Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society
Vol. 24, No. 10 pp. 755-761, 2023

https://doi.org/10.5762/KAIS.2023.24.10.755
ISSN 1975-4701 / eISSN 2288-4688

공공하수처리시설에서의 미세플라스틱 거동, 성상 조사 및 미세기포를 이용한 전처리

안재환*, 오혜철, 오대민
한국건설기술연구원 환경연구본부

Investigation of Microplastics Behavior and Properties in Public Sewage Treatment Plant and Pre-treatment with Microbubbles

Jae-Hwan Ahn*, Hyecheol Oh, Daemin Oh
Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology
Department of Environmental Research

요 약 강우 유출수와 생활하수에 함유된 미세플라스틱(Microplastics, MPs)은 하수관거를 통하여 공공하수처리시설에서 포집된다. 하수처리시설의 처리공정별 미세플라스틱의 거동과 성상을 분석하고, 미세플라스틱의 물리적 특성을 고려하여 미세기포를 이용한 전처리 방안을 알아보았다. 하수처리시설에서 처리공정별 미세플라스틱의 함량과 성상을 조사·분석한 결과, 1차 침전조, 포기조, 2차침전조 그리고 3차 처리조 유출수의 MPs 농도는 각각 719 MP/L, 152 MP/L, 44 MP/L 그리고 16 MP/L로 분석되었다. 1차와 2차 침전조의 침전슬러지는 슬러지 처리공정인 농축조로 이송된다. 슬러지 농축조Ⅰ(1차슬러지), 농축조Ⅱ(2차슬러지), 그리고 슬러지 가용화조의 미세플라스틱 농도는 각각 122 MP/g, 213 MP/g, 그리고 1,363 MPs/g로 나타났다. 수처리 공정의 슬러지와 흡착된 MPs가 슬러지 농축조로 물리적으로 이동되고, 고농도로 농축되어 MPs 농도가 높게 나타난 것으로 분석된다. 하수처리시설에 유입된 MPs 형태는 섬유 형태가 55% 이상으로 가장 많았으며, 다음으로 플라스틱 조각과 필름 형태가 각각 25%, 16%로 나타났다. 이는 생활하수(세탁폐수)중에 함유된 섬유에 기인한다. 따라서 하수처리시설에서 MPs가 슬러지 처리공정으로 이동을 줄일 수 있는 처리 방법이 요구된다. 전처리 공정으로 미세 기포에 의한 MPs의 부상 분리를 검토하였으며, 섬유 성분이 대부분인 세탁폐수를 대상으로 미세기포 부상공정을 이용하여 처리실험 결과, 60% 이상 저감되어 전처리 공정으로 적용을 기대할 수 있다.

Abstract Microplastics contained in rainfall runoff and domestic sewage are collected by public sewage treatment plants (PSTP) through sewage pipes. The behavior and properties of microplastics (MPs) by the treatment process of sewage treatment facilities were analyzed, and pretreatment methods using microbubbles were investigated, considering the physical properties of MPs. As a result of investigating and analyzing the content and properties of MPs by treatment process at a sewage treatment plant, the MPs concentrations of the primary sedimentation tank (PST), aeration tank (activated sludge, AS), final sedimentation tank (FST), and third treatment tank (rapid filtration facility) effluent were 719 MP/L, 152 MP/L, 44 MP/L, and 16 MP/L, respectively. The PST and FST sedimentation sludge is transferred to the thickener, a sludge treatment process. In the sludge of the Thickener I (PST sludge) and Thickener II (FST sludge), and sludge-solubilization (dehydration) tank of the anaerobic digestion tank (ADT), 122 MP/g, 213 MP/g and 1,363 MPs/L were found, respectively. The sludge and adsorbed MPs in the water treatment process were concentrated at a high concentration and physical movement to the sludge concentration tank, increasing the MP concentration. Fiber was the most common MP introduced into sewage treatment plants, with more than 55%, followed by flake and film, with 25% and 16%, respectively. This was attributed to the fiber in household sewage (washing wastewater). Therefore, treatment methods are needed to reduce the movement of MPs to the sludge treatment process in sewage treatment plants. The floctation separation of MPs by microbubbles was reviewed as a pretreatment process. The treatment experiment using the microbubble floating process for washing wastewater with most fiber components revealed a more than 60% reduction. This process can be expected to be applied as a pretreatment process.

Keywords : Microplastics, Sewage Treatment Process, Behavior, Fiber, Fine Bubbles

본 논문은 한국연구재단 연구비 지원으로 수행되었음. (과제번호: 2021M3E8A2100648)
*Corresponding Author : Jae-Hwan Ahn(KICT)
email: jhahn@kict.re.kr
Received August 24, 2023 Revised October 5, 2023
Accepted October 6, 2023 Published October 31, 2023

1. 서론

강우 유출수와 같은 비점오염 물질이나 도시 생활하수는 하수도를 통하여 공공하수처리시설로 수집된 후 적정하게 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 수돗물과 해양수산물, 소금 등에서도 검출됐다. 아직까지 적정한 환경관리기준이 마련되지 못하고 있으며, 하수처리시설과 강우 유출수 등이 주요 발생원(Source)이 되고 있다[1-4]. 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[5] 유출된 플라스틱은 물리·화학적으로 산화되어 작게 부서지는데, 물리적 크기를 기준으로 5mm 이하를 미세플라스틱(Microplastics, 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[6]. 수계로 유출된 미세플라스틱이 분해되어 마이크로 크기보다 작은 나노 크기로 분해됨에 따라 수생생물을 거쳐 생물 농축되어 인간에게까지 전달되고 있다[7-9]. 나노 크기의 미세플라스틱은 물리적·화학적 분석이 어려워 적정한 관리가 쉽지 않다. 특히, 플라스틱 제품의 생산 과정에서 비스페놀A(Bisphenol A), 프탈레이트(Phthalate) 등 여러 종류의 화학물질이 첨가된다. 이러한 화학물질들은 MPs에서 수계로 유입되기도 하고, 반대로 수중의 오염물질들과 흡착되어 가까운 장래에 수생태계에 심각한 영향을 준다[10,11].

플라스틱의 생분해를 촉진시키거나 생분해가 가능한 바이오 플라스틱 개발 등과 관련된 연구가 진행 중이지만, 과거 수십 년간 수계로 유출된 플라스틱은 계속해서 작게 분해되고 생태계 순환을 거쳐 인간에게 직접적인 영향을 미치게 된다. 최근에는 지하 대수층에서도 Microfibers가 검출되었는데, 폐수처리장 처리수, 중수 배출수, 정화조 배출수 그리고 대수층 재충전수 등 다양한 경로를 통하여 유입되고 있다[12-14]. 기존의 환경공학 기술에서 수중의 미세플라스틱을 저감시키는 연구가 미비한 상태에서 도시 오염물질의 최종 수거시설인 하·폐수처리시설의 미세플라스틱의 유입 특성과 공정별 이동 그리고 저감 상태 분석 등의 조사는 유의미한 자료로 활용될 수 있다[15]. 따라서 본 연구에서는 도시 공공하수처리시설에서의 처리 공정 별 미세플라스틱 함량과 성상을 분석하고, 방류수를 통한 수계로의 유출 저감을 위한 적정한 처리 방안을 제안하고자 한다.

2. 실험방법

2.1 미세플라스틱 전처리 및 분석

공공하수처리시설의 처리 공정 별로 채취한 시료는 300㎛~ 5mm 크기로 채 분리하여 미세플라스틱 함량과 상상을 분석하였다. 과산화수소수(30 %)를 주입하여 유기물질을 분해시키고, 입자 크기 별로 분리 후 염화아연($ZnCl_2$) 용액(1.6g/㎤)을 주입하여 3회 반복하여 실온에서 밀도 분리를 진행시켰다. 가열(70~80 ℃) 및 방냉 공정 후 현미경(Zeiss, Discovery V8) 확인과 적외선분광법(FT-IR ; Pekin Elmer, Frontier w/ Spotlight 400)으로 분석 실시하였다(측정 조건: Resolution 8㎝$^{-1}$, wave number 750~4,000 ㎝$^{-1}$). 슬러지와 같이 유기물 함량이 높을 경우 슬러지 1g 기준 과산화수소수(30%)와 팬톤산화 공정이 추가된다(Fig. 1).

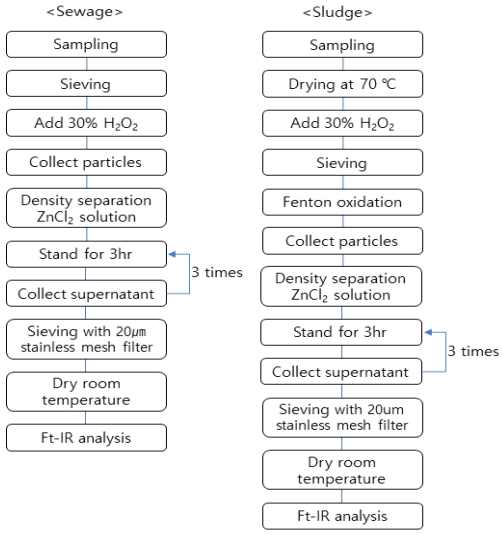

Fig. 1. Pretreatment method for microplastics analysis in sewage and sludge

2.2 하수처리 공정별 미세플라스틱 조사

경기도 K시에 위치한 공공하수처리시설의 하수 처리 공정과 슬러지 처리공정에서 시료를 채취하여 미세플라스틱의 함량을 조사하였다, 하수처리 공정은 1차침전조(SW1), 포기조(SW2), 2차침전조(SW3) 그리고 3차처리(Rapid filtration) 유출수(SW4)를 채취하여 5mm 이하로 채 분리 후 전처리 공정에 따라 미세플라스틱 함량(MPs/L)를 분석하였다. 슬러지 처리공정에서는 농축조 1·2(SL1·2), 소화조(SL3) 그리고 슬러지 가용화조(SL4)에서 슬러지중의 미세플라스틱 함량(MPs/g)를 분석하였다(Fig. 2).

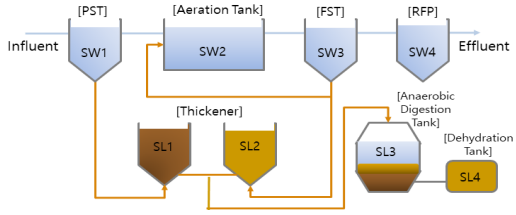

Fig. 2. Sampling point of microplastics in sewage and sludge treatment processes [PST: Paimary Settling Tank, FST: Final Settling Tank, RFP: Rapid Filtration process]

2.3 미세플라스틱의 전처리 실내실험

Fiber 성상의 MPs와 미세기포를 부착하여 부상분리시키는 공정으로의 처리 가능성을 검토하였다. Fig. 3은 실험실 규모의 MPs 부상조로서, 직경 20cm의 원통형 아크릴 반응조 하부에 전기분해식 미세기포 생성을 위하여 전극판 모듈(10cm*10cm*10개)을 설치하였다. 전극판 간격은 단위 인가 전압에서 미세기포 발생 효율이 높은 1.0mm~1.5mm로 제작하였다. 주요 실험인자는 전극판에 가해지는 인가 전압(Applied voltage: 10V~15V), 공기 접촉시간(30sec~60sec)로 설정하였다. 가정용 세탁기를 이용하여 다양한 의복의 세탁 후 배출되는 세탁 폐수를 실험 시료로 이용하였다.

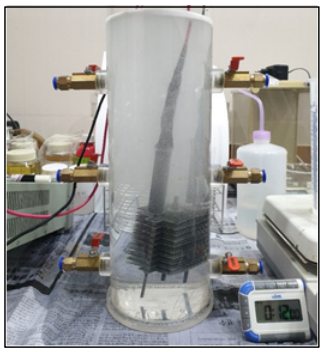

Fig. 3. Lab-scale fine bubble flotation devices

3. 결과 및 고찰

3.1 처리 공정별 미세플라스틱 조사

Fig. 4는 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/L 로 나타나 2차 처리에서 93.9%의 MPs가 저감되었다. 무기성분인 MPs가 높은 처리율은 나타낸 것은 포기조의 활성슬러지에 MPs가 흡착된 후 다음 공정인 2차침전조에서 슬러지의 침전으로 MPs의 유출이 줄어든 것으로 분석된다.

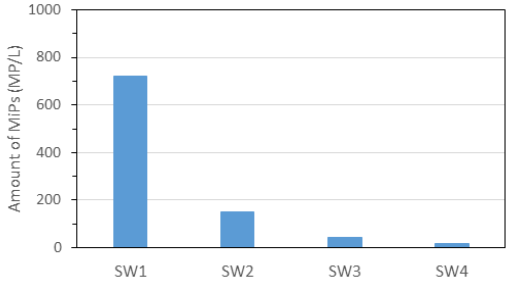

Fig. 4. Amount of microplastics by sewage treatment process

1차 침전조(PST)와 2차 침전조(FST)의 슬러지(고형물 함량 wt% : 0.60%~0.8%)가 이송되어 고형물 체류시간(12hr~24hr) 동안 저류 및 고농도로 농축되는 농축조(중력식 농축조 wt% 1.5%~2.5%, 기계식 농축조 wt% 5.0%~7.5%)에 저장 후 혐기성 소화조에서 분해된다. Fig. 5는 농축조(SL 1, 2), 혐기성 소화조(SL3) 그리고 가용화조(SL4)의 MPs 함량(MP/g)을 나타낸 것이다. 슬러지 농축조 1·2에서는 평균 167.5 MP/g 로 나타났으며, 소화조의 슬러지 가수분해조의 경우 슬러지의 액상화에 따라 MPs가 고농도로 농축되어 1,363 MP/g로 높게 나타났다. 대규모 하수처리시설에서도 하수처리공정과 슬러지 처리공정별로 유사한 분포결과를 보여주었다[16,18].

하수처리시설은 무기성분인 MPs이 단순 흡착되어 방류수중의 MPs 농도가 저감되는 것으로 보이지만, 슬러

지 처리시설과 연계하여 검토할 경우 슬러지와 결합되어 슬러지 처리시설로 물질 이동된다[15]. 또한, 농축수나 슬러지 탈수여액 등의 반류수는 수처리 공정(포기조)으로 반송되어 처리되는데, 포기조의 활성슬러지중에서 무기성분(MLVSS/MLSS %) 비율을 증가시켜서 처리효율 저하의 원인으로 작용한다.

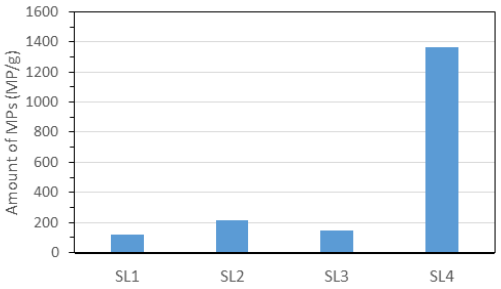

Fig. 5. Amount of microplastics by sludge treatment process

3.2 미세플라스틱 성상 분석

하수처리시설에서 조사된 미세플라스틱 형태는 대부분 fiber, fragment, film 등으로 나타났다(Fig. 6). 수처리 공정과 슬러지처리공정에서 fiber가 55%, 73%로 많았으며(Fig. 7), 다음으로 flake와 film 형태 순으로 포함되었다. Fig. 8은 하수처리시설과 슬러지 처리시설에서 함유율이 많은 fiber와 film에 대한 FT-IR 분석 결과를 나타낸 것이다. FT-IR 분석 스펙트럼은 상업용 폴리머 재료의 사전 스펙트럼과의 일치 정도를 비교하였다. Fiber의 주성분은 Polyester(Search score 0.8571)로, fragment의 경우 Polyacrylate(S.C 0.8319)로 분석되었다. Helena Ruffell 등의 하수처리시설 현장조사에서도 MPs의 종류와 성상이 유사하게 나타났으며, FT-IR 분석에서도 참조 라이브러리에서 특성 피크 확인(S.C 0.7 이상) 하였다고 한다[15].

하수에 fiber 함량이 높게 나타난 것은 가정에서 배출되는 세탁폐수에 포함된 fiber에 기인하는 것으로 사료된다. Table 1은 의복 세탁과정에서 유출되는 미세플라스틱의 발생량을 조사한 것이다. 가정용 세탁기를 이용하여 옷감의 무게(세탁량)와 성분에 따른 MPs 발생량을 측정하였다. 세탁 후 유출수 중의 MPs 성상별 발생량은 Polyester(PE)는 148±21 MPs/L, Acrylic(AC) 150±54 MPs/L, 그리고 Polyamide(PA)는 702±248 MPs/L로 분석되었다. 배출 농도는 PA가 높았지만, 세탁과정에서 의복 중량당 섬유의 유출은 섬유의 성분의 PE가 상대적으로 적게 나타났다. Napper, I. E.(2016) 등도 세탁폐수를 시료로 이용한 실험에서 섬유형태(Polyester, nylon fiber)와 세탁조건에 따라 MPs 유출량에 영향을 주는 것으로 보고하였다[17].

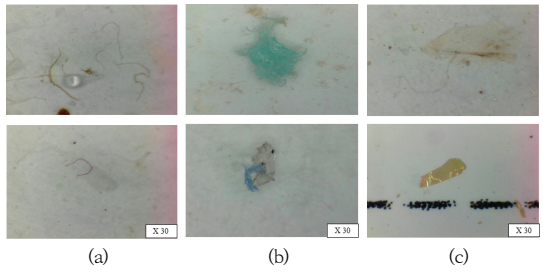

Fig. 6. Shapes of microplastics in the sludge (a) Fiber (b) Fragment (c) Film

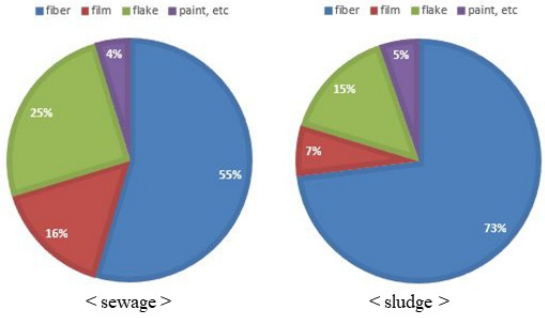

Fig. 7. Composition ratio by microplastics type in sewage and sludge treatment process

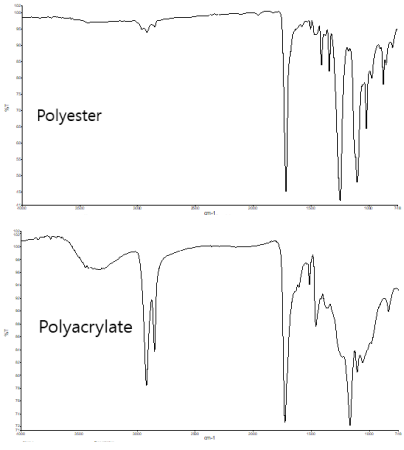

Fig. 8. FT-IR spectroscopy of Polyester(PEs) and Polyacrylate(PA)

Table 1. Amount of microplastics leaked during the washing process of clothes

Amount of Microplastics	Polyester PE	Polyamide PA	Acrylic AC
Washing effluent, MPs/L	148±21	702±248	150±54
Leaked per weight of the garment, MPs/g	85±12	180±63	193±70

3.3 미세플라스틱 전처리

Fiber의 비중이 낮은 점을 고려하여 미세공기에 의한 부상공정으로 전처리 실험을 진행하였다. 전기적 인가전압(Voltage), 미세공기와의 접촉시간과 입자의 부상속도 등이 주요 운전인자이다.

Fig. 9는 미세기포의 발생조건인 인가전압과 공기주입 시간에 따른 MPs의 처리효과(Ce/Co, Ce: effluent concentration, Co: initial concentration, t=0)를 나타낸 것이다. 인가전압 12V, 접촉시간 30sec에서 52.4% 이상의 처리효과를 보였다. Fig. 1에 나타낸 바와 1차침전조의 평균 MPs 농도 719 MP/L 기준으로, 미세기포에 의한 부상공정으로 처리할 경우 약 345 MP/L 이하로 저감을 기대한다. 포기조의 평균 MPs 농도는 1차침전조에서의 저감에 따라 전처리 이전의 농도(152 MP/L) 대비 약 75 MP/L 이하의 저감이 가능하다. 1차침전조와 포기조의 MPs 농도 저감에 따라 슬러지 처리시설의 농축로조 이송되는 1차와 2차슬러지에 함유된 MPs 함량도 현격하게 감소된다. 국내의 하수처리시설의 대부분은 활성슬러지를 이용한 생물학적 처리방법으로 운영되고 있다. 하수처리공정에 미치는 영향을 최소화하고, MPs의 유출을 줄이기 위해서는 슬러지와 혼합되기 전 단계인 1차침전조의 MPs의 분리공정이 효과적인 것으로 판단된다.

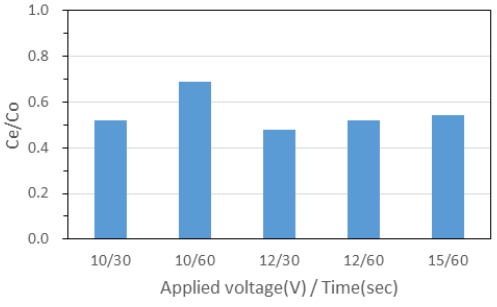

Fig. 9. Removal efficiency of microplastics by fine bubble flotation

4. 결론

공공하수처리시설에서 단위 공정별 미세플라스틱의 거동과 MPs 성상을 분석하고, 수계로의 MPs 유출 저감을 위하여 미세기포를 이용한 전처리 공정을 검토하였으며, 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

4.1 수처리 시설의 단위 공정별 MPs 분포

수처리 시설의 공정별 MPs 농도는 1차 침전조(PST)의 MPs 함량은 평균 719 MP/L, 포기조와 2차침전조(FST)는 각각 평균 152 MP/L, 44 MP/L로 나타났다. 슬러지 농축조 1·2에서는 평균 167.5 MP/g로, 슬러지 가용화조는 1,363 MP/g로 높게 나타났다. 포기조의 활성슬러지와 흡착된 MPs는 다음 공정인 2차침전조에서 슬러지의 침전으로 MPs의 유출이 줄어들지만, 슬러지 처리조로 이동하여 고농도로 농축된 것으로 분석된다. 하수처리시설에 유입된 MPs는 fiber가 55% 이상, flake와 film이 각각 25%, 16% 분포하였으며, 생활하수(세탁폐수)중에 함유된 fiber가 주요 발생원으로 판단된다.

4.2 MPs 전처리 공정 검토

유입된 MPs가 슬러지 처리 공정으로의 이동을 줄이기 위해서는 슬러지가 발생되는 1차침전조 공정에서의 전처리가 필수적이다. 미세기포에 의한 부상공정을 통하여 세탁폐수중의 MPs 처리 실험 결과, 인가전압 12V, 접촉시간 30sec 조건에서 50% 이상의 처리되었다. 국내 하수처리시설은 대부분 활성슬러지공법으로 운영되는데, 수처리 공정(포기조)에서 MPs가 슬러지에 흡착, 침전되어 93% 이상이 저감되는 것으로 분석되었다. 그러나 흡착된 MPs는 슬러지 처리공정으로 이송되어 유입수 MPs의 함량의 두 배 이상으로 농축된다. 따라서 수처리 공정에서 전처리 공정을 통한 사전 저감공정이 요구된다. 미세플라스틱의 발생원(Source) 억제와 사전 차단 그리고 유출저감(Pathway) 등이 필요하다.

Reference

[1] Browne, MA, Crump, P, Niven, SJ, Teuten, E, Tonkin, A, Galloway, T, Thompson, R, "Accumulation of Microplastic on Shorelines Woldwide: Sources and Sinks". Environmental Science and Technology. 45, 9175~9179, 2011
DOI: http://dx.doi.org/10.1021/es201811s

[2] Cosgrove, W. J., Loucks, D. P., "Water management: current and future challenges and research directions". Water Resource. 51, pp.4823~4839, 2015
DOI: https://doi.org/10.1002/2014WR016869

[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
DOI: http://dx.doi.org/10.1021/acs.est.5b05416

[4] Steve A. Carr, Jin Liu, Arnold G. Tesoro, "Transport and fate of microplastic particles in wasterwater treatment plants", Water Research 91, pp. 174~182, 2016
DOI: http://dx.doi.org/10.1016/j.watres.2016.01.002

[5] Boucher, J, Friot, D, "Primary Microplastics in the Oceans: a Global Evaluation of Sources". IUCN. 43, 2017
DOI: http://dx.doi.org/10.2305/IUCN.CH.2017.01.en

[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
DOI: http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.01.190

[7] 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
DOI: http://dx.doi.org/10.1016/j.marpolbul.2007.03.022

[8] 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
DOI: http://dx.doi.org/10.1021/es0010498

[9] 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
DOI: http://dx.doi.org/10.1021/es505233b

[10] 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
DOI: http://dx.doi.org/10.1021/es405717z

[11] 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
DOI: http://dx.doi.org/10.1016/j.marenvres.2016.05.012

[12] Viviana Re, "Shedding light on the invisible: addressing the pothential for ground water contamination by plastic microfibers", Hydrogeology Journal, 27, pp.2719~2727, 2019
DOI: https://doi.org/10.1007/s10040-019-01998-x

[13] David O'Connor, Shizhen Pan, Zhengtao Shen, Yinam Song, Yuanliang Jin, Wei-Min Wu, and Deyi Hou, "Microplastics undergo accelerated vertical migration in sand soil due to small size and wet-dry cycles", Environmental Pollution, 249, pp.527~534, 2019
DOI: https://doi.org/10.1016/j.envpol.2019.03.092

[14] H. Kang, S. Park, B. Lee, S. Yoon, H. Oh, J. Ahn and S. Kim, " Characterization of microplastics content and estimation of microplastics outflow in G city sewage treatment plant", KSWST Jour. War. Treat., 28, pp.43~49, 2020
DOI: http://dx.doi.org/10.17640/KSWST.2020.28.4.43

[15] 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
DOI: https://doi.org/10.1080/00288330.2021.1988647

[16] Satoshi Nakao, Kohsuke Akita, Asako Ozaki, Keiko Masumoto and Tetsuji Okuda, "Circulation of fibrous microplastics (microfober) in sewage and sewage sludge treatment processes", Science of the Total Environment, 795 148873, 2021
DOI: http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.148873

[17] 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
DOI: http://dx.doi.org/10.1016/j.marpolbul.2016.09.025

[18] 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
DOI: http://dx.doi.org/10.1016/j.watres.2016.11.046

안 재 환(Jae-Hwan Ahn) [정회원]

- 1993년 2월 : 아주대학교 환경공학과 (공학석사)
- 2004년 8월 : 한양대학교 토목환경공학과 (공학박사)
- 1993년 10월 ~ 현재 : 한국건설기술연구원 환경연구본부 연구위원

〈관심분야〉
하수처리, 물 재이용, 비점오염원

오 혜 철(Hyecheol Oh) [정회원]

• 2005년 2월 : 강원대학교 환경공학과 (공학석사)
• 2016년 11월 : Kyoto University Environmental engineering (공학박사)
• 2018년 2월 ~ 현재 : 한국건설기술연구원 환경연구본부 수석연구원

〈관심분야〉
유역수질관리, 수처리, 방사능제염

오 대 민(Daeminl Oh) [정회원]

• 2009년 8월 : 한서대학교 대학원 환경공학과 (공학박사)
• 2016년 3월 ~ 2020년 12월 : 한국건설기술연구원 수석연구원
• 2021년 1월 ~ 2022년 4월 : ㈜피에스글로벌 ICT융합연구소 연구소장
• 2022년 5월 ~ 현재 : 한국건설기술연구원 위원

〈관심분야〉
미량유해물질, 수처리