

최종보고서

안산시 수계에서의 미세플라스틱
영향 조사 연구

모 경



환경부지정
안산녹색환경지원센터
Ansan Green Environment Center

제 출 문

안산녹색환경지원센터장 귀하

본 보고서를 “안산시 수계에서의 미세플라스틱 영향 조사 연구”에 관한 최종보고서 제출합니다.

연구기관명 : 한양대학교 에리카산학협력단

연구책임자 : 모 경 박사(한양대 건설환경공학과)

연 구 원 : 모경, 박철, 김도균 (한양대학교)

요 약 문

I. 연구개요

최근 미세플라스틱에 대한 문제가 중요하게 인지됨에 따라 국내·외적으로 미세플라스틱 조사연구가 활발히 진행되고 있으며, 해양 미세플라스틱 오염문제에 초점을 맞추었던 국내에서도 현재 관련된 연구 결과가 거의 없다고 볼 수 있는 담수 환경을 대상으로 한 미세플라스틱 조사에 관심을 갖고 있다. 따라서 본 연구는 육상에서 기인하는 미세플라스틱에 대한 분석 및 조사 방법을 모색하고 이를 통한 안산시 수계 및 하수처리장의 미세플라스틱 분포를 파악하여 현재 현황 및 향후 관리방안 제시하여 향후 미세플라스틱 관리를 위한 기초자료로 활용하고자 한다.

II. 연구의 필요성 및 목적

미세플라스틱에 대한 환경문제가 중요하게 인지됨에 따라 최근 국내·외적으로 미세플라스틱 조사연구가 활발히 진행되고 있으나, 대부분의 연구는 해양생태계에 집중되어 있어서 담수환경의 미세플라스틱 자료조사 및 데이터구축이 필요하다. 국외에서는 하천이나 호소에 미세플라스틱의 현황 및 입자크기를 분석함으로써 해양으로 배출되는 미세플라스틱을 파악하고 관리하기 위한 연구가 활발히 진행되고 있으나 국내에서는 관련된 연구가 부족한 실정이다. 따라서 향후 미세플라스틱 저감을 위한 관리정책에 활용하기 위해 안산시 주요 하천 4개와 안산스마트허브 내 간선수로 4개의 미세플라스틱 현황 및 특성을 분석하고 조사함으로써 미세플라스틱 분포 현황에 대한 데이터베이스 구축이 필요하다.

또한 해외 하수처리장 처리공정에서의 미세플라스틱 배출에 대한 연구결과에 따르면 1차 및 2차처리, 고도처리 공정을 거쳐도 방류수에 미세플라스틱이 검출된 상태로 방류되고 있는 실정이다. 안산 하수처리장의 경우 생활하수뿐만 아니라 안산스마트허브의 공장폐수도 함께 처리하는 처리장으로, 공정 중에 처리되지 않은 미세플라스틱이 방류수를 통해 수계로 방류될 가능성이 있으며 이에 따라 안산 하수처리장 공정에 미세플라스틱의 제거 효율 및 방류수의 미세플라스틱 분석 자료 구축이 필요하다.

본 연구는 향후 미세플라스틱 저감을 위한 관리정책에 활용하기 위해 안산시 주요 하천 4개와 안산스마트허브 내 간선수로 4개의 미세플라스틱 현황 및 특성을 분석하고 조사함으로써 미세플라스틱 분포 현황에 대한 데이터베이스를 구축한다. 또한 안산 하수처리장의 경우 생활하수뿐만 아니라 안산스마트허브의 공장폐수도 함께 처리하는 처리장으로, 공정 중에 처리되지 않은 미세플라스틱이 방류수를 통해 수계로 방류될 가능성이 있어 이에 따라 하수처리장 공정에 미세플라스틱의 제거 효율 및 방류수의 미세플라스틱 분석 자료를 구축하는 것을 목적으로 한다.

III. 연구의 내용 및 범위

본 연구는 육상에서 기인하는 미세플라스틱에 대한 분석 및 조사 방법을 모색하고 이를 통한 안산시 수계 및 하수처리장의 미세플라스틱 분포를 파악하여 현재 현황 및 향후 관리방안 제시하는 것을 목표로 한다.

IV. 연구결과

수계 시료에 포함된 미세플라스틱을 간소하게 판별할 수 있는 방법을 검토해 보고자 시료에 포함된 부유물질과 TED-GC/MS 분석을 통한 미세플라스틱 순질량의 비교를 통해 부유물질농도와 미세플라스틱양의 상관관계를 분석하였다. 각 하천에서의 부유물질농도에 대한 미세플라스틱 순질량의 비율을 검토해 본 결과 전체 고형물의 1%이내인 극히 일부만이 미세플라스틱으로 구성되었음을 확인하였으며, 부유물질의 농도가 낮을수록 미세플라스틱 순질량과의 편차가 작아지면서 상관관계가 높아지는 것으로 판단되었다.

하지만 본 연구에서 검토한 표본의 수가 적고 높은 부유물질 농도에서의 편차가 크게 나타나 명확하게 부유물질과 미세플라스틱 양과의 상관관계가 있다고 판단하기는 어렵지만 모래와 같은 비중 물질의 분리를 통한 부유물질과의 비교나 다른 사례들의 분석을 통해 많은 데이터를 확보하고 검증한다면 두 인자간의 상관관계를 확인할 수 있을 것으로 판단된다.

현재 진행되고 있는 생태계 미세플라스틱 연구의 대다수는 하천 및 호소의 표층수 내 미세플라스틱 분석을 진행하면서 퇴적토 내 미세플라스틱 오염현황 연구는 미비한 상황이며, 물환경 매체별 오염수준 파악 및 미세플라스틱의 수계내 분포·거동 특성을 이해하기 위해 안산시 수계 하천 및 간선수로에 대한 퇴적토 미세플라스틱 오염도 조사를 수행하였다.

안산시 수계에 존재하는 퇴적물의 미세플라스틱 오염 현황을 분석한 결과, 동일한 양의 퇴적물 시료에 대한 미세플라스틱 분석을 진행하였을 때, 간선수로 퇴적물에 포함된 미세플라스틱이 하천 퇴적물에 포함된 미세플라스틱에 비해 평균 10배 이상의 미세플라스틱이 더 존재하는 것으로 나타났으며, 미세플라스틱의 종류 또한 하천에 비해 간선수로에서 다양한 종류의 미세플라스틱이 관찰되었다.

이는 주로 생활 거주 지역 및 자연지가 유역 주변에 존재하는 하천 수계에 비해 안산·시흥 스마트허브와 같은 대형산업단지가 유역의 대부분을 구성하는 간선수로의 유역 환경적 요인이 가장 큰 차이인 것으로 판단되며, 간선수로 유역의 산업단지에서 발생하는 미세플라스틱이 노면유출수나 비점오염원 등으로 인해 흘러들어와 그 중 비교적 비중이 큰 미세플라스틱이 간선수로의 퇴적물 형태로 상당히 많은 부분 축적되어 있는 것으로 볼 수 있다. 이러한 퇴적물에 축적된 다량의 미세플라스틱은 강우나 시화호의 조수차에 의한 하상의 변화 등의 불안정한 상태에서 부유되어 해양으로 유입되거나 생물섭취로 인한 생태계 오염을 유발할 수 있으므로 이에 대한 관리가 필요할 것이다.

안산시 수계의 경우 국내 최대 규모 산업단지인 안산·시흥 스마트허브와 인접하고 있으며 약 70만 인구에 달하는 경기도내 8번째로 많은 인구가 거주하고 있는 지리적 상황으로 인해 도시 내 다양한 폐기물 유입에 노출되어 있는 상황이다. 대형 폐기물이나 하수 등은 안산시 내 처리시스템에 의해 처리가 되는 상황이나 미량오염물이나 비점오염물 등이 우수를 통해 유입될 수 있으며 산업단지 및 거주지역을 통행하는 각종 차량에 의해 도로 노면에서 발생하는 오염물질 또한 쉽게 유입될 수 있는 상황이다. 따라서 본 연구에서는 이러한 강우 시 발생하는 강우유출수의 미세플라스틱을 조사함으로써 비점오염원에 의한 수계 미세플라스틱 오염 현황을 검토하였다.

안산시 수계에서의 우기 시 미세플라스틱 영향을 분석한 결과, 하천 및 간선수로 모두 우기 시 수계의 미세플라스틱 농도가 건기 시에 비해 매우 높게 측정되었다. 이는 앞서 분석된 바와 같이 수계 퇴적물이 강우로 인한 유량 및 유속의 증가로 하상퇴적물이 부상되고, 강우로 인해 발생하는 노면유출수가 우수토구를 통해 비점오염원 형태의 고형물로 유입됨에 따라 표층수의 미세플라스틱 농도가 증가한 것으로 판단된다.

우기 상황에서의 비점오염원 유입 영향을 확인하기 위해 우기 시 하천으로 유입되는 안산천 우수토구의 배출수를 분석한 결과 4개/L로 건기 시 하천 표층수에 존재하는 미세플라스틱의 농도보다 약 6.5배가량 높은 것으로 나타나, 비록 하천 유량에 비해 그 비중이 작고 우기 시에 한정된 유입일지라도 하천 및 간선수로의 미세플라스틱 오염에 적지 않은 영향을

미칠 것으로 판단된다.

우기 상황에서 검출된 미세플라스틱의 종류는 PP, PE, PET 계열의 미세플라스틱 비중이 매우 높게 나타나 우기 시 유입되는 비점오염원 형태의 미세플라스틱 중 이와 같은 성분의 오염원이 다수 존재할 것으로 예상된다. PP, PE, PET와 같은 플라스틱은 의류, 섬유제품, 바디 및 페이스 스크럽, 식품 포장 필름 및 물병을 포함한 퍼스널 케어 제품 등 다양한 용도로 실생활에 많이 사용되고 있는 플라스틱의 종류로 알려져 있다. 따라서 노면유출수로 유입되는 모니터링 및 이러한 오염물질을 제어할 수 있는 방법에 대한 논의가 필요할 것으로 판단된다.

일반적으로 하수처리장은 미세플라스틱의 최대 배출원으로 알려져 있으며, 현재의 하수처리 시설은 미세플라스틱 제거를 목적으로 설계된 것이 아니므로 하수에 존재하는 미세플라스틱의 완벽한 제거는 사실상 불가능하다. 따라서 본 연구에서는 안산하수처리장의 처리공정별 미세플라스틱 분포를 조사함으로써 하수처리 공정을 통한 미세플라스틱의 저감효율 및 최종적으로 배출되는 미세플라스틱에 대한 환경적 영향을 검토하였다.

안산시 하수처리장에 유입되는 공장계열 폐수 중 포함된 미세플라스틱은 6.2개/L이며 최종적으로 배출되는 미세플라스틱은 0.32개/L로 하수처리장 유입수에 존재하는 미세플라스틱 대비 약 95% 이상 저감되어 수계로 방류되는 것으로 나타났다. 안산하수처리장은 일간 약 20만 톤의 공장계열 유입수를 반입하여 처리하고 있으며 유입유량의 약 80% 가량을 방류수로 배출한다고 가정하였을 때 일간 약 16만 톤의 최종 처리수를 방류하므로, 이를 배출 미세플라스틱 농도를 반영하여 계산하면 일간 약 48백만개의 크고 작은 미세플라스틱이 생태계로 방출될 가능성이 있다. 또한 본 연구에서 분석된 미세플라스틱의 크기 범위(100~300 μ m)를 고려하면 이보다 더 작은 크기의 미세플라스틱이 추가적으로 배출될 가능성이 높으며 이처럼 자연으로 배출되는 미세플라스틱을 관리하기 위해 이에 대한 주기적인 모니터링과 저감방법을 확보할 필요성이 있는 것으로 판단된다.

안산시 수계 생물의 미세플라스틱 축적 영향을 분석한 결과 분석된 2종의 생물(붕어, 민물게) 모두 내장에서 미세플라스틱의 축적이 높게 확인되었다. 이는 먹이를 섭취하는 과정에서 수계에 존재하는 많은 양의 미세플라스틱이 함께 섭취되고 있는 것으로 볼 수 있으며, 자연 환경에 서식하는 생물이 미세플라스틱에 오염될 수 있는 다른 외부적인 요인이 없음을 고려하였을 때 수계 하천의 표층수 및 퇴적토에 존재하는 미세플라스틱이 이러한 생물 내에 축적되는데 많은 부분 영향을 주고 있는 것으로 판단된다. 따라서 수계에 존재하는 생물의 미세플라스틱 축적으로 인한 생태영향을 방지하기 위해서는 수계로 배출되는 미세플라스틱의

관리 및 저감이 우선적으로 수행되어야 할 것이다.

국내에서는 미세플라스틱에 대한 문제들을 해결하기 위해 중앙행정기관과 지자체, 민간 환경단체, 관련기관들과 협력하여 해결방안을 모색하고 있다. 식품의약품안전처는 미세플라스틱의 사용제한기준을 마련하여 2017년 화장품 안전기준 등에 관한 규정을 개정하여 고시하는 것을 시작으로 미세플라스틱의 사용에 대한 제한을 추진하고 있다. 또한 2030년까지 플라스틱 폐기물 50% 감축과 재활용률을 70%까지 올리는 폐기물관리종합대책이 추진되고 있으며, 모든 물·음료수 등의 유색페트병을 무색으로의 전환, 일회용품 감량, 과대포장 감량, 비닐봉투 사용금지 등을 통한 미세플라스틱 발생 방지의 노력을 기울이고 있다.

안산시의 수계는 안산·시흥 스마트허브와 인접하고 있어 미세플라스틱과 그 외 오염물질들의 물리·화학적 반응으로 인한 환경위해성이 우려되는 지역으로 많은 관심이 필요한 상황이다. 미세플라스틱은 다양한 산업에 사용되고 있으므로 배출원을 명확하게 파악하여 규제해야 하는데, 현재는 해양배출과 생활용품에 대해서만 규제되고 있다. 특히, 안산시는 다양한 플라스틱 활용 제품을 생산하는 제조업 업체들이 다수 산업단지에 입주하고 있으므로 지자체와 중앙행정기관과의 법적 규제방안 강화가 시급한 상황이다. 산업체 뿐만 아니라 일반 시민들도 플라스틱 재활용 및 일회용품 사용 줄이기 등의 정책마련 및 참여독려를 통해 미세플라스틱 저감을 위한 관리방안을 마련해야 한다.

미세플라스틱의 배출을 관리하는 기준이나 정책이 마련되기 위해서는 미세플라스틱 오염에 대한 데이터베이스 구축이 필요한 실정이나 샘플링이나 분석에 대해 경제적인 측면에서 어려움이 있다. 그러나 수계 내 존재하는 미세플라스틱을 관리하기 위해서는 오염현황에 대한 다양한 데이터가 필요하다. 따라서 이러한 미세플라스틱을 효율적으로 모니터링하기 위해 환경부에서 관리하는 TMS에 연계하여 미세플라스틱 분석을 할 수 있는 자동화 측정기술의 도입을 고려해 볼 수 있다. 이러한 신속측정 및 자동화 기술은 국외에서도 연구되고 있으며, 국가 연구과제를 통해서도 연구 중에 있는 기술이다. 자동샘플링/분석을 통해서 수계 내 존재하는 미세플라스틱의 실시간 측정으로 데이터베이스를 구축하게 되면 지점별로 배출원을 파악할 수 있으며, 이에 따른 규제 및 법적 기준을 지정할 수 있어서 수계 내 존재하는 미세플라스틱의 종합적인 관리계획을 마련할 수 있을 것으로 기대한다.

V. 연구결과의 활용계획

- 안산시 담수 환경에서의 미세플라스틱 생태 오염에 대한 기초 자료로 활용
- 담수 수계에 대한 미세플라스틱 관련 기초자료 제공을 통해 새로운 생태 오염원에 대한

관리 방안 제시

- 현재 보편화 되지 않은 미세플라스틱 연구에 대해 타 지자체가 참고할 수 있는 선행연구 자료 및 기초 데이터로 활용
- 최근 부각되고 있는 새로운 오염 물질에 대한 모니터링 자료 확보를 통해 전반적인 현황 파악
- 미세플라스틱으로 인한 생태 오염 예방 및 안산시 수계의 청정화 기반 마련

목 차

<본문목차>

제1장 연구개요	1
제2장 연구의 필요성 및 목적	3
2.1 연구의 필요성	3
2.1.1 국내 담수환경에서의 미세플라스틱 현황조사 필요성	3
2.1.2 안산시 하수처리장 공정별 미세플라스틱 검출 현황 조사 필요성	4
2.2 연구 목적	5
제3장 연구 내용 및 범위	6
3.1 연구 목표 및 내용	6
3.2 연구 추진 전략	6
3.2.1 안산시 수계 미세플라스틱 오염 현황 (1차년도 연구)	6
3.2.2 안산 수계 미세플라스틱 오염 집중 조사	12
3.2.3 미세플라스틱의 수계 생태 오염 및 영향 평가	13
3.2.4 하수처리장 공정별 유입수 미세플라스틱 분포 조사	14
3.2.5 종합 결과 도출 및 고찰	14
제4장 연구 결과	15
4.1 안산시 수계 미세플라스틱 오염 집중조사	15
4.1.1 하천 부유물질과 미세플라스틱의 상관관계 분석	15
4.1.2 안산시 수계 하천 및 간선수로 퇴적토 미세플라스틱 오염도 조사	20
4.1.3 안산시 수계 우기 미세플라스틱 오염도 조사	38
4.1.4 안산시 하수처리장 공정별 미세플라스틱 분포 조사	46
4.2 담수 어류의 미세플라스틱 섭취에 따른 생태축적 연구	58
4.2.1 하천 생물 내 미세플라스틱 섭취영향 분석	58
4.2.2 미세플라스틱이 생태계에 미치는 영향	72
4.3 수계로 유입되는 미세플라스틱 관리방안	77
4.3.1 국내외 미세플라스틱 관리현황	77
4.3.2 안산시 수계 내 미세플라스틱 관리방안	80
제5장 결론	84
참고문헌	77

<표목차>

표 1. 연구개발 목표 및 내용	6
표 2. 각 하천별 시료 미세플라스틱 정량분석 결과	8
표 3. GC/MS를 이용한 미세플라스틱 해외 분석 연구 사례	16
표 4. TED-GC-MS 분석 조건	18
표 5. TED-GC/MS 분석을 통한 하천별 미세플라스틱 분석 결과	19
표 6. 하천별 300 μ m 이하 부유물질 농도 분석 결과	20
표 7. 하천 및 간선수로 샘플링 진행 지점, 시기, 기상 현황	22
표 8. 각 수계 하천 및 간선수로 별 퇴적물 시료 미세플라스틱 정량분석 결과	27
표 9. 수계 우기 시료 채취 진행 지점, 시기, 기상 현황	40
표 10. 각 하천별 시료 미세플라스틱 정량분석 결과	42
표 11. 하수처리장 공장계열 처리공정별 미세플라스틱 정량분석 결과	52
표 12. 채취된 하천생물 사진 및 크기	59
표 13. 다양한 용액에서 온도에 따른 어류 내 유기물질 분해효율(%)	60
표 14. 채취 생물 부위별 해부 사진 및 무게	61
표 15. 각 하천별 시료 미세플라스틱 정량분석 결과	64
표 16. 해양서식 어류종류 및 특성에 따른 어류 내 미세플라스틱 분포	68
표 17. 해수에서 어류가 섭취하는 미세플라스틱에 대한 현황	70
표 18. 담수에서 어류가 섭취하는 미세플라스틱에 대한 현황	71
표 19. 미세플라스틱 생태독성 연구사례	74
표 20. 미국 각주별 미세플라스틱 규제현황	77
표 21. 국내 미세플라스틱 사용제한에 대한 고시	78
표 22. 재활용 대책에 대한 국가기관 주요내용	79

<그림목차>

그림 1. 미세플라스틱의 분류 및 크기	1
그림 2. 미세플라스틱의 생태계 순환 과정	2
그림 3. 국외 담수 환경에서의 미세플라스틱 검출 사례	4
그림 4. 해외 하수처리장 처리공정에서의 미세플라스틱 현황	5
그림 5. 현미경으로 관찰한 각 시료의 고형물	8
그림 6. 안산시 하천별 미세플라스틱 분포	9
그림 7. 안산시 간선수로별 미세플라스틱 분포	10
그림 8. 안산하수처리장 처리계열별 방류수 미세플라스틱 분포	11
그림 9. 해수, 모래에서의 미세플라스틱 분리과정 및 분석	12
그림 10. 미세플라스틱을 섭취한 동물성 플랑크톤 및 물벼룩	13
그림 11. 미세플라스틱에 노출된 어류 체내 미세플라스틱 분석결과	14
그림 12. TED-GC/MS용 시료전처리 여과장치	17
그림 13. TED-GC/MS 장비 구성	17
그림 14. 안산시 수계 하천 부유물질 및 미세플라스틱 순질량 측정 결과 비교	20

그림 15. 퇴적토 내 미세플라스틱 오염경로	21
그림 16. 대상 수계 퇴적물 채취 과정	22
그림 17. 하천 및 간선수로 채취 퇴적물과 건조 후 퇴적물	23
그림 18. 300 μ m 거름망 분리 및 수집된 고품물	24
그림 19. 현미경으로 관찰한 각 하천별 고품물	25
그림 20. 각 하천별 고품물 spectra map	26
그림 21. 신길천 미세플라스틱 정성분석 결과	28
그림 22. 반월천 미세플라스틱 정성분석 결과	29
그림 23. 안산천 미세플라스틱 정성분석 결과	30
그림 24. 화정천 미세플라스틱 정성분석 결과	31
그림 25. 1간선수로 (옥구천) 미세플라스틱 정성분석 결과	32
그림 26. 2간선수로 (군자천) 미세플라스틱 정성분석 결과	33
그림 27. 3간선수로 (정왕천) 미세플라스틱 정성분석 결과	34
그림 28. 4간선수로 (성곡천) 미세플라스틱 정성분석 결과	35
그림 29. 안산시 하천별 하천수 및 퇴적물 미세플라스틱 분포	36
그림 30. 안산시 간선수로별 간선수로수 및 퇴적물 미세플라스틱 분포	37
그림 31. 안산시 수계 퇴적물 미세플라스틱 분포	38
그림 32. 대상 수계 우기 시료 채취 과정	39
그림 33. 거름망 분리 및 수집된 고품물	40
그림 34. 현미경으로 관찰한 각 하천별 고품물 및 spectra map	41
그림 35. 안산천 우수토구 미세플라스틱 정성분석 결과	43
그림 36. 안산천 우기 하천수 미세플라스틱 정성분석 결과	44
그림 37. 군자천 우기 간선수로수 미세플라스틱 정성분석 결과	45
그림 38. 안산시 수계 하천 및 간선수로 건기 및 우기 시의 미세플라스틱 분포	46
그림 39. 대상 수계 우기 시료 채취 과정	48
그림 40. 거름망 분리 및 수집된 고품물	49
그림 41. 현미경으로 관찰한 각 하천별 고품물 및 spectra map	51
그림 42. 하수처리장 공장계열 유입수 미세플라스틱 정성분석 결과	53
그림 43. 하수처리장 1차 침전지 미세플라스틱 정성분석 결과	54
그림 44. 하수처리장 2차 침전지 미세플라스틱 정성분석 결과	55
그림 45. 하수처리장 최종 처리 배출수 미세플라스틱 정성분석 결과	56
그림 46. 하수처리장 공장계열 처리공정별 미세플라스틱 분포	57
그림 47. 대상 수계 하천 생물 채취 과정	58
그림 48. 어류 내 미세플라스틱 추출과정	60
그림 49. 생물시료의 전처리 과정	62
그림 50. 현미경으로 관찰한 각 하천별 고품물	63
그림 51. 생물 시료 고품물 spectra map	64
그림 52. 하수처리장 공장계열 유입수 미세플라스틱 정성분석 결과	65
그림 53. 하수처리장 공장계열 유입수 미세플라스틱 정성분석 결과	66
그림 54. 안산시 하천 생물에 축적된 미세플라스틱 체내 분포	67

그림 55. 어류의 내장, 아가미, 피부에서 미세플라스틱 크기분포 -----	69
그림 56. 어류 내 존재하는 미세플라스틱 유형분포(a)와 물질 스펙트럼(b) -----	69
그림 57. 미세플라스틱 입자크기에 따른 물리적,화학적 영향 -----	73
그림 58. 하수처리장 및 하천의 TMS -----	83
그림 59. TMS와 연계되는 미세플라스틱 분석기술 -----	83

제 1 장 연구 개요

1960년대 이후 전 세계적으로 플라스틱 사용량이 급증하면서 현재 전 세계적으로 매년 240백만 톤 이상의 플라스틱을 사용하고 있다. 국내에서도 1980년대 이후부터 플라스틱의 생산이 급증하기 시작하였으며, 2017년 기준으로 약 1,406만톤의 플라스틱이 생산되고 이중 약 1,090만톤이 폐기물로 배출되고 있는 것으로 나타났다.

미세플라스틱은 자연적으로 또는 인위적으로 생산된 작은 크기의 플라스틱을 지칭하는 것으로써, 플라스틱의 생산과 소비가 증가함에 따라 하천 및 해양으로 배출되는 미세플라스틱 또한 지속적으로 증가할 것으로 전망하고 있다.

그림 1에 나타난 바와 같이 미세플라스틱은 발생경로에 따라 인위적으로 제조 당시에 작게 만들어진 1차 미세플라스틱과, 크기가 큰 플라스틱이 시간이 지나면서 바람, 파도, 자외선 등에 의해 자연적으로 파쇄 되어 크기가 작아진 2차 미세플라스틱으로 분류할 수 있으며, 통상적으로는 5mm 이하의 크기의 플라스틱을 미세플라스틱으로 보고 있으나 국가별 관리기준이나 환경기구 등의 관점에 따라 마이크로미터(μm) 이하 단위의 크기를 미세플라스틱으로 정의하는 경우도 있어 이에 대한 명확한 기준은 불분명한 상태이다.

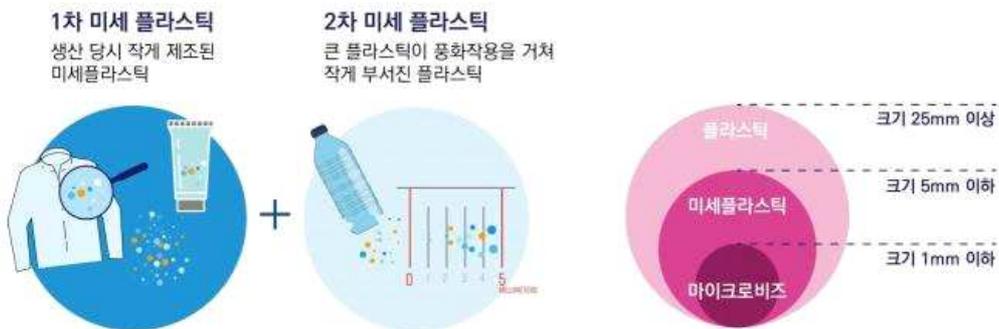


그림 1. 미세플라스틱의 분류 및 크기

최근 유엔환경계획(UNEP)에서는 각국 정부로 하여금 해양오염과 생태계 파괴의 주범인 미세플라스틱에 대한 규제를 도입할 것을 권고하였으며, 2017년 7월 G20정상회담에서도 미세플라스틱을 포함한 해양 플라스틱 쓰레기가 인류 건강과 지구 환경에 미치는 문제를 해결하기 위해 『G20 해양쓰레기 실행계획』이 채택되었음. 또한 2018년 9월 바젤협약에서는 미세플라스틱이 포함된 플라스틱 제품에 대하여 적절한 예방 조치를 취할 것을 고려하고 있다고 언급하는 등 이러한 국제적 동향에 따라 국내에서도 미세플라스틱에 대한 관리 및 대응을 강화할 필요성이 제기되고 있다.

그림 2와 같이 최근 연구 결과에 따르면 미세플라스틱이 소금(EFSA, 2016)이나, 수산물(Karami 외, 2018), 먹는물(Schymanski 외, 2018) 등 다양한 경로를 통해 사람의 체내로 유입되고 있다는

연구가 보고되고 있으며, 실제로 사람 변 중에서도 미세플라스틱이 발견되면서(Liebmann 외, 2018) 미세플라스틱에 대한 사람들의 우려가 커지고 있다.

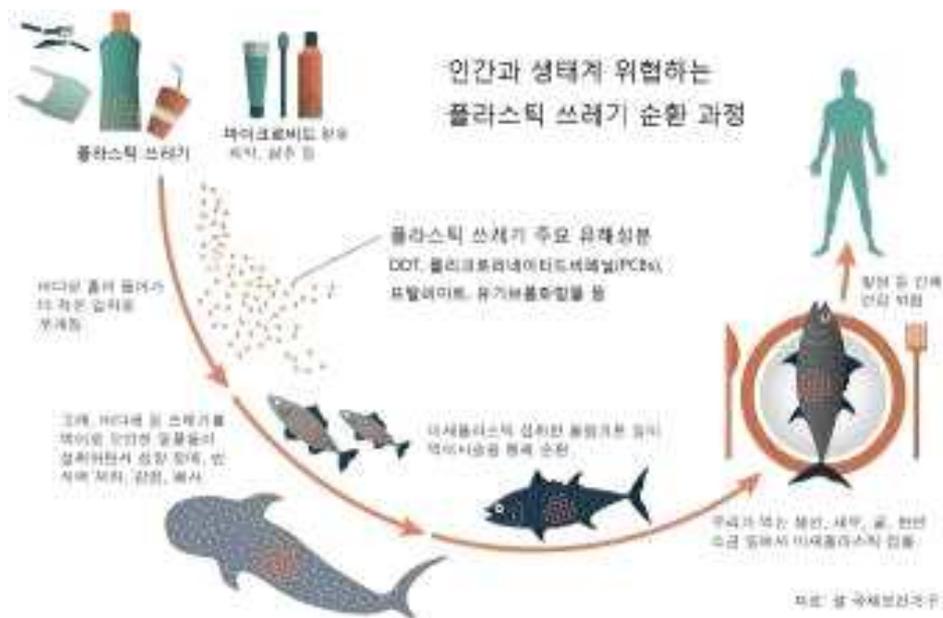


그림 2. 미세플라스틱의 생태계 순환 과정

이처럼 미세플라스틱에 대한 문제가 중요하게 인지됨에 따라 최근 국내·외적으로 미세플라스틱 조사연구가 활발히 진행되고 있으나, 대부분의 연구는 해양생태계에 집중되어 있다. 하지만, 해양생태계뿐만 아니라 최근 국외 담수 환경에 대한 연구 결과에서도 하수처리장이나 하천을 통한 미세플라스틱의 배출이 지속적으로 관찰되고 있는 것으로 보고되었으며, 이러한 상황에 발맞추어 국내에서도 현재 관련된 연구 결과가 거의 없다고 볼 수 있는 담수 환경을 대상으로 한 미세플라스틱 조사가 시급한 실정이다.

따라서 본 연구는 육상에서 기인하는 미세플라스틱에 대한 분석 및 조사 방법을 모색하고 이를 통한 안산시 수계 및 하수처리장의 미세플라스틱 분포를 파악하여 현재 현황 및 향후 관리방안 제시하여 향후 미세플라스틱 관리를 위한 기초자료로 활용하고자 한다.

제 2 장 연구의 필요성 및 목적

2.1 연구의 필요성

2.1.1 국내 담수환경에서의 미세플라스틱 현황조사 필요성

담수 환경에서의 미세플라스틱에 대한 해외 연구결과에 따르면, 담수로의 주요 발생원은 1차 미세플라스틱으로서 하수 배출에 의한 화장품 및 세안제의 polyethylene, polypropylene 및 polystyrene과, 다른 주요 발생원으로는 제품 생산에 사용되는 원료로서 사업장에서 사용되는 미세플라스틱으로 관찰되었다. 미세플라스틱에 대한 환경문제가 중요하게 인지됨에 따라 최근 국내·외적으로 미세플라스틱 조사연구가 활발히 진행되고 있으나, **대부분의 연구는 해양생태계에 집중되어 있어서 담수환경의 미세플라스틱 자료조사 및 데이터구축이 필요하다.** 국외에서는 그림 3과 같이 하천이나 호수에 미세플라스틱의 현황 및 입자크기를 분석함으로써 해양으로 배출되는 미세플라스틱을 파악하고 관리하기 위한 연구가 활발히 진행되고 있다.

따라서 향후 미세플라스틱 저감을 위한 관리정책에 활용하기 위해 **안산시 주요 하천 4개와 안산 스마트허브 내 간선수로 4개의 미세플라스틱 현황 및 특성을 분석하고 조사함으로써 미세플라스틱 분포 현황에 대한 데이터베이스 구축이 필요하다.**

Water body name	Size classes, and Sampling mesh size for water samples	Maximum abundance, and Mean abundance(where reported)
Lake Hovsgol, Mongolia (Free et al., 2014) ¹²⁾	Size classes: 0.355-0.999 mm, 1.00-4.749 mm, and >4.75 mm Sampling mesh: 333 μ m	Max: 44,435 items/km ² Mean: 20,264 items/km ² Abundances include all particles, of which 81% represents size <4.75 mm
Danube river, Austria (Lechner et al., 2014) ¹³⁾	Size classes: <2 mm, 2-20 mm Sampling mesh: 500 μ m	Max: 141,647.7 items/1000 m ³ Mean: 316.8 items/1000 m ³ Abundances include all particles, of which 73.9% represent spherules(<3 mm)
Tamar estuary, UK (Sadri and Thompson, 2014) ¹⁴⁾	Size classes: <1 mm, 1-3 mm, 3-5 mm, >5 mm Sampling mesh: 500 μ m	Max: 204 pieces of suspected plastic Mean: 0.028 items/m ³ Abundances include all particles, of which 82% represents size <5 mm
Lakes Superior, Huron, and Erie, Canada/USA (Eriksen et al., 2013) ¹⁵⁾	Size classes: 0.355-0.999 mm, 1.00-4.749 mm, and >4.75 mm Sampling mesh: 333 μ m	Max: 463,423 items/km ² Mean: 43,157 items/km ² Abundances include all particles, of which 98% represents size <4.75 mm

그림 3. 국외 담수 환경에서의 미세플라스틱 검출 사례

2.1.2 안산시 하수처리장 공정별 미세플라스틱 검출 현황 조사 필요성

그림 4는 해외 하수처리장 처리공정에서의 미세플라스틱 배출에 대한 연구결과이며, 1차 및 2차 처리, 고도처리 공정을 거쳐도 방류수에 미세플라스틱이 검출된 상태로 방류되고 있는 실정이다. 하·폐수 처리 공정에서는 주로 미세 플라스틱 섬유(microplastic fibers (MPFs))와 입자(particles (MPPs))성 성분이 검출되고 있으며 특히 폴리에스테르(polyester(PES)), 폴리에틸렌(polyethylene(PE)), 폴리아미드 (polyamide(PA)) 및 폴리프로필렌(polypropylene (PP))이 주로 검출되고 있다.

안산 하수처리장의 경우 생활하수뿐만 아니라 안산스마트허브의 공장폐수도 함께 처리하는 처리장으로, 타 연구자료에 나타난 바와 같이 공정 중에 처리되지 않은 미세플라스틱이 방류수를 통해 수계로 방류될 가능성이 있으며 따라서 하수처리장 공정에 미세플라스틱의 제거 효율 및 방류수의 미세플라스틱 분석 자료 구축이 필요하다.

Classification	Treatment capacity (m ³ /day)	Treatment process	Concentration (range) (*ea./m ³ , **ea./L)			Collection cut-off size(μm)	Removal efficiency (%)
			Influent	Outflow water in 1st settling tank	Effluent		
Scotland 1WWTP ⁴⁾	260,954	Secondary	15.70 ± 5.23**	3.40 ± 0.28**	0.25 ± 0.04**	> 65	98.4
Germany 12WWTPs ²⁾					0 ~ 50*	> 500	-
					10 ~ 9,000*	< 500	-
Sweden 2STPs ³⁾	740,000 p.e. 14,000 p.e.	-	7,340 ± 13*	-	8 ± 7*	> 300	99.89
			12,120 ± 6,820*	-	23 ± 1*		99.71
Finland 2STPs ³⁾	800,000 p.e. 40,500 p.e.	-	100,000 ± 43,300 [†]	-	43 ± 36 [†]	> 300	99.93
			91,570 ± 28,300 [†]	-	29 ± 10 [†]		99.97
Iceland 2STPs ³⁾	97,000 p.e. 26,000 p.e.	-	631*	-	1,378*	> 300	-
			2,070 ± 200*	-	1,400 ± 66*		50.17
Finland 4WWTPs ⁴⁾	800,000 p.e.	CAS, BAF, DF10	0.5 ± 0.2**	-	0.3 ± 0.1**	> 300,	40.0
	50,000 p.e.	CAS, BAF, DF20	2.0 ± 1.3**	-	0.03 ± 0.01**	100 ~ 300,	98.5
	117,000 p.e.	CAS, RSF	0.7 ± 0.1**	-	0.02 ± 0.007**	20 ~ 100	97.1
	300,000 p.e.	CAS, DAF	2.0 ± 0.07**	-	0.1 ± 0.04**		95.0
		CAS, MBR	6.9 ± 1.0**	-	0.005 ± 0.004**		99.9
Australia 3WWTPs ⁵⁾	308,000	Primary	-	-	1.5**	190 ~ 500	-
	17,000	Secondary	-	-	0.48**	100 ~ 190	-
	13,000	Tertiary	-	-	0.28**	> 25	-
	48,000	RO	-	-	0.21**		-
America 17WWTPs ⁶⁾	-	CAS Advanced/Tertiary	-	-	0.004 ~ 0.195**	125 ~ 355,	-
					0.009 ~ 0.127**	> 355	
Sweden 1WWTP ⁷⁾	45,000 p.e.	Mechanical chemical biological	15.1 ± 0.89 × 10 ³ *	-	8.25 ± 0.85*	> 300	99.9
Korea 1STP ⁸⁾	700,000	MLE	1.3 ~ 4.6 × 10 ⁶ [†]	0.5 ~ 1.6 × 10 ⁶ [†]	7.2 ~ 22.5*	1 ~ 5 mm 300 μm ~ 1 mm 100 ~ 300	99.99
America 34WWTPs ⁹⁾	113,562 ~ 348,258	-	-	-	-	> 355	-
America 3WRPs ¹⁰⁾	-	Tertiary	-	-	3 ~ 23*	> 125	-
America 1WWTP ¹⁰⁾	1,060,000	Secondary	1.0**	-	0.00088**	180 ~ 400 100(150) ~ 180	99.9

그림 5. 해외 하수처리장 처리공정에서의 미세플라스틱 현황

2.2 연구 목적

- 본 연구는 향후 미세플라스틱 저감을 위한 관리정책에 활용하기 위해 안산시 주요 하천 4개와 안산스마트허브 내 간선수로 4개의 미세플라스틱 현황 및 특성을 분석하고 조사함으로써 미세플라스틱 분포 현황에 대한 데이터베이스를 구축한다.
- 또한 안산 하수처리장의 경우 생활하수뿐만 아니라 안산스마트허브의 공장폐수도 함께 처리하는 처리장으로, 공정 중에 처리되지 않은 미세플라스틱이 방류수를 통해 수계로 방류될 가능성이 있어 이에 따라 하수처리장 공정에 미세플라스틱의 제거 효율 및 방류수의 미세플라스틱 분석 자료를 구축한다.

제 3 장 연구의 내용 및 범위

3.1 연구 목표 및 내용

본 연구는 육상에서 기인하는 미세플라스틱에 대한 분석 및 조사 방법을 모색하고 이를 통한 안산시 수계 및 하수처리장의 미세플라스틱 분포를 파악하여 현재 현황 및 향후 관리방안 제시하는 것을 목표로 한다. 표 1은 본 연구의 목표 및 내용을 나타낸 것이다.

표 2. 연구개발 목표 및 내용

구 분	연구개발 목표	연구개발 내용
1차년도 (2020. 3. 16 ~ 2020. 12. 31)	안산시 하수처리장 및 간선수로의 미세플라스틱 발생 현황 조사	<ul style="list-style-type: none"> • 미세플라스틱 환경오염 관련 문헌조사 및 분석방법 정립 • 안산스마트허브 내 간선수로(4개), 하천(4개)에 대한 현장 조사 및 조사지점 선정 • 수질 모니터링 수행을 통한 미세플라스틱의 발생 특성 및 수질환경 영향 조사
2차년도 (2021. 4. 1 ~ 2021. 10. 28)	안산시 주요 미세플라스틱 발생원에 대한 집중 조사	<ul style="list-style-type: none"> • 주요 미세플라스틱 발생 지점 집중조사 수행 • 하천 퇴적물의 미세플라스틱 축적 및 오염도 조사 • 미세플라스틱의 생태 오염 영향 평가 • 안산시 하수처리장 공정별 미세플라스틱 분포 조사 및 개선방안 제시

3.2 연구 추진 전략

3.2.1 안산시 수계 미세플라스틱 오염 현황 (1차년도 연구)

- 일반적으로 수중 내 미세플라스틱 검출을 위해서는 시료 채수(Collection), 시료의 전처리(Pre-treatment), 미세플라스틱 특성화 및 검출(Characterization)의 3가지 순서·단계가 사용되고 있다. 본 연구에서는 샘플 특성에 따른 다양한 방법에 대한 조사를 통해 펌핑 기반 샘플링 방식, 과산화수소 수용액을 이용한 전처리, FT-IR 분석장비를 사용한 미세플라스틱 분석 방법을 채택하여 연구에 활용하였다.

- 안산시 수계 하천, 간선수로 및 하수처리장 방류수에 대해 5mm, 1mm, 500 μ m, 300 μ m, 100 μ m 의 입도별로 수집된 고형물을 육안으로 관찰하였을 때 전반적으로 모든 수계 샘플에서 300 μ m 이하의 미세 고형물이 가장 많이 관찰되었으며 수집된 전체 고형물 중 비교적 가벼운 부유성의 고형물이 많은 비중을 차지하는 것으로 나타났다.
- 미세플라스틱 분석 시 유기물에 의한 방해 작용을 제거하기 위해 30% 과산화수소 수용액을 증류수로 재수집된 각 고형물 시료에 혼합하여 전처리를 진행하였다. 과산화수소와 혼합된 시료는 가열교반기를 이용하여 70 $^{\circ}$ C에서 24시간 이상 가열교반과정을 거쳐 유기물을 충분히 반응시켰으며, 전처리된 시료를 육안으로 관찰한 결과 전처리 전에 비해 눈에 띄게 큰 변화는 확인할 수 없었으나, 전처리 전에 존재했던 미세한 부유성 물질들이 다소 감소된 경향을 보이는 것을 확인하였다.
- 현미경 분석 및 image mapping 분석을 통해 각각의 시료(100 μ m~300 μ m 크기범위)에 대한 미세플라스틱의 정량 분석결과자료를 검토한 결과 하천 샘플의 경우 반월천 시료에서 99개/100L로 가장 많은 양이 측정되었으며, 신길천 시료에서 75개/100L, 안산천 시료에서 63개/100L, 화정천 시료에서 64개/100L 의 미세플라스틱 추정물질이 검출되었다. 또한 간선수로 샘플의 경우 군자천 시료에서 38개/100L로 가장 많은 양이 측정되었으며, 옥구천 시료에서 19개/100L, 정왕천 시료에서 27개/100L, 성곡천 시료에서 7개/100L 의 미세플라스틱 추정물질이 검출되었다. 마지막으로 하수처리장 방류수 샘플의 경우 공장계방류수에서 30개/100L로 생활계방류수의 8개/100L 보다 많은 미세플라스틱 추정물질이 관찰되었다. 전체적으로 분석하였을 때, 상대적으로 하천시료에서 간선수로시료보다 많은 양의 미세플라스틱 추정물질이 관찰되었으며, 하수처리장 방류수에서는 공장계방류수에서의 미세플라스틱 추정물질이 생활계 방류수보다 상대적으로 많은 양이 검출되었음을 확인할 수 있었다.

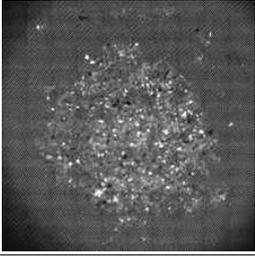
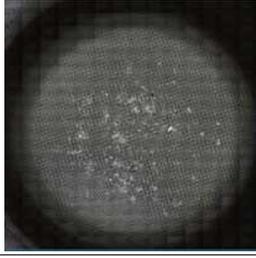
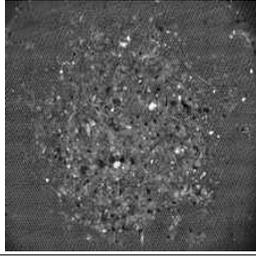
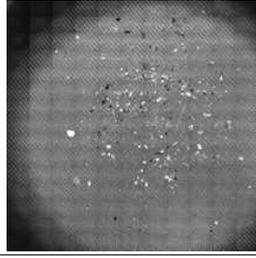
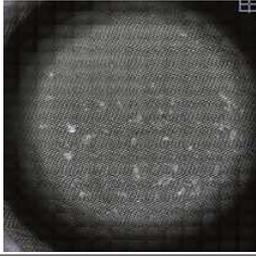
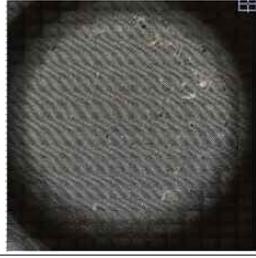
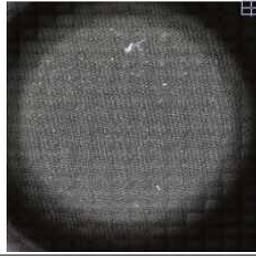
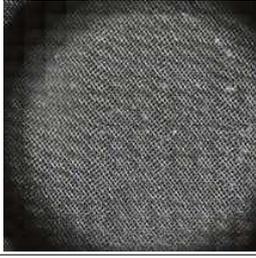
하천				
	반월천	화정천	안산천	신길천
간선수로				
	옥구천	군자천	정왕천	성곡천
처리장방류수			X	
	생활계방류수	공장계방류수		

그림 6. 현미경으로 관찰한 각 시료의 고형물

표 3. 각 하천별 시료 미세플라스틱 정량분석 결과

구분 \ 시료명	신길천	반월천	안산천	화정천
시료량	100L	100L	100L	100L
개수	75개	99개	63개	64개
구분 \ 시료명	옥구천	군자천	정왕천	성곡천
시료량	100L	100L	100L	100L
개수	19개	38개	27개	7개
구분 \ 시료명	생활계방류수	공장계방류수	X	
시료량	100L	100L		
개수	8개	30개		

- FT-IR을 이용한 안산시 수계 하천 미세플라스틱 정성 분석 자료를 검토한 결과 모든 하천에서 전체적으로 PET, PP 및 PE 성분이 80% 이상 검출되었으며 4개 하천 모두 우수관로만 연결된 자연하천임을 고려하였을 때 하천 수계에 존재하는 대부분의 미세플라스틱은 강우 시 노면 등에서 유입된 비점오염원에서 기인되었을 가능성이 높고 일부 농업지역 및 공단지역을 거쳐 흐르는 반월천 및 신길천과 같은 경우에는 농업배수나 공단지역배수에 의한 오염원이 유입되었을 가능성이

2D Graph 3

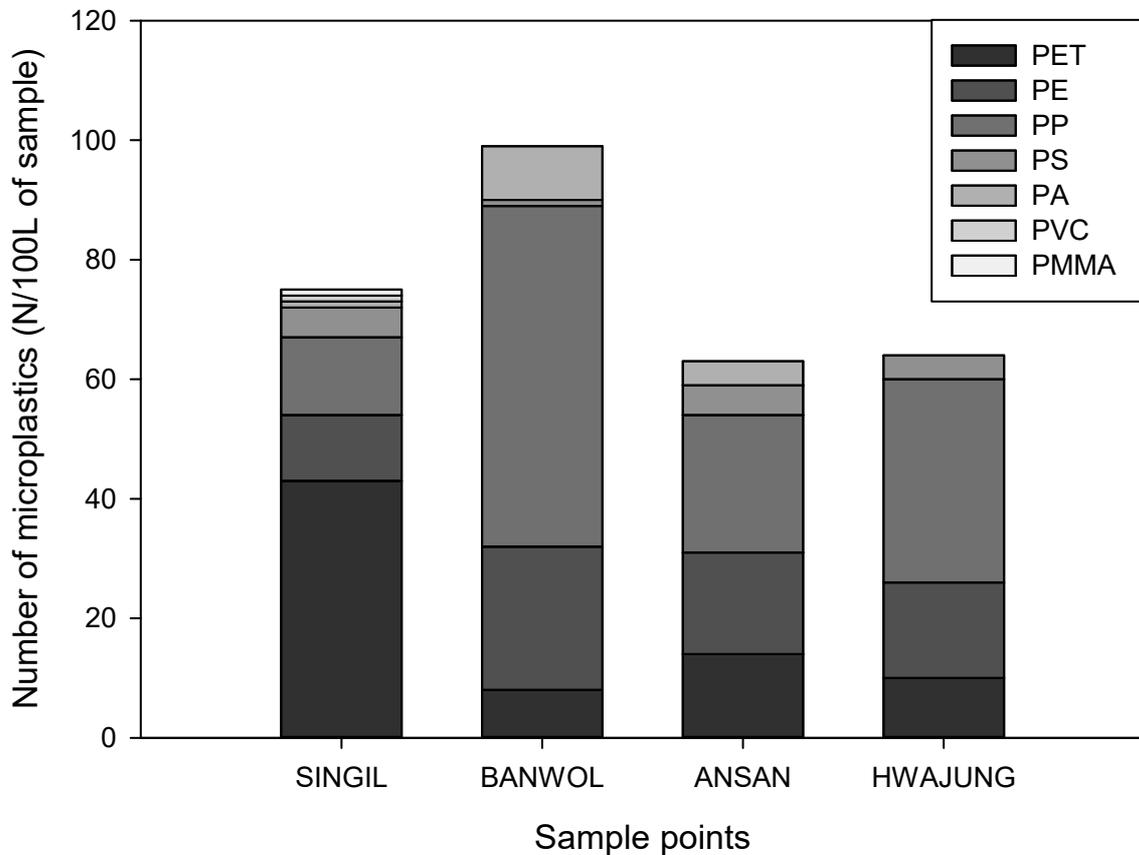


그림 7. 안산시 하천별 미세플라스틱 분포

- FT-IR을 이용한 안산시 수계 간선수로 미세플라스틱 정성 분석 자료를 검토한 결과 하천 미세플라스틱 분석 결과와 마찬가지로 1간선수로인 옥구천을 제외한 모든 간선수로 샘플에서 PET, PP 및 PE 성분이 80% 이상 검출되었다. 4개 간선수로 모두 우수관로만 연결된 인공하천임을 고려하였을 때 하천에서와 유사하게 대부분 노면에서 유입된 비점오염원에 의한 미세플라스틱일 가능성이 높을 것으로 판단되며, 많은 부분을 공단지역을 거쳐 흐르면서 연결된 토구 또한 주거지역의 토구보다 약 2배가량 많아 공단지역의 배수에 의한 영향이 비교적 클 수 있을 것으로 판단되었다.

2D Graph 3

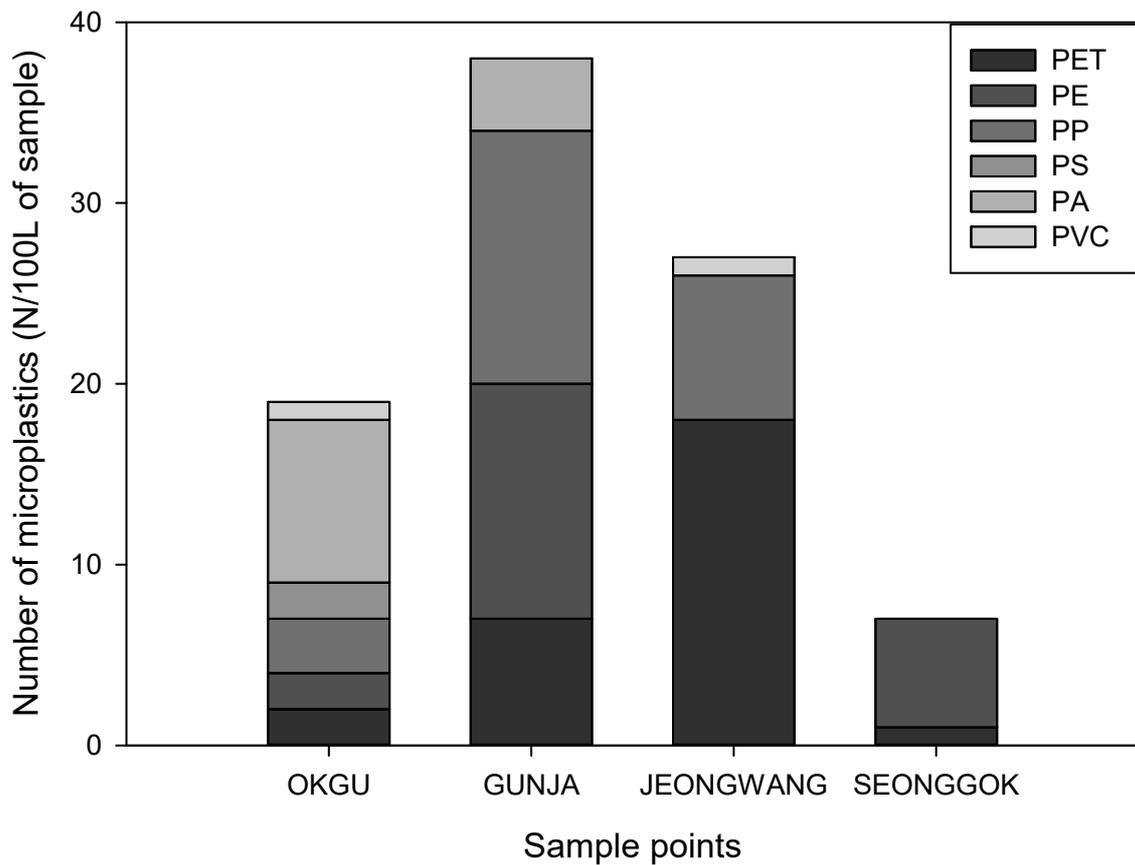


그림 8. 안산시 간선수로별 미세플라스틱 분포

- FT-IR을 이용해 안산시 수계로 방류되는 하수처리장 방류수의 미세플라스틱 정성 분석 자료를 검토한 결과 생활계 처리 방류수에서 공장계 처리 방류수 보다 적은 양의 미세플라스틱이 검출되었다. 생활계 방류수의 경우 PET, PP 및 PE와 같은 물질이 대부분을 차지하였고, 공장계 방류수의 경우 PET, PP 및 PE 이외에 나일론 성분인 PA가 높게 측정되었다. 조사대상인 안산 하수처리장의 경우 다른 하수처리장과는 다르게 인근 공단폐수의 일부를 유입하여 분리된 공정으로 처리하고 있으며 반월공단으로부터 유입된 공단우수배수, 염색단지발생폐수 및 기타 유입수로 주로 구성되어있다. 공장계 처리 방류수에서 나타난 생활계 처리 방류수 보다 높은 미세플라스틱 발생량은 이러한 공단폐수에서 다량의 미세플라스틱이 하수처리장으로 유입되고 있는 것으로 볼 수 있으며, 검출된 미세플라스틱 종류 또한 PET, PP 및 PE 이외에서 나일론 성분인 PA가 높게 측정되고 있어 향후 유입수 및 폐수 유입업종에 대한 추가적인 조사가 필요할 것으로 판단된다.

2D Graph 3

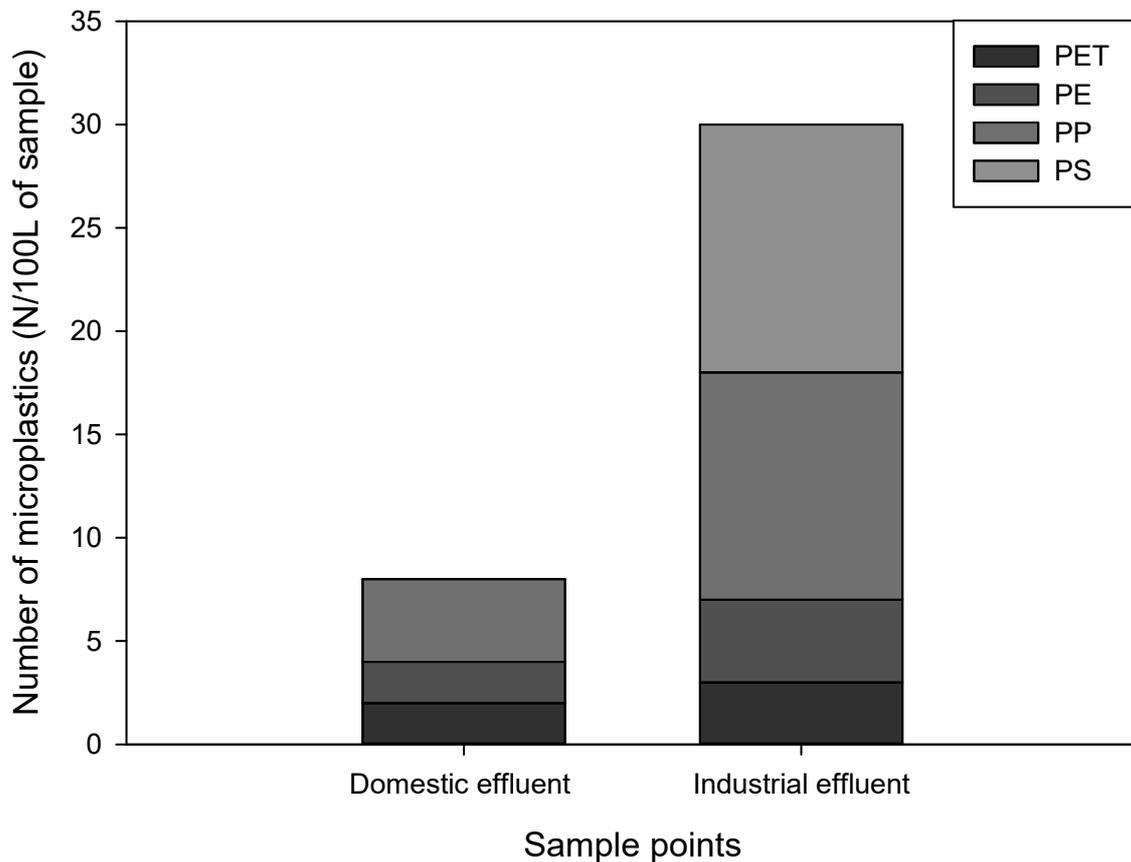


그림 9. 안산하수처리장 처리계열별 방류수 미세플라스틱 분포

- 안산시 하천 및 간선수로 수계에서 주로 검출된 플라스틱 성분인 PET, PP 및 PE는 문헌연구 결과에 따르면 마이크로파이버와 같은 합성섬유의 주요 재료로 사용되고 있으며 의류와 같은 섬유 제품의 세탁과정 등에서 수계로 배출될 가능성이 있다. 또한 이러한 플라스틱 성분은 바디 및 페이스 스크럽, 식품 포장 필름 및 물병을 포함한 퍼스널 케어 제품 등 다양한 용도로 실생활에 많이 사용되고 있어 이와 같은 제품의 사용에 따른 비점오염원 형태로 수계로 유입될 가능성 또한 고려해 볼 수 있다.
- 문헌조사 결과에 따르면 대부분의 하수처리장은 유입되는 미세플라스틱에 대해 약 90% 이상의 제거율을 보여주고 있으며, 국내 연구사례에서도 약 98%의 수치에 해당하는 높은 제거율을 나타내고 있으므로 유입되는 미세플라스틱의 상당부분이 처리과정에서 제거되고 있음을 알 수 있다. 본 연구에서는 잔존하여 배출되는 미세플라스틱 성분이 PET, PP 및 PE와 같은 물질이 대부분을 차지하고 있으며, 이와 같은 물질은 섬유 및 생활제품에서 기인된 미세플라스틱이 하수와 함께 처리장으로 유입되어 그 중 처리되지 못한 매우 작은 크기의 일부 미세플라스틱이 배출되고 있는 것으로 판단된다.

- 하수처리장에서 미처 처리되지 못하고 배출되는 미세플라스틱은 그 단위량으로는 비교적 적게 나타나지만, 전체 방류수의 양을 고려했을 때 누적되어 배출되는 양은 상당히 많을 수 있다. 일반 하천 지류의 하수처리장 배출 전후의 미세플라스틱 농도 비교 결과에서도 하수처리장 방류수 배출 이후 지류의 미세플라스틱 농도가 몇 배 이상 높아지는 것을 확인할 수 있으며 이러한 미세플라스틱이 하천지류를 통해 해양으로 유입되어 궁극적으로 미세플라스틱의 생태계 순환을 초래할 수 있으므로 이에 대한 심층적인 연구가 필요할 것으로 판단된다.

3.2.2 안산 수계 미세플라스틱 오염 집중 조사

- 1차년도 하천 및 간선수로 조사 결과를 바탕으로 미세플라스틱 농도가 높게 나타나는 지점 및 수계에 대해 집중 조사를 실시한다.
- 수계에서 검출된 미세플라스틱의 종류, 양, 주변 환경 등 종합적인 분석을 통해 주요 오염원을 파악하고 수계에 대한 영향을 평가한다.
- 또한, 그림 9는 해수 및 해변의 모래를 채취하여 미세플라스틱을 분석한 것으로 담수 내 퇴적물에 함유되어 있는 미세플라스틱을 분석한 연구는 부족한 상황으로 물리적, 화학적 전처리 방법을 사용하여 담수의 퇴적물 내 미세플라스틱 현황을 조사하는 연구가 필요한 실정이다.

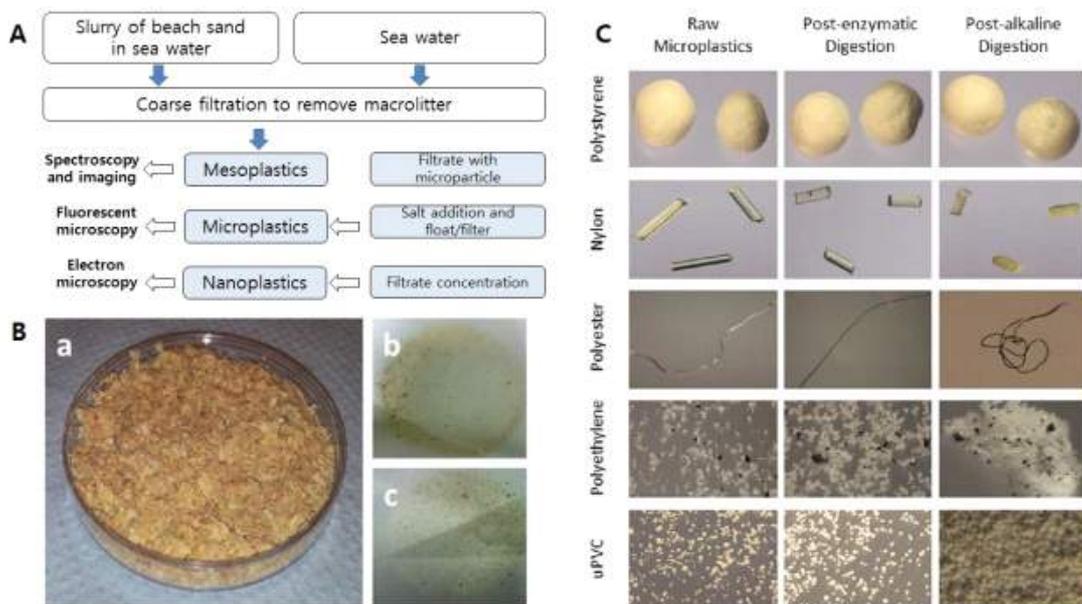


그림 10. 해수, 모래에서의 미세플라스틱 분리과정 및 분석

- 따라서 안산시 하천 퇴적물의 미세플라스틱 축적 및 오염도 조사를 통해 하천수 및 수계에 미칠 수 있는 영향을 분석한다.

3.2.3 미세플라스틱의 수계 생태 오염 및 영향 평가

- 해양생태계에 존재하는 미세플라스틱은 생물체의 생존율과 성장에 유해한 영향을 미치는 것으로 알려져 있으나, 이에 비해 하천이나 호수와 같은 담수 생태계에서 미세플라스틱이 미치는 영향은 비교적 연구가 부족하다.
- 그림 10는 해양의 동물성 플랑크톤과 담수 생태계에 서식하는 물벼룩의 체내에 미세플라스틱이 축적되어 있는 것을 연구를 통해 분석한 것이며, 안산시 수계에서의 담수에 함유된 미세플라스틱 뿐만 아니라 생태계에 축적되어 있는 미세플라스틱 현황을 조사하여 전반적인 미세플라스틱 오염현황 조사가 필요할 것으로 판단된다.



그림 11. 미세플라스틱을 섭취한 동물성 플랑크톤 및 물벼룩

- 본 연구에서는 미세플라스틱의 오염도가 높게 측정된 수계에서의 생태 조사를 통해 동물의 체내에 축적된 미세플라스틱을 분석하고 이를 통해 미세플라스틱이 생태에 미칠 수 있는 영향 여부를 평가한다.
- 국립환경과학원 연구보고서(그림 11)에 따르면 한강하류에 서식하는 어류의 체내에 축적된 미세플라스틱을 분석한 결과, 잉어 (48개/마리), 떡붕어 (4개/마리), 블루길 (16개/마리), 배스 (16개/마리) 등으로 나타났으며 본 연구의 대상 하천의 어류에서의 미세플라스틱 체내 축적현황을 분석하여 안산시 수계 생태오염 현황을 평가하고자 한다.

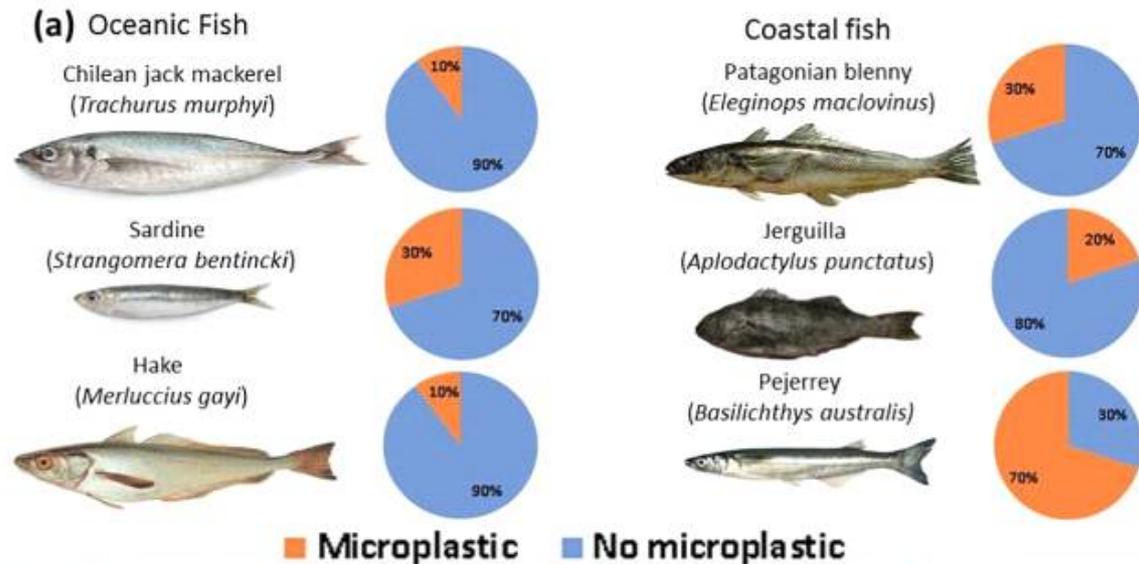


그림 12. 미세플라스틱에 노출된 어류 체내 미세플라스틱 분석결과 (KPozo et al., 2019)

3.2.4 하수처리장 공정별 유입수 미세플라스틱 분포 조사

- 안산시 하수처리장으로 유입되는 생활하수 및 공장폐수에 대한 각 처리계통 별 미세플라스틱 정량/정성 분석을 실시한다.
- 하수처리계통도에 따라 대표적으로 유입수, 최초침전지, 생물반응조, 최종침전지, 여과지, 방류수의 각 공정으로 유입되는 공정수를 채취하여 미세플라스틱 분석을 수행하도록 하며, 분석 결과를 바탕으로 처리 공정별 미세플라스틱 제거율, 입자크기 등의 하수처리장 미세플라스틱 기초 현황 자료를 구축한다.
- 하수처리장 미세플라스틱 분석결과를 토대로 유입수 대비 유출수에 잔존하는 미세플라스틱이 다량으로 검출될 경우, 미세플라스틱이 원활하게 제거되지 않는 단위 공정을 Lab-scale 규모로 모사하여 미세플라스틱의 거동을 파악한다.
- 위와 같은 실험을 통해 단위 공정에서의 미세플라스틱 잔존 원인을 평가하고, 이에 대한 운전방식 및 공정 개선 실험 등을 통한 제거효율 제고방안을 모색한다.

3.2.5 종합 결과 도출 및 고찰

- 1, 2차년도에 걸쳐 조사 및 분석된 자료를 종합하여 안산시 수계의 미세플라스틱의 분포 현황 및 오염도를 평가하고, 최종적으로 안산시뿐만 아니라 타 지자체에서도 미세플라스틱 오염도 조사 및 관리에 본 과제의 내용을 활용할 수 있도록 선행 연구 결과를 제공한다.

제 4 장 연구결과

4.1 안산 수계 미세플라스틱 오염 집중 조사

4.1.1 하천 부유물질과 미세플라스틱의 상관관계 분석

4.1.1.1 개요

해수, 지표수, 하수, 먹는물, 토양, 대기 등 다양한 환경 매체에서 미세플라스틱이 검출되고 있고 많은 연구들에서 이들의 분포를 보고하고 있다. 그러나 각 연구에서 사용한 시료의 채취, 전처리, 측정 방법이 상이하여 상호간 비교가 어렵고, 이로 인해 미세플라스틱의 전 세계적 분포의 파악 또한 어렵게 하고 있다. 미세플라스틱의 위해성에 대해서는 이미 잘 알려져 있으며, 향후 규제를 위해서는 표준화된 분석 방법이 필요하다.

미세플라스틱의 정성 및 정량 분석에 이용되고 있는 대표적인 기기 분석법으로는 FT-IR, Raman 분광법, gas chromatography coupled to mass spectrometry(GC/MS) 등이 있다. 최근에는 신속한 분석이 가능한 열화학적 분석방법으로 TGA(thermo gravimetric analyzer), DSC(differential scanning calorimetry), TGA-IR, TED-GC/MS(thermo extraction desorption GC-MS), Py-GC/MS(pyrolysis-GC/MS), matrix-assisted laser desorption/ionization time-of-flight mass spectrometry(MALDI-TOF-MS) 등이 도입되고 있으며, 이 중에서 Py-GC/MS가 가장 많이 이용되고 있다. 또한 분석 장치와 함께 사용하여 분석을 신속·용이하게 수행할 수 있도록 charge-coupled device(CCD) 카메라와 photodiode를 활용한 방법, Dynamic light scattering(DLS; 동적광산란기법), 나노입자추적분석법(nanoparticle tracking analysis; NTA), 형광분광계(fluorescence spectroscopy), 원자현미경(atomic force microscopy; AFM)과 같은 보조 장비들이 함께 사용되고 있다. (Fu et al., 2020)

이러한 미세플라스틱의 분석 방법은 더 작은 미세플라스틱을 정밀하고 신속하게 측정하는 방향으로 지속적인 연구·개발이 이루어지고 있으나 아직 미세플라스틱 연구 분야가 초기단계이기 때문에 다양한 분석 방법들에 대한 표준화는 미흡한 상태이다. 또한 고가의 장비 사용 및 신규 분석분야에 대한 희소성으로 인해 높은 분석 비용, 시료의 전처리, 많은 분석 시간의 소요 등 비교적 연구를 진행하기 위한 제약사항이 많은 편이다. 따라서 시료에 포함된 미세플라스틱을 간소하게 판별할 수 있는 방법을 찾기 위한 다양한 연구가 시도되고 있으며, 본 연구에서는 이러한 방법 중 하나로 시료에 포함된 부유물질과 TED-GC/MS 분석을 통한 미세플라스틱 순질량의 비교를 통해 부유물질농도와 미세플라스틱양의 상관관계를 분석해 보고자 하였다.

4.1.1.2 TED-GC/MS를 이용한 미세플라스틱의 정량/정성 분석

대표적인 미세플라스틱 분석방법은 앞서 언급한 바와 같이 크게 분광학적 방법과 열분해를 이용한 방법으로 나누어지는데 전통적으로 사용되어온 현미경-적외선분광법 및 라만분광법을 사용하는 분광학적 방법은 미세플라스틱의 개수를 세는데 시간이 많이 걸린다는 점과 측정 가능한 크기에 한계가 있기 때문에, 이를 상호 보완하기 위하여 열분해를 이용한 분석법 활용의 필요성이 높아지고 있다. 대표적인 열분해 분석법인 pyrolysis-GC/MS의 경우 샘플컵에 도입할 수 있는 시료량이 제한적이므로 대량의 환경시료 분석에는 어려움이 있다. 또한, 분석 시 열분해 gas가 모두 GC/MS로 주입되므로 쉽게 오염되는 취약한 부분이 있다. 이를 해결하기 위하여 TGA를 활용한 열분해 gas를 적절한 고체 흡착재에 흡착시킨 후 이를 다시 탈착하여 열분해 생성물을 분석하는 TED(Thermal extraction desorption)-GC/MS 방법이 독일BAM(Federal Institute for Materials Research and Testing)의 연구진에 의해 개발되었고, 현재 ISO/TC61(플라스틱)/SC 14(환경측면)/WG 4(미세플라스틱) 국제표준안으로 제안되어 표준개발이 진행되고 있는 상황이다. TED-GC/MS는 TGA sample cup (최대 900 μL)에 시료 양을 50 mg까지 도입할 수 있어서 샘플량이 많은 환경시료 중 미량 미세플라스틱의 분석에 매우 유용하게 적용할 수 있다. 게다가 환경시료 특성 상 분석시간이 많이 소요되는 분광법 (FT-IR, Raman) 대비 시료 분석에 약 2시간 반 이내로 크게 단축되며 모든 과정을 자동화하여 진행할 수 있다는 큰 장점이 있다. 표 3 은 담수, 해수, 해변, 토양 및 퇴적물에 대해 GC/MS를 이용한 미세플라스틱 분석 연구 사례를 나타낸 것이다. 표에 나타난 바와 같이 TED-GC/MS를 이용한 미세플라스틱 정량 및 정성 분석을 수행한 다수의 해외 연구사례가 보고되고 있으며 이러한 분석방법이 점차 확대되고 있음을 나타내고 있다.

표 4. GC/MS를 이용한 미세플라스틱 해외 분석 연구 사례

Place/origins	MPs type	MPs size	Abundance	Major objective/findings	Refs.
Germany/fish samples	PE, PP, PS, PVC, PA6, PMMA, PET, and PC	<1 mm	<20 μg /fish sample	Pyr-GC/MS was used to identify and quantify eight common types of MPs in fish samples at a trace level.	(Fischer and Scholz-Böttcher, 2017)
USA/seawater	PP and PE	5 mm	0.025 g mL^{-1}	Pyr-GC/MS quantified the concentrations of PCBs released from MPs and identified the main polymer materials of these collected MPs were PP and PE.	(Mendoza and Jones, 2015)
Germany/sediment	PE	0.2 mm	1.15 g cm^{-3}	The components of the MPs as well as their carried organic pollutants from the sediment samples were identified with GC/MS.	(Fries et al., 2013)
France/simulated water	CA, HDPE & LDPE, PA, PC, PET and PS	1-5 mm	1.37 g cm^{-3}	The identification of MPs in biological samples was achieved with GC/MS after an digestion of biological tissues using a KOH 10% solution with no significant degradation on MPs.	(Dehaut et al., 2016)
Germany/soil	PE	1 mm	0.03 $\text{mg } \mu\text{L}^{-1}$	This study developed a method enabling the identification and quantification of MPs in unknown solid environmental sample by combining TD-GC/MS with thermogravimetric analysis (TGA).	(Dümichen et al., 2015)
Germany/rivers	PE, PP, PS, PA6 and PET	630 μm	0.013 $\text{mg } \mu\text{L}^{-1}$	TD-GC/MS was used in this study for fast identification and quantification of MPs in real environmental samples from three rivers and bio gas plant, and found PE and PS were the main MPs.	(Dümichen et al., 2017)
Portugal/beaches	PS, PP and PE	0.5-1 mm	0.05 g mL^{-1}	The MPs collected from Fonte da Telha beach are mainly consisted of PE and PP. The concentrations and species of POPs in the MPs are also identified with GC/MS.	(Frias et al., 2010)
Germany/marine sediments	PE, PP, PVC, PET, PS and PUR	1 mm	4-6 particles mL^{-1}	This study used Pyr-GC/MS to analyze MPs samples in marine sediments from the North Sea island Norderney and found the types of MPs are PP, PVC and PET.	(Nuelle et al., 2014)

4.1.1.3 안산시 수계 하천의 TED-GC/MS를 이용한 미세플라스틱의 정량/정성 분석 방법

본 연구에서의 TED-GC/MS 분석은 안산시 수계 중 하천시료를 대상으로 수행하였으며, 100L의 하천수에 포함된 채취된 고형물 중 300 μm 이하 크기 범위의 시료를 분취하여 분석을 진행하였다. 하천시료의 샘플링 및 전처리는 FT-IR 분석에 사용한 방법을 동일하게 적용하였다. 전처리가 완료된 시료는 그림 12와 같은 TED-GC/MS 분석을 위한 여과장치(5 μm filter crucible)를 통해 여과한 후 샘플컵에 입자를 모아 분석을 진행하였다. 분석에 사용된 TED-GC/MS(TGA2 Mettler Toledo, Germany/MPS-TDU Gerstel, Germany/ 8890-5988B Agilent, USA) 장비의 구성은 그림 13과 같으며 분석조건은 표 4에 나타내었다. 최종적으로 분석된 Mass spectrum의 열분해 생성물은 Mass spectrum library(NIST 17)를 활용하여 확인하였다.



그림 13. TED-GC/MS용 시료전처리 여과장치

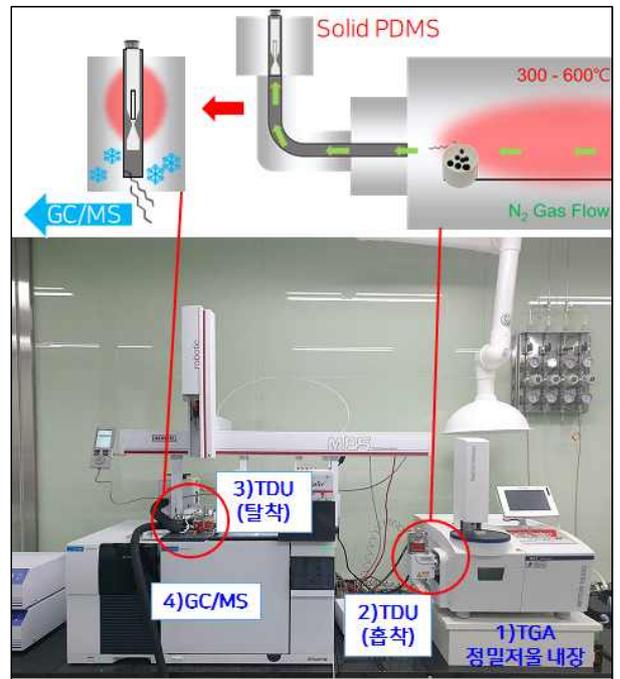


그림 14. TED-GC/MS 장비 구성

표 5. TED-GC-MS 분석 조건

Instrument	Parameter	Condition
TGA	Temperature range	40–600 °C
	Heating rate	10 °C/min
TDU	TED Coupling Temp.	240 °C
	Desorption mode	Splitless Mode
	Desorption temperature	200 °C
CIS	Initial temperature	-100 °C
	End temperature	270 °C
-	Absorber	PDMS
GC/MS	Column	ZB-5MS (30 m x 0.25 mm x 0.25 μm)
	Column flow	1 mL/min
	Temperature range	40 °C~300 °C
	Heating rate	5 °C/min
	Scan range	35 m/z~350 m/z
	Ion source temperature	230 °C
	Quadrupole temperature	150 °C

4.1.1.4 부유물질 및 TED-GC/MS 분석결과를 이용한 미세플라스틱 상관관계 분석

표 5는 TED-GC/MS 분석을 통한 하천별 미세플라스틱 분석 결과를 나타낸 것이다. 각 하천시료에 대해 PE, PP, PS, PET 4종의 미세플라스틱 별 중량이 측정되었으며, 각각의 합을 계산하여 시료에 함유된 미세플라스틱의 순질량을 도출하였다. 먼저 신길천의 경우 PE가 4.2μg, PP가 1.4μg, PS가 2.7μg, PET가 13.0μg 로 PET가 가장 많은 질량 비중을 차지하였으며, 미세플라스틱의 총 질량은 21.3μg으로 나타났다. 반월천의 경우 PE가 17.0μg, PP가 4.4μg, PS가 3.4μg, PET가 9.9μg 로 PE가 가장 많은 질량 비중을 차지하였으며, 미세플라스틱의 총 질량은 34.7μg으로 나타났다. 다음으로 안산천의 경우 PE가 17.8μg, PP가 8.0μg, PS가 6.9μg, PET가 27.2μg 로 PET가 가장 많은 질량 비중을 차지하였으며, 미세플라스틱의 총 질량은 59.9μg으로 하천 시료 중 가장 많은 미세플라스틱 중량을 나타냈다. 마지막으로 화정천의 경우 PE가 8.8μg, PP가 2.7μg, PS가 4.9μg, PET가 5.1μg 로 PE가 가장 많은 질량 비중을 차지하였으며, 미세플라스틱의 총 질량은 21.5μg으로 나타났다. 전체적으로 TED-GC/MS 분석결과 하천별 시료에는 PE 및 PET가 높은 질량 비율을 차지하였으며 안산천, 반월천, 화정천, 신길천 순으로 많은 미세플라스틱

양이 측정되었다.

1차년도에 수행된 하천별 FT-IR 미세플라스틱 정량 분석결과와 비교해 보면 신길천 75개, 반월천 99개, 안산천 63개, 화정천 64개로 TED-GC/MS 분석을 통해 도출된 하천별 미세플라스틱 질량과는 연관성을 확인하기 어려웠으며 FT-IR 분석을 통한 하천별 미세플라스틱 정성분석 결과와도 연관성을 확인하기 어려웠다. 이는 FT-IR 분석의 경우 시료에 포함된 미세플라스틱 개수를 측정하여 개별적인 미세플라스틱의 크기나 비중에 따른 편차로 인해 질량과의 상관관계를 도출하는 것은 한계가 있는 것으로 판단된다.

표 6. TED-GC/MS 분석을 통한 하천별 미세플라스틱 분석 결과

시료명		신길천	반월천	안산천	화정천
구분					
질량 (μg)	PE	4.2	17.0	17.8	8.8
	PP	1.4	4.4	8.0	2.7
	PS	2.7	3.4	6.9	4.9
	PET	13.0	9.9	27.2	5.1
합계		21.3	34.7	59.9	21.5

표 6은 안산시 수계 하천별 $300\mu\text{m}$ 이하 부유물질의 농도 분석 결과를 나타낸 것이다. TED-GC/MS에서 측정된 하천별 미세플라스틱 질량과의 비교를 쉽게 하기 위해 부유물질 농도 단위를 $\mu\text{g}/100\text{L}$ 로 환산하여 나타내었다. 각각의 하천별 부유물질 분석 결과 신길천 4,500, 반월천 43,667, 안산천 36,667, 화정천 4,667 $\mu\text{g}/100\text{L}$ 로 나타났으며 반월천, 안산천, 화정천, 신길천 순으로 많은 부유물질 농도가 측정되었다. 이와 같은 결과를 토대로 각 하천에서의 부유물질농도에 대한 TED-GC/MS를 통해 분석된 각 하천별 미세플라스틱 순질량의 비율을 검토해 본 결과 반월천 0.079%, 안산천 0.163%, 화정천 0.461%, 신길천 0.473%로 전체 고형물의 1%이내인 극히 일부만이 미세플라스틱으로 구성되었음을 알 수 있다. 또한 그림 14에 나타난 바와 같이 각 하천에 대한 부유물질 및 미세플라스틱 순질량 측정 결과를 그래프를 통해 비교한 결과 부유물질의 농도가 낮을수록 미세플라스틱 순질량과의 편차가 작아지면서 상관관계가 높아지는 것으로 판단된다. 비록 본 연구에서 검토한 표본의 수가 적고 높은 부유물질 농도에서의 편차가 크게 나타나 명확하게 부유물질과 미세플라스틱양과의 상관관계가 있다고 판단하기는 어렵지만 모래와 같은 비중 물질의 분리를 통한 부유물질과의 비교나 다른 사례들의 분석을 통해 많은 데이터를 확보하고 검증한다면 두 인자간의 상관관계를 확인할 수 있을 것으로 판단된다.

표 7. 하천별 300 μm 이하 부유물질 농도 분석 결과

시료명	신길천	반월천	안산천	화정천
농도 ($\mu\text{g}/100\text{L}$)	4,500	43,667	36,667	4,667

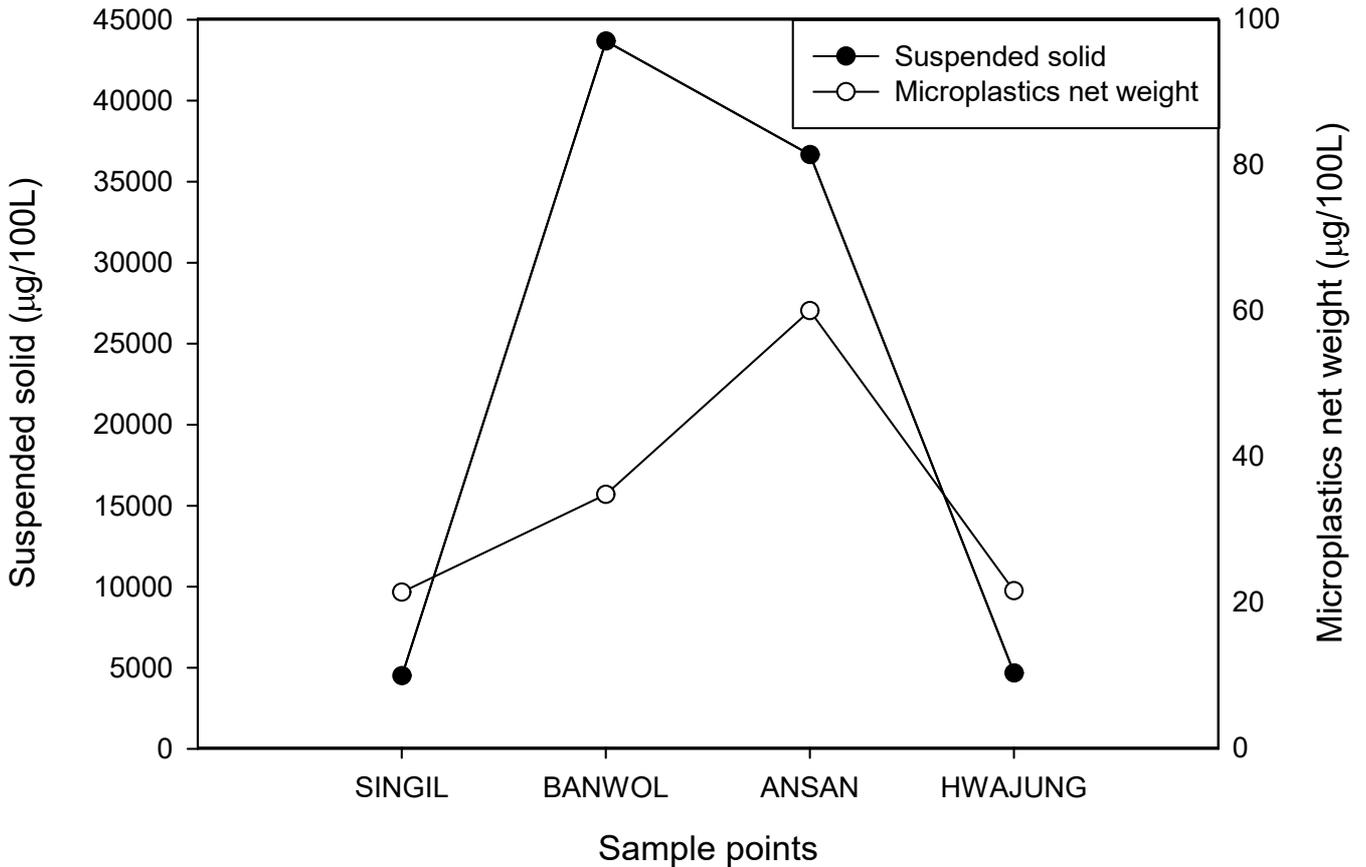


그림 15. 안산시 수계 하천 부유물질 및 미세플라스틱 순질량 측정 결과 비교

4.1.2 안산시 수계 하천 및 간선수로 퇴적토 미세플라스틱 오염도 조사

4.1.2.1 개요

최근 몇 년간 하천이나 강과 같은 수계에 존재하는 미세플라스틱의 오염현황을 분석하는 연구는 광범위하게 연구되고 있다. 그러나 하천과 강바닥의 퇴적토 내 미세플라스틱 오염도를 분석하는 연구는 부족한 실정이다. 그림 15는 담수환경에서의 퇴적물에 대한 미세플라스틱 오염경로를 나타낸 것이다. 미세플라스틱은 주거지역, 상업지역, 산업단지과 도로 및 농업지역 등에서 유입되는

것으로 판단되고 있으며, 점오염원 및 비점오염원에서 유입되고 있어서 오염경로를 단정하기에는 어려움이 있다. 위와 같은 경로로 미세플라스틱이 수계로 유입된 후 퇴적토에 침전되면 강우 시 다량의 미세플라스틱이 해양으로 유출될 수 있다. 또한, 주로 다수의 연구가 하천 및 호소의 표층수 내 미세플라스틱 분석을 진행하면서 퇴적토 내 미세플라스틱 오염현황 연구는 미비한 상황이었어서 하천 및 호소 내 미세플라스틱 오염현황을 정확히 파악하는데 어려움이 있다. 최근 국내에서도 표층수에 대한 미세플라스틱 연구뿐만 아니라 퇴적토에 대한 연구도 한강수계를 기점으로 점차 확장되며 수행되고 있으며 본 연구에서도 이러한 물환경 매체별 오염수준 파악 및 미세플라스틱의 수계내 분포·거동 특성을 이해하기 위해 안산시 수계 하천 및 간선수로에 대한 퇴적토 미세플라스틱 오염도 조사를 수행하였다.

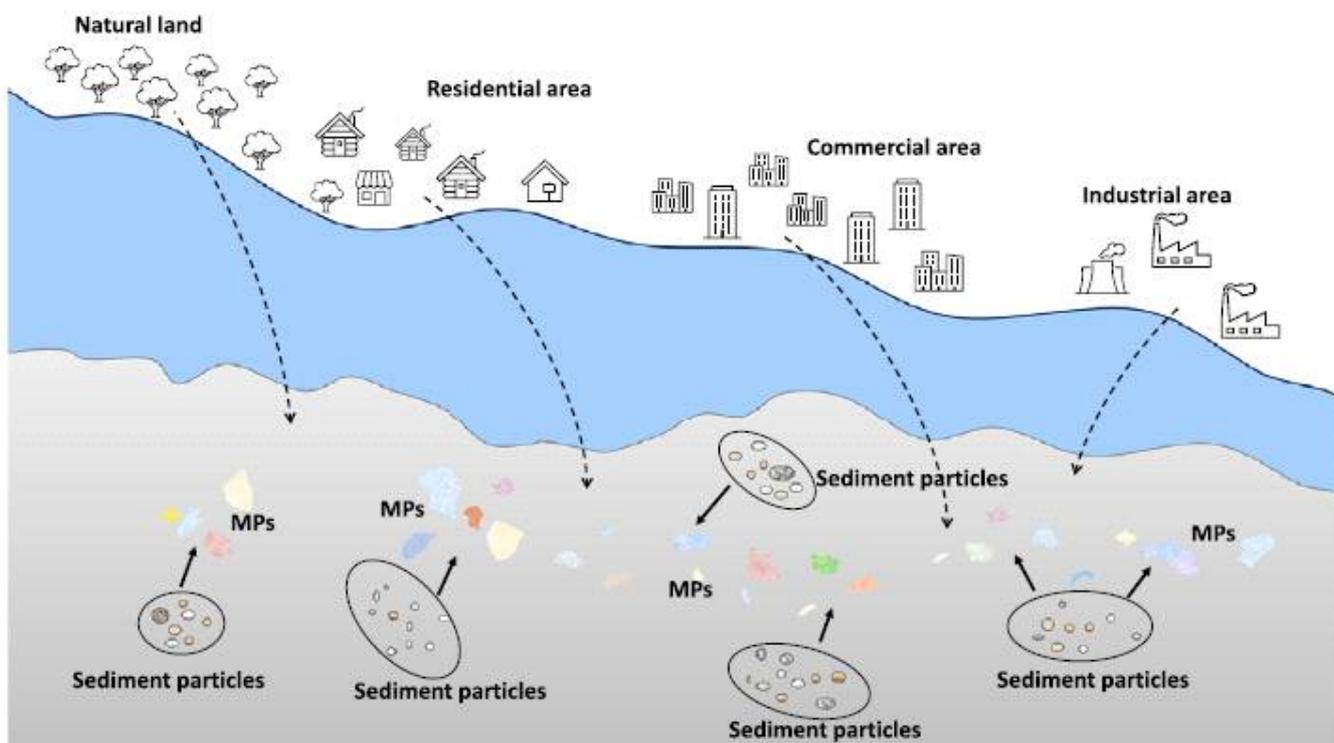


그림 16. 퇴적토 내 미세플라스틱 오염경로

4.1.2.2 미세플라스틱 분석을 위한 하천 및 간선수로 퇴적토 채취

그림 16은 수계내 퇴적토의 미세플라스틱 분석을 위한 현장 샘플 채취과정을 나타낸 것이다. 샘플링 지점은 각 대상 하천 및 간선수로의 하류지점으로 선정하였으며, 퇴적토의 채취는 연구자가 직접 하천 및 간선수로 폭의 중앙부분에 최대한 접근하여 수집할 수 있도록 하였다. 퇴적토의 수집은 스테인리스재질의 토양수집도구를 이용하여 수계 바닥의 20cm 이내 깊이의 퇴적토를 채취하였으며 수집된 퇴적토는 부피 500ml의 채집용 유리병에 담아 실험실로 운반하였다.



그림 17. 대상 수계 퇴적물 채취 과정

표7은 각 하천 및 간선수로 샘플링이 진행된 지점과 측정시기, 기상상황을 나타낸 것이다. 안산시 하천 및 간선수로는 서해안에 매우 인접해 있어 지류의 하류지점은 해수에 대한 영향이 발생할 수 있다. 따라서 모든 샘플링 지점은 해수에 대한 영향이 없도록 선정하였으며, 하천보다 시화호에 더욱 인접해 있는 간선수로의 경우 샘플링 지점과 더불어 조수간만에 의한 해수의 영향으로 만조시간대에는 수로의 중앙부분에 접근하기 어렵기 때문에 시화호의 간조시간에 맞추어 샘플링을 진행할 수 있도록 하였다. 또한 강우에 의한 영향을 배제하기 위해 기상상황이 맑은 날을 선택하여 샘플링을 진행 하였다.

표 8. 하천 및 간선수로 샘플링 진행 지점, 시기, 기상 현황

대상 하천 및 간선수로	샘플링 지점	측정시기	기상현황
반월천	반월 TMS 인근 (경기도 안산시 상록구 팔곡이동 88-7 주변)	2021.6.16. 오전 11시경	맑음 (건기)
신길천	대양제지 인근 (경기도 안산시 신길동 1062-1 주변)	2021.6.16. 오전 11시경	맑음 (건기)
안산천	월피교 인근 (경기도 안산시 단원구 고잔동 542-3 주변)	2021.6.16. 오후 12시경	맑음 (건기)
화정천	안산문화예술의전당 앞 (경기도 안산시 단원구 고잔1동 817 화정천동로 주변)	2021.6.16. 오전 12시경	맑음 (건기)
1간선수로 옥구천	옥구 8교 북단 인근	2021.6.16. 오후 3시경	맑음 (건기)
2간선수로 군자천	군자 8교 북단 인근	2021.6.16. 오후 3시경	맑음 (건기)
3간선수로 정왕천	정왕 8교 북단 인근	2021.6.16. 오후 4시경	맑음 (건기)
4간선수로 성곡천	시흥 8교 북단 인근	2021.6.16. 오후 4시경	맑음 (건기)

4.1.2.3 미세플라스틱 분석을 위한 퇴적물 시료의 전처리

그림 17은 위와 같은 과정을 통해 각 지점에서 수집된 퇴적물 나타낸 것이다. 수집된 퇴적물은 자갈이나 모래 등 부피가 큰 비중 물질을 제거하고 입도분리를 원활히 하기 위해 100℃ 오븐에서 72시간 이상 건조과정을 거쳐 수분을 모두 제거하였다. 수분이 제거된 하천별 퇴적물은 그림 18에 나타난 바와 같이 75mm × 20mm 크기의 스테인레스 표준망체를 이용하여 300µm이하의 고형물만을 분리하는 과정을 거쳐 미세플라스틱 분석을 위한 시료를 준비하였다.

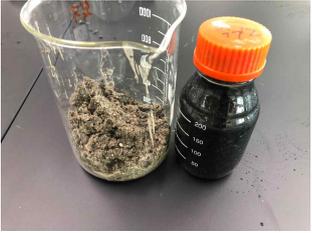
		
	반월천	화정천
전체		
	안산천	신길천
		
옥구천	군자천	정왕천
		
		성곡천

그림 18. 하천 및 간선수로 채취 퇴적물과 건조 후 퇴적물



그림 19. 300 μm 거름망 분리 및 수집된 고형물

이와 같이 수집된 고형물에는 다양한 유기물이 포함되어 있으며 미세플라스틱 표면을 둘러싸고 있는 유기물질은 미세플라스틱의 정성·정량 분석 시 방해물질로 작용하기 때문에 이러한 유기물질의 제거를 위한 전처리가 필요하다. 전처리 과정에 앞서 측정을 위한 고형물의 미세플라스틱 비율을 높이기 위해 ZnCl_2 용액을 이용하여 밀도 1.5g/ml 이상의 고형물에 대한 밀도/비중 분리과정을 거쳤으며, 분리된 각각의 시료는 20 μm 의 여과지에 진공펌프를 이용한 감압여과 과정을 통해 여과하였다. 1차여과가 완료된 시료는 방해물질이 되는 유기물의 산화를 위해 30% 과산화수소 수용액을 이용해 70 $^{\circ}\text{C}$ 에서 24시간 이상 가열교반 전처리를 진행한 후 2차여과하여 FT-IR 분석에 사용하였다.

4.1.2.4 하천 및 간선수로 퇴적물 시료의 미세플라스틱 FT-IR 분석

본 연구에서의 FT-IR 분석은 microscope IR을 통해 분석된 고형물 입자를 Focal Plane Array image mapping을 적용하여 750~4,000 cm^{-1} 을 4 cm^{-1} 의 resolution으로 분석하였다. 또한 데이터해석은 SIMPLE software를 사용하였으며 data library와 비교하여 3,500~2,700 cm^{-1} 구간 매칭률 60%이상, 1,800~1,000 cm^{-1} 구간 매칭률 40%이상 되는 스펙트럼을 분석하였다. 분석에 사용된 시료의 양은 전처리 전 건조시료의 무게를 기준으로 0.5g 으로 통일하여 분석하였다.

그림 19는 각 하천 퇴적물 시료에 대해 현미경으로 촬영한 여과시료를 나타낸 것이다. 현미경으로 촬영한 여과시료를 확인한 결과 하천시료 중에서는 안산천, 간선수로시료에서는 옥구천, 정왕천 시료에서 육안으로 관찰 가능한 많은 양의 미세 고형물이 관찰되었다. 또한 그림 20과 같이

image mapping 프로그램을 활용하여 분석된 각 하천 및 간선수로 퇴적토시료에 대한 고형물의 형태 및 크기를 표현한 spectra map을 분석한 결과 특이점 없이 다양한 크기와 형태의 고형물이 무작위로 존재하는 것으로 나타났다.

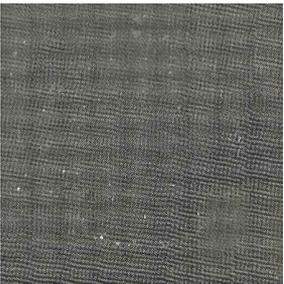
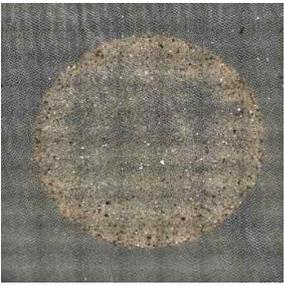
하천				
	신길천	반월천	안산천	화정천
간선수로				
	옥구천	군자천	정왕천	성곡천

그림 20. 현미경으로 관찰한 각 하천별 고형물

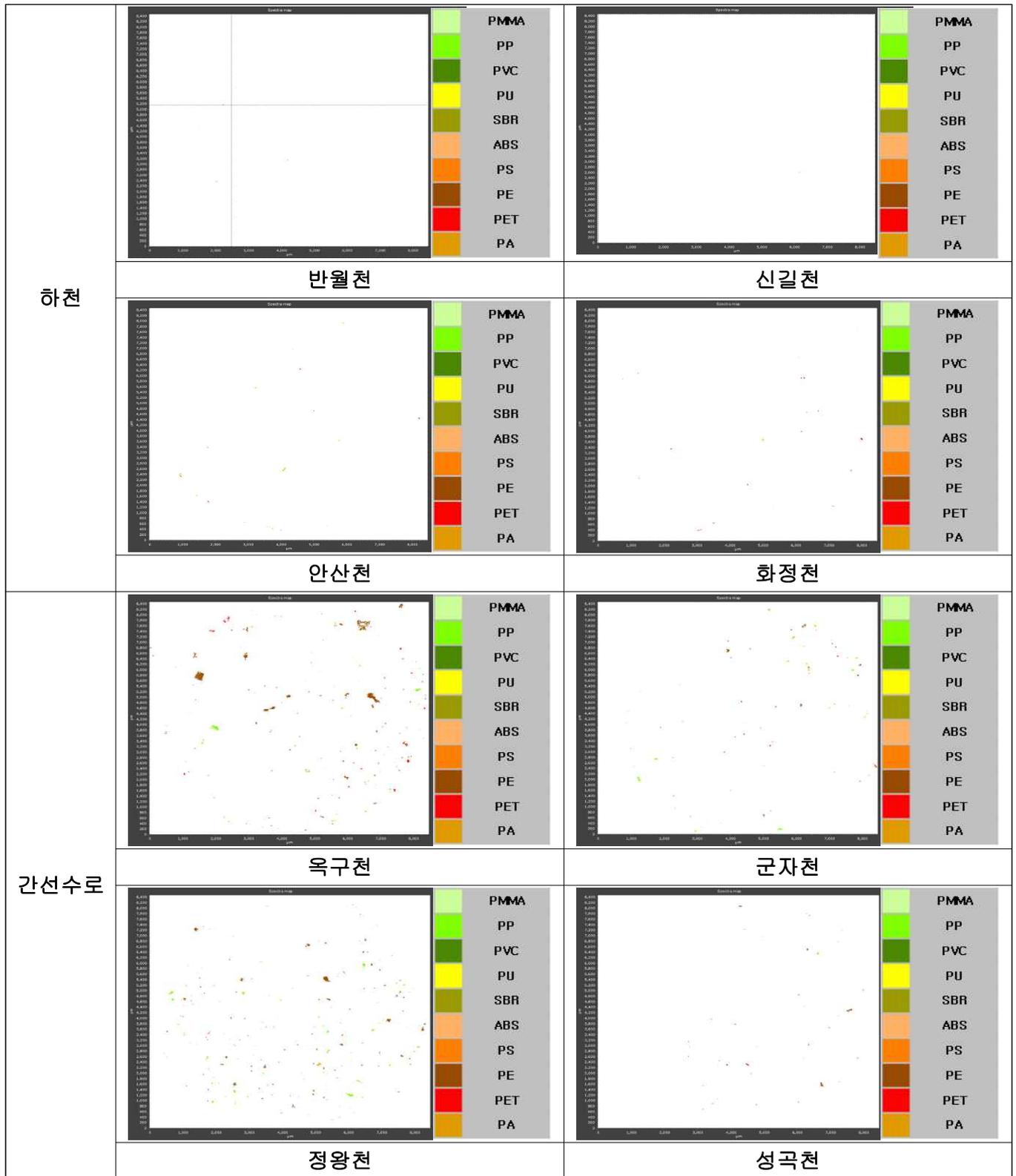


그림 21. 각 하천별 고형물 spectra map

표 8은 현미경 분석 및 image mapping 분석을 통해 각각의 시료에 대한 미세플라스틱의 정량 분석결과를 나타낸 것이다. 분석결과 하천퇴적물 시료에서는 신길천 시료에서 3개/0.5g, 반월천 시료에서 6개/0.5g, 안산천 시료에서 23개/0.5g, 화정천 시료에서 23개/0.5g의 미세플라스틱 추정물질이 검출되었다. 또한 간선수로 퇴적물 시료에서는 옥구천 시료에서 217개/0.5g, 군자천 시료에서 93개/0.5g, 정왕천 시료에서 216개/0.5g, 성곡천 시료에서 54개/0.5g 검출되어 간선수로 퇴적물이 하천 퇴적물에 비해 퇴적되어 있는 미세플라스틱이 많이 존재하는 것으로 나타났다.

표 9. 각 수계 하천 및 간선수로 별 퇴적물 시료 미세플라스틱 정량분석 결과

구분 \ 시료명	신길천	반월천	안산천	화정천
시료량	0.5g	0.5g	0.5g	0.5g
개수	3개	6개	23개	23개
구분 \ 시료명	옥구천	군자천	정왕천	성곡천
시료량	0.5g	0.5g	0.5g	0.5g
개수	218개	93개	217개	54개

4.1.2.5 하천 및 간선수로 퇴적물 시료의 미세플라스틱 정성 분석

다음은 하천 및 간선수로 퇴적물 시료의 미세플라스틱 정성분석 결과이다. 먼저 하천 퇴적물에 대한 미세플라스틱 정성분석을 진행한 결과를 나타내었다. 신길천의 경우 그림 21에 나타난 바와 같이 Polypropylene (PP), Poly methyl methacrylate (PMMA)로 총 2종의 미세플라스틱이 검출되었다. 검출된 플라스틱에서는 PP가 2개로 66.7%, PMMA 가 각각 1개로 33.3%의 비율 순으로 확인되었다. 신길천 하천수에 포함된 미세플라스틱 정량분석 결과와 비교해 보면 7종의 미세플라스틱이 검출된 하천수 시료에 비해 단 2종의 미세플라스틱만이 검출되어 비교적 차이가 크게 나타났다.

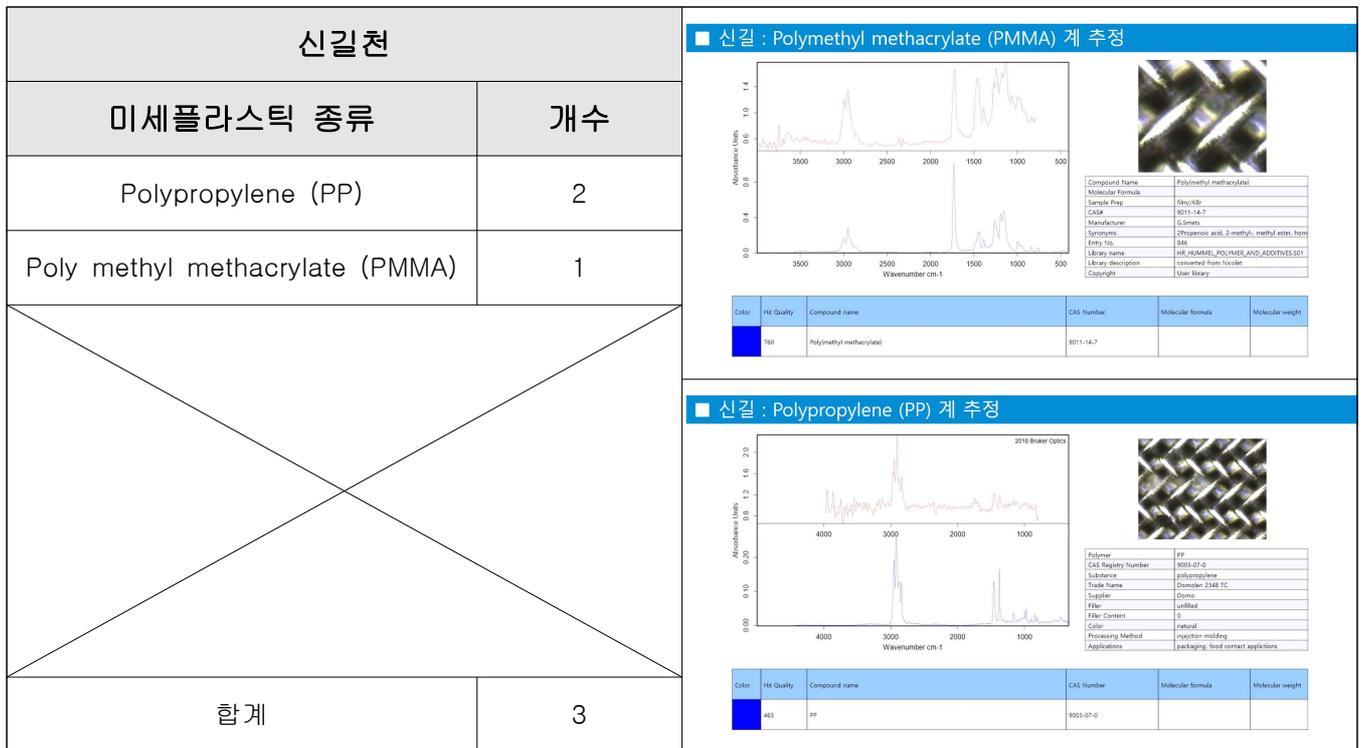


그림 22. 신길천 미세플라스틱 정성분석 결과

반월천의 경우 그림 22에 나타난 바와 같이 Polypropylene (PP), Polystyrene (PS), Polyamide (PA), Polymethyl methacrylate(PMMA)로 총 4종의 미세플라스틱이 검출되었다. 검출된 플라스틱에서는 PP가 3개로 전체 중 50.0%의 가장 많은 비율로 검출되었고 PS가 1개로 16.7%, PA가 1개로 16.7%, PMMA가 1개로 16.7%의 비율 순으로 확인되었다. 반월천 하천수에 포함된 미세플라스틱 정량분석 결과와 비교해 보면 5종의 미세플라스틱이 검출된 하천수 시료에 비해 PE와 PET가 제외되고 PMMA가 검출되는 결과를 나타냈다.

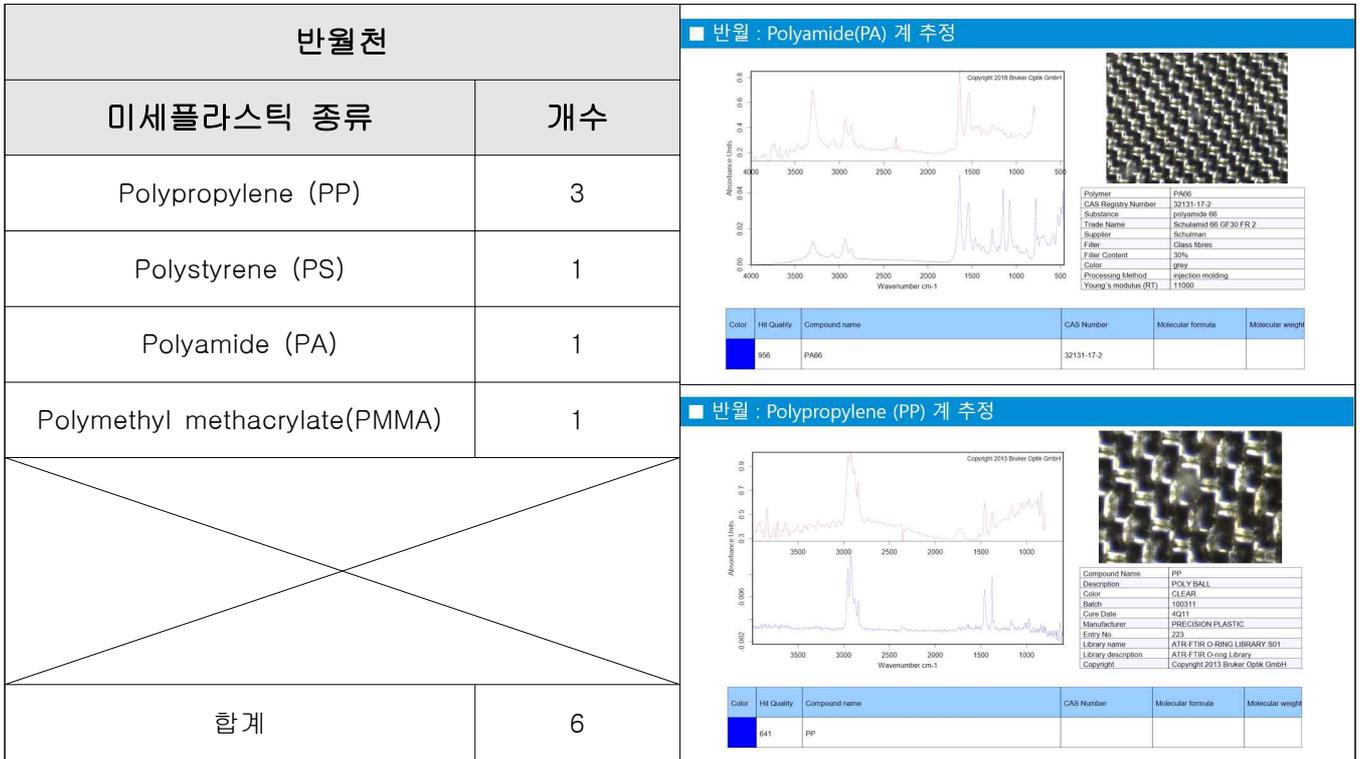
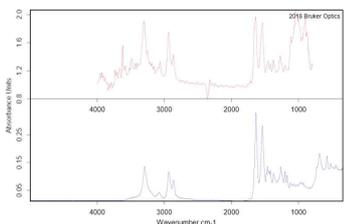
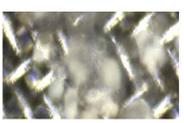
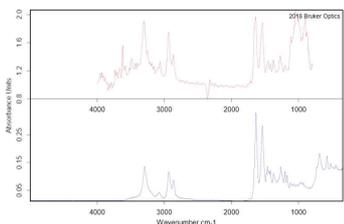
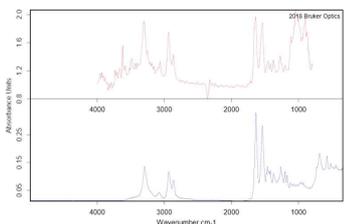
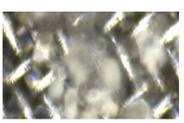
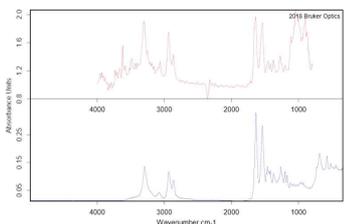
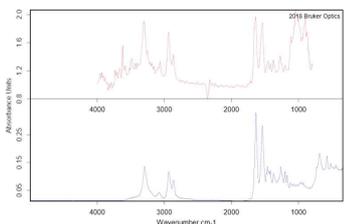
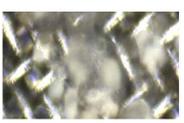
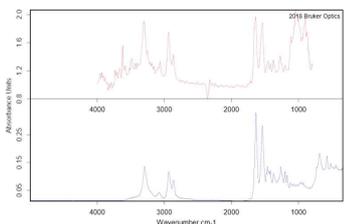
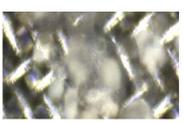
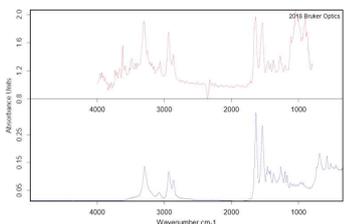
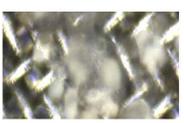
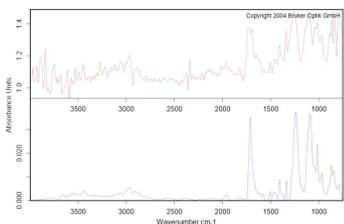
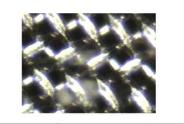
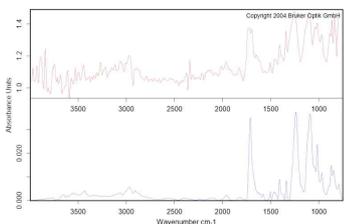
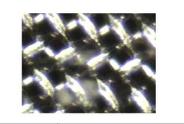
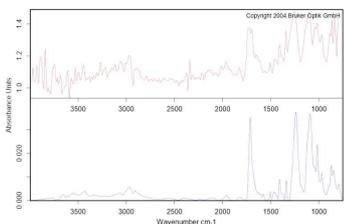
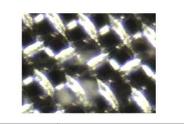
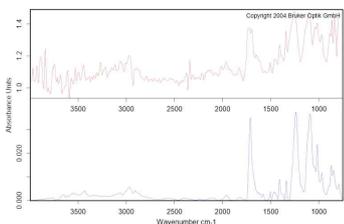
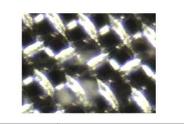
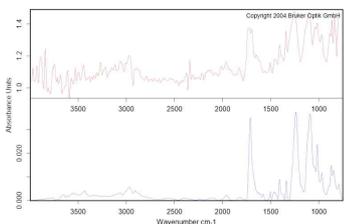
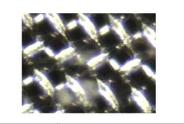
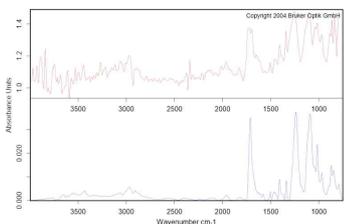
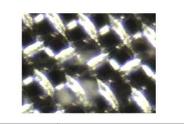
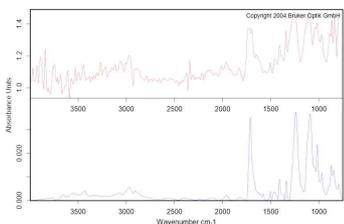
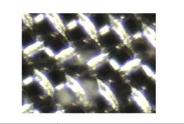
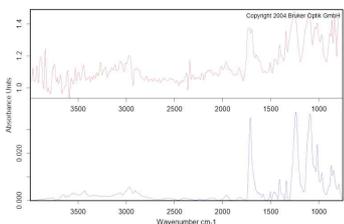
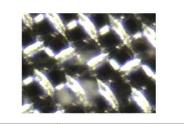
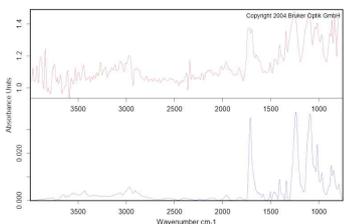
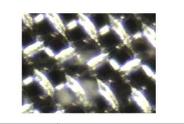
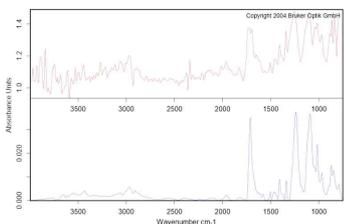
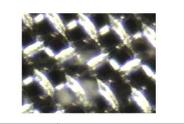
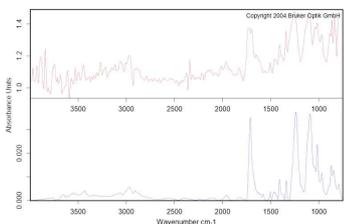
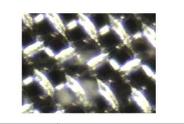
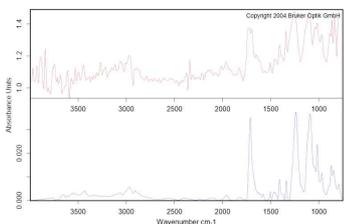
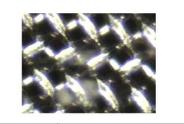
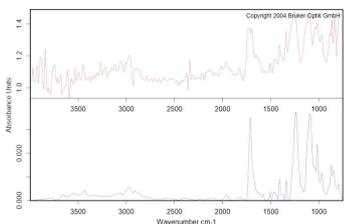
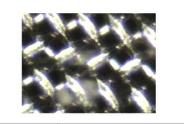
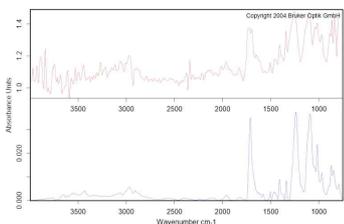
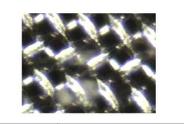
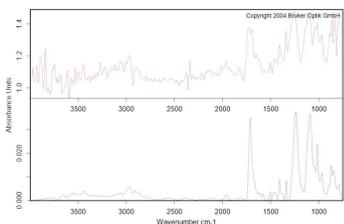
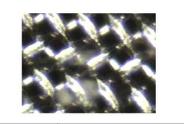
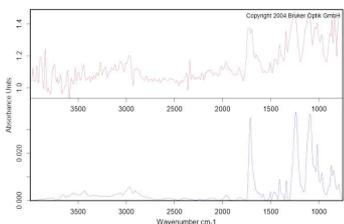
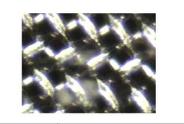
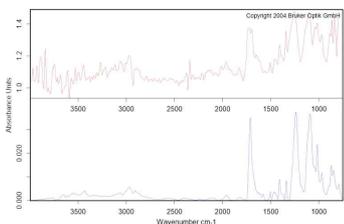
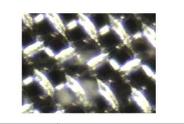
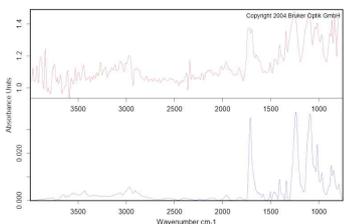
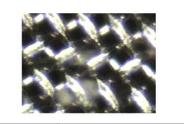
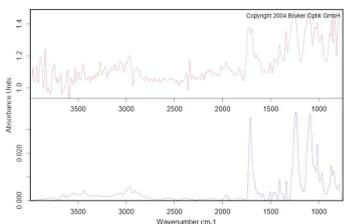
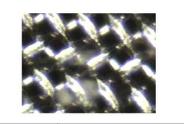
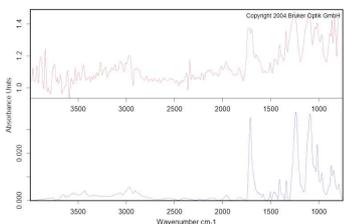
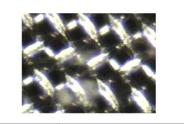
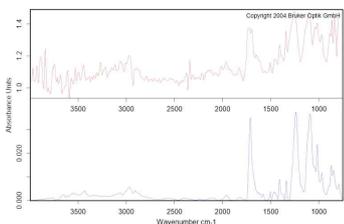
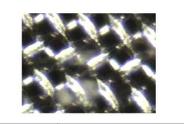
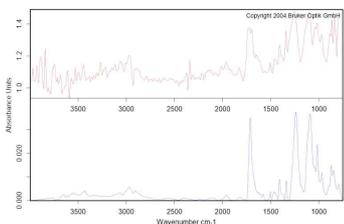
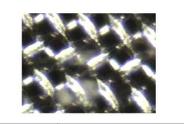
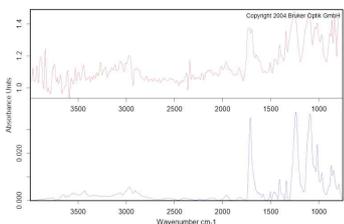
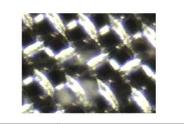
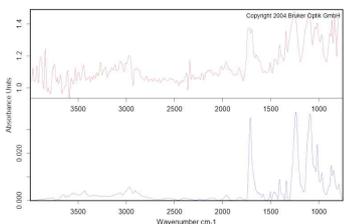
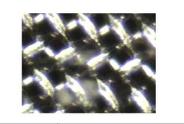
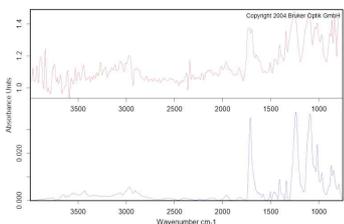
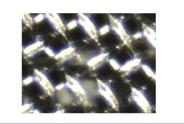
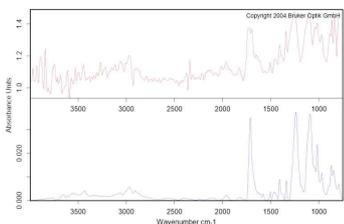
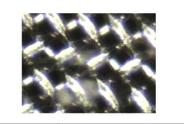
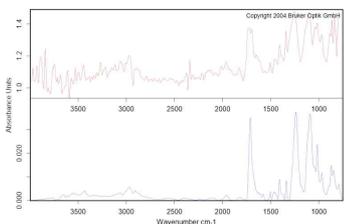
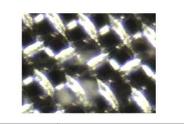
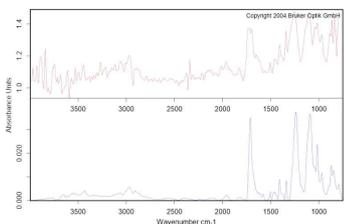
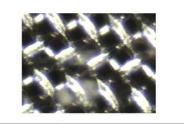
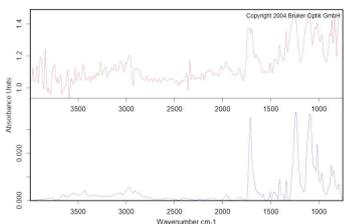
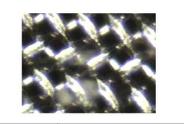
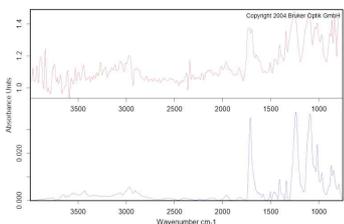
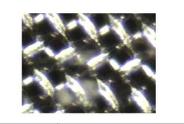
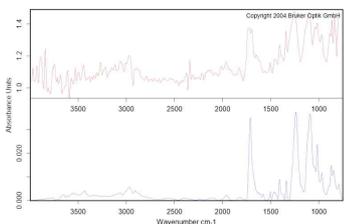
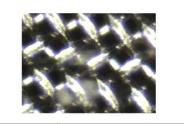
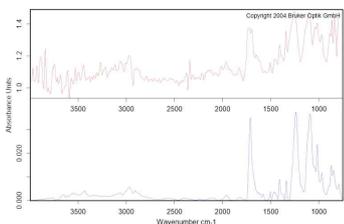
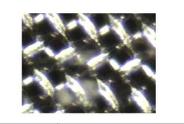
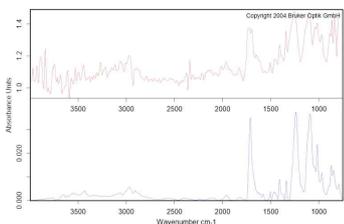
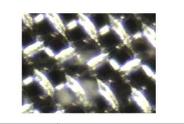
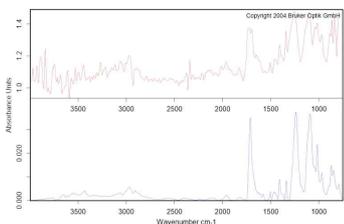
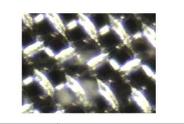
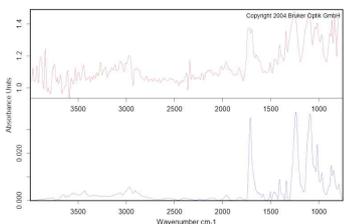
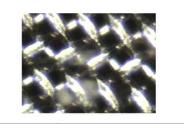
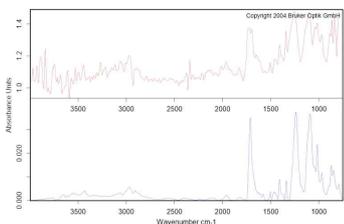
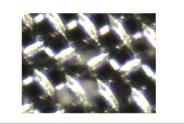
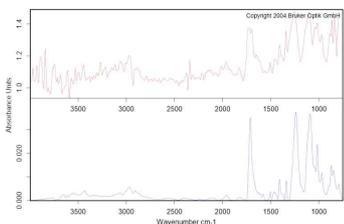
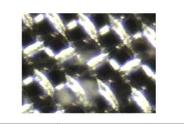
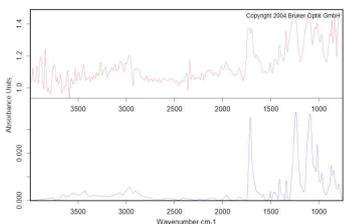
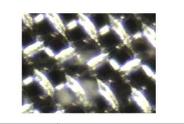
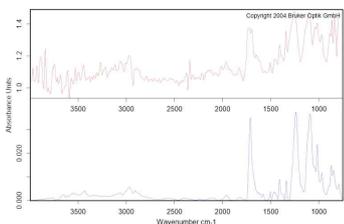
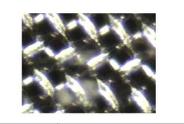
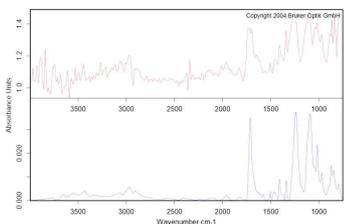
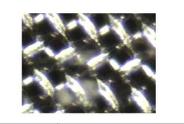
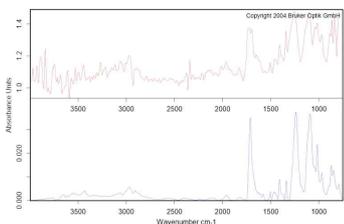
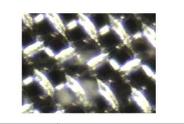
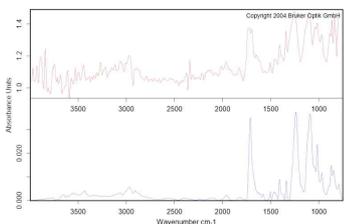
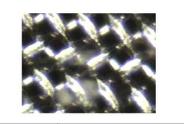
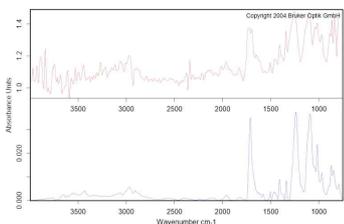
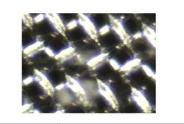
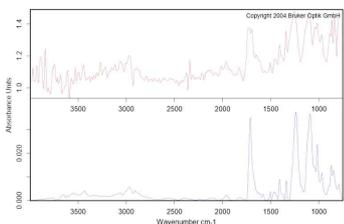
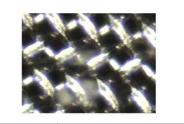
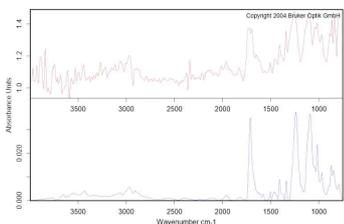
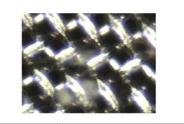
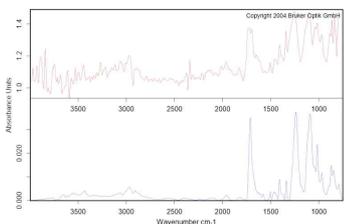
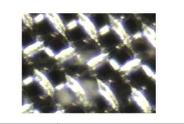
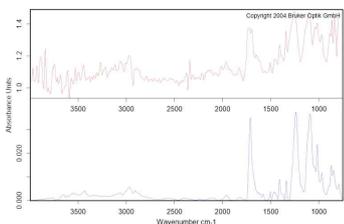
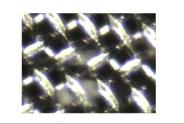
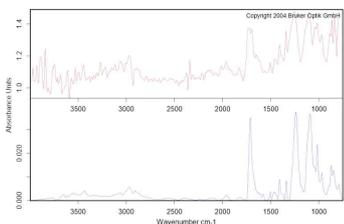
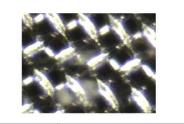
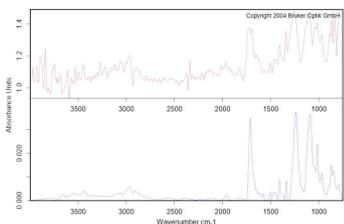
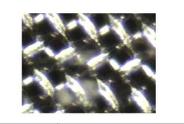
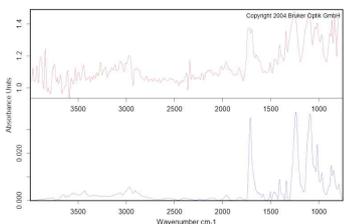
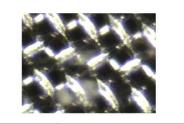
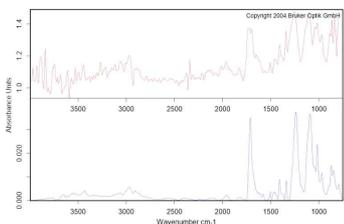
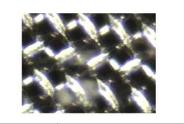
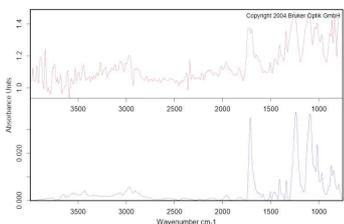
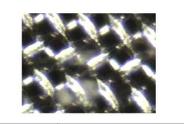
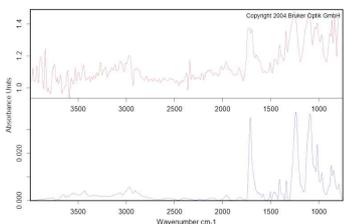
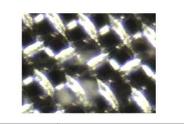
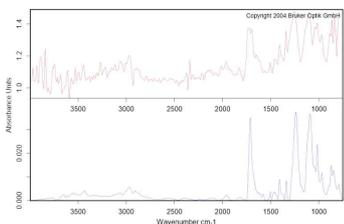
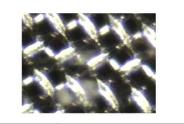
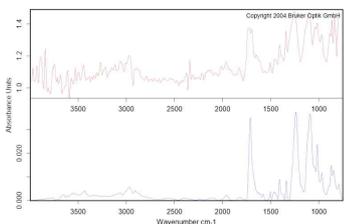
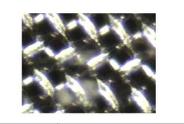
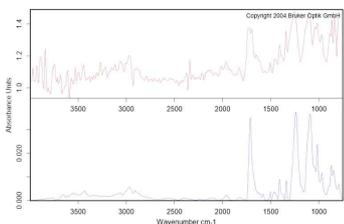
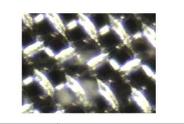
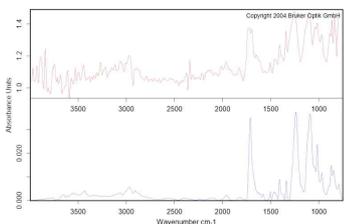
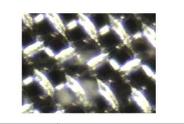
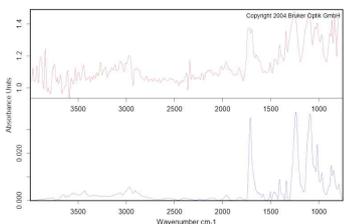
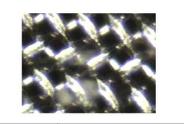
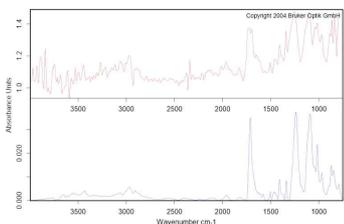
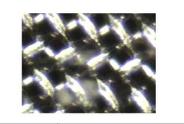
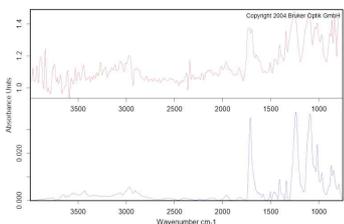
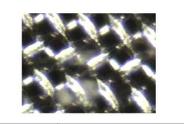
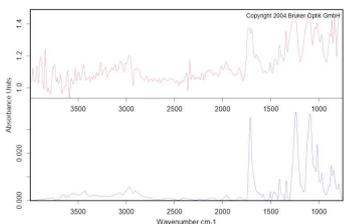
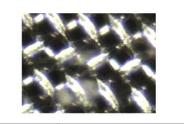
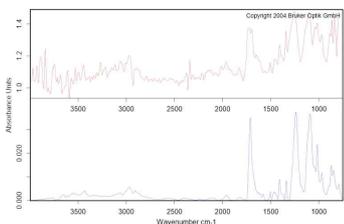
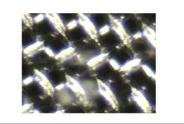
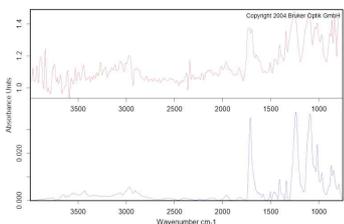
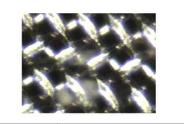
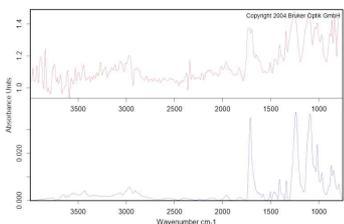
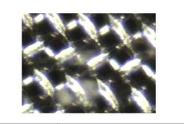
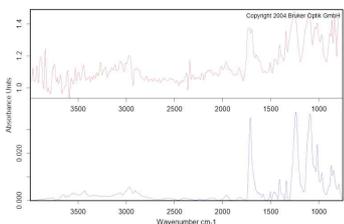
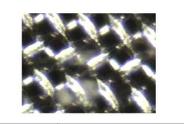
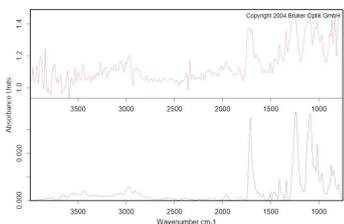
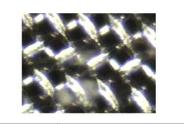
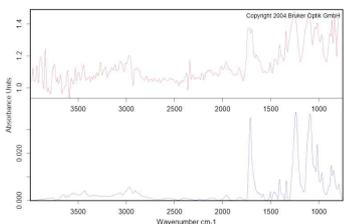
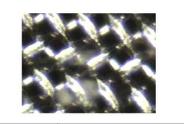
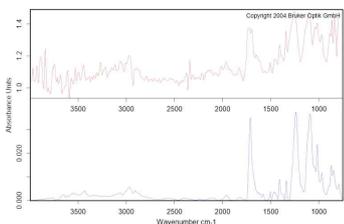
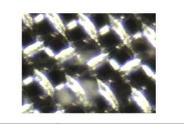
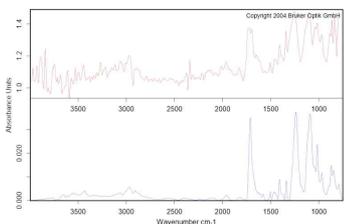
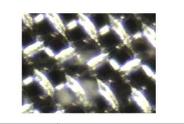
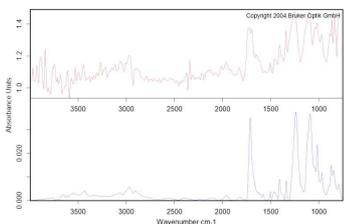
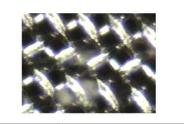
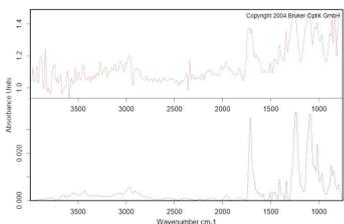
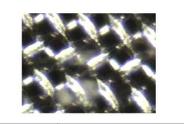
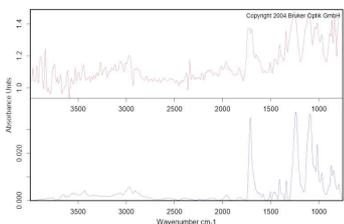
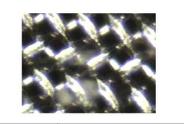
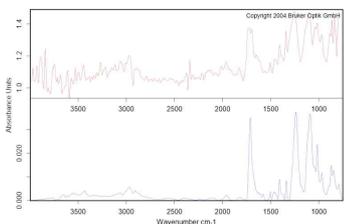
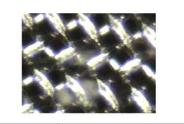
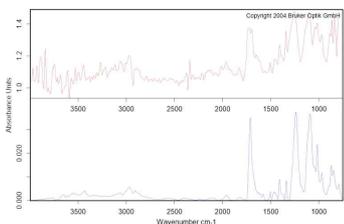
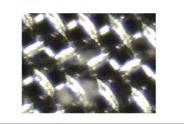
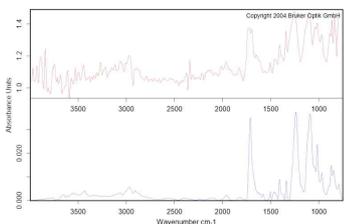
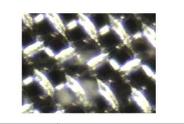
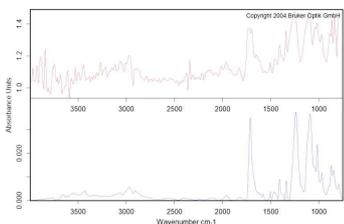
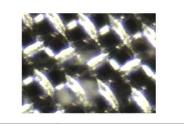
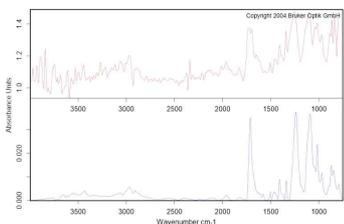
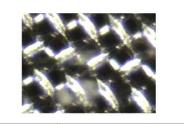
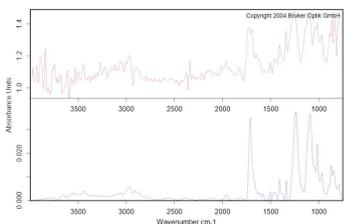
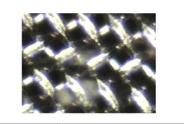
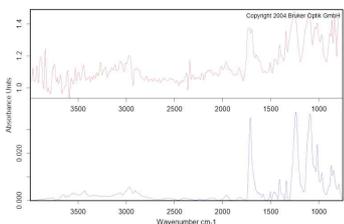
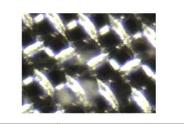
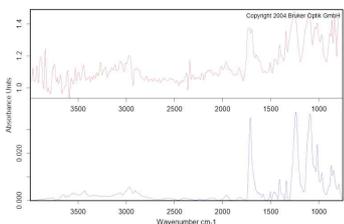
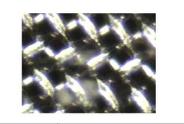
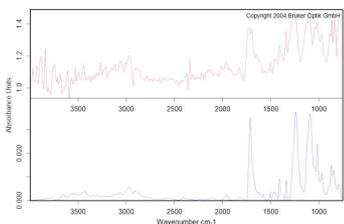
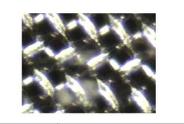
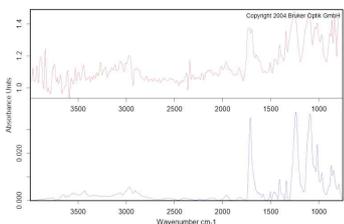
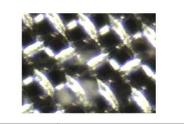
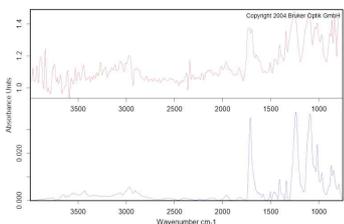
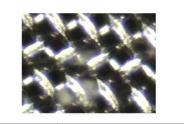
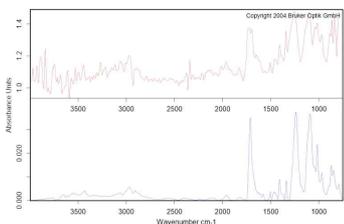
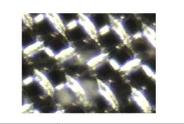
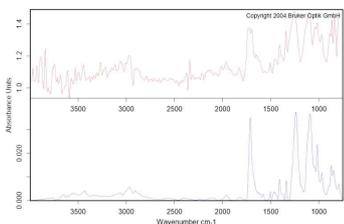


그림 23. 반월천 미세플라스틱 정성분석 결과

안산천의 경우 그림 23에 나타난 바와 같이 Polypropylene (PP), Polyethylene (PE), Polyethylene terephthalate (PET), Polyamide (PA)로 총 4종의 미세플라스틱이 검출되었다. 검출된 플라스틱에서는 PP가 10개로 전체 중 43.5%의 가장 많은 비율로 검출되었고 PE가 3개로 13.0%, PET가 3개로 13.0%, PA가 7개로 30.4%의 비율 순으로 확인되었다. 안산천 하천수에 포함된 미세플라스틱 정량분석 결과와 비교해 보면 5종의 미세플라스틱이 검출된 하천수 시료에 비해 Polystyrene (PS)를 제외하고는 공통되게 검출되는 결과를 나타냈다.

안산천		■ 안산 : Polyamide(PA) 계 추정				
미세플라스틱 종류	개수					
Polypropylene (PP)	10					
Polyethylene (PE)	3					
Polyethylene terephthalate (PET)	3					
Polyamide (PA)	7					
X						
합계	23					
		■ 안산 : Polyethylene terephthalate (PET) 계 추정				
						
						
						
						
						
						
						
						
						
						
						
						
						
						
						
						
						
						
						
						
						
						
						
						
						
						
						
						
						
						
						
						
						
						
						
						
						
						
						
						
						
						
						
						
						
						
						
						
						
						
						
						
						
						
						
						
						
						
						
						
						
						
						
						
						
						
						
						
						
						
						
						
						
						
						
						
						
						
						
						
						
						
						
						
						

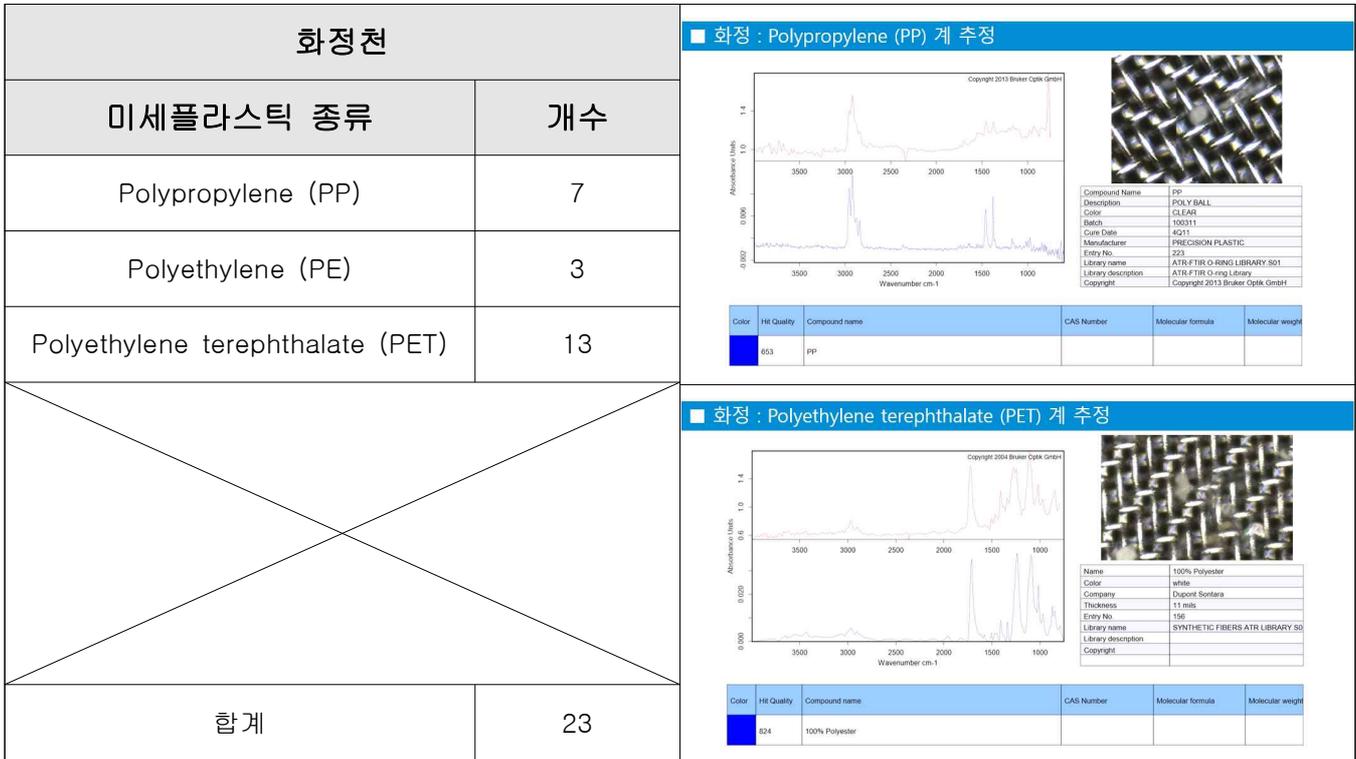


그림 25. 화정천 미세플라스틱 정성분석 결과

다음은 간선수로 퇴적물에 대한 미세플라스틱 정성분석을 진행한 결과를 나타내었다. 먼저 1간선수로 옥구천의 경우 그림 25에 나타난 바와 같이 Polypropylene (PP), Polyethylene (PE), Polyethylene terephthalate (PET), Polyamide (PA), Polymethyl methacrylate (PMMA), Polyvinyl chloride (PVC)로 총 6종의 미세플라스틱이 검출되었다. 검출된 플라스틱에서는 PP가 88개로 전체 중 40.4%의 가장 많은 비율로 검출되었고 PE가 84개로 38.5%, PET가 29개로 13.3%, PA가 11개로 5.0%, PMMA와 PVC가 각 3개로 1.4%의 비율 순으로 확인되었다. 1간선수로 표층수에 포함된 미세플라스틱 정량분석 결과와 비교해 보면 6종의 미세플라스틱이 검출된 간선수로 수 시료에 비해 Polystyrene (PS)를 제외하고는 PMMA가 새롭게 검출되었으며 나머지 미세플라스틱 성분의 경우 공통되게 검출되는 결과를 나타냈다.

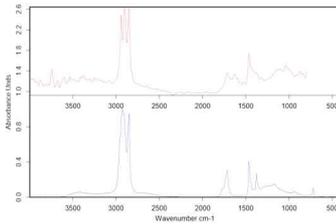
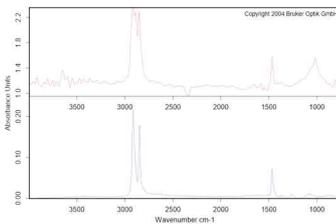
1간선수로 (옥구천)		■ 옥구 : Polypropylene (PP) 계 추정																																				
미세플라스틱 종류	개수																																					
Polypropylene (PP)	88	<table border="1"> <tr><td>Compound name</td><td>Poly(ethylene propylene), 75 mol% E</td></tr> <tr><td>Molecular Formula</td><td>fm(X)n_Cm</td></tr> <tr><td>Sample Prep</td><td></td></tr> <tr><td>CAS#</td><td>9010-29-1</td></tr> <tr><td>Manufacturer</td><td>Polymer 9,32(1969)</td></tr> <tr><td>Synonyms</td><td>Ethylene(propylene copolymer, poly(ethy</td></tr> <tr><td>Entry No.</td><td>277</td></tr> <tr><td>Library name</td><td>IR_LIBRARY_POLYMER_AND_ADDIT</td></tr> <tr><td>Library description</td><td>converted from Nicotol</td></tr> <tr><td>Copyright</td><td>User library</td></tr> </table>		Compound name	Poly(ethylene propylene), 75 mol% E	Molecular Formula	fm(X)n_Cm	Sample Prep		CAS#	9010-29-1	Manufacturer	Polymer 9,32(1969)	Synonyms	Ethylene(propylene copolymer, poly(ethy	Entry No.	277	Library name	IR_LIBRARY_POLYMER_AND_ADDIT	Library description	converted from Nicotol	Copyright	User library	<table border="1"> <thead> <tr> <th>Color</th> <th>IR Quality</th> <th>Compound name</th> <th>CAS Number</th> <th>Molecular formula</th> <th>Molecular weight</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>blue</td> <td>940</td> <td>Poly(ethylene propylene), 75 mol% E</td> <td>9010-29-1</td> <td></td> <td></td> </tr> </tbody> </table>			Color	IR Quality	Compound name	CAS Number	Molecular formula	Molecular weight	blue	940	Poly(ethylene propylene), 75 mol% E	9010-29-1		
Compound name	Poly(ethylene propylene), 75 mol% E																																					
Molecular Formula	fm(X)n_Cm																																					
Sample Prep																																						
CAS#	9010-29-1																																					
Manufacturer	Polymer 9,32(1969)																																					
Synonyms	Ethylene(propylene copolymer, poly(ethy																																					
Entry No.	277																																					
Library name	IR_LIBRARY_POLYMER_AND_ADDIT																																					
Library description	converted from Nicotol																																					
Copyright	User library																																					
Color	IR Quality	Compound name	CAS Number	Molecular formula	Molecular weight																																	
blue	940	Poly(ethylene propylene), 75 mol% E	9010-29-1																																			
Polyethylene (PE)	84	■ 옥구 : Polyethylene (PE) 계 추정																																				
Polyethylene terephthalate (PET)	29																																					
Polyamide (PA)	11	<table border="1"> <tr><td>Name</td><td>Spunbonded Olefin Polyethylene</td></tr> <tr><td>Color</td><td>white</td></tr> <tr><td>Company</td><td>Dupont Tyvek</td></tr> <tr><td>Thickness</td><td>6 mils</td></tr> <tr><td>Entry No.</td><td>178</td></tr> <tr><td>Library name</td><td>SYNTHETIC FIBERS ATR LIBRARY 50</td></tr> <tr><td>Library description</td><td></td></tr> <tr><td>Copyright</td><td></td></tr> </table>		Name	Spunbonded Olefin Polyethylene	Color	white	Company	Dupont Tyvek	Thickness	6 mils	Entry No.	178	Library name	SYNTHETIC FIBERS ATR LIBRARY 50	Library description		Copyright		<table border="1"> <thead> <tr> <th>Color</th> <th>IR Quality</th> <th>Compound name</th> <th>CAS Number</th> <th>Molecular formula</th> <th>Molecular weight</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>blue</td> <td>736</td> <td>Spunbonded Olefin Polyethylene</td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> </tbody> </table>			Color	IR Quality	Compound name	CAS Number	Molecular formula	Molecular weight	blue	736	Spunbonded Olefin Polyethylene							
Name	Spunbonded Olefin Polyethylene																																					
Color	white																																					
Company	Dupont Tyvek																																					
Thickness	6 mils																																					
Entry No.	178																																					
Library name	SYNTHETIC FIBERS ATR LIBRARY 50																																					
Library description																																						
Copyright																																						
Color	IR Quality	Compound name	CAS Number	Molecular formula	Molecular weight																																	
blue	736	Spunbonded Olefin Polyethylene																																				
Polymethyl methacrylate (PMMA)	3																																					
Polyvinyl chloride (PVC)	3																																					
합계		218																																				

그림 26. 1간선수로 (옥구천) 미세플라스틱 정성분석 결과

2간선수로 군자천의 경우 그림 26에 나타난 바와 같이 Polypropylene (PP), Polyethylene terephthalate (PET), Polyamide (PA), Polyethylene (PE), Polymethyl methacrylate (PMMA), Polystyrene (PS), Polyvinyl chloride (PVC)로 총 7종의 미세플라스틱이 검출되었다. 검출된 플라스틱에서는 PP가 46개로 전체 중 49.5%의 가장 많은 비율로 검출되었고 PET가 16개로 17.2%, PA가 13개로 14.0%, PE가 11개로 11.8%, PMMA가 5개로 5.4%, PS와 PVC가 각각 1개로 1.1%의 비율 순으로 확인되었다. 2간선수로 표층수에 포함된 미세플라스틱 정량분석 결과와 비교해보면 4종의 미세플라스틱이 검출된 간선수로수 시료에 비해 PMMA, PS, PVC가 새롭게 검출되었으며 나머지 미세플라스틱 성분의 경우 공통되게 검출되는 결과를 나타냈다.

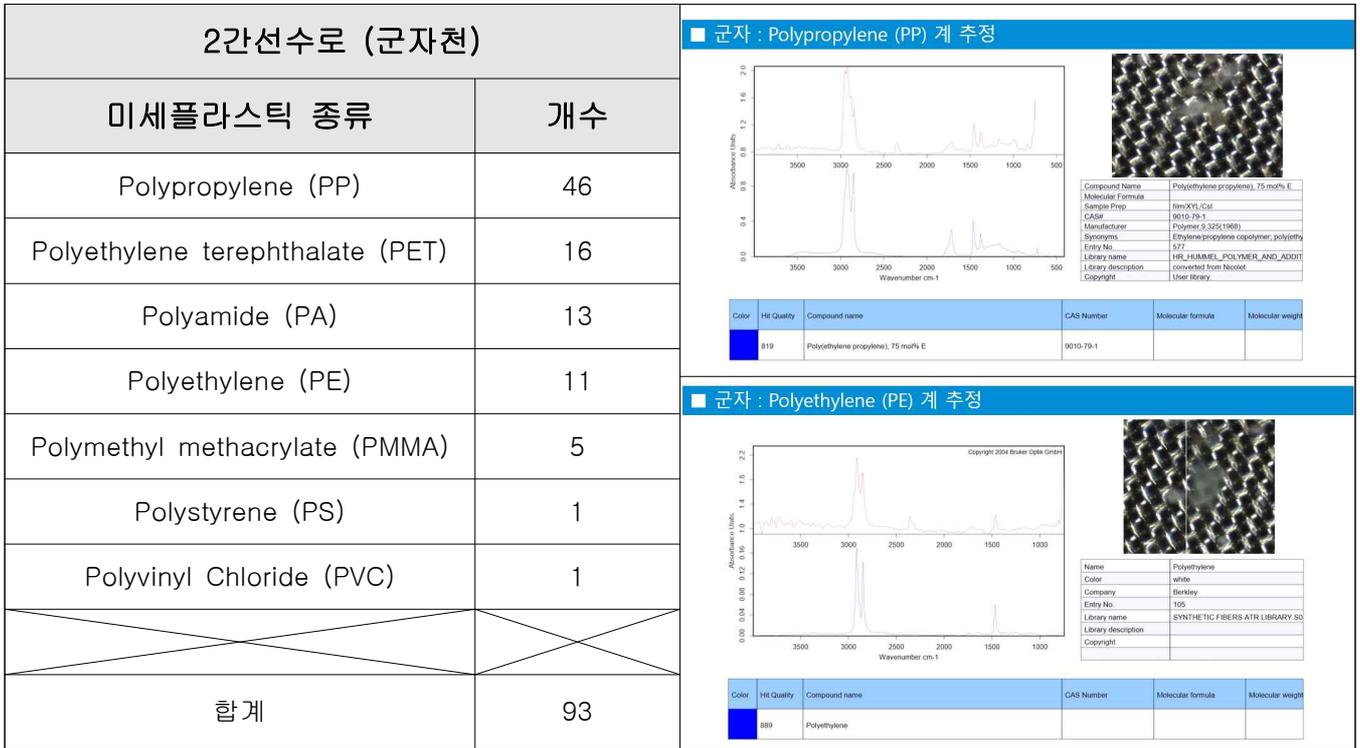


그림 27. 2간선수로 (군자천) 미세플라스틱 정성분석 결과

3간선수로 정량분석의 경우 그림 27에 나타난 바와 같이 Polypropylene (PP), Polyethylene (PE), Polyethylene terephthalate (PET), Polyamide (PA), Polyvinyl chloride (PVC), Polymethyl methacrylate (PMMA)로 총 6종의 미세플라스틱이 검출되었다. 검출된 플라스틱에서는 PP가 125개로 전체 중 57.6%의 가장 많은 비율로 검출되었고 PE가 12개로 29.5%, PA가 8개로 3.7%, PVC가 5개로 2.3%, PMMA가 3개로 1.4%의 비율 순으로 확인되었다. 3간선수로 표층수에 포함된 미세플라스틱 정량분석 결과와 비교해 보면 3종의 미세플라스틱이 검출된 간선수로수 시료에 비해 PET, PA, PMMA가 새롭게 검출되었으며 나머지 미세플라스틱 성분의 경우 공통되게 검출되는 결과를 나타냈다.

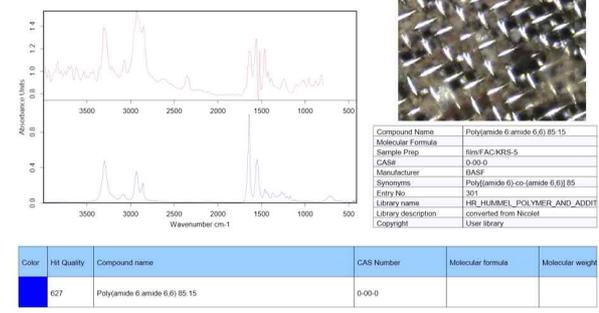
3간선수로 (정왕천)		정왕 : Polyamide(PA) 계 추정																																	
미세플라스틱 종류	개수	 <table border="1"> <tr><td>Compound Name</td><td>Polyamide 6 amide 6,6i,85,15</td></tr> <tr><td>Molecular Formula</td><td></td></tr> <tr><td>Sample Prep</td><td>IR/FAC/MS-5</td></tr> <tr><td>CAS#</td><td>0-00-0</td></tr> <tr><td>Manufacturer</td><td>BASF</td></tr> <tr><td>Synonyms</td><td>Polyamide 6i-co-amide 6,6i,85</td></tr> <tr><td>Entry No.</td><td>301</td></tr> <tr><td>Library name</td><td>IR_HAMMEL_POLYMER_AND_ADDIT</td></tr> <tr><td>Library description</td><td>converted from Nicolet</td></tr> <tr><td>Copyright</td><td>User library</td></tr> </table>	Compound Name	Polyamide 6 amide 6,6i,85,15	Molecular Formula		Sample Prep	IR/FAC/MS-5	CAS#	0-00-0	Manufacturer	BASF	Synonyms	Polyamide 6i-co-amide 6,6i,85	Entry No.	301	Library name	IR_HAMMEL_POLYMER_AND_ADDIT	Library description	converted from Nicolet	Copyright	User library	<table border="1"> <thead> <tr> <th>Color</th> <th>Hit Quality</th> <th>Compound name</th> <th>CAS Number</th> <th>Molecular formula</th> <th>Molecular weight</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Blue</td> <td>027</td> <td>Polyamide 6 amide 6,6i,85,15</td> <td>0-00-0</td> <td></td> <td></td> </tr> </tbody> </table>	Color	Hit Quality	Compound name	CAS Number	Molecular formula	Molecular weight	Blue	027	Polyamide 6 amide 6,6i,85,15	0-00-0		
Compound Name	Polyamide 6 amide 6,6i,85,15																																		
Molecular Formula																																			
Sample Prep	IR/FAC/MS-5																																		
CAS#	0-00-0																																		
Manufacturer	BASF																																		
Synonyms	Polyamide 6i-co-amide 6,6i,85																																		
Entry No.	301																																		
Library name	IR_HAMMEL_POLYMER_AND_ADDIT																																		
Library description	converted from Nicolet																																		
Copyright	User library																																		
Color	Hit Quality	Compound name	CAS Number	Molecular formula	Molecular weight																														
Blue	027	Polyamide 6 amide 6,6i,85,15	0-00-0																																
Polypropylene (PP)	125																																		
Polyethylene (PE)	64																																		
Polyethylene terephthalate (PET)	12																																		
Polyamide (PA)	8	정왕 : Polymethyl methacrylate(PMMA) 계 추정																																	
Polyvinyl Chloride (PVC)	5	 <table border="1"> <tr><td>Compound Name</td><td>Polymethyl methacrylate, 1,2 IT ST</td></tr> <tr><td>Molecular Formula</td><td></td></tr> <tr><td>Sample Prep</td><td>IR/MTC-Cul</td></tr> <tr><td>CAS#</td><td>9011-14-7</td></tr> <tr><td>Manufacturer</td><td>MANOMIX 15, 144(1982)</td></tr> <tr><td>Synonyms</td><td>2Propenoic acid, 2-methyl-, methyl ester</td></tr> <tr><td>Entry No.</td><td>949</td></tr> <tr><td>Library name</td><td>IR_HAMMEL_POLYMER_AND_ADDIT</td></tr> <tr><td>Library description</td><td>converted from Nicolet</td></tr> <tr><td>Copyright</td><td>User library</td></tr> </table>	Compound Name	Polymethyl methacrylate, 1,2 IT ST	Molecular Formula		Sample Prep	IR/MTC-Cul	CAS#	9011-14-7	Manufacturer	MANOMIX 15, 144(1982)	Synonyms	2Propenoic acid, 2-methyl-, methyl ester	Entry No.	949	Library name	IR_HAMMEL_POLYMER_AND_ADDIT	Library description	converted from Nicolet	Copyright	User library	<table border="1"> <thead> <tr> <th>Color</th> <th>Hit Quality</th> <th>Compound name</th> <th>CAS Number</th> <th>Molecular formula</th> <th>Molecular weight</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Blue</td> <td>078</td> <td>Polymethyl methacrylate, 1,2 IT ST</td> <td>9011-14-7</td> <td></td> <td></td> </tr> </tbody> </table>	Color	Hit Quality	Compound name	CAS Number	Molecular formula	Molecular weight	Blue	078	Polymethyl methacrylate, 1,2 IT ST	9011-14-7		
Compound Name	Polymethyl methacrylate, 1,2 IT ST																																		
Molecular Formula																																			
Sample Prep	IR/MTC-Cul																																		
CAS#	9011-14-7																																		
Manufacturer	MANOMIX 15, 144(1982)																																		
Synonyms	2Propenoic acid, 2-methyl-, methyl ester																																		
Entry No.	949																																		
Library name	IR_HAMMEL_POLYMER_AND_ADDIT																																		
Library description	converted from Nicolet																																		
Copyright	User library																																		
Color	Hit Quality	Compound name	CAS Number	Molecular formula	Molecular weight																														
Blue	078	Polymethyl methacrylate, 1,2 IT ST	9011-14-7																																
Polyethylene terephthalate (PET)	12																																		
Polyamide (PA)	8																																		
Polyvinyl Chloride (PVC)	5																																		
Polymethyl methacrylate (PMMA)	3																																		
합계		217																																	

그림 28. 3간선수로 (정왕천) 미세플라스틱 정성분석 결과

4간선수로 성곡천의 경우 그림 28에 나타난 바와 같이 Polypropylene (PP), Polyethylene (PE), Polyamide (PA), Polyethylene terephthalate (PET), Polystyrene (PS), Polymethyl methacrylate (PMMA)로 총 6종의 미세플라스틱이 검출되었다. 검출된 플라스틱에서는 PP가 23개로 전체 중 42.6%의 가장 많은 비율로 검출되었고 PE가 22개로 40.7%, PA가 5개로 9.3%, PET가 2개로 3.7%, PS와 PMMA가 각각 1개로 1.9%의 비율 순으로 확인되었다. 4간선수로 표층수에 포함된 미세플라스틱 정량분석 결과와 비교해 보면 2종의 미세플라스틱이 검출된 간선수로수 시료에 비해 PP, PA, PS, PMMA가 새롭게 검출되었으며 나머지 미세플라스틱 성분의 경우 공통되게 검출되는 결과를 나타냈다.

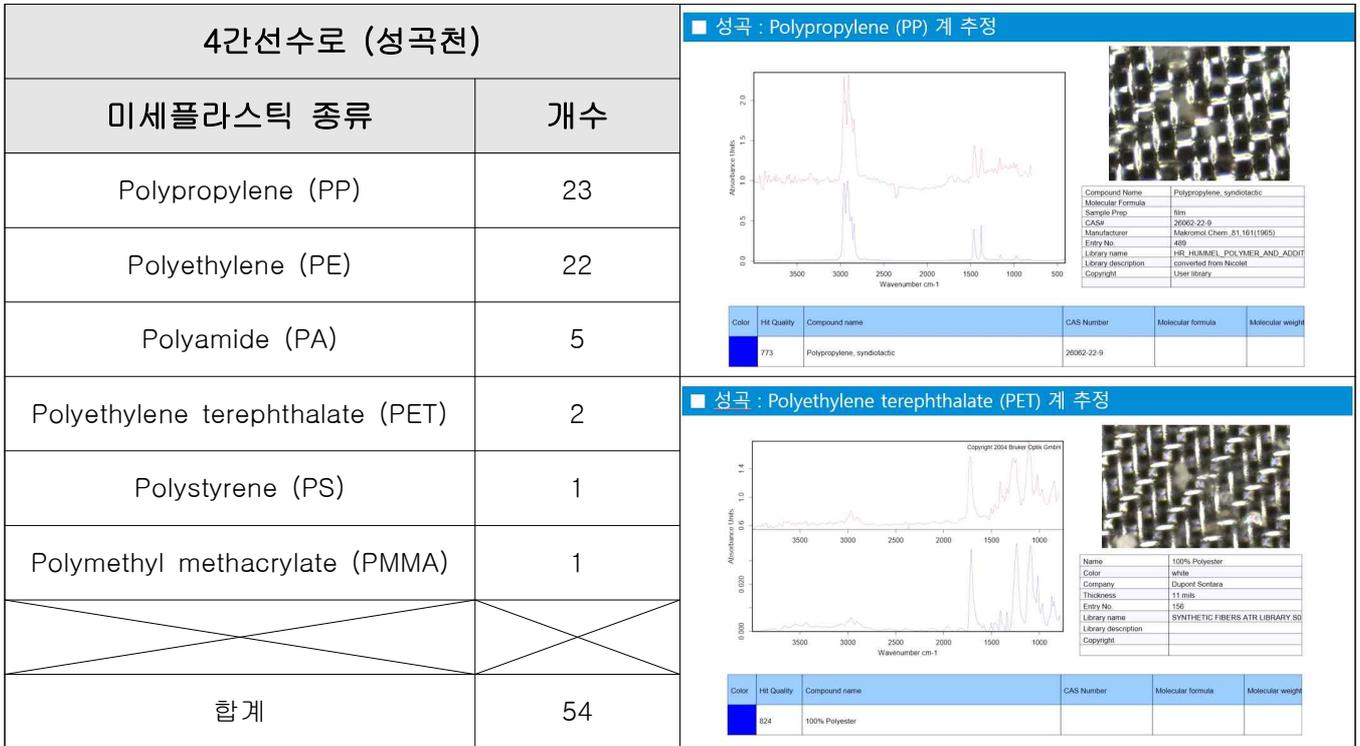


그림 29. 4간선수로 (성곡천) 미세플라스틱 정성분석 결과

4.1.2.6 안산시 수계 퇴적물의 미세플라스틱 오염 영향 분석

그림 29는 조사된 안산시 하천지점별 하천수 및 퇴적물의 미세플라스틱 분포를 비교하여 그래프로 나타낸 것이다. 종합적으로 비교해 보았을 때, 하천수에서 검출된 미세플라스틱의 양은 반월천>신길천>화정천>안산천의 순으로 미세플라스틱이 많이 분포하였으나, 퇴적물에서 검출된 미세플라스틱의 양은 안산천과 화정천이 반월천과 신길천에서 보다 많은 양이 분포하였다. 조사 결과에 나타난 바와 같이 하천수의 미세플라스틱 분포는 모든 하천에서 비교적 편차가 크게 나타나지 않았으나 하천 퇴적물의 미세플라스틱 분포는 안산천과 화정천에서 높게 관찰되었다. 안산천과 화정천의 경우 유역의 대부분이 생활·거주지역을 거쳐 흐르는 하천으로 강우 시 또는 유역환경적 요인으로 인해 유입되는 미세플라스틱의 많은 부분이 퇴적물로 축적되어 있음을 알 수 있다. 따라서 이러한 영향을 확인하기 위해 강우 시 하천수 및 우수토구를 통해 유입되는 미세플라스틱의 영향을 검토할 필요성이 있다. 검출된 미세플라스틱의 종류는 모든 하천의 하천수 및 퇴적물에서 PET, PP, PS 계열의 플라스틱이 대부분의 비중을 차지하고 있는 것으로 나타났으며 그 외의 플라스틱은 낮은 비율로 분포하고 있는 것으로 나타났다.

2D Graph 3

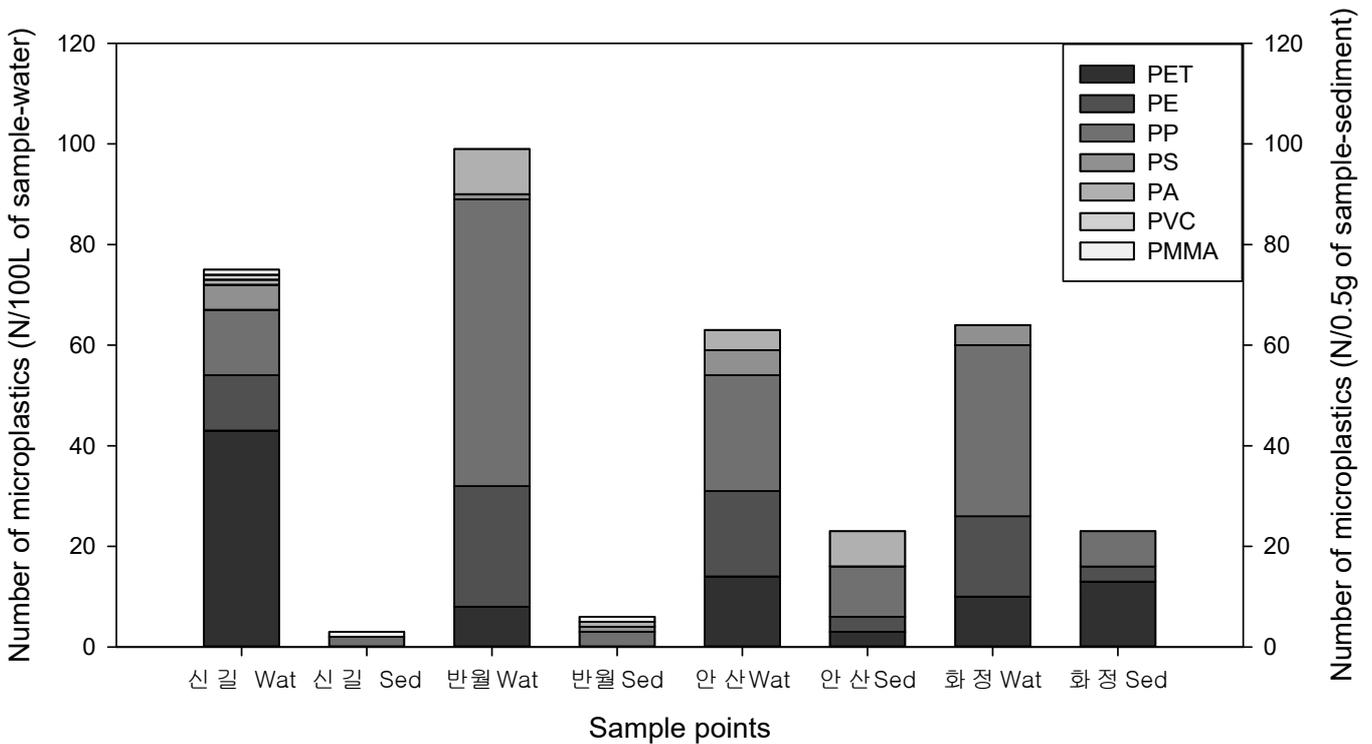


그림 30. 안산시 하천별 하천수 및 퇴적물 미세플라스틱 분포
(Wat-표층수, Sed-퇴적물)

그림 30은 조사된 안산시 간선수로별 간선수로수 및 퇴적물의 미세플라스틱 분포를 비교하여 그래프로 나타낸 것이다. 종합적으로 비교해 보았을 때, 표층수에서 검출된 미세플라스틱의 양은 군자천>정왕천>옥구천>성곡천의 순으로 미세플라스틱이 많이 분포하였으나, 퇴적물에서 검출된 미세플라스틱의 양은 옥구천과 정왕천이 군자천과 성곡천에서 보다 많은 양이 분포하였다. 조사 결과에 나타난 바와 같이 퇴적토에 존재하는 미세플라스틱의 종류와 양이 표층수에 존재하는 미세플라스틱보다 상대적으로 많은 것으로 나타나 간선수로 내 퇴적물에는 많은 양의 미세플라스틱이 퇴적되어 있을 것으로 예상된다. 이는 공단에서 배출되는 일부 유출수 및 토구를 통해 방출되는 비점오염원 등에 의해 많은 양의 미세플라스틱이 간선수로에 노출되어 오랜시간 누적된 것으로 판단된다. 검출된 미세플라스틱의 종류는 표층수에 비해 비교적 다양한 종류의 미세플라스틱이 모든 간선수로에 고르게 분포되어 있는 것으로 나타났으며 특히 PP, PE, PET 계열의 미세플라스틱 비중이 매우 높게 나타났다.

2D Graph 3

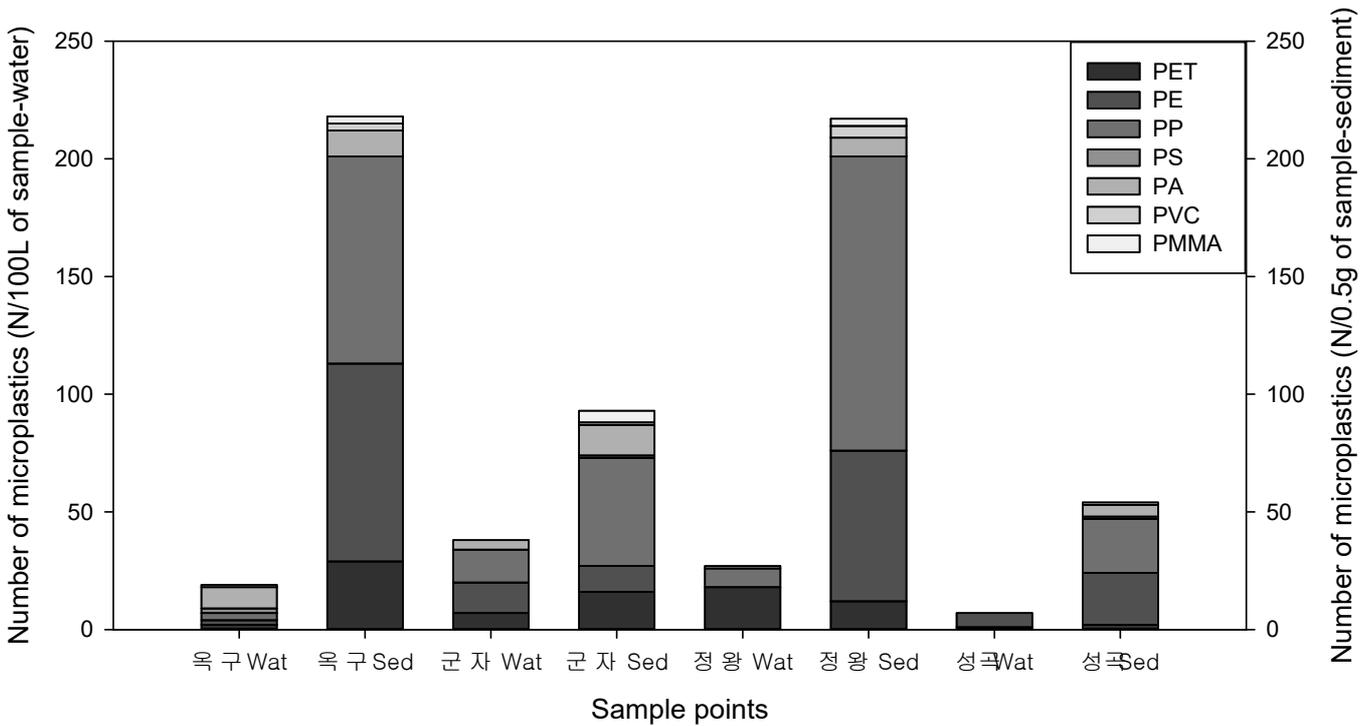


그림 31. 안산시 간선수로별 간선수로수 및 퇴적물 미세플라스틱 분포 (Wat-표층수, Sed-퇴적물)

다음은 위와 같은 결과를 종합하여 안산시 수계에 존재하는 퇴적물의 미세플라스틱 오염 현황을 분석하였다. 그림 31은 안산시 수계 하천 및 간선수로 퇴적물의 미세플라스틱 분포를 비교하여 그래프로 나타낸 것이다. 동일한 양의 퇴적물 시료에 대한 미세플라스틱 분석을 진행하였을 때, 간선수로 퇴적물에 포함된 미세플라스틱이 하천 퇴적물에 포함된 미세플라스틱에 비해 평균 10배 이상의 미세플라스틱이 더 존재하는 것으로 나타났으며, 미세플라스틱의 종류 또한 하천에 비해 간선수로에서 다양한 종류의 미세플라스틱이 관찰되었다. 이는 주로 생활 거주 지역 및 자연지가 유역 주변에 존재하는 하천 수계에 비해 안산·시흥 스마트허브와 같은 대형산업단지가 유역의 대부분을 구성하는 간선수로의 유역 환경적 요인이 가장 큰 차이인 것으로 판단되며, 간선수로 유역의 산업단지에서 발생하는 미세플라스틱이 노면유출수나 비점오염원 등으로 인해 흘러들어와 그 중 비교적 비중이 큰 미세플라스틱이 간선수로의 퇴적물 형태로 상당히 많은 부분 축적되어 있는 것으로 볼 수 있다. 이러한 퇴적물에 축적된 다량의 미세플라스틱은 강우나 시화호의 조수차에 의한 하상의 변화 등의 불안정한 상태에서 부유되어 해양으로 유입되거나 생물섭취로 인한 생태계 오염을 유발할 수 있으므로 이에 대한 관리가 필요할 것이다.

2D Graph 3

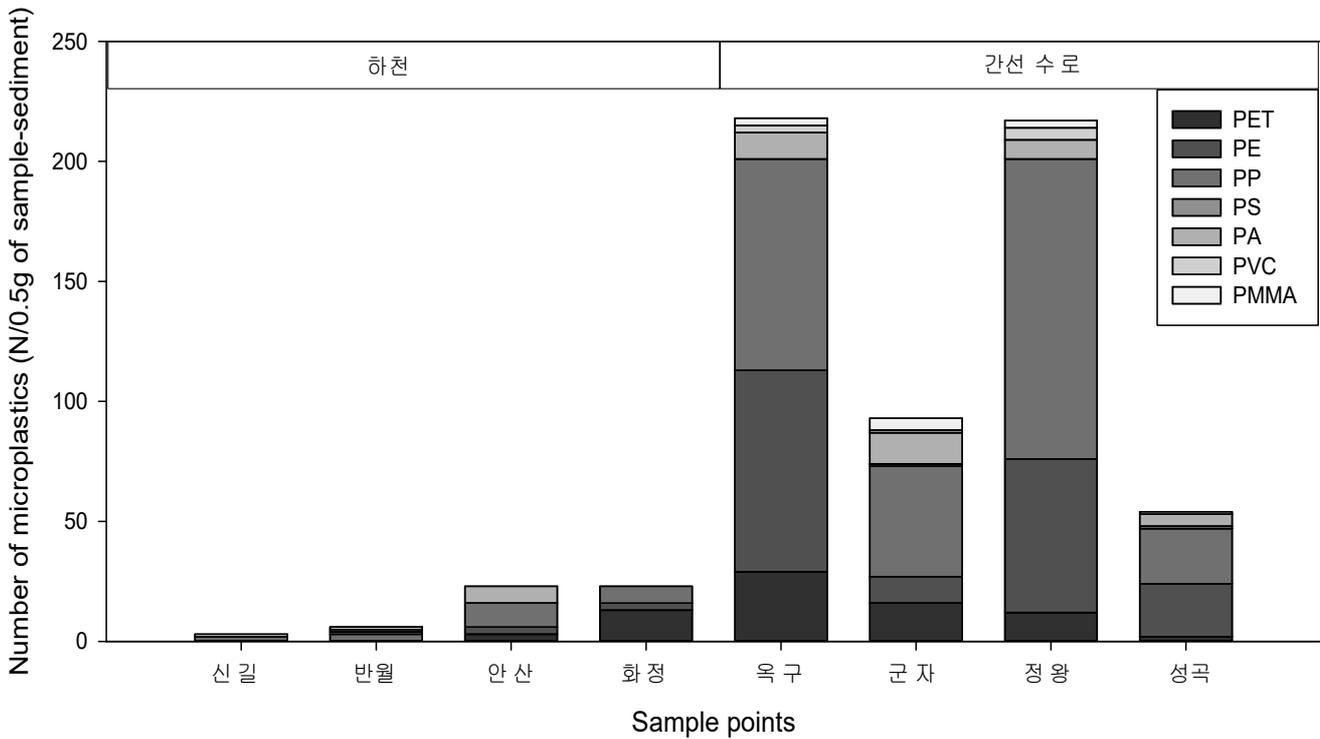


그림 32. 안산시 수계 퇴적물 미세플라스틱 분포

4.1.3 안산시 수계 우기 미세플라스틱 오염도 조사

4.1.3.1 개요

안산시 수계의 경우 국내 최대 규모 산업단지인 안산·시흥 스마트허브와 인접하고 있으며 약 70만 인구에 달하는 경기도내 8번째로 많은 인구가 거주하고 있는 지리적 상황으로 인해 도시 내 다양한 폐기물 유입에 노출되어 있는 상황이다. 대형 폐기물이나 하수 등은 안산시 내 처리시스템에 의해 처리가 되는 상황이나 미량오염물이나 비점오염물 등이 우수를 통해 유입될 수 있으며 산업단지 및 거주지역을 통행하는 각종 차량에 의해 도로 노면에서 발생하는 오염물질 또한 쉽게 유입될 수 있는 상황이다. 하지만 국내외 적으로 도시 활동에 의한 강우유출수의 미세플라스틱 오염 현황조사는 매우 미미한 실정이며, 실제로 도시 강우유출수 내 존재하는 다량의 미세플라스틱이 하천 및 해양으로 흘러 들어가고 있는 것으로 알려져 있으나 이에 대한 대응은 매우 어려운 실정이다. 강우유출수를 통해 유입되는 비점오염원을 저감하기 위해 다양한 저감장치가 설치 및 운영되고 있지만 미세플라스틱을 저감하는 것에는 한계가 있으며 심지어 플라스틱 소재의 여재를 사용하는 저감장치의 경우 추가적인 미세플라스틱의 배출을 유발할 수 있다. 따라서 본 연구에서는 이러한 강우 시 발생하는 강우유출수의 미세플라스틱을 조사함으로써 비점오염원에 의한 수계

미세플라스틱 오염 현황을 검토해보고자 한다.

4.1.3.2 미세플라스틱 분석을 위한 우수토구 및 우기 시료 채취

그림 32는 수계 우수토구 및 우기 시료 미세플라스틱 분석을 위한 현장 샘플 채취과정을 나타낸 것이다. 샘플링 지점은 강우 시료 채취시의 안전과 대표성을 고려하여 우수토구의 경우 안산천으로 유입되는 대형 우수토구인 L-7 지점에서 유출되는 우수월류수를 채취하였으며, 강우 시 하천수 및 간선수로수는 안산천 하류와 군자천 하류에서 채취하였다. 시료의 채취는 시료에 포함된 다량의 고형물을 고려하여 현장에서 약 30L 가량 채취한 뒤(군자천은 15L) 75mm × 20mm 크기의 스테인레스 표준망체를 5mm, 1mm, 500 μ m, 300 μ m, 100 μ m 의 입도별로 준비하여 고형물만을 분리 수집하여 실험실로 운반하였다.



그림 33. 대상 수계 우기 시료 채취 과정

표 9는 수계 우기 시료 채취가 진행된 지점과 측정시기, 기상상황을 나타낸 것이다. 채취지점은 건기시 시료 채취 지점과의 일관성을 위해 건시 시료 채취 지점과 동일하게 정하였으며, 비점오염원의 영향 및 건기 시 누적된 미세플라스틱의 유입을 반영할 수 있도록 건기일수를 3일 이상 확보한 뒤 진행된 강우의 초기 시료를 채취할 수 있도록 하였다.

표 10. 수계 유기 시료 채취 진행 지점, 시기, 기상 현황

대상 하천 및 간선수로	샘플링 지점	측정시기	기상현황
안산천	월피교 인근 (경기도 안산시 단원구 고잔동 542-3 주변)	2021.8.31. 오후 3시경	강우 (우기)
안산천 우수토구	안산천 L-7 지정 우수토구	2021.8.31. 오후 3시경	강우 (우기)
2간선수로 군자천	군자 8교 복단 인근	2021.8.31. 오후 4시경	강우 (우기)

4.1.3.3 미세플라스틱 분석을 위한 우수토구 및 유기 시료의 전처리

그림 33은 위와 같은 과정을 통해 각 지점에서 수집된 고형물 나타낸 것이다. 표준망체를 통해 분리된 고형물은 증류수를 이용하여 망으로 부터의 분리 및 재수집 하였으며 재수집 된 시료는 정성·정량 분석 시 방해물질로 작용하는 유기물질의 제거를 위한 전처리를 진행하였다. 전처리 과정에 앞서 측정을 위한 고형물의 미세플라스틱 비율을 높이기 위해 $ZnCl_2$ 용액을 이용하여 밀도 1.5g/ml 이상의 고형물에 대한 밀도/비중 분리과정을 거쳤으며, 분리된 각각의 시료는 45 μ m의 여과지에 진공펌프를 이용한 감압여과 과정을 통해 여과하였다. 1차여과가 완료된 시료는 방해물질이 되는 유기물의 산화를 위해 전처리 과정으로 펜톤시약 처리 및 30% 과산화수소 수용액을 이용하여 전처리를 진행한 후 2차여과하여 FT-IR 분석에 사용하였다.

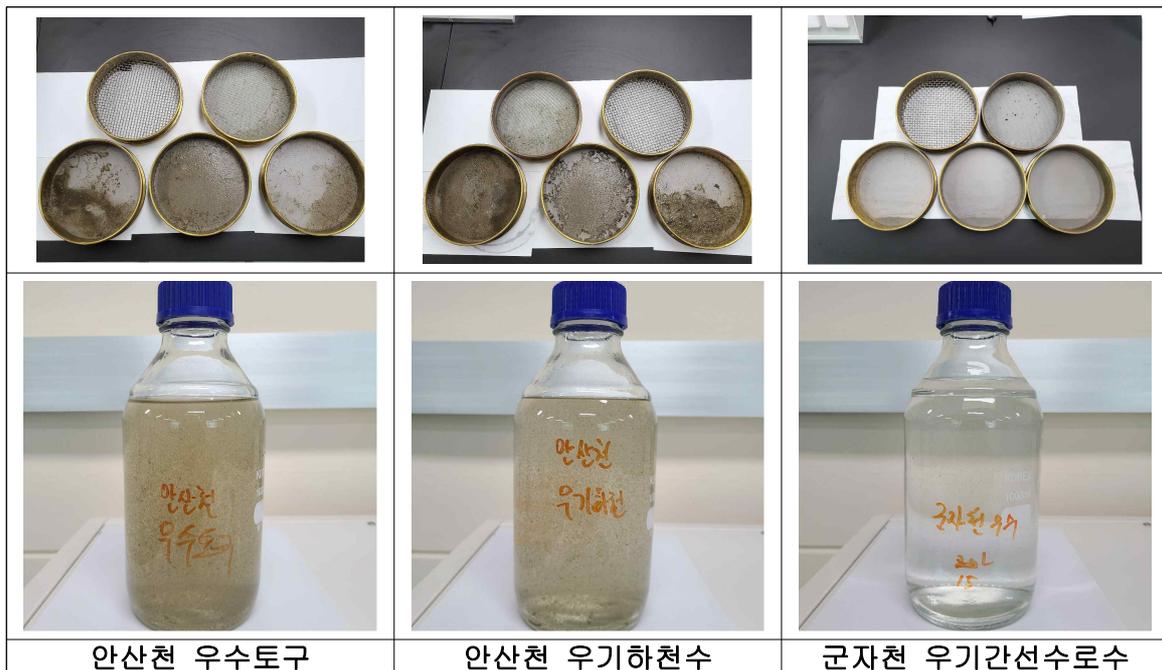


그림 34. 거름망 분리 및 수집된 고형물

4.1.3.4 우수토구 및 우기 시료의 미세플라스틱 FT-IR 분석

본 연구에서의 FT-IR 분석은 microscope IR을 통해 분석된 고형물 입자를 Focal Plane Array image mapping을 적용하여 750~4,000 cm^{-1} 을 4 cm^{-1} 의 resolution으로 분석하였다. 또한 데이터해석은 SIMPLE software을 사용하였으며 data library와 비교하여 3,500~2,700 cm^{-1} 구간 매칭률 60%이상, 1,800~1,000 cm^{-1} 구간 매칭률 40%이상 되는 스펙트럼을 분석하였다. 분석에 사용된 시료는 채집된 시료 중 1/2를 사용하였다. 그림 34는 채취된 우기 시료에 대해 현미경으로 촬영한 여과시료를 나타낸 것이다. 현미경으로 촬영한 여과시료를 확인한 결과 안산천 우수토구 배출수 및 우기하천수의 경우 육안으로 관찰 가능한 많은 양의 미세 고형물이 관찰되었으며 군자천 우기간선수로수의 경우 상대적으로 고형물이 적게 관찰되었다. 이는 수집된 시료의 양의 차이와 더불어 시료 채취 당시 하천수에 비교적 토사가 많아 이에 따른 차이가 있는 것으로 판단된다. 또한 image mapping 프로그램을 활용하여 분석된 우기 시료에 대한 고형물의 형태 및 크기를 표현한 spectra map을 분석한 결과 특이점 없이 다양한 크기와 형태의 고형물이 무작위로 존재하는 것으로 나타났다.

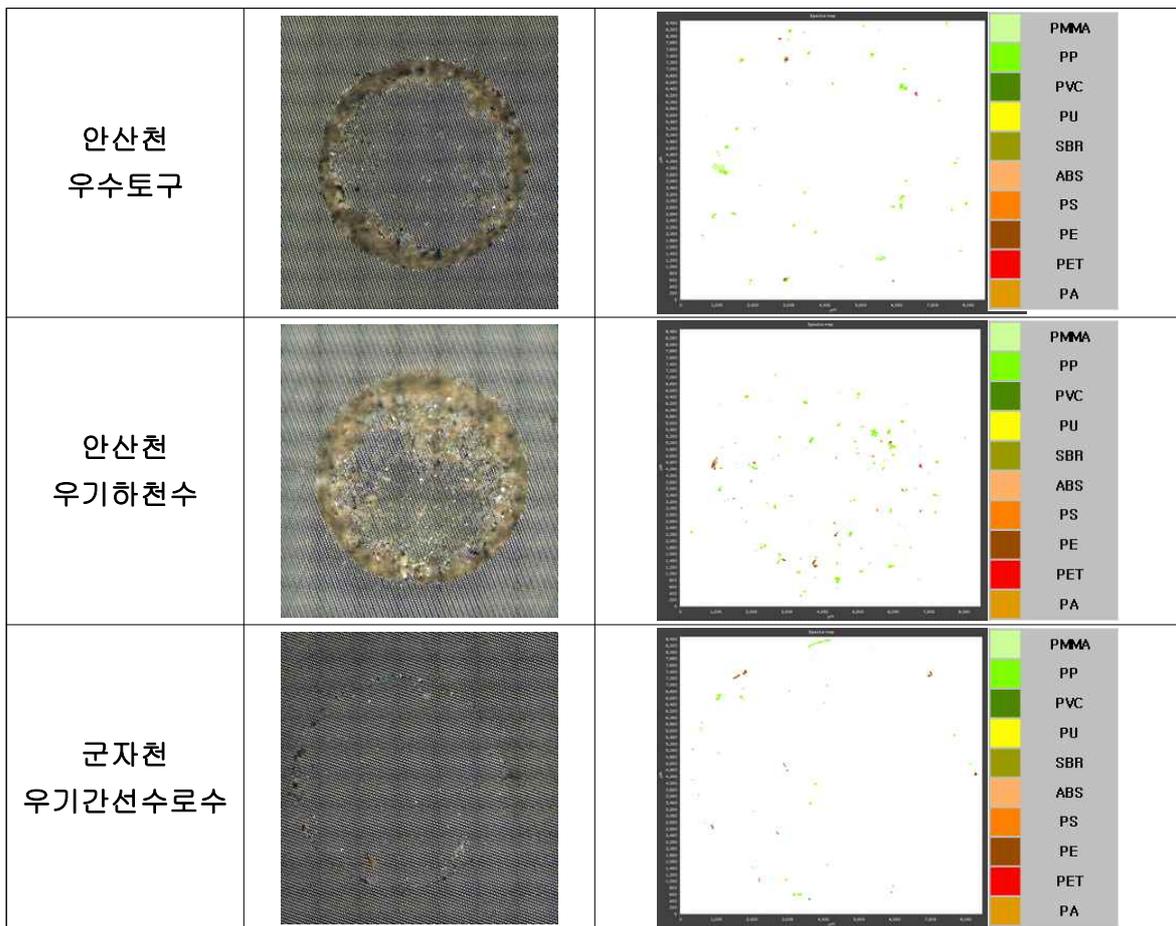


그림 35. 현미경으로 관찰한 각 하천별 고형물 및 spectra map

표 10은 현미경 분석 및 image mapping 분석을 통해 각각의 시료에 대한 미세플라스틱의 정량 분석결과를 나타낸 것이다. 분석결과 안산천 우수토구 배출수 시료에서는 60개/15L, 안산천 우기 하천 시료에서 121개/15L, 군자천 우기 간선수로 시료에서 57개/7.5L의 미세플라스틱 추정물질이 검출되었다. 분석된 시료량의 차이를 고려하여 단위부피당 개수로 분석결과를 환산해보면 안산천 우수토구 배출수 4개/L, 안산천 우기하천 시료 8.07개/L, 군자천 우기 간선수로 시료 7.6개/L로 육안으로 관찰한 고형물에 비해 미세플라스틱으로 추정되는 물질의 양은 우기 하천수와 간선수로 수에서 유사하게 측정되었으며, 우수토구 배출수에서도 비교적 많은 양의 미세플라스틱이 검출되었다.

표 11. 각 하천별 시료 미세플라스틱 정량분석 결과

구분 \ 시료명	안산천 우수토구	안산천 우기하천	군자천 우기간선수로
시료량	15L	15L	7.5L
개수	60개	121개	57개

4.1.3.5 우수토구 및 우기 시료의 미세플라스틱 정성 분석

다음은 안산 수계 우수토구 배출수 및 우기 하천 및 간선수로 시료의 미세플라스틱 정성분석 결과이다. 먼저 안산천 우수토구 배출수의 경우 그림 35에 나타난 바와 같이 Polypropylene (PP), Polyethylene (PE), Polyethylene terephthalate (PET), Polymethyl methacrylate(PMMA)로 총 4종의 미세플라스틱이 검출되었다. 검출된 플라스틱에서는 PP가 53개로 전체 중 88.3%의 가장 많은 비율로 검출되었고 PE가 4개로 6.7%, PET가 2개로 3.3%, PET가 1개로 1.7%의 비율 순으로 확인되었다.

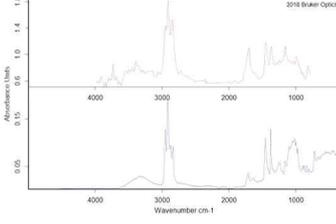
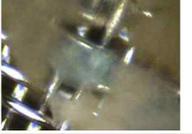
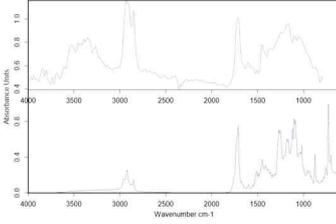
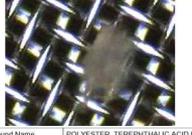
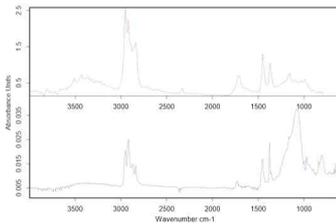
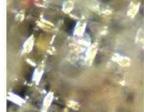
안산천 우수토구		안산천 우수토구 : Polypropylene (PP) 계 추정																																				
미세플라스틱 종류	개수																																					
Polypropylene (PP)	53	<table border="1"> <tr><th>Polymer</th><td>PP</td></tr> <tr><th>CAS Registry Number</th><td>9003-07-0</td></tr> <tr><th>Substance</th><td>polypropylene</td></tr> <tr><th>Trade Name</th><td>PP Flachs</td></tr> <tr><th>Supplier</th><td>unknown</td></tr> <tr><th>Filler</th><td>Flax</td></tr> <tr><th>Filler Content</th><td>ca. 30-35%</td></tr> <tr><th>Color</th><td>yellow</td></tr> <tr><th>Measurement Technique</th><td>DiamondATR</td></tr> <tr><th>Sample Preparation</th><td>cut surface, core material</td></tr> </table>		Polymer	PP	CAS Registry Number	9003-07-0	Substance	polypropylene	Trade Name	PP Flachs	Supplier	unknown	Filler	Flax	Filler Content	ca. 30-35%	Color	yellow	Measurement Technique	DiamondATR	Sample Preparation	cut surface, core material	<table border="1"> <thead> <tr> <th>Color</th> <th>Hit Quality</th> <th>Compound name</th> <th>CAS Number</th> <th>Molecular formula</th> <th>Molecular weight</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Blue</td> <td>945</td> <td>PP</td> <td>9003-07-0</td> <td></td> <td></td> </tr> </tbody> </table>			Color	Hit Quality	Compound name	CAS Number	Molecular formula	Molecular weight	Blue	945	PP	9003-07-0		
Polymer	PP																																					
CAS Registry Number	9003-07-0																																					
Substance	polypropylene																																					
Trade Name	PP Flachs																																					
Supplier	unknown																																					
Filler	Flax																																					
Filler Content	ca. 30-35%																																					
Color	yellow																																					
Measurement Technique	DiamondATR																																					
Sample Preparation	cut surface, core material																																					
Color	Hit Quality	Compound name	CAS Number	Molecular formula	Molecular weight																																	
Blue	945	PP	9003-07-0																																			
Polyethylene (PE)	4																																					
Polyethylene terephthalate (PET)	2	<table border="1"> <tr><th>Compound Name</th><td>POLYESTER, TEREPHTHALIC ACID B</td></tr> <tr><th>Molecular Formula</th><td></td></tr> <tr><th>Molecular Weight</th><td></td></tr> <tr><th>CAS Registry Number</th><td></td></tr> <tr><th>Sample Preparation</th><td>ATR single bounce</td></tr> <tr><th>Manufacturer</th><td>Tecon</td></tr> <tr><th>Reference</th><td>TASSI NIC15212</td></tr> <tr><th>Copyright</th><td>© 2014 Nicoddm</td></tr> <tr><th>Entry No.</th><td>3521</td></tr> <tr><th>Library name</th><td>ATR-LIB-COMLETE-4-482-2-S01</td></tr> </table>		Compound Name	POLYESTER, TEREPHTHALIC ACID B	Molecular Formula		Molecular Weight		CAS Registry Number		Sample Preparation	ATR single bounce	Manufacturer	Tecon	Reference	TASSI NIC15212	Copyright	© 2014 Nicoddm	Entry No.	3521	Library name	ATR-LIB-COMLETE-4-482-2-S01	<table border="1"> <thead> <tr> <th>Color</th> <th>Hit Quality</th> <th>Compound name</th> <th>CAS Number</th> <th>Molecular formula</th> <th>Molecular weight</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Blue</td> <td>624</td> <td>POLYESTER, TEREPHTHALIC ACID BASED, BIODEGRADABLE, DARK GRE</td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> </tbody> </table>			Color	Hit Quality	Compound name	CAS Number	Molecular formula	Molecular weight	Blue	624	POLYESTER, TEREPHTHALIC ACID BASED, BIODEGRADABLE, DARK GRE			
Compound Name	POLYESTER, TEREPHTHALIC ACID B																																					
Molecular Formula																																						
Molecular Weight																																						
CAS Registry Number																																						
Sample Preparation	ATR single bounce																																					
Manufacturer	Tecon																																					
Reference	TASSI NIC15212																																					
Copyright	© 2014 Nicoddm																																					
Entry No.	3521																																					
Library name	ATR-LIB-COMLETE-4-482-2-S01																																					
Color	Hit Quality	Compound name	CAS Number	Molecular formula	Molecular weight																																	
Blue	624	POLYESTER, TEREPHTHALIC ACID BASED, BIODEGRADABLE, DARK GRE																																				
Polymethyl methacrylate(PMMA)	1																																					
합계		60																																				

그림 36. 안산천 우수토구 미세플라스틱 정성분석 결과

안산천 우기 하천시료의 경우 그림 36에 나타난 바와 같이 Polypropylene (PP), Polyethylene (PE), Polyethylene terephthalate (PET), Polyamide (PA), Polyvinyl Chloride (PVC), Polyurethane (PU)로 총 6종의 미세플라스틱이 검출되었다. 검출된 플라스틱에서는 PP가 94개로 전체 중 77.7%의 가장 많은 비율로 검출되었고 PE가 10개로 8.3%, PET가 13개로 10.7%, PA가 2개로 1.7%, PVC와 PU가 각각 1개로 0.8%의 비율 순으로 확인되었다.

안산천 우기 하천수	
미세플라스틱 종류	개수
Polypropylene (PP)	94
Polyethylene (PE)	10
Polyethylene terephthalate (PET)	13
Polyamide (PA)	2
Polyvinyl Chloride (PVC)	1
Polyurethane (PU)	1
X	
합계	121

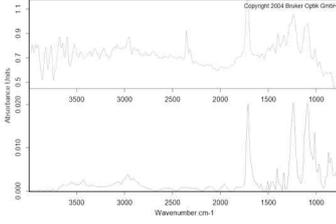
■ 안산천 우기하천 : Polypropylene (PP) 계 추정

Compound name	Polypropylene
Name	Oil, Ingrained dirt Cleaning tissue
Entry No.	1
Library name	YUKHAN-KIMBERLY S01
Library description	
Copyright	

Color	Hit Quality	Compound name	CAS Number	Molecular formula	Molecular weight
Blue	842	Polypropylene			

■ 안산천 우기하천 : Polyethylene terephthalate (PET) 계 추정




Name	100% Polyester
Color	white
Company	Dupont Sorlara
Thickness	40 mils
Entry No.	169
Library name	SYNTHETIC FIBERS ATR LIBRARY S0
Library description	
Copyright	

Color	Hit Quality	Compound name	CAS Number	Molecular formula	Molecular weight
Blue	889	100% Polyester			

그림 37. 안산천 우기 하천수 미세플라스틱 정성분석 결과

군자천 우기 간선수로 시료의 경우 그림 37에 나타난 바와 같이 Polypropylene (PP), Polyethylene (PE), Polyethylene terephthalate (PET)로 총 3종의 미세플라스틱이 검출되었다. 검출된 플라스틱에서는 PP가 34개로 전체 중 59.6%의 가장 많은 비율로 검출되었고 PET가 14개로 24.6%, PE가 9개로 15.8%의 비율 순으로 확인되었다.

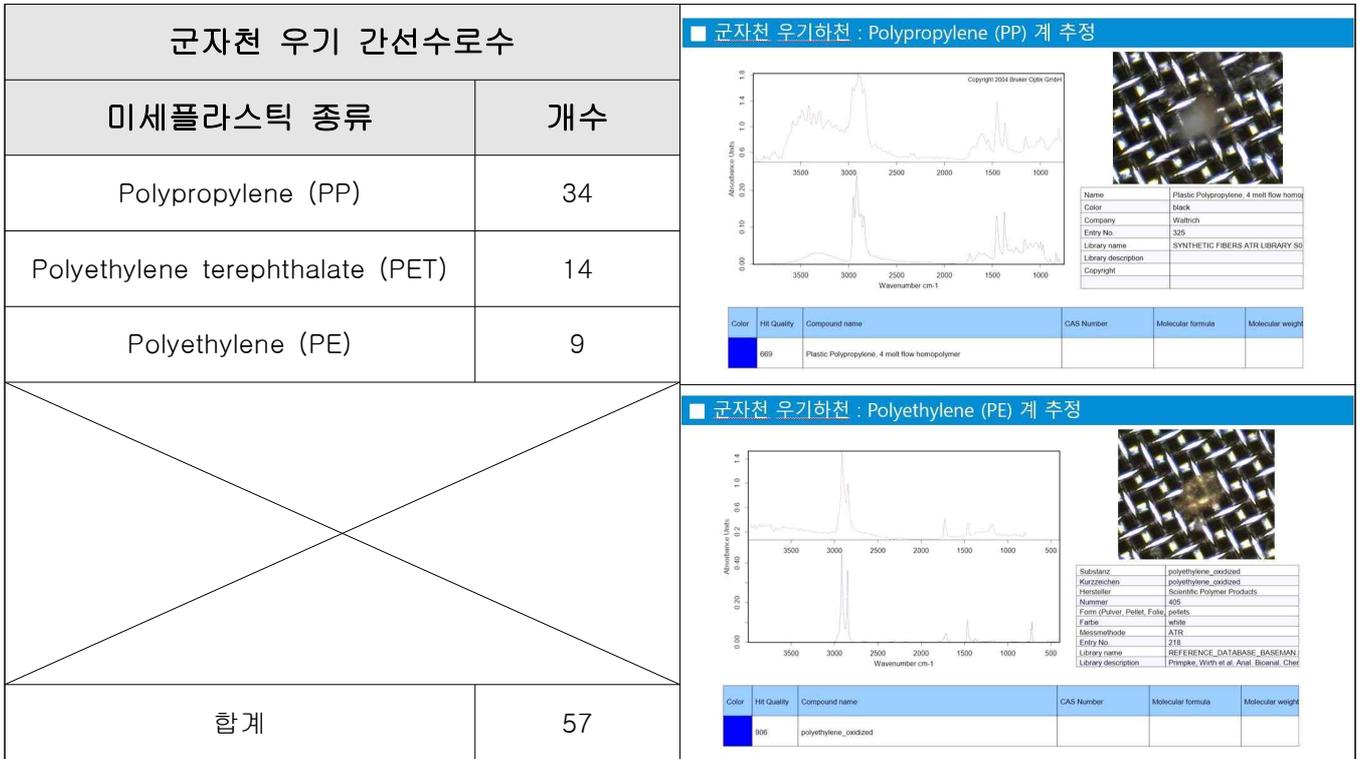


그림 38. 군자천 우기 간선수로수 미세플라스틱 정성분석 결과

4.1.3.6 우기 시 미세플라스틱 수계 영향 분석

다음은 위와 같은 결과를 종합하여 안산시 수계에서의 우기 시 미세플라스틱 영향을 분석하였다. 그림 38은 안산시 수계 하천 및 간선수로 건기 및 우기 시의 미세플라스틱 분포를 비교하여 그래프로 나타낸 것이다. 분석된 상황에 따라 측정된 시료의 양이 다르기 때문에 각각의 분석된 결과를 동일한 부피로 환산하여 미세플라스틱 발생량(N/L)을 계산하였다. 건기 및 우기 상황에 대한 미세플라스틱 분석을 진행하였을 때, 안산시 하천 중 안산천의 경우 우기 시 표층수의 미세플라스틱 농도가 8.07개/L로 건기 시 표층수의 미세플라스틱 농도 0.63개/L에 비해 약 12.8배 높게 측정되었으며, 2간선수인 군자천의 경우에도 우기 시 표층수의 미세플라스틱 농도가 7.6개/L로 건기 시 표층수의 미세플라스틱 농도 0.38개/L에 비해 약 20배 높게 측정되었다. 분석 결과에 나타난 바와 같이 하천 및 간선수로 모두 우기 시 수계의 미세플라스틱 농도가 건기 시에 비해 매우 높게 측정되었다. 이는 앞서 분석된 바와 같이 수계 퇴적물이 강우로 인한 유량 및 유속의 증가로 하상퇴적물이 부상되고, 강우로 인해 발생하는 노면유출수가 우수토구를 통해 비점오염원 형태의 고형물로 유입됨에 따라 표층수의 미세플라스틱 농도가 증가한 것으로 판단된다. 이와 같은 우기 상황에서의 비점오염원 유입 영향을 확인하기 위해 우기 시 하천으로 유입되는 안산천 우수토구의 배출수를 분석한 결과 4개/L로 건기 시 하천 표층수에 존재하는 미세플라스틱의 농도보다 약 6.5배가량 높은 것으로 나타나, 비록 하천 유량에 비해 그 비중이 작고 우기 시에 한정된 유입일

지라도 하천 및 간선수로의 미세플라스틱 오염에 적지 않은 영향을 미칠 것으로 판단된다. 또한 우기 상황에서 검출된 미세플라스틱의 종류는 PP, PE, PET 계열의 미세플라스틱 비중이 매우 높게 나타나 우기 시 유입되는 비점오염원 형태의 미세플라스틱 중 이와 같은 성분의 오염원이 다수 존재할 것으로 예상된다. PP, PE, PET와 같은 플라스틱은 의류, 섬유제품, 바디 및 페이스 스크럽, 식품 포장 필름 및 물병을 포함한 퍼스널 케어 제품 등 다양한 용도로 실생활에 많이 사용되고 있는 플라스틱의 종류로 알려져 있다. 따라서 노면유출수로 유입되는 모니터링 및 이러한 오염물질을 제어할 수 있는 방법에 대한 논의가 필요할 것으로 판단된다.

2D Graph 3

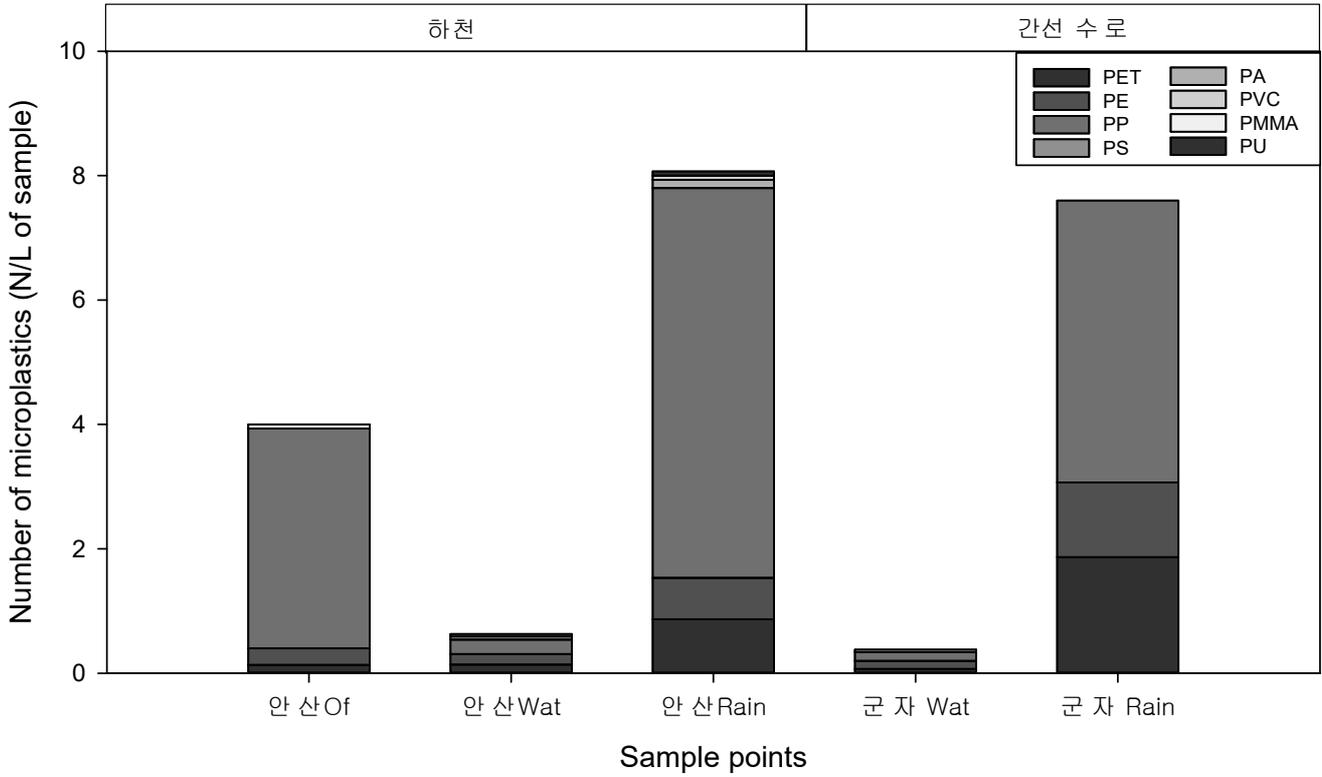


그림 39 안산시 수계 하천 및 간선수로 건기 및 우기 시의 미세플라스틱 분포 (Of-우수토구 유출, Wat-건기, Rain-우기)

4.1.4 안산시 하수처리장 공정별 미세플라스틱 분포 조사

4.1.4.1 개요

일반적으로 하수처리장은 미세플라스틱의 최대 배출원으로 알려져 있다. 하수처리장에서도 많은 양의 미세플라스틱이 제거되지만 화장품에 존재하는 microbeads나 fiber는 제거효율이 낮아서 여전히 많은 양이 처리수에 존재한다. 과거 미세플라스틱과 관련된 다양한 연구가 진행되었음에도

불구하고 하수처리장이 미세플라스틱의 점오염원이라는 인식은 비교적 최근에 이루어졌다. 하수처리장의 미세플라스틱 배출과 관련한 국내외 연구결과에서는 이미 대부분의 하천에서 하수처리장 하류에서의 미세플라스틱 농도 상승이 확인되고 있으며, 통계적으로 전 세계의 하수처리장을 통해 하루 8조개의 microbeads가 수중 생태계로 유입되는 것으로 나타났다. 하수처리시설은 기본적으로 포기, 미생물 플록 형성, 침전 공정으로 구성된다. 1차 처리에서는 스크린을 통해 6mm 이상의 플라스틱이 제거되는데, 이것이 하수처리장으로 유입된 전체 플라스틱의 65%가 여기에서 제거된다. 또한, 비중이 물보다 작은 플라스틱은 1차 침전지 수면으로 부상하여 스키머에 의해 제거된다. 2차 처리는 부유고형물, 용존성 유기물이 미생물에 의해 제거되는 공정이다. 처리 후 미생물은 플록을 형성하여 침전지에서 분리되고 다시 반응조로 순환된다. 처리수는 소독이나 여과 등의 3차 처리를 거친 후 방류된다. 2차 처리에서 미세플라스틱의 96~99%가 제거되고, 3차 처리에서는 90~99.9%의 미세플라스틱 제거율을 보인다. 이러한 높은 제거율에도 불구하고 유량이 많으므로 수계로 방류되는 미세플라스틱의 개수는 결과적으로 상당히 많을 수 있으며, 현재의 하수처리시설은 미세플라스틱 제거를 목적으로 설계된 것이 아니므로 하수에 존재하는 미세플라스틱의 완벽한 제거는 사실상 불가능하다. 따라서 본 연구에서는 안산하수처리장의 처리공정별 미세플라스틱 분포를 조사함으로써 하수처리 공정을 통한 미세플라스틱의 저감효율 및 최종적으로 배출되는 미세플라스틱에 대한 환경적 영향을 검토해 보고자 한다.

4.1.4.2 하수처리장 공정별 미세플라스틱 분석을 위한 시료 채취

그림 39는 안산시 하수처리장 공정별 미세플라스틱 분석을 위한 현장 샘플 채취과정을 나타낸 것이다. 샘플링 지점은 1차년도 하수처리장 배출수 분석결과를 통해 비교적 다수의 미세플라스틱이 배출 될 것으로 예상되는 공장계열 처리 공정에 대해 채취하였으며, 처리 과정중의 미세플라스틱 분포를 확인하기 위해 유입수, 1차 및 2차 침전지, 최종처리 배출수에 대해 시료 채취를 진행하였다. 시료의 채취는 비교적 많은 고형물이 포함된 유입수, 1차 및 2차 침전지의 경우 각각 30L, 20L, 20L 씩 채취하였으며, 최종 처리 배출수는 현장에서 소형양수기를 이용하여 채수하였다. 양수기는 분당 약 60L의 유량을 채수할 수 있도록 설정하여 10분간 약 600L의 하천수를 채수하였으며 75mm × 20mm 크기의 스테인레스 표준망체를 5mm, 1mm, 500 μ m, 300 μ m, 100 μ m 의 입도별로 준비하여 고형물만을 분리 수집하여 실험실로 운반하였다.



그림 40. 대상 수계 우기 시료 채취 과정

4.1.4.3 하수처리장 공정별 채취 시료의 전처리

그림 40은 위와 같은 과정을 통해 각 지점에서 수집된 고형물 나타낸 것이다. 표준망체를 통해 분리된 고형물은 증류수를 이용하여 망으로 부터의 분리 및 재수집 하였으며 재수집 된 시료는 정성·정량 분석 시 방해물질로 작용하는 유기물질의 제거를 위한 전처리를 진행하였다. 전처리 과정에 앞서 측정을 위한 고형물의 미세플라스틱 비율을 높이기 위해 $ZnCl_2$ 용액을 이용하여 밀도 1.5g/ml 이상의 고형물에 대한 밀도/비중 분리과정을 거쳤으며, 분리된 각각의 시료는 45 μ m의 여과지에 진공펌프를 이용한 감압여과 과정을 통해 여과하였다. 1차여과가 완료된 시료는 방해물질이 되는 유기물의 산화를 위해 전처리 과정으로 펜톤시약 처리 및 30% 과산화수소 수용액을 이용하여 전처리를 진행한 후 2차여과하여 FT-IR 분석에 사용하였다.

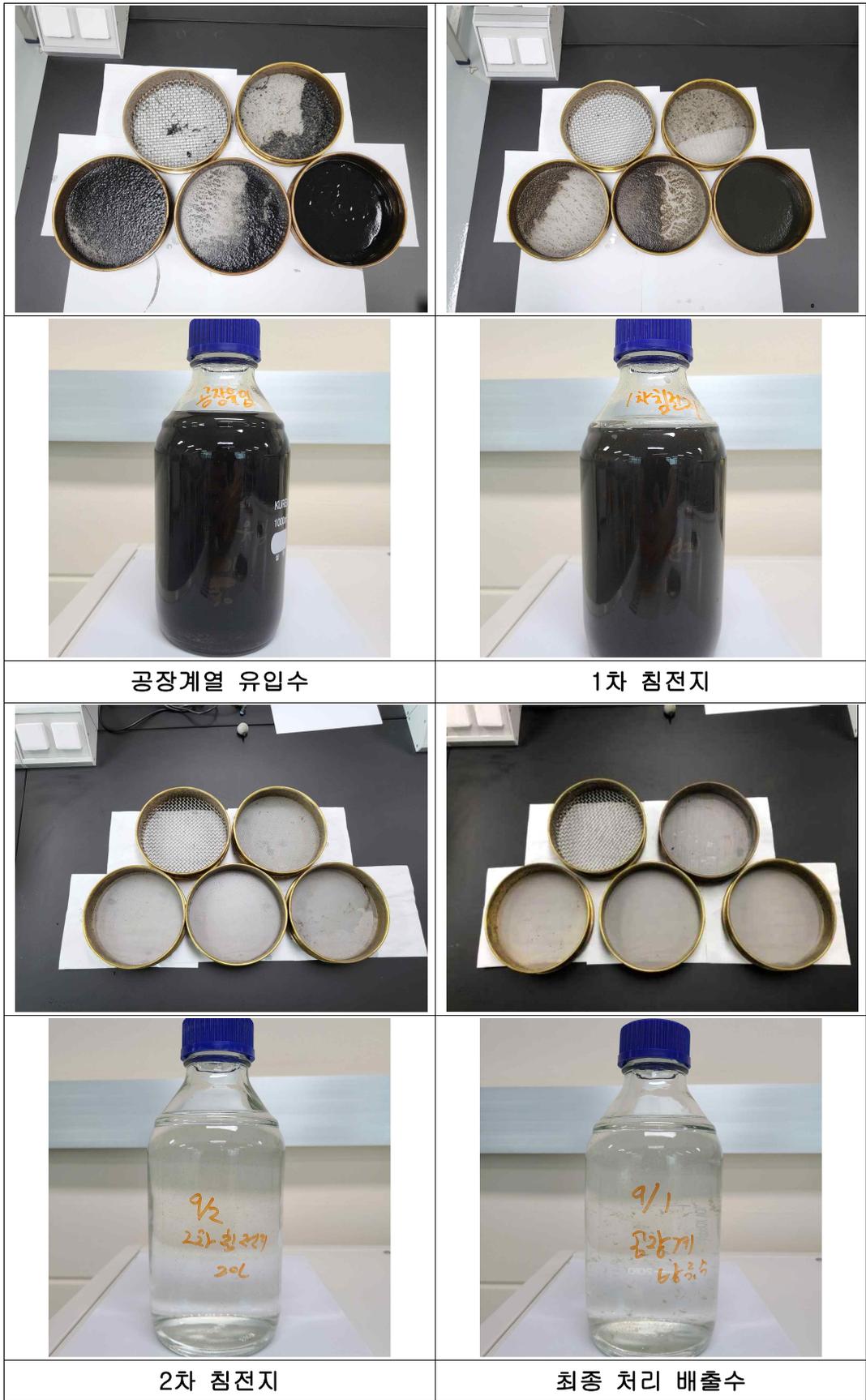


그림 41. 기름망 분리 및 수집된 고형물

4.1.3.4 하수처리장 공정별 채취 시료의 미세플라스틱 FT-IR 분석

본 연구에서의 FT-IR 분석은 microscope IR을 통해 분석된 고형물 입자를 Focal Plane Array image mapping을 적용하여 $750\sim 4,000\text{ cm}^{-1}$ 을 4 cm^{-1} 의 resolution으로 분석하였다. 또한 데이터해석은 SIMPLE software을 사용하였으며 data library와 비교하여 $3,500\sim 2,700\text{ cm}^{-1}$ 구간 매칭률 60%이상, $1,800\sim 1,000\text{ cm}^{-1}$ 구간 매칭률 40%이상 되는 스펙트럼을 분석하였다. 분석에 사용된 시료는 채집된 시료 중 1/2를 사용하였다. 그림 41은 채취된 하수처리장 공장계열 처리공정별 시료에 대해 현미경으로 촬영한 여과시료를 나타낸 것이다. 현미경으로 촬영한 여과시료를 확인한 결과 모든 시료에서 육안으로 관찰 가능한 많은 양의 미세 고형물이 관찰되었다. 또한 image mapping 프로그램을 활용하여 분석된 하수처리장 공장계열 처리공정별 시료에 대한 고형물의 형태 및 크기를 표현한 spectra map을 분석한 결과 특이점 없이 다양한 크기와 형태의 고형물이 무작위로 존재하는 것으로 나타났다.

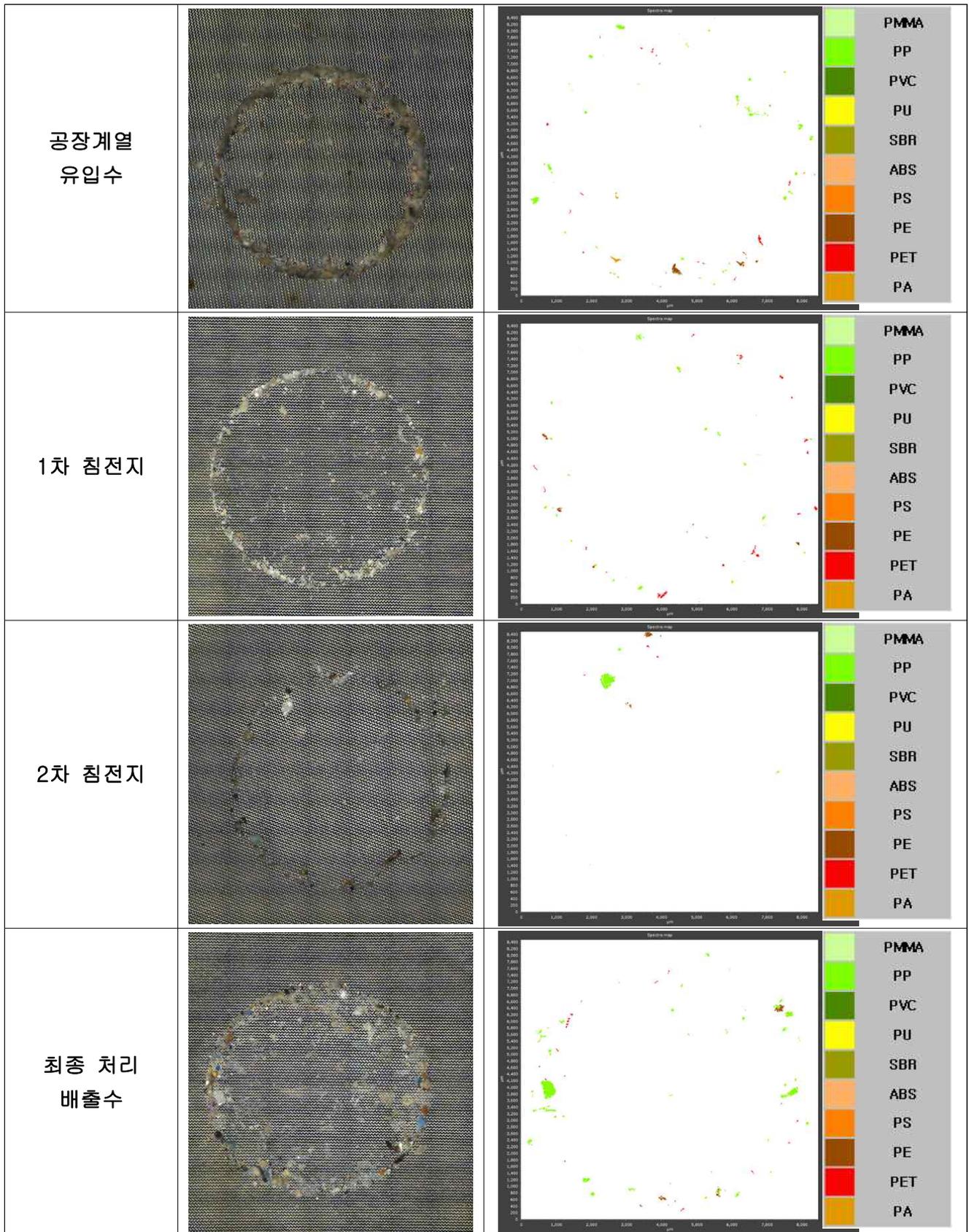


그림 42. 현미경으로 관찰한 각 하천별 고형물 및 spectra map

표 11은 현미경 분석 및 image mapping 분석을 통해 각각의 시료에 대한 미세플라스틱의 정량 분석결과를 나타낸 것이다. 분석결과 하수처리장 공장계열 유입수 시료에서는 96개/15L, 1차 침전지 시료에서 63개/10L, 2차 침전지 시료에서 13개/10L, 최종 처리 배출수 시료에서 96개/300L의 미세플라스틱 추정물질이 검출되었다. 분석된 시료량의 차이를 고려하여 단위부피당 개수로 분석결과를 환산해보면 하수처리장 공장계열 유입수 시료에서는 6.2개/L, 1차 침전지 시료에서 6.3개/L, 2차 침전지 시료에서 1.3개/L, 최종 처리 배출수 시료에서 0.32개/L로 처리공정을 지남에 따라 미세플라스틱이 저감되는 것을 확인 할 수 있었다.

표 12. 하수처리장 공장계열 처리공정별 미세플라스틱 정량분석 결과

구분 \ 시료명	공장계열 유입수	1차 침전지	2차 침전지	최종 처리 배출수
시료량	15L	10L	10L	300L
개수	96개	63개	13개	96개

4.1.3.5 하수처리장 공정별 채취 시료의 미세플라스틱 정성 분석

다음은 안산시 하수처리장 공장계열 처리 공정별 채취 시료의 미세플라스틱 정성분석 결과이다. 먼저 하수처리장 공장계열 유입수의 경우 그림 42에 나타난 바와 같이 Polypropylene (PP), Polyethylene terephthalate (PET), Polyamide (PA), Polyethylene (PE)로 총 4종의 미세플라스틱이 검출되었다. 검출된 플라스틱에서는 PP가 51개로 전체 중 54.8%의 가장 많은 비율로 검출되었고 PET가 19개로 20.4%, PA가 14개로 15.1%, PE가 9개로 9.7%의 비율 순으로 확인되었다.

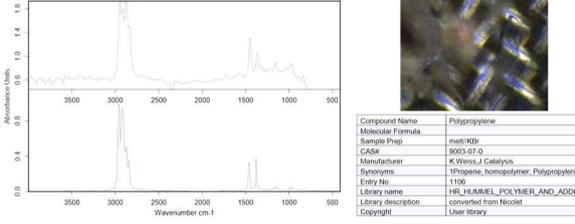
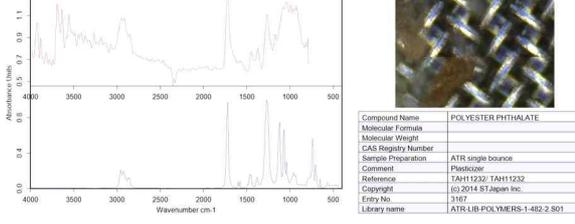
공장계열 유입수		■ 공장계 유입수 : Polypropylene (PP) 계 추정																																				
미세플라스틱 종류	개수																																					
Polypropylene (PP)	51	 <table border="1"> <tr><td>Compound Name</td><td>Polypropylene</td></tr> <tr><td>Molecular Formula</td><td></td></tr> <tr><td>Sample Prep.</td><td>multi-KBr</td></tr> <tr><td>CAS#</td><td>9003-07-0</td></tr> <tr><td>Manufacturer</td><td>K. Iwano, J. Calabasis</td></tr> <tr><td>Synonyms</td><td>1Propene, homopolymer, Polypropylene</td></tr> <tr><td>Entry No.</td><td>1106</td></tr> <tr><td>Library name</td><td>HPL_HAMMEL_POLYMER_AND_ADDIT</td></tr> <tr><td>Library description</td><td>converted from Nicolet</td></tr> <tr><td>Copyright</td><td>User library</td></tr> </table> <table border="1"> <thead> <tr> <th>Color</th> <th>Hit Quality</th> <th>Compound name</th> <th>CAS Number</th> <th>Molecular formula</th> <th>Molecular weight</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Blue</td> <td>512</td> <td>Polypropylene</td> <td>9003-07-0</td> <td></td> <td></td> </tr> </tbody> </table>					Compound Name	Polypropylene	Molecular Formula		Sample Prep.	multi-KBr	CAS#	9003-07-0	Manufacturer	K. Iwano, J. Calabasis	Synonyms	1Propene, homopolymer, Polypropylene	Entry No.	1106	Library name	HPL_HAMMEL_POLYMER_AND_ADDIT	Library description	converted from Nicolet	Copyright	User library	Color	Hit Quality	Compound name	CAS Number	Molecular formula	Molecular weight	Blue	512	Polypropylene	9003-07-0		
Compound Name	Polypropylene																																					
Molecular Formula																																						
Sample Prep.	multi-KBr																																					
CAS#	9003-07-0																																					
Manufacturer	K. Iwano, J. Calabasis																																					
Synonyms	1Propene, homopolymer, Polypropylene																																					
Entry No.	1106																																					
Library name	HPL_HAMMEL_POLYMER_AND_ADDIT																																					
Library description	converted from Nicolet																																					
Copyright	User library																																					
Color	Hit Quality	Compound name	CAS Number	Molecular formula	Molecular weight																																	
Blue	512	Polypropylene	9003-07-0																																			
Polyethylene terephthalate (PET)	19																																					
Polyamide (PA)	14																																					
Polyethylene (PE)	9																																					
X		 <table border="1"> <tr><td>Compound Name</td><td>POLYESTER PHTHALATE</td></tr> <tr><td>Molecular Formula</td><td></td></tr> <tr><td>Molecular Weight</td><td></td></tr> <tr><td>CAS Registry Number</td><td></td></tr> <tr><td>Sample Preparation</td><td>ATR single bounce</td></tr> <tr><td>Comment</td><td>Pesticide</td></tr> <tr><td>Reference</td><td>124111232, 1A411232</td></tr> <tr><td>Copyright</td><td>© 2014 STJAPAN Inc.</td></tr> <tr><td>Entry No.</td><td>3167</td></tr> <tr><td>Library name</td><td>ATR-LIB-POLYMERS-1462-2-801</td></tr> </table> <table border="1"> <thead> <tr> <th>Color</th> <th>Hit Quality</th> <th>Compound name</th> <th>CAS Number</th> <th>Molecular formula</th> <th>Molecular weight</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Blue</td> <td>634</td> <td>POLYESTER PHTHALATE</td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> </tbody> </table>					Compound Name	POLYESTER PHTHALATE	Molecular Formula		Molecular Weight		CAS Registry Number		Sample Preparation	ATR single bounce	Comment	Pesticide	Reference	124111232, 1A411232	Copyright	© 2014 STJAPAN Inc.	Entry No.	3167	Library name	ATR-LIB-POLYMERS-1462-2-801	Color	Hit Quality	Compound name	CAS Number	Molecular formula	Molecular weight	Blue	634	POLYESTER PHTHALATE			
Compound Name	POLYESTER PHTHALATE																																					
Molecular Formula																																						
Molecular Weight																																						
CAS Registry Number																																						
Sample Preparation	ATR single bounce																																					
Comment	Pesticide																																					
Reference	124111232, 1A411232																																					
Copyright	© 2014 STJAPAN Inc.																																					
Entry No.	3167																																					
Library name	ATR-LIB-POLYMERS-1462-2-801																																					
Color	Hit Quality	Compound name	CAS Number	Molecular formula	Molecular weight																																	
Blue	634	POLYESTER PHTHALATE																																				
합계	93																																					

그림 43. 하수처리장 공장계열 유입수 미세플라스틱 정성분석 결과

하수처리장 1차 침전지 시료의 경우 그림 43에 나타난 바와 같이 Polypropylene (PP), Polyethylene terephthalate (PET), Polyethylene (PE), Polyurethane (PU)로 총 4종의 미세플라스틱이 검출되었다. 검출된 플라스틱에서는 PP가 34개로 전체 중 54.0%의 가장 많은 비율로 검출되었고 PET가 24개로 38.1%, PE가 4개로 6.3%, PU가 1개로 1.6%의 비율 순으로 확인되었다.

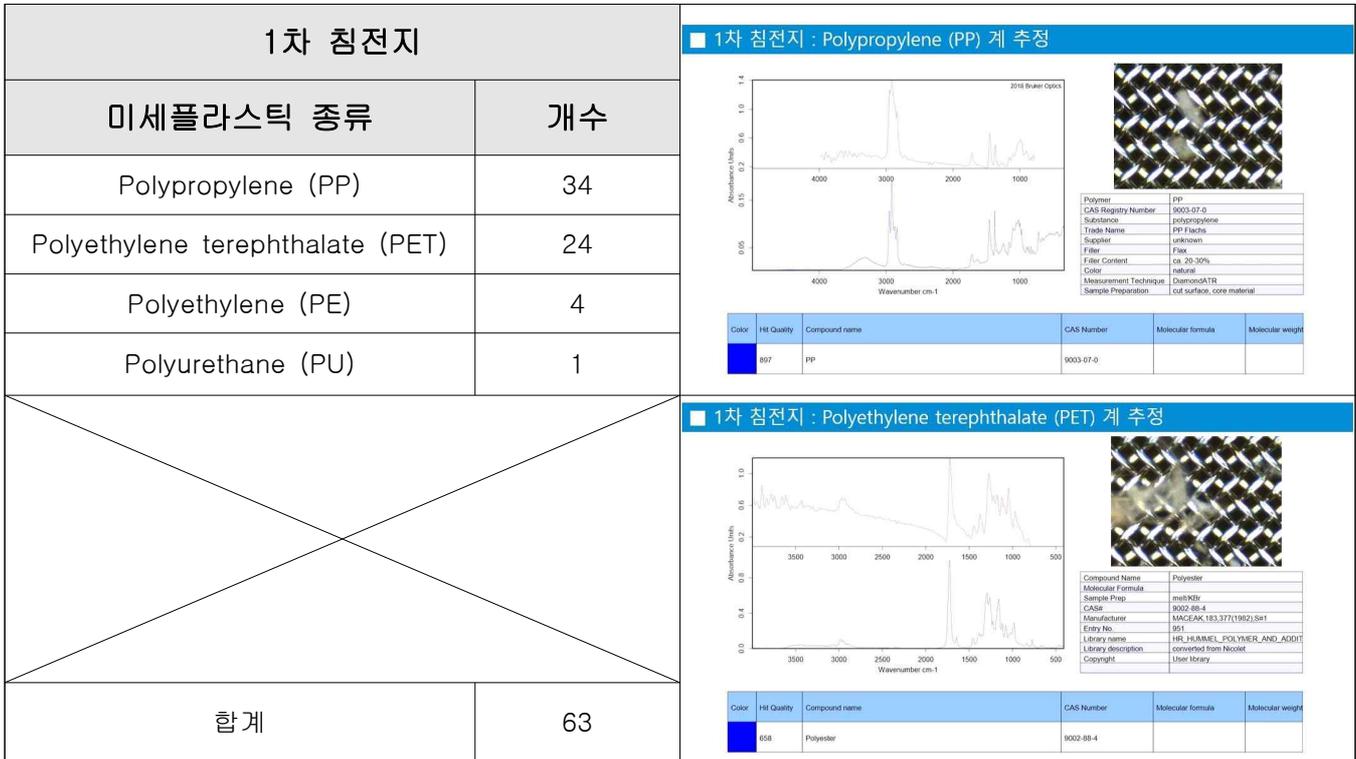


그림 44. 하수처리장 1차 침전지 미세플라스틱 정성분석 결과

하수처리장 2차 침전지 시료의 경우 그림 44에 나타난 바와 같이 Polypropylene (PP), Polyethylene terephthalate (PET), Polyethylene (PE)로 총 3종의 미세플라스틱이 검출되었다. 검출된 플라스틱에서는 PP가 6개로 전체 중 46.2%의 가장 많은 비율로 검출되었고 PET가 4개로 30.8%, PE가 3개로 23.1%의 비율 순으로 확인되었다.

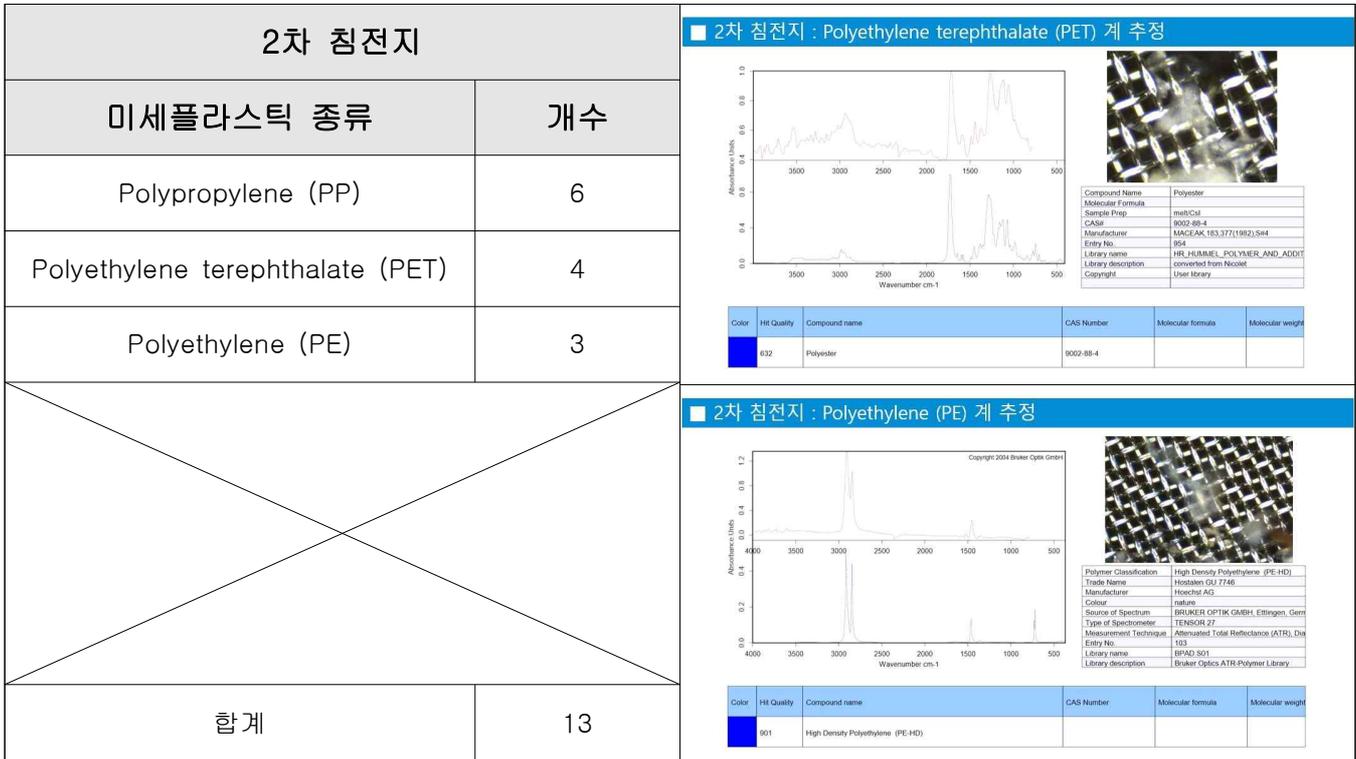


그림 45. 하수처리장 2차 침전지 미세플라스틱 정성분석 결과

하수처리장 공장계열 최종 처리 배출수 시료의 경우 그림 45에 나타난 바와 같이 Polypropylene (PP), Polyethylene terephthalate (PET), Polyethylene (PE), Polyamide (PA)로 총 4종의 미세플라스틱이 검출되었다. 검출된 플라스틱에서는 PP가 62개로 전체 중 64.6%의 가장 많은 비율로 검출되었고 PET가 27개로 28.1%, PE가 6개로 6.3%, PA가 1개로 1.0%의 비율 순으로 확인되었다.

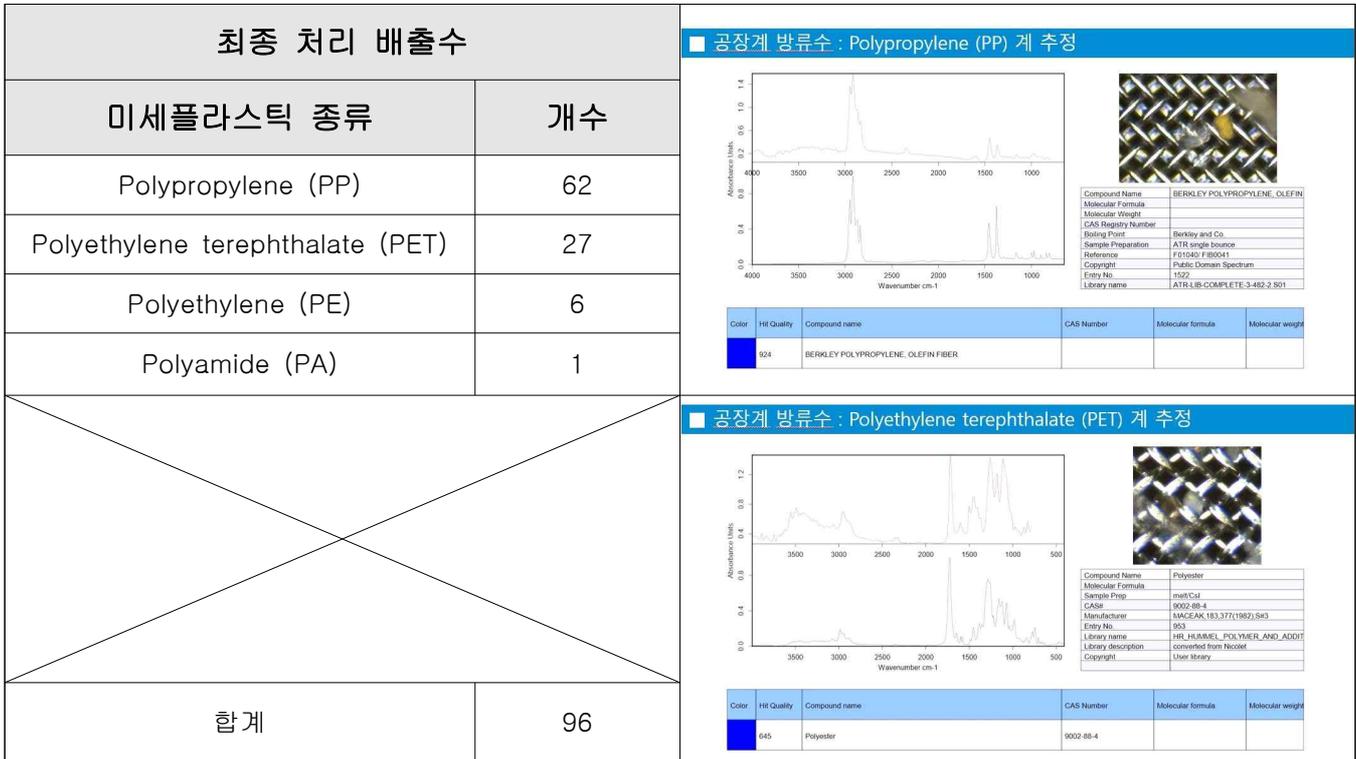


그림 46. 하수처리장 최종 처리 배출수 미세플라스틱 정성분석 결과

4.1.3.6 하수처리장 공정별 채취 시료 미세플라스틱 수계 영향 분석

다음은 위와 같은 결과를 종합하여 안산시 하수처리장 처리공정에서의 미세플라스틱 저감 및 배출 영향을 분석하였다. 그림 46은 안산시 하수처리장 처리공정별 미세플라스틱 분포를 비교하여 그래프로 나타낸 것이다. 분석된 상황에 따라 측정된 시료의 양이 다르기 때문에 각각의 분석된 결과를 동일한 부피로 환산하여 미세플라스틱 배출량(N/L)을 계산하였다. 분석 결과에 따르면 안산시 하수처리장에 유입되는 공장계열 폐수 중 포함된 미세플라스틱은 6.2개/L이며 물리적 침전으로 침강성이 있는 고형물 입자를 제거하기 위한 1차 침전지를 통해 유입수 중 대부분의 미세플라스틱이 저감된다. 1차 침전지에서 월류된 일부 침강성 미세플라스틱과 비중이 작은 부유성 미세플라스틱은 생물학적 활성슬러지 공정의 잉여슬러지 폐기를 위한 2차 침전지에서 추가적으로 저감되며 최종적으로 배출되는 미세플라스틱은 0.32개/L로 하수처리장 유입수에 존재하는 미세플라스틱 대비 약 95% 이상 저감되어 수계로 방류되는 것으로 나타났다. 1차년도에 분석된 하수처리장 공장계열 최종 처리수의 미세플라스틱 농도가 0.3개/L 임을 고려하였을 때 배출수의 미세플라스틱 농도는 비교적 일관성이 있게 배출되는 것으로 판단된다.

안산하수처리장은 일간 약 20만 톤의 공장계열 유입수를 반입하여 처리하고 있으며 유입유량의 약 80% 가량을 방류수로 배출한다고 가정하였을 때 일간 약 16만 톤의 최종 처리수를 방류하므로, 이를 배출 미세플라스틱 농도를 반영하여 계산하면 일간 약 48백만개의 크고 작은 미세플라

스틱이 생태계로 방출될 가능성이 있다. 또한 본 연구에서 분석된 미세플라스틱의 크기 범위 (100~300 μm)를 고려하면 이보다 더 작은 크기의 미세플라스틱이 추가적으로 배출될 가능성이 높으며 이처럼 자연으로 배출되는 미세플라스틱을 관리하기 위해 이에 대한 주기적인 모니터링과 저감대책은 확보할 필요성이 있는 것으로 판단된다

2D Graph 3

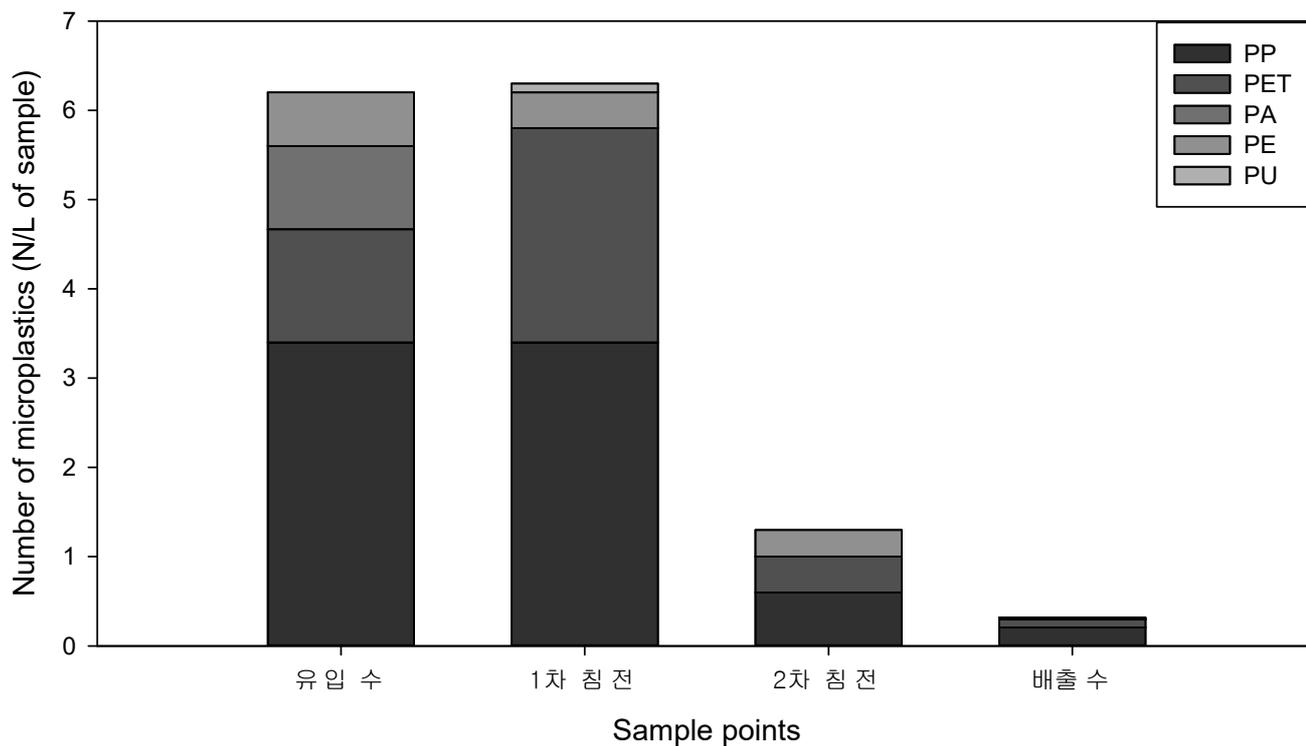


그림 47. 하수처리장 공장계열 처리공정별 미세플라스틱 분포

4.2 담수 생물의 미세플라스틱 섭취에 따른 생태축적 연구

4.2.1 하천 생물 내 미세플라스틱 섭취영향 분석

4.2.1.1 하천 생물 미세플라스틱 축적 분석을 위한 생물 채집

그림 47은 수계 내 하천 생물 미세플라스틱 축적 분석을 위한 현장 생물 채집과정을 나타낸 것이다. 채집 지점은 수계 하천 중 안산천의 하류지점으로 선정하였으며, 하천 생물의 채집은 연구자가 직접 투망 등의 생물 채집도구를 이용하여 하천의 중앙부분 및 천변에서 수집할 수 있도록 하였다. 채집된 하천 생물은 생물의 부패 및 손상을 방지하기 위해 아이스박스에 담아 실험실로 바로 운반하였다. 표 12는 위와 같은 과정을 거쳐 채집된 생물 사진과 크기를 나타낸 것이다. 생물 채취 과정을 통해 붕어 1마리와 민물게 1마리를 채집하였으며 각각의 크기와 무게는 붕어는 약 18cm 길이에 무게는 약82g, 민물게는 약 25cm 길이에 무게는 약 36g 으로 측정되었다.

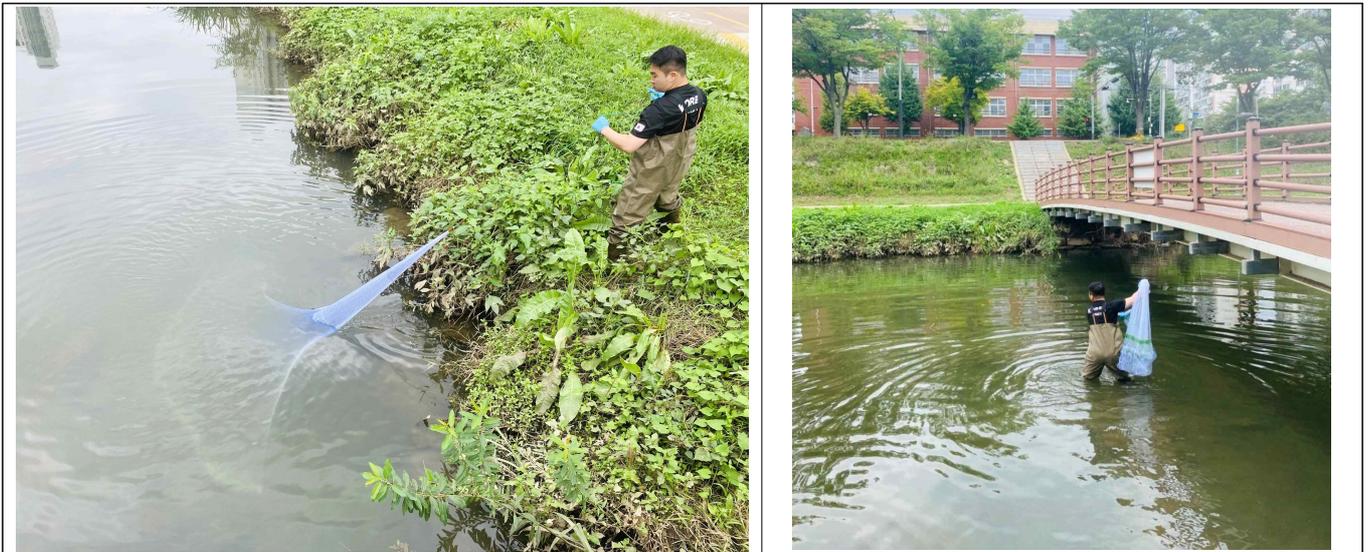


그림 48. 대상 수계 하천 생물 채취 과정

표 13. 채취된 하천생물 사진 및 크기

채취 하천 생물	크기	무게
	<p>약 18 cm</p>	<p>약 82 g</p>
	<p>약 25 cm</p>	<p>약 36 g</p>

4.2.1.2 하천 생물 내 미세플라스틱 분석을 위한 전처리

담수 및 해수에 존재하는 어류는 수계에 부유 및 침전되어 있는 미세플라스틱을 섭취하여 아가미, 내장 등에 축적되어 있다. 이러한 어류 내 미세플라스틱의 함량을 분석하기 위해서는 화학약품을 사용한 전처리가 필요하며 KOH, NaClO, H₂O₂, HCl, HNO₃, NaOH 등의 화학약품을 사용하여 어류의 피부조직, 내장 등의 유기물질을 분해한다. 표 13은 다양한 용액에서 온도에 따른 어류의 유기물질 분해효율을 나타낸 것이다. KOH 용액의 경우 평가된 모든 온도에서 97% 이상의 안정된 분해효율을 보였으며, HCl, HNO₃의 용액의 경우 높은 분해효율을 보였으나 고농도의 HCl, HNO₃ 용액은 어류의 유기물질과 plastic polymers의 분해가 동시에 이루어져 신뢰성 있는 미세플라스틱 분석에는 적합하지 않은 용액으로 보고되었다.

표 14. 다양한 용액에서 온도에 따른 어류 내 유기물질 분해효율(%)

용액	온도(℃)			
	25(상온)	40	50	60
KOH	97.1%	98.6%	98.9%	97.61%
NaClO	82%	77.7%	80.7%	67.92%
H2O2	87.4%	93.5%	98.3%	100%
HCl 37%	100%	98.8%	100%	99.8%
HCl 5%	53.3%	78.8%	78.3%	88.9%
HNO3 69%	99.9%	93.8%	91.4%	94.4%
HNO3 5%	52.5%	78.4%	82.2%	91.8%
NaOH	28.8%	49.4%	82.7%	91%

Ali 등의 연구에 따르면 화학약품과 노출시간, 온도 등의 실험을 통해 그림 48의 추출과정이 미세플라스틱을 추출하는데 가장 효율이 높은 것으로 보고되었다. 추출과정은 KOH 10% 용액을 10:1의 용액/유기물 비율로 주입한 후 40℃에서 48-72시간 동안 배양한다. 그 후 멤브레인 필터를 통해 분해된 유기물질과 용액을 여과 및 분리한다. 필터에 여과된 유기물질은 4.4M NaI Solution과 혼합된 상태로 Bottle에 주입한다. 주입된 Bottle은 50Hz에서 5분동안 초음파 처리 후 200rpm에서 5분동안 교반을 진행한 후 500rpm에서 2분간 원심분리를 거쳐서 고형물과 상등액을 분리한다. 이렇게 분리된 고형물은 4.4M NaI Solution에 다시 혼합하여 2회 초음파처리 및 원심분리를 진행하고, 상등액은 멤브레인 필터 여과를 수행하여 최종적으로 여과된 용액 내 미세플라스틱 분석을 수행한다(Ali, et al., 2017).

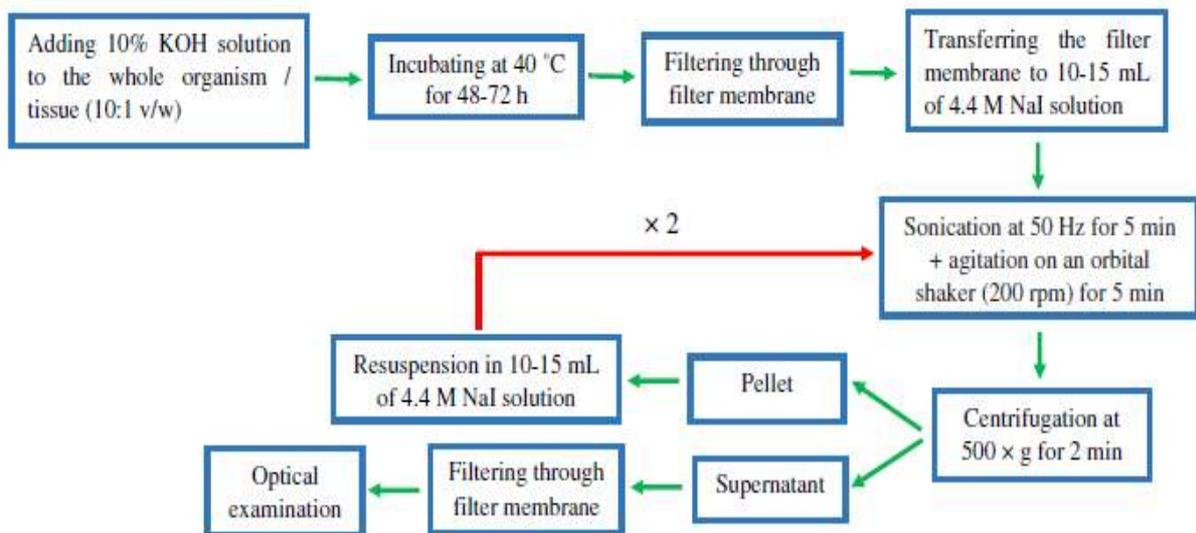


그림 49. 어류 내 미세플라스틱 추출과정

표 14는 본 연구에서 채집된 하천 생물을 해부한 모습과 각각의 부위별 무게를 나타낸 것이다. 채집한 붕어와 민물게의 미세플라스틱 축적을 분석하기 위해 살, 아가미 및 내장으로 분리 해부 하였으며 각각의 무게를 측정된 이후 전처리 과정을 진행하였다.

표 15. 채취 생물 부위별 해부 사진 및 무게

붕어	사진			
	부위	살	아가미	내장
	무게	13.7g	2.3g	4.2g
민물게	사진			
	부위	살	아가미	내장
	무게	1.8g	0.8g	2.9g

이와 같은 시료는 생물 시료이기 때문에 단백질, 지방과 같은 구성성분이 대부분을 차지하며, 이러한 물질을 제거하고 시료에 포함된 미세플라스틱을 측정하기 위해서는 앞선 수계 시료의 전처리보다는 보다 복잡한 과정의 전처리가 필요하다. 전처리 과정은 우선 개별 비커에 해부된 각각의 부위 시료를 잘게 잘라 담은 후 10% KOH 용액을 150 mL 첨가하여 40°C 온도에서 약 1주일간 1차 분해과정을 진행한다. 1차 분해과정을 마친 후 추가적으로 H₂O₂ 용액을 약 1주일간 매일 1 ~ 10 mL씩 투입하며 미세플라스틱을 제외한 나머지 물질을 분해하는 2차 분해과정을 진행한다. 최종적으로 분해가 완료된 시료는 20 µm Metal Filter를 사용하여 감압 여과하고, 부유물이 남아있을 경우 TWEEN-20 0.1% 용액과 에탄올을 첨가하여 부유물을 분산시킨 뒤 20 µm Metal Filter를 사용하여 감압 여과 후 FT-IR 분석에 사용하였다.

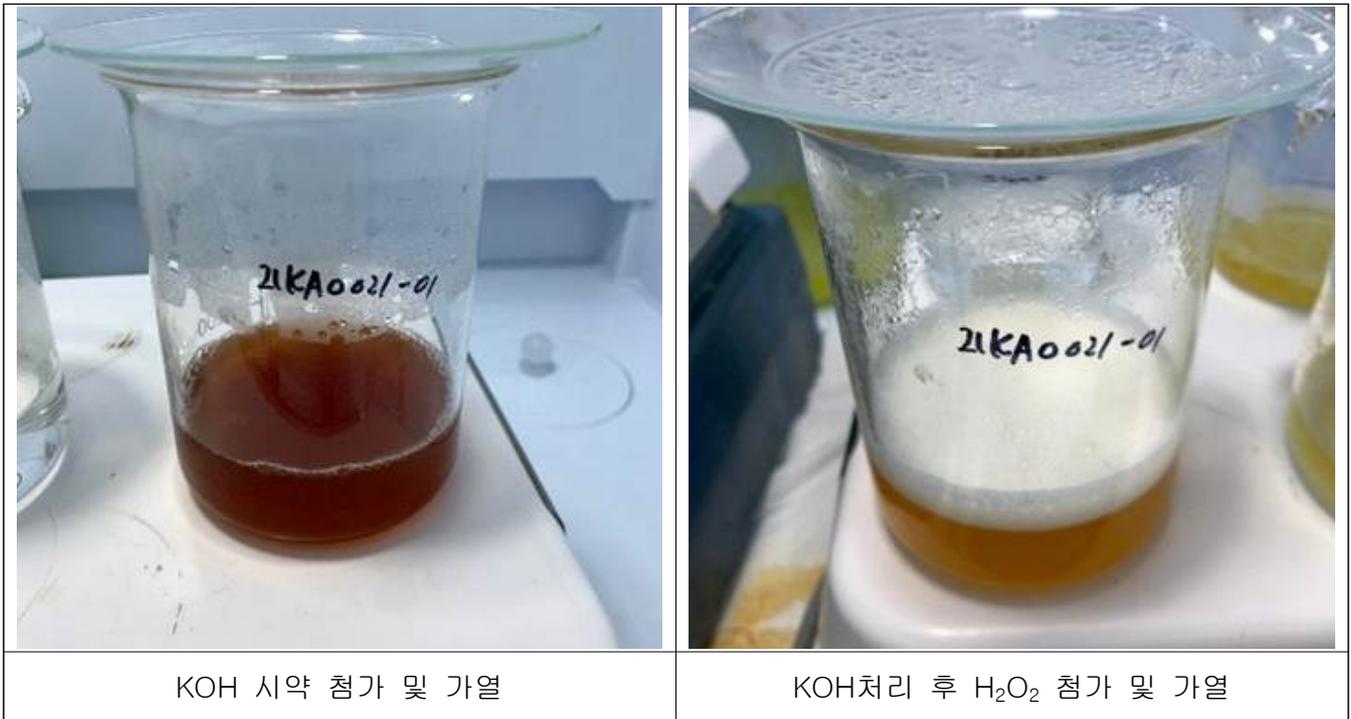


그림 50. 생물시료의 전처리 과정

4.2.1.3 저서 생물 시료의 미세플라스틱 FT-IR 분석

본 연구에서의 FT-IR 분석은 microscope IR을 통해 분석된 고형물 입자를 Focal Plane Array image mapping을 적용하여 750~4,000 cm^{-1} 을 4 cm^{-1} 의 resolution으로 분석하였다. 또한 데이터 해석은 SIMPLE software를 사용하였으며 data library와 비교하여 3,500~2,700 cm^{-1} 구간 매칭률 60%이상, 1,800~1,000 cm^{-1} 구간 매칭률 40%이상 되는 스펙트럼을 분석하였다.

그림 50은 각 하천 생물 부위별 시료에 대해 현미경으로 촬영한 여과시료를 나타낸 것이다. 현미경으로 촬영한 여과시료를 확인한 결과 모든 시료에서 미세 고형물이 관찰되었으며 특히 전반적으로 붕어시료에서 많은 양의 미세 고형물이 관찰되었다. 또한 그림 51과 같이 image mapping 프로그램을 활용하여 분석된 각 하천 생물 시료에 대한 고형물의 형태 및 크기를 표현한 spectra map을 분석한 결과 특이점 없이 다양한 크기와 형태의 고형물이 무작위로 존재하는 것으로 나타났다. 표 15는 현미경 분석 및 image mapping 분석을 통해 각각의 시료에 대한 미세플라스틱의 정량 분석결과를 나타낸 것이다. 시료별로 분석된 미세플라스틱 개수를 단위질량으로 나누어 분석한 결과 붕어 시료에서 살 6개/g, 아가미 21.3개/g, 내장 34.5개/g의 미세플라스틱 추정물질이 검출되었고, 민물게 시료에서 살 11.1개/g, 아가미 7.5개/g, 내장 17.9개/g의 미세플라스틱 추정물질이 검출되었다. 결과에 나타난 바와 같이 생물 체내에 분포하는 미세플라스틱은 살<아가미<내장 순으로 나타났으며 이는 생물의 먹이 섭취과정에서 미세플라스틱이 체내로 유입되어 섭취

기관인 아가미와 소화기관인 내장 부위에 비교적 많은 양의 미세플라스틱이 축적된 것으로 판단된다. 또한 살 부분에서도 일부 미세플라스틱이 추정 물질이 분석되어 미세플라스틱의 생물 체내 이동으로 인한 축적을 의심 할 수 있는 결과를 나타냈다.

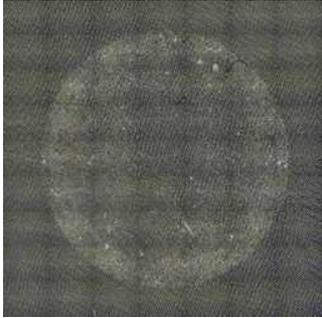
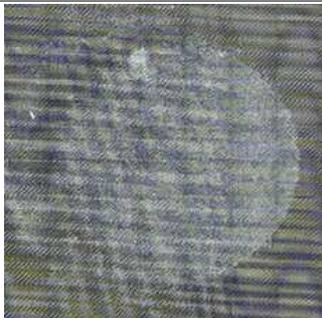
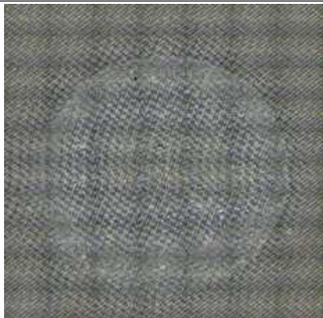
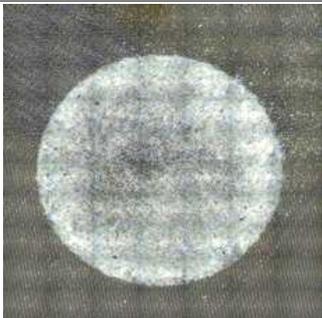
붕어			
	살	아가미	내장
민물게			
	살	아가미	내장

그림 51. 현미경으로 관찰한 각 하천별 고형물

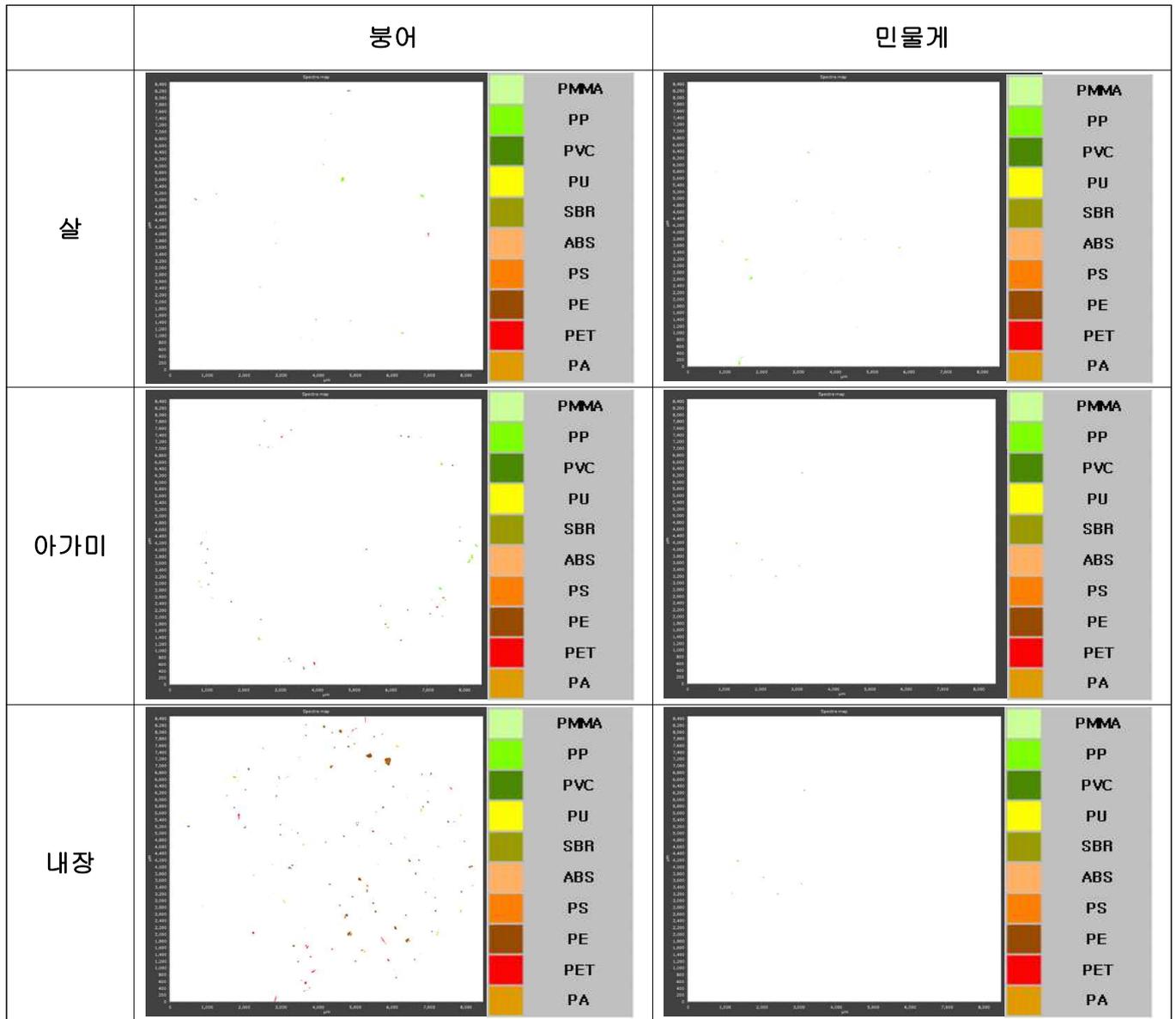


그림 52. 생물 시료 고형물 spectra map

표 16. 각 하천별 시료 미세플라스틱 정량분석 결과

구분	시료명	붕어		
		살	아가미	내장
	시료량	3g	2.3g	4g
	개수	18개	49개	138개
구분	시료명	민물게		
		살	아가미	내장
	시료량	1.8g	0.8g	2.9g
	개수	20개	6개	52개

4.2.1.4 하천 생물 시료의 미세플라스틱 정성 분석

다음은 하천 생물 채취 시료의 미세플라스틱 정성분석 결과이다. 본 결과는 동일 개체에 축적된 미세플라스틱이기 때문에 분석 부위별로 나누지 않고 모든 부위에서 검출된 미세플라스틱 정성분석 결과를 합하여 나타내었다. 먼저 봉어 시료의 경우 그림 52에 나타난 바와 같이 Polypropylene (PP), Polyethylene terephthalate (PET), Polyamide (PA), Polyethylene (PE), Polyvinyl chloride (PVC)로 총 5종의 미세플라스틱이 검출되었다. 검출된 플라스틱에서는 PE가 103개로 전체 중 50.2%의 가장 많은 비율로 검출되었고 PP가 60개로 29.3%, PET가 31개로 15.1%, PE가 9개로 4.9%, PVC가 1개로 0.5%의 비율 순으로 확인되었다.

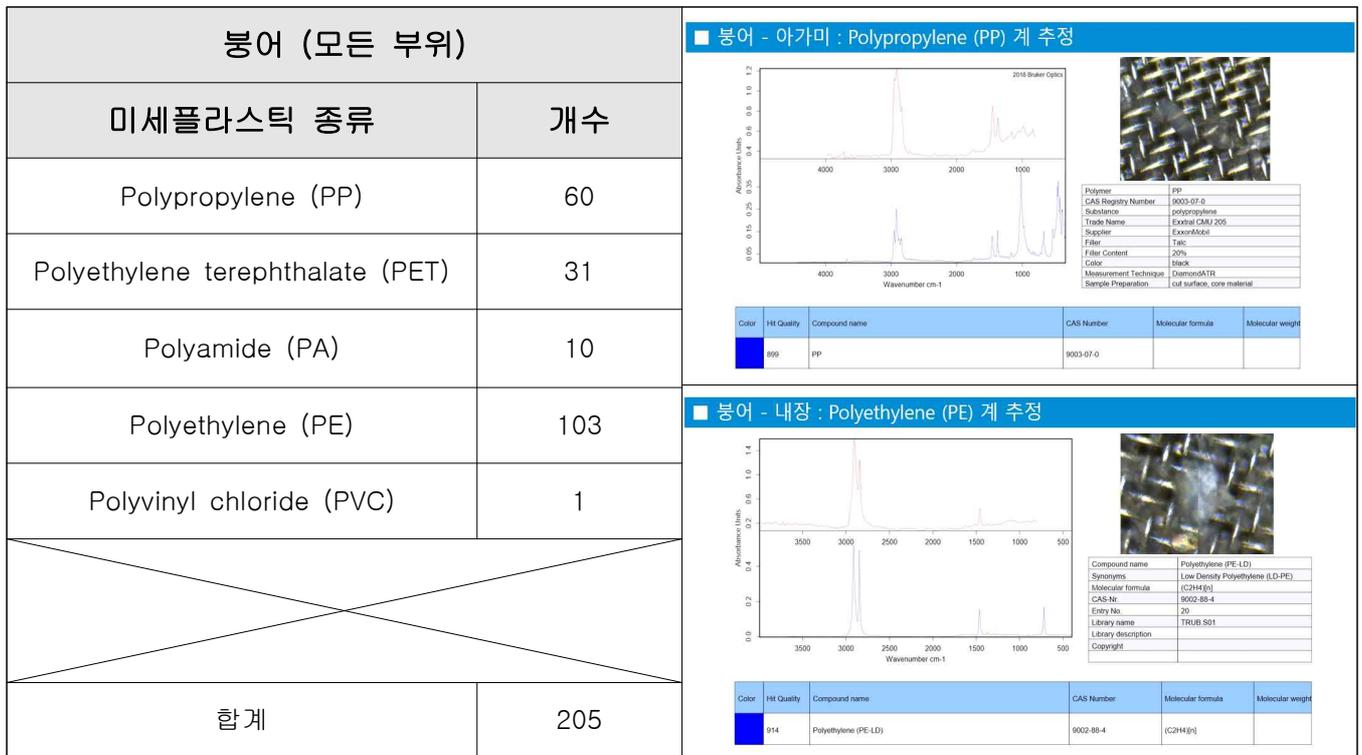


그림 53. 하수처리장 공장계열 유입수 미세플라스틱 정성분석 결과

다음은 민물계의 미세플라스틱 축적 결과를 나타낸 것이다. 그림 53에 나타난 바와 같이 Polypropylene (PP), Polyamide (PA), Polyethylene (PE), Polymethyl methacrylate (PMMA), Polyurethane (PU)로 총 5종의 미세플라스틱이 검출되었다. 검출된 플라스틱에서는 PP가 45개로 전체 중 57.7%의 가장 많은 비율로 검출되었고 PA가 17개로 21.8%, PE가 13개로 16.7%, PU가 2개로 2.6%, PMMA가 1개로 1.3%의 비율 순으로 확인되었다.

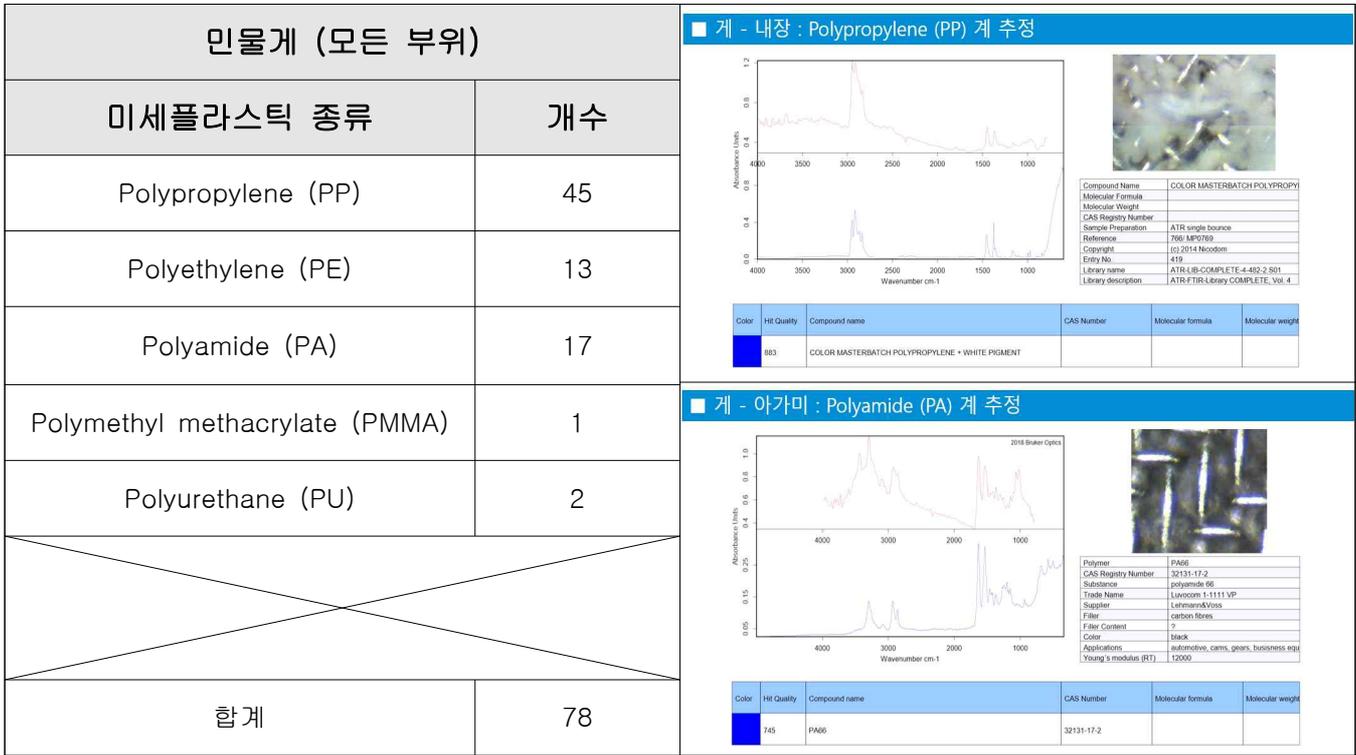


그림 54. 하수처리장 공장계열 유입수 미세플라스틱 정성분석 결과

4.2.1.5 하천 생물의 미세플라스틱 축적 및 영향 분석

다음은 위와 같은 결과를 종합하여 안산시 수계 하천 생물의 미세플라스틱 축적을 분석하였다. 그림 54는 안산시 하천 생물에 축적된 미세플라스틱의 체내 분포를 그래프로 나타낸 것이다. 분석된 상황에 따라 측정된 시료의 양이 다르기 때문에 각각의 분석된 결과를 동일한 중량에 포함된 미세플라스틱 개수로 환산하여 미세플라스틱 축적량(N/g)을 계산하였다. 분석 결과에 따르면 수계 하천 생물 중 어류인 붕어에 축적된 미세플라스틱은 22.04 개/g 이며 체내 분포는 살<아가미<내장 순으로 붕어의 섭취활동과 관련된 기관에서 많은 양의 미세플라스틱이 관찰되었다. 또한 수계 하천 생물 중 갑각류인 민물게에 축적된 미세플라스틱은 14.18 개/g 로 붕어 체내에 축적된 미세플라스틱에 비해 단위중량당 개수는 적게 나타났으며, 체내 분포는 아가미<살<내장 순으로 붕어에서와 마찬가지로 섭취활동과 관련된 내장에서 가장 많은 양의 미세플라스틱이 관찰되었다. 이는 측정된 두가지 생물 모두 먹이를 섭취하는 과정에서 수계에 존재하는 많은 양의 미세플라스틱이 함께 섭취되고 있는 것으로 볼 수 있으며, 자연환경에 서식하는 생물이 미세플라스틱에 오염될 수 있는 다른 외부적인 요인이 없음을 고려하였을 때 수계 하천의 표층수 및 퇴적토에 존재하는 미세플라스틱이 이러한 생물 내에 축적되는데 많은 부분 영향을 주고 있는 것으로 판단된다. 따라서 수계에 존재하는 생물의 미세플라스틱 축적으로 인한 생태영향을 방지하기 위해서는 수계로 배출되는 미세플라스틱의 관리 및 저감이 우선적으로 수행되어야 할 것이다.

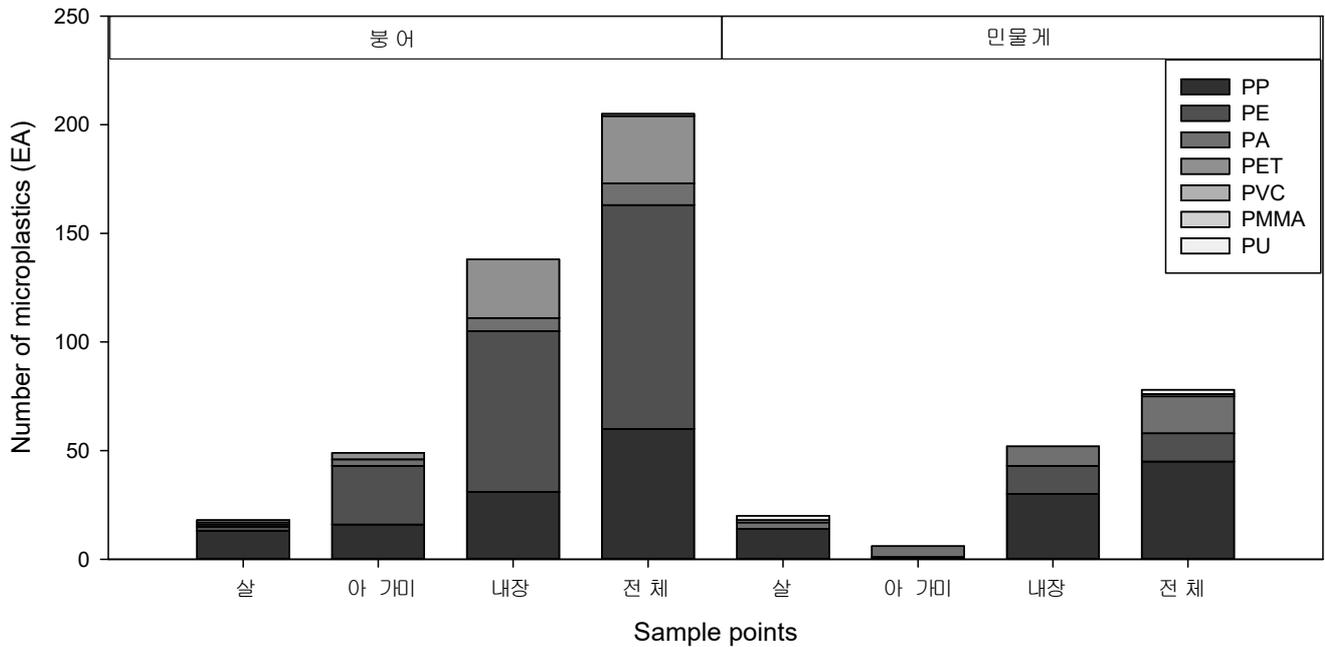


그림 55. 안산시 하천 생물에 축적된 미세플라스틱 체내 분포

지금까지 수행된 다수의 연구에 의하면 수계에 존재하는 생물들에 다량의 미세플라스틱이 흡착 및 섭취되어 생물축적이 발생한다고 보고되고 있다. 특히 해수 내 어류에 대한 연구가 많이 이루어졌으며 대부분의 해양생물에 미세플라스틱이 섭취 및 흡착된 상태로 생물축적 되어 있는 것으로 관찰되었다. 표 16은 Feng 등의 연구에 의해 해양 생태 내 124마리의 어류를 포획 및 6개의 종으로 분류하여 그에 대한 특성 및 어류 내 미세플라스틱 분포를 나타낸 것이다. 124마리의 어류의 특성에 따라서 어류의 내장, 아가미, 피부 중 어느 부위에 미세플라스틱이 분포하는지를 관찰한 결과, 비늘의 유무에 관계없이 미세플라스틱이 존재하는 것으로 나타났으며, 대부분의 경우 피부와 아가미에서 내장보다 많은 양의 미세플라스틱이 관찰되었다. 특히, 아가미를 통해 여과식으로 섭식하는 어류종은 아가미에 특히 더 많은 미세플라스틱이 관찰된 것으로 보고되었다(Feng, et al., 2019).

표 17. 해양서식 어류종류 및 특성에 따른 어류 내 미세플라스틱 분포

어류 종류	A. hexanema	C. stigmatias	O. rubicundus	C. lucidus	C. semilaevis	T. kammal ensis	Total
섭식방법	육식	육식	육식	육식	육식	여과식	-
포획량	23	16	23	17	26	19	124
길이(cm)	20.3	19.7	19.2	9.1	15.6	7.4	-
무게(g)	114.9	72	72.2	35.7	34.8	9.2	-
비늘유무	X	X	X	O	O	O	-
체내 플라스틱 개수	2	1	3	1	2	0	9
체내 미세플라스틱 개수	410	238	399	239	352	422	2060
어류 내장 미세플라스틱 개수	69	55	84	69	117	120	514
어류 아가미 미세플라스틱 개수	127	70	124	97	125	203	746
어류 피부 미세플라스틱 개수	214	113	191	73	110	99	800

그림 55는 어류의 내장, 아가미, 피부에서 분석된 미세플라스틱의 크기 분포를 각각의 어류 종류에 따라서 나타낸 그래프이다. 6개의 종류 모두 편차가 있긴 하지만 대부분 2mm이하의 미세플라스틱이 축적되어 있는 것으로 관찰되었다. 그림 56은 어류 내 존재하는 미세플라스틱의 유형 분포와 물질의 스펙트럼을 나타낸 것이다. CP, PP, PE, Nylon, PET 등의 다양한 성분의 미세플라스틱이 관찰되었으며, 이 연구에서는 Cellophane(CP) 성분이 가장 많은 것으로 보고되었다. 셀로판은 주로 식품, 의약품, 상품의 포장재로 널리 사용되는데 이러한 물질들이 바다로 유입되는 것을 원인으로 보고 있다. 이밖에도 국외 다수의 담수와 해수의 어류종의 미세플라스틱 섭취 현황 연구가 있으며, 표 17과 18에 정리하였다.

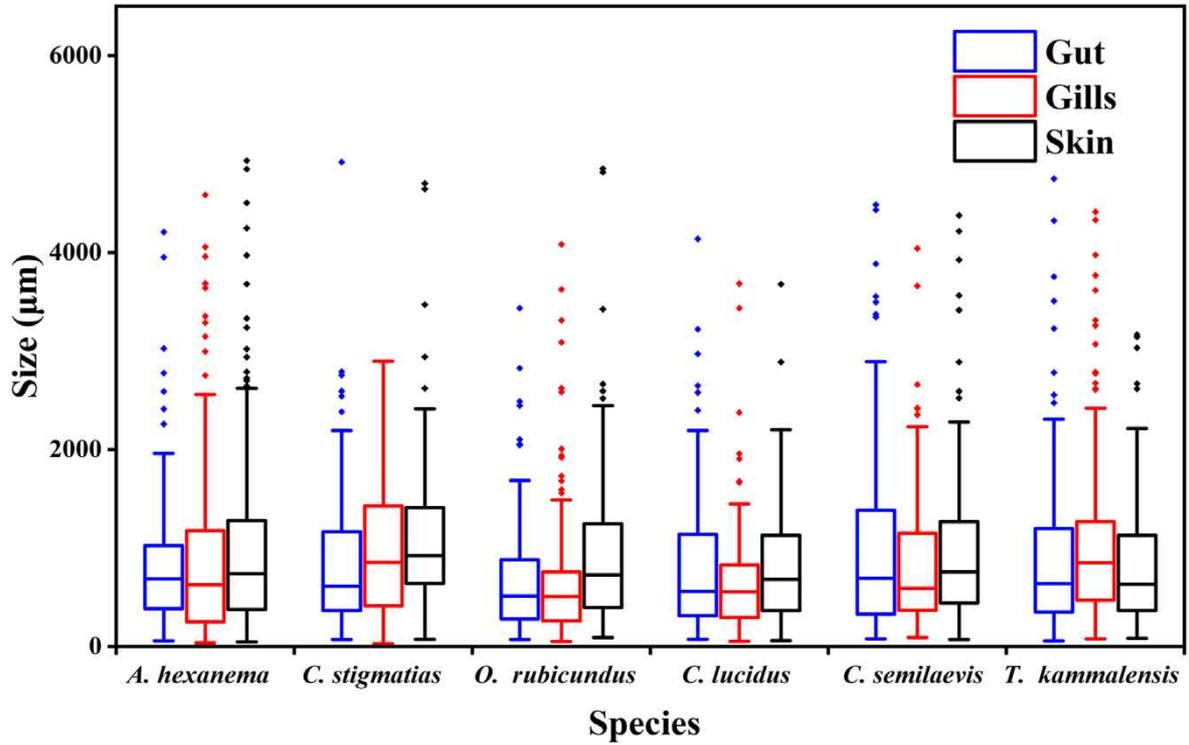


그림 56. 어류의 내장, 아가미, 피부에서 미세플라스틱 크기분포

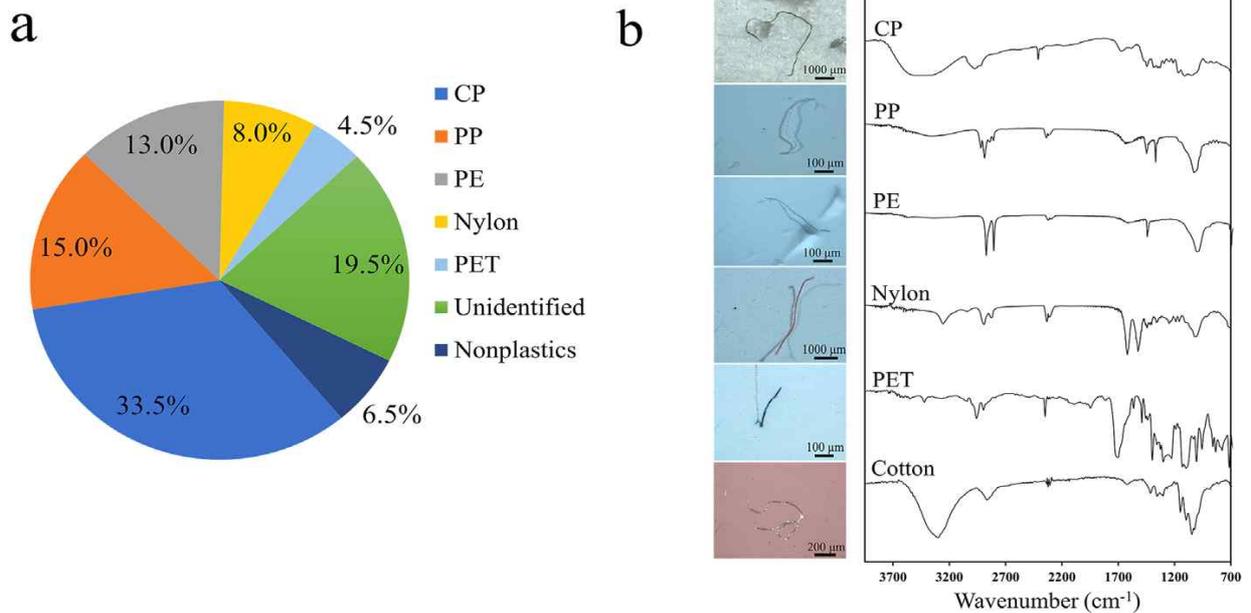


그림 57. 어류 내 존재하는 미세플라스틱 유형분포(a)와 물질 스펙트럼(b)

표 18. 해수에서 어류가 섭취하는 미세플라스틱에 대한 현황

위치	어류 종류	미세 플라스틱 크기(mm)	입자형태	농도	polymer types	참고문헌	
Marine	North pacific Central Gyre	Indian Pacific starfish, Pacific saury, lantern fish, Chardonnay fish, Golden lanternfish & Bigfin lanternfish	1-2.79	Fragment, film, line, rope, foam	2.1±5.78 items/fish	/	Boerger et al.,2010
	Musa Estuary & Persian Gulf	Bartail flathead, Greater lizardfish, northern whiting & Tongue sole	0.1-1	Fiber&fragment	0.16±1.5 items/g	/	Abbasi et al., 2018
	North atlantic	Ten species of mesopelagic fish	0.5-11.7	Fiber&fragment	1.2±0.54 items/fish	/	Lusher et al., 2016
	Tuticorin coast, India	Indian mackerel & Honeycomb grouper	0.5-1	Fiber&fragment	30% contained microplastic	PE&PP	Kumar et al., 2018
	North Sea and Baltic Sea	Common dab, European flounder, Atlantic cod, Atlantic herring & Atlantic mackerel	5미만	Fragment, film, spherule&fiber	5% contained microplastic	PE, PA, PP, PS, PET, PU, rubber	Rummel et al., 2016
	Tokyo Bay, Japan	Japanese anchovy	0.15-6.83	Fragment, bead, filament, foam	2.3±2.5 items/fish	PE,PP,PS	Tanaka and Takada 2016
	South Africa urban harbor	Mullet	0.2-15	Fiber, fragment, foam, film&line	3.8±4.7 items/fish	/	Naidoo et al., 2016
	Western Mediterranean Sea	Blackmouth catshark	5미만	Fiber, fragment&film	0.34±0.07 items/fish	Cellophane, PET,PP,PA	Alomar and Deudero 2017

표 19. 담수에서 어류가 섭취하는 미세플라스틱에 대한 현황

위치		어류 종류	미세플라스틱 크기(mm)	입자형태	농도	polymer types	참고문헌
Fresh water	River Thames, UK	European flounder & European smelt	5미만	Fiber& fragment	20% contained microplastics	PE, PET, PA, acrylic	McGoran et al.,2017
	Brazos River Basin, USA	Bluegill & Longear	0.5-5	Thread,foam, line,sphere	45% contained microplastics	/	Peters and Bratton 2016
	Eleven French river	Gudgeon	5미만	fiber&pellet	12% contained microplastics	/	Sanchez et al., 2014
	Xiangxi Bay of Three Gorges Reservoir, China	Thirteen fish species	0.3-1.8	Line,fragment &sheet	25.7% contained microplastics	PE, PA	Zhang et al., 2017
	Amazon river estuary	Forty six fish species	0.38-4.16	Pellet,sheet&fragment	1.2±5.0 items/fish	PA, PE	Pegado et al., 2018
	Rio de la plata estuary, Argentina	Eleven fish species	0.6-4.7	Fiber and other shapes	19.2 items/fish	/	Pazos et al., 2017

4.2.2 미세플라스틱이 생태계에 미치는 영향

4.2.2.1 미세플라스틱의 생태계에 대한 물리적 화학적 영향

최근 다수의 연구에 따르면 생태계로 배출된 미세플라스틱은 물리적, 화학적으로 생태계에 부정적인 영향을 끼치고 있는 것으로 알려져 있으며, 그림 57에 미세플라스틱의 크기에 따른 물리화학적 생태계 영향정도를 나타내었다. 물리적 영향의 대표적인 특징은 미세플라스틱 섭취로 인한 영양감소, 구조적 피해(장기손상), 염증 반응 유도, 조직학적 변화 유발 등이 나타난다고 보고되고 있으며, 화학적 영향은 미세플라스틱에 포함된 첨가제 및 환경에 존재하는 소수성이 강한 잔류성 유기오염물질(persistent organic pollutants, POPs)이 어류 및 식물에 흡착되어 농축된 상태로 잔류하여 화학적인 유해 가능성이 있는 것으로 보고되고 있다. Lu 등의 연구에 따르면 담수어류인 제브라피시의 폴리스티렌 섭취 실험을 통해 미세플라스틱의 크기에 따른 생체 내 축적기관을 관찰한 결과, 5um 이하의 폴리스티렌의 경우 아가미, 간 및 창자에 축적되었고, 5um-20um 크기의 미세플라스틱은 아가미와 창자에서만 관찰되었다. 축적된 미세플라스틱은 어류의 간에서 염증반응과 지질 축적이 나타난다고 보고된 바 있으며, 미세플라스틱이 물리적으로 섭취되어 담수 내 생물에 미치는 영향에 대해 다수의 연구가 진행되고 있다. 해양생물에 미세플라스틱이 물리적, 화학적으로 얼마나 영향을 미치는지에 대한 연구도 활발히 진행되고 있다. 미세플라스틱이 해양 갑각류의 먹이활동을 둔화시키고, 지속적으로 노출 시 생존율 감소 및 번식량의 감소가 발생한다고 보고되고 있다 (Lu, et al., 2016). 2019년 한국환경정책평가 연구원의 연구에 따르면, 국내 해양 생태에서도 바다 지렁이가 Polyvinylchloride(UPVC)를 섭취한 경우 먹이활동의 저하 및 염증반응이 관찰되었으며 이 결과는 점진적으로 에너지 보유량의 감소, 성장 및 번식, 생존에도 영향을 미친다고 보고된 연구 결과가 있다. 이러한 미세플라스틱의 물리적, 화학적으로 생태계에 영향을 미치는 연구를 보면, 미세플라스틱이 부정적인 영향을 미치는 다수의 연구 결과가 보고되고 있다.

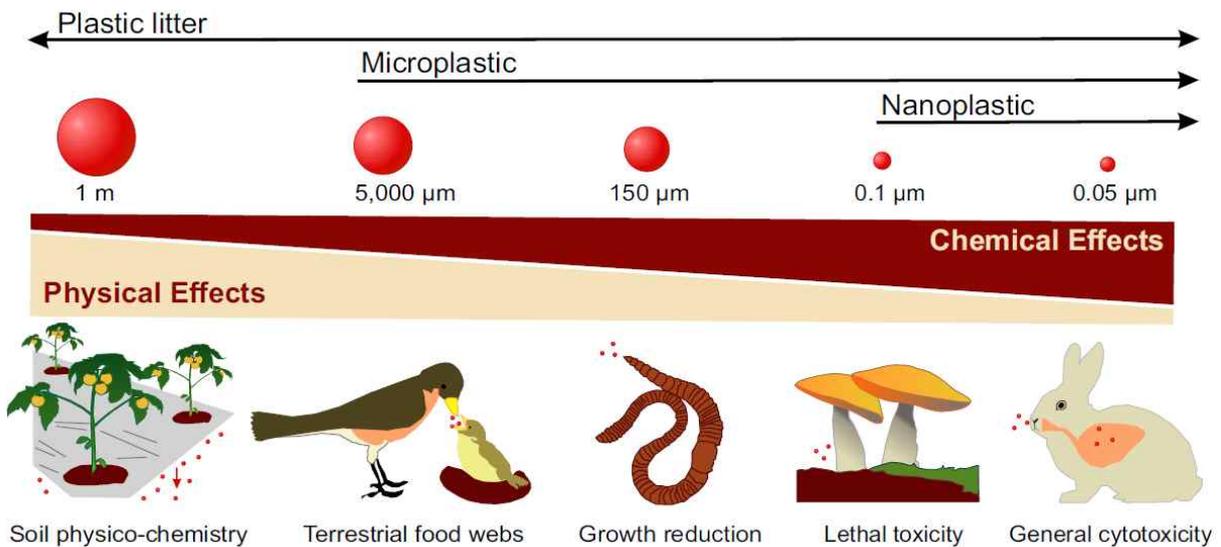


그림 58. 미세플라스틱 입자크기에 따른 물리적, 화학적 영향

4.2.2.2 미세플라스틱 생물농축 및 생태독성영향

담수 및 해수로 유입되는 미세플라스틱은 동물성 플랑크톤이 섭취한 후 먹이사슬을 통해 상위 포식자로 이동하여 결국 인간에게 까지 미세플라스틱이 섭취될 수 있는 것으로 보고되고 있다. 이러한 미세플라스틱의 생물농축에 대한 연구는 주로 해양 생태계를 대상으로 이루어지고 있으며, 먹이사슬을 통하여 이동과 농축에 관한 연구 방법론은 확립되어 있지 않은 상황이다. Saley 등의 연구에 따르면 바닷물에는 미세플라스틱이 36.59개/L 만큼 존재하며, 해변의 모래에는 0.227 ± 0.135 개/g, 녹색 해조류에는 2.34 ± 2.19 개/g, 적색 해조류에는 8.65 ± 6.44 개/g, 달팽이에는 9.91 ± 6.31 개/g로 분석되어 생물농축의 가능성을 보고하였다(Saley et al., 2017).

생물에 농축된 미세플라스틱은 생태독성을 유발할 수 있으며 이러한 생태독성영향에 대해서도 미세플라스틱의 생물 농축 연구와 더불어 다수의 연구가 이루어지고 있다. 생태독성영향과 관련한 대부분의 연구에서는 PS, PE 입자를 사용하여 인공적으로 실험한 결과를 보고하고 있으며, 그 외 다양한 성분에 따른 생태독성의 차이에 대한 연구는 미미한 실정이다. 해양생물을 대상으로 실시한 미세플라스틱의 생태독성영향은 조류, 동물성 플랑크톤, 갑각류, 조개류 등에서 진행되었으며, 담수 생물에서도 무척추동물 뿐만 아니라 어류 등 다양한 종을 대상으로 진행되었다. 일반적으로 생태독성평가는 담수조류생장저해실험, 물벼룩급성독성실험, 어류급성독성실험을 통해서 특정한 물질이 생물들에 미치는 영향을 평가한다. Kim 등의 연구에 따르면 미세플라스틱의 생태독성은 입자의 크기가 작을수록 높은 유해성을 나타내며, 급성노출보다 만성노출 실험에서 생태독성영향이 큰 것으로 보고하고 있다(Kim., et al., 2019). 이와 같은 미세플라스틱의 독성영향에 대한 다수의 연구사례를 표 19에 정리하였다.

표 20. 미세플라스틱 생태독성 연구사례

실험종류	Polymer type	형태	입자크기 (um)	종류	노출기간	노출 농도	독성영향	참고문헌
급성독성실험	PE,PS	Spheres	100미만	패각류	6day	0.5,5,50ug/L	사망률	Avio et al.,2015
만성독성실험	PS	Spheres	400-1300	바다벌레	28day	0.074,0.74,7.4% (W/W, dry weight)	사망률, 섭취 및 배출	Besseling et al.,2013
급성독성실험	PS	Spheres	2,3,9.6, 4-16	홍합류	12h,3day	0.51g/L, 42.86ea/mL	섭취 및 축적	Browne et al.,2008
급성독성실험	PE	Spheres	420-500	망둥어	96h	100ea/L	사망률, 생장률, 섭취	Carlos et al.,2015
급성독성실험	PS	Spheres	0.07-20	요각류	24h,8day	75-100 ea/mL	섭취, 생장률	Cole et al.,2015
급성독성실험	PS	Spheres	0.5	홍합류	1h	685,000 ea/mL	섭취	Farrell and Nelson 2013
만성독성실험	PE,PLA,PVC	-	-	바다벌레	31day	0.02,0.2,2% (W/W wet weight)	건강 및 생물학적 활동, 질소순환, 퇴적물생성	Green et al.,2016
만성독성실험	HDPE,PLA	Fragment	102.6, 65.6	바다벌레, 조류,굴류	60day	0.8,80 ug/L	중량, 호흡, 여과율, 생장률, 다양성	Green et al.,2016

표 19. 미세플라스틱 생태독성 연구사례

실험종류	Polymer type	형태	입자크기 (um)	종류	노출기간	노출 농도	독성영향	참고문헌
급성독성실험	PS+pyrene	Spheres	97	농어류	24h	100ea/L	먹이활동, 이동성	Guven et al.,2018
만성독성실험	PET	Fragment	11미만	동물성 플랑크톤	24day	10,000, 20,000, 40,000, 80,000 ea/mL	생식력, 군집감소	Heindler et al.,2017
급성독성실험	PE	Spheres	10-45	성계류	15-420min, 5,6,9 day	1,10,100,300,500 ea/mL	사망률, 섭취, 신체변화, 생물학적 변화	Kaposi et al.,2014
급성독성실험	PE	Fibers	-	홍합류	48h	2000 ea/L	축적	Kolandhasamy et al.,2018
만성독성실험	PS	Spheres	8-12, 32-38	갯지렁이	28day	100,1000 ea/mL	사망률	Leung and Chang 2018
만성독성실험	PS	Spheres	2-2.4	짚신고둥	14,95day	10,000, 6.0×10^7 , 1.4×10^8 ea/L	사망률, 성장률	Lo and Chan 2018
급성독성실험	PE	Spheres	1-5	망둥어	96h	0.216mg/L	사망률	Luis et al.,2015
급성독성실험	PS, HDPE	Spheres, fibers	6, 80미만	성계류	48h	$10^3, 10^4, 10^5$ ea/mL 0.005,0.5,5 g/L	투과율, 성장률	Martinez-Gomez et al.,2017

4.2.2.3 미세플라스틱의 인체 건강에 대한 영향 분석

미세플라스틱이 식물의 성장에 미치는 영향에 관한 연구는 최근에 집중되고 있다. 2020년에 Nature Nanotechnology에 발표된 내용에 따르면, 양이온성 표면기를 가진 폴리스테렌 나노입자가 음전하를 가진 입자들 보다 더욱 많은 활성산소들을 유발시키고, 대기장대의 생육을 저해한다는 결과를 발표한바 있다. 표면전하에 따른 생체 내에서의 영향에 관한 결과는 기존에 나노의학 분야에서의 기존 연구 결과와도 일치하는 결과이다. 인체로 유입된, 특히 섭취된 130 μm 이하 크기의 미세플라스틱은 대부분 배출되겠지만, 일부는 장세포와의 결합을 통해 세포 내로 이동 가능하여 국부적 면역반응을 일으키거나 전신으로 분포하여 플라스틱에 포함된 유해한 첨가제, 중금속, 흡착된 PCBs 등이 방출되어 유해성을 나타낼 가능성이 높다는 것이 이미 잘 알려진 바 있다. 호흡을 통해 인체 및 호흡기관으로 유입된 미세플라스틱은 폐의 점액섬모청소(mucociliary clearance) 기전에 의해 제거 가능하지만, 개인의 건강 상태와 장시간 노출되는 경우 특히 부정적인 영향이 예상된다.

특히, 작은 크기의 나노입자(≤ 20 nm 크기의 polystyrene) 미세플라스틱은 혈액뇌장벽(blood-brain barrier)을 통과하여 대뇌허혈(cerebral ischemia)과 재관류(reperfusion)를 일으킬 수 있다고 보고된 바 있다. 한편 미세플라스틱 그 자체에 의한 유해성뿐만이 아니라 미세플라스틱에 포함된 침출성 첨가제 및 흡착된 PCBs는 인체 내에서 미세플라스틱으로부터 용출이 가능하기 때문에 주요 첨가제(프탈레이트, 비스페놀A, PBDEs (polybrominated diphenyl ethers)에 의한 유해성도 예상되고 있다. 미세플라스틱이 고농도로 장기간 인체에 유입이 되는 경우에는 인체 건강에 유해한 영향을 미치는 것은 자명하다. 그러나 아직 환경을 통해서 미세플라스틱이 축적되는 정도가 명확하지 않으며, 인체에 미치는 영향은 아직 불분명하다. 그러나, 지속적으로 환경에서 미세플라스틱의 유입이 증가하는 상황에 처해 있음을 고려하면 최대 허용 농도와 다양한 조건의 미세플라스틱이 인체에 미치는 유해성 정도에 관한 연구가 매우 필요한 상황이다.

4.3 수계로 유입되는 미세플라스틱 관리방안

4.3.1 국내외 미세플라스틱 관리현황

4.3.1.1 국외 관리현황

미국은 2014년에 일리노이주에서 미세플라스틱의 사용을 최초로 금지한 후, 여러개의 주에서 미세플라스틱 관련 규제법안이 나오고 있으며, 미세플라스틱 청정해역 법안이 통과되어 개인 위생용품에 대한 플라스틱 사용을 금지하였다. (미국연방법, Microbead-Free Waters Act, 2015) 미국의 규제조치는 2017.7.1. 이후 Microbead가 포함된 세정용 화장품의 생산을 금지하였고, 2018.7.1. 이후 Microbead가 포함된 세정용 화장품의 상업거래 금지 및 처방전 없이 구매할 수 있는 약품을 분류되는 세정용 제품의 생산을 금지하였다. 2019.7.1. 이후에는 Microbead가 포함되어 처방전 없이 구매할 수 있는 세정제품의 주간 상업거래의 단계적 금지를 시행하였다.

표 21. 미국 각주별 미세플라스틱 규제현황

주	법 제정 현황	생분해성 플라스틱 규제여부	세척형 제품에 국한된 규제여부
캘리포니아	제정	YES	NO
미네소타	계류중	YES	NO
오레곤	계류중	YES	YES
뉴욕	도입	YES	NO
매사추세츠, 미시건	계류중	YES	NO
코네티컷, 매릴랜드	제정	YES	YES
콜로라도, 일리노이, 뉴저지, 메인, 인디애나, 위스콘신	제정	NO	YES

프랑스는 미세플라스틱이 함유된 화장품, 일회용품 등을 2020년부터 판매 금지할 예정이며, 대표적인 관련제품 제조기업인 유니레버, 로레알 등은 대체제품 개발작업을 추진하고 있다. 캐나다에서도 개인 위생용품에 미세플라스틱 사용금지 계획을 2016년에 발표하였고, 밴쿠버에서는 2019년 6월부터 모든 요식업소 등에서 일회용 플라스틱 제품사용을 금지하는 법안을 의결하였다. 또한, 2019.12.31. 까지 Microbeads가 함유된 일반의약품, 개인위생용품, 화장품 등의 제조 및

판매 유통, 수입이 금지하는 조치를 시행하고 있다. 영국은 2018년 1월 미세플라스틱 제조를 금지하는데 이어 6월 부터는 미세플라스틱이 함유된 화장품 및 개인위생용품의 판매를 금지하고 있다. 유럽연합(EU)은 2021년까지 플라스틱 빨대, 그릇 등 일회용품의 사용을 퇴출시키겠다고 발표하였으며, 플라스틱병의 사용을 줄일 수 있는 방안을 모색 중 이다. 이 외 뉴질랜드는 2019년부터 비닐봉지 사용을 전면 금지하는 계획을 발표하였으며, 인도 또한 비닐봉지 사용을 금지시키기로 계획하고 있다. 이처럼 국외 주요 국가들은 미세플라스틱이 어떠한 방식으로든 수계로 유입되는 것을 막기 위해서 미세플라스틱이 함유된 제품에 대한 금지방안을 계획하고 있다.

4.3.1.2 국내 관리현황

국내에서는 미세플라스틱에 대한 문제들을 해결하기 위해 해양수산부, 환경부 등 중앙행정기관과 각각의 지자체, 민간 환경단체, 관련기관들과 협력하여 해결방안을 모색하고 있다. 먼저 법적 규제로는 국외 주요 국가들과 같이 해양생태계 등 환경오염 및 인체 위해 우려에 대한 사회적 관심 증대 등 사용 제한 요구 증가에 따라 2017년부터 식품의약품안전처를 주체로 화장품 안전기준 등에 관한 규정 및 의약외품 품목허가·신고·심사규정 개정고시로 미세플라스틱 사용을 제한하고 있다(표 21). 해양수산부도 해양유입 방지부터 해양에 유입된 플라스틱 수거 및 국가해안쓰레기 모니터링을 지속적으로 추진하고 있다. 또한 미세플라스틱의 위험성에 대한 연구과제 실시, 환경부, 해양경찰청 등과 합동으로 제2차 해양쓰레기 기본계획(2014~2018) 수립 등을 통해 해양쓰레기 발생원 집중 관리를 하고 있으며, 더불어 2017년 해양폐기물법 제정을 통해 해양폐기물 등의 전 주기적(발생-수거-처리-유효활용-모니터링) 관리체계 확립을 통한 미세플라스틱 관리를 위해 노력하고 있다.

표 22. 국내 미세플라스틱 사용제한에 대한 고시

구분	현행안	개정안
화장품 안전기준 등에 관한 규제	(사용할 수 없는 원료) 미네랄 울 바륨염(바륨셀페이트 및 색소레이크희석제로 사용한 바륨염은 제외)	(사용할 수 없는 원료) 미네랄 울 미세플라스틱(5mm크기 이하의 고체플라스틱) 바륨염(바륨셀페이트 및 색소레이크희석제로 사용한 바륨염은 제외)
의약외품 품목허가·신고·심사규정	제9조(원료약품 및 그 분량) ①~② (생략) 1. ~4.(생략) <신설>	제9조(원료약품 및 그 분량) ①~② (생략) 1. ~4.(생략) <신설> 5. 의약외품 범위 지정(식품의약품안전처 고시)제2호 가목1).4) 및 자목4)에 해당하는 의약외품에는 첨가제로서 미세플라스틱(세정 등의 제품에 남아있는 5mm크기 이하의 고체플라스틱)을 사용하지 아니한다.

이 밖에도 정책적으로 2018년 5월에 정부부처 합동으로 2030년까지 플라스틱 폐기물 50% 감축과 재활용률을 70%까지 올리는 폐기물관리종합대책이 추진되고 있으며, 모든 물·음료수 등의 유색페트병을 무색으로의 전환, 일회용품 감량, 과대포장 감량, 비닐봉투 사용금지 등의 노력을 기울이고 있다. 그동안 만연했던 과대포장을 줄이고, 대형마트와 슈퍼에서 비닐봉투 사용을 금지하는 등의 조치는 일회용품 사용을 크게 저감하여 미세플라스틱의 발생을 줄일 수 있는 조치가 될 것으로 전망하고 있다. 2018년 9월에는 재활용 폐기물관리종합대책을 포함하는 상위개념으로 환경부 등 10개 관계부처가 10년 단위의 국가전략으로 수립한 제1차 자원순환기본계획을 국무회의(2018.9.4.)에 보고했으며, 이 내용에는 미세플라스틱 관리와 관련하여 그동안 정부의 일회용품 규제 대상에서 빠져있던 플라스틱 빨대가 포함이 되었으며, 2027년까지 폐기물 발생량을 20% 감축하고, 대체가능한 일회용품 사용을 단계적으로 줄여 10년 이내에 퇴출한다는 내용이다. 표 22에는 현재 우리나라의 플라스틱 재활용 대책에 대한 주요내용을 정리하였다.

표 23. 재활용 대책에 대한 국가기관 주요내용

구분	내용	비고
재활용 폐기물관리 종합대책 주요내용	<ul style="list-style-type: none"> - (생산) 2020년까지 무색 페트병으로 전환, 재활용 의무대상 확대 - (소비) 대형마트·슈퍼 비닐봉투 사용금지, 플라스틱 컵 보증금 도입, 택배포장 기준 신설 - (배출) 알기쉬운 분리배출 가이드라인 보급, 아파트 분리배출 도우미 시범사업 - (수거) 아파트 재활용품 계약·보고 의무화 및 표준계약서 보급 - (재활용) 시장안정화 재원마련, 페비닐 등에 대한 재활용제품 조기 상용화 	관계부처 합동, 2018.5.10.
자원재활용법 하위법령 개정안 주요내용	<ul style="list-style-type: none"> ① 1회용 비닐봉투 사용량 감량을 위한 법령 개정 추진 <ul style="list-style-type: none"> * 1인당 연간 사용량 한국(414개), EU(198개), 핀란드(4개) - 무상제공금지 대상 업종인 대규모점포(대형마트 등), 슈퍼마켓(165㎡~3,000㎡) 1회용 봉투 사용금지, 제과점 유상으로 판매 ② 세탁소 비닐, 1회용 비닐장갑, 식품 포장용랩 필름 등 비닐 5종을 생산자 책임재 활용제도(EPR, Extended Producer Responsibility) 품목에 추가 ③ 비닐 재활용의무생산자의 재활용 책임을 강화하기 위해 생산자 분담금을 인상(분담금 : 307원/kg→326원/kg, 지원금 : 271/kg→293원/kg)하고 재활용의 무율을 상향(66.6%→90%) 조정하는 방안도 추진 ④ 생산자책임재활용 품목 확대, 재활용 지원금 인상, 재활용의무율 상향 등 비닐 생산자의 재활용 책임을 강화하기 위한 조치로 인해 재활용업체 지원금은 연간 약 173억원 증가 예정 	환경부, 2018.8.2.
자원순환기본계획 수립 주요내용	<ul style="list-style-type: none"> - ‘생산-소비-관리-재생’ 등 전 과정에서 자원의 효율적 이용과 폐기물의 순환이용 촉진을 위한 10년 단위 국가전략 마련 - 2027년까지 폐기물 원단위 발생량 20% 감축, 순환이용률은 70%에서 82%까지 향상 	관계부처 합동, 2018.9.4.

4.3.2 안산시 수계 내 미세플라스틱 관리방안

4.3.2.1 관리방안

본 연구를 통해서 안산시 수계의 안산천, 반월천, 화정천, 신길천과 4개의 간선수로의 미세플라스틱의 현황을 조사하였는데, 다양한 형태의 미세플라스틱이 지표수 및 퇴적물에 축적되어 있는 것으로 확인되었다. 이를 관리하기 위해서는 지자체의 강제성 있는 규제와 미세플라스틱의 생물학적 위해성 연구가 필요하며, 산업계와 시민사회의 참여를 통해 관리를 진행해야 한다. 또한 안산시의 수계는 약 2만여개의 산업체가 입주하고 있는 안산·시흥 스마트허브와 인접하고 있어 미세플라스틱 등의 오염물질이 유입될 수 있는 가능성이 크기 때문에 이에 대한 더욱 많은 관심이 필요한 상황이다. 따라서 이와 같은 미세플라스틱의 체계적이고 지속적인 관리를 위해 다음과 같은 조치를 취할 수 있다.

◎ 위해성 관리기준 마련

미세플라스틱은 하천이나 바닷물 속의 녹아있는 오염물질을 흡수하거나 흡착하는 등, 다른 화학물질을 끌어당기는 특성으로 일단 환경 속으로 배출된 플라스틱은 유독물질로 간주하는 등 유해물질 지정이 필요하며, 더불어 우리나라 주요해역의 미세플라스틱 오염도평가, 주요 유입원 분석, 확산 및 이동경로 파악, 생물내 축적 및 독성평가 실시 등이 필요하며 해양환경 위해성 저감을 위한 관리기준 마련도 필요하다.

◎ 플라스틱 재활용 정책 확대

미세플라스틱의 오염을 줄이기 위해서는 과도한 플라스틱 포장재나 일회용 플라스틱 용기의 사용을 줄이고, 이미 만들어진 플라스틱의 경우에는 재활용을 확대해야 한다. 또한 플라스틱 용기의 재활용률을 높이기 위해서는 생수나 음료수 등은 무색 패트병으로만 제조해야 하며, 다른 색깔이나 재질이 섞인 것들은 제외해야 한다. 즉, 실질적인 플라스틱 재활용의 제고를 위해서는 재질에 대한 기준을 만들어 생산단계에서부터 관리해야한다. 특히 재활용이 시급한 부분은 어업용 플라스틱이다. 국내 해안쓰레기의 70% 이상은 어업활동에서 발생하고 있으며, 이에 대한 저감을 위해서는 재활용이 가능한 어업용 플라스틱 쓰레기를 회수하여 재활용 하는 것이 무엇보다도 필요하다.

◎ 법적 규제 강화

미세플라스틱은 세탁, 타이어 등에 의한 비점오염원 배출도 심각한 상황이며, 이에 따라 이러한 배출원에 대한 출처를 정확히 파악하여 그에 맞는 규제 적용이 필요하다. 현재 미세플라스틱 규제정책과 연구조사는 해양오염과 생활용품에 대한 비중이 높으며 이처럼 다양한 미세플라스틱 오염원에 대한 규제를 강화하는 법적 규제방안 강화가 시급하다.

◎ 거버넌스 강화 및 주관부서 명확화

민간단체, 연구기관, 정부기관 전문가 등 현안에 대한 협의 등을 통해 정책과 법제도, 사업 현황과 성과에 대한 공유·평가, 예방, 재활용 분야 등 정책의 효과성을 높일 수 있는 협력적 거버넌스 강화가 필요하며, 현재 환경부는 육상 플라스틱 오염을 포괄하고 있고, 해수부는 해양오염에 한정하여 관리하고 있으며, 식품의약품안전처는 화장품과 식품을 관할하고 있다. 향후 미세플라스틱 문제 해결을 위해서는 주관부서 확정 등을 통해 정부 대응력을 높이고, 환경관리체계를 통합하여 부처 간의 협력체계 구축 등 관리체계 명확화도 필요하다. 더불어 중앙정부와 지방자치단체와의 협력 체제 구축도 적극적으로 추진해야 한다.

◎ 안전한 수돗물 공급을 위한 관리 강화

정수처리 공정관리 강화를 위해 정수처리 최적화 및 미량 유해 물질을 포함한 수질검사 및 모니터링을 강화, 유해성 등에 대한 과학적, 객관적 자료를 바탕으로 한 관리방안 검토가 필요하다. 또한 수돗물 수질 상시 공개로 수돗물 안정성에 대한 정보를 수요자에게 제공할 필요가 있다. 예를 들어 장기적으로 원수에서부터 수돗물 공급과정별 주요지점에 수질자동측정기의 설치를 확대하여 수질 정보를 실시간으로 공개하는 방안도 고려 할 수 있다. 아울러 주요 정수장·먹는 샘물 대상 미세플라스틱 검출원인 규명 및 검출원인에 따른 미세플라스틱 관리방안 마련과 미량, 미규제 화학물질 등 하수도 유입 증가에 대비한 수질관리도 강화해야 한다.

또한 안전한 물공급을 위해 노후시설 개량 및 자산관리시스템 구축도 필요하며, 수도시설의 체계적인 개량을 위한 인프라 관련 조사 확대와 지속 가능한 상하수도 자산관리체계(Asset Management) 구축도 필요하다. 우리나라의 경우도 상·하수도 인프라 보급이 상당히 보급되었고, 노후화로 인한 대형사고 시 많은 사회적·환경적 비용이 요구되기 때문에 사후 유지관리 개념에서 벗어나 사전 예방적 유지관리 개념의 자산관리 체계도입 및 활용이 필요하다.

◎ 1회용품 줄이기 적극 참여

플라스틱 해양쓰레기는 생물, 관광, 수산업 등에 피해를 끼치고 있다. 미세플라스틱은 전 지구적으로 분포하며, 독성 영향을 미칠 뿐만 아니라, 먹이망을 통해 전이되기 때문에 그 문제가 심각하다. 이와 같이 우리가 버린 플라스틱은 다시 우리 식탁에 오르기 때문에 플라스틱 저감을 위한 범정부적 노력이 필요하다. 플라스틱 사용을 하루빨리 금지하고 플라스틱의 재활용을 최대화하도록 정부와 기업, 시민이 노력하는 것이 가장 시급한 일이다. 앞으로는 해양 쓰레기 유입 자체를 줄이는 예방 위주의 정책으로 가야한다. 더 이상 쓰레기의 양이 늘지 않도록 발생량을 줄이는 것과 동시에 국민들의 해양플라스틱 쓰레기로 인한 문제점 인식, 플라스틱 쓰레기 저감 노력, 참여와 홍보 및 교육 강화도 필요하다. 이에 대국민 캠페인 공익광고 등의 매체 활용과 국민참여 실천운동으로 전국민이 플라스틱 줄이기 운동에 동참하고, 동시에 청소년, 주민 등 대상 맞춤형 환경 교육 확대가 필요하다.

◎ 기업의 사회적 책임 실현

플라스틱으로 인해 발생하는 환경오염에 대한 우려가 갈수록 커지면서 최근 글로벌 기업들을 중심으로 플라스틱 줄이기에 앞장서는 분위기이다. 세계적 생활용품 업체인 유니레버는 플라스틱 쓰레기 감소를 추진할 비영리 단체를 출범시키기로 했고, 스웨덴의 볼보자동차는 2025년까지 자동차에 들어가는 플라스틱의 재활용 비율 목표치를 25%까지 제시하였다. 이 외에도 재활용 폴리에스테르를 사용하는 스포츠 및 의류업체가 늘어나고 있는 추세이다. 이러한 기업들이 앞장서서 환경보호 분야에서 사회적인 책임을 다한다면 소비자들의 관심을 얻을 수 있을 것이다.

◎ 국제적인 협력 대응

국제사회는 해양 플라스틱 쓰레기를 중요한 환경 문제로 인식하고 있다. 유엔환경총회는 2014년과 2016년에 ‘해양플라스틱 폐기물과 미세플라스틱에 관한 결의문’을 채택했고, 유엔환경계획은 2025년까지 모든 종류의 해양쓰레기를 예방하고 획기적인 저감을 위한 행동 촉구, 국제적으로 구속력 있는 조치 등을 마련하고자 올 초 워킹그룹을 설치하기도 했으며, 해양 폐기물, 미세플라스틱 대응에 대한 장애요인, 해양 폐기물 해결을 위해 국가, 지역, 국제적으로 다루어야 할 대응 방안과 비용, 대응 방안별 타당성과 효과성 등에 대해 논의할 예정이다. 아울러 해양으로 유입된 쓰레기는 국경을 넘어 전 세계 바다를 떠다니기 때문에 국제적인 협력을 통한 대응노력이 필요하다. 우리정부가 아시아 지역에서 해양쓰레기 이슈를 리드할 의지를 가지고 지금도 참여하고 있지만 해양쓰레기 대응 국제 네트워크 구축, 국제협력 프로그램운영 등에 적극 참여 및 지원을 하여 국제사회에서의 해양환경 보호에 주도적인 역할을 담당해야 한다.

4.3.2.2 제안방안

관리방안에서 제시한 사항은 미세플라스틱 배출원의 감축 또는 금지하는 내용이지만, 현실적으로 시행하는데 많은 어려움이 있다. 위의 제시한 기준 이나 정책이 마련되기 위해서는 미세플라스틱 오염에 대한 데이터베이스 구축이 필요한 실정이나 샘플링이나 분석에 대해 경제적인 측면에서 어려움이 있다. 그러나 수계 내 존재하는 미세플라스틱을 관리하기 위해서는 오염현황에 대한 계절별, 건기와 우기별, 하천 지점별로 데이터가 필요한 것은 명확하다. 이에 따라서 본 연구팀에서는 환경부에서 관리하는 TMS에 연계하여 미세플라스틱 분석을 할 수 있는 측정기술을 안산시 하천에 설치되어 있는 TMS 도입하는 것을 제안하고자 한다. 이러한 신속측정 및 자동화 기술은 국외에서도 연구되고 있으며, 본 연구팀에서도 연구 중에 있는 기술이다. 그림 58과 같이 수질 TMS는 하수처리장 방류구 혹은 하천지점에 자동측정기기를 설치하여 TMS 관제센터의 인터넷을 통하여 측정자료를 전송한 후 오염물질의 배출상태를 24시간동안 시간당 모니터링 하는 시스템이다.



그림 59. 하수처리장 및 하천의 TMS

그림 59는 TMS와 연계되는 미세플라스틱 분석방법이다. 자동샘플링/분석을 통해서 수계 내 존재하는 미세플라스틱의 실시간 측정으로 데이터베이스를 구축하게 되면 지정별로 배출원을 파악할 수 있으며, 이에 따른 규제 및 법적 기준을 지정할 수 있어서 수계 내 존재하는 미세플라스틱의 종합적인 관리계획을 마련할 수 있다.



그림 60. TMS와 연계되는 미세플라스틱 분석기술

제 5 장 결론

- 수계 시료에 포함된 미세플라스틱을 간소하게 판별할 수 있는 방법을 검토해 보고자 시료에 포함된 부유물질과 TED-GC/MS 분석을 통한 미세플라스틱 순질량의 비교를 통해 부유물질농도와 미세플라스틱양의 상관관계를 분석하였다. 각 하천에서의 부유물질농도에 대한 미세플라스틱 순질량의 비율을 검토해 본 결과 전체 고형물의 1%이내인 극히 일부만이 미세플라스틱으로 구성되었음을 확인하였으며, 부유물질의 농도가 낮을수록 미세플라스틱 순질량과의 편차가 작아지면서 상관관계가 높아지는 것으로 판단되었다.
- 하지만 본 연구에서 검토한 표본의 수가 적고 높은 부유물질 농도에서의 편차가 크게 나타나 명확하게 부유물질과 미세플라스틱 양과의 상관관계가 있다고 판단하기는 어렵지만 모래와 같은 비중 물질의 분리를 통한 부유물질과의 비교나 다른 사례들의 분석을 통해 많은 데이터를 확보하고 검증한다면 두 인자간의 상관관계를 확인할 수 있을 것으로 판단된다.
- 현재 진행되고 있는 생태계 미세플라스틱 연구의 대다수는 하천 및 호소의 표층수 내 미세플라스틱 분석을 진행하면서 퇴적토 내 미세플라스틱 오염현황 연구는 미비한 상황이며, 물환경 매체별 오염수준 파악 및 미세플라스틱의 수계내 분포·거동 특성을 이해하기 위해 안산시 수계 하천 및 간선수로에 대한 퇴적토 미세플라스틱 오염도 조사를 수행하였다.
- 안산시 수계에 존재하는 퇴적물의 미세플라스틱 오염 현황을 분석한 결과, 동일한 양의 퇴적물 시료에 대한 미세플라스틱 분석을 진행하였을 때, 간선수로 퇴적물에 포함된 미세플라스틱이 하천 퇴적물에 포함된 미세플라스틱에 비해 평균 10배 이상의 미세플라스틱이 더 존재하는 것으로 나타났으며, 미세플라스틱의 종류 또한 하천에 비해 간선수로에서 다양한 종류의 미세플라스틱이 관찰되었다.
- 이는 주로 생활 거주 지역 및 자연지가 유역 주변에 존재하는 하천 수계에 비해 안산·시흥 스마트허브와 같은 대형산업단지가 유역의 대부분을 구성하는 간선수로의 유역 환경적 요인이 가장 큰 차이인 것으로 판단되며, 간선수로 유역의 산업단지에서 발생하는 미세플라스틱이 노면유출수나 비점오염원 등으로 인해 흘러들어와 그 중 비교적 비중이 큰 미세플라스틱이 간선수로의 퇴적물 형태로 상당히 많은 부분 축적되어 있는 것으로 볼 수 있다. 이러한 퇴적물에 축적된 다량의 미세플라스틱은 강우나 시화호의 조수차에 의한 하상의 변화 등의 불안정한 상태에서 부유되어 해양으로 유입되거나 생물섭취로 인한 생태계 오염을 유발할 수 있으므로 이에 대한 관리가 필요할 것이다.

- 안산시 수계의 경우 국내 최대 규모 산업단지인 안산·시흥 스마트허브와 인접하고 있으며 약 70만 인구에 달하는 경기도내 8번째로 많은 인구가 거주하고 있는 지리적 상황으로 인해 도시 내 다양한 폐기물 유입에 노출되어 있는 상황이다. 대형 폐기물이나 하수 등은 안산시 내 처리시스템에 의해 처리가 되는 상황이나 미량오염물이나 비점오염물 등이 우수를 통해 유입될 수 있으며 산업단지 및 거주지역을 통행하는 각종 차량에 의해 도로 노면에서 발생하는 오염물질 또한 쉽게 유입될 수 있는 상황이다. 따라서 본 연구에서는 이러한 강우 시 발생하는 강우유출수의 미세플라스틱을 조사함으로써 비점오염원에 의한 수계 미세플라스틱 오염 현황을 검토하였다.
- 안산시 수계에서의 우기 시 미세플라스틱 영향을 분석한 결과, 하천 및 간선수로 모두 우기 시 수계의 미세플라스틱 농도가 건기 시에 비해 매우 높게 측정되었다. 이는 앞서 분석된 바와 같이 수계 퇴적물이 강우로 인한 유량 및 유속의 증가로 하상퇴적물이 부상되고, 강우로 인해 발생하는 노면유출수가 우수토구를 통해 비점오염원 형태의 고형물로 유입됨에 따라 표층수의 미세플라스틱 농도가 증가한 것으로 판단된다.
- 우기 상황에서의 비점오염원 유입 영향을 확인하기 위해 우기 시 하천으로 유입되는 안산천 우수토구의 배출수를 분석한 결과 4개/L로 건기 시 하천 표층수에 존재하는 미세플라스틱의 농도보다 약 6.5배가량 높은 것으로 나타나, 비록 하천 유량에 비해 그 비중이 작고 우기 시에 한정된 유입일지라도 하천 및 간선수로의 미세플라스틱 오염에 적지 않은 영향을 미칠 것으로 판단된다.
- 우기 상황에서 검출된 미세플라스틱의 종류는 PP, PE, PET 계열의 미세플라스틱 비중이 매우 높게 나타나 우기 시 유입되는 비점오염원 형태의 미세플라스틱 중 이와 같은 성분의 오염원이 다수 존재할 것으로 예상된다. PP, PE, PET와 같은 플라스틱은 의류, 섬유제품, 바디 및 페이스스크럽, 식품 포장 필름 및 물병을 포함한 퍼스널 케어 제품 등 다양한 용도로 실생활에 많이 사용되고 있는 플라스틱의 종류로 알려져 있다. 따라서 노면유출수로 유입되는 모니터링 및 이러한 오염물질을 제어할 수 있는 방법에 대한 논의가 필요할 것으로 판단된다.
- 일반적으로 하수처리장은 미세플라스틱의 최대 배출원으로 알려져 있으며, 현재의 하수처리시설은 미세플라스틱 제거를 목적으로 설계된 것이 아니므로 하수에 존재하는 미세플라스틱의 완벽한 제거는 사실상 불가능하다. 따라서 본 연구에서는 안산하수처리장의 처리공정별 미세플라스틱 분포를 조사함으로써 하수처리 공정을 통한 미세플라스틱의 저감효율 및 최종적으로 배출되는 미세플라스틱에 대한 환경적 영향을 검토하였다.
- 안산시 하수처리장에 유입되는 공장계열 폐수 중 포함된 미세플라스틱은 6.2개/L이며 최종적으

로 배출되는 미세플라스틱은 0.32개/L로 하수처리장 유입수에 존재하는 미세플라스틱 대비 약 95% 이상 저감되어 수계로 방류되는 것으로 나타났다. 안산하수처리장은 일간 약 20만 톤의 공장계열 유입수를 반입하여 처리하고 있으며 유입유량의 약 80% 가량을 방류수로 배출한다고 가정하였을 때 일간 약 16만 톤의 최종 처리수를 방류하므로, 이를 배출 미세플라스틱 농도를 반영하여 계산하면 일간 약 48백만개의 크고 작은 미세플라스틱이 생태계로 방출될 가능성이 있다. 또한 본 연구에서 분석된 미세플라스틱의 크기 범위(100~300 μ m)를 고려하면 이보다 더 작은 크기의 미세플라스틱이 추가적으로 배출될 가능성이 높으며 이처럼 자연으로 배출되는 미세플라스틱을 관리하기 위해 이에 대한 주기적인 모니터링과 저감방법을 확보할 필요성이 있는 것으로 판단된다.

- 안산시 수계 생물의 미세플라스틱 축적 영향을 분석한 결과 분석된 2종의 생물(붕어, 민물게) 모두 내장에서 미세플라스틱의 축적이 높게 확인되었다. 이는 먹이를 섭취하는 과정에서 수계에 존재하는 많은 양의 미세플라스틱이 함께 섭취되고 있는 것으로 볼 수 있으며, 자연환경에 서식하는 생물이 미세플라스틱에 오염될 수 있는 다른 외부적인 요인이 없음을 고려하였을 때 수계 하천의 표층수 및 퇴적토에 존재하는 미세플라스틱이 이러한 생물 내에 축적되는데 많은 부분 영향을 주고 있는 것으로 판단된다. 따라서 수계에 존재하는 생물의 미세플라스틱 축적으로 인한 생태영향을 방지하기 위해서는 수계로 배출되는 미세플라스틱의 관리 및 저감이 우선적으로 수행되어야 할 것이다.
- 국내에서는 미세플라스틱에 대한 문제들을 해결하기 위해 해양수산부, 환경부 등 중앙행정기관과 지자체, 민간 환경단체, 관련기관들과 협력하여 해결방안을 모색하고 있다. 식품의약품안전처는 미세플라스틱의 사용제한기준을 마련하여 2017년 화장품 안전기준 등에 관한 규정을 개정하여 고시하는 것을 시작으로 미세플라스틱의 사용에 대한 제한을 추진하고 있다. 또한 2030년까지 플라스틱 폐기물 50% 감축과 재활용률을 70%까지 올리는 폐기물관리종합대책이 추진되고 있으며, 모든 물·음료수 등의 유색페트병을 무색으로의 전환, 일회용품 감량, 과대포장 감량, 비닐봉투 사용금지 등을 통한 미세플라스틱 발생 방지의 노력을 기울이고 있다.
- 안산시의 수계는 안산·시흥 스마트허브와 인접하고 있어 미세플라스틱과 그 외 오염물질들의 물리·화학적 반응으로 인한 환경위해성이 우려되는 지역으로 많은 관심이 필요한 상황이다. 미세플라스틱은 다양한 산업에 사용되고 있으므로 배출원을 명확하게 파악하여 규제해야 하는데, 현재는 해양배출과 생활용품에 대해서만 규제되고 있다. 특히, 안산시는 다양한 플라스틱 활용 제품을 생산하는 제조업 업체들이 다수 산업단지에 입주하고 있으므로 지자체와 중앙행정기관과의 법적 규제방안 강화가 시급한 상황이다. 산업체 뿐만 아니라 일반 시민들도 플라스틱 재활용 및 일회용품 사용 줄이기 등의 정책마련 및 참여독려를 통해 미세플라스틱 저감을 위한 관리방안을

마련해야 한다.

- 미세플라스틱의 배출을 관리하는 기준이나 정책이 마련되기 위해서는 미세플라스틱 오염에 대한 데이터베이스 구축이 필요한 실정이나 샘플링이나 분석에 대해 경제적인 측면에서 어려움이 있다. 그러나 수계 내 존재하는 미세플라스틱을 관리하기 위해서는 오염현황에 대한 다양한 데이터가 필요하다. 따라서 이러한 미세플라스틱을 효율적으로 모니터링하기 위해 환경부에서 관리하는 TMS에 연계하여 미세플라스틱 분석을 할 수 있는 자동화 측정기술의 도입을 고려해 볼 수 있다. 이러한 신속측정 및 자동화 기술은 국외에서도 연구되고 있으며, 국가 연구과제를 통해서도 연구 중에 있는 기술이다. 자동샘플링/분석을 통해서 수계 내 존재하는 미세플라스틱의 실시간 측정으로 데이터베이스를 구축하게 되면 지점별로 배출원을 파악할 수 있으며, 이에 따른 규제 및 법적 기준을 지정할 수 있어서 수계 내 존재하는 미세플라스틱의 종합적인 관리계획을 마련할 수 있을 것으로 기대한다.

참 고 문 헌

- 이재호 외, 2016, 담수 중 미세플라스틱 조사 기법 연구, 국립환경과학원
- 이재호 외, 2017, 담수 중 미세플라스틱 조사 기법 연구(II), 국립환경과학원
- 박태진 외, 2018, 담수 중 미세플라스틱 조사 기법 연구(III), 국립환경과학원
- 박정규 외, 2018, 미세플라스틱 관리동향 및 정책 제언, 한국환경정책평가연구원
- 박정규 외, 2019, 미세플라스틱의 건강피해 저감연구. 한국환경정책평가연구원
- 김규원 외, 2018, 플라스틱 오염 현황과 그 해결책에 대한 과학기술 정책, 한국과학기술한림원
- 이소라, 2019, 순환경제로의 전환을 위한 플라스틱 관리전략 연구, 한국환경정책평가연구원
- 김귀성, 2018, 미세플라스틱에 의한 고등어 오염실태에 관한 연구, 을지대학교 석사학위논문
- 김주양 외, 2020. 미세플라스틱 분석을 위한 신규 TED-GC-MS 분석법. 한국분석과학회 학술대회, 87-87.
- 이혜성 외, 2017, 다양한 매체에서 미세플라스틱의 정량·정성법에 관한 고찰, 한국폐기물자원순환학회, 34권, 6호, 537-545
- 정동환 외, 2018, 국내·외 연구사례를 통해 본 하수처리시설 미세플라스틱 배출특성 및 관리방안 고찰, 한국상하수도학회, 32권, 4호, 337-348
- 박지혜, 2018, 미세플라스틱 오염현황 및 주요 국가의 관리방안과 시사점, 저널 물 정책·경제, 31호, 77-88
- Fu, W et al., 2020, Separation, characterization and identification of microplastics and nanoplastics in the environment, Science of The Total Environment, 721: 137561.
- KARAMI, Ali, et al.. 2017, A high-performance protocol for extraction of microplastics in fish. Science of the total environment, 578: 485-494.
- FENG, Zhihua, et al.. 2019, The accumulation of microplastics in fish from an important fish farm and mariculture area, Haizhou Bay, China. Science of the Total Environment, 696: 133948.
- LU, Yifeng, et al., 2016, Uptake and accumulation of polystyrene microplastics in zebrafish (Danio rerio) and toxic effects in liver. Environmental science & technology, 50.7: 4054-4060.
- KIM, Kanghee, et al., 2019, The effects of microplastics on marine ecosystem and future research directions. Korean Journal of Environmental Biology, 37.4: 625-639.
- SALEY, A. M., et al., 2019, Microplastic accumulation and biomagnification in a coastal marine reserve situated in a sparsely populated area. Marine pollution bulletin, 146: 54-59.

주 의 문

최종연구보고서 (21-07-02-30-31)
안산시 수계에서의 미세플라스틱 영향 조사 연구

발행인 : 센터장 김 문 일
발행일 : 2021년 12월
발행처 : 안산녹색환경지원센터
주 소 : 경기 안산시 상록구 한양대학로 55, 2공학관 513호
전 화 : 031-400-4236, 436-8141~5
팩 스 : 031-400-4237
e-mail : agec@agec.or.kr

※ 주 의

1. 이 보고서는 안산녹색환경지원센터에서 시행한 연구개발사업의 보고서입니다.
2. 이 보고서 내용을 발표할 때에는 반드시 안산녹색환경지원센터에서 시행한 연구개발사업의 연구결과임을 밝혀야 합니다.
3. 국가과학기술 기밀유지에 필요한 내용은 대외적으로 발표 또는 공개하여서는 아니됩니다.