

발간등록번호

11-1482021-100020-01

보고서번호(NIER번호) NIER-SP2025-097

최종보고서

환경 대기 중 미세플라스틱 측정을 위한 시험방법(안) 마련 및 현장 적용성 평가

서울시립대학교

한국화학융합시험연구원



국립환경과학원

제 출 문

국립환경과학원장 귀하

본 보고서를 ‘환경 대기 중 미세플라스틱 측정을 위한 시험방법
(안) 마련 및 현장 적용성 평가’ 용역 최종보고서로 제출합니다.

2025. 12. 19 .

연 구 기 관 : 서울시립대학교 / 한국화학융합시험연구원
연구수행기간: 2025.04.25. ~ 2025.12.19
연 구 책 임 자: 김 현 욱 (서울시립대학교)
정 무 현 (한국화학융합시험연구원)
연 구 원: 김 지 숙 (서울시립대학교)
강 자 현 (서울시립대학교)
김 나 경 (서울시립대학교)
박 세 은 (서울시립대학교)
한 진 석 (서울시립대학교)
이 인 규 (서울시립대학교)
한 지 수 (서울시립대학교)
이 종 훈 (한국화학융합시험연구원)
김 소 연 (한국화학융합시험연구원)
조 경 렬 (한국화학융합시험연구원)

요 약 문

I. 연구개요

연구과제명	국문	환경 대기 중 미세플라스틱 측정을 위한 시험방법(안) 마련 및 현장 적용성 평가			
	영문	Establishment of Standard Methods for Measurement and Validation of Microplastics in Ambient			
연구기관	서울시립대학교 산학협력단		연구책임자	소속	환경공학부
				성명	김현욱
연구기간	25. 04. 25 ~ 25. 12. 19				
연구비	98,000,000 원				
참여연구원수	총 12 명		내부 : 5명, 외부 : 7명		

II. 연구목적 및 필요성

공기 중 부유 미세플라스틱(Microplastics,MPs)은 호흡을 통해 인체에 유입될 가능성이 있고, 대기와 함께 장거리 이동을 할 수 있기 때문에 주요 대기오염물질로 파악됨. 유엔환경계획(UNEP)을 비롯한 국제사회는 대기 순환에 의한 MPs의 장거리 이동과 강우를 통한 지표 재침적 등 전 지구적 MPs 오염 순환 구조에 대해 지속적으로 문제를 제기하고 있음. 이에 편승하여, 유럽연합(EU) 등 주요국은 환경 중 MPs에 대한 규제 마련을 위해서 기술적·법적 근거를 적극적으로 검토 하고 있음. 실제로 여러국가에서 MPs에 의한 환경오염 현황 조사가 진행되고 있고, 특히 수자원 및 토양 중 MPs 농도 조사 연구가 많이 진행되고 있음. 하지만, 대기 중 MPs 연구는 수질이나 토양 매질에 비해 상대적으로 미비하게 진행되고 있는 실정임. 우리나라의 경우에는 거의 전무한 실정임. 이에 국립환경과학원(이하 과학원)은 2024년부터 우리나라 대기 중 MPs 농도 현황을 파악하고, 대응책 마련을 위한 조사연구를 시행하고 있음. 본 연구는 대기 중 MPs를 정확하게 분석할 수 있는 표준시험방법을 개발하는 것을 목적으로 함. 보다 세부적으로는 MPs 분석 관련 국제 동향을 파악하고, 시료 채취 및 전처리 절차와 MPs 크기별(2.5 μ m, 10 μ m) 분석 방법(안)을 체계적으로 표준화하는 것임.

III. 연구개발의 내용 및 범위

1. 환경 대기 중 MPs 시료 채취 및 전처리 방법 표준화

국내·외 대기 중 MPs 연구 결과 및 표준화 동향을 검토하였음. 즉, 대기 중 MPs 시료 채취

및 분석방법 현황을 파악하고, 각 분석법의 한계점을 분석하였음. 크기별 MPs(2.5 μ m, 10 μ m) 분석을 위해 고용량(High Volume) 혹은 저용량(Low Volume) 공기 포집 장치를 설치하여, 공기시료 포집 필터 재질(스테인리스 스틸 메쉬 등), 포집량, 포집 시간 등의 조건이 포집 효율에 미치는 영향을 분석하였음. 포집된 시료 내 유기성 및 무기성 방해 물질을 전처리 하기 위해 재부유(resuspension), 밀도 분리, 펜톤 산화(Fenton oxidation), 다단 여과 등의 전처리 방법들을 교차 혹은 병행 적용하여 최적의 전처리 시험 절차를 도출하였음.

2. 환경 대기 중 MPs 분석 방법 표준화

분광분석법(μ -Raman)과 열분석법(Py-GC/MS)을 동시에 적용하여 대기 매질에 적합한 분석 장비를 선정하였음. μ -Raman 분광분석을 이용하여 대기 중 MPs 개수 및 형태 특성을 정성·정량적으로 평가하였고, Py-GC/MS 분석을 통해 질량 농도를 정량하였음. 이를 통해 서로 보완되는 결과를 확보하고, 각 분석 결과의 정확도 및 신뢰도를 평가 하였음.

3. 개발 분석 방법의 현장 적용성 평가

경기도 과천시 내 주거단지와 안산 산업단지의 대기 중 MPs를 본 연구에서 확립한 표준 시험법을 적용하여 분석하였음. 이를 통해서 대기 중 크기별 MPs의 구성 성분(PE, PP, PS, PVC, PET 등) 및 농도를 파악하였음. 또한 대기 중 유기탄소(OC) 및 비내화성 유기성분(OM) 농도 변화와 MPs 농도 간의 상관관계를 평가하여, 대기 중 MPs의 대기중 미세먼지에 대한 기여도를 평가하였음. 이를 기반으로 μ -Raman을 분석장비로 이용하여 대기중 MPs를 분석하는 표준시험방법(안)을 개발 하였음.

IV. 연구 결과

본 연구를 통해 대기 중 MPs 분석을 위한 시료 채취 및 전처리 방법과 분석 방법이 개발되었고, 개발된 방법은 현장 적용성 검증을 거친 이후에 국제표준화가 추진되었음.

대기 중 MPs 시료에 고용량과 저용량 공기 시료채취기를 적용하여 포집하였음, Py-GC/MS의 경우 저용량 공기 시료채취기로 포집한 시료에서 MPs를 검출할 수 없었음. 고용량 포집기를 통해 채취한 시료의 경우 정량 한계 이상의 농도인 MPs가 일부 검출되었음. 한편, 고용량 공기 포집기로 채취하여 μ -Raman을 분석한 경우, 필터 위에 포집된 입자상 물질이 과다하여 분석에 어려움이 잦았음. 따라서 필터를 초순수 용액에 침지하고 초음파를 가하여 필터 위의 입자를 재부유한 후 다시 여과하여 분석하였음.

분석을 위한 전처리 과정으로는 초음파를 40분 설정하여 필터에 부착된 MPs를 탈착하였고, 유·무기성 방해물질을 제거하기 위해 펜톤 산화(펜톤 용액 10 mL와 과산화수소 10 mL)를 적용하

였음. 산화제는 MPs이 포집된 스테인리스 필터에 직접 투입되었음.

개발된 표준시험방법(안)을 적용하여, 고용량 포집기로 채취된 과천과 안산 시료를 μ -Raman으로 분석한 결과, 평균 319개/ m^3 가 검출되었음. 이 중 1~5 μm 범위의 MPs가 전체의 64%를 차지하는 것으로 관찰됨. 이를 통해서 1-5 μm 크기 범위의 MPs가 대기 중 MPs 중에서 지배적임을 확인함. 폴리머 조성은 전반적으로 PE(폴리에틸렌)와 PP(폴리프로필렌)가 가장 높은 비중을 차지하였음. 산업단지인 안산의 경우, PVC와 타이어 마모 성분인 SBR의 비중이 높았으나, 주거단지인 과천 지역의 경우에는 PMMA, PU 등 건축 및 코팅재 유래 성분의 비중이 높았음. 고용량 시료채취기를 이용하여 채취한 시료를 Py-GC/MS로 분석한 결과, 2.5 μm 이하 및 10 μm 이하 범위에서 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 수준의 MPs가 검출되었음. 반면, 저용량 시료 채취기를 이용하여 채취한 시료의 경우 대부분 정량한계 이하로 나타나 질량 기반 열분해 분석은 충분한 시료량 확보가 중요한 조건임을 확인함. $\text{PM}_{2.5}$ 내 유기성분(OM, OC) 농도가 높은 시기에 MPs 농도가 동반 상승하는 경향을 보였음. MPs에 기인하는 OC가 $\text{PM}_{2.5}$ 중 OC에 기여하는 비율은 0.04~0.16% 정도였음.

본 연구 결과에서 개발된 대기 중 MPs 분석 방법을 국제표준화하기 위하여, 2025년 9월 도쿄에서 개최된 ISO/TC 146/SC 3 총회에 참석하여 본 연구 내용을 소개하고 대기 중 MPs 분석 필요성을 개진 하였음. 그 결과, ‘대기 중 MPs 측정’ 필요성이 채택되어 전담 작업반(Working Group; WG)이 신설되었음. 서울시립대 김현욱 교수가 신규 WG의 컨비너(Convenor)로 선임되어 과학원의 MPs 분석 기술을 국제 표준(NWIP)으로 제정할 수 있는 기반을 마련하였고, 향후 대기중 MPs 분석 국제 표준 선점을 위한 핵심적인 발판을 확보하였음.

목차

1. 연구과제명	1
2. 연구의 배경, 필요성 및 목적	1
2-1. 추진 배경	1
2-1-1. 대기 중 MPs 분석 및 분포 관련 연구동향	1
2-1-2. 대기분야 국내외 MPs 표준화 동향	7
2-2. 추진 목적 및 필요성	9
3. 연구 내용 및 방법	12
3-1. 연구 내용	
3-1-1. 국내·외 연구결과 검토를 통한 환경 대기 중 MPs 분석 현황 파악	13
3-1-2. 대기중 MPs 분석장비 현황 및 특성	13
3-1-3. 입자 크기(2.5 μ m, 10 μ m)별 MPs 분석을 위한 시료채취(장비, 필터, 채취량, 채취시간 등) 방법 표준화	14
3-1-4. 전처리방법 표준화를 위한 시료 전처리 과정 최적화	16
3-1-5. 환경 대기 중 최적 측정범위 선정을 위한 현장 적용성 평가	21
3-2. 연구 방법	22
3-2-1. 국내·외 연구 결과 검토를 통한 환경 대기 중 MPs 분석 현황 파악	22
3-2-2. 분석에 활용되는 분석장비(Raman, FT-IR, Py-GC/MS) 선정	23
3-2-3. 측정범위 결정을 위한 입자크기(2.5 μ m, 10 μ m)별 MPs 시료채취 및 분석	24
3-2-4. 환경대기 중 MPs 구성성분 파악 및 주요물질 스펙트럼 도출	29
4. 연구 결과	32
4-1. 환경 대기 중 MPs 시료채취 및 전처리방법 표준화	32
4-1-1. 국내·외 연구결과 검토를 통한 환경 대기 중 MPs 분석 현황 파악	32

4-1-2. 입자크기별 MPs 분석을 위한 시료채취 방법 표준화	40
4-1-3. 전처리방법 표준화를 위한 시료 전처리 과정 최적화	43
4-2. 환경 대기 중 MPs 분석 방법 표준화	55
4-2-1. 환경 대기 및 타 매질에서 MPs 분석에 활용되는 분석장비 현황 및 특성 제시	55
4-2-2. 입자 크기별 MPs 분석에 활용되는 분석장비 검토 및 최적 분석장비 선정	57
4-3. 환경 대기 중 최적 측정범위 선정을 위한 현장 적용성 평가	62
4-3-1. 측정범위 결정을 위한 입자 크기(2.5 μ m, 10 μ m)별 MPs 시료채취 및 분석	62
4-3-2. 수도권지역 대표지점 기준 MPs 입자 크기별(2.5 μ m, 10 μ m) 현장적용성 평가	87
4-3-3. 환경 대기 중 MPs 구성성분 파악 및 주요물질 스펙트럼 도출	101
4-4. 대기 중 MPs 분석법 국제표준화 연구 수행 결과	105
 5. 기대 성과 및 활용 방안	 109
5-1. 기대 성과	109
5-2. 활용 방안	109
 6. 결론	 111
 7. 참고문헌	 114

<표 차례>

<표 1> 국외 대기 중 MPs 연구 동향	5
<표 2> 국내 대기 중 MPs 연구 동향	5
<표 3> MPs 식별법에 따른 장·단점 비교	14
<표 4> Raman을 이용한 방법별 회수율 평가 결과	18
<표 5> 시료 채취 시 이용하는 장비 및 기구 구성	25
<표 6> 전처리 기구 기본 구성	27
<표 7> 밀도 분리 용액별 주입 농도 및 밀도값 비교	28
<표 8> 국내 대기 중 MPs 연구 동향	33
<표 9> 국외 대기 중 MPs (열분해법) 연구 동향	38
<표 10> 국외 대기 중 MPs (열분해법) 직경 크기별 연구 사례	39
<표 11> 시료 채취 시간 및 장소	41
<표 12> 고용량 공기 시료 채취기 및 대기 측정 시 사용 필터	41
<표 13> 시료 채취 장소 미세먼지 농도 및 기상 상황	42
<표 14> 대기 중 PM _{2.5} / PM ₁₀ 농도 별 상관관계 분석을 위한 실험 시험 목록	54
<표 15> 전처리 방법 재현성 파악 실험 필터 목록	55
<표 16> Raman 분석조건	61
<표 17> Raman 장비 사양 및 분석조건	61
<표 18> 시간 별 MP 측정 결과 (1)	66
<표 19> 조건 별 MP 측정 결과 (1)	69
<표 20> Py-GC/MS 분석 조건	71
<표 21> MPs 표준물질 총량 (3 points)	71
<표 22> 시료 추출을 위한 Sonication 시간 결정 실험 결과	73
<표 23> Py-GC/MS/MS 시스템 분석 조건	74
<표 24> 각 폴리머 별 Py-GC/MS/MS STD Calibration 곡선에 대한 LOD, LOQ	75
<표 25> 대기 중 입자크기 (10 μ m), 입자크기 (2.5 μ m) MPs 측정 실험 열분석 후 각 폴리머 별 정량 결과	76
<표 26> 대기 중 입자크기 (10 μ m), 입자크기 (2.5 μ m) MPs 측정 실험 열분석 후 각 폴리머 별 농도 환산	76
<표 27> Py-GC/MS 분석 조건	77

<표 28> MPs 표준물질 총량 (4 points)	78
<표 29> 방법검출한계	78
<표 30> 정밀도 및 정확도	79
<표 31> 다단 여과 필터 기반 입자 산화 전처리 실험(1차) 열분석 후 각 폴리머 별 정량 결과	81
<표 32> 다단 여과 필터 기반 입자 산화 전처리 실험 열분석(1차) 후 각 폴리머 별 농도 환산	82
<표 33> Py-GC/MS 분석 조건	83
<표 34> MPs 표준물질 총량 (3 points)	83
<표 35> 폴리머 STD의 반복성 평가 (평균, 표준편차, RSD%)	83
<표 36> 각 폴리머 별 Py-GC/MS STD Calibration 곡선에 대한 LOD, LOQ	84
<표 37> 다단 여과 필터 기반 입자 산화 전처리(2차) 열분석 후 각 폴리머 별 정량 결과	85
<표 38> 다단 여과 필터 기반 입자 산화 전처리 실험 열분석(2차) 후 각 폴리머 별 농도 환산	86
<표 39> MPs 표준물질 총량 (3 points)	87
<표 40> 폴리머 STD의 반복성 평가 (평균, 표준편차, RSD%)	87
<표 41> 시료 추출을 위한 Sonication 시간 결정(2차) 및 산화 후 농도 파악 실험 열분석 후 각 폴리머 별 정량 결과	88
<표 42> 시료 추출을 위한 Sonication 시간 결정(2차) 및 산화 후 농도 파악 실험 열분석 후 각 폴리머 별 농도 환산	89
<표 43> MPs 농도 및 샘플링 기간 대기질	91
<표 44> MPs 농도 및 샘플링 기간 대기질	93
<표 45> 조건 별 MP 측정 결과 (1)	95
<표 46> MPs 입자 크기별 현장 적용성 평가 (안산 입자크기 (2.5 μ m)) 열분석 후 각 폴리머 별 정량 결과 ...	97
<표 47> MPs 입자 크기별 현장 적용성 평가 (안산 입자크기 (2.5 μ m)) 열분석 후 각 폴리머 별 농도 환산 ...	98
<표 48> MPs 입자 크기별 현장 적용성 평가 (안산 입자크기 (10 μ m)) 열분석 후 각 폴리머 별 정량 결과 ...	99
<표 49> MPs 입자 크기별 현장 적용성 평가 (안산 입자크기 (10 μ m)) 열분석 후 각 폴리머 별 농도 환산 ...	100
<표 50> MPs 입자 크기별 현장 적용성 평가 (과천 입자크기 (10 μ m)) 열분석 후 각 폴리머 별 정량 결과 ...	101
<표 51> MPs 입자 크기별 현장 적용성 평가 (과천 입자크기 (10 μ m)) 열분석 후 각 폴리머 별 농도 환산 ...	102
<표 52> MPs 입자 크기별 현장 적용성 평가 (과천 입자크기 (10 μ m)) 열분석 (2차) 후 각 폴리머 별 정량 결과	103
<표 53> MPs 입자 크기별 현장 적용성 평가 (과천 입자크기 (10 μ m)) 열분석 (2차) 후 각 폴리머 별 농도 환산	

〈표 54〉 HR-ToF-AMS를 이용한 $PM_{2.5}$ 화학 성분 분포 통계자료 (2025년 5월 24일 ~ 5월 31일)	105
---	-----

〈그림 차례〉

〈그림 1〉 환경으로 유입되는 다양한 MPs 오염원	1
〈그림 2〉 대기 중 MPs 노출 및 인체 유해성에 관한 국내외 연구	2
〈그림 3〉 대기환경 중 MPs의 이동 및 확산	3
〈그림 4〉 대기 중 MPs 분포 및 흡입시 노출량	6
〈그림 5〉 실내·외 MPs 농도 분포	13
〈그림 6〉 대기 중 MPs 시료 포집 및 전처리법 (Luo, et al., 2022)	14
〈그림 7〉 샘플링 기기의 사양 및 대상 시료별 MPs 최저 예상 포집 개수	15
〈그림 8〉 Raman을 이용한 방법별 회수율 테스트 비교	18
〈그림 9〉 대기 중 MPs 분석과정 (Enyoh al., 2019)	20
〈그림 10〉 MPs 분석장비 특성	22
〈그림 11〉 측정지점 경기권 대기환경연구소 (안산소재)	29
〈그림 12〉 대기 중 MPs 시료 포집 및 전처리법 (Luo, et al., 2022)	34
〈그림 13〉 샘플링 위치별 MPs 농도 분포 (O'Brien. et al., 2023)	35
〈그림 14〉 대기 중 MPs 분석 장비 종류 및 빈도 (Luo et al., 2022)	36
〈그림 15〉 샘플링 위치별 MPs 농도 분포 (O'Brien. et al., 2023)	37
〈그림 16〉 Py-GC/MS 기반 MPs 분석 방법 과정 (Jing et al., 2025)	38
〈그림 17〉 대기 중 MPs 직경 크기별 구분 (Morioka et al., 2024)	39
〈그림 18〉 시료 채취 지점의 PM _{2.5} , PM ₁₀ 농도 변화, $\mu\text{g}/\text{m}^3$	43
〈그림 19〉 시료 추출을 위한 Sonication 시간 결정 실험 모식도	44
〈그림 20〉 40분 Sonication 및 희석 조건 검토 실험 모식도	45
〈그림 21〉 산화제 투입량에 따른 실험 모식도	46
〈그림 22〉 적정 산화용액 용량 검토 실험 모식도	46
〈그림 23〉 필터 기반 입자 산화 용액 투입량 검토 실험	47
〈그림 24〉 재부유 실험	48
〈그림 25〉 열분해에 사용한 STS 1 μm 필터 및 지지대	49
〈그림 26〉 열분해 시료 추출을 위한 Sonication 시간 결정 실험 모식도	50
〈그림 27〉 열분해 대기 중 PM ₁₀ , PM _{2.5} MPs 측정 실험 모식도	51

<그림 28> 열분해 다단 여과 필터 기반 입자 산화 전처리 실험 모식도	52
<그림 29> 시료 추출을 위한 Sonication 시간 결정(2차) 및 산화 후 농도 파악 실험 모식도	53
<그림 30> 대기 중 PM _{2.5} / PM ₁₀ 농도 별 상관관계 분석을 위한 실험 모식도	54
<그림 31> 시료 추출을 위한 Sonication 시간 결정 실험 모식도	56
<그림 32> 필터 기반 입자 산화 전처리 평가 실험 모식도	56
<그림 33> Raman을 이용한 MPs 측정	60
<그림 34> 열분해-가스 크로마토그래피/질량 분석법(Py-GC/MS)	62
<그림 35> MPs Sonication 조건 실험 결과	66
<그림 36> 시간 별 MPs 측정 결과	66
<그림 37> 40분 Sonication 진행 시 Raman 관측 결과	67
<그림 38> 20분 sonication 진행 후 필터링 후 Raman 관찰 사진	67
<그림 39> Sonication 시간 별 Raman 관측 결과	69
<그림 40> 조건 별 MPs 측정 결과	69
<그림 41> 산화 용량 차이에 따른 Raman 관측 결과	70
<그림 42> MPs 필터 직접 산화 실험 결과	70
<그림 43> 각 폴리머 별 Py-GC/MS STD Calibration 곡선	72
<그림 44> Py-GC/MS/MS 시스템	73
<그림 45> 각 폴리머 별 Py-GC/MS/MS STD Calibration 곡선	75
<그림 46> 대기 중 입자크기 (10 μ m), 입자크기 (2.5 μ m) MPs 측정 위한 실험STS	76
<그림 47> 각 폴리머 별 Py-GC/MS STD Calibration 곡선	80
<그림 48> 다단 여과 필터 기반 입자 산화 전처리 실험 (6월 11일자 시료)	81
<그림 49> Py-GC/MS 시스템 구성	82
<그림 50> 각 폴리머 별 Py-GC/MS STD Calibration 곡선	84
<그림 51> 다단 여과 필터 기반 입자 산화 전처리 실험 (6월 12일자 시료) STS 1 μ m 필터 (21 ϕ) 현미경 관찰 결과	85
<그림 52> 각 폴리머 별 Py-GC/MS (2)	88
<그림 53> Sonication 시간 별 검출 대기 중 총 MPs (μ g)	89
<그림 54> Sonication 시간 별 검출 대기 중 MPs 성분 별 (%)	89

<그림 55> 대기 중 MPs 열분해법 분석을 위한 최적 전처리 방법 제시	90
<그림 56> 5 μm 여지 적용에 따른 MPs 분석 결과	92
<그림 57> 1 μm 여지 적용에 따른 MPs 분석 결과	93
<그림 58> PM_{10} 과 $\text{PM}_{2.5}$ 농도에 따른 MPs 개수	99
<그림 59> MPs 입자 크기별 현장 적용성 평가 안산 입자크기 (2.5 μm) 열분해 전처리 완료 STS 1 μm 필터 (21 $\varnothing$) 현미경 관찰 결과	97
<그림 60> MPs 입자 크기별 현장 적용성 평가 안산 입자크기 (10 μm) 열분해 전처리 완료 STS 1 μm 필터 (21 $\varnothing$) 현미경 관찰 결과	95
<그림 61> MPs 입자 크기별 현장 적용성 평가 과천 입자크기 (10 μm) (1차) STS 1 μm 필터 (21 $\varnothing$) 현미경 관찰 결과	101
<그림 62> MPs 입자 크기별 현장 적용성 평가 과천 입자크기 (10 μm) (2차) STS 1 μm 필터 (21 $\varnothing$) 현미경 관찰 결과	103
<그림 63> $\text{PM}_{2.5}$ 화학성분 시계열 분포 - (a) 시계열 농도, (b) 구성비	105
<그림 64> $\text{PM}_{2.5}$ 유기 성분(OM, OC)과 MPs 분포	106
<그림 65> PM 및 유기 성분과 MPs과 산포도 - (a) PM_{10}	107
<그림 66> ISO/TC 146 총회 결과 (24. 9. 27)	109
<그림 67> TC146 총회 사진	110
<그림 68> 대기 중 MPs 분석 방법 표준 제안 일정 및 제안 내용 구성 목차	111

제 1/2 장. 연구의 개요

1. 연구과제명

환경 대기 중 MPs 측정을 위한 시험방법(안) 마련 및 현장 적용성 평가

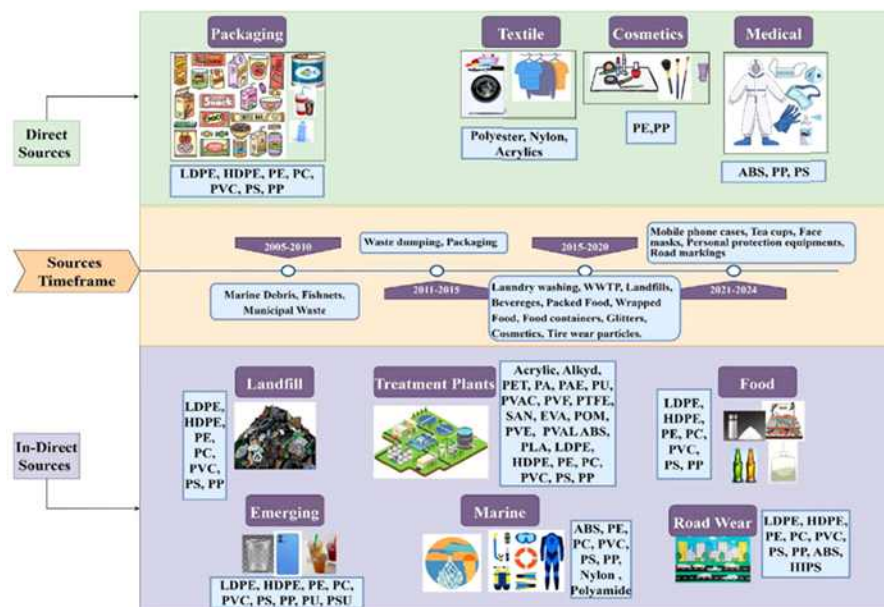
2. 연구의 배경, 목적 및 필요성

2-1. 추진 배경

2-1-1 대기 중 MPs 분석 및 분포 관련 연구 동향

○ 환경 중 MPs의 분포 및 근원

- 인구밀도 증가와 도시화로 인해 다양한 합성 고분자 제품 사용이 확대되면서 미세플라스틱(MPs)의 환경 배출이 증가하고 있음.
- MPs는 제조 단계에서부터 미세한 크기로 생산·사용되는 1차 미세플라스틱과, 플라스틱 제품이 환경 중에서 마모·풍화·파쇄 과정을 거쳐 생성되는 2차 미세플라스틱으로 구분됨. 산업용 미세입자 등은 1차 미세플라스틱에 해당하며, 플라스틱 포장재의 파편화, 도로 포장 및 타이어 마모 입자 등은 대표적인 2차 미세플라스틱 발생원으로 분류됨. 이 MPs는 강우 및 도시 유출수 등을 통해 수계로 유입되어 주요 오염원으로 작용됨 <그림 1>.

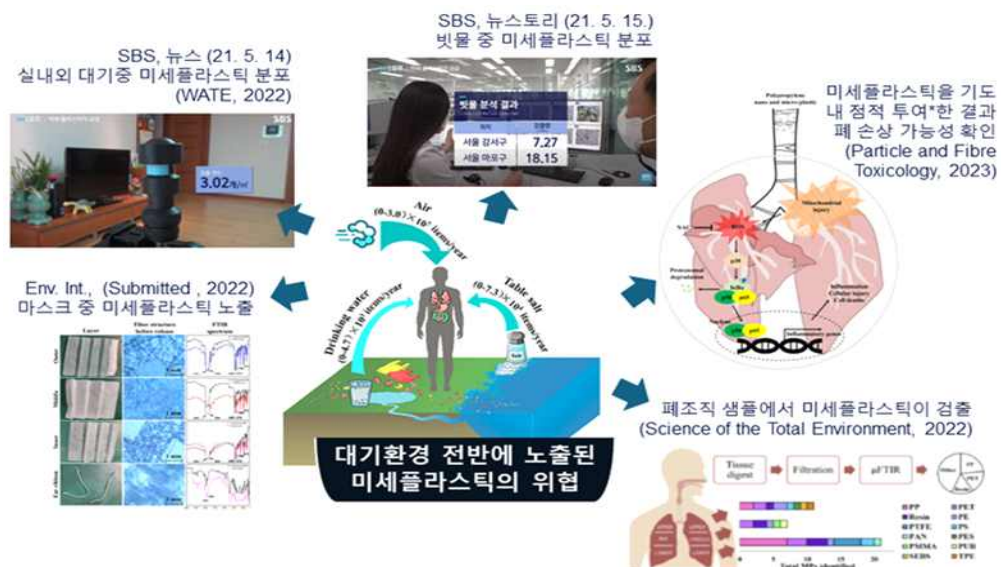


<그림 1> 환경으로 유입되는 다양한 MPs 오염원

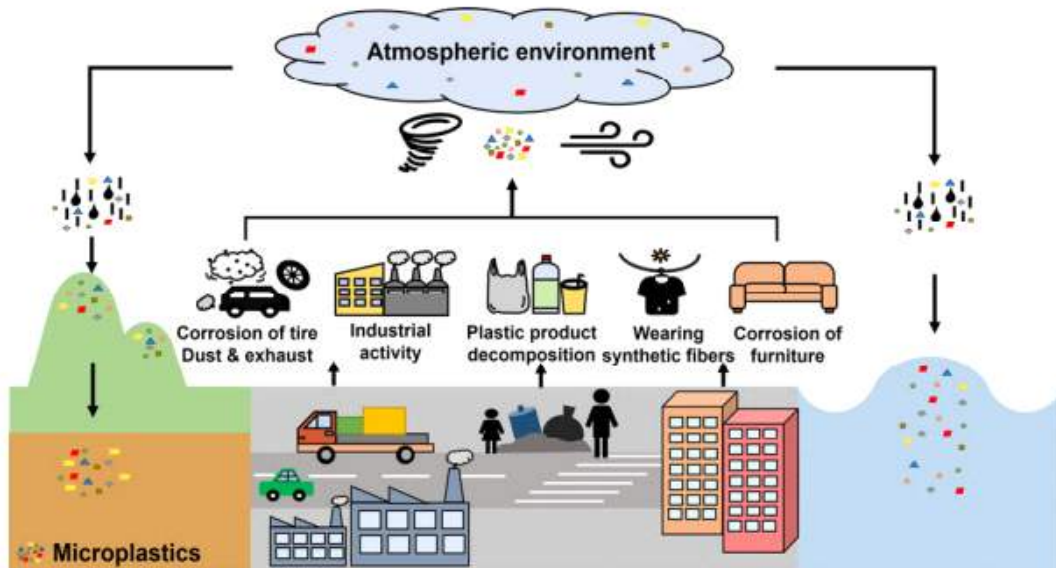
- 수계로 유입된 MPs는 하천 및 호소에 축적되거나 해양으로 이동할 뿐만 아니라,

건조 과정과 수면 교란(파랑, 바람 등)에 의해 재부유되어 대기 중으로 재유입됨. 특히 수표면에서의 에어로졸화(aerosolization) 과정은 MPs가 수계에서 대기 환경으로 이동하는 주요 경로임.

- 대기 중 MPs는 제품의 분해, 합성섬유의 마모, 합성 고무 타이어의 부식, 가구, 도시 먼지, 하수 슬러지, 건설 자재, 매립지, 폐기물 소각 등을 통해 발생하며, 바람과 강우 같은 기상현상은 MPs를 이동시키는 중요한 매개체 역할을 함(Kim et al., 2022).
- 환경 매질별 MPs 연구 현황을 살펴보면, 수질, 토양, 지하수 등에 비해 대기 중 MPs 연구가 상대적으로 미비한 실정임. 이는 대기 중 MPs 농도가 수계에 비해 낮아 정량이 어렵고, 입자 크기 범위가 넓어 분석 장비의 한계가 존재하며, 시료 채취 및 전처리 과정에서의 손실 가능성이 크기 때문임. 또한 표준화된 시료 채취·분석 방법이 확립되어 있지 않아 연구 결과 간 비교가 어렵고, 발생원 추적 및 노출 평가에 대한 체계적인 접근이 제한되어 온 점도 주요 원인임.
- 최근 연구에 따르면 도심 지역뿐만 아니라 고산지대, 극지방 등 이른바 청정지역에서도 미세플라스틱(MPs)이 검출되고 있어, 대기 흐름을 따른 장거리 이동 가능성이 제기되고 있음. Brahney et al. (2020)은 미국 서부 국립공원 지역에서 대기 침강을 통해 미세플라스틱이 유입되고 있음을 보고하였으며, Allen et al. (2019)은 프랑스 피레네 산맥의 외딴 산악지역에서도 대기 중 미세플라스틱 침착이 발생함을 보여줌. 이러한 결과는 미세플라스틱이 지역적 오염을 넘어 대기 순환을 통해 광역적으로 이동할 수 있음을 시사함. 이에 따라 대기 매질에서의 미세플라스틱 거동, 장거리 수송 메커니즘 및 인체 노출 가능성에 대한 국제적 관심이 점차 높아지고 있음.



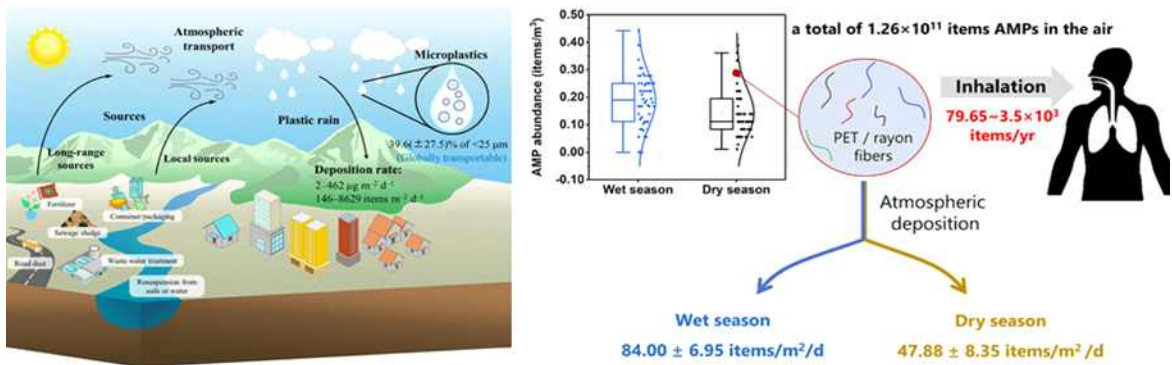
<그림 2> 대기 중 MPs 노출 및 인체 유해성에 관한 국내외 연구



〈그림 3〉 대기환경 중 MPs의 이동 및 확산

- MPs는 자연계 전반에 걸쳐 광범위하게 잔류하며 생태계 독성을 유발할 뿐만 아니라, 탄소 순환 저해 및 알베도 변화 등을 통해 기후변화의 가속화 인자로 작용될 수 있음(Ashwin et al., 2025).
- 이와 같이 선행연구에 따르면, 대기 중 미세플라스틱(MPs)은 지속적으로 침강 및 부유 형태로 존재하는 것으로 보고되고 있음.
- Brahney et al. (2021)은 대기 중으로부터 일일 약 50-700개/m² 수준의 미세플라스틱 입자가 지표로 침강한다고 보고함.
- Amato-Lourenço et al. (2021)은 공기 중에 부유하는 미세플라스틱이 인체 호흡기를 통해 폐조직까지 침투할 수 있음을 확인하여 인체 건강에 대한 잠재적 위해 가능성을 제시하였음.
- Yuan et al. (2023)의 연구에서는 성인의 연간 부유 미세플라스틱 흡입 노출량이 약 $79.65 \sim 3.5 \times 10^3$ 개/yr 범위로 추정하였음.
- 공기 중 부유 미세플라스틱이 인체 폐 조직까지 침투할 수 있다는 보고(Amato-Lourenco et al., 2021)는 대기 미세플라스틱의 잠재적 건강 영향에 대한 우려를 증폭시키고 있음. 이에 따라 대기 중 미세플라스틱의 실태 규명, 노출 평가, 위해성 검증을 포함한 체계적이고 표준화된 연구 체계 마련이 시급함.

- Bourzac et al. (2022)은 다수의 연구자들이 대기 중 미세플라스틱 분석에 참여하고 있음에도 불구하고, 시료 채취 및 분석 방법의 표준화가 미비하여 정확한 오염 현황 파악과 발생원 규명에 여전히 한계가 존재함을 지적하였음



<그림 4> 대기 중 MPs 분포 및 흡입시 노출량

○ 국내외 MPs 분포 연구 현황

- 대기 중 MPs의 분석 연구는 많은 국가에서 수행되었으며, 최근 연구를 바탕으로 아래 표 1과 같이 정리하였음.
- 미국 애리조나 주 Tempe의 대기 중 부유 미세플라스틱은 0.02~1.1 개/ m^3 (평균 약 0.2 개/ m^3) 범위로 검출되었으며, 약 5~5000 μm 의 크기 범위로 분포하였음. 형태별로는 섬유(fiber)가 $\geq 82\%$ 로 우세하였고, 화학 조성 분석 결과 PVC 계열이 가장 많이 확인되었으나 많은 입자가 특징적인 라만 신호를 보이지 않아 특정 폴리머 판별이 어려움 (Chandrakanthan et al., 2023).
- 중국 상하이에서 진행된 부유성 대기 MPs 연구 결과에서 PET, PE, PP, PA, PS, 에폭시수지, 레이온 등 폴리머 조성이 다양하게 나타났고, 형태로는 섬유(fiber)가 우세하였음. 5~1000 μm 범위에서 20~100 μm 입자가 가장 높은 비율로 나타났고, MPs 개수는 0~1.37 개/ m^3 로 검출되었음 (Kai Liu et al., 2019).
- 독일에서 μ -Raman 분광분석을 적용한 결과, 모든 대기 샘플에서 $\geq 4 \mu\text{m}$ 크기 범위의 MPs이 검출되었으며, 평균 농도는 약 91 ± 47 particles/ m^3 로 나타났음. MPs 중에 폴리에틸렌(PE) 계열 입자가 우세한 것을 확인함(Kernchen, S. et al., 2022).

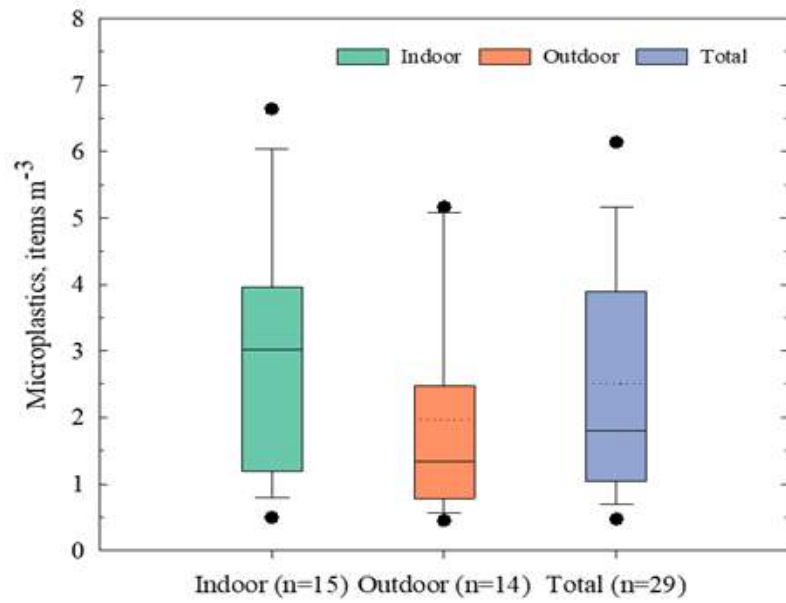
〈표 1〉 국외 대기 중 MPs 연구 동향

지역	국가	샘플러	분석 장비	Mean Conc. (#/m ³)	Size cut-off	크기 범위 (μm)	Ref.
Remote area	China	Passive, Hi Vol.	FT-IR	0.19	-	10-100	Dong et al., 2023
Surburban	USA	Hi Vol.	Raman	0.2	-	5-5,000	Chandrakanthan et al., 2023
Shanghai	China	-	FT-IR	0.01	-	5-1,000	Kai Liu et al., 2019
Paris	France	-	-	0.3-1.5	-	-	Dris et al., 2017
Asaluyeh	Iran	-	-	0.3-1.1	-	-	Abbasi et al., 2019
Guangzhou	China	Low Vol.	FT-IR	0.17	>20	-	Yan et al., 2023
River Catchment	Germany	Low Vol.	Raman	37-121	>4	11-1945	Kernchen et al., 2022

- 한편, 국내에서도 서울 지역을 대상으로 대기 중 미세플라스틱(MPs)의 분포 및 화학적 성분을 분석한 연구 결과가 보고된 바 있음(표 2).
- 실내 공간과 건물 외부 대기를 대상으로 미세플라스틱 농도 및 특성을 조사한 결과 실외 0.45~5.16 개/m³, 실내는 0.46~6.64 개/m³으로 실내 농도가 높게 검출되었음 (Choi et al., 2022).
- Chang et al. (2023)은 도시 지역, 숲 지역, 상업지역, 대중교통 중심지, 비즈니스 센터 등 5개 유형의 야외 환경을 대상으로 대기 중 미세플라스틱의 분포 특성을 조사하였음. 그 결과, 모든 조사 지점에서 미세플라스틱이 검출되었고, 대중교통 중심지 및 상업지역에서 상대적으로 높게 나타났음. 또한 두 연구 모두 섬유 유형 입자가 우세하게 나타났음.

〈표 2〉 국내 대기 중 MPs 연구 동향

대상	샘플러	분석장비	Shape	Size(μm)	Average concentration	Ref.
실내	Mini Vol.	μ FT-IR	Fiber 10.2%	166.1	2.51 ± 1.77 개/m ³	Choi et al., 2022
실외			Fiber 3.6%	115.5	0.05 ± 0.07 개/m ³	
실외	Low Vol.	μ FT-IR	Fiber 12.6%	62.23	0.72 ± 0.39 개/m ³	Chang et al., 2023



〈그림 5〉 실내·외 MPs 농도 분포

○ 대기 중 MPs 분석 방법

- 일반적으로 대기는 실내·외로 구분할 수 있음. 실내는 공기 중 낙하 먼지, 실외는 부유 공기, 침적 및 강우 시료가 있으며 이에 따라 다양한 채취 방법을 이용하고 있음 (Azari et al., 2023).
- 대기 중 시료 포집은 위치에 따라 크게 실내·외로 구분하며, 해양에서도 시료 포집이 가능함 (O'Brien et al., 2023). 또한 대기 시료는 부유 입자와 건식/습식 침적 형태로 구분할 수 있음.

됨. 밀도 분리(ZnBr_2 등 사용)는 무기물 제거에 효과적이거나 과정 중 MPs 손실 우려로 인해 생략하거나 산화 처리와 병행하는 방식이 연구되고 있음. 최근 서울시 보건환경연구원은 과산화수소를 이용한 유기물 제거 후 실리кон 필터로 여과하여 라만 분광기로 분석하는 기술이 특허가 등록되기도 함.

- 기기 분석법: 분석법은 크게 입자의 개수와 형태를 식별하는 분광분석법과 질량을 정량하는 열분석법으로 나뉨.
- 분광분석법 (Spectroscopic Analysis): 가장 널리 쓰이는 방법으로 $\mu\text{-FT-IR}$ 과 $\mu\text{-Raman}$ 이 있음. $\mu\text{-FT-IR}$ 은 20~45 μm 이상의 상대적으로 큰 입자 분석에 적합하고, $\mu\text{-Raman}$ 은 1 μm 수준의 작은 입자까지 식별 가능하여 45 μm 미만 미세입자 분석에 필수적임. 최근에는 AI(딥러닝)를 활용하여 현미경 이미지에서 MPs를 자동 식별하고 분석 비용을 낮추려는 연구도 진행되고 있음.
- 열분석법 (Thermo-analytical Methods): Py-GC/MS(열분해-가스크로마토그래피 질량분석기)나 TOC(총유기탄소) 분석을 이용해 시료 내 MPs에서 기인하는 탄소의 질량을 정량하는 방법임. 서울시립대에서 특허가 등록된 기술임.
- TOC 분석장비를 이용한 간접적인 정량방법으로 전처리 시간을 단축하고 스크리닝 목적으로 활용 가능하며, PM_{10} , $\text{PM}_{2.5}$ 와 같은 미세입자 내 고분자 성분(PE, PP, PS 등)을 검출하는데 유용함.

2-1-2. 대기분야 국내외 MPs 표준화 동향

○ 대기 중 MPs 분석 표준화 제정 관련 국내 및 국외 전문위원회 동향

- 현재 연구자마다 사용하는 채취 장비, 필터, 전처리 방법이 달라 데이터 간 직접 비교가 어렵다는 한계가 있음. 대기 중 MPs에 의한 환경 오염과 건강 위해성에 대한 국제적 우려가 증대됨에 따라, 신뢰성 있는 측정 데이터 확보를 위한 국제표준(ISO) 분석법 마련이 시급한 상황임
- 이에 NIER 주도하에 ISO/TC 146(대기)을 중심으로 대기 중 MPs 분석법의 국제 표준화(ISO) 논의가 진행 중이며, 2023년부터 2025년까지 한국 주도의 분석 기술을 개발하고, 이를 국제 표준화 기구(ISO/TC 146)의 공식 작업 과제로 반영하기 위한 연구를 수행함.

- 과학원은 2024년부터 우리나라 대기 중 MPs의 정확한 오염 현황을 파악하고, 대응책 마련을 위한 조사연구를 시행하고, 사용가능한 최적 분석 체계를 구축함.
- 또한, 과학원에서는 구축된 분석 체계를 바탕으로 국내 전문위원회를 통해 라만(Raman) 분광법 중심의 분석 전략을 수립하여 국제적 기술 경쟁력을 확보하기 위한 기반을 마련함.
- ISO 국제표준회의의 성과로 2024년에는 TC 146(대기) 총회에서 채택된 결의문(Resolution 399)에 따라 한국의 연구 성과를 담은 기술 문서를 제출하고, 차기 회의 발표권을 확보하는 등 외교적 기반을 다짐.
- 향후 국제 환경 규제 및 표준 제정 과정에서 과학원에서 주도적인 역할을 수행하기 위한 발판을 마련함.

○ ISO/TC146 대기분야 표준화 관련 동향

- 참가회원국(P-Member): 30개국 (알제리, 오스트리아, 바레인, 벨기에, 브라질, 캐나다, 중국, 콜롬비아, 프랑스, 독일, 헝가리, 인도, 이탈리아, 일본, 케냐, 대한민국, 말레이시아, 몽골리아, 네덜란드, 필리핀, 폴란드, 포르투갈, 러시아, 사우디아라비아, 스페인, 스웨덴, 터키, 아랍에미리트, 영국, 미국)
- 참관국(O-member): 45개국 (아르헨티나, 호주, 보스니아 헤르체코비나, 보츠와나, 불가리아, 칠레, 코트디부아르, 크로아티아, 쿠바, 체코, 덴마크, 이집트, 핀란드, 그리스, 홍콩, 아이슬란드, 인도네시아, 이란, 아일랜드, 카자흐스탄, 조선민주주의인민공화국, 레바논, 몰타, 몰도바, 몬테네그로, 모로코, 뉴질랜드, 노르웨이, 루마니아, 세인트 루시아, 세르비아, 세이셸, 싱가포르, 슬로바키아, 슬로베니아, 남아프리카, 스리랑카, 스위스, 탄자니아, 태국, 트리니다드 토바고, 튀니지, 우크라이나, 베트남, 짐바브웨)
- 간사(Secretariat): DIN (Deutsches Institut für Normung e.V.), Mrs Dr Elisabeth Hösen-Seul
- 의장(Chairperson, 2026년도까지): Dr. James S Webber
- SC(subcommittee, 분과위원회): 6개 / WG(working group, 작업반): 30

구분		제정 표준	개발중인 표준
Direct responsibility of ISO/TC 147			2
SC 1	Stationary source emissions	44	6
SC 2	Workplace atmospheres	54	10
SC 3	Ambient atmospheres	28	3
SC 4	General aspects	12	2
SC 5	Meteorology	10	4
SC 6	Indoor air	53	10
계		201	37

2-2. 추진 필요성 및 목적

○ 환경 생태계 보전 및 국민 건강 보호를 위한 MPs의 법적 기반 마련과 글로벌 규제 대응

- 미세플라스틱(MPs)은 대기, 수질, 토양 등 다양한 환경 매체를 통해 이동·순환하는 신규 오염물질로, 생태계 및 인체에 잠재적 위해성을 초래할 수 있어 체계적인 관리가 요구됨.
- 유엔환경계획(UNEP)은 MPs가 대기 순환을 통해 전 지구적으로 확산되며, 강우를 통해 지표면으로 재침적되는 순환 구조를 형성한다고 경고하고 있다. 이에 따라 장거리 이동 특성 및 환경 내 거동을 정량적으로 규명할 수 있는 정밀 모니터링 체계 구축이 필요함.
- 2025년 이후 MPs에 대한 국제적 규제가 본격화될 것으로 예상되며, 유럽연합(EU)을 중심으로 의도적 미세플라스틱 사용 제한, 화장품 및 세정제 등 소비재 내 MPs 규제가 강화되고 있음.
- 국제표준과 조화를 이루는 분석 체계를 구축함으로써 무역 장벽을 해소하고, MPs와 같은 신규 오염물질에 대한 과학적·법적 근거를 마련하여 환경오염 저감과 국민 건강 보호를 달성하는 것을 본 사업의 궁극적 목표로 함.

○ MPs 측정 자료의 부정확성 해소를 위한 표준 시험방법 마련

- 수질, 토양, 지하수 등에 비해 대기 중 MPs 연구는 상대적으로 부족한 실정이며, 데이터 축적과 방법론 정립이 시급함.

- 최근 연구에 따르면 청정지역에서도 MPs가 검출되고 있어, 대기 이동에 따른 장거리 확산 가능성이 제기되고 있음. 현재 대기, 수질, 토양 등 다양한 매체에서 MPs 분석이 수행되고 있으나, 시료 채취, 전처리, 정량·정성 분석 방법이 표준화되지 않아 연구 간 결과 비교가 어려운 문제가 존재함.
 - 따라서 국내외 분석 데이터의 상호 비교 가능성을 확보하기 위해 신뢰성 높은 시험방법(안)을 개발하고, 공통된 분석 프로토콜을 적용함으로써 정확한 오염 현황 파악과 발생원 규명하는 것을 목적으로 함.
- 대기 중 입자크기(2.5 μm , 10 μm)별 MPs 시료채취·분석 최적 범위 설정 및 현장 적용성 검증 기반 시험방법(안) 마련
- 공기 중 MPs 시료 채취는 주로 active sampler 또는 passive sampler 방식으로 수행되고 있으나, 채취 조건 및 필터 특성에 따라 회수율과 정량 결과에 차이가 발생함.
 - 기존 유리섬유 필터 사용 시 일부 입자가 섬유 내부로 침투하여 정량에서 제외될 가능성이 있어, 대기 중 MPs 전용 채취 필터 개발 및 전처리 최적화가 필요함.
 - 시료 포집 조건(입경 구획, 유량, 전처리 방법)에 따라 MPs 개수 분포가 상이하게 나타나며, 일반적으로 입자 크기가 작을수록 개수가 증가하는 경향을 보임.
 - 또한 분광분석(μ -Raman, μ -FTIR)과 열분석(Py-GC/MS 등) 간의 상호 데이터 활용을 위한 통합적·표준화된 분석 체계 구축이 요구됨.
 - 따라서 환경 대기 중 미량으로 존재하는 MPs의 정확한 현황 파악을 위해, 입자 크기별(2.5 μm , 10 μm) 최적 측정 범위와 현장 적용성을 검증한 신뢰성 높은 시험방법(안)을 마련하고, 이를 기반으로 시험방법을 만드는 것을 목적으로 함.

제 3 장. 연구 내용 및 방법

3. 연구내용 및 방법

3-1 연구 내용

3-1-1 국내·외 연구결과 검토를 통한 환경 대기 중 MPs 분석 현황 파악

- 본 연구에서는 환경 대기 중 미세플라스틱(MPs)의 외 분석 현황을 체계적으로 조사·정리하여, 향후 표준 시험방법 마련을 위한 기초자료로 활용하고자 함. 이를 위해 외 학술논문, 정부 보고서, 국제기구(UNEP, EU 등) 및 표준화 기구(ISO 등) 자료를 종합적으로 검토하여 대기 중 MPs의 시료 채취, 전처리, 분석 기법 및 정량·정성 평가 방법을 비교·분석.
- 시료 채취 측면에서는 active sampler와 passive sampler의 적용 사례를 조사하고, PM_{2.5} 및 PM₁₀ 임팩터 기반 입경 구획별 분석 동향을 파악. 또한 사용되는 필터 종류(유리섬유, PTFE, 금속 필터 등)에 따른 회수율 및 오염 가능성 차이에 대한 연구 결과를 분석.
- 전처리 단계에서는 유기물 제거를 위한 산화 처리(Fenton 반응, 과산화수소 등), 밀도분리 및 여과 조건 등에 대한 외 적용 사례를 비교하고, 전처리 조건에 따른 MPs 손실 가능성 및 형태 보존성 문제를 검토
- 분석 기술 측면에서는 μ -Raman, μ -FTIR, Raman imaging, 열분석(Py-GC/MS) 등 주요 분석 기법의 적용 현황과 장단점을 정리하고, 최소 분석 가능 입경, 정량 방식(입자 개수 기반 vs 질량 기반), 라이브러리 매칭 방법 등 기술적 차이를 분석. 또한 데이터 보고 형식 및 단위(개수/m³, 질량 농도 등)의 차이를 비교하여 국제적 데이터 호환성 검토
- 외 연구 결과를 종합하여 대기 중 MPs 농도 범위, 입자 형태(섬유·파편 등), 폴리머 조성 특성 및 장거리 이동 가능성에 대한 연구 동향을 분석하고, 현재 분석 방법의 한계와 표준화 필요성을 도출. 이를 통해 향후 환경 대기 중 MPs 시험방법(안) 마련 및 공정시험기준 제정을 위한 과학적·기술적 기반을 확보

3-1-2 대기중 MPs 분석장비 현황 및 특성

- 분광분석법은 주로 플라스틱을 회수한 여과지 위에 입자를 현미경으로 확인하여 색깔, 모양, 크기 등을 확인하고, FT-IR 분광기나 Raman 분광기를 이용하여 미지 입자의 고유 스펙트럼을 식별 (Identification)함. FT-IR 분광기나 Raman 분광기를 통해 확인된 물질 고유의 스펙트럼은 다양한 종류의 MPs 스펙트럼이 저장된 라이브러리와 비교하여 폴리머의 성분을 확인함.
- 열분해 분석법으로 Py-GC/MS (Pyrolysis-Gas Chromatography/Mass Spectrometry)를

사용하고 고분자를 고온에서 열분해하여 생성되는 분해산물을 기체크로마토그래피와 질량분석기로 분석함. 낮은 농도에서 정량이 가능하고 복합시료에서도 총 질량 기반 평가가 가능함.

- SEM(주사전자현미경)은 전자빔을 시료 표면에 조사하여 표면 형상과 미세 구조를 고해상도로 관찰하는 장비로 폴리머의 입자형태 및 크기 측정할 수 있음
- 지금까지 연구된 방법을 검토하여 보편적으로 사용되는 MPs 분석장비인 FT-IR, Raman, 열분해(Py-GC/MS), SEM을 선정하여 요약한 내용을 아래 표에 나타냄.

〈표 3〉 MPs 식별법에 따른 장·단점 비교

방법	특징	장점	단점
FT-IR Spectroscopy	분자의 결합구조를 알게 해주어 다른 유기물이나 무기물로부터 플라스틱을 구분 가능함	- 입자 과대 평가 및 과소 평가 가능성 無 - 실제 20 μm 크기까지 분석 가능함 - 비파괴 분석	- 고가의 장비 - 환경 시료 적용시 시간, 및 노동력이 많이 소요
Raman Spectroscopy	특정 파장의 빛이 산란되는 것을 측정하여 분자의 결합구조 파악	- 입자 과대 평가 및 과소 평가 가능성 無 - 1 μm 크기의 입자까지 분석 가능 - 비파괴 분석	- 고가의 장비 - 시간 및 노동력 많이 소요 - 분석 시 플라스틱에 혼합된 색소의 간섭을 받음
열분해법 Py-GC/MS	열에 대한 안정성에 따라 휘발 또는 분해되어 나오는 입자 검출	- MPs과 첨가제 동시 분석 가능	- 파괴 분석 - 식별 가능한 재질이 한정되어 있음.
제안내용	- 입자가 1mm 이하일때 스펙트로스코피나 열 분석법과 같은 화학적 분석을 병행 - 분석 시간과 폴리머수를 고려할 때 대상이 20μm 이상인 경우 FT-IR 추천 - 라만 분광법은 입자의 크기가 20μm 이하인 경우 사용 - 열분석법과 폴리머 타입을 알고 있는 실험실 시료에 적합		

3-1-3. 입자크기(2.5 μm , 10 μm)별 MPs 분석을 위한 시료채취(장비, 필터, 채취량, 채취시간 등) 방법 표준화

- 국·내외 연구결과 검토를 통한 환경 대기 중 MPs 분석 현황 파악
- 입자크기별 (2.5 μm , 10 μm) MPs 분석을 위한 시료채취(장비, 필터, 채취량, 채취시간 등) 방법 표준화
- 전처리방법 표준화를 위한 시료 전처리 과정(밀도 분리·여과·정제·농축과정 등) 최적화
- 환경대기 및 타 매질에서 MPs 분석에 활용되는 분석장비 현황 및 특성 제시
- 입자크기별 (2.5 μm , 10 μm) MPs 분석에 활용되는 분석장비(Raman, FT-IR, Py-GC/MS)

검토 및 최적 분석장비 선정

○ 시료 포집 방법 및 시료 채취량 일반적인 MPs 분석 절차

- <시료 채취> Air sampler 사양 및 포집 시간에 따른 MPs 검출 가능량 평가
- 그림9에는 공기 시료채취기(air sampler)의 사양(유량, 포집 시간 등)에 따라 실내 및 실외 조건에서 검출 가능한 미세플라스틱(MPs) 예상 포집량을 산정한 결과를 제시하였음. 동일한 농도 조건에서도 샘플러의 유량과 포집 시간에 따라 검출 가능한 MPs 개수는 크게 차이가 발생하는 것으로 나타났음. 특히 저유량·단시간 포집 조건에서는 검출 한계에 근접하거나 정량이 어려운 수준으로 감소하는 반면, 고유량·장시간 포집 조건에서는 충분한 입자 수 확보가 가능한 것으로 분석되었음. 이는 분석 장비의 정량한계 및 통계적 신뢰도 확보를 위해 적정 유량 및 포집 시간 설정이 필수적임을 나타냄.(문헌상 최저값 0.39 개/m³).

Target	Sampler Type	Flow rate (L/min)	Sampling Time (hr) / Predicted abundance (Count)								
			1	3	6	24	72	96	120	144	168
Indoor	Mini	5	0	1	2	7	22	29	36	43	50
	Mini	7	0	1	3	10	30	40	50	60	71
	Low	16.7	1	3	6	24	72	96	120	144	168
Atmosphere	Low	16.7	0	1	2	10	29	38	48	58	67
	High	1000	24	72	144	576	1728	2304	2880	3456	4032

<그림 7> 샘플링 기기의 사양 및 대상 시료별 MPs 최저 예상 포집 개수

- 대기 중 MPs 시료 채취는 저용량 및 고용량 공기 시료 채취기법을 사용함. (Particulate matter test method in ambient air - Low & High volume air sampler).
- 시료 흡입부에는 여과망을 설치하여 MPs과 공기가 혼합된 대기가 유입되도록 하되, 거대 입자 및 곤충 등 외부 오염물의 침입을 차단하도록 함. 시료 채취 시 유량 오차는 ±5% 이내로 유지하고, 1분 이내 간격으로 유량 확인이 가능하도록 하여 안정적인 채취 조건을 확보함.
- 대기 중 MPs의 입자 크기별 특성을 구분하여 분석하기 위해, PM₁₀ 및 PM_{2.5} 분리용 임팩터(impactor)를 장착한 공기 시료채취기(Air Sampler)를 사용함. 임팩터는 공기 흐름 내 입자의 관성 차이를 이용하여 특정 공기역학적 직경(aerodynamic diameter) 이상 또는 이하의 입자를 분리하는 장치로, PM₁₀(≤10 μm) 및 PM_{2.5}(≤2.5 μm) 조건에 맞추어 입자를 선택적으로 포집할 수 있음.

- PM₁₀ 임팩터를 장착할 경우 10 µm 이하의 입자만이 필터로 유입되며, PM_{2.5} 임팩터 적용 시 2.5 µm 이하의 미세 입자만을 선별적으로 포집할 수 있음. 이를 통해 대기 중 미세플라스틱의 크기 구획별 분포 특성을 정량적으로 평가할 수 있으며, 특히 초미세 영역(PM_{2.5})의 MPs 존재 여부 및 농도 수준을 확인할 수 있음.
- 시료 채취용 필터는 스테인리스 스틸 재질로 된 것을 사용하며, 단일 층(Single layer)로 제작된 것을 사용함. 필터의 공극(Pore)은 대기 중 MPs의 크기와 PM₁₀, PM_{2.5} 수준을 고려하여 1 µm를 사용함. 본 연구에서는 금속 필터 재질을 이용하여 입자의 포집을 수행하고자 하며, 이에 따른 적절한 샘플러의 선택 및 유량 등의 조건을 확인하고자 함. 또한, 일반적인 대기 시료포집 방법을 통해 얻은 시료를 바탕으로 비교 분석을 통해 제안된 방법과 적절성을 비교하고자 함.
- 시료 채취 기구에서 시료 또는 시약과 맞닿는 부분의 재질은 MPs 측정 및 분석에 부합하도록 플라스틱류 및 그와 유사한 재질의 사용은 피하고, 스테인리스강(Stainless Steel, STS), 금속제 또는 유리 재질 등으로 구성되도록 함. 단, 시료 채취 모듈 구성품 간 연결에 사용하는 튜브는 실리콘 재질을 사용할 수 있음.

3-1-4 전처리방법 표준화를 위한 시료 전처리 과정(밀도 분리·여과·정제·농축과정 등) 최적화

○ (선행연구) 전처리 과정의 회수율 평가 결과

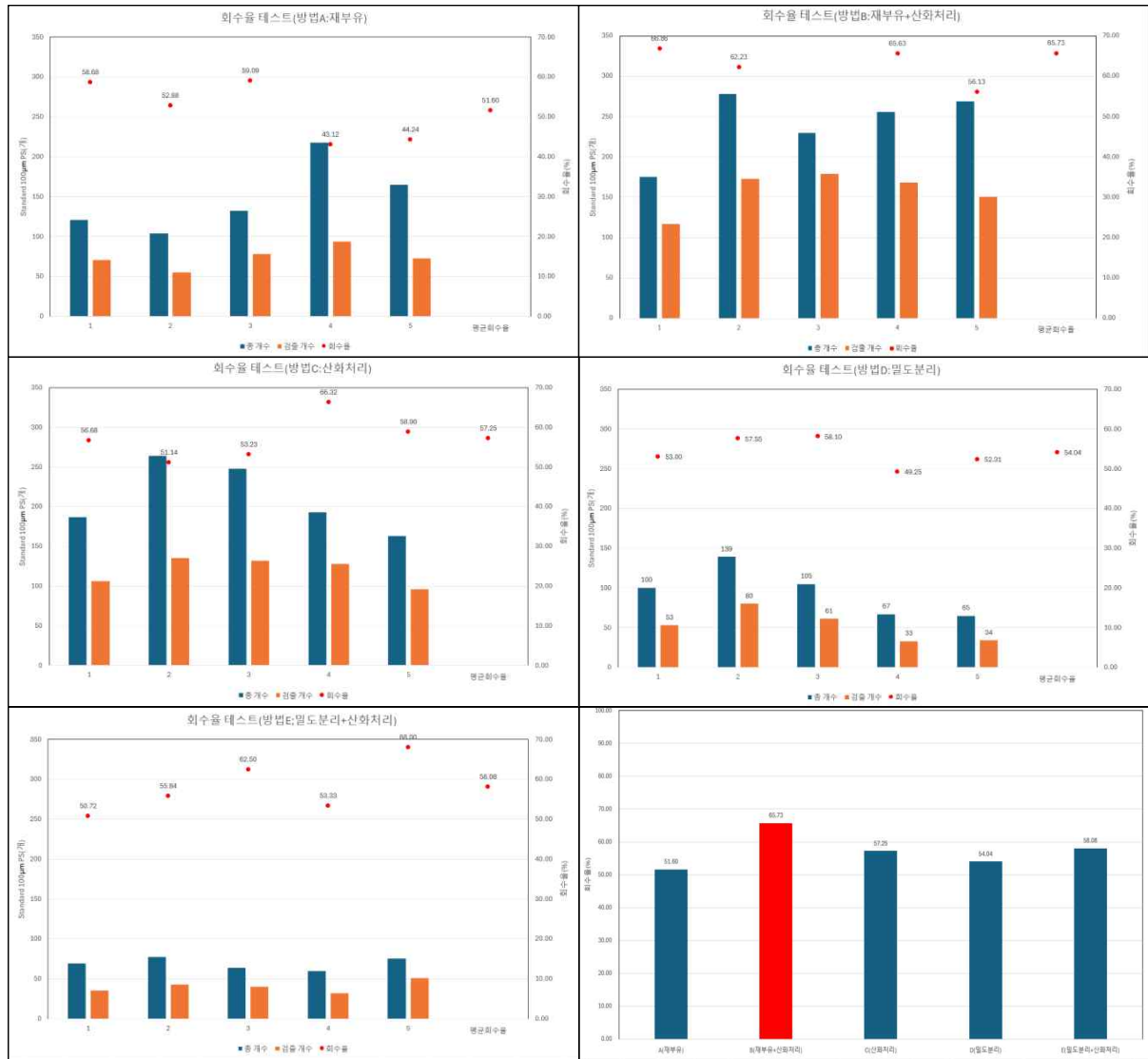
- 선행연구에서는 전처리의 효율적인 방법을 제안하기 위해 밀도 분리·여과·정제·농축과정에서의 회수율을 평가하였음. 회수율 테스트 결과 분석을 위한 전처리를 진행하지 않았을 때인 재부유 처리시 회수율은 51.6%로 나타냄.
- 시료의 유기물을 제거하는 산화 처리만을 진행하였을 때의 회수율은 57.3%로서 방해물질이 다소 제거되어 비교적 높은 회수율을 확인함.
- 밀도 차이를 통해 MPs보다 무거운 물질을 제거하는 밀도 분리를 진행하였을 때의 회수율은 54.1%로써 이 과정에는 MPs를 탈착하는 과정인 재부유가 포함되어 있으며 밀도 분리 과정에서 일어나는 손실까지 고려하였을 때 비교적 낮은 회수율을 확인할 수 있었음.
- 방법을 조합하여 실험을 진행하였을 때에 재부유를 포함한 산화처리시 회수율이 65.7%

로써 가장 높은 회수율을 확보하였으며, 밀도 분리와 산화처리를 같이 진행하였을 때에는 58.1%로써 산화처리를 통해 방해물질을 제거하는 것이 회수율 향상에 큰 영향을 미친다는 것을 확인할 수 있음.

- 또한 실제 시료에서 MPs를 탈착시키기 위한 과정인 재부유를 포함하여야 하며 재부유 만으로는 방해물질들의 존재로 분석이 불가능하고 밀도 분리 만으로도 방해물질이 다소 존재하여 분석은 가능하나 50% 대의 낮은 회수율의 결과가 나왔기 때문에 재부유를 포함한 산화처리 시 10 μ m PS 사용시 65.7%의 가장 높은 회수율 확보로 방법의 높은 신뢰성을 가지고 분석을 위한 전처리 과정에 가장 적합한 방안임을 알 수 있었음.
- 따라서 이러한 실험들의 결과를 이용하여 대기 중 MPs 분석 표준화 방안을 제안하기 위한 방법들의 기초적인 제안 근거로 본 연구에서 활용함.

<표 4> Raman을 이용한 방법별 회수율 평가 결과

전처리 방법	회수율
재부유	51.6%
산화처리	57.3%
밀도 분리	54.1%
재부유 + 산화처리	65.7%
밀도 분리 + 산화처리	58.1%



〈그림 8〉 Raman을 이용한 방법별 회수율 테스트 비교

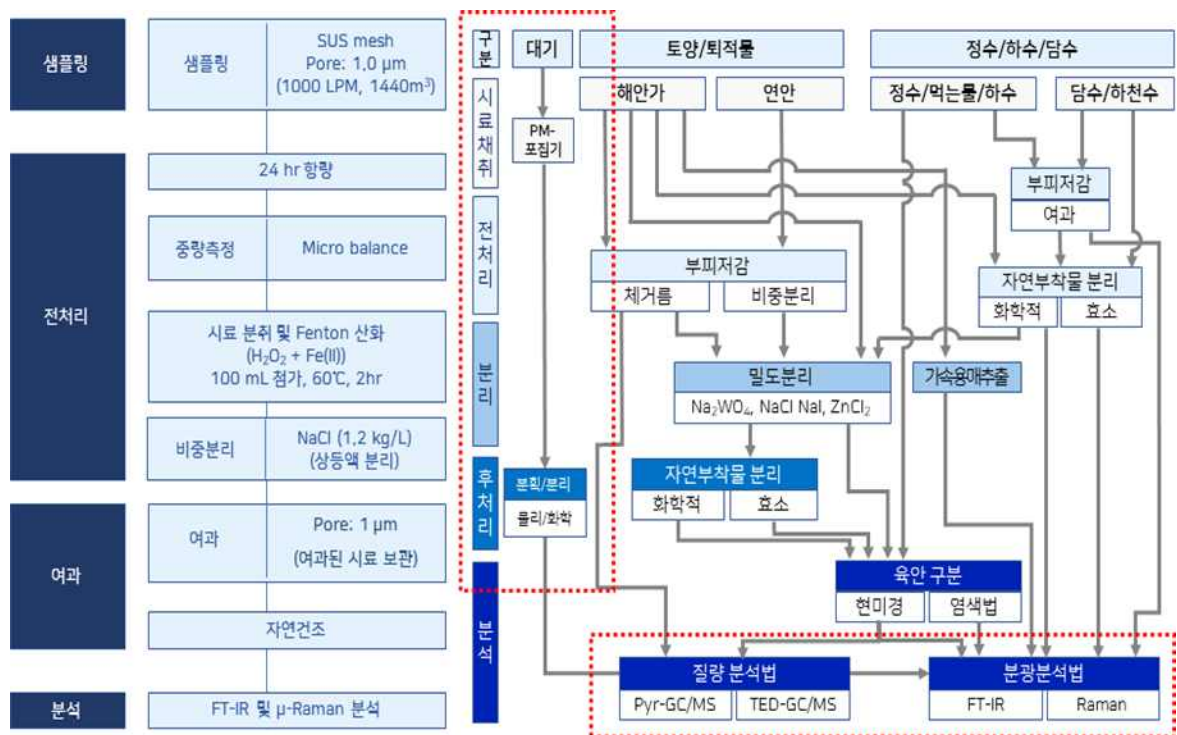
○ 대기 중 MPs 분석을 위한 전처리 과정

- 〈전처리 방법〉 MPs 전처리는 크게 두 가지로 나뉘게 됨. MPs 입자의 판정에 방해가 되는 유기물이 입자를 덮거나 분석에 방해가 되는 것을 제거하는 유기물 산화와 MPs 입자보다 큰 무기물 등을 제거하는 밀도 분리 과정이 있음.
- 채취한 시료의 분석을 위해 밀도 분리, 유기물 분해 등의 전처리 방법은 다음과 같음. 밀도 분리는 혼합되어있는 시료 중 MPs와 다른 물질과 구분하기 위해 NaI, ZnBr₂, NaCl 등 시약을 물에 녹여 밀도를 높인 후 MPs를 상부로 부상시킨 뒤 하층부로 가라앉는 물질을 제거하기 위한 과정임.

- 포집된 시료는 분석에 방해되는 유기물질의 분해에는 과산화수소수(H_2O_2)가 높은 비율 (25%)로 사용되고 있었으며, 유기물 분해가 된 시료는 전량 회수하여 다양한 공극 크기 및 재질의 여과지로 여과하여 입자성 물질을 여과하거나 여과 과정 없이 분석하는 경우도 존재함.

○ 대기 중 MPs 분석을 위한 전처리 과정 제안을 위한 검토 및 적용 사항

- 전처리 과정에서 사용되는 시약에는 30~35% 과산화수소 (Hydrogen Peroxide, H_2O_2), Fe(II) 용액, $ZnBr_2$ (밀도 분리 용액)가 있으며, 시료 채취 과정에서 사용하는 시약은 시약 내 불순물을 제거하기 위해 사용 전, $0.7\ \mu m$ 공극의 GF/C 유리섬유 재질의 필터로 1회 여과 후 사용함.
- 전처리 과정은 재부유, 밀도 분리, 산화 처리 순으로 진행하며 전처리 단계 중 실험자의 판단하에 분석을 위해 전처리 일부 과정을 생략할 수 있음.
- MPs의 경우 오염에 취약하므로 전처리 모든 과정은 시약 주입 시를 제외하고 알루미늄 포일 등으로 상부를 밀봉하여 진행함.- 일반적으로 대기 중 MPs 분석은 실내, 실외 공기 중 MPs 분석으로 나눌 수 있으며, 실내 시료는 부유와, 낙하 시료로 구분하며, 실외 시료는 부유, 침적 및 강우 시료로 구분될 수 있음. 시료 채취는 일반적인 대기 시료 채취 방법을 따름.
- 시료 채집 이후의 전처리, 분리, 분석 방법은 시료 채취 대상에 따라 구분할 수 있으나, 일반적인 환경 시료 분석 방법에 준하여 구분할 수 있음. 밀도 분리, 산화 과정을 거치는 전처리 과정을 따름.



〈그림 9〉 대기 중 MPs 전처리 및 분석 과정

1) 재부유

- 시료가 여과된 필터를 증류수에 침지하여 10분간 Sonication을 진행하여 재부유시켜 MPs를 재 탈착시킬 수 있음.

2) 밀도 분리

- 밀도 분리 용액을(ZnBr₂) 20mL 주입하고 실제 필터를 10분간 초음파 처리를 진행하여 필터 표면에 부착된 MPs를 탈착시킴. 그 후 초음파 처리가 완료된 시료를 분별깔대기에 24 hr 동안 정치시킴. 밀도 분리가 끝난 후 밀도 분리 용액을 침전물이 부상하지 않도록 천천히 주입하여 상등액을 분리함. 분취한 상등액을 5μm STS 필터에 여과하여 Petri Dish에 보관함. 밀도 분리 용액과 H₂O₂ 및 증류수가 만나 염이 생길 경우 황산을 희석하여 약산을 제조하여 여과 시 사용함.
- 전처리 과정 중 밀도 분리를 진행하였을 경우 100 μm PS 기준으로 표준물질이 상당히 크기 때문에 방해 물질 중 무기물질만 제거되었음에도 불구하고 FT-IR 분석이 가능했음. 하지만 10 μm PS 기준으로 작은 표준물질로 회수율 평가를 진행하였을 경우에는 여전히 남아있는 방해 물질로 인해 Raman 분석이 불가능함. 따라서 Raman 분석 시 시료에 밀도 분리 전처리 방법을 사용하지 않음.

3) 유기물 산화

밀도 분리가 완료된 필터를 세척한 용기에 옮겨준 후 필터가 담긴 용기에 H₂O₂와 Fe(III) 용액을 각각 20 mL씩 주입하고 70 °C 로 2시간 동안 가열함. 가열이 시작되고 1시간 후 과산화수소와 Fe(II) 용액을 추가로 20 mL씩 주입한다. 2시간의 가열이 종료되면 20 µm - 5 µm STS 필터에 다단 여과를 진행하여 MPs 분석에 방해되는 크기가 큰 방해 물질을 분류함.

4) 크기 분류

20 µm - 5 µm STS 필터에 다단 여과를 진행하여 실제 FT-IR/Raman으로 분석 시 방해 물질들을 제거하여 효율적인 분석을 위한 시료를 크기별로 분류한 뒤 분석을 진행함. 최종적으로 5 µm STS 필터를 초음파 처리를 통해 해당 필터에 존재하는 MPs를 탈착시킨 뒤 자체적으로 개발 한 5 µm 니켈 필터에 여과를 진행하여 분석을 위한 전처리를 완료함.

3-1-5 환경 대기 중 최적 측정범위 선정을 위한 현장 적용성 평가

- 측정범위 결정을 위한 입자크기별 (2.5 µm, 10 µm) MPs 시료채취* 및 분석

* 수도권지역 대표지점 기준 MPs 입자크기별 (2.5 µm, 10 µm) 현장적용성 평가

- 환경대기 중 MPs 구성성분* 파악 및 주요물질 스펙트럼 도출**

* 주요 MPs 재질정보 : PE(polyethylene, 비닐봉투), PS(polystyrene, 플라스틱 용기), PET(polyethyleneTerephthalate), PP(polypropylene), PU(polyurethane), PVC(polyvinyl-chloride) 등

** 환경대기 중 MPs 검출 물질별 이미지 및 스펙트럼 분류 특성 제시

3-2 연구 방법

3-2-1 국내·외 연구 결과 검토를 통한 환경 대기 중 MPs 분석 현황 파악

○ 대기 중 MPs 분포 및 분석 방법 연구 동향 분석

- 연구 현황은 라만분광법 및 열분해 방법을 이용한 분석 방법 마련 기초연구를 수행함. 다음의 연구 내용을 검토하여 연구동향 분석을 수행하고자함.

* 극미세먼지(PM₁₀) 관측 기반 구축 연구(Ⅲ), 국립환경과학원, 2023, 김현욱 등

- 현재, 환경 대기 중 MPs에 대한 개수(질량) 분석 방법을 여러 연구 논문을 통해 확인한 결과, 시료채취방법 및 분석 방법에 차이점*이 발견되어 표준화된 시험방법 개발을 통한 분석 방법 정립이 필요함.

* 시료채취방법: ① 입경 한계를 1 μm 로 하여 대용량 시료 채취방법, ② 입경 한계를 5 μm 로 하여 대용량 및 저용량 시료채취하는 방법

** 분석 방법: ① 라만분광기를 이용한 수 μm 입자 크기까지 분석, ② Py-GC/MS 법을 이용한 플라스틱 입자의 식별 및 정량분석

- MPs의 분석을 위한 방법으로 분광분석은 개별 폴리머의 개수, 열분석은 질량이 분석 가능함.

* 라만분광기를 이용한 수 μm 입자 크기까지 분석, Py-GC/MS를 이용한 열분석 방법으로 구분하여 조사를 수행함.

3-2-2 대기 중 MPs 분석에 활용되는 분석장비 선정

○ MPs의 측정 방법에 따른 분석장비 선정

- 본 연구에서는 질량분석법과 분광분석법을 적용하여 대기 중 MPs 분석법을 최적화하여 제시하고자함.
- 대기 중 MPs는 PM_{2.5} 및 PM₁₀ 조건에서 입자 크기 분포가 상이하며, 분석 목적 또한 입자 기반(개수·크기·형태)과 질량 기반(폴리머별 질량 정량)으로 구분됨. 따라서 2.5 μm 및 10 μm 수준의 MPs를 정밀하게 평가하기 위해서는 분석장비의 검출 한계, 정량 특성(입자 수/질량), 시료 매트릭스 간섭을 종합적으로 고려하여 장비를 선정해야

μ-Raman

- ✓ 이미지기반 입자 자동선택 분석방법 적용
- ✓ 사용장비: XploRA™ Plus, HORIBA Scientific



Spectrum Range (cm⁻¹)	840 – 4000
Acq. Time (s)	3
RTD time (s)	1
Wavelength(nm)	532

분석면적: Raman 부분 분석의 경우 30%이상의
면적을 분석 < 20 % 오차율 (Brant et al., 2021)

Py-GC/MS

- ✓ Pyrolyzer: EGA/PY-3030D (Frontier Lab)
- ✓ GC/MS: 8890/5977 (Agilent Technology)



Qualitative/Quantitative Analysis
F-Search / External Standard
Calibration

Pyrolyzer	Furnace temp. 600 °C
	Interface temp. 300 °C
	Inlet: 320 °C, Split: 20:1
	Carrier gas: Helium, 1 mL/min
GC	Column: DB-5 (30mD X 0.250mm X 0.25μm)
	GC Oven: 40 °C (2 min) -> 20 °C/min -> 320 °C (14 min)
	Runtime: 30 min
	EM: 1,364
MS	Scan range: m/z 29 – 550
	Scan speed: 2.8 scans/sec

<그림 10> MPs 분석장비 특성

함.

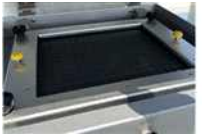
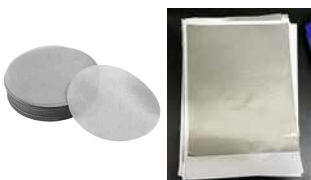
- 분광분석법(μ-Raman, μ-FTIR)은 개별 입자의 분자 진동 특성을 이용해 폴리머를 동정하며 입자 개수/m³, 크기 분포, 형태(섬유/파편)를 분석할 수 있음. Raman은 상대적으로 더 작은 입자(수 μm 수준)까지 측정이 가능하여 PM_{2.5} 영역의 작은 사이즈의 MPs를 포함한 입자 기반 분석에 유리함. 반면 μ-FTIR은 일반적으로 측정 가능한 최소 크기가 더 큰 편(대략 수십 μm 수준에서 안정적)으로, PM₁₀ 영역의 비교적 큰 입자에 대해서는 유효하나 2.5 μm 수준의 미세 MPs 평가에는 한계가 있음.
- 열분해 분석법(Py-GC/MS)은 시료를 열분해하여 생성되는 특징적 분해산물을 분석함으로써 폴리머 종류를 확인하고 폴리머별 질량(μg 수준) 정량이 가능함. 이를 통해 규제·위해성 평가에서 활용도가 높지만, 충분한 질량이 확보되지 않으면 정량한계 이하로 불검출될 수 있음. 특히 PM_{2.5} 조건 또는 저용량 포집 시에는 시료 질량이 부족해 Py-GC/MS 단독 적용이 어려울 수 있으므로, 포집량(유량·시간)과 시료 질량 확보 여부를 반영한 적용 전략이 요구됨.
- 따라서, PM_{2.5}(2.5 μm) 수준의 MPs를 포함한 입자 기반 특성(개수·크기·형태·폴리머 동정)을 확보하기 위해서는 μ-Raman을 최적(주 분석) 장비로 선정하는 것이 유리함. 또한 PM₁₀(10 μm) 조건에서는 μ-Raman으로 입자 기반 분석을 수행하되, 폴리머별 질량 정량 및 총량 평가를 위해 Py-GC/MS를 병행(보조 분석)하는 방식이 적절한 것으로 판단됨.

3-2-3. 측정범위 결정을 위한 입자크기(2.5 μ m, 10 μ m)별 MPs 시료채취 및 분석

○ 측정범위 결정을 위한 입자크기(2.5 μ m, 10 μ m)별 MPs 시료채취 및 분석

- <시료 포집 방법> 1) 시료 포집은 고용량/저용량 공기시료 채취법 (Particulate matter test method in ambient air-Low volume air sampler)에 따라서 PM₁₀, PM_{2.5} 임팩터를 장착하여 구분 채취. 2) 시료 채취 모듈 구성품 중 일부는 아래 제반 사항 및 특성을 따름. ①시료 흡입부는 MPs와 공기가 혼합된 대기가 유입되는 부분으로 여과망을 통해 거대 입자 및 벌레 등의 오염물의 침입을 막음. ②시료 채취용 카세트는 시료 흡입부 아래에 수평으로 위치하여 필터를 지지하고 공기가 일정한 속도로 필터를 통과하게 하는 역할을 수행하며, 고용량은 254mm × 203mm, 저용량은 47 $\varnothing$ 규격의 스테인리스 필터를 사용함. ③시료 채취용 필터는 MPs 시료 채취에 방해가 되지 않는 재질로 되어야 하며, 700~1000 L/min의 유량으로 공기를 흡입할 경우, 사용하지 않은 필터의 압력손실은 22 mmHg 이하여야 함. ④ 유량 측정부는 시료 채취 시 유량 오차가 $\pm 5\%$ 이내이어야 하며 채취기는 1분 이내 시간 간격으로 시료 채취 유량 확인이 가능하여야 하며 다음 사항을 확인할 수 있어야 함. ⑤ 흡입펌프는 필터를 장착한 상태에서 저용량은 16.7L/min, 고용량은 최대 1000 L/min 유량으로 흡입능력이 48시간 이상 지속할 수 있어야 함.
- <시료 채취 준비> 1) 시료 채취 전 스테인리스 필터의 오염물을 제거하기 위해 메탄올 용액으로 Sonication을 10분 세척 한 후 110 $^{\circ}$ C $\pm$ 5 $^{\circ}$ C 에서 충분히 건조하고 데시케이터에서 24시간 이상 보관한 후 사용함.
- <시료채취 지점 선정> 1) 시료 채취 지점은 주위에 건물과 수목 등의 장애물이 없는 장소로 함. 2) 주위에 건물 등이 밀집되거나 접근되어 있을 경우에는 건물 바깥벽으로부터 적어도 1.5 m 이상 떨어진 곳에 채취 지점을 선정함. 3) 도로 인근에서 시료 채취 진행 시 특이사항에 도로와의 직선거리를 표시함.
- <시료채취 시간> 12시간~24시간 연속 채취를 기본으로 하며, 측정감도에 따라 시간을 변동할 수 있음. 반드시 시료 채취 기록부에 시료 채취 시간 및 채취량을 기록함.

〈표 5〉 시료 채취 시 이용하는 장비 및 기구 구성

번호	품명	재질	사진	용도
1	침강유입방지용 흡입덮개 및 흡입부	-		시료 채취기 부품
2	필터 카세트	STS 또는 유리 등		시료 채취기 부품
3	유량측정장치	-		시료 채취기 부품
4	시료 채취용 카세트	STS 또는 금속제		필터 고정용
5	시료채취용 필터	STS		시료채취
7	페트리디쉬	유리		시료 보관용
8	알루미늄호일	알루미늄		시료 보관용

- 〈시료채취 방법〉 1) 유량 교정 필요시 3회, 10분 이상의 공시료 흡입 후 유량계의 유량을 교정함. 2) 시료 채취기의 시료 채취 시간을 기록 및 설정함. 3) 시료 채취용 카세트에 시료 채취용 필터를 위치하고 시료 채취기에 장착한 후 시료 채취를

- 시작함. 4) 시료 채취 종료 후 시료 채취용 카세트 위의 필터를 유리 디쉬 및 알루미늄 호일에 넣고 밀봉 후 운송함. 5) 운송 후 시료는 항온항습 조건에서 보관함.
- <시료의 전처리> MPs 측정용 시료에 30~35%의 과산화수소수(H_2O_2) 20mL+Fenton 용액 20mL를 투입하여 유기물을 제거하고, 염화브롬($ZnBr_2$)수용액으로 밀도 분리를 함.
 - <전처리 기구의 재질, 보관 방법 및 구성> 전처리 기구에서 시료 또는 시약과 맞닿는 부분의 재질은 MPs 측정 및 분석에 부합하도록 플라스틱류 및 그와 유사한 재질의 사용은 피하고, 스테인리스강(stainless steel, STS) 또는 유리 재질로 구성되도록 함.
 - <전처리 기구의 세척 및 보관> 1) 전처리 기구를 세척, 보관하는 장소는 외부에 노출되지 않는 장소이며, 장소 내부에는 강한 공기의 흐름을 유발하지 않도록 함. 2) 세척 작업 전, 작업대와 건조대 등 전처리 기구와 직접적으로 접촉하는 부분은 증류수로 표면을 세척 하여 오염을 제거함. 3) 전처리 기구는 인산염이 포함되지 않은 세제로 거품 세척 후 증류수로 3회 행구며, 자연 건조 후 알루미늄 호일로 밀봉하여 보관함.
 - <전처리 기구의 구성> 전처리 기구는 보관용기, 45 μm 공극 스테인리스 필터, 1 μm , 5 μm , 20 μm 공극의 평탄도가 있는 실리콘 혹은 금속 필터, 다단여과장치, 유리흡인기, 밀도 분리용기, 실리콘 튜브, 펌프, 알루미늄 호일, 알루미늄 디쉬, 유리 디쉬를 기본으로 구성하며, 그 외 기구는 전처리 상황을 고려하여 추가할 수 있음.
 - <시약의 전처리 및 보관> 1) 전처리 과정에서 사용하는 시약은 사용 전 0.7 μm 공극 GF/C 유리섬유재질의 필터로 여과 2) 여과된 시약은 플라스틱류 및 유사한 재질을 제외한 용기에 보관하며, 용기는 시료 채취 모듈과 같은 장소에 보관함.

〈표 6〉 전처리 기구 기본 구성

번호	품명	재질	사진	용도
1	보관용기	STS 또는 유리		시약 보관
2	필터	STS 또는 Si (금속필터)		시약 여과용
3	다단여과장치	STS 또는 금속재질		감압여과용 및 다단크기분류용
4	유리흡인기	유리		감압여과용
5	밀도 분리용기	유리		밀도 분리용
6	실리콘 튜브	실리콘		모듈 간 연결용
7	펌프	-		감압여과용
8	알루미늄 호일	알루미늄		밀봉용
9	알루미늄 디쉬	알루미늄		시료 보관용
10	페트리디쉬	유리		시료 보관용

- <전처리 방법> 포집된 필터는 D.I water에 Sonication - 47℃, 20μm STS 필터 여과- 유기물 산화 - 밀도 분리(생략가능) - Silicon 필터 5μm, 1μm 다단 여과 순서로 전처리함. 모든 과정에서 초자류의 상부는 호일로 밀봉함.

- <유기물 산화> 1) 유리 디쉬 및 알루미늄 호일에 밀봉된 필터를 개봉하여 세척한 용기에 옮겨줌. 2) 용기에 펜톤산화용액을 필터가 잠길 정도로 주입하고 30분 동안 초음파처리를 진행함. 3) 60℃, 24시간 반응시켜 유기물을 제거하고 여액은 1단으로 구성된 다단여과장치와 1μm의 STS 필터를 이용하여 여과하고 에탄올을 추가로 주입하여 잔류하는 시료 회수 및 과산화수소 용액을 세척함.

- <밀도 분리 - 생략가능> 1) 밀도 분리용액은 염화아연을 최소 972 g/L의 농도로 용액을 제조함. 2) 염화아연 외 다른 밀도 분리 용액도 <표 7>을 참조하여 이용할 수 있음. 3) 유기물 산화 ‘3)’ 과정에서 여과한 필터를 밀도 분리 용기에 넣고 밀도 분리용액을 주입하고 알루미늄 호일로 밀봉함. 4) 밀도 분리 용기를 30분 초음파처리 후 방치하여 밀도차에 의한 입자를 분리함. 5) 밀도 분리 용기에 추가로 밀도 분리용액을 천천히 입하여 상등액을 분리함.

<표 7> 밀도 분리 용액별 주입 농도 및 밀도값 비교

시약 종류	염화아연(ZnCl ₂)	아이오딘화 나트륨(NaI)	염화브롬(ZnBr ₂)
농도 (g/L)	972	1,000	750
밀도 (g/cm ³)	1.546(±0.002)	1.576(±0.019)	1.600(±0.005)

- <재부유 및 크기분류> 입자의 크기가 45μm 이상의 입자는 FT-IR로 분석한다. 또한 5μm 이상 45 μm 이하의 입자는 Raman 분석을 수행함. 1) 먼저 상등액을 45μm의 STS 필터를 이용하여 여과를 통해 FT-IR 분석용으로 사용함. 2) 이때 여액은 20μm 공극을 가지는 체를 통과시킴. 통과된 여액은 5μm 공극을 가지는 금속필터에 최종 여과를 하여 Raman 분석에 이용함. 3) 잔류된 20μm 위의 입자 성 물질은 에탄올을 사용하여 털어내어 유리 비이커 위에 회수함. 4) 회수된 상등액은 5μm 공극을 가지는 금속필터에 최종 여과를 하여 Raman 분석에 이용함. (열분석 적용시 생략 가능)

3-2-4 환경대기 중 MPs 구성성분 파악 및 주요물질 스펙트럼 도출

○ PM_{2.5} 유기 성분 및 유기탄소성분 분석

1) HR-ToF-AMS를 이용한 PM_{2.5} 유기 성분 실시간 분석

- 2025년 5월 24일부터 5월 31일까지 경기도 안산에 위치한 경기권대기환경연구소에서 High-Resolution Time-of-Flight Aerosol Mass Spectrometer (HR-ToF-AMS)를 이용하여 대기 중 PM_{2.5}의 화학적 성분을 실시간으로 연속 관측함. 본 관측은 5분 시간해상도로 수행되었으며, 단기간 집중 관측 캠페인 형태로 운영함.



<그림 11> 측정지점 경기권 대기환경연구소 (안산소재)

- HR-ToF-AMS를 통해 PM_{2.5} 입자 중 비내화성(non-refractory) 성분인 유기 성분(organic matter), 질산염(nitrate), 황산염(sulfate), 암모늄(ammonium), 염소(chloride)를 정량 분석함. 이 중 유기 성분은 고해상도 질량스펙트럼 정보를 바탕으로 시간별 변동 특성과 주요 기여 성분을 평가함.
- HR-ToF-AMS로 측정된 PM_{2.5} 유기 성분 자료를 기반으로, 동일 관측 기간 동안 PM_{2.5} 필터 시료에서 분석된 MPs 자료와의 비교 검토를 수행함. 대기 중 유기 성분의 시간적 변동성과 MPs 농도 수준 간의 동시적 변화 양상을 탐색적으로 평가함.
- 다만, HR-ToF-AMS 분석은 유기 성분의 총질량 및 화학적 특성을 제공하는 반면, MPs 분석은 필터 시료 기반의 정성·준정량적(polymer-related) 정보에 해당하므로, 본 비교

는 정량적 기여율 산정이 아닌 개념적·탐색적 비교의 성격을 가짐.

2) OCEC 분석기를 이용한 PM_{2.5} 유기탄소 성분 분석

- 동일 관측 기간 동안 대기 중 PM_{2.5}의 유기탄소(Organic Carbon, OC) 및 원소탄소(Elemental Carbon, EC) 성분을 정량하기 위하여 OCEC 분석기를 이용한 필터 분석을 수행함. PM_{2.5} 시료는 석영 필터(quartz fiber filter)에 포집되었으며, 표준 열-광학 분석법에 따라 탄소 성분을 분석함.
- OCEC 분석은 시료를 불활성 분위기(He) 및 산화 분위기(He/O₂)에서 단계적으로 가열하여, 휘발 및 산화되는 탄소 성분을 분리·정량하는 방식으로 수행됨. 이 과정에서 유기탄소(OC)는 저온 구간에서 방출되는 탄소 성분으로 정의되며, 원소탄소(EC)는 고온 산화 단계에서 방출되는 탄소 성분으로 정의함. 분석 중 발생하는 열분해 탄소(pyrolyzed carbon)는 광학 신호를 이용해 보정함.
- PM_{2.5} 내 OC 농도는 대기 중 유기물질의 총량적 지표(bulk organic carbon)로 활용되었으며, HR-ToF-AMS로 측정된 비내화성 유기 성분(organic matter)과의 시간적 변동 특성을 비교·검토함. 이를 통해 대기 중 유기 성분의 질량 기반 특성을 보완함.
- OCEC 분석 결과는 PM_{2.5} 필터 시료를 기반으로 수행된 MPs 분석과의 비교 해석에 활용함. 다만, OCEC 분석은 총 유기탄소의 질량 농도를 제공하는 반면, MPs 분석은 특정 고분자(폴리머) 유래 유기물의 존재 및 특성을 평가하는 방법이므로, 두 결과간의 비교는 정량적 기여율 산정이 아닌 개념적·보완적 해석에 초점을 둠.

제 4장. 연구 결과

4. 연구결과

4-1. 환경 대기 중 MPs 시료채취 및 전처리방법 표준화

4-1-1. 국내·외 연구 결과 검토를 통한 환경 대기 중 MPs 분석 현황 파악

○ 대기 중 MPs 분포 및 분석 방법 연구 동향 분석

- 서울시립대가 최초로 실내외 공기 중 MPs 분포 현황에 대한 연구논문을 발표하였고 (Choi et al., 2022), 도시, 숲, 상업지역, 대중교통 중심지, 비즈니스 센터 등 5개 야외 환경에서 대기 MPs 분포 연구하고 (Chang et al., 2023)를 진행하였음.
- 실내·외 대기 MPs 선행연구에서는 Mini Volume 샘플러를 이용해서 실내와 옥외에서 5 μm 미세먼지를 포집하였음.
- 실내·외 MPs 조사 결과, 실외에서는 0.45~5.16 개/ m^3 , 실내에서는 0.46~6.64 개/ m^3 가 검출되었고 지역별 오염원 영향의 차이가 큰 편이었음(Choi et al., 2022).
- 일반적으로 실외보다 실내 공기 중 MPs 농도가 높게 나타나는 경향이 있음. 서울시 보건환경연구원의 조사에 따르면 실내(평균 3.02 개/ m^3)가 실외(평균 1.96 개/ m^3)보다 발생량이 약 1.5배 높았음.
- 대기 중에서 검출되는 주요 MPs 재질은 폴리에틸렌(PE), 폴리프로필렌(PP), 폴리스티렌(PS), 폴리에틸렌 테레프탈레이트(PET) 등임. 실내에서는 합성섬유인 폴리에스테르의 비율이 높게 나타남.
- 열분석 결과, 특정 산업단지나 주거단지 인근 대기에서 SBR(타이어 마모 입자 관련), PVC 등의 성분도 유의미하게 검출되었음.
- 또한, MPs이 대기 순환을 통해 전 지구적으로 확산되며, 강우와 함께 지표로 떨어지는 ‘MPs 강우’ 현상이 있다고 보고됨. 이는 MPs이 발생원으로부터 멀리 떨어진 청정 지역(남극, 고산 지대 등)까지 이동할 수 있음을 시사함.
- 강우 중 MPs의 분포를 파악하고자 2020년 8월~2021년 8월까지 서울시의 양재 대기측정소에서 빗물 시료를 분석한 결과, 1 L당 594.5개의 MPs가 검출됨. 이중 폴리에틸렌(PE)과 PP가 74.9~95.2%를 차지함. (서울시보건환경연구원 연구 결과, 2022)

〈표 8〉 대기 중 MPs 연구 동향

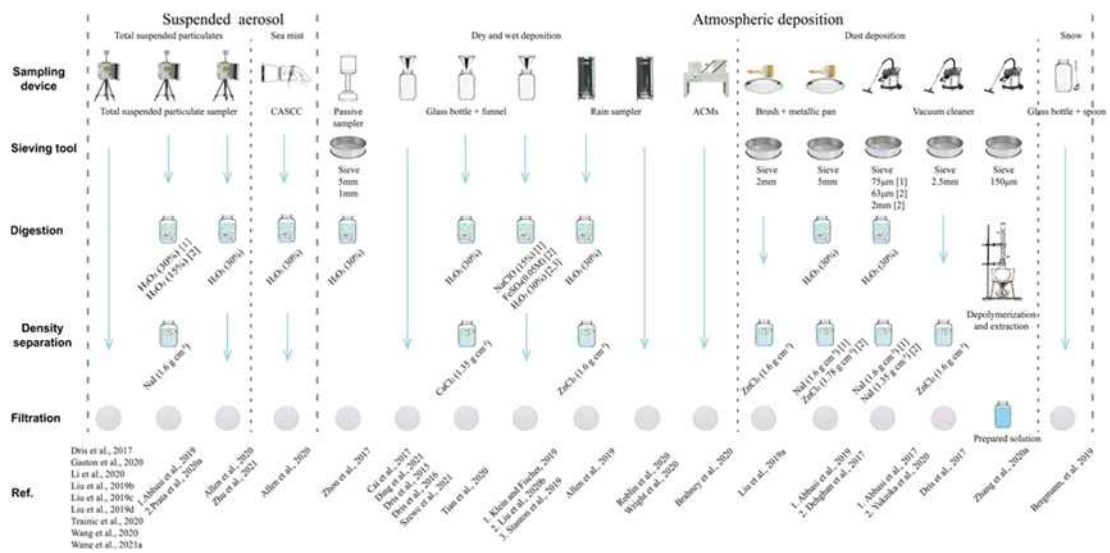
대상	샘플러	분석장비	Shape	Size(μm)	평균농도	Ref.
실내	Mini Vol.	μ FT-IR	Fiber 10.2%	166.1	2.51 ± 1.77 개/m ³	Choi et al., 2022
실외			Fiber 3.6%	115.5	0.05 ± 0.07 개/m ³	
실외	Low Vol.	μ FT-IR	Fiber 12.6%	62.23	0.72 ± 0.39 개/m ³	Chang et al., 2023

- 환경 중 MPs 정밀 분석 방법 마련을 위한 연구의 일부로 대기 MPs 분석을 위한 전처리 및 분광분석 기반 연구(입자크기: > 20 μm)가 수행됨. *MPs 정밀측정 기술개발 연구단 (KEITI, 20~22)
- 국립환경과학원(이하 과학원)은 KEITI가 제안한 분석 방법을 바탕으로 하여, 라만분광법(>5 μm) 및 열분석 방법(Py-GC/MS, TOC)를 이용한 분석 방법 마련 기초연구를 수행함. *환경 대기 중 MPs 분석 방안 마련 (NIER, 21~23)
- 과학원을 중심으로 대기 중 MPs 분석 방법 확립 및 표준 제정을 위한 기초연구를 수행하고 있음. 따라서, 표준화된 분석 방법을 확립하여, 실내외 공기 중에 존재하는 MPs를 정량하는 방법의 표준화 필요한 시점임.

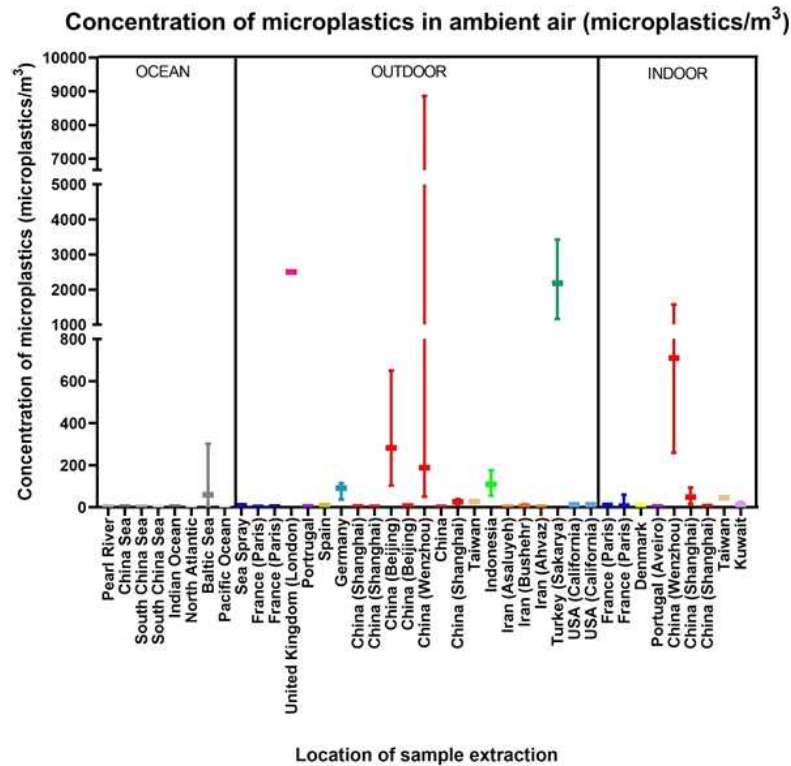
○ 대기 중 MPs 분석을 위한 시료 포집, 전처리, 분석 장비에 관한 문헌조사

- 실내외는 공기 중 낙하먼지, 실외는 부유 공기, 침적 및 강우 시료가 있으며 이에 따라 다양한 채취 방법을 이용하고 있으나 아직 대기 중 MPs 시료를 포집해서 표준화하는 방법이 정립되지 않았음(Azari et al., 2023).
- 시료 포집은 위치에 따라 크게 실내·외로 구분하며, 해양에서도 시료 포집이 가능함(O'Brien et al., 2023). 또한, 대기 시료는 부유 입자와 대기 퇴적물의 형태로 존재함.
- 시료 포집은 채취 도구나 장비, 채취법 실내·외 상관없이 연구하고자 하는 대기 위치에 따라 달라짐(Enyoh et al., 2019). 시료 포집은 일반적으로 Active와 Passive 샘플러에 의해 채취할 수 있으며, 두 가지 샘플링 방법을 조합하여 사용할 수 있음.
- 부유 입자는 주로 Pump-powered total suspended particulate 샘플러를 사용하고, 해무에는 Caltech Active Strand Cloud water Collector(CASCC)를 사용함.

- 샘플링 조건(샘플러 종류, 샘플링 위치)에 따라 대기 중 MPs의 개수 분포가 다양하게 나타나 시료 포집을 위한 명확한 방법을 마련하는 것이 중요함.
- 아래 그림들은 샘플러의 종류나 샘플링 위치에 따라 MPs의 검출 분포가 다르게 나타나는 것을 보여줌.

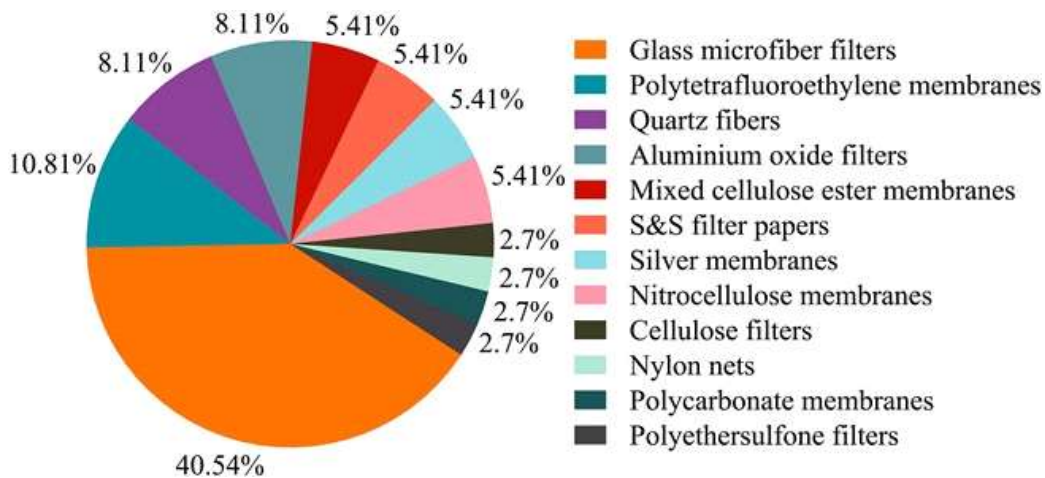


- 샘플링 조건(샘플러 종류, 샘플링 위치)에 따라 대기 중 MPs의 개수 분포가 다양하게 나타나 시료 포집을 위한 명확한 방법을 마련하는 것이 중요함.
- 아래 그림들은 샘플러의 종류나 샘플링 위치에 따라 MPs의 검출 분포가 다르게 나타나는 것을 보여줌.



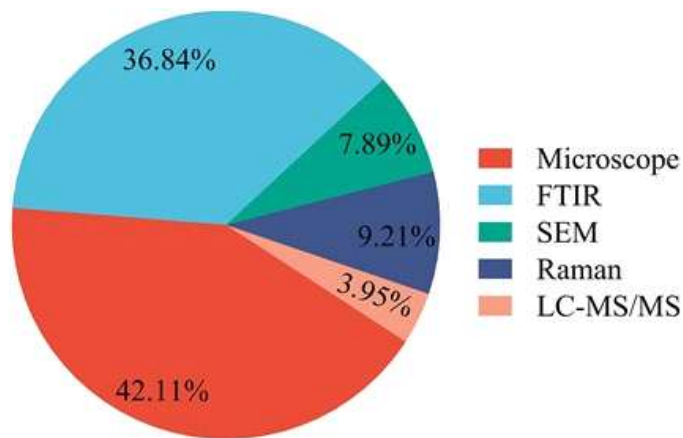
〈그림 13〉 샘플링 위치별 MPs 농도 분포 (O'Brien. et al., 2023)

- MPs 분석 전 유기 및 무기 불순물 제거와 농축, 식별하기 위해 전처리가 필요함. 전처리는 포집된 입자에 존재할 수 있는 유기, 생물, 기타 비플라스틱 물질로 인해 발생하는 MPs 식별의 간섭을 제거하는 것을 목표로 함.
- 이를 위해 시각적 분류, 여과, 밀도 분리, 재부유, 효소 소화 등을 포함한 다양한 방식의 전처리를 진행할 수 있음. 시료의 유기물 제거를 위해 산화 방법을 사용하며, 주로 H_2O_2 (30% w/w)나 Fenton 시약($H_2O_2 + FeSO_4$)을 이용하며 진행됨.
- 고밀도 오염물질로부터 MPs를 분리하기 위해 밀도 분리를 이용하며, 주로 $ZnCl_2$, NaI , $NaBr$ 을 사용할 수 있음. 분석용 시료 준비를 위해 다양한 필터를 사용해 진공 여과하여 MPs를 농축시킬 수 있음.
- 유리 극세사 필터는 대기의 미세한 입자를 포집하는 효율이 높아 가장 많이 사용됨(Luo et al., 2022). 그 외에도 은 필터, 니트로셀룰로오스 필터, 알루미늄 기반 멤브레인 필터, SS 필터, 석영 필터, 니켈 필터, PTFE, 폴리카보네이트 필터 등이 있음. 필터 및 공극 크기, 종류는 샘플링 방법이나 연구 설정에 따라 달라짐(Azari et al., 2023).



〈그림 14〉 대기 중 MPs 연구에 사용된 필터의 종류 및 빈도 (Luo et al., 2022)

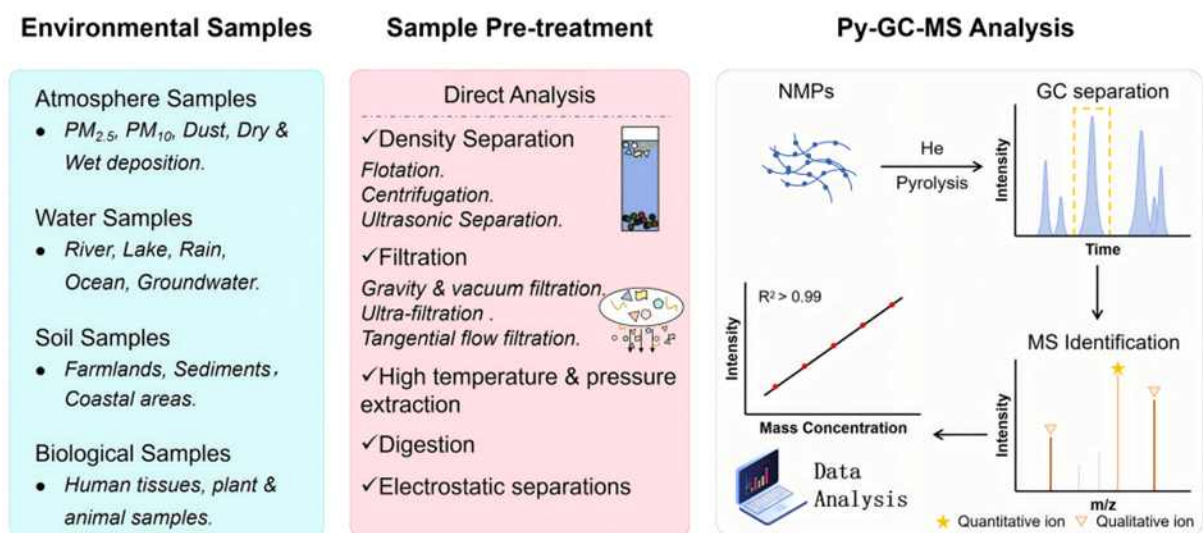
- MPs 식별을 위한 분석 방법에는 크게 시각적 분석과 화학적 분석으로 나뉨. 시각적 분석을 통해 크기, 색상, 모양, 광택, 형태, 개수 농도 등 MPs의 물리적 특성을 다양한 종류의 현미경으로 확인할 수 있음.
- 가장 일반적으로 실체현미경을 사용하고 있으며, 형광 현미경, 주사전자현미경(SEM), 쌍안현미경, 편광현미경(PLM) 등을 사용함. 대기환경에서 MPs와 유사한 물리적 특징을 가지고 있는 불순물을 배제하기 위해 샘플의 화학적 특성 분석이 필요하며, 이를 통해 폴리머 구성을 파악할 수 있음.
- 화학적 분석에는 FT-IR, Raman 분광법과 같은 분광분석을 포함하며, 다양한 스펙트럼 라이브러리와 샘플의 손상이 없다는 장점이 있음.
- 다른 방법으로 열분석이 있으며, Py-GC/MS, TGA-GC/MS, TED-GC/MS 등이 있으며 입자의 크기를 확인할 수 없지만, MPs의 화학적 조성 and 개별 성분의 농도를 결정할 수 있음(Azari et al., 2023).
- 이러한 분광 및 열분석의 구분은 MPs의 질량, 수 분포에 따라 정해짐. MPs의 분석은 현미경으로 입자의 물리적 특성을 파악한 후 분광 분석하여 폴리머를 구분하는 등 시각적 및 화학적 분석을 복합적으로 사용할 수 있음.
- 최근에는 입자의 개수를 구분하는 현미경이 결합 된 FT-IR과 Raman 분광분석 방법이 대부분을 차지함.



〈그림 15〉 대기 중 MPs 분석 장비 종류 및 빈도 (Luo et al., 2022)

○ 대기 중 MPs 분포 및 분석 방법 열분해법 연구 동향 분석

- 앞서 제시한 기존 현미경 및 분광분석(Raman, FT-IR)은 주로 입자의 개수 농도(개/m³)로 결과를 제시함. 반면 열분해 기반 분석법은 폴리머의 화학적 조성과 농도를 질량 기반(μg/m³)으로 산출할 수 있음.
- 다만, 열분해 기반 분석은 입자 크기 및 형상에 대한 정보는 잃지만 질량 기반 농도(μg/m³)로 제시할 수 있어 분광분석법의 한계를 보완하는 유용한 분석법으로 평가됨 (Zheng et al., 2024).
- Py-GC/MS는 포집한 시료를 고온에서 순간 열분해(Flash Pyrolysis)하여 생성되는 열분해 산물을 GC/MS로 분리, 검출하고 특정 지표 이온으로 폴리머를 정성 및 정량하는 분석법임.



<그림 16> Py-GC/MS 기반 MPs 분석 방법 과정 (Jing et al., 2025)

<표 9> 국외 대기 중 MPs (열분해법) 연구 동향

지역	장소	분석 방법	주요 검출 폴리머	Ref.
Finland	도로변	TD-Py-GC/MS	NR, SBR, PE, PET, PP, PS	Martinmäki et al. (2025)
New Zealand	실내(연구실)	TD-Py-GC/MS	PC, PVC, PE	Rindelaub & Miskelly (2025)
Japan	옥상	Py-GC/MS	PE, PS, PET, PA66	Morioka et al. (2024)
Japan	실외	Py-GC/MS	PS, SBR, PP	Mizuguchi et al. (2023)
Germany	도심	Fenton 산화 + Py-GC/MS	PET, PVC	Goßmann et al. (2022)

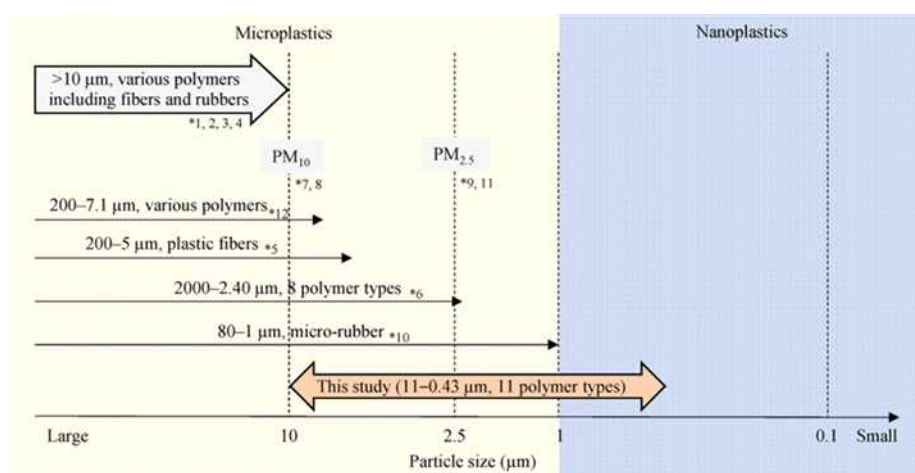
- 대기 시료의 경우 유기물, PAH(Polycyclic Aromatic Hydrocarbons) 등이 존재하기 때문에 열탈착(thermal desorption, TD) 후 열분해(Pyrolysis)를 단계별로 수행하는 Double-shot이 간접 저감에 유리한 것으로 알려짐(Mizuguchi et al., 2023).
- 실외 도로 경계에서 PM₁₀ Low Volume Sampler (38.3 L/min)로 Quartz Fibre 필터를 이용해 포집 후 Py-GC/MS 열분해법으로 MPs를 정량한 결과 PE가 47-156 ng/m³으로 가장 많은 비율을 차지하고 있으며 이후 PP, SBR 그리고 NR(Natural rubber)이 각각 21-63, 14-106 그리고 6-42 ng/m³으로 검출되었음(Martinmäki et al., 2025).
- 열분해 기반 MPs 분석은 대기 시료를 입자 직경(PM₁₀, PM_{2.5-10}, PM_{2.5} 이하)로 구분한 후 각 분획 별 폴리머 질량(ng/m³)을 산정하는 접근이 흔히 활용됨.
- Mizuguchi et al. (2023)는 >PM₁₀, PM_{2.5-10} 그리고 PM_{2.5} 세 가지 직경으로 구분하였는데, 이 때 PM_{2.5} 구간에서 대기 중 MPs 농도는 PP가 약 0.8~3.5 ng/m³, PS가 0.25~0.76

ng/m³ 그리고 SBR은 대부분 <LOD 수준으로 보고되었음.

- Morioka et al. (2024)는 입자를 크기별로 8단계로 구분하여 NanoPlastic 단위까지 측정했는데, 1 µm 이하의 Nanoplastics 범위까지도 포함하였음. 11개의 폴리머를 대상으로 Py-GC/MS 분석을 수행하였으며 그 중 4가지 폴리머 PE, PS, PET 그리고 PA66가 각각 0.81 µg/m³, 0.14 µg/m³, 0.23 µg/m³ 그리고 0.02 µg/m³ 검출되었음. 또한 1 µm 이하에서도 상당량을 확인하였음. 대기 중 플라스틱의 질량 농도는 1.20 µg/m³이었음.

<표 10> 국외 대기 중 MPs (열분해법) 직경 크기별 연구 사례

구분	국가	샘플 채취 유량	직경 구분	분석법	Ref.
Urban & agricultural region	Spain	30 m ³ /h	PM ₁₀ PM _{2.5}	TGA-MS	Costa-Gómez et al., (2023)
Urban area	Japan	20 L/min	> PM ₁₀ PM _{2.5-10} PM _{2.5}	TD Py-GC/MS	Mizuguchi et al. (2023)
Urban area	Japan	500 L/min (High Volume)	> 11 µm 7.0-11 µm 4.7-7.0 µm 3.3-4.7 µm 2.1-3.3 µm 1.1-2.1 µm 0.65-1.1 µm 0.45-0.65 µm	Py-GC/MS	Morioka et al. (2024)
살내(연구실)	New Zealand	10 L/min	PM ₁₀ PM _{2.5}	Py-GC/MS	Rindelaub & Miskelly (2025)



<그림 17> 대기 중 MPs 직경 크기별 구분 (Morioka et al., 2024)

○ 대기 중 MPs 분석 QC을 위한 시료 포집, 전처리, 분석 장비 문헌 조사

- MPs 분석은 외부 오염에 민감하므로 시료 포집부터 전처리까지 엄격한 관리가 요구됨. Martinmäki et al. (2025)은 오염을 방지하기 위해 현장 바탕시료(Field Blanks), 실험실

바탕시료(Laboratory blanks) 그리고 기기 바탕시료(Instrument blanks)를 사용하여 분석 데이터의 신뢰성을 확보하였음.

- * Field Blank: 석영 섬유 필터(Quartz Fibre Filters)에 0.11 m³ 공기를 포집하여 준비. 실제 포집 시료와 동일하게 처리하였으며, 시료 채취, 운송, 보관 및 전처리 과정에서 발생하는 MNP 오염 확인
- * Laboratory Blank: 균질화 단계를 제외한 모든 시료 전처리 과정을 수행하여 발생하는 MNP 오염 확인
- * Instrument Blank: 분석 기기 자체 MNP 오염 평가를 위해 열분해 컵 없이 분석 수행

- 또한 모든 초자료를 분석 전 초순수 증류수(25 °C, 18.2 MΩ · cm, 0.22-μm)와 트리클로로메탄(Trichloromethane)으로 세척하였으며 금속 장비는 사용 전 고온 처리하였음. 실험에 사용한 모든 시약과 희석액은 미세/나노 플라스틱(MNP) 오염 여부를 배제하기 위해 분석을 거친 후 사용하였음(Martinmäki et al., 2025).
- Martinmäki et al. (2025)는 Py-GC/MS 분석을 위해 포집 필터 자체를 Ball mill에 넣고 균질화(Homogenization)하여 가루로 만들어, 분석용 컵(Pyrolysis cup)에 담아 분석을 수행하였음. 또한 PET 성분을 검출하기 위해 TMAH(Tetramethylammonium hydroxide 25% in Methanol)를 적신 필터 조각을 시료컵 위에 덮어 분석을 수행하였음.
- Goßmann et al. (2022) 또한 PET와 PC의 검출 감도를 높이기 위해, 각 열분해 컵에 20 μL의 TMAH(메탄올에 녹인 25% 용액)를 첨가하여 메틸화 반응을 유도하였음.
- 열분해 시료 분석 전 전처리 중 유기 오염물질 제거를 위해 필터를 450 °C에서 6시간 동안 회화(Muffle furnace) 처리한 후 사용함(Costa-Gómez et al. 2023).
- 1 μm 나일론 필터는 시료 포집 전 55°C에서 건조한 후 칭량(무게 측정)하여 준비하였다. 이 필터를 공기역학적 직경의 50% 절단 입경(D₅₀)이 1.0 μm인 시료 채취기에 장착하여 포집하였음(Morioka et al., 2024).

4-1-2. 입자 크기별(2.5μm, 10μm) MPs 분석을 위한 시료 채취(장비, 필터, 채취량, 채취 시간 등) 방법 표준화

○ 실제 시료 포집 방법 및 시료 채취량 MPs 분석 절차 진행 사항

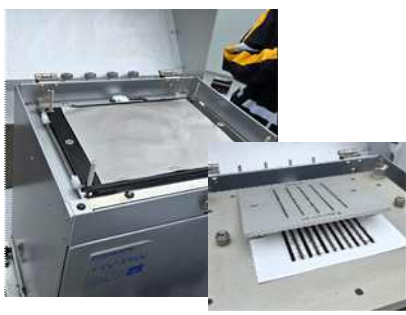
1) 시료 채취 시간 및 채취 장소

- 경기도 안산 산업단지와 경기도 과천 주거단지 2지점에서 시료 채취 진행함.

<표 11> 시료 채취 시간 및 장소

구분	경기도 안산 산업단지	경기도 과천 주거단지
시료 채취 기간	2025년 05월 24일~ 30일(7일)	2025년 06월 10일~ 16일(5일)
시료 채취 시간	23hr/d	23hr/d
고용량 공기 포집 유량	1000L/min	700L/min
저용량 공기 포집 유량	16.7L/min	16.7L/min

<표 12> 고용량 공기 시료 채취기 및 대기 측정 시 사용 필터

고용량			
	High Volume Air Sampler(1,000LPM)		STS 필터
저용량			
	Low Volume Air Sampler (16.7 LPM)		STS 필터

-포집 사이즈 : PM₁₀, PM_{2.5} 임팩터(Impactor) 부착 후 시료 포집

-시료 포집 필터

: 고용량 공기 포집장치: STS (Stainless steel) Filter(230 mm × 177 mm, Pore size: 1 μm)를 제작하여 채취함.

: 저용량 공기 포집장치: STS (Stainless steel) Filter(Φ 47, Pore size: 1 μm) 사용
STS(Stainless steel)은 물리적으로 단단한 재질이며, 내화학적 역시 좋기 때문에 시료를 추출하는 과정에서 영향을 줄 가능성이 적다

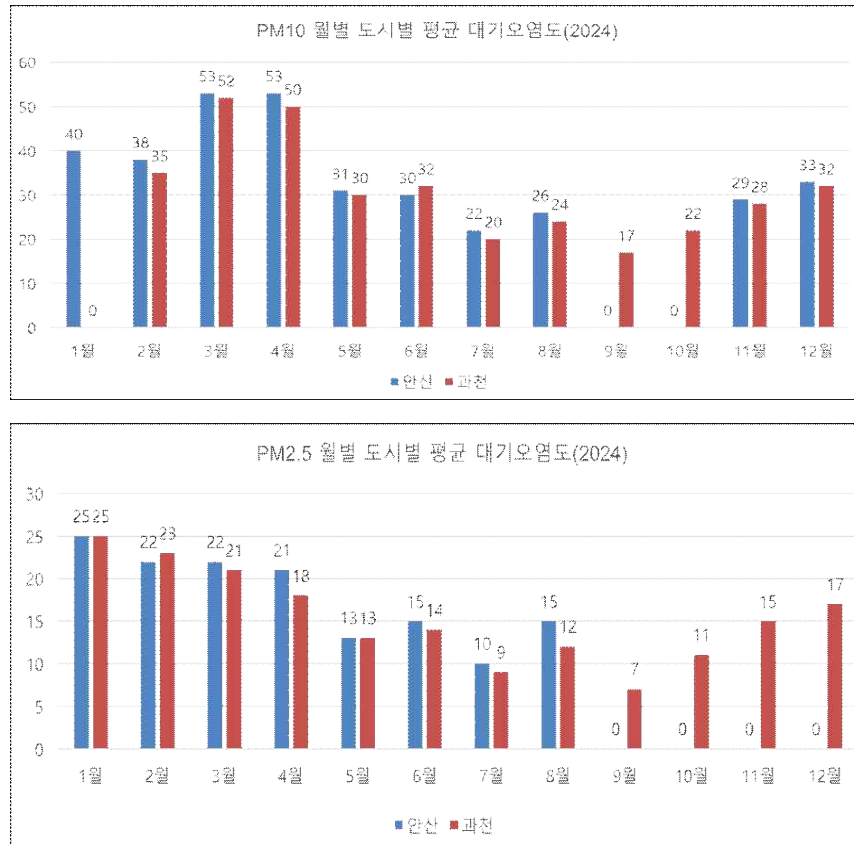
- 시료 채취 기간 유량의 변동계수(유량의 표준편차를 평균 유량으로 나눈 값, %)
- 시료 채취 기간 동안 5분 이상 평균 유량의 5%를 초과하는지 여부
- 시료 채취 기간 동안 총 시료의 부피, $30 \times 24 \times 60 \times 700/1000 \text{ m}^3$

2) 시료 채취 장소 기상 상황

- 경기도 과천 (주거단지)
 - 시료 채취 기간: 2025년 06월 10일~ 06월 16일(5일)
- 경기도 안산 (산업단지):
 - 시료 채취 기간: 2025년 05월 24일~ 05월 30일(7일)
- 시료 채취기간 동안에 대체적으로 무강우 기간이었고 1~2회 정도 강우가 기록됨.
- PM₁₀, PM_{2.5}에서 측정 결과와 비교하여 MP 개수를 비교하였음.

〈표 13〉 시료 채취 장소 미세먼지 농도 및 기상 상황

구분	날짜	PM _{2.5}	PM ₁₀	일강수량 (mm)
경기도 과천 주거단지	6월 10일	9	17	17
	6월 11일	12	24	4
	6월 12일	18	31	0
	6월 13일	26	36	2
	6월 16일	14	32	0
경기도 안산 산업단지	5월 24일	9	15	4
	5월 25일	8	13	0
	5월 26일	22	37	0
	5월 27일	26	50	0
	5월 28일	24	44	0
	5월 29일	25	40	0
	5월 30일	29	46	0



〈그림 18〉 시료 채취 지점의 PM_{2.5}, PM₁₀ 농도 변화, µg/m³

3) 대기 시료 채취 방법

- 대기 중 MPs 시료 채취는 고용량 공기 시료 채취 기법 사용함. (Particulate matter test method in ambient air - High volume air sampler)
- 시료 흡입부는 MPs와 공기가 혼합된 대기가 유입되는 부분으로 여과망을 통해 거대 입자 및 벌레 등의 오염물 침입을 막음.
- 유량 측정부는 시료 채취 시 유량 오차가 ±5% 이내이어야 하며 채취기는 1분 이내 시간 간격으로 시료 채취 유량 확인이 가능해야 하며 다음 사항을 확인할 수 있어야 함.
- 시료 채취용 필터는 스테인리스 스틸 재질로 된 것을 사용하며, 단일 층 (Single layer)로 제작된 것을 사용한다. 필터의 공극 (Pore)은 대기 중 MPs의 크기와 PM₁₀, PM_{2.5} 수준을 고려하여 1 µm를 사용함.
- 시료 채취 기구에서 시료 또는 시약과 맞닿는 부분의 재질은 MPs 측정 및 분석에 부합하도록 플라스틱류 및 그와 유사한 재질의 사용은 피하고, 스테인리스강(Stainless

Steel, STS), 금속제 또는 유리 재질 등으로 구성되도록 해야 함. 단, 시료 채취 모듈 구성품 간 연결에 사용하는 튜브는 실리콘 재질을 사용할 수 있음.

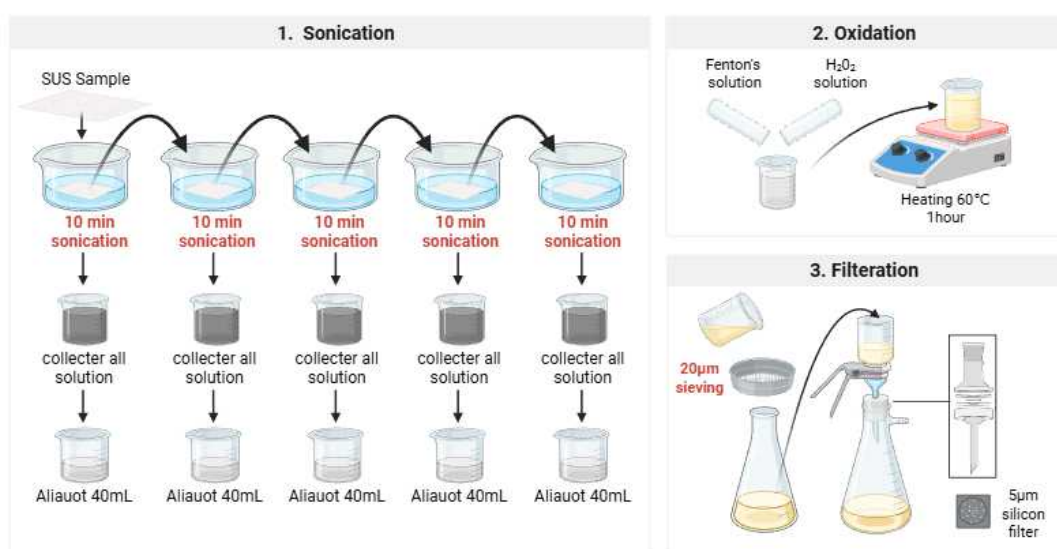
4-1-3. 전처리 방법 표준화를 위한 시료 전처리 과정(밀도 분리 · 여과 · 정제 · 농축 과정 등) 최적화

○ 대기 중 MPs 분석을 위한 Raman 전처리 실험 (고용량 공기 포집 시료)

1) MPs 추출을 위한 Sonication 및 펜톤 산화 조건 실험

① Sonication (40 kHz) 추출 시간 (10min, 5회)

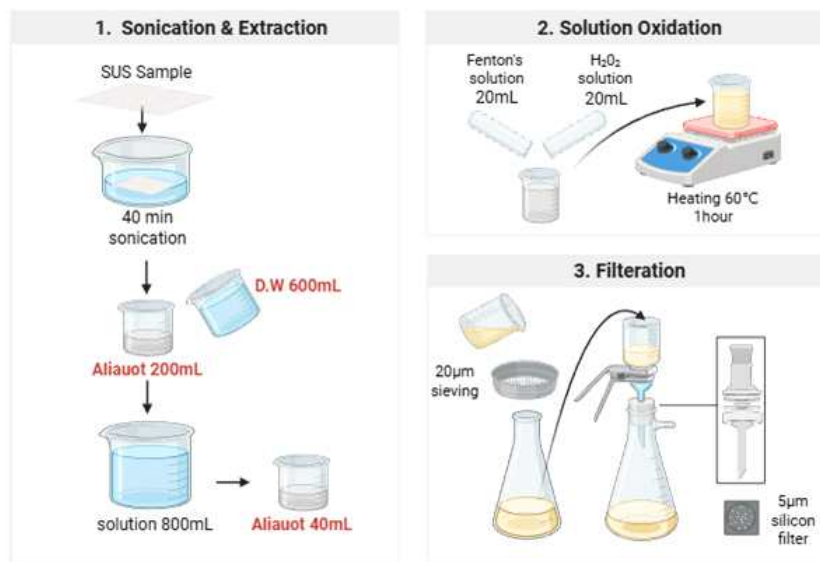
- PM₁₀ 포집기를 통한 사각 STS 필터에 포집된 MPs의 추출을 위해 sonication 시간을 10분 단위로 나누어 실험
- 과천 주거단지(6월 10일)에서 포집한 필터를 480 mL 증류수에 넣고 10분간 sonication을 진행한 뒤, 분석용 샘플로 분취 함. 동일 필터를 480 mL 용량 증류수에 다시 넣어 10분간 sonication하는 과정을 총 5회까지 반복함.
- 1차~5차까지 진행한 분석용 샘플에서 각 40 mL씩 분취하여 펜톤 산화 용액 20 mL, 과산화수소 20 mL을 투입하고 60°C 열을 가하여 펜톤 산화를 진행함.
- 산화한 용액을 20 µm STS filter에 여과하고, 다시 5 µm 실리콘 필터에 재여과하여 Raman 분석함



<그림 19> 시료 추출을 위한 Sonication 시간 결정 실험 모식도

② Sonication 시간 실험 (40min)

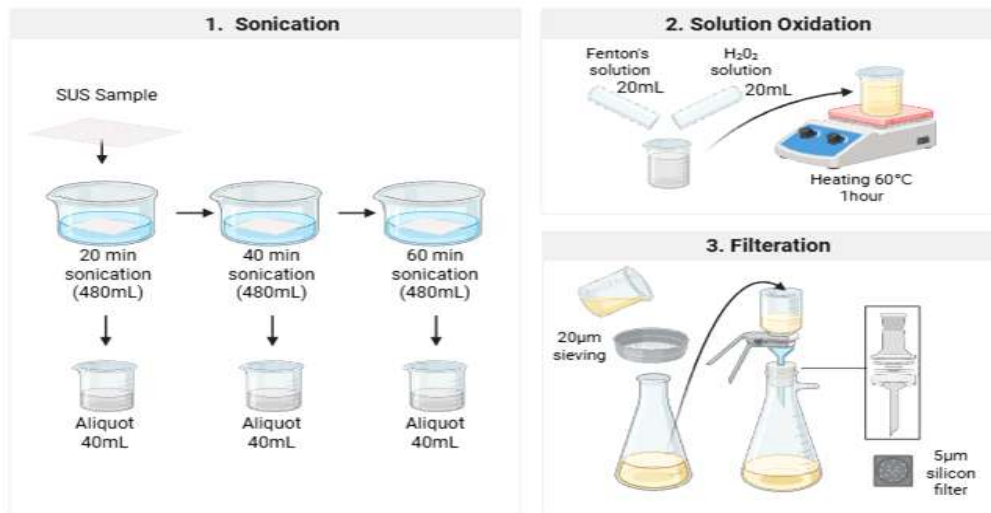
- 과천 주거단지(6월 12일)에서 포집한 필터를 사용하여 실험 ①과 동일한 조건에서 Sonication 시간을 40분으로 진행함.
- 필터를 40분간 sonication한 후 용액을 4배 희석하여, 그 중 40 mL를 분취하여 펜톤 용액 20 mL, 과산화수소 20 mL을 투입하고 60 °C 열을 가하여 펜톤 산화를 진행함.
- 산화한 용액을 20 μ m STS filter에 여과하고, 다시 5 μ m 실리콘 필터에 재여과하여 Raman 분석함



<그림 20> 40분 Sonication 및 희석 조건 검토 실험 모식도

③ Sonication 시간 실험 (20, 40, 60 min)

- 과천 주거단지(6월 13일)에서 포집한 필터를 사용하여 실험 ①과 동일한 조건에서 Sonication 시간을 20분씩 3회 진행함. 각 sonication 후 40 mL씩 분취된 분석 용액은 펜톤 용액 20 mL, 과산화수소 20 mL을 투입하고 60 °C 열을 가하여 펜톤 산화를 진행함. 산화한 용액을 20 μ m STS filter에 여과하고, 다시 5 μ m 실리콘 필터에 재여과하여 Raman 분석함.

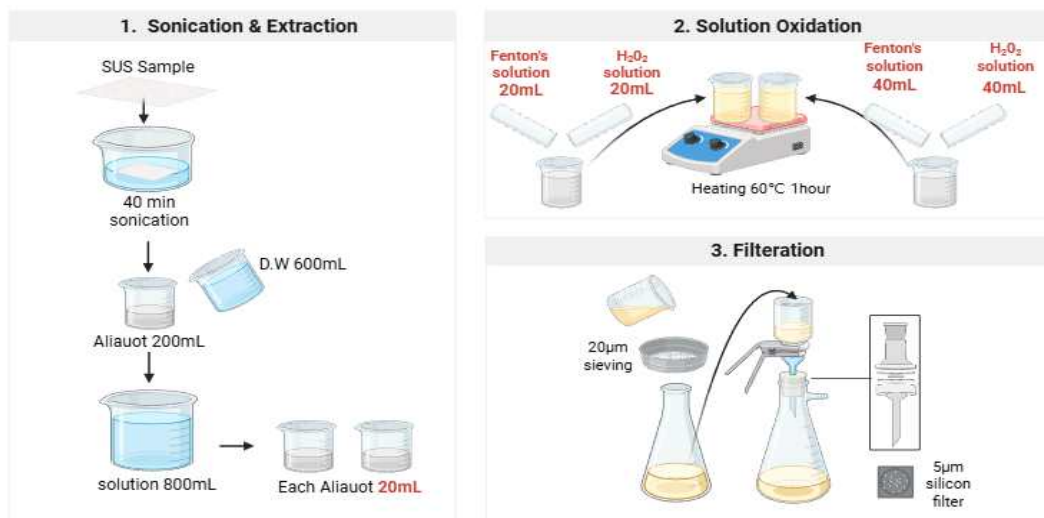


〈그림 21〉 산화제 투입량에 따른 실험 모식도

2) 펜톤 산화 용액 투입 조건 실험

① 산화제 투입 양에 따른 효율

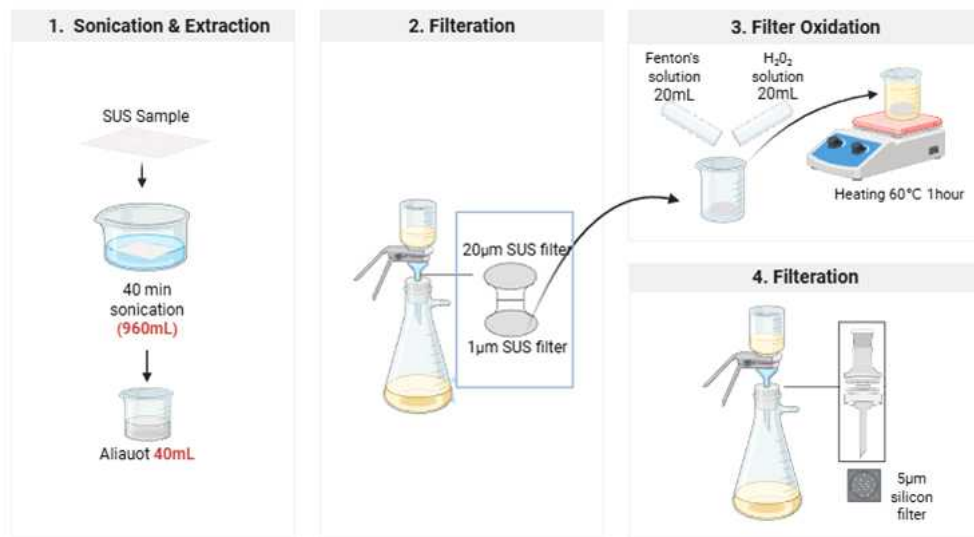
- 실험 1)의 ②와 동일한 시료를 동일한 조건으로 40분간 sonication한 후 용액을 4배 희석하여 그 중 20 mL씩 2번 분취하여 분석 용액을 제조.
- 1번 분석 용액에는 펜톤 용액 10 mL+ 과산화수소 10 mL을 투입하였고, 2번 분석 용액에는 펜톤 용액 20 mL+ 과산화수소 20 mL을 투입함
- 산화한 용액을 20 µm STS filter에 여과하고, 다시 5 µm 실리콘 필터에 재여과하여 Raman 분석함



〈그림 22〉 적정 산화용액 용량 검토 실험 모식도

② 산화제 투입 조건에 따른 효율

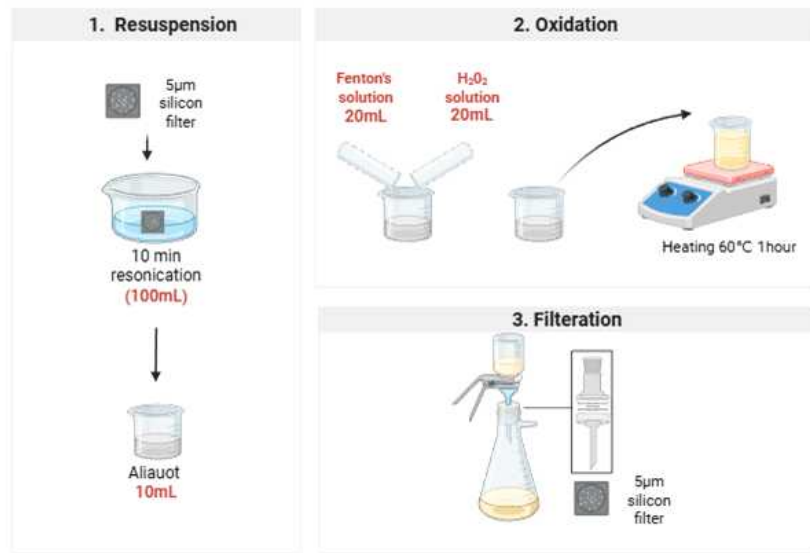
- 실험 1)의 ③과 동일한 시료를 증류수 480 mL에서 60분간 sonication 한 후, 20 μm 체로 거른 후 1 μm STS 필터에 여과하고, 1 μm STS 필터 자체를 산화시킴.
- 사각 STS filter를 증류수 480 mL에서 60분간 sonication 진행함.
- 20 μm 와 1 μm STS 필터에 다단으로 여과한 후, 1 μm STS 필터 자체를 산화 용액에 넣어서 산화함.



<그림 23> 필터 기반 입자 산화 전처리 평가 실험 모식도

3) 재부유 실험

- Raman 분석이 불가능할 정도로 이물질이 많은 경우에는 재부유를 하였고, 그 방법은 5 μm 실리콘 필터를 100 mL 증류수에 넣고 10분간 sonication 후 10 mL만 분취하여 다시 5 μm 필터에 여과한 뒤 Raman으로 관찰함.



〈그림 24〉 재부유 실험 모식도

○ 대기 중 MPs 분석을 위한 열분해법 전처리 실험 (고용량 공기 포집 시료)

- 분석에 사용할 초자류는 세척제를 이용하여 실리콘 솔로 세척 후, 증류수로 헹구어 Oven에 건조하여 사용하였음.
- 분석에 사용한 필터 (STS, 실리콘) 및 여과 장치는 세척을 위해 Methyl Alcohol, 99.9% 용액에 넣어 10분간 Sonication 후, 증류수에 넣어 10분간 Sonication 하여 Oven에 건조 후 사용함. 이 후 오염되지 않도록 알루미늄 포일 등으로 밀봉하여 진행함.
- 전처리 과정에서 사용되는 시약에는 Fenton Solution 0.05 M Fe(II), 과산화수소 (Hydrogen Peroxide, H_2O_2) 용액이 있으며, 시약 내 불순물을 제거하기 위해 사용 전 0.2-0.45 μm 공극의 GF/F 필터에 여과 후 사용.

*** Fenton Solution: 0.05 M Fe(II)**

- 15 g $FeSO_4 \cdot 7H_2O$ + 6 ml H_2SO_4 + 1 L D.I

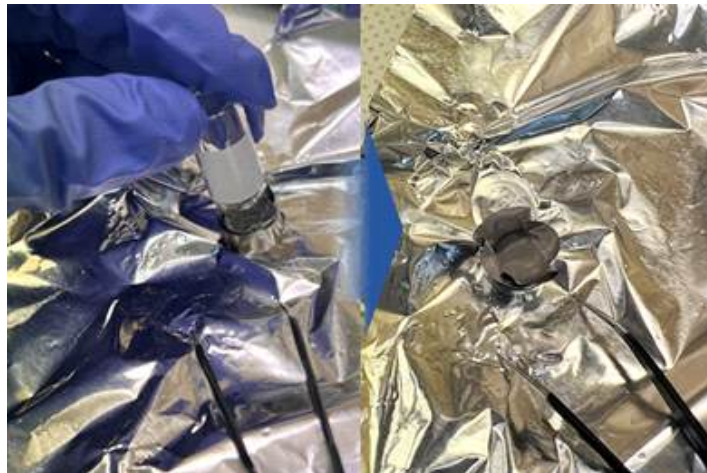
- 실험 중 플라스틱 제품을 사용하지 않도록 유의하였으며, 세척 및 실험에 사용한 증류수는 모두 3차 증류수를 이용하였음.

1) 시료 추출을 위한 Sonication 시간 결정 실험 (1차)

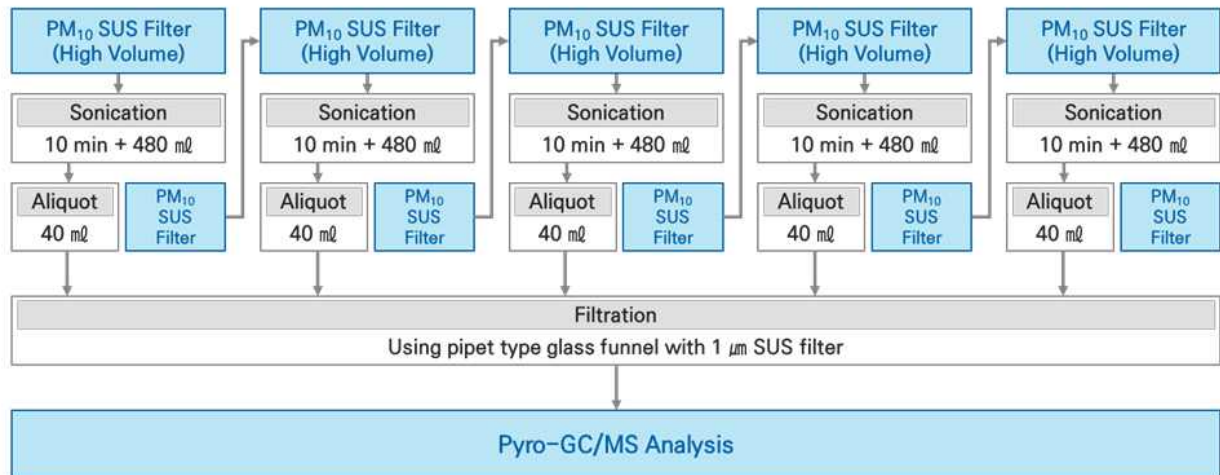
- 본 실험은 Mesh type STS 1 μm 필터 (Size: 254×203 mm)에 부착된 MPs를 추출하기

위한 적정 Sonication 시간을 찾기 위해 수행되었음.

- 전처리 대상 시료는 6월 10일 경기도 과천 주거단지 중심 도시에서 포집한 PM_{10} 사각 STS 필터임. 이는 앞서 제시한 Raman 측정을 위한 ‘1) 시료 추출을 위한 Sonication 시간 결정 실험’ 전처리 실험과 동일한 필터이며, 전처리 과정 일부는 동시에 진행되었음.
- 사각 STS 필터에서 시료가 포집된 면이 증류수에 닿을 수 있도록 비커에 넣고, 480 ml 증류수에 넣어 10분간 Sonication을 진행하였음. Sonication한 용액은 갈색병에 전량 보관하였음. 이후 동일한 필터를 새로운 480 ml 증류수에 넣어 추가로 10분간 Sonication한 용액을 보관하는 과정을 총 5차까지 반복함.
- 1차부터 5차까지 진행한 Sonication 용액 각 480 ml 중 40 ml를 Pipet type glass funnel (Pyro solution)을 이용하여 STS 1 μm 필터 (21 $\varnothing$)에 여과하고, 해당 필터로 열분석을 수행함. 이 때 STS 1 μm 필터 (21 $\varnothing$)는 Metal Support에 넣어 여과함.



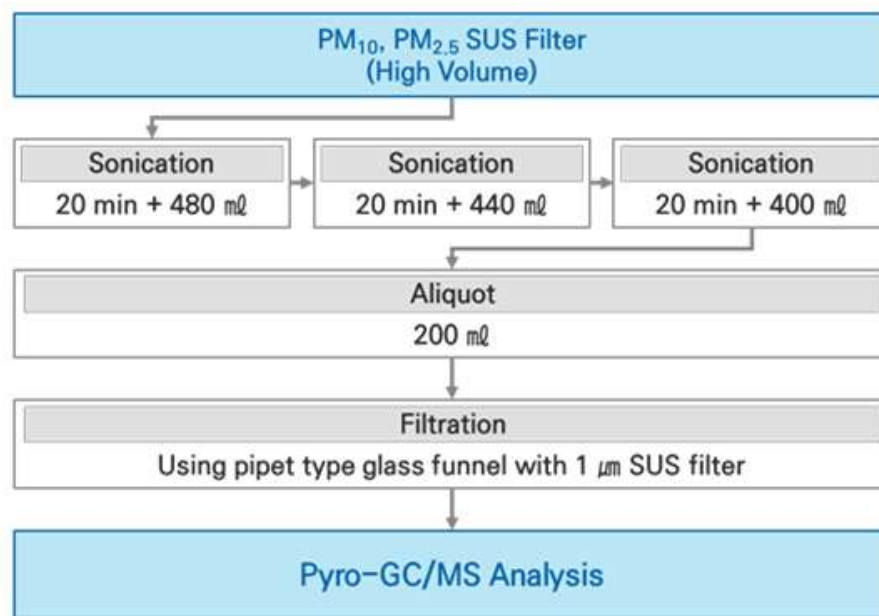
<그림 25> 열분해에 사용한 STS 1 μm 필터 및 지지대



〈그림 26〉 열분해 시료 추출을 위한 Sonication 시간 결정 실험 모식도

2) 대기 중 PM₁₀, PM_{2.5} MPs 측정 실험

- 본 실험은 고용량 공기 포집기를 통해 채취된 시료 PM₁₀, PM_{2.5}에서 측정되는 MPs를 비교 및 분석하기 위해 수행되었음. 산화 과정의 전처리 없이 바로 열분석을 진행하여 적정 시료 용량을 파악하려 했음.
- 전처리 대상 시료는 6월 13일 경기도 과천 주거단지 중심 도시에서 포집한 PM₁₀, PM_{2.5} 사각 STS 필터로 이는 앞서 제시한 Raman 측정을 위한 Sonication 시간별 전처리 효과 검토 실험 전처리 실험에 사용한 동일한 필터이며, 해당 실험에서 필터를 60분간 Sonication한 용액 중 일부를 분취하여 열분석을 위한 전처리를 수행하였음.
- 시료 재부유를 위해 60분간 Sonication을 진행한 400 ml 용액 중 일부인 200 ml를 Pipet type glass funnel을 이용하여 STS 1 μm 필터 (21 Ø)를 금속 지지대에 넣고 여과하였음. 이후 해당 필터로 열분석을 수행함.

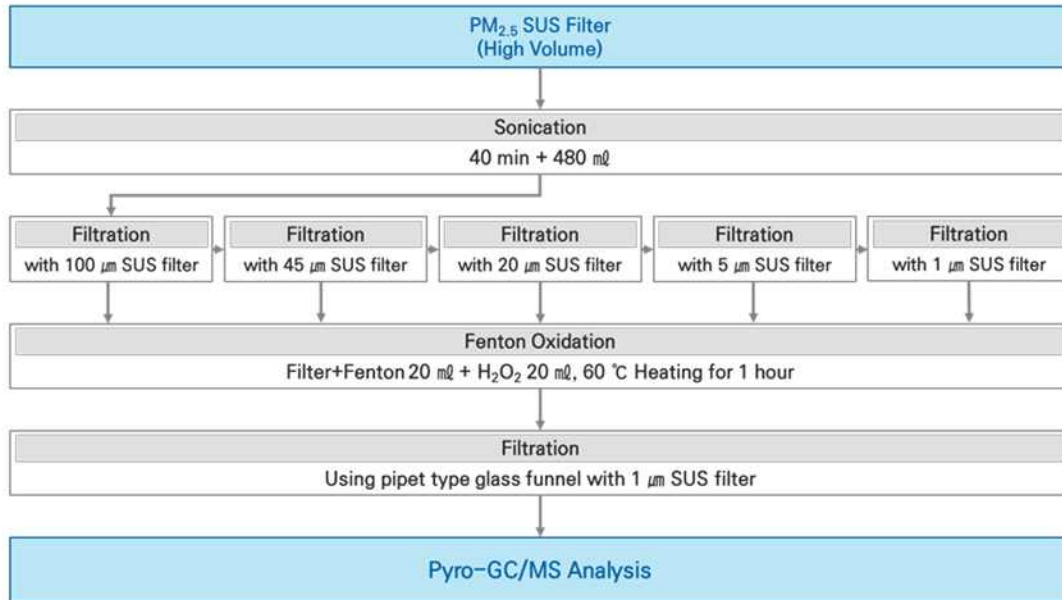


<그림 27> 열분해 대기 중 PM₁₀, PM_{2.5} MPs 측정 실험 모식도

3) 다단 여과 필터 기반 입자 산화 전처리 실험

- 산화 과정 없이 진행한 ‘대기 중 PM₁₀, PM_{2.5} MPs 열분석 실험’에서 사각 STS 필터를 Sonication한 용액이 STS 1 μm 필터 (21 Ø)로 여과하는 과정 중 필터 막힘 현상이 발생하는 것을 확인하였음. 이에 본 실험은 다단 여과 및 Fenton 산화를 통해 유기물 성분을 제거하여 막힘 현상을 방지하였음.
- 전처리 대상 시료는 6월 11일, 12일 경기도 과천 주거단지 중심 도시에서 포집한 PM_{2.5} 사각 STS 필터임.
- Sonication은 앞서 Raman 분석 전처리 ‘1) 시료 추출을 위한 Sonication 시간 결정 실험’에서 확인한 적정 시간인 40분간 진행하였으며 480 ml 증류수에 사각 STS 필터를 담구어 진행하였음.
- Sonication을 진행한 용액 전량(480 ml)을 47 Ø STS 필터를 이용하여 다단 여과를 수행함. 이 때 사용한 필터의 사이즈는 100 μm → 45 μm → 20 μm → 5 μm → 1 μm 순으로 여과를 실시함. 필터는 실험 전처리 과정을 통해 미리 세척한 필터를 사용함.
- 여과한 필터 47 Ø STS 필터 각각을 Conical beaker (500 ml)에 넣고, 필터 자체를 Fenton 산화함. 이 때 산화를 위해 Fenton Solution(0.05 M Fe (II)) 20 ml + H₂O₂ 20 ml를 주입하고, 60℃에서 1시간 동안 가열함.
- Fenton 산화를 마친 용액 전량(40 ml)을 Pipet type glass funnel을 이용하여 여과하는데,

이 때 STS 1 μm 필터(21 $\varnothing$)를 Metal Support에 넣어 여과하였음. 이 후 해당 필터로 열분석을 수행함.

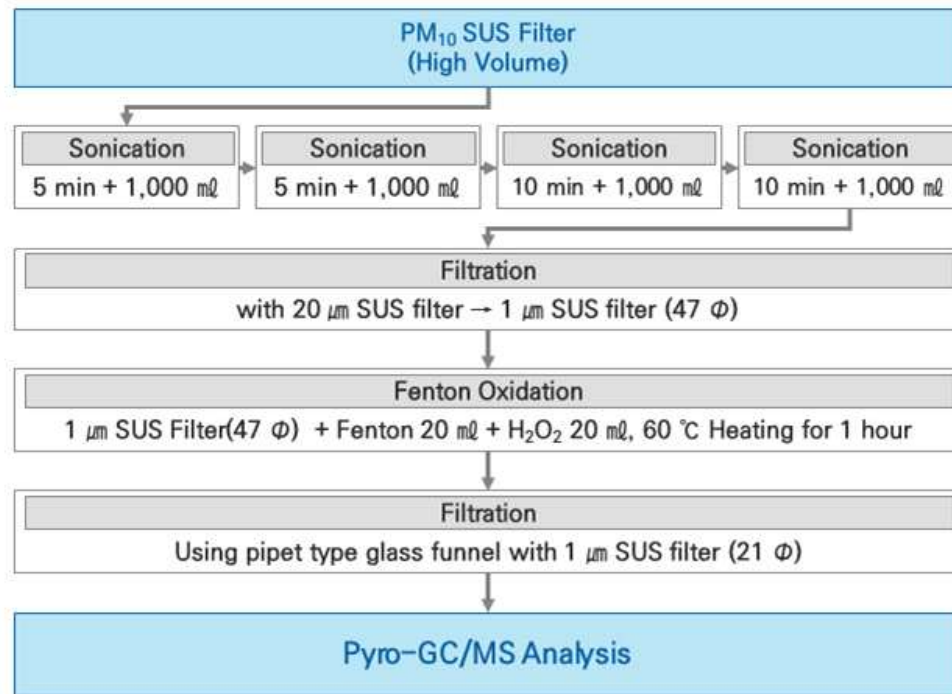


<그림 28> 열분해 다단 여과 필터 기반 입자 산화 전처리 실험 모식도

4) 시료 추출을 위한 Sonication 시간 결정 (2차) 및 산화 후 농도 파악 실험

- 본 실험은 기존 ‘1) 시료 추출을 위한 Sonication 시간 결정 (1차)’ 와 동일하게 Mesh type STS 1 μm 필터 (Size: 254×203 mm)에 부착된 MPs를 추출하기 위한 적정 Sonication 시간을 찾고 산화 이후 MPs 농도를 파악하기 위해 수행되었음.
- 전처리 대상 시료는 ‘6월 18일 경기도 과천 주거단지 중심 도시에서 포집한 PM₁₀ 사각 STS 필터’ 이고, 실험에 사용한 시료 전량을 열분석에 사용하였음.
- 사각 STS 필터에서 시료가 포집된 면이 증류수에 닿을 수 있도록 사각 비커에 넣고, 1,000 ml 증류수에 넣어 1차로 5분간 sonication을 진행하였음. Sonication한 용액은 즉시 47 $\varnothing$ STS 필터를 이용하여 20 μm → 1 μm 순으로 다단 여과를 수행함.
- 이 후 1차로 Sonication을 진행한 동일한 필터를 새로운 증류수 1,000 ml에 넣어 추가 Sonication을 진행하고 즉시 47 $\varnothing$ STS 필터에 20 μm → 1 μm 다단 여과를 진행하였으며, 각 샘플당 총 Sonication 시간은 (5분-10분-20분-30분)으로 총 4차까지 진행하였음.
- 여과한 필터 중 1 μm STS 필터(47 $\varnothing$)는 각각 Conical beaker (500 ml)에 넣고, 필터 자체를 Fenton 산화함. 이 때 산화를 위해 Fenton Solution(0.05 M Fe (II)) 20 ml + H₂O₂ 20 ml를 주입하고, 60°C에서 1시간 동안 가열함.

- Fenton 산화를 마친 용액 전량(40 ml)을 Pipet type glass funnel을 이용하여 여과하는데, 이때 STS 1 μm 필터(21 ϕ)를 Metal Support에 넣어 여과하였음. 이후 해당 필터로 열분석을 수행함.



<그림 29> 시료 추출을 위한 Sonication 시간 결정(2차) 및 산화 후 농도 파악 실험 모식도

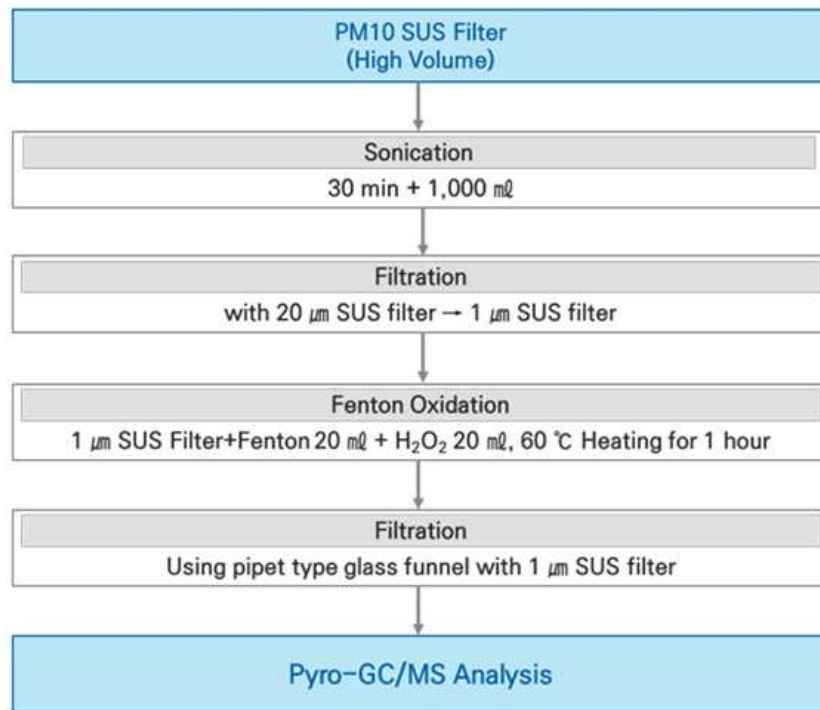
○ 대기 중 MPs 현장 시료 분석 열분해법 (고용량 공기 포집 시료)

1) MPs 입자 크기 별 (2.5 μm , 10 μm) 현장 적용성 평가 (1차)

- 앞서 진행한 실험에서 파악한 전처리 방법을 적용하여 최종적으로 실제 포집된 시료의 전처리를 진행하였음. 이 때 시료 재부유를 위한 Sonication은 30분, 필터 막힘을 방지하기 위한 다단 여과 (20 μm → 1 μm) 그리고 유기물 성분 제거를 위한 Fenton 산화를 진행하였음.
- 전처리 대상 시료는 5월 안산산업단지 중심에서 포집한 PM_{2.5} 및 PM₁₀ 시료 각 6개로 총 12개임. 자세한 일자 및 항목은 하단 표에 제시하였다.

<표 14> 대기 중 PM_{2.5} / PM₁₀ 농도 별 상관관계 분석을 위한 실험 시험 목록

채취 위치	날짜	입자 사이즈	입자 별 시험 횟수
경기도 안산 산업단지	5월 24일(토)	PM _{2.5} / PM ₁₀	1
	5월 25일(일)	PM _{2.5} / PM ₁₀	1
	5월 26일(월)	PM _{2.5} / PM ₁₀	1
	5월 27일(화)	PM _{2.5} / PM ₁₀	1
	5월 28일(수)	PM _{2.5} / PM ₁₀	1
	5월 29일(목)	PM _{2.5} / PM ₁₀	1



<그림 30> 대기 중 PM_{2.5} / PM₁₀ 농도 별 상관관계 분석을 위한 실험 모식도

2) MPs 입자 크기별 (10 μm) 현장 적용성 평가 (2차)

- 동일한 장소에서 시료 포집을 동시에 진행하였고, 같은 전처리 방법으로 실험을 2회 진행하였음.
- 앞서 파악한 전처리 방법인 시료 재부유를 위한 Sonication은 30분, 필터 막힘을 방지하기 위한 다단 여과 (20 μm → 1 μm) 그리고 유기물 성분 제거를 위한 Fenton 산화를 진행하였음.
- 전처리 대상 시료는 9월 중 경기도 과천 주거단지 중심에서 포집한 PM₁₀ 시료 6(×2)개로 총 12개임. 자세한 일자 및 항목은 하단 표에 제시하였음.
- 본 실험에서는 실험의 영향을 파악하기 위해, 증류수 1,000 ml를 사용한 방법 바탕시료와, 증류수 내 MPs를 파악하기 위한 바탕시료 두 종의 실험을 진행하였음.

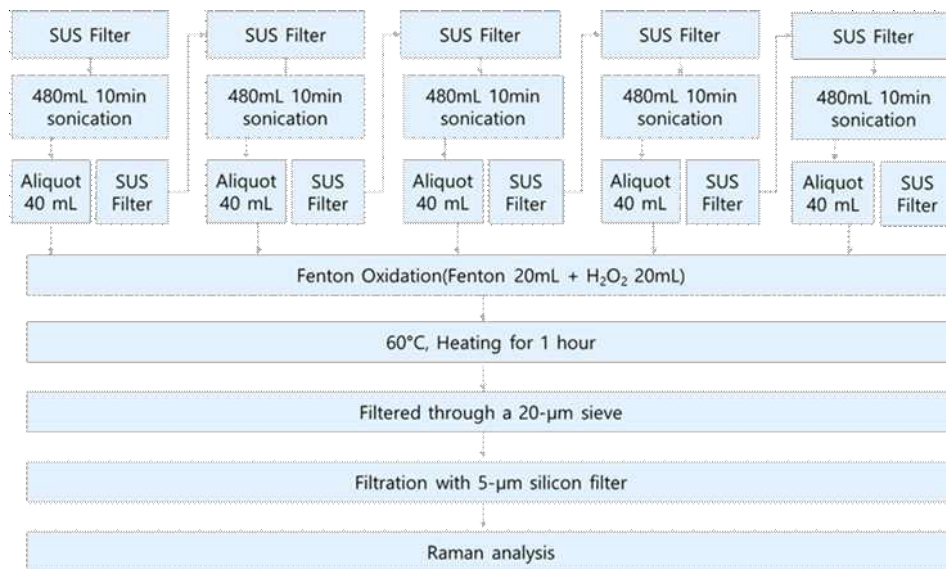
〈표 15〉 전처리 방법 재현성 파악 실험 필터 목록

채취 위치	날짜	입자 사이즈	필터 목록	
경기도 과천 주거단지	9월 24일(수)	입자크기 (10 μm)	HV-11	HV-21
	9월 25일(목)		HV-12	HV-22
	9월 26일(금)		HV-13	HV-23
	9월 28일(일)		HV-14	HV-24
	9월 29일(월)		HV-15	HV-25
	9월 30일(화)		HV-16	HV-26

○ 대기 중 MPs 분석을 위한 전처리 실험 (저용량 공기 포집 시료)

1) 시료 추출을 위한 Sonication 시간 결정 실험

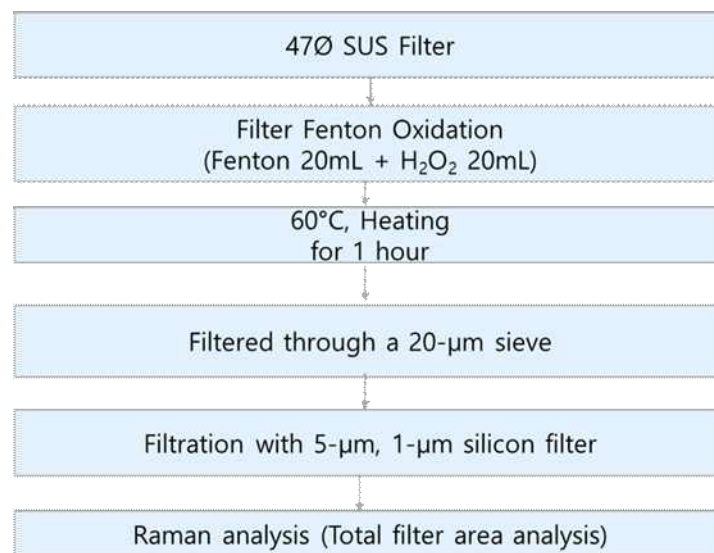
- 6월 10일 경기도 과천 주거단지 중심 도시에서 저용량 공기 포집기를 이용하여 입자크기 (2.5 μm , 10 μm)별로 포집함.
- 고용량 공기 포집기로 포집한 시료와 동일하기 저용량 공기 포집기로 포집한 시료 또한 47 ϕ 원형 STS 필터의 sonication 시간을 최적화하기 위한 실험을 수행함.
- 필터를 480 mL 증류수에 넣고 10분간 sonication을 진행한 뒤, 동일 필터를 새로운 동일 용량 증류수에 넣어 다시 10분간 sonication하는 과정을 총 5차까지 반복함.
- 1차~5차까지 진행한 용량에서 각 40 mL씩 분취하여 펜톤 산화를 진행함. 펜톤 산화 진행 시 펜톤 용액 20 mL, 과산화수소 20 mL을 사용함.
- 산화한 용액을 20 μm STS 필터에 걸러 그 용액을 다시 5 μm 실리콘 필터에 여과해 Raman 분석 시료로 사용함.



〈그림 31〉 시료 추출을 위한 Sonication 시간 결정 실험 모식도

2) 필터 기반 입자 산화 전처리 평가 실험

- 6월 16일 동일 시료를 대상으로 용액 산화 대신 입자 자체를 산화하는 방법 검토함.
- 사각 STS 필터를 증류수 480 mL에서 60분간 sonication 진행함.
- 20 µm 체로 거른 후 1 µm STS 필터에 여과하고, 1 µm STS 필터 자체를 산화시킴.
- 5 µm 및 1 µm 필터에 다단 여과하여 Raman 분석 실시.
- 동일 과정을 5회 반복해 재현성을 평가함.



〈그림 32〉 필터 기반 입자 산화 전처리 평가 실험 모식도

4-2. 환경 대기 중 MPs 분석 방법 표준화

4-2-1. 환경 대기 및 타 매질에서 MPs 분석에 활용되는 분석 장비 현황 및 특성 제시

○ Raman을 이용한 MPs 분석 현황

- 대기 중 미세플라스틱 분석에서는 필터 기반 시료 채취 후 μ -Raman을 이용하여 입자를 직접 탐색·분석하는 방법이 널리 활용되고 있음 (Dris et al., 2016; Liu et al., 2019).
- Raman은 FTIR 대비 수 μm 수준의 더 작은 입자까지 분석 가능하여 대기 PM 시료 분석에 적합한 기술로 보고됨 (Araujo et al., 2018; K  ppler et al., 2016). 대기 PM(실외·실내) 시료에서 μ -Raman spectroscopy를 이용한 미세플라스틱 분석 연구가 증가하고 있으며, $\text{PM}_{2.5}/\text{PM}_{10}$ 임팩터 기반 필터 채취 후 직접 분석하는 방식이 일반적으로 적용되고 있음 (Zhang et al., 2022; Xu et al., 2023).
- Raman mapping과 자동화 입자 인식 알고리즘을 결합하여 수 μm 크기의 입자를 고속 스크리닝하는 방법이 확산되고 있고 (Primpke et al., 2022; Brandt et al., 2023), 최소 분석 가능 입경(LODsize)을 1-5 μm 범위까지 보고함 (Zhang et al., 2022).
- 미세입자(1-10 μm 범위) 분석에 유리하여 대기 중 초미세 플라스틱 연구에 활용도가 높음 (K  ppler et al., 2016). 대기 시료 특성상 입자 질량이 낮고 크기가 작기 때문에 Raman의 고공간 해상도($\leq 1 \mu\text{m}$ 수준)가 분석 정확도 향상에 기여함 (Xu et al., 2023).

○ Raman을 이용한 MPs 분석 특성

- 초미세 입자 분석 가능

μ -Raman은 약 1-5 μm 범위 입자까지 분석 가능하여 대기 중 $\text{PM}_{2.5}$ 영역의 미세플라스틱 동정에 유리함. FTIR 대비 공간해상도가 높아 초미세 입자 분석에 적합함.

- 비파괴 분석

시료 손상이 거의 없으며 후속 분석(SEM, 이미지 분석 등)과 병행이 가능하고, 필터 상에서 직접 분석 가능하여 시료 이동 손실 최소화.

- 다매질 적용성

고체(필터, 퇴적물), 액체(수계 여과 시료), 기체(에어로졸 포집 시료) 분석 가능하고 환경

대기, 수계, 토양 등 다양한 매질에 적용 가능.

○ Py-GC/MS의 원리와 작동 방식

- 열분해-가스 크로마토그래피/질량 분석법(Py-GC/MS)은 복잡한 고분자 물질의 화학적 구조와 조성을 분석하기 위한 강력한 분석 도구임. 이 기술은 세 가지 핵심 요소—열분해 장치(pyrolyzer), 가스 크로마토그래프(GC), 그리고 질량 분석기(MS)—가 통합된 시스템으로 구성되어 있으며, 각 요소는 MPs 분석 과정에서 특정 역할을 수행함.
- 열분해는 시료를 산소가 없는 불활성 기체(보통 헬륨이나 질소) 환경에서 급격히 가열하여 고분자 구조를 더 작은 분자로 분해하는 과정임. 일반적으로 600° C에서 1000° C 사이의 고온에서 이루어지는 이 과정에서 고분자 사슬은 열에너지에 의해 결합이 끊어지고, 각 고분자 유형에 특징적인 저분자량 화합물로 분해됨. 예를 들어, 폴리에틸렌(PE)은 주로 알켄과 알킬 사슬로, 폴리스티렌(PS)은 스티렌 단량체와 그 유도체로, 폴리염화비닐(PVC)은 염화수소와 방향족 화합물로 분해됨.
- 미세먼지 필터에서 얻은 소량의 시료(대개 수백 마이크로그램에서 수 밀리그램)는 열분해 장치에 투입되어 프로그래밍 된 온도 프로필에 따라 급속히 가열됨. 이 때 발생하는 기체상 열분해 산물은 즉시 가스 크로마토그래프로 이송됨.
- 가스크로마토그래피(Gas Chromatography)는 열분해로 생성된 혼합 기체를 각각의 구성 성분으로 분리하는 역할을 함. 이 분리 과정은 이동상(캐리어 가스)과 고정상(컬럼 내부 코팅) 사이의 화합물 분배 차이를 이용함. 열분해 산물은 컬럼을 통과하면서 분자량, 극성, 구조적 특성에 따라 서로 다른 속도로 이동하게 되고, 결과적으로 체류 시간에 따라 분리됨.
- MPs 분석에 최적화된 GC 설정은 일반적으로 온도 프로그래밍(예: 40° C에서 시작하여 320° C까지 점진적 승온)을 통해 다양한 범위의 열분해 산물을 효과적으로 분리할 수 있도록 구성됨. 분리된 화합물은 컬럼을 통과한 후 질량 분석기로 직접 이송됨.
- 질량 분석기는 GC로부터 분리된 각 화합물을 이온화하고, 생성된 이온을 질량 대 전하비(m/z)에 따라 분리하여 각 화합물의 분자 구조와 양에 대한 정보를 제공함. 일반적으로 전자 이온화(EI) 방식이 사용되며, 이온화된 분자는 특정 패턴의 조각화를 거쳐 해당 화합물에 특징적인 질량 스펙트럼을 생성함.

- 수집된 데이터는 파이로그램(pyrogram)이라 불리는 그래프 형태로 표현되며, 여기에는 시간에 따라 검출된 모든 화합물의 피크가 나타남. 각 피크의 질량 스펙트럼은 표준 라이브러리와 비교하거나 전문가에 의해 해석되어 원래 고분자의 종류를 식별하는 데 사용됨.
- 데이터 해석 및 정량 분석
 - 고분자 식별은 특징적인 열분해 산물의 패턴을 인식하거나 특정 마커 화합물을 검출함으로써 이루어짐.
 - 정량 분석은 각 고분자 유형에 특정한 마커 화합물의 피크 면적을 이용하여 수행됨. 이를 위해 각 타겟 고분자의 표준 시료를 다양한 농도로 분석하여 검량선을 작성하고, 실제 시료의 피크 면적과 비교하여 질량을 산출함. 이 과정에서 내부 표준물질을 첨가하여 분석의 정확도와 정밀도를 향상시킬 수 있음

4-2-2. 입자 크기(2.5 μ m, 10 μ m)별 MPs 분석에 활용되는 분석 장비(Raman, FT-IR, Py-GC/MS) 검토 및 최적 분석장비 선정

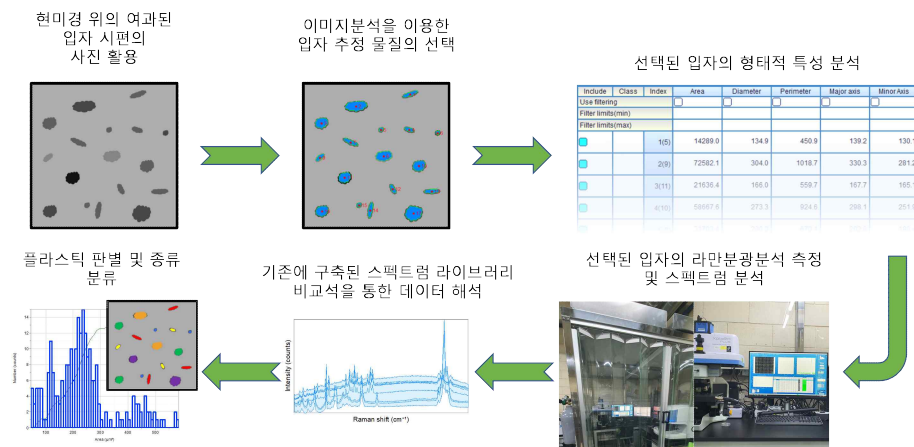
○ (분광분석) 대기 중 MPs 분석을 위한 시료 채취 및 전처리 방법 확립

- 표준 분석 방법은 실외 대기 중에 존재하는 1 μ m 이상의 고밀도 폴리에틸렌(high density polyethylene; HDPE), 저밀도 폴리에틸렌(low density polyethylene; LDPE), 폴리프로필렌(polypropylene; PP), 폴리스티렌(polystyrene; PS), 폴리에틸렌 테레프탈레이트(polyethylene terephthalate; PET), 폴리염화비닐(polyvinyl chloride; PVC) MPs에 적용될 수 있음.
- MPs의 분광분석법은 μ FT-IR과 μ -Raman을 사용하였으며, MPs의 크기에 따라 45 μ m 이상의 시료는 FT-IR을 이용하여 분석하였고, IR 사용시 20 μ m 근접 구간의 MPs를 과소 측정하는 것으로 판단 된 바가 있기 때문에(극미세먼지 PM_{1.0} 관측 기반 구축 연구) 45 μ m 미만의 시료는 Raman을 이용하여 분석하였음.
- 대기 내 존재하는 MPs를 측정함에 있어 측정의 정확성 및 통일성을 유지하기 위해 필요한 제반사항에 대하여 규정하고 분광분석과 열분석에 대한 다음과 같은 사항을 고려하여 분석법 절차서 마련 및 실험을 수행하고자 함.

- 본 연구에서는 PM₁₀, PM_{2.5} 대응을 위해 Raman 분광분석법을 입자의 수농도를 분석하는 장비로 활용하고자 하였음.

• 분석 절차

- 시료는 라만 측정을 할 수 있을 정도로 전처리가 된 후, 실리콘 필터에 측정할 이물질을 여과함.
- 라만 현미경이 시료의 전체 면적을 현미경의 카메라의 FOV의 크기에 맞게 분할함.
- 분할된 각 영역으로 라만 현미경의 XY stage가 움직이고, Z stage가 최적의 초점을 맞춘 후, 해당 분할 영역에 대한 광학 이미지를 얻을 수 있음.
- 추출된 라만 측정 대상 좌표 (X, Y, Z)로 XY, Z stage를 이동하여 라만 분광을 측정하고, 이를 판별하여 이물질의 종류를 분석함.
- 해당 영역의 추출된 대상 좌표를 모두 측정하면, 다음 분할 영역으로 이동한 뒤 측정을 반복하여 마지막 분할 영역을 측정할 때까지 지속함.
- 시료에서 검출된 MP의 위치, 종류, 물리적 특징을 광학 이미지에 오버레이로 표시하고 표로 출력함.



<그림 33> Raman을 이용한 MPs 측정

<표 16> Raman 분석 조건

스펙트럼 파장 범위, cm^{-1}	800 - 4,000
Mosaic image size, μm	6,800 X 6,100
Acq. Time, sec	3
Accumulation, sec	1
Software	분석 소프트웨어는 이미지 추적 기능이 있고, 스펙트럼 대조가 가능하여 개별 스펙트럼의 유사도를 대조할 수 있음.

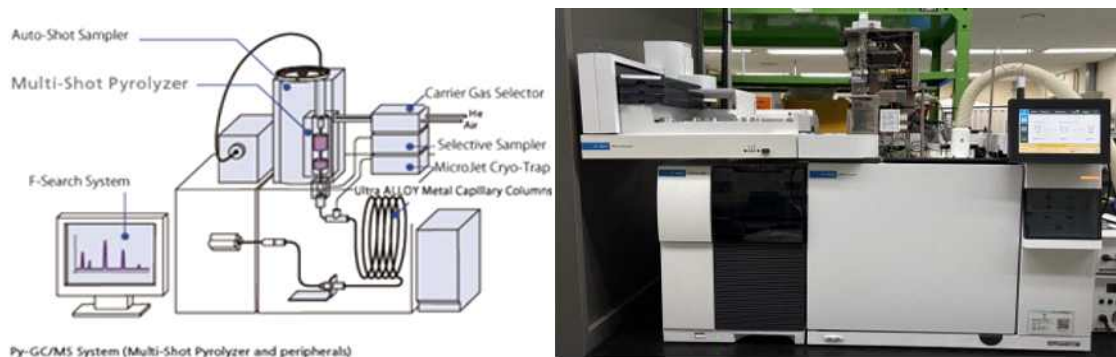
<표 17> Raman 장비 사양 및 분석 조건

	제조사	HORIBA Scientific
	모델명	XploRA TM Plus
	측정 조건	1. 스펙트럼 범위 : $4000\text{ cm}^{-1} \sim 800\text{ cm}^{-1}$ 2. 레이저 파장 : 532nm 3. Spatial resolution(X/Y) : $0.5\text{ }\mu\text{m} \times 0.5\text{ }\mu\text{m}$ 4. 회절격자 : 1200-1800 gr/mm 5. Acquisition Time(s) : 3 s 5. 스펙트럼 해상도 : 1 cm^{-1} 이하

○ 열분석(Py-GC/MS) 기반 MPs 분석법

- 현대 사회에서 플라스틱 사용량의 급증과 함께 심각한 환경 문제로 대두된 MPs 오염은 이제 해양과 토양을 넘어 대기 중에서도 확인되고 있음. 최근 연구에 따르면, 인간은 호흡과 음식물 섭취를 통해 연간 수만 개에 달하는 MPs 입자에 노출될 수 있는 것으로 추정됨. 특히 대기 중 부유하는 PM_{10} 및 $\text{PM}_{2.5}$ 와 같은 미세먼지에 포함된 MPs는 호흡기를 통해 인체에 직접 유입될 가능성이 높고, 장기간 노출 시 만성 염증이나 호흡기 질환 등 다양한 건강 영향을 초래할 수 있음.
- 이러한 잠재적 위험성에도 불구하고, 대기 중 MPs의 정확한 존재량과 종류를 파악하는 데에는 여러 기술적 한계가 존재함. 현재 널리 사용되는 MPs 분석 방법들(광학 현미경 관찰, 푸리에 변환 적외선 분광법(FT-IR), 라만 분광법 등)은 다음과 같은 명확한 제한점을 가지고 있음.
 - 수 마이크로미터(μm) 이하의 극미세 입자 식별 및 정량화의 어려움
 - 시료 전처리 및 분석에 소요되는 과도한 시간

- 시료 중 존재하는 다른 종류의 섬유나 입자와의 혼동 가능성
 - MPs의 질량 기반 정량적 평가의 한계
- 이러한 기존 분석법의 한계를 극복하고 대기 중 MPs에 대한 보다 정확하고 포괄적인 이해를 위해, 열분해-가스 크로마토그래피/질량 분석법(Py-GC/MS)의 적용이 주목받고 있음. 이 고급 열분석 기법은 MPs의 정확한 고분자 종류 식별뿐 아니라 질량 기반 정량 정보를 제공할 수 있으며, 나노미터 수준의 육안으로 식별 불가능한 입자까지도 검출할 수 있는 역량을 갖추고 있음.
- 본 연구에서는 질량분석을 위한 장비로 열분해를 적용한 Py-GC/MS 분석법을 활용하고자 하였으며, 일반적인 분석 방법은 다음과 같음.



<그림 34> 열분해-가스 크로마토그래피/질량 분석법(Py-GC/MS)

○ 시료채취

- 수체에 존재하는 MPs 시료를 채취하기 위한 방법은 바다나 강에서 사용되던 방법인 만타트룰 넷, 플랑크톤 넷, 핸드 넷 등으로 물을 직접 여과하는 방법이 주로 사용됨. 또한, 시료가 채취되는 양을 정확하게 판단하기 위해 정량펌프 등을 사용하는 여과 방법이 있으며, 소량의 물을 직접 정량 시료병에 담아 실험실로 운반하여 여과하기도 함.
- 퇴적물 시료의 경우, 퇴적물 표면을 채취할 수 있는 Grab 샘플러, 깊이별 퇴적물을 얻을 수 있는 코어 샘플러 등 실험 목적에 맞는 채취기를 이용함.

○ 전처리

- MPs 시료의 분석을 위해서는 분석에 방해되는 유·무기물질을 처리하기 위해 밀도 분리, 유기물 분해 등의 전처리를 실시함.

- 밀도 분리는 혼합되어 있는 시료 중 MPs와 다른 물질과 구분하기 위해 NaI, ZnCl₂, NaCl 등 시약을 물에 녹여 밀도를 높인 후, MPs를 상부로 부상시켜 하층부로 가라앉는 물질을 제거하기 위한 과정임
- 유기물 분해는 현미경 확인 혹은 분광분석을 정확하게 하기 위해서, MPs에 부착된 유기물을 분해하기 위해서 수행하며, 분해 시약으로는 과산화수소, 펜톤, 염산, KOH 등이 주로 사용되고 있음
- 전처리가 완료된 시료는 전량 회수하여 다양한 공극 크기와 재질의 여과지로 여과하여 육안 또는 기기분석 방법을 사용해 분석함. 본 연구에서는 기기분석법은 현미경이 결합된 라만분광기 및 열분해 분석법을 적용함.

○ 열분석을 위한 입자 크기별 주요 검토 사항

- 입자 크기별 시료 채취 관련 사항

- 필터 선택 : 입자 크기별로 적합한 필터 재질 설정

PM₁₀: 47 mm 직경 석영섬유 필터(QFF) / 금속 재질의 STS 필터

PM_{2.5}: 47 mm 직경 석영섬유 필터(QFF) / 금속 재질의 STS 필터

QFF가 열 안정성과 낮은 배경 신호로 적합할 것으로 판단되며, 테플론(PTFE) 필터는 PTFE 고분자와의 간섭 가능성으로 사용 제외한다. 이에 필터 공백 테스트로 오염 확인함.

- 필터 절단 크기 및 시료량 : 입자 크기별 시료량과 분석 감도를 고려한 절단 크기 최적화.

PM₁₀: 5 mm² (0.5-1 mg)으로 예상되며, 복잡한 매트릭스와 높은 입자 부하 반응을 고려함.

PM_{2.5}: 3 mm² (0.3-0.5 mg)으로 예상되며, 중간 크기 입자와 농도 균형을 보이며, 시료량 부족 시 감도 저하, 과다 시 매트릭스 간섭 증가 우려를 고려함.

- 전처리 : 입자 크기별 매트릭스 특성에 맞춘 전처리 선택 필요

선택 1) 과산화수소(H₂O₂, 30%) 2시간 + 초음파 세척(30분) - 유기물 및 무기물 제거

선택 2) 펜톤 시약(Fe²⁺ + H₂O₂) 1시간 + 증류수 세척 - 생물 기원 유기물 분해

다만, 과도한 전처리는 시료 손실로 이어질 수 있음.

- Py-GC/MS 분석 조건 최적화

- 열분해 온도 : 입자 크기와 고분자 특성에 따른 온도 조정함.

PM₁₀: 700 °C - 복잡한 매트릭스에서 고분자 분해 완성도를 높임.

PM_{2.5}: 650 °C - 합성섬유(예: PET, 나일론) 등 중간 크기 입자에 최적되어 있음.

온도 상승 시 비특이적 방향족 피크(m/z 91, 77)가 증가하며, 특이성을 일정하게 유지하는 조건을 찾습니다. 다만, 고온(750 °C) 사용 시 열분해 과다로 신호 혼잡 가능성이 있음.

• 가스크로마토그래피 분석 조건 설정 : 입자 크기별 열분해 산물 분리 효율성 확보함.

컬럼종류: DB-5ms (30 m, 0.25 mm 내경, 0.25 μ m 필름).

온도 프로그래밍

PM₁₀: 40 °C(2분) → 320 °C(10 °C/min) - 다양한 화합물 분리.

PM_{2.5}: 40 °C(2분) → 300 °C(10 °C/min) - 중간 범위 산물 집중.

과도한 온도 상승 시 컬럼 오염 위험 등을 고려함.

- 데이터 해석 및 스펙트럼 분류

• 표준물질 마커 : 입자 크기별 스펙트럼 패턴 차이 분석함.

PE: PM₁₀(알켄, m/z 55)

PP: PM_{2.5}(프로필렌 트라이머, m/z 126)

PS: PM₁₀(스티렌 다이머, m/z 208), PM_{2.5}(모노머, m/z 104).

열화로 인한 마커 손실 가능성 확인 필요함.

• 정량 분석: 입자 크기별 농도 산출 정확도를 확인함.

입자 크기별로 μ g/m³ 단위로 고농도 정량함.

4-3. 환경 대기 중 최적 측정 범위 선정을 위한 현장 적용성 평가

4-3-1. 측정범위 결정을 위한 입자 크기(2.5 μ m, 10 μ m)별 MPs 시료 채취 및 분석

○ 대기 중 MPs 분석을 위한 전처리 실험 결과 (고용량 공기 포집 시료)

1) MPs 추출을 위한 Sonication 조건 실험 결과

① Sonication 10분씩 5회 진행 <10 μ m 입자 시료>

- 고용량 포집기로 채취한 필터를 480 mL 증류수에 침지한 후, 10분간 sonication을 수행하고(1차), 해당 용액을 회수한 뒤 동일 조건으로 2차 sonication을 반복하는 방식으로 총 5회 연속 처리함.
- 그 결과, 1차 및 2차 시료에서 입자들이 개별적으로 분산되지 않고 뭉친 형태로 관찰되었다.
- 이러한 현상은 초음파 처리 과정에서 입자의 재배치, 재부착 또는 표면 상에서의 물리적 응집이 발생한 것으로 추정되며, 개별 미세플라스틱(MPs)의 형태 보존이 충분히 유지되었다고 보기 어려움.
- 따라서 해당 전처리 조건(480 mL 수침 + 10분 × 5회 반복 sonication)은 대기 중 MPs의 Raman 기반 동정 분석에는 부적합한 것으로 판단됨<그림 36>.
- 1차 및 2차 시료는 입자 분리가 원활하지 않아 재부유 과정을 거쳐 분석을 수행하였으며, 그 결과 <표 19>와 같이 각각 59개/m³, 32개/m³로 나타남. 반면 3차, 4차, 5차 시료는 별도의 재부유 과정 없이 직접 분석이 가능하였으며, 분석 결과는 각각 2개/m³, 4개/m³, 4개/m³로 확인됨. 해당 값은 blank 시료 농도(5개/m³)와 유사한 수준으로, 통계적으로 유의한 MPs 검출로 보기 어려움.

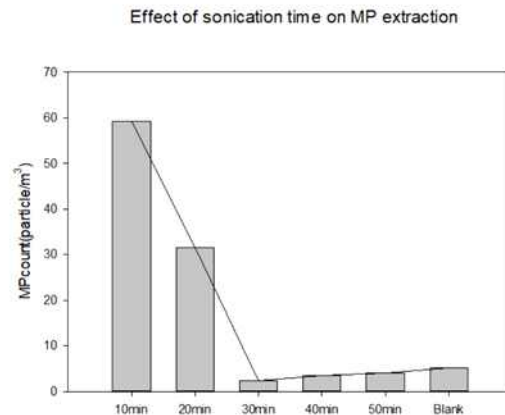
고용량 공기 포집기로 채취한 필터 시료의 경우, 입자가 필터 표면에 과도하게 부착될 가능성이 높아 적절한 sonication(약 10-20분)을 통한 재부유 과정이 MPs 회수 및 정량 정확도 향상에 필요한 것으로 사료됨.

				
1차	2차	3차	4차	5차
		-	-	-
1차-재부유	2차-재부유			

〈그림 35〉 MPs Sonication 조건 실험 결과

〈표 18〉 시간 별 MP 측정 결과 (1)

Time (m)	Microplastics (개/㎥)
10min	59.17
20min	31.56
30min	2.36
40min	3.55
50min	3.94
Blank	5.13

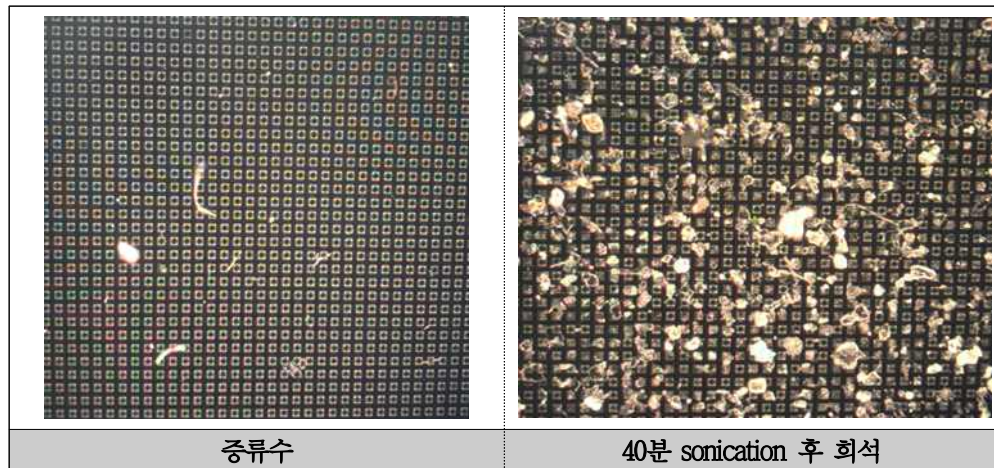


〈그림 36〉 시간 별 MPs 측정 결과

② sonication 40분 진행 <10 μ m 입자 시료>

- 40분간 sonication을 수행한 후 분취·회석한 시료 용액을 관찰한 결과, 약 10,000개 이상의 입자가 확인되었음.
- 이는 고용량 공기 포집 시 필터에 포집된 고형물 내에 다량의 비플라스틱성 입자(유기물, 먼지 등)가 포함되어 있으며, 기존 전처리 조건으로는 이들 간섭 물질이 충분히 제거되지 않는 것을 의미함.

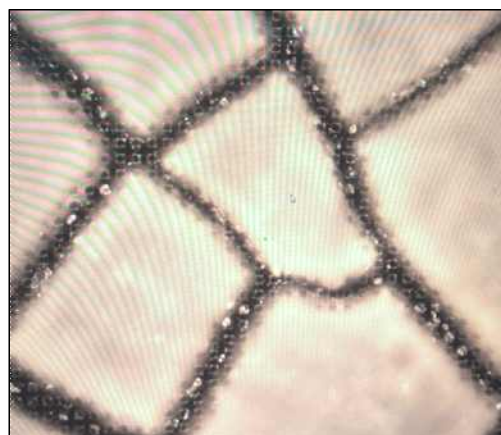
- 특히 이러한 고농도 비플라스틱 입자는 광학적 구분을 어렵게 하고, μ -Raman 분석 시 레이저 초점 설정 및 스펙트럼 해석에 혼선을 초래하여 MPs 동정 정확도를 저하시킬 가능성이 있음.
- 따라서 고용량 포집 시료의 경우, 단순 sonication 외에 재부유 과정과 함께 추가적인 전처리(예: 유기물 산화, 밀도 분리 등)를 병행하는 단계적 전처리 절차가 필요할 것으로 판단됨.



<그림 37> 40분 Sonication 진행 시 Raman 관측 결과

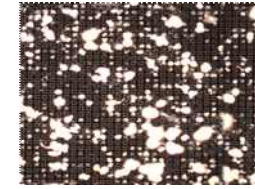
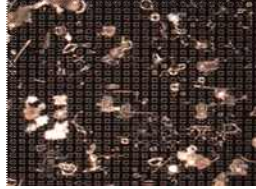
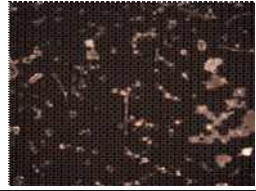
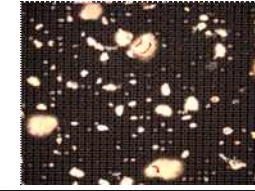
③ Sonication 시간별로 진행(20분, 40분, 60분 후 재부유)

- Sonication을 20분 한 결과, <그림 39>과 같이 다량의 고형물이 필터 표면에 두껍게 축적되어 있는 것이 관찰되었고, 40분, 60분 Sonication을 한 후에도 <그림 40>과 같이 고형물이 여전히 필터 위에 잔존하여 입자 구분이 어려웠음.



<그림 38> 20분 sonication 진행 후 필터링 후 Raman 관찰 사진

- 이에 따라, 필터를 100 mL 증류수에 침지한 후 10분간 sonication하여 포집된 입자를 재부유함. 재부유된 용액은 10 mL씩 분취하여 시료 균질성을 확보한 뒤, 세 가지 산화 조건을 적용하여 전처리를 수행
- 첫 번째 조건(무산화): 분취한 10 mL 용액을 산화제 투입 없이 5 μ m 실리콘 필터에 여과하였을 때는 모두 라만 측정이 가능할 정도의 입자가 포집되었음. 이는 산화제 추가 투입 없이 재부유 조건만으로 일정 수준의 분석이 가능함을 의미함.
- 두 번째 조건(산화용량 2배: Fenton 10 mL + H₂O₂ 10 mL 추가): 분취한 10 mL 용액을 Fenton 10 mL와 과산화수소 10 mL를 추가 투입하여 (산화용량 2배) 분석한 결과, sonication 20분일 때 많은 고형물이 축적되어 라만 분석이 불가능하였지만, 40분, 60분 sonication 조건에서 각각 398개/m³, 184개/m³ 가 검출됨.
- 세 번째 조건 (산화용량 4배: Fenton 20 mL + H₂O₂ 20 mL 추가): 분취한 10 mL 용액을 Fenton 20 mL와 과산화수소 20 mL를 추가 투입하여 (산화용량 4배) 분석한 결과 40분과 60분 조건일 때 각각 153개/m³, 92개/m³으로 분석되었음.
- 산화제 농도를 증가시켜 투입한 조건에서 MPs 입자 수가 감소하는 경향이 확인되었으며, 이는 과량의 산화제가 유기성 방해물질뿐만 아니라 고분자 사슬(polymer chain)에도 부분적 산화 또는 구조 변화를 유발하여 입자 수 감소 또는 형태 변화가 발생했을 가능성을 시사함
- 따라서 고용량 공기 포집 시료의 전처리 과정에서는 유기물 제거 효과와 MPs 보존성 간의 균형을 고려한 최적 산화 조건 설정이 필요한 것으로 판단됨.

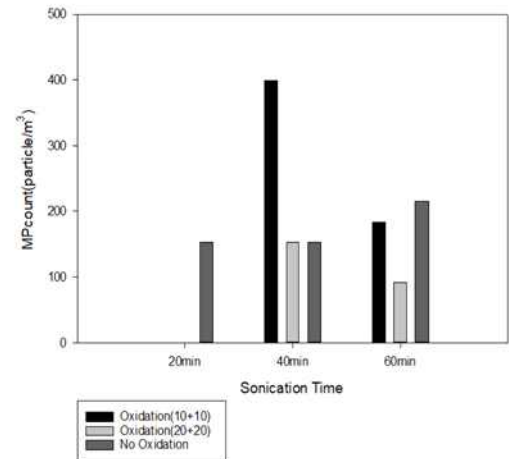
구분	재부유+산화(2배)	재부유+산화(4배)	재부유
20분			
40분			
60분			

〈그림 39〉 Sonication 시간 별 Raman 관측 결과

〈표 19〉 조건 별 MP 측정 결과 (1)

Time (m)	Microplastics (개/m ³)		
	재부유+산화 (2배)	재부유+산화 (4배)	재부유
20	-	-	153.3
40	398.7	153.3	153.3
60	184.0	92.0	214.7

Observed MP counts by sonication time and oxidation condition



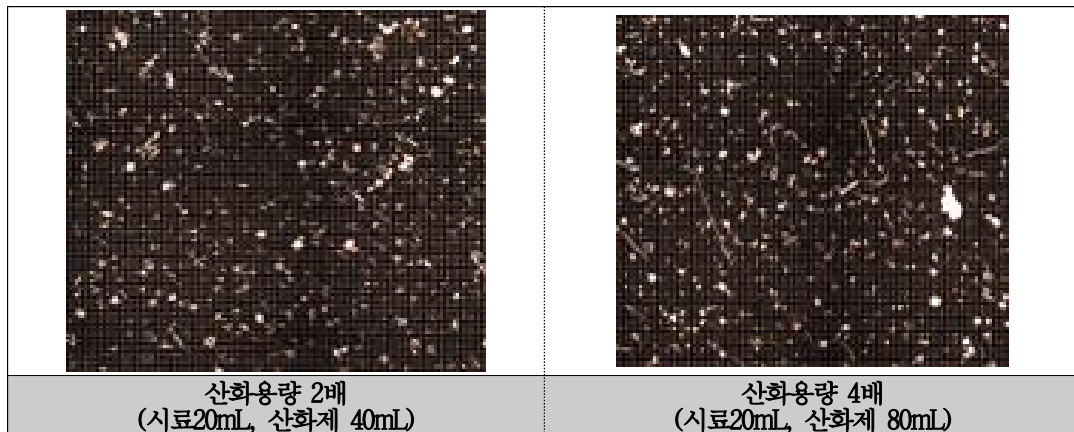
〈그림 40〉 조건 별 MPs 측정 결과

3) 산화용액 투입량 실험 결과 <10 μ m 입자 시료>

- 실험 1) ②와 동일한 시료를 이용하여 40분 sonication 후 4배 희석한 시료를 산화용액 40mL(산화용량 2배), 80mL(산화용량 4배)를 각각 투입하여 MPs를 분석한 결과, 각각 MP 215개/m³, 859개/m³가 검출됨.
- 산화용액의 투입량이 증가할수록 MPs 입자 수가 증가하는 경향을 확인함. 선행연구인 Gonzalez-Pleiter와 Smith의 연구에서도 산화제 사용량이 많을수록 MPs의 전체 구조에는 큰 변화가 없으나, 일부가 파편화(fragmentation)되어 입자 수가 증가하는 것으로

보고된 바 있음. 본 연구 결과 역시 이와 유사한 경향을 나타내어, 산화제 과량 사용 시 입자 수 증가가 발생할 수 있음을 확인하였음.

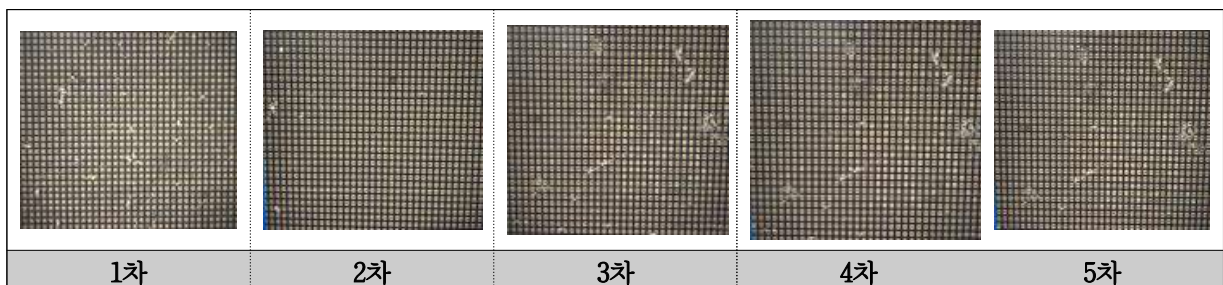
- 이에 따라 MPs를 고용량으로 포집 시 산화제 양은 Fenton 10 mL+ H₂O₂ 10 mL가 적당한 것으로 판단됨.



〈그림 41〉 산화 용량 차이에 따른 Raman 관측 결과

4) 산화용액 적정 투입량 실험결과 <2.5μm 입자 시료>

- 실험 1) ② 시료를 PM_{2.5} 임팩터로 포집한 후 40분 Sonication, 20 μm 체로 거른 후 1 μm STS 필터에 여과함. 필터 자체를 펜톤 산화 용액에 직접 투입하는 과정을 5회 반복함. 그 결과 〈그림 43〉과 같이 입자가 거의 관찰이 되지 않았음.
- 따라서 본 결과는 PM_{2.5} 임팩터 포집 특성에 따른 영향인지, 또는 필터 직접 산화 처리에 따른 영향인지에 대한 추가적인 검증이 필요한 것으로 판단됨.



〈그림 42〉 MPs 필터 직접 산화 실험 결과

○ 대기 중 MPs 분석을 위한 열분해법 전처리 실험 결과 (고용량 공기 포집 시료)

1) 시료 추출을 위한 Sonication 시간 결정 실험 (1차)

- 전처리 완료된 시료 열분석 진행을 위해, Py-GC/MS(Pyrolyzer: EGA/PY-3030D (Frontier Lab), GC/MS: 8890/5977 (Agilent Technology)를 적용하여 열분해를 진행하였음. 분석 조건은 하단 테이블에 제시하였음.

<표 20> Py-GC/MS 분석 조건

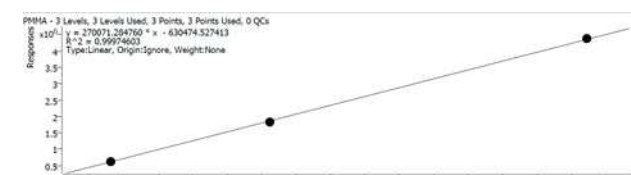
Instrument conditions	
Pyrolyzer	Furnace TD : 100 °C → 20 °C/min → 300 °C (10 min)
	Furnace PY : 600 °C
	Interface temp. 300 °C
GC	Inlet: 320 °C, Split: 20:1
	Carrier gas: Helium, 1 mL/min
	Column: DB-5 (30mD X 0.250mm X 0.25µm)
	GC Oven: 40 °C (2 min) → 20 °C/min → 320 °C (14 min)
	Runtime: 30 min
MS	Scan range: m/z 29 - 550
	Scan speed: 2.8 scans/sec

- 열분석(Py-GC/MS) 수행을 위해 고체 표준물질(STD, Standard)을 이용한 MPs 열분석용 표준시료를 제조하였음.
- 11종 고분자가 혼합된 고체 STD를 사용하였으며, 각 폴리머의 목표 분취량을 산정한 후 초미량 저울을 이용해 정밀 계량하여 표준시료를 조제하였음.
- 고체 STD의 균질성과 취급성을 확보하기 위해 무기 희석제(SiO₂)를 적용한 혼합 고상 표준시료 형태로 제조하였음.

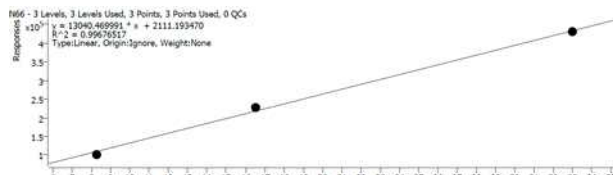
<표 21> MPs 표준물질 총량 (3 points)

(Unit: µg)

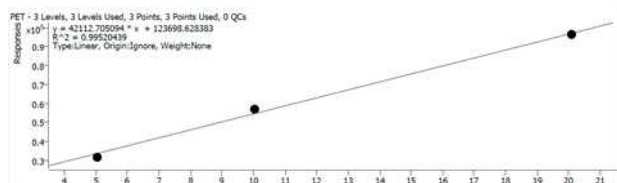
Polymer	PMMA	N-6,6	PP	PET	PVC	N-6	SBR	PE	ABS	PC	PS
RetentionTime	3.953	4.863	5.410	8.698	8.775	9.400	9.828	13.859	14.537	14.579	15.685
STD 1	4.61	8.25	18.79	5.03	16.43	2.06	6.75	70.01	6.19	1.28	4.35
STD 2	9.23	16.50	37.58	10.05	32.85	4.13	13.50	140.03	12.38	2.55	8.70
STD 3	18.45	33.00	75.15	20.10	65.70	8.25	27.00	280.05	24.75	5.10	17.40



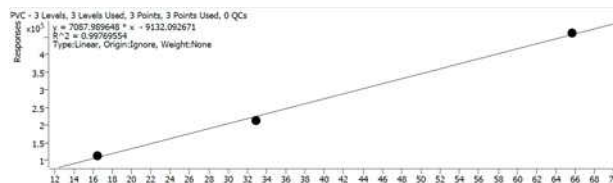
PMMA



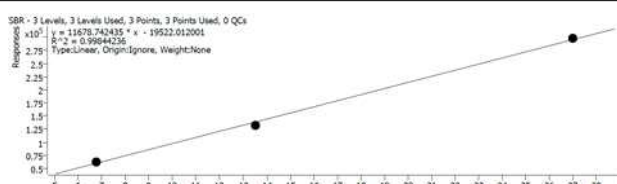
N-6,6



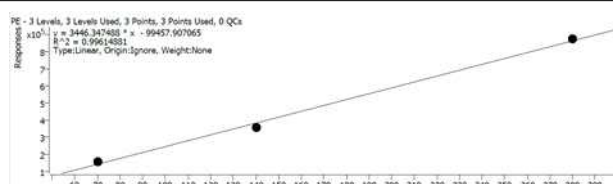
PET



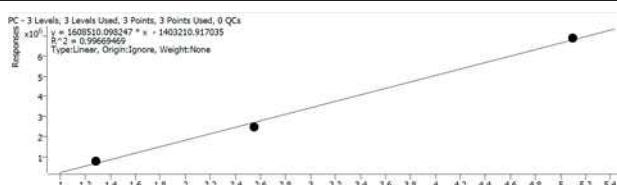
PVC



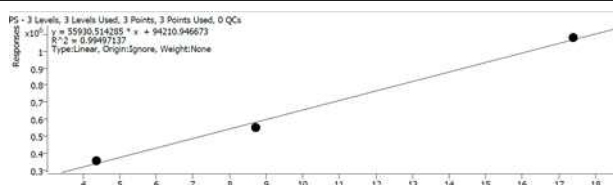
SBR



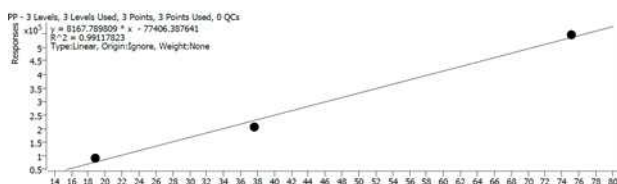
PE



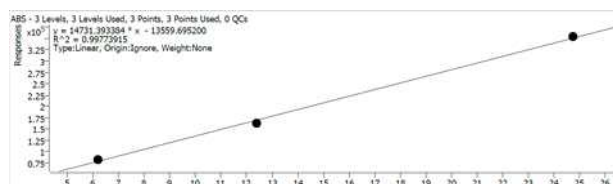
PC



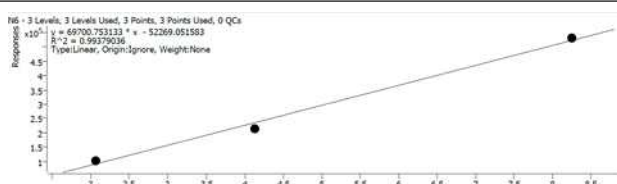
PS



PP



ABS



N6

<그림 43> 각 폴리머 별 Py-GC/MS STD Calibration 곡선

- 더블샷으로 분석한 결과, 열탈착 구간(100→300 ℃)에서는 일부 시료에서 비특이적 유기물 신호 관찰되었음.
- 열분해 구간(600 ℃)에서는 MPs를 대표할 수 있는 특이 패턴이 일관되게 확인되지 않았음.

- 시료량이 충분하지 않아 대부분의 시료에서 MPs 성분이 검출되지 않거나, 일부 성분은 STD 1 수준 이하로 확인되었으며, 이에 따라 시료 투입량을 증가시켜 2차 실험을 추가로 수행하였음.

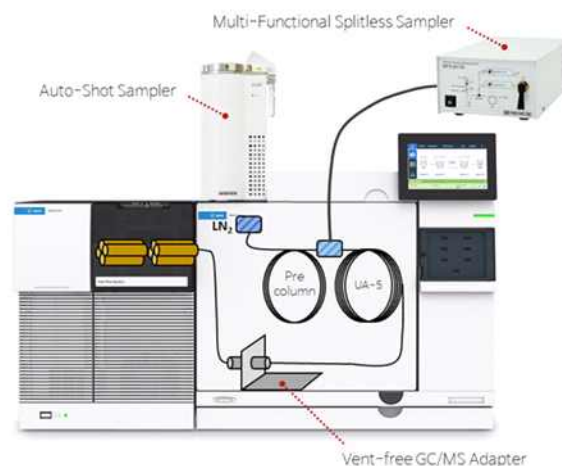
〈표 22〉 시료 추출을 위한 Sonication 시간 결정 실험 결과

(Unit: μg)

Polymer	PMMA	N-6,6	PP	PET	PVC	N-6	SBR	PE	ABS	PC	PS
RetentionTime	3.953	4.863	5.410	8.698	8.775	9.400	9.828	13.859	14.537	14.579	15.685
BLK	N/D	N/D	N/D	N/D	N/D	N/D	N/D	N/D	N/D	N/D	N/D
SAMPLE 1	N/D	N/D	N/D	N/D	N/D	N/D	N/D	N/D	N/D	N/D	N/D
SAMPLE 2	2.4735 (<STD1 :4.61)	0.7908< STD1 :8.25)	N/D	1.3944 (<STD1 :5.03)	9.3686 (<STD1 :16.43)	N/D	2.6650 (<STD1 :6.75)	N/D	N/D	0.9425 (<STD1 :1.28)	N/D
SAMPLE 3	N/D	N/D	N/D	N/D	N/D	N/D	N/D	N/D	N/D	N/D	N/D
SAMPLE 4	N/D	N/D	N/D	N/D	N/D	N/D	N/D	N/D	N/D	N/D	N/D
SAMPLE 5	N/D	N/D	N/D	N/D	N/D	N/D	N/D	N/D	N/D	N/D	N/D

2) 대기 중 입자크기 (10 μm), 입자크기 (2.5 μm) MPs 측정 실험

- STS 1 μm 필터 (21 ϕ)에 여과한 시료 열분석 진행을 위해, Splitless Mode에서도 안정적 열분해가 가능한 Py-GC/MS/MS MRM(Multiple Reaction Monitoring) 시스템을 적용하여 열분해를 진행하였음.



〈그림 44〉 Py-GC/MS/MS 시스템

- 열분석 진행을 위해 2종류의 액체 표준용액(STD, Standard) 및 1종류의 고체 STD를 사용하여 MPs 열분석용 STD를 제조하였음.
- 액상 표준의 경우, 초미량 저울을 사용하여 정확한 양의 고분자를 계량한 뒤, 해당 고분자에 적합한 용매에 정밀하게 용해하였으며, 용해 효율을 높이기 위해 초음파

분산기(Sonicator)를 함께 사용하였음.

- 고체 STD PE와 PP의 경우에는 무기 희석제(SiO_2)를 이용하여 PE-PP 혼합 고상 표준시료를 제조하였음.

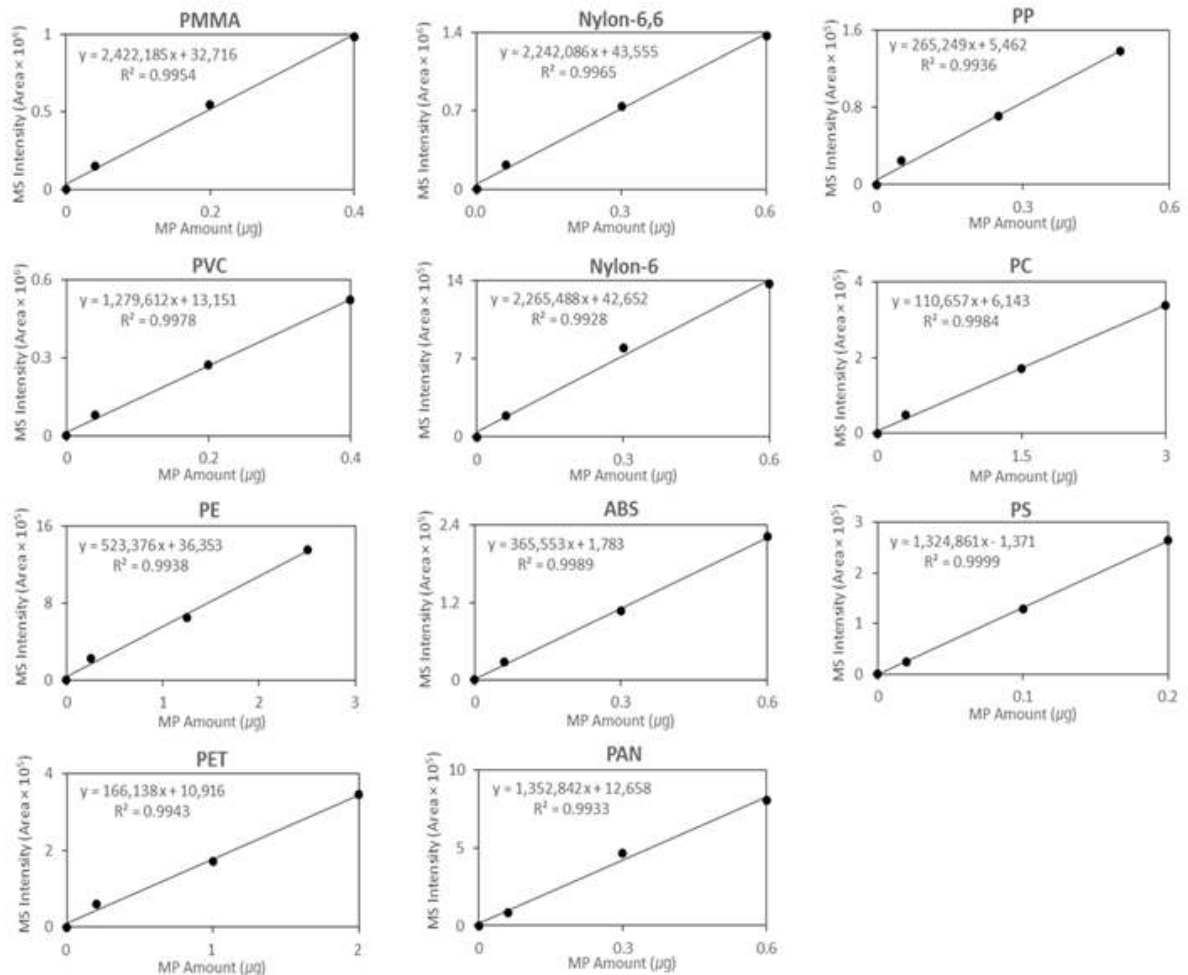
<표 23> Py-GC/MS/MS 시스템 분석 조건

PY Frontier Lab EGA/PY-3030D Pyrolyze		Column 1: Separation column	
Mode	Single-shot	Type	Frontier Lab Ultra ALLOY+-5 (UA-5)
Furnace Temperature	600 °C		
Interface Temperature	320 °C		
Accessories (All from Frontier Lab)	Auto-Shot Sampler (AS-1020E) Multi-Functional Splitless Sampler (MFS-2015E) MicroJet Cryo-Trap (MJT-2030E)	Diameter	0.25 mm
		Film Thickness	0.5 μm
		Control Mode	Constant Pressure 76.954 kPa
		Flow	1.008 mL/min
GC Agilent 8890 gas chromatograph		Column 2: Pre-column	
Inlet Temperature	320 ° C	Type	Frontier Lab Ultra ALLOY+-50
Mode	Splitless		
	using MFS splitless mode	Length	2 m
Septum Purge Flow	3 mL/min	Diameter	0.25 mm
Septum Purge Flow Mode	Switched	Film Thickness	0.1 μm
Gas Saver	On at 30 mL/min after 4 min	Control Mode	Constant Pressure 76.954 kPa
Carrier Gas	Helium		
Accessories	Frontier Lab	Flow	1.008 mL/min
	Vent-free GC/MS Adapter		
Oven		MSD Agilent 7000E mass spectrometer	
Initial Oven Temperature	40 °C (2 min hold)	Source	EI(Electron ionization)
Ramp Rate 1	20 °C/min	Quad Temperature (MS1 and MS2)	150 ° C
Final Temp 1	280 °C (10 min hold)	Source Temperature	230 ° C
Ramp Rate 2	40 °C/min	Mode	MRM
Final Temp 2	320 °C (10 min hold)	He Quench Gas	2.25 mL/min
Total Run Time	35 min	N2 Collision Gas	1.5 mL/min
		EM Voltage Gain Mode	0.1

- 이를 바탕으로 측정된 11종의 폴리머에 대한 Calibration 곡선을 제시하였으며, 이에 대한 내용은 및 LOD, 최소 정량 한계 (LOQ, limit of Quantitation)을 아래 표에 제시하였음.

* Standard for MP

- Liquid STD 01 : PMMA, PS, PVC, ABS, PC In DCM/THF solvent (1/1)
- Liquid STD 02: N-6, N-66, PET, PAN In HFIP Solvent
- Solid STD 01: PE and PP In SiO2



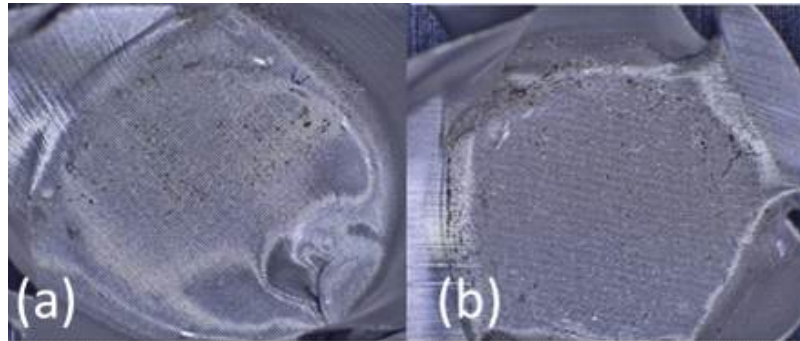
<그림 45> 각 폴리머 별 Py-GC/MS/MS STD Calibration 곡선
(Cal #1> LOQ, Cal #2: Cal1 x 5, Cal #3: Cal1 x 10)

<표 24> 각 폴리머 별 Py-GC/MS/MS STD Calibration 곡선에 대한 LOD, LOQ

Polymer	PMMA	N-6,6	PP	PET	PVC	N-6	PC	PAN	PE	ABS	PS
Slope	2,422,185	2,242,086	265,249	166,138	1,279,612	2,265,488	110,657	1,352,842	523,376	365,553	1,324,861
SD	5,908	23,320	1,142	9,095	7,625	16,979	3,365	8,883	18,266	1,922	1,181
LOD	0.008	0.034	0.014	0.181	0.020	0.025	0.100	0.022	0.115	0.017	0.003
LOQ	0.024	0.104	0.043	0.547	0.060	0.075	0.304	0.066	0.349	0.053	0.009

* LOD = $(3.3 \times \text{SD}) / \text{Slope}$, LOQ = $(10 \times \text{SD}) / \text{Slope}$

- 전처리 후 STS 1 μm 필터 (21 ϕ) 표면을 현미경으로 관찰하였을 때 아래와 같음.



<그림 46> 대기 중 입자크기 (10 μm), 입자크기 (2.5 μm) MPs
측정 위한 실험 STS 1 μm 필터 (21 ϕ) 현미경 관찰 결과 (a)
입자크기 (2.5 μm), (b) 입자크기 (10 μm)

<표 25> 대기 중 입자크기 (10 μm), 입자크기 (2.5 μm) MPs 측정 실험 열분석 후 각 폴리머 별 정량 결과

(unit: μg)

No.	Polymer	PMMA	N-6,6	PP	PET	PVC	N-6	PC	PAN	PE	ABS	PS
	R.T. (min)	4.632	6.218	6.855		10.163	10.636	10.869		16.206	18.302	20.178
1	PM _{2.5}	0.114	0.434	0.080	-	0.003 (<LOD: 0.020)	-	0.012 (<LOD: 0.100)	-	0.084 (<LOD: 0.115)	0.016 (<LOD: 0.017)	0.077
2	PM ₁₀	0.199	0.633 (>Cal #3: 0.600)	0.115	-	0.063	0.247	1.539	-	0.527	0.016 (<LOD: 0.017)	0.079

- 입자크기 (2.5 μm)와 입자크기 (10 μm) 사각 STS 필터를 전처리 과정을 거쳐 Py-GC/MS/MS 열분해법으로 분석한 폴리머 별 정량 결과를 μg 단위로 나타냈음.
- 여기서 ‘-’ 는 피크가 검출되지 않은 경우이고, LOD 이하 수치 (<LOD: value)는 참고용으로 제시하였음. 해당 수치는 검출 피크는 있지만 표준물질의 LOD 보다 낮아 정량되었다고는 할 수 없음.

<표 26> 대기 중 입자크기 (10 μm), 입자크기 (2.5 μm) MPs 측정 실험 열분석 후 각 폴리머 별 농도 환산

(unit: ng/m^3)

No.	Polymer	PMMA	N-6,6	PP	PET	PVC	N-6	PC	PAN	PE	ABS	PS
	R.T. (min)	4.632	6.218	6.855		10.163	10.636	10.869		16.206	18.302	20.178
1	PM _{2.5}	0.236	0.899	0.166	-	N/D	-	N/D	-	N/D	N/D	0.159
2	PM ₁₀	0.412	1.311	0.238	-	0.130	0.511	3.186	-	1.091	N/D	0.164

- 6월 13일 경기도 과천 주거단지 중심 도시에서 포집한 입자크기 (10 μm), 입자크기 (2.5 μm) 사각 STS 필터에 희석 배수 50% (200 ml / 400 ml)와 고용량 시료 포집기 채취 용량 700 L/min (23시간) 총 966 m^3 을 고려하여 농도로 환산하였을 때 결과 값을 ng/m^3 로 제시하였으며, LOD 이하의 값은 N/D로 표기하였음.
- 동일 일자에 포집한 입자크기 (2.5 μm)와 입자크기 (10 μm) 시료에서 PMMA, N-6,6, PP PS가 같은 경향으로 검출되었으며, PVC, PC, PE는 PM_{10} 에서 검출되었으나, 입자크기 (2.5 μm)에서는 검량 한계 이하로 차이를 보였음.

3) 다단 여과 필터 기반 입자 산화 전처리 실험

(1차) 입자크기 (2.5 μm) 6월 11일 사각 STS 필터

- 전처리 완료된 시료 열분석 진행을 위해, Py-GC/MS(Pyrolyzer: EGA/PY-3030D (Frontier Lab), GC/MS: 8890/5977 (Agilent Technology)를 적용하여 열분해를 진행하였음. 분석 조건은 하단 테이블에 제시하였음.

<표 27> Py-GC/MS 분석 조건

Instrument conditions	
Pyrolyzer	Furnace temp. 600 $^{\circ}\text{C}$
	Interface temp. 300 $^{\circ}\text{C}$
GC	Inlet: 320 $^{\circ}\text{C}$, Split: 20:1
	Carrier gas: Helium, 1 mL/min
	Column: DB-5 (30mD X 0.250mm X 0.25 μm)
	GC Oven:
	40 $^{\circ}\text{C}$ (2 min) $\rightarrow$ 20 $^{\circ}\text{C}/\text{min} \rightarrow$ 320 $^{\circ}\text{C}$ (14 min)
	Runtime: 30 min
MS	Scan range: m/z 29 - 550
	Scan speed: 2.8 scans/sec

- 열분석(Py-GC/MS) 수행을 위해 고체 표준물질(STD, Standard)을 이용한 MPs 열분석용 표준시료를 제조하였음.
- 11종 고분자가 혼합된 고체 STD를 사용하였으며, 각 폴리머의 목표 분취량을 산정한 후 초미량 저울을 이용해 정밀 계량하여 표준시료를 조제하였음.
- 고체 STD의 균질성과 취급성을 확보하기 위해 무기 희석제(SiO_2)를 적용한 혼합 고상

표준시료 형태로 제조하였음.

- 해당 STD를 바탕으로 측정한 11종의 폴리머에 대한 Calibration 곡선을 제시하였으며, 이에 대한 내용은 및 방법 검출한계, 정량한계, 정밀도 및 정확도를 아래 표에 제시하였음.

<표 28> MPs 표준물질 총량 (4 points)

(Unit: μg)

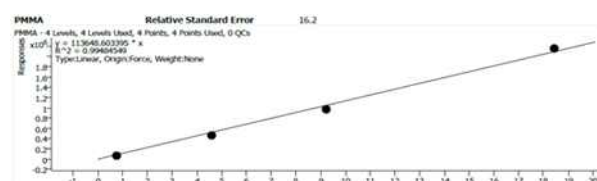
농도 (μg)	STD 1	STD 2	STD 3	STD 4
PMMA	0.75	4.61	9.23	18.45
N-6,6	0.92	8.25	16.50	33.00
PP	3.43	18.79	37.58	75.15
PVC	2.24	16.43	32.85	65.70
SBR	1.07	6.75	13.50	27.00
PE	11.20	70.01	140.03	280.05
ABS	1.04	6.19	12.38	24.75
PS	0.74	4.35	8.70	17.40
PET	5.03	7.37	10.05	20.10
N-6	2.06	3.03	4.13	8.25
PC	1.28	1.87	2.55	5.10
비고	표준물질 : MPs-SiO ₂ , MPs-SiO ₂ -L			

<표 29> 방법검출한계

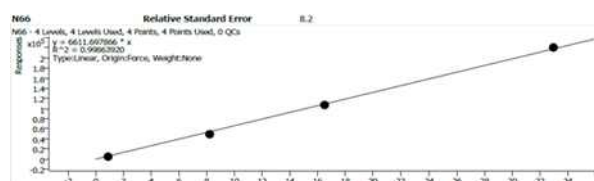
농도 (μg)	1회	2회	3회	4회	5회	6회	7회	표준 편차	방법 검출한계	정량 한계
PMMA	1.1735	1.1726	1.1653	1.1577	1.1476	1.1466	1.1418	0.0130	0.041	0.13
N-6,6	1.7168	1.5304	1.5831	1.4610	1.6415	1.5721	1.5073	0.0858	0.269	0.86
PP	7.0531	7.0224	6.9727	6.9598	7.0130	6.8794	6.8342	0.0794	0.249	0.79
PVC	3.3242	3.2878	3.2067	3.5467	3.2118	2.8360	2.9087	0.2449	0.769	2.45
SBR	1.7128	1.5897	1.6839	1.6456	1.5926	1.6030	1.6139	0.0481	0.151	0.48
PE	23.3955	22.8571	24.2375	22.8770	23.5567	23.1362	22.5036	0.5699	1.790	5.70
ABS	1.9294	1.9804	1.9714	1.9073	1.9496	1.9015	1.9488	0.0301	0.095	0.30
PS	0.4509	0.4144	0.4341	0.4782	0.5393	0.4113	0.4619	0.0442	0.139	0.44
PET	5.3930	5.1590	5.1048	5.2227	5.3264	5.3868	5.7746	0.2221	0.697	2.22
N-6	2.3380	2.2882	2.1422	2.2295	2.1924	2.2557	2.2989	0.0671	0.211	0.67
PC	1.4461	1.4464	1.4463	1.4177	1.4123	1.4181	1.3913	0.0214	0.067	0.21

〈표 30〉 정밀도 및 정확도

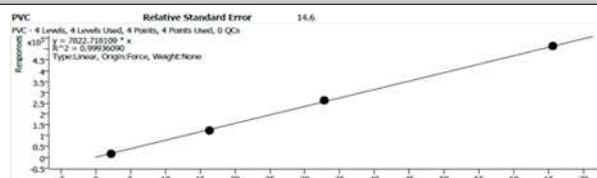
농도 (μg)	1회	2회	3회	4회	평균	표준 편차	정밀도 (%)	정확도 (%)
PMMA	10.0616	9.2025	9.6091	9.2770	9.5376	0.392	4.11	103.3
N-6,6	14.6458	16.8459	16.3342	15.6936	15.8799	0.948	5.97	96.2
PP	31.4613	33.9448	33.3299	32.7560	32.8730	1.059	3.22	87.5
PVC	27.9261	32.0978	32.5695	28.7763	30.3424	2.333	7.69	92.4
SBR	11.5669	12.1909	12.6266	11.7710	12.0389	0.470	3.91	89.2
PE	117.4860	122.4896	117.8571	115.0080	118.2102	3.121	2.64	84.4
ABS	11.4213	10.7273	10.4394	10.1006	10.6722	0.561	5.26	86.2
PS	9.3619	8.8182	8.1098	8.2343	8.6311	0.577	6.68	99.2
PET	9.6082	9.6858	9.6295	9.5455	9.6173	0.058	0.60	95.7
N-6	4.0436	4.0984	4.0409	3.9401	4.0308	0.066	1.64	97.6
PC	2.3224	2.2924	2.3065	2.2740	2.2988	0.021	0.90	90.2



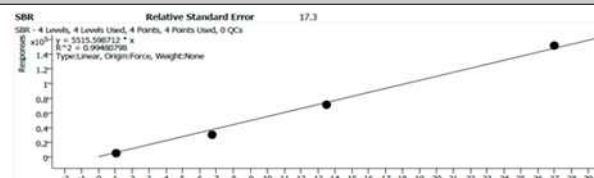
PMMA



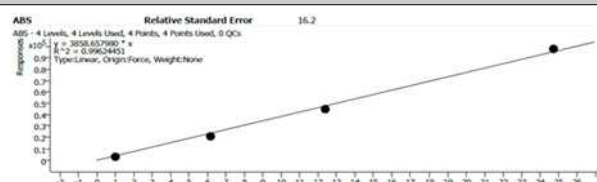
N-6,6



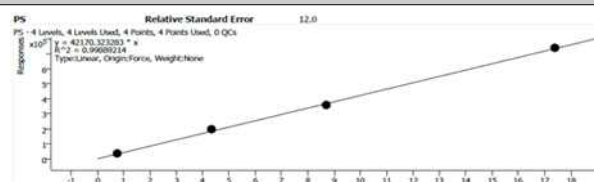
PVC



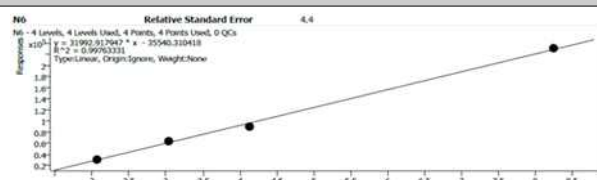
SBR



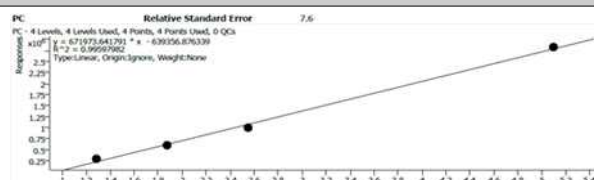
ABS



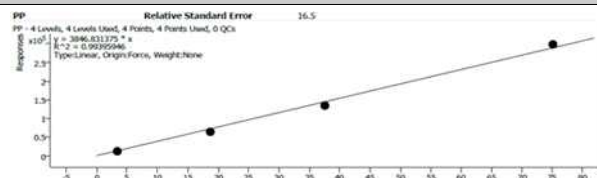
PS



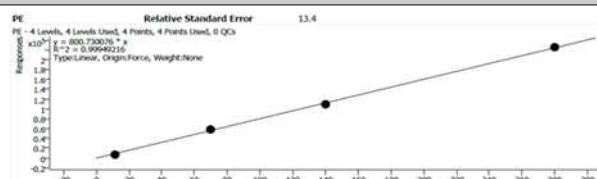
N-6



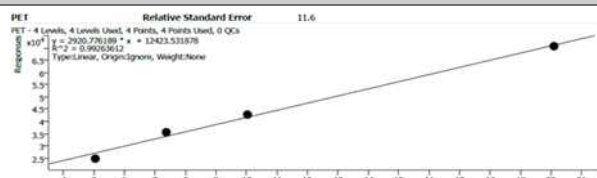
PC



PP



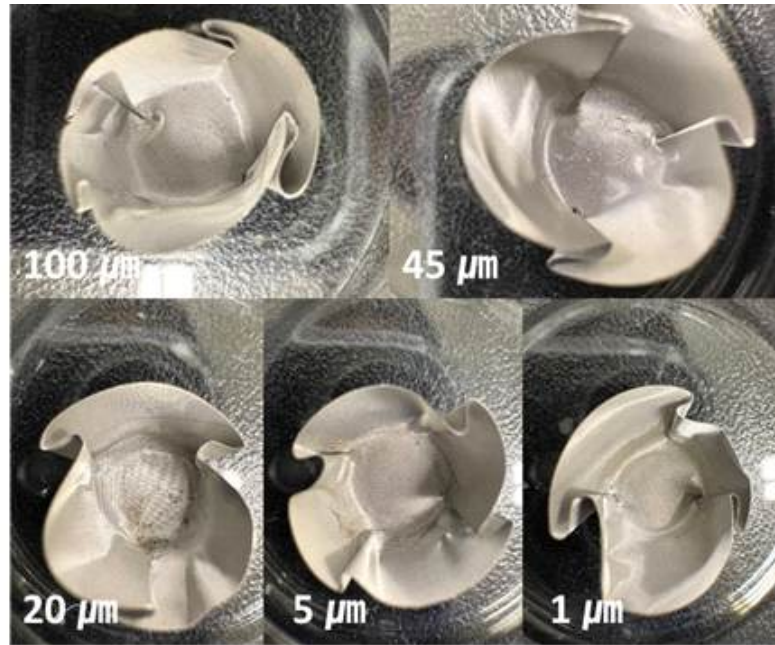
PE



PET

<그림 47> 각 폴리머 별 Py-GC/MS STD Calibration 곡선

- 앞서 ‘다단 여과 필터 기반 입자 산화 전처리 평가 실험’ 전처리 후 STS 1 μm 필터 (21 ϕ) 표면을 관찰하였을 때 아래와 같음.



〈그림 48〉 다단 여과 필터 기반 입자 산화 전처리 실험
(6월 11일자 시료) STS 1 μm 필터 (21 ϕ) 사이즈 별 관찰 결과

- 전처리 완료된 시료는 열분해를 진행하였는데, 아래 테이블에 각 폴리머 별 정량 결과를 μg 단위로 나타냈음. ‘-’ 는 피크가 검출되지 않은 경우이고, MDL 이하 수치 (<MDL: value)는 참고용으로 제시하였음. 해당 수치는 검출 피크는 있지만 표준 물질의 MDL 보다 낮아 정량되었다고는 할 수 없음.

〈표 31〉 다단 여과 필터 기반 입자 산화 전처리 실험(1차) 열분석 후 각 폴리머 별 정량 결과

No.	Polymer R.T. (min)	(unit: μg)										
		PMMA	N-6,6	PP	PET	PVC	N-6	SBR	PE	ABS	PC	PS
		3.947	4.857	5.416	8.692	8.787	9.358	9.84	13.865	14.543	14.585	15.691
1	100 μm	N/D	0.0273 (>MDL:0.269)	0.2234 (>MDL:0.249)	N/D	N/D	N/D	N/D	N/D	N/D	N/D	N/D
2	45 μm	N/D	4.3429	N/D	-	N/D	N/D	N/D	N/D	0.6249	N/D	N/D
3	20 μm	0.1245	3.4185	0.3204	-	1.3833	N/D	N/D	N/D	N/D	N/D	1.056
4	5 μm	0.0713	1.9085	0.2751	-	1.6689	N/D	N/D	N/D	N/D	N/D	0.4645
5	1 μm	0.0602	1.3105	0.1495 (>MDL:0.249)	N/D	1.746	N/D	N/D	N/D	N/D	N/D	0.1306 (>MDL:0.139)

- 6월 11일 경기도 과천 주거단지 중심 도시에서 포집한 입자크기 (2.5 μm) 사각 STS 필터에 고용량 시료 포집기 채취 용량 700 L/min (23시간) 총 966 m^3 을 고려한 시료 채취 용량으로 환산하였을 때 결과 값을 ng/m^3 로 제시하였음.

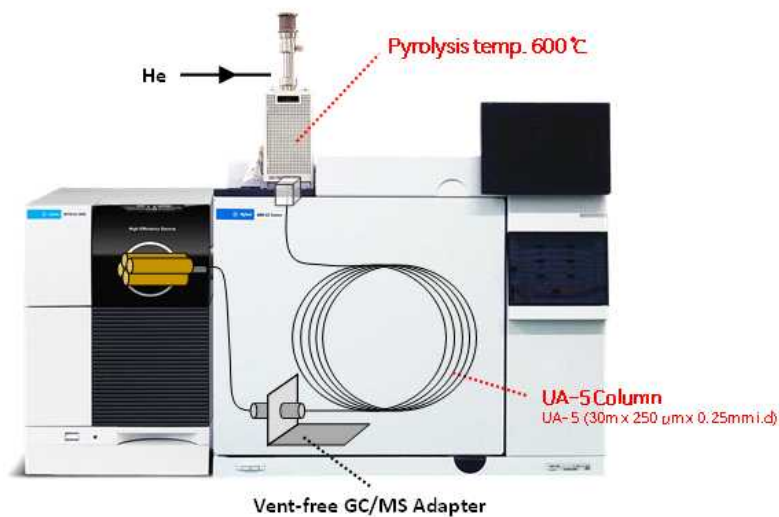
<표 32> 다단 여과 필터 기반 입자 산화 전처리 실험 열분석(1차) 후 각 폴리머 별 농도 환산

(unit: ng/m^3)

No.	Polymer	PMMA	N-6,6	PP	PET	PVC	N-6	SBR	PE	ABS	PC	PS
	R.T. (min)	3.947	4.857	5.416	8.692	8.787	9.358	9.84	13.865	14.543	14.585	15.691
1	100 μm	N/D	N/D	N/D	N/D	N/D	N/D	N/D	N/D	N/D	N/D	N/D
2	45 μm	N/D	4.496	N/D	-	N/D	N/D	N/D	N/D	0.647	N/D	N/D
3	20 μm	0.129	3.539	0.332	-	1.432	N/D	N/D	N/D	N/D	N/D	1.093
4	5 μm	0.074	1.976	0.285	-	1.728	N/D	N/D	N/D	N/D	N/D	0.481
5	1 μm	0.062	1.357	N/D	N/D	1.807	N/D	N/D	N/D	N/D	N/D	N/D

(2차) 입자크기 (2.5 μm) 6월 12일 사각 STS 필터 (교차실험기관)

- 전처리 완료된 시료 열분석 진행을 위해, Py-GC/MS(Pyrolyzer: EGA/PY-3030D (Frontier Lab), GC/MS: 8890/5977 (Agilent Technology)를 적용하여 열분해를 진행하였음. 분석 조건은 하단 테이블에 제시하였음.



<그림 49> Py-GC/MS 시스템 구성

〈표 33〉 Py-GC/MS 분석 조건

Instrument conditions	
Pyrolyzer	Furnace temp. 600 °C
	Interface temp. 320 °C
GC	Inlet: 320 °C, Split: 50:1
	Carrier gas: Helium, 1 mL/min
	Column: UA-5(30mx250 μ m filmx0.25mm i.d.)
	GC Oven:
	40 °C (2 min) → 20 °C/min → 320 °C (14 min)
	Runtime: 30 min
MS	EM: 1,138
	Scan range: m/z 29 - 550
	Scan speed: 5.3 scans/sec

- 11종류의 폴리머(PMMA, Nylon-6,6, PP, PET, PVC, Nylon-6, PC, PAN, PE, ABS, PS)에 대하여 Calibration Curve를 작성하였음. 검량선은 총 3 points를 진행하였으며, 아래 테이블에 제시된 질량으로 혼합되어있는 STD를 제조하여 분석하였음.

〈표 34〉 MPs 표준물질 총량 (3 points)

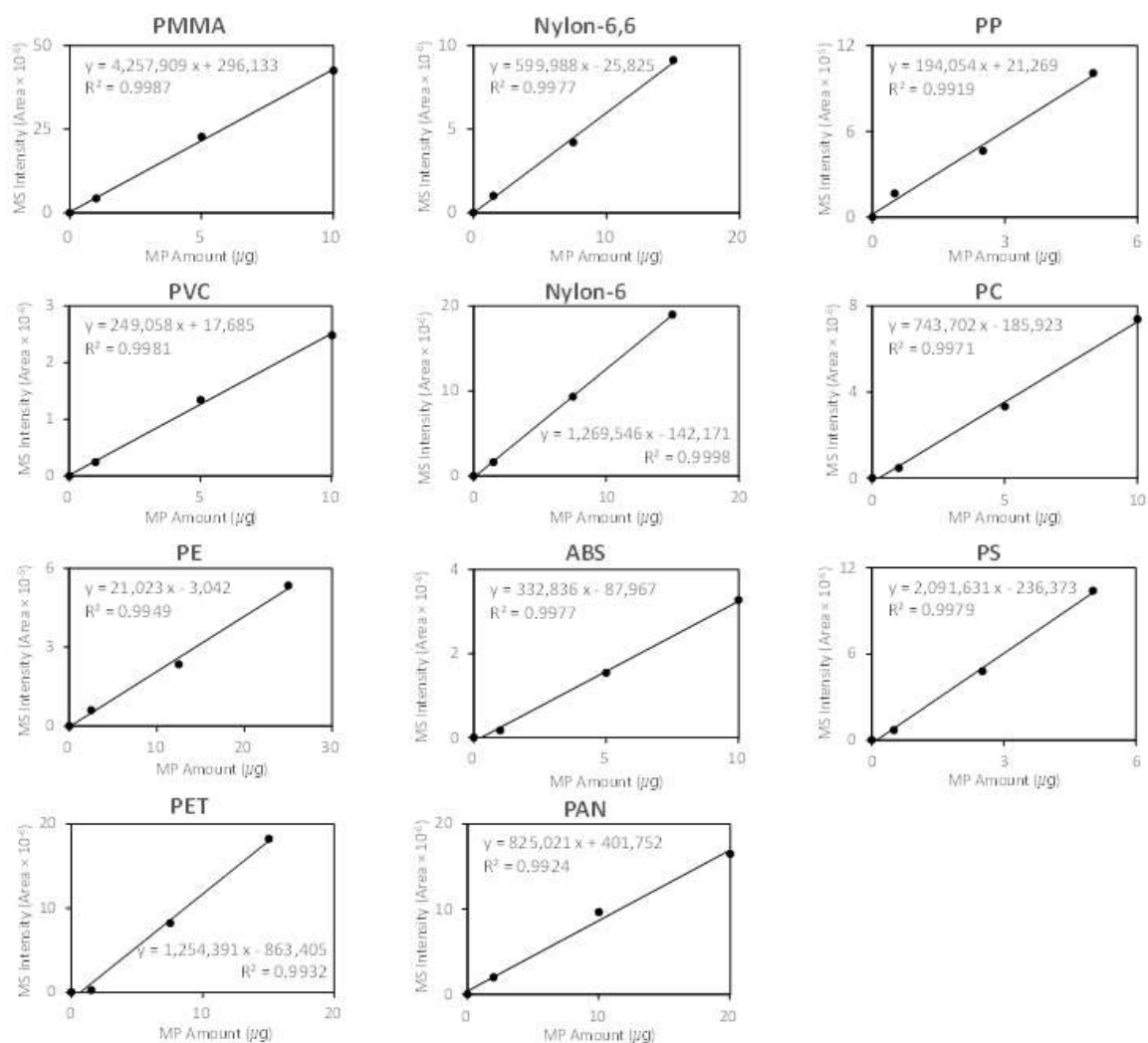
(Unit: μ g)

Polymer RetentionTime	PMMA 3.643	N-6,6 4.625	PP 5.332	PET 8.756	PVC 9.035	N-6 9.520	PC 9.810	PAN 11.623	PE 14.319	ABS 15.502	PS 16.823
#1	1.001	1.502	0.500	1.502	1.002	1.502	1.001	2.006	2.499	1.001	0.502
#2	5.005	7.512	2.500	7.510	5.012	7.510	5.006	10.029	12.494	5.006	2.511
#3	10.010	15.023	5.000	15.020	10.023	15.019	10.011	20.058	24.987	10.012	5.022

- 분석법의 LOD를 구하기 위해 최소 농도 값을 7회 반복하여 얻어진 표준편차와 상대 표준편차를 나타냈음.

〈표 35〉 폴리머 STD의 반복성 평가 (평균, 표준편차, RSD%)

Polymer	PMMA	N-6,6	PP	PET	PVC	N-6	PC	PAN	PE	ABS	PS
1.D	4,530,698	901,664	168,919	289,761	241,107	1,650,493	482,946	1,936,568	67,064	192,346	748,949
2.D	4,265,429	1,075,108	191,974	214,578	251,287	1,699,362	488,067	2,161,312	63,879	182,490	764,920
3.D	4,532,735	950,915	153,432	319,355	267,177	1,668,237	487,039	1,935,310	60,319	176,122	705,091
4.D	4,190,794	1,098,155	196,967	262,648	209,916	1,658,035	484,765	1,958,333	64,858	174,374	691,002
5.D	4,292,559	1,042,667	141,724	210,920	270,133	1,571,678	438,946	1,936,632	60,653	148,402	626,110
6.D	4,321,746	941,550	164,096	228,602	245,113	1,550,536	451,019	1,862,430	54,827	157,986	586,857
7.D	3,987,087	1,020,032	141,110	240,734	238,904	1,699,042	440,292	2,018,767	48,432	156,967	614,343
Average	4,303,007	1,004,299	165,460	252,371	246,234	1,642,483	467,582	1,972,765	60,005	169,812	676,753
SD	191,001	74,009	22,400	40,491	20,148	58,979	22,980	94,927	6,450	15,771	68,960
RSD(%)	4.44	7.37	13.54	16.04	8.18	3.59	4.91	4.81	10.75	9.29	10.19



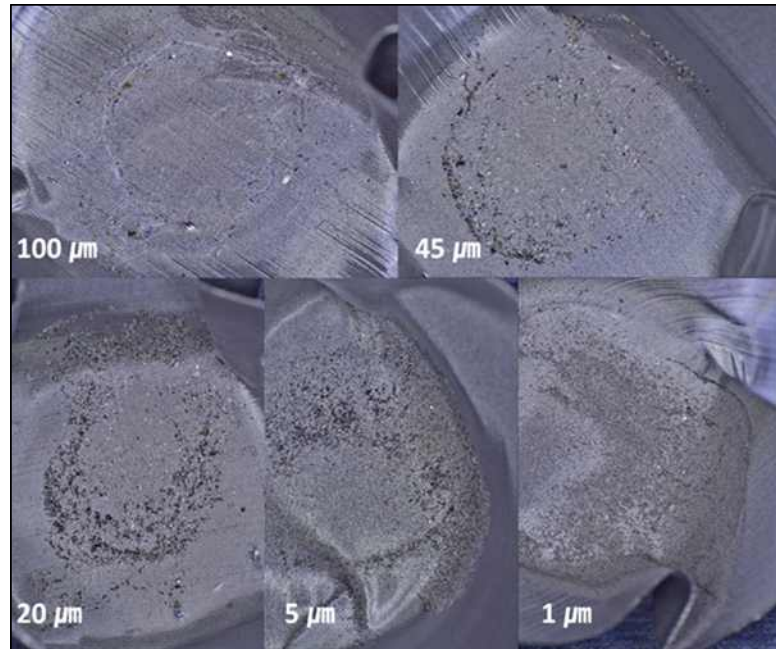
<그림 50> 각 폴리머 별 Py-GC/MS STD Calibration 곡선
(Cal #1> LOQ, Cal #2: Call x 5, Cal #3: Call x 10)

<표 36> 각 폴리머 별 Py-GC/MS STD Calibration 곡선에 대한 LOD, LOQ

Polymer	PMMA	N-6,6	PP	PET	PVC	N-6	PC	PAN	PE	ABS	PS
Slope	4,257,909	599,988	194,054	1,254,391	249,058	1,269,546	743,702	825,021	21,023	332,836	2,091,631
SD	191,001	74,009	22,400	40,491	20,148	58,979	22,980	94,927	6,450	15,771	68,960
LOD	0.148	0.407	0.381	0.107	0.267	0.153	0.102	0.380	1.013	0.156	0.109
LOQ	0.449	1.234	1.154	0.323	0.809	0.465	0.309	1.151	3.068	0.474	0.330

* LOD = $(3.3 \times \text{SD}) / \text{Slope}$, LOQ = $(10 \times \text{SD}) / \text{Slope}$

- 앞서 ‘다단 여과 필터 기반 입자 산화 전처리 실험’ 전처리 후 STS 1 μm 필터 (21 ϕ) 표면을 현미경으로 관찰하였을 때 아래와 같음.



〈그림 51〉 다단 여과 필터 기반 입자 산화 전처리 실험
(6월 12일자 시료) STS 1 μm 필터 (21 ϕ) 현미경 관찰 결과

〈표 37〉 다단 여과 필터 기반 입자 산화 전처리(2차) 열분석 후 각 폴리머 별 정량 결과

(unit: μg)												
No.	Polymer	PMMA	N-6,6	PP	PET	PVC	N-6	PC	PAN	PE	ABS	PS
	R.T. (min)	3.696	4.646	5.326		9.025	9.514	9.802		14.309	15.483	16.807
1	100 μm	–	0.288 (>LOD: 0.407)	0.038 (>LOD: 0.381)	–	1.243	–	–	–	0.928 (>LOD: 1.013)	0.308	0.173
2	45 μm	–	0.223 (>LOD: 0.407)	N/D	–	1.170	0.126 (>LOD: 0.153)	0.316	–	1.139	0.308	0.191
3	20 μm	0.029 (>LOD: 0.148)	0.399 (>LOD: 0.407)	0.161 (>LOD: 0.381)	–	2.894	0.152 (>LOD: 0.153)	0.370	–	2.338	0.345	0.303
4	5 μm	0.095 (>LOD: 0.148)	0.750	0.169 (>LOD: 0.381)	–	4.764	0.164	0.337	–	4.019	0.358	0.406
5	1 μm	0.184	0.737	0.066 (>LOD: 0.381)	–	6.544	0.142 (>LOD: 0.153)	0.346	–	4.211	0.423	0.429

- 6월 12일 경기도 과천 주거단지 중심 도시에서 포집한 입자크기 (2.5 μm) 사각 STS 필터에 고용량 시료 포집기 채취 용량 700 L/min (23시간) 총 966 m^3 을 고려한 시료 채취 용량으로 환산하였을 때 값을 ng/m^3 로 제시하였으며, LOD 이하의 값은 N/D로

표기하였음.

<표 38> 다단 여과 필터 기반 입자 산화 전처리 실험 열분석(2차) 후 각 폴리머 별 농도 환산

(unit: ng/m³)

No.	Polymer R.T. (min)	PMMA 3.696	N-6,6 4.646	PP 5.326	PET	PVC 9.025	N-6 9.514	PC 9.802	PAN	PE 14.309	ABS 15.483	PS 16.807
1	100 μ m	-	N/D	N/D	-	1.287	-	-	-	N/D	0.319	0.179
2	45 μ m	-	N/D	-	-	1.211	N/D	0.327	-	1.179	0.319	0.198
3	20 μ m	N/D	N/D	N/D	-	2.996	N/D	0.383	-	2.420	0.357	0.314
4	5 μ m	N/D	0.776	N/D	-	4.932	0.170	0.349	-	4.160	0.371	0.420
5	1 μ m	0.190	0.763	N/D	-	6.774	N/D	0.358	-	4.359	0.438	0.444

- 본 실험에서는 ① 6월 11일, ② 6월 12일 HV STS PM_{2.5} 시료를 포집하여 다단 여과 전처리를 거쳐 열분석법으로 MPs를 정량하였음. 두 개의 시료 모두 N-6,6과 PS가 다양한 입자 사이즈에서 공통적으로 검출되는 것을 확인하였음. N-6의 경우 (1차), (2차) 실험 간 검출 차이를 확인하였음.
- 이에 대한 원인은 각 분석에 사용한 STD 구성의 차이로 판단되는데, (1차) 실험에서 사용한 STD는 혼합 STD로 실제 시료와 유사한 매트릭스 조건을 반영하여 폴리머 간 상호 간섭까지 고려가능한데 반해, (2차) 실험에서 사용한 STD는 단일 STD로 개별 폴리머의 응답을 명확히 확인 할 수 있다는 장점이 있음.
- (1차) 실험과 (2차) 실험 모두 폴리머 별 경향성과 검출 가능성이 일관성이 있음을 파악하였음. 또한 비슷한 농도 범위의 폴리머를 중심으로 교차 분석을 추가 수행하여 방법 차이에 따른 영향을 정량적으로 규명해야 할 것으로 판단됨.

4) 시료 추출을 위한 Sonication 시간 결정 (2차) 및 산화 후 농도 파악 실험

- 전처리 완료된 시료는 ‘3) 다단 여과 필터 기반 입자 산화 전처리 실험(2차)’ 에서 진행한 분석 조건을 바탕으로 열분해를 진행하였음.
- 12종류의 폴리머(PMMA, Nylon-6,6, SBR, PP, PET, PVC, Nylon-6, PC, PAN, PE, ABS, PS)에 대하여 Calibration Curve를 작성하였음. 검량선은 총 3 points를 진행하였으며, 아래 테이블에 제시된 질량으로 혼합되어있는 STD를 제조하여 분석하였음.

〈표 39〉 MPs 표준물질 총량 (3 points)

(Unit: μg)

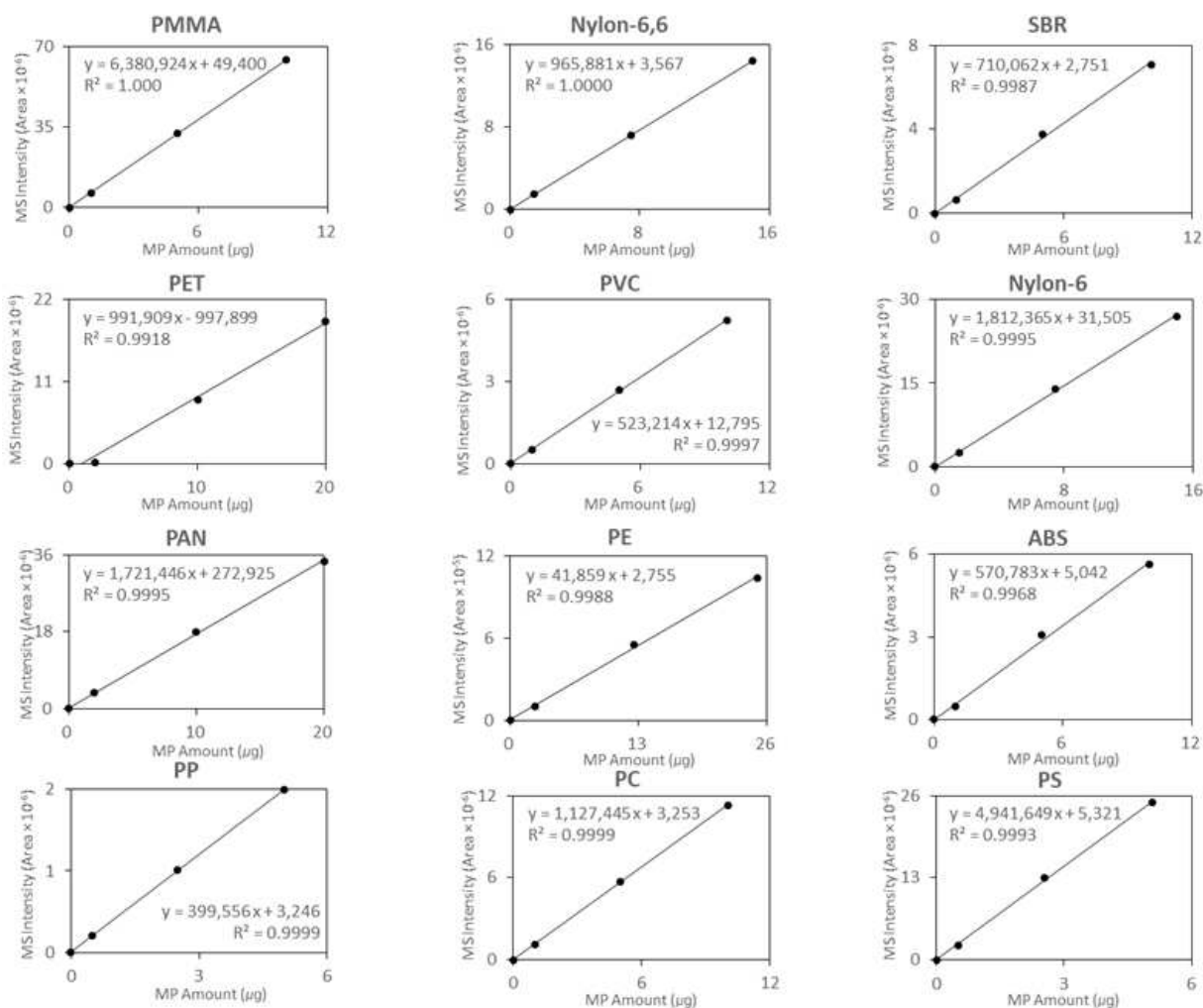
Polymer	PMMA	N-6,6	SBR	PP	PET	PVC	N-6	PC	PAN	PE	ABS	PS
Retention Time	3.41	4.335	4.929	5.01	8.594	8.741	9.173	9.479	11.284	13.949	15.102	16.394
#1	1.006	1.496	1.009	0.500	2.000	1.004	1.498	1.004	2.000	2.499	1.002	0.507
#2	5.030	7.478	5.030	2.500	9.999	5.018	7.488	5.021	9.998	12.494	5.010	2.536
#3	10.060	14.955	10.060	5.000	19.997	10.035	14.975	10.042	19.996	24.987	10.020	5.072

- 분석법의 LOD를 구하기 위해 최소 농도 값을 7회 반복하여 얻어진 표준편차와 상대 표준편차를 나타냄.

〈표 40〉 폴리머 STD의 반복성 평가 (평균, 표준편차, RSD%)

Polymer	PMMA	N-6,6	SBR	PP	PET	PVC	N-6	PC	PAN	PE	ABS	PS
1.D	6,348,389	1,460,392	560,482	220,185	93,631	659,973	2,661,858	1,129,805	4,092,604	92,076	490,840	2,383,438
2.D	5,672,176	1,478,057	639,937	203,083	104,772	637,304	2,072,247	1,082,633	3,200,096	93,453	423,999	2,156,587
3.D	6,547,259	1,428,787	606,592	192,869	83,411	532,699	2,761,763	1,152,575	4,072,876	106,061	466,200	2,345,585
4.D	6,055,619	1,413,780	660,493	215,940	91,837	515,020	2,563,625	1,052,978	3,382,051	89,043	442,165	2,048,525
5.D	6,616,300	1,557,866	680,222	180,233	86,702	414,875	2,466,201	1,104,361	4,104,674	108,535	470,699	2,353,005
6.D	6,510,309	1,320,947	606,311	185,864	96,290	448,696	2,806,762	1,030,079	3,861,626	89,995	500,849	2,480,392
7.D	6,943,188	1,589,534	653,820	210,245	94,332	417,605	2,590,854	1,140,369	3,523,565	100,081	462,379	2,201,784
Average	6,384,749	1,464,195	629,694	201,203	92,996	518,025	2,560,473	1,098,971	3,748,213	97,035	465,304	2,281,331
SD	413,331	90,375	40,946	15,315	6,886	100,110	244,826	45,999	376,145	7,894	26,443	150,224
RSD(%)	6.47	6.17	6.50	7.61	7.41	19.33	9.56	4.19	10.04	8.13	5.68	6.58

- 아래 테이블에 각 폴리머 별 정량 결과를 μg 단위로 나타냄. ‘-’ 는 피크가 검출되지 않은 경우이고, LOD 이하 수치 (<LOD: value)는 참고용으로 제시하였음. 해당 수치는 검출 피크는 있지만 표준 물질의 LOD 보다 낮아 정량되었다고는 할 수 없음.
- 경기도 과천 주거단지 중심 도시에 설치한 고용량 시료 포집기 채취 용량 700 L/min (23시간) 총 966 m^3 을 고려하여 농도로 환산하였을 때 결과 값을 ng/m^3 로 제시하였으며, LOD 이하의 값은 N/D로 표기하였음.



<그림 52> 각 폴리머 별 Py-GC/MS (2) STD Calibration 곡선
(Cal #1> LOQ, Cal #2: Cal1 x 5, Cal #3: Cal1 x 10)

<표 41> 시료 추출을 위한 Sonication 시간 결정(2차) 및 산화 후 농도 파악 실험 열분석 후 각 폴리머 별 정량 결과

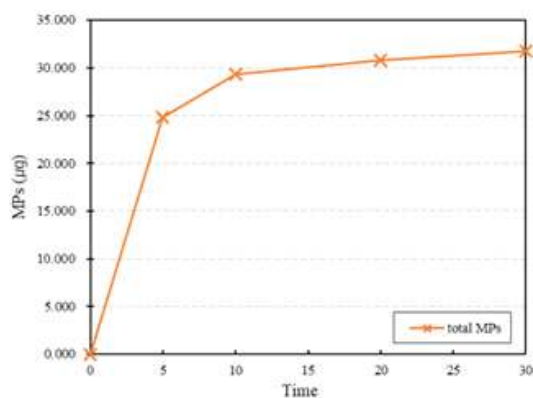
(unit: μg)

No.	Polymer R.T. (min)	PMMA 3.527	N-6,6 4.359	SBR 4.925	PP 5.013	PET 8.703	PVC 8.703	N-6 8.703	PC 8.703	PAN 13.947	PE 13.947	ABS 15.102	PS 16.393
1	PM ₁₀ 5 min	0.640	1.837	7.437	0.225	-	3.267	-	-	-	13.709	0.173	0.768
2	PM ₁₀ 10 min	0.126 (<LOD: 0.214)	0.043 (<LOD: 0.309)	1.664	0.110 (<LOD: 0.126)	-	3.061	-	-	-	2.284	0.070 (<LOD: 0.153)	0.227
3	PM ₁₀ 20 min	0.065 (<LOD: 0.214)	-	0.396	0.108 (<LOD: 0.126)	-	1.205	-	-	-	0.823	-	0.072 (<LOD: 0.100)
4	PM ₁₀ 30 min	0.054 (<LOD: 0.214)	-	0.242	0.086 (<LOD: 0.126)	-	0.819	-	-	-	0.502 (<LOD: 0.622)	-	0.055 (<LOD: 0.100)

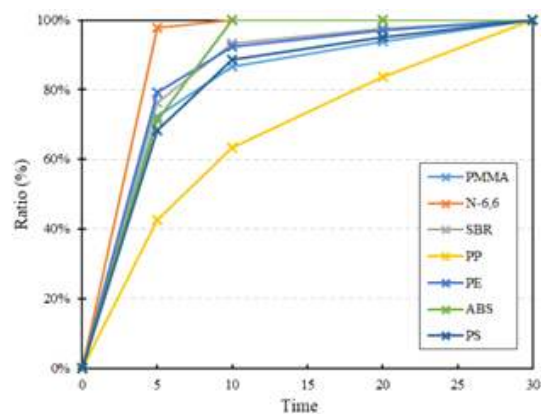
<표 42> 시료 추출을 위한 Sonication 시간 결정(2차) 및 산화 후 농도 파악 실험 열분석 후 각 폴리머 별 농도 환산

No.	Polymer R.T. (min)	(unit: ng/m ³)											
		PMMA	N-6,6	SBR	PP	PET	PVC	N-6	PC	PAN	PE	ABS	PS
		3.527	4.359	4.925	5.013		8.703				13.947	15.102	16.393
1	PM ₁₀ 5 min	0.663	1.902	7.699	0.233	-	3.382	-	-	-	14.192	0.179	0.795
2	PM ₁₀ 10 min	N/D	N/D	1.723	N/D	-	3.169	-	-	-	2.364	N/D	0.235
3	PM ₁₀ 20 min	N/D	-	0.410	N/D	-	1.247	-	-	-	0.852	-	N/D
4	PM ₁₀ 30 min	N/D	-	0.251	N/D	-	0.848	-	-	-	N/D	-	N/D

- 열분석 결과 PMMA, N-6,6 SBR, PP, PVC, PE, ABS, PS 총 8개의 폴리머 성분이 Sonication 5분 후 검출되는 것을 파악하였음. SBR, PVC, PE, PS 성분은 10분 Sonication 구간까지도 유의미한 수준으로 검출되는 것을 파악하였음.
- 대다수의 폴리머 성분은 주로 5-10분 구간에서 검출되지만 SBR, PVC 폴리머 성분은 30분간 Sonication을 진행하여도 여전히 유의미한 농도로 검출되기 때문에 최소 시간을 30분으로 설정하였음.

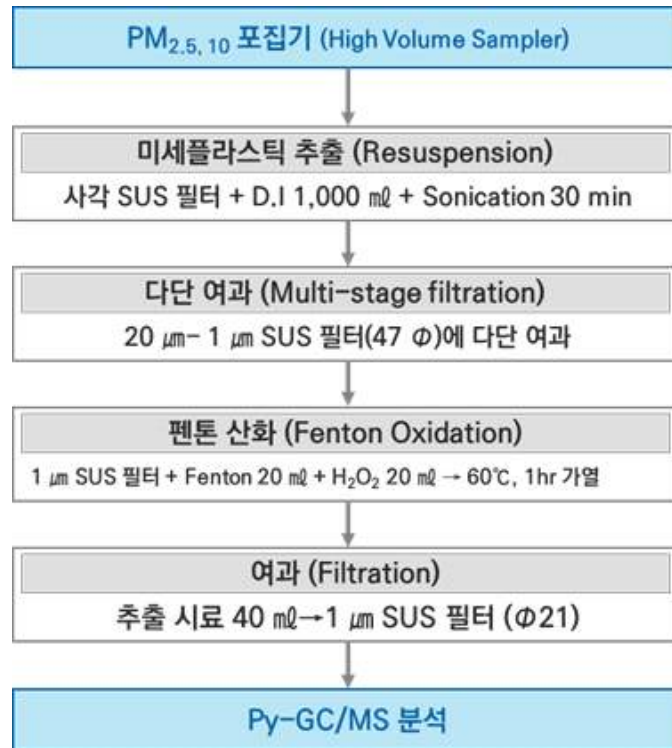


<그림 53> Sonication 시간 별 검출 대기 중 총 MPs (µg)



<그림 54> Sonication 시간 별 검출 대기 중 MPs 성분 별 (%)

- 앞서 진행한 실험을 바탕으로 도출한 대기 중 MPs 열분해법 분석을 위한 최적 전처리 방법은 Sonication 30분, 다단 여과 20 µm → 1 µm 그리고 Fenton 산화를 적용한 것으로 아래 모식도에 제시하였음.



〈그림 55〉 대기 중 MPs 열분해법 분석을 위한 최적 전처리 방법 제시

4-3-2. 수도권지역 대표지점 기준 MPs 입자 크기별 (2.5 μ m, 10 μ m) 현장 적용성 평가

○ 대기 중 MPs 현장 시료 분석 결과 분광분석법 적용

① 과천 주거단지 입자크기 (2.5 μ m)

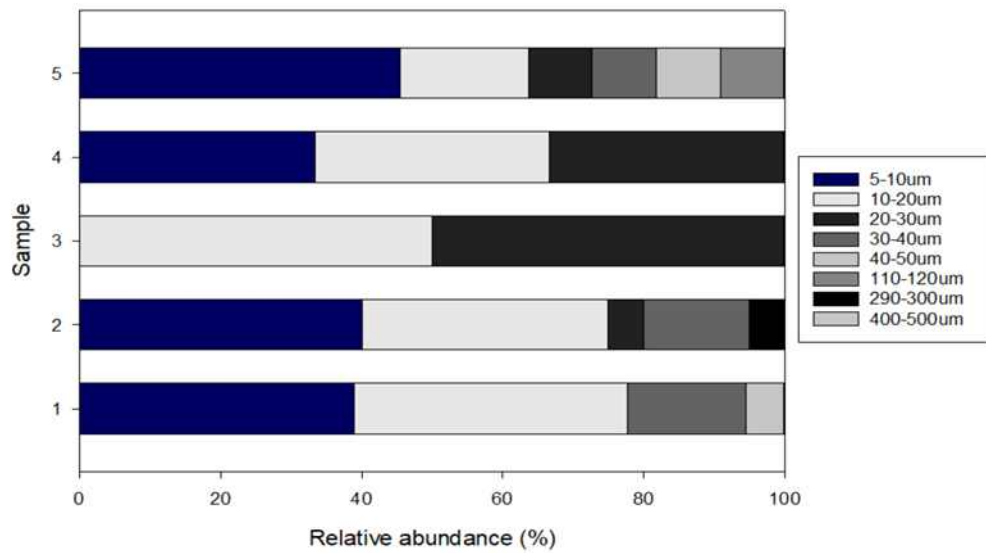
-5 μ m silicon filter 분석 결과

PM_{2.5} 임팩터로 포집한 여지를 전처리 한 후, 5 μ m 여지를 적용하여 분석 결과, MPs 입자 수는 평균 233 개/m³로 나타남. 입자 크기 분포를 살펴보면, 5-10 μ m 범위가 38%로 가장 높은 비율을 차지하였고, 10-20 μ m 범위 역시 34% 이상을 차지하여, 5-20 μ m 범위의 입자가 전체 MPs 분포의 대부분을 구성하는 것으로 확인되었음.

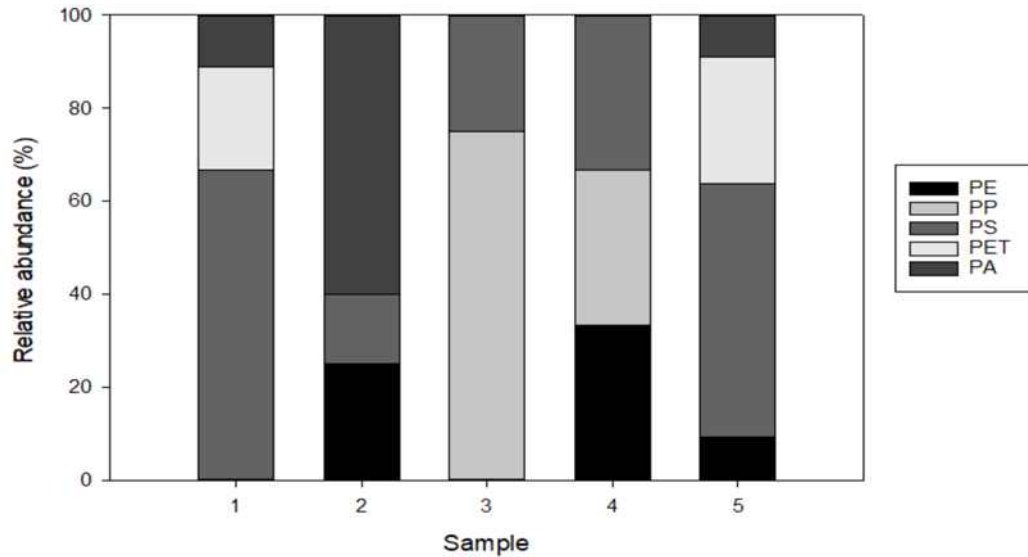
<표 43> MPs 농도 및 샘플링 기간 대기질

Date	6/10	6/11	6/12	6/13	6/16
Microplastics (개/m ³)	220.80	245.33	245.33	184.00	269.87
PM _{2.5} (ug/m ³)	17.00	24.00	31.00	36.00	32.00

- 이는 대기에서 장기간 부유가 가능한 초미세 플라스틱의 특성을 나타내었고, 50~200 μ m의 입자는 일자별 변동성이 커서 환경 조건 차이에 기인한 것으로 판단됨. 200 μ m 이상 입자는 일부 시료에서만 제한적으로 확인되었기 때문에 상대적으로 큰 입자(≥ 200 μ m)는 대기 중 체류 시간이 짧아 분석 대상에서 제외(cut-off)하더라도 전체 분포 해석에 미치는 영향이 제한적임을 나타냄
- 시료별 주요 폴리머의 상대적 비율 분석 결과, PE, PP, PS, PET, PA 등 다양한 플라스틱이 확인되었고, 그중 PE(폴리에틸렌)와 PP(폴리프로필렌)는 대부분의 시료에서 높은 비중을 차지하였음. 이는 비닐·포장재 등 생활 플라스틱의 전형적인 기원 특성과 일치함.
- PS(폴리스티렌)는 일부 시료에서 두드러지게 나타났는데, 건축 자재나 완충재 등 특정 배출원의 영향을 시사하였고, PET(폴리에틸렌테레프탈레이트) 및 PA(폴리아미드)는 섬유 또는 의류 소재에서 기원할 가능성이 높으며, 대기 중 섬유성 MPs의 존재를 뒷받침함.



MPs 입자 크기 범위



폴리머 조성 분포 (%)

<그림 56> 5 μm 여지 적용에 따른 MPs 분석 결과

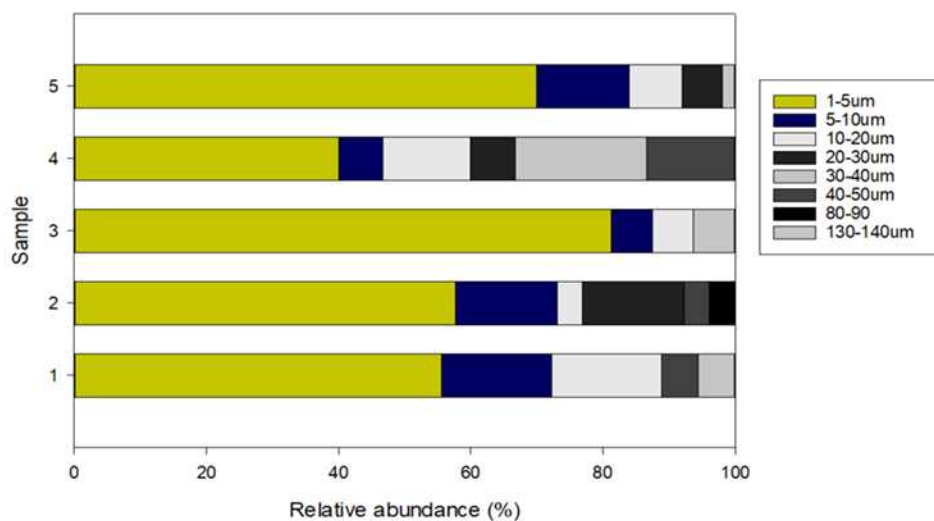
- 1 μm silicon filter 분석결과

PM_{2.5} 임팩터로 포집한 여지를 전처리 한 후, 1 μm 여지를 적용한 MPs 분석 결과, 평균 입자 수는 319 개/ m^3 로 나타났다. 입자 크기별 분석 결과, 전체 입자의 대부분이 1-5 μm 범위에 집중되어 전체의 약 64%를 차지하였으며, 5-10 μm 범위는 13%를 차지하는 것으로 확인되었음.

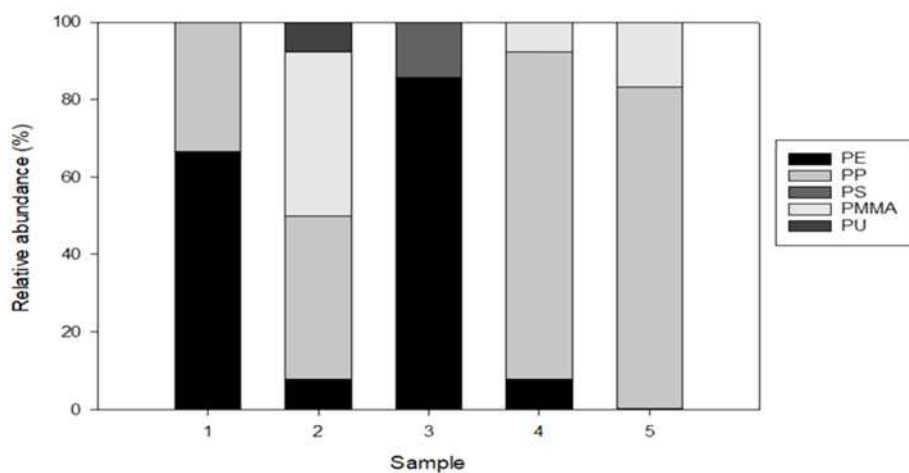
이와 같이 공극 크기가 작은 1 μm 여지를 적용한 경우, 5 μm 여지를 사용했을 때보다 포집된 MPs 입자 수가 유의하게 증가한 것을 확인할 수 있었음. 이는 1 μm 여지의 적용을 통해 기존 분석에서 제한되었던 미세한 크기의 MPs까지 분석 범위가 확장되었음을 의미함.

〈표 44〉 MPs 농도 및 샘플링 기간 대기질

Date	9/24	9/25	9/26	9/28	9/29
Microplastics (개/ m^3)	230.00	332.22	204.44	191.67	638.89
PM ₁₀ ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	13.00	17.00	28.00	15.00	27.00



MPs 입자 크기 범위



폴리머 조성 분포 (%)

〈그림 57〉 1 μm 여지 적용에 따른 MPs 분석 결과

- 1 μm 실리콘 여지를 적용하여 분석한 MPs의 폴리머 조성 분포를 나타내었다. 분석 결과, 시료별로 폴리머 조성 비율에 차이는 존재하였으나, 전반적으로 PE, PP, PS, PMMA, PU 등 다양한 합성 폴리머가 검출되어 대기 중 MPs의 조성 다양성이 확인되었다.
- Sample 1과 Sample 3에서는 PE의 상대적 비중이 높게 나타나는 경향을 보였으며, 특히 Sample 3에서는 전체 MPs 중 대부분이 PE로 구성된 것으로 나타남. 이는 포장재, 비닐류 등에서 기원한 PE 기반 MPs이 대기 중에서 풍화 및 분해 과정을 거쳐 1-5 μm 범위의 미세 입자 형태로 존재할 가능성이 높음을 시사함.
- Sample 2에서는 PP와 PS의 복합적인 조성 분포가 관찰되었으며, 이는 생활계 플라스틱 제품 및 산업활동에서 발생한 파편형 MPs이 다양한 크기로 존재함을 반영하는 결과로 판단됨. 특히 1 μm 여지를 적용함으로써, 기존 5 μm 여지에서는 포집이 제한되었을 가능성이 있는 소형 파편 및 초미세 입자군이 조성 분석에 포함된 것으로 판단됨.
- Sample 4와 Sample 5에서는 PMMA 및 PU의 비중이 상대적으로 높게 나타나는 경향을 보였음. PMMA와 PU는 건축 자재, 도료, 접착제, 코팅재 등에서 기원하는 경우가 많으며, 물리적 마찰 및 노후화 과정에서 수 μm 수준의 미세 입자로 발생할 가능성이 높음. 이러한 특성은 1 μm 실리콘 여지가 해당 폴리머 기반의 초미세 입자를 효과적으로 포집했음을 시사함.
- 종합적으로, 1 μm 실리콘 여지를 이용한 분석은 PE·PP와 같은 범용 플라스틱뿐만 아니라 PMMA, PU 등 비전통적 폴리머 성분까지 확인할 수 있는 장점을 가지며, 이는 대기 중 MPs의 조성 및 기원을 보다 정밀하게 평가하는 데 유효한 방법임을 보여줌.

② 안산 산업단지 입자크기 (2.5 μm , 10 μm 입자)

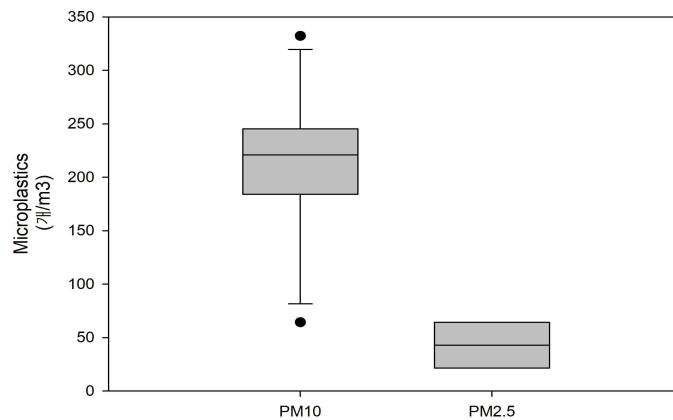
- 1 μm silicon filter 적용 분석결과

2.5 μm 와 10 μm 이하 입자를 포집한 여지를 전처리 한 후, 1 μm filter를 적용하여 분석한 결과, MPs 개수는 2.5 μm 조건에서 각각 64개/ m^3 와 21개/ m^3 로 확인됨. 10 μm 조건에서는 각각 150개/ m^3 와 64개/ m^3 가 검출됨. 전체적으로 10 μm 이하 조건에서 MPs 개수가 2.5 μm

조건보다 높게 나타났으며, 이는 2.5-10 μm 범위의 거친(coarse) 입자 영역에 미세플라스틱이 상대적으로 많이 분포하고 있을 가능성을 나타냄. 따라서 향후에는 입자를 단계적으로 여과하여 크기 구획별 분포 및 특성을 정밀 분석하는 추가 연구가 필요할 것으로 사료됨.

<표 45> 조건 별 MP 측정 결과 (1)

Time (day)	PM _{2.5} ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	PM ₁₀ ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Microplastics (개/ m^3)	
			2.5 μm	10 μm
5/28	24	44	64	150
5/29	25	40	21	64



<그림 58> PM₁₀과 PM_{2.5} 농도에 따른 MPs 개수

○ 대기 중 MPs 현장 시료 분석 결과 열분해법

1) MPs 입자 크기별(2.5 μ m, 10 μ m) 현장 적용성 평가 (1차)

① 안산 입자크기 (2.5 μ m)

- 앞서 실험을 통해 파악한 내용을 바탕으로 대기 중 MPs 분석을 위한 최적 전처리 방법을 적용하여 열분해를 진행하였음.
- 전처리 완료된 STS 1 μ m 필터 (21 $\varnothing$) 표면을 현미경으로 관찰하였을 때 아래와 같음.
- (전처리 완료된 시료 열분석 진행을 위해, Py-GC/MS(Pyrolyzer: EGA/PY-3030D (Frontier Lab), GC/MS: 8890/5977 (Agilent Technology)를 적용하여 열분해를 진행하였음.
- 11종류의 폴리머(PMMA, Nylon-6,6, PP, PET, PVC, Nylon-6, SBR, PE, ABS, PC, PS)에 대하여 Calibration Curve를 작성하였음.
- 검량선은 4개 농도 구간으로 구성하였으며, 11종 고분자가 혼합된 고상 표준물질을 이용하였음. 각 폴리머의 목표 분취량을 산정한 후 초미량 저울을 사용하여 정밀 계량함으로써 표준시료를 조제하였음.



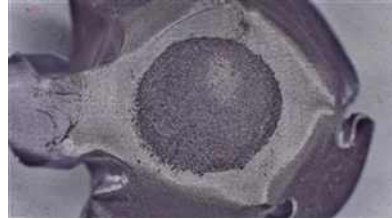
<25/05/24>



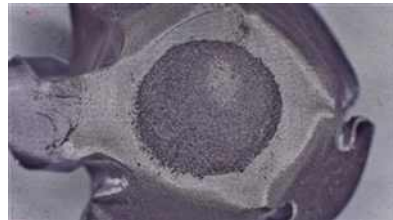
<25/05/25>



<25/05/26>



<25/05/27>



<25/05/28>



<25/05/29>

<그림 59> MPs 입자 크기별 현장 적용성 평가
안산 입자크기 (2.5 μm) 열분해 전처리 완료 STS 1 μm 필터 (21 ϕ) 현미경
관찰 결과

- 5월 24일 ~ 5월 29일 6일간 안산에서 포집한 입자크기 (2.5 μm) 사각 STS 필터를 전처리 과정을 거쳐 Py-GC/MS 열분해법으로 분석한 결과인데, 여기서 ‘-’ 는 피크가 검출되지 않은 경우이고, N/D는 MDL 이하 값임.

<표 46> MPs 입자 크기별 현장 적용성 평가 (안산 입자크기 (2.5 μm)) 열분석 후 각 폴리머 별 정량 결과

(unit: μg)

No.	Polymer	PMMA	N-6,6	PP	PVC	SBR	PE	ABS	PS	PET	N-6	PC
1	5/24	0.833	0.921	ND	6.023	3.347	ND	ND	0.418	ND	ND	-
2	5/25	0.853	1.562	3.072	11.336	7.534	ND	ND	0.205	ND	ND	-
3	5/26	1.404	2.649	3.064	16.700	23.222	ND	ND	1.187	ND	ND	-
4	5/27	1.124	1.511	5.189	8.955	3.893	ND	ND	0.918	ND	ND	-
5	5/28	1.056	2.642	3.236	13.400	12.336	ND	ND	0.666	ND	ND	-
6	5/29	1.073	1.653	3.170	16.998	12.786	ND	ND	1.444	2.662	ND	-

- 하단 테이블은 μg 단위로 정량된 폴리머 성분에 희석 배수 91.7% (440 ml / 480 ml)와 고용량 시료 포집기 채취 용량 1,000 L/min (23시간)인 총 1,380 m^3 을 고려하여 ng/m^3 농도로 환산하였음.
- PMMA, N-6,6, PVC, SBR 그리고 PS는 상시 검출되는 경향이 있고, PP, PET는 특정 일자는 MDL 이하로 검출되었음. 주로 PVC 혹은 SBR이 폴리머 성분 중 높은 비율을 띄고 있는 것을 파악하였음.

<표 47> MPs 입자 크기별 현장 적용성 평가 (안산 입자크기 (2.5 μm)) 열분석 후 각 폴리머 별 농도 환산

(unit: ng/m^3)

No.	Polymer	PMMA	N66	PP	PVC	SBR	PE	ABS	PS	PET	N6	PC
1	5/24	0.659	0.728	ND	4.761	2.646	ND	ND	0.330	ND	ND	-
2	5/25	0.674	1.235	2.429	8.961	5.956	ND	ND	0.162	ND	ND	-
3	5/26	1.109	2.094	2.422	13.202	18.358	ND	ND	0.939	ND	ND	-
4	5/27	0.888	1.194	4.102	7.079	3.078	ND	ND	0.726	ND	ND	-
5	5/28	0.919	2.297	2.814	11.652	10.727	ND	ND	0.579	ND	ND	-
6	5/29	0.933	1.438	2.757	14.781	11.118	ND	ND	1.255	2.314	ND	-

② 안산 입자크기 (10 μm)

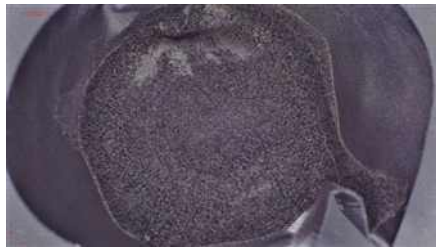
- 전처리 완료된 STS 1 μm 필터 (21 $\varnothing$) 표면을 현미경으로 관찰하였을 때 아래와 같음.



<25/05/24>



<25/05/25>



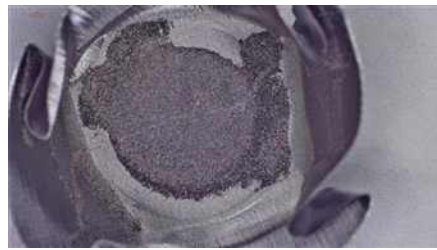
<25/05/26>



<25/05/27>



<25/05/28>



<25/05/29>

<그림 60> MPs 입자 크기별 현장 적용성 평가

안산 입자크기 (10 μm) 열분해 전처리 완료 STS 1 μm 필터 (21 ϕ) 현미경 관찰 결과

- 5월 24일 ~ 5월 29일 6일간 안산에서 포집한 입자크기 (10 μm) 사각 STS 필터를 전처리 과정을 거쳐 Py-GC/MS 열분해법으로 분석한 결과인데, 여기서 ‘-’ 는 피크가 검출되지 않은 경우이고, N/D는 LOD 이하 값임.

<표 48> MPs 입자 크기별 현장 적용성 평가 (안산 입자크기 (10 μm)) 열분석 후 각 폴리머 별 정량 결과

(unit: μg)

No.	Polymer	PMMA	N-6,6	PP	PVC	SBR	PE	ABS	PS	PET	N-6	PC
1	5/24	0.984	1.117	ND	10.570	3.353	ND	ND	0.518	ND	ND	-
2	5/25	0.810	1.586	2.708	12.157	11.538	ND	ND	0.530	0.820	ND	-
3	5/26	1.855	3.429	3.402	34.826	17.441	ND	ND	1.431	1.603	ND	ND
4	5/27	0.921	0.753	2.949	7.964	5.147	ND	ND	0.396	ND	ND	-
5	5/28	1.104	1.632	2.897	10.666	18.493	ND	ND	0.147	ND	ND	-
6	5/29	0.860	0.880	2.854	9.559	9.010	ND	ND	0.658	ND	ND	-

- μg 단위로 정량된 폴리머 성분에 희석 배수 91.7% (440 ml / 480 ml)와 고용량 시료 포집기 채취 용량 1,000 L/min (23시간)인 총 1,380 m^3 을 고려하여 ng/m^3 농도로 환산하였음.
- $\text{PM}_{2.5}$ 시료와 마찬가지로 PMMA, N-6,6, PVC, SBR 그리고 PS는 상시 검출되는 경향이 있고, PP, PET는 특정 일자는 MDL 이하로 검출되었음. 주로 PVC 혹은 SBR이 폴리머 성분 중 높은 비율을 띄고 있어, 동일한 경향을 보이고 있음을 확인하였음.
- 입자크기 (10 μm) 및 입자크기 (2.5 μm) 시료 모두에서 입자 크기에 따른 폴리머 조성 차이 관찰

<표 49> MPs 입자 크기별 현장 적용성 평가 (안산 입자크기 (10 μm)) 열분석 후 각 폴리머 별 농도 환산

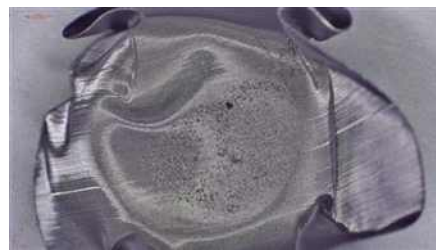
(unit: ng/m^3)

No.	Polymer	PMMA	N-6,6	PP	PVC	SBR	PE	ABS	PS	PET	N-6	PC
1	5/24	0.778	0.883	ND	8.356	2.651	ND	ND	0.409	ND	ND	-
2	5/25	0.640	1.254	2.141	9.610	9.121	ND	ND	0.419	0.648	ND	-
3	5/26	1.467	2.711	2.689	27.530	13.787	ND	ND	1.131	1.267	ND	ND
4	5/27	0.728	0.595	2.331	6.295	4.069	ND	ND	0.313	ND	ND	-
5	5/28	0.960	1.419	2.519	9.274	16.081	ND	ND	0.127	ND	ND	-
6	5/29	0.748	0.765	2.481	8.312	7.835	ND	ND	0.572	ND	ND	-

2) MPs 입자 크기별(10 μm) 현장 적용성 평가 (2차)

① 과천 입자크기 (10 μm) (1차)

- 전처리 완료된 STS 1 μm 필터 (21 $\varnothing$) 표면을 현미경으로 관찰하였을 때 아래와 같음.



<25/09/24> HV-11



<25/09/25> HV-12



<25/09/26> HV-13



<25/09/28> HV-14



<25/09/29> HV-15



<25/09/30> HV-16

<그림 61> MPs 입자 크기별(PM₁₀) 현장 적용성 평가
과천 PM₁₀ (1차) STS 1 μm 필터 (21 Ø) 현미경 관찰 결과

- 하단 테이블은 9월 24일 ~ 9월 30일 총 6일간 과천에서 포집한 입자크기 (10 μm) 사각 STS 필터를 전처리 과정을 거쳐 Py-GC/MS 열분해법으로 분석한 결과인데, 여기서 ‘-’ 는 피크가 검출되지 않은 경우이고, N/D는 MDL 이하 값임.

<표 50> MPs 입자 크기별 현장 적용성 평가 (과천 입자크기 (10 μm)) 열분석 후 각 폴리머 별 정량 결과

(unit: μg)												
No.	Polymer	PMMA	N-6,6	PP	PVC	SBR	PE	ABS	PS	PET	N-6	PC
1	9/24	0.704	0.468	2.833	2.179	N/D	N/D	N/D	-	N/D	N/D	N/D
2	9/25	0.896	0.799	2.977	4.561	3.500	N/D	N/D	-	N/D	N/D	-
3	9/26	0.854	0.937	3.265	4.773	7.698	N/D	N/D	0.097	N/D	N/D	-
4	9/28	0.782	0.450	2.815	4.976	3.728	N/D	N/D	0.828	N/D	N/D	N/D
5	9/29	0.879	0.686	2.929	6.166	6.684	N/D	N/D	0.192	N/D	N/D	N/D
6	9/30	1.139	1.678	3.792	8.097	12.342	N/D	N/D	1.118	N/D	N/D	-

- 앞서 μg 단위로 정량된 폴리머 성분을 희석 배수 90.0% (900 ml/ 1,000 ml)와 고용량 시료 포집기 채취 용량 1,000 L/min (23시간)인 총 1,380 m³을 고려하여 ng/m³ 농도로 환산하였음.

- (Mizuguchi et al., 2023)에 의하면 입자크기 (2.5 μm) 구간에서 대기 중 MPs 농도는 폴리머 종류에 따라 서로 다른 범위를 보이는데, PP가 약 0.8~3.5 ng/m^3 , PS가 0.25~0.76 ng/m^3 그리고 SBR은 대부분 <MDL 수준으로 보고되었음.
- 본 실험은 입자크기 (10 μm) 시료를 포집하여 분석을 진행하였고, 입자크기 (2.5 μm)를 대상으로 한 (Mizuguchi et al., 2023)와 비교하면 PS는 대체로 유사하고, PP 및 SBR는 상대적으로 높은 경향을 보임.

<표 51> MPs 입자 크기별 현장 적용성 평가 (과천 입자크기 (10 μm)) 열분석 후 각 폴리머 별 농도 환산

(unit: ng/m^3)

No.	Polymer	PMMA	N-6,6	PP	PVC	SBR	PE	ABS	PS	PET	N-6	PC
1	9/24	0.567	0.377	2.281	1.754	N/D	N/D	N/D	-	N/D	N/D	N/D
2	9/25	0.721	0.644	2.397	3.672	2.818	N/D	N/D	-	N/D	N/D	-
3	9/26	0.688	0.754	2.629	3.843	6.198	N/D	N/D	0.078	N/D	N/D	-
4	9/28	0.630	0.363	2.267	4.007	3.001	N/D	N/D	0.666	N/D	N/D	N/D
5	9/29	0.708	0.552	2.358	4.964	5.382	N/D	N/D	0.155	N/D	N/D	N/D
6	9/30	0.917	1.351	3.053	6.519	9.937	N/D	N/D	0.900	N/D	N/D	-

② 과천 입자크기 (10 μm) (2차)

- 실험은 (1차)와 동일한 방법으로 수행하였으나, Fenton 산화 후 24시간 이상 방치 후 STS 1 μm 필터 (21 ϕ)에 여과를 진행하였다는 차이가 있음. 이로 인한 실험 결과의 차이가 있는 것으로 추측됨. 추후 산화 후 시간에 대한 영향을 파악하는 추가적인 실험을 필요로 함.
- 또한 증류수의 의한 영향을 파악하기 위해 바탕 실험(Blank)를 수행하였고, 실험 과정에서 영향을 파악하기 위한 방법 바탕 실험(Method Blank)를 같이 진행하였음. 전처리 완료된 STS 1 μm 필터 (21 ϕ) 표면을 현미경으로 관찰하였을 때 아래와 같음.



Blank



Method Blank



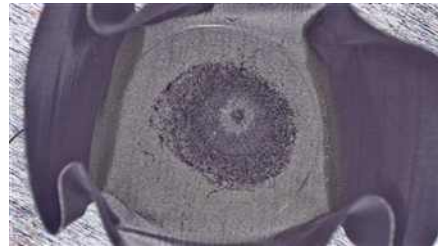
<25/09/24> HV-21



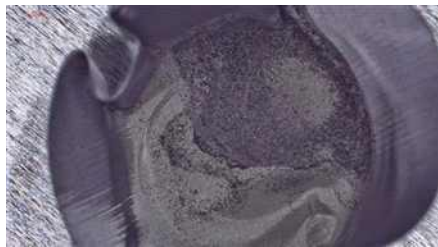
<25/09/25> HV-22



<25/09/26> HV-23



<25/09/28> HV-24



<25/09/29> HV-25



<25/09/30> HV-26

<그림 62> MPs 입자크기 (10 μm) 현장 적용성 평가
과천 입자크기 (10 μm) (2차) STS 1 μm 필터 (21 ϕ) 현미경 관찰 결과

<표 52> MPs 입자 크기별 현장 적용성 평가 (과천 입자크기 (10 μm) 열분석 (2차) 후 각 폴리머 별 정량 결과

(unit: μg)

No.	Polymer	PMMA	N-6,6	PP	PVC	SBR	PE	ABS	PS	PET	N-6	PC
1	9/24	-	1.509	-	0.715	ND	ND	ND	-	ND	ND	ND
2	9/25	0.495	1.990	-	7.791	ND	ND	ND	-	ND	ND	-
3	9/26	-	2.345	0.246	8.928	ND	ND	ND	-	ND	ND	ND
4	9/28	-	1.717	7.344	2.907	ND	ND	ND	-	ND	ND	-
5	9/29	0.541	1.472	1.787	12.807	ND	ND	ND	-	ND	ND	ND
6	9/30	0.147	2.387	4.356	9.439	ND	ND	ND	-	ND	ND	ND

- Blank와 방법 바탕 시료는 모두 검출되지 않았음.

- 하단 테이블은 μg 단위로 정량된 폴리머 성분을 희석 배수 100% (전량 사용)와 고용량 시료 포집기 채취 용량 1,000 L/min (23시간)인 총 1,380 m^3 을 고려하여 ng/m^3 농도로 환산하였음.

<표 53> MPs 입자 크기별 현장 적용성 평가 (과천 입자크기 (10 μm) 열분석 (2차) 후 각 폴리머 별 농도 환산

(unit: ng/m^3)

No.	Polymer	PMMA	N-6,6	PP	PVC	SBR	PE	ABS	PS	PET	N-6	PC
1	9/24	-	1.093	-	0.518	ND	ND	ND	-	ND	ND	ND
2	9/25	0.358	1.442	-	5.646	ND	ND	ND	-	ND	ND	-
3	9/26	-	1.699	0.178	6.470	ND	ND	ND	-	ND	ND	ND
4	9/28	-	1.244	5.321	2.107	ND	ND	ND	-	ND	ND	-
5	9/29	0.392	1.066	1.295	9.280	ND	ND	ND	-	ND	ND	ND
6	9/30	0.107	1.729	3.157	6.840	ND	ND	ND	-	ND	ND	ND

- 과천 입자크기 (10 μm) 열분석 (1차) 실험 시 Fenton 산화 후 즉시 여과를 진행하였고, (2차) 실험 시 Fenton 산화 후 24시간 방치 후 여과를 진행하였는데, 이로 인해 폴리머 성분(SBR, PS) 성분 검출 여부 차이 발생한 것으로 파악됨. 추후 Fenton 산화 후 여과 시점에 대한 손실 및 재침전에 대한 영향 추가 검증이 필요할 것으로 판단됨.
- 대기 중 MPs 열분석 결과 발견되는 주요 폴리머 성분은 PS, SBR, PMMA, N-66, PP, PVC 임
- 일부 폴리머(PE 등)는 본 분석 조건에서 검출되지 않았으며, 이는 환경 중 부재보다는 표준물질 농도 설정 및 열분해 특성에 따른 정량 한계의 영향으로 해석됨.

4-3-3. 환경대기 중 MPs 구성성분 파악 및 주요물질 스펙트럼 도출

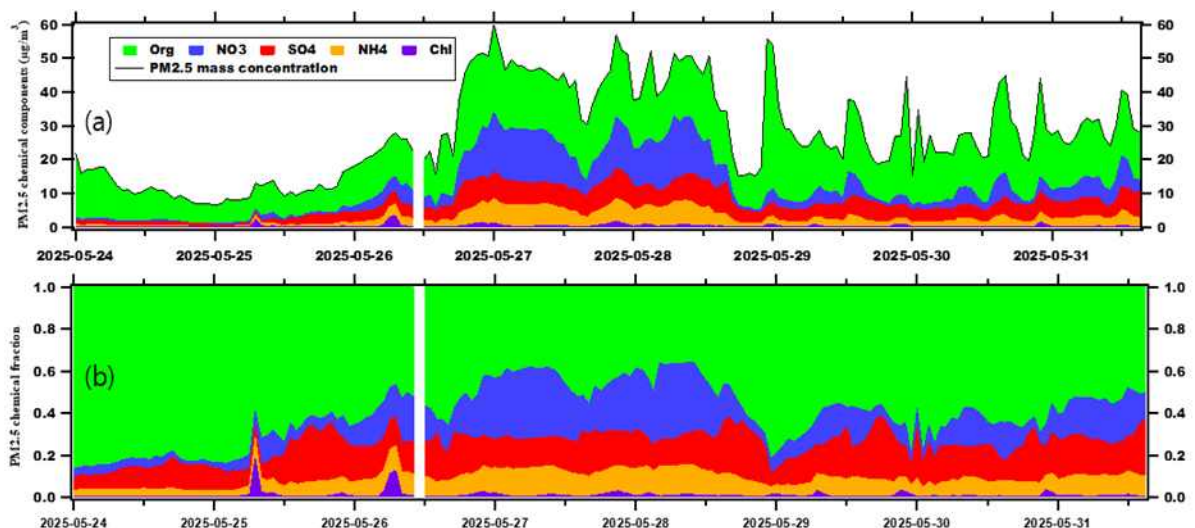
○ PM_{2.5} 유기 성분과 MPs

1) PM_{2.5} 화학성분

- PM_{2.5}의 평균 농도는 27.56 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이었고, 유기 성분이 전체 질량의 약 55%를 차지하여 가장 지배적인 화학성분으로 나타남. 안산 지역이 산업단지 영향권에 위치한 특성을 반영하며, 1차 유기 에어로졸과 광화학적 2차 유기 에어로졸의 복합적인 기여를 시사함.
- PM_{2.5} 유기 성분 형태로 존재할 수 있는 MPs와 같은 고분자 유기물질에 대한 기여율을 파악하기 위한 추가 분석의 필요성을 뒷받침함.

<표 54> HR-ToF-AMS를 이용한 PM_{2.5} 화학 성분 분포 통계자료 (2025년 5월 24일 ~ 5월 31일)

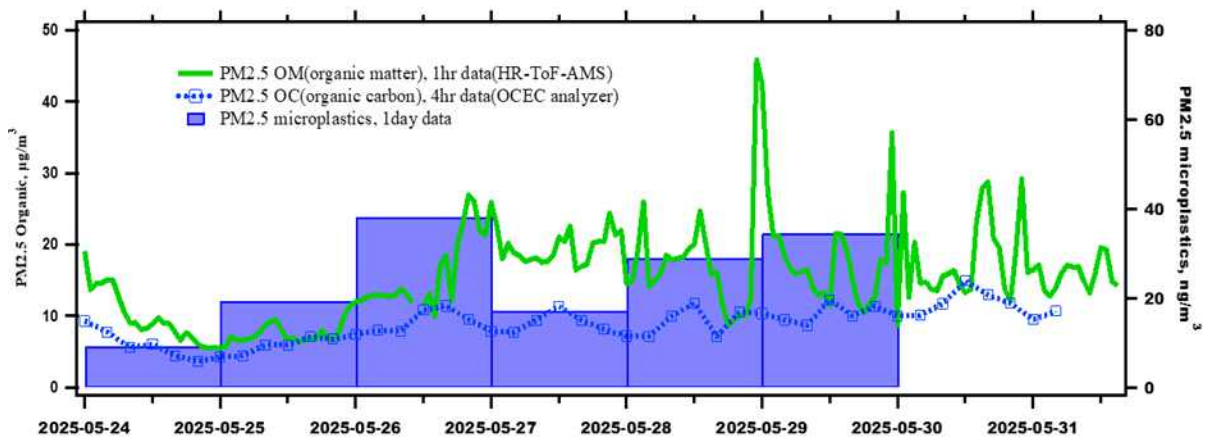
Statistics	PM _{2.5}	Organic	Nitrate	Sulfate	Ammonium	Chloride
Mean	27.56	15.24	5.03	4.36	2.59	0.33
S.D.	14.00	6.47	5.05	2.31	2.01	0.48
S.E.	1.03	0.48	0.37	0.17	0.15	0.04
Median	25.96	14.69	3.32	3.98	2.02	0.19
95th	45.63	20.68	12.06	7.06	5.46	0.66
5th	8.49	6.62	0.36	0.83	0.28	0.02



<그림 63> PM_{2.5} 화학성분 시계열 분포 - (a) 시계열 농도, (b) 구성비

2) PM_{2.5} 중 유기 성분(OM, OC)과 MPs 분포 특성

- 2025년 5월 24일부터 5월 31일까지 안산(경기권대기환경연구소)에서 HR-ToF-AMS, OCEC 분석기 및 PM_{2.5} 필터 시료 기반 MPs 분석을 병행하여, PM_{2.5} 유기 성분과 MPs 성분의 분포 특성을 비교·검토함.
- 유기 성분의 시간 변동성을 살펴보면, HR-ToF-AMS로 측정된 OM은 5분 시간해상도에 서 비교적 큰 단기 변동성을 보였으며, 특정 시점에서는 급격한 증가 양상이 관측되었다. 이러한 단기 피크는 국지적 배출원 영향 또는 광화학적 2차 유기 에어로졸 생성에 민감하게 반응한 결과로 해석될 수 있음.
- 한편, 동일기간 동안 석영 필터를 이용한 OCEC 분석 결과에서 도출된 유기탄소(organic carbon, OC)는 OM과 전반적으로 유사한 증감 경향을 보였으나, 필터 기반 평균값의 특성상 상대적으로 완만한 시간 변동성을 나타냄. 이는 OM과 OC가 모두 PM_{2.5} 내 유기물질의 질량적 변동을 반영하되, 분석 방법 및 시간해상도의 차이에 따라 변동 폭이 다르게 표현됨을 의미함.

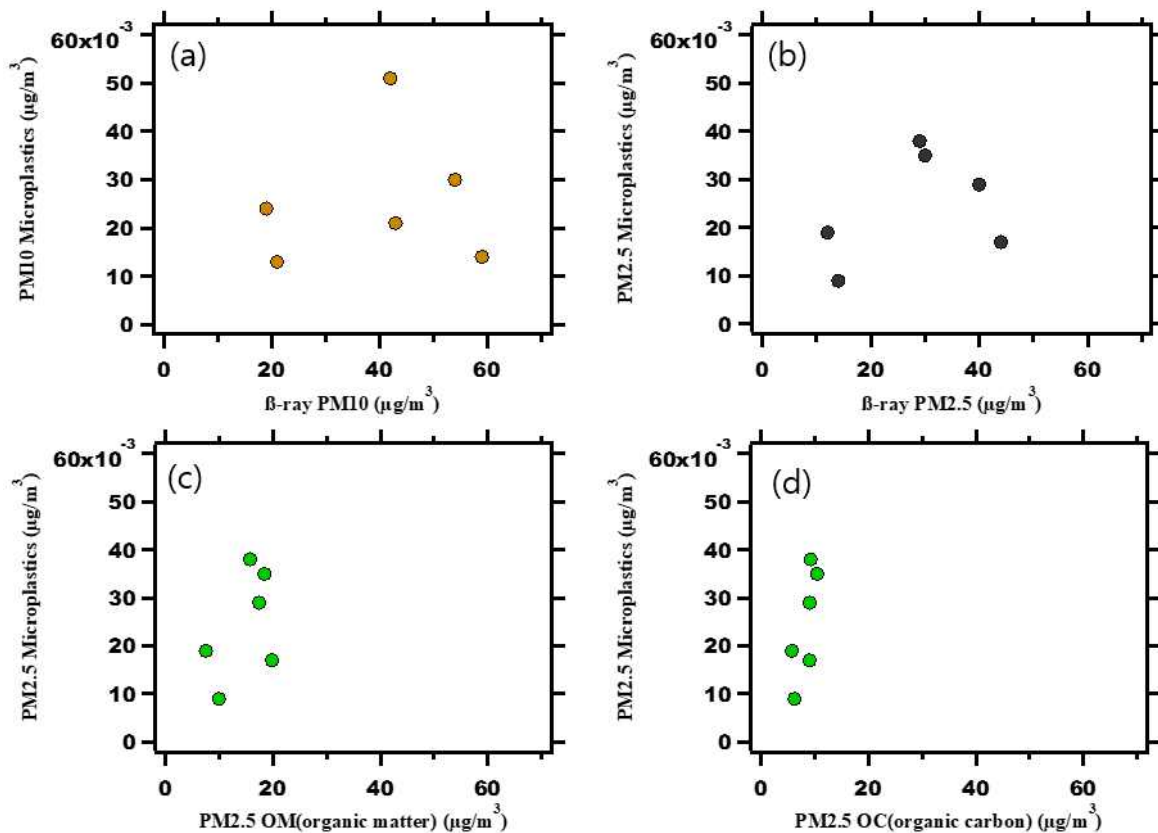


〈그림 64〉 PM_{2.5} 유기 성분(OM, OC)과 MPs 분포

- PM_{2.5} 필터 시료를 대상으로 수행된 MPs 분석 결과를 OM 및 OC 시계열과 비교한 결과, MPs 농도가 상대적으로 높게 나타난 구간에서는 OM과 OC의 평균 수준 또한 전반적으로 높게 유지되는 경향이 관측됨.
- 반대로 MPs 농도가 낮은 구간에서는 유기 성분의 평균 농도 역시 낮은 수준을 보임. 이러한 결과는 MPs가 PM_{2.5} 유기 성분 분포와 완전히 독립적으로 존재하기보다는, 유기물질이 우세한 조건에서 함께 관측되는 경향이 있음을 시사함. 다만, OM에서

관측되는 단기적인 급격한 증가가 항상 MPs 농도의 증가로 이어지지 않는 것이며, 이는 두 성분 간의 생성 메커니즘과 시간적 응답 특성이 상이함을 반영함.

- PM_{2.5} 필터 시료에서 분석된 MPs 농도는 약 9-38 ng/m³ 수준으로 나타났으며, 이는 PM_{2.5} 질량 대비 약 0.04-0.16%의 미량 성분에 해당함. 절대적인 질량 기여도는 매우 낮았으나, PM_{2.5}, PM₁₀, OM 및 OC 농도와의 산점도 분석 결과, MPs 농도는 PM 질량 및 유기 성분 수준이 상대적으로 높은 구간에서 함께 증가하는 경향을 보임. 특히 PM_{2.5} 및 OM, OC와의 비교에서 MPs은 완전히 독립적인 분포를 보이기보다는, 유기 성분이 우세한 조건에서 동시에 관측되는 특성을 나타냄.



〈그림 65〉 PM 및 유기 성분과 MPs과 산포도 - (a) PM₁₀

- OM과 OC는 기체 전구물질의 산화 반응, 1차 배출, 반휘발성 유기물의 기상- 분배 등 다양한 화학적 · 물리적 과정에 의해 빠르게 변동하는 반면, MPs은 고체 고분자 물질로서 마모, 재비산, 기계적 발생 등 상대적으로 누적적이고 평균적인 특성이 있음. 따라서 본 연구에서 관측된 OM/OC와 MPs 간의 관계는 정량적 상관관계라기보다는, 서로 다른 시간 스케일에서 나타나는 동시적 변동(co-variation)으로 해석하는 것이

타당함.

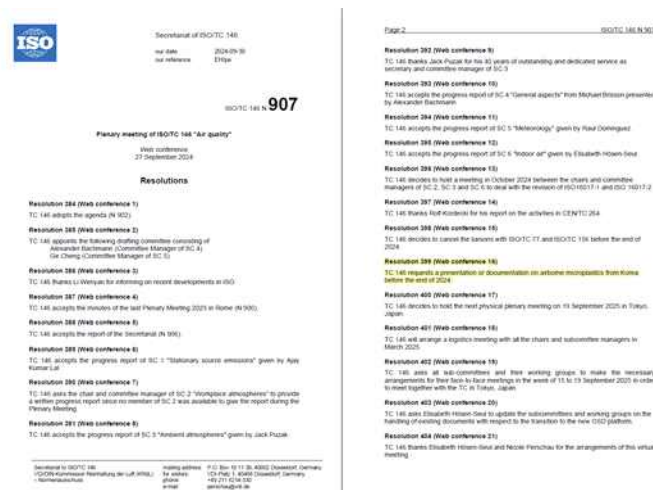
- 하지만, 본 비교 분석에는 몇 가지 한계점이 존재함. HR-ToF-AMS 기반 OM 자료는 고시간해상도(5분), OCEC 기반 OC는 필터 평균, MPs은 일 평균 자료로서 시간해상도가 상이함. HR-ToF-AMS와 OCEC 분석은 총 유기물질의 질량 특성을 제공할 뿐, 폴리머 특이적인 정보를 직접적으로 제공하지 않음.
- 본 연구 결과는 PM_{2.5} 유기 성분이 지배적인 조건에서 MPs이 유기물 분포 맥락 내에서 함께 관측될 수 있음을 보여주며, MPs을 PM_{2.5} 유기 성분의 ‘특정 하위 집단’으로 개념화할 수 있는 가능성을 제시함.
- 이러한 탐색적 결과는 향후 MPs의 시간해상도를 개선한 연속 관측과 유기 성분의 기원 분석을 결합함으로써, PM_{2.5} 유기물질 구성 내에서 MPs의 역할과 환경적 의미를 보다 정량적으로 규명할 필요성을 시사함.
- 향후에는 장기간 연속 관측을 통해 자료 수를 확대하고, MPs 분석의 시간해상도를 개선함으로써, PM_{2.5} 유기 성분과 MPs의 발생·수송 특성을 보다 정량적으로 규명할 필요가 있음. 이러한 접근은 대기 중 MPs의 환경적 의미와 PM_{2.5} 유기물질 구성 내 역할을 보다 체계적으로 이해하는 데 기여할 것으로 판단됨.

4-4 대기 중 미세플라스틱 분석법 국제표준화 연구 수행 결과

○ 국제표준 대기분야(ISO/TC146) NP 제안 진행 현황

○ 24. 9. 27일 ISO/TC146 총회가 온라인 회의를 통해 시행되었으며, 결의문 399(Resolution 298)에 대기 중 미세플라스틱 표준화 제안 필요성을 개진하였음.

○ 결정문 채택 이후, 11월 및 12월에 개최된 전문위원회에서 기고 내용에 대한 검토가 진행되었음. 해당 검토 의견을 반영하여 발표 자료를 보완하고, ISO 제출 규격에 맞춘 기고문 형식의 문서를 작성하여 2024년 12월에 ISO/TC 146 위원회에 제출하였음.



<그림 66> ISO/TC 146 총회 결과 (24. 9. 27)

○ 2025년 국제표준 대기분야(ISO/TC146) 총회 결과

- 환경분야 ISO 제·개정의 국제적 합의 과정 참여 및 기술의 국제표준화 기반 구축을 위하여 한국 대표단 자격으로 ISO 총회에 참가함.
- 일정 및 장소: 2025년 9월 15일 ~ 9월 19일, 일본 도쿄(Koto City).
- ISO/TC 146 SC3 Planery Meeting 참석 및 미세플라스틱 NP 제안발표 수행, 미세플라스틱의 공기 중 존재와 측정 방법에 대한 새로운 작업 항목 제안이 논의되었고, 한국 대표단은 미세 플라스틱의 표준화된 측정 방법 개발의 필요성을 강조함.
- 공기 중 미세플라스틱 분석 방법에 대한 새로운 작업 항목이 논의되었음. 미세플라스틱은 일반적으로 5mm 미만의 크기로 정의되며, 최근 연구에 따르면 공기를 통해 장거리 또는 중거리로 운반될 수 있다고 보고되었음. 그러나 현재까지는 이러한 이동이 장거

리로 가능한지 확실하지 않으며, 이를 정량화하기 위한 표준화된 방법론이 필요하다고 강조하였음.

- 공기 중 미세플라스틱을 정량화하기 위한 통일된 방법론이 필요하며, 이를 통해 미세플라스틱의 이동 경로를 추적할 수 있을 것임. 현재 다양한 기술을 사용하여 미세플라스틱을 분석하고 있음. 특히 입자의 크기와 형태에 대한 관심이 큰 만큼 연구자들은 미세플라스틱의 크기와 형태를 측정하기 위해 주로 현미경과 분광기를 사용하고 있음. 최종적으로, 새로운 표준을 제정을 위한 미세플라스틱 수집 및 분석 전략을 제공하기 위해 KATS (한국측 대표단)가 발표를 수행함.

○ 대기 중 MPs 신규 작업반(WG) 신설 및 한국 컨비너 수임

- 신규 WG 신설 승인 (Resolution 2025-09): ISO/TC 146/SC 3는 '대기 중 미세플라스틱 측정(Measurement of microplastics in air)'을 위한 새로운 작업반(New Working Group)의 활성화에 동의하였음.
- 한국 컨비너 선임: SC3/4(대기환경) 분과회의 신설된 WG의 컨비너(Convenor)로 김현욱 교수(서울시립대학교)가 TC146(대기분야) 위원회 전문가로 선임되었음. 한국이 제안한 신규 작업 항목(NWIP)인 “Method for Analyzing Microplastics in Air“ 발표를 통해 국제 표준화 논의를 주도할 수 있는 기반을 마련
- 국제 네트워크 강화: 총회 기간 중 미국, 독일, 네덜란드 등 주요국 전문가들과의 면담을 통해 미세플라스틱 분석법에 대한 공감대 형성 및 협력 네트워크를 구축함.

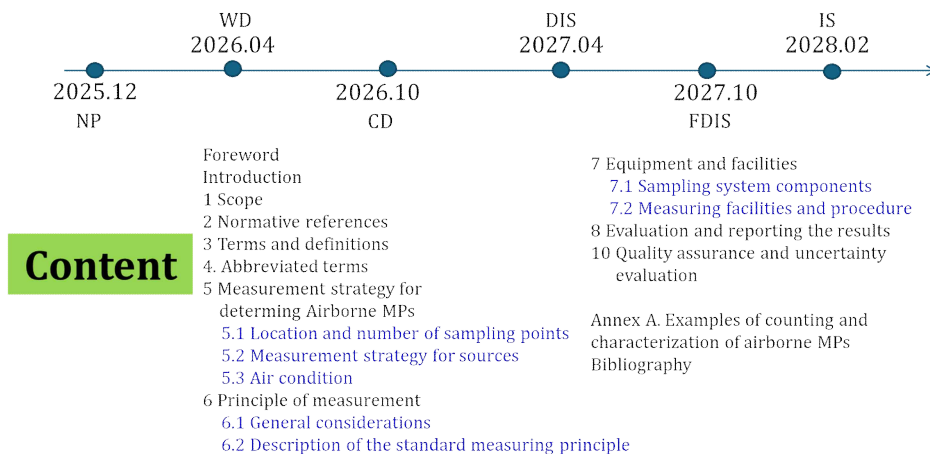


<그림 67> TC146 총회 사진

○ 대기 중 MPs 신규 표준안 제안(NP) 내용

- 표준화의 필요성 및 배경 : 플라스틱의 폭발적 사용으로 인해 미세플라스틱(MPs)은 토양과 수질을 넘어 대기 중에서도 광범위하게 발견되고 있으며, 이는 장거리 이동과 호흡기 흡입을 통해 인체 건강에 심각한 위협이 되고 있음.
- 현재 수질 분야에서는 ISO 국제 표준화가 진행 중이나, 대기 분야에서는 통일된 분석법이 없어 연구 데이터 간 비교가 어려운 실정임.
- 따라서 대기 중 MPs의 양과 크기, 성분을 정확히 파악하고 체계적인 대응책을 마련하기 위해 ISO/TC146 차원의 국제 표준(IS) 제정이 시급함을 강조함.
- 제안서에서는 고용량/저용량 시료 채취기(Metal filter 장착)와 현미경 분광 분석기를 결합한 표준 분석 방법의 개발을 제안하였음.

“General Guidelines for Management of Airborne Microplastics”



<그림 68> 대기 중 MPs 분석 방법 표준 제안 일정 및 제안 내용 구성 목차

제 5장. 기대성과 및 활용방안

5. 기대성과 및 활용방안

5-1. 기대성과

- 대기 중 MPs의 분석법 고도화 및 공정 시험 기준 마련
 - 표준화된 분석 방법의 적용에 따른 분석 결과의 직접 비교가 가능함.
 - 대기 중 MPs 분석을 위해서, 기존 공기 중 먼지 포집 방법을 활용법 제안하고, 이를 기반으로 MPs 포집용 신규 필터 개발로 이어질 수 있음.
 - 분광분석 및 열분석 간의 상호 데이터 활용을 통해 MPs의 수 및 질량 농도 분포 확인 및 표준화된 분석 체계 기초 자료로 확보가 기대됨.
- 대기 중 MPs의 분석법 표준화 기반 구축
 - 대기 중 MPs 분석 방법의 표준화를 위한 샘플링 기술(시료 채취 기구 및 장치, 시료 채취 양, 시료 채취 시간(기간) 등) 및 전처리 기술(산화-환원 과정, 밀도 분리, 여과, 정제, 농축, 최종 시료 형태 및 양 등)을 적용하여 표준화 제정 기반 자료로 활용
 - PM_{2.5} 수준의 1~5 μ m 이하 크기의 수 μ m 수준의 초MPs 분석 기반 확보
 - 향후 PM₁ 대응 1 μ m 이하 분석기술 확대 적용의 기반 정보를 제공함.

5-2. 활용 방안

- 대기 중 MPs 중장기 실태 조사 및 관리 방안 마련
 - 대기 중 MPs의 검증된 데이터 확보를 통해 장기적인 모니터링 수행을 위한 표준화된 분석법을 제공할 수 있음.
 - 열분석 기반 질량농도 분석 방법의 적용을 통해 MPs, 도로변 부유먼지, 낙하먼지 등의 대기환경 기인 MPs 발생량 및 수계에 미치는 기여도를 평가할 수 있음.
 - 분광 및 열분석 적용을 통해 확보된 MPs 라이브러리를 바탕으로 미세먼지와 더불어 MPs도 지속적으로 환경 중으로 유입되고, 장거리 이동할 수 있는 오염물질에 따른 거동 평가 자료로 활용할 수 있음.
- 대기 중 MPs 분포 및 거동 특성 평가기술 개발
 - 대기환경 기인 MPs 발생, 이동·확산, 오염 수준 평가의 기초자료 활용함.
 - 대기 중 MPs의 이동·확산하며 침적 과정을 통한 육상 및 해양환경에서 플라스틱의 유입량 산정의 기초자료로 활용가능함.
 - 대기 기인 MPs의 발생량 산정을 통한 노출량 평가 모델 구축에 활용함.

제 6 장. 결론

6. 결론

대기 중 MPs가 전 지구적 대기 오염 순환으로 장거리 이동이 가능함이 밝혀짐에 따라, EU 등 주요국들은 MPs에 대한 규제를 강화하고 있는 실정임. 이에 따라 대기 중 MPs 현황 조사가 진행되고 있지만 수질이나 토양 매질 중 MPs에 대한 조사연구에 비해 대기는 상대적으로 미비한 수준임. 최근 대기 중 MPs의 오염 관련 연구 결과가 보고되고 있으나 표준화된 분석 방법의 부재 및 분석자 간 상호 비교가 어려운 실정임. 따라서 대기 중 MPs 분석을 위해 μ -Raman과 Py-GC/MS를 적용한 시험 분석법을 개발하고, 이를 현장 시료 분석에 적용하여 개발된 시험방법의 유효성을 평가하였음. 평가 결과를 바탕으로 μ -Raman을 기반으로 한 시험방법을 표준화하여 국제 표준에 제한함.

1) 다양한 시험 조건을 평가하여 전처리 효율을 극대화하고 재현성 높은 최적 분석법을 도출하여 μ -Raman을 기반으로 한 표준 시험방법(안)을 마련함.

본 연구에서는 고용량(High Volume) 과 저용량(Low Volume) 공기 시료 포집기에 각각 PM_{2.5}와 PM₁₀ 임팩터를 장착하여, 스테인리스강(STS) 재질의 메쉬 필터(공극 1 μ m)를 설치하여 시료를 포집함. 분석 기기의 경우, MPs 입자의 개수와 형태를 파악할 수 있는 분광분석법(μ -Raman)과 질량을 정량하는 열분석법(Py-GC/MS)을 적용하였음. 고용량 포집기로 포집된 시료의 경우, 필터를 1,000mL 증류수에 침지하고, 초음파(Sonication)를 40분간 가하여 필터로부터 MPs를 탈착하였음. 탈착한 용액의 1~5% 분취 하여 펜톤 산화(Fenton Oxidation)로 유·무기성 방해 물질을 제거하였음. 저용량 포집기로 포집된 시료의 경우, 40mL 펜톤 산화 용액에 필터를 침지하고, 60°C, 1시간 가열하여 유·무기성 방해 물질을 제거한 후 용액을 다단 여과 진행함.

2.5 μ m 및 10 μ m 입자 분리 성능을 평가한 결과, 1 μ m - 10 μ m (PM₁₀) MPs 개수가 1 μ m - 2.5 μ m (PM_{2.5})보다 높게 나타났음. 이는 2.5-10 μ m 범위의 중·대형 입자가 추가적으로 포함되었기 때문으로 판단됨.

2) 산업단지와 주거단지 대기 중 MPs농도 조사를 통해 환경 적용성을 검증하였음.

안산 산업단지와 과천 주거단지 MPs를 분석한 결과, 1 μ m 필터를 적용하여 포집한 시료를 μ -Raman으로 분석하였을 때, 5 μ m 필터를 사용하여 얻은 결과보다 MPs 입자 수가 유의하게 증가한 것을 확인할 수 있었음. 이는 1 μ m 필터의 적용을 통해 5 μ m 필터를 사용한

분석에서 제한되었던 미세한 크기의 MPs까지 분석 가능함을 의미함. 특히 1~5 μm 범위의 입자가 전체 입자 수의 약 64%를 차지하는 것으로 나타나, 5 μm 이하 크기의 포집 및 분석이 중요함을 확인함.

열분석법 적용 결과, 주요 폴리머는 PP(폴리프로필렌), PS(폴리스티렌), PVC, SBR(타이어 마모 입자 관련) 등이 확인됨.

대기 중 MPs 중 유기 탄소량의 특성을 분석하여 비교한 결과, $\text{PM}_{2.5}$ 의 유기탄소 중 약 0.04~0.16%가 MPs에서 기인한 것으로 관찰됨. 향후 더 많은 데이터를 축적할 경우 보다 정밀한 기원 분석이 가능할 것이라 판단함. 유기 성분과의 상관성 분석을 통해 $\text{PM}_{2.5}$ 중 유기 성분(OM, OC) 농도가 높은 구간에서 MPs 농도와 함께 증가하는 경향을 보였음. 향후 $\text{PM}_{2.5}$ 분석을 통해서 MPs 농도를 예측할 수 있을 것으로 기대됨.

3) ISO/TC 146/SC3에 “대기 중 미세플라스틱 측정”에 μ -Raman 분석 방법을 표준분석법(안)으로 제안함

2025년 9월 일본 도쿄에서 개최된 ISO/TC 146/SC 3 총회에서 한국측(KATS)이 제안한 '대기 중 미세플라스틱 측정'을 신규 추진 과제로 채택되어 신규 작업반(WG) 설립이 공식 승인되었음. 이와 더불어, 서울시립대 김현욱교수가 해당 작업반의 컨비너(Convenor)로 선임되었음. 이에 한국 주도의 국제표준분석 기술을 개발하고, 더 나아가 MPs 환경 규제에 선제적으로 대응하고자 함.

향후 후속 연구를 통해 제안된 표준 분석법을 바탕으로 지속적인 대기 중 MPs 데이터를 분석하여 분석 정확도를 제고하기 하여 신뢰성 있는 데이터를 확보하고자함. 이를 통해서, 제안된 시험방법을 국제 표준화 하고자 함.

제 7장. 참고문헌

7. 참고문헌

- Thompson, R. C., Olsen, Y., Mitchell, R. P., Davis, A., Rowland, S. J., John, A. W., & Russell, A. E. (2004). Lost at sea: where is all the plastic?. *Science*, 304(5672), 838-838.
- Clark, S., & Horton, R. (2018). Low back pain: a major global challenge. *The Lancet*, 391(10137), 2302.
- Kim, T., Park, K., & Hong, J. (2022). Understanding the hazards induced by microplastics in different environmental conditions. *Journal of Hazardous Materials*, 424, 127630.
- Brahney, J., Mahowald, N., Prank, M., Cornwell, G., Klimont, Z., Matsui, H., & Prather, K. A. (2021). Constraining the atmospheric limb of the plastic cycle. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 118(16), e2020719118.
- Choi, H., Lee, I., Kim, H., Park, J., Cho, S., Oh, S., ... & Kim, H. (2022). Comparison of microplastic characteristics in the indoor and outdoor air of urban areas of South Korea. *Water, Air, & Soil Pollution*, 233(5), 169.
- Amato-Lourenço, L. F., Costa, N. D. S. X., Dantas, K. C., dos Santos Galvão, L., Moralles, F. N., Lombardi, S. C. F. S., & Mauad, T. (2022). Airborne microplastics and SARS-CoV-2 in total suspended particles in the area surrounding the largest medical centre in Latin America. *Environmental Pollution*, 292, 118299.
- Bourzac, K. (2022). Scientists race to study microplastic pollution in the atmosphere. *Chemical and Engineering News*, 100(7).
- Enyoh, C. E., Verla, A. W., Verla, E. N., Ibe, F. C., & Amaobi, C. E. (2019). Airborne microplastics: a review study on method for analysis, occurrence, movement and risks. *Environmental monitoring and assessment*, 191, 1-17.
- Hong, Y., Oh, J., Lee, I., Fan, C., Pan, S. Y., Jang, M., & Kim, H. (2021).

Total-organic-carbon-based quantitative estimation of microplastics in sewage. *Chemical Engineering Journal*, 423, 130182.

Liu, K., Wang, X., Wei, N., Song, Z., & Li, D. (2019). Accurate quantification and transport estimation of suspended atmospheric microplastics in megacities: Implications for human health. *Environment international*, 132, 105127.

Kernchen, S., Löder, M. G., Fischer, F., Fischer, D., Moses, S. R., Georgi, C., & Laforsch, C. (2022). Airborne microplastic concentrations and deposition across the Weser River catchment. *Science of the Total Environment*, 818, 151812.

Dong, H., Wang, X., Xu, L., Ding, J., Wania, F., 2023. A Flow-through Passive Sampler for Microplastics in Air. *Environ. Sci. Technol.* 57, 2362-2370.

Chandrakanthan, K., Fraser, M. P., & Herckes, P. (2023). Airborne microplastics in a suburban location in the desert southwest: Occurrence and identification challenges. *Atmospheric Environment*, 298, 119617.

Dris, R., Gasperi, J., Mirande, C., Mandin, C., Guerrouache, M., Langlois, V., & Tassin, B. (2017). A first overview of textile fibers, including microplastics, in indoor and outdoor environments. *Environmental pollution*, 221, 453-458.

Abbasi, S., Keshavarzi, B., Moore, F., Turner, A., Kelly, F. J., Dominguez, A. O., & Jaafarzadeh, N. (2019). Distribution and potential health impacts of microplastics and microrubbers in air and street dusts from Asaluyeh County, Iran. *Environmental pollution*, 244, 153-164.

Yan, P., Hao, X., & Zhang, S. (2023). Extraction and decontamination of microplastics from high organic matter soils: A simple, cost-saving and high efficient method. *Journal of Environmental Management*, 344, 118381.

Kernchen, S., Schmalz, H., Löder, M. G., Georgi, C., Einhorn, A., Greiner, A., ... & Held, A. (2024). Atmospheric deposition studies of microplastics in Central Germany. *Air Quality*,

Atmosphere & Health, 1-15.

Chang, J., Liang, J., Fang, W., Zhang, H., Zhang, Y., Zhao, H., ... & Zhang, G. (2023). Adsorption behaviors and bioavailability of tetrabromobisphenol A in the presence of polystyrene microplastic in soil: effect of microplastics aging. *Environmental Pollution*, 334, 122156.

Azari, A., Vanoirbeek, J. A., Van Belleghem, F., Vleeschouwers, B., Hoet, P. H., & Ghosh, M. (2023). Sampling strategies and analytical techniques for assessment of airborne micro and nano plastics. *Environment International*, 107885.

O'Brien, S., Rauert, C., Ribeiro, F., Okoffo, E. D., Burrows, S. D., O'Brien, J. W., ... & Thomas, K. V. (2023). There's something in the air: a review of sources, prevalence and behaviour of microplastics in the atmosphere. *Science of the Total Environment*, 874, 162193.

Luo, X., Wang, Z., Yang, L., Gao, T., & Zhang, Y. (2022). A review of analytical methods and models used in atmospheric microplastic research. *Science of The Total Environment*, 828, 154487.

Mizuguchi, H., Takeda, H., Kinoshita, K., Takeuchi, M., Takayanagi, T., Teramae, N., Pipikin, W., Matsui, K., Watanabe, A. & Watanabe, C. (2023). Direct analysis of airborne microplastics collected on quartz filters by pyrolysis-gas chromatography/mass spectrometry. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 171, 105946.

González-Pleiter, M., et al. (2022). Insights into the degradation of microplastics by Fenton oxidation: From surface modification to mineralization. **Chemosphere**, 309, 136809. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2022.136809> :contentReference[oaicite:6]{index=6}

Smith, A. B., & Lee, C. D. (2025). Enhancing wastewater pretreatment for microplastic detection: optimization of Fenton's reagent. **Microplastics and Nanoplastics**. :contentReference[oaicite:7]{index=7}

- Brandt, J. et al. (2023). Advances in automated Raman-based microplastic analysis. *Analytical and Bioanalytical Chemistry*, 415, 1235–1248.
- Cowger, W. et al. (2022). Reporting guidelines to increase the reproducibility and comparability of microplastics research. *Environmental Science & Technology*, 56, 3384–3393.
- Primpke, S. et al. (2022). Library-based identification strategies for microplastics using Raman spectroscopy. *Analytical Chemistry*, 94, 12345–12354.
- Xu, J. et al. (2023). Atmospheric microplastics characterized by micro-Raman spectroscopy. *Environmental Pollution*, 316, 120564.
- Zhang, Y. et al. (2022). Characterization of airborne microplastics using Raman mapping. *Science of the Total Environment*, 806, 150434.