아문젠해의 현재 유기/무기 탄소 순환과 과거 유기탄소 퇴적환경의 변동 이해

Understanding the current carbon cycling and past sedimentation of organic carbon in the Amundsen Sea

서울대학교 산학협력단

KOPRI 극지연구소

제 출 문

극지연구소장 귀하

본 보고서를 “아문젠 빙붕소멸 속도와 해양변동 추세 연구” 과제의 위탁연구 “아문젠해의 현재 유기/무기 탄소 순환과 과거 유기탄소 퇴적환경의 변동 이해에 관한 연구에 관한 연구” 과제의 최종보고서로 제출합니다.

2020 . 01. 31

(본과제) 총괄연구책임자 : 김 태 완

위탁연구기관명 : 서울대학교 산학협력단

위탁연구책임자 : 황 정 식

위탁참여연구원 : 나 태 희
“ : 김 민 경
“ : 류 영 진

보고서 초록

위탁연구과제명	아문젠해의 현재 유기/무기 탄소 순환과 과거 유기탄소 퇴적환경의 변동 이해				
위탁연구책임자	황 점 식	해당단계 참여연구원수	4	해당단계 연구비	45,000,000원
연구기관명 및 소속부서명	서울대학교 산학협력단/ 지구환경과학부		참여기업명		
국제공동연구	상대국명 :		상대국연구기관명 :		

요약(연구결과를 중심으로 개조식 500자이내)	보고서 면수	

1. 아문젠해 고기후 추정

○ 해빙역, 개구부, 그리고 Dotson 빙붕 앞에서 획득한 침강입자 시료의 생지화학 성분을 분석하여 표층 환경에 따른 입자들의 생산, 수층을 통한 이동, 기원 등에 대하여 고찰하고 입자 플럭스를 조절하는 요인을 해빙과 관련지어 파악하였음(SCI 논문 1편을 주저자로 게재)

○ 퇴적물 트랩에 포집된 거대저서동물의 발견에 대하여 이들의 수송 기작에 대한 연구를 통하여 아문젠해에서 앵커아이스의 형성 가능성을 제시하였음(SCI 논문 1편을 주저자로 게재)

○ 과거 Dotson 트러프를 따라 4개 정점에서 획득한 박스코어 퇴적물 시료 중 개구부 내부 정점 퇴적물 시료의 추가 분석으로 연구의 시간 범위를 확장하였으며, 2016년 크루즈를 통해 아문젠해 대륙붕을 가로지르는 라인 및 외해에서 시료를 추가로 획득, 분석하였음(김민경 학생 박사학위 논문)

○ 아문젠해 중력코어에서 고해상도 방사성탄소동위원소 값 및 생지화학적 지표들 (우점 일차생산자가 합성할 수 있는 여러 종류의 스테롤 농도 등)의 자료를 획득하였으며 이를 통하여 아문젠해 폴리냐 형성 역사를 규명하는 연구 진행 중임

2. 아문젠해 탄소순환 이해

○ 해빙역, 개구부, 그리고 Dotson 빙붕 앞에서 깊이 별 용존유기탄소의 방사성탄소동위원소 자료 획득하여 용존유기탄소 순환을 파악하였음(SCI 논문 1편을 주저자로 게재 예정)

색 인 어 (각 5개 이상)	한 글	아문젠해, 방사성탄소, 입자성유기탄소, 용존유기탄소, 용존무기탄소
	영 어	Amundsen Sea, Radiocarbon, Particulate organic carbon, Dissolved organic carbon, Dissolved inorganic carbon

KOPRI 극지연구소

요 약 문

Ⅰ. 제 목

아문젠해의 현재 유기/무기 탄소 순환과 과거 유기탄소 퇴적환경의 변동이해

Ⅱ. 연구개발의 목적 및 필요성

남극은 현재 진행되고 있는 기후변화에 민감하게 반응하는 해역으로 일차생산, 이산화탄소의 흡수와 같은 탄소순환 양상이 급격하게 변화할 것으로 예상된다. 이런 변화는 미래의 기후변화에 영향을 미칠 것이기에 극지역에서 진행되는 탄소순환의 변화를 감지하는 것은 미래의 기후 예측에 중요한 자료를 제공할 것이다.

태평양쪽 서남극해는 해수면 상승을 유발하는 빙상과 빙붕의 급격한 감소를 겪고 있으며 그 원인을 이해하고자 하는 연구가 국제적으로 활발히 진행 중이다. 따라서 CDW(Circumpolar Deep Water)의 유입에 따른 생물학적인 변화 그리고 궁극적으로 탄소의 순환 양상 변화를 밝히기 위한 인공위성으로부터 심해 퇴적물에 이르는 다층 중장기 관측연구가 절실히 필요하게 되었다.

본 위탁과제에서는 극지연구소에서 추진하고 있는 아문젠해 생지화학 연구의 일환으로 아문젠 해역에서의 유기탄소순환을 이해하려 하였다. 방사성탄소동위원소는 탄소순환을 이해하는데 있어 나이와 기원이라는 중요한 정보를 제시할 수 있기 때문에 아문젠해의 해수순환 및 생지구화학을 이해하는데 큰 역할을 할 것으로 기대된다.

아문젠 해역은 개구부가 열리는 시기를 제외하고는 접근이 힘든 지역이기 때문에 퇴적물 트랩이 이 해역의 생물학적 펌프 작용을 살펴볼 수 있는 유일한 방법이다. 비교적 미개척지인 아문젠 해역에서 방사성탄소동위원소 분석을 기반으로 한 퇴적물 입자유기물과 퇴적물 트랩으로 획득한 입자유기물의 다각적 연구는 아문젠해의 현재와 과거에 관한 전반적인 이해를 돕고 미래 기후변화에 따른 아문젠해의 변화를 예측하는 데 도움이 될 것이다. 특히 용존유기탄소의 방사성탄소동위원소 값은 이 해역에서는 최초로 얻은 값으로 아문젠해 용존유기탄소의 생성과 소멸에 대한 정보를 제공할 것이다.

Ⅲ. 연구개발의 내용 및 범위

본 위탁과제 연구에서는 아문젠해의 해빙 진퇴, 생물 다양성과 생리특성 변화 등의 연구와 밀접히 연계하여, 퇴적물 트랩을 이용하여 연간 시계열 침강입자 시료를 획득하고 생지화학적 정보들에 추가하여 방사성탄소동위원소를 분석하였다. 이를 통하여 다양한 유기탄소의 기원 및 입자유기물이 퇴적 후에 겪게 되는 여러 가지 과정들을 이해함으로써 아문젠해의 유기탄소순환을 밝히고자 하였다. 나아가 시/공간적으로 확장한 퇴적물 시료를 통한 고해상도 방사성탄소 연대측정 및 바이오마커 분석을 통해서 과거 퇴적환경 변동의 복원을 시도하였으며 아문젠 해역 개구부 형성 역사를 파악하고자 하였다. 또한 해수중에 녹아있는 용존유기탄소의 방사성탄소동위원소를 분석함으로써 아문젠해의 용존유기탄소 순환 양상을 이해하고자 하였다.

Ⅳ. 연구개발결과

연구 결과를 아래와 같이 정리할 수 있다.

- 침강입자유기물 분석
  한국해양과학기술원 김동선 박사 팀에서 침강입자 시료의 기본 조성을 분석하였으며, 본 실험실에서는 방사성탄소동위원소 분석을 진행하였다. 특히 해빙역에 위치한 K1 정점과 아문젠 개구부 내에 설치되었던 US ASPIRE(The Amundsen Sea Polynya International Research Expedition) 팀의 유기탄소 플럭스를 비교하여 Deep Sea Research I에 게재한 논문에서 나아가 3년여에 걸쳐 시공간적으로 확장된 침강입자유기탄소 시료를 해빙의 농도 변화와 연관하여 해석한 논문을 Journal of Marine Systems에 게재하였다. 또한 퇴적물트랩에서 발견된 거대저서동물의 수송 기작과 근원지를 규명하는 논문을 Biogeosciences에 게재하였다.

- 퇴적유기물 분석
  전년도에 Deep Sea Research II에 게재한 아문젠 해역 유기탄소 퇴적 양상 연구 결과를 바탕으로 퇴적속도의 시공간적 변화를 이해하고, 생산성, 해빙의 농도 등을 추정할 수 있는 생물학적 프록시들을 추가 분석하여 아문젠해 개구부의 형성 및 과거 기후변화를 추정하고자 하였다. 아문젠해 대륙붕단과 빙붕 앞, 개구부 내 정점에서 각각 획득한 중력코어 시료에서 생지화학적 프록시 및 고해상도의 방사성탄소동위원소, 지방계 바이오마커 및 금속분석을 진행하였으며 이를 토대로 과거 일차생산과 퇴적환경의 변화 등을 추정하는 연구를 진행 중이다. 이 내용을 바탕으로 박사학위논문(김민경)이 완성되었으며 저널 논문 작성 중이다.

- 용존유기탄소 분석
  용존유기탄소 추출 라인을 이용하여 용존유기탄소의 방사성탄소 동위원소 측정을 위한 전처리를 실시하였고, C-14 값을 얻었다. 이 자료는 아문젠해 대륙붕에서 최초로 얻어진 용존유기탄소 방사성탄소 값이다. 아문젠해에서 난분해성 용존유기물이 개구부 형성시 해수로 공급되는 신선한 용존유기물과 함께 소모되는 현상을 발견하였으면 이 결과는 Scientific Report에 2020년 1월말경 출판 예정이다.

Ⅴ. 연구개발결과의 활용계획

새롭게 획득한 해빙역과 개구부 내부, 빙붕 앞의 침강입자의 총 물질 플럭스, 유기탄소 플럭스, 그리고 탄소동위원소 분석을 통하여 아문젠 해역의 유기탄소 기원 및 순환과 생물학적 펌프에 대한 전반적인 해석이 가능하게 되었다.

- 개구부 내부와 외부에서 획득한 퇴적물 중력코어의 고해상도 방사성탄소동위원소 연대측정 및 고해양환경을 추정할 수 있는 다양한 바이오마커, Al, Ti, Ba 등의 금속원소를 이용하여 과거 우점일차생산종의 변화 및 표층환경을 추정할 수 있었다. 이를 해석함으로서 아문젠해의 과거 물리해양학적 변화를 추적하고 미래 기후변화에 대한 아문젠해의 역할을 이해하는 자료로 활용될 것이다. 또한 나아가 극지 해역에서의 생지화학 연구에 기여할 것이다.

아문젠해 해수 중의 용존유기탄소의 C-14 데이터는 대양의 용존유기물 순환, 특히 용존유기물의 소모기작에 대한 중요한 단서를 제공할 것이다.

KOPRI
극지연구소

SUMMARY

Ⅰ. Title

Understanding the current carbon cycling and past sedimentation of organic carbon in the Amundsen Sea

Ⅱ. Purpose and Necessity of R&D

The Antarctic region is being influenced by climate change most severely. Physical changes such as seasonal sea ice melting will influence the carbon cycling in this region. The change in carbon cycling, in turn, will affect the future climate change through feedback mechanisms. Understanding the cause of the change in carbon cycling of this region will provide information to enhance the model performance for future climate projection.

Pacific sector of west Antarctic region is experiencing a rapid decrease of ice shelf thickness. This region has recently attracted international research interests to understand the current status and the cause of melting of the ice shelf according to the inflow of CDW (Circumpolar Deep Water). In this sense, it is necessary and timely to perform a multi-prong, interdisciplinary, and multi-year research project to study the Amundsen Sea in the West Antarctic related to the carbon cycling.

As part of this large project, operated by KOPRI, we, at Seoul National University, focus on understanding the POC (particulate organic carbon) cycling in the Amundsen Sea by analysing radiocarbon. As providing information of the age and source, the radiocarbon analyses expected to play an important to role to understand the water circulation and biogeochemical cycling in the Amundsen Sea.

Because of logistical difficulty for access, sediment trap is the only way to obtain year-round sinking particle samples to study biogeochemistry such as biological pump. Multilateral radiocarbon analysis in surface water suspended particles, sediment trap material, and sediment will provide critical information to carbon cycling in the Amundsen sector. Especially the DOC (dissolved organic radiocarbon) radiocarbon contents that we aim to obtain, have not been obtained from this region.

Ⅲ. Contents and Extent of R&D

We aimed to understand the POC cycling by analysing radiocarbon of sinking POC collected

by time-series sediment trap moorings in the Amundsen Sea. We attempted to understand the sources of particulate organic matter and the controlling mechanisms of particle export in association with hydrography and ice cover. Also, temporally and spatially expanded sediment samples by using boxcores and gravity cores, history of the Amundsen Sea Polynya was aimed to be examined. We also aimed to reveal DOC cycling in the Amundsen Sea, especially focusing on its consumption during the polynya opening period. was

During the current year research, we spatially and temporally expanded sinking particle flux and composition data. Also, we reported collection of benthic macro-organisms in sediment traps and potential mechanisms of their transport. The results of these aspect were published in Journal of Marine Systems and Biogeosciences, respectively. We have carried out research to reconstruct the history of sea ice retreat and the change of productivity in surface water based on biomarkers and high resolution of radiocarbon chronology. In addition to these, radiocarbon values of DOC were obtained for the first time in the coastal region of the Antarctic. Our new results will help to understand the carbon cycling on the Amundsen Shelf and in the oceans. The results are scheduled to be published in late January, 2020 in Scientific Reports.

IV. R&D Results

- Sinking Particulate Organic Carbon

  Dr. Dongseon Kim's group at KIOST obtained iogenic compositions and fluxes of sinking particles recovered during the campaign, from three different stations: the sea ice zone, inside the polynya, and in front of the Dotson ice shelf. We analyzed radiocarbon contents of selected samples. This work expanded the spatial and temporal scope of POC export dynamics on the Amundsen Shelf from the previous research published in Deep-Sea Research I (Kim et al., 2015). The new results on contolling mechanisms of particle flux in the Amundsen Sea has been published in *Journal of Marine Systems*.

  In addition, collection of macrobenthic organisms were observed in sediment traps. Plausible source region and transport mechanisms of benthic organisms and the possibility of anchor ice formation, impacts on Antarctic biology were published in Biogeosciences.

- Sedimentary Organic Matter

  Based on a paper on the OC cycling from primary production to sedimentation has been published in Deep-Sea Research II, we tried to examine biological proxies of productivity and sea ice concentration to understand the development of the polynya and the history of the climate on the Amundsen Shelf. The paleoproductivity and paleoenvironment by various metal contents have been studied together with high resolution radiocarbon ages in depth for the cores. History of the ASP formation and sedimentation characteristics were examined from three gravity cores recovered in the shelf break, inside the polynya, and near the Dotson Ice Shelf. Based on the result one PhD thesis was completed.

KOPRI
극지연구소

- Dissloved Organic Carbon

  We treated DOC samples from three stations and obtained the radiocarbon data. This is the first DO^{14}C dataset obtained from the Amundsen Shelf, Antarctica. The results are scheduled to be published in late January, 2020 in Scientific Reports.

V. Application Plans of R&D Results

- Extended dataset of sinking POC collected in the sea ice zone, inside the polynya, and near the ice shelf will help us to understand the overall POC cycling on the Amundsen Shelf.

- High resolution radiocarbon chronology combined with lipid biomarker and metal contents from the gravity core collected in and outside of the ASP, the paleoenvironment, paleoproductivity and surface condition in the Amundsen Sea has been examined. These dataset will help to understand the past physical oceanographic changes and future response to climate change of this region.

- The results of radiocarbon in the DOC in conjunction with the hydrographic data will reveal the water circulation and organic carbon cycling in the Amundsen Sea. This study will contribute to further advance our understanding and future climate model of the organic carbon cycling in the Amundsen Sea.

목 차

요약문 ····· 3

영문요약서 ····· 6

영문목차 ····· 9

목차 ····· 10

그림목차 ····· 11

제1장 서론 ····· 12

1절 연구개발의 목적 및 필요성 ····· 12

2절 연구범위 ····· 13

제2장 국내외 기술개발 현황 ····· 15

제3장 연구개발 수행 내용 및 결과 ····· 16

1절 연구개발 수행 내용 ····· 16

2절 연구 내용 및 결과 ····· 20

제4장 연구개발목표 달성도 및 대외기여도 ····· 31

1절 연구개발목표 ····· 31

2절 연구개발목표의 달성도 ····· 31

제5장 연구개발결과의 활용계획 ····· 32

1절 추가연구의 필요성 ····· 32

2절 타연구에의 응용 ····· 33

제6장 연구개발과정에서 수집한 해외과학기술정보 ····· 34

제7장 참고문헌 ·····

KOPRI 극지연구소

제 1 장 서론

제 1 절 연구개발의 목적 및 필요성

□ 연차별 연구목표

연차	연구 목표	연구 내용	비고
1차년도 (2017)	침강입자유기탄소 시공간적 변동 파악	— 퇴적물 트랩을 이용한 아문젠해 침강입자유기탄소의 시간적, 공간적 변동 파악 — 퇴적물 트랩에 포집된 거대저서동물의 수송기작과 근원지 파악	
	아문젠해의 용존유기탄소 순환 이해	— 방사성탄소를 이용하여 아문젠해 용존유기탄소(DOC)의 생성과 소멸 기작 파악	
2차년도 (2018)	침강입자유기탄소 시공간적 변동 파악	— 침강입자유기물 자료의 시공간적 확장, 해석 — 해빙과 관련된 침강입자유기물 플럭스 조절 요인 파악	
	과거 퇴적환경 추적	— 퇴적물 시료의 바이오마커 분석을 통하여 과거 퇴적환경 변동 복원 가능성 파악	
3차년도 (2019)	과거 퇴적환경 복원	— 퇴적물 시료의 바이오마커 분석을 통하여 과거 퇴적환경 변동 복원 시도	

제 2 절 연구개발의 범위

아문젠해의 현재 탄소순환 과정을 방사성탄소를 이용하여 이해하고 과거 유기탄소 퇴적환경의 변동을 바이오마커 분포를 통하여 이해하고자 한다.

1. 아문젠해 침강입자유기탄소의 시공간적 변동 파악

- 2012/13년도에 획득한 침강입자 시료를 분석, 해석하여 아문젠해 입자유기탄소 순환의 해석을 시공간적으로 확장함
- 2011/12년도에 획득한 해빙역(K1)의 침강입자유기탄소 플럭스와 비교하여 3년에 걸친 아문젠해 해빙역의 입자유기탄소플럭스 변화를 해빙의 농도 등 환경인자의 연변화에 따라 이해함
- 해빙역과 개구부 내부, 닷슨 빙붕 앞에서 침강입자의 플럭스와 조성 비교를 통하여 침강입자플럭스에 대한 빙붕과 해빙의 영향을 이해함

2. 아문젠해 용존유기탄소 순환 이해

- 전단계 연구를 통하여 용존유기탄소의 방사성탄소 동위원소값을 획득하였으며 이 자료는 용존유기탄소의 생성과 소멸에 대한 정보를 제공하고 있음
- 기존에 획득한 시료의 용존유기탄소의 방사성탄소동위원소를 추가로 분석하여 이전 자료를 보강하고 자료를 시공간적으로 확장함

3. 과거 퇴적환경 추적 및 복원

- 중력코어 및 박스코어 퇴적물 시료에서 지방계 바이오마커, 금속, 유기탄소 함량 등 생지화학적 지시자 및 고해상도 방사성탄소동위원소 값을 분석함으로서 아문젠해 유기탄소 순환 해석의 시공간적 범위를 넓힘
- 특히 규조류 등 아문젠해의 우점 일차생산자가 합성할 수 있는 여러 종류 스테롤 분석을 통하여 과거 퇴적환경 변동 복원 가능성을 파악 (그림 1)

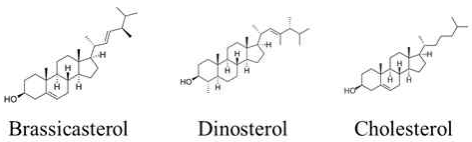

그림 1. 연구에서 분석한 주요 스테롤들의 구조

KOPRI 극지연구소

제 2 장 국내외 기술개발 현황

극지역 연구는 접근이 난이하여 가장 연구되지 않은 해역이기는 하지만 선진국들은 일찍부터 쇄빙선을 보유하고 북극해와 남극해의 해빙해역에 대한 연구를 수행하고 있다. 특히 아문젠해에서 빙하의 빠른 용융이 특징적으로 관측되면서 이 해역에 대한 Amundsen Sea Polynya International Research Expedition(ASPIRE) 등과 같은 대규모 연구 프로젝트가 최근 수행되었다(http://antarcticaspire.org/). 하지만 대부분의 연구들이 물리적, 해양지질학적, 고해양학적 측면에서 중점적으로 이루어져 왔고 여기에 생물학적인 연구가 추가되고 있으나 화학적인 측면에서의 연구는 매우 드물다. 특히 빙붕의 용융 양상과 원인을 파악하기 위한 물리해양학적 연구가 중점적으로 이루어지고 있는데 AUV(Autonomous Underwater Vehicle)를 이용하여 빙붕의 하부를 관측하는 등 첨단 관측 장비를 동원한 연구가 진행되고 있다.

입자유기물 순환의 연중 변화를 연구하기 위한 퇴적물 트랩의 계류는 최근에 시작되었다. 미국의 ASPIRE 팀 역시 아문젠해에서 퇴적물 트랩을 계류하였으나, 주로 기본적인 침강입자 플럭스에 대한 분석과 swimmer와 fecal fellet 분석에 초점을 맞추었으며, 개구부 해역에서 한 해의 시료를 얻은 후, 연속적인 시료의 획득은 진행되지 않고 있다. 현재 극지연구소 팀은 아문젠해역의 해빙역, 개구부, 빙붕 앞에서 2년에 걸친 연속 시료를 얻었으며, 2015년, 2017년 아문젠 캠페인에서는 빙붕 앞에서 부분 시료를 획득하였다.

C-14를 이용한 유기탄소순환 연구는 국내에서는 매우 제한적으로 이루어지고 있으며 특히 남극 해역에서는 적용된 바가 없다. 국내에 C-14을 분석할 수 있는 AMS를 보유하고 있는 연구기관들이 있으나 환경시료는 제한적으로 분석이 가능하다. 주로 미국 우즈홀 해양연구소의 AMS 센터에 CO_2 가스로 치환한 샘플을 의뢰하여 분석하고 있다.

제 3 장 연구개발 수행 내용 및 결과

제 1 절 연구개발 수행 내용

1. 접근 방법

C-14는 반감기가 5730년으로 약 5만년 정도에 이르기까지의 시간을 가지는 현상들을 이해하기에 매우 유용한 도구이다. 특히 탄소는 생명체의 유기물을 구성하는 가장 중요한 원소이기 때문에 생명현상과 관련된 과정들에 대한 연구에 이용될 수 있다. 광합성에 의하여 생산된 유기물은 침강하여 퇴적물로 이동되는데 이들이 가지는 C-14 값은 퇴적유기물의 C-14 값과 크게 차이가 나므로 이 두 기원 유기물에 대한 정보를 제공하고 유기탄소 순환에 대한 실마리를 얻을 수 있다. 또한 해수 중에 녹아 있는 용존무기탄소는 해수 수괴마다 순환의 역사가 다르므로 서로 다른 C-14값을 가지고 있다. 따라서 C-14 은 해수의 혼합, 대기와의 이산화탄소 교환, 용융된 빙붕으로부터의 이산화탄소 공급 등의 기작들을 이해하는데 사용될 수 있다.

2. 실험적 접근 방법

가. 입자유기물(Particulate Organic Matter)의 C-14 측정

유기물 시료는 C-14 분석을 위하여 이산화탄소로 변환시켜야 하며 궁극적으로는 흑연으로 환원시켜 가속질량분석기(Accelerator Mass Spectrometer)로 분석한다. 본 실험실에서는 유기물 시료를 전처리하여 이산화탄소로 변환시킨 후 AMS center에서 C-14을 측정할 수 있도록 준비한다.

- 유기물 시료를 곱게 갈아서 microbalance로 무게를 잰 후 미리 450°C에서 태운 GF/F 필터 위에 놓는다.
- 진한 염산이 들어 있는 데시케이터에 시료를 넣고 약 20시간 가량 염산 증기로 $CaCO_3$를 제거한다(Hedges and Stern, 1984). 이 때 24시간을 넘기지 않도록 조심한다(Komada et al., 2008).
- 깨끗한(미리 세척하여 450°C에서 태운) 트위저로 필터를 잘 접어 석영관에 CuO, Ag needle과 함께 넣고 진공라인에서 염산과 수증기를 제거한다.
- 충분히 수증기와 염산이 제거되면 석영관을 flame-sealing하고 오븐에서 약 850°C로 4시간 이상 태운다.
- 고온에서 유기물 시료는 CO_2와 수증기, 다른 기체로 변환된다.
- 진공라인에서 아이소프로필알콜/드라이아이스 트랩을 통과시켜 수증기를 제거하고 액체질소를 이용하여 CO_2만 한 곳에 모은 후 나머지 기체를 제거한다.

부피를 알고 있는 공간에 포집된 CO_2 기체의 압력을 측정하여 탄소의 양을 계산한 후 1/4인치 파이렉스 튜브에 모아 flame-sealing 한다.

KOPRI 극지연구소

나. 용존유기탄소(Dissolved Organic Carbon)의 C-14 측정

용존유기탄소 시료는 C-14 분석을 위하여 이산화탄소 기체 상태로 포집하여야 하며 궁극적으로는 흑연으로 환원시켜 가속질량분석기(Accelerator Mass Spectrometer)로 분석한다. 본 실험실에서는 용존유기탄소를 이산화탄소 기체로 포집하여 AMS center에서 C-14 를 측정할 수 있도록 전처리 과정을 수행한다(Beaupré et al., 2007).

- 해수는 미리 450°C에서 태운 GF/F 필터를 사용하여 입자를 걸러내고, 곧바로 갈색 유리병에 얼려서 보관한다.
- 얼렸던 해수를 녹인 후, 석영 reactor로 옮겨 담은 후, 시료의 부피를 측정한다.
- 그림 2와 같이 석영 reactor를 진공라인에 연결시킨다.
- 용존무기탄소를 제거하기 위하여, 인산을 넣어 pH를 2~3 정도로 낮춘 후, 질소 기체를 폭기한다.
- 수은 아크 램프의 강한 자외선(1200W, 5시간)을 쬐어 DOC를 이산화탄소 기체로 변환시킨다.
- 이산화탄소 기체는 질소가스와 함께 KIO_3- 트랩을 통과시켜 염산이온을 제거한 뒤, 위의 진공라인들과 같은 원리로 이산화타소 가스를 포집한다.
- 질소 트랩에 포집된 이산화탄소 가스를 부피를 알고 있는 부분(cold finger)으로 다시 옮겨 포집하고 이산화탄소의 압력을 측정하여 탄소량을 정량한다.
- 이산화탄소를 1/4인치 튜브에 모아 flame-sealing 한다.
- 이산화탄소는 우즈홀 해양연구소의 C-14 분석센터에 의뢰하여 방사성탄소를 측정한다.

그림 2. 방사성탄소 분석을 위한 용존유기탄소 추출라인

제 2 절 연구 내용 및 결과

1. 침강입자 유기탄소 시공간적 변동 파악

가. 퇴적물 트랩을 이용한 아문젠해 침강입자유기탄소의 시간적, 공간적 변동 파악

이 부분은 한국해양과학기술원의 김동선 박사 연구팀과의 공동협력으로 이루어 졌으며 김동선 박사의 보고서와 일부 내용이 겹칠 수 있음.

2014년 남극 아문젠해에서 퇴적물트랩 계류를 통하여 채집한 침강입자의 조성과 플럭스를 통하여 아문젠해 침강입자유기탄소의 시공간적 변동을 파악하고자 하였다. 표층의 환경이 서로 다른 3개 정점 (해빙역, 개구부 내부, Dotson 빙붕 앞, 그림 3)에서 침강입자 시료를 분석함으로써 아문젠해에서의 침강입자, 특히 입자유기탄소 플럭스를 조절하는 요인을 표층 해빙과 관련 지어 해석하였다.

세 정점 모두에서 남극의 여름철에 대부분의 입자가 침강하였으며, 아문젠해 전반적으로 규조류가 우점하는 해빙역이 폴리냐 내부와 빙붕 앞쪽에 비해 침강입자 플럭스가 높게 관측되었다. 반면 개구부와 Dotson 빙붕 앞의 침강입자 중에는 비생물학적 (non-biogenic) 입자의 양이 비교적 많았다. 특히 해빙역은 인공위성 관측이 불가능하여 연간 일차생산력을 알 수 없는 해역으로 퇴적물트랩을 통한 유기탄소 플럭스의 연구는 이 해역의 생물학적 펌프 작용을 이해하는데 있어 필수적이다. 본 연구를 통해 현장 관측한 일차생산력이 10배가량 차이가 나는 해빙역과 개구부에서 연간 침강입자의 양은 비슷함을 밝혔고, 추후 남극해의 생물학적 펌프를 고찰할 때 해빙역의 역할이 중요할 수 있음을 시사하였다.

또한 본 연구를 통해 약 3년에 걸친 아문젠해 해빙역에서 입자유기탄소의 플럭스를 측정하였다. 이 값은 연간 차이가 굉장히 크게 나타났는데, 플럭스와 표층해빙농도의 비교를 통하여 해빙의 농도와 더불어 시기가 해빙역의 입자유기탄소 플럭스에 매우 중요한 요인임을 제시하였다(그림 4 & 5). 이 자료들은 2019년 Journal of Marine Systems 저널에 게재하였다.

KOPRI 극지연구소

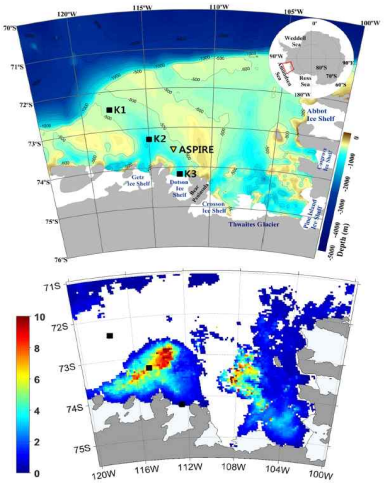

그림 3. 2012/2013 퇴적물 트랩이 계류된 연구정점 (Kim et al., 2019a)

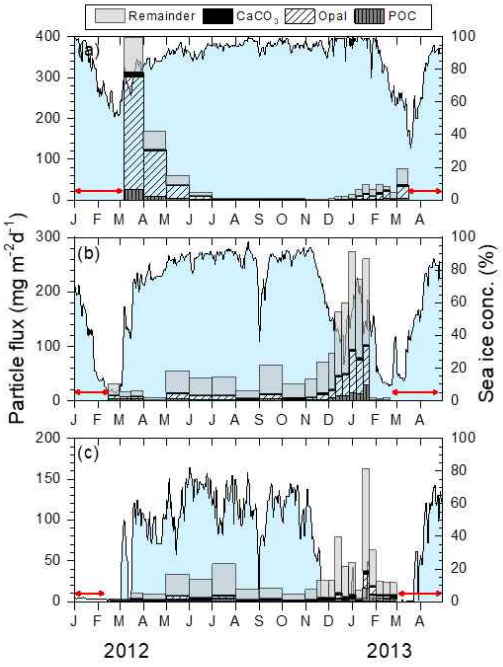

그림 4. 아문젠해 해빙역(a), 개구부 내부(b) 및 Dotson 빙붕 앞(c)에서 퇴적물 트랩으로 획득한 침강입자플럭스와 해빙의 농도 (Kim et al. 2019a)

KOPRI
극지연구소

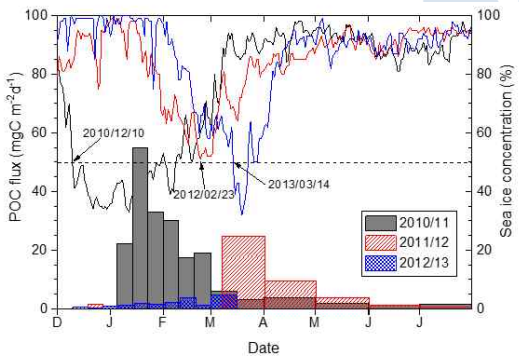

그림 5. 아문젠 해빙역 퇴적물트랩에서의 입자상유기탄소와 해빙 농도의 관계 고찰 (Kim et al. 2019a)

나. 퇴적물 트랩에 포집된 거대저서동물의 수송기작과 근원지 파악

남극 아문젠해에 해저면으로부터 400-700미터 위의 수심에 설치한 퇴적물트랩(정점 K4, 그림 6)에 거대 저서생물(길이가 60cm가 넘는 환형동물과 가리비조개, 성게)이 포집되었다(그림 7). 이러한 거대 저서동물이 퇴적물 트랩에 포집된 현상은 아직까지 보고된 바가 전혀 없으며, 이는 아마도 해빙으로 뒤덮힌 남극이라는 특이한 환경이기에 가능했던 것으로 추정된다.

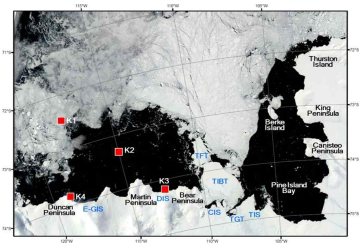

그림 6. 2017/2018 아문젠해역에 계류된 퇴적물 트랩 정점

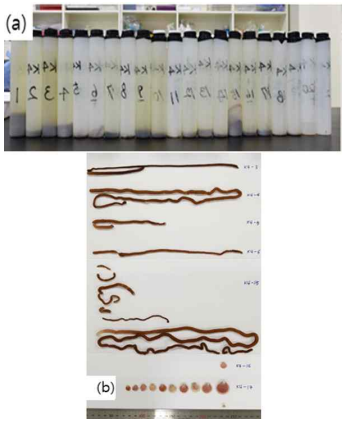

그림 7. 2017/18 크루즈에서 획득한 (a) K4 트랩 시료와 (b) 거대저서동물 분류

본 연구에서는 이들의 운송 기작 및 근원지에 대해 살펴보았다. 생물들이 자발적으로 이동하여 트랩에 포집되었다고 본다면 이는 이들 생물들이 비록 유영능력이 거의 없지만 해류를 이용하는 등 다른 방법을 통하여 장거리 이동이 가능하다는 점은 생물들의 거주지 이동에 대한 중요한 함의를 제공하는 것이다. 이들이 자발적으로 이동한 것이 아니라 다른 물리적인 요인에 의하여 수동적으로 운송된 것일 경우 다음의 경우들을 생각해 볼 수 있음을 제시하였다.

첫 번째로는 연안을 따라 흐르는 강한 해류에 의한 저서생물의 이동인데 퇴적물 트랩에 함께 계류된 저서생물들이 이런 해류에 적응해서 살고 있는 것을 생각하면 확률은 낮아 보인다. 또 다른 주요 요인은 앵커 아이스(해수가 과냉각되면 동물의 표면이나 퇴적물 등 얼음 응결핵으로 작용할 수 있는 표면에 얼음이 형성되는 현상)이다. 얼음 덩어리로 인한 부력이 저서동물들을 표층의 해빙으로 이동시키고 표층 해류에 따라 해빙이 이동함으로써 생물들을 운송시킬 수 있는 기작인데 주로 북극과 겨울철 관측이 가능한 남극의 기지 주변에서는 보고된 바가 있다. 이는 아문젠해에서도 겨울철에 해수의 과냉각이 일어나고 앵커아이스가 형성될 수도 있음을 제시하는 중요한 발견이다.

이 외에도 해빙이 냉각되면서 형성되는 작은 구멍에 플랑크톤이 서식하며 이를 먹이원으로 하는 생물들이 해빙 아래쪽에 하나의 생태계를 이루며 살게 되고, 이들 생물의 유생 또한 이곳에 살다가 트랩으로 떨어졌을 가능성도 있다. 이 저서동물 시료의 길이와 두께를 측정하여

KOPRI 극지연구소

유기탄소량으로 환산한 값은 일차생산으로 공급되는 유기탄소의 약 5배에 달했다. 본 연구에서는 이러한 형태의 유기물 공급이 주로 남반구의 겨울철에 관측되었음을 제시하며, 이 현상이 아문젠 해역, 나아가 남극주변 대륙붕의 저서생태계에 미치는 영향을 고찰하였으며 연구결과는 2019년 Biogeosciences에 게재하였다(그림 8).

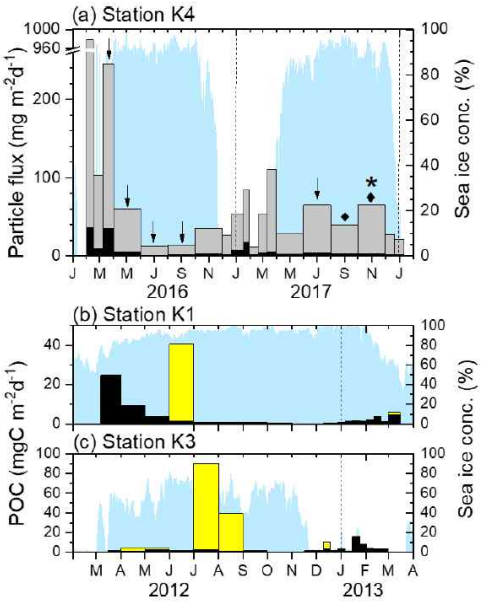

그림 8. 아문젠해 해빙역(K1)과 Dotson 빙붕 앞(K3)에서 퇴적물 트랩으로 획득한 침강입자 중 1mm 이하의 유기탄소 플럭스와 거대저서동물로 인한 유기탄소 플럭스의 비교 (Kim et al. 2019b)

2. 아문젠해의 용존유기탄소 순환 이해
: 방사성탄소를 이용하여 아문젠해 용존유기탄소의 생성과 소멸 기작 파악

용존유기탄소의 추출을 위한 진공라인 설치 및 용존유기탄소 추출법을 확립하고 (그림 9) 2014, 16년도에 획득한 용존유기탄소 시료 중 퇴적물 트랩을 계류하였던 해빙역, 개구부, 그리고 Dotson 빙붕 앞에서 깊이 별 용존유기탄소 추출 및 방사성탄소동위원소 값을 얻었다(그림 10).

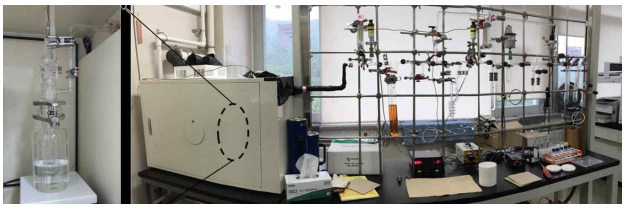

그림 9. 방사성탄소 분석을 위한 용존유기탄소 추출라인

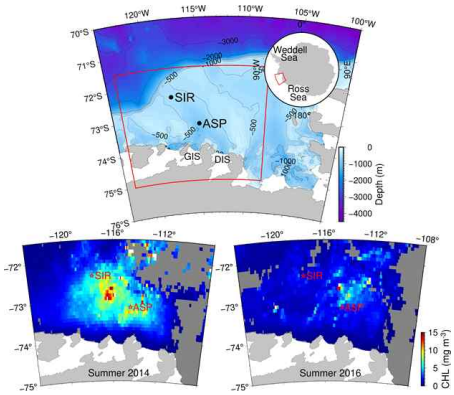

그림 10. 아문젠에서 용존유기탄소 농도와 방사성탄소를 분석한 두 정점을 표시한 그림 (위). 시료 채취 시기인 2014년 여름과 2016년 여름의 표층 클로로필 농도 (아래).

KOPRI 극지연구소

용존유기탄소 농도는 대략 40에서 60 μM의 분포를 보였으며 표층에서 높게 나타났다. 방사성탄소는 아문젠해로 유입되는 CDW 의 값과 유사하게 나타났으나 표층에서 약간 더 높은 값을 보였다(그림 11).

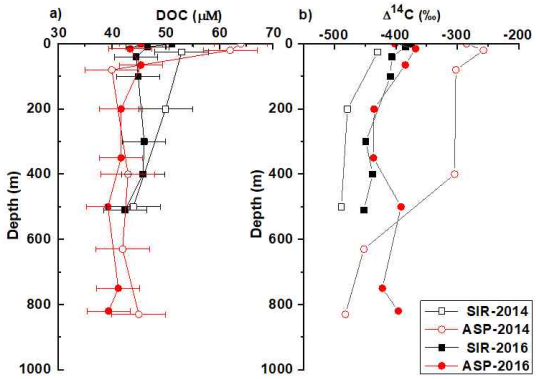

그림 11. 2014년과 2016년의 해빙역과 개구부 정점에서의 용존유기탄소 농도(왼쪽)와 방사성탄소값(오른쪽).

용존유기탄소의 방사성탄소값으로부터 새로 생산된 유기물과 심층수에서 기인하는 난분해성 유기물의 비율을 구해본 결과 표층으로 가면서 난분해성 유기물의 농도가 줄어드는 경향을 관찰하였다(그림 11). 이것은 표층수에서 새로 생산된 용존유기물이 미생물에 의하여 소모되면서 난분해성 유기물이 함께 소모되는 것으로 해석할 수 있다. 이 결과는 Scientific Report에 게재되었다.

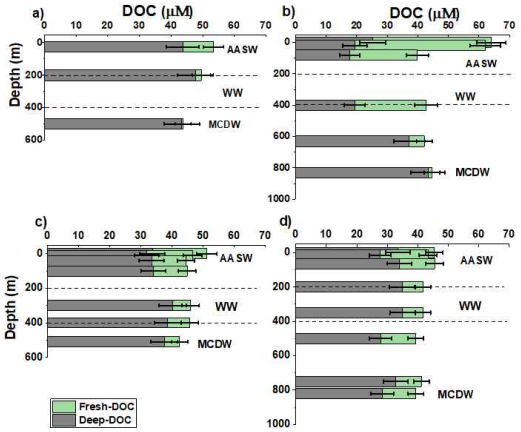

그림 11. 2014년(위)과 2016년(아래) 두 정점에서의 용존유기탄소 중 새로 생산된 부분과 심층에서 기인한 난분해성 유기탄소의 분포.

KOPRI
극지연구소

3. 과거 퇴적환경 추적

: 퇴적물 시료의 바이오마커 분석을 통하여 과거 퇴적환경 변동 복원

2012년 대륙붕단에서부터 Dotson 빙붕 앞까지 골짜기를 따라서 획득한 박스코어 연구 (Kim et al., 2016)를 통해 아문젠해 개구부 내부 정점에서 퇴적 속도의 변화가 나타나는 시기가 있음을 발견하였고, 이를 해빙의 진퇴 및 우점 생물종의 변화와 관련하여 해석하고자 하였다.

이를 위해 극지연구소 이재일 박사 팀에서 박스코어와 같은 시기, 동일 정점(3개 정점)에서 획득한 최장 200 cm깊이의 중력코어 퇴적물 시료의 생지화학적, 지질학적 분석을 진행하였다(그림 12). 이를 통해 홀로세 동안 아문젠 해역 내 유기탄소 퇴적양상을 규명하였으며, 이전까지 이 해역에서의 고기후 연구와는 차별적으로 깊이에 따른 고해상도의 방사성탄소동위원소 값을 얻었다. 중력코어 시료의 방사성탄소동위원소 및 바이오마커 분석은 ETH Zurich의 Tim Eglinton 교수 실험실과 공동으로 진행하였다.

아문젠해 해빙역, 개구부 내부와 닷슨 빙붕 앞에서 획득한 각각의 퇴적물에는 아문젠 해역의 해빙역과 폴리냐가 빙하의 후퇴와 해빙 이후 겪은 서로 다른 표층 환경이 반영되어 나타났다 (그림 13). 빙하의 후퇴 전후로 입자 사이즈 및 대자율은 전반적으로 줄어들었으며 함수량과 유기탄소 함량은 대체로 증가하였다. C/N 비 또한 해양 기원의 값으로 줄어드는 등 공통적인 변화를 보였다. 이러한 변화가 나타난 후 퇴적량은 개구부 내부의 정점들과 대륙 붕단에서 약 10배의 차이를 보여 박스코어 연구를 통해 유추한 퇴적률과 비슷한 경향을 나타내었다.

폴리냐 내부 퇴적물의 다양한 생지화학적 근거(Br/Ti, Ba/Al, 지방계 바이오마커와 규조류 개체 수 등)를 바탕으로 아문젠해 폴리냐의 형성 시기와 과거 환경 변화를 유추하였다 (그림 14). 아문젠해 폴리냐는 해빙 직후 형성되기 시작한 것으로 예상되었다. 대자율과 입자 사이즈, 함수량, 유기탄소 함량 등의 변화와 더불어 생지화학적 근거(Br/Ti, Ba/Al, 지방계 바이오마커와 규조류 개체 수 등) 또한 해빙 직후 크게 변화였다.

특히 9~6 kyr cal BP 무렵 유기탄소 함량이 높고 생산성을 나타내는 지표들은(Br/Ti, Ba/Al) 증가한 반면 다이아톰 밸브 수나 brassicasterol의 값은 증가하지 않고 일정하게 유지되어 이 시기에 우점종의 변화가 있었던 것으로 추정된다 (그림 14). 아문젠해 개구부 형성 시기 관련 논문 작성 중으로 고기후 관련 자료 해석은 극지연구소 이재일 박사 연구팀과 BAS (British Antarctic Survey)의 Claus-Dieter Hillenbrand 박사와 공동으로 진행 중이다.

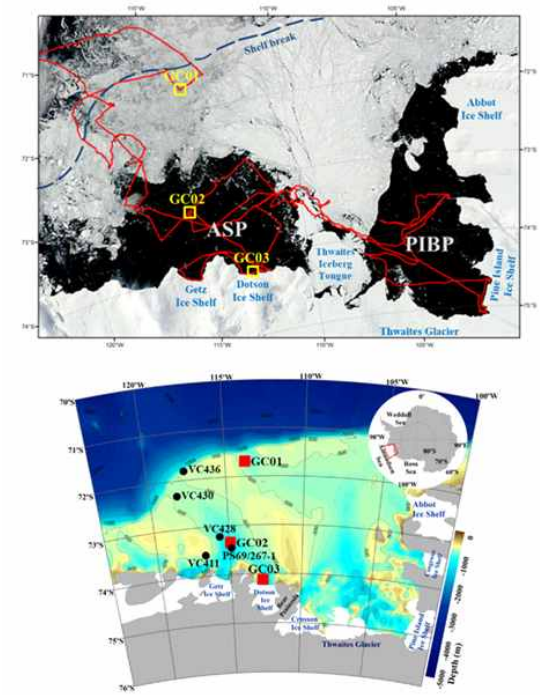

그림 12. 2012년 아라온호의 크루즈 트랙 및 중력코어 시료 획득 정점(상)과 과거 아문젠해에서의 중력코어 연구 정점들 (하)

KOPRI
극지연구소

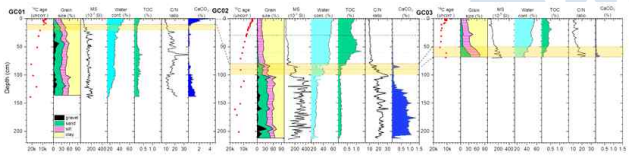

그림 13. 아문젠 해역의 3개 정점에서 획득한 중력코어 시료의 환경 변화에 따른 생지화학적 변화. GC01, GC02, GC03은 각각 대륙붕단, 개구부 내부, Dotson 빙붕 앞에서 획득

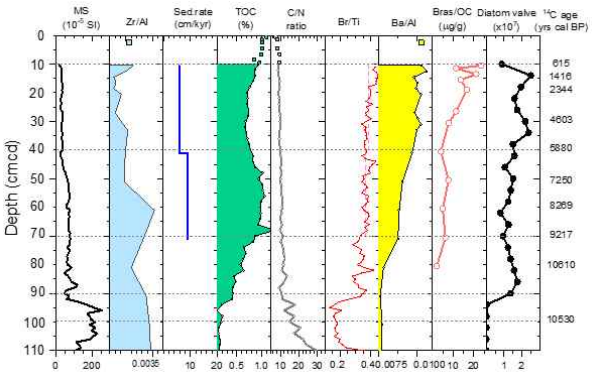

그림 14. 아문젠해 폴리냐에서 획득한 중력코어 시료의 대자율, Zr/Al비, 퇴적률, TOC(%), C/N 비, Br/Ti, Ba/Al 비, Brassicasterol과 다이아톰 밸브 수. 방사성탄소동위원소 연대는 동일정점 박스코어 시료의 표층 값으로 보정함

중력코어의 공간적 한계를 보완하고자 아문젠 폴리냐 내/외부와 닷슨 트러프의 내/외부 다양한 정점에서 박스코어 퇴적물을 획득하였다. 방사성탄소동위원소, 지방계 바이오마커, 입자사이즈 등을 분석함으로써 과거 아문젠 해역의 고환경과 퇴적양상을 보다 고해상도로 추정하였다.

입자성유기탄소 농도와 방사성탄소동위원소 값을 바탕으로 표층에서 일정 깊이까지 균질한 성질을 가진 혼합층(생물학적 교란층)의 깊이를 유추하였으며, 혼합층 하부에서부터 깊이에 따른 C-14의 상대적인 시간 변화율이 일정한 깊이까지의 기울기를 구하고, 이를 통하여 각 정점에서의 퇴적속도(cm/kyr)를 계산하였다. 개구부 내의 퇴적속도가 대륙붕단이나 빙붕 주변에 비해

10배 가량 높았다. 빙붕 앞(정점 D, H)에서 약 9 cm 가량 깊게 나타난 혼합층을 해석하기 위하여 납 동위원소 분석을 진행, 해석 중이다.

퇴적속도와 퇴적물의 함수량, 밀도, 입자성유기탄소 비율을 이용하여 유기탄소 퇴적률 (gC/m^2yr)을 계산하였다. 그 결과, 대륙붕단에서는 0.06-0.08 gC/m^2yr, 개구부 내부에서는 1.5-7.6 gC/m^2yr, 해빙 앞에서는 0.06-2.1 gC/m^2yr 의 유기탄소가 연간 퇴적되었다. 획득한 자료와 일차생산, 침강입자플럭스 값을 이용하여 아문젠 해역전반의 유기탄소 생성 및 보존에 대한 이해를 하고자 한다. 특히 2015/16년 크루즈를 통하여 닷슨 트러프를 따라 아문젠해 대륙붕을 가로지르는 라인에서 획득한 시료는 유기탄소 퇴적률 및 생지화학적 지표들의 수직분포에서 트러프 내부의 시료와는 다른 특징을 보였다 (그림 15). 나아가 IRD(Ice rafted Debris)와 입자 사이즈 등 과거 표층해역에서의 생산성, 해빙의 유무 등을 유추하는 데 이용 가능한 여타 바이오마커를 활용한 연구를 진행 중이다 (그림 16).

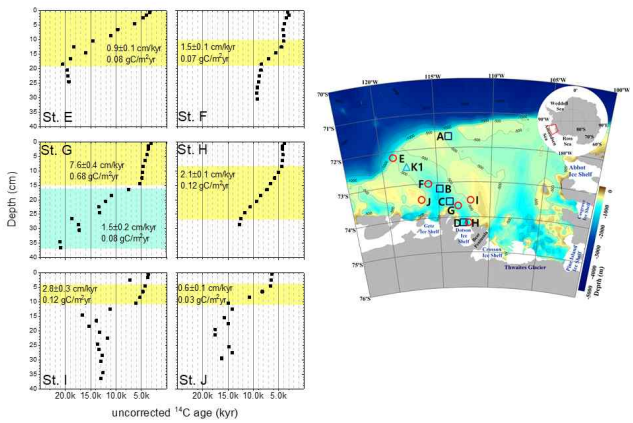

그림 15. 아문젠 해역의 다양한 표층환경과 퇴적환경 하에서 획득한 박스코어 퇴적물시료의 방사성탄소동위원소 나이(좌)와 위치(우)

KOPRI
극지연구소

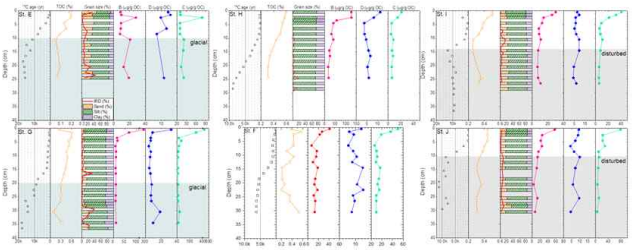

그림 16. 아문젠 해역의 다양한 표층환경과 퇴적환경 하에서 획득한 박스코어 퇴적물시료의 유기탄소 함량, 입자 사이즈, 및 주요 바이오마커 (B: brassicasterol, D: dinosterol, C: Cholesterol)의 수직 분포

제 4장 연구개발목표 달성도 및 대외기여도

제 1 절 연구개발목표의 달성도

년도	성과목표	세부목표	달성 주요 내용	달성도 (%)
1차년도 (2017)	침강입자유기탄소 시공간적 변동 파악	침강입자유기물 자료의 시공간적 확장 및 생지화학 이해	- 퇴적물트랩 시료 해석의 시, 공간적 범위 확장 및 방사성탄소동위원소 분석 완료	100
		퇴적물 트랩에 포집된 거대저서동물의 수송기작과 근원지 파악	- 아문젠 해역으로 ice rafted로 이동되는 입자성 유기물 공급 및 과냉각 현상 관련 문헌조사	100
	아문젠해의 용존유기탄소 순환 이해	방사성탄소를 이용하여 아문젠해 용존유기탄소의 생성과 소멸 기작 파악	- 용존유기탄소의 방사성탄소동위원소 분석결과 제시	100
2차년도 (2018)	침강입자유기탄소 시공간적 변동 파악	침강입자유기물 자료의 시공간적 확장, 해석	- 2017/18 크루즈를 통해 Getz Ice Shelf 앞 정점에서 퇴적물트랩 자료를 획득/분석 진행	100
		해빙과 관련된 침강입자유기물 플럭스 조절 요인 파악	- 해빙과 관련된 침강입자유기물 플럭스 조절 요인 관련 참고문헌 자료조사 진행	100
	과거 퇴적환경 추적	퇴적물 시료의 바이오마커 분석을 통하여 과거 퇴적환경 변동 복원 가능성 파악	- 2017/18 크루즈를 통해 퇴적물시료 자료의 시공간적 확장 - 아문젠해 중력코어 시료 및 박스코어 시료의 방사성탄소 동위원소 분석 완료 - 퇴적물시료의 바이오마커 분석 완료	100
3차년도 (2019)	과거 퇴적환경 복원	퇴적물 시료의 바이오마커 분석을 통하여 과거 퇴적환경 변동 복원 시도	- 해빙역 우점종인 다이아톰의 brassicasterol 및 dinosterol 등 분석완료 - 시/공간적으로 확장한 퇴적물 시료를 통한 고해상도 방사성탄소 연대측정 완료 - 아문젠해역 개구부 형성 역사를 파악	100

KOPRI 극지연구소

제 2 절 관련분야의 기술발전에의 기여도

가. 학술적 파급효과

— 태평양측 남극해의 기후변화에 따른 해수순환 및 탄소순환의 변화에 대한 이해로 이 해역의 대기 중 이산화탄소 흡수 능력 변화에 대한 새로운 이해 가능
— 아문젠 해역에서 용존유기탄소 방사성탄소동위원소 값을 최초로 제시
— 퇴적물 시료에서 과거 표층환경을 추정할 수 있는 다양한 생지화학적 프록시들을 분석, 해석함으로서 극지 해역에서의 생지화학 연구에 기여

나. 경제적 파급효과

— 쇄빙선 아라온호의 적극적 활용으로 효율 증대
— 국제적으로 인정받는 high impact 연구의 수행으로 국가의 과학적 위상 제고

제 5 장 연구개발결과의 활용계획

- 탄소순환양상 변화로 인해 해빙의 계절적인 용융 범위가 넓어짐에 따라 이 해역에서의 일차생산 양상의 변화, 그리고 이러한 변화가 전지구적인 탄소 순환에 미치는 영향에 대한 연구는 지속적이고 광범위한 관찰과 다년간의 연구가 요구된다.

- 본 연구를 통해 획득한 아문젠해 해빙역, 개구부 내부, 빙붕 앞 퇴적물 트랩의 시계열 자료는 미개척지였던 아문젠 해역의 침강입자유기탄소 순환을 중장기적으로 이해하는 데 필수적인 자료를 제공할 것이다.

- 또한 아문젠해 퇴적물 시료에서 구한 표층환경에 따른 퇴적속도와 유기탄소 퇴적률, 표층 해빙 분포의 바이오마커 인덱스등 일차생산을 추정할 수 있는 여러 프록시를 활용하여 아문젠해 폴리냐의 형성 역사를 추적하고 남극의 과거 환경변화 추적자로의 활용 가능성을 타진하려 한다.

- 용존유기탄소 시료의 방사성탄소동위원소 분석 결과를 바탕으로 아문젠해 탄소순환과 해수순환을 해석하는 연구 결과를 발표, 이후 연구들의 가치 있는 자료를 제공하고자 한다. 이 자료는 전세계적으로 매우 희귀하며 특히 전대양의 용존유기탄소 순환에 대한 남극해의 기여와 역할을 이해하는 데 도움을 줄 것이다.

- 아문젠해에서의 탄소순환 양상에 대한 이해는 가까운 미래에 이 해역이 전지구적 탄소순환에 있어서 어떤 역할을 할 것인지를 이해하는 데 실마리를 제공할 것이며, 전지구적 기후모델을 이용한 연구에 주요 자료를 제공할 것이다.

제 6 장 연구개발과정에서 수집한 해외과학기술정보

아문젠해에서 입자유기물 순환의 연중 변화를 연구하기 위한 퇴적물 트랩의 계류는 최근에 시작되었다. 미국의 ASPIRE 팀 역시 아문젠해에서 퇴적물 트랩을 계류하였으나, 주로 기본적인 침강입자 플럭스에 대한 분석과 swimmer와 fecal fellet 분석에 초점을 맞추었으며, 개구부 해역에서 한 해의 시료를 얻은 후, 연속적인 시료의 획득은 진행되지 않고 있어 극지연구소에서 유일하게 연구를 진행해 왔다. 특히 C-14를 이용한 침강입자의 유기탄소순환 연구는 해외에서도 매우 제한적으로 이루어지고 있으며 특히 남극 해역에서는 적용된 바가 없다.

아문젠해에서 빙하의 빠른 용융이 특징적으로 관측되면서 이 해역에 대한 대규모 연구 프로젝트가 수행되었지만 대부분의 연구들이 물리적, 해양지질학적, 고해양학적 측면에서 중점적으로 이루어져 왔다. 특히 아문젠 해역에서는 BAS를 비롯하여 여러 연구팀에서 빙하의 후퇴시기와 최대빙하기 시기 등 고해양학적 측면으로 많은 연구를 진행하였지만 화학적인 측면에서의 연구는 매우 드문 실정이다. 특히 최대빙하기 이후 비교적 최근에 가까운 과거 동안 지방계 바이오마커와 고해상도의 C-14을 이용한 연대측정을 통해 과거 아문젠 해역의 고환경을 파악하고 현재 탄소순환과 연결지어 해석하는 연구는 아문젠해역에서 최초로 시도하였다.

하지만 현재 연구에 사용한 C-14 자료는 모두 POC를 통째로 사용한 값으로, 여러 기원의 유기물이 섞일 수 있는 남극 해역의 특성 상 하버드대학 등에서 시도 중인 열분해를 통한 C-14 측정법이나 ETH Zurich 등에서 측정하는 특정 지방산 중의 C-14 값만을 측정하는 등으로 추후 연구 개발이 가능할 것으로 기대된다. 또한 네덜란드의 NIOZ나 독일의 AWI, 영국의 플리머스 대학 등에서 주로 개발 중인 남극 해역의 해빙 농도 지시자 바이오마커 등도 미래 활용 가능성이 있을 것으로 보인다.

KOPRI
극지연구소

제 7 장 참고문헌

Beaupre, S.R., E.R.M. Druffel, S. Griffin. 2007. A low-blank photochemical extraction system for concentration and isotopic analyses of marine dissolved organic matter. Limnol. Oceanogr-Meth. 5, 174-184.

Hedges, J.L., and J.H. Stern. 1984. Carbon and nitrogen determination of carbonate-containing solids. Limnol. Oceanogr. 29:657-663.

Komada, T., Anderson, M.R., Dorfmeier, C.L., 2008. Carbonate removal from coastal sediments for the determination of organic carbon and its isotopic signatures, δ13C and Δ 14C: comparison of fumigation and direct acidification by hydrochloric acid. Limnol. Oceanogr-Meth. 6, 254-262.

M. Kim, E.J. Yang, D. Kim, J.-H. Jeong, H.J., Kim, J. Park, J. Jung, H.W. Ducklow, S. Lee, J. Hwang. 2019a. Sinking particle flux and composition at three sites of different annual sea ice cover in the Amundsen Sea, Antarctica, Journal of Marine Systems, 192, 42-50.

M. Kim, E.J. Yang, H.-J. Kim, D. Kim, T.-W. Kim, H.S. La, S. Lee, J. Hwang. 2019b. Collection of large benthic invertebrates in sediment traps in the Amundsen Sea, Antarctica, Biogeosciences, 16, 2683-2691.

KOPRI
극지연구소

주 의

1. 이 보고서는 극지연구소 위탁과제 연구결과보고서 입니다.
2. 이 보고서 내용을 발표할 때에는 반드시 극지연구소에서 위탁연구과제로 수행한 연구결과임을 밝혀야 합니다.
3. 국가과학기술 기밀유지에 필요한 내용은 대외적으로 발표 또는 공개하여서는 안됩니다.