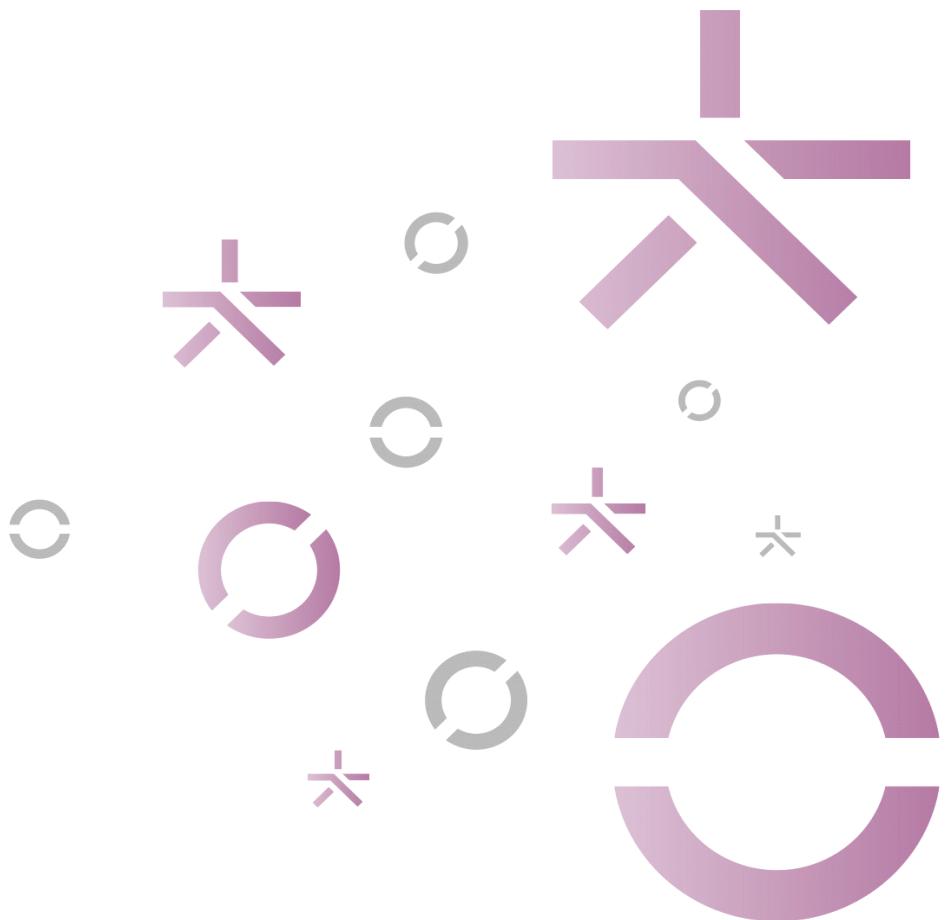


인천 연안 미세플라스틱 특성 연구

최여울



연구책임

최여울

경제환경연구부 연구위원

연구참여

백승아

경제환경연구부 전임연구원

본 연구 결과는 연구진의 견해로서
인천광역시의 정책과는 다를 수 있습니다.

1. 서론

1) 연구의 배경 및 필요성

- 연안의 미세플라스틱은 해양 생태계를 위협하는 오염원으로, 인천 연안에 분포하는 미세플라스틱의 영향은 간과할 수 없음. 하지만 인천 연안을 대상으로 한 미세플라스틱 연구는 현재까지 미비한 실정임.
 - 인천시는 2020년부터 연안의 미세플라스틱 모니터링을 진행하고 있지만, 데이터의 부족 및 자료의 활용도가 낮아 수생태계 영향에 관한 연구가 미흡함.
- 인천 연안의 경우, 다양한 배출원으로부터 미세플라스틱이 유입되기 때문에 지역 특성을 반영한 미세플라스틱 연구가 필요함.
 - 한강, 인천항 등 배출원으로부터 인천 연안으로 미세플라스틱이 유입될 수 있음.
 - 미세플라스틱으로 인한 시민의 건강과 연안 생태계를 보호하기 위해 연안에 분포하는 미세플라스틱의 특성을 파악하는 과정이 필요함.

2) 연구 목적

- 본 연구는 수생태계 관점에서 미세플라스틱 연구의 필요성을 인지하고 인천 연안에 분포하는 미세플라스틱의 관리 전략을 파악하고자 함. 이를 위해 인천 연안의 미세플라스틱 특성을 분석하여 수생태계 보호를 위한 미세플라스틱 저감 방안을 제언함.

3) 연구 범위 및 방법

- 인천 연안의 미세플라스틱을 규명하기 위해 다음의 연구 흐름을 반영함.
 - 정의 : 미세플라스틱 개념
 - 현상 : 인천 연안의 미세플라스틱 분포
 - 기원 : 인천 연안의 미세플라스틱 유입원
 - 예측 : 인천 연안의 미세플라스틱 위험성
 - 전략 : 인천 연안의 미세플라스틱 저감 방안

2. 미세플라스틱 특성

1) 미세플라스틱 정의 및 종류

- 플라스틱은 폴리머와 첨가제가 혼합되어 원하는 모양으로 가공할 수 있는 합성수지로, 입자의 크기가 5mm 이하인 플라스틱을 미세플라스틱(microplastic)으로 분류함.
- 미세플라스틱은 생성 유형에 따라 1차 미세플라스틱과 2차 미세플라스틱으로 구분함.
 - 1차 미세플라스틱은 인위적으로 작은 크기의 입자를 제조하여 제품(세정제, 화장품, 치약, 연마제, 페인트 등)에 함유됨.
 - 2차 미세플라스틱은 플라스틱 제품이 분해 과정을 거쳐 미세플라스틱으로 변한 형태를 의미함.
- 미세플라스틱은 산소, 질소, 황 원자 등이 부착된 탄소 원자 사슬이 반복적으로 연결된 구조이며, 대표적인 성분은 polypropylene(PP), polyethylene(PE), polystyrene(PS) 등이 있음.

2) 미세플라스틱 연구 동향

- 기존 연구에 따르면 하천 상류보다는 하류에서, 본류보다는 지류에서 미세플라스틱의 농도가 높게 나타남.
 - 하천 하류에는 비교적 작은 크기의 미세플라스틱이 분포하였고, 주로 2차 미세플라스틱임을 확인함.
- 하수처리장으로 유입된 미세플라스틱은 공정을 거쳐 제거되지만, 일부 미세플라스틱은 제거되지 않은 상태로 방류수로 배출됨.
 - 크기가 작은 미세플라스틱은 상대적으로 하수처리 공정을 통해 제거가 어려움.
- 국내외해역 주변의 산업활동, 주거 형태, 육지로부터의 거리 등의 특성에 따라 미세플라스틱의 분포 및 성분이 달라짐.
- 미세플라스틱은 대기, 수계, 토양, 생물체 등에 잔류하여 인체 및 생태계에 독성 영향을 일으킴.

3. 인천 연안 미세플라스틱 분포

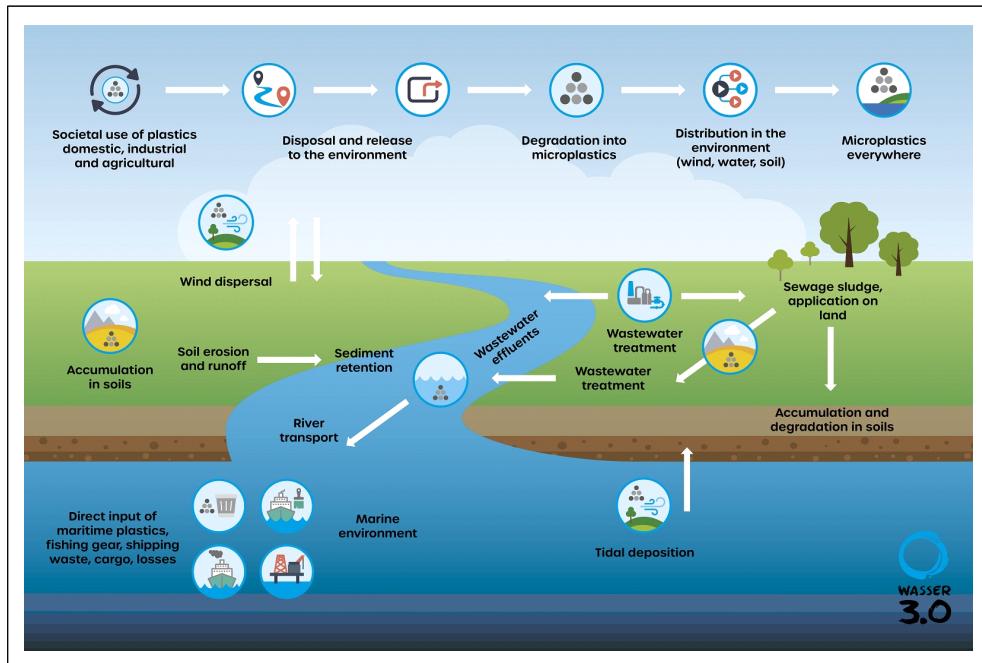
- 한강 및 인천 연안을 중심으로 수행한 기존 연구 10종을 인용하여 미세플라스틱의 분포를 파악함.
 - 지표수를 중심으로 동일 지점의 미세플라스틱 농도는 평균값을 산출하였고, 시료 내 미세플라스틱 크기는 100~300㎛ 이상으로 설정함.
 - 연구 대상 지점은 다음과 같음: 한강 상류, 한강 중·하류, 임진강, 김포-강화도-볼음도 인근 연안, 영종도-인천 북항 인근 연안, 덕적도 인근 연안
- 조사 결과 임진강의 미세플라스틱 농도가 가장 낮았고, 강화도 인근 연안에서 가장 높게 나타남. 미세플라스틱은 한강 상류 3.48, 한강중·하류 3.4, 임진강 1.71, 강화도 인근 6.59, 영종도 인근 4.06, 덕적도 인근 3.01개/m³로 분포함.
 - 한강 상류는 미세플라스틱 공급원으로 작용하는 팔당댐의 영향, 한강 중·하류는 주거 및 산업 지역을 관통하여 배출되는 미세플라스틱의 영향을 받은 것으로 추정함.
 - 임진강은 인근에 오염원이 많지 않아 다른 지점에 비해 상대적으로 미세플라스틱의 농도가 낮음.
 - 육상 활동으로 발생한 미세플라스틱이 한강에 유입되어 하구에 축적된 결과, 강화도 인근 연안의 미세플라스틱 농도가 높게 관찰된 것으로 추정함.
 - 영종도 인근 연안은 하수처리장 및 육상 기인 미세플라스틱의 영향을 받으며, 덕적도 인근 연안은 육상에서 비교적 먼 거리에 위치하므로 미세플라스틱의 농도가 낮음.

4. 인천 연안 미세플라스틱 유입원

- 연안에 잔류하는 미세플라스틱의 유입원은 육상 기인과 해상 기인으로 구분함.
 - 육상 기인은 하수처리장 및 육상 배출 폐기물이며, 해상 기인은 어업 활동 및 선박운송으로 분류함.
- 인천의 하수처리장은 총 14곳이며 이 중 해양으로 방류하는 하수처리장은 8곳임. 시나리오를 기반으로 해당 하수처리장으로부터 인천 연안으로 유입되는 미세플라스틱의 양을 추정한 결과, 연간 약 3조 개, 18톤의 미세플라스틱이 연안으로 방류되는

것으로 나타남. 성분 및 형태 분석을 통해 하수처리장에서 방류되는 미세플라스틱은 주로 산업 및 가정 활동을 통해 생성된 것임을 확인함.

[요약 그림 1] 미세플라스틱의 해양 유입경로



자료(출처): WASSER 3.0

- 한강은 하수 및 폐수 방류, 도시, 산업, 주변 하천 등을 통해 유입된 미세플라스틱이 해양으로 이동하는 경로임. 시나리오에 따라 한강에서 인천 연안으로 유입되는 미세플라스틱은 연간 약 30조 개, 80톤으로 추정함.
- 인천 연안에 잔류하는 쓰레기의 76.5%는 플라스틱이며, 어업 활동과 관련이 있는 스티로폼 제품(부표, 용기 등)과 어업용 밧줄의 비중이 높음.
 - 스티로폼 부표에서 발생하는 미세플라스틱은 발포폴리스티렌(Expanded Polystyrene, EPS)으로 나타남.
- 본 연구에서 조사한 한강 상류, 한강 중·하류, 임진강, 강화도 인근, 영종도 인근, 덕적도 인근의 미세플라스틱 성분은 주로 PE(polyethylene), PP(polypropylene), PS(polystyrene)가 검출됨.

- 해당 성분은 플라스틱 제품 제조 시 가장 흔하게 사용되기 때문에 환경에 잔류할 가능성이 높음. 또한 물보다 밀도가 작거나 비슷한 저밀도 입자이므로, 표층을 수집하는 모니터링 분석 시 많이 검출될 수 있음.
- 인천 연안(강화도, 영종도, 덕적도 인근)에서 유의미하게 검출된 미세플라스틱 성분은 dye(페인트), EVA(ethylene vinyl acetate), PS 입자로 나타남.
 - 선박 코팅제로 사용하는 페인트 입자는 인천항 및 선박의 이동 경로를 따라 영종도와 덕적도 인근에서 검출됨.
 - 방수용 플라스틱, 발포 고무 등 제품에 사용하는 EVA 입자는 육상 배출 폐기물로부터 풍화작용을 거쳐 연안으로 유입된 것으로 추정함.
 - 스티로폼 부표 성분인 PS는 어업 활동을 통해 발생하며, 덕적도 인근 지점에서 높은 비율로 분포함.

5. 인천 연안 미세플라스틱 위해성

- 위해성은 환경으로 배출되는 화학물질이 생태계에 유해한 영향을 줄 가능성을 의미하며, 화학물질의 유해성과 노출량에 의해 결정함. 본 연구에서는 인천 연안에 분포하는 미세플라스틱이 수생생물에 미치는 영향(위해성)을 예측함.
- 미세플라스틱의 독성자료를 토대로 수생생물에 유해한 영향이 나타나지 않을 농도(예 측무영향농도)와 조사지점의 미세플라스틱 분포를 비교한 결과, 지표수 내 100~300 μm 이상의 미세플라스틱 입자가 수생생물에 영향을 줄 가능성이 높지 않음을 확인함.(단, 해당 결과는 인천 연안 중 일부 지점의 지표수를 대상으로 일정 크기 이상 미세플라스틱만을 고려하였기 때문에 실제보다 과소평가 되었을 가능성이 높음.)
- 플라스틱 배출 시나리오로 볼 때, 장기적으로 미세플라스틱이 수생생물에 영향을 줄 수 있음을 추정함. 또한 전체 연안을 대상으로 모든 미세플라스틱 입자를 고려하면 수생생물의 영향을 좀 더 명확하게 예측할 것으로 기대함.

6. 정책제언

- 육상에서부터 인천 연안으로 유입되는 육상 기인 미세플라스틱을 저감하기 위해 하수처리시설 효율 개선 및 플라스틱 포집 장치 설치를 제안함.
 - 하수처리시설 효율 개선: 현재 처리 공정으로는 미세플라스틱 제거효율이 높지 않고, 특히 작은 크기의 입자는 여과가 어려움. 하여, 하수처리 전처리 및 후처리 기술을 도입하여 연안으로 배출되는 미세플라스틱을 줄이는 방안을 제안함.
 - 플라스틱 포집 장치 설치: 인천은 한강하구 및 연안을 포함하는 지역적 특징이 있으므로 하구에 플라스틱 포집 장치를 설치하여 해상으로 유입되는 플라스틱의 선제적인 제거가 필요함.
- 해상 기인 미세플라스틱을 저감하기 위해 해양 쓰레기 수거, 친환경 해양 시설물 설치, 선박운송 관리를 제안함.
 - 해양 쓰레기 수거: 인천시는 매년 해상에 잔류하는 수천 톤의 쓰레기를 수거하고 있으며, 2025년까지 스마트 해양 환경 관리시스템을 구축할 예정임. 해당 정책의 장기적 성과를 위해서는 지자체와 정부의 지속적인 관심과 노력이 필요함.
 - 친환경 해양 시설물 설치: 스티로폼 부표로 인해 생성되는 플라스틱 파편을 저감하기 위해 인천 해안에 표류하는 스티로폼 부표를 전면 철거하고 친환경(생분해성) 소재로의 교체를 제안함.
 - 선박운송 관리: 선박으로부터 발생하는 미세플라스틱을 최소화하기 위해 친환경 페인트 사용 인증 제도를 도입하거나 인센티브를 제공하는 전략이 필요함.
- 연안 내 미세플라스틱을 저감하기 위해 지역 및 국가 간 협력이 필요함.
 - 인천 연안에 분포하는 미세플라스틱은 육상 및 해상 등 다양한 유입원의 영향을 받으므로, 인접 지역 및 국가 간의 발생 원인과 영향을 이해해야 함.
 - 정보 공유 및 데이터베이스 구축: 하천 및 해양을 공유하는 지역과 국가는 미세플라스틱 발생, 분포, 관리 등의 정보를 주기적으로 공유해야 함.
 - 해양 관리 정책 마련: 미세플라스틱 관리 협의체 구성, 지원금 확보 등을 통해 지역 및 국가의 공동 목표를 설정하고 미세플라스틱 저감을 위한 협력을 강화해야 함.

차례

TABLE OF CONTENTS

1 서론

1. 연구의 배경 및 필요성	3
2. 연구 목적	4
3. 연구 범위 및 방법	4

2 미세플라스틱 특성

1. 미세플라스틱 정의	9
2. 미세플라스틱 종류	10
3. 미세플라스틱 연구 동향	16
4. 미세플라스틱 독성	36

3 인천 연안 미세플라스틱 분포

1. 인천 연안의 특징	45
2. 인천 연안의 미세플라스틱 연구 동향	47
3. 인천 연안의 미세플라스틱 분포	56
4. 소결	65

4 인천 연안 미세플라스틱 유입원

1. 육상 기인 미세플라스틱 유입원	69
2. 해상 기인 미세플라스틱 유입원	83
3. 인천 연안의 미세플라스틱 성분	90
4. 소결	96

5 인천 연안 미세플라스틱 위해성

1. 위해성의 개념	101
2. 미세플라스틱의 수생생물 유해성	103
3. 미세플라스틱의 수생생물 위해성	109
4. 소결	112

차례

TABLE OF CONTENTS

6 결론

1. 연구 결과 요약	115
2. 정책제언	117
3. 연구 한계	121
참고문헌	123

표 차례

LIST OF TABLES

[표 2-1] 미세플라스틱의 유형	11
[표 2-2] 양쯔강 하구 및 연안 해역의 미세플라스틱 분포	12
[표 2-3] 샌프란시스코 만 중부 및 남부 지표수의 미세플라스틱 분포	13
[표 2-4] 미세플라스틱의 구조 및 물리화학적 특성	14
[표 2-5] 금강수계의 입자크기·종류별 미세플라스틱 분포 비율	23
[표 2-6] 국가별 하·폐수처리장의 미세플라스틱 분포	26
[표 2-7] 하수처리장 내 미세플라스틱 구성성분	27
[표 2-8] 탄천 수계의 미세플라스틱 분포	28
[표 3-1] 조사 지점별 EPS와 Non-EPS 미세플라스틱 농도	51
[표 3-2] Kwon et al.(2020) 연구의 조사 지점	51
[표 3-3] 미세플라스틱 크기별 형태별 평균 풍부도	53
[표 3-4] 한강 및 인천 연안의 미세플라스틱 연구 목록	57
[표 3-5] 하수처리장 인근 수계의 미세플라스틱 분포	64
[표 4-1] 인천광역시 하수처리시설 현황	71
[표 4-2] 조사 대상 시설 현황	72
[표 4-3] 조사 대상 하수처리장을 통한 미세플라스틱의 연간 해양 유입량	74
[표 4-4] 인천 하수처리장으로부터 해양으로 유입되는 미세플라스틱 유입량	74
[표 4-5] 조사 대상 시설 현황	75
[표 4-6] 한강 미세플라스틱의 시나리오별 해양 유입량 추정	80
[표 4-7] 인천의 해안 쓰레기 분포	84
[표 4-8] 유형별 인천 해안 쓰레기 분포(2022년 기준)	85
[표 4-9] 최근 5년간 스티로폼 부표 발생량	88
[표 5-1] 미세플라스틱 종민감분포(SSD)에 사용한 수생 생물종	106
[표 5-2] 미세플라스틱 분포 및 예측무영향농도	109

그림 차례

LIST OF FIGURES

[그림 1-1] 연구모식도	5
[그림 2-1] 크기에 따른 플라스틱 입자 분류	10
[그림 2-2] 형태에 따른 미세플라스틱 분류	12
[그림 2-3] 한강 본류 및 지류 시료 채취지점	17
[그림 2-4] 한강수계의 미세플라스틱 농도	18
[그림 2-5] 대전광역시 주요 하천 시료 채취지점	19
[그림 2-6] 금강수계의 미세플라스틱 농도	20
[그림 2-7] 한강수계의 미세플라스틱 종류별 분포 현황	21
[그림 2-8] 한강수계의 미세플라스틱 형태별 분포 현황	22
[그림 2-9] 하수처리장의 미세플라스틱 배출 분포	24
[그림 2-10] 탄천 수계의 하수처리장 공정	25
[그림 2-11] 거제도 동부의 연안 외·내 해역 및 진해만 조사 지점	29
[그림 2-12] 거제 동부해역의 미세플라스틱의 종류 및 분포	30
[그림 2-13] 진해만의 미세플라스틱 형태	31
[그림 2-14] 남해 해역의 미세플라스틱 조사지점	32
[그림 2-15] 남해 해역의 미세플라스틱 형태 조성	33
[그림 2-16] 남해 해역의 미세플라스틱 조성	34
[그림 2-17] 카스피해 연안에서 수집한 미세플라스틱 크기(a) 및 종류(b)	35
[그림 2-18] 토스카나 해안의 미세플라스틱 크기 및 종류 비율(%)	36
[그림 2-19] 미세플라스틱의 인체 유입경로	37
[그림 2-20] Danopoulos et al.(2021) 연구요약	38
[그림 2-21] 폴리프로필렌 미세플라스틱 노출을 통한 폐 손상 경로	39
[그림 2-22] 미세플라스틱이 축적된 물벼룩을 섭취한 어류의 뇌 영향	41
[그림 2-23] 미세플라스틱의 물벼룩 체내 이동 경로	42
[그림 2-24] 물벼룩 배아의 대조군 및 노출군의 지방 소립 관찰	42
[그림 3-1] 연안의 정의	45
[그림 3-2] 인천 연안의 범위	46
[그림 3-3] Chae et al.(2015) 연구의 조사 지점	47
[그림 3-4] 미세플라스틱 조성 비율	48

그림 차례

LIST OF FIGURES

[그림 3-5] Jung et al.(2021) 연구의 조사지점	49
[그림 3-6] Kim et al.(2015) 연구의 조사 지점	50
[그림 3-7] 지역별 미세플라스틱 크기 및 형태별 분포도	52
[그림 3-8] 미세플라스틱 시료 채취 방법	54
[그림 3-9] 모래 퇴적물의 미세플라스틱 농도 및 조성 분석 결과	56
[그림 3-10] 한강 및 인천 연안의 미세플라스틱 분포	58
[그림 3-11] 댐 상류 및 하류 퇴적물의 미세플라스틱 분포	59
[그림 3-12] 수도권 인구밀도	61
[그림 3-13] 임진강과 한강 하류의 BOD	62
[그림 3-14] 남해 외해역 미세플라스틱 농도분포	63
[그림 3-15] 제주도 해역의 미세플라스틱 분포	65
[그림 3-16] 한강 및 인천 연안 미세플라스틱 분포 결과	66
[그림 4-1] 미세플라스틱 유입원	69
[그림 4-2] 하수처리장 방류수의 미세플라스틱 조성	73
[그림 4-3] 하수처리장 내 미세플라스틱 성분 및 크기 분포	76
[그림 4-4] 하수처리장 내 미세플라스틱 형태 분포	77
[그림 4-5] 미세플라스틱 거동	78
[그림 4-6] 한강하구 조사지점 및 채취지점 모식도	79
[그림 4-7] 시료 채취 조사지점	81
[그림 4-8] 한강 유역의 미세플라스틱 농도 및 크기별 분포	81
[그림 4-9] 미세플라스틱의 형태별 분포	82
[그림 4-10] 국가 해안 쓰레기 모니터링 대상 지역	83
[그림 4-11] 2018~2022년 해안 쓰레기 종류	85
[그림 4-12] 2018~2022년 해안 쓰레기의 플라스틱 형태	87
[그림 4-13] 인천·경기 연안의 미세플라스틱 조사지점 및 풍부도	89
[그림 4-14] 인천·경기 연안의 미세플라스틱 분포 비율	89
[그림 4-15] 국내외 미세플라스틱 풍부도	90
[그림 4-16] 모니터링 지점별 미세플라스틱 성분	91
[그림 4-17] 담수 내 미세플라스틱 검출 빈도	93

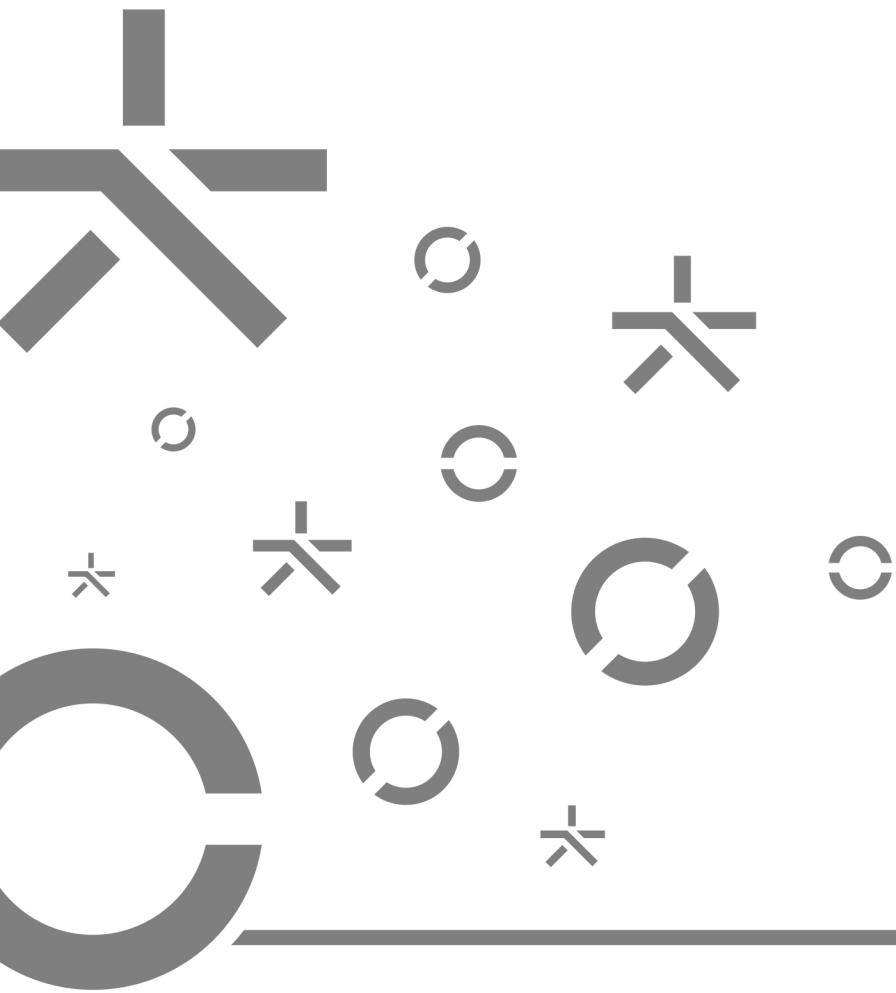
그림 차례

LIST OF FIGURES

[그림 4-18] 인천항 항로 개요도	94
[그림 4-19] 인천 및 경기 연안 지표수의 미세플라스틱 조성 비율 및 검출 빈도	95
[그림 4-20] 한강 및 인천 연안의 미세플라스틱 성분	97
[그림 5-1] 화학물질의 위해성	102
[그림 5-2] 생태위해성평가의 절차	103
[그림 5-3] 용량-반응 곡선의 독성 지표	104
[그림 5-4] 종민감도분포(Species Sensitivity Distribution, SSD) 지표	105
[그림 5-5] 미세플라스틱의 종민감도분포(SSD) 곡선(1)	107
[그림 5-6] 미세플라스틱의 종민감도분포(SSD) 곡선(2)	108
[그림 5-7] 미세플라스틱의 위해성 예측 절차	109
[그림 5-8] 플라스틱 배출 시나리오에 따른 해양 미세플라스틱 예측	111
[그림 5-9] 기간에 따른 전 세계 해양 미세플라스틱의 분포	111
[그림 6-1] 하수처리시설의 미세플라스틱 제거 기술 개발	117
[그림 6-2] 미국 하천·하구의 플라스틱 포집 장치	118
[그림 6-3] 스마트 해양 환경 관리시스템 구축 개념도	119

1

서론



서론

1. 연구의 배경 및 필요성

미세플라스틱은 5mm 크기 이하의 플라스틱 입자로, 연안으로 유입·잔류하는 플라스틱이 광분해 또는 풍화작용을 거쳐 변형된 형태를 의미한다. 2018년부터 국내 연안에서 연평균 26,209개의 플라스틱이 수거된다는 점을 고려할 때(남명숙 외, 2022), 국내 연안에서의 미세플라스틱 영향은 간과할 수 없다. 실제로 인천·경기 해안은 전 세계 미세플라스틱의 오염지역 2위로 조사될 만큼(Hurley et al., 2018) 인천 연안의 미세플라스틱 오염은 심각하다. 연안에 잔류하는 미세플라스틱은 해양 생태계를 위협하는 오염원이며, 지속 가능한 환경을 유지하기 위해서는 미세플라스틱에 대한 이해가 필요하다.

이러한 상황에도 불구하고 인천 연안을 대상으로 한 미세플라스틱 연구는 미비한 실정이다. 인천시가 2020년부터 연안을 대상으로 미세플라스틱을 모니터링하고 있지만 현재로서는 데이터가 부족하며, 이를 활용한 수생태계 영향에 관한 연구가 미흡하다. 인천 연안은 한강하구를 포함하고 국내 2위 규모의 인천항이 위치하는 등 다양한 배출원으로부터 미세플라스틱이 유입되기 때문에 지역 특성을 반영한 접근법이 필요하다.

현재 국내에서는 「화장품 안전기준 등에 관한 규정」 등 제품 중심의 미세플라스틱 관리 규정만 지정되어 있고, 국내 해양에 분포하는 미세플라스틱에 대한 정부와 지자체의 규정은 부재한 실정이다. 미세플라스틱으로 인한 인천시민의 건강과 인천 연안의 생태계를 보호하기 위해서는 연안에 분포하는 미세플라스틱의 특성을 파악하는 과정이 선행되어야 한다. 하여 본 연구에서는 수생태계 관점에서의 미세플라스틱 연구 필요성을 인지하고, 인천 연안에 분포하는 미세플라스틱의 관리 전략을 제안하고자 한다.

2. 연구 목적

본 연구는 인천 연안의 미세플라스틱 특성을 분석하여 수생태계 보호를 위한 방안을 제안하였다. 우선 미세플라스틱의 형태학적 특성을 파악하고 인천 연안의 지점별 미세플라스틱 분포 및 성분을 분석하였다. 또한 기존 문헌을 통해 인천 연안의 미세플라스틱 유입원을 추정하고, 미세플라스틱 분포 및 독성자료를 토대로 수생태계 위해성을 예측하여 인천 연안에 분포하는 미세플라스틱 저감 방안을 제안하였다.

3. 연구 범위 및 방법

인천 연안에 잔류하는 미세플라스틱을 규명하기 위해 본 연구는 “[정의] 미세플라스틱 개념-[현상] 미세플라스틱 분포-[기원] 미세플라스틱 유입원-[예측] 미세플라스틱 위해성-[전략] 미세플라스틱 정책제언” 순으로 내용을 구성하였다. 미세플라스틱에 대한 기본 지식을 바탕으로 인천 연안의 미세플라스틱 분포를 파악하고, 해당 플라스틱의 유래를 추정하는 과정을 거쳐 플라스틱의 수생태계 영향을 예측하였다. 연구 결과를 토대로 최종적으로는 미세플라스틱의 저감 방안을 전략으로 제시하였다.

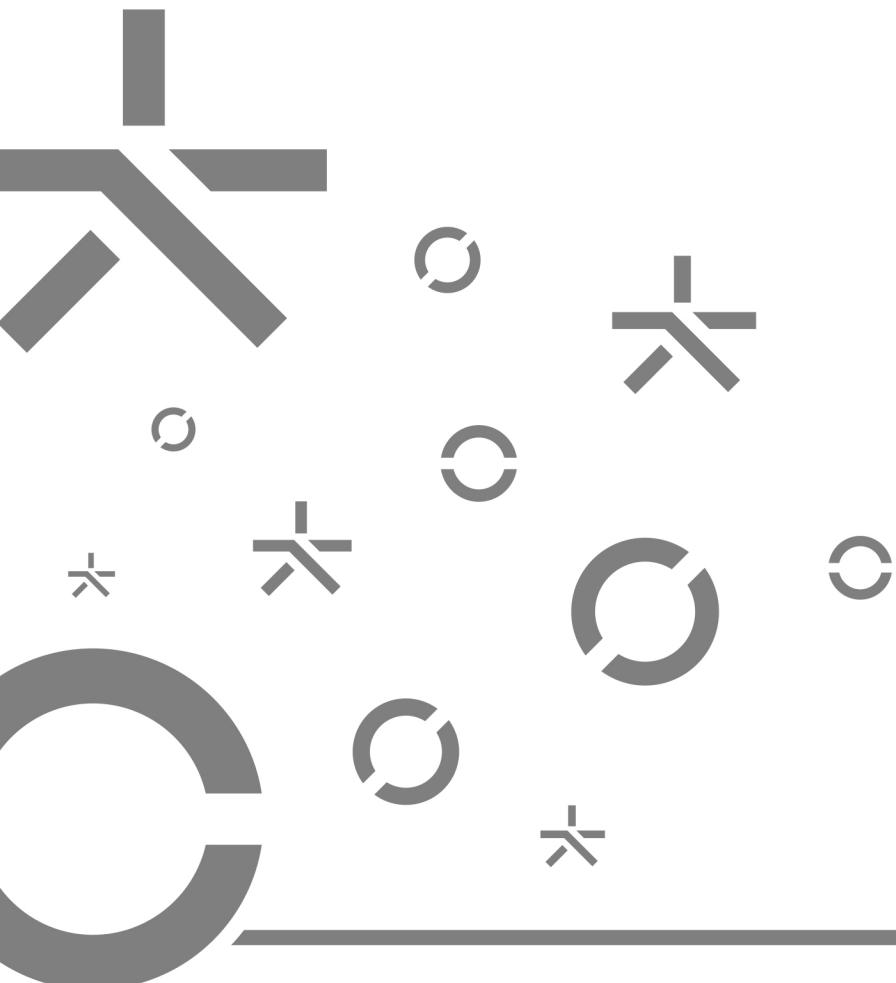
2장에서는 미세플라스틱의 전반적인 특성에 대해 파악하였다. 미세플라스틱의 정의와 종류, 형태, 성분에 대한 개념을 정리하고, 국내외 수계를 중심으로 수행한 미세플라스틱 연구 동향, 미세플라스틱의 인체 및 생물 영향을 조사하였다. 3장에서는 한강 및 인천 연안을 중심으로 수행한 10종의 연구 결과를 바탕으로 지점별 미세플라스틱 분포를 규명하였다. 4장에서는 앞서 인용한 참고문헌을 토대로 한강과 인천 연안의 미세플라스틱 유입원을 예측하였다. 5장에서는 수계에 서식하는 생물종의 독성자료를 활용하여 인천 연안에 서식하는 수생생물의 미세플라스틱 위해성을 추정하였고, 6장에서는 인천 연안에 분포하는 미세플라스틱 저감 방안을 제안하였다.

[그림 1-1] 연구모식도



2

미세플라스틱 특성



미세플라스틱 특성

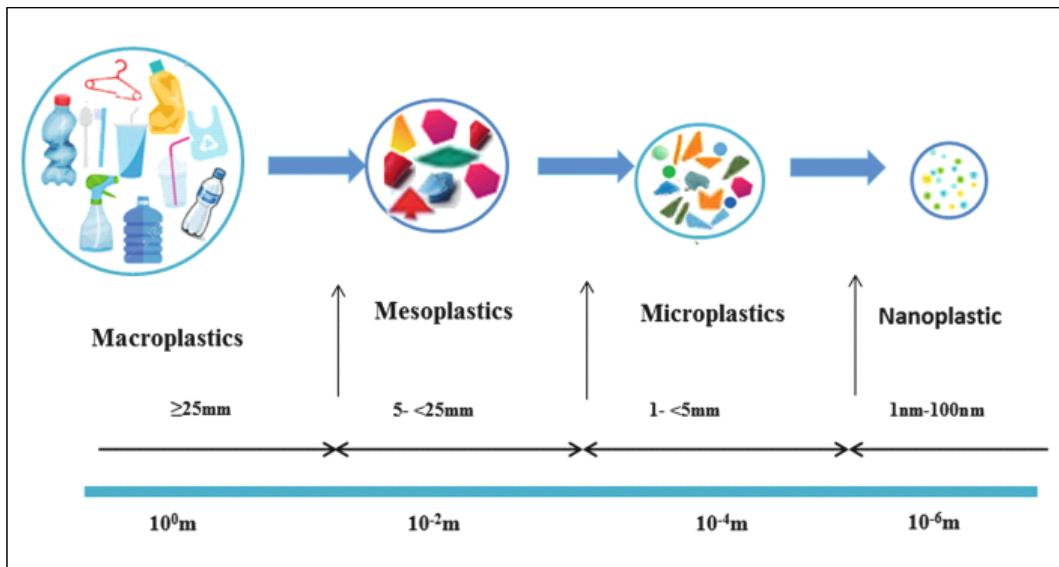
1. 미세플라스틱 정의

플라스틱은 열과 압력을 가해 원하는 모양으로 가공할 수 있는 합성수지이며, 미세플라스틱(microplastic)은 지구상에 존재하는 작은 크기의 플라스틱을 의미한다. 미세플라스틱은 화장품, 의류, 포장재 등 생활용품뿐만 아니라 산업공정 등의 다양한 경로로부터 생성되어 환경으로 유입된다(위키백과, 2023, 미세플라스틱).

미세플라스틱은 폴리머와 첨가제가 혼합된 고체 플라스틱 입자로, 미국 해양대기청(National Oceanic and Atmospheric Administration)과 유럽화학물질청(European Chemical Agency)에서는 5mm 이하인 플라스틱을 미세플라스틱으로 분류한다(Wikipedia, 2023). 이전에는 미세플라스틱의 정의와 분류에 대한 합의가 이루어지지 않았지만, 현재는 미세플라스틱 크기의 상한선을 5mm로 설정하고 있다.

매크로 플라스틱(macroplastic)은 플라스틱 폐기물과 미세플라스틱을 구분하기 위해 사용하는 용어로, 길이 25mm 이상의 플라스틱이다. 나노플라스틱(nanoplastics)은 일반적으로 나노미터 크기의 폴리머 입자를 의미한다. 나노플라스틱 크기의 상한선은 아직 명확한 정의가 없이 100nm 또는 1,000nm를 혼용한다(Batool & Qadir, 2022; Hartmann et al., 2019).

[그림 2-1] 크기에 따른 플라스틱 입자 분류



자료(출처): Batool, I. & Qadir, A.(2022)

2. 미세플라스틱 종류

1) 미세플라스틱 구분

미세플라스틱은 생성되는 유형에 따라 1차 미세플라스틱(primary microplastic)과 2차 미세플라스틱(secondary microplastic)으로 구분한다. 1차 미세플라스틱은 인위적으로 제조한 5mm 이하의 고체 플라스틱을 말한다. 1차 플라스틱은 세안용 세정제, 치약, 화장품 등에 사용되는 마이크로비즈(microbeads), 플라스틱 원료 물질인 레진펠렛(resin pellet), 공업용 연마제 등에 사용된다(한국해양과학기술원, 2021a). 또한 비료, 페인트, 경기장 충전재에 1차 플라스틱이 사용되며, EU와 EEA(유럽경제지역, European Economic Area)에서는 매년 145,000톤의 미세플라스틱을 사용하는 것으로 알려져 있다(ECHA, 2023).

2차 미세플라스틱은 5mm 이상의 크기로 제작된 마크로 또는 메조 플라스틱 제품이 미세화 과정을 거쳐 1차 미세플라스틱 크기로 변한 것을 의미한다. 미세화 요인은 인간 활동, 환경 요인, 플라스틱 자체의 특성 등이 있으며, 자동차 타이어나 염색 도료 등이 마모되어 2차 플라스틱이 생성된다(박정규 외, 2019).

1차 미세플라스틱은 제조단계에서 크기를 고려하여 생산되기 때문에 모양과 크기가 일정하다. 사용 형태와 배출 경로가 비교적 명확하므로 1차 미세플라스틱은 사용량 또는 배출량 관리가 쉽다. 반면 2차 미세플라스틱은 마모, 분해 등의 메커니즘에 따라 미세화되어 모양과 크기가 불규칙하다. 2차 미세플라스틱의 경우 불특정한 장소에서 불특정하게 생성 또는 배출되므로 관리가 어렵다. 유형에 따라 1차 플라스틱과 2차 플라스틱을 설명할 수 있지만 실제 환경 중 잔류하는 미세플라스틱을 1차와 2차로 구분하는 것은 쉽지 않다.

[표 2-1] 미세플라스틱의 유형

제품 생산 당시 크기	미세플라스틱(Microplastic)	마크로·메조 플라스틱(Macro Meso plastic)	
생성 원인	제조	인간 활동	자연분해
의도성	의도적	비의도적	
정의	<ul style="list-style-type: none"> 사용 목적에 따라 인위적으로 5mm 이하의 크기로 제조·생산된 플라스틱 	<ul style="list-style-type: none"> 생산 당시에는 5mm 이상인 크기로 제조된 플라스틱 제품이 미세화 과정을 거쳐 5mm 이하의 크기로 변한 형태 	
		<ul style="list-style-type: none"> 제품을 사용하면서 일상적인 인간 활동으로 마모 또는 분해된 미세플라스틱 	<ul style="list-style-type: none"> 5mm 이상 크기의 플라스틱이 환경에 유입되어 풍화, 분해 등의 과정을 거쳐 작은 크기로 변한 미세플라스틱

자료(출처): 박정규 외(2019)

2) 미세플라스틱 형태

앞서 언급한 바와 같이 1차 미세플라스틱은 특정 목적에 맞게 제조하기 때문에 크기와 모양이 일정하다. 2차 미세플라스틱은 인간 활동 또는 환경 중 분해를 거쳐 다양한 모양으로 변형된다. 미세플라스틱의 형태는 파편(fragment), 조각(flake), 줄(line), 펠렛(pellet), 섬유(fiber), 포일 또는 필름(foil or film), 폼(foam), 구(sphere) 등으로 분류한다.

Fragment/flake는 일상생활에서 플라스틱을 사용하거나 환경 중 외부 요인으로 인해 파손되어 생성되는 불규칙한 형태의 입자이다. Fiber/line는 플라스틱 실의 형태로, 의류나 어망 등의 합성섬유로부터 발생한다. Pellet은 플라스틱 제품 제조의 원료로, 구형 또는 원통형의 작은 플라스틱이다. Foil은 플라스틱 시트 또는 필름 등의 포장재로부터

만들어지는 미세플라스틱 형태로, 가장자리가 매끄럽고 평평한 입자이다. Foam은 단열재, 완충재, 포장재 등으로부터 생성되어 탄성이 있는 미세플라스틱 조각이다.

[그림 2-2] 형태에 따른 미세플라스틱 분류



자료(출처): Campanale, C. et al.(2019)

Zhao et al.(2014)는 양쯔강 하구 및 연안 해역에 잔류하는 미세플라스틱의 종류를 분석하였다. 양쯔강 하구에서는 섬유(79.1%), 구(11.8%), 필름(9.1%)의 비율로 검출되었고, 동중국해 연안 해역에서는 섬유(83.2%), 구(14.7%), 필름(2.1%) 미세플라스틱 형태가 확인되었다. 해당 연구에서는 파편·조각(Fragment·flake)의 형태는 관찰하지 않았다.

[표 2-2] 양쯔강 하구 및 연안 해역의 미세플라스틱 분포

형태	하구		연안	
	개수	%	개수	%
섬유	1178	79.1	312	83.2
구	176	11.8	55	14.7
필름	135	9.1	8	2.1

자료(출처): Zhao et al.(2014)

Sutton et al.(2016)은 미국 캘리포니아 샌프란시스코 만 두 곳의 지표수를 채취하여 미세플라스틱을 모니터링하였다. 샌프란시스코 만 중부 지표수에서는 섬유(48%), 파편(34%), 폼(5%), 필름(1%), 펠렛(1%) 형태의 미세플라스틱이 검출되었다. 남부 지표수의 미세플라스틱은 파편(60%), 섬유(22%), 폼(9%), 필름(7%), 펠렛(2%) 형태 순으로 나타났다. 수계 내 미세플라스틱 형태의 분포는 지역에 따라 다른 비율로 검출되는 것으로 판단된다.

[표 2-3] 샌프란시스코 만 중부 및 남부 지표수의 미세플라스틱 분포

지역	형태	크기(mm)			비율(%)
		0.355–0.999	1–4.749	4.75 이상	
샌프란시스코 만 중부	섬유	80,000	67,000	1,200	48%
	파편	68,000	35,000	2,100	34%
	폼	2,300	12,000	460	5%
	필름	8,200	22,000	3,500	1%
	펠렛	3,100	970	0	1%
	비율(%)	53%	45%	2%	100%
샌프란시스코 만 남부	섬유	140,000	86,000	2,800	22%
	파편	450,000	150,000	5,400	60%
	폼	35,000	52,000	2,300	9%
	필름	25,000	37,000	6,700	7%
	펠렛	17,000	2,500	0	2%
	비율(%)	66%	32%	2%	100%

자료(출처): Sutton et al.(2016)

3) 미세플라스틱 성분

미세플라스틱은 플라스틱으로부터 유래한 형태이므로 플라스틱과 물리·화학적 특성은 동일하다. 플라스틱(plastic)은 ‘양을 만들거나 성형할 수 있음’을 의미하는 그리스어 plastikos와 ‘주형’을 의미하는 plastos에서 파생된 단어로, 폴리머를 주성분으로 하는 합성·반합성 소재이다. 플라스틱을 구성하는 유기 폴리머는 산소, 질소, 황 원자 등이 부착된 탄소 원자 사슬이 반복적으로 연결된 구조이다.

대표적으로 사용되는 합성 고분자 물질은 폴리에틸렌(PE: polyethylene), 폴리프로필렌(PP: polypropylene), 폴리스티렌(PS: polystyrene), 폴리염화비닐 또는 폴리비닐 클로라이드(PVC: Polyvinyl Chloride), 폴리에틸렌 테레프탈레이트(PET: polyethylene terephthalate) 및 폴리우레탄(PUR) 등이 있다. 미세플라스틱은 폴리머의 기본골격과 측쇄의 화학구조에 따라 분류한다. 다음의 표는 환경 중 잔류하는 미세플라스틱의 주요 구조 및 물리화학적 특성을 제시한다([표 2-4] 참고). 해수의 밀도는 1.025g/cm^3 이기 때문에 그보다 낮은 밀도를 가진 PE, PP, EVA는 해수에서 부유하는 성질을 나타낸다.

[표 2-4] 미세플라스틱의 구조 및 물리화학적 특성

Polypropylene(PP)	$(C_3H_6)_n$
	CAS No. 9003-07-0
	밀도 $0.85\sim0.92\text{ g/cm}^3$
	사용처 플라스틱 부품 및 직물, 로프
	미세플라스틱 검출 형태 Fragment/flake(파편), Fiber/line(섬유)
Polyethylene(PE)	$(C_2H_4)_n$
	CAS No. 9002-88-4(LDPE)
	밀도 $0.89\sim0.93\text{ g/cm}^3$ (LDPE), $0.94\sim0.98\text{ g/cm}^3$ (HDPE)
	사용처 포장용 비닐 및 용기, 파이프, 패킹, 친환경 부표 외장재 등
	미세플라스틱 검출 형태 Fragment/flake(파편), Fiber/line(섬유), Foil(포일)
Polystyrene(PS)	$(C_8H_8)_n$
	CAS No. 9003-53-6
	밀도 PS: $1.01\sim1.06\text{ g/cm}^3$, EPS ¹⁾ : $0.01\sim0.04\text{ g/cm}^3$
	사용처 스티로폼부표, 일회용 용기 및 포장재
	미세플라스틱 검출 형태 Fragment/flake(파편), Foam(폼)

1) Expanded Polystyrene(발포 폴리스티렌)

Ethylene vinyl acetate(EVA)	$(C_2H_4)_n(C_4H_6O_2)_m$
	CAS No. 24937-78- 밀도 0.93~0.95 g/cm³ 사용처 부이, 제품케이스, 완충제, 퍼즐매트 미세플라스틱 검출 형태 Fragment/flake(파편)
Polyamide(PA, nylon)	-CO-NH-의 총칭
	CAS No. 63428-84-2 밀도 1.12~1.15 g/cm³ 사용처 낚시줄, 그물, 로프, 기모의 원단, 스타킹 미세플라스틱 검출 형태 Fragment/flake(파편), Fiber/line(섬유)
Polymethyl methacrylate(PMMA)	$(C_5O_2H_8)_n$
	CAS No. 9011-14-7 밀도 1.16~1.20 g/cm³ 사용처 빌딩 유리, LCD 스크린, 선박도료 등 미세플라스틱 검출 형태 Fragment/flake(파편) Foil(포일)
Polycarbonate(PC)	$(C_2H_3Cl)_n$
	CAS No. 25037-45-0 밀도 1.38~1.41 g/cm³ 사용처 인조가죽, 레코드판, 포장재, 파이프, 전기절연체, 바닥재 등 미세플라스틱 검출 형태 Fragment/flake(파편)
Polyurethane(PU)	$(C_2H_3Cl)_n$
	CAS No. 9009-54-5 밀도 1.38~1.41 g/cm³ 사용처 신발용 섬유, 구조재, 타이어, 로프, 낚시용 바늘, 페인트 등 미세플라스틱 검출 형태 Fragment/flake(파편), Fiber/line(섬유)

Polyethylene terephthalate(PET)	$(C_{10}H_8O_4)_n$	
	CAS No.	25038-59-9
	밀도	1.38~1.41 g/cm³
	사용처	섬유, 전기절연체, 페트병 등
	미세플라스틱 검출 형태	Fragment/flake(파편), Fiber/line (섬유)
Polyvinyl chloride(PVC)	$(C_2H_3Cl)_n$	
	CAS No.	9002-86-2
	밀도	1.38~1.41 g/cm³
	사용처	포장재, 파이프, 물받이, 낚시줄 등
	미세플라스틱 검출 형태	Fragment/flake(파편)
Polytetrafluoroethylene(PTFE)	$(C_2F_4)_n$	
	CAS No.	9002-84-0
	밀도	2.10~2.30 g/cm³
	사용처	가스킷, 베어링, 컨테이너, 관의 내벽, 밸브, 펌프 부품, 조리기구, 톱날 등
	미세플라스틱 검출 형태	Fragment/flake(파편)

자료(출처): 국립수산과학원(2021)

3. 미세플라스틱 연구 동향

1) 하천 연구

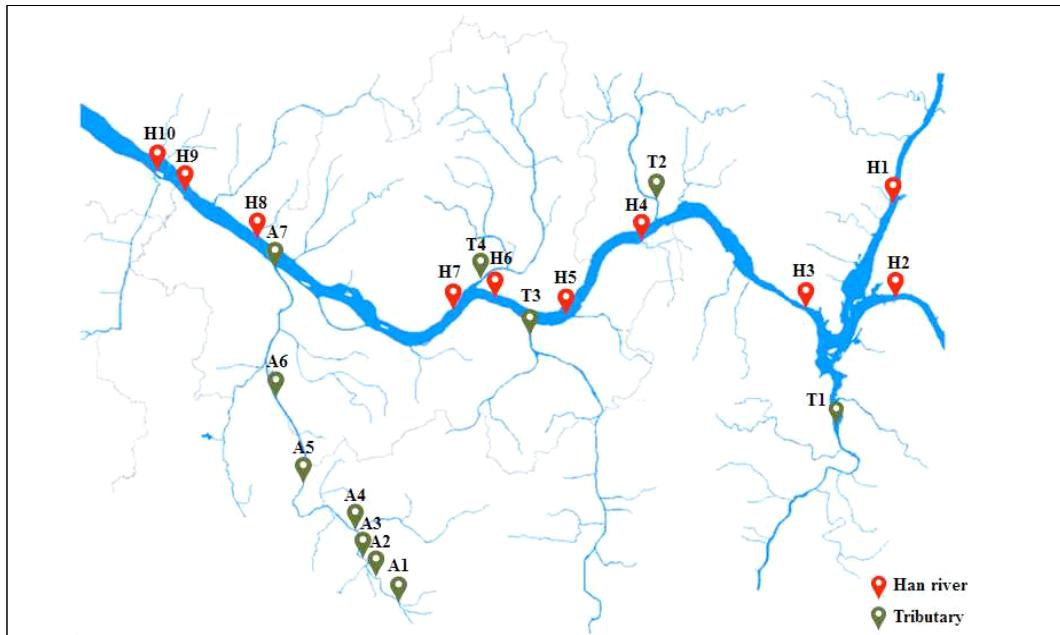
여러 오염원으로부터 하천으로 유입된 미세플라스틱은 본류를 거쳐 해양으로 최종 유입된다. 인천 연안의 미세플라스틱 농도에 영향을 미치는 육상 기인 발생원의 특성을 파악하기 위해 기존 연구를 바탕으로 하천의 미세플라스틱 농도 및 특성을 파악하였다.

(1) 미세플라스틱 농도

국립환경과학원에서는 한강수계인 팔당댐 상류부터 김포대교에 이르는 지역을 대상으로 2016년부터 2018년까지 미세플라스틱의 분포를 조사하였다(박태진 외, 2018). 조사 지점은 한강 본류 10곳(남·북한강, 경안천, 팔당댐 앞 등), 지류 11곳(경안천, 왕숙천,

탄천, 중량천, 안양천 등)으로 선정하였다([그림 2-3] 참고). 안양천 상류에는 공장들이 밀집하고 있어 이에 대한 영향을 파악하기 위해 안양천 상류~하류 지점(A1~A7)을 선정하여 조사하였다. 한강 본류의 시료는 표층(0m)과 중층(2m)에서 채취하였다. 시료는 만타트롤 네트²⁾를 사용하여 3~5톤 정도 수집하여 FT-IR로 미세플라스틱 재질을 분석하고 입자크기가 100 μ m~5mm인 미세플라스틱을 파악하였다.

[그림 2-3] 한강 본류 및 지류 시료 채취지점



자료(출처): 박태진 외(2018)

표층(0m) 중 팔당댐 상류에서는 북한강에서 미세플라스틱 농도가 가장 높고($20\text{개}/\text{m}^3$), 팔당댐 앞에서는 낮은 농도($4\text{개}/\text{m}^3$)로 검출되었으며, 팔당댐 하류에서는 신행주대교 인근에서 $15\text{개}/\text{m}^3$ 미세플라스틱이 검출되었다. 중층(2m)의 경우 팔당댐 앞에서 미세플라스틱이 가장 높은 농도($15\text{개}/\text{m}^3$)로 검출되었고, 북한강에서 가장 낮았다($1\text{개}/\text{m}^3$).

한강 본류로 유입되는 지류에서는 미세플라스틱의 농도가 본류보다 높게 검출되었다. 특히 탄천($104\text{개}/\text{m}^3$), 중랑천($36\text{개}/\text{m}^3$), 안양천($41\text{개}/\text{m}^3$)은 본류보다 미세플라스틱의 농도

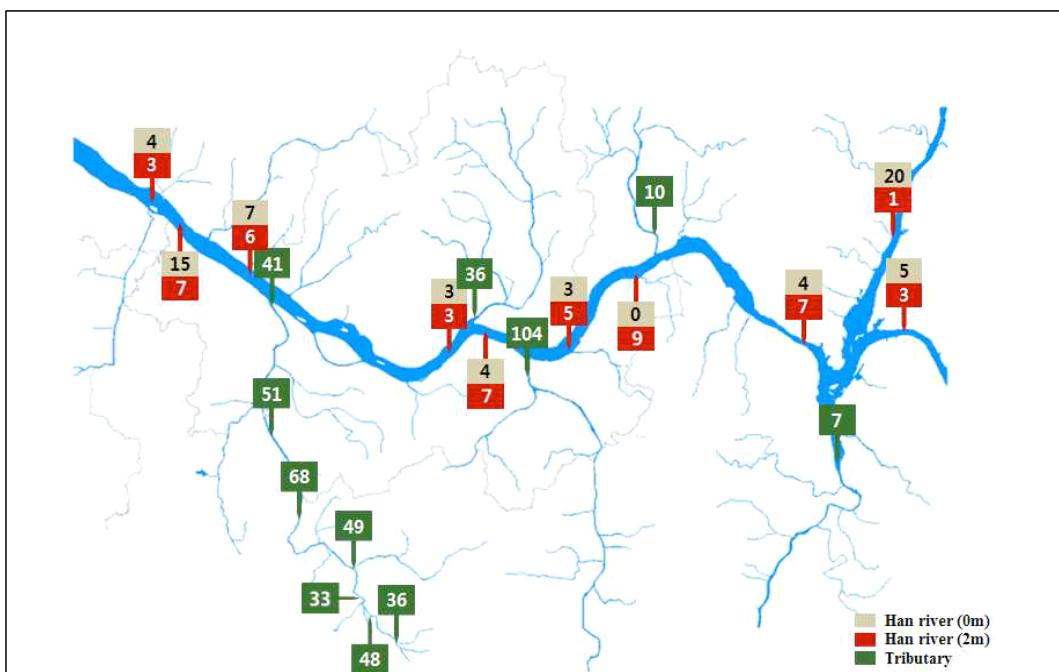
2) 해수면을 일정한 수심으로 끌어 채집하는 장치

(<https://www.chemlab.kr/pdt/PDNN19110300001?keywords=>)

가 높고, 이는 해당 지점 근처에 있는 하수처리장의 영향으로 판단된다. 공장에서 사용·배출하는 미세플라스틱이 하천에 미치는 영향을 파악하기 위해 안양천 상류에 위치한 공장 주변에서 미세플라스틱을 조사한 결과, 본류와 비교하여 안양천 상류에서 미세플라스틱이 상대적으로 높은 농도($33\sim49개/m^3$)로 검출되었다. 안양천의 하수처리장을 중심으로 하수처리장 유입수에서는 미세플라스틱의 농도($68개/m^3$)가 높고, 하수처리장을 거치면서 농도($41, 51개/m^3$)가 낮아졌다.

[그림 2-4] 한강수계의 미세플라스틱 농도

(단위: 개/ m^3)



자료(출처): 박태진 외(2018)

대전광역시는 하천의 수질관리와 미세플라스틱 관리 방안을 마련하기 위해 미세플라스틱의 하천 오염 현황을 연구하였다(최영균, 2020). 지역의 주요 생활·산업·농업용수를 담당하는 금강을 중심으로 상류 지점(현도면, 대청댐 인근)과 주요 지류(갑천, 유등천, 대전천)에서 미세플라스틱을 분석하였다. 모니터링 지점은 금강 상류, 갑천, 유등천 대전천의 상류·중류·하류, 하수처리장 방류지점으로, 하계, 추계에 걸쳐 $25\mu\text{m}\sim1\text{mm}$ 크기의 미세플라스틱을 채취하였다([그림 2-5] 참고).

[그림 2-5] 대전광역시 주요 하천 시료 채취지점



자료(출처): 최영균(2020) 자료 재가공

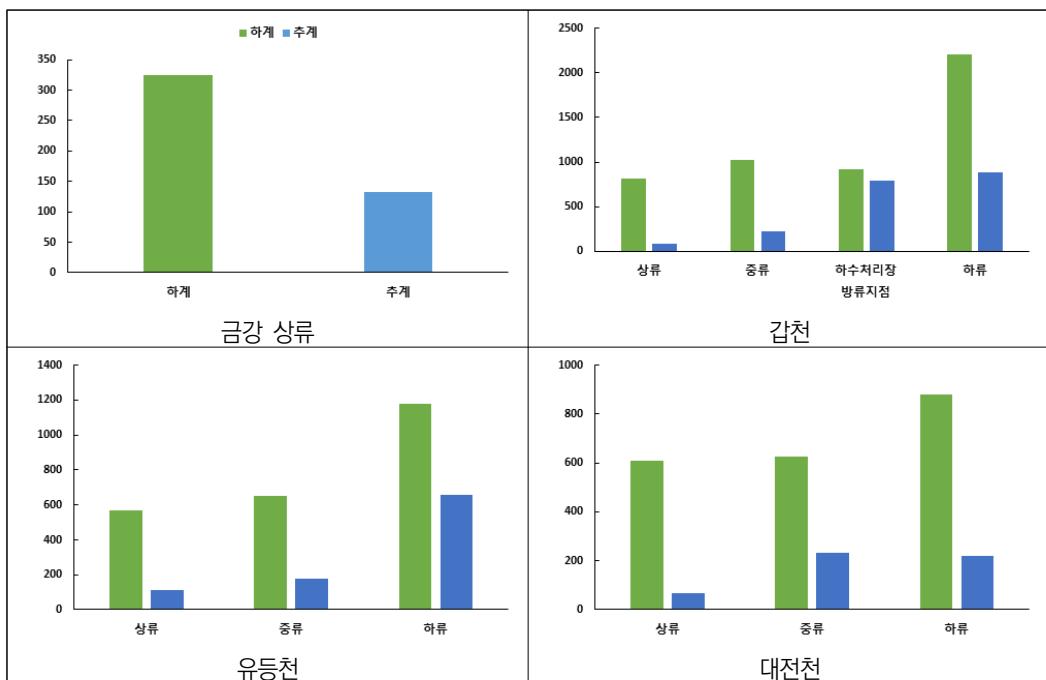
금강 상류 지점의 미세플라스틱 농도는 하계 때 325개/ m^3 , 추계 때 225개/ m^3 로 검출되었다. 갑천은 상류에서 83~186개/ m^3 , 중류에서 221~1,018개/ m^3 , 하수처리장 인근에서 790~922개/ m^3 , 하류에서 889~2,211개/ m^3 로 확인되었다. 유등천에서 검출된 미세플라스틱은 상류에서 567(하계), 110개/ m^3 (추계), 중류에서 651(하계), 178개/ m^3 (추계), 하류에서 1,178(하계), 655개/ m^3 (추계)로 나타났다. 대전천은 하계 시기에 108(상류), 625(중류), 879(하류)개/ m^3 , 추계 시기에 66(상류), 233(중류), 221(하류)개/ m^3 의 미세플라스틱이 검출되었다([그림 2-6] 참고).

갑천, 유등천, 대전천 모두 상류에서 하류로 갈수록 미세플라스틱의 농도가 증가하였다. 금강 상류, 지류에서 계절별 미세플라스틱 수를 파악한 결과, 하계에 비해 추계의 미세플라스

틱 개수가 감소하였다. 이는 하계 때 장마, 태풍의 영향으로 하천유량이 많아져³⁾ 시료 내 미세플라스틱 농도의 교란이 일어난 것으로 보인다.

[그림 2-6] 금강수계의 미세플라스틱 농도

(단위: 개/m³)



자료(출처): 최영균(2020) 자료 재가공

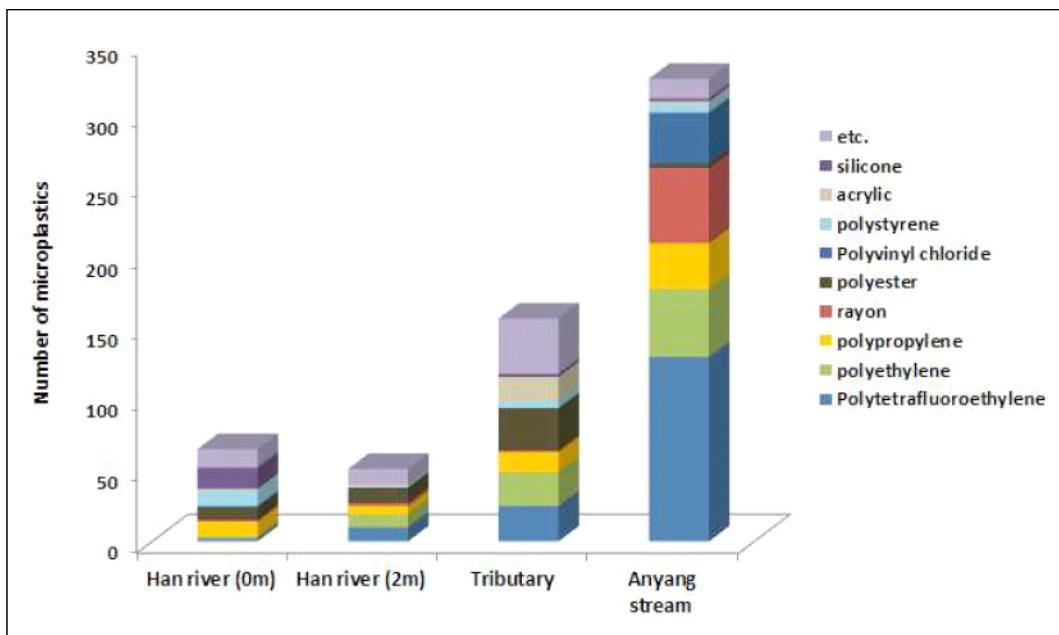
(2) 미세플라스틱 특성

한강수계의 미세플라스틱 입자 크기 분포를 조사한 결과, 한강 본류 표층(0m)에서는 0.3~0.6mm 크기의 미세플라스틱이 가장 많이 검출되고, 두 번째로 0.1~0.3mm 미세플라스틱의 농도가 높았다. 그 이외의 지점(본류 중층, 지류)에서는 0.1~0.3mm 미세플라스틱의 농도가 가장 높게 관측되었다.

한강수계 중 본류를 중심으로 미세플라스틱의 특성을 파악한 결과, 한강 본류의 표층(0m)과 중층(2m)에서는 미세플라스틱의 종류가 다르게 관찰되었다. 표층에서는 주로 polystyrene(PS), silicone, polypropylene(PP)이 검출되었고, 중층에서는 polyester, polyethylene(PE), polytetrafluoroethylene(PTFE) 순서로 검출되었다([그림 2-7] 참고).

3) 갑천의 계절별 유량 : 하계 6.19~102.26m³/sec, 추계 0.44~14.88m³/sec

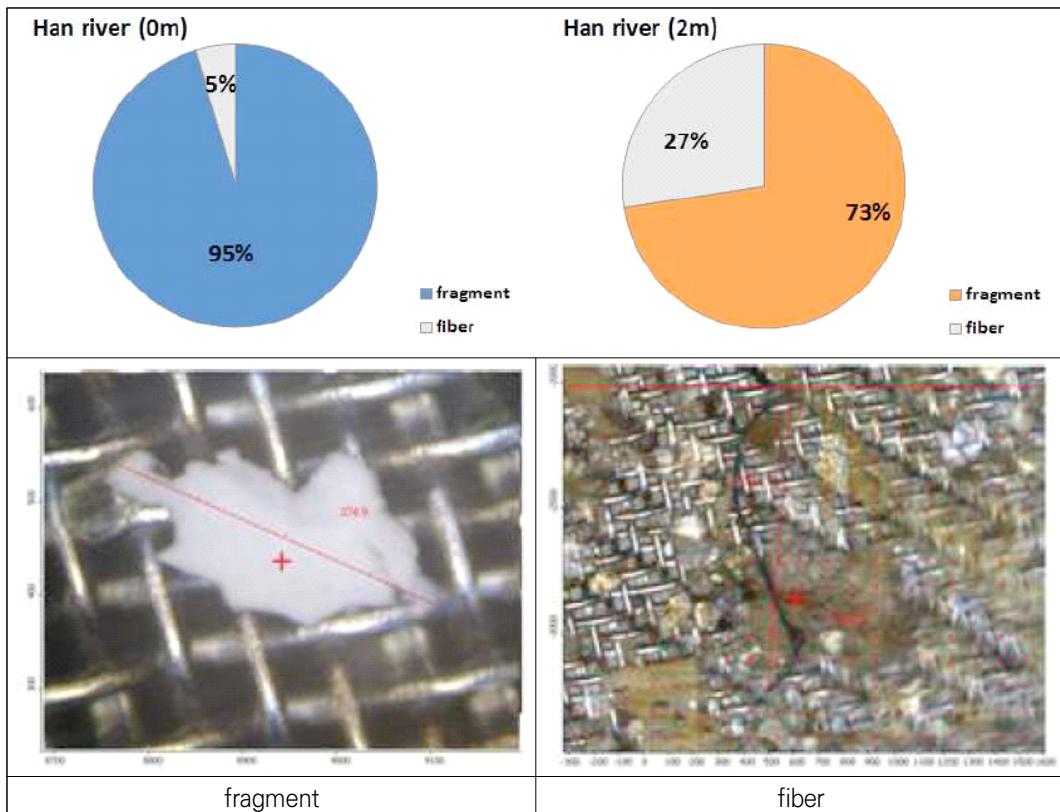
[그림 2-7] 한강수계의 미세플라스틱 종류별 분포 현황



자료(출처): 박태진 외(2018)

한강 본류의 표층과 중층의 미세플라스틱 형태는 비슷하게 나타났다([그림 2-8] 참고). 본류 표층과 비교하여 중층에서는 fiber가 상대적으로 많이 관찰되었고, 이는 지류 및 안양천보다 높은 수치이다(fiber 비중 : 표층 5%, 중층 27%, 지류 11%, 안양천 6%). 검출된 미세플라스틱의 형태가 주로 fragment, fiber인 것으로 보아 한강 본류의 미세플라스틱은 주로 2차 미세플라스틱임을 예측할 수 있다.

[그림 2-8] 한강수계의 미세플라스틱 형태별 분포 현황



자료(출처): 박태진 외(2018)

금강 상류에서는 $63\sim500\mu\text{m}$ 크기의 미세플라스틱 입자가 주로 검출되었고, 섬유형은 $250\sim500\mu\text{m}$, 입자형은 $63\sim125\mu\text{m}$ 가 가장 큰 비중을 차지했다([표 2-5] 참고). 갑천, 유등천, 대전천의 경우, 하류에서 작은 크기($25\sim63$, $63\sim125\mu\text{m}$)의 미세플라스틱이 주로 확인되었다. 이는 미세플라스틱이 하류로 이동하면서 수온, 광분해, 유속에 의한 파쇄 등 여러 풍화작용을 거쳐 크기가 작아진 결과이다. 유등천 하류의 미세플라스틱은 $1,178\text{개}/\text{m}^3$ 이고 섬유형이 24%, 입자형이 76%로 조사되었다. 갑천과 다르게 유등천 하류에서 입자형의 비율이 높은 이유는 하류 인근에 있는 소규모 사업체에서 미세플라스틱을 배출한 것으로 예상된다.

[표 2-5] 금강수계의 입자크기·종류별 미세플라스틱 분포 비율

(단위: %)

크기	지점	금강 상류		갑천		유등천		대전천	
		섬유	입자	섬유	입자	섬유	입자	섬유	입자
1mm	상류	-	-	0.0	10.1	21.6	15.8	11.6	13.2
	중류			12.1	4.0	27.5	4.8	10.3	5.5
	하류			0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.8
500μm~1mm	상류	-	16.6	5.3	10.1	22.5	12.0	16.3	5.3
	중류			9.7	13.4	22.0	9.0	8.3	23.2
	하류			0.0	7.8	17.6	1.8	25.4	10.2
250~500μm	상류	48.4	8.3	10.5	11.2	14.4	15.0	16.3	9.7
	중류			12.9	10.0	11.0	6.3	19.3	18.3
	하류			19.8	33.6	40.3	9.5	27.7	20.2
125~250μm	상류	32.3	33.4	36.8	16.9	22.5	19.5	23.3	8.7
	중류			46.0	9.9	24.8	5.3	22.8	20.1
	하류			2.6	10.2	13.7	11.3	25.4	24.0
63~125μm	상류	-	41.7	26.3	23.6	16.2	26.4	16.3	47.4
	중류			9.7	22.0	9.1	29.7	8.3	12.8
	하류			8.6	14.1	16.6	19.0	13.1	33.6
25~63μm	상류	19.3	-	21.1	28.1	2.7	11.3	16.3	15.8
	중류			9.7	40.7	5.5	45.0	31.0	20.1
	하류			68.9	34.4	11.7	58.3	8.5	10.2

자료(출처): 최영균(2020) 자료 재가공

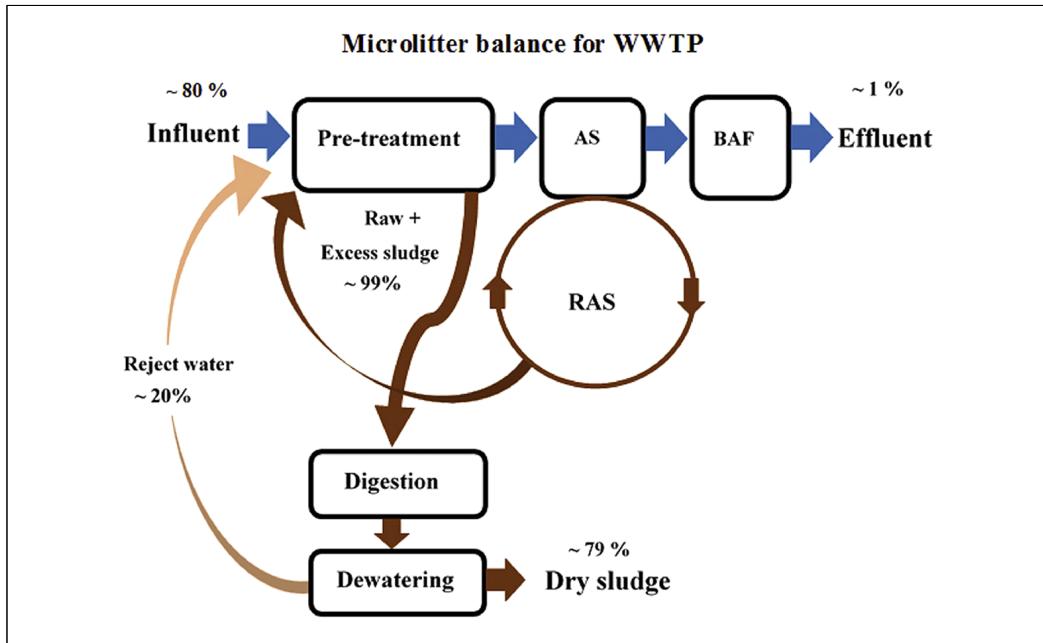
2) 하수처리장 연구

다양한 산업에서 제조·사용하는 미세플라스틱은 산업폐수 형태로 하수처리장으로 유입된다. 또한 일상생활에서 사용하는 플라스틱 제품, 미세플라스틱이 함유된 세정제, 섬유, 자동차 타이어, 농촌에서 사용하는 폐비닐 등 여러 경로를 통해 미세플라스틱은 하천으로 유입될 수 있다. 이렇게 수계로 유입된 미세플라스틱은 일반적으로는 하수처리장의 공정을 거쳐 제거되지만, 실제로는 하수처리장 방류수에 여전히 많은 미세플라스틱이 잔류하고 있다 (Murphy et al. 2016, Talvite et al. 2017a). 본 연구에서는 하수처리장이

미세플라스틱의 발생원이 될 수 있음을 판별하기 위해 하수처리장을 중심으로 미세플라스틱 선행연구를 조사하였다.

Talvitie et al.(2017a) 연구에 따르면, 하수처리장으로 유입된 미세플라스틱의 80%는 슬러지에 잔류하고 20%는 반류수(Reject water)를 통해 처리 공정으로 재유입된다([그림 2-9] 참고). 해당 반류수는 미세플라스틱의 하수처리장 내부 발생원으로 작용할 수 있다. 하수처리장으로부터 배출되는 슬러지는 건조 작업을 통해 비료로 사용되거나 석탄발전소의 연료, 매립장 복토재로 활용된다. 슬러지에 잔류하는 미세플라스틱은 다양한 활용처로 이동하여 인체 및 생태계에 영향을 줄 가능성이 있다.

[그림 2-9] 하수처리장의 미세플라스틱 배출 분포



자료(출처): Talvitie et al.(2017a)

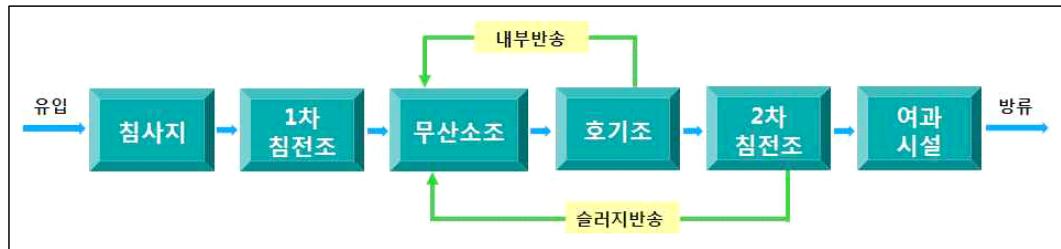
국내외 하·폐수처리장에서 검출된 미세플라스틱의 농도와 크기에 대한 선행연구는 [표 2-6]에 제시하였다. 동일한 국가임에도 불구하고 검출되는 미세플라스틱의 농도가 다른 이유는 시료 채수 장비, 채수량이 상이하고 분석 입자의 크기와 분석 장비의 차이 때문이다.

Mason et al.(2016)은 미국 전역에 있는 17곳의 하수처리장을 대상으로 총 90개의 샘플에서 미세플라스틱을 분석하였다. 17곳의 하수처리장에서는 평균 0.004~0.195개/L의 미세플라스틱이 확인되었고, 고급 여과장치가 있는 6곳의 하수처리장에서 0.009~0.127개/L의 미세플라스틱을 검출하였다. 조사 결과를 토대로 방류수로부터 배출되는 미세플라스틱의 수를 산출한 결과, 하루에 30억~230억 개의 미세플라스틱이 하수처리시설로부터 미국 수계로 방출되는 것으로 예측하였다.

스웨덴의 하-폐수처리장에서 300 μm 크기 이상의 미세플라스틱을 분석한 결과, 유입수에서 15,000개/m³, 방류수에서 8개/m³를 검출하였다. 해당 처리장의 슬러지에는 미세플라스틱의 99%가 잔류하였고, 주로 fiber(플라스틱 섬유) 형태가 확인되었다. 독일 하수처리장 12곳의 방류수에서 입자크기 500 μm 이상의 미세플라스틱은 0~50개/m³, 500 μm 이하의 미세플라스틱은 10~9000개/m³로 나타났고, 분석된 미세플라스틱 대부분은 폴리에틸렌이었다(Mintening et al. 2017).

국립환경과학원에서는 탄천 수계로 방류하는 하수처리장을 대상으로 유입수, 1차 침전조, 방류수에서 미세플라스틱을 조사하였다([그림 2-10] 참고). 해당 하수처리장의 일일 처리량은 약 70만 톤으로, 한강권역에 있는 대규모 시설이다. 유입수에서는 $1.3\sim4.6\times10^6$ 개/m³, 1차 침전조에서는 $0.5\sim1.6\times10^6$ 개/m³, 방류수에서는 7.6~12.6개/m³의 미세플라스틱이 검출되었다([표 2-6] 참고).

[그림 2-10] 탄천 수계의 하수처리장 공정



자료(출처): 이재호 외(2016)

[표 2-6] 국가별 하·폐수처리장의 미세플라스틱 분포

지역	농도(단위 *개/m ³ , **개/L)			입자크기 (μm)
	유입수	1차 침전조	방류수	
한국 (하수처리장)	1.3~4.6×10 ^{6*}	0.5~1.6×10 ^{6*}	7.2~22.5*	100~5000
한국 (폐수처리장)	11,892*	—	2,919*	100~1000
미국 (하수처리장 17곳)	—	—	0.004~0.195** 0.009~0.127**	125~355 > 355
미국 (하수재이용시설 3곳)	—	—	3~23*	> 125
미국 (하수처리장)	1.0**	—	8.8×10 ^{-6*}	100~400
스웨덴 (폐수처리장 2곳)	7,340±13* 12,120±6,820*	—	8±7* 23±1*	> 300
스웨덴 (하수처리장)	15.1±0.89 ×10 ^{3*}	—	8.25±0.85*	> 300
핀란드 (하수처리장 4곳)	0.5±0.2** 2.0±1.3** 0.7±0.1** 2.0±0.07** 6.9±1.0**	—	0.3±0.1** 0.03±0.01** 0.02±0.007** 0.1±0.04** 0.005±0.004**	> 300 20~300
핀란드 (폐수처리장 2곳)	1.0±4.33×10 ^{5*} 9.1±2.83×10 ^{4*}	—	43±36* 29±10*	> 300
독일 (하수처리장 12곳)	—	—	0~50* 10~9,000*	> 500 < 500
호주 (하수처리장 3곳)	—	—	1.5** 0.48** 0.28** 0.21**	100~500 > 25
아이슬란드 (폐수처리장 2곳)	631* 2,070±200*	—	1,378* 1,400±66*	> 300
스코틀랜드 (하수처리장)	15.70±5.23**	3.40±0.28**	0.25±0.04**	> 65

자료(출처): 이재호 외(2016); 정동환 외(2018); Carr et al.(2016) ; Mason et al.(2016); Mintentig et al.(2017); Murphy et al.(2016); Swedish Environmental Research Institute(2014, 2016); Talvitie et al.(2017b); Ziajahromi et al.(2017)

주: 빈칸은 미검출 농도가 아닌 데이터가 없는 경우임

탄천 수계 하수처리장의 유입수, 1차 침전조, 방류수의 미세플라스틱 구성 비율을 [표 2-7]에 요약하였다. 유입수, 1차 침전조, 방류수 모두 Acrylic이 주성분이었고, 방류수의 경우 여러 종류의 미세플라스틱이 검출되었다. 다만 유입수 - 1차 침전조와 방류수와의 시료 채취 방법의 차이로 인해 유입수 - 1차 침전조에서는 모든 미세플라스틱이 여과되지 않아 결과 해석의 한계가 있다. Acrylic의 경우 비중이 1보다 크기 때문에 침전 등의 공정을 통해 제거할 수 있으며, 나머지 PE, PP, PO는 비중이 1보다 작으므로 방류수에 잔류한다.

[표 2-8]에서는 탄천을 중심으로 하수처리장 방류수 합류 전(T1)·후(T2) 지점의 미세플라스틱 분포를 정리하였다. 방류수 합류 전 지점보다 합류 후 지점에서 미세플라스틱의 농도가 약 2배 증가하였고, 작은 크기의 미세플라스틱이 방류수 합류 후에 더 높게 검출되었다. 이는 하수처리장의 방류수가 하천의 미세플라스틱 농도와 구성성분에 영향을 줄 수 있다는 것을 의미한다.

[표 2-7] 하수처리장 내 미세플라스틱 구성성분

구성성분	유입수(%)	1차 침전조(%)	방류수(%)
Acrylic	72	100	46
Polyethylene(PE)	0	0	25
Polypropylene(PP)	0	0	14
Polyolefin(PO)	0	0	13
Polyamide(PA)	0	0	1
Ethylene vinyl acetate(EVA)	0	0	1
기타	28	0	0

자료(출처): 이재호 외(2016) 자료 재가공

[표 2-8] 탄천 수계의 미세플라스틱 분포

시료 채취지점	크기	T1	T2
	100~300μm(%)	58.5	68
	300μm~1mm(%)	41.5	32
	1~5mm(%)	0	0
	평균 농도(개/m³)	4.95	10.1

자료(출처): 이재호 외(2016) 자료 재가공

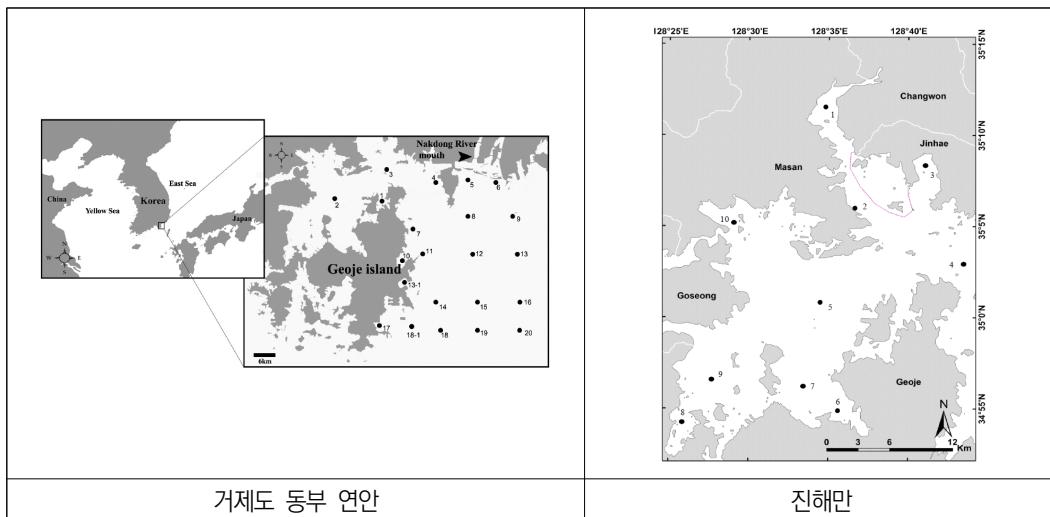
3) 해양 연구

(1) 국내

❖ 거제도 연안

심원준 외(2015)는 우리나라에서 오염이 가장 심할 것으로 예상되는 우심 해역을 중심으로 미세플라스틱의 오염실태를 파악하였다. 모니터링은 거제도 동부 연안의 21개 지점과 진해만 10개 지점에서 견기(5~6월)와 우기(7월) 시기에 진행하였다([그림 2-11] 참고). 시료 채취는 330μm 이상 미세플라스틱을 표층에서 수집하는 manta trawl net과 50μm 이상 크기의 미세플라스틱을 표층부터 수심 20cm 사이에서 수집하는 hand net을 이용하였다.

[그림 2-11] 거제도 동부의 연안 외·내 해역 및 진해만 조사 지점

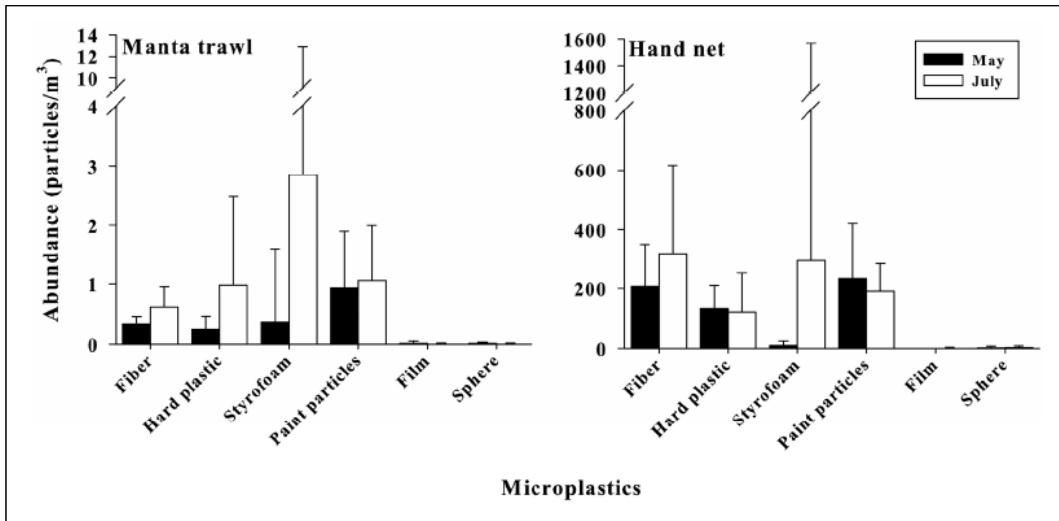


자료(출처): 심원준 외(2015)

거제도 동부 연안에서 2㎟ 크기 이하의 미세플라스틱은 섬유(fiber), 경질플라스틱(hard plastic), 스티로폼(styroform), 필름(film), 소구(spherule), 기타 폴리머로 분류되었다. Manta trawl net으로 5월에 수집한 시료에는 페인트 입자(48.9%)가 가장 많았고, 스티로폼(19.6%)과 섬유(17.5%) 순으로 조사되었다. 7월에는 스티로폼이 전체 입자 개수의 51.7%를 차지하였고, 페인트 입자가 19.2%, 경질플라스틱 입자가 17.8%로 나타났다. Hand net으로 5월에 수집한 시료에는 페인트 입자가 총 미세플라스틱 입자 개수의 39.8%를 차지했고, 섬유가 35.2%, 경질플라스틱이 22.7%를 차지하였다. 7월에는 스티로폼이 총 미세플라스틱 입자 개수의 31.7%를 차지했고, 다음으로 섬유가 34.5%, 페인트 입자가 20.5%로 나타났다.

장비를 이용하여 미세플라스틱의 성분을 분석한 결과, 폴리에틸렌(polyethylene), 폴리프로필렌(polypropylene), 폴리에스터(polyester), 알키드(alkyd), 폴리스티렌(polystyrene) 등이 확인되었다. 우점 재질은 폴리에틸렌(경질플라스틱), 알키드(페인트 레진 입자), 폴리에스터(섬유)였다.

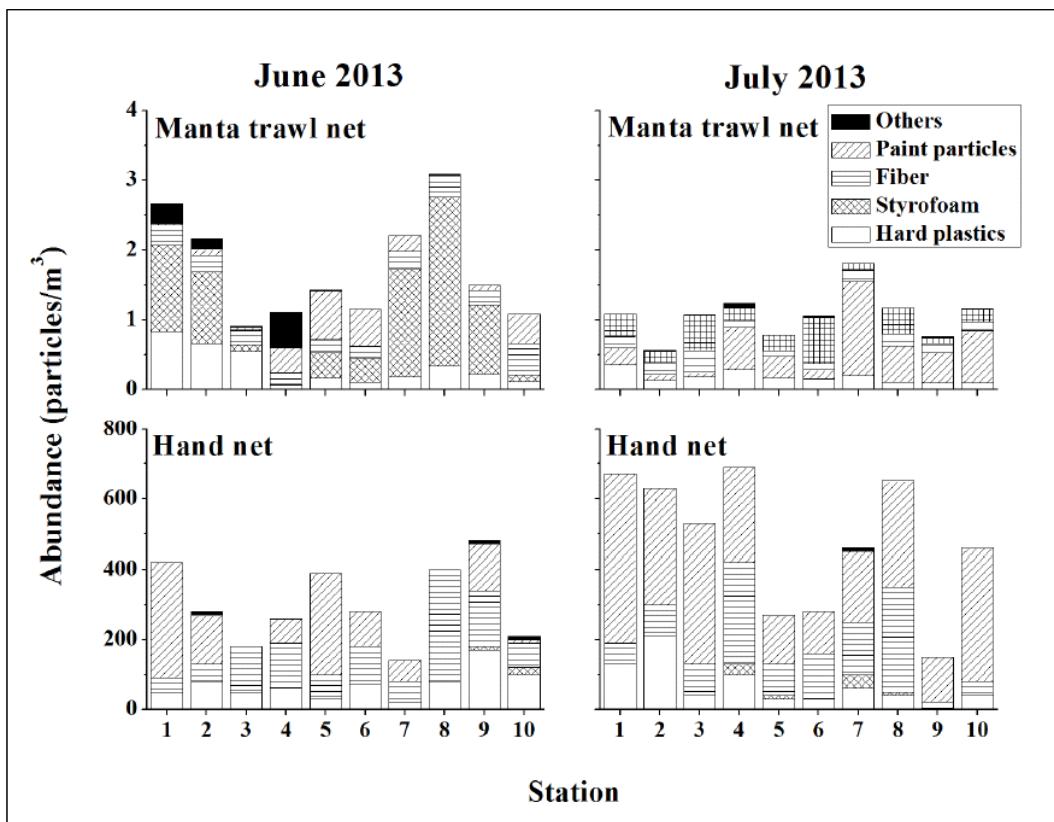
[그림 2-12] 거제 동부해역의 미세플라스틱의 종류 및 분포



자료(출처): 심원준 외(2015)

진해만에서 6~7월에 manta trawl net과 hand net을 이용하여 수집한 시료에서 2mm 이하 미세플라스틱을 파악하였다([그림 2-13] 참고). Manta trawl net으로 6월에 분석한 미세플라스틱에서는 스티로폼이 가장 우세하였고(46.8%), 다음으로 경질플라스틱(18.8%), 섬유(14.4%) 및 페인트 입자(14.3%) 순으로 조사되었다. 7월에는 스티로폼이 42.1%로 가장 높고 페인트 입자(26.4%), 경질플라스틱(16.6%), 섬유(13.8%) 순으로 나타났다. Hand net으로 6월에 수집한 시료에서는 섬유(37.5%)였고, 다음으로 페인트 입자(37.2%), 경질플라스틱(23.4%)의 순서로 미세플라스틱이 검출되었다. 7월에는 페인트 입자(57.4%)가 가장 높았으며, 섬유(26.3%), 경질플라스틱(14.2%) 순으로 조사되었다. 분석 결과 채집망의 종류(manta trawl net, hand net)에 따라 우점하는 부유 미세플라스틱의 조성에 차이가 있었고, Manta trawl net는 스티로폼이, hand net에서는 섬유와 페인트 입자가 가장 우점하였다.

[그림 2-13] 진해만의 미세플라스틱 형태

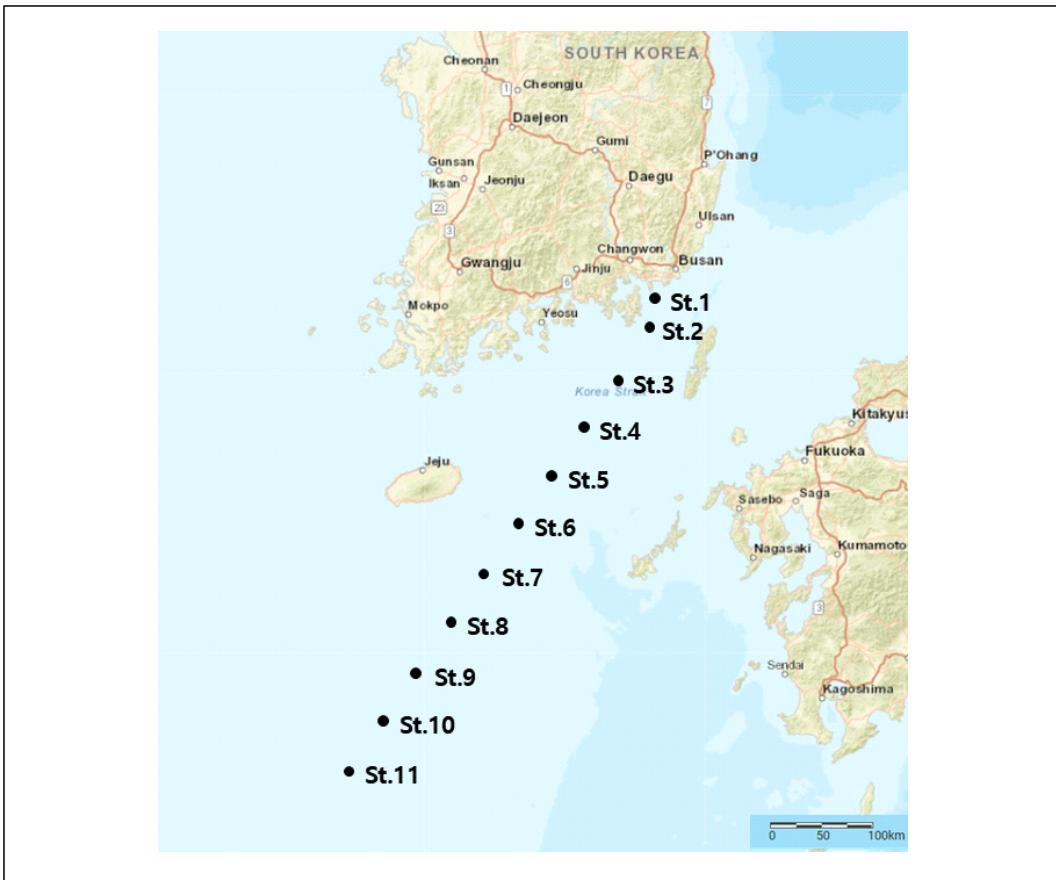


자료(출처): 심원준 외(2015)

❖ 남해

한국해양과학기술원(2021b)은 미세플라스틱의 오염평가와 거동 기작을 규명하기 위해 환경 시료 중 미세플라스틱을 연구하였다. 2020년 10월 남해 외해역 11개 지점에서 입자크기 $20\mu\text{m}$ 이상의 미세플라스틱을 수집하였고([그림 2-14] 참고), FT-IR(Fourier-transform infrared spectroscopy)을 이용하여 미세플라스틱의 특성을 조사하였다.

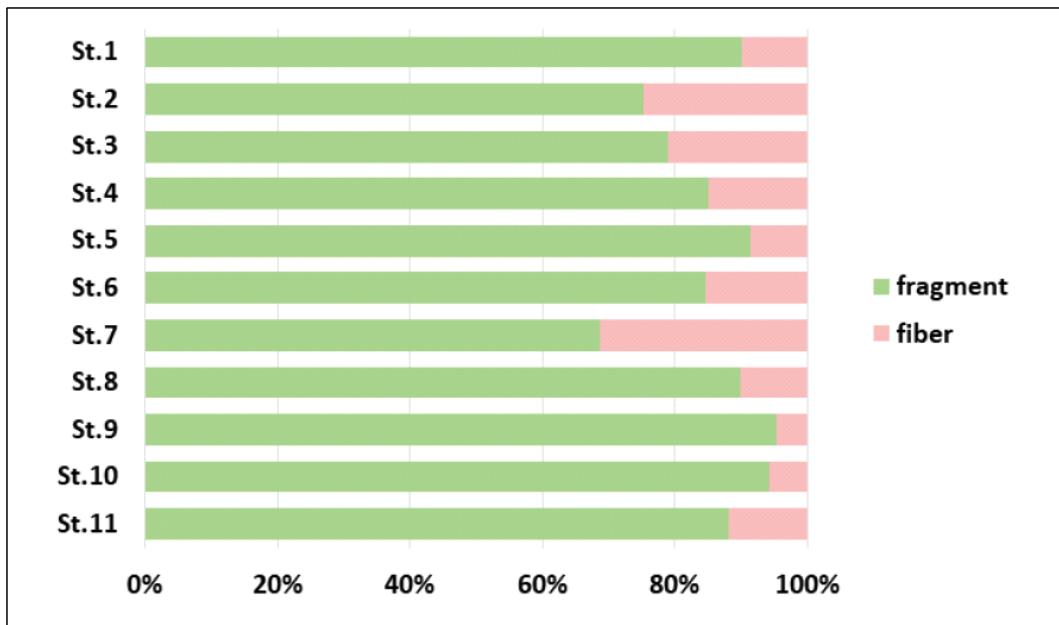
[그림 2-14] 남해 해역의 미세플라스틱 조사지점



자료(출처): 한국해양과학기술원(2021b)

분석 결과, 남해 외해역의 모든 모니터링 지점에서 파편(fragment) 형태의 미세플라스틱이 우세하였다([그림 2-15] 참고). 파편 비율은 St.9 지점에서 95.3%로 가장 높았고, St.7 지점에서 68.6%로 가장 낮았다. 발견된 미세플라스틱 입자크기의 중간값은 $106\mu\text{m}$ ($31\sim3,718\mu\text{m}$)이고, $100\mu\text{m}$ 이하 크기의 미세플라스틱은 전체에서 46%, $300\mu\text{m}$ 이하는 88.5%를 차지하였다.

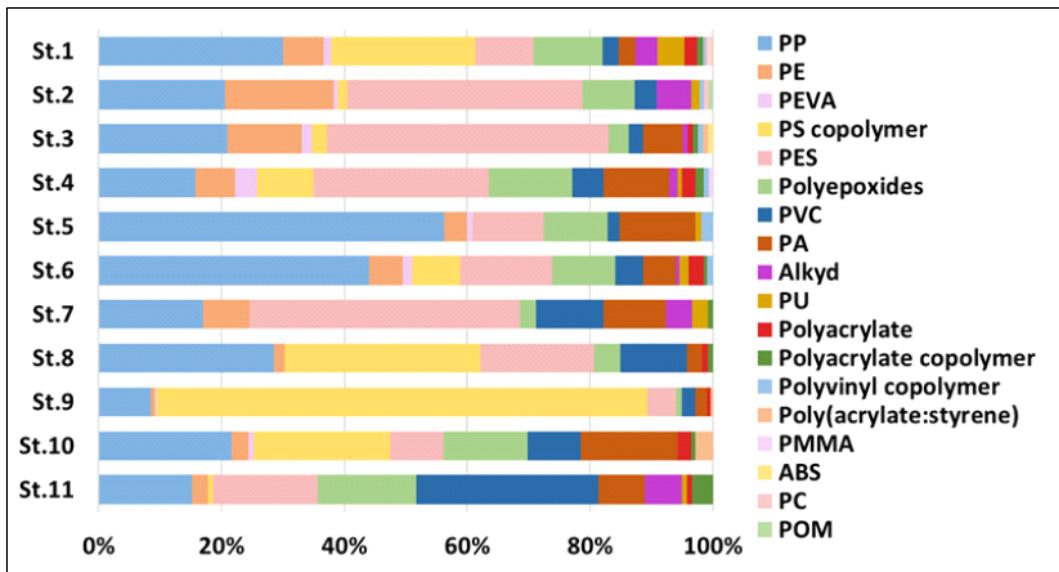
[그림 2-15] 남해 해역의 미세플라스틱 형태 조성



자료(출처): 한국해양과학기술원(2021b)

남해 외해역의 미세플라스틱 조성은 polypropylene(PP)이 24.7%로 가장 많았고, polyester(21.6%), polystyrene copolymer(PS copolymer, 17.9%), polyepoxides (8.5%), polyvinyl chloride(PVC, 7.4%), polyamide(PA, 6.8%), polyethylene(PE, 6.1%), alkyd(2%), polyacrylate copolymer(1.1%), polyurethane(PU, 1.1%) 순서로 확인되었다([그림 2-16] 참고). 이 중 해수($1.02\text{g}/\text{m}^3$)보다 밀도가 낮은 플라스틱을 저밀도 폴리머라고 하며, PP, PE, EVA 3종의 저밀도 폴리머는 각 지점에서 9.4%~61%의 범위로 나타났다. St.5(61%)와 St.6(51%)을 제외한 9개 정점에서 저밀도 폴리머는 모두 40% 이하로, 표층임에도 불구하고 고밀도 폴리머가 상당량 검출되었다.

[그림 2-16] 남해 해역의 미세플라스틱 조성



자료(출처): 한국해양과학기술원(2021b)

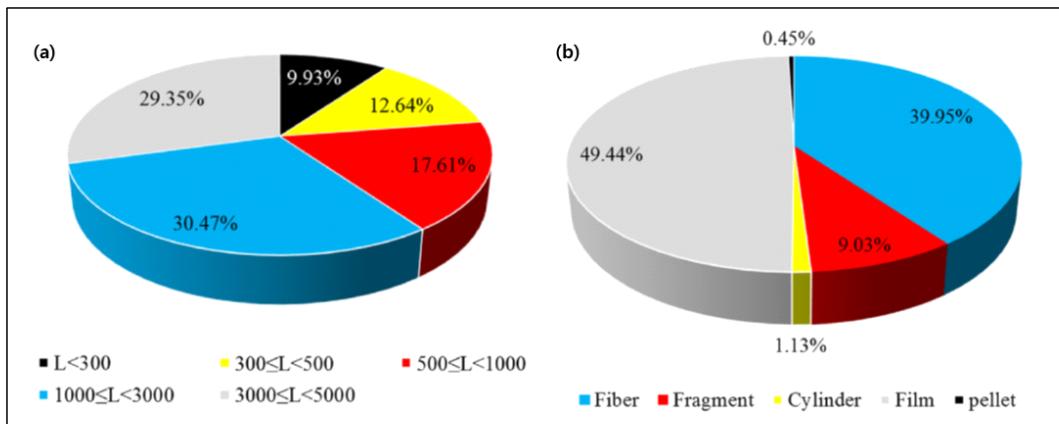
(2) 국외

❖ 카스피해 연안

Manbohi et al.(2021)은 남부 카스피해 연안 및 연안 표층수에서 미세플라스틱의 발생, 특징, 분포 등을 연구하였다. 카스피해는 전 세계에서 가장 큰 내륙 수역으로, 러시아, 카자흐스탄, 아제르바이잔, 이란, 투르크메니스탄 등 5개국에 둘러싸여 있다. 카스피해 연안의 평균 미세플라스틱 농도는 0.246 ± 0.02 개/ m^3 ($0.056\sim 0.635$ 개/ m^3)로 검출되었다. 1,000~5,000 μm 크기의 미세플라스틱이 전체의 60% 정도 차지하였고, 필름(film)과 섬유(fiber)가 약 90%를 차지하였다. 필름은 일반적으로 포장재, 비닐로부터 생성되고, 섬유는 양식장과 어업에서 사용하는 그물, 직물로부터 유래할 수 있다. 필름과 섬유가 대부분을 차지한다는 모니터링 결과는 카스피해 연안에 1차 미세플라스틱보다 2차 미세플라스틱의 기여도가 높다는 것을 의미한다.

카스피해의 미세플라스틱 발생원은 해안 관광, 어업 활동, 하천, 도시 폐기물, 운송 등으로 예상하였다. 낚시를 하거나 가두리 양식장이 있는 지점의 경우, 다른 지점에 비해 섬유상 미세플라스틱의 비중이 매우 높았다. 즉, 연안의 미세플라스틱 분포는 도시화뿐만 아니라 어업, 관광 활동 등에 영향을 받을 수 있음을 알 수 있다.

[그림 2-17] 카스피해 연안에서 수집한 미세플라스틱 크기(a) 및 종류(b)



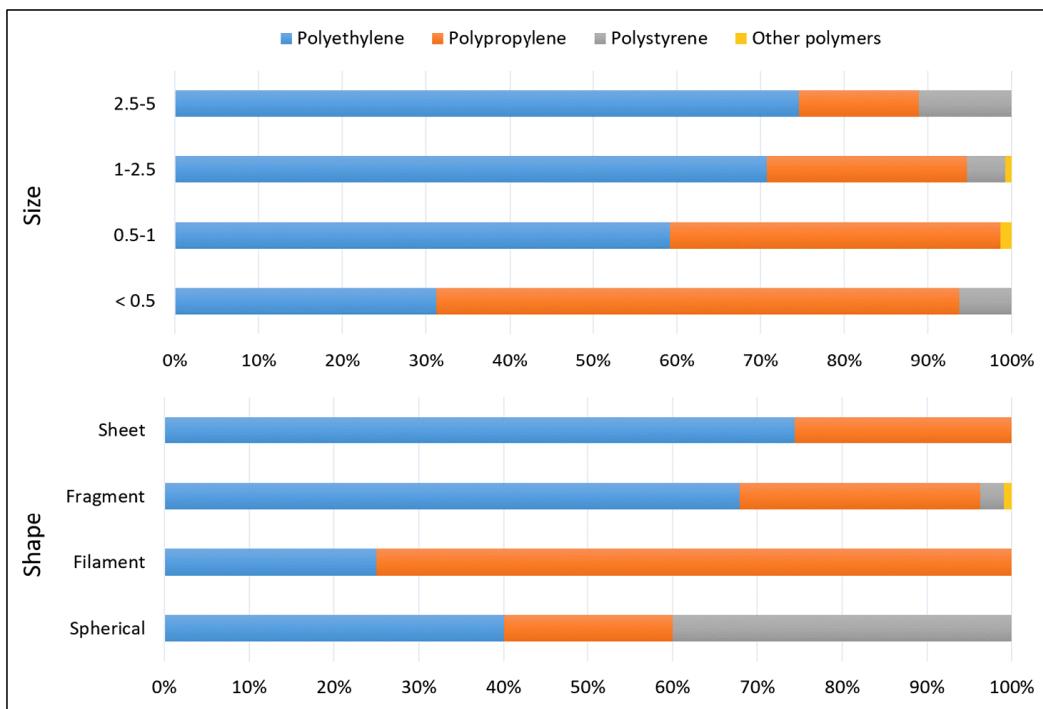
자료(출처): Manbohi et al.(2021)

• 토스카나 연안

토스카나는 이탈리아 중부에 있는 주이며, 해안에는 이탈리아 최대 규모의 항구가 자리 잡고 있다. 큰 규모의 강이 도시, 농업 지역, 산업 지역을 가로지르고, 도시 옆에 해안이 있는 지역적·산업적 특징으로 인해 토스카나 연안에는 다량의 미세플라스틱이 축적될 가능성이 있다. 토스카나 연안에서 미세플라스틱은 겨울에 평균 0.212 ± 0.360 개/ m^3 , 봄에 평균 0.27 ± 0.33 개/ m^3 로 나타났다(Baini et al., 2018).

토스카나 연안의 미세플라스틱은 대부분 폴리에틸렌(66%)이고, 폴리프로필렌(28%), 폴리스티렌(5%), 에틸렌-비닐 아세테이트(1%), 스티렌 부타디엔(1%)이 조사되었다. 0.5 mm 이하 크기의 미세플라스틱은 폴리프로필렌의 비중이 가장 높았다(Baini et al., 2018). 폴리에틸렌과 폴리프로필렌은 물보다 밀도가 낮아서 지표수에 부유할 수 있으며, 모니터링 결과 두 종류의 미세플라스틱이 대부분 검출됨을 확인하였다([그림 2-18] 참고).

[그림 2-18] 토스카나 해안의 미세플라스틱 크기 및 종류 비율(%)



자료(출처): Baini et al.(2018)

4. 미세플라스틱 독성

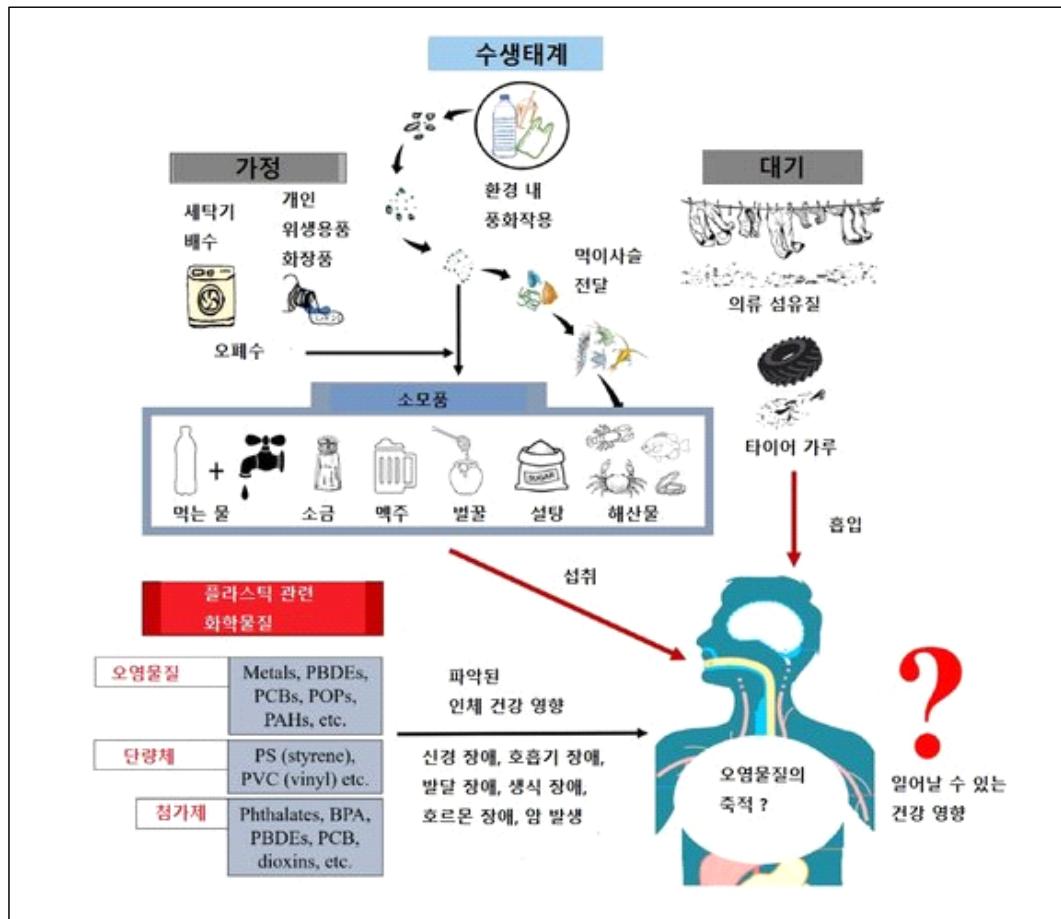
1) 인체 독성

미세플라스틱은 대기, 수계, 토양뿐만 아니라 인간이 소비하는 식품에 잔류하므로 섭취 또는 흡입 시 건강에 악영향을 미칠 수 있다([그림 2-19] 참고). 가정에서 수계로 배출된 미세플라스틱은 식수와 식품에 축적되어 섭취를 통해 인체로 유입되고, 대기에 부유하는 미세플라스틱은 흡입 경로를 통해 인체로 유입된다(Senathirajah et al. 2021).

Danopoulos et al.(2021)은 사람이 식품을 통해 섭취하는 미세플라스틱이 세포 사멸, 알레르기 반응 등을 유발할 수 있음을 확인하였다([그림 2-20] 참고). 발표된 기존 연구 논문을 바탕으로 인체 세포에 유해한 미세플라스틱 수준을 제시하고 독성 영향을 다섯 가지 범주로 나누어 분석한 결과, 미세플라스틱이 세포독성, 면역반응 교란, 산화스트레스, 세포 장벽변형에 영향을 주는 것으로 나타났다. 반면 유전독성은 미세플라스틱에 의한 영향이 확인되지 않았다.

미세플라스틱의 노출 농도가 $10\mu\text{g}/\text{ml}$ ($5\sim200\mu\text{m}$)이면 세포 생존율이 낮아졌고, $20\mu\text{g}/\text{ml}$ ($0.4\mu\text{m}$)가 되면 사이토카인(cytokine)⁴⁾이 분비되고 산화스트레스가 나타났다. 또한 구형 미세플라스틱보다 불규칙 형태의 미세플라스틱이 세포 사멸을 더 많이 유발하였다.

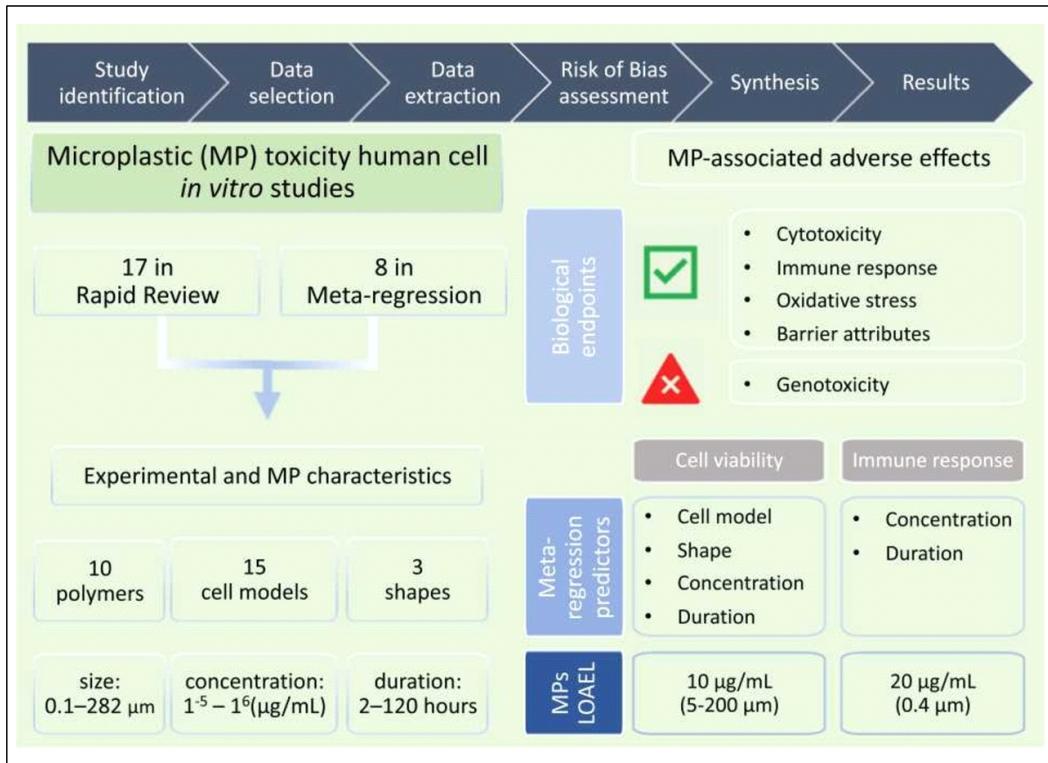
[그림 2-19] 미세플라스틱의 인체 유입경로



자료(출처): Senathirajah et al.(2021), 강찬수(2023)

4) 체내에서 면역체계 및 염증을 조절하는 신호 단백질

[그림 2-20] Danopoulos et al.(2021) 연구요약



주1: 17건의 연구 논문 검토, 8건의 메타 회귀분석을 통해 10종의 폴리머, 15종의 세포 모델, 3종의 입자크기 조건을 선별하였다.

주2: 미세플라스틱은 네 가지(세포독성, 면역반응 교란, 산화스트레스, 세포 장벽변형)의 생물학적 종말점에 영향을 줄 수 있다.

주3: 메타 회귀모형을 통해 세포 생존력과 세포 모형, 미세플라스틱 형태, 농도, 노출 기간의 상관관계를 분석하였고, 면역반응과 미세플라스틱 농도, 노출 기간의 상관관계를 분석하였다.

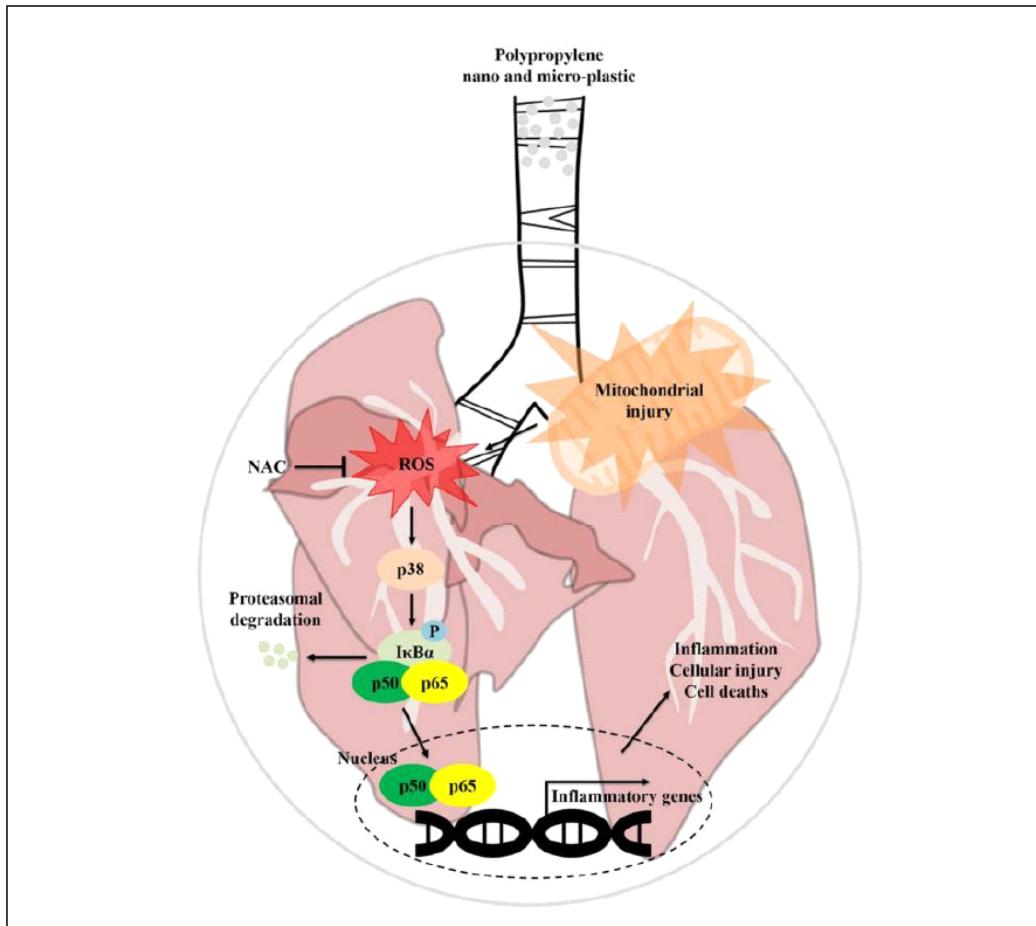
주4: 세포 생존에 대한 미세플라스틱의 최소독성용량(LOAEL, Lowest observed adverse effect level)은 10µg/mL, 면역반응에 대한 최소독성용량은 20µg/mL로 산출되었다.

자료(출처): Danopoulos et al.(2021)

Woo et al.(2023)은 폴리프로필렌(polypropylene) 미세플라스틱을 실험동물의 기도에 노출(기도 내 점적 투여5))하여 폐 손상을 확인하였다. 폐의 염증성 세포 수와 활성산소 생성이 대조군에 비해 크게 증가하였고, 폐 조직의 염증 반응을 관찰하였다. 또한 폴리프로필렌 미세플라스틱이 인체 폐암 상피세포(A549)에 노출되면 미토콘드리아 손상이 일어나고, 염증 반응을 유도하는 신호전달경로를 통해 세포 손상과 염증 유발이 나타났다([그림 2-21] 참고).

5) 기도에 실험 물질을 노출하여 호흡 과정을 통해 폐로 물질이 전달되는 방식

[그림 2-21] 폴리프로필렌 미세플라스틱 노출을 통한 폐 손상 경로



주1: 폴리프로필렌 미세플라스틱이 기도를 통해 폐로 유입되면 미토콘드리아가 손상되어 활성산소(ROS)가 생성되고 p38⁶⁾ 신호전달경로가 활성화된다.

주2: 활성화된 신호전달경로는 p-NF- κ B $7)$ 를 활성화하여 프로테아좀 $8)$ 분해로 연결된다.

주3: 활성화된 p-NF- κ B는 염증 반응, 세포사멸을 유도한다.

자료(출처): Woo et al.(2023)

2) 생태 독성

미세플라스틱은 수계에 서식하는 생물에 급성 및 만성 독성 영향을 미칠 수 있다. 미세플라스틱의 생태 독성은 입자크기, 영양단계에 따른 섭취 가능성, 화학성분 등 다양한

6) 염증, 세포 스트레스, 세포사멸, 세포 성장 등의 생리학적 과정에서 중요한 역할을 하는 단백질(ABclonal, 2023)

7) 면역 단백질 생성과 세포의 생존에 관여하는 단백질 복합체(위키백과, 2022, 핵인자 카파비)

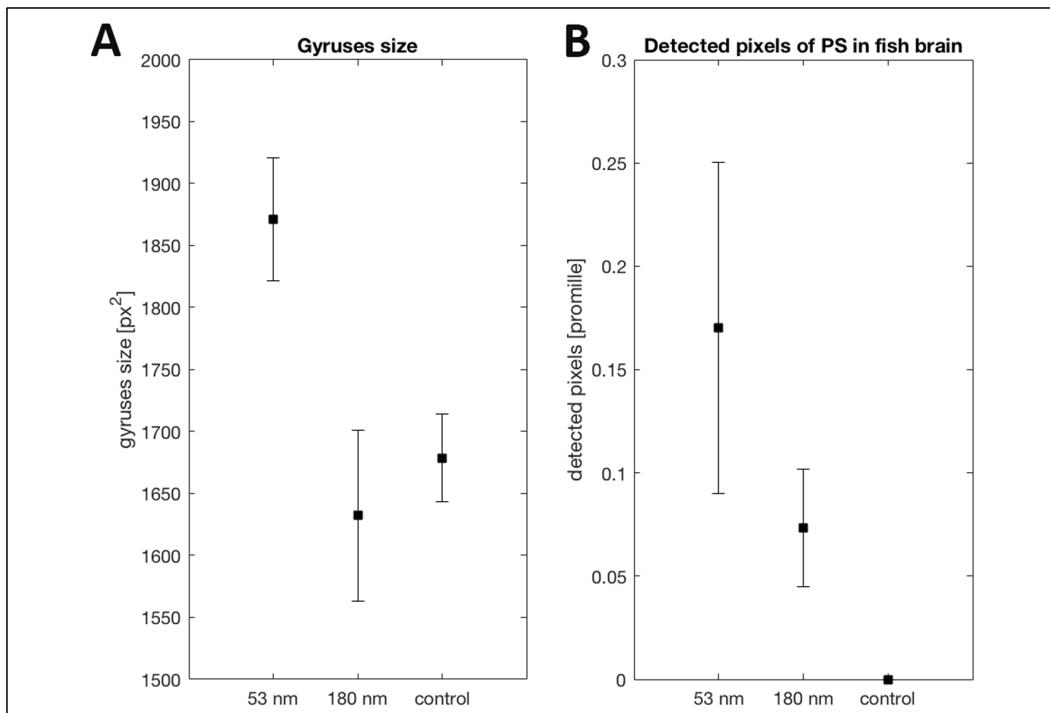
8) 세포 내에서 여분의 단백질을 분해하는 단백질 분해효소 복합체(위키백과, 2023, 프로테아좀)

요인을 통해 발생한다. 생태 독성은 결국 최상위 포식자인 인체 건강과 직결되므로 생태 독성의 메커니즘에 대한 정확한 이해가 필요하다.

Mattsson et al.(2017)은 물벼룩을 대상으로 미세플라스틱의 입자 크기별 독성 실험을 한 결과, 입자의 크기가 생태 독성에 중요한 요인임을 알아냈다. 53nm 크기의 폴리스티렌 (polystyrene)을 다양한 농도에 노출한 후 24시간 동안 살아있는 물벼룩 수를 조사한 결과 0.075g/L 이상 농도에서는 모두 13시간 이내 사멸하였다.

미세플라스틱은 먹이사슬을 통해 상위 포식자인 어류의 뇌로 침투하여 행동 장애를 일으키거나 생태계의 기능을 훼손할 가능성이 있다. 53nm 미세플라스틱에 노출된 물벼룩을 섭취한 어류는 대조군에 비해 행동 속도가 저하되었다. 이는 섭식 속도의 감소, 먹이 탐색 영역의 감소, 활동 저하 등의 양상을 통해 어류의 에너지 사용이 최적화되지 않았음을 알 수 있다. 미세플라스틱이 축적된 물벼룩을 섭취한 어류의 뇌에서는 폴리스티렌 미세플라스틱이 검출되었고, 대조군에 비해 크기 증가와 형태가 변한 것을 관찰하였다([그림 2-22] 참고). 즉, 먹이사슬을 통해 물벼룩 체내 미세플라스틱 중 일부가 어류의 뇌에 침투하여 행동 장애를 일으킨 것으로 예상된다.

[그림 2-22] 미세플라스틱이 축적된 물벼룩을 섭취한 어류의 뇌 영향



주1: 53nm, 180nm 크기의 미세플라스틱 노출군과 대조군의 어류 뇌 크기를 비교한 결과, 53nm 미세플라스틱 노출군의 어류 뇌가 가장 큰 것으로 나타났다(그림 A). 노출군은 미세플라스틱이 축적된 물벼룩을 섭취한 어류이고, 대조군은 정상 상태의 물벼룩을 섭취한 어류이다.

주2: 어류 뇌 샘플에서 미세플라스틱을 분석한 결과, 53nm 노출군에서 가장 많은 미세플라스틱이 검출되었다(그림 B). 자료(출처): Mattsson et al.(2017)

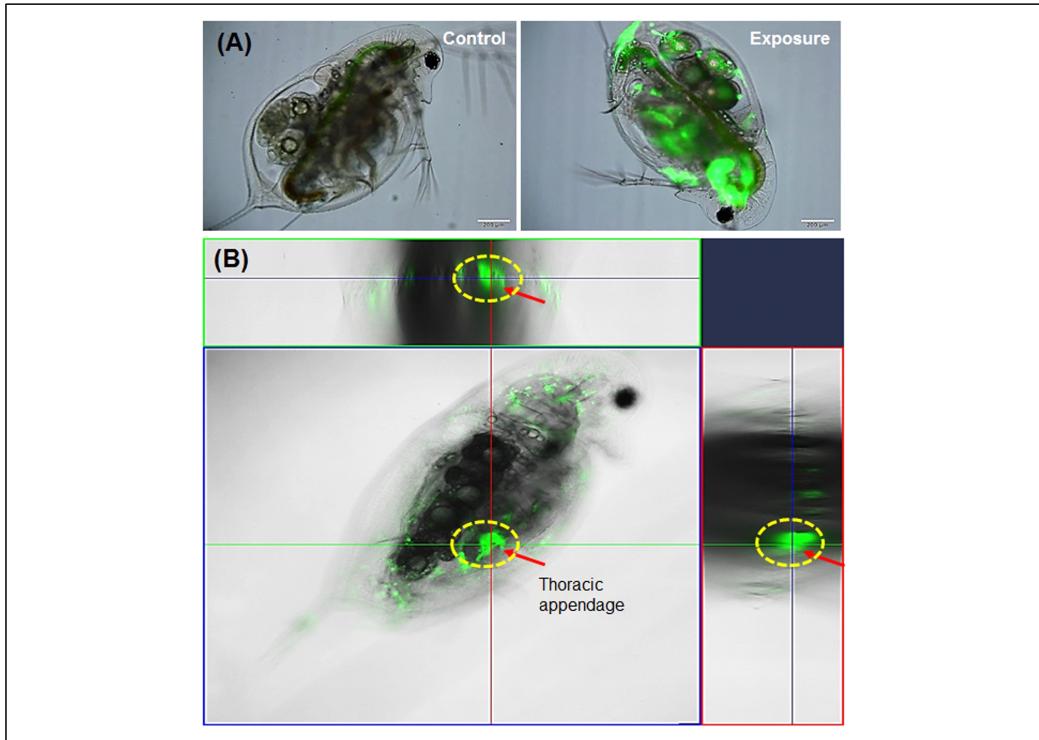
Cui et al.(2017)은 한국 우점종인 유리 물벼룩(*Daphnia galeata*)에 5mg/L 농도의 폴리스티렌(polystyrene) 미세플라스틱을 노출하여 생식독성 및 배아 발달을 관찰하였다. 미세플라스틱에 노출된 배아의 $10 \pm 15\%$ 만 정상적으로 부화하였고, 사망률은 $83 \pm 25\%$ 로 나타났다. 미세플라스틱은 물벼룩의 소화기관, 생식기관, 알주머니에 침투하고, 흉부 부속기에 특히 축적이 많이 되는 것으로 보아 해당 기관이 미세플라스틱의 침투 경로임을 예측하였다 ([그림 2-23] 참고).

폴리스티렌 미세플라스틱에 노출된 물벼룩의 경우 체내 지방 저장을 조절하는 지방 소립⁹⁾ 형태가 크게 변화하였고, 이는 물벼룩의 번식과 관련이 있음을 파악하였다. 대조군과 미세플라스틱 노출군 암컷 물벼룩으로부터 분리한 배아의 염색 분석 결과, 대조군에 비해 노출군에서 형광 밝기가 크게 나타났다. 즉, 모계의 미세플라스틱 노출 여부에 따라 지질

9) 생물체 내 지방을 조절하는 기능을 수행

저장의 양상이 변하는 것을 알 수 있다([그림 2-24] 참고). 결국, 미세플라스틱은 다세대 독성과 관련이 있으므로 물벼룩 세대 간 연구 및 메커니즘 규명이 필요하다.

[그림 2-23] 미세플라스틱의 물벼룩 체내 이동 경로

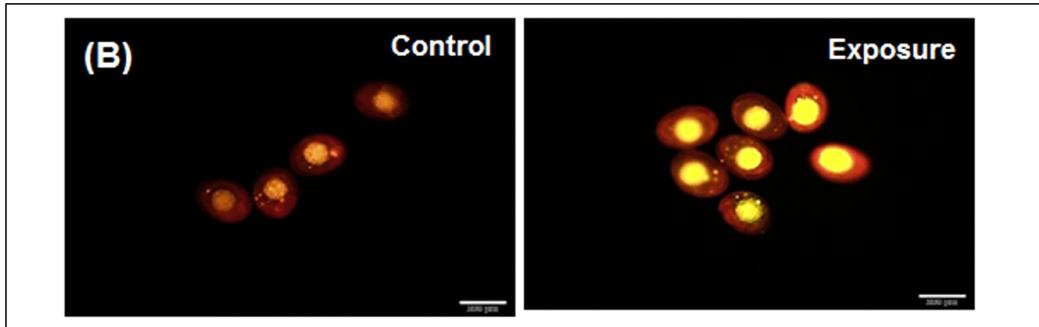


주1: 물벼룩 대조군과 미세플라스틱 노출군을 광학현미경으로 관찰한 결과, 미세플라스틱에 노출된 개체 전체에서 입자가 확인되었다(그림 A).

주2: 미세플라스틱이 흉부 부속기(throacic appendage)에 많이 축적됨을 현미경으로 관찰하였다(그림 B).

자료(출처): Cui et al.(2017)

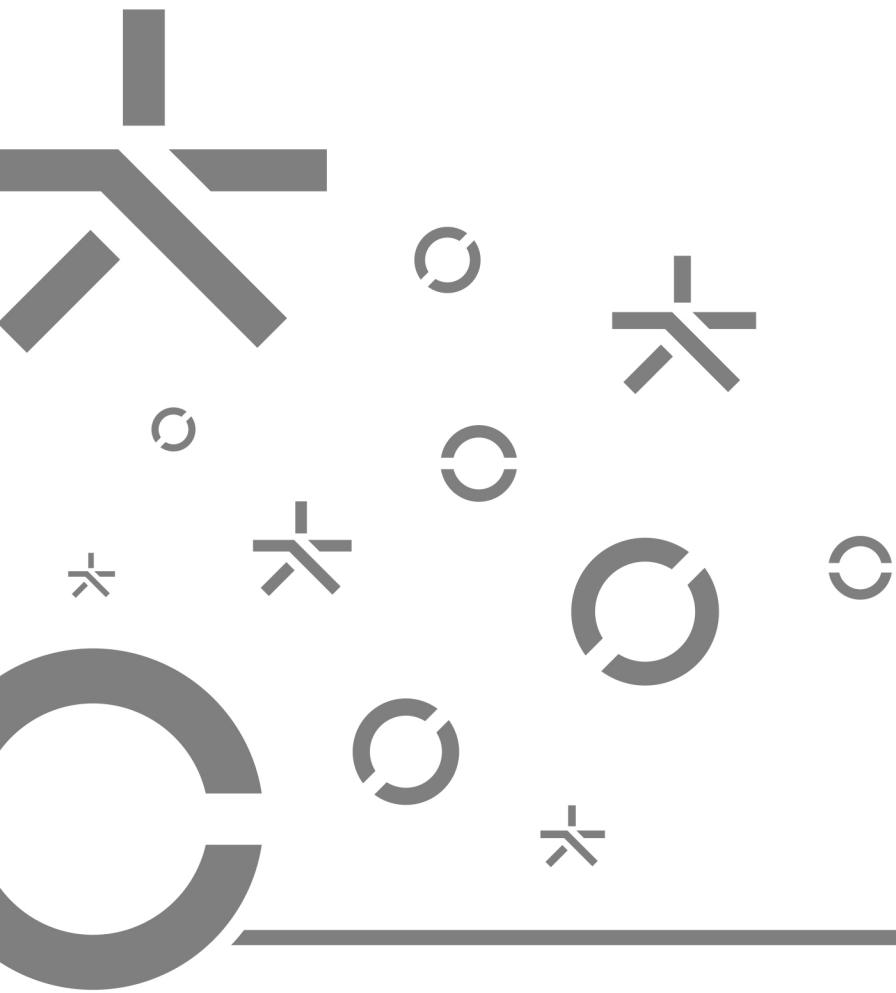
[그림 2-24] 물벼룩 배아의 대조군 및 노출군의 지방 소립 관찰



자료(출처): Cui et al.(2017)

3

인천 연안 미세플라스틱 분포

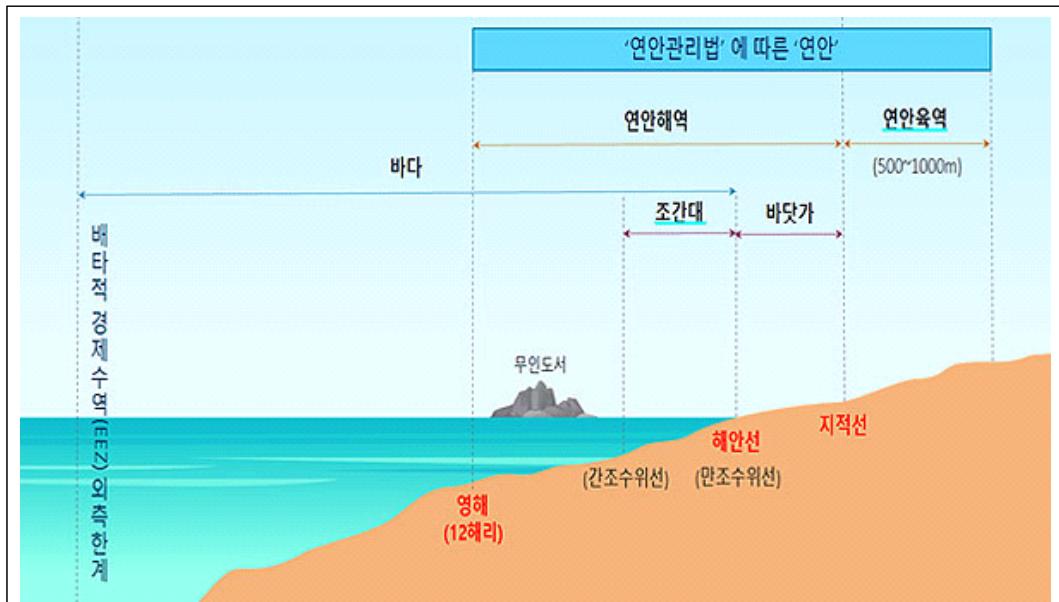


인천 연안 미세플라스틱 분포

1. 인천 연안의 특징

연안은 해양과 육지가 맞닿은 지역 및 해역으로, 연안 해역과 연안 육역을 의미한다. 연안 해역은 해안선으로부터 지적공부에 등록된 지역 사이의 바닷가와 해안선으로부터 영해의 외측 한계 사이의 바다이고, 연안 육역은 무인도서와 연안 해역의 육지 쪽 경계선으로부터 500~1000m 이내의 육지 지역을 말한다([그림 3-1] 참고).

[그림 3-1] 연안의 정의



자료(출처): 김정호(2023)

인천 연안은 리아스식 해안(하천 침식을 받은 지역이 지반 침강 또는 해수면 상승으로 침수되어 형성)을 포함하고 168개의 섬이 분포하고 있다(인천광역시, 2019). 2022년 기준 우리나라의 해안선은 총 15,258km이며 인천광역시는 1,077km(자연 해안선 649.11km, 인공해안선 428.09km)로 조사되었다. 인천광역시 행정 구역별 해안선의 길이는 중구(147.87 km), 동구(9.87km), 연수구(39.82km), 남동구(5.71km), 서구(27.5km), 강화군(270.38km), 옹진군(576.05km)이다 (행정안전부, 2022a). 연안관리법에 따라 인천 연안은 강화도를 포함한 인근 해역부터 인천항, 영종도, 영흥도, 덕적도 해안을 포함한다([그림 3-2] 참고).

[그림 3-2] 인천 연안의 범위



주: 인천 연안은 검은색으로 표시된 지역임

자료(출처): 해양환경정보포털(a)

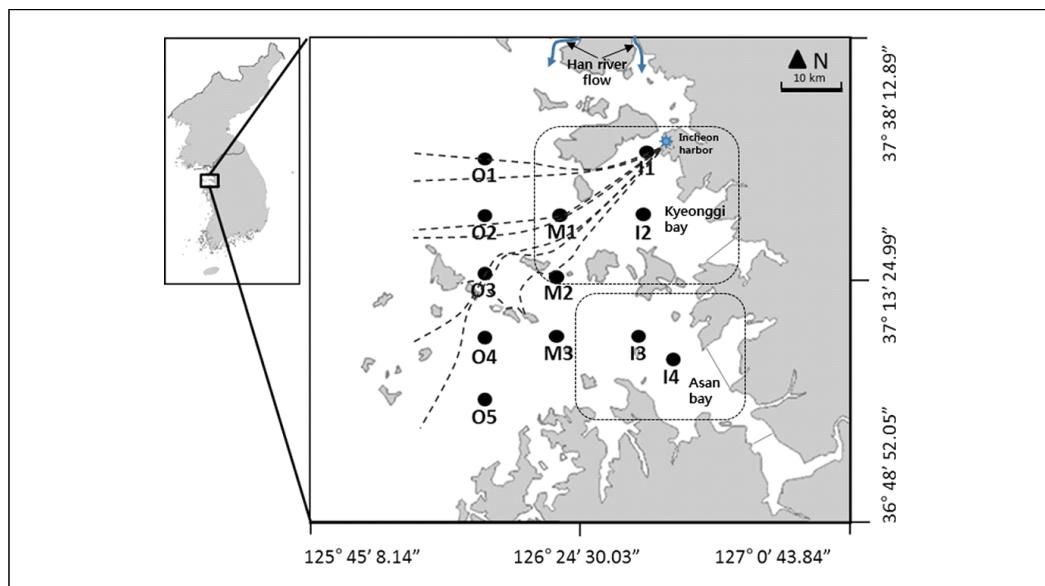
2. 인천 연안의 미세플라스틱 연구 동향

1) Chae et al.(2015)

Chae et al.(2015)는 경기만, 아산만, 인천항부터 소야도를 포함하는 인천-경기 연안의 12개 관측소에서 2013년 8월에 시료를 채취하였다([그림 3-3] 참고). 시료는 손 그물(hand net)과 트롤망(trawl net)을 이용하여 표면 해수층(surface microlayer, SML)과 해수층(subsurface water, SSW)에서 수집하였다. 시료에서 파악한 미세플라스틱의 크기는 4등급 ($1000\mu\text{m}$ 이상, $500\mu\text{m} \sim 1000\mu\text{m}$, $300\mu\text{m} \sim 500\mu\text{m}$, $50\mu\text{m} \sim 300\mu\text{m}$)으로 분류하였다.

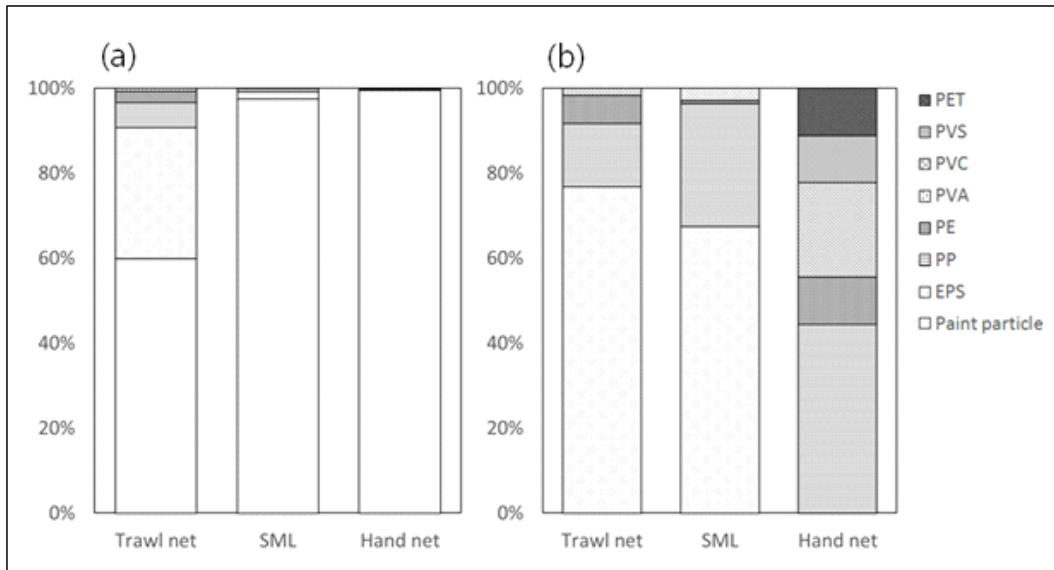
해당 연구에서는 미세플라스틱 성분 중 PP, PE, PVC, PVA, PVS, PET, EPS, 페인트 입자를 확인하였다. 분석 장비로 확인한 페인트 입자는 alkyd 레진과 poly(acrylate/styrene)를 의미한다. 식별된 미세플라스틱의 주요 구성성분은 페인트 입자로 확인되었다. 페인트 입자는 SML 샘플에서 98.7%, 손 그물로 수집한 SSW 샘플에서 99.6%, 트롤망으로 수집한 SSW 샘플에서 59.9%로 검출되었다. 페인트 입자를 제외하면 해수 시료에서는 EPS와 PP, PE가 높은 비중을 차지하였다([그림 3-4] 참고).

[그림 3-3] Chae et al.(2015) 연구의 조사 지점



자료(출처): Chae et al.(2015)

[그림 3-4] 미세플라스틱 조성 비율



주1: (a)는 해수 시료에서 페인트 입자를 포함한 미세플라스틱 구성 비율이고, (b)는 페인트 입자를 제외한 미세플라스틱의 구성 비율임.

주2: 그래프의 x축은 다음을 의미함.

- Trawl net은 트롤링을 이용하여 수집한 해수 시료임.
- SML은 표면 해수층 시료임.
- Hand net은 손 그물을 이용하여 수집한 해수 시료임.

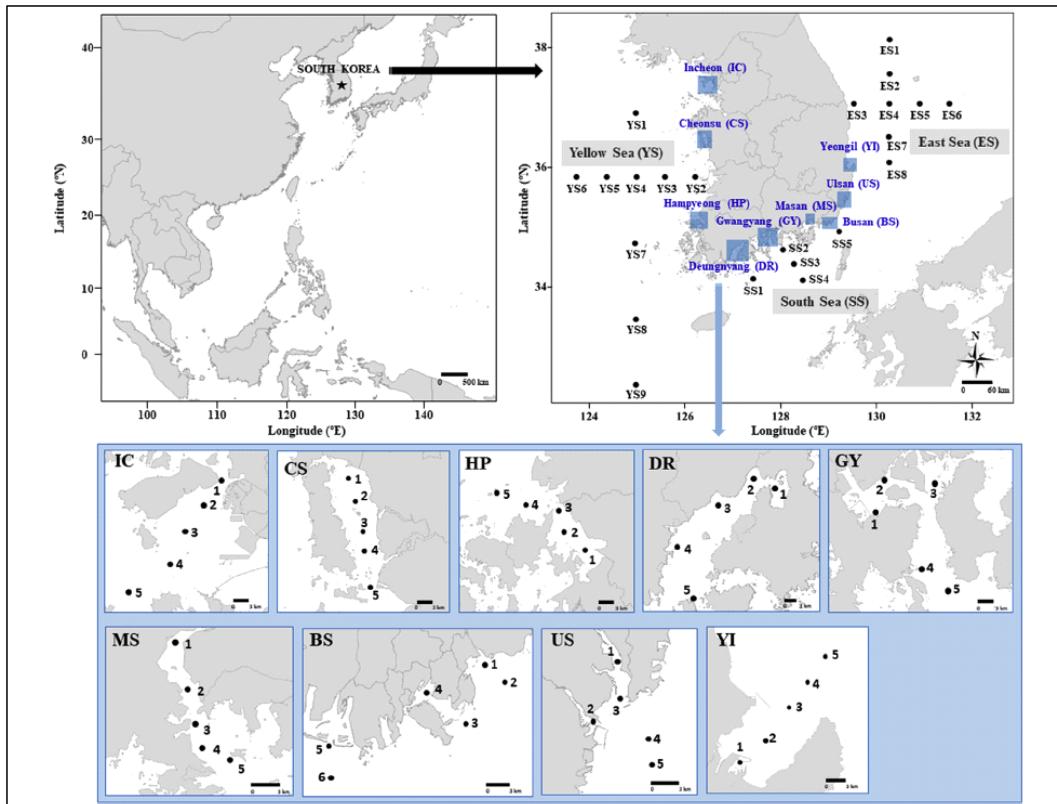
자료(출처): Chae et al.(2015)

2) Jung et al.(2021)

Jung et al.(2021)은 2016년부터 2017년까지 9개 연안(인천, 부산, 마산, 광양만, 영일만, 울산만, 천수만, 함평만, 득량만)에서 20~300 μm 크기의 미세플라스틱 샘플을 수집하였다([그림 3-5] 참고). 정량분석 결과 평균 0.29~1.57개/ ℓ 의 미세플라스틱이 분포하였고, 인천에서는 1.57개/ ℓ 로 가장 높게 나타났다.

20~300 μm 크기의 미세플라스틱 예측무영향농도는 12개/ ℓ 로 산출되었으며, 우리나라 연안에 분포하는 미세플라스틱 농도가 해양생물에 영향을 미치는 수준 이하인 것으로 예측하였다. 하지만 현재 미세플라스틱 오염 속도를 고려하면 2100년까지 미세플라스틱의 농도는 50배로 증가하고, 해당 시점에는 미세플라스틱 농도가 PNEC 값을 초과할 가능성이 있다.

[그림 3-5] Jung et al.(2021) 연구의 조사지점

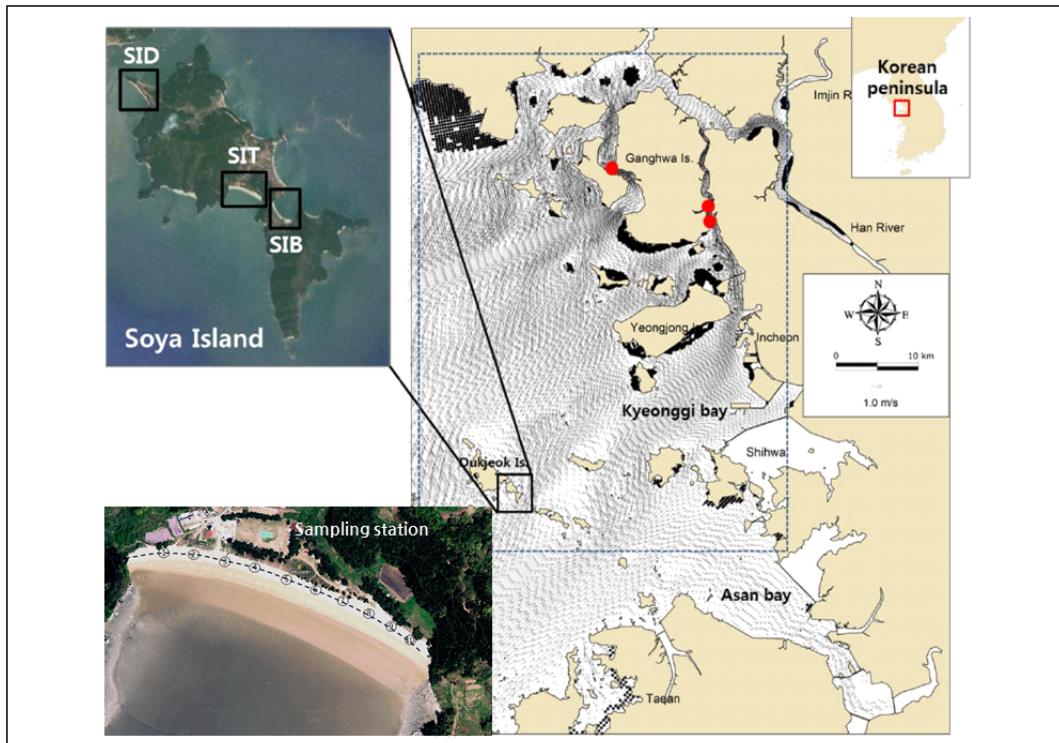


자료(출처): Jung et al.(2021)

3) Kim et al.(2015)

Kim et al.(2015)는 해안 환경에서 미세플라스틱이 공간적 분포에 미치는 요인을 파악하기 위해 섬의 해변에서 미세플라스틱 풍부도와 공간적 분포를 파악하였다. 인천 소야도는 조수가 높고 규모가 작은 섬으로, 인위적 활동(관광)의 영향을 최소한으로 받는 지역이므로 연구 지점으로 선정되었다. 소야도 내 6개 해변 중 방향, 접근성, 인위적 활동 등을 고려하여 3개 해변(SID(남서쪽 방향), SIT(남쪽 방향), SIB(북쪽 방향))을 조사 지점으로 선별하여 2013년 7월에 퇴적물을 수집하였다.

[그림 3-6] Kim et al.(2015) 연구의 조사 지점



자료(출처): Kim et al.(2015)

3개의 해변에서 조사된 미세플라스틱($<5,000\mu\text{m}$)의 정량분석 결과, SID 지점은 $119,182 \pm 96,885$ 개/ m^2 , SIT 지점은 $46,669 \pm 44,614$ 개/ m^2 , SIB 지점은 $1,247 \pm 918$ 개/ m^2 로 조사되었다. 미세플라스틱 정성분석 결과 PP, PE, PS, PVS, PU, EPS, paraffin, PA, EVA, ABS가 검출되었다. 조사 지점에서는 EPS 입자가 매우 우세하였고, 이는 대부분 대형 스티로폼 부표들이 산화 및 풍화작용으로 파편화된 것으로 보인다. 조사 지점별 EPS 함량의 최대 풍부도는 SID 285,221개/ m^2 , SIT 137,860개/ m^2 , SIB 3,260개/ m^2 로 나타났다 ([표 3-1] 참고).

SID, SIT 지점에 비해 SIB의 미세플라스틱 함량이 낮게 나타나는 것은 계절풍과 해류 방향의 영향이다. 조사 시점상 풍향은 남풍, 조류 방향은 북동쪽에서 남서쪽으로 썰물이 발생하고 반대 방향으로 밀물이 발생하였다. 이에 따라 북쪽 연안의 미세플라스틱 농도가 상대적으로 낮게 관찰된 것으로 예상하였다.

[표 3-1] 조사 지점별 EPS와 Non-EPS 미세플라스틱 농도

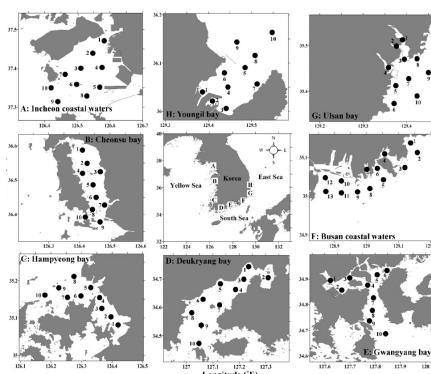
사이즈(μm)	EPS(개/m ³)			Non-EPS(개/m ³)		
	SID(n=8)	SIT(n=10)	SIB(n=13)	SID(n=8)	SIT(n=10)	SIB(n=13)
>5,000	2,287±2,387	286±280	4±6	108±88	42±44	1±2
4,000~5,000	2,638±2,622	281±217	2±5	45±39	36±51	1±2
2,800~4,000	23,200±21,671	3,614±2,261	35±63	99±99	147±234	2±3
2,000~2,800	31,573±29,459	7,593±4,831	349±76	54±50	134±145	2±4
1,000~2,000	38,076±31,866	17,324±17,996	147±217	47±48	88±120	6±9
500~1,000	18,533±12,998	13,739±22,112	346±495	58±33	134±207	12±17
300~500	2,175±1,716	1,534±1,986	91±138		12±28	3±8
50~300	2,688±1,621	2,031±2,024	463±543			88±181
전체	118,168±96,688	46,118±44,017	1,133±938	301±227	551±621	144±180

자료(출처): Kim et al.(2015)

4) Kwon et al.(2020)

Kwon et al.(2020)은 도시지역과 농어촌 지역 간 미세플라스틱의 차이를 비교하기 위해 2015~2017년 7~8월에 8곳 지점을 대상으로 연구를 수행하였다. 조사 지점은 인천 연안, 부산 연안, 광양만, 영일만, 울산만, 천수만, 함평만, 득량만을 대상으로 산업시설과 인접한 도시지역과 어업 활동을 주로 하는 농어촌 지역을 선정하였다([표 3-2] 참고).

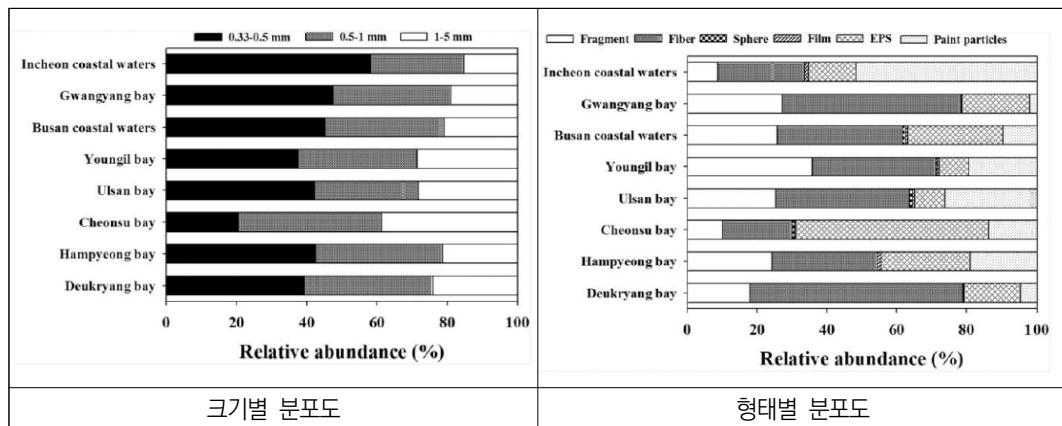
[표 3-2] Kwon et al.(2020) 연구의 조사 지점

지점	구분	정보	산업	조사 지점
인천연안	도시	특별관리구역 (국제항만 및 산업단지 포함)	광역도시	
광양만	도시	특별관리구역 (국제항만 및 산업단지 포함)	제철소, 화학단지	
부산연안	도시	특별관리구역 (국제항만 및 산업단지 포함)	광역도시	
영일만	도시	국제항만 및 산업단지 포함	제철소	
울산만	도시	특별관리구역 (국제항만 및 산업단지 포함)	석유화학 단지	
천수만	농어촌	어업 및 양식업		
함평만	농어촌	환경보전지역(어업 및 양식업)		
득량만	농어촌	환경보전지역(어업 및 양식업)		

자료(출처): Kwon et al.(2020)

연구 결과 8곳의 조사 지점에서는 평균 $1.12\sim4.73\text{개}/\text{m}^3$ 미세플라스틱이 분포하였고, 인천 연안에서는 평균 $1.96\text{개}/\text{m}^3$ 미세플라스틱이 검출되었다. 도시지역 수계의 미세플라스틱 농도($2.85\text{개}/\text{m}^3$)는 농어촌 지역($1.86\text{개}/\text{m}^3$)보다 높게 나타났다. $0.33\sim0.5\text{mm}$ 크기의 미세플라스틱은 전체에서 $20.4\sim58.2\%$ 로 인천 연안에서 가장 높은 비율(58.2%)을 보였고, 해당 크기의 미세플라스틱은 농어촌 지역(34.1%)보다 도시지역(46.1%)이 더 큰 비중을 차지하였다([그림 3-7] 참고).

[그림 3-7] 지역별 미세플라스틱 크기 및 형태별 분포도



자료(출처): Kwon et al.(2020)

미세플라스틱 성분 분석 결과 대부분 섬유형, 페인트 입자, 파편형, 발포 폴리스티렌(EPS)이 차지하였다. 도시지역의 경우 파편형, 페인트 입자, 섬유형이 우세했지만, 농어촌 지역은 EPS가 우세하였고 인천 연안에서는 주로 페인트 입자, 섬유형이 관찰되었다([표 3-3] 참고).

[표 3-3] 미세플라스틱 크기별 형태별 평균 풍부도

(단위: 개/m³, *p<0.05)

구분	크기	형태						
		파편형	섬유형	구형	필름형	EPS	페인트 입자형	
도시	1~5mm	0.19	0.30	0.00	0.01	0.07	0.14	0.71
	0.5~1mm	0.22	0.34	0.01	0.01	0.12	0.19	0.89
	0.33~0.5mm	0.28	0.38	0.01	0.00	0.26	0.32	1.25
	sub-total	0.69*	1.02	0.02	0.02	0.45*	0.65*	2.85*
농어촌	1~5mm	0.09	0.13	0.00	0.01	0.32	0.03	0.58
	0.5~1mm	0.09	0.23	0.00	0.01	0.29	0.10	0.72
	0.33~0.5mm	0.11	0.23	0.00	0.00	0.10	0.12	0.56
	sub-total	0.29*	0.59	0.00	0.02	0.71*	0.25*	1.85*

자료(출처): Kwon et al.(2020)

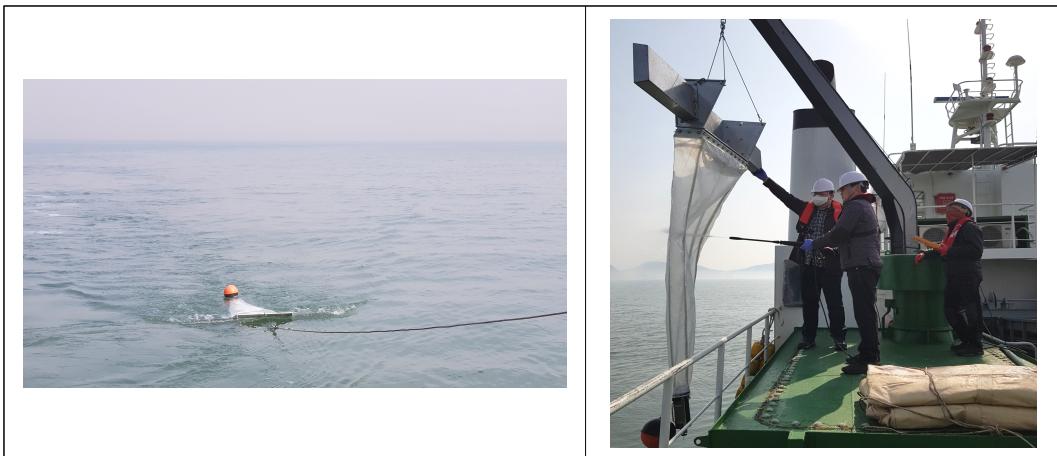
5) 유재원 외.(2020; 2021; 2022)

유재원 외.(2020; 2021; 2022)는 2020년부터 2022년까지 한강하구의 수환경 실태와 수질 상태를 파악하기 위한 환경기초조사를 하였다. 인천광역시, 경기도 등 한강 하구역과 한강하구 공동수역 11곳에서 연 5회 시료를 채취하여 18종의 항목을 조사하였고, 본 연구에서는 미세플라스틱의 결과를 활용하였다.

6) 인천광역시(2020)

2019년 3월부터 8월까지 인천광역시는 인천 연안의 5개 지점을 대상으로 미세플라스틱을 확인하였고, 조사 지점은 세어도 해역(한강 및 수도권 매립지 등 오염원), 영종대교 해역(수도권 매립지 및 아라천 등 오염원), 인천 신항 해역(인천 신항 및 유수지 등 오염원) 등 내해 3개소와 덕적도 및 자월도 해역 등 외해 2개소를 선정하였다.

[그림 3-8] 미세플라스틱 시료 채취 방법



자료(출처): 인천광역시(2020)

미세플라스틱은 세어도 해역 8.19 ± 0.28 개/ m^3 , 영종대교 해역 7.59 ± 0.46 개/ m^3 , 인천 신항 해역 6.74 ± 0.41 개/ m^3 , 자월도 해역 4.93 ± 0.37 개/ m^3 , 덕적도 해역 4.75 ± 0.35 개/ m^3 로 분포하였고, 한강의 영향이 가까운 지점에서 미세플라스틱이 많이 검출되었으며, 입자크기가 작아질수록 미세플라스틱 풍부도는 증가하였다. 미세플라스틱이 가장 많이 검출된 지점은 강우 직후(8월) 세어도 해역(10.0 개/ m^3)이었으며, 가장 적게 검출된 지점은 자월도 해역(3월, 3.7 개/ m^3)으로 조사되었다. 또한, 모든 지점에서 하절기 집중 강우 직후 미세플라스틱의 출현이 급증하였는데, 강우 전 대비 약 22~39%의 증가율을 보였다.

미세플라스틱의 정성분석 결과, 검출된 성분은 PE(폴리에틸렌) > PP(폴리프로필렌) > Polyester(폴리에스터) > PU(폴리우레탄) > PET(폴리에틸렌 테레프탈레이트) > PS(폴리스타이レン) 순으로 많았다. 한강 영향이 가장 높은 세어도와 영종대교 해역 지점에서는 타 지점에 비해 상대적으로 단열재, 스티로폼, 포장지 등으로 쓰이는 PS와 섬유 소재인 Polyester 성분이 많이 검출되었다.

7) 환경부(2016; 2018)

한강의 미세플라스틱 분포를 파악하기 위해 국립환경과학원에서 수행한 2016년, 2018년 연구보고서를 활용하였다. 해당 내용은 2장 ‘미세플라스틱 특성’ 중 ‘미세플라스틱 연구 동향’을 참고하였다.

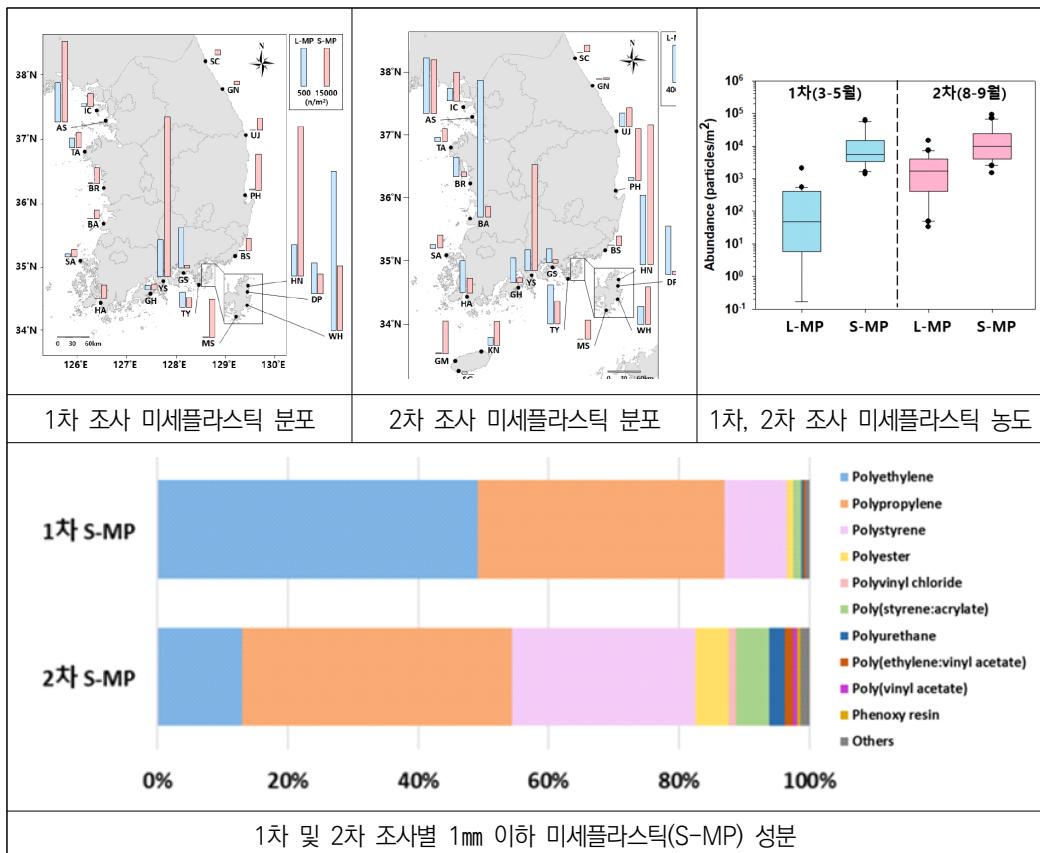
8) 한국해양과학기술원(2021a)

국내 해안의 미세플라스틱 분포 양상을 참고하기 위해 한국해양과학기술원(2021a) 보고서 중 학술논문으로 게재한 부분은 제외하고 해당 내용을 요약하였다. 한국해양과학기술원(2021a)은 2015~2016년 전국 20곳 해안 퇴적물의 2차 조사를 통해 미세플라스틱을 확인하였다. 육안으로 식별할 수 있는 1~5mm 미세플라스틱(large microplastic, L-MP)과 식별이 어려운 1mm 이하 미세플라스틱(small microplastic, S-MP)으로 구분하였다.

1차 조사된 L-MP의 평균 농도는 남해안이 425 ± 621 개/m³로 가장 높았고 서해안이 128 ± 198 개/m³, 동해안 5 ± 10 개/m³이었다. S-MP의 평균 농도는 남해안 $18,910 \pm 9,433$ 개/m³, 서해안 $9,433 \pm 11,039$ 개/m³, 동해안 $5,750 \pm 5,932$ 개/m³로 조사되었다. 2차 조사된 L-MP의 평균 농도는 서해안이 $4,180 \pm 5,466$ 개/m³로 가장 높았고, 남해안이 $2,849 \pm 2,273$ 개/m³, 동해안 485 ± 658 개/m³이었다. S-MP의 평균 농도는 남해안 $24,275 \pm 31,620$ 개/m³, 서해안 $14,208 \pm 11,930$ 개/m³, 동해안 $13,500 \pm 15,093$ 개/m³로 조사되었다. 2차 조사 시 미세플라스틱 농도는 1차 조사의 미세플라스틱보다 L-MP 11배, S-MP 1.4배 높았으며, 이는 우기에 강에서 해양으로 유입된 플라스틱 쓰레기가 표류하였음을 암시한다. 특히 시기적으로 우기 이후 S-MP보다 L-MP가 급격하게 증가한 것으로 보아, 외부 요인으로 인해 미세플라스틱이 해양으로 유입되었음을 알 수 있다.

L-MP는 밸포스티렌이 1차, 2차 조사에서 각각 94.8%, 98.9%로 조사되었으며, S-MP는 1차, 2차 조사에서 파편 형태가 각각 96.7%, 78.6%로 가장 우세하였으며, 조성은 1차 조사에서 PE가 49.2%, PP 37.8%, PS 9.6%이며, 2차 조사에서는 PP 41.4%, PS 28.2%, PE 13%를 차지하였다.

[그림 3-9] 모래 퇴적물의 미세플라스틱 농도 및 조성 분석 결과



자료(출처): 한국해양과학기술원(2021a)

3. 인천 연안의 미세플라스틱 분포

본 연구에서는 인천 연안의 미세플라스틱 분포를 파악하기 위해 선행연구자료를 활용하였다([표 3-4] 참고). 선행연구의 시료 채취 지점을 토대로 인접한 지점은 같은 그룹으로 분류하여 총 여섯 지역을 모니터링 지점으로 선정하였다([그림 3-10] 참고). 우선 한강과 연안의 미세플라스틱 농도를 비교하기 위해 한강 상류와 한강 중·하류를 모니터링 지점으로 선별하였고, 한강 하구 수역으로 합류하는 임진강의 농도를 파악하였다. 인천 연안의 모니터링 지점은 총 세 지역으로, 김포·강화도·볼음도 인근 연안, 영종도·인천 북항 인근 연안, 덕적도 인근 연안으로 분류하였다. 참고문헌에서 시료 채취 지점이 불분명하거나 인천 연안의 총 농도로 결과를 제시한 경우, 해당 자료는 비교 값으로 활용하였다.

[표 3-4] 한강 및 인천 연안의 미세플라스틱 연구 목록

저자(연도)	제목
Chae et al.(2015)	Abundance and Distribution Characteristics of Microplastics in Surface Seawaters of the Incheon/Kyeonggi Coastal Region
Jung et al.(2021)	Ecological risk assessment of microplastics in coastal, shelf, and deep sea waters with a consideration of environmentally relevant size and shape
Kwon et al.(2020)	Spatial distribution of microplastic in the surface waters along the coast of Korea
유재원 외.(2020; 2021; 2022)	한강하구 환경기초조사 연구 용역
인천광역시(2020)	인천시, 해양 미세플라스틱 조사 결과 발표
환경부(2016; 2018)	담수 중 미세플라스틱 조사 기법 연구
한국해양과학기술원(2021a)	해양 미세플라스틱에 의한 환경위해성 연구 최종보고서

선행연구에서 분석한 미세플라스틱 크기는 20 μm 부터 5mm까지 광범위하게 확인되었다. 본 연구에서는 데이터 확보를 위해 100~300 μm 이상 크기의 미세플라스틱 결과를 수집하였고, 100 μm 이하의 미세플라스틱 데이터는 비교 자료로 활용하였다. 또한 미세플라스틱의 구성성분은 고려하지 않고, 미세플라스틱의 총 농도 자료를 수집하였다. 선행연구에서 미세플라스틱의 성분별 농도를 제시한 경우, 성분별 농도를 합산하여 총 농도를 산출하였다. 또한 동일한 모니터링 지점으로 분류된 데이터는 평균을 산출하였다. 데이터를 취합하여 한강 및 인천 연안의 미세플라스틱 분포를 파악한 결과는 [그림 3-10]과 같다.

[그림 3-10] 한강 및 인천 연안의 미세플라스틱 분포

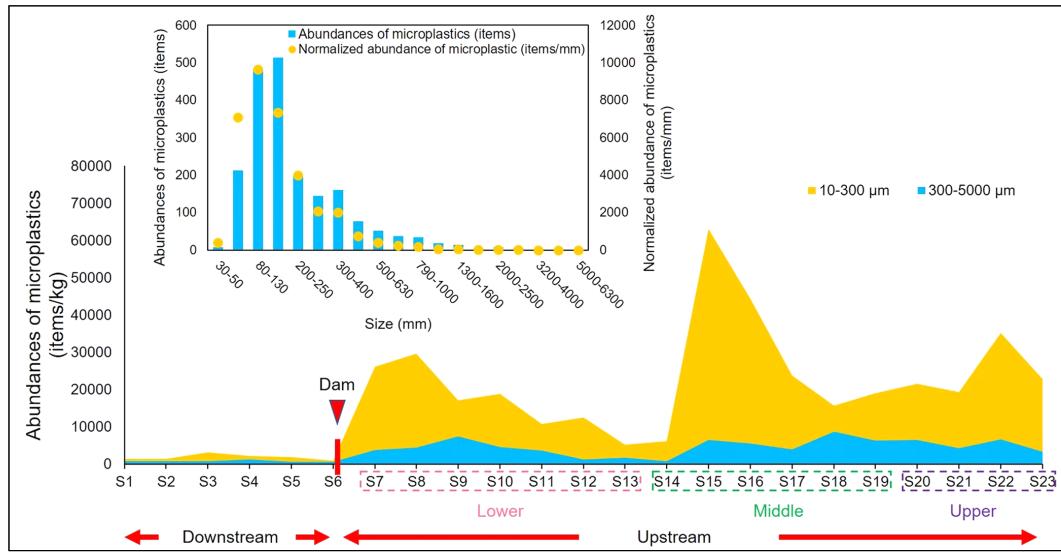


1) St.1

한강 유역의 상류 지점인 St.1에서 100 μm 이상의 미세플라스틱 검출 농도는 3.48개/ m^3 로 나타났다. St.1 지점은 팔당댐 인근으로, 북한강과 남한강이 합류하는 두물머리로부터 7km 하류 지점에 해당한다(위키백과, 2022, 팔당댐). 이론상 한강 하류보다 상류의 미세플라스틱 농도가 낮을 것으로 예상하였지만, 실제로는 St.1과 St.2에서 미세플라스틱이 비슷한 양으로 검출되었다.

Gao et al.(2023)은 2020년 중국의 후베이성에 위치한 삼협댐(싼샤댐, Three Gorges Dam)의 상류와 하류, 삼협 저수지(Three Gorges Reservoir)의 상류, 중류, 하류의 퇴적물을 수집하여 미세플라스틱을 분석하였다([그림 3-11] 참고). 댐의 상류와 하류의 퇴적물에서 미세플라스틱을 비교한 결과, 상류 퇴적물의 농도가 훨씬 높았다. 저수지 하류의 미세플라스틱은 댐과 가까워질수록 농도가 증가하였으며, 이는 댐에 가까울수록 유속이 느려져 미세플라스틱이 퇴적층에 쌓이기 때문이다. 댐의 상류에 형성되는 저수지 또는 호수에서는 유속이 감소하고 퇴적물과 수계의 체류시간이 길어지는데, 퇴적물에 잔류하는 미세플라스틱 등의 오염물질은 저수지나 호수에 축적되어 댐 주변에 많은 양의 미세플라스틱이 모이게 된다. 즉, 댐과 호수는 미세플라스틱의 공급원이 될 수 있다.

[그림 3-11] 댐 상류 및 하류 퇴적물의 미세플라스틱 분포



자료(출처): Gao et al.(2023)

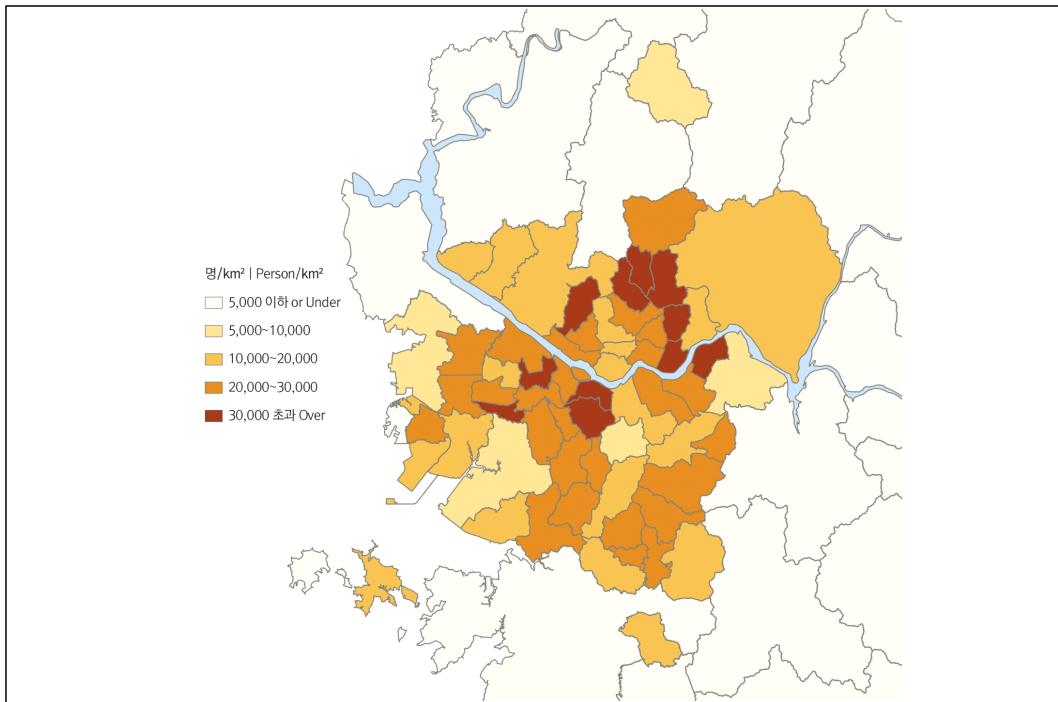
팔당댐은 높이 29m, 길이 575m, 체적 250,000m³, 방류량은 약 5,000~6,000m³/s이 고, 전력 생산을 담당한다(한국대댐회, 2023). 팔당댐을 설치하면서 생긴 인공 담수호인 팔당호는 수도권 지역의 취수원으로 이용되고 있다. 팔당호의 유역 면적은 23,800km², 만수 면적은 36.5 km², 총 저수용량은 2억 4,400만 톤, 용수 공급은 340만 톤/일이다(경기도 수자원본부, 2023). Gao et al.(2023)의 연구 결과를 비추어 볼 때, 팔당댐과 팔당호는 대규모 미세플라스틱의 수계 공급원이다. 따라서 팔당댐 인근 지점(St.1)의 미세플라스틱 농도는 한강 중류와 하류 지점(St.2)과 유사한 것으로 예상된다.

2) St.2

St.2는 한강 중류 및 하류 지점으로, 미세플라스틱의 농도는 3.41개/m³로 확인되었다. St.2의 중류 지점은 강동대교, 잠실대교, 영동대교, 한남대교 부근이고, St.2의 하류 지점은 가양대교, 김포대교, 전류리 인근이다.

환경부(2018) 연구에 따르면 중류 지점 표층의 미세플라스틱 평균 농도는 2.5개/m³, 하류 지점 표층의 평균 농도는 6개/m³로 나타났다. 수심 2m 지점의 미세플라스틱 농도는 중류에서 8.67개/m³, 하류에서 5.33개/m³였다. 표층에 부유하는 미세플라스틱은 강의 하류로 갈수록 축적되어 농도가 높아지지만, 수심 2m 깊이에 잔류하는 미세플라스틱은 중류에서의 농도가 높았다. 중류 지점과 하류 지점의 미세플라스틱 농도는 통계분석을 통해 유의미하게 다르지 않음을 확인하였다($p>0.05$). St.2 지점 중류와 하류 모두 주변 도시와 지류 등의 다양한 오염원의 영향을 받기 때문에 미세플라스틱의 농도가 유의미하게 다르지 않았다. [그림 3-12]와 같이 St.2 지점의 중류와 하류의 인구밀도가 비슷하므로, 일상생활로부터 수계로 배출되는 미세플라스틱의 양은 비슷할 것으로 예상된다.

[그림 3-12] 수도권 인구밀도



자료(출처): 서울연구원(2010)

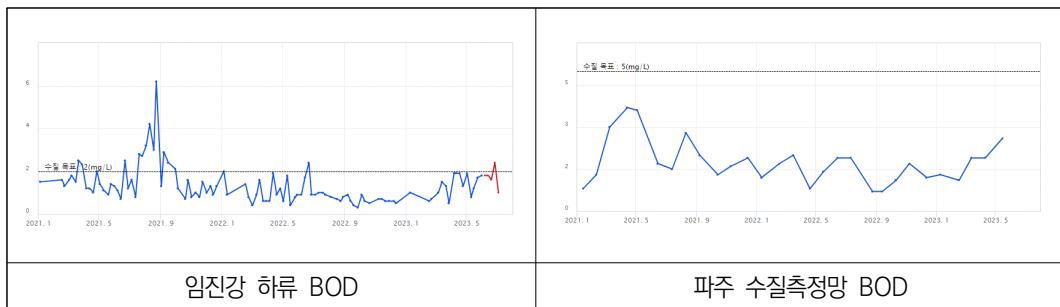
3) St.3

임진강(St.3)의 미세플라스틱 평균 농도는 $1.71\text{개}/\text{m}^3$ 로 확인되었다. 본 연구에서 파악한 한강 유역 및 인천 연안의 미세플라스틱 농도 중, St.3 지점이 가장 낮았다. 이는 임진강 상류에 미세플라스틱 발생원의 규모 또는 빈도가 낮기 때문이다. 임진강은 길이 254.6km, 수역 면적 $8,117\text{km}^2$ 로, 발원지는 마식령 또는 두류산이다. 한강의 지류인 임진강은 한탄강과 합류 후 경기도 김포 북부에서 한강 하류로 유입한다. 임진강은 연천군, 파주시의 상수도 수원이자 농업용수 공급지이기 때문에 정기적으로 수질을 관리하고 있다(위키백과, 2023, 임진강).

경기도 하천 수계별 수질 평가 자료에 따르면 임진강 상류는 BOD 0.5mg/L, 하류는 BOD 1.1mg/L로, BOD 기준 좋은 물 달성을 100%로 조사되었다(경기도 보건환경연구원, 2020). 2021년부터 현재까지 임진강 하류와 파주 인근에 있는 한강 하류의 BOD(Biological Oxygen Demand : 생화학적 산소 요구량)를 비교한 결과, 임진강의 BOD가 낮았다([그림 3-13] 참고). BOD와 미세플라스틱 농도에 상관관계가 있다는 기존 연구(Buwono et

al. 2021)를 토대로, 임진강은 다른 수계보다 오염도가 낮아 미세플라스틱의 농도가 낮은 것으로 보인다.

[그림 3-13] 임진강과 한강 하류의 BOD



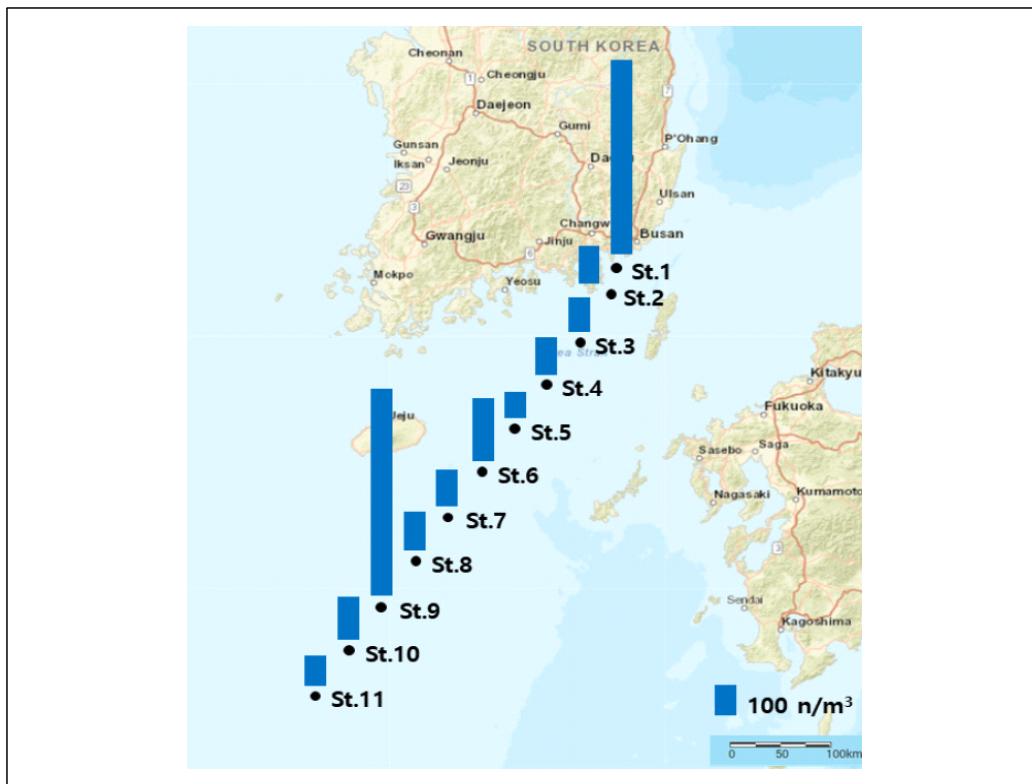
자료(출처): 국립환경과학원(2023)

4) St.4

강화도 인근 연안 지점은 강화도, 석모도, 복음도 연안을 지칭하며, 해당 지점의 미세플라스틱 농도를 파악하였다. 강화도 인근 연안의 미세플라스틱 농도는 6.59개/ m^3 로, 모니터링 지점 중 가장 높은 미세플라스틱 농도를 나타냈다. 한강은 수도권 및 서울의 주요 지역을 관통하기 때문에 도시화, 산업화, 기타 육상 활동으로 발생하는 미세플라스틱의 운반체 역할을 할 수 있다. 한강에 유입된 미세플라스틱은 하류로 운반되어 하구 지역에 축적되어 해당 지역에서 높은 농도를 형성하며, 해양에서 발생한 미세플라스틱은 해류나 조수 등에 의해 연안으로 운반되어 수계 또는 퇴적층에 축적될 수 있다.

한국해양과학기술원(2021b)은 남해 외해역의 11지점에서 표층 해수를 수집하여 미세플라스틱을 분석하였다. 시작 정점은 가덕도와 거제도 주변 낙동강하구 연안 권역이고, 종료 정점은 시작 정점으로부터 약 500km 떨어진 동중국해이다([그림 3-14] 참고). 그 결과 연안 지역에서 미세플라스틱의 농도가 가장 높게 나타났고, St.9를 제외한 외해역 지점에서는 비슷한 농도를 보였다. 해당 연구를 통해 해역의 미세플라스틱 농도는 육상의 영향을 받는 것을 알 수 있었다.

[그림 3-14] 남해 외해역 미세플라스틱 농도분포



자료(출처): 한국해양과학기술원(2021b)

5) St.5

신도, 영종대교, 인천대교, 인천항을 영종도 인근 연안 지점(St.5)으로 분류하여 미세플라스틱의 모니터링 농도를 파악하였다. St.5의 평균 미세플라스틱 농도는 $4.06\text{개}/\text{m}^3$ 로, 강화도 인근 연안 다음으로 높은 농도를 나타냈다. 14곳의 인천광역시 하수처리시설 중 해당 모니터링 지점 주변에는 총 9개의 하수처리장이 있으며, 기존 연구를 통해 하수처리장이 미세플라스틱의 발생원임을 파악하였다.

2장에서 확인한 바와 같이 수계로 유입된 미세플라스틱은 일반적으로 하수처리장의 공정을 통해 제거되지만, 여전히 많은 미세플라스틱이 하수처리장을 거쳐 배출될 수 있다. 방류수에 잔류하는 미세플라스틱의 하천 영향은 이재호 외(2016)의 연구를 인용하였다. 탄천 수계에 있는 하수처리장을 중심으로 하수처리장 방류수의 합류 지점 전과 후의 미세플라스틱 농도를 파악한 결과, 합류 전 지점에서는 $4.95\text{개}/\text{m}^3$, 합류 후 지점에서는 $10.1\text{개}/\text{m}^3$ 가

검출되었다([표 3-5] 참고). 탄천 수계의 하수처리장에서 방류수가 유입되면 미세플라스틱의 농도가 증가하는 것으로 보아, 하수처리장이 미세플라스틱의 배출원(오염원)임을 알 수 있었다.

[표 3-5] 하수처리장 인근 수계의 미세플라스틱 분포

시료 채취지점	미세플라스틱 농도(개/ m^3)			
	1회	2회	평균	표준편차
방류수 합류 전	1.6	8.3	4.95	3.35
방류수 합류 후	7.8	12.4	10.1	2.3

자료(출처): 이재호 외(2016) 자료 재구성

St.5 지점 인근의 하수처리장은 가좌, 승기, 남항, 공촌, 검단증설, 송도2, 송산, 송도1, 영종공공하수처리시설로, 인천광역시 하수처리장의 절반 이상이 영종도 인근 연안 지점에 있다. 앞서 살펴본 바와 같이, 하수처리장은 미세플라스틱의 배출원이므로 하수처리장 방류수가 연안 내 미세플라스틱 농도에 영향을 준 것으로 보인다.

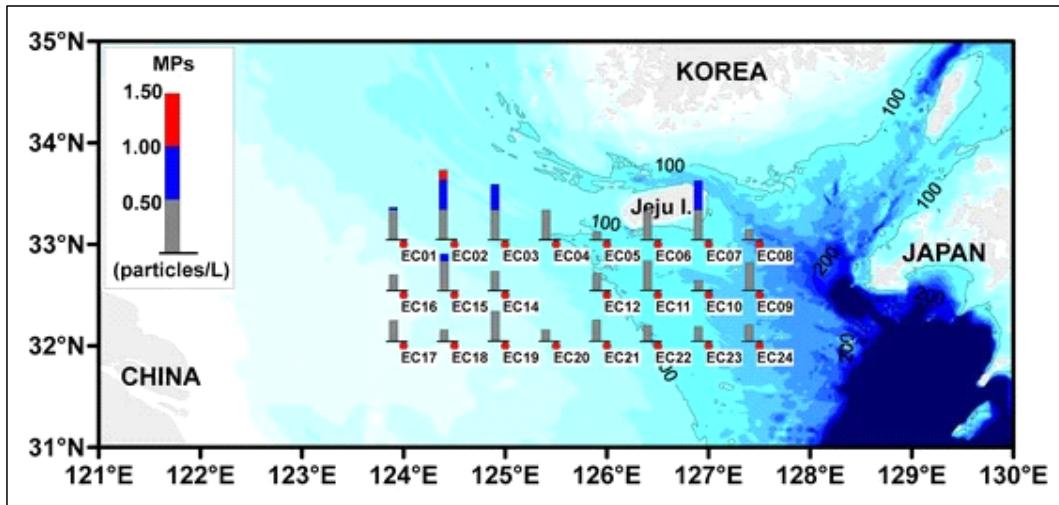
6) St.6

자월도와 덕적도 인근 연안 지점을 St.6으로 설정하고 미세플라스틱 농도를 파악한 결과, 평균 3.01개/ m^3 로 나타났다. 해당 결과는 임진강(St.3)의 미세플라스틱 농도(2.28개/ m^3)보다는 높지만, 다른 모니터링 지점(평균 3.8개/ m^3)보다는 낮은 농도이다. St.6은 인천 도심뿐만 아니라 한강 하류에서 떨어진 지점으로, 영종대교를 기준으로 자월도는 약 40km, 덕적도는 약 50km 떨어진 곳에 있다. 육상에서 해안으로 갈수록 미세플라스틱의 농도가 낮아진다는 Min et al.(2023)의 연구 결과에 따라, 다른 지점보다 St.6에서 미세플라스틱 분포가 낮은 것으로 보인다.

Min et al.(2023)은 제주도 해역의 표층 해수를 채취하여 미세플라스틱의 분포를 조사하였다. 그 결과 평균 미세플라스틱의 농도는 0.46개/L이고, 내륙과 제주도에서 가까운 지점(EC02, EC03, EC07)일수록 미세플라스틱의 농도가 높게 나타났다([그림 3-15] 참고).

즉, 모니터링 지점을 중심으로 남쪽에서 북쪽으로 갈수록 해역 내 미세플라스틱의 분포가 증가하였다.

[그림 3-15] 제주도 해역의 미세플라스틱 분포



자료(출처): Min et al. (2023)

4. 소결

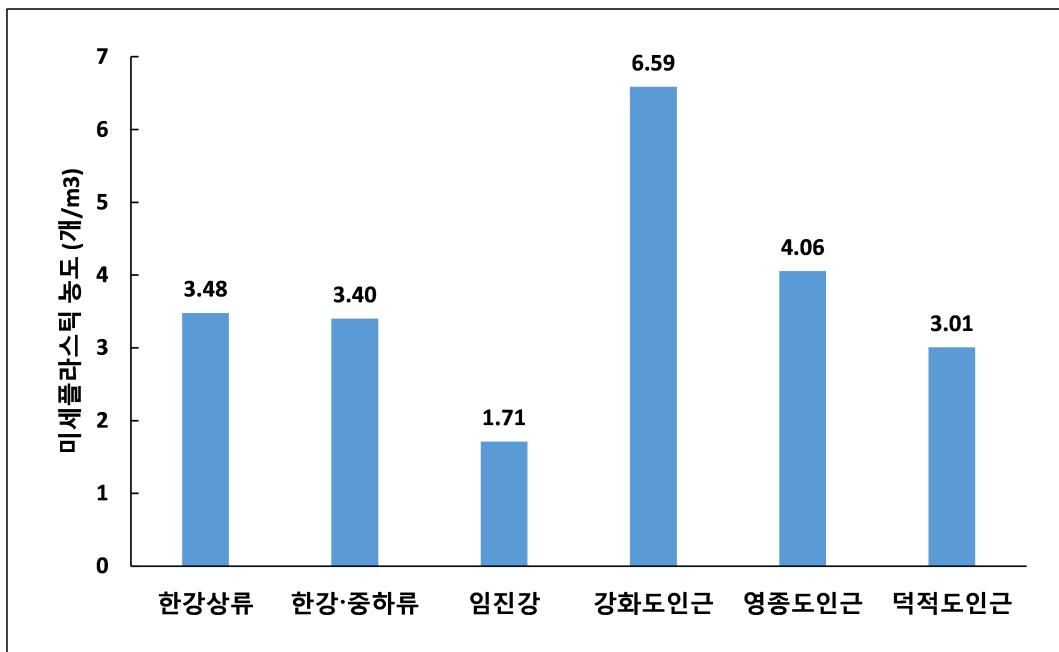
본 연구에서는 한강과 인천 연안의 기존 연구자료를 바탕으로 100~300 μm 이상 크기의 미세플라스틱 분포를 파악하였다([그림 3-16] 참고). 한강 및 임진강의 경우, 인천 연안의 대조군으로써 비교를 위해 미세플라스틱 농도를 조사하였다. 인근에 오염원이 많지 않은 임진강 상류(St.3)의 미세플라스틱 농도(1.71개/ m^3)가 가장 낮았고, 한강하구 지역인 강화도 인근 연안 지점(St.4, 6.59개/ m^3)에서 미세플라스틱이 가장 많이 검출되었다. 경기도와 서울을 관통하는 한강 상류(3.48개/ m^3)와 한강 중류·하류(3.40개/ m^3) 지점의 미세플라스틱 농도는 유의미한 차이가 나타나지 않았다. 영종도 인근(St.5)의 경우, 하수처리장의 영향으로 미세플라스틱의 농도(4.06개/ m^3)가 비교적 높게 검출되었고, 육상에서 가장 먼 곳에 있는 St.6의 미세플라스틱 분포는 3.01개/ m^3 로 조사되었다.

미세플라스틱의 농도가 가장 높은 St.4의 데이터를 바탕으로 통계분석을 한 결과, St.5(영종도 인근 연안)를 제외한 모든 모니터링 지점과 St.4(강화도 인근 연안) 사이에는 유의미한 차이가 나타났다($p<0.05$). 한강 유역의 도시화, 산업활동으로 발생하는 미세플라스-

틱이 한강으로 유입하여 하구에 축적됨으로써, St.4 지점의 미세플라스틱 분포가 높은 것으로 보인다.

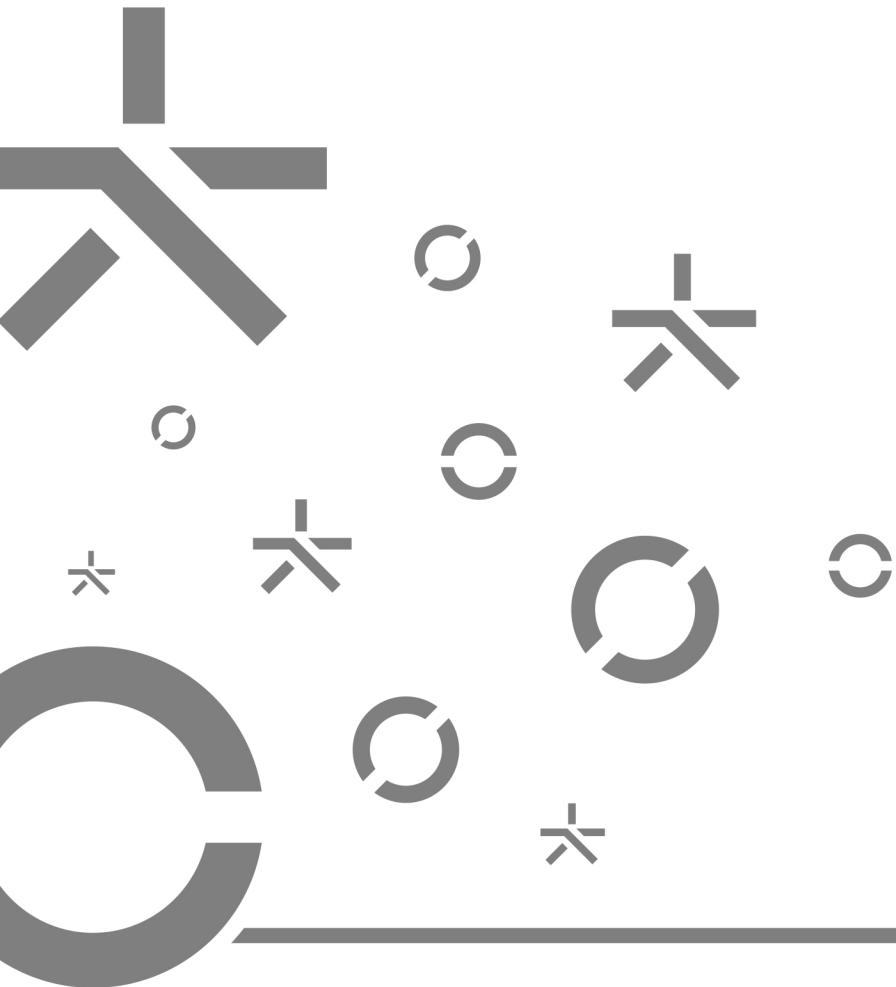
본 연구의 한계점은 조사지점의 지표수를 대상으로 일정 크기 이상의 미세플라스틱 농도만을 파악하였다는 점이다. 즉, 표층 아래의 미세플라스틱과 100 μm 이하 입자는 고려하지 않았으므로 인천 연안에 잔류하는 미세플라스틱 농도보다 결괏값이 낮게 예측되었을 가능성 이 있다.

[그림 3-16] 한강 및 인천 연안 미세플라스틱 분포 결과



4

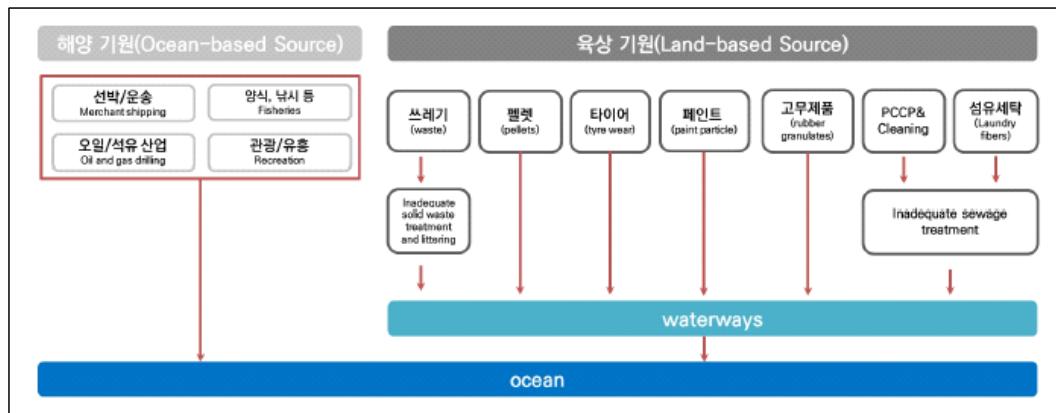
인천 연안 미세플라스틱 유입원



인천 연안 미세플라스틱 유입원

연안에 잔류하는 미세플라스틱의 유입원은 육상 기인과 해상 기인으로 구분된다. OSPAR Commission(2017)은 육상으로부터 해양으로 배출되는 미세플라스틱의 육상 유입원을 하폐수처리장과 육상 배출 폐기물로 분류하였고, 해상 배출원은 선박운송, 폐어구 등의 항목으로 분류하였다([그림 4-1] 참고). 4장에서는 해양으로의 미세플라스틱 유입원 특성과 인천 연안의 미세플라스틱 성분 분포 결과를 기반으로, 연안에 잔류하는 미세플라스틱의 유입원을 추정하였다.

[그림 4-1] 미세플라스틱 유입원



자료(출처): 박정규 외(2019)

1. 육상 기인 미세플라스틱 유입원

육상에서 해양으로 유입되는 미세플라스틱의 오염원은 점오염원과 비점오염원으로 구분할 수 있다. 점오염원은 관로·수로 등을 통하여 일정 지점으로 오염물질을 배출하는

형태이고, 비점오염원은 불특정장소에서 불특정하게 오염물질을 배출하는 형태이다(물환경 보전법, 2021). 미세플라스틱의 점오염원은 하수처리장으로 파악할 수 있지만, 비점오염원의 경우 OSPAR Commission(2017) 자료에서 볼 수 있듯이 다양한 형태로 해양에 영향을 주기 때문에 유입경로의 예측이 어렵다. 하여, 본 연구에서는 미세플라스틱의 점오염원인 하수처리장과 비점오염원으로부터 미세플라스틱이 유입하는 하천(한강)을 다루었다. 또한 대기 중 부유하는 미세플라스틱이 수계로 유입되는 경로는 해당 연구에서 제외하였다.

1) 하수처리장

(1) 인천 하수처리장 현황

산업 및 가정에서 사용한 미세플라스틱은 폐수 형태로 하수처리장에 유입되어 공정을 거치지만, [표 2-6]에서 확인한 바와 같이 처리되지 못한 미세플라스틱은 하수처리장 방류수와 함께 수계로 배출된다. 방류수 내 미세플라스틱은 수계를 따라 연안으로 유입될 가능성이 있으므로, 인천의 하수처리장을 파악하여 미세플라스틱 점오염원의 규모를 조사하였다.

2021년 기준으로 인천광역시의 하수처리시설은 총 14곳으로, 서구와 중구에 각각 4곳, 연수구에 3곳, 남동구, 강화군, 옹진군에 각각 1곳씩 설치되었다. 인천 하수처리장의 총 처리용량은 1,131,500톤이고, 시설용량이 10만 톤 이상인 곳은 가좌, 승기, 남항 공공하수 처리시설이다. 방류수를 해양으로 배출하는 처리장은 8개(가좌, 승기, 남항, 송도2, 송산, 송도, 영종, 운북, 진두)이고, 총 방류량은 60만 톤이다. 인근 하천으로 방류수를 배출하는 처리장은 4개(만수, 공촌, 검단증설, 강화)이고, 총 방류량은 13만 톤이다([표 4-1] 참고). 인천에 위치한 14곳의 하수처리장 중, 연안에 직접적인 영향을 주는 점오염원은 8곳임을 알 수 있다.

[표 4-1] 인천광역시 하수처리시설 현황

처리장별	시설명	소재지	시설용량(m³)	방류량(m³)	방류수역	가동개시일
기좌	기좌 공공하수처리시설	인천광역시 서구 기좌동598	350,000	212,558	서해(해양방류)	1992-02-01
승기	승기 공공하수처리시설	인천광역시 능허대로 484	275,000	222,704	서해(해양방류)	1995-01-01
남항	남항 공공하수처리시설	인천광역시 서해대로 94	125,000	95,660	서해(해양방류)	2008-09-01
만수	만수공공하수처리시설	인천광역시 남동구 서창남순환로16번길 78	70,000	70,341	인근 하천	2004-12-08
공촌	공촌공공하수처리시설	인천광역시 장도로 138	65,000	47,578	인근 하천	1999-07-15
검단중煞	검단중煞공공하수처리시설	인천광역시 송도국제도대로 372번길 6	69,000	7,802	인근 하천	2020-09-07
송도2	송도2공공하수처리시설	인천광역시 송도국제도대로 372번길 6	42,500	18,944	서해(해양방류)	2014-06-05
검단	검단공공하수처리시설	인천광역시 서구 길무로 24	40,000	34,309	인근 유수지	2007-01-20
송산	송산공공하수처리시설	인천광역시 영종대로 842-57	30,000	10,223	서해(해양방류)	2015-09-30
송도	송도1공공하수처리시설	인천광역시 송도국제도대로 372번길 6	30,000	28,442	서해(해양방류)	2005-06-15
영종	영종공공하수처리시설	인천광역시 영종해안남로 797	24,000	6,743	서해(해양방류)	2012-08-04
운북	운북공공하수처리시설	인천광역시 영종해안북로 1204번길105	23,000	5,953	서해(해양방류)	2012-01-28
강화	강화공공하수처리시설	인천광역시 선원면 고식이길 177	9,000	6,795	인근 하천	2003-03-02
진두	진두공공하수처리시설	인천광역시 옹진군 영흥면 내리 1866번지	2,000	828	서해(해양방류)	2018-12-01

자료(출처): 행정안전부(2022c), 환경부(2023)

(2) 하수처리장을 통한 미세플라스틱 해양 유입

한국해양과학기술원(2021a)은 연안 해양환경으로 직접 배출하는 인천 내 하수처리장 정보를 이용하여 하수처리장으로부터 해양으로 유입되는 미세플라스틱의 양을 추정하였다.

[표 4-2] 조사 대상 시설 현황

조사 대상 시설	분류	방류량(m^3)	최종 방류수역
STP-1*	A	209,495	서해(해양방류)
STP-2*	A	179,314	서해(해양방류)
STP-3*	A	78,244	서해(해양방류)
STP-4	A	67,393	인근 하천
STP-5	B	47,719	인근 하천
STP-6	A	39,665	인근 유수지
STP-7	A	26,158	서해(해양방류)
STP-8	A	6,710	인근 하천
STP-9	B	6,177	서해(해양방류)
STP-10	B	6,152	서해(해양방류)
STP-11	B	5,662	서해(해양방류)
STP-12	B	3,778	서해(해양방류)

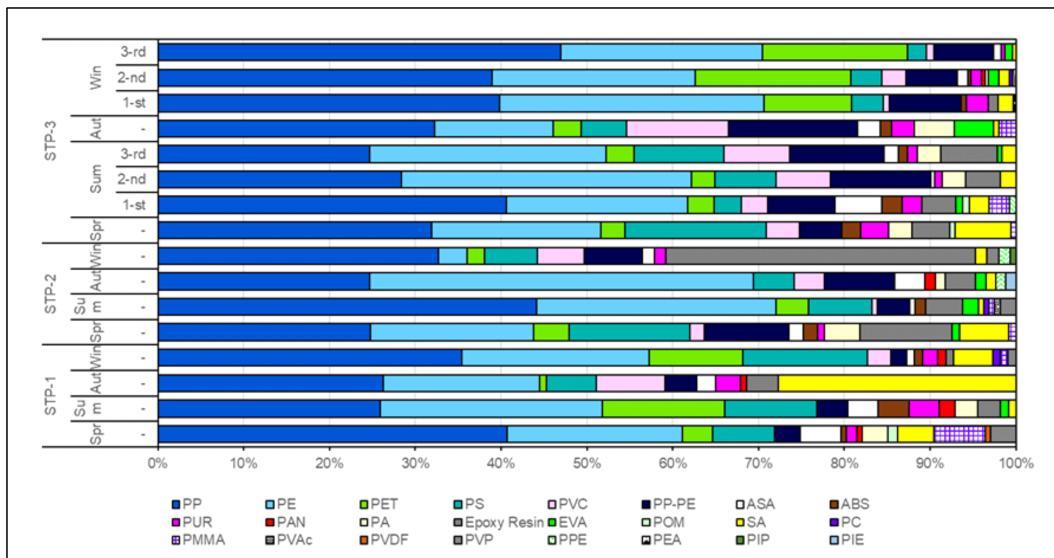
주1: * 연구에서 선정된 조사 대상 하수처리장

주2: A-여과막 처리가 없는 처리공법, B-여과막 처리가 있는 처리공법

자료(출처): 한국해양과학기술원(2021a)

조사 대상인 인천 하수처리장 세 곳(STP-1, 2, 3)의 방류수에서는 평균 $16,810 \pm 15,745$ 개/ m^3 의 미세플라스틱이 검출되었다. 플라스틱 생산량 상위에 해당하는 PP, PE, PS, PET, PVC 성분이 전체의 50%(75±115%) 이상을 차지하였고, PP, PE, PET는 45%(63±14%)를 나타냈다([그림 4-2] 참고). 형태별 조성비는 파편형(85±8.8%)이 가장 우세하였고, 다음으로 섬유(9.3±4.2%), 필름(6.1±5.5%) 순으로 조사되었다. 하수처리장에서 검출된 미세플라스틱 중 가장 작은 크기 범위인 20~100 μm 의 비율이 전체의 35~75%를 차지하는 것으로 보아, 미세플라스틱 입자크기가 작을수록 하수처리장에 잔류 농도가 높음을 알 수 있다.

[그림 4-2] 하수처리장 방류수의 미세플라스틱 조성



자료(출처): 한국해양과학기술원(2021a)

하수처리장 방류수를 통해 해양으로 유입되는 미세플라스틱의 양은 다음의 함수를 이용하여 예측하였다.

$$MP\ discharge = EFF\ discharge \times C_{eff}$$

- MP discharge : 미세플라스틱 해양 유입량(n 또는 mg)/(season 또는 day, yr)
- EFF discharge : 방류 유량(m^3/day , $m^3/season$, m^3/yr)
- Ceff : 방류수 시료에서의 미세플라스틱 농도(n/m^3 또는 mg/m^3)

해양으로 방류하는 하수처리장 STP-1, STP-2, STP-3의 방류수 내 미세플라스틱 연평균 농도를 적용하여 인천 연안으로 미세플라스틱이 유입되는 시나리오를 가정하였다.

- 시나리오-1 : 미세플라스틱 1년 유입량 = 계절별 평균 일일 방류수의 양 × 계절별 미세플라스틱 평균 농도
- 시나리오-2 : 미세플라스틱 1년 유입량 = 조사년도 평균 일일 방류수의 양 × 연평균 미세플라스틱 농도

위의 시나리오를 적용하여 조사 대상 세 곳의 하수처리장으로부터 해양으로 연간 유입되는 미세플라스틱의 입자 수와 중량을 추정하였다([표 4-3] 참고). 시나리오-1과

시나리오-2를 통해 하수처리장 세 곳으로부터 인천 연안으로 유입되는 미세플라스틱의 수는 연간 1.74조와 1.81조 개이고, 미세플라스틱 중량은 연간 15.2톤과 15.7톤으로 예측하였다.

[표 4-3] 조사 대상 하수처리장을 통한 미세플라스틱의 연간 해양 유입량

하수처리장	입자 수(단위 : 10^{12} 개/년)		중량(단위 : 톤/년)	
	시나리오-1	시나리오-2	시나리오-1	시나리오-2
STP-1	0.5	0.5	3.8	3.8
STP-2	0.5	0.49	8.9	8.2
STP-3	0.74	0.87	2.5	3.7
합계	1.74	1.81	15.2	15.7

자료(출처): 한국해양과학기술원(2021a)

[표 4-3] 자료를 토대로 인천 하수처리장 중 해양으로 직접 방류하는 8곳의 하수처리장의 미세플라스틱 해양 유입량을 추정하였다([표 4-4] 참고). 시나리오-1의 인천 하수처리장 내 미세플라스틱 해양 유입량은 연간 3.16조 개, 18.6톤이고, 시나리오-2는 연간 3.03조 개, 17.8톤으로 산출되었다. 즉, 최종 방류수역이 서해인 인천 하수처리장에서는 연간 약 3조 개, 18톤의 미세플라스틱을 인천 연안으로 방류하는 것으로 예상된다.

[표 4-4] 인천 하수처리장으로부터 해양으로 유입되는 미세플라스틱 유입량

구분	개수기준($\times 10^{12}$ 개/년)	중량기준(톤/년)
시나리오-1	3.16	18.6
시나리오-2	3.30	17.6

자료(출처): 한국해양과학기술원(2021a)

(3) 하수처리 유형에 따른 미세플라스틱 배출 특성

이재호 외(2021)는 하수처리시설 공법에 따른 미세플라스틱 제거 특성을 평가하기 위해 유입수와 방류수를 채취하여 조사하였다. 처리 규모가 3만 톤/일 이상인 하수처리시설 중 대표 공법(A₂O, SBR, Media, MBR)별로 2~3개 시설을 선정하고, 연계 처리 시설을

각 1개소씩 포함하여 총 10개 시설을 선별하였다. 이 중 인천지역의 연구 대상 하수처리시설은 두 곳이 포함되었다([표 4-5] 참고).

[표 4-5] 조사 대상 시설 현황

공정	조사대상 시설	시설용량 ($\times 10^3$ 톤/일)	연계 처리	지역
A ₂ O	S1	50	분뇨	용인
	S2	40		용인
	S3	65		부천
SBR	S4	58	산업폐수	평택
	S5	80		고양
Media	S6	43	분뇨, 축산폐수, 산업폐수	인천
	S7	60		파주
	S8	47		성남
MBR	S9	32	음폐수	하남
	S10	42.5		인천

주1: A₂O(anaerobic/anoxic/oxic) - 혼기/무산소/호기를 조합하여 생물학적으로 질소와 인을 동시에 제거

주2: SBR(sequencing batch reactor) - 단일 반응조에서 유입/반응/침전/배출/휴지 공정을 수행

주3: Media - 담체를 이용한 공정을 수행

주4: MBR(membrane bioreactor) - 여과막 분리 공정을 결합

자료(출처): 이재호 외(2021)

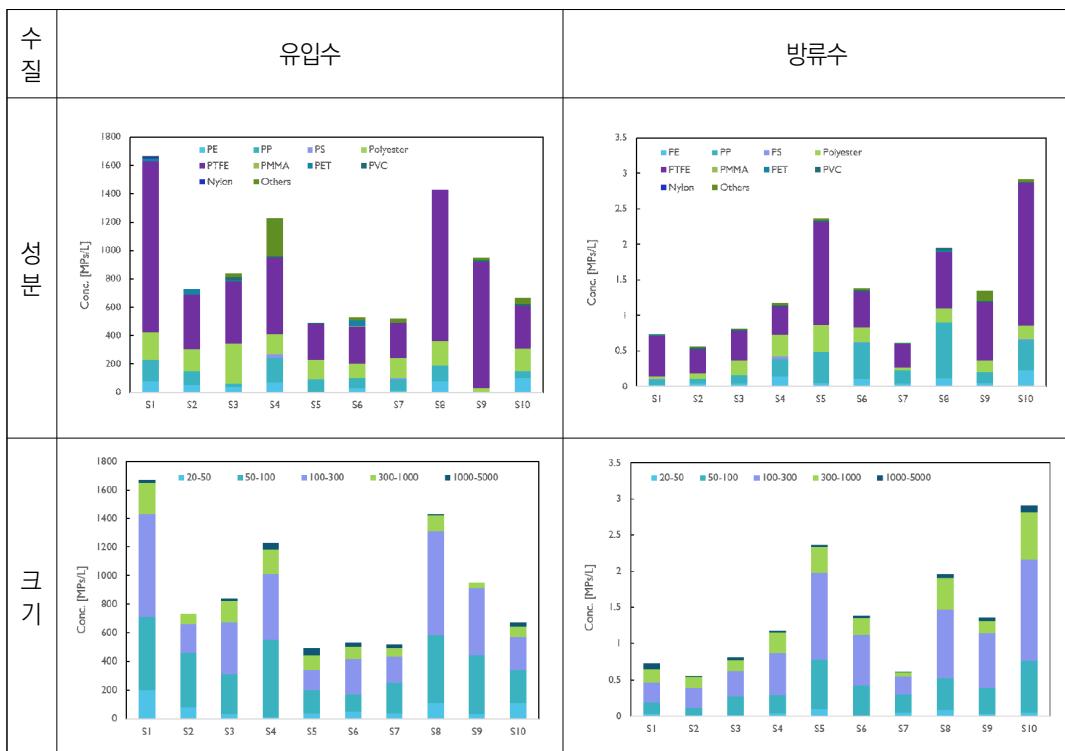
하수처리장 10곳의 유입 및 방류수 내 미세플라스틱을 분석한 결과, 유입수에서는 490~1,670개/L, 방류수에서는 0.22~2.92개/L로 나타났다. 유입부하량을 적용하면 유입수에서는 하루에 평균 약 330억 개의 미세플라스틱이 유입되고, 방류수를 통해 4천5백만 개의 미세플라스틱이 배출된다. 인천에 있는 S10 하수처리장은 다른 시설과 비교하였을 때 유입수의 미세플라스틱 농도가 비교적 낮았지만, 방류수에서는 높은 농도로 검출되었다.

조사 대상 하수처리장의 평균 미세플라스틱 제거 효율은 99.8%이고, A₂O 공법에서 99.9%, SBR 공법에서 99.7%, Media 공법에서 99.8%, MBR 공법에서 99.7%로 확인되었다. 해당 하수처리장은 모두 3차 시설로, 2차와 3차 처리 공정이 미세플라스틱 저감에 주된 역할을 하는 것으로 보인다.

유입수와 방류수에서 주로 검출되는 미세플라스틱은 Polyester, PTFE 및 PP이고, PE, PET 등이 추가로 확인되었다([그림 4-3] 참고). Polyester는 세탁을 통한 섬유 조각, PTFE는 배관 등의 테프론 조각, PP는 플라스틱 용기 및 포장재 조각이므로, 이는 일상생활에

서 사용하는 플라스틱 제품이 조개지면서 하수로 유입된 것으로 보인다. 방류수에서는 polyester가 상대적으로 감소하였는데, 이는 polyester가 섬유상 미세플라스틱이므로 하수처리장에서의 처리 효율이 높은 것으로 판단된다. 미세플라스틱 크기는 주로 1mm 이하로 검출되었으며, 파편 형태의 50~300 μm 의 크기 비율이 가장 높은 것으로 보아 주로 2차 미세플라스틱이 하수처리장으로 유입되는 것으로 예상한다([그림 4-3] 참고).

[그림 4-3] 하수처리장 내 미세플라스틱 성분 및 크기 분포

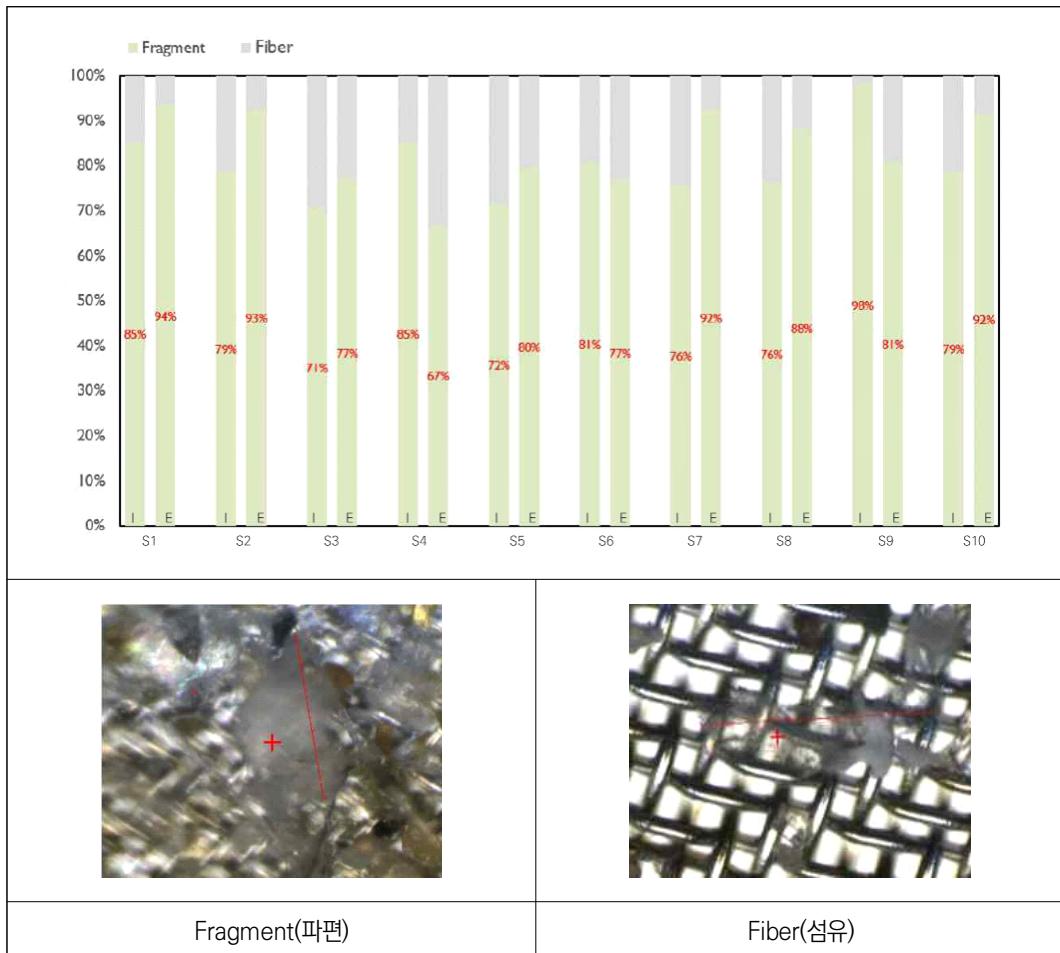


자료(출처): 이재호 외(2021)

하수처리장의 유입수 및 방류수에 잔류하는 미세플라스틱 형태는 주로 파편과 섬유 입자로 나타났다([그림 4-4] 참고). 파편 형태는 유입수에서 80.2%, 방류수에서 84%를 차지하였고, 섬유 형태는 유입수에서 19.8%, 방류수에서 16%를 차지하였다. 파편 입자는 주로 일상생활에서 사용하는 플라스틱이 파쇄되어 미세플라스틱 형태로 변환되거나 강우를 통해 하수로 유입된 미세플라스틱일 것으로 추정한다. 섬유상 입자는 세탁 과정에서 의류에서 떨어진 섬유 형태이므로, 하수처리구역 세대수가 많으면 하수에 잔류하는 입자가 많아진다.

연구 결과 방류수에서 섬유상 입자의 비율이 감소한 것으로 보아, 하수처리 과정은 파편 형태보다 섬유 형태의 미세플라스틱을 좀 더 효과적으로 제거할 수 있다.

[그림 4-4] 하수처리장 내 미세플라스틱 형태 분포

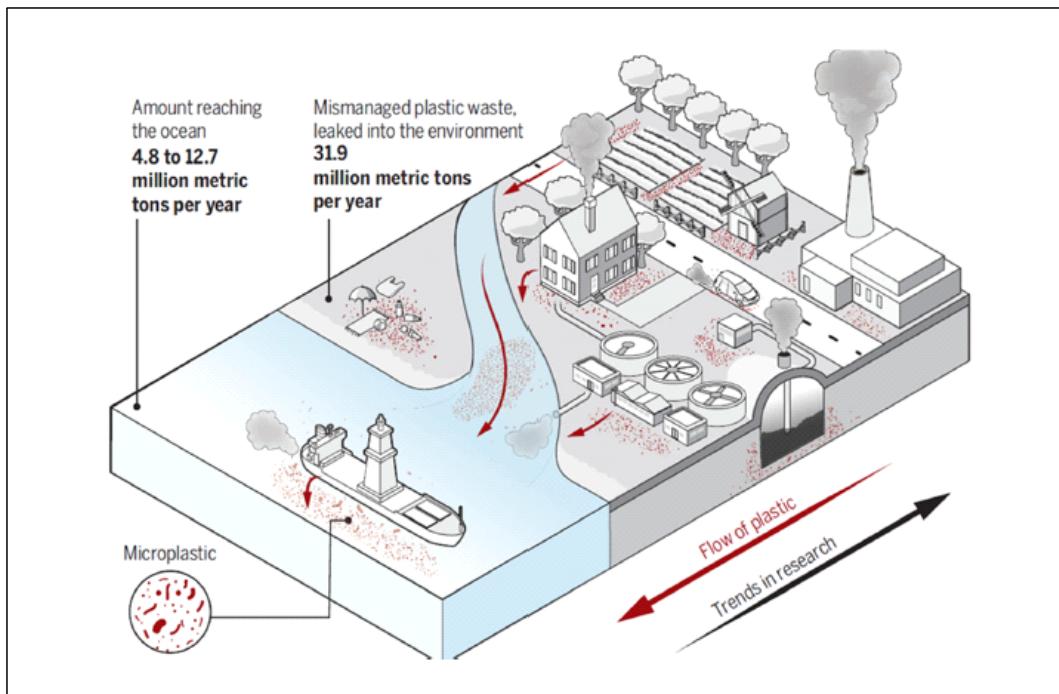


자료(출처): 이재호 외(2021)

2) 한강

강(하천)은 하수 및 폐수 방류, 도시 유출, 주변 하천 등의 경로를 통해 유입된 미세플라스틱이 해양으로 이동하는 오염경로이다. 연간 3천2백만 톤의 미관리 플라스틱 폐기물이 환경으로 유입되며, 이 중 5백~천3백만 톤이 해양으로 유입된다([그림 4-5] 참고).

[그림 4-5] 미세플라스틱 거동

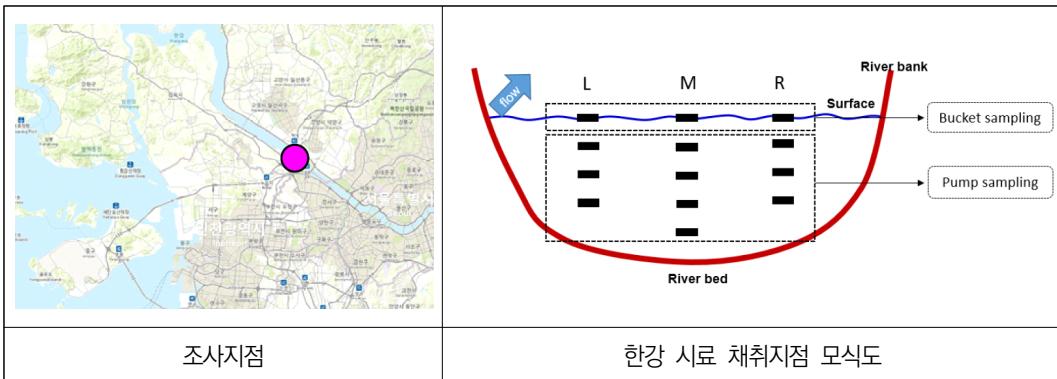


자료(출처): 유혜원 외(2020)

(1) 한강을 통한 미세플라스틱 해양 유입량 추정

한국해양과학기술원(2021a)은 한강을 통한 미세플라스틱의 해양 유입량을 추정하기 위해 한강하구에서 가장 가까운 지점을 선정하여 건기와 우기를 포함한 2019년 2월부터 7월까지 1개월 간격으로 모니터링을 하였다. 공간적 변동을 고려하여 수계를 3등분으로 나누어 높이에 따라 3~5곳의 수층을 채집하여 미세플라스틱의 평균 농도를 산정하였다([그림 4-6] 참고).

[그림 4-6] 한강하구 조사지점 및 채취지점 모식도



자료(출처): 한국해양과학기술원(2021a)

5년간(2015~2019년) 월별 평균 유량 및 2019년 월별 평균 유량을 파악하고, 아래의 함수를 활용하여 한강으로 유입되는 미세플라스틱의 월별 유입량을 산출하였다.

$$MPdischarge = FWdischarge \times Cw$$

- MPdischarge : 미세플라스틱 해양 유입량(n , mg/month, day, yr)
- FWdischarge : 유량($\text{m}^3/\text{month, m}^3/\text{yr, m}^3/\text{day}$)
- CW : 모든 수층에서의 미세플라스틱 평균 농도(n/m^3 , mg/m^3)

한강을 통한 미세플라스틱의 해양 유입량은 [표 4-6] 시나리오를 이용하여 추정하였다. 시나리오-1과 시나리오-2는 각 달의 하천유량과 평균 농도를 적용하여 월별 미세플라스틱 유입량을 산출하고, 월별 미세플라스틱 유입량을 합하여 연평균 유입량을 파악하였다. 시나리오-3과 시나리오-4는 연평균 하천유량과 미세플라스틱 농도를 적용하여 연평균 유입량을 산출하였다.

[표 4-6] 한강 미세플라스틱의 시나리오별 해양 유입량 추정

시나리오 구분	계산 방법	해양 유입량 추정	
		개수기준 (10^{12} 개/년)	중량기준 (톤/년)
1	<ul style="list-style-type: none"> 5년간 각 달의 평균 유량 × 미세플라스틱 평균 농도 5년은 2015~2019년을 의미함 	35.5	62
2	<ul style="list-style-type: none"> 2019년 각 달의 평균 유량 × 미세플라스틱 평균 농도 	29.7	55
3	<ul style="list-style-type: none"> 5년간 연평균 유량 × 미세플라스틱 평균 농도 5년은 2015~2019년을 의미함 	36.2	80
4	<ul style="list-style-type: none"> 2019년 유량 × 미세플라스틱 평균 농도 건기와 우기 구분 없음 	30.0	67

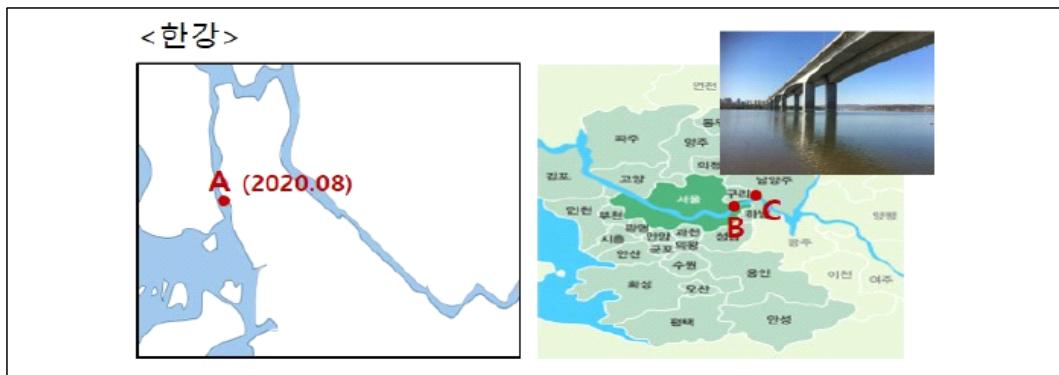
자료(출처): 한국해양과학기술원(2021a)

시나리오에 따라 한강에서 해양으로 유입되는 미세플라스틱은 연간 $29.7\sim36.2 \times 10^{12}$ 개로, 시나리오-2에서 해양 유입량이 가장 낮았고 시나리오-3에서 가장 높은 해양 유입량이 예측되었다. 두 시나리오 추정치의 편차가 1.2배이므로 시나리오별 차이는 무시할 수 있었다. 중량을 기준으로 한강에서 해양으로 유입되는 미세플라스틱은 연간 55~80톤으로 추정하였다([표 4-6] 참고).

(2) 한강 유역 미세플라스틱 오염도 분석

한국해양과학기술원(2021b)은 한강 유역의 미세플라스틱 오염도를 파악하기 위해 담수 및 하구 시료를 대상으로 미세플라스틱을 분석하였다. 현장 시료는 한강 수역 내 하구 지점(A)과 미사대교 인근 상수원 지점(B, C)에서 2020년 8월과 11월 시료를 채취하였다 ([그림 4-7] 참고).

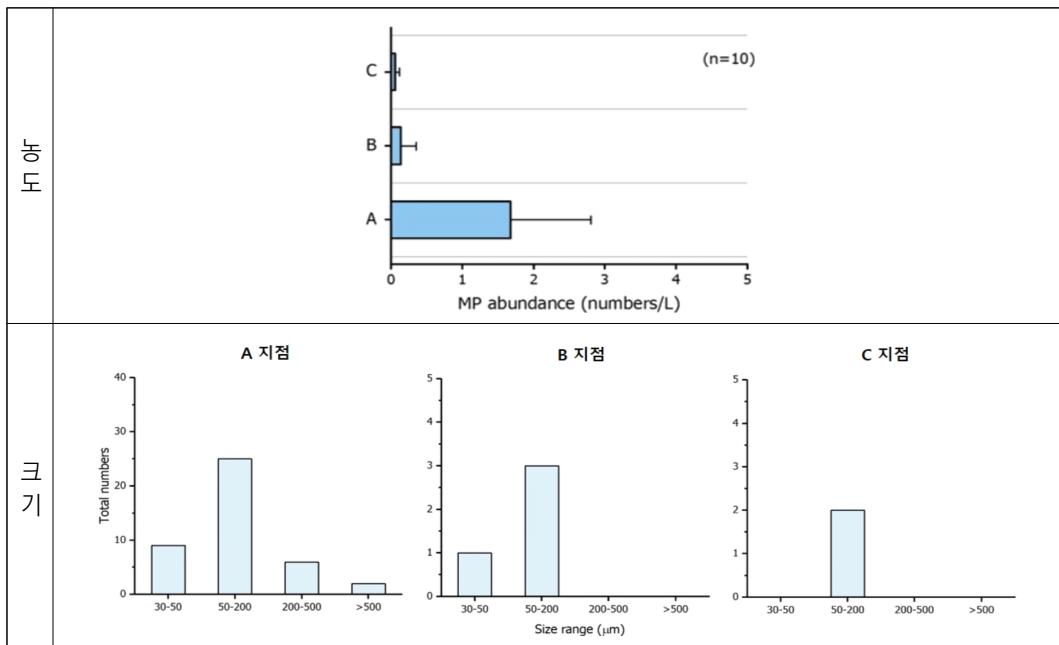
[그림 4-7] 시료 채취 조사지점



자료(출처): 한국해양과학기술원(2021b)

한강 유역 A, B, C 지점에서 미세플라스틱은 0.06~1.7개/L로 검출되었고, 입자크기는 30~200 μm 가 대부분(80~100%)을 차지하였다. 담수 지점에 비해 한강하구에서 미세플라스틱이 가장 많이 분포하는 것으로 보아([그림 4-8] 참고), 하구 수역은 미세플라스틱이 모이는 지점임을 알 수 있다. 또한 환경 중 플라스틱은 풍화작용을 통해 더 작은 조각으로 분해되므로, 한강에 잔류하는 미세플라스틱은 작은 입자가 우세할 것으로 예상한다.

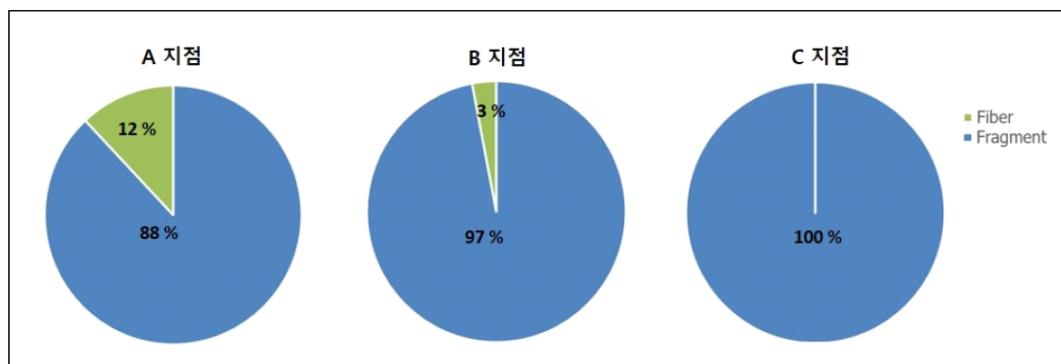
[그림 4-8] 한강 유역의 미세플라스틱 농도 및 크기별 분포



자료(출처): 한국해양과학기술원(2021b)

한강의 A, B, C 지점에서는 주로 PP와 PE가 검출되었고, 하구(A)에서는 polyester도 확인되었다. 하구에서 검출된 polyester는 어업 활동으로부터 발생한 미세플라스틱 성분으로 예상하였다. 조사 대상 지점에서는 파편과 섬유 형태의 미세플라스틱이 검출되었고, 대부분은 파편 형태로 나타났다([그림 4-9] 참고). 파편 입자는 주로 2차 미세플라스틱으로, 일상 활동 중 사용하는 플라스틱이 쪼개져 미세플라스틱 형태로 변환되거나 육상에 진류하는 미세플라스틱이 강우를 통해 하수로 유입된 형태일 것으로 예상한다. 1차 미세플라스틱인 구형 입자는 세정제, 화장품 등의 제품에 사용되는데, 조사지점인 한강 유역에서 검출되지 않은 것은 제품 내 의도적으로 첨가하는 미세플라스틱을 제한하는 미국과 유럽의 정책과 관련이 있다.

[그림 4-9] 미세플라스틱의 형태별 분포



자료(출처): 한국해양과학기술원(2021b)

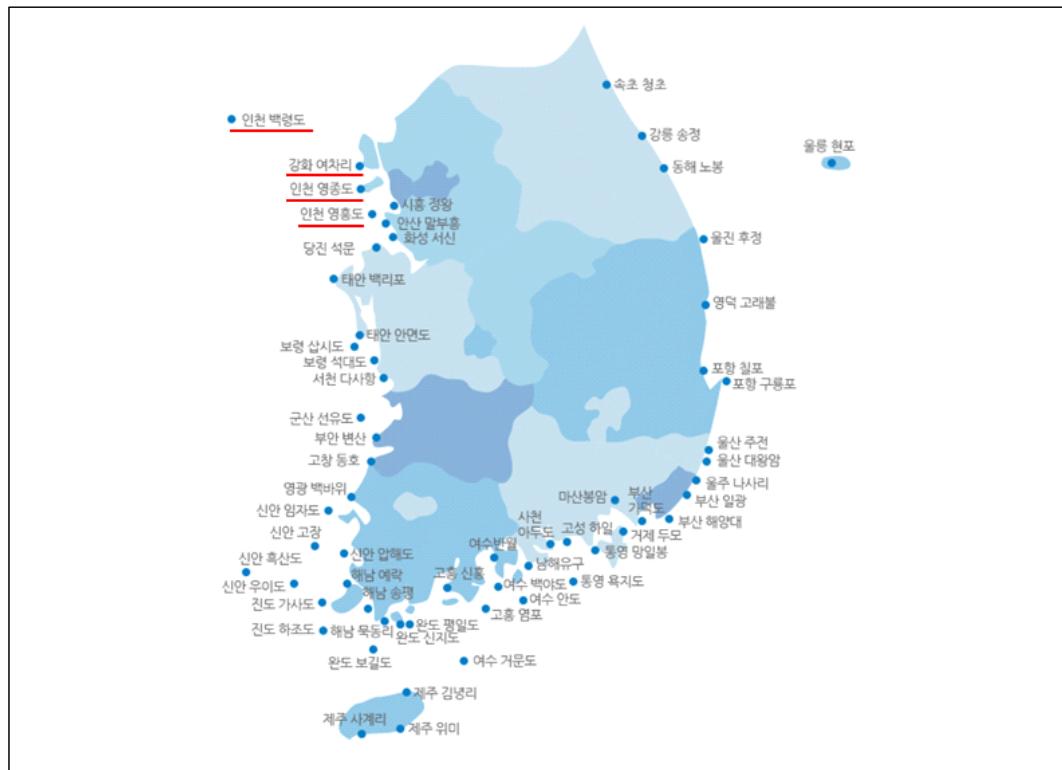
2. 해상 기인 미세플라스틱 유입원

1) 해양폐기물

풍화 및 분해 과정을 거친 해안 쓰레기는 미세플라스틱으로 변형되어 연안 해역에 잔류할 수 있다. 연구를 위해 해안 쓰레기와 미세플라스틱의 상관성을 고려하여 국내 및 인천 연안 쓰레기 조사 자료를 검토하였다.

해양환경공단은 국가 해안 쓰레기 모니터링을 통해 국내 연안 60곳을 선정하여 2개월에 한 번씩 정기 조사를 하고 있으며, 인천에서는 백령도, 강화 여자리, 영종도, 영흥도가 모니터링 대상 지점이다([그림 4-10] 참고). 전국 중 통영 욕지도에서 가장 많은 해안 쓰레기 발생량이 나타났으며, 상위 5위까지는 모두 남해 연안 지점이었다.

[그림 4-10] 국가 해안 쓰레기 모니터링 대상 지역



자료(출처): 해양환경정보포털(b)

인천 연안의 쓰레기는 2018년부터 2022년까지 연간 평균 1,712개(1,212~2,479개), 168kg(34~488kg)으로 조사되었고, 2018년부터 2021년까지 해안 쓰레기 개수 및 무게가 감소하다가 2022년에 증가하였다. 해안 쓰레기의 평균값은 강화도 여자리 해변에서 가장 높았고, 강화도의 경우 2018년 해안 쓰레기가 인천 전체의 80%를 차지하였지만 2022년에는 37%로 감소하였다. 반면 백령도의 해안 쓰레기는 2018년 기준 12%였지만 2022년에 54%로 증가하였다. 2018년에는 영종도에서 해안 쓰레기가 가장 적게 조사되었으나 이후에는 점차 증가 추세이며, 2022년에는 영종도와 영흥도에서 해안 쓰레기의 발생량이 비슷하였다([표 4-7] 참고).

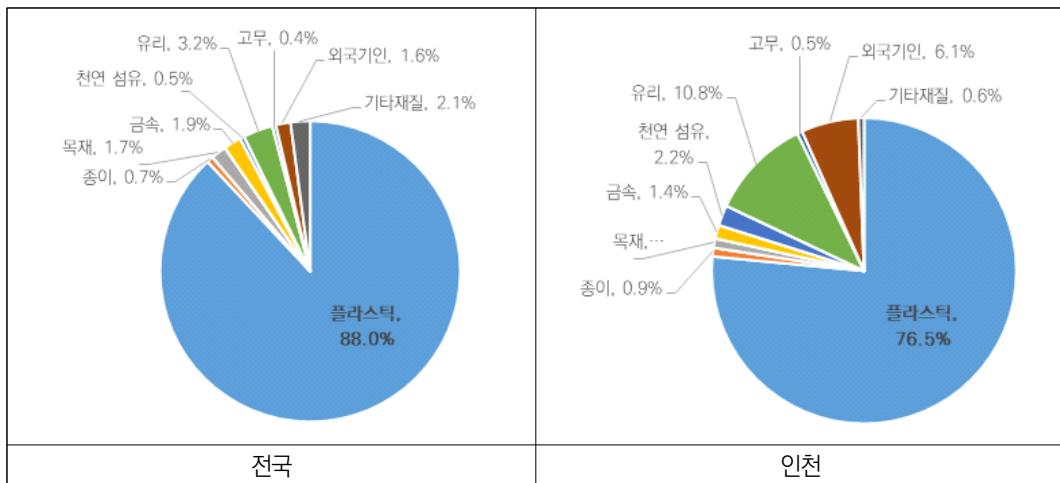
[표 4-7] 인천의 해안 쓰레기 분포

지역	구분	2018년	2019년	2020년	2021년	2022년
인천	강화	개수(개)	2,004	1,485	1,005	415
		무게(kg)	357.6	81.6	36.1	29.3
	백령	개수(개)	304	114	62	657
		무게(kg)	115.9	63.8	38.4	46.3
	영종	개수(개)	71	71	95	81
		무게(kg)	6.4	5.5	4.5	2.2
	영흥	개수(개)	100	107	142	59
		무게(kg)	7.8	3.3	2.2	4.5
	합계	개수(개)	2,479	1,777	1,304	1,212
		무게(kg)	488	154	81	82

자료(출처): 해양환경정보포털(b) 자료 재구성

2018년부터 2022년까지 5년간 해안 쓰레기에서 플라스틱이 차지하는 비율은 전국에서 88%, 인천에서 76.5%로 11.5% 차이를 보였다. 전국의 해안 쓰레기 분포는 플라스틱 다음으로 유리, 기타 재질, 금속 등의 순서로 확인되었고, 인천에서는 플라스틱, 유리, 외국 기인, 천연 섬유 등의 순서로 검출되었다. 전국에 분포하는 해안 쓰레기의 국내 기인은 98.4%, 외국 기인은 1.6%에 불과하지만, 인천의 경우 국내 기인은 93.9%, 외국 기인은 6.1%를 차지할 만큼 인천의 해안 쓰레기는 외국 기인의 비중이 높았다([그림 4-11] 참고).

[그림 4-11] 2018~2022년 해안 쓰레기 종류



자료(출처): 해양환경정보포털(b) 자료 재구성

인천 연안의 해안 쓰레기 조사 결과, 개수기준으로는 영흥을 제외하고 플라스틱 비율이 가장 높았으며, 특히 백령, 강화, 영종도는 플라스틱 비율이 84.4%, 83.8%, 68.2%를 차지하였다. 무게를 기준으로 해안 쓰레기에서 높은 비중을 차지하는 항목의 경우, 강화에서는 플라스틱(70.3%), 영흥은 유리(80%), 백령은 외국 기인(43.2%)으로 나타났다([표 4-8] 참고).

[표 4-8] 유형별 인천 해안 쓰레기 분포(2022년 기준)

지역	인천		강화		백령		영종		영흥	
	개수	무게	개수	무게	개수	무게	개수	무게	개수	무게
플라스틱	1,445	38.8	550	20.6	807	16.7	60	1.1	28	0.4
종이	21	0.3	9	0.2	5	0.1	1	-	6	-
목재	22	12.8	3	4.2	17	8.6	2	-	-	-
금속	27	1.0	14	0.7	1	-	8	0.2	4	0.1
천연 섬유	19	1.4	13	0.8	-	-	1	0.2	5	0.4
유리	101	5.5	46	1.5	5	0.2	10	0.2	40	3.6
고무	11	1.0	5	0.4	1	0.6	2	-	3	-
외국 기인	122	20.1	4	0.1	118	20.0	-	-	-	-
기타 재질	18	1.4	12	0.8	2	0.1	4	0.5	-	-
합계	1,786	82.3	656	29.3	956	46.3	88	2.2	86	4.5

주: 개수 단위(개), 무게 단위(kg)

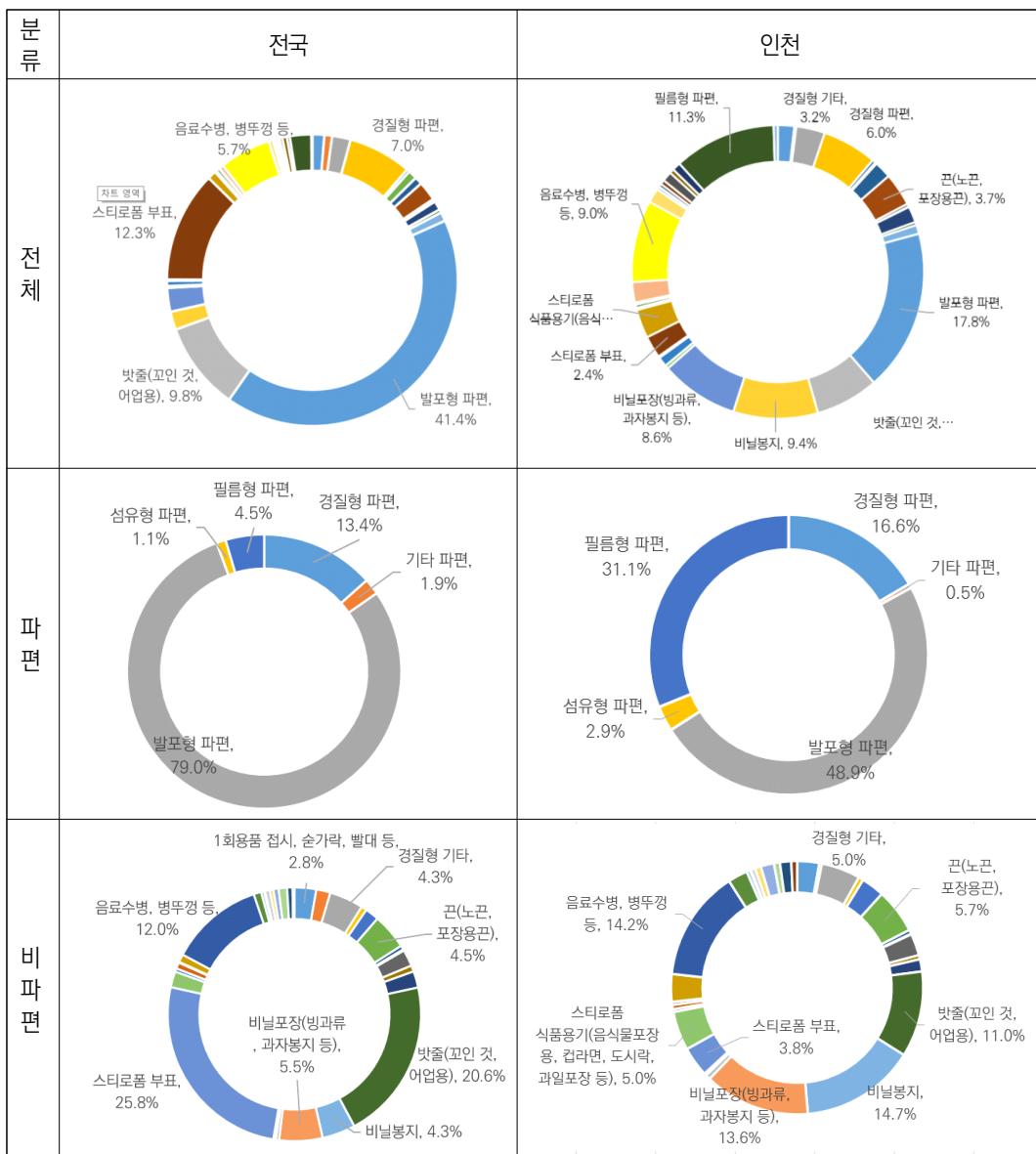
자료(출처): 해양환경정보포털(b) 자료 재구성

2018년부터 2022년까지 전국 해안에서 검출된 플라스틱의 형태는 발포형 파편이 가장 많았고, 스티로폼 부표, 어업용 뱃줄, 경질형 파편 등이 뒤를 이었다. 인천 해안에서도 발포형 파편이 가장 많이 검출되었고, 필름형 파편, 비닐봉지 등의 순으로 나타났다([그림 4-12] 참고).

해양수산부는 제품으로부터 미세플라스틱으로 변형되는 과정을 파악하기 위해 플라스틱 세부 형태에 파편을 추가하여 파악하였다. 발포형 파편은 주로 스티로폼 제품(부표, 식품 용기, 포장용 충전재, 어상자 등), 필름형 파편은 비닐 제품(포장지 등), 경질형 파편은 다양한 플라스틱 제품, 섬유형 파편은 끈, 뱃줄, 합성섬유 등으로부터 발생하는 입자이다. 발포형, 필름형, 경질형 등의 파편은 작은 크기로 인해 수거가 어렵고, 파쇄를 통해 미세플라스틱으로 변형될 가능성이 크기 때문에 지속적인 관찰이 필요하다. 인천 연안의 파편 분포는 발포형> 필름형> 경질형> 섬유형 순으로 나타났다([그림 4-12] 참고). 전국의 필름형 파편 비율보다 인천의 비율이 더 높은 것으로 보아, 인천 연안은 생활 쓰레기의 영향을 많이 받는 지역임을 알 수 있다.

비파편 플라스틱 중 어업 활동과 관련된 뱃줄(어업용)과 스티로폼 부표의 비율은 전국 해안에서 46.4%, 인천에서 14.8%로 조사되었다([그림 4-12] 참고). 인천지역은 비닐봉지·포장 등의 쓰레기 비율(28.3%)이 높은 것으로 보아, 인천 연안에 분포하는 미세플라스틱에 육상 요인이 영향을 미치는 것으로 판단하였다.

[그림 4-12] 2018~2022년 해안 쓰레기의 플라스틱 형태



자료(출처): 해양환경정보포털(b) 자료 재구성

최근 5년간 인천지역의 해안 쓰레기 중 해양 시설물(스티로폼 부표, 뱃줄-어업용)은 전체의 10.2%를 차지하였다. 또한 가장 높은 비율로 검출된 밭포형 파편은 스티로폼으로부터 배출되므로, 인천지역의 스티로폼 부표 발생량을 파악할 필요가 있다. 인천 연안에서 확인한 스티로폼 부표는 2018년 91개에서 2021년 7개까지 감소하였으나, 2022년에 30개로 증가하였다. 이는 백령도와 영종도의 스티로폼 부표 발생량이 2022년에 증가함에 따라

나타난 결과이다([표 4-9] 참고). 전국 양식장에서는 2021년 기준 약 5,500만 개의 부표가 사용되고 있고, 이 중 3,940만 개(72%)가 스티로폼 부표인 것으로 예상한다(해양수산부, 2021). 정부는 2024년까지 친환경 부표를 100% 보급한다는 목표를 세웠으며, 2023년 어장관리법 시행규칙 개정으로 양식장 내 스티로폼 부표의 신규 설치가 단계적으로 금지될 예정이다.

[표 4-9] 최근 5년간 스티로폼 부표 발생량

(단위: 개수)

지역	2018년	2019년	2020년	2021년	2022년	합계
인천	91	22	9	7	30	159
강화	74	22	4	3	2	105
백령	15	-	2	2	22	41
영종	-	-	-	2	5	7
영흥	2	-	3	-	1	6

자료(출처): 해양환경정보포털(b) 자료 재구성

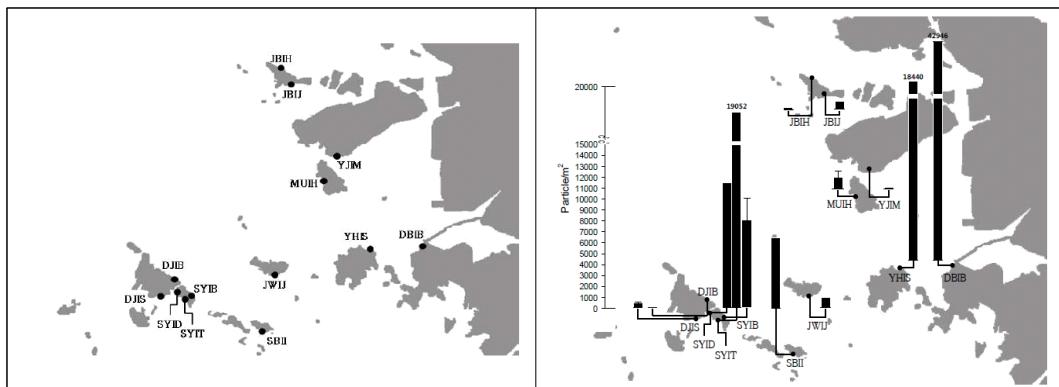
2) 해양 시설물 기인 미세플라스틱 분포

현재 양식장에서 사용하는 부표의 대부분은 발포폴리스티렌(Expanded Polystyrene, EPS)으로, 이는 우리가 흔히 말하는 스티로폼(Styrofoam)이다. EPS는 가볍고 저렴하며 밀도가 낮아 물 위에 뜨기 때문에 설치하면 장기간 사용할 수 있다는 장점이 있지만, 해양 미세플라스틱으로 변형된다는 단점이 있다(김범규, 2021).

김인성(2015) 연구에서는 인천·경기 연안 13곳의 해변에서 2014년 미세플라스틱을 수집하여 정량·정성 분석하였다. 인천·경기 연안의 해변에서 검출된 미세플라스틱은 평균 $8,355 \pm 12,422$ 개/ m^3 이며, 풍부도가 가장 높은 곳은 대부도 방아머리(DBIB) $42,613 \pm 33,381$ 개/ m^3 , 가장 낮은 곳은 덕적도 북쪽해변(DJIB) 22 ± 11 개/ m^3 으로 나타났다 ([그림 4-13] 참고).

- 미세플라스틱 조사 해변은 장봉도 한들(JBIH), 장봉도 진촌(JBIJ), 대부도 방아머리 (DBIB), 승봉도 이일레(SBII), 영종도 마시안(YJIM), 소야도 뼈뿌리(SYIT), 소야도 반도 (SYIB), 소야도 뒷장불(SYID), 무의도 하나개(MUIH), 영흥도 십리포(YHIS), 자월도 장꼴 (JWIJ), 덕적도 서포리(DJIS), 덕적도 목섬 펜션 해변(DJIB)임.

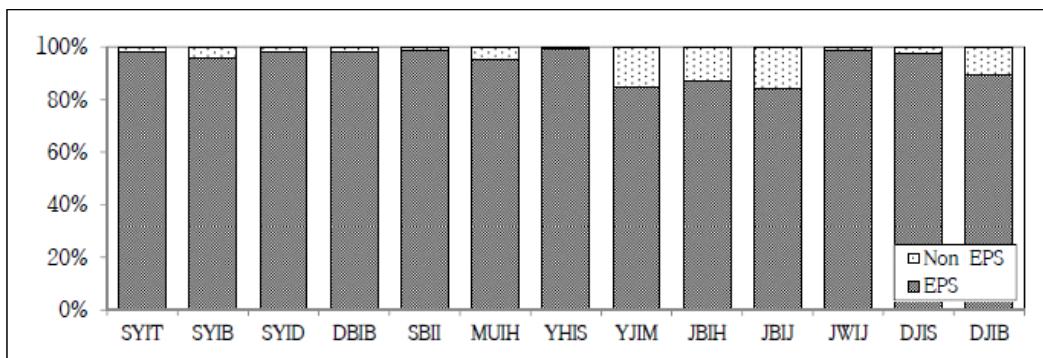
[그림 4-13] 인천·경기 연안의 미세플라스틱 조사지점 및 풍부도



자료(출처): 김인성(2015)

인천·경기 연안 13곳의 해변에서 조사한 미세플라스틱 중 EPS가 84~99%를 차지하였다([그림 4-14] 참고). 이는 서해안에서 이루어지는 어업 활동에 사용하는 시설물 대부분이 EPS 재질로 된 스티로폼 부표인 것으로 보인다. 해변 시료 내 EPS는 크기 1~2mm 입자가 가장 큰 비중을 차지하였다(43~84%). EPS의 크기가 1~2mm 이상인 그룹에서는 크기가 커질수록 검출되는 미세플라스틱 수가 감소하였고, 크기가 0.5~1mm 이하인 그룹에서는 크기가 작아질수록 검출되는 EPS 수가 감소하였다.

[그림 4-14] 인천·경기 연안의 미세플라스틱 분포 비율

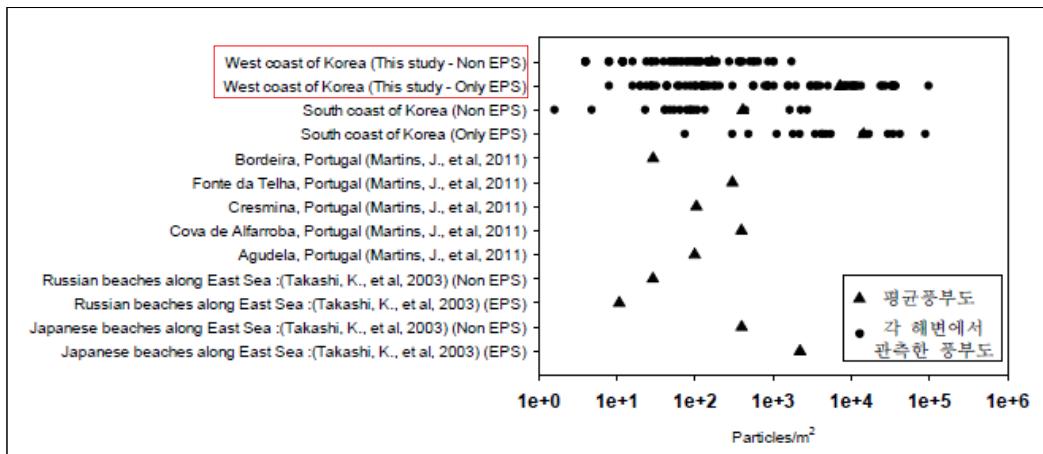


자료(출처): 김인성(2015)

본 연구에서 수행한 인천·경기 연안 해변 13곳의 미세플라스틱 농도는 남해안 해변과는 비슷하였지만, 국외 해변의 미세플라스틱 농도보다는 현저히 높았다([그림 4-15] 참고).

포르투갈, 러시아, 일본 해변의 평균 EPS 농도와 비교하였을 때, 인천·경기 연안의 해변에서는 EPS가 4~13,635배 높았다. 반면 EPS를 제외한 미세플라스틱의 농도는 국내(174 ± 258 개/ m^3)와 국외(237 ± 561 개/ m^3) 해변에서 유사하게 관찰되었다. 해당 결과를 토대로, 인천·경기 연안에서 어업을 위해 사용하는 스티로폼 부표는 미세플라스틱 발생에 큰 비중을 차지한다는 것을 예상할 수 있다.

[그림 4-15] 국내외 미세플라스틱 풍부도



자료(출처): 김인성(2015)

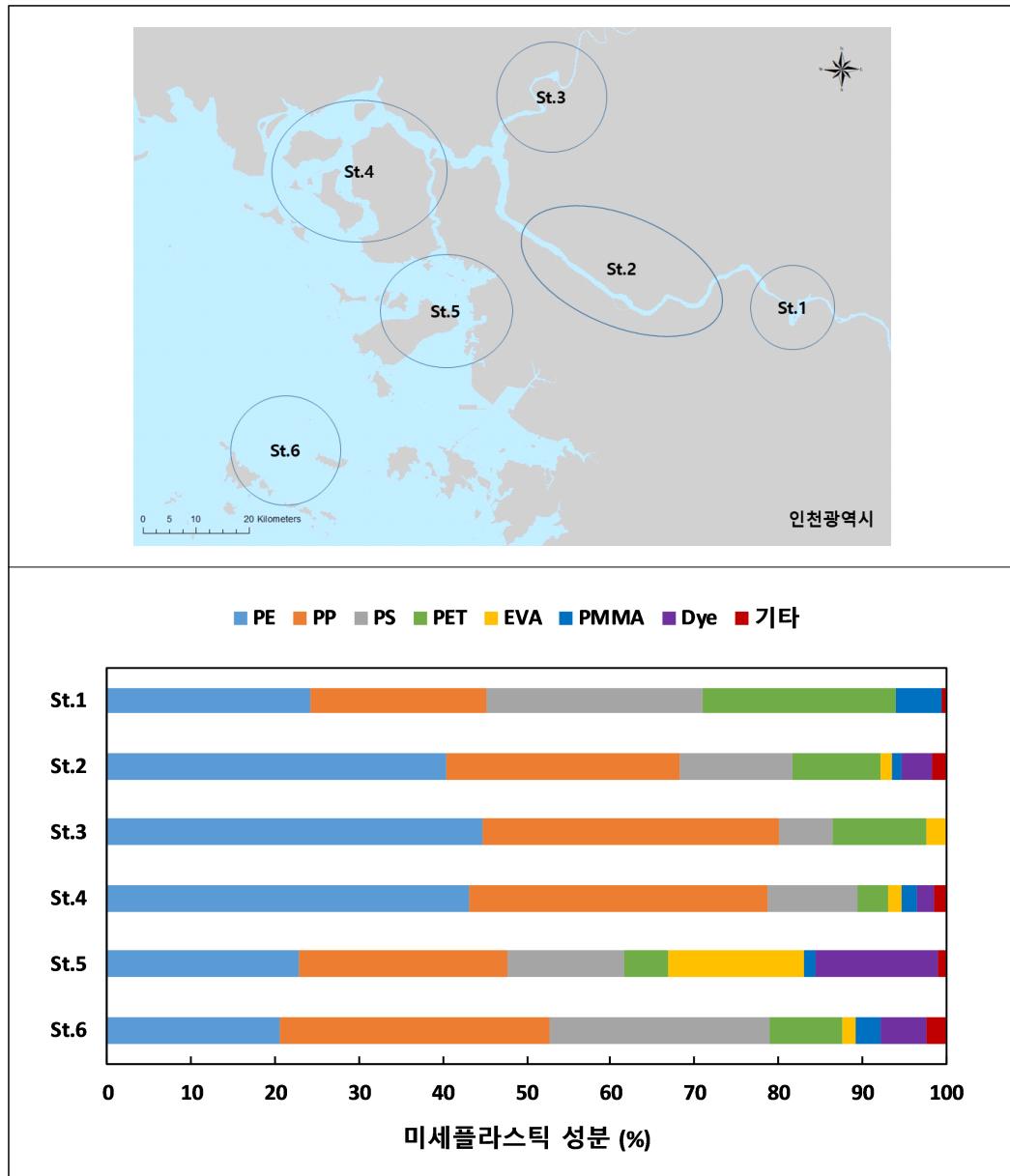
3. 인천 연안의 미세플라스틱 성분

플라스틱은 산소, 질소, 황 등이 부착된 탄소 원자 사슬로 구성된 폴리머가 주성분이며, 미세플라스틱 성분은 폴리머의 분자구조에 따라 분류한다. 산업에서 일반적으로 사용하는 미세플라스틱의 성분은 PP, PE, PS, EVA, PET, PVC, PMMA 등이 있다([표 2-4] 참고).

3장에서 선별한 한강 및 인천 연안의 미세플라스틱 연구 목록 [표 3-4]를 토대로, 한강 상류(St.1), 한강 중·하류(St.2), 임진강(St.3), 강화도 인근(St.4), 영종도 인근(St.5), 자월도·덕적도 인근(St.6) 지점에서 검출된 미세플라스틱 성분을 조사하였다. 한강은 연안과 연결된 미세플라스틱 유입원으로, 육상 기인 미세플라스틱의 성상을 파악할 수 있는 지표일 뿐만 아니라 대조군으로써 활용할 수 있으므로 본 연구의 분석 지점에 포함하였다.

참고문헌에서 분석한 미세플라스틱의 조성이 다르므로, 입자 성분을 PE, PP, PS, EVA, PET, PMMA, Dye로 구분하고 나머지는 기타로 분류하였다. 검출된 미세플라스틱 성분 중 PET, PMMA는 고밀도로 분류되고 나머지는 해수 밀도(1.025 g/cm^3)보다 낮은 저밀도로 구분된다. 시료 채취 기간은 고려하지 않고 연구 단위 별 검출된 미세플라스틱의 성분비를 파악하여 평균값으로 비중을 산출하였다.

[그림 4-16] 모니터링 지점별 미세플라스틱 성분



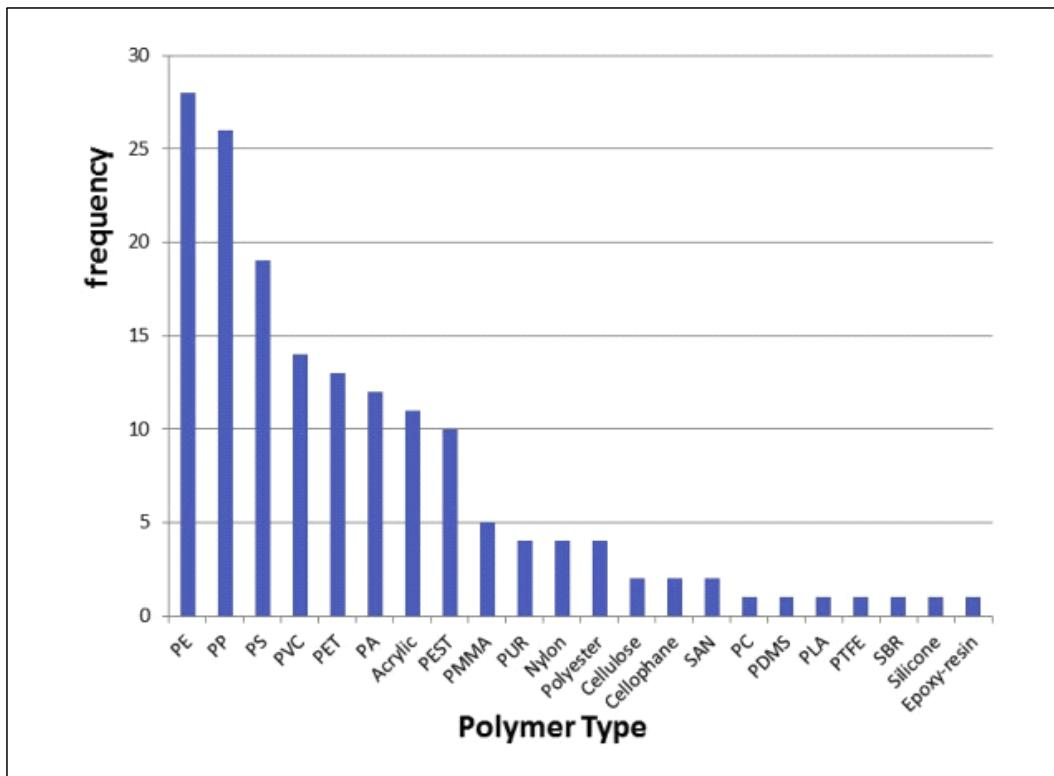
1) 한강·임진강 미세플라스틱 성분

대조군 지점인 한강(St.1, St.2) 및 임진강(St.3)에서는 PE, PP, PS, PET 입자가 90% 이상 검출되었다. St.1 지점에서는 PE, PP, PS, PET 성분이 고르게 분포하여 각각 20% 이상의 비율을 차지하였고, St.2와 St.3 지점에서는 PE와 PP를 합한 성분비가 각각 68%, 80%로 나타났다([그림 4-17] 참고). 2장에서 살펴본 바와 같이, 기존 연구에서 검출된 한강수계의 미세플라스틱 주요 성분도 PS, PP, PE로 확인됨에 따라([그림 2-7] 참고) St.1, St.2, St.3 지점에 분포하는 미세플라스틱은 육상에서 사용한 플라스틱이 수계로 유입된 것으로 보인다. 플라스틱 생산량은 PE, PP, PET, PS가 높은 것으로 보아(Geyer et al. 2017), 산업 및 일상생활에서 고빈도로 사용하는 플라스틱 성분이 한강과 임진강으로 유입되었음을 알 수 있다.

PE와 PP는 일반적으로 사용하는 플라스틱 폴리머로, 높은 내구성 및 내열성의 장점이 있어 포장재, 플라스틱 용기, 섬유 등 여러 분야에 사용한다. 세정제, 치약 등 개인 위생제품에 포함되는 폴리올레핀의 주요 성분은 PE와 PP이다. 유럽에서 실시한 세정제품 조사에 따르면 PE는 세정제 미세플라스틱의 93%를 차지하였고, PE와 PP는 치과용 치아 광택제 등의 의료분야에서 담체로 사용한다(Duis & Coors, 2016). 개인이 사용한 위생제품 및 의료 제품의 미세플라스틱은 폐수를 통해 환경으로 유입된다.

Koelmans et al.(2019)는 55개의 미세플라스틱 연구 중 32개의 연구를 바탕으로 미세플라스틱 성분의 검출 빈도를 조사하였고, 담수에서 빈번하게 검출되는 폴리머는 PE \approx PP $>$ PS $>$ PET $>$ PMMA(본 연구에서 다른 성분만 고려) 순으로 나타났다([그림 4-17] 참고). Koelmans et al.(2019) 연구 결과와 한강 및 임진강의 미세플라스틱 성분 분포가 유사한 것은 다음의 두 가지 이유로 설명할 수 있다. i) 전 세계 플라스틱 수요가 PE $>$ PP $>$ PET $>$ PS 순으로 알려져 있어, 수계에 분포하는 미세플라스틱 성분도 이와 비슷할 것으로 예상한다. ii) 미세플라스틱 성분별 밀도는 PE, PP < 물 \approx PS < PET 순이다. 미세플라스틱 연구에서는 일반적으로 지표수를 채취하므로, 물보다 밀도가 큰 입자는 다른 성분에 비해 시료에 잔류할 확률이 낮다.

[그림 4-17] 담수 내 미세플라스틱 검출 빈도



자료(출처): Koelmans et al.(2019)

2) 인천 연안 미세플라스틱 성분

인천 연안 지점(St.4, St.5, St.6)에서 관찰한 미세플라스틱의 성분은 한강·임진강과 유사하게 PE, PP, PS가 주로 검출되었고, 전체 미세플라스틱의 60~90%를 차지하였다([그림 4-16] 참고). 앞서 확인한 바와 같이, PE, PP, PS는 플라스틱의 주요 성분이므로 연안 내 미세플라스틱에서 큰 비중을 차지하는 것으로 보인다.

Dye 입자는 산업용 코팅제 등의 알카드 수지 폴리머를 의미하며, 일반적으로는 선박 페인트 입자로 분류된다. 한강 및 임진강의 미세플라스틱 분포와는 다르게 인천 연안에서는 미세플라스틱 성분 중 dye(염료)가 높은 비중으로 나타났다(St.5에서 15%, St.6에서 6%). 신도, 영종대교, 인천대교, 인천항 인근을 통합한 영종도 인근 지점인 St.5의 미세플라스틱 성분은 다른 지점보다 dye 입자의 비율이 높았다.

인천항은 연간 31,279척의 선박이 입출항하고, 컨테이너 물동량이 전국 2위인 무역항이다(인천항만공사, 2022). 국제 규모의 인천항을 포함하는 영종도 인근 지점에서는 선박 입출항 빈도가 높으므로, 선박으로부터 발생한 페인트 입자가 많이 잔류하는 것으로 추정된다. 또한 육상과 멀리 떨어진 St.6 지점에서 dye 성분이 높게 나타난 것은 선박이 이동하는 경로를 따라 dye 입자가 분포함을 나타낸다([그림 4-18] 참고).

[그림 4-18] 인천항 항로 개요도

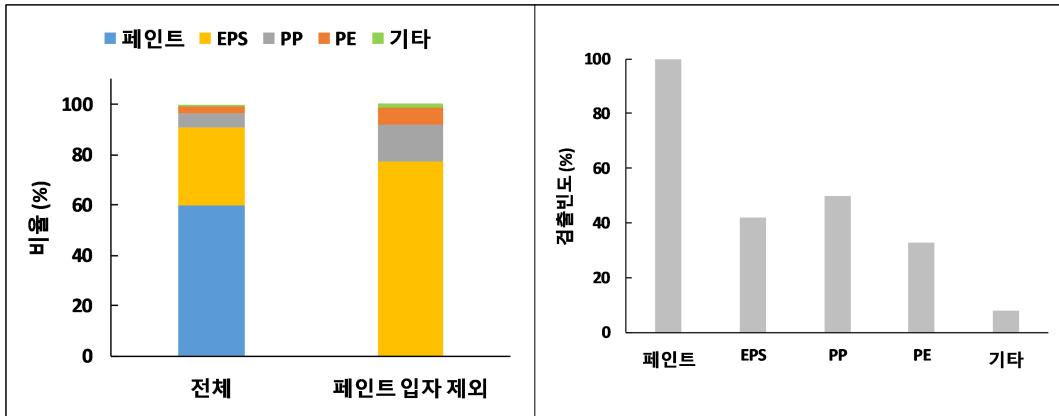


자료(출처): 인천항 도선사회

Chae et al.(2015) 연구에 따르면 인천 및 경기 연안 12곳의 표층수에서 페인트, EPS, PP, PE 입자가 검출되었다. 성분 중 페인트 입자는 50% 이상으로, 모든 조사 대상 지점에서 관찰되었다([그림 4-19] 참고). 부식 방지 페인트는 주로 철 또는 목재 용기의 표면에 사용되므로, 항로와 항만에는 선박 페인트가 잔류할 가능성이 높다. 전체 선박의

10%를 차지하는 1,000톤 이상의 여객선이 인천항과 주변 섬을 매일 왕복하기 때문에 인천 연안에서 페인트 입자가 많이 잔류하는 것으로 예상한다.

[그림 4-19] 인천 및 경기 연안 지표수의 미세플라스틱 조성 비율 및 검출 빈도



자료(출처): Chae, D. H. et al.(2015) 자료 재구성

영종도 인근 지점인 St.5에서는 EVA 입자가 전체 미세플라스틱 성분의 16%를 차지하였다. EVA는 에틸렌과 비닐아세테이트의 중합체로, 방수용 플라스틱, 발포 고무, 포장지, 접착제, 코팅제 등에 사용한다. EVA의 용도로 보아, 연안에 잔류하는 EVA는 육상으로부터 유입된 입자일 가능성이 높다(Song et al, 2018). 또한 EVA의 특성상 결합력이 약해 육상으로부터 배출된 EVA는 풍화작용을 거쳐 수계에 미세플라스틱으로 잔류한다. 본 연구의 조사지점인 St.5는 인천지역에서 배출된 오염물질이 모이는 위치이므로, 육상에서 발생한 EVA가 영종도 인근 연안에 분포하는 것으로 예상한다.

본 연구 대상인 6곳의 모니터링 지점 중, St.6에서 PS의 비중(26%)이 가장 높았다. 스티로폼 부표는 폴리스티렌(PS)을 발포 성형한 발포폴리스티렌(EPS)으로 제조하며, 어업 활동에 사용하는 PS 플라스틱은 밀도가 낮고 결합력이 약해 수계에서 미세플라스틱 입자로 분쇄되기 쉽다. 하여, 서해에 있는 어업 시설물로부터 PS 입자가 발생하여 덕적도 인근 St.6 지점에 잔류하는 것으로 예측하였다.

4. 소결

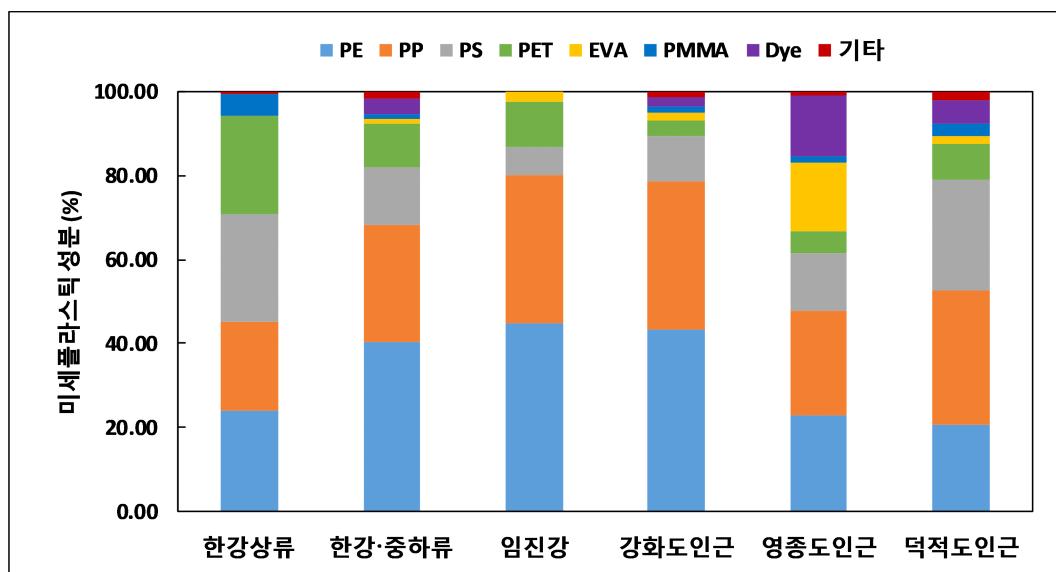
연안으로 유입되는 미세플라스틱은 기원에 따라 육상과 해상으로 구분한다. 육상에서 연안으로 유입되는 미세플라스틱의 기원은 하수처리시설과 육상 배출 폐기물이며, 해양에서 발생하는 미세플라스틱의 기원은 어업 활동과 선박운송 등으로 분류한다. 본 연구에서는 기원에 따라 미세플라스틱 성상이 다를 수 있다는 전제하에, 한강 및 인천 연안에서의 미세플라스틱 성분을 분석하였다.

조사 대상인 여섯 지점에서 모두 PE, PP, PS 성분이 주로 검출되었다([그림 4-20] 참고). 수계에 PE, PP, PS가 많이 분포하는 이유는 첫째, 플라스틱 제품 수요와 관련이 있다. 전 세계에서 플라스틱 제품에 PE, PP, PS 성분이 가장 많이 사용되기 때문에 환경 중 잔류하는 미세플라스틱의 성분도 이와 같다고 판단하였다. 둘째, PE, PP는 저밀도로 분류되고, PS는 물과 비슷한 밀도를 갖기 때문에 해당 성분은 지표수에 잔류할 확률이 높다. 미세플라스틱 모니터링 시 일반적으로 지표수를 수집하기 때문에 저밀도 성분이 주로 검출되는 것으로 보인다.

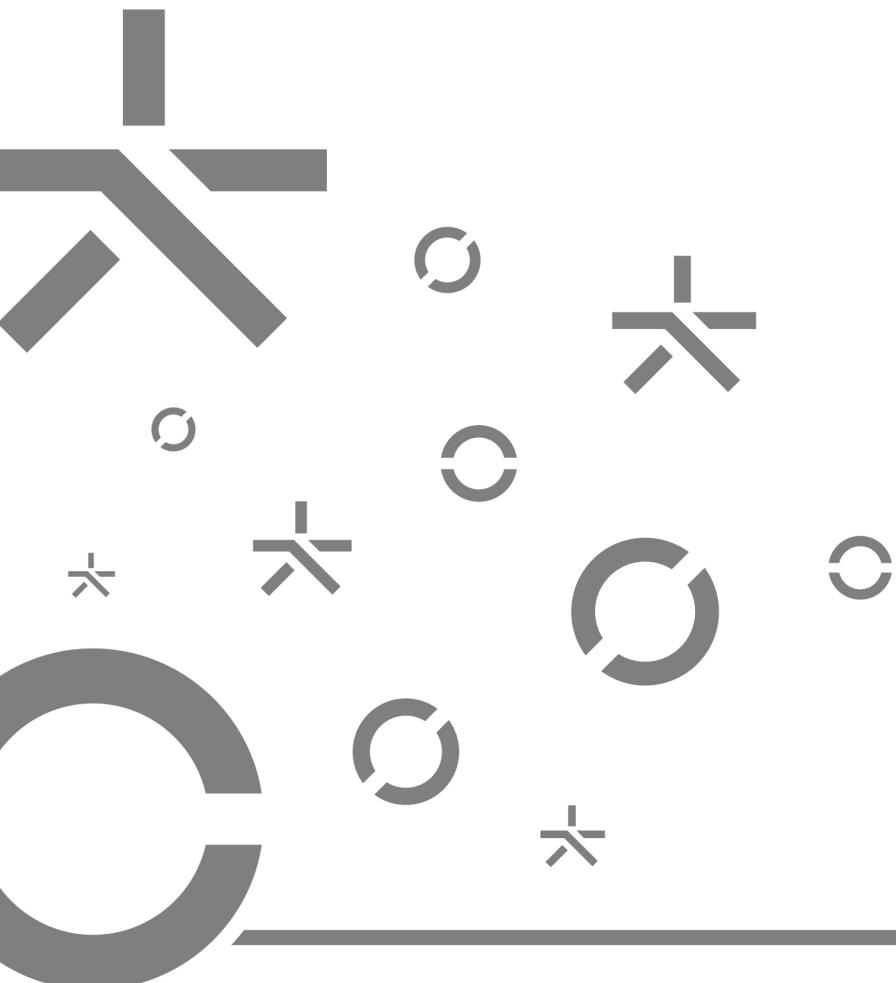
한강 및 임진강의 미세플라스틱 분포와는 다르게 인천 연안에서는 미세플라스틱 성분 중 dye(염료)가 확인되었다. Dye는 산업용 코팅제의 성분으로, 선박 페인트 입자로 분류한다. 영종도 인근과 덕적도 인근 지점은 인천항 항로로 선박 입출항 빈도가 높아 선박으로부터 발생한 페인트 입자가 연안에 잔류하는 것으로 예상하였다.

영종도 인근 지점에서는 방수용 플라스틱, 밸포 고무, 포장지 등 다양한 분야에 사용하는 EVA가 다른 지역보다 높은 비중으로 확인되었다. 해당 성분은 육상에서 배출되어 풍화작용을 거쳐 연안으로 유입된 미세플라스틱일 것으로 추정하였다. 덕적도 인근에서 많이 검출된 PS는 스티로폼 부표 등 어업 활동에 사용하는 성분으로, 밀도가 낮고 결합력이 약해 미세플라스틱으로 파쇄되기 쉽다. 즉, 덕적도 인근에서는 어업 활동으로 발생한 미세플라스틱 입자가 분포함을 알 수 있었다.

[그림 4-20] 한강 및 인천 연안의 미세플라스틱 성분



인천 연안 미세플라스틱 위해성



인천 연안 미세플라스틱 위해성

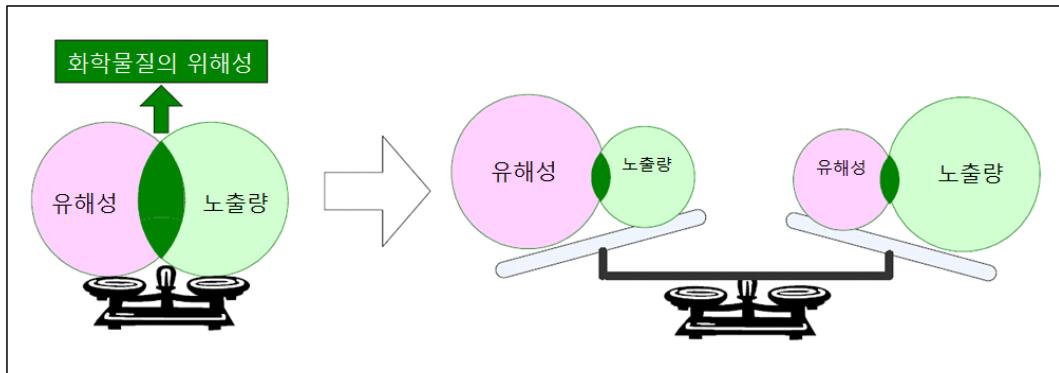
1. 위해성의 개념

위해성(risk)은 바람직하지 않은 영향이 일어날 가능성을 의미하며, 위해성 평가(risk assessment)란 유해성¹⁰⁾이 있는 화학물질이 사람 또는 환경에 노출되는 경우 사람의 건강이나 환경에 미치는 결과를 예측하기 위해 검토·평가하는 과정이다. 환경에서의 위해성은 일상생활 및 산업활동을 통해 대기·토양·수계로 배출되는 화학물질이 인체와 생태계에 미치는 영향을 의미한다. 위해성 평가는 화학물질의 잠재적 위험을 파악하고 정량화하여 효과적인 위해도 관리 전략 구축에 활용한다.

위해성의 규모는 화학물질의 유해성과 노출량에 의해 결정되며, 화학물질의 유해성이 약하더라도 노출되는 양이 많거나, 노출량이 적더라도 유해성이 강하면 화학물질의 위해성은 높아진다([그림 5-1] 참고). 즉, 위해성은 화학물질의 유해성과 노출량을 모두 고려하여 산정한다. 화학물질의 위해성은 주변 환경의 위해성 여부뿐만 아니라 배출량 등의 저감이 필요한지 파악할 수 있으며, 대체제의 필요성을 제안하는 지표로 활용할 수 있다.

10) 화학물질이 사람의 건강이나 환경에 좋지 않은 영향을 주는 특성

[그림 5-1] 화학물질의 위해성

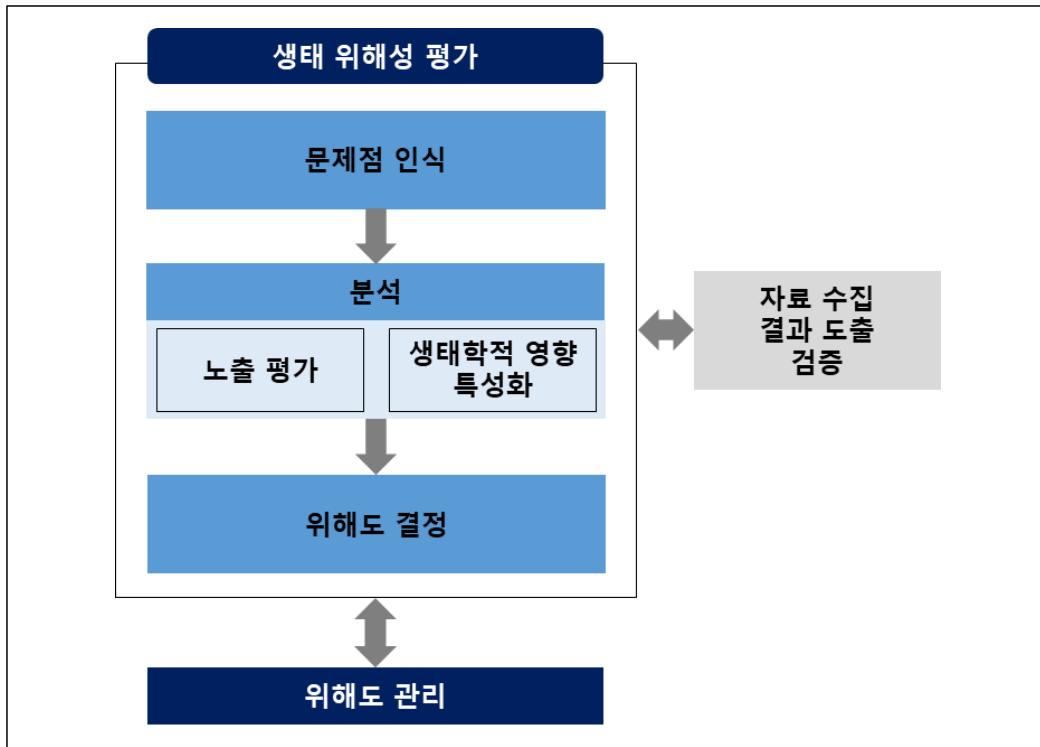


자료(출처): 환경부(2010)

화학물질의 위해 정도를 평가하는 방법은 오염원으로부터 환경으로 배출된 화학물질로 인한 인체 건강을 평가하는 인체위해성평가와 환경 중 생물 영향을 평가하는 생태위해성평가가 있다. 본 연구에서는 연안에 분포하는 미세플라스틱이 수생태계에 미치는 영향을 파악하기 위해 생태위해성평가 방법의 일부를 활용하였다. 생태위해성평가의 목표는 화학물질로부터 생물다양성을 관리하고 화학물질에 취약한 생태계를 보전하는 것이다. 생태 위해성은 수계에 서식하는 생물종(어류 또는 무척추동물 등)이 화학물질에 노출되었을 때의 영향을 예측하고, 화학물질(미세플라스틱)과 생태학적 영향 간의 관계, 독성, 노출, 불확실성 등의 정보를 결합하는 과정을 포함한다.

생태위해성평가는 문제점 인식, 분석, 위해도 결정 단계로 구성된다([그림 5-2] 참고). 문제점 인식 단계에서는 환경으로 유입되거나 잔류하는 오염물질을 이해하고, 해당 화학물질이 환경에 영향을 줄 수 있음을 인지한다. 분석 단계는 화학물질이 환경 중에 분포하는 정도, 잠재적으로 생물체에 노출될 수 있는 수준 등의 노출 평가와 화학물질로 인한 생물체의 스트레스 요인, 잠재적 영향 등의 생태학적 영향 특성화 과정을 거친다. 위해도 결정 단계는 화학물질의 노출과 생태 영향을 결합하여 화학물질이 생태계에 미치는 위해 수준을 예측한다. 생태위해성평가의 신뢰성을 높이기 위해서는 자료 수집·결과 도출·검증 작업 및 화학물질 관리·규제·생태계 보호 방안 전략을 마련해야 한다.

[그림 5-2] 생태위해성평가의 절차



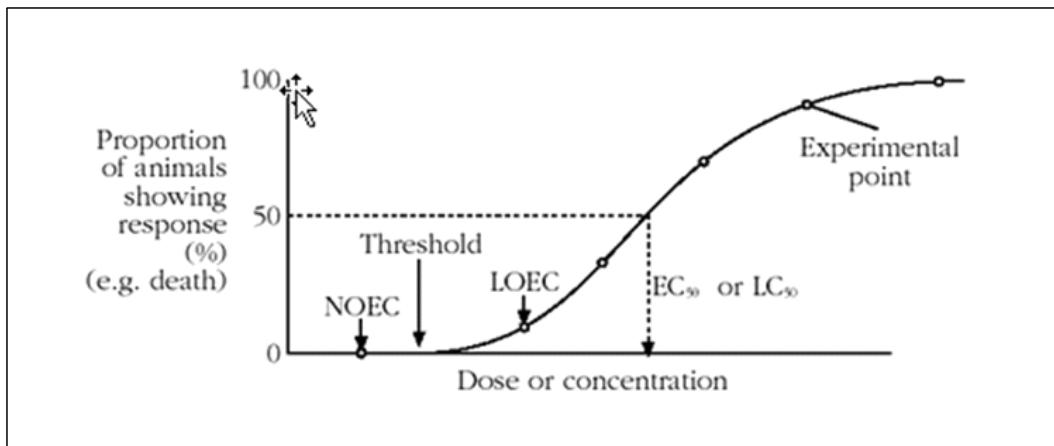
자료(출처): EPA(1998) 자료 재가공

2. 미세플라스틱의 수생생물 유해성

1) 독성자료 구축

수생 독성은 미세플라스틱에 단기간 또는 장기간 노출되어 생물에 유해성을 유발하는 특성을 의미하며, 급성독성과 만성독성으로 구분한다. 급성독성은 생물체의 생애주기에 비해 짧은 기간 동안 미세플라스틱에 노출되었을 때의 독성을 의미하며, 미세플라스틱이 생물체에 50% 영향을 주는 농도인 반수치사농도(Half maximal lethal concentration, LC50) 또는 반수영향농도(Half maximal effective concentration, EC50)를 적용한다. 만성독성은 수생생물에 미세플라스틱을 장기간 노출하였을 때의 독성(성장, 생식, 발달 등)을 의미하며, 미세플라스틱이 생물체에 영향을 주지 않는 농도인 무영향관찰농도(No observed effect concentration, NOEC), 최소영향관찰농도(Lowest observed effect concentration, LOEC)를 적용한다.

[그림 5-3] 용량-반응 곡선의 독성 지표



- 주1: 용량-반응 곡선은 화학물질의 용량 및 농도에 따른 생물체의 영향을 함수로 나타냄.
- 주2: 실험동물에 실험 대상 물질을 노출할 때 실험동물의 50%가 죽는 농도(반수치사농도, LC50)
- 주3: 실험동물에 실험 대상 물질을 노출할 때 실험동물의 50%가 영향을 받는 농도(반수영향농도, EC50)
- 주4: 실험동물에 실험 대상 물질을 노출할 때 실험동물에 영향을 주지 않는 농도(무영향관찰농도, NOEC)
- 주5: 실험동물에 실험 대상 물질을 노출할 때 실험동물에 영향을 주는 가장 낮은 농도(최소영향관찰농도, LOEC)

자료(출처): Bjørke and Ahmed(2011)

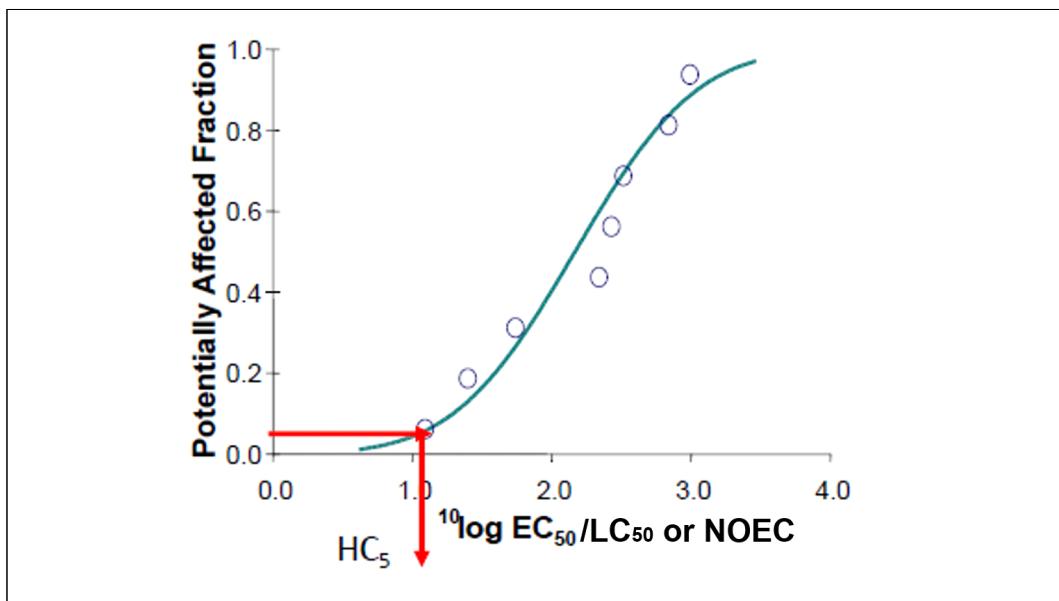
수생생물의 유해성은 미세플라스틱으로부터 생태계를 보호하는 데 필요한 지표이며, 미세플라스틱의 인체 유해성을 예측하는 보조수단이다. 독성자료 수집을 위해 미국 환경보호청(U.S. Environmental Protection Agency), SCCWRP(Southern California Coastal Water Research Project) 자료 및 연구 논문 및 보고서를 참고하였다. 기존 연구 자료의 미세플라스틱 성분은 polyamide(PA), polyethylene(PE), polyethylene, terephthalate(PET), polypropylene(PP), polystyrene(PS), polyurethane(PU), polyvinylchloride(PVC), polylactic acid, 기타 입자로 분류하였다. 수집한 자료에서 미세플라스틱 크기는 1μm~5mm 범위로 설정하였고, 형태는 파편(fragment), 섬유(fiber), 구(sphere)로 구분하였다. 참고문헌에서 부피당 미세플라스틱 무게로 농도를 제시한 경우, 입자의 크기와 길이, 밀도 등의 정보를 활용하여 부피당 미세플라스틱 개수로 단위를 환산하였다.

본 연구에서는 급성독성 및 만성독성 값을 활용하였고, 사망률(Mortality), 성장(Growth), 발달(Development), 번식(Reproduction)을 대상으로 생물 종말점을 구분하였다. 연구 대상 생물은 담수와 해수에 서식하는 갑각류(Crustacean), 극피동물(Echinoderm), 어류(fish), 연체동물(Mollusca), 윤형동물(Rotifer), 자포동물(Cnidarian)문으로 분류하였다.

2) 독성자료 적용

동일한 화학물질에 대해 서로 다른 생물종은 민감도(Sensitivity)¹¹⁾가 다르게 나타나며, 이러한 종 간의 차이는 통계분포로 설명할 수 있다. 종민감도분포(Species Sensitivity Distribution, SSD)는 특정 화학물질에 대한 독성 및 스트레스에 대한 생물종 간 민감도를 나타내는 누적 분포로, 화학물질의 생태위해성평가에 가장 많이 활용하는 방법이다. SSD로부터 도출하는 HC_5 (Hazardous Concentration 5%, HC_5)는 생태계에 서식하는 생물종 중 민감한 5% 생물종이 위해를 받는 농도이며, 이는 생태계의 95% 생물종은 화학물질로부터 보호받는 농도를 의미한다. HC_5 는 불확실성에 대한 보정을 통해 생태계에 서식하는 생물에게 유해한 영향이 나타나지 않는다고 예측되는 환경 중 농도인 예측무영향농도(Predicted No Effect Concentration, PNEC)로 변환된다([그림 5-4] 참고).

[그림 5-4] 종민감도분포(Species Sensitivity Distribution, SSD) 지표



주1: SSD 그래프는 화학물질의 농도에 따른 생물체의 민감도를 누적확률분포로 표현함. x축은 생물체에 영향을 주는 화학물질의 노출 농도, y축은 화학물질의 영향을 받는 생물종의 민감도 또는 반응을 나타냄. 생물종은 화학물질에 가장 민감한 종부터 덜 민감한 종으로 정렬함.

주2: 생물종의 5%가 영향을 받는 농도(HC_5)

자료(출처): ChemSafetyPro(2021)

11) 특정 환경 조건 또는 화학물질에 대한 생물종의 반응 정도

국립환경과학원 고시에 따르면 SSD를 도출하기 위해 4개 분류군(어류, 무척추동물-갑각류, 연체류, 조류 등)에서 최소 5종 이상의 생물종의 NOEC, LOEC, EC₁₀ 등의 만성 독성 값이 필요하다(국립환경과학원, 2021). 기존 연구를 통해 담수 종 독성 값을 기반으로 한 SSD와 해수 종 SSD 간의 차이가 크지 않음을 확인하였고(Yanagihara et al., 2022), 담수 종과 해수 종을 모두 고려하여 갑각류(Crustacean) 7종, 극피동물(Echinoderm) 2종, 어류(Fish) 2종, 연체동물(Mollusca) 1종, 윤형동물(Rotifer) 1종, 자포동물(Cnidarian) 1종으로부터 SSD를 도출하였다([표 5-1], [그림 5-5] 참고).

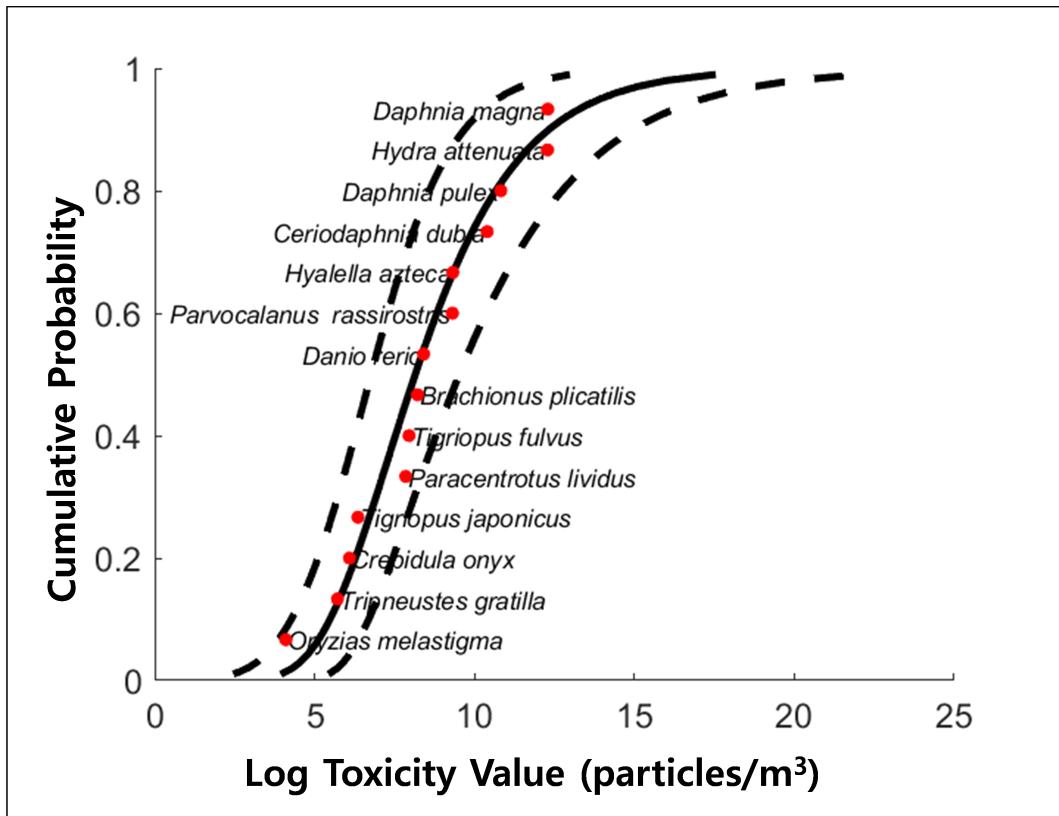
[표 5-1] 미세플라스틱 종민감분포(SSD)에 사용한 수생 생물종

생물 문	생물종
갑각류	<ul style="list-style-type: none"> • <i>Tigriopus japonicus</i> • <i>Parvocalanus crassirostris</i> • <i>Hualella azteca</i> • <i>Tigriopus fulvus</i> • <i>Ceriodaphnia dubia</i> • <i>Daphnia pulex</i> • <i>Daphnia magna</i>
극피동물	<ul style="list-style-type: none"> • <i>Tripneustes gratilla</i> • <i>Paracentrotus lividus</i>
어류	<ul style="list-style-type: none"> • <i>Oryzias melastigma</i> • <i>Danio rerio</i>
연체동물	<ul style="list-style-type: none"> • <i>Crepidula onyx</i>
윤형동물	<ul style="list-style-type: none"> • <i>Brachionus plicatilis</i>
자포동물	<ul style="list-style-type: none"> • <i>Hydra attenuata</i>

미세플라스틱에 민감한 수생태계 5% 생물종이 영향을 받는 농도(HC₅)는 3.5×10^4 개/m³로 나타났다([그림 5-5] 참고). 미세플라스틱의 예측무영향농도(PNEC)는 HC₅ 값에 불확실성(Uncertainty)을 반영하는 안전 계수(safety factor)를 적용하며, 위해성 예측에서 의미하는 불확실성은 실험 결과의 정확성, 예측 모델의 불확실성, 실험 조건 및 생물종의 제한 등을 말한다. SSD를 통해 HC₅를 산출하는 경우 안전 계수를 1에서부터 5로 설정하며, 본 연구에서는 보수적인 접근방법으로 불확실성을 보정하기 위해 안전 계수 5를 사용하여 미세플라스틱 예측무영향농도(PNEC)를 7.1×10^3 개/m³로 도출하였다. 이는 수계 내 미세플

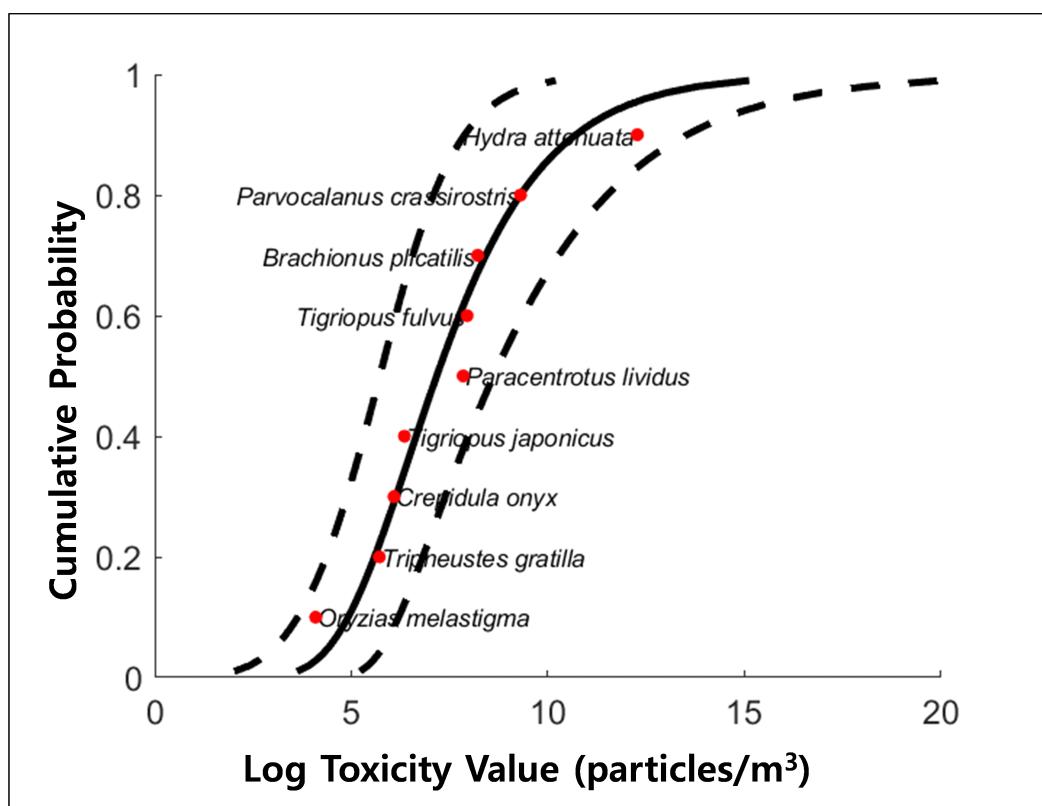
라스틱이 7.1×10^3 개/ m^3 이하로 분포하면 서식 생물종의 95%는 미세플라스틱의 영향을 거의 받지 않음을 의미한다.

[그림 5-5] 미세플라스틱의 종민감도분포(SSD) 곡선(1)



[그림 5-5]에서는 담수 생물종과 해수 생물종을 모두 고려한 미세플라스틱의 SSD로부터 PNEC 값 7.1×10^3 개/ m^3 를 산정하였다. 해양 생태계를 중심으로 미세플라스틱의 위험성을 예측하기 위해 [표 5-1] 중 해수 생물종을 선별하여 SSD를 도출하였다([그림 5-6] 참고). 미세플라스틱에 민감한 해양 생태계 5% 생물종이 영향을 받는 농도(HC₅)는 1.3×10^4 개/ m^3 이고, 안전 계수 5를 적용한 예측무영향농도(PNEC)는 2.7×10^3 개/ m^3 로 나타났다. 즉, 해양 내 미세플라스틱이 2.7×10^3 개/ m^3 이하로 분포하면 생물종의 95%는 미세플라스틱의 영향을 거의 받지 않음을 의미한다. 본 연구에서는 인천 연안의 미세플라스틱의 생태위험성을 예측이 목적이며, 보수적인 접근을 위해 해수 생물종으로부터 산출한 PNEC 값 (2.7×10^3 개/ m^3)을 활용하였다.

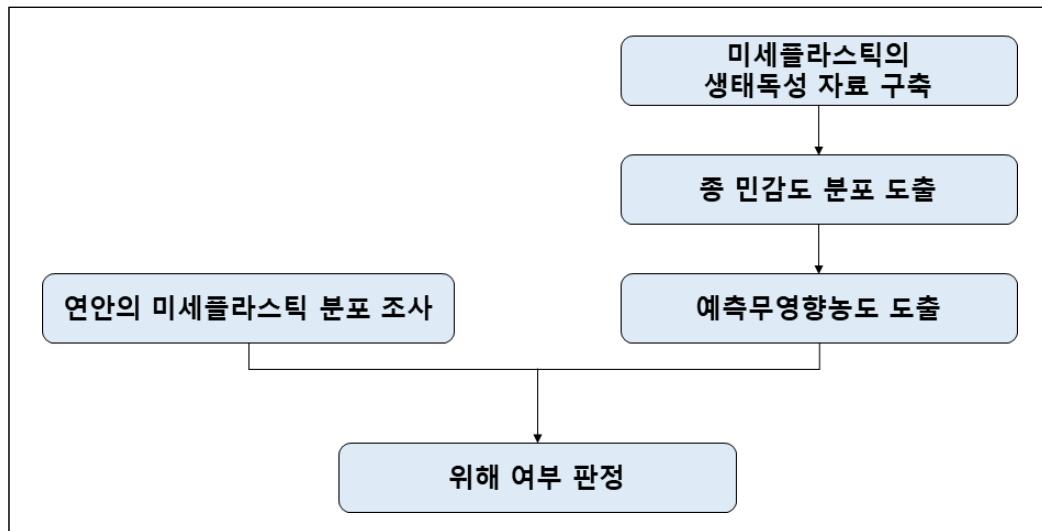
[그림 5-6] 미세플라스틱의 종민감도분포(SSD) 곡선(2)



3. 미세플라스틱의 수생생물 위해성

앞에서 설명한 바와 같이 미세플라스틱의 위해성은 유해성과 노출량을 모두 고려하여 산정한다([그림 5-1] 참고). 미세플라스틱의 노출량은 3장에서 조사한 한강 및 인천 연안의 미세플라스틱 분포 결과를 활용하였고, 미세플라스틱의 유해성은 미세플라스틱의 종민감도 분포(SSD)로부터 도출한 예측무영향농도(PNEC)를 반영하였다([그림 5-7] 참고).

[그림 5-7] 미세플라스틱의 위해성 예측 절차



한강 유역 및 인천 연안에 분포하는 미세플라스틱의 농도는 3장 결과에 따라 [표 5-2]에 요약하였다. 한강 상류(St.1), 한강 중·하류(St.2), 임진강 인근(St.3), 강화도 인근(St.4), 영종도 인근(St.5), 덕적도 인근(St.6) 연안의 미세플라스틱 농도는 $1.71\sim6.59\text{개}/\text{m}^3$, 평균 농도는 $3.71\text{개}/\text{m}^3$ 로 나타났다. 미세플라스틱의 생태 독성 자료를 기반으로 종민감도분포(SSD)로부터 예측무영향농도(PNEC)를 도출한 결과, 미세플라스틱의 PNEC은 $2.7\times10^3\text{ 개}/\text{m}^3$ 로 확인되었다.

[표 5-2] 미세플라스틱 분포 및 예측무영향농도

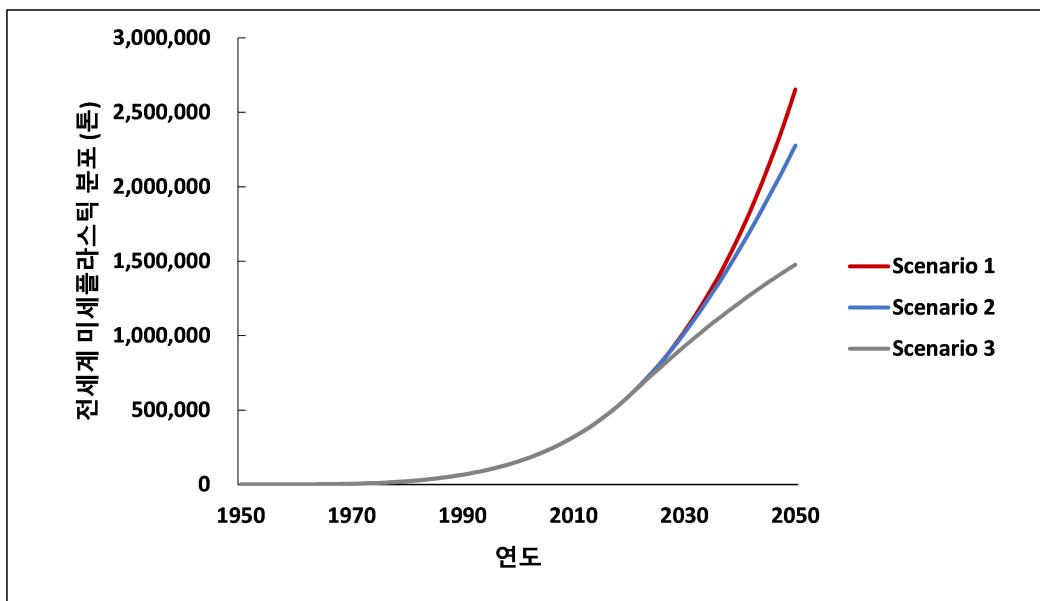
미세플라스틱 분포							예측무영향농도 (개/ m^3)
지점	St.1	St.2	St.3	St.4	St.5	St.6	2.7×10^3
농도 (개/ m^3)	3.48	3.4	1.71	6.59	4.06	3.01	

환경 중 미세플라스틱의 농도가 예측무영향농도(PNEC) 이상이면 높은 위해성, $0.1 \times PNEC$ 이상이면 중간 위해성, $0.01 \times PNEC$ 이상이면 낮은 위해성, $0.01 \times PNEC$ 이하면 위해성이 거의 없다 (Figuiere et al., 2022; Molnar et al., 2021). 미세플라스틱 분포를 파악한 한강 및 인천 연안의 모든 지점의 미세플라스틱 농도는 $27개/m^3(0.01 \times PNEC)$ 이하로, 미세플라스틱이 생물에게 위해를 주는 농도보다는 낮게 검출되었다. 하지만 이는 일부 지점 지표수 내 $100\sim300\mu\text{m}$ 이상 크기의 미세플라스틱을 대상으로 한 위해성 예측 결과이므로, 미세플라스틱의 실제 농도보다 과소평가 되었을 가능성이 있다. 향후 연구를 통해 조사지점 높이 및 연안 수심, 유량 등의 지표를 반영하여 인천 연안의 미세플라스틱 농도를 추정한다면, 실제 농도를 파악할 수 있을 것으로 기대한다.

미세플라스틱 사용량이 증가한다면 환경 중 미세플라스틱의 생태 영향을 무시할 수 없으므로 플라스틱 배출 시나리오에 따른 해양 미세플라스틱의 양을 예측하였다. 2005~2015년 사이의 전 세계 평균 플라스틱 생산량 증가율만큼 2050년까지 플라스틱 배출량이 증가하는 경우, 2050년 해양에 잔류하는 미세플라스틱은 2020년보다 4배 이상 늘어난다([그림 5-8] 참고). 또한 플라스틱의 생산량, 해양으로 유입되는 폐기물의 양 등을 고려하여 2100년의 해양 미세플라스틱은 50배 증가할 것으로 예상한다([그림 5-9] 참고). 해당 시나리오를 반영하면 2050년 인천 연안의 미세플라스틱 농도는 2022년 ($3.71 \pm 1.48개/m^3$)보다 4배 증가한 $14.83 \pm 5.9개/m^3$, 2100년에는 50배 증가한 $185.42 \pm 73.76개/m^3$ 로 예상된다.

플라스틱 배출 예측 시나리오에 따라 일부 연안에서는 2050년 미세플라스틱 농도가 PNEC의 1/100배를 초과하여 낮은 위해성이 나타날 수 있다. 2100년 인천 연안 대부분은 미세플라스틱이 $0.01 \times PNEC$ 값을 초과하고, 일부 지역은 $0.1 \times PNEC$ 을 초과함에 따라 미세플라스틱이 수생생물에 악영향을 줄 가능성이 있다. 덧붙여 본 연구에서 활용한 수생태계 위해성 결과는 예측값으로, 표준화된 결과가 아님을 강조하고자 한다. 추후 연구자료가 충분히 확보된다면 미세플라스틱의 수생생물 영향을 명확하게 규명할 수 있을 것으로 기대한다.

[그림 5-8] 플라스틱 배출 시나리오에 따른 해양 미세플라스틱 예측



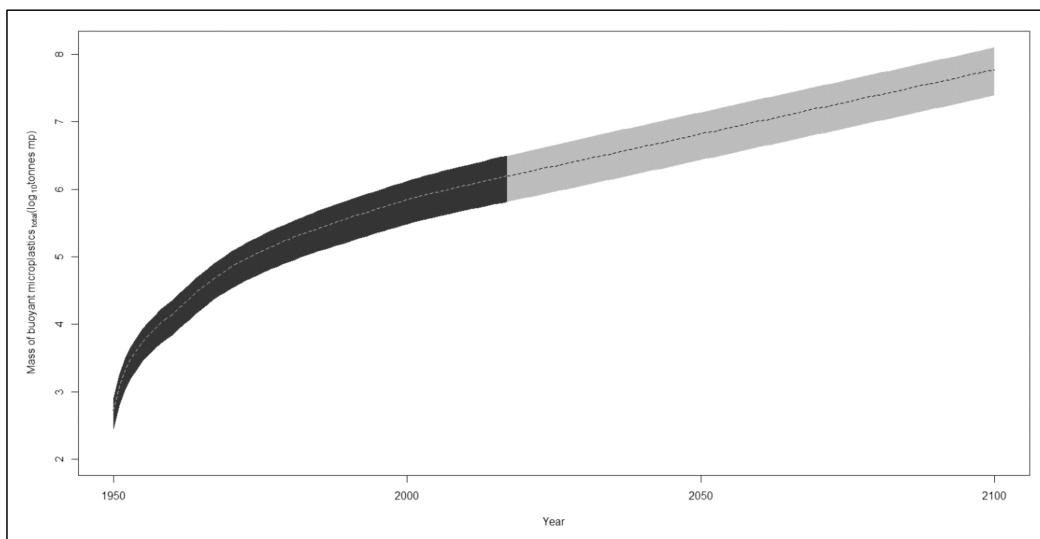
주1: Scenario 1은 2020년까지의 플라스틱 생산량에 따라 배출량이 증가하는 경우

주2: Scenario 2는 2020년까지의 플라스틱 배출량이 유지되는 경우

주3: Scenario 3은 2020년부터 배출량이 없는 경우

자료(출처): Lebreton et al.(2019) 자료 재구성

[그림 5-9] 기간에 따른 전 세계 해양 미세플라스틱의 분포



주1: 2016년 이전 미세플라스틱 존재량은 검은색으로 표기, 2017~2100년 예측하는 미세플라스틱 존재량은 회색으로 표기

주2: 점선은 미세플라스틱의 평균 예측 농도, 점선 아래와 위는 최상의 시나리오와 최악의 시나리오를 반영

자료(출처): Everaert et al.(2018)

4. 소결

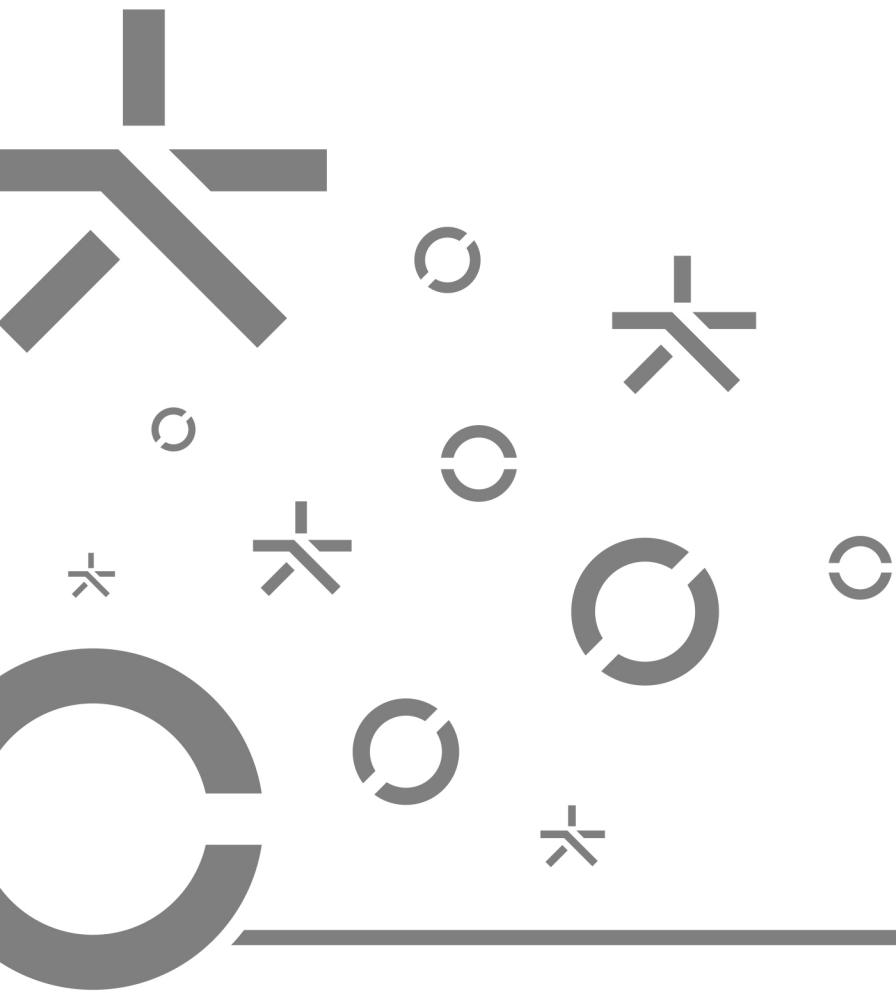
위해성은 일상생활 및 산업활동을 통해 환경으로 배출되는 화학물질이 인체와 생태계에 바람직하지 않은 영향을 줄 가능성의 의미한다. 위해성의 규모는 노출량과 유해성(바람직하지 않은 영향을 주는 특성)에 의해 결정된다. 본 연구에서는 미세플라스틱이 수생생물에 미치는 영향(유해성)을 파악하고, 수계의 미세플라스틱 농도를 토대로 생태 위해성을 예측하였다.

해양에 서식하는 생물종의 미세플라스틱 독성자료를 수집하여 종민감분포를 도출하였고, 생태계에 서식하는 생물에게 유해한 영향이 나타나지 않는다고 추정하는 예측무영향농도 (2.7×10^3 개/m³)를 파악하였다. 연구 대상 지점의 100~300μm 이상 미세플라스틱 농도는 예측무영향농도의 100배 이하로 미세플라스틱이 수생생물에 위해를 줄 가능성이 크지는 않다. 하지만 미세플라스틱 사용량이 현재와 동일한 속도로 증가한다면, 수계에 잔류하는 미세플라스틱의 양은 기하급수적으로 증가하며 이에 따른 수생태계 영향은 무시할 수 없다. 플라스틱 배출 시나리오를 통해 2050년 및 2100년 인천 연안에 분포하는 미세플라스틱의 양을 예측한 결과, 장기적으로 인천 연안의 미세플라스틱이 서식 생물종에 독성 영향을 줄 가능성이 있음을 확인하였다.

5장 연구의 한계점은 다음과 같다. ① 본 연구는 인천 연안 일부 지점의 지표수 내 100~300μm 이상 미세플라스틱을 대상으로 한 결과이므로, 연안 전체의 미세플라스틱 농도보다 낮게 예측되었을 가능성이 있다. ② 본 연구에서 도출한 수생태계 위해성 결과는 표준값이 아닌 예측값임을 밝힌다.

6

결론



결론

1. 연구 결과 요약

폴리머와 첨가제가 혼합된 합성수지인 플라스틱 중 5㎛ 이하의 형태는 미세플라스틱(microplastic)이고, 생성 유형에 따라 1차 미세플라스틱과 2차 미세플라스틱으로 구분한다. 1차 미세플라스틱은 인위적으로 제조하여 세정제, 화장품, 치약, 공업용 연마제, 페인트 등의 성분으로 사용하며, 2차 미세플라스틱은 플라스틱 제품이 분해 과정을 거쳐 미세플라스틱으로 변한 형태를 의미한다. 미세플라스틱은 산소, 질소, 황 원자 등이 부착된 탄소 원자 사슬이 반복적으로 연결된 구조로 대표적인 성분은 polypropylene(PP), polyethylene(PE), polystyrene(PS) 등이 있다. 이러한 미세플라스틱 입자는 대기, 수계, 토양뿐만 아니라 식품에 잔류하여 인체 건강에 악영향을 미칠 수 있다. 대기에 부유하는 미세플라스틱은 흡입을 통해, 수계에 잔류하는 미세플라스틱은 해산물 및 식수에 축적되어 섭취를 통해 인체로 유입된다. 또한 미세플라스틱은 생물체에 축적되어 행동 장애, 활동 저하, 번식 저해 등의 생태 독성을 일으킨다.

연안은 해양과 육지가 맞닿은 지역 및 해역으로, 인천 연안은 강화도를 포함한 인근 해역부터 인천항, 영종도, 영흥도, 덕적도 해안을 포함하는 지역을 의미한다. 본 연구에서는 인천 연안에 분포하는 미세플라스틱을 파악하고 대조군 지점과의 비교를 위해 기존 연구 10종을 인용하였다. 선행연구의 시료 채취 위치를 토대로 인접한 지점은 동일 그룹으로 분류하여 총 여섯 지역(한강 상류, 한강 중·하류, 임진강 인근, 강화도 인근, 영종도 인근, 덕적도 인근)을 대상 지점으로 선정하였고, 동일 지점의 미세플라스틱 데이터는 평균값을 산출하였다. 시료는 지표수를 중심으로 수집한 결과이며, 시료 내 미세플라스틱 크기는 100~300㎛ 이상으로 설정하였다.

지표수를 기준으로 분석한 결과, 미세플라스틱 분포는 한강 상류 3.48, 한강중·하류 3.4, 임진강 1.71, 강화도 인근 6.59, 영종도 인근 4.06, 덕적도 인근 3.01개/ m^3 로 나타났다. 인근에 오염원이 많지 않은 임진강 상류의 미세플라스틱 농도가 가장 낮았고, 한강하구인 강화도 인근 지점의 미세플라스틱 농도가 가장 높았다. 즉, 도시화, 산업활동으로 발생한 미세플라스틱이 인천 연안으로 유입되어 강화도와 영종도 인근 연안에 미세플라스틱이 많이 분포하는 것으로 보인다.

연안으로 유입되는 미세플라스틱은 기원에 따라 육상과 해상으로 구분한다. 육상 기인은 하수처리장과 육상 배출 폐기물이며, 해상 기인은 어업 활동과 선박운송 등으로 분류한다. 육상 기인인 인천의 하수처리장으로부터 해양으로 유입되는 미세플라스틱의 양은 예측 모델에 따라 연간 약 3조 개, 18톤으로 추정하였고, 세탁 섬유, 플라스틱 용기 등 일상생활에서 사용하는 플라스틱 제품이 하수로 유입되어 연안에 분포할 수 있음을 파악하였다. 인천에 분포하는 해안 쓰레기의 76.5%는 플라스틱으로 조사되었고, 어업 활동과 관련이 있는 스티로폼 부표와 빗줄 등의 비중이 높은 점으로 보아 해상 기인 미세플라스틱 역시 연안에 분포할 가능성이 있다고 판단하였다.

본 연구의 조사 대상인 한강 상류, 한강중·하류, 임진강, 강화도 인근, 영종도 인근, 덕적도 인근 수계에서는 PE, PP, PS 성분이 주로 검출되었다. 이는 다음 세 성분이 플라스틱 제품에서 가장 흔하게 사용될 뿐만 아니라, 해당 성분들은 밀도가 낮아 지표수에 잔류하기 쉽기 때문에 다량 검출된 것으로 보인다. 인천 연안에서 유의미하게 확인한 성분은 페인트 염료, EVA, PS 입자로, 페인트 염료는 선박운송 시 배출, EVA는 육상으로부터 유입, PS는 어업 활동(스티로폼 부표)으로 배출된 형태임을 예측하였다.

연안에 잔류하는 미세플라스틱이 서식 생물종에 미치는 영향을 파악하기 위해 수생태계 위해성을 파악하였다. 위해성은 환경으로 배출되는 화학물질이 생태계에 유해한 영향을 줄 가능성을 의미한다. 미세플라스틱 독성자료를 토대로 생태계에 서식하는 생물에 유해한 영향이 나타나지 않을 농도(예측무영향농도)와 인천 연안 일부 지점의 미세플라스틱 농도를 비교하였다. 결과를 통해 조사 대상 지점에 분포하는 미세플라스틱 농도는 수생생물에 영향을 줄 가능성이 크지 않지만, 플라스틱 배출 시나리오를 통해 장기적으로는 연안 미세플라스틱이 수생생물에 독성 영향을 줄 가능성이 있음을 추정하였다.

2. 정책제언

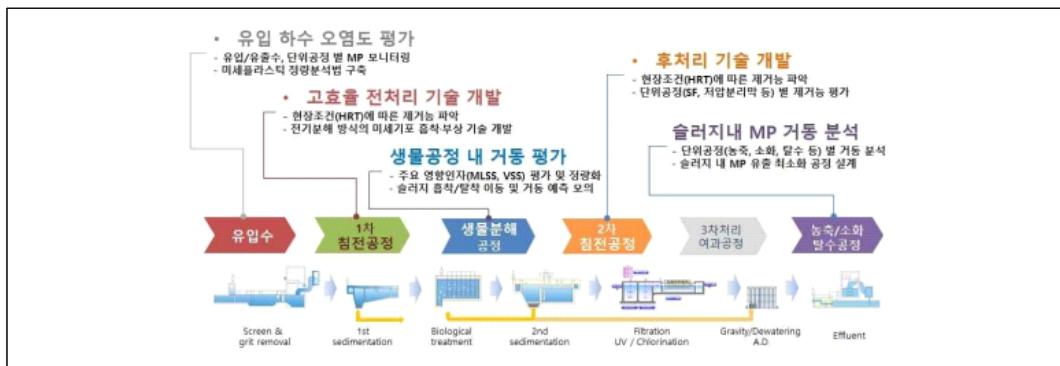
❖ 육상 기인 미세플라스틱 저감 방안 마련

육상에서 연안으로 유입되는 미세플라스틱의 경로는 하수처리시설과 육상 배출 폐기물이 주를 이룬다. 하수처리시설은 크기가 작은 물질을 여과하는데 한계가 있어, 미세플라스틱과 같은 작은 입자는 완전히 제거하기 어렵다. 2장에서 확인한 바와 같이 하수처리장에서 배출되는 방류수에 미세플라스틱이 잔류할 뿐만 아니라 방류수가 합류되는 지점의 하천에서 미세플라스틱 농도가 증가하는 사례도 존재하였다 ([표 3-5] 참고). 육상 배출 폐기물은 하수처리시설을 거치지 않고 바로 하천으로 유입되는 플라스틱을 의미하며, 도로에 잔류하는 폐기물, 운송·하역 중 유실, 작업장 쓰레기 등에서 발생한 플라스틱은 하천으로 유입 후 연안으로 이동할 수 있다.

i. 하수처리시설 효율 개선

4장에서 확인한 바와 같이, 인천에는 총 14곳의 하수처리장이 있으며 모델을 통해 하수처리장으로부터 연안으로 유입되는 미세플라스틱의 양을 연간 3조 개로 예측하였다. 현재 처리 공정으로는 하수처리장의 미세플라스틱 제거효율이 높지 않고, 작은 크기의 입자는 여과가 어려우므로 하수처리시설의 효율을 개선하여 육상 기인 미세플라스틱을 저감할 필요가 있다. 최근에는 하수처리장에서 배출되는 미세플라스틱을 저감하기 위해 전처리 및 후처리 등의 기술 개발 연구가 진행되고 있다 (안재환 외, 2019; Spacilova, M. 2023). 이러한 선진화된 미세플라스틱 저감 기술이 하수처리장에 도입된다면, 연안으로 배출되는 미세플라스틱을 줄일 것으로 기대한다.

[그림 6-1] 하수처리시설의 미세플라스틱 제거 기술 개발



자료(출처): 안재환 외(2019)

ii. 플라스틱 포집 장치 설치

플라스틱 포집 장치는 하천이나 하구에 설치하여 연안으로 유입되는 플라스틱 쓰레기를 수거하고 분리·처리하는 장치를 의미한다. 인천은 한강하구와 연안을 포함하는 지역적 특징이 있어, 해상으로 유입되는 플라스틱을 선제적으로 처리하는 과정이 필요하다. 미국 등에서 사용하는 플라스틱 포집 장치([그림 6-2] 참고)는 수계 플라스틱 저감에 효과적이며, 실제로 볼티모어 항구에 사용하는 trash wheel은 하루 17톤 이상의 플라스틱 쓰레기를 수거한다. 하여 플라스틱 포집 장치를 인천 하천 및 연안 교차점에 설치하여 연안으로 유입되는 미세플라스틱을 저감하는 노력이 필요하다.

[그림 6-2] 미국 하천·하구의 플라스틱 포집 장치



자료(출처): 이윤정·김경신 (2019)

❖ 해상 기인 미세플라스틱 저감 방안 마련

해상에서 직접 유입되는 미세플라스틱의 경로는 해양 시설물과 선박운송 등으로 분류한다. 4장에서 확인한 바와 같이 인천 연안에 잔류하는 해양 쓰레기, 시설물 및 선박 등이 미세플라스틱 발생원으로 작용할 수 있으므로, 해양 쓰레기 수거, 친환경 해양 시설물 설치, 선박운송 관리를 해상 기인 미세플라스틱의 저감 방안으로 제안하였다.

i. 해양 쓰레기 수거

인천시는 매년 해상에 잔류하는 약 5천 톤의 쓰레기를 수거하기 위해 바지선·운반선 등을 지원하고 있고, 2025년까지 위성, 드론, 음파탐지기 등을 활용한 스마트 해양 환경 관리시스템을 구축할 예정이다 ([그림 6-3] 참고). 해양 쓰레기 수거는 단기적인 효과를 나타내기 어려울 수 있지만, 장기적인 관점에서는 생태계 및 인체 건강 보호를 위해 필요한 정책이다. 지역 특성상, 인천은 해양 쓰레기의 영향을 피할 수 없으며 현재 인천에서 수행하고

있는 해양 쓰레기 관련 정책은 상대적으로 체계적으로 추진되고 있다고 판단된다. 하여, 이러한 정책이 장기적인 성과를 이루기 위해서는 인천시뿐만 아니라 정부의 지속적인 관심과 노력이 필요하다.

[그림 6-3] 스마트 해양 환경 관리시스템 구축 개념도



자료(출처): 인천광역시 (2023)

ii. 친환경 해양 시설물 설치

2020년 기준으로 김, 해조류, 굴 양식장 위주로 약 5천5백만 개의 부표가 사용되고 있고, 이 중 75%가 스티로폼 부표로 조사되었다. 인천 해안에 표류하는 스티로폼 부표는 2020년까지 감소 추세였지만, 2022년에는 스티로폼 부표가 다시 증가하였다. 환경부는 2025년까지 스티로폼 부표를 제로화하고 친환경 부표로 교체할 예정이지만, 현재 사용 중인 스티로폼 부표로 인해 생성되는 플라스틱 파편은 해양에 잔류할 수밖에 없다. 따라서 사용 중인 모든 스티로폼 부표를 철거하고 친환경(생분해성) 소재로 교체될 수 있도록 정부와 지자체의 관리가 필요하다.

iii. 선박운송 관리

4장에서는 산업용 코팅제 성분인 선박 페인트가 미세플라스틱으로 연안에 잔류함을 확인하였다. 이에 따라, 선박으로부터 발생하는 미세플라스틱을 최소화하기 위해 내구성이 높고 환경친화적인 성분의 선박용 페인트 사용을 장려해야 한다. 지자체는 친환경 페인트를 사용하는 선박회사에 대한 지역 인센티브 제도를 도입하거나 인증 제도를 마련함으로써, 지역 산업체의 친환경으로의 전환을 지원해야 한다.

◆ 미세플라스틱 저감을 위한 지역 및 국가 간 협력 필요

미세플라스틱의 해양 오염은 지역을 초월하여 발생하기 때문에 하나의 지역에서 해결할 수 없으며, 인접 지역과 국가 간의 연결된 원인을 찾고 이로 인한 영향을 이해해야 한다. 앞서 확인한 바와 같이, 인천 연안 해역에 분포하는 미세플라스틱은 육상과 해상 등 다양한 유입원의 영향을 받는다. 특히 인천 연안과 연결된 한강은 도심을 가로지르는 국내 최대 규모의 강으로, 한강에 유입된 다량의 미세플라스틱은 서해로 유입될 수밖에 없다. 또한 서해로 유입되는 미세플라스틱 중 외국의 영향도 무시할 수 없다. 따라서 연안에 분포하는 미세플라스틱은 지역 단위의 문제가 아닌 공동 책임이라는 점을 인지하고, 미세플라스틱 저감을 위한 지역·국가 간 협력이 필요하다.

i. 정보 공유 및 데이터베이스 구축

인천 연안 내 미세플라스틱 저감을 위해 하천 및 서해를 공유하는 지역과 국가 간 네트워크를 구축하여 미세플라스틱 발생, 분포, 관리 등의 정보를 주기적으로 공유해야 한다. 또한 표준화된 미세플라스틱 데이터 수집 방법을 도입하여 지역·국가 간 자료를 비교하고, 모니터링 자료를 토대로 미세플라스틱 유입원과 추이를 파악하는 작업이 필요하다. 미세플라스틱의 최신 정보 확보는 인천 연안뿐만 아니라 해양 미세플라스틱 저감으로 이어져, 궁극적으로는 연안 미세플라스틱의 종합적인 해결책을 모색할 수 있다.

ii. 해양 관리 정책 마련

연안의 미세플라스틱 저감을 위해 미세플라스틱 관리 협의체를 구성하여 지역 및 국가의 공동 목표를 설정하고 협력을 강화해야 한다. 앞서 언급한 정보 공유 및 데이터베이스 시스템 구축을 통해 미세플라스틱의 경로를 추적하고, 오염원을 관리하는 정책을 마련함으로

써 연안으로 유입되는 미세플라스틱의 효과적인 관리가 필요하다. 또한 해양 오염관리를 위한 지역 및 국가 지원금을 공동으로 확보하여 지속 가능한 미세플라스틱 관리가 이루어질 수 있도록 지원해야 한다.

3. 연구 한계

❖ 자료확보 및 기존 연구자료의 한계: 모니터링 지점, 미세플라스틱 분포, 미세플라스틱 독성 값 등

i. 모니터링 지점 및 미세플라스틱 분포 자료의 한계

본 연구는 인천 연안의 미세플라스틱 분포를 파악하기 위해 한강 및 인천 연안과 관련된 참고문헌을 활용하였다. 하지만 기존 연구자료 간 모니터링 지점, 시료 채취 시기, 실험방법, 미세플라스틱 분포 등이 상이하여 이를 취합하여 결과를 도출하는데 한계가 있었다. 연구의 한계점인 ① 인천 연안의 일부 지점만을 대상으로 함, ② 표층 이외의 심층은 고려하지 않음, ③ $100\mu\text{m}$ 이하의 입자는 제외함으로 인해 연구 결과가 실제 연안에 분포하는 미세플라스틱 농도보다 과소평가 되었을 가능성이 높다. 추후 미세플라스틱 연구 결과가 표준화되어 인천 연안에 분포하는 미세플라스틱을 정량적으로 산출할 수 있다면, 해당 연구의 한계점을 보완할 수 있을 것으로 판단한다.

ii. 미세플라스틱 독성자료의 한계

미세플라스틱이 수생생물에 미치는 영향을 파악하기 위해 기존 연구의 독성 값을 인용하였으나 미세플라스틱의 크기, 종류, 대상 생물종, 독성 지표 등 적용의 한계가 존재하였다. 하여 본 연구의 수생태계 위해성 결과는 예측값이며, 표준화된 결과가 아님을 밝혀두는 바이다. 향후 연구자료가 충분히 확보된다면 미세플라스틱의 독성 영향을 명확하게 규명할 수 있을 것으로 기대한다.

❖ 미세플라스틱의 인체 위해성 연구 보강

본 연구는 인천 연안의 미세플라스틱 특성 및 모니터링 결과를 기반으로 수생생물에 미치는 영향을 예측하였다. 즉, 해당 연구는 인천 연안에 분포하는 미세플라스틱에 초점을 맞추어 수생생물의 위해성을 다루었고 미세플라스틱의 인체 영향은 논외로 두었다. 미세플라

스틱이 인체에 미치는 영향은 해산물 등의 섭취로 인한 생물 축적의 개념을 적용해야 하며, 수계-대기-토양-생물 메커니즘의 이해가 필요하다. 하여, 미세플라스틱의 인체 영향은 충분한 자료확보를 통해 추후 연구를 수행할 예정이다.

주제어 ▶ 미세플라스틱, 인천 연안, 유입원, 수생생물 위해성

참고문헌

■ 단행본/연구보고서

- 경기도 보건환경연구원(2020). 2020년 경기도 수질 평가보고서
- 박정규·박하늘·이희선·정다운·주문솔·한선영·이혜성(2019). 미세플라스틱의 건강 피해 저감 연구. 한국환경연구원.
- 박태진·이승현·이영선·김문주·박지형·김용석(2018). 담수 중 미세플라스틱 조사 기법 연구(II). 국립환경과학원.
- 안재환·김석구·김영민·윤상린·이복진·강희준·오헤칠·정재형·안호상(2019). 미세플라스틱 유출 저감 및 제거 기술 개발 기획연구. 한국건설기술연구원
- 유재원 외(2020~2022). 인천시 한강하구 환경기초조사. 인천광역시
- 이윤정·김경신(2019). 육상기인 해양 플라스틱 예방 정책을 강화해야. 한국해양수산개발원.
- 이재호 외(2016). 담수 중 미세플라스틱 조사 기법 연구. 국립환경과학원
- 이재호·정동환·김창수·손동진·이수형·신선경·박응로·최인천·유경아·박상민·박지현·최병규·양미희·주윤리·정아름·배경선(2021). 하수처리구역 유형에 따른 미세플라스틱 배출특성 조사(I). 국립환경과학원
- 심원준·강정훈·권오윤·김경민·김남숙·김문구·박주은·박형준·석주영·송영경·안준건·이균우·이상균·임운혁·장미·정지현·최부경·최서열·최혜주·하성용·한기명·허낙원·홍상희·Andrew·Manviri(2015). 미세플라스틱에 의한 연안환경 오염 연구. 한국해양과학기술원
- 최영균(2020). 대전광역시 주요 하천 미세플라스틱 오염현황 및 오염원 조사연구. 대전녹색환경지원센터.
- 해양수산부(2021). 2021년 국가해안쓰레기 모니터링 최종보고서.
- 한국해양과학기술원(2021a). 해양 미세플라스틱에 의한 환경위해성 연구 최종보고서. 해양수산부 해양수산과학기술진흥원
- 한국해양과학기술원(2021b). 해양 미세플라스틱 오염 및 거동 기작 규명을 위한 통합기반 구축 연구. 과학기술정보통신부 한국해양과학기술원.
- Batool, I., & Qadir, A(2022). Atmospheric Microplastic Distribution, Fate, and Behavior in Context to Pollution. In Microplastic Pollution: Environmental Occurrence and Treatment Technologies, 111–132. Cham: Springer International Publishing.
- Campanale, C., Massarelli, C., Bagnuolo, G., Savino, I., & Uricchio, V. F(2019). The problem of microplastics and regulatory strategies in Italy: In Plastics in the

- aquatic environment–part ii: stakeholders' role against pollution, 255–276. Cham: Springer International Publishing.
- Magnusson, K(2014). Screening of microplastic particles in and down-stream a wastewater treatment plant, Report C55, Swedish Environmental Research Institute. <https://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:773505/FULLTEXT01.pdf>.
- Magnusson, K(2016b). Microlitter in sewage treatment systems: A Nordic perspective on waste water treatment plants as pathways for microscopic anthropogenic particles to marine systems, Report C194, Swedish Environmental Research Institute. <https://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:923936/FULLTEXT01.pdf>.
- OSPAR Commission (2017), Assessment Document of Land-based Inputs of Microplastics in the Marine Environment. OSPAR Commission.

▣ 학술지/학위논문

- 김인성(2015). 인천·경기연안 해변에 잔류하는 미세플라스틱의 공간분포 특성, 석사학위논문. 인천대학교, 인천.
- 남명숙·윤권감·이승원(2022). 해양 미세플라스틱 저감 방안 연구 –환경 거버넌스를 중심으로-. 한국환경기술학회지. 23(2). 109–114
- 유혜원·김윤석·이선흥·유지수·최재원(2020). 담수 물환경 중 미세플라스틱 분석방법 및 검출에 대한 고찰. 환경분석과 독성보건, 23(4), 180–193.
- 정동환·주병규·이원석·정현미·박준원·김창수(2018). 국내·외 연구사례를 통해 본 하수처리시설 미세플라스틱 배출특성 및 관리방안 고찰. 상하수도학회지, 32(4), 337–348
- Baini, M., Fossi, M. C., Galli, M., Caliani, I., Campani, T., Finoia, M. G., & Panti, C(2018). Abundance and characterization of microplastics in the coastal waters of Tuscany (Italy): The application of the MSFD monitoring protocol in the Mediterranean Sea. *Marine Pollution Bulletin*. 133. 543–552.
- Buwono, N. R., Risjani, Y., & Soegianto, A(2021). Distribution of microplastic in relation to water quality parameters in the Brantas River, East Java, Indonesia. *Environmental Technology & Innovation*, 24, 101915.
- Chae, D. H., Kim, I. S., Kim, S. K., Song, Y. K., & Shim, W. J(2015). Abundance and Distribution Characteristics of Microplastics in Surface Seawaters of the Incheon/Kyeonggi Coastal Region. *Archives of Environmental Contamination and Toxicology*, 69(3), 269–347.

- Carr, S. A., Liu, J., & Tesoro, A. G. (2016). Transport and fate of microplastic particles in wastewater treatment plants. *Water research*, 91, 174–182.
- Cui, R., Kim, S. W., & An, Y. J(2017). Polystyrene nanoplastics inhibit Reproduction and induce abnormal embryonic Development in the freshwater crustacean *Daphnia galeata*. *Scientific reports*, 7(1), 12095.
- Duis, K., & Coors, A(2016). Microplastics in the aquatic and terrestrial environment: sources (with a specific focus on personal care products), fate and effects. *Environmental Sciences Europe*, 28(1), 1–25.
- Danopoulos, E., Twiddy, M., West, R., & Rotchell, J. M(2021). A rapid review and meta-regression analyses of the toxicological impacts of microplastic exposure in human cells, *Journal of Hazardous Materials*, 427, 127861
- Everaert, G., Van Cauwenbergh, L., De Rijcke, M., Koelmans, A. A., Mees, J., Vandeghe huchte, M., & Janssen, C. R(2018). Risk assessment of microplastics in the ocean: Modelling approach and first conclusions. *Environmental pollution*, 242, 1930–1938.
- Figuiere, R., Waara, S., Ahrens, L., & Golovko, O(2022). Risk-based screening for prioritisation of organic micropollutants in Swedish freshwater. *Journal of Hazardous Materials*, 429, 128302.
- Gao, B., Chen, Y., Xu, D., Sun, K., & Xing, B(2023). Substantial burial of terrestrial microplastics in the Three Gorges Reservoir, China. *Communications Earth & Environment*. 4(1), 32.
- Geyer, R., Jambeck, J. R., & Law, K. L(2017). Production, use, and fate of all plastics ever made. *Science advances*, 3(7), e1700782.
- Hurley, R., Woodward, J., & Rothwell, J. J(2018). Microplastic contamination of river beds significantly reduced by catchment-wide flooding. *Nature Geoscience*. 11, 251–257.
- Jung, J. W., Park, J. W., Eo, S., Choi, J., Song, Y. K., Cho, Y., ... & Shim, W. J(2021). Ecological risk assessment of microplastics in coastal, shelf, and deep sea wate rs with a consideration of environmentally relevant size and shape. *Environment al Pollution*, 270, 116217.
- Kim, I. S., Chae, D. H., Kim, S. K., Choi, S., & Woo, S. B(2015). Factors influencing the spatial variation of microplastics on high-tidal coastal beaches in Korea. *Archives of environmental contamination and toxicology*, 69, 299–309.

- Koelmans, A. A., Nor, N. H. M., Hermsen, E., Kooi, M., Mintenig, S. M., & De France, J(2019). Microplastics in freshwaters and drinking water: Critical review and assessment of data quality. *Water research*, 155, 410–422.
- Kwon, O. Y., Kang, J. H., Hong, S. H., & Shim, W. J(2020). Spatial distribution of microplastic in the surface waters along the coast of Korea. *Marine Pollution Bulletin*, 155, 110729.
- Lebreton, L., Egger, M., & Slat, B(2019). A global mass budget for positively buoyant macroplastic debris in the ocean. *Scientific reports*, 9(1), 12922.
- Manbohi, A., Mehdinia, A., Rahnama, R., & Dehbandi, R(2021). Microplastic pollution in inshore and offshore surface waters of the southern Caspian Sea. *Chemosphere*. 281.
- Mason, S. A., Garneau, D., Sutton, R., Chu Y., Ehmann, K., Barnes, J., Fink, P., Papazissimos, D., Rogers, D.L(2016). Microplastic pollution is widely detected in US municipal wastewater treatment plant effluent, *Environment Pollution*, 218, 10 45–1054.
- Mattsson, K., Johnson, E. V., Malmendal, A., Linse, S., Hansson, L. A., & Cedervall, T(2017). Brain damage and behavioural disorders in fish induced by plastic nano particles delivered through the food chain. *Scientific reports*, 7(1), 11452.
- Mintentig, S.M., Int-Vee, I., Löder, M.G.J., Gerdts, G(2017). Identification of microplastic in effluents of waste water treatment plants using focal plane array-based micro-Fourier-transform infrared imaging, *Water Research*, 108, 365–372.
- Min, B. K., Jeong, H. H., Ju, M. J., Ko, U., Dae, K. H., Kim, H. J., ... & Cho, H. S(2023). Baseline Study on Microplastic Distribution in the Open Surface Waters of the Korean Southwest Sea. *Water*, 15(13), 2393.
- Molnar, E., Maasz, G., & Pirger, Z(2021). Environmental risk assessment of pharmaceuticals at a seasonal holiday destination in the largest freshwater shallow lake in Central Europe. *Environmental Science and Pollution Research*, 28, 59233–5 9243.
- Senathirajah, K., Attwood, S., Bhagwat, G., Carbery, M., Wilson, S., & Palanisami, T(202 1). Estimation of the mass of microplastics ingested—A pivotal first step towards human health risk assessment. *Journal of Hazardous Materials*, 404, 124004.
- Song, Y. K., Hong, S. H., Eo, S., Jang, M., Han, G. M., Isobe, A., & Shim, W. J(2018). Horizontal and vertical distribution of microplastics in Korean coastal waters. *Environmental science & technology*, 52(21), 12188–12197.

- Spacilova, M., Dytrych, P., Lexa, M., Wimmerova, L., Masin, P., Kvacek, R., & Solcova, O. (2023). An Innovative Sorption Technology for Removing Microplastics from Wastewater. *Water*, 15(5), 892.
- Talvitie, J., Mikola, A., Setälä, O., Heinonen, M., Koistinen, A.(2017a). How well is microlitter purified from wastewater?: A detailed study on the stepwise removal of microlitter in a tertiary level wastewater treatment plant, *Water Research.*, 109, 164–172.
- Talvitie, J., Mikola, A., Koistinen, A., Setälä, O(2017b). Solutions to microplastic pollution – Removal of microplastics from wastewater effluent with advanced wastewater treatment technologies, *Water Research.*, 123, 401–407.
- Woo, J. H., Seo, H. J., Lee, J. Y., Lee, I., Jeon, K., Kim, B., & Lee, K(2023). Polypropylene nanoplastic exposure leads to lung inflammation through p38-mediated NF-κB pathway due to mitochondrial damage, *Particle and Fibre Toxicology*, 20(2), 1–17.
- Yanagihara, M., Hiki, K., & Iwasaki, Y(2022). Can chemical toxicity in saltwater be predicted from toxicity in freshwater? A comprehensive evaluation using species sensitivity distributions. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 41(8), 2021–2027.
- Zhao, S., Zhu, L., Wang, T., & Li, D(2014). Suspended microplastics in the surface water of the Yangtze Estuary System, China: first observations on occurrence, distribution. *Marine pollution bulletin*, 86(1–2), 562–568

▣ 법률과 특허

물환경보전법(제18469호). 2021.9.24. [타법개정]

▣ 행정자료

- 국립수산과학원(2021). 해양퇴적물 중 잔류하는 미세플라스틱의 정성·정량을 위한 조사 지침서.
- 국립환경과학원(2021). 화학물질 위해성평가의 구체적 방법 등에 관한 규정[제2021-13호]
- 환경부(2010). 화학물질 배출량 정보를 이용한 초기 위해성 평가 해설서.
- 인천항만공사(2022). 2022 인천항만공사 주요통계집.
- EPA(1998). EPA's Guidelines for Ecological Risk Assessment (Order 630R95002F (EPA/630/R-95/002F).

▣ 보도자료/신문기사

강찬수(2023.2.10.). 미세플라스틱, 매주 카드 한 장 먹는다?… “입 까끌까끌했을 것”. 중앙일보.
<https://www.joongang.co.kr/article/25139628> (검색일: 2023.08.09.)

김정호(2023.03.20). 바다 영토 전쟁 ‘횡간도’‘사수도’ 제주 해상경계 기준은 어디. 제주의소리.
<https://www.jesusori.net/news/articleView.html?idxno=413049>(검색일: 2023.09.11.).

김범규(2021.04.16.), [탄소중립 진단] 정부의 ‘스티로폼 부표’ 퇴출전략, 이번에 성공할까. 이넷뉴스.
<http://www.enetnews.co.kr/news/articleView.html?idxno=3620>(검색일: 2023.09.18.)

인천광역시 보건환경연구원 보도자료(2020). 인천시, 해양 미세플라스틱 조사 결과 발표.

▣ 전자문서자료/홈페이지

국립환경과학원(2023). 물환경정보시스템. <http://water.nier.go.kr/web>

경기도 수자원본부(2023). 팔당유래&주변관광지. <https://water.gg.go.kr/ctzn/grpTour.do;jsessionid=7AA55C21EC7337CD27F34C86B4186110>

서울연구원(2010). 수도권 인구밀도. <https://data.si.re.kr/data/%EC%A7%80%EB%8F%84%EB%A1%9C-%EB%B3%B8-%EC%84%9C%EC%9A%B8-2013/127>

위키백과(2022). 팔당댐. <https://ko.wikipedia.org/wiki/%ED%8C%94%EB%8B%B9%EB%8C%90>

위키백과(2022). 핵인자 카파비. https://ko.wikipedia.org/wiki/%ED%95%B5%EC%9D%B8%EC%9E%90_%EC%B9%B4%ED%8C%8C%EB%B9%84

위키백과(2023). 임진강. <https://ko.wikipedia.org/wiki/%EC%9E%84%EC%A7%84%EA%B0%95>

위키백과(2023). 미세플라스틱. <https://ko.wikipedia.org/wiki/미세플라스틱>

인천광역시(2019). 인천의 주요 갯벌. <https://www.incheon.go.kr/ocean/OC030302>

인천항 도선사회. 인천항_인천항 항로 개요도. <http://www.incheonpilot.com/port/port014.asp>

e-나라지표(2019). 연안습지(갯벌) 면적의 변동 추이. https://www.index.go.kr/unity/potal/main/EachDtIPageDetail.do?idx_cd=1275

토지e음(2023) 연안육역. <http://www.eum.go.kr/web/in/dc/dcDictDet.jsp?termsNo=00344&termsIndexNm=%BF%AC%BE%C8%C0%B0%BF%AA&pageNo=&search>

- Way=word&startWord=&endWord=&searchType=term&searchCIs=000&searchWord=%BF%AC%BE%C8
- 해양환경포털(a). 해양환경 정보지도. <https://www.meis.go.kr/map/oemsBaseMap.do>
- 해양환경정보포털(b). 해안쓰레기 모니터링 통계. <https://www.meis.go.kr/mli/monitoringInfo/stat.do>
- 행정안전부(2022a). 해양수산부 국립해양조사원_지자체별 해안선 길이. <https://www.data.go.kr/data/15083949/fileData.do?recommendDataYn=Y>
- 행정안전부(2022b). 인천광역시 해수욕장 이용. <https://www.data.go.kr/data/15066567/fileData.do?recommendDataYn=Y>
- 행정안전부(2022c). 인천광역시 하수처리시설 현황. <https://www.data.go.kr/data/15055856/fileData.do?recommendDataYn=Y>
- 한국대댐회(2023). 팔당댐. http://www.kncold.or.kr/ds2_3_1.html?dam=%C6%C8%B4%E7%B4%EF
- 환경부(2023). 2021 하수도통계. http://27.101.216.200/home/web/public_info/read.do;jsessionid=MBNS5xMXkN-0GuQh1QiZvaLZ.mehome1?pagerOffset=500&maxPageItems=10&maxIndexPages=10&searchKey=all&searchValue=&menuId=10357&orgCd=&condition.deleteYn=N&publicInfold=640&menuId=10357
- ABclonal(2023). MAPK-P38 신호전달 경로. <https://abclonal.co.kr/mapk-p38-signaling-pathway/>
- ChemSafetyPro(2021). Introduction to Species Sensitivity Distributions (SSD) and HC5. https://www.chemsafetypro.com/Topics/CRA/Species_Sensitivity_Distributions_SS_and_HC5.html
- ECHA(2023). Microplastics. <https://echa.europa.eu/hot-topics/microplastics>
- S. Å. Bjørke and M. T. Ahmed(2011). Risk assessment, Theory and Practices. <https://grimstad.uia.no/puls/climatechange2/nni04/14nni04.htm>
- WASSER 3.0. Background and overview of microplastics. https://wasserdreinull.de/en/knowledge/microplastics/?gclid=EAIaIQobChMJu5CAmAeTC_wIVJ8eWCh0dwQscEAAYASAAEglxmPD_BwE
- Wikipedia(2023). Microplastics. <https://en.wikipedia.org/wiki/Microplastics>

2023년도 기초연구

인천 연안 미세플라스틱 특성 연구

발행인 박호군

발행일 2024년 1월 15일

발행처 인천연구원

인쇄처 청송출판인쇄사

I S B N 979-11-6870-209-7 93530

주소 22711 인천광역시 서구 심곡로 98

© 인천연구원 2023

이 보고서의 내용은 연구책임자의 견해로서 인천연구원의 공식적 입장과는 다를 수 있습니다.

출처를 밝히는 한 자유로이 인용할 수 있으나 무단 전재나 복제는 금합니다.