

연구논문

충북지역 하수처리시설의 미세플라스틱 검출현황 및 공법별 비교연구

김혜성^{1,2} · 문준식¹ · 조준영¹ · 이찬근¹ · 조영철² · 홍순기^{1†}

¹(재)FITI시험연구원
²충북대학교 환경공학과

Occurrence and Removal of Microplastic in Sewage Treatment Facilities in Chungcheongbuk-do

Hye-Sung Kim^{1,2}, Joon-Sik Moon¹, Jun-Young Jo¹, Chan-Geun Lee¹, Young-Cheol Cho²,
and Soon-Ki Hong^{1†}

¹Environmental & Bio Department, FITI Testing & Research Institute, Chungbuk, Korea
²Department of Environmental Engineering, Chungbuk National University, Chungbuk, Korea

Received February 01, 2023 / Revised February 14, 2023 / Accepted March 07, 2023

Microplastics from sewage and wastewater treatment facilities can be discharged into rivers and oceans, and the treatment facilities themselves can be a point source of microplastic pollution. The microplastic detection status and methods were compared in Miwon, Cheongju, Jecheon, and Chungju sewage treatment facilities in Chungcheongbuk-do. Samples were collected from the inlet, filtration facility, and discharge of Miwon Sewage Treatment Facility, a Porous Substrate Bioreactor (PSBR) construction corporation. Additionally, the inlet, first settling tank, final settling tank and outlet samples were taken from three sewage treatment facilities (Cheongju, Jecheon, and Chungju), which use bioreactor transformation processes. In the results, raw water showed a range of 232-1,510 pieces/L, and effluent water showed a range of 0.7-6.7 pieces/L. All four sewage treatment facilities showed high treatment efficiency of 98.5-99.9%. The treatment processes showed high removal efficiency in the order of CNR (97.0%) > PSBR (95.9%) > NPR (91.5%) > SMART3 (70.3%). As a study was conducted on only one sewage treatment facility for each process, additional research is necessary.

Keywords: Microplastics, Sewage treatment facilities, PSBR(Porous Substrate Bioreactor), CNR(Cilium Nutrient Removal), NPR(Nitrogen & Phosphorus Removal), SMART3.

1. 서 론

미세플라스틱이란 길이나 지름이 5 mm이하인 플라스틱을 일컫는 말이며, 예상되는 발생원에 따라 1차 미세플라스틱(primary microplastic)과 2차 미세플라스틱(secondary microplastic)으로 구분된다. 1차 플라스틱은 생산 당시부터 의도적으로 작게 만들어지는 플라스틱으로 화장품, 공업용 연마제, 치약과 레진 펠렛(resin pellet) 등과 같은 제품에 함유되어 있다. 이는 제품 내 미세플라스틱이 마이크로비드로 활용되어 세정제의 역할로 사용

되어 왔던 것이다. 또한 가공 공정에 사용되는 연마제에도 1차 플라스틱이 배출되며, 이렇게 소비자 제품부터 산업용 및 산업용 제품까지 다양한 제품에서 미세플라스틱이 나오고 있다. 2차 미세플라스틱은 생산될 때는 크기가 그보다 컸으나, 이후 플라스틱이 사용, 소모, 폐기되는 과정 중 인위적으로 또는 자연적으로 미세화 된 플라스틱을 말한다. 2차 미세플라스틱은 펠릿을 운송하는 과정 중 해양 유실로 인해 발생하거나, 페인트 코팅이 벽면으로부터 탈락되어 발생하는 경우부터 농업용 비닐이 풍화되는 등과 같은 인간의 활동에 의해 생기는 것부터 자연에 의

[†]To whom correspondence should be addressed.

해 풍화 및 침식 등에 의하여 미세화가 되는 경우까지 이른다. 2차 미세플라스틱은 이러한 물리적인 힘뿐 아니라 빛과 같은 광화학적 프로세스에 의해서도 발생할 수 있다.¹⁾ 미세플라스틱은 주로 합성 고분자 화합물(synthetic polymer)로 구성되어 있고 대표적으로 polyethylene(PE), polyamide(PA), polyvinylchloride(PVC), polystyrene(PS), polyethylene terephthalate(PET)등이며, 종류에 따라 잠재적 위해성이 다르다. 선행연구를 통해 알려진 미세플라스틱의 형태는 크게 다섯 가지로 구분할 수 있으며, 이러한 형태적 차이가 미세플라스틱의 특징으로 식별될 수 있다.²⁾ 대표적인 미세플라스틱의 형태로는 파편(fragment), 섬유(fiber) 등이 있으며 세분화한 형태에는 폼(foam), 필름(film), 펠릿(pellet), 구형 등이 포함되기도 한다.

이렇게 미세플라스틱은 다양한 곳에서 발생하여 다양한 경로를 통해 유입되고 미세플라스틱의 특성상 쉽게 퍼지는 특성으로 인해 오염이 광범위하게 발생할 수 있다. 광범위하게 퍼진 미세플라스틱은 생태계 전반에 물리적, 화학적, 생물농축 등 다양한 방식으로 악영향을 미치게 된다는 보고가 있다. 미세플라스틱의 대표적인 물리적 영향은 미세플라스틱 섭취로 인한 영양 감소, 구조적 피해(장기 손상), 염증 반응 유도, 조직학적 변화 유발 등이 나타난다고 보고되고 있으며, 화학적 영향의 경우에는 미세플라스틱에 포함된 첨가제 및 환경에 존재하는 강한 잔류성 유기오염물질(persistent organic pollutant, POPs)이 흡착되어 농축된 상태 등에 의한 화학적인 유해 가능성이 있다고 예상되고 있다. 이러한 미세플라스틱의 위해성으로 인해 우리는 미세플라스틱의 오염을 방지해야 하며 플라스틱 사용의 저감 및 대체품을 사용할 필요가 있다.

한편, 하·폐수처리시설은 담수 중 미세플라스틱을 배출하는 점오염원으로 작용하는 곳으로써 처리장을 거쳐 배출된 미세플라스틱은 하천이나 해양으로 배출되기 때문에 미세플라스틱에 대한 오염을 광범위하게 발생시킬 수 있는 시설이기 때문에 하수처리시설에서의 미세플라스틱의 배출특성을 밝혀내는 것은 중요한 일이다. 국내 미세플라스틱의 배출원은 선박수송에 의한 발생량이 가장 많았고 타이어 분진, 가정 세탁의 배출원 등이 뒤를 이었다. 우리나라의 미세플라스틱 발생 잠재량은 연간 총 (6만 3,000~21만 6,000) 톤으로 추정되며, 개인 관리 제품과 가정 내 세탁에서의 발생 잠재량은 연간 약 (40~370) 톤, (1,010~1만 1,480) 톤으로 추정되었으며, 전체 발생량의 약 (0.1~5)% 수준의 미세플라스틱이 하수처리시설로 유입될 것으로 추정된다.³⁾

미세플라스틱에 대한 최초 연구는 1972년 Carpenter가

발표한 2편의 논문으로, 해양 환경에서 미세플라스틱이 증가한다는 보고이다. 이후 해양 환경을 중심으로 미세플라스틱의 연구가 주로 진행되었는데, 현재까지도 해양에서 미세플라스틱이 동물성 플랑크톤, 조개류, 새우, 어류 등 다양한 해양 생물들에게 미치는 영향에 대한 연구들이 활발하게 진행되고 있다.^{4,5,6)}

미세플라스틱의 유해성은 직접적 피해와 간접적 피해로 나눌 수 있다. 먼저 직접적인 플라스틱의 피해로는 플라스틱 파편에 의한 생물 조직의 찢어상과 염증 등에 의한 세포 괴사가 발생할 수 있다는 것이다. Lehner의 연구에서 미세플라스틱은 피부, 소화기관, 폐 등으로 흡입될 수 있으며, 이로 인해 소화기관을 막거나 점막을 자극시키고 마모시킬 수 있는 것으로 나타났다. 특히 미세플라스틱의 사이즈가 $1\ \mu\text{m}$ 이하로 작아지면 모세혈관으로 침투되며 몸 전체로 확산될 수 있다고 경고하였다.⁷⁾

간접적 피해 중 대표적인 미세플라스틱의 피해는 각종 유해물질의 운반체 역할을 수행한다는 것이다. 미세플라스틱은 디에틸헥실프탈레이트(DEHP), 노닐페놀(Nonylphenol), 옥틸페놀(Octylphenol), 다환방향족탄화수소(PAHs) 등 다양한 오염물질의 매개체 역할을 하는 것으로 확인되었다.⁸⁾ 마찬가지로 폴리염화바이페닐(PCBs), PAHs, 유기염소계농약(organochlorine pesticides) 등의 잔류성 유기오염물질(POPs)의 축적에 미세플라스틱이 기여하는 것으로 보고되었다.⁹⁾ PVC와 PE에 POPs 물질을 흡착시켜 생태계 조건에서 탈착시킨 결과, 30배 이상 빠르게 탈착되는 것으로 나타났다.¹⁰⁾ 또한 미세플라스틱의 생태계 노출로 인해 공정에서 반응하지 않은 모노머나 부산물, 가소제, 첨가제, 색소, 안정제, 용매 등이 침출될 수 있다는 것도 간접적 피해에 해당한다. 대표적으로 PS의 스타이렌 모노머, PVC 생산을 위한 가소제나 폴리카보이네트 생산에 첨가되는 BPA(비스페놀A) 같은 유해 물질이 생태계로 유입될 수 있다.¹¹⁾ 또한 해양에서 소수성 미량오염물질인 PCB, DDE, 노닐페놀 등을 미세플라스틱이 흡수하여 매개체 역할을 하는 것으로 나타났다.¹²⁾

미세플라스틱을 생물에 노출시킨 연구에서, 동물성 플랑크톤이 PS를 섭취하였을 때 미세플라스틱의 크기가 작을수록 흡수하는 양이 증가하였으며, 동물성 플랑크톤의 섭취 기능이 떨어지는 결과를 확인하였다. 또한 미세플라스틱이 축적된 동물성 플랑크톤의 상위 포식자의 대변에서 미세플라스틱이 배출되는 것을 확인하였다.⁴⁾ 다양한 크기의 PS를 단소강 담류충(monogonont rotifer)에게 섭취시킨 후 영향을 보는 연구에서는 담류충의 산화스트레스 및 항산화 효소의 증가를 확인하였고, 성장률, 생식력, 수

명, 개체크기의 감소를 확인하였다.¹³⁾ PE를 다양한 조건에서 혼합에 노출 시킨 결과, 6시간 이후부터 혼합에서의 염증 반응이 나타나며 노출 시간의 증가에 따라 리소좀의 안정성이 감소되는 것을 확인하였다.^{14,15)} Steinmetz의 연구에서는 미세플라스틱으로 인한 농작물 재배의 피해를 보고하였다. 농작물을 재배하는 토양 표면에 미세플라스틱의 축적이 토양의 퇴화 또는 수분저항성을 촉진시키는 것으로 나타났다.¹⁶⁾

미세플라스틱에 대한 정량/정성 분석 방법에 관한 연구 사례를 보면, 미세플라스틱 분석법으로는 현미경 방법, 분광 분석법, 고온 분석법 등이 확인된다.

주사전자현미경(scanning electron microscopy, SEM)으로 미세플라스틱을 분석하는 것은 선명한 고배율 이미지를 제공할 수 있어, 유기물로부터 미세플라스틱을 구별하는데 용이한 것으로 보고되었다.¹⁷⁾ 또한 정성/정량 분석을 위해 SEM-EDS, Pys-GC/MS를 이용하여 미세플라스틱을 분석한 사례도 확인된다.¹⁸⁾ 최근에는 새로운 광학현미경 방법으로 초분광 이미징(hyperspectral imaging system, HIS)이 사용되기도 한다.^{19,20)} 분광분석법 중 FT-IR은 미세플라스틱의 정량, 정성 분석에 활용되는 일반적인 방법으로 알려져 있다. 그 외 푸리에 변환 마이크로 적외선 분광법(μ FT-IR)과 환경주사전자현미경(ESEM-EDS)을 이용하여, 미세플라스틱 표면의 화학적 매핑을 통해 입자의 조성 및 형태를 분석한 연구도 확인된다.¹⁰⁾ 고온분석법은 파괴분석법이라는 단점이 있으나 분석시간이 빠르다는 장점이 있는 분석법으로 알려져 있다. 열중량분석기(thermogravimetric analysis, TGA)-시차주사열량계(differential scanning calorimeter, DSC)를 이용하여 해양에서 채취한 미세플라스틱의 정성, 정량 분석 진행한 사례가 확인된다.²¹⁾

실제 환경 매체에서 미세플라스틱의 분포 현황을 검출한 연구 사례도 국내·외에서 다수 확인된다. 플라스틱의 종류와 대륙 간의 분포에 관한 연구에서는, 미세플라스틱 중 2차 미세플라스틱인 섬유가 61%, 파편은 36%인 반면에 1차 플라스틱인 구형은 3%에 불과한 것으로 나타났다. 또한 북극해와 아일랜드 대륙붕 퇴적물에서의 미세플라스틱 분포는 섬유가 85%, 파편 15%로 확인되었다.²²⁾ 영국해협 상 미세플라스틱을 검출한 결과, PA와 PP가 검출된 미세플라스틱 중 높은 비율로 나타났다.²³⁾ 반면 북극해에서 발견되는 미세플라스틱은 PET와 PA가 각각 15%이며, PE가 5%, Acrylic이 10%, PVC가 5%로 나타났다. 같은 연구에서 확인된 결과로는 북극해의 해수면에서 1 m³ 당 (0~1.31)개의 미세플라스틱이 발견되며, 해수

면 아래서는 (0~11.5)개의 미세플라스틱 입자가 확인된 것으로 보고되었다.²⁷⁾ 대서양과 지중해 수심 (1,100~5,000) m 심해의 퇴적물에는 1 m³당 (200~400) 개의 미세플라스틱이 확인되었다.²³⁾ 영국에서 발표한 결과에서는 영국 수돗물 83%에서 500 mL 당 (1.9~4.8)개의 수준의 미세플라스틱 합성 섬유가 검출되었고 미국 94.4%, 레바논 93.8%, 인도 82.4%인 것으로 보고되었다.²⁴⁾

하·폐수처리시설의 오염 물질 제거 효율에도 불구하고 방류수에 미세플라스틱이 검출되고 있는 것으로 확인된다. 미국 뉴욕주 하·폐수처리시설 34개소를 대상으로 방류수의 미세플라스틱을 조사한 결과, 25개소에서 미세플라스틱이 검출되었다. 34개소 중 여과공정이 설치된 시설은 10개소이며, 정밀여과의 경우 5개소, 급속모래여과 1개소 등 6개소에서는 미세플라스틱이 검출되지 않았으나 일반 여과공정이 설치된 2개소, 급속모래여과공정 1개소, 연속역세척모래여과공정이 설치된 1개소에서는 방류수에서 미세플라스틱이 검출된 것으로 보고되었다.²⁵⁾ 독일 하·폐수처리시설 12개소를 대상으로 방류수 미세플라스틱은 500 μ m 이상 (0~50)개/m³, 500 μ m 미만 (10~9000)개/m³로 나타났으며 PE의 분포가 가장 높은 것으로 보고되었다.²⁶⁾

스코틀랜드의 경우 유입수 15.7개/L, 방류수 0.25개/L로 98.4%의 미세플라스틱 처리 효율을 나타내었다.²⁷⁾ 또한 스웨덴, 핀란드, 아이슬란드 하수처리시설 6개소의 미세플라스틱을 비교한 결과, 핀란드 유입수에서 미세플라스틱이 더 많이 발견되었다. 반면 아이슬란드 하수처리시설의 경우 유입수와 방류수의 미세플라스틱 개수의 차이가 크지 않은 것으로 확인되었다.²⁸⁾ 핀란드에서는 하수처리공정에 따른 미세플라스틱 제거 효율을 평가하였는데 MBR공법의 하수처리시설에서 처리효율이 99.9%로 가장 높게 나타났으며 급속모래여과법 97%, 용존공기부상법 95% 순으로 확인되었다.²⁹⁾ 이처럼 공법에 따라 처리효율이 다르게 나타나는 결과를 볼 수 있었다. 호주의 한 연구에서는 1차 처리, 2차 처리, 3차 처리 방류수의 미세플라스틱에서 각각 1.54개/L, 0.48개/L, 0.28개/L로 나타났다.³⁰⁾ 스웨덴에서 조사된 하·폐수처리시설의 미세플라스틱은 300 μ m 이상의 미세플라스틱이 유입수에서 15,000개/m³, 방류수에서 8개/m³으로 확인되었으며 슬러지에 미세플라스틱의 99%가 포함된다고 보고하였다.³¹⁾

국내에서는 2010년 한국해양과학기술원에서 해양 분야 미세플라스틱 연구를 시작으로 연구 분야가 확장되어 왔다.

환경부는 2017년 수돗물에서 미세플라스틱 함유 실태

조사를 수행하였으며 24개 정수장, 수돗물 병입수 2개 제품, 먹는 샘물 6개 제품에 대해 미세플라스틱을 검출한 결과, 정수장에서 1 L당 평균 0.4개, 병입수 평균 0.33개, 먹는 샘물의 경우 1개 제품에서만 2개가 검출되었다고 보고하였다. 해양수산부에서는 2017년 소금에서의 미세플라스틱을 조사하였는데 국내산 소금 2종에서 100 g 당 최소 17개에서 최대 242개의 미세플라스틱이 검출되었다. 2019년 한국소비자원에서 시장에 유통 판매 중인 먹는 샘물 20개 제품에 대해 미세플라스틱을 측정 한 결과, 모든 제품에서 불검출 되었다고 보고하였다.

한국환경정책·평가연구원에서는 1차 및 2차 미세플라스틱의 발생원을 확인하고 일부 제품군에서의 미세플라스틱 발생량을 추정하는 연구를 수행하였다. 해당 연구에서 확인된 1차 미세플라스틱의 주요 발생원으로는 화장품, 세제류, 의약품, 농업, 원예, 오일, 가스, 건축 산업, 잉크 및 페인트 등으로 다양하게 나타났다. 2차 미세플라스틱으로는 타이어의 마모, 세탁 시 미세섬유, 생산·운송 시 펠릿 유출, 농업용 필름의 풍화, 페인트 도료의 탈락 등으로 나타났다. 일부 제품군에서 확인된 미세플라스틱의 발생량으로는 국내 생산 페인트 제품의 경우 48만 톤, 세제류의 경우 1만 톤, 타이어 마모로 인한 2차 플라스틱의 경우 5만 톤으로 추정하였다.^[2]

국립환경과학원은 담수 중 미세플라스틱의 분포 현황 및 서식 어류 대상 미세플라스틱 축적 현황을 보고하였다. 연구 결과에 따르면, 한강 수계의 미세플라스틱은 1 m³ 당 최초 0개에서 최대 104개로 나타났다. 상대적으로 본류에 비하여 지천에서의 미세플라스틱의 개수가 높았으며, 미세플라스틱의 종류는 본류 및 지천 마다 다른 양상을 보였다. 본류에서는 PE, PS가 많이 검출되었으며, 지천에서는 PTFE, PE, Polyester 등이 많이 검출되었다. 미세플라스틱의 형태로는 73% 이상이 파편이었으며 나머지는 섬유 형태의 미세플라스틱이 검출되었다. 같은 연구에서 보고된 한강 수계 서식 어류 대상 미세플라스틱의 축적 현황으로는 어류내장에서 마리 당 (4-48) 개의 미세플라스틱이 확인되었고 살에서는 검출되지 않았다. 대상 6개 어종 중 잉어에서 최대로 검출되었다. 어류에 축적된 미세플라스틱의 크기는 (0.3-0.6) mm가 대부분인 것으로 확인되었다. 검출된 미세플라스틱의 종류로는 PTFE, PE 순으로 많이 검출되었고 94%의 파편과 나머지의 섬유형태의 미세플라스틱이 확인되었다.^[32]

국내 하수처리시설의 대상으로 한 연구로는 국립환경과학원에서 2014년 탄천하수처리시설에서의 유입수 및 방류수의 미세플라스틱을 3회 검출한 결과, 유입수에서 평

균 3.2 × 10⁶개/m³, 방류수에서 14.1개/m³이 검출된 것으로 보고하였다.^[33]

국내 500 톤/일 이상 처리 규모의 공공하수처리시설을 대상으로 대표 공법별 (A2O, MBR, Media, SBR) 미세플라스틱의 제거 효율을 조사한 결과에서, 유입수 및 방류수에서의 미세플라스틱 분포는 대부분 1 mm 이하로 나타났다으며 파편 형태의 50~300 μm의 비율이 가장 높은 것으로 확인되었다. 또한 하수처리시설 공정에서 섬유 형태가 더 쉽게 제거가 가능하며 모든 공정에서 99.8%의 미세플라스틱 제거 효율이 나타났다.^[34]

국내·외적으로 하수처리시설 내 미세플라스틱 배출특성에 관한 연구는 많이 진행되고 있으나 대부분이 단기적이고 일시적인 모니터링에 관한 연구가 주를 이루고 있어 중장기적인 하수처리장 내 미세플라스틱 배출특성에 대한 연구가 필요하며, 또한 우리나라는 지역별로 산업의 특성이 뚜렷하고 대도시 중심의 발전이 이루어져 지역 간 발전규모의 차이가 뚜렷하다는 특성이 있어 지역별 하수처리장 내 미세플라스틱 배출특성에 대한 연구가 필요한 실정이다. 본 연구는 충청지역 하수처리시설의 미세플라스틱 검출 현황 및 공법별 비교 연구로서 충청북도 내 하수처리장 현황과 공법 및 단위공정에 대한 사전조사를 실시한 후 4개의 하수처리시설을 선정해 공법 및 공정에 따른 미세플라스틱 배출특성을 연구하였다.

2. 연구재료 및 방법

2.1. 연구의 범위

본 연구는 충청지역 하수처리시설의 미세플라스틱 검출 현황을 조사하고 하수처리시설 공법별 미세플라스틱 제거효율을 분석하는 것을 목표로 하였고 미세플라스틱 분석을 위한 하수처리시설을 선정하고 시설별 처리공법을 비교하고 하수처리시설 내 공정별 시료채취를 진행하고 농도를 분석하며 그 결과를 가지고 공정 및 공법별 미세플라스틱 제거효율을 알아내고자 하였다.

2.2. 조사대상시설

2019년 한국환경공단의 공공하수처리시설 현황에 따라 시설용량, 지역(소재지), 수계, 준공일 등을 고려하여 청주, 충주, 제천, 미원하수처리시설의 총 4개 지점의 각각 다른 4개 처리공법을 선정하여 비교 연구하였다. 시료채취는 총 2회하였고, 조사지점은 미원하수처리시설의 경우 유입수 지점, 여과설비 후 지점, 방류수 지점으로 하였고, 그 외 3개지점은 유입수 지점, 최종침전지 후 지

점, 최종침전지 후 지점, 방류수 지점으로 하여 공정 및 공법별 제거효율을 분석하고자 하였다.

2.2.1. 미원하수처리시설

미원하수처리시설은 일 최대 700 m³/일의 하수를 처리하고 있으며 일평균 679 m³/일의 하수가 유입되고 있으며 98.9%의 처리효율을 보였다.

2.2.2. 제천하수처리시설

제천하수처리시설은 NPR공법을 활용하여 질산화율을 극대화한 공법으로 질산화율의 저하를 최소화하며, 찌꺼기 발생량이 감소하는 등의 특징을 가진 하수처리시설이다. 일 최대 70,000 m³/일의 하수를 처리하고 있다.

2.2.3. 청주하수처리시설

청주하수처리시설은 청주시 전역의 2개의 행정구역, 9

개의 처리구역에서 발생하는 생활하수와 인근 환경 기초 시설에서 발생하는 오·폐수를 연계 처리하고 있으며 최대 280,000 m³/일의 하수를 처리하고 있다. 합류식, 분류식 혼합 차집 방식을 이용하며 하수처리구역 면적이 51.66 km², 인구가 512,575명에 해당한다.

2.2.4. 충주하수처리시설

충주하수처리시설은 2018년 시설 개량사업을 완료하여 기존 B3공법에서 SMART3 (협기, 무산소와 호기공정을 이용한 하수 처리공법)으로 변경하였다. 처리구역 면적은 16.59 km²이며 인구는 161,719명에 해당한다.

2.3. 연구 방법

2.3.1. 시료채취방법

본 연구에서는 하수처리시설별 미세플라스틱을 분석을 위해 각 하수처리시설에 협조를 요청하였고, 동의를 얻어

Table 1. Miwon sewage treatment facility overview

Treatment facility name	Miwon sewage treatment	Completion date	December, 2004
Water system	Han River (Miwon Stream)	Operating institution	Cheongju Environmental Management Headquarters
Facility capacity	700 m ³ /day	Inflow sewage	679 m ³ /day (98.9%)
Processing method	PSBR Process	Effluent disinfection method	UV rays
Processing area	Area	Collection method	classification formula
	Population		

Table 2. Jecheon sewage treatment facility overview

Treatment facility name	Jecheon sewage treatment	Completion date	January, 2009
Water system	Han River (Jangpyeong Stream)	Operating institution	Jecheon City Environmental Office
Facility capacity	70,000 m ³ /day	Inflow sewage	63,745 m ³ /day (98.9%)
Processing method	Standard activated sludge method-NPR method Total Phosphorus Micro Filtration	Effluent disinfection method	UV rays
Processing area	Area	Collection method	classification formula
	Population		

Table 3. Cheongju sewage treatment facility overview

Treatment facility name	Cheongju sewage treatment facility	Completion date	Step 1: April, 1992 Step 2: June, 2000
Water system	Geum River (Miho Stream)	Operating institution	Cheongju Environmental Management Headquarters
Facility capacity	280,000 m ³ /day	Inflow sewage	285,686 m ³ /day (99.2%)
Processing method	Standard activated sludge, CNR	Effluent disinfection method	UV rays
Processing area	Area	Collection method	Confluence (38%) Classification formula (62%)
	Population		

Table 4. Chungju sewage treatment facility overview

Treatment facility name	Chungju sewage treatment facility		Completion date	Step 1: October, 1995 Step 2: February, 2005
Water system	Han River (Chungju Stream)		Operating institution	Chungju City Hal
Facility capacity	75,000 m ³ /day		Inflow sewage	62,350 m ³ /day (98.8%)
Processing method	SMART3 공법		Effluent disinfection method	Chlorine
Processing area	Area	16.59 km ²	Collection method	Classification formula
	Population	161,719 people		

**Fig. 1.** Filtering net.

진행하였다. 청주, 제천, 충주, 미원하수처리시설을 대상으로 단위 공정별 시료를 채취하였으며, 사전 조사를 통해 각 하수처리시설별 채수 위치와 적정 시료량을 선정하였다. 미원하수처리시설의 경우, 회분식 공법을 사용하

고 고도하수처리 단계가 없으므로 유입부, 여과설비, 방류부 3곳을 채수 장소로 선정하였으며, 나머지 청주, 제천, 충주하수처리시설의 경우 유입부, 최초침전지 말단, 최종침전지 말단, 방류부 4곳에서 채수를 진행하였다. 사전 조사 시에, 유입수와 최초침전지의 경우 시료의 부유물이 상당히 많았기 때문에 갈색유리병에 1 L를 직접 채수하여 시료로 사용하였다. 반면 최종침전지와 방류수의 경우 대량 채수를 위해 현장에서 채수 거름망(네트, net)을 사용하였다. 거름망은 상부 5 mm 공극, 측면 20 μ m 공극으로 제작되어, 시료가 통과 시 20 μ m 이상의 입자만 하부에 포집될 수 있도록 하였다.

방류수의 경우 100 L를 거름망에 통과시킨 후 하부에 포집된 시료를 갈색유리병에 담고 이후 거름망을 증류수로 3회 정도 씻어 하부에 포집된 시료도 포함시켰다. 최종 침전지의 시료의 경우 방류수와 방식은 같았으나 현

Table 5. Water collection volume and pretreatment volume according to sewage treatment facility process (unit: L)

Target facility	Main method	Classification	Influent (raw water)	First settling tank	Final Settling Tank	Effluent
Cheongju	CNR	Water collection amount	1	1	60	20
		Preprocessing amount	0.05	0.1	5	10
Jecheon	NPR	Water collection amount	1	1	20	100
		Preprocessing amount	0.05	0.1	1	50
Chungju	SMART3	Water collection amount	1	20	40	100
		Preprocessing amount	0.05	1	4	50
Miwon	PSBR	Water collection amount	1	-	40	100
		Preprocessing amount	0.254	-	5	20

Table 6. Weather conditions at the time of primary sampling at sewage treatment facilities

Target facility	Chungju	Jecheon	Cheongju	Miwon
Collection date and time	June 7, 2022	June 9, 2022	June 9, 2022	June 9, 2022
Average temperature (°C)	17.8	15.4	22.4	22.4
Daily amount of precipitation (mm)	0.0	0.0	0.0	0.0
7 days precipitation (mm)*	6.8	11.1	6.6	6.6

*Cumulative precipitation within 7 days prior to collection date

Table 7. Weather conditions at the time of secondary sampling at sewage treatment facilities

Target facility	Chungju	Jecheon	Cheongju	Miwon
Collection date and time	August 22, 2022	August 22, 2022	August 22, 2022	August 22, 2022
Average temperature (°C)	25.4	23.8	27.8	27.8
Daily amount of precipitation (mm)	0.0	0.0	0.0	0.0
7 days precipitation (mm)*	49.6	79.4	62.7	62.7

* Cumulative precipitation within 7 days prior to collection date

장 상황에 따라 거름망이 막히지 않을 정도의 시료만을 통과시켰다.

각 하수처리시설의 공정별 시료 채수량은 Table 5와 같으며, 시료 채취 시 환경조건은 기상청 날씨누리포털을 활용하였으며 Table 6과 Table 7과 같다.

2.3.2. 시료의 전처리

시료 전처리의 경우 ①체거름 및 유기물 분해 ②밀도 분리 및 여과 ③건조 순으로 진행되며 세부내용은 다음과 같다. 시료를 흔들어 균질하게 만든 후, 적정량의 시료를 부피플라스크에 옮겨 담는다. 시료별 전처리 부피는 Table 5와 같다. 그 후 진공 유리여과장치에 5 mm sieve와 20 μ m sieve를 사용하여 시료를 진공 유리여과장치에 부어 20 μ m~5 mm크기의 미세플라스틱 입자를 선별한다. Sieve에 걸러진 입자들은 30% H₂O₂가 담긴 세척병을 이용하여 씻어내려 비커에 200 mL 부피가 될 때까지 담는다. 마지막으로 30% H₂O₂ 200 mL와 걸러진 입자가 담긴 비커에 유리 마그네틱바를 넣고 24시간동안 62.5°C, 180 rpm으로 가열 교반시켜 유기물을 제거한다. 가열교반이 끝난 시료를 진공 유리여과장치에 20 μ m sieve를 사용하여 30% H₂O₂을 걸러내어 버려 유기물이 제거된 입자만 남긴다. 걸러낸 입자들에 LMT(밀도 2.3 g/cm³)를 부으면서 비커에 담아낸 후 뭉친 입자가 없도록 잘 섞어가며 밀도분리용 유리깔대기에 넣고 상부를 호일로 덮는다. 그 후 1시간 간격으로 하부의 클램프를 조금씩 열어 침전된 입자를 제거하며, 세 번 정도의 하부 침전물 제거가 끝난 후 상부의 시료는 진공 유리여과장치에 금속재질의 메쉬 필터(pore size 20 μ m, 직경 25 mm)를 사용해 시료를 여과하면서 증류수로 세척하여 시료에 잔존해 있는 LMT용액을 씻어낸다. 걸러진 시료가 있는 금속재질의 메쉬 필터를 드라이오븐에 40°C, 12시간동안 건조시킨다.

2.3.3. FT-IR 분석방법

완전 건조된 필터를 1/4등분하여 FT-IR(Thermo

Scientific, NOCOLET iN10MX)을 이용해 측정한다. 측정조건은 resolution 16 cm⁻¹이고 wave number는 750~4000 cm⁻¹에서 분석하였다. 측정 후 데이터는 대기 중 CO₂의 영향을 제거하기 위해 2400~2270 cm⁻¹파장 범위에 대해 직선화(Straight line)를 진행한다. 이후 분석자가 원하는 물질을 찾기 위한 프로파일링 과정을 수행하는데, 본 연구에서는 PP, PE, PS, PTFE, Polyester 등 5개에 대하여 프로파일링을 진행하였다. 각 스펙트럼으로 프로파일링을 하여 검출된 미세플라스틱에 대하여 종류, 좌표(x축, y축), 크기, 형태 등을 기록하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 미세플라스틱 분석 결과

3.1.1. 미세플라스틱 분석 검증

FT-IR을 이용한 시료분석 전 분석자의 숙련도 검증 시행을 위해 CRM(Certified reference material, 인증표준물질)을 사용하여 시료분석을 실시하였다. 숙련도 검증 시행을 마치면 그 후 FT-IR을 이용하여 시료분석을 하게 되며 세부내용은 다음과 같다.

CRM을 흔들어주어 균일상태로 만든 후 오토마이크로 피펫으로 2 mL를 채취하여 금속재질의 메쉬 필터(pore

Table 8. CRM Standard

	Detail
Microplastic Material	PS
Manufacturer	Spherotech Inc.
Product name	SPHEROTM Polystyrene Particles, Crosslinked, 400-600 μ m
product capacity	10 mL
Density	5% w/v
Storage solution	Deionized Water with 0.02% Sodium Azide
Average particle diameter	509 μ m

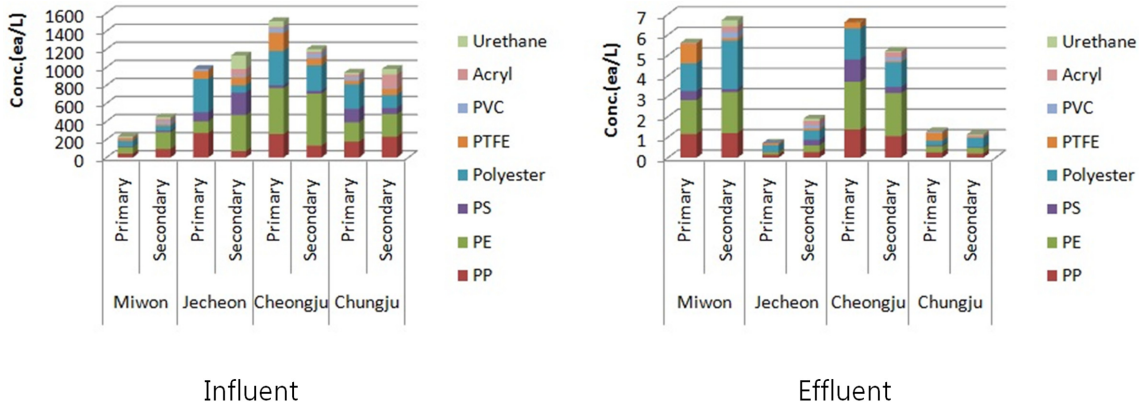


Fig. 2. Distribution of microplastics in influent and effluent water.

size 20 μm , 직경 25 mm)를 장착한 진공 유리여과장치를 이용하여 여과시킨 후 여과된 메쉬필터를 드라이오븐에 40°C, 12시간동안 건조시킨다. 건조된 CRM이 여과된 메쉬필터를 FT-IR을 이용해 분석을 실시하여 나온 Image 파일을 FT-IR 자체프로그램(OMNIC)을 적용하여 산출된 결과값과 분석자가 계수하여 나온값의 상대백분율로써 나타나어 그 값이 (80~120)% 이내(수질오염공정시험기준 준용)를 기준으로 하여 숙련도 검증을 시행한다.

인증표준물질로 분석자의 분석능력을 검증해본 결과 OMNIC 결과 73개, 분석자결과 72개로 나타나 98.6%로 목표 기준값을 만족하였다. 본 연구에서 분석자의 미세플라스틱분석 능력만큼 중요한 것이 전처리 과정에서의 미세플라스틱 오염 여부를 확인하고 이를 검증하는 과정이 필요하다고 판단되어 MB(Method Blank)시험을 실시하였다. 50 L 정제수로 시료채취 시 미세플라스틱 분석 시 필요한 전과정(①체거름 및 유기물 분해 ②밀도분리 및 여과 ③건조)을 거쳐 시험하였으며, 시험 결과 0.18개/L의 결과가 산출되었다.

3.1.2. 유입방류 농도 결과

조사대상 4개 하수처리시설의 유입 및 방류수에서의 미세플라스틱 농도를 산출하였다. 유입수에서는 (232~1,510)개/L의 범위로 나타났고, 방류수에서는 (0.7~6.7)개/L의 범위로 나타났다. 유입수에서는 청주(1,355개/L) > 제천(1,055개/L) > 충주(960개/L) > 미원(339개/L) 하수처리시설의 순서로 미세플라스틱이 높게 검출되었다. 인구수가 많은 지역일수록 유입수에서 미세플라스틱의 농도 분포가 증가하는 경향을 확인하였다.

방류수에서는 미원(6.2개/L) > 청주(5.9개/L) > 제천(1.3개/L) > 충주(1.2개/L) 순으로 미세플라스틱이 검출되

었다.

미세플라스틱의 종류는 유입수에서 PE(293개/L) > Polyester(204개/L) > PP(159개/L) > PS(82개/L) > PTFE(77개/L) 순으로 검출되었으며, 방류수에서는 PE(1.14개/L), Polyester(0.98개/L)가 주로 검출되었다. 그 외에 PVC, Acryl, Urethane 등의 미세플라스틱도 확인되었다. 유입수에서 가장 많이 검출된 Polyester는 섬유유래 미세플라스틱으로 알려져 가정세탁과정에서의 폐수로 인해 하수로 유입되었을 것으로 사료되고, 열가소성플라스틱으로 음료수 병뚜껑, 장난감, 식품용기, 포장용 비닐, 지퍼백, 종이컵 코팅제 등을 만드는 폴리에틸렌(PE)과 테이크아웃 커피 뚜껑, 컵라면 용기, 포장재에 사용되는 폴리프로필렌(PP)은 생활환경에서 쓰이는 플라스틱으로 가정에서 제품 사용에 의한 마모에 의한 2차 플라스틱이 하수로 유입되었을 가능성이 있다.

3.1.3. 형태별 분포 현황

미세플라스틱의 형태는 파편과 섬유로 조사되었다. 섬유형태 미세플라스틱은 6.5~21.0% 비율, 파편형태는 79.0~93.5%의 비율로 나타났다.

또한 유입되는 미세플라스틱의 형태는 섬유 형태의 Polyester와 파편 형태의 PE, PP가 대부분인 것으로 나타나 생활 속에 쓰이는 플라스틱 파편들이 하수로 많은 부분이 들어오는 것으로 추정되었다.

3.1.4. 크기별 분포 현황

하수처리시설의 공정별 크기 분포 현황을 살펴보았다. 원수에서는 (50~100) μm 크기의 미세플라스틱이 미원에서 185개/L로 54.4%, 제천에서 505개/L로 47.9%, 청주에서 580개/L로 42.8%, 충주에서 400개/L로 41.7%로 가장 높

은 비율을 차지했고, (100~300) μm 크기는 미원에서 98개/L로 28.8%, 제천에서 250개/L로 23.7%, 청주에서 465개/L로 34.3%, 충주에서 370개/L로 38.5%로 그 다음 비중을 차지했다. 이는 원수에서 (50~300) μm 크기가 (71.6~83.2)%의 대부분의 비율을 차지함을 알 수 있었다.

방류수에서는 (50~100) μm 크기가 미원에서 2.0개/L로 39.9%, 제천에서 0.50개/L로 41.7%, 청주에서 2.7개/L로 44.9%, 충주에서 0.40개/L로 31.5%로 가장 높은 비율을 차지했고, (100~300) μm 크기는 미원에서 1.7개/L로 35.5%, 제천에서 0.5개/L로 37.8%, 청주에서 1.6개/L로 26.3%, 충주에서 0.5개/L로 39.8%로 그 다음 비중을 차지했다. 이는 원수에서와 마찬가지로 (50~300) μm 크기가 (71.2~79.5)%의 대부분의 비율을 차지함을 알 수 있었다. (300~5000) μm 크기의 비율이 원수 (3.5~7.6)%로 나타난 것에 비해 방류수에서 (5.9~18.3)%로 나타남을 알 수 있었다.

3.1.5 제거효율 현황

하수처리시설의 공법별 미세플라스틱 제거효율을 보면 미원 최종침전지 후 지점에서 원수 대비 95.7%의 제거효율을 보였고, 방류수에서는 98.6%가 제거되는 것을 확인하였다. 제천하수처리시설에서는 최초침전 후 지점에서 43.0%, 최종침전지 후 지점에서 95.2%, 방류수에서 97.5%의 제거효율을 보였다. 청주하수처리시설에서는 최초침전지 후 지점에서 69.7%, 최종침전지 후 지점에서 99.0%, 방류수에서 99.6%의 제거효율이 나타났다. 충주하수처리시설에서는 다른 하수처리시설에서의 최초침전에서 처리효율과는 다르게 95.1%의 높은 효율을 나타냈고, 최종침전에서 98.5%, 방류수에서 99.9%의 제거

효율을 보여 4개 하수처리시설 모두 (98.5~99.9)%의 높은 처리 효율을 보였다.

3.2. 하수처리시설 주요 공법별 미세플라스틱 제거 특성 평가

미원하수처리시설에서는 회분식반응조를 통해 하수를 처리하는 PSBR 공법을 채용하고 있는데 이는 다른 하수처리시설에 비해 최초침전 단계가 없고 반응조와 최종침전 공정만으로 구성되어 있다. 제천, 청주, 충주하수처리시설에서는 NPR, CNR, SMRAT3 공법을 채용하고 있으며, 3 개의 하수처리시설 모두 [유입 → 최초침전 → 생물반응조 → 최종침전 → 고도산화처리 → 소독 → 방류]의 처리공정에 따라 하수가 처리되는 형태이며 각 공법의 차이로는 생물반응조 또는 고도산화 단계에서 처리 방식의 차이로 구분된다. 생물반응조나 고도산화처리의 운영형태에 따라 미세플라스틱 제거 메커니즘, 제거율의 차이가 분명하게 있을 것이라 추측된다. 이에 미원하수처리시설의 경우 유입수와 최종침전, 나머지 3개 하수처리시설의 경우 최초침전과 최종침전 후의 시료를 분석해 공법별 제거효율의 차이점을 살펴보았다. 물론 최종침전 후의 시료의 경우 생물반응조 직후 시료가 아니라 차이점이 있을 수 있겠으나 생물반응조 직후의 시료의 경우 시료에 미생물들이 혼합되어 있어 전처리하는데 어려움이 있어 최종침전 후의 시료를 채취하여 분석하였다. 이를 살펴본 결과 CNR(97.0%)>PSBR(95.9%)>NPR(91.5%)>SMART3(70.3%) 순으로 제거효율이 높은 것으로 나타났다. 미원하수처리시설의 PSBR공법의 경우 유입하수량이 697 m³/d로 타 시설에 비해 규모가 작고, 충주하수처리시설의 경

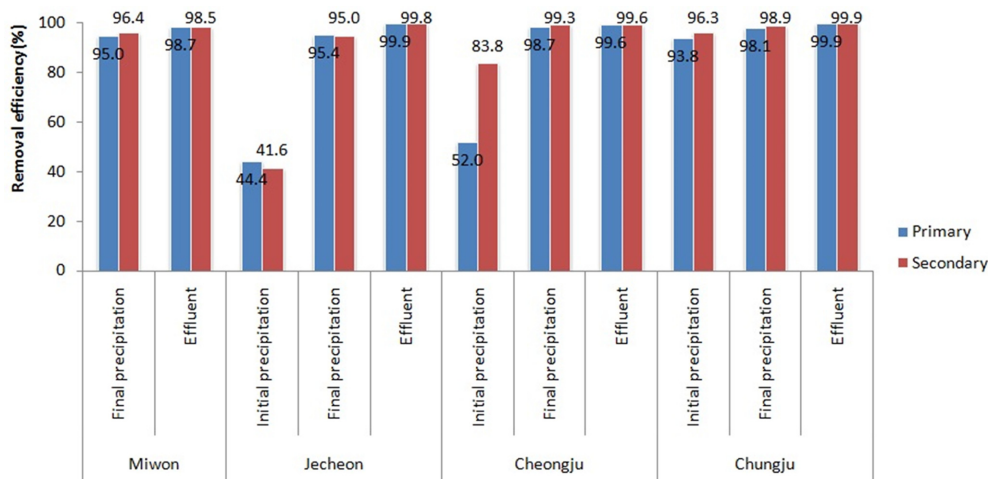


Fig. 3. Efficiency of microplastic removal in sewage treatment facilities.

Table 9. Sewage treatment facility process and removal efficiency

Target facility	Main Process	Collection Method	Inflow sewage	Microplastic Removal Efficiency*
Miwon	PSBR	Classification formula	697 m ³ /day	98.6%
Jecheon	NPR	Classification formula	63,475 m ³ /day	99.9%
Cheongju	CNR	Classification formula + Confluence	285,686 m ³ /day	99.6%
Chungju	SMART3	Classification formula	62,350 m ³ /day	99.9%

* Effluent removal efficiency compared to raw water, average value of primary and secondary results

우 최초침전에서 타 처리시설에 비해 처리효율이 높아 상대적으로 낮은 제거효율을 보이는 것으로 판단되어 추가적인 연구가 필요할 것으로 보인다.

본 연구와 비교 가능한 국내 연구를 확인하였다. 첫 번째로 국립환경과학원에서 진행한 연구에서 A2O, SBR, Media, MBR 공법을 포함한 10개 하수처리시설에서 99% 이상의 제거 효율을 보였으며 A2O > Media > SBR > MBR 순서로 높은 제거 효율을 확인하였다. 두 번째로 각기 다른 생물반응조 형태인 A2O, SBR, Media의 합류식 하수처리시설 3개에 대한 미세플라스틱 제거 효율을 비교한 연구에서는 3개 공법 모두 98% 이상의 효율을 보였고 SBR > A2O > Media의 순서로 미세플라스틱의 제거 효율이 높다고 보고하였다^[35]. 위 연구들과 본 연구에서 공통적으로 확인된 점은 공법별로 차이는 있으나 원수 대비 방류수에서 대부분의 미세플라스틱이 제거되었다는 점이다. 추가적으로 공법별 연구결과와 차이를 확인하기 위해 본 연구에서 선정한 하수처리장의 공법을 분류했을 때, 제천하수처리장의 NPR은 호기조에 Biocube를 충전한 공법이고 청주하수처리장의 CNR은 A2O개량 공법으로 섬모상 생물막을 설치한 것이어서 국립환경과학원에서 연구한 접촉여재를 통한 Media, 미생물접촉재를 사용한 MBR과 비교하여 생물반응조에 여재 및 막의 종류만 다른 공법이라고 볼 수 있다. PSBR은 SBR과 유사한 것으로 분류되어 국립환경과학원 연구결과인 A2O > SBR와 비교하여 CNR > PSBR로 유사한 결과를 얻을 수 있었고, 호기조에 Biocube를 충전한 NPR공법은 PSBR > NPR의 결과를 볼 수 있어 두 번째 논문과 유사한 결과를 확인하였다. SMART3의 경우 새로 개발된 공법에 해당되므로 분류하기 제한적이라 판단된다.

4. 결 론

본 연구는 1차년도 연구로써 우선 충북지역 하수처리 시설 중 4곳만을 선정해 단위 공정별 미세플라스틱 제거

율 및 미세플라스틱 종류에 따른 분포비율과 크기, 그리고 형태등과 같은 기초조사를 실시하여 다음과 같은 결과를 얻었다.

1. 미세플라스틱의 종류는 유입수에서 PE(293개/L) > Polyester(204개/L) > PP(159개/L) > PS(82개/L) > PTFE(77개/L) 순으로 검출되었으며, 방류수에서는 PE(1.14개/L), Polyester(0.98개/L)가 주로 검출되었다. 그 외에 PVC, Acryl, Urethane의 다른 종류의 미세플라스틱이 분포하는 것으로 나타났다. 또한 인구수가 많은 지역의 하수처리시설일수록 미세플라스틱의 농도분포가 증가하는 경향을 나타냈다.

2. 파편형태의 미세플라스틱은 79.0~93.5%, 섬유형태의 미세플라스틱은 6.5~21.0%의 비율을 나타냈고, 섬유형태의 Polyester와 파편 형태의 PE, PP가 대부분으로 일상생활에서 사용하는 플라스틱 파편이 많이 유입되는 것으로 나타났다.

3. 100 μm 이하 입자의 미세플라스틱비율이 원수에서는 (55.2~68.7)%, 최초침전에서는 (37.8~56.5)%로 나타나 대부분의 하수처리시설에서 공정이 진행 될수록 감소하는 경향을 나타내 입자가 작은 미세플라스틱의 제거 효율이 높아지는 경향을 보였다.

4. 방류수에서는 4개 하수처리시설 모두 (97.5~99.9)%의 높은 처리 효율을 보였다.

5. CNR(97.0%) > PSBR(95.9%) > NPR(91.5%) > SMART3(70.3%) 순으로 공법별로 제거효율의 차이가 나타났다. 충주하수처리시설의 경우 타 처리시설에 비해 1차 침전지에서 95.1%의 높은 제거효율을 보였으며 이는 유입하수량과 슬러지계면 높이 변화에 따라 처리효율이 다른 결과가 나왔던 것으로 판단된다.^[36,37] 또한 본 연구에서는 공법 별로 한 개 하수처리시설에 대한 연구가 진행되어 시설의 유입수량, 농도, 운전조건 등의 비교가 고려되지 않은 연구결과로 추후 각 공법의 균수를 여러 개로 하여 연구해볼 필요성이 있어 보인다.

감사의 글

이 연구는 충북녹색환경지원센터의 지원으로 수행되었습니다(22-02-30-31-16).

참고문헌

1. 류지현, “미세플라스틱 현황과 인체에 미치는 영향”, *The Korean Society of Industrial and Engineering Chemistry*, **2019**, 공업화학전망 22권2호.
2. 박정규 “미세플라스틱의 건강 피해 저감 연구”, **2019**, KEI 사업보고서.
3. H.-Y.Lee, and Y.-J. KIM, “Estimation of Microplastics Emission Potential in South Korea- For Primary Source -”, *The Sea: JOURNAL OF THE KOREAN SOCIETY OF OCEANOGRAPHY*, **2017**, 22(3), 135-149.
4. M. Cole, R. Lindeque, E. Fileman, C. Halsband, R. Goodhead, J. Moger, and T. S. Galloway, “Microplastic ingestion by zooplankton”, *Environmental Science & Technology*, **2013**, 47, 6646-6655.
5. J. Li, D. Yang, L. Li, K. Jabeen, and H. Shi, “Microplastics in commercial bivalves from China”, *Environmental Pollution*, **2015**, 207, 190-195.
6. C.-B. Jeong, E.-J. Won, H.-M. Kang, M.-C. Lee, D.-S. Hwang, U.-K. Hwang, B. Zhou, S. Souissi, S.-J. Lee, and J.-S. Lee, “Microplastic size-dependent toxicity, oxidative stress induction, and p-JNK and p-p38 activation in the monogonont rotifer (*Brachionus koreans*)”, *Environmental Science & Technology*, **2016**, 16, 49-57.
7. R. Lehner, C. Weder, A. Petri-Fink, and B. Rothen-Rutishauser, “Emergence of nanoplastic in the environment and possible impact on human health”, *Environmental Science & Technology*, **2019**, 53, 1748-1765.
8. R. Lohmann, “Microplastics are not important for the cycling and bioaccumulation of organic pollutants in the oceans - but should microplastics be considered pops themselves?”, *Integrated Environmental Assessment and Management*, **2017**, 13(3), 460-465.
9. N. Doorn, “Allocating responsibility for environmental risks: A comparative analysis of examples from water governance”, *Integrated Environmental Assessment and Management*, **2017**, 13(2), 371-375.
10. A. Bakir, S. J. Rowland, and R. C. Thompson, “Enhanced desorption of persistent organic pollutants from Microplastics under simulated physiological conditions”, *Environmental Pollution*, **2014**, 185, 16-23.
11. O. S. Alimi, J. F. Budarz, L. M. Hernandez, and N. Tufenkji, “Microplastics and Nanoplastics in Aquatic Environments: Aggregation, Deposition, and Enhanced Contaminant Transport”, *Environmental Science & Technology*, **2018**, 52, 1704-1724.
12. J. Li, H. Liu, and J. P. Chen, “Microplastics in freshwater systems: A review on occurrence, environmental effects, and methods for microplastics detection”, *Water Research*, **2018**, 137, 362-374.
13. A. Vianello, A. Boldrin, P. Guerriero, V. Moschino, R. Rella, A. Sturaro, and L. D. Ros, “Microplastic particles in sediments of Lagoon of Venice, Italy: First observations on occurrence, spatial patterns and identification”, *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, **2013**, 130, 54-61.
14. N. v. Moos, P. Burkhardt-Holm, and A. Kohler, “Uptake and effects Microplastics on cells and tissue of the blue mussel *Mytilus edulis* L. after an experimental exposure”, *Environmental Science & Technology*, **2012**, 46, 11327-11335.
15. C. O. Egbeocha, S. Malek, C. U. Emenike, and P. Milow, “Feasting on microplastics: Ingestion by and effects on marine organisms”, *Aquatic Biology*, **2018**, 27, 93-106.
16. Z. Steinmetz, C. Wollmann, M. Schaefer, C. Buchmann, J. David, J. Troger, K. Munoz, O. Fror, and G. E. Schaumann, “Plastic mulching in agriculture, Trading short-term agronomic benefits for long-term soil degradation?”, *Science of The Total Environment*, **2016**, 550, 690-705.
17. D. A. Cooper, and P. L. Corcoran, “Effects of mechanical and chemical processes on the degradation of plastic beach debris on the island of Kauai, Hawaii”, *Marine Pollution Bulletin*, **2010**, 60, 650-654.
18. E. Fries, J. H. DeKiff, J. Willmeyer, M.-T. Nuelle, M. Ebert, and D. Remy, “Identification of polymer types and additives in marine microplastic particles using pyrolysis-GC/MS and scanning electron microscopy”, *Environmental Science. Processes & Impacts*, **2013**, 15, 1949-1956 (2013).
19. S. Serranti, R. Palmieri, G. Bonifazi, and A. Cozaar, “Characterization of microplastic litter from oceans by an innovative approach based on hyperspectral imaging”, *Waste Management*, **2018**, 76, 117-125.
20. J. Shan, J. Zhao, L. Liu, Y. Zhang, X. Wang, and F. Wu, “A novel way to rapidly monitor microplastics in soil by hyperspectral imaging technology and chemometrics”, *Environmental Pollution*, **2018**, 238, 121-129.
21. A. L. Lusher, V. Tirelli, I. O’Connor, and R. Officer, “Microplastics in Arctic polar waters: The first reported values of particles in surface and sub-surface samples”, *Scientific Reports*, **2015**, 5, 14974.
22. E. J. Carpenter, S. J. Anderson, G. R. Harvey, H. P. Miklas, and B. B. Peck, “Polystyrene spherules in coastal

- waters”, *Science*, **1972**, 178(4062):749-50.
23. The Guardian, Plastic fibres found in tap water around the world, study reveals, <https://www.theguardian.com/environment/2017/sep/06/plastic-fibres-found-tap-water-around-world-study-reveals>, 2017.
 24. New York State Office of the Attorney General, Discharging microbeads to our waters: An examination of wastewater treatment plants in New York, http://www.ag.ny.gov/pdfs/2015_Microbeads_Report_FINAL.pdf, April 2015.
 25. S. M. Mintentig, I. Int-Vee, M. G. J. Löder, S. Primpke, and G. Gerdtts, “Identification of microplastic in effluents of waste water treatment plants using focal plane array-based micro-Fourier-transform infrared imaging”, *Water Research*, **2017**, 108, 365-372.
 26. F. Murphy, C. Ewins, F. Carbonnier, and B. Quinn, “Wastewater treatment works (WwTW) as a source of microplastics in the aquatic environment”, *Environmental Science & Technology*, **2016**, 50, 5800-5808.
 27. Swedish Environmental Research Institute, “Microlitter in sewage treatment systems: A Nordic perspective on waste water treatment plants as pathways for microscopic anthropogenic particles to marine systems”, Report C194, <https://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:923936/FULLTEXT01.pdf>, 2016.
 28. J. Talvitie, A. Mikola, A. Koistinen, O. Setälä, “Solutions to microplastic pollution - Removal of microplastics from wastewater effluent with advanced wastewater treatment technologies”, *Water Research*, **2017**, 123, 401-407.
 29. S. Ziajahromi, P. A. Neale, L. Rintoul, F. D. L. Leusch, “Wastewater treatment plants as a pathway for microplastics: Development of a new approach to sample wastewater-based microplastics”, *Water Research*, **2017**, 112, 93-99.
 30. Swedish Environmental Research Institute. “Screening of microplastic particles in and down-stream a wastewater treatment plant”, Report C55, <https://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:773505/FULLTEXT01.pdf>, 2014.
 31. 박태진, “담수 중 미세플라스틱 조사 기법 연구(Ⅲ)”, 국립환경과학원, **2018**, 18-218.
 32. 박창희, “담수 중 미세플라스틱 조사 기법 연구”, 국립환경과학원, **2016**, 16-282.
 33. 이재호, “하수처리구역 유형에 따른 미세플라스틱 배출 특성 조사(I)”, 국립환경과학원, **2021**, 21-218.
 34. 정동환, 주병규, 이원석, 정현미, 박준원, 김창수, “정수처리장 내의 미세플라스틱의 유입 및 처리기술 현황에 관한 고찰”, 상하수도학회지, **2020**, 제34권5호
 35. H. Lee, Y. Kim, “Treatment characteristics of microplastics at biological sewage treatment facilities in Korea”, *Marine Pollution Bulletin*, **2018**, 137, 1-8.
 36. K. Kim, “A study on optimum management model for wastewater treatment plant according to increasing water inflow on rainy days”, *Ph.D Dissertation, Department of Environmental Engineering, University of Seoul*, **2008**, pp. 84-85.
 37. H. Park, and S. Song, “Estimations of efficiency for wastewater treatment plant with changing sludge height and increasing water inflow on rainy days”, *Journal of Korean Society of Environmental Engineering*, **2004**, Vol. 36, No. 8, pp. 549-558.