미세플라스틱 처리를 위한 연구동향

김성민* · 백상호* · 한요셉* · Tsogchuluun Davaadorj** · 고병현* · §전호석***

*한국지질자원연구원 광물자원연구본부 자원회수연구센터, **과학기술연합대학원대학교 자원순환공학과

Current Research Trends for Treatment of Microplastics

Seong-Min Kim*, Sang-Ho Baek*, Yosep Han*, Tsogchuluun Davaadorj**,
Byung-Hun Go* and §Ho-Seok Jeon***

**Resources Recovery Research Center, Mineral Resources Research Division,
Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources*

***Department of Resources Recycling, University of Science and Technology*

요 약

미세플라스틱은 매우 중요하고 심각한 환경 문제로 인식되어, 전세계적으로 관심이 증대하고 있다. 플라스틱은 저렴한 가격, 경량성, 우수한 가공성, 다양한 재질별 특성을 가지고 있어 산업이 발전함에 따라서 생산량과 폐기량 또한 급격하게 증가하고 있다. 특히, 최종적으로 해양 환경으로 유입되어 생태계에 큰 영향을 줄 것으로 예상하고 있어, 이에 대한 처리가 매우 시급한 문제이다. 그러나 작은 입자크기와 함께 존재하는 환경이 다양하기 때문에 일반적인 처리방법의 적용이 어려워 다양한 분야에서 많은 연구가 진행되고 있다. 특히, 기존에 광물을 처리하는 선광과정 중 비중, 자력, 정전선별 등의 방법을 미세플라스틱의 처리에 적용하는 연구가 다수 진행되고 있으나 아직 실험실 단계이기 때문에 효율적인 처리를 위한 선별기술의 개발이 시급한 실정이다.

주제어 : 미세플라스틱, 분류, 비중선별, 자력선별, 정전선별

Abstract

Microplastics are recognized as critical and serious environmental problem in worldwide. Plastics are inexpensive, lightweight, excellent in processability, and various in material-specific properties. Along industrial development, the production and disposal amount of plastics are also rapidly increasing. In particular, abundant plastic wastes are eventually disposed into marine environment with harmful impacts on the ecosystem. Therefore, lots of relevant studies were recently progressed in various fields. However, many studies are being just conducted due to its difficulty in applying a general treatment method for those small particle sizes and their various characteristics. In the meantime, lots of researches are being conducted on applying methods using physical properties such as specific gravity, magnetic, and electrostatic separation, which are beneficiation processes of minerals. However, since it is still in the laboratory stage, the development of larger scale separation technology for efficient treatment is urgent.

Key words : Microplastics, Classification, Gravity separation, Magnetic separation, Eletrostatic separation

· Received : August 31, 2020 · Revised : September 29, 2020 · Accepted : October 5, 2020

§ Corresponding Author : Ho-Seok Jeon (E-mail : hsjeon@kigam.re.kr)

Resources Recovery Research Center, Mineral Resources Research Division, Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources, 124 Gwahang-no, Yuseong-gu, Daejeon 34132, Korea

©The Korean Institute of Resources Recycling. All rights reserved. This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/>), which permits unrestricted non-commercial use, distribution and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

1. 서 론

환경부는 지난 2017년 수도물 중 미세플라스틱 함유실태 조사결과를 발표하였다¹⁾. 그 결과 4대강 수계에서 주로 지표수를 취수하는 24개 정수장 중 21개 정수장은 검출되지 않았고, 3개 정수장은 평균 1 L 당 0.05개로 확인되었다. 2020년에는 지속적으로 미세플라스틱을 저감하기 위한 대책으로, 2021년 1월 1일부터 제조 및 수입하는 세정제품, 세탁제품에 포함된 미세플라스틱의 종류인 마이크로비즈의 사용 금지안을 발표하였다²⁾. 여기에는 미세플라스틱 충전제로 만든 아이스팩의 친환경 소재로의 전환 및 재사용확대를 위하여 2022년부터 폐기물부담금을 적용하는 등의 대책이 포함되어 있다. 전세계적으로 이보다 몇 년 앞선 2015년부터 지속적으로 미국, 캐나다, 호주, 유럽연합, 대만 등지에서 다양한 제품에 마이크로비즈의 사용을 금지하는 법안이 통과되었다^{3,4)}.

미세플라스틱은 5 mm 이하의 크기를 가지는 플라스틱을 말하며, 지구가 직면하고 있는 문제들 가운데 가장 중요하고 심각한 문제 중 하나로 인식되어, 이에 대한 관심이 증대하고 있다⁴⁻⁷⁾. 플라스틱은 1869년 미국에서 발명된 이래 급속한 발전을 거쳐, 현대 사회에서 낮은 가격, 우수한 내식성, 경량, 양호한 가공성 등의 특성과 함께 다양한 기능성으로 인하여 생산과 소비가 급속히 증가하고 있다⁸⁻¹⁰⁾.

전세계 플라스틱 생산량은 1950년 200만 톤에서 2015년 4억7000만 톤으로 급격히 증가하였고, 지난 65년간 누적 생산량은 약 83억 톤이며, 이중 49억 톤이 폐기되었고, 나머지는 재활용, 소각 등으로 처리되었다. 지금까지의 추세대로라면 2050년에는 플라스틱의 누적 생산량 320억 톤, 폐기량 120억 톤일 것으로 예측 된다⁵⁾. 이렇게 플라스틱이 광범위하게 사용됨에 따라 폐기되는 플라스틱 제품은 그 양과 종류가 점차 많아지고 있다. 폐기되는 경우 토양에 매립 또는 해양 환경으로 유입되며, 한번 유입되면 플라스틱이 보유하고 있는 지속성(persistence), 소수성(hydrophobic), 부유성(floating)으로 인하여 계속하여 이동하게 된다^{11,12)}. 일반적으로 토양 속에서 플라스틱은 분해가 잘 되지 않는 것으로 알려져 있지만, 해양에서 부유 시 자외선의 노출 빈도가 많기 때문에 광분해되어 유해물질이 방출되는 경우가 있어 인근 해양 생태계에 위해성을 주는 것으로 알려져 있다. 2010년 192개국의 연안에서 2.75억 톤의 플라스틱 폐기물이 발생하고, 그 한 해에만 480-1270만 톤의 플라스틱 조각이 해양 환경으로 유입되기도 하였다¹³⁾. 이렇게 해양에 존재하는 미세플라스틱이 먹이사슬을 통해 생태계에 축적되고 이에 대한 위해성 연구가 계속 보고 되고 있다^{3,4,14)}.

미세플라스틱 문제를 해결하기 위하여, 채취, 분석, 대체물질 개발 등의 연구가 진행되고 있다. Fig. 1과 같이 미

Fig. 1. Research methodology; (a) selected categories of Web of Science Core Collection database, (b) categories of environmental compartment and (c) subcategories of research¹⁴⁾.

세플라스틱의 연구 방법론 측면에서도 다양한 학문적 카테고리, 환경 그리고 세부주제로 다뤄지고 있기 때문에 이를 처리하기 위한 융합적인 기술의 개발이 필요하다¹⁴⁾. 분석방법은 ISO 나 표준화된 공인방법도 없을뿐더러, 특히 이를 분석하기 위한 샘플링 공정도 미세플라스틱의 작은 입도로 인하여 매우 큰 문제가 되고 있다^{15,16)}. 이를 해결하기 위한 방안을 모색하기 위하여 자원공학 측면으로 고려하면, 입자 간의 분리를 주로 하는 선광공정에서 사용하는 기술을 적용이 가능할 것이라 판단된다. 다양한 환경으로부터 기인한 시료로부터 미세플라스틱을 분리하는 것은 분석을 위한 수집 뿐 아니라 제거를 위한 분리이기 때문에 매우 중요한 기술로서, 꾸준히 연구되어야 할 분야이다.

2. 본 론

2.1. 미세플라스틱의 정의 및 특성

플라스틱은 Fig. 2(a)와 같이 입자의 크기에 따라 메가플라스틱(megaplastics, >100 mm), 메크로플라스틱(macroplastics, > 25 mm), 메조플라스틱(mesoplastics, 5-25

mm), 미세플라스틱(microplastics, < 5 mm) 그리고 나노플라스틱(nanoplastics, < 100 nm)으로 구분하고 있다^{11,17-19)}.

그리고 Fig. 2(b)와 같이 생성유형에 따라서 생산당시 작게 제조된 1차 미세플라스틱(primary microplastics) 그리고 플라스틱이 물리화학적으로 파/분쇄 되거나 풍화 및 분해 등의 작용을 거쳐 작게 부서진 2차 미세플라스틱(secondary microplastics)으로 구분하고 있다^{11,14,17)}. 대표적인 예로, 1차 미세플라스틱에는 다양한 충전재의 원료가 되는 작은 펠렛(pellet), 화장품에 들어가는 마이크로비즈(microbeads) 등이 있으며, 2차 미세플라스틱에는 외부로부터의 힘을 받아 작게 된 플라스틱 조각(debris), 밧줄 등에서 배출된 미세섬유(microfibers) 및 직물(textiles), 도로로부터 이송된 타이어 및 도로 페인트 입자 등이 있다. 이와 같은 미세플라스틱의 잔해는 전세계적으로 극지방, 바다, 해안선 등에 널리 퍼져 있는 것으로 알려져 있다.

그리고 이러한 플라스틱은 폴리프로필렌(PP; Polypropylene), 폴리에틸렌(PE; Polyethylene), 폴리에틸렌 테레프탈레이트(PET; Polyethylene terephthalate), 폴리메타크릴산 메틸(PMMA; Polymethyl methacrylate), 폴리비

Fig. 2. (a) Size classification of plastics and (b) microplastics from primary and secondary sources and food chain^{17,19)}.

Table 1. Densities of widely used plastics²⁰⁾

Plastic class	Acronym	Density (g/cm ³)
Expanded Polystyrene	EPS	0.03-0.15
Acrylonitrile butadiene styrene	ABS	0.90-1.53
Polypropylene	PP	0.91-0.95
Low density polyethylene	LDPE	0.92
High density Polyethylene	HDPE	0.96
Mater-Bi	MB	1.02
Nylon (Polyamide)	Nylon (PA)	1.02-1.06
Polystyrene	PS	1.05
Polymethyl methacrylate	PMMA	1.09-1.20
Polyurethane	PU	1.20
Polycarbonate	PC	1.20-1.22
Polyhydroxy butyrate	PHB	1.2
Polyactic acid	PLA	1.25
Polyvinyl chloride	PVC	1.35-1.39
Polyethylene terephthalate	PET	1.38-1.41
Polyester	PES	Unknown

닐알코올(PVA; Polyvinyl alcohol), 폴리스티렌(PS; Polystyrene), 폴리아미드(PA; Polyamide), 나일론(Nylon) 등의 석유계 화학물질 제품으로 구성되어 있다^{5,18,19)}. 이런 석유계 화학물질을 포함하고 있는 미세플라스틱은 자연계에서 쉽게 분해되지 않으며, 최종적으로 수계를 통하여 해양으로 배출되고 있다. 그리고 플라스틱은 일반적인 퇴적물의 밀도보다 상대적으로 낮은 밀도를 가지고 있으나 (Table 1), 물과 유사하기 때문에 이를 분리하기 어려운 문제가 있다²⁰⁾.

2.2. 미세플라스틱 선별 기술 개요

플라스틱은 상대적으로 낮은 밀도를 가지는 것과 동시에 표면이 소수성인 것이 특징이다. 일반적인 플라스틱은 이러한 특성을 이용하여 선별 등과 같은 처리 공정을 적용하지만, 미세플라스틱은 작은 크기로 인하여, 입자의 특성 파악이 어렵기 때문에 선별이 어려운 것으로 알려져 있다(Fig. 3). 그렇기 때문에 효율적인 미세플라스틱의 분리를 위하여 최근 다양한 연구가 진행되고 있다. 크게, 입도, 밀도, 표면특성을 활용하여 체가름법(Sieving), 세정법(Elutriation), 비중선별(Gravity separation), 부유선별(Flotation), 자력선별(Magnetic separation), 정전선별(Elec-

Fig. 3. Venn diagram of weaknesses in current methods of microplastic separation from the environment²²⁾.

trostatic separation) 등으로 구분할 수 있다^{18,20-22)}. 그리고 이런 개별적인 방법들을 서로 결합하여 보다 포괄적인 분석 프로토콜 및 효율적인 처리 방안을 제시하는 연구가 보고되고 있다.

2.3. 미세플라스틱 선별 연구 동향

폐기물 중 미세플라스틱은 단일 크기로 존재하지 않고, mm 단위부터 nm 단위까지 다양한 입도 범위로 존재하고 있다. 특히, 세정 및 세안제품에 다량 포함되어있다고 알려져 있는 미세플라스틱인 마이크로비즈(microbeads)는 용도 및 제품에 따라 크기의 차이가 나는 것으로 알려져 있다. Hernandez는 시중에 시판되고 있는 페이스얼 스크럽(facial scrub) 제품을 선정하고, 그 중에 포함되어 있는 마이크로비즈(microbeads)를 분석하는 연구를 수행하였다³⁾. 페이스얼 스크럽에 다양한 사이즈의 마이크로비즈가 포함되어 있을 것이라 예상하고, 이를 각각 분리하기 위하여 5단계로 나누어 서로 다른 크기의 필터를 사용하였다. 그 결과, 폴리에틸렌 재질의 미세플라스틱의 크기가 수십um-수십nm 까지 존재하는 것을 확인하고, 입자의 크기에 따른 각 분리 구간의 전자현미경(SEM and TEM) 사진과 현탁액으로 해당 입자를 성공적으로 분리시켰다(Fig. 4).

세안 및 세정제품과 같이 1차 미세플라스틱은 비교적

Fig. 4. (a) Image of microbeads in facial scrub, (b) scheme of the filtration process, (c) SEM images of samples taken at different filtration steps of the commercial scrubs (red circles are used to highlight nano-particles) and (d) picture of scrub A and its 5 filtrates³⁾.

Fig. 5. (a) Schematic diagram of microplastics during coagulation and ultrafiltration processes and (b) morphology of Fe-based flocs before and after coagulation with microplastics at pH 7.0: a. flocs formed by 0.2 mmol/L $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$, b. flocs formed by 0.2 mmol/L $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ and 12 mg/L anionic PAM, c. flocs formed by 2 mmol/L $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ and 12 mg/L cationic PAM, d. flocs formed by 2 mmol/L $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ and 12 mg/L anionic PAM²³⁾.

균일한 입도 구간을 가지는 미세플라스틱이 포함되어 있으나, 2차 미세플라스틱에서는 이보다 입도 구간이 넓으며, 다양한 유기물질 등이 포함되어 있다. 또한, 체가름법과 같은 방법으로 미세플라스틱만 선택적으로 분리하기 어렵기 때문에 미세플라스틱의 표면특성을 이용하여 응집체를 형성하는 방법도 연구되고 있다. Ma는 용액 속에 존재하는 미세플라스틱이 너무 작아서 분리가 어렵기 때

문에, 금속염을 이용하여 미세플라스틱 간의 응집을 유도하여 응집체를 형성시켜 분리하는 연구를 수행하였다²³⁾. 응집제로는 주로 Al, Fe 염이 많이 사용되는데, Al 염은 잔류되어 섭취하는 경우 인체에 신경독성으로 작용할 수 있기 때문에 Fe 염($\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$, Iron(III) chloride hexahydrate)을 사용하였다. 그 결과, 미세플라스틱 간 플록(floc)이 형성되어 응집체가 커지는 것을 확인할 수 있었

Fig. 6. (a) Sectional drawing of the Munich Plastic Sediment Separator (MPSS) consisting of (I) the sediment container, (II) the standpipe and (III) the dividing chamber, (b) apparatus for the froth flotation and the experiments with the classical density separation setup and (c) Recovery rate (weight) of S-MPP (<1 mm) of different plastic particles, using density separation with zinc chloride solution (1.6–1.7 kg/L), for the density separation with classical setup (classic) and with the MPSS with an optimized handling procedure (MPSS)²⁴⁾.

으며, 주요 구성성분으로는 폴리에틸렌인 것을 확인하였다(Fig. 5). 그리고 이렇게 형성된 플록은 침전이나 여과법(filtering)을 통하여 미세플라스틱을 분리할 수 있는 것을 확인하였다.

플라스틱은 재질별 밀도 차이가 있어, 해당 특성을 이용하여 분리하는 연구도 진행되었다. Imhof는 Munich Plastic Sediment Separator(MPSS)라는 비중선별기를 제작하여 미세플라스틱을 분리하는 연구를 수행하였다²⁴⁾. 1 mm를 기준으로 하여 이보다 크면 L-MPP, 작으면 S-MPP로 구분하여 새로 개발한 MPSS와 이에 대조군으로 기존에 사용하던 부유선별기를 이용하여 각 입자의 밀도 차이에 기인한 비중선별을 수행하였다. 그 결과, 부유선별기는 L-MPP는 55.0%, S-MPP는 39.8%인 것을 확인하였으며, MPSS를 사용하였을 때 L-MPP는 100%, S-MPP는 95.5%의 회수율을 보이는 것으로 그 효율이 훨씬 우수한 것을 확인하였다(Fig. 6).

Kedzierski는 사질퇴적물(sandy sediments)로부터 미세플라스틱을 분리하기 위하여, 세정(elutriation)법을 사용하는 시스템을 개발하고 연구를 수행하였다²⁵⁾. 문헌조사를 통해서, 퇴적물과 미세플라스틱의 입도별 구분 기준을 다시 정립하고 이를 바탕으로 별도의 금속염과 같은 화학물질을 사용하지 않고 물만 비중선별의 매체로 사용하는 비중선별법인 세정법을 고안하여 시스템을 개발하였

다(Fig. 7). 그 결과, 미세플라스틱 범위인 63 μ m-2 mm에서 90% 이상 회수율이 나오는 것을 확인하였고, 추가적으로 시스템에서 컬럼(column)의 크기와 직경 및 펌프의 마력(HP)을 조절한다면, 메조/매크로플라스틱 뿐 아니라 나노플라스틱에도 적용이 가능한 것을 주장하였다.

Rodríguez-Alegre는 폐수와 슬러지로부터 미세플라스틱을 분리하기 위하여, 세정시스템에 화학적 전처리 및 하이드로사이클론을 접목시켜 연구를 수행하였다²⁶⁾. Fenton reaction을 이용하여 산성 조건에서 폐수 및 슬러지의 유기물질을 분해시키고, 세정 공정을 통해서 분리한 플라스틱을 하이드로사이클론 공정을 통해서 크기를 나누어 분리하는 기술을 개발하였다(Fig. 8). 그 결과, 다양한 크기의 미세플라스틱을 회수하였고, 또한 미세플라스틱에 스크럽과 치약으로부터 발생할 것으로 추정하는 구형의 마이크로비즈도 분리 가능한 것을 확인하였다.

이와 같이, 비중선별에는 밀도차이로 분리하기 위하여 다양한 외력을 이용하는 비중선별 장비를 연구하는 방법과 함께, 용액에 금속염을 용해시키거나, 밀도가 높은 금속 입자를 넣고 교반함으로써 용액의 밀도를 조절하여 분리하는 방법도 있다. Coppock는 해저퇴적물(marine sediments)에 포함되어 있는 미세플라스틱을 현장에서 바로 분리시키고 확인할 수 있는 방법(small scale and portable method)을 연구하였다²⁷⁾. 이를 위하여, 작은 규모의

Fig. 7. (a) Particle-size classifications for sediment and plastic particles and (b) schematic diagram of the elutriation system²¹⁾.

Fig. 8. (a) Flow diagram of microplastics extraction system using elutriation and hydrocyclone, (b) Fenton process with different H_2O_2 concentration, from left to right: 0, 300, 4000, 7500, 15000 and 30000 mg/L, (c) visual analysis of separated products through an optical microscope a. 5 min, b. 20 min, c. 40 min and d. 60 min and (d) microspheres observed in wastewater²⁶⁾.

Sediment-Microplastic Isolation(SMI) 장비를 개발하고 다양한 농도의 금속염($NaCl$, NaI , $ZnCl_2$)을 이용한 진중액($1.2 \sim 1.8 \text{ g/cm}^3$)을 활용하여 비중선별 실험을 수행하였

다(Fig. 9). 그 결과 밀도 1.5 g/cm^3 ($ZnCl_2$ 사용)에서 미세플라스틱을 분리하는 경우 1회만 수행하여도 회수율이 95.8%로 매우 높은 것을 확인하였다. 특히, 본 연구는 시

Fig. 9. (a) Schematic and photograph of Sediment-Microplastic Isolation (SMI) unit and (b) mean percentage recovery of microplastics from artificially spiked sediment²⁷⁾.

Table 2. Comparative amount of salts (g) added to 1 L ultra- pure water to achieve specific densities, and their associated costs²⁷⁾

Salt	Density (g/cm ³)	Amount added to 1 L H ₂ O (g)	Cost (GBP/L)	Relative cost unit
Sodium chloride (NaCl)	1.2	337	4.17	1
Sodium Iodide (NaI)	1.3	494	85.44	20.5
	1.5	1000	172.95	41.5
Zinc chloride (ZnCl ₂)	1.3	500	18.06	4.3
	1.5	972	35.10	8.4
	1.8	1800	65.00	15.6

약의 사용량과 공정의 비용적인 측면도 고려한 것으로서, 다양한 침전물 유형에서 효과적으로 적용할 수 있을 것으로 언급하고 있다(Table 2).

플라스틱은 전도성이 모래, 자갈과 같이 광물 등으로 구성된 일반 퇴적물들 보다 높기 때문에, 이를 이용한 정전선별 연구도 수행되고 있다^{8,9)}. Felsing은 미세플라스틱을 간단히 분리하는 방법을 연구하기 위하여 플라스틱 입자의 정전기적 특성을 이용하여 분리하는 연구를 수행하였다²⁸⁾. 높은 전압을 이용하여 코로나방전을 발생시키는 원리를 활용한 코로나방전 정전선별기(Korona Walzen Scheider, KWS)를 이용하여 선별실험을 진행한 결과, 다양한 물질(모래, 퇴적물, 해사, 입자상 물질)들에 포함되어 있는 미세플라스틱의 회수율이 거의 100% 인 것을 확인하였다(Fig. 10, Table 3). 해당 공정을 적용하면 기존의 화학물질을 사용하여 침전시키는 방법보다 화학물질로 인한 분해 반응을 방지할 수 있고, 처리시간이 줄어들며 사용이 용이한 것을 확인하였다. 그리고 미세플라스틱의 종류에 따른 밀도, 크기, 형상 등에 영향을 적게 받기 때문

에 산업현장에 적용이 용이하며, 입자크기가 수십 μ m(63 μ m)인 경우에도 99% 이상의 회수율을 보이는 것을 확인하였다.

퇴적물들은 보통 표면이 친수성이나, 플라스틱은 표면이 소수성을 가지고 있기 때문에, 이를 이용한 선별도 진행되고 있다. 일반적으로 이러한 표면 특성을 이용하는 방법은 분리하고자 하는 입자의 표면을 소수성화시켜 기포에 부착시키고 부유시켜 제거하는 부유선별이 많이 사용되나, 미세플라스틱과 같이 작은 입자에서는 기포에 입자가 부착되기 어려운 단점이 있다. Grbic는 입자가 매우 작은 미세플라스틱을 액상에서 분리하기 위하여 표면특성을 이용하는 연구를 수행하였다²⁹⁾. 우선, 플라스틱의 표면이 소수성을 가지는 것을 이용하여, 표면이 소수성을 가지는 철 나노입자를 합성하였다. 그리고 미세플라스틱이 포함되어 있는 용액에 투입하면, 물 속에서 철 나노입자가 같은 소수성을 가지는 플라스틱에 부착되고, 이를 자석을 이용하는 자력선별 공정으로 미세플라스틱을 분리하였다. 그 결과, 1 mm 이상의 미세플라스틱 뿐 아니라

Fig. 10. (a) Scheme of the Korona-Walzen-Scheider (KWS) electrostatic metal separator (hamos GmbH), (b) scheme of the corona electrostatic separation process using the KWS and (c) recovery of MP particles in four size ranges from four different sample materials after the third separation step using the KWS⁽²⁸⁾.

Table 3. Grain size distribution of the materials used in the KWS recovery⁽²⁸⁾ (unit: %)

Material	630-2000 µm	200-630 µm	63-200 µm	20-63 µm	<20 µm	Loss
Quartz sand	0	16.6	82.9	0.3	0.3	0
Freshwater sediment	0	2.9	25.7	17.9	47.1	6.4
Beach sand	0.1	41.4	57.6	0.1	0.3	0.6
Particulate matter	0	1.7	37.0	15.4	39.4	6.4

다른 공정에서 분리가 어려운 20 µm 이하의 매우 작은 입자도 90% 이상 회수할 수 있는 것으로 확인되었다(Fig. 11). 그러나 아직 200 µm-1 mm의 미세플라스틱은 80% 정도의 회수율로 그 효율이 다른 공정보다 상대적으로 낮은 문제점이 있기 때문에 이에 대한 후속 연구가 필요한 기술이다.

Scopetani는 기존 비중선별 및 부유선별의 한계를 극복하기 위하여 올리브기름을 사용하여 토양이나 퇴비로부터 미세플라스틱을 사용하는 연구를 수행하였다⁽³⁰⁾. Fenton reaction으로 우선 유기물질 등을 제거하고, 남은 고형물

질을 컬럼에 물과 올리브기름을 함께 넣어 교반 하였다. 표면이 친유성(소수성)을 띄고 있는 플라스틱은 올리브기름 내에 존재하게 되고, 올리브기름은 비중으로 인하여 물 위로 부유하여 미세플라스틱을 분리하였다. 본 논문에서는 6가지 종류의 비중이 서로 다른 플라스틱을 3개 군으로 구분하여 실험을 수행하였다(저비중; PE, PU, 중비중; PS, PC, 고비중; PVC, PET). 그 결과, 미세플라스틱의 회수율이 90% 이상이며, 플라스틱 간 비중은 회수율에 큰 영향을 미치지 않는 것을 확인하였다(Fig. 12). 또한 퇴비보다는 토양에서 미세플라스틱의 회수율이 5% 정도

Fig. 11. (a) Schematic of the magnetic plastic separation method; a. modification of Fe nanoparticles with hexadecyltrimethoxysilane (HDTMS) to create hydrophobic Fe nanoparticles that bind to plastic due to hydrophobic interaction, b. bound Fe nanoparticles allow magnetic recovery of MPs because magnetic force acts on the particles, (b) results from the spike and recovery experiments with large MPs and (c) spike and recovery of small (<20 μm) MPs in seawater (scale bar is 1 mm)²⁹⁾.

높은 것을 확인하였다. 본 방법은 기존의 비중선별에서 사용하는 금속염이 필요 없으며, 중액에서 분리가 어려운 고비중 플라스틱인 PET, PVC도 높은 회수율로 분리 가능한 것을 확인하였다.

2.4. 향후 미세플라스틱 선별 연구

이와 같이 전세계에서 연구되고 있는 미세플라스틱의 선별 연구 동향을 확인하였다. 플라스틱이 가지고 있는 상대적으로 가벼운 밀도와 표면이 소수성인 특성을 주로 이용하는 선별 시스템과 및 이를 이용한 장비의 개발이 이루어지고 있는 것을 확인하였다. 각 선별 방법들은 미세플라스틱의 채취, 분석, 제거 시 필수 요소이기 때문에 지속적인 연구가 필요하며, 미세플라스틱의 종류 및 존

재하는 환경에 따라 적절한 방법을 융합시켜 처리하는 공정을 개발한다면 경제성 또한 확보할 수 있을 것이라 판단된다.

3. 결 론

플라스틱은 미국에서 낮은 가격, 우수한 내식성, 경량, 양호한 가공성 등의 특성과 함께 다양한 기능성으로 인하여 생산과 소비가 급속히 증가하고 있다. 그러나, 미세플라스틱은 5 mm 이하의 작은 크기, 지속성으로 인하여 다양한 생물 뿐 아니라 인간에게도 위험성을 초래하고 있다. 특히, 해양생태계에서 그 피해가 많이 발생되고 있는 것으로 확인되고 있으며, 이를 처리하기 위하여 채취, 분석, 제

Fig. 12. (a) Schematic diagram of olive oil-based method for microplastics (MPs) extraction and FTIR spectra of two polystyrene MPs before and after oxidation and extraction procedure, (b) MPs recovery rate for low density (plain), medium density (dotted) and high density (tiled) polymer groups in compost (yellow) and soil (blue) matrixes as averaged across the oxidation treatment and (c) MPs recovery rate for each polymer in low density (plain), medium density (dotted) and high density (tiled) polymer groups as averaged across all matrixes and the oxidation treatment³⁰⁾.

거 등의 다양한 연구가 진행되고 있다. 전세계적으로 다양한 폐기물과 퇴적물 등에 포함되어 있는 미세플라스틱을 분리하는 방법을 개발하기 위하여 플라스틱이 가지고 있는 특성을 이용하는 기술 및 장비의 연구가 지속되고 있다. 특히, 기존에 광물 중 유가금속을 분리할 때 사용하는 비중, 자력, 정전선별 등의 공정을 접목하는 연구도 많이 진행되고 있다. 앞으로, 미세플라스틱의 다양한 특성 파악과 함께 부존 환경 등의 연구를 지속적으로 수행하고, 이를 이용하여 다양한 융복합 선별공정을 개발한다면 미세플라스틱의 문제를 점차 해결할 수 있을 것으로 기대된다.

감사의 글

본 연구는 한국지질자원연구원(KIGAM)의 주요사업

(20-3212-1, 20-5103) 및 한국에너지기술평가원(KETEP)의 연구개발사업(20172510102220) 지원으로 수행되었습니다.

References

1. Ministry of Environment, 2017 : <http://www.me.go.kr/home/web/board/read.do?menuId=286&boardMasterId=1&boardCategoryId=39&boardId=826090>, November 24, 2017.
2. Ministry of Environment, 2020 : <http://www.me.go.kr/home/web/board/read.do?menuId=286&boardMasterId=1&boardCategoryId=39&boardId=1388040>, July 29, 2020.
3. Hernandez, L.M., Yousefi, N. and Tufenkji, 2017 : Are there nanoplastics in your personal care products?, Environmental Science and Technology Letters, 4(7), pp.280-

- 285.
4. Irfan, T., Khalid, S., Taneez, M., et al., 2020 : Plastic driven pollution in Pakistan: the first evidence of environmental exposure to microplastic in sediments and water of Rawal Lake, *Environmental Science and Pollution Research*, 27, pp.15083-15092.
5. Geyer, R., Jambeck, J.R. and Law, K.L., 2017 : Production, use, and fate of all plastics ever made, *Science Advances*, 3(7), pp.1-5.
6. Wang, H., Zhang, Y. and Wang, C., 2019 : Surface modification and selective flotation of waste plastics for effective recycling - a review, *Separation and Purification Technology*, 226(1), pp.75-94.
7. Cho, Y. and Cho, B.G., 2020: Status and future prospects for plastics recycling, *Journal of Korean Institute of Resources Recycling*, 29(4), pp.31-44.
8. Jeon, H.S., Baek, S.H., Park, C.H., et al., 2007 : A study on material separation heavy group plastics by triboelectrostatic separation, *Journal of Korean Institute of Resources Recycling*, 16(2), pp.56-62.
9. Lee, E.S., Baek, S.H., Kim, S.K., et al., 2013: Development of triboelectrostatic separation technique for material separation of ABS and PS mixed plastic waste, *Journal of Korean Institute of Resources Recycling*, 22(6), pp.33-40.
10. Choi, Y., Choi, H.J. and Rhee, S.W., 2018 : Current status and improvements on management of plastic waste in Korea, *Journal of Korean Institute of Resources Recycling*, 27(4), pp.3-15.
11. Andrad, A.L., 2017 : The plastic in microplastics: A review, *Marine Pollution Bulletin*, 119(1), pp.12-22.
12. Engler, R.E., 2012 : The complex interaction between marine debris and toxic chemicals in the ocean, *Environmental Science and Technology*, 46(22), pp.12302-12315.
13. Jambeck, J.R., Geyer, R., Wilcox, C., et al., 2015 : Plastic waste inputs from land into the ocean, *Science*, 347(6223), pp.768-771.
14. Akdogan, Z. and Guven, B., 2019 : Micro-plastics in the environment: A critical review of current understanding and identification of future research needs, *Environment Pollution*, 254, pp.1-24.
15. Corami, F., Rosso, B., Bravo, B., et al., 2020 : A novel method for purification, quantitative analysis and characterization of microplastic fibers using Micro-FTIR, *Chemosphere*, 238, pp.1-10.
16. Gomiero, A., Oysaed, K.B., Agustsson, T., et al., 2019 : First record of characterization, concentration and distribution of microplastics in coastal sediments of an urban fjord in south west Norway using a thermal degradation method, *Chemosphere*, 227, pp.705-714.
17. Greanpeace, 2016a : Microplastics that tighten the breath of the sea, Greanpeace Report 07-2016, Seoul, Korea, 12p.
18. Miller, M.E., Kroon, F.J. and Motti, C.A., 2017 : Recovering microplastics from marine samples: A review of current practices, *Marine Pollution Bulletin*, 123(1-2), pp. 6-18.
19. Greanpeace, 2016b : Plastics in Seafood – full technical review of the occurrence, fate and effects of microplastics in fish and shellfish, Greenpeace Research Laboratories Technical Report 07-2016, Exeter, UK, 3p.
20. Ruggero, F., Gori, R. and Lubello, C., 2020 : Methodologies for microplastics recovery and identification in heterogeneous solid matrices: A Review, *Journal of Polymers and the Environment*, 28, pp.739-748.
21. Nguyen, B., Claveau-Mallet, D., Hernandez, L.M., et al., 2019 : Separation and analysis of microplastics and nanoplastics in complex environmental samples, *Accounts of chemical research*, 52(4), pp.858-866.
22. Reimonn, G., Lu, T., Gandhi, N. et al., 2019 : Review of microplastic pollution in the environment and emerging recycling solutions, *Journal of Renewable Materials*, 7(12), pp.1251-1268.
23. Ma, B., Xue, W., Ding, Y., et al., 2019 : Removal characteristics of microplastics by Fe-based coagulants during drinking water treatment, *Journal of Environmental Sciences*, 78, pp.267-275.
24. Imhof, H.K., Schmid, J., Niessner, R., et al., 2012 : A novel, highly efficient method for the separation and quantification of plastic particles in sediments of aquatic environments, *Limnology and Oceanography: Methods*, 10(7), pp.524-537.
25. Kedzierski, M., Tilly, V.L., Bouriseau, P., et al., 2016 : Microplastics elutriation from sandy sediments: A granulometric approach, *Marine Pollution Bulletin*, 107(1), pp.315-323.
26. Rodriguez-Alegre, R., Sanchez-Ramirez, J.E., Pastor, L., et al., 2019 : Microplastics Extraction and Counting from Wastewater and Sludge Through Elutriation and Hydrocyclone, *Proceedings of the 2nd International Conference on Microplastic Pollution in the Mediterranean Sea*, pp. 53-59, MicroMed, 15-18 Sep, 2019, Printed in Italy.
27. Coppock, R.L., Cole, M., Lindeque, P.K., et al., 2017 : A small-scale, portable method for extracting microplastics from marine sediments, *Environmental Pollution*, 230, pp. 829-837.
28. Felsing, S., Kochleus, C., Buchinger, S., et al., 2018 : A new approach in separating microplastics from environmental samples based on their electro static behavior, *Environmental Pollution*, 234, pp.20-28.
29. Grbic, J., Nguyen, B., Guo, E., et al., 2019 : Magnetic Extraction of Microplastics from Environmental Samples,

Environmental Science and Technology Letters, 6(2), pp.68-72.

30. Scopetani, C., Chelazzi, D., Mikola, J., et al., 2020 : Olive

oil-based method for the extraction, quantification and identification of microplastics in soil and compost samples, Science of The Total Environment, 733(1), pp.1-7.

김 성 민

- 2009년 한양대학교 지구환경시스템 공학과 공학사
- 2016년 한양대학교 자원환경공학과 공학박사
- 현재 한국지질자원연구원 광물자원 연구본부 연구원

백 상 호

- 2003년 조선대학교 자원공학과 공학사
- 2005년 조선대학교 자원공학과 공학석사
- 2018년 과학기술연합대학원대학교 자원순환공학과 공학박사
- 현재 한국지질자원연구원 광물자원 연구본부 연구원

한 요 셉

- 2002년 강원대학교 환경공학과 공학사
- 2004년 한양대학교 지구환경시스템 공학과 공학석사
- 2013년 한양대학교 자원환경공학과 공학박사
- 현재 한국지질자원연구원 광물자원 연구본부 선임연구원

Tsogchuluun Davaadorj

- 2004년 Mongolian University of Science and Technology, Mining Technology Engineering, Bachelor
- 현재 과학기술연합대학원대학교 자원순환공학과 박사과정

고 병 현

- 2014년 한국해양대학교 에너지자원 공학과 공학사
- 2016년 한국해양대학교 에너지자원 공학과 공학석사
- 현재 한국지질자원연구원 광물자원 연구본부 연구원

전 호 석

- 1994년 강원대학교, 자원공학과 공학박사
- 현재 한국지질자원연구원 광물자원 연구본부 책임연구원 센터장 과학기술연합대학교 자원순환 공학과 교수