

서남극해 결빙해역의
순환 및 하위생태계 특성 분석

Analysis of characteristics of
the circulation and lower trophic level ecosystem
in the western Antarctic Ocean

2015. 1. 20

한국해양과학기술원

제 출 문

극지연구소장 귀하

본 보고서를 “온난화 관측 모델 시스템으로 서남극 아문젠해 해빙역 연구”
과제의 위탁연구 “서남극해 결빙해역의 순환 및 하위생태계 특성 분석” 과제의 연
차보고서로 제출합니다.

2015. 1. 20.

총괄연구책임자 : 이상훈

위탁연구기관명 : 한국해양과학기술원

위탁연구책임자 : 이재학

위탁참여연구원 : 강돈혁, 김동선, 변상경,
정진현, 조소실, 주세종,
최유정, 홍창수, 황상철

보고서 초록

과제관리번호	N65890	해당단계 연구기간	2014.1.1- 2014.12.31	단계 구분	1/1
연구사업명	중 사업명	온난화 관측 모델 시스템으로 서남극 아문젠해 해빙역 연구			
	세부사업명	서남극해 결빙해역의 순환 및 하위생태계 특성 분석			
연구과제명	중 과제명				
	세부(단위)과제명				
연구책임자	이재학	해당단계 참여연구원수	총 : 10 명 내부 : 10 명 외부 : 명	해당단계 연구비	정부: 100,000천원 기업: 천원 계: 100,000천원
연구기관명 및 소속부서명	한국해양과학기술원 물리연구본부		참여기업명		
국제공동연구	상대국명 :		상대국연구기관명 :		
위탁연구	연구기관명 :		연구책임자 :		
요약 (연구결과를 중심으로 개조식 500자 이내)					보고서 면수
<p>47</p> <p>1. 현장 조사</p> <ul style="list-style-type: none"> • 해류계와 퇴적물채집기 회수 및 재계류 <ul style="list-style-type: none"> - 위치: 아문젠해 3개 지점 • 뜰개(surface drifting buoys) 투하 <ul style="list-style-type: none"> - 투하 개수: 아문젠해 4대, 남극해 26대 <p>2. 해류 자료 분석</p> <ul style="list-style-type: none"> • 아문젠해 해류계 시계열 자료 분석 <ul style="list-style-type: none"> - 심층 해류 특성 및 계절 변동성 • 뜰개 궤적 분석 <ul style="list-style-type: none"> - 아문젠해 폴리냐 해역 서향 연안류 및 소용돌이 관측 - Udintsev Fracture Zone 통과 남극순환류 확인 <p>3. 생기원원소 침강플럭스의 계절변화 파악</p> <ul style="list-style-type: none"> • 총질량 플럭스: 4.06~515 mg m⁻² day⁻¹의 범위로 여름에 높았고 겨울에 낮았음 • 유기탄소 플럭스: 1.19~36.8 mgC m⁻² day⁻¹의 범위, 유기탄소 함량은 6.6~33.2% • CaCO₃ 플럭스: 0.26~3.15 mg m⁻² day⁻¹의 범위, CaCO₃ 함량은 0.49~13.9% • 생기원규소 플럭스: 1.01~333 mg m⁻² day⁻¹의 범위, 생기원규소 함량은 13.7~68.3% • 쇄설물 플럭스는: 1.04~105 mg m⁻² day⁻¹의 범위, 쇄설물 함량은 17.5~54.0% 					
색인어 (각 5개 이상)	한 글	아문젠해, 남극순환심층수, 계류, 해류, 생기원원소			
	영 어	Amundsen Sea, Polynya, Circumpolar Deep Water, Mooring, Current, Biogenic elements			

요 약 문

I. 제목

서남극해 결빙해역의 순환 및 하위생태계 특성 분석

II. 연구개발의 목적

- 아문젠해 결빙해역 해빙(解氷)에 대한 해수순환의 역할 규명
- 아문젠해 생기원원소 침강 플럭스의 계절변화 파악

III. 연구개발의 내용 및 범위

1. 연구 기간

- 2014년 1월 1일 - 2014년 12월 31일

2. 연구 개발의 내용

- 현장조사
 - 해류계 및 퇴적물채집기 계류
 - 표층 뜰개 투하
- 해류 자료 분석
- 시계열 퇴적물채집기를 이용하여 생기원원소 침강플럭스 측정
 - 퇴적물트랩 시료에서 유기탄소, 탄산칼슘, 생기원규소, 육상기원 쇄설물 분석

IV. 연구개발결과

1. 현장 조사

가. 해류계 및 퇴적물트랩 계류

- 계류정점 1

계류기간: 2014. 1. 2 ~

위치: 72°23.188'S, 117°42.757'W

설치 장비: 해류계 2, 퇴적물트랩 1, CTD 2

- 계류정점 2

계류기간: 2014. 1. 6 ~

위치: 73°16.790'S, 114°57.024'W

설치 장비: 해류계 2, 퇴적물트랩 1, CTD 2

- 계류정점 3

계류기간: 2014. 1. 10 ~

위치: 73°49.176'S, 113°02.712'W

설치 장비: 해류계 2, 퇴적물트랩 1, CTD 2

나. 표층 뜰개 투하

- 투하 개수: 아문젠해 4대, 남극해 26대 (NOAA 제공)

- 투하 시기: 2013년 12월 26일~2014년 1월 10일

3. 해류 자료 분석

가. 해류계 시계열 자료 분석

- 아문젠해 저층 해류 특성 분석

- 계절 변동성 분석

나. 뜰개 궤적 분석

- 아문젠해 폴리나 해역 서향 연안류 및 소용돌이 관측

- Udintsev Fracture Zone 통과 남극순환류 확인

4. 생기원원소 침강 플럭스 산출

- 분석자료

- 계류지점 K1

관측기간: 2012년 2월 15일 - 2013년 2월 12일

위치: 72°24.163'S, 117°43.341'W

- 계류지점 K2

관측 기간: 2012년 2월 24일 - 2013년 2월 21일

계류 위치: 73°16.28'S, 114°58.23'W

- 계류지점 K3

관측 기간: 2012년 3월 4일 - 2013년 3월 1일

계류 위치: 74°11.23'S, 112°32.40'W

- 일년 동안 총질량 플럭스
 - 정점 K1: 15.6 g m⁻² yr⁻¹
 - 정점 K2: 15.9 g m⁻² yr⁻¹
 - 정점 K3: 7.49 g m⁻² yr⁻¹
- 일년 동안 유기탄소 플럭스
 - 정점 K1: 1.02 gC m⁻² yr⁻¹
 - 정점 K2: 1.08 gC m⁻² yr⁻¹
 - 정점 K3: 0.62 gC m⁻² yr⁻¹
- 일년 동안 CaCO₃ 플럭스
 - 정점 K1: 0.50 g m⁻² yr⁻¹
 - 정점 K2: 0.24 g m⁻² yr⁻¹
 - 정점 K3: 0.20 g m⁻² yr⁻¹

V. 연구개발결과의 활용계획

- 남극해에서 변화가 가장 급격한 곳인 결빙해역의 해양환경변화의 이해
- 아문젠해 해양 시계열 자료의 국제 학계 제공
- 국내 극지연구(극지 연안순환 및 생태계) 수준 제고를 위한 다학제적 연구 개발
- 남극 아문젠해에서 "Biological pump"에 의해 대기에서 해양으로 유입되는 이산화탄소 양 추정

S U M M A R Y

I . Title

Analysis of characteristics of the circulation and lower trophic level ecosystem in the western Antarctic Ocean (Amundsen Sea)

II . Objectives of the study

- Examination of the role of the circulation to melting sea ice in the Polynya area in the Amundsen Sea
- Investigating the seasonal variations in the sinking fluxes of biogenic elements in the Amundsen Sea

III . Contents of the study

1. Period of the study

- 2014. 1. 1 - 2014. 12. 31

2. Contents of the study

- Field surveys
 - Deployment of current meters and sediment traps moorings
 - Deployment of surface drifting buoys
- Analysis of current data
- Estimating sinking fluxes of biogenic elements using time-series sediment traps
 - Analysis of total mass, organic carbon, and CaCO₃ at the sinking particles

IV . Results of the study

1. Field surveys

a. Deployment of current meters and sediment traps moorings

- Mooring station 1

Recording period: 2014. 1. 2 ~

Location: 72°23.188 ' S, 117°42.757 ' W

Equipments installed: 2 current meters, 1 sediment trap, 2 CTD

- Mooring station 2

Recording period: 2014. 1. 6 ~

Location: 73°16.790 ' S, 114°57.024 ' W

Equipments installed: 2 current meters, 1 sediment trap, 2 CTD

- Mooring station 3

Recording period: 2014. 1. 10 ~

Location: 73°49.176 ' S, 113°02.712 ' W

Equipments installed: 2 current meters, 1 sediment trap, 2 CTD

b. Deployment of surface drifting buoys and data analysis

- Number of drifters: Amundsen Sea 4, Southern Ocean 26

(provided by NOAA)

- Deployment dates: 2013. 12. 26. ~ 2014. 1. 10.

2. Analysis of current data

a. Current meter time series data

- Analysis of deep currents characteristics
- Analysis of seasonal variability

b. Trajectories of drifters

- Observation of an eddy and westward coastal current
- Observation of the Antarctic Circumpolar Current in the Udintsev Fracture Zone

3. Measurements of the sinking fluxes of biogenic elements

- Analysed data

- Mooring station K1

Recording period: 2012. 2. 15 - 2013. 2. 12

Location: 72°24.163'S, 117°43.341'W

- Mooring station K2

Recording period: 2012. 2. 24 - 2013. 2. 21

Location: 73°16.28'S, 114°58.23'W

- Mooring station K3

Recording period: 2012. 3. 4 - 2013. 3. 1

Location: 74°11.23'S, 112°32.40'W

- Annual total mass fluxes
 - Station K1: 15.6 g m⁻² yr⁻¹
 - Station K2: 15.9 g m⁻² yr⁻¹
 - Station K3: 7.49 g m⁻² yr⁻¹
- Annual organic carbon fluxes
 - Station K1: 1.02 gC m⁻² yr⁻¹
 - Station K2: 1.08 gC m⁻² yr⁻¹
 - Station K3: 0.62 gC m⁻² yr⁻¹
- Annual CaCO₃ fluxes
 - Station K1: 0.50 g m⁻² yr⁻¹
 - Station K2: 0.24 g m⁻² yr⁻¹
 - Station K3: 0.20 g m⁻² yr⁻¹

V. Application plan of research outputs

- Understanding of the ocean environmental variation in the rapid changing area in the Antarctic Ocean
- Opening time series data in the Amundsen Sea to the international research community
- Development of multidisciplinary polar study (coastal circulation and ecosystem) to improve the domestic research level
- Estimating the amounts of CO₂ removed into the ocean from atmosphere by "Biological pump" in the Amundsen sea

C O N T E N T S

Summary (Korean)	3
Summary (English)	6
Contents (English)	9
Contents (Korean)	10
Chapter I Introduction	11
Section 1 Objectives of the study	11
Section 2 Scopes of the study	11
Section 3 Propulsive strategies and methods	11
Chapter II Research status	13
Chapter III Results of the study	14
Section 1 Field surveys	14
Section 2 Analysis of current data	19
Section 3 Measurements of the sinking fluxes of biogenic elements	33
Chapter IV Achievements of objectives and contributions to the related area	42
Section 1 Achievements of objectives	42
Section 2 Contributions to the related area	44
Chapter V Application plan of research outputs	45
Chapter VI References	46

목 차

요약문	3
요약문 (영문)	6
목차 (영문)	9
목차	10
제 1 장 서론	11
제 1 절 연구개발 목표	11
제 2 절 연구개발 내용	11
제 3 절 추진 전략 및 방법	11
제 2 장 국내외 기술개발 현황	13
제 3 장 연구개발 수행 내용 및 결과	14
제 1 절 현장 조사	14
제 2 절 해류 자료 분석	19
제 3 절 생기원원소 침강플럭스 산출	33
제 4 장 연구개발 목표 달성도 및 대외 기여도	42
제 1 절 연구개발 목표 달성도	42
제 2 절 대외기여도	44
제 5 장 연구개발 결과의 활용계획	45
제 6 장 참고문헌	46

제 1 장 서론

제 1 절 연구개발 목표

- 아문젠해 결빙해역 해빙(解氷)에 대한 해수순환의 역할 규명
- 아문젠해 생기원원소 침강 플럭스의 계절변화 파악

제 2 절 연구개발 내용

- 현장조사
 - 해류계 및 퇴적물채집기 계류
 - 표층 뜰개 투하
- 해류 자료 분석
 - 해류계 시계열 자료 분석
 - 뜰개 궤적 분석
- 시계열 퇴적물채집기를 이용하여 생기원원소 침강 플럭스 측정
 - 퇴적물트랩 시료에서 유기탄소, 탄산칼슘, 생기원규소, 육상기원 쇄설물 분석

제 3 절 추진 전략 및 방법

1. 추진전략 및 체계

- 다학제적 연구
 - 본과제의 최종 목표 달성을 이룰 수 있도록 생물 및 화학 분야와 관측지점을 결정
 - 해빙 인접 해역과 해빙 하부 해역의 해양환경 특성(생물채집 자료, 환경 관측 자료) 및 음향 자료와의 통합 분석
 - SAM과 같은 기후지수의 자료를 활용하여 대기의 변화 특성과 연계 해석

- 국제공동 연구의 지속 확대
 - 아문젠해 해류: 스웨덴 고텐버그대, 영국 BAS
 - 아문젠해 퇴적물채집기: 미국 WHOI
- 국제공동 연구 개발
 - 아문젠해 외해역 순환 연구: 프랑스 파리6대, 미국 NOAA 등
- 1-3차년도 연구의 논문화

2. 목표달성 방법

- 일회적 해역 조사와 정점 시계열 자료의 복합적 해석
- 외국의 선진 연구그룹과 자료 분석 결과의 토의를 통하여 자료 해석의 신뢰성을 제고
- 기존 문헌과 관련 연구 자료 및 정보를 통해 각 분야의 조사 방법 정립
- 국제 학술발표와 논문화로 연구 결과를 검증

제 2 장 국내외 기술개발 현황

제 1 절 국내의 기술개발 현황

- 국내에서 아문젠해 해양조사는 본 연구 사업이 최초로서 기존 연구가 전무함.
- 한국해양연구원 연구팀은 프랑스 연구팀과 공동으로 드레이크해협을 가로질러 10개 지점에서 2 - 3년간의 해류계 계류 조사를 수행한 바 있음.
- 남극 브란스필드해협, 두 정점에서 2000년부터 2005년까지 6년 동안 생기원원소 침강 플럭스의 계절 및 연 변화를 측정하였는데, 생기원원소 침강 플럭스는 주로 여름에 집중되어 일어났으며, 연변화도 크게 관측되어 해빙이 많은 해에는 생기원원소 침강 플럭스가 적게 일어났고 해빙이 적은 해에는 많이 일어났음.

제 2 절 국외의 기술개발 현황

- 2003년 3월 영국 조사팀은 RRS JAMES Clark Ross 를 이용하여 아문젠해 폴리나 해역의 해양 조사를 실시하여 CDW 가 대륙붕해역으로 유입되는 양을 산출하였음.
- 최근 4년동안 영국 BAS 에서는 Global Science in the Antarctic Context (GSAC)의 일환으로 Pine Island Glacier 분지 및 주변해에서 다학제적 연구 수행. 특히, GRADES 및 ACES 프로그램 연구 결과는 이 해역에 대한 영국의 장기연구계획 (The framework of LWEC, NERC Strategy and the Theme Action Plan)의 근간이 됨.
- 2008/09년 시기에 스웨덴 쇠빙선 Oden 호를 이용하여 아문젠해 대륙붕역에서 해양조사를 실시하였고, 이 자료로부터 해빙에 대한 CDW의 영향을 정량적으로 산출되었음.
- 미국은 남극반도 대륙붕에서 1992년부터 2007년까지 16년 동안 시계열 퇴적물 채집기를 이용하여 유기탄소 침강 플럭스를 하였는데, 여름에 높은 플럭스를 보였고 겨울에 낮은 플럭스를 나타냈으며, 표층해수에서 생산된 총유기탄소의 4% 가량이 수심 170 m에 침강하였음.
- 미국은 2011년에 아문젠해 폴리나에 시계열 퇴적물채집기를 계류하여 2012년 2월에 회수하였음.

제 3 장 연구개발수행 내용 및 결과

제 1 절 해류 및 부유퇴적물 시계열 조사

1. 조사 개요

가. 해류계 및 퇴적물채집기 회수

아문젠해 현장 조사는 2013년 12월 31일부터 2014년 1월 14일까지 실시되었다. 2차년도 조사 시기(2012년 2-3월)에 아문젠해 외해역으로부터 상대적으로 고온수가 대륙붕 쪽으로 유입된다는 가설 하에 이에 대한 유속 시계열 자료 획득을 위하여 아문젠해 대륙붕 해역 3개 정점에 설치하였던 해류계 및 퇴적물채집기(sediment trap)을 회수하였다. 회수한 해류계의 계류 지점은 Fig. 3.1.1에 표시하였으며, 해류계 등 정보는 Table 3.1.1에 정리하였다. 또한, CTD 조사는 35개 정점에서 이루어졌으며 이에 대한 분석은 본 보고서에서는 제외하였다.

나. 해류계 및 퇴적물채집기 재계류

아문젠해 외해역으로부터 상대적으로 고온수가 대륙붕 쪽으로 유입된다는 가설을 검증할 목적으로 시계열 유속 자료획득을 위한 해류계 계류 지점 2곳(정점 K1, K2)은 2차년도 조사시 계류 지점과 동일한 위치에 동일한 장비 구성으로 재설치 하였으며, Dotson 빙벽 앞 정점 K3은 장비 구성은 동일하지만 설치 위치를 북쪽으로 이동시켰으며 정점명을 K6(수심 782 m)으로 변경하였다(Fig. 3.1.1) Table 3.1.2에 재계류 관련 해류계 및 계류 작업 정보를 정리하였다. Dotson 빙벽 앞에는 극지연구소의 ADCP 6기(75kHz 1기, 150kHz 2기, 300kHz 3기) 및 수 심기의 CTD를 집중 설치하였다(정점 K3, K4, K5). 계류 장비들은 2016년 1월에 회수할 예정이다.

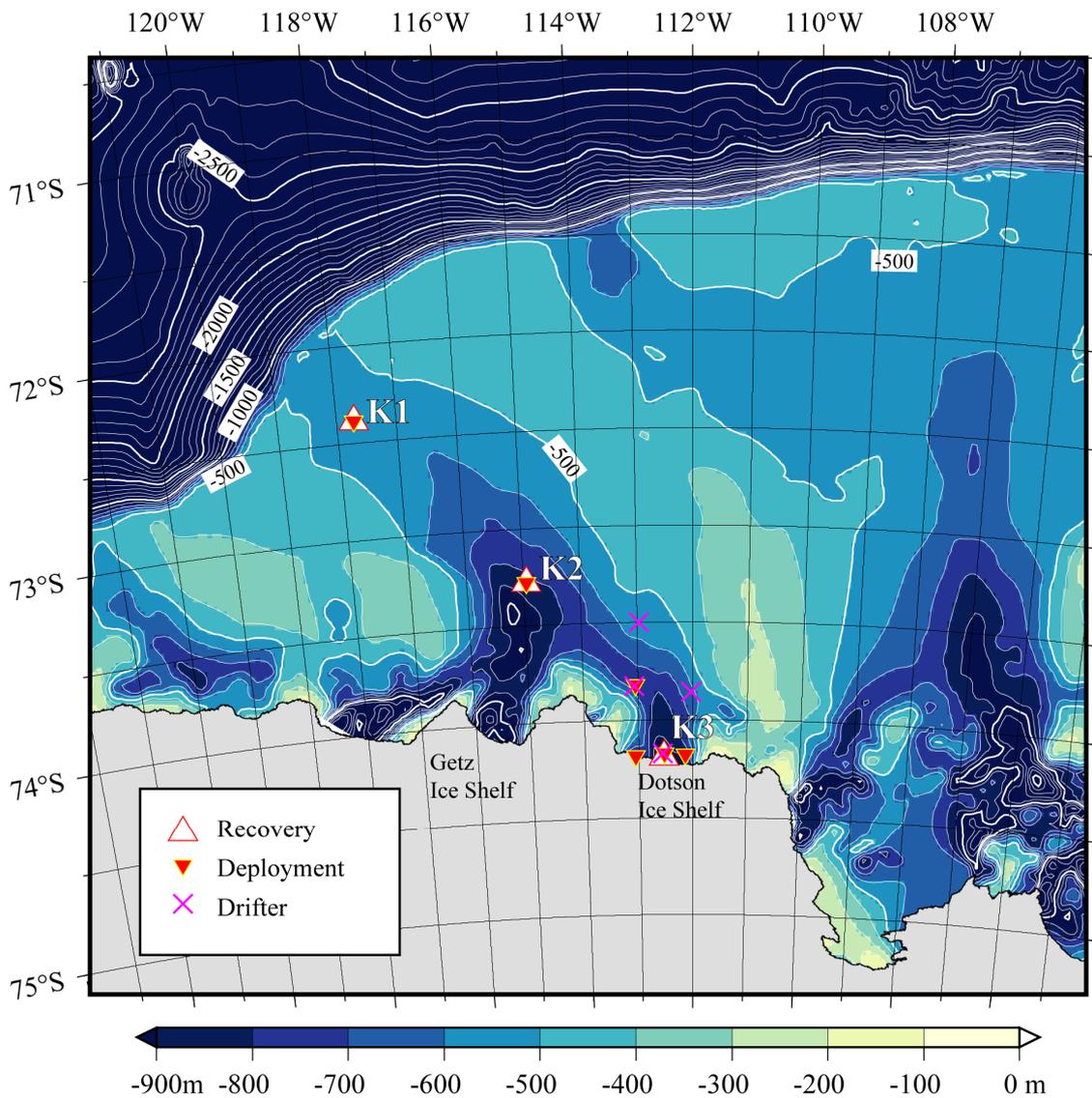


Fig. 3.1.1. Map of mooring stations of current meter and sediment trap, and positions of surface drifter deployment in the central shelf of Amundsen Sea. Background contours are bottom topography.

Table 3.1.1. Information of location and date for deployment and recovery stations

St.	Triangulation position		Depth (m)	Deployment		Recovery	
	Latitude (S)	Longitude (W)		Date	Time (UTC)	Date	Time (UTC)
K1	72°23.210 ′	117°42.634 ′	525	2012/03/04	02:03	2014/01/02	20:19
K2	73°16.882 ′	114°56.999 ′	823	2012/02/15	07:23	2014/01/06	07:06
K3	74°11.231 ′	112°32.399 ′	1057	2012/02/16	18:27	2014/01/09	04:10

Table 3.1.2. Location and date of new deployment of current meters and sediment traps

St.	Triangulation position		Depth (m)	Date	Time (UTC)	Institute
	Latitude (S)	Longitude (W)				
K1	72°23.188 ′	117°42.757 ′	525	2014/01/03	12:45	KOPRI/KOIST
K2	73°16.790 ′	114°57.024 ′	840	2014/01/06	13:50	KOPRI/KIOST
K3	74°10.292 ′	112°31.699 ′	1028	2014/01/09	15:15	KOPRI
K4	74°10.576 ′	112°08.083 ′	785	2014/01/08	22:06	KOPRI
K5	74°10.946 ′	113°03.823 ′	774	2014/01/09	21:10	KOPRI
K6	73°49.176 ′	113°02.712 ′	782	2014/01/10	12:20	KOPRI/KIOST

다. 표층 뜰개 투하

남극해에서 극향열속 (poleward heat flux) 기작 연구를 위한 사전 조사로 Udintsev Fracture Zone를 통과하는 남극순환류와 아문젠해 표층해류의 형태 파악을 위하여 NOAA AOML (Global Drifters Program)에서 제공받은 인공위성 추적 표층 뜰개(surface drifting buoy, Drogue 수심은 15 m) 투하하였다. 뜰개 수량은 30기로 뉴질랜드에서 아문젠해로 이동하면서 23기, 아문젠해 연구해역에 4기 및 아문젠해에서 뉴질랜드로 이동하면서 Ross 해 순환계 해역에 3기를 투하하였다. Fig. 3.1.2에 투하 지점을 표시하였으며 Table 3.1.3에 뜰개 ID, 투하 시간 및 위치를 정리하였다.

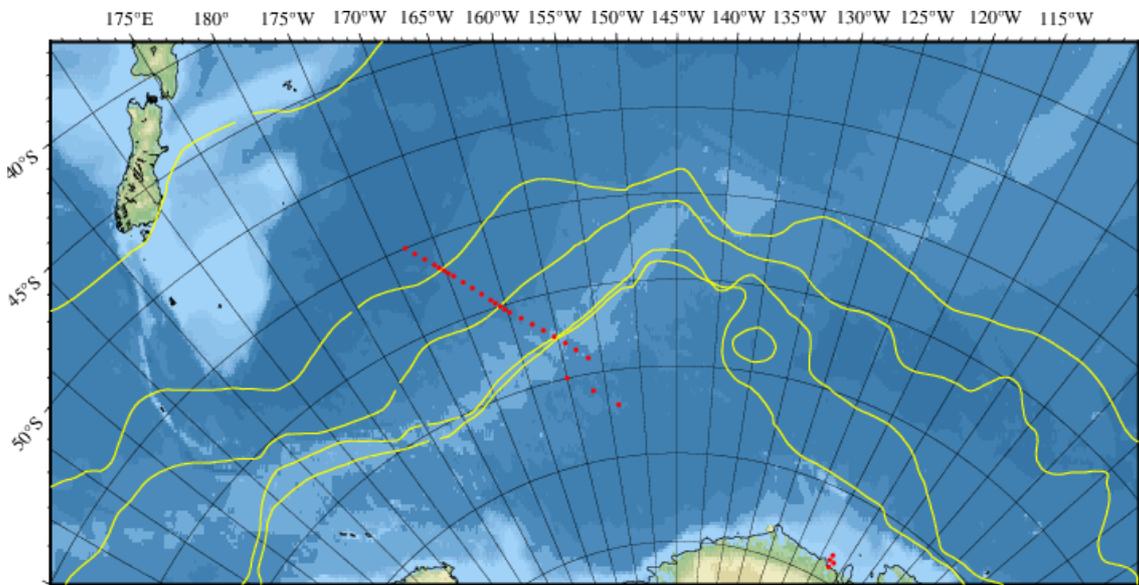


Fig. 3.1.2. The position map of surface drifter deployment during the cruise (from Dec. 2013 to Jan. 2014). Yellow lines are the fronts of the Antarctic Circumpolar Current (Orsi et al., 1995). Filled contour is topography.

Table 3.1.4. Information of the satellite-tracked surface drifting buoy (drifter) deployment

Buoy ID	Date	Time (UTC)	Latitude (S)	Longitude (W)	Releasing Area
116429	2013/12/26	17:40	55° 00.2'	172° 57.2'	Southern Ocean
116431	2013/12/26	20:44	55° 30.2'	172° 17.1'	
116164	2013/12/26	23:22	56° 00.2'	171° 34.0'	
116430	2013/12/27	02:07	56° 30.2'	170° 53.0'	
116426	2013/12/27	03:34	56° 45.2'	170° 31.0'	
116427	2013/12/27	04:56	57° 00.2'	170° 10.0'	
116423	2013/12/27	06:19	57° 15.5'	169° 48.0'	
116424	2013/12/27	07:40	57° 30.4'	169° 25.7'	
116425	2013/12/27	10:24	58° 00.3'	168° 41.0'	
116162	2013/12/27	13:13	58° 30.3'	167° 56.5'	
116166	2013/12/27	16:02	59° 00.3'	167° 11.5'	
116167	2013/12/27	18:53	59° 30.3'	166° 25.7'	
116428	2013/12/27	20:20	59° 45.4'	166° 02.2'	
116422	2013/12/27	21:45	60° 00.5'	165° 37.8'	
116199	2013/12/27	23:06	60° 15.2'	165° 15.2'	
116165	2013/12/28	00:31	60° 30.2'	164° 48.6'	
116202	2013/12/28	03:41	61° 00.2'	163° 43.4'	
116160	2013/12/28	06:51	61° 30.2'	162° 38.0'	
116203	2013/12/28	09:59	62° 00.2'	161° 31.3'	
116168	2013/12/28	13:05	62° 30.2'	160° 23.4'	
116163	2013/12/28	16:17	63° 00.3'	159° 14.6'	
116300	2013/12/28	19:27	63° 30.3'	158° 04.3'	
116206	2013/12/28	23:03	64° 05.2'	156° 41.7'	
116205	2014/01/18	11:12	66° 59.7'	153° 34.5'	
116207	2014/01/18	20:15	66° 00.0'	156° 50.5'	
116204	2014/01/19	06:00	65° 00.0'	160° 00.0'	
116201 (A)	2014/01/08	00:15	73° 29.9'	112° 58.3'	Amundsen Sea
116161 (B)	2014/01/08	11:55	73° 51.4'	112° 02.3'	
116208 (C)	2014/01/09	16:05	74° 10.2'	112° 33.3'	
116209 (D)	2014/01/10	13:10	73° 49.5'	113° 04.0'	

제 2 절 해류 관측 결과 및 분석

1. 해류계 시계열 자료 분석

아문젠해의 급격한 빙하 감소 원인의 하나로 외해로부터 상대적으로 고온수인 CDW(Circumpolar Deep Water)의 해저면층을 따른 유입으로 보고 이를 뒷받침할 증거를 찾는 연구가 진행되고 있다 (Wählín et al, 2010, 2012, 1013; Ha et al. 2914). 본 연구도 이 연구들과 공동 또는 연장선상에 있다. Fig. 3.2.1~3.2.3에 관측점 K1, K2, K3의 전 시계열 자료를 표시하였다. 정점 K1에서는 두 해류계의 설치 수심이 2011년 이후 동일하게 유지한 반면 정점 K2에서는 2011년에 275 m와 410 m의 설치 수심에서 2012년에 410 m와 715 m 수심으로 변경하였다. 정점 K3는 2012년부터 계류를 시작한 곳이다.

2011년 시계열 자료의 초기 분석 결과는 3차년도보고서(극지연구소, 2013)에 기술하였는바 K1, K2 두 정점 관측 수심에서는 상층 250m 층과 하층 400m 층의 흐름 방향이 유사하고, 전반적으로 상층 유속이 하층 보다 강한 특성을 나타낸다. 그러나 두 정점사이에서는 정점 K2의 유속이 정점 K1 보다 강하고 그 변동성도 크게 나타나 대륙붕단 부근의 골과 폴리냐의 골에서 순환특성이 다름을 보여 주고 있음을 설명한 바 있다. 또한, 계절 변동성으로 북쪽 정점 (K1)의 해류는 계류 (1월) 후 3월까지 북류가 우세하다가 그 이후에는 북서류가 우세하였으며, 폴리냐 중앙 (K2)의 해류는 계류 (1월, 여름철) 후 3월까지 남동류가 우세하고 10월까지 북류가 우세하다가 12월 (여름철)에는 대륙붕 내부로 유입하는 남동류가 나타났다. 흐름의 방향이 일정한 K1과는 달리 여름철 해빙의 용해로 폴리냐가 형성되는 K2 정점에는 여름철과 겨울철 해류패턴에 변화를 보여주고 있음도 설명한 바 있다.

2012~2013년의 시계열 자료는 세 지점의 해류 특성이 유사하지 않아 아문젠해 내에서도 위치에 따라 해류 변화 등의 특성이 매우 다름을 보여주고 있다. 2011년부터 3년간 250 m 및 400 m의 동일한 수심에서 시계열 자료가 획득된 정점 K1에서는 두 수심 모두 여름에 유속이 증가하고 겨울에 감소하는 계절적 특성이 나타났다. 전반적으로 두 수심대의 흐름 방향은 유사하고 상층(250 m) 유속이 상대적으로 강하였다. 2011년과 마찬가지로 단주기(1개월 내외) 변동성이 있으며 특히 2013년 1-4월에는 반복적으로 유향 변화가 있었음을 보여주었다. 이러한 유향 변화는 450 m 수심의 수온 자료에서 나타난 급격한 변화와 관련된 것으로 판단된다.

정점 K2의 410 m 수심에서는 흐름의 단주기 변화가 3년간 모두 지속적으로 나타나고 있어 이러한 변동성은 일반적인 해황인 것으로 판단된다. 다만, 2011년에는

5-8월에 유속이 매우 약하였지만 2012-2013년에는 연중 변화 폭이 크지 않게 나타나 흐름장의 연 변동성도 큰 것을 시사해준다. 정점 K2 해저로부터 약 110m 위에 해당하는 715 m 수심에서의 자료는 대륙쪽인 남동 방향의 흐름이 2년 기간 모두 큰 변화 없이 나타났다. 이는 CDW 또는 이의 혼합수가 아문젠 내해역을 향하여 약 10 cm/sec 유속을 가지고 지속적으로 공급되고 있음을 의미한다. 만일 이러한 해석을 받아들인다면 정점 K1의 400 m 수심도 해저면에서 약 120 m 떨어져 있지만 지속적인 남향류가 관측되지 않았던 것은 CDW의 유입 경로가 한정되어 있음을 암시하는 사항이다. 수심 410 m 층 해류의 변동성은 715 m에서는 나타나지 않고 있는 것은 이 변동성이 저층의 CDW 공급과 관련된 해류 자체의 변화와는 관련이 없고 바람과 같은 상층에서의 변화에 기인된 가능성을 높여준다.

빙벽에 인접한 정점 K3의 해류는 수심대에 따른 해류 변화의 형태가 정점 K2와는 반대로 200 m와 490 m 수심에서는 전 관측 기간 동안 단주기 변화는 약하고 서향 또는 북서향류가 우세하며 9-11월에 1노트 이상까지 강한 유속을 보여주었다. 이러한 서향류는 Fig. 3.2.4에 표시한 Dotson 빙벽 부근의 Bear 반도에서 관측된 바람 자료에서 우세하게 나타나는 동풍의 영향일 가능성이 높다. 반면 해저면으로부터 약 200 m 위에 해당하는 845 m 수심에서는 단주기 변화가 두드러지고 북향류가 우세하게 나타났다. 상층에서는 단주기 변동성이 약하기 때문에 저층 자료에 나타난 해류 변동성은 대기의 외력보다는 조류나 해저 지형의 영향을 받는 물리적 기작이 작용하였을 것으로 판단된다.

Fig. 3.2.5는 해류 시계열 자료로부터 연도별 누적 유속 벡터를 도시한 것이다. 정점 K1은 두 수심대 모두 북서 방향의 흐름으로 나타나 계류 위치가 아문젠해에서 외해역으로 순환이 연결되는 곳임을 보여준다. 정점 K2은 상층과 저층의 순환 양상이 뚜렷하게 다름을 보여주고 있는바 저층(715 m)에서는 외해역에서 아문젠해로 CDW가 공급되는 흐름이 통과하는 것으로 나타났고 상층(270 m)은 동향과 북향이 우세하게 나타났다. 430 m 층은 2011년에는 상층과 유사하나 2013년에는 저층과 유사한 흐름 형태로 나타나 이 수심대는 상하층 순환계의 경계역일 가능성이 있다. 정점 K3에서는 상층은 서향류가 절대적으로 강하고 저층은 북향류가 우세한 것으로 나타났다. 이러한 상층의 서향류는 표층 해류 시스템이 빙벽을 따라 서향류 시스템을 의미하며 다음 절에서 설명할 뜰개 관측 결과와 일치한다.

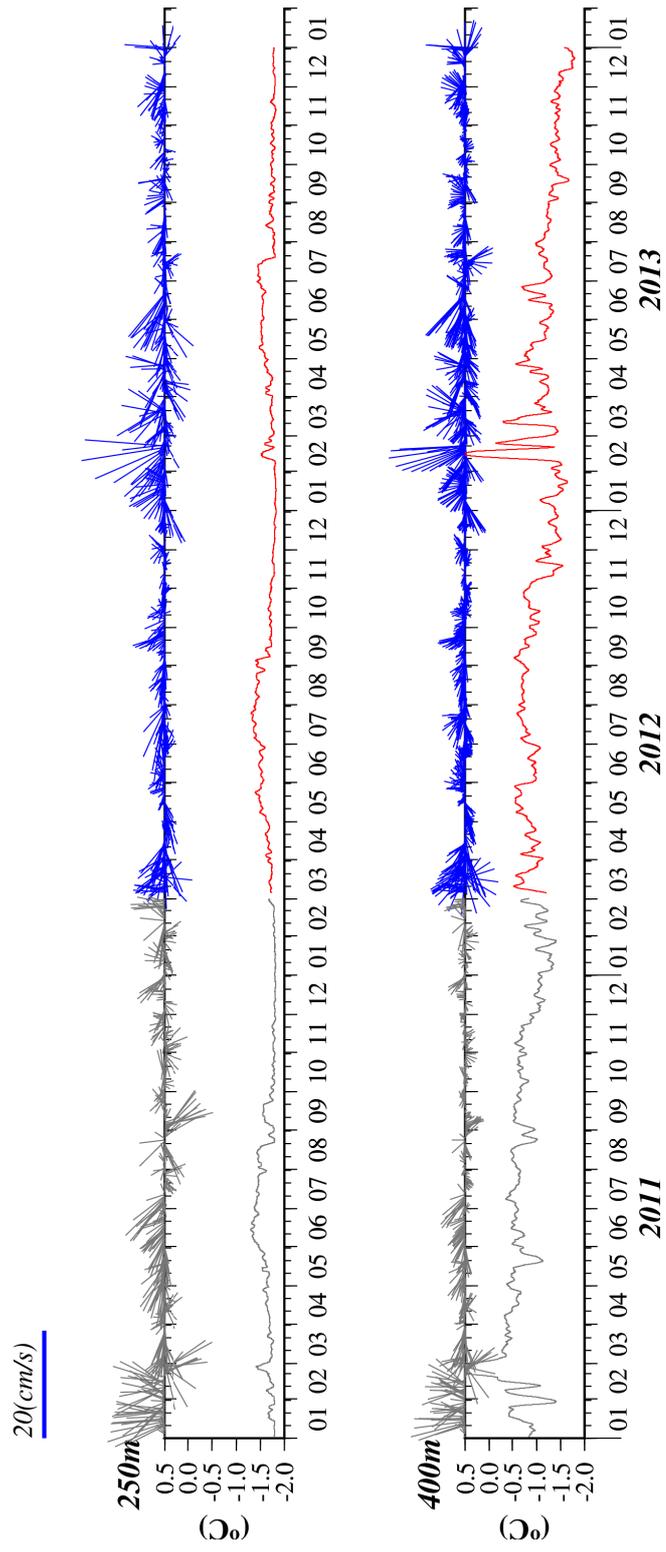


Fig. 3.2.1 Time series of the 3-day moving averaged current vector (blue) and temperature (red) measured with current meter at K1 station from 2011 to 2013. The gray is the previous data.

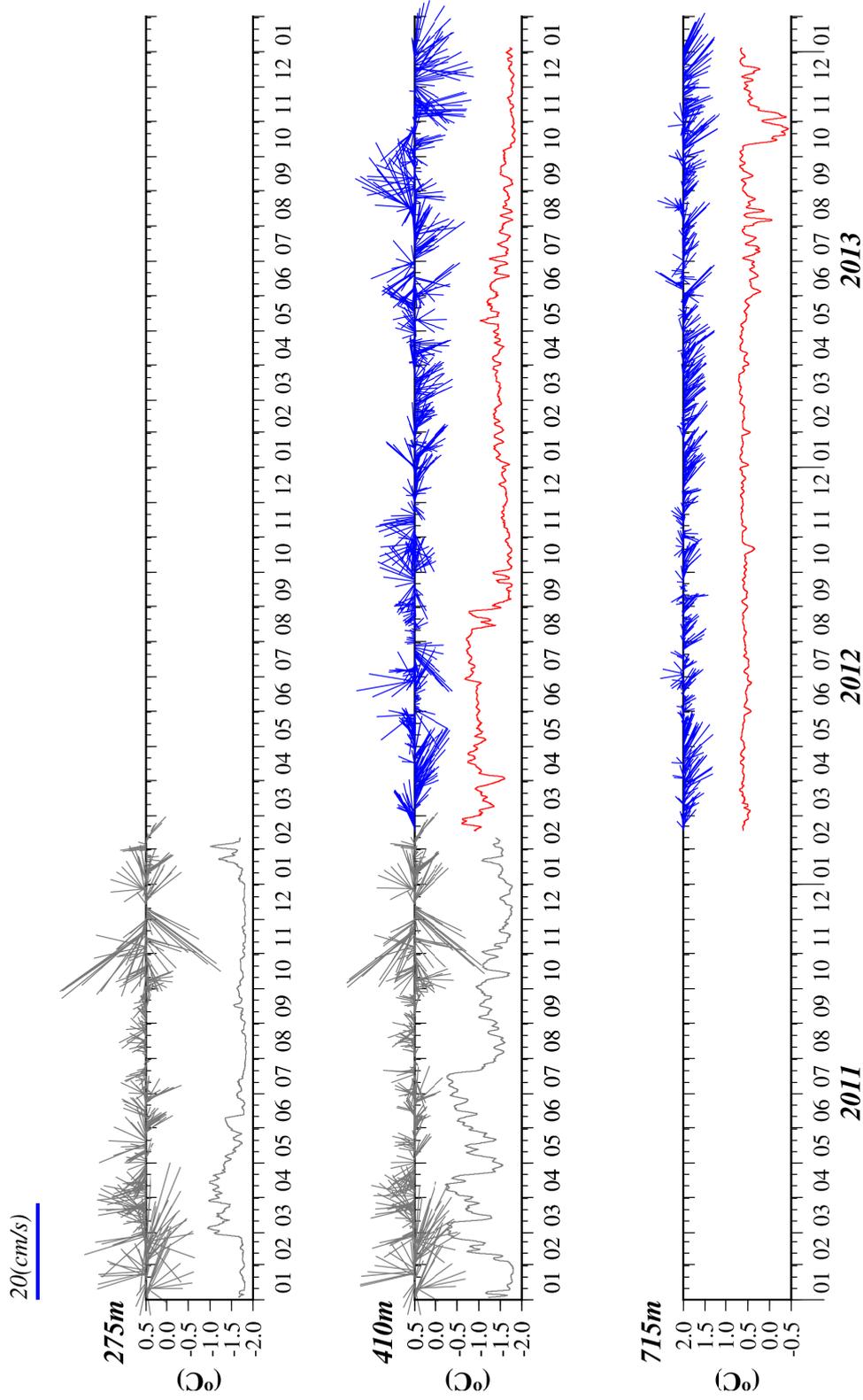


Fig. 3.2.2. Time series of the 3-day moving averaged current vector (blue) and temperature (red) measured with current meter at K2 station from 2011 to 2013. The gray is the previous data.

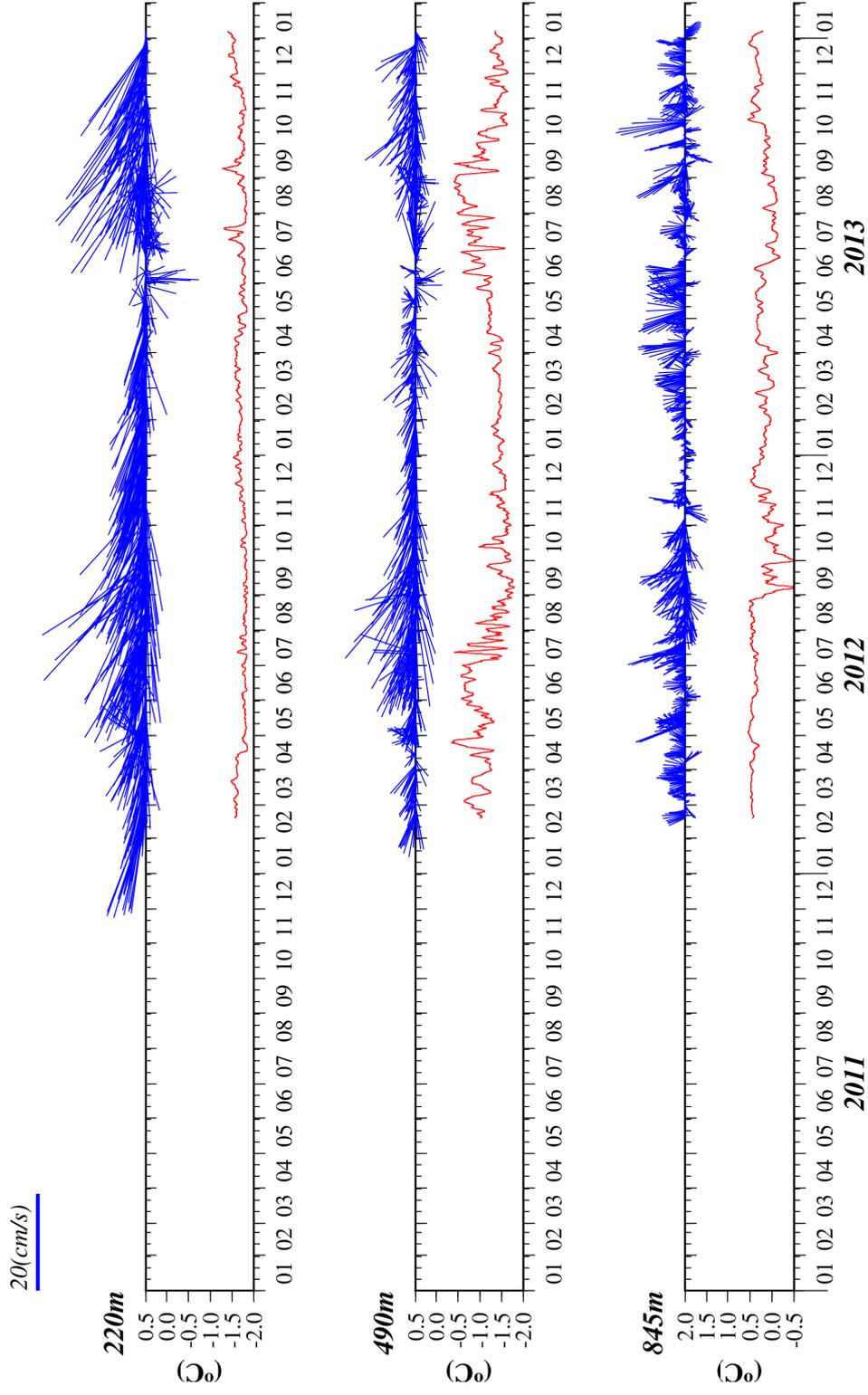


Fig. 3.2.3. Time series of the 3-day moving averaged current vector (blue) and temperature (red) measured with current meter at K3 station from 2012 to 2013.

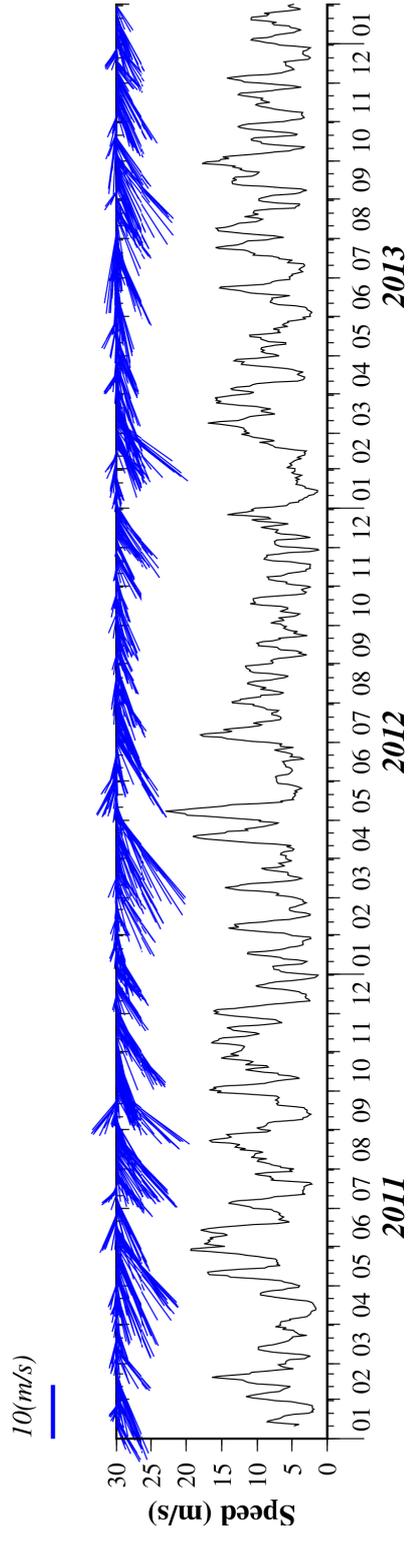


Fig. 3.2.4. Time series of the 7-day moving averaged wind vector (blue) and wind speed (black) measured with AWS at the station of Bear Peninsula near the Dotson Ice Shelf.

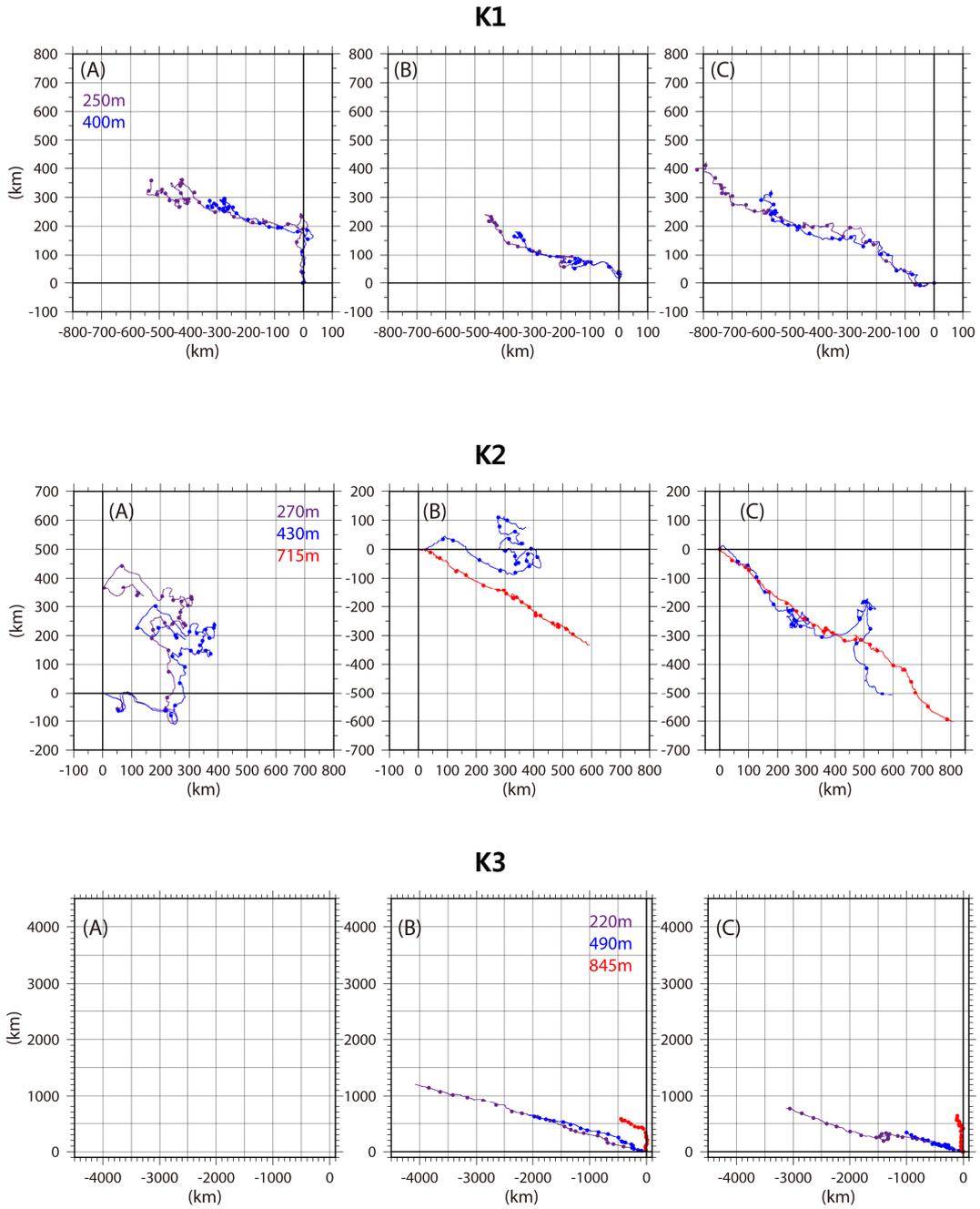


Fig. 3.2.5. Yearly progressive vector diagrams of current meters at 3 mooring stations (A) from Jan. 2011 to Feb. 2012, (B) from Mar. 2012 to Dec. 2012 and (C) from Jan. 2013 to Dec. 2013. Color means the mooring depth (purple: ~250m, blue: ~450m, red: 700~850m).

2. 뜰개 관측 결과 및 분석

뜰개 관측은 NOAA AOML에서 주도하는 Global Drifters Program의 일환으로 수행되었다. Fig. 3.2.6은 뜰개 투하 시기인 2014년 1월 6일과 1년 후인 2015년 1월 12일의 뜰개 분포 현황이다. 태평양쪽의 남극해의 표층 해류 모니터링에 본 사업에서의 투하가 많은 기여가 있음을 보여주고 있으며, 향후 아라온호 항해가 있을 경우에 해양수산부-NOAA Joint Project Agreement 사업을 통한 협력으로 매년 30여기를 투하할 수 있도록 NOAA와 협의가 되어있다.

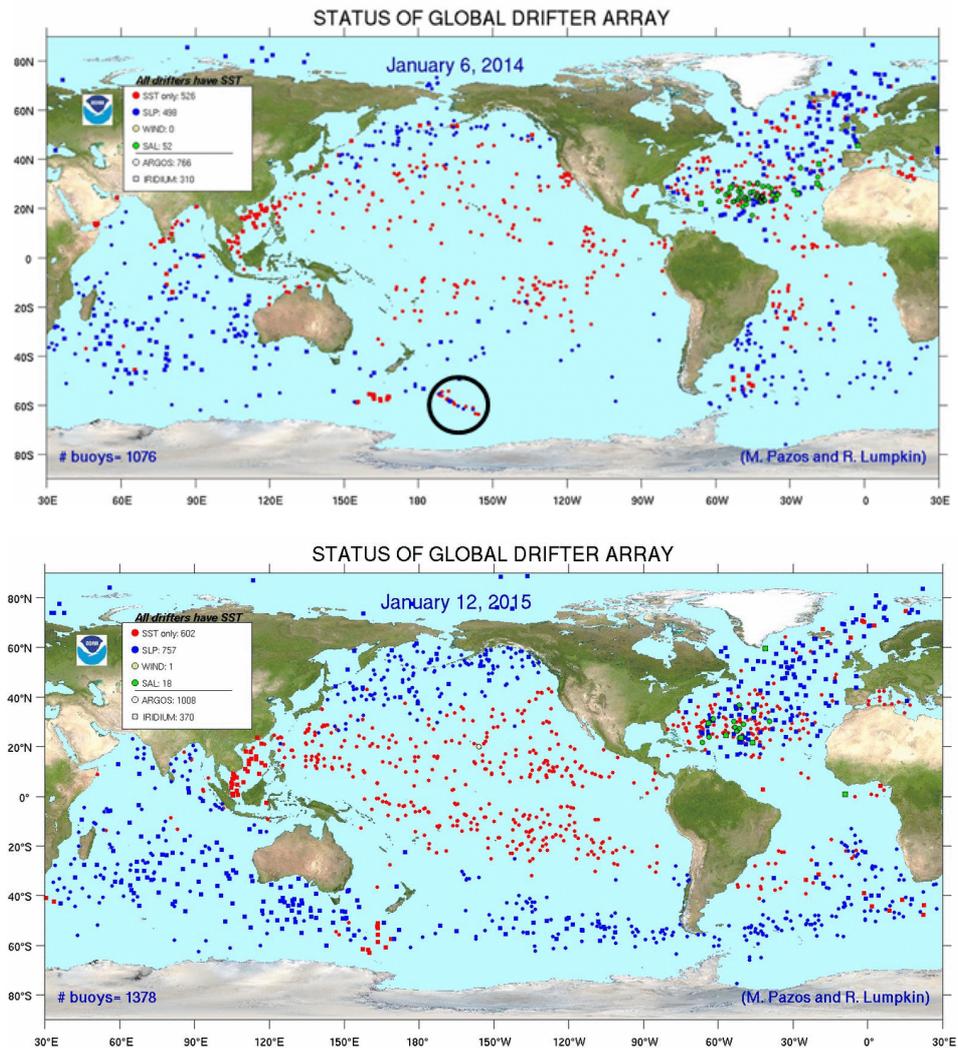


Fig. 3.2.6. Distribution of surface drifters on January 4, 2014 (top) and January 12, 2015 (bottom). The area where drifters deployed from the Araon is marked by a black circle.

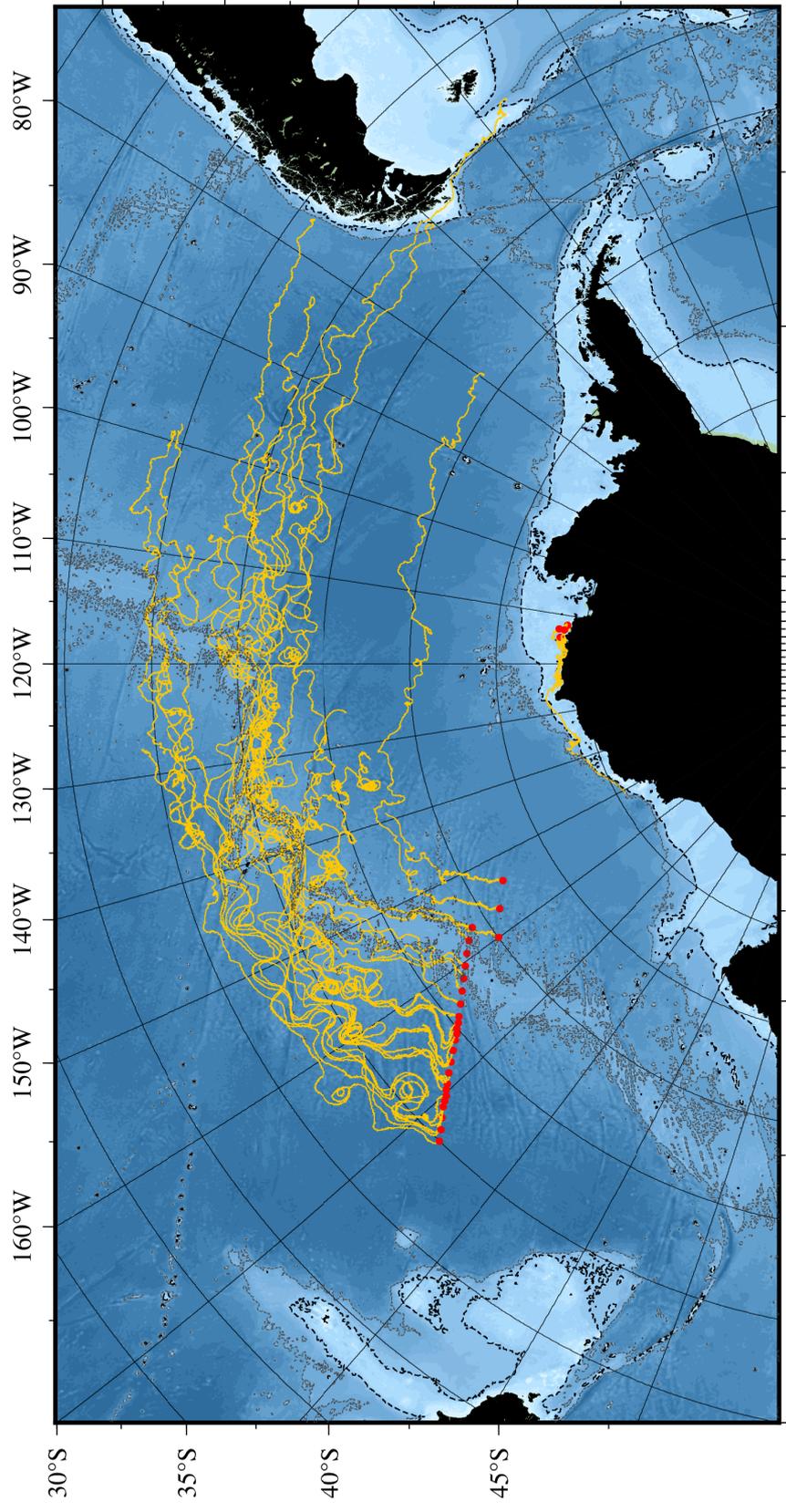


Fig. 3.2.7. Trajectories (yellow) of the satellite-tracked surface drifting buoys from Dec. 2013 to Dec. 2014. Red is the releasing position of buoy.

Fig. 3.2.7은 뜰개 투하 후 2014년 12월까지 이동궤적을 표시한 것이다. 남극해에 투하한 26기의 뜰개 중 4기의 뜰개는 자료 전송이 종료되었고, 아문젠해에 투하한 4대의 뜰개는 모두 기능이 중지되었다. 자료 전송이 중단된 뜰개 중 5기는 해빙(海水)에 의한 파괴 또는 자료 전송 불능 상태에 의한 것으로 판단되며 나머지는 자료 전송 중단이 투하직후부터 1개월 정도 시간 내에 발생한 것으로 보아 장비 자체의 성능 마비에 의한 것으로 판단된다. 남극순환류 해역의 뜰개는 해류에 수반된 전선을 표현해주고 있으나 Fig. 3.1.2에 보인 바와 같이 뜰개의 투하 위치가 ACC에 수반된 모든 전선이 포함된 반면 동쪽으로 갈수록 이들 전선을 정확하게 따르지 않고 북쪽에 치우친 경향을 보여주었다. 이는 동풍계열의 바람의 영향(에크만 효과)으로 뜰개들이 북쪽으로 이동하는 성분이 있었을 것으로 판단되며 추후 세심한 분석이 필요하다. 향후 아문젠외해역의 표층 순환 관측을 위해서는 뜰개를 Fracture Zone의 남쪽에 투하할 필요가 있다. 한편 뜰개 궤적은 많은 소용돌이가 존재하는 것을 보여주는데 소용돌이들이 Fracture Zone의 서쪽이 동쪽보다 두드러지게 관측된 것은 흥미로운 사항이다. Udintsev Fracture Zone (UFZ)과 Eltanin Fracture Zone (EFZ)에서는 뜰개들이 좁은 폭의 영역에서 jet 형태를 보이며 상대적으로 빠른 속도로 통과하여 ACC의 통과 길목임을 보여주었다. 가장 멀리 이동한 뜰개는 드레이크해협 북쪽 해역을 지난 것으로 나타났다. 이러한 1년 동안의 이동궤적은 남극순환류가 남극해를 순환하는데 3년 이상이 소요될 것임을 보여주고 있다.

Fig. 3.2.7의 궤적으로부터 산출한 1주일 평균 유속벡터를 Fig. 3.2.8에 표시하였다. UFZ와 EFZ에서는 50 cm/sec 이상의 유속을 보였으며 드레이크해협쪽에 근접한 뜰개들도 50 cm/sec 정도의 유속을 보이고 있다.

아문젠해 내해역에 투하한 뜰개의 이동궤적을 Fig. 3.2.9에 나타내었다. 북쪽(A)에 투하한 뜰개(ID#116206, Table 3.1.4)는 2월 18일경 자료 전송이 가장 빨리 중단되었다. 서쪽(D, 116209)과 남쪽(C, 116208)에 투하한 뜰개는 각각 3월 20일 경과 5월 8일 이후 자료 전송이 중단 되었으며, 동쪽(B, 116161)에 투하한 가장 늦은 뜰개는 10월 7일경까지 자료를 전송한 것으로 나타났다. 자료의 전송이 도중에 중단 경우는 해빙에 의하여 자료 전송 불능상태에 따른 것으로 판단되며 (Fig. 3.2.9에 이동궤적을 직선으로 표시) 남쪽 투하 뜰개의 경우 3월 13일부터 5월 8일경까지 자료 전송이 중단되었다가 전송이 재개된 바 있다. 이동 궤적의 전반적인 특징은 모두 빙벽 가까운 해역에서 서쪽으로 이동한 점이다. 이는 아문젠해의 순환이 바람 및 해저지형에 의하여 유지되고 제약됨을 시사한다. 즉, 수심이 깊은 내해의 심층 순환은 얕은 수심의 해저지형에 의하여 다른 빙벽의 해역들 사이에 순환계 연결이 차단되기 때문에 아문젠해 외해역과 연결되는 순환형태를 보이는 반면에 상

층에서는 빙벽에 인접한 서향의 연안류가 우세하고 이는 아문젠해 표층 순환이 외해역(대륙사면 해역)으로는 바로 연결되지 않음을 의미한다. 이 연안류는 동풍계열의 바람에 의한 것으로 판단된다. 또한 폴리나 형성에 관련된 강한 북풍인 Katabatic 바람에 의한 에크만 효과도 고려해볼 수 있다. 빙벽에 인접한 서향류의 확인은 최근 증가하고 있는 빙상의 용빙에 따른 담수(특히, basalt melting water) 이동 경로 연구(Kusahara and Hasumi, 2014; Nakayama et al., 2014)에 중요한 자료가 된다.

결빙 시기의 이동궤적 자료는 해류와 함께 해빙의 이동 경향을 보여주는 것으로 판단된다. 먼저 최종 중단된 뜰개들의 최종 송신 위치는 모두 125°W 부근의 Siple 섬 동쪽인 점은 흥미로운 사항이다. 동쪽(B, 116161)에 투하한 뜰개도 5월 2일경 Siple 섬 북쪽(125°W, 73°S)을 통과한 후에는 빙벽에 인접한 해역에서 벗어나 대륙사면 해역으로 이동하고 5월 25일경에 135°W까지 이동하여 Getz 빙벽 외해역을 벗어나 자료를 최종 전송한 10월 7일경 Ross 해 동쪽인 157°W, 76°S 까지 이동한 것으로 나타났다.

뜰개 이동 궤적의 자료에서 또 하나의 특이한 점은 Getz 빙벽 해역 Glade 만에서 관측된 반시계방향의 소용돌이(eddy)이다 (Fig.3.2.10). 북쪽에 투하한 뜰개(A)를 제외하고 다른 뜰개는 모두 소용돌이 궤적을 보여주었다. 소용돌이의 크기는 직경이 약 15~20 km로 나타났으며 그 중심은 Glade 만의 깊은 골에서 동쪽으로 치우쳐 위치하였다. 각각의 뜰개의 이동궤적을 Fig. 3.2.11에 나타내었다. 뜰개 B는 2월 1일에서 10일 사이에 두 번 회전한 후에 소용돌이를 벗어났다. 뜰개 C는 소용돌이를 1월중 만나 10회 회전하고 3월 3일 이후에 벗어났으며 뜰개 D는 2월달 1개월간 5회전을 한 것으로 나타났다. 이들 궤적들은 뜰개가 소용돌이를 1회전하는데 4~6일 소요되었음을 보여주었으며 적어도 1개월 이상 소용돌이가 유지되고 있었음을 나타내고 있다. 소용돌이의 발생 원인은 바람과 지형으로 판단되지만 Tortell et al. (2012)이 Pine Island Glacier 앞에서 관측한 소용돌이의 방향과는 반대로 발생 및 소멸 기작에 대해서 연구의 필요성이 있다. 이러한 소용돌이의 존재는 용빙에 의한 담수의 이동 (즉, 아문젠해에서 로스해 동쪽)을 지연시키는 효과가 있을 것으로 판단되며 아문젠해에서 기원되는 물질의 이동 시간과도 밀접하기 때문에 추후 보강 관측이 필요한 것으로 판단된다.

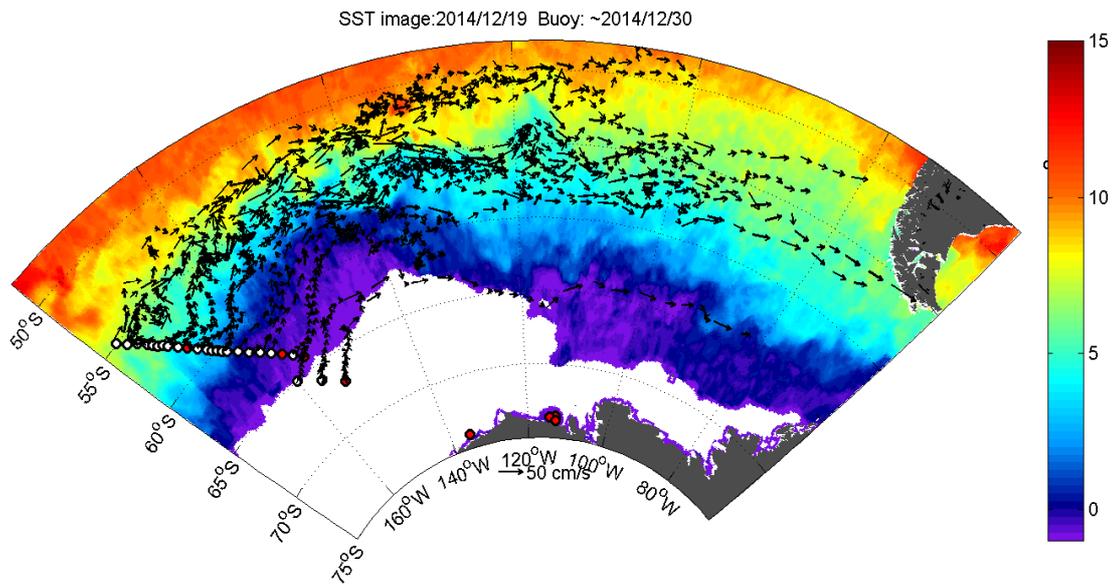


Fig. 3.2.8. Weekly mean velocity vectors estimated based on trajectories shown in Fig. 3.2.7. Colour image represents composite sea surface temperature from satellite data in the period of December 19~30, 2014. White image means the area where the sea surface is covered by ice.

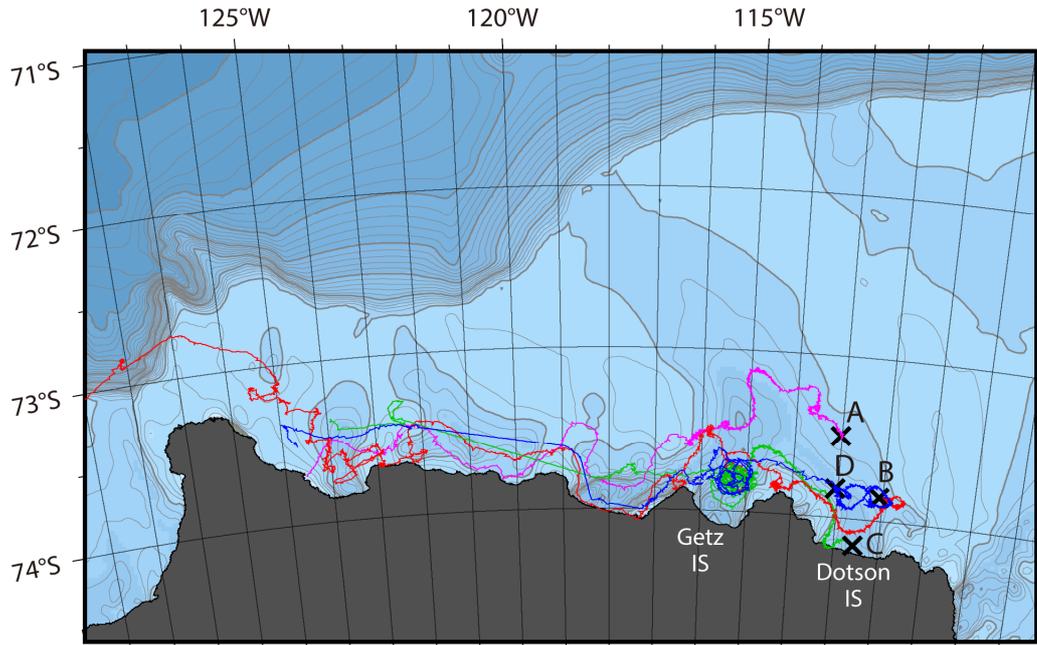


Fig. 3.2.9. Trajectories of the satellite-tracked surface drifting buoys released in the trough in front of Dotson Ice Shelf in the central Amundsen Sea in early January of 2014. The releasing locations are marked by cross symbol.

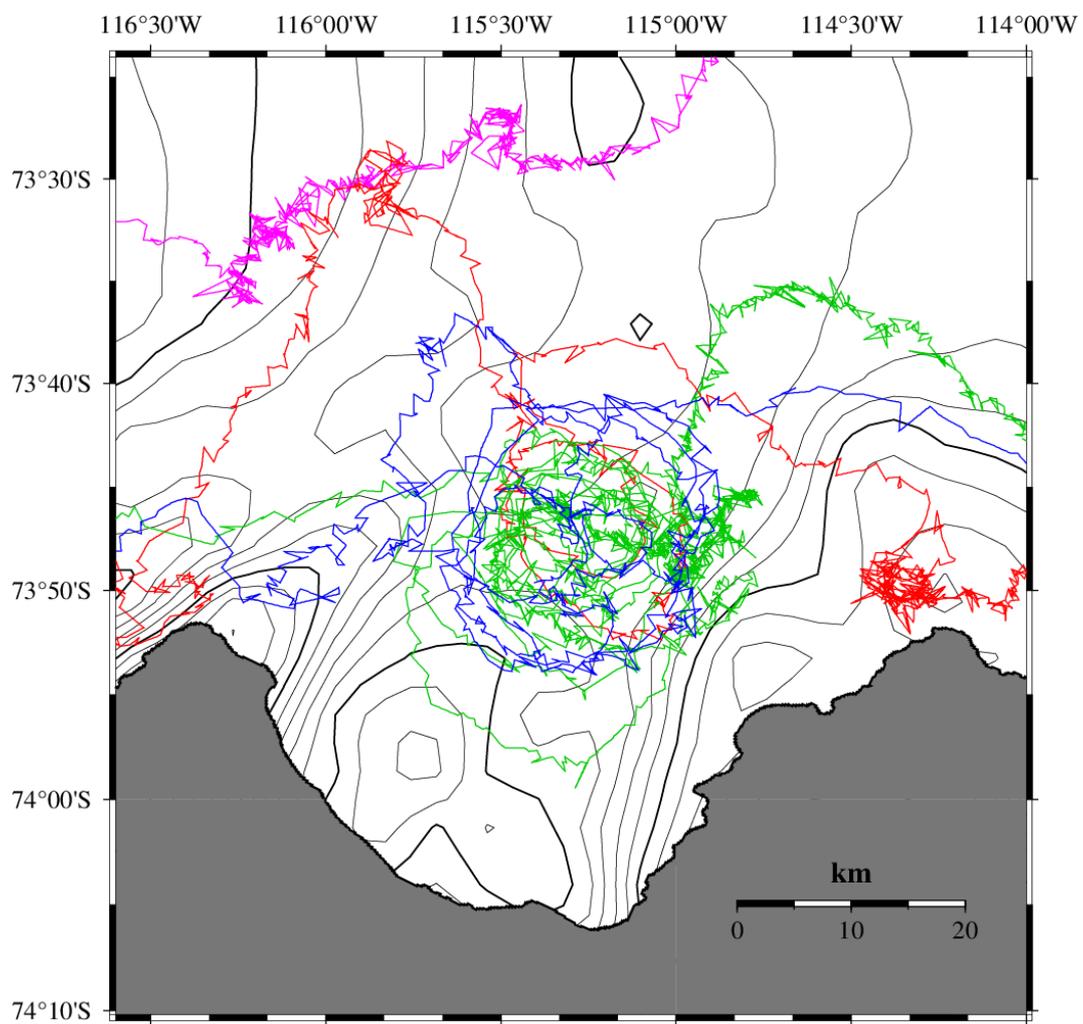


Fig. 3.2.10. Eddies tracked by surface drifters in front of Getz Ice Shelf (Glade bay) from January to March of 2014.

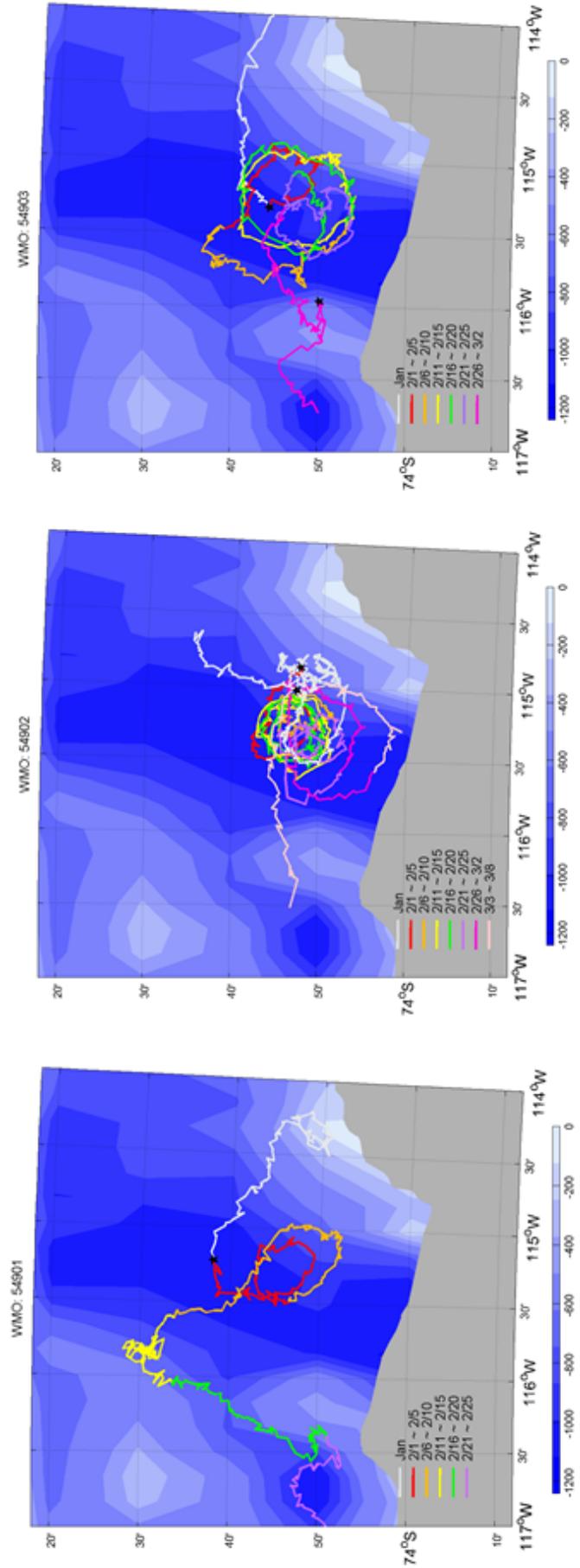


Fig. 3.2.11. Trajectories of each drifter representing with different colours in the interval of 5 days from late January to early March of 2014.

제 3 절 생지화학원소 침강 플럭스 산출

1. 서론

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

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

아문젠해(Amundsen Sea)는 서남극에 위치하고 있으며 아문젠해 폴리냐(polynya)(~27,000 km²)와 파인아일랜드(Pine Island) 폴리냐(~18,000 km²)가 존재한다. 특히 아문젠해 폴리냐는 남극에서 가장 높은 일차생산력을 보이며 연간 변화도 매우 큰 것으로 관측되었다(Arrigo and van Dijken, 2003). 아문젠해 폴리냐에서 관측한 엽록소의 연간평균농도는 2.2 mg m⁻³으로 로스해에서 관측한 값(1.5 mg m⁻³)보다 40% 가량 높았다. Fisher *et al.* (1988)이 웨델해(Weddell Sea)에서 입자플럭스의 계절변화를 관측하였으며, Collier *et al.* (2000)은 로스해(Ross Sea)에서 입자플럭스의 계절 및 연변화를 관측하였다. 하지만 아직까지 아문젠해에서 시계열 퇴적물트랩(time-series sediment trap)을 이용한 생지화학원소 침강플럭스에 대한 연구가 전혀 수행되지 않았다. 본 연구에서는 아문젠해 폴리냐,

두 지점과 폴리나 바깥해역, 한 지점에 퇴적물트랩을 2012년 2월부터 2013년 2월까지 1년 동안 계류하여 침강입자 플럭스의 계절변화를 파악하고자 한다.

2. 재료 및 방법

시계열 퇴적물트랩을 아문젠해 폴리나(St. K2, K3)와 폴리나 바깥해역(St. K1), 세 곳에 계류하였다(Fig. 3.3.1). 폴리나 바깥해역, 정점 K1에 퇴적물 트랩을 계류한 곳의 위치는 남위 $72^{\circ} 24.16'$, 서경 $117^{\circ} 43.34'$, 수심은 530m이었다. 정점 K1에서는 퇴적물트랩을 수심 418m에, 2012년 2월 15일부터 2013년 2월 12일까지 362일 동안 계류하였다. 폴리나 중앙해역에 위치한 정점 K2는 남위 $73^{\circ} 16.28'$, 서경 $114^{\circ} 58.23'$ 에 위치하였고 수심은 830m이었다. 정점 K2에서는 퇴적물트랩을 수심 414m에, 2012년 2월 24일부터 2013년 2월 21일까지 362일 동안 계류하였다. 폴리나 주변해역에 위치한 정점 K3는 남위 $74^{\circ} 11.23'$, 서경 $112^{\circ} 32.40'$ 에 위치하였고 수심은 1057m이었다. 정점 K3에서는 퇴적물트랩을 수심 507m에, 2012년 3월 4일부터 2013년 3월 1일까지 362일 동안 계류하였다. 본 연구에 이용한 시계열 퇴적물 트랩은 21개의 시료병을 갖는 McLane PARFLUX Mark 7G이었고 유속계는 Aanderaa RCM8이었다. 입자 플럭스가 많은 1월, 2월, 12월은 퇴적물 시료를 10일 간격으로 포집하였고 3월과 11월에는 15일, 나머지 계절에는 30/31일 간격으로 포집하였다. 퇴적물 트랩을 계류하기 전에 Na-borate로 중화한 5% 포르말린 용액을 시료병에 넣어 퇴적물 시료가 부패하지 않도록 하였다.

퇴적물 시료는 증류수로 3번 세척하고 원심분리한 후에 냉동 건조하였다. 건조된 퇴적물 시료의 무게를 측정하여 총질량 플럭스를 계산하였다. 총탄소/질소 함량은 CNS 원소분석기(Carlo-Erba EA 1112)를 이용하여 측정하였다. 모든 시료를 두 번 분석한 결과, 분석 정밀도는 3%였다. 무기탄소 함량은 coulometrics 탄소분석기(UIC CM5130)를 이용하여 측정하였는데, 분석 정밀도는 2%였다. 유기탄소 함량은 총탄소 함량에서 무기탄소 함량을 빼어 계산하였다. 생기원규소 함량은 시간에 따라 1M Na_2CO_3 를 이용하여 추출하여 분석하였다.

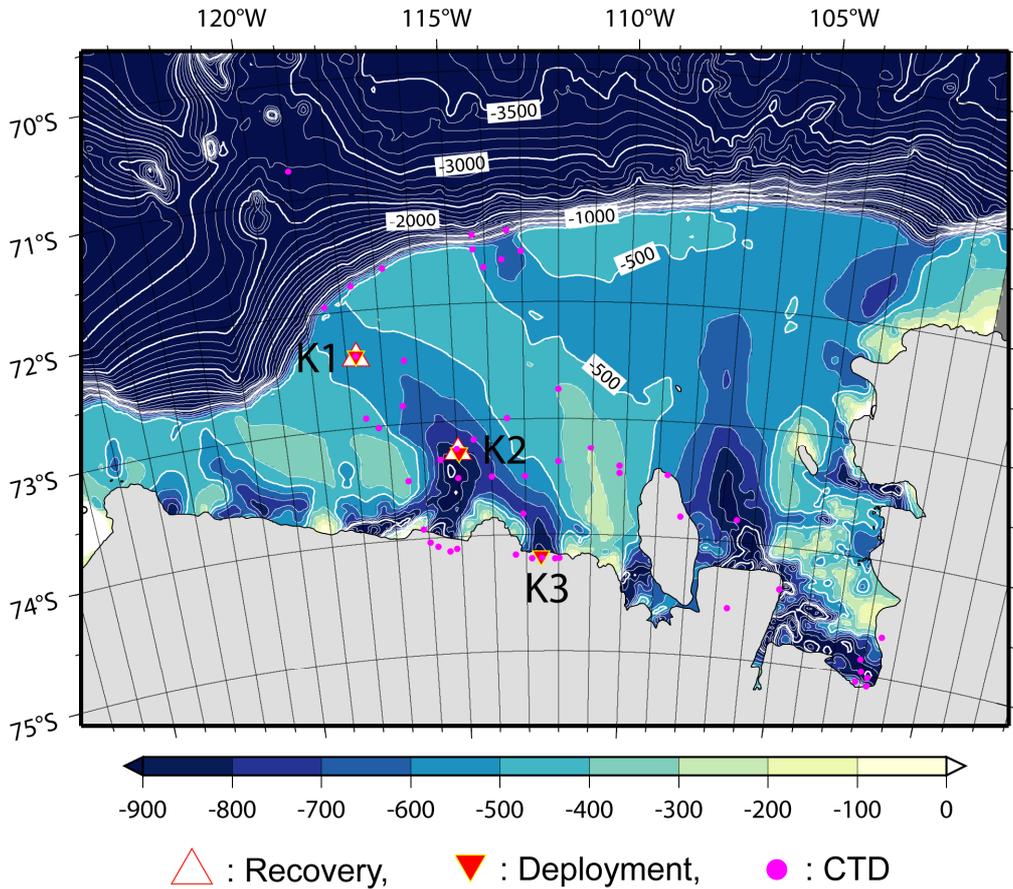


Fig. 3.3.1. Location map of mooring and CTD stations. Background contours are bottom topography.

3. 결과 및 토의

아문젠해 폴리나 바깥해역에 위치한 정점 K1에서 관측한 총질량 플럭스(total mass flux)는 1월에 $833 \text{ mg m}^{-2} \text{ day}^{-1}$ 으로 가장 큰 값을 보였고 4월~11월 동안에 $5.0 \text{ mg m}^{-2} \text{ day}^{-1}$ 이하로 매우 낮았다(Fig. 3.3.2a). 정점 K1에서 2012년 2월 15일부터 2013년 2월 12일까지 일년동안 측정된 총질량 플럭스는 $15.6 \text{ g m}^{-2} \text{ yr}^{-1}$ 이었다. 2011년에는 총질량 플럭스가 1월에 $500 \text{ mg m}^{-2} \text{ day}^{-1}$ 이상으로 가장 높은 값을 보였지만 2013년 1월에는 $13.2\sim 27.0 \text{ mg m}^{-2} \text{ day}^{-1}$ 으로 2011년에 비해 1/20 밖에 되지 않았다. 총질량 플럭스가 2011년에는 1월과 2월에 매우 높은 값을 보인 반면, 2013년 1~2월에는 매우 낮게 관측되었는데, 이것은 2013년 1~2월에 퇴적물트랩 계류 해역에 해빙이 녹지 않아 생물생산력이 크게 감소하였기 때문인 것으로 생각된다. 폴리나 중앙해역에 위치한 정점 K2에서 관측한 총질량 플럭스는 $2.29\sim 207 \text{ mg m}^{-2} \text{ day}^{-1}$ 의 범위로, 3월~11월에는 대체로 낮았고 12월과 1월

에 비교적 높았다(Fig. 3.3.2b). 정점 K2에서 2012년 2월 24일부터 2013년 2월 21일까지 일년 동안 측정된 총질량 플럭스는 $15.9 \text{ g m}^{-2} \text{ yr}^{-1}$ 으로, 정점 K1에 비해 약간 높았다. 2012년 12월부터 해빙이 서서히 녹기 시작하면서 총질량 플럭스가 급격히 증가하여 2013년 1월에 최고 값을 보였지만 해빙이 거의 존재하지 않는 2월에는 오히려 총질량 플럭스가 급격히 감소하여 $5 \text{ mg m}^{-2} \text{ day}^{-1}$ 이하의 매우 낮은 값을 보였다. 폴리나 주변해역에 위치한 정점 K3에서 총질량 플럭스는 $3.52\sim 123 \text{ mg m}^{-2} \text{ day}^{-1}$ 의 범위로, 정점 K2와 마찬가지로, 3월~11월에는 대체로 낮았고 12월과 1월에 비교적 높았다(Fig. 3.3.2c). 정점 K3에서 2012년 3월 4일부터 2013년 3월 1일까지 일년 동안 측정된 총질량 플럭스는 $7.49 \text{ g m}^{-2} \text{ yr}^{-1}$ 으로, 정점 K1과 K2에 비해 1/2 정도였다. 해빙이 정점 K02에 비해 정점 K03에서 상대적으로 적었음에도 불구하고 정점 K3에서 총질량 플럭스는 정점 K2에 비해 1/2 수준으로 낮았다.

정점 K1에서 유기탄소 플럭스는 $0.053\sim 52.1 \text{ mg m}^{-2} \text{ day}^{-1}$ 의 범위로, 2012년 2월에 가장 높았으며, 4월~11월에는 매우 낮은 값을 보였다(Fig. 3.3.3a). 정점 K1에서 일년동안 측정된 유기탄소 플럭스는 $1.02 \text{ gC m}^{-2} \text{ yr}^{-1}$ 이었다. 정점 K1에서 유기탄소 함량은 $5.22\sim 28.8\%$ 로 2012년 5월에 가장 높았고 그 후로 점차 감소하여 2012년 12월과 2013년 1월에 가장 낮았으며, 일년 평균 유기탄소 함량은 11.1% 였다(Fig. 3a). 유기탄소 함량이 2012년 4~6월에 다른 시기에 비해 상대적으로 높은 것은 이 시기에 동물플랑크톤 생물량이 증가하였기 때문인 것으로 생각된다. 정점 K2에서 유기탄소 플럭스는 $0.34\sim 22.1 \text{ mg m}^{-2} \text{ day}^{-1}$ 의 범위로, 2012년 2월부터 11월까지는 대체로 낮았고, 2012년 12월부터 점차 증가하여 2013년 1월에 최고 값을 보였으며, 그 후에 $1.0 \text{ mg m}^{-2} \text{ day}^{-1}$ 이하로 급격히 감소하였다(Fig. 3.3.3b). 정점 K2에서 일년 평균 유기탄소 함량은 9.46% 로 정점 K1에 비해 약간 낮았다. 정점 K2에서 일년 동안 측정된 유기탄소 플럭스는 $1.08 \text{ gC m}^{-2} \text{ yr}^{-1}$ 으로, 정점 K1과 매우 유사하였다. 정점 K2에서 유기탄소 함량은 $3.49\sim 23.4\%$ 로 2012년 3월에 가장 높았고 그 후로 점차 감소하여 2012년 11월에 가장 낮았으며, 그 후에 다시 증가하여 2013년 2월에 14.6% 로 보였다(Fig. 3.3.3b). 정점 K2에서 일년 평균 유기탄소 함량은 9.46% 로, 정점 K1에 비해 다소 작았다. 정점 K3에서 유기탄소 플럭스는 $0.42\sim 12.0 \text{ mg m}^{-2} \text{ day}^{-1}$ 의 범위로, 2013년 1월에만 높은 값을 보였고 그 이외 기간에는 $5 \text{ mg m}^{-2} \text{ day}^{-1}$ 이하로 낮았다(Fig. 3.3.3c). 정점 K3에서 일년동안 측정된 유기탄소 플럭스는 $0.62 \text{ gC m}^{-2} \text{ yr}^{-1}$ 으로, 정점 K1과 K2에서 측정된 값의 60% 가량 되었다. 정점 K03에서 유기탄소 함량은 $4.10\sim 20.5\%$ 로 2012년 3월에 최고 값을 보였고 그 후로 점차 감소하다가 2013년

1월에 다시 증가하였다(Fig. 3.3.3c). 정점 K3에서 일년 평균 유기탄소 함량은 9.59%로, 정점 K2에서 구한 값과 유사하였다. 정점 K1에서는 남극 여름동안 유기탄소 함량이 낮았던 반면, 정점 K2와 K3에서는 유기탄소 함량이 여름에 오히려 높았다.

정점 K1에서 CaCO_3 플럭스는 $0.25\sim 23.5 \text{ mg m}^{-2} \text{ day}^{-1}$ 의 범위로, 유기탄소 플럭스와 마찬가지로, 2012년 2월에 가장 높았으며, 4월~11월에는 매우 낮은 값을 보였다(Fig. 3.3.4a). 정점 K1에서 일년 동안 측정된 CaCO_3 플럭스는 $0.50 \text{ g m}^{-2} \text{ yr}^{-1}$ 이었다. 정점 K01에서 CaCO_3 함량은 1.56~18.4%로 2012년 6월에 가장 높았고 2012년 3월에 가장 낮았으며, 일년 평균 CaCO_3 함량은 6.46%였다(Fig. 3.3.4a). 2012년 6월에 CaCO_3 함량이 가장 높은 것은 이 시기에 pteropod와 같이 CaCO_3 껍질을 갖는 동물플랑크톤 생물량이 증가하였기 때문인 것으로 생각된다. 정점 K2에서 CaCO_3 플럭스는 $0.018\sim 2.45 \text{ mg m}^{-2} \text{ day}^{-1}$ 의 범위로, 2012년 12월과 2013년 1월에 다른 시기에 비해 높은 값들을 보였다(Fig. 3.3.4b). 정점 K2에서 일년 동안 측정된 CaCO_3 플럭스는 $0.24 \text{ g m}^{-2} \text{ yr}^{-1}$ 으로, 정점 K1에 비해 1/2 정도 밖에 되지 않았다. 정점 K02에서 CaCO_3 함량은 0.15~3.01%로, 2012년 2월부터 점차 증가하여 2012년 11월에 최고 값을 나타냈고 그 이후에 약간 감소하였다(Fig. 3.3.4b). 정점 K2에서 일년 평균 CaCO_3 함량은 1.44%로, 정점 K1에 비해 1/4 정도 밖에 되지 않았다. 정점 K3에서 CaCO_3 플럭스는 $0.044\sim 2.76 \text{ mg m}^{-2} \text{ day}^{-1}$ 의 범위로, 여름 기간인 2012년 12월부터 2013년 2월까지 비교적 높은 값을 보였음(Fig. 3.3.4c). 정점 K3에서 일년 동안 측정된 CaCO_3 플럭스는 $0.20 \text{ g m}^{-2} \text{ yr}^{-1}$ 으로, 정점 K2에 측정된 값과 유사하였다. 정점 K3에서 CaCO_3 함량은 0.26~10.7%로, 2012년 3월부터 10월까지는 대체로 낮았고 11월부터 점차 증가하여 2013년 2월에 최고 값을 보였다(Fig. 3.3.4c). 정점 K3에서 일년 평균 CaCO_3 함량은 3.48%로, 정점 K2에 비해 2배 가량 높았지만 정점 K1에 비해서는 1/2 정도였다.

4. 결론

정점 K1에서 2012년 2월 15일부터 2013년 2월 12일까지 일년 동안 측정된 총질량 플럭스는 $15.6 \text{ g m}^{-2} \text{ yr}^{-1}$ 이었다. 정점 K1에서 일년 동안 측정된 유기탄소 플럭스는 $1.02 \text{ gC m}^{-2} \text{ yr}^{-1}$ 이었으며, 일년 평균 유기탄소 함량은 11.1%였다. 일년 동안 측정된 CaCO_3 플럭스는 $0.50 \text{ g m}^{-2} \text{ yr}^{-1}$ 이었으며, 일년 평균 CaCO_3 함량은

6.46%였다

정점 K2에서 2012년 2월 24일부터 2013년 2월 21일까지 일년 동안 측정된 총질량 플럭스는 $15.9 \text{ g m}^{-2} \text{ yr}^{-1}$ 으로, 정점 K1에 비해 약간 높았다. 정점 K2에서 일년 동안 측정된 유기탄소 플럭스는 $1.08 \text{ gC m}^{-2} \text{ yr}^{-1}$ 으로, 정점 K1과 매우 유사하였으며, 일년 평균 유기탄소 함량은 9.46%로, 정점 K1에 비해 다소 작았다. 일년 동안 측정된 CaCO_3 플럭스는 $0.24 \text{ g m}^{-2} \text{ yr}^{-1}$ 으로, 정점 K1에 비해 1/2 정도 밖에 되지 않았으며, 일년 평균 CaCO_3 함량은 1.44%로, 정점 K1에 비해 1/4 정도 밖에 되지 않았다.

정점 K3에서 2012년 3월 4일부터 2013년 3월 1일까지 일년 동안 측정된 총질량 플럭스는 $7.49 \text{ g m}^{-2} \text{ yr}^{-1}$ 으로, 정점 K1과 K2에 비해 1/2 정도였다. 정점 K3에서 일년동안 측정된 유기탄소 플럭스는 $0.62 \text{ gC m}^{-2} \text{ yr}^{-1}$ 으로, 정점 K1과 K2에서 측정된 값의 60% 가량 되었으며, 일년 평균 유기탄소 함량은 9.59%로, 정점 K2에서 구한 값과 유사하였다. 일년동안 측정된 CaCO_3 플럭스는 $0.20 \text{ g m}^{-2} \text{ yr}^{-1}$ 으로, 정점 K2에 측정된 값과 유사하였으며, 일년 평균 CaCO_3 함량은 3.48%로, 정점 K2에 비해 2배 가량 높았지만 정점 K1에 비해서는 1/2 정도였다.

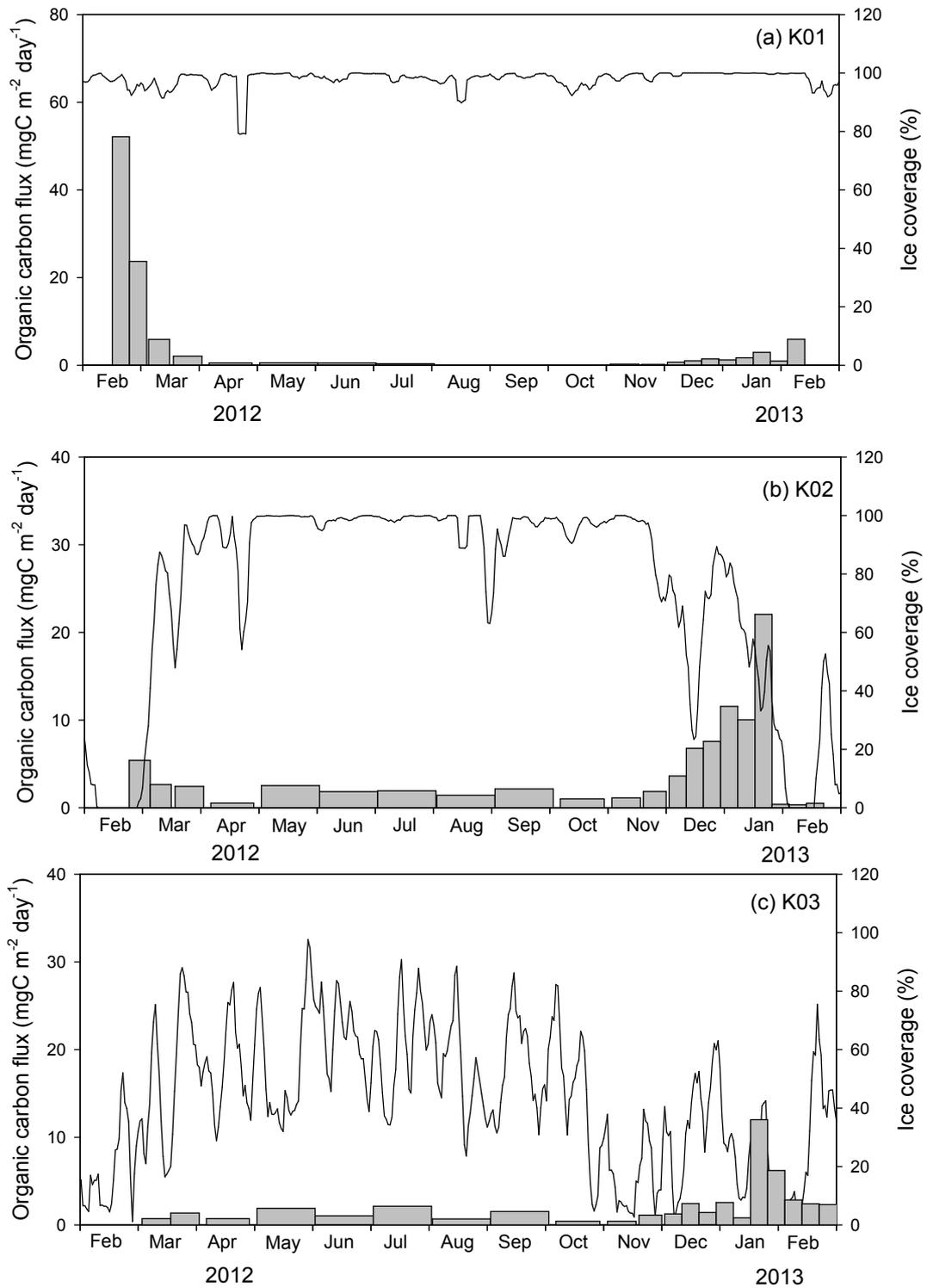


Fig. 3.3.2. Temporal evolution of total mass fluxes and sea ice coverage at Stations K1 (a), K2 (b), and K3 (c) from February 2012 to February 2013. The vertical bars indicate total mass fluxes, and solid lines indicate sea ice coverage.

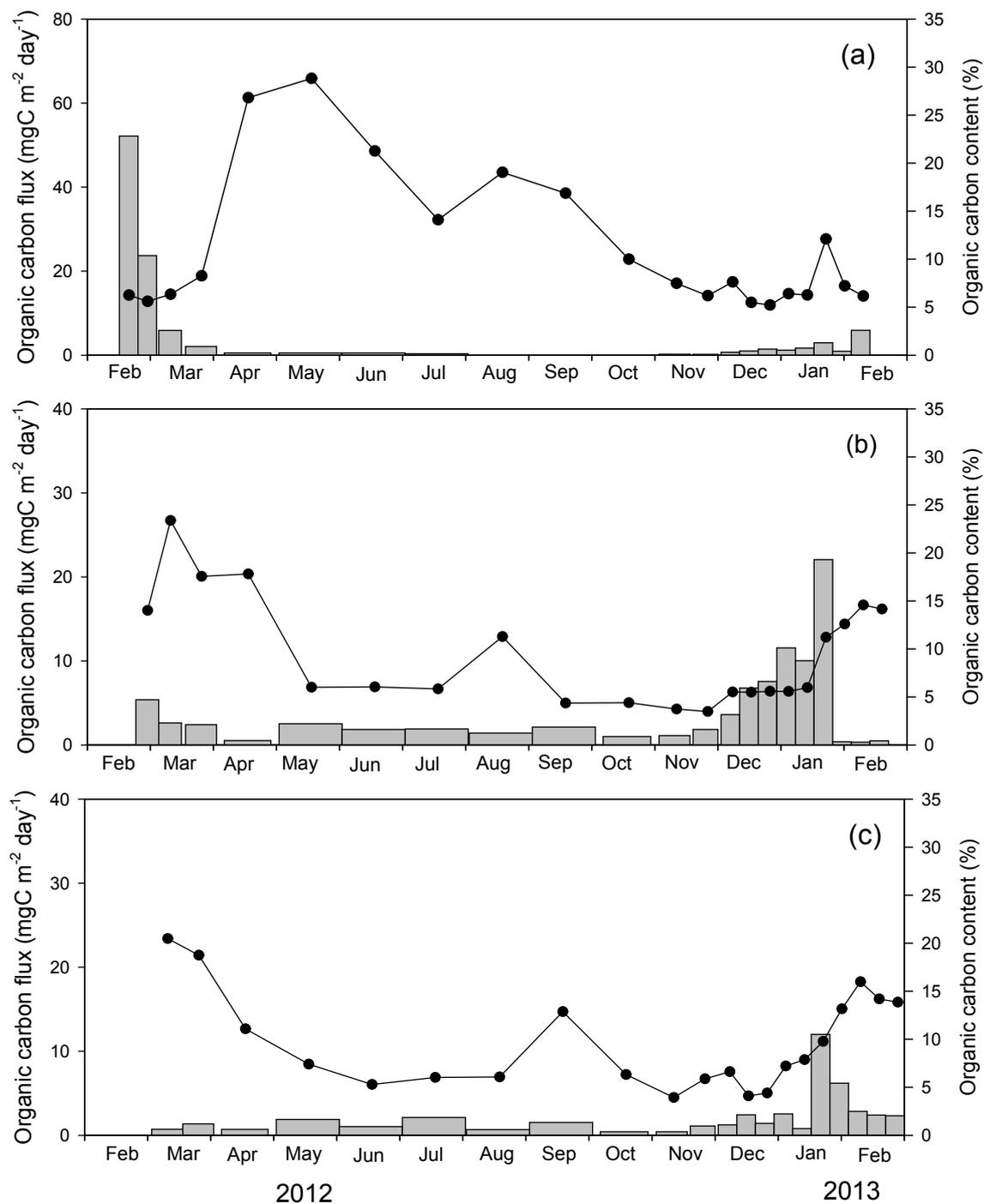


Fig. 3.3.3. Temporal evolution of organic carbon fluxes and contents at Stations K1 (a), K2 (b), and K3 (c) from February 2012 to February 2013. The vertical bars indicate organic carbon fluxes, and solid lines indicate organic carbon contents.

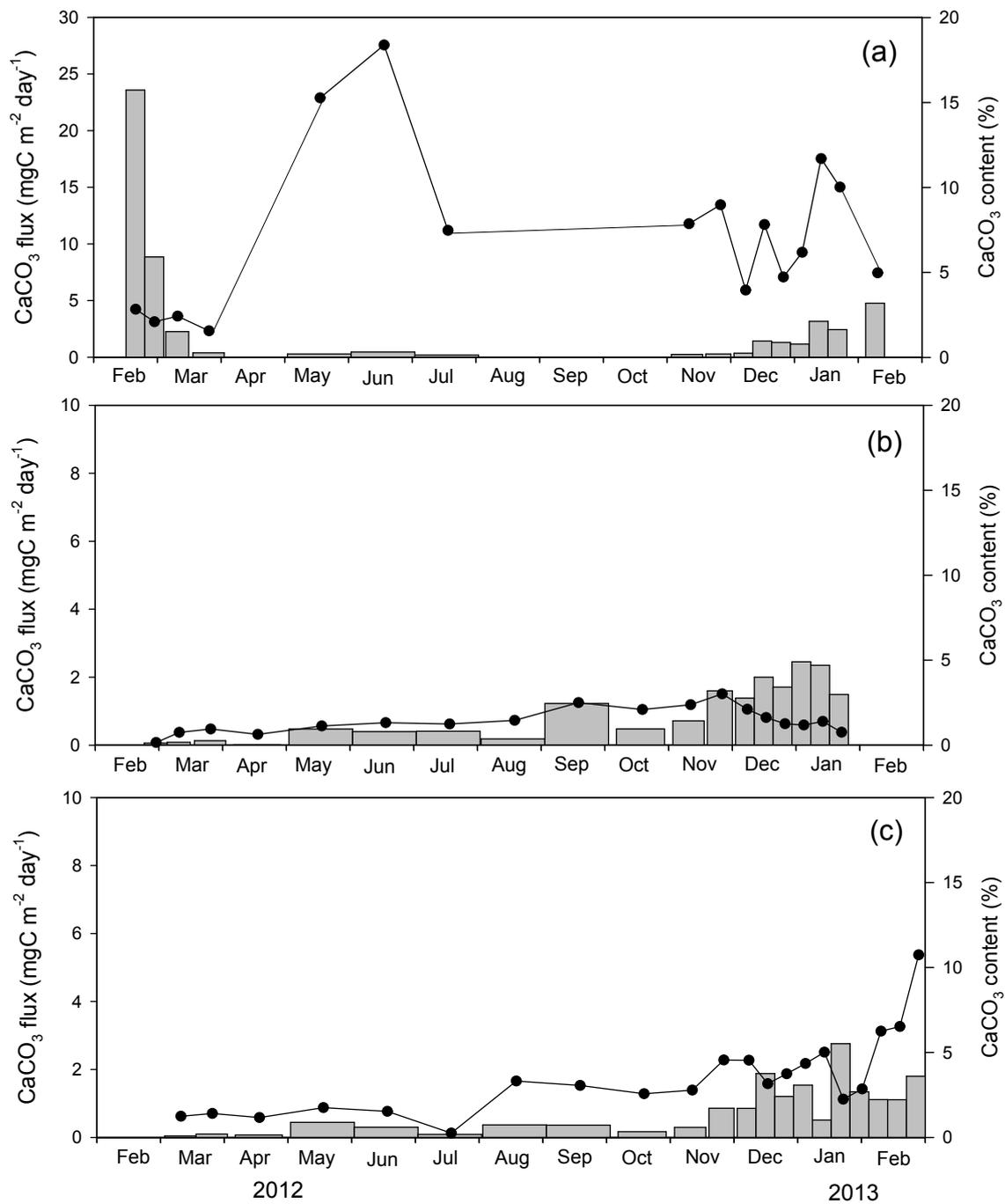


Fig. 3.3.5. Temporal evolution of CaCO_3 fluxes and contents at Stations K1 (a), K2 (b), and K3 (c) from February 2012 to February 2013. The vertical bars indicate CaCO_3 fluxes, and solid lines indicate CaCO_3 contents.

제 4 장 연구개발목표 달성도 및 대외기여도

제 1 절 연구개발 목표 달성도

1. 정성적 달성도

성과목표	세부목표		달성 주요 내용	달성여부	가중치 (%)
1. 결빙해역 해빙의 해수 순환 역할 규명	1-1	해류 시계열 관측	- 기존 시계열 자료 분석 (논문 발표) - 아문젠해 세 지점에 이년동안 계류한 해류계 회수 (2016. 1 예정)	완료 자료 획득중	40
	1-2	아문젠해 외해역 ACC 관측	- Udintsev Fracture Zone 실험에 표층 뜰개 30기 투하 (NOAA 제공)	완료	10
2. 아문젠해 생기원원소 침강플럭스 규명	2-1	퇴적물트랩 시료 확보	- 아문젠해 세 지점에 2년 동안 계류한 해류계 회수 (2016. 1 예정)	자료 획득중	20
	2-2	생기원원소 침강 플럭스 측정	- 유기탄소, 생기원규소 및 탄산칼슘 침강플럭스 계산	완료	30

2. 정량적 성과

(가) 학회/국제회의 발표: 1편

J.H. Lee and Y.-H. Park, The Udintsev Fracture Zone Experiment: A study for poleward heat flux and the ACC variability, *The 20th International Symposium on Polar Sciences (ISPS)* May 27-29, 2014, Incheon.

(나) 논문(SCI) 발간: 3편

H.K. Ha, A.K. Wåhlin, T.W. Kim, S.H. Lee, J.H. Lee, H.J. Lee, C.S. Hong, L. Arneborg, G. Björk, and O. Kalén, 2014, Circulation and modification of warm deep water on the central Amundsen shelf, *Journal of Physical Oceanography*, 44, 1493-1501, Doi:10.1175/JPO-D-13-0240

H.S. La, H. Lee, D. Kang*, S.H. Lee and H.C. Shin. 2014. Ex situ target strengths of ice krill (*Euphausia crystallorophias*). *Chinese Journal of Oceanology and Limnology* (in press).

H.S. La, H. Lee, S. Fielding, D. Kang, H.K. Ha, A. Atkinson, J. Park, V. Siegel, S.H. Lee, H.C. Shin*. 2014. High density of ice krill (*Euphausia crystallorophias*) in the Amundsen sea coastal polynya, Antarctica. *Deep-Sea Research I*, 95: 75 - 84.

(다) 논문(SCI) 투고: 1편

A.-R. Ko, S. Ju et al., Trophodynamics of Euphausiids in the Amundsen Sea during the austral summer by fatty acid and stable isotopic signatures. *Deep-Sea Research II* (Special issue, Submitted)

제 2 절 대외 기여도

- 우리 나라 최초의 남극해 결빙역인 아문젠해 탐사로 극지 해양 연구 영역 확대로 해양과학적 기여와 대국민 자긍심에 기여
- 국제적으로도 아문젠해 조사 연구는 이제 시작 단계인바 현장 조사 자료는 국제적 활용 예상
- 쇄빙연구선 아라온호 활용에 대한 노하우 축적
- 국내 극지연구(극지 연안순환 및 생태계) 수준 제고를 위한 다학제적 연구 개발

제 5 장 연구개발결과의 활용계획

- 남극해에서 변화가 가장 급격한 곳의 결빙해역의 해양환경변화의 이해
- 아문젠해 해양 시계열 자료의 국제 학계 제공
- 남극 아문젠해에서 "Biological pump"에 의해 대기에서 해양으로 유입되는 이산화탄소 양 추정에 활용
- 남극해의 기후조절능력 평가에 활용

제 6 장 참고문헌

- Arneborg, L., A. K. Wåhlin, G. Björk, B. Liljebadh, and A. H. Orsi, 2012: Persistent inflow of warm water onto the central Amundsen shelf. *Nature Geoscience*, 5, 876–880.
- Arrigo K.R., G.L. van Dijken, 2003. Phytoplankton dynamics within 37 Antarctic coastal polynya systems. *J. Geophys. Res. C*, 108, 3271.
- Bakker, DCE., HJW de Baar, and UV Bathmann. 1997. Changes of carbon dioxide in surface waters during spring in the Southern Ocean. *Deep-Sea Res. II*, 44, 91-127.
- Collier R., J. Dymond, S. Honjo, S. Manganini, R. Francois, and R. Dunbar. 2000. The vertical flux of biogenic and lithogenic material in the Ross Sea: moored sediment trap observation 1996-1998. *Deep-Sea Res., II*, 47, 3491-3520.
- Fisher, G., D. Futterer, R. Gersonde, S. Honjo, D.R. Osterman, and G. Wefer. 1988. Seasonal variability of particle flux in the Weddell Sea and its relation to ice cover. *Nature*, 335, 426-428.
- Fisher, G., V. Ratmeyer, and G. Wefer. 2000. Organic carbon fluxes in the Atlantic and the Southern Ocean: relationship to primary production compiled from satellite radiometer data. *Deep-Sea Res. II*, 47, 1961-1997.
- Ha, H.K., A.K. Wåhlin, T.W. Kim, S.H. Lee, J.H. Lee, H.J. Lee, C.S. Hong, L. Arneborg, G. Björk, and O. Kalén, 2014. Circulation and modification of warm deep water on the central Amundsen shelf, *J. Phys. Oceanogr.*, 44, 1493-1501.
- Kusahara, K. and H. Hasumi, 2014. Pathways of basal meltwater from Antarctic ice shelves: A model study, *J. Geophys. Res. Oceans*, 119, 5690-5704.
- Kim, D., D.-Y. Kim, Y.-J. Kim, Y.-C. Kang, and J. Shim. 2004. Downward fluxes of biogenic material in Bransfield Strait, Antarctica. *Antarctic Sci.*, 16, 227-237.
- Nakayama, Y., R. Timmermann, C.B. Rodehacke, M. Schröder, and H.H. Hellmer, 2014, *Geophys. Res. Lett.*, 41, 7942-7939.
- Orsi, A.H., T. Whitworth III, and W.D. Nowlin Jr, 1995. On the meridional extent and fronts of the Antarctic Circumpolar Current, *Deep-Sea Res. I*, 42, 641-673.
- Palanques, A., E. Isla, P. Puig, J.A. Snaches-Cabeza, and P. Masque. 2002. Annual evolution of downward particle fluxes in the Western Bransfield Strait (Antarctica) during the FRUELA project. *Deep-Sea Res. II*, 49, 903-920.

- Rabouille, C., J.-F. Galliard, P. Treguer, and M.-A. Vincendeau. 1997. Biogenic silica recycling in surficial sediments across the Polar Front of the Southern Ocean (Indian Sector). *Deep-Sea Res. II*, 44, 1151-1176.
- P.D. Tortell, M.C. Long, C.D. Payne, A.-C. Alderkamp, P. Dutrieux, and K.R. Arrigo, 2012. Spatial distribution of pCO₂, ΔO₂/Ar and dimethylsulfide (DMS) in polynya waters and the sea ice zone of the Amundsen Sea, Antarctica, *Deep-Sea Res. II*, 71, 77-93.
- Wåhlin, A. K., X. Yuan, G. Björk, and C. Nohr, 2010. Inflow of warm Circumpolar Deep Water in the Central Amundsen Shelf. *J. Phys. Oceanogr.*, 40, 1427–1434.
- Wåhlin, A. K., R. D. Muench, L. Arneborg, G. Björk, H. K. Ha, S. H. Lee, and H. Alsén, 2012. Some implications of Ekman layer dynamics for cross-shelf exchange in the Amundsen Sea. *J. Phys. Oceanogr.*, 42, 1461–1474.
- Wåhlin, A.K., O. Kalén, L. Arneborg, G. Björk, G. Carvajal, H.K. Ha, S.H. Lee, J.H. Lee, C. Stranne, 2013. Variability of warm deep water in a submarine trough on the Amundsen Sea Shelf, *J. Phys. Oceanogr.*, 43, 2054-2070.

주 의

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