

제 출 문

극지연구소장 귀하

본 보고서를 “ 남극 과학기지 운영에 따른 주변 환경 및 생태계 오염 요인 모니터링에 관한 연구(본과제명)” 과제의 위탁연구 “남극 세종기지 및 주변 환경 미세플라스틱 배출 및 오염 모니터링을 통한 연구기지 영향 평가에 관한 연구(위탁과제명)” 과제의 최종보고서로 제출합니다.



(본과제) 총괄연구책임자	:	김 지 희
위탁연구기관명	:	인 천 대 학 교
위탁연구책임자	:	김 승 규
위탁참여연구원	:	성 민 재
“	:	신 준 혁
“	:	지 윤 정
“	:	김 진 유
“	:	정 은 서
“	:	이 기 뽐

보고서 초록

위탁연구과제명	남극 세종기지 및 주변 환경 미세플라스틱 배출 및 오염 모니터링을 통한 연구기지 영향 평가				
위탁연구책임자	김 승 규	해당단계 참여연구원수	31명	해당단계 연구비	180,000,000 원
연구기관명 및 소속부서명	인천대학교		참여기업명		
국제공동연구	상대국명 : 상대국연구기관명 :				
요약				보고서 면수	56
• 본 연구는 남극 세종기지 및 주변 환경에서 미세플라스틱의 배출과 오염 특성을 파악하고, 연구기지 기반 인간 활동이 환경에 미치는 영향을 종합적으로 평가하는 것을 목적으로 수행되었다. • 기존 남극 미세플라스틱 연구를 검토하여 해수, 퇴적물, 눈, 해빙, 생물 등 매체별 조사 방법과 적용 한계를 체계적으로 정리하였다. • 문헌 분석 결과를 바탕으로 연구기지 배출원과 주변 환경을 포괄하는 조사 매체를 선정하고, 극지 환경에 적용 가능한 표준화된 시료 채취 및 분석 절차를 구축하였다. • 세종기지 하수처리장, 인근 수계 및 육상환경을 대상으로 공간적 분포와 계절적 체류 인원 변동을 고려한 조사 체계를 설계하였다. • 연구 결과, 수계환경에서는 실내 환경 → 하수처리장 → 마리안 소만 수계로 이어지는 오염 경로가 확인되었으며, 육상환경에서는 연구기지 설비 및 외부 활동이 주변 토양과 실외 대기 오염에 영향을 미치는 것으로 나타났다. • 연구기지 영향이 명확히 확인됨에 따라 미세플라스틱 오염 저감을 위한 관리 노력이 필요하며, 그 효과를 검증하기 위한 중장기 모니터링 설계의 필요성이 제시되었다. • 본 연구 성과는 논문 출간 이후 남극조약 체제 하 국제기구(AMAP, SCAR 등)를 통한 발표에 활용되어 국내 연구진의 연구 역량을 알리고 향후 유사 연구를 주도하기 위한 기반 자료로 활용될 예정이다.					
색 인 어	한 글	남극, 미세플라스틱, 세종기지, 연구기지 기원 오염, 중장기 모니터링, 다중 환경 매체 모니터링			
	영 어	Antarctica, King Sejong Station, Research station origin contamination, Mid- to long-term monitoring, Multi-environmental media monitoring			

요 약 문

I. 제 목

남극 세종기지 및 주변 환경 미세플라스틱 배출 및 오염 모니터링을 통한 연구기지 영향 평가

II. 연구개발의 목적 및 필요성

전 세계적으로 해양 미세플라스틱 오염이 대두되며 이는 극지 환경 보호의 핵심 의제로 부상하고 있다. 남극에서는 연구기지가 주요 배출원으로 지목되지만 이에 대한 종합적인 평가는 부족하다. 본 연구는 세종기지를 중심으로 미세플라스틱 배출 경로와 오염 특성을 통합적으로 관측 및 평가하여 남극 환경 보호를 위한 과학적 근거를 마련하고자 한다.

III. 연구개발의 내용 및 범위

본 연구는 남극 미세플라스틱 관련 기존 문헌들을 검토하여 조사 매체와 방법의 특성을 파악하고 연구기지 중심의 통합 연구가 부족함을 확인하였다. 이에 세종기지를 대상으로 배출원(하수, 실내 대기)과 주변 환경(해수, 퇴적물, 눈, 토양, 실외 대기)을 구분해 조사 범위를 설정하고 계절별 모니터링을 통해 기지 운영에 따른 오염을 평가하도록 연구 범위를 설정하였다.

IV. 연구개발결과

본 연구를 통해 수계와 육상환경의 미세플라스틱 오염도를 평가한 결과, 세종기지 주변 환경의 주요 원인이 연구기지 기반 인간 활동임을 확인하였다. 수계에서는 실내 발생 미세플라스틱이 하수처리장을 거쳐 주변 수계로 확산되었고, 육상에서는 기지 설비와 활동이 토양 및 대기 오염에 영향을 미쳤다. 이에 따라 하수처리장과 설비 관리가 핵심 저감 대상이며, 극지 환경의 제약을 고려한 효율적 중장기 모니터링 체계 구축이 필요하다.

V. 연구개발결과의 활용계획

본 연구에서 확보된 남극 연구기지의 미세플라스틱 자료는 남극 환경에 대한 인간 활동의 영향을 평가하고, 향후 모니터링 및 저감 대책 수립의 기초 자료로 활용될 수 있다. 또한, 국내 연구진의 전문성 강화와 국제 협력 확대를 통해 남극 환경 보전과 관련한 과학적·정책적 대응에 기여할 것으로 기대된다.

S U M M A R Y

(영 문 요 약 문)

I. Title

Research base impact assessment through microplastic emission and pollution monitoring in King Sejong Station and its surrounding environment, Antarctica

II. Purpose and Necessity of R&D

Marine microplastic pollution is a global concern and a key issue in polar environmental protection. Antarctic research stations are potential emission sources, yet their impacts remain poorly understood. This study establishes a scientific basis for protecting the Antarctic environment by assessing microplastic emissions and contamination around King Sejong Station.

III. Contents and Extent of R&D

A literature review revealed limited integrated studies on station-related microplastics. This research therefore examined emission sources (wastewater, indoor air) and surrounding media (seawater, sediments, snow, soil, outdoor air) at King Sejong Station through seasonal monitoring to evaluate contamination linked to station operations.

IV. R&D Results

Results show that human activities at King Sejong Station are major contributors to local microplastic pollution. Microplastics from indoor environments were released via wastewater into nearby seas, while station facilities and operations affected soils and air. These findings highlight wastewater treatment and facility management as key mitigation targets and emphasize the need for a long-term monitoring framework suited to polar conditions.

V. Application Plans of R&D Results

The data provide baseline information for assessing human impacts and developing monitoring and mitigation strategies in Antarctica. They will also support domestic research capacity and international collaboration for Antarctic environmental conservation.

목 차

제 1 장 서론

제1절 연구개발의 필요성

제2절 연구개발의 목적

제 2 장 국내외 연구 현황

제1절 국외 연구 현황

제2절 국내 연구 현황

제 3 장 연구개발수행 내용 및 결과

제1절 이론적, 실험적 접근방법

제2절 연구 내용 및 결과

제 4 장 연구개발목표 달성도 및 대외기여도

제1절 연구개발목표 달성도

제2절 목표달성을 위한 연구수행 방법

제3절 추가 연구의 필요성 및 대외기여도

제 5 장 연구개발결과의 활용계획

제 6 장 연구개발과정에서 수집한 해외과학기술정보

제 7 장 참고문헌

제 1 장 서론

제1절 연구개발의 필요성

전 세계 플라스틱 사용량의 기하급수적 증가에 따라 해양으로 유입되는 양 또한 비례하여 증가함에 따라 해양 플라스틱 오염 문제는 국제적 환경 이슈로 부각되고 있어, 이에 대한 전 국가적 차원 및 국제적 협력 대응과 노력이 요구되고 있다. 제5차 유엔환경총회(UNEA-5.2)에서 미세플라스틱을 포함한 해양 플라스틱 쓰레기 저감을 위한 법적 구속력 있는 국제협약 체결을 결의하였고, UN 지속가능 발전 목표(SDG 14.1)을 포함한 거의 모든 국제기구에서 해양 미세플라스틱을 주요 의제로 다루고 있는바, 미세플라스틱 해양오염에 대한 자료 확보를 통해 국제협약에 선제적으로 대응할 필요가 있다. 남극은 기후변화 및 지구 환경오염의 가장 민감한 지역이며, 비교적 청정지역으로 알려진 극지방의 해수, 생물체, 저서퇴적물, 해빙, 눈, 대기 등 모든 환경매체에서 미세플라스틱이 잇달아 발견됨에 따라 극지방에서의 미세플라스틱 발생원 추적 관리, 오염의 지속적인 모니터링 및 오염 저감을 위한 지역 및 국제 협력 프로그램들이 실행되고 있다. 우리나라에서도 극지방 환경 보호를 위한 선도적 노력 및 국제 협력 필요성이 증가하고 있다. 남극의 경우 선박 활동이 증가하고 있을 뿐만 아니라 현재 30여 개 국가가 82 개의 연구기지를 운영하고 있어, 이들이 남극 미세플라스틱의 주요 배출원이 될 수 있다. 특히, 이들 연구기지에서 배출된 미세플라스틱은 남극환류(Antarctic Circumpolar Current; ACC)에 의해 지속적으로 남극 환경 안에 축적될 가능성이 제기됨에 따라 연구기지 및 주변 환경에 대한 모니터링이 필수적이며 남극조약 등 남극 환경 보호를 위한 국제아젠다 수립 시 우리나라의 주도적 기여를 위해 선제적 연구가 진행될 필요가 있다.

극지연구소

제2절 연구개발의 목적

1. 세종기지 인근 맥스웰만 및 마리안 소만 주변 환경

(1) 우리나라는 남극에 2개의 상설 연구기지(세종기지, 장보고기지)를 운영 중에 있으며, 1988년 2월 17일에 준공된 세종기지는 남셰틀랜드군도 킹조지섬(King George Island)의 맥스웰만(Maxwell Bay)에 있는 마리안 소만(Marian Cove) 입구에 위치해 있다.

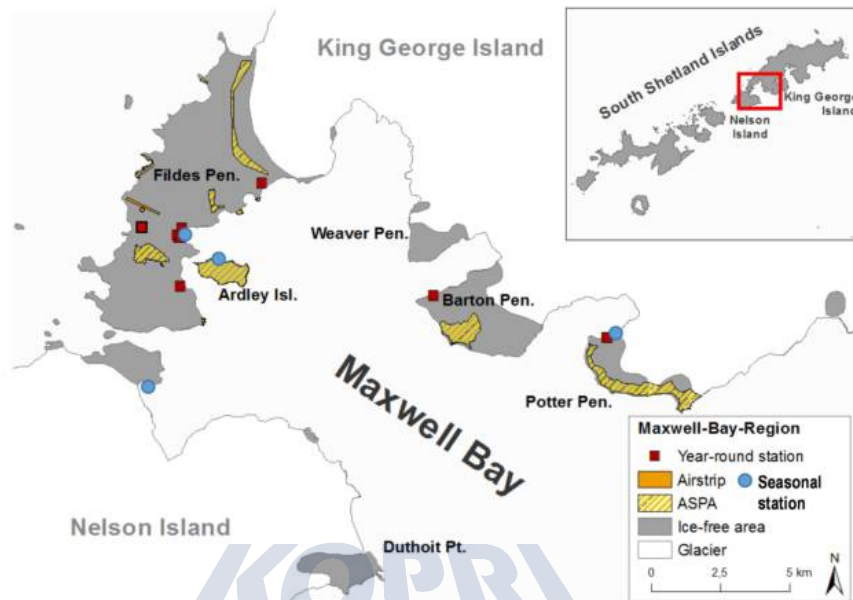


그림 1. 맥스웰만 지형도 및 연구기지 현황(Braun et al., 2017 자료 수정)

(2) 맥스웰만에는 세종기지를 포함하여 8개 국가에서 8개의 상설기지와 4개의 비상설기지를 포함하여 총 12개의 연구기지가 운영되고 있다(그림 1). 이들 연구기지의 최대 체류 인원은 12 - 150명으로 이들 연구기지(특히, 상설기지)를 운영하는 과정에서 시설로부터 대기, 토양, 수계로 미세플라스틱을 배출할 수 있다.

2. 최종 목표 설정 근거

(1) 본 연구의 최종 목표는 ‘남극 연구기지(세종기지) 및 주변 환경에서의 미세플라스틱의 배출 및 오염 현황에 대한 관측 자료 확보를 통해 연구기지 기반 인간 활동 영향을 평가하고 남극 미세플라스틱 연구 기반을 구축’하는 것이다. 남극 환경을 위협하는 미세플라스틱의 오염원으로써 연구기지를 포함한 인위적 활동이 유력한 오염원으로 추정되는 바 연구기지 중심의 모니터링이 추진될 필요가 있으나 육상 및 수계를 포괄하는 연구기지의 전반적인 활동 영향에 대한 연구는 추진된 바가 없다. 연구기지의 영향을 파악하기 위해서는 연구기지에서 배출되는 미세플라스틱의 양과 연구기지 주변의 다양한 환경매체들에 대한 오염도 및 미세플라스틱 분포 특성에 대한 조사가 필수적이다.

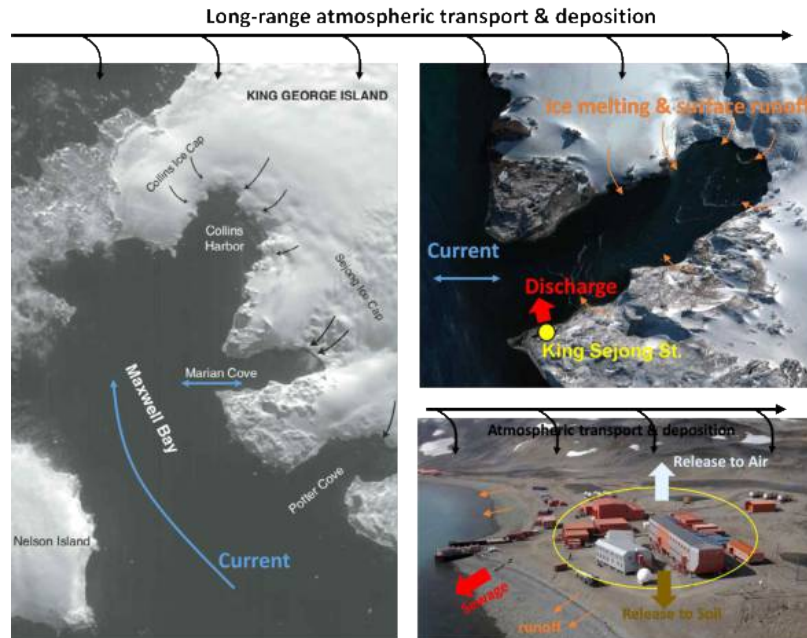


그림 2. 연구기지 활동을 통한 미세플라스틱 주요 배출 및 이동 경로 모식도

(2) 연구기지에서부터의 배출은 하수를 통한 수서 환경으로의 배출과 육상 활동 및 시설물을 통한 대기 혹은 토양 등 육상환경으로의 배출로 구성되며, 대기로 배출된 미세플라스틱은 토양 및 수체로 침적되고 토양에 잔류하는 미세플라스틱은 눈과 얼음이 녹으면서 수체로 유출된다(그림 2). 한편, 고산지대 혹은 남북극과 같은 지역들에 대한 대기를 통한 이동 및 확산의 영향이 중요하게 대두되고 있음에도 불구하고 대기에 대한 연구는 최근까지 전 세계적으로도 조사 자료가 매우 제한적이다(Allen et al., 2022). 예컨대, 마리안 소만은 연구기지에서부터의 수계 및 육상을 통한 배출, 대기를 통한 침적, 주변 맥스웰만으로부터의 유입 등으로부터 영향받을 수 있기 때문에 두 배출경로 및 그로 인한 주변 환경 모니터링이 필요함에도 불구하고, 이와 같은 연구는 지금까지 전 세계적으로도 수행된 바가 없다. 그러나, 남극 연구기지의 자연환경 특성상 아라온호 등 대형 연구선을 이용하지 않으면 상시적이고 광범위한 해양조사가 불가능하기 때문에 연구기지 상주 인원이 시료 채취 수행 가능한 공간적 범위가 대상이 되어야 하고, 연구기지 운영 및 활동 인원의 변화(하계 및 동계)를 고려하여 배출의 시간적 변동성을 파악하는데 연구가 집중될 필요가 있다.

제 2 장 국내외 연구 현황

제1절 국외 연구 현황

1. 국외 연구 현황

(1) 지구적 차원의 환경문제로서의 미세플라스틱 문제에 대한 대응과 국제사회 노력

① 2004년, 해양환경에서의 미세플라스틱 오염도가 플라스틱 생산량에 비례하여 증가해 왔음이 관측됨에 따라 기존 해양오염의 패러다임을 바꿔야 하는 지구적 해양환경 현안으로 급부상하였다.

② 유엔환경계획(UNEP)은 2014년 국제 환경 문제를 갱신하면서 유엔 지속가능발전목표(SDG-14.1)에 미세플라스틱을 포함한 ‘플라스틱 해양쓰레기’를 포함 시키고 2025년까지 해양오염의 예방과 현저한 저감을 목표로 제시한 바가 있으며, 최근 제5차 유엔환경총회(UNEA-5.2)에서 2024년까지 해양 미세플라스틱 오염을 획기적으로 줄이기 위한 법적 구속력 있는 국제협정 체결을 결의한 바가 있다.

③ 유네스코 정부간 해양위원회(UNESCO-IOC)와 유엔환경계획(UNEP) 등 유엔 산하 국제기구들이 공동으로 지원하는 국제해양환경전문가그룹(GESAMP)에서 미세플라스틱을 신규 관심 물질로 지정하고 전문가들로 구성된 워킹그룹(WG40)을 구성하여 기술보고서 및 UNEP 보고서를 발간해 오고 있으며, 그 외 유네스코(UNESCO), 국제해사기구(IMO), 국제식량농업기구(FAO), 세계보건기구(WHO) 등 대부분의 국제기구와 G7, G20 등 정부간 협의체에서 미세플라스틱 오염을 시급히 연구가 필요한 환경 현안으로 인식하고 있다.

(2) 남극 환경에서의 미세플라스틱 오염과 생태계 위협 증가에 따른 연구 필요성 증가

① 최근의 연구들은 비교적 청정지역으로 알려진 남극과 북극의 대기, 해수, 저서퇴적물, 생물, 해빙, 눈 등 모든 환경매체에서 미세플라스틱이 검출되고 있음을 보고하고 있다(Cincinelli et al., 2017; Munari et al., 2017; Rodríguez Pirani et al., 2024; Absher et al., 2019; Aves et al., 2022).

② 남극에서 배출되거나 남극으로 유입된 미세플라스틱은 전세계 대양으로 이동되지 않고 남극 주변 환경에 축적될 가능성이 커서 이에 대한 우려가 증가함에 따라 관련 연구의 필요성이 크게 증가되고 있다(그림 3).

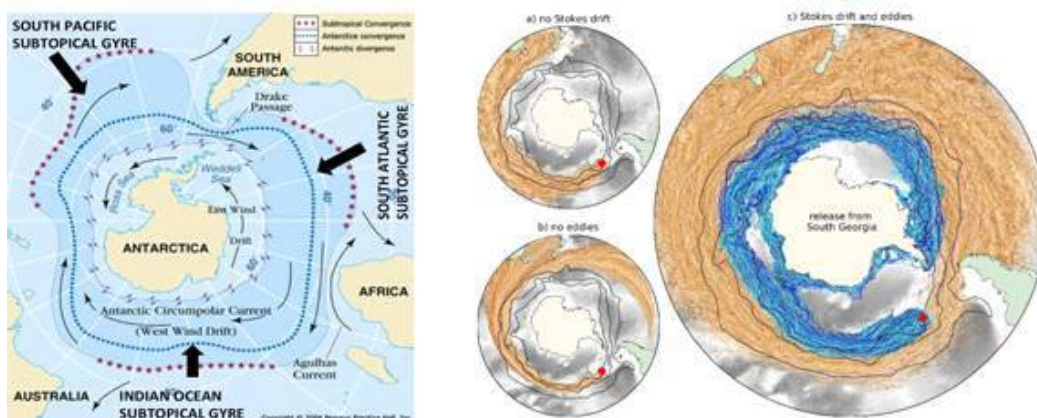


그림 3. ACC 및 입자성 물질의 남극 축적 가능성(Fraser et al., 2018)

③ 남극 및 남극해 연합(ASOC)이 해양쓰레기를 ‘남극 생태계의 지속적이며 새로운 위협’

으로 적시한 보고서(SC-CAMLR-XXXVI/BG/29)를 남극 해양생물자원 보존위원회에 제시한 바 있는데 전 세계 다른 지역과 달리 남극 환경에서의 미세플라스틱에 대한 연구는 상대적으로 빈약하여 이에 대한 연구의 필요성을 강조하고 있다.

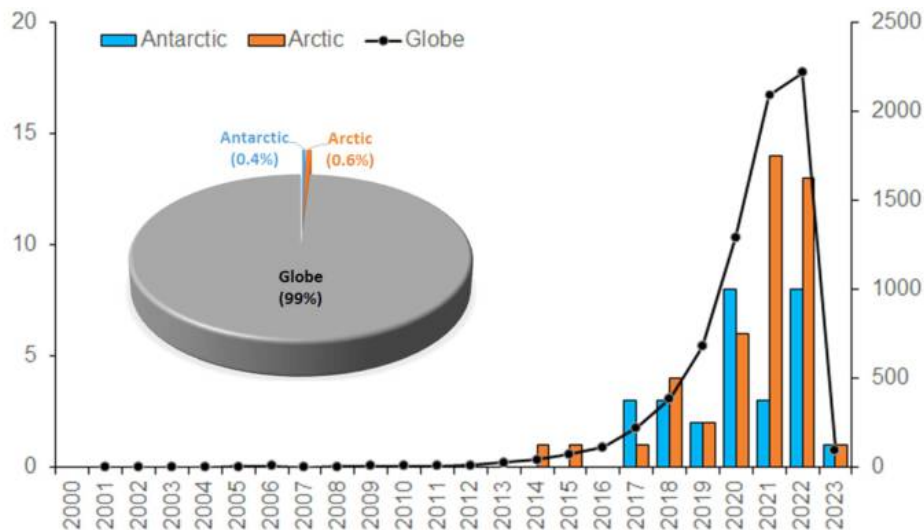


그림 4. 전 세계, 북극, 남극에 대한 미세플라스틱 관련 출판 연구논문 수의 시계열적 경향(출처: Web of Science 2023.01.10 기준, title keywords = 'microplastic*' and 'arctic' or 'antarctic*')

④ 북극과 다르게 남극에서는 주로 대형 해양쓰레기(marine debris)에 대한 연구가 핵심적으로 진행 되어왔으나 최근에는 미세플라스틱에 대한 관심과 연구들이 크게 증가하여 2023년 1월 Web of Science 기준으로 28편의 연구논문이 보고되었고 그 숫자가 점차 증가하고 있다(그림 4).

⑤ 그러나, 동일 기간 동안 전 세계에서 출판된 연구논문 수에 비해 극지방에 대한 연구논문 수는 전체의 1% 정도로 현저하게 적으며, 특히 남극에 대한 연구결과는 더 적어서 남극 환경에서의 미세플라스틱 오염원, 오염 현황 등에 대한 체계적이고 지속적인 연구가 필요함을 암시한다.

(3) 남극 환경 보호를 위한 국제 협력 필요성 증가

① 남극은 인간의 영향이 상대적으로 적은 전 세계에서 마지막 남은 청정지역이자 해양포유류, 어류, 무척추동물 등을 포함해 높은 생물다양성을 갖는 지역으로 2016년 남극해양생물자원보존위원회(CCAMLR)에 의해 세계에서 가장 넓은 면적이 해양보호구역으로 지정된 곳이기도 하다.

② 최근 남극 생태계를 이루는 주요 생물종인 크릴과 펭귄 등에서 미세플라스틱이 검출되며 생태계에 대한 위협이 증가하고 미세플라스틱의 오염도에 대한 우려가 증가함에 따라 남극해양생물자원보존 과학위원회(SC-CAMLR), 남극 및 남극해 연합(ASOC), 국가남극사업책임자회의(COMNANP) 등에서 미세플라스틱 연구 및 남극조약 지역에서의 국제 협력 연구의 필요성을 제시하고 있다.

③ 남극 및 남극해 연합(ASOC)의 보고서(SC-CAMLR-XXXVI/BG/29)에서 남극해는 예상보다 미세플라스틱 오염도가 높아 CCAMLR 및 남극조약 하 기구들 사이의 유기적 협력과 연구가 필요함을 강조하고 있다.

④ 우리나라는 남극조약 협의당사국(Antarctic Treaty Consultative Party, ATCP), 남극연구과학위원회(Scientific Committee on Antarctic Research, SCAR), 남극해양생물자원보존

위원(Convention for the Conservation of Antarctic Marine Living Resources, CCAMLR), 국가남극사업책임자회의(COMNAP), 아시아극지과학포럼(Asian Forum for Polar Science, AFOPS) 등의 주요 가입국이다.

⑤ 북극에서는 북극이사회(Arctic Council) 산하 워킹그룹인 AMAP와 PAME 주도 하에 해양플라스틱 쓰레기에 대한 대응을 하고 있고 최근 AMAP에서 ‘해양쓰레기 및 미세플라스틱 모니터링을 위한 가이드라인(AMAP Monitoring Guidelines for Litter and Microplastics)’을 제출한 바 있는데, 향후 남극 환경에서의 해양쓰레기 및 미세플라스틱에 대해서도 유사한 대응 노력이 추진될 개연성이 큰 바, 주요 남극조약 및 관련 기구 가입국이자 세종기지와 장보고기지를 운영하는 우리나라에서도 이에 대한 선제적이며 책임있는 대응 및 노력이 요구되고 있다.

(4) 남극 연구기지 및 주변 환경 미세플라스틱 모니터링 중요성 증가

① 전술한 것처럼, 남극은 남극환류에 의해 해류를 통한 미세플라스틱 유입기여도는 상대적으로 작을 것으로 추정되며 남극 환경에서의 미세플라스틱의 주요 오염원으로 연구 활동(연구기지), 선박 활동 증가, 대형플라스틱 쓰레기의 풍화가 주된 원인일 것으로 추정되고 있다.

② 특히, 남극에서는 현재 30개 국가에서 82개의 연구기지를 운영하고 있는데 ASOC 보고서 또한 선박 활동과 함께 연구기지에서 배출하는 미처리 폐수/하수 등 인간 활동을 주요 지역오염원으로 지적하고 이에 따른 조사, 주변 환경에 대한 영향 연구, 배출 저감을 위한 기술의 도입 등의 필요성을 강조하고 있다(그림 5).

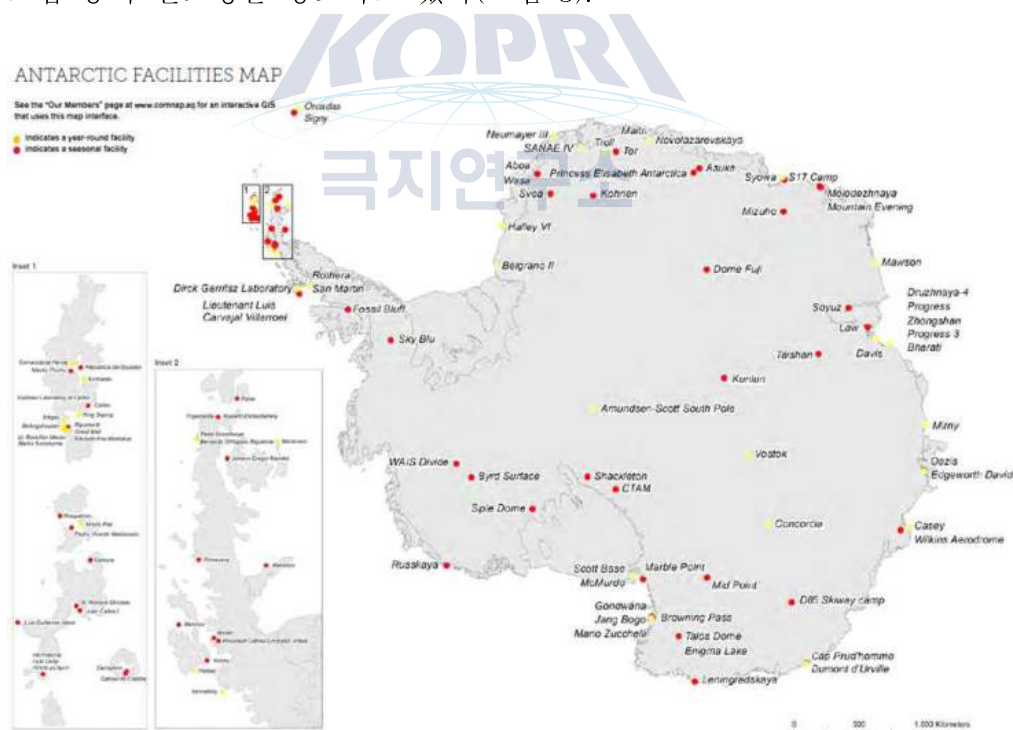


그림 5. 남극 연구기지 현황(COMNAP, 2017)

제2절 국내 연구 현황

2. 국내 연구 현황

(1) 지구적 차원의 환경문제로서의 미세플라스틱 문제에 대한 대응과 국제사회 노력

① 국내 연구진에 의한 미세플라스틱 연구의 대부분은 국내 육상환경 및 연근해 해양환경에 집중됐으며, 극지 환경 연구의 필요성의 증가에도 불구하고 관련 연구는 제한적으로 진행되었다.

② 남북극 환경에서의 미세플라스틱에 대한 연구는 국내 연구진으로는 유일하게 본 연구진(인천대학교)이 진행해 왔으며, 인천대학교-극지연구소 연구진이 최근 ‘전 세계 해양 표층에 떠 있는 미세플라스틱 양에 버금가는 28만여 톤의 미세플라스틱이 서북극해 계절해빙에 포획될 수 있다’는 연구 결과를 저명한 국제학술지에 게재한 바가 있다(Kim et al., 2021).

③ 남극 환경에 대한 연구는 본 연구진(인천대학교)이 기획 연구 성격의 ‘극지환경 중 미세플라스틱 오염 및 거동 기작 규명을 위한 기반 구축 연구(한국연구재단; 18개월)’를 진행한 바 있고 동 연구팀이 극지연구소의 ‘학연 극지연구 진흥프로그램(PAP)’ 연구과제(연구책임자: 서울대학교 황진환 교수)에 참여하여 세종기지 주변 마리안 소만에 관한 선행 연구를 진행하여 오염원으로서 연구기지의 중요성을 확인하였으나 1회성 조사 연구라는 한계가 있다.

④ 해당 선행 연구 결과는 세종기지 하수처리장에서 배출된 미세플라스틱의 대부분이 마리안 소만 안쪽으로 이동하여 축적될 가능성을 암시하였다(그림 6).

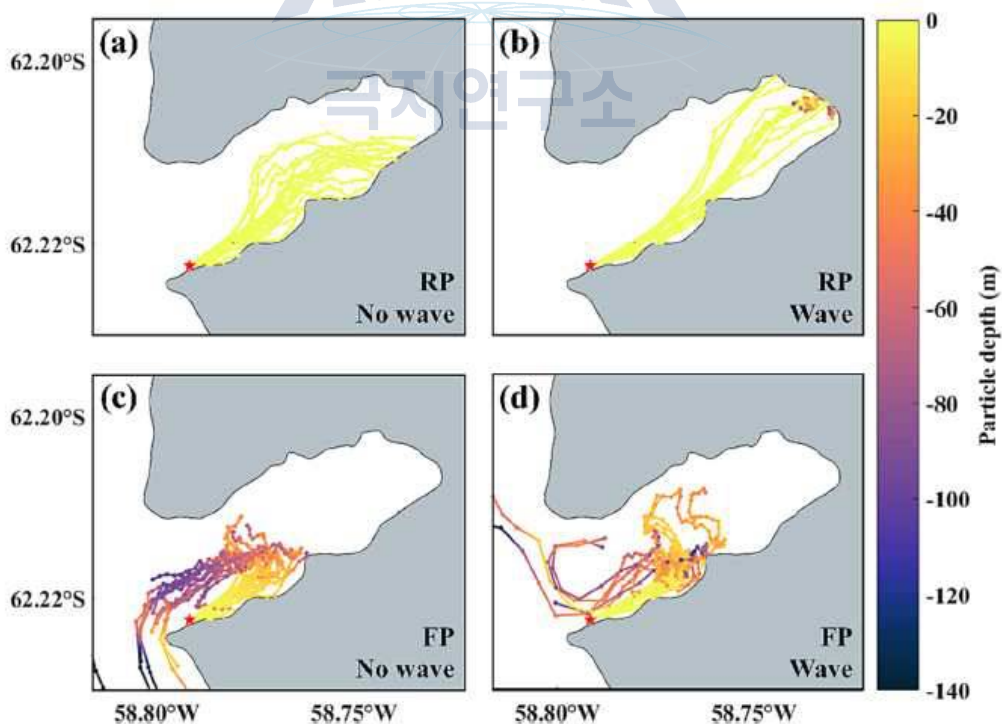


그림 6. 세종기지 하수처리장에서 배출된 미세플라스틱의 마리안 소만에서의 이동 경로에 대한 입자 추적 모델 결과(Kim et al., 2023)

⑤ 그러나, 남극 환경에서 미세플라스틱 연구 필요성과 중요성이 증가하고 있음에도 불구하고 연구 지역 접근의 어려움과 안정적인 연구 사업의 부재로 인해 현재까지 1회성 선행

연구만 진행됨으로 인해 남극 연구기지 및 주변 환경에서의 미세플라스틱 오염에 대한 실질적인 자료 구축이 부재한 상황이다.

⑥ 남극조약에 기반한 남극 환경 보호 및 보존을 위한 연구의 필요성 및 국제아젠다 수립의 요구가 증가함에 따라 우리나라가 운영하는 연구기지(세종기지, 장보고기지) 및 그 주변 환경에 대한 중장기 모니터링사업과 인근의 타 국가가 운영하는 연구기지에 대한 국제 협력 연구의 필요성이 중요하게 대두되고 있다.



제 3 장 연구개발수행 내용 및 결과

제1절 이론적, 실험적 접근방법

1. 기존 남극 환경 미세플라스틱 연구 문헌조사

(1) 매체별 미세플라스틱 조사 방법론 조사

남극 환경의 다양한 환경매체에 대해 미세플라스틱을 조사한 기존 연구 문헌들을 취합하여 각 문헌에서 제시한 주요 조사 방법론과 결과를 (표 1)에 요약하여 제시하였다. 조사된 문헌은 총 23편으로써, 해수 11편(표층해수 5편, 표하층해수 4편, 수직층해수 1편, 저층해수 1편), 저서 퇴적물 3편, 모래 퇴적물 1편, 눈 2편, 해빙 1편, 남극 생물 5편(저서생물 1편, 물범 배설물 1편, 펭귄 배설물 1편, 어류 1편, 크릴 1편)으로 구성된다. 해수의 경우, (가) 표층해수(5편)는 모두 선박을 이용하여 유사한 망목 크기(주로, 300-350 μm)를 갖는 네트(neuston, manta, hydroBios net)를 끌어서 채집하는 방법을 사용한 것으로서 주로 대기-해양 계면에 부유하는 큰 입자의 미세플라스틱을 채집하였으며, (나) 수직층해수(1편)는 표층부터 특정 수심까지의 해수층에 잔류하는 미세플라스틱을 한꺼번에 채집하는 방법으로 150 μm 공극을 갖는 동물플랑크톤 네트를 사용하였고, (다) 표하층해수나 (라) 저층해수는 niskin병을 이용하거나 펌프 시스템을 이용하여 특정 수심의 해수를 채취후 선상에서 여과하는 방법을 사용하였다. 따라서, 적용한 채집 방법에 따라 포획되는 미세플라스틱 입자크기가 달라질 수 있다. 퇴적물의 경우, 주로 수심에 따라 다른 방법을 채취하는데 (가) 해변퇴적물은 metal spatula를 사용하여 표층 1 cm의 퇴적물을 채취하였고 (나) 저서 퇴적물은 그랩채니기(혹은 diver)나 코어채취기(box corer, multicorer)를 사용하여 채취하였다. 강설(snow) 시료는 스테인레스강으로 만들어진 스푼이나 컵을 사용하여 채집하였는데 표층 눈(0-2 cm)을 채집하거나 혹은 20-40 cm 깊이의 눈을 채집한 연구로 나뉜다. 후자의 경우, 강설물을 고려하여 강설 시료 채취 시 오염을 최소화 하기위한 방법을 고려한 것으로 판단된다. 해빙(sea ice) 시료는 ice corer를 사용하여 채집하여 층을 나눈 후 각 층을 분석하였다. 남극 생물의 경우, (가) 물범이나 펭귄 배설물을 채취하여 배설물 속 미세플라스틱을 정성·정량하여 보고하거나 (나) 트롤네트로 채취된 크릴이나 어류의 소화관이나 생체에 잔류하는 미세플라스틱을 측정하는 방법으로 나눌 수 있다. 기존 문헌 연구 방법을 종합 평가하면, 대체적으로 각 환경 매체에 대해 일반적으로 적용되는 방법을 동일하게 사용하고 있음을 알 수 있다.

표 1. 남극 환경매체 대상 미세플라스틱 관련 문헌조사 결과 요약표

매체	채집 년도	채집 방법	채집 지역	MPs 농도 (particles/m ³)	우점 형태	분석 크기군 (μm)	참고 문헌
표층 해수	2016	neuston net(350 μm) 2-3knots,20-40min	From fremantle to Hobart	0.031(± 0.041)	only fragment	>350	Isobe et al. (2017)
	2018	HydroBios-net(300 μm) 1-2knots,30min	Around the Antarctic continent	-	-	>300	Kuklinski et al. (2019)
	2018	HydroBios microplastics net (300 μm) 2-3knots,30min	Adelaide Island	0.013	fragment	>100	Jones-Williams et al. (2020)
	2018	Manta net(330 μm) 2.5-3.5knots,15-20m in	Around the Antarctic Peninsula	0.008	only fragment	>330	Lacerda et al. (2019)
	2017- 2018	Manta net(330 μm) 4knots,10-15min	Around southeastern pole	0.10(± 0.14)	fiber> fragment	>330	Zhang et al. (2022)

			including Ross sea				
표하층 해수	2017, 2018, 2020	20L stainless steel Niskin bottles	Three fjords along the Western Antarctic Peninsula	0.579	fragment> fiber	>1	Graza et al. (2023)
	2010	pump system 5m 아래의 해수 채집 후 1 μm에 여과	The Ross Sea	0.17(±0.34)	fragment> fiber	>60	Cincinelli (2017)
	2017-2018	Pump system 0-0.5m 채집 후 330μm에 여과	Around southeastern pole including Ross sea	1.66(±1.20)	fiber> fragment	>330	Zhang et al. (2022)
	2019-2020	Pump system 0-0.3m 채집 후 1.5mm, 0.1mm에 여과	Antarctic (south of 40°S)	0.43	fragment> fiber	>100	Pakhomova et al. (2022)
수직층 해수	2010-2011	zooplankton net(150 μm) 수심 50m	Admiralty Bay	0.024(±0.045)	only fiber	>2000	Absher et al. (2018)
저층 해수	2017, 2018, 2020	20L stainless steel Niskin bottles	Three fjords along the Western Antarctic Peninsula	0.254	fragment> fiber	>1	Graza et al. (2023)
저서 퇴적물	2003	diving or box coring 0-3cm 채집	Adelaide Island	0.05 (n/ml)	fiber	>100	Reed et al. (2018)
	2015	Van Veen grab (표면 0.18m ²)	The Ross Sea	41.3 (n/m ²)	fragment	>300	Munari et al. (2017)
	2017, 2019	Multicorer	Antarctic Peninsula, South Sandwich Islands, South Georgia Peninsula, King George Island	1143.334 (±137.96) (n/kg)	fragment> fiber	>0.7 (but visual)	Cunningham et al. (2020)
모래 퇴적물	2018	Metal spatula 0-1cm 채집	Peninsula, King George Island	0.153 (n/ml)	fiber	>1	Perfetti-Bolaño et al. (2022)
눈 (강설)	2021	500 mL stainless-steel bottle, stainless-steel 스푼 사용 0-2 cm 채집	Across the Ross Island region of Antarctica	0.029	fiber>fragment	>1.2 (minimum size = 44)	Aves et al. (2022)
	-	800mL stainless steel tankard (ECOtanka™) 사용 20-40 cm에서 채집	Union Glacier, Schanz Glacier, and the South Pole	0.073 - 3.099 0.817(±0.310 SE)	fragment> fiber	>11	Rowlands et al. (2023)
해빙	2009	Ice corer	East Antarctic coastal	11710	-	>11	Kelly et al. (2020)
저서 생물	2015	Van Veen grab	The Ross Sea	1/individual	fragment> fiber	>33	Sfriso et al., (2020)
배설물 (물범)	2019	Metallic shovel을 사용하여 한 개체에서 배설 직후의 시료 채취	The South Shetland Islands	-	-	>500	Garcia-Garin et al. (2020)
배설물 (펭귄)	2009	Nitrile gloves을 사용하여 한 개체에서 배설 직후의 시료 채취 Plasticbag에 냉동보관	Bird Island, South Georgia, Signy Island, South Orkney Islands	0.23(±0.53) /individual	fiber> fragment	>60	Bessa et al. (2019)
어류	2020	Bottom trawling net (2.2 m wide,	The Ross Sea, The	1.227 /individual	fiber> fragment	>10	Zhang et al. (2022)

		0.65 m high, 6.5 m long, 20 mm mesh diameter)	Amundsen Sea				
크릴	2021	Mechanized trawler 2knots, 1-2h	the South Shetland Islands, the South Orkney Islands	0.245 /individual	fiber	>150	Zhu et al. (2023)

(2) 매체별 미세플라스틱 잔류 특성 및 오염 현황 조사

해당 문헌에서 제시하고 있는 각 매체에서의 미세플라스틱 잔류 특성과 오염 현황은 (표 1)에서 제시한 각 문헌에서의 조사 방법들과 함께 제시하였다. 해수에서의 미세플라스틱 오염도는 표층해수에서 0.008 - 0.1 개/ m^3 , 표하층해수에서 0.17 - 1.66 개/ m^3 , 수직층해수에서 0.024 개/ m^3 , 저층해수에서 0.254 개/ m^3 였다. 미세플라스틱 오염도는 채집한 네트의 망목 크기(net mesh size)나 여과지의 공극 크기(filter pore size)에 따라 채집된 입자 크기가 달라지므로 각 오염도를 직접 비교하는 것은 위험할 수 있다. 유사한 망목 크기(300 - 350 μm)를 갖는 네트로 채집된 표층해수와 표하층해수를 비교하면, 대체적으로 표하층해수가 표층해수보다 10배 정도 높은 것으로 보인다. 퇴적물의 경우, 각 문헌에서 보고한 미세플라스틱 오염도의 단위가 n/ml, n/ m^2 , n/kg 등으로 서로 달라서 오염도를 직접 비교할 수 없다. 따라서, 향후 퇴적물에 대한 미세플라스틱 오염도를 비교할 때는 단위환산이 가능하도록 조사할 필요가 있다. 예컨대, 특정 깊이(표층 2 cm)에 대해 특정 면적을 채취하고 분석 시 중량을 측정하면 단위환산이 가능할 것으로 판단된다. 눈(강설) 시료는 2개의 연구문헌이 있는데, Ross Island에서 채취한 눈 시료에서의 평균 오염도는 0.029 개/ m^3 이 검출된 반면 Union Glacier/Schanz Glacier/the South Pole에서 채취한 눈에서는 0.817 개/ m^3 이 검출되었다. 전자의 경우에는 1.2 μm 공극 크기를 갖는 여과지를 사용하였다고 하였으나 실제 측정된 최소 크기는 44 μm 인 반면, 후자의 경우에는 최소 분석 크기가 11 μm 였고 50 μm 미만의 입자들이 95%를 차지하고 있다. 따라서, 두 문헌상의 미세플라스틱 오염도 차이는 최소 분석 크기 한계 때문일 수도 있다. 해빙(sea ice)에서 관측된 미세플라스틱 평균 오염도는 11,710 개/ m^3 로서 동일한 분석 크기 한계(11 μm)를 갖는 Glacier/Schanz Glacier/the South Pole에서 채취한 눈 시료에서의 평균 오염도(0.817 개/ m^3)보다 10,000배 이상 높았다. 이러한 결과는 북극 등에서의 연구 결과와 동일하여 바다얼음이 얼 때 미세플라스틱을 포획하는 메카니즘에 대한 연구 필요성을 제기하고 있다. 남극 생물의 경우, 조사 대상 매체가 생체 소화관이든 배설물이든 관계없이 그리고 조사 대상 종에 관계없이 개체 당 0.245 - 1.23개의 미세플라스틱이 검출되어 상대적으로 균일한 오염 수준을 보였다.

2. 세종기지 및 주변 환경 사전 조사를 통한 시료 확보 및 조사 체계 및 조사 방법론 구축

(1) 연구기지 배출원 및 주변 환경 매체에 대한 조사 대상 매체 선정

본 연구의 최종 목표는 ‘남극 연구기지(세종기지) 및 주변 환경에서의 미세플라스틱의 배출 및 오염 현황에 대한 관측 자료 확보를 통해 연구기지 기반 인간 활동 영향을 평가하고 남극 미세플라스틱 연구 기반을 구축’하는 것이다. 남극 환경을 위협하는 미세플라스틱의 오염원으로써 연구기지를 포함한 인위적 활동이 유력한 오염원으로 추정되는 바, 연구기지 중심의 전반적인 활동 영향에 대한 모니터링이 추진될 필요가 있다. 연구기지의 영향을 파악하기 위해서는 연구기지에서부터 배출되는 미세플라스틱과 연구기지 주변의 다양한 환경 매체들에 대한 오염도 및 분포 특성에 대한 조사가 필수적이다. 연구기지에서부터의 배출은 하수를 통한 수서 환경으로의 배출과 육상 활동 및 시설물을 통한 대기 혹은 토양

등 육상환경으로의 배출로 구성되며, 대기로 배출된 미세플라스틱은 토양 및 수체로 침적되고 토양에 잔류하는 미세플라스틱은 눈과 얼음이 녹으면서 수체로 유출된다. 한편, 고산 지대 혹은 남북극과 같은 지역들에 대한 대기를 통한 이동 및 확산의 영향이 중요하게 대두되고 있음에도 불구하고 대기에 대한 연구는 최근까지 전 세계적으로도 조사 자료가 매우 제한적이다(Allen et al., 2022). 예컨대, 마리안 소만은 연구기지로부터의 수계 및 육상을 통한 배출, 대기를 통한 침적, 주변 맥스웰만으로부터의 유입 등으로부터 영향받을 수 있기 때문에 두 배출경로 및 그로 인한 주변 환경 모니터링이 필요함에도 불구하고 이와 같은 연구는 지금까지 전 세계적으로도 수행된 바가 없다. 그러나, 남극 연구기지의 자연 환경 특성상 아라온호 등 대형 연구선을 이용하지 않으면 상시적이고 광범위한 해양조사가 불가능 하기 때문에 연구기지 상주 인원이 시료 채취 수행 가능한 공간적 범위가 대상이 되어야 하고, 연구기지 운영 및 활동 인원의 변화(하계 및 동계)를 고려하여 배출의 시간적 변동성을 파악하는데 연구가 집중될 필요가 있다. 하여, 본 연구는 연구기지 영향 평가를 위해 조사 대상 매체를 ‘연구기지 배출원 매체’와 ‘주변 환경에 대한 조사 대상 매체’로 나누어 (표. 2)와 같이 선정하였다.

표 2. 연구기지 영향 파악을 위한 주요 선정 대상 매체

구분	분류	선정 조사 대상 매체
배출원	수체	하수처리장(유입수, 방류수)
	대기	기지 내 실내 대기(침적 시료, 부유 시료)
주변 환경	수체	기지 주변 표층해수, 해변퇴적물, (해저퇴적물)
	대기	기지 주변 눈(강설), 실외 대기 부유 시료
	육상	기지 주변 육상토양

(2) 연구기지 배출원 및 주변 환경 매체에 대한 조사 체계 및 방법론 구축

본 연구에서 대상이 되는 매체를 채취하기 위한 준비절차, 준비물, 현장에서의 시료 채취 방법 등에 대한 구체적인 내용을 표준절차로 하여 (그림 7)과 같이 작성하였다. 해당 매뉴얼은 극지연구소 협업 대상자(본 과제 연구책임자인 김지희 박사, 월동대 및 하계대 중 해당 시료 채취 참여자들과) 공유하였다.

남극 세종기지 미세플라스틱 시료채취 조사방법 표준절차(SOP)

2023. 10. 27

인천대학교 김승균 교수 연구실
(인천대학교 해양학과 해양환경화학분석 실험실 - INU
MECA LAB)

담당자 연락처: 김승균 교수 (010-5014-7328)

본 시료채취 SOP는 인천대학교 김승균 교수가 연구책임자로 수행한 연구과제들의 결과물입니다. 연구표준에 근거하여 평가 받는 후단 프로세스 사용을 권장합니다.

목차

1. 시료 채취 목적
2. 시료 채취 준비물
3. 시료 채취 절차 및 주의 사항
 - 3-1 하수처리장, 호입수
 - 3-2 하수처리장, 방류수
 - 3-3 부두 표층 해수
 - 3-4 육상 토양
 - 3-5 해변 퇴적물
 - 3-6 눈
 - 3-7 대기
4. 참고 사진들

1. 시료 채취 목록				
표준 4271 별 시료채취용 용수 및 시료용기				
시점	시료 종류	개수 (개)	비고	당 지기별 시료 수 (개)
2023-03-14(2023년) 1차 월동대	호입수	3	1) 월동 1차 (1차/월) 127개/127개	33-39
	방류수	2	1) 월동 1차 (1차/월) 127개/127개	
	부두 표층해수	2	1) 월동 1차 (1차/월) 127개/127개	
	연구기지 주변 육상 토양	5-10	1) 연구과제에 따라 달라짐 시료 사용이 많은 경우 표층 토양 3-4개 2) 기지로부터 일정 거리를 띄운 5-10개	
	주변 퇴적물	3-4	1) 대략 10cm 깊이에 표층 퇴적물 중 1개 2) 연구과제에 따라 달라짐 3) 월동 1차 월동대, 1차 월동대 표층 퇴적물 1-2개	
	연구기지 내 대기	8	1) 월동 1차 월동대 표층 퇴적물 중 1개 (1차/월) 127개/127개	
	연구기지 내 대기	8	1) 월동 1차 월동대 표층 퇴적물 중 1개 (1차/월) 127개/127개	
	연구기지 내 대기	8	1) 월동 1차 월동대 표층 퇴적물 중 1개 (1차/월) 127개/127개	
	연구기지 내 대기	8	1) 월동 1차 월동대 표층 퇴적물 중 1개 (1차/월) 127개/127개	
	연구기지 내 대기	8	1) 월동 1차 월동대 표층 퇴적물 중 1개 (1차/월) 127개/127개	
2023-03-14(2023년) 2차 월동대	호입수	3	1) 월동 1차 (1차/월) 127개/127개	40
	방류수	2	1) 월동 1차 (1차/월) 127개/127개	
	부두 표층해수	2	1) 월동 1차 (1차/월) 127개/127개	
	연구기지 주변 육상 토양	5-10	1) 연구과제에 따라 달라짐 시료 사용이 많은 경우 표층 토양 3-4개 2) 기지로부터 일정 거리를 띄운 5-10개	
	주변 퇴적물	3-4	1) 대략 10cm 깊이에 표층 퇴적물 중 1개 2) 연구과제에 따라 달라짐 3) 월동 1차 월동대, 1차 월동대 표층 퇴적물 1-2개	
	연구기지 내 대기	8	1) 월동 1차 월동대 표층 퇴적물 중 1개 (1차/월) 127개/127개	
	연구기지 내 대기	8	1) 월동 1차 월동대 표층 퇴적물 중 1개 (1차/월) 127개/127개	
	연구기지 내 대기	8	1) 월동 1차 월동대 표층 퇴적물 중 1개 (1차/월) 127개/127개	
	연구기지 내 대기	8	1) 월동 1차 월동대 표층 퇴적물 중 1개 (1차/월) 127개/127개	
	연구기지 내 대기	8	1) 월동 1차 월동대 표층 퇴적물 중 1개 (1차/월) 127개/127개	

그림 7. 세종기지 배출원 및 주변 환경 조사를 위한 표준절차 작성(예시)

해당 시료 채취는 ‘세종기지 하계 기간에 채취 가능한 1회성 채취 시료’와 ‘하계 및 동계기간을 포함하여 정기적으로 진행하는 정기모니터링 채취 시료’로 나누어 진행하였다(표 3). 현장상황을 고려한 가용한 조건에서 구축된 방법론을 적용하여 조사대상 매체별 시료채취를 진행하였으며, 해당 조사대상 매체들 채취지점 선정을 위한 전략은 연구기지 영향확인을 우선적인 목적으로 하여 (가) 수계배출원인 하수처리장의 경우 유입수와 방류수를 조사하여 처리효율을 확인하고자 하였으며, (나) 수계 주변환경 조사대상 매체로 선정된 해수는 매월 정기적인 모니터링이 가능하고 하수처리장 배출로 인한 영향을 확인하기 위해 부둣가 1개 지점에서 진행하였으며 해변퇴적물은 마리안소만 입구에서부터 접근가능한 안쪽까지에서 채취하였고, (다) 실내 대기는 채류 인원의 활동 양상을 반영하여 침실, 식당, 연구실험실로 나누어 진행하였으며, (라) 실외 대기의 간접 반영매체로써 선정된 눈(강설)은 기지 인근과 기지에서 떨어진 곳 3지점에서 채취하였고, (마) 육상토양은 기지주변부터 먼 곳까지를 포함하여 채취하였음.

표 3. 매체별 채취 시료 목록

구분	경로	선정 조사대상 매체	조사지점	조사정점 수	비고
배출원	수체	하수처리장(유입수)	정기모니터링	하수처리장 1개	• 월동대원 협조를 통해 채취 예정
		하수처리장(방류수)	정기모니터링	하수처리장 1개	• 월동대원 협조를 통해 채취 예정
	대기	실내 대기(침적 시료)	정기모니터링	실내 3개	• 월동대원 협조를 통해 채취 예정 • 침실, 식당, 연구실험실(3곳)에서 채취 예정
		실내 대기(부유)	정기모니터링	실내 3개	• 월동대원 협조를 통해 채취 예정 • 침실, 식당, 연구실험실(3곳)에서 채취 예정
주변 환경	수체	기지 주변 표층해수	정기모니터링	부둣가 1개	• 월동대원 협조를 통해 채취 예정
		해변퇴적물	1회성 모니터링 (하계 1회)	해변 6개 정점	• 하계 및 월동대원 협조를 통해 채취 예정
		해양퇴적물	1회성 모니터링 (하계 1회)	-	• 하계 및 월동대원 협조를 통해 채취 예정
	대기	기지 주변 강설(눈)	정기모니터링 혹은 불필요	기지 및 주변 환경	• 하계 및 월동대원 협조를 통해 채취 예정 • 토양 및 실외대기 조사 불능으로 인한 대안 매체 측면에서 채취 예정
		기지 주변 부유	정기모니터링	기지 주변 1개 정점	• 월동대원 협조를 통해 채취 예정
	육상	기지 주변 토양	1회성모니터링	기지 및 주변 9개 정점	• 하계 및 월동대원 협조를 통해 채취 예정

제2절 연구 내용 및 결과

1. 연구기지 기반 인간 활동 영향 종합 평가

(1) 1 - 3차년도 연구 결과 종합을 통한 매체별 오염도 파악

세종기지 주변 수계환경은 연구기지 활동으로 인한 영향을 직접적으로 반영할 수 있는 환경으로 하수처리장(King Sejong Station-Wastewater treatment plant; KSS-WWTP)을 통해 배출된 미세플라스틱이 인근 수계로 유입되어 인근 표층해수 및 해변퇴적물, 해저 표층퇴적물로 확산 및 정착되는 기작을 파악하는데 유리한 환경조건을 가지고 있다. 이번 연구에서 수계환경의 오염도 파악을 위해 수계환경의 흐름에 따라 하수처리장 유입수(WWT P-WI)와 유출수(WWTP-WE), 부두 표층해수(DSW), 해변퇴적물(BS), 마리안 소만 해양 표층퇴적물(MSS)을 선정하여 채집 및 분석을 진행하였다(그림 8). 이러한 정점 구성 및 매체 선정은 연구기지 활동으로 기인한 미세플라스틱의 확산 경로와 정착되는 과정을 파악할 수 있도록 설계하였다.

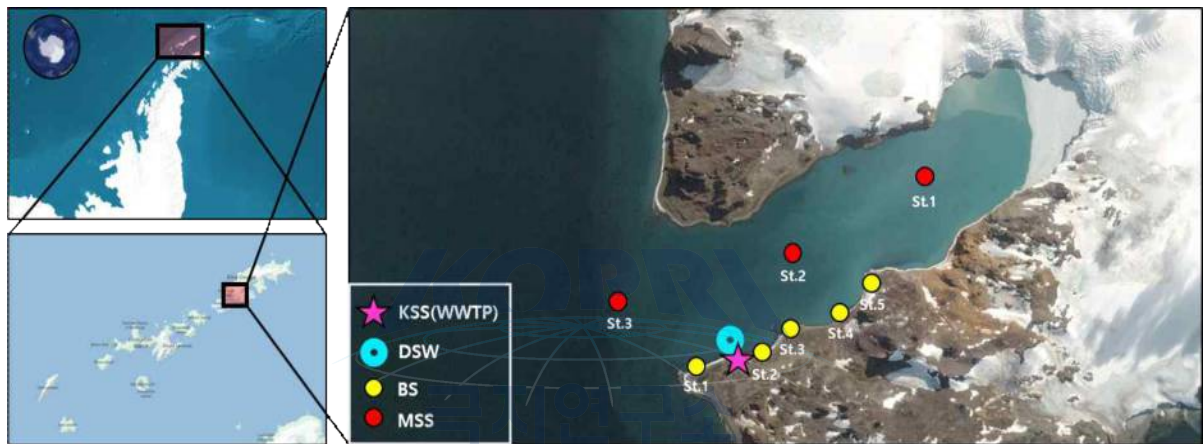


그림 8. 세종기지 인근 수계환경 시료 채취 정점

하수처리장은 연구기지 활동으로 발생하는 모든 생활하수 등이 유입·배출되는 곳으로 기지 기원 오염원의 가장 중요한 곳이라고 할 수 있다. 하수처리장을 통해 배출된 미세플라스틱은 해류의 흐름을 통해 부도가 표층으로부터 만의 가장 안쪽 혹은 만의 바깥쪽까지 이동하며, 그 과정에서 해변퇴적물에 축적되거나 혹은 소만의 표층퇴적물에 침강 후 침적될 수 있다. 수계환경의 모든 시료 분석은 매체 간 상호 비교를 위해 2023년에 채취한 시료를 대상으로 진행하였는데, 2023년 1월, 4월, 7월, 10월 하수처리장 유입·방류수와 부두 표층해수를 분석하였으며, 해변퇴적물은 2023년 1월 모든 정점 시료를 분석하였고, 마리안 소만 해양퇴적물은 현지 현장 시료 채취 한계로 인해 불가피하게 2024년 1월에만 채집 가능하여 해당 시료를 분석하였다(표 4).

세종기지 인근 육상환경의 경우 육상 눈(강설), 육상토양, 실내 대기 침적, 실외 대기 부유(부유) 시료를 포함하며, 연구기지 운영에 기인하는 것뿐만 아니라 남극의 다양한 기상인자(강우, 강설, 기온, 바람 등)로 인한 장거리 이동에 따른 오염도를 동시에 이해할 수 있는 중요한 매체이다. 이번 연구에서 육상환경에 대한 오염도 평가를 위해 기지 인근의 정점부터 원거리까지 정점을 선정하였는데, 눈 시료는 대기 중에 존재하는 미세플라스틱이 강설에 의해 육상으로 침적되어 연구기지 활동 기반 오염원인지 혹은 장거리 이동에 의한 오염인지 파악하기 위해 기지 인근부터 8km에 달하는 먼 거리까지 채취 정점을 선정하였다(다만, 눈 시료의 경우 실외 대기 시료 미채집 시 대안으로 분석하고자 채취한 관계로

이번 연구에서는 분석하지 않음). 육상토양의 경우에도 연구기지에서 기인한 미세플라스틱이 장기간 잔류하거나 축적되었을 가능성이 높은 매체로 연구기지에서 기인한 오염을 파악하기 위해 기지 인근부터 도로 인근, 기지로부터 먼 곳까지 정점을 선정하였다. 실내 대기 침적의 경우 연구기지 내부에서 인원이 주로 활동하는 공간인 실험실, 식당, 침실에서 채집을 진행하여 기지 내부의 공간별 오염도 파악과 기지 내부에서 발생하는 오염을 정성·정량적으로 파악할 수 있도록 선정하였다. 실외 대기 부유 시료의 경우 연구기지 외부 대기 중에 부유하는 미세플라스틱을 포집하여 대기 중에 존재하는 미세플라스틱의 오염도를 파악할 수 있도록 하였다. 이러한 매체 및 공간적 지점 선정은 연구기지 활동으로 기인한 미세플라스틱 오염과 더불어 장거리 이동에 의한 오염도도 함께 파악할 수 있도록 설계한 것이다(그림 9). 육상환경의 시료 분석은 매체 간 상호 비교를 위해 2023년 시료를 대상으로 진행하였으며, 격월 혹은 매월 채집된 시료를 대상으로 진행하였다. 다만, 육상환경 매체들 중 실외 대기 시료 채집이 불가능할 경우를 대비하여 대기 기원을 반영할 수 있는 눈(강설) 시료를 채집했으나, 실외 대기 부유 입자를 채집할 수 있는 장비의 설치 및 운영이 2024년에 진행됨에 따라 눈 시료는 제외하고 2024년에 격월로 채집된 실외 대기 부유 입자 시료를 대상으로 분석을 진행하였다(표 4). 한편, 실내 오염에 대한 모니터링을 위해 실내 침적 시료 외에 실내 대기 부유 시료를 채집했으나 연구 계획 시 ‘실내 부유 시료 채집이 불가능할 경우’를 가상하여 ‘실내 침적 시료 채집을 진행하여 분석’한 관계로 본 연구에서 ‘실내 부유 시료 분석’은 제외하였다. 본 연구에서 미분석된 매체들에 대해서는 향후 논문 작성을 위해 필요하다고 판단되면 선정된 시료들을 대상으로 정성·정량 분석을 진행할 계획이다.



표 4. 세종기지 1 - 3차년도 채집 시료 목록(● 채취 완료, 분석 완료; ○ 채취 완료 X 채취 불가능 (현지 상황))

조사매체		년도	수행 월											
			1월	2월	3월	4월	5월	6월	7월	8월	9월	10월	11월	12월
수 계 환 경	하수처리장 유입·방류수	2023	●	○	○	●	○	○	●	○	○	●	○	○
		2024	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
		2025	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	X	X
	부두 표층해수	2023	●	○	○	●	○	○	●	○	○	●	○	○
		2024	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
		2025	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	X	X
	해변퇴적물	2023	●											
		2024	○											
		2025	○											
	마리안 소만 해양 표층퇴적물	2023												
		2024	●											
		2025												
	마리안 소만 해양 표층해수	2023												
		2024	○											
		2025												
육 상 환 경	눈	2023	○	○	X	○	○	○	○	○	○	○	○	○
		2024	○		○		○		○		○		○	
		2025	○		○		○		○		○		X	
	육상토양	2023	●											
		2024	○											
		2025	○											
	실내 대기 침적	2023	●		●		●				●			
		2024	○		○		○		○		○		○	
		2025	○		○		○		○		○		X	
	실내 대기 부유	2023												
		2024	○		○		○		○		○		○	
		2025	○		○		○		○		○		X	
	실외 대기 부유	2023												
		2024	●	○	●	○	●	○	●	○	●	○	●	○
		2025	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	X	X

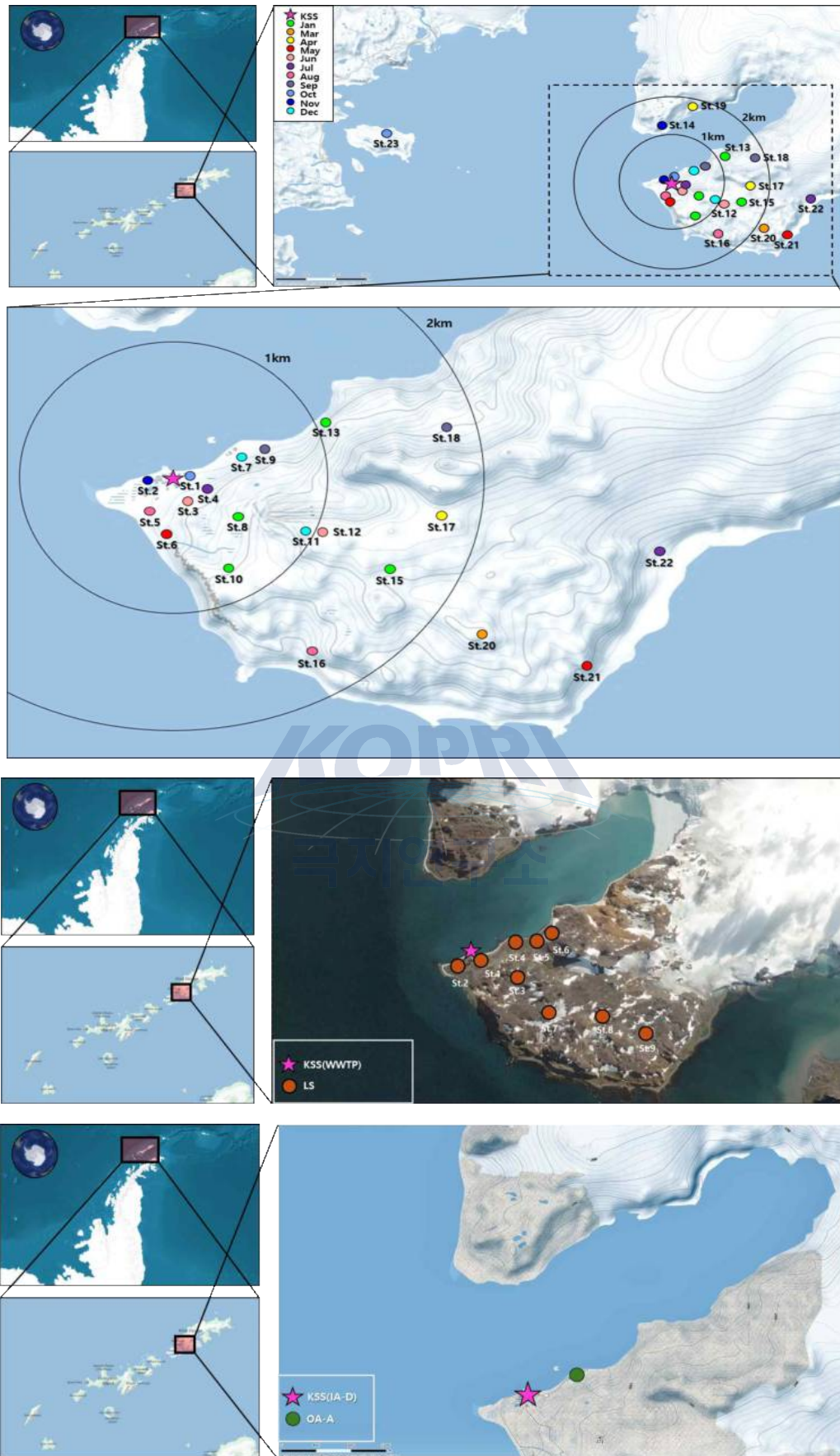


그림 9. 세종기지 인근 육상환경 시료 채집 정점: (상) 눈 채취 정점, (중) 육상토양 채취 정점, (하) 실내외 대기 채취 정점. 본 연구에서 실외 대기 시료와 실내 침적 시료가 분석됨에 따라 눈 시료 및 실내 부유 시료는 분석에서 제외

(2) 연구기지 인근 수계환경 매체별 오염도 파악

(2-1) 수계환경 매체 미세플라스틱 오염도

(2-1-1) 하수처리장 유입수 및 방류수

하수처리장은 세종기지 인근 수계환경을 오염시키는 중요한 점오염원으로 작용할 수 있다. 특히, 연구기지의 하수처리장은 체류 인원의 변동과 계절적 요인에 따라 하수 발생량 및 처리 효율의 차이를 발생시킬 수 있기 때문에 하수처리장의 하수에 대한 정기모니터링이 중요하다. 각 시료 채취 시점에서의 하수처리장의 유입수와 방류수에 대한 동시 조사는 각 시점의 하수처리 효율을 확인할 수 있어 향후 시설 개선에 활용할 수 있고, 최종적으로 처리된 하수의 방류를 통해 인근 수계(마리안 소만)로 유입되는 오염물질(본 조사에서는 미세플라스틱)의 유입부하량을 산정하는데 활용될 수 있다.



그림 10. 세종기지 하수처리장 유입수 및 방류수 채취 지점 및 예상 배출구

연구기지(세종기지)에서는 시설동에서 발생된 하수를 모아 처리한 후 파이프라인을 통해 방류하기 때문에 유입수와 방류수는 시설동에서 채취하였으며, 최종 처리된 하수는 부둣가 좌측으로 배출되고 있다(그림 10).

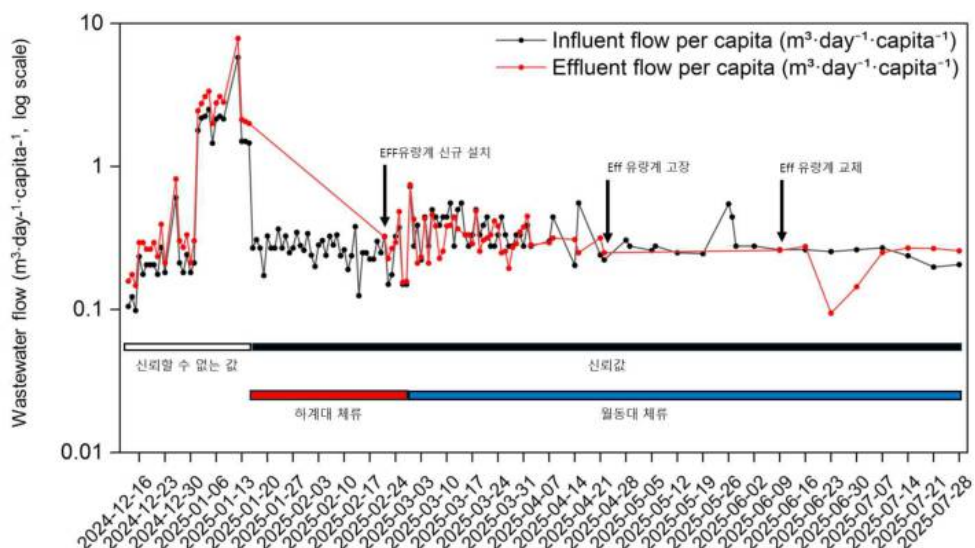


그림 11. 세종기지 하수처리장 1인당 일일 하수 발생량 현황

세종기지의 하수 발생량은 그동안 유량계의 불안정한 작동으로 인해 자료 신뢰성이 부족한 측면이 있었다. 그러나 2025년 2월에 유량계의 교체 및 신규 설치가 진행되면서 비교적 신뢰할 수 있는 유량값이 확보되었다. 다만, 일부 시기에 유량계의 잦은 고장이 발생하면서 이상값이 발견되었기 때문에 신뢰 가능한 구간만을 선별하여 분석에 활용하였다(그림 11).

최근 월동대원과의 논의를 통해 확보된 세종기지 하수처리장의 처리 계통도는 [하수유입 ⇒ 유입수조 ⇒ 정화조(정화처리 ⇒ 슬러지 침전) ⇒ 소형 최종 방류수조 ⇒ 외부 최종 방류]로 구성되어있으며, 유입수는 유입수조(그림 12의 스크린조)에서 채취되었으며 방류수는 정화조(그림 12의 방류조)에서 채취되었다. 하수처리장 처리를 통한 미세플라스틱 처리효율 및 주변 수계로의 배출량 산정을 위해서는 ‘유입수’와 ‘최종방류수’에서 채취된 시료가 분석되어야 함에도 불구하고, 최초 시료 채취 시 원인 불명의 이유로 최종 방류수조(그림 12의 최종방류조)가 아닌 방류조에서 방류수가 채취되어 현재까지 지속되어 왔다. 결과적으로, 방류수의 미세플라스틱 농도는 최종방류수의 농도보다 높을 것으로 추정됨에 따라 미세플라스틱의 처리 효율은 과소평가되고 반면 최종방류량은 과대평가될 수 있다. 현재, 월동대원과의 긴밀한 협의를 통해 방류수의 정확한 채취 지점을 확인하였으며, 최종 방류 수조에서 2024년 10월부터 2025년 4월까지 채취 완료하였다(그림 12). 하수처리장의 유입수와 방류수 시료들(각각 5 L)은 현장에서 20 μ m 망목 크기를 갖는 네트에 여과하여 1 L 이내로 농축하여 보관 및 운송되었다.

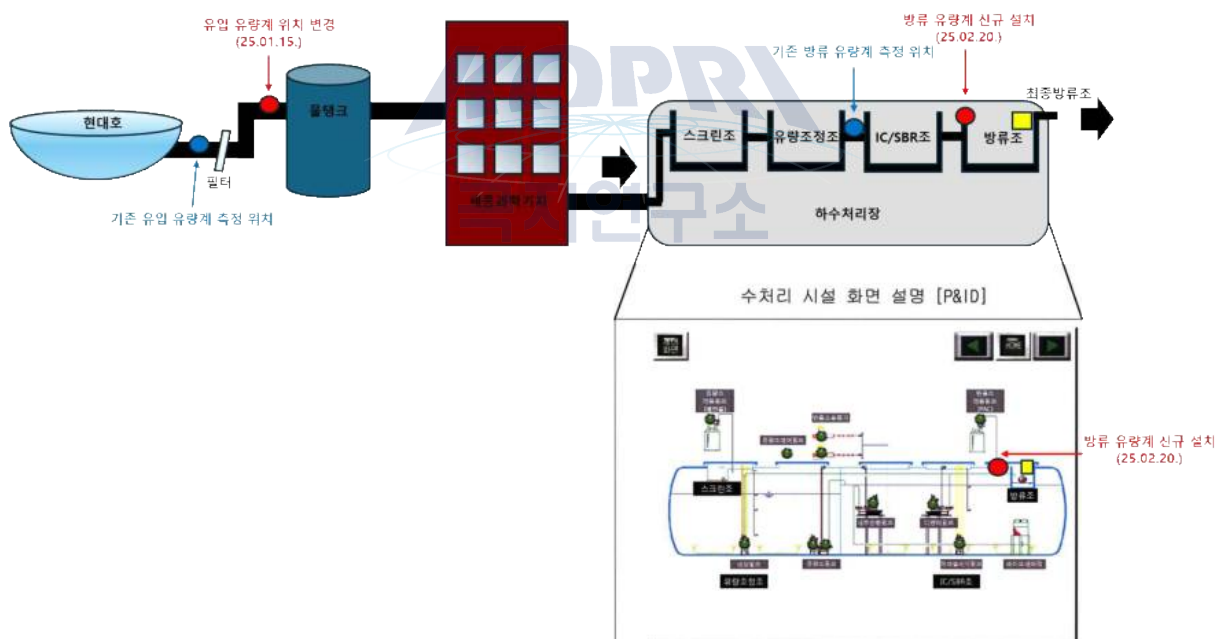


그림 12. 세종기지 하수처리장 모식도

2023년 1월, 4월, 7월, 10월에 분석된 하수처리장 유입수 및 방류수에서의 미세플라스틱(0.02 - 5 mm) 농도를 (그림 13a)에 제시하였다. 유입수에서의 미세플라스틱 농도는 평균적으로 $289,300 \pm 229,115$ 개/ m^3 를 보였는데, 이 오염도는 같은 크기 범위에 대해 최근 우리나라 도심지역의 하수처리장 유입수에 조사한 오염도(평균 114,000 개/ m^3 ; Kim et al., 2022)와 크게 다르지 않지만 평균적으로는 2배 이상 높은 수준이었다. 세종기지 하수처리장에서의 월별 오염도는 동계대와 하계대가 모두 함께 활동하여 기지 체류 인원이 가장 많았던 1월(67명)에 가장 높은 오염도($534,400$ 개/ m^3)를 보였고, 월동대(18명)만 체류했던 4월과 7월에는 1월보다 2배 정도 감소하는 경향을 보였다. 한편, 월동대만 체류했던 10월

의 유입수에서 미세플라스틱 농도가 다시 급증했는데 이 결과는 후술할 실내 대기 침적 시료에서의 미세플라스틱 오염도와 유사한 경향이였다. 즉, 체류 인원이 감소했음에도 불구하고 9월에 실내 환경에서 다량의 미세플라스틱이 발생했고 그 결과로 하수처리장으로 유입된 유입수에서의 농도 또한 증가한 것으로 판단된다. 이것은 체류 인원수와 무관하게 실내 환경에서의 세탁량 증가 등이 잠재적으로 중요한 요인일 수 있음을 의미한다.

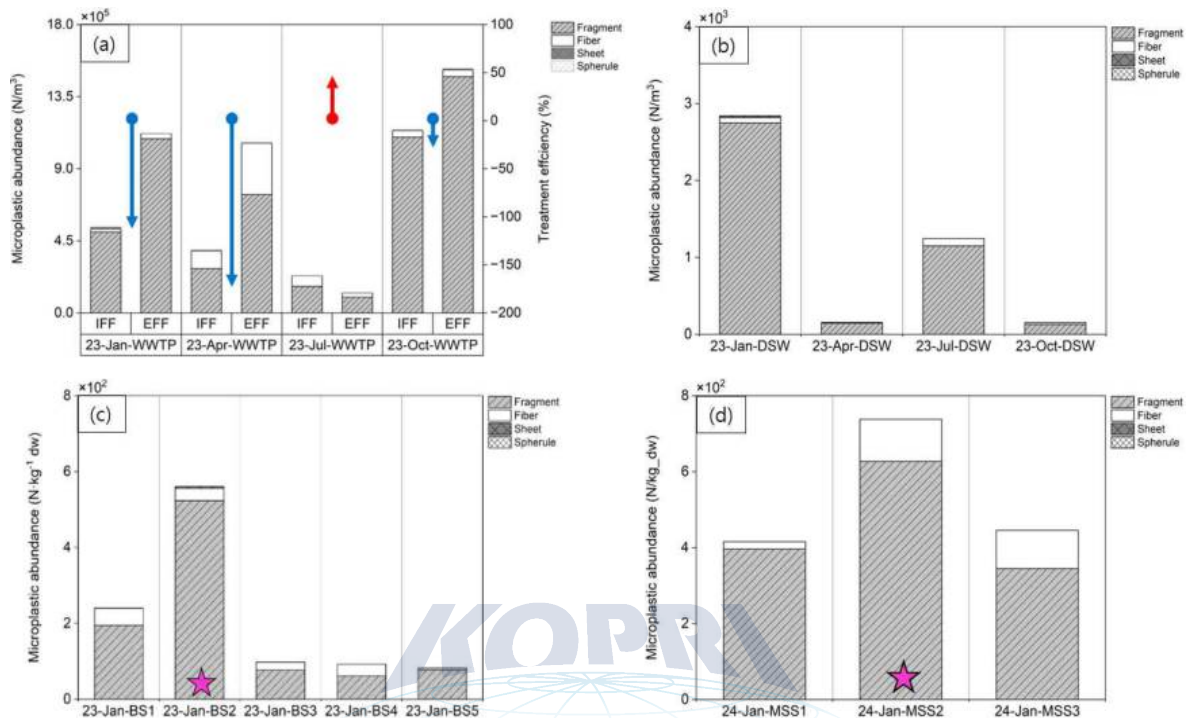


그림 13. 세종기지 수계환경 매체들에서의 미세플라스틱 농도: (a) 하수처리장 유입수 및 방류수, (b) 부둣가 표층해수, (c) 해변퇴적물, (d) 해양퇴적물

체류 인원의 감소폭과 다르게 유입수에서의 미세플라스틱 농도의 감소폭이 적은 것은 발생한 하수량과 관련된 농축 효과일 수 있다. 방류수에서의 미세플라스틱 농도는 평균적으로 $577,650 \pm 597,010$ 개/m³를 보여 유입수에서의 오염도보다 2배 정도 높은 수준을 보였다. 통상 하수처리장에서의 오염물질(미세플라스틱 포함)은 정화 처리 이후 최종방류수에서의 농도는 크게 감소하는 경향이 있는데, 미세플라스틱과 같은 입자성 물질은 주로 응집·침전되어 슬러지로 침강한 후 탈수케익으로 만들어져 제거가 된다. 그러므로, 대부분의 도심 하수처리장에서 이 과정을 통한 유입수 대비 방류수에서의 미세플라스틱 제거 효율은 90% 이상인 것으로 알려져 있다. 그러나, 본 조사에서 세종기지 하수처리장 방류수에서의 미세플라스틱 농도는 유입수에서보다 평균적으로 2배 가량 높게 관측되어 현재 하수처리장에서의 처리 효율이 좋지 않음을 의미한다. 현재 세종기지 하수처리장 하수처리 계통도에 따르면, [하수유입 $\Rightarrow$ 유입수조 $\Rightarrow$ 정화조(정화처리 $\Rightarrow$ 슬러지 침전) $\Rightarrow$ 소형 최종방류수조 $\Rightarrow$ 외부 최종방류]로 구성되어있으며, 정화조에서 응집침전 후 하수가 정화조의 일정 수위를 넘는 상등액이 소형 최종 방류수조를 통해 외부로 방류되는 것으로 알려지고 있다. 이러한 시스템으로 인해 최종 방류수조로 흘러넘치는 상등액의 방류(최종방류수의 방류)는 간헐적이기 때문에 수동으로 모니터링하여 최종 방류수조로 넘어가는 방류수를 채취해야 하는 문제가 발생한다. 결과적으로, 본 조사에서 월동대는 정화조에서 흘러넘치지 않은 상태의 표층 정화수를 최종방류수로 채취한 것으로 확인된다. 따라서, 정화조의

수위가 낮을 때(즉, 슬릿지가 다량으로 농축된 상태)와 수위가 높을 때(즉, 슬릿지가 정화조 하단에 위치하고 상대적으로 깨끗한 하수가 상층에 위치할 때) 채취된 방류수에서의 미세플라스틱 농도가 다를 수 있다. 본 조사 연구 결과의 유입수에서보다 방류수에서의 미세플라스틱 농도가 상대적으로 높은 것은 고농도로 미세플라스틱을 농축한 슬릿지가 응집·침전되지 않고 재부유했거나 혹은 수위가 낮아 농축된 상태의 시료가 채취되었을 가능성을 의미한다. 이것은 채취 시점과 최종방류수로의 월류 시점이 서로 달라져 발생한 것으로 추정된다. 방류수에서의 월별 오염도는 유입수에서의 오염 경향과 유사하게 1월 > 4월 > 7월로 나타났으나, 1월 및 4월과 다르게 7월에는 유입수(231,600 개/m³)에 비해 방류수(125,800 개/m³)에서의 농도가 2배 가량 낮은 값을 보여 채취 시점의 하수처리장의 상태(즉, 수위)가 차이를 발생하는 중요한 인자일 수 있음을 보여준다. 그럼에도 불구하고, 여전히 7월의 유입수 대비 방류수에서의 농도가 50%의 처리 효율을 보였다는 것은 세종기지 하수처리장의 슬릿지가 완전히 침강하여 제거되지 못하고 재부유 등을 통해 최종방류수를 거쳐 인근 수계로 유입될 수 있음을 의미한다. 특히, 하계대(12 - 1월)와 동계대(3 - 10월)의 체류 인원수 차이에도 불구하고 1인당 하수 발생량에는 크게 차이를 보이지 않았다. 따라서, 2025년 1월 16일부터 현재까지의 1인당 하수 발생량을 대푯값으로 적용하여 연간 미세플라스틱 유입·배출량을 산출하였다. 배출량 산정은, 각 계절을 대표하는 월[1월(12 - 2월), 4월(3 - 5월), 7월(6 - 8월), 10월(9 - 11월)]의 미세플라스틱 오염도가 해당 계절의 미측정 월의 농도를 대변한다고 가정하고, 관측된 농도, 1인당 하수 발생량, 월별 체류 인원을 고려하여 계산하였다. 추정결과, 미세플라스틱의 하수처리장으로의 유입량은 연간 약 1.77×10^9 개였고, 하수처리장을 통한 마리안 소만으로의 배출량은 연간 약 2.92×10^9 개로 산출되었다. 이것은 하수처리장 방류를 통한 기지 인근 수계환경으로의 미세플라스틱 유입이 주요 오염원이 될 수 있음을 시사하는 바이다.

(2-1-2) 부둣가 표층해수

연구기지 인근 수계인 마리안 소만의 해수는 하수처리장으로부터 배출되는 미세플라스틱의 오염을 직접 반영할 수 있기 때문에 지속적인 모니터링이 필요하다. 마리안 소만 내의 해수층 내 미세플라스틱 오염도는 해류 및 조류의 흐름과 바람의 방향에 의해 영향을 받기 때문에 내만 전체를 대상으로 모니터링하는 것이 타당하다. 그러나, 현실적 조건(선박 이용의 한계, 동계 시기 조사 불가능한 기상 및 해상조건 등)상의 한계로 인해 소만 전체를 대상으로 정기모니터링을 수행하는 것은 불가능하다. 하여, 월동대가 쉽게 접근 가능하고 정기적으로 채취가 가능한 부둣가를 정기모니터링 채취 지점으로 선정하였다(그림 10). 해당 채취 지점은 하수처리장 배출구와 인접해 있어 실제 마리안 소만 전체 평균 오염도보다 더 높은 가능성이 있다. 해당 부둣가 지점에서 매월 1회씩 표층해수 200-500 L를 펌프를 이용해서 채취하여 현장에서 20 μ m 망목크기를 갖는 네트에 여과하여 1 L 이내로 농축하여 보관/운송된다. 인근 수계 정기모니터링 정점인 부둣가에서 2023년 1월, 4월, 7월, 10월에 채취하여 분석한 표층해수에서의 미세플라스틱(0.02 - 5 mm) 농도를 (그림 13b)에 제시하였다. 미세플라스틱 농도는 평균적으로 $1,099 \pm 1,269$ 개/m³를 보였는데, 이 오염도는 세종기지 하수처리장 유입수와 방류수의 평균 농도보다 각각 약 300배와 500배 낮은 값이다. 이것은 하수처리장으로부터 배출되는 하수가 인근 수계의 중요한 오염원이 될 가능성을 암시한다. 다만, 농도가 높더라도 배출되는 하수량이 적으면 그 기여도가 낮을 수 있기 때문에 인근 수계로 유입되는 하수를 통한 유입량을 산정하기 위해서는 반드시 하수 방류량(혹은 하수 발생량) 자료의 확보가 필수적이다. 월별 표층해

수의 오염도는 하수처리장 방류수에서의 오염도가 높았던 1월에 2,840 개/m³으로 가장 높았으며 4월-10월 기간에는 155 - 1,245 개/m³으로 계절별 변동폭이 10배 정도인 것으로 나타난다. 표층해수에서의 미세플라스틱 오염도는 해상 기상 조건, 날씨, 오염원의 영향 등에 의해 복합적으로 영향을 받기 때문에 분석 자료의 해석에 주의가 필요하다. 다만, 부둣가 표층해수가 하수처리장 최종방류구 인근에 위치해 있고 하수처리장 방류수에서의 농도가 높았던 1월에 상대적으로 표층해수에서의 농도가 높았던 점은 전술한 하수처리장의 처리 효율이 좋지 못하다는 것과 인근 수계가 하수처리장 방류수의 영향을 반영한 결과로 유추할 수 있다.

(2-1-3) 해변 퇴적물

연구기지 인근 마리안 소만에서 2023년 1월에 채취하여 분석한 해변퇴적물에서의 미세플라스틱(0.02 - 5 mm) 농도를 (그림 13c)에 제시하였다. 미세플라스틱 농도는 건중량 기준으로 평균 215±204 개/kg 값을 보였는데, 미세플라스틱 오염도의 공간 분포는 BS2 > BS1 > BS3 > BS4 > BS5의 순으로 높았다. 특히, 하수처리장 방류구와 인접한 BS2 정점에서 미세플라스틱 농도가 가장 높게 나타났고 B2와 상대적으로 가까운 B1지점에서 2번째로 높은 농도가 관측된 것은 인근 수계의 미세플라스틱 유입에 연구기지 하수처리장에서 배출되는 방류수의 영향이 클 수 있음을 의미한다. 마리안 소만 안쪽 정점들(BS3 - BS5)은 하수처리장 방류구 인근 정점들(B1, B2)에서보다 평균적으로 4배 정도 낮은 값을 보인 상태로 세 정점 모두에서 대체적으로 유사한 오염도를 보였다. 이러한 분포는 비록 하수처리장에서 떨어져 있더라도 표층해수에 잔류하는 미세플라스틱이 만조 시 해변퇴적물에 증착할 수 있음을 보여준다. 이전 본 연구진 및 서울대 연구팀이 마리안 소만 하수처리장에서 배출된 미세플라스틱이 해류, 조류, 바람 등의 영향으로 마리안 소만에서 이동·확산을 거쳐 해변에 증착할 수 있음을 보인 바가 있다(Kim et al., 2023). 한편, 해변퇴적물에 잔류하는 미세플라스틱은 인근 육상에서 발생한 미세플라스틱, 대형 플라스틱 쓰레기의 풍화로부터 발생한 미세플라스틱, 대기로부터 침적된 미세플라스틱 등이 표면 유출수를 통해 유입될 수도 있다. 그러나, 후술할 기지 혹은 도로가 인근 육상토양에서 관측된 오염도에 비해 10-50배 낮은 값이 해변퇴적물에서 관측되어 육상으로부터의 직접 유입보다는 마리안 소만 표층해수로부터의 증착이 주요 원인인 것으로 추정된다.

(2-1-4) 해양 표층퇴적물

연구기지 인근 마리안 소만에서 2023년 1월에 채취하여 분석한 해양 표층퇴적물에서의 미세플라스틱(0.02-5 mm) 농도를 (그림 13c)에 제시하였다. 미세플라스틱 농도는 건중량 기준으로 평균 533±178 개/kg 값을 보였는데, 미세플라스틱 오염도의 공간 분포는 MSS2 (ST2) > MSS1 (ST1) ≈ MSS3 (ST3)의 순으로 높았다. 특히, 하수처리장 방류구와 가장 인접하고 있지만 마리안 소만의 외부인 맥스웰만과 인접한 MSS1와 마리안 소만의 가장 안쪽 정점인 MSS3에서보다 마리안 소만의 중간지점인 MSS2에서의 농도가 2배 이상 높은 것은 하수처리장에서 방류된 미세플라스틱이 주로 안쪽으로 이동하여 침강하여 해저퇴적물에 축적될 가능성을 의미한다. 전술한 해변퇴적물에서의 미세플라스틱 농도(평균 = 205 개/kg)와 해양 표층퇴적물에서의 미세플라스틱 농도가 2배 정도밖에 차이 나지 않는 것은 주목할 만하다. 해변퇴적물은 주로 큰 입자로 구성되어 있어 함수율이 3.8% 정도로 분석된 시료의 대부분이 광물입자로 구성된 반면 해양 표층퇴적물은 상대적으로 고운 입자와 높은 함수율(49%)로 구성되어 있다. 결과적으로, 두 퇴적물의 건중량 단위의 농도가 2-3배 차이를 보인다는 것은 해변퇴적물에서의 미세플라스틱 입자 수가 더 많을 수 있음을 의미한다. 따라서, 해수층에 부유하는 미세플라스틱이 해저면으로 침강하는 것 이상으로

조류를 통해 해변퇴적물에 증착하는 미세플라스틱 또한 무시할 수 없음을 의미한다. 이러한 결과를 종합했을 때, 세종기지 하수처리장에서 배출된 미세플라스틱은 부두 표층해수를 거쳐 해변 퇴적물과 마리안 소만 표층퇴적물까지 유기적인 영향을 미치고 있으며 이는 하수처리장이 연구기지 인근 수계의 주 오염원임을 시사한다.

(2-2) 수계 환경 매체 미세플라스틱 폴리머 구성비

(2-2-1) 하수처리장 유입수 및 방류수

2023년 1월, 4월, 7월, 10월에 조사된 유입수와 방류수에서의 미세플라스틱의 폴리머 재질 구성비를 (그림 14a)에 제시하였다. 22개 폴리머 재질이 최소 1회 이상 검출되었는데, PP, PE, PET, PVC, ASA 등이 평균 구성비에서 5%를 넘는 우점적인 폴리머 재질이었다. 이 중에서 PP는 평균 22.1%, PET는 평균 18.4%를 구성하였다.

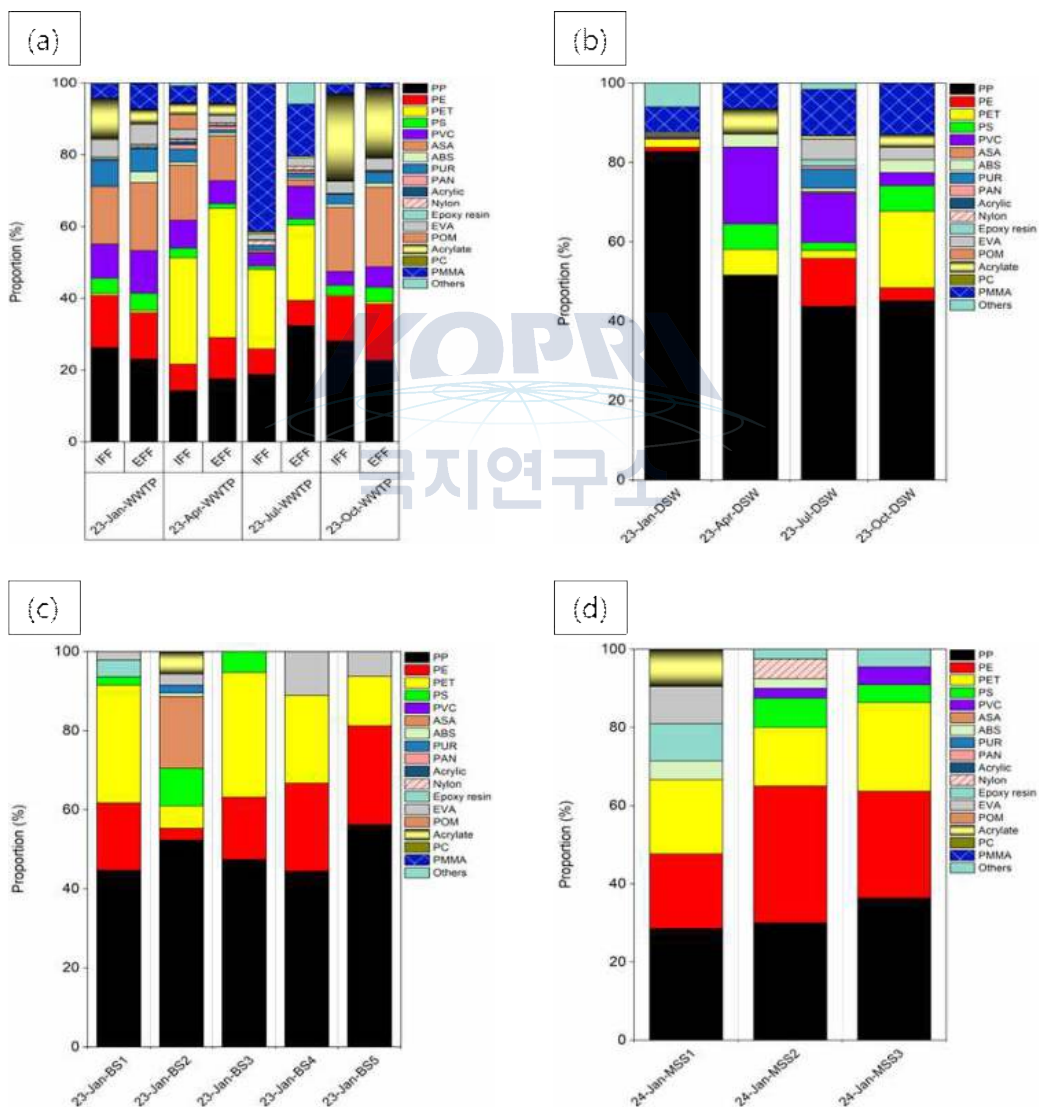


그림 14. 세종기지 수계환경 매체들에서의 미세플라스틱 폴리머 구성비: (a) 하수처리장 유입수 및 방류수, (b) 부둣가 표층해수, (c) 해변퇴적물, (d) 해양퇴적물

폴리머 재질 구성에서 주목할 만한 점은 ‘월별 유입수와 방류수에서의 폴리머 재질 구성이 유사하다는 점’과 ‘1월과 다르게 4월과 7월의 폴리머 구성에서 PET의 비율이 크게

증가했다는 점'이다. 모든 조사 시점에서 유입수와 방류수에서의 폴리머 재질 구성비가 유사하다는 것은 앞서 오염도에서 논의한 것처럼 유입된 하수의 하수처리장 내 처리 효율이 좋지 못하여 슬러지 등이 재부유하여 방류될 수 있음을 나타낸다. 이것이 채취 시점에 최종방류수를 채취하지 못해서 발생한 문제인지 아니면 연구기지 하수처리장의 처리 효율이 좋지 못해서 발생한 문제인지는 향후 별도로 채취한 최종방류수를 분석하여 확인할 필요가 있다. 특이한 점은 유입수에서보다 방류수에서 농도가 2배 낮은 7월에도 유입수에서와 방류수에서의 폴리머 재질 구성비가 유사한 것은 여전히 하수처리장의 처리 효율이 낮을 수 있음을 암시한다. 한편, 하계대와 월동대의 체류 활동(연구실험 및 기타 활동)이 1월에 왕성했음에도 불구하고 월동대만 활동한 4월과 7월에 상대적으로 PET의 비율이 크게 증가한 것은 동계활동시 착용한 PET재질의 의복의 세탁에 의해 상당량의 PET가 미세플라스틱으로 발생함을 암시한다. 후술하겠지만, 발생한 PET의 상당량은 의복의 세탁에서 발생하는 fiber 재질이었다.

(2-2-2) 부돗가 표층해수

2023년 1월, 4월, 7월, 10월에 조사된 부돗가 표층해수에서의 미세플라스틱의 폴리머 재질 구성비를 (그림 14b)에 제시하였다. 하수처리장 유입수 및 방류수에서보다 다소 적은 16개 폴리머 재질이 최소 1회 이상 검출되었는데, PP, PET, PVC, PMMA 등이 평균 구성비에서 5%를 넘는 우점적인 폴리머 재질이었다. 이 중에서 PP는 평균 55.8%, PET, PVC, PMMA는 평균 7-9%를 구성하였다. 하수처리장 유입수 및 방류수에서 우점 재질 중 하나였던 PE는 평균적으로 4.1%의 점유율을 보였다. 폴리머 재질 구성에서 주목할 만한 점은 '월별 유입수와 방류수에서의 폴리머 재질 구성과 다르다는 점'과 '1월과 다르게 4월-10월의 폴리머 구성비가 뚜렷하게 다르다는 점'이다. 미세플라스틱의 재질에 따라 해수보다 밀도가 낮은 양부력을 갖는 것과 해수보다 밀도가 큰 음부력을 갖는 것이 있다. 따라서, 하수처리장에서 기원하더라도 밀도에 따라 표층해수에 잔류하지 않고 침강하는 것이 있을 수 있다. 예컨대, 하수처리장 방류수에서 가장 우점했지만 평균 점유율이 22.1%였던 PP는 부돗가 표층해수는 55.8%로 크게 증가하였는데 이것은 해수보다 낮은 밀도를 갖는 PP(0.91 g/cm^3)의 특성의 영향일 수도 있다. 또한, 미세플라스틱 형태와 크기에 따라 그리고 미세플라스틱 입자에 형성된 생물 응집에 의해 침강과 부유의 영향을 받는다. 따라서, 표층해수의 폴리머 재질 구성비가 하수처리장 방류수에의 구성비와 다르다고 해서 기원이 다르다고 결론 내릴 수 없다. 한편, 가장 우점한 폴리머 재질인 PP를 기준으로 볼 때 1월과 다르게 동계시즌인 4월 - 10월까지의 부돗가 표층해수의 폴리머 재질 구성비는 대체적으로 유사하며 하수처리장 방류수의 구성비와 상대적으로 유사함을 보인다. 그러나, 동계시즌의 하수처리장 방류수에서 눈에 띄게 증가한 PET의 구성비가 동일한 동계 기간의 부돗가 표층해수에서의 점유율이 낮았다. 이것은 PP와 반대로 PET의 밀도(1.41 g/cm^3)가 해수보다 크기 때문에 유입 후에 침강될 가능성이 크기 때문인 것으로 추정된다.

(2-2-3) 해변 퇴적물

2023년 1월에 조사된 마리안 소만 해변퇴적물에서의 미세플라스틱의 폴리머 재질 구성비를 (그림 14c)에 제시하였다. 하수처리장 유입수 및 방류수나 부돗가 표층해수에서보다 적은 10개 폴리머 재질이 최소 1회 이상 검출되었는데, PP, PE, PET 등이 평균 구성비에서 5%를 넘는 우점적인 폴리머 재질이었다. 이 중에서 PP는 평균 49.0%, PE는 평균 16.6%, PET는 평균 20.4%의 점유율을 보였다. 폴리머 재질 구성에서 주목할 만한 점은 '하수처리장 방류수에서 가까운 정점일수록 가장 풍부한 폴리머 종류가 검출되었다는 점'과

‘최인근 정점인 B2에서는 PET의 비율이 상대적으로 낮았으나 그 외 정점들에서 PET의 비율이 증가했다는 점’이다. 하수처리장 방류구 최인점 정점인 B2에서 가장 많은 폴리머 종류(9 종)가 검출되었고 B1 정점에서 두 번째로 풍부한 폴리머 종류(6 종)가 검출되었으며 기타 마리안 소만 안쪽 정점(B3-B5)들에서는 4개 종류의 폴리머가 검출되었다. 이러한 결과는 배출된 미세플라스틱이 여러 과정을 거쳐 해변퇴적물에 증착하는 동안 분급화되어 이동·확산될 수 있음을 보여준다. 또한, 하수나 해수에서보다 덜 풍부한 폴리머 종류가 검출된 이유는 해변퇴적물 분석시료량(100-200g)이 수체시료(시료량 = 200 - 500L)보다 상대적으로 적기 때문이며 현실적으로 불가능하지만 수체시료만큼의 충분한 시료량이 분석된다면 수체에서 검출된 만큼(혹은 그 이상)의 미세플라스틱 폴리머 재질 종류가 검출될 것으로 추정된다. 하수처리장 방류구 최인근 정점인 B2에서보다 다른 정점들에서 PET비율이 상대적으로 높은 것은 전술한 것처럼 해수보다 밀도가 큰 PET(특히, fiber형태의 PET)가 다른 폴리머들과 비교하여 상대적으로 높은 비율로 해변퇴적물에 증착할 수 있음을 보여준다. 고려해야 할 또 다른 중요한 기작 중 하나는 대기를 통한 침적이다. 모든 폴리머는 아니더라도 실외 대기에서 상대적으로 풍부한 폴리머(예, PET)가 해변퇴적물에도 침적할 수 있는데, 후술할 것처럼 실외 대기에서 PET의 비율이 높았다. 육상토양에 비해 해변퇴적물의 총 농도가 낮았지만, 모두에서 PET가 검출되었고 특히 농도가 낮은 해변퇴적물에서 상대적으로 PET가 높은 비율로 검출된 것은 대기 침적이 어느 정도 영향을 미친 것으로 추정된다.

(2-2-4) 해양 표층퇴적물

2023년 1월에 조사된 마리안 소만 해양 표층퇴적물에서의 미세플라스틱의 폴리머 재질 구성비를 (그림 14d)에 제시하였다. 해양 표층퇴적물에서 발견된 미세플라스틱은 10 종류의 폴리머가 최소 1회 이상 검출되었는데 PP, PE, PET, Epoxy resin 등이 평균 구성비에서 5%를 넘는 우점적인 폴리머 재질이였다. 이 중에서 PP는 평균 31.6%, PE는 평균 27.1%, PET는 평균 18.9%, Epoxy resin은 평균 5.5%의 점유율을 보였다. 이러한 폴리머의 종류수와 우점 재질의 평균 구성비는 해변퇴적물에서 발견된 것들과 유사하였다. 폴리머 재질 구성에서 주목할만한 점은 ‘MSS2 정점에서의 폴리머 재질 종류가 10 종으로 가장 풍부하다는 점’과 ‘PP, PE 만큼 PET의 비율이 높다는 것’이다. 전술한 것처럼 마리안 소만 안쪽에 있으면서 하수처리장 방류구에서 가까운 정점인 MSS2 정점에서 폴리머 종류가 10 종으로 가장 풍부하게 발견된 반면 하수처리장 방류구와 가장 가깝지만 맥스웰만과 인접한 정점인 MSS1에서는 7 종류, 하수처리장 방류구에서 가장 먼 마리안 소만 안쪽 정점인 MSS3에서 가장 적은 6종류가 발견된다. 이것은 하수처리장 방류수의 유입 영향일 것으로 추정할 만한 가치가 있다. 전술한 것처럼, 해양 표층퇴적물에서 발견된 폴리머 종류가 수체(하수나 표층해수)에서 보다 적은 종류의 폴리머가 발견된 것은 상대적으로 적은 분석시료량에 기인한다고 볼 수 있다. 해변퇴적물에서처럼 1월에 채취한 수체시료들에서보다 PET 비율이 상대적으로 높은 것은 해수보다 밀도가 큰 PET(특히, fiber형태의 PET)이 다른 폴리머들과 비교하여 상대적으로 높은 비율로 해양 표층퇴적물로 침강할 수 있음을 보여준다.

(2-3) 수계환경 매체 미세플라스틱 형태 구성비

(2-3-1) 하수처리장 유입수 및 방류수

2023년 1월, 4월, 7월, 10월에 조사된 유입수와 방류수에서의 미세플라스틱의 형태 구성비를 (그림 15a)에 제시하였다. 평균적으로 형태 구성은 fragment (80.1%) > fiber (19.0%) > sheet (0.8%) > spherule (<0.1%)로써 일반적인 환경에서 발견되는 미세플라스틱

형태 구성비와 유사하였다. 폴리머 재질 구성비에서 기술했던 것처럼, 형태 구성비 또한 모든 조사 시점에 유입수와 방류수가 유사한 구성비를 보인다.

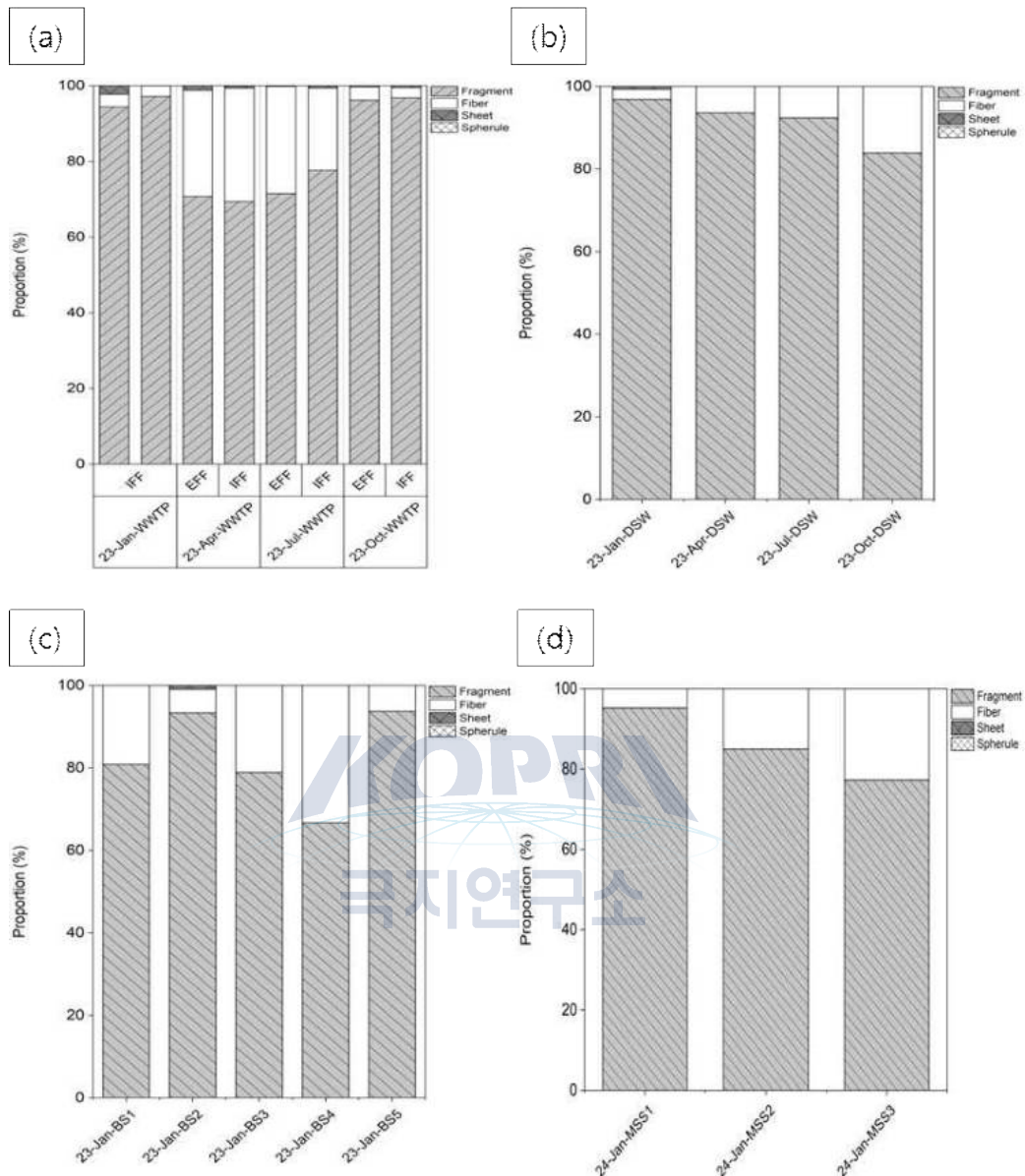


그림 15. 세종기지 수계환경 매체들에서의 미세플라스틱 형태 구성비: (a) 하수처리장 유입수 및 방류수, (b) 부닷가 표층해수, (c) 해변퇴적물, (d) 해양퇴적물

이것은 최종방류되는 방류수를 채취하지 못해서 발생한 문제일 수 있으나 유입수의 처리 효율이 좋지 못한 결과일 수도 있다. 특이한 점은 하계대가 활동한 1월에는 fiber의 비율이 유입수 및 방류수 모두에서 3%였던 반면 월동대만 활동하는 4월과 7월에 fiber의 비율이 유입수 및 방류수 모두에서 22-30%의 높은 비율로 상승했다는 점이다. 월동대만 활동한 4월과 7월에 높게 상승한 fiber 비율은 주로 PET 재질의 fiber로써 월동대의 동계활동 시 착용한 PET재질의 의복 세탁의 결과일 것으로 추정된다. 특히, 동계의 경우 기상 조건 등으로 인해 실내-외 환기가 원활하지 않아 PET재질의 의복으로부터 발생하는 미세플라스틱이 실내 환경에 축적되고 그것이 하수처리장으로 유입될 가능성도 있다. 따라서, 이러한 추정은 실내 대기에 대한 모니터링의 필요성을 의미하며 3월과 7월 실내 대기 침적 시료에서 PET-fiber의 비율이 상대적으로 증가한 반면 9월 실내 대기 침적 시료에서

PET-fiber의 비율이 감소한 관측 결과와 유사하다.

(2-3-2) 부둣가 표층해수

2023년 1월, 4월, 7월, 10월에 조사된 부둣가 표층해수에서의 미세플라스틱의 형태 구성비를 (그림 15b)에 제시하였다. 평균적으로 형태 구성은 fragment (91.7%) > fiber (8.2%) > sheet (0.2%) > spherule (미검출)로써 일반적인 환경에서 발견되는 미세플라스틱 형태 구성비와 유사하였다. 형태 구성비는 1월의 경우 fragment가 압도적으로 많은 비율을 보인 반면 동계 기간인 4월-10월에는 fragment 비율이 상대적으로 줄어들고 fiber의 비율이 상대적으로 증가하였다. 평균적인 형태 구성비는 하수처리장 방류수에서의 형태 구성비와 다르지만 대체적으로 경향성은 유사해서 부둣가 표층해수에서의 미세플라스틱이 하수처리장 방류수의 영향을 받을 수 있음을 암시한다.

(2-3-3) 해변 퇴적물

2023년 1월에 조사된 마리안 소만 해변퇴적물에서의 미세플라스틱의 형태 구성비를 (그림 15c)에 제시하였다. 평균적인 형태 구성은 fragment (82.7%) > fiber (17.1%) > sheet (0.2%) > spherule (미검출)로써 일반적인 환경에서 발견되는 미세플라스틱 형태 구성비와 유사하였다. 형태 구성비는 하수방류구 최인접 정점인 BS1과 마리안 소만 안쪽 정점인 BS5에서 fragment 비율이 90% 이상으로 압도적으로 높은 반면 그 외 정점들에서는 67-80%로 감소한 것이 특징이다. 특히, B1, B3, B4에서 fragment 점유율이 줄어드는 대신 fiber의 비율이 20-30%로 증가한 것은 전술한 것처럼 해수보다 밀도가 큰 PET재질의 fiber의 해변 증착이 더 빠른 속도로 발생했거나 대기 침적의 결과라고 유추할 수 있다.

(2-3-4) 해양 표층퇴적물

2023년 1월에 조사된 마리안 소만 해양 표층퇴적물에서의 미세플라스틱의 형태 구성비를 (그림 15d)에 제시하였다. 평균적인 형태 구성은 fragment (85.8%) > fiber (14.2%) > sheet (미검출), spherule (미검출)로써 일반적인 환경에서 발견되는 미세플라스틱 형태 구성비와 유사하였다. 형태 구성비는 맥스웰만과 인접한 마리안 소만의 최외곽 정점인 MSS1에서는 fragment 비율이 90% 이상으로 압도적으로 높은 반면 MSS2 ⇒ MSS3 등 마리안 소만 안쪽으로 진행될수록 fragment 비율이 줄어들고 fiber의 비율이 상대적으로 증가하였다. 이것은 fiber를 구성하는 주요 폴리머 재질이 해수보다 밀도가 큰 PET라는 것을 감안하면 하수처리장에서 방류된 미세플라스틱이 해류를 통해 안쪽으로 이동하는 과정에서 해저면으로 침강한 결과인 것으로 추정된다.

(2-4) 수계 환경 매체 미세플라스틱 크기 구성비

(2-4-1) 하수처리장 유입수 및 방류수

2023년 1월, 4월, 7월에 조사된 유입수와 방류수에서의 미세플라스틱의 크기 구성비를 (그림 15a)에 제시하였다. 미세플라스틱의 크기 구성은 입자크기가 작아질수록 기하급수적으로 증가하는 환경매체에서 관측되는 전형적인 크기분포를 보였다. 농도, 폴리머 재질 구성, 형태 구성에서와 동일하게 모든 조사 시점의 유입수와 방류수에서의 크기 분포가 유사하여 하수처리장 처리 효율의 문제를 보여준다. 폴리머 재질 및 형태 구성비에서 논의한 것처럼, 1월에 비해 월동대만의 동계활동이 이뤄진 4월과 7월에 가장 작은 크기군(20-100 μm)의 비율이 줄어드는 대신 큰 크기군들의 비율이 상대적으로 증가한 것은 크기가 큰 PET fiber의 비율이 증가했기 때문인 것으로 추정된다.

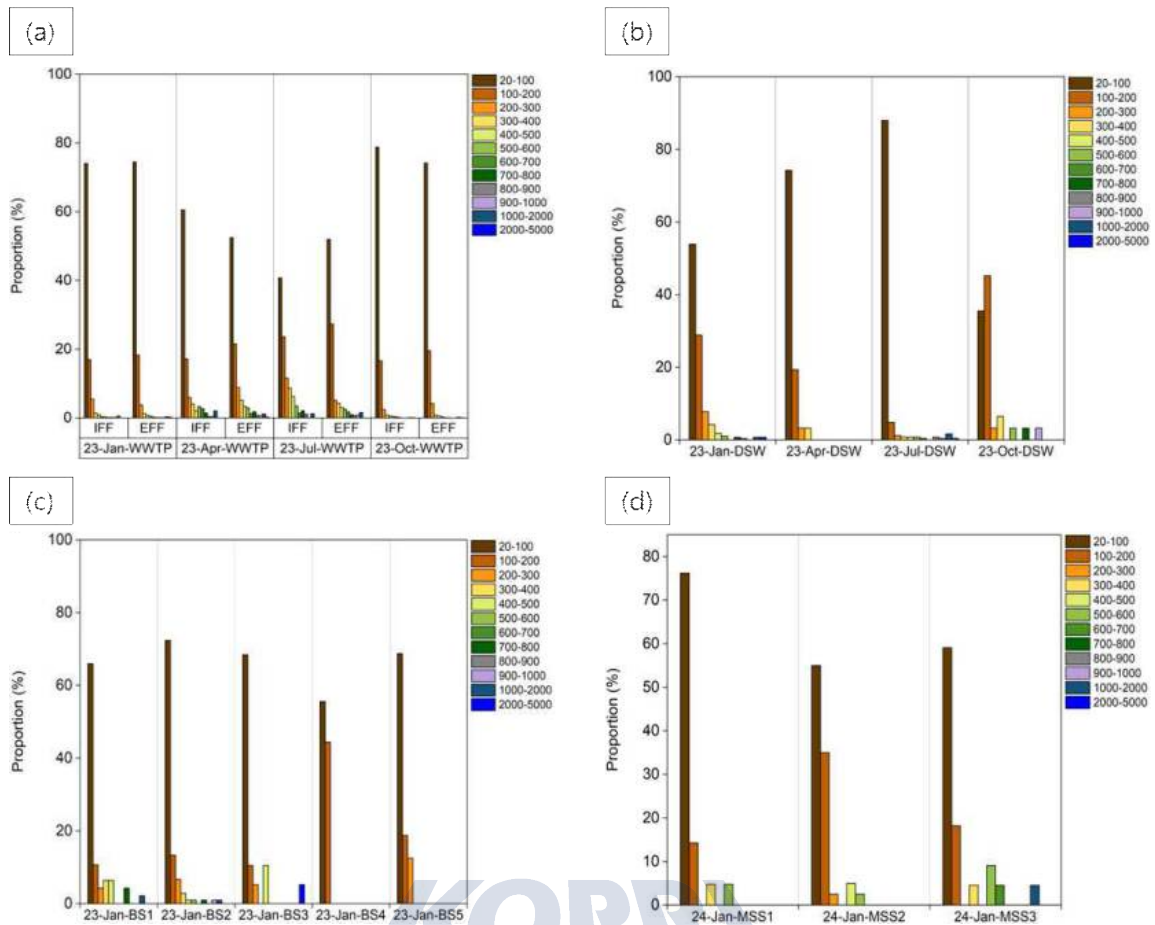


그림 15 세종기지 수계환경 매체들에서의 미세플라스틱 크기 구성비: (a) 하수처리장 유입수 및 방류수, (b) 부둣가 표층해수, (c) 해변퇴적물, (d) 해양퇴적물

(2-4-2) 부둣가 표층해수

2023년 1월, 4월, 7월, 10월에 조사된 부둣가 표층해수에서의 미세플라스틱의 크기 구성비를 (그림 15b)에 제시하였다. 하수처리장 유입수 및 방류수에서와 유사하게 미세플라스틱의 크기 구성은 입자크기가 작아질수록 기하급수적으로 증가하는 환경매체에서 관측되는 전형적인 크기분포를 보인다. 하수처리장 유입수 및 방류수에서와 다르게 7월에 가장 작은 크기군(20-100 μm)의 비율이 크게 증가한 반면 10월에는 그 비율이 급격히 줄고 상대적으로 큰 크기군의 미세플라스틱 비율이 증가한 모습을 보였는데 이것은 상대적으로 큰 fiber의 비율이 증가한 것 때문일 수 있다. 그러나, 환경매체에서의 크기 구성비는 다양한 오염원 외의 다양한 원인(폴리머 재질, 형태, 생물 응집, 물리적 항력, 재부유 등)에 의해 영향을 받기 때문에 특정 원인을 단정적으로 지목하기 어렵다.

(2-4-3) 해변 퇴적물

2023년 1월에 조사된 마리안 소만 해변퇴적물에서의 미세플라스틱의 크기 구성비를 (그림 15c)에 제시하였다. 전술한 수체시료들에서 기술한 것과 유사하게 미세플라스틱의 크기 구성은 입자크기가 작아질수록 기하급수적으로 증가하는 환경매체에서 관측되는 전형적인 크기분포를 보인다. 하수처리장 방류구 인근 정점들인 B1과 B2에서 상대적으로 다양한 크기군이 발견되었으며, 그것들의 크기분포가 수체에서 발견된 것과 유사한 분포를 가진다. 반면, 상대적으로 거리가 떨어진 마리안 소만의 안쪽 정점들인 B4와 B5에서는 2-3개의 크기군(20-100 μm , 100-200 μm , 200-300 μm)의 미세플라스틱이 검출된다. 이것은

전술한 것처럼 이 정점들에서 미세플라스틱의 개수와 종류가 적게 검출되었기 때문인 것으로 추정된다.

(2-4-4) 해양 표층퇴적물

2023년 1월에 조사된 마리안 소만 해양 표층퇴적물에서의 미세플라스틱의 크기 구성비를 (그림 15d)에 제시하였다. 전술한 모든 환경 매체 시료들에서 기술한 것과 유사하게 미세플라스틱의 크기 구성은 입자크기가 작아질수록 기하급수적으로 증가하는 전형적인 크기분포를 보인다. 맥스웰만과 인접한 MSS1 정점에서 최소 크기군(20-100 μm)이 상대적으로 우점했으며 그 외 2개 정점에서의 크기분포는 대략 유사하였다. 다만, MSS3에 비해 MSS2 정점에서 100-200 μm 크기군의 비율이 더 높았다. 마리안 소만 가장 안쪽 정점인 MSS3에서 상대적으로 큰 입자의 비율이 소폭 증가한 것은 해당 정점에서 크기가 큰 PET fiber의 비율이 증가했기 때문이다.

(3) 연구기지 인근 육상환경 매체별 오염도 파악

(3-1) 육상환경 매체 미세플라스틱 오염도

(3-1-1) 육상토양

선정된 육상토양 각각의 정점에서 2023년 1월 채취하여 분석한 육상토양에서의 미세플라스틱(0.02 - 5 mm) 농도를 (그림 16)와(그림 17)에 제시하였다. 기지 인근(Near-KSS sites, St.1 - St. 3)의 농도는 건중량 기준으로 평균 $2,230 \pm 1,332$ 개/kg_{dw}로 비교적 높은 오염도를 보여 연구기지에서 발생하는 인위적인 활동에 의한 영향이 그대로 반영된 결과로 기지 인근 토양에 일정 수준의 미세플라스틱이 축적되어 있음을 나타낸다. 도로 주변(Along-road sites, St.4 - St.6)의 농도의 범위는 $12,679 \pm 12,036$ 개/kg로 가장 높은 오염도를 보였다. 특히, St.6에서 가장 높은 농도(24,853 개/kg)를 보였는데, 이 조사 정점은 도로 끝 지점으로 실외 대기 부유 시료를 채집한 대기구성물질 관측동(S 62°13' 15.76" W 58°46' 41.17")이 위치한 곳이기도 하다. 도로 인근 특성상 차량 이동 및 물자 이동이 빈번한데 그 영향이 토양 내 미세플라스틱 축적에 기여했을 것으로 추정된다.

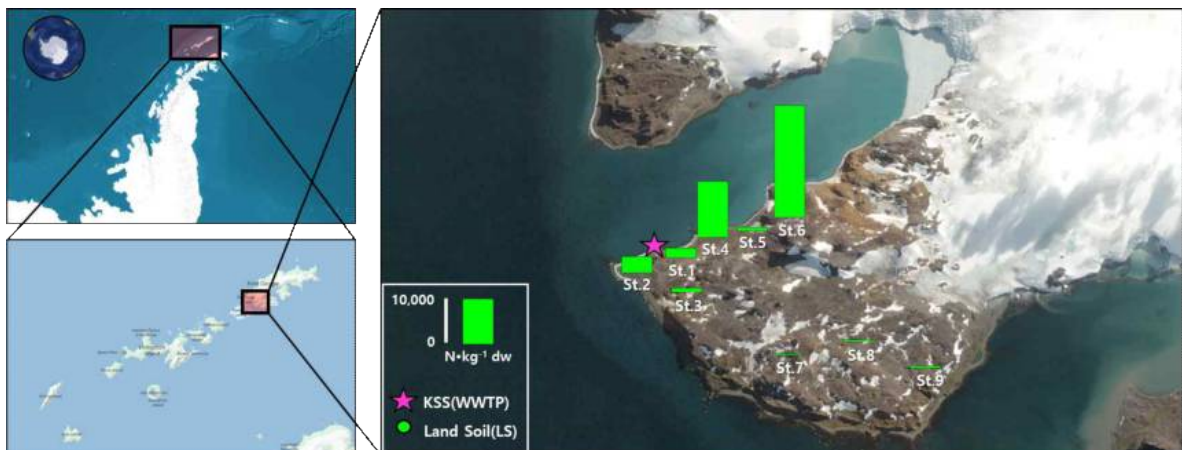


그림 16. 세종기지 인근 육상토양 시료 채취 지점 및 육상토양 내 미세플라스틱 농도

원거리 지역(Remote-KSS sites, St.7 - St. 9)의 농도는 평균 371 ± 102 개/kg_{dw}로 가장 낮은 오염도를 보여 연구기지에서 발생한 영향이 직접적으로 미치지 않고 있음을 보여준다. 이러한 결과는 세종기지 주변 육상토양의 미세플라스틱 오염도가 공간적으로 크게 달라진다는 것을 보여 준 것으로서, 기지와 도로 인근 토양이 원거리 지역 토양보다 높은 오

염도를 보인 것은 장거리 이동에 따른 대기 침적이 육상토양 오염의 주 원인이라면 발생하기 힘든 패턴으로 결과적으로 연구기지 인근 육상토양의 주요 오염원이 연구기지 활동임을 암시한다.

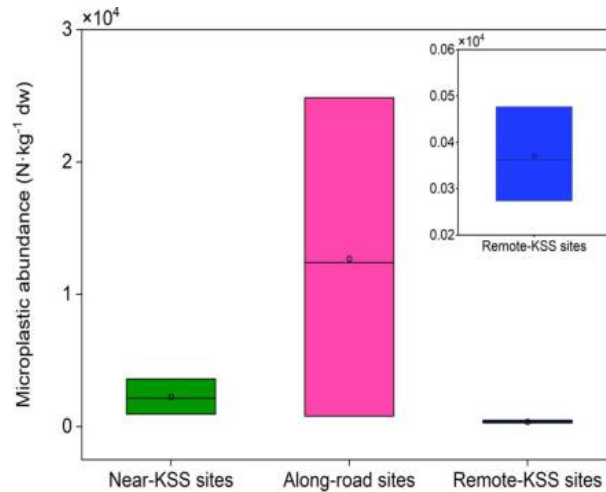


그림 17. 육상토양 채집 정점분류에 따른 미세플라스틱 농도

(3-1-2) 실내 대기 침적

세종기지의 주요 활동 공간인 실험실(Lab), 식당(DR), 침실(BR)을 대상으로 2023년 1월, 3월, 5월, 9월에 걸쳐 실내 대기 침적(indoor air deposition) 시료를 채취하고, 단위면적당, 단위시간당 미세플라스틱(0.02 - 5 mm) 침적량(개/m²/일)을 산정하였다(그림 18). 실내 대기 침적량에서의 월별 오염도는 하계대와 월동대가 동시에 채류하여 인원이 가장 많았던 1월(69명)에 3곳 모두 비교적 높은 오염도 범위(169 - 468 개/m²/일)를 보였으며, 평균적으로 272±170 개/m²/일을 보였다. 특히, 채류 인원이 가장 오랫동안 머무는 공간인 침실에서 477 개/m²/일로 가장 높은 침적량을 보였으며, 실험실과 식당에서도 다른 달에 비해 비교적 높은 농도를 보였다. 이러한 결과는 기지 내 채류 인원이 가장 많은 달로 채류 인원의 증가가 곧 실내 대기 오염 증가의 원인으로 작용했을 가능성이 있다(그림 19). 하계대 철수 후 48명에서 18명으로 채류 인원이 감소한 3월과 월동대만 잔류한 5월의 경우, 1월과 비교하여 모든 장소에서 오염도가 2배 정도 감소하는 경향을 보였다. 특히, 5월 식당에서의 농도는 35 개/m²/일로 조사한 기간 및 장소들 중 가장 낮은 오염도를 보였다. 9월의 경우, 월동대 인원(18명)만이 잔류했음에도 불구하고 143 - 470 개/m²/일의 침적량 범위를 보였고, 평균적으로 260±182 개/m²/일 였다. 특히, 식당(470 개/m²/일)에서 매우 높은 오염도가 관찰되었다. 이 관측값은 1월 침실에서 관찰된 오염도와 유사한 수준으로 해당 시기에 차년도 월동대 입남극 전 시설 유지 보수 및 변경된 생활 환경 등 복합적인 요인이 작용했을 것으로 추정된다. 또한, 실내라는 공간 특성상 폐쇄된 공간에 정기적인 인원이 활동하는 곳으로 실제 오염 수준보다 과대평가된 값으로 나타났을 가능성이 있다. 이러한 9월 달의 특이적인 오염도가 일반적인 현상인지와 증가 원인을 보다 명확하게 규명하기 위해서는 2024년과 2025년에 채취된 시료에 대해 과제 종료 후 논문 작성과정에서 추가 분석을 통해 파악할 계획이다.

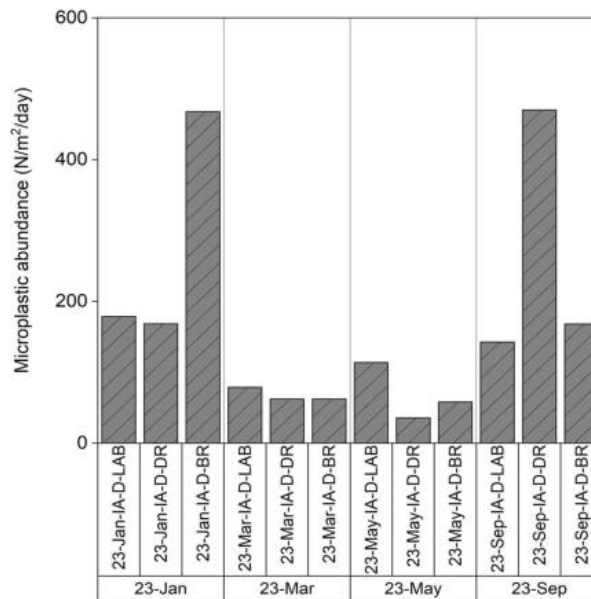


그림 18. 세종기지 실내 대기 미세플라스틱 침적량

관측된 월별 분포의 변화는 체류 인원의 증감과 변화된 생활공간 등 복합적인 요인들로 인해 실내 대기 침적량이 변화할 수 있음을 시사한다. 1월에는 다수의 인원이 체류하며 연구 활동 및 일상생활을 진행함에 따라 3곳 모두에서 비교적 높은 오염도를 보였고 이후 하계대 철수 후 인원이 감소함에 따라 오염도가 감소하는 경향을 보였는데, 3월, 5월과 같은 동계대 인원만 체류한 9월에 그러한 경향이 지속되지 않고 1월과 유사하게 높은 오염도를 보였다(그림 19). 이것은 기지 내 ‘체류 인원수’ 외에도 다른 복합적인 환경요인이 작용했음을 설명한다. 실내 대기 침적량에서의 공간별 오염도는 실험실에서 전 기간에 걸쳐 비교적 낮고 안정적인 오염도를 보인 반면, 식당과 침실에서는 변동폭이 크고 유사한 평균 오염도를 보였다. 실험실에서의 침적량은 79 - 179 개/m²/일로 3배 이내의 변동폭을 보여 연중 일정한 실내 공기질을 유지함을 보여주었다. 반면, 전술한 것처럼 식당(36-470 개/m²/일)과 침실(58-468 개/m²/일)에서는 특정 달에 특이적으로 높은 침적량을 보여 변동폭이 10배까지 증가하였다. 이것은 식당 및 침실에서의 실내 공기질이 환기나 생활패턴 등에 의해 크게 변화할 수 있음을 보여준다.

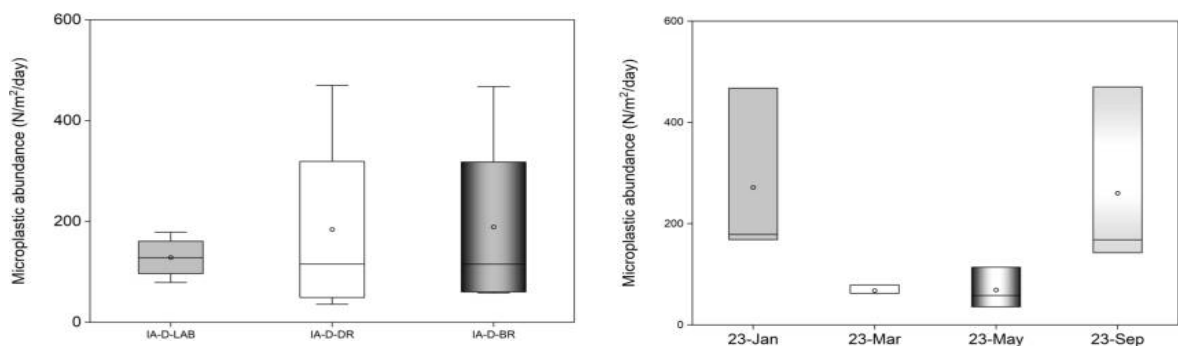


그림 19. 세종기지 실내 대기 미세플라스틱 침적량의 시기별, 공간별 비교

(3-1-3) 실외 대기 부유

채취된 세종기지 외부 환경 대기 부유 입자 시료들 중 2024년 1월, 3월, 5월, 7월, 9월, 11월에 시료를 대상으로 미세플라스틱(0.02 - 5 mm)을 정성·정량 분석하여 단위부피당 농도(개/m³)로 산정하였다(그림 20). 실외 대기 부유 시료에서 미세플라스틱 농도는 0.01 - 0.

23 개/m³ 범위였으며, 평균값은 0.07±0.08 개/m³였다. 월별 농도 변화를 보면 1월에 0.23 n/m³으로 가장 높은 값을 보였으며, 이후에는 꾸준히 감소하는 경향을 보였다. 기지 내 활동 인원이 많고 외부 출입이 다수 발생하는 1월(하계 기간)에 농도가 증가했으며, 하계 대 철수 이후 월동대만이 잔류했을 때 낮은 수준을 유지하고 있다. 이는 실내 대기 침적량에서의 농도 결과와 비슷하게 체류 인원 및 활동 인원의 변화가 실외 대기 부유 농도에도 영향을 미칠 수 있다는 것을 보여주고 있다. 실내의 경우 폐쇄된 공간에 다수의 인원 혹은 정기적인 인원이 잔류하는 반면, 실외의 경우 자연환경에 노출되어 있어 여러 가지 기상인자(바람, 강우, 강설 등)의 영향이 크게 미치는 공간적 특성을 갖고 있다는 차이가 있다. 따라서, 매체 특성을 고려할 때 실내 대기 침적 시료와 실외 대기 부유 시료에서의 오염도를 단순 비교하는 것은 무리가 있으나, 두 매체 모두에서 1월에 최대 농도를 보이고 이후 3월과 5월에 걸쳐 감소세를 보였다는 공통점이 있다. 다만, 실내 대기 침적의 경우 9월 오염도가 증가한 반면, 실외 대기 부유 시료에서는 동계 기간 전체에 걸쳐 꾸준히 낮은 오염도를 보였다는 차이가 있어 실내 대기 오염이 실외 대기 오염으로 직접 연결되는 것 같지는 않다. 일반적으로 극지 환경의 실외 대기에서는 장거리 대기 이동에 의해 외부 기원의 미세플라스틱이 유입되는 것이 주요 오염 경로로 고려되어 왔다. 그러나 이번 조사 결과에서 1월에 농도가 뚜렷하게 증가한 것은 단순히 장거리 이동에 의한 오염뿐 아니라 기지 내 체류 인원과 활동이 실외 대기 부유 농도에도 일정한 영향을 미쳤을 가능성을 시사한다. 즉, 외부에서 장거리 이동을 통해 유입된 미세플라스틱이 배경농도를 형성하고, 연구기지 운영과 인위적인 활동이 추가적인 배출을 발생해서 오염도를 증가시켰을 가능성이 있다.

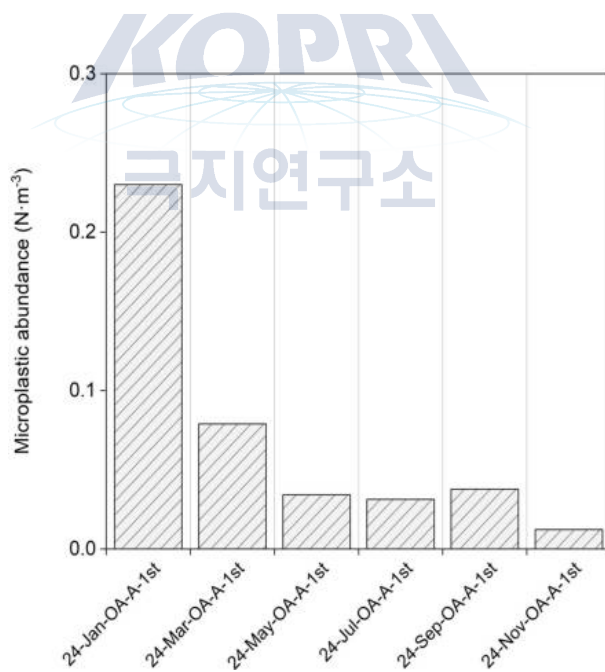


그림 20. 세종기지 주변 실외 대기 부유 시료에서의 미세플라스틱 농도

이러한 복잡한 기작을 명확히 이해하기 위해서는 중장기적 모니터링과 기상인자와 결합한 해석이 필수적이다. 예컨대, 향후 논문 작성 과정에서 현재 연구기지에 보관되어 2026년 중순에 운송될 2025년 채취 시료의 추가 분석과 air mass back-trajectory 등 기상인자와의 관계분석 등을 통해 기지 활동의 영향 가능성을 밝힐 계획이다.

(3-2) 육상환경 매체 미세플라스틱 폴리머 구성비

(3-2-1) 육상토양

2023년 1월에 조사된 육상토양에서의 미세플라스틱의 폴리머 재질 구성비를 (그림 21 a)에 제시하였다. 20개의 폴리머 재질이 최소 1회 이상 검출되었는데, PP, PE, PET, PS, Acrylate 등이 평균 구성비 5%를 넘는 우점적인 폴리머 재질이었다. 이중 PP는 평균 31%, Acrylate는 평균 24%를 구성하였다. 폴리머 재질에서 주목할 만한 것은 ‘기지의 영향이 직접 미치는 정점의 폴리머 재질 구성비에서 PS와 Acrylate의 비율이 매우 높게 나타났다’는 것과 원거리 정점들에서는 PET의 비율이 높아졌다는 것’이다.

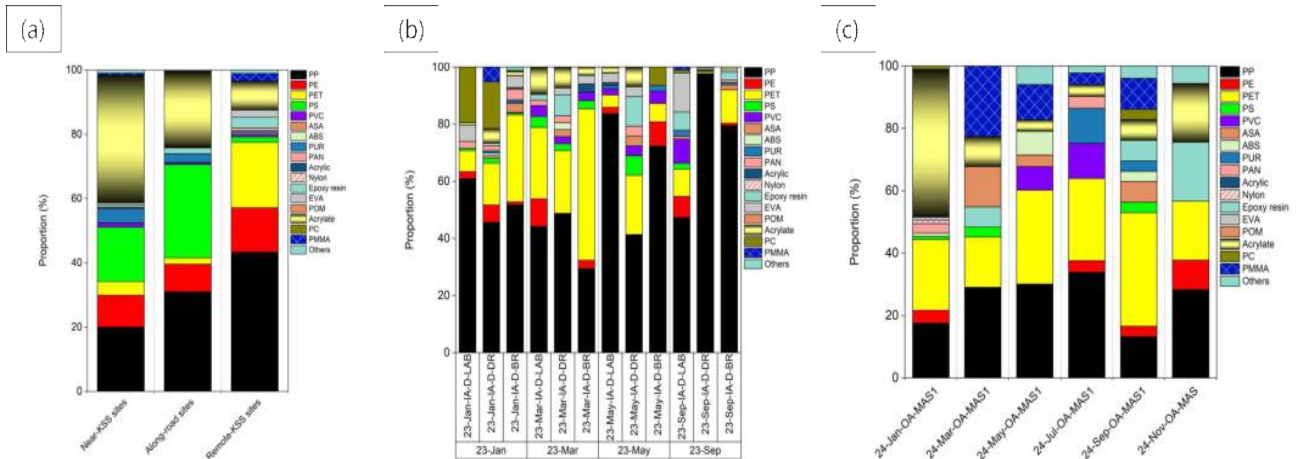


그림 21. 세종기지 육상환경 매체들에서의 미세플라스틱 폴리머 구성비: (a) 육상토양, (b) 실내 대기 침적, (c) 실외 대기 부유

기지 인근 정점들에서 Acrylate(40%) > PP(20%) > PS(17%)의 평균 폴리머 재질 비율을 보였는데, Acrylate와 PS 등 폴리머들의 높은 출현은 시설 장비 및 건축자재 등에서 기인한 것으로 여겨지며 연구기지의 직접적인 영향을 나타내는 지표로써 작용할 수 있다. 다만, 기지 인근 정점 중 St.3에서 Acrylate(85%)가 특이적으로 높은 경향이 관측되었는데 이것은 외부 활동이 활발한 시기에 이벤트성으로 발생한 것이 축적된 결과로 추정된다. 도로 주변 정점들의 경우, PP(31%) > PS(29%) > Acrylate(23%)로 평균 폴리머 비율의 차이는 있지만 우점하는 폴리머 재질은 기지 주변 토양에서 관측된 것과 동일하다. 전술한 바와 같이 도로 주변 특성상 차량의 이동과 물자 이동에 따른 발생한 입자에 의한 결과라고 추정된다. 전술한 1월 실외 대기 부유 시료에서의 높은 농도와 함께 Acrylate가 높은 비율로 관측된 것은 도로가 주변 육상토양에서 비산한 입자가 대기로 이동한 결과라고 추정 가능하다. 원거리 정점들에서는, PP(43.%) > PET(20%) > PE(14%)의 평균 폴리머 재질 비율을 보였으며, PS와 Acrylate의 비율이 낮아진 반면 PET 비율이 크게 증가하였다. 이러한 결과는 원거리 지역 육상토양의 경우 기지의 직접적인 영향보다는 대기 장거리 이동에 의한 오염의 결과라고 추정된다. 후술하겠지만, 원거리 정점들에서 fiber가 확연히 증가하였고 해당 fibers는 주로 PET으로 구성된 것으로 볼 때 재질 밀도와 관계없이 fiber형태의 더 큰 장거리 이동성이 주요 원인인 것으로 추정된다. 종합하면, 기지 인근과 도로 주변에서 높은 농도와 함께 확연하게 높게 검출된 PS와 Acrylate는 기지 활동과 직접적으로 연관된 특성을 보여주며, 원거리 정점에서는 PET 비율이 상대적으로 증가하며 장거리 이동이나 확산을 통해 유입되었을 가능성을 보여주고 있다. 이러한 공간적 차이는 세종기지 인근 육상토양이 연구기지 활동으로 인한 오염 정도를 가장 명확하게 보여주고 있다고 판단된다.

(3-2-2) 실내 대기 침적

2023년 1월, 3월, 5월, 9월에 조사된 실내 대기 침적에서의 미세플라스틱의 폴리머 재질 구성비를 (그림 21b)에 제시하였다. 18개의 폴리머 재질이 최소 1회 이상 검출되었는데, PP, PE, PET, EVA 등이 평균 구성비 5%를 넘는 우점적인 폴리머 재질이었다. 이중 PP는 평균 59%, PET는 평균 17%를 구성하였다. 폴리머 재질에서 주목할만한 점은 '1월과 3월에 모든 공간에서 PET 비율이 상대적으로 높은 경향이 있다는 것'과 '5월을 제외한 모든 시기에 다른 공간에 비해 침실에서 PET의 비율이 상대적으로 높았다'는 점이다. 통상 대부분의 침실에는 PET 재질의 침구류와 의류가 위치해 있어 이로부터 PET이 상대적으로 높게 발생했을 것으로 추정되어 공간별 특성을 잘 반영한 결과라고 판단된다. 후술해 다시피, PET 구성비와 유사하게 미세플라스틱의 형태 구성비에서도 fiber 형태의 입자가 유사한 월별 경향을 띄고 검출되었다. 통상 침구류나 의복류의 주요 재질인 PET는 fiber 형태로 존재한다. 전술한 하계대 활동으로 체류 인원이 증가한 1월에 침적량이 증가한 것은 다른 폴리머들과 함께 의복·침구류 사용 증가로 인한 PET-fiber 재질의 발생 증가 때문인 것으로 판단된다. 따라서, 이러한 결과는 침실이 기지 내부의 주 오염원 중 하나라는 사실을 뒷받침하는 결과라고 볼 수 있다. 한편, 또 다른 주목할 만한 특징은 다른 환경에서 잘 검출되지 않는 PC재질이 종종 높은 비율로 검출된다는 것인데 이것은 남극세종기지에 관련 오염원이 있는 것으로 추정된다. 또, 다른 시기나 장소와 비교할 때 9월 식당에서 PP가 99.8%로 압도적인 비율을 보였는데 이것은 해당 시기 해당 장소에서 이벤트성으로 발생한 것으로 추정된다.

(3-2-3) 실외 대기 부유

2024년 1월, 3월, 5월, 7월, 9월, 11월에 조사된 실외 대기 부유 시료에서의 미세플라스틱 폴리머 재질 구성비를 (그림 21c)에 제시하였다. 18개의 폴리머 재질이 최소 1회 이상 검출되었는데, PP, PET, Acrylate, PMMA 등이 평균 구성비에서 5%를 넘는 우점적인 폴리머 재질이었다. 이중에서 PP는 평균 23%, PET는 평균 25%, Acrylate는 평균 15%를 구성하였다. 폴리머 재질 구성에서 가장 눈에 띄는 점은 오염도가 가장 높았던 1월에 Acrylate의 비율(47%)이 우점했다는 것과 모든 시기에 PP와 함께 PET가 우점하게 검출되었다는 것이다. 1월 실외 대기 미세플라스틱 오염을 주도한 폴리머는 Acrylate로써, 실내 침적 시료에서는 해당 폴리머의 눈에 띄는 증가가 없었다. 따라서, 1월 실외 대기에서 Acrylate의 증가는 체류 인원 증가와 함께 외부 연구 활동 증가에 따른 장비·설비의 활용 증가와 관련될 수 있다. 이것은 후술한 육상토양(특히, 연구기지 주변 및 도로 주변 육상토양)에서 관측된 높은 비율의 Acrylate가 검출된 것과 일맥상통하다. 따라서, Acrylate는 기지 주변 외부 활동 증가에 따른 오염 지표가 될 수 있다. 1월 시료에서 Acrylate를 제외하더라도 여전히 오염도는 다른 조사 시기에서보다 높은 경향이 있어 다른 폴리머들 또한 체류 인원 및 외부 활동 시기에 배출이 증가하였음을 보여준다. 조사 시기 전반에 걸쳐 PET가 15 - 35%의 범위로 우점하는 폴리머로 나타났다. PET는 전술한 실내 환경에서도 빈번하게 검출된 폴리머로써 다양한 기지 내 생활환경에서 기원할 수 있다. 하지만, 실내 대기 침적 시료와 비교해 전 기간에 걸쳐 PET가 주요 폴리머 재질 중 하나로 검출된 것은 실내 오염원의 영향만으로 간주될 수 없다. 요컨대, 실외 대기 부유 미세플라스틱 오염은 외부로부터 유입된 것 외에 체류 인원 변동과 기지 외부 활동 변화 등 연구기지 운영과 관련된 인위적인 활동이 미세플라스틱 오염을 가중시켰을 가능성이 높다.

(3-3) 육상환경 매체 미세플라스틱 형태 구성비

(3-3-1) 육상토양

2023년 1월에 조사된 육상토양에서의 미세플라스틱의 형태 구성비를 (그림 22a)에 제시하였다. 평균적으로 형태 구성은 fragment(91.6%) > fiber(8.4%) > sheet(<0.1%) > spherule(미검출)로 일반적인 환경에서 발견되는 미세플라스틱 형태 구성비와 유사하였다. 육상토양에서 검출된 미세플라스틱 형태는 대체로 fragment 형태가 우세하게 나타났지만, 주목할만하게도 원거리 정점에서 fiber형태의 비율이 증가했다. 원거리 정점에서 fragment의 비율이 감소하고 상대적으로 fiber의 비율이 증가한 것은 전술한 것처럼 원거리 정점들에서 PET 재질의 fiber의 비율이 증가했기 때문이다. 이것은 기지 운영에 의한 직접적인 영향이 아닌 대기의 장거리 이동에 의한 영향을 반영한 결과라고 볼 수 있다.

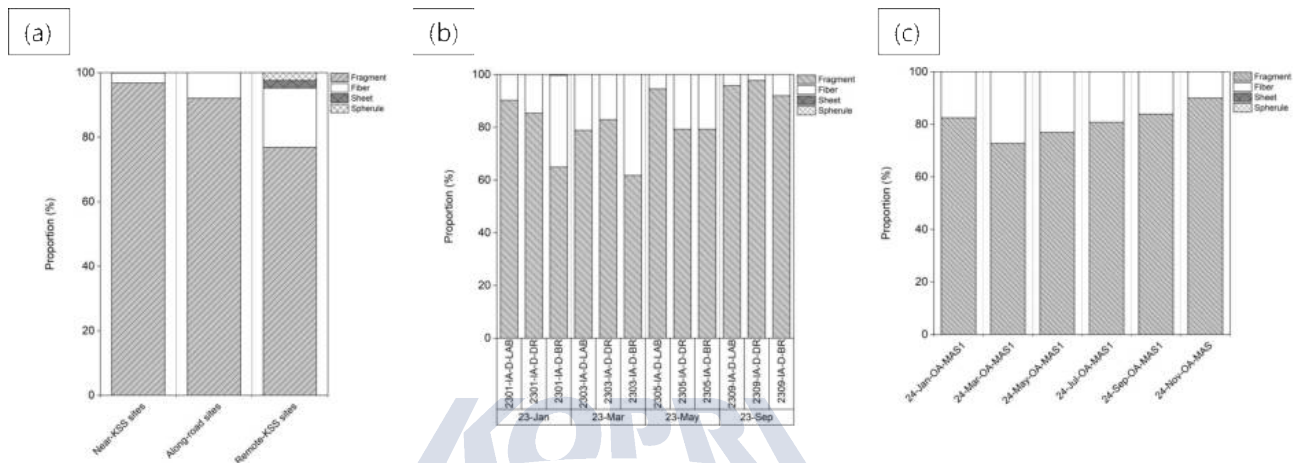


그림 22. 세종기지 육상환경 매체들에서의 미세플라스틱 형태 구성비: (a) 육상토양, (b) 실내 대기 침적, (c) 실외 대기 부유

(3-3-2) 실내 대기 침적

2023년 1월, 3월, 5월, 9월에 조사된 실내 대기 침적에서의 미세플라스틱 형태 구성비를 (그림 22b)에 제시하였다. 평균적으로 형태 구성은 fragment(84%) > fiber(16%) > sheet(<0.1%) > spherule(미검출)로 일반적인 환경에서 발견되는 미세플라스틱 형태 구성비와 유사하였다. 모든 시기에 걸쳐 침실에서 fiber 구성비가 다른 공간에 비해 비교적 높게 나타났다. 실험실의 fiber 비율은 평균 10%, 식당의 fiber 비율은 평균 14%, 침실은 25%로 침실에서의 fiber 비율이 2배가량 높게 나타났다. 앞서 제시한 폴리머 구성비에서도 침실에서 채취한 시료에서 PET 비율이 상대적으로 높게 나타났는데, 이 결과들은 침실에서의 fiber의 상대적으로 높은 검출은 PET 기반의 fiber에서 기인한 것으로 연구기지 내 실내 대기 침적의 오염원의 특성을 반영한 결과라고 볼 수 있다.

(3-3-3) 실외 대기 부유

2024년 1월, 3월, 5월, 7월, 9월, 11월에 조사된 실외 대기 부유에서의 미세플라스틱 형태 구성비를 (그림 22c)에 제시하였다. 평균적으로 형태 구성은 fragment(81%) > fiber(19%) > sheet(미검출), spherule(미검출)로 일반적인 환경에서 발견되는 미세플라스틱 형태 구성비와 유사하였다. 모든 시기에 fragment가 가장 우점했음에도 불구하고 fiber가 비교적 높은 비율로 검출되었는데, 이 결과는 실내 대기 침적 시료의 결과와 유사하다. 결과적으로 이러한 결과는 침구류 및 의복류 등에서 주로 발생하는 PET fiber의 영향이라고 판단된다. 그러나, 실내 대기 침적 시료에 비해 실외 대기 시료에서 전 기간에 걸쳐 fiber 형

태가 일정한 점유율을 가지고 검출된 것은 주목할만 하다. Fiber형태는 다른 형태의 입자보다 공기역학적으로 더 오랫동안 대기에 부유할 수 있기 때문에 대기 장거리 이동을 통한 유입 또한 무시할 수 없다.

(3-4) 육상환경 매체 미세플라스틱 크기 구성비

(3-4-1) 육상토양

2023년 1월에 조사된 육상토양에서의 미세플라스틱의 크기 구성비를 (그림 23a)에 제시하였음. 세종기지 인근 육상토양에서의 미세플라스틱 크기 구성은 다른 매체에서와 유사하게 모든 정점에서 입자크기가 작아질수록 기하급수적으로 증가하는 환경 매체에서 관측되는 전형적인 크기분포를 보인다. 원거리 정점에서 가장 작은 크기군(20-100 μm)의 비율이 줄어들고 상대적으로 큰 크기군의 미세플라스틱 비율이 증가한 모습을 보였는데 이것은 상대적으로 입자 크기가 큰 PET fiber의 비율이 증가한 것 때문이다.

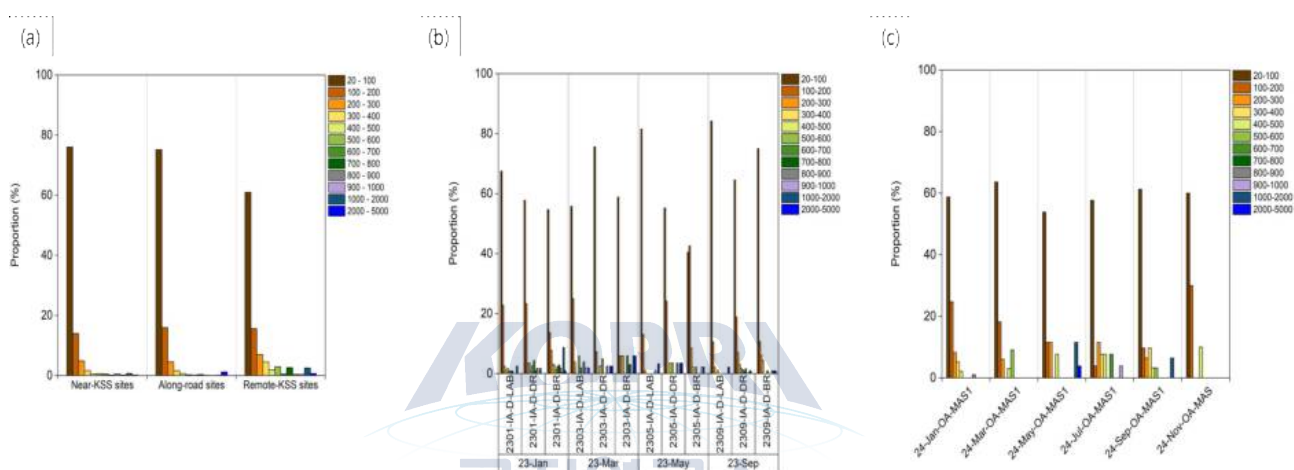


그림 23. 세종기지 육상환경 매체들에서의 미세플라스틱 크기 구성비: (a) 육상 토양, (b) 실내 대기 침적, (c) 실외 대기 부유

(3-4-2) 실내 대기 침적

2023년 1월, 3월, 5월, 9월에 조사된 실내 대기 침적에서의 미세플라스틱 크기 구성비를 (그림 23b)에 제시하였다. 미세플라스틱의 크기 구성은 입자크기가 작아질수록 기하급수적으로 증가하는 환경 매체에서 관측되는 전형적인 크기분포를 보인다. 폴리머 재질 및 형태 구성비에서 논의한 것처럼, 다른 채집 장소에 비해 침실에서의 가장 작은 크기군(20 - 100 μm)의 비율이 줄어드는 대신 큰 크기군들의 비율이 상대적으로 증가한 것은 크기가 큰 PET fiber의 비율이 증가했기 때문인 것으로 추정된다.

(3-4-3) 실외 대기 부유

2024년 1월, 3월, 5월, 7월, 9월, 11월에 조사된 실외 대기 부유에서의 미세플라스틱 크기 구성비를 (그림 23c)에 제시하였다. 모든 매체에서 관측된 것과 유사하게 미세플라스틱의 크기 구성은 모든 조사 시점의 시료들에서 공통적으로 입자크기가 작아질수록 기하급수적으로 증가하는 크기분포를 보인다.

(4) 연구기지 인근 수계 환경 및 육상 환경 매체별 오염도 종합 비교

(4-1) 분석 시료 현황 및 근거

본 연구에서는 수계환경과 육상환경으로 구분하여 조사가 진행되었는데, 조사된 수계 환경 매체는 ‘하수처리장 유입수(4점)’, ‘하수처리장 방류수(4점)’, ‘부둣가 표층해수(4점)’, ‘해변퇴적물(5점)’, ‘해양 표층퇴적물(3점)’ 등이며, 육상환경 매체는 ‘실내 대기 침적(12점)’, ‘실외 대기 부유(6점)’, ‘육상토양(9점)’ 등으로 구성되어 총 47개의 시료가 분석되었다. 각 시료는 운송 및 분석에 소요되는 시간을 고려하여 2023년에 채집된 시료들을 대상으로 가급적이면 유사한 계절(혹은 월)에 채집된 시료들을 짝을 지어 분석하였다. 예컨대, 하수처리장 유입수-방류수-부둣가 표층해수의 경우 2023년 하계대와 동계대 활동을 각각 포함하고 동계대 활동시의 계절별 변화를 반영할 수 있도록 1월, 4월, 7월, 10월 시료들을 선정하여 정성·정량 분석을 진행하였다. 육상토양과 해양 표층퇴적물은 2023년 1월 하계대 활동시에만 채취가능하여 해당 시료들을 대상으로 분석을 진행하였다. 해변퇴적물의 경우, 표층해수로부터 해변에 증착하는 오염도의 공간 분포와 하수처리장의 영향을 볼 수 있도록 마리안 소만 바깥쪽부터 안쪽까지 접근가능한 폭넓은 구간에서 정점을 선정하여 분석하였다. 마리안 소만 바깥쪽부터 안쪽까지 전체에 대한 해수 모니터링이 불가능하기 때문에 해변퇴적물은 해수 오염도의 공간 분포를 반영할 것으로 추정된다. 육상토양의 경우, 연구기지의 영향을 보기 위해 연구기지 주변, 연구기지의 차량 운행·화물 운송 등에 의해 발생하는 영향을 보기 위해 도로 주변, 연구기지 외곽의 비오염원 지점 등을 선정하여 공간적 분포를 조사하였다. 실내 대기는 2023년 1월, 3월, 5월, 9월 각 시기에 ‘침실, 실험실, 식당’의 3곳을 선정하여 실내 환경별, 시기별 침적되는 오염도를 조사하였고, 실외 대기는 시료 채취기가 2024년 1월에 설치되어 운영됨에 따라 2024년 격월 단위(즉, 1월, 3월, 5월, 7월, 9월, 11월) 시료를 대상으로 정성·정량 시료를 분석하였다. 전술한 시료들 외에도 ‘마리안 소만 표층해수(2023년 1회)’, ‘육상토양에 쌓인 눈(강설)’, ‘실내 대기 부유’ 시료들도 채취하였으나, ‘마리안 소만 표층해수’의 경우 운송 중 일부 시료가 파손되어 분석에서 무의미하다 판단하여 분석에서 제외하였으며, ‘눈(강설)’과 ‘실내 대기 부유’ 시료는 각각 실외 대기 부유 시료와 실내 대기 침적 시료 채집이 불가능할 경우를 대비하여 대안적으로 선정하여 채집된 시료였는데, 실외 대기 부유 및 실내 대기 침적 시료가 정상적으로 확보·분석이 진행됨에 따라 본 연구에서는 제외하였다.

(4-2) 매체별 미세플라스틱 오염도 및 잔류 특성 비교

분석 대상이 된 매체들을 ‘수체’, ‘토양/퇴적물’, ‘실내 대기 침적’, ‘실외 대기 부유’로 구분하여 미세플라스틱 오염도 범위와 평균을 (그림 24)에, 각 매체에서의 평균 폴리머·형태·크기 구성비를 (그림 25)에 비교하여 제시하였다. 평균 형태 구성비(그림 25b) 및 크기 구성비(그림 25c)는 매체 간에 큰 차이가 없으나 폴리머 구성비(그림 25a)에서 차이가 있음이 관측되었다.

(4-2-1) 수체

수체의 경우, 오염도는 하수처리장 방류수 > 하수처리장 유입수 > 부둣가 표층해수 순으로 발견되었다(그림 24a). 하수처리장 유입수에서보다 방류수에서 대략 2배 정도 높은 값이 검출된 것은 ‘최종 방류수조’가 아닌 ‘슬러지 등이 상존하는 방류조’에서 채집된 결과로 추정된다. 즉, 방류수 채취는 방류조에서 채취되었는데, 유입된 하수가 제대로 처리되지 않은 상태에서 슬러지에 농축된 상태로 부유하여 채집된 결과로 추정된다. 통상 하수처리장에서 응집·침전 등의 과정을 통해 슬러지가 형성되면 그것을 제거하여 탈수케익 형태로 반출하여 처리해야 한다. 그러나, 현재 세종기지 하수처리장에서 그 과정이 정상적으로 진

행되고 있는지 점검이 필요해 보인다. 방류수조의 하수가 일정 수위를 넘으면 최종방류수조로 넘어가는 구조이기 때문에 본 연구에서 진행된 방류조와 최종방류수조의 차이는 ‘별도의 처리과정’에 의한 것이 아닌 단순 체류시간과 상등액의 월류에 따른 배출 여부이다. 비록 본 연구에서 최종방류수조에서 방류수가 채취된 것이 아니더라도 현재 하수처리계통도와 시스템상 슬러지가 제거·처리되지 않고 있기 때문에 본 연구에서 조사된 방류수에서처럼 농축된 미세플라스틱이 최종적으로 방류될 가능성이 크다. 본 연구에서 조사된 방류조가 아닌 최종방류 수조의 위치와 하수의 흐름이 확인됨에 따라 2024년 10월부터 2025년 4월까지 최종방류수조에서 시료를 추가적으로 채취하였다. 그러나, 운송·분석에 소요되는 시간상의 한계로 본 연구에서는 분석을 진행하지 않았다. 해당 시료는 과제 종료 후 연구 논문 작성 과정에서 진행할 계획이다. 하수처리장 유입수 및 방류수와 비교할 때, 부도가 표층해수에서의 농도는 평균적으로 300-500 배 낮은 값을 보여 하수처리장에서 배출된 미세플라스틱이 배출 후에 빠르게 이동·확산·침강 등을 거치는 것으로 판단된다. 특히, 미세플라스틱 입자들의 폴리머 및 형태 구성비에서 일부 차이가 있지만 대체적으로 하수처리장 방류수에서 발견된 입자들이 부도가 해수에서 발견되고 있다(그림 25a). 일부 구성비에서의 차이는 이동·확산·침강 과정을 거쳐 입자들이 분급된 결과라고 추정된다. 비록 하수 발생량 및 배출량에 대한 제한된 자료와 불확실한 측정값으로 인해 정확한 값은 아니지만 추정된 1인당 일별 하수배출량을 통해 산정된 하수처리장으로부터 마리안 소만으로 유입되는 미세플라스틱은 연간 약 2.92×10^9 개로 추정된다.

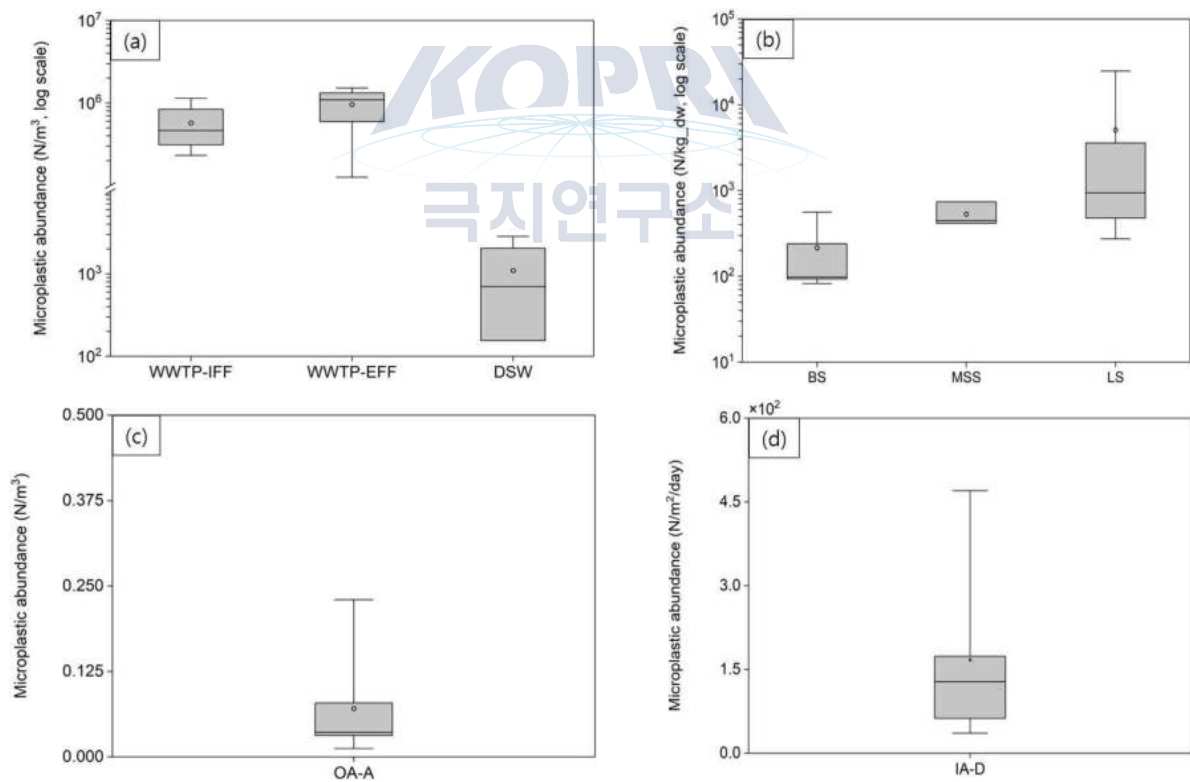


그림 24. 세종기지 인근 수계 및 육상환경매체들에 검출된 미세플라스틱 오염도: (a) 수체(하수처리장 유입수, 방류수, 부도가 표층해수), (b) 고형매체(해변퇴적물, 해양퇴적물, 육상토양), (c) 실내 대기 침적, (d) 실외 대기 부유(부유)

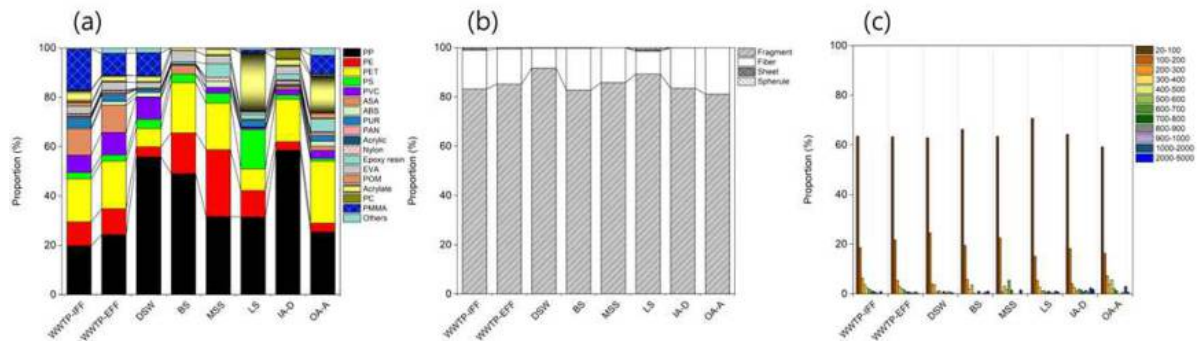


그림 25. 세종기지 인근 수계 및 육상 환경매체들에 검출된 미세플라스틱 잔류특성: (a) 폴리머 구성비, (b) 형태 구성비, (c) 크기 구성비

(4-2-2) 고형 매체

고형 매체의 경우, 미세플라스틱의 평균 오염도는 육상토양 > 해양퇴적물 > 해변퇴적물 순으로 발견되었다(그림 24b). 수계 고형매체인 해양퇴적물과 해변퇴적물 모두 하수처리장 인근 정점들에서 상대적으로 고농도가 발견되고 거리가 멀어질수록 감소하는 경향이 발견되어 수계 매체 모두가 하수처리장의 영향을 강하게 받는 것으로 추정된다. 하수처리장 방류수 및 부도가 표층해수에서 발견된 밀도가 큰 입자들(예, PVC, PMMA)이 해변퇴적물에서는 발견되지 않은 것은 이동·확산·침강을 거쳐 증착하는 과정에서 상대적으로 가벼운 입자들이 해변퇴적물에 증착한 결과로 해석된다. 반면, 해양퇴적물에서는 PMMA를 제외하고는 부도가 표층해수에서 발견된 미세플라스틱 입자들이 모두 발견되어 하수처리장→부도가 해수→해양퇴적물로 분류·전이를 설명하고 있다. 육상토양은 전술한 수계 고형매체들보다 평균적으로 10-40배 높은 오염도를 보였을 뿐만 아니라 검출된 폴리머 구성비에서도 수계 고형매체들에서 거의 검출되지 않거나 낮은 비율로 검출된 Acrylate와 PS가 육상토양에서 상대적으로 높은 비율로 검출된다(그림 25A). 이러한 결과는 육상토양이 수계의 영향보다는 연구기지 설비·활동으로부터 영향받았을 가능성을 의미한다. 특히, 육상토양의 경우 도로 주변 토양 > 연구기지 인근 토양 > 원거리 토양 순으로 오염도의 공간 분포를 보였는데 도로 주변 토양은 연구기지 주변 토양보다 6배, 원거리 토양보다 30배 높은 오염도를 보였다. 이러한 결과는 연구기지 설비 및 외부 활동이 주변 육상계에 중요한 오염원으로 작용함을 의미한다. 원거리 토양의 경우, 연구기지 주변이나 도로 주변 토양보다 5-30배 낮은 값을 보였을 뿐만 아니라 폴리머 및 형태 구성비에서 확인한 차이를 보여 연구기지 영향보다는 장거리 대기 이동·침적의 결과로 추정된다. 해양퇴적물과 다르게 육상토양 및 해변퇴적물이 대부분 작은 자갈들로 구성됨을 고려할 때, 해변퇴적물 및 육상토양의 미세플라스틱 오염도는 측정된 값보다 더 높을 것으로 추정된다.

(4-2-3) 대기 매체

본 연구에서 실내 대기 침적과 실외 대기 부유가 채집되어 분석되었다(그림 24c,d). 두 매체는 단위가 서로 다르므로 오염도의 직접 비교가 불가능하다. 실내 대기 침적의 경우, 하계대가 활동한 1월에 높은 오염도를 보였다가 하계대가 철수한 후인 3월과 5월에 감소했다가 9월에 다시 증가하는 경향을 보였다. 이러한 월별 오염도와 발견된 미세플라스틱 입자의 잔류 특성이 하수처리장 유입수와 유사함을 보여 실내 활동의 결과가 하수처리장 오염도에 반영됨을 보였다. 실외 대기 부유 시료에서 체류 인원과 외부 활동이 크게 증가한 1월에 가장 높은 오염도를 보이고 하계대가 철수하고 외부 활동이 감소한 동계 기간에 오염도가 급격히 감소한 경향을 보여 연구기지 활동이 중요한 오염원으로 작용할 수 있음을 보여준다. 특히, 실외 대기 부유 1월 시료에서 인근 육상토양에서 높은 비율로 검출된

Acrylate가 높게 검출된 것은 육상토양에서 대기로 비산한 결과로 추정된다.

(4-2-4) 종합 결론

본 연구에서 조사된 수계환경 및 육상환경 매체들에서 조사된 미세플라스틱의 월별(혹은 계절별) 오염도와 공간 분포 자료와 미세플라스틱의 잔류 특성 자료는 연구기지 활동이 주변 환경에 중요한 오염원이 됨을 보여주고 있다. 수계환경 매체의 경우, 실내 환경→하수처리장→마리안 소만의 수계(해수, 해변퇴적물, 해양퇴적물)에 연속적으로 영향을 주고 있음이 확인되었으며, 이와 다르게 육상환경의 경우 연구기지 설비·활동이 토양 및 대기에 영향을 줄 수 있음이 확인되었다. 이러한 결과로 볼 때, 세종기지 주변 환경의 미세플라스틱 오염 저감을 위해서는 연구기지 하수처리장 설비 개선 및 운영 개선이 필요해 보이며, 동시에 육상에 설치된 설비들의 개선(특히, 도로를 활용한 차량 등 운송장비)이 필요해보인다.

(5) 조사 매체, 조사 시기, 조사 시점, 조사 방법론에 대한 평가 및 중장기모니터링 설계

본 연구에서 수계 및 육상환경의 다양한 환경매체에 대한 시료 채취 및 분석을 진행하였다. 연구 결과는 수계환경은 실내 환경→하수처리장→마리안 소만의 수계로 연결되는 경로로 오염이 진행되며, 육상환경은 연구기지 설비 및 외부 활동이 기지 주변 토양과 실외 대기 오염에 영향을 줄 수 있음이 확인된다. 연구기지의 영향이 명확히 확인됨에 따라 향후 연구기지로 인한 미세플라스틱 오염 저감 노력이 필요하며 그러한 저감 노력의 결과를 파악하기 위한 중장기 모니터링이 설계되어 진행될 필요가 있다. 하지만, 열악한 환경조건에서 시료 채취가 안정적으로 진행되기 어려우며 채취된 시료의 운송 및 분석에도 상당한 시간이 소요되기 때문에 효율적인 모니터링 설계가 중요하다. 지금까지의 연구 결과를 바탕으로 예상 가능한 중장기 모니터링을 위한 주요 매체 및 시료 채취 수를 배출 저감 방안과 함께 제안한다(표. 5).

표 5. 중장기 모니터링을 위한 매체별 시료 목록

구분	경로	조사 매체	조사 시점	조사 정점	비고
배출원	수체	하수처리장 유입수	정기모니터링 (계절별 조사 연 4회)	하수처리장 유입수조	1, 4, 7, 10월 채취 - 최소한 하계대와 동계대 활동을 대표하는 1월과 7월에 조사) - 배출 저감을 위한 하수처리장 운영 및 설계 재검토 필요 - 설비 개선 이후 처리 효율 평가를 위해 유입수와 방류수 동시 조사 - 하수발생량 지속 모니터링 및 슬러지 처리공정 필요
		하수처리장 방류수	정기모니터링 (계절별 조사 연 4회)	하수처리장 최종방류수조	
	대기	실내 대기 (침적시료)	정기모니터링 (계절별 조사 연 4회)	실내 3개 (침실,식당,실험실)	- 하수처리장과 연계하여 채취할 필요 있음 - 저감을 위해, 실내 먼지 청소 및 제거와 환기 필요 - 채취기 소음 문제로 채취에 제한 - 가능한 경우, 식당에서만 조사 - 침적시료가 대체할 수 있으므로 불필요할 수 있음
		실내 대기 (부유)	정기모니터링 (계절별 조사 연 4회) 혹은 불필요	실내 1개 (식당)	
주변 환경	수체	기지 주변 표층해수	정기모니터링 (계절별 조사 연 4회)	부둣가 1개	하수처리장 조사와 연계하여 진행할 필요 있음.
		해변퇴적물	1회성 모니터링 (하계×1회/2-3년)	해변 6개 정점	- 매년 조사할 필요없이 매 2-3년 단위 조사 가능 - 공간 분포를 위해 6개 정점 추천
		해양퇴적물	1회성 모니터링 (하계×1회/2-3년)	마리안 소만 3-5개 정점	- 매년 조사할 필요없이 매 2-3년 단위 조사 가능 - 공간 분포를 위해 3-5개 정점 추천
	대기	기지 주변 눈(강설)	불필요		- 육상토양 및 실외 대기 부유시료가 조사된다면 불필요 - 단, 토양과 실외 대기가 조사되지 않는다면 대안적인 매체가 될수 있음
		기지 주변 부유	정기모니터링 (계절별 조사 연 4회)	기지 1개 정점	하수처리장, 해수, 실내 대기 침적과 연계하여 조사할 필요있음
	육상	기지 주변 토양	1회성 모니터링 (하계×1회/2-3년)	기지 및 주변 9개 정점	- 매년 조사할 필요없이 매 2-3년 단위 조사 가능 - 공간 분포를 위해 6개 정점 추천 - 기지 영향 및 비영향 지역을 고려한 정점 선택 필요

제 4 장 연구개발목표 달성도 및 대외기여도

제1절 연구개발목표 달성도

년도	성과목표	세부목표	가중치	평가의 착안점 및 척도
1차년도 (2023)	모니터링을 위한 사전 기반 구축 및 시범 조사	- 남극 연구 문헌 조사 - 매체별 사전조사 및 시료 확보 - 분석법 확립 및 시범 분석 - 증장기 모니터링 설계	10 40 40 10	1. 극지연구소 연구원들과의 공동 연구 수행 능력 2. 목표한 연구내용 초과 달성 여부 3. 시료 채취 및 분석에서의 상대적 어려움을 고려한 연구 수행 능력 평가 4. 증장기 모니터링 설계를 위한 연구추진 능 력과 연구결과의 적용가능성
2차년도 (2024)	남극 연구기지 (세종기지) MP 수계 배출 특성 및 주변 수계환 경 오염도 조사	- 수계 유입원(하수처리장) 정기 모니터링 - 마리안 소만 해수 정기 모니터링 - 주변 수계환경 오염도 조사	50 30 20	1. 극지연구소 연구원들과의 공동 연구 수행 능력(시료채취) 2. 목표한 시료 채취 초과 달성 여부(하수처리 장 유입수/방류수 총 42건, 부돗가 표층해수 21건, 해변퇴적물 총 11건, 표층해수 2 건, 해양표층퇴적물 3건 등 총79건 채취 완 료함) 3. 2차년도 목표한 정성·정량분석 시료수(15건) 과 비교하여 초과 달성 여부(하수처리장 유 입수/방류수 총 8건, 부돗가 표층해수 4건, 해변퇴적물 5건, 해양 표층퇴적물 3건등 총 20건 분석 완료) 4. 시료 채취 및 분석에서의 상대적 어려움을 고려한 연구 수행 능력 평가 5. 분석 자료 해석 및 연구결과의 연구기지 영 향 평가에 활용 가능성
3차년도 (2025)	남극 연구기지 (세종기지) MP 육상환경 배출 특성 및 주변 육 상환경 오염도 조사	- 연구기지 실내 대기 오염도 조사 - 연구기지 외부 대기를 통한 오염도 조사 - 연구기지 주변 및 인근 육상토양 오염도 조사 - 연구기지(세종기지) 기반 인간 활동 영향 종합 평가	30 20 45 5	1. 극지연구소 연구원들과의 공동 연구 수행 능력(시료 채취) 2. 목표한 시료 채취 초과달성 여부(실내 대기 침적 총 45건, 실내 대기 부유 총 33건, 실 외 대기 부유 총 42건, 육상토양 총 27건 총 114건 채취) 3. 2차년도 목표한 정성정량분석 시료수(15건) 과 비교하여 초과달성 여부(실내 대기 침적 총 12건, 실외 대기 부유 6건, 육상토양 9 건등 총 29건 분석 완료) 4. 연구기지 인간활동 영향에 대한 종합평가 여부 5. 시료 채취 및 분석에서의 상대적 어려움을 고려한 연구 수행 능력 평가 6. 분석자료 해석 및 연구결과의 연구기지영향 평가에 활용가능성

제2절 목표달성을 위한 연구수행 방법

성과목표	세부목표	연구수행방법 (이론적·실험적 접근방법)	구체적인 내용
모니터링을 위한 사전 기반 구축 및 시범 조사	사전조사 수행을 통 한 충분한 수의 시 료 확보 및 시범 분 석 자료 확보	1. 매체별 대표성있는 시료 채취	• 시료 채취 기술 • 시료 채취 표준절차 확립
		2. 매체별 미세플라스 틱 정성·정량 화학분 석	• 미세플라스틱 정성·정량 분석법 확립 • 미세플라스틱($\geq 20 \mu\text{m}$)에 대한 폴리머 재질, 형태, 크기에 대한 분석자료 산출
		3. 중장기모니터링 연 구설계	• 자료 종합 및 분석을 통한 연구계획안 제시
남극 연구기지 (세종기지) 유래 미세플라스틱의 수계 배출 특성 및 주변 수계환 경 오염도 조사	수계를 통한 연구기 지의 영향을 평가하 기에 충분한 매체(하 수처리장, 마리안 소 만 해수, 해변퇴적 물, 해양퇴적물)의 시료 확보, 미세플라 스틱 정성·정량분석 자료 확보	1. 수계 유입원(하수 처리장) 정기모니 터링	• 하수처리장의 유입수 및 방류수 시료 채취 표준절차 확립 • 유입수 및 방류수의 시료내 MP의 정량 정성·분석절차 확립 • 연구기지 잔류 인원 및 계절적 특성을 반영한 월별 시료 채취 및 분기별 시료 분석 • 미세플라스틱($\geq 20 \mu\text{m}$)에 대한 폴리머 재질, 형태, 크기에 대한 분석자료 산출
		2. 마리안 소만 해수 정기모니터링	• 표층해수 정기모니터링을 위한 정점(부 둑가) 선정 및 시료채취 표준절차 확립 • 하수처리장 운영상황(잔류인원 및 계절 적 특성)을 반영한 주변 해양에서의 월 별 시료채취 및 분기별 시료분석 • 미세플라스틱($\geq 20 \mu\text{m}$)에 대한 폴리머 재질, 형태, 크기에 대한 분석자료 산출 • 주변 수계환경의 영향정도 파악을 위한 조사대상 매체 선정 및 시료채취(표층 해수, 표층퇴적물, 해변퇴적물)
		3. 주변 수계환경 오 염도 조사	• 각 매체별 특성에 맞는 미세플라스틱 정성정량 분석법 확립 • 해변퇴적물 및 해양퇴적물을 대상으로 한 미세플라스틱($\geq 20 \mu\text{m}$)에 대한 폴리 머재질, 형태, 크기에 대한 분석자료 산 출
남극 연구기지 (세종기지) MP 육상환경 배출 특성 및 주변 육 상환경 오염도 조사	육상환경을 통한 연 구기지의 영향을 평 가하기에 충분한 매 체(실내 대기 침적, 실내 대기 부유, 실 외대기 부유, 육상토 양)의 시료 확보, 미 세플라스틱 정성·정 량 분석 자료 확보	1. 연구기지 실내 대 기 오염도 조사	• 실내 대기 침적 및 부유 시료채취 표준 절차 확립 • 실내 대기의 시료 내 MP의 정량정성분 석절차 확립 • 연구기지 잔류 인원 및 계절적 특성을 반영한 월별 시료 채취 및 분기별 시료 분석 • 미세플라스틱($\geq 20 \mu\text{m}$)에 대한 폴리머 재질, 형태, 크기에 대한 분석자료 산출
		2. 연구기지 외부 대 기 오염도 조사	• 실외대기 부유 시료채취 표준절차 확립 • 실외대기의 시료 내 MP의 정량정성분 석절차 확립 • 연구기지 잔류 인원 및 계절적 특성을 반영한 월별 시료 채취 및 분기별 시료 분석 • 미세플라스틱($\geq 20 \mu\text{m}$)에 대한 폴리머 재질, 형태, 크기에 대한 분석자료 산출

		3. 연구기지 주변 및 인근 육상토양 오염도 조사	• 연구기지 인근 육상토양 시료 채취 표준절차 확립 • 육상토양의 시료내 MP의 정량·정성분석절차 확립 • 연구기지의 영향을 평가할 수 있는 공간 특성을 반영한 시료 채취 및 시료 분석 • 미세플라스틱($\geq 20 \mu\text{m}$)에 대한 폴리머 재질, 형태, 크기에 대한 분석자료 산출
	1-3차년도 연구 결과 종합을 통한 매체별 오염도 파악	4. 연구기지 기반 인간 활동 영향 종합 평가	• 1-3차년도에 걸친 수계환경 및 육상환경의 각 매체에서 측정된 MP의 공간별, 시기별 오염도와 잔류 특성 분석 결과 비교자료 확보 • 확보된 분석 결과 자료로부터 매체별 연구기지 영향 여부 파악 및 수계환경과 육상환경에 주로 영향을 주는 경로 파악

제3절 추가 연구의 필요성 및 대외기여도

- 본 연구 사업을 통해 극지연구소 월동대 및 연구자들의 협력과 협조가 중요했고, 원활한 의사소통 구조를 통해 목표한 연구 내용을 모두 초과 달성하였다.
- 연구 사업 기간 및 원거리 지역이라는 특성 때문에 시료 보관·운송·분석에 소요되는 시간문제로 종합적으로 판단할 수 있는 자료가 과제 종료 시점에 산출되었으며 이 결과를 바탕으로 본 연구에서 채취되었으나 미분석된 시료들을 선별하여 분석할 계획이다.
- 본 연구에서 산출된 결과들은 연구기지 영향을 종합적으로 이해하는데 큰 도움이 될 것으로 사료되는 바, 향후 참여한 극지연구소 연구자들과 함께 다양한 연구논문 작성에 활용될 계획이다.
- 논문 출간 이후, 해당 자료들은 남극 조약 하의 다양한 국제기구(AMAP, SCAR 등)에서 발표를 통해 국내 연구진의 우수성을 알리고 향후 유사 연구를 개발하고 주도할 수 있는 기반을 마련하는데 활용하고자 한다.

제 5 장 연구개발결과의 활용계획

가. 학술적 파급효과

- 남극 과학기지 및 주변 환경에 대한 미세플라스틱 배출특성 및 오염도 자료 확보를 통한 연구기지 활동 영향 평가에 활용
- 남극 미세플라스틱 발생 및 축적과 전 지구적 미세플라스틱 순환에서 남극환경의 기여도 및 영향 평가에 기여
- 남극 미세플라스틱 주 배출 및 오염경로로써 해류 및 대기 순환의 영향 파악을 위한 자료 확보
- 연구기지 상주 인원의 실내 대기를 통한 미세플라스틱 호흡노출량 평가
- 연구기지 인근 수계 및 토양 환경 미세플라스틱 오염에 따른 생태계 적응 및 변화 추적에 활용
- 연구기지 운영에 따른 주변 환경을 포함한 남극생태계 미세플라스틱 위해성 평가에 활용
- 연구기지 및 주변 환경에 대한 국내 연구진의 중장기 모니터링 체계 및 기반 구축
- 다양한 환경매체 조사를 통해 남극환경에 대한 인위적 환경영향평가 연구 개발사업 개발 및 수립

나. 경제적 파급효과

- 극지 환경 미세플라스틱 오염에 대한 사회적 관심 증대 및 이에 따른 연구기지 및 주변 환경 중장기 모니터링을 위한 모멘텀 확보
- 중장기 연구를 통한 남극 환경 연구 전문가 양성 및 배출
- 인위적 활동에 의한 연구기지 기원 미세플라스틱 배출을 최소화하기 위한 처리기술 개발 및 오염 저감을 위한 최적의 기지 운영 조건 확립에 기여
- 연구기지 내 환경 모니터링 및 연구기지 상주 인원의 미세플라스틱 노출평가를 통해 안전한 연구기지 구축 및 개선에 기여
- 남극환경에서의 미세플라스틱 연구를 선도하고 국제 협력 연구 수행을 위한 국내 연구진 협력체계 및 연구 기반 구축
- 남극조약에 따른 다양한 국제기구 활동에 있어 국내 연구진의 연구 자료에 근거한 아젠다 수립에 기여하고 국제공동연구 협력 조율 및 국제적 대응체계 구축에 활용

제 6 장 연구개발과정에서 수집한 해외과학기술정보

매체	채집 년도	채집 방법	채집 지역	MPs 농도 (particles/m ³)	우점 형태	분석 크기군 (μ m)	참고 문헌
표층 해수	2016	neuston net(350 μ m) 2-3knots,20-40min	From fremantle to Hobart	0.031($\pm$ 0.041)	only fragment	>350	Isobe et al. (2017)
	2018	HydroBios-net(300 μ m) 1-2knots,30min	Around the Antarctic continent	-	-	>300	Kuklinski et al. (2019)
	2018	HydroBios microplastics net (300 μ m) 2-3knots,30min	Adelaide Island	0.013	fragment	>100	Jones-Williams et al. (2020)
	2018	Manta net(330 μ m) 2.5-3.5knots,15-20m in	Around the Antarctic Peninsula	0.008	only fragment	>330	Lacerda et al. (2019)
	2017- 2018	Manta net(330um) 4knots,10-15min	Around southeastern pole including Ross sea	0.10($\pm$ 0.14)	fiber> fragment	>330	Zhang et al. (2022)
표하층 해수	2017, 2018, 2020	20L stainless steel Niskin bottles	Three fjords along the Western Antarctic Peninsula	0.579	fragment> fiber	>1	Graza et al. (2023)
	2010	pump system 5m아래의해수채집후 1 μ m에 여과	The Ross Sea	0.17($\pm$ 0.34)	fragment> fiber	>60	Cincinelli (2017)
	2017- 2018	Pump svstem 0-0.5m채집후330um 에 여과	Around southeastern pole including Ross sea Antarctic	1.66($\pm$ 1.20)	fiber> fragment	>330	Zhang et al. (2022)
	2019- 2020	Pump svstem 0-0.3m채집후1.5mm, 0.1mm에 여과	(south of 40°S)	0.43	fragment> fiber	>100	Pakhomova et al. (2022)
수직층 해수	2010- 2011	zooplankton net(150 μ m) 수심50m	Admiralty Bay	0.024($\pm$ 0.045)	only fiber	>2000	Absher et al. (2018)
저층 해수	2017, 2018, 2020	20L stainless steel Niskin bottles	Three fjords along the Western Antarctic Peninsula	0.254	fragment> fiber	>1	Graza et al. (2023)
저서 퇴적물	2003	diving or box coring 0-3cm채집	Adelaide Island	0.05 (n/ml)	fiber	>100	Reed et al. (2018)
	2015	Van Veen grab (표면 0.18m ²)	The Ross Sea	41.3 (n/m ²)	fragment	>300	Munari et al. (2017)
	2017, 2019	Multicorer	Antarctic Peninsula, South Sandwich Islands, South Georgia	1143.334 ($\pm$ 137.96) (n/kg)	fragment>f iber	>0.7 (but visual)	Cunningham et al. (2020)
모래 퇴적물	2018	Metal spatula 0-1cm채집	Peninsula. King George Island	0.153 (n/ml)	fiber	>1	Perfetti-Bolaño et al. (2022)
눈 (강설)	2021	500 mL stainless-steel bottle. stainless-steel 스푼 사용 0-2 cm 채집	Across the Ross Island region of Antarctica	0.029	fiber>frag ment	>1.2 (minimu m size = 44)	Aves et al. (2022)
	-	800mL stainless steel tankard (ECOtanka™) 사용 20-40 cm에서 채집	Union Glacier, Schanz Glacier, and the South Pole	0.073 - 3.099 0.817($\pm$ 0.310 SE)	fragment> fiber	>11	Rowlands et al. (2023)
해빙	2009	Ice corer	East Antarctic	11710	-	>11	Kelly et al.

			coastal				(2020)
저서 생물	2015	Van Veen grab	The Ross Sea	1/individual	fragment> fiber	>33	Sfriso et al., (2020)
배설물 (물범)	2019	Metallic shovel을 사용하여 한 개 체에서 배설 직후의 시료 채취	The South Shetland Islands	-	-	>500	Garcia-Garin et al. (2020)
배설물 (펭귄)	2009	Nitrile gloves을 사용하여 한 개 체에서 배설 직후의 시료 채취 Plasticbag에냉동보 관	Bird Island, South Georgia, Signy Island, South Orkney Islands	0.23(±0.53) /individual	fiber> fragment	>60	Bessa et al. (2019)
어류	2020	Bottom trawling net (2.2 m wide, 0.65 m high, 6.5 m long, 20 mm mesh diameter)	The Ross Sea, The Amundsen Sea	1.227 /individual	fiber> fragment	>10	Zhang et al. (2022)
크릴	2021	Mechanized trawler 2knots,1-2h	the South Shetland Islands, the South Orknev Islands	0.245 /individual	fiber	>150	Zhu et al. (2023)



제 7 장 참고문헌

- Absher, T. M., Ferreira, S. L., Kern, Y., Ferreira Jr, 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.
- Allen, D., Allen, S., Abbasi, S. (et al.), 2022. Microplastics and nanoplastics in the marine-atmosphere environment. *Nat. Rev. Earth Environ.* 3, 393–405.
- Aves, A. R., Revell, L. E., Gaw, S., Ruffell, H., Schuddeboom, A., Wotherspoon, N. E., ... & McDonald, A. J. (2022). First evidence of microplastics in Antarctic snow. *The Cryosphere Discussions*, 2022, 1–31.
- Bessa, F., Ratcliffe, N., Otero, V., Sobral, P., Marques, J. C., Waluda, C. M., ... & Xavier, J. C. (2019). Microplastics in gentoo penguins from the Antarctic region. *Scientific reports*, 9(1), 14191.
- Braun, C., Esefeld, J. Peter, H.-U., 2017. Monitoring the consequences of local climate change on the natural resources of the ice-free regions of Maxwell Bay (King George Island, Antarctic). German Environment Agency Report. Report No. (UBA-FB) 002366/ENG.
- 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.
- COMNAP, 2017. Antarctic station catalogue.
- Cunningham, E. M., Ehlers, S. M., Dick, J. T., Sigwart, J. D., Linse, K., Dick, J. J., & Kiriakoulakis, K. (2020). High abundances of microplastic pollution in deep-sea sediments: evidence from Antarctica and the Southern Ocean. *Environmental science & technology*, 54(21), 13661–13671.
- Frazer, C.I., Morrison, A.K., Hogg, A.M. (et al.). 2018. Antarctica's ecological isolation will be broken by storm-driven dispersal and warming. *Nat. Climat. Chang.* 8, 704–708.
- Garcia-Garin, O., García-Cuevas, I., Drago, M., Rita, D., Parga, M., Gazo, M., & Cardona, L. (2020). No evidence of microplastics in Antarctic fur seal scats from a hotspot of human activity in Western Antarctica. *Science of The Total Environment*, 737, 140210.
- Garza, T. N., Barnes, D. K., Scourse, J. D., Whitaker, J. M., & Janosik, A. M. (2023). Quantifying microplastics in fjords along the Western Antarctic Peninsula. *Marine pollution bulletin*, 193, 115144.
- 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.
- Jones–Williams, K., Rowlands, E., Primpke, S., Galloway, T., Cole, M. J., Waluda, C., & Manno, C. (2025). Microplastics in Antarctica–A plastic legacy in the Antarctic snow?. *Science of the Total Environment*, 966, 178543.
- Kelly, A., Lannuzel, D., Rodemann, T., Meiners, K. M., & Auman, H. J. (2020). Microplastic contamination in east Antarctic sea ice. *Marine Pollution Bulletin*, 154, 111130.
- Kim, B.-K., Hwang, J.-H., Kim, S.-K., 2023. Modeling of microplastics discharged from a station in Marian Cove, West Antarctica. *Mar. Pollut. Bull.* 186, 114441.
- Kim, M. J., Na, S. H., Batool, R., Byun, I. S., & Kim, E. J. (2022). Seasonal variation and spatial distribution of microplastics in tertiary wastewater treatment plant in South Korea. *Journal of Hazardous Materials*, 438, 129474.
- Kim, S.-K., Lee, H.-J., Kim, J.-S. (et al.), 2021. Importance of seasonal sea ice in the western Arctic ocean to the Arctic and global microplastic budgets. *J. Hazard. Mater.* 418, 12591.
- 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), 3977.
- Munari, C., Infantini, V., Scoponi, 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.
- Pakhomova, S., Berezina, A., Lusher, A. L., Zhdanov, I., Silvestrova, K., Zavialov, P., ... & Yakushev, E. (2022). Microplastic variability in subsurface water from the Arctic to Antarctica. *Environmental Pollution*, 298, 118808.
- Perfetti–Bolaño, A., Araneda, A., Muñoz, K., & Barra, R. O. (2022). Occurrence and distribution of microplastics in soils and intertidal sediments at Fildes Bay, Maritime Antarctica. *Frontiers in Marine Science*, 8, 774055.
- Pirani, L. S. R., Picone, A. L., Costa, A. J., Silvestri, G. E., Berman, A. L., Sznajder, F., ... & Vodopivec, C. (2024). Airborne microplastic pollution detected in the atmosphere of the South Shetland Islands in Antarctica. *Chemosphere*, 368, 143762.
- Reed, S., Clark, M., Thompson, R., & Hughes, K. A. (2018). Microplastics in marine

- sediments near Rothera research station, Antarctica. Marine pollution bulletin, 133, 460-463.
- Sfriso, A. A., Tomio, Y., Rosso, B., Gambaro, A., Sfriso, A., Corami, F., ... & Munari, C. (2020). Microplastic accumulation in benthic invertebrates in Terra Nova bay (Ross Sea, Antarctica). Environment international, 137, 105587.
- Zhang, M., Liu, S., Bo, J., Zheng, R., Hong, F., Gao, F., ... & Fang, C. (2022). First evidence of microplastic contamination in Antarctic fish (Actinopterygii, Perciformes). Water, 14(19), 3070.
- Zhang, S., Zhang, W., Ju, M., Qu, L., Chu, X., Huo, C., & Wang, J. (2022). Distribution characteristics of microplastics in surface and subsurface Antarctic seawater. Science of the Total Environment, 838, 156051.
- Zhu, W., Liu, W., Chen, Y., Liao, K., Yu, W., & Jin, H. (2023). Microplastics in Antarctic krill (*Euphausia superba*) from Antarctic region. Science of The Total Environment, 870, 161880.



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.