TSPM16040-076-6

인위적 환경오염 물질(미세플라스틱)의 정량화 방법 정립

Development of analytical methods for anthropogenic pollutants (microplastics)

KOPRI
극지연구소

인천대학교 산학협력단

제 출 문

극지연구소장 귀하

본 보고서를 “북극해 환경변화 통합관측 및 활용연구” 과제의 위탁연구 “인위적 환경오염 물질(미세플라스틱)의 정량화 방법 정립” 과제의 최종보고서로 제출합니다.

2017. 06. 30

(본과제) 총괄연구책임자 : 강 성 호

위탁연구기관명 : 인천대학교 산학협력단

위탁연구책임자 : 김 승 규

위탁참여연구원 : TIANZHEXI (전 철 석)

“ : 이 희 지

“ : 노 지 우

“ : 성 지 연

“ : 송 난 선

위탁연구과제명	인위적 환경오염 물질(미세플라스틱)의 정량화 방법 정립				
위탁연구책임자	김 승 규	해당단계 참여연구원수	6명	해당단계 연구비	50,000,000원
연구기관명 및 소속부서명	인천대학교 산학협력단		참여기업명	없음	
국제공동연구	상대국명 : 없음		상대국연구기관명 : 없음		

요약(연구결과를 중심으로 개조식 500자이내)	보고서면수	

- 본 연구의 최종목표는 북극해양환경내 미세플라스틱(MPs)의 기원, 분포 및 거동기작 규명하여 향후 미세플라스틱에 의한 북극해양생태계 및 북극환경 변화에 미치는 영향을 추적하는데 활용하기 위함임.
- 총 5개년으로 구성된 본 연구의 1차년도에는 'manta-trawl net'를 이용한 북극표층해수 중 잔류 MPs 조사분석법 확립과 오염도 분포특성을 조사하는 것이었으나, 연구지역 특성을 고려하여 5개년 각각의 조사대상 매체(해수표층, 해수표하층, 해빙, 퇴적물)를 screening 차원에서 모두 조사하였음. 이들 시료는 5개년에 걸쳐 점진적으로 분석될 계획이며, 경우에 따라 매년 반복조사를 통해 시계열적 변동을 분석하는데 활용할 계획이었임.
- 1차년도 채취시료는 해수표층(12개 정점), 해수표하층(수직-21개 정점, underway-32개 정짐), 해빙(7개 정점), 퇴적물(6개 정점)이고, 이 중 1차년도에 해수표층 12개 시료와 해빙 7개 시료에 대한 분석을 완료하였음.
- 해수표층에서 관측된 MPs의 오염도는 평균적으로 0.66 n/m^{3}으로써 북대서양으로부터 북극의 Barrent Sea로 유입되는 노르웨이 스발바도에서 관측된 0.30 n/m^{3}과 유사하거나 다소 높은 수준이었고, 베링해에서 북극해로 진행함에 따라 감소하는 경향이 관측됨.
- 특히, 해수표층에서 관측된 MPs의 주요 구성성분은 선박도료에서 기인했을 것으로 추정되는 페인트성 MPs여서 이 지역내 선박운항 증가의 결과이거나 연구선에서 기인했을 가능성이 있어 향후 이를 고려한 추가조사가 필요함.
- 해빙시료에서 관측된 MPs 오염도는 13,600 n/m^{3}으로써 5-10여년 전 관측된 선행연구값보다 수 백배 이상 높은 수준으로 그 증가원인을 규명하기 위한 추가연구가 필요함을 보여줌.
- 이번 1차년도 연구를 통해, 북극해의 여러 매체에 대한 조사방법이 확립되었으며 일부 매체에서의 오염도가 확인됨에 따라 향후 연차별 연구를 통해 대표성을 확보하고 그 기작을 규명하는 연구를 수행할 필요가 있음이 확인됨.

색 인 어 (각 5개 이상)	한 글	북극	미세플라스틱	오염도 지도	해빙트랩	심해침강
	영 어	Arctic region	microplastic	pollution map	sea-ice trapping	sinking

요 약 문

Ⅰ. 제 목

인위적 환경오염 물질(미세플라스틱)의 정량화 방법 정립

Ⅱ. 연구개발의 목적 및 필요성

북극해양환경에서의 미세플라스틱의 분포특성 및 거동기작 파악을 통해 미세플라스틱 오염지도 작성 및 해빙/결빙과 북극생태계에 미치는 영향을 추적하고자 함.

Ⅲ. 연구개발의 내용 및 범위

총 5개년으로 계획된 연구개발 내용 및 범위는 1) 표층해수, 해빙(sea-ice), 침강 및 표층 퇴적물 등 다양한 북극환경 매체에 잔류하는 미세플라스틱의 정성정량법을 확립하고, 2) 이를 통해 북극해의 각 매체에 잔류하는 미세플라스틱의 오염도 조사 빛 분포특성을 파악하며, 3) 미세플라스틱 기인성 유기오염물질의 북극해 환경교란 가능성 조사와 sea ice 형성 및 용해에 미치는 미세플라스틱의 영향을 파악하는 것이었음. 1차년도의 목표는 '표층해수 잔류 미세플라스틱 조사 및 정성정량법 확립 및 오염도 조사'임.

Ⅳ. 연구개발결과에 따른 기대성과

북극해양환경내 미세플라스틱 오염지도 작성을 통한 장기변화추적기반을 세우고, 미세플라스틱 연구에 대한 국내 연구진의 선도적 역할을 통한 국제사회에 기여하며, 플라스틱오염에 의한 북극환경 변화와의 관계/영향 연구에 대한 기반을 마련함.

Ⅴ. 연구개발결과의 활용계획

극지방 환경에서 관측된 미세플라스틱의 오염분포를 통해 북극으로의 오염물질 이동(혹은 오염원)에 대한 추적자로써 활용함. 또한 지구온난화와 북극권 해빙에 따른 북극환경내 미세플라스틱의 거동규명을 통해 미생물 등의 외래종 전파, 해류순환, 얼음의 해빙과 결빙 메카니즘과 그에 따른 주변 환경변화, 마린스노우(marine snow)와의 응집에 따른 관련 물질(탄소, 영양염, 오염물질 등)의 심해침강 등 생지화학적 순환 등과의 관련성 규명 및 추적자로의 활용할 수 있음.

KOPRI 극지연구소

S U M M A R Y

I. Title

Development of analytical methods for anthropogenic pollutants (microplastics)

II. Purpose and Necessity

This study aims to produce the pollution map of microplastic, to understand the possible effects of microplastics (MPs) on formation and melting of the ice and ecosystem in polar region by investigating the distribution characteristics and the fate of microplastics in the Arctic marine environment.

III. Contents and Scope

(1) Development of analytical methods of MPs in various media including seawater, sea-ice, sinking materials, and sediment,

(2) Investigation of distribution characteristics of MPs in each medium, and MPs-associated chemical pollutants in the Arctic environment,

(3) Understanding the possible effects of MPs on the formation and melting of sea ice

IV. Expected results

(1) Development of pollution map of microplastics and long-term monitoring,

(2) Leading of Arctic environment-associated microplastic studies,

(3) Understanding of microplastic-driven effect on change of the Arctic environment/ecosystem.

V. Application Plans

Application of MPs as a tracer by analyzing correlations between MPs behavior and several factors, such as: 1) exotic species, 2) circulation of the ocean, 3) melting and freezing mechanism of sea-ice, 4) biogeochemical circulation due to sinking of materials (ex. carbon, nutrients, pollutants etc.) with aggregation with marine snow.

KOPRI 극지연구소

〈 목 차 〉

1. 서론 ····· 1

2. 국내외 기술 개발 현황 ····· 4

3. 연구 개발 수행 내용 및 성과 ····· 9

4. 연구개발목표달성도 및 대외 기여도 ····· 17

5. 연구개발결과의 활용 계획 ····· 19

6. 연구 과정에서 수집한 해외 과학기술 정보 ····· 20

7. 참고 문헌 ····· 22

KOPRI
극지연구소

제1장. 서론

1. 연구개발 목적

2014년 기준으로 3억여톤에 달하는 플라스틱의 전세계 생산량은 2050년이 되면 연간 11억여톤이 생산될 것으로 추정되는데, 이 양은 2015년 기준으로 전체 탄소수지의 15%, 화석연료 소비량의 20%에 해당한다(PlasticsEurope, 2012). 생산된 플라스틱 중 연간 8백만톤이 해양으로 유입되며 결과적으로 해양에 누적적으로 존재할 것으로 추정되는 양은 현재 1.5억톤이며, 2050년이 되면 전체 해양 어류량보다 많아질 것으로 추정된다(Jambeck et al., 2015; Trevail et al., 2015).

최초 생산과정 중에서 미세하게 제조되거나, 환경 중에서 풍화되어 무기화되기까지 수 mm 이하 크기(통상적으로 1 mm – 5 mm)로 존재하는 것을 통상 '미세플라스틱(microplastics)'이라하며, 담수환경 및 해양환경의 수체, 퇴적물, 생물체 등 다양한 환경매체에 잔류하는 것으로 밝혀지고 있다. 예컨대, 미세플라스틱은 대양의 거대 환류지역(Gyre)의 해수(Cózar et al., 2014), 북극지방의 얼음(Obbard et al., 2014), 수천미터 깊이의 심해퇴적물(Cauwenberghe et al., 2013; Woodall et al., 2014)에서도 발견되고 있다. 이들 미세플라스틱은 해양 먹이사슬을 통해 전이될 하위 영양단계에서 상위 영양단계로 전이될 수 있고(Provencher et al., 2014; Collard et al., 2015; Desforges et al., 2015), 세포/면역/발달/생식 독성을 갖는다고 알려져 있으며(von Moos et al., 2012), 다양한 유해화학물질을 고농도로 흡착하거나 함유하고 있어 새로운 오염원이자 매개체로 작용할 수 있다(Cole et al. 2011).

전술한 것과 같은 해양환경내 지속적 오염증가 가능성, 장거리 이동성, 다양한 매체에서의 잔류성, 첨가/흡착성 오염물질의 전이매체로써의 작용성 등의 문제로 인해 UN 정부간 해양위원회(IOC)는 해양미세플라스틱문제를 해양건강성을 위한 3대 이슈 중 하나로 설정하였고, 전세계 저명 과학자들의 회의에서 미세플라스틱문제를 향후 지구환경에서 보존해야 할 15개 중요 이슈 중 하나로 결정하는 등 미세플라스틱문제는 해양환경보존을 위한 전세계 핵심이슈로 인식되고 있다(Sutherland et al., 2010).

해양환경에서 미세플라스틱의 거동 및 영향에 대한 중요성, 관심에도 불구하고 최근까지의 미세플라스틱에 대한 연구는 주로 연근해 해양환경(해변 퇴적물 혹은 해수)에서 검출되는 미세플라스틱의 재질, 농도, 크기분포 등을 특성화하는 것이 주류를 이뤄왔고, 대양 및 극지방에 대한 연구는 상대적으로 최근에 시도되고 있다. 특히, 플라스틱의 물질수지에 대한 최근의 검토에 따르면 플라스틱 발생량, 해양유입량, 그리고 해양잔류량 사이에 큰 차이가 관측되고 있다. 이에 대한 가능한 가설

KOPRI 극지연구소

로써, 1) 해양유입량의 과대추정, 2) 심해로의 퇴적에 의한 소멸, 3) 정성정량방법의 불확실성에 의한 해양잔류량의 과소평가, 4) 자연적 풍화과정에 의한 무기화의 가속화, 5) 해양생물에 의한 섭취, 6) 극지방 얼음으로의 포획 등이 제시되고 있다. 제시된 이들 모든 과정은 '연안환경'에서 '대양환경'으로, 그리고 다시 '극지방'이나 '심해퇴적환경'으로 연결되는 메카니즘들에 대한 설명을 필요로 한다. 그러나, 제시된 가설들 모두 전지구환경에서의 미세플라스틱의 물질수지에 대한 기여라는 측면에서 여전히 큰 불확실성을 내포하고 있어 각 메카니즘의 정성정량적 이해를 위한 연구가 필요하다.

2. 연구개발의 필요성

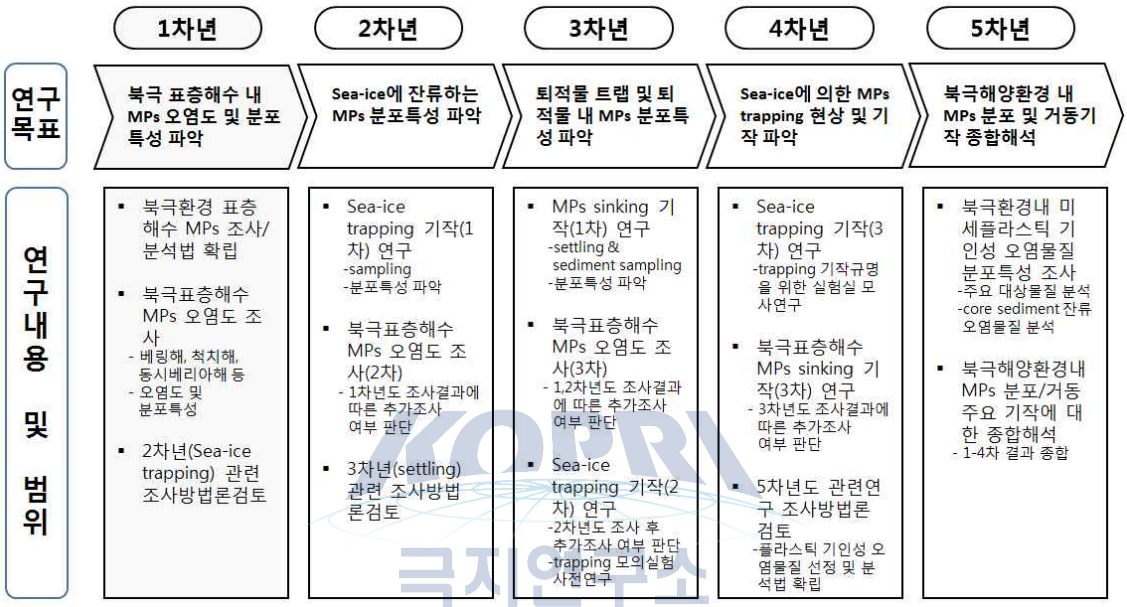
최근의 연구에 따르면 북극해의 해빙(sea-ice)에 잔류하는 미세플라스틱의 오염수준이 일반 대양에서 관측되는 오염수준보다 높은 것으로 관측되어 플라스틱에 의한 북극해의 지속적 오염과 그에 따른 북극해양생태계가 받을 수 있는 잠재적 위험이 커져 북극해양환경내 미세플라스틱의 오염도 및 분포특성, 거동기작, 생태계 및 지구환경에 미치는 영향 등에 대한 연구가 전지구적인 이슈로 부각되고 있다(Obbard et al., 2014). 그럼에도 불구하고, 북극해양환경으로 유입되는 미세플라스틱의 양과 기원, 북극해의 오염도 및 분포특성과 거동기작 등을 포함한 가장 기초적인 정보들부터 플라스틱 기인성 오염물질에 의한 북극해양생태계에 대한 영향, sea-ice의 결빙 및 해빙에 대한 플라스틱오염의 영향 등의 보다 장기적이고 복합적인 주제들까지 연구된 바가 거의 없다.

우리나라는 남북극에 연구기지를 운영하고 있으며 쇄빙선등을 통한 연구기반이 조성되어 있음에도 불구하고 우리나라 연구진에 의한 대양 및 극지방에서의 플라스틱 거동과 영향에 대한 연구는 전무한 상황이다. 따라서, 아라온호를 활용한 연구를 통해 단기적으로는 북극해양환경에서의 미세플라스틱에 대한 기초연구들부터 중장기적으로는 북극해양생태계 및 기후변화에 미치는 영향 등에 대한 연구들을 수행함으로써 북극해양환경연구(특히, 미세플라스틱 연구)를 선도할 수 있으리라 기대된다.

3. 연구개발의 범위

5개년도에 걸친 전체 연구내용 및 연구범위는 <Figure 1>에 제시하였다. 1차년도에는 북극환경에 잔류하는 미세플라스틱의 조사분석법 확립 및 표층해수잔류 미세플라스틱(MPs) 분포특성 파악을 조사하고, 2차년도에는 1차년도 표층해수에 대한 조사결과를 토대로 추가여부를 판단하고 신규로 sea-ice trapping기작 1차연구로써

현장 해빙(sea-ice)에 잔류하는 미세플라스틱 분포특성을 파악하며, 3차년도에는 1,2차년도 조사를 토대로 표층해수 및 해빙 추가조사여부와 함께 sinking기작 연구로써 settling/bed sediment에 잔류하는 MPs 분포특성을 조사하고, 4차년도에는 sinking기작 추가조사 및 ice trapping 실험실 모사연구를 진행하고, 최종년도에는 1-4차년도 연구결과의 종합을 통한 북극해양환경내 MPs의 거동기작을 해석하는 것을 주된 내용을 하고 있다.



KOPRI 극지연구소

<Figure 1> 연차별 연구목표, 연구내용 및 범위

제2장. 국내외 기술 개발 현황

1. 국내 기술 동향

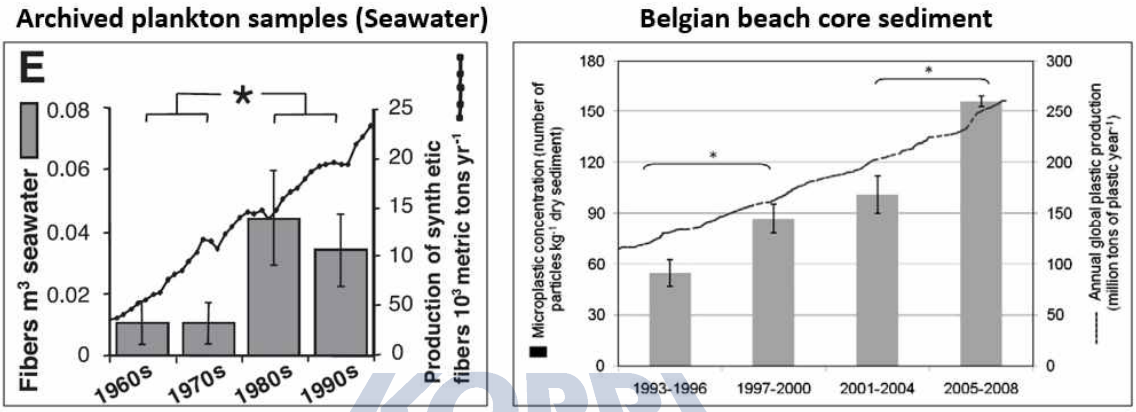
미세플라스틱이 국제적 이슈로 부각되면서 국내에서는 몇몇 연구진들에 의해 국내 환경에서의 미세플라스틱 연구가 진행되고 있다. 초기연구는 거대 해양쓰레기의 해변내 분포와 특성에 대한 현황파악이 주된 주제였으며, 10여년에 걸친 국제연안정화활동 등의 결과로 해양쓰레기 관리기본계획의 수립과 정기적인 해변쓰레기 모니터링사업이 구축될 수 있는 계기를 마련하였다. 최근에는 미세플라스틱 자체의 환경위해성에 대한 우려로 인해, 미세플라스틱의 각 연안해역별 오염도, 분포특성, 거동 및 동태, 오염물질 전이에 따른 생물영향, 배출량 등 환경위해성에 대한 연구가 해양수산환경개발사업의 일환(2015-2020)으로 진행되고 있으며, 이와 별도로 일부 연구진에 의해 육상환경에서의 미세플라스틱의 잔류특성 및 동태에 대한 연구가 한국연구재단의 연구사업으로 진행중에 있다. 그러나, 이들 연구의 모두가 육상 및 육상과 연계된 연안해양환경을 대상으로 진행되고 있고, 대양 및 극지방으로 연결되는 지구환경이라는 큰 틀에서의 거동 및 동태는 수행되고 있지 않다.

KOPRI 극지연구소

2. 국외 기술 동향

해양환경 중 미세플라스틱 오염에 대한 연구는 1970년대 초에 이미 Science지를 통해 보고된 바가 있다(Carpenter and Smith, 1972; Colton et al., 1974). 그러나, 비교적 최근에 플라스틱 생산량 및 사용량의 급증과 함께 해양환경내 미세플라스틱의 오염도도 비례하여 증가하는 것을 Thompson 등이 밝히면서(Thompson et al., 2004), 그 심각성이 인식되기 시작하였다 (Figure 2). 결과적으로 해양환경에서 미세플라스틱에 대한 연구는 다른 연구분야와 달리 비교적 최근에 대두된 이슈로써 그 연구결과가 매년 기하급수적으로 증가하고 있는 상황이다(Figure 3). 그 중요성만큼 연구주제들도 다양하며, 최근의 많은 연구논문들은 Science, PNAS 등 고급저널부터 해양환경관련 저널들까지 다양하게 수록되고 있다. 미세플라스틱에 관한 연구는 초기 단계에 해당하고 참신한 연구주제로 최근 주목받고 있으며 환경 및 해양분야의 큰 규모 학회들의 특별세션으로 구성되어 활발한 연구교류가 진행되고 있고, 여러 SCI급 학술지에서도 특별호를 발간하는 등 국제적으로 큰 관심을 끌고 있다.

이들 선행연구들의 연구결과를 종합하면 미세플라스틱에 대한 향후의 연구는 기존의 연안해양환경에서의 분포특성에 대한 연구에서 '대양, 거동 및 동태, 생물노출, 첨가/흡착 미세플라스틱 오염물질' 등의 키워드로 구분될 수 있는 연구들로 다변화되고 있음을 알 수 있다(Barboza & Gimenez, 2015). 이들 미세플라스틱 관련 연구들 가운데, 본 연구과제에서 제안되고 있는 주요한 연구주제는 '극지 및 대양 환경에서의 미세플라스틱의 거동 및 동태에 대한 연구'로써 이 분야에 대한 최근 동향을 요약하면 다음과 같다.



<Figure 2> 영국-아이스란드 사이 해협 해수(좌-Thompson et al., 2004)와 Belgian beach core sediment(Clasessens et al., 2011)에서 관측된 미세플라스틱 농도의 시계열적 증가

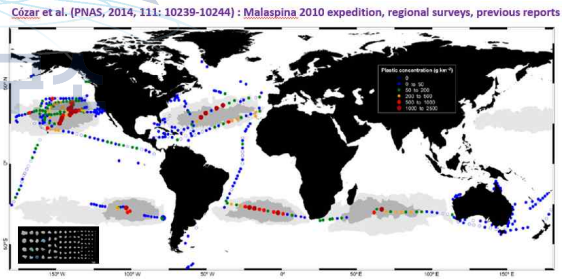
KOPRI 극지연구소

<Figure 3> 미세플라스틱 연구 편수 및 출판 연구저널의 최근 현황(2004-현재; Barboza & Gimenez, 2015)

(1) 해양환경(대양 및 극지방 환경)에서의 플라스틱 향방 및 물질수지의 불확실성

전술한 바와 같이, 초기 미세플라스틱의 연구는 연안해양환경(특히, 해변퇴적물

및 연안해수)에 잔류하는 미세플라스틱의 분포특성에 집중되었다가 최근에 와서 대양 및 극지방에서의 연구로 확대되기 시작하였다. 지난 반세기에 걸친 플라스틱 사용량의 기하급수적 증가에 따라 해양으로의 유입량 또한 지속적으로 증가할 것으로 예측(Jambeck et al., 2015)되었고, 일부 연안해양환경에서의 잔류량 또한 증가한 것으로 관측(Thompson et al. 2004)되었다. 그러나, 최근에 진행된 대양연구의 결과에 따르면, 1986-2008년 사이의 대서양 표층수에서 진행된 모니터링 자료의 대부분에서는 시계열적 증가나 감소가 관측되지 않아서 해양으로 유입된 플라스틱의 향방에 대한 의문이 제기되었다. Cózar 등(2014)은 주요 환류지역(Gyres)을 포함한 대양 표층수에서 관측되는 a few - 2,500 g/km^{2}의 미세플라스틱의 잔류농도로부터 현존하는 해양 잔류량을 6.6-35.2 킬로톤으로 추정하였다. 반면, Jambeck 등(2015)은 2010년 기준 해양으로 유입된 플라스틱은 대략 4.8-12.7 백만톤으로 추정하였다 (Figure 4). 대부분의 발생량으로부터 추정되는 해양유입량에 대한 연구결과들은 대략 1-13 백만톤인 것으로 추정되고 있다. 따라서, 해양환경으로의 유입량과 대양해수 잔류량으로부터 추정되는 해양내 현존량 사이에는 수백-수천배의 차이가 발생한다. 결과적으로, 해양환경으로 유입된 플라스틱의 상당부분이 어디로, 어떻게 이동되는지 등에 대해 설명되지 않은 상태로 남아있다.



Plastic debris, kilotons	North Pacific Ocean	North Atlantic Ocean	Indian Ocean	South Atlantic Ocean	South Pacific Ocean	Total
Low estimate	2.3	1.0	0.8	1.7	0.8	6.6
Mid estimate	4.8	2.7	2.2	2.6	2.1	14.4
High estimate	12.4	6.7	5.1	5.4	5.6	35.2

<Figure 4> 추정되는 해양으로의 플라스틱 유입량(좌-Jambeck et al., 2015)과 대양 표층수에서 관측된 plastic debris 농도로부터 추정되는 해양내 현존량(Cózar et al., 2014)

(2) 해양환경(대양 및 극지방 환경)에서의 플라스틱의 이동 및 동태 연구 동향

앞서 기술한 해양환경내 잔류 플라스틱의 향방과 불확실성에 대한 가능한 설명으로 전술한 바와 같이 1) 해양유입량의 과대추정, 2) 심해로의 퇴적에 의한 소멸, 3) 정성정량방법의 불확실성에 의한 해양잔류량의 과소평가, 4) 자연적 풍화과정에 의한 무기화의 가속화, 5) 해양생물에 의한 섭취, 6) 극지방 얼음으로의 포획 등이 제시되고 있으며, 이들 모든 과정은 '연안환경'에서 '대양환경'으로, 그리고 다시 '극

지방'이나 '심해퇴적환경'으로 연결되는 메카니즘들에 대한 설명을 필요로 한다.

상업적/개인적 용도로 사용되는 범용 플라스틱 재질들 중에서 polyethylene (PE), polypropylene (PP), polystyrene (PS) 등이 가장 많은데 이들은 해수의 밀도(~1.02 g/cm^3)보다 작거나 유사하여 물에 부유하기 때문에 물리적 혹은 화학적 변화 없이 그 자체로는 퇴적되지 않고 부유하여 장거리 이동할 것으로 추정되었다. 그러나, 플라스틱 제품의 전과정을 통해 환경으로 배출될 수 있는 양과 비교할 때 세계 각지에서 발견된 부유성 플라스틱의 환경내 잔류 현존량(즉, 오염도(단위면적 혹은 부피 당 개수(혹은 중량))은 극히 일부분으로써 많은 양의 저밀도 플라스틱들이 미세플라스틱으로 변화하는 과정에서 물리적 특성의 변화로 인해 퇴적될 가능성이 배제될 수 없다. 예컨대, Thompson 등(2004)은 이미 수층에 부유하여 잔류하는 플라스틱을 퇴적층에서도 유사하게 발견함으로써 플라스틱 자체가 갖는 본래의 밀도가 환경내 거동에 있어서 중요한 인자가 아닐 수 있음이 제시되었고, 최근에 심해퇴적물에서의 미세플라스틱이 오염된 해수층보다 104배까지 높은 수준임이 보고되기도 하였다(Woodall et al., 2014). 저밀도 플라스틱이 심해퇴적물에 도달되는 메카니즘으로 표층의 플랑크톤이나 유기물과의 중합의 결과라는 보고도 있다(Long et al. 2015). 그러나, 실제 대양에서 미세플라스틱의 침적율과 퇴적양이 조사된 바가 없어 심해퇴적물로의 sinking이 얼마나 큰 기여를 하는지 알려져있지 않다.

한편, 북극지방으로의 잠재적인 유입해수에 잔류하는 수준보다 수백-수천배 높은 수준의 미세플라스틱이 북극지방의 얼음에서 관측되어 극지방 얼음에 의한 미세플라스틱의 trapping이 해양에 잔류하는 미세플라스틱 현존량을 과소평가시키는 또다른 메카니즘으로 제안되기도 한다(Obbard et al., 2014). 그러나, Ice-trapping이 해양내 잔류 미세플라스틱의 중요한 sinking mechanism으로 고려될 수 있음에도 불구하고, 북극의 얼음에서 많은 양의 미세플라스틱이 검출된 것의 원인이 1) 실질적으로 북극해로 유입되는 미세플라스틱이 많은 것에 의한 것인지, 2) 많이 유입된다면 어떤 경로(예컨대, Farm strait나 Barents Sea를 통해 대서양으로부터 유입, Bering and Chukchi shelves를 통한 북태평양으로부터의 유입, Alaskan coast에서의 형성 및 Baufort Gyre를 통한 유입, Sibberian or Candian rivers를 통한 유입 등)를 통해 유입되는지, 3) 얼음이 어는 과정에서 발생하는 scavenging 효과가 얼마나 크며 그 메카니즘은 어떠한지 등에 알려진 바가 없다.

(3) 해양환경(대양 및 극지방 환경)에서의 플라스틱의 생물섭취 연구동향

해양생물의 미세플라스틱 섭취에 대한 연구는 플라스틱 함유/흡착성 오염물질의 먹이사슬을 통한 전이와 관련하여 중요하다. 이와 관련하여, 해양환경 먹이사슬의 최하층에서부터 다양한 생물군들에 대해 보고되고 있다. 이중에서 극지방에 대한 연구는 북극 바닷새를 조사한 경우인데, 조사된 종의 87.5%가 플라스틱을 위장내에 함유하고 있는 것으로 보고되고 있다. 그러나, 기타 극지방 해양생물들에 대한 연구는 초기단계에 있다.

(4) 해양환경(대양 및 극지방 환경)에서의 플라스틱 흡착/첨가 오염물질의 거동

미세플라스틱은 대부분 소수성 고분자구조체로 이루어져 있어서 물에 용해도가 낮은 환경오염물질에 대한 높은 수착능을 가지고 있어 수환경에 널리 퍼져 있는 미세플라스틱은 환경오염물질의 거동과 생물흡수(혹은 생이용성)에 영향을 미칠 것으로 추정된다. 전술한 바와 같이 극지방에서의 미세플라스틱의 고농도 농축가능성이 사실이라면 이들 환경오염물질의 극지방으로의 이동에 중요한 매개체로 작용함으로써 극지방 환경에서의 환경오염물질 거동에도 유의미한 영향을 끼칠 것으로 추정된다. 그러나, 미세플라스틱 자체에 대한 극지방에서의 동태 및 물질수지에 대한 연구가 진행되지 않았기 때문에 이와 관련된 오염물질 거동연구도 진행되고 있지 못하다. 특히, 미세플라스틱에 흡착/함유된 오염물질의 생물흡수는 해당 해양환경 해수와 생물체내의 열역학적 분배로 설명될 수 있는데 이와 관련하여 미세플라스틱의 성상 및 체내 체류시간 등이 중요한 인자로 평가된다. 이에 대한 연구가 최근에 시작되고 있지만 아직 미세플라스틱이 환경오염물질의 거동 및 화학물질의 생물영향에 미치는 영향을 구체적으로 결론내리고 있지 못한 상황이다. 최근의 몇몇 연구진에 의해 미세플라스틱으로부터의 탈착과정을 설명하는 모델등이 개발되고 있다.

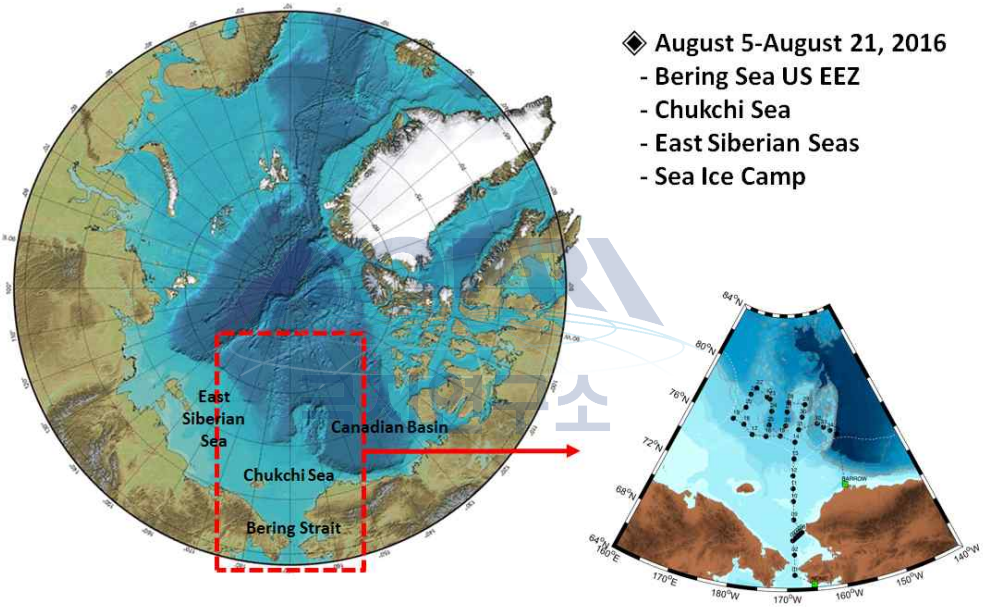
KOPRI
극지연구소

제3장. 연구개발수행 내용 및 결과

1. 1차년도 (2016.05-2017.04) 연구내용

(1) 조사기간 및 지역

본 연구조사는 아라온을 이용하여 2016년 8월 5일 미국 알래스카 놈(Nome)에서 출항하여 8월 22일 베로우로 입항까지 위경도 64° 28.9′ N – 78° 30.93′ N와 173° 34.62′ E to 156° 00.00′ W를 포괄하는 베링해, 척치해, 동시베리아해, 뷰포트해 등을 항해하며 조사였다(Figure 5).



<Figure 5> 1차년도 북극해 조사기간, 조사해역 및 조사정점도

(2) 조사내용

전술한 전체 연구계획에 따라, 1차년도는 표층해수에 잔류하는 MPs의 분포특성을 조사하는 것이 주요내용으로써 manta-trawl net(ø 200 ㎛)를 사용한 표층해수 MPs의 채취 및 분리분석법 확립과 현장조사를 통한 잔류특성분석을 수행하는 것이었다. 그러나, 본 연구에서 수행되는 북극현장조사는 1년에 1회 가능한 것으로 매년 조사대상 매체를 변경하는 것은 해당 매체 관측값의 대표성 및 연도별 변동가능성을 누락함으로써 과학자료로써의 가치가 감소할 수 있고 현장상황에 따라 조사 불가능에 따른 자료수 감소가 불가피할 수 있다. 따라서, 기본적으로는 <Figure 1>에 기초한 연구내용을 토대로 수행하지만 가능한 조사대상 매체에 대한 연구는 매년

반복수행하여 관측값의 대표성을 확보하고 연도별 변동성을 파악하고자 한다. 하여, 1차년도에는 현장조사 첫 시행시기로써 ‘표층해수’, ‘표하층해수’, ‘sea-ice’, ‘bed sediment’ 등 1-5차년도에 걸쳐 계획된 모든 현장시료가 screening 목적으로 채취되었다(Table 1).

1차년도에 채취된 시료들 중 일부 시료(1차년도 대상인 표층해수 및 2차년도 대상인 sea-ice)에 대한 분석이 완료되어 그 결과를 수록하였다. 현재의 미세플라스틱 분석법은 시료 1개당 2주정도의 분석시간을 소요하는 관계로, 채취된 시료들 및 향후 채취될 시료들에 대한 분석은 연차별 목표에 맞게 수행될 계획이다. 또, 분석결과에 기초하여 매년 수행될 연구내용에 대한 검토 및 보완이 진행될 계획이다.

<Table 1> 조사기간 중 채취된 조사정점별 조사내용 및 시료종류

KOPRI
극지연구소

	1564	-	underway water	bongo net	-	box core
	2008	manta net	underway water	bongo net	-	-
	2078	-	underway water	-	-	-
	1315	-	underway water	bongo net	-	box core
	2212	-	underway water	-	-	-
	1760	-	underway water	bongo net	-	-
	275	-	underway water	bongo net	-	box core
		manta net	underway water	-	-	-
		-	underway water	bongo net	-	-
		manta net	underway water	-	-	-
		-	underway water	-	-	-
		manta net	underway water	-	-	-
		-	underway water	-	-	-
		-	underway water	-	-	-

) for MPs was collected by manta trawl net
' m depth) for MPs was collected through on-board underway water pumping system
(~200 m depth) for MPs was collected by bongo net
ollected by ice corer
s was collected by box core
) for chemicals was collected by rosete sampler holding 10-L Niskin bottle.

(3) 시료별 조사방법

○ 표층해수 잔류 MPs

▸ 표층해수에 잔류하는 MPs은 2 knot 속도에서 20분간 manta-trawl net (ø 200

㎛)를 이용하여 채취함(대략 106-356 m^3).

▸ 채취한 시료는 현장에서 ø 200 ㎛ stainless sieve를 통해 여과한 후 4% 포르말린 용액에 보관한 후 냉장보관함.

▸ 냉장보관하여 한국으로 운반된 시료는 실험실에서 유기물처리 후(2 주), 여과 등을 거쳐 microscopic analysis와 FTIR 분석을 통해 '재질 및 형태'에 대한 정성분석과 오염도에 대한 정량분석을 수행

○ 표하층 잔류 MPs

▸ 표하층 잔류 MPs은 2가지 방법으로 채취되었는데 첫째는 bongo net를 이용해 수직적 해수층에 잔류하는 MPs를 채취하였고, 둘째는 항해 중에 표층 7m 아래 수심에서 펌프를 통해 선박내 각 실험실로 공급되는 underway water를 여과하여 채취함.

▸ underway water는 아라온의 항해 중에 실험실 수조를 통해 공급되는 해수를 유량계가 달린 2-L 알루미늄 여과기(ø 200 ㎛)를 이용해 5-6 m^3 정도를 채취함.

▸ Bongo net 및 underway water내 MPs는 채취 후 모두 표층해수 MPs와 동일한 절차를 통해 처리됨.

○ 퇴적물(bed sediment) 잔류 MPs

▸ 6개 정점에서 box corer (30 cm × 21 cm, 59-cm depth)를 통해 채취된 퇴적물 중 표층퇴적물은 생지화학 연구를 위해 채취되었고, 표층(0-10cm) 1 kg이 MPs 용으로 stainless spoon을 이용해 채취되어 냉동보관됨.

○ 해빙(sea-ice) 잔류 MPs

▸ 7개 정점에서 sea-ice corer(9 cm diameter and 132-196 cm depth)를 이용해 채집됨.

▸ 현장에서 해빙표면을 stainless knife를 이용해 깎아내어 채취/운반/보관 과정에서 표면에 달라붙어있을 MPs를 제거한 후 Sand bath를 이용해 녹인 후 바로 0.7 ㎛ GF/F를 통해 여과함.

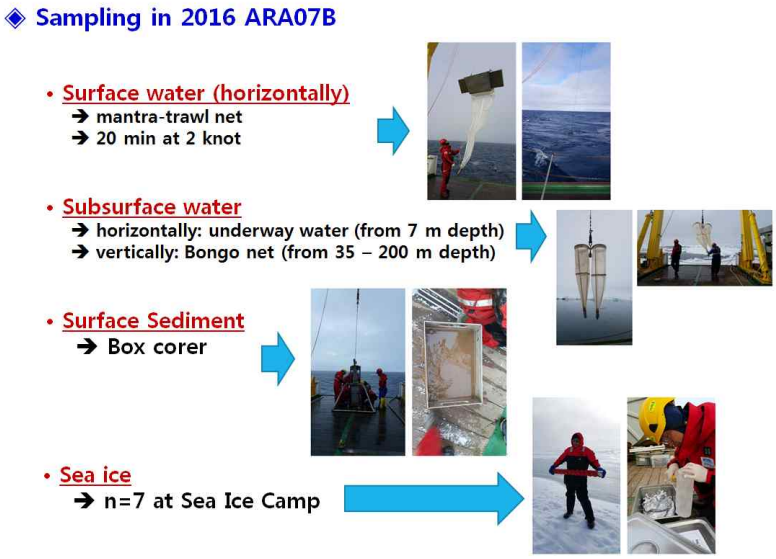
▸ 여과지는 냉동보관하여 한국으로 운반하고, 운반된 시료는 표층해수와 동일한 방법을 통해 정성정량분석을 수행함.

○ 해수에 잔류하는 MPs 기인성 오염물질

▸ 표층해수 8-L를 채취하여 DCM으로 추출하여 보관함.

▸ 이후, 추가 분석절차를 통해 환경오염물질(화학물질)의 잔류도를 측정함.

KOPRI 극지연구소



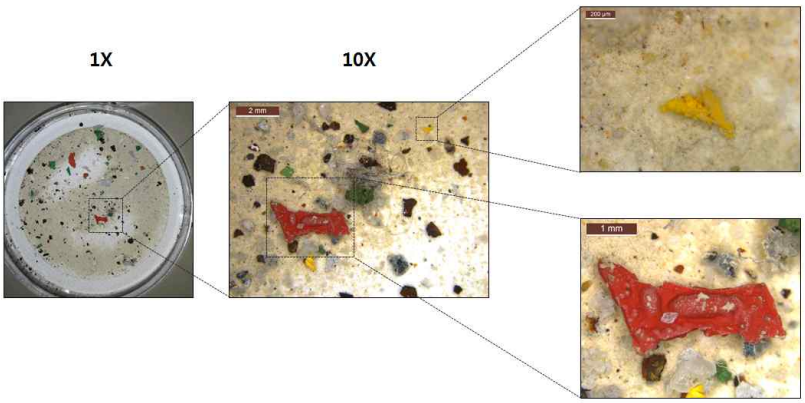
<Figure 6> 각 환경매체별 시료채취 현장 모습

2. 1차년도 연구결과

KOPRI 극지연구소

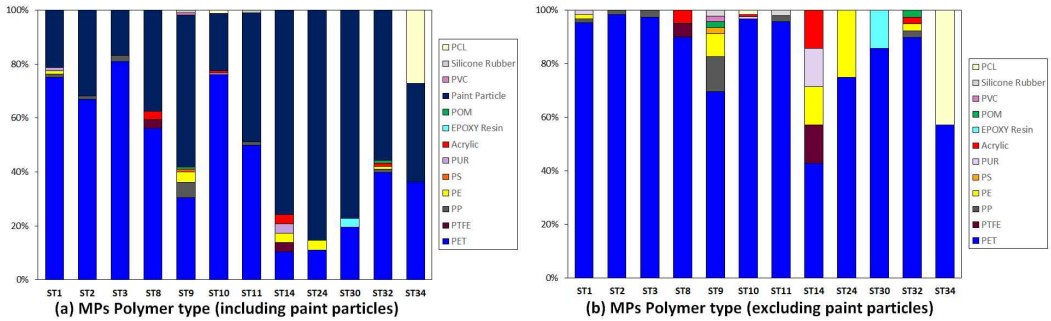
(1) 표층해수 내 MPs 잔류특성

Manta-trawl net에 의해 채집된 표층해수에 잔류하는 미세플라스틱(MPs)에 대한 조사는 총12개 지점에서 수행되었다. Figure 9에서 보듯이 다양한 미세플라스틱들이 표층해수에서 관측되었다.



<Figure 7> 북극 표층해수에서 관측된 MPs들과 주요구성 MPs로써 페인트 조각

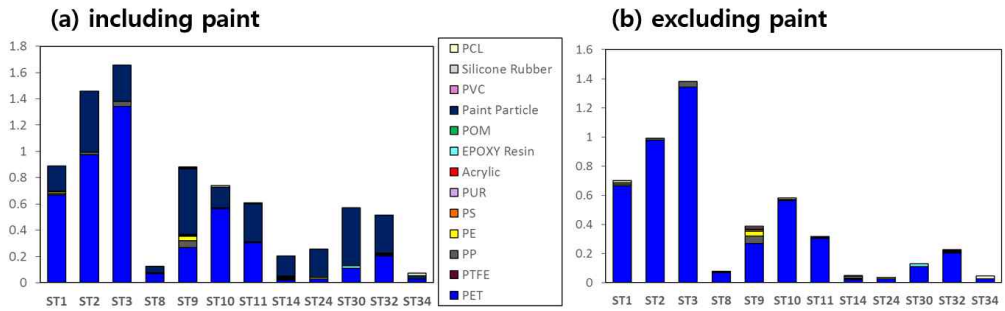
본 연구에서 조사된 북극 표층해수에 잔류하는 다양한 MPs가 관측되었는데, 그 중에서 선박도료에서 기인했을 것으로 추정되는 페인트류(paint-MP)가 전체 MPs의 17-85(47±23%)을, 의복이나 어구 등에 사용되는 fiber 형태의 MPs를 형성하는 PET가 46±25%를 차지하였다(Figure 8). 이것은 이 해역에서의 주된 MPs 오염원이 선박일 수 있음을 의미하며, 이 결과는 대서양에서 기인하는 해수에서 관측된 결과와는 상이하다. 따라서, 대서양-북극해와 본 연구의 태평양-북극해로 연결되는 과정에서의 MPs의 기원, 이동경로, 매체간 전이 기작 등이 향후 연구들을 통해 밝혀질 필요가 있다.



<Figure 8> 조사해역에서 발견된 MPs의 재질별 상대기여도

KOPRI 극지연구소

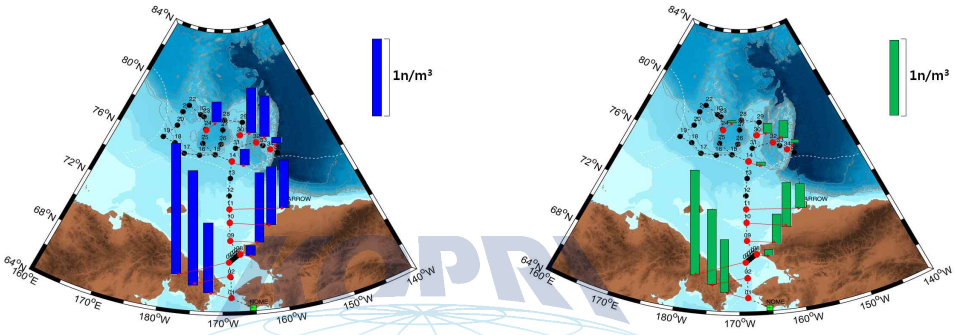
표층해수에서 관측된 MPs중 페인트조각의 기여도는 베링해에서 북극으로 진행할수록 증가하는 경향이 관측되었다(Figure 8). 그러나, 이러한 경향이 베링해에서 북극으로 진행함에 따라 페인트조각의 오염도가 증가함을 의미하진 않는다. 오히려 페인트조각의 오염도는 조사지점들 사이에서 뚜렷한 차이를 보이지 않고 유사한 수준으로 보였다(Figure 9). 페인트조각을 제외했을 때의 MPs들에서는 2차오염원을 갖는 fiber형태의 PET가 전 조사정점들에서 우점적이었는데, 페인트조각과 달리 PET는 오염도뿐만 아니라 상대적 기여도 또한 북극으로 갈수록 감소하는 경향이 관측되었다(Figure 9).



<Figure 9> 조사해역에서 MPs 재질별 오염도의 공간분포

이러한 사실은 본 연구에서 관측된 '페인트조각'이 기후변화에 따른 해빙(melting)의 지속적 증가와 관련된 해당 해역내 선박활동의 증가의 결과라고 해석하기에 무리가 있음을 의미한다. 페인트조각의 출현에 대한 또 다른 가능한 가설은 연구선 도료의 탈착에 따른 오염을 들 수 있다.

전술한 바와 같이, MPs의 오염도는 공간적으로 베링해에서의 오염도가 북극해에서의 오염도보다 높은 수준을 보여줌으로써 베링해가 미세플라스틱(특히, 2차오염원을 갖는 fiber)의 주요 이동통로임을 암시한다(Figure 10). 그러나, 베링해를 통해 북극해로 유입되는 fiber가 북태평양에서 기인한 것인지 아니면 베링해 유입전의 Yukon 강의 기인한 것인지는 관련된 추가연구를 통해 확인될 필요가 있다.



(a) Total MPs (including paint particles) (b) Total MPs (excluding paint particles)

KOPRI 극지연구소

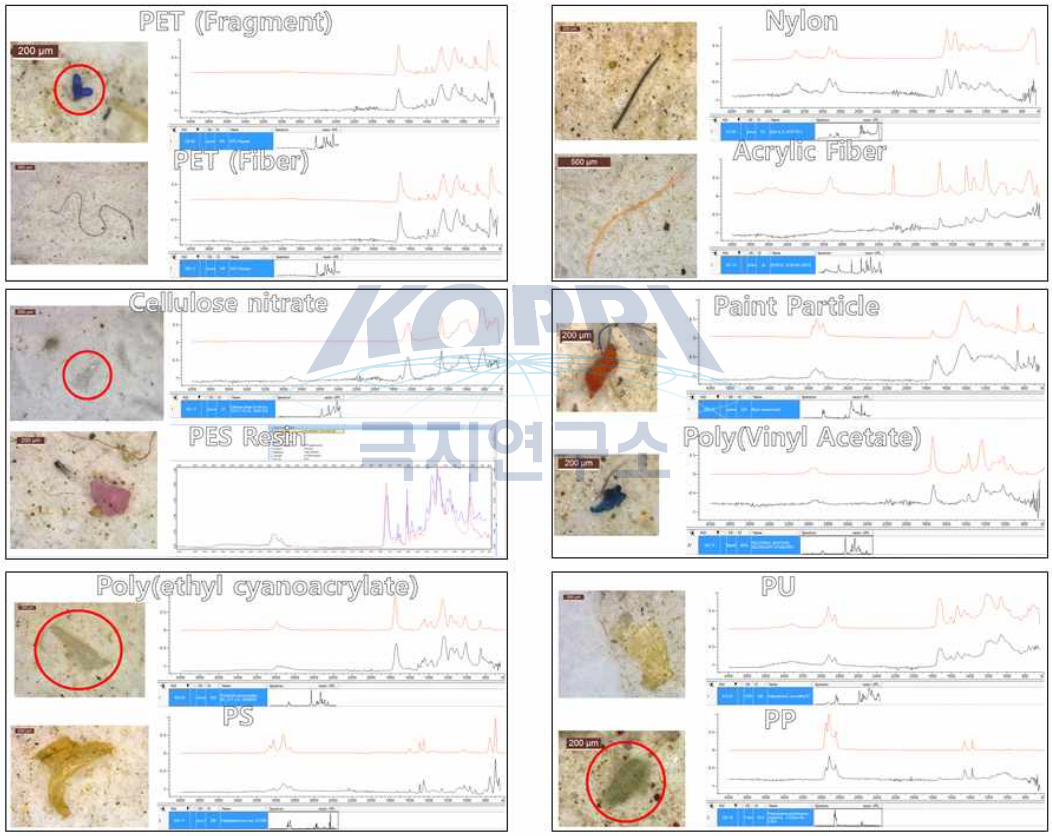
<Figure 10> 조사해역에서의 MPs 오염도의 분포

표층해수에서의 미세플라스틱 오염도는 페인트조각을 미세플라스틱에 포함할 경우 1 m^3의 해수 속에 0.07 - 1.66 (0.66±0.50) n/m^3, 페인트조각을 포함하지 않을 경우 0.05 - 1.38 (0.41±0.43) n/m^3 수준으로 잔류함이 확인되었다. 본 연구에서 관측된 베링해에서 시작되는 북극해 표층해수 MPs 오염도는 대서양을 통해 북극해(Barents Sea)로 유입되는 경로인 노르웨이 스발바도 인근해역에서 동일한 채집방법을 통해 관측된 MPs 오염도인 0-1.31 (0.30±0.31) n/m^3와 유사하였지만 페인트를 포함할 경우 평균적으로 본 조사지역의 오염도가 2배 높았다(Lusher et al., 2015).

본 연구에서 관측된 MPs의 오염도는 대체적으로 베링해에서 북극으로 진행됨에 따라 감소하는 경향이 관측되었는데, 최대 오염도가 베링해에서 관측되었음은 주변 육상기인 오염과 태평양을 통한 유입 모두의 결과로 추정되므로 그 주요 기원을 파악하기 위해서는 향후 이에 대한 모니터링 계획이 필요하다.

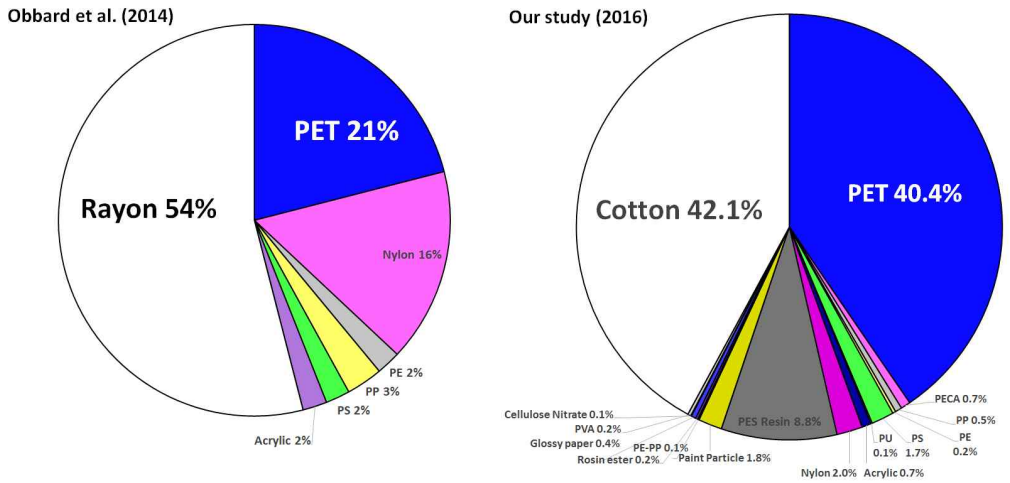
(2) 해빙(sea-ice)내 MPs 잔류특성

PET, nylon, paint-MP, PP, PS 등 다양한 MPs가 해빙시료에서 관측되었다(Figure 11). 7개의 해빙시료에서 관측된 플라스틱((semi-)synthetic polymers)은 시료 당 28-223개가, cotton(자연물 기인 폴리머)은 32-79개가 검출되어 관측된 폴리머 전체는 시료 당 60-282개가 검출되었다. 채취, 분석 과정에서 발생하는 오염여부를 확인하는 QA/QC과정에서 0-4개의 fiber(주로 cotton)가 관측되었음을 고려할 때 본 조사의 해빙시료에서 관측된 MPs는 모두 실제 시료에 잔류하는 MPs라고 추정된다.



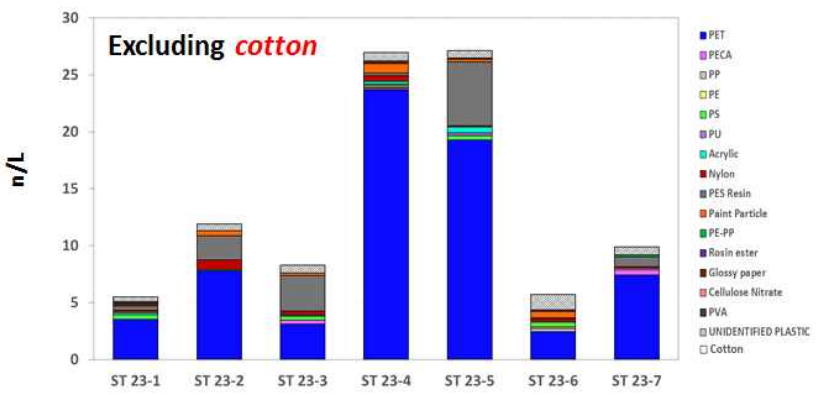
<Figure 11> 북극 해빙에서 관측된 다양한 형태 및 재질의 MPs

본 연구에서 조사된 해빙시료에 잔류하는 MPs의 주된 구성성분은 fiber(66%) > fragment(31%) > sheet(3%) 순으로 많이 관측되었다(Figure 12). Fiber를 구성하는 주요 재질은 PET로써 재질에 따른 구분에서 평균적으로 50%이상을 기여하였다. 본 연구에서 MPs에 포함되지 않는 자연기인성 폴리머인 cotton이 PET보다 많이 검출되었는데, cotton은 FTIR등에서 rayon등으로 잘못 관측될 수 있기 때문에 주의가 필요하다.



<Figure 12> 기존 문헌(좌)과 본 연구(우)의 sea-ice내 MPs의 재질 분포

Obbard 등(2014)은 2005년과 2010년에 채취된 북극해 4개 지점의 sea-ice core시료에서 38-234 n/m^{3}의 MPs을 관측하였고, 해당 연구에서 가장 점유율이 높은 MPs는 rayon이었다(Figure 12). 본 연구에서 관측된 cotton과 Obbard의 rayon의 점유도를 제외하고는 대체적으로 우점적 구성물질이 유사하였다. 본 연구에서 조사된 MPs의 해빙 속 오염도는 평균적으로 13,600 n/m^{3}으로써 시료간의 최소-최대값의 차이는 5배 미만이었다(Figure 13). 본 연구에서 관측된 sea-ice core에서 관측된 미세플라스틱 오염도는 5-10여년 전 채취된 Obbard 등(2014)의 해빙시료 오염도 보다 수 백배 높은 수준이어서 시료간의 변이로는 설명되지 않는다. 따라서, 수 년 사이에 오염도가 증가한 원인에 대한 추가연구가 필요하다. 본 연구결과를 토대로, 2차년도에서는 지리적으로 서로 다른 지점의 해빙캠프(sea-ice camp)에서 해빙시료를 채취하여 조사할 필요가 있고, 그와 별도로 trapping 혹은 그 이후 기작을 설명하기 위해 별도의 생지화학적 tracer에 대한 연구가 필요하다.



<Figure 13> 북극해빙에서 관측된 MP의 형태별 오염도

제4장. 연구개발목표 달성도 및 대외기여도

1. 목표 달성도

본 연구는 북극 표층해수내 잔류 미세플라스틱의 오염도 및 분포특성 파악조사를 시작으로, 최종적으로 미세플라스틱의 분포특성 및 거동기작 파악을 통해 미세플라스틱 오염지도 작성 및 해빙/결빙과 북극생태계에 미치는 영향을 추적하는 것을 대목표로 수행되었다. 해당 목표를 위한 1차년도 (2016-2017년) 연구 목표는, 1) MPs 정성정량 분석법 확립, 2) 북극 표층해수내 MPs 오염도 조사, 3) sea-ice trapping 기작 조사 준비였다.

<Table 2> 연구목표 및 범위에 대한 달성도

연차	연구목표	연구내용	달성도	주요 목표달성 내용
1차 년도	MPs 정성정량 분석법 확립	• 크기군/재질별 정성 정량법 확립 • 채취방법 검토 및 확립	100%	• MPs의 분석법 확립을 위한 국내외 문헌연구 완료 • 시료 채취방법 확립
	북극 표층해수내 MPs 오염도 조사	• 각 해역내 정점별 시료채취 • 표층해수내 오염지도 작성	100%	• 북극 표층해수 12지점의 시료를 manta-trawl net으로 채취 완료 • 표층해수 시료 내 MPs의 농도, 크기, 재질별 분석 완료
	sea-ice trapping 기작 조사 준비	• 시료채취/기작에 대한 문헌검토 • 시료 가용시 사전실험	100%	• sea-ice 시료 채취를 위한 문헌검토 완료 • ice camp의 7개 지점의 sea-ice 시료 채취 완료 • sea-ice 시료 내 MPs의 농도, 크기, 재질별 분석 완료
	기존연구자료와의 비교검토	• 기존 연구결과와의 상호비교를 통한 향후 연구방향 설정	100%	• 다른 극지 연구에서의 MPs 농도와의 비교 검토 완료

KOPRI 극지연구소

본 연구과제 수행 전에 과제수행의 결과로 도출될 성과지표에 대한 달성도를 아래 <Table 3>에 제시하였다.

본 과제의 1차년도 정량적 성과목표는 국내학회 1편, 인력양성(학사학위자 배출) 2인이었다. 사업기간 중 발생한 연구성과는 국내학회 발표 1편, 국외학회 1편, 인력양성은 학사학위자 1인 배출이었다. 인력양성에서 기재한 1인과 다른 추가적인 1인의 학사학위자를 배출했음에도 불구하고 목표한 학사배출예정자 1인은 졸업을 연기한 관계로 실제 성과에 포함되지 않았다.

<Table 3> 정량적 성과목표에 대한 달성도

구분	년도	성과목표	목표치 (건)	달성치 (건)	비고
1차년도	2016	국내특허(출원/등록)	0/0	0/0	0%
		국제특허(출원/등록)	0/0	0/0	0%
		논문(SCI/비SCI)	0/0	0/0	0%
		학회발표(국내/국외)	1/0	1/1	200%
		기술료(기술실시계약)			(기술실시기관)
		인력양성(학사/석사/박사)	2/0/0	1/0/0	50%
		소 계			100 %

KOPRI 극지연구소

2. 대외 기여도

본 연구의 결과를 통해 1)북극해양환경에서의 인위적 오염물질 (미세플라스틱)의 정성·정량 방법을 확립하여, 2)북극해양환경에서의 미세플라스틱의 분포를 확인할 수 있었고 이를 통해 극지방에서의 인위적 오염에 대한 기초자료로 활용될 것으로 기대된다.

<Table 4> 연구개발에 따른 기여도

연구목표	연구내용
관련 연구분야 기여도	○ 북극해양환경에서의 미세플라스틱의 오염 정황을 파악 ○ 극지방 시료 내에서의 미세플라스틱 분석법 확립 ○ 미세플라스틱 연구에 대한 국내 연구진의 선도적 역할을 통한 국제사회에 기여 ○ 플라스틱오염에 의한 북극환경 변화와의 관계/영향 연구에 대한 기반을 마련 ○ 북극해양환경내 미세플라스틱 오염지도 작성을 통한 장기변화 추적기반을 마련 ○ 다양한 해양환경 서식지에 생존하는 해양생물들의 미세플라스틱 노출에 의한 위해성 평가 등에 활용 ○ 북극환경에서의 기후변화와 생지화학적 변화에 따른 추적자로서의 미세플라스틱 활용성 평가와 기획에 활용

제5장. 연구개발결과의 활용계획

1. 연구개발 결과의 활용계획

○ 극지방 환경에서 관측된 미세플라스틱의 오염분포를 통해 북극으로의 오염물질 이동(혹은 오염원)에 대한 추적자로써 활용

○ 지구온난화와 북극권 해빙에 따른 북극환경내 미세플라스틱의 거동규명을 통해 미생물 등의 외래종 전파, 해류순환, 얼음의 해빙과 결빙 메카니즘과 그에 따른 주변 환경변화, 마린스노우(marine snow)와의 응집에 따른 관련 물질(탄소, 영양염, 오염물질 등)의 심해침강 등 생지화학적 순환 등과의 관련성 규명 및 추적자로의 활용.

2. 연구개발 결과의 기대성과 파급효과

KOPRI 극지연구소

○ 극지방 연구에 있어서 국내 연구진의 선도적 역할 및 기여가능성이 큼

○ 해양에 잔류하는 플라스틱의 물질수지에 있어서 기존연구를 통해 설명하지 못했던 부분들에 대한 규명이 가능할 것으로 기대됨

○ 향후 Global carbon cycle에서의 플라스틱 기여도에 대한 추정에 활용

○ 오염물질의 전지구적 거동기작에 대한 새로운 패러다임 제시 가능성

제6장. 연구개발과정에서 수집한 해외과학기술정보

본 연구과제에서의 핵심내용은 북극해양환경에서의 미세플라스틱의 분포특성 및 거동기작 파악을 통한 미세플라스틱 오염지도 작성 및 해빙/결빙과 북극생태계에 미치는 영향 분석이다. 본 연구를 통해 수집된 주요 해외과학기술정보는 미세플라스틱에 대한 기존연구 내용이다. 그 중 주된 내용은 미세플라스틱의 정성 정량 분석법 확립, 표층 해수에서의 MPs 오염도를 평가한 논문들 등이 있다. 북극해양환경에서의 미세플라스틱에 대한 연구 논문들은 극소수이며, 때문에 해당 환경에서의 미세플라스틱의 거동에 대해서는 불명확한 상태이다.

<Table 5> 미세플라스틱 관련 해외과학기술 정보

주요 내용	주요 문헌
MPs 정성정량 분석법 확립	• Hidalgo-Ruz, V., Gutow, L., Thompson, R. C., & Thiel, M. (2012). Microplastics in the marine environment: a review of the methods used for identification and quantification. Environmental science & technology, 46(6), 3060-3075. • Claessens, M., Van Cauwenberghe, L., Vandegehuchte, M. B., & Janssen, C. R. (2013). New techniques for the detection of microplastics in sediments and field collected organisms. Marine pollution bulletin, 70(1), 227-233. • Herring, C. (Ed.). (2015). Laboratory methods for the analysis of microplastics in the marine environment: recommendations for quantifying synthetic particles in waters and sediments. US Department of Commerce, National Oceanic and Atmospheric Administration,[National Ocean Service], NOAA Marine Debris Program.
표층해수내 MPs 오염도 조사	• Collignon, A., Hecq, J. H., Glagani, F., Voisin, P., Collard, F., & Goffart, A. (2012). Neustonic microplastic and zooplankton in the North Western Mediterranean Sea. Marine Pollution Bulletin, 64(4), 861-864. • Desforges, J. P. W., Galbraith, M., Dangerfield, N., & Ross, P. S. (2014). Widespread distribution of microplastics in subsurface seawater in the NE Pacific Ocean. Marine pollution bulletin, 79(1), 94-99. • van der Hal, N., Ariel, A., & Angel, D. L. (2017). Exceptionally high abundances of microplastics in the oligotrophic Israeli Mediterranean coastal waters. Marine

주요 내용	주요 문헌
	pollution bulletin, 116(1), 151-155.
극지해양환경에서의 MPs 조사	• Obbard, R. W., Sadri, S., Wong, Y. Q., Khitun, A. A., Baker, I., & Thompson, R. C. (2014). Global warming releases microplastic legacy frozen in Arctic Sea ice. Earth's Future, 2(6), 315-320. • Lusher, A. L., Tirelli, V., O'Connor, I., & Officer, R. (2015). Microplastics in Arctic polar waters: the first reported values of particles in surface and sub-surface samples. Scientific reports, 5. • 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.

KOPRI
극지연구소

제7장. 참고문헌

Claessens, M., Van Cauwenberghe, L., Vandegehuchte, M. B., & Janssen, C. R. (2013). New techniques for the detection of microplastics in sediments and field collected organisms. Marine pollution bulletin, 70(1), 227-233.

Cole, M., Lindeque, P., Halsband, C., & Galloway, T. S. (2011). Microplastics as contaminants in the marine environment: a review. Marine pollution bulletin, 62(12), 2588-2597.

Collard, F., Gilbert, B., Eppe, G., Parmentier, E., & Das, K. (2015). Detection of anthropogenic particles in fish stomachs: an isolation method adapted to identification by Raman spectroscopy. Archives of environmental contamination and toxicology, 69(3), 331-339.

Collignon, A., Hecq, J. H., Glagani, F., Voisin, P., Collard, F., & Goffart, A. (2012). Neustonic microplastic and zooplankton in the North Western Mediterranean Sea. Marine Pollution Bulletin, 64(4), 861-864.

Cózar, A., Echevarría, F., González-Gordillo, J. I., Irigoien, X., Úbeda, B., Hernández-León, S., ... & Fernández-de-Puelles, M. L. (2014). Plastic debris in the open ocean. Proceedings of the National Academy of Sciences, 111(28), 10239-10244.

Desforges, J. P. W., Galbraith, M., Dangerfield, N., & Ross, P. S. (2014). Widespread distribution of microplastics in subsurface seawater in the NE Pacific Ocean. Marine pollution bulletin, 79(1), 94-99.

Desforges, J. P. W., Galbraith, M., & Ross, P. S. (2015). Ingestion of microplastics by zooplankton in the Northeast Pacific Ocean. Archives of environmental contamination and toxicology, 69(3), 320-330.

Herring, C. (Ed.). (2015). Laboratory methods for the analysis of microplastics in the marine environment: recommendations for quantifying synthetic particles in waters and sediments. US Department of Commerce, National Oceanic and Atmospheric Administration,[National Ocean Service], NOAA Marine Debris Program.

Hidalgo-Ruz, V., Gutow, L., Thompson, R. C., & Thiel, M. (2012). Microplastics

KOPRI 극지연구소

in the marine environment: a review of the methods used for identification and quantification. Environmental science & technology, 46(6), 3060-3075.

Jambeck, J. R., Geyer, R., Wilcox, C. et al., (2015) Plastic waste inputs from land into the ocean. Science, 347, 768.

Lusher, A. L., Tirelli, V., O'Connor, I. and Officer, R. (2015) Microplastics in Arctic polar waters: the first reported values of particles in surface and sub-surface samples. Scientific Report, 5, 14947.

Obbard, R. W., Sadri, S., Wong, Y. Q., Khitun, A. A., Baker, I., & Thompson, R. C. (2014). Global warming releases microplastic legacy frozen in Arctic Sea ice. Earth's Future, 2(6), 315-320.

PlasticsEurope, 2014. Plastics-the Facts 2014/2015.

Provencher, J. F., Bond, A. L., Hedd, A., Montevecchi, W. A., Muzaffar, S. B., Courchesne, S. J., ... & Durinck, J. (2014). Prevalence of marine debris in marine birds from the North Atlantic. Marine pollution bulletin, 84(1), 411-417.

Sutherland, W.J. et al. (2010) A horizon scan of global conservation issues for 2010. Trends in Ecology & Evolution, 25, 1-7.

Trevail, A. M., Gabrielsen, G. W., Kühn, S. and Van Franeker, J.A. (2015) Elevated levels of ingested plastic in a high Arctic seabird, the northern fulmar (Fulmarus glacialis). Polar Biology, 38, 975-981.

Van Cauwenberghe, L., Vanreusel, A., Mees, J., & Janssen, C. R. (2013). Microplastic pollution in deep-sea sediments. Environmental Pollution, 182, 495-499.

van der Hal, N., Ariel, A., & Angel, D. L. (2017). Exceptionally high abundances of microplastics in the oligotrophic Israeli Mediterranean coastal waters. Marine pollution bulletin, 116(1), 151-155.

von Moos, N., Burkhardt-Holm, P and Kohler, A. (2012) Uptake and effects of microplastics on cells and tissue of the blue mussel Mytilus edulis L. after an experimental exposure. Environmental Science and Technology, 46, 11327-11335.

Waller, C. L., Griffiths, H. J., Waluda, C. M., Thorpe, S. E., Loaiza, I., Moreno,

KOPRI 극지연구소

B. & Hughes, K. A. (2017). Microplastics in the Antarctic marine system: An emerging area of research. Science of the Total Environment, 598, 220-227.

Woodall, L. C., Sanchez-Vidal, A., Canals, M., Paterson, G. L., Coppock, R., Sleight, V., ... & Thompson, R. C. (2014). The deep sea is a major sink for microplastic debris. Royal Society Open Science, 1(4), 140317.

KOPRI
극지연구소

KOPRI
극지연구소

주 의

1. 이 보고서는 극지연구소 위탁과제 연구결과보고서 입니다.

2. 이 보고서 내용을 발표할 때에는 반드시 극지연구소에서 위탁연구과제로 수행한 연구결과임을 밝혀야 합니다.

3. 국가과학기술 기밀유지에 필요한 내용은 대외적으로 발표 또는 공개하여서는 안됩니다.