

BSPP16020-002-12

서남극 아문젠해역 생태계와 해양순환
변동 연구

Physical & Bio-geochemical Processes
in the Amundsen Sea: Their Roles & Responses in
Global Climate Change

극지연구소

2017. 1.

극지연구소

제 출 문

극지연구소장 귀하

본 보고서를 “서남극 아문젠해역 생태계와 해양순환 변동 연구”과제의 2014-2016 단계
보고서로 제출합니다.

2017. 1. 30

연구책임자: 이상훈

극지연구소 참여연구원

조경호, 김태완, 박태욱, 함도식, 박기홍,

정진영, 양은진, 박지수, 나형술, 하선용,

황청연, 김창신, 김인태, 이영주

위탁연구기관 1: 한국해양연구원

위탁연구책임자: 이재학

위탁연구기관 2: 충북대학교

위탁연구책임자: 이성근

위탁연구기관 3: 서울대학교

위탁연구책임자: 김덕진

위탁연구기관 4: 한양대학교

위탁연구책임자: 현정호

위탁연구기관 5: 서울대학교

위탁연구책임자: 황점식

위탁연구기관 6: 부산대학교

위탁연구책임자: 이상헌

위탁연구기관 7: 충남대학교

위탁연구책임자: 최만식

기술자문: 네오씨텍(주) 함석현



보고서 초록

과제관리번호		해당단계 연구기간	2014.1.1 - 2016.12.31	단계 구분	2단계/3단계 총 9년
연구사업명	중 사업명				
	세부사업명				
연구과제명	중 과제명	극지연구 인프라 공동 활용을 통한 녹색성장과 글로벌 이슈대응 (K-Polar)			
	세부(단위)과제명	서남극 아문젠해역 생태계와 해양순환 변동 연구			
연구책임자	이 상 훈	해당단계 참여연구원수	총 : 28명 내부 : 11명 외부 : 17명	해당단계 연구비 (직접비)	정부: 57.2억원 기업: 0 계: 57.2억원
연구기관명 및 소속부서명	극지연구소 해양환경연구부		참여기업명		
국제공동연구	상대국명 : 영국 상대국연구기관명 : 남극연구소 (BAS) 상대국명 : 미국 상대국연구기관명 : Rutgers Univ, NYU, LDEO, NOAA, URI 상대국명 : 스웨덴 상대국연구기관명 : Gotenberg Univ 상대국명 : 프랑스 상대국연구기관명 : L'Ocean Group 상대국명 : 노르웨이 상대국연구기관명 : Bergen Univ. 상대국명 : 중국 상대국연구기관명 : 제 3 해양연구소				
위 탁 연 구	연구기관명 1 : 한국해양연구원 연구책임자 : 이재학 연구기관명 2 : 충북대학교 연구책임자 : 이성근 연구기관명 3 : 서울대학교 연구책임자 : 김덕진 (2015 종료) 연구기관명 4 : 한양대학교 연구책임자 : 현정호 연구기관명 5 : 서울대학교 연구책임자 : 황점식 연구기관명 6 : 부산대학교 연구책임자 : 이상현 연구기관명 7 : 충남대학교 연구책임자 : 최만식				
요약				보고서면수	
<ul style="list-style-type: none"> ◦ 쇄빙연구선 아라온호를 이용한 아문젠해 종합해양연구 (연구목표: 서남극 온난화 원인과 경향, 온난화에 따른 생태계와 생지화학순환 변화 연구) - 2013/2014 제 3차 및 2015/2016 제 4차 현장조사에서 획득한 시료와 자료 처리 및 분석, 논문화작업 연중 실시. ◦ 아문젠해역 수괴 분포와 해류 순환 패턴, 빙해역, 폴리니아, 대륙사면 등 다양한 남극 해양환경의 식물플랑크톤 종류, 분포, 생산력, 규산염, 아질산염+질산염, 암모니아, 인산염 등 기초자료 분석. ◦ 광대역 식물플랑크톤 생리활성(FIR: Fluorescence Induction and Relaxation), 부유 원생동물 생태적 분포 특성, 중형 동물플랑크톤 분포와 우점종 섭식율 등 자료 분석. ◦ 아문젠해 온난화에 따른 생태계 환경변화 및 반응, 탄소순환/생지화학순환 경로 연구. 					
색 인 어 (각 5개 이상)	한 글	해빙, 물질순환, 기후변화, 아문젠해, 생태계, 폴리니아			
	영 어	sea ice, biogeochemical cycle, climate change, Amundsen Sea, ecosystem, polynya			

요 약 문

I. 제목

서남극 아문젠해역 생태계와 해양순환 변동 연구

II. 연구개발의 목적 및 필요성

1. 목적

- 가. 쇄빙연구선 아라온이 2009년에 취항함에 따라, 쇄빙연구선을 유·결빙해역 종합연구에 본격 활용하는 국제협동연구 프로그램을 최초로 극지연구소에 창설·운영
- 나. 극지방 온난화의 진원지인 서남극 결빙(結氷)해역과 해빙생태계의 지구 기후/환경변화 진원지 및 반응지로서의 역할 규명; 온난화에 따른 해류순환, 해빙, 생태계의 변화를 파악하고 향후 지구 환경 변화 추세를 예측
- 다. 극지결빙 해역 변화를 전지구 변화와 연계 고찰할 수 있는 다층(多層) 중장기 관측 시스템(우주 인공위성부터 심해 퇴적물 트랩까지)을 구축
- 라. 결빙해역 연구에 중·저위도 통과해역 연구를 연계시켜 결빙해역 유래 기후변화 신호의 지구시스템 파급 과정을 이해하고 선진국 지구 관측 네트워크에 주도적 참여

2. 필요성

가. 기술적 측면

- (1) 지구 생태계는 급격한 기후변화와 온실기체의 증가로 온난화 가속, 해양 산성화 등 근본적인 변화를 겪고 있음. 서남극 결빙해역은 변화의 진원지(해빙 후퇴, 빙상 붕괴)이자 반응지(연쇄적 파급효과)로서 중요한 연구대상임
- (2) 지구 온도를 조절하는 저층냉수의 생성량과 온실기체 처리능력 등이 크게 달라질 것으로 예상되며, 결빙해역과 개구부(開口部, polynya)는 향후 변화를 예측할 수 있는 시금석인 동시에, 미래 전 지구적 기후변화 예측을 위하여 극지방 해빙과 해류순환 변화에 대한 연구는 반드시 필요.
- (3) 대한민국 최초의 쇄빙연구선을 활용하여 우리 자체의 유·결빙해역 연구기술 축적이

시급

나. 경제·산업적 측면

- (1) 극지역 발원 변화는 전지구 규모로 파급되며 중·저위도권 해양은 이러한 변화가 매개되는 경로이자 경제활동(교통, 물류, 어업)의 장소임. 북극항로 개방, 수온 상승, 빈산소층 확대, 생물량 감소, 먹이사슬 단순화 등이 예견되는 바, 관련 산업의 대비를 위해 정기적인 관측과 예측 능력의 배양이 필요함
- (2) 쇄빙연구선을 기반으로 하는 관측 및 시료 수집과 인공위성을 활용한 원격 관측의 활용, 모델링 연구의 결합으로 배경 기작에 대한 이해와 예측 능력 증진
- (3) 생물 다양성, 유전자 DB 등 무형 유형의 자원 활용기반 확보

다. 사회·문화적 측면

- (1) 쇄빙연구선 활용 대표 연구프로그램으로 정착, 국제적으로 인정받는 활동과 성과의 창출로 국민적 자긍심과 한국의 브랜드 가치 제고
- (2) 국제관측 네트워크에 참여하여 우리 프로그램의 질적 성장을 도모하고, 중장기적으로 대한민국이 주도하는 국제공동연구 네트워크와 프로그램을 구축함으로써, 성숙하고 책임있는 지구촌 구성원으로 발전하여, 궁극적으로는 지구환경연구를 리드하는 선도국가로 부상

극지연구소

III. 연구개발의 내용 및 범위

- 서남극 온난화의 원인과 추세를 규명하여 미래 예측
 - 온난화 모델시스템으로서 아문젠 결빙해역 해류순환, 해양-대기-해빙 상호작용, 남극빙하후퇴와 해수면상승 연구
- 온난화가 서남극 물질순환과 생태계에 미치는 파급효과 사정
 - 생지화학 물질순환 및 생태계의 기후환경변화에 대한 반응 규명
- 부수적으로
 - 급속 온난화 해역에 다층(多層) 중장기 관측시스템 구축 (인공위성 - 심해저)
 - 한국-남극 통과해역 관측을 연계, 기후변화 신호의 전지구적 파급과정 이해
 - Leading Science 수행으로 지구관측 네트워크 주도 선진과학 연구국가 부상

가. 해류순환 및 생지화학순환 중장기 관측 및 모니터링

- 관측시스템 보강: 계류장비 추가확보 및 노후장비 현대화
- Dotson, Pine Island Bay 등 관측거점 중장기 운용

- 결빙해역 기원 저층 냉수 변화가 대양순환과 온난화에 미치는 영향 파악
- 나. 해류와 용빙수 유입/유출에 대한 아문젠해역 박스모델 개발
- 아문젠 대륙붕 해역 해류순환 박스모델 개발과 테스트
- 다. 생지화학 물질순환의 주요 경로에 따른 물질순환 Flux 계산
- 대기-해양-해저 경로를 따라 추적된 물질 (탄소, 질소, 온실기체 등)의 Flux 파악
- 라. 생태계와 생리현상 중장기 관측자료 분석, 종조성, 다양성, 생리활성 등 파악
- 논문화 및 중장기 모니터링을 위한 개선사항 (측정항목, 측정방법 등) 도출
- 마. 국제협력사업을 **한국주도 서남극 중장기 종합해양관측망으로 유도 발전**
- 프랑스, 미국, EU 팀과 아문젠 인근 주요 관측거점 분담 (East Ross Sea, ACC)
 - 남위 60도 - 75도 생지화학 순환 Flux, 생태계 모니터링 연구거점 운영
 - SOOS 산하의 한국주도 국제공동 관측프로그램으로 확대 고착



IV. 연구개발결과

1. **아문젠해 수층 구조 특성:** 2014년과 2016년 남반구 여름에 두 번에 걸쳐서, 쇄빙연구선 아라온호를 이용하여 남극 아문젠 해에서 종합적인 해양탐사를 실시하였다. 해양물리분야의 주된 연구주제는 아문젠해(Amundsen Sea)에서 남극순환심층수(circumpolar deep water) 분포의 시공간적인 변동성을 규명하고 빙봉 용해수의 분포 및 해양순환에 미치는 영향을 규명하는 것이다. 총 81개의 CTD 정점에서 수직 수온, 염분 및 유속과 해수 샘플을 획득하였다. 2014년에 설치하였던 6기의 계류 시스템 중 닷슨 빙봉(Dotson Ice Shelf) 전면 및 서쪽에 설치된 4기의 계류시스템을 회수하였다. 닷슨 골(Dotson Trough)의 입구에서는 2014년 관측시 2012년보다 얇았던, CDW의 두께가 2016년 관측시 다시 두터워 졌으며, 2016년 폴리냐에서의 수온, 염분의 수직단면에서도 2012년과 유사하게 닷슨 골의 동쪽사면에서 CDW 유입량이 서쪽사면에 비해 많은 것으로 나타났다. 2년 동안 닷슨 빙봉 전면에서 관측된 수직 유속은 빙봉의 동쪽사면 저층에서 20cm s^{-1} 이상의 남서쪽 흐름이 나타났으며, 서쪽사면의 중층에서는 북동방향의 흐름이 우세하였다.

2. **아문젠 화학환경 특성:** 아문젠해의 물질순환 과정과 기후변화에 따른 빙하 소실 과정의 시간 변동성 및 빙하 용빙수의 해양 내 분포 양상을 이해하고자 (1) 영양염, (2) 용존 유기탄소, (3) 입자상 유기탄소 및 질소, (4) 불활성기체, (5) dimethyl sulfide (DMS)의 분포를 조사하였다. 아문젠 해역에서는 소모비율이 뚜렷이 다른 두 개의 질산염과 인산염의 관계가 관측되었고 *Phaeocystis antarctica*와 diatom이 주요 식물플랑크톤 종이라는 것을 시사하였으며 아문젠 해역에서의 탄소순환을 이해하기 위해서는 식물플랑크톤의 종에 따른 탄소소모율을 반영해야 한다는 것을 시사했다. 2013-14년도 항해에서는 폴리냐 내에서 표층뿐만 아니라 깊은 수심 (< 700 m)에서도 약 70 μM C의 용존유기탄소가 관측되어 아문젠 폴리냐 내에서 생물학적 활동에 의해 식물플랑크톤에서 기인한 입자상 유기탄소가 활발히 분해되고 있음이 시사되었다. 이에 비해 2015-16년도에 표층에서 1000 m까지의 수심에서 관측된 용존유기탄소 결과는 2013-14년도 항해에서 얻어진 농도보다 낮은 범위인 25-60 μM C의 농도범위를 보여 두 항해기간의 해양환경이 상당히 다른 것으로 확인되었다. 또한 입자성 유기탄소 및 유기질소는 아문젠 폴리냐에서 상당히 높은 농도를 유지하고 있었으며, 표층에서 높고 수심이 깊어짐에 따라서 농도가 낮아지는 경향을 보였다. 빙하 내에 존재하는 기포는 빙하의 용해과정에 불활성기체의 과포화를 유발한다. 아문젠해 Dotson ice shelf 앞에서 24%이상의 He 과포화가 관측되었으며, 해류의 순환과 혼합에 따라 점차 외해로 가면서 과포화 정도가 감소하는 양상을 보였다. 또한, 2012년에는 전 년에 비해 30-40% 가량 빙하용해수의 양이 감소한 것으로 관측되었다. 이러한 결과는 빙하용해수가 200 km 이상의 외해까지 해양의 물리, 화학 현상에 영향을 미칠 수 있으며, 1년 이내의 짧은 시간에도 상당한 변화가 있음을 시사한다. 폴리냐 내에서 표층해수의 용존 DMS 농도는 < 1-400 nM 까지 매우 큰 범위에서 분포 하였다. 가장 고농도의 DMS는 해빙-폴리냐의 경계지역과 Getz 빙봉의 부근에서 관측 되었다. 다른 관측지역들에서 높은 농도의 DMS는 일반적으로 높은 클로로필과 산소-아르곤비와 함께 나타났다. 아문젠해 폴리냐 표층에서의 이러한 큰 DMS의 농도 분포와 일차생산은 해빙의 용빙 정도, DMS의 주 배출자인 *Phaeocystis antarctica*의 우점 정도, 그리고 플랑크톤의 블룸과 이어 발생하는 DMS의 생산간의 시간차에 의해 나타나는 것으로 추정되었다. DMS의 수직 분포 또한 수평 분포와 같이 주목할만한 변화의 폭을 가지고 변화하였으며, 대체로 산소-아르곤 비와 일치하였다. 하지만 과거의 2009년에 보고된 연구결과 비교시, 뚜렷한 해빙지역과 폴리냐 지역의 농도차이는 볼 수가 없었다. 이러한 결과는 블룸 기간, 해빙상태 및 관측경로에 따른 식물플랑크톤 분포의 경년변동에 기인한 것으로 추정되었다.

3. **식물플랑크톤 광합성생리활성:** 아문젠사업 2단계 연구기간 동안 아라온을 활용한 두

차례의 아문젠해 현장관측이 이루어졌다. 첫 번째 항해는 2013년 12월 31일부터 2014년 1월 15일까지 16일간 수행되었으며, 이 기간 식물플랑크톤 생리활성특성을 연구하기 위한 총 연구정점은 26개 정점이었고, 두 번째 항해는 2016년 1월 15일부터 2월 16일까지 총 33일간 52개 정점에서 수행되었다. 연구해역에서 수직 해수 채수와 표층 연속관측을 통해 Fluorescence Induction and Relaxation (FIRe) 장비를 사용하여 식물플랑크톤의 광합성 최대효율 변수인 Fv/Fm 값 등을 측정하였으며, 남극해 식물플랑크톤 성장 제한요인으로 잘 알려져 있는 철분과 빛 제한에 대한 효과를 알기 위해 현장에서 배양실험을 수행하였고, 광량 등의 위성자료도 분석에 활용되었다. 과거의 연구결과와 종합해, 아문젠해역의 식물플랑크톤 성장 및 생물량을 조절하는 요인으로 철분과 함께 빛의 제한이 매우 중요함을 밝힐 수 있었다.

4. **식물플랑크톤 군집에 영향을 미치는 환경특성:** 아문젠 해역에서 식물플랑크톤 군집은 *Phaeocystis antarctica* (Prymnesiophytes)와 규조류가 우점하며 이 두 그룹은 아문젠 폴리니아의 생지화학 순환에 다른 역할을 한다. 아문젠 폴리니아에서 식물플랑크톤 군집의 변동에 영향을 주는 환경 요인을 파악하기 위하여 2014년 1월과 (ANA04B) 2016년 1월 (ANA06B) 현장조사가 이루어졌다. 조사수역에서 2014년과 2016년 1월 모두 해빙이 많이 감소하였으나 2016년 1월에 월평균 일조량이 상대적으로 낮게 나타났고 평균 chl-a 농도 또한 2016년 1월이 낮았다. 폴리니아 중앙해역에서 식물플랑크톤 군집은 2014년 1월에 *P. antarctica*가 우점하여 나타났으나 2016년 1월에는 규조류와 *Dictyocha speculum* (Chrysophytes), *P. antarctica*가 우점종으로 나타났다. 이는 급격한 환경변화를 보이는 아문젠 폴리니아에서 수중 광 환경이 식물플랑크톤 군집구조와 생물량에 중요한 영향요인 중 하나일 수 있음을 시사한다.
5. **생물음향:** 아문젠해의 대표적 빙봉인 Dotson과 Getz 빙봉은 과거 20년 동안 급격한 변화를 겪어왔다. 생물음향 분야에서는 지난 아문젠 탐사 동안 높은 생물량의 아이스크릴이 아문젠해 폴리냐 중앙에 분포하는 것을 관측하였다. 특히 인접한 Dotson 빙봉과 Getz 빙봉 주위의 해양환경 특성이 매우 달랐으며 아이스크릴의 밀도 또한 Dotson보다 Getz에서 높게 관측되었다. 본 보고서에서는 아문젠해 대표 빙봉인 Dotson 빙봉 주변에 서식하는 중대형 동물플랑크톤의 종 구성과 음향산란층 (sound scattering layer)의 수직·수평 분포 변화를 확인하였다. 음향산란층은 어류, 중형 동물플랑크톤, 대형 동물플랑크톤으로 구분할 수 있었으며 이들 세 그룹이 분포하는 주요 서식 수심과 지리적인 위치는 서로 다르게 나타나는 것을 확인하였다. 동물플랑크톤 분포의 시공간적인 변화를 관측함으로써 급격한 해양환경 변화를 겪고 있는 아문젠해

에서의 동물플랑크톤 분포의 변화 원인과 해양생태계에서의 역할을 이해하는데 도움이 될 것으로 판단된다.

6. **미생물 생태 특성:** 박테리아와 바이러스를 포함한 해양 미생물은 전 지구적으로 가장 많은 수를 차지하고 있으며, 해양의 생지화학적 순환에서 중요한 역할을 담당하고 있다. 해양 바이러스는 입자성 유기물인 숙주 생물을 용균시켜 용존성 유기물을 증가시키며, 숙주 생물에 포함되어 있는 영양염을 해수로 용출시켜 재순환시키는 역할을 담당한다. 박테리아는 입자성 유기물을 용존성 유기물로 변환시키는 기초 생태계의 중요한 구성원으로, 환경 요인의 변동에 따라 이들의 군집 구조는 민감하게 반응하는 것으로 알려져 있다. 본 연구에서는 남극 아문젠해의 미생물 생태 특성을 이해하기 위해 2014년 1월 탐사를 통해 아문젠해 폴리나 및 인근 해역에 출현하는 바이러스의 분포와 용원성 박테리아의 출현 빈도, 식물플랑크톤과 연관성을 갖는 박테리아의 종 구성에 대한 실험을 수행하였다. 현재까지 분석된 결과에 따르면, 폴리나의 표층 바이러스 개체수($8.1 \times 10^6 - 1.6 \times 10^7$ viruses/ml)는 박테리아에 비해 평균 14배 많은 수를 보였다. 용원성 박테리아는 5개 중 4개의 표층 시료에서 미검출 수준으로 낮은 것으로 나타나, 용원성 바이러스 생산의 기여는 크지 않을 것으로 추정된다. 16S rRNA 유전자 서열을 분석한 결과, 식물플랑크톤 농축 시료에서 분리된 박테리아는 주로 식물과 관련된 종 또는 남극해에서 출현했던 기존 종들과 유사하였다.

극지연구소

V. 연구개발결과의 활용계획

1. 서남극의 가장 급격한 온난화 해역인 아문젠해에서 다음 단계 연구사업 (연구주제: 아문젠 빙봉소멸 속도 추정과 용빙수 유입이 해양에 미치는 영향 연구)의 선행연구로 활용 (아래 로드맵 참조).

연구분야	2017	2018	2019
빙봉 소멸	아문젠해 해류순환과 열수지 기존 확보자료 분석	빙봉소멸속도 해양열수지 실측 및 자료분석	아문젠 빙봉소멸 과정과 속도 실측 (국제공동연구)
용빙수 영향	용빙수 성분과 분포 기존 확보자료 분석	용빙수 성분과 유입량, 분포 및 확산 측정	용빙수와 해양환경 상호영향 규명
생지화학적순환 & 생태계	생지화학적순환과 생태계 기존 확보자료 분석	용빙수 영향권 대조해역 비교 조사, 차이점 파악	용빙수 영향권 대조해역 비교, 차이점 규명
현장조사			

2. 중장기, 전지구 시스템 기후변화 방향 예측과 변화 양상 이해를 통해 정책 입안 과정에 학술적인 근거를 제공함

3. 기후변화 국제 논의과정에서 인용되는 연구결과 산출과 발언권 유지
4. 한반도 기후와 차례대로 연계되는 태평양 중·저위도권, 남북극 해역의 연구를 토대로 기후변화 예측 능력 강화
5. 태평양 생태계 변화로 인한 어업 잠재력과 분포 변화 예측; 국외 공해역 어업 관리와 정책 입안에 기본 자료 활용
6. 그동안 선진국들도 연구범위에 포함하지 못했던 미답지에서 자료 축적으로 독자적 연구 성과 창출, 국제 과학 협력의 중심으로 부상
7. 인공위성 관측 결과를 중장기 광역 추세 파악과 생태계 관리에 활용하는 기술 축적, 다른 해역에서도 적용, 인공위성 자료 보정을 위한 실측 자료 생산
8. 해양미소생물 종 다양성과 생리 활성 자료를 전지구 규모로 확보, 생물자원 자산화
9. 미답지 자료축적, 국제공동연구 네트워크 참여, 결빙해역 연구능력 함양 등을 통하여 한국의 과학 선진국 리더십 함양, 국제사회에서 영향력과 브랜드 가치 제고

S U M M A R Y

I. Title

Sea ice zone in Amundsen Sea as a model system to observe the global warming and its impacts

II. Research Goal

Research goal of this study is;

1. To assess the rapid warming of the Amundsen, and related physical, chemical, and biological processes under the current trend of climate change, by implementing an Earth observation system from space down to deep sea.
2. To assess the impacts of the warming on the biology and biogeochemistry in the region, in particular, the polynya and costal waters.
3. To understand the temporal and spatial distributions of the climate gases in and out of the ploynya and their fluxes along with ecological processes

III. Major Lines of the Work

Scientific research was carried out either in laboratory or shipboard in the field;

1. To determine the spatial and temporal variability of the basic physical properties of sea ice that are important to air-sea interaction and to biological processes in the rapidly melting Antarctic sea-ice zone (ice and snow cover thickness distributions; structural, chemical and thermal properties of the snow and ice; upper ocean hydrography; floe size and lead distribution).
2. To document changes in hydrography and biogeochemical cycles associated with sea ice variabilities and to investigate the significance in larger temporal and spatial scales.
3. To examine the links between biogeochemical processes and food web structure, including the identification of key functional groups and interactions, and the

roles.

4. To study and predict the impacts of the combined changes in ocean physics, biogeochemical capacities, and marine ecosystems in ms in waters.
5. To undertake sustained measurements and sampling programs in waters transecting between the study sites in both poles and to detect basin scale and decadal changes.

IV. Results

1. Physical Oceanography in the Amundsen Sea. In order to monitor the temporal and spatial variation of circumpolar deep water (CDW) and its effect on the rapid melting of glaciers in the Amundsen Sea, an extensive oceanographic survey was conducted on the 2016 expedition (ANA06B). During the 2016 Amundsen Sea cruise (ANA06B) by IBRV Araon, a total of 81 CTD stations were visited, 9 moorings were successfully recovered and 6 moorings were newly deployed on the shelf troughs and near the ice shelf fronts. The thickness of CDW (defined by 0°C isotherm) along the Dotson trough was much thinner in 2014 than in 2012 (Figure 1.2). However, the thickness of CDW layer at continental shelf break had rebounded back in 2016 and the CDW layer thickness was large compared to 2012. Two transects across the Dotson Trough show the intrusion of warm CDW, tilting toward the eastern side of the trough. A strong southward flow greater than 20cm s^{-1} was measured near the bottom at eastern side of Dotson Ice Shelf from the two years mooring. At the western side of Dotson Ice Shelf, the northward flow was measured at 400 m depth.

2. Chemical Oceanography in the Amundsen Sea. To understand biogeochemical cycles and quantify basal melting rate and its temporal variation, distributions of (1) nutrients, (2) dissolved organic carbon (DOC), (3) particulate organic carbon (POC) and nitrogen (PON), (4) noble gases and (5) dimethyl sulfide (DMS) were investigated in the Amundsen Sea. Two distinctive disappearance ratios of $\text{NO}_3:\text{PO}_4$ were observed, suggesting that *Phaeocystis antarctica* and diatom were dominant phytoplankton species. This result also reflected that different carbon

uptake ratio by different phytoplankton taxa, which should be considered to estimate carbon flux in the Amundsen Sea. In 2013–14, high DOC concentrations (40–140 $\mu\text{M C}$) were observed between surface and 700 m, suggesting that remineralization of particulate organic matters by microbial activities was significant. In contrast, DOC concentrations observed in 2015–2016 ranged from 25–60 $\mu\text{M C}$, suggesting that marine environment was significantly different between two periods. POC and PON concentrations were high in the Amundsen polynya, and decreased with increasing depth. The results for noble gases exploited the fact that when glacier melts under high hydraulic pressure, it produces significant supersaturation ($\text{DHe} \sim 1000\%$) of helium in the water column. Helium supersaturation was highest near the ice shelf ($> 24\%$) and it gradually decreased as it went far away from the ice shelf, reflecting the glacial meltwater input from the base of the ice shelf and subsequent advection and mixing by overturning circumpolar deep water (CDW). The temporal variation of the meltwater fraction appeared to be significant. Near the Doton and Getz ice shelves the meltwater fraction of 2012 was 30–40% lower than that of 2011. These results imply that glacial meltwater influences the physical and biogeochemical processes at places as far as 300 km away from ice shelves and the rate of basal melting varies in a time scale as short as less than a year. The surface water concentrations of DMS varied from <1 to 400 nM. The highest DMS (up to 300 nM) were observed in sea ice - polynya transition zones and near the Getz ice shelf, where both the first local ice melting and high plankton productions were observed. In other regions, high DMS concentration was generally accompanied by higher chlorophyll and $\Delta\text{O}_2/\text{Ar}$. The large spatial variability of DMS and primary productivity in the surface water of the Amundsen Sea seems to be attributed to melting conditions of sea ice, relative dominance of *Phaeocystis antarctica* as a DMS producer, and timing differences between bloom and subsequent DMS productions. The depth profiles of DMS and $\Delta\text{O}_2/\text{Ar}$ were consistent with the horizontal surface data, showing noticeable spatial variability. However, despite the large spatial variability, in contrast to the previous results from 2009, DMS concentrations and $\Delta\text{O}_2/\text{Ar}$ in the surface water were indistinct between between the two major domains: the sea ice zone and polynya region. The discrepancy may be associated with inter-annual variations of phytoplankton assemblages superimposed on differences in sea-ice conditions,

blooming period, and spatial coverage along the vast surface area of the Amundsen Sea.

- 3. Characteristics of phytoplankton ecology and biological environment in the Amundsen Sea.** Two cruises were conducted in the Amundsen Sea of the Southern Ocean in austral summer (January 2014 and January–February 2016) on board R/V icebreaker ARAON. The total stations for phytoplankton physiological study were 26 and 52, respectively where seasonally sea ice covered zone, Amundsen & Pine Island polynyas, and open sea were included. During the cruise, we mainly observed maximum photosynthetic quantum efficiencies (F_v/F_m) using Fluorescence Induction and Relaxation system (FIRe) for understanding the characteristics of phytoplankton ecology and biological environment. Moreover, to demonstrate that iron limited responses of natural phytoplankton assemblages, we carried out iron assimilation experiments at four stations (open sea, outer shelf, polynya center, front of ice shelf) during more than seven days. Satellite data of daily solar irradiance were also used for analysis light regimes of study area. Both observed and analysed data clearly showed that light availability rather than Fe controls the magnitude of massive phytoplankton bloom in this most productive system in the Southern Ocean.
- 4. Environmental factor controlling phytoplankton community structure in the Amundsen Sea Polynya.** The Amundsen Sea, Antarctica, is one of the vulnerable area, where increased basal melting and upwelling have occurred. Phytoplankton community dominated by *Phaeocystis antarctica* (Prymnesiophytes) and/or diatoms during the bloom periods, and they play different roles in the biogeochemical cycle of the Amundsen Sea polynya (ASP). To understand the distribution of phytoplankton community and the influential environmental factors in the ASP, the field surveys were conducted in January 2014 and 2016. The mean open water area of the ASP was largely extended during both austral summer of 2014 and 2016. However, the average insolation was dramatically lower in January 2016 with a lower phytoplankton biomass (chl-a) than January 2014. Phytoplankton community dominated by *P. antarctica* in January 2014, while diatoms, *Dictyocha speculum* (Chrysophytes), and *P. antarctica* were co-dominated

in the ASP in January 2016. These results indicated that the light availability could be one of the important influential factors for phytoplankton biomass and community structure in the habitat conditions of rapidly thinning ice shelves and sea ice loss in the ASP.

5. Bioacoustics. The DIS and GIS, two representative ice shelves in the Amundsen Sea coastal polynya, have dramatically thinned during the past two decades: the elevation have been changed 36 ± 2 cm year⁻¹ and -17 ± 6 cm year⁻¹ from 1992 to 2001 (Shepherd et al., 2004). During the last Amundsen Sea expeditions, we found that ice shelf is one of main habitats for ice krill and high density of ice krill was distributed within coastal polynya. Interestingly, two closed ice shelves showed different environmental condition, as well as ice krill density was highly different that the higher density was represented around GIS than that around DIS. In this report, we observed the meso- and macrozooplankton compositions and the vertical and horizontal distribution of sound scattering layer (SSL) around Dotson ice shelf. The SSL was classified with fish, mesozooplankton, and macrozooplankton using dB difference method. These three groups represent the different pattern in the vertical habitat and regional location within study region. This result could support to understand the variation of zooplankton compositions and the role of zooplankton in the Amundsen Sea marine ecosystem.

6. Microbial ecology in the Amundsen Sea Marine microbes including bacteria and viruses are the most abundant organisms on the planet and play vital roles in the biogeochemical cycle in marine environments. Marine viruses influence the production of dissolved organ matters (DOM) and increase regeneration of nutrients by destruction of their hosts formed in particulate. Bacteria are important members of microbial foodweb which transform DOM into bacterial biomass in particulate form. Bacterial community structure is susceptible to the change of environmental conditions. To understand ecological characteristics of marine microbes in the Amundsen polynya and its vicinity, we investigated (1) spatial distribution of viruses, (2) the occurrence of lysogenized bacteria, and (3) isolation and identification of bacteria associated with phytoplankton during the ARAON cruise in January 2014. In interim results, viruses (8.1×10^6 – 1.6×10^7

viruses/ml) exceeded bacteria by ca. 14-fold in numbers. The occurrence of lysogenized bacteria was not detected in 4 out of 5 samples assessed so far, indicative of a minor contribution of lysogeny virus production to viral assemblages in the study area. Based on the 16S rRNA gene sequences, bacterial strains isolated from phytoplankton concentrates turned out to be closely related to those from plant-associated samples or those from Antarctic seas. In-depth analysis of microbial data is undergoing for better understanding the microbial interactions in the Amundsen polynya.

V. Applications & Future Directions

This study is expected;

1. To strengthen the scientific basis to understand the issues of environmental changes in global perspective and to adapt to these changes.
2. To enhance the nation's standing as major scientific contributors by conducting coordinated expeditions and filling the data gap in poorly explored regions.
3. To establish long-term data base and specimen archives on the physical changes and biodiversity and ecosystem functioning.

CONTENTS

Summary(Korean)	iv
Summary(English)	xi
Contents(English)	xvii
Contents(Korean)	xviii
Chapter I Introduction	1
Chapter II Current standing and state of the art	2
Chapter III Content and results of the study	14
1. Physical Oceanography in the Amundsen Sea	14
2. Chemical Oceanography in the Amundsen Sea	25
3. Characteristics of phytoplankton ecology and biological environment	50
4. Environmentals factor controlling phytoplankton community structure	60
5. Bioacoustics	68
6. Microbial ecology in the Amundsen Sea	77
Chapter IV Research Goal Attained	88
Chapter V Future Directions	94
Chapter VI Contemporary Trend	95

목 차

한글요약	iv
영문요약	xi
영문목차	xvii
한글목차	xviii
제 1 장 서 론	1
제 2 장 국내외 기술개발 현황	2
제 1 절 국내 기술개발 현황	2
제 2 절 국외 기술개발 현황	2
제 3 장 연구개발수행 내용 및 결과	14
제 1 절 아문젠해 수층 구조 특성 (김태완, 조경호, 박태욱)	14
제 2 절 아문젠해 화학 환경 (정진영, 하선용, 박기홍, 함도식, 김인태)	25
제 3 절 식물플랑크톤 광합성생리활성 (박지수)	50
제 4 절 식물플랑크톤 군집에 영향을 미치는 환경특성 (이영주, 양은진)	60
제 5 절 생물음향 (나형술)	68
제 6 절 미생물 생태 특성 (황청연)	77
제 7 절 위탁연구 수행성과	86
제 4 장 연구개발목표 달성도 및 대외기여도	88
제 1 절 단계 및 연도별 연구목표	88
제 2 절 연구개발 목표 달성도	88
제 3 절 주요 정성적 성과 (국제협력 분야)	91

제 5 장 연구개발 결과의 활용계획 94

제 6 장 연구개발과정에서 수집한 해외과학기술정보 95



제 1 장 서 론

지구 생태계는 급격한 기후변화와 CO₂의 증가로 온난화 가속되고 있으며, 해양은 대양순환패턴의 변화, 해양 산성화 등 근본적인 변화를 겪고 있음. 특히 서남극 지역은 최근 20년간 약 2도 가까이 온도가 상승하였으며, 서남극 결빙해역은 해빙 후퇴, 빙상 붕괴 등 급격한 변화의 진원지이자 동시에 반응지 - 물리 화학적 변화가 생태계에 반영되고 중저위도 해역으로 연쇄적 파급 - 로서 중요한 연구대상임. 남극연구 선발국가들은 이미 2009년에 아문젠해역의 온난화 원인과 현상에 대한 연구를 시작하였음. 2009년에 취향한 대한민국 최초의 쇄빙연구선을 활용하여 전 지구적 기후변화연구 네트워크에 기여하고 유·결빙해역 연구기술을 축적하는 대한민국 남극연구프로그램의 가동과 뿌리내림은 시급한 과제임.

중저위도 지방에서 데워진 해수가 대양순환에 따라 아문젠 해역을 비롯한 남북극 극해역에 도달하면, 냉각되어 가라앉으며 다시 대양순환을 시작하게 됨. 따라서 극해역의 온난화는 지구 온도를 조절하는 저층냉수의 생성량 변화와 해류순환 양상의 변화 해양의 온실기체 처리능력 변화 등, 그 연쇄적 파급효과는 매우 큼. 따라서 아문젠 결빙해역과 개구부(開口部, polynya)는 향후 전 지구적 기후변화를 예측할 수 있는 시금석이며 동시에 미래 지구기후변화 예측을 위한 필수적 연구 해역임.

극지역에서 발원된 변화는 결국 전 지구로 파급되며, 중·저위도권 해양은 이러한 변화가 매개되는 경로이자 경제활동(교통, 물류, 어업)의 장소임. 북극항로 개방, 수온 상승, 빈산소층 확대, 생물량 감소, 먹이사슬 단순화 등이 예견되는 바, 관련 산업의 대비를 위해 정기적인 관측과 예측 능력의 배양이 또한 필요함. 따라서 본 과제의 목적은 다음과 같음.

- 가. 쇄빙연구선 아라온을 유·결빙해역 종합연구에 본격 활용하는 국제협동연구 프로그램을 최초로 극지연구소에 창설·운영.
- 나. 서남극 결빙(結氷)해역과 해빙생태계의 지구환경변화 진원지 및 반응지 역할 규명; 온난화에 따른 역할 변화를 파악하고 향후 지구 환경 변화 추세를 예측.
- 다. 극지결빙 해역 변화를 전지구 변화와 연계 고찰할 수 있는 다층(多層) 중장기 관측 시스템(우주 인공위성부터 심해 퇴적물 트랩까지)을 구축.
- 라. 결빙해역 연구에 중·저위도 통과해역 연구를 연계시켜 결빙해역 유래 기후변화 신호의 지구시스템 파급 과정을 이해하고 선진국 지구 관측 네트워크에 주도적 참여.

제 2 장 국내·외 기술개발 현황

제 1 절 국내기술개발현황

- 2010년 이후 아문젠 유결빙 해역에서의 장기계류 관측장비 설치 및 회수 작업을 성공적으로 수행하고, 국제공동연구를 통한 공동현장조사 수행으로 관련 기술 습득 등, 극지연구소는 국내 유일 서남극 아문젠해 종합해양연구를 2010-2016간 수행해 오고 있으며, 아라온을 활용, 4회 총 103일의 아문젠해 현장조사를 수행, 8개 국내 기관, 6개국 9개 외국 기관, 국내 인원 연 120명, 외국 인원 연 20명의 지구환경 연구자들이 참여, 서남극 온난화 원인과 추세, 서남극 물질순환과 생태계에 미치는 온난화 과급 효과를 연구하여 2015. 12월 현재 39편의 국제저명 SCI 학술논문을 생산함.
- 과거 세종기지 인근 남쉐틀랜드 군도 인근 해역에서 해양조사가 이루어진 바 있으나 결빙 해역에 대한 연구는 2010 아라온의 취항과 함께 비로소 시작. 틈틈이 세종기지 인근에서 겨울철 결빙시 제한적인 연구 수행.
- 2010년 8월에 아라온 북극 연구항해가 최초로 있었으며, 그 이전에는 북극 베링해와 북극 척치해, 북극해 분지에서 일본, 중국, 미국, 캐나다 등 타국 연구선을 이용한 공동 연구 수행.
- 남극해에서 임차 연구선을 활용, 해빙 가장자리 수 km 밖에서 해빙 영향을 연구한 경험 수 차례 있으며, 2010/2011 하계기간 중 한국 최초의 아문젠 해역 현장조사.
- 한국 극지연구는 쇄빙 연구선의 부재로 지구환경변화 조절 핵심지역 (유결빙 해역)에 그동안 출입이 불가능했으나, 2010년 이후 초기 단계의 경험을 축적 중.
- 해빙-해양의 상호작용, 빙붕 후퇴 등 물리현상과 모델링 분야 연구기술 습득 및 향상 필요성 대두.
- 결빙 해역 미세 조류의 배양에 대한 기술은 상당 부분 확보.

제 2 절 국외기술개발현황

- 가. 영국 NERC-BAS는 2010-2015에 750만 파운드 연구비를 투자하여 iSTAR (Ice Stability: 서남극 빙붕소멸연구)를 수행하면서 벨링즈하우젠해와 아문젠 동부해역의 주요 빙붕의 안정성 (융빙속도, 후퇴속도, 그라운드 라인 위치변화 등)에 대한 연구를 진행하였다 (<http://www.istar.ac.uk>). 과학적으로 의미있는 연구결과가 생산되었으며, 이러한 연구결과는 전 지구적 관심사인 지구온난화와 해수면상승 이슈와 맞물려, iSTAR 프로그램은 2015년 시작된 FISS (<https://www.bas.ac.uk/project/fiss/>) Filchner Ice

Shelf System, 2015-2020) 프로그램으로 진화 발전하여 2020까지 6년간 남극 웨델해 Filchner 빙붕 소멸속도 관측과 모델링 연구를 수행하게 된다. FISS 프로그램은 영국의 BAS가 주축이 되어, NERC 산하 연구기관과 대학, 그리고 독일 AWI가 국제협력 파트너로 참여한다.

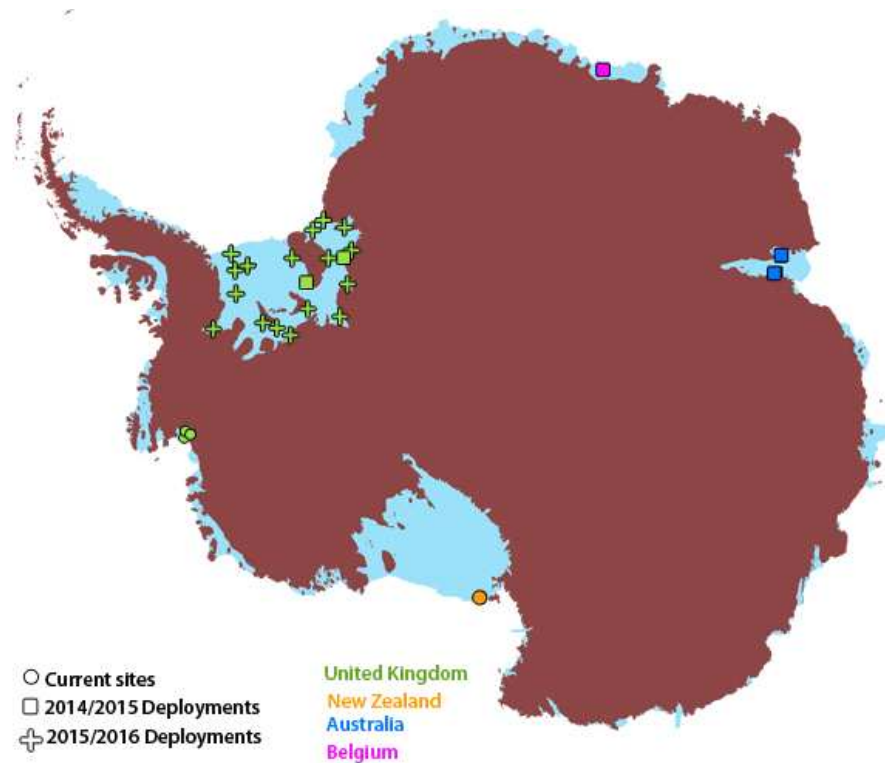
The screenshot shows the website for the Filchner Ice Shelf System project. The header includes the British Antarctic Survey logo and navigation menus for About, Science, Data, Polar operations, People, News & media, Jobs, and Contact. The breadcrumb trail reads: BAS > Science > Our research > Research projects > Filchner Ice Shelf System, Antarctica. The main banner image shows a vast ice shelf under a bright sun. The title 'Filchner Ice Shelf System, Antarctica' is overlaid on the image. Below the banner, the project title is repeated, followed by a subtitle: 'FISS: Ice shelves in a warming world, Filchner Ice Shelf System, Antarctica'. Project start and end dates are listed: 'Project start date 5 January, 2015' and 'Project end date 4 January, 2020'. A navigation bar includes tabs for About, Aims, People, Blogs, and Facilities. The main text describes the project's goal to quantify the contribution of polar ice sheets to global sea-level rise. A sidebar on the right contains contact information for Hugh Corr, research topics like Climate modelling and Oceanography, an 'Ice flows game' link, and a 'Partner blogs' section.

참고자료: BAS의 FISS 프로그램 웹사이트

FISS 프로그램은 해양-빙하-기후 상호 역학관계에 의한 Filchner 빙하후퇴를 실측 (기상, 해양, 지구물리 분야)과 모델링을 통하여 규명하는 연구로서, 지금까지 일반적으로 위성자료에 의존한 빙하후퇴 모델링과는 다른, 실측에 근거하는 단기 (30-50년) 예측을 목표로 하고 있다. 첨부 3은 프로그램 연구지역 연구활동과 연구 내용을 간략히 소개하고 있으며, 프로그램의 최종연구목표는 아래와 같다.

1. *Determine the geometry of the model domain (ice-bed elevation, ice thickness and sub-ice shelf bathymetry) in several key areas that lack data coverage. In addition, make targeted measurements of the present-day oceanographic and glaciological regime.*
2. *Generate atmospheric forcing fields for the ocean models from historical observations*
3. *Determine the oceanographic regimes, under present and historical atmospheric forcing, and establish the associated pattern and intensity of melting of the ice shelf base and their sensitivity to changes in the atmospheric forcing.*
4. *Establish the present dynamics of the tributary ice-streams within the coupled ice-sheet ice-shelf system, and determine, with multiple models, the sensitivity of the system to changes in basal melt rate.*
5. *Produce a state-of-the-art regional coupled ocean-ice shelf-ice sheet model. Verify its performance using observations of grounding-line stability.*

나. FISS가 웨델해 Filchner 빙하를 연구하는 영국 국내용 빙하후퇴 관측/모델링 프로그램 이라면, 영국이 제안하여 SOOS가 공인한 NECKLACE 프로그램은 남극대륙 전체의 주요 빙붕붕괴 현장을 남극연구국가 각국의 국내프로그램이 분담하여 “환남극 빙하후퇴 관측과 모델링 연구”를 수행하자는 국제공동연구 프로그램이다. 따라서 NECKLACE 프로그램은 FISS 프로그램을 남극 전역으로 확대하여 빙하후퇴를 실측 (기상, 해양, 지구물리 분야)과 모델링을 통하여 규명하는 연구이다. 영국은 Filchner-Ronne 빙붕을 맡고, New Zealand는 Ross 빙붕, 호주는 Amery 빙하, 벨지움은 Roi Baudouin을 분담하여 2014/2015 남극시즌부터 국제공동연구가 시작되었다. 아래 그림은 지난 시즌부터 설치되기 시작한 빙하관측거점들이다. 한국, 스웨덴, 노르웨이는 지난 2015/2016 부터 아문젠 해역의 Thwaites, Dotson, Getz에서 관측을 시작함으로써 NECKLACE 프로그램에 참여하였다 (<http://www.soos.aq/news/current-news/196-necklace-2>).



환남극 빙붕후퇴 실측자료 획득을 위한 국제공조 NECKLACE 프로그램에서 빙하레이더를 설치한 현황

극지연구소

다. 미국 Princeton 대학이 주도하는 SOCCOM Southern Ocean Carbon and Climate Observations and Modeling 프로그램은 미국 과학재단 남극연구 프로그램이 2014-2018간 지원하고 UW, MBARI, Scripps 등이 컨소시엄으로 참여하는 남빙양 탄소 순환과 기후모델링 연구프로그램이다 (<http://socom.princeton.edu> 남빙양 Carbon & Climate 관측과 모델링). 각종 생지화학 센서를 장착한 자동해양관측 부이를 국내외 협력연구기관 선박에서 남빙양 해역에 투하하고 (2016. 5월 현재 50개 운영 중: 총 200개 목표), 실시간 위성전송된 자동관측자료는 연구진에 의하여 후처리되는 동시에 전세계 연구진에 공개되는 자료개방형 프로그램이다. 각지의 관측부이에서 위성전송된 자료를 활용하여 탄소/온실기체 등 물질들의 생지화학 순환 구조를 모델링함으로써, 지구기후 변화에 미치는 남빙양의 역할을 추정해 보고자하는 연구이며, 남빙양 탄소생지화학순환 관측과 모델링 연구의 진행간에 중간 결과를 아래와 같이 웹사이트에 공개한다.



SOCCOM Unlocking the mysteries of the Southern Ocean

Try Out Our New Interactive Map to Access SOCCOM Data

Click to access map

SEARCH SOCCOM ABOUT US | OBSERVATIONS | MODELING | BROADER IMPACTS | NEWS | BLOGS | MEMBERS

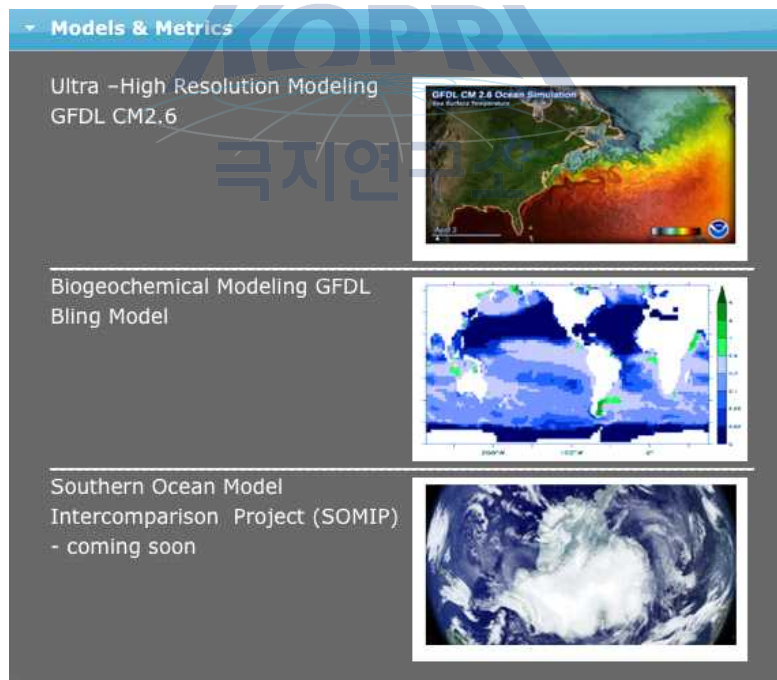
Latest News

SOUTHERN OCEAN CARBON AND CLIMATE OBSERVATIONS AND MODELING

The Southern Ocean Carbon and Climate Observations and Modeling project (SOCCOM) is an NSF-sponsored program focused on unlocking the mysteries of the Southern Ocean and determining its influence on climate.

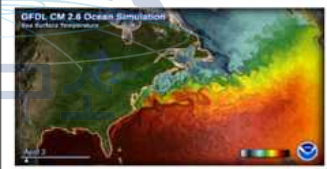
Housed at Princeton University and administered by the Princeton Environmental Institute, SOCCOM draws on the strengths of teams of investigators across the U.S. as well as participating in international observational and simulation efforts.

SOCCOM Annual Meeting May 9-11

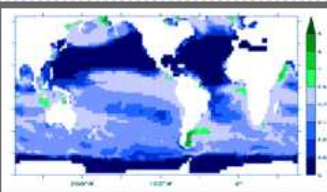


Models & Metrics

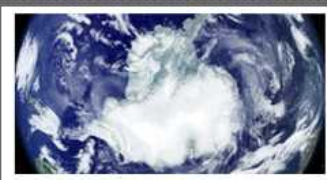
Ultra -High Resolution Modeling
GFDL CM2.6



Biogeochemical Modeling GFDL
Bling Model




Southern Ocean Model
Intercomparison Project (SOMIP)
- coming soon



SOCCOM에서 공개한 생지화학 모델링

라. US Antarctic LTER 프로그램 (<https://www.lternet.edu/sites/pal> Long-Term Ecosystem Research)은 1990부터 현재까지 계속 남극반도-벨링스하우젠 해역의 남극 해 생태계의 주요 구성 종과 생리활동, 1차생산과 유기물 침강 등 탄소의 생지화학순환


을 장기모니터링해 오고 있다. 본 프로그램은 현재 미국 Columbia LDEO Lamont-Doherty Earth Observatory에서 주도하고 있으며, 쇄빙연구선 Gould와 Palmer를 이용한 해양생태계, 퇴적물 트랩을 이용한 해양 유기물침강, 남극기지 Palmer station을 근거지로 연안생태계, 위성 원격관측, 무인자동관측용 Glider 등 다양한 연구 기법과 관측기술을 활용, 남극 생태계 연구를 30년 가까이 수행하고 있다. 그동안 진행된 (그리고 현재도 진행되고 있는) 남극해 온난화의 생태계 영향이 고스란히 중장기 모니터링 데이터에 축적되고 있는, 생태계 장기모니터링 연구의 세계적 표준이 된 사례이다.


The Long Term Ecological Research Network

f
t
v
p

HOME
PUBLICATIONS
SITES
RESEARCH
NETWORK
DATA
PEOPLE

Palmer Antarctica LTER



Antarctic Research and Supply Vessel (ARSV) Laurence M Gould docked at Palmer Antarctica LTER, January, 2002.

Contact Information

Lamont-Doherty Earth Observatory
61 Route 9W Box 1000
Palisades, NJ 10964-1000
USA
Email: hducklow@ldeo.columbia.edu
Phone: 845-365-8167

Web Site Links


- [Site Home Page](#)
- [Data Catalog](#)
- [Information Management](#)
- [Bibliography](#)
- [Education Program](#)
- [Personnel Directory](#)

Site Contacts


PI: [Hugh Ducklow](#)
Primary: [Hugh Ducklow](#)
Education: [Beth Simmons](#)
IM: [James Conners](#)
Grad rep: [Travis Miles](#)
Climate rep: [Sharon Stammerjohn](#)

Publications

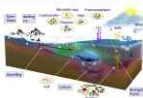
Foundations for Ecological Research West of the Antarctic Peninsula



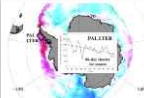
Key Research Findings:



New View
PAL scientists have pioneered the use of remotely-operated vehicles and animal-mounted sensors to generate new information and images of the Antarctic that have not been available from traditional approaches.
[Read more](#)



Delicate Conditions
Working in one of the most rapidly-warming regions on the planet, LTER scientists at Palmer Station in the Antarctic discovered intricate, previously-unknown influences of climate change on plant and animal populations throughout the polar ecosystem food web.
[Read more](#)



Changes in Ice and...
PAL scientists have documented a remarkable decrease in the length of the sea ice season by up to 3 months and an exponential increase in ocean heat content of waters being delivered to western Antarctica via the Circumpolar Current.
[Read more](#)

[View all key research findings for this site.](#)

Overview: The Palmer LTER, established in the Fall of 1990, is one of the National Science Foundation sponsored Long Term Ecological Research Sites which is funded by the NSF Office of Polar Programs. It focuses on the pelagic marine ecosystem along the west Antarctic Peninsula, and the ecological

US Antarctic LTER Website 에 소개된 프로그램 개요

마. 기타 미국관련 (자료출처 <http://www.nsf.gov/dir/index.jsp?org=OPP>):

- Ross Sea Ice Shelf 프로그램: OPP와 미지질조사국 USGS 지원으로 McMurdo기지와 RV Nathaniel Palmer를 기반으로 로스해 빙붕 시추, 해저지질 및 고기후, 해양생태계 등 연구를 2000년 이후 매년 1-2월 수행. OPP 예산 연 1천3백만불.
- Amundsen Sea 해빙연구: OPP 지원으로 RV N. Palmer를 기반으로 아문젠해역 해빙 연구 2009에 시작. 해양 물리특성 관측을 위주로 해빙의 후퇴 추세와 원인 연구. 영국 국가환경연구위 NERC 지원을 받는 영국극지연구소 BAS 연구팀과 장비계류 등 공조. 3년간의 활동을 마치고 성과확산 활동 중. 2014년 하반기 Elementa: Science of the Anthropocene 에 특별논문호 발간

바. 기타 독일관련 (자료출처 독일극지연구소 AWI Yearbook 2013, 쇄빙연구선 Polarstern Cruise Report 2013)

- 웨델해 종합해양연구: RV Polarstern를 기반으로 2002년부터 북서 웨델해에서 해빙, 빙붕, 기후변화, 생태계 연구 진행. 인력 및 예산 규모 미상.
- 아문젠 해빙역 연구: RV Polarstern를 기반으로 아문젠 해빙의 후퇴 원인 연구 2009에 시작. 물리관측 계류장비를 주로 이용하여 남극주변 중층수의 해빙하부 유입 관측. 인력 및 예산 규모 미상.

사. 기타 영국관련 (자료출처 BAS Yearbook, 2013, SOOS 남빙양 국제공동관측기구 2014)

- 기후와 생태계, 생물자원연구: Rothera기지와 RV James Clark Ross를 기반으로 벨링즈하우센해역에서 2000년 이후 수행. 인력 및 예산 규모 미상.
- 아래는 NECKLACE와 FISS 프로그램에 대한 영국 BAS의 내부기획보고서 자료에서 발췌한 프로그램 주요 내용들이다.

Network for the Collection of Knowledge on melt of Antarctic ice shelves (NECKLACE)

Principle Investigator

Keith Nicholls (British Antarctic Survey, UK)

Contact: kwni@bas.ac.uk

Other key participants

H. Corr (British Antarctic Survey, UK)

P. Brennan (University College London, UK)

Project Description

The aim of the project is to provide researchers into ice shelf-ocean interactions with a set of time series of basal melt rates from selected locations on Antarctic ice shelves. The goal would be for circum-Antarctic coverage over a time interval of about five years.

This would provide urgently-needed control and validation data for models of ice shelf-ocean interaction, and a source of ground truth for satellite-derived estimates of average ice shelf basal melt rates.

The proposal is to use ground-based phase-sensitive radar (pRES), a technique that has gained traction in recent years for the measurement of various aspects of the vertical motion of ice in an ice sheet, yielding estimates of compaction, vertical strain, and basal mass balance. In particular, the instrument has proved itself capable of delivering basal melt rate measurements at temporal resolutions approaching tidal periods. New developments have led to a version of the instrument that can be left recording over winter (auto-pRES), yielding extended time series of basal melt rates. The instrument is undergoing field trials on Ross Ice Shelf, and eight units will be deployed in the 2013-14 season at various locations on Pine Island Glacier as part of UK NERC's iSTAR programme. Those instruments will collect data for a period of twelve months; four will use a phased array of sixteen antennas to image the ice base, the remaining instruments will be range radars (non-imaging).

With the combined reach of all Antarctic research operators, it will be possible to establish a circumpolar network of these instruments, transmitting in real time a reduced dataset for processing at a processing centre. The full dataset (too voluminous to transmit) would be collected when the sites were revisited.

As a result of ice shelves' contribution both to Antarctic Bottom Water formation and to the stability of the Antarctic Ice Sheet, the SOOS themes addressed by this project would be principally Theme 2 ("The stability of the Southern Ocean overturning circulation") and Theme 3 ("The role of the ocean in the stability of the Antarctic Ice Sheet and its future contribution to sea-level rise").

Project Timeline

2015 – 2020

Key deliverables

The ultimate product is a database of time series of basal melt rates, but this project aims to provide a coordinating role, with many research groups contributing by procuring and deploying instruments. The project will provide assistance in procuring the necessary instruments, and establish the processing centre.

Funding

Not yet funded.

Linkages with other programmes

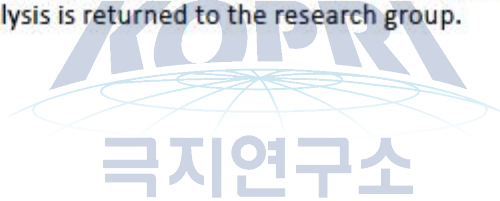
Various projects (so far, from the US, Germany, UK, France and Belgium), either plan to use this technique to generate time series of melt rates, or else are seeking funding to do so. iSTAR is an example of a UK project that is already funded.

Data Management

Individual project scientists will have data protocols determined by funding agencies. However, a requirement of participating in this project would be that a reduced melt rate time series be made available via a mechanism such as the SOOS data portal.

Various models could be adopted. The model proposed here is:

1. A reduced dataset is collected in near-real time via satellite link, and sent to a processing center for analysis.
2. The basic result (a basal melt rate) is made available to the community from the processing center via the data portal, with the full analysis (including vertical strain and surface compaction) being returned to the research group.
3. Once the full data sets are recovered from the instruments they are optionally processed at the processing center, and the basic melt rates made available to the community via the data portal. The full analysis is returned to the research group.



Ice shelves in a warming world: Filchner Ice Shelf system, Antarctica

Introduction

We propose to determine the future contribution of the Filchner Ice Shelf system (FISS) to global sea level change during the 21st Century. FISS (here understood to include of the Filchner Ice Shelf, the ice-stream tributaries, and the sub-ice shelf ocean cavity) is one of the least-studied parts of Antarctica. A recent study (Hellmer et al, 2012) suggests that the region might soon experience a wholesale change in oceanographic regime with potentially dramatic consequences for the ice shelf and its tributary ice streams.

We will assess this threat by gathering glaciological and oceanographic measurements to optimise and validate a suite of regional models. Those models will be used to provide the best possible prediction of the 21st century contribution of FISS to global sea level. We will then extend the study to include the whole of Antarctica using the framework of the NERC/Met Office Earth System model UKESM1.

To achieve this we will bring together knowledge, skills and expertise from two NERC centres (British Antarctic Survey [BAS] and National Oceanography Centre [NOC]), the Met Office Hadley Centre [MO], University College London, the University of Exeter and Oxford University. A European partner, Alfred Wegener Institute (AWI, Germany), will bring scientific knowledge and expertise to the proposal as well as an offer of operational support equivalent to around €1 million. The proposed research will address one of the most pressing questions in earth sciences today, that is, the future contribution of the Antarctic Ice Sheet to sea level change. In doing so we will explore the least accessible part of the World Ocean, eliminate the largest data gap in ice-thickness measurements in Antarctica today, contribute to the UK Earth System Modelling Strategy and further advance our understanding of coupled atmosphere, ocean, ice-shelf and ice-sheet processes.

Ice shelves play two vital roles in determining our climate: they act as vast heat exchangers, producing globally significant water masses that act as a driver for global ocean circulation (Orsi & Whitworth 2004), and they act as buttresses to the tributary ice streams, controlling the rate at which the inland ice sheet drains into the ocean. First proposed as a theory (Hughes 1981) then observed (Pritchard *et al.* 2009) and also simulated numerically (Durand *et al.* 2011), the buttressing effect of ice shelves has enormous societally-relevant consequences. Remove an ice shelf and the previously-restrained ice streams flow faster, drawing down the interior reservoir of ice, and resulting in a positive contribution to global sea-level change. The aim of this proposal is to quantify the role of a large Antarctic ice shelf in its dual pivotal functions. A quantitative study of the relevant processes will allow us to make reliable projections of ice sheet and ocean evolution in a changing climate. Our current skill in making such projections led the latest IPCC report (IPCC 2013) to declare: “Abrupt and irreversible ice loss from a potential instability of marine-based sectors of the Antarctic Ice Sheet in response to climate forcing is possible, but current evidence and understanding is insufficient to make a quantitative assessment.” The urgency has been highlighted by well-documented changes that are already underway around Antarctica, particularly in the Amundsen Sea sector where the driver of change appears to be increased basal melting of small floating ice shelves. While other sectors appear to be relatively stable at present, due diligence demands that we understand and quantify the potential for near-future change in these regions. The Weddell and Ross sectors are currently well buttressed by large ice shelves, but future ocean-driven ice-shelf thinning has the potential to change dramatically the seaward ice flux via the tributary ice streams.

The Filchner Ice Shelf (FIS) (Hellmer *et al.* 2012), located at the southern boundary of the Weddell Sea, is bounded on the west by Berkner Island and on the east by Coats Land (Fig. 1A). FIS is fed by four ice streams - Bailey, Slessor, Recovery and Support Force - located east of Berkner Island, with a fifth tributary, Foundation Ice Stream, defining the southern boundary of the ice shelf. Having a combined discharge flux of over 100 Gtons yr⁻¹, these five ice streams drain an area nearly ten times the size of the UK (2,273,000 km²), approximately 19% of the Antarctic continent. Satellite

- D2** Predictions, with uncertainties, of how the oceanographic conditions over the southern Weddell Sea continental shelf will change over the 21st Century, and how the coupled ice-ocean system will respond to the changing basal melt rates.
- D3** Predictions of the consequences of these changes for the region's contribution to global sea level rise.

Research objectives

To quantify the effect of future climate change on the contribution of the Filchner Ice Shelf catchment to global sea-level change (Fig 1A outlines the study region), we will first characterise and represent numerically the present atmospheric, oceanographic and glaciological regime of the southern Weddell Sea (Fig 1B shows the model domain and the individual model components). With knowledge of the present state, and from a study of the sensitivity of the system to variability over the satellite period, we will be equipped to deliver a significant advance in the capability of models to predict regional contributions to the future rate of sea level rise. To achieve the deliverables we will need to complete the following objectives:

To deliver a numerical description of the present state of the Filchner sector of Antarctica and to quantify its sensitivity to change (D1), we will meet the following five objectives:

1. Determine the geometry of the model domain (ice-bed elevation, ice thickness and sub-ice shelf bathymetry) in several key areas that lack data coverage. In addition, make targeted measurements of the present-day oceanographic and glaciological regime.
2. Generate atmospheric forcing fields for the ocean models from historical observations
3. Determine the oceanographic regimes, under present and historical atmospheric forcing, and establish the associated pattern and intensity of melting of the ice shelf base and their sensitivity to changes in the atmospheric forcing.
4. Establish the present dynamics of the tributary ice-streams within the coupled ice-sheet ice-shelf system, and determine, with multiple models, the sensitivity of the system to changes in basal melt rate.
5. Produce a state-of-the-art regional coupled ocean-ice shelf-ice sheet model. Verify its performance using observations of grounding-line stability.

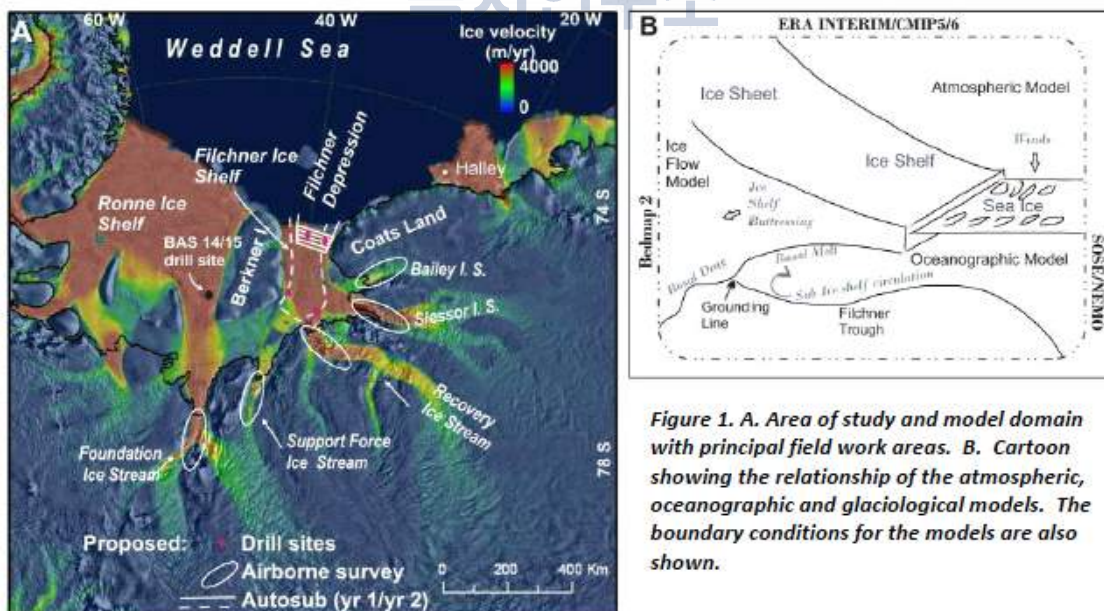


Figure 1. A. Area of study and model domain with principal field work areas. B. Cartoon showing the relationship of the atmospheric, oceanographic and glaciological models. The boundary conditions for the models are also shown.

Project Partner MO and NERC have an ongoing joint project to develop a UK Earth System Model (UKESM1) and a goal of the work proposed here is to transfer knowledge gained from the regional to the global model domain. We propose to verify that regional processes can be reliably

Present and Recent Past		Future
Data acquisition (2015-18)	Modelling (1979-2018)	Modelling (2006-2100)
<p>WP1: Field work WP1a: Measurements of topography. Seismic point measurements of bathymetry across the ice shelf. Lead: BAS with involvement by AWI. WP1b: Dense grid of grounding-line regions from airborne surveys. Lead: BAS</p> <p>WP1c: Ocean cavity observations through bore holes (salinity, temperature). Joint: AWI/ BAS</p> <p>WP1d: GPS measurements of tidal modulation of ice streams by ice shelf. Lead: BAS</p> <p>WP1e: A year long time series of ice-shelf melt rates by a network of low-power phase-sensitive radars. Lead: BAS & UCL with AWI involvement</p> <p>WP1f: Phase sensitive radar survey of year-averaged basal melt rates Joint: AWI/BAS involvement.</p> <p>WP1g: Synoptic measurements of oceanographic conditions beneath the ice shelf by an autonomous long-range submarine. Lead: BAS with NOC and AWI involvement. Group/Lead: BAS/KN</p>	<p>WP2: Atmospheric Modelling Provide atmospheric forcing fields for WP3 at two resolutions: 1. ERA-interim at 70km. 2. Dynamically downscale ERA-interim to 12km with observed sea-ice. Generate atmospheric input fields from ERA-interim to drive WRF atmospheric model. WRF/BAS/SH</p> <p>WP3: Ocean Modelling WP3a: Regional ocean model optimisation. Model optimisation and validation using data from WP1. (adjoint) WP3b: Regional ocean sensitivity studies Sensitivity of calculated ice-shelf melt rates to atmospheric forcing, at the two different resolutions, from WP2. WP3c: Regional ocean hindcast studies Generating 30 years ice-shelf melt history using forcing from WP2. WP3d: Global ocean model optimisation Ocean model inter-comparison: MITgcm & NEMO/BAS/AJ FESOM/AWI/AH ROMS/Akvaplan-niva/TH</p> <p>WP4: Ice-flow Modelling WP4a: Model initialisation: inversion of surface velocity data and inference of basal boundary conditions from observation of tidally induced flow variations. (adjoint) WP4b: Determine the sensitivity of ice volume above flotation to applied ice-shelf melt rates Use the current distribution of ice-shelf melt rates as a datum field. WP4c: Ice flow model inter-comparison. Úa/BAS/GHG BISICLES/MO/JR PISM/TIMFD3/AWI/AH MARC, FEniCS/BAS,Oxford/GHG,PF</p> <p>WP5: Coupled Ocean/Ice-flow modelling (hindcast) Couple the ocean models to the ice-flow models and validate through simulations spanning the 36 years of atmospheric forcing from WP2. Compare calculated with observations and stationary grounding-line (over this period). Úa/BAS/GHG MITgcm & NEMO/BAS/AJ Nemo+BISICLES/MO+BAS/JR,AJ</p>	<p>WP6: Future projections WP6a: Future projections with the regional model Use the ocean/ice-flow coupled models (WP5) with future surface forcing taken from a subset of climate projections, available from the international climate modelling centres. Produce a set of projections of ice sheet evolution in the Filchner sector. MITgcm+Ua/BAS/AJ,GHG Nemo+BISICLES/MO+BAS/JR,AJ TIMFD3+FESOM/AWI/AH</p> <p>WP6b: Future projections with the global model Incorporate optimised model components within NERC/MO Earth System Model (here referred to as UKESM1-b) to improve cryosphere interactions. Validate against observation and compare with the regional coupled ocean/ice-flow model (WP5) and 'standard' UKESM1.</p> <p>Design and run a set of experiments for the global model UKESM1-b that enable the best estimate of uncertainty in future projections resulting from climate change scenarios. Assess projections for the Filchner sector Nemo+BISICLES/MO+BAS/JR,AJ,GHG UKESM1/MO/JR</p>
<p>WP7: Assessment of uncertainties Identify the leading-order sources of uncertainty in observations and models. Assess the uncertainties in the key processes linking the model components and how they affect projections. Provide a (scenario-based) future projection with a full assessment of uncertainties for the Weddell Sea sector. (Contributions from all other work packages.) Group/Lead: Exeter/MC</p>		

Table 1: Project framework with interdependent work packages

The present state of the ice sheet is already well constrained by the surface velocity field. The necessary time series data will be provided by oceanographic instruments left beneath the FIS at the site of the hot-water drilled access holes (WP1c), ice shelf basal melt rates measured using

제 3 장 연구개발수행 내용 및 결과

제 1 절 수층 구조 특성 (김태완, 조경호, 박태욱)

요약: 2016년 남반구 여름, 쇄빙연구선 아라온호를 이용하여 남극 아문젠 해에서 4번째 종합적인 해양탐사를 실시하였다. 해양 물리분야의 주된 연구주제는 아문젠해(Amundsen Sea)에서 남극순환심층수(circumpolar deep water) 분포의 시공간적인 변동성을 규명하고 빙붕 용해수의 분포 및 해양순환에 미치는 영향을 규명하는 것이다. 총 81개의 CTD 정점에서 수직 수온, 염분 및 유속과 해수 샘플을 획득하였다. 2014년에 설치하였던 6기의 계류 시스템 중 닷슨 빙붕(Dotson Ice Shelf) 전면 및 서쪽에 설치된 4기의 계류시스템을 회수하였다. 닷슨 골(Dotson Trough)의 입구에서는 2014년 관측시 2012년보다 얇았던, CDW의 두께가 2016년 관측시 다시 두터워 졌으며, 2016년 폴리냐에서의 수온, 염분의 수직단면에서도 2012년과 유사하게 닷슨 골의 동쪽사면에서 CDW 유입량이 서쪽사면에 비해 많은 것으로 나타났다. 2년 동안 닷슨 빙붕 전면에서 관측된 수직 유속은 빙빙의 동쪽사면 저층에서 20cm s^{-1} 이상의 남서쪽 흐름이 나타났으며, 서쪽사면의 중층에서는 북동방향의 흐름이 우세하였다.

1. 서론

최근 수년간 관측을 통해 서남극해 빙붕의 지속적인 소멸이 확인되었다. 특히, 아문젠해에서 빙붕 소멸이 가장 급격하였으며 이는 대륙사면의 골들을 따라 유입되는 상대적으로 고온 고염인 남극순환 심층수(CDW: Circumpolar Deep Water)의 영향임이 밝혀졌다(Jenkins et al., 2010; Walker et al., 2007; Wåhlin et al., 2010). 이러한 저층을 통해 유입되는 CDW와 빙붕 용해로 인해 주변해역으로 확산되는 저염의 빙붕 용해수는 주변해역의 해수순환 및 수괴 변화를 초래할 것으로 예상된다. 그러나 아문젠 해역은 연간 두꺼운 해빙으로 둘러싸여 있으며, 급격한 기상변화로 인해 접근자체가 어려워 상대적으로 연구가 빈약하다. 본 연구에서는 최근 급격한 환경변화가 관측된 남극 아문젠 해에서 기후변화에 따른 해수 수괴 구조 변화를 관측하였다. 또한, 장기계류시스템을 활용 2년 이상 연속 관측된 수온, 염분 및 유속자료를 분석하여 닷슨 빙붕 전면에서의 해수순환의 변동성을 파악하고 이들 변동의 원인을 규명하고자 한다.

2. 재료 및 방법

아문젠 해와 우딘체프(Udintsev Fracture Zone)에서의 해양조사는 2016년 1월 6일부터 2016년 2월 23일까지 약 50일 동안 쇄빙연구선 아라온(ARAON)을 활용하여 이루어졌

다(Fig. 3.1.1). 총 81개 정점에서 SeaBird사의 SBE 911+ CTD와 Rosette 채수기를 이용하여 수온, 염분 등의 수직 프로파일을 획득하였다. 수온과 염분 같은 주요 자료들은 동일한 두개의 센서를 이용하여 측정하였고, CTD의 상승 시, 몇몇 수심에서 채수하여 염분 보정을 위한 기준 값(ground truth)으로 사용하였다. 항해 기간 동안 수직 유속구조는 CTD의 프레임에 LADCP (RDI 300 kHz)를 부착하여 관측하였다. 2014년 닛스 골의 입구 (K1), 폴리냐 중앙 (K2), 닛스 빙붕 전면 (K3, K4, K5)와 닛스 빙붕과 갯츠 빙붕(Getz Ice Shelf) 사이 (K6)에 6개의 장기 해류 및 수온·염분을 관측하기 위한 계류 시스템을 설치하였으며, 2016년 현장 방문시 K3, K4, K5, K6의 전체를 성공적으로 회수하였다. 그러나 K1, K2는 계류시스템의 일부 또는 전체가 망실되었다. 또한 2016년 탐사 기간 동안, 갯츠 빙붕에서의 빙붕하부 용융률의 변화를 연구하기 위해 4대의 자동위상전파 음향 측정기 (ApRES)를 갯츠 서쪽 빙붕에 설치하였다.

3. 결과 및 고찰

2016년 1 월과 2 월에 닛스 골을 따라 총 16개 정점에서 관측된 수직 수온·염분으로부터 공간적 CDW 변동성을 관측하였다(Fig. 3.1.2). 아문젠해의 북쪽 외해 (St.2)에서 CDW의 수온은 1.6 °C이며, 염분은 34.7 psu였다. CDW가 아문젠해 대륙사면을 넘어 닛스 골을 따라 유입되면서 빙하 및 해빙의 용융수와 혼합되어 수온과 염분이 낮아진 변형된 CDW (Modified CDW: MCDW)를 형성한다. 한편, 닛스 골을 따라 유입되는 CDW의 양은 계절적, 연간 변동성을 보이며, 이는 대륙사면에서의 해빙 분포와 바람의 변화에 따른 용승의 차이임이 밝혀졌다 (Kim et al., 2017). 0 °C 등온선으로 정의된 MCDW의 두께는 2012 년에 비해 2014 년에 얇아졌으며, 2016년 관측시 다시 두꺼워졌다. 또한, 2012년 S1 스웨덴 장기계류지점 (72° 27.27'S, 116° 20.0415'W)에서 관측되었던 저층 최대염분은 34.62 psu였지만, 2014년에는 34.49 psu가 관측되었다. 그러나 2016년 현장 관측시 동일 지점에서 저층 최대염분은 34.65 psu로 나타나 2016년 가장 많은 양의 MCDW가 아문젠해로 유입되는 것으로 확인되었다.

닛스 골을 가로지르는 두 개의 측선 (T-2와 T-3)에서 따뜻한 MCDW의 유입 경로를 확인한 결과, 2016년 MCDW는 주로 골의 동쪽 사면에 치우쳐 유입됨이 확인되었다(Fig. 3.1.3, 3.1.4). 북쪽에 위치한 T-2 측선에서는 3번의 관측 기간 동안 MCDW 공간적 분포가 유사하여, MCDW가 주로 닛스골의 동쪽사면을 따라 강하게 유입되면 상대적으로 저온, 저염의 빙붕 용해수는 서쪽사면을 따라 북쪽으로 확산되었다. 반면, 73° 30.0'S에 위치한 T-3측선에서의 수직 수온, 염분분포는 확연한 연간변화를 보였다. 2012년의 수직 수온, 염분 분포는 그해의 T-2측선에서의 분포와 매우 유사하였다. 그러나, 2014년의 T-3측선의 경우 주요한 MCDW 유입경로가 골의 중앙에 위치하였다. 반면, 2016년에는 골의 중앙에 등염분선의 수심이 가장 깊고 동쪽과 서쪽사면에 얇았다. 이러한 닛스 골에

서의 연간 MCDW 분포의 차이는 아문젠해 폴리나의 순환 패턴의 변화에 의존할 것으로 사료된다.

2014년 닷슨 빙붕과 해수의 열교환 및 빙붕 전면에서의 해수순환을 관측하기 위해 빙붕으로부터 약 2km 북쪽 해역에 해류계와 계류용 수온염분계로 구성된 장기해류관측 시스템을 3개 지점(K4, K3, K5)에 설치하였으며 2016년 1월 현장 조사시 약 2년 동안 관측한 자료를 획득하였다. Fig. 3.1.5는 2개 지점 (동쪽사면: K4, 서쪽사면: K5)의 각 층에서 관측한 유속자료로부터 산출한 Progressive Vector Diagram이다. 비록 K4 정점 저층 유속을 관측하기 위해 설치한 300kHz ADCP에 약 1년간의 자료만이 기록되었지만, 다른 3개의 ADCP에서 2년 이상의 자료를 획득 할 수 있었다. CDW의 빙붕 하부로 유입되는 주요 경로인 K4 680m층에서는 남남서(SSW) 방향의 흐름이 우세하였으며, 상층으로 갈수록 시계방향으로 회전하여 400m층에서는 남서(SW) 방향의 흐름이 우세하였다. 반면, 빙붕으로부터 용융수가 주로 유출되는 K5정점의 700m층에서는 남동(SE) 방향의 흐름이 우세하였으며, 상층으로 갈수록 반시계방향으로 회전하여 420m층에서는 동쪽(E) 방향의 흐름이 우세하였다. 더불어 2년 동안 관측된 층별 유속중 남북방향의 성분에 계절변화가 나타났다(Fig. 3.1.6). K4 정점 남북방향 성분은 여름철 강한 남향류가 나타났으며 겨울철 약화되었으며, 유속의 층별 계절 변동폭은 크게 차이를 보이지 않았지만, 절대값은 저층으로 갈수록 남향류가 강화되었다. 반면, K5 정점에서의 남북방향 성분은 400m층에서 가을철 북향류가 강화되고 봄철 남향류가 강화되는 것으로 나타났으며, 그 계절변화 폭은 저층으로 갈수록 약화되었다.

Physical Oceanography in the Amundsen Sea

Tae-Wan Kim, Kyoung-Ho Cho and Taewook Park

Division of Polar Ocean Science, KOPRI

Abstract: In order to monitor the temporal and spatial variation of circumpolar deep water (CDW) and its effect on the rapid melting of glaciers in the Amundsen Sea, an extensive oceanographic survey was conducted on the 2016 expedition (ANA06B). During the 2016 Amundsen Sea cruise (ANA06B) by IBRV Araon, a total of 81 CTD stations were visited, 9 moorings were successfully recovered and 6 moorings were newly deployed on the shelf troughs and near the ice shelf fronts. The thickness of CDW (defined by 0°C isotherm) along the Dotson trough was much thinner in 2014 than in 2012 (Fig. 1.2). However, the thickness of CDW layer at continental shelf break had rebounded back in 2016 and the CDW layer thickness was large compared to 2012. Two transects across the Dotson Trough show the intrusion of warm CDW, tilting toward the eastern side of the trough. A strong southward flow greater than 20cm s⁻¹ was measured near the bottom at eastern side of Dotson Ice Shelf from the two years mooring. At the western side of Dotson Ice Shelf, the northward flow was measured at 400 m depth.

참고문헌

- Jenkins, A., Dutrieux, P., Jacobs, S.S., McPhail, S.D., Perrett, J.R., Webb, A.T. and White, D., 2010. Observations beneath Pine Island Glacier in West Antarctica and implications for its retreat. *Nature Geoscience*, 3:468–472.
- Thoma, M., Jenkins, A., Holland, D. and Jacobs, S., 2008. Modelling Circumpolar deep water intrusions on the Amundsen Sea continental shelf, Antarctica. *Geophysical Research Letters*, 35(L18602), doi:10.1029/2008GL034939.
- Vaughan, D.G., 2008. West Antarctic Ice Sheet collapse—the fall and rise of a paradigm. *Climate Change*, 91:65–79.
- Wåhlin, A.K., Yuan, X., Björk, G. and Nohr, C., 2010. Inflow of warm circumpolar deep water in the central Amundsen Shelf. *Journal of Physical Oceanography*, 40:1427– 1434.
- Wåhlin, A.K., Muench, R.D., Arneborg, L., Björk, G., Ha, H.K., Lee, S.H., and Alsén, H., 2012. Some implications of Ekman layer dynamics for cross-shelf exchange in the Amundsen Sea. *Journal of Physical Oceanography*, 42, 1461 - 1474.
- Wåhlin, A.K., Kalén, O., Arneborg, L., Björk, G., Carvajal, G.K., Ha, H.K., Kim, T.W., Lee, S.H., Lee, J.H., and Stranne, C., 2013. Variability of warm deep water inflow in a submarine trough on the Amundsen Sea Shelf. *Journal of Physical Oceanography*, 43, 2054–2070.
- Walker, D.P., Brandon, M.A., Jenkins, A., Allen, J.T., Dowdeswell, J.A. and Evans, J., 2007. Oceanic heat transport onto the Amundsen Sea shelf through a submarine glacial trough. *Geophysical Research Letters*, 37(L02602), doi:10.1029/2006GL028154.
- Ha, H.K., Wåhlin, A.K., Kim, T.W., Lee, S.H., Lee, J.H., Lee, H.J., Hong, C.S., Arneborg, L., Björk, G., and Kalén, O. (2014), Circulation and modification of warm deep water on the Central Amundsen Shelf. *Journal of Physical Oceanography*, 44, 1493 - 1501. doi: 10.1175/JPO-D-13-0240.1
- Kim, T. W., Ha, H. K., Wåhlin, A. K., Lee, S. H., Kim, C. S., Lee, J. H., & Cho, Y. K. (2017). Is Ekman pumping responsible for the seasonal variation of warm circumpolar deep water in the Amundsen Sea?. *Continental Shelf Research*.
- Kim, C. S., Kim, T. W., Cho, K. H., Ha, H. K., Lee, S., Kim, H. C., & Lee, J. H. (2016). Variability of the Antarctic Coastal Current in the Amundsen Sea. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 181, 123–133.

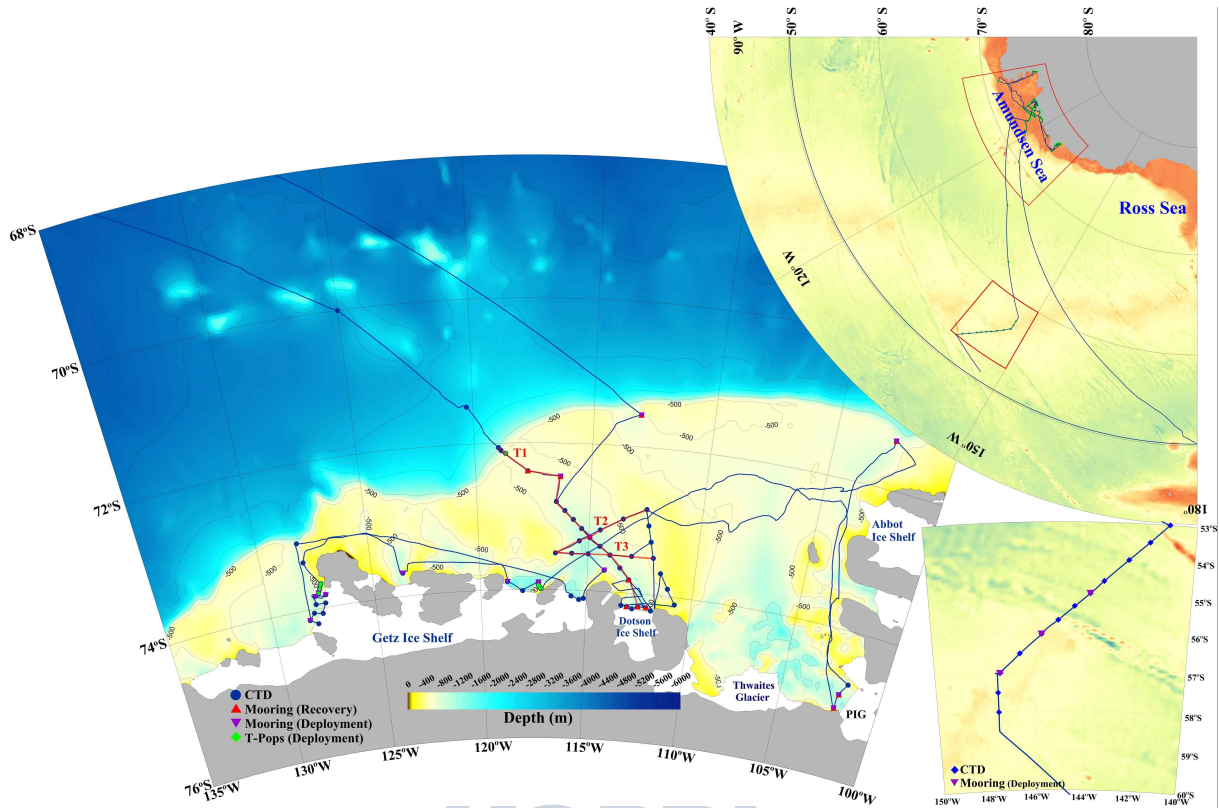


Fig. 3.1.1. Map of study area. Blue dots denote the CTD stations visited during ANA06B expedition. Triangles are the mooring sites. Three transects (T-1, T-2 and T-3) were selected to reveal the spatial distribution of CDW along and cross the Dotson Trough.

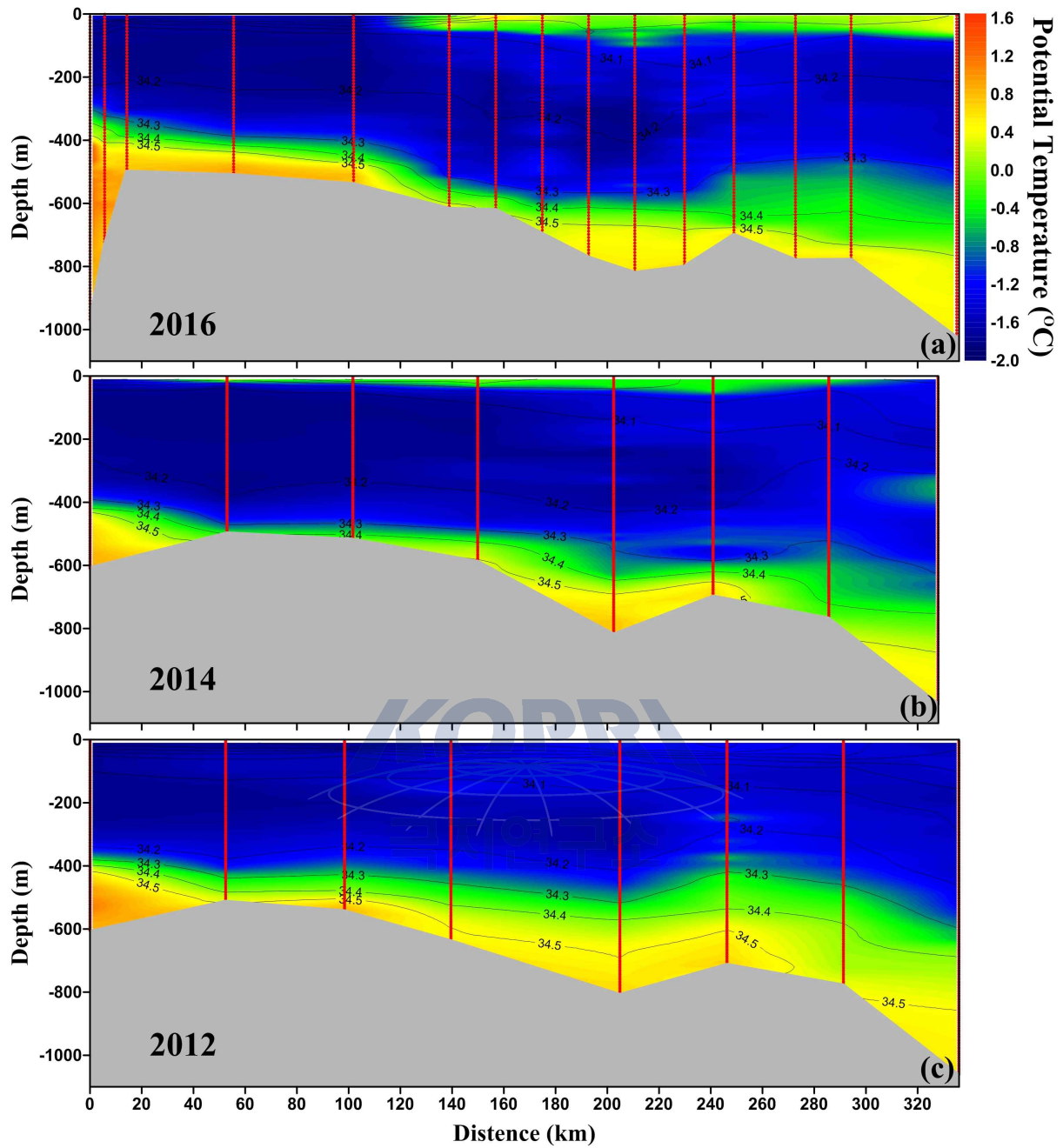


Fig. 3.1.2. Vertical distribution of water mass properties along the Dotson Trough (T-1): (a) 2016 expedition, (b) 2014 expedition, and (c) 2012 expedition. The color indicates the potential temperature, and the contour indicates the isohaline.

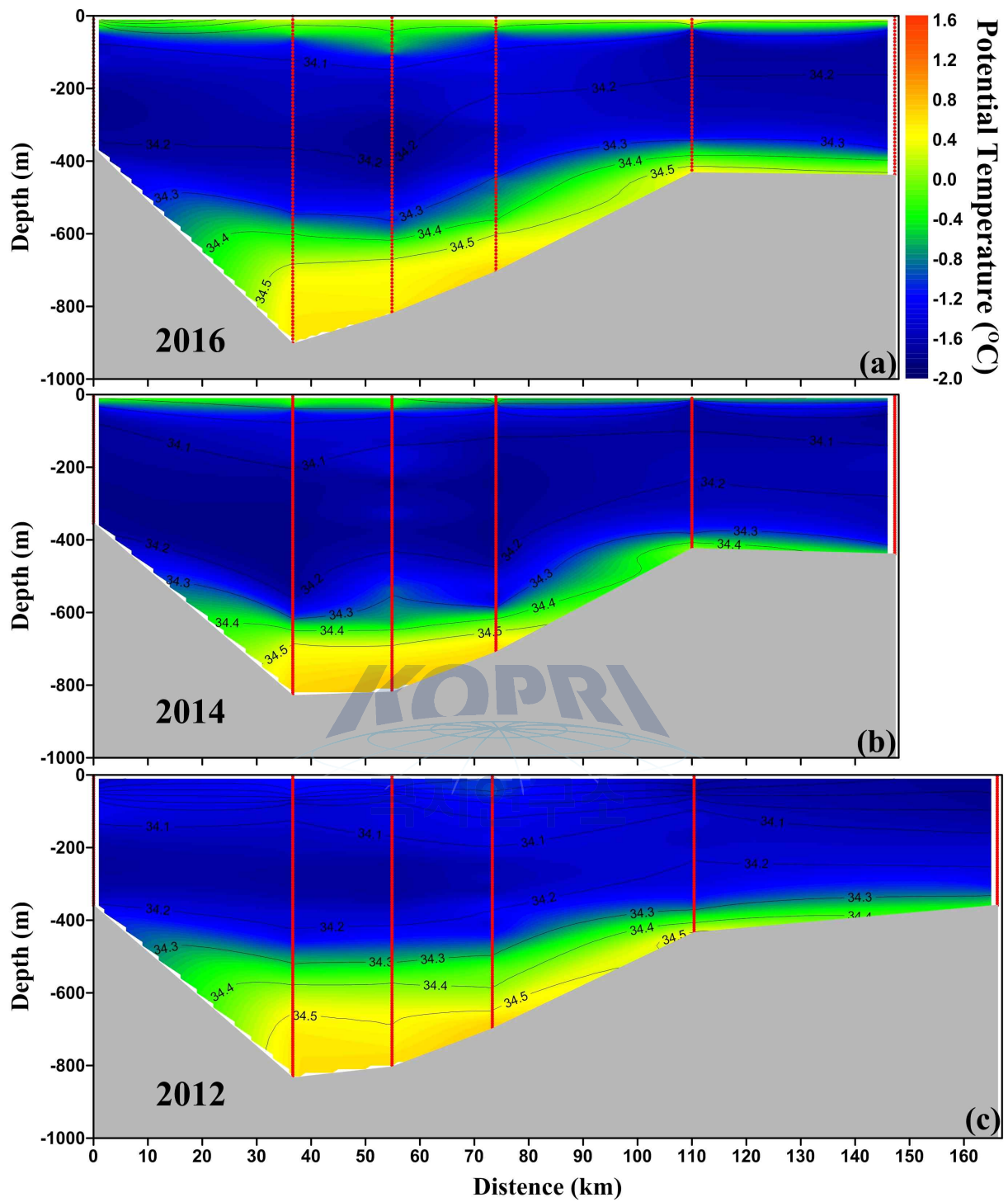


Fig. 3.1.3. Vertical distribution of water mass properties across the Dotson Trough (T-2): (a) 2016 expedition, (b) 2014 expedition, and (c) 2012 expedition. The color indicates the potential temperature, and the contour indicates the isohaline.

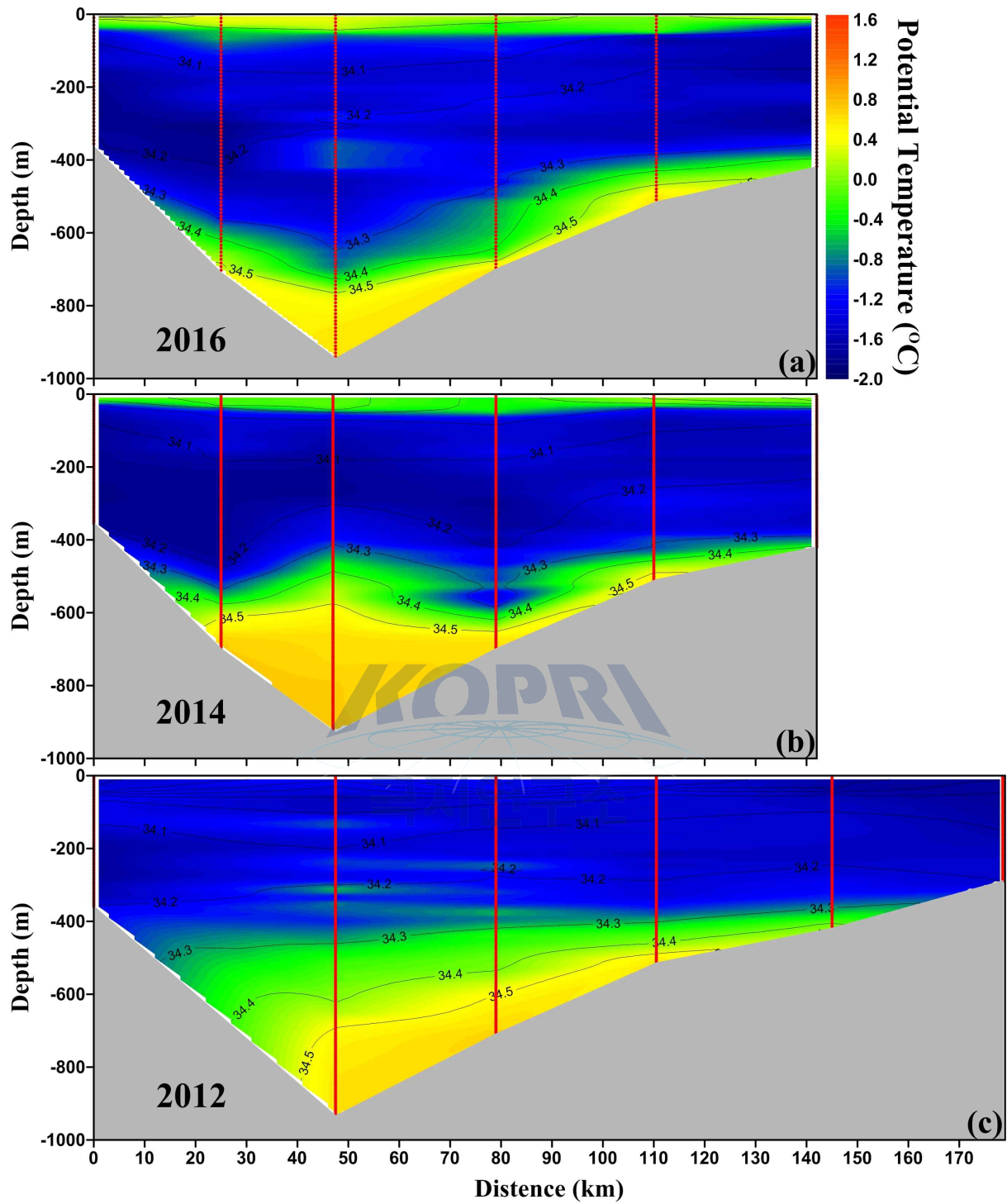


Fig. 3.1.4. Vertical distribution of water mass properties across the Dotson Trough (T-3): (a) 2016 expedition, (b) 2014 expedition, and (c) 2012 expedition. The color indicates the potential temperature, and the contour indicates the isohaline.

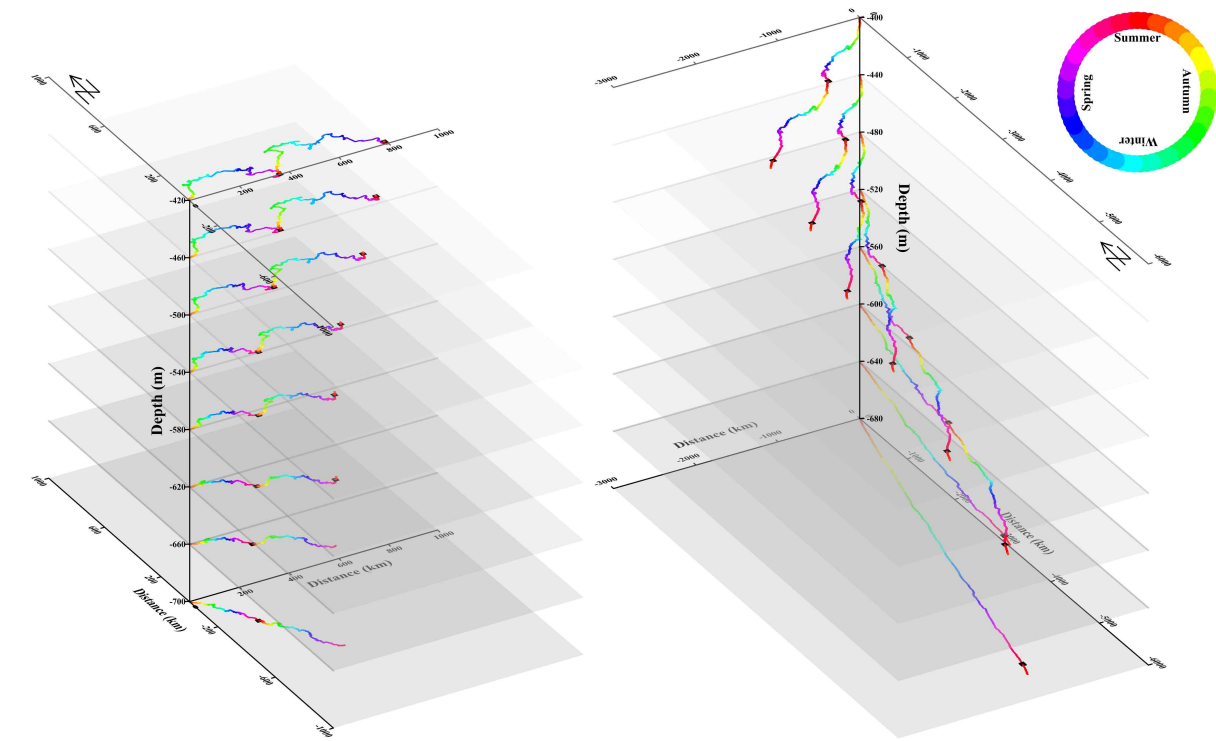


Fig. 3.1.5. Progressive vector of two moorings (K4, K5) from January, 2014 to January, 2016.



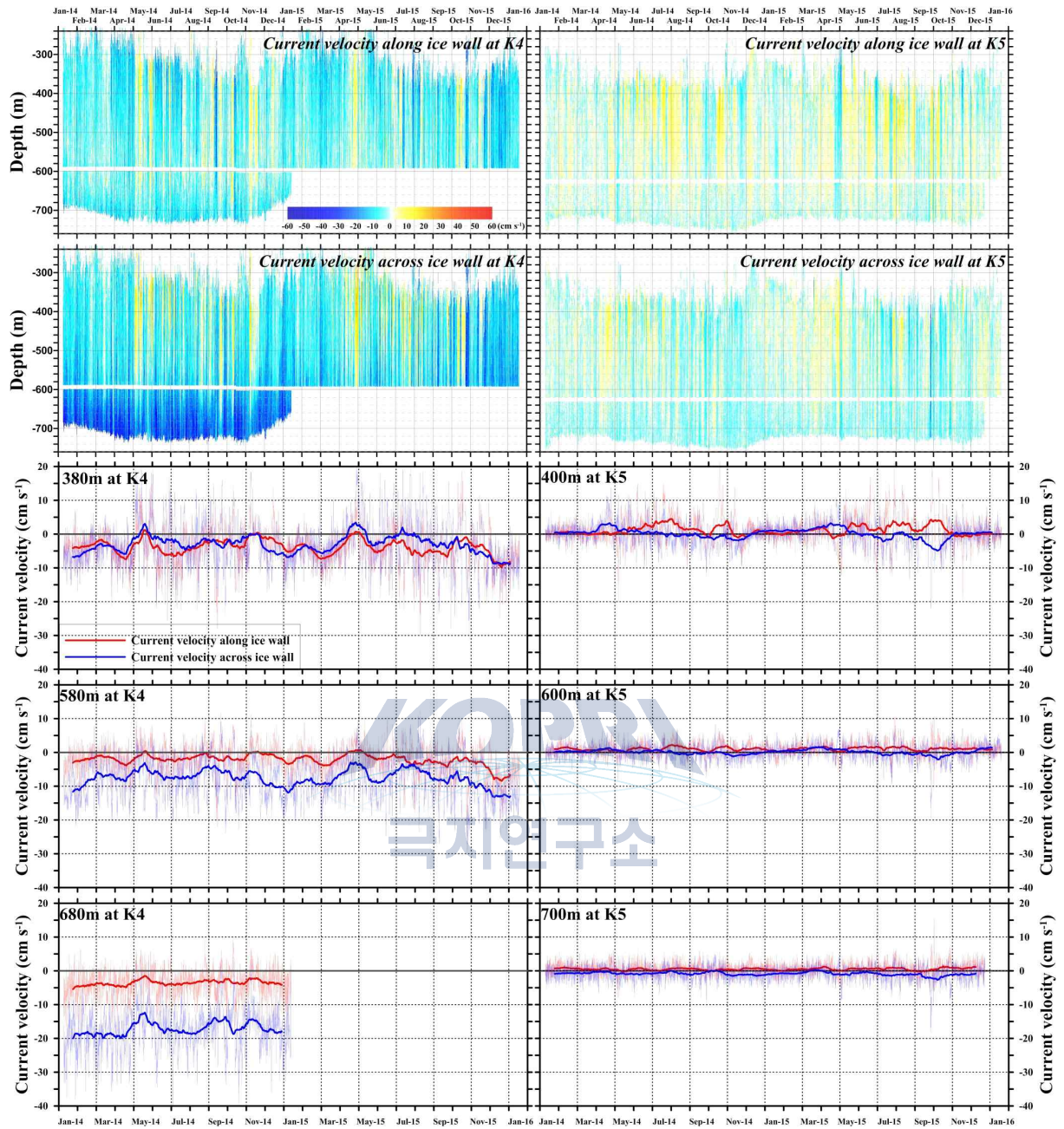


Fig. 3.1.6. Time series variation of east/west direction current velocities at K4 and K5 from January, 2014 to January, 2016.

제 2 절 화학환경 (정진영, 박기홍, 함도식)

요약: 본 절에서는 아문젠해의 물질순환 과정과 기후변화에 따른 빙하 소실 과정의 시간 변동성 및 빙하 용빙수의 해양 내 분포 양상을 이해하고자 (1) 영양염, (2) 용존 유기탄소, (3) 입자상 유기탄소 및 질소, (4) 불활성기체, (5) dimethyl sulfide (DMS)의 분포를 조사하였다. 아문젠 해역에서는 소모비율이 뚜렷이 다른 두 개의 질산염과 인산염의 관계가 관측되었고 *Phaeocystis antarctica*와 diatom이 주요 식물플랑크톤 종이라는 것을 시사하였으며 아문젠 해역에서의 탄소순환을 이해하기 위해서는 식물플랑크톤의 종에 따른 탄소소모율을 반영해야 한다는 것을 시사했다. 2013-14년도 항해에서는 표층뿐만 아니라 깊은 수심 (< 700 m)에서도 약 70 μM C의 용존유기탄소가 관측되어 아문젠 폴리냐 내에서 생물학적 활동에 의해 식물플랑크톤에서 기인한 입자상 유기탄소가 활발히 분해되고 있음이 시사되었다. 이에 비해 2015-16년도에 표층에서 1000 m까지의 수심에서 관측된 용존유기탄소 결과는 2013-14년도 항해에서 얻어진 농도보다 낮은 범위인 25-60 μM C의 농도범위를 보여 두 항해기간의 해양환경이 상당히 다른 것으로 확인되었다. 또한 입자성 유기탄소 및 유기질소는 아문젠 폴리냐에서 상당히 높은 농도를 유지하고 있었으며, 표층에서 높고 수심이 깊어짐에 따라서 농도가 낮아지는 경향을 보였다. 빙하 내에 존재하는 기포는 빙하의 용해과정에 불활성기체의 과포화를 유발한다. 아문젠해 Dotson ice shelf 앞에서 24%이상의 He 과포화가 관측되었으며, 해류의 순환과 혼합에 따라 점차 외해로 가면서 과포화 정도가 감소하는 양상을 보였다. 또한, 2012년에는 전 년에 비해 30-40% 가량 빙하용해수의 양이 감소한 것으로 관측되었다. 이러한 결과는 빙하용해수가 200 km 이상의 외해까지 해양의 물리, 화학 현상에 영향을 미칠 수 있으며, 1년 이내의 짧은 시간에도 상당한 변화가 있음을 시사한다. 폴리냐 내에서 표층해수의 용존 DMS 농도는 < 1-400 nM 까지 매우 큰 범위에서 분포 하였다. 가장 고농도의 DMS는 해빙-폴리냐의 경계지역과 Getz 빙봉의 부근에서 관측 되었다. 다른 관측지역들에서 높은 농도의 DMS는 일반적으로 높은 클로로필과 산소-아르곤비와 함께 나타났다. 아문젠해 폴리냐 표층에서의 이러한 큰 DMS의 농도 분포와 일차생산은 해빙의 용빙 정도, DMS의 주 배출자인 *Phaeocystis antarctica*의 우점 정도, 그리고 플랑크톤의 블룸과 이어 발생하는 DMS의 생산간의 시간차에 의해 나타나는 것으로 추정되었다. DMS의 수직 분포 또한 수평 분포와 같이 주목할만한 변화의 폭을 가지고 변화하였으며, 대체로 산소-아르곤 비와 일치하였다. 하지만 과거의 2009년에 보고된 연구결과 비교시, 뚜렷한 해빙지역과 폴리냐 지역의 농도차이는 볼 수가 없었다. 이러한 결과는 블룸 기간, 해빙상태 및 관측경로에 따른 식물플랑크톤 분포의 경년변동에 기인한 것으로 추정되었다.

1. 서론

남극 아문젠 해는 급격한 환경변화를 겪고 있는 해역으로 남극 대륙중에서 가장 빠르게 빙붕이 녹아내리고 있는 지역이다. 이렇게 빙붕이 빠르게 녹고 있는 원인은 남극 주변을 돌고 있는 상대적으로 따뜻한 ($\sim 2^{\circ}\text{C}$) 순환심층수 (Circumpolar Deep Water)가 골을 따라 아문젠 해로 유입되기 때문이다. 또한 철성분의 농도는 남극 퇴적물 위에 존재하는 깊은 해수층 (Coale et al., 2005)과 빙붕의 용빙수 (Poulton and Raiswell, 2005)에서 높기 때문에 순환심층수의 유입에 의한 빙붕의 용빙은 아문젠 해역에서 봄철과 여름철에 식물 플랑크톤의 번성이 활발하게 일어나게 하는 역할을 한다. 이 지역에서 빙붕이 녹아 내리고 있는 속도가 점점 증가하고 있다는 것을 고려할 때 (Rignot, 2002), 표층으로의 철성분 공급이 증가할 것으로 추정되며 이는 남극 아문젠 폴리냐의 생물생산량의 변화를 야기시킬 것이다. 남극 대륙 주변의 모든 폴리냐가 생물생산량이 높지는 않지만, 남극 대륙 주변 폴리냐는 단위면적 당 평균 $1\text{g C m}^{-2} \text{d}^{-1}$ 을 초과하는 생물생산력을 보이며 이는 남빙양의 생물생산력인 $0.2\text{-}0.4\text{ C m}^{-2} \text{d}^{-1}$ 보다 훨씬 높은 수치이다 (Arrigo et al., 2008). 아문젠 해는 서남극에 위치해 있으며 아문젠 해역 안에는 생물생산량이 특히 높은 아문젠 폴리냐 (면적 $27,000\text{ km}^2$)와 파인아일랜드 폴리냐 (면적 $18,000\text{ km}^2$)가 존재하고 있다 (Arrigo et al., 2012). 특히 아문젠 폴리냐는 남극 대륙 주변 37개의 폴리냐들 중 가장 생물생산성이 높은 폴리냐로 알려져 있다 (Arrigo and Dijken 2003). 위성으로 관측된 아문젠 폴리냐의 평균 엽록소 a 농도는 아문젠 폴리냐보다 훨씬 면적이 넓은 로스해 폴리냐에서의 평균 엽록소 a 농도보다 약 40% 더 높게 관측되어 탄소저장 측면에서의 아문젠 폴리냐의 중요성이 시사되고 있다 (Smith et al., 2006).

아문젠해 대륙붕으로 유입된 CDW는 Dotson, Getz 빙붕과의 접촉을 통해 빙붕의 기저부 손실을 유발한다 (Jacobs et al., 2011). 인공위성 자료를 이용한 광역, 장기 변동성에 대한 연구들은 존재하지만 (Rignot et al., 2008; Pritchard et al., 2013), 빙하용해수의 해양 내 분포양상과 단기간 변동성에 대한 연구는 매우 제한적이다 (Deutrieux et al., 2014). 본 연구에서는 빙하 용해를 통해 해양으로 유입되는 불활성기체의 양을 추정함으로써, 빙하용해수의 분포 양상 및 유입량을 추정하고자 한다.

Dimethyl sulfide (DMS)는 휘발성 미량기체로 주로 해양의 생물활동으로부터 발생된다 (Kettle et al., 1999). 생성되어 대기중으로 배출된 DMS는 광화학 과정을 거쳐 구름의 응결핵으로 작용하며 이는 지구의 알베도 변화에 중요한 기여를 한다 (Thomas et al., 2010). 따라서, 기후변화의 피드백 과정을 이해하는데 있어 DMS의 배출량에 관해 정확한 정보를 얻는 것은 필수적이다. 특히, 생산성이 강한 남극해의 폴리냐는 이러한 DMS의 대기로의 배출이 가장 큰 지역으로 추정되어지고 있으며, 근래에 300nM 이상의 고농도의 용존 DMS가 로스해와 아문젠해역에서 관측되어 보고된바가 있다 (Tortell et al., 2011; 2012). 이러한 많은 남극해 기원 DMS의 배출은 급격한 온난화가 진행되고있는 이

지역에서 알베도를 증가시켜 냉각효과를 일으킬 수 있다 (Cameron-Smith et al., 2011). 남극해의 폴리나 중 가장 생산성이 높은 아문젠해에서의 DMS 관측은 Getz 빙봉 근처에서만 2009년에 관측 되었다 (Tortell et al., 2012). 이에 본 연구에서는 아문젠해 폴리나의 전반에 걸쳐 DMS의 수평 뿐 만 아니라 수직 분포의 관측을 수행하였고 (Fig. 3.2.1), 대기로의 배출량의 계산을 통해 기후변화의 이해에 있어 아문젠 해역의 중요성을 보여주었다.

2. 재료 및 방법

가. 영양염 분석

아문젠해 해양조사는 2015년 12월 28일부터 2016년 2월 27일까지 총 64개의 연구정점에서 CTD 채수시스템을 이용하여 영양염 시료채취를 실시하였다. 영양염 시료는 50 ml 코니칼튜브에 채취하여 분석전까지 2°C에서 냉장 보관하였고 시료채취 후 3일 이내에 선상에서 분석하였다. 영양염 시료는 4 channel auto-analyzer (QuAatro)를 이용하여 분석하였으며, KANSO technos사에서 제공하는 표준물질 (Lot. No. BF)을 이용하여 영양염의 농도를 결정하였다.

나. 용존유기탄소 및 용존유기질소

용존유기탄소 (DOC) 및 질소 (DON)분석을 위한 시료채취는 영양염 시료채취 정점과 동일한 정점에서 수행되었고, 채수시에는 Niskin bottle의 spigot과 550°C에서 6시간 이상 가열하여 유기물질을 제거한 GF/F 필터가 탑재된 여과장치 (PP-47, ADVANTEC) 사이에 테프론 튜브를 연결하여 공기노출을 최소화하였으며 입자상 물질의 파괴에 의한 용존유기물질의 농도증가에 따른 실험오차를 최소화하기 위해 중력만으로 여과를 실시하였다. 채취된 여과액은 550°C에서 6시간 이상 가열한 20 ml 유리 앰플로 분취한 후 토치를 이용하여 완전히 외부공기와의 접촉을 차단시켰으며 해양생물의 활동을 억제하기 위해 분석까지 -24°C에서 냉동 보관하였다. Shimadzu사의 TOC-TN analyzer를 이용하여 용존유기탄소와 총용존질소를 분석하였으며, 용존유기질소 농도는 총용존질소의 농도에서 동일 시료에서 분석한 무기질소성분의 농도차를 이용하여 산출하였다.

다. 입자상 유기탄소 및 유기질소

입자상 유기탄소 및 유기질소의 특성을 연구하기 위한 정점조사는 2015년 12월 28일부터 2016년 2월 27일까지 37개 정점에서 수심 깊이에 따라 Rosette 채수기를 이용하여 입자상 유기탄소 및 유기질소 분석을 위한 현장 해수를 채수하였다. 입자상 유기탄소 및 유기질소 시료를 얻기 위해 550°C에서 6시간 이상 가열하여 유기물질을 제거한 GF/F

필터를 여과시스템에 탑재하여 낮은 압력상태에서 여과하였다. 입자상 유기탄소 및 유기 질소화합물의 분석을 위해 GF/F 필터를 동결건조기로 건조시키고 데시케이터 안에서 염산에 24시간동안 노출시켜 입자상 무기탄소화합물을 모두 제거한 후 원소분석기 (vario Macro cube, Elementar)로 분석하였으며 아세틸아닐라이드를 표준물질로 사용하였다.

라. 불활성기체 분석

2011년 아문젠해 탐사에서는 빙벽에서 대륙붕단까지의 종단면을 따른 시료를, 2012년에는 Pine Island Glacier Ice Shelf(PIG), Dotson Ice Shelf (DIS), Getz Ice Shelf(GIS)을 따른 단면의 빙하용해수 분포를 파악하기 위한 불활성기체 분석용 해수 시료를 채취하였다. 2014년에는 Dotson trough를 따른 종단면과, Doton, Getz 빙봉을 따른 횡단면의 해수 시료를 함께 채취하였다. 2016년 1-2월에 이루어진 탐사에서는 기존의 Dotson Trough의 종단 및 횡단면을 따른 시료 채취에 더하여, Dotson 빙봉, Getz 빙봉의 3단면을 포함하는 총 4개의 독립된 빙봉면을 따라 추가적인 시료 채취를 수행하였다. 시료 채취 정점을 Fig. 3.2.2에 적색 점들로 표현하였다. 아문젠 탐사를 통해 모두 네 해(2011, 2012, 2014, 2016년)의 빙봉 근처의 불활성기체 시료를 확보하였으며, 다음 단계에서는 빙하용해수의 연간변동성을 파악하는 연구를 진행할 계획이다. 헬륨은 일반 유리, 플라스틱 용기를 통한 확산이 매우 빠르기 때문에, 장기 보관을 위해 구리관에 cold welding 방법을 이용하여 채집하였다. 구리관 속의 해수 용존 기체는 고진공 기체추출시스템을 이용하여 헬륨의 확산이 낮은 유리관(aluminosilicate glass)에 포집하였다. 유리관에 포집된 혼합기체에서 저온냉각장치가 장착된 기체정제시스템를 이용하여 불활성기체를 분리해 내어 순차적으로 질량분석기에 주입 분석하였다(Stanley et al., 2009).

마. DMS 측정

DMS의 수평 분포는 박막주입식 질량분석기(MIMS)를 통하여 DMS의 표층에서의 농도를 아라온의 항적을 따라 연속관측하였다. 해수시료는 아라온에서 공급되는 수심 7m의 해수를 사용하였다. MIMS는 해수샘플로부터 반투과성막을 통하여 기체를 질량분석기로 보내 시료의 양을 검출한다 (Fig. 3.2.3). 이는 기존의 해수-대기 평형을 이용하는 방법과 달리 평형에 이르는 시간을 기다릴 필요없이 용존 기체의 실시간 고해상도 관측이 가능하다. 분석중 시료의 유량은 200mL/min으로 유지하였으며, 항온을 유지하기위해 6m 길이의 1/4인치 스테인레스 튜브를 항온기에 넣고 시료를 통과시킨후 측정하였다. 항온 온도는 2 ~ 4°C로 표층수온에 따라 변하게 하였으며 이는 실제 표층수온보다 약간 높은 온도로 유지하였다. 분석주기는 약 1분으로 설정하였으며, DMS의 검출기로 사용된 사중극자질량분석기 내의 압력은 $<2 \times 10^{-5}$ torr로 유지 하였으며 DMS는 SEM detector를 이용하여 검출하였다.

또한, DMS의 수직분포를 알기위해 연구항해동안 16개의 정점에서 수심별 해수시료를 채취하여 분석하였다. 시료 준비중 용존기체의 손실을 방지하기위해 시료병에 빈공간 없이 해수시료를 채웠으며, 채수즉시 4°C로 분석 전까지 보관하였다. 그리고 해수의 분석은 채수후 1시간이내에 분석하였다. 분석시 2분간 시료를 MIMS에 흘려보낸 다음, 샘플 병에서 시료를 순환시키며 분석하였다. 분석은 최소 7분이상 측정하여 나온 평균 값을 사용하였다.

DMS의 해양에서 대기로의 배출량은 현장에서 관측한 DMS의 농도와 풍속자료(10m)를 사용하여 계산하였다. 해양내의 농도에 비해 대기중의 농도는 극히적으므로 계산에 있어 무시하였으며, 해빙으로 덮힌 면적을 제외하고 계산하였다. 따라서 플럭스는 해빙의 부분을 제외한 전체면적과 용존DMS의 농도 그리고 해양-기체 수송상수의 곱으로 계산하였다.

3. 결과 및 고찰

가. 영양염 분포 특성

남극 폴리나에서의 식물플랑크톤의 일차생산은 대부분 미세조류인 *Phaeocystis antarctica*와 diatom에 의해 발생되며 이 두 종의 식물플랑크톤의 분포 및 종조성은 그 해역에서의 생지화학과 생태계에 영향을 미친다 (Arrigo et al., 1999; Fragoso and Smith, 2012). 예를 들면, *Phaeocystis antarctica*는 diatom보다 인산염의 단위 몰 당 2배의 이산화탄소를 흡수하며 (Arrigo et al., 1999), 미세 동물플랑크톤에게 잘 섭취되지 않는다고 알려져 있다 (Caron et al., 2000). 일반적으로 식물플랑크톤은 Redfield ratio (N:P = 16:1)에 근접한 비율로 해수 중 존재하는 질산염과 인산염을 생물생장에 이용한다. 하지만 아문젠 해역에서는 소모비율이 뚜렷이 다른 두 개의 질산염과 인산염의 관계가 관측되었고 이는 *Phaeocystis antarctica*와 diatom이 성장할 때 다른 비율로 질산염과 인산염을 이용한다는 것을 보여준다 (Fig. 3.2.4) (Arrigo et al., 1999). 이 결과는 *Phaeocystis antarctica*는 상대적으로 질산염을 보다 많이 소모하고 diatom은 인산염에 대한 의존도가 크다는 것을 보여주며 아문젠 해역에서의 탄소순환을 이해하기 위해서는 식물플랑크톤의 종에 따른 탄소소모율을 반영해야 한다는 것을 시사한다. 2013-14년도 항해 (ANA04B)와 2015-16년도 항해 (ANA06B)기간 중 관측된 영양염 결과를 비교해 본 결과, 상이한 특성은 관측되지 않았으며 *Phaeocystis antarctica*가 우점하고 있음을 알 수 있었고 diatom과 공존하고 있음이 확인되었다. 또한 외해에서 관측된 영양염은 *Phaeocystis antarctica*와 diatom의 N:P ratio를 벗어난 범위에서 관측되어 아문젠 폴리나의 영양염 분포와 다른 특성을 보였다.

나. 용존유기탄소 (DOC) 분포특성

2013-14년도 항해 (ANA04B)와 2015-16년도 항해 (ANA06B)기간 중 아문젠 해역에서 관측된 용존유기탄소의 연직분포를 Fig. 3.2.5에 나타내었다. 2013-14년도 항해기간 중에는 용존유기탄소는 표층에서 40-140 $\mu\text{M C}$ 의 농도범위를 보였고, 깊이가 증가할수록 점점 감소하여 수심 1000 m이하에서는 약 42 $\mu\text{M C}$ 의 일정한 농도분포를 보였다. 이 결과는 표층에서 식물플랑크톤의 생물학적 활동에 의해 생성된 용존유기탄소가 미생물의 활동 등으로 인해 소비되고 미생물에 의해 더 이상 분해되지 않는 refractory한 용존유기탄소가 심층수에 분포하고 있는 것을 보여준다 (Carlson et al., 2000). 2013-14년도 항해에서는 폴리냐 내에서 표층뿐만 아니라 깊은 수심 (< 700 m)에서도 약 70 $\mu\text{M C}$ 의 용존유기탄소가 관측되어 아문젠 폴리냐 내에서 생물학적 활동에 의해 식물플랑크톤에서 기인한 입자상 유기탄소가 활발히 분해되고 있음이 시사되었다. 이에 비해 2015-16년도 항해기간 중 관측된 용존유기탄소는 1000 m 이하의 수심에서는 2013-14년도 항해에서 얻어진 농도와 유사한 농도를 보여 배경농도임을 시사하였으나 표층에서 1000 m 까지의 결과는 2013-14년도 항해에서 얻어진 농도보다 낮은 범위인 25-60 $\mu\text{M C}$ 의 농도범위를 보여 두 항해기간의 해양환경이 상당히 다른 것으로 확인되었다. 특히 29번과 53번 정점에서는 용존유기탄소 농도가 배경농도인 42 $\mu\text{M C}$ 보다 낮은 값이 관측되어 박테이아에 의한 용존유기탄소 소모가 시사되었다.

다. 입자성 유기탄소 (POC)와 유기질소 (PON)의 분포

아문젠 폴리냐 (polynya) 내 표층 입자성 유기탄소 및 유기질소의 분포는 폴리냐 중심 부분인 총 12정점에서 평균값 1.51 (± 0.8) mgC L^{-1} 과 0.1 (± 0.04) mgN L^{-1} 값을 보였다. 입자성 유기탄소의 최대값은 정점 32에서 2.94 mgC L^{-1} , 최소값은 정점 15에서 0.74 mgC L^{-1} 값이 관측되었다. 반면 입자성 유기질소의 값은 정점 26에서 0.18 mgN L^{-1} 가 관측되었고, 최소값은 0.06 mgN L^{-1} 로 정점 29에서 관측되었다. Ice shelf 앞 15 정점의 평균 입자성 유기탄소의 값은 0.59 (± 0.39) mgC L^{-1} 로 폴리냐 센터보다 약 3배정도 낮은 값을 보이고 있으며, 입자성 유기질소는 평균 0.07 (± 0.03) mgN L^{-1} 로 폴리냐 중심보다 다소 낮은 값을 보였다. Ice shelf 정점들 중 최대값은 서쪽 Getz 46 정점에서 유기탄소와 유기질소 (1.73 mgC L^{-1} 과 0.11 mgN L^{-1})의 값을 보였지만, 최소값을 보인 정점은 동쪽 Dotson 17 정점으로 0.11 mgC L^{-1} 의 유기탄소 값을 보였다. 입자성 유기질소의 최소값은 정점 69에서 0.01 mgN L^{-1} 의 값을 보였다. 폴리냐 중심부의 식물플랑크톤 대발생으로 인한 유기물 생성으로 인하여 입자성 유기탄소와 유기질소 모두 아문젠 폴리냐 중심부에서 상당히 높은 농도를 유지하였고, 상대적으로 ice shelf 앞은 낮은 유기탄소 및 유기질소 농도 값이 관측되었다 (Fig. 3.2.6). 모든 정점에서 유광층 내에서 보다 높은 농도값을 보였고, 수심이 깊어짐에 따라 농도가 점차 감소하여 일정한 값을 유지하

였다 (Fig. 3.2.7). 폴리나 중심부정점들의 유기탄소 및 유기질소는 ice shelf 정점들에 비해 수층 내에서도 상대적으로 높은 농도를 보이고 있으며, 유광층 내 식물플랑크톤에 의해 생성된 유기물이 수괴 내 전달됨을 볼 수 있었다.

라. 불활성기체를 이용한 서남극 아문젠해 용융수 분포의 시공간적 변동 연구

불활성 기체의 농도는 아문젠해 빙붕지역인 Dotson ice shelf (DIS, 10번 정점)과 Getz ice shelf (GIS, 11번 정점)에서 기저 용융(Basal melting)이 가장 활발하게 일어나는 수심 450-550미터에서 가장 높게 나타났다(>20% for He and >10% for Ne). 대륙붕 지역에서도 (7-9번 정점) Dotson trough를 따라 shelf break (6번 정점)까지 약 육상으로부터 300km 거리까지도 여전히 높은 DHe과 DNe의 값을 보인다(Fig. 3.2.8; Kim et al., 2016). 이는 빙하용해수의 영향이 300km 이상의 먼 바다까지 미칠 수 있음을 나타낸다.

DIS와 GIS에서 용빙에 의한 불활성기체의 분포는 다소 큰 연간 차이를 보인다. DHe(%)과 DNe(%) 모두 2011년이 2012년에 비해서 30-40% 더 높게 나타났다(Fig. 3.2.9; Kim et al., 2016). 이는 2012년에 발생한 강한 La Niña 이벤트로 인해 아문젠 해에서 (Pine Island Glacier 지역) 다른 해보다 빙하 녹는 양이 약 53% 가까이 감소하였다는 최근 보고된 연구 결과와 일치한다 (Dutrieux et al., 2014).

앞선 선행연구들에서 (Arnebog et al., 2012; Wåhlin et al., 2013) 보고된 평균 유속으로부터, Dotson trough에서 물의 체류시간(water flushing time)은 약 0.4년(~150일)으로 계산되었다. 2011년과 2012년 각 관측전 몇 달 전부터 열전달량(heat flux)는 큰 변동이 없는 것으로 보아 (Wåhlin et al., 2013), 이와 같은 DHe과 DNe의 결과들은 Dotson trough에서 약 4-5달의 기간 동안 평균된 용융수의 분포를 나타내는 것으로 생각된다.

또한, 2011년 Dotson trough에서 DHe(%)과 DNe(%)로부터 해수 중 용융수의 농도 (Glacier melt water fraction)을 추정하였다. 각 정점에서 과잉의 He과 Ne 농도와 용융수의 영향이 거의 없는 외양(open ocean)의 4번 정점의 baseline 농도 차이를 빙하용해수에 의한 농도로 정의하였다(CGMW). 이 농도를 대기 중의 일정한 He/Ne 농도와 알려진 남극 빙하 코어 중 대기 농도인 $0.11 \text{ cm}^3 \text{ STP g}^{-1}$ (Loose and Jenkins, 2014)를 기반으로 계산된 순수한 얼음에서의 He/Ne 농도 (Cice)로 나눠 각 해수 중 용융수의 농도 (%)를 계산할 수 있었다.(GMW fraction, $F\% = (\text{CGMW}/\text{Cice}) \times 100\%$), 그 결과 아문젠 해수 중 용융수의 농도는 GIS, DIS, 대륙붕 지역에서 각각 0.4-0.8, 0.5-1.2, 0.2-1.0%로 나타났다 (Fig. 3.2.10; Kim et al., 2016). 이러한 결과들은 극지방의 해수 중 불활성 기체의 분포가 용융수의 시공간적 분포와 양을 알아내는 유용한 화학적 추적자가 될 수 있음을 시사한다.

불활성기체를 이용한 본 연구는 기존의 수온, 염분을 이용한 방법과는 독립적으로 빙하용해수의 분포를 파악할 수 있는 방법이 될 수 있음을 잘 보여주고 있다. 하지만 헬

름과 네온만을 이용한 방법은 수온, 염분을 이용한 방법과 유사하게 대기과 기체/열 교환으로 인해 해양 표층에서 추적자 특성이 보존되지 않는 제한점이 있다. 이를 보완하기 위해 다음 단계에서는 아르곤, 크립톤, 제논 등의 무거운 불활성기체를 함께 측정하고 Optimum Multiparameter Analysis(예를들면, Beard et al., 2015)를 이용한 수괴 분석을 통해 보다 정교한 빙하용해수 분포 연구를 진행하고자 한다.

마. DMS의 공간적 분포와 해양-대기 배출량 및 수직적 분포

우선 아문젠 폴리나에서의 DMS의 농도와 해양의 환경변수와의 상관성을 알아보기 위해 비교해 보았다. 분석한 변수는 표층수온, 표층염분, 형광도, 생물 산소포화도 (산소-아르곤비), 그리고 해빙 농도였다 (Fig. 3.2.11). DMS의 농도는 3 ~ 400nM 이었으며, 평균 37nM, 그리고 중간값은 20nM 이었다. 또한 산소-아르곤비와 형광도는 20 ~ 30%과 0 ~ 18로 각각 분포하였다. 관측기간중 DMS의 최고 농도는 1월 27 ~ 28일 사이에 40번 정점 근처에서 관측 되었다 (Fig. 3.2.12). 하지만, 산소-아르곤비와 형광도의 최대값은 23번 ~ 25번 정점 관측시에 보였다. 파인아일랜드 빙붕(PIIS) 근처에서의 DMS는 Getz 빙붕 (GIS)과 닷슨빙붕 (DIS)과 비교시 생산력과 DMS 모두 더 낮은 값을 보였다. 관측 기간 중 몇몇 고농도(150nM 이상)의 DMS를 보인 지역들(Hot spot: HS)이 관측 되었다. 대체적으로, DMS, 산소-아르곤비, 형광도는 해빙과 반대의 경향성을 보였다. 이는 해빙의 감소가 생물활동의 증가로 나타난 산소와 다른 미량기체의 증가와 함께 DMS의 증가에 영향을 미칠것임을 제시하였다. 또한 본 고나측에서는 고농도의 DMS 분포지역은 폴리나 내에서 골고루 나타나고 있었으며 이는 식물플랑크톤의 종분포 및 해양환경 변수들의 분포와 밀접한 관련을 가지고 있음을 알 수 있었다.

대부분의 정점에서 DMS의 농도는 표층에서 최고의 농도를 보였으며, 수심에 따라 감소하였다 (Fig. 3.2.13). 가장 고농도의 DMS는 HS1 부근인 Station 4에서 관측 되었고, HS4 부근인 24번부터 26번 정점구간에서도 고농도가 관측 되었다. 따라서, 이런 수직 분포의 관측 결과는 연속관측결과와 일치하는 경향을 보임을 알 수 있었다. 4번 정점과 8번 정점 사이는 비교적 가까운 거리임에도 8번 정점에서의 DMS의 농도는 거의 0nM에 가깝게 나타났다. 이는 해빙의 농도가 거의 0%였던 4번과 50%였던 8번의 차이를 감안할 때 해빙의 농도와 녹는 시기가 *Phaeocystis*의 번성에 영향을 주어 나타난 것으로 추정되었다. 한편 HS2 부근인 정점 23번부터 26번에서는 식물플랑크톤의 양이 가장 높았다. DMS 및 산소-아르곤 비 또한 150-200nM과 10 ~ 20%로 높게 나타났다. 하지만 흥미로운 점은 수심 50m 이하에서 다른 생물 및 화학적 변수의 변동은 없으나 DMS의 농도는 100m에서 증가하였다. 이러한 DMS 농도의 깊은 수심에서의 증가는 물리적인 해수의 믹싱이 영향을 미쳤을 것으로 생각된다 (Jenkins et al., 2010; Jacobs et al., 2011). 40번 정점 (HS4 부근)에서의 DMS 농도는 200nM 까지 관측 되었다. 하지만 형광도에 있어서는

뚜렷한 증가가 관찰되지 않았다. 입구부근인 42번 ~ 44번 정점의 DMS 농도는 다른 곳보다 더 낮음과, 다른 곳과 달리 50m 정도의 깊은 곳에서도 증가된 DMS가 관측 되는 것을 보아 이 지역의 DMS는 다른 곳에서 수평적으로 수송되어 나타났음을 추측할 수 있었다.



Chemical Oceanography in the Amundsen Sea

Jinyoung Jung, Sun-Yong Ha, Keyhong Park, Doshik Hahm, and Intae Kim

Division of Polar Ocean Sciences, KOPRI

Abstract: To understand biogeochemical cycles and quantify basal melting rate and its temporal variation, distributions of (1) nutrients, (2) dissolved organic carbon (DOC), (3) particulate organic carbon (POC) and nitrogen (PON), (4) noble gases and (5) dimethyl sulfide (DMS) were investigated in the Amundsen Sea. Two distinctive disappearance ratios of $\text{NO}_3:\text{PO}_4$ were observed, suggesting that *Phaeocystis antarctica* and diatom were dominant phytoplankton species. This result also reflected that different carbon uptake ratio by different phytoplankton taxa, which should be considered to estimate carbon flux in the Amundsen Sea. In 2013-14, high DOC concentrations (40-140 $\mu\text{M C}$) were observed between surface and 700 m, suggesting that remineralization of particulate organic matters by microbial activities was significant. In contrast, DOC concentrations observed in 2015-2016 ranged from 25-60 $\mu\text{M C}$, suggesting that marine environment was significantly different between two periods. POC and PON concentrations were high in the Amundsen polynya, and decreased with increasing depth. The results for noble gases exploited the fact that when glacier melts under high hydraulic pressure, it produces significant supersaturation ($\text{DHe} \sim 1000\%$) of helium in the water column. Helium supersaturation was highest near the ice shelf ($> 24\%$) and it gradually decreased as it went far away from the ice shelf, reflecting the glacial meltwater input from the base of the ice shelf and subsequent advection and mixing by overturning circumpolar deep water (CDW). The temporal variation of the meltwater fraction appeared to be significant. Near the Doton and Getz ice shelves the meltwater fraction of 2012 was 30-40% lower than that of 2011. These results imply that glacial meltwater influences the physical and biogeochemical processes at places as far as 300 km away from ice shelves and the rate of basal melting varies in a time scale as short as less than a year. The surface water concentrations of DMS varied from <1 to 400 nM. The highest DMS (up to 300 nM) were observed in sea ice - polynya transition zones and near the Getz ice shelf, where both the first local ice melting and high plankton productions were observed. In other regions, high DMS concentration was generally

accompanied by higher chlorophyll and $\Delta O_2/Ar$. The large spatial variability of DMS and primary productivity in the surface water of the Amundsen Sea seems to be attributed to melting conditions of sea ice, relative dominance of *Phaeocystis antarctica* as a DMS producer, and timing differences between bloom and subsequent DMS productions. The depth profiles of DMS and $\Delta O_2/Ar$ were consistent with the horizontal surface data, showing noticeable spatial variability. However, despite the large spatial variability, in contrast to the previous results from 2009, DMS concentrations and $\Delta O_2/Ar$ in the surface water were indistinct between the two major domains: the sea ice zone and polynya region. The discrepancy may be associated with inter-annual variations of phytoplankton assemblages superimposed on differences in sea-ice conditions, blooming period, and spatial coverage along the vast surface area of the Amundsen Sea.



참고문헌

- Arneborg, L., Wåhlin, A., Björk, G., Liljebladh, B., Orsi, A., 2012. Persistent inflow of warm water onto the central Amundsen shelf. *Nature Geoscience* 5, 876-880.
- Arrigo, K.R. and van Dijken, G.L., 2003. Phytoplankton dynamics within 37 Antarctic coastal polynya systems. *Journal of Geophysical Research*, 108:27-1-27-18.
- Arrigo, K.R., van Dijken, G.L., Bushinsky, S., 2008. Primary production in the Southern Ocean, 1997 - 2006. *Journal of Geophysical Research* 113, C08004. <http://dx.doi.org/10.1029/2007JC004551>.
- Arrigo, K.R., Lowry, K.E., Dijken, G.L.. 2012. Annual changes in sea ice and phytoplankton in polynyas of the Amundsen Sea, Antarctica. *Deep-Sea Research Part II* 71, 5 - 15, <http://dx.doi.org/10.1016/j.dsr2.2012.03.006>.
- Arrigo, K.R., Robinson, D.H., Worthen, D.L., Dunbar, R.B., DiTullio, G.R., VanWoert, M. and Lizotte, M.P., 1999. Phytoplankton community structure and the drawdown of nutrients and CO₂ in the Southern Ocean. *Science*, 283:365-367.
- Beaird, N., Straneo, F., Jenkins, W., 2015. Spreading of Greenland meltwaters in the ocean revealed by noble gases. *Geophysical Research Letters*, 42(18), 7705 - 7713.
- Cameron Smith, P., Elliott, S., Maltrud, M., Erickson, D., Wingenter, O., 2011. Changes in dimethyl sulfide oceanic distribution due to climate change. *Geophysical Research Letters* 38(7).
- Carlson, C.A., Hansell, D.A., Peltzer, E.T. and Smith Jr, W.O., 2000. Stocks and dynamics of dissolved and particulate organic matter in the southern Ross Sea, Antarctica. *Deep-Sea Research II*, 47:3201-3225.
- Caron, D.A., Dennett, M.R., Lonsdale, D.J., Moran, D.M., Shalapyonok, L., 2000. Microzooplankton herbivory in the Ross Sea, Antarctica. *Deep Sea Research Part II* 47, 3,249 - 3,272.
- Coale, K.H., Gordon, R.M., Wang, X., 2005. The distribution and behavior of dissolved and particulate iron and zinc in the Ross Sea and Antarctic circumpolar current along 170°W. *Deep-Sea Research I* 52, 295-318.
- Dutrieux, P., De Rydt, J., Jenkins, A., Holland, P.R., Ha, H.K., Lee, S.H., Steig, E.J., Ding, Q., Abrahamsen, E.P., Schröder, M., 2014. Strong sensitivity of pine island ice-shelf melting to climatic variability. *Science* 343, 174-178.
- Fragoso, G.M., Smith Jr, W.O., 2012. Influence of hydrography on phytoplankton distribution in the Amundsen and Ross Seas, Antarctica. *Journal of Marine Systems* 89, 19 - 29.
- Jacobs, S., A. Jenkins, and C. Giulivi (2011), Stronger ocean circulation and increased melting under Pine Island Glacier ice shelf, *Nature Geoscience* 4, 519-523.

- Jenkins, A., Dutrieux, P., Jacobs, S. S., McPhail, S. D., Perrett, J. R., Webb, A. T., & White, D., 2010. Observations beneath Pine Island Glacier in West Antarctica and implications for its retreat. *Nature Geoscience* 3(7), 468–472.
- Kettle, A. J., Andreae, M. O., Amouroux, D., Andreae, T. W., Bates, T. S., Berresheim, H., Helas, G., 1999. A global database of sea surface dimethylsulfide (DMS) measurements and a procedure to predict sea surface DMS as a function of latitude, longitude, and month. *Global Biogeochemical Cycles* 13(2), 399–444.
- Kim, I., Hahm, D., Rhee, T. S., Kim, T. W., Kim, C.-S., Lee, S., 2016. The distribution of glacial meltwater in the Amundsen Sea, Antarctica, revealed by dissolved helium and neon. *Journal of Geophysical Research*, <http://doi.org/10.1002/2015JC011211>
- Loose, B., Jenkins, W., 2014. The five stable noble gases are sensitive unambiguous tracers of glacial meltwater. *Geophysical Research Letters* 41, 2835–2841.
- Pritchard, H. D., S. R. M. Ligtenberg, H. A. Fricker, D. G. Vaughan, M. R. van den Broeke, L. Padman, 2012. Antarctic ice-sheet loss driven by basal melting of ice shelves, *Nature* 484, 502 - 505.
- Poulton, S.W., Raiswell, R., 2005. Chemical and physical characteristics of iron oxides in riverine and glacial meltwater sediments. *Chemical Geology* 218(3 - 4), 203 - 221.
- Rignot, E., 2002. Ice-shelf changes in Pine Island Bay, Antarctica, 1947 - 2000. *Journal of Glaciology* 48(161), 247 - 256.
- Rignot, E., J. L. Bamber, M. R. van den Broeke, C. Davis, Y. Li, W. J. van de Berg, and E. van Meijgaard (2008b), Recent Antarctic mass loss from radar interferometry and regional climate modeling, *Nature Geoscience* 2, 106 - 110.
- Smith, W.O. Jr., Shields, A.R., Peloquin, J.A., Catalano, G., Tozzi, S., Dinniman, M.S., Asper, V.A., 2006. Interannual variations in nutrients, net community production, and biogeochemical cycles in the Ross Sea. *Deep Sea Research Part II* 53, 815 - 833.
- Stanley, R. H. R., B. Baschek, D. E. Lott, W. J. Jenkins., 2009. A new automated method for measuring noble gases and their isotopic ratios in water samples, *Geochem. Geophys. Geosyst*, 10.
- Thomas, M. A., Suntharalingam, P., Pozzoli, L., Rast, S., Devasthale, A., Kloster, S., Lenton, T. M., 2010. Quantification of DMS aerosol-cloud-climate interactions using the ECHAM5-HAMMOZ model in a current climate scenario. *Atmospheric Chemistry and Physics* 10(15), 7425–7438.
- Tortell, P. D., Guéguen, C., Long, M. C., Payne, C. D., Lee, P., DiTullio, G. R., 2011. Spatial variability and temporal dynamics of surface water $p\text{CO}_2, \Delta$

- O_2 /AranddimethylsulfideintheRossSea, Antarctica. Deep Sea Research Part I 58(3), 241-259.
- Tortell, P. D., Long, M. C., Payne, C. D., Alderkamp, A. C., Dutrieux, P., Arrigo, K. R. (2012). Spatial distribution of $pCO_2, \Delta O_2$ /Arand dimethylsulfide DMS) in polynya waters and the sea ice zone of the Amundsen Sea, Antarctica. Deep Sea Research Part II 71, 77-93.
- Wåhlin, A., Kalén, O., Arneborg, L., Björk, G., Carvajal, G., Ha, H., Kim, T., Lee, S., Lee, J., Stranne, C., 2013. Variability of warm deep water inflow in a submarine trough on the Amundsen Sea shelf. Journal of Physical Oceanography 43, 2054-2070.



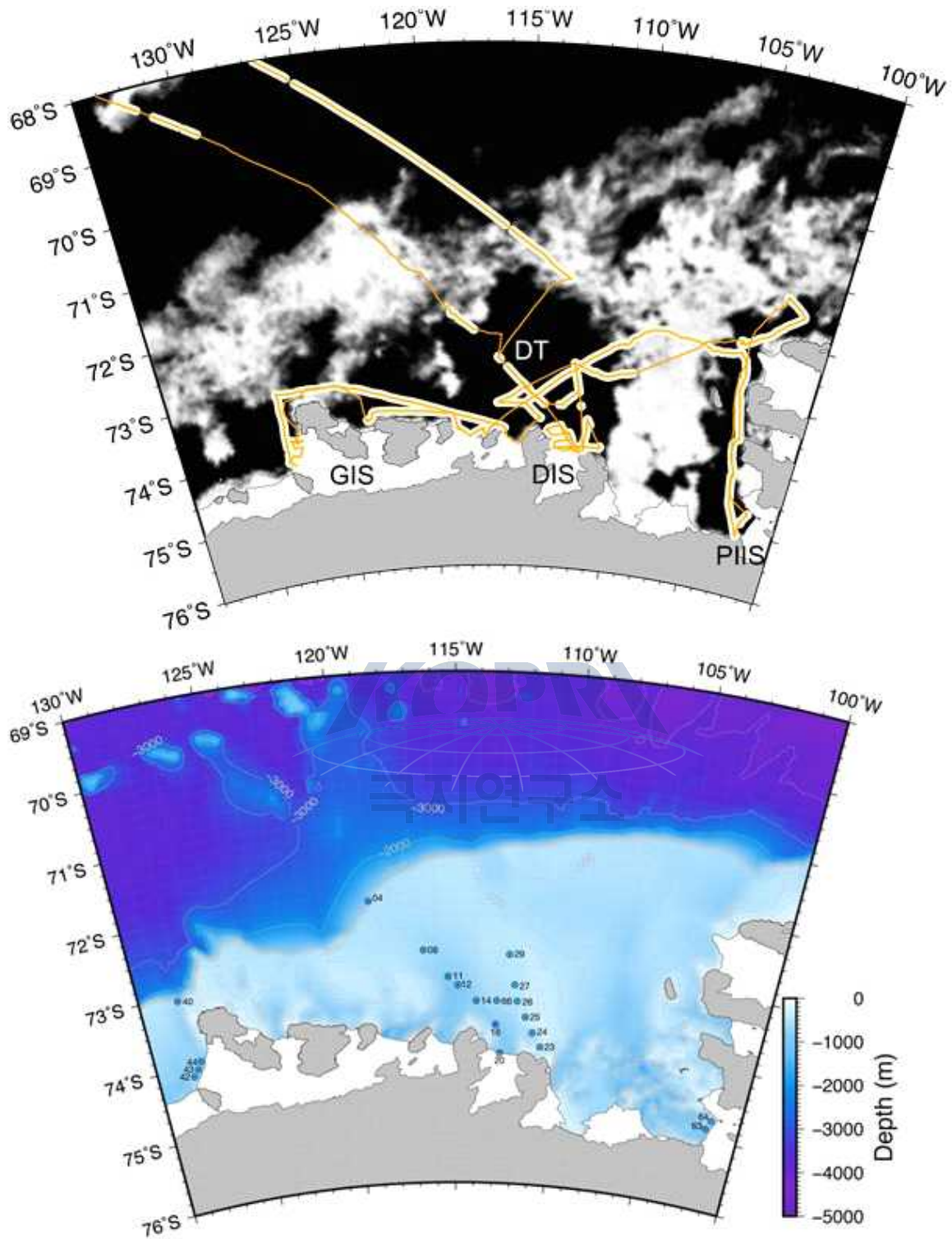


Fig. 3.2.1. Map showing cruise track of underway measurements of DMS, $\Delta O_2/Ar$, and fluorescence (upper figure) with sea-ice distributions from satellite image. Seawater samples for vertical profiles of DMS and O_2/Ar were collected at 20 stations (below figure). The station numbers of each CTD cast for bottle sampling are denoted below map.

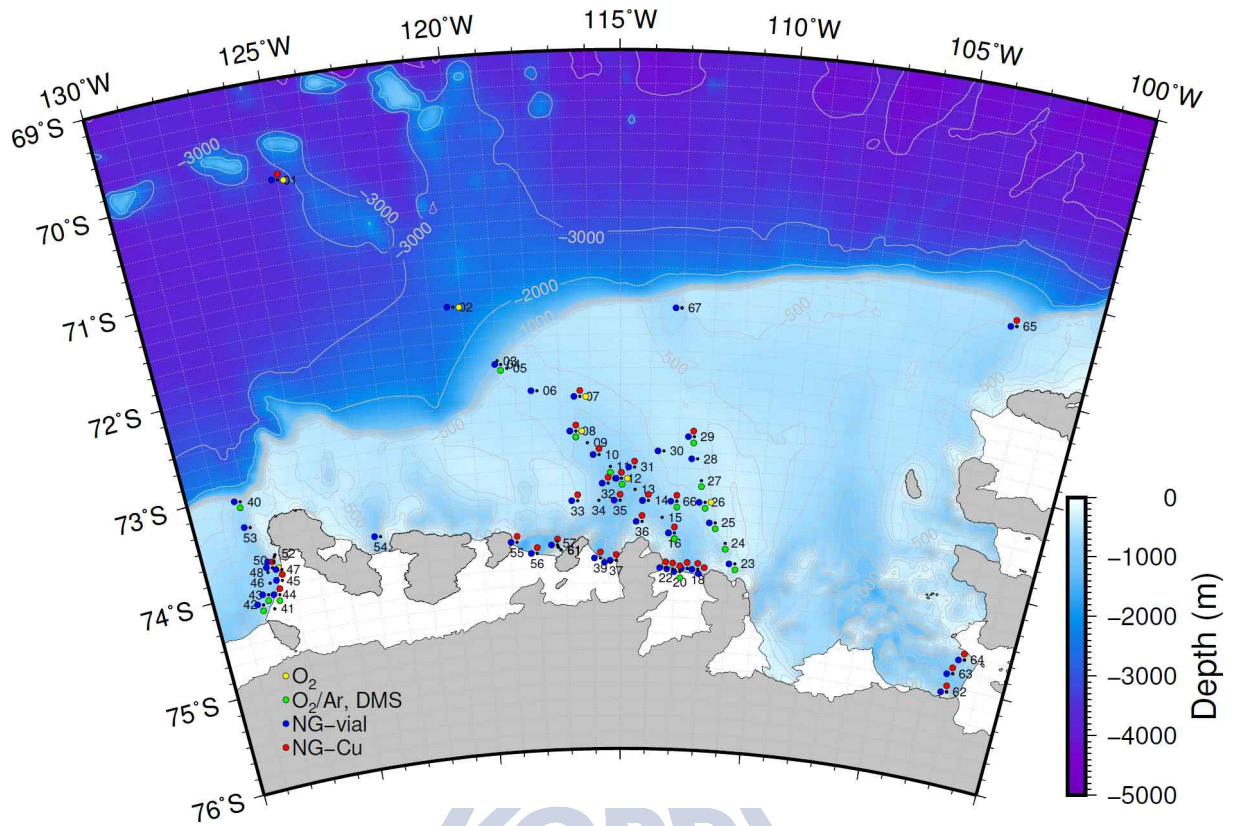


Fig. 3.2.2. Map showing the locations where samples for noble gas analysis were collected during 2016 cruise.

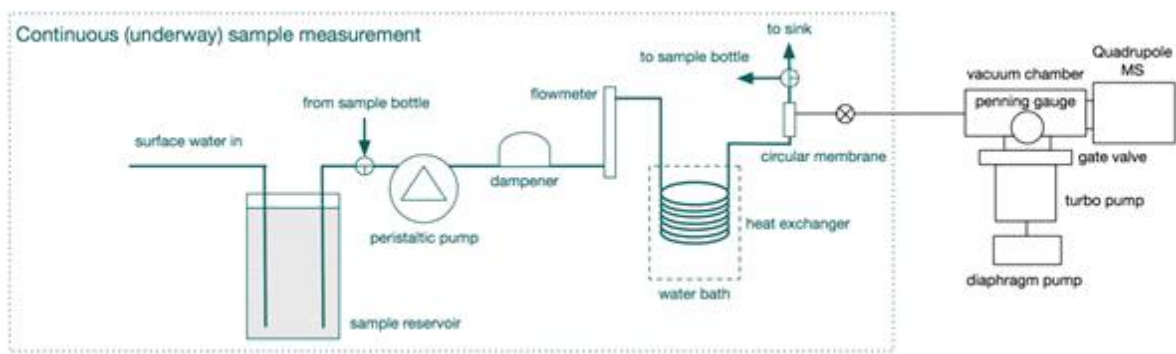


Fig. 3.2.3. Schematic of our MIMS-underway measurement system

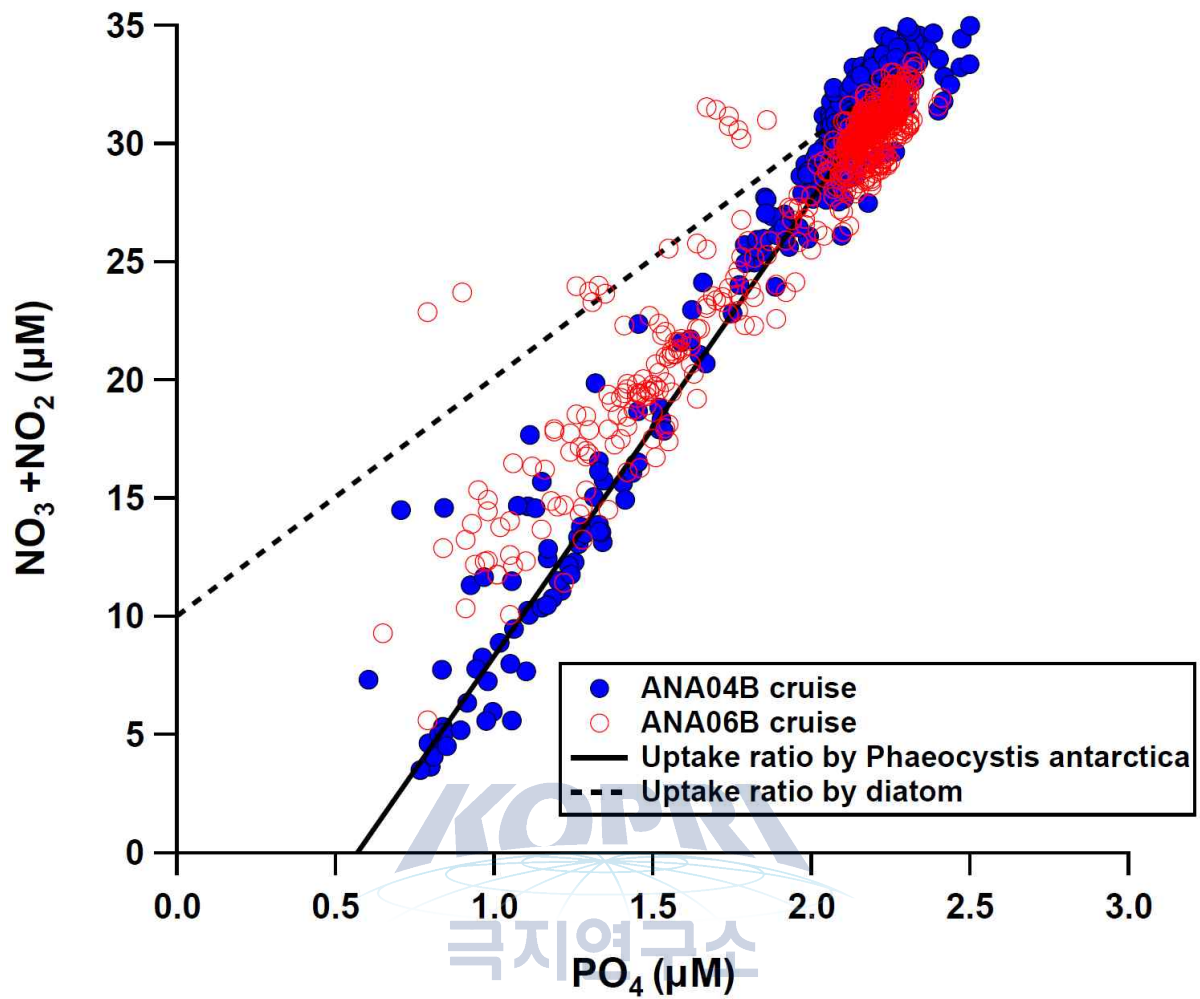


Fig. 3.2.4. Plot of nitrate concentration versus phosphate concentration measured in the Amundsen Sea during ANA04B and ANA06B cruises. Solid and dashed lines indicate nutrients uptake ratios by *Phaeocystis antarctica* and diatom, respectively.

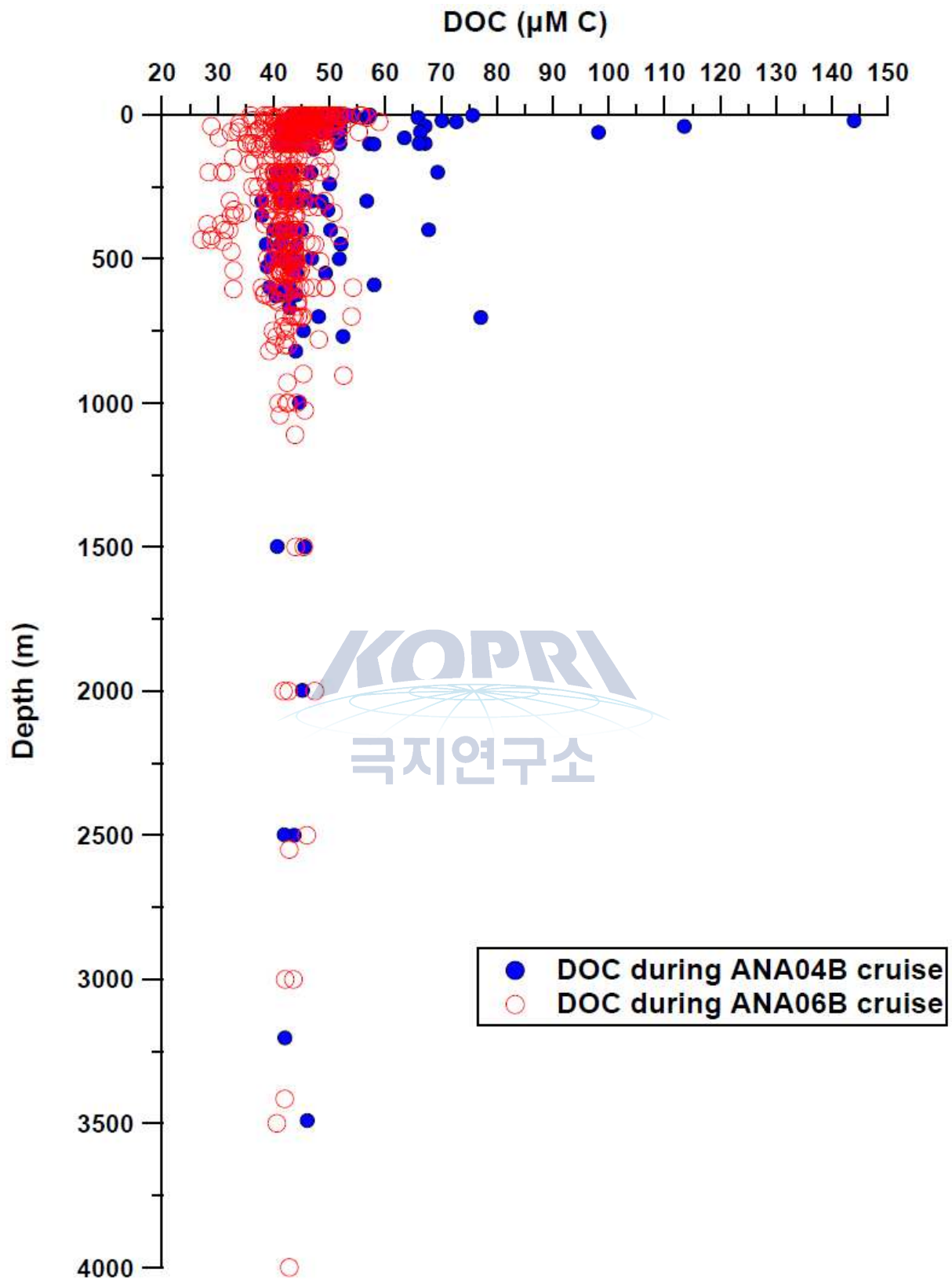
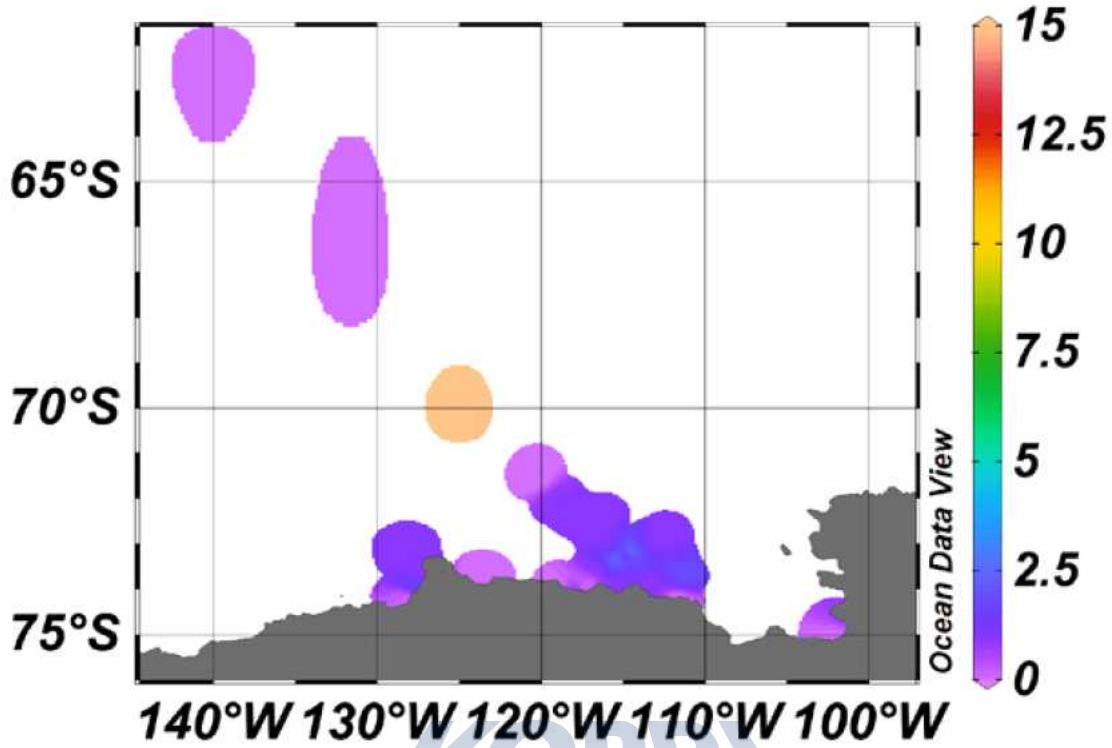


Fig. 3.2.5. Vertical profiles of dissolved organic carbon (DOC) measured in the Amundsen Sea during ANA04B and ANA06B cruises.

POC[mg/L] @ Depth[m]=first



PON[mg/L] @ Depth[m]=first

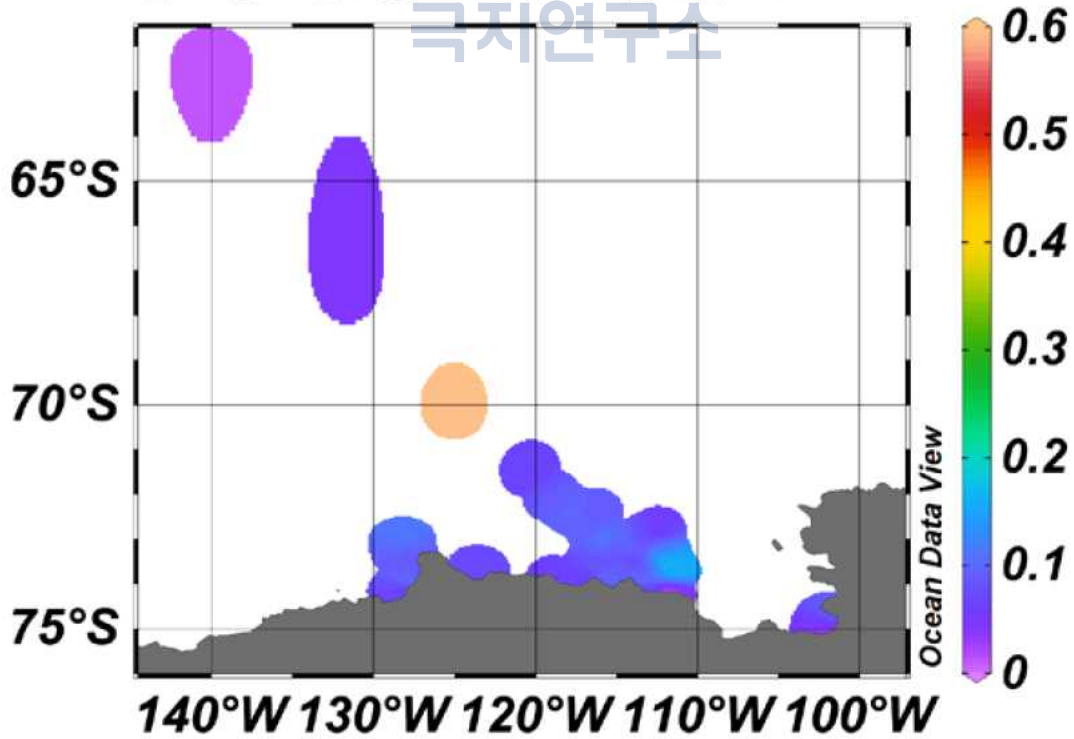


Fig.

3.2.6. Distribution of particulate organic carbon (POC) and particulate organic nitrogen (PON) on the surface in the Amundsen Sea.

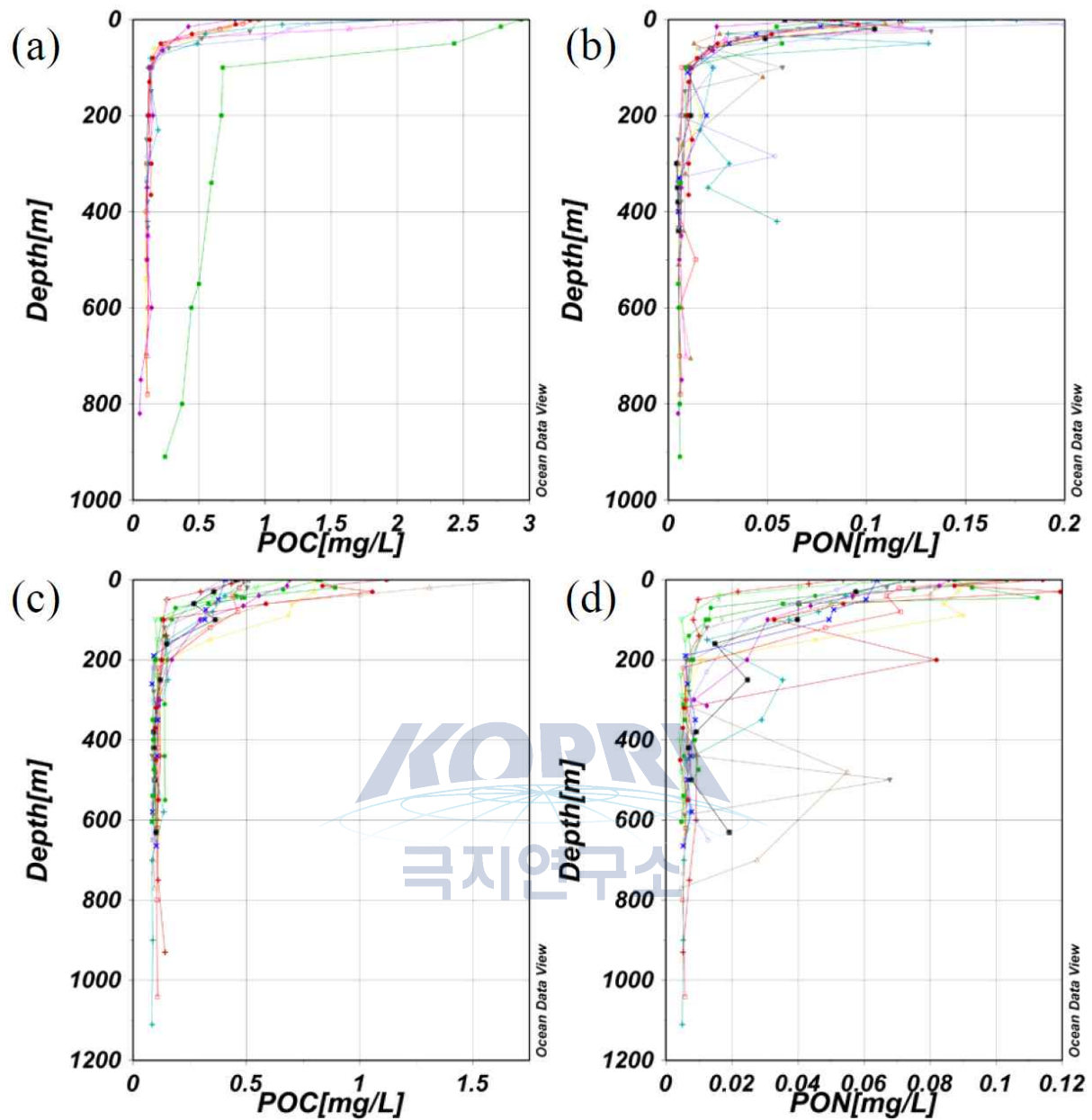


Fig. 3.2.7. Depth profile of particulate organic carbon (POC) (a and c) and particulate organic nitrogen (PON) (b and d) in the center of polynya (a and b) and ice shelf (c and d) in the Amundsen Sea.

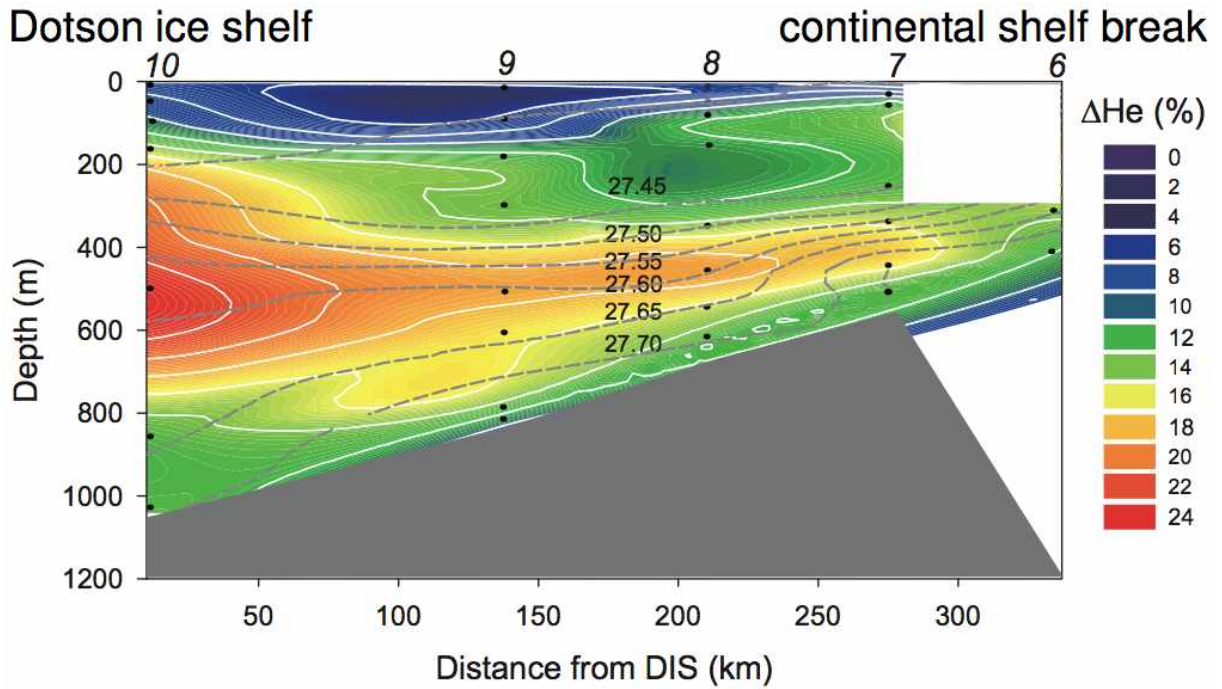


Fig. 3.2.8. The distribution of excess He (DHe) along the Dotson Trough from the Dotson ice shelf (St. 10) to the outer shelf (St. 6).

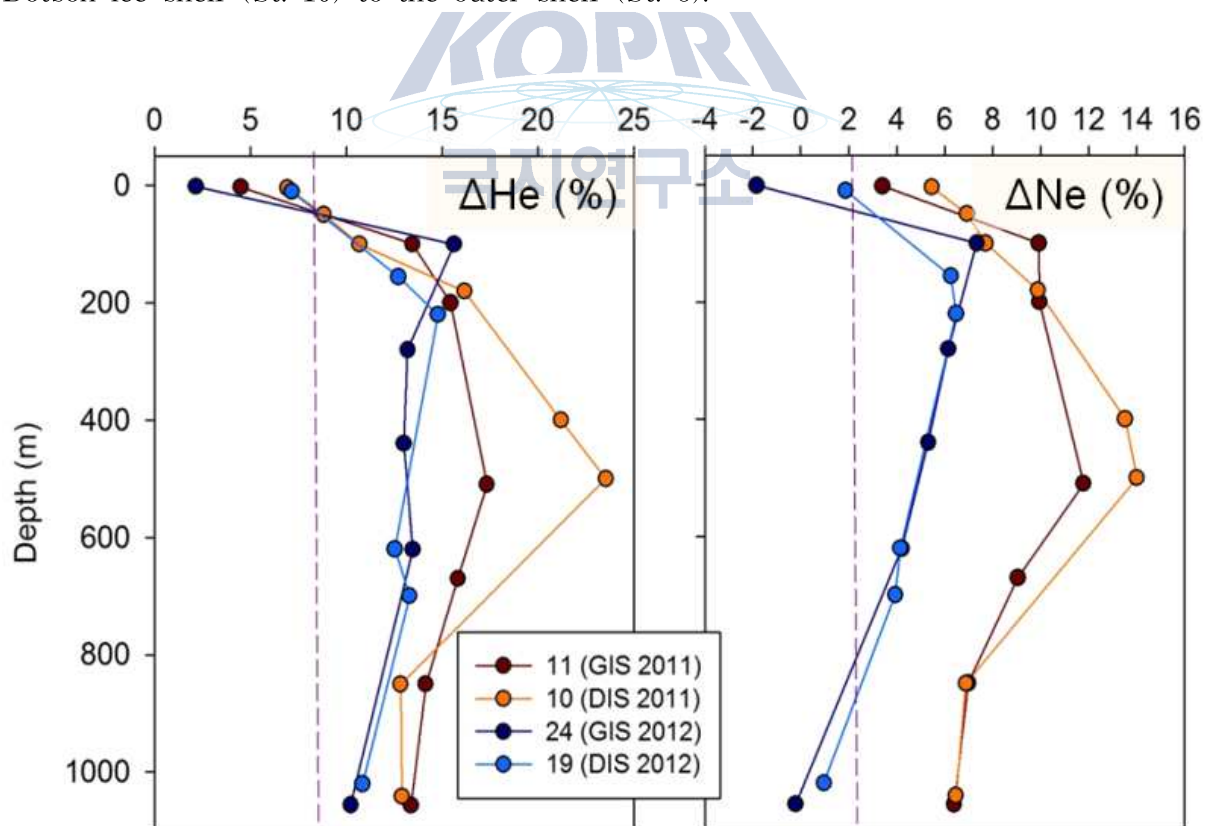


Fig. 3.2.9. The temporal changes of DHe and DNe. The DHe and DNe in 2012 were significantly lower than those in 2011.

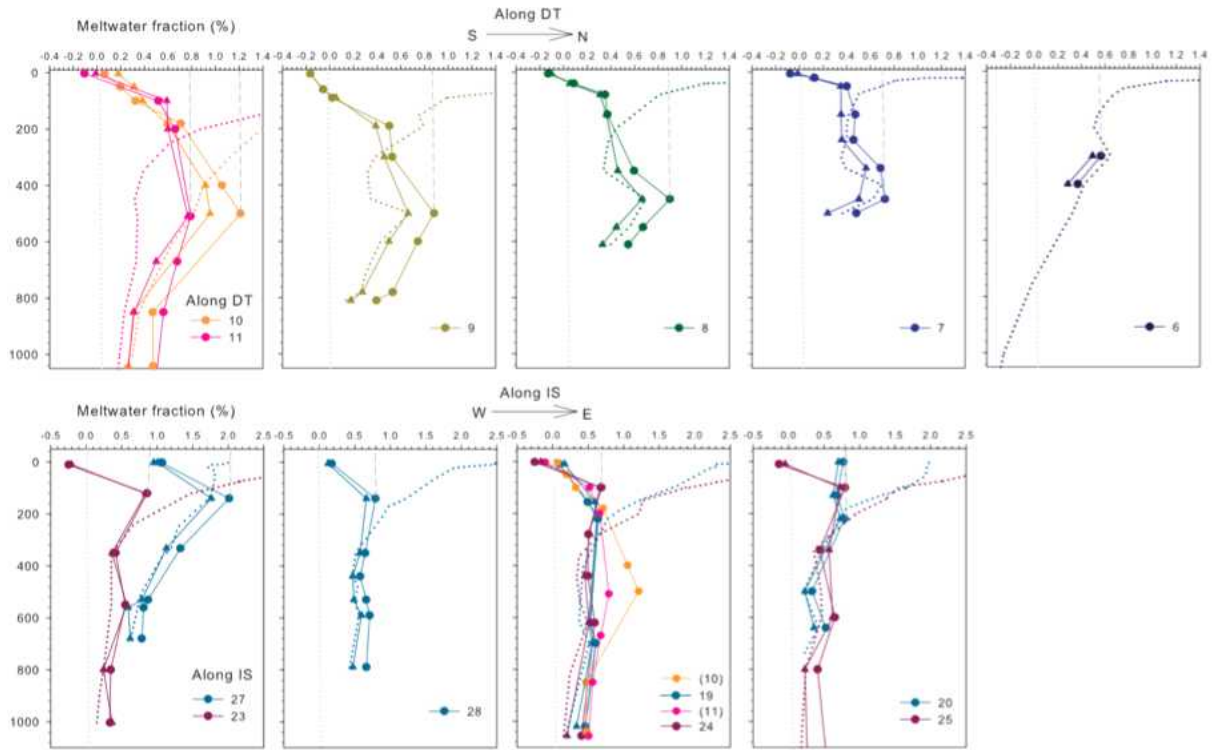
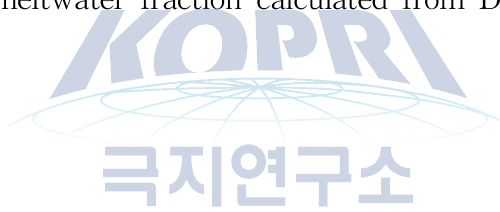


Fig. 3.2.10. The glacial meltwater fraction calculated from DHe.



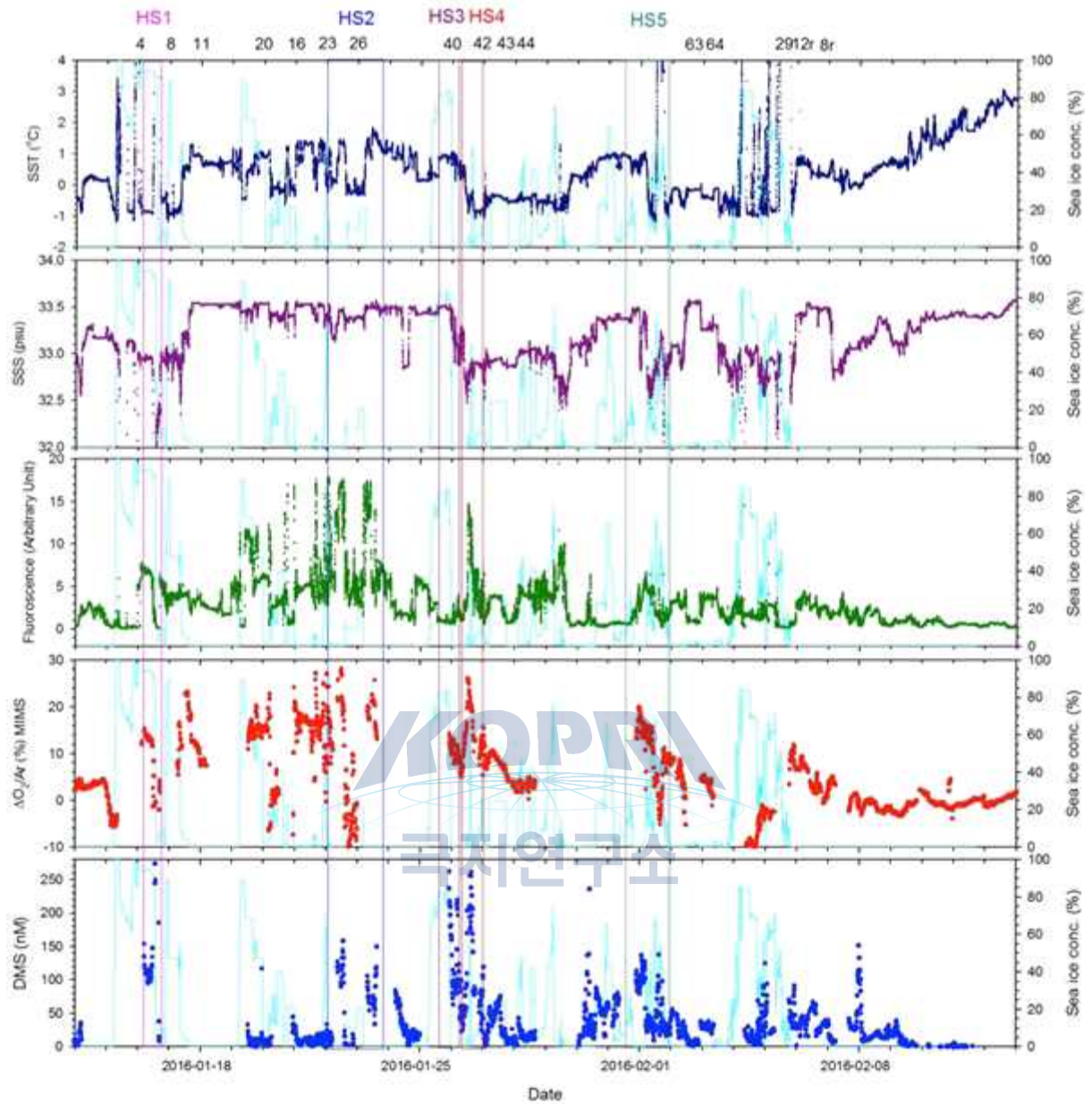


Fig. 3.2.11. Time series of SST (navy dots), SSS (purple dots), fluorescence (green dots), $\Delta O_2/Ar$ (red dots), and DMS (blue dots) measured by and MIMS during the entire sampling period with sea-ice concentrations (%). Station numbers are denoted in the top row with the corresponding date.

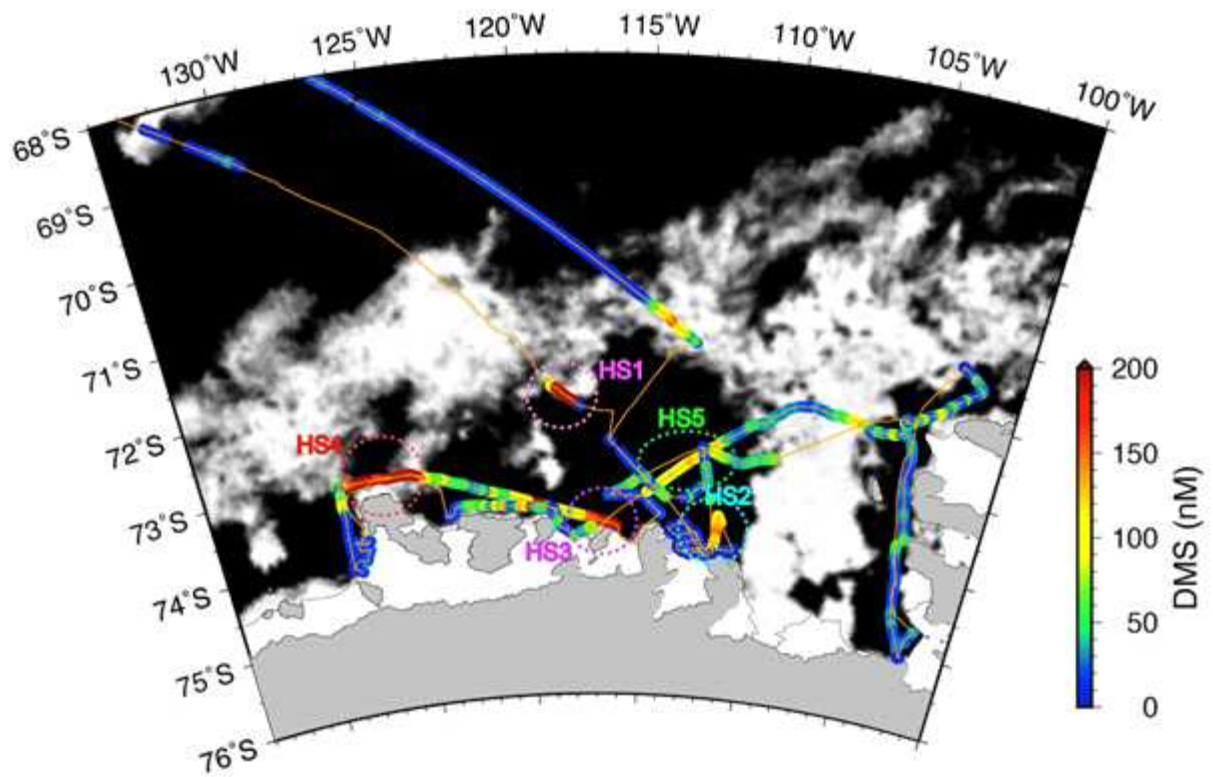


Fig. 3.2.12. Spatial distributions of DMS concentrations (contour map) throughout the Amundsen Sea surface waters from Jan 14 to Feb 10. The five hotspot (HS) sites are presented, where the mean DMS concentrations are >150 nM.

극지연구소

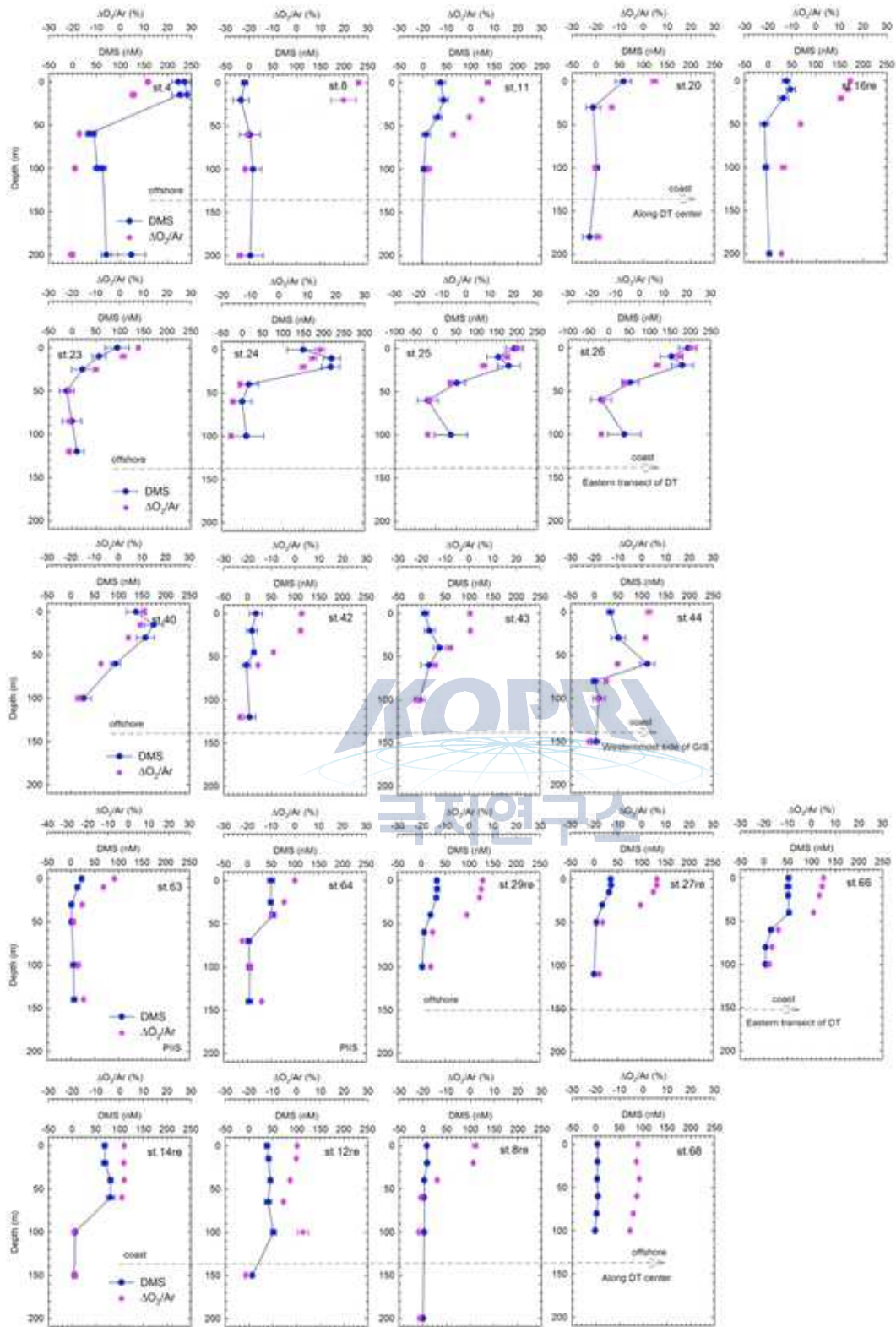


Fig. 3.2.13. Vertical profiles of DMS (blue dots and lines) and $\Delta O_2/Ar(\%)$ (pink dots and dotted lines) for the CTD cast stations. The uncertainty of each data set is expressed by the 1-sigma (1σ) error bar.

제 3 절 식물플랑크톤 광합성 생리활성 (박지수)

요약: 아문젠사업 2단계 연구기간인 2014년 1월부터 2016년 12월말까지 기간 동안, 아라온을 활용한 두 차례의 아문젠해 현장관측이 이루어졌다. 첫 번째 항해는 2013년 12월 31일부터 2014년 1월 15일까지 16일간 수행되었으며, 이 기간 식물플랑크톤 생리활성특성을 연구하기 위한 총 연구정점은 26개 정점이었고, 두 번째 항해는 2016년 1월 15일부터 2월 16일까지 총 33일간 52개 정점에서 수행되었다. 연구해역에서 수직 해수 채수와 표층 연속관측을 통해 Fluorescence Induction and Relaxation (FIRe) 장비를 사용하여 식물플랑크톤의 광합성 최대효율 변수인 F_v/F_m 값 등을 측정하였으며, 남극해 식물플랑크톤 성장 제한요인으로 잘 알려져 있는 철분과 빛 제한에 대한 효과를 알기 위해 현장에선 배양실험을 수행하였고, 광량 등의 위성자료도 분석에 활용되었다. 과거의 연구결과와 종합해, 아문젠해역의 식물플랑크톤 성장 및 생물량을 조절하는 요인으로 철분과 함께 빛의 제한이 매우 중요함을 밝힐 수 있었다.

1. 서론

남극해에서 생산력이 상대적으로 높은 해역은 대륙붕과 섬 주변 (Smith and Comiso, 2008; Korb et al., 2004), 지형적인 효과로 용승이 발생하는 곳 (Park et al., 2010), 그리고 폴리니아 해역 (Arrigo and Van Dijken, 2003)이다. 남극해는 세 가지 주요영양염인 질산염, 인산염, 규산염은 모두 풍부하지만, 일차생산이 미세영양염류인 철분과 빛에 의해 제한받는다고 알려져 있다 (De Baar et al., 1995; Sunda and Huntsman, 1997). 본 연구의 목적은 아문젠 폴리니아의 식물플랑크톤 대번성 해역과 주변 해역의 식물플랑크톤 번성 특성과 이에 따른 생리활성도의 분포 특성, 그리고 철분 혹은 빛 조건 등의 식물플랑크톤 성장에 제한을 주는 요인에 대한 효과를 밝히고자함 이었다. 이미 선행 연차보고서에 몇 차례 소개하였지만, 식물플랑크톤 광합성과 관련한 광화학 변수를 측정하는 Fast Repetition Rate Fluorometry 방법 (Kolber and Falkowski, 1993)은 최근 많은 해양생물 연구분야에 사용되고 있으며, 이를 원리로 제작된 Fluorescence Induction and Relaxation (FIRe) 장비를 연구에 사용하였다 (Fig. 3.3.1). 이 장비를 이용하여 측정할 수 있는 생리활성도 변수 (Kolber et al., 1998)인 광합성 최대 효율을 나타내는 F_v/F_m 값은 식물플랑크톤의 생리활성도를 나타내는 대표적인 지표로 활용되며, 식물플랑크톤의 광적응 정도 및 영양염 제한 등에 대한 스트레스 정도에 따라 값의 차이를 보이게 된다 (Falkowski and Raven, 2007).

2. 재료 및 방법

본 연구기간인 2014년 1월부터 2016년 12월말까지 기간 동안, 아라온을 활용한 두 차례의 아문젠해 현장관측이 이루어졌다. 첫 번째 항해는 2013년 12월 31일부터 2014년 1월 15일까지 16일간 수행되었으며, 이 기간 식물플랑크톤 생리활성특성을 연구하기 위한 총 연구정점은 26개 정점이었고, 두 번째 항해는 2016년 1월 15일부터 2월 16일까지 총 33일간 52개 정점에서 수행되었다 (Fig. 3.3.2). 각각의 정점에서는 Rosette 채수기를 이용하여 식물플랑크톤 생리활성 특성 분석을 위한 현장 해수를 채수하였다. FIRE로 식물플랑크톤의 생리변수를 측정하기 전에 채수된 시료는 반투명 채수병에 담아 약한 빛에 노출된 채로 현장온도를 유지시키며 약 30분 이상 광적응을 시켜 빛이 강한 주간에 표층시료에서 발생할 수 있는 광저해 효과를 회복시킨 후 측정을 시작하였다. 이러한 과정을 통해, 광저해 효과를 제거한 철분 제한만의 효과를 관찰할 수 있게 된다 (Park et al., 2013). 또한, 해수 자체의 형광을 제거하기 위한 blank 시료는 0.2 um 막 여과지를 사용해 각 정점별 시료를 여과해 측정하였다. 또한, 2014년의 경우엔, 연구해역 식물플랑크톤의 철분 부족에 따른 성장제한 효과를 관찰하기 위해서 고안된 배양실험을 통해 영양염, 등의 변화와 식물플랑크톤 엽록소 농도 및 생리활성도 변화를 측정하기 위한 실험이 수행되었다. 실험을 위한 시료는 총 4곳 (외해, 아문젠 사면입구, 폴리니아 중심부, 빙봉 앞)에서 이루어졌으며, 이때 실험을 위한 해수는 올해 도입한 Go-FLO 멀티 채수기를 사용하여 채수시의 오염을 방지하였다 (Fig. 3.3.3). 배양실험은 각각 7일 이상의 기간 동안 갑판에서 배양하며 주기적으로 변화를 측정하였다.

3. 결과 및 고찰

가. 광합성 생리변수의 철분 첨가 배양실험에 따른 반응

2014년 현장조사 시, 약 7일에서 10일간의 철분 첨가 배양실험을 수행한 결과, 아문젠 폴리니아 해역 4곳의 모든 정점에서, 철분이 첨가된 시료에서 광합성 생리변수 F_v/F_m 의 증가가 관찰되었다 (Fig. 3.3.4). 이들 변수 F_v/F_m 의 증가는 엽록소 농도 등의 다른 측정치와 달리, 배양이 시작된지 하루 이틀도 지나지 않아 빠른 반응을 나타냈고, 철분이 첨가되지 않은 시료인 control 시료와의 반응 차이가 모든 정점에서 뚜렷하였다. 특히, 지난해의 관측을 통해, 철분 제한이 상대적으로 심하게 나타나는 곳으로 알려진 폴리니아의 중심부와 외해에 위치한 정점의 시료에서 배양실험 시작 후 상대적으로 낮은 수준이었던 F_v/F_m 값이 빠르게 증가하였고 (0.45 이상), 이 경우 control 시료도 배양초기 같이 증가하였다 감소하며 차이를 보였다. 상대적으로 철분이 풍부할 것으로 예상되는 빙봉 앞 정점의 시료는 철분을 첨가한 시료의 F_v/F_m 값이 초기 0.42 수준에서 0.5 수준까지 약간 증가한 반면 control 시료에선 0.25 수준까지 지속적으로 감소하는 패턴이 나타났다. 이 정점 시료와 더불어 모든 정점에서 control 시료는 배양이 시작된 후 수일이

지나 모두 Fv/Fm 값이 0.3 이하로 떨어졌다. 보다 정확한 해석은 현장에서 직접 채취된 용존상 철의 농도 시료가 분석되어야 하겠지만, 지난 연구들을 통해 예상했던 결과를 크게 벗어나진 않는 것으로 판단된다. 이러한 배양실험을 통해 얻어진 결과는 아문젠해역의 철분 부족이 식물플랑크톤 성장의 제한 요인이 되고 있음을 간접적으로 밝히고 있으며, 이들 요인과 함께 빛이 아문젠해역의 주요 성장 제한 요인임을 규명하는 내용은 조만간 국제학술지를 통해 출간될 예정이다.

나. 아문젠 폴리니아와 파인아일랜드 폴리니아의 표층 광합성생리활성 분포

2016년 현장조사는 2014년과 달리 아문젠 주변해역 연안의 빙붕을 따라 동-서에 걸쳐 광역 자료를 얻을 수 있었다. 이들 정점의 동쪽 끝은 앞을 포함하며, 서쪽 방향으로 Dotson Ice Shelf, Getz Ice Shelf, 그리고 서쪽 끝의 Wrigley Gulf에 이른다. 이들 연안 및 빙붕을 따라 관측된 표층의 식물플랑크톤 광합성 최대수율인 Fv/Fm 값도 매우 큰 차이를 보이고 있다 (Fig. 3.3.5). 관측된 Fv/Fm 값은 Pine Island Glacier 주변에서 0.45-0.5 수준으로 높은 반면 서쪽의 Wrigley Gulf에선 0.4 수준이나 그 이하의 값이 관측되었으며, 최대값은 Getz Ice Shelf 근처에서 관측되었다. 아문젠 폴리니아 중심부는 다른 해에 관측된 결과와 달리 0.5가 넘는 상대적으로 높은 값이 관측되었으며 폴리니아 동북부에선 예년과 비슷한 수준인 0.4 이하의 값도 관측되었다. 2016년의 경우엔 태평양에서 발생한 슈퍼엘니뇨의 영향인지는 아직 확실하지 않으나, 다른 해와 달리 폴리니아를 만드는 해빙 (sea ice)이 많이 발달하지 않아 아문젠 폴리니아의 반 이상이 북쪽의 open sea와 연결되는 형태를 갖춰 폴리니아 중심의 식물플랑크톤 종조성도 다른 해와는 달랐으며, 이들 복합적인 요인이 지난 세 번의 관측과 다른 생리활성 분포를 나타나게 한 원인으로 판단하고 있다. 또한, 뉴질랜드를 출발한 아라운의 항적을 따라 연속으로 관측된 표층 부근 (7 m 수심)의 식물플랑크톤 광합성 최대수율 광역 분포는 예전과 크게 다르지 않았으며 (Fig. 3.3.6), 지난 네 차례의 연구결과를 종합하여 분석을 진행 중이다.

Characteristics of phytoplankton ecology and biological environment in the Amundsen Sea

Jisoo Park

Department of Polar Ocean & Environment Research, KOPRI

Abstract: Two cruises were conducted in the Amundsen Sea of the Southern Ocean in austral summer (January 2014 and January–February 2016) on board R/V icebreaker ARAON. The total stations for phytoplankton physiological study were 26 and 52, respectively where seasonally sea ice covered zone, Amundsen & Pine Island polynyas, and open sea were included. During the cruise, we mainly observed maximum photosynthetic quantum efficiencies (F_v/F_m) using Fluorescence Induction and Relaxation system (FIRe) for understanding the characteristics of phytoplankton ecology and biological environment. Moreover, to demonstrate that iron limited responses of natural phytoplankton assemblages, we carried out iron assimilation experiments at four stations (open sea, outer shelf, polynya center, front of ice shelf) during more than seven days. Satellite data of daily solar irradiance were also used for analysis light regimes of study area. Both observed and analysed data clearly showed that light availability rather than Fe controls the magnitude of massive phytoplankton bloom in this most productive system in the Southern Ocean.

참고문헌

- Arrigo, K.R., van Dijken, G.L., 2003. Phytoplankton dynamics within 37 Antarctic coastal plynua systems. *Journal of Geophysical Reserch*, 108, doi:10.1029/2002JC001739.
- De Baar, H. J. W. and others 1995. Importance of iron for plankton blooms and carbon dioxide drawdown in the Southern Ocean. *Nature* 373:412-415.
- Falkowski P.G. and Raven, J.A., 2007. *Aquatic photosynthesis*. Princeton University Press, U.K. 484pp.
- Kolber, Z. and Falkowski, P.G., 1993. Use of active fluorescence to estimate phytoplankton photosynthesis in situ. *Limnology and Oceanography*, 38:1646-1665.
- Kolber, Z., Prasil, O. and Falkowski, P.G., 1998. Measurements of variable chlorophyll fluorescence using fast repetition rate techniques: defining methodology and experimental protocols. *Biochemica et Biophysica Acta-Bioenergetics*, 1367:88-106.
- Korb, R. E., Whitehouse, M. J. and P. Ward. 2004. SeaWiFS in the southern ocean: spatial and temporal variability in phytoplankton biomass around South Georgia. *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography* 51:99-116.
- Park, J., Oh, I.-S., Kim, H.-C. and Yoo, S. 2010. Variability of SeaWiFs chlorophyll-a in the southwest Atlantic sector of the Southern Ocean: Strong topographic effects and weak seasonality. *Deep-Sea Res.* 57:604-620.
- Park, J. and others 2013. Early summer iron limitation of phytoplankton photosynthesis in the Scotia Sea as inferred from fast repetition rate fluorometry. *Journal of Geophysical Research: Oceans* 118:3795-3806.
- Smith, W. O., Jr., and Comiso. J. C. 2008. Influence of sea ice on primary production in the Southern Ocean: A satellite perspective. *J. Geophys. Res.* 113: C05S93.
- Sunda, W. G., and Huntsman. S. A. 1997. Interrelated influence of iron, light and cell size on marine phytoplankton growth. *Nature* 390:389-392.

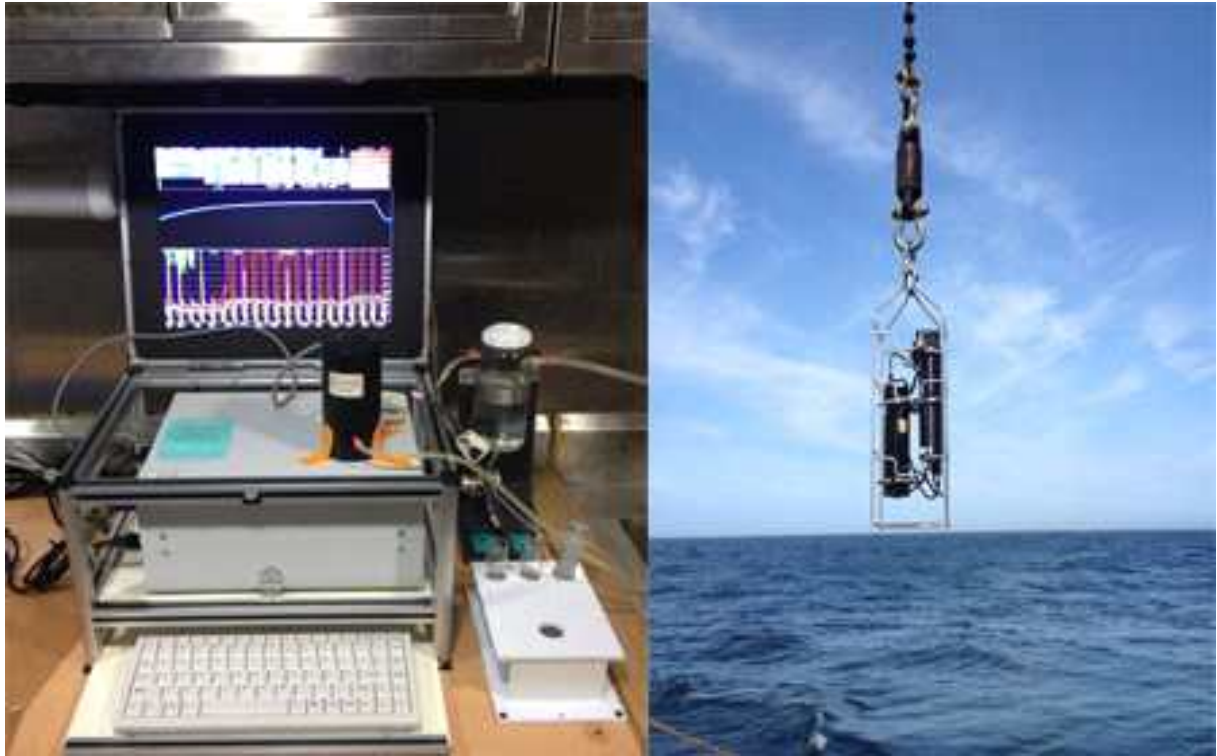
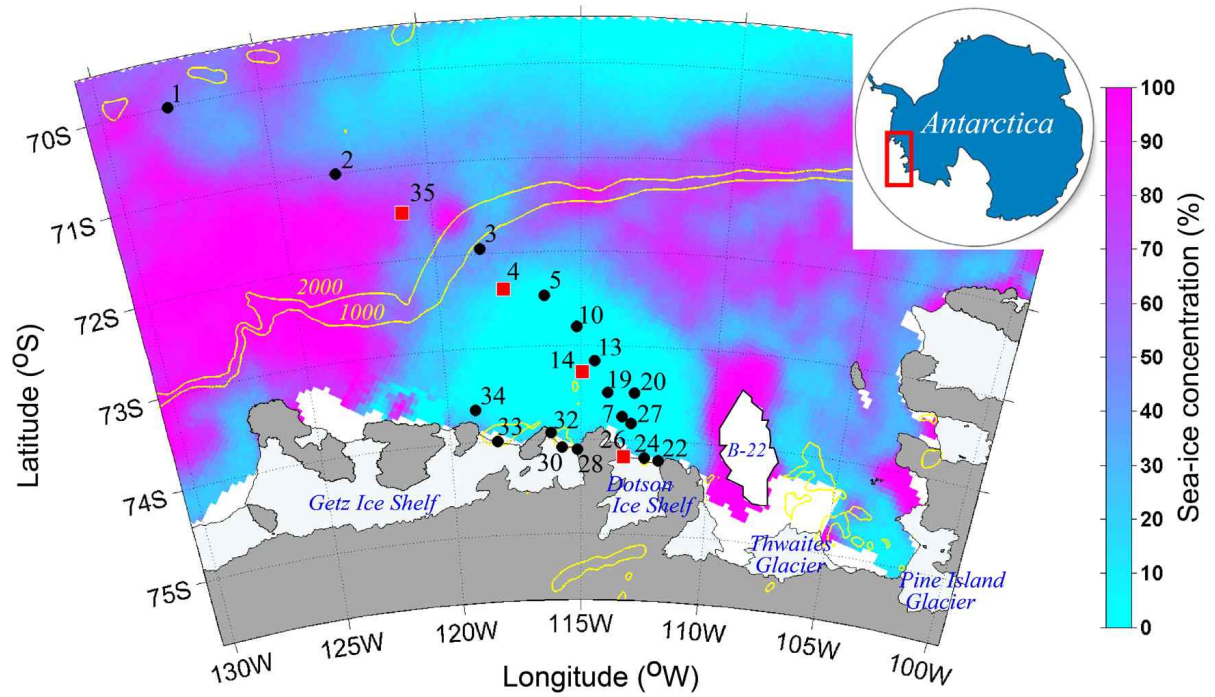


Fig. 3.3.1. Fluorescence Induction and Relaxation Systems (FIRE) on board and in-situ profiling type.



(a) 2013/2014 cruise



(b) 2015/2016 cruise

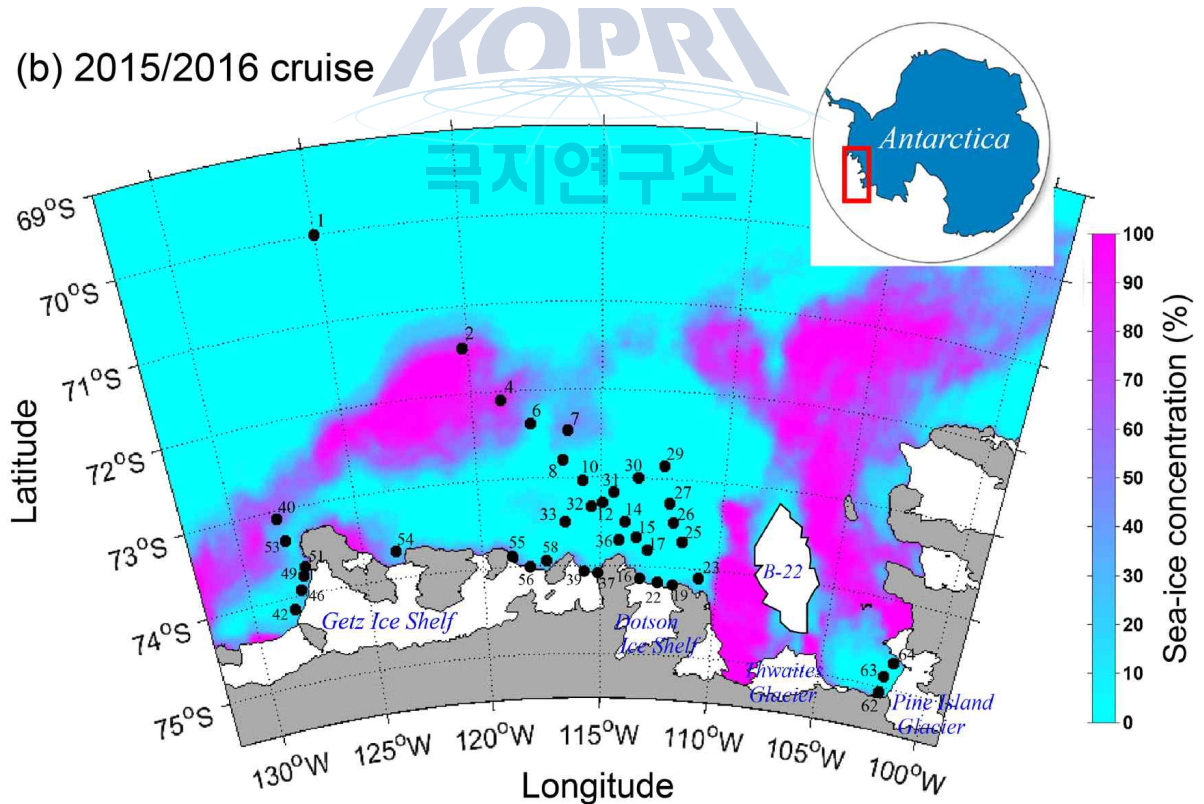


Fig. 3.3.2. A map of stations for for phytoplankton physiological parameters in the Amundsen Sea (a) 2013/2014 and (b) 2015/2016. Colors represent averaged sea ice concentrations during the cruise.



Fig. 3.3.3. A picture showing the sampling of metal free seawater using Go-FLO rosette system for iron assimilation experiment.

극지연구소

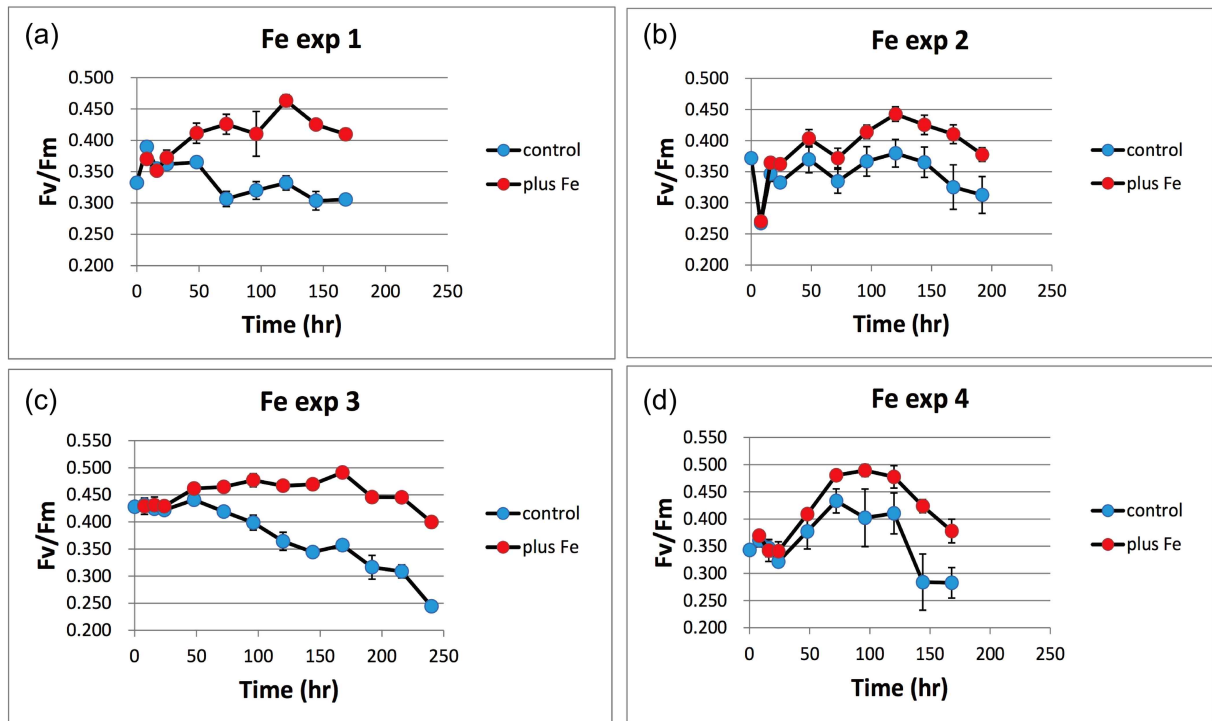


Fig. 3.3.4. Temporal evolution of photosynthetic efficiencies (F_v/F_m) at four iron assimilation stations of the Amundsen Sea during 2013/2014 cruise. Stations are located at a) outer shelf (st. 4), b) polynya center (st. 14), c) front of ice shelf (st. 26), and d) open sea (st. 35), respectively.

극지연구소

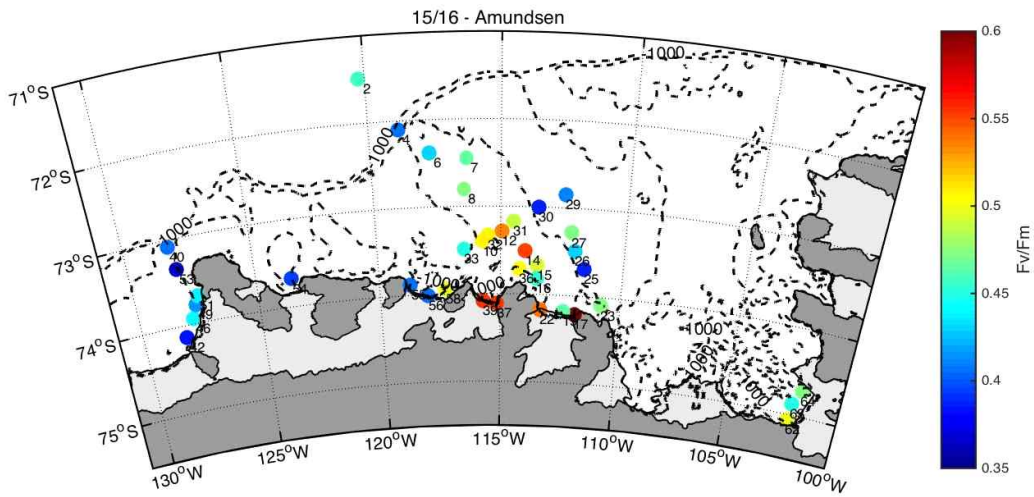


Fig. 3.3.5. Surface distribution of maximum photosynthetic quantum efficiencies (Fv/Fm) in the Amundsen Sea in 2015/2016.

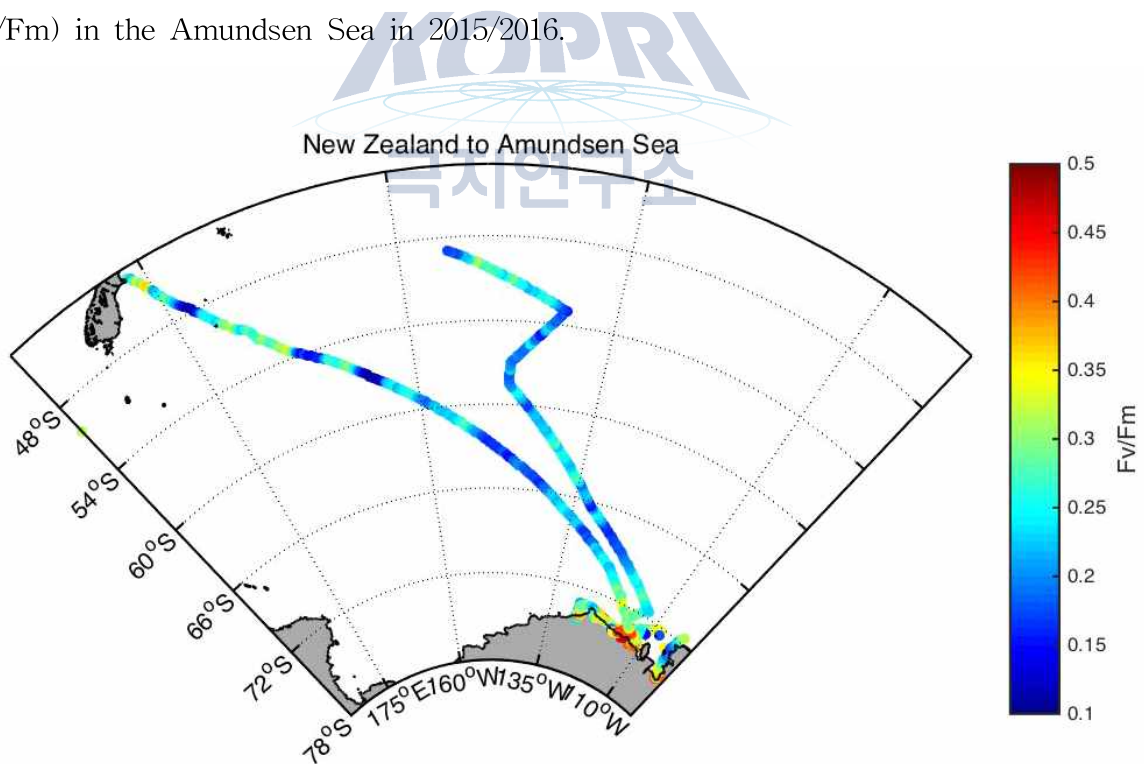


Fig. 3.3.6. Underway measurements of maximum photosynthetic quantum efficiencies (Fv/Fm) during Araon's New Zealand to Amundsen Sea transit in 2015/2016.

제 4 절 식물플랑크톤 군집에 영향을 미치는 환경특성 (이영주, 양은진)

요약: 아문젠 해역에서 식물플랑크톤 군집은 *Phaeocystis antarctica* (Prymnesiophytes)와 규조류가 우점하며 이 두 그룹은 아문젠 폴리니아의 생지화학 순환에 다른 역할을 한다. 아문젠 폴리니아에서 식물플랑크톤 군집의 변동에 영향을 주는 환경 요인을 파악하기 위하여 2014년 1월과 (ANA04B) 2016년 1월 (ANA06B) 현장조사가 이루어졌다. 조사수역에서 2014년과 2016년 1월 모두 해빙이 많이 감소하였으나 2016년 1월에 월평균 일조량이 상대적으로 낮게 나타났고 평균 chl-a 농도 또한 2016년 1월이 낮았다. 폴리니아 중앙해역에서 식물플랑크톤 군집은 2014년 1월에 *P. antarctica*가 우점하여 나타났으나 2016년 1월에는 규조류와 *Dictyocha speculum* (Chrysophytes), *P. antarctica*가 우점종으로 나타났다. 이는 급격한 환경변화를 보이는 아문젠 폴리니아에서 수중 광 환경이 식물플랑크톤 군집구조와 생물량에 중요한 영향요인 중 하나일 수 있음을 시사한다.

1. 서론

식물플랑크톤은 해양생태계에서 일차생산자로서 중요한 역할을 한다. 식물플랑크톤의 생물량과 생산력은 해양의 물리, 화학적 환경 요인과 상위 포식자인 동물플랑크톤의 섭식에 의하여 영향 받는다. 남극은 높은 일차생산으로 전 지구 탄소흡수율의 20%를 차지하는 해역이다 (Takahashi et al., 2009). 남극의 하계에는 일조량이 증가하고 기온이 증가하여 해빙이 녹기 시작하는데 활강바람이 해빙을 바깥해역으로 밀어내어 대륙붕 해역에 폴리니아 (polynya)가 형성되며 식물플랑크톤은 폴리니아에서 대증식을 일으킨다 (Tremblay and Smith, 2007). 서남극 폴리니아에서는 하계 식물플랑크톤 대증식에 착편모류 *Phaeocystis antarctica*와 규조류가 크게 우점하여 나타나며, 시공간적으로 다른 분포특성을 보인다 (Smith et al., 2010). 이 두 우점 그룹은 탄소 흡수율, 영양염 이용률이 다르게 나타날 뿐 아니라 크릴에 의한 먹이 선호도 또한 차이를 보여 남극 연안해역에서 생지화학 순환과 해양 먹이망에 직접적인 영향을 미친다. 식물플랑크톤 그룹의 분포에 대한 많은 연구가 이루어져 있으며 이들은 표층혼합층 (Mixed Layer Depth, MLD), 수온, 광량, 해빙으로부터의 seeding, 용승, 포식압 등 다양한 환경요인에 의해 영향 받는 것으로 알려져 있다. 아문젠 폴리니아는 37개의 남극 연안 폴리니아 중 단위해역당 일차생산이 가장 높은 해역이다 (Arrigo and van Dijken, 2003). 남극순환심층수 (Circumpolar Deep Waters)의 유입으로 빙봉의 기저부 손실이 증가하며 해수순환, 용승, 철 공급 등 환경 변화가 가속화될 것으로 예상되지만 이러한 환경변화에 의한 식물플랑크톤 군집구조 및 생물량 변동에 대한 연구는 매우 부족하다. 본 연구에서는 급격한 환경변화를 보이는 아문젠 폴리니아에서 식물플랑크톤 군집 변동과 이에 영향을 미치는 환경요인을 파악

하고자 하였다.

2. 재료 및 방법

아문젠해 현장조사는 2013년 12월 31일 - 2014년 1월 15일의 기간 동안 18개 정점에서, 2016년 1월 15일 - 2월 16일의 기간 동안 51개 정점에서 수행되었다 (Fig. 3.4.1). 식물플랑크톤 분석을 위한 해수는 CTD 채수시스템을 이용하여 4-6개 수심에서 채집하였다. 크기별 chl-a 농도를 측정하기 위하여 해수 500 mL를 20 μm , 3 μm , GF/F 필터로 연속하여 여과하였고, 총 chl-a 농도는 해수를 GF/F에 여과하였다. 추출을 위해 90% 아세톤에 여과지를 넣어 냉암소에서 보관하였고, 24시간 후 형광광도계 (Trilogy, Turner Designs)를 이용하여 흡광도를 측정하여 계산하였다. 색소분석을 위하여 채집된 해수 1L를 직경 47 mm GF/F에 여과하여 분석 전까지 -80°C 에 보관하였다. 여과지는 100% 아세톤 3 mL에 넣고 30초 동안 초음파처리 되었으며 냉암소에서 15시간 추출되었다. 고성능 액체 크로마토그래피 (HPLC, Agilent series 1200)는 21개의 표준색소를 이용하여 보정하였고 색소분석은 Zapata et al. (2000)의 방법을 따랐다. 각 피크의 머무름 시간은 표준색소의 머무름 시간과 비교하여 구분하였고 response factor는 표준색소의 주입량과 피크 면적의 비율로 계산하였으며 표준색소의 농도는 분광광도계로 측정된 최대흡광도 파장과 알려져 있는 각 표준색소의 흡광계수를 이용하여 보정되었다. 전체 식물플랑크톤 군집연구를 위하여 CHEMTAX (CHEMical TAXonomy) 프로그램 1.95가 사용되었다. 연구해역에서의 기존 연구와 본 연구의 현미경 관찰 결과에 기초하여 7개의 식물플랑크톤 그룹이 CHEMTAX 분석에 선택되었고 초기색소비율은 Wright et al. (2010)를 따랐다. 식물플랑크톤 중 현존량 분석을 위하여 슬라이드를 제작하였다. 채집된 해수 200 mL를 글루타알데히드 (최종농도 1%)로 고정한 후 30 - 100 mL를 0.8 μm 필터에 여과하여 슬라이드 글라스 위에 필터지를 올리고 이물질 오일을 문힌 커버글라스로 덮어 냉동보관 하였다. 식물플랑크톤 정량분석을 위하여 blue excitation filter가 장착된 형광현미경 (Olympus, BX51) 하에서 400 - 1600배의 배율로 계수하였으며 탄소생물량 계산을 위해 각 개체의 크기를 측정하였다. 규조류 및 편모조류의 각 개체는 적절한 도형에 적용시켜 세포의 부피를 계산하였고, 계산된 부피로부터 Menden-Deuer and Lessard (2000)의 방정식을 이용하여 규조류와 편모조류의 탄소생물량을 계산하였다. *P. antarctica*는 단독 유영세포에 대한 전환상수 3.33 pgC/cell을 이용하였다 (Mathot et al., 2000).

3. 결과 및 고찰

아문젠 폴리니아에서 식물플랑크톤 군집 변동을 파악하기 위하여 정점조사가 수행되었다. 2014년 1월에는 Dotson trough를 따라 Dotson 빙봉 앞 까지의 관측선에서 현미경 분석 결과를, 2016년 1월에는 Dotson trough 관측선과 동측에 평행하게 위치한 관측

선을 추가하여 색소분석 결과를 비교하였다. 식물플랑크톤 군집 분포는 2014년 1월과 2016년 1월에 다르게 나타났다 (Fig. 3.4.3). 2014년 1월에 Dotson trough의 정점에서는 대륙붕단 인근에 나타난 marginal sea ice zone에서 규조류가, 폴리니아 중앙해역에서 *P. antarctica*가 식물플랑크톤 그룹에서 가장 우점하는 것으로 나타났다. 그러나 2016년 1월에 Dotson trough 정점에서는 규조류와 *Dictyocha speculum*이 우점하여 나타났으며 *P. antarctica*는 Dotson trough의 동쪽 측선 정점들에서 최우점종으로 출현하였다. 아문젠 폴리니아의 식물플랑크톤 군집변동에 관한 이전 연구에서 MLD(Mixed Layer Depth), 해빙으로부터의 seeding, Fe 등의 환경 요인이 이들의 분포에 영향을 주는 것으로 언급되어 있으며 2014년 1월의 본 연구결과는 이와 유사한 결과를 보였다 (Lee et al., 2016). 그러나 2016년 1월에 조사해역의 식물플랑크톤 군집구조는 다소 다른 경향을 나타냈다. 이전에 조사되어진 많은 연구에서 MLD가 깊은 해역에 *P. antarctica*가 우점하는 것으로 보고하고 있지만 본 조사결과에서는 오히려 반대의 경향을 보였다. MLD가 가장 얇은 것으로 나타난 동측선 정점에서 *P. antarctica*가 우점하여 나타났다 (Fig. 3.4.2). *P. antarctica*가 주로 우점하여 나타났던 폴리니아 중앙해역에서는 규조류가 최우점 그룹으로 출현하였고 동시에 *D. speculum*이 두 번째 우점종으로 나타났다. 남극 연안해역에서 식물플랑크톤 군집연구는 주로 색소분석을 통한 CHEMTAX가 활용되며 기존 연구에서 *D. speculum*이 속한 Chrysophytes 그룹은 배제되어왔다. 그러나 현미경 기반의 최근 논문에서 로스해와 아문젠해에 *D. speculum*종의 분포에 관한 언급이 있었고 (Fragoso and Smith, 2012; Lee et al., 2016), 본 연구에서 이러한 정보를 추가하여 계산한 결과 2016년 1월 *D. speculum*이 규조류와 함께 식물플랑크톤 엽록소 생물량의 50% 이상을 차지하는 우점종으로 나타났다. 2016년 1월에 상대적으로 낮은 광량, 높은 표층수온과 염분 등이 식물플랑크톤 군집분포에 중요 조절요인 중 하나일 수 있는 것으로 나타났으며 이러한 결과는 급변하는 아문젠 해양환경 하에서 이들 그룹의 분포변동을 이해하고 예측하는데 중요한 정보가 될 것으로 판단된다.

Environmental factor controlling phytoplankton community structure in the Amundsen Sea Polynya, Antarctica.

Youngju Lee and Eun Jin Yang

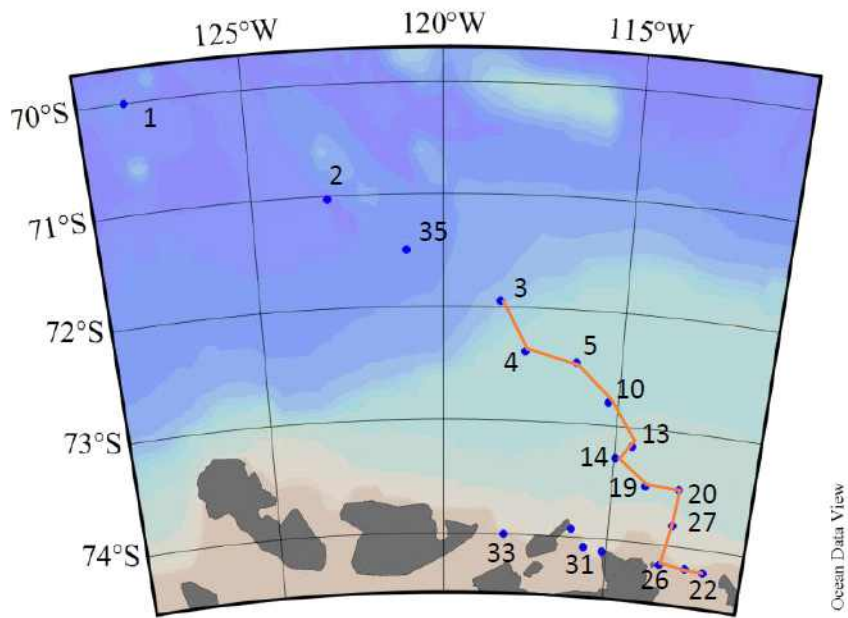
Department of Polar Ocean Environment, KOPRI

Abstract: The Amundsen Sea, Antarctica, is one of the vulnerable area, where increased basal melting and upwelling have occurred. Phytoplankton community dominated by *Phaeocystis antarctica* (Prymnesiophytes) and/or diatoms during the bloom periods, and they play different roles in the biogeochemical cycle of the Amundsen Sea polynya (ASP). To understand the distribution of phytoplankton community and the influential environmental factors in the ASP, the field surveys were conducted in January 2014 and 2016. The mean open water area of the ASP was largely extended during both austral summer of 2014 and 2016. However, the average insolation was dramatically lower in January 2016 with a lower phytoplankton biomass (chl-a) than January 2014. Phytoplankton community dominated by *P. antarctica* in January 2014, while diatoms, *Dictyocha speculum* (Chrysophytes), and *P. antarctica* were co-dominated in the ASP in January 2016. These results indicated that the light availability could be one of the important influential factors for phytoplankton biomass and community structure in the habitat conditions of rapidly thinning ice shelves and sea ice loss in the ASP.

참고문헌

- Arrigo, K.R., van Dijken, G.L., 2003. Phytoplankton dynamics within 37 Antarctic coastal polynya systems. *J. Geophys. Res.-Oceans* (1978 - 2012) 108 (C8).
- Fragoso, G.M., Smith Jr, W.O., 2012. Influence of hydrography on phytoplankton distribution in the Amundsen and Ross Seas, Antarctica. *J. Mar. Syst.* 89, 19-29.
- Lee, Y., Yang, E.J., Park, J., Jung, J., Kim, T.W., Lee, S., 2016. Physical-biological coupling in the Amundsen Sea, Antarctica: Influence of physical factors on phytoplankton community structure and biomass. *Deep-Sea Res. PT I* 117, 51-60.
- Mathot, S., Smith, W.O., Carlson, C.A., Garrison, D.L., Gowing, M.M., Vickers, C.L., 2000. Carbon partitioning within *Phaeocystis antarctica* (Prymnesiophyceae) colonies in the Ross Sea, Antarctica. *J. Phycol.* 36, 1049-1056.
- Menden-Deuer, S., Lessard, E.J., 2000. Carbon to volume relationships for dinoflagellates, diatoms, and other protist plankton. *Limnol. Oceanogr.* 45 (3), 569-579.
- Smith, W.O., Dinniman, M.S., Tozzi, S., DiTullio, G.R., Mangoni, O., Modigh, M., Saggiomo, V., 2010. Phytoplankton photosynthetic pigments in the Ross Sea: patterns and relationships among functional groups. *J. Mar. Syst.* 82 (3), 177-185.
- Takahashi, T., Sutherland, S.C., Wanninkhof, R., Sweeney, C., Feely, R.A., Chipman, D.W., Hales, B., Friederich, G., Chavez, F., Sabine, C., 2009. Climatological mean and decadal change in surface ocean pCO₂, and net sea - air CO₂ flux over the global oceans. *Deep Sea Res. PT II* 56 (8), 554-577.
- Tremblay, J.-É., Smith, W., 2007. Primary production and nutrient dynamics in polynyas. *Elsevier Oceanography Series* 74, 239-269.
- Wright, S.W., van den Enden, R.L., Pearce, I., Davidson, A.T., Scott, F.J., Westwood, K.J., 2010. Phytoplankton community structure and stocks in the Southern Ocean (30-80°E) determined by CHEMTAX analysis of HPLC pigment signatures. *Deep-Sea Res. PT II* 57 (9-10), 758-778.
- Zapata, M., Rodríguez, F., Garrido, J.L., 2000. Separation of chlorophylls and carotenoids from marine phytoplankton: A new HPLC method using a reversed phase C8 column and pyridine-containing mobile phases. *Mar. Ecol. Prog. Ser.* 195, 29-45.

(a)



(b)

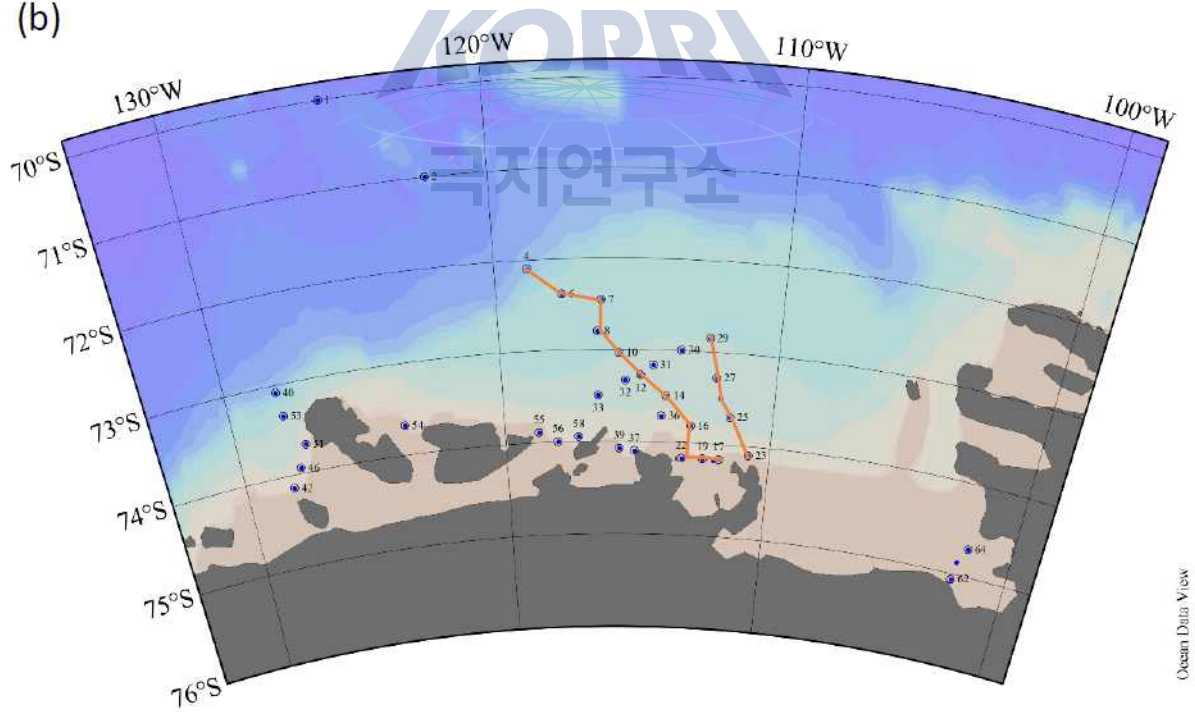


Fig. 3.4.1. Sampling stations and the transects in January (a) 2014 and (b) 2016 in the Amundsen Sea, Antarctica.

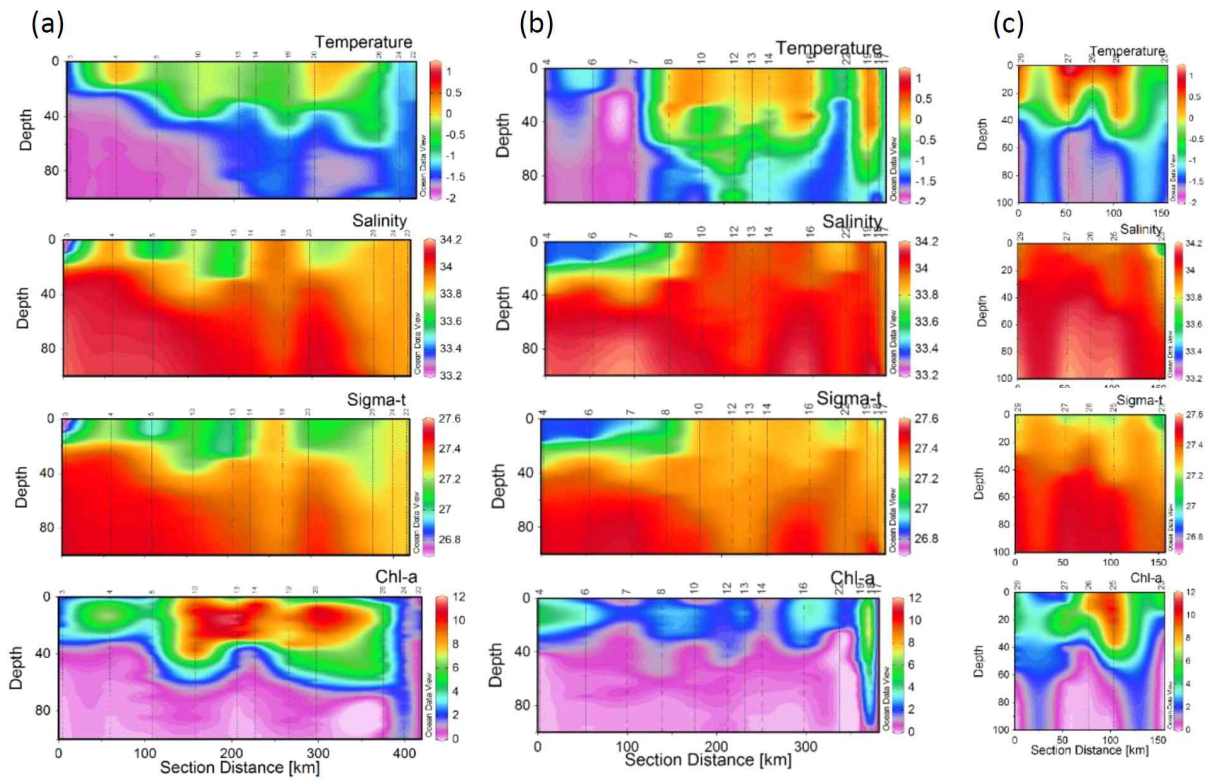


Fig. 3.4.2. Vertical distribution of water temperature ($^{\circ}\text{C}$), salinity, water density (sigma-t), and chl-a concentration ($\mu\text{g/L}$) along the transects in the Amundsen Sea in January (a) 2014 and (b and c) 2016.

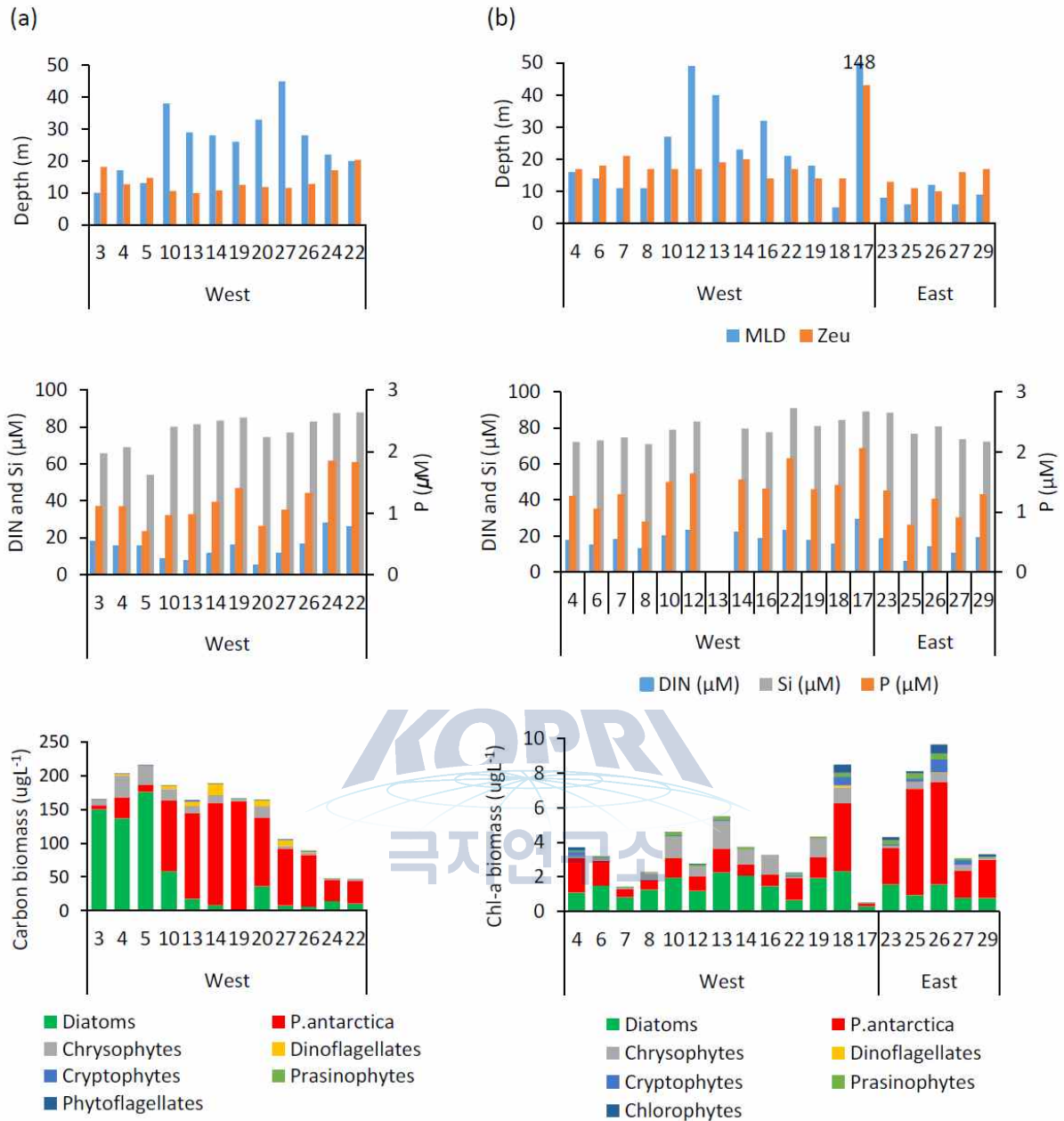


Fig. 3.4.3. Cross-shelf distributions of environmental variables (mixed layer depth, euphotic depth, nutrient concentrations) and phytoplankton group biomass in January (a) 2014 and (b) 2016 along the transects in the Amundsen Sea.

제 5 절 생물음향 (나형술)

요약: 아문젠해의 대표적 빙봉인 Dotson과 Getz 빙봉은 과거 20년 동안 급격한 변화를 겪어왔다. 생물음향 분야에서는 지난 아문젠 탐사 동안 높은 생물량의 아이스 크릴이 아문젠해 폴리나 중앙에 분포하는 것을 관측하였다. 특히 인접한 Dotson 빙봉과 Getz 빙봉 주위의 해양환경 특성이 매우 달랐으며 아이스 크릴의 밀도 또한 Dotson보다 Getz에서 높게 관측되었다. 본 보고서에서는 아문젠해 대표 빙봉인 Dotson 빙봉 주변에 서식하는 중대형 동물플랑크톤의 종 구성과 음향산란층 (sound scattering layer)의 수직·수평 분포 변화를 확인하였다. 음향산란층은 어류, 중형 동물플랑크톤, 대형 동물플랑크톤으로 구분할 수 있었으며 이들 세 그룹이 분포하는 주요 서식 수심과 지리적인 위치는 서로 다르게 나타나는 것을 확인하였다. 동물플랑크톤 분포의 시공간적인 변화를 관측함으로써 급격한 해양환경 변화를 겪고 있는 아문젠해에서의 동물플랑크톤 분포의 변화 원인과 해양생태계에서의 역할을 이해하는데 도움이 될 것으로 판단된다.

1. 서론

동물플랑크톤은 남극 해양생태계의 하위영양단계와 상위영양단계를 연결하는 중요한 연결고리로서 시공간적인 환경변화에 따른 생물량 차이가 크기 때문에 동물플랑크톤의 생태학적 특성과 해양생태계에 영향을 미칠 수 있는 주요 환경 요인을 이해하는 것은 필수적이다. 남극 아문젠해는 하계 기간 남극해에서 일차생산성이 가장 높은 지역 (Arrigo and van Dijken, 2003)으로 생물학적으로 중요한 연구지역으로 알려져 있다. 하지만 최근 10년 동안 빙봉(Dotson 빙봉과 Getz 빙봉)의 두께가 매년 약 20 - 40 cm 씩 급감하여 (Shepherd et al., 2004) 발생하는 빙봉의 붕괴 및 후퇴에 의해 급격한 해양환경 변화를 겪고 있기 때문에 이에 따른 해양생태계 변화가 예상된다. 따라서 2016년 ANA06B 항해 동안 아문젠해의 대표 빙봉중 하나인 Dotson 빙봉 주변의 동물플랑크톤 분포 특성을 파악하기 위해서 중대형 동물플랑크톤 군집 구성과 음향산란층의 공간적인 변화를 관측하였다.

2. 재료 및 방법

2016년 1월 21일과 1월 22일, ANA06B 항해기간 중 Dotson 빙봉 주변에서 음향조사를 실시하였다 (Fig. 3.5.1). 네트 정점 및 선박 이동 간에 연속적으로 음향조사를 실시하였고, 총 음향조사 정선거리는 약 87 마일이었다. 음향조사를 위한 시스템은 선저 설치형 과학어군탐지기 (scientific echo sounder) EK60를 사용하였으며 3개의 주파수 (38, 120, 200 kHz)를 이용하여 표층에서 수심 500 m 까지의 음향 데이터를 수신하였다.

(SIMRAD, 2003). 선속은 음향자료의 안정성을 고려하여 7 - 10 노트로 일정하게 유지하였으며 EK60과 항해용 음향 장비와의 주파수 간섭을 피하기 위하여 EK60 이외의 항해 및 연구용 음향 장비는 사용을 중지하였다. 음향 센서 보정은 음향조사 전 또는 후에 실시해야 하나 항해 일정상 센서 보정을 실시하지 못했기 때문에 ANA04B 기간에 측정된 보정값을 사용하였다. 음향 데이터 분석은 Myriax Echoview software (Ver. 7.0)를 이용하여 크릴 분석에 유용한 주파수인 38과 120 kHz의 에코그램을 함께 사용하였다. 분석 수심은 동물플랑크톤이 주로 분포하는 표층으로부터 수심 200 m 까지를 고려하였으며 생물 신호 이외의 해수면 소음, 공기중으로부터의 신호, 기포에 의한 노이즈들은 제거되었다. 원시 데이터는 수평거리 0.1 nmile, 수심 1 m 격자에 대한 평균 체적산란강도 (volume backscattering strength)로 추출하였으며 -90 dB 이하의 평균 체적산란강도는 노이즈로 고려하여 NaN 값 처리하였다. 음향산란층에 분포하는 동물플랑크톤 중 확인은 4개 정점에서 사각네트 (1 m × 1 m, 330 μm)를 이용하여 사선 채집 (표층 - 400 m) 으로 획득하였다. 사선 채집은 선속 2 - 3 노트로 약 1 시간 동안 수행되었고 채집된 샘플 중 100 개체를 랜덤 선택하여 아이스 크릴의 길이 분포 (length frequency)를 측정하였다. 남은 샘플은 중성 포르말린과 에탄올로 고정하여 항해 후 종 분석을 실시하였다.

3. 결과 및 고찰

Dotson 빙봉 주변 해양생물 (어류 및 중대형 동물플랑크톤) 군집의 수직분포를 파악하기 위하여 주파수가 38, 120 kHz인 에코그램으로부터 음향산란층을 확인하였다 (Fig. 3.5.2). 두 주파수 모두 수심 150 m 이내와 200 m 이후에서 상대적으로 강한 체적산란강도가 확인되었다. 음향산란층을 구성하는 주요 해양생물은 T1 - T4에서 채집한 네트 결과로 확인하였다 (Fig. 3.5.3). 그 결과 동물플랑크톤의 군집은 7개의 군집으로 구성되어 있었으며 요각류와 크릴류가 전체 개체수의 약 90 %로 우점하였다. 중형 동물플랑크톤 (200 - 2000 μm)은 요각류의 개체수가 77 %로 가장 우점하였으며 대형 동물플랑크톤 (>2000 μm) 에서는 아이스 크릴이 우점하는 것으로 확인되었다. 아이스 크릴의 길이 분포는 최소 7 mm 에서 최대 29 mm 의 범위에서 평균길이 16.4 mm (표준편차: 4.34) 로 확인되었다. 측정된 길이 분포는 추후 모델식을 활용하여 길이별 음향산란강도를 파악하고 아이스 크릴의 밀도 추정에 활용될 예정이다.

음향산란층에 분포하는 해양생물의 수직 분포를 구분하기 위해 다중 주파수 차이 방법을 이용하였다 (Fig. 3.5.4). 해양생물의 종 구분은 주파수 차이가 어류인 경우 $-20 \leq S_{v120-38 \text{ kHz}} < 2 \text{ dB}$, 대형 동물플랑크톤인 경우 $2 \leq S_{v120-38 \text{ kHz}} \leq 12 \text{ dB}$, 그리고 중형 동물플랑크톤인 경우 $12 < S_{v120-38 \text{ kHz}} \leq 20 \text{ dB}$ 로 구분하였다. 어류에 해당되는 38 kHz 체적산란강도는 주로 -85 - -75 dB로 전 수층에서 고르게 분포하였다. 반면 대형 동물플랑크톤의 경우 수심 40 - 100 m에서 120 kHz 체적산란강도가 -80 - -70 dB로 상

대적으로 높게 나타났으며 100 m 보다 깊은 수심에서는 -80 dB 이하의 낮은 체적산란강도가 관측되었다. 중형 동물플랑크톤에 해당되는 체적산란강도는 수심 50 - 100 m 에 집중되어 대형 동물플랑크톤의 체적산란강도 보다 약 10 dB 높게 관측되었다. 즉, 어류는 표층 - 200 m 수층에 분포하지만 수심에 따른 생물량 (음향산란강도에 따른 상대적인 생물량)의 차이는 없었다. 대형 동물플랑크톤 경우 수층 전체에 분포하고 있었지만 P1 - P2, P3 - P6 구간과 P8 부근의 수심 100 m 이내에서 생물량이 가장 높고 100 m 이상의 깊은 수심에서는 생물량이 낮게 관측되었다. 반면 중형 동물플랑크톤 생물량은 100 m 이상의 깊은 수심에서는 거의 분포하지 않고 주로 50 - 100 m 수심에 집중되어 분포하였다. 어류, 대형 동물플랑크톤, 중형 동물플랑크톤이 분포하는 수심의 최빈수는 각각 30 - 40 m, 40 - 50 m, 그리고 70 - 80 m 로 조사 해역의 표층 - 200 m 수층에는 어류가 가장 낮은 수심에 주로 서식하며 중형 동물플랑크톤이 가장 깊은 수심에 서식하였다.

Fig. 3.5.5는 어류, 대형 동물플랑크톤, 그리고 중형 동물플랑크톤 생물량의 지역적 차이를 파악하기 위해서 표층 - 200 m 전체 수층의 체적산란강도 합 (Integrated Sv)을 0.1 nmile 간격으로 계산한 결과이다. 어류는 수심 500 m 이내의 지역에서 주로 분포하였으며 약 -80 dB 이상의 체적산란강도 값이 관측되었다. 반면 중대형 동물플랑크톤은 수심 500 m 이상의 깊은 지역에서 각각 -75 dB, -70 dB 로 높은 체적산란강도가 관측되었으며 수심 400 m 보다 낮은 지역에서는 대형 동물플랑크톤이 거의 존재하지 않은 것으로 확인되었다.

Dotson 빙봉 주변의 음향조사 결과 음향산란층은 어류, 중형 동물플랑크톤, 대형 동물플랑크톤으로 구분할 수 있었으며 이들 세 그룹이 분포하는 주요 서식 수심과 지리적인 위치가 다르게 확인되었다. 추후 주요 해양환경과 비교하여 각 해양생물 그룹의 서식 환경에 영향을 미치는 환경인자를 파악할 예정이다. 그리고 네트 채집으로 확인된 아이스크릴의 길이 분포와 아이스크릴의 음향산란 모델을 이용하여 조사 해역의 아이스크릴 밀도를 추정하고자 한다. 본 연구는 급격한 변화를 겪고 있는 아문젠해 빙봉 주변에 서식하는 동물플랑크톤 군집 구성과 분포 변화를 파악하는데 활용될 수 있으며 향후 해양생태계의 변화를 이해하는데 큰 도움이 될 것으로 판단된다.

Bioacoustics

Hyoungh Sul La

Division of Polar Ocean Sciences, KOPRI

Abstract: The DIS and GIS, two representative ice shelves in the Amundsen Sea coastal polynya, have dramatically thinned during the past two decades: the elevation have been changed 36 ± 2 cm year⁻¹ and -17 ± 6 cm year⁻¹ from 1992 to 2001 (Shepherd et al., 2004). During the last Amundsen Sea expeditions, we found that ice shelf is one of main habitats for ice krill and high density of ice krill was distributed within coastal polynya. Interestingly, two closed ice shelves showed different environmental condition, as well as ice krill density was highly different that the higher density was represented around GIS than that around DIS. In this report, we observed the meso- and macrozooplankton compositions and the vertical and horizontal distribution of sound scattering layer (SSL) around Dotson ice shelf. The SSL was classified with fish, mesozooplankton, and macrozooplankton using dB difference method. These three groups represent the different pattern in the vertical habitat and regional location within study region. This result could support to understand the variation of zooplankton compositions and the role of zooplankton in the Amundsen Sea marine ecosystem.

참고문헌

- Arrigo, K.R., van Dijken, G.L., 2003. Phytoplankton dynamics within 37 Antarctic coastal polynya systems. J. Geophys. Res. 108, 3271.
- Myriax. 2012. Help file 5.20 for Echoview [Internet]. Myriax, Hobart, TAS,AU, Accessed 6 Apr 2011, <http://support.echoview.com/WebHelp/Echoview.htm>.
- Shepherd, A., Wingham, D., Rignot, E., 2004. Warm ocean is eroding West Antarctic ice sheet. Geophysical Research Letters 31 (L23402).
- SIMRAD. 2003. Simrad EK60 Scientific Echo Sounder system Instruction manual. Horten, Norway.



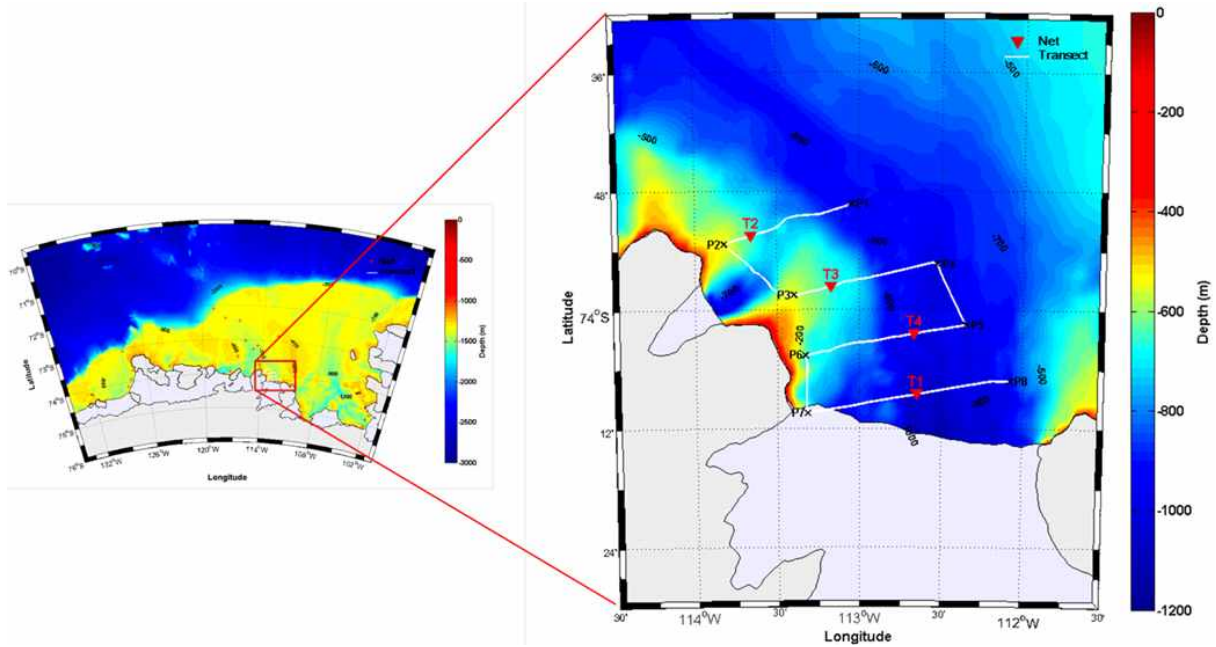


Fig. 3.5.1. Study area on the bathymetry of the Amundsen Sea showing acoustic transect (white line), CTD (red cross), and net (red triangle) stations during 2016.

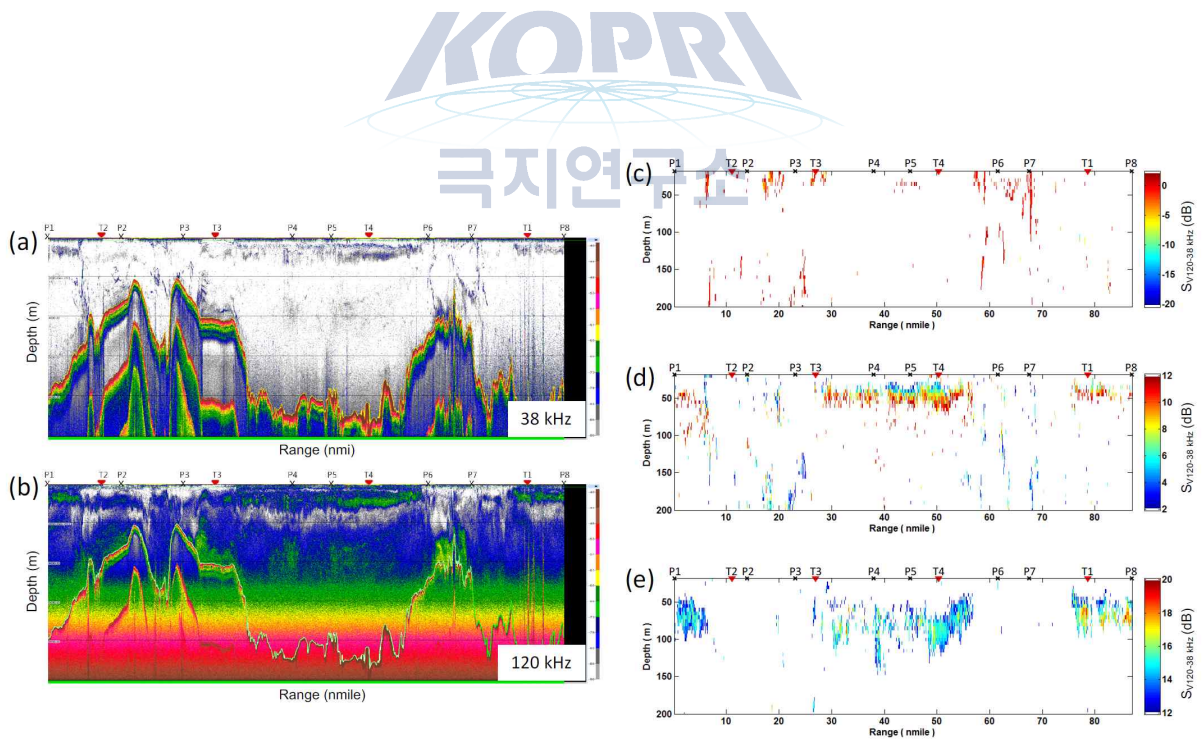


Fig. 3.5.2. Volume backscattering strengths (S_V) echograms at 38 (a) and 120 kHz (b) for the top 200 m of water column in the acoustic transect. The echograms using the dB difference window of $-20 < S_{V120-38 \text{ kHz}} < 2$ (c), $2 < S_{V120-38 \text{ kHz}} < 12$ (d), and $12 < S_{V120-38 \text{ kHz}} < 20$ (e).

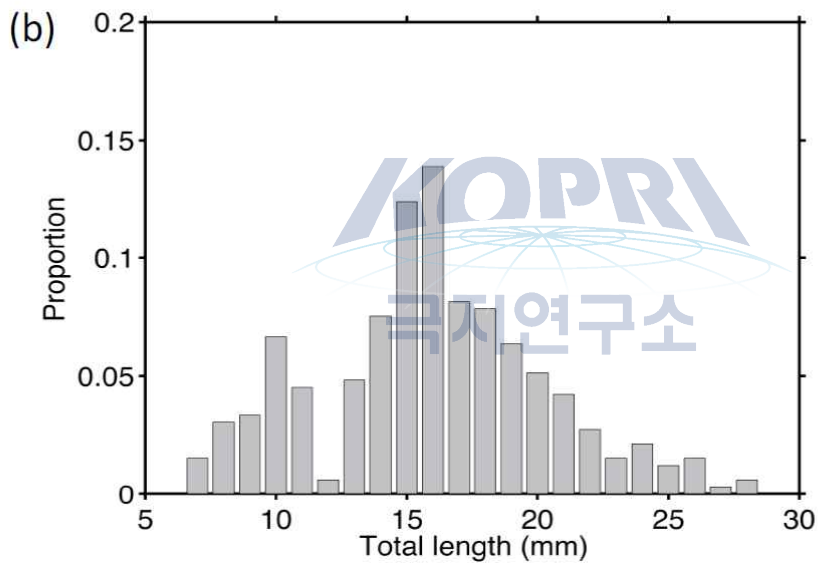
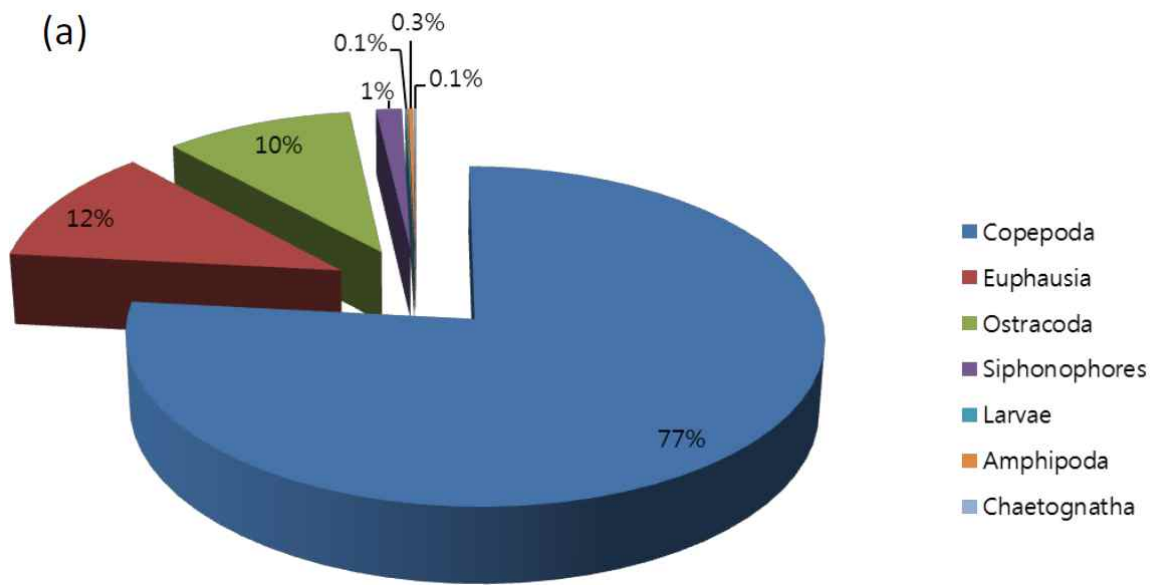


Fig. 3.5.3. Mesozooplankton composition at four net stations (a) and the length distribution of ice krill (b).

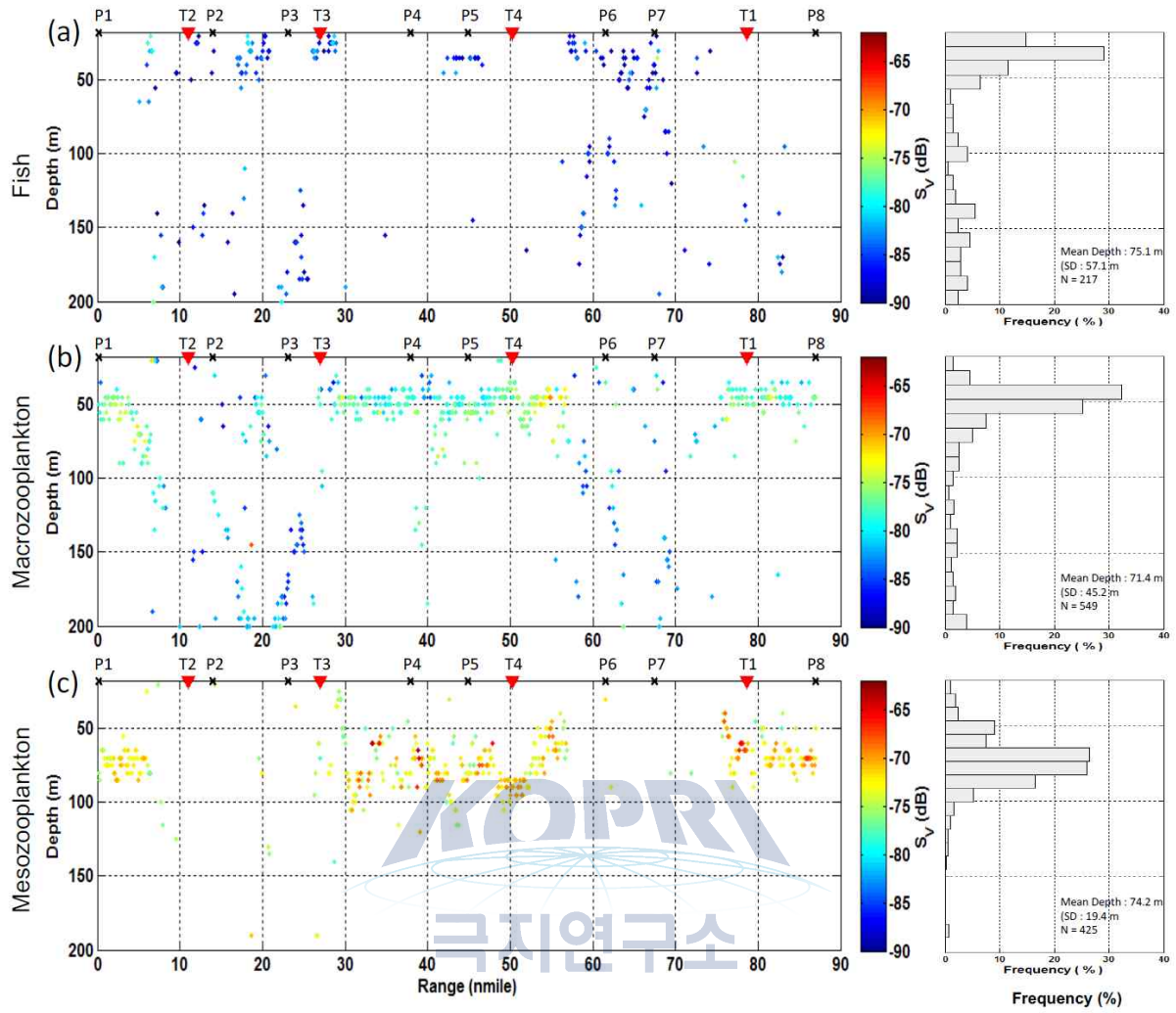


Fig. 3.5.4. Volume backscattering strengths (S_V) at 38 kHz for fish ($-20 < S_{V120-38 \text{ kHz}} < 2$) (a), S_V at 120 kHz for macrozooplankton ($2 < S_{V120-38 \text{ kHz}} < 12$) (b), and S_V at 120 kHz for mesozooplankton ($12 < S_{V120-38 \text{ kHz}} < 20$) (c).

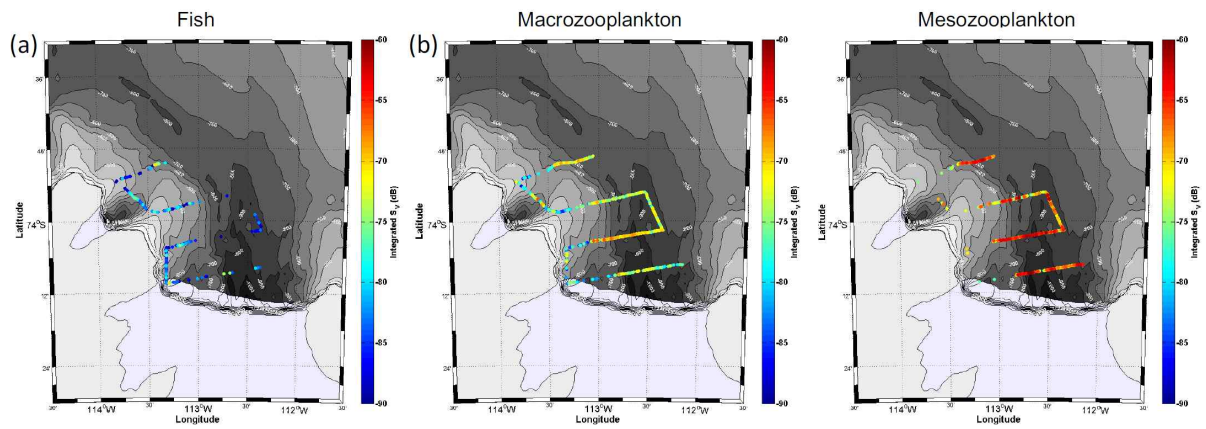


Fig. 3.5.5. Spatial distribution of the integrated volume backscattering strengths (Integrated S_V) on the bathymetry. Integrated S_V for fish ($-20 < S_{V120-38 \text{ kHz}} < 2$) (a), Integrated S_V at 120 kHz for macrozooplankton ($2 < S_{V120-38 \text{ kHz}} < 12$) (b), and Integrated S_V at 120 kHz for mesozooplankton ($12 < S_{V120-38 \text{ kHz}} < 20$) (c).



제 6 절 미생물 생태 특성 (황청연)

요약: 박테리아와 바이러스를 포함한 해양 미생물은 전 지구적으로 가장 많은 수를 차지하고 있으며, 해양의 생지화학적 순환에서 중요한 역할을 담당하고 있다. 해양 바이러스는 입자성 유기물인 숙주 생물을 용균시켜 용존성 유기물을 증가시키며, 숙주 생물에 포함되어 있는 영양염을 해수로 용출시켜 재순환시키는 역할을 담당한다. 박테리아는 입자성 유기물을 용존성 유기물로 변환시키는 기초 생태계의 중요한 구성원으로, 환경 요인의 변동에 따라 이들의 군집 구조는 민감하게 반응하는 것으로 알려져 있다. 본 연구에서는 남극 아문젠해의 미생물 생태 특성을 이해하기 위해 2014년 1월 탐사를 통해 아문젠해 폴리냐 및 인근 해역에 출현하는 바이러스의 분포와 용원성 박테리아의 출현 빈도, 식물플랑크톤과 연관성을 갖는 박테리아의 종 구성에 대한 실험을 수행하였다. 현재까지 분석된 결과에 따르면, 폴리냐의 표층 바이러스 개체수($8.1 \times 10^6 - 1.6 \times 10^7$ viruses/ml)는 박테리아에 비해 평균 14배 많은 수를 보였다. 용원성 박테리아는 5개 중 4개의 표층 시료에서 미검출 수준으로 낮은 것으로 나타나, 용원성 바이러스 생산의 기여는 크지 않을 것으로 추정된다. 16S rRNA 유전자 서열을 분석한 결과, 식물플랑크톤 농축 시료에서 분리된 박테리아는 주로 식물과 관련된 종 또는 남극해에서 출현했던 기존 종들과 유사하였다.

1. 서론

바이러스와 박테리아를 포함한 미생물은 열대에서 극지역에 이르는 모든 해양 환경에 널리 분포하고 있으며, 생지화학적 순환에 중요한 영향을 미치는 것으로 알려져 있다 (Azam, 1998; Fuhrman, 1999). 이러한 중요성에도 불구하고 남극에서의 해양 바이러스 연구는 매우 제한적인 상황이다. 남극 반도 주변에서의 연구 (Guixa-Boixereu et al., 2002)와 호주 부근의 남극해 polar frontal zone에서의 연구 (Evans et al., 2009)에 따르면, 박테리아 생산의 25% 정도가 바이러스에 의해 사망하는 것으로 보고하고 있다. 하지만 이러한 박테리아 사망이 바이러스의 용균성 증식 (lytic virus production)에 의한 것인지, 용원성 증식 (lysogeny virus production)에 의한 것인지 규명되지 않았다. 자외선이 용원성 바이러스의 증식을 유발시키는 환경 요인으로 작용할 수 있음을 고려하면 (Jiang & Paul, 1996), 용원성 바이러스에 감염된 박테리아의 비율을 평가하는 것은 남극해 하계의 바이러스 증식 기작을 이해하는데 있어 필요하다.

아문젠해에서의 최근 박테리아 연구는 폴리냐에 다양한 종류의 박테리아가 출현하고 있으며, 식물플랑크톤의 생물량 또는 물리·화학적 환경 요인에 크게 영향을 받는 박테리아 그룹들의 존재를 시사하였다 (Kim et al., 2014). 실제로 식물플랑크톤의 종류와 성장 상태에 따라 밀접하게 연관되는 박테리아의 구성이 변화되기도 하며 (Grossart et al.,

2005), 일부 조류 (algae)는 성장에 필수적인 영양소 (vitamin B₁₂)를 공생 박테리아로부터 얻는 것 (Croft et al., 2005)으로 알려져 있다. 본 연구에서는 폴리냐의 식물플랑크톤과 연관성이 높은 박테리아의 조성과 생리·생화학적 특성을 이해하기 위해, 평판 배양법을 이용하여 식물플랑크톤 농축 시료로부터 박테리아 균주를 분리하였다. 현재 아문젠해 폴리냐의 미생물 상호 작용을 이해하기 위해 미처리 시료들에 대한 분석을 진행하고 있다.

2. 재료 및 방법

해양 미생물 연구를 위한 시료는 2014년 1월 아라온호 탐사를 통해 얻었다. 총 15개의 정점의 수층에서 6-15개 수심을 선택하여 미생물 분포와 군집 연구를 위한 시료를 확보하였다 (Fig. 3.7.1). 바이러스 개체수는 SYBR Gold 염색 시약과 에피형광현미경을 이용하여 측정하였다 (Noble & Fuhrman, 1998). 용원성 박테리아의 빈도를 측정하기 위한 배양 실험은 Weinbauer et al. (2003)의 방법에 따라 현장에서 수행되었다. 식물플랑크톤 농축 시료는 plankton net를 이용하여 확보하였으며, 멸균한 해수와 mesh를 이용하여 해수의 free-living 박테리아를 희석시켜 감소시켰다. 식물플랑크톤 농축 시료에 멸균한 글리세롤 (최종 농도 10%)을 첨가한 후, -80도에 냉동 보관하였다. 다양한 평판 배지 (MA, R2A, TSA; Difco)에 식물플랑크톤 농축 시료를 도말한 후, 10°C와 25°C에서 각각 배양하여 박테리아 균주를 분리하였다. 계대 배양을 통해 순수 분리한 후 16S rRNA 유전자 서열을 분석하여 종을 동정하였다 (Hwang & Cho, 2008).

3. 결과 및 고찰

가. 바이러스 분포 및 용원성 박테리아

아문젠해의 외양으로부터 폴리냐, 빙봉에 이르는 해양 바이러스의 분포 특성에 대한 예비 분석을 위해 6개 정점의 표층 바이러스 개체수를 측정하였다 (Fig. 3.7.2). 폴리냐의 바이러스 개체수(정점 14, 19, 27)는 8.1×10^6 - 1.6×10^7 viruses/ml의 변화를 보였으며, 이는 박테리아에 비해 평균 9.3-22.0배 높은 수준이었다. 외양(정점 2)과 빙봉 부근(정점 24, 32)의 바이러스 개체수는 8.6×10^6 - 1.7×10^7 viruses/ml의 변화를 보였으며, 폴리냐의 바이러스 개체수와 유사한 수준이었다.

용원성 박테리아의 중요성을 평가하기 위한 배양 실험은 5개 시료에 대해 우선 분석을 수행하였다 (Fig. 3.7.3). 실험에 사용된 mitomycin C는 lysogeny induction(용원성에서 용균성으로 유도)을 유발시키는 시약으로 (Jiang & Paul, 1996), 이를 첨가하면 용원성 박테리아가 많을수록 바이러스의 수가 대조구 시료(control samples)에 비해 증가하게 된다. 3개의 폴리냐 정점 시료들(정점 14, 19, 27)에서 용원성 박테리아의 induction 현상이 관찰되었으나, 이들 중 정점 14에서만 대조구 시료에 비해 통계적으로 유의한 바이

리스 증가가 관찰되었다 (t -test, $p < 0.05$; Fig. 3.7.3). 감염된 한 개체의 박테리아에서 방출되는 바이러스 수(burst size)를 20-50개체로 가정할 경우, 정점 14에서 용원성 박테리아의 비율은 전체 박테리아의 10-25%로 추정된다. 외양(정점 2)과 빙봉(정점 24)의 표층 시료에서 용원성 박테리아의 비율은 미검출 수준이었다.

나. 박테리아 배양

식물플랑크톤 농축액으로부터 총 42개의 박테리아 균주를 분리하였고, 16S rRNA 유전자 서열 분석을 통해 종 동정을 수행하였다 (Fig. 3.7.4). *Gammaproteobacteria*에 속하는 균주들이 전체 균주의 69%로 가장 빈번하게 분리되었다. 기존에 남극 해설(marine snow)에서 분리된 것으로 알려진 *Psychrobacter nivimaris*와 유사한 균주들(98.5-100%의 16S rRNA 서열 유사도)이 단일 종으로는 가장 많이 분리되었다 (8개; Fig. 3.7.4). 이 외에도 남극 연안 또는 해빙에서 분리된 기존 박테리아 종(*Shewanella vesiculosa*, *Pseudoalteromonas prydzensis*, *Alteromonas stellipolaris*, *Flavobacterium frigidarium*) 또는 식물과 연관성을 갖는 박테리아 종 (*Pseudoalteromonas elyakovii*, *Methylobacterium oryzae*, *Rhodococcus cerastii*, *Rhodococcus cercidiphylii*)과 유사한 균주들이 본 연구에서 분리·배양되었다. 이들은 저온 환경에서 높은 활성을 갖는 식물플랑크톤과의 상호 연구의 모델 시스템으로 추후 활용할 예정이다.

극지연구소

Microbial ecology in the Amundsen Sea

Chung Yeon Hwang

Division of Polar Life Sciences, KOPRI

Abstract: Marine microbes including bacteria and viruses are the most abundant organisms on the planet and play vital roles in the biogeochemical cycle in marine environments. Marine viruses influence the production of dissolved organ matters (DOM) and increase regeneration of nutrients by destruction of their hosts formed in particulate. Bacteria are important members of microbial foodweb which transform DOM into bacterial biomass in particulate form. Bacterial community structure is susceptible to the change of environmental conditions. To understand ecological characteristics of marine microbes in the Amundsen polynya and its vicinity, we investigated (1) spatial distribution of viruses, (2) the occurrence of lysogenized bacteria, and (3) isolation and identification of bacteria associated with phytoplankton during the ARAON cruise in January 2014. In interim results, viruses (8.1×10^6 – 1.6×10^7 viruses/ml) exceeded bacteria by ca. 14-fold in numbers. The occurrence of lysogenized bacteria was not detected in 4 out of 5 samples assessed so far, indicative of a minor contribution of lysogeny virus production to viral assemblages in the study area. Based on the 16S rRNA gene sequences, bacterial strains isolated from phytoplankton concentrates turned out to be closely related to those from plant-associated samples or those from Antarctic seas. In-depth analysis of microbial data is undergoing for better understanding the microbial interactions in the Amundsen polynya.

참고문헌

- Azam, F., 1998, Microbial control of oceanic carbon flux: the plot thickens. *Science*, 280:694-696.
- Croft, M.T., Lawrence, A.D., Raux-Deery, E., Warren, M.J. and Smith, A.G., 2005, Algae acquire vitamin B₁₂ through a symbiotic relationship with bacteria. *Nature* 438:90-93.
- Evans, C., Pearce, I. and Brussaard, C.P.D., 2009, Viral-mediated lysis of microbes and carbon release in the sub-Antarctic and Polar Frontal zones of the Australian Southern Ocean. *Environmental Microbiology*, 11:2924-2934.
- Fuhrman, J.A., 1999, Marine viruses and their biogeochemical and ecological effects. *Nature*, 399:541-548.
- Grossart, H.-P., Levold, F., Allgaier, M., Simon, M. and Brinkhoff, T., 2005, Marine diatom species harbour distinct bacterial communities. *Environmental Microbiology*, 7:860-873.
- Guixa-Boixereu, N., Vaqué, D., Gasol, J.M., Sánchez-Cámara, J. and Pedrós-Alió, C., 2002, Viral distribution and activity in Antarctic waters. *Deep Sea Res Part II*, 49:827-845.
- Hwang, C.Y. and Cho, B.C., 2008, *Cohaesibacter gelatinilyticus* gen. nov., sp. nov., a marine bacterium that forms a distinct branch in the order *Rhizobiales*, and proposal of *Cohaesibacteraceae* fam. nov. *International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology*, 58:267-277.
- Jiang, S.C. and Paul, J.H., 1996, Occurrence of lysogenic bacteria in marine microbial communities as determined by prophage induction. *Marine Ecology Progress Series*, 142:27-38.
- Kim, J.-G., Park, S.-J., Quan, Z.-X., Jung, M.-Y., Cha, I.-T., Kim, S.-J., Kim, K.-H., Yang, E.-J., Kim, Y.-N., Lee, S.-H. and Rhee, S.-K., 2014, Unveiling abundance and distribution of planktonic *Bacteria* and *Archaea* in a polynya in Amundsen Sea, Antarctica. *Environmental Microbiology*, 16:1566-1578.
- Noble, R.T. and Fuhrman, J.A., 1998, Use of SYBR Green I for rapid epifluorescence counts of marine viruses and bacteria. *Aquatic Microbial Ecology*, 14:113-118.
- Weinbauer, M.G., Brettar, I. and Höfle, M.G., 2003, Lysogeny and virus-induced mortality of bacterioplankton in surface, deep, and anoxic marine waters. *Limnology and Oceanography*, 48:1457-1465.

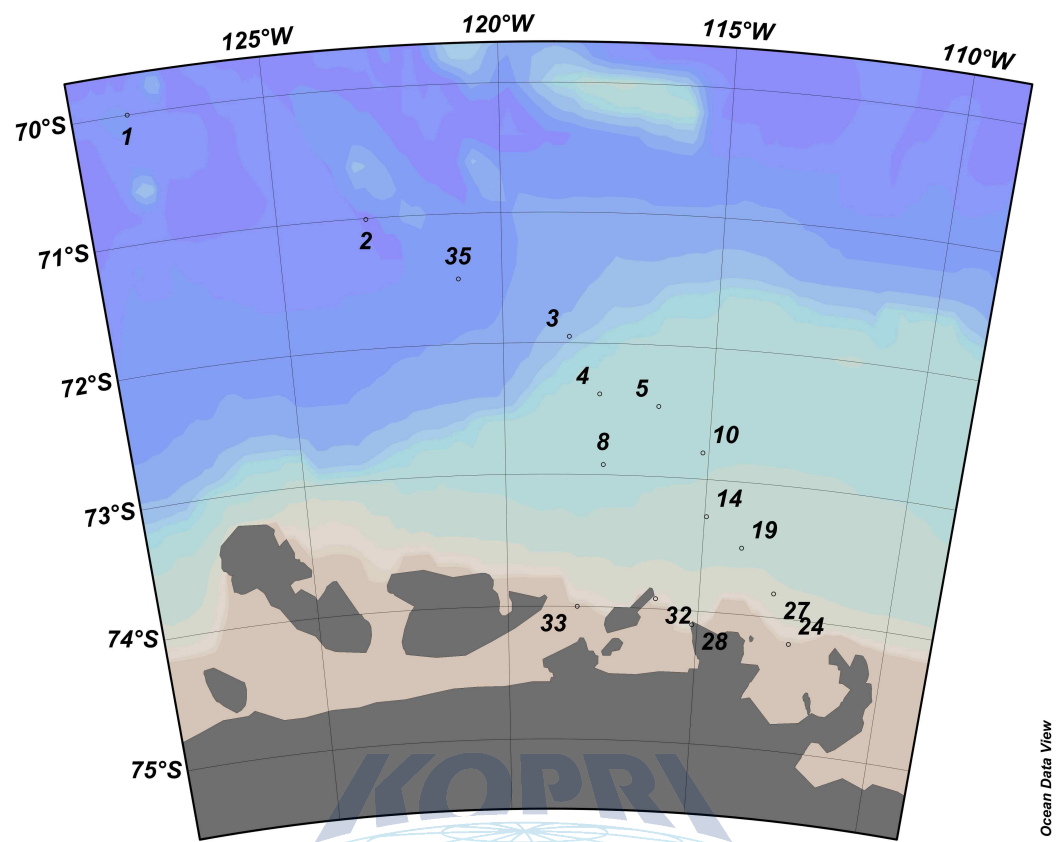


Fig. 3.7.1. Study area and sampling stations for microbiological study.

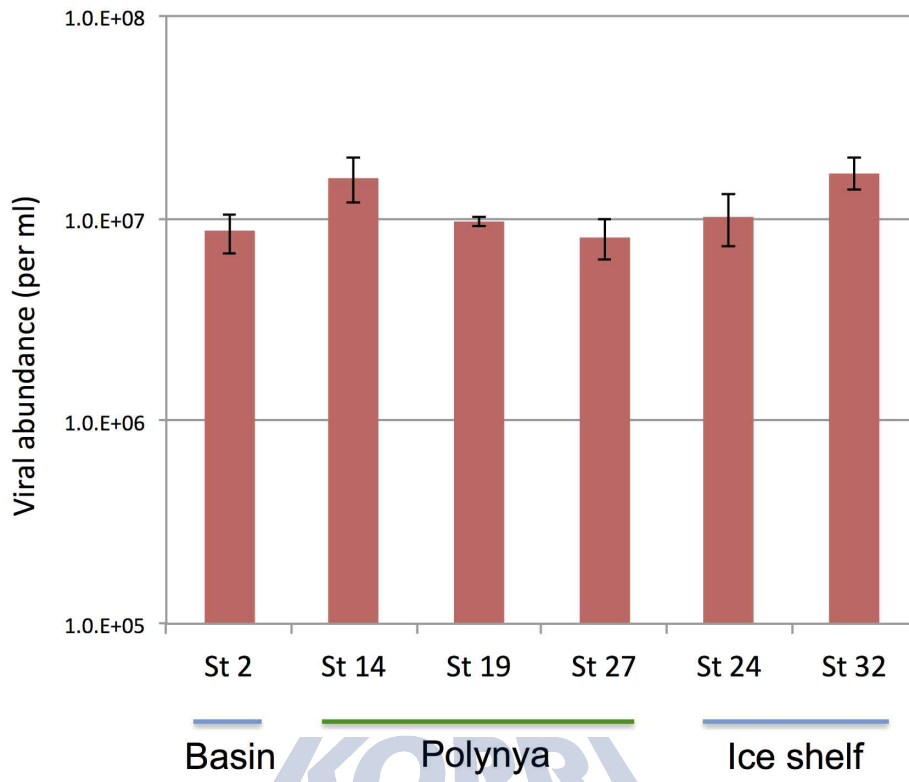


Fig. 3.7.2. Viral abundances in surface waters in the Amundsen Sea, 2014.

극지연구소

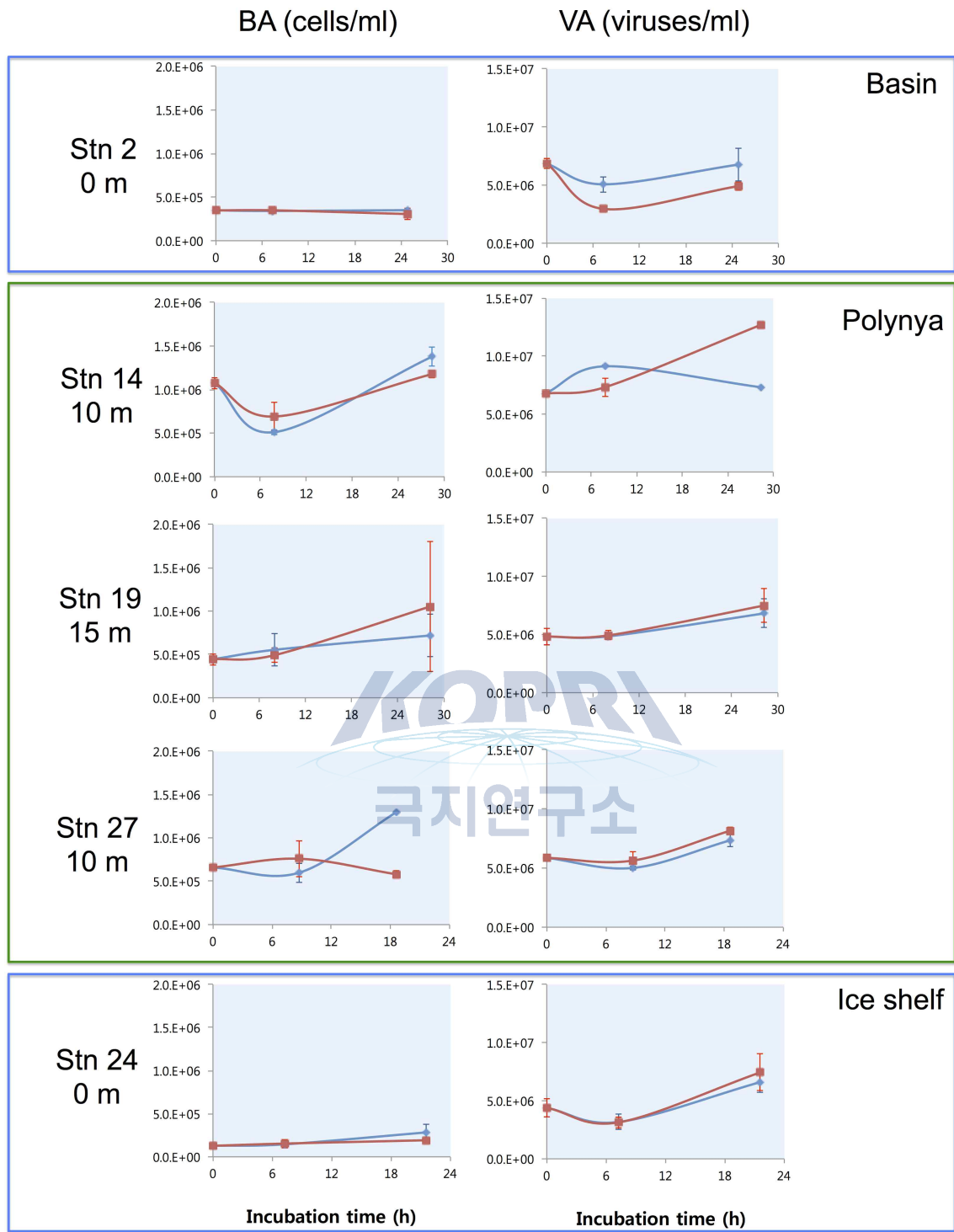


Fig. 3.7.3. Changes of bacterial (BA) and viral abundances (VA) over the incubation time in lysogeny induction experiments. Blue and red symbols represent microbial abundances in untreated (control) and mitomycin C-amended samples, respectively.

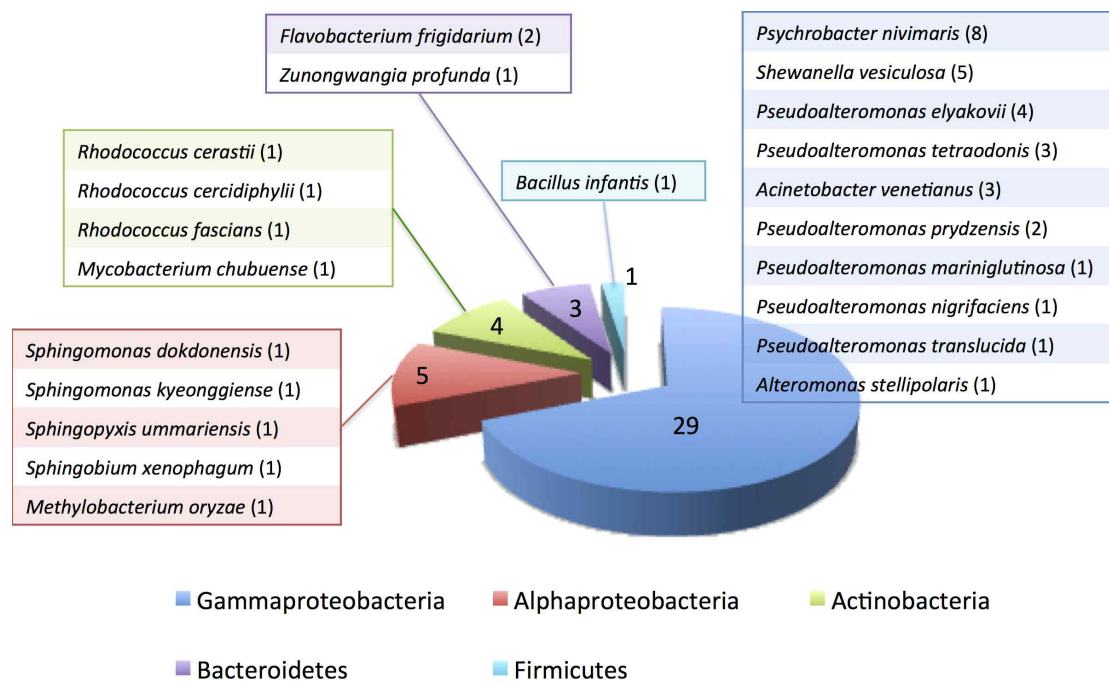


Fig. 3.7.4. Bacterial strains isolated from the concentrates of phytoplankton in the present study. Numbers in the parentheses represent numbers of strains belonging to each bacteria species.

제 7 절 위탁연구 수행성과

과제명	연구참여자		연구기간	
	연구책임자	참여연구원(명)	총기간	당해단계
1 서남극해 결빙해역 해류순환 및 물질순환	이재학	7	2010. 5. 1 - 2016. 12. 31	2014. 1. 1 - 2016. 12. 31
2 해빙하부 미생물 다양성	이성근	4	2010. 5. 1 - 2016. 12. 31	2014. 1. 1 - 2016. 12. 31
3 남극 아문젠해 미생물 생태	현정호	5	2011. 1. 1 - 2016. 12. 31	2014. 1. 1 - 2016. 12. 31
4 탄소동위원소를 이용한 탄소순환 및 기후변화	황점식	4	2011. 1. 1 - 2016. 12. 31	2014. 1. 1 - 2016. 12. 31
5 인공위성을 이용한 아문젠해 해빙변화 연구	김덕진	5	2011. 1. 1 - 2015. 12. 31	2014. 1. 1 - 2016. 12. 31
6 결빙해역 식물플랑크톤 신생산성과 생리상태 연구	이상현	2	2011. 1. 1 - 2016. 12. 31	2014. 1. 1 - 2016. 12. 31
7 동위원소 비평형법을 활용한 유기탄소플럭스	최만식	4	2012. 1. 1 - 2016. 12. 31	2014. 1. 1 - 2016. 12. 31



위탁과제명		당해단계 연구목표	목표 달성도 (%)	본과제 목표달성 기여 및 활용 내용
1	서남극해 결빙해역 해류순환 및 물질순환	- 해류 관측자료 분석 - 온실기체, 퇴적물 분석자료 해석	90	- 부족한 물리해양 연구기술 지원 기여 - (미보유) 퇴적물트랩 지화학 전공분야 지원
2	해빙하부 미생물 다양성	- 미생물 유전체, 계통분류 - 미생물 생화학 특성 규명	95	- (미보유) 미생물 첨단 분석기법과 연구진 - 생태계 조성과 생리특성 분석에 필수
3	남극 아문젠해 미생물 생태	- 환경요인과 미생물 변수 분석 - 미생물에 의한 탄소순환 분석	95	- (미보유) 물질순환과 미생물 역할 연구진 - 생지화학 물질순환 자료해석에 필수
4	탄소동위원소를 이용한 탄소순환 및 기후변화	- 침강입자 퇴적물 분석 - 용존무기탄소 순환양상 규명	95	- (미보유) 첨단 연구기법과 분석장비 - 생지화학 물질순환 자료해석에 필수
5	결빙해역 식물플랑크톤 신생산성과 생리상태 연구	- 탄소 및 질소 흡수율 변동성 - 다양한 대사물질 조성비율 분석	95	- (미보유) 식물플랑크톤 연구기술 - 생태계 일차생산자 생리활성 분석 기여
6	동위원소 비평형법을 활용한 유기탄소플럭스	- 유기탄소 침강플럭스 추산 - 미량금속 청정시료 정밀분석	80	- (미보유) 첨단 연구기법과 분석장비 - 생지화학 물질순환 자료해석에 필수
7	인공위성을 이용한 아문젠해 해빙변화 연구 (서울대 김덕진)	- 위성활용 해빙/빙하이동 추적 - 해빙/빙하 고도/면적 추정기법	60	- (미보유) 위성영상 해빙/빙하후퇴 연구 - 온난화 모델링의 주요 축

제 4 장 연구개발목표 달성도 및 대외기여도

제 1 절 단계 및 연도별 연구목표

가. 단계 최종 연구목표

- 아문젠해 해류순환 및 열수지 규명
 - 대륙붕에 유입되는 고염 고온 남극순환저층수의 유입·확산·순환패턴 규명
 - 아문젠해 해류순환과 열수지 규명을 통한 아문젠해 온난화 과정 규명
- 아문젠 해양생태계 구조와 기능 기본골격 파악
 - 주요 지표종 분포, 생리, 상호작용 규명
 - 주요 생태군집 종조성 및 변화, 유전자 발현 등 환경영향 기초자료 확보
- 아문젠해 생지화학순환 기본흐름 파악
 - 아문젠 폴리나 생물군집간 탄소의 흐름과 침강·퇴적을 측정
 - 아문젠해 생지화학순환의 과정과 Flux 기초자료 확보

나. 연도별 연구목표



구분	2014	2015	2016
연차 목표	<ul style="list-style-type: none"> - 해류순환 및 열교환 현상 1차 상세 실사 - 물질순환 Flux Draft 수정보완 - 생태계 기후환경 영향 상세 관측 	<ul style="list-style-type: none"> - 아문젠 열수지 및 온난화 추세 자료 심층분석 (계속) - 물질순환 Flux 규모와 방향 자료 심층분석 (계속) - 생태계 반응과 변화 1차규명: 기후환경변화 영향 평가 계속 	<ul style="list-style-type: none"> - Heat & Mass Balance 규명, 해류순환 및 열교환 모델 완성 - 물질순환 Flux 규모와 방향 파악 (생지화학순환도 완성) - 생태계 기후환경영향 중기 평가, 장기모니터링 시스템과 프로그램 완성
달성 방법	<ul style="list-style-type: none"> - 관측거점과 인프라 증보 - 자체 관측 인프라 확충 - 한국 주도 국제프로그램 결성 	<ul style="list-style-type: none"> - 결빙해 연구기술 정립 - 관측 인프라 개선 보완, 확충 - 서남극 관측시스템과 국제 네트워크 구동/완성도 제고 	<ul style="list-style-type: none"> - 관측 거점 및 인프라 증보 - 자체 관측 인프라 확충 - 한국 주도 국제프로그램 결성

제 2 절 연구개발목표 달성도 (정성적 성과)

연구기간내 연차별 목표 대비 달성율(%)					
연차	연차별 달성내용				연차별 계획 대비 연구 실적 달성율(B)(%)
	세부연구목표	연구내용	가중치(A)	달성실적	
1년차 (2014)	해류순환 및 열교환 현상 1차 상세 실사	<ul style="list-style-type: none"> · 3차 현장조사, 자료 분석 · 무인장기계류 관측거점 증보 (대륙 근접 Ice Shelf) 	0.4	<ul style="list-style-type: none"> - 3차 현장조사 상세자료 분석 - 장기계류 관측거점 증보 	100
	물질순환 2차시료/자료 분석	<ul style="list-style-type: none"> · 물질순환 2차시료 획득 및 분석 · 물질 Flow Chart와 Flux 추정 · 3차 계류 	0.3	<ul style="list-style-type: none"> - 물질순환 2차시료 획득 및 분석 - 물질 Flow Chart와 Flux 추정 - 3차 계류 	100
	미량금속 관련 생태 3차자료 획득 및 분석	<ul style="list-style-type: none"> · 미량금속, 온실기체, 용빙수, 영양염 등의 생태/생리 영향 조사 · 원양역과 아문젠해 비교 분석 등 	0.3	<ul style="list-style-type: none"> - 환경변수와 생태/생리 영향 분석 조사 - 종조성, 유전체 분석 등 진행 중 	100
	계		1.0		100
2년차 (2015)	해류순환 및 열교환 실사자료 분석	열수지 기본 모델 개념도 파악	0.4	<ul style="list-style-type: none"> - 3차 현장조사 및 누적 자료를 활용한 열수지 모델 개념 정립 - 논문화 	100
	물질순환 2차시료/자료 분석계속	물질순환 2차시료 분석 계속, 논문화 및 성과확산	0.3	<ul style="list-style-type: none"> - 누적자료 분석과 논문화 - Flow Chart와 Flux 추정 	100
	3차 현장조사 생태 생리연구 시료 및 자료분석 계속	2014년도 연구 주안점 심층분석과 논문화	0.3	<ul style="list-style-type: none"> - 환경변수와 생태/생리 영향, 종조성, 유전체 등 분석 조사 계속 - 논문화 및 성과확산 	100
	계		1.0	DSR2 특별논문집 발간	100

3년차 (2016)	해류순환 및 열교환 현상 자료 분석. 아문젠해역 Heat & Mass Balance 추정	15/16 4차 현장조사 실사자료 분석, 모델 검증 및 수정, 해빙 하부 등 희소 관측거점 확대, 국제공동연구 확대 심화	0.4	- 아문젠해 Heat & Mass Balance와 급속 온난화 원인 규명	100
	생지화학 물질순환 Flux 규모와 방향 파악	물질순환 시료 및 자료 분석, 생지화학 물질순환 Flux 흐름도 (규모와 방향) 작성	0.3	- 생지화학 물질순환 Flux 규명 - 아문젠해 탄소제거속도 규명	100
	생태자료 분석. 생태계에 대한 기후환경변화 중장기 영향 평가	생태계 종조성 및 생리활성에 미치는 - 온난화 (아문젠 Heat Balance에 근거) - 미량금속, 영양염, 용존기체 (온실가스) 등의 영향 평가 - 장기모니터링 국제공동 관측네트워크 구성	0.3	- 중장기 생태계 모니터링 (온난화 영향) 체제 구축 - 아문젠 해역 생태계 생리 생태 특성과 온난화 영향 논문화	100
	계		1.0		1000



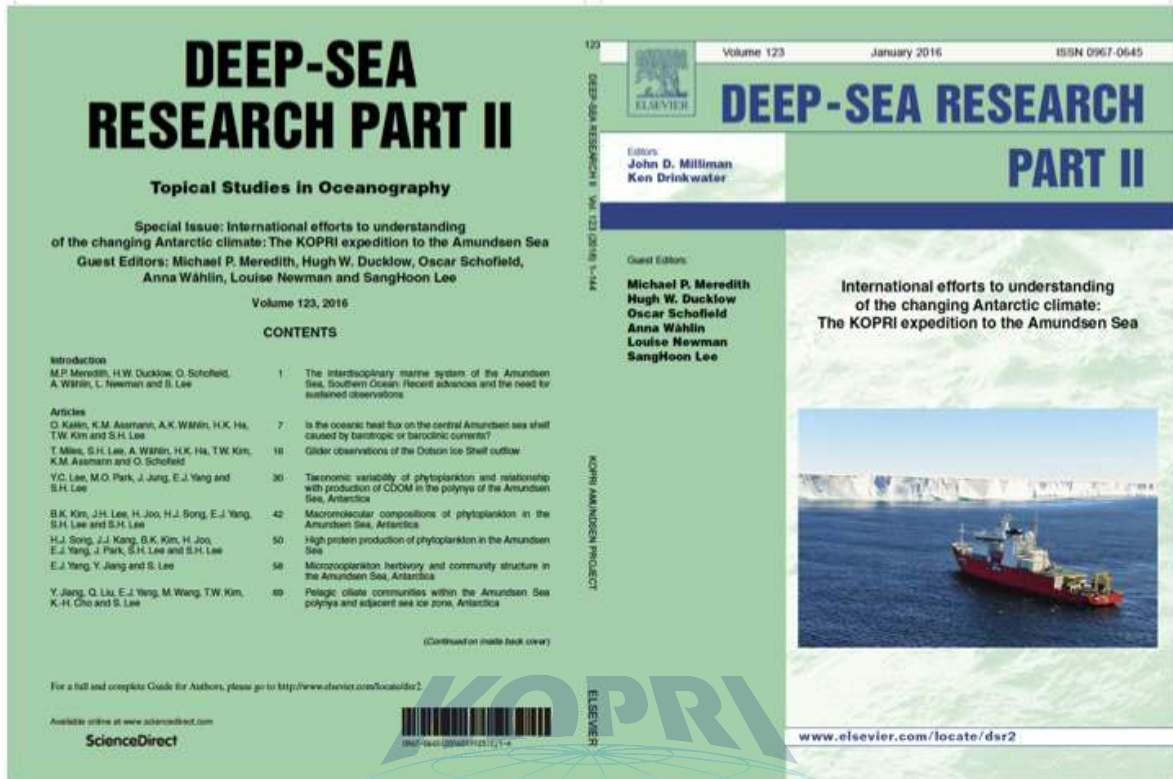
제 3 절 주요 정성적 성과 (국제협력분야)

- 과학적 성과와 관련분야 기술발전 기여도는 제 3 장 연구개발수행 내용 및 결과 참조

□ 국제공동연구 2014-2016 수행현황

연구협력 파트너	수행 형태	연구협력 내용(목표)	수행 결과 및 우수성
British Antarctic Survey	공동/협동	현장인력파견, 자료공유, 공동논문, 계류장비 15대 (45억원) 투자, JCR 공동사용	공동논문 발표 4건, 준비 1
스웨덴 Gotenburg University	공동/협동	현장인력파견, 자료공유, 공동논문, 계류장비 3대 (9억원) 투자	공동논문 발표 5건, 준비 2건
미국 Rutgers University	공동/협동	기술지원, 장비제공 (FIRE 1억, Glider 4억), 자료 공동분석, 공동논문	공동논문 완간 4건, 준비 2건
미국 LDEO, NYU	공동/협동	해빙-해양 물리관측자료, Sediment Trap 시료/자료 공유, 공동 논문	공동논문 완간 2건, 준비 1건
미국 NOAA	공동/협동	NOAA Drifter 제공, 자료공유, 공동논문	남빙양 자동관측자료 위성수신중
노르웨이 베르겐대	공동/협동	현장인력파견, 자료공유, 공동논문, 계류장비 4대 (12억원) 투자	아문젠해역 온난화연구 계류정점 증보
프랑스 LOCEAN	공동/협동	현장인력파견, 자료공유, 공동논문, 계류장비 3대 (9억원) 투자	서남극 온난화에 미치는 남극순환류 Heat/Mass Transfer 연구
중국 제3 해양연구소	공동/협동	현장인력파견 (협의중), 자료공유, 공동논문	환남극 온실기체 가스 측정

- 국제학술지 Deep-Sea Research II에 극지연구소 아문젠 연구성과 특별호 발간 (2016. 1월 논문 14편 게재)



극지연구소

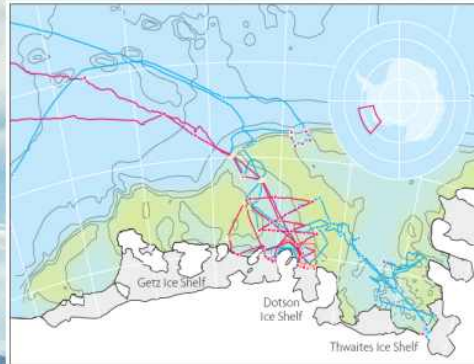
- 국제기구 SOOS (남빙양관측기구) Progress Report 2012-2014에서 아문젠 국제 협력성과를 보고

SOOS 남빙양관측기구가 주목하는 국제협력 프로그램: SOOS 3개년 (2012-2014) 성과보고서가 소개한 성공적인 Multi-National 프로그램 (한, 호, 미/영) 중 첫번째 프로그램으로 보고함.

MULTI-NATIONAL CONTRIBUTIONS TO SOOS

In addition to these large internationally coordinated programmes, national and multi-national field campaigns form the bedrock of SOOS implementation. Many large field campaigns have collected and contributed data over the last 3 years. New Zealand and Italy have maintained various long-term **moored arrays** in the Ross Sea; South Africa has pushed technological boundaries with the deployment of wave gliders through the **SOSICEx project**; Germany has supported a RAFOS sound source array and acoustically-tracked floats in the Weddell sea; the USA has supported activities under its **Long-Term Ecological Research** site at Palmer Station for 25 years...and the list goes on.

This section cannot highlight all of them, but the maps below showcase just some of these important contributions.



KOPRI Multi-National Amundsen Sea Project

The KOPRI Amundsen Sea Project is a multi-disciplinary and multi-national (Sweden, USA, UK, France, Norway) programme that aims to understand regional climate change mechanisms in the West Antarctica, and impacts of these changes on ecosystems and biogeochemical cycles. The map above indicates international activities undertaken in 2012 (blue) and 2014 (green).

- | | |
|--|---|
| ■ 2012 Ship Track & CTD | ▲ Mooring (KOPRI) |
| ■ 2014 Ship Track & CTD | ▲ Mooring (UGot, Sweden) |
| ■ Glider Track (Rutgers, US) | ▲ Mooring (BAS, NERC, ISTAR, UK) |
| | ▲ Mooring (ASPRE, US) |



제 5 장 연구개발결과의 활용계획

1. 기후변화 영향과 예측 기술 기반 축적: 쇄빙연구선을 기반으로 하는 관측 및 시료 수집과 인공위성을 활용한 원격 관측의 활용, 모델링 연구의 결합으로 배경 기작에 대한 이해와 예측 능력 증진
2. 쇄빙연구선 활용 유·결빙해역 연구기술을 우리 자체적으로 함양, 축적하고, 쇄빙연구선 활용 대표 연구프로그램으로 정착, 국제적으로 인정받는 활동과 성과의 창출로 국민적 자긍심과 한국의 브랜드 가치 제고
3. 남극해 연구 미진지역에서 독보 독자적 연구결과 생성
4. 기후변화 국제 동향에 대한 우리나라 정책 대안의 다변화
5. 국제 기후변화 정책 결정 포럼에 인용되는 독보적 연구결과 생성
6. 저온 극한 환경에서 생존하는 생물다양성과 생리 활성을 자산화하는 기반 마련
7. 미답지 자료축적, 국제공동연구 네트워크 참여, 결빙해역 연구능력 구축 등을 통하여 우리 프로그램의 질적 성장은 물론, 성숙하고 책임있는 지구촌 구성원으로 부상하여, 한국의 과학 선진국 리더십 함양하고, 국제사회에서 영향력과 브랜드 가치 제고
8. 중장기, 전지구 시스템 기후변화 방향 예측과 변화 양상 이해를 통해 정책 입안 측면에서 학술적인 근거로 우위를 유지함
9. 한반도 기후와 차례대로 연계되는 태평양 중저위도권, 극지해역의 연구를 토대로 기후 변화 예측 능력 강화
10. 태평양 생태계 변화로 인한 어업 잠재력과 분포 변화 예측; 국외 공해역 어업 관리와 정책 입안에 기본 자료 활용
11. 그동안 선진국들도 연구범위에 포함하지 못했던 미답지에서 자료 축적으로 독자적 연구 성과 창출, 국제협력의 중심으로 부상
12. 인공위성 관측 결과를 중장기 광역 추세 파악과 생태계 관리에 활용하는 기술 축적, 다른 해역에서도 적용, 위성자료 보정을 위한 실측 자료 생산
13. 해양미소생물 종 다양성과 생리 활성 자료를 전지구 규모로 확보, 생물 다양성, 유전자 DB 등 무형 유형의 자원 활용기반 확보하고 우리 자산화

제 6 장 연구개발과정에서 수집한 해외과학기술정보

1. Southern Ocean Observing System (이하 SOOS)은 남극해에서 다학제 관측망을 구축하고 지속적으로 관측을 수행하는 것을 목표로 하는, SCAR, SCOR, POGO를 포함하는 국제기구들의 이니셔티브임. SOOS는 2011년 8월 국제사무소(IPO)를 호주의 University of Tasmania에 설치하고, Science Steering Committee의 활동을 통하여 국제프로그램을 개발하고자, 2012년 2월 (미국 Ocean Science Meeting), 10월 (호주 CSIRO 워크샵), 2013년 5월 (중국 상해 극지연구소), 2014년 6월 (노르웨이) 회동하고 있음. 현재 8개의 endorsed program이 등록되어 있음.
2. 남북극 극지방 해빙의 분포와 변화를 다양한 방법과 참여회원국의 활동을 통하여 종합 모니터링하고자 SCAR 산하에서 활동하는 ASPECT (Antarctic Sea Ice Processes & Climate), 기후변화와 남극해양생태계 동태 사이의 상호작용을 환남극 수준에서 통합 분석하고자 하는 국제프로그램 ICED (Integrating Climate and Ecosystem Dynamics in the Southern Ocean) 등 활발한 활동 중.
3. 미국이 야심적으로 추진한 남빙양생지화학연구 중장기 대형프로그램 (SOBOM)은 OPP 재원이 부족하여 실패하고, 2013년도 미국 NSF ONR에서 SOBOM 프로그램의 일부 sub program만을 지원하기로 함으로써 전체 프로그램은 무산됨. 현재 진행 중인 연구과제 이외에 미국 ONR의 신규 대형 남극해연구프로그램은 당분간 가능하지 않을 듯.
4. Horizon Scan: SCAR (남극과학위원회)는 미래에 예측되는 유망한 남극연구주제를 발굴하기 위하여 2013년도 6-10월간 남극전문가 집단의 의견을 광범위하게 조사.
 - 향후 20-30년 후를 겨냥한 미래 유망 핵심 남극연구주제 대상
 - 남녀 노소 국적 전공을 불문, Web online을 통한 자유 제안Horizon Scan Retreat 위원단을 구성하여, 제안된 미래 남극연구주제를 검토, 선별, 취사선택하여 과학적으로 가치 있는 유망 연구주제를 발굴, 선정하기 위한 전문가 그룹을 SCAR Horizon Scan International Steering Committee ISC에서 2014년 9월 선임함. 국가, 지역, 성별, 전문가 집단 크기, 전공 등을 고려한 안배였으며, 한국에서는 극지연 김예동 소장과 이상훈이 선임됨. 이후 Horizon Scan Retreat 작업을 수행함. 2014년 4월 뉴질랜드 쿼크타운에서 70여명의 Retreat 위원이 합숙하며 미래 유망 남극연구주제 선정 작업.

- 80개의 최종 선별 주제들을 분야별 분류, 종합, 정리하여
- Nature 등 국제학술지를 통하여 SCAR의 미래지향 이니셔티브를 전세계에 홍보
- 중요한 80개의 과학적 질문들 (아래 참조)

Table II. Antarctic and Southern Ocean Science Horizon Scan questions in clusters ‘Antarctic atmosphere and global connections’ and ‘Southern Ocean and sea ice in a warming world’.

Antarctic atmosphere and global connections		Southern Ocean and sea ice in a warming world	
1.	How is climate change and variability in the high southern latitudes connected to lower latitudes including the tropical ocean and monsoon systems?	12.	Will changes in the Southern Ocean result in feedbacks that accelerate or slow the pace of climate change?
2.	How do Antarctic processes affect mid-latitude weather and extreme events?	13.	Why are the properties and volume of Antarctic Bottom Water changing, and what are the consequences for global ocean circulation and climate?
3.	How have teleconnections, feedbacks, and thresholds in decadal and longer term climate variability affected ice sheet response since the Last Glacial Maximum, and how can this inform future climate projections?	14.	How does Southern Ocean circulation, including exchange with lower latitudes, respond to climate forcing?
4.	What drives change in the strength and position of westerly winds, and what are their effects on ocean circulation, carbon uptake and global teleconnections?	15.	What processes and feedbacks drive changes in the mass, properties and distribution of Antarctic sea ice?
5.	How did the climate and atmospheric composition vary prior to the oldest ice records?	16.	How do changes in iceberg numbers and size distribution affect Antarctica and the Southern Ocean?
6.	What controls regional patterns of atmospheric and oceanic warming and cooling in the Antarctic and Southern Ocean? <i>(Cross-cuts ‘Southern Ocean’)</i>	17.	How has Antarctic sea ice extent and volume varied over decadal to millennial timescales?
7.	How can coupling and feedbacks between the atmosphere and the surface (land ice, sea ice and ocean) be better represented in weather and climate models? <i>(Cross-cuts ‘Southern Ocean’ and ‘Antarctic ice sheet’)</i>	18.	How will changes in ocean surface waves influence Antarctic sea ice and floating glacial ice?
8.	Does past amplified warming of Antarctica provide insight into the effects of future warming on climate and ice sheets? <i>(Cross-cuts ‘Antarctic ice sheet’)</i>	19.	How do changes in sea ice extent, seasonality and properties affect Antarctic atmospheric and oceanic circulation? <i>(Cross-cuts ‘Antarctic atmosphere’)</i>
9.	Are there CO ₂ equivalent thresholds that foretell collapse of all or part of the Antarctic ice sheet? <i>(Cross-cuts ‘Antarctic ice sheet’)</i>	20.	How do extreme events affect the Antarctic cryosphere and Southern Ocean? <i>(Cross-cuts ‘Antarctic ice sheet’)</i>
10.	Will there be release of greenhouse gases stored in Antarctic and Southern Ocean clathrates, sediments, soils and permafrost as climate changes? <i>(Cross-cuts ‘Dynamic Earth’)</i>	21.	How did the Antarctic cryosphere and the Southern Ocean contribute to glacial/inter-glacial cycles? <i>(Cross-cuts ‘Antarctic ice sheet’)</i>
11.	Is the recovery of the ozone hole proceeding as expected and how will its recovery affect regional and global atmospheric circulation, climate and ecosystems? <i>(Cross-cuts ‘Antarctic life’ and ‘Human’)</i>	22.	How will climate change affect the physical and biological uptake of CO ₂ by the Southern Ocean? <i>(Cross-cuts ‘Antarctic life’)</i>
		23.	How will changes in freshwater inputs affect ocean circulation and ecosystem processes? <i>(Cross-cuts ‘Antarctic life’)</i>

Questions are assigned numbers for ease of referencing and do not indicate relative importance or rank-order within or between clusters. *Questions that cross-cut clusters are indicated with red italics.*

Table III. Antarctic and Southern Ocean Science Horizon Scan questions in clusters 'Antarctic ice sheet and sea level' and 'Dynamic earth – probing beneath Antarctic ice'.

Antarctic ice sheet and sea level		Dynamic Earth – probing beneath Antarctic ice	
24.	How does small-scale morphology in subglacial and continental shelf bathymetry affect Antarctic ice sheet response to changing environmental conditions? (<i>Cross-cuts 'Dynamic Earth'</i>)	35.	How does the bedrock geology under the Antarctic ice sheet inform our understanding of supercontinent assembly and break-up through Earth's history?
25.	What are the processes and properties that control the form and flow of the Antarctic ice sheet?	36.	Do variations in geothermal heat flux in Antarctica provide a diagnostic signature of sub-ice geology?
26.	How does subglacial hydrology affect ice sheet dynamics, and how important is it? (<i>Cross-cuts 'Dynamic Earth'</i>)	37.	What is the crust and mantle structure of Antarctica and the Southern Ocean, and how do they affect surface motions due to glacial isostatic adjustment?
27.	How do the characteristics of the ice sheet bed, such as geothermal heat flux and sediment distribution, affect ice flow and ice sheet stability? (<i>Cross-cuts 'Dynamic Earth'</i>)	38.	How does volcanism affect the evolution of the Antarctic lithosphere, ice sheet dynamics, and global climate? (<i>Cross-cuts 'Antarctic atmosphere' and 'Antarctic ice sheet'</i>)
28.	What are the thresholds that lead to irreversible loss of all or part of the Antarctic ice sheet?	39.	What are and have been the rates of geomorphic change in different Antarctic regions, and what are the ages of preserved landscapes?
29.	How will changes in surface melt over the ice shelves and ice sheet evolve, and what will be the impact of these changes?	40.	How do tectonics, dynamic topography, ice loading and isostatic adjustment affect the spatial pattern of sea level change on all timescales? (<i>Cross-cuts 'Antarctic ice sheet'</i>)
30.	How do oceanic processes beneath ice shelves vary in space and time, how are they modified by sea ice, and do they affect ice loss and ice sheet mass balance? (<i>Cross-cuts 'Southern Ocean'</i>)	41.	Will increased deformation and volcanism characterize Antarctica when ice mass is reduced in a warmer world, and if so, how will glacial- and ecosystems be affected? (<i>Cross-cuts 'Antarctic life'</i>)
31.	How will large-scale processes in the Southern Ocean and atmosphere affect the Antarctic ice sheet, particularly the rapid disintegration of ice shelves and ice sheet margins? (<i>Cross-cuts 'Antarctic atmosphere' and 'Southern Ocean'</i>)	42.	How will permafrost, the active layer and water availability in Antarctic soils and marine sediments change in a warming climate, and what are the effects on ecosystems and biogeochemical cycles? (<i>Cross-cuts 'Antarctic life'</i>)
32.	How fast has the Antarctic ice sheet changed in the past and what does that tell us about the future?		
33.	How did marine-based Antarctic ice sheets change during previous inter-glacial periods?		
34.	How will the sedimentary record beneath the ice sheet inform our knowledge of the presence or absence of continental ice? (<i>Cross-cuts 'Dynamic Earth'</i>)		

Questions are assigned numbers for ease of referencing and do not indicate relative importance or rank-order within or between clusters. *Questions that cross-cut clusters are indicated with red italics.*



Table IV. Antarctic and Southern Ocean Science Horizon Scan questions in cluster 'Antarctic life on the precipice'.

Antarctic life on the precipice	
43. What is the genomic basis of adaptation in Antarctic and Southern Ocean organisms and communities?	55. How will invasive species and range shifts of indigenous species change Antarctic and Southern Ocean ecosystems? (<i>Cross-cuts 'Human'</i>)
44. How fast are mutation rates and how extensive is gene flow in the Antarctic and the Southern Ocean?	56. How will climate change affect the risk of spreading emerging infectious diseases in Antarctica? (<i>Cross-cuts 'Human'</i>)
45. How have ecosystems in the Antarctic and the Southern Ocean responded to warmer climate conditions in the past? (<i>Cross-cuts 'Antarctic atmosphere' and 'Oceans'</i>)	57. How will increases in the ice-free Antarctic intertidal zone impact biodiversity and the likelihood of biological invasions?
46. How has life evolved in the Antarctic in response to dramatic events in the Earth's history? (<i>Cross-cuts 'Dynamic Earth'</i>)	58. How will climate change affect existing and future Southern Ocean fisheries, especially krill stocks? (<i>Cross-cuts 'Human'</i>)
47. How do subglacial systems inform models for the development of life on Earth and elsewhere? (<i>Cross-cuts 'Eyes on the sky'</i>)	59. How will linkages between marine and terrestrial systems change in the future?
48. Which ecosystems and food webs are most vulnerable in the Antarctic and Southern Ocean, and which organisms are most likely to go extinct?	60. What are the impacts of changing seasonality and transitional events on Antarctic and Southern Ocean marine ecology, biogeochemistry and energy flow?
49. How will threshold transitions vary over different spatial and temporal scales, and how will they impact ecosystem functioning under future environmental conditions?	61. How will increased marine resource harvesting impact Southern Ocean biogeochemical cycles? (<i>Cross-cuts 'Human'</i>)
50. What are the synergistic effects of multiple stressors and environmental change drivers on Antarctic and Southern Ocean biota?	62. How will deep sea ecosystems respond to modifications of deep water formation, and how will deep sea species interact with shallow water ecosystems as the environment changes?
51. How will organism and ecosystems respond to a changing soundscape in the Southern Ocean? (<i>Cross-cuts 'Human'</i>)	63. How can changes in the form and frequency of extreme events be used to improve biological understanding and forecasting? (<i>Cross-cuts 'Antarctic atmosphere'</i>)
52. How will next-generation contaminants affect Antarctic and Southern Ocean biota and ecosystems?	64. How can temporal and spatial 'omic-level' analyses of Antarctic and Southern Ocean biodiversity inform ecological forecasting?
53. What is the exposure and response of Antarctic organisms and ecosystems to atmospheric contaminants (e.g. black carbon, mercury, sulfur, etc.), and are the sources and distributions of these contaminants changing? (<i>Cross-cuts 'Antarctic atmosphere' and 'Human'</i>)	65. What will key marine species tell us about trophic interactions and their oceanographic drivers such as future shifts in frontal dynamics and stratification?
54. How will the sources and mechanisms of dispersal of propagules into and around the Antarctic and Southern Ocean change in the future?	66. How successful will Southern Ocean Marine Protected Areas be in meeting their protection objectives, and how will they affect ecosystem processes and resource extraction? (<i>Cross-cuts 'Human'</i>)
	67. What <i>ex situ</i> conservation measures, such as genetic repositories, are required for the Antarctic and Southern Ocean? (<i>Cross-cuts 'Human'</i>)
	68. How effective are Antarctic and Southern Ocean conservation measures for preserving evolutionary potential? (<i>Cross-cuts 'Human'</i>)

Questions are assigned numbers for ease of referencing and do not indicate relative importance or rank-order within or between clusters.

Questions that cross-cut clusters are indicated with red italics.

Table V. Antarctic and Southern Ocean Science Horizon Scan questions in clusters 'Near-Earth space and beyond – eyes on the sky' and 'Human presence in Antarctica'.

Near-Earth space and beyond – eyes on the sky	Human presence in Antarctica
69. What happened in the first second after the universe began?	74. How can natural and human-induced environmental changes be distinguished, and how will this knowledge affect Antarctic governance? (<i>Cross-cuts all other clusters</i>)
70. What is the nature of the Dark Universe and how is it affecting us?	75. What will be the impacts of large-scale, direct human modification of the Antarctic environment? (<i>Cross-cuts 'Antarctic life'</i>)
71. What are the differences in the inter-hemispheric conjugacy between the ionosphere and that in the lower, middle and upper atmospheres, and what causes those differences?	76. How will external pressures and changes in the geopolitical configurations of power affect Antarctic governance and science?
72. How does space weather influence the polar ionosphere and what are the wider implications for the global atmosphere? (<i>Cross-cuts 'Antarctic atmosphere'</i>)	77. How will the use of Antarctica for peaceful purposes and science be maintained as barriers to access change?
73. How do the generation, propagation, variability and climatology of atmospheric waves affect atmospheric processes over Antarctica and the Southern Ocean? (<i>Cross-cuts 'Antarctic atmosphere'</i>)	78. How will regulatory mechanisms evolve to keep pace with Antarctic tourism?
	79. What is the current and potential value of Antarctic ecosystem services?
	80. How will humans, diseases and pathogens change, impact and adapt to the extreme Antarctic environment? (<i>Cross-cuts 'Antarctic life'</i>)

Questions are assigned numbers for ease of referencing and do not indicate relative importance or rank-order within or between clusters.

Questions that cross-cut clusters are indicated with red italics.

5. 지구관측그룹(GEO, Group on Earth Observations)의 설립으로, '전지구관측시스템(GEOSS, Global Earth Observation System of Systems)'프로젝트가 수행되고 있음. 50개 회원국 및 40개 국제기구, 과학 관련 조직이 참여하여 기후변화와 관련하여 지구 환경 상태에 대한 감시, 관측을 수행하고 이의 정보를 하나로 통합하여 제공하는 것을 목표로 함.

6. GCOS, GOOS 및 WCRP의 지원을 받는 OOPC (Ocean Observations Panel for Climate) 에서는 전 해양의 관측시스템 구축에 대한 과학적 권고를 하고 있으며, 여기에서 제시하고 있는 관측시스템은 UNFCCC에 보고되었고 모든 관측망 정보를 제공하고 있는바 선박을 활용하는 시스템으로는 SOT(JCOMM Ship Observations Team)의 VOS(Volunteer Observing Ship) fleet와 IOCCP (International Ocean Carbon Coordination Project)의 Carbon VOS가 있음. 본 국제기구 관련 한국의 2014 활동은 미미함.
7. 해양연구선을 운영하는 해양연구기관의 모임인 Partnership for Observation of the Global Ocean (POGO) 2014 annual meeting (Australia, Jan 2014)에 해양연구원이 주축으로 참여하였으나, 여러가지 이유로 극지연구소는 참여하지 않음. 귀중한 해양연구 플랫폼 아라운을 활용하여 극지연구소의 visibility를 국제사회에서 좀 더 제고할 필요가 있으며, POGO에 정식 회원기관으로 정례 참여할 필요가 있다고 판단되어 2013 연차보고서에 본 내용을 기재하였으나, 2014 1월 이후 상황은 변동 없음.
8. SCAR 및 SOOS 관련 소위원회 활동. 뉴질랜드 오클랜드에서 개최된 SCAR SSG Business Meeting에서는 SCAR Horizon Scan 작업과 성과 (전 SCAR 의장 C. Kennicutt), 지구기후변화연구에 대한 SCAR의 역할 (ACCE Ant Climate Change & Environ 의장 J. Turner), SOOS 과학위 활동과 향후 계획 (SOOS O. Schofield), AnTOS Ant. & Near Shore Terrestrial Observ. Sys 구성 제안에 대한 배경, 경위, 필요성 (D. Bergstrom), 해양산성화 연구의 주요 성과와 남극해 현황 (R. Bellerby) 등이 발표됨. SOOS Business Meeting (8/27)에서는 SOOS SSC member (O. Schofield, Andy Constable, Angie Brandt, Steve Diggs, Steve Rintoul, Mike Sparrow, Louise Newman, *Mike Williams, *SangHoon Lee: * 2015년도 임기 시작)들이 2012 Hobart SOOS WS "Under the Ice" 보고서에 대한 review 의견을 교환하고, 새로운 무인관측 기술 new technology의 도입에 대한 필요성, 미국 신규 쇄빙선건조 기획보고서 추진 현황 등을 논의함. SOOS Data Management Sub-Committee (8/29)에서는 SOOS Data의 정의, 데이터의 포맷과 유닛 등 아직도 산적한 문제들에 대한 해결방안, 웹사이트 포털 구성과 메뉴에 대한 의견, 관측데이터와 모델링데이터를 조화시키는 방법에 대한 고민 등 다양한 토의가 이루어졌으며, 참여인원 각자 자국의 데이터센터를 소개하고, 실제 인터넷 상으로 access를 실연함.
9. 기타 자세한 사항은 제2장 제2절 국외기술개발동향 참조. -끝-