

강변여과수 공정에 따른 미세플라스틱 검출 특성 연구

오유경 · 이동근 · 조성현* · 이영규 · 김태승

서울대학교 농생명과학공동기기원

Changes in Microplastic Characteristics throughout the Riverbank Filtration Process

Yukyung Oh, Dongguen Lee, Sunghyen Cho*, Young-Kyu Lee, and TeaSeoung Kim

National Instrumentation Center for Environmental Management (NICEM), Seoul National University, Seoul 08826, Korea

ABSTRACT

This study evaluated the behavior of microplastics (MPs) in a riverbank filtration (RBF) system using radial collector wells. To ensure sampling representativeness, large-volume sampling (20~100 L) with five replicates was conducted, utilizing median values for comparison. The μ -FT-IR results revealed a discrepancy between particle count and surface area; while raw water was dominated by small particles, RBF water exhibited a significant increase in surface area within larger size classes. Notably, PTFE accounted for 83% of the total MP area in RBF water, alongside facility-related polymers (PA, PMMA, and POM) absent in raw water. These findings indicate that the mechanical wear of internal components, such as pumps and seals, serves as a secondary source of MPs. This study underscores the necessity of surface area-based assessments and the management of infrastructure-derived MPs in water treatment processes.

Key words : Microplastic, Riverbank filtration (RBF), Large-volume sampling, PTFE, surface area-based assessments

1. 서 론

플라스틱은 본래 상아나 나무 등 천연 자연을 대체하여 환경을 보호하려는 목적으로 발명되었다. 가벼운 무게, 우수한 내구성, 성형의 용이성 및 생산 비용의 효율성 덕분에 전 세계적으로 널리 사용되는 혁신적인 소재로 자리 잡았다(Geyer, 2020). 그러나 이러한 장점인 '난분해성'은 역설적으로 수거와 처리를 어렵게 만들었고, 오늘날 플라스틱은 지구 생태계를 위협하는 환경파괴 소재로 전락했다(MacLeod et al., 2021).

2015년 기준 전 세계 플라스틱 생산량은 약 83억 톤에 달하며, 이 중 약 30%(25억 톤)만이 사용 중인 것으로

나타났다. 나머지 중 10%(8억 톤)는 조각, 1%(1억 톤)는 재활용되었으나, 무려 60%인 약 49억 톤이 폐기물로 축적되었다(Geyer et al., 2017). 이로 인해 해양에서 우리나라 면적의 16배에 달하는 거대 쓰레기 지대(GPGP)를 형성되었으며, 육지에서는 플라스틱이 자연물과 엉겨 붙어 만들어진 신종 암석인 플라스틱글로머레이트(Plastiglomerate)가 발견되며 지질학적 변화를 야기하고 있다(Corcoran and Jazvac, 2020; Egger et al., 2020).

플라스틱은 생물권에 직·간접적인 피해를 발생시킨다. 직접적인 피해는 미세 파편이 생물 조직에 찰과상과 염증을 일으켜 세포 괴사의 유발이다. 특히 미세입자는 피부, 소화 기관, 폐를 통해 흡입될 수 있으며, 모세혈관에 침투하여 전신에 확산될 위험이 존재한다(Lehner et al., 2019). 간접적인 피해는 제조 과정에서 첨가된 가소제(프탈레이트류), 다환방향족탄화수소(PAHs), 잔류성유기화합물(POPs) 등 유해 오염 물질을 흡착하고 운반하는 오염물질 매개체(Vector) 역할의 수행이다(Alimi et al., 2018; Bakir et al., 2014).

크기 5 mm 이하의 플라스틱인 미세플라스틱은 발생원에 따라 1차(의도적 제조)와 2차(파쇄 및 분해)로 구분된다

주저자: 오유경, 선임연구원; 조성현, 책임연구원
공저자: 이동근, 선임연구원; 김태승, 책임연구원; 이영규, 연구교수
*교신저자: 조성현, 책임연구원
E-mail: sunghc@snu.ac.kr

Received : 2025. 12. 29 Reviewed : 2026. 01. 07
Accepted : 2026. 02. 03 Discussion until : 2026. 04. 30

(ISO, 2018, 2025). 1차 미세플라스틱은 화장품, 세정제, 레진 펠렛 등 의도적으로 작게 제조된 것이며, 2차 미세플라스틱은 큰 플라스틱이 사용 및 폐기 과정에서 물리·화학적으로 세분된 것이다. 현재 미세플라스틱은 도시와 산업지역을 넘어 티베트 고원, 산악 지대, 극지방 등 인류의 발길이 닿지 않는 전 지구적 영역에서 광범위하게 발견되고 있다(Allen et al., 2019; Zhang et al., 2022b).

미세플라스틱의 분석은 입자의 개수, 크기, 종류와 형태를 측정하는 진동 분광법(vibrational spectroscopy)과 성분별 질량을 측정하는 질량 분광법(mass spectroscopy)으로 나뉜다. 진동 분광법은 FT-IR 또는 라만(Raman) 분광법이 대표적이며, 1~20 μm 이상의 미세입자를 높은 공간 분해능으로 식별한다(Ivleva, 2021). 질량 분광법은 Py-GC/MS 또는 TED-GC/MS 등을 활용하여 플라스틱의 화학적 성분과 전체 질량을 분석한다(Okoffo et al., 2020).

한편, 국내 상수원관리규칙(MCEE, 2025)에 따르면 상수원은 하천수, 복류수, 호소수, 지하수, 해수, 그리고 강변여과수로 분류된다. 이 중 강변여과수(Riverbank Filtration water)는 하천 인근의 사력층(모래 및 자갈층)을 통과시킨 물을 의미한다(Ray, 2002).

강변 여과는 표층수가 충적 대수층을 통과하는 과정에서 발생하는 물리적 여과, 화학적 흡착, 생물학적 분해 작용을 통해 미세플라스틱을 포함한 다양한 오염물질을 효과적으로 제거하는 자연 친화적 수처리 기법이다(Ibrahim et al., 2024). 1870년대 유럽의 라인강, 도나우강 등의 유역에서 시작된 이 방식은 국내에서도 1990년대 시작하여, 이후 낙동강 유역을 중심으로 청정 원수 확보를 위해 개발 및 운영되고 있다(Lee et al., 2010).

지표수에서 미세플라스틱 오염이 심화됨에 따라, 천연 여과막인 대수층을 활용한 강변 여과의 제거 효율성에 대한 과학적 검증이 필요하다. 본 연구는 강변 여과 시설 주변의 강물과 여과수 내 미세플라스틱의 개수, 크기(장축 및 표면적), 및 종류를 정밀 분석하여 비교하고자 한다. 이를 통해 충적 대수층 통과에 따른 미세플라스틱의 저감효과를 확인하고, 플라스틱 종류별 조성을 확인함으로써 강변 여과 시설이 상수원 수질 안전성에 미치는 영향과 기여도를 검토하는 것을 목적으로 한다.

2. 본 론

2.1. 연구방법

2.1.1. 연구지역

연구지역은 의령군 낙서면 낙동강변이다. 연구지역은

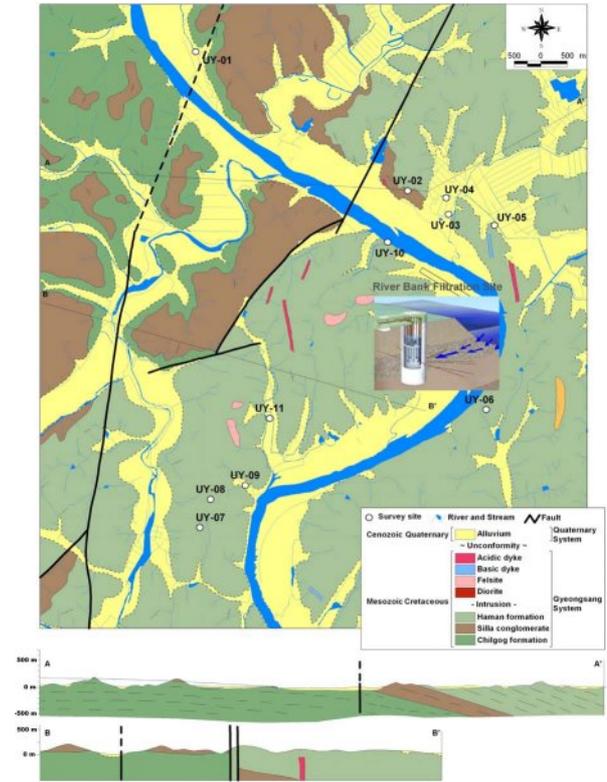


Fig. 1. Geology of the study area and conceptual diagram of radial collector well.

북서면에 위치한 신라역암이 풍화에 상대적으로 강해 산정상에 남아있다. 신라역암의 남동부에 위치한 함안층은 자색이나 암회색 이암이다. 함안층은 신라역암과 북북서 방향의 단층에 의해 구분되며, 남서부로 갈수록 낮은 구릉을 형성한다(Fig. 1). 안정된 충적 환경에서 퇴적된 칠곡층은 사질이나 흙색 세일이고, 신라역암의 북서부를 덮고 있다. 중생대 경상계에 속하는 이 지층들은 하부에서 상부로 칠곡층, 신라역암, 그리고 함안층 순으로 이를 낙동강변에서 제4기 충적층이 피복한다. Fig. 1에서 A-A'의 B-B'은 칠곡층-신라역암-함안층 순으로 쌓인 층서와 수직단층을 보여준다(Choi and Yeo, 1972; Kim and Lee, 1969). 본 지역의 수계는 상부로부터 사행하여 남동부로 흐르는 낙동강과, 본 지역의 남부에서 사행하여 북동류하는 신만천이 낙서면 북서부에서 낙동강과 합류한다.

연구지역의 집수정 위치는 낙동강 주변 제4기 충적층인 곡류사주(point bar)이다. 강변여과수는 집수정의 설치 형태에 따라 수직형, 경사형, 방사형, 그리고 매거형으로 구분되며, 본 연구의 대상인 강변 여과 시설은 대용량 원수 확보와 고효율 여과를 위해 방사형 집수정(Radial Collector Well) 공법을 채택하고 있다. 방사형 집수정은 지표면에서

대수층까지 수직으로 설치된 대구경 우물(Caisson)과, 그 하단에서 대수층 수평 방향의 방사형으로 뻗어 나간 여러 개의 수평 집수관(Lateral Screen)으로 구성된다. 방사형 집수정은 수직 관정에 비해 하천 바닥과의 접촉 면적이 넓어 저속 취수가 가능하며, 이는 대수층 내에서 체류시간을 증대시킨다. 하천의 표층수는 강바닥의 사력층(모래 및 자갈)을 통과하며 지하로 침투하며, 이 과정에서 대수층이 거대한 천연 여과막(Natural Filter) 역할을 한다. 수평 집수관을 통해 집수된 여과수는 수직 우물로 모인 후 양수 펌프를 통해 정수 공정으로 공급된다. 대수층의 두께는 20~25 m였다. 수평집수관의 길이는 40 m 이상, 개수는 6개, 하천의 이격거리는 약 50 m이고, 수직관의 심도는 약 27 m로, 시설용량은 약 3,000 m³/day이다.

2.1.2. 시료채취 및 분석

시료와 관련된 모든 기구는 종이, 스테인리스 스틸 또는 유리 재질을 사용하였다. 시료 채취 용기인 필터팩은 사용 전 실험실에서 세척하고 알루미늄 포일로 밀봉하여 보관하였다. 일반적으로 시료채취 시 외부 환경에서 미세플라스틱의 유입을 통한 오염의 가능성이 있기 때문이다.

시료는 원수(강물, RW)는 20 L, 여과수(RF)와 침전조 물(ST)은 100 L씩 채취하였다. 여과수와 침전조 물은 미세플라스틱의 농도가 낮을 수 있어, 100 L 이상 채수

하였다(ISO, 2025). 물에서 미세플라스틱 함량은 부피(L)당 개수로 평가한다. 공정별 시료 채취는 5회씩이었다. 시료는 채수용 필터(20 μm mesh, 직경 47 mm 스테인리스강 필터)를 넣은 필터 팩을 준비하여, 이를 배수통에 연결하고, 음압 펌프(1기압 내외)를 이용해, 현장에서 채취하였다. 20~100 L 여과 후 채수용 필터는 페트리디쉬(petridish)에 넣어, 알루미늄 포일로 밀봉한 후 라벨링하고, 상온에서 종이상자에 담아, 실험실로 운반하였다.

실험실에서 채수용 필터는 40 mL 정제수가 담긴 비커에 넣은 후 초음파로 5분 이내로 필터 위의 미세플라스틱을 탈착했다. 그리고 정제수는 진공 여과장치 및 감압 여과용 진공펌프를 이용해 분석용 필터(20 μm mesh, 직경 25 mm 스테인리스강 필터)에 다시 여과했다. 분석용 필터의 건조는 유리질 페트리디쉬에 넣고 건조 오븐에서 40°C-12시간 이상 수행했다. 만약, 건조 후 분석용 필터에 불순물이 많아 분석이 어렵다고 판단된다면, 정제수에 다시 넣어 전처리를 반복하였다. 반복된 전처리에도 불순물 제거가 힘들다면, 밀도 분리 용액을 이용해 12시간 정치한 후 상등액을 여과하여, 필터를 30% 과산화수소수가 50 mL까지 채워진 비커에 넣고, 알루미늄 포일로 덮은 후 40°C에서 약 2시간 교반하고, 상온에서 24시간 동안 방치해, 유기물을 최대한 제거했다. 그리고 다시 비커의 과산화수소수를 분석용 필터에 여과한 후, 정제수로 세척하여 건조했다.

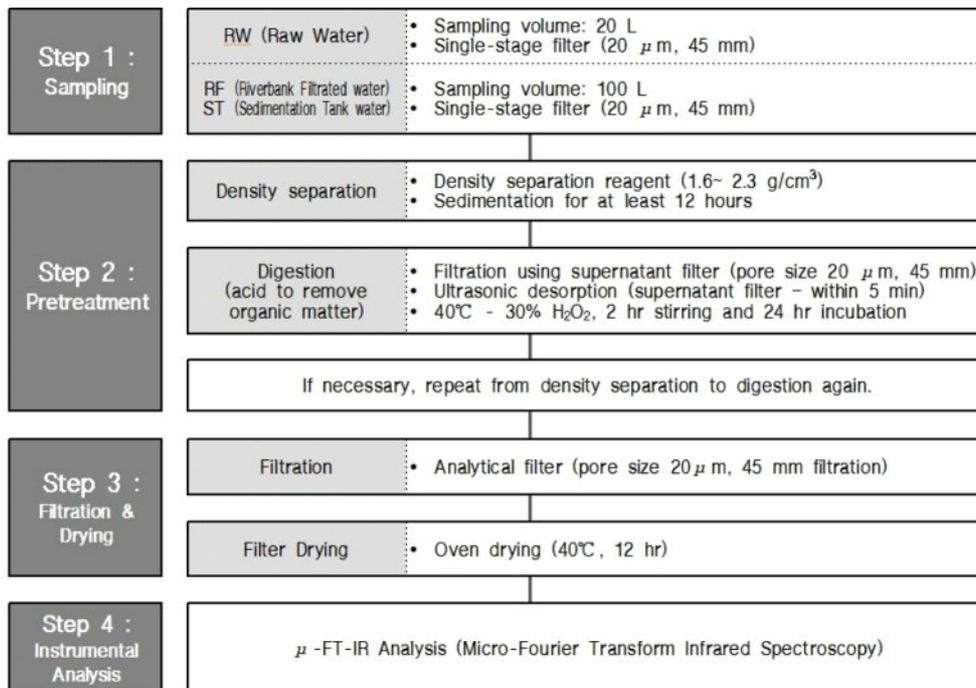


Fig. 2. Flowchart for sampling and analysis of microplastic.

Table 1. Abundance and surface area of microplastics in RW, RF, and ST samples

Number and Area of MPs		Times					Avg.	Mdn	SD
		1	2	3	4	5			
Abundance (MPs/L)	RW	5.30	7.10	3.45	5.60	2.20	4.73	5.30	1.92
	RF	1.12	1.22	1.20	1.76	1.30	1.32	1.22	0.25
	ST	0.85	0.15	2.29	2.30	0.61	1.24	0.85	1.00
Surface Area (μm ² /L)	RW	31,937.50	14,375.00	25,687.50	26,875.00	8,343.75	21,443.75	25,687.50	9,736.58
	RF	10,887.50	14,893.75	21,075.00	39,037.50	73,725.00	31,923.75	21,075.00	25,730.28
	ST	6,081.25	812.50	20,937.50	18,712.50	2,968.75	9,902.50	6,081.25	9,282.97

Abbreviations: RW, River Water / Raw Water; RF: Riverbank Filtered Water; ST: Settled Water / Sedimentation Tank; Avg., arithmetic mean; Mdn, median; SD, Standard Deviation.

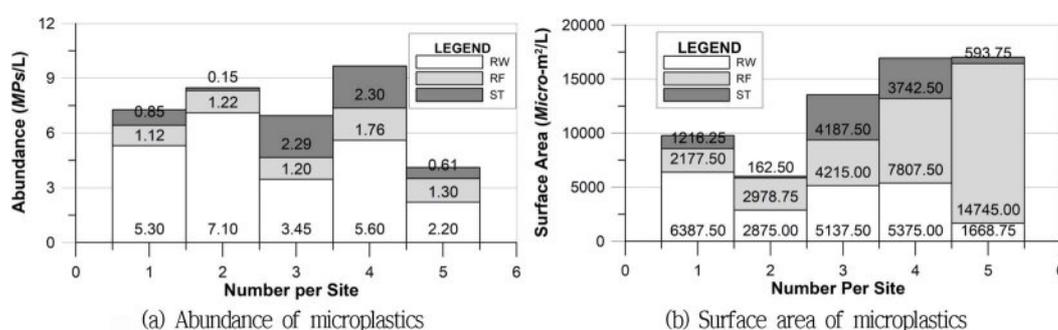


Fig. 3. Comparison of microplastic abundance and surface area in RW, RF, and ST samples (n=5 per site).

미세플라스틱 분석은 서울대학교 농생명과학공동기기원의 μ-FT-IR (Nicolet iN10 IR Microscope (iN10), ThermoFisher Scientifi, USA)을 이용하여 분석하였다. 분석 장비는 진동 분광(vibrational spectroscopy)으로 미세플라스틱 입자의 개수, 크기, 및 종류를 측정한다. 분석 절차는 1차로 분석용 필터 위에 있는 미세플라스틱 이미지를 인공지능(AI) 시스템(K-spot)으로 파악하고, 2차로 분석자가 재판 단하여 정량 및 정성분석을 수행하였다. 다음 그림(Fig. 2)은 분석 과정을 설명한 것이다.

2.2. 연구결과

강물(RW), 여과수(RF) 및 침전조(ST)의 물 시료에서 각각 5회씩 분석한 결과를 검출된 미세플라스틱의 개수(abundance)와 표면적(surface area)으로 구분한 것이 다음 표(Table 1)이다. 강물, 여과수 및 침전조의 물 시료에서 미세플라스틱 검출 수는 각각 4.73±1.92 MPs/L, 1.32±0.25 MPs/L, 및 1.24±1.00 MPs/L이고, 검출 수가 큰 순서는 강물>여과수>침전조 순이다. 검출 표면적은 21,443.75±9,736.58 μm²/L (약 2.1 × 10⁻⁴ cm²/L), 31,923.75±25,730.28 μm²/L(약 3.1 × 10⁻⁴ cm²/L), 및 9,902.50±9,282.97 μm²/L(약 0.9 × 10⁻⁴ cm²/L) 이고, 검출 표면적이 큰 순서는 여과수>강물>침전조 순이

다. 검출 개수의 표준편차(SD, Standard Deviation)가 큰 순서는 강물>침전조>여과수 순이고, 검출 표면적의 표준 편차가 큰 순서는 여과수>강물>침전조 순이다. 참고로, 미세플라스틱 분석 결과의 개수는 MPs/L(1 L당 검출 개수), 표면적(surface area)은 μm²/L(1 L당 검출 표면적) 단위로 표현된다.

강물, 여과수 및 침전조의 물 시료에서 각각 5회씩 분석한 결과를 검출된 미세플라스틱의 개수와 표면적으로 나타낸 것이 Fig. 3이다. 침전조(ST)의 물 시료는 미세플라스틱의 개수와 표면적의 크기변화가 유사해, 개수가 많으면 표면적도 커지는 관계를 보여준다. 그러나 강물(RW)과 여과수(RF)는 미세플라스틱의 개수에 대해 표면적의 크기가 비례하지 않는다. 강물은 2회에서 미세플라스틱의 검출 개수는 많지만, 표면적의 크기는 가장 작다. 여과수는 미세플라스틱의 개수와 표면적의 크기변화가 3회, 4회, 5회로 갈수록 점점 더 커지지만, 표면적은 개수의 증가보다 훨씬 크다. 특히, 여과수는 2회에서 미세플라스틱의 개수와 표면적이 각각 1.22 MPs/L과 2,978.75 μm²/L이지만, 5회는 각각 1.30 MPs/L과 14,745.00 μm²/L이다. 개수의 차이는 거의 없지만, 미세플라스틱의 표면적은 5회에서 약 5배 정도가 더 크다.

Table 2. Abundance and surface area of microplastics by size class (length) in RW, RF, and ST samples

Number and Area of MPs		Length (μm)						Total
		Class 1 (20-45)	Class 2 (45-100)	Class 3 (100-300)	Class 4 (300-700)	Class 5 (700-1000)	Class 6 (1000<)	
Abundance (MPs/L)	RW	1.420	1.740	1.480	0.080	0.010	-	4.73
	RF	0.374	0.374	0.380	0.152	0.016	0.024	1.32
	ST	0.248	0.392	0.542	0.052	0.004	0.002	1.24
Surface Area (μm ² /L)	RW	887.50	3,362.50	12,750.00	3,243.75	1,200.00	-	21,443.75
	RF	233.75	730.00	4,992.50	11,091.25	2,780.00	12,096.25	31,923.75
	ST	155.00	768.75	5,831.25	2,742.50	180.00	225.00	9,902.50

Abbreviations: RW, River Water / Raw Water; RF: Riverbank Filtered Water; ST: Settled Water / Sedimentation Tank

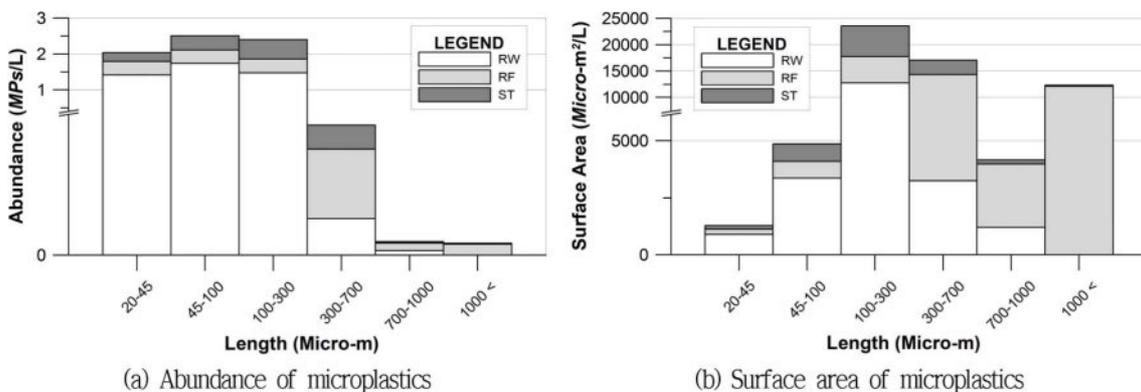


Fig. 4. Size distribution of microplastic abundance and surface area based on length in RW, RF, and ST samples.

강물, 여과수 및 침전조의 물 시료에 대해 장축(Length, μm)으로 검출된 미세플라스틱을 개수와 면적으로 구분한 것이 Table 2이다. 표에서 6계급의 구분은 ASTM E-11를 참조하여 구분한 것이다(ASTM E11-24, 2024). 가장 많이 검출된 개수 구간은 강물 시료에서 Class 2(45-100 μm)고, 여과수 및 침전조의 물 시료에서 Class 3(100-300 μm)으로, 최대 검출 구간이 강물과 나머지인 여과수 및 침전조 물 시료와 다르다. 그리고 Class 6(1000 μm <)에서 강물 시료의 미세플라스틱 검출은 없으나, 여과수 및 침전조 시료에서 각각 0.024 μm/L와 0.002 μm/L로 검출된다. Class 5(700-1000 μm)에서 미세플라스틱의 검출 개수는 여과수 및 침전조에서 각각 0.014 μm/L와 0.004 μm/L로, 여과수는 Class 6(1000 μm <)보다 약 2배 적고, 침전조는 약 2배 많다. 그러나 여과수와 침전조의 미세플라스틱 검출 표면적은 Class 6(1000 μm <)보다 각각 약 4.3배와 약 1.3배로 모두 작다. 강물 시료는 20L씩 5회, 여과수와 침전조의 시료는 100L씩 5회 채수했으므로, 표에서 미세플라스틱 개수와 표면적에 대한 합계(total)는 강물은 100L로, 여과수와 침전조는 500L로 나눠 표현된다.

강물, 여과수 및 침전조의 물 시료에 대해 장축(Length,

μm)으로 검출된 미세플라스틱의 개수와 표면적으로 나타낸 것이 Fig. 4이다. 장축 크기에 따른 구간(class)별 개수를 표현한 그림(Fig. 4a)의 축 생략(break axis)은 0.3-0.5 MPs/L이고, 표면적을 표현한 그림(Fig. 4b)의 축 생략은 6000-8000 μm²/L이다. 강물 시료에서 미세플라스틱의 검출 개수는 Class 3까지 1 MPs/L 이상이고 Class 3 이상부터 0.1 MPs/L 이하이다. 여과수와 침전조 시료에서 검출 개수는 Class 3(100-300 μm)에서 가장 크다. Fig. 4a에서 Class 4(300-700 μm)의 검출 개수가 가장 많아 보이나 축 생략으로 인해 왜곡된 결과이다. Fig. 4b에서 강물과 침전조 물 시료의 표면적의 크기 분포는 Class 3(100-300 μm)을 중심으로 정규분포(normal distribution) 형태이다. 그러므로 강물과 침전조에서 검출된 미세플라스틱의 표면적은 Class 3에서 가장 크다. 여과수는 Class 4과 6에서 미세플라스틱의 표면적이 가장 크다.

강물, 여과수 및 침전조의 물 시료에 대해 검출된 미세플라스틱의 종류를 개수와 표면적으로 구분한 것이 Table 3이다. 강물 시료에서 검출된 플라스틱 종류 중 PA(Polyamide, Nylon), PMMA(Polymethyl Methacrylate, Acrylic), 및 POM (Polyoxymethylene, Acetal) 등 3종은 없지만, 여과

Table 3. Abundance and surface area of microplastics by polymer type in RW, RF, and ST samples

Number and Area of MPs		Type												Total	
		EPOXY	EVA	PA	PC	PE	PET	PMMA	POM	PP	PS	PTFE	PU		PVC
Abundance (MPs/L)	RW	0.01	0.03	-	0.06	0.07	0.33	-	-	0.33	0.01	3.82	0.04	0.03	4.73
	RF	0.05	0.20	0.06	-	0.17	0.14	0.03	0.02	0.09	0.01	0.49	0.03	0.02	1.32
	ST	0.01	0.01	0.01	-	0.04	0.06	0.02	0.02	0.05	0.004	1.00	0.02	0.002	1.24
Surface Area ($\mu\text{m}^2/\text{L}$)	RW	50	44	-	919	381	1,725	-	-	2,950	25	15,206	38	106	21,444
	RF	146	754	175	-	432	3,046	79	84	590	8	26,427	120	63	31,924
	ST	29	18	37	-	79	1,060	32	30	274	3	8,307	29	5	9,903

Abbreviations: RW, River Water / Raw Water; RF: Riverbank Filtered Water; ST: Settled Water / Sedimentation Tank

수와 침전조 시료에서 이들이 검출된다. 그리고 강물 시료에서 검출되지만, 여과수와 침전조 물 시료에 없는 플라스틱의 종류는 PC (Polycarbonate) 1종이다. 상대적으로 검출량이 큰 종류는 PET (Polyethylene Terephthalate), PP (Polypropylene) 및 PTFE (Polytetrafluoroethylene) 등 3종이고, 강물, 여과수 및 침전조의 물 시료에서 공통으로 검출된다.

강물, 여과수 및 침전조의 물 시료에 대해 검출된 미세플라스틱의 종류를 개수와 표면적으로 나타낸 것이 Fig. 5이다. 플라스틱 종류에 따른 미세플라스틱의 검출 개수를 표현한 그림(Fig. 5a)에서 축 생략(break axis) 구간은 1.0~3.6 MPs/L이고, 표면적을 표현한 그림(Fig. 4b)에서 축 생략 구간은 6000~9000 $\mu\text{m}^2/\text{L}$ 이다. 강물 시료에서만 검출되는 미세플라스틱 형태는 PC 1종이고, 여과수와 침전조 물 시료에서만 검출되는 미세플라스틱 형태는 PA, PMMA 및 POM 등 3종으로, EPOXY, PS, PU 및 PVC 등 4종의 검출 개수 또는 표면적과 유사한 양이다. 강물 시료에서 많이 검출되는 미세플라스틱의 형태는 PC, PET, PP 및 PTFE 등 4종이다. 여과수와 침전조 물 시료에서 많이 검출되는 미세플라스틱의 형태는 EVA, PE, PET, PP 및 PTFE 등 5종이다. 강물, 여과수 및 침전조 물 시료에서 미세플라스틱 개수와 표면적으로 표현할 때 가장 많이 검출되는 미세플라스틱의 형태는 PET, PP 및 PTFE 등 3종이다.

2.3. 논의

시료의 부피(volume)는 작을수록, 농도가 과대 평가될 위험이 있다. 그러나 전처리 한계로 인해, 미세플라스틱의 함유량이 많은 것으로 추정되는 시료는 적은 부피를, 함유량이 적은 것으로 추정되는 시료는 많은 부피의 여과 방법이 권고된다. 그래서 이들의 대표성을 확보하기 위해서 3~5회 반복 채취(replicate sample)가 필요하다(ISO, 2025;

Koelmans et al., 2019; Tamminga et al., 2019). 연구 지역의 강변 여과수의 공정은 강물(RW)을 방사성 집수정을 통해 강변 여과(RF)시켜 모래 탱크(ST)에서 부유물질(suspended solid)을 침전시킨다. 그러므로 본 연구는 국제 표준(ISO)에서 권고한 20~100 L의 대용량 여과(Large volume sampling)와 공정당 5회씩 반복 측정을 병행하여 최대한 대표성을 확보하고자 한 것이다.

검출된 미세플라스틱의 개수와 표면적을 평균(Avg.) \pm 표준편차(SD)로 표현(Table 1 참조)하는 것은 환경 매체 내 미세플라스틱 고유의 불균일성에도 불구하고 높은 재현성과 시료채취의 대표성을 받아들일 수 있는 수준임을 나타낸다. 또한, 상대표준편차(RSD)가 30% 미만으로 유지된 것을 의미한다. 이는 상대표준편차(RSD, Relative Standard Deviation)는 표준편차(SD)를 평균(Mean)으로 나눈 뒤 백분율(%)로 나타낸 수치이다. 평균값 대비 오차가 얼마나 큰가를 상대적으로 보여주기 위해 서로 다른 집단의 정밀도를 비교할 때 매우 중요하다. Table 4는 강물, 여과수 및 침전조 물 시료에서 검출된 미세플라스틱의 상대표준편차를 개수와 표면적을 구분하여 나타낸 것이다.

강물, 여과수 및 침전조 물 시료에서 검출된 미세플라스틱 개수의 상대표준편차는 각각 40.58%, 19.25% 및 80.27%이다. 표면적의 상대표준편차는 각각 45.41%, 80.60% 및 93.74%이다. 여과수 검출 개수의 상대표준편차를 제외하고 모두 30% 이상이므로, 평균으로부터 멀어져

Table 4. Relative Standard Deviation (RSD) of microplastic abundance and surface area in RW, RF, and ST samples

	Abundance			Surface Area		
	RW	RF	ST	RW	RF	ST
RSD (%)	40.58	19.25	80.27	45.41	80.60	93.74

Abbreviations: RW, River Water / Raw Water; RF: Riverbank Filtered Water; ST: Settled Water / Sedimentation Tank; RSD, Relative Standard Deviation.

분포한다. 그러므로 공정별 대표성은 중앙값(Mdn.) ± 표준편차(SD)로 표현해야 한다. 강물, 여과수 및 침전조의 물 시료에서 검출된 미세플라스틱 개수는, 중앙값(Mdn.) ± 표준편차(SD)로 표현하면, 각각 5.30 ± 1.92 MPs/L, 22 ± 0.25 MPs/L, 및 0.85 ± 1.00 MPs/L이다. 표면적은 각각 $25,687.50 \pm 9,736.58 \mu\text{m}^2/\text{L}$ (약 $2.6 \times 10^{-4} \text{ cm}^2/\text{L}$), $21,075.00 \pm 25,730.28 \mu\text{m}^2/\text{L}$ (약 $2.1 \times 10^{-4} \text{ cm}^2/\text{L}$), 및 $6,081.25 \pm 9,282.97 \mu\text{m}^2/\text{L}$ (약 $0.6 \times 10^{-4} \text{ cm}^2/\text{L}$)이다. 값은 침전조 시료에서 미세플라스틱의 검출 개수와 표면적이 약 4-26배 대폭 감소했음을 보여준다. 미세플라스틱 양을 평균값으로 표현한 것과 달리, 중앙값으로 표현할 때, 검출된 개수와 표면적 모두에서 강물 > 여과수 > 침전조 순으로 미세플라스틱이 많았다. 이 순서는 강변여과수 공정 과정과 같으므로, 공정에 의해 미세입자가 여과되는 것으로 판단된다. 그런데 공정 간 개수 차이에 대한 통계적 유의성 검정은 수행하지 못했다. 분석 개수가 충분하지 않았기 때문이다. 제시한 값의 비교는 공정 간 경향성(trend)이다.

분석용 필터 위에 미세플라스틱이 서로 겹쳐서 개수와 표면적이 적어지거나 줄어들 수도 있다. 최근 연구에 의하면, 정확한 미세플라스틱의 개수를 위해서 최대 200개 이하 미세플라스틱 입자 또는 분석용 필터 면적에 대한 개별 미세플라스틱 입자의 면적 합이 1%~10% 사이로 제한된다(Xu and Arakawa, 2022; Hagelskjaer et al., 2023). 강물, 여과수 및 침전조 물 시료에서 검출된 미세플라스틱 표면적의 중앙값이 각각 $25,687.50 \mu\text{m}^2$, $21,075.00 \mu\text{m}^2$, 및 $6,081.25 \mu\text{m}^2$ 이다(Table 1 참조). 분석용 필터 면적이 $4.9(1.25^2 \times 3.14) \text{ cm}^2$ 로, 강물, 여과수 및 침전조 물 시료에서 검출된 미세플라스틱의 표면적은 분석용 필터 면적의 약 0.005%, 약 0.004% 및 약 0.001%이다. 그러므로 검출된 미세플라스틱은 분석용 필터 위에 적절히 분산되어 최소로 겹쳤을 것으로 예상되며, 개수의 분석 결과도 적절한 것으로 평가된다.

한편, 평균값(Avg.)으로 표현할 때, 개수의 결과는 중앙값의 표현과 동일한, 강물 > 여과수 > 침전조 순으로 미세플라스틱이 많았다. 그런데 평균값으로 표현한 표면적은 크기 순서는 여과수 > 강물 > 침전조 순이었다. 총적 퇴적층에 의해 여과된 물(여과수)에서 미세플라스틱이 여과 전 물(강물)보다 더 많이 검출된다는 것은 강물 이외의 미세플라스틱을 공급하는 공급원이 따로 있는 것으로 가정된다. 여과 중 미세플라스틱은 강물-여과수 공정보다는 여과수-침전조 공정에서 추가된 것으로 생각된다. Fig. 3에서 침전조(ST)의 물 시료는 개수와 표면적의 크기변화가 비례한다. 개수가 많으면 표면적도 커지는 관계이다. 그러나

강물(RW)과 여과수(RF)의 개수와 표면적의 크기변화는 비례하지 않는다. 강물의 경우, 2회 시료채취에서 미세플라스틱의 개수가 많지만, 표면적 크기는 가장 작았다. 이것은 미세플라스틱 풍부도(abundance)의 개수가 미세플라스틱의 양으로 반드시 귀결되지 않음을 보여준다. 특히, 여과수의 2회와 5회의 미세플라스틱 분석 결과는 개수의 차이는 거의 없지만, 면적의 차이는 5배 이상이다. 공정 중 개수의 변화는 풍화된 플라스틱의 세분화로 볼 수 있지만, 표면적의 변화는 여과수의 미세플라스틱 공급원이 원수가 아닌 다른 것일 수 있다.

공정별 검출된 미세플라스틱의 크기를 장축(Length, μm) 기준으로 Class 1(20-45 μm), Class 2(45-100 μm), Class 3(100-300 μm), Class 4(300-700 μm), Class 5(700-1000 μm) 및 Class 6(1000 μm 이상) 등 6개 계급으로 분류하면, 미세플라스틱의 최대 검출 개수의 구간은 강물 시료에서 Class 2, 여과수와 침전조의 물 시료에서 Class 3이다. 그러나 미세플라스틱의 최대 검출 표면적의 구간은 강물과 침전조 시료에서 Class 3, 여과수 시료에서 Class 6이다. 침전조의 물 시료만 미세플라스틱의 최대 개수와 최대 표면적 구간이 일치한다(Table 2와 Fig. 4 참조). 공정 중 원수(강물)의 미세플라스틱 검출 개수와 표면적은 Class 4까지 여과수와 침전조의 물 시료의 것보다 컸지만, Class 5 이상부터는 여과수와 침전조의 물 시료 것보다 작았다. 그러므로 Class 5 이상부터 검출된 미세플라스틱은 공급원으로 강물이 아닐 수 있다.

강물, 여과수 및 침전조의 물 시료에 대해 검출된 플라스틱의 종류를 개수와 표면적으로 구분하면, 여과수와 침전조 물 시료에서만 검출된 형태는 3종이며, 이들은 PA, PMMA, 및 POM, 등이다. 반대로 강물에서만 검출되는 종류는 PC 1종이다. 공정 전체에서 다량으로 검출되는 종류는 PET, PP, 및 PTFE, 등 3종이다. 이중 여과수 시료에서 PTFE 검출 개수는 0.49 MPs/L로, 강물과 침전조의 물 시료의 것에 비해 각각 약 8배와 2배 정도 작지만, 표면적은 각각 약 3배와 2배 정도 크다(Table 3과 Fig. 5 참조). 개수가 적은 것에 비해 표면적이 큰 이유는 여과수 시료에서 검출된 PTFE가 Class 5 이상의 크기 때문으로 해석된다. 더구나 PTFE는 여과수 시료에서 표면적은 $26,475 \mu\text{m}^2/\text{L}$ 로, 여과수 시료에서 검출된 미세플라스틱의 총면적($31,924 \mu\text{m}^2/\text{L}$)의 약 83%를 차지한다. PTFE는 화학적으로 매우 안정적이고 마찰 계수가 낮아 산업용 실링제(테이프, 링, 패킹)로 널리 쓰인다. 밸브를 여닫거나 나사산 배관을 조일 때 사용된 PTFE 실링 테이프가 기계적 가공 및 마모(mechanical wear)로 미세하게 깎여나거나,

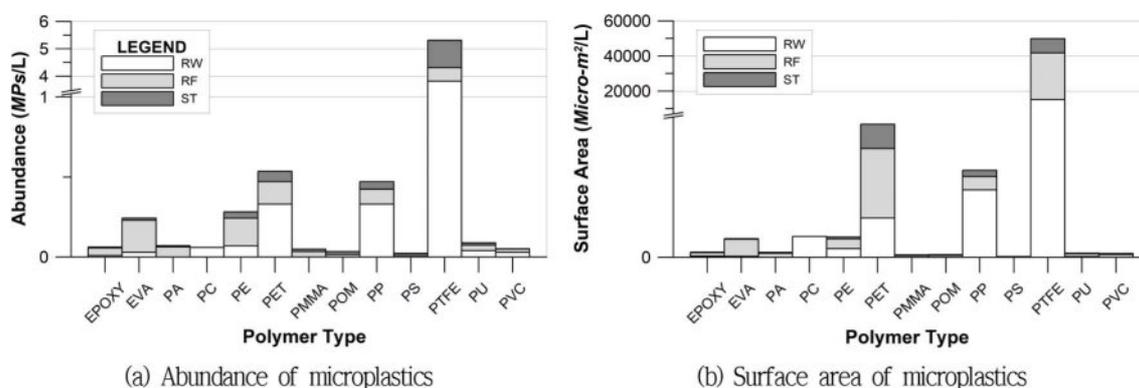


Fig. 5. Distribution of microplastic abundance and surface area by polymer type in RW, RF, and ST samples.

오래된 배관 시스템의 PTFE 재질 가스켓이나 씰(seal)이 노후화(infrastructure aging)로 인해 부식되거나 헐거워 입자 형태로 탈락한다(Dalmau-Soler et al., 2022). 여과수에서 다량의 PTFE 검출은 집수정, 배관, 펌프 밸브 등에 사용된 실링제로 추정되며, 노출이 오래되어 풍화로 인해 세분되기보다 뜯겨어 Class 5와 6구간 정도의 크기(700 μm 이상)로 검출된 것으로 생각된다.

검출된 폴리머 중 PA(Polyamide, Nylon)로 불리는 고분자는 인장 강도가 높고 내마모성이 뛰어난 재질이다. 섬유, 의류, 어망, 밧줄, 베어링, 기어 등에 사용된다. PMMA (Polymethyl Methacrylate, Acrylic)은 유리보다 가볍고, 투명도가 매우 우수하고, 잘 깨질 수 있는 재질이다. 간판, 수족관, 조명 커버 등에 사용된다. POM(Polyoxymethylene, Acetal)은 고결정성 엔지니어링 플라스틱으로, 금속과 유사한 강성을 지녀 마찰 계수가 매우 낮고 치수 안정성(형태 유지력)이 뛰어나 정밀 부품에 사용되는 재질이다. 정밀 기계, 시계 톱니바퀴, 안전벨트 버클, 지퍼, 등에 사용된다. PA와 POM은 수중펌프의 임펠러에 사용되는 재질이다. 이밖에 PP(Polypropylene), PU(Polyurethane) 및 PVC(Polyvinyl Chloride)은 수중펌프의 하우징, 배관 등에 사용되는 것으로 알려졌다(Brydson, 1999; Pivokonský, M., et al., 2018; Dalmau-Soler, J., et al., 2021). 원수보다 시설에서 더 많은 미세플라스틱에 노출될 가능성이 있다. 본 연구는 펌프, 밸브, 배관 재질에 대한 실제 설계 도면 및 시설의 재질 정보를 확보하지 못했다. 또한 운행 중인 시설에 대해 공정 전후의 바탕시험(blank test)도 할 수 없었다. 그러나 연구 결과는 공정 시설에 사용된 재질로부터 용수로 미세플라스틱이 다량 공급될 수도 있음을 시사했다. 명확한 결과를 도출하기 위해서 추가적인 시험과 여러 시설의 실태조사를 통해 정수 공정 시설로부터 발생할 수 있는 미세플라스틱의 관리 방안도 검토되어야 할 것이다.

3. 결 론

강변여과수 공정 중 강물(원수), 여과수 및 침전지의 물 시료에서 미세플라스틱을 분석하여, 검출 개수와 표면적으로 미세플라스틱의 풍부도(abundance)를 공정별로 확인하였다. 그리고 미세플라스틱의 크기와 종류를 공정별로 비교하여 미세플라스틱의 검출 변화를 검토하였다.

공정별 미세플라스틱 검출을 비교하기 위해 시료의 대표성이 중요하다. 시료의 부피(volume)가 작을수록 농도가 과대 평가될 위험이 크며, 이를 방지하기 위해 20 L ~100 L 대용량 여과(Large volume sampling)와 5회씩 반복 측정을 병행하였다. 상대표준편차(RSD)를 검토하여 평균보다 중앙값을 공정별 비교 값으로 선정했다. 횡수별 미세플라스틱 검출량의 차이가 컸기 때문이다. 서로 다른 집단의 분석 결과를 비교하기 위해선 3회 이상의 분석 결과로부터 대표성 확보가 중요하다.

미세플라스틱 분석은 진동 분광(vibrational spectroscopy) 장비인 $\mu\text{-FT-IR}$ 로 분석했다. 장비는 20 μm 이상의 미세 입자를 높은 공간 분해능으로 식별한다. 그러나 장비의 특성상, 분석용 필터 위에 미세플라스틱이 서로 겹치어 개수와 표면적이 적어지거나 줄어들 수도 있다. 200개 미만의 미세플라스틱 입자 또는 미세플라스틱 입자의 면적 합이 분석용 필터 면적의 10% 미만일 때, 적절한 분석 결과로 평가될 수 있다. 본 연구는 공정별 모두에서 분석용 필터 면적의 0.01% 이하의 미세플라스틱 양을 분석하였으므로 적절한 분석이 이뤄졌다고 평가할 수 있다.

한편, 분석 결과를 개수와 표면적으로 표현할 때, 개수가 많으면 표면적도 커지는 관계를 보여줬다. 그러나 원수와 여과수에서 검출된 미세플라스틱의 개수와 표면적의 크기 변화는 비례하지 않았다. 이것은 미세플라스틱 풍부도(abundance)를 표현한 개수가 미세플라스틱의 양으로

반드시 귀결되지 않음을 보여줬다. 그리고 원수(강물)보다 여과수의 시료에서 특정 미세플라스틱이 더 검출되는 현상은 강물 이외에 미세플라스틱 공급원이 따로 있음을 보여줬다.

공정별 검출된 미세플라스틱 장축의 길이를 기준으로 6개 계급으로 나눠 분류한 결과, 개수와 표면적의 최대로 검출되는 구간이 서로 달랐다. 원수와 침전조의 물 시료는 비교적 미세입자 구간에서 개수와 표면적이 최대였던 반면, 여과수는 큰 입자 분포 구간에서 표면적이 최대였다. 모든 공정에서 발견되는 PTFE, 여과수에서 83%를 차지하며 대부분 큰 입자 구간에 속했다. PTFE 이외에 PA, PMMA 및 POM 등 3종은 원수에서도 검출되지 않았다. 이들은 공정시설에서 충분히 배출될 수도 있는 플라스틱 형태로, 정수 과정은 공정으로 인해 미세플라스틱을 감소시킬 수도 있으나, 시설로 인해 증가시킬 수도 있음을 보여줬다.

References

- Alimi, O.S., Farmer Budarz, J., Hernandez, L.M., and Tufenkji, N., 2018, Microplastics and nanoplastics in aquatic environments: aggregation, deposition, and enhanced contaminant transport, *Environ. Sci. Technol.*, **52**(4), 1704-1724.
- Allen, S., Allen, D., Phoenix, V.R., Le Roux, G., Durántez Jiménez, P., Simonneau, A., Binet, S., and Galop, D., 2019, Atmospheric transport and deposition of microplastics in a remote mountain catchment, *Nat. Geosci.*, **12**(5), 339-344.
- ASTM E11-24, 2024, Standard specification for woven wire test sieve cloth and test sieves, ASTM International, West Conshohocken, PA, USA. <https://doi.org/10.1520/E0011-24>
- Bae, J.S., Jeon, S.W., Lee, D.H., and Oh, D.H., 2025, Comparison of water quality characteristics between riverbank filtration and riverbed filtration in the anseongcheon area, *J. Soil Groundwater Environ.*, **30**(5), 9-21.
- Bakir, A., Rowland, S.J., and Thompson, R.C., 2014, Enhanced desorption of persistent organic pollutants from microplastics under simulated physiological conditions, *Environ. Pollut.*, **185**, 16-23.
- Brydson, J.A., 1999, *Plastics Materials*. Butterworth-Heinemann. 7th edition, Oxford, Boston.
- Cao, J.H., Zhao, X.N., Gao, X.D., Zhang, L., Hu, Q., and Kadambot, H.M.S., 2021, Extraction and identification methods of microplastics and nanoplastics in agricultural soil: A review, *J. Environ. Manag.*, **294**, 112997.
- Choi, S.O., and Yeo, S.C., 1972, Geological report of the Nam Ji sheet. KIGAM.
- Corcoran, P.L., and Jazvac, K., 2020, The consequence that is plastiglomerate, *Nat. Rev. Earth Environ.*, **1**(1), 6-7.
- Egger, M., Sulu-Gambari, F., and Lebreton, L., 2020, First evidence of plastic fallout from the North Pacific Garbage Patch, *Sci. Rep.*, **10**(1), 7495.
- Dalmau-Soler, J., Ballesteros-Cano, R., Ferrer, N., Boleda, M. R., and Lacorte, S., 2022, Microplastics throughout a tap water supply network, *Water Environ. J.*, **36**(2), 292-298.
- Ding, L., Wang, X., Ouyang, Z., Chen, Y., Wang, X., Liu, D., Liu, S., Yang, X., Jia, H., and Guo, X., 2021, The occurrence of microplastic in Mu Us Sand Land soils in northwest China: Different soil types, vegetation cover and restoration years, *J. Hazard. Mater.*, **403**, 123982.
- Dong, H., Wang, L., Wang, X., Xu, L., Chen, M., Gong, P., and Wang, C., 2021, Microplastics in a remote lake basin of the Tibetan Plateau: impacts of atmospheric transport and glacial melting, *Environ. Sci. Technol.*, **55**(19), 12951-12960.
- Doorn, N., 2017, Allocating responsibility for environmental risks: A comparative analysis of examples from water governance, *Integr. Environ. Assess.*, **13**(2), 371-375.
- Gong, J., and Xie, P., 2020, Research progress in sources, analytical methods, eco-environmental effects, and control measures of microplastics, *Chemosphere*, **254**, 126790.
- Ivleva, N.P., 2021, Chemical analysis of microplastics and nanoplastics: challenges, advanced methods, and perspectives, *Chem. Rev.*, **121**(19), 11886-11936.
- ISO/WD TR 21960:2018, *Plastics in the Environment — Current state of knowledge and methodologies (ISO/TC61/SC14/WG4)*.
- ISO/FDIS 16094-2:2025(E), *Water quality — Analysis of microplastics in water — Part 2: Vibrational spectroscopy methods for waters with low content of suspended solids including drinking water*.
- Ibrahim, M., Gad, A., and Aly, O., 2024, Enhanced efficiency of water purification plant by combined riverbank filtration, *J. Water Land Dev.*, **62**, 220-229.
- Hartmann, N., Hüffer, T., Thompson, R.C., Hassellöv, M., Verschoor, A., Daugaard, A.E., Rist, S., Karlsson, T.M., Brennholt, N., Cole, M., Herrling, M.P., Hess, M.C., Ivleva, N.P., Lusher, A.L., and Wagner, M., 2019, Are we speaking the same language? Recommendations for a definition and categorization framework for plastic debris, *Environ. Sci. Technol.*, **53**, 1039-1047.
- Hagelskjær, O., Le Roux, G., Liu, R., Dubreuil, B., Behra, P., and Sonke, J.E., 2023, The recovery of aerosol-sized microplastics in highly refractory vegetal matrices for identification by automated Raman microspectroscopy, *Chemosphere*, **328**, 138487.

- Kim, K.W., and Lee, Y.J., 1969, Geological report of the Changyeong sheet. KIGAM.
- Koelmans, A.A., Nor, N.H.M., Hermsen, E., Kooi, M., Mintenig, S.M., and De France, J., 2019, Microplastics in freshwaters and drinking water: Critical review and assessment of data quality, *Water Res.*, **155**, 410-422.
- K-water, 2007, Development of water service system using aquifer. Ministry of Science and Technology, 21st Century Frontier R&D Program, *Sustainable Water Resources Research Center*, p. 1373 (in Korean).
- K-water, 2008, Technical guidelines for riverbank filtration in preparation for water intake system reorganization, p. 6 and p. 34-50 (in Korean).
- Lee, S.I., and Lee, S.S., 2010, Site suitability analysis for riverbank filtration using game theory, *J. Korea Water Resour. Assoc.*, **43**(1), 95-104.
- Lehner, R., Weder, C., Petri-Fink, A., and Rothen-Rutishauser, B., 2019, Emergence of nanoplastic in the environment and possible impact on human health, *Environ. Sci. Technol.*, **53**(4), 1748-1765.
- Li, J., Liu, H., and Chen, J.P., 2018, Microplastics in freshwater systems: A review on occurrence, environmental effects, and methods for microplastics detection, *Water Res.*, **137**, 362-374.
- Lohmann, R., 2017, Microplastics are not important for the cycling and bioaccumulation of organic pollutants in the oceans—but should microplastics be considered POPs themselves?, *Integr. Environ. Assess.*, **13**(3), 460-465.
- Ministry of Climate, Energy and Environment (MCEE), 2025, Rules on the Management of Water Sources. e-Law, Korea Ministry of Government Legislation.
- Mishra, A.K., Singh, J., and Mishra, P.P., 2021, Microplastics in polar regions: an early warning to the world's pristine ecosystem, *Sci. Total Environ.*, **784**, 147149.
- Okoffo, E.D., Ribeiro, F., O'Brien, J.W., O'Brien, S., Tscharke, B.J., Gallen, M., Samanipour, S., Kaserzon, S., Mueller J.F., Galloway, T., and Thomas, K.V., 2020, Identification and quantification of selected plastics in biosolids by pressurized liquid extraction combined with double-shot pyrolysis gas chromatography-mass spectrometry, *Sci. Total Environ.*, **715**, 136924.
- Pivokonsky, M., Cermakova, L., Novotna, K., Peer, P., Cajthaml, T., and Janda, V., 2018, Occurrence of microplastics in raw and treated drinking water, *Sci. Total Environ.*, **643**, 1644-1651.
- Ray, C., Grischek, T., Schubert, J., Wang, J.Z., and Speth, T.F., 2002, A perspective of riverbank filtration, *J. Am. Water Works Assoc.*, **94**(4), 149-160.
- Rafique, A., Irfan, M., Mumtaz, M., and Qadir, A., 2020, Spatial distribution of microplastics in soil with context to human activities: a case study from the urban center, *Environ. Monit. Assess.*, **192**, 1-13.
- Tamminga, M., Stoewer, S.C., and Fischer, E.K., 2019, On the representativeness of pump water samples versus manta sampling in microplastic analysis, *Environ. Pollut.*, **254**, 112970.
- Thompson, R.C., Olsen, Y., Mitchell, R.P., Davis, A., Rowland, S.J., John, A.W.G., McGonigle, D., and Russell, A.E., 2004, Lost at sea: where is all the plastic? *Science*, **304**(5672), 838-838.
- Xu, H., and Arakawa, H., 2022, Determining the appropriate number of particles on a filter to allow small microplastics to be analyzed by microscopy, *MethodsX*, **9**, 101646.
- Yakovenko, N., Carvalho, A., and ter Halle, A., 2020, Emerging use thermo-analytical method coupled with mass spectrometry for the quantification of micro (nano) plastics in environmental samples, *TrAC, Trends Anal. Chem.*, **131**, 115979.
- Zhang, Z., Cui, Q., Chen, L., Zhu, X., Zhao, S., Duan, C., Zhang, X., Song D., and Fang, L., 2022a, A critical review of microplastics in the soil-plant system: Distribution, uptake, phytotoxicity and prevention, *J. Hazard. Mater.*, **424**, 127750.
- Zhang, Z., Zhao, S., Chen, L., Duan, C., Zhang, X., and Fang, L., 2022b, A review of microplastics in soil: Occurrence, analytical methods, combined contamination and risks, *Environ. Pollut.*, **306**, 119374.