

*Korea Ocean
Research &
Development
Institute*

KORDI 한국해양연구원

마이크로플라스틱에 의한 해양오염과 생물영향 연구

2012.4

한국해양연구원

2011년도 해양 융·복합 기획연구사업

BSPE98716-10122-7

*Korea Ocean
Research &
Development
Institute*

마이크로플라스틱에 의한 해양오염과 생물영향 연구

2012. 4

KORDI 한국해양연구원

마이크로플라스틱에 의한 해양오염과 생물영향 연구

2012. 4

제 출 문

한국해양연구원장 귀하

본 보고서를 「마이크로플라스틱에 의한 해양오염과 생물영향 연구 기획」
과제의 최종보고서로 제출합니다.

2012. 4

총괄연구책임자 : 심원준

참 여 연 구 원 : 강정훈, 권오윤, 박영규,
송영경, 이균우, 장 미,
한기명, 허낙원, 홍상희

자 문 위 원 : 이종명, 홍선욱
(동아시아바다공동체 오션)
권정환 (아주대학교)



요 약 문

1. 추진 필요성

- 최신 국제 해양환경 이슈 선점 및 대응
 - 1997년 북동태평양 쓰레기섬 발견 및 2004년 마이크로플라스틱 오염 최초 보고 이후 해양의 마이크로플라스틱은 기존의 해양쓰레기 오염 연구의 패러다임을 바꿔야 하는 전지구적 해양환경 현안문제로 급부상
 - 해양의 마이크로플라스틱 오염은 UNESCO-IOC(정부간해양학위원회)에서 2010년에 우선대응 국제해양환경 현안문제로 선정되었으며, UNEP, IMO, UNIDO, FAO 등의 국제기구에서도 국제적인 현안문제로 부상
 - 국제환경 현안문제는 부상 초기에 과학적인 자료 수집을 통해 현안 해결에 선도적인 역할을 해야 할 뿐만 아니라, 향후 국제협약 도입 시에도 선제적으로 대응할 수 있음
 - 국제해양환경 이슈 선점 및 해결을 통해 우리나라 해양과학의 국제적 위상을 강화할 뿐만 아니라, 신생 분야의 연구 수월성 확보
- 우리나라는 피해자이자 가해자
 - 동남아시아 및 중국 등 인접국의 부유 플라스틱은 우리나라 연안으로 지속적으로 유입되고 있어 지역해의 국가간 환경 분쟁 가능성 증대
 - 우리나라를 포함하는 동아시아 지역은 해양 플라스틱의 주요 배출원이며, 북동태평양 쓰레기섬의 잠재적인 공급자 역할
 - 국내 연안의 플라스틱 쓰레기는 현재 해양관광, 선박안전, 수산업 및 생태계에 가시적인 영향을 미치고 있음
- 투입비용 대비 약 2.3배의 경제적 편익 유발
 - 향후 10년간 연구 사업에 따른 순편익은 246.7억원에 달하는 것으로 예상되고 이에 따른 경제적 B/C비율은 2.3로 추정됨
 - 사업기간인 10년간 총 110명의 전문인력을 양성하고, 이를 통하여 총 45.7억원의 편익 달성 효과를 기대하고, 방송 및 신문을 통한 대국민 해양과학기술 이해 고양에 약 17.1억원의 경제적 파급효과에 기여



2. 국내 · 외 기술개발 동향분석

| 연구현황 및 동향분석 | |
|-------------|---|
| 국외 | <ul style="list-style-type: none"> - 해양쓰레기에 대한 국제적 연구논문은 1990년대 초 43건에서 2011년 108건으로 빠르게 증가하는 추세(자료출처: Web of Science). 해양쓰레기 분야 중 플라스틱 오염과 생물 섭취 연구는 현재까지 아주 제한적인 수준이나 2000년대 중반 이후 논문 편수 증가 추세 - 1960년대에 처음으로 해양동물의 위장에서 플라스틱 조각이 발견되면서, 플라스틱 조각이 해양생태계에 영향을 미칠 수 있다는 사실이 제기됨(Ryan et al., 2009; Harper & Fowler 1987; Kenyon & Kridler 1969) - 2004년 Thompson 박사가 Science 지에 현미경 수준에서 식별되는 마이크로플라스틱의 출현이 해양환경에서 증가하는 추세에 있음을 발표하면서 국제적으로 이슈화되기 시작하며, 이때부터 'micro-plastics'라는 용어가 사용되기 시작함. - 플라스틱 조각이 외딴 섬, 대양, 극지방에 걸쳐 지구 전체에 널리 분포한다는 사실이 뒤이어 밝혀지면서 차츰 지구적 환경 이슈로 부상(Barnes et al., 2009) 및 국제적 공동 협의체 구성 및 국제공동연구 필요성이 확대 추세(Andrady, 2011). - 2008년, 2010년 NOAA 워킹그룹, 2009 UNEP 해양쓰레기 가이드라인, 2010년 IOC 해양환경 이슈, 2011년 GESAMP 보고서, 2010년 영국 전지구적 환경보전이슈, 2011 PICES MEQ 회의에서 모두 마이크로플라스틱 오염문제를 글로벌 해양환경 아젠다로 다룸 - 해양환경전문가그룹(GESAMP)에서 2012년 3월 '마이크로플라스틱의 전세계 오염 평가' 워킹그룹 발족 - 현재까지 세계적으로 표준화된 모니터링 프로토콜이 없어 지역 간 또는 연구자 간 데이터 비교가 어려운 상황으로, 표준화된 마이크로플라스틱 모니터링 프로토콜에 대한 필요성이 제기되고 있음. GESAMP나 NOAA의 연구자 회의에서 가장 우선적으로 해결해야하는 안건으로 지목하고 있음 - 현재, 연안 모래해변, 수층, 해저퇴적물, 하수슬러지 등에 플라스틱 조각 출현을 밝히는 연구가 선진국을 중심으로 차츰 활발해지고 있으며, 플라스틱 분해와 생물축적, 오염물질 전달 등 플라스틱의 분해에 따른 마이크로플라스틱의 출현, 거동 및 생태계 영향에 대한 연구가 시작되는 시점에 있음 |
| 국내 | <ul style="list-style-type: none"> - 이제까지 국내 해양쓰레기 연구는 대형 쓰레기를 중심으로 제한적으로 추진되었으며 마이크로플라스틱 오염에 대한 연구는 해양연에서 2011년에 시범적으로 실시한 것이 전부임 - 해양환경관리공단(KOEM)은 2010년 '해양쓰레기 대응센터'를 개설하여 해양쓰레기에 관한 연구와 정책제안 등의 업무를 수행하기 시작하였으나, 대형 해양쓰레기 중 일부만을 다루고 있음 - 국토해양부 해양환경 연구개발 중장기계획(2012~2020)에 마이크로플라스틱 오염을 포함하는 해양쓰레기 오염에 대한 장기연구개발 계획 포함됨 |



3. 연구개발 비전 및 목표

가. 비전



※ MP: 마이크로플라스틱(Microplastic)

나. 연구개발 목표

- 최신 국제 해양환경 현안 문제 해결 및 국제 해양 플라스틱 오염 연구 선도를 위한 국내 연안, 동아시아 및 태평양 해역의 마이크로플라스틱의 환경오염, 거동 및 생물 영향 규명



4. 중점추진 연구개발 과제

| | 1단계 | 2단계 | 3단계 |
|-------------|-------------------------|----------------------|----------------------|
| MP의 유입과 분포 | MP 조사기법 개발 및 표준화 | MP 오염지도 작성 및 추세규명 | MP 유입원 및 유입경로 규명 |
| | MP 시료채취/현장조사기법 개발 | MP 오염현황 평가 | MP 주요 유입원 평가 |
| | MP 식별 및 정량평가 기술개발 | MP 오염추세 평가 | MP 주요 유입경로 평가 |
| MP의 분해와 거동 | MP 풍화특성 평가기술 개발 | MP 분해과정 평가 | 풍화/미세화에 따른 거동 평가 |
| | MP 표면특성 변화 평가기술 개발 | MP 미세화 과정 규명 | 현장 MP 풍화 및 미세화 평가 |
| | 풍화특성 평가 시스템 구축 | MP aging 측정기술 개발 | MP 풍화 및 미세화에 따른 거동평가 |
| MP 오염물질 | MP 오염물질 흡/탈착 특성 규명 | MP 잔류 오염물질 환경거동 평가 | MP 잔류 오염물질 생물축적 평가 |
| | MP의 오염물질 분배 특성 분석 | MP 잔류 오염물질 평가 | MP 오염물질 생물축적성 평가 |
| | MP 첨가 유해물질 용출 특성 분석 | MP 역할고려 다매체거동모형 개발 | MP 오염물질의 생물축적 평가 |
| MP 생물축적과 독성 | MP 생물축적/독성 평가법 개발 | MP 생물축적/독성 평가 | MP 생태위해성평가 |
| | MP 생물축적 평가법 개발 | MP 현장 생물축적 평가 | 먹이망을 통한 MP 생물농축 평가 |
| | MP 생물독성 평가법 개발 | MP 생물독성 평가 | MP 부착미소생물 영향 평가 |
| MP 이동 평가 | MP 이동/분포평가 모델링 기반 기술 개발 | 연안역 MP 이동 및 분포평가 모델링 | 외해역 MP 이동/분포 평가 모델링 |
| | 해양순환 모델 성능 평가/개선 | 국내 MP 기원과 운명 평가 기술 | 외해역 MP 기원과 운명 평가 기술 |
| | 라그랑지안 모델링 기술 개발 | 연안 MP 생성/소멸 모사기술 개발 | 외해역 MP 생성/소멸 모사기술 개발 |

5. 연구개발 소요예산

| 단 계 | 1단계 | | | 2단계 | | | 3단계 | | | | 합계 | |
|---------------|-----|------|------|------|------|------|------|------|------|------|----|------|
| | 연 도 | 2013 | 2014 | 2015 | 2016 | 2017 | 2018 | 2019 | 2020 | 2021 | | 2022 |
| MP 유입과 분포 | | 5 | 7 | 6 | 11 | 11 | 11 | 10 | 3 | 3 | 3 | 70 |
| MP 분해와 거동 | | 4 | 4 | 3 | 8 | 6 | 6 | 5 | 5 | 5 | 5 | 51 |
| MP 흡착/첨가 오염물질 | | 4 | 4 | 4 | 6 | 8 | 7 | 6 | 6 | 4 | 4 | 53 |
| MP 생물축적과 독성 | | 4 | 4 | 4 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 47 |
| MP 이동 | | 4 | 4 | 4 | 3 | 3 | 2 | 4 | 3 | 3 | 3 | 33 |
| 합 계 | | 21 | 23 | 21 | 33 | 33 | 31 | 30 | 22 | 20 | 20 | 254 |



6. 지원근거

- 「제4차 해양환경종합계획(2011~2020)」상에는 ‘해양환경개선 및 오염원의 예방적 관리’를 위한 연안유입오염물질 및 해양쓰레기 관리 강화 추진 사업을 규정함
- 제2차 해양수산발전기본계획(2011~2020)에서 “해양수질 및 해저퇴적물 환경 개선 추진”을 4대 정책목표 중의 하나로 도출하였으며, 목표달성을 위해 “해양 생태 환경의 건강성과 장래 이용을 고려한 과학적 기준 도입 및 문제해결 중심의 정책결정지원 시스템 도입”을 명시함
- 해양수산발전기본법 15조에 의거 해양안전기술의 개발을 시행해야 함
- “해양쓰레기 오염 대응기술 개발”은 해양환경기술개발사업 중장기 기본계획 (국토해양부, 2011)에 포함되어 있음
- 해양환경관리공단(KOEM)은 2011년 ‘해양쓰레기 대응센터’를 개설하여 업무를 수행하기 시작하였으나, 해양쓰레기 문제에 대한 연구개발 수요를 충족할 수 있는 국가연구개발 사업은 없음
- 「한국해양과학기술원 발전전략(2012)」 전략 연구과제 선정
- 과학기술기본법 7조, 11조에 의거 “과학기술기본계획”에 따라 국가연구개발 사업을 추진. 제2차 과학기술기본계획(2008~2012)에서 “건강하고 안전한 삶을 위한 기술개발 강화”가 향후 5년간 15대 핵심과제중 하나로 도출됨('07.12.20.)

7. 기대성과 및 활용 방안

| | |
|------|--|
| 기대효과 | <ul style="list-style-type: none"> ○ 마이크로플라스틱에 의한 오염의 수준과 심각성 규명 ○ 마이크로플라스틱의 함유 유해물질의 생태계위해성 여부 확인 ○ 마이크로플라스틱의 분해 반감기 규명을 통한 해양잔존 기간 산정 ○ 마이크로플라스틱 이동 및 분포 예측 가능 ○ 효율적인 마이크로플라스틱 오염 모니터링 방안 마련 ○ 해양쓰레기 관리대책의 선진화에 기여 ○ 마이크로플라스틱 오염으로부터 연안환경 및 관광자원 보호 ○ 마이크로플라스틱 쓰레기의 사후 수거 및 처리 비용 저감 |
| 활용방안 | <ul style="list-style-type: none"> ○ 정부의 플라스틱 해양쓰레기 오염 관리를 위한 중장기 대책 수립에 활용 ○ 국제사회의 마이크로플라스틱의 전지구적 오염평가에 활용 ○ 국제 해양쓰레기 관련 협약 대응 자료로 활용 |

목 차



| | |
|---|----|
| 요약문 | i |
| I. 국내·외 관련 연구개발 동향 및 환경 분석 | 1 |
| 1. 국내·외 연구개발동향 및 전망 분석 | 1 |
| 2. 정책동향 및 제도 분석 | 22 |
| 3. 연구수준 분석 | 26 |
| 4. 관련기술의 필요성 분석 | 27 |
| II. 연구개발 비전 및 추진 전략 | 32 |
| 1. 연구개발 비전 | 32 |
| 2. 연구개발 최종 목표 | 32 |
| 3. 추진전략 | 33 |
| 4. 중점 연구개발과제 도출 | 34 |
| III. 연구개발 추진계획 | 40 |
| 1. 중점 및 세부연구개발과제 요약 | 40 |
| 2. 총괄 로드맵 | 40 |
| 3. 세부분야별 로드맵 | 41 |
| 4. 소요예산 및 연구기간 | 43 |
| IV. 연구개발의 타당성 분석 | 46 |
| 1. 정책적 타당성 분석 | 46 |
| 2. 경제적 타당성 분석 | 49 |
| 3. 기술적 타당성 분석 | 58 |
| V. 연구개발 결과의 활용방안 및 기대효과 | 60 |
| 1. 활용방안 | 60 |
| 2. 기대효과 | 60 |
| VI. 참고문헌 | 61 |

표 목 차



| | |
|---|----|
| <표 1-1> 연도별 주제별 연구논문 발표 건수 분석. 출처: Web of Science | 2 |
| <표 1-2> 최근까지 발표된 마이크로플라스틱 관련 논문의 주요 연구 주제 (Hidalgo-Ruz et al., 2012)] | 2 |
| <표 1-3> 주요 플라스틱 폴리머의 종류, 물리·화학적 성질 및 용처 | 3 |
| <표 1-4> 해안 구획 별 퇴적물 미세플라스틱 연구 논문 수 | 7 |
| <표 1-5> 부유성 마이크로플라스틱의 해양에서 출현 빈도 조사 자료 | 8 |
| <표 1-6> 플라스틱 첨가제 종류와 사용목적 | 14 |
| <표 1-7> 해양환경에서 마이크로플라스틱의 분해와 풍화 관련 연구논문 | 15 |
| <표 1-8> 바다쓰레기를 섭취하는 해양 동물의 종 수 (Laist, 1997) | 17 |
| <표 1-9> 마이크로플라스틱에 의한 생물 영향 연구 사례 (Cole et al.(2011), Davison & Asch(2011) 에서 발췌) | 17 |
| <표 1-10> EU MSFD ‘지시자 10 해양쓰레기’의 특성, 기준, 지표 (Cardoso et al.(2010) | 23 |
| <표 1-11> 제1차 해양쓰레기 관리 기본 계획에 명시된 사업의 추진 현황 (국토해양부와 해양환경관리공단, 2011) | 25 |
| <표 1-12> 핵심기술의 국제경쟁력 분석 | 26 |
| <표 4-1> 학력별 월급여액 | 52 |
| <표 4-2> 서울지역 39개 일반대학원 등록금 현황 | 53 |
| <표 4-3> 1명의 지불용의 | 54 |
| <표 4-4> 인력양성수 | 54 |
| <표 4-5> 인력양성사업의 편익 추정 | 55 |
| <표 4-6> 해양(연) 보유 온누리호의 방송 및 신문 홍보 성과 | 57 |
| <표 4-7> 태평양 미세플라스틱 거동분석 사업에 따른 비용-편익 분석 결과 | 57 |

그림 목 차



| | |
|--|----|
| [그림 1-1] 연도별 주제별 연구논문 발표 건수 분석. 출처: Web of Science | 1 |
| [그림 1-2] 인도양과 대서양에서 채집된 부유성 해양쓰레기 (Algalita Marine Research Foundation) | 4 |
| [그림 1-3] 세안제에 함유되어 있는 미세플라스틱 입자 (Fendall and Sewell, 2009) | 5 |
| [그림 1-4] 미세플라스틱 쓰레기의 형성, 거동, 생물축적과 영향을 보여주는 모식도 | 9 |
| [그림 1-5] 해양환경에서 서식하는 바닷새, 어류, 갑각류 등의 위장에서 발견된 미세플라스틱 | 19 |
| [그림 1-6] 마이크로플라스틱을 매개로한 오염물질(흡착성, 침가성)의 생물전이 모식도 | 20 |

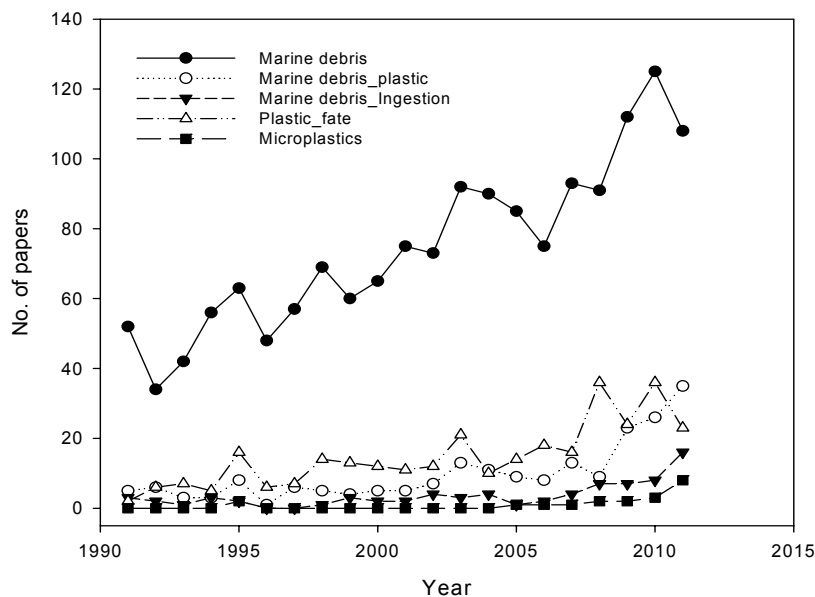


I 국내·외 관련 연구개발 동향 및 환경 분석

1) 국내·외 연구개발 동향 및 전망 분석

1.1. 국외 연구동향

- 해양쓰레기에 대한 국제적 연구논문은 1990년대 초 43건에서 2011년 108건으로 빠르게 증가하는 추세(자료출처: Web of Science). 해양쓰레기 분야 중 플라스틱 오염과 생물섭취 연구는 현재까지 아주 제한적인 수준이나 2000년대 중반 이후 논문 편수 증가 추세
- 마이크로플라스틱을 주제로 다루는 논문은 지난 20년간 총 20편으로 2005년 이후 해마다 1-2편씩 발표되기 시작하여 2011년에 8편으로 급속히 늘어남
- 최근 몇 년간 Science와 Nature 등에 해양쓰레기 관련 논문이 5편 이상 게재되는 등 핵심 이슈의 하나로 부상하고 있음
- 현재까지 발표된 마이크로플라스틱 관련 연구 논문의 수는 68편으로 상당히 제한적인 연구가 진행된 실정이며, 연구 주제별로 살펴보면 공간분포, 존재여부 확인, 계절변동과 같은 분포에 관한 연구가 전체의 약 70%를 차지하며, 해양 환경 중 거동과 오염물질에 대한 연구는 더욱 제한적임



[그림 1-1] 연도별 주제별 연구논문 발표 건수 분석. 출처: Web of Science



〈표 1-1〉 연도별 주제별 연구논문 발표 건수 분석. 출처: Web of Science

| Year | MD | MD & plastic | MD & organism | MD & entanglement | MD & accumulation | PD | PD & Marine | micro-plastics | pellet & Marine | plastic & fate |
|------|-------|--------------|---------------|-------------------|-------------------|-----|-------------|----------------|-----------------|----------------|
| 1991 | 52 | 5 | 2 | 2 | 4 | 22 | 5 | 0 | 2 | 2 |
| 1992 | 34 | 6 | 3 | 3 | 1 | 24 | 6 | 0 | 1 | 6 |
| 1993 | 42 | 3 | 3 | 1 | 6 | 18 | 3 | 0 | 0 | 7 |
| 1994 | 56 | 3 | 5 | 0 | 4 | 18 | 3 | 0 | 2 | 5 |
| 1995 | 63 | 8 | 4 | 3 | 7 | 30 | 8 | 2 | 2 | 16 |
| 1996 | 48 | 1 | 2 | 0 | 8 | 25 | 1 | 0 | 0 | 6 |
| 1997 | 57 | 6 | 8 | 2 | 6 | 40 | 6 | 0 | 0 | 7 |
| 1998 | 69 | 5 | 4 | 1 | 13 | 29 | 5 | 0 | 1 | 14 |
| 1999 | 60 | 4 | 4 | 2 | 8 | 32 | 4 | 0 | 1 | 13 |
| 2000 | 65 | 5 | 2 | 1 | 8 | 44 | 5 | 0 | 0 | 12 |
| 2001 | 75 | 5 | 3 | 1 | 11 | 29 | 5 | 0 | 2 | 11 |
| 2002 | 73 | 7 | 6 | 3 | 9 | 37 | 7 | 0 | 2 | 12 |
| 2003 | 92 | 13 | 5 | 2 | 16 | 48 | 13 | 0 | 2 | 21 |
| 2004 | 90 | 11 | 3 | 4 | 14 | 45 | 11 | 0 | 4 | 10 |
| 2005 | 85 | 9 | 5 | 1 | 14 | 46 | 9 | 1 | 1 | 14 |
| 2006 | 75 | 8 | 3 | 3 | 5 | 38 | 8 | 1 | 3 | 18 |
| 2007 | 93 | 13 | 3 | 2 | 14 | 53 | 13 | 1 | 2 | 16 |
| 2008 | 91 | 9 | 4 | 0 | 15 | 59 | 9 | 2 | 8 | 36 |
| 2009 | 112 | 23 | 7 | 6 | 20 | 75 | 23 | 2 | 7 | 24 |
| 2010 | 125 | 26 | 6 | 5 | 18 | 55 | 26 | 3 | 6 | 36 |
| 2011 | 108 | 35 | 18 | 6 | 21 | 64 | 36 | 8 | 1 | 23 |
| sum | 1,565 | 205 | 100 | 48 | 222 | 831 | 206 | 20 | 47 | 309 |

MD: marine debris, PD: plastic debris

〈표 1-2〉 최근까지 발표된 마이크로플라스틱 관련 논문의 주요 연구 주제 (Hidalgo-Ruz et al., 2012)]

| 목적 | n = 44 퇴적물 | n = 30 표층 해수 | n = 7 수층 | n = 68 합계 |
|-------|---------------|-----------------|-------------|--------------|
| 방법론 | 2 | 2 | - | 3 |
| 존재/부재 | 4 | 2 | 1 | 5 |
| 공간 분포 | 25 | 22 | 5 | 45 |
| 계절 변화 | 3 | 6 | 1 | 9 |
| 분산 과정 | 1 | - | - | 1 |
| 분해/풍화 | 4 | 2 | - | 6 |
| 오염물질 | 12 | 3 | 1 | 13 |



1.1.1. MP 유입과 분포

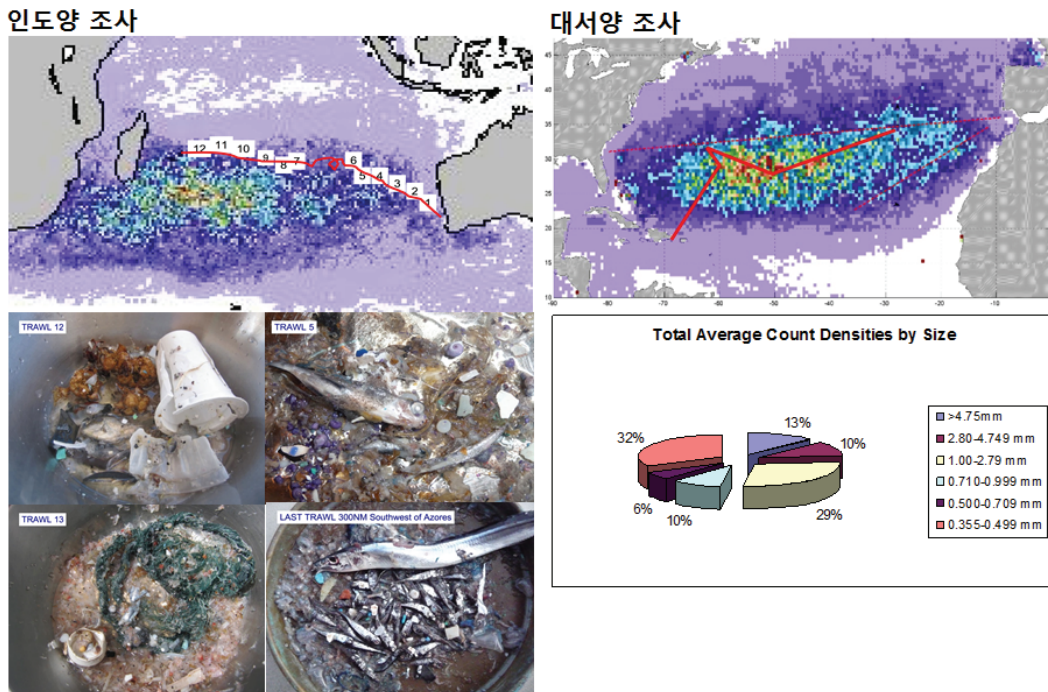
- 플라스틱은 1907년에 처음 합성되어 1950년대부터 대량생산되기 시작함. 2010년에 전 세계에서 2억 6천 톤의 플라스틱이 생산되었으며, 매년 10%씩 생산량 증가 추세

〈표 1-3〉 주요 플라스틱 폴리머의 종류, 물리 · 화학적 성질 및 사용처

| 폴리머의 종류 | 밀도 (g/cm ³) | 유리전이 온도 (°C) | 녹는점 (°C) | 비점 (°C) | 사용처 |
|--|--|--------------|--|---------|--|
| polyethylene | 0.92-0.97 | -120 | 120-130 (고/중 밀도), 105-115 (저밀도) | | 플라스틱 가방, 필름, 토목 섬유, 부이 포장재 등 |
| polypropylene | 0.86-0.95 | -10 | 130 - 171 | | 보온 속옷, 카펫, 포장재, 라벨, 직물, 실험 장비, 확성기, 자동차 부품, 지폐, 콘덴서, 음식 용기, 주전자, 플라스틱 버킷, 자동차 배터리, 약품함, 에어컨 등 |
| polystyrene | 1.05 | 95-100 | 240 | 145 | 요거트 용기, CD 케이스, 포장재, 음료수 컵, 절연체, 연기 측정기 케이스, 자동차 번호판, 페트리 디쉬, 테스트 튜브, microplate 등 |
| polyvinylchloride (비유연), 1.10-1.35 (유연) | 1.10-1.45 (비유연), 1.10-1.35 (유연) | 80-82 | 100-260 | | 파이프, 전기 케이블, flat sheet, 코트, 스키장비, 신발, 자켓, 앞치마, 가방, 장난감, 방수포, 천장 타일, 인테리어 피복 등 |
| polyethylene terephthalate | 1.40(20°C) | 69 | >250 | | |
| polyester | 1.4 | | | | 실, 의류, 가구, 침대 시트, 담요, 컨베이어 벨트, 안전 벨트, 방수포, 병, 필름, 카누, 콘덴서, 홀로그램, 기타, 피아노, 자동차 인테리어, 요트 인테리어 등 |
| polyamide (nylon 6/66) | 1.1 | 50 | 210-265 | | 칫솔, 스타킹, 낙하산, 전투조끼, 자동차 바퀴, 섬유, 면사포, 카펫, 악기의 줄, 로프, 머리빗, 드라이버, 기어 등 |
| nylon-6,10 (semicrystalline polyamide) | 1.04-1.19 | 50 | 215 | | |
| polyvinyl alcohol | 1.19-1.31 | 85 | 230 | 238 | |
| acrylic | 1.15 | | 190(연화점) | | 일회용 냅킨, 순간 접착제, 압감 접착제 등 |
| polycarbonate | 1.20-1.22 | 150 | 267 | | 전기통신 부속품, 콘덴서, 차내등, 방음벽, 방탄유리, 전투기 조종석 canopy, 렌즈, 고글, 헬멧의 얼굴 가리개, 폭동 진압봉, 4륜 산악바이크, 소형 비행기, 헬리콥터, 믹서기 병, 여행 가방, 컴퓨터 케이스, 음향기기 케이스 등 |
| polyacrylonitrile | | | | | 울트라 필터 membrane, 군수품, 미사일, 추진체, 로켓 모터, 압력용기, 낚시대, 테니스 라켓, 자전거 등 |
| silicone | | | | | 밀폐제, 윤활유, 보형물, 주방용품, 절연체, 방화간막이, 수의, 붕대, 소독, 에너지 팔찌, 콘택트 렌즈, 자전거 체인, 우유병 꼭지 등 |
| polyvinyl butyral | | | | | 자동차 windshield, 잉크, 금속 접착제, 세라믹 접착제, 무기 이온 접착제, 태양광 모듈 등 |
| neoprene | | | | | 노트북 커버, 보호대, 절연체, 가스킷, 호스, 부식방지 코팅, 접착제, 방음제, 전원 변압기, 금속 케이스의 외부 충전물 질, 체스터, 리모컨, 안장, 고무 장갑 등 |
| bakelite | | | | | 시트, 낚시대, 냄비 손잡이, 브레이크 실린더, 전자 플러그, 스위치 배전기 캡, 소켓, 전구, 진공관, 브레이크 패드, 절연선, 호루라기, 섹소폰, 마우스 피스, 카메라, 보석함, 시계, 라디오, 포커패, 당구공 등 |



- 플라스틱 총 생산량의 30% 이상이 일회용 포장제로 사용되고 있으며, 이들 대부분은 생산된 후 일 년 이내에 폐기. 전체 배출되는 폐기물의 약 10%를 플라스틱이 차지
- 해양으로 유입되는 경로로서 유출사고, 의도적 투기, 강, 하수처리장 배출수/슬러지 등 다양함
- 해양으로 유입된 쓰레기는 해류를 타고 전지구를 이동하며, 원형순환해류와 바람을 타고 모여 태평양과 대서양의 공해상에 거대한 '쓰레기 패치(garbage patch)'를 형성. 이 중 약 80%가 플라스틱 쓰레기임



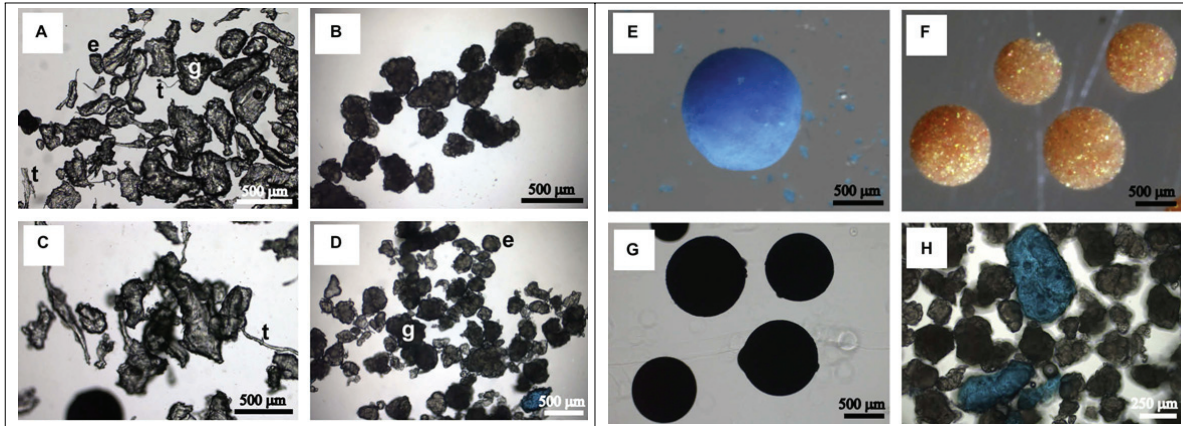
Source: Bill Francis at Algalita Marine Research Foundation (www.algalita.org)

[그림 1-2] 인도양과 대서양에서 채집된 부유성 해양쓰레기
(Algalita Marine Research Foundation)]

- 1960년대에 처음으로 해양동물의 위장에서 플라스틱 조각이 발견되면서, 플라스틱 조각이 해양생태계에 영향을 미칠 수 있다는 사실이 밝혀짐(Ryan et al., 2009; Harper & Fowler 1987; Kenyon & Kridler 1969)
- 1970년대 연안지역에 수mm 크기의 작은 플라스틱 조각의 출현이 Science 지와 Marine Pollution Bulletin 학술지에 발표됨(Carpenter et al., 1972; Carpenter and Smith, 1972; Gregory, 1977; Morris and Hamilton 1974)



- 해양으로 유입된 플라스틱은 자연적 풍화를 거치면서 점차 잘게 쪼개져 크기가 마이크로미터 수준으로 작아지며, 최근에는 공업용/화장품 등에 미세플라스틱 자체가 제조되어 사용되면서 미세플라스틱의 해양 유입이 증가되는 추세



[그림 1-3] 세안제에 함유되어 있는 미세플라스틱 입자(Fendall and Sewell, 2009)

- 2004년 Thompson 박사가 Science 지에 현미경 수준에서 식별되는 마이크로플라스틱의 출현이 해양환경에서 증가하는 추세에 있음을 발표하면서 국제적으로 이슈화되기 시작하며, 이때부터 'micro-plastics'라는 용어가 사용되기 시작함
- 플라스틱 조각이 외딴 섬, 대양, 극지방에 걸쳐 지구 전체에 널리 분포한다는 사실이 뒤이어 밝혀지면서 차츰 지구적 환경 이슈로 부상(Barnes et al., 2009)하고 있으며, 이에 따라 국제적 공동협약체 구성 및 국제공동연구에 대한 필요성이 확대되는 추세(Andrady, 2011)
- 2008년, 2010년 NOAA 워킹, 2009 UNEP 해양쓰레기 가이드라인, 2010년 IOC 해양환경이슈, 2011년 GESAMP 보고서, 2010년 영국 전지구적 환경보전이슈, 2011 PICES MEQ 회의에서 모두 마이크로플라스틱 오염문제를 글로벌 해양 환경 아젠다로 다루고 있음
- 정부간해양위원회(IOC)는 2010년 중기전략 4개 목표 중 '해양생태계의 건강보호' 분야의 4대 주요 이슈 중 하나로 '마이크로플라스틱'을 선정하면서 마이크로플라스틱 오염을 전지구적 환경이슈로 주목
- 미국 국립해양대기청(NOAA)은 2005년에 해양쓰레기 프로그램을 시작하여 해양쓰레기 관련 연구, 방지, 제거에 관한 정책을 추진하고 있음. NOAA는



2011년에 “국제 해양쓰레기 심포지움”을 개최하였으며, 2008년과 2010년에 미세 플라스틱 관련 국제워크숍을 개최하는 등 이슈를 선점하고 있음(Arthur et al., 2009)

- 해양환경전문가그룹(GESAMP)에서 2009년 ‘미세플라스틱과 오염물질 - 해양에서 출현과 영향’이 논의되었고, 이어서 2010년 6월에는 ‘잔류성·생물축적성·독성 물질의 이동매개체로서의 미세플라스틱’이란 주제로 IOC-GESAMP 공동회의 개최 및 2011년 보고서 발간(GESAMP, 2010)
- 영국왕립학회에서 발행하는 “Philosophical Transactions of the Royal Society B”에서는 2009년 7월 364호에 “Plastics, the environment and human health”를 타이틀로 한 특별호를 발간하였고, 미세플라스틱 오염을 주요 이슈로 주목함
- 일본은 1971년부터 미세플라스틱의 경년 변동성을 일부 수행하고 있으며, 자국 정부 내 환경부의 적극적인 활동으로 일본 주변해에서 미세플라스틱의 변동성을 장기모니터링 중에 있음
- 선진국을 중심으로 해수욕장과 해수 표층에서 미세플라스틱의 공간분포 연구가 활발해지기 시작하는 시점으로, 미세플라스틱의 환경 자료는 아직까지 상당히 제한적인 수준. 연안환경(모래해변, 수층, 해저퇴적물)과 일부 오염원(하수슬러지 등)에서 마이크로 플라스틱의 공간적 분포와 밀도에 대한 환경자료를 본격적으로 축적해가는 초기 단계에 있음
- 현재까지 세계적으로 표준화된 모니터링 프로토콜이 없어 지역 간 또는 연구자 간 데이터 비교가 어려운 상황으로, 표준화된 미세플라스틱 모니터링 프로토콜에 대한 필요성이 제기되고 있음. 이는 GESAMP나 NOAA의 연구자 회의에서 가장 우선적으로 해결해야하는 안건으로 지목하고 있으며, 연구자간 합의 필요
- 미국 국립해양대기청(NOAA)는 해변과 해수층에 존재하는 미세플라스틱의 표준화된 모니터링 프로토콜을 개발하기 위해 워싱턴 대학 Baker 박사팀과 공동 연구를 진행 중임
- 마이크로플라스틱의 연안 퇴적물 모니터링 연구는 조간대에서 대부분 이뤄져 왔고, 조하대 연구는 극히 제한적



〈표 1-4〉 해안 구획 별 퇴적물 미세플라스틱 연구 논문 수

| 해안 구분 | no. |
|-------------------------------|-----|
| 조상대 (supralittoral) | 13 |
| 고조선 (high tide line) | 28 |
| 상부 조간대 (high intertidal zone) | 14 |
| 중부 조간대 (mid intertidal zone) | 13 |
| 하부 조간대 (low intertidal zone) | 13 |
| 조하대 (sublittoral) | 3 |
| 명시되지 않음 (not specified) | 8 |

- 부유성 마이크로플라스틱의 대표적 연구논문과 연구지역, 사용된 네트의 메쉬 사이즈를 아래 표에 나타냄. 주로 표층의 부유물 채집에는 Manta trawl netd; 사용되었으며, 중층 채집에는 bongo net와 CPR(continuous plankton recorder)가 사용됨
- 연구자들 마다 서로 다른 메쉬 사이즈(예: 0.33mm, 0.95mm)를 사용하여 연구 결과를 통합적으로 취합하기 어려운 면이 있으며, 네트의 메쉬 사이즈에 따라 미세한 플라스틱 조각의 유실이 불가피한 실정(Carpenter, 1972, Colton et al., 1974)
- 현재, 해양환경에서 출현하는 마이크로플라스틱의 크기와 조성 등 정성적 자료를 확립하기 시작하는 단계로서, 향후 정량적 자료 확립이 필요함



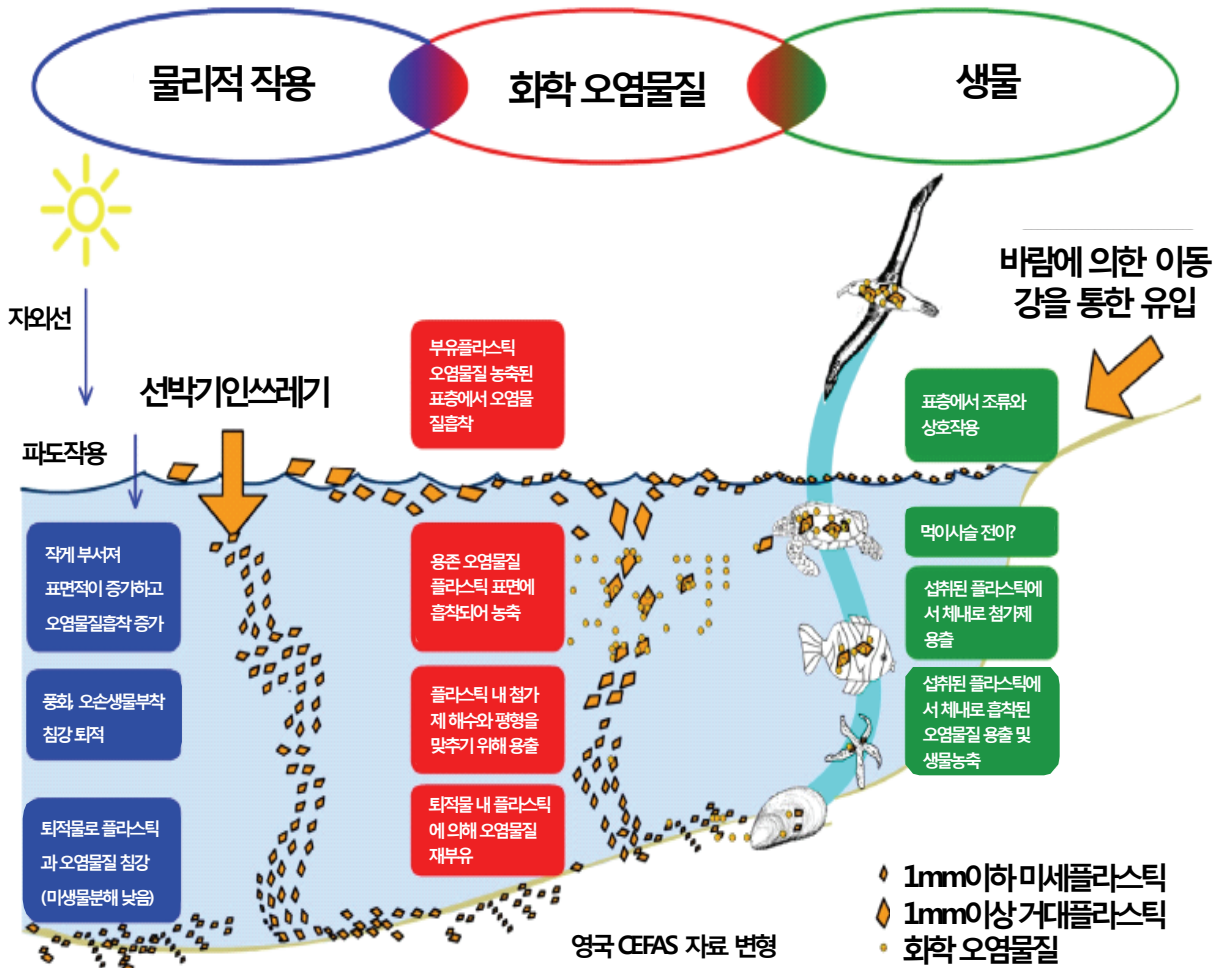
〈표 1-5〉 부유성 마이크로플라스틱의 해양에서 출현 빈도 조사 자료

| Concentration of floating micro-debris | Characteristics of micro-debris | Sampled location | Sampled water depth and distance from land | Sampling gear type | Applied mesh size of net | References |
|---|--|------------------------------|--|--|--|-------------------------------|
| 0.00-2.52 (per m ³) | Spherical plastic particles | Southern New England | Surface waters and coastal waters | National Academy of Sciences (NAS) reference net | 0.5m diameter, 333 μ m | Carpenter et al. (1972) |
| 0-9,894,044 (per km ²) | Plastic pellets | Off Japan | Coastal and offshore | Neuston net | 300 μ m | Ogi and Fukumoto (2000) |
| 531-195,484 pieces (per km ²) | Fragments, Filaments, Thin plastic films | North Pacific Central Gyre | Surface and mid depth, and open ocean | Manta trawl net | 333 μ m | Moore et al. (2001) |
| 0.01-0.06 (per m ³) | Fibers (~20 μ m in diameter) and brightly colored | Northern part of UK | 10 m depth and from coastal to offshore | Continuous Plankton Recorder | 127mm ² aperture, 280 μ m | Thompson et al. (2004) |
| 1-18 pieces (per m ³) | Microplastics (~4.75mm) | Santa Monica Bay, California | Three depths and nearshore and offshore | Manta trawl net, Bongo net | 333 μ m | Lattin et al. (2004) |
| 0.43-7.25 (per m ³) | Fragments, Filaments, Thin plastic films | North Pacific | Surface and inshore and offshore | Manta trawl net | 333 μ m | Moore et al. (2005) |
| 1,000-100,000 (per m ³) | Fibers Blue particles Black particles Black round particles | Norwegian waters (Skagerrak) | 2m depth and near and offshore | Submersible water pump(12V) & Zooplankton net | 180-450 μ m | Lysekil and FlØdevigen (2010) |

- 이 외에 싱가포르, 칠레, 북대서양 아열대 환류, 쿠로시오 해류역과 북서태평양 해역, 캘리포니아해류 남측, 북서대서양, 그리고 남중국해 북측 해역에서 부유성 해양쓰레기 연구가 수행된 바 있음



1.1.2. MP 분해와 거동



[그림 1-4] 미세플라스틱 쓰레기의 형성, 거동, 생물축적과 영향을 보여주는 모식도

- 해저 퇴적물 층에서 마이크로플라스틱 출현은 2004년에 Thompson 등이 영국 연안에서 처음으로 밝혔으며, 이어 싱가포르, 인도, 벨기에(Thompson et al., 2004; Obbard, 2006; Reddy et al., 2006; Claessens et al., 2011) 연안에서도 관찰됨. 마이크로플라스틱의 분포 범위(연안, 대륙붕, 심해)와 축적장소 등 해양에서의 거동에 대한 정보는 아직 부재함
- 마이크로플라스틱의 유입원과 유입경로를 규명하기 위한 연구가 시도되고 있으며, Browne 박사 연구팀에서 하수처리장의 방류수가 의류의 세탁과정을 통해 나오는 폴리에스터와 아크릴 섬유류의 주요 유입경로가 되고 있음을 밝힌 것이 전부임 (Browne et al., 2011)



- 플라스틱은 단위체(monomer)들이 첨가중합/축합중합 되어 이루어진 합성 고분자(polymer)로서, 플라스틱의 분해는 폴리머의 분자량을 감소시키는 화학적 변화를 의미함. 일반적으로 화합물의 분해는 에너지를 얻는 방법에 따라 생물학적 분해, 광분해, 산화적 분해, 열분해, 가수분해로 나뉘지는데, 일반적인 폴리머의 경우 광산화반응이 주요 분해메커니즘인 것으로 알려짐(Andraday, 2011)
- 과거 폴리머 분해 연구는 플라스틱 제품의 내구성과 성능 유지, 플라스틱 쓰레기의 재활용/재사용적 측면에 집중
- 육상환경에서 플라스틱의 분해성을 평가하는데 초점을 두고 연구되어 왔으며, 해양환경에서 플라스틱의 분해속도와 잔류시간에 대한 연구는 아직까지 전무함
- 폐플라스틱로 인한 환경문제를 줄이기 위하여 생분해성 수지 개발에 대해 1980년대부터 주목하기 시작. Polyhydroxyalkanoates (PHA), polylactides, polycaprolactone, aliphatic polyesters, polysaccharides 등이 지난 10년 사이에 개발되었으며, 기존의 플라스틱 폴리머와의 혼합물이 개발되기도 함
- 현재 생분해성 플라스틱 개발과 동시에 폴리머의 분해능이 뛰어난 미생물 균주의 확인, 효소개발 등 산업적 생산/처리 중심의 연구는 활발히 진행되고 있으나, 플라스틱의 환경 중 거동을 규명하고자 하는 연구는 극히 미진한 실정
- 미생물을 이용한 생분해성 플라스틱의 분해는 실험실내 특정 조건에서 효능을 보이나 분해 미생물의 농도가 낮고 온도 등 인자 조절이 어려운 실제 환경에서는 그리 효과적이지 않는 것으로 알려짐
- 최근 육안으로 식별이 어려운 마이크로 미터 사이즈의 플라스틱 조각이 해양 환경에 존재하고 있음이 미국과 유럽 과학자들에 의해 규명되었으며(Thompson et al., 2004; Browne et al., 2010), 현재까지 가장 작은 크기의 플라스틱으로 약 20 μ m 입자가 관찰됨
- 해양에서의 폴리머의 분해는 상대적으로 낮은 온도와 낮은 산소농도로 인해 육상환경에 비해 느릴 것으로 예측되며, 해양에서도 해변, 해수 표층, 심해 등 환경에 따라 폴리머의 풍화 속도는 매우 다를 것으로 예상하고 있음
- 대기에 노출되거나 해변에 표착한 플라스틱의 경우 UV 조사가 가장 효과적인 분해 메커니즘임(Andrady and Pegram, 1990; 1989, Andrady et al., 1993). 플라스틱의 분해속도는 수중에 부유할 때 대기 중에 노출되었을 때보다 훨씬



늦춰지며, 표면에 생물이 부착하면서 분해되는 속도가 더욱 느려지는 것으로 추정됨

- 혐기성이고 온도가 낮은 저서환경에서의 플라스틱의 분해속도는 해변과 수층에 비해 더욱 느릴 것으로 추정
- 어구 등을 대상으로 태양 빛에 의한 풍화 연구가 일부 수행된 바 있음 (Al-Oufi et al., 2004; Meenakumari and Radhalakshmi, 1995, 1988; Meenakumari and Ravindran, 1985a,b; Meenakumari and Radhalakshmi, 1988; Thomas and Hridayanathana, 2006; Meenakumari and Ravindran, 1985a,b, 1988)
- 해양환경에서 플라스틱이 광물화(mineralization)되는 Kinetics에 대한 연구는 현재까지 없음
- 플라스틱 폴리머의 분해속도를 규명하기 위하여 중탄소로 치환된 폴리머를 이용하거나 산화도에 따른 생물학적 분해속도를 측정하는 등 실험실 연구를 중심으로 진행되고 있음(Albertsson, 1978; Albertsson and Karlsson, 1988, Abrusci et al., 2011)
- 실제 환경에 적용하여 폴리머의 분해속도를 측정한 연구는 매우 제한적이며, 특히 해양환경에 적용한 사례로는 Sudhakar and Doble (2008)이 인도 Bengal 만에 HDPE, LEPE, PP 조각을 6개월 간 담귀 무게감소를 측정한 것이 전부임
- 플라스틱 제품에 첨가된 물질의 종류는 분해속도에 영향을 미칠 수 있음. 예로서 자외선 안정제(stabilizer)가 첨가된 경우 분해속도가 느려질 것으로 추정됨
- 해양연구원의 선행 연구에 따르면 우리나라 연안의 플라스틱 해양쓰레기의 오염은 양식용 부이로 대량 사용되는 발포형 폴리스틸렌이 주를 이루는 것으로 파악되고 있음. 발포형 폴리스틸렌의 쉽게 부서지는 특성상 미세한 크기가 주를 이루고 있는 것으로 파악됨



1.1.3. MP 흡착/첨가 오염물질

- 마이크로플라스틱은 소수성 오염물질에 대한 강한 흡착특성으로 인해 잔류성 오염물 및 중금속류의 거동에 영향을 끼칠 것으로 예상
- 1970년대에 Carpenter et al. (1972)와 Gregory (1978)가 해안의 플라스틱 입자에 오염물질이 흡착되어 있다는 사실을 처음으로 밝힘
- 2001년 H. Takada 박사 연구팀이 플라스틱 펠렛이 오염물질을 흡착하여 이동시키는 매체가 되며, 해양의 오염물질 모니터링 매체로 활용될 수 있음을 제안하면서, 플라스틱 쓰레기와 오염물질 간의 관계에 대해 연구자들이 새롭게 주목하기 시작(Mato et al., 2001)
- 뒤이어 플라스틱 펠렛에 흡착된 오염물질 농도와 홍합류의 체내에 축적된 오염물질 농도가 서로 상관성을 갖는다는 연구결과를 제시하였고, 이를 바탕으로 플라스틱 펠렛이 오염물질 모니터링의 대상 매체로 유용함을 주장(Endo et al., 2005)
- Takada 박사 연구팀은 플라스틱 펠렛을 세계 각지에서 수거하여 잔류성 오염물질을 모니터링하기 위한 International Pellet Watch를 제안하였고, 17개국 30개 해변에서 수거된 펠렛을 분석한 자료를 2009년 Marine Pollution Bulletin에 게재함(Ogata et al., 2009)
- 그러나 마이크로플라스틱의 흡착 및 용출에 관한 연구는 2000년대에 시작되었고, 국외에서 초기단계의 연구가 이루어짐. 국내에서는 현재까지 보고된 관련 연구 결과가 없음
 - 중금속 흡착에 관한 연구(Ashton et al., 2010; Betts, 2008)
 - 소수성유기화학물질의 흡착에 관한 연구(Hirai et al., 2011; Rios et al., 2007; Teuten et al., 2007, 2009)
 - 해양에서 채취한 마이크로플라스틱에서의 오염물질의 농도수준 모니터링에 관한 연구(Hirai et al., 2011; Ng and Obbard, 2006; Rios et al., 2007; Teuten et al., 2009; Van et al., 2012)
- 마이크로플라스틱으로의 흡/탈착에 관한 연구는 기존의 수동샘플링 및 크로마토그래피를 이용한 분리연구와 유사성을 가짐



- 예를 들어 많은 고분자구조체들이 가스크로마토그래피의 capillary column의 코팅재질로 사용되고 있고, 휘발성 및 반휘발성 유기화학물질의 코팅재질로의 흡/탈착 특성에 관한 연구는 크로마토그래피 관련 연구의 발전에 따라 1960년대 부터 지속적으로 이루어진 분야임(예: Goss, 2011)
- 플라스틱 재질의 일부는 수동샘플링 혹은 수동용량법의 재질로 활발히 연구되어 왔음. 대표적인 재질에는 다음의 플라스틱류를 포함함
 - 폴리에틸렌(polyethylene): 수계에서 소수성유기화학물질을 흡수하는 수동샘플러 로 활용됨. 대표적인 것으로 지질을 채워넣은 구입가능한 SPMD가 있음
 - 폴리우레탄폼(polyurethane foam; PUF): foam의 형태로 제조와 취급이 용이해 주로 대기중에서 휘발성 오염물질의 샘플링에 많이 사용됨
 - 폴리스티렌폼(polystyrene foam): PUF와 유사한 용도로 사용됨
 - 폴리디메틸실록산(polydimethylsiloxane): 실리콘의 높은 물질투과성과 성형의 용이성 으로 인해 소수성유기화학물질의 수동샘플링 및 수동용량법의 재질로 널리 사용됨
- 플라스틱의 제조과정에서 성형의 용이성과 플라스틱의 기능성을 향상하기 위해 첨가제가 사용됨
- 플라스틱 첨가제란,
 - 플라스틱 또는 합성수지의 가공을 용이하게 하고 최종제품의 성능을 개량하기 위해 가공이나 중합과정에서 첨가되는 화학물질로서 플라스틱의 취약성을 보완하고 특성을 살리기 위해 사용되는 보조물질
 - 주로 플라스틱의 품질개량, 성형품의 가공성, 물성향상, 장기적 안정성유지를 위해 사용. 석유화학 및 합성수지 생산량이 급팽창하면서 플라스틱첨가제의 사용량도 크게 증가 추세
 - 용도에 따라 크게 1) 형태의 수지가공을 위한 가공첨가제로 발포제, 핵제, 윤활제; 2) 공기, 열, 빛 미생물에 의한 분해를 최소화하는 안정제로 산화방지제, 열안정제, 자외선안정제, 생물안정제; 3) 최종제품 성형시 들어가는 성능첨가제로 충전제, 보강제, 가소제, 착색제, 내충격제, 난연제, 대전방지제, 가교제, 형광증백제의 3가지로 분류



〈표 1-6〉 플라스틱 첨가제 종류와 사용목적

| 첨가제 | 사용 목적 |
|--------------------|---|
| 가소제 | 유연화: 폴리머에 유연성, 가공의 작업성, 플라스틱의 팽창성을 증가시키기 위해 플라스틱 성형시 첨가되는 물질 |
| 열안정제, 외선안정제, 산화방지제 | 안정화: 열, 빛, 산화에 의해 플라스틱이 분해 및 노화 방지 |
| 발포제 | 경량화: 플라스틱안에 다공질 구조를 갖도록 해 경량, 유연한 물성을 부여하는 역할 |
| 활제 | 가공성 향상: 가공, 성형, 압출 중에 플라스틱과 접촉하는 금속표면을 윤활시켜 유동을 도와주는 물질로서, 압출기 표면과 수지 사이의 점착성을 방지하고 슬립성 향상을 위한 첨가 |
| 착색제 | 착색: 색조를 부여 |
| 대전방지제 | 정전기 방지: 플라스틱에 첨가 되거나 완성된 제품의 표면에 처리하여 제품의 표면에 형성되는 정전기를 감소 또는 제거 |
| 난연제 | 난연화: 플라스틱을 비롯한 고무·섬유·종이·목재 등을 난연화시켜 연소를 방지 또는 지연 |
| 블로킹방지제, 슬립제 | 표면개선: 필름표면을 거칠게 하여 인접한 필름층 사이에 얇은 공간을 형성함으로써 접착을 방지/ 필름이나 시트가 잘 미끄러지도록 하기 위한 첨가제 |
| 강화제, 충전제 | 강도 향상: 기본수지의 물리적 성질을 향상시켜 기계적 강도 또는 경도를 향상 |
| 핵제 | 결정성을 높여주고 투명성을 향상 |

- 여기에 사용된 첨가제는 플라스틱이 자연계(해양)에서 잘게 부서지고 마모되는 과정에서 용출이 가능함. 플라스틱 첨가제로 사용되며 잠재적 환경우려가 있는 물질에는 다음의 것들을 포함
 - 다브롬화디페닐에테르(polybrominated diphenyl ether)
 - 프탈레이트 가소제
 - 비스페놀 A
- 이들 첨가물들의 생물 독성영향에 대한 연구는 지난 수십 년간 이루어져 온 것에 비하여 해양에서 용출된 물질의 해양생태계에의 영향에 대해서는 제한적인 연구만이 이루어짐



- 마이크로플라스틱은 패류, 어류, 갑각류, 조류 및 해양포유류의 위장에서 빈번히 발견되며, 생물체 내에 축적된 마이크로플라스틱은 물리적인 영향과 아울러 함유 유해물질을 생물체에 전이할 가능성이 높을 것으로 예상되고 있음
- 분해는 Biodegradation, Photodegradation, Thermooxidative degradation, Thermal degradation, Hydrolysis로 구분되며, 해양환경에서 플라스틱의 분해는 Photo-oxidative degradation이 우세한 것으로 예측되고 있음
- 현재까지 연구된 해양환경에서 플라스틱 분해/풍화 논문은 대다수 최근 3년 사이에 발표되었으며, 총 10편 이하로 극히 제한적인 연구만이 진행된 상태
- 주로 형태적/화학적 표면변화와 색상변화에 대한 연구가 진행되어 왔으며, 주사 전자현미경(Scanning electron microscope), 적외선분광기(FTIR spectrometry), ToF-SIMS(Time-of-Flight Secondary Ion Mass Spectrometry)의 첨단 분석기술이 활용되고 있음. 이 외에도 강도, 표면장력 변화 등이 측정 인자로 활용되고 있음

〈표 1-7〉 해양환경에서 마이크로플라스틱의 분해와 풍화 관련 연구논문

| 저자 | 년도 | 학술지명 | SEM | Yellowing | FTIR 측정 | 기타 |
|-------------------|------|---|-----|-----------|---------|--------------|
| Biesinger et al. | 2010 | SIMS Proceeding | | | | ToF-SIMS |
| Harrison et al. | 2012 | Sci. Total Environ. | | | ○ | |
| Cooper & Corcoran | 2010 | Mar. Pollut. Bull. | ○ | | ○ | |
| Corcoran & Cooper | 2009 | Mar. Pollut. Bull. | ○ | | ○ | |
| Artham et al. | 2009 | International Biodeterioration & Biodegradation | | ○ | ○ | Biofouling 등 |
| Andrew et al. | 2011 | Mar. Pollut. Bull. | | ○ | | |



1.1.4. MP 생물축적과 독성

- 아직까지 마이크로플라스틱이 해양생물에 미치는 영향에 대해서 많이 알려져 있지 않음(Cole et al., 2011; Barnes et al., 2009; Gregory, 1996; Ryan et al., 2009)
- 해양생물에 축적된 마이크로플라스틱 자료는 해양쓰레기의 분포와 밀도를 보여주는 지표로 활용되기도 함(van Franeker et al., 2011)
- 유럽연합은 해양쓰레기 모니터링 생물로 폴마슴새(*Fulmarus glacialis*)를 활용하고 있음. 폴마슴새는 (1) 서유럽의 북해에 널리 분포하며, (2) 바다에서만 먹이 활동을 하며, (3) 소화되지 않는 딱딱한 물질을 흡수하면 구토하는 대신 위장에서 잘게 부수어 소화기관을 통해 내보냄으로서(van Franeker et al., 2011) 해양쓰레기의 양과 분포를 나타내는 좋은 지시자의 역할을 함
- 유럽연합은 폴마슴새(*Fulmarus glacialis*)의 위장 속에 있는 플라스틱의 양을 “좋은 환경 상태”의 기준으로 삼아 조사를 하도록 회원국에게 권고하고 있음(Galgani et al., 2010; EC, 2008). 2011년 현재는 영국 등 북서유럽 15개국에 가입되어 있는 OSPAR 협약에서 적극적으로 시행에 나서고 있으며, 유럽연합에서는 각 회원국들이 적용할 수 있는 방법들을 검토하고 있음. OSPAR 협약에서는 0.1g이상의 플라스틱을 위장 속에 품고 있는 폴마슴새의 비율이 10%이하가 되는 것을 정책목표로 삼고 있음(van Franeker et al., 2011). 북해 지역의 조사 결과 1980년 이후 0.1g이상의 플라스틱을 위장 속에 품고 있는 폴마슴새의 비율은 50~70%임
- 마이크로플라스틱은 플랑크톤 등 생태계 먹이사슬의 최하위 단계에서부터 해양포유류 등 최상위 단계까지 광범위하게 영향을 미침으로써, 해양 생태계 자체를 위협할 수도 있음(Thompson et al., 2009; Cole et al., 2011)
- 해양쓰레기로 인한 생물피해의 유형은 크게 섭취(ingestion)와 얽힘(entanglement)이 있음. 이 두 가지 유형을 합쳐 세계적으로 최소한 267종의 생물피해 기록이 있으며(Laist, 1997), 전세계 바다거북류 7종 중 6종, 바다새 312종 중 111종(36%), 바다포유류 115종 중 26종(23%)가 바다쓰레기 섭취 피해를 받고 있는 것으로 보고됨



〈표 1-8〉 바다쓰레기를 섭취하는 해양 동물의 종 수 (Laist, 1997)

| 생물 분류 | 전체 생물종 수 | 섭취 피해 종 수 |
|-------|----------|-----------|
| 바다거북 | 7 | 6(86%) |
| 바다새 | 312 | 111(36%) |
| 해양포유류 | 115 | 26(23%) |
| 어류 | - | 33 |
| 합계 | | 177 |

○ 이 외에도 많은 종의 피해 사례가 계속해서 보고되고 있으며, Laist (1997) 조사 이후의 플라스틱 섭취 생물 기록을 취합하면 다음과 같음

〈표 1-9〉 마이크로플라스틱에 의한 생물 영향 연구 사례
(Cole et al.(2011), Davison & Asch(2011) 에서 발췌)

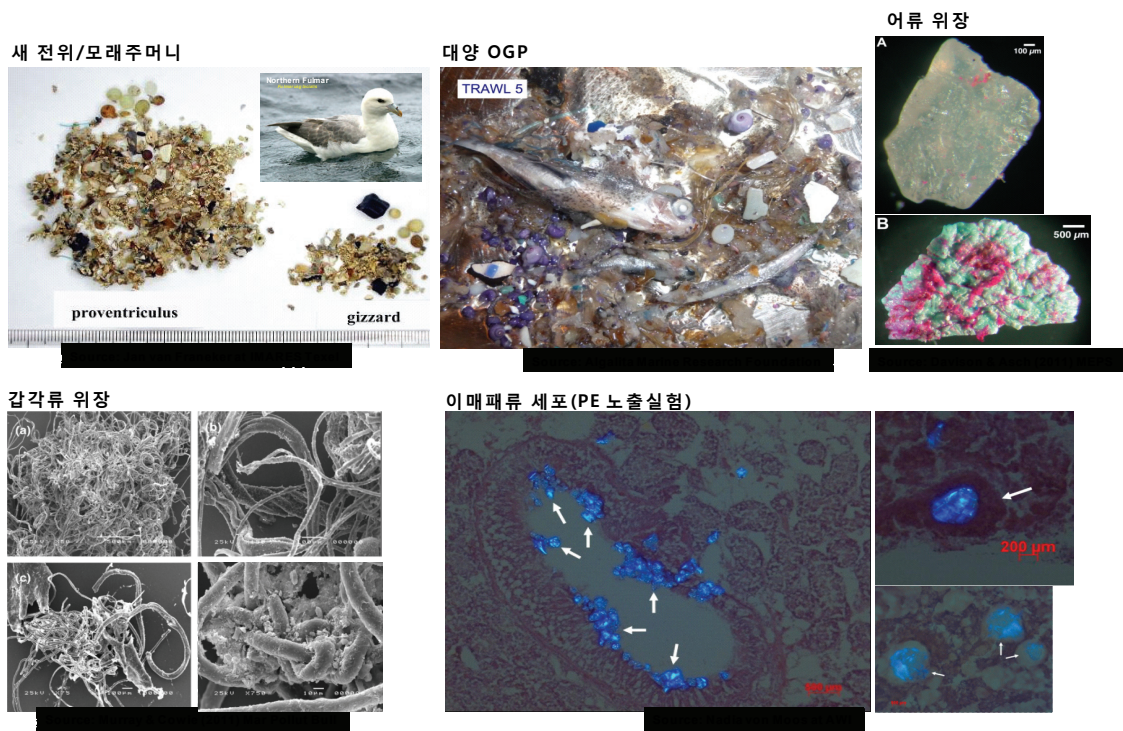
| 대분류 | 생물종 | 지역 | 관련 논문 |
|------|--|---------|---|
| 갑각류 | Copepod (요각류) | 실험실 | Wilson (1973) |
| 갑각류 | Amphipod | 실험실 | Thompson et al. (2004) |
| 갑각류 | Barnacle (거북손) | 실험실 | Thompson et al. (2004) |
| 갑각류 | Nephrop (바다가재) | | Murray and Cowie (2011) |
| 극피동물 | Echinoderm | 실험실 | Hart (1991) |
| 플랑크톤 | Trochophore | 실험실 | Bolton and Havenhand (1998) |
| 패류 | Scallop (가리비조개) | 실험실 | Brillant and Macdonald (2002) |
| 패류 | Mytilus edulis (섭조개) | 실험실 | Browne et al. (2008); Kohler (2010) |
| 환형동물 | Lugworm (갯지렁이) | 실험실 | Thompson et al. (2004) |
| 극피동물 | Sea cucumber (해삼) | 실험실 | Graham and Thompson (2009) |
| 원생동물 | Ciliate (섬모충) | 실험실 | Pace and Baliliff (1987) |
| 어류 | 어류 10여 종 | 북태평양 환류 | Boerger et al. (2010); Davison and Asch (2011) |
| 조류 | Fulmarus glacialis (폴마슴새) | 북유럽 | van Franeker et al. (2011) |
| 조류 | Uria lomvia (바다쇠오리류) | 캐나다 | Provencher et al. (2010) |
| 조류 | Spheniscus magellanicus (마젤란 펭귄) | 브라질 | Brandao et al (2011) |



- 플라스틱 크기가 작아질수록 해수 내 작은 입자를 섭식하는 해양무척추동물로 까지 영향범위가 확산될 수 있으며, 먹이망을 따라 이동하고 확대될 수 있음
- 과거 약 20년 동안의 해양 플라스틱 쓰레기에 관한 연구를 보면 주로 가시적 크기의 플라스틱 단편이 해양생물 및 군집에 미치는 영향에 관한 것임. 예로 척추동물의 경우, 돌고래의 플라스틱 섭취(Denuncio et al., 2011), 거북이의 플라스틱 섭취(Bjorndal et al., 1994; Tomas et al., 2002; Tourinho et al., 2010; do Sul et al., 2011) 및 어류의 플라스틱섭취(Boerger et al., 2010; Davison and Asch, 2011; Possatto et al., 2011), 플라스틱밴드에 의한 상어의 피해(Sazima et al., 2002)사례가 보고된 바 있음
- 무척추동물의 경우, polystyrene 단편에 노출된 성체는 수정에 관해서는 유의적인 효과가 없었으나 유생의 성장을 감소시키는 것으로 보고된 바 있으며 (Weis, 1992) 조간대지역에서 플라스틱 조각오염이 규조류의 수를 감소시키는 것으로 보고됨(Uneputty and Evans, 1997)
- 생물종에 대한 직접적인 영향 이외에 플라스틱 단편은 외래종 유입을 위한 매개물로 사용되어 외래생물 유입으로 인한 생태계교란의 가능성이 있다는 연구보고도 있음(Barnes, 2002; Maso et al., 2003)
- 해양생물에 대한 마이크로플라스틱의 유해성에 관한 연구는 많지는 않지만 2003년 이후 부터 지속적으로 연구되어 오고 있음. 그러나 이들 연구는 주로 생물에 대한 구체적인 영향 보다는 다양한 해양생물이 마이크로플라스틱을 섭취하고 있거나 섭취가능성이 있음을 증명하는 방식의 연구보고가 대부분임
- 예를 들면, 척추동물의 경우, 호주 Macquarie 섬에 서식하는 물개의 변에서 마이크로플라스틱을 섭취한 어류를 섭취하는 것에 의해 평균 4.1 mm의 플라스틱 입자들이 발견된 바 있어 먹이사슬에 의해 마이크로플라스틱이 이동할 수 있음을 입증하였고(Eriksson and Burton, 2003), 북태평양 Central Gyre 내의 부유생물식성을 가진 어류에 의한 플라스틱 섭취가 확인되었음(Boerger et al., 2010)
- 무척추동물에서는, 실험실조건에서, 단각류, 따개비류, 갯지렁이류가 평균 230 μm 크기의 작은 PVC 플라스틱 단편을 섭취한다는 연구(Thompson et al., 2004)와 이매패류인 가리비와 담치도 polystyrene bead를 여과 섭식한다는 연구가 있음 (Ward and Shumway, 2004). 특히 진주담치(*Mytilus edulis*)는 그들의 소화맹낭에



2 μm 크기의 polystyrene bead를 섭취하여 축적하는 것으로 보고되었는데 (Browne et al., 2007, 2008), 3~9.6 μm 크기의 마이크로플라스틱에 노출되었던 담치는 오염이 되지 않은 물로 환수시킨 후에도 hemolymph 내에서 마이크로플라스틱이 발견되었고 이들 마이크로플라스틱입자는 3일내에 위장에서 순환계로 이동하여 12일째를 최고점으로 해서 48일 동안에 걸쳐 체내에 존재하였음. 한편, 영국 Cumbrae 지역에서 채집된 갑각류인 랍스터(*Nephrops norvegicu*)의 장내에서도 이들이 섭취한 어구로 추측되는 마이크로플라스틱 섬유가 발견된 바 있어 마이크로플라스틱 피해의 잠재성을 증가시키고 있음(Murray and Cowie, 2001)



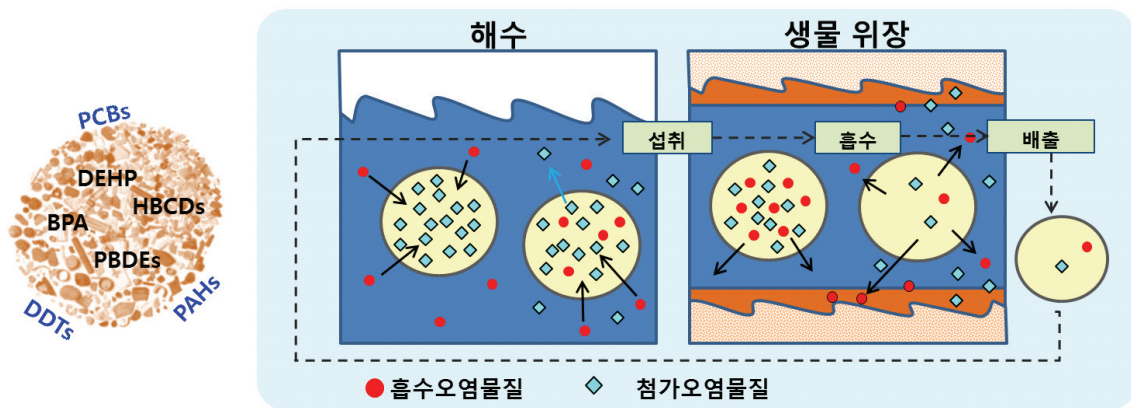
[그림 1-5] 해양환경에서 서식하는 바닷새, 어류, 갑각류 등의 위장에서 발견된 미세플라스틱

- 최근 Zarfl et al. (2011)은 마이크로플라스틱의 물리적인 생물 영향에 대한 향후 연구방향을 다음과 같이 제시하고 있음: ①어떤 종류의 물리적 영향이 해양생물에 영향을 미치는가? ②어떤 생물이 가장 크게 또는 가장 적게 영향을 받는가? ③먹이사슬을 따라 어떻게 전달이 되며 먹이사슬 내에서 증가 또는 감소되는가? 최종 포식자에서 마이크로플라스틱이 발견되는가? ④생물에서 마이크로플라스틱의 물리적 효과를 반영할 수 있는 적절한 endpoint는 무엇인가? ⑤생물은



어느 정도 양의 마이크로플라스틱을 견딜 수 있으며 어떤 한계치가 설정되어야 하는가? ⑥마이크로플라스틱에 의해 침입한 외래생물의 수는 어느 정도이며 어떤 경향이 관찰되는가? ⑦침입한 외래생물종은 토착생물과 생태계에 어떤 영향을 미치는가? ⑧플라스틱에 의해 유입된 외래생물의 양을 어떻게 측정할 것인가?

- 마이크로플라스틱은 그 자체의 물리적 영향 이외에 해수에서 흡착하고 생산과정에서 첨가제로 첨가된 많은 유해화학물질(PCBs, PBDEs, PAHs, PFOS, 농약류 등)을 함유하고 있어, 마이크로플라스틱을 섭취한 생물은 직접적으로 물리·화학적 영향을 받을 수 있음
- 특히, 플라스틱의 크기가 작아질수록 표면적이 증가하여 보다 많은 양의 화학물질을 흡착하기 때문에 독성은 증가하게 됨. 플라스틱이 미세화 될수록 1차 소비자이며 초기먹이생물 위치에 있는 여과섭식 소형 동물플랑크톤이나 이매패류에 의해 섭취될 가능성이 커지게 됨
- 먹이망의 하위단계 생물에 유입된 마이크로플라스틱 및 화학물질은 먹이망을 통해 상위단계의 생물에 까지 전이되어 영향을 미칠 수 있음



[그리 1-6] 마이크로플라스틱을 매개로한 오염물질(흡착성, 첨가성)의 생물전이 모식도

- 한편, 마이크로 사이즈의 플라스틱이 분해과정을 통해 나노 또는 피코 사이즈의 미립자로 작아질 경우, endocytosis에 의해 세포내로 이동이 가능하게 되어 해양생물에 생리학적 영향을 미칠 수 있을 것으로 예상됨(Andrady, 2011)



1.2. 국내 연구동향

- 우리나라에서 해양쓰레기에 대한 연구는 1980년대 후반부터 시작되어 1990년대 말에 본격화됨(국토해양부 2009). 1986년 연안정화사업을 시작으로 1998년 해양폐기물종합처리 대책을 수립됨. 이를 바탕으로 수중침적폐그물류 수거사업(1999~), 해양폐기물 종합처리시스템 개발(1999~2003) 사업이 수행됨. 그러나 우리나라의 해양폐기물종합처리대책은 기본적으로 수거와 처리에 치중되어 운영되어 왔고, 해양쓰레기 관련 정부 예산의 83%(약 100억원)가 수거에 사용되고 있음(국토해양부 등, 2008)
- 해양쓰레기와 관련된 국내논문으로서 해양쓰레기의 국가 간 이동에 대한 정책 연구(남정호, 2004), 국제 동향에 대한 보고(정노택, 2009), 해양쓰레기 수매제 소개 (Cho, 2009), 동중국해와 남해안에서 해양침적 쓰레기 조사(Lee 등, 2006) 등이 있으며, 전체적으로 해양쓰레기에 관련한 연구가 극히 제한적
- 부유쓰레기 조사로서 동해와 제주-중국 청도 구간 부유쓰레기조사(김종화 등, 1997; 김민석 등, 1999)가 수행된 것이 전부이며, 수층에 존재하는 미세플라스틱의 정량/정성평가 시도는 전무함
- 미세플라스틱 오염의 경우 영일만 주변 해수욕장에서 수행된 미세플라스틱에 조사 연구(김삼곤 등, 2000)와 최근 해양연구원에서 남해안에서 수행된 모니터링 연구가 있음
- 해양환경관리공단(KOEM)은 2010년 '해양쓰레기 대응센터'를 개설하여 해양쓰레기에 관한 연구와 정책제안 등의 업무를 수행하기 시작하였으나, 대형 해양쓰레기만을 다루고 있음
- 국토해양부 해양환경 연구개발 중장기계획(2012~2020)에 마이크로플라스틱 오염을 포함하는 해양쓰레기 오염에 대한 장기연구개발 계획이 포함됨
- 해안표착 쓰레기에 대한 조사법만이 표준화되어 있을 뿐, 부유, 침적, 미세플라스틱 등의 경우에는 조사기법 및 지침이 없으며, 오염실태 조사 자료도 극히 제한되어 있음
- 국내 해양쓰레기 현황 모니터링 정기적인 조사는 해안가 표착 중·대형쓰레기(외국기인 포함)를 중심으로 수행되고 있으며, 부유/침적/미세플라스틱은 모니터링 대상에 포함되지 않음
- 해양쓰레기에 의한 해양생물피해에 대한 조사는 한 민간단체에서 일부 바닷새에 대한 피해사진을 확보하는 수준에서 진행 중



2 정책동향 및 제도 분석

2.1. 해양쓰레기 관련 국내·외 정책동향 분석

2.1.1. 국제 정책 동향

- 전 지구적 차원에서 해양쓰레기 문제를 종합적으로 대응하기 위한 국제법, 협약 등은 아직 수립되지 않았으나 국제사회 및 각 국가 단위의 입법, 규제, 시설 확충, 대중인식증진 등의 노력이 다양하게 진행되어 왔음(UNEP, 2012)
 - 유엔해양법협약(UN Convention on the Law of the Sea, UNCLOS)과 유엔 총회 결의(A/60/L.22)
 - 육상기인 오염물질로부터 해양을 보호하기 위한 프로그램(Global Programme of Action for the Protection of the Marine Environment from Land-based Activities, GPA)
 - 선박기인 오염 방지 국제협약(International Convention for the Prevention of Pollution from Ships, MARPOL 73/78) 부속서 V
 - 해양투기 금지 협약(London Convention)
 - 위험 폐기물의 국가간 이동 통제를 위한 바젤협약(Basel Convention)
 - 책임있는 어업을 위한 FAO Code of conduct
- UNEP 산하의 12개 지역해 프로그램(Regional Sea Conventions and Action Plan)들에서 해양쓰레기 대응 활동을 전개하고 있으며, ‘정부간 해양위원회(Intergovernmental Oceanographic Commission, IOC)과 공동으로 해양쓰레기 모니터링 가이드라인 발간(Cheshire et al., 2009), UN 식량농업기구(Food and Agriculture Organization, FAO)와는 폐어구 예방과 영향 저감을 위한 보고서를 발간한 바 있음(Mcfadyn et al., 2009)
 - ※ 우리나라가 참여하고 있는 지역해 프로그램인 북서태평양해양보전실천계획(이하, NOWPAP)과 동아시아해역조정기구(이하, COBSEA)에서도 ‘지역해 해양쓰레기 관리 사업(RAP/MALI)’을 진행 중임(NOWPA, 2008; COBSEA, 2008)
- 2011년 3월 하와이에서 제5차 해양쓰레기 국제컨퍼런스가 미국해양대기청(이하, NOAA)과 유엔환경계획(이하, UNEP)의 주최로 개최되었으며, 이 행사를 계기로 해양쓰레기 대응에 관한 지구적 기본 대응 전략을 정리한 ‘호놀룰루 전략(Honolulu Strategy)’이 작성되었음. 주요 내용은 ‘육상기인 해양쓰레기 저감’,



‘해상 기인 해양쓰레기 저감’, ‘해양쓰레기 제거 및 영향 저감’ 등 3가지 영역별로 목표, 세부전략, 잠재적 활동, 평가 수단 및 지표 등(NOAA & UNEP, 2012)

※ 단, 호놀룰루 전략은 새로운 행동을 요구하는 국제협약이 아니며 해양쓰레기 관리 정책 수립과 평가 등에서 활용할 수 있는 플랫폼 문서로 볼 수 있음

- 미국은 2006년 ‘해양쓰레기 연구·예방·저감법(Marine Debris Research, Prevention, and Reduction Act)’이 제정되어 ‘NOAA Marine Debris Program’과 ‘부처간 협의회(Interagency Marine Debris Coordinating Committee)’를 설립, 운영하고 있음(<http://marinedebris.noaa.gov>)

- 주요 사업은 ‘방치 폐선 및 유실 어구 추정과 제거’, ‘모니터링 및 평가’, ‘국제연안 정화’, ‘국제 컨퍼런스와 워크숍 개최’ 등임

- EU는 2008년 ‘해양전략기본지침(Marine Strategy Framework Directive, MSFD (2008/56/EC))’을 제정하면서 11개의 ‘해양환경 지시자(Descriptor)’의 하나로 ‘해양쓰레기’를 포함시켰으며, 각 국가별로 2020년까지 달성할 ‘좋은 환경상태(Good Environmental Status, GES)’의 기준과 측정 방법을 설정하여 이행하도록 규정(Cardoso et al., 2010). 해양쓰레기와 관련해서는 각 분야별 세부 항목의 조사 방법 표준화 시도와 함께 각 국가별 및 지역해별 조사 사업이 진행될 것으로 보임

※ 위 지침의 이행을 지원하기 위한 ‘해양쓰레기 Task Group’에서 검토된 방법에는 해안선, 표층, 중층 및 저층 침적 해양쓰레기에 대한 모니터링과 선박·항공기 조사, 해양생물 엽집과 섭취 실태 모니터링, 미세 플라스틱 조사(해안, 표층), 사회경제적 영향 조사 등이 있음

〈표 1-10〉 EU MSFD ‘지시자 10 해양쓰레기’의 특성, 기준, 지표(Cardoso et al.(2010))

| 특성 | 기준 | 지표 | 적용 시 고려 |
|-----------|---------------------|----------------------|----------------------------|
| 해양환경 중 분포 | 유입, 미관 영향, 사회적 피해 등 | 해변쓰레기의 양, 구성, 원인 | 체계적 정보 DB 표준 모니터링 방법 |
| | | 부유·침적 쓰레기의 양, 구성, 원인 | 우선 조사 지역 선정 어류 조사 기법 활용 |
| 해양생물 영향 | 유입과 영향의 시공간적 변화 | 해양생물에 의한 섭취량 및 구성 | Fulmar EcoQO 준용 |
| 해양에서 분해 | 잠재적 2차 오염원 | 미세플라스틱의 양과 구성 | Baseline 설정 조사 위험성 평가 |



- 일본은 2009년 6월, 의원입법으로 「해안표착쓰레기처리법」을 제정하였으나 3년으로 된 이 법안 부수 예산의 시한이 종료되는 2012년 이후의 조치는 불분명한 상태임. 대신 해양쓰레기의 광역 이동에 대한 모델링 연구가 활발하게 진행되고 있음(Yoon et al., 2009; Kako et al., 2010)
- 과거 중국은 해양쓰레기 관리 정책이 없다고 평가될 정도였으나, NOWPAP 사업이 진행되면서 국가적 차원의 대응이 진척되고 있으며, 해양국 산하 국가 해양환경 모니터링센터(NMEMC/SOA)에서 2007년부터 해양쓰레기 정기 모니터링을 시행 중임(Hu, 2010)

2.1.2. 국내제도 분석

- 우리나라에서 해양쓰레기 관리 정책은 1999년 ‘해양폐기물 정화사업’과 함께 정부차원의 과제로 추진되기 시작함. 이후, 태풍 및 폭우시 해양쓰레기가 대량으로 연안으로 유입되어 연안양식장과 해수욕장에 막대한 피해를 입히는 현상이 반복되면서 해양쓰레기 대응에 정책 우선 순위를 부여하기 위해 2008년 해양환경관리법을 개정하여 근거조항을 마련(국토해양부와 해양환경관리공단, 2011)
- 해양환경관리법은 제24조(해양오염방지활동)에서 국가(정부)에게는 해양쓰레기(폐기물)의 수거·처리계획을 수립·시행하고, 해역관리청인 시·도지사는 폐기물해양수거·처리계획에 따라 세부 실천계획을 수립·시행하도록 규정하고 있으며, 현재 「제1차 해양쓰레기 관리 기본계획(2009~2013)」이 시행되고 있음(국토해양부 등, 2009)
 - ※ 해양환경관리법에서 해양쓰레기는 ‘폐기물’로 정의하고 있으며, “폐기물”이라 함은 해양에 배출되는 경우 그 상태로는 쓸 수 없게 되는 물질로서 해양환경에 해로운 결과를 미치거나 미칠 우려가 있는 물질(제5호(기름)·제7호(선박평형수) 및 제8호(유해액체물질)에 해당하는 물질을 제외한다)”고 규정(제2조)하여 액상의 폐기물을 제외한 고형 폐기물만을 포함
 - ※ ‘해양쓰레기’라는 용어는 「제1차 해양쓰레기 관리 기본계획(2009~2013)」에서 처음 공식적으로 사용하기 시작하였고, 향후 용어 정의 부분의 법률 개정이 필요한 사항임
- 「제1차 해양쓰레기 관리 기본계획(2009~2013)」은 ‘선진화된 해양쓰레기 관리시스템 구축’을 기본 목표로 4대 전략으로 ‘해양쓰레기 발생 최소화’, ‘해양쓰레기 수거·처리능력 강화’, ‘해양쓰레기 관리기반 구축’, ‘시민참여 및 국제협력 강화’ 등을 제시하고 있으며, 관련 부처별로 다양한 사업을 추진 중임
 - ※ 국내 법, 정책에서 마이크로 플라스틱에 대한 내용은 전무한 상태임



〈표 1-11〉 제1차 해양쓰레기 관리 기본 계획에 명시된 사업의 추진 현황(국토해양부와 해양환경관리공단, 2011)

| | 주요 사업 | 추진부처 | 수행주체 |
|---------------|----------------------|---------|------------|
| 1. 발생최소화 | 선상집하장 | 국토해양부 | 지자체 |
| | 어구관리 시스템 구축 | 농림수산식품부 | - |
| | 생분해성 어구사용 확대 | 농림수산식품부 | 국립수산과학원 |
| | 고밀도 부표 보급 지원 | 농림수산식품부 | 지자체 |
| | 굴 패각 자원화 | 농림수산식품부 | 지자체 |
| | 어선생활쓰레기 되가져오기 | 해양경찰청 | 해경 |
| | 해양유입쓰레기 책임관리제 | 환경부 | 지자체 |
| | 해양유입 쓰레기 차단막 설치 | 국토해양부 | 지자체 |
| 2.수거처리 능력강화 | 해양폐기물 정화사업 | 국토해양부 | 해양환경관리공단 |
| | 조업중 인양쓰레기 수매사업 | 국토해양부 | 지자체 |
| | 침체어망 인양사업 | 국토해양부 | 지자체/어촌어항협회 |
| | 어업용 페스티로폼 감용기 보급 | 국토해양부 | 지자체 |
| | 어장관리해역 어장정화사업 | 농림수산식품부 | 어촌어항협회 |
| | 하천 및 하구쓰레기 정화사업 | 환경부 | 지자체 |
| | 연안대청소 행사 활성화 | 국토해양부 | 지방청/지자체 |
| | 폐FRP선박처리시스템 개발 구축 | 국토해양부 | 한국해양연구원 |
| | 해안부착쓰레기 수거장비개발 | 국토해양부 | - |
| 자원화기술 개발 및 도입 | 국토해양부 | - | |
| 3. 관리 기반 강화 | 통계조사 및 분석기법 개발 | 국토해양부 | - |
| | 해양쓰레기 분포현황실태 조사 | 국토해양부 | 어촌어항협회 |
| | 통합정보시스템구축 | 국토해양부 | 해양환경관리공단 |
| | 해양쓰레기 대응센터 설치 | 국토해양부 | 해양환경관리공단 |
| 4. 시민참여와 국제협력 | 시민단체 해양환경보전 실천사업 지원 | 국토해양부 | 해양환경관리공단 |
| | 교육프로그램개발 및 교육강화 | 국토해양부 | 해양환경관리공단 |
| | 다양한 매체활용 범국민 홍보 | 국토해양부 | 해양환경관리공단 |
| | 청소년 해양환경보전 프로그램 | 해양경찰청 | 해양경찰청 |
| | 국가 해양쓰레기 모니터링 | 국토해양부 | 해양환경관리공단 |
| | 지역해 및 범지구적 공동협력사업 추진 | 국토해양부 | - |
| 5. 기타 | 연근해 침적폐기물 수거사업 | 농림수산식품부 | 어촌어항협회/지자체 |
| | 낙시터 환경개선사업 | 농림수산식품부 | 어촌어항협회 |
| | 불법어구 철거사업 | 농림수산식품부 | 어촌어항협회 |
| | 인공어초 어장폐기물 수거사업 | 농림수산식품부 | 어촌어항협회 |
| | 유류피해지역 지원사업 | 농림수산식품부 | 어촌어항협회 |
| | 어업협정이행사업 | 농림수산식품부 | 한국수산회 |

- 해양쓰레기 관리기본계획의 상위 계획인 제4차 해양환경종합계획(2011~2020)에서는 '연안유입 오염물질 및 해양쓰레기 관리 강화 추진'이 4개 추진 전략 중 하나로 포함되어 있으며, 추진 과제로는 '해양쓰레기 유입저감을 위한 관리체제 강화', '해양쓰레기 수거·처리 사업의 지속 추진'을 제시하고 있음(국토해양부 등, 2011)



3 연구수준 분석

〈표 1-12〉 핵심기술의 국제경쟁력 분석

| 핵심 기술 내용 | 세부 기술 내용 | 국외 (미국 및 유럽 중심) | 국내 개발 현황 | 수준 (국외 대비) |
|--------------|---|--|---|------------|
| MP 유입과 분포 | MP 오염 분포/현황 자료 구축 MP 모니터링 조사기법 표준화 MP 채집 장치 개발 부유/침적성 미세 폴리머 분리기술 극미세 플라스틱 분리·정량기술 MP 오염원 평가 기술 MP 유입경로, 유입량 평가 기술 MP 화학적 정성 기술 MP를 매개로한 외래종 유입 규명 | 60편 연구 논문 발표, 도약 단계 연구개발 단계 기술확보 / 세부기법 연구개발 단계 기술확보 / 세부기법 연구개발 단계 연구개발 단계 연구개발 단계 연구개발 단계 연구개발 단계 기술확보 / 세부기법 연구개발 단계 시도되지 못함 | 해양연 선행연구 외 12건이 전부 연구개발 단계 기초기술 확보 기초기술 확보 연구개발 단계 연구개발 단계 연구개발 단계 연구개발 단계 기초기술 확보 연구개발 단계 | 80 |
| MP 분해와 거동 | 해양에서 플라스틱 반감기 산정 미세화 프로세스 규명 미세화에 따른 거동특성 변화 MP 풍화 시뮬레이션 장치 개발 Aging 추정 기술 MP 표면 형태적 분석 기술 MP 표면 화학적 분석 기술 첨가제에 따른 거동특성 변화 Biofouling이 MP 거동에 미치는 영향 | 연구개발 단계 시도되지 못함 시도되지 못함 연구개발 단계 시도되지 못함 해양시료에 일부 적용 / 기존의 표면분석 기술 적용 단계 일부 해양시료에 적용 / 기존의 표면 분석 기술 적용 단계 시도되지 못함 시도되지 못함 | 시도되지 못함 시도되지 못함 시도되지 못함 연구개발 단계 시도되지 못함 시도되지 못함 연구개발 단계 시도되지 못함 시도되지 못함 | 70 |
| MP 흡착/첨가오염물질 | MP 흡착 오염물질 분석기술 MP 첨가 오염물질 분석기술 MP 흡/탈착 오염물질 해양오염 자료 구축 환경중 오염물질 흡/탈착 연구 MP/환경 오염물질 흡/탈착 연구 MP에서 첨가물 용출 연구 해양에서 MP 첨가물 용출 평가 오염물질 해양거동에서 MP 기여도 평가 기술 | 기술확보, 세부기법 연구개발 단계 연구개발 단계 제한적 연구. 발전 단계 기술확보, 세부기법 연구개발 단계 연구개발 단계 연구개발 단계 시도되지 못함 시도되지 못함 시도되지 못함 | 기술확보, 세부기법 연구개발 단계 연구개발 단계 연구개발 단계 기술확보, 세부기법 연구개발 단계 연구개발 단계 시도되지 못함 시도되지 못함 시도되지 못함 | 90 |
| MP 생물 축적과 독성 | 해양쓰레기 생물피해 사례 자료 구축 생물영향 평가 지표종 선정 해양생물 MP 축적 자료 확립 MP 생물축적 시험 기술 흡착오염물질 생물 독성평가 기술 첨가제의 생물 독성평가 기술 MP 생물영향 실험모델생물 확립 MP로부터 흡착오염물질 생물전이 규명 MP로부터 첨가오염물질 생물전이 규명 MP가 먹이망내 오염물질 생물확대에 미치는 기여도 규명 | 체계 구축 세부기법 연구개발 단계 연구개발 단계 수 편의 논문 발표 수준 기술확보 기술확보, 세부기법 연구개발 단계 연구개발 단계 연구개발 단계 연구개발 단계 시도되지 못함 | 한 시민단체의 사례 조사 수준 연구개발 단계 시도되지 못함 연구개발 단계 기술확보 기술확보, 세부기법 연구개발 단계 연구개발 단계 시도되지 못함 시도되지 못함 시도되지 못함 | 85 |
| MP 이동 | 해수순환 모형 개발 해수순환 관측 자료 확립 입자 추적 모델 개발 입자 생성/소멸을 고려한 입자추적모델 개발 MP 이동모델 개발 | 기술확보, 세부기법 연구개발 단계 관측자료 축적 단계 기술확보, 세부기법 연구개발 단계 시도되지 못함 시도되지 못함 | 기술확보, 세부기법 연구개발 단계 관측자료 축적 단계 연구개발 단계 시도되지 못함 시도되지 못함 | 90 |



4 관련기술의 필요성 분석

4.1. MP 유입과 분포

- 선진국을 중심으로 해수욕장과 해수 표층에서 미세플라스틱의 공간분포 연구가 활발해지기 시작하는 시점으로, 미세플라스틱의 환경 자료는 아직까지 상당히 제한적인 수준. 우리나라의 경우, 마이크로플라스틱의 분포와 현존량 데이터 마저 구축되지 않은 실정으로, 연안오염 현황과약을 위한 모니터링 연구가 우선적으로 수행되어야 함
- 마이크로플라스틱의 정확한 채집 및 수도(abundance) 파악기술 정립은 형성 진원지에서의 거리에 따른 영향 혹은 계절적 변동(강우 및 배출) 또는 외부로부터 유입된 것인지 명확한 근거자료를 제시할 수 있는 기본이 됨. 따라서 국내 뿐만 아니라, 국외로부터 발생가능성이 높은 경우 우리나라 근해에 악영향을 끼치는 것이 명백할 경우 그에 상응하는 국제적 조치를 내릴 수 있는 근거가 됨
- 현재까지 각 국에서 수행된 마이크로플라스틱의 크기별 구분이 일정하지 않아 조만간 국제해사기구의 GESAMP에서 국제적으로 만족할 수 있는 구분이 합의될 것으로 예상됨. 이에 대응하여 우리나라 주변해에서 출현하는 주요 마이크로플라스틱의 그룹별 출현특성을 파악하여 이 결과가 고려된 크기 그룹이 선택되도록 국제적 역량 강화할 필요 있음
- 현재 mm 크기의 마이크로플라스틱 출현량에 대한 해변과 퇴적층에서의 조사가 점차 늘어가는 시점에 있으나 μm 크기의 입자에 대해서는 출현 여부만을 언급하는 수준. μm 크기 입자의 출현량을 정량화하기 위한 기술 개발이 필요하며, 더불어 nm 크기의 입자의 존재 여부를 밝히고 정량하는 기술 역시 궁극적으로 확립되어야 함
- 현재 기후변동이나 선박평형수에 의한 외래종 유입 및 방출이 국제적으로 화두가 되어 국제법과 시스템 측면에서 자국의 연안환경을 지키고자 하는 노력이 활발함. 이외에 해류에 실려 국가 간 경계를 넘어오는 마이크로플라스틱 표면 부착외래생물에 의한 유해성 가능성을 파악하여 새로운 경로로 채택할 필요가 있는지 판단할 근거가 필요함



- 해변, 수층, 퇴적층 등에서 마이크로플라스틱의 출현이 보고되고 있으나, 환경 위해성평가와 국가의 환경정책 수립에 기초가 되는 유입원, 유입경로, 유입량 등에 대한 정보 부재
- 미세플라스틱의 크기가 초미소 플랑크톤의 크기 (< 2 μ m)에서 5mm 미만 까지 다양하게 출현하면서, 연안 및 외양의 부유생태계 내 먹이망 내에서 비슷한 크기 범위에 해당되는 플랑크톤 그룹들에게 물리적 관점에서 어떤 영향을 끼치는지 알아야 할 필요성이 대두됨. 이에 연계하여 기초적으로 부유생태계 내 크기그룹 별 생물 및 비생물 구분이 시급한 과제이며, 이후 오염 및 독성적인 측면에 기준을 제시할 수 있음
- 미세플라스틱 표면에 형성되는 biofilm과 부착된 미세플랑크톤에 의한 새로운 외래종 유입 경로 출현 가능성 및 실제적 외래유입 가능성 부각

4.2. MP 분해와 거동

- 플라스틱 입자의 해양환경에서 최종적 운명을 규명하기 위해서는 환경에서 거치는 분해와 풍화 과정을 우선적으로 이해해야 함
- 현재까지 MP 연구는 분포 범위와 밀도를 밝히는데 집중되어 왔으며 해양에서 분해와 풍화에 대해서는 거의 밝혀진 바 없음
- 플라스틱 분해에 관련된 연구는 대부분 육상환경에서 플라스틱의 내구성을 점검하는 목적으로 수행되어 왔으며, 해양환경을 고려한 연구는 시도되지 못하였음. UV, 온도, 파도, 물속의 화학적 특성 등 해양환경 조건에 따른 폴리머의 분해 원리와 프로세스에 대한 실험실 연구가 우선적으로 수행될 필요가 있음
- 폴리머 타입, 생물 부착 여부, 미세화 정도에 따라 다양한 부유/침적 특성을 가질 것으로 예상되며, 이를 고려한 거동 모델이 개발되어야 함
- 제조과정에서 상당량의 첨가물이 플라스틱 제품에 첨가되기 때문에, 첨가물의 특성에 따라 해양에서 플라스틱 입자의 분해성과 독성 영향이 크게 달라질 수 있음. 이를 증명할 수 있는 연구 역시 필요함
- 플라스틱 쓰레기가 해양환경에 잔류한 시간을 추정할 수 있는 aging 지표 개발은 해양에서 플라스틱을 매개로한 오염물질의 거동과 분해속도 및 전반적인 거동을 이해하는데 중요한 정보를 제공할 수 있음



- 플라스틱의 유입원과 유입장소를 추적할 수 있는 추적자 개발 역시 해양쓰레기의 관리방안 수립은 물론 해양에서 플라스틱 거동과 생태계 영향 해석에 중요한 정보를 제공할 수 있음

4.3. MP 흡착/첨가 오염물질

- 플라스틱류는 주요 환경오염물질들이 잔류성유기오염물질과 중금속을 강하게 흡착하는 특성이 있으므로, 해양에 축적되고 있는 마이크로플라스틱은 이들 오염물질의 국지적 혹은 전지구적 거동에 영향을 끼칠 것으로 예상됨. 마이크로플라스틱에 흡착/수착된 화학물질은 생물에 체내에 흡수되어 생물확대(biomagnification)와 유사한 효과를 나타낼 개연성이 있음
- 플라스틱 첨가물의 양은 고분자구조체의 질량대비 최대 50%까지도 사용되므로, 해양에 존재하는 마이크로플라스틱은 첨가물에 의한 해양오염을 야기할 것으로 예상되지만, 제한적인 연구결과들만이 시도되었고(예, Artham and Doble, 2012) 충분한 연구사례가 보고되지 않은 실정임
- 플라스틱이 지속적으로 잘게 부수어지는 과정에서 장기간에 걸쳐 흡착/첨가 오염물질의 배출이 일어날 것으로 예상되나 첨가물질의 용출에 관한 연구는 거의 진행되지 못함
- 구체적으로 해수에 존재하는 소수성유기오염물질은 자연유기물질 등과 같은 매질에 수착이 되면 생물이용도(bioavailability)가 감소하여 소수성 유기오염물질의 생물축적성과 독성이 감소하는 것이 잘 알려져 있으나, 마이크로플라스틱으로의 수착도 비슷한 효과를 나타낼 것인지의 여부에 대해서는 연구된 바 없음
- 해양생태계에서 소수성유기오염물질은 일반적으로 호흡기관(아가미)을 통해 물에 용해되어 있는 물질이 수동확산을 통해 유입되는 것으로 생각되고 있으므로, 생물막을 투과할 수 없는 자연유기물질에 수착된 형태로는 체내로 유입되지 않는 것으로 보고 있지만, 생물이 마이크로플라스틱을 먹이 등으로 오인하여 섭취하게 되면 유입경로가 호흡기가 아닌 소화기관을 통하게 되므로, 자연유기물질에서와 다른 영향이 나타날 수 있을 것으로 생각되지만, 아직 구체적인 연구결과는 부족함



- 비슷한 원리로 자연유기물질로의 수착은 잔류성유기화학물질의 이동을 가속화하는 경향이 있는 것으로 보고되어 왔으나(Kwon et al., 2009; Mayer et al., 2007; Ter Laak et al., 2009), 이보다 입자의 크기가 10배 이상 큰 마이크로플라스틱에 의한 역할에 대해서는 보고된 바 없음
- 앞서 기술한 내용들을 종합하면 마이크로플라스틱이 흡착매체로서 잔류성오염물질의 환경거동에 어떠한 형태로든 영향을 미칠 것으로 추정되고 있으나, 아직 연구의 초기단계이므로 축적된 결과물이 많이 보고된 것은 아님. 따라서 이 분야의 연구는 국내·외에서 연구를 선도할 수 있는 기회가 될 것으로 생각되며, 해양에 축적되고 있는 마이크로플라스틱이 먹이연쇄에 의한 잔류성오염물질의 생물축적 현상과 그 영향에 관한 연구는 지구적 규모에서 인간활동의 지속가능성을 평가한다는 측면에서 그 중요도가 매우 큰 연구인 것으로 사료됨

4.4. MP 생물축적과 특성

- 해양쓰레기로 인해 피해보고 사례와 피해 생물종 수가 지속적으로 확대되고 있음. 플라스틱 입자의 미세화에 따른 피해 생물종의 범위와 먹이망을 통한 마이크로플라스틱의 확대 여부 규명이 필요함
- 지역별 또는 국가별 마이크로플라스틱 오염으로 인한 생물학적 영향을 과학적이고 효율적으로 비교 평가하기 위해서는 오염평가를 위한 생물 지표종이 선정되어야 하며, 독성 영향을 측정할 수 있는 바이오마커가 개발되고 적절한 종말점이 선정되어야 함
- 마이크로플라스틱에 포함된 대부분의 화학물질의 유독성과 환경독성학적 유해성은 잘 알려져 있지만 플라스틱에 흡착된 화학물질의 생물이용성의 정도에 대해서는 알려져 있지 않으며, 생물의 오염물질 축적에 플라스틱 입자의 기여도가 평가되어야 함
- 먹이사슬에 의한 마이크로플라스틱과 흡착된 유기화학물질의 생물농축 또는 마이크로플라스틱을 섭취하여 농축한 이매패류 같은 여과 섭식동물을 직접 섭취함으로써 결과적으로 먹이사슬 최고단계인 인간에게도 직·간접적인 영향을 줄 것으로 예상됨. 따라서 먹이사슬 하위단계의 동물에 대한 마이크로플라스틱의 영향을 구체적으로 파악하여 독성을 평가하는 것은 조기진단의 관점에서 매우 중요한 작업이 됨



- 현재 독성물질의 위해성을 평가하기 위한 방법으로 대부분 개체 및 개체군수준의 생물반응을 이용한 독성시험방법이 주를 이루고 있으나 최근에는 가시적 특성에 의한 독성평가를 보완하여 보다 민감성 높은 생화학 및 분자수준에서의 반응을 특성화한 평가가 시도되고 있음. 따라서 마이크로플라스틱의 생물영향을 보다 입체적으로 평가하기 위해서는 1차 소비자인 요각류 및 윤충류를 이용한 급성독성, 2세대 만성독성 및 분자수준에서의 동시 평가가 요구됨

4.5. 마이크로플라스틱 이동

- 마이크로플라스틱이 해류와 바람에 의해 이동하기 때문에 마이크로플라스틱의 이동평가를 위해서 필요한 가장 기본적인 기술은 해양순환모델링 기술임. 연안역과 외해에서 해양순환을 결정하는 요인이 다르기 때문에 연안역과 외해역에 대한 모델링을 따로 수행해야 함. 연안역은 고해상도 모델이 필요하고 마이크로플라스틱의 유입원인 하천도 포함되어 있어야 함. 다루기 위해서는 일부 해역에 대해서는 상당 수준의 모델이 존재함. 이런 경우 기 개발된 해양순환 모형의 활용이 가능함
- 해양순환모형결과가 라그랑지안 입자추적모델과 결합되어야 하는데 라그랑지안 입자추적모델에 대한 국내 연구는 많지 않음. 기본적인 라그랑지안모델은 해양순환모형에 비하여 간단하기 때문에 해양순환모형 개발에 비해 기초적인 입자추적모델개발에는 노력과 시간이 덜 소요될 것임
- macro plastic의 풍화에 의한 마이크로플라스틱의 생성을 모사하기 위한 시도는 아직 없는 것으로 파악되었음. 이를 위해서는 라그랑지안입자에 성격을 부여해야함. 이런 모델의 개발이 유류 오염영향평가 모델링 분야에서 이미 시작되었음. 이런 라그랑지안입자추적모델 개발에는 상당한 노력과 시간이 필요할 것으로 예상됨
- 풍화에 의한 마이크로플라스틱의 생성을 모사하기 위해서는 macro plastic의 분포와 구성에 대한 자료가 필요함
- 해저에 가라앉은 마이크로플라스틱의 특성과 이동을 평가하기 위해서는 퇴적학 분야에서 사용되는 모델링 기술을 활용할 수 있을 것으로 예상됨
- 마이크로플라스틱의 이동과 기원을 한 번의 모델링만으로는 유의하게 파악하기 어렵기 때문에 통계적 기법을 도입되어야 함. Macro plastic 분포 평가에 활용되는 통계적 기법을 활용할 수 있을 것으로 예상됨



II 연구개발 비전 및 추진 전략

1 연구개발 비전



2 연구개발 최종 목표

- 최신 국제 해양환경 현안 문제 해결 및 국제 해양 플라스틱 오염 연구 선도를 위한 국내 연안, 동아시아 및 태평양 해역의 마이크로플라스틱의 환경오염, 거동 및 생물영향 규명



3 추진 전략

추진전략 1

국제적 핵심 현안 문제 해결 가능한 사업 우선 지원

- 국제해양환경보호전문가그룹(GESAMP)에서 2012년 선정한 마이크로플라스틱 오염의 전지구적 평가의 우선연구대상 분야(나노플라스틱 존재 여부, 플라스틱 풍화 및 반감기, 전지구적 분포 양상, 유해물질 이동 및 해양생물 피해)에 집중

추진전략 2

원천기술 개발과 핵심 현장자료 생산 병행

- 우선연구대상 분야 추진을 위한 핵심원천기술 개발과 현장 실태 파악을 위한 자료 생산을 병행
- 국내 연안, 동아시아, 북태평양으로 연결되는 해역에 대한 마이크로플라스틱 분포, 이동, 생물피해 자료 생산 및 다양한 개발 모형 현장 검증

추진전략 3

국제협력기구 및 국외전문가 공동연구 네트워크 활용

- GESAMP, PICES, NOWPAP, COBSEA 등 국제협력기구 해양 마이크로플라스틱 및 해양쓰레기 워킹그룹 및 협력 프로그램 참여
- 국제 마이크로플라스틱 연구 전문가와의 공동연구 추진 및 네트워크 구축을 통한 국제적인 연구주도

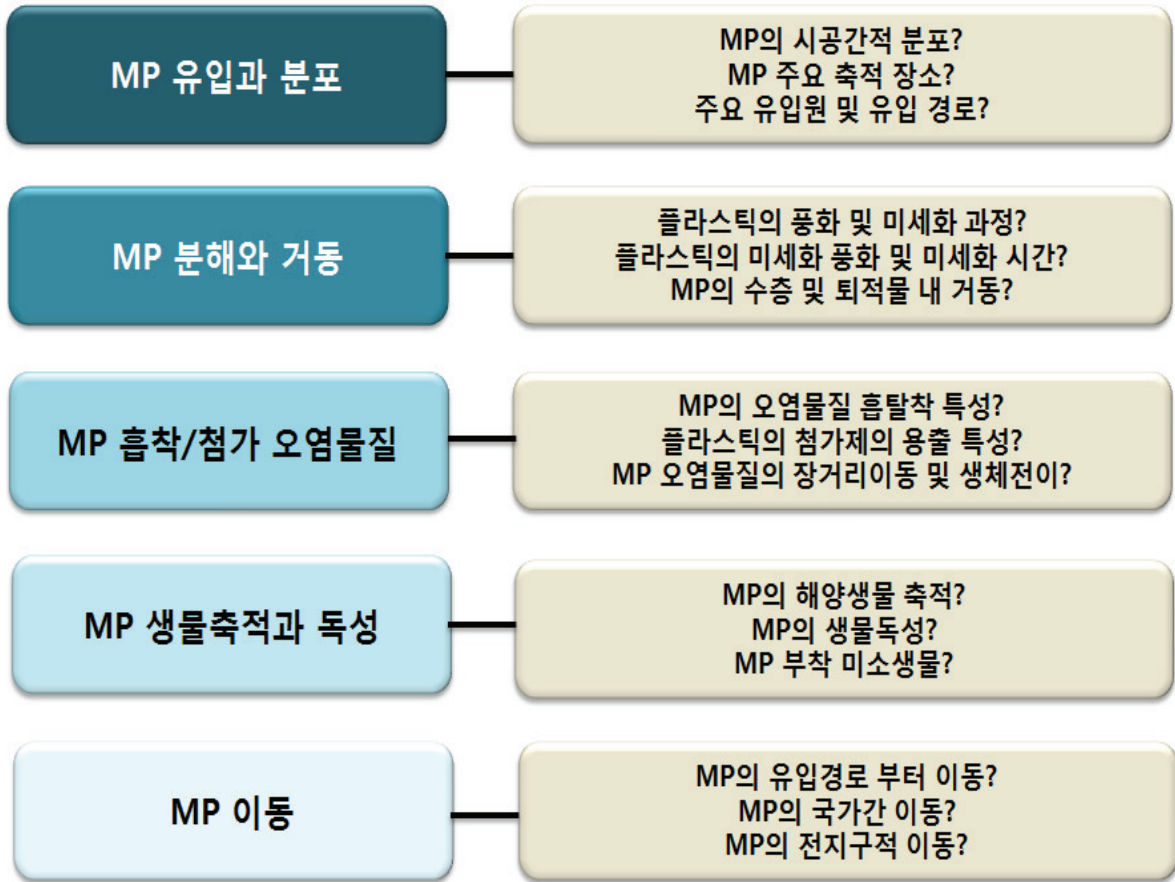
추진전략 4

융복합기술을 이용한 협력형 연구개발 추구

- MT, NT, BT 등 융합 기술 협력체계 구축 활용
- 산학연의 다학제간 협력



4) 중점연구개발과제 도출





4.1. 중점 연구개발 과제

4.1.1. MP 유입과 분포

| 프로그램 목표 | | 필요지식 및 기술적 도전과제 | 세부연구 개발과제 |
|--------------------------------|------------------------|---|--|
| 단계별 목표 | 중점연구개발과제 | | |
| 1단계(3년) MP 조사기법 개발 및 표준화 | - MP 시료채취 및 현장 조사기법 개발 | <ul style="list-style-type: none"> 입자의 cut-off size 퇴적물로부터 MP의 분리법 고밀도 플라스틱의 분리법 채취 MP의 농축기술 정량평가 시료채취기법 | <ul style="list-style-type: none"> 부유 MP 분리 및 농축 기술 개발 해안 표착 MP 분리 및 농축 기술 개발 해저 침적 MP 분리 및 농축 기술 개발 MP 오염 정량 평가 기법 개발 MP조사 기법 표준화 |
| | - MP 식별 및 정량평가 기술 개발 | <ul style="list-style-type: none"> MP 재질 판별법 FTIR Spectroscopy Raman Spectroscopy Atomic Force Microscopy 광학/형광현미경 SEM/TEM 판별법 폴리머 염색 기법 | <ul style="list-style-type: none"> MP 밀도 측정법 개발 MP 크기 정량법 개발 MP 재질 분석기술 개발 MP 자동 식별기술 개발 |
| 2단계(3년) MP 오염지도 작성 및 추세 규명 | - MP 오염현황 평가 | <ul style="list-style-type: none"> 물리적 조건에 따른 분포 해안타입에 따른 분포 환경변화에 따른 오염현황 공간 분포 분석 지형/환경요인과의 관계성 GIS를 이용한 mapping | <ul style="list-style-type: none"> 국내 연안 부유 MP 분포 평가 국내 해안 표착 MP 분포 평가 국내 해저 침적 MP 분포 평가 동아시아 MP 오염 평가 북서태평양 MP 오염 평가 |
| | - MP 오염추세 평가 | <ul style="list-style-type: none"> 해안별 제거/유입률 평가기술 과거오염 추세의 추정 기법 | <ul style="list-style-type: none"> 국내 연안 MP 오염 추세 평가 동아시아 MP 오염 추세 평가 북서태평양 MP 오염 추세 평가 |
| 3단계(4년) MP 주요 유입원 및 유입경로 규명 | - MP 주요 유입원 및 경로 평가 | <ul style="list-style-type: none"> 하천을 통한 MP 유입 하수처리장을 통한 MP 유입 투기장해역의 MP 유입 외국기인 MP 유입 MP 종류별 유입원 및 유입경로 | <ul style="list-style-type: none"> MP 잠재적 유입원 조사 MP 배출량 산정 기술 개발 하수/폐수처리장을 통한 MP 유입 평가 하천을 통한 MP 유입평가 외국기인 MP 유입평가 MP 부하량 산정 기술 개발 |



4.1.2. MP 분해와 거동

| 프로그램 목표 | | 필요지식 및 기술적 도전과제 | 세부연구 개발과제 |
|---|--------------------------------|---|--|
| 단계별 목표 | 중점연구개발과제 | | |
| 1단계(3년) MP 풍화 특성 평가 기술 개발 | - MP 표면특성 변화 평가기술 개발 | <ul style="list-style-type: none"> • 풍화 측정기술 • FTIR Spectroscopy 기술 • SEM 기술 • AFM 기술 • TOF-SIMS 기술 | <ul style="list-style-type: none"> - 물리적 표면특성 평가기술 개발 - 화학적 표면특성 평가기술 개발 |
| | - 환경조건 별 풍화 특성 평가 시스템 구축 | <ul style="list-style-type: none"> • 물리적 풍화조건 • 화학적 풍화조건 • MP 풍화 시뮬레이션 기술 | <ul style="list-style-type: none"> - 물리적 환경조건 별 풍화 특성 평가 - 화학적 환경조건(UV, 온도, 산소 등)별 풍화특성 평가 - 폴리머 타입별 풍화특성 평가 - 플라스틱 첨가물이 풍화특성 에 미치는 영향평가 |
| 2단계(3년) MP 분해과정 평가 | - MP 미세화 과정 규명 | <ul style="list-style-type: none"> • 환경에 따른 MP미세화 기작 • 폴리머별 MP 미세화 기작 • 제품군 별 미세화 비교 평가 • 첨가제가 미세화에 미치는 영향 • Monomer, dimer 등 정량/정성 기술 | <ul style="list-style-type: none"> - 물리적 환경조건별 MP 미세화 기작 규명 - 화학적 환경조건별 MP 미세화 기작 규명 - 폴리머 타입별 MP 미세화 기작 규명 - MP의 환경조건 및 재질별 반 감기 산정 |
| | - MP Aging 측정 기술 개발 | <ul style="list-style-type: none"> • 폴리머 aging 특성 • Aging 지표(indicator) | <ul style="list-style-type: none"> - 물리적 aging 지표 개발 - 화학적 aging 지표 개발 - 현장시료 aging 평가 |
| 3단계(4년) 풍화/미세화에 따른 해양환경 중 MP 거동 평가 | - 현장 MP 풍화 및 미세화 평가 | <ul style="list-style-type: none"> • 폴리머 타입별 풍화도 평가 • 환경요인과의 관계성 | <ul style="list-style-type: none"> - 현장 MP의 풍화도 평가 - 현장 MP의 미세화 정도 평가 |
| | - MP 풍화 및 미세화에 따른 거동 평가 | <ul style="list-style-type: none"> • MP 입자 크기 변화에 따른 부유 • MP 미소생물부착 영향 | <ul style="list-style-type: none"> - 풍화에 따른 MP의 거동 기작 규명 - 미세화에 따른 MP의 거동 기작 규명 |



4.1.3. MP 흡착/첨가 오염물질

| 프로그램 목표 | | 필요지식 및 기술적 도전과제 | 세부연구 개발과제 |
|-------------------------------------|-------------------------------|---|--|
| 단계별 목표 | 중점연구개발과제 | | |
| 1단계(3년) MP 흡/탈착 특성규명 | - MP의 오염물질 분배특성 | <ul style="list-style-type: none"> • 물질별 분배계수 측정법 • 물질별 분배 특성 • MP 재질별 분배 특성 • 오염물질 분배 모형 | <ul style="list-style-type: none"> - 오염물질 분배계수 측정법 개발 - POPs의 MP 분배 특성 평가 - 중금속의 MP 분배 특성 평가 |
| | - MP 첨가 유해물질 용출 특성 | <ul style="list-style-type: none"> • MP 첨가제 종류 • MP 첨가제 분석기술 • MP 첨가제 용출 조건 • 물리/화학적 조건에 따른 첨가제 용출 특성 • 재질별 단량체 분석 기술 | <ul style="list-style-type: none"> - 첨가제 용출시험법 개발 - 첨가제별 용출특성 평가 - 단량체 용출특성 평가 |
| 2단계(3년) MP에 의한 잔류성오염물질의 환경거동 평가 | - MP 잔류오염물질 오염평가 | <ul style="list-style-type: none"> • 폴리머 타입별 유해물질 추출기술 • 유해물질 정제 기술 • 유해물질별 전처리 기술 • 유해물질 분석 기술 | <ul style="list-style-type: none"> - 국내연안 MP 흡착 오염물질 모니터링 - 국내연안 MP의 플라스틱 첨가제 오염 평가 - 동아시아/북서태평양 MP 흡착 오염물질 모니터링 |
| | - MP의 역할을 고려한 다매체 거동모형 및 모니터링 | <ul style="list-style-type: none"> • MP의 물리화학적 특성에 따른 거동인자 변화 • 장거리이동 모델링 기술 • MP에 의한 sequestration 모형 • MP에 의한 facilitated transport 모형 • 기존의 장거리이동 모형 보완 • 중요한 흡착매체로서의 MP의 역할고려 | <ul style="list-style-type: none"> - MP에 의한 잔류성유기 오염물질의 확산이동 모형 개발 - MP의 시공간적 특성변화에 따른 확산이동 변화 - MP의 역할을 고려한 다매체 거동모형 개발 - 다매체거동모형 보완을 위한 모니터링 |
| 3단계(4년) MP로 인한 잔류성오염물질의 생물축적성 평가 | - MP에 의한 오염물질의 생물축적성 평가 | <ul style="list-style-type: none"> • MP의 섭취에 의한 오염물질 생물축적성 변화 • 생물축적성평가를 위한 in silico/in vitro/in vivo 모형 | <ul style="list-style-type: none"> - MP에 의한 잔류성오염물질의 생물축적성변화 규명 - MP의 역할을 고려한 생물축적모형의 보완 |
| | - MP에 의한 잔류성 오염물질의 생물축적 평가 | <ul style="list-style-type: none"> • 먹이연쇄 생물축적모형에서 MP의 역할 규정 • 생물축적 모니터링 • MP에 의한 오염물질의 생태계 축적 현상 규명 | <ul style="list-style-type: none"> - 환경모니터링을 통한 MP의 생물축적성에의 영향 규명 |



4.1.4. MP 생물축적과 독성

| 프로그램 목표 | | 필요지식 및 기술적 도전과제 | 세부연구 개발과제 |
|--------------------------------|-----------------------|--|--|
| 단계별 목표 | 중점연구개발과제 | | |
| 1단계(3년) 생물축적 및 독성 평가법 개발 | - MP 생물축적 평가법 개발 | <ul style="list-style-type: none"> • 생물의 섭식형태 • 생물의 이동경로 • 생물의 생활사 • 시료 채취 및 평가법 | <ul style="list-style-type: none"> - MP 생체축적 지표 생물종 선정 - 생체시료 중 MP의 분리 기술 개발 |
| | - MP의 생물독성 평가법 개발 | <ul style="list-style-type: none"> • 모델생물의 선정 및 확보 • 모델생물 최적배양조건 • 모델생물의 생활사 • 모델생물의 유전자정보 • 생리생태학적 영향 • 분자생물학적 영향 | <ul style="list-style-type: none"> - MP 물리적/화학적 영향평가 대상 생물 선정 - MP의 노출 및 영향평가 기법 개발 - MP의 재질별/크기별 물리적 영향 평가 |
| 2단계(3년) MP의 생물축적 및 독성평가 | - MP 현장 생물축적 평가 | <ul style="list-style-type: none"> • 생물의 섭식형태 • 생물의 이동경로 • 생물의 생활사 • 시료 채취 및 평가법 | <ul style="list-style-type: none"> - 국내 연안 무척추동물 대상 MP 생체축적 평가 - 국내 연안 어류 MP 생체축적 평가 - 국내 연안 바닷새 MP 생체축적 평가 |
| | - MP의 생물독성 평가 | <ul style="list-style-type: none"> • 수온 및 염분의 영향 • UV의 영향 • 흡착 유해물질별 독성 • 첨가 유해물질별 독성 • 분자생물학적 영향 | <ul style="list-style-type: none"> - MP 흡착물질에 의한 독성 영향 평가 - MP 첨가제 용출에 의한 독성 영향 평가 |
| 3단계(4년) MP의 생태위해성 평가 | - 먹이망에 의한 생물농축 연구 | <ul style="list-style-type: none"> • 먹이망 구조 • 먹이망구조 분석 기술 • 대상종 생활사 | <ul style="list-style-type: none"> - 인공생태계 활용 위해성 평가 기법 개발 - 먹이망을 통한 MP 생물축적 및 생물확대 규명 |
| | - MP 부착 미소생물 영향 평가 | <ul style="list-style-type: none"> • MP 부착 생물 정보 • 외래침입생물의 생태학적 영향 | <ul style="list-style-type: none"> - MP 부착 미소생물의 분리 및 동정 기법 개발 - MP 부착 미소생물에 의한 생태적 영향 평가 |



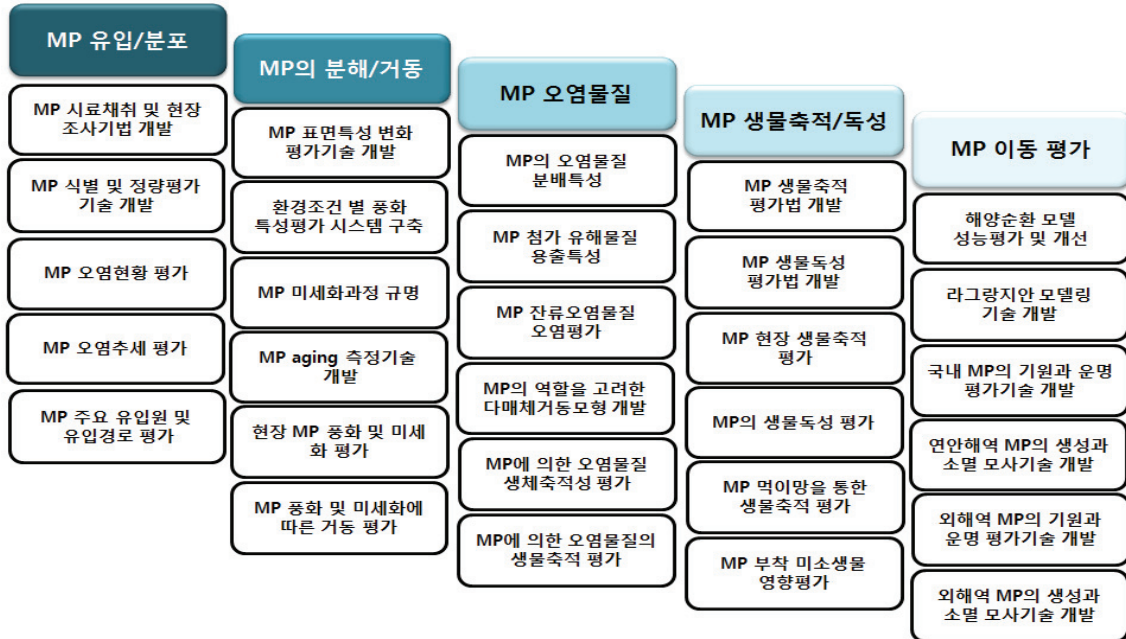
4.1.5. MP 이동

| 프로그램 목표 | | 필요지식 및 기술적 도전과제 | 세부연구 개발과제 |
|---|---------------------------|--|---|
| 단계별 목표 | 중점연구개발과제 | | |
| 1단계(3년) MP 이동 및 분포 평가 모델링 기반 기술 개발 | - 해양순환 모델 성능 평가 및 개선 | <ul style="list-style-type: none"> • 고해상도 해양순환모형 • 연안순환 모형 및 성능 개선기술 | <ul style="list-style-type: none"> - 해양순환 모형 개선 - 연안순환 모형 개선 |
| | - 라그랑지안 모델링 기술 | <ul style="list-style-type: none"> • 라그랑지안 입자 추적 모델링 기술 • 라그랑지안 일관구조 (LCS) 평가 기술 | <ul style="list-style-type: none"> - LCS를 이용한 해수의 수렴역과 발산역 평가 기술 - 라그랑지안 입자의 나이와 성격 모델링 기술 - 라그랑지안 입자 농도 평가 기술 |
| 2단계(3년) 연안역 MP 이동 및 분포 평가 모델링 | - 국내 MP의 기원과 운명 평가 기술 | <ul style="list-style-type: none"> • 고해상도 연안모델링 기술 • 연안순환모형과 라그랑지안 모델링 접합 | <ul style="list-style-type: none"> - 확률분포를 이용한 시작점 과 분포평가 - 민감도 평가 기술 |
| | - MP의 생성과 소멸 모사기술 개발 | <ul style="list-style-type: none"> • MP 침강 및 재부유 모델링 기술 개발 • macroplastic의 충돌 및 풍화에 의한 MP의 생성 모수화 기술 • 연안역 macroplastic 이동 모 의 기술 | <ul style="list-style-type: none"> - 해저경계층에서 MP의 운동 모델링 - 조석 및 파랑과 MP간 상호 작용 - Large eddy simulation 기술 - 라그랑지안 입자의 생성과 소멸 모델링 기술 |
| 3단계(4년) 외해역 MP 이동 및 분포 평가 모델링 | - 외해역 MP의 기원과 운명 평가 기술 | <ul style="list-style-type: none"> • 고해상도 외해역 모델링 기술 • 외해역 순환 모델과 라그랑지안 모델 접합 | <ul style="list-style-type: none"> - 국내에서 발견되는 MP의 기원 평가 - 국내에서 시작하는 MP의 이동경로 평가 |
| | - MP의 생성과 소멸 모사기술 개발 | <ul style="list-style-type: none"> • 외해역 macroplastic 이동 모의 기술 • 표층혼합층 입자 이동 기술 | <ul style="list-style-type: none"> - 표면 혼합층내 운동 모의 기술 - 아격자 규모 입자 확산과 난류혼합 모수화 기술 |



III 연구개발 추진계획

1) 중점 및 세부연구개발과제 요약



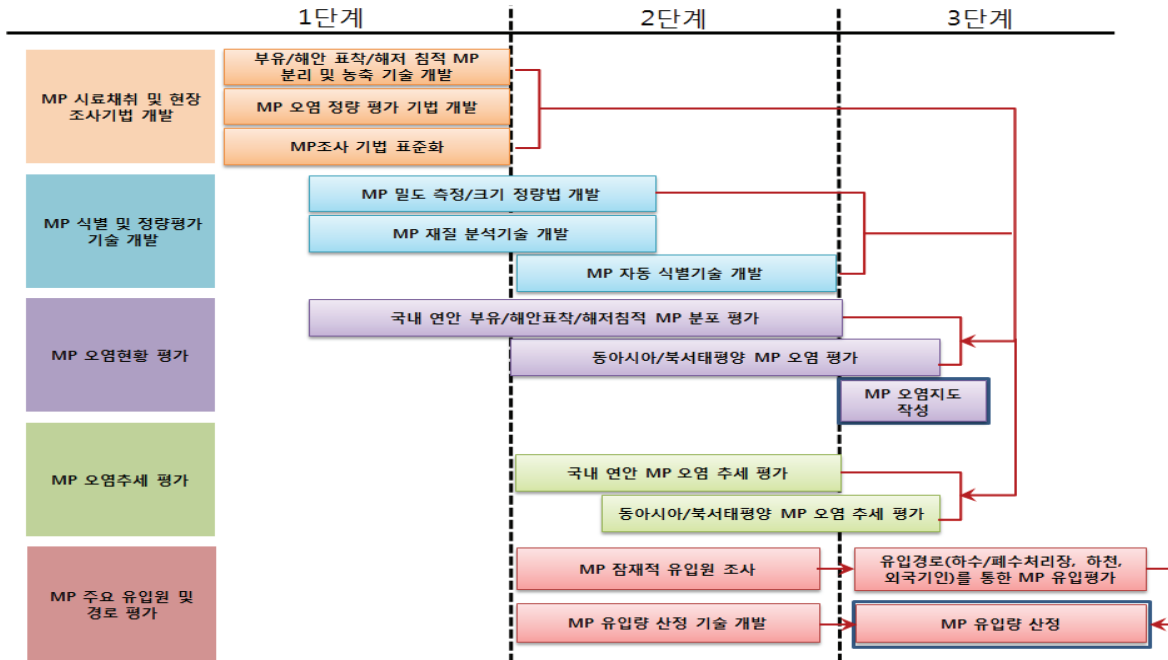
2) 총괄 로드맵

| | 1단계 | 2단계 | 3단계 |
|--------------------|--|--|---|
| MP의 유입과 분포 | MP 조사기법 개발 및 표준화 MP 시료채취/현장조사기법 개발 MP 식별 및 정량평가 기술개발 | MP 오염지도 작성 및 추세규명 MP 오염현황 평가 MP 오염추세 평가 | MP 유입원 및 유입경로 규명 MP 주요 유입원 평가 MP 주요 유입경로 평가 |
| MP의 분해와 거동 | MP 풍화특성 평가기술 개발 MP 표면특성 변화 평가기술 개발 풍화특성 평가 시스템 구축 | MP 분해과정 평가 MP 미세화 과정 규명 MP aging 측정기술 개발 | 풍화/미세화에 따른 거동 평가 현장 MP 풍화 및 미세화 평가 MP 풍화 및 미세화에 따른 거동평가 |
| MP 오염물질 | MP 오염물질 흡/탈착 특성 규명 MP의 오염물질 분배 특성 분석 MP 첨가 유해물질 용출 특성 분석 | MP 잔류 오염물질 환경거동 평가 MP 잔류 오염물질 평가 MP 역할고려 다매체거동모형 개발 | MP 잔류 오염물질 생물축적 평가 MP 오염물질 생체축적성 평가 MP 오염물질의 생물축적 평가 |
| MP 생물축적과 독성 | MP 생물축적/독성 평가법 개발 MP 생물축적 평가법 개발 MP 생물독성 평가법 개발 | MP 생물축적/독성 평가 MP 현장 생물축적 평가 MP 생물독성 평가 | MP 생태위해성평가 먹이망을 통한 MP 생물축적 평가 MP 부착미소생물 영향 평가 |
| MP 이동 평가 | MP 이동/분포평가 모델링 기반 기술 개발 해양순환 모델 성능 평가/개선 라그랑지안 모델링 기술 개발 | 연안역 MP 이동 및 분포평가 모델링 국내 MP 기원과 운명 평가 기술 연안 MP 생성과 소멸 모사기술 개발 | 외해역 MP 이동/분포 평가 모델링 외해역 MP 기원과 운명 평가 기술 외해역 MP 생성과 소멸 모사기술 개발 |

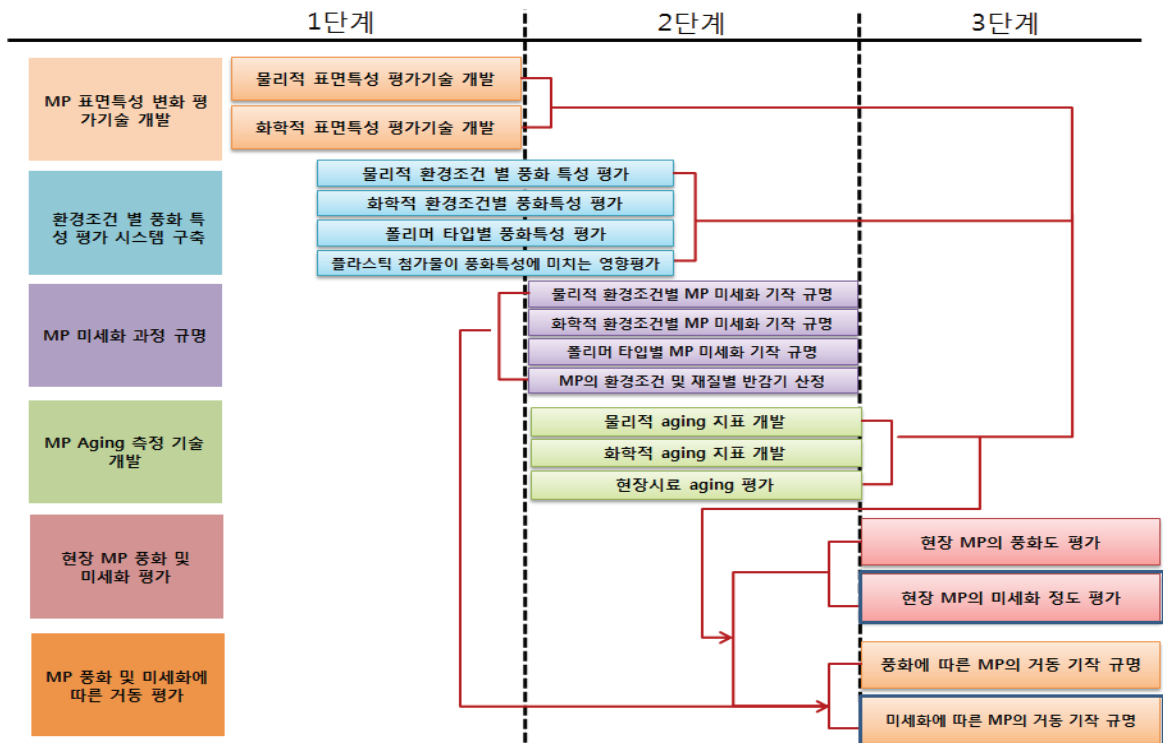


3 세부분야별 로드맵

3.1. MP 유입과 분포

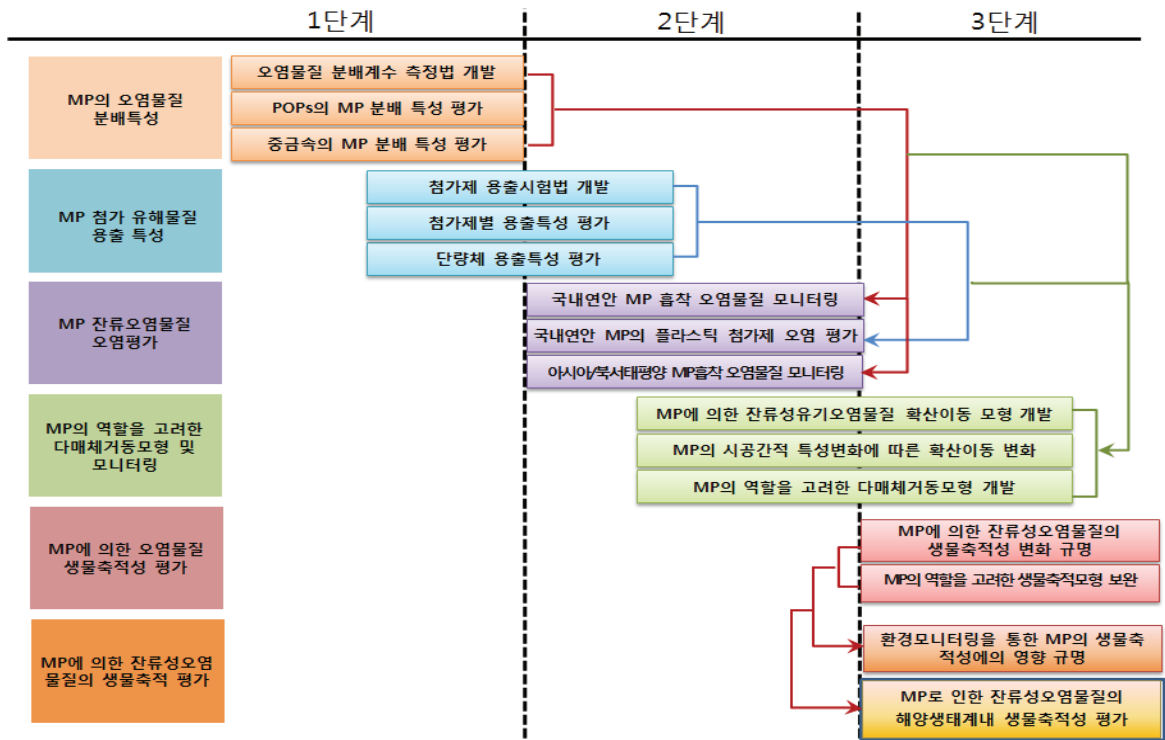


3.2. MP 분해와 거동

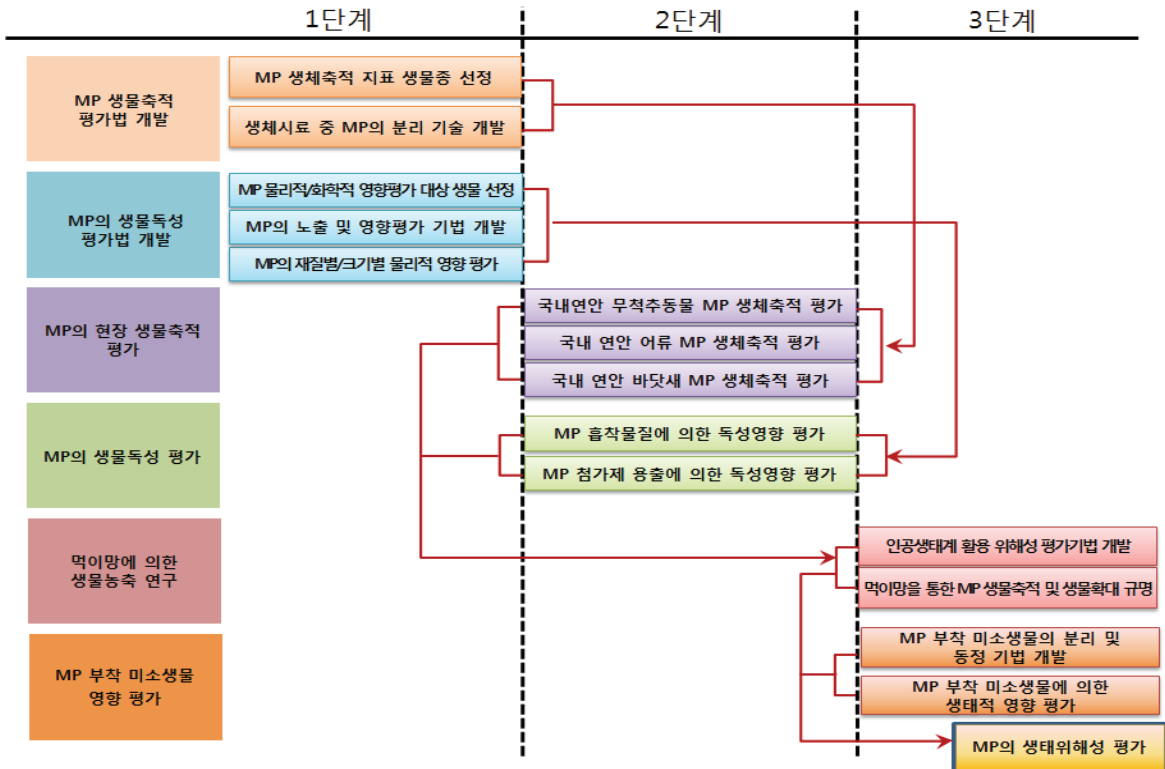




3.3. MP 흡착/첨가 오염물질

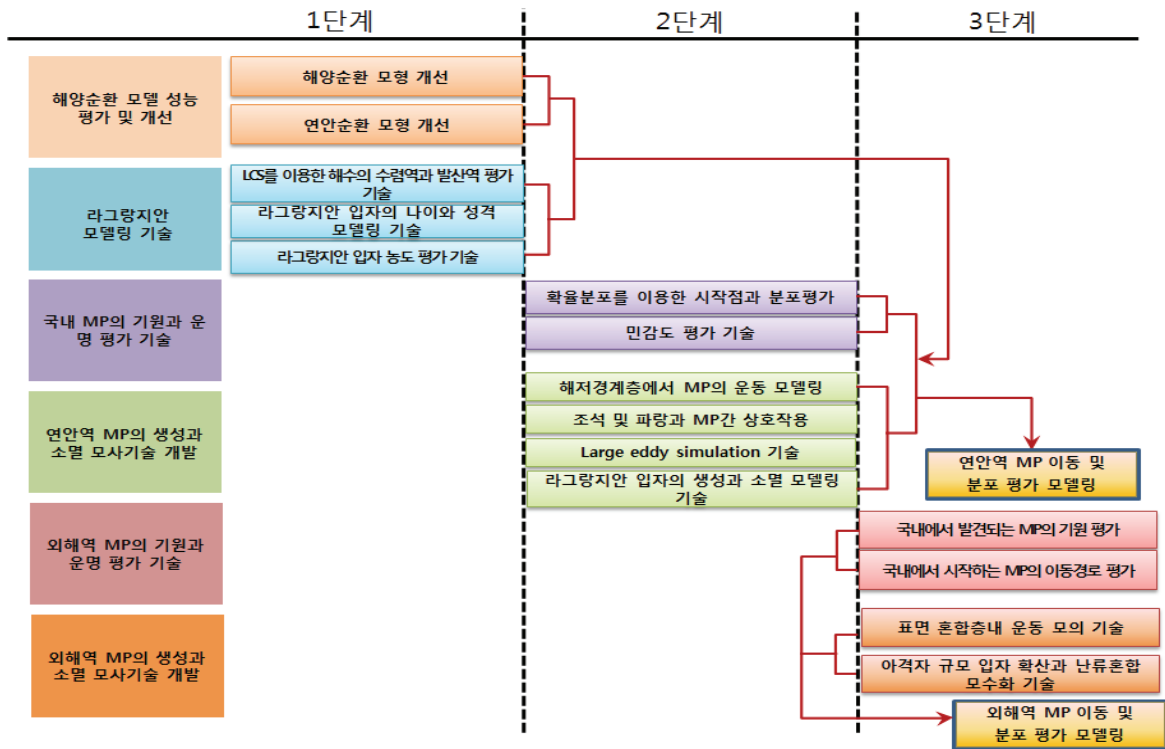


3.4. MP 생물축적과 독성





3.5. MP 이동



4. 소요예산 및 연구기간

4.1. MP 유입과 분포

(단위 : 억원)

| 분야 | 년도 | 1단계 | | | 2단계 | | | 3단계 | | | | 계 |
|------------------------|-------------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|----|
| | | 2009 | 2010 | 2011 | 2012 | 2013 | 2014 | 2015 | 2016 | 2017 | 2018 | |
| MP 조사기법 개발 및 표준화 | - MP 시료채취 및 현장 조사 기법 개발 | 3 | 2 | 2 | | | | | | | | 7 |
| | - MP 식별 및 정량평가 기술 개발 | 2 | 2 | 1 | 2 | 2 | 2 | | | | | 11 |
| MP 오염지도 작성 및 추세 규명술 개발 | - MP 오염현황 평가 | | 3 | 3 | 5 | 5 | 5 | 5 | | | | 26 |
| | - MP 오염추세 평가 | | | | 2 | 2 | 2 | 2 | | | | 8 |
| MP 주요 유입원 및 유입경로 규명 | - MP 주요 유입원 및 경로 평가 | | | | 2 | 2 | 2 | 3 | 3 | 3 | 3 | 18 |
| 계 | | 5 | 7 | 6 | 11 | 11 | 11 | 10 | 3 | 3 | 3 | 70 |



4.2. MP 분해와 거동

(단위 : 억원)

| 분야 | 년도 | 1단계 | | | 2단계 | | | 3단계 | | | | 계 |
|-------------------------------------|--------------------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|----|
| | | 2009 | 2010 | 2011 | 2012 | 2013 | 2014 | 2015 | 2016 | 2017 | 2018 | |
| MP 풍화 특성 평가 기술 개발 | - MP 표면특성 변화 평가기술 개발 | 2 | 2 | 1 | | | | | | | | 5 |
| | - 환경조건 별 풍화 특성 평가 시스템 구축 | 2 | 2 | 2 | 2 | | | | | | | 8 |
| 연안 MP 풍화도 평가 | - MP 미세화 과정 규명 | | | | 5 | 5 | 5 | | | | | 15 |
| | - MP Aging 측정 기술 개발 | | | | 1 | 1 | 1 | | | | | 3 |
| 풍화/미세화에 따른 해양환경 중 MP 거동 평가 | - 현장 MP 풍화 및 미세화 평가 | | | | | | | 2 | 2 | 2 | 2 | 8 |
| | - MP 풍화 및 미세화에 따른 거동 평가 | | | | | | | 3 | 3 | 3 | 3 | 12 |
| 계 | | 4 | 4 | 3 | 8 | 6 | 6 | 5 | 5 | 5 | 5 | 51 |

4.3. MP 흡착/첨가 오염물질

(단위 : 억원)

| 분야 | 년도 | 1단계 | | | 2단계 | | | 3단계 | | | | 계 |
|---|--------------------------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|----|
| | | 2009 | 2010 | 2011 | 2012 | 2013 | 2014 | 2015 | 2016 | 2017 | 2018 | |
| MP 흡/탈착 특성연구 | - MP의 오염물질 분배특성 | 2 | 2 | 2 | | | | | | | | 6 |
| | - MP 첨가 유해 물질 용출 특성 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | | | | | | 10 |
| MP에 의한 잔류성오염물질 의 환경거동 평가 | - MP 잔류오염 물질 오염평가 | | | | 4 | 4 | 5 | | | | | 13 |
| | - MP의 역할을 고려 한 다매체거동 모형 및 모니터링 | | | | | 2 | 2 | 2 | 2 | | | 8 |
| MP로 인한 잔류성 오염물질들의 해양생태계에서 의 생물축적성 평가 | - MP에 의한 오염 물질의 생물축적 성 평가 | | | | | | | 2 | 2 | 2 | 2 | 8 |
| | - MP에 의한 잔류성 오염물질의 생물 축적 평가 | | | | | | | 2 | 2 | 2 | 2 | 8 |
| 계 | | 4 | 4 | 4 | 6 | 8 | 7 | 6 | 6 | 4 | 4 | 53 |



4.4. MP 생물축적과 독성

(단위 : 억원)

| 분야 \ 년도 | | 1단계 | | | 2단계 | | | 3단계 | | | | 계 |
|---------------------|---------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|----|
| | | 2009 | 2010 | 2011 | 2012 | 2013 | 2014 | 2015 | 2016 | 2017 | 2018 | |
| MP 생물축적 및 독성 평가법 개발 | - MP 생물축적 평가법 개발 | 1 | 1 | 1 | | | | | | | | 3 |
| | - MP의 생물독성 평가법 개발 | 3 | 3 | 3 | | | | | | | | 9 |
| MP의 생물축적 및 독성평가 | - MP 현장 생물 축적 평가 | | | | 3 | 3 | 3 | | | | | 9 |
| | - MP의 생물독성 평가 | | | | 2 | 2 | 2 | | | | | 8 |
| MP의 생태위해성 평가 | - 먹이망에 의한 생물농축 연구 | | | | | | | 3 | 3 | 3 | 3 | 12 |
| | - MP 부착 미소 생물 영향 평가 | | | | | | | 2 | 2 | 2 | 2 | 8 |
| 계 | | 4 | 4 | 4 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 49 |

4.5. MP 이동

(단위 : 억원)

| 분야 \ 년도 | | 1단계 | | | 2단계 | | | 3단계 | | | | 계 |
|----------------------------|---------------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|----|
| | | 2009 | 2010 | 2011 | 2012 | 2013 | 2014 | 2015 | 2016 | 2017 | 2018 | |
| MP 이동 및 분포 평가 모델링 기반 기술 개발 | - 해양순환 모델 성능 평가 및 개선 | 2 | 2 | 1 | | | | | | | | 5 |
| | - 라그랑지안 모델링 기술 | 2 | 2 | 1 | | | | | | | | 5 |
| 연안역 MP 이동 및 분포 평가 모델링 | - 국내 MP의 기원 과운명 평가기술 | | | 1 | 1 | 1 | | | | | | 3 |
| | - 연안MP의 생성 과 소멸 모사 기술 개발 | | | 1 | 2 | 2 | 2 | 1 | | | | 8 |
| 외해역 MP 이동 및 분포 평가 모델링 | - 외해역 MP의 기원과 운명 평가 기술 | | | | | | | 2 | 2 | 2 | 2 | 8 |
| | - 외해역 MP의 생성과 소멸 모사 기술 개발 | | | | | | | 1 | 1 | 1 | 1 | 4 |
| 계 | | 4 | 4 | 4 | 3 | 3 | 2 | 4 | 3 | 3 | 3 | 33 |



IV

연구개발의 타당성 분석

1) 정책적 타당성 분석

1.1. 정부정책과의 연관성

- 「제4차 해양환경종합계획(2011~2020)」 상에는 ‘해양환경개선 및 오염원의 예방적 관리’를 위한 연안유입오염물질 및 해양쓰레기 관리 강화 추진 사업을 규정함
- 제2차 해양수산발전기본계획(2011~2020)에서 “해양수질 및 해저퇴적물 환경 개선 추진”을 4대 정책목표 중의 하나로 도출하였으며, 목표달성을 위해 “해양 생태 환경의 건강성과 장래 이용을 고려한 과학적 기준 도입 및 문제해결 중심의 정책결정지원 시스템 도입”을 명시함
- 해양수산발전기본법 15조에 의거 해양안전기술의 개발을 시행해야 함
- “해양쓰레기 오염 대응기술 개발”은 해양환경기술개발사업 중장기 기본계획 (국토해양부, 2011)에 포함되어 있음
- 해양환경관리공단(KOEM)은 2011년 ‘해양쓰레기 대응센터’를 개설하여 업무를 수행하기 시작하였으나, 해양쓰레기 문제에 대한 연구개발 수요를 충족할 수 있는 국가연구개발 사업은 없음
- 「한국해양과학기술원 발전전략(2012)」 전략 연구과제 선정
- 과학기술기본법 7조, 11조에 의거 “과학기술기본계획”에 따라 국가연구개발 사업을 추진. 제2차 과학기술기본계획(2008~2012)에서 “건강하고 안전한 삶을 위한 기술개발 강화”가 향후 5년간 15대 핵심과제중 하나로 도출됨('07.12.20.)

1.2. 연구수행의 시급성

- 마이크로플라스틱에 의한 오염은 UNEP, UNESCO-IOC, IMO, UNIDO 등의 국제기구에서 최신 해양환경이슈의 하나로 선정하고 관심을 가지고 있는 주제로 최신 급부상하는 해양환경이슈에 선제적으로 대응하기 위해서는 관련 과학 기술적 노하우와 자료를 우선적으로 확보해야 함



- 마이크로플라스틱 오염은 해양의 대형쓰레기 오염과 달리 가시적으로 영향의 정도와 범위를 가늠하기 어렵고 수거 및 처리 방법의 적용이 불가능하기 때문에 실질적인 문제 수준에 도달하기 전에 현황을 파악하고 필요 시 대책을 수립해야 함
- 국내 남해안의 모래해변에 대한 예비조사 결과 낙동강의 영향을 직접적으로 받는 거제도 모래해변의 마이크로플라스틱의 함량은 세계 최고 수준으로 조사되었으며, 양식용 부이에 대규모로 사용되는 발포스티렌이 입자화된 마이크로플라스틱은 전세계에서 유래를 찾아볼 수 없는 수준으로 오염되어 있음을 확인한 바, 체계적인 조사와 연구개발이 시급함
- 전세계적으로 플라스틱의 사용량과 쓰레기 발생량이 지속적으로 증가하고 있으며, 해양 마이크로플라스틱의 오염도 증가하는 추세로 보고되고 있어 이에 대한 대책수립을 위해서는 과학적인 조사가 시급하게 선행되어야 함
- 과학기술 분야의 연구개발의 주기 상 마이크로플라스틱 오염은 최신훈급부상한 도입기의 연구 분야로 선진국의 연구자들의 연구가 급격하게 증가될 것으로 예상되고 있는 바, 세계적으로 선도적인 연구의 주도권을 확보하기 위해서는 시의적절한 연구개발이 이루어져야 함

1.3. SWOT 분석 및 대응전략

| Strength | Weakness |
|--|---|
| <ul style="list-style-type: none"> - 정부의 해양쓰레기 종합관리 정책 도입 의지 - 국내 해양환경 연구의 기초 인프라 및 전문인력 확보 - 국내 해양환경 중 유해물질 오염 평가 분야의 수월성 확보 - 국내 나노물질 등 미세입자의 생물독성 평가 기술 경쟁 잠재력 보유 - 국내 플라스틱 합성 및 제조 분야의 경쟁력 | <ul style="list-style-type: none"> - 해양 마이크로플라스틱 연구의 전문인력 부족 - 해양쓰레기 유입 사전예방 및 종합 관리정책 미흡 - 해양 플라스틱 오염에 대한 기초 자료 부족 - 체계적이고 일관적인 관리 기술의 미비 - 해양쓰레기의 수거 및 사후 처리 위주의 기술 개발에 투자 집중 - 정부의 해양쓰레기 오염 대응 기술개발 투자의 체계적 통합기획 및 관리 미흡 |
| Opportunity | Threats |
| <ul style="list-style-type: none"> - 마이크로플라스틱에 대한 국제 환경이슈화 (UNEP, UNESCO-IOC, IMO, UNIDO, GESAMP 등) - 해양환경 및 생태계 보존을 위한 인식 고조 - 예방적 관리에 입각한 국내 해양환경 정책의 변화 - 통합환경관리를 위한 해양쓰레기 오염 관련 기술 수요 급증 - 해양쓰레기가 미치는 경제적 피해에 대한 평가 요구 증대 - 해양환경에 미치는 위해성 평가가 포함된 사전환경영향예측의 필요성 증대 | <ul style="list-style-type: none"> - 국내 플라스틱 생산량 및 사용량의 증가 - 환경 정보 부재 및 부정확으로 인한 국민의 잘못된 환경인식(지나친 우려 또는 경시) - 해양환경 분야 투자의 경기변동 의존성 - 국내 해양 쓰레기 연구개발 분야 투자 규모의 영세성 - 관련 전문가들의 기술 융합 미흡 - 사업화 기술 확보 미흡 |



| 대응전략 | |
|--------------|---|
| SO 전략 | <ul style="list-style-type: none"> - 국내 해양환경 및 해양쓰레기 문제에 대한 인식이 고조되어 정부차원의 해결 요구가 증대되고 있어 현안 문제해결 중심형의 연구개발 사업으로 개발에 유리 - 국제적인 해양환경 현안으로 선도적인 연구개발을 통해 국제현안 해결에 기여할 수 있음 - 국내 예방적 관리차원의 해양환경 정책 변화 및 통합환경관리에 부합하는 연구개발 사업으로 개발 |
| ST 전략 | <ul style="list-style-type: none"> - 해양환경 연구의 선진화된 인프라와 인력을 확보하고 있는 만큼, 부족한 전문 인력을 해당 연구사업을 통해서 확보할 경우 국제적으로 플라스틱 오염 연구개발 분야를 리드할 수 있음 - 해양쓰레기 수거 및 사후처리에 집중 투자되고 있는 예산의 일부를 연구개발에 투여할 경우 투자대비 효과는 물론 효율적인 해양 플라스틱 쓰레기 관리로 수거 및 사후처리 비용을 대폭 감소시킬 수 있음 |
| WO 전략 | <ul style="list-style-type: none"> - 마이크로플라스틱이 국제 해양환경 이슈로 급부상 된 현시점 및 국내 해양환경과 생태계 보존에 대한 인식 고조 여건을 고려할 경우 과학적인 근거자료를 확보할 경우 국가차원의 해양쓰레기 유입 사전예방 및 종합 관리정책을 수립할 수 있음 - 과학적인 자료에 근거한 마이크로플라스틱의 생태계, 관광, 선박안전, 수산, 인체 건강 등에 미치는 피해를 입증하고 정량화하여 제시할 경우 정부의 해양쓰레기 오염 대응 기술개발 투자가 수월해 질 수 있음 |
| WT 전략 | <ul style="list-style-type: none"> - 국내 해양환경 및 생태계에 대한 보존 의식의 고조는 마이크로플라스틱 오염 및 영향에 대한 기초 자료 부족으로 지나친 우려 및 과장된 반응을 야기할 소지가 매우 큰 환경으로 연구개발을 통해 정확한 현황을 알려줄 필요성이 있음 - 국내 플라스틱의 사용량과 쓰레기 발생량이 급증하고 있는 상황에서 해양쓰레기 수거 및 처리 비용 역시 증가하고 있는 바, 연구개발을 통한 과학적인 정보의 제공은 효율적인 사전예방을 교육 및 정책 수립 효과를 극대화 할 수 있음 |



2 경제적 타당성 분석

2.1. 비용/편익 분석

2.1.1. 비용분석

- 태평양 미세플라스틱 거동분석 연구 사업은 총 254억원이 소요되고, 향후 10년간 할인율 5.5%의 현재가치를 적용할 경우, 약 181.8억원으로 추정
 - 미세플라스틱 유입 및 분포 연구에 70억원, 미세플라스틱 분해 및 거동 연구에 51억원, 미세플라스틱 오염물질 흡착 및 용출 연구에 53억원, 미세플라스틱 생물학적 및 독성 연구에 47억원, 미세플라스틱 이동평가 연구에 33억원이 소요되어 총 254억원으로 추산

2.1.2. 편익분석

- 태평양 미세플라스틱 거동분석 연구사업의 경제적 편익 분석 방법은 해양과학기술 분야의 과학적 연구 결과를 산출하는 바 과학기술적 편익으로서의 직접적 편익과 간접적 편익으로 구분하여 검토 가능
 - 해양과학기술 연구의 기초 및 응용연구 분야의 역할에 대한 평가와 연구 수행에 의해 산출되는 직·간접적 결과물들을 과학적 편익으로 분류하여 평가
 - 구체적으로는 연구사업의 운용을 통한 비용절감효과, 수입대체효과 등은 극히 미미하다고 볼 때, 해양기초과학기술 분야의 국제공동연구나 기초연구 분야에 해당되는 탐사 및 조사를 수행함으로써 평가될 수 있는 과학기술적 편익이 타당성 검토의 핵심이 될 것으로 사려됨
 - 이에 연구의 성과로 산출되는 과학기술적 성과를 산정 또는 평가하는 방법은 다양하나, 대표적으로 사용되는 방법으로는 해당 과학기술적 성과의 수요조사 및 해당 성과에 대하여 수요자가 느끼는 지불의사(willingness to pay)의 조사를 통하여 과학적 성과를 화폐가치로 산정
- 경제성 분석을 위한 가정
 - 3단계에 걸쳐 총 10년간 지원하는 사업으로 고려하고, 편익 발생 기간은 2013년에서 2022년까지 총 10년으로 가정함
 - 본 연구에서는 분석상의 위험을 피하기 위해 한국개발연구원(KDI)의 사회적 할인율¹⁾ 적용 지침인 5.5% 수준을 준용하여 현재가치(Present Value)로 전환



2.1.3. 과학기술의 비시장적 편익분석

- 본 연구에서는 직접적 과학기술적 편익 산정방식으로서, 첫째 수요조사를 통한 과학기술적 편익 산정방법으로 시장에서 평가되기 어려운 편익을 고려하기 위해 납세자들의 최대 ‘지불의사금액’ (willingness to pay, WTP)을 화폐적 가치로 시현시켜 측정하는 ‘조건부가치측정법’ (Contingent Valuation Method, CVM)을 활용하여 평가
 - 연구사업의 혜택이 해양기초과학기술 발전의 기반 마련, 국가과학 이미지 제고를 통한 국가경쟁력 상승 기여 및 국민의 자긍심 고취 등 매우 추상적인 비시장 재화(non-market) 가치를 평가
- 국제공동연구의 필요성이 강조된다는 점을 활용하면, 최근에 수행된 IODP 사업에 대한 CVM 사례를 검토한 후, 태평양 미세플라스틱 거동분석 연구 사업과의 비시장적 편익에 적용 가능함
 - 먼저 IODP 사업의 비시장적 편익을 추정했던 사례를 살펴보고
 - 소비자 물가지수로 조정하여 태평양 미세플라스틱 거동분석 연구의 비시장적 편익을 도출

가) IODP사업의 비시장적 편익 분석결과로 부터의 태평양 미세플라스틱 거동분석 연구사업의 비시장재화(non-market) 가치 평가

- 국제공동 해양시추사업(IODP) 사업은 세계 20여 개국 과학자가 최첨단 시추선에 승선하여 전 세계의 해저를 시추하여 지질학, 지구과학, 해양학 등 다양한 과학분야의 연구를 수행하는 범세계적인 연구개발 사업임
 - 이런 IODP 사업은 지구과학 분야에서 가장 규모가 크고 잘 추진되고 있는 국제적인 사업으로 우리가 살고 있는 지구의 형성과 해양의 구조에 관해 수년전부터 연구를 진행하고 있음
- IODP 사업에 대한 비시장적 편익의 추정을 위해, 한국지질자원연구원(2007)의 연구에서 전국 7대 광역시를 대상으로 한 CVM 연구결과 가구당 연간 2,864원의 평균 WTP가 추정되었음
 - 이 값을 전체 모집단인 7개 광역시로 확장하기 위해 2008년 기준 가구 수 정보 7,459,596를 이용하면 연간 총 편익이 약 213.6억원에 이룸

1) 한국개발연구원, 2008, 『2008년 하반기 예비타당성조사 착수회의』 지침



- 인구주택총조사가 시행된 2008년 기준 광역지방자치단체별 세대수, 가계소비지출, 세대당 가계소비지출, 세대당 가계소비지출을 이용하여 조정한 가구당 WTP 값을 2012년 불변가격으로 환산된 값이 태평양 미세플라스틱 거동분석 연구사업의 연간 경제적 편익임
- 분석결과, 태평양 미세플라스틱 거동분석 연구의 비시장적 가치는 소비자 물가지수 (2008년=94.5, 2012년 2월=106.1)로 조정을 하면 2012년 2월 기준으로 연간 239.9 억원으로 추정됨
- 그러나, 상기에서 언급한 것과 같이 국제공동 해양시추사업(IODP)과 태평양 미세플라스틱 거동분석 연구가 추진방법적인 측면에서 국제공동 연구사업이라는 점과
- 연구사업의 혜택이 해양기초과학기술 발전의 기반 마련, 국가과학 이미지 제고를 통한 국가경쟁력 상승 기여 및 국민의 자긍심 고취 등 양적 성과지표가 동일하다고 보았을 때, 예산 규모면에서 1/4의 차이가 발생하여 이로 인해 활동영역 측면에서 유발효과의 규모가 적어져야 한다는 점을 적용할 필요성이 있음
- 따라서, 태평양 미세플라스틱 거동분석 연구는 국제공동 해양시추사업(IODP)의 예산규모면에서 1/4 수준인 매년 60억원의 편익이 산정되고, 향후 2013년부터 2022년까지 10년 동안 할인율 5.5%의 현재가치로 전환된 편익규모는 총 428.5억원의 편익을 기대

2.1.4. 간접적 과학기술적 편익

- 태평양 미세플라스틱 거동분석 연구 사업에 따른 간접적 과학기술적 편익의 경우도 그 가치를 화폐적 단위로 쉽게 산정되기 어려운 문제점이 있지만, 전문 인력양성 효과, 방송홍보효과 등을 고려할 수 있음

가) 전문 연구인력 양성 효과

- 해양과학기술 전문 연구인력 양성 및 연구능력 증진 효과는 연구 시설 확충 시 수반되는 편익으로서, 동일하게 성과지표의 향상정도 및 성과 목표치로 평가
- 플라스틱 거동분석 전문인력 양성사업의 경제적 효과를 추정하기 위해 사업을 통해 양성되는 전문인력의 효용을 계산함
- 조건부 가치추정법(CVM: Contingent Valuation Method)과 지불용의(WTP)에 기반을 두어 전문인력양성에 대한 편익을 추정함²⁾

2) 김찬준 외(2010), 「광역경제권 선도산업 인력양성사업의 경제적 가치 분석」, 산업연구원 참조



나) 편익 도출 방안

| | |
|---|---------------|
| 기본구조 | 유전체 전문인력양성 편익 |
| $\text{편익} = \text{인력양성규모(연도별)} \times \text{교육자들의 지불용의(평균 급여차 - 교육비)}$ | |

- 편익의 크기는 국토해양부의 인력 양성사업을 통해 양성되는 전문인력의 규모에 이들의 평균적인 지불용의를 곱연산하여 도출함
 - 사업의 공급자가 아닌 수요자 시점에서 편익 크기를 추론
 - 전문인력의 규모는 사업목표인 110명(연도별 차이 감안)으로 산정
 - 교육자들의 지불용의(WTP)는 고등전문교육을 받은 사람과 받지 못한 사람 간의 급여 차이와 교육 소요 비용의 차액으로 계산
 - (급여 차이) 고등전문교육 이수 여부에 따른 급여 차이를 계산하기 위해, 유전체 분석 연구의 난이도를 감안하여 대학원 진학자의 평균 급여와 대학원 비진학자의 평균급여 차이를 사용

〈표 4-1〉 학력별 월급여액

(단위: 천원)

| 학력 | 2006 | 2007 | 2008 | 2009 | 평균 |
|------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 전체 | 1,742 | 1,847 | 1,945 | 1,960 | 1,874 |
| 중졸이하 | 1,294 | 1,283 | 1,346 | 1,335 | 1,315 |
| 고졸 | 1,472 | 1,542 | 1,613 | 1,626 | 1,563 |
| 초대졸 | 1,590 | 1,685 | 1,817 | 1,829 | 1,730 |
| 대졸 | 2,287 | 2,427 | 2,553 | 2,523 | 2,448 |
| 대학원졸 | 3,233 | 3,407 | 3,522 | 3,475 | 3,409 |

※ 고용노동부 고용정책실 노동시장정책관 노동시장분석과 2011년 노동통계 참고

※ 석사과정과 박사과정의 차이까지 나타난 자료는 제공되지 않음

- 대학원 졸업자와 대학 졸업자간 월 급여 차액은 약 95만원으로 조사됨
- (지불용의) 평균급여 차이로부터 지불용의를 산출하기 위해 서울 각 대학 대학원들의 등록금 정보를 집계3)



〈표 4-2〉 서울지역 39개 일반대학원 등록금 현황

(단위: 천원)

| 학교명 | 2010년도 등록금 | 학교명 | 2010년도 등록금 |
|-------|------------|--------|------------|
| 평균 | 4,871 | 서울여자대 | 5,136 |
| 가톨릭대 | 5,131 | 성공회대 | 4,944 |
| 건국대 | 5,143 | 성균관대 | 5,592 |
| 경기대 | 5,159 | 성신여자대 | 5,299 |
| 경희대 | 5,287 | 세종대 | 4,628 |
| 고려대 | 5,600 | 숙명여자대 | 5,623 |
| 광운대 | 5,394 | 숭실대 | 5,173 |
| 국민대 | 5,394 | 연세대 | 5,656 |
| 그리스도대 | 4,500 | 이화여자대 | 5,977 |
| 덕성여자대 | 4,753 | 장로회신대 | 5,133 |
| 동국대 | 5,457 | 중앙대 | 5,214 |
| 동덕여자대 | 4,633 | 총신대 | 4,899 |
| 삼육대 | 5,090 | 추계예술대 | 5,040 |
| 상명대 | 5,414 | 한국성서대 | 4,370 |
| 서강대 | 5,500 | 한국외국어대 | 5,261 |
| 서경대 | 4,850 | 한국체육대 | 3,137 |
| 서울기독대 | 3,992 | 한성대 | 4,778 |
| 서울대 | 3,325 | 한양대 | 5,300 |
| 서울산업대 | 3,158 | 한영신대 | 3,654 |
| 서울시립대 | 2,427 | 홍익대 | 5,502 |

※ <http://blog.peoplepower21.org/StableLife/40939>, 참여연대 보도자료(2010. 2. 10)자 참고

- 대학원의 최소 교육기간이 2년임을 감안하여 교육기간은 2년으로 가정
- 학력에 따른 임금격차는 일생의 상당 기간 동안 지속되나, 본 분석에서는 교육 이후 10년 동안의 임금격차에만 영향을 미친다고 가정
- 평균적인 지불용의(WTP)는 '급여차이(95만원 × 12개월 × 10년) - 교육비 소요액(487.1만원 × 4학기)'으로 나타남(현재가치화 전)
- 연도별 인력양성 규모 실적에 이들의 지불용의(WTP)를 곱연산하여 편익을 도출

3) 편익산출과정에서 편의상 지식경제부의 유전체 교육 과정은 대학원 과정에 비해 거의 무료라고 가정



다) 편익 추정

- 1명의 지불용의를 구하고 해당 지불 용의와 연도별 인력양성 목표를 곱연산
- 10년 동안의 1인당 지불 용의는 11,400만원이고 이를 현재가치화하면 5,922만원임
- 지불 용의는 교육 전에 있는 것이므로 교육기간 2년을 가정하고 교육시점 이전에 현익을 산정

〈표 4-3〉 1명의 지불용의

(단위: 만원)

| 기준년도와의 차이 | 교육비 소요 | 급여차 | 현재가치화 |
|-----------|--------|--------|-------|
| 1 | -974.2 | | -923 |
| 2 | -974.2 | | -875 |
| 3 | | 1,140 | 971 |
| 4 | | 1,140 | 920 |
| 5 | | 1,140 | 872 |
| 6 | | 1,140 | 827 |
| 7 | | 1,140 | 784 |
| 8 | | 1,140 | 743 |
| 9 | | 1,140 | 704 |
| 10 | | 1,140 | 667 |
| 11 | | 1,140 | 633 |
| 12 | | 1,140 | 600 |
| 합계 | | 11,400 | 5,922 |

- 국토해양부의 전문 인력양성 사업의 목표는 110명으로 인력양성사업의 편익은 지불 용의에 연도별 인력양성 규모를 곱연산하여 추정함

〈표 4-4〉 인력양성수

| 연 도 | 2013 | 2014 | 2015 | 2016 | 2017 | 2018 | 2019 | 2020 | 2021 | 2022 | 합계 |
|--------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|-----|
| 인력양성수 (명) | | 15 | | 15 | | 20 | | 30 | | 30 | 150 |



- 전문인력 양성사업의 편익은 약 45.7억원으로 추정됨

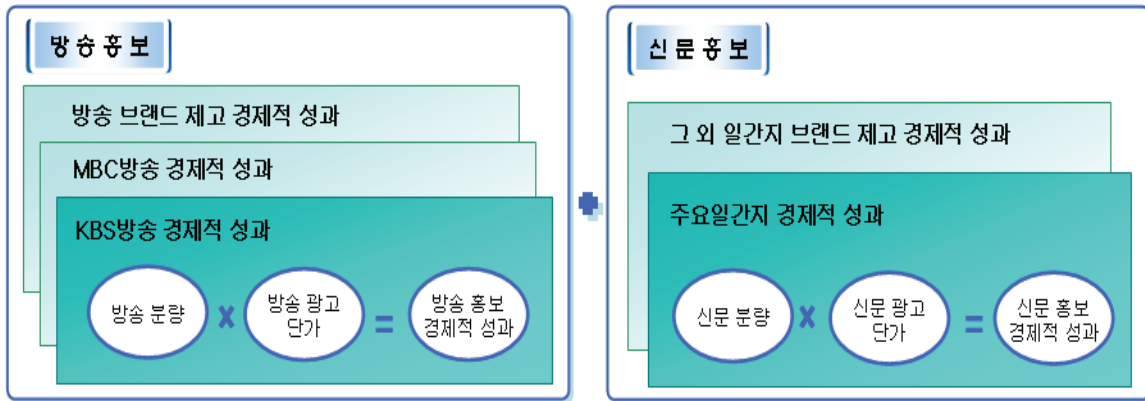
〈표 4-5〉 인력양성사업의 편익 추정

(단위: 만원)

| 연 도 | 편익 | 현재가치화 |
|-------|---------|---------|
| 2013 | | |
| 2014 | 88,824 | 79,804 |
| 2015 | | |
| 2016 | 88,824 | 71,700 |
| 2017 | | |
| 2018 | 118,432 | 85,893 |
| 2019 | | |
| 2020 | 177,649 | 115,756 |
| 2021 | | |
| 2022 | 177,649 | 104,001 |
| 편익 합계 | 651,378 | 457,154 |

라) 방송 및 신문홍보 효과

- 태평양 미세플라스틱 거동분석 연구를 활용하여 산출된 연구결과는 방송홍보와 신문홍보를 통하여 해양과학연구 대중인지도 확산 및 증대를 가져오고, 이는 범국민 브랜드 제고 효과를 발생시킬 수 있기에 이러한 방송홍보 및 신문홍보 효과를 광고단가기준으로 경제적 파급효과를 산출
- 브랜드 제고성과는 방송 및 신문의 노출빈도 및 노출 시간 등을 통하여 국민들에게 국가브랜드를 제고시키는 방법으로 방송 및 신문분량에 광고단가를 곱하여 홍보 경제적 성과로 간주



- ※ 주: 1. 방송시간은 방송 주제 및 내용을 고려하여 추정하였으며, 신문기사 크기는 A4 사이즈 분량을 20단 칼럼으로 추정하여 계산함
2. 방송광고단가는 한국방송광고공사 홈페이지의 발표내용으로 참조하고, 지상파 프로그램 광고요금(30초)을 기준으로 설정하여 SA급 10,753,000원, A급 7,102,000원 적용
3. 신문 광고단가는 기타면 광고단가를 기준으로 설정하고 중앙일간지는 500,000원 기준, 지역일간지는 70,000원 기준

- 한국해양연구원의 해양과학연구선을 활용한 방송 및 신문 홍보 실적은 평균적으로 연간 8.8건(방송 1.8건/신문 7건)으로 방송이 20%, 신문이 80%를 차지
- 이에, 태평양 미세플라스틱 거동분석 연구 사업을 활용한 대국민 해양과학기술 이해 고양에도 동일하게 기여할 수 있을 것으로 가정하여 적용
- 기존 온누리호를 활용한 해양과학지식을 MBC, KBS, SBS 방송 등 지상파프로그램에 소개되어 대국민 해양과학기술 이해 증진에 이바지한 실적은 연 평균 1.8건(약 10분)으로 산출되어 홍보 효과를 광고단가기준으로 산출한 결과 매년 약 2억 3,657만원, 총 23.6억원 정도의 경제적 파급효과를 기대
 - 향후 2013년부터 2022년까지 10년 동안 할인율 5.5%의 현재가치로 전환된 편익규모는 총 16.9억원의 편익을 기대
- 또한, 기존 온누리호를 활용한 해양과학지식을 주요 중앙 및 지역일간지 등 신문기사에 소개되어 대국민 해양과학기술 이해 증진에 이바지한 실적은 연 평균 7건(중앙일간지 6건, 지역일간지 1건)으로 산출되어 홍보 효과를 광고단가기준으로 산출한 결과 약 307만원, 총 3,070만원 정도의 경제적 파급효과 예상
 - 향후 2013년부터 2022년까지 10년 동안 할인율 5.5%의 현재가치로 전환된 편익규모는 총 2,193만원의 편익을 기대



〈표 4-6〉 해양(연) 보유 온누리호의 방송 및 신문 홍보 성과

| 연 도 | | 2003 | 2004 | 2005 | 2006 | 2007 | 평균 |
|---------|-----|------|------|------|------|------|------|
| 총 횟수(건) | 방 송 | 1 | 0 | 1 | 2 | 5 | 1.80 |
| | 신 문 | 1 | 4 | 11 | 7 | 12 | 7.00 |
| | 계 | 2 | 4 | 12 | 9 | 17 | 8.80 |

2.2. 경제적 타당성 편익분석 종합

2.2.1. 비용-편익 분석 결과

- 향후 10년간 태평양 미세플라스틱 거동분석 연구 사업에 따른 예상 경제적 B/C 비율은 할인율 5.5%를 적용한 경우 총 비용(Cost)이 181.8억원이 소요될 예정이며, 총 경제적 편익(Benefit)은 428.5억원이 발생하여 순편익은 246.7억원에 달하는 것으로 예상되고 이에 따른 B/C비율은 2.3로 추정됨

2.2.2. 경제적 파급효과 분석 결과

- 전문 인력양성 효과
 - 사업기간인 10년간 총 110명의 전문인력을 양성하고, 이를 통하여 총 45.7억원의 편익 달성 효과를 기대
- 방송·신문 홍보 효과
 - 방송 및 신문을 통한 대국민 해양과학기술 이해 고양에 기여할 경우, 10년간 총 추정 편익은 17.1억원임

〈표 4-7〉 태평양 미세플라스틱 거동분석 사업에 따른 비용-편익 분석 결과

(단위 : 억원)

| 구 분 | 경제적 편익(B) | 경제적 파급효과 | | 비용 (C) | 순편익 (B-C) | B/C 비율 |
|-----|--------------|----------|------------|--------|-----------|--------|
| | 해양기초과학 발전 가치 | 전문인력양성 | 방송·신문 홍보효과 | | | |
| 합 계 | 428.5 | 45.7 | 17.1 | 181.8 | 246.7 | 2.3 |



3 기술적 타당성 분석

3.1. 기존 연구사업과의 중복 및 연계성

- 국내에서 마이크로플라스틱을 대상으로 한 연구사업은 현재 전무하여, 기존 연구사업과의 중복성은 없음
- 국토해양부에서 2012년 하반기 중 수행 예정인 “해양쓰레기 오염 대응기술 개발 기획 연구”에 본 마이크로플라스틱 기획연구 내용을 연계하여 수행할 예정임
- 국토해양부 “국가 해양쓰레기 모니터링” 용역사업의 경우 국내 해안 표착 대형쓰레기를 대상으로 한 모니터링 사업으로 연구개발 내용은 없으며, 향후 마이크로플라스틱 연구개발 결과를 활용하여 국가단위의 모니터링 사업 확대 진행 시, 기존 “해양쓰레기 분포 현황 실태 조사”에 해안, 부유, 침적 마이크로플라스틱 쓰레기를 포함시킬 필요가 있음

3.2. 연구개발의 성공가능성

| 분야명 | 강약점 | 성공가능성 |
|------------|---|---|
| MP의 유입과 분포 | <ul style="list-style-type: none"> - 강점: 주요만 육상기인 해양오염 유입원과 경로에 대한 자료와 연구경험 보유하고 있으며, 선행 연구를 통해 남해 분포 기초 자료 확보 중 - 약점: MP의 유입원과 유입경로에 대한 자료 전무하고 부유 및 침적 MP 연구경험 부재 | <ul style="list-style-type: none"> - MP에 특화된 분석기술을 확보하면 기존 육상기인 오염물질의 유입원 중심 및 개발된 유역모델을 기반으로 MP의 유입원, 유입경로 및 유입량 산정 가능 - MP 시료 채취, 분리, 정량 및 식별을 확보하면 해역별 MP 오염현황 및 특성을 규명할 수 있음 |
| MP의 분해와 거동 | <ul style="list-style-type: none"> - 강점 : 국내 플라스틱 합성과 제조의 우수성 및 폴리머 관련 전문인력 다수 보유 - 단점 : 해양환경 조건에서 플라스틱의 분해와 거동 연구를 위한 장치와 시설의 부족 | <ul style="list-style-type: none"> - 해양 환경조건에서 MP의 분해와 풍화를 평가하는 기술은 선진국에서도 현재 개발을 시작한 분야로 해양환경 조건을 시뮬레이션 할 수 있는 시스템을 우선적으로 구축하면, MP의 분해와 풍화를 정량적으로 평가하여 MP 오염의 최대 현안 사항인 해양환경 조건에 따른 미세화와 분해의 시간을 산정할 수 있음 |



| 분야명 | 강약점 | 성공가능성 |
|---------------|--|--|
| MP 흡착/첨가 오염물질 | <ul style="list-style-type: none"> - 강점: 주요 MP 흡착 오염물질인 유기오염물질에 대한 분석 기술 및 환경오염 자료 확보 - 단점: 흡착/첨가 오염물질의 흡탈착 및 용출관련 정보 및 첨가제의 환경 중 오염 정보 부재 | <ul style="list-style-type: none"> - MP 흡착 오염물질의 연구 인프라, 기술 및 전문인력은 충분히 확보하고 있어 우선적인 연구개발로 성공가능성이 높으나, MP 첨가 오염물질의 경우 종류가 매우 다양하고 해양환경 조건에서 용출에 관한 정보가 세계적으로도 부재한 상태로 연구의 어려움이 예상되나, 주요 연구대상 첨가제의 종류의 선정과 용출시험 조건과 장치의 제작을 통해서 해결할 수 있을 것으로 평가함 |
| MP의 생물축적과 독성 | <ul style="list-style-type: none"> - 강점 : 나노물질 등 미세입자의 생물독성평가에 관한 노하우 및 기술 확보 - 단점 : 국내 생물축적 모니터링 경험 전무하며, 플라스틱을 대상 독성시험 경험 부재 | <ul style="list-style-type: none"> - 플라스틱의 해양생물에 대한 축적과 독성은 세계적으로도 자료가 극히 제한적이고 연구가 시작되는 분야로 모니터링 및 독성 실험 대상생물의 올바른 선정과 주요 종말점 선택 및 플라스틱과 흡착/첨가 오염물질의 복합적인 영향을 체계적으로 규명할 경우 위해성을 평가할 수 있을 것으로 평가함 |
| MP의 이동 | <ul style="list-style-type: none"> - 강점 : 국내 연안 및 동북아시아 해수유동에 대한 자료 및 모델 확보 - 단점: 플라스틱을 대상으로 한 이동 모델 부재 및 경험 부재 | <ul style="list-style-type: none"> - 국내 해수유동모형과 전문인력의 수준으로 볼 때, 플라스틱의 재질, 크기, 형태별 이동 등을 설명할 수 있는 변수의 종류 및 함수를 구해낼 경우 MP의 이동의 예측하는 모델의 개발은 성공가능성이 높음 |



V

연구개발 결과의 활용방안 및 기대효과

1 활용방안

- 정부의 플라스틱 해양쓰레기 오염 관리를 위한 중장기 대책 수립에 활용
- 국제사회의 마이크로플라스틱의 전지구적 오염평가에 활용
- 국제 해양쓰레기 관련 협약 대응 자료로 활용

2 기대효과

2.1. 기술적 측면

- 마이크로플라스틱에 의한 오염의 수준과 심각성 규명
- 마이크로플라스틱의 함유 유해물질의 생태계위해성 여부 확인
- 마이크로플라스틱의 분해 반감기 규명을 통한 해양잔존 기간 산정
- 마이크로플라스틱 이동 및 분포 예측 가능

2.2. 경제 산업적 측면

- 효율적인 마이크로플라스틱 오염 모니터링 방안 마련
- 해양쓰레기 관리대책의 선진화에 기여
- 마이크로플라스틱 오염으로부터 연안환경 및 관광자원 보호
- 마이크로플라스틱 쓰레기의 사후 수거 및 처리 비용 저감



VI 참고문헌

- 국토해양부, 환경부, 농림수산식품부, 해양경찰청 2009. 제1차 해양쓰레기 관리 기본계획.
- Abrusci, C., J.L. Pablos, T. Corrales, J. López-Marín, I. Marín, F. Catalina, 2011. Biodegradation of photo-degraded mulching films based on polyethylenes and stearates of calcium and iron as pro-oxidant additives. *Int. Biodeter. Biodegr.* 65(3), 451 - 459.
- Albertsson, A.C., 1978. Biodegradation of synthetic polymers. 2. Limited microbial conversion of C-14 in polyethylene to (CO₂)-C-14 by some soil fungi. *J. Appl. Polym. Sci.* 22, 3419.
- Albertsson, A.C., S.J. Karlsson, 1988. The three stages in degradation of polymers-polyethylene as a model substance. *J. Appl. Polym. Sci.* 35, 1298-1302.
- Al-Oufi, H., E. McLean, A.S. Kumar, M. Claereboudt, M. Al-Habsi, 2004. The effects of solar radiation upon breaking strength and elongation on of fishing nets. *Fish. Res.* 66(1), 115 - 119.
- Andrady, A.L., 2011. Microplastics in the marine environment. *Mar. Pollut. Bull.* 62(8), 1596-1605.
- Andrady, A.L., J.E. Pegram 1989. Degradable Plastics in the Marine Environment. International Conference on Recent Developments in Petrochemical and Polymer Technologies, Chulalongkorn University, Bangkok, Thailand, Chulalongkorn University.



- Andrady, A.L., J.E. Pegram 1990. Weathering of polyethylene (LDPE) and enhanced photodegradable polyethylene in the marine environment. *J. Appl. Polym. Sci.* 39, 363 - 370.
- Andrady, A.L., J.E. Pegram, Y. Tropsha 1993. Changes in carbonyl index and average molecular weight on embrittlement of enhanced-photodegradable polyethylenes. *J. Environ. Polym. Degrad.* 1(3), 171 - 179.
- Artham T., M. Doble 2012. Bisphenol A and metabolites released by biodegradation of polycarbonate in seawater. *Environ. Chem. Lett.* (In Press).
- Ashton K., L. Holmes, A. Turner 2010. Association of metals with plastic production pellets in the marine environment. *Mar. Pollut. Bull.* 60, 2050-2055.
- Barnes, D.K.A., 2002. Biodiversity - Invasions by marine life on plastic debris. *Nature* 416(6883), 808-809.
- Barnes, D.K.A., F. Galgani, R.C. Thompson, M. Barlaz 2009. Accumulation and fragmentation of plastic debris in global environments. *Philos. Trans. R. Soc. B* 364, 1985 - 1998.
- Betts K., 2008. Why small plastic particles may pose a big problem in the oceans. *Environ. Sci. Technol.* 42, 8995.
- Biesinger, M.C., P.L. Corcoran, M.J. Walzak 2011. Developing ToF-SIMS methods for investigating the degradation of plastic debris on beaches. *Surf. Interface Anal.* 43, 443 - 445.
- Bjorndal, K.A., A.B. Bolten, C.J. Lagueux 1994. Ingestion of marine debris by juvenile sea-turtles in coastal Florida habitats. *Mar. Pollut. Bull.* 28(3), 154-158.



- Boerger, C.M., G.L. Lattin, S.L. Moore, C.J. Moore 2010. Plastic ingestion by planktivorous fishes in the North Pacific Central Gyre. *Mar. Pollut. Bull.* 60(12), 2275-2278.
- Bolton, T.F., J.N. Havenhand, 1998. Physiological versus viscosity-induced effects of an acute reduction in water temperature on microsphere ingestion by trochophore larvae of the serpulid polychaete *Galeolaria caespitosa*. *Journal of Plankton Research* 20, 2153 - 2164.
- Brillant, M., B. MacDonald 2002. Postingestive selection in the sea scallop (*Placopecten magellanicus*) on the basis of chemical properties of particles. *Marine Biology* 141, 457 - 465.
- Browne, M.A., A. Dissanayake, T.S. Galloway, D.M. Lowe, R.C. Thompson 2008. Ingested microscopic plastic translocates to the circulatory system of the mussel, *Mytilus edulis* (L.). *Environ. Sci. Technol.* 42(13), 5026-5031.
- Browne, M.A., T.S. Galloway, R.C. Thompson 2010. Spatial patterns of plastic debris along Estuarine shorelines. *Environ. Sci. Technol.* 44, 3404-3409.
- Browne, M.A., T. Galloway, R. Thompson 2007. Microplastic – An Emerging Contaminant of Potential Concern? *IEAM* 3(4), 559 - 561.
- Carpenter, E.J., S.J. Anderson, G.R. Harvey, H.P. Miklas, B.B. Peck 1972. Polystyrene spherules in coastal waters. *Science*, 178(4062), 749-750.
- Carpenter. E.J., K.L. Smith 1972. Plastics on the Sagasso sea surface. *Science* 175, 1240-1241.
- Claessens M., S.D. Meester, L.V. Landuyt, K.D. Clerck, C.R. Janssen 2011. Occurrence and distribution of microplastics in marine sediments along the Belgian coast. *Marine Pollution Bulletin*, 62(10), 2199-2204.



- Cole M., P. Lindeque, C. Halsband, T.S. Galloway 2011. Microplastics as contaminants in the marine environment: A review. *Marine Pollution bulletin* 62, 2588-2597.
- Colton J.B., F.D. Knapp, B.R. Burns 1974. Plastic particles in surface waters of the Northwestern Atlantic. *Science* 185(4150), 491-497.
- Davison, P., R.G. Asch 2011. Plastic ingestion by mesopelagic fishes in the North Pacific Subtropical Gyre. *Mar. Ecol. Prog. Ser.* 432, 173-180.
- Denuncio, P., R. Bastida, M. Dassis, G. Giardino, M. Gerpe, D. Rodriguez 2011. Plastic ingestion in Franciscana dolphins, *Pontoporia blainvillei* (Gervais and d'Orbigny, 1844), from Argentina. *Mar. Pollut. Bull.* 62(8), 1836-1841.
- do Sul, J.A.I., I.R. Santos, A.C. Friedrich, A. Matthiensen, G. Fillmann 2011. Plastic Pollution at a Sea Turtle Conservation Area in NE Brazil: Contrasting Developed and Undeveloped Beaches. *Estuar. Coast.* 34(4), 814-823.
- Earls A.O., I.P. Axford, J.H. Braybrook 2003. Gas chromatography-mass spectrometry determination of the migration of phthalate plasticisers from polyvinyl chloride toys and childcare articles. *J. Chromatogr. A.* 983, 237-246.
- Eriksson, C., H. Burton 2003. Origins and biological accumulation of small plastic particles in fur seals from Macquarie Island. *Ambio* 32(6), 380-384.
- Galgani, F., D. Fleet, J.V. Franeker, S. Katsanevakis, T. Maes, J. Mouat, L. Oosterbaan, I. Poitou, G. Hanke, R. Thompson, E. Amato, A. Birkun, C. Janssen 2010. Task group 10 report: marine litter. In: Zampoukas, N. (Ed.), Marine Strategy Framework Directive. JRC, IFREMER & ICES.



- Goss K.U., 2011. Predicting equilibrium sorption of neutral organic chemicals into various polymeric sorbents with COSMO-RS. *Anal. Chem.* 83, 5304-5308.
- Graham, E.R., J.T. Thompson 2009. Deposit- and suspension-feeding sea cucumbers (Echinodermata) ingest plastic fragments. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology* 368(1), 22 - 29.
- Gregory, M.R., 1977. Plastic pellets on New Zealand beaches. *Marine Pollution Bulletin* 8, 82 - 84.
- Gregory, M.R., 1996. Plastic 'scrubbers' in hand cleansers: a further (and minor) source for marine pollution identified. *Marine Pollution Bulletin* 32(12), 867-871.
- Hart, M.W., 1991. Particle captures and the method of suspension feeding by echinoderm larvae. *The Biological Bulletin* 180, 12 - 27.
- Hirai H., H. Takada, Y. Ogata, R. Yamashita, K. Mizukawa, M. Saha, C. Kwan, C. Moore, H. Gray, D. Laursen, E.R. Zettler, J.W. Farrington, C.M. Reddy, E.E. Peacock, M.W. Ward 2011. Organic micropollutants in marine plastics debris from the open ocean and remote and urban beaches. *Mar. Pollut. Bull.* 62, 1683-1692.
- Köhler, A., 2010. Cellular fate of organic compounds in marine invertebrates. *Comparative Biochemistry and Physiology - Part A: Molecular & Integrative Physiology* 157, S8.
- Kwon, J.H., T. Wuethrich, P. Mayer, B.I. Escher 2009. Development of a dynamic delivery method for in vitro bioassays. *Chemosphere* 76, 83-90.
- Laist, D.W., 1997. Impacts of marine debris: entanglement of marinelife in marine debris including a comprehensive list of species with entanglement and ingestion records. In: Coe, J.M., Rogers, D.B. (Eds.),



- Marine Debris - Sources, Impacts and Solutions. *Springer-Verlag, New York* pp. 99 - 139.
- Lattin, G.L., C.J. Moore, A.F. Zellers, S.L. Moore, S.B. Weisberg 2004. A comparison of neustonic and zooplankton at different depths near the southern California shore. *Mar. Pollut. Bull.* 49, 291-294.
- Lee D.I., H.S. Cho, S.B. Jeong 2006. Distribution characteristics of marine litter on the sea bed of the East China Sea and the South Sea of Korea. *Estuarine, Coastal and Shelf Science* 70, 187-194.
- Lysekil and Flødevigen 2010. Pilot study report : Survey of microscopic anthropogenic particles in Skagerrak. *Havforskningsinstituttet, Institute of Marine Research* 21p.
- Maso, M., E. Garces, F. Pages, J. Camp 2003. Drifting plastic debris as a potential vector for dispersing Harmful Algal Bloom (HAB) species. *Sci. Mar.* 67(1), 107-111.
- Maragou N.C., A.A. Makri, E. Lampi, N.S. Thomaidis, M.A. Koupparis 2008. Migration of bisphenol A from polycarbonate baby bottles under real use conditions. *Food Additives Contam. A.* 25, 373-383.
- Mayer P., M.M. Fernqvist, P.S. Christensen, U. Karlson, S. Trapp 2007. Enhanced diffusion of polycyclic aromatic hydrocarbons in artificial and natural aqueous solutions. *Environ. Sci. Technol.* 41, 6148-6155.
- Meenakumari, B., K. Radhalakshmi 1988. Induced photooxidative degradation of nylon 6 fishing net twines. *Ind. J. Text. Res.* 13, 84 - 86.
- Meenakumari, B., K. Radhalakshmy 1995. Weathering of PA netting yarns. *Fish. Technol.* 32, 85 - 88.



- Meenakumari, B., K. Ravindran 1985a. Tensile strength properties of polyethylene netting twines under exposure to out-door and artificial UV radiation. *Fish. Technol.* 22, 82 - 86.
- Meenakumari, B., K. Ravindran 1985b. Effect of sunlight and UV radiation on mechanical strength properties of PA netting twines. *Ind. J. Text Res.* 10, 15 - 19.
- Morris A.W., E.I. Hamilton 1974. Polystyrene spherules in the Bristol Channel. *Marine Pollution Bulletin* 5(2), 26-27.
- Moore, C.J., G.L. Lattin, A.F. Zellers 2005. Density of plastic particles found in zooplankton trawls from coastal waters of California to the North Pacific Central Gyre. *The Plastic Debris Rivers to Sea Conference, Redondo Beach, California, USA.*
- Moore, C.J., S.L. Moore, M.K. Leecaster, S.B. Weisberg 2001. A comparison of plastic and plankton in the North Pacific Central Gyre. *Mar. Pollut. Bull.* 42(12), 1297-1300.
- Murray, F., P.R. Cowie 2011. Plastic contamination in the decapod crustacean *Nephrops norvegicus* (Linnaeus, 1758). *Mar. Pollut. Bull.* 62(6), 1207-1217.
- Ng K.L., J.P. Obbard 2006. Prevalence of microplastics in Singapore's coastal marine environment. *Mar. Pollut. Bull.* 52, 761-767.
- Ogi, H., Y. Fukumoto 2000. A sorting method for small plastic debris floating on the sea surface and stranded on sandy beaches. *北大水産業報*, 51(2), 71-93.
- Pace, M.L., M.D. Bailiff, 1987. Evaluation of a fluorescent microsphere technique for measuring grazing rates of phagotrophic microorganisms. *Marine Ecology Progress Series* 40, 185 - 193.



- Possatto, F.E., M. Barletta, M.F. Costa, J.A.I. do Sul, D.V. Dantas 2011. Plastic debris ingestion by marine catfish: An unexpected fisheries impact. *Mar. Pollut. Bull.* 62(5), 1098-1102.
- Reddy M.S., S. Basha, S. Adimurthy, G. Ramachandraiah 2006. Description of the small plastics fragments in marine sediments along the Alang-Sosiya ship-breaking yard, India. *Estuarine Coastal and Shelf Science* 68, 656-660.
- Rios L.M., C. Moore, P.R. Jones 2007. Persistent organic pollutants carried by synthetic polymers in the ocean environment. *Mar. Pollut. Bull.* 54, 1230-1237.
- Ryan G.P., C.J. Moore, J.A. van Franeker, C.L. Moloney 2009. Monitoring the abundance of plastic debris in the marine environment. *Phil. Trans. R. Soc. B* 364, 1999-2012.
- Sazima, I., O.B.F. Gadig, R.C. Namora, F.S. Motta 2002. Plastic debris collars on juvenile carcharhinid sharks (*Rhizoprionodon lalandii*) in southwest Atlantic. *Mar. Pollut. Bull.* 44(10), 1149-1151.
- Sudhakar, M., M. Doble 2008. Marine microbe-mediated biodegradation of low- and high-density polyethylenes. *Int. Biodeter. Biodegrad.* 61(3), 203 - 213.
- Ter Laak, T.L., M.A. ter Bekke, J.L.M. Hermens 2009. Dissolved organic matter enhances transport of PAHs to aquatic organisms. *Environ. Sci. Technol.* 43, 7212-7217.
- Teuten E.L., S.J. Rowland, T.S. Galloway, R.C. Thompson 2007. Potential for plastics to transport hydrophobic contaminants. *Environ. Sci. Technol.* 41, 7759-7764.
- Teuten E.L., J.M. Saquing, D.R.U. Knappe, M.A. Barlaz, S. Jonsson, A. BjArn, S.J. Rowland, R.C. Thompson, T.S. Galloway, R. Yamashita, D. Ochi, Y. Watanuki,



- C. Moore, P.H. Viet, T.S. Tana, M. Prudente, R. Boonyatumanond, M.P. Zakaria, K. Akkhavong, Y. Ogata, H. Hirai, S. Iwasa, K. Mizukawa, Y. Hagino, A. Imamura, M. Saha, H. Takada 2009. Transport and release of chemicals from plastics to the environment and to wildlife. *Phil. Trans. Royal. Soc. B* 364, 2027-2045.
- Thompson, R.C., Y. Olsen, R.P. Mitchell, A. Davis, S.J. Rowland, A.W.G. John, D. McGonigle, A.E. Russell 2004. Lost at sea: Where is all the plastic? *Science* 304(5672), 838-838.
- Thomas, S.N., C. Hridayanathana 2006. The effect of natural sunlight on the strength of polyamide 6 multifilament and monofilament fishing net materials. *Fish. Res.* 81(2 - 3), 326 - 330.
- Tomas, J., R. Guitart, R. Mateo, J.A. Raga 2002. Marine debris ingestion in loggerhead sea turtles, *Caretta caretta* from the Western Mediterranean. *Mar. Pollut. Bull.* 44(3), 211-216.
- Tourinho, P.S., J.A.I. do Sul, G. Fillrann 2010. Is marine debris ingestion still a problem for the coastal marine biota of southern Brazil? *Mar. Pollut. Bull.* 60(3), 396-401.
- Turner A., L. Holmes 2011. Occurrence, distribution and characteristics of beached plastic production pellets on the island of Malta (central Mediterranean). *Marine Pollution Bulletin* 62, 377-381.
- Uneputty, P., S.M. Evans 1997. The impact of plastic debris on the biota of tidal flats in Ambon Bay (eastern Indonesia). *Mar. Environ. Res.* 44(3), 233-242.
- van Franeker, J.A., C. Blaize, J. Danielsen, K. Fairclough, J. Gollan, N. Guse, P.L. Hansen, M. Heubeck, J.K. Jensen, G.L. Guillou, B. Olsen, K.O. Olsen, J. Pedersen, E.W.M. Stienen, D.M. Turner 2011. Monitoring plastic



ingestion by the northern fulmar *Fulmarus glacialis* in the North Sea. *Environmental Pollution* 159, 2609 - 2615.

Van A., C.M. Rochman, E.M. Flores, K.L. Hill, E. Vargas, S.A. Vargas 2012. Persistent organic pollutants in plastic marine debris found on beaches in San Diego, California. *Chemosphere* 86, 258-263.

Ward, J.E., S.E. Shumway 2004. Separating the grain from the chaff: particle selection in suspension- and deposit-feeding bivalves. *J. Exp. Mar. Biol. Ecol.* 300(1-2), 83-130.

Weis, P., J.S. Weis, A. Greenberg, T.J. Nosker 1992. Toxicity of construction materials in the marine-environment - a comparison of chromated-copper-arsenate-treated wood and recycled plastic. *Arch. Environ. Con. Tox.* 22(1), 99-106.

Wilson, D.S., 1973. Food size selection among copepods. *Ecology* 54, 909 - 914.

Zarfl, C., D. Fleet, E. Fries, F. Galgani, G. Gerdt, G. Hanke, M. Matthies 2011. Microplastics in oceans. *Marine Pollution Bulletin* 62, 1589 - 1591.