

남
극
해
환
경
에
서
입
자
성
오
염
물
질
의
물
질
순
환
과
의
관
계
성
연
구

↑
7cm
↓

남극해 환경에서 입자성 오염물질의 물질순환과의 관계성 연구

A study on the relationship between
particulate pollutants and material
cycling in the Antarctic Ocean
Environment



(16 포인트 고딕체)
주 ↑ 의
(편집 순서8)
7cm
↓

인
천
대
학
교
산
학
협
력
단
↑
5cm
↓

인천대학교 산학협력단

↓
7cm
↑

남극해 환경에서 입자성 오염물질의
물질순환과의 관계성 연구

A study on the relationship between particulate pollutants
and material cycling in the Antarctic Ocean Environment

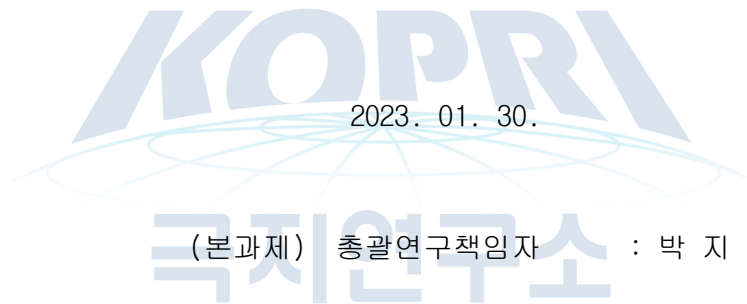


위탁연구기관 : 인천대학교 산학협력단

제 출 문

극지연구소장 귀하

본 보고서를 “서남극해 온난화에 따른 탄소 흡수력 변동 및 생태계 반응 연구” 과제의 위탁연구 “남극해 환경에서 입자성 오염물질의 물질순환과의 관계성 연구” 과제의 최종보고서로 제출합니다.



2023. 01. 30.

(본과제) 총괄연구책임자 : 박 지 수

위탁연구기관명 : 인천대학교 산학협력단

위탁연구책임자 : 김 승 규

위탁참여연구원 : 전 철 석

“ : 김 지 수

“ : 신 준 혁

“ : 제 찬 영

“ : 이 혜 인

“ : 송 난 선

“ : 이 희 지

“ : 백 혜 원

“ : 박 병 용

“ : 유 현 진

“ : 김 수 진

“ : 이 황

“ : 정 하 늘

“ : 문 유 빈

보고서 초록

위탁연구과제명	남극해 환경에서 입자성 오염물질의 물질순환과의 관계성 연구				
위탁연구책임자	김 승 규	해당단계 참여연구원수	15명	해당단계 연구비	140,000,000원
연구기관명 및 소속부서명	인천대학교 산학협력단		참여기업명	없음	
국제공동연구	상대국명 : 없음		상대국연구기관명 : 없음		
요약(연구결과를 중심으로 개조식 500자 이내)				보고서 면수	33
<ul style="list-style-type: none"> • 본 연구의 최종목표는 남극 해양환경 내 입자성 오염물질의 공간분포 및 심해 침강 특성을 조사하여 조사 해역 내 생지화학적 물질순환에 미치는 영향을 파악하는 것임. • 본 과제는 3개년에 걸쳐 대표적인 입자성 오염물질인 미세플라스틱에 대한 연구를 진행하였는데, 연차별로 (1) 남극의 ACC 및 polar front 외해 및 내해에 이르는 지역에서의 조사해역에서 입자성 오염물질(미세플라스틱)의 공간분포 및 오염도를 조사하고, (2) 조사해역(로스해)을 포함한 표층해수의 오염도 조사를 통해 1차년도 조사해역 결과와 비교분석하고 심해침강을 위한 사전연구를 진행하여, (3) 조사해역 내 수위가 다른 지역들에서 표층에서 심층으로의 입자성물질 수직적 분포특성을 파악하여 심해침강 가능성을 파악하였음. • 1차 년도(2020년)에 분석된 표층해수 내 미세플라스틱 평균 농도는 21.70 ± 12.64 particles/m³였으며, 2차 년도(2021년)에 분석된 표층해수 내 미세플라스틱 평균 농도와(26.23 ± 19.38 particles/m³) 유사한 것으로 확인되었음. 2개년에 걸쳐 분석된 표층 해수 내 미세플라스틱의 주요한 재질은 PP였으며, 주요한 형태는 fragment였음. • 2차년도 침강시료 분석을 통하여 도출된 일일 단위 면적 당 침적되는 미세플라스틱의 평균 개수는 15.50 ± 22.96개였음. 주요한 미세플라스틱 재질은 PE였으며, 주요한 형태는 fragment였음. • 3차년도 CTD를 활용하여 로스해 2개의 정점에서 각 5개 층 씩 채수 된 수직 층 해수의 경우, 미세플라스틱의 평균 농도는 $1,360 \pm 568$ particles/m³였음. 주요한 미세플라스틱 재질은 PP였으며, 주요한 형태는 fragment였음. 남극 대륙과 가까운 ST9($1,762 \pm 1,264$ particles/m³)에서 ST1(958 ± 293 particles/m³)보다 높은 미세플라스틱 오염도가 확인되어 인위적 오염원에 대한 영향으로 추정할 수 있음. 또한, 다양한 수층 내 미세플라스틱 분포는 미세플라스틱의 침강을 의미함. • 본 연구 결과를 통하여 미세플라스틱 오염도는 남극 대륙 주변에서 높은 것으로 확인 되어 인위적 오염원의 영향을 받는 것으로 추정 할 수 있음. • 침강 시료 및 수직 층 시료 내 미세플라스틱 검출은 미세플라스틱이 해양환경 내 여러 요인과 상호 작용하여 수평·수직 이동할 수 있음을 암시함. 					
색 인 어 (각 5개 이상)	한 글	남극해, 입자성 오염물질, 수평분포, 수직분포, 침강			
	영 어	Antarctic ocean, particulate pollutant, horizontal distribution, vertical distribution, sinking			

요 약 문

I. 제 목

남극해 환경에서 입자성 오염물질의 물질순환과의 관계성 연구

II. 연구개발의 목적 및 필요성

극지방 내 입자성 오염 물질(미세플라스틱)의 발견이 보고되고 있지만 연구의 제한성으로 인하여 남극 해 내 미세플라스틱의 수평·수직 이동에 대한 연구는 상대적으로 부족한 실정임. 따라서 본 연구를 통하여 남극 해양환경 내 미세플라스틱의 공간 분포 및 심해 침강 특성을 조사하여 조사해역 내 생지화학적 물질 순환에 미치는 영향을 파악하고자 함.

III. 연구개발의 내용 및 범위

남극의 ACC 및 polar front 외해 및 내해에 이르는 지역에서의 조사해역에서 입자성 오염물질(미세플라스틱)의 공간분포 및 오염도를 조사하여 중위도에서 발원한 입자성 오염물질의 남극으로의 유입가능성을 밝히고(1차 년도), 조사해역(로스해)을 포함한 표층해수의 오염도를 조사하여 1차 년도에서 조사한 해역과의 비교분석을 진행함으로써 조사해역의 오염특성을 파악하고 심해침강을 위한 사전연구를 진행하며(2차 년도), 로스해 내 수위가 다른 지역들에서 표층에서 심층으로의 입자성물질 수직적 분포특성을 파악하여 심해침강 가능성을 파악함(3차년도).

IV. 연구개발결과에 따른 기대 성과

본 연구에서 획득된 입자성물질(미세플라스틱)의 해수 내 수평 및 수직적 분포자료를 통해 향후 조사해역 및 남극해에서의 관련 물질(탄소, 영양염, 오염물질 등)의 생지화학적 물질순환과의 관련성을 이해하는데 기여할 것으로 판단됨.

V. 연구개발결과의 활용계획

향후 조사해역 및 남극해에서 해저로의 퇴적, 퇴적물로의 매몰, 해양생물로의 전이, marine snow와의 응집, 대기를 통한 유입, 생물응집 등의 연구를 진행하여 입자성 오염물질의 전체 순환체계를 이해하고, 관련 물질의 생지화학적 순환과의 관련성 및 기여도를 규명하는데 활용하고자 함.

S U M M A R Y

I. Title

A study on the relationship between particulate pollutants and material cycling in the Antarctic Ocean Environment

II. Purpose and Necessity of R&D

Although the discovery of particulate pollutants (microplastics) has been reported in the polar regions, studies on the horizontal and vertical distribution of microplastics in the Antarctic Ocean are relatively lacking due to limitations in research. Therefore, in this study, the spatial distribution and sinking characteristics of microplastics in the Antarctic Ocean Environment were investigated to understand their effects on the biogeochemical cycle in the study area.

III. Contents and Scope of R&D

- (1) Investigating the spatial distribution and pollution level of microplastics in the surface water of the ACC and polar front of Antarctica.
- (2) Determining the distribution characteristics of microplastics in the surface water of the study area including the Ross Sea and conducting a preliminary research for microplastic sinking.
- (3) Identifying the vertical distribution characteristics of microplastics from the surface layer to the bottom layer in two regions of the Ross Sea.

IV. Expected Results

It is expected to contribute to understanding the relevance of particulate pollutants (microplastics) and the biogeochemical cycling of related materials (carbon, nutrient, and other pollutants) in the Antarctic Ocean.

V. Application Plans of R&D Results

These field-measured horizontal and vertical distribution data of microplastics can be used in future studies (1) to draw total flow of MP and carbon including settling to seafloor, burial in sediment, intake to marine organisms, the aggregation with marine snow, and atmospheric input, and (2) to assess their relevance and contribution.

목 차

제 1 장 서론	6
제 2 장 국내외 기술개발 현황	11
제 3 장 연구개발수행 내용 및 결과	13
제 4 장 연구개발목표 달성도 및 대외기여도	28
제 5 장 연구개발결과의 활용계획	30
제 6 장 연구개발과정에서 수집한 해외과학기술정보	31
제 7 장 참고문헌	32



제 1 장. 서론

제 1 절. 연구개발 배경

남극의 로스해(Ross Sea) 해역은 높은 생물다양성을 갖는 지역으로 2016년 남극해양생물 자원보존위원회(CCAMR)에 의해 세계에서 가장 넓은 면적이 해양보호구역으로 지정된 곳이기도 하다. 따라서, 이 해역에서의 물질순환(특히 탄소순환)을 이해하는 것은 남극해 환경 및 생태계 보전을 위해 필수적이다. 생물학적 펌프(biological pump)를 통해 대기로부터 해수로 흡수된 탄소는 광합성을 통해 생물먹이망으로 유입되며 그 대부분은 해수표층에서 분해되고 극히 일부가 분해되지 않은 입자성 유기물질(POM)로써 심해로 침강되는 순환체계를 갖는다. 입자성 오염물질(particulate pollutant)은 표면에 박테리아등이 서식하여 생물막(biofilm)을 형성하고, 용존성 유기물질(DOM)이나 타 입자물질(미세조류 등)과 응집(bioaggregation)하며, 생물에 섭취된 후 배설물과 응집하여 배설되는데 이 과정을 통해 기존 생물펌프에 의한 탄소순환에 영향을 끼칠 것으로 추정된다(Michels et al., 2018). 입자성 오염물질들 중에서 현재 지구환경 시스템에 유입되는 양과 속도에서 크게 우려할만한 것은 인위적으로 생산된 미세플라스틱이다. 풍화를 통해 2차적으로 생성되는 작은 크기의 미세플라스틱은 그 자체로써 탄소 덩어리이기도 하지만 전술한 메커니즘을 통해 기존 탄소순환에서 중요하게 영향을 미칠 것이라고 추정되고 있다(Zhu, 2021).

2020년 기준으로 플라스틱의 생산량은 3억 6,800톤으로 꾸준히 증가했으며(Plastics Europe, 2021), 플라스틱 생산과정 중에서 미세하게 제조되거나, 환경 중에서 풍화, 마모과정을 거쳐 작아진 5mm 이하 크기로 존재하는 플라스틱을 ‘미세플라스틱(microplastics)’이라고 한다. 미세플라스틱을 구성하는 재질은 생산량이 많은 재질과 유사하게 폴리에틸렌, 폴리프로필렌, 폴리비닐클로라이드, 폴리에틸렌 테레프탈레이트 등 다양하며, 구성 재질에 따라 미세플라스틱의 밀도가 결정되는데 대략 0.91-1.41 g/cm³ 범위이다. 다양한 형태의 폴리프로필렌, 폴리에틸렌을 포함하여 생산된 플라스틱의 65% 이상이 해수보다 낮은 밀도를 갖는 것으로 확인되며(Geyer et al 2017), 폴리스티렌과 같은 음부력 플라스틱을 제외한 대부분의 플라스틱의 해수면에 떠 있을 것으로 예상 된다. 그러나 해양으로 배출되는 플라스틱 폐기물의 양과 다르게 실제 해양에 표류하는 플라스틱의 양은 약 25만 톤으로 추정됨에 따라 플라스틱의 배출량과 관측값의 불일치에 대한 문제는 꾸준히 제기되어 왔다. 이러한 원인으로는 해양 생물에 의한 섭취, 바람의 물리적 혼합으로 인한 수직이동, 미세플라스틱 표면에 생물의 축적 후 침적, 미세(나노) 입자로의 빠른 분해와 같은 현상으로 미세플라스틱이 수중에 분포하거나 퇴적되어 저서퇴적물에 축적 등이 제기되고 있지만 명확한 거동 메커니즘 자료는 부족한 실정이다.

남극 해양생물자원보존을 위한 협약(CAMLR: The Convention for the Conservation of Antarctic Marine Living Resources)의 생태계 모니터링 및 관리 작업 그룹 회의는 2016년 남극해 내 미세플라스틱의 오염 문제를 처음으로 발표하고 잠재적인 우려 사항을 나타냈다

(Munari et al., 2017). 남극과 같은 극지방은 광범위한 오염 출처가 없는 상대적으로 깨끗한 유역으로 여겨진다. 그러나, 일부 연구자의 남극해 연구항해에서 macroplastic의 발견이 보고되면서 청정지역이라고 여겨지던 남극해에서의 미세플라스틱 오염문제가 인식되기 시작되었다(Barnes et al., 2010). 이후, 인위적인 입자성 오염물질인 미세플라스틱들이 남극과 같이 오염원으로부터 멀리 떨어진 지역에서까지도 발견되어 왔으며, 남극 환류등을 고려할 때 이 지역들은 잠재적인 미세플라스틱 축적지역으로 의심되고 있다.

남극해 내 미세플라스틱 오염에 대한 관심은 증가하고 있지만 연구의 제한성으로 단일 매체에 대한 조사, 비교적 큰 입자에 대한 조사 및 연구 진행으로 모니터링 조사 수준에 머물러 있으며, 남극 환경 내 미세플라스틱의 전반적 분포와 뚜렷한 오염원 파악이 부족한 실정이다. 특히, 전술한 것처럼 미세플라스틱의 침강은 탄소순환과 밀접하게 관련되어 있음에도 불구하고 해당 해역에서의 미세플라스틱의 침강 가능성을 파악한 연구도 전무한 상황이다. 남극환경(특히 조사해역)에서의 탄소순환을 정확하게 파악하기 위해서는 해당 해역에서의 미세플라스틱의 침강 가능성을 고려한 미세플라스틱의 수평·수직적 거동 평가연구가 필요하다.

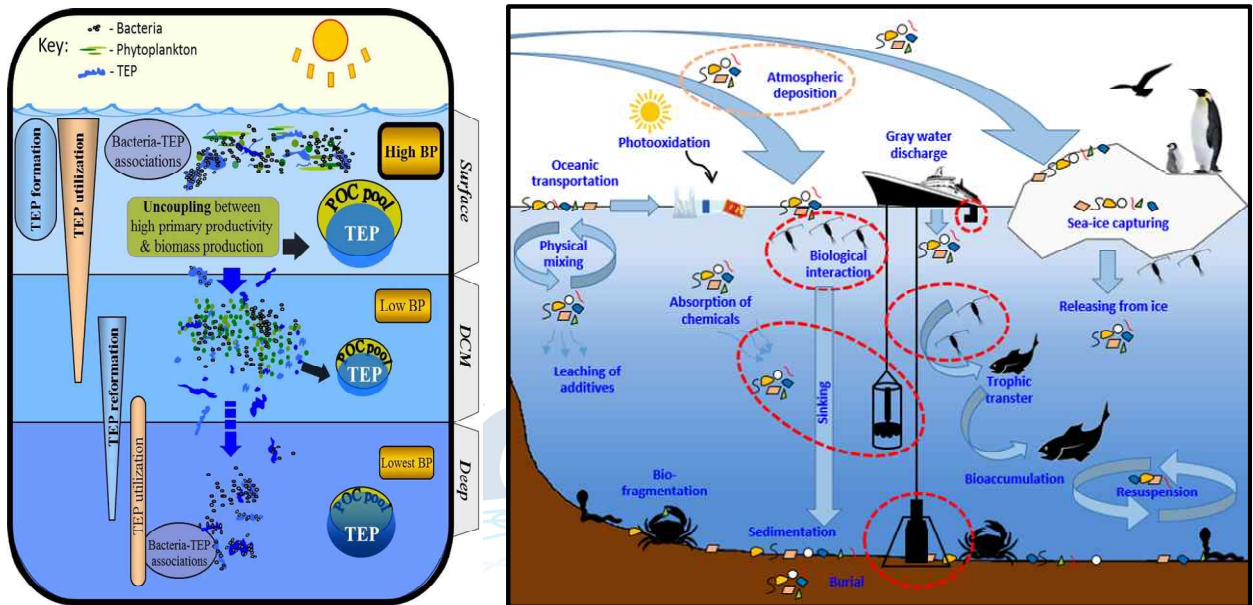
제 2 절. 연구개발의 필요성

전술한 바처럼, 다양한 오염원으로부터 발생한 입자성 오염물질(특히, 미세플라스틱(MPs))은 전 지구적으로 발생량이 지속적으로 증가하고 있고 그것에 비례하여 해양으로의 유입량 또한 증가할 것으로 예측된다(Isobe et al., 2019). 입자성 물질인 미세플라스틱은 궁극적으로 해양으로 유입된 후 해류를 통해 전 지구적으로 확산·이동하여 극지방 환경으로 도달할 뿐만 아니라 극지방 환경에 축적 되는 것으로 알려져 극지 생태계에 대한 우려가 증가하고 있다.

해양환경으로 유입된 이들 입자성 오염물질(미세플라스틱)의 해양 유입량과 전 대양 표층해수에 잔류할 것으로 추정되는 양 사이에 현격한 차이가 발생하여 해양에 유입된 미세플라스틱의 상당량은 심해로 침강되어 주로 해저에 잔류할 것으로 추정되고 있다(EUNOMIA, 2016). 미세플라스틱의 심해침강은 물리적 혼합 외에도 biofouling 혹은 bio-aggregate 등 생물학적 기작에 의한 침강이 주요 원인으로 의심되고 있는데, 이들 생물학적 기작에 의한 심해침강은 해양에서의 생지화학적 물질순환과 밀접하게 관련되어 있다(<그림 1>). 예컨대, 미세플라스틱 기인성 오염물질은 1차생산자의 광합성/생장을 억제하여 군집크기를 변화시키고, 미세플라스틱이 1차 생산자에서 유래한 생물기인성 유기물질인 TEP등과의 응집을 형성하여 DOM-POM관계를 변화시킴으로써 잠재적으로 해양탄소순환에 예기치 않은 장애를 일으키거나, biofilm이 형성되거나 bio-aggregation 된 미세플라스틱은 더 빠르게 침강할 뿐만 아니라 저서생물의 이용도에도 영향을 주는 것으로 알려져 있다.(Kaiser et al., 2017; Yokota et al., 2017; Chen et al., 2018; Porter et al., 2018; Michels et al., 2018).

생물학적 기작과 연계된 응집(biofouling, bio-aggregate, bio-fellet)에 의해 형성된 마린

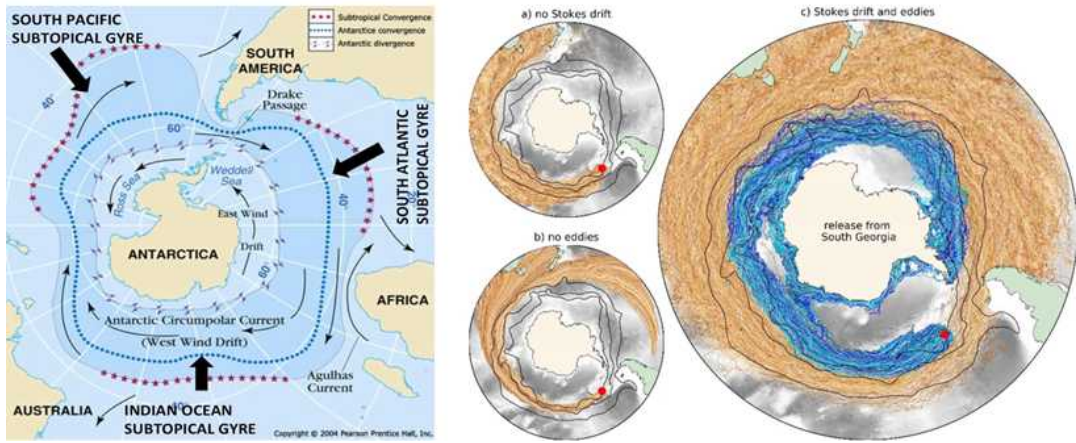
스노우(marine snow)는 궁극적으로 해양환경에서의 탄소 및 기타 물질순환과 밀접하게 관련되어 있는 것으로 추정되지만 대부분의 연구는 실험실에서 확인된 것으로서 실제 해양환경에서 미세플라스틱이 이러한 기작에 어떻게 영향을 주는지는 명확히 알려져 있지 않은 상황이다. 특히, 극지환경에서의 입자성 오염물질(미세플라스틱)에 대한 연구는 대부분 각 환경매체 내 오염도 현황 파악, 공간분포 특성 등에 국한되어 있으며, 남극해 내 미세플라스틱의 수직 분포 및 침강과 연계된 전무한 상황이다.



<그림 1> 입자성 오염물질(MPs)의 해양환경 내 생지화학적 물질순환과의 관련성 모식도

남극은 남극순환류(Antarctic Circumpolar Current; ACC)에 의해 둘러싸여 있어 중위도 지역에서 발생한 입자성 오염물질들이 ACC를 뚫고 남극해역으로 유입되는지가 중요한 연구주제가 되고 있다. 특히, 최근의 해양순환모델 결과는 중위도 지역에서 발원한 입자성 물질이 ACC 및 polar front를 뚫고 빈번하게 남극대륙에 도달되는 것을 보여주었다(<그림 2>). 또, 최근에는 입자성 오염물질의 대기를 통한 극지방으로의 이동 가능성과 극지방 눈과 빙하에 침강된 대기기인성 입자성 오염물질에 의한 sea ice-melting의 가속화 가능성이 제기되어 기후변화와도 밀접하게 관련될 수 있음이 제시되었다(Evangelidou et al., 2020).

그러나 남극 해양환경에서의 미세플라스틱 연구는 남극 환경으로 유입되는 미세플라스틱의 양과 기원, 남극해의 오염도 및 분포 특성과 거동기작 등을 포함한 중장기적이고 복잡한 내용들까지의 연구는 미미한 상태이다. 따라서 본 연구를 통하여 남극 환경 내 미세플라스틱에 대한 매체 별 관측 자료를 획득하고, 남극해 내 미세플라스틱의 거동 특성을 파악하기 위해 기초 자료를 도출하는 것은 필수적으로 여겨진다.



<그림 2> 입자성 물질의 남극으로의 유입(Fraser et al., 2018)

제 3 절. 연구개발의 범위

본 연구는 3개년에 걸쳐(2020 - 2022년) 주요 인위적 입자성 오염물질인 미세플라스틱을 대상으로 연구를 수행하였다. 각 연차별 주요 연구내용, 연구범위 및 연구체계를 <그림 3>에 제시하였다.

첫째, 1차년도에는 남극의 ACC 및 polar front 외해 및 내해에 이르는 지역에서의 조사해역에서 입자성 오염물질(미세플라스틱)의 공간분포 및 오염도를 조사하여 중위도에서 발원한 입자성 오염물질의 남극으로의 유입가능성을 밝히고,

둘째, 2차년도에는 1차년도와 다르게 로스해를 포함한 조사해역의 표층해수에서의 미세플라스틱 오염도를 조사하여 1차년도의 조사결과와 비교분석하여 조사해역을 포함한 주변해역의 미세플라스틱 잔류특성과 오염현황을 파악하고, 심해침강을 위한 사전연구로써 인근 해역에서의 퇴적물 트랩시료를 획득하여 분석을 진행하였으며,

셋째, 3차년도에는 로스해 내 수괴가 다른 두 지역들의 해수 표층에서 심층까지 입자성물질의 수직적 분포특성을 파악하여 심해침강 가능성을 파악하였다.

이 연구결과들은 향후 조사해역 및 남극해에서 해저로의 퇴적 및 퇴적물내 매립(퇴적물 트랩, 퇴적물 코어), 해양생물로의 전이 및 marine snow와의 응집, 생물응집, 대기를 통한 유입 등의 연구를 진행하여 입자성 오염물질의 전체 순환 모식도를 작성함으로써 남극해 탄소순환과의 연계성을 파악하는데 기여할 것으로 판단된다.

	1차년(2020)	2차년(2021)	3차년(2022)
연구 목표	남극 외/내 해역 표층 해수 내 입자성 오염물질 공간 분포 사전 연구	입자성 오염 물질의 조사 해역 내 공간 분포 조사 및 침강 특성 사전 조사	입자성 오염 물질의 조사 해역 내 수직적 분포 특성 조사
연구 내용	<ul style="list-style-type: none"> ▶ 타 해역 표층 해수 시료 확보 <ul style="list-style-type: none"> • ACC를 관통하는 비교 대상 해역의 기 채취 표층 해수 ▶ 확보된 타 해역 표층 해수 내 입자성 오염 물질 (미세플라스틱(MPs)) 공간분포 파악 <ul style="list-style-type: none"> • 오염도 및 공간분포 특성 (10 정점) ▶ 차년도 침강 관력 기작 조사 방법론 확립 <ul style="list-style-type: none"> • 퇴적물 트랩 및 저층(심층) 해수 내 잔류 MPs 조사 및 정성 정량 법 확립 	<ul style="list-style-type: none"> ▶ 조사 해역 표층 해수 내 공간 분포 파악 <ul style="list-style-type: none"> • ACC를 포함하여 조사 해역을 포함한 표층 해수(Underway water) 시료 채취 (10정점) • 전 년도 타 해역 조사 자료와의 비교 • 시료 미확보시, 타 매체(예, 대기 유입) 측정 혹은 연계된 타 해역 채취 시료 분석 하여 비교 ▶ 타 해역 퇴적물 트랩 시료 사전 연구 <ul style="list-style-type: none"> • 남극 내 타 해역(예, 아문젠해)에서 채취한 퇴적물 트랩 시료 확보 • 입자성 오염 물질(MPs)의 침강시료에서의 분포 특성 파악 • 표층 해수와 시료와 침강시료에서의 분포 특성 비교 	<ul style="list-style-type: none"> ▶ 조사해역에서 채취한 표층-저층-심층 해수에 잔류하는 MPs 특성 파악 <ul style="list-style-type: none"> • 조사 해역 내 수직적 분포 특성 파악을 위한 시료 확보(수괴가 다른 최소 2개 정점에서 각각 층 별로 최소 3개 층 이상) • 정점 별 층 별 입자성 물질의 잔류 특성 파악 • 기타 물리/이화학적 인자들과의 관련성 파악 • 시료 미확보시, 타 매체(예, 대기 유입) 측정 혹은 연계된 해역 채취 시료 분석하여 비교

<그림 3> 연차별 주요 연구목표 및 내용의 연계 및 체계도



제 2 장 국내외 기술 개발 현황

제 1 절. 국내 기술 동향

최근에는 미세플라스틱 자체의 환경위해성에 대한 우려로 인해, 미세플라스틱의 각 연안 해역 별 오염도, 분포특성, 거동 및 동태, 오염물질 전이에 따른 생물영향, 배출량 등 환경위해성에 대한 연구가 해양환경 개발사업의 일환(2015-2020)으로 진행되었으며, 이와 별도로 일부 연구진에 의해 육상 환경에서의 해양으로까지 미세플라스틱의 거동특성 및 동태에 대한 연구가 진행 중에 있다. 그러나 이들 연구의 모두가 육상 및 육상과 연계된 연안 해양환경을 대상으로 진행되고 있고, 대양 및 극지방으로 연결되는 지구환경이라는 큰 틀에서의 거동 및 동태에 대한 국내 연구는 미미하다. 극지방 내 미세플라스틱 오염도에 대한 연구는 국내에서 유일하게 본 연구진이 2016년부터 진행해왔다.

비교적 최근에 미세플라스틱 이슈가 국가적 및 국제적 관심사가 됨에 따라 각 정부부처에서 미세플라스틱에 대한 연구로드맵을 만들고 극지방에 대한 관심이 높아짐에 따라 관련 연구과제 및 사업을 진행할 것으로 예상된다.

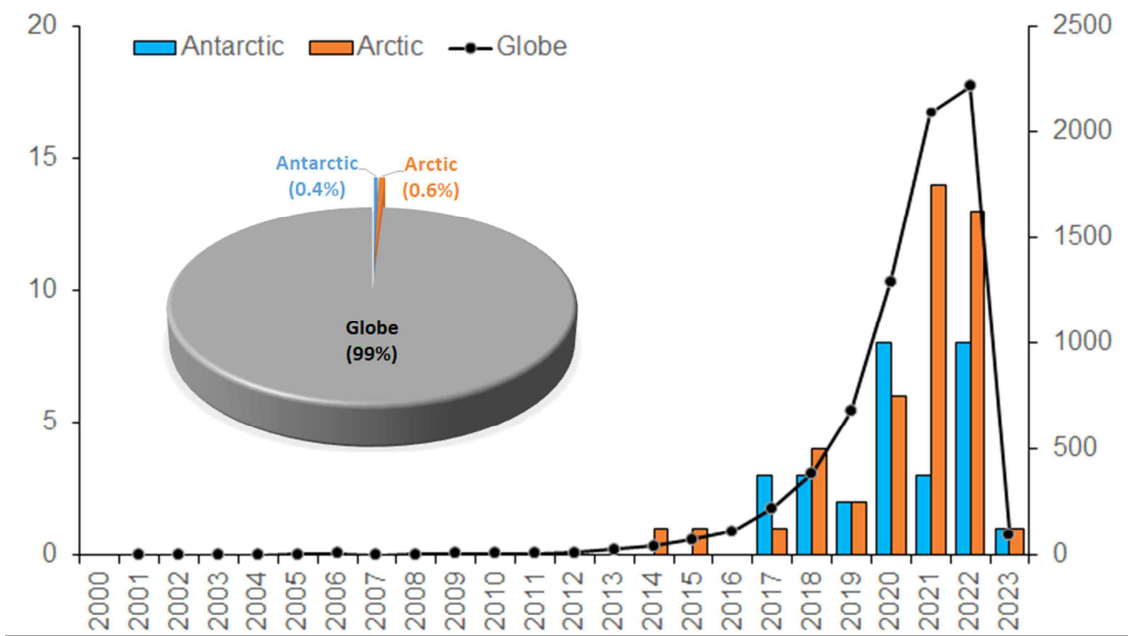
제 2 절. 국외 기술 동향

최근의 연구들은 비교적 청적지역으로 알려진 남극과 북극의 다양한 환경매체에서 미세플라스틱이 검출되고 있음을 보고하고 있다. 남극해의 경우, 영국의 헐대학교(University of Hull), 영국남극연구소(British Antarctic Survey, BAS), 페루의 Cientifica del Sur University에서 남극해의 미세플라스틱 영향을 조사하여 연구결과를 발표하였다(Waller et al., 2017). 또한, 2016년에는 일본 규슈대학과 도쿄해양대학 연구팀이 공동으로 남극해의 미세플라스틱 오염 정도를 조사하여 연구결과를 발표하였다(Isobe, et al., 2016). 이외에도, 관련 연구들이 일부 수행된 바 있으나 대부분 남극해의 미세플라스틱의 분포(Cincinelli et al., 2017; Munari et al., 2017) 및 생·화학적 위험성(Dawson et al., 2018)을 제기하거나 모니터링 수준에 그치고 있다.

남극환경에서의 미세플라스틱은 남극에서 배출되거나 남극으로 유입된 후 ACC에 갇혀 전 세계 대양으로 확산되지 않고 남극 주변환경에 축적될 가능성이 커서 이에 대한 우려가 증가되고 있다. 이에 따라, 남극 및 남극해 연합(ASOC)이 해양쓰레기를 ‘남극생태계의 지속적인 새로운 위협’으로 적시한 보고서(SC-CAMLR-XXXVI/BG/29)를 남극해양생물자원보존위원회에 제시한 바 있는데 전 세계 다른 지역과 달리 남극환경에서의 미세플라스틱에 대한 연구는 상대적으로 빈약하여 이에 대한 연구의 필요성을 강조하고 있다.

북극과 다르게 남극에서는 주로 대형해양쓰레기(marine debris)에 대한 연구가 핵심적으로 진행되어 왔으나 최근에는 미세플라스틱에 대한 관심과 연구들이 크게 증가하여 2023년 1월 Web of Science 기준으로 28편의 연구논문이 보고되었고 그 숫자가 점차 증가하고 있다 (<그림 4>). 그러나, 동일 기간 동안 전 세계에서 출판된 연구 논문 수에 비해 극지방에 대한 연구 논문 수는 전체의 1% 정도로 현저하게 적으며 특히 남극에 대한 연구결과는 더 적어서 남극환경에서의 미세플라스틱 오염원, 오염현황 등에 대한 체계적이고 지속적인 연구가 필요함을 암시하고 있다.

청정해역으로 알려졌던 남극해에 미세플라스틱 오염 및 축적 가능성이 최근 국제적인 이슈로 부상하고 있음에 따라 국제동향에 발맞추어 관련연구가 수행될 필요가 있다. 특히, 인위적 입자성 오염물질인 미세플라스틱이 기존 탄소순환에 중요한 영향을 미칠 것으로 추정됨에도 불구하고 탄소 및 영양염 등 물질순환(화학) 관점에서의 남극해 내 미세플라스틱의 수평·수직이동과 관련한 연구는 국내외적으로 전무한 상태이다.



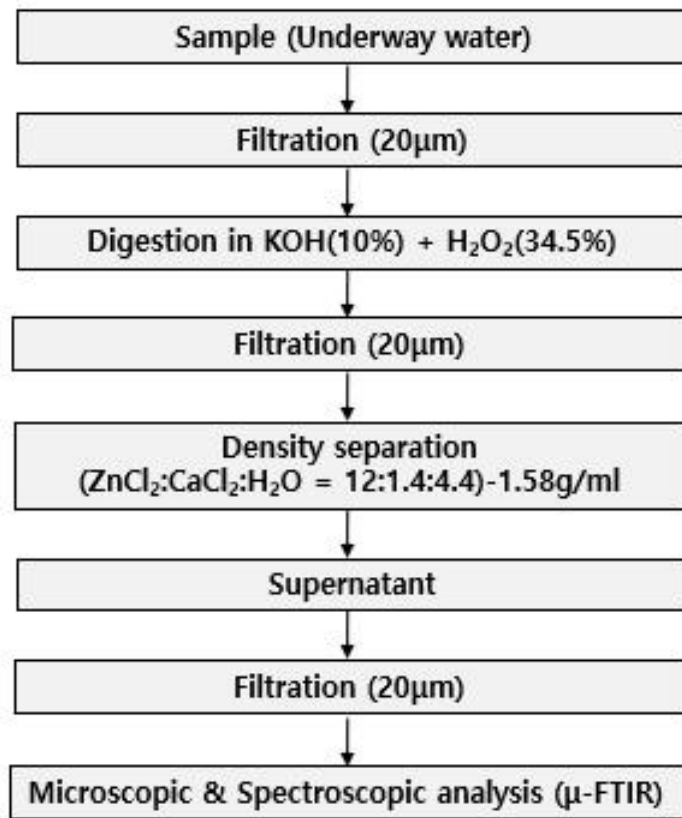
<그림 4> 전 세계, 북극, 남극에 대한 미세플라스틱 관련 출판 연구논문 수의 시계열적 경향(출처: Web of Science 2023. 01.10 기준)

제 3 장 연구개발 내용 및 결과

제 1 절. 입자성 오염물질 분석법 확립

1. 해수 및 침강 시료 분석법 확립

본 연구에서 해수(표층 및 저층) 및 퇴적물 트랩 시료 내 입자성 오염 물질(미세플라스틱)을 정성·정량적으로 분석하기 위한 분석법을 확립하였다(<그림 5>).



<그림 5> 해수 및 퇴적물 트랩 시료 내 MPs 분석법

채취된 시료를 20 µm 스테인레스 재질의 mesh screen을 이용하여 선 여과 진행 후 수산화칼륨(10% KOH)를 이용하여 유기물 분해 시간을 단축시켰다. 1차 유기물 분해 후 고농도의 과산화수소(34.5% H₂O₂)를 추가하여 분석 시 방해 될 수 있는 요인(플랑크톤, 유기물)을 효과적으로 제거하고, 유기물 분해를 마친 시료는 2차 여과 후 밀도분리를 진행하여 유기물 분해로 제거 되지 않는 광물 입자를 제거하였다. 유기물분해 및 밀도분리를 마친 시료는 20 µm mesh screen에 최종 여과 하여 건조 후 분석을 진행하였다. 전처리가 완료된 시료는 MCT 검출기가

장착된 μ -FTIR microscope를 이용하여 여과지에 있는 입자들의 크기, 형태, 폴리머에 대한 정성정량 분석을 진행하였다.

입자의 화학적 특성(폴리머의 재질)의 정성적 확인은 분광분석기의 투과모드 (transmission mode)를 이용했으며 측정된 스펙트럼 범위는 $650\text{-}4000\text{ cm}^{-1}$, 스펙트럼 해상도 (resolution)는 4 cm^{-1} 였고, 스캔 수는 32회였다. 모든 시료분석은 Bruker사의 OPUS 8.2.2 프로그램에서 제공하는 기능을 이용하여 배경스펙트럼을 보정하였으며, 최종적으로 Bruker사에서 제공하는 스펙트럼 라이브러리와 비교하여 각 입자의 화학적 특성을 확인하였다.

본 연구에서는 polypropylene (PP), polyethylene (PE), polyethylene terephthalate (PET), polystyrene (PS), polyvinyl chloride (PVC), PP/PE copolymer (PP-PE), acrylonitrile butadiene styrene (ABS), polyurethane (PUR), polyamide (PA), epoxy resin, ethylene vinyl acetate (EVA), polyoxymethylene (POM), styrene/Acrylate copolymer (SA), polymethyl methacrylate (PMMA), polyether surphone (PES), Others (acrylonitrile styrene acrylate (ASA), polyacrylonitrile (PAN), acrylic, polycarbonate (PC), polyvinyl acetate (PVAc), alkyd resin, ethylene tetra fluoro ethylene (ETFE), polyphenylene ether (PPE), polyphenylene sulfide (PPS), polyisoprene, polydimethylsiloxane (PDMS)) 등 26개 폴리머를 대상으로 정성 분석을 진행하였다. 또한, 미세플라스틱은 형태에 따라 fragment, fiber, sheet, spherule 등으로 구분하고 $20\text{ }\mu\text{m} - 5\text{ mm}$ 의 크기 내에서 분석이 진행되었다.

퇴적물 트랩 시료의 경우, 전처리 전에 무게가 측정된 mesh filter paper에 시료를 여과한 후 건조하여 시료 전체의 건중량을 획득하였다. 무게 측정이 완료된 시료는 해수시료와 마찬가지로 유기물 분해, 밀도 분리, 여과 등의 과정을 거쳐 전처리를 완료하였다. 퇴적물 트랩 시료에 잔류하는 미세플라스틱 오염도는 '단위 면적 당 하루에 침적 되는 미세플라스틱의 개수' 단위로 보고하였다.

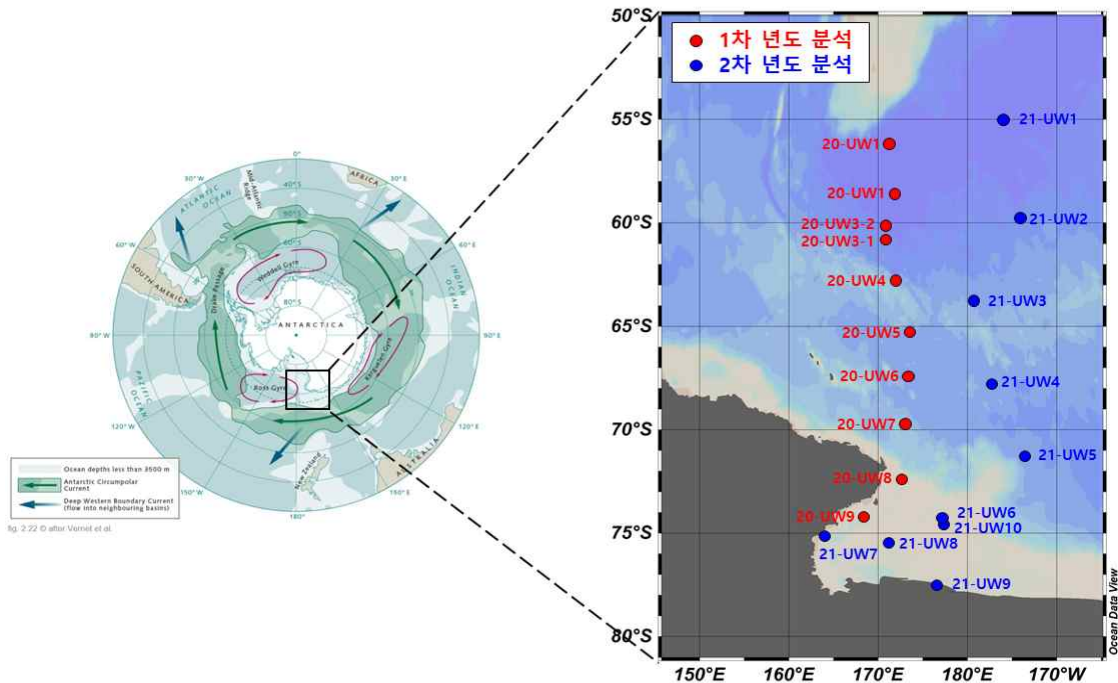
제 2 절. 표층해수 내 입자성 오염물질 공간 분포 파악

1. 조사 지역 및 시료 채취 방법

표층해수시료에 잔류하는 미세플라스틱은 아라운호에 장착된 underway water pump system을 이용하여 해수면에서 6-7 m 깊이의 해수를 채취한 후 현장에서 $20\text{ }\mu\text{m}$ 의 망목크기를 갖는 네트에 여과하여 수집하였다. 네트의 cod-end에 미세플라스틱을 농축한 해수시료는 1-L 유리병에 담아 실험실로 운반하였다. 시료 채취는 선박이 이동하는 동안 펌프를 이용하여 4-5 시간에 걸쳐 연속적으로 채취하였는데 채수된 시료의 양은 해역 별 해수의 특성에 따라 $1.8\text{-}4.3\text{ m}^3$ 였다.

2020년과 2021년에 총 20개의 표층해수 시료를 확보하였는데, 1차년도와 2차년도 각각 10개씩의 시료를 뉴질랜드에서 장보고 기지를 연결하는 이동항해 구간에서 위도에 따라 채취

하였다(1차년도 시료 = 20-UW; 2차년도 시료 = 21-UW) (<그림 6>). 위도별 시료채취 정점의 구성은 남극해 표층해수에서의 미세플라스틱 오염분포에 있어서 ACC의 영향을 확인할 수 있도록 ACC를 경계로 외부와 내부를 포함하였다.



<그림 6> 2020년 및 2021년 표층해수 시료채취 정점도

극지연구소

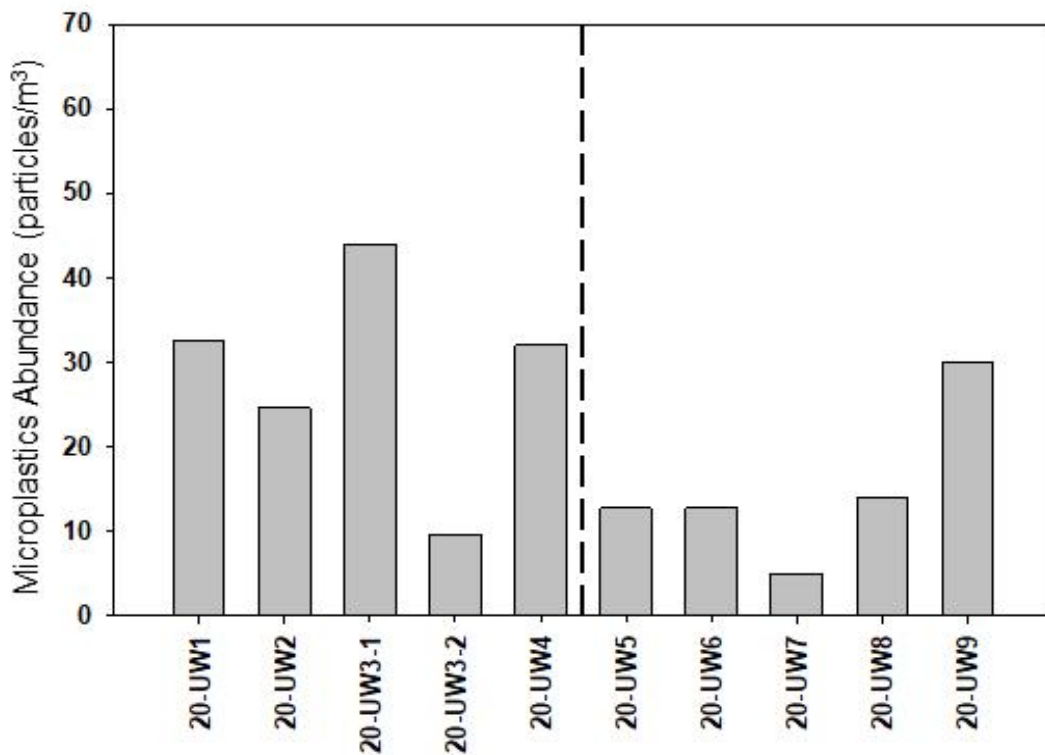
1차 년도 연구 시료로써 2020. 03. 08 - 04. 04까지 10개의 시료를 채취하였는데, 뉴질랜드에서 장보고기지로 이동항해 중에 20-UW1부터 20-UW9까지 5일 이내에 채취되었다. 그러나, 20-UW3-2는 로스해로부터 뉴질랜드로 복귀하는 과정에서 채취하여 다른 정점들과 달리 1개월의 채취시점의 차이를 두고 채취하였다. 채취한 해수시료는 잠정적으로 ACC 외부 정점들(20-UW1, 20-UW2, 20-UW3-1, 20-UW3-2, 20-UW4)과 ACC 내부의 정점들(20-UW5, 20-UW6, 20-UW7, 20-UW8, 20-UW9)로 구분할 수 있었다. 채수된 해수시료 부피는 지점별 특성에 따라 1.8-3.11 m³ 였다.

2차 년도 시료는 2020. 11. 26 - 12. 14 사이에 채취되었으며, 해역 별 해수 특성에 따라 7-13시간에 걸쳐 4 - 4.3 m³의 해수가 채취되었다. 채취된 시료는 잠정적으로 ACC 외부 정점들(21-UW1, 21-UW2, 21-UW3)과 ACC 내부의 정점들(21-UW4, 21-UW5, 21-UW6, 21-UW7, 21-UW8, 21-UW9, 21-UW10)로 구분할 수 있었다.

2. 1차년도(2020년) 표층해수 내 입자성 물질의 특성 및 공간분포

1차년도에 조사된 10개의 표층해수 시료 모두에서 미세플라스틱이 검출되었으며, 미세플라스틱의 평균농도는 21.70 ± 12.64 particles/m³ 였다(<그림 7>). 1개월의 채취시점의 차이를 갖는 20-UW3-2 정점을 제외하면, ACC 외부 정점들에서의 표층해수 내 미세플라스틱의 오염도 (33.24 ± 7.96 particles/m³)가 ACC 내부 정점들에서의 표층해수 내 미세플라스틱 오염도 (14.88 ± 9.17 particles/m³) 보다 상대적으로 2배 이상 높은 것으로 확인되었다. 이것은 ACC 외부의 남태평양이 ACC 내부의 남극해보다 오염수준이 상대적으로 높음을 의미한다.

ACC 내부의 표층해수 내 미세플라스틱 분포 경향을 살펴보면, 남극 연구기지에서 가장 가까운 20-UW9 정점에서 가장 높은 미세플라스틱 오염도를 보였는데 해당 정점에서의 오염도는 타 내부 정점들에서의 오염도보다 2배 이상 높았다. 이 결과는 남극 대륙에서의 인위적 활동(남극 과학 기지 등)으로 인해 남극 대륙에 가까운 정점일수록 미세플라스틱 오염도가 높아졌을 것이라고 추정된다.

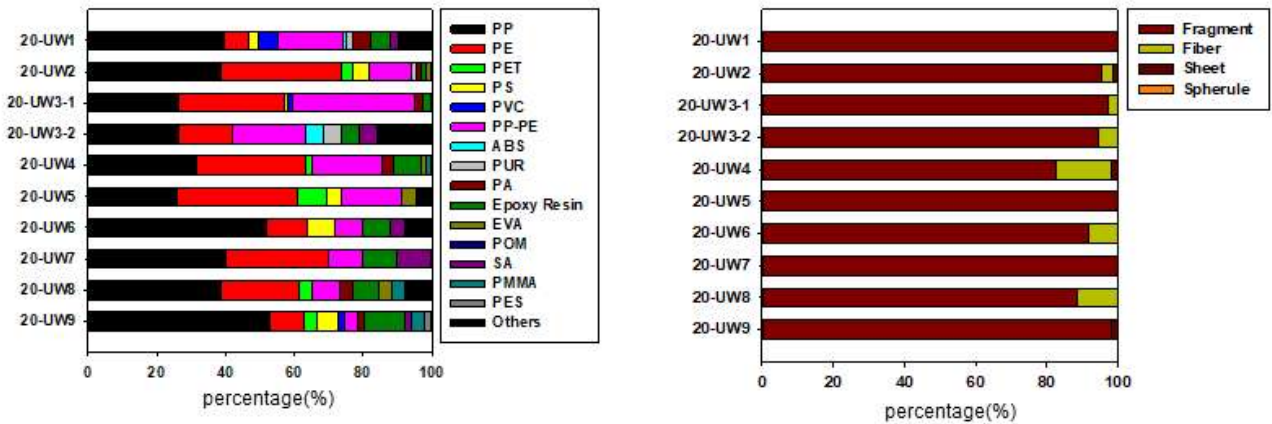


<그림 7> 1차년도 표층해수 내 미세플라스틱 농도(점선은 잠정적인 ACC 위치)

분석된 표층해수에서는 서로 다른 18개 재질의 미세플라스틱 폴리머가 확인되었는데, 10개 시료에서의 평균적인 폴리머 구성비는 PP($37 \pm 10\%$) > PE($23 \pm 11\%$) > PP-PE($16 \pm 9\%$) > 기타 등의 순으로 검출되어 대체적으로 PP가 가장 우점하는 폴리머였다(<그림 8(좌)>). 그러나,

일부 정점들에서는 PE나 PP-PE가 가장 우점적으로 발견되기도 하였다. 폴리머 구성에서의 공간분포에서 ACC 내/외부의 가장 큰 차이는 내부정점들에 비해 외부정점들에서 PP-PE가 상대적으로 더 빈번하게 검출되었다는 것이다. 통상 PP-PE는 수산활동과정에서 사용되는 로프나 그물의 재질로 많이 사용되는 플라스틱 재질인 것으로 알려지고 있는 바, 이에 따른 향후 관련 조사가 필요함을 의미한다. 한편, ACC 내부 정점들에서는 장보고 기지에서 가장 가까운 정점인 20-UW9 정점에서 검출된 폴리머재질이 가장 많았고 남극대륙에서 멀어질수록 그 다양성이 감소함을 확인하였다. 통상 하수처리장과 같은 오염원 주변에서 미세플라스틱의 폴리머재질이 가장 풍부함을 고려할 때, ACC 내부 해역은 남극대륙 연구기지활동과 같은 내부 오염원의 영향이 클 수 있음을 내포한다. 이러한 결과는 오염도의 공간분포와 일치한다.

표층해수 내 미세플라스틱의 형태 구성은 fragment(95±6%) > fiber(5±6%) > 기타 순으로 확인되었으며, 모든 정점들에서 fragment 형태가 가장 우세한 것으로 나타났다(<그림 8(우)>).



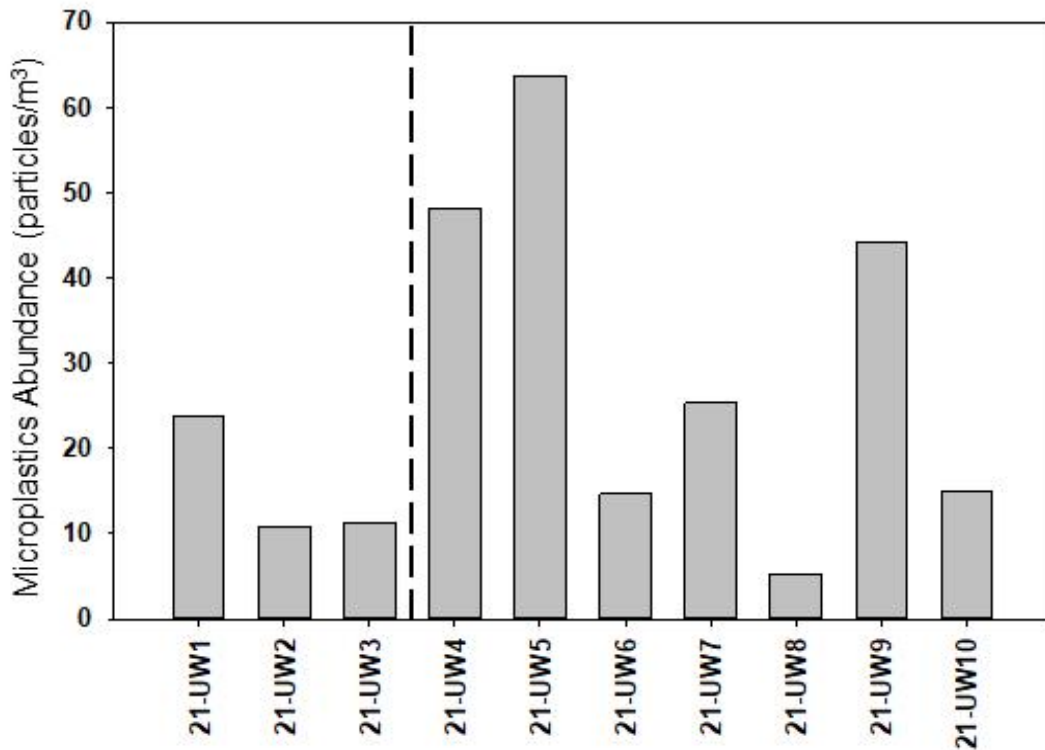
<그림 8> 1차 년도 표층해수 내 미세플라스틱 폴리머재질(좌) 및 형태(우) 구성비

3. 2차 년도(2021년) 표층해수 내 입자성 물질의 특성 및 공간분포

2차년도에 조사된 10개 정점의 표층해수 내 미세플라스틱 농도범위는 5.27-63.66 particles/m³ 였고, 평균농도는 26.23±19.38 particles/m³로 확인되었다(<그림 9>). 1차년도와 다르게 ACC 내부 정점들에서의 표층해수 내 미세플라스틱의 농도(30.93±21.44 particles/m³)가 ACC 외부 정점들에서의 표층해수 내 미세플라스틱 농도(15.27±7.35 particles/m³) 보다 높은 것으로 확인되었다. 이러한 경향은 ACC 외부와 다르게 내부에 미세플라스틱이 축적될 가능성이 있음을 의미한다. 특히, 전술한 것처럼 남극대륙에서의 과학기지 운영과 같은 인위적 활동이 지속됨에 따라 내부 오염원에 의한 배출의 효과가 더 커질 수 있음을 의미한다. ACC와 가까운 21-UW4와 21-UW5를 제외한 로스해 인근 해역 정점들 중에서 남극 연구기지과 상대적으로 가까운 정점들(21-UW7, 21-UW9)에서의 오염도가 상대적으로 높은 것은 1차년도와 유사

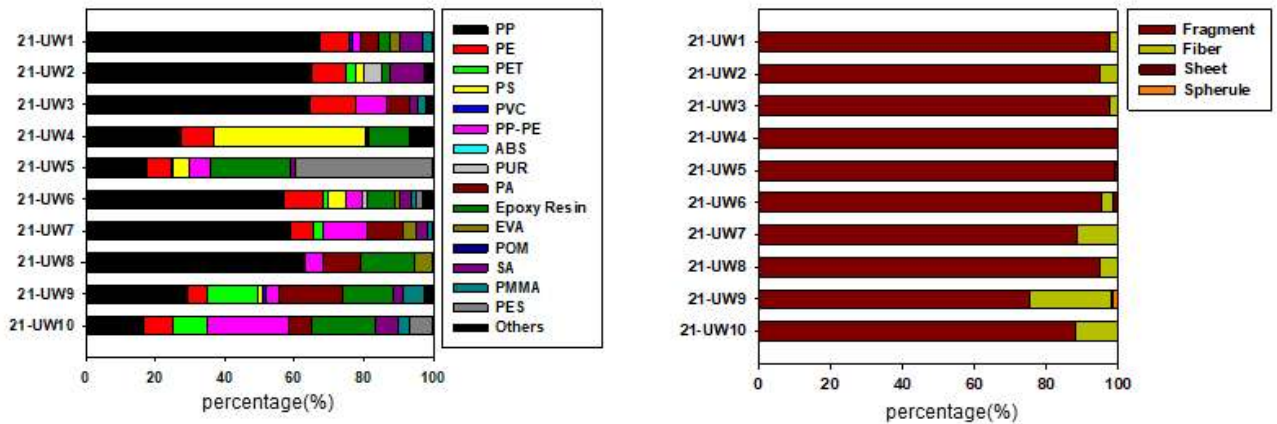
하계 내부 오염원에 의한 영향일 가능성이 제기될 수 있다.

그러나, 대체적으로 ACC를 경계로 한 내/외부의 공간분포에서 1차년도와 상이한 결과는 채취시기에 따라 해류순환에 의한 확산이 달라져서 관측결과가 영향을 받을 수 있음을 의미하기 때문에 조사대상 해역에서의 장기간에 걸친 모니터링이 필수적이며, 조사 시기에 따른 오염도 변화의 원인을 파악하고 추적할 수 있도록 추가연구가 진행될 필요가 있다.



<그림 9> 2차년도 표층해수 내 미세플라스틱 농도(점선은 잠정적인 ACC 위치)

조사된 시료들에서 미세플라스틱의 폴리머 재질 및 형태 구성비를 <그림 10>에 제시하였다. 2차년도 표층해수 내 미세플라스틱의 폴리머 재질 구성비는 평균적으로 PP(47±21%) > epoxy resin(10±6%) > PP-PE(10%) > 기타 순으로 확인되었다(<그림 10(좌)>). 일반적으로 모든 정점에서 PP가 가장 우점하는 폴리머였지만 일부 정점들(21-UW4, 21-UW5, 21-UW10)에서는 PS, PES, PP-PE 등이 우점하였다. 1차년도와 다르게 남극 연구기지와 상대적으로 가까운 정점들(21-UW7, 21-UW9) 중에서 21-UW9에서 상대적으로 다양한 폴리머재질이 관측되었는데 이것은 전술한 것처럼 내부 오염원의 영향 가능성을 의미한다. 그러나, 21-UW7 정점에서 그러한 경향은 명확하게 관측되지 않아서 추가적인 중장기 모니터링을 통해 남극 연구기지의 영향을 확인할 필요가 있다. 조사된 시료들에서 미세플라스틱의 형태 구성비는 fragment 형태가 가장 우점함을 보였다(<그림 10(우)>).



<그림 10> 2차 년도 표층해수 내 미세플라스틱 폴리머재질(좌) 및 형태(우) 구성비

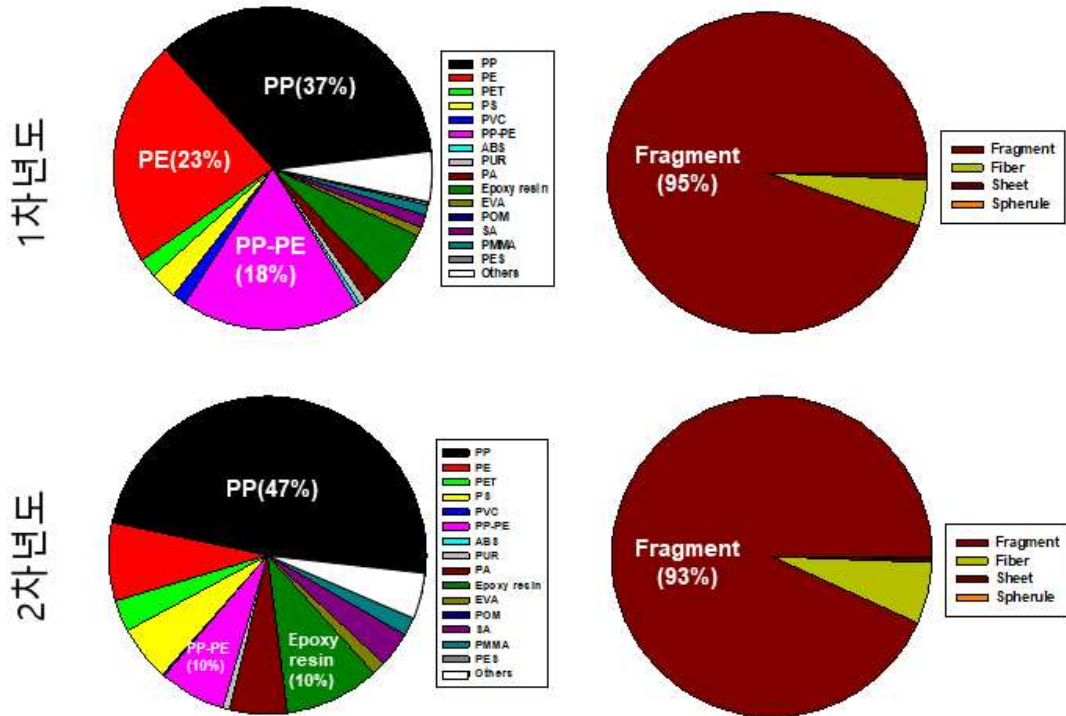
4. 입자성 오염물질의 분포특성에 대한 조사년도별 비교 고찰

전술한 것처럼, 1차년도와 2차년도에 표층해수 내 미세플라스틱 오염도는 1차년도 (21.70 ± 12.64 particles/ m^3)와 2차년도(26.23 ± 19.38 particles/ m^3)에서 유사한 농도수준을 보여 두 조사시점 사이에 유의한 차이를 보이지 않았다. 하지만, 전술한 것처럼 ACC를 경계로 한 오염도의 공간분포 경향은 다른 것으로 관측되어 이러한 차이가 두 조사시점에서의 물리적인 해수 순환 혹은 생물응집 등 생지화학적 메카니즘의 차이에서 기인한 것인지 아니면 해당 해역에서의 잠재적인 오염원(예, 관광/수산 등 선박활동이나 연구기지 활동)의 영향 강도의 차이에서 기인한 것인지 등에 대해 추가연구를 통해 밝힐 필요가 있다.

본 연구의 조사해역과 유사한 해역(로스해)에서 조사되어 보고된 남극 해수(underway water) 내 미세플라스틱(>60 μm 입자) 오염도 결과(Cincinelli et al., 2017)와 비교 했을 때, 본 연구의 결과는 기존 연구결과보다 약 140배 정도 높은 오염도를 보였다. 이러한 결과는 기존 연구와 다르게 본 연구에서 조사된 미세플라스틱 입자의 최소크기 한계가 20 μm 였다는 점에서 그 차이가 설명될 수 있다. 일반적으로 미세플라스틱은 풍화에 의해 더 작고 조각화 되는데 크기가 작을수록 개수가 기하급수적으로 증가하는 경향이 있다. 그러므로, 더 작은 크기까지를 조사한 본 연구의 결과가 더 높은 개수단위의 오염도를 보인 것은 타당할 수 있다. 이러한 결과는 큰 입자를 대상으로 분석이 진행된 기존연구들의 결과가 남극해에서의 미세플라스틱 오염도를 과소평가 할 수 있음을 의미한다.

검출된 미세플라스틱을 구성하는 우점 폴리머재질은 PP로 유사하였지만 1차년도에 상대적으로 구성비가 컸던 PE와 PP-PE의 비율이 2차년도 결과에서는 줄어든 경향을 보인 반면, 검출된 미세플라스틱의 형태 구성비는 1, 2차년도 공통적으로 fragment가 우점한 것으로 확인되었다(<그림 11>). 또한 전술한 것처럼 연구기지 인근에서 상대적으로 관측된 폴리머 재질 다양성이 크다는 것을 확인하여 향후 연구기지 활동의 영향이 추가적으로 조사연구될 필요가

있다.



<그림 11> 표층해수 내 미세플라스틱 재질(좌) 및 형태(우)의 조사년도별 비교

극지연구소

제 3 절. 입자성 오염물질의 침강 특성 사전 조사

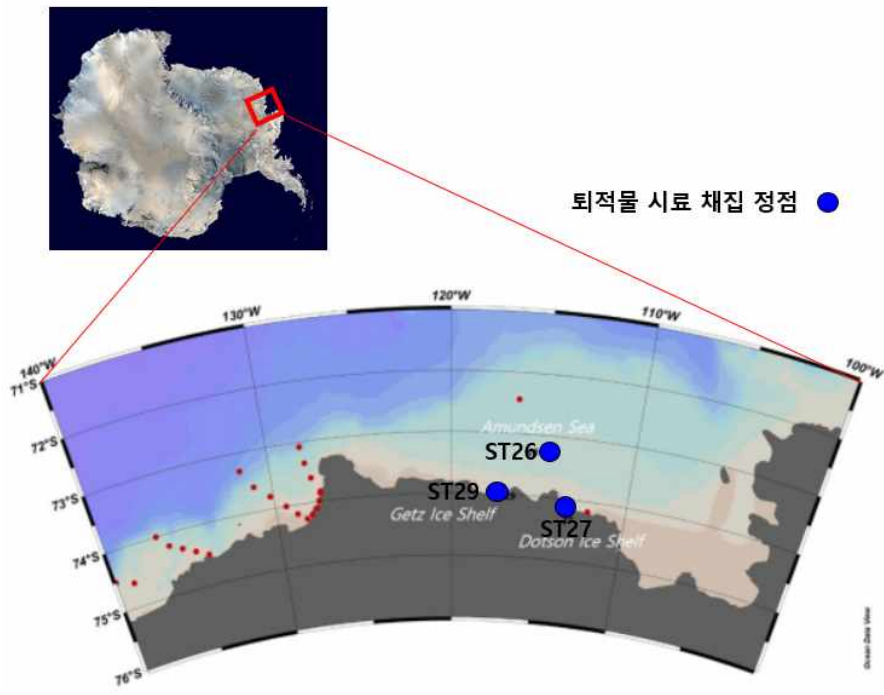
1. 조사 해역 내 퇴적물 트랩 시료 확보

입자성 오염물질의 해저면으로 침강 가능성을 조사하기 위해 퇴적물 트랩 장치를 통해 채취된 시료를 분석하였다. 해당 연구를 위해 극지연구소 연구진의 도움을 받아 조사해역과 가까운 아문젠해의 3개 정점에서 채취된 6개 시료를 확보하였다(<그림 12>).

퇴적물 트랩 시료는 0.5 m² 면적을 가진 McLane PARFLUX model 장비를 3개 모든 정점에서 해수면과 해저면의 중간 정도의 수심(약 440-567 m)에 설치하여 남극 하계기간인 1월부터 3월 사이에 19-28일간 채집된 시료들이다. 정점 ST26에서는 동일수심(440 m)에서 2018년(ST26-1: 2018. 01. 26 - 02. 25 (21일))과 2020년(ST26-21; 2020. 02. 01 - 02. 28 (28일))에 채집되었으며, 정점 ST27에서는 동일수심(440 m)에서 2018년 1월부터 3월까지 20여일 간격으로 연속적으로 포집하였고(ST27-1(2018. 01. 28 - 02. 15 (19일)), ST27-2(2018. 02. 16 - 03. 09 (22일)), ST27-3(2018. 03. 10 - 03. 31 (22일)), 정점 ST29(ST29-1)에서는 2018. 01.

25 - 02. 15 (22일)에 채집되었다.

채집된 시료는 현장에서 10 % 포르말린으로 고정하고, 외부 공기가 통하지 않도록 밀봉한 뒤 냉장 상태로 한국으로 운반 되었다.



<그림 12> 퇴적물 트랩 시료 채집 정점도

극지연구소

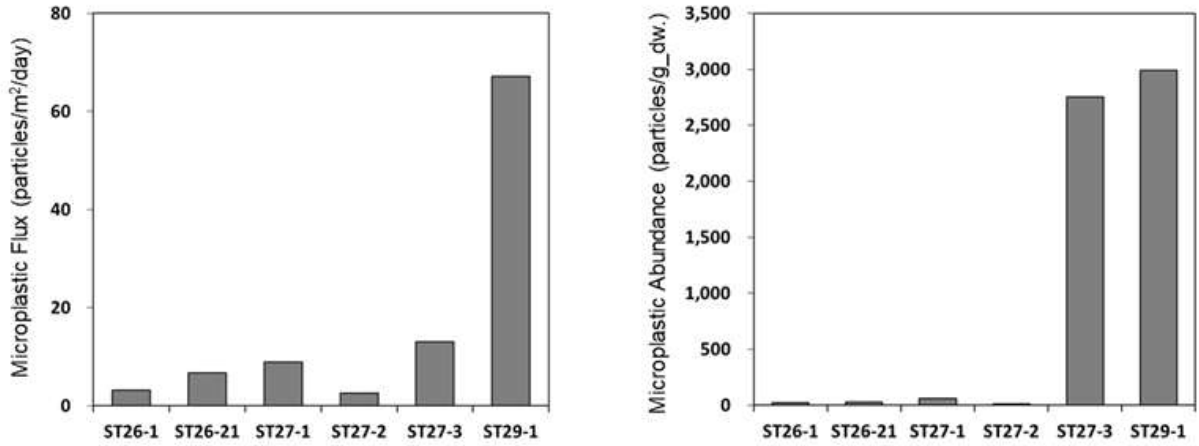
<표 1> 퇴적물 트랩 시료 정보

시료	정점(정점수심)	시료 명	채집 수심	입자 포집 기간
	ST26(830 m)	ST26-1	440 m	2018.01.26.- 2018.02.15. (21일)
	ST26(830 m)	ST26-21	440 m	2020.02.01.- 2020.02.28. (28일)
	ST27(650 m)	ST27-1	456 m	2018.01.28.- 2018.02.15. (19일)
	ST27(650 m)	ST27-2	456 m	2018.02.16.- 2018.03.09. (22일)
	ST27(650 m)	ST27-3	456 m	2018.03.10.- 2018.03.31. (22일)
	ST29(800 m)	ST29-1	567 m	2018.01.25.- 2018.02.15. (22일)

2. 침강시료(퇴적물 트랩) 내 입자성 물질 분포 특성 파악

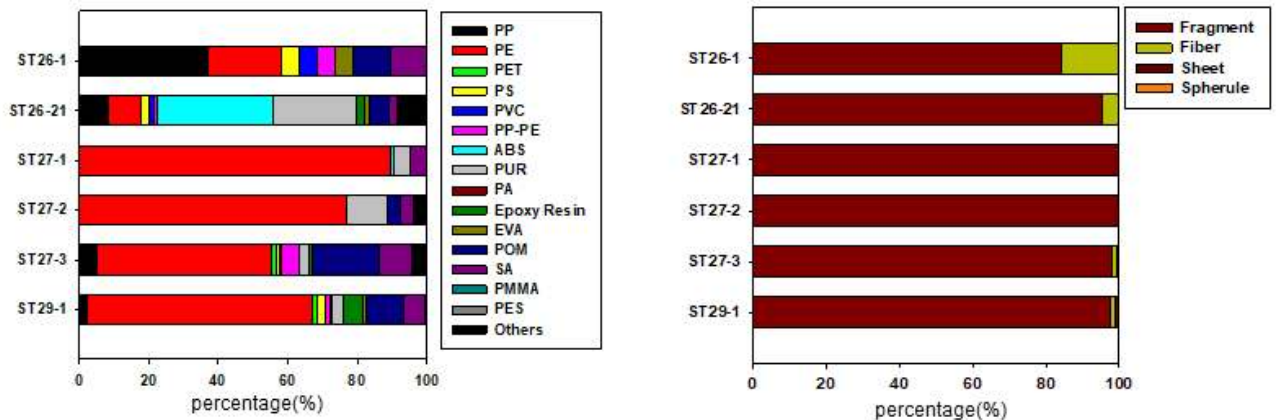
분석된 6개의 침강시료에서 하루에 단위 면적 당 침적된 미세플라스틱의 개수(즉, 미세플라스틱의 침강율)는 1.81-61.73 개/m²/day 였으며 평균 침강율은 15.60±22.96 개/m²/day 인 것으로 확인되었다(<그림 13(좌)>). 전 세계적으로 퇴적물 트랩장치를 이용한 미세플라스틱 침강율에 대한 조사자료가 없기 때문에 비교대상 자료가 없다. 따라서, 퇴적물 트랩에 포집된 전체 입자성물질의 중량당 검출된 미세플라스틱의 개수를 파악하였다. 퇴적물 트랩 시료에서 검출된 미세플라스틱의 오염도는 12-2,749 n/g 범위였으며 평균농도는 922±1,388 n/g 였다(<그림 13

(우)>). 퇴적물 트랩에서 검출된 미세플라스틱의 오염도(건중량 당 개수)는 퇴적물에서 검출되는 오염도보다 큰 값으로써 이것은 해수 층에서 해저로 침강되는 미세플라스틱의 개수가 전체 침강하는 입자성 물질에서 차지하는 비율이 클 수 있음을 의미한다.



<그림 13> 침강 시료 내 미세플라스틱 침강율(좌)과 건중량 당 농도(우)

퇴적물 트랩 시료에서 검출된 미세플라스틱의 폴리머 재질 구성비는 PE(60.92±31.48%) > POM(10.54±6.78%) > SA(6.35±3.20%) 순으로 확인되었으며(<그림 14(좌)>), 주요한 미세플라스틱의 형태는 fragment(97%)였다(<그림 14(우)>). 주요 폴리머재질에서의 관측결과는 해수에서 관측된 결과와 다른 것으로써 그 원인은 퇴적물 트랩장치에 사용되는 플라스틱들이 원인일 것으로 추정된다. 따라서, 퇴적물 트랩장치를 이용하여 산출된 미세플라스틱의 침강율 또한 과대평가되었을 가능성이 있다. 향후 연구에서는 플라스틱을 회피한 퇴적물 트랩장치를 적용하여 조사하는 것이 타당하다고 사료된다. 그럼에도 불구하고 트랩장치에 사용되지 않는 폴리머 재질들이 검출된 것은 미세플라스틱들이 생물응집 등의 과정을 통해 침강할 수 있음을 내포하고 있다.

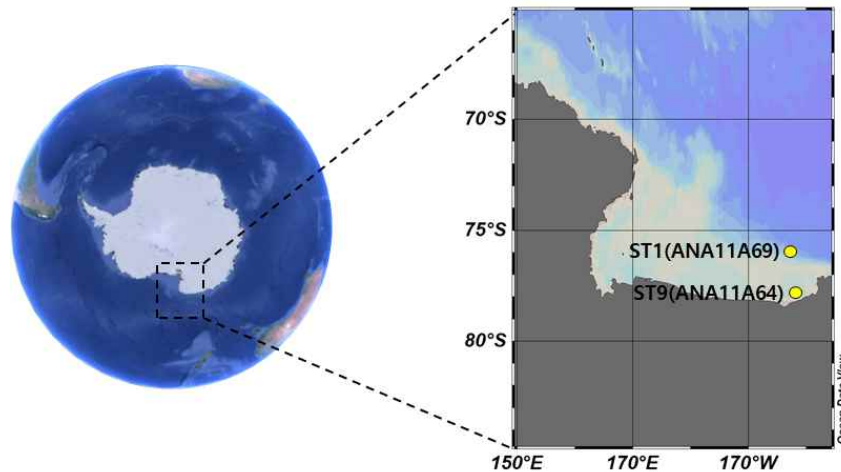


<그림 14> 침강 시료 내 미세플라스틱 재질(좌) 및 형태(우)

제 4 절. 입자성 오염물질의 수직적 분포 특성 조사

1. 조사 해역 내 표층-저층-심층 해수 시료 확보

본 연구에서는 전술한 퇴적물 트랩 시료에서 관측된 미세플라스틱의 침강 가능성을 토대로 표층-저층-심층 해수 내 입자성 오염물질(미세플라스틱)의 수직적 분포를 확인하고자 하였다. 이것을 위해, 로스해의 대륙과 상대적으로 멀고 수심이 깊은 대륙사면(continental slope) 지점(ST1; 2238 m)와 대륙에서 가깝고 수심이 상대적으로 얇은 대륙붕(continental shelf) 지점(ST9; 669 m)에서 조사를 수행하였다(<그림 15>). 각 조사정점 당 5개 수심에서 해수시료를 확보하였다(n=10).

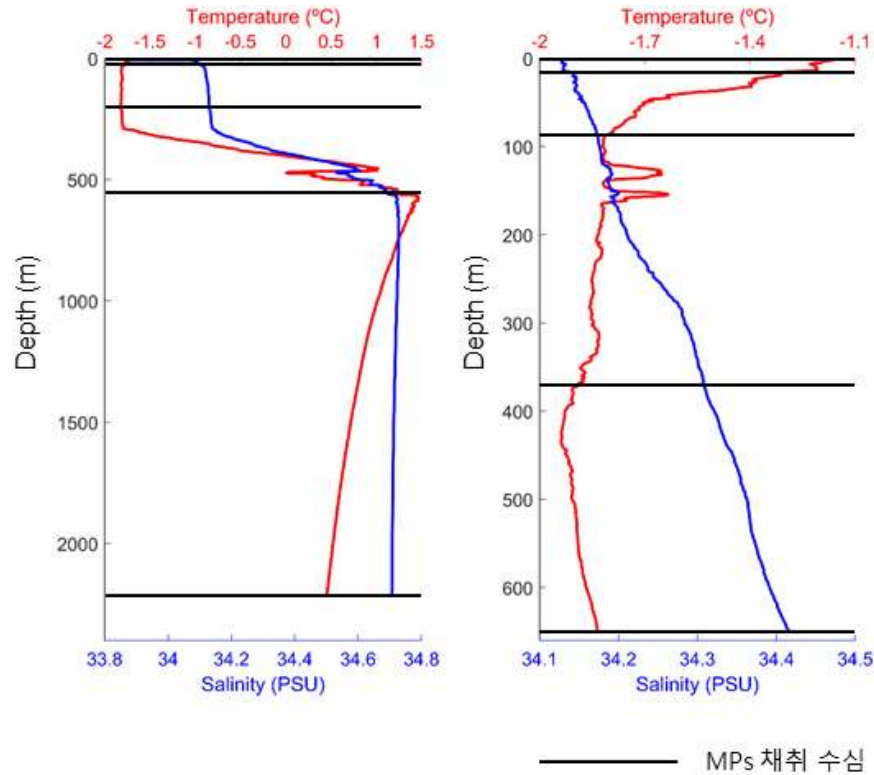


<그림 15> 수직 층 해수 시료 채집 정점

수직 층 해수 시료는 2020년 12월에 각 정점에서 CTD를 통해 수괴 특성 프로파일(수온, 염분)을 확인한 후, CTD에 장착된 니스킨 병을 이용하여 5개 각 층에서 40-50 L의 해수를 채취하였다. 채취한 시료는 선상에서 20 μ m 망목크기를 갖는 네트를 통해 여과하였으며, 네트 cod-end에 농축된 시료는 1 L 유리병에 담아 보관하여 실험실로 운반되었다.

각 정점에서 채집된 5개 수심은 'D1 - 해수면과 가까운 표층(1-2 m)', 'D2 - 해수면 아래 surface chlorophyll maximum layer', 'D3 - 표층수온 최저층 수심', 'D4 - circumpolar deep water 층 혹은 D3와 D5 중간 수심층', 'D5 - 해저면 위 저층 수심'을 선택하여 채집하고자 하였다. 하지만, <그림 16>에서 보듯이 두 정점은 수괴 특성이 완전히 다른 것으로 확인되었는데 ST1에서는 표층에서 낮은 온도와 중층에서 상대적으로 높은 온도를 보인 후 다시 온

도가 감소하여 중층에서 상대적으로 온도가 높은 수괴가 유입되고 있음을 보였다. 반면, 대륙과 가까운 ST9 지점에서는 표층온도가 높고 수심이 감소할수록 감소하는 전형적인 온도 프로파일을 보였다.



<그림 16> 수직층 해수 CTD 프로파일: ST1(좌) 및 ST9(우)

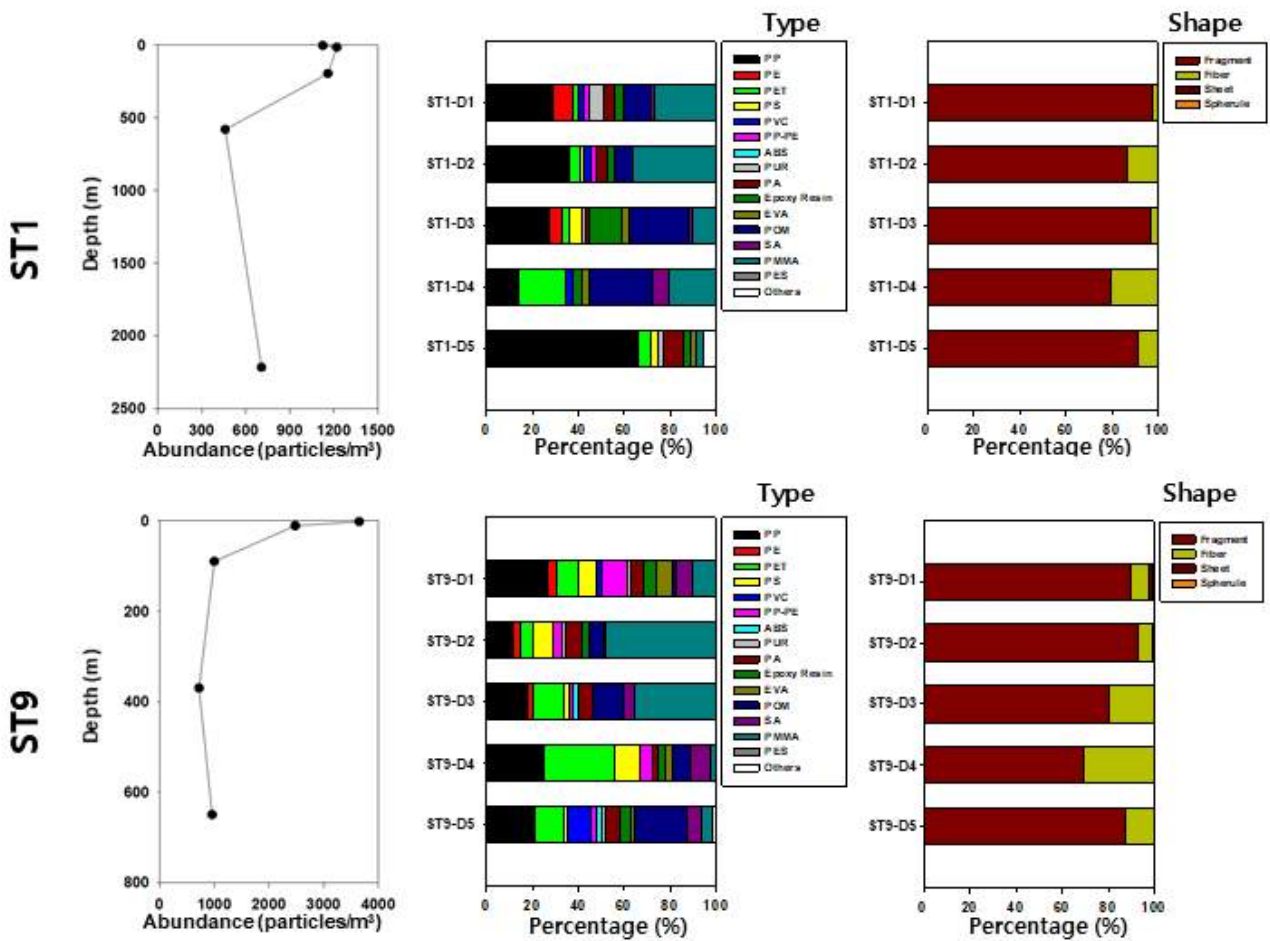
2. 입자성 오염물질의 수직적 분포 특성

ST1 정점의 수직층 해수에서의 미세플라스틱 농도 범위는 580-1,125 particles/m³로 확인되었으며, 평균 농도는 958±293 particles/m³로 확인되었다(<그림 17(좌)>). ST1 정점에서 관측된 미세플라스틱의 폴리머 재질 구성비는 PP(34±19%) > PMMA(19±13%) > POM(15±12%) > 기타 순으로 검출되어 PP가 우점하는 폴리머임이 확인되었다(<그림 17(중)>). 한편, 관측된 주요 형태는 fragment가 평균적으로 83%를 차지했으며 전 수층에서 우점하는 것으로 나타났다(<그림 17(우)>).

ST9 정점의 수직층 해수에서의 미세플라스틱 농도 범위는 720-3,650 particles/m³로 확인되었으며, 평균 농도는 1,762±1,264 particles/m³로 확인되었다. ST9 정점의 미세플라스틱 폴리머재질 구성비는 PP(20.4±6.1%) > PMMA(20.3±20.6%) > PET(14.3±9.6%) > 기타 순으로 검출되었으며, 검출된 미세플라스틱의 주요 형태는 fragment(83%)였다.

전술한 underway water pump 시스템을 통해 채집된 표층해수에서 상대적으로 빈번하게 관측되었던 PP와 PE의 비율은 수직층 해수에서는 상대적으로 감소한 반면 해당 표층해수에서

덜 빈번하게 검출되었던 PET, POM, PMMA가 수직분포에서는 빈번하게 관측된 것은 주목할 만 하다. PP와 PE는 밀도가 <math>< 1 \text{ g/cm}^3</math>으로 해수보다 밀도가 작은 반면 PET, POM, PMMA 등은 밀도가 1.15-1.51 $\text{g/cm}^3</math>임을 고려할 때 고밀도 미세플라스틱의 침강이 주요하게 발생한 것으로 추정된다. 한편, 수직 층 해수에서 PE가 잘 관측되지 않음을 고려할 때 전술한 퇴적물 트랩시료에서 다량으로 검출된 PE는 트랩장치로부터 기인한 것으로 추정된다. 또한, 주목할 만한 것은 밀도가 작은 PP는 여전히 저층에서도 빈번하게 관측되는 것으로 보아 입자의 고유한 밀도 외에도 생물응집 등을 통한 침강이 주요한 원인이 될 것으로 추정된다. 한편, 두 정점 모두에서 fiber형태를 갖는 미세플라스틱이 수심이 깊어질수록 상대적으로 증가하는 것으로 보여 fiber형태의 침강속도가 상대적으로 큰 것으로 판단된다.$



<그림 17> 수직층 해수 내 미세플라스틱 농도(좌), 재질(중) 및 형태(우)

수직 층 해수 내 미세플라스틱 오염도는 남극대륙과 접해 있는 ST9($1,762 \pm 1,264 \text{ particles/m}^3$)에서 ST1($958 \pm 293 \text{ particles/m}^3$)보다 더 높은 것이 확인되었는데 이것은 대륙에 가까울수록 인위적 오염원의 영향을 받아 미세플라스틱 오염도가 다른 해역보다 높을 수 있음을 암시한다. 수층에 따른 미세플라스틱 오염도의 수직분포는 미세플라스틱 대부분이 표층에

잔류하고 수심이 깊어질수록 감소하는 경향을 보였으며 저층과 심층에서도 유의미한 수준으로 발견되었다. 이것은 미세플라스틱이 다양한 환경요인과 함께 가라앉아 여러 수층에 분포할 수 있으며 침강을 통해 해저면에 축적될 수 있음을 의미한다. 미세플라스틱이 고유한 밀도 외에도 다른 해양 환경인자들과 상호작용하여 수직 이동할 수 있는 것으로 예측됨에 따라 염분, 수온 뿐 아니라 Chlorophyll-a, DOC, POC 등의 다양한 해양 환경요소와의 상호연관성에 대한 추가 연구가 필수적이다.



제 4 장 연구개발목표 달성도 및 대외기여도

제 1 절. 목표 달성도

본 연구의 목표는 남극 해양환경 내 입자성 오염물질(미세플라스틱)의 공간분포 및 심해 침강 특성을 조사하여 조사 해역 내 생지화학적 물질순환에 미치는 영향을 파악하는 것이다. 본 연구를 통해 수평수직 분포와 침강가능성을 조사하였으며 폴리머 및 형태 잔류특성에 대한 자료분석을 통해 입자 고유의 밀도외의 다른 인자들이 침강에 영향을 줄 수 있으며 그 결과로 표층부터 심층까지 전 수층에 분포할 수 있음을 밝혔다. 이것은 향후 추가연구를 통해 탄소순환에 대한 입자성 오염물질의 기여도를 평가하는데 활용될 수 있다.

<표 2> 연차 별 연구 목표 및 달성도

년도	연구목표	연구내용	달성도	주요 목표 달성도
1차년도 (2020)	남극 외/내해역 표층해수 내 입자성오염물 질 공간분포 파악 사전연구	○ 타 해역 표층해수 시료 확보 ○ 확보된 타 해역 표층해 수 내 입자성 오염물질 (미세플라스틱) 공간분포 파악 ○ 차 년도 침강관련 기작 조사방법론 확립	100%	1. 남극 로스 해 해역 표층해수(underway water) 시료 확보 2. 표층 해수 내 미세플라스틱 분석법 확립 3. 확보 시료 분석 완료 및 미세플라스틱 분포특성과 공간분포 파악 4. 침강시료 문헌조사 및 침강시료 내 미세플라스틱 분석법 확립
2차년도 (2021)	조사 해역 표 층 해수 내 오 염 특성 파악 입자성 오염 물질의 조사 해역 내 공간 분포 조사 및 침강특성 사전 조사	○ 표층 해수 시료 확보 ○ 표층 해수 내 입자성 물질 공간 분포 파악 ○ 전 년도 자료와의 비교 ○ 타 해역 퇴적물 트랩 시료 확보 ○ 침강시료 내 입자성 물 질 분포 특성 파악 ○ 표층해수와 침강시료 분포 특성 비교	100%	1. 남극 로스 해 해역 표층해수(underway water) 시료 확보 2. 확보 표층 해수 시료 분석 완료 및 미세플라스틱 분포특성과 공간분포 파악 3. 1차 년도 조사 자료와의 비교 4. 타 해역(아문젠 해) 퇴적물 트랩시료 확보 5. 확보 표층 해수 시료 분석 완료 및 미세플라스틱 분포특성과 침강 특성 파악 6. 매체 간(표층해수, 퇴적물 트랩)의 미세플라스틱 분포 특성 비교
3차년도 (2022)	입자성 오염물 질의 조사해역 내 수직적 분 포 특성 조사	○ 조사 해역에서 채취한 표층-저층-심층 해수에 잔류하는 미세플라스틱 특성 파악	100%	1. 조사 해역 내 수직적 분포 특성 파악을 위한 시료 확보(수위가 다른 최소 2개 정점에서 각각 층별로 최소 3개 층 이상) 2. 정 점별, 층 별 입자성 물질의 잔류 특성 파악 3. 기타 물리/이화학적 인자들과의 관련성 파악

제 2 절. 대외 기여도

본 연구의 결과를 통해 1) 남극 해양환경에서의 매체 별 인위적 오염물질(미세플라스틱)의 오염현황과 2) 남극 해양환경에서의 미세플라스틱 침강 가능성에 대한 기초 자료를 확보할 수 있었다. 이를 통해 남극환경에서의 연구기지, 선박 활동 등 인위적 오염원의 영향 가능성과 미세플라스틱 입자 자체 및 응집체 형성 등으로 인해 기존 탄소순환(생물학적 펌프)에 대한 영향 가능성이 확인됨에 따라 향후 관련된 연구의 기초자료로 활용될 것으로 기대된다.

<표 3> 연구개발에 따른 기여도

연구목표	연구내용
<p>관련 연구분야 기여도</p>	<ul style="list-style-type: none"> ○ 남극 해양환경에서의 미세플라스틱의 오염 정황을 파악 ○ 극지방 해수 시료 내에서의 >20 μm이상의 미세플라스틱 분석법 확립 ○ 미세플라스틱 연구에 대한 국내 연구진의 선도적 역할을 통한 국제사회에 기여 ○ 플라스틱오염에 의한 남극환경 변화와의 관계/영향 연구에 대한 기반을 마련 ○ 남극 해양환경 내 미세플라스틱 모니터링을 통한 장기변화추적 기반을 마련 ○ 다양한 해양환경 서식지에 생존하는 해양생물들의 미세플라스틱 노출에 의한 위해성 평가 등에 활용 ○ 남극환경에서의 기후변화와 생지화학적 변화에 따른 추적자로서의 미세플라스틱 활용성 평가와 기획에 활용

제 5 장 연구개발결과의 활용계획

제 1 절. 연구개발 결과의 활용 계획

- 남극환경에 잔류하는 미세플라스틱의 평균오염도 파악 및 남극해 내 축적되는 미세플라스틱의 유입원 규명
- 남극지방 환경에서 관측된 미세플라스틱의 오염분포를 통해 남극으로의 오염물질 유입 혹은 축적에 대한 추적자로서 활용
- 남극환경 내 미세플라스틱의 수평 혹은 수직이동 자료 확보를 통해 마린스노우(marine snow)와의 응집에 따른 관련 물질(탄소, 영양염, 오염물질 등)의 심해침강 등 생지화학적 순환 등과의 관련성 규명 및 추적자로서의 활용

제 2 절. 연구개발 결과의 기대 성과 파급효과

1. 학술적 파급효과

- 입자성 오염물질의 남극환경으로의 유입, 순환, 분포 등 전 지구적 이동에 대한 이해
- 입자성 오염물질과 생지화학적 물질순환의 관계성 규명을 통한 지구차원의 환경변화 예측
- 남극환경 내 서식환경 별 입자성 오염물질의 생물노출, 먹이사슬을 통한 전이 및 축적을 이해하기 위한 기초자료 획득
- 남극환경변화에 대한 다양한 연구분야와의 다학제 간 공동연구 기회 확대

2. 경제적 파급효과

- 입자성 오염물질의 극지환경 오염에 대한 관심 증대
- 입자성 오염물질의 배출저감 및 관리방안 마련을 위한 국제적 대응체계 구축에 기여
- 입자성 오염물질 관련 전문인력 양성

제 6 장 연구개발과정에서 수집한 해외과학기술정보

본 연구과제에서 추구하는 연구목표는 남극으로 연결되는 조사해역 내 임자성 오염물질 (미세플라스틱)의 오염도 공간분포자료 확보 및 조사해역 내 생지화학적 물질순환과의 관련성을 조사하는 것이다. 본 연구를 통해 수집된 주요 해외과학기술정보는 미세플라스틱에 대하여 남극해 내 유사 매체(해수)에서 연구된 내용이다. 남극 해양환경에서의 해수 미세플라스틱에 대한 연구는 채취 방법 및 분석 방법은 한정적이며, 단순히 모니터링 수준에서 연구가 진행되어 왔다. 또한 극지방에서 수직이동 또는 침강을 대상으로 한 연구는 전무한 상태이며, 때문에 해당 환경에서의 미세플라스틱의 거동에 대해서는 불명확한 상태이다.

<표 4> 남극해 유사 매체 내 미세플라스틱 관련 해외과학기술 정보

주요 내용	주요 문헌
남극해 표층 해수 내 미세플라스틱 오염도	<ul style="list-style-type: none"> • Cincinelli, A., Scopetani, C., Chelazzi, D., Lombardini, E., Martellini, T., Katsoyiannis, A., Corsolini, S. (2017). Microplastic in the surface waters of the Ross Sea (Antarctica): occurrence, distribution and characterization by FTIR. <i>Chemosphere</i>, 175, 391-400. • Isobe, A., Uchiyama-Matsumoto, K., Uchida, K., Tokai, T. (2017). Microplastics in the southern ocean. <i>Marine pollution bulletin</i>, 114(1), 623-626. • Kuklinski, P., Wicikowski, L., Koper, M., Grala, T., Leniec-Koper, H., Barasiński, M., Małcki, W. (2019). Offshore surface waters of Antarctica are free of microplastics, as revealed by a circum-Antarctic study. <i>Marine pollution bulletin</i>, 149, 110573. • Lacerda, A. L. D. F., Rodrigues, L. D. S., Van Sebille, E., Rodrigues, F. L., Ribeiro, L., Secchi, E. R., Proietti, M. C. (2019). Plastics in sea surface waters around the Antarctic Peninsula. <i>Scientific reports</i>, 9(1), 1-12. • Jones-Williams, K., Galloway, T., Cole, M., Stowasser, G., Waluda, C., Manno, C. (2020). Close encounters-microplastic availability to pelagic amphipods in sub-antarctic and antarctic surface waters. <i>Environment International</i>, 140, 105792.
남극해 수직 층 해수 내 미세플라스틱 오염도	<ul style="list-style-type: none"> • Absher, T. M., Ferreira, S. L., Kern, Y., Ferreira, A. L., Christo, S. W., Ando, R. A. (2019). Incidence and identification of microfibers in ocean waters in Admiralty Bay, Antarctica. <i>Environmental Science and Pollution Research</i>, 26(1), 292-298.

제 7 장 참고문헌

- Absher, T. M., Ferreira, S. L., Kern, Y., Ferreira, A. L., Christo, S. W., Ando, R. A. (2019). Incidence and identification of microfibers in ocean waters in Admiralty Bay, Antarctica. *Environmental Science and Pollution Research*, 26(1), 292–298.
- Barnes, D. K., Walters, A., Gonçalves, L. (2010). Macroplastics at sea around Antarctica. *Marine environmental research*, 70(2), 250–252.
- Chen, M., Jin, M., Tao, P., Wang, Z., Xie, W., Yu, X., Wang, K. (2018). Assessment of microplastics derived from mariculture in Xiangshan Bay, China. *Environmental Pollution*, 242, 1146–1156.
- Cincinelli, A., Scopetani, C., Chelazzi, D., Lombardini, E., Martellini, T., Katsoyiannis, A., Corsolini, S. (2017). Microplastic in the surface waters of the Ross Sea (Antarctica): occurrence, distribution and characterization by FTIR. *Chemosphere*, 175, 391–400.
- Dawson, A. L., Kawaguchi, S., King, C. K., Townsend, K. A., King, R., Huston, W. M., Bengtson Nash, S. M. (2018). Turning microplastics into nanoplastics through digestive fragmentation by Antarctic krill. *Nature communications*, 9(1), 1–8.
- Eunomia. 2016. *Plastics in the Marine Environment*. Bristol: Eunomia Research & Consulting Ltd.
- Evangelidou, N., Grythe, H., Klimont, Z., Heyes, C., Eckhardt, S., Lopez-Aparicio, S., Stohl, A. (2020). Atmospheric transport is a major pathway of microplastics to remote regions. *Nature communications*, 11(1), 1–11.
- Fraser, C. I., Morrison, A. K., Hogg, A. M., Macaya, E. C., van Sebille, E., Ryan, P. G., Waters, J. M. (2018). Antarctica's ecological isolation will be broken by storm-driven dispersal and warming. *Nature climate change*, 8(8), 704–708.
- Geyer, R., Jambeck, J. R., Law, K. L., (2017). Production, use, and fate of all plastics ever made. *Sci. adv.* 3(7), e1700782.
- Isobe, A., Iwasaki, S., Uchida, K., Tokai, T. (2019). Abundance of non-conservative microplastics in the upper ocean from 1957 to 2066. *Nature communications*, 10(1), 1–13.
- Isobe, A., Uchiyama-Matsumoto, K., Uchida, K., Tokai, T. (2017). Microplastics in the southern ocean. *Marine pollution bulletin*, 114(1), 623–626.
- Jones-Williams, K., Galloway, T., Cole, M., Stowasser, G., Waluda, C., Manno, C. (2020). Close encounters—microplastic availability to pelagic amphipods in sub-antarctic and antarctic surface waters. *Environment International*, 140, 105792.
- Kaiser, D., Kowalski, N., Waniek, J. J. (2017). Effects of biofouling on the sinking behavior of microplastics. *Environmental research letters*, 12(12), 124003.

- Kuklinski, P., Wicikowski, L., Koper, M., Grala, T., Leniec-Koper, H., Barasiński, M., Małecki, W. (2019). Offshore surface waters of Antarctica are free of microplastics, as revealed by a circum-Antarctic study. *Marine pollution bulletin*, 149, 110573.
- Lacerda, A. L. D. F., Rodrigues, L. D. S., Van Sebille, E., Rodrigues, F. L., Ribeiro, L., Secchi, E. R., Proietti, M. C. (2019). Plastics in sea surface waters around the Antarctic Peninsula. *Scientific reports*, 9(1), 1-12.
- Michels, J., Stippkugel, A., Lenz, M., Wirtz, K., Engel, A. (2018). Rapid aggregation of biofilm-covered microplastics with marine biogenic particles. *Proceedings of the Royal Society B*, 285(1885), 20181203.
- Munari, C., Infantini, V., Scoconi, M., Rastelli, E., Corinaldesi, C., Mistri, M. (2017). Microplastics in the sediments of Terra Nova Bay (Ross Sea, Antarctica). *Marine pollution bulletin*, 122(1-2), 161-165.
- Porter, A., Lyons, B. P., Galloway, T. S., Lewis, C. (2018). Role of marine snows in microplastic fate and bioavailability. *Environmental science & technology*, 52(12), 7111-7119.
- Waller, C. L., Griffiths, H. J., Waluda, C. M., Thorpe, S. E., Loaiza, I., Moreno, B., Hughes, K. A. (2017). Microplastics in the Antarctic marine system: an emerging area of research. *Science of the total environment*, 598, 220-227.
- Yokota, K., Waterfield, H., Hastings, C., Davidson, E., Kwietniewski, E., Wells, B. (2017). Finding the missing piece of the aquatic plastic pollution puzzle: interaction between primary producers and microplastics. *Limnology and Oceanography Letters*, 2(4), 91-104.
- Zhu, X. (2021). Unknown branch of the carbon cycle. *Frontiers in Marine Science*, 7, 609243.

주 의

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