

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 연차보고서로 제출합니다.

2013. 1. 18

총괄연구책임자 : 이상훈

위탁연구기관명 : 한국해양과학기술원

위탁연구책임자 : 이재학

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

보고서 초록

과제관리번호	N65250	해당단계 연구기간	2012.1.1- 2012.12.31	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 : 11 명 내부 : 11 명 외부 : 명	해당단계 연구비	정부: 천원 기업: 천원 계: 천원
연구기관명 및 소속부서명	한국해양과학기술원 해양순환·기후연구부		참여기업명		
국제공동연구	상대국명 :		상대국연구기관명 :		
위탁연구	연구기관명 :		연구책임자 :		
요약 (연구결과를 중심으로 개조식 500자 이내)				보고서 면수	52
<ul style="list-style-type: none"> • 아문젠해 입구 해역의 해류 특성 분석 <ul style="list-style-type: none"> - 해저면을 통하여 아문젠해 대륙붕역으로 CDW 유입 - 바람장에 의한 강한 해류 유발 가능 • 생기원원소 침강플럭스의 계절변화 파악 <ul style="list-style-type: none"> - 총질량 플럭스는 4.06~515 mg m² day⁻¹의 범위로 여름에 높았고 겨울에 낮았음 - 유기탄소 플럭스는 1.19~36.8 mgC m² day⁻¹의 범위로 여름에 높았고 겨울에 낮았음 - CaCO₃ 플럭스는 0.26~3.15 mg m² day⁻¹의 범위로 여름에 높았고 겨울에 낮았음 • 생물 음향조사를 통한 크릴 공간분포 특성 및 밀도 추정 <ul style="list-style-type: none"> - 폴리냐 인근 해역 및 유빙 인근해역에서 공간적인 변화에 따른 음향 자료 수집 - 네트 이용한 음향 산란층 내의 생물 채집 - 음향 자료와 채집 자료를 활용한 연구해역 내 크릴 밀도 계산 - 크릴 분포와 환경자료 중 수온과의 연관성 확인 • 결빙해역 해양생태계 먹이망 구조 및 에너지 흐름 이해 <ul style="list-style-type: none"> - 아이스크릴(<i>E. crystallorophias</i>)은 1-2월부터 월동을 위해 지방을 축적하기 시작하며, 이러한 지방 소모/축적 양상은 남극의 타 지역에 서식하는 동일종의 패턴과 일치 - <i>E. crystallorophias</i>와 먹이원(입자유기물)의 지방산 구성은 유사성이 미약하게 나타났으며, 정확한 크릴 먹이원 파악을 위해 추가적인 분석(위내용물, 동위원소비)이 필요 					
색인어 (각 5개 이상)	한글	아문젠해, 폴리냐, 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
- 폴리냐를 중심으로 한 남극해 크릴 분포 특성 파악
- 생화학지시자를 이용한 결빙해역 동물플랑크톤 섭식생태 및 생태계에서의 역할 이해

III. 연구개발의 내용 및 범위

1. 연구 기간

- 2012년 1월 1일 - 2012년 12월 31일

2. 연구 개발의 내용

- 해류 시계열 자료 분석
 - 아문젠해로의 CDW 유입 기작 관련 분석
 - 해류 강도와 바람장과의 연관성 분석
- 퇴적물트랩 시계열 자료를 이용하여 생기원원소 침강플럭스 측정
 - 아문젠해 두 지점에 일년동안 계류한 퇴적물트랩 회수 및 재계류
 - 퇴적물트랩 시료에서 유기탄소와 탄산칼슘 분석
- 음향 자료를 이용한 polynya 및 인접 해역에서의 크릴 분포 특성 파악
- 크릴 분포와 환경 자료와의 상관성 분석
- 생화학적 기법(dietary lipid markers, stable isotope ratios)을 활용한 크릴 및 주요 동물플랑크톤의 생존전략 및 섭식관계 이해

IV. 연구개발결과

1. 해류 및 퇴적물트랩 시계열 자료 분석

- 해류계 및 퇴적물트랩 회수

- 계류지점 K1

- 관측기간: 2010년 12월 31일 - 2012년 3월 2일

- 위치: 72° 24.163'S, 117° 43.341'W

- 계류지점 K2

- 관측 기간: 2011년 1월 1일 - 2012년 2월 12일

- 계류 위치: 73° 16.28'S, 114° 58.23'W

- 해류 특성 분석

- 해저면을 따라 CDW 유입 확인

- 바람장 변화에 따른 아문젠해 유입해류 특성 변화 기작 제시

- 생기원원소 침강플럭스의 계절변화 파악

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

- 유기탄소 플럭스는 $1.19\sim 36.8 \text{ mgC m}^{-2} \text{ day}^{-1}$ 의 범위로 여름에 높았고 겨울에 낮았음.

- CaCO_3 플럭스는 $0.26\sim 3.15 \text{ mg m}^{-2} \text{ day}^{-1}$ 의 범위로 여름에 높았고 겨울에 낮았음.

2. Polynya를 중심으로 한 남극해 크릴 분포 특성 파악

- 생물 음향조사를 통한 크릴 공간분포 특성 및 밀도 추정

- 폴리냐 인근 해역 및 유빙 인근해역에서 공간적인 변화에 따른 음향 자료 수집

- 네트 이용한 음향 산란층 내의 생물 채집

- 음향 자료와 채집 자료를 활용한 연구해역 내 크릴 밀도 계산

- 크릴 분포 특성과 환경자료와의 연관성 파악

- 크릴 분포와 환경자료 중 수온과의 연관성 확인

3. 결빙해역 해양생태계 동물플랑크톤의 생존 전략 및 섭식 생태 이해

- 남극 크릴 *Euphausia crystallorophias*의 해양생태계에서의 역할 이해

- *E. crystallorophias*는 환경조건에 따른 생존전략(월동, 산란)의 일환으로 주로 하계(12-2월)에 지방을 집중적으로 축적하는 것으로 나타났음

- 생화학적 방법을 활용한 남극해 주요 동물플랑크톤의 섭식 생태 파악

- 먹이추적 지방산 분석을 통해 아문젠 해에 서식하는 아이스 크릴(*E. crystallorophias*)은 잡식성인 것으로 추정되며, 특히 pine island bay에서 채집된 아이스 크릴의 경우에는 채집 당시 대번성을 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
- 국내 극지 연구(극지 연안 순환 및 생태계) 수준 제고를 위한 다학제적 연구 개발
- 남극 아문젠해에서 "Biological pump"에 의해 대기에서 해양으로 유입되는 이산화탄소 양 추정
- 아문젠해 크릴 분포 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
- Understanding of spatial-temporal distribution and biomass estimates of Antarctic krill around the Polynya, Amundsen Sea, Antarctic Ocean.
- 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

- 2012. 1. 1-2012. 12. 31

2. Contents of the study

- Analysis of time series current data
 - Related process for CDW input into the Amundsen Sea
 - Relation between current intensity and wind field
- 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 and CaCO₃ at the sinking particles
- Based on the acoustic data, understanding of krill distribution and relationship with environmental parameters, polynya and adjacent regions, Amundsen Sea, Antarctic Ocean.
- Understanding the survival strategy and feeding ecology of dominant zooplankton including

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: 2010. 12. 31 - 2012. 3. 2
Location: 72° 24.163'S, 117° 43.341'W
 - Mooring station K2
Recording period: 2011. 1. 1 - 2012. 2. 12
Location: 73° 16.28'S, 114° 58.23'W
- Analysis of current meter data
 - Verification of the inflow of CDW near the bottom
 - Suggestion of possible mechanism for the relation between the wind field and current intensity
- 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, with high values in summer and low values in winter
 - CaCO₃ fluxes range from 0.26 to 3.15 mg m⁻² day⁻¹, with high values in summer and low values in winter

2. Krill acoustics field

- Hydroacoustic survey to know distribution of ice krill around the coastal polynya during austral summer in 2010/2011 and 2011/2012
 - Understanding spatial distribution around the polynya and adjacent regions
 - Net sampling and analysis in acoustic scattering layer.
 - Estimates of ice krill density using acoustic data and biological data
- Comparison krill acoustic data with biological/environmental data.
 - Relationship between ice krill density and temperature of Antarctic Surface Water

3. Understanding the survival strategy and feeding ecology of zooplankton in marine

ecosystem of Amundsen Sea

- Understanding the role of Antarctic ice krill, *Euphausia crystallorophias*, in marine ecosystem of Amundsen Sea
 - During the austral summer (December-February), *E. crystallorophias* intensively accumulated lipids as an energy storage for overwintering and spawning in the following year.
- Understanding the feeding ecology of Antarctic ice krill, *Euphausia crystallorophias*, through biochemical approaches (dietary lipid markers, stable isotopes)
 - The ice krill (*E. crystallorophias*) from Amundsen 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 Amundsen Sea to the international research community
- 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 Amundsen sea
- Application for understanding ecological function of ice krill and for developing useful biological resources in Amundsen 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 suspended sediment	16
Section 2 Krill acoustic	28
Section 3 Characteristics of low trophic ecosystem	39
Chapter IV Achievements of objectives and contributions to the related area	47
Section 1 Achievements of objectives	47
Section 2 Contributions to the related area	48
Chapter V Application plan of research outputs	49
Chapter VI References	50

목 차

요약문	3
요약문 (영문)	6
목차 (영문)	9
목차	10
제 1 장 서론	11
제 1 절 연구 개발 목표	11
제 2 절 연구 개발 내용	11
제 3 절 추진 전략 및 방법	12
제 2 장 국내외 기술 개발 현황	14
제 3 장 연구 개발 수행 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	39
제 4 장 연구 개발 목표 달성도 및 대외기여도	47
제 1 절 연구 개발 목표 달성도	47
제 2 절 대외기여도	48
제 5 장 연구 개발 결과의 활용계획	49
제 6 장 참고문헌	50

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 폴리냐를 중심으로 한 크릴 분포 특성 파악
- 생화학적 방법을 통한 결빙해역 크릴 및 주요 동물플랑크톤 섭식 생태 및 생태계에
서의 역할 이해

제 2 절 연구 개발 내용

- 결빙해역의 Circumpolar Deep Water (CDW) 분포 조사 및 해류 시계열 자료 확보
 - 아문젠해 결빙해역에서 해수 물성 분포를 조사하여 CDW 분포 특성 파악
 - 아문젠해 결빙해역에서 해류 시계열 자료 확보 및 CDW 대륙붕 유입 특성 분석
- 아문젠해에서 시계열 퇴적물트랩을 이용하여 생기원원소 침강플럭스 측정
 - 아문젠해 두 지점에 일년동안 계류한 퇴적물트랩 회수 및 재계류
 - 퇴적물트랩 시료에서 유기탄소와 CaCO₃ 분석
- 생물 음향 탐지 연구
 - 관측한 음향 자료를 이용한 남극 아문젠해 polynya 및 인접 해역에서의 크릴 분포
특성 파악 및 밀도 추정
 - 아문젠 해역의 크릴 분포와 환경 자료와의 상관성 분석
- 남극 결빙해역 하위생태계에서 동물플랑크톤(*E. crystallorophias*, *Calanus* sp.)의 역할
및 섭식 생태 이해
 - 생화학 지시자를 통한 결빙해역의 크릴 및 주요 동물플랑크톤의 생존 전략 이해
 - 전통적 방법(i.e. gut content analysis)과 생화학적 방법(i.e. lipid biomarker, stable
isotope)의 동시 수행으로 크릴을 포함한 주요 동물플랑크톤의 섭식 생태 이해

Table 1.2.1 대표적 지방 먹이 추적자의 기원과 응용

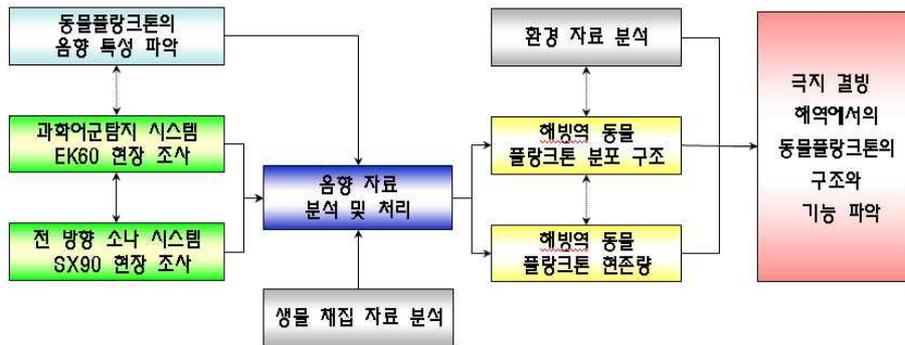
지방 바이오마커	기원	응용
Desmosterol, eicosenoic and docosenoic acids	동물플랑크톤	먹이 관계, 유기물 기원 및 순환
Dinosterol, Docosahexaenoic acid (DHA)	적조류 (dinoflagellates)	먹이 관계, 해양환경, 유기물 기원
Brassicasterol, Eicosapentaenoic acid (EPA)	규조류 (diatom)	먹이 관계, 해양환경, 유기물 기원
Fucosterol	갈조류 (brown algae)	먹이 관계, 해양환경, 유기물 기원
Bacterioplanetrol (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
 - 기후지수의 특성 자료를 활용하여 대기의 변화 특성과 연계 해석
- 기존 외국 자료 및 연구 결과 활용: 연구 대상 해역의 관측 자료가 국제적으로 절대 부족한 상태이기 때문에 영국 BAS와 스웨덴 등 연구팀의 아문제해 결빙해역의 해양 조사 및 연구와 협력
- 쇄빙연구선 음향시스템 (과학어군탐지 시스템, 전 방향 소나 시스템)을 이용한 현장 음향 자료 수집
 - margin of ice shelf (IS) / costal polynya (CP) / pack ice boundary (PB) / pack ice zone (PI) 에서의 공간적인 변화에 따른 음향자료 수집
- 음향자료 획득과 동시에 네트를 활용하여 크릴 채집
 - 채집된 동물플랑크톤의 종조성 분석 및 우점종 길이분포 측정
 - 우점종의 길이 분포를 활용, 음향 자료의 밀도 환산 파라미터 설정
- 음향 자료와 해양환경 관측 자료와의 비교 및 상호 분석

“남극에 에빙(sea-ice) 인접역과 에빙 아부의 동물플랑크톤 관측” 연구 체계



• 생화학적 분석 체계

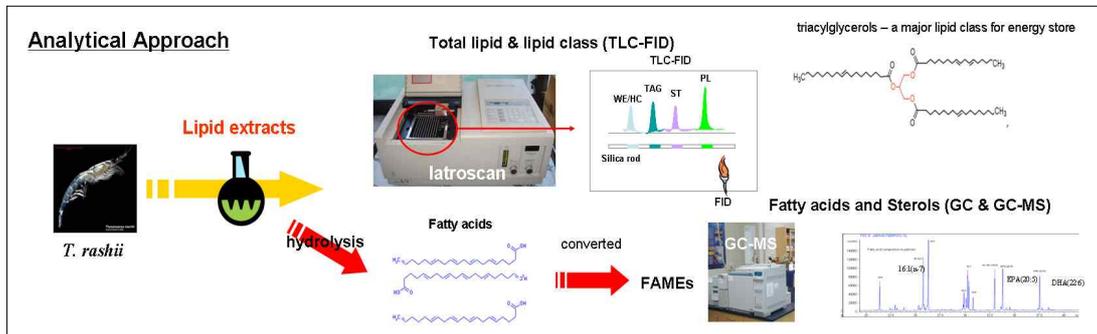


Fig. 1..2.1. Analysis procedure of lipid dietary markers.

2. 목표달성 방법

- 일회적 해역 조사와 정점 시계열 자료의 복합적 해석
- 외국의 선진 연구그룹과 자료 분석 결과의 토의를 통한 자료 해석의 신뢰성을 제고
- 기존 문헌과 관련 연구 자료 및 정보를 통해 각 분야의 조사 방법 정립
- 아문젠해 지역별 크릴의 수직적, 공간적 구조 파악을 위한 자료 해석
- 음향자료와 채집 자료를 통한 연구해역 내 지역별 크릴 밀도 계산
- 음향자료와 채집자료 및 환경자료와의 통합 분석을 통한 크릴의 생태 특성 파악
- 국제 학술발표와 논문화로 연구 결과 검증
- 본 연구와 관련된 참고 문헌과 연구 자료, 정보 획득
- 조사지역에서 생물시료 확보 후, -80℃에서 보관하여 실험실에서 위내용물 분석과 지방 및 안정동위원소 분석을 통해 생존전략, 섭식 생태 및 생태계 구조 파악
- 국내·외 학술발표를 통해 연구결과 발표 및 논문화로 연구결과 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 두 정점에서 2000년부터 2005년까지 6년동안 생기원원소 침강 플럭스의 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 폴리나 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 대륙붕에서 해양 조사를 실시하였고, 이 자료로부터 해빙에 대한 CDW의 영향을 정량적으로 산출되었음.
- 미국에서는 남극반도 대륙붕에서 1992년부터 2007년까지 16년동안 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, 영국 등에 의해 대규모 크릴 조사 음향 조사를 실시하였으며, CCAMLR를 통해 자료 처리 프로토콜 제공 및 자원량 파악
- 최근에는 크릴 자원량 조사 이외에 남극해 유용생물 자원 개발로 확대하여 다양한 음향 조사를 실시중
- 남극 아문젠해의 크릴 음향 조사는 접근의 제한으로 최근에 연구가 실시되고 있음
- 캐나다의 NSERC(Natural Sciences and Engineering Research Council) 연구팀은 2003-2004년에 아문젠해에서 뷰포트해(Beaufort Sea)까지 저서경계층(Benthic boundary layer)에 서식하는 동물플랑크톤의 C:N:P와 지방 구성비를 최초로 보고함.
- 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.

제 3 장 연구개발수행 내용 및 결과

제 1 절 해류 및 부유퇴적물 시계열 조사

1. 조사 개요

가. 해류계 및 퇴적물채집기 회수

2012년 2월 10일부터 3월 11일까지 52개 정점에서 CTD 조사를 하였으며 1차년도 (2010년 12월 31일과 2011년 1월 1일)에 아문젠해 대륙붕 해역 2개 정점에 계류하였던 해류계 및 퇴적물 수집기(sediment trap)의 회수 및 3개 정점에 계류를 실시하였다 (Fig. 3.1.1, Table 3.1.1). 회수와 관련된 구체적인 사항은 2차년도보고서(극지연구소, 2012)에 수록되어 있다.

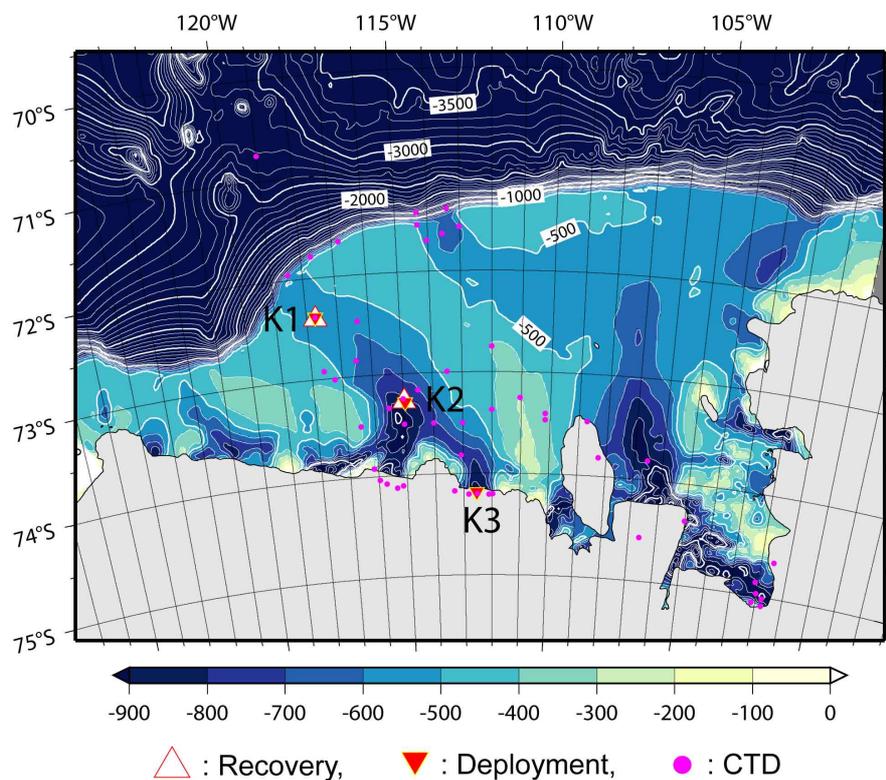


Fig. 3.1.1. Location map of mooring and CTD stations. Background contours are bottom topography.

Table 3.1.1. Location of recovery mooring stations

Station Name	Latitude (S)	Longitude (W)	Depth (m)	Deployment		Recovery	
				Date	Time (UTC)	Date	Time (UTC)
K1	72° 24.163 ′	117° 43.341 ′	530	2010/12/31	12:06	2012/03/02	23:07
K2	73° 16.280 ′	114° 58.230 ′	830	2011/01/01	08:00	2012/02/12	08:55

나. 해류계 및 퇴적물채집기 재계류

아문젠해 외해역으로부터 상대적으로 고온수가 대륙붕 쪽으로 유입된다는 가설 하에 이에 대한 시계열 유속 자료획득을 위한 해류계 계류 지점 2곳 (정점 K1, K2)은 1차년도와 동일한 위치로 설정하였다 (Table 3.1.2). 두 정점 모두 1차년도와 동일하게 계류 구성을 유지하였고 (정점 K2의 200 m 해류계 제외), 정점 K1에서는 300 m 층에 1개, 정점 K2에서는 500-600 m 층에 2개의 수온센서를 추가 설치하였다. 정점 K2의 해류계 수심은 회수된 해류계의 자료 및 CTD 관측 결과를 참고하여 수심 200m 층의 해류계를 700m 층으로 옮겨서 설치하였다. Dotson 빙벽 앞 (수심 1000m)에 새로운 계류 정점을 추가 (jdqja K3), 3대 해류계 (상,중,하층)를 계류하고 상층과 하층의 해류계 밑에 CTD를 설치하였다. 해류계, CTD 및 수온센서는 2년 동안 측정하기 위해 기록 간격을 각각 1시간, 30분 및 30분으로 설정하였다. 모든 정점에 퇴적물채집기를 1개씩 부착하였다. 정점, 계류 환경, 음파분리기, 해류계 및 기타 설치 장비의 정보는 2차년도보고서 (극지연구소, 2012)에 기술되어 있다.

Table 3.1.2. 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. 해류

가. 해류 특성

2차년도보고서(극지연구소, 2012)에 나침반의 원리로 유향을 측정하기 때문에 관측 위치에 따라 진북과 자북의 차이가 있어 유향을 보정한 정점 K1과 K2 해류계 원시자료 및 Scatter diagram을 포함한 예비 분석 결과를 기술한 바 있다. K1, K2 두 정점 관측 수심에서는 상층 250m 층과 하층 400m 층의 흐름 방향이 유사하고, 전반적으로 상층 유속이 하층 보다 강한 특성을 나타낸다. 그러나 두 정점사이에서는 정점 K2의 유속이 정점 K1 보다 강하고 그 변동성도 크게 나타나 대륙붕단 부근의 골과 폴니냐의 골에서 순환특성이 다름을 보여 주었다.

계절 변동성으로 북쪽 정점 (K1)의 해류는 계류 (1월) 후 3월까지 북류가 우세하다가 그 이후에는 북서류가 우세하였으며, 폴리냐 중앙 (K2)의 해류는 계류 (1월, 여름철) 후 3월까지 남동류가 우세하고 10월까지 북류가 우세하다가 12월 (여름철)에는 대륙붕 내부로 유입하는 남동류가 나타났다. 흐름의 방향이 일정한 K1과는 달리 여름철 해빙의 용해로 폴리냐가 형성되는 K2 정점에는 여름철과 겨울철 해류패턴에 변화를 보여주었다. 이는 겨울철 판빙 형성에 의해 바람의 영향을 받지 못했던 대륙붕역에서는 여름철에 바람의 영향으로 해류와 수온에 계절변화가 나타난 것으로 판단된다.

나. 수온 변화

해류계에 장착된 수온센서로 관측된 수온자료 분석 결과 상층 수온은 몇몇 이벤트를 제외하면 두 정점이 비슷하였으나 하층 수온(Fig. 3.1.2)은 북쪽의 정점 K1이 높게 나타났다. 계절별 특성으로 여름철에는 수온이 높게 보이다가 다음해 여름철까지 감소하는 경향이 두 정점에서 동일하게 나타났다. 겨울철에는 상층의 차가운 해수가 두꺼워지거나 대륙붕 바닥으로 따뜻한 해수 유입의 약화 또는 유입층 두께의 감소 경향이 가능함을 보여주었다. 해류자료와 수온자료를 비교하여 보면 여름철에는 대륙붕 안쪽으로 유입하는 남동류와 하층 수온이 상승하는 상관성이 있음을 보여주었다.

CDW 공급된 해수는 유속의 강약에 따라 그 두께가 변화하겠지만 관측점 K1과 K2 사이에서 그 두께의 변화는 크게 다르지 않을 것으로 판단된다. 따라서 관측점 K1과 K2 저층 해류계의 설치가 해저면으로부터 유사하게 근접해 있지 않아 두 자료의 수온 변화를 종관적으로 함께 해석하는데 어려움이 있다. 본 보고서에서는 관측점 K1에서의 수온 변화가 더 의미 있다고 보고 이 부분만 기술하였다.

관측점 K1의 수온변화에서 두드러진 것은 2011년 2월 하순에 강한 수온 상승이 나타나 점이다. 이때 염분의 변화도 고염의 상승으로 나타나고 있다(Fig. 3.1.3). 또한, 유속장을 보면 남향 성분의 유속이 전체 기간 중 가장 강하게 나타나고 있다. 이는 CDW의 강한 유입은 해류의 변화에 의하여 간헐적으로 발생하고 있다는 점을 암시해 준다.

2011년 강한 CDW 유입을 일으킨 해수 유동의 원인이 바람장 변화에 의한 가능성을 살펴보기 위하여 바람장 변화를 분석하였다. Fig. 3.1.4는 1978-2011년 기간 동안의 NCEP 재분석 바람장으로부터 계산한 연평균 동서방향 성분 바람분포도이다. 북반구와 마찬가지로 위도에 따라 저위도의 동풍, 중위도의 서풍 및 고위도의 동풍대가 번갈아 나타나고 있다. 아문젠해의 대륙붕단 해역은 동풍과 서풍이 교차하는 경계에 해당되고 ACC 전선의 남쪽 경계에 해당되어 해양과 대기의 외력 조건이 복잡한 것을 알 수 있다. 특히 바람장은 동풍과 서풍의 경계 해역이 남북으로 이동하는 경우에 바람 방향이 바뀌게되므로 바람에 반응하는 해수온 운동이 상이하게 나타날 것임을 짐작할 수 있다.

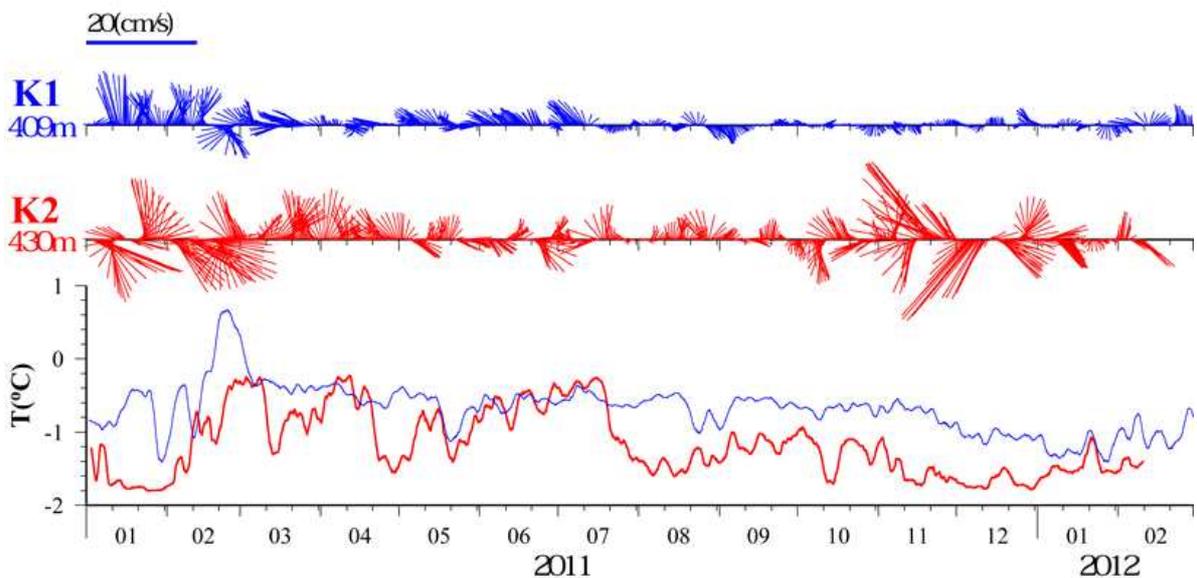


Fig. 3.1.2. Time series of current vector and temperature at 409 m of St. K1 (blue color) and 430 m of K2 (red color).

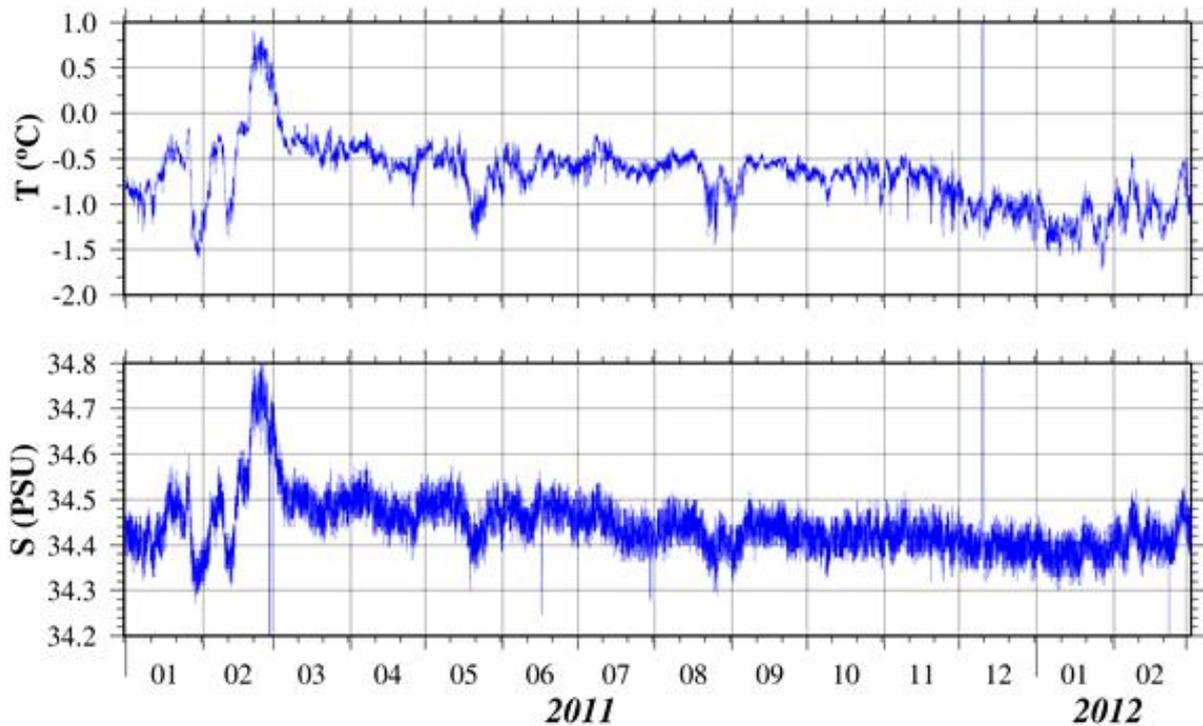


Fig. 3.1.3. Time series of temperature and salinity at 430 m of K2..

Fig. 3.1.5는 Fig. 3.1.4에 점선상자로 아문젠해 해역의 2011년도에 동풍방향 10도 범위 평균한 일평균 바람장의 시계열을 나타내고 있다. 동풍대와 서풍대 경계가 남북 방향으로 이동하는 것을 잘 보여주고 있다. 2월의 경우에 경계가 남위 70도 까지 남향하였음을 보여준다. 바람 방향에 따른 해양에서의 이론적인 에크만 수송을 생각하면 2011년 2월 하순의 강한 CDW 유입은 바람장에 의한 해수 반응과 일치하여 나타나기 때문에 어느 기간 이상동안 지속적인 지역적 바람장 변화에 의하여 CDW 유입 강도가 변할 수 있음을 제시해볼 수 있다. 이 해역은 겨울철에는 얼음에 덮여있기 때문에 바람에 의한 에크만 수송 분석에 주의를 요한다.

CDW 유입 강화는 두 가지의 다른 시나리오로 설명해 볼 수 있다. 하나는 에크만 상승이 강화되는 결과를 주는 바람장 변화이고 또 하나는 CDW 전체가 아문젠해 방향으로 이동하는 바람장의 변화이다. 즉, 바람장 변화의 시간적 크기에 따라 해양의 반응은 다를 것인 바 Fig. 3.1.6에 이를 모식적으로 표현하였다. Fig. 3.1.6의 좌측은 대륙붕단 바로 북쪽해역에서 에크만 상승이 강화되어 CDW가 아문젠해로 유입될 경향이 커지는 상태로 이는 지역적 바람장 변화, 즉 기압계 변화를 가상해 볼 수 있다. 반면 Fig. 3.1.6의 우측은 CDW 전체가 아문젠해에 근접 분포하여 CDW 유입이 용이하게 된 경우로 보다 장기적인 해양 상태의 변화에 의하며 기후적인 바람장 변화에 따른 시나리오를 생각해 볼 수 있다.

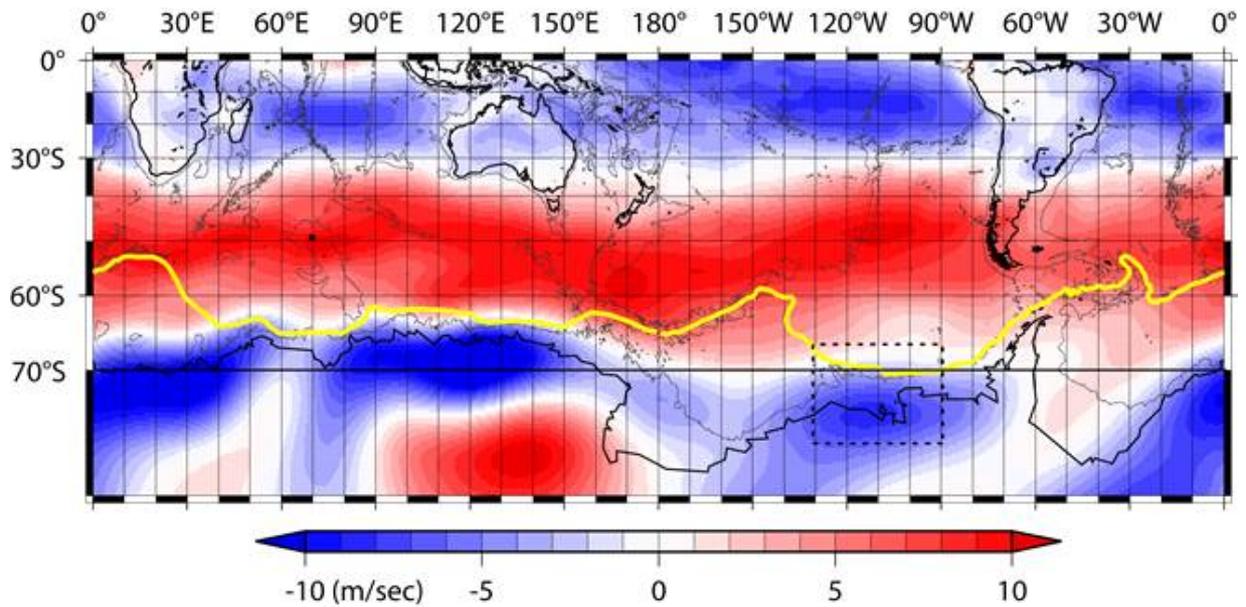


Fig. 3.1.4. Annual mean zonal wind for the period of 1978-2011 based on NCEP reanalysis-II data (1000 mb geopotential height). Blue and red colors mean easterly and westerly winds, respectively. The yellow line represents the southern boundary of the ACC front. The black lines are the contour of 1000 m depth.

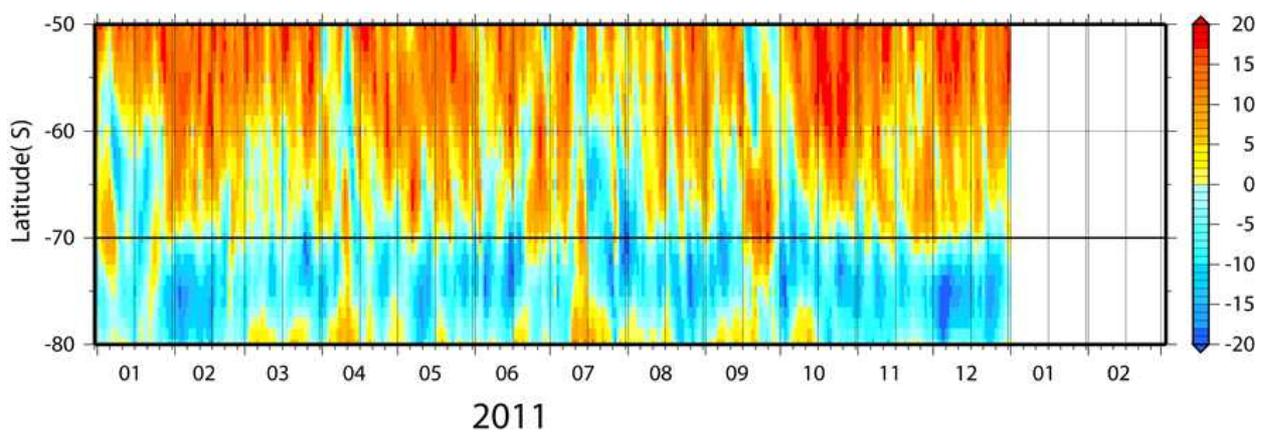


Fig. 3.1.5. Daily mean zonal wind averaged over a zonal band between 70W and 80W as shown in a dashed box in Fig. 3.1.4.

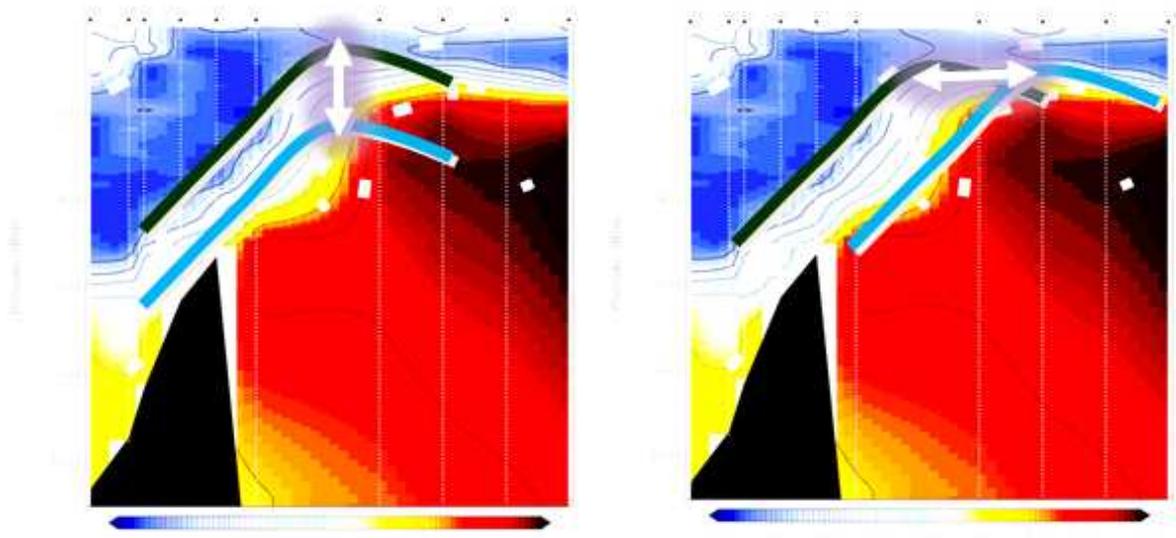


Fig. 3.1.6. Different types of CDW response to wind field change. (left) short term local wind change and (right) long term climatic wind change.

3. 생기원원소 침강플럭스

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 퇴적물트랩(time-series sediment trap)을 이용한 생기원원소 침강플럭스에 대한 연구가 전혀 수행되지 않았다. 본 연구에서는 아문젠해 폴리냐와 폴리냐 바깥해역에 퇴적물트랩을 1년 동안 계류하여 생기원원소 침강플럭스의 계절변화를 파악하고자 한다.

나. 재료 및 방법

시계열 퇴적물 트랩을 2011년 1월 5일부터 2012년 1월 5일까지 아문젠해 폴리냐(St. K2)와 폴리냐 바깥해역(St. K1), 두 곳에 계류하였다(Fig. 3.1.1). 폴리냐 바깥해역, 정점 K1에 퇴적물 트랩을 계류한 곳의 위치는 남위 72° 24.16', 서경 117° 43.34', 수심은 530m 이었다. 폴리냐, 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 7G이었고 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.

다. 결과 및 토의

아문젠해 폴리냐 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. 3.1.7a). 총질량 플럭스는 남극 여름철인 1월과 2월에 집중되어, 이 기간 동안 관측된 전체 플럭스의 83%를 차지했다. 해빙(sea ice)이 생성되는 3월부터는 총질량 플럭스가 급격히 감소하여, 표층이 해빙으로 덮히는 4월 이후에는 10 mg m⁻² 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⁻²이었다. 유기탄소 플럭스는 전반적으로 총질량 플럭스와 유사한 계절변화를 나

타냈다(Fig. 3.1.7b). 유기탄소 플럭스도 1월에 $36.8 \text{ mgC m}^{-2} \text{ day}^{-1}$ 으로 제일 큰 값을 보였고 10월 $1.19 \text{ mgC m}^{-2} \text{ day}^{-1}$ 으로 가장 낮았다. 유기탄소 플럭스도 1월과 2월에 집중되어, 이 기간 동안 관측된 플럭스가 총유기탄소 플럭스의 74%를 차지했다. 정점 k1에서 1년동안 관측된 총유기탄소 플럭스는 2.41 gC m^{-2} 이었다. 이 값은 남극 브랜스필드 해협 (Bransfield Strait)에서 1년 동안 관측한 총유기탄소 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. 3.1.7c). CaCO_3 플럭스는 총질량 플럭스나 유기탄소 플럭스와 달리 11월과 12월에도 비교적 높은 값들을 보였다. 정점 k1에서 1년동안 관측된 총 CaCO_3 플럭스는 0.39 g m^{-2} 이었다.

침강입자의 유기탄소 함량은 6월에 33.2%로 가장 높았고 2월에 6.6%로 가장 낮았다(Fig. 3.1.8a). 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. 총질소 함량은 유기탄소 함량과 매우 비슷한 계절변화를 보였다; 6월에 5.85%로 가장 높았고 2월에 1.02%로 가장 낮았다(Fig. 3.1.8b). 일년 평균 총질소 함량은 2.75%이었다. 탄소/질소 비율은 6.07~9.95의 범위를 보였으며(Fig. 3.1.8c), 일년 평균비율은 7.22로 Redfield ratio (6.62)와 큰 차이를 보이지 않아, 유기탄소가 해양기원임을 지시해준다. CaCO_3 함량은 0.49~13.9%의 범위를 보였으며, 일년 평균 함량은 6.15%이었다(Fig. 3.1.8d). 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.

라. 결론

정점 K1에서 관측한 총질량 플럭스와 유기탄소 플럭스는 남극 여름철인 1월과 2월에 집중되어, 이 기간 동안 관측된 플럭스가 전체 플럭스의 각각 83%와 74%를 차지했다. 이렇게 총질량 플럭스유기탄소 플럭스가 여름철에만 집중되어 일어나는 것은 남극해 다른 해역에도 관측되고 있어, 남극해 침강입자 플럭스의 일반적인 특징으로 판단된다. 하지만 CaCO_3 플럭스는 총질량 플럭스나 유기탄소 플럭스와 약간 다른 계절변화를 나타내, 11월과 12월에도 비교적 높은 값들을 보였다. 아문젠해 폴리냐 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} 이었다.

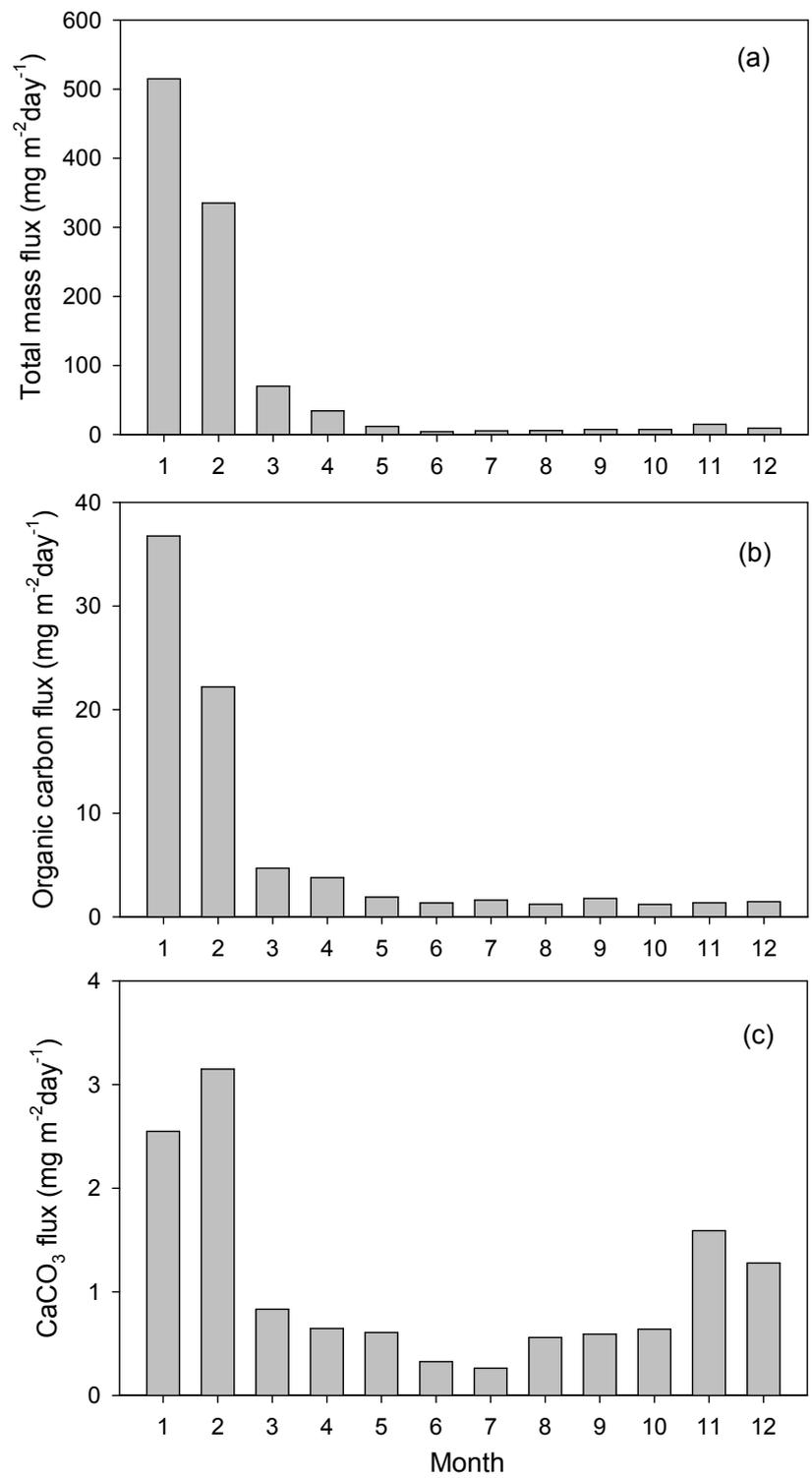


Fig. 3.1.7. Temporal evolution of total mass flux (a), organic carbon flux (b), and CaCO₃ flux (c) at station K1 in 2011.

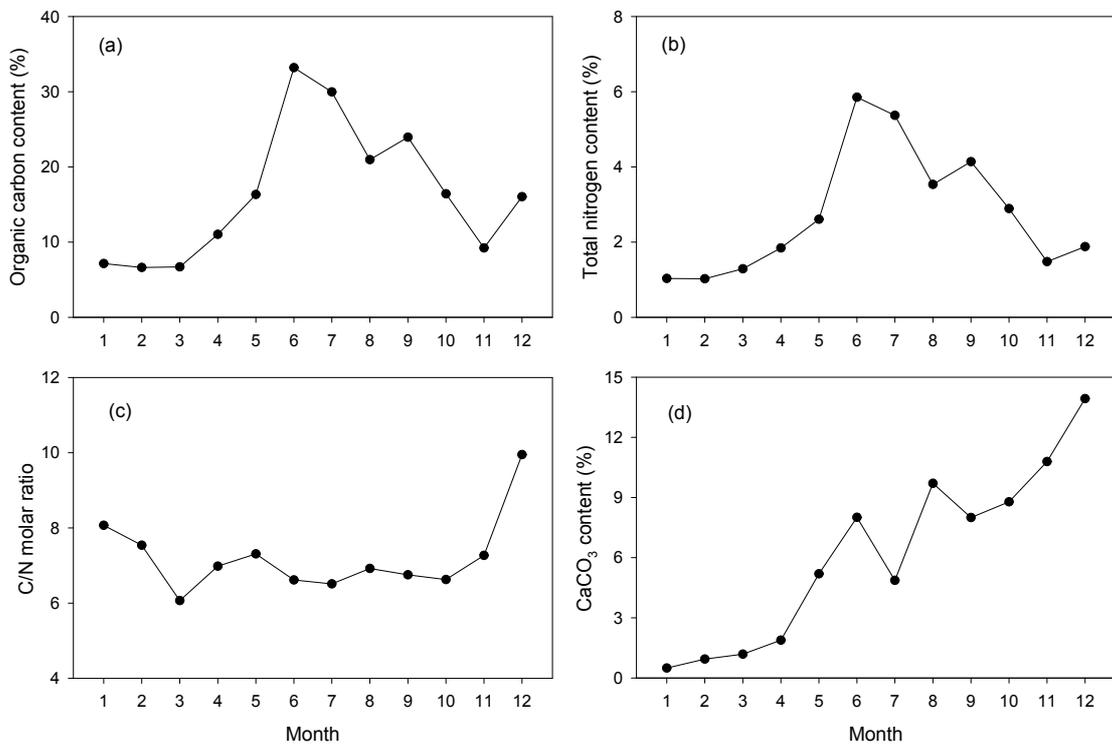


Fig. 3.1.8. Temporal evolution of organic carbon content (a), total nitrogen content (b), C/N molar ratio (c), and CaCO₃ content (d) at station K1.

제 2 절 생물 음향 특성

1. 생물 음향 조사

가. 서론

남극크릴 (Antarctic krill)은 식물 플랑크톤의 포식자이며, 동시에 펭귄, 해표, 조류 등의 중요한 피식자로 남극 생태계의 먹이 체계에서 중요한 부분을 차지하고 있다 (강 등, 2005; Everson, 2000). 또한 크릴 자체는 자원량 측면에서 인류의 대체 수산 자원으로 가치가 크므로 분포 위치, 자원량, 계절별 이동 특성 등 다양한 연구가 진행되고 있다 (Miller and Agnew, 2000; Pauly et al., 2000).

남극해 가운데 연구선 접근이 가능한 해역에서는 크릴 분포에 대해서 많은 연구가 되어 있다. 그러나 남극 아문젠 해역 (Amundsen Sea)의 경우 하계 시기에도 해빙에 의한 영향으로 쇄빙선을 제외한 일반 연구선을 이용한 조사가 어려운 해역이다. 따라서 다른 남극 해역에 비해서 크릴에 대한 연구가 제한적으로 실시되었다.

본 연구는 쇄빙 연구선인 아라온호 (*IBRV ARAON*)를 이용, 많은 연구가 되지 않은 남극 아문젠 해역에서 크릴 음향조사를 실시하였다. 본 연구를 통해서 남극 아문젠해 해빙 인접 해역의 생태계 구조 파악을 위하여 생물음향 탐지시스템을 활용한 크릴의 시·공간 구조 파악 및 밀도를 추정 하였고, 해양환경 자료와 음향 자료와의 상관성 분석을 통한 해빙 인접 해역의 분포 특성 파악을 실시하였다.

나. 재료 및 방법

(1) 음향 자료 획득

남극 아문젠 해역에서 남극 하계 기간 중 2010년 12월 25일-2011년 1월 14일과 2012년 2월 9일-2012년 3월 9일 총 2회에 걸쳐 음향 조사를 실시하였다.

음향 조사를 위한 시스템은 선저 부착형 과학 어군탐지기 EK60를 사용하였고, 음향 센서는 split-beam 센서 형태로 주파수는 38, 120, 200 kHz이다 (SIMRAD, 2003). 음향 신호 획득시 음향신호 간격은 아라온호에 탑재된 항해용 음향 장비와 지구물리 탐사 장비와의 주파수 간섭을 피하기 위하여 synchronization unit을 이용하여 조정하였다. 센서 보정은 음향 조사 중 해빙 지역 정점에서 배를 정지한 후 실시하였다. 조사에 사용한 음향 센서의 시스템 파라미터는 Table 3.2.1에 정리하였다. 신호 분석은 크릴 분석에 유용한 120 kHz를 사용하였으며, 2011/2012년에 결과는 38 kHz 주파수도 함께 사용하였다.

선박 이동에 의한 해수면 아래 공기방울의 형성은 크릴의 정확한 밀도 추정에 큰 영향

을 준다. 아라온호 선속 증가에 따른 음향 신호를 모니터한 결과, 음향 신호는 6 노트 이상일 경우 해수면 공기 방울에 의한 노이즈 때문에 신호의 안정성이 감소하였다. 따라서 획득한 전체 음향자료 가운데 음향 신호의 안정성을 고려하여 선속 6 노트 미만일 때 획득한 음향 자료만을 이용하였다.

Table 3.2.1 Acoustic EK60 setting.

	2010/2011			2011/2012		
	38 kHz	120 kHz	200 kHz	38 kHz	120 kHz	200 kHz
Frequency	38 kHz	120 kHz	200 kHz	38 kHz	120 kHz	200 kHz
Pulse duration (ms)	1.024	1.024	1.024	1.024	1.024	1.024
2-way beam angle (dB)	-20.60	-21.00	-20.70	-20.60	-21.00	-20.70
Absorption coefficient (dB/km)	10.0	25.9	39.6	9.9	24.8	38.9
Sound speed (ms ⁻¹)	1454.9	1454.9	1454.9	1449.39	1449.39	1449.39
Collection depth (m)	400	400	400	400	400	400
Transducer depth (m)	7.5	7.5	7.5	7.5	7.5	7.5

전체 조사 지역 가운데 6 노트 미만의 안정된 음향 자료를 획득한 해역은 크게 네 지역으로 구분 된다 (Fig. 3.2.1). 세분화된 네 지역은 (1) pack ice zone (PI), (2) pack ice boundary (PB), (3) center of costal polynya (CP), 그리고 (4) margin of ice shelf (IS) 으로 PI 지역은 10% 이상의 해빙 농도를 기준으로 설정하였다 (Arrigo et al., 2012).

세분화된 지역에서 취득한 음향 정선은 2010/2011년 하계 시기의 경우 빙봉 부근 (IS1), 연안 폴리냐와 팩 아이스 경계 (PB1), 그리고 대륙사면 부근 팩 아이스 지역 (PI1)이고, 2011/2012년 하계 시기에는 Getz와 Dotson 빙봉 부근 (IS2-1, IS2-2), 연안 폴리냐 중앙 (CP2) 그리고 연안 폴리냐와 팩 아이스 경계 (PB2) 해역으로 총 7 개다.

지역 별 6 노트 음향조사 시간 및 거리는 Table 3.2.2에 정리하였다.

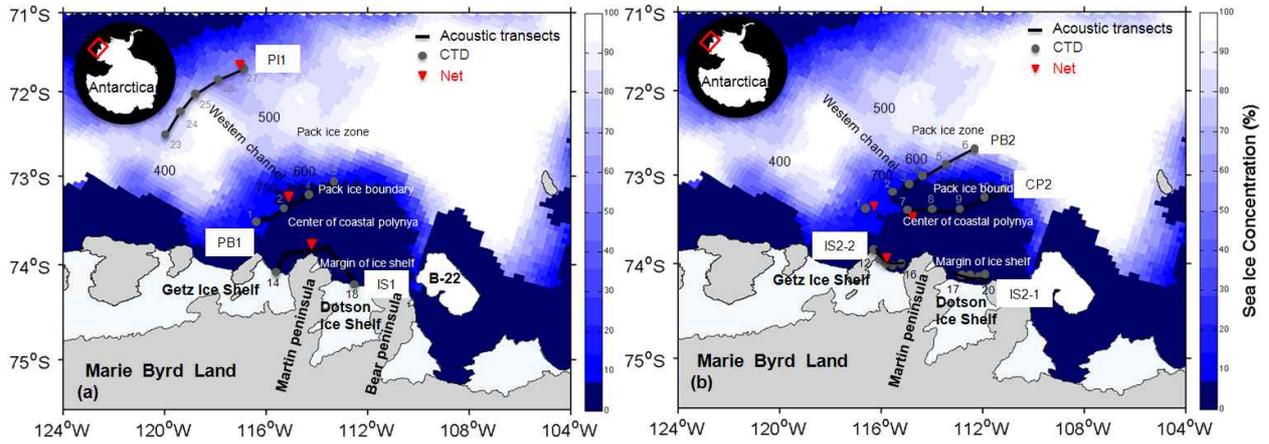


Fig. 3.2.1. A map of the region with the acoustic transect, CTD stations, net stations and pack-ice boundary on the bathymetry of the central Amundsen shelf during 2010/2011 (a) and 2011/2012 (b). IS is the margin of ice shelf, CP is the center of the coastal polynya, PB is the pack-ice boundary and PI is the pack ice zone.

음향 자료 분석 프로그램은 Myriax Echoview software (Ver. 4.50)를 이용하였고 (Myriax, 2008), 크릴 밀도는 CCAMLR 2000 조사시 계산 방법을 활용하였다 (Hewitt et al. 2004). 취득한 모든 음향 자료는 표층과 수심 250 m 이하 그리고 노이즈 신호를 제거 후, 거리와 수심에 대해서 압축하여 가상 에코그램 (Virtual echogram) 기법으로 기반으로 분석하였다 (Fig 3.2.2).

Table 3.2.2. The acoustic survey transect.

Location	Transect name	Transect start time (date, time UTC)	Transect end time (date, time UTC)	Distance run (km)
Ice shelf (IS)	IS1	2011/01/01 18:08	2011/01/02 07:00	154
	IS2-1	2012/02/16 20:48	2012/02/17 16:33	50
	IS2-2	2012/02/17 21:39	2012/02/18 13:51	46
Pack Ice Boundary (PB)	PB1	2011/01/05 18:10	2011/01/06 06:36	157
	PB2	2012/02/12 10:37	2012/02/13 16:02	120
Center of Coastal Polynya (CP)	CP2	2012/02/13 23:33	2012/02/15 02:15	133
Pack Ice zone (PI)	PI1	2011/01/01 18:00	2011/01/02/01:30	204

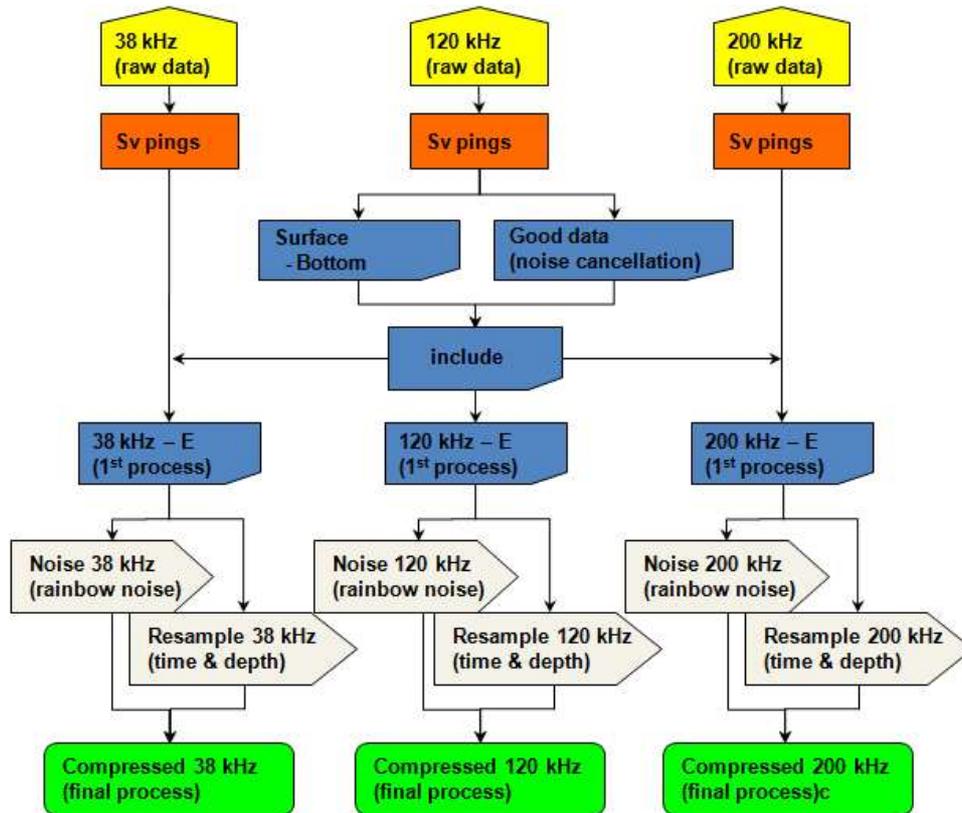


Fig. 3.2.2. post-processing method for acoustic signal.

(2) 환경 및 생물 자료 획득

음향 자료와 해양 환경의 상관성 파악을 위해서 CTD를 이용한 해양 환경 관측과 네트를 이용한 크릴 채집을 실시하였다.

환경 자료는 모든 정점에서 CTD (SBE 911plus)를 이용하여 수온, 염분, 클로로필 등을 획득 하였고 (Fig. 3.2.1), 생물 자료는 수심 센서 (Time depth recorder, TDR)가 부착된 붕고 네트 (Bongo net)를 이용, target trawling 방법을 통해 채집하였다. 타겟 트롤은 음향 에코그램에서 음향 산란층의 수심을 확인한 후 선속을 2~3 노트로 유지하며 20~30 분 동안 실시하였다.

2011/2012년 하계 시기에는 target trawling 외에 일부 정점에서 MOCNESS (Multiple Opening/Closing Net and Environmental Sensing System)를 이용하여 층별 (0-25, 25-50, 50-75, 75-100, 100-125, 125-150, 150-200, 200-bottom or 400 m) 채집을 실시하였다.

획득한 샘플은 선상에서 종 분류와 우점종 파악 후, 체장과 무게를 측정하여 체장-무게 관계식을 산출하였다. 체장-무게 관계식은 크릴의 밀도 환산에 적용하였고, 측정 후 모든 샘플은 포르말린으로 고정하여 보관하였다.

다. 결과 및 고찰

(1) 연안 폴리나 인근 해역 환경 및 생물 자료

남극 아문젠해 폴리나 인근 해역의 크릴의 공간적인 분포를 파악하기 위해 환경 특성 및 생물 분포를 파악하였다. 수온/염분 조사 결과 조사 해역은 Antarctic Surface Water (AASW)와 Modified Circumpolar Deep Water (MCDW)의 외형적으로는 두 개의 수괴가 존재하는 것으로 판단된다 (Fig. 3.2.3).

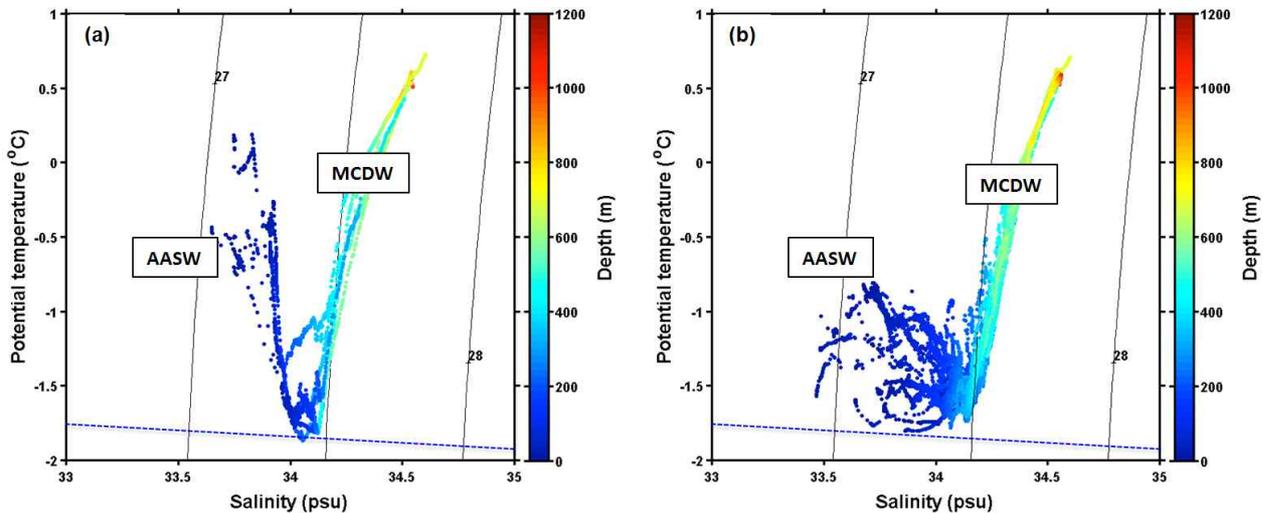


Fig. 3.2.3. The potential temperature (θ) - salinity (S) diagram for the Amundsen Sea polynya in 2010/2011 (a) and 2011/2012 (b). The boxes denote the approximate θ and S characteristics that correspond to the Antarctic Surface Water (AASW) and Modified Circumpolar Deep Water (MCDW).

생물 조사 결과 2010/2011년과 2011/2012년 하계 시기 모두 채집된 크릴 종은 ice krill (*Euphausia crystallophias*)로 95 %의 비율을 차지했으며, 일부 정점에서 ice krill과 남극해 *E. csupertba*가 공존하였다. Ice krill의 평균 길이는 24 mm 이고, 2010/2011년과 2011/2012년 길이 분포는 각각 7~37 mm와 9~37 mm로 연도별 크기 차이는 없으므로 나타났다 (Fig. 3.2.4). 또한 ice krill의 길이 분포는 이전의 다른 남극지역의 길이 분포와 유사하였다 (Siegel, 1990; Sala et al., 2002; Guglielmo et al., 2009).

측정된 ice krill 길이 분포는 음향 자료를 크릴 밀도로 환산하는 과정에서 변환 계수로 활용하였다.

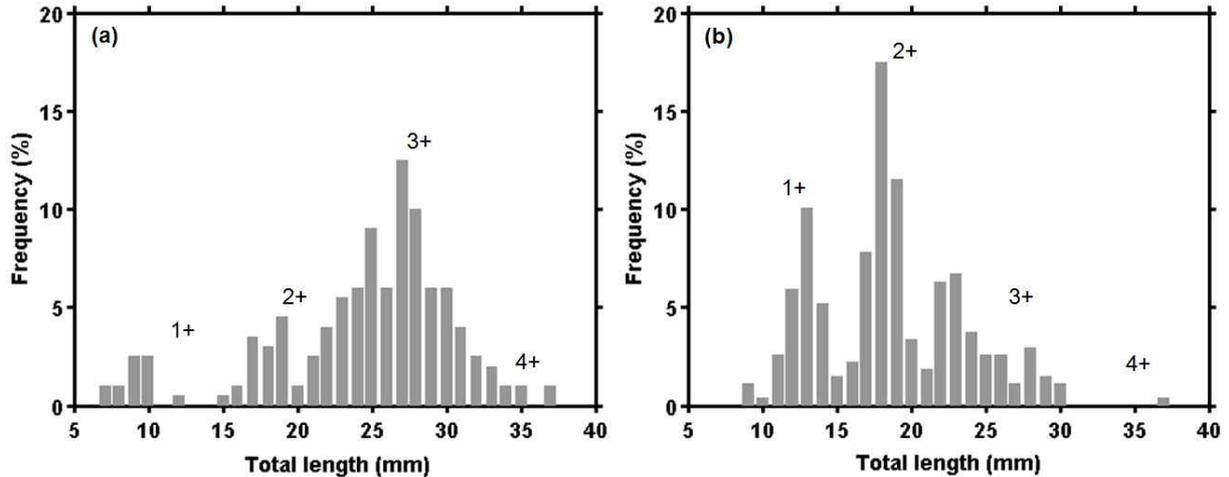


Fig. 3.2.4. Ice krill length-frequency distributions in Amundsen Sea coastal polynya during 2010/2011 (a) and 2011/2012 (b).

(2) 연안 폴리나 인근해역 ice krill의 공간 분포

Fig. 3.2.5는 120 kHz 음향 데이터의 지역별 수직 분포이다 (지역 분류 Fig. 3.2.1 참조). 관측된 음향 신호는 네트 채집 결과를 통해서 ice krill로 판단할 수 있으며, 조사 결과 ice krill은 모든 지역에 걸쳐 표층-250 m 수심에 분포하였다.

Ice krill의 수평 분포를 파악하기 위해서 면적 후방산란강도 (S_A , dB re 0.1 m²/mile²)를 계산하였다 (Fig 3.2.6). 여기서 S_A 는 0.1 n·mi (Width)×0.1 n·mi (Height)×250 m (Depth) 체적에서 수신되는 체적산란계수 (Volume scattering coefficient)의 합으로 ice krill의 밀도 변화를 파악할 수 있다.

분석 결과, 2010/2011년은 PB1 부근에서 고밀도의 ice krill이 측정되었다 (Fig. 3.2.5(a)). IS1의 경우 Martin peninsula 부근에서 높은 밀도로 존재하였으나 Dotson 빙봉 부근에서는 상대적으로 낮은 밀도로 존재하였다 (Fig. 3.2.5(b)). Getz와 Dotson 빙봉 부근의 ice krill 밀도는 Getz 빙봉 해역이 Dotson 빙봉 해역보다 밀도가 높았다. PI 지역은 2010/2011년과 2011/2012년 하계 시기 중 가장 낮은 밀도로 존재했다 (Fig. 3.2.5(c)).

2011/2012년 하계 시기에 조사한 margin of ice shelf (IS2), pack-ice boundary (PB2-1, PB2-2) 그리고 center of costal polynya (CP) 해역의 자료에서는 지역 별로 ice krill 분포에서 큰 차이가 보였다. 생물 밀도는 PB2 지역 중 St.3 (800 m)과 St.5 (500 m) 부근에서 가장 높은 밀도가 확인되었다 (Fig. 3.2.5(d)). 또한 western channel (St.3) 부근에서 수심이 낮아질수록 밀도가 감소하는 경향을 보였고, St.6 부근에서는 가장 낮은 밀도로 존재하였다. 반면에 CP2 해역의 밀도는 상대적으로 낮은 수심 (<500 m) 부근에서 깊은 수심 (>500 m) 부근에 비해서 높게 나타났고, 최대 밀도 해역은 St.10 부근 (수심: 약 400 m)이다.

빙붕 지역의 경우 Getz 빙붕 해역(IS2-2)의 생물 밀도가 Dotson 빙붕 해역(IS2-1)에 비해서 상대적으로 높게 측정되었다 (Fig. 3.2.5(e)). 분석 결과, 2010/2011, 2011/2012 시즌 모두 PB1, PB2 부근에서 높은 생물 밀도가 측정되었고, 이 지역은 연안 폴리냐와 팩 아이스가 인접하여 ice krill에게 유리한 서식지를 제공하기 때문으로 판단된다 (Smith Jr. and Barber, 2007).

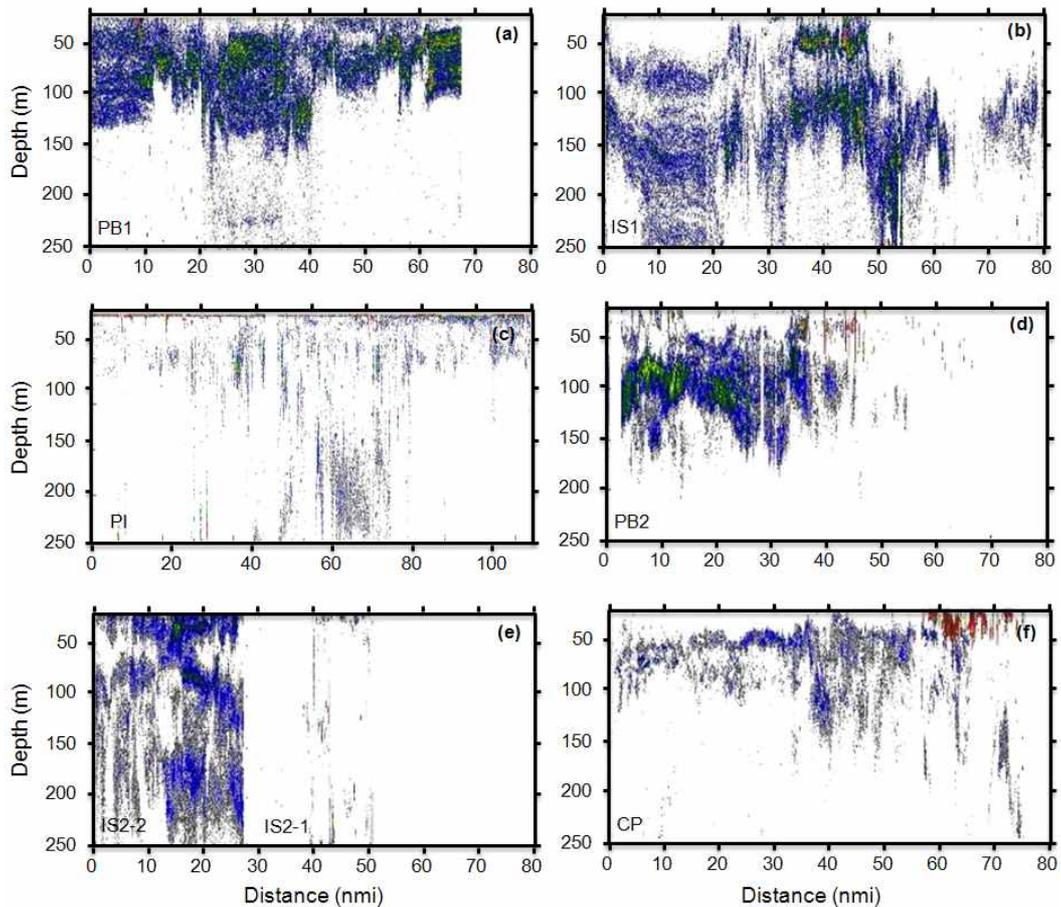


Fig 3.2.5 The vertical distribution of ice krill with each subdivided area for the top 250 m of the water column. PI is the pack ice zone, PB is the pack-ice boundary, CP is the center of the coastal polynya and IS is the margin of ice shelf. In 2010/2011, PB1, IS1 and PI represent the pack-ice boundary, the ice shelf margin and the pack ice zone, respectively; In 2011/2012, PB2, IS2-1, IS2-2 and CP represent the pack-ice boundary, margin of the Dotson ice shelf, margin of the Getz ice shelf and center of the coastal polynya, respectively.

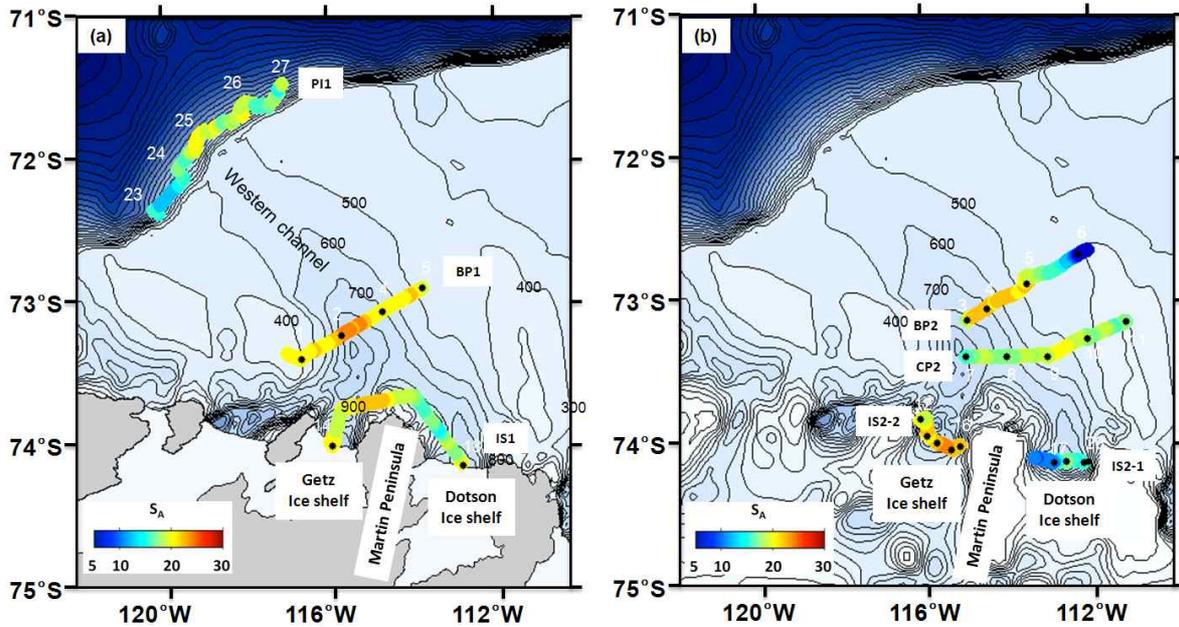


Fig 3.2.6 The distribution of Nautical area scattering strength (S_A , dB re $1 \text{ m}^2 \text{ n} \cdot \text{mi}^{-2}$) along transect in 2010/2011(a) and 2011/2012(b). S_A dimensions are 1852 m (1 n-mi) along-track by 20-250m.

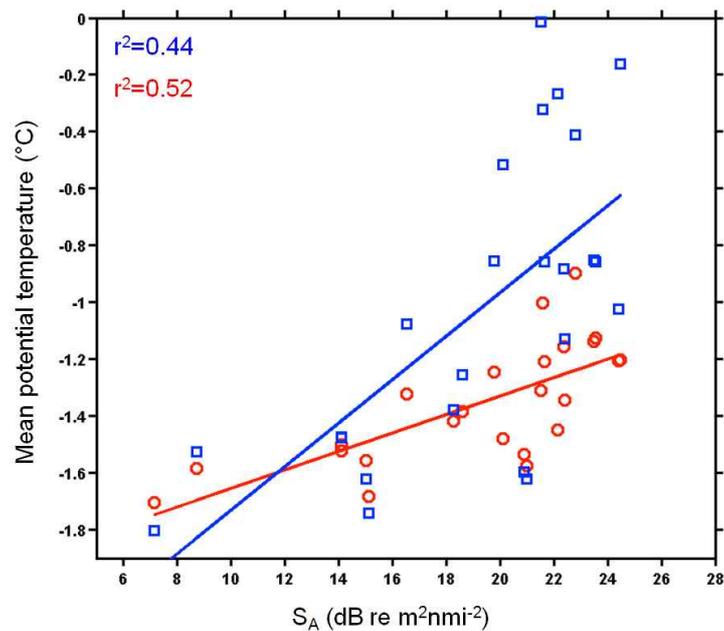


Fig. 3.2.7 Relationship between the mean nautical area scattering strength (S_A) and the surface potential temperature (blue squares) and mean potential temperature (red circles) of the AASW. The mean potential temperature was depth-averaged from the surface to a depth of 250 m, whereas the surface potential temperature was averaged from the surface to a depth of 20 m.

(3) Ice krill과 환경자료와의 상관성 분석

Ice krill의 수직 및 공간적인 분포를 환경 자료와 비교한 결과, 수온과의 연관성을 보였다. 정밀한 비교를 위해서 ice krill의 S_A 를 AASW의 표층 수온과 평균 수온으로 상관성 분석 (Pearson's correlation) 하였다 (Fig. 3.2.7).

남극 아문젠 해역 하계 시기의 수온 분포는 $-1.8\sim 0$ °C 으로 비교를 위해서 표층 수온은 표층부터 20 m 까지, 평균 수온은 ice krill의 분포 수심인 표층부터 250 m 까지 평균하여 적용하였다.

정점 별 ice krill의 밀도와 표층 수온 (0~20m) 및 평균 수온 (0~250 m) 과의 상관 결정 계수 (coefficient of determination, r^2)는 각각 0.44와 0.52 이다. 본 결과를 통해서 ice krill의 밀도와 아문젠 해역의 AASW에 의한 수온 분포와의 상관성을 보였고, 상대적으로 높은 수온 조건에서 ice krill의 밀도가 크게 나타나는 경향을 보였다.

(4) 연안 폴리나 인근해역에서의 ice krill 밀도 분포

Ice krill의 지역별 밀도 계산을 위해서 Greene TS 모델을 이용하였다 (Greene et al., 1991). Greene TS 모델은 log-linear 관계식으로 일반적으로 남극 크릴 자원량 계산에 사용한다. 기존 연구 결과에서 ice krill의 TS 모델 경험식 (길이-TS)이 없기 때문에, 본 연구에는 *E. superba*와 ice krill의 길이 별 TS 특성이 유사하다고 가정하여 Greene TS 모델을 사용하였다.

사용 주파수의 체적산란강도 차이를 이용하는 기법인 $MVBS_{120-38}$ 의 범위는 Greene TS 모델을 이용하여, 채집한 아이스크릴의 길이 분포를 고려했을 때 7~19 dB로 설정하였다. 즉, 임의의 체적에서 120 kHz와 38 kHz의 평균 체적 산란강도 ($MVBS$, dB) 차이가 '7 dB < $\Delta MVBS_{120kHz-38kHz}$ < 19 dB' 를 만족하는 것을 ice krill에 의한 산란신호로 정의하였다. $\Delta MVBS$ 자료 처리를 위한 가상 에코그램에서 수심과 거리를 각각 20-250 m 와 0.1 n·mile로 분리하여 분석하였다. 밀도는 면적 후방산란계수 (S_A , $m^2/n \cdot mile^2$)에 변환계수 (conversion factor, C)를 곱하여 계산하였다. 여기서 변환 계수는 음향 신호를 생물량으로 환산하는데 필요한 인자로 아이스크릴의 길이-무게 관계식과 길이-구형 산란 단면적 (σ_{sp})의 관계식으로 유도 된다 (Jarvis et al., 2010).

계산 결과, 2010/2011년과 2011/2012년의 120 kHz에 대한 ice krill의 변환 계수는 각각 0.1809와 0.1790로 파악되었다. 계산된 변환 계수를 이용하여 지역 별 평균 밀도를 추정하였고 (Fig. 3.2.8), 전체 조사 해역의 평균 밀도는 정선별 평균 밀도 자료의 가중 평균 계산식을 이용하였다 (Jolly and Hampton, 1990).

아문젠해 내의 폴리나 및 해빙 인접해역의 ice krill 밀도는 2010/2011년 IS, PB, PI에서 각각 17.4, 27.6, 10.9 g/m^2 , 2011/2012년 IS, CP, PB에서 각각 19.3, 13.2, 18.5 g/m^2 으로 추정됐다. 지역적으로 IS와 PB에서 상대적으로 높은 밀도가 확인되었으며, PI와 CP에

서 상대적으로 낮은 밀도가 나타났다. Ice krill 밀도는 2010/2011년 PB에서 가장 높게 밀도가 측정됐고, 2010/2011년 PI에서 가장 낮게 나타났다. 관측 정선에 대한 ice krill의 전체 밀도는 2010/2011년에 21 g/m², 2011/2012년에 17 g/m² 로 추정되어 거의 유사한 밀도가 관측되었다.

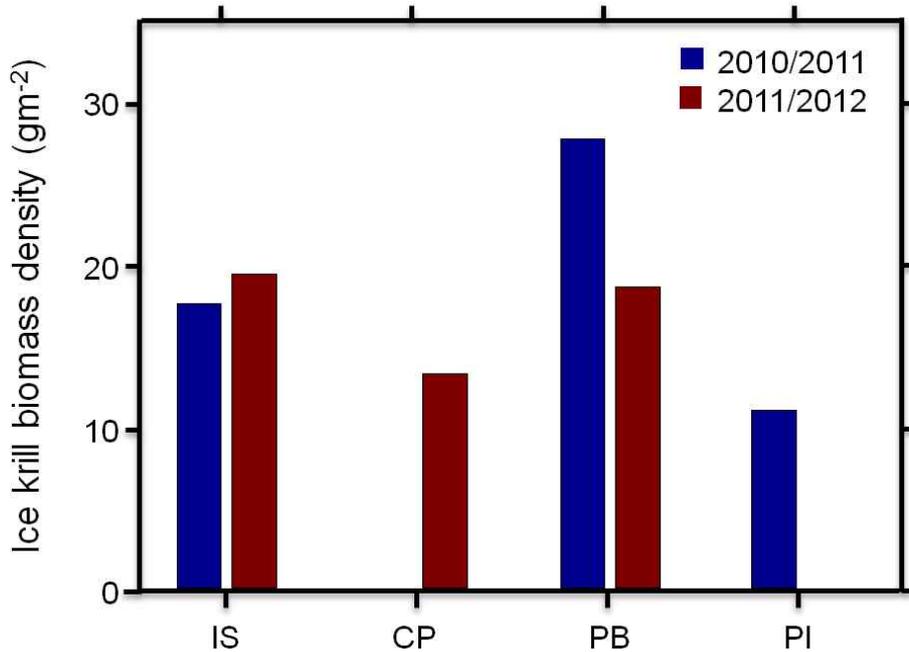


Fig. 3.2.8. The geographical distribution of mean ice krill densities determined using a log-linear target strength model of the coastal polynya during 2010/2011 and 2011/2012 (IS is the margin of ice shelf, CP is the center of the coastal polynya, PB is the pack-ice boundary and PI is the pack ice zone).

아문젠해 폴리냐 및 해빙 인근 지역에서 세분화된 지역에 대한 음향조사 결과 ice krill 밀도는 지역적으로 큰 차이를 보였다. 2010/2011, 2011/2012 모두 PB에서 높은 밀도로 나타나 연안 폴리냐와 만나는 해빙의 경계 지역이 ice krill의 좋은 서식처임을 추정된다. 그러나 연중 해빙 농도가 높아 1차 생산성이 낮은 지역과 펭귄, 고래, 바다표범과 같은 ice krill의 포식자들이 많이 관측되는 폴리냐의 중앙 지역은 ice krill에 있어 상대적으로 좋지 않은 서식처로 보인다. 또한 ice krill 밀도가 2월 보다 1차 생산성이 높은 1월에 높게 나타나 ice krill의 밀도와 식물 플랑크톤이 시간에 따른 연관성을 보였다.

아문젠해 연안 폴리냐는 년도별 기상 및 해양 환경에 따라 유빙의 분포가 결정되며, ice krill 변동성 또한 유빙의 분포 조건에 따라 결정될 것으로 판단된다. 따라서 연안 폴리냐에 서식하는 ice krill 밀도 변화와 생태학적인 특성을 이해하기 위한 지속적인 관측

이 필요하다. 또한 ice krill의 분포 밀도의 정확한 산출을 위해서는 길이별 TS 관계식 파악과 연안 폴리냐에 서식하는 다른 해양생물 (Silver fish, other krill)과의 음향 특성 차이에 대한 연구가 수반되어야 할 것이다.

(5) 요약

남극 아문젠해 폴리냐 인근 해역에서 음향 조사를 통한 Ice krill (*Euphausia crystallorophias*)의 지역 별 공간적, 수직적 분포 특성을 파악하기 위하여 (1) margin of ice shelf (IS), (2) center of costal polynya (CP), (3) pack ice boundary (PB) 그리고 (4) pack ice zone (PI) 해역으로 분리하여 2010/2011년과 2011/2012년 남극 하계기간 동안 음향 조사를 실시하였다. 음향 조사 외에 네트 (Bongo net, MOCNESS)를 이용한 생물 채집 및 CTD를 이용한 환경 자료 분석을 실시하였다.

조사 결과, 전체적으로 폴리냐와 팩 아이스의 경계면에서 높은 ice krill 밀도가 나타났다. 이는 연안 폴리냐와 팩 아이스가 인접한 지역이 ice krill의 유리한 서식지를 제공하기 때문이다. 반면 연안 폴리냐가 형성되지 않고 연중 해빙 농도가 높아 1차 생산성이 낮은 팩 아이스 지역에서는 상대적으로 적은 양의 ice krill 밀도가 확인되었다. 또한 ice krill의 지역별 분포 밀도와 수온, 식물플랑크톤 그리고 해빙 분포와 같은 환경 자료와의 상관성 분석 결과 수온과의 높은 연관성이 확인됐다

제 3 절 하위생태계 먹이망 특성

1. 서론

남극(Antarctica) 해역은 상위포식자(e.g. 오징어, 어류, 고래)와 그들의 먹이 생물인 초식성 부유생물(e.g. 크릴, 요각류)에 의해 구성되는 비교적 단순한 생태계 구조로 이루어져 있다(Quetin and Ross, 1991; Loeb et al., 1997). 또한 유빙의 계절 및 연간 변동이 광합성에 의한 기초생산자의 생산력에 영향을 미치면서 불안정한 해양생태계가 유지되고 있다. 따라서 남극 해역에 대한 연구가 미래 극지 생태계의 관리 및 변동을 예측하는데 활용될 수 있기 때문에 중요한 연구 분야로 관심 받고 있으나, 접근성 때문에 이에 관한 연구가 매우 제한적이다. 특히, 본 연구 지역인 남극 아문젠해(Amundsen Sea)는 여름철에도 유빙으로 인하여 접근이 매우 어려운 실정이다. 남극 해역에 서식하는 동물플랑크톤 중, 남극 크릴(Antarctic krill)이라 불리는 *Euphausia* sp. (주로 *Euphausia superba*)는 남극에 서식하는 해양 포유류가 섭취하는 먹이의 30-90%를 차지하고 있으며, 이는 연간 전세계 어획량의 3배 이상과 맞먹는 것으로 추정된다(Gulland, 1970; Laws, 1977; Anon, 1986). 이렇게 해양생태계 먹이망에서 하위 영양단계와 상위 영양단계를 연결해주는 *Euphausia* sp.는 다양한 기작으로 월동하며, 결빙 해역에서의 생존을 위하여 폴리니아 부근이나 유빙의 가장자리에 주로 서식하는 것으로 알려져 있다. 남극 해양생태계에서 이들의 중요성이 대두되면서 남극의 여러 해역에서 그들의 생리/생태를 이해하기 위해 활발히 연구가 진행되고 있지만, 본 연구 지역에서의 생태계 연구는 매우 미흡한 실정이다. 아문젠해는 물리적으로 남극 해빙역 중에서 가장 빠른 변화를 보이고 있는 것으로 보고되고 있다(Walker et al., 2007). 따라서 이러한 변화에 따른 해양생태계의 변동을 파악하기 위해서는 먹이망 내에서 에너지 흐름의 중추적인 역할을 하는 크릴의 먹이 생태를 이해하는 것이 우선되어야 한다.

과거에는 동물플랑크톤의 먹이 생태를 이해하기 위하여 위 내용물(gut content) 분석을 주로 활용하여 왔다. 이 방법은 크릴이 채집직전에 섭취한 먹이의 형태 및 종류를 직접 확인할 수 있는 장점이 있다. 하지만, 이미 소화되었거나 위가 비어 있을 경우에는 섭취한 먹이를 전혀 확인할 수 없을 뿐만 아니라, 위에 장기간 남아 있는 소화가 느리거나 잘 되지 않는 먹이만을 선택적으로 확인하게 되는 단점이 있다. 따라서 최근에 와서는 생화학 분석기술의 발달로 생화학적 기법(지방산 먹이 추적자, 안정동위원소비)을 활용하여 생물들의 영양단계, 섭취한 먹이, 에너지 흐름 등을 파악하고 있다. 지방은 모든 생물에 있어서 필수적인 구성요소로써, 동물플랑크톤이 저장한 지방은 먹이 공급이 낮은 시기에 에너지원으로 이용되며, 포식, 생식, 이동 등에 필요한 에너지를 공급해준다. 주요 지방

class에는 세포막을 구성하는 인지질(phospholipid), 에너지원으로 사용되는 트리아실글리세롤(triacylglycerol)과 왁스 에스테르(wax ester), 그리고 기타 콜레스테롤(cholesterol)과 디아실글리세롤 에테르(diacylglycerol ether) 등이 있다. 남극 크릴 중, *E. superba*는 트리아실글리세롤을, *E. crystallophias*는 왁스 에스테르를 주 에너지원으로 사용한다(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 안정동위원소비 차이를 보이기 때문에 해양생태계 먹이망에서 상위-하위 영양단계를 파악할 수 있다(Søreide et al., 2006). 그러므로 본 연구에서는 남극 결빙 해역에서 동물플랑크톤 중 가장 우점하며, 수산자원의 주요 먹이원으로써 기초생산자(식물플랑크톤)와 상위 포식자를 연결하는 *Euphausia* sp.(*E. superba*, *E. crystallophias*)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

크릴을 포함한 동물플랑크톤 시료는 남극 아문젠 해역의 만(bay) 주변(Fig. 3.3.1)에서 남극 하계에 봉고네트(333, 505 μ m)를 이용하여 수심 측정기(Depth recorder)로 수심 200m 지점까지 수직 인양하였다. 각 정점에서 총 2회 반복 채집하였으며, 평균 인양시간은 약 20분 정도였다. 채집한 크릴 및 동물플랑크톤 시료는 테프론 처리된 뚜껑이 있는 유리 용기에 넣었으며, 실험실로 옮기기 전까지 냉동(-20 $^{\circ}$ C)보관하였다. 또한 크릴 및 동물플랑크톤의 먹이원으로 추정되는 입자(식물플랑크톤)는 GF/F 필터에 해수를 여과하여 채집한 후, 필터는 은박지에 싸서 페트리디쉬에 넣어 냉동(-20 $^{\circ}$ C)보관하였다. 모든 시료(크릴, 동물플랑크톤, 식물플랑크톤)는 실험실로 옮겨와 분석 전까지 -80 $^{\circ}$ C에서 보관하였다. 분석 전 실험실에서 시료를 해동시킨 후, 현미경으로 크릴(*E. crystallophias*)을 분류하였다. 분류한 크릴의 총 길이(total length), 체장(body length), 눈 직경(eye diameter), 습중량(wet weight)을 측정하였다.

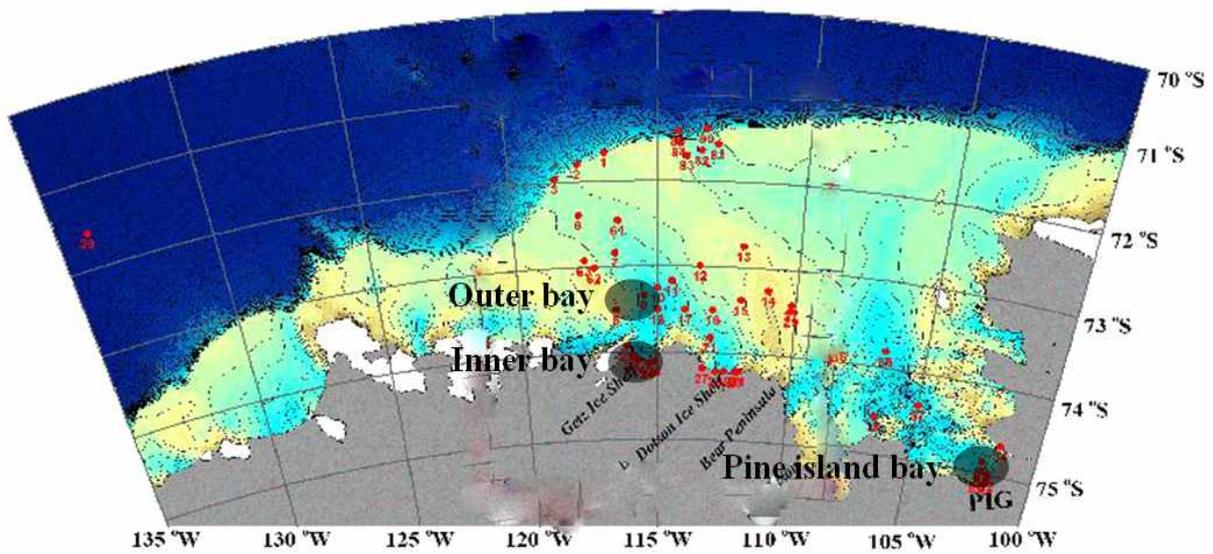


Fig. 3.3.1. Areas where krill *Euphausia crystallorophias* were sampled (dark grey circle) in January-February 2012.

나. 지방 추출 및 분석

아문젠해에서 지역별 크릴의 지방 함량 및 구성을 비교하기 위해, 세 지역(inner bay, outer bay, pine island bay)에서 채집된 크릴시료 중, 5개체의 성체를 분류하여 혼합 유기용매[Dichloromethane:Methanol(CH_2Cl_2 :MeOH)=1:1]로 세척된 유리 용기에 넣고, 혼합 유기용매(CH_2Cl_2 :MeOH=1:1)를 첨가해서 1분간 sonication하였다. 그 후, 용매의 최종 비율이 CH_2Cl_2 :MeOH:H₂O=1:1:0.8이 되도록 증류수를 첨가한 후, 잘 혼합되도록 흔들어서 두 층으로 분리되면 지방을 포함하고 있는 아래층을 새로운 유리 시험관에 옮겼다. 이 같은 과정을 3번 반복하여 지방을 추출·분리하였다(Bligh and Dyer 1959). 지방 추출액에서 혼합 유기용매를 질소 가스로 제거한 후, 다시 알고 있는 양의 혼합 유기용매 (CH_2Cl_2 :MeOH=2:1)에 용해시켜 지방 함량 및 class 구성을 분석하였다. 혼합 유기용매 (CH_2Cl_2 :MeOH=2:1)에 재용해된 시료 중 적정량(0.8-1.2 μl)을 chromarod(Mitsubishi Kagaku Iatron)에 떨어뜨린 후, 혼합 유기용매(CH_2Cl_2 :MeOH=1:1)로 농축하여 비극성 유기용매(Hexane:Diethyl ether:Formic acid=85:15:0.2)로 지방 class를 분리하였다. chromarod에서 분리된 주요 지방 class는 Iatroscan Mark-V TLC-FID(Thin-Layer Chromatography with Flame-Ionization Detector; IATROM LABORATORIES, INC.)로 분석되었다(Ju et al. 1997). 각 지방 class는 상업적으로 이용되는 표준 물질(phospholipid: 1,2-Dipalmitoyl-rac-glycero-3-phosphocholine hydrate; cholesterol: 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 함량 및 class 분석 후 잔여 추출액 중 적정량(약 200 μ l)을 혼합 유기용매로 세척한 유리 시험관에 넣고, 0.5N KOH/MeOH를 첨가하여 70 $^{\circ}$ C에서 30분 동안 가열하였다. 그 후, 혼합 유기용매(Hexane:Diethyl ether=9:1)를 넣어서 총 3회에 걸쳐 중성지방(알코올 및 스테롤)을 다른 용기에 분리 및 추출하였다. 중성지방을 추출하고 남은 용액에 pH가 2 이하로 되도록 염산(HCl)을 첨가하여 KOH를 침전시킨 후, 혼합 유기용매(Hexane:Diethyl ether=9:1)를 이용하여 3번 지방산을 추출하였다. 추출된 지방산은 BF₃(Boron trifluoride methanol solution)/MeOH로 에스테르화하여 지방산 메틸 에스테르(Fatty Acid Methyl Ester)로 유도하였고, 남아있는 혼합 유기용매를 질소 가스로 제거한 후, CH₂Cl₂로 재용해하여 GC-FID(Gas Chromatography-Flame Ionization Detector)로 분리·분석하였다. 표준 물질(internal standard; 19:0)을 기준으로 하여 각 지방산을 정량화하였으며, 각 지방산의 합으로 총 지방산 함량을 산출하였다. 지방산 중 불포화 지방산의 이중결합(double bond) 위치는 GC-MS(GC-Mass Spectrum)를 이용하여 확인되었다.

3. 결과 및 고찰

가. 지역별 크릴의 지방 함량 및 구성

(1) 크릴의 지방 함량 및 구성

2012년 아문젠 해의 만(bay) 주변 세 해역(Inner bay, Outer bay, Pine island bay; Fig. 3.3.1 참조)에서 크릴을 채집하였으며, 각 해역에서 크릴의 생존전략 및 먹이생태를 비교하기 위하여 채집 해역에 서식하는 크릴의 지방 함량 및 구성을 분석하였다(Fig. 3.3.2). 세 해역에서 채집한 크릴은 *Euphausia crystallophias*가 가장 우점하였다. *E. crystallophias*의 지방 분석 결과를 해역별로 살펴보면, pine island bay에서 채집된 크릴이 가장 높은 지방 함량(건중량의 20.98 \pm 6.17%)을 보였다. 반면 inner bay와 outer bay는 각각 건중량의 15.44 \pm 3.98%와 16.38 \pm 1.77%로 이 두 해역에서는 유사한 값을 보였다. 이들 크릴의 지방은 주로 장기적 에너지 저장을 위한 왁스 에스테르(wax ester)와 세포막 구성 지방인 인지질(phospholipid)로 구성되어 있었다. 특히 outer bay에서 채집된 크릴은 왁스 에스테르가 총 지방의 54.32%로 인지질보다 더 높았으며, pine island bay와 inner bay는 인지질과

왁스 에스테르가 유사한 구성비를 보였다. 2011년 조사에서 대륙사면(continental slope)과 폴리냐(polynya)에서 채집한 동일종 크릴과 비교하였을 때, 지방 class 구성은 유사하게 나타났으나, 지방 함량은 2012년에 채집한 크릴이 약 2배 정도 높게 나타났다. 이러한 크릴의 서식 해역에 따른 지방 함량 및 구성비 차이는 물리적 환경 특성과 채집시기에 따른 크릴의 생존 전략차이에 의한 것으로 추정된다.

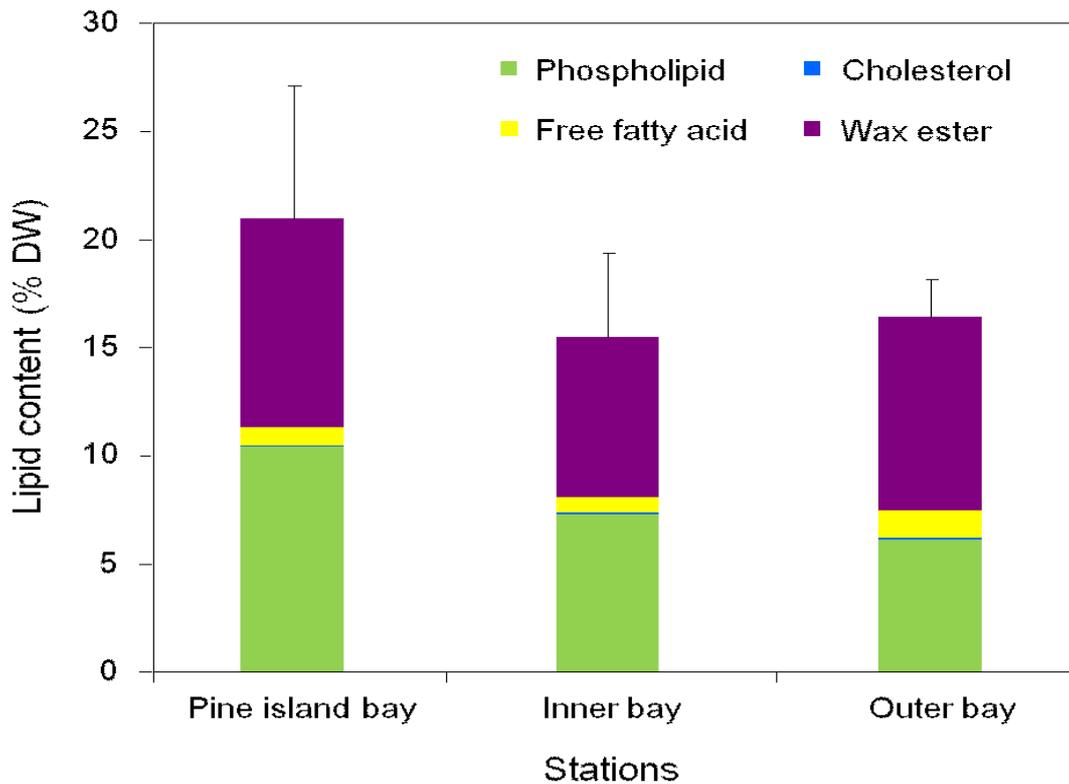


Fig. 3.3.2. Total lipid content and lipid class composition of krill *Euphausia crystallorophias* collected from pine island bay, inner bay and outer bay in the study region.

2012년 2월 12~26일에 채집된 *E. crystallorophias*의 지방 함량은 건중량의 약 15-21%로서, 남극 해역에 서식하는 동일종에서 나타난 계절적 지방 함량의 계절별 변동양상과 일치하게 나타났다. 이를 통해 아문젠해에 서식하는 이들 크릴도 남극 타해역에 서식하는 동종과 유사한 생존전략(지방축적/소모)을 가지고 있을 것으로 추정할 수 있다 (Fig. 3.3.3).

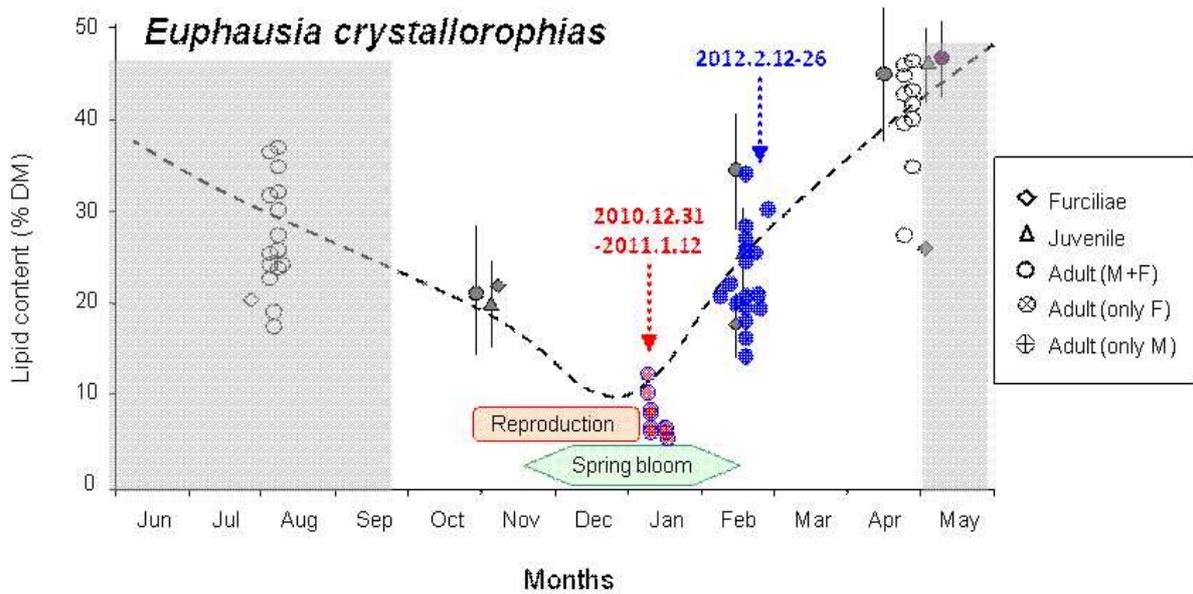


Fig. 3.3.3. Seasonal and annual variation of total lipid contents (in % of dry mass, DM) with different life stages. Red and blue colored symbols indicate the lipid content of *E. crystallorophias* in 2011 and 2012, respectively. Gray shaded areas indicate the winter season.

(2) 크릴(*E. crystallorophias*) 및 부유입자의 지방산 구성

조사 해역에서 채집된 크릴 *E. crystallorophias*는 다양한 지방산(탄소수 14~22개)을 함유하고 있었다(Fig. 3.3.4). 아문젠 해에 서식하는 크릴 *E. crystallorophias*은 지방산중 18:1(n-9)를 포함한 단일 불포화 지방산(monounsaturated fatty acid)이 가장 우점하여 나타났다, 특히 inner bay에서 채집된 크릴에서는 18:1(n-9)를 비롯해 20:1(n-11)의 구성비가 다른 지역에 비하여 매우 높게 나타났다. Inner bay와 outer bay는 지리적으로 근접해 있음에도 불구하고 outer bay의 크릴은 14:0과 16:0을 포함한 포화지방산(saturated fatty acid)이 inner bay의 크릴에 비하여 높은 함량을 보였다. 다른 두 해역(inner bay, outer bay)에 비해 더욱더 내만에 위치해 있는 pine island bay에서 채집된 크릴에서는 포화지방산 16:0과 단일 불포화 지방산 18:1(n-9), 18:1(n-7)이 높게 나타났다. 이와 같이 크릴의 지방산 구성은 모든 해역에서 유사하였으나, 주요 지방산의 구성비는 지역에 따라 차이를 보였다. 또한 크릴의 섭식 생태를 이해하기 위한 입자유기물의 지방산 구성은 outer bay에서는 타 해역에 비해 포화 지방산 16:0과 18:0이 가장 높았으며, 채집 당시 식물플랑크톤 *Phaeocystis* sp. 특히 *Phaeocystis antarctica*의 대번성(bloom)이 일어났던 pine island bay에서는 포화 지방산이 우점하기는 하였으나, 규조류 및 와편모조류에서 기원하는 것으로 알려진 20:5(n-3)과 22:6(n-3)를 포함한 긴 사슬 불포화 지방산(polyunsaturated fatty

acid)이 매우 높게 나타났다. 동물플랑크톤의 섭식형태를 구분하는 지표인 18:1(n-9)/18:1(n-7)의 비를 각 해역에서 채집된 크릴에서 살펴보면, pine island bay에서는 2.33, inner bay에서는 2.46, outer bay에서는 2.52로 나타나, 세 지역의 *E. crystallorophias*는 모두 잡식성 또는 육식성에 가까운 것으로 분류되었다. 그러나 2011년 대륙사면과 폴리냐에서 채집된 크릴은 1.80과 1.69의 비를 보여서 아문젠해에 비해 초식성에 가까운 섭식형태를 가지고 있음을 시사하고 있다. 각 지방산을 포화도에 따라 그룹화하여 살펴보면, 아문젠 해에서 채집된 크릴에는 단일 불포화 지방산이 가장 우점하였으나, 미생물 또는 원생동물에서 기원하는 branched & odd-chain의 지방산들은 거의 검출되지 않았다(Fig. 3.3.5). 이는 2011년의 대륙사면과 폴리냐에서 채집된 크릴의 지방산 구성과 유사하였다. 그러나, 세 해역에서 크릴과 잠재적 먹이원인 부유입자의 먹이 추적 지방산 구성은 서로 상관성이 매우 낮았으며, 섭식형태의 지표로 사용하는 일부 지방산의 비를 통해 연구해역의 크릴 *E. crystallorophias*는 잡식성 또는 육식성의 먹이 습성을 가지는 것으로 추정할 수 있었다. 하지만 pine island bay에서 채집된 크릴은 채집 당시 수층에 대변성한 식물플랑크톤(*Phaeocystis* sp.)을 주로 섭식하고 있었음을 눈으로 확인 할 수 있었다. 이러한 차이는 추가적인 분석(스테롤, 위내용물, 안정동위원소)을 통하여 확인될 예정이다.

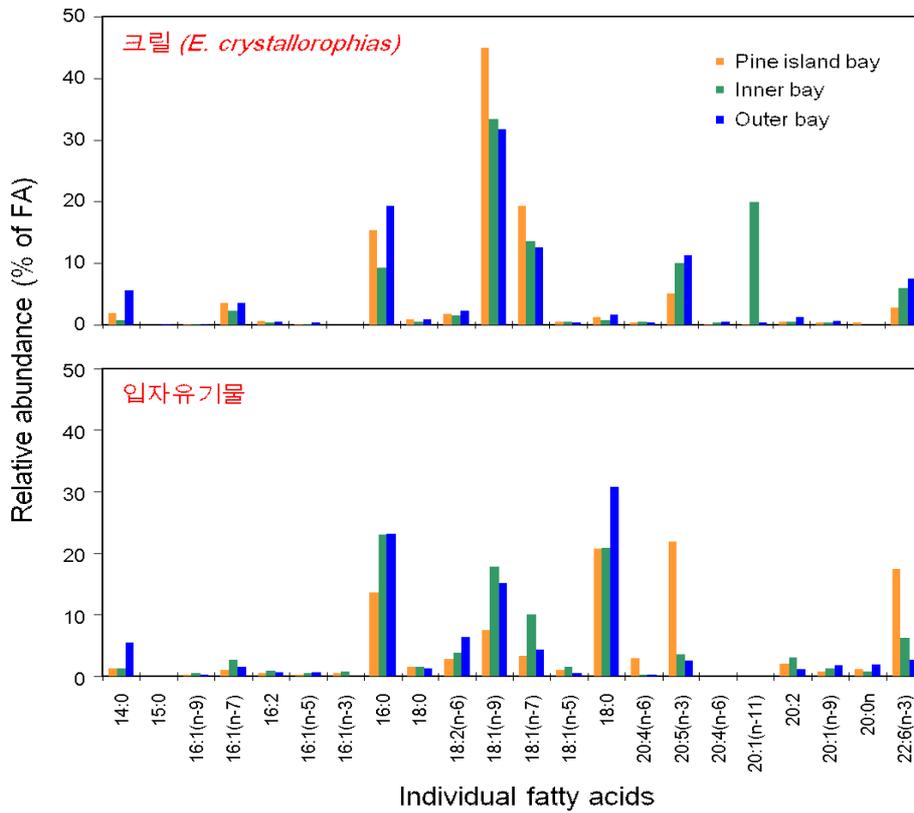


Fig. 3.3.4. Relative abundance (%) of total fatty acids in krill *Euphausia crystallophias* collected from pine island bay, inner bay and outer bay in the study region.

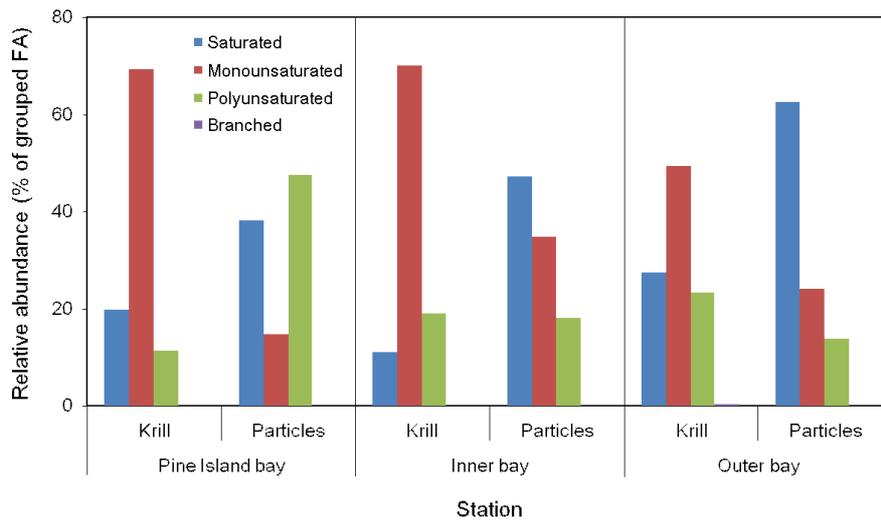


Fig. 3.3.5. Relative abundance (%) of grouped fatty acids in krill *Euphausia crystallophias* and particles sampled from pine island bay, inner bay and outer bay in the study region.

제 4 장 연구개발목표 달성도 및 대외기여도

제 1 절 연구개발 목표 달성도

성과목표	세부목표	평가지표(핵심성과 스펙)	달성여부	가중치(%)
1. 결빙해역 해빙(解氷) 해수 순환 역할 규명 및 생기원원소 침강플릭스 규명	1-1	- 시계열 관측 - 재계류 및 관측 계속	완료 자료획득중	10 10
	1-2	- 해류자료 분석 - 해류자료 분석 및 해석	완료	10
	1-3	- 생기원원소 침강플릭스 측정 - 퇴적물트랩 시료에서 유기탄소와 CaCO ₃ 을 분석하여 침강플릭스 측정	완료	10
2. 남극 아문젠 해역의 폴리나를 중심으로 크릴 분포 특성 파악	2-1	- 크릴 분포 특성 파악 및 밀도추정 - 크릴 분포와 환경자료와의 상관성 분석 - 음향 자료와 네트 채집 자료를 이용한 연구지역 내 크릴 밀도 계산 - 크릴 분포와 환경자료 중 수온과의 연관성 확인	완료	20
	2-2	- 음향자료를 활용한 유빙 인접 혹은 유빙 아래의 크릴 분포 및 밀도 추정 - 유빙 인접해역에서의 음향 자료와 채집 자료로부터 아문젠해 유빙 인접의 크릴 분포 특성 파악	조사완료	10
3. 결빙해역 동물플랑크톤의 섭식 생태 및 역할 변화 이해	3-1	- 아문젠 해역의 동물플랑크톤 시료 확보 - 크릴 및 주요 동물플랑크톤 채집 및 분류	완료	20
	3-2	- 생화학적 지시자 및 위 내용물 분석을 통한 동물플랑크톤 섭식 생태 이해 - 주요 동물플랑크톤(크릴 및 요각류) 위내용물 분석 - 크릴 및 요각류의 지방 및 안정동위원소 분석 - 주요 생물종의 섭식관계 추적과 생화학 구성 자료 제공	지방분석 완료 및 추가분석 전처리	10

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

- 강돈혁, 신형철, 이운호, 김영신, 김수암. 2005. 음향조사에 의한 2002/2003 하계 시기의 남극 남쉐틀랜드 군도와 남오크니섬 사이의 크릴 밀도, *Ocean and Polar Research* 27(1), 75-86.
- 극지연구소, 2012 서남극해 결빙해역의 순환 및 하위생태계 특성 분석, 2차년도 연구보고서, BSPN 65030-10119-3, 60pp.
- Anon. 1986. Yearbook of fishery statistics 1984. Catches and landings, vol 58. FAO, Rome, 451pp.
- Arrigo, K.R. and G.L. van Dijken. 2003. Phytoplankton dynamics within 37 Antarctic coastal polynya systems. *Jour. Geophys. Res.*, 108, 3271.
- Arrigo, K.R., Lowry, K.E. and van Dijken, G. 2012. Annual changes in sea ice and phytoplankton in polynyas of the Amundsen Sea, Antarctica. *Deep-Sea Res. II*, 15:71-76.
- Bakker, D.C.E., H.J.W. de Baar, and U.V. Bathmann. 1997. Changes of carbon dioxide in surface waters during spring in the Southern Ocean. *Deep-Sea Res. II*, 44, 91-127.
- Bottino NR. 1974. The fatty acids of Antarctic phytoplankton and euphausiids. Fatty acid exchange among trophic levels of the Ross Sea. *Mar Biol* 27:197-204.
- Budge SM, Springer AM, Iverson SJ, Sheffield G, Rosa C. 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 SE, Loneragan NR, Kempster MA. 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*, 63:928-935.
- Cripps GC, Atkinson A. 2000. Fatty acid composition as an indicator of carnivory in Antarctic krill, *Euphausia superba*. *Canadian J Fish Aqua Sci* 57:31-37.
- Cripps GC, Watkins JL, Hill J, Atkinson A. 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.

- Everson, I. 2000. Distribution and standing, The Southern Ocean. p. 63-79. In: Krill Biology, Ecology and Fisheries.ed. by I. Everson. Blackwell Science, London.
- 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 McClatchie, S. 1991. Acoustic estimates of Antarctic krill. *Nature*, 349:110.
- Guglielmo, L., Donato, P., Zagami, G. and Granata, A. 2009. Spatial-temporal distribution and abundance of *Euphausia crystallorophias* in Terra Nova Bay (Ross Sea, Antarctica) during austral summer. *Polar Biol* 32:347-367.
- Gulland JA. 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.
- Hewitt, R.P., Watkins, J., Naganobu, M., Sushin, V., Brierley, A.S., Demer, D., Kasatkina, S., Takao, Y., Goss, C., Malyshko, A., Brandon, M., Kawaguchi, S., Siegel, V., Trathan, P., Emery, J., Everson, I. and Miller, D. 2004. Biomass of Antarctic krill in the Scotia Sea in January/February 2000 and its use in revising an estimate of precautionary yield. *Deep-Sea Res. II*, 51:1215-1236.
- Jacobs, S.S., and Comiso, J.C. 1997. A climate anomaly in the Amundsen and Bellingshausen Seas. *J. Climate*, 10:697-711.
- Jarvis, T., Kelly, N., Kawaguchi, S., van Wijk1, E. and Nicol, S. 2010. Acoustic characterisation of the broad-scale distribution and abundance of Antarctic krill (*Euphausia superba*) off East Antarctica (30-80°E) in January-March 2006, *Deep-Sea Res. II*, 57:9-10.
- Jolly, G.M. and Hampton, I. 1990. A stratified random transect design for acoustic surveys of fish stocks, Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences, 47(7):1282-1291.
- Jones, A.G.E. 1982. Antarctica Observed. Caedmon of Whitby, Yorkshire, UK. 118pp.
- Ju SJ, Harvey HR. 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 SJ, Kucklick JR, Kozlova T, Harvey HR. 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 RM. 1977. Seals and whales of the Southern Ocean. *Phil Trans R Soc London, Ser B* 279:81-96.
- Lee RF, Hagen W, Kattner G (2006) Lipid storage in marine zooplankton. *Mar Ecol Prog Ser* 307:273-306.
- Loeb V, Siegel V, Holm-Hansen O, Hewitt R, Fraser W, Trivelpiece W, Trivelpiece S. 1997. Effects of sea-ice extent and krill or salp dominance on the Antarctic food web. *Nature* 387:897-900.
- Miller, D. and Agnew, D. 2000. Management of krill fisheries in the Southern Ocean. In: *Krill Biology, Ecology and Fisheries*. ed. by I. Everson. Blackwell Science, London. pp. 300-337.
- Myriax Pty Ltd. 2008. EchoView Myriax software Pty Ltd, Hobart, Tasmania, Australia.
- 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 CF, Nelson MM, Mooney BD, Nichols PD (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 LB, Ross RM. 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). *Sci. Mar.*, 66(2):123-133.
- Sargent JR, Henderson J, Tocher DR. 1989. The lipids, In: Halver JE (ed) *Fish Nutrition*. pp 153-218.
- Schmidt K, Atkinson A, Petzke K-J, Boss M, Pond DW. 2006. Protozoans as a food source

- for Antarctic krill, *Euphausia superba*: Complementary insights from stomach content, fatty acids, and stable isotopes. *Limnol Oceanogr* 51(5): 2409-2427.
- Siegel, V., Bergström, B., Strömberg, J.O. and Schalk, P.H. 1990. Distribution, size frequencies and maturity stages of krill, *Euphausia superba*, in relation to sea-ice in the northern Weddell Sea, *Polar biology*, 10:549-557.
- SIMRAD. 2003. Simrad EK60 Scientific Echo Sounder system Instruction manual. Horten, Norway.
- Smith Jr, W.O. and Barber D.G. 2007. Polynyas: Windows to the world. Elsevier, Amsterdam
- Søreide JE, Tamelander T, Hop H, Hobson KA, Johansen I. 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.
- Stanton, T.K. and Chu, D. 2000. Review and recommendations for the modelling of acoustic scattering by fluid-like elongated zooplankton: euphausiids and copepods. *ICES J. Mar. Sci.* 57(4):793-807.
- Virtue P, Nichols PD, Nicol S, McMinn A, Sikes EL, 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 DP, Brandon MA, Jenkins A, Allen JT, Dowdeswell JA, Evans J, 2007, Oceanic heat transport onto the Amundsen Sea shelf through a submarine glacial trough. *Geophys. Res. Lett.* 37(L02602), doi: 10.1029/2006GL028154.