

# 수처리공정에서 미세플라스틱 거동 및 전처리

안재환,† 오혜철, 김석구

한국건설기술연구원 환경연구본부

jhahn@kict.re.kr, hcoh79@kict.re.kr, sgkim@kict.re.kr

## Microplastics Behavior and Pre-treatment in Public Wastewater Treatment Process

Jae-Hwan Ahn†, Hae-Cheol Oh, seog-ku Kim

Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology

Department of Environmental Research

### 요약

하수처리시설에서 처리공정별 미세플라스틱(Microplastics, MPs)의 함량과 성상을 조사·분석한 결과, 1차 침전조, 포기조 그리고 2차침전조 유출수의 MPs 농도는 각각 719 MP/L, 152 MP/L, 44 MP/L로 조사되었다. 3차처리(여과시설) 후의 농도는 16 MP/L로 분석되었다. 1차와 2차 침전조의 침전슬러지는 슬러지 처리조인 농축조로 이동된다. 슬러지 농축조 I (1차슬러지)과 농축조II(2차슬러지)의 슬러지에서는 각각 122 MP/g, 213 MP/g로 나타나 2차침전조의 슬러지에서 MPs 함량이 높았다. 소화조의 슬러지 가용화조에서 1,363 MP/g로 나타나 수처리 공정의 슬러지와 흡착된 MPs가 슬러지 농축조로의 물리적 이동과 고농도로 농축되어 MPs 농도가 높게 증가하였다. 하수처리시설에 유입된 MPs는 대부분 fiber 형태가 50% 이상을 차지하였고, 다음으로 flake와 film이 분포하였는데, 이는 생활하수(세탁폐수)중에 함유된 fiber가 원인으로 판단된다. 따라서 수처리 공정에서 슬러지 처리공정인 농축조로의 유출을 줄일 수 있는 공정이 요구된다. 전처리 공정으로 미세기포에 의한 MPs의 분상분리를 검토하였으며, fiber 성분이 대부분인 세탁폐수를 대상으로 미세기포 부상공정을 이용하여 처리실험 결과, 60% 이상 저감되어 전처리공정으로 적용을 기대할 수 있다.

## 1. 서론

도시에서 발생하는 생활하수는 하수도를 통하여 공공하수처리시설로 수집된 후 적절하게 처리되어 인근 수계로 방류된다. 우리나라는 1990년대 후반부터 하수고도처리시설의 도입으로 처리수질이 향상되었지만, 미처리된 잔류성 유기오염물질(POPs)과 영양염류 등이 지속적으로 유출되고 있다. 하수처리시설이 수질 오염원을 정화하는 순기능을 하지만, 오염물질을 집중 배출하는 역기능을 한다.

최근에 관심이 높아지고 있는 미세플라스틱은 가정의 수도물과 해양수산물, 소금 등에서도 검출됐다. 아직까지 적절한 환경관리기준이 마련되지 못하고 있으며, 하수처리시설과 강우 유출수 등이 주요 발생원(Source)이 되고 있다.<sup>1~4)</sup> 사용 후 처분된 플라스틱 중에서 100만~1,300만 톤이 해양으로 유출되고, 발생원으로 합성섬유(46.0%), 도로 유출 타이어(37.3%) 그리고 개인용품(2.6%)에 해당한다.<sup>5)</sup> 유출된 플라스틱은 물리·화학적으로 산화되어 작게 부서지는데, 물리적 크기를 기준으로 5mm 이하를 미세플라스틱(Micro plastics, MPs)으로 분류한다. 제조단계에서 작게 생산할 경우 1차 MPs으로, 유출된 후 5mm 이하로 작게 부서진 플라스틱을 2차 MPs로 구분한다. MPs의 성상은 PEs(Polyester),

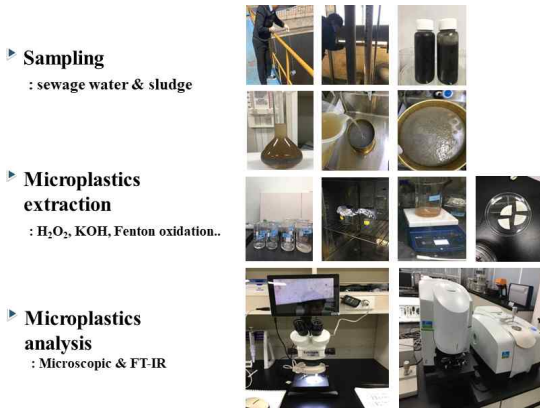
PP(Polypropylene), PE(Polyethylene) 등 다양하고, Fiber, Sphere, Film, Sheet, Fragment과 같은 여러 가지 모양으로 존재한다.<sup>6,7)</sup> 수계로 유출된 미세플라스틱이 분해되어 마이크로 크기보다 작은 나노 크기로 분해됨에 따라 수생생물을 거쳐 생물농축되어 인간에게까지 전달되고 있다.<sup>8,9)</sup> 나노 크기의 미세플라스틱은 물리적·화학적 분석이 어려워 적절한 관리가 쉽지 않다. 특히, 플라스틱은 제품의 제조과정에 따라 비스페놀A(Bisphenol A, 프탈레이트(Phthalate) 등의 화학물질이 첨가되기도 하는데, 이러한 물질이 MPs에서 수계로 유출되어 가까운 장래에 수생태계에 심각한 영향을 준다.<sup>10,11)</sup> 따라서 본 연구에서는 도시 공공하수처리시설과 같은 1차적인 처리시설에서 단위 공정별 미세플라스틱의 처리특성과 거동을 분석하여 적절한 처리 및 관리방안을 제안하고자 한다.

## 2. 실험방법

### 2.1 미세플라스틱 분석

공공하수처리시설의 단위 공정별로 시료를 채취하여 수중의 MPs를 분석하였다. 시료채취 후 전처리와 크기를 분류하고 정성·정량분석으로 진행된다. 유기물질 농도가 높을 경우

과산화수소수(30%)를 첨가하고 가열(70~80 °C) 및 방냉 공정이 추가된다. 이후 공정은 여과지 건조, 현미경(Zeiss, Discovery V8) 확인과 적외선분광법(FT-IR ; Pekin Elmer, Spotlight 400)으로 분석 실시하였다(분석조건 resolution 8 cm<sup>-1</sup>, wave number 750~4,000 cm<sup>-1</sup>).



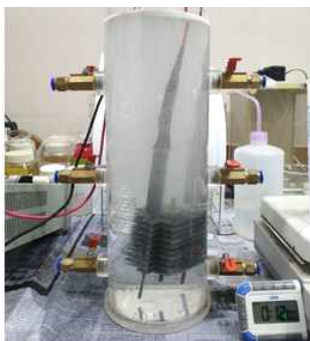
[Figure 1] Experiment methods of Microplastics analysis

## 2.2 하수처리 공정별 미세플라스틱 조사

경기도 K시에 위치한 공공하수처리시설의 수처리공정에서 1차침전조(SW1), 포기조(SW2), 2차침전조(SW3) 그리고 유출수(SW4)를 채취하여 5mm 이하로 채 분리 후 MPs를 분석하였다. 슬러지처리공정에서는 농축조 1·2(SL1·2), 소화조(SL3) 그리고 슬러지 가용화조(SL4)에서 MPs를 분석하였다.

## 2.3 미세기포에 의한 MPs 전처리

전기분해 방식의 미세기포에 의한 부상분리 장치를 이용하여 fiber 성상의 MPs 제거 가능성을 검토하였다. 직경 20cm의 원통형 아크릴반응조에 전기분해를 위한 전극을 배열하여 인가전압 10~15 voltage, 공기 접촉시간 30sec, 60sec로 조절하였다(Figure 2)

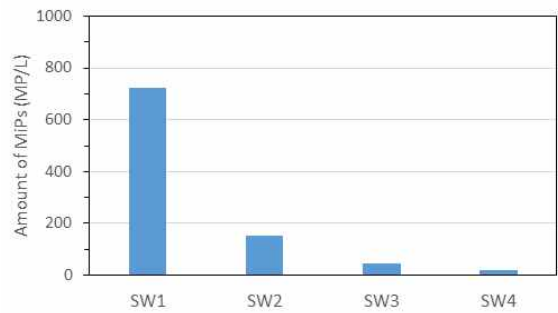


[Figure 2] Apparatus of fine bubble flotation

## 3. 결과 및 고찰

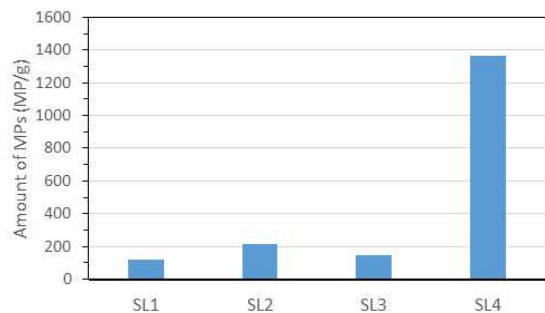
### 3.1 처리 공정별 미세플라스틱 조사

Figure 3은 수처리 공정별 MPs의 함량을 나타낸 것으로, 1차 침전조의 MPs 함량은 평균 719 MP/L로 분석되었다. 포기조(SW2)와 2차침전조(SW3)는 각각 평균 152 MP/L, 44 MP/L로 나타나 2차 처리에서 93.9%의 MPs가 저감되었다. 무기성분인 MPs가 높은 처리율은 나타난 것은 포기조의 활성슬러지에 MPs가 흡착된 후 다음 공정인 2차침전조에서 슬러지의 침전으로 MPs의 유출이 낮아진 것으로 판단된다.



[Figure 3] Amount of microplastics by water treatment process

Figure 4는 1차 침전조와 2차 침전조의 슬러지를 처리하는 농축조와 혐기성 소화조의 MPs 함량(MP/g)을 나타낸 것이다. 슬러지 농축조 1·2에서는 평균 167.5 MP/g로 나타났으며, 소화조의 슬러지 가수분해조의 경우 슬러지의 액상화에 따라 MPs가 고농도로 농축되어 1,363 MP/g로 분석되었다. 하수처리시설은 무기성분인 MPs이 단순 흡착되어 농도가 저감되는 것으로 보이지만 슬러지에 흡착되어 슬러지 처리시설로 물질 이동된 것으로 나타났다. MPs는 소화되지 않고 농축되어 소화조 운영을 어렵게 하는 원인이다.<sup>12,13)</sup>

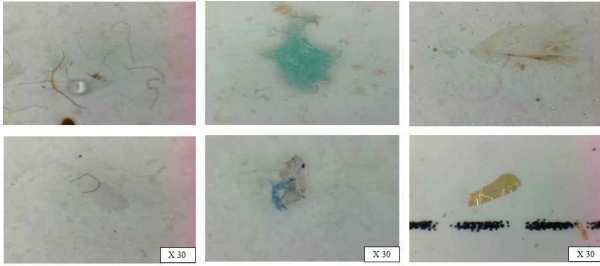


[Figure 4] Amount of microplastics by sludge treatment process

### 3.2 미세플라스틱 성상 분석

하수처리시설에서 조사된 미세플라스틱은 대부분 fiber, fragment, film 등으로 나타났다(Figure 5). 수처리공정과 슬

리지처리과정 각각 fiber가 55%, 73%로 많았으며, 다음으로 flake와 film 형태 순으로 포함되었다. Fiber에 대하여 FT-IR 분석 결과, 주성분은 Polyester로 나타났다. Helena Ruffell 등의 연구에서도 MPs의 유출수 농도와 성상이 유사하게 나타났다.<sup>14)</sup> 하수에 fiber 함량이 높게 나타난 것은 가정에서 배출되는 세탁폐수에 포함된 fiber에 기인하는 것으로 사료된다.



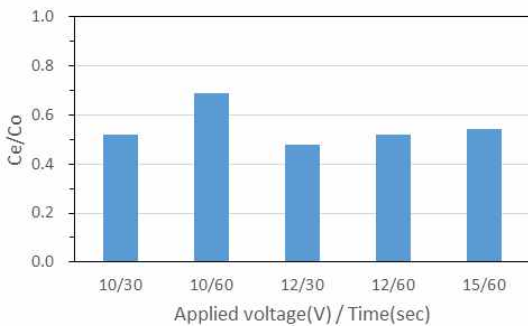
(a) Fiber (b) Flake, Fragment (c) Film

[Figure 5] Shape of microplastics in the sludge

### 3.3 미세플라스틱 전처리

Fiber의 비중이 낮은 점을 고려하여 미세공기에 의한 부상공정으로 전처리 실험을 진행하였다. 미세공기의 발생 기작은 다양한 공정이 있으나 본 실험에서는 전기분해에 의해 발생하는 미세기포를 주입하였다. 즉, 전기적 인가전압(Voltage), 미세공기와의 접촉시간과 그에 따른 부상속도 등이 주요 운전인자이다. 본 실험에서는 fiber 성분이 대부분인 세탁폐수(Polyester, nylon fiber)를 시료로 이용하였다.<sup>15)</sup>

Figure 6은 미세기포의 발생조건인 인가전압과 공기 주입 시간에 따른 MPs의 분리효과를 나타낸 것이다. 인가전압 12V, 접촉시간 30sec에서 처리효과가 우수하게 나타났다. 하수처리시설에서 1차침전조 유출수를 대상으로 추가적인 실험을 통한 효과 검증과 적용 방안이 요구된다.



[Figure 5] Removal efficiency of microplastics by fine bubble flotation

## 4. 결론

공공하수처리시설에서 단위 공정별 미세플라스틱의 거동과 처리특성 그리고 함유하고 있는 MPs의 성상을 분석한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

국내 하수처리시설은 대부분 활성슬러지공법으로 운영되고 있는데, 수처리 공정에서 MPs 대부분이 슬러지에 흡착되어 90% 이상이 저감되는 것으로 나타났다. 그러나 슬러지 처리 공정의 경우 유입수 MPs의 함량의 두 배 이상 높게 증가하는 것으로 나타나 수처리 공정에서 전단계(1차침전조)에서 전처리공정을 통한 사전 차단공정 도입이 필요하다.

하수처리시설에 유입된 MPs는 대부분 fiber 형태가 50% 이상을 차지하였고, 다음으로 flake와 film이 분포하는 것으로 나타났는데, 이는 생활하수(세탁폐수)중에 함유된 fiber가 주요 발생원으로 판단된다. 슬러지 처리공정으로의 MPs 이동을 줄이기 위해 포기조 전 단계에서의 전처리 공정으로, 미세기포에 의한 부상공정을 통하여 세탁폐수중의 MPs 실험결과, 인가전압 12V, 접촉시간 30sec 조건에서 50% 이상의 유출저감 효과가 있었다. 미세플라스틱의 발생(Source) 억제와 사전차단 그리고 유출저감(Pathway) 등이 필요하며, 적정환 환경기준 설정과 관리가 필요하다.

## 참고문헌

- [1] Browne, MA, Crump, P, Niven, SJ, Teuten, E, Tonkin, A, Galloway, T, Thompson, R, "Accumulation of Microplastic on Shorelines Worldwide: Sources and Sinks". Environmental Science and Technology. 45, 9175 ~9179, 2011
- [2] Cosgrove, W. J., Loucks, D. P., "Water management: current and future challenges and research directions". Water Resource. 51, pp.4823~4839, 2015
- [3] Murphy, F., Ewins, C., Carbonnier, F., Quinn, B., "Wastewater Treatment Works (WwTW) as a Source of Microplastics in the Aquatic Environment". Environmental Science and Technology, 50, pp. 5800~5808, 2016
- [4] Steve A. Carr, Jin Liu, Arnold G. Tesoro, "Transport and fate of microplastic particles in wastewater treatment plants", Water Research 91, pp. 174~182, 2016
- [5] Boucher, J, Friot, D, "Primary Microplastics in the Oceans: a Global Evaluation of Sources". IUCN. 43, 2017
- [6] Horton, A. A., Walton, A., Spurgeon, D. J., Lahive, E., Svendsen, C., "Microplastics in freshwater and terrestrial environments: Evaluating the current understanding to identify the knowledge gaps and future research priorities", Science Total Environment, 586, 127 ~141, 2017

- [7] Carr, S. A., Liu, J., Tesoro, A. G., “Transport and fate of microplastic particles in wastewater treatment plants. *Water Resource*. 91, 174~182, 2016
- [8] Rios, L. M., Moore, C., Jones, P. R., “Persistent organic pollutants carried by synthetic polymers in the ocean environment”. *Marine Pollution Bulletin*. 54, 1230~1237, 2007
- [9] Mato, Y, Isobe, T, Takada, H, Kanehiro, H, Ohtake, C, Kaminuma, T., “Plastic Resin Pellets as a Transport Medium for Toxic Chemicals in the Marine Environment”. *Environmental Science and Technology*. 35, pp.318~324, 2001
- [10] Net, S., Sempéré, R., Delmont, A., Paluselli, A., Ouddane, B., “Occurrence, Fate, Behavior and Ecotoxicological State of Phthalates in Different Environmental Matrices”, *Environmental Science and Technology*. 49, pp.4019~4035, 2015
- [11] Chua, E. M., Shimeta, J., Nugegoda, D., Morrison, P. D., Clarke, B. O., “Assimilation of Polybrominated Diphenyl Ethers from Microplastics by the Marine Amphipod, *Allorchestes Compressa*”, *Environmental Science and Technology*, 48, pp.8127~8134, 2014
- [12] Avio, C. G., Gorbi, S., Regoli, F., “Plastics and microplastics in the oceans: from emerging pollutants to emerged threat”. *Marine Environmental Research*, 128, pp.2~11, 2017
- [13] Talvitie, J., Mikola, A., Setälä, O., Heinonen, M., Koistinen, A., “How well is microlitter purified from wastewater? : A detailed study on the stepwise removal of microlitter in a tertiary level wastewater treatment plant”, *Water Research*, 109, pp.164~172, 2017a
- [14] Helena Ruffell, Olga Pantos, Grant Northcott and Sally Gaw, “Wastewater treatment plant effluents in New Zealand are asignificant source of microplastics to the environment”, *NEW ZEALAND JOURNAL OF MARINE AND FRESHWATER RESEARCH*, 2021  
<https://doi.org/10.1080/00288330.2021.1988647>
- [15] Napper, I. E., Thompson, R. C., “Release of synthetic microplastic plastic fibres from domestic washing machines: Effects of fabric type and washing conditions”. *Marine Pollution Bulletin*, 112, pp.39~45, 2016