

미세기포를 활용한 토양 중 플라스틱 분리 시스템 개발

황건욱^{1,2} · 김도운³ · 김주양³ · 정재학³ · 황성연^{2,4} · 옥용식^{1,2*}

¹고려대학교 환경생태공학부

²국제ESG협회

³한국분석과학연구소

⁴경희대학교 식물환경신소재공학과

Development of Soil-Plastic Separation System Using Microbubble

Geonwook Hwang^{1,2} · Dowoon Kim³ · Juyang Kim³ · Jaehak Jung³,
Sung Yeon Hwang^{2,4} · Yong Sik Ok^{1,2*}

¹Division of Environmental Science and Ecological Engineering, Korea University, Seoul 02841, Korea

²International ESG Association, Seoul, 06621, Korea

³Korea Institute of Analytical Science and Technology, Seoul, 04790, Korea

⁴Department of Plant & Environmental New Resources, Kyung Hee University, Yongin 17104, Korea

ABSTRACT

Soil plastics have emerged as a critical environmental issue due to their negative impact on soils and crops, making their monitoring essential for evaluating the environmental impacts of plastics. However, no standardized method for analyzing soil plastics has been established yet. Most studies employ chemical digestion to remove organic matter and density separation to extract plastics from soil particles. However, the density separation is labor-intensive, time-consuming, and incurs high costs. Moreover, it is not well-suited for handling large sample volumes, posing limitations on accurately analyzing the actual amount of soil plastics that the entire soil sample represents. To overcome these limitations, we developed a soil-plastic separation system utilizing microbubbles. This system aims to enhance the efficiency of soil plastic analysis by reducing processing time and securing high recovery rates. The separation system demonstrated comparable recovery rates to the density separation method, achieving over $90.44 \pm 1.59\%$ for polyethylene (PE) fibers across three different soil types and standard sand samples. Additionally, excluding the chemical digestion, the separation system significantly reduced processing time per batch to approximately 12 hours. The developed system can be easily applied to domestic soil environments and can be utilized as an efficient and sustainable processing method for soil plastic monitoring.

Key words : Plastic waste, Soil plastic monitoring, Agricultural soil, Sustainable waste management, Microbubble

1. 서 론

토양 플라스틱 오염은 토양질과 작물 생산성을 포함하여 인류의 식량 안보에 부정적인 영향을 미치는 환경 문제로 부각되고 있다. 플라스틱 사용의 증가는 토양 생태계 내

플라스틱의 장기 체류 및 축적을 야기하였으며, 특히 5 mm 미만의 플라스틱 입자인 미세플라스틱(microplastic, MP)은 환경에서의 지속성과 토양 생태계에 미치는 잠재적 교란 가능성으로 인해 우려가 커지고 있다.

토양 플라스틱 오염의 원인은 다양하며, 농업 분야에서는 멀칭 비닐의 사용, 플라스틱 잔류물이 포함된 비료의 살포, 하수 슬러지의 토양 혼입 등이 원인으로 보고되고 있다(Chang et al., 2024; Dogra et al., 2024; Heinze et al., 2024; Liu et al., 2024a). 또한 부적절한 폐기물 관리, 대기 침적, 산업 활동 등도 도시와 농촌의 토양에 직간접적인 플라스틱 오염을 가중시킬 수 있다(Bodor et al., 2024; Hu et al., 2024; Zhou et al., 2023).

주저자: 황건욱, 박사수료

공저자: 정재학, 연구소장; 김도운, 연구원; 김주양, 연구원;
황성연, 교수

*교신저자: 옥용식, 정교수

E-mail: yongsikok@korea.ac.kr

Received : 2024. 11. 13 Reviewed : 2024. 12. 04

Accepted : 2024. 12. 27 Discussion until : 2025. 02. 28

토양 내 플라스틱은 토양 구조, 공극률, 투수성에 부정적인 영향을 미쳐 수분 보유력 감소와 영양분 순환의 변화를 초래하며, 이로 인해 작물의 뿌리 성장과 수분 흡수를 저하시킨다(Chang et al., 2024; Han et al., 2024; Ma et al., 2023). 또한 플라스틱은 토양 내에서 유해 화학물질과 병원체의 운반체로 작용하여 토양과 식품망(food chain)에 독성 물질을 유입시킬 수 있다(Seo et al., 2024). 최근 지렁이와 같은 토양 생물체가 미세플라스틱을 섭취할 시, 장내 미생물 군집 및 에너지 대사와 같은 생물학적 기능이 교란되고, 산화 스트레스를 유발할 수 있다는 연구결과가 게재되기도 하였다(Jiang et al., 2023; Yang et al., 2023).

이와 같이 토양 생태계와 식량 안보에 잠재적으로 미칠 수 있는 영향들을 고려할 때, 토양 내 플라스틱 오염을 모니터링하는 것은 플라스틱의 거동 및 환경 영향을 평가하고, 플라스틱 폐기물의 지속가능한 관리 전략 수립 및 관련 정책 개발을 위해 필수적이다. 하지만, 토양 플라스틱 모니터링을 위한 표준화된 분석 방법의 부재는 여전히 중요한 도전 과제로 남아있으며, 이는 연구자들 간의 일관된 결과 도출을 어렵게 하는 요인으로 작용하고 있다(Liu et al., 2024b). 현재 일반적으로 사용되고 있는 토양 내 플라스틱 분석법은 유기물을 제거하기 위한 화학적 분해법(chemical digestion)과 물리적인 특성 차이에 기반한 밀도 분리법(density separation)을 통해 플라스틱 입자를 추출하는 방식이다. 화학적 분해법은 주로 토양 시료와 플라스틱 표면에 존재하는 유기물을 제거하는 방법으로 산-염기 분해법, 산화 분해법, 효소 분해법 등을 사용할 수 있고, 일반적으로 플라스틱의 회수율을 향상시키기 위해 밀도 분리 이전에 진행한다. 밀도 분리법은 주로 플라스틱의 종류에 따라 다른 분리 용액을 적용할 수 있으며, 정제수(purified water, H_2O , 1.0 g/cm^3), 염화 아연(zinc chloride, $ZnCl_2$, $1.5 - 1.7 \text{ g/cm}^3$), 염화 소듐(sodium chloride, $NaCl$, 1.2 g/cm^3), 아이오딘화 소듐(sodium iodide, NaI , $1.6 - 1.8 \text{ g/cm}^3$) 등을 사용할 수 있다(Imhof et al., 2012; Sa'adu and Farsang, 2023). 이 중, 폴리염화 비닐(polyvinyl chloride, PVC, $1.35 - 1.45 \text{ g/cm}^3$)이나 폴리에틸렌 테레프탈레이트(polyethylene terephthalate, PET, $1.3 - 1.45 \text{ g/cm}^3$)와 같이 비교적 높은 밀도의 플라스틱 분리를 위해, 일반적으로 $ZnCl_2$ 와 NaI 용액을 사용한다(Wang et al., 2018). 하지만, 두 밀도 분리 용액은 제조 단가가 높고, $ZnCl_2$ 용액의 경우 인체에 유해한 자극성 물질이며, 수생 생물에게 강한 독성을 지니고 있다. NaI 또한 자극성 물질이며, 토양 시료 내 유기물의 화학적 분해 과정에서 주로 사용되는 과산화

수소(hydrogen Peroxide, H_2O_2) 용액과 강한 반응을 일으키므로, 밀도 분리 과정에서 추가적인 주의가 요구된다. 또한, 밀도 분리 용액은 별도의 여과과정을 거치지 않으면 용액 내 잔류하는 미세플라스틱의 존재로 인해 재사용이 까다롭다는 단점이 있다. 따라서, 밀도 분리법은 토양으로부터 플라스틱을 추출하기 위한 가장 기본적인 방법이지만, 시간 소모적이고 노동 집약적이며 수십 g 이상의 큰 시료량을 한 번에 처리하기가 어렵다는 단점이 있다.

따라서, 토양 플라스틱 분석의 효율성, 정확성, 처리량을 확보하고, 환경 영향을 최소화할 수 있는 전처리 기술의 개발이 필요한 실정이다. 최근에는 다양한 접근법이 시도되고 있는데, 예를 들어 철 나노입자를 토양 플라스틱에 부착하여 자기적 성질을 부여한 뒤 이를 추출하는 자력 분리 방법(Grbic et al., 2019; Ramage et al., 2022)이나, 화학적 분해법과 밀도 분리법을 하나의 프로세스로 통합하는 방식(Li et al., 2024)이 있다. 이러한 기술들 중에서도 특히 미세기포 기술은 지름 $0.1 - 100 \mu\text{m}$ 의 미세한 기포를 플라스틱 입자에 부착하여 부력을 증가시키고, 이를 통해 플라스틱을 효율적으로 분리시킬 수 있는 방법이다(Wang et al., 2022). 이 기술은 수처리 분야에서 부유 물질 제거에 활용되고 있으며, 에너지 효율성과 처리 속도 면에서 우수한 성능을 보이고 있다(Sakr et al., 2022; Shen et al., 2022; Zhao et al., 2024).

본 연구는 이러한 미세기포 기술을 토양 플라스틱 처리 과정에 적용하여 새로운 분리 시스템을 개발하였다. 플라스틱 입자의 분리 과정을 간소화하고 처리 시간을 크게 단축하며, 더 많은 토양 시료를 분석할 수 있도록 하여 시료의 대표성을 향상시키는 것을 목표로 하였다. 개발된 시스템을 이용하여 서로 다른 특성을 가진 국내 농경지 토양과 표준사 시료에 폴리에틸렌(PE) 미세섬유를 첨가하여 회수율 평가를 진행하였다. 또한, 밀도 분리법과의 결과를 비교하여 분리 시스템의 효율성과 정확성을 분석하고, 국내 농경지 토양에서의 적용 가능성을 평가하였다.

2. 재료 및 방법

2.1. 미세기포를 이용한 토양 중 플라스틱 분리 시스템

본 연구에서 개발한 토양 중 플라스틱 분리 시스템(Fig. 1)은 토양 시료 중 플라스틱 입자를 효과적으로 회수할 수 있도록 선행연구에서 제안된 디자인을 참고하여 재구성하였다(Wenzel et al., 2022). 시스템의 전체 높이는 약 80 cm로, 실험실 규모(bench scale)에서 사용할 수 있도록 설계하였다. 분리 용액은 1.3 L까지 주입할 수

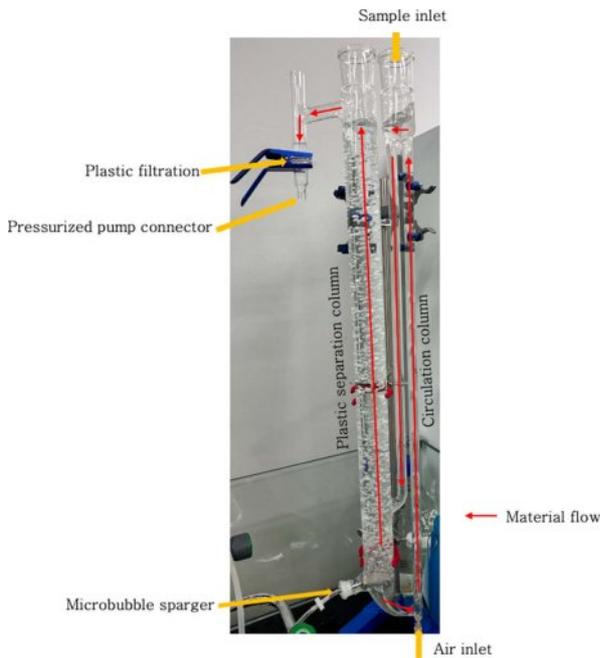


Fig. 1. Picture of the microbubble soil-plastic separation system (modified from Wenzel et al., 2022)

있으며, 한 번의 처리로 약 50 g 이상의 토양 시료를 처리할 수 있다. 토양 시료가 시스템 내에서 적절히 순환되지 않고 정체되거나 액체의 흐름이 전달되지 않는 사각지대(dead space)가 존재할 수 있어, 이를 최소화할 수 있도록 세부적인 디자인을 수정하였다. 시스템의 재질은 유리이며, 국내 실험기구 제작 업체를 통해 맞춤 제작하였다.

토양 내 플라스틱 분리 시스템은 1) 미세기포 발생기(microbubble sparger) 2) 시료 투입부(sample inlet) 및 순환관(circulation column) 3) 플라스틱 분리관(plastic separation column) 4) 공기 펌프(air pump) 및 공기 주입구(air inlet) 5) 플라스틱 입자 여과부(plastic filtration)로 구성되어 있다.

미세기포 발생기는 전체 시스템의 핵심 요소로, 지금 0.1 – 100 μm 의 미세기포를 생성한다. 미세기포는 플라스틱 입자에 부착하여 부력을 증가시키며, 이를 통해 플라스틱 입자가 분리용액 내에서 쉽게 부상하여 분리될 수 있도록 한다. 본 연구에서 미세기포 발생기는 원기둥 모양의 소결 산기장치(sintered sparger) 중에서 공극의 크기가 0.1 μm 인 것을 사용하였다.

시료 투입구 및 순환관은 시스템 내 토양 시료 투입 및 지속적인 순환을 통해 토양 입자와 미세기포 간의 상호작용을 발생시킬 수 있도록 구성되어 있다. 토양 시료가 조금씩 미세기포 발생기 부근으로 떨어지도록 경사를 이루고 있으며, 일부 시료는 하단부로 이동하여 순환관을

따라 다시 상승하게 된다. 이러한 순환 구조를 통해 플라스틱 분리관에서 플라스틱 입자를 지속해서 재순환시켜 회수율을 높일 수 있도록 설계하였다.

플라스틱 분리관은 토양 입자와 미세기포가 상호작용하는 공간이다. 순환관을 타고 떨어지는 토양 시료와 미세기포 발생기에서 방출되는 기포가 반응하여, 플라스틱 입자를 상승시킨다. 상부에 포집된 플라스틱 입자는 유체의 흐름을 따라 필터가 장착된 플라스틱 입자 여과부로 이동하게 된다. 플라스틱 분리관 상부는 개방된 형태를 가지고 있어, 플라스틱 입자가 내부 벽에 달라붙는 경우 이를 씻어 내릴 수 있고, 미세기포 형성을 통한 공기의 압력이 해소될 수 있도록 하였다.

공기 펌프 및 공기 주입구는 미세기포를 생성하는 데 필요한 공기의 흐름을 제어하여, 시료가 시스템 내를 원활히 순환할 수 있도록 유지한다. 공기 주입구에서 생성되는 공기 방울은 순환관을 따라 하강한 일부 시료를 다시 상승시킨다. 이 때, 공기 주입구의 유량은 순환관의 직경과 일치하는 크기의 공기 방울이 형성될 수 있도록 하여, 시료가 효율적으로 상승할 수 있도록 하였다. 공기 펌프는 국내 상업용 제품을 사용하였으며, 펌프의 토출부에는 유량 조절기를 연결하여 분리 시스템으로 유입되는 공기 유량을 적절하게 조절할 수 있도록 하였다.

플라스틱 입자 여과부에서는 분리된 플라스틱 입자를 회수할 수 있도록 여과 필터 장착부와 감압 펌프 연결부(pressurized pump connector)를 포함하고 있으며, 원활한 여과 과정을 위해 상부가 개방된 상태로 되어 있다. 여과 필터 장착부는 필터 장착이 용이하도록 클램프로 고정 및 분리가 용이하도록 제작하였다. 필터는 미세플라스틱을 여과할 수 있는 나일론, 유리 섬유, 세라믹, 금속, 실리콘, 테플론(poly tetra fluoro ethylene, PTFE), 알루미늄아 멤브레인(aluminum oxide membrane filters, AMF) 등 다양한 재질을 사용할 수 있다.

분석 대상 토양 및 시스템 내에 사용한 분리용액의 특성에 따라 공기 유량 및 처리 시간을 조절할 수 있으며, 본 연구에서는 미세기포 생성 공기 유량은 7 – 100 L/h, 시료 순환을 위한 공기 유량은 240 – 600 L/h, 시료 처리 시간은 각 시료당 30 – 60분으로 설정하여 진행하였다.

2.2. 토양 시료 채취 및 유기물 제거

토양 내 플라스틱 분리 시스템의 회수율 측정 및 밀도 분리법과의 비교를 위해 토양 시료 3점과 표준사(SNL inc., France) 1점을 이용하였다. 토양 시료 A는 경상남도 김해시 대동면 초정리(35°14'24.4"N, 128°58'44.4"E), B는

서울시 방학동(37°39'34.20"N, 127°01'18.84"E), C는 경기도 남양주시(37°34'56"N, 127°14'04"E)에 위치한 밭토양을 사용하였다. 토양 시료 채취 시에는 일정 간격으로 채취 지점을 선정하고, 토양 표면의 이물질(식물 잔해, 돌, 낙엽 등)을 제거한 뒤 철제 삽을 이용하여 0–20 cm 깊이로 토양 시료를 채취하였다. 시료 채취 시 플라스틱으로 인한 추가 오염을 방지하기 위해 유리 재질의 보관함을 이용해 시료를 운반하였다. 채취한 토양 시료는 실내 조건에서 풍건하여 수분을 제거한 후, 2 mm 체(10 mesh)를 사용해 체질하여 회수율 측정에 적합한 입도로 분리하였다. 또한, 토성에 따른 회수율 차이가 발생할 것을 가정하여, 각 토양 시료의 토성을 피펫법으로 측정하였다(Table 1a) (Gee and Bauder, 2020).

표준사는 유럽 표준화 기구(european committee for standardization, CEN) 및 유럽 표준(european norm, EN)의 196-1 규격으로, 시멘트의 압축강도 및 휨강도의 공시체 제작용으로 사용하는 표준 규격의 모래를 사용하였다. 표

준사 시료의 입도 분포는 모두 2 mm 이내로(Table 1b), 별도의 체질을 진행하지 않고 사용하였다.

회수율 측정에 앞서, 토양 내 일부 소수성 유기물이 미세기포와 반응할 가능성을 최소화하고, 원활한 플라스틱 입자의 분리를 위해 화학적 분해법으로 유기물을 제거하였다. 화학적 분해법은 산성, 알칼리성, 산화 및 효소 분해 등 사용되는 분해 용액의 유형에 따라 분류되며(Table 2), 본 실험에서는 30% H₂O₂(Duksan General Science Co., Ltd.)을 사용하였다. 토양 시료는 각 5 g씩 4개의 반복 시료로 준비하여 비커에 담고, 10 mL의 H₂O₂를 첨가한 뒤 50°C에서 24시간 동안 가열하여 유기물을 분해하였다. 유기물 분해를 완료한 시료는 분리 시스템에 투입하여 처리 후 회수율 측정을 진행하였다.

2.3. 섬유형 PE 제작 및 회수율 측정

본 연구에서는 MP 크기의 섬유형 PE를 사용하여 분리 시스템의 회수율을 측정하였다. 국내에서 상용화된 주황

Table 1. Characteristics of the samples used in the recovery test
(a) Composition ratio and texture of the soil samples

Soil sample (location)	Composition ratio (%)			Soil texture
	Sand (2–0.05 mm)	Silt (0.05–0.002 mm)	Clay (<0.002 mm)	
Sample A (Gimhae-si, Gyeongsangnam-do)	22.7	54.9	22.4	Silt loam
Sample B (Banghak dong, Seoul)	50.1	39.3	10.6	Loam
Sample C (Namyangju, Gyeonggi-do)	74.2	20.9	4.9	Loamy sand

(b) Composition of the standard sand sample

Sieve size (mm)	Cumulative residue on sieve (%)
0.08	99 ± 1
0.03	87 ± 5
0.50	67 ± 5
1.00	33 ± 5
1.60	7 ± 5
2.00	0

Table 2. Chemical digestion techniques for soil sample treatment

Chemical digestion method	Digestion solution	References
Acid digestion	Hydrochloric acid (HCl), Nitric acid (HNO ₃)	(Fan et al., 2023; Pfeiffer and Fischer, 2020)
Alkaline digestion	Sodium hydroxide (NaOH), Potassium hydroxide (KOH)	(Patrucco et al., 2024; Prosenc et al., 2021; Xiong et al., 2012)
Oxidizing digestion	Hydrogen peroxide (H ₂ O ₂)	(Hurley et al., 2018; Okoffo et al., 2021; Radford et al., 2021)
Enzymatic digestion	Protease, Lipase, Cellulase	(Fan et al., 2023; Möller et al., 2022)

색 PE 로프 제품(Rope & Wire)을 5 mm 미만 크기로 절단하여 섬유형 PE 입자를 제작하였다. 제작된 PE 입자는 0.05 g씩 칭량하여 개수를 측정한 후, 유기물 분해를 진행하기 이전에 각 토양 시료에 첨가하였다.

회수율 측정을 위해 섬유형 PE를 사용한 이유는 다음과 같다. 첫째, 기존 토양 시료와 표준사에 이미 존재할 수 있는 플라스틱 입자와 구별하기 위해 최대한 외부 오염이 없는 것을 선택하였다. 만약 토양 및 표준사에 이미 PE 입자가 존재하더라도, 본 실험에서 사용한 것은 고유한 색깔과 형태를 가지고 있어 입자 개수 측정 시 혼동 가능성을 최소화할 수 있었다. 둘째, PE는 과산화수소를 이용한 유기물 분해 과정에서도 색깔이나 물리적인 형태의 변화 없이 안정적으로 유지되었다. 또한, PE 입자와 토양 시료의 구분을 용이하여 정확한 입자 수 분석이 가능하였다.

토양 내 플라스틱 분리 시스템의 회수율 측정은 다음과 같이 진행하였다. 먼저, 토양 시료로 인해 미세기포 발생기에 파울링(fouling)이 발생하지 않도록 미리 에어펌프를 가동한 후 분리 시스템 내에 1.3 L의 정제수(Human corporation, Republic of Korea)를 첨가하였다. 그 후 공기 주입구로 공기 펌프를 가동하여 정제수가 시스템 내를 순환할 수 있도록 하고, 플라스틱 입자 여과부에 45 μm 스테인리스 필터(Korea institute of analytical science and technology, Republic of Korea)를 장착하였다. 순환관이 막히지 않도록 시료 투입부에 토양 시료 5 g을 천천히 투입하면서, 시료가 정제수의 흐름을 따라 적절하게 순환이 이루어지는 것을 확인하였다. 이 때, 투입부 벽면에 달라붙은 시료는 정제수를 여러 번 나누어 주입하여 세척해주면서 적절히 수위를 맞춘 뒤, 30 - 60분간 처리를 진행하였다. 그 후 감압펌프를 가동시키고, 적정량의 증류수를 시료 투입부에 주입하여 플라스틱 분리관에 포집된 플라스틱 입자가 증류수의 흐름을 타고 흘러 넘치도록(overflow) 하여 플라스틱 입자 여과부로 이동시켰다. 여과된 플라스틱 입자는 50°C 오븐에서 6시간 건조한 후 회수된 플라스틱 입자 개수를 측정하였다.

회수율은 각 토양 시료의 전체 처리 과정 전후의 PE 입자 개수 차이로 산출하였다. PE 입자 개수 분석 시에는 PE와 배경색의 뚜렷한 대비가 나타날 수 있도록 일회용 흰색 평량접시에 먼저 회수된 PE 입자들을 고르게 편 뒤, 모바일 기기 혹은 디지털 카메라를 이용하여 사진을 촬영하였다. 촬영한 사진은 이미지 파일로 추출한 뒤 ImageJ 소프트웨어를 이용해 입자 개수 분석을 진행하였다. 이 때, 첨가한 PE 입자 외에 다른 입자가 같이 계측된 경우에는 수작업으로 이를 제거한 후 전체 입자 개수를 산출하였다.

2.4. 밀도 분리법을 이용한 토양 내 플라스틱 분리

본 연구에서는 기존의 밀도 분리법을 이용하여, 분리 시스템과 회수율을 비교 분석하였다. 토양 시료의 유기물 제거는 2.2 항에서 설명한 것과 동일한 과정으로 진행하였으며, 밀도 분리를 위해 유기물 제거를 완료한 5 g의 토양과 60% NaI 용액 20 mL를 혼합한 후, 교반기를 이용하여 180 r/min에서 1시간 교반하였다. 교반을 마친 시료는 12시간 동안 정치시킨 후 상등액을 추출하여 45 μm 스테인리스 필터를 이용하여 여과를 진행하였다. 회수한 입자를 여과한 필터는 50°C 오븐에서 6시간 건조한 후 플라스틱 입자 개수를 측정하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 토양 내 플라스틱 분리 시스템의 회수율 평가 및 밀도 분리법과의 비교

개발된 분리 시스템의 회수율을 평가한 결과, 토양 시료 A, B, C와 표준사 시료에 대해 각각 $90.4 \pm 1.59\%$, $97.39 \pm 1.79\%$, $97.38 \pm 1.68\%$, $96.98 \pm 2.56\%$ 으로 측정되었으며, 모든 토양 시료 종류에서 90% 이상의 회수율을 달성하였다.

일반적으로 미세기포는 지름이 0.1~100 μm 인 기포로, 표면적이 큰 특성을 가지며 수중에서 표면 에너지가 불안정한 상태를 유지한다(Zhou et al., 2022). 한편, PE를 포함한 대부분의 플라스틱은 소수성(hydrophobic) 특성을 지니고 있어 물과의 상호작용을 최소화하려는 경향이 있으며, 물 분자보다 공기와의 상호작용을 선호한다. 이러한 특성으로 인해 플라스틱 입자 표면은 미세기포가 부착되기 쉬우며, 이는 시스템 내에서 전체 자유 에너지를 감소시키고 열역학적 안정성을 추구하는 과정으로 설명될 수 있다(Fujii, 2024; Liu et al., 2024c). 수중에서 미세기포가 플라스틱 입자와 가까워지면, 두 입자 사이에 얇은 액체 막이 형성된다. 소수성 상호작용에 의해 이 액체 막은 점차 얇아지고 불안정해지며, 결국 파괴된다. 이로 인해 미세기포가 플라스틱 입자 표면에 직접 부착하게 되고, 부착된 미세기포로 인해 플라스틱 입자의 전체 부피에 비해 밀도가 낮아져 부력이 증가하면서 상부로 부상하게 된다(Swart et al., 2022). 본 연구의 회수율 평가에서 90% 이상의 회수율을 달성한 것은 분리 시스템 내에서 이러한 미세기포와 플라스틱 입자 사이의 반응을 30 - 60분 이내로 충분히 발생시킬 수 있음을 의미한다.

비교를 위해 기존 밀도 분리법을 이용한 회수율 평가를 진행한 결과, 토양 시료 A, B, C와 표준사 시료에 대해 각각 $97.43 \pm 1.49\%$, $98.47 \pm 0.63\%$, $94.91 \pm 1.32\%$, $98.03 \pm 0.93\%$ 인

것으로 나타났다. 밀도 분리법도 마찬가지로 모든 시료에서 90% 이상의 회수율을 보였으며, 비록 시료 A의 경우 밀도 분리법이 약 7% 더 높은 회수율을 보였으나, 결과적으로는 두 방법 모두 높은 수준의 회수율을 보였다(Fig. 2).

시료 A의 회수율을 살펴보았을 때, 해당 토양 시료는 토성 측정결과에서 비교적 다른 토양 시료보다 미사와 점토의 함량이 높은 것으로 나타났다(Table 1a). 이러한 특성으로 인해, 분리 시스템 내에서 PE 입자와 미세기포 간의 상호작용 과정에서 미사 크기 이하의 작은 토양 입자가 물리적 방해 요소로 작용했을 가능성이 있다. 또한, 점토와 미사 입자는 수중에서 쉽게 응집되는 경향이 있어, 미세기포가 PE 입자 대신 점토 및 미사 입자에 부착되는 현상이 발생할 수 있다. 이로 인해 PE 입자가 충분한 부력을 확보하지 못해 회수율이 감소했을 것으로 판단된다.

3.2. 토양 내 플라스틱 분리 시스템의 효율성 평가

본 연구에서는 토양 내 플라스틱 분리 시스템의 효율성을 기존의 밀도 분리법의 전체 처리 시간을 비교하여 평가하였다(Table 3). 먼저, 토양 시료의 건조, 체가름, 그리고 유기물 분해 과정을 완료하는 데 약 3일이 소요되었다. 이

과정은 분리 시스템과 밀도 분리법 모두 동일하게 적용되는 절차이므로, 처리 시간 비교에서는 제외하였다.

밀도 분리법의 경우, 밀도 분리 용액과 토양 시료를 혼합하여 교반하는 데 약 1시간이 소요되며, 혼합된 시료를 12시간 동안 정치시켜 토양 입자와 플라스틱 입자가 분리 되도록 한다. 이후 상등액을 추출하여 여과하고, 회수된 플라스틱 입자를 건조하는 데 약 6시간이 추가로 필요하다. 따라서, 밀도 분리법은 1회 처리에 약 19시간이 소요된다. 그러나 토양의 물리적 특성이나 유기물 함량 등에 따라 분리 효율이 달라질 수 있으므로, 일관된 회수율을 확보하기 위해 동일한 과정을 최소 3회 이상 반복하는 것이 일반적이다. 이러한 반복 처리로 인해 전체 처리 시간은 최대 45시간까지 증가할 수 있다.

반면에, 토양 내 플라스틱 분리 시스템은 분리 용액 주입, 에어펌프의 유량 조절, 필터 장착 등의 준비 과정에 약 30분이 소요된다. 토양 시료를 투입한 후 시스템을 가동하여 플라스틱 입자를 분리하는 데 30-60분이 필요하며, 분리된 플라스틱 입자를 여과하고 건조하는 데 약 6시간이 추가로 소요된다. 따라서 분리 시스템을 이용한 1회 처리시간은 약 7.5시간 정도이다. 시료의 특성에 따라 필요한 경우 이 과정을 최대 3회 반복 처리가 가능하며, 이 경우에도 전체 처리 시간은 9 - 10.5시간으로, 밀도 분리법에 비해 현저히 짧다.

비교 결과, 미세기포 기반 분리 시스템은 기존 밀도 분리법에 비해 처리 시간이 크게 단축됨을 확인할 수 있었다. 1회 처리 기준으로 약 12시간 이상의 시간 절감이 가능하며, 반복 처리 시에도 전체 처리 시간이 약 35시간 이상 단축된다. 이러한 시간 단축은 대량의 토양 시료를 처리해야 하는 연구나 모니터링 프로그램에서 매우 중요한 이점으로 작용하며, 효율성 향상 뿐만 아니라 인력 및 자원의 절약, 더 빠른 데이터 확보를 가능하게 한다. 또한, 분리 시스템은 한 번에 더 많은 양의 시료를 처리할 수 있어, 토양 시료의 대표성을 높이고 분석 결과의 신뢰성을 향상시킬 수 있다. 따라서, 개발된 분리 시스템은 기존의 밀도 분리법에 비해 효율성이 뛰어나며, 토양 내 플라스틱 오염

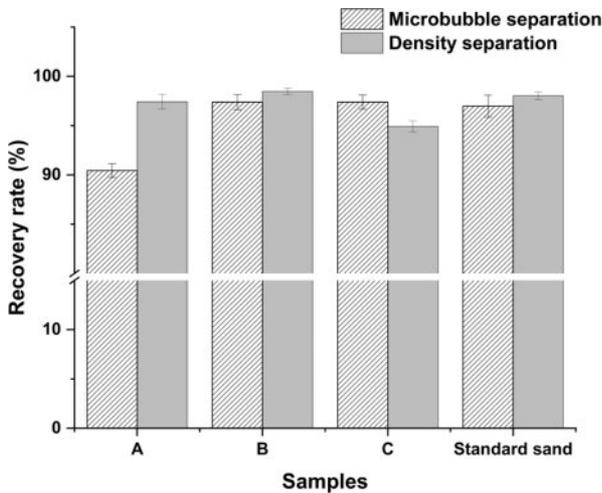


Fig. 2. Recovery test results of the microbubble separation system and density separation.

Table 3. Comparison of processing time between the microbubble soil-plastic separation system and the density separation method

Analytical procedure	Processing time for 1 cycle (per sample)			
	Microbubble soil-plastic separation system		Density separation	
Physical separation	Preparing the separation system	0.5 hr	Mixing the density separation solution with soil	1 hr
	Operating the system	0.5 - 1 hr	Standing the sample after mixing	12 hr
	Drying the sample	6 hr	Filtering and drying the sample	6 hr
Total	7-7.5 hr		19 hr	

모니터링과 분석을 위한 실용적인 대안이 될 수 있음을 확인하였다.

3.3. 토양 중 플라스틱 분리 시스템의 최적화 및 확장성 평가

본 연구에서 개발된 분리 시스템은 다양한 토양 유형에서 90% 이상의 회수율을 달성하여 그 효율성과 신뢰성을 입증하였다. 그러나 일부 토양, 특히 미사와 점토 함량이 높은 토양에서는 미세기포와 플라스틱 입자의 상호작용이 저해되어 회수율이 다소 낮아지는 경향이 있었다. 이러한 경우 높은 회수율을 확보하기 위한 추가적인 방안을 모색할 필요가 있다.

첫째, 분산제의 활용을 고려할 수 있다. 분산제는 토양 입자 간의 응집을 방지하여 토양 입자와 플라스틱 입자의 분리를 촉진한다. 이를 통해 미세기포가 플라스틱 입자에 더욱 효과적으로 부착할 수 있으며, 결과적으로 회수율을 향상시킬 수 있을 것으로 예상된다. 다만, 분산제는 일반적으로 계면활성제의 일종으로, 소수성 부분과 친수성 부분을 모두 가지고 있어, 플라스틱 입자 표면에 부착되는 경우 플라스틱 표면에 친수성 층을 형성시킬 수 있어 미세기포와의 친화력이 감소될 가능성이 있다. 따라서, 분산제의 종류와 투입량은 토양의 특성에 따라 최적화되어야 하며, 환경 친화적인 물질을 사용하는 것이 바람직하다.

둘째, 반복 처리의 도입을 통해 회수율을 높일 수 있다. 분리 시스템을 한 번 가동한 후 회수된 토양 시료를 다시 투입하여 반복 처리를 진행하면, 초기 분리 과정에서 회수되지 않은 플라스틱 입자를 추가로 회수할 수 있다. 더 나아가, 시스템의 구조를 병렬로 연결하여 여러 개의 분리 시스템을 동시에 운영하면 대량의 시료를 신속하게 처리할 수 있어, 토양 플라스틱 모니터링 연구나 산업현장에서의 규모 확대(scale-up) 적용이 가능할 것으로 예상된다.

셋째, 시스템 가동 조건의 최적화를 통해 추가적인 회수율을 확보할 수 있다. 공기 유량, 미세기포 생성량, 처리 시간 등의 파라미터를 조정하여 미세기포와 플라스틱 입자의 접촉 빈도를 높일 수 있다. 예를 들어, 공기의 유량을 증가시키면 미세기포의 생성이 촉진되어 플라스틱 입자와의 상호작용 기회가 늘어날 수 있다. 그러나 지나친 공기 유량 증가는 토양 입자의 과도한 교반을 유발하여 오히려 분리 효율을 저하시킬 수 있으므로 토양 특성에 따른 최적의 조건을 설정하는 것이 중요하다. 또한, 토양 내 존재하는 소수성 광물 입자가 미세기포와 상호작용하여 플라스틱 입자와 함께 분리될 가능성을 최소화하는 것도 필수적이다. 이를 위해 가동 조건을 정밀하게 조정하여 플라스틱

입자의 선택적 부상을 촉진하면서 비플라스틱 성분의 혼입을 억제하는 방향으로 시스템을 운용해야 한다.

마지막으로, 초음파 처리와 같은 물리적 방법을 추가적으로 적용하는 것도 고려해볼 수 있다. 초음파 처리는 토양 입자의 응집을 분해하고(Lehtinen et al., 2014), 미세기포의 생성과 분산을 촉진하여 플라스틱 입자의 부상을 돕는 역할을 할 수 있다. 장치 내 소형 초음파 장치 등을 처리 초기에 일정시간 투입하거나, 내부에 장착하는 방식으로 설계한다면, 추가적인 회수율 및 효율성을 확보할 수 있을 것으로 기대된다.

본 분리 시스템의 경우 프로세스의 연속화를 통해 전체 작업 흐름의 효율성을 높일 수 있다. 예를 들어, 분리 시스템에서 회수된 플라스틱 입자를 건조하고 분석 기기로 도입하는 과정을 하나의 프로세스로 연결하면, 중간 과정에서 발생할 수 있는 시료 손실이나 오염을 최소화할 수 있다. 특히, 플라스틱 입자 여과부에 자동화된 건조 장치나 분석 장비를 직접 연결함으로써 인력 투입을 최소화하고 처리 시간을 단축할 수 있다.

이렇게 다양한 방법들을 통해 분리 시스템의 회수율과 효율성을 향상시키는 동시에, 실제 연구 및 산업적 응용에서의 확장성을 높일 수 있다. 이를 통해 광범위한 지역의 토양 플라스틱 오염을 효율적으로 모니터링할 수 있으며, 연구 목적이나 산업 규모에 따라 시스템의 크기를 조정하여 처리 용량을 유연하게 조절할 수 있다. 또한, 이 시스템은 수처리 분야에서 활발히 활용되고 있는 미세기포 기술을 기반으로 개발되었기 때문에, 기존 시설과 장비를 활용하여 쉽게 구축 및 운영이 가능하다. 이로 인해, 초기 비용 절감과 기술 도입을 더 신속하게 진행할 수 있을 것으로 예상된다.

4. 결 론

본 연구에서는 토양 내 플라스틱 오염의 심각성을 인식하고 이를 정확히 모니터링할 필요성에 기반하여, 미세기포 기술을 활용한 토양 내 플라스틱 분리 시스템을 개발하였다. 이 시스템은 기존 밀도 분리법의 시간 소모적이고 노동 집약적인 한계를 극복하기 위해 설계되었으며, 회수율 평가를 통해 효율성을 검증하고 확장 가능성을 평가하였다. 연구 결과, 미세기포 기반 분리 시스템은 세 가지 종류의 토양 시료와 표준사 시료에서 모두 90% 이상의 높은 회수율을 달성하였다. 특히, 처리 시간 측면에서 기존의 밀도 분리법에 비해 1회 처리당 약 12시간 이상, 반복 처리 시 최대 35시간 이상의 시간을 단축할 수

있어 효율성이 크게 향상되었다. 이는 대량의 토양 시료를 처리해야 하는 환경 모니터링이나 연구에 있어 중요한 이점으로 작용할 수 있다.

본 시스템은 미세기포가 소수성인 플라스틱 입자에 부착하여 부력을 증가시키는 원리를 활용하여, 토양 입자와의 효과적인 분리를 가능하게 하였다. 더 나아가, 분산제의 활용이나 반복 처리의 도입, 시스템 운영 조건의 최적화 등을 통해 회수율과 효율성을 더욱 향상시킬 수 있을 것으로 기대된다.

본 연구의 기여도는 다음과 같이 평가할 수 있다. 첫째, 미세기포 기술을 토양 플라스틱 분석에 적용함으로써 효율성을 향상시키고, 환경적 영향을 최소화하여 기존 방법의 한계를 극복하였다. 둘째, 대량의 시료를 신속하게 처리할 수 있는 시스템을 통해 토양 시료의 대표성을 높이고 분석 결과의 신뢰성을 확보하였다. 셋째, 분리 시스템의 응용 가능성을 평가하여 실제 연구 및 산업 현장에서의 확장성과 적용 가능성을 제시하였다.

그러나 본 연구에는 몇 가지 제한점이 존재한다. 회수율 평가에서는 비교적 낮은 밀도를 가진 PE 섬유를 사용하였으므로, PVC, PET, PLA 등 다양한 종류와 밀도를 가진 플라스틱에 대해서도 일정한 회수율을 유지할 수 있는지에 대한 추가적인 검증이 필요하다. 또한, 본 연구에서는 시각적으로 관찰 가능한 미세플라스틱 크기를 사용하여 입자 개수를 측정하였으나, 현미경 수준으로 관찰 가능한 더 작은 크기의 입자나, 다양한 형태의 플라스틱에 대한 추가적인 평가가 필요하다. 이러한 추가 검증을 통해 분리 시스템이 다양한 크기와 특성을 가진 플라스틱에 대해 안정적으로 적용될 수 있는지 확인하고, 실제 환경에서의 복잡한 플라스틱 오염 조건에 따른 처리 과정을 최적화할 수 있을 것이다. 특히, 후속 연구에서는 플라스틱으로 오염된 농경지 토양을 대상으로 본 분리 시스템을 적용하여 분석을 수행함으로써, 시스템의 실효성을 평가하고, 토양 플라스틱 오염의 공간적 분포와 농업 환경에 미치는 영향을 보다 구체적으로 규명할 수 있을 것으로 기대된다.

사 사

본 연구는 2021년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 일부 지원을 받아 수행된 기초연구사업이다(2021R1A6A1A10045235). 또한 본 연구는 2024년도 산업통상자원부 및 산업기술기획평가원(KEIT) 연구비 지원에 의한 연구이다(Project No. 00432915). 또한 본 연구는

오정리질리언스연구원의 지원으로 수행된 연구이다.

References

- Bodor, A., Feigl, G., Kolossa, B., Mészáros, E., Laczi, K., Kovács, E., Perei, K., and Rákhely, G., 2024, Soils in distress: The impacts and ecological risks of (micro)plastic pollution in the terrestrial environment, *Ecotoxicol. Environ. Saf.*, **269**, 115807.
- Chang, N., Chen, L., Wang, N., Cui, Q., Qiu, T., Zhao, S., He, H., Zeng, Y., Dai, W., Duan, C., and Fang, L., 2024, Unveiling the impacts of microplastic pollution on soil health: A comprehensive review, *Sci. Total Environ.*, **951**, 175643.
- Dogra, K., Kumar, M., Bahukhandi, K.D., and Zang, J., 2024, Traversing the prevalence of microplastics in soil-agro ecosystems: Origin, occurrence, and pollutants synergies, *J. Contam. Hydrol.*, **266**, 104398.
- Fan, W., Qiu, C., Qu, Q., Hu, X., Mu, L., Gao, Z., and Tang, X., 2023, Sources and identification of microplastics in soils, *Soil Environ. Heal.*, **1**(2), 100019.
- Fujii, S., 2024, Foams/bubbles stabilized with polymer particles, *Curr. Opin. Colloid Interface Sci.*, **72**, 101808.
- Gee, G.W. and Bauder, J.W., 2020, Methods of Soil Analysis, *SSSA Book Ser.*, 383-411.
- Grbic, J., Nguyen, B., Guo, E., You, J.B., Sinton, D., and Rochman, C.M., 2019, Magnetic Extraction of Microplastics from Environmental Samples, *Environ. Sci. Technol. Lett.*, **6**(2), 68-72.
- Han, L., Chen, L., Feng, Y., Kuzyakov, Y., Chen, Q., Zhang, S., Chao, L., Cai, Y., Ma, C., Sun, K., and Rillig, M.C., 2024, Microplastics alter soil structure and microbial community composition, *Environ. Int.*, **185**, 108508.
- Heinze, W.M., Steinmetz, Z., Klemmensen, N.D.R., Vollertsen, J., and Cornelis, G., 2024, Vertical distribution of microplastics in an agricultural soil after long-term treatment with sewage sludge and mineral fertiliser, *Environ. Pollut.*, **356**, 124343.
- Hu, J., Zhang, L., Zhang, W., Muhammad, I., Yin, C., Zhu, Y., Li, C., and Zheng, L., 2024, Significant influence of land use types and anthropogenic activities on the distribution of microplastics in soil: A case from a typical mining-agricultural city, *J. Hazard. Mater.*, **477**, 135253.
- Hurley, R.R., Lusher, A.L., Olsen, M., and Nizzetto, L., 2018, Validation of a Method for Extracting Microplastics from Complex, Organic-Rich, Environmental Matrices, *Environ. Sci. Technol.*, **52**(13), 7409-7417.
- Imhof, H.K., Schmid, J., Niessner, R., Ivleva, N.P., and Laforsch, C., 2012, A novel, highly efficient method for the separation and

- quantification of plastic particles in sediments of aquatic environments, *Limnol. Oceanogr.: Methods*, **10**(7), 524-537.
- Jiang, X., Cao, J., Ye, Z., Klobučar, G., and Li, M., 2023, Microplastics - Back to Reality: Impact of Pristine and Aged Microplastics in Soil on Earthworm *Eisenia fetida* under Environmentally Relevant Conditions, *Environ. Sci. Technol.*, **57**(44), 16788-16799.
- Lehtinen, T., Lair, G.J., Mentler, A., Gísladóttir, G., Ragnarsdóttir, K.V., and Blum, W.E.H., 2014, Soil Aggregate Stability in Different Soil Orders Quantified by Low Dispersive Ultrasonic Energy Levels, *Soil Sci. Soc. Am. J.*, **78**(3), 713-723.
- Li, G., Pei, Z., Li, Y., Yang, R., Wang, P., Liang, Y., Zhang, J., Zhang, Q., and Jiang, G., 2024, A high-precision, effective method for extraction and identification of small-sized microplastics from soil, *Talanta*, **272**, 125802.
- Liu, L., Liu, C., Fu, R., Nie, F., Zuo, W., Tian, Y., and Zhang, J., 2024a, Full-chain analysis on emerging contaminants in soil: Source, migration and remediation, *Chemosphere*, **363**, 142854.
- Liu, B., Shen, Z., Zhou, Q., Hu, L., Zeng, G., Wang, X., Zhang, M., Zhang, D., and Pan, X., 2024b, Microplastics in soil aggregates: Analytical methods, occurrence patterns, impact analyses and removal approaches, *TrAC Trends Anal. Chem.*, **178**, 117855.
- Liu, D., Wu, M., and Li, X., 2024c, A mechanism for the stable adhesion of bubbles and particles: The effect of particle surface properties, *J. Water Process Eng.*, **60**, 105154.
- Ma, R., Xu, Z., Sun, J., Li, D., Cheng, Z., Niu, Y., Guo, H., Zhou, J., and Wang, T., 2023, Microplastics affect C, N, and P cycling in natural environments: Highlighting the driver of soil hydraulic properties, *J. Hazard. Mater.*, **459**, 132326.
- Möller, J.N., Heisel, I., Satzger, A., Vizsolyi, E.C., Oster, S.D.J., Agarwal, S., Laforsch, C., and Löder, M.G.J., 2022, Tackling the Challenge of Extracting Microplastics from Soils: A Protocol to Purify Soil Samples for Spectroscopic Analysis, *Environ. Toxicol. Chem.*, **41**(4), 844-857.
- Okoffo, E.D., O'Brien, S., Ribeiro, F., Burrows, S.D., Toapanta, T., Rauert, C., O'Brien, J.W., Tschärke, B.J., Wang, X., and Thomas, K.V., 2021, Plastic particles in soil: state of the knowledge on sources, occurrence and distribution, analytical methods and ecological impacts, *Environ. Sci.: Process. Impacts*, **23**(2), 240-274.
- Patrucco, S.G., Rivoira, L., Bruzzoniti, M.C., Barbera, S., and Tassone, S., 2024, Development and application of a novel extraction protocol for the monitoring of microplastic contamination in widely consumed ruminant feeds, *Sci. Total Environ.*, **947**, 174493.
- Pfeiffer, F. and Fischer, E.K., 2020, Various Digestion Protocols Within Microplastic Sample Processing—Evaluating the Resistance of Different Synthetic Polymers and the Efficiency of Biogenic Organic Matter Destruction, *Front. Environ. Sci.*, **8**, 572424.
- Prosenc, F., Leban, P., Šunta, U., and Kralj, M.B., 2021, Extraction and Identification of a Wide Range of Microplastic Polymers in Soil and Compost, *Polymers*, **13**(23), 4069.
- Radford, F., Zapata-Restrepo, L.M., Horton, A.A., Hudson, M.D., Shaw, P.J., and Williams, I.D., 2021, Developing a systematic method for extraction of microplastics in soils, *Anal. Methods*, **13**(14), 1695-1705.
- Ramage, S.J.F.F., Pagaling, E., Haghi, R.K., Dawson, L.A., Yates, K., Prabhu, R., Hillier, S., and Devalla, S., 2022, Rapid extraction of high- and low-density microplastics from soil using high-gradient magnetic separation, *Sci. Total Environ.*, **831**, 154912.
- Sa'adu, I. and Farsang, A., 2023, Plastic contamination in agricultural soils: a review, *Environ. Sci. Eur.*, **35**(1), 13.
- Sakr, M., Mohamed, M.M., Maraqa, M.A., Hamouda, M.A., Hassan, A.A., Ali, J., and Jung, J., 2022, A critical review of the recent developments in micro-nano bubbles applications for domestic and industrial wastewater treatment, *Alex. Eng. J.*, **61**(8), 6591-6612.
- Seo, Y., Zhou, Z., Lai, Y., Chen, G., Pembleton, K., Wang, S., He, J., and Song, P., 2024, Micro- and nanoplastics in agricultural soils: Assessing impacts and navigating mitigation, *Sci. Total Environ.*, **931**, 172951.
- Shen, W., Mukherjee, D., Koirala, N., Hu, G., Lee, K., Zhao, M., and Li, J., 2022, Microbubble and nanobubble-based gas flotation for oily wastewater treatment: a review, *Environ. Rev.*, **30**(3), 359-379.
- Swart, B., Pihlajamäki, A., Chew, Y.M.J., and Wenk, J., 2022, Microbubble-microplastic interactions in batch air flotation, *Chem. Eng. J.*, **449**, 137866.
- Wang, Z., Taylor, S.E., Sharma, P., and Flury, M., 2018, Poor extraction efficiencies of polystyrene nano- and microplastics from biosolids and soil, *PLoS ONE*, **13**(11), e0208009.
- Wang, J., Wang, Z., Pei, F., and Wang, X., 2022, Enrichment of microplastic pollution by micro-nanobubbles, *Chin. Phys. B*, **31**(11), 118104.
- Wenzel, M., Fischer, B., Renner, G., Schoettl, J., Wolf, C., Schram, J., Schmidt, T.C., and Tuerk, J., 2022, Efficient and sustainable microplastics analysis for environmental samples using flotation for sample pre-treatment, *Green Anal. Chem.*, **3**, 100044.
- Xiong, X.L., Luo, X.G., and Chen, C., 2012, Extraction and Analysis of Degradable Polyethylene Residues in Soil, *Adv. Mater. Res.*, **554-556**, 157-160.
- Yang, X., Zhang, X., Shu, X., Gong, J., Yang, J., Li, B., Lin, J., Chai, Y., and Liu, J., 2023, The effects of polyethylene microplastics on the growth, reproduction, metabolic enzymes, and

metabolomics of earthworms *Eisenia fetida*, *Ecotoxicol. Environ. Saf.*, **263**, 115390.

Zhao, Z., Huang, X., Zhang, Z., Pang, H., Wang, X., Li, P., Li, C., and Lu, J., 2024, Removal efficiency and mechanism of geosmin by modified micro-nano bubbles in drinking water treatment process, *J. Water Process Eng.*, **60**, 105125.

Zhou, S., Marcelino, K.R., Wongkiew, S., Sun, L., Guo, W., Khanal, S.K., and Lu, H., 2022, Untapped Potential: Applying

Microbubble and Nanobubble Technology in Water and Wastewater Treatment and Ecological Restoration, *ACS EST Eng.*, **2**(9), 1558-1573.

Zhou, Y., Wang, T., Zou, M., Yin, Q., Jia, Z., Su, B., Zhang, Q., Chen, L., and Zhou, S., 2023, Trends in the occurrence and accumulation of microplastics in urban soil of Nanjing and their policy implications, *Sci. Total Environ.*, **903**, 166144.