

Review

10여년간의 서남극 아문젠해 관측과 연구: 방사성탄소동위원소 값을 중심으로

김민경*

경북대학교 자연과학대학 지구시스템과학부
(41566) 대구광역시 북구 대학로 80

Decadal Observation and Studies in the Amundsen Sea, Antarctica: Insights from Radiocarbon Values

Minkyung Kim*

*School of Earth System Sciences, College of Natural Sciences, Kyungpook National University,
Daegu 41566, Korea*

Abstract : The Amundsen Sea in West Antarctica is one of the most affected regions by climate change, but it is one of the least studied realms due to difficulties in access. Korea Polar Research Institute (KOPRI) launched a research project in the Amundsen Sea in 2010 using the icebreaker research vessel (IBRV) *Araon* and has been conducting various research initiatives. In this paper, previous researches derived from the Amundsen Sea Embayment by Korean researchers are introduced. Through previous studies, researchers have been able to interpret the environmental and biogeochemical changes according to the inflow Circumpolar Deep Water (CDW) and provide information for climate models. In particular, researches using radiocarbon isotopes (^{14}C) were introduced to understand the physical and biogeochemical mechanisms of the carbon cycle in the Amundsen Sea. Opportunely, with the construction of a second icebreaker research vessel, the direction for systematic and long-term polar data acquisition can be presented.

Key words : amundsen sea, antarctic research, radiocarbon, biogeochemistry, climate change

1. 서 론

태평양측 서남극, 특히 아문젠 해역(Amundsen Sea)은 기후 변화에 민감하게 반응하며, 해빙의 후퇴와 빙상의 붕괴 등 다양한 물리적 변화를 겪고 있다(Jenkins et al. 2010; Turner et al. 2017). 이에 따라 대기 중 이산화탄소의 흡수, 일차생산성(primary production)과 같은 탄소 순환 양상이 급격하게 변화할 것으로 예상된다. 따라서 아문젠해에서 진행되는 탄소 순환의 변화를 감지하는 것은 미래의 기후를 예측하는 데 중요한 자료를 제공할 것이며, 이를 이해

하고자 하는 연구가 활발히 진행되어 왔다.

국제적으로는 미국의 ‘ASPIRE (Amundsen Sea Polynya International Research Expedition, 2009-2011)’, 영국의 ‘iSTAR (Ice Sheet Stability Programme, 2010-)’를 필두로, ‘INSPIRE (Investigating the Role of Mesoscale Processes and Ice Dynamics in Carbon and Iron Fluxes in a Changing Amundsen Sea, 2015-2018)’, 그리고 ‘Elucidating Environmental Controls of Productivity in Polynyas and the Western Antarctic Peninsula, 2017-2020’ 프로젝트 등 온난화에 따른 아문젠해의 해양 생태계 변화를 구체적으로 파악하기 위한 다양한 연구가 진행되었다. 국내에서는 극

*Corresponding author. E-mail: minkyung@knu.ac.kr

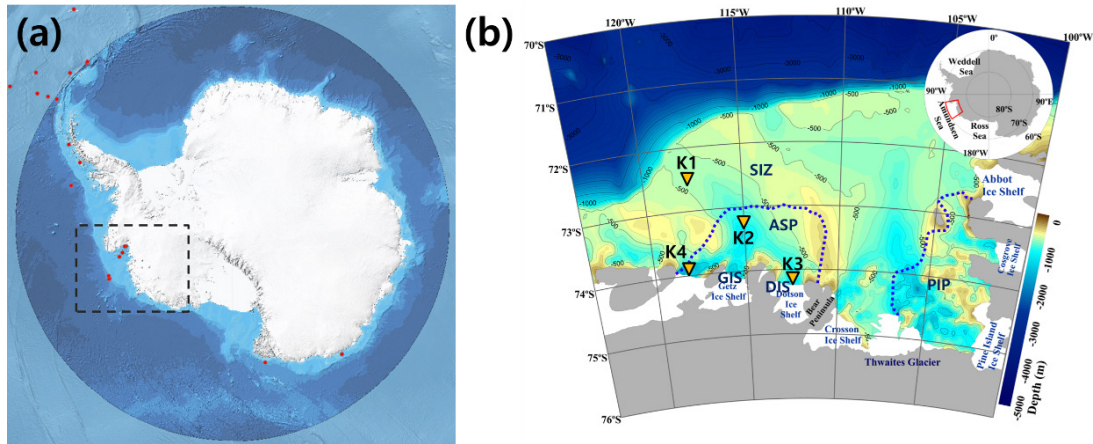


Fig. 1. (a) Map of the Antarctic with Amundsen Sea (dotted line), and time-series mooring stations (red dots) provided by SOOS (Bricher and the SOOS Data Management Sub-Committee 2022; <https://www.soos.aq/data/soosmap>). (b) Bathymetry of the Amundsen Shelf and sampling stations (reversed triangle). The dotted line indicates the boundary of the ASP and PIP, 10% of sea ice concentration in January 2011 (redrawn from Kim et al. 2015b)

지연구소(Korea Polar Research Institute, KOPRI)를 중심으로 2009년 취항한 쇄빙 연구선 아라온호(IBRV *Araon*)를 활용하여 2010년 아문젠해 탐사를 시작하였다(Fig. 1). 아문젠해는 폴리냐(Polynya; Arrigo et al. 2012)가 열리는 남극의 여름철 시기를 제외하고는 접근이 힘든 해역이기 때문에 다양한 계류선과 인공위성 등을 관측에 활용하고, 여름철 현장 조사 기간에는 프랑스, 네덜란드, 미국, 영국 등과 다국적으로 연구를 진행하며 다양한 해양 시료를 채취하였다. 이 프로그램을 통해 아문젠해의 해수 순환, 특히 남극순환심층수(Circumpolar Deep Water, CDW)의 유입과 해빙의 변동을 규명하고, 이에 따른 환경적, 생지화학적 변화를 고찰하여 궁극적으로 기후 변화에 따른 탄소 순환 양상을 파악할 수 있는 다양한 데이터를 생산하였다. 국내 연구팀의 아문젠해 연구 결과는 2016년 Deep-Sea Research-II 저널 특별호(The interdisciplinary marine system of the Amundsen Sea, Southern Ocean: recent advances and the need for sustained observations, <http://dx.doi.org/10.1016/j.dsr2.2015.12.002>), Lee et al. (2017a) 등을 통해 정리되어 왔다. 비슷한 시기에, 미국 ASPIRE팀도 아문젠 해역에서의 연구 결과를 2016년 Elementa: Science of the Anthropocene 저널(Special Feature: ASPIRE: The Amundsen Sea Polynya International Research Expedition)에 소개하였다. 본 논문에서는 위의 리뷰 이후 수행된 다양한 연구 결과를 집약하여 학생들에게 소개하고, 향후 나아가야 할 방향에 관하여 제시하고자 한다. 특히 입자상유기탄소(Particulate Organic Carbon, POC), 용존상유기탄소(Dissolved Organic Carbon, DOC), 그리고 용존상무기탄소(Dissolved Inorganic Carbon, DIC) 등 아문젠 해역에서 다양한 형태

로 존재하는 탄소의 방사성탄소동위원소(^{14}C) 값을 활용한 연구 결과를 정리하였다(Table 1; Kim et al. 2015b, 2019a, 2019b; Kim et al. 2018; Fang et al. 2020). 이 리뷰를 통해 국내 학자와 학생들이 극지 연구, 특히 극지 탄소 순환 연구에 관심을 가지고, 활발히 참여할 수 있기를 기대한다.

2. 아문젠해의 수괴 연구

아문젠해는 빙상의 용융과 해빙의 감소가 급격하게 일어나고 있는 해역이다(Pritchard et al. 2009, 2012; Stammerjohn et al. 2012; Lilien et al. 2018). 특히 아문젠해 빙봉의 용융은 서남극 빙상(West Antarctic Ice Sheet, WAIS)에서 남극해로 유입되는 용빙수의 가장 큰 원천 중 하나이기 때문에(Rignot et al. 2013), 기후 변화나 인간 활동에 따른 그 변동을 파악하는 것은 매우 중요하다(Turner et al. 2017; Jenkins et al. 2018; Milillo et al. 2017; Holland et al. 2019; Adusumilli et al. 2020).

아문젠해를 비롯한 서남극 해역에서의 급격한 빙봉 감소의 원인으로는 대륙붕수에 비해 상대적으로 고온, 고염인 CDW의 유입이 제시되어 왔다(Jenkins et al. 2010; Rignot et al. 2013; Sherrell et al. 2015). CDW는 남극 주변을 순환하다가 닷슨 골(Dotson trough)의 동쪽 사면을 따라 닷슨 빙봉(Dotson Ice Shelf, DIS)까지 유입되어 빙봉을 녹인다고 알려져 있다(Wählín et al. 2010; Ha et al. 2014). 용빙수를 포함하는 CDW는 대륙붕수와 섞여 mCDW(modified CDW)를 형성하고, mCDW는 DIS의 동쪽 사면을 따라 남쪽으로, 서쪽 사면을 따라 연안과 북서쪽으로

Table 1. List of samples collected for the $\Delta^{14}\text{C}$ and related publications

Samples	Site description (Station)	Lat (°)	Long (°)	Sampling/water depth (m)	$\Delta^{14}\text{C}$ (‰)	Sampling periods ¹⁾	Related publications
Suspended particles	SIZ	72.39	117.72	0/530	-193		
	ASP	73-74	113-114	0/830	-128--142	Jan.-Mar. 2012	Kim et al. 2016c
	DIS	74.20	112.52	0/1057	-144		
Sinking particles	SIZ (K1)	72.40	117.72	400/530	-154--252	1/5/11-12/28/11 3/7/12-3/16/13	Kim et al. 2015b
	ASP (K2)	73.28	114.97	410/830	-171--245	2/15/12-2/20/13	Kim et al. 2019a
	DIS (K3)	74.19	112.54	490/1057	-197--224	2/17/12-3/1/13	Kim et al. 2019a, 2019b
	GIS (K4)	73.89	118.72	427/688	-158--204	2/1/16-2/28/18	Kim et al. 2019b
Sediment (Box core)	Shelf break	71.70	114.04	543	-386--825		
	periphery ASP	73.23	114.91	802	-311--420	Jan.-Mar. 2012	Kim et al. 2016c
	ASP	74.20	112.52	710	-344--531		
	DIS	73.04	115.72	1080	-407--765		
DOC	SIZ (K1)	72.40	117.72	25-500/530	-342--489	Jan. 2014, Jan. 2016	Fang et al. 2020
	ASP (K2)	73.28	114.97	0-830/830	-285--482		
DIC	SIZ (K1)	72.39	117.72	3-515/520	-147--154		
	ASP (K2)	73.28	114.99	2-810/825	-129--161	Jan.-Mar. 2012	Kim et al. 2018
	DIS (K3)	74.20	112.51	10-1064/1065	-140--162		

¹⁾Sampling periods for sinking particles: (mm/dd/yy)

흐르는 것이 최근 연구에서 밝혀졌다(Ha et al. 2014; Miles et al. 2016; Dotto et al. 2020).

최근 Kim et al. (2021c)은 2007-2018년, 총 7차례의 현장 조사를 통해 얻은 중장기적 자료를 활용하여 연간 mCDW의 변동과 그 원인을 규명하였다. 저지들에 의하면 mCDW의 부피는 DIS 앞쪽에서 가장 큰 연간 변동성을 보였는데, 2007년(8,000 km³)에 비해 2014년에는 감소(4,700 km³)한 후, 2018년에 다시 증가했다(7,300 km³). 이러한 변화는 해빙에 따른 에크만 용승의 변동과 유사하게 나타났고(Kim et al. 2017b), 저지들은 바람의 변동성과 아문젠해 저기압(Amundsen Sea Low, ASL)의 위치 사이에 강한 상관 관계가 있음을 제시하였다. 관측 결과를 바탕으로 mCDW의 유입 기작을 파악하기 위한 모델 연구도 활발히 진행되었다(Thoma et al. 2008; Dotto et al. 2019). 또한 ASL의 예측은 남극과 전지구 기후 변화를 이해하는 데 필수적이므로, Gao et al. (2021)은 CMIP6 (Coupled Model Intercomparison Project)의 14개 모델을 사용하여 전지구 평균 온도가 1.5-4°C 증가할 때 ASL의 향후 변화를 비교하는 연구를 진행하기도 하였다.

원격 조사도 활발히 수행되었다. 내륙 해빙(fast ice)은 바다에 떠다니는 얼음(pack ice)과 달리 움직임이 거의 없

이 해안선에 부착된 해빙을 뜻하는데, Kim et al. (2015c)은 2003-2008년, 다중 센서 자료와 머신 러닝 접근 방식을 활용하여 내륙 해빙의 시공간적 분포를 밝히고, 내륙 해빙의 체류 기간이 아문젠해 동쪽보다 서쪽에서 훨씬 짧다는 것을 발견하였다. Kim et al. (2015a)은 고해상도 광학 위성사진 등 원격 자료의 시계열 분석을 통해 아문젠해 스웨이츠 빙붕(Thwaites Ice Shelf, TIS)의 붕괴 양상을 조사하기도 하였다.

한편 남극 연안에는 약 46개의 폴리냐가 존재하는데, 아문젠해는 아문젠해 폴리냐(Amundsen Sea Polynya, ASP; -27000 km²)와 파인 섬 폴리냐(Pine Island Polynya, PIP; -18000 km²)를 포함하고 있다(Fig. 1; Arrigo and van Dijken 2003; Arrigo et al. 2012). 아문젠해의 해빙역(Sea ice Zone, SIZ)은 연간 해빙에 덮여있는 데 반해, 연 변화가 있기는 하지만 ASP와 DIS 앞의 해빙 농도는 대략 11월 초에 감소하기 시작하여 3월 정도까지는 열린(open ocean)상태로 유지되는데, 1997-2010년 ASP와 PIP는 각각 약 132, 122일 가량 열려 있었던 것으로 관측, 보고되었다(Arrigo et al. 2012).

2. 아문젠해의 무기탄소 순환과 기체 연구

용존무기탄소의 방사성탄소동위원소(DI^{14}C)

Kim et al. (2018)은 아문젠해에 분포하는 다양한 수괴의 나이 및 이동 경로를 규명하기 위해 DIC의 $\Delta^{14}\text{C}$ (지금부터 DI^{14}C 로 기술)을 측정하였다(Fig. 2). 해수면 환경에 따라 SIZ (K1 정점, 72.39°S, 117.72°W; 수심 520 m), ASP (K2 정점, 73.28°S, 114.92°W; 수심 825 m), 그리고 DIS (K3 정점, 74.19°S, 112.51°W; 수심 1065 m)에서 2012년 현장조사 중 채취한 해수 시료를 분석하였다(Figs. 1 and 2, Kim et al. 2018). DIC는 표층에서는 대기와의 교환이나 생물 활동에 의해, 심층에서는 다른 해수와의 혼합, 유기물의 분해 등에 의해 주로 영향을 받는데, 저자들은 각각의 수괴가 서로 다른 DI^{14}C 값을 가지고 있다는 점을 활용하여 아문젠해의 해수 순환과 관련 기작을 고찰하였다(Kim et al. 2018).

표층의 DI^{14}C 값은 SIZ, ASP, DIS에서 각각 -153‰, -136‰, -140‰로, SIZ에서 가장 낮았으며, 이는 외부 남극해의 값(-102‰; Sabine et al. 2012)보다 낮아 표층수가 외부에서 유입되지 않은 것으로 해석하였다(Figs. 2 and 4; Kim et al. 2018). 동계수(Winter Water, WW)는 약 200-400 m 수심에 존재하며, 지난해의 겨울 동안 해빙이 생성되며 형성된 차가운 수괴이다(Randall-Goodwin et al. 2015). WW층 하부 수괴의 DI^{14}C 값은 mCDW와 WW의 혼합으로, 100-410 m 수심의 DI^{14}C 값은 모든 정점에서 약 -147‰로 거의 동일하였다(Kim et al. 2018). 세 정점

모두 400 m 이하에서 DI^{14}C 는 수심이 증가함에 따라 감소하였으며, ASP와 DIS 정점 해저면 근처 DI^{14}C 값은 외양에서 관측한 CDW의 DI^{14}C 값과 유사하였다(Figs. 2 and 4; Sabine et al. 2012; Bercovici and Hansell 2016). SIZ 해저면 근처 DI^{14}C 값은 다른 정점의 400 m 수심의 DI^{14}C 값과 유사하며, 온도와 염분도도 낮아 빙하 용빙수와 혼합된 것으로 해석하였다(Kim et al. 2016c, 2018). 저자들은 DI^{14}C 를 통해 CDW가 해저면을 따라 유입되고, 상층에 mCDW가 형성되는 것을 추정하였으며, 박스 모델을 이용해 아문젠해의 해수 순환 시간을 약 10-30년으로 제시하였다(Kim et al. 2018).

DMS (dimethyl sulfide)와 대기 중 가스들

그 외에도 다양한 화학적 추적자를 사용하여 수괴 분포를 파악하는 연구가 진행되었다. Kim et al. (2016b)은 불활성 기체인 헬륨(He)과 네온(Ne)의 농도가 해수보다 빙하 얼음에서 높다는 특성을 활용하여, 2011/12년 DIS와 겟츠 빙붕(Getz Ice Shelf, GIS) 앞의 용빙수 분포를 규명하였다. 저자들은 상당량의 용빙수가 200-600 m, 특히 WW와 mCDW 사이인 400-500 m 수심에 많이 존재하는 것을 확인하였다. GIS보다 DIS앞, 특히 DIS의 서쪽에서 헬륨의 포화도가 높았는데, 이는 물리 계류선을 통해 서쪽에서 용빙수의 집중 유출이 관측된 것과 일치했으며, 헬륨과 네온의 높은 포화도는 대륙붕단의 바깥쪽까지 이어져 용빙수가 약 300 km까지도 이동함을 시사하였다(Kim et al. 2016b).

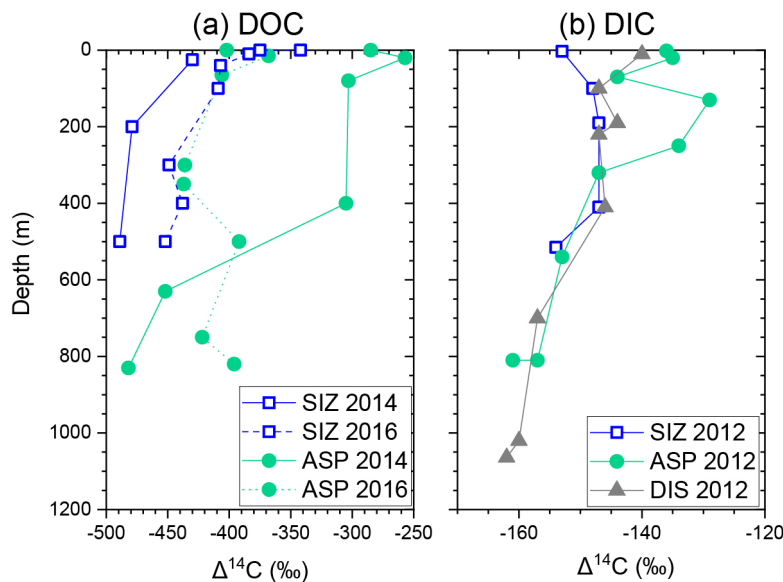


Fig. 2. Vertical profiles of $\Delta^{14}\text{C}$ of (a) DOC collected in SIZ and ASP in 2014 and 2016, and (b) DIC in the SIZ, ASP and DIS in 2012 (data from Kim et al. 2018; Fang et al. 2020)

한편, Kim et al. (2017a)은 아라온호의 박막 주입식 질량분석기(Membrane Inlet Mass Spectrometer, MIMS)를 이용하여 2016년 탐사 중 DMS (Dimethyl sulfide)의 분포를 파악하였다. DMS는 *Phaeocystis Antarctica* (*P. antarctica*로 표기) 등에 의해 전구체인 DMSP (Dimethylsulfoniopropionate) 형태로 생성되며, 남극해가 그 중요한 공급원으로 알려져 있다(Zhang et al. 2020). DMS는 광산화되어 구름 응결핵에 중요한 역할을 하는 에어로졸(SO_4^{2-} , MSA (methanesulphonic acid) 등)을 형성한다(Stefels and Boekel 1993; Jang et al. 2022). 아문젠해 표층수에서 DMS 농도는 < 1-400 nM까지 다양했고, SIZ과 ASP의 사이와 GIS 근처에서 가장 높았다(Kim et al. 2017a). 이후 Kim et al. (2021a)은 가을철 아문젠해와 로스해의 SIZ을 포함한 남극해(50°W-170°W) 표층수의 DMS 분포를 조사하였는데, 평균(약 2.7 nM)에 비해 높은 DMS 농도(5-28 nM)가 로스해와 아문젠해 주변 SIZ의 경계부에서 관측되었고, 이는 빙하나 해빙의 용빙수에서 영양분을 공급 받은 해빙 조류의 일차생산 때문인 것으로 해석했다. 이 연구를 통해 Kim et al. (2021a)은 그 동안 과소 평가되어 온 가을철 DMS 플럭스의 중요성을 시사하였다.

해양에서 나아가 Jung et al. (2020)은 2016년 아문젠해 대기 중 황산화물과 유기물의 분포를 규명하였다. 아문젠해에서 MSA의 농도는 약 $0.57 \mu\text{g m}^{-3}$ 로 다른 남극해($0.01 \mu\text{g m}^{-3}$)에 비해 상당히 높아, 해양 생물의 활동이 대기 중 MSA 농도에 영향을 주는 것을 확인하였다(Jung et al. 2020).

3. 아문젠해의 생지화학 및 생물학적 탄소 펌프 연구

해양은 연간 약 2 Pg의 탄소를 흡수하는데 그 중 약 절반 정도가 남극해에서 제거된다(Takahashi et al. 2009; Sigman et al. 2010). 이에 따라 대기 중의 이산화탄소에 대한 아문젠해의 역할을 규명하고 생물학적 탄소 펌프(Biological Carbon Pump, BCP) 기작을 이해하기 위한 다양한 연구가 수행되었다.

일차생산과 식물플랑크톤

ASP는 남극 주변부의 46개 폴리냐 중 가장 생산성이 큰 것으로 알려져 있다(Arrigo and van Dijken 2003; Arrigo et al. 2012; Lee et al. 2012). 두 해에 걸친 현장 조사에서 ASP의 일차생산성은 2010/11년의 번성기에는 2200 ± 1400 , 2011/12년의 쇠퇴기에는 $250 \pm 110 \text{ mgCm}^{-2}\text{d}^{-1}$ 로 관측되었다(Lee et al. 2012).

ASP에서 용존 산소와 아르곤의 비율($\Delta\text{O}_2/\text{Ar}$)로 평균 순생산(Net Community Production, NCP)을 추정할 결과,

Hahn et al. (2014)은 번성기에서 쇠퇴기로 변함에 따라 NCP가 약 1020에서 $200 \text{ mgCm}^{-2}\text{d}^{-1}$ 로 감소한 것을 관측하였다. Park et al. (2019b)은 해수면 온도, 혼합층 수심, 엽록소 및 광합성에 이용 가능한 빛 등 네 가지 변수로 도출한 ASP의 여름철 평균 NCP를 2010/11년과 2011/12년에 각각 약 420, $390 \text{ mgCm}^{-2}\text{d}^{-1}$ 로 추정하여, 실제 관측 값과 대체로 일치하였으나, 꾸준한 추가 관측이 필요함을 제시하였다.

연간 아문젠해의 식물플랑크톤 양의 변동은 로스해 등에 비해 크기 때문에, 물리적 환경 변화에 따른 식물플랑크톤 군집의 반응 연구 또한 중요하다(Arrigo and van Dijken 2003; Smith et al. 2006). Lee et al. (2016a)은 ASP에서는 *P. antarctica*가, SIZ에서는 규조류(*Fragilariopsis* spp. *Chaetoceros* spp. 및 *Proboscia* spp.)가 우점함을 밝혔으며, 이들 식물플랑크톤의 군집 구조가 주로 해빙의 용해 및 해수 순환과 관련된 해수의 밀도에 영향을 받는 것을 밝혔다(Fragoso and Smith Jr. 2012; Lee et al. 2016a). 이 두 종의 식물플랑크톤은 해양 탄소 순환에 서로 다른 영향을 미칠 수 있는데, 예를 들어 *P. antarctica*는 규조류에 비해 인산염 1몰당 이산화탄소를 2배가량 더 많이 흡수하고, DMS의 생산자로 잘 알려져 있지만, 동물 플랑크톤이 선호하는 먹이원은 아니며(Liss et al. 1994; Arrigo et al. 1999; Caron et al. 2000), 껍데기가 있는 규조류에 비해 침강 효율이 좋지 않다(Reigstad and Wassmann 2007; Kim et al. 2015b).

한편, 온난화에 따른 소형 식물플랑크톤의 기여도에 관한 연구도 진행되었다(Moran et al. 2010; Lee et al. 2013). 아문젠해의 경우 SIZ에는 소형 식물플랑크톤($0.7-5 \mu\text{m}$)이, ASP내부에는 대형 식물플랑크톤($> 5 \mu\text{m}$)이 대체로 우점하는데, 소형 식물플랑크톤은 해수의 온도가 상승하고 성층화가 일어나는 환경에서 특히 중요한 역할을 하는 것으로 밝혀졌다(Lee et al. 2017b; Lim et al. 2019). 2012-2016년 동안의 연구에 따르면 ASP에서 1월에서 3월 사이 일차생산성은 약 $840 \text{ mgCm}^{-2}\text{d}^{-1}$ 에서 $190 \text{ mgCm}^{-2}\text{d}^{-1}$ 로 감소한 데 반해, 전체 탄소 흡수율에 대한 소형 식물플랑크톤의 기여도는 1월 초(15%)보다 2-3월(51%)에 증가하는 것을 발견하였다(Lim et al. 2019).

Kim et al. (2016a)은 식물플랑크톤의 생화학적 조성(단백질, 탄수화물 및 지질)을 분석하여 상위 영양단계 소비자를 위한 먹이 공급원으로서 식물플랑크톤의 성장 조건 및 영양 상태에 대한 정보를 제공하였다. ASP의 유광층에서 무기영양염은 전반적으로 풍부했고, 아문젠 해역 전반에서 식물플랑크톤의 조성 구성은 단백질, 탄수화물 및 지질이 각각 평균 66%, 22%, 그리고 12%로, 아문젠해는 질소가 제한적인 환경이 아니며 식물플랑크톤이 풍부한 단백질 공급원임을 시사하였다(Kim et al. 2016a). 이후

Song et al. (2016)도 안정동위원소를 이용하여 식물플랑크톤의 높은 단백질 생산성에 대해 규명하였다.

철과 빛

ASPIRE 연구 항해를 통해 2010/11년 획득한 용존철의 농도는 표층수에서는 상대적으로 낮으며, 150-300 m 수심에서 0.3-0.4 nM로 비교적 균일하게 존재하고, 퇴적물에서의 재광물화로 인하여 해저면 근처로 갈수록 증가하였다(Sherrell et al. 2015). Miles et al. (2016)은 글라이더(Deep glider; RU25D)를 활용하여 철분 등 입자상 물질이 빙하에서 공급되는 것을 확인하였다. 이후 수치 모델 시뮬레이션을 통해 St-Laurent et al. (2017, 2019)은 빙하 용빙수와 퇴적물이 용존철의 주요 공급원임을 제시하였다. 종합적으로, 빙봉의 용융은 표층 용존철 농도에 영향을 미치며, 용존철의 농도는 강한 계절성과 측면 이동(lateral transport)양상을 보이는 것을 확인하였다(Sherrell et al. 2015).

용존철 이외에도 2010/11년 Sherrell et al. (2015)은 여러 미량금속(Mn, Zn, Cu, Ni 등)의 분포를 규명하며, 망간(Mn)이 빙하 용융 및 퇴적물로부터의 용출과 재부유 등에 의해 공급됨을 확인하였다(Planquette et al. 2013; Sherrell et al. 2015). 이후 Jang et al. (2019)은 2014, 2016년 아문젠해의 용존상과 입자상 Mn 분포를 식물플랑크톤의 거동과 연결하여 해석하였다. 또한 DIS 주변을 제외한 WW에서 용존상 Mn 농도는 일정했는데(-1.09 nmol/kg), 이 값은 로스해나 웨델해의 값에 비해 두 배 정도 높아 빙하나 퇴적물로부터의 공급이 많음을 시사하였다(Jang et al. 2019).

Park et al. (2017)은 2012년 ASP와 PIP에서 철과 빛의 가용성을 비교하여 빙봉의 용융으로 인한 철의 공급보다는 빛이 식물플랑크톤의 번성에 영향을 줄 수 있음을 제시하였다. 나아가 Park et al. (2019a)은 1998-2016년 위성 및 대기 재분석 자료를 기반으로 남극 주변부 폴리냐에서 클로로필(Chl-a)의 연간 변동성이 크고, 대기 강제력에 대한 반응이 지역적으로 다르다는 것을 발견했는데, 서남극 해역 폴리냐에서는 바람이 강하면 지표수로의 영양분 공급이 증가하여 Chl-a가 증가한다고 밝혔다. 아문젠해에서는 1998-2016년 동안 Chl-a 농도가 감소했는데, 이는 다량의 빙하 용빙수로 인한 해양 성층화 때문으로 추정했으며, 빙봉의 용융으로 인한 철의 공급은 장기적인 Chl-a 농도의 변화에 직접적인 영향을 미치지 않는다고 밝혔다(Park et al. 2019a). 저자들은 기후변화에 따라 미래에 해빙이 없는 해역이 확장되어 수직 혼합이 강화되면, 식물플랑크톤의 생산성이 감소할 수 있음을 시사하였다(Park et al. 2017). 일차원 모델에서도 빛과 철이 모두 폴리냐의 대번성을 제한하는 요인이 될 수 있지만, 빛이 주요 원인일 가능성을 제시하였다(Oliver et al. 2019).

그 외에도 ASP의 높은 일차생산성이 유지되는 역할을

규명하기 위해 La and Park (2016)은 빛 조건에 영향을 미치는 구름의 농도와 이에 따른 빛의 강도 및 플랑크톤의 생물량을 조사하였다. 최근 Kwon et al. (2021)은 일차원 원양 생태계 모델을 사용하여 아문젠해의 두 우점 식물플랑크톤의 일차생산성이 철과 빛 조건의 변화에 따라 어떻게 반응할지에 관한 연구를 수행하였다. 모델을 통해 현재의 철과 빛 조건이 구조류보다 *P.antarctica*의 성장에 좋으며, 향후 *P.antarctica* 우점이 지속될 것으로 예측하였다.

동물플랑크톤과 크릴

동물플랑크톤은 수직 이동을 통해 해양 내 생지화학 및 탄소 순환에 큰 영향을 미치며, 유광층에서의 탄소 흡수를 14%까지 증가시킬 수 있다고 알려져 있다(Archibald et al. 2019; La et al. 2019). Yang et al. (2016, 2019)은 ASP와 SIZ에서 다양한 소형, 중형 동물플랑크톤의 섭식과 먹이 조성비 등을 규명하였다. 저자들은 ASP에서 소형 동물플랑크톤이 식물플랑크톤 생산성의 대부분(77%)을 섭식하였으며, 중형 동물플랑크톤은 식물플랑크톤보다 크기가 큰(20-100 μm) 섬모류(ciliates)와 종속영양 외편모조류(heterotrophic dinoflagellates, HDF)를 우선적으로 섭취하고, 식물플랑크톤을 먹는 소형 동물플랑크톤을 섭식하는 것을 발견하였다. 이로써 ASP의 먹이망 구조가 다양하며, 이들이 탄소 순환에 중요한 역할을 함을 밝혔다(Yang et al. 2019).

La et al. (2015, 2019)은 음향 산란 자료(acoustic analysis on volume-backscatter data)를 통해 *E. crystallorophias* 등이 특별한 음향 값을 가지고 있음을 발견하여 기후 변동에 따른 동물플랑크톤의 수직 이동 변화를 규명하고, 그 연관성을 밝혔다(La et al. 2019). 동물플랑크톤은 2010년 -SAM (남반구환상모드; Southern Annular Mode)/엘니뇨(El Niño) 기간에 비해 2013년 +SAM/라니냐(La Niña) 기간에 심층에서의 월동 기간이 절반 정도로 짧고, 비교적 얇은 수심까지만 이동했다가 표층으로 올라갔는데, 저자들은 이러한 차이가 +SAM/라니냐 기간 동안 해빙의 면적이 더 넓고 일차생산성이 감소했기 때문일 것이라고 제안했다(La et al. 2019).

그 외에도 Ko et al. (2016)은 지방산과 안정동위원소 분석을 통해 주요 크릴 종의 먹이원을 밝혔는데, *E. superba*는 주로 식물플랑크톤을 먹는 반면, *E. crystallorophias*는 소형 동물플랑크톤을 섭식하는 것을 발견하였다. 2010년 2-3월, 약 760시간 동안 Joiris (2018)는 *Thalassoica antarctica*와 아델리 펭귄(*Pygoscelis adeliae*) 등 약 11개 종의 해양 포유류와 조류를 아문젠 해 빙하 주변부에서 관찰하였다. 한편, SIZ과 DIS, GIS 앞쪽에 계류한 퇴적물 트랩(sediment trap)에서는 2년에 걸쳐 거대 저서 동물과 가리비, 성게가 발견되었으며, 저서 동물의 길이와 두께를

측정하여 유기탄소량으로 환산한 값은 일차생산으로 해저면에 공급되는 유기탄소량의 5배에 달했다(Kim et al. 2019b). Kim et al. (2019b)은 해빙에 의한 저서 동물 수송 기작을 고찰하고, 이들이 주로 먹이가 없는 겨울철에 발견되었다는 점에서, 남극 주변 대륙붕의 저서 생태계에 미치는 영향에 대하여 시사하였다.

침강입자유기탄소

일차생산으로 만들어져 해양 심층으로 침강하는 입자들의 양과 종류, 나아가 시공간적 다양성을 파악하는 것은 해양 탄소 순환을 이해하는 데 있어 핵심적인 부분이다.

2012년, 아문젠 해역 상층 약 100 m 수심에서 ^{234}Th 의 비평형법을 통해 침강하는 POC 플럭스를 추정하는 연구가 수행되었다(Kim et al. 2014). 저자들은 계류 정점과 수심이 고정된 퇴적물 트랩과 달리, 침강입자의 시계열 변동을 측정할 수 있다는 장점을 활용해 아문젠해 전역에서 침강 POC의 양을 측정하였다. 추정된 침강 POC의 양은 평균 $71 \text{ mgCm}^{-2}\text{d}^{-1}$ 로, 일차생산의 약 28%였다. 나아가 ^{234}Th 의 비평형법으로 유추한 침강입자의 양을 Martin et al. (1987) 식을 통해 추정된 결과, 2011년 비슷한 시기 퇴적물 트랩으로 채취한 값(Kim et al. 2015b)과 유사함을 확인하였다(Kim et al. 2014).

퇴적물 트랩은 해저면으로 이동하는 침강 입자를 시계열(time-series)로 직접 채취할 수 있는 도구로, 특히 아문젠 해역은 남반구의 여름철을 제외하고는 접근이 힘든 지역이기 때문에 퇴적물 트랩은 연간 이 해역의 BCP를 규명할 수 있는 유일한 방법이다(Honjo et al. 2008; Ducklow et al. 2008; Kim et al. 2015b). 국내 연구진은 퇴적물 트랩(McLane, 깔때기 형태, 입구 지름 = 80 cm)을 계류선(mooring line)에 부착하여 SIZ, ASP, DIS 등에서 꾸준히 침강입자 시료를 획득하였다(Figs. 1 and 3). SIZ (K1 정점, 72.40°S , 117.72°W ; 트랩 계류 수심 400 m, 수심 530 m)에서는 2011–2013년(Kim et al. 2015b, 2019a), ASP (K2 정점, 73.28°S , 114.97°W ; 트랩 계류 수심 410 m, 수심 830 m)와 DIS (K3 정점, 74.19°S , 112.54°W ; 트랩 계류 수심 490 m, 수심 1057 m)정점에서는 2012–2013년, 그리고 GIS의 동쪽 앞(K4 정점, 73.89°S , 118.72°W ; 트랩 계류 수심 427 m, 수심 664 m)에서는 2016–2018년에 침강입자 시료를 획득하였다(Kim et al. 2019a, 2019b). 2011–2012년에는 미국 ASPIRE 팀에서도 ASP (73.82°S , 113.07°W ; 트랩 계류 수심 350 m, 수심 785 m)에 퇴적물 트랩(Technicap, 실린더 형태)을 계류하여 시료를 획득하였다(Ducklow et al. 2015).

2012–2013년, SIZ, ASP, DIS에서 침강 POC의 양은 각각 4.0, 3.8, 그리고 $2.1 \text{ mgCm}^{-2}\text{d}^{-1}$ 였다(Kim et al. 2019a). 규조류가 우점하는 SIZ이 ASP와 DIS 앞쪽에 비해 침강

POC의 양이 많았으며, 다년간의 시료 채취를 통해 SIZ에서의 침강 POC의 양은 연간 변동성이 크고, 해빙이 녹는 정도와 시기에 많은 영향을 받는 것을 규명하였다. ASP는 높은 일차생산성에도 불구하고 약 1–2.5% 정도만이 400 m 심층까지 침강하였다(Ducklow et al. 2015; Kim et al. 2019a). 이는 대부분의 POC가 해양 심층을 통해 퇴적물로 가라앉기보다는, 혼합층에서 작은 크기의 부유 입자유기탄소(Suspended POC), DOC나 DIC 형태로 변하여 잔류함을 의미하는데, *P. antarctica*가 우점하는 ASP에서의 침강 효율이 규조류가 우점하는 환경에 비해 좋지 않기 때문이거나(Reigstad and Wassmann 2007), 높은 박테리아 호흡률($180\text{--}1390 \text{ mgCm}^{-2}\text{d}^{-1}$; Ducklow et al. 2015) 때문일 수 있다고 해석하였다(Lee et al. 2017a).

연간 침강입자의 PO^{14}C 는 SIZ에서 -154‰ 에서 -252‰ , ASP에서 -171‰ 에서 -245‰ , 그리고 DIS 앞에서는 -197‰ 에서 -224‰ 사이였다(Fig. 3). 대부분의 경우, 침강입자의 PO^{14}C 값은 표층 해양의 DI^{14}C (Fig. 4: $-155\text{--}135\text{‰}$, $n =$

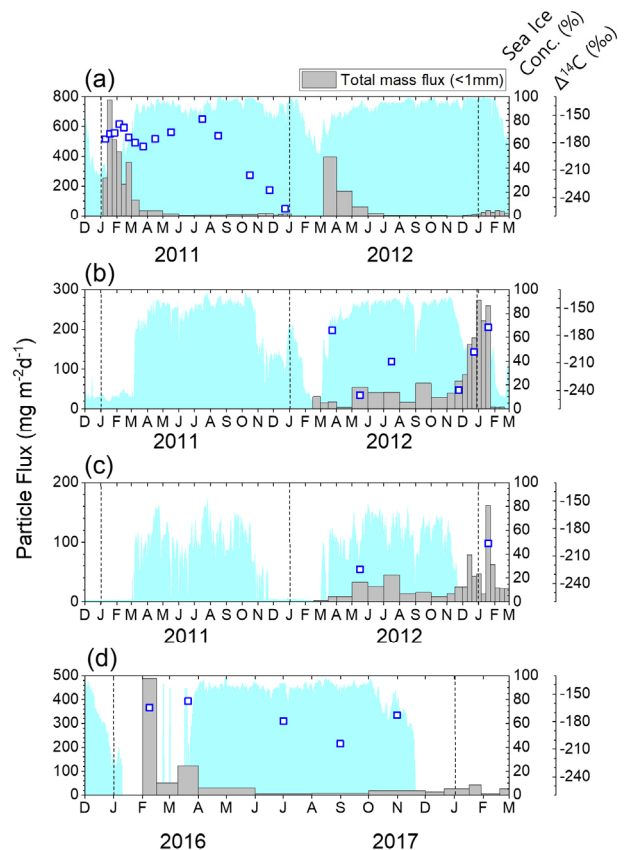


Fig. 3. Vertical change of total mass flux (bar), sea ice concentration (color), and $\Delta^{14}\text{C}$ of POC in the (a) SIZ, (b) ASP, (c) DIS and (d) GIS. Data from Kim et al. (2015b, 2019a, 2019b) and redrawn from Kim et al. 2019a

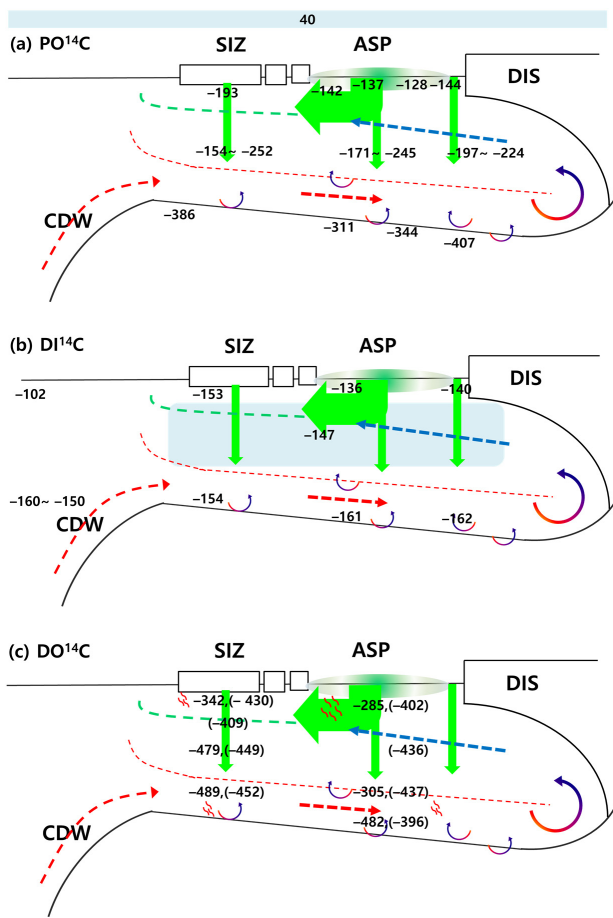


Fig. 4. Scheme of various $\Delta^{14}\text{C}$ values in (a) suspended, sinking POC and sedimentary OC, (b) DIC in 2012, and (c) DOC in the Amundsen Sea in 2014 and 2016 (in parentheses) (redrawn from Lee et al. 2017a). $\Delta^{14}\text{C}$ values of atmospheric CO_2 (+40‰; Hua et al. 2013), CDW (-160~150‰; Bercovici and Hansell 2016; Key and McNichol 2012) and outer Southern Ocean (-102‰; Sabine et al. 2012) are also presented. Arrows indicate the sinking particles (green), sediment resuspension, and flow of watermass (red and blue)

4)보다 낮게 관측되었는데, 두 값 사이의 차이는 다양한 기원(대기나 주변 육상 기원, 해저 퇴적물 기원, 해빙이나 빙붕의 용융 기원, DOC의 흡착 등)을 가진 POC의 유입을 의미한다(Druffel and Williams 1990; Eglinton et al. 2002; Hwang et al. 2010; Kim et al. 2020). 예를 들어 표층 퇴적물(0-1 cm)의 ^{14}C 값은 -407‰에서 -311‰로, 재부유된 오래된 퇴적물의 유입이 대표적이다(Planquette et al. 2013). 특히 ASP와 DIS 앞에서 침강입자 중 비생물학적 입자의 함량은 80%에 달했고, 해빙이 녹는 남극의 여름철에 그 비율이 높아 해빙이나 빙붕 기원 POC 유입 또한 예상된다(Kim et al. 2019a). 표층수의 부유입자 PO^{14}C 는 식물플랑

크톤이 갖 합성한 유기물의 값으로, 표층 퇴적물과 함께 침강 PO^{14}C 의 ^{14}C 단성분(end member) 중 하나이다. 부유입자의 PO^{14}C 값은 -193‰에서 -128‰ 사이로, SIZ에서 가장 값이 낮았고, DIS 주변이 그 다음(-144‰), 그리고 ASP에서 가장 높았다. Kim et al. (2016c)은 ASP에 비해 SIZ과 DIS 주변부에서 부유입자의 PO^{14}C 값이 낮은 것은 해빙과 빙상으로부터의 오래된 유기탄소의 유입 때문인 것으로 해석하였다. 하지만 아직까지 다양한 기원을 가진 탄소의 정확한 기원과 유입 경로는 확립되지 않았기에 극지 탄소 순환 양상을 보다 구체적으로 규명하기 위해서는 각각의 기원을 가진 탄소의 ^{14}C 단성분의 확립이 필요하다.

퇴적유기탄소

대기 중에서 해양으로 유입된 탄소의 일부는 해저면에 유기탄소 형태로 퇴적되고, 이는 지질학적 시간 규모에 걸쳐 전지구적 생지화학 순환을 조절하는 주요 기작 중 하나이다(Berner 1990). 일련의 결과를 바탕으로 Lee et al. (2017a)은 일차생산성이 높은 ASP에서 탄소가 저층으로 전달되는 탄소 격리(carbon sequestration)가 활발하게 나타날 것으로 예상되었으나 생성된 대부분의 POC가 저층으로 침강하는 과정에서 대부분이 작은 입자의 POC 혹은 DOC로 전환되었으며, CDW가 유출되는 과정을 통해 다른 해역으로 빠져나갔을 가능성을 제시하였다. 침강하는 POC의 양이 적기 때문에, 유기탄소의 퇴적 속도 또한 약 $2.7 \pm 0.8 \text{ mgCm}^{-2}\text{d}^{-1}$ ($= 1.0 \pm 0.3 \text{ gCm}^{-2}\text{yr}^{-1}$)로, 일차생산성의 1% 미만으로 추정되었다(Kim et al. 2016c). ASP에서 저서 재광물화 또한 일차생산성의 2% 정도로, 다른 극지방보다 낮았다(Kim et al. 2016d).

Kim et al. (2016c)은 아문젠해의 4개 정점에서 획득한 박스코어 퇴적물의 ^{14}C 값을 이용해 퇴적 속도와 유기탄소의 퇴적률을 규명하였다. ASP의 유기탄소 퇴적률($-1.2 \text{ gCm}^{-2}\text{yr}^{-1}$)은 폴리나 외부($-0.05 \text{ gCm}^{-2}\text{yr}^{-1}$)에 비해 20배 가량 높았으며, 표층 퇴적물(0-1 cm)의 ^{14}C 값은 ASP에서 -311‰, DIS 앞쪽에서 -418‰로, 빙하와 빙붕의 용융으로 공급되는 오래된 유기탄소의 유입이 있는 것으로 해석하였다. 한편 Kim et al. (2016c)은 ASP에서 약 4.7 kyr BP (Before Present)를 경계로 갑작스러운 퇴적률의 변화를 발견하였는데, 이는 아문젠 해역에서 기후 변화에 따른 생지화학적 변동이 퇴적층에 기록된 것으로 추정하였다. Kim et al. (2021b)은 박스코어 퇴적물 시료를 통해 과거 약 350년 동안 아문젠 해역으로의 CDW 유입량이 +SAM 시기에 많았을 것으로 추정했으며, 온실가스의 증가가 남반구의 대기와 해양 순환에 영향을 미치고, 이것이 20세기 중반 CDW의 유입 변동과 관련되어 있을 가능성을 제시하였다.

이후, Kim (2019)은 200 cm 가량의 중력코어 퇴적물

분석을 통해 홀로세(Holocene) 동안 아문젠 해역 내 유기탄소 퇴적 양상을 연구하였는데, 그 동안 진행되어 온 기후 연구(e.g. Hillenbrand et al. 2017)와는 차별적으로 고해상도의 ^{14}C 값을 분석하였다. 빙하의 후퇴 이후 아문젠 해역의 SIZ와 ASP가 서로 다른 표층 환경에 노출되어 있었음이 퇴적 양상에 나타났다(Kim 2019). 나아가 다양한 생지화학적 추적자(지방계 바이오마커와 구조류 개체 수 등)를 바탕으로 ASP의 형성 시기와 과거 환경 변화를 유추하였다(Kim 2019, unpublished data). 최근 Lamping et al. (2020) 등은 아문젠 해의 해빙 상태와 GIS의 후퇴에 대한 장기적 관점을 제공하기 위해 퇴적물 코어에서 해빙에 서식하는 구조류가 만들어 내는 바이오마커인 IPSO_{25} 를 분석하여 과거 해빙의 변화를 파악하였다.

ASP 퇴적물에서 주요 미생물 군집의 조성 및 생지화학적 특성을 파악하기 위해 대사율 측정 및 16S rRNA 유전자 분석을 수행하기도 하였다(Cho et al. 2020). 저서 미생물 군집은 ASP에서는 *Planctomycetes*가, 그 외의 해역에서는 *Thaumarchaeota*가 우세했으며, 저자들은 기후 변화에 따라 향후 *Planctomycetes*가 우점하는 미생물 군집의 탄소 순환 관련 기작에 대한 연구의 필요성을 제안하였다.

용존유기탄소

ASP의 높은 일차생산은 생물이 사용하기 좋은 신선한 DOC를 유광층에 공급한다(Carlson et al. 1998; Yager et al. 2016). Fang et al. (2020)은 SIZ (K1 정점)과 ASP (K2 정점)에서 2014년, 2016년에 두 해에 걸쳐 채취한 해수 시료에서 DOC의 농도와 DO^{14}C 값을 획득하였다(Figs. 1 and 2). 표층 DOC 농도는 45–64 μMC 로, 일차생산성과 WW의 영향을 받는 것으로 보였다(Fang et al. 2020). 심층(100 m 이하)에서는 평균 43 μMC 로, 남극해 CDW의 DOC 농도(39–41 μMC ; Bercovici et al. 2018; Druffel and Bauer 2000)와 유사했으며, 2014년과 2016년 DOC 농도의 차이는 시료 채취 당시 일차생산성의 영향인 것으로 설명하였다(Fang et al. 2020). 최근 Jeon et al. (2021)도 아문젠 해역 상층(100 m 미만)과 심층(100 m 이하) DOC의 농도를 각각 36–49 μMC (평균 42 μMC)과 37–45 μMC (평균 40 μMC)로 밝혔다. 로스해와 비교해 상층 DOC 농도는 로스해(46, 55 μMC)보다 작았으나, 심층의 농도는 유사(42 μMC)했는데(Carlson et al. 2000), 이는 아문젠 해역에 생물학적, 광학적으로 불안정한 새롭게 생성된 DOC가 많아 해수 표층에는 거의 축적되지 않기 때문으로 설명했다(Chen et al. 2019).

DO^{14}C 의 값은 표층보다 심층에서 낮았는데, 표층 DO^{14}C 는 ASP에서 -285%, SIZ에서 -430%로, ASP의 높은 일차생산성을 반영한다(Figs. 2 and 4; Fang et al. 2020). 2년간 심층 DOC의 농도가 유사했던 데 비해 DO^{14}C 값은 차

이를 보였다(각각 -489%과 -452%). 두 정점에서 모두 DOC의 농도와 DO^{14}C 값이 염분도와 음의 상관관계를 나타냈기에, Fang et al. (2020)은 DO^{14}C 값이 주로 수괴의 수직 혼합에 영향을 받는 것으로 설명하였다. 저자들은 CDW의 유입과 상층 수괴와의 혼합으로 표층으로 공급된 DOC는 일차생산으로 만들어진 신선한 DOC와 함께 미생물이나 광화학적 분해로 소모되고(Shen and Benner 2018), 이후 겨울철에 해빙이 형성되는 동안 수직 혼합이 일어나면서 2016년에는 심층으로 새로 생성된 DOC가 유입되었을 것으로 보이며, 이는 수 년 단위의 짧은 DOC의 순환을 의미한다고 제안하였다(Fang et al. 2020).

그 외에도 Lee et al. (2016b)은 ASP에서 높은 유색용존 유기물(Colored DOM) 농도를 관측하였고, 이후 해수 중 형광용존유기물(Fluorescent DOM)을 측정하여 아문젠해에 휴믹계(humic-like), 트립토판계(tryptophan-like), 그리고 단백질계(protein-like) 세 종류의 형광용존유기물(FDOM)이 존재함을 확인하였다. 특히 CDW가 존재하는 외양의 400 m 이상 수심과 mCDW에서 휴믹계 FDOM의 농도가 다른 수괴에 비해 높은 것을 확인하고, FDOM이 수괴를 규명하고 심층수 순환을 추적하기에 적합한 추적자임을 시사했다. Jeon et al. (2021)도 산소동위원소 값과 함께 FDOM을 활용하여 CDW의 비율을 계산하였다. Jeon (2020)은 외양에서 DIS까지 DOC 농도를 측정하여 CDW의 유출입과 DIS에서 DOC의 공급과 빠른 소모에 대해 자세히 고찰하였다(Hood et al. 2015; Smith et al. 2017).

수층 내 박테리아는 POC를 DOC로 변환시키고, 영양염을 해수 중으로 용출시켜 재순환하는 등 생태계 순환에 중요한 역할을 한다. Hyun et al. (2016)은 2011–2012년 ASP 혼합층에서 박테리아 생산성은 약 $130 \pm 53 \text{ mgCm}^{-2}\text{d}^{-1}$ 로, 일차생산성의 17%를 차지하며, 높은 박테리아 활동도가 이 해역의 입자 플럭스가 낮은 이유를 설명할 수 있다고 밝혔다. 번성이 감소하는 시기의 박테리아 호흡률은 PP 값보다 훨씬 높아, 박테리아가 번성 기간 동안 축적된 유기탄소를 이용하는 것으로 해석하였다(Hyun et al. 2016). 나아가 Kim et al. (2019c)은 주요 박테리아 유전자를 재구성하고 유기탄소의 재광물화에 관련된 유전자의 발현을 분석함으로써, ASP의 번성시기에는 *Polaribacter*가 우세하고, 쇠퇴기에는 *Gammaproteobacteria* (Ant4D3, SUP05, SAR92)가 증가하며, SIZ에서는 SAR11 계통군이 우세한 것을 밝혔다. 이 중 Ant4D3 계통군은 ASP 번성시기에 항상 우세하게 존재하여, ASP의 LMW-DOM 재광물화에 중요한 역할을 함을 유추하였다.

4. 극지 연구의 나아갈 방향 고찰

2010년 첫 연구 향해 이후, 국내 연구자들이 다양한 분

야에서 꾸준한 관심을 가지고 활약함으로써 미답지였던 아문젠 해역, 나아가 남극해의 해양 탄소 순환과 탄소 저장고로서의 역할에 대해 보다 깊이 이해할 수 있었다. 끝맺으며, 본 리뷰에서는 향후 극지 연구가 나아갈 방향성들을 제시해 보고자 한다.

퇴적물 트랩 계류로 연간 침강입자를 획득하여 ASP뿐만 아니라 SIZ의 BCP를 규명하고, 그 중요성을 재조명하였으며(Kim et al. 2015b; Ducklow et al. 2015), $PO^{14}C$ 분석을 통해 아문젠 해역의 다양한 유기탄소의 기원에 대해 추정할 수 있었다(Kim et al. 2019a). 물리해양학적 자료와 더불어 DIC와 DOC의 ^{14}C 분석을 통해 전반적인 해수 순환의 양상과 탄소 순환을 이해하는 데 중요한 자료를 제공하기도 하였다(Kim et al. 2018; Fang et al. 2020). 향후 해빙이나 용빙수에서 공급되는 POC, DOC 등 보다 다양한 탄소 저장고의 ^{14}C 값을 파악하고, 이들의 시공간적 변화를 파악함으로써, 저장고 간의 상호 작용 역할, 탄소의 체류 시간 및 수송 경로 뿐만 아니라 인간 활동에 의해 배출되는 탄소의 저장고로서의 역할을 이해할 수 있을 것이다.

또한 미래 전지구적 기후 변화에 따른 극지 해양의 반응을 예측하기 위하여 계류선과 원격 탐사, 현장 관측 등을 통한 장기 모니터링이 필수적이다. 첫 아문젠해 탐사 이후 10여년간 축적된 자료를 바탕으로 하여 최근의 기후변화에 따른 아문젠해의 반응과 역할에 대한 고찰 또한 필요할 것이다. 나아가 지금까지 비교적 연구 결과가 적은 용빙수의 증가에 따른 해양 산성화, 해빙의 감소, 해양 생물체의 영향 등을 고찰하기 위하여 pH, DIC 등 무기 탄소 순환 연구도 지속되어야 하겠다. 접근이 난해한 해역인 만큼, 글라이더를 활용한 빙봉의 하부 관측 연구(Miles et al. 2016)나 물개 등 해양 포유류에 부착한 센서를 활용한 데이터 수집(Zheng et al. 2021; Yoon and Lee 2021), 다양한 AUV (Autonomous Underwater Vehicle)의 활용 또한 필요할 것이다. 규조류 뿐만 아니라, *P. antarctica*를 추적할 수 있는 생지화학적 추적자의 개발 등도 보다 다양한 정보를 제공할 것이다. 나아가 국제적으로 다양한 남극 해양 관측 자료를 집대성, 공유하는 SOOS (Southern Ocean Observing System; Fig. 1) 등에 관측 결과를 제공하고, 남극과학위원회(Scientific Committee on Antarctic Research, SCAR) 활동에 적극적으로 참여하는 등 한국 극지 연구의 위상을 높이는 데 힘써야 하겠다.

미국 컬럼비아대학의 Lamont-Doherty Earth Observatory에서는 1990년부터 약 30여년간 남극반도에서 LTER 프로그램(<https://www.lternet.edu/sites/pal> Long-Term Ecosystem Research)을 수행하며, 다양한 관측 기술을 활용한 장기 모니터링 연구를 수행 중이다. 시계열 계류 자료가 부족한 남극해에서(Fig. 1) 서남극 아문젠해에서의 지난 10여년

에 걸친 탐사는 쇄빙선 아라온호 덕분에 가능했다. LTER 연구 정점과 같이 한국 연구팀을 중심으로 한 남극해의 중장기적 연구가 지속되기를 희망하며, 제2쇄빙선의 건조를 통해 남극 연구에 보다 많은 국내 학생들이 관심을 가지고 활약할 것을 기대한다.

사 사

이 논문은 2021학년도 경북대학교 신임교수정착연구비에 의하여 연구되었습니다.

참고문헌

- Adusumilli S, Fricker HA, Medley B, Padman L, Siegfried MR (2020) Interannual variations in meltwater input to the Southern Ocean from Antarctic ice shelves. *Nat Geosci* **13**(9):616–620. doi:10.1038/ s41561-020-0616-z
- Archibald KM, David AS, Scott CD (2019) Modeling the impact of zooplankton diel vertical migration on the carbon export flux of the biological pump. *Global Biogeochem Cy* **33**(2):181–199. doi:10.1029/ 2018GB005983
- Arrigo KR, Robinson DH, Worthen DL, Dunbar RB, DiTullio GR, Vanwoert M, Lizotte MP (1999) Phytoplankton community structure and the drawdown of nutrients and CO₂ in the Southern Ocean. *Science* **283**:365–367
- Arrigo KR, van Dijken GL (2003) Phytoplankton dynamics within 37 Antarctic coastal polynya systems. *J Geophys Res* **108**(C8):3271. doi:0.1029/2002JC001739
- Arrigo, KR, Lowry KE and van Dijken GL (2012) Annual changes in sea ice and phytoplankton in polynyas of the Amundsen Sea, Antarctica. *Deep Sea Res PT I* **71**:5–15
- Bercovici SK, Hansell DA (2016) Dissolved organic carbon in the deep Southern Ocean: local versus distant controls. *Global Biogeochem Cy* **30**:350–360
- Bercovici SK, McNichol AP, Xu L, Hansell DA (2018) Radiocarbon content of dissolved organic carbon in the South Indian Ocean. *Geophys Res Lett* **45**:872–879
- Berner RA (1990) Atmospheric carbon dioxide levels over phanerozoic time. *Science* **249**:1382–1386
- Bricher P, the SOOS Data Management Sub-Committee (2022) Southern Ocean Mooring Network, <https://www.soosmap.aq> Accessed 12 Jan 2022
- Carlson CA, Ducklow HW, Hansell DA, Smith WO Jr (1998) Organic carbon partitioning during spring phytoplankton blooms in the Ross Sea polynya and the Sargasso Sea. *Limnology Oceanography* **43**(3):375–386
- Carlson CA, Hansell DA, Peltzer ET, Smith WO Jr (2000)

- Stocks and dynamics of dissolved and particulate organic matter in the southern Ross Sea, Antarctica. *Deep-Sea Res Pt II* **47**:3201–3225. doi:10.1016/S0967-0645(00)00065-5
- Caron DA, Dennett MR, Lonsdale DJ, Moran DM, Shalapyonok L (2000) Microzooplankton herbivory in the Ross Sea, Antarctica. *Deep-Sea Res Pt II* **47**:3249–3272
- Chen M, Jung J, Lee YK, Kim TW, Hur J (2019) Production of tyrosine-like fluorescence and labile chromophoric dissolved organic matter (DOM) and low surface accumulation of low molecular weight-dominated DOM in a productive Antarctic sea. *Mar Chem* **213**:40–48
- Cho H, Hwang CY, Kim JG, Kang S, Knittel K, Choi A, Kim SH, Rhee SK, Yang EJ, Lee S, Hyun JH (2020) A unique benthic microbial community underlying the *Phaeocystis antarctica*-dominated Amundsen Sea polynya, Antarctica: a proxy for assessing the impact of global changes. *Front Mar Sci* **6**:797. doi:10.3389/fmars.2019.00797
- Dotto TS, Naveira Garabato AC, Bacon S, Holland PR, Kimura S, Firing YL, Tsamados M, Wahlin, AK, Jenkins A (2019) Wind-driven processes controlling oceanic heat delivery to the Amundsen Sea, Antarctica. *J Phys Oceanogr* **49** (11):2829–2849. doi:10.1175/JPO-D-19-0064.1
- Dotto TS, Naveira Garabato AC, Wahlin AK, Bacon S, Holland PR, Kimura S, Tsamados M, Herraiz-Borreguero L, Kalen O, Jenkins A (2020) Control of the oceanic heat content of the Getz-Dotson Trough, Antarctica, by the Amundsen Sea Low. *J Geophys Res* **125**(8):e2020JC016113
- Druffel ER, Bauer JE (2000) Radiocarbon distributions in Southern Ocean dissolved and particulate organic matter. *Geophys Res Lett* **27**:1495–1498
- Druffel ERM, Williams PM (1990) Identification of a deep marine source of particulate organic carbon using bomb ¹⁴C. *Nature* **347**:172–174
- Ducklow HW, Erickson M, Kelly J, Montes-Hugo M, Ribic CA, Smith RC, Stammerjohn SE, Karl DM (2008) Particle export from the upper ocean over the continental shelf of the west Antarctic Peninsula: a long-term record, 1992–2006. *Deep-Sea Res Pt II* **55**:2118–2131
- Ducklow HW, Erickson M, Lee S, Lowry K, Post A, Sherrell R, Stammerjohn S, Wilson S, Yager P (2015) Particle flux on the continental shelf in the Amundsen Sea Polynya and Western Antarctic Peninsula. *Elementa* **3**:000046. doi:10.12952/journal.elementa.000046
- Eglinton TI, Eglinton G, Dupont L, Sholkovitz ER, Montluçon D, Reddy CM (2002) Composition, age, and provenance of organic matter in NW African dust over the Atlantic Ocean. *Geochem Geophys Geosyst* **3**. doi:10.1029/2001GC000269
- Fang, L. Lee S, Lee SA, Hahm D, Kim G, Druffel ER, Hwang J (2020) Removal of refractory dissolved organic carbon in the Amundsen Sea, Antarctica. *Sci Rep* **10**(1):1–8
- Fragoso GM, Smith WO Jr (2012) Influence of hydrography on phytoplankton distribution in the Amundsen and Ross seas, Antarctica. *J Marine Syst* **89**:19–29
- Gao M, Kim SJ, Yang J, Liu J, Jiang T, Su B, Wang Y, Huang J (2021) Historical fidelity and future change of Amundsen Sea Low under 1.5°C–4°C global warming in CMIP6. *Atmos Res* **255**:105533. doi:10.1016/j.atmosres.2021.105533
- Ha HK, Wahlin A, Kim T, Lee S, Lee J, Lee H, Hong C, Arneborg L, Bjork G, Kalen O (2014) Circulation and modification of warm deep water on the central Amundsen Shelf, *J Phys Oceanogr* **44**(5):1493–1501
- Hahm D, Rhee TS, Kim HC, Park J, Kim YN, Shin HC, Lee S (2014) Spatial and temporal variation of net community production and its regulating factors in the Amundsen Sea, Antarctica. *J Geophys Res* **119**(5):2815–2826
- Hillenbrand CD, Smith JA, Hodell DA, Greaves M, Poole CR, Kender S, Williams M, Andersen TJ, Jernas PE, Elderfield H (2017) West Antarctic Ice Sheet retreat driven by Holocene warm water incursions. *Nature* **547** (7661):43–48
- Holland PR, Bracegirdle TJ, Dutrieux P, Jenkins A, Steig EJ (2019) West Antarctic ice loss influenced by internal climate variability and anthropogenic forcing. *Nat Geosci* **12**(9):718–724. doi:10.1038/s41561-019-0420-9
- Honjo S, Manganini SJ, Krishfield RA, Francois R (2008) Particulate organic carbon fluxes to the ocean interior and factors controlling the biological pump: a synthesis of global sediment trap programs since 1983. *Progr Oceanogr* **76**:217–285
- Hood ET, Battin J, Fellman J, O'neel S, Spencer RG (2015) Storage and release of organic carbon from glaciers and ice sheets, *Nat Geosci* **8**(2):91–96
- Hua Q, Barbetti M, Rakowski AZ (2013) Atmospheric radiocarbon for the period 1950–2010. *Radiocarbon* **55**(04):2059–2072
- Hwang J, Druffel ERM, Eglinton TI (2010) Widespread influence of resuspended sediments on oceanic particulate organic carbon: insights from radiocarbon contents in sinking particles. *Global Biogeochem Cy* **24**:GB4016. doi:10.1029/2010GB003802
- Hyun JH, Kim SH, Yang EJ, Choi A, Lee SH (2016) Biomass, production, and control of heterotrophic bacterioplankton during a late phytoplankton bloom in the Amundsen Sea Polynya, Antarctica. *Deep-Sea Res Pt II*

- 102**:102–112. doi:10.1016/j.dsr2.2015.10.001
- Jang D, Choi M, Park J, Park K, Hong J, Lee S, Jung J (2019) Manganese in Seawaters of the Amundsen Sea, Antarctic. *Ocean Polar Res* **41**(2):63–77
- Jang E, Park KT, Yoon YJ, Kim K, Gim Y, Chung HY, Lee K, Choi J, Park J, Park SJ, Koo JH, Fernandez RP, Saiz-Lopez A (2022) First-year sea ice leads to an increase in dimethyl sulfide-induced particle formation in the Antarctic Peninsula. *Sci Total Environ* **803**:150002
- Jenkins A, Shoosmith D, Dutrieux P, Jacobs S, Kim TW, Lee SH, Ha HK, Stammerjohn S (2018) West Antarctic ice sheet retreat in the Amundsen Sea driven by decadal oceanic variability. *Nat Geosci* **11**(10):733–738. doi:10.1038/s41561-018-0207-4
- Jenkins, A. Dutrieux P, Jacobs SS, McPhail SD, Perrett JR, Webb AT and White D (2010) Observations beneath Pine Island Glacier in West Antarctica and implications for its retreat. *Nat Geosci* **3**(7):468–472
- Jeon MH (2020) Tracing circumpolar deep water and understanding of dissolved organic carbon behavior in the Amundsen Sea using fluorescent properties of dissolved organic matter. Masters Thesis, Pukyung National University, pp 1–97
- Jeon MH, Jung J, Park MO, Aoki S, Kim TW, Kim SK (2021) Tracing circumpolar deep water and glacial meltwater using humic-like fluorescent dissolved organic matter in the Amundsen Sea, Antarctica. *Mar Chem* **235**:104008
- Joiris CR (2018) Seabird hotspots on icebergs in the Amundsen Sea, Antarctica. *Polar Biol* **41**:111–114. doi:10.1007/s00300-017-2174-4
- Jung J, Hong SB, Chen M, Hur J, Jiao L, Lee Y, Park K, Hahm D, Choi J, Yang EJ, Park J, Kim T, Lee S (2020) Characteristics of methanesulfonic acid, non-sea-salt sulfate and organic carbon aerosols over the Amundsen Sea, Antarctica. *Atmos Chem Phys* **20**(9): 5405–5424
- Kim B, Lee S, Kim M, Hahm D, Rhee TS, Hwang J (2018) An investigation of gas exchange and water circulation in the Amundsen Sea based on dissolved inorganic radio-carbon. *Geophys Res Lett* **45**(22):12,368–312,375
- Kim BK, Lee JH, Joo HT, Song HJ, Yang EJ, Lee S, Lee SH (2016a). Macromolecular compositions of phytoplankton in the Amundsen Sea, Antarctica. *Deep-Sea Res Pt II* **123**:42–49
- Kim I, Hahm D, Park K, Lee Y, Choi JO, Zhang M, Chen L, Lee S (2017a) Characteristics of the horizontal and vertical distributions of dimethyl sulfide throughout the Amundsen Sea Polynya. *Sci Total Environ* **584**:154–163
- Kim I, Hahm D, Rhee TS, Kim TW, Kim CS, Lee S (2016b) The distribution of glacial meltwater in the Amundsen Sea, Antarctica, revealed by dissolved helium and neon. *J Geophys Res* **121**(3):1654–1666
- Kim I, Zhang M, Kim K, Park K (2021a) First high-frequency underway observation of DMS distribution in the Southern Ocean during Austral Autumn. *Atmosphere* **12**(1):122. doi:10.3390/atmos12010122
- Kim JW, Kim DJ, Kim SH, Ha HK, Lee SH (2015a) Disintegration and acceleration of Thwaites Ice Shelf on the Amundsen Sea revealed from remote sensing measurements. *Gisci Remote Sens* **52**(4):498–509
- Kim M (2019) Present and past organic carbon cycling on the Amundsen Shelf, Antarctica: implications from radiocarbon and sterols. Ph.D. Thesis, Seoul National University, pp 1–161
- Kim M, Choi MS, Lee SH, Lee SH, Rhee TS, Hahm D (2014) Estimation of POC export fluxes using ²³⁴Th/²³⁸U disequilibria in the Amundsen Sea, Antarctica; preliminary result, the sea. *J Kor Soc Oceanogr* **19**(2):109–124
- Kim M, Hwang J, Eglinton TI, Druffel ER (2020) Lateral particle supply as a key vector in the oceanic carbon cycle, *Global Biogeochem Cy* **34**(9):e2020GB006544
- Kim M, Hwang J, Kim HJ, Kim D, Yang EJ, Ducklow HW, La Hyoung S, Lee SH, Park J, Lee S (2015b) Sinking particle flux in the sea ice zone of the Amundsen shelf, Antarctica. *Deep-Sea Res Pt I* **101**:110–117
- Kim M, Hwang J, Lee SH, Kim HJ, Kim D, Yang EJ, Lee S (2016c) Sedimentation of particulate organic carbon on the Amundsen Shelf, Antarctica. *Deep-Sea Res Pt II* **123**:135–144
- Kim M, Im J, Han H, Kim J, Lee S, Shin M, Kim HC (2015c) Landfast sea ice monitoring using multisensor fusion in the Antarctic. *Gisci Remote Sens* **52**(2):239–256
- Kim M, Yang EJ, Kim D, Jeong JH, Kim HJ, Park J, Jung J, Ducklow HW, Lee S, Hwang J (2019a) Sinking particle flux and composition at three sites of different annual sea ice cover in the Amundsen Sea, Antarctica. *J Marine Syst* **192**:42–50
- Kim M, Yang EJ, Kim HJ, Kim D, Kim TW, La HS, Lee S, Hwang J (2019b) Collection of large benthic invertebrates in sediment traps in the Amundsen Sea, Antarctica *Biogeosciences* **16**(13):2683–2691
- Kim SH, Choi A, Yang EJ, Lee SH, Hyun JH (2016d) Low benthic respiration and nutrient flux at the highly productive Amundsen Sea Polynya, Antarctica. *Deep-Sea Res Pt II* **123**:92–101. doi:10.1016/j.dsr2.2015.10.004
- Kim SJ, Kim JG, Lee SH, Park SJ, Gwak JH, Jung MY, Chung WH, Yang EJ, Park J, Jung J, Hahn Y, Cho JC,

- Madsen EL, Rodriguez-Valera F, Hyun JH, Rhee SK (2019c) Genomic and metatranscriptomic analyses of carbon remineralization in an Antarctic polynya. *Microbiome* **7**:29. doi:10.1186/s40168-019-0643-4
- Kim SY, Lim D, Rebolledo L, Park T, Esper O, Muñoz P, La HS, Kim TW, Lee S (2021b) A 350-year multiproxy record of climate-driven environmental shifts in the Amundsen Sea Polynya, Antarctica. *Global Planet Change* **205**:103589
- Kim TW, Ha HK, Wählin AK, Lee SH, Kim CS, Lee JH, Cho YK (2017b) Is Ekman pumping responsible for the seasonal variation of warm circumpolar deep water in the Amundsen Sea? *Cont Shelf Res* **132**:38–48. doi:10.1016/j.csr.2016.09.005
- Kim TW, Yang HW, Dutrieux P, Wahlin AK, Jenkins A, Kim YG, Ha HK, Kim CS, Cho KH, Park T, Park J, Lee S, Cho YK (2021c) Interannual variation of modified circumpolar deep water in the Dotson-Getz Trough, West Antarctica. *J Geophys Res* **126**:e2021JC017491. doi:10.1029/2021JC017491
- Ko AR, Yang EJ, Kim MS, Ju SJ (2016) Trophodynamics of euphausiids in the Amundsen Sea during the austral summer by fatty acid and stable isotopic signatures. *Deep-Sea Res Pt II* **123**:78–85
- Kwon YS, La HS, Jung J, Lee SH, Kim TW, Kang HW, Lee S (2021) Exploring the roles of iron and irradiance in dynamics of diatoms and Phaeocystis in the Amundsen Sea continental shelf water. *J Geophys Res* **126**:e2020JC016673. doi:10.1029/2020JC016673
- La HS, Ha HK, Kang CY, Wahlin AK, Shin HC (2015) Acoustic backscatter observations with implications for seasonal and vertical migrations of zooplankton and nekton in the Amundsen shelf (Antarctica). *Estuar Coast Shelf Sci* **152**:124–133. doi:10.1016/j.ecss.2014.11.020
- La HS, Park K (2016) The evident role of clouds on phytoplankton abundance in Antarctic Coastal Polynyas. *Terr Atmos Ocean Sci* **27**:293–301
- La HS, Park K, Wahlin A, Arrigo KR, Kim DS, Yang EJ, Atkinson A, Fielding S, Im J, Kim TW, Shin HC, Lee SH, Ha HK (2019) Zooplankton and micronekton respond to climate fluctuations in the Amundsen Sea polynya, Antarctica. *Sci Rep* **9**:10087. doi:10.1038/s41598-019-46423-1
- Lamping N, Müller J, Esper O, Hillenbrand CD, Smith JA, Kuhn G (2020) Highly branched isoprenoids reveal onset of deglaciation followed by dynamic sea-ice conditions in the western Amundsen Sea, Antarctica. *Quat Sci Rev* **228**:106103
- Lee SH, Hwang J, Ducklow HW, Hahm D, Lee SH, Kim D, Hyun JH, Park J, Ha HK, Kim TW (2017a) Evidence of minimal carbon sequestration in the productive Amundsen Sea polynya. *Geophys Res Lett* **44**(15):7892–7899
- Lee SH, Kim BK, Lim YJ, Joo H, Kang JJ, Lee D, Park J, Ha SY, Lee SH (2017b) Small phytoplankton contribution to the standing stocks and the total primary production in the Amundsen Sea. *Biogeosciences* **14**(15):3705–3713
- Lee SH, Kim BK, Yun MS, Joo H, Yang EJ, Kim YN, Shin HC, Lee S (2012) Spatial distribution of phytoplankton productivity in the Amundsen Sea, Antarctica. *Polar Biol* **35**(11):1721–1733
- Lee SH, Yun MS, Kim BK, Joo H, Kang SJ, Kang CK, Whitley TE (2013) Contribution of small phytoplankton to total primary production in the Chukchi Sea. *Cont Shelf Res* **68**:43–50
- Lee Y, Yang EJ, Park J, Jung J, Kim TW, Lee S (2016a) Physical-biological coupling in the Amundsen Sea, Antarctica: influence of physical factors on phytoplankton community structure and biomass. *Deep-Sea Res Pt I* **117**:51–60
- Lee YC, Park MO, Jung J, Yang EJ, Lee SH (2016b) Taxonomic variability of phytoplankton and relationship with production of CDOM in the polynya of the Amundsen Sea, Antarctica. *Deep-Sea Res Pt II* **123**:30–41
- Lilien DA, Joughin I, Smith B, Shean DE (2018) Changes in flow of Crosson and Dotson ice shelves, West Antarctica, in response to elevated melt. *The Cryosphere* **12**(4):1415–1431
- Lim YJ, Kim TW, Lee S, Lee D, Park J, Kim BK, Kim K, Jang HK, Bhavya P, Lee SH (2019) Seasonal variations in the small phytoplankton contribution to the total primary production in the Amundsen Sea, Antarctica. *J Geophys Res* **124**(11):8324–8341
- Liss PS, Malin G, Turner SM, Holligan, PM (1994) Dimethyl sulphide and phaeocystis: a review. *J Marine Syst* **5**:41–53
- Martin JH., Knauer GA., Karl DM, Broenkow WW (1987) VERTEX: carbon cycling in the northeast Pacific. *Deep-Sea Res* **34**:267–285. doi:10.1016/0198-0149(87)90086-0
- Miles T, Lee SH, Wahlin A, Ha HK, Kim TW, Assmann KA, Schofield O (2016) Glider observations of the Dotson ice shelf outflow. *Deep-Sea Res Pt II* **123**:16–29
- Milillo P, Rignot E, Mougnot J, Scheuchl B, Morlighem M, Li X, Salzer JT (2017) On the short-term grounding zone dynamics of Pine Island Glacier, West Antarctica, observed with COSMO-SkyMed interferometric data. *Geophys. Res Lett* **44**:10,436–10,444
- Moran XAG, Lopex-Urrutia A, Calvo-diaz A, Li WKW (2010)

- Increasing importance of small phytoplankton in a warmer ocean. *Global Change Biol* **16**:1137–1144
- Oliver H, St-Laurent P, Sherrell RM, Yager PL (2019) Modeling iron and light controls on the summer *Phaeocystis* antarctica bloom in the Amundsen Sea Polynya. *Global Biogeochem Cy* **33**(5):570–596
- Park J, Kuzminov FI, Bailleul B, Yang EJ, Lee S, Falkowski PG, Gorbunov MY (2017) Light availability rather than Fe controls the magnitude of massive phytoplankton bloom in the Amundsen Sea polynyas, Antarctica. *Limnol Oceanogr* **62**(5):2260–2276
- Park J, Shin EK, Ko E, Park T (2019a) Atmospheric factors influencing biological productivity in the Antarctic polynyas, derived from satellite and reanalysis data. *IEEE Geosci Remote S* **10**(11):1113–1122
- Park K, Hahm D, Choi JO, Xu S, Kim HC, Lee S (2019b) Spatiotemporal variation in summer net community production in the Amundsen Sea Polynya: a self-organizing map analysis approach. *Cont Shelf Res* **184**:21–29
- Planquette H, Sherrell RM, Stammerjohn S, Field MP (2013) Particulate iron delivery to the water column of the Amundsen Sea, Antarctica. *Mar Chem* **153**:15–30. doi:10.1016/j.marchem.2013.04.006
- Pritchard HD, Arthern RJ, Vaughan DG, Edwards LA (2009) Extensive dynamic thinning on the margins of the Greenland and Antarctic ice sheets. *Nature* **461**(7266):971–975
- Pritchard HD, Ligtenberg SR, Fricker HA, Vaughan DG, van den Broeke MR, Padman L (2012) Antarctic ice-sheet loss driven by basal melting of ice shelves. *Nature* **484**(7395):502–505
- Randall-Goodwin E, Meredith MP, Jenkins A, Yager PL, Sherrell RM, Abrahamsen EP, Guerrero R, Yuan X, Mortlock RA, Gavahan K, Alderkamp, A-C, Ducklow H, Robertson R, Stammerjohn SE (2015) Freshwater distributions and water mass structure in the Amundsen Sea polynya region, Antarctica. *Elem Sci Anth* **3**:000065
- Reigstad M, Wassmann P (2007) Does *Phaeocystis* spp. contribute significantly to vertical export of organic carbon? *Biogeosciences* **83**:217–234. doi:10.1007/s10533-007-9093-3
- Rignot E, Jacobs S, Mouginot J, Scheuchl B (2013) Ice shelf melting around Antarctica. *Science* **341**:266–270
- Sabine C, Feely R, Wanninkhof R, Dickson A, Millero F, Hansell D, Swift J, McNichol A, Key R (2012) Carbon dioxide, hydrographic, and chemical data obtained during the R/V Nathaniel B. Palmer cruise in the Southern Ocean on CLIVAR repeat hydrography section S04P (Feb. 19–Apr. 23, 2011). https://doi.org/10.3334/cdiac/otg.clivar_s04p_2011 Accessed 2 Jan 2022
- Shen Y, Benner R (2018) Mixing it up in the ocean carbon cycle and the removal of refractory dissolved organic carbon. *Sci Rep* **8**:2542. doi:10.1038/s41598-018-20857-5
- Sherrell R, Lagerström M, Forsch K, Stammerjohn S, Yager P, Miller LA (2015) Dynamics of dissolved iron and other bioactive trace metals (Mn, Ni, Cu, Zn) in the Amundsen Sea Polynya, Antarctica. *Elementa* **3**:000071. doi:10.12952/journal.elementa.000071
- Sigman DM, Hain MP, Haug GH (2010) The polar ocean and glacial cycles in atmospheric CO₂ concentration. *Nature* **466**(7302):47–55. doi:10.1038/nature_09149
- Smith HJ, Foster RA, McKnight DM, Lisle JT, Littmann S, Kuypers MM, Foreman CM (2017) Microbial formation of labile organic carbon in Antarctic glacial environments. *Nat Geosci* **10**(5):356–359
- Smith WO Jr, Shields AR, Peloquin JA, Catalano G, Tozzi S, Dinniman MS, Asper VA (2006) Interannual variations in nutrients, net community production, and biogeochemical cycles in the Ross Sea. *Deep-Sea Res Pt II* **53**:815–833. doi:10.1016/j.dsr2.2006.02.014
- Song HJ, Kang JJ, Kim BK, Joo H, Yang EJ, Park J, Lee SH, Lee SH (2016) High protein production of phytoplankton in the Amundsen Sea. *Deep-Sea Res Pt II* **123**:50–57
- Stammerjohn S, Massom R, Rind D, Martinson D (2012) Regions of rapid sea ice change: an inter-hemispheric seasonal comparison. *Geophys Res Lett* **39**(6):L06501. doi:10.1029/2012GL050874
- Stefels J, Van Boekel WHM (1993) Production of DMS from dissolved DMSP in axenic cultures of the marine phytoplankton species *Phaeocystis* sp. *Mar Ecol-Prog Ser* **97**:11–18
- St-Laurent P, Yager P, Sherrell R, Oliver H, Dinniman M, Stammerjohn S (2019) Modeling the seasonal cycle of iron and carbon fluxes in the Amundsen Sea Polynya, Antarctica. *J Geophys Res* **124**(3):1544–1565
- St-Laurent P, Yager P, Sherrell R, Stammerjohn S, Dinniman M (2017) Pathways and supply of dissolved iron in the Amundsen Sea (Antarctica). *J Geophys Res* **122**(9):7135–7162
- Takahashi T, Sutherland SC, Wanninkhof R, Sweeney C, Feely RA (2009) Climatological mean and decadal change in surface ocean pCO₂, and net sea-air CO₂ flux over the global oceans. *Deep-Sea Res Pt II* **56**(8):554–577. doi:10.1016/j.dsr2.2008.12.009
- Thoma M, Jenkins A, Holland D, Jacobs S (2008) Modelling circumpolar deep water intrusions on the Amundsen Sea continental shelf, Antarctica. *Geophys Res Lett* **35**(18):L18602. doi:10.1029/2008GL034939

- Turner J, Orr A, Gudmundsson GH, Jenkins A, Bingham RG, Hillenbrand CD, Bracegirdle TJ (2017) Atmosphere-ocean-ice interactions in the Amundsen Sea embayment, West Antarctica. *Rev Geophys* **55**(1):235–276. doi:10.1002/2016RG000532
- Wählin AK, Yuan X, Bjork G, Nohr C (2010) Inflow of warm circumpolar deep water in the central Amundsen shelf. *J Phys Oceanogr* **40**:1427–1434
- Yager PL, Sherrell RM, Stammerjohn SE, Ducklow HW, Schofield OME, Ingall ED, Wilson SE, Lowry KE, Williams CM, Riemann L, Bertilsson S, Alderkamp AC, Dinasquet J, Logares R, Richert I, Spiler RE, Melara AJ, Newstead RG, Post AF, Swalethorp R, van Dijken GL (2016) A carbon budget for the Amundsen Sea Polynya, Antarctica: estimating net community production and export in a highly productive polar ecosystem Amundsen Sea Polynya carbon budget. *Elementa* **4**:000140. doi:10.12952/journal.elementa.000140
- Yang EJ, Lee Y, Lee S (2019) Trophic interactions of micro- and mesozooplankton in the Amundsen Sea polynya and adjacent sea ice zone during austral late summer. *Prog Oceanogr* **174**:117–130
- Yang EJ, Jiang Y, Lee S (2016) Microzooplankton herbivory and community structure in the Amundsen Sea. *Antarctica Deep-Sea Res Pt II* **123**:58–68. doi:10.1016/j.dsr2.2015.06.001
- Yoon ST, Lee WY (2021) Quality control methods for CTD data collected by using instrumented marine mammals: a review and case study. *Ocean Polar Res* **43**(4):321–334
- Zhang M, Park KT, Yan J, Park K, Wu Y, Jang E, Gao W, Tan G, Wang J, Chen L (2020) Atmospheric dimethyl sulfide and its significant influence on the sea-to-air flux calculation over the Southern Ocean. *Progr Oceanogr* **186**:102392
- Zheng Y, Heywood KJ, Webber BGM (2021) Winter seal-based observations reveal glacial meltwater surfacing in the southeastern Amundsen Sea. *Commun Earth Environ* **2**:40. doi:10.1038/s43247-021-00111-z

Author's Information

Minkyong Kim

Assistant Professor, Kyungpook National University

Received Jan. 21, 2022

Revised Mar. 1, 2022

Accepted Mar. 2, 2022