

아문젠해 봉빙수멸에 따른
해양산성화 및 침강입자 플럭스
변동추세

The changes in the ocean acidification
and particle fluxes in the Amundsen Sea



한국해양과학기술원

제 출 문

극지연구소장 귀하

본 보고서를 “아문젠해 빙붕소멸 속도와 해양환경 변동추세” 과제의 위탁연구
“아문젠해 붕빙수멸에 따른 해양산성화 및 침강입자 플럭스 변동추세” 과제의 최종보고서로 제출합니다.

2020. 1. 23.



총괄연구책임자: 김태완

위탁과제기관명: 한국해양과학기술원

위탁과제책임자: 김동선

위탁참여연구원: 김예원, 김호정,
조소설, 최유정

보고서 초록

위탁연구과제명	아문젠해 빙봉소멸에 따른 해양산성화 및 침강입자 플럭스 변동추세				
위탁연구책임자	김동선	해당단계 참여연구원수	5	해당단계 연구비	165,000,000원
연구기관명 및 소속부서명	한국해양과학기술원/ 해양환경연구센터		참여기업명		
국제공동연구	상대국명 :		상대국연구기관명 :		
요약(연구결과를 중심으로 개조식 500자 이내)				보고서 면수	36
<ul style="list-style-type: none"> ○ 남극 아문젠해에서 빙봉소멸에 의한 해양산성화와 탄소순환 변화 파악하기 위해서, 아문젠해에서 침강입자 플럭스의 시간 및 공간 변화와 해양산성화 경향을 파악하였음 ○ 1년 동안 해빙해역, 폴리나해역, 빙벽해역 등 3개 정점에 퇴적물트랩을 계류하여 침강입자 플럭스를 관측하였는데, 모든 해역에서 유기탄소 플럭스는 여름동안에만 높은 값을 보였고 그 외 다른 계절에서는 낮은 값을 나타냈음 ○ 해빙해역에서 여름동안 관측한 유기탄소 플럭스는 폴리나해역에서 관측한 값과 유사하였으며, 이 해역에서 관측한 유기탄소 플럭스는 해빙의 영향을 크게 받아서 매우 큰 연간 변화를 보였음 ○ 폴리나해역에서 유기탄소 플럭스는 빙벽해역에서 관측한 값보다 높았는데, 이것은 두 해역사이에서 일차생산력의 차이 때문이었으며, 빙벽해역에서 관측한 유기탄소 플럭스는 3개 해역에서 관측한 값들 가운데 가장 낮은 값을 보였음. ○ 아문젠해 표층해수에서 아라고나이트 포화도가 1 이상으로 아라고나이트 과포화가 관측되었고 해빙과 빙벽해역에서 아라고나이트 포화도가 낮았고 폴리나 해역에서 높았음 ○ 폴리나해역에서 아라고나이트 포화도가 상대적으로 높은 것은 생물생산력이 높아서 광합성에 의해 DIC 농도가 감소하여 pH가 높아졌기 때문임 ○ 아라고나이트 포화도는 표층에서 가장 높았고 수심에 따라 감소하여 700m 이하 수심에서 1.0 이하로 아라고나이트 불포화가 관측되었음 ○ 50년 후에는 해빙과 빙벽해역 표층해수에서도 아라고나이트 불포화가 예측되고 폴리나 해역에서는 50m 이하 수심에서 아라고나이트 불포화가 예측되어 해양산성화 매우 심각하게 진행될 것으로 예상됨 					
색 인 어 (각 5개 이상)	한 글	아문젠해, 해양산성화, 침강입자 플럭스, 빙봉소멸, 환경변화			
	영 어	Amundsen Sea, Ocean acidification, sinking particle flux, ice shelf retreat, environmental changes			

요 약 문

I. 제 목

아문젠해 빙봉소멸에 따른 해양산성화 및 침강입자 플럭스 변동추세

II. 연구개발의 목적 및 필요성

1. 연구개발의 목적

아문젠해에서 빙봉소멸에 의한 해양산성화와 탄소순환 변화 파악한다.

2. 연구개발의 필요성

남극 아문젠해에서 해빙과 빙봉이 빠르게 감소하고 있기 때문에, 아문젠해가 해빙과 빙봉 감소에 어떻게 반응할 것인지를 파악하기 위해서 탄소순환과 해양산성화에 대한 이해를 높이는 것이 중요하다.

III. 연구개발의 내용

- 아문젠해 과거 해양산성화 상태 파악
- 해수시료 및 퇴적물트랩 시료 확보
- 아문젠해 해양산성화와 탄소순환 변화 파악

IV. 연구개발결과

1. 남극 아문젠해에서 침강입자 플럭스의 시간 및 공간 변화

남극 아문젠해에서 1년동안 해빙해역, 폴리냐해역, 빙벽해역 등 3개 정점에서 계류하여 침강입자 시료를 채집하였다. 유기탄소 플럭스는 여름동안에만 높은 값을 보였고 그 외 다른 계절에서는 낮은 값을 나타냈다. 해빙해역에서는 규조규가 침강입자의 가장 중요한 성분이었다. 해빙해역에서 여름동안 관측한 유기탄소 플럭스는 폴리냐해역에서 관측한 값과

유사하였으며, 이 해역에서 관측한 유기탄소 플럭스는 해빙의 영향을 크게 받아서 매우 큰 연간 변화를 보였다. 폴리나해역에서 유기탄소 플럭스는 빙벽해역에서 관측한 값보다 높았는데, 이것은 두 해역사이에서 일차생산력의 차이 때문이었다. 빙벽해역에서 관측한 유기탄소 플럭스는 3개 해역에서 관측한 값들 가운데 가장 낮은 값을 보였으며, 규소류가 침강입자에 미치는 영향도 가장 낮았다.

2. 남극 아문젠해 해양산성화 경향

아문젠해 표층해수에서 아라고나이트 포화도가 1 이상으로 아라고나이트 과포화가 관측되었고 해빙과 빙벽 해역에서 아라고나이트 포화도가 낮았고 폴리나해역에서 높았다. 폴리나해역에서 아라고나이트 포화도가 상대적으로 높은 것은 생물생산력이 높아서 광합성에 의해 DIC 농도가 감소하여 pH가 높아졌기 때문이다. 아라고나이트 포화도는 표층에서 가장 높았고 수심에 따라 감소하여 700m 이하 수심에서 1.0 이하로 아라고나이트 불포화가 관측되었다. 따라서 아문젠해에서 아라고나이트 불포화 수심은 700m 이다. 50년 후에는 해빙과 빙벽 해역 표층해수에서도 아라고나이트 불포화가 예측되고 폴리나해역에서는 50m 이하 수심에서 아라고나이트 불포화가 예측되어 해양산성화 매우 심각하게 진행될 것으로 예상된다.

V. 연구개발결과의 활용계획

- 해양-대기-해빙-생태계 결합 지구시스템모델의 결과 검증과 성능향상을 위한 기반자료로 활용
- 남극해 해양산성화 예측결과를 해양생물자원 피해를 최소화하기 위한 정책 결정에 활용
- 남극해에서의 “biological pump” 효율을 평가하여 미래 기후변화 예측에 활용
- 지구온난화에 따른 남극해 해양생태계변화 예측에 활용

S U M M A R Y

I. Title

The changes in the ocean acidification and particle fluxes due to the ice shelf decline

II. Objectives and Necessities of the Study

1. Objectives of the study

Finding out the changes in the ocean acidification and particle fluxes due to the ice shelf decline

2. Necessities of the study

As sea ice and ice shelves are rapidly decreasing in the Amundsen Sea, it is important to increase understanding of carbon cycle and ocean acidification to understand how the Amundsen Sea will react to the sea ice and ice shelf decline

III. Contents of the Study

- Identifying the status of ocean acidification in the past of the Amundsen Sea
- Securing seawater and sediment trap samples
- Identifying the change in the ocean acidification and carbon cycle in the Amundsen Sea

IV. Results of the Study

1. Temporal and spatial variations of particle fluxes in the Amundsen Sea

This study examines the sinking particle flux and composition of samples collected at three sites in the western Amundsen Sea,

Antarctica: a perennial sea-ice-covered area, the central region of the Amundsen Sea polynya, and close to the Dotson Ice Shelf within the polynya. The majority of annual POC (particulate organic carbon) flux in the Amundsen Sea occurs during the austral summer, with much smaller POC fluxes during other seasons. In the perennial ice-covered area, sea ice diatoms were the dominant source of sinking particles. In this region, the summertime POC flux is similar to that in the central polynya. However, the POC flux exhibited large interannual variability, with the reduction in sea ice cover and sufficient insolation being critical to enhanced sinking POC flux. Within the Amundsen Sea polynya, the sinking POC flux was higher in the central region than near the Dotson Ice Shelf, consistent with spatial variability in primary production. The site near the Dotson Ice Shelf had the lowest contribution of diatoms to sinking particles and the smallest POC flux among the three sites.

2. Ocean acidification in the Amundsen Sea

Aragonite supersaturation was observed at the surface waters of the Amundsen Sea. Aragonite saturation state was relatively low at the sea ice and ice cliff areas and high at the polynya area. The relatively high aragonite saturation state at the polynya area was due to the high primary productivity, which reduced the DIC concentration by photosynthesis, thereby increasing the pH. Aragonite saturation state was the highest in the surface layer and decreased with depth and reached the aragonite undersaturation at depths below 700m. Therefore, the aragonite undersaturation depth was 700 m in the Amundsen Sea. In the next 50 years, the aragonite undersaturation will be predicted at the surface waters of sea ice and ice cliff areas and at depths below 50 m at the polynya area. Ocean acidification will be highly serious in the waters below 50 meters in the Amundsen Sea.

V. Application plans of the results of the study

- Applying the ocean-atmosphere-seaice-ecosystem combined earth system model as the base data for the verification of the results and performance improvement
- The prediction of the future ocean acidification in the Antarctic Ocean is used to determine policies to minimize damage to marine life resources.
- Evaluating the "biological pump" efficiency in the Antarctic Ocean and use it to predict future climate change
- Utilizing it to predict changes in the marine ecosystem in the Antarctic Ocean due to the global warming



목 차

제1장 서론	1
제1절 연구개발의 필요성	1
제2절 연구개발 목표 및 내용	3
제2장 국내외 기술개발 현황	4
제1절 국내 연구동향	4
제2절 국외 연구동향	5
제3장 연구개발 수행내용 및 결과	6
제1절 남극 아문젠해에서 침강입자 플럭스의 시간 및 공간 변화	6
1. 침강입자 플럭스 및 조성의 시간 변화	6
2. 해빙 및 유기탄소 플럭스의 시간 변화	8
3. 침강입자 플럭스와 화학조성의 공간 변화	9
4. 비생물기원 입자의 조성	10
제2절 남극 아문젠해 해양산성화 경향	17
1. 아문젠해 표층 해양산성화	17
2. 아문젠해 수층별 해양산성화	18
3. 아문젠해 해양산성화 미래변화 예측	19
제4장 연구개발목표달성도 및 대외기여도	26
제1절 연구개발목표달성도	26
제2절 대외기여도	30
제5장 연구개발결과의 활용계획	31
제6장 참고문헌	32

C O N T E N T S

Chapter I Outline of the study	1
Section 1 Necessity of the study	1
Section 2 Objectives and contents of the study	3
Chapter II States of technical development in the home and foreign countries	4
Section 1 Trends of the study in Korea	4
Section 2 Trends of the study in foreign countries	5
Chapter III Results of the study	6
Section 1 Temporal and spatial variations of particle fluxes in the Amundsen Sea	6
1. Temporal variations of particle fluxes and composition	6
2. Temporal variations of organic carbon flux and sea ice	8
3. Spatial variations of particle fluxes and composition	9
4. Composition of non-biogenic particles	10
Section 2 Ocean acidification in the Amundsen Sea	17
1. Ocean acidification in the surface waters	17
2. Ocean acidification in the deep waters	18
3. Future changes in the ocean acidification	19
Chapter 4 Achievement of objectives and contributions to the related area	26
Section 1 Achievement of objectives	26
Section 2 Contributions to the related area.....	30
Chapter 5 Application plans of the results of the study	31
Chapter 6 References	32

제 1 장 서 론

제1절 연구개발의 필요성

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

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

서남극해 아문젠해에서 해빙과 빙봉이 빠르게 감소하고 있다(Stammerjohn *et al.*, 2012). 이 해역이 해빙과 빙봉 감소에 어떻게 반응할 것인지를 파악하기 위해서 아문젠해의 생태계 특성과 생지화학에 대한 이해를 높이는 것이 중요하다. 현장 측정의 부족으로, 아문젠해의 생지화학은 주로 위성 원격측정법을 이용하여 관측해왔다(Arrigo *et al.*, 2012). 아문젠해 서쪽에 위치한 아문젠해 폴리냐는 남극에서 가장 생산성이 높은 폴리냐임을 보여주었다(Arrigo and van Dijken, 2003). 게다가, 이러한 폴리냐는 대기 이산화탄소 흡수를 용이하게 하는 환경이 된다(Arrigo *et al.*, 2012). 아문젠해 폴리냐 북부는 여름에도 계속해서 총빙(pack ice)으로 덮혀져있다

(Stammerjohn et al., 2015). 이 해역은 여름에 해빙 농도가 감소하지만, 해빙은 완전히 사라지지 않는다. 이렇게 항시해빙 해역은 “seasonal ice zone” (즉, 영구적인 ice zone부터 겨울철 해빙이 최대로 확장되는 경계까지의 해양 영역)과는 다르다. 남극 주변부에서 항시 해빙해역은 9월에 전체가 1700-2000만km²인 것에 비해 2월에는 3,000,000-4,000,000 km²이다. 그러므로 항시해빙 해역에서의 일차생산력과 침강입자 플럭스를 이해하는 것은 중요하다.

해빙과 빙붕이 녹으면서 발생하는 담수는 pH가 해수에 비해 매우 낮기 때문에, 아문젠해에서 해빙과 빙붕 감소는 해양산성화에도 매우 큰 영향을 미칠 것으로 예측된다. 북극해에서는 해빙의 감소로 인해 해양산성화가 가속화되어 이미 일부 해역에서는 표층에서 아라고나이트 불포화가 관측되어 해양산성화가 매우 심각한 상태이다(Yamamoto-Kawai et al., 2009). 하지만 남극 아문젠해에서는 아직까지 해양산성화에 대한 연구가 전혀 이루어지지 않았다. 따라서 해빙과 빙붕의 감소가 관측되고 있는 아문젠해에서 해양산성화 연구는 해양산성화에 의한 해양생물의 피해를 최소화하기 위해서 필수적이다.



제2절 연구개발 목표 및 내용

1. 연구개발의 목표

아문젠해에서 빙벽소멸에 의한 해양산성화 가속화와 탄소순환 변화 파악한다.

2. 연차별 연구개발 세부목표 및 내용

연차	연구 목표	연구 내용	비고
1차년도 (2017)	아문젠해 과거 해양산성화 상태 파악	- 기존 용존기탄소와 알칼리도 자료로부터 아라고나이트 포화도 산출	
		- 아라고나이트 포화도로부터 과거 아문젠해 해양산성화 상태 파악	
2차년도 (2018)	해수시료 및 퇴적물트랩 시료 확보	- 아문젠해 25개 정점에서 해양산성화 평가를 위한 해수시료 채집	
		- 해수시료에서 용존기탄소와 알칼리도 분석	
		- 아문젠해 3개 정점에서 퇴적물트랩을 회수하여 퇴적물트랩시료 확보	
		- 퇴적물트랩 시료에서 유기탄소, CaCO ₃ , 생기원규소 분석	
3차년도 (2019)	아문젠해 해양 산성화와 탄소 순환 변화 파악	- 아문젠해에서 해양산성화 경향 파악	
		- 아문젠해에서 해양산성화 미래 변화 예측	
		- 아문젠해에서 침강입자 플럭스의 시간 및 공간 변화 파악	

제 2 장 국내외 기술개발 현황

제1절 국내 연구동향

- 국내에서 물질순환 연구는 한국해양과학기술원을 중심으로 수행되었으며, 북동·북서 태평양에서 기후변화에 따른 침강입자 플럭스 변동 연구가 주로 진행되었다.
- 한국해양과학기술원은 북동태평양에서 약 10년간(2003년~2014년) 시계열 퇴적물 포집장치를 이용하여 월별 침강입자를 획득하였으며, 이 자료를 분석하여 엘니뇨/라니냐에 따른 해양 생산성 및 침강입자 플럭스 변동 연구를 수행하여 국제학술지에 다수 발표하였다.
- 한국해양과학기술원은 남극 브란스필드 해협, 두정점에서 2000년부터 2005년까지 6년동안 생기원원소 침강플럭스의 계절 및 연변화를 측정하였는데, 생기원원소 침강플럭스는 주로 여름에 집중되어 일어났으며, 연변화도 크게 관측되어 해빙이 많은 해에는 생기원원소 침강플럭스가 적게 일어났고 해빙이 적은 해에는 많이 일어났다.
- 한국해양과학기술원은 2012년부터 2016년까지 남극 아문젠해 3지점에 퇴적물트랩을 계류하여 침강입자 플럭스를 관측하였는데, 침강입자 플럭스는 여름동안에 특히 증가하였고, 다른 계절에는 침강입자 플럭스가 낮게 유지되었다. 아문젠해 폴리냐에서 유기탄소 플럭스의 최고 값은 해빙해역에서 관측한 값보다 두배 높았다. 해빙해역보다 아문젠해 폴리냐에서 현장의 일차생산량이 더 높았음에도 불구하고, 두 해역에서 유기탄소 플럭스는 여름 전체를 통합했을 때는 비슷했다.

제2절 국외 연구동향

- 2003년 3월 영국 조사팀은 RRS JAMES Clark Ross 를 이용하여 아문젠해 폴리냐 해역의 해양 조사를 실시하여 Circumpolar Deep Water (CDW)가 대륙붕 해역으로 유입되는 양을 산출하였다.
- 최근 4년동안 영국 BAS 에서는 Global Science in the Antarctic Context (GSAC)의 일환으로 Pine Island Glacier 분지 및 주변해에서 다학제적 연구 수행. 특히, GRADES 및 ACES 프로그램 연구 결과는 이 해역에 대한 영국의 장기 연구계획 (The framework of LWEC, NERC Strategy and the Theme Action Plan)의 근간이 되었다.
- 2008/09년 시기에 스웨덴 쇠빙선 Oden 호를 이용하여 아문젠해 대륙붕역에서 해양조사를 실시하였고, 이 자료로부터 해빙에 대한 CDW의 영향을 정량적으로 산출되었다.
- 남극 아문젠해의 크릴 음향조사는 유빙에 의한 영향으로 쇠빙선을 제외한 일반 연구선의 접근이 불가능하여, 국외에서도 많은 연구가 실시되지 못하였다.
- 캐나다의 NSERC(Natural Sciences and Engineering Research Council) 연구팀은 2003-2004년에 아문젠해에서 보퍼트해(Beaufort Sea)까지 저서경계층(Benthic boundary layer)에 서식하는 동물플랑크톤의 C:N:P와 지방 구성비를 최초로 보고하였다.
- 미국에서는 남극반도 대륙붕에서 1992년부터 2007년까지 16년동안 시계열 퇴적물트랩을 이용하여 유기탄소 침강플럭스를 하였는데, 여름에 높은 플럭스를 보였고 겨울에 낮은 플럭스를 나타냈으며, 표층해수에서 생산된 총유기탄소의 4%가량이 수심 170 m에 침강하였다.
- 미국에서도 2011년에 아문젠해 폴리냐에 시계열 퇴적물트랩을 계류하여 2012년 2월에 회수하였는데, 유기탄소 플럭스는 폴리냐가 형성되는 여름동안에 매우 높은 값들을 보인 반면, 폴리냐가 형성되지 않는 나머지 계절에서는 유기탄소 플럭스가 거의 관측되지 않았다

제 3 장 연구개발 수행 내용 및 결과

제1절 남극 아문젠해에서 침강입자 플럭스의 시간 및 공간 변화

1. 침강입자 플럭스 및 조성의 시간 변화

남극 아문젠해에서 세 정점(K1, K2, K3)에 2012년 3월부터 2013년 3월까지 1년동안 퇴적물트랩을 계류하여 침강입자 플럭스를 관측하였다(그림 1). 정점 K1은 아문젠해 북쪽 해빙해역(72.40S°, 117.72W°)에 위치하였고 수심은 530m이며 퇴적물트랩 계류수심은 400m이었다. 정점 K2는 아문젠해 폴리나 중앙해역(73.38S°, 114.97W°)에 위치하였고 수심은 830m이며 퇴적물트랩 계류수심은 410m이었다. 정점 K3는 Dotson Ice Shelf(74.19S°, 112.54W°) 앞에 위치하였고 수심은 1057m이며 퇴적물트랩 계류수심은 490m이었다.

정점 K1에서 총입자 플럭스는 0.7-396 mg m⁻² day⁻¹이었고, 2012년 3월과 4월에 값이 높았다(그림 2). 입자 플럭스는 샘플링 기간 초기인 2012년 3월에 가장 높았고 6월에는 16 mg m⁻² day⁻¹로 꾸준히 감소했다. 0.7-7.0 mg m⁻² day⁻¹의 범위로 낮은 플럭스가 7월부터 12월까지 지속되었다. 총 입자 플럭스는 2013년 1월에 약간 증가했고 샘플링 기간이 끝나는 3월 16일까지 12-76 mg m⁻² day⁻¹로 변동했다. 이전 여름에 기록된 것과 같은 입자 플럭스의 두드러진 피크는 발견되지 않았다. 정점 K2에서 총 입자 플럭스는 3.0-273 mg m⁻² day⁻¹였다(그림 2). 2월 중순부터 시료가 채집되었고, 2011-2012년 여름의 침강 입자 플럭스는 누락되었다. 총입자 플럭스는 2012년 11월까지 3.9-70 mg m⁻² day⁻¹으로 낮게 유지되다가, 꾸준히 증가하여 2012년 12월 말부터 2013년 1월 초에 최댓값이 되었다. 1월 24일부터 샘플링이 끝날 때까지 총입자 플럭스는 5.0 mg m⁻² day⁻¹이하로 낮아졌다. 우리는 트랩회전 기능을 확인했음에도 불구하고, 이러한 플럭스의 급격한 감소가 샘플링 인공물 때문인지 알 수 없었다(갈매기가 막혔을 가능성이 있다). 정점 K3에서의 총 입자 플럭스는 2.5-162 mg m⁻² day⁻¹였다. 정점 K3에서의 일시적인 변동은 정점 K2에서와 유사했다(그림 2). 샘플링이 시작되는 2012년 2월 말에 입자 플럭스가 높게 관측되지 않았다. 플럭스가 증가하기 시작할 때인 11월까지 겨울철 플럭스는 낮았다. 2013년 1월에 최댓값이 관측되었고, 이후에 입자 플럭스는 급감했다.

정점 K1의 유기탄소 함량은 7,8월 최대 29%까지 증가하기 전까지인, 2012년

3-5월 기간에 높은 값으로 5.6-6.3%였다(그림 3). 유기탄소 함량은 2012년 10월에 약 14%로 점차 감소하였다. 그 후에, 여름의 유기탄소 함량은 5-8%로 낮게 유지되었다. 반대로, 정점 K2에서는 겨울보다 여름에 더 높은 값이 관측되었다. 2012년 2-4월에 유기탄소 함량은 23%로 최댓값이었다. 이후 2013년 1월 중순까지 3.5-6.0%로 유지되고(8월의 11%는 제외) 2013년 2월에 14.6%까지 증가했다. 정점 K3에서, 유기탄소 함량의 시간에 따른 변동과 그 규모는 정점 K2와 유사했다. 유기탄소 플럭스의 시간에 따른 변동은 총 입자 플럭스와 유사했다(그림 3). 유기탄소 플럭스는 정점 K1, K2, K3에서 각각 0.4-25, 0.4-29, 0.5-16 mg m⁻² day⁻¹였다. 샘플링 기간 가중 평균 유기탄소 플럭스는 정점 K1, K2, K3에서 각각 4.0, 3.8, 2.1 mg m⁻² day⁻¹였고, 이는 연간 플럭스 1.5, 1.4, 0.78 gC m⁻² yr⁻¹와 일치했다.

정점 K1에서 CaCO₃는 입자 플럭스의 3.2%(연간 통합 플럭스 기준)를 차지했다(그림 3). 기간 가중 평균 CaCO₃ 함량은 정점 K1 보다 K2, K3 두 정점에서(각각 1.5%, 2.7%) 더 낮았다. CaCO₃ 플럭스는, K1에서 최댓값 11 mg m⁻² day⁻¹로, 총 플럭스의 가장 적은 비율을 차지했고 모든 정점에서 거의 중요하지 않았다(그림 3).

정점 K1에서 생물기원 오팔 함량은 2012년 6월에 43%까지 감소하기 전, 2012년 3월에 최고치(70%)였다(그림 3). 2013년 1월에 27%로 시작하여 2월 중순에 51%까지 증가했다. 정점 K1에서 생물기원 오팔 플럭스는 6.4-277 mg m⁻² day⁻¹였다(그림 3). 정점 K2에서, 생물기원 오팔 함량은 10%에서 28%였다. 오팔 함량은 2012년 11월에 증가하기 시작하여, 2013년 1월에 최댓값에 도달했다. 생물기원 오팔 플럭스는 2.9-75 mg/m²/d였다(그림 3). 세 정점에서, 생물기원 오팔 함량과 플럭스는 정점 K3에서 가장 낮았고, 오팔 플럭스의 범위는 0.5-18 mg m⁻² day⁻¹였다.

비생물기원 물질은 총 질량과 생물기원 오팔, CaCO₃, 유기탄소×1.88(Lam et al., 2011)의 합계의 차이로 계산하였다. 불확실성은 10% 이하이다. 비생물기원 물질은 정점 K2, K3에서 우세하고 입자 플럭스의 최대 80%를 차지하였다(그림 3). 비생물기원 물질 플럭스는 모든 정점에서 여름에 최고치였고, 최대 플럭스는 12-1월에 정점 K2에서 관측되었다(그림 2).

규조류 플럭스는 정점 K1에서, 특히 2012년 3월과 4월에 가장 높았다(그림 4). 정점 K1에서 규조류 플럭스는 겨울에 낮게 유지되다가 2013년 1월부터 3월의 샘플링 마지막까지 증가했다. 그러나 2013년 3월의 최대 플럭스는 그 규모가 2012년 3월보다는 낮았다. 정점 K2와 K3에서, 2012년 2-4월에 규조류 플럭스의 두드러진 피크는 관측되지 않았다. 규조류 플럭스는 K2, K3 두 정점에서 2012년 12월에 증가하기 시작했고, 2013년 1월에 피크를 보였다. 정점 K2와 K3에서 규조류 플럭스 피크는 정점 K1보다 더 일찍(1달 이상) 발생했다.

2. 해빙 및 유기탄소 플럭스의 시간 변화

해빙은 표층 가까이에서 광합성 유효복사, 일차생산, 그리고 일차생산자에게 영향을 주고(Smith Jr and Comiso, 2008; Smith Jr et al., 2014) 그에 따라 유광대부터 심층까지의 입자 수송 규모와 효율에 영향을 준다 (Ramseier et al., 1999; Garrity et al., 2005). 계절적 해빙 지역에 대해 연간 해빙 농도의 함수로서 유기탄소 플럭스를 계산하기 위한 모델이 개발되었다 (Garrity et al., 2005). 이 모델은 연간 해빙 농도가 80%를 초과할 때 유기탄소 플럭스를 낮게 계산했다. 이 모델과 비교할 때, 유기탄소 수송과 관련하여, 항시해빙 지역은 계절적 해빙 지역과는 다르게 행동한다는 점이 강조되며, 정점 K1에서 연간 유기탄소 플럭스는 해빙 농도에 따른 예상보다 두 배 이상이었다.

정점 K1에서 여름 유기탄소 플럭스는 연간 변동이 크게 나타났다(그림 5). 예를 들어, 2011년 1월에 두드러진 피크가 있었지만 2013년 1월에는 나타나지 않았다. 또한, 2012년 3월의 유기탄소 플럭스는 다른 두 해 보다 더 컸다. 정점 K1에서 규조류 세포 플럭스와 유기탄소 플럭스는 좋은 상관관계를 보였다($R^2=0.98$, 그림 4). 규조류의 유기탄소 함량은 세포 당 128-158 pgC의 범위로 보고된다 (Cornet-Barthaux et al., 2007). 이러한 값을 바탕으로, 규조류 플럭스를 유기탄소 플럭스로 변환할 때, 2012년 3,4월에 관측된 유기탄소 플럭스는 규조류로 계산한 유기탄소 플럭스로 완전히 설명할 수 있다.

해빙 농도는 항시 해빙 지역에서 유기탄소 생산성과 플럭스에 영향을 주는 중요한 파라미터로 작용한다. 해빙이 언제 감소하기 시작하는지 나타내기 위해, 우리는 다른 연구에서처럼 해빙 농도가 처음 50%에 도달하는 날짜를 이용했다. 2011년에, 2010년 12월 해빙이 감소한 지 33-34일 후 유기탄소 플럭스가 최대치를 보였다(그림 6). 그 이후 여름 동안, 해빙 농도는 2013년 2월 23일에 겨우 50%가 되었다. 두 번째 해에 약 60일간의 공백 이후, 샘플링을 3월 7일에 다시 시작할 수 있었고, 이 샘플링 기간은 유기탄소 플럭스가 감소하는 단계라 피크를 해석하지 못할 수 있다. 하지만, 해빙감소부터 식물플랑크톤 블룸까지 약 40일이 걸린다면, 우리와 Yager et al. (2016) 또한 여름 이전에 관측했기 때문에, 우리의 첫 샘플은 유기탄소 플럭스 최대치를 측정할 것이 된다. 2012년 3월 첫 샘플에서 유기탄소 플럭스($24.8 \text{ mgC/m}^2/\text{d}$)는 약 2011년 1월의 유기탄소 피크($54.9 \text{ mgC m}^{-2} \text{ day}^{-1}$)의 약 절반인 값이었다(그림 5). 이 차이는 월별 통합 값을 비교했을 때 또한 두드러졌다(3월 $768 \text{ mgC m}^{-2} \text{ month}^{-1}$ vs. 1월 $1140 \text{ mgC m}^{-2} \text{ month}^{-1}$). 2013년, 해빙 농도는 3월 14일 약 50%였고 유기탄소 플럭스는 샘플링 기간이 끝날 때까지 증가했다. 비록 2000만

cell m⁻² day⁻¹을 초과하는 규조류 플럭스 값이 식물플랑크톤 블룸이 발생했음을 나타내지만, 샘플링 기간 마지막의 유기탄소 플럭스가 지난 두 여름보다 더 낮았다. 2013년 3월 중순 이후 유기탄소 플럭스가 더 증가했는지 아닌지를 결정할 자료는 없다.

이렇게 짧은 시계열 자료를 바탕으로, 12월과 4월 사이의 유기탄소 플럭스는 복합적 시간 플럭스와 피크 규모 모두와 관계되어 해빙 농도 감소 시기에 영향을 받은 것 같다. 해빙 감소와 유기탄소 플럭스 피크 간의 시간차에 대한 설명은 “과중 가설”일 수 있다. 이것은 해빙 조류가 해빙이 용해됨에 따라 해빙에서 수층으로 방출되는 것이고, 그 수층에서 잇따른 대변성이 발생하도록 자극하는 것이다 (Lizotte, 2001). 고립이 감소하는 계절인 2013년 3월에, 본격적인 대변성이 발생하기에는 해빙이 너무 늦게 녹기 시작했다. 우리의 예비적 해석은 해빙 감소 그 자체뿐만 아니라, 해빙 감소시기가 항시해빙 지역의 규조류 대변성과 유기탄소 수송 강화에 중요하다는 것이다. 그러므로, 정점 K1에서 아문젠해 폴리냐 중앙만큼 높은 유기탄소 플럭스가 관측되었을지라도, 이러한 제한점 때문에 항시해빙 지역 전체의 유기탄소 수송이 동등하게 높다고 예측할 수는 없다. 아문젠해의 항시해빙 지역 일부 지역에서는 아문젠해 폴리냐에 비해 낮은 유기탄소 축적률을 보이는데, 이것은 이 가설을 뒷받침해 준다(M. Kim et al., 2016). 궁극적으로, 해빙 농도와 플럭스 생물계절학 사이의 정량적 관계를 확립하기 위해서는 더 오랜 시계열 자료가 필요하다.

3. 침강입자 플럭스와 화학조성의 공간 변화

정점 K1, K2에서의 연중 유기탄소 플럭스는 유사하지만, 생물학적 입자 조성은 달랐다. 침강 입자에 대해 생물기원 규소의 조성은 정점 K1에서 총 플럭스의 62%로 가장 높았고, 정점 K2, K3에서는 각각 20%, 9%였다(그림 3). 생물기원 규소/유기탄소 비율은 정점 K1에서 2.8, 정점 K2에서 1.2, 정점 K3에서 0.46 이었다. 생물기원규소 플럭스는 침강입자 플럭스에서 방산충(radiolarians) 및 규질편모류(silicoflagellates)는 거의 관측되지 않기 때문에, 대부분이 규조류에 의한 것이다. 유기탄소 플럭스에 대한 규조류 플럭스 비율은 정점 K1에서 가장 높았다 (그림 4). 유기탄소 플럭스에 대해 규조류 조성이 변화함에도 불구하고, 플럭스는 모든 정점에서 잘 일치하였다.

침강입자 플럭스 조성의 차이는 2011년 1월 (Yang et al., 2016)과 2014년 1월 (Lee et al., 2016b)의 탐사에서 100m 상부 두 지역 사이에서 관측된 뚜렷한 식물플랑크톤 조성과의 비교될 수 있다. Yang et al. (2016)은 2011년 1월에 규조류가 총 식물플랑크톤 생물량의 90±44%와 24±10%를 차지했다고 보고했다. 반면, Phaeocystis

antarctica (*P. antarctica*)는 항시 해방 지역과 아문젠해 폴리냐에서 각각 2% 와 73±32%를 차지했다. 식물플랑크톤의 유사한 공간적 변동성은 2012년 2월과 2014년 1월의 탐사의 색소 분석을 통해 관측되었다(Lee et al., 2016a).

두 위치가 아문젠해 폴리냐 내에 있을 때, 정점 K3에서 유기탄소 플럭스는 정점 K2의 절반 정도였고, 공간적으로 불균일한 분포의 유기탄소 생산성에 영향을 주었다. 정점 K2보다 80m 깊은 정점 K3에서의 샘플링 깊이는 관측된 차이의 주요 원인이 아니고, 이는 Martin Curve에 의해 410m부터 490m까지의 유기탄소 플럭스 감소가 약 15%이기 때문이다. 우리는 b 값을 -0.8로 하였고, 490m의 플럭스 값을 수송 생산성 값으로 계산한 후, 이를 이용하여 410m의 유기탄소 플럭스를 계산하였다. 정점 K2에서, 12월과 1월 상반기의 규조류 플럭스는 정점 K3보다 훨씬 높았다. 위성자료를 이용할 수 있는 여름에는, 표층 엽록소-a 농도가 아문젠해 폴리냐 주변 부보다 중앙부에서 몇 배나 높았다. 2012년 11월에서 2013년 2월의 평균 일차생산량은 정점 K2, K3이 있는 지역에서 각각 760, 550 $\text{mgC m}^{-2} \text{day}^{-1}$ 였다. 동일 기간에, 기간 가중 평균 침강 유기탄소 플럭스는 정점 K2, K3에서 각각 7.3 그리고 3.6 $\text{mgC m}^{-2} \text{day}^{-1}$ 였고, 이것은 결과적으로 아문젠해 폴리냐에서 1% 이하의 수송 효율(일차생산량에 대한 유기탄소 플럭스)을 의미한다.

우리는 스냅샷을 제외한 일차생산량 자료가 없어서 정점 K1에 대한 수송 효율을 결정할 수 없었다. 하지만, 정점 K1에 대해 규조류 우세가 유기탄소 수송 효율에 영향을 줄 수 있다. 규조류의 비교적 많은 양과 규산질 광물 함량은 침강을 용이하게 한다. McDonnell and Buesseler (2010)은 입자 크기 스펙트럼과 그에 상응하면 침강 속도를 계산하여, 규조류와 크릴 배설물 입자가 크기 스펙트럼에 대해 침강속도가 빠른 것을 알아냈다. 아문젠해 폴리냐에서 수송 효율에 영향을 주는 요소들은 *P. Antarctic*의 느린 침강속도(Dunbar et al., 1998; Asper and Smith Jr, 1999)와 수층에서의 효율적인 유기물 분해이다(Ducklow et al., 2015).

4. 비생물기원 입자의 조성

시료채집 해역이 대륙붕에 위치했기 때문에, 수집된 침강입자에 대해 외래 유기물과 육상기원 입자의 측면 공급의 기여도가 상당할 것으로 예상되었다. 항시해빙 지역에서 전년에 수집된 침강입자 샘플의 방사성탄소 분석은 오래된 유기탄소의 측면 공급이 겨울에 한해 유기탄소 유입에 상당한 근원이 될 수 있음을 의미한다(Kim et al., 2015).

우리는 결석 형성 입자를 대신하여 비생물기원 물질을 이용했다. 비생물기원 물질은 특히 정점 K2(연간 통합 플럭스 기준 62%, 평균 플럭스 = 41.0 mg m^{-2}

day⁻¹)와 정점 K3(68%, 19.0 mg m⁻² day⁻¹)에서 침강입자 플럭스 대부분을 차지했지만, 정점 K1(19%, <12 mg m⁻² day⁻¹)에서는 덜 중요하였다(그림 3). 육상기원 물질의 근원은 대기 먼지 침적, 퇴적물 재부유, 그리고 해빙, 빙산, 빙붕의 용해를 포함한다 (Planquette et al., 2013). 남극 연안의 대기 먼지 침적은 관측된 비생물기원 물질 플럭스에 비해 무시할 만하다 (Planquette et al., 2013). 정점 K1에 계류한 퇴적물트랩은 해저면에 가장 가까웠음(바닥에서 약 130m)에도 불구하고, 총입자 플럭스는 6월에서 12월 사이에 매우 낮았고, 이는 지역적 퇴적물 재부유가 주원인이 아님을 의미한다. 정점 K2에서의 값은 정점 K1과 K3보다 더 높았고, 이것은 육상기원 입자가 해빙 용해로부터 나왔음을 의미한다. 다른 계절보다 여름에 비생물기원 물질 플럭스가 높은 것 또한 입자가 해빙 용해로부터 방출되는 것을 의미한다. 미세입자들은 여름의 높은 침강 입자 플럭스에 의해 더 효과적으로 제거될 수 있었다. Planquette et al. (2013)은 다른 지역보다 Dotson Ice Shelf 앞에서 입자(5 μm 이상) 알루미늄 농도가 상당히 높음을 보여주었다. 알루미늄 농도는 해저면 근처와 표층 근처에서 특히 높고, 입자 알루미늄의 명확한 두 근원이다 (Planquette et al., 2013).

침강 입자의 $\Delta^{14}\text{C}$ 값과 비생물기원 물질의 함량은 음의 상관관계를 보였다(그림 6). 연구지역에서 2012년에 수집된 표층수 용존무기탄소의 $\Delta^{14}\text{C}$ 값은 -135‰과 -155‰사이였다(Kim et al., 2016). 침강 유기탄소에 대한 모든 관측 값은 이보다 낮았고, 침강 유기탄소는 외래 근원으로부터 오래된 유기탄소를 함유하고 있음을 의미한다. 아문젠해 표층 퇴적물에서 $\Delta^{14}\text{C}$ 값은 아문젠해 폴리나의 정점 K2 근처에서 -311‰, Dotson Ice Shelf 근처에서 -418‰ 사이의 범위였다(M. Kim et al., 2016). 그러므로, 재부유 퇴적물을 계산에 넣은 것은 관측한 $\Delta^{14}\text{C}$ 값에 대해 그럴듯한 설명이다. 게다가, 빙산과 빙붕의 용해에 의한 입자는 오래된 유기탄소를 공급한다.

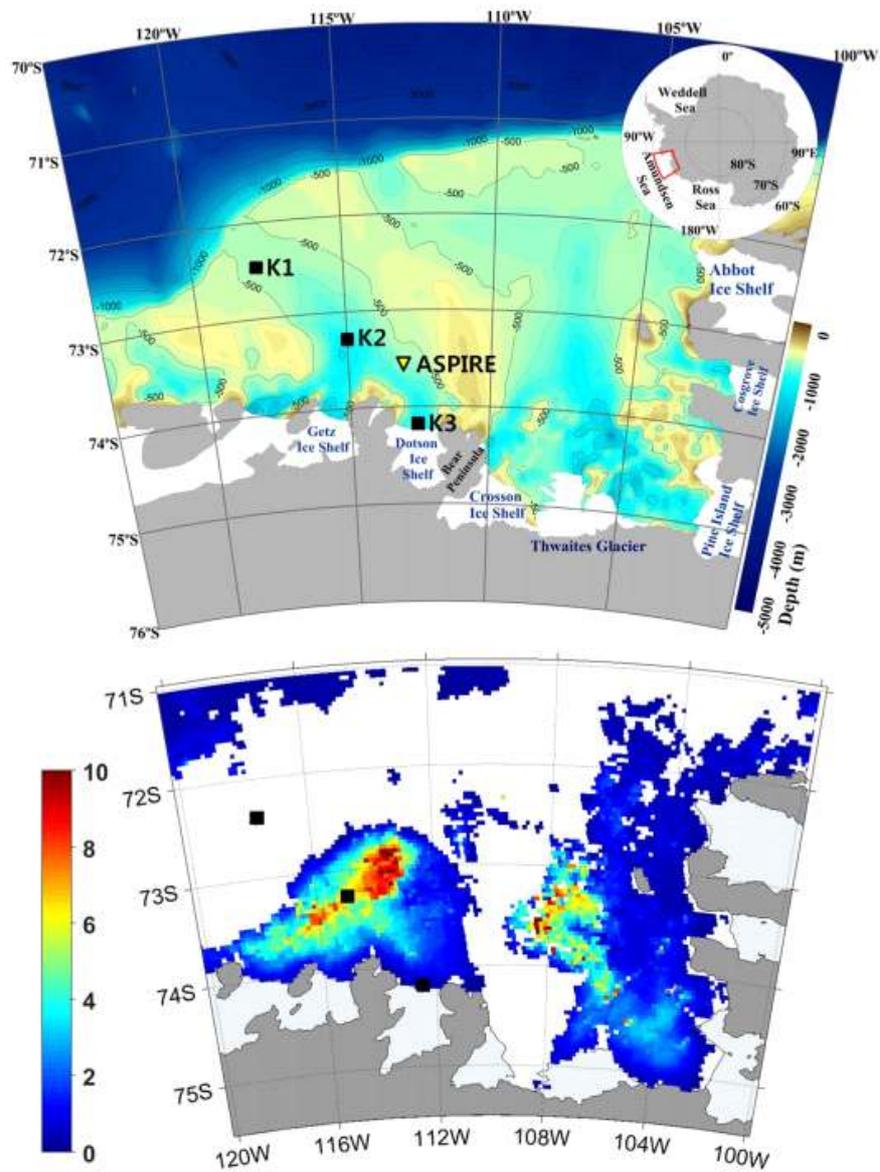


그림 1. 아문젠해 퇴적물트랩 계류 정점(K1, K2, K3) 위치(상)와 아문젠해 표층 엽록소 농도 분포(하)

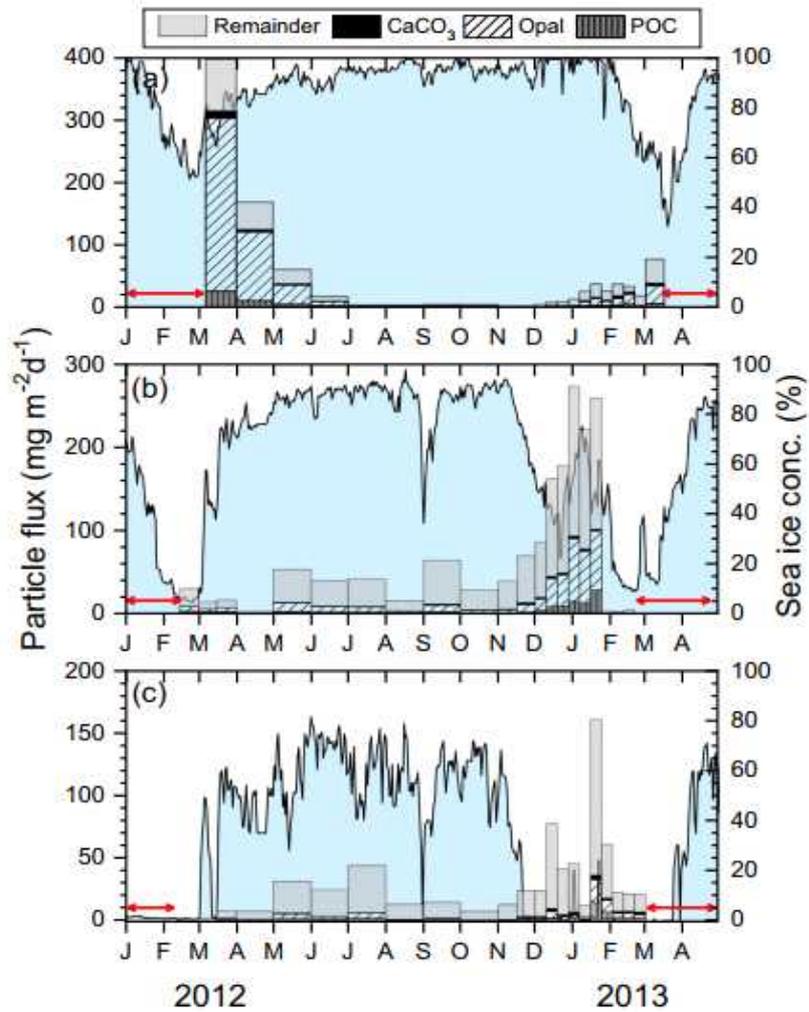


그림 2. 아문젠해 정점 K1(a), K2(b), K3(c)에서 총입자, 유기탄소, 탄산칼슘, 생물기원오팔, 비생물물질 플럭스와 해빙분포의 계절변화

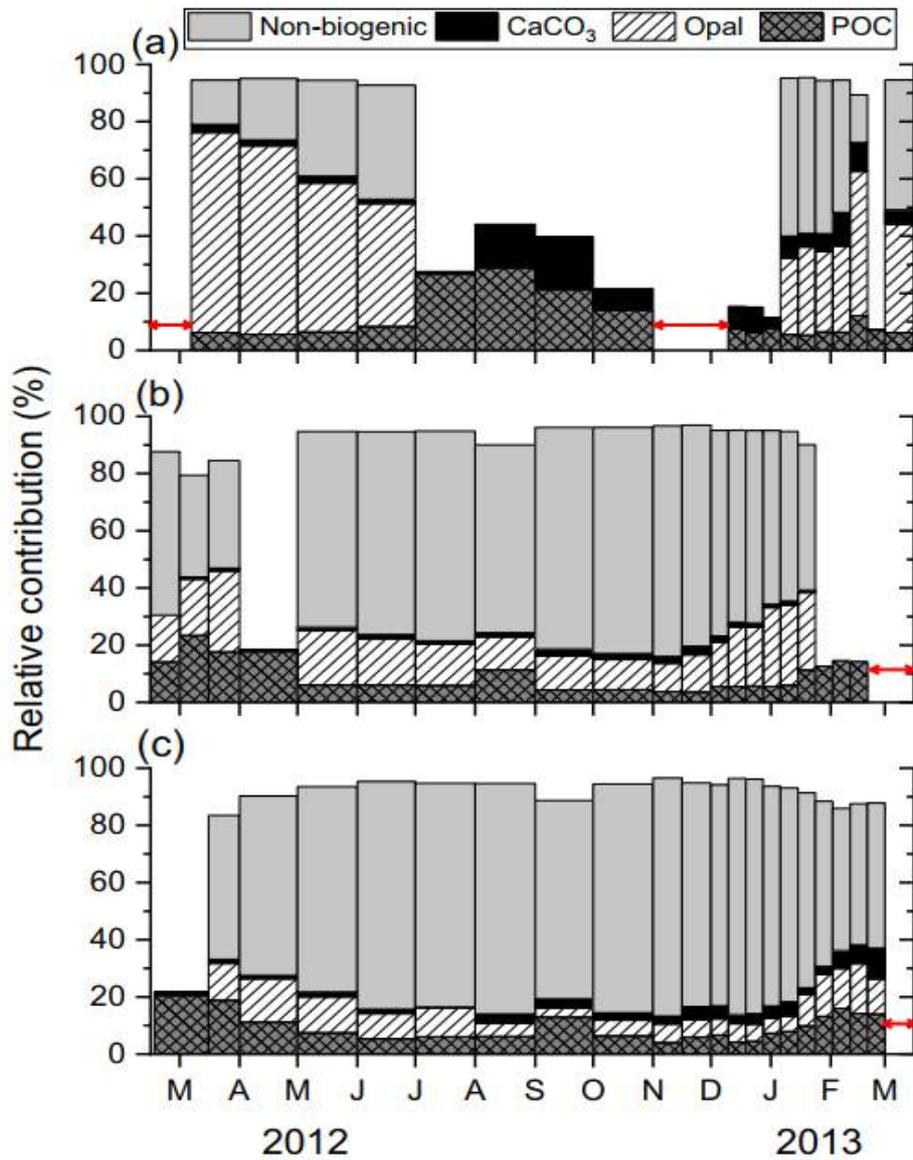


그림 3. 아문젠해 정점 K1(a), K2(b), K3(c)에서 유기탄소, 탄산칼슘, 생물기원오팔, 비생물물질의 상대적 기여도(%)의 계절변화

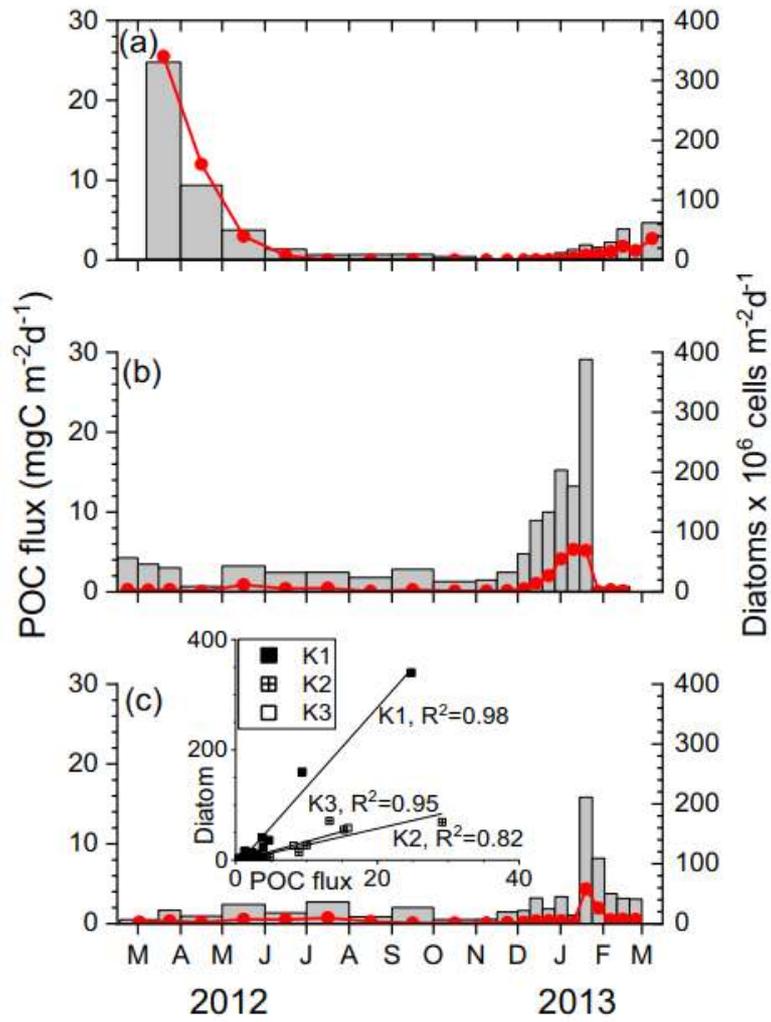


그림 4. 아문젠해 정점 K1(a), K2(b), K3(c)에서 유기탄소(막대바)와 규조류(점선) 플럭스의 계절변화

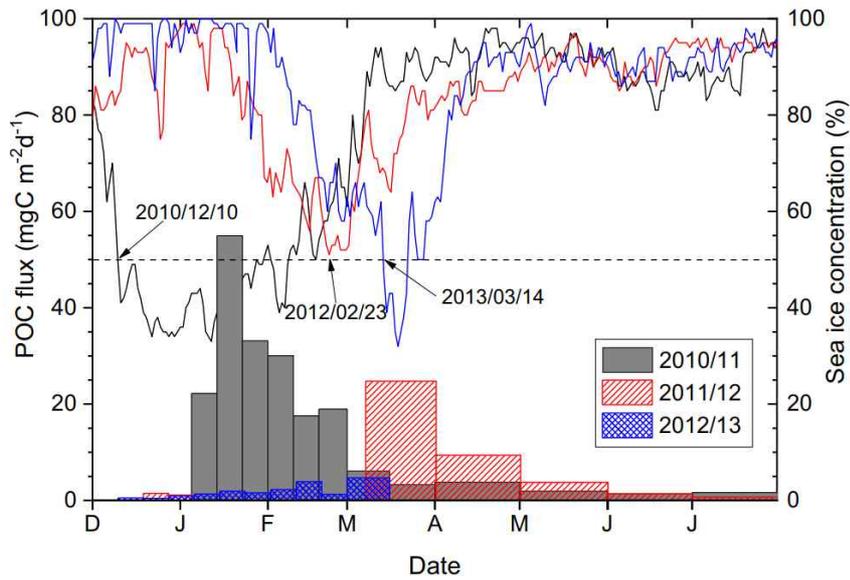


그림 5. 2010년, 2011년, 2012년에 정점 K1에서 유기탄소 플럭스와 해빙분포의 계절변화

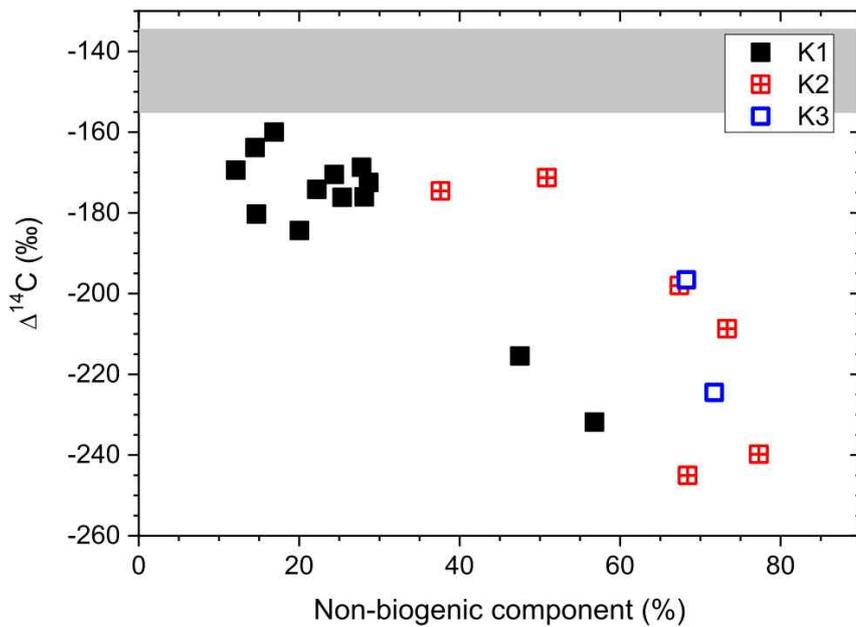


그림 6. 비생물물질 함량과 탄소 방사능동위원소와의 상관관계

제2절 남극 아문젠해 해양산성화 경향

1. 아문젠해 표층 해양산성화

2018년 1-2월에 관측한 아문젠해 정점 위치는 그림 7에 표시하였다. 연구해역은 크게 세가지 해역으로 나누어진다; 해빙이 존재하는 해빙해역, 해빙이 존재하지 않는 폴리냐(polynya) 해역, 해빙이 존재하지 않으면서 ice shelf에 인접한 빙벽해역(그림 7). 아문젠해에서 표층수온은 $-1.62 \sim -0.33$ 의 범위를 보였으며, 해빙해역에서 가장 낮은 수온을 보였고 폴리냐 중앙해역에서 가장 높은 수온을 나타냈다(그림 8). 표층염분은 $33.33 \sim 33.98$ 의 범위를 보였으며, 북쪽에서 남쪽으로 갈수록 점차 증가하였다(그림 8). 엽록소 농도는 $0.03 \sim 7.61 \mu\text{g L}^{-1}$ 의 범위를 나타냈으며, 폴리냐 해역에서 높았고 해빙과 빙벽해역에서 낮았다(그림 8). dissolved inorganic carbon (DIC) 농도는 $2113.0 \sim 2196.7 \mu\text{mol kg}^{-1}$ 의 범위를 나타냈으며, 폴리냐 해역에서 가장 낮았고 빙벽해역에서 가장 높았다(그림 8). Total alkalinity (TA) 농도는 $2262.6 \sim 2314.1 \mu\text{mol kg}^{-1}$ 의 범위를 나타냈으며, 표층염분의 분포와 매우 유사하여 북쪽에서 남쪽으로 갈수록 점차 증가하였다(그림 8). 해양산성화 지표로 주로 이용되는 아라고나이트 포화도(aragonite saturation state)가 이용되는데, 아라고나이트 포화도가 1을 초과하면 아라고나이트 과포화 상태임을 지시해주고, 1이면 아라고나이트 포화 상태, 그리고 1 미만이면 아라고나이트 불포화 상태임을 지시해준다. 아라고나이트 포화도가 2 초과하면 해양산성화가 양호한 상태이고, 1~2 범위면 심각하게 진행되고 있는 상태이고, 1 미만이면 매우 심각한 상태임을 나타낸다. 아문젠해 표층해수에서 아라고나이트 포화도는 $1.34 \sim 2.00$ 의 범위를 나타냈으며, 폴리냐 해역에서 높았고 해빙과 빙벽 해역에서 낮았다(그림 8).

아문젠해 표층해수에서 아라고나이트 포화도에 영향을 미치는 주요 요인을 파악하기 위해서 아라고나이트 포화도와 염분, TA, DIC, 엽록소와의 상관관계를 파악하였다(그림 9). 그림 9에서 보는 바와 같이, 아라고나이트 포화도는 염분과 TA와는 아무런 상관관계를 보이지 않았다. 하지만 아라고나이트 포화도는 DIC와의 뚜렷한 음의 상관관계를 보였고 엽록소와는 뚜렷한 양의 상관관계를 보였는데, 이것은 아라고나이트 포화도가 표층해수에서의 생물생산력에 의해 크게 영향을 받고 있다는 것을 지시해준다. 엽록소 농도가 높은 것은 식물플랑크톤 생물량이 높다는 것을 지시해주고 일반적으로 식물플랑크톤 생물량이 높으면 일차생산력도 증가하게 된다. 식물플랑크톤이 광합성을 위해 용존 이산화탄소를 성취하며 DIC 농도가 감소하게 되고 DIC 농도가 감소하면 해수 pH가 감소하여 아라고나이트 포화도가 증가한다. 결국, 표층해수에서의 생물생산력이 증가하면, 엽록소 농도는 증가하고 동시

에 DIC 농도는 감소하여, 아라고나이트 포화도는 증가한다. 그래서 아라고나이트 포화도는 DIC와는 음의 상관관계를 보이고 엽록소와는 양의 상관관계를 보인다.

표층 엽록소 농도는 해빙과 빙벽 해역에 비해 폴리나 해역에서 월등히 높은 값을 보였다(그림 8), 이것은 폴리나 해역에서 생물생산력이 상대적으로 높다는 것을 지시해준다. 식물플랑크톤은 충분한 광량과 영양염 공급, 안정된 수층에서 대변성이 일어난다. 해빙 해역은 해빙이 존재하기 때문에 충분한 광량이 공급되지 않아서 엽록소 농도가 높지 않은 것으로 판단된다. 빙벽 해역은 혼합층 깊이가 100m 이상으로 매우 깊어서 수층이 안정화되지 않아서 엽록소 농도가 높지 않은 것으로 판단된다. 폴리나 해역은 해빙이 존재하지 않아서 충분한 광량이 공급되고 혼합층 깊이도 20~80m의 범위로 수층 안정도도 비교적 높아서, 엽록소 농도가 상대적으로 높게 관측되었다. 하지만 폴리나 해역에서 엽록소 농도가 동서를 기준으로 뚜렷한 차이를 보여, 서쪽 폴리나에 비해 동쪽 폴리나에서 월등히 높았다(그림 8). 동쪽과 서쪽 폴리나 모두에서 비슷한 강도의 태양광이 입사하기 때문에, 두 해역에서 동일한 유광대 깊이(평균 18m)을 보였다. 하지만, 혼합층 깊이는 동쪽 폴리나에서 수심 20m로 비교적 얇은 반면, 서쪽 폴리나에서는 수심 80m로 상당히 깊었다. 혼합층 깊이가 유광대 깊이보다 깊으면, 식물플랑크톤이 유광대에 체류하는 시간이 짧아져서 일차생산력이 감소하는 반면, 혼합층 깊이가 유광대 깊이보다 얇으면, 식물플랑크톤이 유광대에 체류하는 시간이 길어져서 일차생산력이 증가한다. 따라서 엽록소 농도가 서쪽 폴리나에 비해 동쪽 폴리나에서 월등히 높은 이유는 동쪽 폴리나에서는 유광대 깊이와 혼합층 깊이가 유사하여 식물플랑크톤이 유광대에 체류하는 시간이 길어져서 일차생산력이 증가한 반면, 서쪽 폴리나에서는 유광대 깊이보다 혼합층 깊이가 훨씬 깊어서 식물플랑크톤이 유광대에 체류하는 시간이 짧아져서 일차생산력이 감소했기 때문이다.

2. 아문젠해 수층별 해양산성화

아문젠해에서 수층별 해양산성화를 파악하기 위해서 남북 방향으로 수온, 염분, TA, DIC, 아라고나이트 포화도의 수직분포를 그림 10에 도시하였다. 수온은 수심 100m~300m 사이에서 -1.0°C 이하의 차가운 중층수가 존재하였고 그 이하 수심에서는 비교적 따뜻한 Circumpolar Deep Water가 유입되어 수온이 수심에 따라 점차 증가하여 저층에는 0.5°C 이상의 따뜻한 저층수가 존재하였다. 염분은 표층에서 33.3~33.9의 범위로 가장 낮았으며, 수심에 따라 점차 증가하여 저층에는 34.5 이상의 고염의 저층수가 존재하였다. TA 농도는 표층에서 $2300 \mu\text{mol kg}^{-1}$ 내외로 가장 낮았고 수심에 따라 점차 증가하여 저층에서 $2345 \mu\text{mol kg}^{-1}$ 이상의 높은 농

도가 관측되었다. DIC 농도는 TA 수직분포와 유사하여, 표층에서 $2125 \mu\text{mol kg}^{-1}$ 내외로 가장 낮았고 수심에 따라 점차 증가하여 저층에서 $2250 \mu\text{mol kg}^{-1}$ 이상의 높은 농도가 관측되었다. 하지만 표층 50m 이내 수심에서 DIC 농도는 TA와 크게 차이를 보여, 폴리나 해역에서 $2125 \mu\text{mol kg}^{-1}$ 이하의 낮은 농도가 관측되었고 해빙과 빙벽 해역에서는 $2125 \mu\text{mol kg}^{-1}$ 이상의 비교적 높은 농도가 관측되었다. 이처럼 폴리나 해역 표층 50m에서 낮은 DIC 농도가 관측된 것은 이 해역에서 생물생산력이 다른 해역보다 높아서 광합성에 의한 식물플랑크톤의 섭취 때문이다. 아라고나이트 포화도는 표층에서, 특히 폴리나 해역, 표층에서 1.8 이상의 높은 값들이 관측되었으며 수심에 따라 감소하여 수심 400m 이하에서 1.05를 보였고 700m 이하 수심에서 1.0 이하로 최저 값을 보였다. 특이한 사항은 해빙 해역과 폴리나 해역의 경계 해역, 수심 350m 이하 수심에서 아라고나이트 포화도가 1.0 이하로 최소 값을 보인 것이다. 아문젠해에서 아라고나이트 불포화(1.0 이하)는 빙벽 해역 수심 750m, 해빙 해역과 폴리나 해역의 경계 해역 수심 350m와 450m 등 3개 지점에서 관측되었다. 하지만 아문젠해 300m 이하 수심에서 아라고나이트 포화도가 1.01~1.05의 범위를 보여서, 아라고나이트 포화상태임을 지시해준다. 이것은 아문젠해 300m 이하 수심에서는 해양산성화가 심각하다는 것을 지시해준다. 또한 표층에서도 아라고나이트 포화도가 2.0 이하로 관측되어서 해양산성화 주의단계인 것으로 판단된다. 따라서 아문젠해는 표층에서 수심 300m 까지는 해양산성화 주의단계이고 300m 이하 수심에서는 해양산성화가 심각한 단계인 것으로 판단된다.

3. 아문젠해 해양산성화 미래변화 예측

해양산성화가 아문젠해에서 50년 후에 어떻게 변화하였는지를 예측해 보았다. 화석연료의 사용에 의해 대기 이산화탄소 분압이 매년 0.5% 씩 증가하고 화석연료의 사용에 의해 발생한 이산화탄소의 30% 가량이 해양으로 유입되고 있다. 이로 인해 표층해수에서 DIC 농도가 매년 $1.0 \mu\text{mol kg}^{-1}$ 씩 증가하고 있다 (IPCC 2007). 따라서 50년 후에 아문젠해 해수 DIC 농도가 $50 \mu\text{mol kg}^{-1}$ 증가하고 수온은 1.0°C 증가할 것으로 예측된다. 이것을 바탕으로 염분과 alkalinity는 현재와 같다고 가정하여 아문젠해에서 50년 후 아라고나이트 포화도 변화를 계산하였다. 50년 후 아문젠해 표층에서 아라고나이트 불포화(<1.0)가 해빙과 빙벽해역에서 예측되었고 폴리나 해역에서는 아라고나이트 과포화(>1.0)이 예측되었다(그림 11). 수직적으로는 해빙과 빙벽해역에서 아라고나이트 불포화가 표층부터 바닥까지 전체 수층에서 예측되었고 폴리나 해역에서는 50m 이하 수심에서 예측되었다(그림 12). 따라서 아문젠해에서 50년 후에는 폴리나 해역 표층 50m 층을 제외하고는 아라고나이트 불포화가

예측되어 해양산성화 매우 심각하게 진행될 것으로 예상된다.

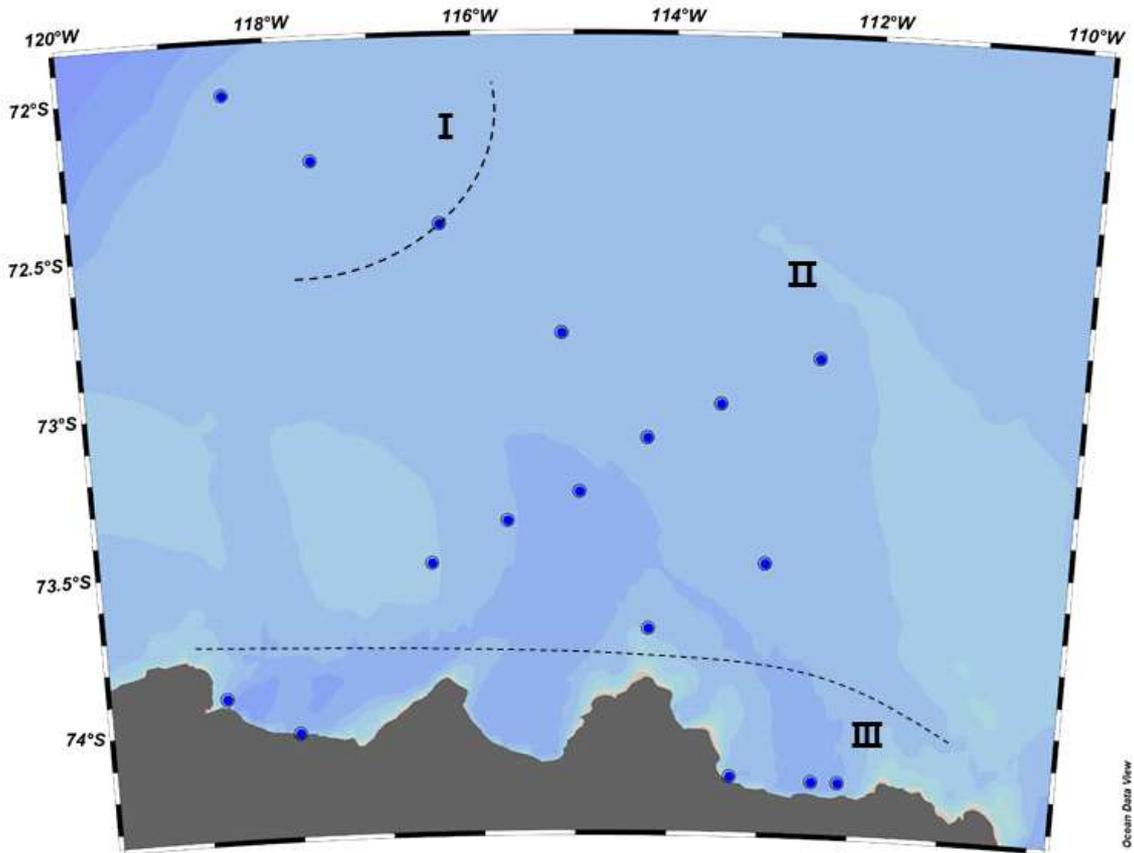


그림 7. 남극 아문젠해에서 시료채집 정점: I 해빙해역, II 폴리나 해역, III 빙벽해역

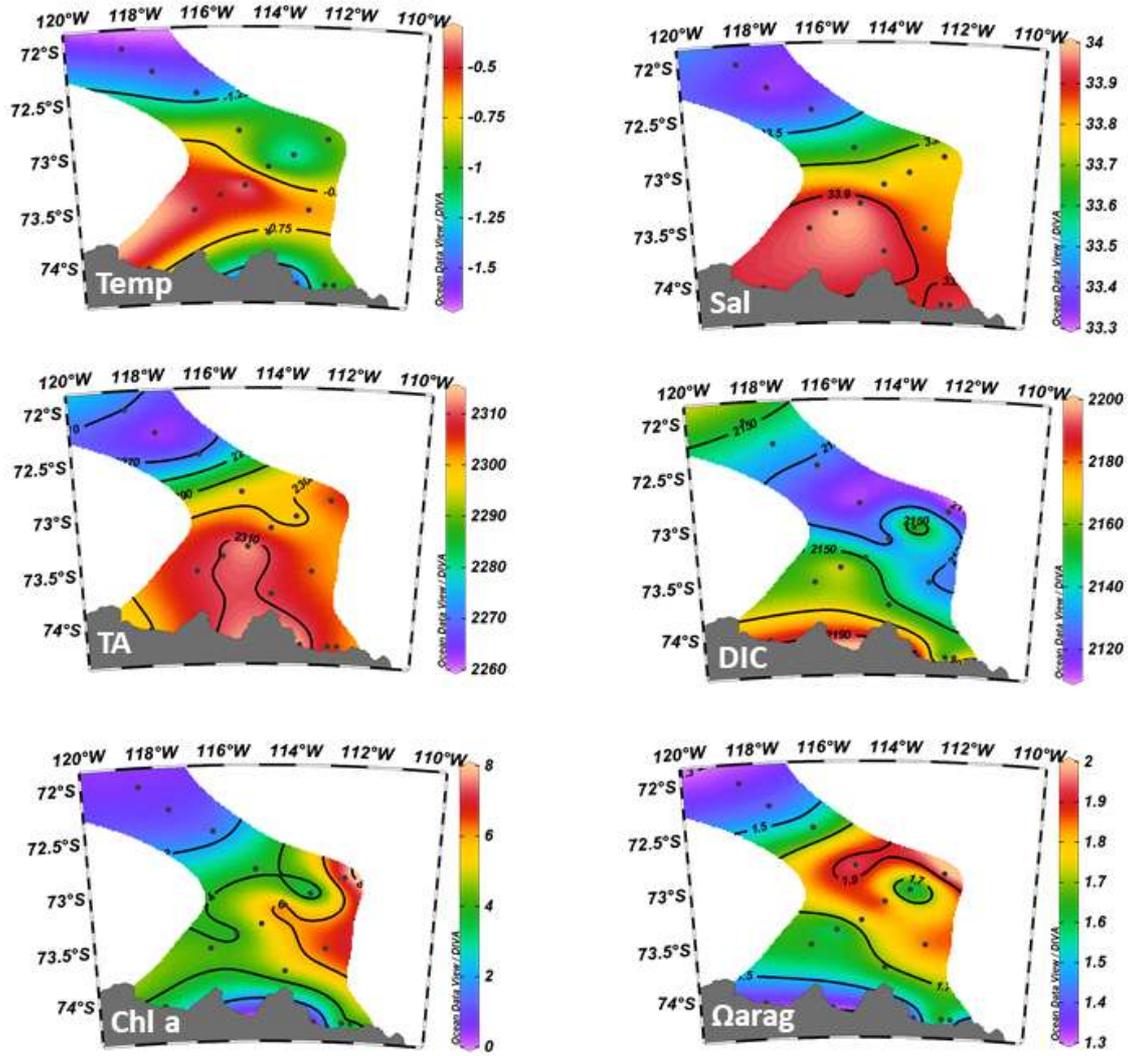


그림 8. 남극 아문젠해에서 수온, 염분, TA, DIC, 엽록소, 아라고나이트 포화도의 표층분포

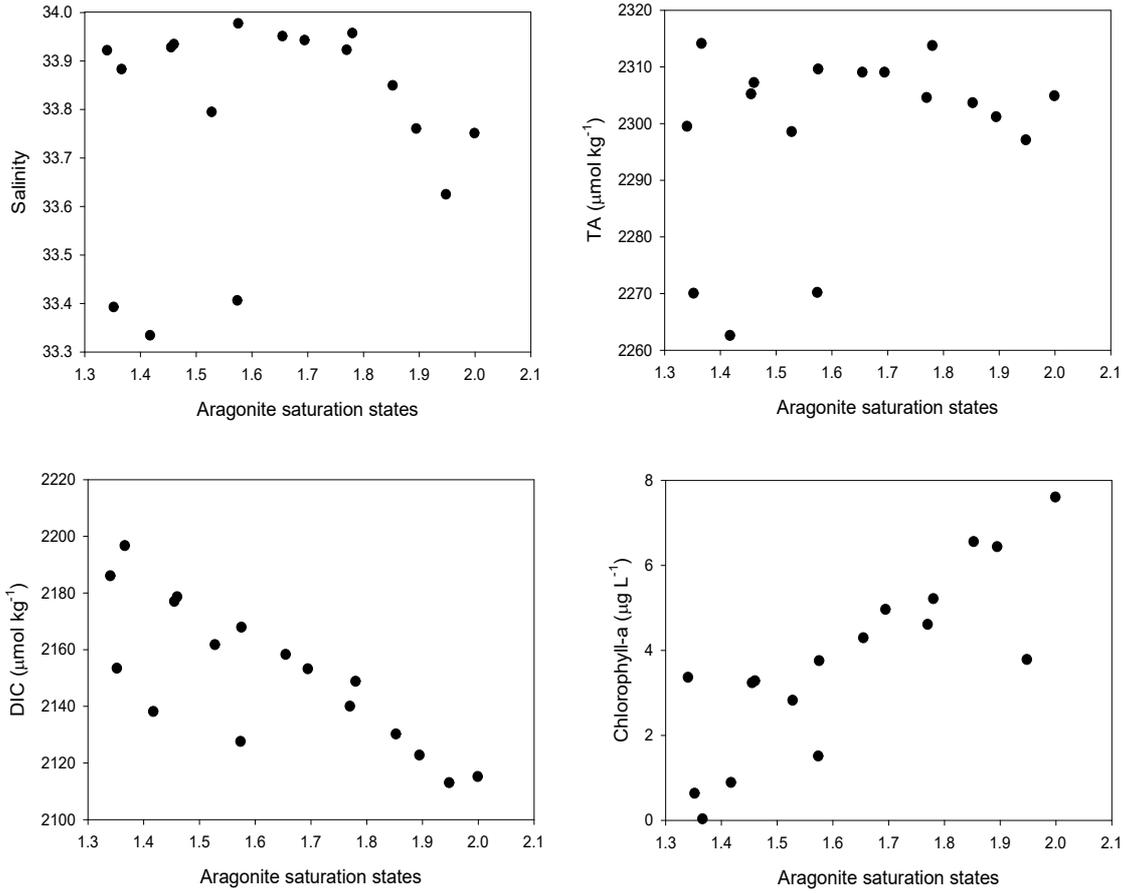


그림 9. 아라고나이트 포화도와 염분, TA, DIC, 엽록소와 상관관계

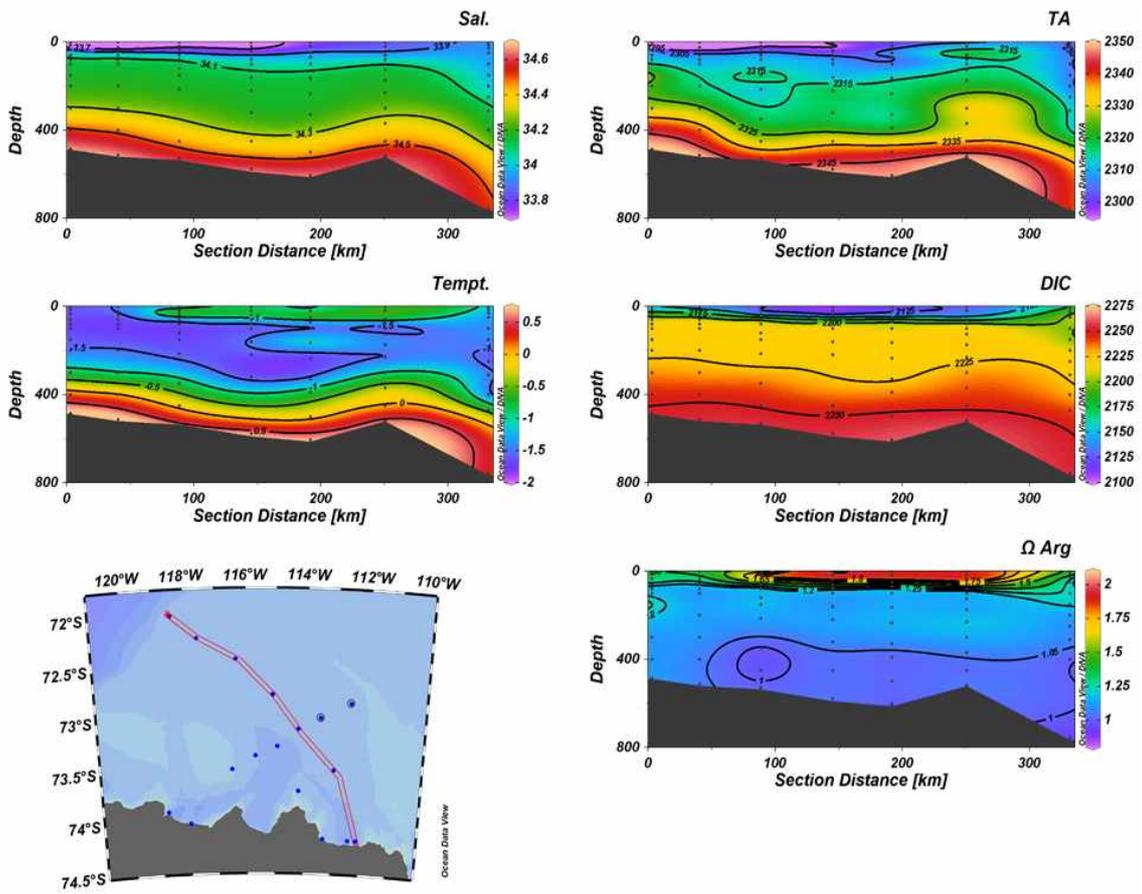


그림 10. 아문젠해에서 수온, 염분, TA, DIC, 아라고나이트 포화도의 수직분포

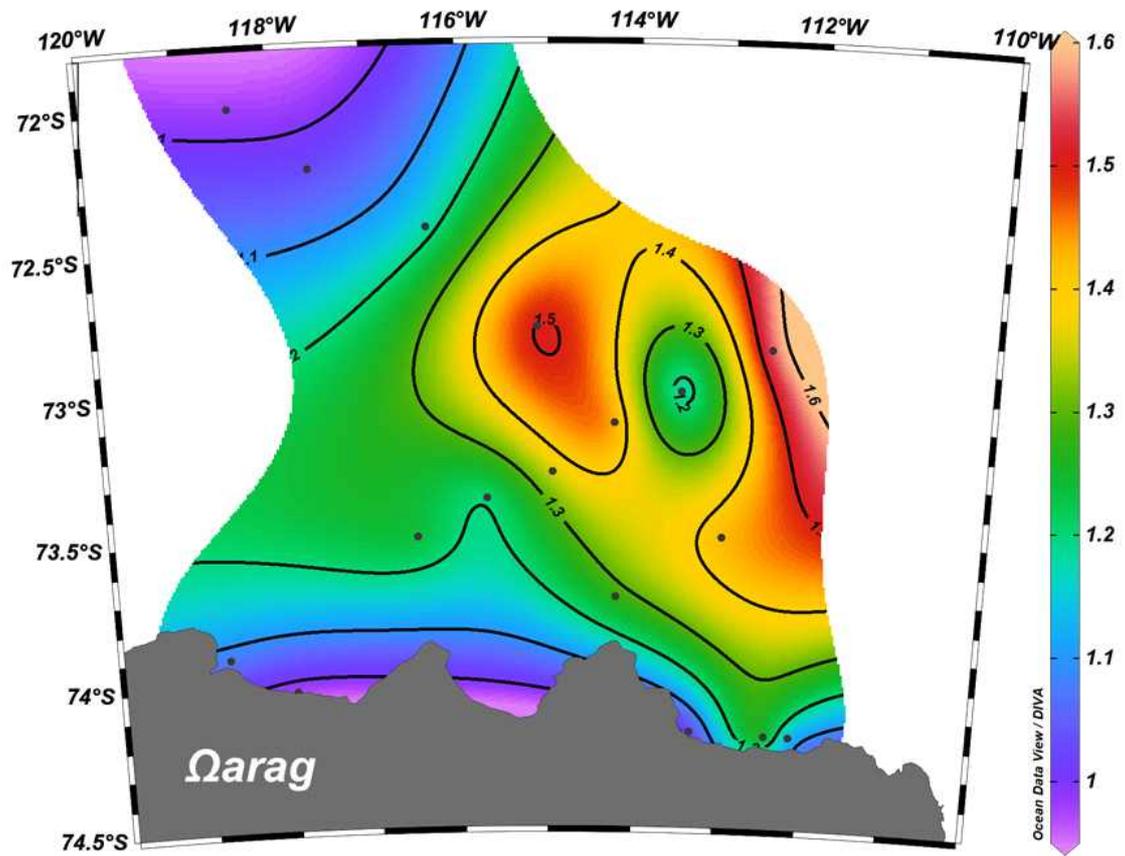


그림 11. 남극 아문젠해에서 50년 후 아라고나이트 포화도의 표층분포

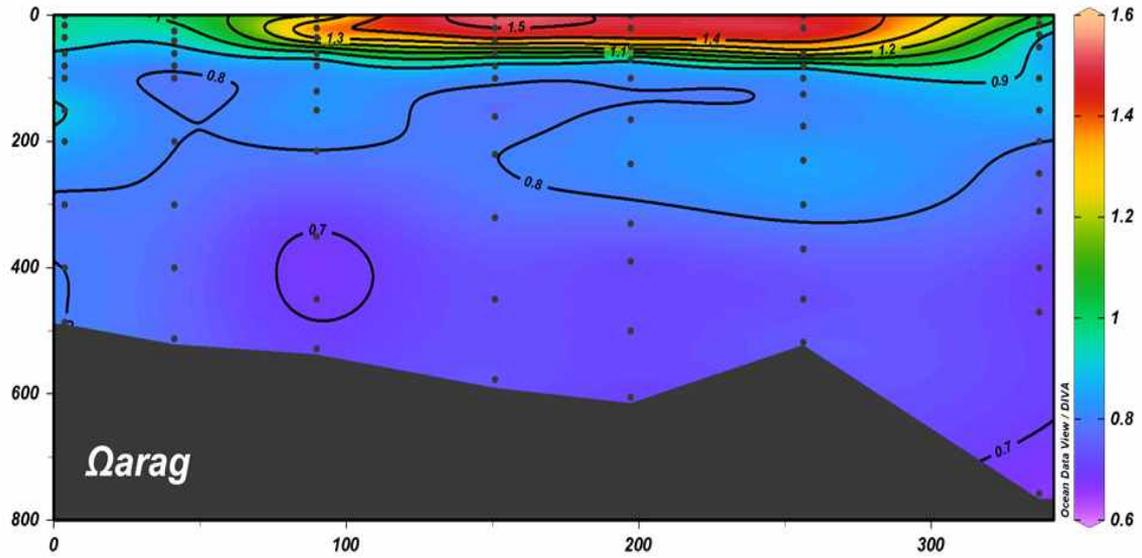


그림 12. 남극 아문첸해에서 50년 후 아라고나이트 포화도의 수직분포



제 4 장 연구개발목표 달성도 및 대외기여도

제1절 연구개발목표 달성도

총연구기간내 연차별 목표 대비 달성율(%)					
구분	연차별 달성내용				연차별 계획대 비 연구실 적 달성율(B) (%)
	성과목표	연구내용	가중치 (A)	달성실적	
1년차 (2017)	1.아문젠해 과 거 해양산 성화 상태 파악	1-1. 2014년에 관 측한 용존기탄 소와 알칼리도 자료 수집	0.3	<ul style="list-style-type: none"> - 2014년에 아문젠해에서 관측한 용존무기탄소와 알칼리도 자료 총 450개 수집 - 수집한 용존무기탄소와 알칼리도 자료로부터 아라고나이트 포화도 산출 	100
		1-2. 2014년 아문 젠해 해양산성 화 파악	0.7	<ul style="list-style-type: none"> - 아문젠해 표층해수에서 아라고나이트 포화도는 1.1-3.1의 범위로, 표층 전체 해역에서 아라고나이트에 대해 과포화상태이며, 아라고나이트 포화도가 해빙과 빙벽해역에 비해 폴리나해역에서 높았는데, 이것은 폴리나해역에서 일차생산성이 높아서 DIC 농도가 감소하여 pH가 증가하였기 때문임 - 수심 200m에서 아라고나이트 포화도가 1.0 이하가 관측되어서 아라고나이트 불포화가 시작되었고 수심 500m 이하에서는 대부분이 아라고나이트 불포화 상태를 보였음. 따라서 아문젠해 아라고나이트 불포화 수심은 500m임 	100
	계	1.0		100	

2년차 (2018)	1. 해수시료 및 퇴적물 트랩 시료 확보 및 분 석	1-1. 아문젠해에서 해수시료 채집 및 용존기탄소 와 알칼리도 분 석	0.5	<ul style="list-style-type: none"> - 아문젠해 32개 정점에서 410개의 해수 시료를 채집하여 용존무기 탄소와 알칼리도를 분석함 - 아문젠해 표층에서 용존무기탄소 농도는 2050~2180 $\mu\text{mol kg}^{-1}$의 범위를 보였으며 알칼리도 농도 는 2245~2317 ueq kg^{-1}의 범위 를 나타냈음 - 용존무기탄소 농도는 수심이 깊 어짐에 점차 증가하여 수심 800 m에서 2250 $\mu\text{mol kg}^{-1}$을 보였으 며, 알칼리도 농도도 수심이 깊어 짐에 점차 증가하여 수심 800 m 에서 2350 ueq kg^{-1}을 나타냈음 	100
		1-2. 아문젠해 퇴적 물트랩시료 확 보 및 유기탄 소, CaCO_3 , 생 기원규소 분석	0.5	<ul style="list-style-type: none"> - 아문젠해 빙벽해역에서 2016년 1 월부터 2018년 1월까지 2년동안 관측한 총질량 플럭스는 11.9~ 666.8 $\text{mg m}^{-2} \text{day}^{-1}$의 범위를 보 였으며 최소값은 2016년 6-7월에 보였고 최고 값은 2016년 1-2월 에 나타났음 - 유기탄소 플럭스는 1.05~35.3 $\text{mg m}^{-2} \text{day}^{-1}$의 범위를 보였고 최소값은 2016년 6-7월에 보였고 최고값은 2016년 3월에 나타났음 - CaCO_3 플럭스는 0.41~10.6 mg $\text{m}^{-2} \text{day}^{-1}$의 범위를 보였고 최소 값은 2016년 6-7월에 보였고 최 고값은 2016년 1-2월에 나타났음 - 생기원규소 플럭스는 1.8~277 $\text{mg m}^{-2} \text{day}^{-1}$의 범위를 보였고 최소값은 2016년 8-9월에 보였고 최고값은 2016년 2월초에 나타났 음 	100
	계	1.0		100	

3년차 (2019)	1. 아문젠해 해양산성화 와 탄소순 환 변화 과 약	1-1. 아문젠해에서 해양산성화 경 향 파악	0.3	<ul style="list-style-type: none"> - 아문젠해 표층해수에서 아라고나이트 포화도는 범위는 1.4-2.5의 범위로, 표층해수에서 아라고나이트가 과포화 상태를 보여 표층해수에서는 해양산성화가 심각하게 진행되고 있지않은 것으로 판단됨 - 아라고나이트 포화도는 표층에서 가장 높은 값을 보였고 수심에 따라 아라고나이트 포화도가 점차 감소하여 수심 800 m에서 아라고나이트 불포화가 관측되어 수심 800 m 이하에서는 해양산성화가 심각하게 진행되고 있음. 	100
		1-2. 아문젠해에서 해양산성화 미 래 변화 예측	0.2	<ul style="list-style-type: none"> - 50년 후 아문젠해 표층에서 아라고나이트 불포화가 해빙과 빙벽해역에서 예측되었고 폴리냐 해역에서는 아라고나이트 과포화가 예측됨. - 수직적으로는 해빙과 빙벽해역에서 아라고나이트 불포화가 표층부터 바닥까지 전체 수층에서 예측되었고 폴리냐 해역에서는 50m 이하 수심에서 예측되었음 	100
		1-3. 아문젠해에서 침강입자 플릭 스의 시간 및 공간 변화 파악	0.5	<ul style="list-style-type: none"> - 해빙해역에 위치한 정점 K1에서 총 입자 플릭스는 $0.7 \sim 396 \text{ mg m}^{-2} \text{ day}^{-1}$이었고, 2012년 3월과 4월에 값이 높았으며, 입자 플릭스는 2012년 3월에 가장 높았고 6월에는 $16 \text{ mg m}^{-2} \text{ day}^{-1}$로 꾸준히 감소함. 총입자 플릭스는 2013년 1월에 약간 증가했고 샘플링 기간이 끝나는 3월 16일까지 $12 \sim 76 \text{ mg m}^{-2} \text{ day}^{-1}$로 변동하였으며 이전 여름에 기록된 것과 같은 입자 플릭스의 두드러진 피크는 발견되지 않았음 - 폴리냐 해역에 위치한 정점 K2에서 총 입자 플릭스는 $3.0 \sim 273 \text{ mg m}^{-2} \text{ day}^{-1}$였으며, 2012년 11월까지 $3.9 \sim 70 \text{ mg m}^{-2} \text{ day}^{-1}$으로 낮게 유지되다가, 꾸준히 증가하여 2012년 12월 말부터 2013년 1월 초에 최댓값이 	100

			<p>되었음</p> <p>- 병벽해역에 위치한 정점 K3에서의 총 입자 플럭스는 2.5~162 mg m⁻² day⁻¹였으며, 2012년 2월 말에 입자 플럭스가 높게 관측되지 않았고 2013년 1월에 최댓값이 관측되었으며, 이후에 입자 플럭스는 급감했음</p>	
		계	1.0	100



제2절 대외기여도

- 남극 아문젠해에서 탄소순환에 대한 학술적 이해
- 남극 아문젠해 해양산성화 상태 평가 및 미래변화 예측
- 국제 공동연구 활성화로 연구수준 향상
- 대양 관측기술 발전으로 국가위상 제고 및 관련기술 미보유국에 대한 교육 및 기술제공
- 기후변화 연구활용으로 장기적인 경제적 이익 발생



제 5 장 연구개발결과의 활용계획

- 해양-대기-해빙-생태계 결합 지구시스템모델의 결과 검증과 성능향상을 위한 기반자료로 활용
- 남극해 해양산성화 예측결과를 해양생물자원 피해를 최소화하기 위한 정책 결정에 활용
- 남극해에서의 “biological pump” 효율을 평가하여 미래 기후변화 예측에 활용
- 지구온난화에 따른 남극해 해양생태계변화 예측에 활용



제 6 장 참고문헌

- Arrigo, K.R., Alderkamp, A.-C., 2012. Shedding dynamic light on Fe limitation (DynaLiFe). *Deep-Sea Res. II* 71, 1 - 4.
- Arrigo, K.R., van Dijken, G.L., 2003. Phytoplankton dynamics within 37 Antarctic coastal polynya systems. *J. Geophys. Res.* 108 (27-21).
- Arrigo, K.R., Lowry, K.E., van Dijken, G.L., 2012. Annual changes in sea ice and phyto-plankton in polynyas of the Amundsen Sea, Antarctica. *Deep-Sea Res. II* 71-76, 5 - 15.
- Asper, V.L., Smith Jr., W.O., 1999. Particle fluxes during austral spring and summer in the southern Ross Sea, Antarctica. *J. Geophys. Res.* 104, 5345 - 5359.
- Behrenfeld, M.J., Falkowski, P.G., 1997. Photosynthetic rates derived from satellite-based chlorophyll concentration. *Limnol. Oceanogr.* 42, 1 - 20.
- Berelson, W.M., 2001. The flux of particulate organic carbon into the ocean interior: a comparison of four US JGOFS regional studies. *Oceanography* 14, 59 - 67.
- Buesseler, K.O., Antia, A.N., Chen, M., Fowler, S.W., Gardner, W.D., Gustafsson, O., Harada, K., Michaels, A.F., van der Loeff, M.R., Sarin, M., Steinberg, D.K., Trull, T., 2007. An assessment of the use of sediment traps for estimating upper ocean particle fluxes. *J. Mar. Res.* 65, 345 - 416.
- Buesseler, K.O., McDonnell, A.M.P., Schofield, O.M.E., Steinberg, D.K., Ducklow, H.W., 2010. High particle export over the continental shelf of the west Antarctic Peninsula. *Geophys. Res. Lett.* 37, L22606.
- Collier, R., Dymond, J., Honjo, S., Manganini, S., Francois, R., Dunbar, R., 2000. The vertical flux of biogenic and lithogenic material in the Ross Sea: moored sediment trap observations 1996 - 1998. *Deep-Sea Res. II* 47, 3491 - 3520.
- Cornet-Barthaux, V., Armand, L., Quéguiner, B., 2007. Biovolume and biomass estimates of key diatoms in the southern ocean. *Aquat. Microb. Ecol.* 48, 295 - 308.
- DeMaster, D.J., 1981. The supply and accumulation of silica in the marine

- environment. *Geochim. Cosmochim. Acta* 45, 1715 - 1732.
- Ducklow, H.W., Wilson, S.E., Post, A.F., Stammerjohn, S.E., Erickson, M., Lee, S., Lowry, K.E., Sherrell, R.M., Yager, P.L., 2015. Particle flux on the continental shelf in the Amundsen Sea Polynya and western Antarctic peninsula. *Elementa* 3, 000046.
- Dunbar, R.B., Leventer, A.R., Mucciarone, D.A., 1998. Water column sediment fluxes in the Ross Sea, Antarctica: atmospheric and sea ice forcing. *J. Geophys. Res.* 103, 30741 - 30759.
- Garrity, C., Ramseier, R., Peinert, R., Kern, S., Fischer, G., 2005. Water column particulate organic carbon modeled fluxes in the ice-frequented Southern Ocean. *J. Mar. Syst.* 56, 133 - 149.
- Ha, H.K., Wåhlin, A.K., Kim, T.W., S.H., L., Lee, J.H., Lee, H.J., Hong, C.S., Arneborg, L., Bjork, G., Kalen, O., 2014. Circulation and modification of warm deep water on the central Amundsen Shelf. *J. Phys. Oceanogr.* 44, 1493 - 1501.
- Hedges, J.I., Stern, J.H., 1984. Carbon and nitrogen determinations of carbonate-containing solids. *Limnol. Oceanogr.* 29, 657 - 663.
- Hyun, J.-H., Kim, S.-H., Yang, E.J., Choi, A., Lee, S.H., 2016. Biomass, production, and control of heterotrophic bacterioplankton during a late phytoplankton bloom in the Amundsen Sea Polynya, Antarctica. *Deep-Sea Res. II* 123, 102 - 112.
- Kim, H.J., Hyeong, K., Yoo, C.M., Khim, B.K., Kim, K.H., Son, J.W., Kug, J.S., Park, J.Y., Kim, D., 2012. Impact of strong El Niño events (1997/98 and 2009/10) on sinking particle fluxes in the 10 °N thermocline ridge area of the northeastern equatorial Pacific. *Deep-Sea Res. I* 67, 111 - 120.
- Kim, M., Hwang, J., Kim, H.J., Kim, D., Yang, E.J., Ducklow, H.W., La young, S., Lee, S.H., Park, J., Lee, S., 2015. Sinking particle flux in the sea ice zone of the Amundsen shelf, Antarctica. *Deep-Sea Res. I* 101, 110 - 117.
- 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. *Deep-Sea Res. II* 123, 135 - 144.
- Komada, T., Anderson, M.R., Dorfmeier, C.L., 2008. Carbonate removal from coastal sediments for the determination of organic carbon and its

- isotopic signatures, $\delta^{13}\text{C}$ and $\Delta^{14}\text{C}$: comparison of fumigation and direct acidification by hydrochloric acid. *Limnol. Oceanogr. Methods* 6, 254 - 262.
- La, H.S., Lee, H., Fielding, S., Kang, D., Ha, H.K., Atkinson, A., Park, J., Siegel, V., Lee, S., Shin, H.C., 2015. High density of ice krill (*Euphausia crystallorophias*) in the Amundsen Sea coastal Polynya, Antarctica. *Deep-Sea Res. I* 95, 75 - 84.
- Lam, P.J., Doney, S.C., Bishop, J.K., 2011. The dynamic ocean biological pump: insights from a global compilation of particulate organic carbon, CaCO_3 , and opal concentration profiles from the mesopelagic. *Glob. Biogeochem. Cycles* 25, GB3009. <https://doi.org/10.1029/2010GB003868>.
- Lee, Y.C., Park, M.O., Jung, J., Yang, E.J., Lee, S.H., 2016a. Taxonomic variability of phytoplankton and relationship with production of CDOM in the Polynya of the Amundsen Sea, Antarctica. *Deep-Sea Res. II* 123, 30 - 41.
- Lee, Y., Yang, E.J., Park, J., Jung, J., Kim, T.W., Lee, S., 2016b. Physical-biological coupling in the Amundsen Sea, Antarctica: influence of physical factors on phytoplankton community structure and biomass. *Deep-Sea Res. I* 117, 51 - 60.
- Lee, S., Hwang, J., Ducklow, H.W., Hahm, D., Lee, S.H., Kim, D., Hyun, J.H., Park, J., Ha, H.K., Kim, T.W., 2017. Evidence of minimal carbon sequestration in the productive Amundsen Sea Polynya. *Geophys. Res. Lett.* 44, 7892 - 7899.
- Lizotte, M.P., 2001. The contributions of sea ice algae to Antarctic marine primary production. *Am. Zool.* 41, 57 - 73.
- Martin, J.H., Knauer, G.A., Karl, D.M., Broenkow, W.W., 1987. VERTEX: carbon cycling in the northeast Pacific. *Deep-Sea Res. I* 34, 267 - 285.
- McDonnell, A.M.P., Buesseler, K.O., 2010. Variability in the average sinking velocity of marine particles. *Limnol. Oceanogr.* 55, 2085 - 2096.
- McNichol, A., Osborne, E., Gagnon, A., Fry, B., Jones, G., 1994. TIC, TOC, DIC, DOC, PIC, POC—unique aspects in the preparation of oceanographic samples for ^{14}C -AMS. *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., Sect. B* 92, 162 - 165.
- Meredith, M.P., Ducklow, H.W., Schofield, O., Wählin, A., Newman, L., Lee, S.,

2016. The interdisciplinary marine system of the Amundsen sea, southern ocean: recent advances and the need for sustained observations. *Deep-Sea Res. II* 123 (1 - 6).
- Mu, L., Stammerjohn, S., Lowry, K., Yager, P., 2014. Spatial variability of surface pCO₂ and air-sea CO₂ flux in the Amundsen Sea Polynya, Antarctica. *Elementa* 2, 000036.
- Planquette, H., Sherrell, R.M., Stammerjohn, S.E., Field, M.P., 2013. Particulate iron delivery to the water column of the Amundsen Sea, Antarctica. *Mar. Chem.* 153, 15 - 30.
- Ramseier, R.O., Garrity, C., Bauerfeind, E., Peinert, R., 1999. Sea-ice impact on long-term particle flux in the Greenland sea's is Odden-Nordbukta region, 1985 - 1996. *J. Geophys. Res.* 104, 5329 - 5343.
- Reigstad, M., Wassmann, P., 2007. Does *Phaeocystis* spp. contribute significantly to vertical export of organic carbon? *Biogeochemistry* 83, 217 - 234.
- Salter, I., Kemp, A.E., Moore, C.M., Lampitt, R.S., Wolff, G.A., Holtvoeth, J., 2012. Diatom resting spore ecology drives enhanced carbon export from a naturally iron-fertilized bloom in the Southern Ocean. *Glob. Biogeochem. Cycles* 26, GB1014.
- Smith Jr., W.O., Comiso, J.C., 2008. Influence of sea ice on primary production in the Southern Ocean: a satellite perspective. *J. Geophys. Res.* 113, C05S93.
- Smith Jr., W.O., Ainley, D.G., Arrigo, K.R., Dinniman, M.S., 2014. The oceanography and ecology of the Ross Sea. *Annu. Rev. Mar. Sci.* 6, 469 - 487.
- Stammerjohn, S., Massom, R., Rind, D., Martinson, D., 2012. Regions of rapid sea ice change: an inter-hemispheric seasonal comparison. *Geophys. Res. Lett.* 39, L0501.
- Stammerjohn, S., Maksym, T., Massom, R., Lowry, K., Arrigo, K., Yuan, X., Raphael, M., Randall-Goodwin, E., Sherrell, R., Yager, P., 2015. Seasonal sea ice changes in the Amundsen Sea, Antarctica, over the period of 1979 - 2014. *Elementa* 3, 000055.
- Walker, D.P., Brandon, M.A., Jenkins, A., Allen, J.T., Dowdeswell, J.A., Evans,

- J., 2007. Oceanic heat transport onto the Amundsen Sea shelf through a submarine glacial trough. *Geophys. Res. Lett.* 34, 1 - 4.
- Yager, P.L., Sherrell, L., Stammerjohn, S., Alderkamp, A., Schofield, O., Abrahamsen, E., Arrigo, K., Bertilsson, S., Garay, D., Guerrero, R., 2012. ASPIRE: the Amundsen Sea Polynya international research expedition. *Oceanography* 25, 40 - 53.
- Yager, P.L., Sherrell, R.M., Stammerjohn, S.E., Ducklow, H.W., Schofield, O.M.E., Ingall, E.D., Wilson, S.E., Lowry, K.E., Williams, C.M., Riemann, L., Bertilsson, S., Alderkamp, A.-C., Dinasquet, J., Logares, R., Richert, I., Sipler, R.E., Melara, A.J., Mu, L., Newstead, R.G., Post, A.F., Swalethorp, R., van Dijken, G.L., 2016. A carbon budget for the Amundsen Sea Polynya, Antarctica: estimating net community production and export in a highly productive polar ecosystem. *Elementa* 4, 00140.
- Yang, E.J., Jiang, Y., Lee, S., 2016. Microzooplankton herbivory and community structure in the Amundsen Sea, Antarctica. *Deep-Sea Res. II* 123, 58-68.

KOPRI
극지연구소