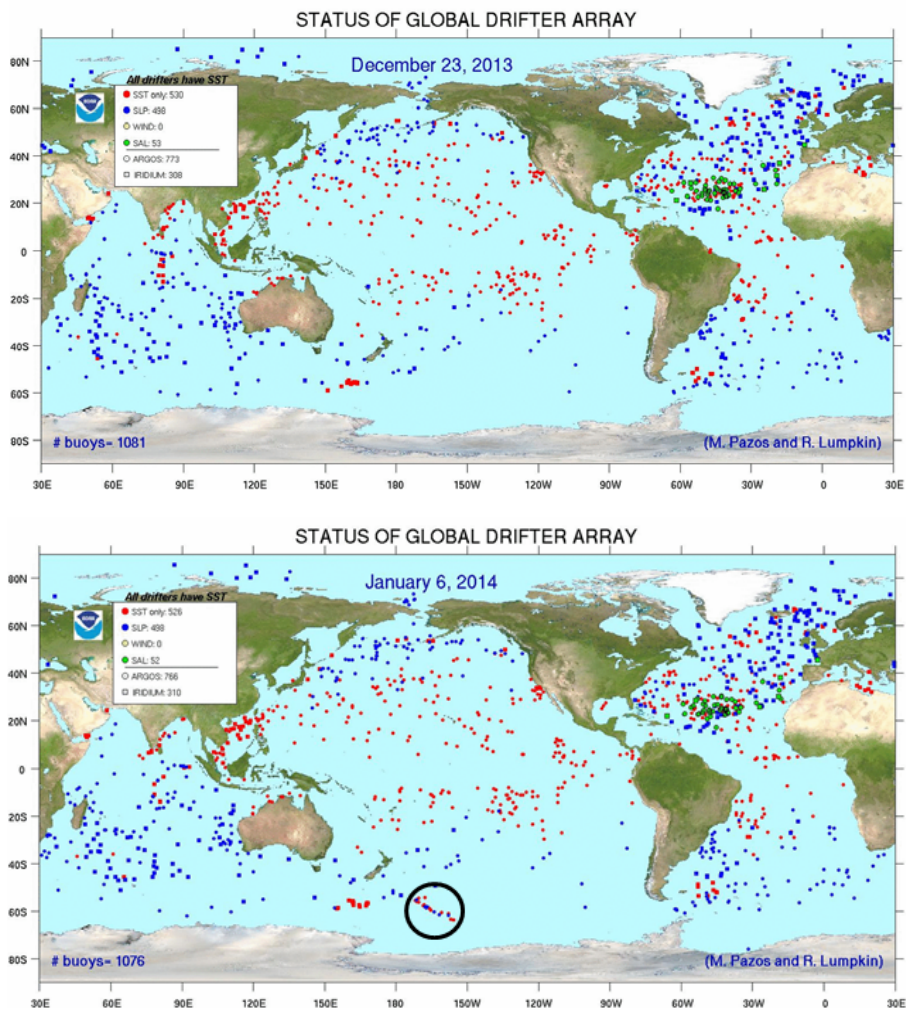


Fig. 3.1.8. Distribution of surface drifters on December 12, 2013 (top) and December 23, 2013 (bottom). The drifters deployed from the Araon is marked by a black circle.

제 2 절 생물 음향 특성

1. 서론

아이스 크릴(Ice krill, *Euphausia crystallorophias*)은 남극 크릴(Antarctic krill, *Euphausia superba*)과 더불어 남극 생태계의 먹이 체계에 중요한 역할을 하고 있다(Sala et al., 2002; Pakhomov, 1998). 또한 크릴은 자원량 측면에서 인류의 대체 수산자원으로 가치가 크므로 분포 위치, 자원량, 계절별 이동 특성 등 다양한 연구가 진행되고 있다(Miller and Agnew, 2000; Pauly et al., 2000). 그 중 아이스 크릴은 주로 남극 연안 부근에 존재하여, 남극 연안 생태계에 큰 영향을 준다.

남극해 중 연구선 접근이 가능한 다양한 해역에서 크릴 분포에 대한 많은 연구가 되어 있다. 반면 남극 아문젠 해역(Amundsen Sea)의 경우 여름기간에도 유빙에 의한 영향으로 쇄빙선을 제외한 일반 연구선을 이용한 조사가 어려운 해역이다. 따라서 아문젠 해역은 다른 남극 해역에 비해서 제한적으로 연구가 진행되었다.

본 연구는 쇄빙선인 아라온호(*IBRV ARAON*)를 이용하여 아문젠 폴리나 해역에서 음향 조사를 실시하였다. 음향 조사는 크릴의 분포 및 밀도를 추정하는데 가장 좋은 방법으로 알려져 있다. 음향 자료 분석시 크릴 음향 밀도의 정확한 추정을 위해서는 주요 생물의 음향 특성을 알아야 한다. 본 과제를 통해서 2011년과 2012년 2회에 걸친 음향 및 채집 조사 결과 아문젠 폴리나 해역의 주요 크릴 종은 아이스 크릴이었다. 아이스 크릴의 밀도 계산시 남극해 크릴의 음향함수를 조정하여 사용하고 있다. 하지만 많은 연구에 의하면 아이스 크릴과 남극해 크릴은 음향학적인 차이를 보인다. 따라서 정확하지 않은 주요 어종은 음향 함수는 음향 밀도 추정시 큰 오차를 초래한다.

본 연구에서는 아문젠 해역에서 채집된 크릴 시료를 이용하여 아이스 크릴의 음향 반사강도(acoustic target strength, TS)를 측정하였다. 음향 반사강도 측정의 주목적은 조사 해역에 분포하는 주요 생물의 음향 함수를 유도하여, 현장 조사에서 획득한 체적 산란강도(volume backscattering strength, Sv)를 음향 밀도로 변화하는 과정에서 중요한 변수로 활용하는 것이다. 따라서 2회에 걸쳐 아라온호로 획득한 아문젠해 폴리나 내 아이스 크릴의 정확한 밀도 파악을 위해서 음향 반사강도를 측정 하였고, 기존의 생물 음향 모델과 비교·분석을 통하여 검증하였다. 다중 주파수에 대한 아이스 크릴의 음향 반사강도를 차이를 통해서 아문젠 폴리나 해역에서 획득한 음향 신호 중 남극해 크릴 및 어류 등의 신호를 제거하는 생물 분류기법을 활용하여 아이스 크릴의 정확한 음향 밀도를 추정하였고, 해양환경 자료와 음향 자료와의 상관성 분석을 통한 해빙 인접해역의 분포 특성 파악을 실시하였다.

2. 재료 및 방법

가. 크릴 음향 실험

아이스 크릴의 음향 반사강도 실험은 2012년 8월 대형수조(5 m × 5 m × 5 m)에서 실시하였다(Fig. 3.2.1). 실험에 사용한 음향 시스템은 과학 어군 탐지기(BioSonics DT-X)이고, 음향센서는 split-beam 형태로 주파수는 아문젠해 생물 음향 조사와 동일한 38 kHz와 120 kHz를 이용하였다(BioSonics, 2005). 시스템 변수는 0.1 ms의 신호를 0.5 sec 간격으로 송·수신하였고, 개체 별로 약 10~15분간 음향신호를 획득하였다. 음향 시스템은 실험 전·후 보정구를 이용하여 보정을 실시하였다. 자세한 음향 변수는 표 3.2.1에 정리하였다.

실험에 사용한 시료는 2012년 1월 아문젠 폴리나 해역에서 봉고 네트(0.5-m² mouth area, 505- μ m mesh)로 채집된 크릴로 채집 당시 포르말린(10 % buffer, pH 7)을 이용하여 고정하였다. 크릴 시료는 음향 간섭이 없는 낚시 줄(0.1-mm monofilament line)로 매달아 센서 면 아래 2.0 m에 위치 시켰다. 음향 실험시 시료가 센서의 빔 축을 벗어나는 것을 방지하기 위해서 시료 아래로 0.5 m 간격을 두고 무게 추(0.5 kg)를 매달았다. 죽어 있는 시료이기 때문에 평균 음향 반사강도 측정을 위해서 낚시줄에 움직임을 주었고, 시료의 자세각 확인을 위해 측면에서 수중 카메라를 이용하여 촬영을 실시하였다. 수중 카메라 설치시 음향 신호에 영향을 주지 않도록 시료에서 2 m의 간격을 두었다. 실험 후 각각의 크릴 시료에 대해서 길이 및 습중량을 측정하였다.

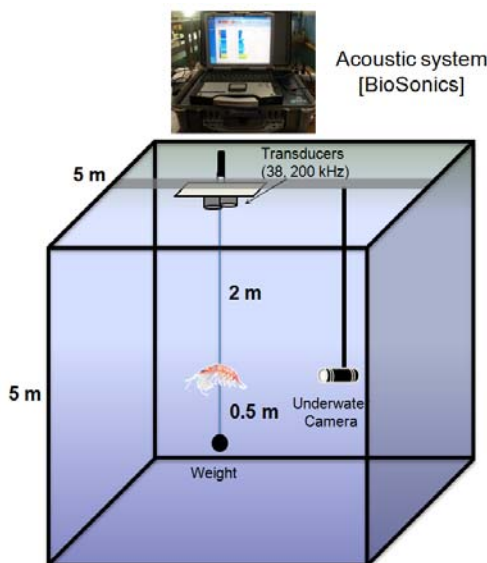


Fig 3.2.1 System configuration for acoustic experiment of ice krill.

음향 자료 처리에 사용된 프로그램은 음향 시스템 제작사에 제공하는 자료 취득 및 분석용 프로그램인 Visual Acquisition & Analyzer (BioSonics)와 음향 자료 전문 응용 프로그램인 Echoview software (ver 4.50; Myriax, 2008)을 혼용하여 사용하였다(Fig. 3.2.2). 아이스 크릴의 음향 반사강도 계산은 후방 산란 단면적($\sigma_{bs} = 10^{TS/10}$)을 이용하여 구할 수 있고, 계산식은 다음과 같다.

$$\overline{\sigma_{bs}} = \frac{1}{n} \sum_i^n \sigma_{bsn}, \quad TS_{mean} = 10 \log_{10}(\overline{\sigma_{bs}}) \quad (3.2.1)$$

크릴의 길이 별 음향 반사강도를 계산하여, 아이스 크릴의 음향 반사강도 함수를 도출하였다.

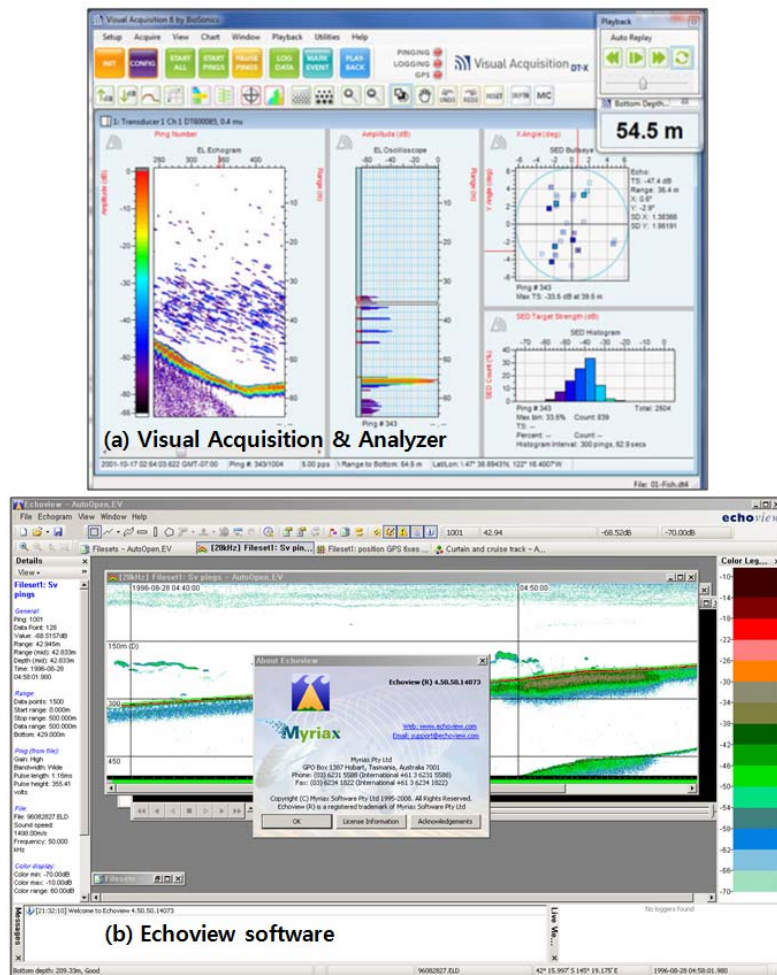


Fig. 3.2.2 Example of acoustic analysis program.

Table 3.2.1 Echosounder specifications.

Parameters	Unit	Value	
Frequency	kHz	38	120
Source Level	dB// μ Pa	217.8	221.6
Beam Width	degree	10.1	7.5
Data Threshold	dB	- 130	- 130
Ping Rate	pps	2	2
Pulse Width	msec	0.1	0.10
Collection Range	m	1~7	1~7

3. 결과 및 고찰

남극 아문젠 폴리나 해역에서 획득한 생물음향 자료 분석시 정확한 밀도 추정을 위해서는 대상 생물의 음향 반사강도(Target strength, TS) 함수가 필요하다. 따라서 정확한 밀도 추정을 위해 아이스 크릴을 대상으로 음향 반사강도 실험을 실시하였다.

실험에 시용한 개체수는 총 21 개체이고, 시료 크릴의 길이와 무게 분포는 각각 13~36 mm (mean: 22 mm)와 0.01~0.38 mg (mean: 0.10 mm) 이었다(Fig. 3.2.3). 실험 시료의 길이(L , cm) 및 무게(W , mg)를 이용한 함수는 $W = 0.001218 \times 10^{-3}L^{3.53}$ ($r^2 = 0.97$) 이었다. 21 개체의 시료에 대한 음향신호 중 안정된 신호 분포를 나타낸 20 개체 대해서 음향 자료를 분석을 실시하였다.

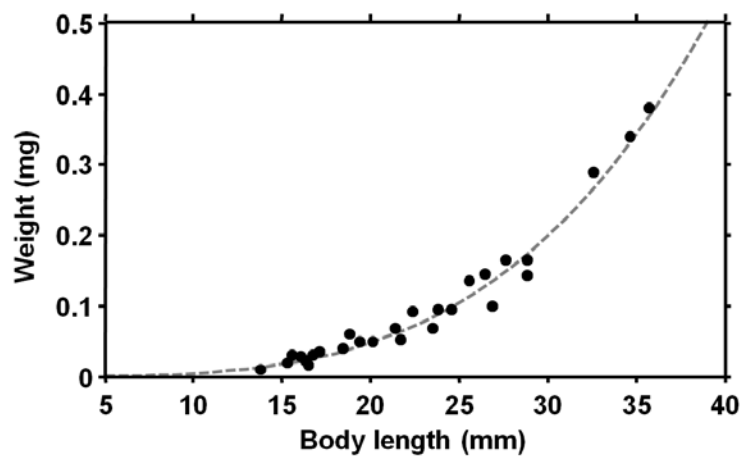


Fig 3.2.3 Size and weight of ice krill used in experiment.

그림 3.2.4는 음향실험을 통해서 획득한 120 kHz 음향 반사강도 에코그램의 예이다. 아이스 크릴 27.6 mm와 34.2 mm를 대상으로 실시한 결과로 측정된 시료(2.0 m)의 음향신호가 하부의 무게 추(2.5 m)와 수조 바닥(4.5 m)이 분리되어 나타남을 볼 수 있다. 측정된 음향 신호 중 크릴에 의한 음향 반사강도 자료만을 추출하여 분석에 활용하였다.

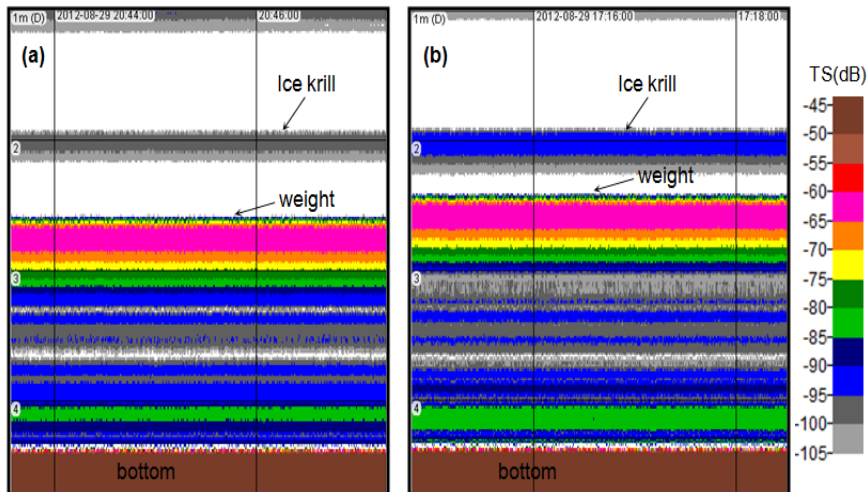


Fig 3.2.4 Example echogram for 27.6 mm (a) and 34.2 mm (b) of ice krill at 120 kHz.

Fig 3.2.5는 음향 실험 시 획득한 주파수 별 음향 반사강도의 분포 예제이다. 조사한 크릴 시료의 음향 반사강도 분포는 전체적으로 최대 빈도수를 기준으로 정규 분포(Gaussian distribution)을 가져 평균값 산출이 용이한 특성을 보였다. 최대 및 최소 음향 반사강도 범위를 보면, 38 kHz에서 20 mm는 -110 ~ -98 dB, 38 mm는 -95 ~ -86 dB, 120 kHz에서 20 mm는 -95 ~ -85 dB, 38 mm는 -86 ~ -78 dB로 주파수와 무게의 증가에 따라 음향 신호의 증가를 보였다.

주파수 별 비교시 120 kHz의 음향 반사강도가 38 kHz에 비해서 강하게 측정되었다. 이는 일반적으로 부레가 없는 동물 플랑크톤의 경우 38 kHz에 비해서 상대적으로 고주파인 120 kHz에서 강한 음향 반사강도가 나타나고, 부레가 있는 어류의 경우 상대적으로 저주파인 38 kHz에서 강한 반사강도가 나타난다(Simmonds and MacLennan, 2005). 따라서 본 결과는 부레가 없는 동물플랑크톤의 일반적인 패턴과 유사하다. 생물 음향 자료처리 프로그램을 이용하여 추출한 크릴의 길이 별 음향 반사강도 자료에 대하여 평균 음향 반사강도 및 음향 함수를 도출하기 위해서 식 (3.2.1)을 이용하였다.

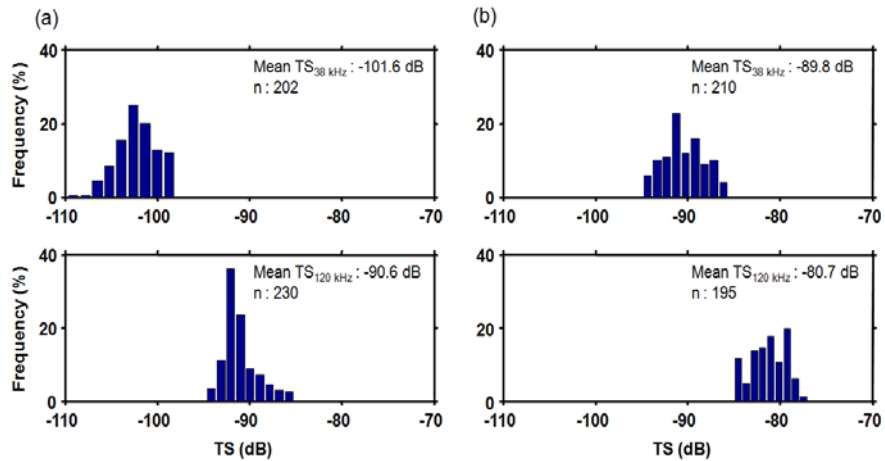


Fig. 3.2.5 TS histogram for 20 mm (a) and 37 mm (b) of Ice krill at 38 and 120 kHz.

아이스 크릴을 대상으로 실시한 음향 반사강도 자료를 이용하여 밀도 추정의 중요 변수인 음향 반사강도 함수를 도출하였다.

$$TS_{38\text{kHz}} = 57.0 \log_{10}(L) - 177.4 \quad (95\% \text{ CI: } 45.8 \text{ to } 68.7, -162.3 \text{ to } -192.5; r^2 = 0.86)$$

$$TS_{120\text{kHz}} = 31.6 \log_{10}(L) - 129.9 \quad (95\% \text{ CI: } 25.8 \text{ to } 37.3, -122.2 \text{ to } -137.7; r^2 = 0.87)$$

일반적으로 생물신호의 일반화 함수는 표적강도와 길이의 로그함수로 나타낸다 (SC-CAMLR, 2005). 크릴의 체장 별 음향 반사강도는 길이에 비례하는 패턴을 보였다(Fig. 3.2.6).

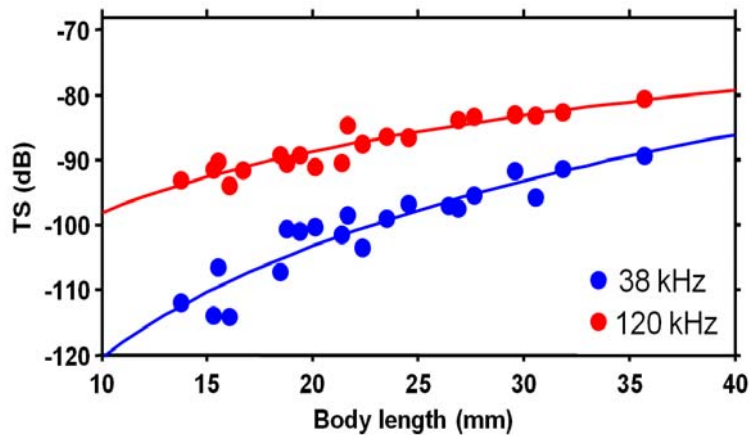


Fig. 3.2.6 Mean TS (dB re 1 m²) of ice krill at 38 kHz (a), and 120 kHz (b).

실험을 통해서 획득한 음향 반사강도 함수의 검증을 위해서 2개의 생물음향 모델과 비교하였다. 첫번째 생물음향 모델은 식 (3.3.2)로 남극 크릴의 음향 특성을 반영한 음향 함수이다(Greene et al. 1991).

$$TS(L) = -127.45 + 34.85 \log_{10}(L) + 10 \log_{10}(k_f / k_{120\text{kHz}}) \quad (3.2.2)$$

여기에서, $L(\text{cm}) = \text{body length (cm)}$, $k = 2\pi f/c$: acoustic wave number, f (kHz): carrier frequency 그리고 c (m/s): sound speed를 나타낸다.

두 번째 생물음향 모델은 SDWBA (Stochastic Distorted Wave Born Approximation) 모델로 대상 생물의 길이, 매질과 대상생물과의 밀도비(g)와 음속비(h)의 관한 음향 변수를 설정하여 대상생물의 음향 반사강도를 추정한다(Conti and Demer, 2003). 본 연구에서 측정한 아이스 크릴의 밀도비 및 음속비에 대해서는 아직 연구가 되어 있지 않고, 기존에 연구된 남극 크릴의 밀도비와 음속비는 각각 1.0357과 1.0279 이었다. 따라서 남극 크릴의 음향 특성을 반영한 음향 반사함수를 계산하여 비교 하였다.

본 실험을 통해서 획득한 음향 반사강도 결과와 모델 결과를 비교하기 위하여 SDWBA 모델을 이용하여 아이스 크릴의 밀도비와 음속비를 역산 하였다.

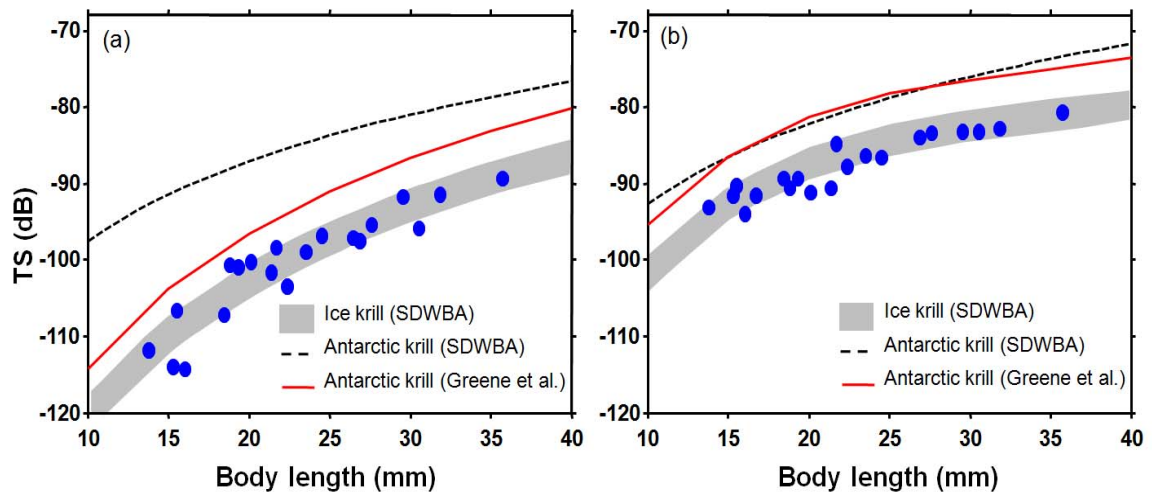


Fig. 3.2.7 Comparisons of the measured mean TS values with the model predictions at 38 kHz (a) and, 120 kHz (b).

본 실험 결과와 기존에 연구된 남극 크릴의 음향변수를 이용한 2개의 모델 함수와의 비교 결과 음향 반사 특성의 차이를 보였다(Fig. 3.2.7). 측정된 음향 반사강도는 Greene et al. (1991)의 생물 음향모델과의 비교시 38 kHz의 경우 11~24 dB, 120 kHz의 경우 4~9 dB 낮게 측정되었다. 남극 크릴의 음향 특성을 이용한 SDWBA 모델과 실측 결과와 비교시, 38 kHz와 120 kHz는 각각 2~12 dB와 4~9 dB 낮게 추정되었다.

Fig. 3.2.8의 회색면은 SDWBA 모델을 이용하여 아이스 크릴의 음속비와 밀도비를 역산한 결과로 밀도비와 음속비의 범위는 각각 1.0000~1.0009와 1.025~1.029 이다.

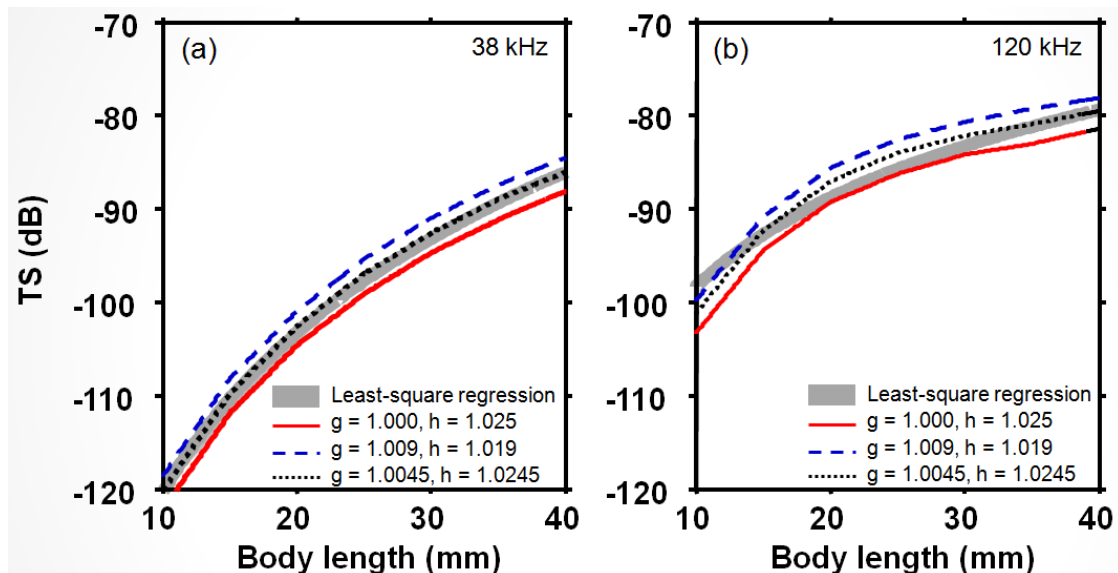


Fig. 3.2.8. Comparisons of the least-square regression with the model predictions at 38 kHz (a) and, 120 kHz (b).

수중에 어류와 동물플랑크톤 등이 혼재되어 있을 경우 단일 주파수를 이용한 생물의 분리가 불가능하다. 따라서 생물 음향기법을 이용하여 음향 신호 내 생물 분리시 다중 주파수의 반사강도 차이를 이용한다(Simmonds and MacLennan, 2005). 38 kHz와 120 kHz의 다중 주파수를 이용하여 남극해 내에 획득한 음향 신호에 대해서 남극 크릴 신호와 다른 생물체에 의한 음향 반사강도의 차이는 일반적으로 2~16 dB로 실측 자료와 생물 음향 모델로 연구가 되었다(Fig. 3.2.9, Foote et al. 1990; Greene et al. 1991; Madureira et al. 1993). 본 실험에 사용한 아이스 크릴 13~36 mm

에 대한 38 kHz와 120 kHz의 반사강도 차이는 7~20 dB로 측정되었다(Fig. 3.2.9).

음향 실험 및 모델 추정을 통한 아이스 크릴의 음향 반사함수 및 반사강도 차이는 남극 아문젠 해의 생물음향 자료 처리시 크릴 신호 분리와 밀도 추정을 위해 활용하였다.

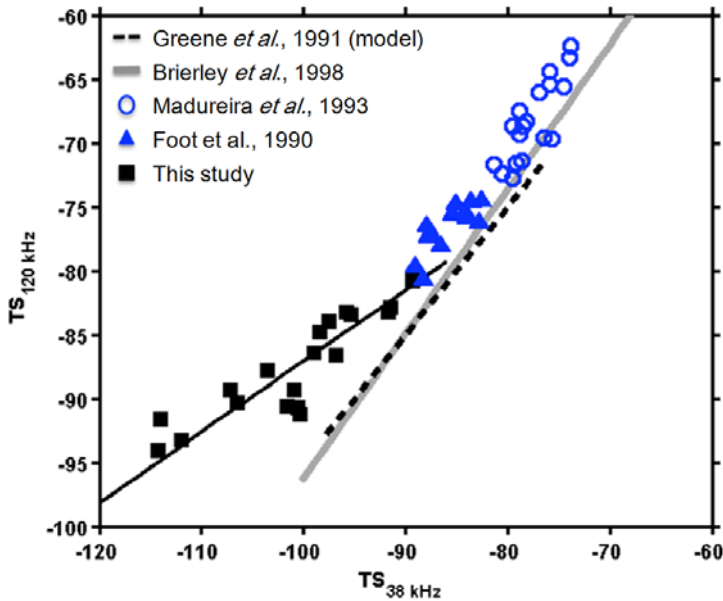


Fig. 3.2.9. Target strength at 120 and 38 kHz for ice krill (this study) and other studies for Antarctic krill; Measured Sv ranging 34-45 mm by Madureira et al., 1993, Measured TS ranging 30-40 mm by Foot et al., 1990; linear regression curve based on measured Sv by Brierley et al., 1998.

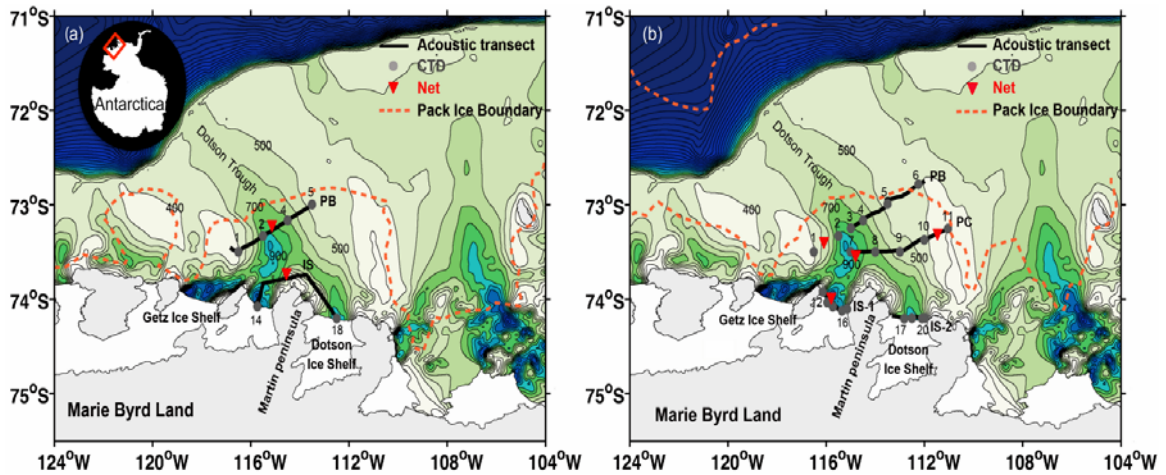


Fig. 3.2.10. A map of the region with the acoustic transects, CTD stations, net stations and pack-ice boundary (orange dashed line) on the bathymetry of the central Amundsen shelf during 2011 (a) and 2012 (b). PB is the pack-ice boundary, CP is the center of the coastal polynya and IS is the ice shelf margin.

남극 아문젠 폴리나 해역에서 남극 하계 기간 중 2010년 12월 25일 ~ 2011년 1월 14일과 2012년 2월 9일 ~ 3월 9일 총 2회에 걸쳐 음향조사를 실시하였다. 음향조사에 사용한 시스템은 선저형 과학 어군탐지기 EK60을 이용하였고, 음향 주파수는 38 kHz와 120 kHz를 이용하였다. 전체 조사해역 중 안정된 음향자료를 획득한 해역은 크게 4 지역으로 구분된다(Fig. 3.2.10). 세분화된 세 지역은 (1) pack-ice boundary (PB), (2) the coastal polynya center (PC), 그리고 (3) ice-shelf margin (IS) 로 PB 지역은 10 % 이상의 해빙농도를 기준으로 설정하였다(Arrigo et al, 2012)

Fig. 3.2.11은 2012년 아문젠 해역 음향 정선 중 PB 해역에서 획득한 120 kHz 음향 산란신호의 예이다. 음향 자료 분석시 음향 정선 간의 공간적 분포의 차이를 보였다. PB 해역 0~100 km에서 음향 신호는 수심 50~150 m에서 -90~-70 dB 범위의 음향 산란강도가 측정되었다. 반면에 PB 해역 100~140 km은 표층부터 50 m 부근에서 -70 dB 이상의 강한 음향 산란신호가 측정되었다. 본 조사 해역에서 채집 결과 PB 해역 0~100 km에서는 아이스 크릴이, PB 해역 100~140 km에서는 남극해 크릴이 우점하였다. 음향 정선에서 획득한 38 kHz와 120 kHz 다중주파수 자료를 비교한 결과 아이스 크릴과 남극해 크릴에 의한 음향신호는 큰 차이를 보였고, 두 종의 음향 산란강도 차이 및 크릴 분류 기법을 사용하여 38 kHz는 -80 dB, 120 kHz는 -65 dB 이하에 신호에 대해서만 음향 밀도 추정시 활용하였다(Fig. 3.2.12).

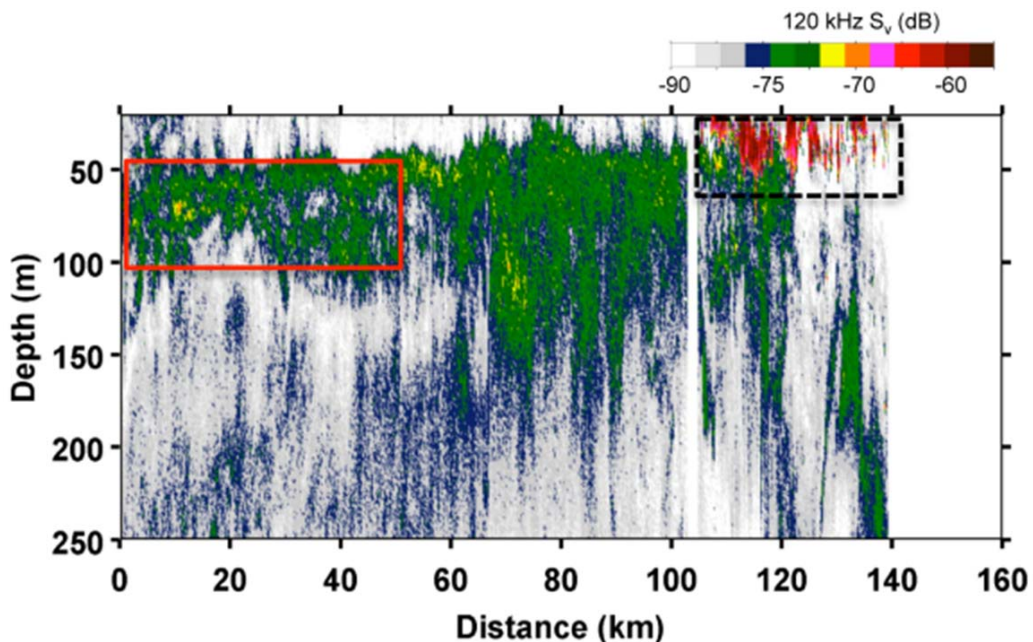


Fig. 3.2.11. Acoustic signals of Antarctic krill (box with dashed line) and ice krill (boxed solid line) identified in the acoustic transect.

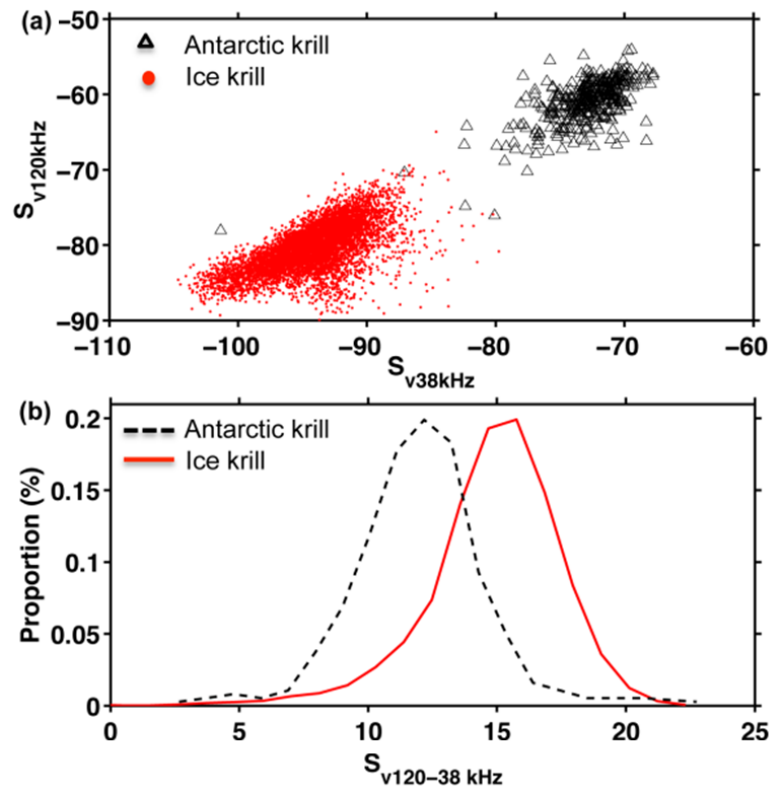


Fig. 3.2.12. Scatter plots of the volume backscattering strengths (S_v) at 120 and 38 kHz attributed to Antarctic krill (triangles) and ice krill (dots) (b). Differences in the volume backscattering strengths (S_v) attributed to Antarctic krill (solid line) and ice krill (dashed line) at 120 and 38 kHz (c).

Table 3.2.2 Mean (standard deviation) densities of ice krill (g/m^2) determined using the SDWBA target strength model. Transect densities (pack-ice boundary (PB), ice-shelf (IS) and polynyacentre (PC) from each year are estimated from 120 kHz S_v using multi frequency analysis methods

Transect name	Year	Range (n·mile)	Ice krill density (g m^{-2})	
			Mean (SD)	Median (SE)
PB	2011	68	12.8 (4.8)	11.8 (0.2)
	2012	445	30.9 (13.4)	32.4 (0.9)
PC	2012	76	13.1 (4.1)	12.8 (0.2)
IS	2011	87	13.4 (7.3)	12.5 (0.2)
	2012	51	19.0 (14.4)	17.9 (0.5)

본 연구를 통한 검증된 아이스 크릴에 대한 SDWBA 모델 결과와 기존의 남극 크릴을 이용하여 아문젠 폴리나 음향 정선의 음향 밀도를 추정하였다. 아이스크릴 평균 밀도 추정 결과 2011년은 13.2 g/m^2 (SD = 0.4), 2012년은 13.2 g/m^2 (SD = 23.6)로 추정되었다. 음향 정선 간의 평균값과 중앙값 크릴 밀도는 유사하였다 (Table. 3.2.2). 최대 밀도(30.9 g/m^2)는 2012년 PB 해역으로 2011년에 비해서 2배 이상 추정되었다. IS 해역에서의 음향 밀도는 2년간의 조사 결과 유사하게 측정되었다(2011년 13.4 g/m^2 , 2012년 19.0 g/m^2).

아문젠해 폴리나에 서식하는 아이스 크릴의 밀도 변화와 생태학적인 특성을 이해하기 위해서는 지속적인 관측이 필요하다. 또한 아이스 크릴의 분포 밀도의 정확한 산출을 위해서는 음향 특성 파악이 중요한 역할을 한다.

아이스 크릴의 수직 및 공간적인 분포를 환경자료와 비교한 결과, 수온과의 연관성을 보였다. 비교 분석을 아이스크릴의 밀도와 평균수온과의 상관성 분석 (Spearman rank correlation)을 실시하였다(Fig. 3.2.13). 정점 별 ice krill의 밀도와 및 평균 수온 (0~250 m) 과의 상관 결정계수 (coefficient of determination, r^2)는 각각 0.55와 0.77 이다. 본 결과를 통해서 ice krill의 밀도와 아문젠 해역의 AASW에 의한 수온 분포와의 상관성($P < 0.05$)을 보였고, 상대적으로 낮은 수온 조건에서 ice krill의 밀도가 크게 나타나는 경향을 보였다.

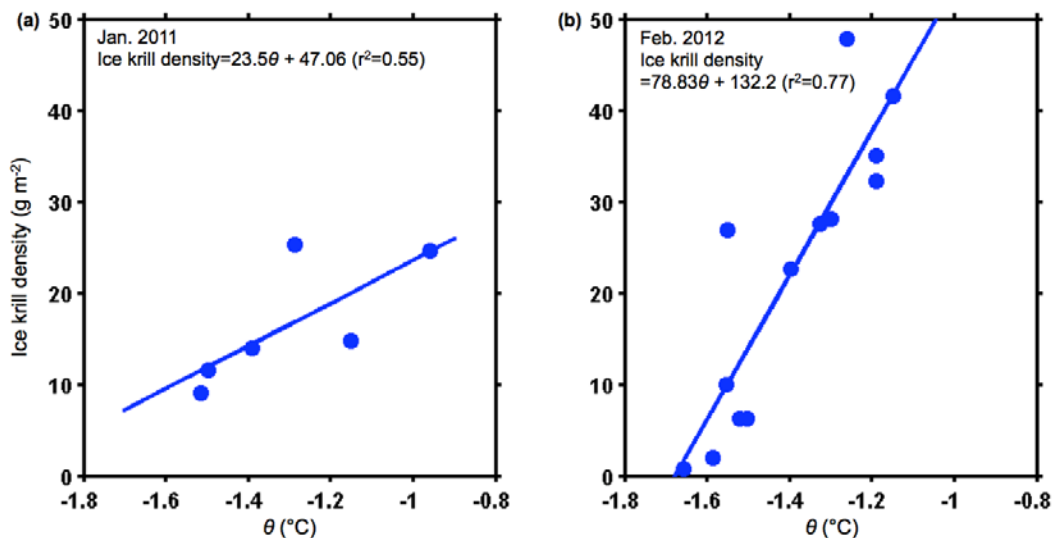


Fig. 3.2.13 Ice krill density in relation to mean potential temperature for each CTD station within the in PB and IS during January 2011 (a) and February 2012 (b). The mean potential temperature was depth-averaged from the surface to 250 m depth.

제 3 절 하위생태계 먹이망 특성

1. 서론

남극 해역은 상위포식자(e.g. 오징어, 어류, 고래)와 그들의 먹이 생물인 초식성 부유생물(e.g. 크릴, 요각류)과 기초 생산자인 식물플랑크톤으로 구성되어 있는 비교적 단순한 생태계 구조로 이루어져있다(Quetin and Ross, 1991; Loeb et al., 1997). 또한 유빙의 계절 및 연간 변동이 광합성에 의한 기초생산자의 생산력에 영향을 미치면서 불안정한 해양생태계로 유지된다. 따라서 남극 해역에 대한 연구가 미래 극지 생태계의 관리 및 변동을 예측하는데 활용될 수 있기 때문에 중요한 연구 분야로 관심 받고 있으나, 접근성과 극한환경 때문에 연구가 매우 제한적이다. 특히, 본 연구 지역인 남극 아문젠해(Amundsen Sea)는 다른 남극 해역에 비해 상대적으로 기초 생산력이 높아 과학적 관심을 받아왔지만, 겨울은 물론이거니와 여름에도 대부분의 해역이 두꺼운 유빙으로 덮여 있어서 내만으로의 접근이 매우 어려워 아직까지 연구가 매우 미흡한 실정이다(Arrigo and van Dijken 2003, Alderkam et al. 2012, Arrigo et al. 2012).

남극 해역에 서식하는 동물플랑크톤 중, 남극 크릴(Antarctic krill)이라 불리는 *Euphausia* sp. (주로 *Euphausia superba*)는 조류, 어류, 해양포유류 등 다양한 상위 포식자들의 주요 먹이원으로 남극 생태계 먹이망에서 기초생산자와 상위포식자를 연결해 주는 중추적인 역할을 하고 있다(El-Sayed 1985). 특히, 남극에서 해양 포유류가 섭취하는 남극 크릴의 양은 연간 전 세계 어획량의 3배 이상과 맞먹는 것으로 추정된다(Gulland, 1970; Laws, 1977; Anon, 1986). 이렇게 남극 해양생태계 먹이망에서 하위 영양단계와 상위 영양단계를 연결해주는 *Euphausia* sp.는 다양한 기작으로 월동하며, 특히 대부분의 크릴 유생들은 결빙 해역에서 생존을 위해 폴리나 부근이나 유빙의 가장자리에 주로 서식하는 것으로 알려져 있다. 최근 남극 해양생태계 내에서 이들의 매개체 역할이 알려지면서 남극에서 그들의 생리/생태를 이해하기 위한 연구가 활발히 진행되고 있다. 특히 물리적으로 가장 빠른 변화를 보이는 남극 아문젠해의 생태계 변동을 이해하기 위해서는 먹이망 내에서 에너지 흐름의 중추적인 역할을 하는 남극 크릴의 섭식 생태의 이해가 필수적이다(Walker et al. 2007).

현재까지 동물플랑크톤의 먹이 생태를 이해하기 위하여 위 내용물(gut content)과 섭식 실험 등 다양한 방법들이 활용되고 있다. 위 내용물 분석을 통해 크릴이 채집

되기 직전에 섭취한 먹이의 형태 및 종류를 육안으로 직접 확인할 수 있다. 하지만 이미 섭취한 먹이가 소화되었거나 한동안 섭식활동이 없어 위가 비어 있을 경우에는 섭취한 먹이를 위 내용물 분석으로는 전혀 확인할 수 없다. 또한 일부 먹이의 경우 그 종류에 따라 소화가 느리거나 쉽게 소화되지 않아서 장기간 위에 남아있게 되고 이런 경우에 위 내용물 분석은 전체 섭취한 먹이를 대표하기 보다는 소화가 어려운 먹이만을 선택적으로 확인하게 되므로 섭취한 먹이에 대한 대표성이 매우 결여될 수 있다. 따라서 최근에는 다양한 생화학적 방법(지방산 먹이 추적자, 안정동위원소 비)을 활용하여 생물들의 영양단계, 섭취한 먹이, 에너지 흐름 등을 파악하고 있다. 대표적으로 지방은 모든 생물에 있어서 필수적인 구성요소로써, 동물플랑크톤이 저장한 지방은 먹이 공급이 낮은 시기에 에너지원으로 이용되며, 포식, 생식, 이동 등에 필요한 에너지를 공급한다. 주요 지방 class에는 세포막을 구성하는 인지질(phospholipid), 에너지원으로 사용되는 트리아실글리세롤(triacylglycerol)과 왁스 에스테르(wax ester), 그리고 기타 콜레스테롤(cholesterol)과 다이아실글리세롤 에테르(diacylglycerol ether) 등이 있다. 남극 크릴 중, *E. superba*는 트리아실글리세롤을, *E. crystallorophias*는 왁스 에스테르를 주 에너지원으로 사용하는 것으로 보고되고 있다(Hagen et al., 1996; Phleger et al., 2002; Ju et al., 2004). 지방을 구성하는 지방산이나 스테롤 중에서 특정 성분들(긴 사슬 불포화 지방산 등)은 먹이를 통해서만 획득될 수 있기 때문에 생태계 내에서의 먹이 관계를 이해하는 추적자로도 많이 활용되고 있다(Bottino, 1974; Virtue et al., 1993; Cripps et al., 1999; Cripps and Atkinson, 2000). 이와 같이 지방은 에너지 저장원으로써 생물체의 성장, 번식 등 생존과 밀접한 관계를 가지고 있기 때문에, 지방의 함량 및 구성을 비교·분석하여 해양 생물의 생존전략(월동, 먹이 생태) 및 생활사(성숙, 산란)를 이해할 수 있다(Sargent et al., 1989; Lee et al., 2006; Budge et al., 2008). 그밖에 탄소 및 질소 안정동위원소 분석은 먹이망 내에서 탄소의 기원과 영양단계를 파악하는데 활용된다. 특히 포식자와 먹이생물 간에 상대적으로 3-4‰의 질소 안정동위원소 비 차이를 보이기 때문에 해양생태계 먹이망에서 상위-하위 영양단계를 파악할 수 있다(Søreide et al., 2006). 그러므로 본 연구에서는 남극 결빙 해역에서 상위포식자의 주요 먹이원인 *Euphausia* sp.(*E. superba*, *E. crystallorophias*)를 포함한 주요 동물플랑크톤(*Calanus acutus*)의 지방, 안정동위원소 분석을 동시 수행하여, 상호 보완적인 해석을 통해 그들의 먹이생태와 생태계 내에서의 영양단계를 이해하고자 하였다.

2. 재료 및 방법

가. 시료채집 및 준비

동물플랑크톤(*Euphausia* sp., *Calanus* sp.)은 남극 아문젠 해역의 만(bay) 주변(Fig. 3.3.1)에서 남극 하계에 봉고네트(333, 505 μ m)를 이용하여 채집되었다. 각 정점에서 총 2회 반복 채집되었으며, 네트는 수심 200m까지 약 20분 정도 수직 인양되었다. 채집한 동물플랑크톤은 테프론 처리된 뚜껑의 유리 용기에 넣었으며, 실험실로 옮기기 전까지 냉동(-20 $^{\circ}$ C)보관되었다. 또한 동물플랑크톤의 먹이원으로 추정되는 입자유기물(대부분 식물플랑크톤)은 잔존 유기물 제거를 위해 전처리된 GF/F 필터(diameter: 47mm, pore size:0.45 μ m)에 해수를 여과하여 채집한 후, 은박지에 싸서 페트리디쉬에 넣어 냉동(-20 $^{\circ}$ C)보관하였다. 모든 시료(크릴, 동물플랑크톤, 입자유기물)는 실험실로 옮겨와 분석 전까지 초저온 냉동고(-80 $^{\circ}$ C)에 보관하였다. 동물플랑크톤 시료는 생화학적 분석 전에 해동시킨 후, 현미경으로 종 별로 분류하였으며, 이와 더불어 남극 크릴의 경우에는 총 길이(total length), 체장(body length), 습중량(wet weight) 등을 추가적으로 측정하였다.

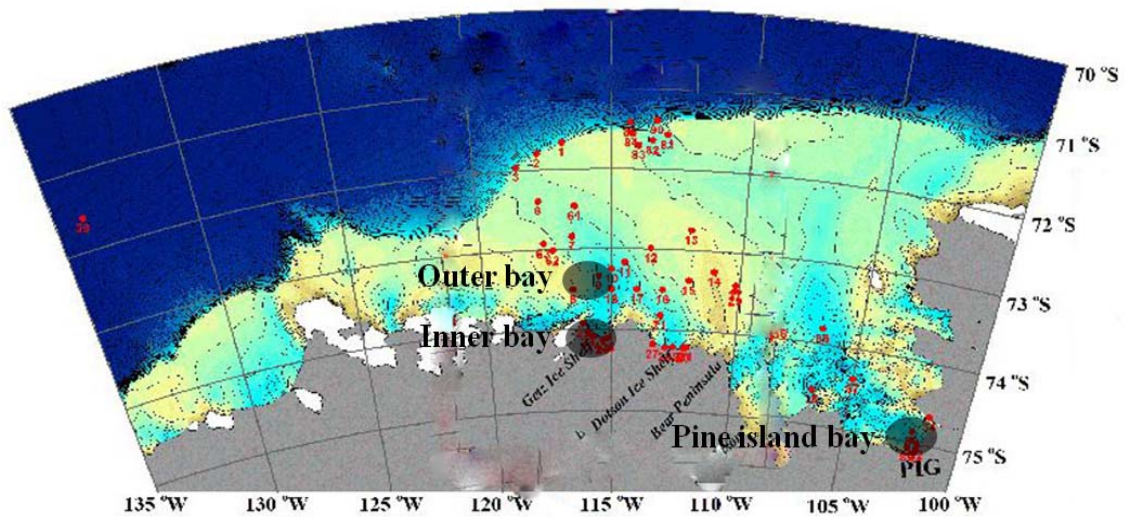


Fig. 3.3.1. Areas where krill *Euphausia crystallorophias* were sampled (dark grey circle) in January-February 2012.

나. 지방 추출 및 분석

지방분석 시에 모든 실험용기는 유리재질을 사용하였으며, 이 용기들은 사용 전에 혼합 유기용매[Dichloromethane: Methanol(CH_2Cl_2 :MeOH)=1:1]로 2-3번 세척한

후 사용되었다. 동물플랑크톤 시료를 용기에 넣고, 혼합 유기용매 ($\text{CH}_2\text{Cl}_2:\text{MeOH}=1:1$)로 지방을 추출하였다(Bligh and Dyer 1959). 이렇게 추출된 지방 추출액의 유기용매를 질소가스로 완전히 제거한 후, 혼합 유기용매 ($\text{CH}_2\text{Cl}_2:\text{MeOH}=2:1$)에 다시 용해시켜 지방 class와 지방산 분석에 사용하였다. 추출된 지방 중 1.5-2 μl 을 chromarod (Mitsubishi Kagaku Iatron)에 떨어뜨린 후, 혼합 유기용매($\text{CH}_2\text{Cl}_2:\text{MeOH}=1:1$)로 농축(focusing)하여 비극성 유기용매(Hexane:Diethyl ether:Formic acid=85:15:0.2)로 지방 class를 분리, 분석하였다. 주요 지방 class는 Iatroscan Mark-V TLC-FID(Thin-Layer Chromatography with Flame-Ionization Detector; IATROM LABORATORIES, INC.)로 정성/정량 분석되었다(Ju et al. 1997). 각 지방 class는 상업적으로 이용되는 표준 물질(phospholipid: 1,2-Dipalmitoyl-rac-glycero-3-phosphocholine hydrate; cholestero: cholesterol; free fatty acid: n-Nonadecanoic acid; triacylglycerol: Glyceryl trioleate; Sigma-Aldrich Co.)을 기준으로 정성·정량화되었으며, 총 지방 함량은 정량화된 주요 지방 class의 합으로부터 산출되었다.

다. 지방산 분석

지방 추출액 중 적정량(약 200 μl)을 새로운 시험관에 옮겨 담아 0.5N KOH/MeOH를 넣고, 30분간 70 $^{\circ}\text{C}$ 로 가열한 후, 3회에 걸쳐 혼합 유기용매 (Hexane:Diethyl ether=9:1)로 중성지방(알코올 및 스테롤)을 분리 및 추출하였다. 중성지방이 추출되고 남은 용액에 염산을 첨가하여 KOH를 침전시킨 후, 혼합 유기용매(Hexane:Diethyl ether=9:1)를 이용하여 지방산을 추출하였다. 추출된 지방산을 BF_3 (Boron trifluoride methanol solution)/MeOH로 에스테르화하여 지방산 메틸 에스테르(fatty acid methyl ester)로 유도하였고, 이를 GC-FID로 분리/분석하였다. 표준 물질(internal standard; 19:0)을 기준으로 각 지방산을 정량화하였으며, 각 지방산의 합으로 총 지방산 함량을 산출하였다. 지방산 중 불포화 지방산의 이중결합(double bond) 위치는 GC-MSD(GC-Mass Spectrum)를 이용하여 확인되었다.

라. 안정동위원소 분석

탄소 안정동위원소 측정을 위해 시료에서 지방을 추출하고 1N 염산을 이용하여 데시케이터 안에서 24시간동안 증기처리하여 무기태 탄소를 제거한 후, 증류수를 이용하여 염산을 제거하고 동결건조하였다. 그러나 지방 추출 및 염산 처리 과정이 질소 안정동위원소 측정 결과에 영향을 미치는 것으로 보고되었기 때문에, 본 연구에서는 질소 안정동위원소 측정 시료에서 이러한 과정을 생략하였다(Bunn et al.

1995). 탄소, 질소 안정동위원소 비는 원소(Euro EA 3000-D, Italy)-질량 분석기 (Isoprime; GV Instrument, U.K.)를 이용하여 분석되었다. 탄소는 VPDB(Vienna PeeDee Belemnite), 질소는 대기중 N₂를 표준 물질로 사용하였으며, 탄소, 질소 안정동위원소 비는

$$\delta X = \{(R_{\text{sample}} - R_{\text{std}}) / R_{\text{std}}\} \times 1000 (\text{‰})$$

$$X = {}^{13}\text{C} \text{ or } {}^{15}\text{N}, R = {}^{13}\text{C}/{}^{12}\text{C} \text{ or } {}^{15}\text{N}/{}^{14}\text{N}$$

과 같은 계산식을 이용하여 계산되었다.

3. 결과 및 고찰

가. 해역별 크릴과 요각류의 지방 함량 및 class 구성 변화

남극 아문젠해에서 주요 동물플랑크톤의 섭식생태 및 생존 방법을 이해하고자, 2011-12년 하계 기간(1-2월)동안 남극 크릴 및 요각류를 채집하였다. 각 조사 해역에서 채집된 남극 크릴의 종 구성을 살펴보니, 가장 바깥쪽에 위치한 외해(open sea)에서는 *Euphausia superba*가 가장 우점하였으며, 이를 제외한 해역(대륙붕, 폴리냐, Pine island bay(PIB))에서는 *E. crystallorophias*가 우점하였다. 각 해역에서 우점하는 남극 크릴의 지방 함량 및 class 구성을 분석·비교해보니, 폴리냐와 PIB에서 채집한 크릴의 지방 함량이 건중량의 약 17-18%로 가장 높았으나, 대륙사면에서 채집된 크릴의 지방 함량이 건중량의 약 9%로 가장 낮게 나타났다(Fig. 3.3.2). 따라서 아문젠해에서 남극 크릴의 지방 함량은 채집된 지역에 따른 차이를 보이는 것으로 확인되었다. 그러나 각 지역마다 우점종이 다르기 때문에, 이러한 지역별 지방 함량의 차이가 우점종의 차이로부터 기인한 것으로 여겨지며, 남극 크릴의 지방 class 구성에서도 우점종에 따라 뚜렷한 차이가 나타났다. 대륙사면, 폴리냐, 그리고 PIB에서 우점한 *E. crystallorophias*의 지방은 주로 인지질(phospholipid)과 왁스 에스테르(wax ester)로 구성되었으며, 미량의 콜레스테롤(cholesterol)이 함유되어 있었다. 그러나 외해에서 주로 채집된 *E. superba*는 인지질과 트리아실글리세롤(triacylglycerol)이 가장 우점하게 검출되었다. 따라서 각 지역에 따라 물리·환경 조건(수온, 주요 먹이원 등)이 다르기 때문에 출현하는 우점종과 이들의 지방 함량 및 구성 성분이 다른 것으로 추정된다.

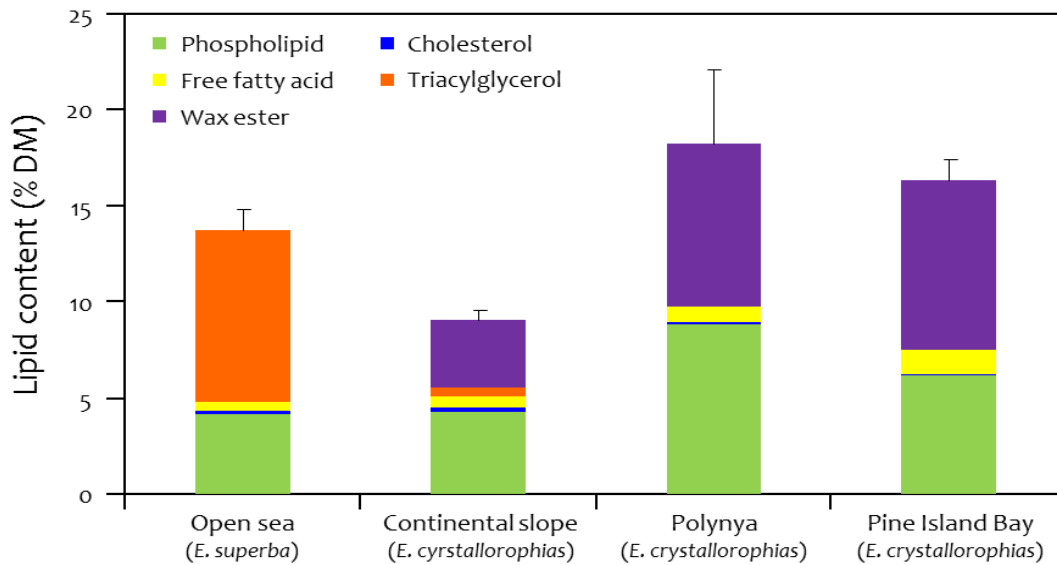


Fig. 3.3.2. Total lipid content and lipid class composition of krill (*E. superba* and *E. crystallorophias*) collected from Amundsen Sea in 2011-12.

2011년 남극 아문젠 해역의 외해에서 채집된 크릴 *E. superba*의 지방 함량은 기존에 연구된 남극 타해역에 서식하는 동일종의 지방 함량과 함량의 계절적 변동성과 잘 일치하는 것으로 나타났다. 아문젠 해에서의 채집 지역에 따른 우점종의 차이로 인해 2012년에는 *E. superba*가 채집되지 않았으나, 이와 달리 2011-12년에 채집된 *E. crystallorophias*의 지방 함량은 2011년보다 2012년에 높게 나타났다. 이러한 *E. crystallorophias*의 지방 함량 차이는 채집시기(2011년: 2010.12~2011.1; 2012년:2012.01~2012.02)의 차이에 따른 먹이생물(식물플랑크톤)의 농도와 지방의 축적 정도차이에 따른 것으로 사료된다. 특히 여름동안 지속적인 섭식활동을 통하여 여름이 끝나가는 시기(2월경)에는 여름(12-1월)보다 더 많은 지방을 체내에 축적하고 있기 때문이다(Fig.3.3.3). 이는 *E. superba*와 마찬가지로, 이미 남극 해역 내에서 밝혀진 *E. crystallorophias*의 계절적 지방 함량 변동성과 일치하는 것으로 나타났다 (Fig. 3.3.3).

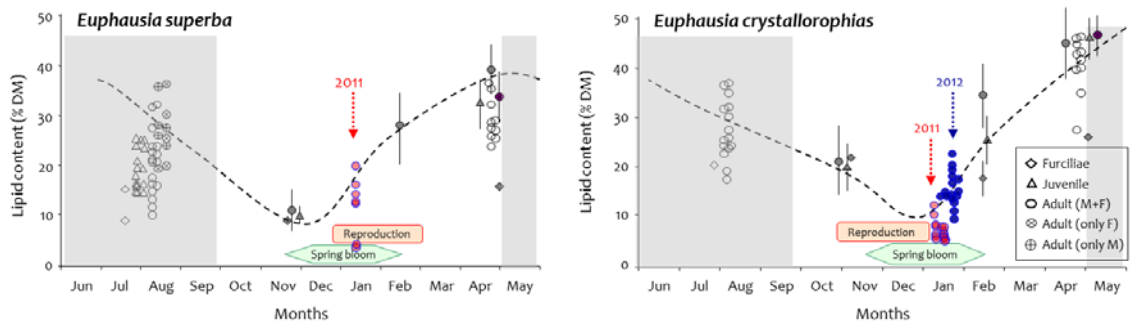


Fig. 3.3.3. Seasonal and annual variation of total lipid contents (% of dry mass, DM) with different life stages. Red and blue colored symbols indicate the lipid content of *E. superba* (left) and *E. crystallorophias* (right) in 2011 and 2012, respectively. Gray shaded areas indicate the winter season.

2011년 남극 아문젠 해역의 외해와 폴리냐 해역에서 채집한 요각류 *Calanoides acutus*의 지방 함량 및 class 구성 성분을 살펴보니, 외해의 *C. acutus*(건중량의 약 29%)보다 폴리냐(건중량의 약 44%)에서 더 높은 지방 함량을 보였다. 해역에 따른 지방 함량뿐만 아니라, 지방 class 구성 성분에서도 외해와 폴리냐 사이에 다르게 나타났다. 폴리냐에서 *C. acutus*의 지방이 인지질과 왁스 에스테르로만 구성된 반면, 외해에서는 다양한 지방으로 구성되어 있었다. 이러한 지역별 지방 함량 및 구성 성분이 차이는 기존에 남극 해역에서 연구된 동일종의 계절별 지방 함량 변동성과도 차이를 보였다(Fig. 3.3.4).

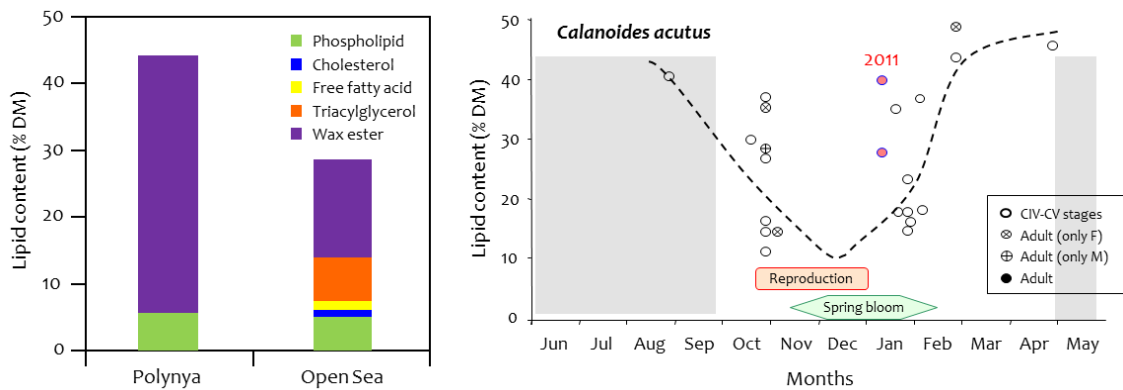


Fig. 3.3.4. Total lipid content and class composition (left) and seasonal variation of total lipid contents (in % of dry mass, DM; right). Red colored symbols indicate the lipid content of *C. acutus* in 2011. Gray shaded areas indicate the winter season.

나. 해역별 남극 크릴의 지방산 구성

남극 크릴 *Euphausia* sp.의 지방 분석 결과와 유사하게, 지방산 구성에서도 해역 뿐만 아니라, 종 간의 차이가 뚜렷하게 나타났다. 외해의 *E. superba*는 포화 지방산 (saturated fatty acid)과 단일 불포화 지방산(monounsaturated fatty acid)을 가장 우점하여 함유하고 있었으며, 박테리아로부터 기원하는 branched 지방산도 미량 검출되었다(Fig. 3.3.5). 그러나 타 해역(대륙사면, 폴리나, PIB)에서 *E. crystallorophias*의 지방산은 단일 불포화 지방산이 총 지방산의 55-60%로 가장 우점하였으며, 포화 지방산은 외해의 *E. superba*에 비해 적은 구성비를 보였다. 이뿐만 아니라, *E. superba*에서는 미량 검출된 branched 지방산이 *E. crystallorophias*에서는 거의 나타나지 않았다. 그러나 시료가 채집된 세 해역 간 *E. crystallorophias*의 지방산 구성을 비교해보면, 대륙사면과 폴리나에서는 이 종의 지방산 구성비는 유사하게 나타났으나, 육지와 인접해있는 PIB에서는 식물플랑크톤으로부터 기원하는 다 불포화 지방산 (polyunsaturated fatty acid)의 구성비가 다른 해역에 비해 낮았으며, branched 지방산은 검출되지 않았다. 남극 아문젠 해역에서는 하계 기간에 식물플랑크톤 *Phaeocystis antarctica* 또는 규조류의 대번성이 일어나는 것으로 알려져 있으며 (Arrigo et al. 2000, Smith et al. 2000), 실제로 현장조사 시에도 식물플랑크톤 *Phaeocystis antarctica*의 대번성이 PIB정점에서 관찰되었다. 일부 해역에서 나타나는 대번성으로 인해 이들의 먹이원이 서식 해역에 따라 차이를 보이는 것으로 사료된다.

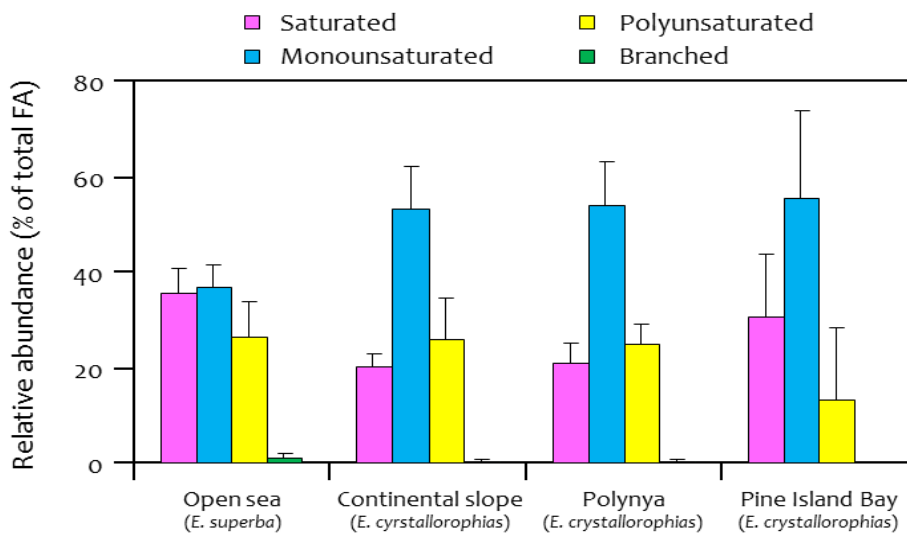


Fig. 3.3.5. Relative abundance (%) of grouped fatty acids in *E. superba* and *E. crystallorophias* from Amundsen Sea, 2011-12.

다. 크릴의 탄소·질소 안정동위원소 비의 시공간적 변화

남극 아문젠 해역에 서식하는 크릴 *E. superba*와 *E. crystallophias*의 탄소($\delta^{13}\text{C}$) 및 질소($\delta^{15}\text{N}$) 안정동위원소 비는 지역과 크릴 종에 따라 다르게 나타났다. 외해에서 우점하게 나타난 *E. superba*의 $\delta^{13}\text{C}$ 와 $\delta^{15}\text{N}$ 는 $-24.33\pm 2.45\text{‰}$ 과 $5.08\pm 1.04\text{‰}$ 이며, 대륙사면과 폴리냐 그리고 PIB에서 채집된 *E. crystallophias*의 $\delta^{13}\text{C}$ 는 각각 $-23.12\pm 0.51\text{‰}$, $-25.31\pm 1.28\text{‰}$, $-24.71\pm 0.42\text{‰}$ 로 나타났다. 그러나 *E. crystallophias*의 $\delta^{15}\text{N}$ 는 채집 지역에 상관없이 세 지역에서 유사한 값을 보였다($7.86\pm 0.39\text{‰}$). 일반적으로 해양생태계 먹이망에서 탄소 및 질소 안정동위원소 비는 탄소의 기원과 영양 단계를 나타내는 지시자로서, 최근 가장 많이 사용되고 있는 생화학적 방법 중 하나이다. 따라서 본 연구에서 분석한 세 지역의 *E. crystallophias*는 비록 서식 해역이 다르지만, 이들의 $\delta^{15}\text{N}$ 을 통해 먹이망 내에서 유사한 영양단계에 위치하고 있음을 지시하고 있다. 반면에 $\delta^{13}\text{C}$ 는 $-24.38\pm 1.13\text{‰}$ 로써, 이들이 비교적 넓은 범위로 분포하지만, 동일한 기원으로부터 유기물을 섭취하지 않았을 것으로 보인다. 그러나 시료 부족으로 인해 크릴을 채집한 각 해역에서 추정 먹이원의 분석이 수행되지 않았으며, 추가적으로 채집 당시 대변성이 일어났던 식물플랑크톤 (*Phaeocystis antarctica* 또는 규조류)의 안정동위원소 비를 분석한다면, 좀 더 정확한 섭식 생태를 파악할 수 있을 것이다.

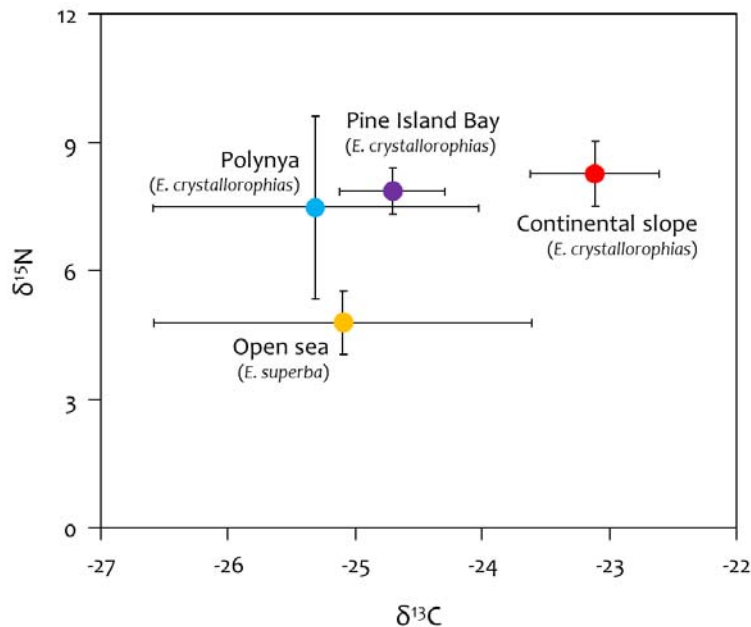


Fig. 30. Carbon and nitrogen stable isotope ratios in *E. superba* and *E. crystallophias* in 2011-2012.

제 4 장 연구개발목표 달성도 및 대외기여도

제 1 절 연구개발 목표 달성도

1. 정성적 달성도

성과목표	세부목표		달성 주요 내용	달성여부	가중치(%)
1. 결빙해역 해빙의 해수 순환 역할 규명	1-1	해류 시계열 관측	- 기존 시계열 자료 분석 (논문 발표) - 아문젠해 세 지점에 이년동안 계류한 해류계 회수 (2014. 1 예정)	완료 자료획득중	15
	1-2	아문젠해 외해역 ACC 관측	- 국제공동 관측 기획 완료 - Udintsev Fracture Zone 실험에 표층 뜰개 투하 계획 (NOAA 30기/년 제공)	완료	10
2. 아문젠해 생기원원소 침강플럭스 규명	2-1	퇴적물트랩 시료 확보	- 아문젠해 세 지점에 2년 동안 계류한 해류계 회수 (2014. 1 예정)	자료획득중	10
	2-2	생기원원소 침강 플럭스 측정	- 유기탄소, 생기원규소 및 탄산칼슘 침강플럭스 계산	완료	15
3. 아문젠해 주요 생물 (크릴/어류)의 음향 특성 파악 및 분류 기법 연구	3-1	아문젠해의 크릴 및 어류의 음향 특성 파악	- 채집된 크릴의 음향 특성 파악 (대형수조) - 음향 자료와 크릴 및 어류의 음향산란 모델과의 비교 및 검증	완료	20
	3-2	음향 특성을 이용, 크릴과 어류의 분류 기법 연구	- 아문젠해에서 획득한 음향자료에 대한 크릴과 어류의 분류 기법 적용 - 생물분류 기법 적용을 통한 아문젠해의 크릴 밀도 파악	완료	10
4. 결빙해역 동물플랑크톤의 섭식 생태 및 역할 규명	4-1	주요 동물플랑크톤 시료 확보	- 확보 완료	완료	5
	4-2	전통적 방법 및 생화학적 방법을 통한 주요 동물플랑크톤의 섭식 생태 이해	- 요각류 <i>Calanus acutus</i> 와 남극 크릴 (<i>Euphausia superba</i> , <i>E. crystallophias</i>)의 지방 함량 분석 및 지역을 구분하여 이들 동물플랑크톤의 지방 함량과 성분을 비교, 분석	완료	15

2. 정량적 성과

(가) 학회/국제회의 발표: 2편

이재학, Time series measurements in the Pacific Ocean, OceanSITES Science Committee meeting, 2013.5.28, 서울.

La, H.S. , H. Lee, D. Kang, H.K. Ha, S. Fielding, E.J. Yang, S.H. Lee, H.C. Shin, High density of ice krill in the Amundsen Sea Coastal Polynya, XIth SCAR biology symposium, 2013.7.15-19, Barcelona, Spain.

(나) 논문(SCI) 발간: 2편

Wählin, A.K., O. Kalén, L. Arneborg, G. Björk, G. Carvajal, H.K. Ha, S.H. Lee, J.H. Lee, C. Stranne, 2013, Variability of warm deep water in a submarine trough on the Amundsen Sea Shelf, Journal of Physical Oceanography, doi:10.1175/JPO-D-12-0157.1.

Kim, B.-K., R. Dunber, and D. Kim, 2013, $\delta^{15}\text{N}$ values of settling biogenic particles in the eastern Bransfield Basin (west Antarctic) and their records for the surface-water condition, Geoscience Journal, DOI 10.1007/s112303-013-0032-0.

제 2 절 대외 기여도

- 우리 나라 최초의 남극해 결빙역인 아문젠해 탐사로 극지 해양 연구 영역 확대로 해양과학적 기여와 대국민 자긍심에 기여
- 국제적으로도 아문젠해 조사 연구는 이제 시작 단계인바 현장 조사 자료는 국제적 활용 예상
- 쇄빙연구선 아라온호 활용에 대한 노하우 축적
- 아문젠해 크릴 분포 특성에 의한 생태계 구조 파악과 유용 생물자원 개발에 활용

제 5 장 연구개발결과의 활용계획

1. 학술적 활용

- 남극해에서 변화가 가장 급격한 곳의 결빙해역의 해양환경변화의 이해
- 아문젠해 해양 시계열 자료의 국제 학계 제공
- 남극 아문젠해에서 "Biological pump"에 의해 대기에서 해양으로 유입되는 이산화탄소 양 추정에 활용
- 남극해의 기후조절능력 평가에 활용
- 남극 아문젠 해역의 시·공간적인 동물플랑크톤의 분포 특성과 생물량 파악에 따른 남극 연안 생태계 자료 구축 및 해석 능력 확보
- 남극해 해빙 인접 지역에서의 동물플랑크톤 관측을 통한 유빙 하부의 크릴 밀도가 남극해 외해에 미치는 영향 파악

2. 경제적 활용

- 향후 남극해 해양생물 자원 개발을 위한 남극해 크릴 자료 구축
- 극지 해양생태계에서 동물플랑크톤을 포함한 하위 먹이망 및 생태계 구조를 이해하여, 향후 극지해역의 생물 자원량 변동 추정 및 관리 지표로 사용 가능

제 6 장 참고문헌

- Anon, 1986, Yearbook of fishery statistics 1984. Catches and landings, vol 58. FAO, Rome, 451 pp.
- Alderkamp A.C., M.M. Mills, G.L. van Dijken, P. Laan and others, 2012, Iron from melting glaciers fuels phytoplankton blooms in the Amundsen Sea (Southern Ocean): phytoplankton characteristics and productivity. *Deep-Sea Res II* 71-76:32-48.
- Arrigo K.R., G.L. van Dijken, 2003, Phytoplankton dynamics within 37 Antarctic coastal polynya systems. *J Geophys Res C* 108:3271.
- Arrigo K.R., G.R. DiTullio, R.B. Dunbar, D.H. Robinson, M. Van-Woert, D.L. Worthen, and M.P. Lizotte, 2000, Phytoplankton taxonomic variability in nutrient utilization and primary production in the Ross Sea. *J Geophys Res* 105(C4):8827-8846.
- Arrigo K.R., K. Lowry, and G. van Dijken, 2012, Annual changes in sea ice and phytoplankton in polynyas of the Amundsen Sea, Antarctica. *Deep-Sea Res II* 71-76:5-15.
- Bakker, DCE., HJW de Baar, and UV Bathmann. 1997. Changes of carbon dioxide in surface waters during spring in the Southern Ocean. *Deep-Sea Res. II*, 44, 91-127.
- BioSonics. 2005. X-Series Echosounder and Visual Acquisition 5.0 User Guide. BioSonics Inc., Seattle, USA.
- Bottino N.R., 1974, The fatty acids of Antarctic phytoplankton and euphausiids. Fatty acid exchange among trophic levels of the Ross Sea. *Mar Biol* 27:197-204.
- Brierley, A.S., Watkins, J.L., Goss, C., Wilkinson, M.T. and Everson, I. 1999. Acoustic estimates of krill density at South Georgia, 1981 to 1998. *CCAMLR Science*, 6, 47-57.
- Budge S.M., A.M. Springer, S.J. Iverson, G. Sheffield, and C. Rosa, 2008, Blubber fatty acid composition of bowhead whales, *Balaena mysticetus*: Implication for diet assessment and ecosystem monitoring. *J Exp Mar Biol Ecol* 359:40-46.
- Bunn S.E., N.R. Loneragan, and M.A. Kempster, 1995, Effects of acid washing samples on stable isotope ratios of C and N in penaeid shrimps and seagrass: implications for food web studies using stable isotopes. *Limnology and Oceanography* 40:622-625.
- Collier R., J. Dymond, S. Honjo, S. Manganini, R. Francois, and R. Dunbar. 2000. The vertical flux of biogenic and lithogenic material in the Ross Sea: moored sediment

- trap observation 1996-1998. *Deep-Sea Res.*, II 47, 3491-3520.
- Conti, S.G. and Demer, D.A. 2006. Improved parameterization of the SDWBA for estimating krill target strength. *ICES Journal of Marine Science: Journal du Conseil*, 63(5), 928-935.
- Cripps G.C. and A. Atkinson, 2000, Fatty acid composition as an indicator of carnivory in Antarctic krill, *Euphausia superba*. *Canadian J Fish Aqua Sci* 57:31-37.
- Cripps G.C., J.L. Watkins, J. Hill, and A. Atkinson, 1999, Fatty acid content of Antarctic krill, *Euphausia superba*, at South Georgia related to regional populations and variations in diet. *Mar Ecol Prog Ser* 181:177-188.
- El-Sayed S.Z., 1985, Plankton of the Antarctic Seas. In L Bonner W.N., Walton D.W.H. (eds) *Key environments-Antarctica*. Pergamon Press, Oxford, p 135-155.
- Foote, K.G., 1990. Target strengths of Antarctic krill (*Euphausia superba*) at 38 and 120 kHz. *J. Acoust. Soc. Am.* 87(1): 16-24.
- Fisher, G., D. Futterer, R. Gersonde, S. Honjo, D.R. Osterman, and G. Wefer. 1988. Seasonal variability of particle flux in the Weddell Sea and its relation to ice cover. *Nature*, 335, 426-428.
- Fisher, G., V. Ratmeyer, and G. Wefer. 2000. Organic carbon fluxes in the Atlantic and the Southern Ocean: relationship to primary production compiled from satellite radiometer data. *Deep-Sea Res.* II, 47, 1961-1997.
- Greene, C.H., Stanton, T.K., Wiebe, P.H. and McCiatchie, S.A.M. 1991. Acoustic estimates of Antarctic krill. *Nature*, 349(6305), 110-110.
- Gulland J.A., 1970, The development of the resources of the Antarctic seas. In: Holdgate MW (ed) *Antarctic ecology*, vol 1. Academic Press, London New York, pp 217-223.
- Hagen W., E.S. Van Vleet, and G. Kattner, 1996, Seasonal lipid storage as overwintering strategy of Antarctic krill. *Mar Ecol Prog Ser* 134:85-89.
- Ju S.J. and H.R. Harvey, 2004, Lipids as markers of nutritional condition and diet in the Antarctic krill *Euphausia superba* and *Euphausia crystallorophias* during austral winter. *Deep-Sea Res* II 51:2199-2214.
- Ju S.J., J.R. Kucklick, T. Kozlova, and H.R. Harvey, 1997, Lipid accumulation and fatty acid composition during maturation of three pelagic fish species in Kake Vaikal. *Journal of Great Lake Research* 23(3):241-253.
- Kim, D., D.-Y. Kim, Y.-J. Kim, Y.-C. Kang, and J. Shim. 2004. Downward fluxes of

- biogenic material in Bransfield Strait, Antarctica. *Antarctic Sci.*, 16, 227-237.
- Laws R.M., 1977, Seals and whales of the Southern Ocean. *Philos Trans R Soc London, Ser B* 279:81-96.
- Lee R.F., W. Hagen, and G Kattner., 2006, Lipid storage in marine zooplankton. *Mar Ecol Prog Ser* 307:273-306.
- Loeb V., V. Siegel, O. Holm-Hansen, R. Hewitt, W. Fraser, W. Trivelpiece, and Trivelpiece S., 1997, Effects of sea-ice extent and krill or salp dominance on the Antarctic food web. *Nature* 387:897-900.
- Madureira, L.S.P., Everson, I. and Murphy, E.J. 1993. Interpretation of acoustic data at two frequencies to discriminate between Antarctic krill (*Euphausia superba* Dana) and other scatterers. *J. Plankton Res.* 15, 787-802.
- Miller, D. and Agnew. D. 2000. Management of krill fisheries in the Southern Ocean. p. 300-337. In: *Krill Biology, Ecology and Fisheries*. ed. by I. Everson. Blackwell Science, London.
- Myriax Pty Ltd. 2008. EchoView Myriax software Pty Ltd, Hobart, Tasmania, Australia.
- Orsi, A.H., 2010, Recycling Bottom Waters. *Nature Geoscience*, 3, 307-309, doi:10.1038/ngeo854.
- Orsi, A.H., T. Whitworth III and W.D. Nowlin, Jr., 1995, On the meridional extent and fronts of the Antarctic Circumpolar Current, *Deep-Sea Res. I*, 42, 641-673.
- Pakhomov, E.A., Perissinotto, R. and Froneman, P.W. 1998. Abundance and trophodynamics of *Euphausia crystallorophias* in the shelf region of the Lazarev Sea during austral spring and summer. *Journal of Marine Systems* 17 (1998) 313-324.
- Palanques, A., E. Isla, P. Puig, J.A. Snaches-Cabeza, and P. Masque, 2002, Annual evolution of downward particle fluxes in the Western Bransfield Strait (Antarctica) during the FRUELA project. *Deep-Sea Res. II*, 49, 903-920.
- Pauly, T., Nicol, S., Higginbottom, I., Hosie, G. and Kitchener. J. 2000. Distribution and abundance of Antarctic krill (*Euphausia superba*) off East Antarctica (80-150°E) during the Austral summer of 1995/1996. *Deep-Sea Res. II*, 47, 2465-2488.
- Phleger C.F., M.M. Nelson, B.D. Mooney, P.D. and Nichols, 2002, Interannual and between species comparison of the lipids, fatty acids and sterols of Antarctic krill from the US AMLR Elephant Island survey area. *Comp Biochem Physiol Part B* 131:733-747.
- Quetin L.B. and R.M. Ross, 1991, Behavioral and physiological characteristics of the

- Antarctic krill, *Euphausia superba*. *Am Zool* 97:67-77.
- Rabouille, C., J.-F. Galliard, P. Treguer, and M.-A. Vincendeau. 1997. Biogenic silica recycling in surficial sediments across the Polar Front of the Southern Ocean (Indian Sector). *Deep-Sea Res. II*, 44, 1151-1176.
- Sala, A., Azzali, M. and Russo, A. 2002. Krill of the Ross Sea: distribution, abundance and demography of *Euphausia superba* and *Euphausia crystallorophias* during the Italian Antarctic Expedition (January-February 2000). *Scientia Marina* 66(2): 123-133.
- Sargent J.R., J. Henderson, and D.R. Tocher, 1989, The lipids, In: Halver JE (ed) *Fish Nutrition*. pp 153-218.
- SC-CAMLR. 2005. Report of the First Meeting of the Subgroup on Acoustic Survey and Analysis Method (SG-ASAM). In: Report of the Twentieth Meeting for the Scientific Committee (SC-CAMLR-XXIV), Annex 6. CCAMLR, Hobart, Australia: 563-585
- Sekma, H., Y.-H. Park, and F. Vivier, 2013, Time-mean flow as the prevailing contribution to the poleward heat flux across the southern flank of the Antarctic Circumpolar Current: A case in the Fawn Trough, Kerguelen Plateau, *J. Phys. Oceanogr*, 43, 583-600.
- Simmonds, E.J. and MacLennan, D.N. 2005. *Fisheries Acoustics*, Second Edition. Blackwell Science Ltd, Oxford, UK. 437p.
- Smith W.O., J. Marra, M.R. Hiscock, and R.T. Barber, 2000, The seasonal cycle of phytoplankton biomass and primary productivity in the Ross Sea, Antarctica. *Deep-Sea Res II* 47:3119-3140.
- Søreide J.E., T. Tamelander, H. Hop, K.A. Hobson, and I. Johansen, 2006, Sample preparation effects on stable C and N isotope values: a comparison of methods in Arctic marine food web studies. *Mar Ecol Prog Ser* 328:17-28.
- Virtue P., P.D. Nichols, S. Nicol, A. McMinn, and E.L. Sikes, 1993, The lipid composition of *Euphausia superba* Dana in relation to the nutritional value of *Phaeocystis pouchetii* (Hariot) Lagerheim. *Antarctic Sci* 5:169-177.
- Walker D.P. M.A., Brandon, A. Jenkins, J.T. Allen, J.A. Dowdeswell, and J. Evans, 2007, oceanic heat transport onto the Amundsen Sea shelf through a submarine glacial trough. *Geophysical Research Letters*, 37(L02602), doi: 10.1029/2006GL028154.