

미세플라스틱의 환경노출을 최소화하기 위한 하·폐수 슬러지 관리방안

안준영¹, 이병권¹, 전병훈², 지민규^{1,*}

¹한국환경정책·평가연구원

30147 세종특별자치시 시청대로 370

²한양대학교 자원환경공학과

04763 서울특별시 성동구 왕십리로 222

(2021년 1월 19일 접수; 2021년 2월 10일 수정본 접수; 2021년 2월 10일 채택)

A Management Plan of Wastewater Sludge to Reduce the Exposure of Microplastics to the Ecosystem

Junyeong An¹, Byung Kwon Lee¹, Byong-Hun Jeon², and Min-Kyu Ji^{1,*}

¹Korea Environment Institute

370 Sicheong-daero, Sejong, 30147, Republic of Korea

²Department of Earth Resources and Environmental Engineering, Hanyang University

222 Wangsimni-ro, Seongdong-gu, Seoul, 04763, Republic of Korea

(Received for review January 19, 2021; Revision received February 10, 2021; Accepted February 10, 2021)

요 약

미세플라스틱으로 인한 생태환경에 미치는 부정적인 영향들이 보고되면서 이의 발생현황 및 처리효율에 대한 연구가 하·폐수처리장을 중심으로 수행되어 왔다. 처리공정 내의 미세플라스틱은 대부분 슬러지에 침전되어 제거되므로 적절한 관리가 필요하나 이와 관련한 국내 연구는 제한적이다. 본 연구에서는 공공하수처리장 및 공공폐수처리장을 대상으로 슬러지의 발생 및 처리현황과 관련 법률 조사 및 정책 동향 파악을 통해 미세플라스틱의 환경노출을 최소화할 수 있는 적절한 관리방안을 검토하였다. 슬러지 처리방법의 조사·분석 결과, 공공하수처리장 슬러지는 재활용 > 소각 > 매립 등 순으로 비율이 높게 나타났다. 이 중 재활용은 연료화 > 건축소재 > 퇴비화 순으로 확인되었다. 공공폐수처리장의 경우는 재활용 > 연료화 > 매립 순으로 비율이 높게 나타났으며, 재활용은 소각 후 > 퇴비화 후 > 고형화 후 > 지렁이 사육 순으로 확인되었다. 미세플라스틱의 생태계 노출을 가중시킬 수 있는 슬러지 처리방법은 매립 및 농업분야의 이용 용도로 판단되며, 해당 방법은 국내 매립장의 수용 용량 부족 현상과 화학비료 및 가축분뇨 비료 등의 충분한 공급 현황을 고려할 때 그 필요성이 낮아 보인다. 대신 신재생 에너지 정책과 연계하여 연료화, 에너지화 이용 방안을 확대하고 이외 건축자재 부원료 등의 활용을 적극적으로 모색하는 것이 지속가능한 환경보전 측면에서 보다 합리적인 것으로 예상된다. 향후 동 계획의 실효성과 관련 법 개정을 위한 주요 기초 자료를 확보하기 위해서는 국내 슬러지 수요-공급 현황과 관리 계획의 환경적 영향 및 경제적 효과 등을 심도 있게 연구하는 과정이 필요할 것으로 판단된다.

주제어 : 미세플라스틱, 점오염원, 하·폐수처리장, 슬러지 관리

Abstract : Due to the negative impacts of microplastics (MPs) on the ecosystem, the investigation of its occurrence and its treatment from sewage and wastewater treatment plants (WWTPs) have received a lot of attention in the recent years. Most MPs are precipitated and removed with the sludge during the treatment process. Proper sludge management is immensely necessary to avoid MP exposure in the environment. However, the domestic research on this aspect is limited. This study reviews appropriate sludge management approaches to decrease environmental MP exposure. This can be achieved through investigating sludge generation and treatment, regulation laws and government policy trends with an emphasis on WWTPs. The ratio of sludge in sewage treatment plants has been observed to be highest in recycling followed by incineration and landfills. Recycling is the

* To whom correspondence should be addressed.

E-mail: mkji@kei.re.kr; Tel: +82-44-415-7913; Fax: +82-44-415-7744

doi: 10.7464/ksct.2021.27.1.1 pISSN 1598-9712 eISSN 2288-0690

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.

highest in fuel followed by construction materials and composting. For WWTPs, the highest ratio is in recycling followed by fuel and landfills, and recycling is confirmed in the following order: incineration > after composting > after solidification > earthworm breeding. Treatment approaches that can increase the exposure of MPs to the ecosystem are considered to be used in landfills and agricultural fields. However, this method is not appropriate given the insufficient capacity of domestic landfills and the sufficient supply of existing chemical and animal manure fertilizers. Instead, it would be rational in terms of environmental preservation to expand the use of fuel and energy in connection with the new and renewable energy policy, and to actively seek the use of sub-materials for construction materials. In order to secure the basic data for the effectiveness of future planning and revision of related laws, it is required to perform an in-depth investigation of the sludge supply and demand status along with the environmental and economic effects.

Keywords : Microplastic, Point source pollution, Wastewater treatment plant, Sludge management

1. 서 론

전 세계적으로 1950년대 이후부터 플라스틱 생산량이 급격히 증가하면서, 해당 폐기물의 처리 문제가 크게 대두되고 있다[1]. 그동안 생산된 플라스틱의 양은 총 83억 ton 규모로 처리방법별 비율은 재활용, 소각, 매립이 각각 9%, 12%, 8%로 나타났고 이외 잔여량은 산과 수계 등으로 유출되어 자연에 누적된 것으로 보고되고 있다[2]. 최근 연구에서는 플라스틱 폐기물의 부실관리로 인한 주변 환경(예, 토양, 수계(강, 호수, 해안) 등)으로의 노출이 광범위하게 증가하는 현황을 보고하였으며, 특히 입자의 크기가 작은 미세플라스틱에 대해서는 노출 농도 및 환경적 영향에 대한 연구가 중점적으로 수행되어 왔다[3,4].

미국 해양대기청(National Oceanic and Atmospheric Administration, NOAA)에서는 5 mm 이하 크기의 플라스틱 입자를 미세플라스틱으로 정의하고 있으며, 화장품, 샴푸, 치약, 합성세제 등에 포함된 마이크로비즈를 1차 미세플라스틱 그리고 플라스틱 제품이 물리·화학·생물학적 분해과정을 통해 발생된 것을 2차 미세플라스틱으로 분류한다[5]. 또한, 미세플라스틱의 구성물질은 폴리에틸렌(polyethylene, PE), 폴리프로필렌(polypropylene, PP), 폴리스티렌(polystyrene, PS), 폴리에틸렌 테레프탈레이트(polyethylene terephthalate, PET), 폴리염화비닐(polyvinyl chloride, PVC) 등으로 구분되며 알갱이, 섬유, 조각, 파편의 다양한 형태를 띠고 있다[6]. 한편, 미세플라스틱은 자연환경에 노출되면 장기간 분해되지 않아 먹이사슬을 통해 상위 단계로 이동하며 이때 미세플라스틱의 표면에 흡착된 다양한 오염물질(예, 잔류성 유기오염물질, 내분비계성 교란물질 및 중금속류 등)들은 생태계 교란의 원인으로 주목 받고 있다[3,7,8]. 다수의 연구에 의하면 미세플라스틱은 조류(algae), 무척추동물, 어류 등의 소화기관에 물리적 폐쇄를 유발하고 성장저하, 번식장애 등의 부정적인 영향을 주는 것으로 보고되고 있다[9-11]. 이외 미세플라스틱은 인체의 소화기관 및 폐를 통해서 체내에 섭취·흡입이 가능하고, 나노플라스틱의 경우 혈류를 통해 전신으로 분산될 수 있는 가능성이 보고되었다[12].

미세플라스틱의 발생원은 크게 점오염원(예, 하수처리장, 폐수처리장, 폐기물 매립장 등)과 비점오염원(예, 타이어 분진, 선박도료 등)으로 구분되며, 비점오염원의 저감 연구는 현실적으로 접근이 어려워 대부분이 점오염원을 중심으로 진행되

고 있다[8,9]. 하·폐수처리장으로 유입되는 미세플라스틱은 비교적 효과적으로 제거가 가능한 것으로 알려져 있으며[13], Talvitie et al. [14]은 분리막 생물반응조(99.9%) > 급속모래여과(97%), 용존공기부상법(95%) > 원판형 여과기(40~98.5%) 순으로 처리공정별 저감효율을 보고하였다. 일부 공정별 미세플라스틱의 저감효율은 국가마다 다소 상이한 것으로 나타났으나 이는 미세플라스틱의 검출기법과 측정대상 종류 및 크기 범위에 따른 영향으로 예상하고 있다[15]. 미세플라스틱은 하·폐수 처리공정 내에서 생물학적 및 화학적으로 쉽게 분해되지 않아 공정 내 반류수(20%)를 제외하고는 대부분 슬러지 형태로 침전·축적된다. 최근 슬러지 유래 미세플라스틱의 연구동향은 검출량, 발생유형 및 농업용도로의 이용 등에 따른 환경적 영향을 중심으로 초기 연구가 수행되고 있다[16-18]. 주목할 만한 점은 국외에서는 슬러지 유래 미세플라스틱의 환경영향을 고려하여 슬러지 처리 및 재이용의 관리정책 방향에 대한 논의가 진행되고 있지만[8,13,15,19], 국내는 미세플라스틱의 사용을 제한하는 정책마련과 환경 내 거동평가 및 표준분석법 마련 등에 중점되어 있다는 것이다. 즉, 국내는 점 오염원인 슬러지의 관리 부분이 사각지대에 놓여져 있는 실정이다.

따라서, 본 연구에서는 1) 하·폐수처리장 슬러지 내 미세플라스틱의 검출 현황과 2) 국내 슬러지 발생량, 처리현황 및 3) 처리(관리)에 대한 법률·동향을 조사·분석하고, 이를 통해 미세플라스틱의 환경노출을 최소화하기 위한 슬러지 관리방안을 모색하고자 한다.

2. 연구의 내용 및 방법

국내 하·수처리시설로부터 발생하는 슬러지의 대부분은 공공하수처리시설 및 공공폐수처리시설로부터 발생되며, 해당 시설의 슬러지 발생량과 처리현황에 대한 조사는 환경부 하수도 통계[20], 공공폐수처리시설 운영 현황[21], 전국 폐기물 발생 및 처리현황[22] 및 기타 연구보고서[23,24] 등을 활용하였다. 국내 슬러지의 처리 및 재활용 등에 관한 관련 법률·고시는 국가법령정보센터[25]에서 확인하였다. 이외 국내·외 슬러지 및 미세플라스틱 처리 정책 동향 등은 문헌자료를 인용하였다.

Table 1. Occurrence status of microplastics in sludge

Source of data	Microplastics, particles g ⁻¹ dry weight	Influent (particles L ⁻¹)	Detection methods	Type of micro-plastics (e*)	Size of microplastics (mm)	Removal rate of microplastics by WWTP (%)	References
WWTP in China	240 ± 31	79.9 ± 9.3	a*, b*	PA, PE, PP, PVC, PC	0.02 ~ 5	64.4	[26]
WWTP in China	1.6 ~ 56.4	-	c*, d*	PE, PO, AF, PA	0.037 ~ 5	-	[27]
WWTP in Italian	113 ± 57	2.0 ± 0.3	a*, d*	PE, AB, PA etc.	0.01 ~ 5	84	[28]
WWTP in Spain	133 ± 59	-	a*, d*	PE, PP, AF	0.025 ~ 5	93.7	[17]
WWTP in Finland	171 ± 28.7	57.6 ± 12.4	a*, b*, d*	PET, PE, PA	0.25 ~ 5	99.4	[29]
WWTP in Spain	47.1 ± 3	-	b*	PE, PP, PET	0.31 ~ 2.1	-	[18]
WWTP in China	13.7 ~ 37.4	-	c*, d*	PA, PP, PVC, PS	0.037 ~ 5	-	[8]
WWTP in Ireland	4.2 ~ 15.3	-	c*, d*	PE, PET, PP, PA	0.25 ~ 4	-	[30]
WWTP in Germany	1 ~ 24	-	a*, d*	PE, PP, PA, PVC etc.	0.05 ~ 7.2	93 ~ 98	[31]
WWTP in Canada	> 20.1	31 ± 6.7	a*, d*	PE, PP, PVC	0.2 ~ 5	> 97 ~ 99	[32]
WWTP in Korea	13.2 ~ 14.9	13.8 ~ 29.8	a*, d*	-	0.1 ~ 5	98	[33]

a* Microscope; b* Raman spectroscopy; c* Scanning electron microscopy; d* Fourier transform infrared spectrometer; e* AB (acrylonitrile-butadiene), AF (acrylic fibers), PA (polyamide), PC (polycarbonate), PE (polyethylene), PET (polyethylene terephthalate), PO (polyolefin), PP (polypropylene), PVC (polyvinyl chloride), PS (polystyrene)

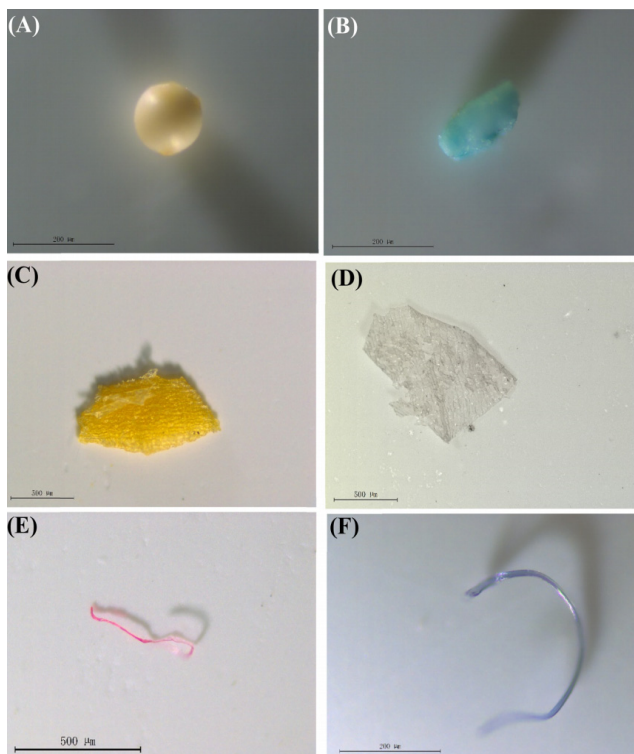


Figure 1. Images of microplastics in sludge collected from STP. (A): Microbead; (B): Pellet; (C): Fragment; (D): Film; (E-F): Microfiber [35].

3. 연구결과 및 논의

3.1. 슬러지 내 미세플라스틱 검출 현황

하·폐수처리장 슬러지 내 미세플라스틱의 검출현황은 다수의 문헌자료를 활용하여 조사하였다(Table 1). 슬러지 건조 중량당 미세플라스틱의 검출량은 g당 최소 1개에서 최대 240 ±

31개로 광범위하게 나타났으며, 처리장 유입수의 미세플라스틱은 L당 2 ~ 80개로 확인되었다. 슬러지에 포함된 미세플라스틱의 검출량이 크게 다른 것은 유입수 내 초기 존재량, 하·폐수 공정의 처리효율, 검출대상 미세플라스틱 종류 및 입자 크기, 검출방법(전처리방법 포함) 등의 차이로 예상되며[15,34]. 이에 대한 내용은 Table 1에서도 확인할 수 있다. 한편, Xu et al. [35]의 연구에서는 하수처리장 슬러지 내에서 검출된 미세플라스틱이 Figure 1과 같이 다양한 형태와 색을 띠는 것으로 조사되었으며, 주로 폴리에틸렌과 폴리프로필렌으로 성분으로 구성되고 입자 크기는 마이크로비즈와 섬유에서 각각 평균 192 ± 135 및 1104 ± 763 μm로 보고되었다.

3.2. 국내 슬러지 발생현황 및 처리현황

하·폐수처리장의 법정 방류수 수질기준이 강화되면서 고도처리시설의 증가와 함께 슬러지 발생량도 증가하고 있다[14]. 국내 하수처리장의 방류수수질기준은 생물학적 산소요구량과 총인 항목을 기준으로 2000년도에 각각 10 mg L⁻¹ 및 2 mg L⁻¹에서 근래 5 mg L⁻¹ 및 0.2 mg L⁻¹로 강화되었고, 화학약품(응집제 등) 사용량의 증가에 따라 단위슬러지의 발생원단위(kg m⁻³)도 증가(08년 0.42 → 17년 0.56)하였다. 이외 지방자치단체의 하수처리구역 확대와 함께 공공처리시설로 유입되는 오수량이 증가하여 총 슬러지의 발생량도 해마다 증가하고 있다[36]. 최근 환경부의 하수도 통계자료를 분석한 결과, 총 4,111개소의 공공하수처리장에서 연간 약 4백만 ton 이상의 하수슬러지가 발생하는 것으로 조사되었으며[20], 2015 ~ 2017년 동안 하수슬러지 발생량 및 처리량은 아래의 Table 2와 같이 집계되었다. 하수슬러지의 처리는 전반적으로 연료화, 건설자재 원료 이용, 퇴비화의 재활용 비중이 높았으며, 이외 소각처리, 매립 방법이 높게 나타났다. 소각방법은 소각처리 후 건설자재 원료로 이용되거나 매립되며, 건조방법은 공정 적용 후 재활용, 소각,

Table 2. Generation and treatment status of sewage sludge in South Korea

Year	Total sewage sludge generation (m ³ year ⁻¹)	Ratio by type of treatment method							
		Total (%)	Incineration	Drying	Landfill	Etc.	Recycle		
							Fuel	Composting	Construction material
2015	3,842,282	100	18.7	8.6	13.7	2.0	20.6	11.1	25.3
2016	3,580,832.5	100	14.7	7.0	8.5	1.5	20.4	30.7	17.2
2017	4,194,215	99.8	19	6.1	15.3	1.8	23.8	10.8	22.1

Table 3. Generation and treatment status of wastewater sludge in South Korea

Year	Total wastewater sludge generation (m ³ year ⁻¹)	Ratio by type of treatment method								
		Total (%)	Landfill			Fuel	Recycle			
			After drying	After solidification	After incineration	After drying	After solidification	After incineration	Composting	Earthworm breeding
2018	401,897.5	100	12.8	3.0	6.6	35.9	10.1	16.0	11.2	4.4

매립에 의해 처리되는 것으로 알려져 있다. 이외 재활용은 Table 2에 제시한 용도 이외에도 토양개량제(녹생토, 부숙토), 매립시설 복토재 등으로 이용된다[36]. 국내 공공폐수처리장의 경우 207개소로 폐수처리 과정 중 연간 약 4십만 ton의 슬러지가 발생하는 것으로 보고되었다[21]. 슬러지 처리방법은 재이용, 연료화, 매립순으로 비중이 높았으며, 개별처리 유형으로는 건조 후 연료화, 소각 후 재이용, 건조 후 매립, 퇴비화 등 순으로 나타났다(Table 3). 소각 후 재이용의 경우 하수슬러지와 유사하게 건설자재(시멘트 원료 등) 또는 성토재, 복토재 등으로 활용되는 것으로 확인되었다.

슬러지는 『폐기물 관리법 시행규칙』 별표 5에 의거하여 고형물 중 유기성물질의 함량이 40% 이상인 것을 유기성슬러지로 그 미만인 것을 무기성슬러지로 구분한다. 하수슬러지의 경우 유기성슬러지의 비율이 높으며, 폐수슬러지는 무기성의 비율이 다소 높은 것으로 보고되었다. 슬러지의 재활용에 있어서 하·폐수 유래 유기성슬러지는 퇴비화와 연료화의 비중이 높았으며 폐수 유래 무기성 슬러지는 건설자재 등 이용의 비중이 높았다[23]. 한편, 공공하수 및 공공폐수처리장의 “슬러지 발생 및 처리”에 대한 자료는 처리방법의 분류체계가 상이하여 데이터 활용에 제한이 있으므로, 향후 이를 개선할 수 있는 대책 마련이 필요하다고 사료된다.

3.3. 슬러지 처리방법에 따른 환경 영향

슬러지에 포함된 미세플라스틱의 환경노출(토양 및 수계 등) 및 환경영향을 가중 시키는 처리방법은 매립(건조 후), 퇴비화, 비료, 토양개량제 등으로 분류할 수 있다. 슬러지의 매립은 미세플라스틱이 매립장 침출수에 포함되어 운영시 뿐만 아니라 매립장 운영 종료 후에도 반영구적으로 유출될 수 있으며 최근 관련 문헌들이 중국 및 유럽에서 다수 보고되고 있다[9,37]. 특히, 매립장 침출수에는 생태계에 크게 영향을 미칠 수 있는 다양한 오염원이 존재하여[38], 일반적인 하수 유래 미세플라스틱보다 위해성이 더 높을 것으로 예상된다. 또한, 하수슬러지는 질소, 인, 칼륨 등 유기물 및 무기물이 풍부하여 토양개량제 및

비료 등으로 농업분야에 광범위하게 적용되어 왔으나 근래에는 이에 대한 많은 환경문제가 보고되고 있다[18,27,30,39]. 그 예로서 슬러지 내 유해물질(예, 내분비계 교란물질, 항생물질, 중금속 등)과 미세플라스틱은 토양 내 장기간 잔류하면서 식물과 토양미생물의 성장, 번식, 생존 등에 위협을 가하고 있는 것으로 알려졌다[15,34,40]. Hernandez-Arenas et al. [18]는 미세플라스틱이 포함된 슬러지를 토양에 시비하여 토마토 식물의 과실 발달 및 성장에 미치는 영향을 연구하였으며, 그 결과 미세플라스틱의 노출이 증가될수록 과수의 생산량 감소와 함께 식물의 발아율 및 뿌리 성장에 영향을 미치는 것을 확인할 수 있었다. 아울러, 슬러지를 농경지에 비료용도로 살포할 경우 미세플라스틱이 표토에 장기간 잔류하여 강우 시 비점오염원의 형태로 하천에 유출되고 수생태계에도 영향을 미치는 것으로 보고하고 있다[41].

3.4. 법규 및 정책 동향

3.4.1 국내 슬러지 처리 법규

슬러지의 처리와 관련한 법률, 고시 등은 아래의 Table 4에 나타내었다. 『폐기물 관리법』에 의하면 슬러지는 크게 생활폐기물 슬러지, 사업장 일반폐기물 슬러지, 지정폐기물 슬러지로 구분되며 대부분이 수분규제가 적용되고 있다. 특히 매립시에는 탈수 및 건조 등의 전처리과정을 통해 75~85%의 수분 조건을 충족해야한다. 슬러지 재활용은 이용방안 별로 개별 규제가 적용되고 있으며 유기성 오니와 무기성 오니별로 그 용도가 나뉜다. 유기성 오니는 부숙토, 토지개량제, 비탈면 녹화토, 지렁이 분변토, 열 회수, 매립복토재 등으로 그리고 무기성 오니는 성토재, 보조기층재, 매립복토재 등으로 적용된다[23]. 『폐기물 관리법 시행규칙』에서는 1일 처리용량이 1만 m³ 이상인 공공폐수처리시설 및 공공하수처리시설과 1일 폐수배출량이 2천 m³ 이상인 폐수배출시설의 사업장 일반폐기물 슬러지(유기성)는 수분함량을 충족시킬 지라도 바로 매립하여서는 아니 된다고 규정되고 있어, 슬러지 매립 전 재활용 또는 감량이 우선시되어야 함을 알 수 있다[25]. 이외, 국내 슬러지 처리

Table 4. Current regulations related to sludge treatment in South Korea [23,25]

Classification of sludge	Treatment method	Treatment condition	Related regulations
Municipal solid waste-sludge	Landfill	Moisture : < 85% Pre-treatment (dewatering, drying)	Wastes control act-enforcement decree, attached table #5
Industrial general waste-organic sludge (VS/TS > 40%, DM)	Incineration	Incineration facility regulations	Wastes control act-enforcement decree, attached table #5
	Solidification	Solidification facility regulations	Wastes control act-enforcement decree, attached table #5
	Landfill	Moisture : < 85% Pre-treatment (dewatering, drying) ※ Exception: Landfill using landfill gas recovery: < 75%	Wastes control act-enforcement decree, attached table #5
	Solid waste compost / earthworm breeding / soil covering / soil conditioner	MoE Notification No. 2020-71	Wastes control act-enforcement decree, attached table #5
	Raw material of recycle product (aggregate manufacturing)	Solidification	Industrial standardization act
	Raw material of recycle product (fertilizer)	MAFRA, Fertilizer control act	Wastes control act-enforcement decree, attached table #5
	Raw material of recycle product (landfill cover material)	Solidification	Wastes control act-enforcement decree, attached table #5
Industrial general waste-inorganic sludge (VS/TS < 40%, DM)	Incineration	Incineration facility regulations	Wastes control act-enforcement decree, attached table #5
	Landfill	Moisture : < 85% Pre-treatment (dewatering, drying)	Wastes control act-enforcement decree, attached table #5
	Embanking material, sub-base layer material landfill cover material etc.	Moisture : < 70% Soils mix : < 50%	Wastes control act-enforcement decree, attached table #5
Specified waste-sludge	Incineration	-	Wastes control act-enforcement decree, attached table #5
	Solidification	-	Wastes control act-enforcement decree, attached table #5
	Stabilization	Moisture : < 85%	Wastes control act-enforcement decree, attached table #5
	Landfill	Moisture : < 85%	Wastes control act-enforcement decree, attached table #5

범률은 유해 성분에 대한 규격을 설정하여 슬러지 재이용 시에 적용하도록 되어 있으나, 미세플라스틱 등 신규 유해물질에 대한 고려는 배제되어 있어 향후 이에 대한 대응방안 마련이 필요하다.

3.4.2. 국·내외 슬러지 처리 및 미세플라스틱 정책동향

국내 슬러지 처리는 재활용의 비율이 약 57%에 도달하며, 이중 퇴비화와 연료화는 2012년 대비 2017년 기준 각각 6.6 → 10.8% 및 10.1 → 23.8%로 증가하였다. 이는 환경부의 슬러지 처리 및 자원화 제도 방향이 연료화 및 에너지화에 기인하기 때문으로 판단되며, 특히 신재생에너지 발전보조금과 매립 등 2차 처리비용의 절감 원인으로 일부 기여한 것으로 예상된다. 더불어 하수처리장의 슬러지 감량을 극대화하고 바이오에너지 생산성을 증대시키기 위해 슬러지 감량화 설비(소화조 증)의 개량·신설 계획이 하수도 정비계획에 반영되어 있으며 현재 사업단계별로 추진되고 있다[36].

국외의 경우, 미국은 2015년을 기준으로 농업용(퇴비, 비료,

토양개량제) 및 복원용 36%, 토양 표면처리 10%로 재활용 되었으며, 이외 매립 38%, 소각 16%로 처리되었다. 슬러지 처리의 주된 정책방향은 발생량 감량, 재활용, 소각 및 최종 잔여분의 매립 순으로 국내의 정책방향과 유사하다[23,36]. 이외 미국은 약 16,000개소의 하·폐수처리설 중 544개소에서만 혐기성 소화 공정을 적용하여 슬러지 감량 및 에너지화(바이오가스)에 기여하고 있어 이의 확대방안이 거론되고 있다[42]. 유럽의 슬러지 처리방법은 농업이용, 퇴비화, 소각, 매립, 기타(건설자재 등)로 구분된다. 과거에는 주로 농업이용이 많았으나 근래에는 슬러지 내 중금속함량, 병원균, 잔류성유기오염물질 및 미세플라스틱 등의 문제로 소각처리의 비중이 가장 높다[30]. 최근 유럽에서는 슬러지 처리와 관련하여 매립, 소각의 대안으로서 경제적이고 합리적인 열분해를 통한 자원화가 부각되고 있으며 일부 소각시설로부터 열·전기에너지 생산계획도 고려되고 있다[36]. 일본은 슬러지 매립 비율이 감소하고 있으며, 2015년 기준 재활용 비중이 68%로 시멘트 제조 원료 15%, 건축자재 20%, 농지이용 10%, 연료화 4% 등으로 이용되고 있다. 일본도

최근에는 농축, 소화, 탈수, 소각 등의 공정을 통해 슬러지의 감량화 추진과 함께 바이오 가스화 등 에너지화 전환에 노력하고 있다[23,24,36]. 기타 중국은 63% 매립, 14% 농업이용, 2% 소각 비율로 슬러지를 처리하며 나머지 21%는 처리 경로를 확인할 수 없어 슬러지 관리문제가 심각함을 알 수 있다[43].

미세플라스틱 관련 정책동향으로 국외에서는 미세플라스틱을 제한물질로 지정하거나 독성물질로 등재하는 등 대응방안을 마련하고 있으며, 생활 속 미세플라스틱 대체물질을 개발하고 있다. 미국에서는 청정 해역 법안을 통과시켜 물로 씻겨 나가는 모든 제품에 마이크로비즈의 사용을 전면 금지하였고 캐나다, 프랑스, 이탈리아, 뉴질랜드 등에서도 마이크로비즈의 법적 규제를 선언하였다. 또한, 유럽연합에서는 2025년부터 재활용 가능 폐기물과 플라스틱 폐기물의 매립을 금지할 예정으로 매립장 침출수 내 미세플라스틱의 추가 유출을 차단할 계획이다. 국내에서는 『화장품 안전기준 등에 관한 규정』, 『의약품 품목허가 신고·심사규정』 등에 의한 미세플라스틱의 원료 사용 제한과 이들 물질이 포함된 화장품 등 제품의 생산, 수입, 판매에 그치고 있다[44].

3.5. 미세플라스틱의 환경노출을 고려한 슬러지 관리방안

미세플라스틱의 표면에 흡착되어 있는 다양한 유해물질들로 인한 생태계 교란 영향이 보고되면서 미국과 유럽연합을 중심으로 환경보호 규정 및 관리 전략들이 수립되고 있다. 특히, 미세플라스틱의 주요 발생 근원 중 현실적으로 통제가 가능한 슬러지 처리·관리 부분은 지속가능하고 환경중심적으로 변화되고 있다[45]. 따라서, 국내에서도 토양 및 수계 내 환경문제를 발생시킬 수 있는 매립 및 농업이용(퇴비, 토양개량제, 비료 등)의 방법을 최대한 제한하고, 시멘트 제조 부원료, 경량 골재, 화력/열병합 발전소 연료원 등으로 재활용 확대방안을 적극적으로 추진할 필요가 있다. 슬러지의 처리 단가 분석결과에서도 고화후 재이용, 건조후 연료화, 재활용은 톤당 처리비용이 약 65,000~87,000원으로 건조후 매립, 매립, 소각후 매립(약 94,000~113,000원) 보다 경제성이 높아 재활용 방안의 정책반영 시 환경과 경제적 부분에 있어 시너지 효과가 있을 것으로 예상된다[24]. 한편, 국내 토양은 경제협력개발기구(OECD) 국가 중 질소(N) 수지가 1위, 인(P) 수지가 2위로서 영양염류가 과다한 실정이며, 화학비료와 가축분뇨에 기반한 비료의 공급도 수요를 충분히 충족시키고 있어 슬러지를 농업용으로 재이용하는 것은 필요성이 낮아 보인다[46]. 또한, 수도권 매립장을 포함한 국내 매립시설의 일부 부지는 매립가능한 여유 용량이 크지 않거나 포화상태에 이르는 상황이므로 재활용이 가능한 슬러지 매립은 불필요하다[47]. 향후에는 연료화 및 자재원료 등 재이용 방안 확대를 고려한 수요-공급 분석과 슬러지의 농업용도 활용에 따른 환경 영향을 보다 정량화하여 슬러지 처리 정책방향의 적정성과 타당성을 확보하는 것이 필요하다고 판단된다. 아울러 동 정책방향에서도 기술성, 환경성 및 경제성 등의 부분에 있어 쟁점 사항이 존재할 수 있으므로, 추후 핵심내용의 파악과 함께 미비점 개선에 대한 심도 있는 연구가 이루어질 필요성이 있다.

4. 결론

본 연구는 하·폐수 슬러지 유래 미세플라스틱의 환경노출을 최소화하고 이의 적정 관리방안을 마련하기 위한 기초 연구로서 수행되었다. 슬러지 내 미세플라스틱의 검출현황을 조사한 결과, g 당 최대 240 ± 31개로 그 농도가 매우 높았으며, 주요 구성성분은 폴리에틸렌과 폴리프로필렌으로 나타났다. 국내 공공하수처리장과 공공폐수처리장의 슬러지 발생량은 각각 연간 약 4백만 ton 및 4십만 ton으로 매립, 소각 및 재활용 등 다양한 방법으로 처리되고 있으며 이중 재활용의 비율이 가장 높았다. 슬러지의 처리 및 재활용 방법 중 매립과 농업용도(예, 비료, 토양개량제 등)로의 이용은 오염물질이 흡착된 미세플라스틱의 입자가 최종적으로 토양 및 수계로 배출·누적되어 환경생태계에 교란을 주는 것으로 확인되었다. 상기 언급한 미세플라스틱의 환경영향을 최소화하기 위해서는 폐기물 처리 및 재이용 관련 법의 개정이 요구되며, 이때 본문에서 언급한 에너지화 등의 슬러지 이용 확대방안 있어 환경성, 경제성 및 수요-공급의 분석이 종합적으로 검토·반영되는 것이 필요하다.

감사

본 논문은 한국환경정책·평가연구원의 2019년도 기초과제인 「매립장 유래 미세플라스틱 관리방안: 침출수 발생원을 중심으로(BA2019-12)」의 지원으로 수행되었다.

References

1. Plastics Europe, "Plastics - the facts 2017. An Analysis of European Plastics Production, Demand and Waste Data," <https://www.plasticseurope.org/en/resources/market-data> (2018).
2. Geyer, R., Jambeck, J. R., and Law, K. L., "Production, Use, and Fate of All Plastics Ever Made," *Sci. Adv.*, **3**(7), e1700782 (2017).
3. Eerkes-Medrano, D., Thompson, R. C., and Aldridge, D. C., "Microplastics in Freshwater Systems: A Review of the Emerging Threats, Identification of Knowledge Gaps and Prioritisation of Research Needs," *Water Res.*, **75**, 63-82 (2015).
4. Li, J., Liu, H., and Chen, J. P., "Microplastics in Freshwater Systems: A Review on Occurrence, Environmental Effects, and Methods for Microplastics Detection," *Water Res.*, **137**, 362-374 (2018).
5. Allen, S., Allen, D., Phoenix, V. R., Roux, G. L., Jiménez, P. D., Simonneau, A., Binet, S., and Galop, D., "Atmospheric Transport and Deposition of Microplastics in a Remote Mountain Catchment," *Nat. Geosci.*, **12**, 339-344 (2019).
6. Li, C., Busquets, R., and Campos, L. C., "Assessment of Microplastics in Freshwater Systems: A Review," *Sci. Total Environ.*, **707**, 135578 (2020).

7. Lourenço, P. M., Serra-Gonçalves, C., Ferreira, J. L., Catry, T., and Granadeiro, J. P., "Plastic and Other Microfibers in Sediments, Macroinvertebrates and Shorebirds from Three Intertidal Wetlands of Southern Europe and West Africa," *Environ. Pollut.*, **231**(1), 123-133 (2017).
8. Li, X., Mei, Q., Chen, L., Zhang, H., Dong, B., Dai, X., He, C., and Zhou, J., "Enhancement in Adsorption Potential of Microplastics in Sewage Sludge for Metal Pollutants After the Wastewater Treatment Process," *Water Res.*, **157**, 228-237 (2019).
9. He, P., Chen, L., Shao, L., Zhang, H., and Lu, F., "Municipal Solid Waste (MSW) Landfill: A Source of Microplastics? - Evidence of Microplastics in Landfill Leachate," *Water Res.*, **159**, 38-45 (2019).
10. de Sá, L. C., Oliveira, M., Ribeiro, F., Rocha, T. L., and Futter, M. N., "Studies of the Effects of Microplastics on Aquatic Organisms: What do We Know and Where Should We Focus Our Efforts in the Future," *Sci. Total Environ.*, **645**, 1029-1039 (2018).
11. Jeong, C. B., Kang, H. M., Lee, M. C., Kim, D. H., Han, J., Hwang, D. S., Souissi, S., Lee, S. J., Shin, K. H., Park, H. G., and Lee, J. S., "Adverse Effects of Microplastics and Oxidative Stress-induced MAPK/Nrf2 Pathway-Mediated Defense Mechanisms in the Marine Copepod," *Sci. Rep.*, **7**, 41323 (2017).
12. Lehner, R., Weder, C., Petri-Fink, A., and Rothen-Rutishauser, B., "Emergence of Nanoplastic in the Environment and Possible Impact on Human Health," *Environ. Sci. Technol.*, **53**(4), 1748-1765 (2019).
13. Sun, J., Dai, X., Wang, Q., van Loosdrecht, M. C. M., and Ni, B.-J., "Microplastics in Wastewater Treatment Plants: Detection, Occurrence and Removal," *Water Res.*, **152**, 21-37 (2019).
14. Talvitie, J., Mikola, A., Koistinen, A., and Setälä, O., "Solutions to Microplastic Pollution- Removal of Microplastics from Wastewater Effluent with Advanced Wastewater Treatment Technologies," *Water Res.*, **123**, 401-407 (2017).
15. Gatidou, G., Arvaniti, O. S., and Stasinakis, A. S., "Review on the Occurrence and Fate of Microplastics in Sewage Treatment Plants," *J. Hazard. Mater.*, **367**, 504-512 (2019).
16. Rolsky, C., Kelkar, V., Driver, E., and Halden, R. U., "Municipal Sewage Sludge as a Source of Microplastics in the Environment," *Curr. Opin. Environ. Sci. Health*, **14**, 16-22 (2020).
17. Edo, C., Gonzalez-Pleiter, M., Leganes, F., Fernandez-Pinas, F., and Rosal, R., "Fate of Microplastics in Wastewater Treatment Plants and Their Environmental Dispersion with Effluent and Sludge," *Environ. Pollut.*, **259**, 113837 (2020).
18. Hernandez-Arenas, R., Beltran-Sanahuja, A., Navarro-Quirant, P., and Sanz-Lazaro, C., "The Effect of Sewage Sludge Containing Microplastics on Growth and Fruit Development of Tomato Plants," *Environ. Pollut.*, **268**, 115779 (2021).
19. Zhang, J., Zuo, W., Tian, Y., Chen, L., Yin, L., and Zhang, J., "Sulfur Transformation During Microwave and Conventional Pyrolysis of Sewage Sludge," *Environ. Sci. Technol.*, **51**(1), 709-717 (2016).
20. "2018 Statistics of Sewerage," Ministry of Environment, http://me.go.kr/home/web/policy_data/read.do?pagerOffset=20&maxPageItems=10&maxIndexPages=10&searchKey=&searchValue=&menuId=10264&orgCd=&condition.code=A5&condition.deleteYn=N&seq=7440 (2019).
21. "2017 Status of Public Wastewater Treatment Facilities," Ministry of Environment, https://www.me.go.kr/home/web/policy_data/read.do?pagerOffset=0&maxPageItems=10&maxIndexPages=10&searchKey=&searchValue=&menuId=10259&orgCd=&condition.deleteYn=N&seq=7433 (2018).
22. "2018 Status of Waste Generation and Treat," Ministry of Environment, https://www.recyclinginfo.or.kr/rts/stat/envStatDetail.do?menuNo=M13020201&pageIndex=1&bbsId=BBSMSTR_000000000002&s_nttSj=KEC005&nttId=1010&searchBgnDe=&searchEndDe= (2019).
23. Kim, K. Y., Moon, H. S., Bae, J. S., Son, J. I., Kang, J. K., Jeon, T. W., and Shi, S. K., "Survey on Landfill Minimization through Improvement of Waste Management Streams," National Institute of Environmental Research, NIER-RP2016-399 (2016).
24. Lee, J. I., Cho, Y. M., Jung, H. Y., and Hong, L. S., "Method for Efficient Treatment of Sewage Sludge," Gyeonggi Research Institute, ISBN 979-11-8884-876-8 93530 (2018).
25. "National Law Information Center," <https://www.law.go.kr>, Ministry of Government Legislation.
26. Liu, X., Yuan, W., Di, M., Li, Z., and Wang, J., "Transfer and Fate of Microplastics During the Conventional Activated Sludge Process in One Wastewater Treatment Plant of China," *Chem. Eng. J.*, **362**, 176-182 (2019).
27. Li, X., Chen, L., Mei, Q., Dong, B., Dai, X., Ding, G., and Zeng, E. Y., "Microplastics in Sewage Sludge from the Wastewater Treatment Plants in China," *Water Res.*, **142**, 75-85 (2018).
28. Magni, S., Binelli, A., Pittura, L., Avio, C. G., Della Torre, C., Parenti, C. C., Gorbi, S., and Regoli, F., "The Fate of Microplastics in an Italian Wastewater Treatment Plant," *Sci. Total Environ.*, **652**, 602-610 (2019).
29. Lares, M., Ncibi, M. C., Sillanpa, M., and Sillanpa, M., "Occurrence, Identification and Removal of Microplastic Particles and Fibers in Conventional Activated Sludge Process and Advanced MBR Technology," *Water Res.*, **133**, 236-246 (2018).
30. Mahon, A. M., O'Connell, B., Healy, M. G., O'Connor, I., Officer, R., Nash, R., and Morrison, L., "Microplastics in Sewage Sludge: Effects of Treatment," *Environ. Sci. Technol.*, **51**(2), 810-818 (2017).
31. Mintenig, S. M., Int-Veen, I., Loder, M. G. J., Primpke, S., and Gerdt, G., "Identification of Microplastic in Effluents

- of Wastewater Treatment Plants Using Focal Plane Array-Based Micro-Fourier-Transform Infrared Imaging,” *Water Res.*, **108**, 365-372 (2017).
32. Gies, E. A., LeNoble, J. L., Noel, M., Etemadifar, A., Bishay, F., Hall, E. R., Ross, P. S., and Peter, S., “Retention of Microplastics in a Major Secondary Wastewater Treatment Plant in Vancouver, Canada,” *Mar. Pollut. Bull.*, **133**, 533-561 (2018).
 33. Lee, H., and Kim, Y., “Treatment Characteristics of Microplastics at Biological Sewage Treatment Facilities in Korea,” *Mar. Pollut. Bull.*, **137**, 1-8 (2018).
 34. Zhang, S., Wang, J., Liu, X., Qu, F., Wang, X., Wang, X., Li, Y., and Sun, Y., “Microplastics in the Environment: A Review of Analytical Methods, Distribution, and Biological Effects,” *Trends Analyt. Chem.*, **111**, 62-72 (2019).
 35. Xu, Q., Gao, Y., Xu, L., Shi, W., Wang, F., LeBlanc, G. A., Cui, S., An, L., and Lei, K., “Investigation of the Microplastics Profile in Sludge from China’s Largest Water Reclamation Plant Using a Feasible Isolation Device,” *J. Hazard. Mater.*, **388**, 122067 (2020).
 36. “Performance Evaluation of Sewage Sludge reduction Project and Research on Improvement Plans,” Ministry of Environment, ISBN 11-1480000-001607-01 (2019).
 37. Van Praagh, M., Hartman, C., and Brandmyr E., “Microplastics in Landfill Leachates in the Nordic Countries,” Nordic Council of Ministers, ISBN 978-92-893-5914-6 (2018).
 38. Qi, C., Huang, J., Wang, B., Deng, S., Wang, Y., and Yu, G., “Contaminants of Emerging Concern in Landfill Leachate in China: A Review,” *Emerg. Contam.*, **4**(1), 1-10 (2018).
 39. Singh, R. P., and Agrawal, M., “Potential Benefits and Risks of Land Application of Sewage Sludge,” *Waste Manag.*, **28**(2), 347-358 (2008).
 40. De Souza Machado, A. A., Kloas, W., Zarfl, C., Hempel, S., and Rillig, M. C., “Microplastics as an Emerging Threat to Terrestrial Ecosystems,” *Glob. Chang. Biol.*, **24**(4), 1405-1416 (2018).
 41. Zubris, K. A. V., and Richards, B. K., “Synthetic Fibers as an Indicator of Land Application of Sludge,” *Environ. Pollut.*, **138**(2), 201-211 (2005).
 42. McCarty, P. L., Bae, J., and Kim, J., “Domestic Wastewater Treatment as a Net Energy Producer - Can This Be Achieved,” *Environ. Sci. Technol.*, **45**, 7100-7106 (2011).
 43. Wang, X., Zhao, B., Zhang, A., and Sha, Z., “The Present Situation and Research Progress of Treatment of Sludge from City Sewage Treatment Plant,” *Tianjin Daxue Xuebao*, **30** (2015).
 44. Ji, M.-K., and Ahn, J., “Management Plans of Microplastic from Landfill: Focusing on Leachate Sources,” Korea Environment Institute, ISBN 979-11-5980-322-2 95530 (2019).
 45. Raheem, A., Sikarwar, V. S., He, J., Dastyar, W., Dionysiou, D. D., Wang, W., and Zhao, M., “Opportunities and Challenges in Sustainable Treatment and Resource Reuse of Sewage Sludge: A Review,” *Chem. Eng. J.*, **337**, 616-641 (2018).
 46. Lee, J.-H., and Yoon, Y.-M., “Comparison of Nutrient Balance and Nutrient Loading Index for Cultivated Land Nutrient Management,” *Korean J. Environ. Biol.*, **37**(4), 554-567 (2019).
 47. Yi, S., Jo, J. H., Lim, H. S., Lee, W. J., and Park, H. J., “Analysis of Landfill Resource Recovery Potentials and Strategies for Managing Future Landfills,” Korea Environment Institute, ISBN 979-11-5980-141-9 93530 (2019).