

입자 및 용존 탄소의 방사성탄소를 이용한
남극해 탄소 순환 이해

Radiocarbon in DIC, DOC and POC in the Southern Ocean



서울대학교 산학협력단

제 출 문

극지연구소장 귀하

본 보고서를 “서남극해 온난화에 따른 탄소흡수력 변동 및 생태계 반응 연구에 관한 연구(본과제명)” 과제의 위탁연구 “입자 및 용존 탄소의 방사성탄소를 이용한 남극해 탄소 순환 이해에 관한 연구(위탁과제명)” 과제의 최종보고서로 제출합니다.



(본과제) 총괄연구책임자 : 박 지 수

위탁연구기관명 : 서울대학교 산학협력단

위탁연구책임자 : 황 점 식

위탁참여연구원 : 나 태 희

“ : 오 선 민

요 약 문

I. 제 목

입자 및 용존 탄소의 방사성탄소를 이용한 남극해 탄소 순환 이해

II. 연구개발의 목적 및 필요성

남극해는 기후 변화에 민감하게 반응하는 해역으로 전 지구 기후 시스템에서 중요한 역할을 한다. 남극해에서 생성되는 남극저층수는 전 해양에서 가장 무거운 수괴로 전 지구 해양 순환에 중요한 역할을 하며, 남극해 주변에 흐르는 남극순환류는 태평양, 인도양, 대서양을 연결하기 때문에 남극해를 연구하는 일은 대양 사이의 해수 및 물질 순환을 이해하는데 중요하다. 따라서 남극해의 기후 조절력 변화는 전 지구적인 탄소 물질 순환과도 연관이 있어 미래의 기후 예측에 중요한 자료를 제공할 것이다.

서남극해는 빙상과 빙붕의 급격한 감소를 겪고 있으며 그 원인을 이해하고자 하는 연구가 국제적으로 활발히 진행 중이다. 서남극해에 위치한 로스해는 웨델해와 함께 남극저층수를 형성하는 대표적인 해양 중 하나이며 여름철에 개구부가 연안을 따라 넓게 열리는 지역으로 일차 생산성이 높기 때문에, 로스해의 해수 및 용존물질의 순환 연구는 남극해의 탄소 순환을 이해하는 데에 큰 역할을 할 것으로 기대된다.

본 위탁과제는 극지연구소에서 추진하는 서남극해의 탄소흡수력 변동 및 생태계 변화를 알아보는 연구의 일환으로 입자유기탄소 자료와 용존 탄소의 탄소동위원소 추적자를 활용하여 로스해와 남극해의 탄소 순환을 종합적으로 이해하고자 하였다. 남극해 연안에서 방사성탄소 자료는 아문젠해를 제외하면 보고된 바가 없어 희소성이 높다. 탄소동위원소는 용존탄소의 나이와 기원에 대한 정보를 제공하여 로스해 대륙붕 수괴의 분포, 물질 순환 등에 대한 핵심적인 정보를 제공할 것으로 사료된다.

III. 연구개발의 내용 및 범위

본 위탁과제 연구에서는 남극순환심층수를 형성하는 로스해 대륙붕에서 해수 그리고 용존물질의 순환에 대해 알아보고자 용존유/무기 탄소 내의 방사성탄소 및 안정탄소동위원소를 분석하였고, 나아가 남극해의 입자유기탄소 자료를 취합하여 전 해양의 탄소 순환에서 남극해의 역할을 전반적으로 이해하고자 하였다. 용존무기탄소 내 방사성탄소 분석을 통해 로스해 대륙붕단부터 빙붕 앞쪽의 연안까지 수괴의 분포와 해수 순환 양상을 파악하고자 하였고, 광합성으로

대기에서 표층으로 흡수되는 이산화탄소의 거동을 이해하고자 하였다. 용존유기탄소 내 방사성 탄소 분석을 통해 로스해 대륙붕에서의 용존유기탄소의 기원과 생성 및 소모 기작에 대해 알아보고, 남극해가 전 대양의 용존유기물 순환에 어떤 역할을 하는지 알아보하고자 하였다. 나아가 남극해 약 50개의 정점에서 계류된 퇴적물 트랩 자료를 취합하여 보고하고, 다각적 분석을 통해 남극해의 침강입자 플럭스를 조절하는 요인을 밝히고자 하였다.

IV. 연구개발결과

- 남극해 침강입자유기물 자료 취합

남극해의 약 50개 정점에서 퇴적물 트랩에서 얻은 침강입자플럭스 및 입자유기탄소 플럭스 자료를 취합하였고, 이를 통하여 침강입자 플럭스를 조절하는 요인을 알아보하고자 하였다. 입자유기탄소 플럭스는 해역의 연간 해빙 농도와 밀접한 연관성이 있을 것으로 추정되며, 마틴 커브를 이용한 입자유기탄소 플럭스 보정을 통해 취합된 자료를 종합적으로 분석하였다. 현재 남극해 침강입자 플럭스 조절 요인에 대한 종합적인 논문을 작성 중이다.

- 용존무기탄소 분석

로스해 Little America Basin의 용존무기탄소 내 방사성탄소 및 안정탄소동위원소 결과를 통해 대륙붕 내의 수괴 분포와 해수 유동 특성을 파악하였다. 방사성탄소 분포는 대륙붕단부터 빙붕부근의 정점까지 500m 이내에서 수직적으로 균일한 분포를 보였는데 이는 베이슨내의 해수가 수직적으로 빠른 속도로 혼합됨을 의미한다. 대륙붕단 정점의 심층에는 환남극심층수(Circumpolar Deep Water)의 전형적인 값이 관찰되었으며, 대륙붕 내부에서는 이보다 높은 값이 수직적으로 균일하게 분포하여 CDW의 대륙붕으로의 유입은 제한적인 것으로 파악된다. 대륙붕의 저층을 통해 환남극심층수가 유입되는 인근 해역인 아문젠해와는 상반되는 결과이다.

- 용존유기탄소 분석

로스해 Little America Basin의 용존유기탄소 내 방사성탄소 및 안정탄소동위원소 결과를 통해 대륙붕 내의 용존유기탄소의 기원에 대해 알아보고 생성 및 소모 기작을 밝히고자 하였다. 남극해에서의 용존유기탄소 내 방사성탄소 자료는 희귀하며 본 결과는 로스해에서 최초로 얻은 자료이다. 로스해 대륙붕의 용존유기탄소 농도는 기존에 남극해에서 보고된 값과 유사하였으나, 방사성탄소 분석 결과 연령이 아주 오래되었으며 일반적인 해양의 분포와는 다르게 표층에서 더 낮은 값이 나타나는 역전이 관측되어, 표층에 오래된 연령의 유기탄소 유입이 있을 것으로 추정된다. 로스해 대륙붕의 역전된 방사성탄소 수직 분포는 이제까지 보고된 바가 없는 특이한 현상이다. 현재 남극 연안해인 로스해에서의 용존유기탄소 순환과 용존유기탄소의 기원 및 소모에 관한 논문을 작성 중이다.

V. 연구개발결과의 활용계획

남극해 침강입자 및 입자유기탄소 플럭스 자료는 남극해의 생물학적 탄소 펌프 능력에 대한 정보를 제공하고 이를 조절하는 요인에 대한 고찰은 기후 변화에 따른 남극 해빙역의 탄소 흡수력 변동에 대한 실마리를 제공할 것이다.

로스해 Little America Basin에서 획득한 해수 내의 용존유/무기탄소 내 탄소동위원소 분석을 통해 로스해 대륙붕 내의 수괴 및 용존물질의 거동, 그리고 생물학적 펌프에 대한 전반적인 이해를 높일 수 있게 되었다. 용존무기탄소의 탄소동위원소 결과는 로스해 대륙붕의 물리해양학적 연구를 뒷받침하는 자료가 될 것이며, 개구부에서 광합성을 통해 대기로부터 유입되는 이산화탄소의 흡수력 정도를 진단하는 자료로 활용될 수 있다. 또한 용존유기탄소의 동위원소 결과는 남극 연안해의 용존유기탄소의 기원에 대한 정보를 제공하여 대양의 용존유기물 순환에서 남극해의 역할과 오래된 난제인 용존유기탄소의 생성 및 소모 기작에 대한 중요한 단서를 제공할 것이다.



S U M M A R Y

(영 문 요 약 문)

I. Title

Radiocarbon in DIC, DOC and POC in the Southern Ocean

II. Purpose and Necessity of R&D

The Southern Ocean plays an important role in the Earth's climate system. It is greatly affected by the ongoing climate change. Antarctic Bottom Water(AABW), one of the dominant driving forces of global overturning circulation, is formed in the Southern Ocean and Antarctic Circumpolar Current(ACC) flowing clockwise around Antarctica connects three major ocean basins. Thus, studying the Southern ocean is important in understanding global carbon cycle and ocean circulation.

West Antarctic region is experiencing a rapid decrease of ice shelf and sea ice. The Ross Sea is one of the regions where AABW is formed and high primary production is observed in the large coastal polynya during the austral summer. Thus, understanding the water circulation and carbon cycle in the Ross Sea is of global importance.

As part of a project conducted by KOPRI, we attempted to comprehensively understand the carbon cycle of the Ross Sea and the Southern Ocean, mainly utilizing dual carbon isotopes. Radiocarbon data from the coast of Southern Ocean are very limited, although they could provide key pieces of information on the age and origin of dissolved carbon, distribution of carbon, and water circulation in the Southern Ocean.

III. Contents and Extent of R&D

We analyzed carbon isotopes in the dissolved organic and inorganic carbon to investigate the water mass and organic matter circulation in the Ross Sea continental shelf. Also, we compiled literature data of sediment trap studies to understand the role of the Southern Ocean in the global carbon cycle. With the help of dissolved inorganic radiocarbon tracer, we aimed to understand the water circulation and behavior of carbon dioxide absorbed from the atmosphere to the surface layer through photosynthesis in the Ross Sea continental shelf. We also investigated the origin, formation and consumption of DOC in the Ross Sea shelf area to study the role of the Southern Ocean in the global dissolved organic carbon cycle, using radio carbon and stable carbon isotopes.

IV. R&D Results

- Particulate Organic Carbon

We compiled sediment trap data from 50 stations in the Southern ocean to investigate the controlling mechanisms of sinking particle and POC fluxes. The POC data calibrated with martin curve model equation allow us to conduct the intercomparison study of the trap data. We found that POC flux is mainly related to annual sea ice extent. We are writing a synthesis paper based on our analysis results currently.

- Dissolved Inorganic Carbon

We studied the distribution of water mass and feature of water circulation in the Little America Basin, Ross Sea continental shelf, with carbon isotope ratios of DIC. The vertical distribution of radiocarbon in the continental shelf area fell within the relatively narrow range. Because of high primary productivity within the polynya in summer, higher radiocarbon content is expected in the surface water than in the subsurface layer. Thus, vertically uniform radiocarbon distribution implies rapid vertical mixing. Also, higher values on the shelf than off shelf suggests limited inflow of CDW onto the shelf, as also shown by T-S distributions.

- Dissolved Organic Carbon

We aimed to study the origin, formation and consumption of DOC within the Ross Sea continental shelf, using the carbon isotopes of DOC. We obtained radiocarbon data in DOC in the Ross Sea for the first time. The concentration of DOC in the Ross Sea continental shelf was not much different from the previous reported value, but the radiocarbon age was oldest observed so far in the open ocean. Also, vertical distribution of radiocarbon content was in contrast to what is typically observed in the open ocean. This implies sources of aged DOC in the surface water. We are writing a paper based on our findings..

V. Application Plans of R&D Results

Sinking particle and particulate organic carbon flux data of the Southern Ocean will provide the information on the efficiency of biological carbon pump in the Southern Ocean. Our analysis will provide a clue to the future change of particulate carbon cycle in the Southern Ocean.

Dissolved inorganic radiocarbon data will be used together with the physical properties distribution to diagnose the efficiency of the carbon dioxide absorption from the atmosphere during the polynya opening season. Additionally, dissolved organic carbon isotope tracers will provide information on the origin of the DOC in the Southern Ocean, provide important clues to the role of the Antarctic Ocean in the ocean's dissolved organic circulation and its old challenges: the formation and consumption of dissolved organic carbon.



목 차

제 1 장 서론.....	1
1 절 연구개발의 목적 및 필요성.....	1
2 절 연구범위.....	2
제 2 장 국내외 기술개발 현황.....	5
제 3 장 연구개발 수행 내용 및 결과.....	6
1 절 연구개발 수행 내용.....	6
2 절 연구 내용 및 결과.....	10
제 4 장 연구개발목표 달성도 및 대외기여도.....	21
1 절 연구개발목표.....	21
2 절 연구개발목표의 달성도.....	22
제 5 장 연구개발결과의 활용계획.....	23
1 절 추가연구의 필요성.....	23
2 절 타연구에의 응용.....	23
제 6 장 연구개발과정에서 수집한 해외과학기술정보	24
제 7 장 참고문헌.....	25

제 1 장 서론

제 1 절 연구개발의 목적 및 필요성

□ 연차별 연구목표

연차	연구 목표	연구 내용	비고
1차년도 (2020)	남극 연안해 탄소 펌프와 조절 요인 파악	<ul style="list-style-type: none"> — 기존 확보된 남극 연안해 시료 분석 — 문헌조사를 통한 남극해 탄소펌프 조절 요인 파악 	
2차년도 (2021)	남극해 용존 유기 및 무기탄소 순환 이해	<ul style="list-style-type: none"> — 남극 순환심층수 내 용존무기탄소의 방사성탄소의 공간적 변동 파악 	
		<ul style="list-style-type: none"> — 용존유기탄소의 대양 순환에 있어서 남극 순환심층수의 역할 규명 	
3차년도 (2022)	남극해 탄소순환 이해	<ul style="list-style-type: none"> — Little America Basin의 해수 및 용존물질의 유동 특성 파악 	
		<ul style="list-style-type: none"> — 남극해의 용존유기탄소 내 동위원소를 이용하여 남극해 탄소순환 이해 	

극지연구소

제 2 절 연구개발의 범위

1. 남극 연안해 탄소 펌프와 조절 요인 파악

- ▷ 퇴적물 트랩은 여름철 외에는 접근이 어려운 남극해에서 침강입자 및 입자유기탄소의 시계열 시료를 얻을 수 있는 유일한 수단으로 남극해의 생물학적 탄소 펌프 능력을 이해하는데 중요한 자료를 제공한다(Kim, 2021).
- ▷ 남극해의 퇴적물 트랩 연구는 1980년대부터 꾸준히 진행되어왔고, 남극반도의 LTER(Long Term Ecological Research) 정점(그림 1)을 비롯하여 현재 약 50개 정점에서 연구가 진행되었다.
- ▷ 남극해에서 침강입자 및 입자유기탄소 플럭스의 변동성을 조절하는 요인을 파악하는 것은 기후 변화에 따른 남극해의 탄소 흡수력 변화에 대한 중요한 정보를 제공할 것이다.

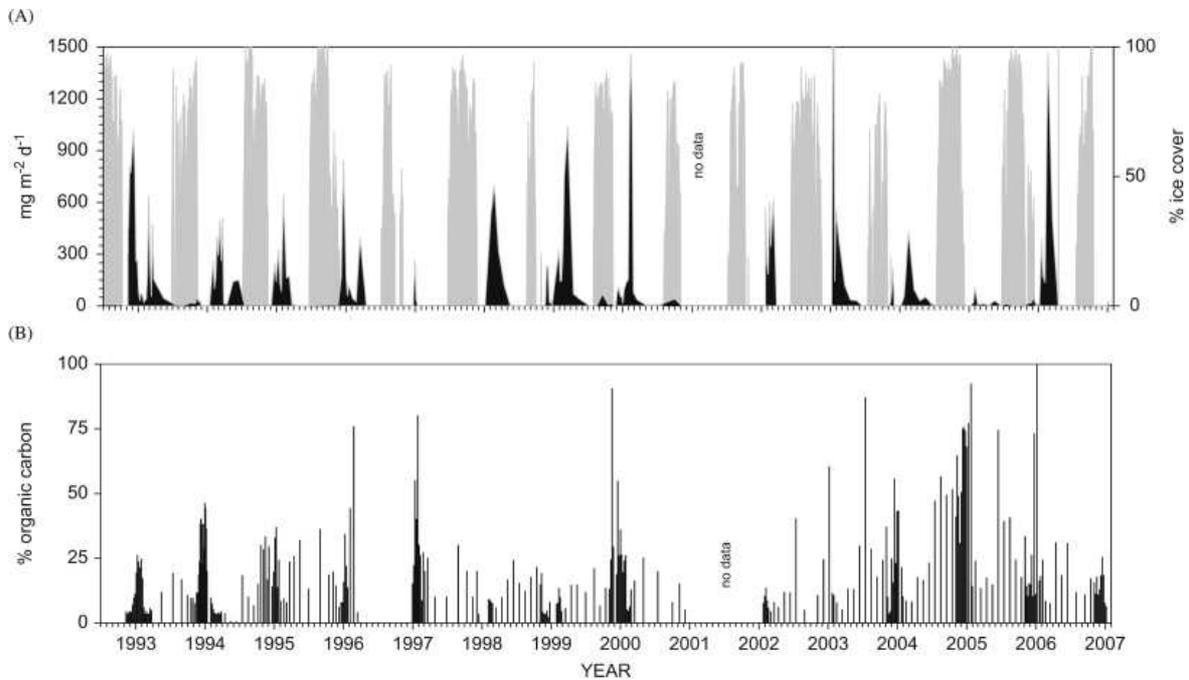


그림 1 남극 반도 LTER 정점에 계류된 침강입자(상), 입자유기탄소(하) 플럭스 자료

2. 남극해 용존 유기 및 무기탄소 순환 이해

- ▶ 남극해 용존 유기 및 무기탄소의 물질 순환은 다른 대양과 밀접한 관계를 가지고 있어, 남극해의 기후변화 조절력 변화는 남극해 뿐 아니라 전 지구적인 탄소 물질 순환에 큰 영향 미칠 것으로 예상된다(그림 2).

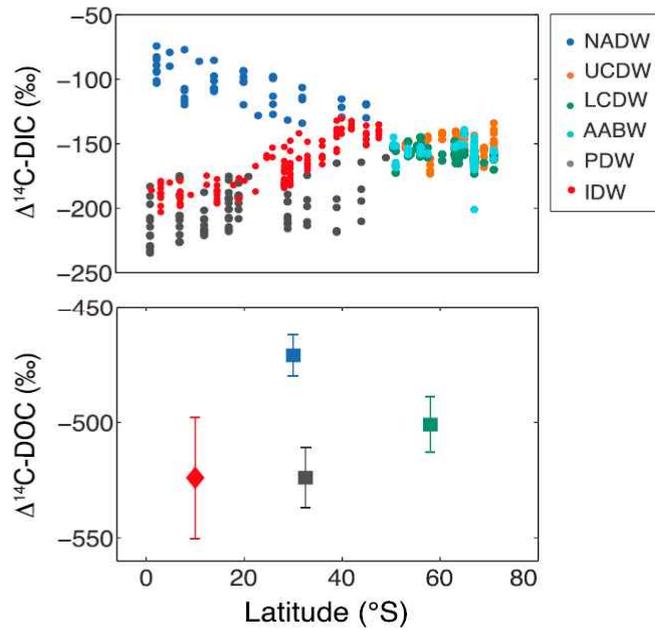


그림 2 남극해 위도에 따른 용존무기탄소와 용존유기탄소 내 방사성탄소 함량 분포 (Bercovici and Hansel, 2016)

- ▶ 용존무기탄소 내의 방사성탄소 동위원소 값을 획득하였으며, 이 자료는 대륙붕 내의 수괴 분포 및 거동에 대한 정보를 제공할 것이다.
- ▶ 참고문헌 조사를 통해 남극해의 용존유기탄소 분포를 이해하고 대양의 용존물질 순환에서 남극해의 역할에 대하여 고찰하였다.

3. 남극해의 탄소 순환 이해

- ▷ 남극대륙 주위를 돌고 있는 남극순환류는 태평양, 인도양, 대서양을 연결하며 이들 대양사이의 해수 순환에 중요한 역할을 담당하고 있으며, 깊은 수심까지 영향을 미쳐 남극해 전체 물질 순환의 주요한 변동 요인이다(그림 3).
- ▷ 남극 연안해는 용존유기탄소, 특히 남극순환 심층수에 존재하는 난분해성 용존유기탄소가 소모되고 다량의 신선한 용존유기탄소가 공급되는ダイナ미한 해역이다 (Ling et al., 2020).
- ▷ 용존유기탄소의 방사성탄소 동위원소비는 측정이 매우 까다로운 항목이나 본 연구실에서는 방사성탄소 측정을 위한 용존유기탄소 추출 장치를 갖추고 자료를 생산하기 시작하였다.

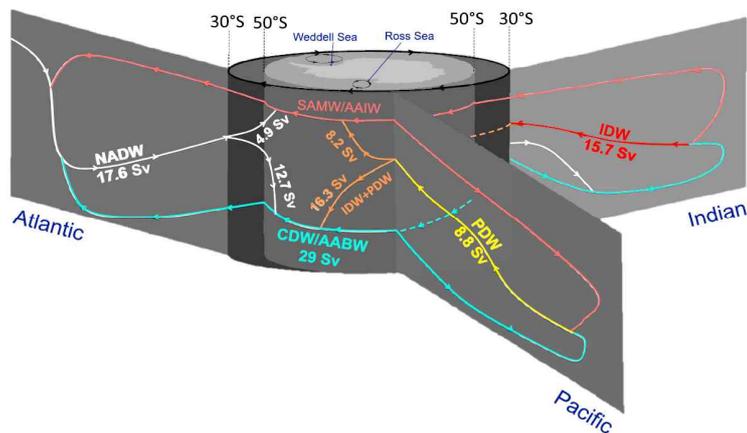


그림 3 남극해와 대서양/인도양/태평양의 심층 순환 모식도
(Bercovici and Hansel, 2016)

- ▷ 남극순환류(남극순환심층수) 내 용존무기탄소의 방사성탄소 연령 분포 특성과 변동을 이해하기 위해 용존무기탄소에서 방사성탄소동위원소 값들을 측정하여 남극해의 용존무기탄소 방사성탄소동위원소 값을 제시하고, 물리데이터와 함께 남극해 해수 순환 양상을 해석하였다.
- ▷ 용존유기탄소의 방사성탄소 동위원소 분석을 통하여 용존유기탄소의 생성과 소모 등 대양 순환에 있어서 남극순환류(남극순환심층수)의 역할을 규명하였다.
- ▷ 남극 연안해와 남극해에서의 탄소펌프가 전 대양의 용존유기물 순환에 미치는 영향을 이해하고자 하였다.

제 2 장 국내외 기술개발 현황

극지 해역 연구는 접근이 어려워 가장 연구되지 않은 해역이기는 하지만 선진국들은 일찍부터 쇄빙선을 보유하고 북극해와 남극해의 해빙역에 대한 연구를 수행하고 있다. 미국과 뉴질랜드는 1950년대에 로스섬에 기지를 구축하여 연구를 주도하고 있으며, 이탈리아 또한 지난 35년간 꾸준히 해양학적 연구를 수행해왔다. 대부분의 연구는 해수 순환, 해양조류 및 플랑크톤, 저서 생태계, 일차생산력 등 물리, 생물학적 연구가 주를 이루었으며, 화학적 연구의 경우 용존탄소를 중심으로 진행되기도 하였으나 남극해 연안에서의 자료는 드물었다. 국내에서는 극지연구소의 주도하에 장보고 과학 기지 설립 이후인 2013년부터 로스해 연구를 수행하고 있으며 생물, 지질학적 연구와 더불어 용존유기탄소, 영양염, 탄산염계 시스템 등 화학 해양학적 자료를 취득하고 있다.

남극해에서의 퇴적물 트랩은 1980년대를 시작으로 약 50개 정점에서 장기, 단기적으로 계류되어 왔으며 여름철을 제외하면 접근이 어려운 남극해에서 탄소 순환을 이해하는데 중요한 정보를 제공한다. 대표적인 정점에는 남극 반도의 LTER 정점이 있으며 1992년부터 현재까지 꾸준히 계류하여 남극해 생물학적 펌프의 장기변동성에 대한 연구를 진행중에 있다. 극지연구소에서도 아문젠해에서 2013년도부터 2년에 걸쳐 침강입자의 시계열 자료를 얻었으며, 2021년도에는 로스해 대륙붕단 부근에 퇴적물 트랩을 계류하여 2023년도에 회수를 계획하고 있다.

방사성탄소를 이용한 용존탄소순환 연구는 국내에서는 매우 제한적으로 이루어지고 남극해 연안에서 아문젠해에서 보고된 자료가 유일하다. 국내에 방사성탄소를 분석할 수 있는 가속질량분석기(AMS)를 보유하고 있는 연구기관들이 있으나 환경시료는 제한적으로 분석이 가능하다. 주로 미국 우즈홀 해양연구소의 AMS 센터에 이산화탄소 가스로 치환한 샘플을 의뢰하여 분석하고 있다.

제 3 장 연구개발 수행 내용 및 결과

제 1 절 연구개발 수행 내용

1. 접근 방법

방사성탄소는 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. 용존유기탄소의 방사성탄소 연령은 수천년에 이르며 그 기원과 순환 역사에 따라 방사성탄소 값이 다르다. 용존무기탄소 또한 해수 수괴마다 순환의 역사가 다르므로 서로 다른 방사성탄소 값을 가지고 있다. 따라서 방사성탄소는 유기탄소의 거동, 해수의 혼합, 대기와의 이산화탄소 교환, 용융된 빙붕으로부터의 이산화탄소 공급 등의 기작들을 이해하는데 이용될 수 있다.

2. 시료 채취

2020년 12월 쇄빙선 아라온호 조사를 통해 남극 로스해 동부에 위치하는 Little America Basin의 대륙붕단 바깥쪽부터 빙붕 부근까지 6개의 정점, 10개의 수심에서 용존유기탄소와 용존무기탄소 내 방사성탄소를 측정하기 위한 시료 총 120개를 얻었다(그림 4, 표 1). 용존유기탄소 시료의 경우 200m 이내의 수심에서는 GF/F(142 mm, Whatman, 0.7 μ m) 필터를 이용해 여과하였고, 그 외의 샘플은 채수 후 바로 냉동 보관하였다. 용존무기탄소 시료는 Dickson et al. (2007)의 방법으로 전처리한 후 상온에 보관하여 연구실로 가져와 분석하였다.

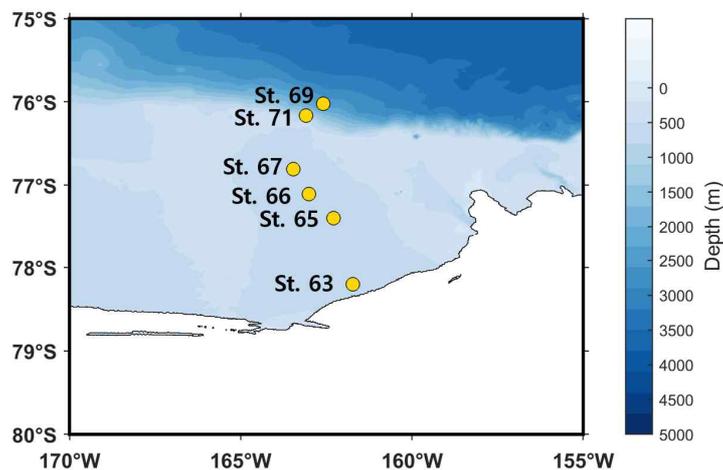


그림 4 로스해 Little America Basin의 정점도

표 1 로스해 Little America Basin의 정점 정보

정점	위도(S)	경도(W)	수심(m)
St. 69	67.02°	163.58°	2247
St. 71	76.17°	163.10°	986
St. 67	76.81°	163.46°	575
St. 66	77.11°	163.01°	614
St. 65	77.40°	162.29°	646
St. 63	78.20°	161.72°	605



3. 실험 방법

가. 용존유기탄소(Dissolved Organic Carbon)의 방사성탄소 측정

용존유기탄소 시료는 방사성탄소 분석을 위하여 이산화탄소 기체 상태로 포집하여야 하며 궁극적으로는 흑연으로 환원시켜 가속질량분석기(Accelerator Mass Spectrometer)로 분석한다. 본 실험실에서는 용존유기탄소를 이산화탄소 기체로 포집하여 AMS 센터에서 방사성탄소 동위원소비를 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 진공 라인들과 같은 원리로 이산화탄소 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 AMS 센터에 의뢰하여 방사성탄소를 측정한다.



그림 5 방사성탄소 분석을 위한 용존유기탄소 추출라인

나. 용존무기탄소(Dissolved Inorganic Carbon)의 방사성탄소 측정

용존무기탄소 내 방사성탄소 분석을 위해서는 용존무기탄소를 진공라인 시스템을 이용하여 이산화탄소 기체 상태로 포집하여야 한다. 본 실험에서는 위의 진공 라인과 마찬가지로 용존무기탄소를 이산화탄소 기체로 포집하여 AMS 센터에서 방사성탄소 동위원소비를 측정할 수 있도록 전처리 과정을 수행한다(McNichol et al., 1994).

- ▷ 질소로 가득찬 atmos bag 안에서 500mL의 해수 샘플 중 150mL를 분취하여 샘플 바틀에 담고 ‘ㄱ’자 관에 인산을 넣어 샘플 바틀, 버블러, 인산관을 그림 6과 같이 조립한다
- ▷ 조립한 유리 기구를 진공라인에 연결시킨다.
- ▷ 진공상태의 유리 라인에 질소를 주입하여 압력을 ~ 830 torr 까지 높여준 후 샘플에 인산을 넣어 pH를 2 ~ 3으로 낮춘다.
- ▷ 라인과 연결된 펌프를 이용해 질소 기체를 10분간 순환시켜 액체질소 트랩에 이산화탄소 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 AMS 센터에 의뢰하여 방사성탄소를 측정한다.



그림 6 방사성탄소 분석을 위한 용존무기탄소 추출 라인

제 2 절 연구 내용 및 결과

1. 남극해 연안해 탄소펌프와 조절 요인 파악

가. 기존 확보된 남극 연안해 시료 분석

아문젠해 해빙역과 개구부에서 수직적인 용존유기탄소 농도 및 방사성탄소 동위원소비 값을 얻었다. 개구부 표층에서 새로 생산된 유기물 유입에 의해 방사성탄소 동위원소비 값이 높았으며 2014년, 2016년 개구부의 같은 정점에서 측정된 용존유기탄소의 방사성탄소 값이 다르게 나타나, 아문젠해에서의 용존유기탄소 순환이 빠르게 일어난다는 것을 짐작할 수 있었다. 새로 생산된 유기물과 심층수에서 기인하는 난분해성 유기물의 비율을 구해본 결과 표층으로 가면서 난분해성 유기물의 농도가 줄어드는 경향을 관찰하였다(그림 9). 이것은 표층수에서 새로 생산된 용존유기물이 미생물에 의하여 소모되면서 난분해성 유기물이 함께 소모되는 것으로 해석할 수 있다. 이를 통해 표층으로 새로 생성된 유기물 유입이 많은 지역은 전 해양 용존유기탄소 순환에 중요한 역할을 할 수 있다는 것을 의미한다. 이 결과는 Scientific Report에 게재되었다(Ling et al., 2020).

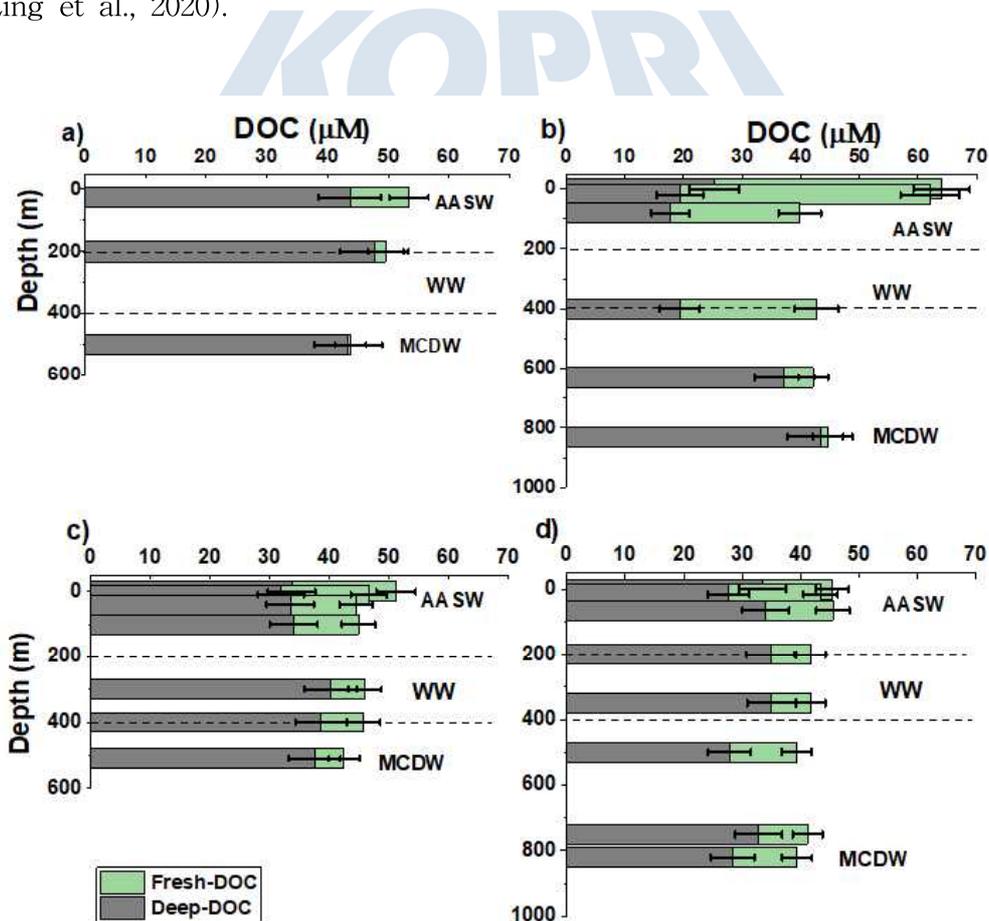


그림 9 2014년(위)과 2016년(아래) 두 정점에서의 용존유기탄소 중 새로 생산된 부분과 심층에서 기인한 난분해성 유기탄소의 분포.

나. 문헌조사를 통한 남극해 탄소펌프 조절 요인 파악

남극해에서의 퇴적물 트랩 연구는 1983년 남극반도의 킹조지섬(Wefer et al., 1991) 정점을 시작으로 꾸준히 진행되어왔으며 JGOFS와 PANGEA 등의 웹사이트, 그리고 과거 문헌을 참고하여 남극해의 약 50개 정점의 퇴적물 트랩 자료를 취합하였다. Garrity et al., 2005은 남극해의 연간 입자유기탄소 플럭스와 연간 해빙 농도의 상관관계를 보았을 때 연간 해빙 농도가 9 ~ 67%일 때 입자유기탄소 플럭스와 양의 상관관계를 가지며, 그 외의 범위에서 오히려 해빙의 농도가 높아짐에 따라 입자유기탄소 플럭스가 낮아진다고 보고하였다(그림 10). Ducklow et al. (2008) 또한 서남극빙상에서 1992년부터 2006년까지 장기간 계류한 트랩 결과를 통해 해빙이 후퇴하기 시작하는 11월부터 3월까지 침강입자플럭스가 증가하는 주기적인 변화를 보인다는 결과를 보고한 바 있어 남극해에서 해빙의 용융과 입자유기탄소 농도는 밀접한 연관성이 있을 것으로 사료된다. 취합한 남극해 침강입자플럭스 자료 중 400-500m의 트랩 자료만 모아 남극의 해빙 농도와 비교했을 때 연간 해빙 농도가 67% 부근인 곳에서 최대값을 보이고 그 이하인 곳에서 양의 상관관계를 나타내는 양상은, Garrity et al., 2005가 보고한 연간 해빙의 면적과 입자유기탄소 플럭스와 관계의 경향성과 유사하다(그림 11). 퇴적물 트랩의 경우 다양한 수심에 계류된 자료가 있기 때문에 다량의 자료의 취합 및 비교를 위해서는 한 수심으로 값을 보정하는 작업이 필요하다(수식 1).

$$F_z = F_{z_0} \left(\frac{z}{z_0} \right)^{-b} \quad (1)$$

마틴 커브로 보정한 입자유기탄소 플럭스 자료를 이용하여 해빙 농도, 일차생산성, 생물플랑크톤의 종조성 등 침강입자 플럭스 조절 요인이 무엇인지 파악하고 북극해 캐나다분지를 연구한 Honjo (2010) 논문의 그림(그림 12)과 같이 남극해 해빙역에서의 탄소펌프 이해 및 모식도를 제시하는 남극 침강입자유기탄소 종합 논문을 작성하고 있다.

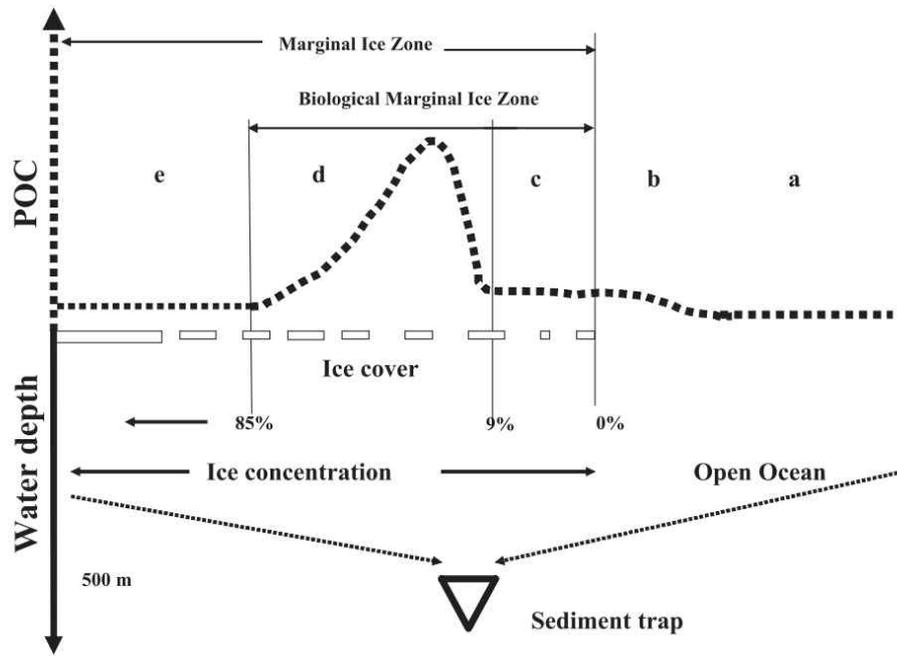


그림 10 연간 해빙농도와 입자유기탄소 플럭스와의 관계(Garrity et al., 2005)

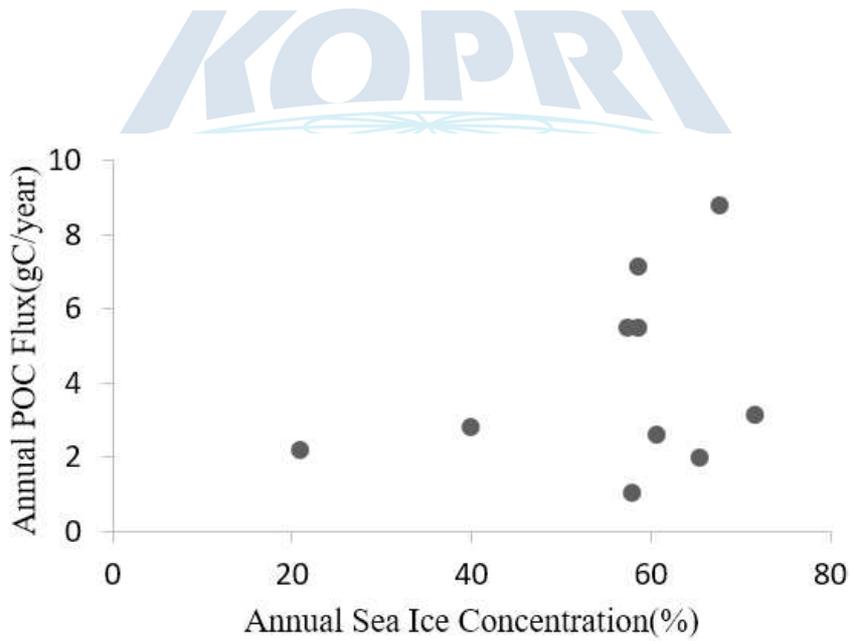


그림 11 남극해 400-500m의 입자유기탄소 플럭스와 연간 해빙 농도와의 관계

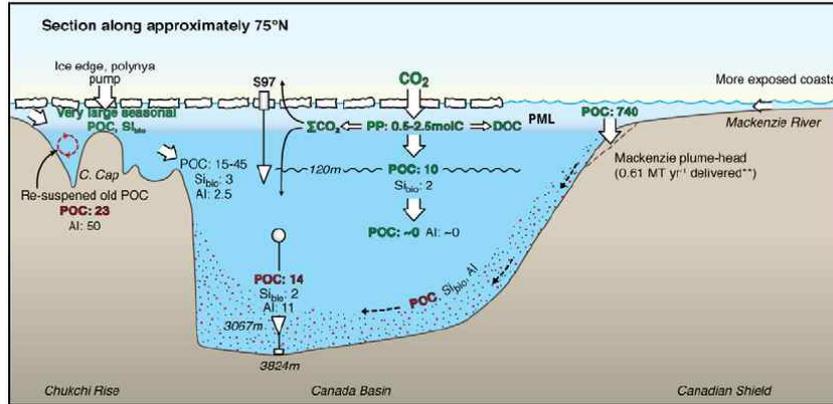
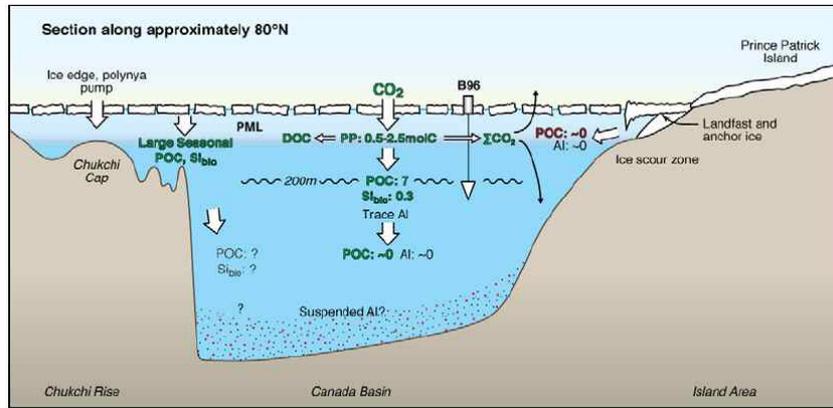
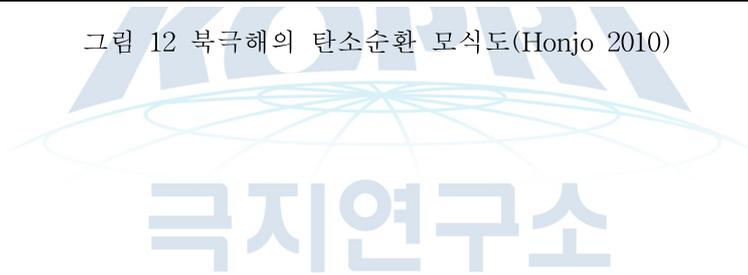


그림 12 북극해의 탄소순환 모식도(Honjo 2010)



2. 남극해 용존유기 및 무기탄소 순환 이해

가. 남극 순환심층수 내 용존무기탄소의 방사성탄소의 공간적 변동 파악

대륙붕의 수온, 염분, 용존 산소 등 물리 자료를 이용하여 수주 구조를 파악한 후, 총 19개의 샘플을 선별하여 이산화탄소 포집 후 NOSAMS(The National Ocean Sciences Accelerator Mass Spectrometry)에 의뢰하여 방사성탄소 동위원소비를 측정하였다.

71번 정점(대륙사면)에서 용존무기탄소 내 방사성탄소 분포($\Delta^{14}\text{C}$, ‰)는 200m 이내에서는 -141 ± 2 ‰로 균일한 분포를 보이고, 그 아래에서는 -158 ± 8 ‰로 위의 수층보다 낮은 값이 나타났다(그림 13, 좌). 63번 정점(빙붕 부근)에서 방사성탄소 분포는 전 수층에서 -140 ± 2 ‰로 균일하게 분포하였다. 두 정점 외의 다른 정점들에서도 방사성탄소 동위원소비가 -140 ‰ 부근의 범위로 수직적으로 균일한 분포를 보였고, 본 값은 Kim et al. (2016)이 보고한 아문젠해 대륙붕에서의 값과 유사한 범위를 보였다. 71번 정점의 300m 아래에서는 환남극 심층수가 관찰되었는데, 이 값 또한 아문젠해 대륙붕으로 들어오는 용존무기탄소 내 방사성탄소의 값(-160 ‰)과 유사하였다. 수온, 염분 자료에서도 대륙붕 내의 균일한 수괴 분포가 관찰되며 71번 정점의 300m 아래에서 수온과 염분이 높은 환남극심층수가 관찰되었다(그림 13, 우). 로스해 대륙붕의 용존무기탄소 내 방사성탄소 분포와 수온, 염분 자료를 통해, 로스해 대륙붕은 환남극 심층수의 유입이 제한적이며 빠른 수직적 혼합으로 인해 균일한 수괴가 분포함을 유추할 수 있다.

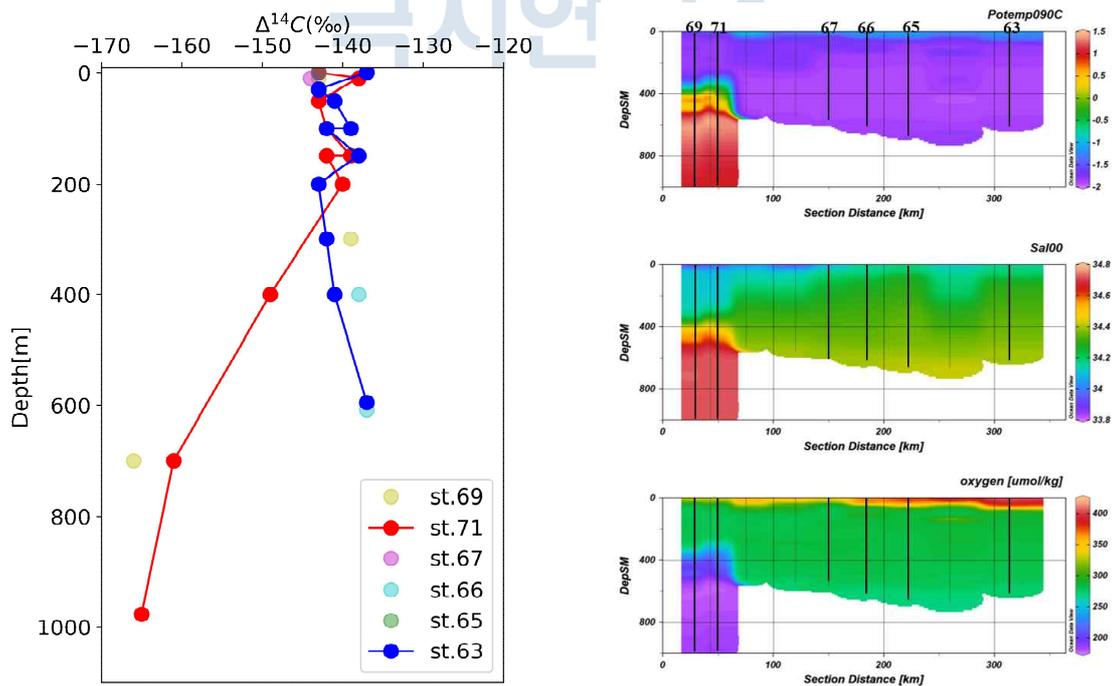


그림 13 Little America Basin의 용존무기탄소 내 방사성탄소 수직 분포(좌)와 수온, 염분, 용존 산소 분포(우)

나. 용존유기탄소의 대양순환에 있어서 남극 순환심층수의 역할 규명

남극해의 용존유기탄소 분포의 특징은 방사성탄소 동위원소비가 북태평양의 값과 유사한데, 농도는 전지구적 자오면 순환과 연결 지어 보았을 때 예상보다 낮은 값이 나타난다는 것이다(그림 14).

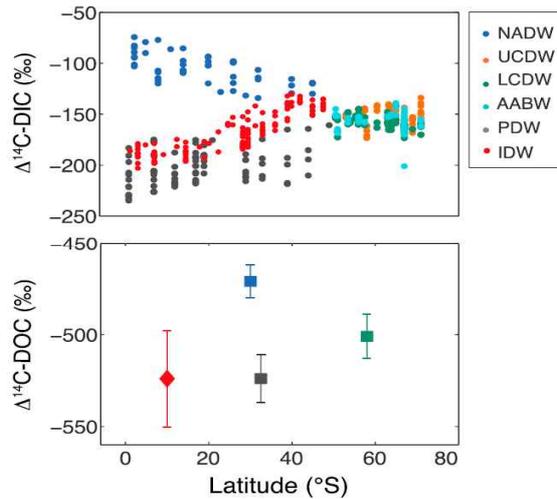


그림 14 남극해의 위도에 따른 용존 탄소 내의 방사성탄소 함량 분포 (Bercovici and Hansel, 2016)

낮은 값의 원인으로 다양한 이론들이 제시되었는데, Druffel & Bauer (2000)은 대륙붕의 퇴적물로부터 기인한 퇴적물의 영향이라 제시하였고, Lechtenfeld et al. (2014)는 이류와 용승 작용이 심층의 난분해성 용존유기탄소를 표층으로 이동시켜 낮은 값을 보인다고 제시하였다. Follett et al. (2014)은 침강입자가 분해되면서, 방사성탄소 연령이 낮은 이산화탄소를 광합성에 이용한 해양생물의 signature가 발견된 것이라고 하였고, Bercovici&Hansell (2016)은 남극해에서 자생적으로 만들어진 용존유기탄소에 의한 것이 아니라 대양의 순환 과정에서 여러 수괴들의 혼합에 의해 낮은 값이 나타날 수 있음을 제시하였다.

로스해는 높은 염분의 대륙붕수를 생성하는 곳으로 이는 남극해의 탄소와 산소의 순환에 있어 중요한 역할을 한다. Bercovici et al. (2017)은 수층의 수직적 혼합을 통해 용존유기탄소가 환남극심층수로부터 고염의 대륙붕수로 수송되며, 대륙붕수는 환남극심층수에 비해 $7.4 \pm 1.7 \mu\text{mol kg}^{-1}$ 만큼 더 높은 DOC 농도가 나타난다고 보고하였다. Bercovici et al. (2017)이 제시한 용존유기탄소 농도의 모식도(그림 15)를 통해 볼 수 있듯 남극해 대륙붕수는 전 수층이 대륙붕단 바깥쪽의 표층 농도와 그 값이 유사하고, 심층과는 $7 \mu\text{mol kg}^{-1}$ 정도 차이가 나는 것으로 알려졌다.

이러한 분포를 보이는 원인에 대하여 로스해 대륙붕에서의 용존유기탄소 내 방사성탄소 동위원소 분석을 통해 남극해의 용존유기탄소 순환, 생성 및 소모 기작을 알아보고 더 나아가 대양 용존물질 순환에서 남극해가 가지는 역할에 대해 연구해보았다.

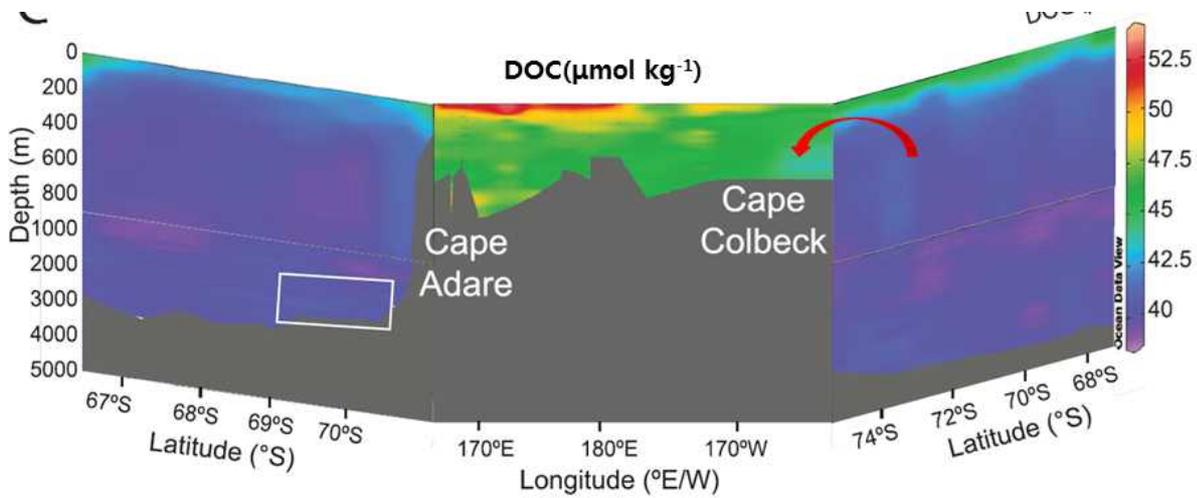


그림 15 남극해의 용존유기탄소 농도 분포(Bercovici et al., 2017)

3. 남극해 순환이해

가. Little America Basin의 해수 및 용존물질의 유동 특성 파악

Little America Basin의 해수 순환 및 용존물질의 유동 특성을 파악하기 위해 세 정점(그림 4: 71번 정점, 66번 정점, 63번 정점)에서 용존탄소 내의 방사성탄소 자료를 획득하였다. 해수에서 용존유기탄소를 추출하기 위해 진공라인 시스템을 이용하였으며, 추출 후 AMS 센터에 분석을 의뢰하였다.

71번, 66번, 63번 정점의 용존유기탄소 농도는 $45 \sim 66 \mu\text{mol kg}^{-1}$ 의 범위를 보였으며, 표층에서 $62 \pm 3 \mu\text{mol kg}^{-1}$, 그 아래 수층에서 $50 \pm 3 \mu\text{mol kg}^{-1}$ 로 나타났다(그림 16, 좌). 용존유기탄소 내 방사성탄소 값은 $-576 \sim -477\%$ 의 범위를 보였으며, 표층에서는 $-560 \pm 22\%$, 그 아래 수층에서 $-576 \pm 25\%$ 로 나타나 표층에서 낮고 그 아래 수층에서 높게 나타났다(그림 16, 우). 표층의 용존유기탄소 농도는 빙봉 부근의 63번 정점에서 가장 높았고 대륙사면의 71번 정점에서 가장 낮았으며, 방사성탄소 값은 63번 정점에서 가장 낮게, 71번 정점에서 가장 높게 나타났다. 농도 범위의 경우 이전에 보고된 남극해의 용존유기탄소 농도(Bercovici et al., 2017)와 유사하며 표층에서 높고 심층에서 낮아지는 일반적인 분포를 보였다. 방사성탄소 수직 분포는 해양의 일반적인 분포와는 다르게 역전되어 나타났다. 이는 Little America Basin의 표층에서 외부 기원의 오래된 연령의 용존유기탄소의 유입이 있을 가능성을 제시하며, 이것이 남극해의 높은 용존유기탄소 방사성탄소 연령을 설명할 수 있는지 연구를 진행 중이다.

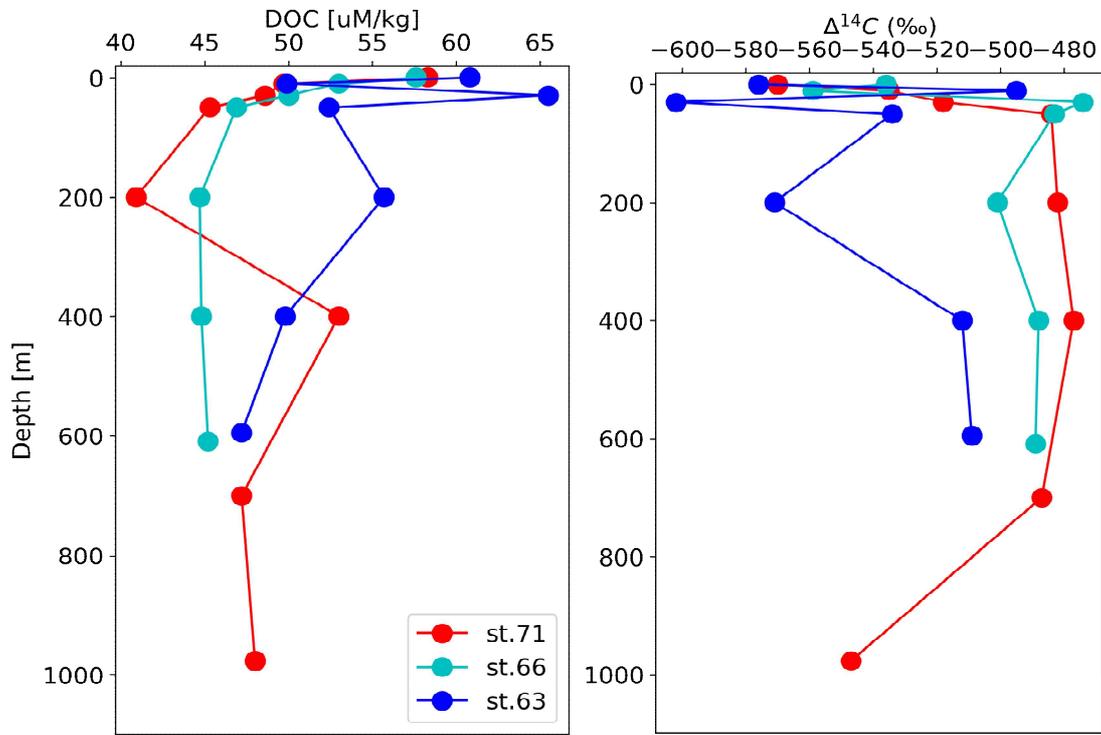


그림 16 Little America Basin의 수직적인 용존유기탄소 농도(좌)와 방사성탄소 분포(우)



나. 남극해의 용존무기 및 유기탄소 순환의 이해

로스해 Little America Basin에서 용존무기탄소 내의 안정동위원소($\delta^{13}\text{C}$, ‰) 수직 분포 자료를 얻었다. 로스해 대륙붕의 용존무기탄소 내 안정동위원소 분포는 200m 이내에서 $0.98 \pm 0.53\%$, 그 아래 수층에서는 $0.44 \pm 0.21\%$ 로 나타났다(그림 17, 좌). 71번, 63번 정점 모두 표층에서는 높고 심층에서 낮아 표층과 심층이 뚜렷이 구분되었고 특히 빙봉 부근의 63번 정점에서 그 특징이 더 두드러졌다. $\delta^{13}\text{C}$ 는 AOU(Apparent Oxygen Utilization)와는 음의 상관관계를 보여 표층에서 일차생산자의 광합성에 의해 표층의 탄소가 심층으로 이동하며 로스해에서 생물학적 펌프가 작동함을 알 수 있다(그림 17, 우).

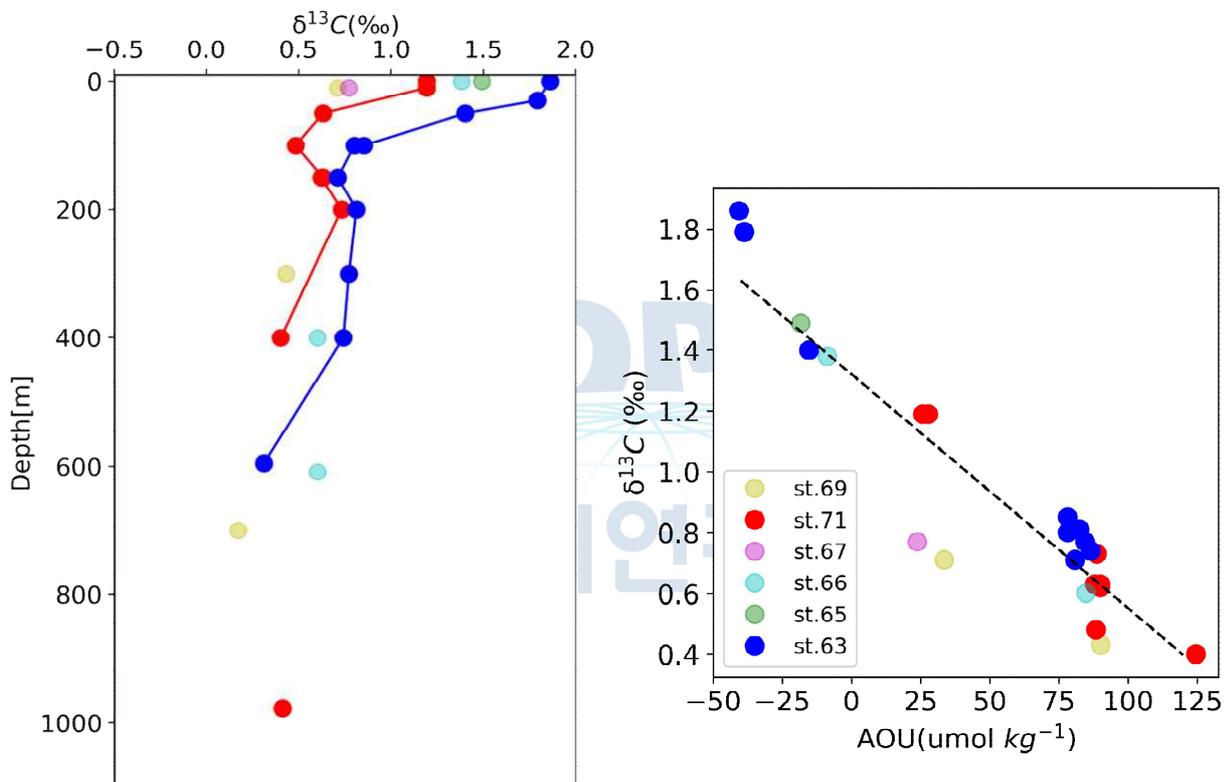


그림 17 용존무기탄소 내 안정탄소동위원소 수직 분포(좌)
AOU와 용존무기탄소 내 안정동위원소와의 상관관계(우)

또한 AOU가 음의 값을 가지는 정점에서 안정탄소동위원소 값과 용존무기탄소 농도를 이용하여 물질 수지 식(mass balance equation) (수식 2)을 세워보면 본 해역에서 광합성이 일어날 시 안정탄소동위원소에서 약 -29 ‰의 분별 작용(fractionation)이 일어남을 추정할 수 있으며 (수식 2), 이는 Kim et al. (2016) 이 보고한 표층의 부유입자유기탄소 내 안정탄소동위원소 값 ($\approx -28 ‰$)과 유사하다. 해양에서 광합성에 의한 안정탄소동위원소 분별 작용은 -20 ‰ 정도로 알려져 있어, 남극해에서는 분별 작용이 다른 해역에 비해 크게 나타나는 것으로 사료된다.

$$DIC_A * \delta_A - (DIC_A - DIC_B) * X = DIC_B * \delta_B \quad (2)$$

Little America Basin의 용존유기탄소의 방사성탄소 연령은 매우 높게 나타났으며 인근 해역인 아문젠해의 값과도 큰 차이를 보인다(그림 18, 우). 농도의 경우 아문젠해와 다른 남극해의 값과 크게 다르지 않은 것을 보아(그림 18, 좌), 아주 오래된 연령의 용존유기탄소 유입이 로스해 대륙붕에 있고, 특히 표층으로 그 기원이 있는 것으로 추정된다.

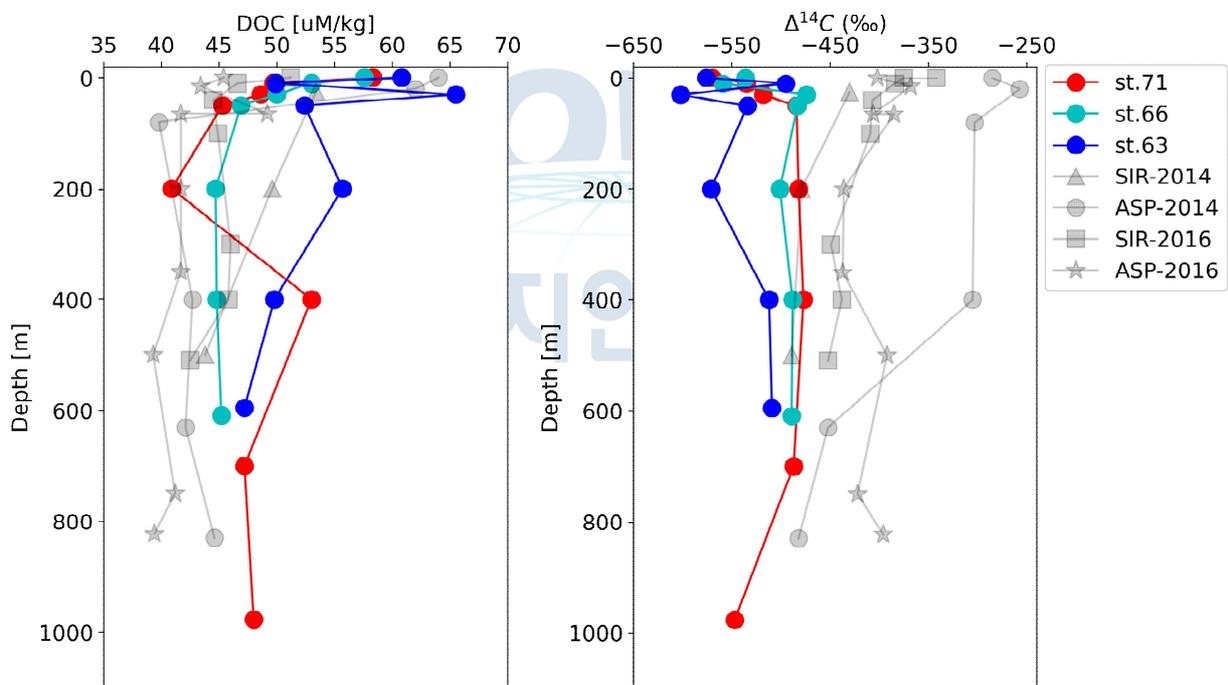


그림 18 로스해(색)와 아문젠해(회색)의 수직적인 용존유기탄소 농도(좌)와 방사성탄소 분포(우)

해양의 용존유기탄소를 두 성분의 혼합 모델로 설명하는 킬링 플롯(keeling plot)을 이용하여 용존유기탄소의 기원을 알아내는 연구는 꾸준히 진행되고 있다(Pataki et al., 2003; Mortazavi&Chanton, 2004; Beupre & Aluwihare, 2010). 킬링 플롯은 해양의 용존유기탄소를 분해되지 않고 잔존하는 난분해성 용존유기탄소(refractory DOC)에 새롭게 생성되어 분해가 잘 되는 용존유기탄소(labile DOC)의 합으로 설명한다(그림 19). 킬링 플롯에서 y 절편은 기원에 대한 정보를 제공하며 전 대양의 용존유기탄소 내 방사성탄소 값은 그림 20 과 같이 나타난다. Little America Basin에서 분석한 용존유기탄소 값은 글로벌 데이터와는 완전히 벗어나는 경향성을 보이며 y 절편은 약 -819‰로 나타났다. 이는 -800 ‰ 퍼밀에 달하는 아주 오래된 연령의 용존유기탄소가 표층에 있을 가능성을 제시하며 해양에서 처음으로 관찰되는 아주 희귀한 자료이다. 로스해의 용존유기탄소는 킬링 플롯에서 설명하는 두 가지 기원이 아닌 두 가지 이상의 기원의 용존유기탄소의 혼합으로 추정되며, 이를 활용하여 로스해 대륙붕의 용존물질의 순환에 관한 논문을 작성하고 있다.

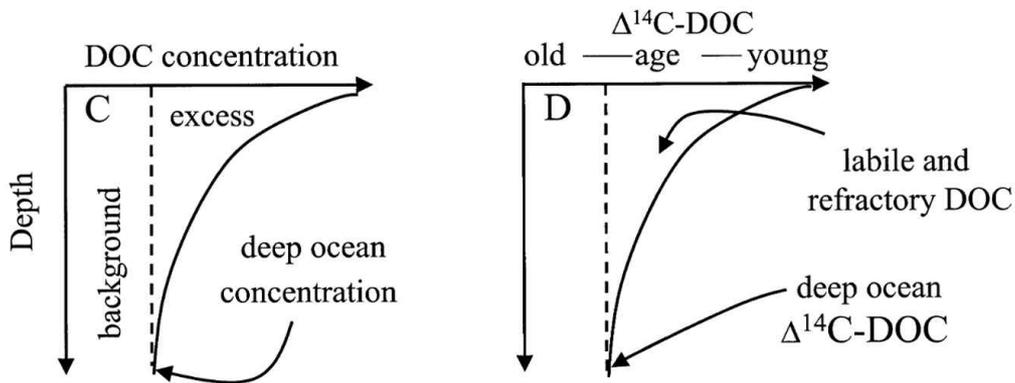


그림 19 용존유기탄소의 두 성분 혼합 모델(Mortazavi & Chanton, 2004)

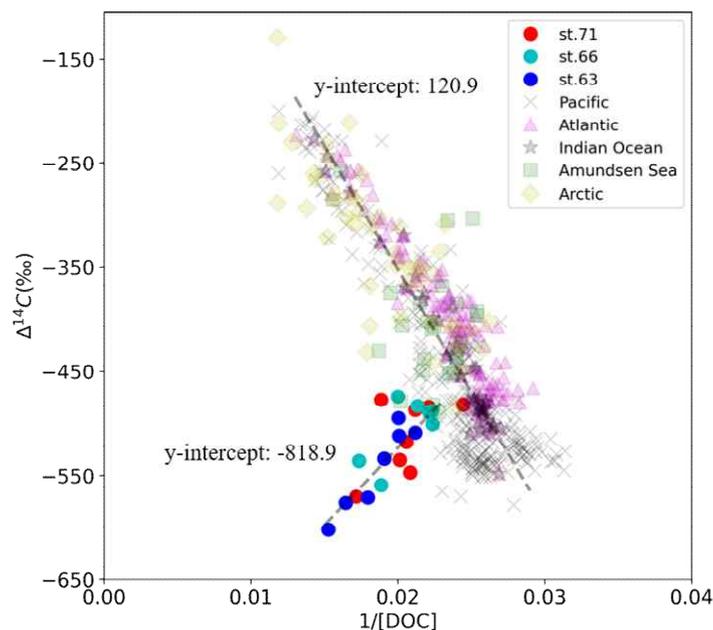


그림 20 대양과 Little America Basin의 킬링 플롯

제 4장 연구개발목표 달성도 및 대외기여도

제 1 절 연구개발목표의 달성도

성과목표	세부목표		달성 주요내용	달성도 (%)
1. 남극해 연안 탄소펌프와 조절 요인 파악	1-1	기존 확보된 남극 연안해 시료 분석	- 논문 1편 게재함(Fang et al., 2020, Scientific Reports)	100
	1-2	문헌조사를 통한 남극해 탄소펌프 조절 요인 파악	- 남극해에서 기존에 보고된 문헌연구를 통하여 리뷰논문 작성을 위한 자료를 수집하고 연구를 진행하였음	100
2. 남극해 용존 유기 및 무기탄소 순환 이해	2-1	남극 순환심층수 내 용존무기탄소의 방사성탄소의 공간적 변동 파악	- 남극해 용존무기탄소의 방사성탄소 분석 및 결과 제시함 - 남극해 용존무기탄소의 방사성탄소 연령 특성과 변동 파악함	100
	2-2	용존유기탄소의 대양순환에 있어서 남극 순환심층수의 역할 규명	- 기존에 보고된 남극해 용존유기탄소 관련 참고문헌 수집 - 남극해 용존유기탄소의 생성과 소모 기작 파악함	100
3. 남극해 탄소순환 이해	3-1	Little America Basin의 해수 및 용존물질의 유동 특성 파악	- 용존무기탄소 내 방사성탄소를 이용하여 Little America Basin의 해수 유동 특성 파악함 - 용존유기탄소 내 방사성 탄소를 이용하여 Little America Basin의 해수 유동 특성 파악함	100
	3-2	남극해의 용존유기 및 무기탄소 순환의 이해	- 용존탄소의 동위원소를 이용하여 남극해의 탄소순환 이해도 제고함	100

제 2 절 관련분야의 기술발전예의 기여도

가. 학술적 파급효과

- 남극해의 기후변화에 따른 해수순환 및 탄소순환의 변화에 대한 이해로 이 해역의 대기 중 이산화탄소 흡수 능력 변화에 대한 새로운 이해 가능
- 남극해에서 용존유기·무기탄소 방사성탄소동위원소 값 제시
- 퇴적물 시료에서 과거 표층환경을 추정할 수 있는 다양한 생지화학적 프록시들을 분석, 해석 함으로서 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

제 1 절 추가연구의 필요성

- ▷ 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.
- ▷ 특히 로스해에서 관측된 용존유기탄소 내 방사성탄소 수직 분포를 이해하기 위해서는 오래된 용존유기탄소의 기원을 추적하기 위해 더 넓은 범위의 해역에서 연구가 이루어져야 할 것이다.

제 2 절 타연구에의 응용

- ▷ 남극해 침강입자 및 입자유기탄소 플럭스 자료를 통해 남극해의 생물학적 탄소 펌프 능력에 대한 정보를 제공하고 이를 조절하는 요인에 대한 연구는 기후 변화에 따른 미래 남극해의 탄소 흡수력 변동에 대한 실마리를 제공할 것이다.
- ▷ 용존무기탄소 시료의 탄소동위원소 분석 결과는 남극해 연안의 물리 환경을 해석하는데 뒷받침되는 자료가 될 것이며, 여름철 개구부에서 광합성을 통해 대기로부터 유입되는 이산화탄소의 흡수력 정도를 진단하는 자료로 활용될 수 있다.
- ▷ 용존유기탄소 시료의 방사성탄소동위원소 분석 결과를 바탕으로 로스해 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.
- ▷ 로스해에서의 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

미국과 뉴질랜드는 1950년대에 로스섬에 기지를 구축하여 연구를 주도하고 있으며, 이탈리아 또한 지난 35년간 로스해에서 꾸준히 해양학적 연구를 수행해왔다. 미국의 로스해 연구로는 ROVAERRS(Research on Atmospheric Variability & Ecosystem Response in the Ross Sea, Antarctica), McMurdo Dry Valley LTER 프로젝트가 있었으며 대기 변동과 이에 따른 생태계 반응을 주제로 하여 기후학, 해양물리학 그리고 해양생물학 연구가 주를 이뤘다. 뉴질랜드와 이탈리아에서도 육상 및 저서생물군집 구조와 해양생물 데이터베이스 구축, 해빙 연구 등을 목표로 하였으며 화학적인 측면에서의 연구는 매우 드물었다. 특히 방사성탄소를 이용한 유/무기탄소 순환 연구는 해외에서도 매우 제한적으로 이루어지고 있고 남극해 연안에서의 방사성탄소 자료는 아문젠해를 제외하면 보고된 바가 없다.

현재 연구에 사용한 용존유기탄소 내 방사성탄소 자료는 용존유기탄소를 통째로 사용한 값이다. 그러나 여러 기원의 유기물이 섞일 수 있는 남극 해역의 특성상 플로리다와 어바인 주립대학교에서 진행중인 SPE(Solid-Phase Extraction) 컬럼을 이용하거나 UV 조사 시간에 따른 sequential extraction을 통해 특정 용존유기탄소 성분을 분리하여 방사성탄소를 측정하는 연구 등으로 연구가 더 개발될 수 있을 것으로 기대된다.

남극해에서의 퇴적물 트랩 연구는 1980년대에 시작되어 약 50개 정점에서 장기, 단기적으로 계류되어왔으며 여름철을 제외하면 접근이 어려운 남극해에서 탄소순환을 이해하는데 중요한 정보를 제공하였다. 대표적인 정점에는 미국 JGOFS 프로젝트에서 진행하 남극 반도의 LTER(Long Term Ecological Research) 정점이 있으며 1992년부터 현재까지 꾸준히 계류하여 남극해 생물학적 펌프의 장기 변동성에 대한 연구를 진행중에 있다.

제 7 장 참고문헌

- 김민경. (2021). 퇴적물 트랩을 이용한 해양 탄소 순환 연구 동향: 재부유 퇴적물의 중요성. *바다*, 26(2), 145-166. doi:10.7850/jkso.2021.26.2.145
- Beaupré, S. R., & Aluwihare, L. (2010). Constraining the 2-component model of marine dissolved organic radiocarbon [Article]. *Deep-Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, 57(16), 1494-1503. <https://doi.org/10.1016/j.dsr2.2010.02.017>
- Wefer, G., & Fischer, G. (1991). Annual primary production and export flux in the Southern Ocean from sediment trap data. *Marine Chemistry*, 35(1-4), 597-613. [https://doi.org/10.1016/S0304-4203\(09\)90045-7](https://doi.org/10.1016/S0304-4203(09)90045-7)
- Bercovici, S. K., & Hansell, D. A. (2016). Dissolved organic carbon in the deep Southern Ocean: Local versus distant controls [Article]. *Global Biogeochemical Cycles*, 30(2), 350-360. <https://doi.org/10.1002/2015GB005252>
- Bercovici, S. K., Huber, B. A., DeJong, H. B., Dunbar, R. B., & Hansell, D. A. (2017). Dissolved organic carbon in the Ross Sea: Deep enrichment and export [Article]. *Limnology and Oceanography*, 62(6), 2593-2603. <https://doi.org/10.1002/lno.10592>
- Dickson, A.G. Sabine, C. L. & Christian, J. R. (Eds.) (2007). Guide to best practices for ocean CO₂ measurements, PICES Special Publication (Vol. 3). North Pacific Marine Science Organization.
- Druffel, E. R. M., & Bauer, J. E. (2000). Radiocarbon distributions in Southern Ocean dissolved and particulate organic matter [Article]. *Geophysical Research Letters*, 27(10), 1495-1498. <https://doi.org/10.1029/1999GL002398>
- Ducklow, H. W., Erickson, M., Kelly, J., Montes-Hugo, M., Ribic, C. A., Smith, R. C., Stammerjohn, S. E., & Karl, D. M. (2008). Particle export from the upper ocean over the continental shelf of the west Antarctic Peninsula: A long-term record, 1992-2007 [Article]. *Deep-Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, 55(18-19), 2118-2131. <https://doi.org/10.1016/j.dsr2.2008.04.028>
- Fang, L., Lee, S. H., Lee, S. A., Hahm, D., Kim, G., Druffel, E. R. M., & Hwang, J. (2020). Removal of Refractory Dissolved Organic Carbon in the Amundsen Sea, Antarctica [Article]. *Scientific Reports*, 10(1), Article 1213. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-57870-6>

- Follett, C. L., Repeta, D. J., Rothman, D. H., Xu, L., & Santinelli, C. (2014). Hidden cycle of dissolved organic carbon in the deep ocean [Article]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, *111*(47), 16706–16711. <https://doi.org/10.1073/pnas.1407445111>
- Follett, C. L., Repeta, D. J., Rothman, D. H., Xu, L., & Santinelli, C. (2014). Hidden cycle of dissolved organic carbon in the deep ocean [Article]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, *111*(47), 16706–16711. <https://doi.org/10.1073/pnas.1407445111>
- Garrity, C., Ramseier, R. O., Peinert, R., Kern, S., & Fischer, G. (2005). Water column particulate organic carbon modeled fluxes in the ice-frequented Southern Ocean. *Journal of Marine Systems*, *56*(1–2), 133–149. <https://doi.org/10.1016/j.jmarsys.2004.09.009>
- Kim, B., Lee, S., Kim, M., Hahm, D., Rhee, T. S., & Hwang, J. (2018). An Investigation of Gas Exchange and Water Circulation in the Amundsen Sea Based On Dissolved Inorganic Radiocarbon [Article]. *Geophysical Research Letters*, *45*(22), 12,368–312,375. <https://doi.org/10.1029/2018GL079464>
- Kim, M., Hwang, J., Lee, S. H., Kim, H. J., Kim, D., Yang, E. J., & Lee, S. (2016). Sedimentation of particulate organic carbon on the Amundsen Shelf, Antarctica [Article]. *Deep-Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, *123*, 135–144. <https://doi.org/10.1016/j.dsr2.2015.07.018>
- Lechtenfeld, O. J., Kattner, G., Flerus, R., McCallister, S. L., Schmitt-Kopplin, P., & Koch, B. P. (2014). Molecular transformation and degradation of refractory dissolved organic matter in the Atlantic and Southern Ocean [Article]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, *126*, 321–337. <https://doi.org/10.1016/j.gca.2013.11.009>
- McNichol, A. P., Jones, G. A., Hutton, D. L., & Gagnon, A. R. (1994). The rapid preparation of seawater ΣCO_2 for radiocarbon analysis at the National Ocean Sciences AMS facility [Article]. *Radiocarbon*, *36*(2), 237–246. <https://doi.org/10.1017/s0033822200040522>
- Mortazavi, B., & Chanton, J. P. (2004). Use of Keeling plots to determine sources of dissolved organic carbon in nearshore and open ocean systems [Article]. *Limnology and Oceanography*, *49*(1), 102–108. <https://doi.org/10.4319/lo.2004.49.1.0102>
- Pataki, D. E., Ehleringer, J. R., Flanagan, L. B., Yakir, D., Bowling, D. R., Still, C. J., Buchmann, N., Kaplan, J. O., & Berry, J. A. (2003). The application and

interpretation of Keeling plots in terrestrial carbon cycle research [Article]. *Global Biogeochemical Cycles*, 17(1), 22-21 - 22-14. <https://doi.org/10.1029/2001GB001850>



주 의

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

