



# 하수 유래 미량오염물질 현황과 관리 방안 고찰

## A review on status of organic micropollutants from sewage effluent and their management strategies

최상기<sup>1</sup>·이웅배<sup>1</sup>·김영모<sup>2</sup>·홍석원<sup>3</sup>·손희종<sup>4</sup>·이윤호<sup>1,\*</sup>

Sangki Choi<sup>1</sup>·Woongbae Lee<sup>1</sup>·Young-Mo Kim<sup>2</sup>·Seok-Won Hong<sup>3</sup>·Heejong Son<sup>4</sup>·Yunho Lee<sup>1,\*</sup>

<sup>1</sup>광주과학기술원 지구환경공학부, <sup>2</sup>한양대학교 건설환경공학과, <sup>3</sup>한국과학기술연구원 물자원순환연구센터

<sup>4</sup>부산광역시 상수도사업본부 수질연구소

<sup>1</sup>School of Earth Sciences and Environmental Engineering, Gwangju Institute of Science and Technology (GIST)

<sup>2</sup>Department of Civil and Environmental Engineering, Hanyang University

<sup>3</sup>Water Cycle Research Center, Korea Institute of Science and Technology (KIST)

<sup>4</sup>Water Quality Institute, Busan Water Authority

pp. 187-196

pp. 197-204

pp. 205-225

pp. 227-235

pp. 237-246

### ABSTRACT

Due to the large-scale production and use of synthetic chemicals in industrialized countries, various chemicals are found in the aquatic environment, which are often termed as micropollutants. Effluents of municipal wastewater treatment plants (WWTPs) have been identified as one of the major sources of these micropollutants. In this article, the current status of occurrence and removal of micropollutants in WWTPs and their management policies and options in domestic and foreign countries were critically reviewed. A large number of pharmaceuticals, personal care products, and industrial chemicals are found in WWTPs' influent, and are only partially removed by current biological wastewater treatment

Received 20 May 2021, revised 21 May 2021, accepted 14 June 2021.

\*Corresponding author: Yunho Lee (E-mail: [yhlee42@gist.ac.kr](mailto:yhlee42@gist.ac.kr))

- 최상기 (박사과정) / Sangki Choi (Ph.D. Student)  
광주광역시 북구 첨단과기로 123, 61005  
123, Cheomdangwagi-ro, Buk-gu, Gwangju 61005, Republic of Korea
- 이웅배 (박사과정) / Woongbae Lee (Ph.D. student)  
광주광역시 북구 첨단과기로 123, 61005  
123, Cheomdangwagi-ro, Buk-gu, Gwangju 61005, Republic of Korea
- 김영모 (교수) / Young-Mo Kim (Professor)  
서울특별시 성동구 왕십리로 222, 04763  
222, Wangsimni-ro, Seongdong-gu, Seoul 04763, Republic of Korea
- 홍석원 (책임연구원) / Seok-Won Hong (Senior Researcher)  
서울특별시 성북구 화랑로 14길 5, 02792  
5, Hwarang-ro 14-gil, Seongbuk-gu, Seoul 02792, Republic of Korea
- 손희종 (연구원) / Heejong Son (Researcher)  
경상남도 김해시 상동면 동북로 691, 50804  
691, Dongbuk-ro, Sangdong-myeon, Gimhae-si, Gyeongsangnam-do 50804, Republic of Korea
- 이윤호 (교수) / Yunho Lee (Professor)  
광주광역시 북구 첨단과기로 123, 61005  
123, Cheomdangwagi-ro, Buk-gu, Gwangju 61005, Republic of Korea

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.

processes. As a result, some micropollutants are present in WWTPs' effluents, which can negatively affect receiving water quality or drinking water source. To better understand and assess the potential risk of micropollutants, a systematic monitoring framework including advanced analytical tools such as high resolution mass spectrometry and bioanalytical methods is needed. Some Western European countries are taking proactive approach to controlling the micropollutants by upgrading WWTP with enhanced effluent treatment processes. While this enhanced WWTP effluent treatment appears to be a viable option for controlling micropollutant, its implementation requires careful consideration of the technical, economical, political, and cultural issues of all stakeholders.

**Key words:** Wastewater treatment, Micropollutants, Monitoring, Sewage discharge regulation

**주제어:** 하수처리, 미량오염물질, 모니터링, 하수 방류기준

## 1. 서 론

산업의 고도화로 화학물질의 개발 및 유통이 증가함에 따라 화학물질 배출량은 매년 증가하고 있다 (KOSTAT, 2018). 산업에서 제조 또는 사용과정 중 배출되는 화학물질은 다양한 경로로 환경으로 유출되며, 수환경에서 ng/L 또는 µg/L의 농도로 잔류하여 상수원 수질과 수생태계에 영향을 미칠 수 있으며, 미량오염물질로 명명되고 있다 (Luo et al., 2014). 이러한 미량오염물질에는 다양한 화학물질이 포함되는데 (i) 질병의 예방, 진단, 치료 목적으로 사용되는 의약품( pharmaceuticals), (ii) UV 차단제, 사향물질 등과 같은 생활화학 제품(personal care products, PCPs), (iii) 제초제와 살충제 같은 농약류(pesticides), (iv) 난연제(flame retardants), (v) 표면처리제, 계면활성제로 사용되는 과불화화합물(perfluorinated compounds) 등을 들 수 있다. 최근에는 잔류 항생제에 의한 항생제 내성 유전자

(antibiotic resistance genes, ARGs)나 미세플라스틱(microplastic) 등도 새로운 수환경 오염물질로 보고되고 있다. 유럽에서 수행된 조사에 의하면 미량오염물질 중 약 70%가 의약품 및 생활화학 제품이고, 약 30%는 과불화화합물과 농약류 물질을 포함한 산업용 화학물질이다 (Schueth, 2014; Virkutyte et al., 2010). 그간 미량오염물질의 잠재적 부정적 영향을 고려하여, 수계 미량오염물질에 대한 체계적 관리 필요성이 제기되어 왔다 (Luo et al., 2014; Son and Jang, 2011).

Table 1에는 수계 미량오염물질의 대표적 유입경로를 나타내었다. 다양한 미량오염물질은 공통적으로 생활하수를 통해 배출되었으며, 일부는 산업폐수, 병원폐수 및 축산폐수로부터 유래되어 자체 처리 후 배출되거나 혹은 하수에 포함되어 배출되었다 (Kim et al., 2020). 하수 방류수는 공공수역의 미량오염물질 주요 배출원으로 알려져 있으며 상수원의 수질에도 영향을 미친다 (Lee et al., 2009). 그러나 현재까지 미

**Table 1.** Sources of micropollutants in the aquatic environment (Luo et al., 2014)

Category	Important subclasses	Major sources
Pharmaceuticals	NSAIDs, lipid regulator, anticonvulsants, antibiotics, β-blockers, and stimulants	1. Domestic wastewater 2. Hospital effluent 3. Run-off from CAFOs and aquaculture
PCPs	Fragrances, disinfectants, UV filters	1. Domestic wastewater 2. Industrial wastewater
Steroid hormones	Estrogens	1. Domestic wastewater 2. Run-off from CAFOs and aquaculture
Surfactants	Non-ionic surfactants	1. Domestic wastewater 2. Industrial wastewater
Industrial chemicals	Plasticizers, fire retardants, and perfluorinated compounds	1. Domestic wastewater 2. Landfill leachate
Pesticides	Insecticides, herbicides, and fungicides	1. Domestic wastewater 2. Agricultural runoff



량오염물질 배출과 관련한 직접적인 규제는 없으며, 일부 해외국가에서 가이드라인 정도가 제시되고 있다 (Barbosa et al., 2016). 유럽연합(EU)은 2015년 물관리 지침(Directive 2015/495/EU)에서 17종의 오염물질 감시목록을 구성하여 각각의 대상 물질에 대한 전처리 및 분석방법, 지표수와 하수 방류수의 모니터링 등 수질 모니터링 관련한 제도가 운영되고 있다 (Barbosa et al., 2016). 또한, 스위스에서는 2016년부터 하수처리시설 방류수 내 미량오염물질의 부하를 감소하여 수질 개선을 목표로 하는 새로운 물 보호법이 시행되었으며, 12가지 지표물질 목록을 구성하여 유입대비 방류수의 평균 제거율 80%를 기준으로 설정하였다 (Bourgin et al., 2018; FOEN, 2017). 국내에서도 미량오염물질 주요 배출원인 하수 방류수에 대해 정기적인 모니터링과 제어 방안 마련 등 관리 제도 선진화가 필요한 시점이다.

이러한 배경하에 본 총설에서는 국내의 하수 유래 미량오염물질 발생 및 모니터링 현황과 관리를 위한 법 및 정책 동향을 살펴보고, 현재 접근법의 한계와 향후 개선 방향에 대하여 살펴보고자 한다.

## 2. 하수 미량오염물질 검출 및 처리 현황

국내·외 하수에서 검출되는 미량오염물질의 종류, 농도 및 하수처리 공정별 거동과 처리현황에 대해 살펴보았다. 미량오염물질 중 미세플라스틱은 하수처리 시설에서 대부분 슬러지로 분리되어 제거되었으며 하수 방류수 내 잔류하는 미세플라스틱은 수생환경에 미치는 영향이 다른 오염원에 비해 미미한 것으로 최근 보고되고 있다 (Liu et al., 2021; Nguyen et al., 2021). 본 총설에서는 미세플라스틱을 제외한 미량유기오염물질을 중심으로 논의하였다.

### 2.1 국외 현황

#### 2.1.1 하수처리장 유입수 및 배출수 검출 종류 및 농도

총 45개의 문헌 조사를 통해 13개국의 하수처리시설 유입수 및 방류수 내 주요 미량오염물질 검출 현황을 Fig. 1에 나타내었다. Fig. 1에서 검출농도는 유럽 7개국, 아메리카 3개국, 아시아 3개국의 하수처리시설 유입수와 방류수의 최대 검출농도를 비교해서 함께 나타내었다. 조사된 미량오염물질을 계열별로 분류하면 의약품

질 20종(acetaminophen, diclofenac, ibuprofen, ketoprofen, mefenamic acid, naproxen, salicylic acid, metformin, venlafaxine, carbamazepine, benzafibrate, clofibrac acid, gemfibrozil, azithromycin, clarithromycin, erythromycin, sulfamethoxazole, trimethoprim, atenolol, metoprolol), 식품 보조제 1종(caffeine), 생활화학 제품 3종(galaxolide, tonalide, triclosan), 호르몬류 4종(estrone(E1), 17 $\beta$ -estradiol(E2), estriol(E3), 17 $\alpha$ -ethinylestradiol(EE2)), 산업 제품 5종(bisphenol A, 1h-benzotriazole, 4-methyl-1h-benzotriazole, TCEP, TCPP), 농약류 2종(Atrazine, Diuron) 과 과불화화합물 8종(PFPeA, PFHxA, PFHpA, PFOA, PFDA, PFBS, PFHxS, PFOS)으로 총 43종이며, 그래프의 우측에 방류수 내 개별 미량오염물질의 최대 검출농도가 1  $\mu$ g/L 이상 배출되는 국가의 정보를 표시하였다.

유입수에서 대부분의 미량오염물질은 0.01-10  $\mu$ g/L의 농도 범위로 검출되었으며, 일부 의약품질(acetaminophen, ibuprofen, naproxen, salicylic acid, metformin)과 신경 흥분제(caffeine)는 상대적으로 높은 농도 (> 10  $\mu$ g/L)로 유입되었다. 유입수에서 가장 높은 농도로 검출된 미량오염물질은 당뇨병 치료제인 metformin으로 포르투갈에서 최대 325  $\mu$ g/L로 검출되었다 (Carmona et al., 2017). 비스테로이드성 항염증제(Non-steroidal anti-inflammatory drugs, NSAIDs) 계열의 물질들도 높은 농도로 유입되었으며, acetaminophen의 경우 스페인에서 최대 246  $\mu$ g/L의 농도로, salicylic acid는 영국에서 최대 32.1  $\mu$ g/L의 농도로 검출되었다 (Gómez et al., 2007; Kasprzyk-Hordern et al., 2009). Ibuprofen과 naproxen은 핀란드와 미국에서 각각 최대 23.4  $\mu$ g/L와 12.8  $\mu$ g/L의 농도로 검출되었다 (Thomas and Foster, 2005; Vieno et al., 2005). 신경 흥분제 계열의 caffeine은 스페인에서 최대 118  $\mu$ g/L로 검출되었다 (Gómez et al., 2007). 산업용 화학제품 중 부식방지제로 사용되는 1H-benzotriazole은 독일에서 최대 25.6  $\mu$ g/L의 농도로 검출되었다 (Herzog et al., 2014). 반면, 호르몬류와 농약류는 대부분 1  $\mu$ g/L의 낮은 농도로 유입되었으며, 과불화화합물(PFAS) 0.001-2  $\mu$ g/L의 농도 범위로 유입되었다. 과불화화합물 중 PFHxA와 PFOS는 스페인에서 각각 최대 1.9  $\mu$ g/L와 0.7  $\mu$ g/L의 농도로 유입되어 다른 과불화화합물(< 0.1  $\mu$ g/L) 대비 높은 농도로 검출되었다 (Campo et al., 2014).

하수 방류수에서 대부분의 미량오염물질은 0.001-10  $\mu$ g/L의 농도 범위로 검출되었으며, 유입수 대비 농도

pp. 187-196

pp. 197-204

pp. 205-225

pp. 227-235

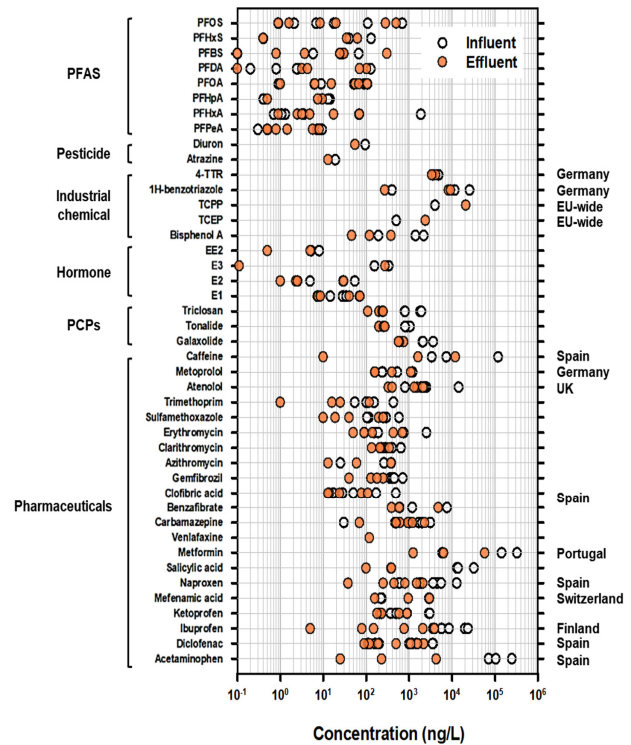
pp. 237-246

가 감소하였다. 방류수에서 가장 높은 농도로 검출된 미량오염물질은 metformin으로, 포르투갈에서 최대 58 µg/L로 검출되었다 (Carmona et al., 2017). 다음으로 검출농도가 높은 미량오염물질은 난연제 TCPP로 21 µg/L의 농도였으며, 이는 유입수(4 µg/L) 대비 오히려 농도가 크게 증가하였다 (Luo et al., 2014). 이런 현상은 또 다른 난연제인 TCEP에서도 나타났으며, TCPP와 TCEP 같은 염화 유기인산염 에스테르 난연제는 하수처리시설에서 거의 제거되지 않으며 방류수에서 농도가 증가 하는 경우가 있어 전구체 물질이 존재하는 것으로 추정된다 (Reemtsma et al., 2008). 유입수에서 농도가 높은 미량오염물질은 배출수에서도 그 농도가 상대적으로 높았는데, caffeine과 acetaminophen의 경우 스페인에서 각각 최대 12 µg/L와 4.3 µg/L의 농도로 배출되며, ibuprofen, naproxen와 mefenamic acid와 같은 NSAIDs는 최대 1 µg/L 이상의 농도로 배출되었다 (Gómez et al., 2007; Lindqvist et al., 2005; Rodriguez et al., 2003; Tauxe-Wuersch et al., 2005). 1H-benzotriazole과 4-Methyl-1H-benzotriazole과 같은 부식방지제 역시 독일에서 각각 최대 9.3 µg/L와 4.2 µg/L의 높은 농도로 배출되었다 (Herzog et al., 2014). 반면, 호르몬류와 농약류는 대부분 0.1 µg/L의 낮은 농도로 배출되었으며 과불화화합물은 0.0001-0.5 µg/L 이하의 낮은 농도로 배출되었다.

하수처리시설에서 배출된 미량오염물질은 지표수 등 수계로 유입되어 희석, 흡착, 광분해, 생분해 등 다양한 경로를 통해 분해 및 저감 된다고 알려져 있다 (Pal et al., 2010). 그러나 일부 잔류성이 강한 미량오염물질의 경우 지표수에서 빈번하게 검출되었다. 특히, 소비량이 많은 caffeine의 경우 미국과 대만의 지표수에서 각각 0.2 µg/L, 1.8 µg/L의 최대 검출농도를 보였다 (Kasprzyk-Hordern et al., 2009; Lin et al., 2011). 윤활제, 세제, 유화제 등으로 사용되는 nonylphenol의 경우, 중국과 그리스에서 각각 최대 33.2 µg/L와 2.7 µg/L 농도로 검출되었다.

Fig. 1에서 보듯, 하수처리시설의 개별 미량오염물질의 최대 검출농도는 문헌별 상당한 차이를 보였으며, 이는 생활환경, 하수처리 공법별, 1인당 물 소비량 차이 등 다양한 요인에서 기인한 것으로 보인다. 일부 연구에 따르면, 특정 미량오염물질의 현지 생산 및 사용/소비량은 하수처리시설에 유입되는 미량오염물질의 검출농도와 높은 상관성을 보였다 (Luo et al.,

2014). 한편, 조사된 미량오염물질의 대부분은 의약품 및 생활화학 제품에 관한 모니터링 결과이며, 농약류나 산업용 화학물질의 분포현황에 대한 모니터링 결과는 연구결과는 상대적으로 제한적이었다.



**Fig. 1.** Maximum concentrations of micropollutants detected in the influents and effluents of wastewater treatment plants in 13 different countries. Data were taken from various literature (Ref. Alder et al., 2010; Bendz et al., 2005; Bourgin et al., 2018; Campo et al., 2014; Carballa et al., 2004; Carmona et al., 2017; Clara et al., 2005; Foster, 2007; Göbel et al., 2005; Gómez et al., 2007; Herzog et al., 2014; Hollender et al., 2009; Jim et al., 2006; Joss et al., 2004; Kasprzyk-Hordern et al., 2009; Khan et al., 2005; Kimura et al., 2007; Lindqvist et al., 2005; Lishman et al., 2006; Loganathan et al., 2009; Loos et al., 2013; Luo et al., 2014; Mao et al., 2020; Maurer et al., 2007; Nakada et al., 2006; Paxeus, 2004; Quintana et al., 2005; Roberts and Thomas, 2006; Rodriguez et al., 2003; Rosal et al., 2010; Santos et al., 2009; Spongberg and Witter, 2008; Stumpf et al., 1999; Tauxe-Wuersch et al., 2005; Thomas and Foster, 2005; Trautwein et al., 2014; Vieno et al., 2005; Vieno et al., 2007; Watkinson et al., 2007; Weigel et al., 2004; Wick et al., 2009; Xu et al., 2007; Yasojima et al., 2006; Zhang et al., 2013; Zorita and Mathiasson, 2009).



### 2.1.2 하수처리장 공정별 제거 현황

앞서 조사된 문헌들의 결과를 통해 13개국 하수처리시설에서의 미량오염물질 제거율과 방류수 내 평균 농도를 Fig. 2에 나타내었다. 조사된 문헌의 90% 이상이 표준활성슬러지 공법을 이용한 하수처리시설을 대상으로 수행되었다. 지질 조절제(40-69%), 항생제(38-67%), 생활화학 제품(73-80%), 농약류(32-42%)와 같은 계열군은 하수처리장별 유사한 처리효율을 보였으나, 호르몬류(4-64%)나 베타 차단제(24-61%)의 경우 동일한 계열에서도 상당히 다른 처리효율을 보였다. 개별 미량오염물질별 처리효율은 큰 편차를 보이는 경우도 있었는데, 특히 estrone의 경우 스페인에서는 74%의 높은 제거효율을 보였으나 일본, 영국, 스페인에서는 하수 방류수에서 농도가 더 증가하였다. 즉, 하수처리시설별 수온과 처리공법 및 운전조건 등에 따라 일부 미량오염물질은 그 처리효율이 다르게 나타난 것으로 사료된다 (Oulton et al., 2010).

NSAIDs 계열의 의약품물질은 하수처리시설에서 가장 빈번하게 조사되었는데, 이들 대부분은 상당히 높은 제거효율을 보였다. Acetaminophen, salicylic acid, ibuprofen은 각각 99%, 98%, 88%의 높은 처리효율을 보였으며, naproxen, ketoprofen, mefenamic acid은 각각 69%, 61%, 46%의 처리효율을 나타내었다. 특히 acetaminophen과 salicylic acid의 처리효율은 여러 국가에서 비교적 일관적이었으며 97% 이상 저감되었다. 스위스 물 보호법에서 지정한 지표물질인 diclofenac, metoprolol, carbamazepine의 경우, 각각 39%, 24%, 12%의 낮은 처리효율을 보였다. 또한, 과불화화합물과 난연제는 하수처리시설에서 제거되지 못하고 그 농도가 오히려 다소 증가하였다.

하수처리시설의 단위공정별 미량오염물질 제거율을 살펴보면, 전처리 공정인 침사지와 1차 침전지는 미량오염물질 저감에 효과적이지 않다고 보고되었다 (Oulton et al., 2010). 응집·침전공정을 활용한 향상된 1차 처리공정에서도 소수성이 강한 사향(galaxolide, tonalide) 물질 외에는 20% 이하의 제거율을 보였다 (Carballa et al., 2004). 반면, 대부분의 미량오염물질은 2차 처리인 생물학적 처리공정에서 저감되는 것으로 알려져 있다 (Ternes et al., 2004). 미생물에 의한 미량오염물질 제거기작은 생물학적 분해와 슬러지 표면의 흡착으로 분류된다 (Suárez et al., 2008). 하수처리 공정별 미량오염물질처리의 기여율을 조사한 결과, 생물분해에

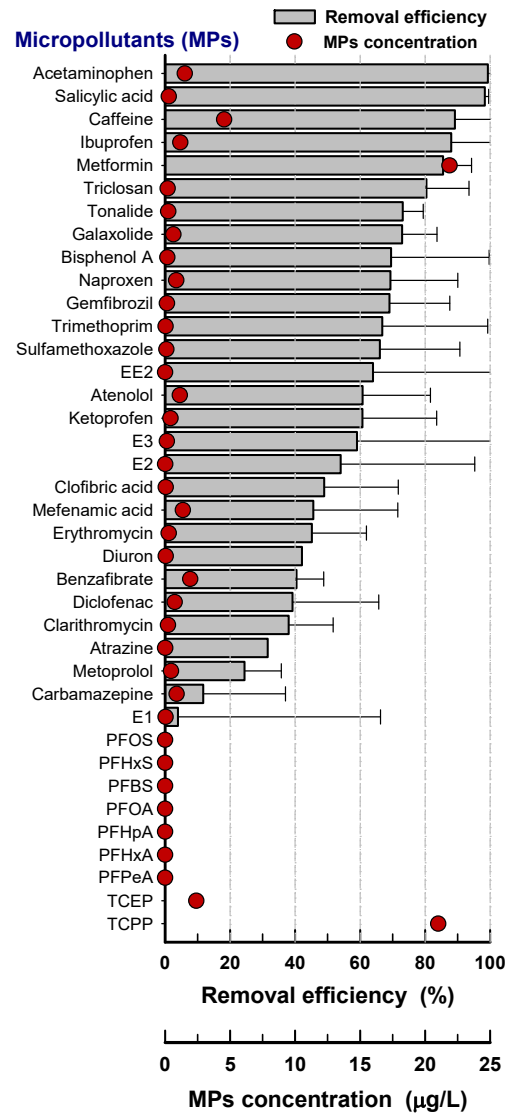


Fig. 2. Removal efficiency and average concentration of micropollutants in the WWTP effluents (data from the same literature shown in Fig. 1. negative removal expressed as 0%).

의한 저감이 45%, 슬러지 흡착에 의해 33%, UV와 같은 소독공정에서 22% 저감되는 것으로 나타났다 (Salgado et al., 2012). 이는 하수처리시설 내 생물학적 처리공정이 주요 제거공정이며 미량오염물질의 생분해성과 소수성과 같은 특성이 중요함을 말해준다. 과불화화합물과 난연제 물질은 난분해성으로 생물학적 처리로 제거가 어렵다. 따라서 이들 물질의 하수처리장 유입농도가 높은 경우, 생물학적 처리공정 외 추가적인 처리공정이 요구된다 (Jeong et al., 2017). 더불어, acetaminophen, caffeine, metformin과 같이 80%가 넘는

pp. 187-196

pp. 197-204

pp. 205-225

pp. 227-235

pp. 237-246

처리효율을 보임에도 1 µg/L 이상의 농도로 방류되는 물질들의 경우, 그 위해성이 불분명하더라도 예방의 차원에서(precautionary principle) 관리방안을 생각해 볼 수 있다.

## 2.2 국내 현황

### 2.2.1 하수처리장 유입수 및 배출수 검출 종류 및 농도

국내에서도 수계 내 미량오염물질에 대한 실태조사가 이루어지고 있으나, 하수처리시설별 미량오염물질 모니터링 목록이 다른 경우가 많고, 물질별 전처리 및 분석방법에 대한 기준이 상이한 경우가 많아, 개별 미량오염물질의 평균 검출농도는 문헌별로 상당한 차이를 보였다 (Fig. 3). 본 논의에서는 국내 하수처리시설 방류수 내 미량오염물질 검출 현황에 대해 중점적으로 다루었으며, 문헌별 공통적으로 조사가 이루어진 미량오염물질을 대상으로 논의하였다.

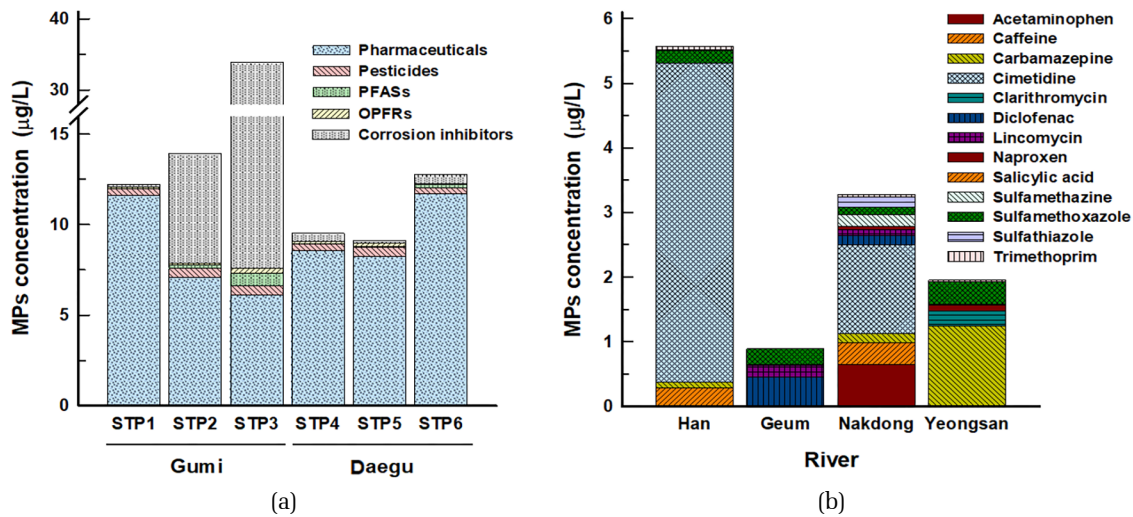
국내 낙동강 수계에 위치한 하수처리시설 방류수에 대해 미량오염물질 모니터링이 진행되었다 (Choi et al., 2020; Seo et al., 2015; Seo et al., 2020). 낙동강 종류에 위치한 구미와 대구의 6개 하수처리시설의 방류수 내 미량오염물질 검출 현황을 Fig. 3(a)에 나타내었다. 이들 하수처리시설에서 공통적으로 의약품물질이 가장 빈번하게 검출되었으며, 총 의약품물질의 평균 농도는 0.6-11.7 µg/L 범위였다. 그 중 STP2 (sewage treatment plant)와 STP3에서 비교적 낮은 의약품물질 농도를 보였는데, 이는 다른 지역의 하수처리시설과 다르게 산업폐수가 유입되며 생활하수의 비율이 낮아짐에 따라 의약품물질의 총 농도가 낮게 검출되는 것으로 보인다 (Choi et al., 2020). 소염진통제로 사용되는 niflumic acid는 하수처리시설에서 잘 처리되지 않는 것으로 보고되며 방류수 내 평균 1.5 µg/L 농도로 가장 높게 배출되었고, 위산분비 억제제로 처방되는 cimetidine은 평균 1.4 µg/L 농도로 그 뒤를 이었다. Metformin은 평균 1.2 µg/L 농도로 높게 배출되었으나, 국외 방류수에서 조사된 농도 범위 (1.3-58 µg/L)보다는 낮은 수준이었다. 진통제인 tramadol, 고혈압 치료제인 telmisartan은 각각 1.1 µg/L, 0.9 µg/L의 평균 농도로 검출되었다.

부식방지제는 의약품물질 다음으로 높은 평균 농도를 보였다. 그러나 Fig. 3(a)에서 보듯, STP2와 STP3과 같은 일부 하수처리시설에서만 높은 농도로 방류되었으

며, 이는 산업폐수와 연계처리 시 높은 농도의 부식방지제가 유입된 것으로 보인다. 특히, benzotriazole은 STP3에서 25 µg/L의 평균 농도를 보이며 단일 물질 기준으로는 가장 높은 농도를 보였다. 농약류 제품은 의약품물질과 부식방지제 다음으로 평균 농도가 높았다. 농약류 중에서는 atrazine이 평균 0.2 µg/L의 농도로 가장 높았으며, 국외에서 조사된 농도(0.013 µg/L)보다 10배 이상 높게 검출되었다. Atrazine은 내분비교란의 특성을 가지고 대사체의 잔류성이 높아 유럽연합에서 사용 금지된 물질인데 (Singh et al., 2018), 국내 하수에서 상당히 높은 농도로 검출되어 그 기원(source)에 대한 조사가 필요해 보인다. 그 외에도 icaridin과 diuron이 0.1 µg/L의 농도로 검출되었다.

총 13종의 과불화화합물은 0.22 µg/L의 평균 농도를 보였다. 그 중 perfluoroalkyl carboxylic acids (PFCAs)는 0.08 µg/L, perfluoroalkyl sulfonic acids (PFSA)는 0.14 µg/L의 평균 농도를 보였다. 특히, PFHxS는 0.13 µg/L의 농도를 보이며 다른 개별 물질 대비 높은 농도로 검출되었다. 가장 빈번히 조사되는 PFOA, PFOS, PFBS는 각각 0.02 µg/L, 0.01 µg/L, 0.02 µg/L의 농도로 검출되었다. 검출된 과불화화합물은 미국 보건국이나 유럽연합의 가이드라인을 대체적으로 만족하고 있지만 (PFOA + PFOS 농도 0.07 µg/L 이하 혹은 총 과불화화합물 농도 0.5 µg/L 이하), PFHxS와 같이 0.1 µg/L 이상으로 배출되는 개별 물질에 대해서는 관리가 필요해 보인다.

Fig. 3(b)는 국내 4대강 소재의 하수처리시설 방류수 내 대표적인 의약품물질 농도를 나타내었다. 한강과 낙동강 소재의 하수처리시설 방류수에서 cimetidine이 각각 4.9 µg/L, 1.4 µg/L로 검출되며 가장 높은 농도를 보였다. 다음으로는 간질 치료제로 사용되는 carbamazepine이 영산강 소재의 하수처리시설 방류수에서 1.2 µg/L의 농도로 높게 검출되었다. 하지만, 한강과 낙동강 소재의 하수처리시설 방류수에서는 0.1 µg/L의 검출농도를 보여 상대적으로 낮게 검출되었다. Acetaminophen 역시 낙동강과 한강에서 각각 0.6 µg/L, 0.005 µg/L (LOQ=0.4 ng/L)의 검출농도를 보여 지역적 차이를 보였다. 반면, caffeine과 sulfamethoxazole의 경우 각각 0.3 µg/L, 0.2 µg/L의 평균 농도를 보이며 지역적으로 일관된 검출농도를 보였다. Fig. 3에서 보듯, 하수처리시설의 개별 미량오염물질의 평균 검출농도는 문헌별 상당한 차이를 보였다. 향후 체계적인 모니터링 기준



**Fig. 3.** (a) Concentration of substances classified by pharmaceuticals, pesticides, PFASs, OPFRs, and corrosion inhibitors from six WWTPs located in Nakdong River; (b) concentration of micropollutants in effluent from WWTPs at different river in Korea (Ref. Choi et al., 2008; Choi et al., 2021; Na et al., 2019; NIER, 2006; Seo et al., 2020).

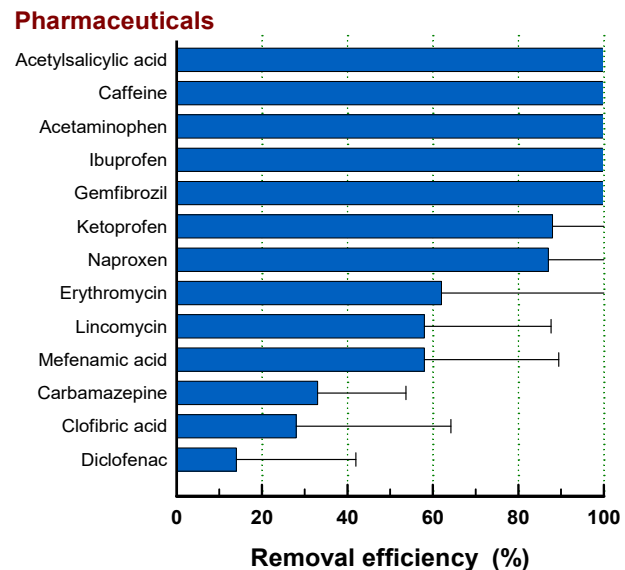
정립을 통해 하수처리시설별 미량오염물질 모니터링 항목 확대 및 조정이 필요하다.

하수 방류수에 높은 농도로 검출된 미량오염물질은 낙동강 하류에서도 상당히 높은 농도로 검출되었는데, niflumic acid와 melamine은 각각 0.32 µg/L, 11 µg/L의 농도로 가장 높게 검출된다고 보고되었다 (Park and Jeon, 2021). 또한 위해성 측면에서 산업에서 기인한 화학물질들은 대부분 높은 독성과 농도를 보였는데, TCP와 같은 난연제는 조사된 전체 미량오염물질 중 가장 높은 위해성을 보였다 (Park and Jeon, 2021). 의약품 중에서는 carbamazepine이 가장 높은 위해성을 보였다. 과불화화합물의 경우 국내 160개 수돗물 시료에서 PFOS, PFPeA, PFHxA, PFOA가 절반 이상의 시료에서 검출되었으며, PFOA와 PFOS는 최대 0.20 µg/L와 0.37 µg/L의 농도로 검출되어 잠재적인 위해성을 보였다 (NIER, 2010). 이 결과는 하수처리시설 방류수 내 검출되는 미량오염물질 목록과 일치하며, 하수처리시설의 방류수가 수계의 미량오염물질 오염의 주요 오염원이라는 것을 시사한다. 따라서 난분해성 의약품, 난연제, 과불화화합물 등 낮은 처리효율을 보이는 미량오염물질에 대한 지속적인 모니터링 및 적절한 관리대책 수립이 필요하다.

**2.2.2 하수처리장 공정별 제거 현황**

Fig. 4는 부산 소재의 10개 하수처리시설을 대상으로

조사된 미량오염물질의 처리효율을 나타내었다 (Sim et al., 2010). 해당 조사에서는 처리용량 7,000 ton/일부터 330,000 ton/일의 대규모 하수처리시설까지 다양하게 포함하였다. 처리공법별로는 생물 여과공법, 표준활성슬러지 공법, 연속 회분식 공법, anaerobic/anoix/oxic (A2O) 공법, modified Ludzack Ettinger (MLE) 공법 등 다양하게 적용되었으며, 수리학적 체류시간 또한 11.8-21.3 시간으로 다양하게 분포하였다. 조사 결과, 해당 하수



**Fig. 4.** Removal efficiency of selected micropollutants in WWTPs (data from Sim et al., 2010).

pp. 187-196

pp. 197-204

pp. 205-225

pp. 227-235

pp. 237-246

**Table 2.** Classification of micropollutants based on the removal efficiency (Luo et al., 2014)

Degree of removal	Compounds
Poorly removed (<40%)	Atrazine, carbamazepine, diazinon, diclofenac, erythromycin, metoprolol, mefenamic acid, TCEP, TCPP
Moderately removed (40-70%)	Atenolol, bezafibrate, clofibrac acid, durion, ketoprofen, nonylphenol, sulfamethoxazole, tebuconazole, trimethoprim
Highly removed (>70%)	Acetaminophen, benzophenone-3, bisphenol A, caffeine, clotrimazole, DBP, DEET, DEHP, DMP, estradiol, estriol, estrone, ethinylestradiol, galaxolide, gemfibrozil, ibuprofen, naproxen, octylphenol, salicylic acid, tonalide, triclosan

처리장들의 다양한 생물학적 처리공법 및 운전조건에도 불구하고 하수처리시설별 미량오염물질 처리효율은 유사하게 나타났다. Acetylsalicylic acid, caffeine, acetaminophen은 유입수에서 1-10 µg/L의 높은 농도로 유입되었는데, 하수처리시설 공법 및 운전조건과 상관없이 99% 이상의 높은 처리효율을 보였다. Ibuprofen, gemfibrozil, ketoprofen, naproxen 또한 각각 99%, 99%, 88%, 87%의 높은 처리효율을 보였다. 반면 carbamazepine, clofibrac acid, diclofenac은 33% 이하의 낮은 처리효율을 보였다.

국내외 다양한 하수처리시설에서 미량오염물질 제거율을 조사한 결과 하수처리 공법별 차이는 크지 않았다. 특히, 생물학적 처리공정은 미량오염물질 제거에 가장 중요한 처리공정으로써 다양한 처리공법에 따른 제거율 차이가 예상되었지만, 조사된 문헌들을 검토한 결과 하수 처리공법별, 운전조건별 요인은 제거율에 크게 영향을 미치지 않았다. 반면, 미량오염물질 종류별로 제거율은 다양하게 나타났다. Table 2는 국외 하수처리시설에서 제거율에 따라 미량오염물질을 간단히 분류하였다 (Luo et al., 2014). 이러한 분류 경향은 국내에서도 유사하였으며 acetaminophen, caffeine, ibuprofen, naproxen, salicylic acid와 같은 물질은 70% 이상의 높은 제거율을 보였고, carbamazepine, diclofenac, metoprolol과 같은 물질은 40% 이하의 제거율을 보였다. 이는 활성슬러지 공법을 통한 미량오염물질의 생분해 속도상수 ( $K_{biol}$ ) 값을 조사한 연구에서도 유사하게 나타났으며, ibuprofen과 naproxen의 생분해 속도상수 값은 각각 21-35  $L_{gss}^{-1}d^{-1}$ , 1-2  $L_{gss}^{-1}d^{-1}$ 으로 diclofenac ( $< 0.1 L_{gss}^{-1}d^{-1}$ )과 clarithromycin ( $< 0.5 L_{gss}^{-1}d^{-1}$ ) 대비 높은 제거율을 보였다 (Joss et al., 2006). 따라서 미량오염물질의 소수성, 생분해성과 같은 특성에 따라 제거율 차이를 보였으며, 하수처리 공법 및 운전조건과 더불어 환경요인 (수온, 강우) 등에 따른 미량오염물질 처리율 변화에 대한 정보가 필요한데,

현재 관련한 연구가 활발히 진행 중이다 (Achermann et al., 2018; Meynet et al., 2020; Wang et al., 2020).

### 3. 미량오염물질 규제 및 관리 정책 동향

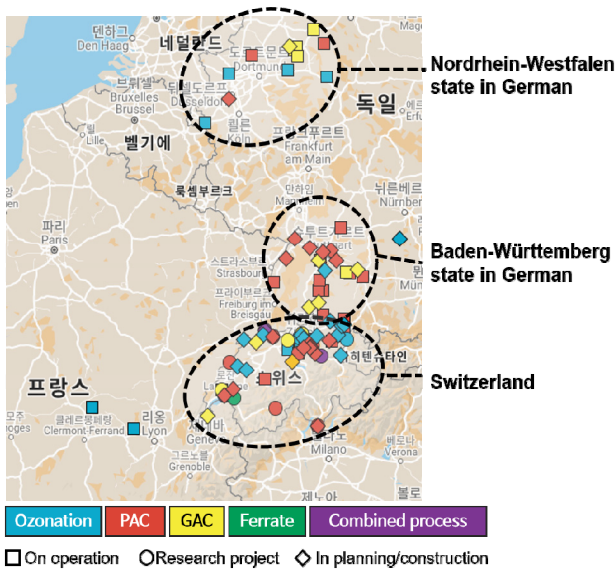
하수처리과정에서 완벽히 처리되지 않은 미량오염물질은 지표수로 흘러 들어가서 생태계에 악영향을 미치고 상수원의 수질을 위협할 우려가 있으므로, 하수처리시설로부터의 유출을 최소화하는 것이 바람직하다. 그러나 미량오염물질 제거를 위해 방류수 추가 처리 공정을 도입할 경우 그 설치와 운영에 따른 추가 비용이 발생하게 된다. 따라서 하수 방류수 수질강화 처리 시설의 도입을 위해 미량오염물질의 위해성 평가 및 그 처리 수준에 대한 정보가 요구되고, 강화 처리 공정 도입이 필요한 처리장 선정, 공정별 적용 가능성, 재정 확보 방안 등에 대한 검토가 필요하다. 또한, 미량오염물질로 인한 수질 이슈 관리 방안으로 하수처리시설 강화에 대한 모든 이해당사자의 공감 및 정책적 뒷받침이 필요하다. 이 장에서는 국내외 사례를 통해 미량오염물질 규제 및 관리 정책에 관하여 살펴보고자 한다.

#### 3.1 국외 미량오염물질 규제 및 관리 정책 동향

##### 3.1.1 하수방류수 강화처리를 통한 미량오염물질 관리

하수방류수 강화처리를 통한 미량오염물질의 저감 전략은 2021년 현재까지는 서유럽 권역에서 주로 시행되고 있다. Fig. 5는 서유럽에서 미량오염물질 저감을 위한 방류수 강화처리가 적용된 하수처리장의 분포를 나타내었다 (VSA Micropoll, 2020). 이하 본문에서는 스위스, 독일 등 서유럽 국가들의 수계 미량오염물질 관리 및 방류수 강화처리 관련 정책 동향에 대하여 소개한다.





**Fig. 5.** Status of wastewater treatment plants employing enhanced effluent treatment processes for micropollutants elimination (Figure was taken from www.micropoll.ch and reconstructed).

• **스위스:** 스위스는 2021년 현재로서는 유일하게 국가 차원에서 포괄적인 미량오염물질 관리 및 규제 정책을 시행 중이다. 스위스는 방류수 수질 강화처리 적용에 필요한 제도 정비, 사회적 인식, 기술 수준 등 대부분의 분야에서 앞서 나가고 있으며, 2020년 기준 100만 명 거주 구역의 12개 하수처리장에서 미량오염물질 제거를 위한 방류수 강화처리를 시행 중이다 (VSA Micropoll, 2020). 2016년부터 시행 중인 스위스의 물 보호법(water protection act)에 따르면 방류수 수질 강화처리 도입 대상 하수처리장은 2040년까지 지표 미량오염물질을 유입수 대비 80% 이상 제거하여 방류해야 한다. 관리 대상 미량오염물질은 제거 대상 미량오염물질은 분석의 용이성, 생물학적 분해 저항성, 상시 관찰 가능한 높은 유입농도, 고도처리(오존 및 활성탄) 시 제거율을 고려하여 12종이 선정되었다 (McArdell, 2019; Table 3). 방류수 수질 강화처리를 적용할 하수처리장은 방류수 수질 강화처리의 적용 목적에 따라 다음의 기준으로 선정된다. 1) 담당 인구수 8만 명 이상 하수처리시설은 스

**Table 3.** Indicator compounds for monitoring and assessing the removal efficiency of micropollutants in enhanced wastewater treatment processes

Regions with indicator compounds	Classification	Indicator compounds lists	References
Swiss Indicator Substances	Pharmaceuticals	Amisulpride, Carbamazepine, Citalopram, Clarithromycin, Diclofenac, Hydrochlorothiazide, Metoprolol, Venlafaxine, Candesartan, Irbesartan	McArdell, 2019
	Corrosion inhibitors	Benzotriazole, Methylbenzotriazole	
Indicator substances of Baden-Württemberg, German	Pharmaceuticals	Carbamazepine, Diclofenac, Hydrochlorothiazide, Irbesartan, Metoprolol	Acosta, 2019
	Corrosion inhibitors	Benzotriazole, 4- and ,5-Methylbenzotiraozle	
Recommended CECs to be considered in direct potable reuse projects, US	Hazardous substances	Perfluorooctanoic acid, Perfluorooctane sulfonate, Perchlorate, 1,4-Dioxane	WateReuse Research Foundation, 2015
	Pharmaceuticals	Estriol, Estradiol, 17 $\alpha$ -ethinylestradiol, Cotinine, Primidone, Phenyltoin, Meprobmate, Atenolol, Carbamazepine	
	Other chemicals	Sucralose, Tris (2-Carboxyethylphosphine)hydrochloride, N,N-dietmhyl-meta-toluamide, Triclosan	
Target CECs to be monitored in indirect potable reuse in California, US	Health-based CECs	1,4-Dioxane, N-nitrosodimethylamine(NDMA), N-nitrosomorphone (NMOR), Perfluorooctane sulfonate (PFOS), Perfluorooctanoic acid(PFOA)	California Water Boards, 2018
	Performance indicator CECs	Gemfibrozil, Iohexol, Sucarlose, Sulfamethoxazole,	
	Surrogates for CECs	Ammonia, Dissolved organic carbon, Nitrate, Total Fluorescence, Ultraviolet light absorbance	
	Bioanalytical screening tools for CECs	Endpoint activity: Estrogen receptor- $\alpha$ (ER- $\alpha$ ), Aryl hydrocarbon receptor (AhR)	

pp. 187-196

pp. 197-204

pp. 205-225

pp. 227-235

pp. 237-246

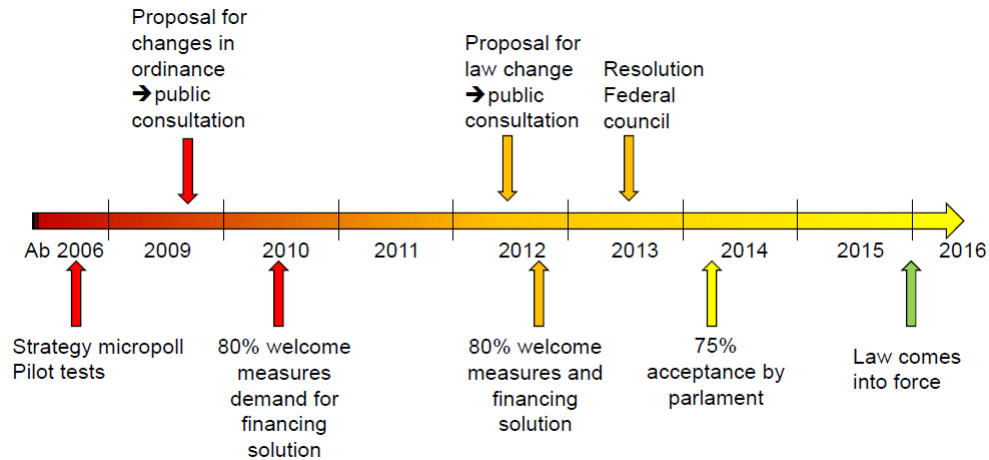


Fig. 6. A milestone in the legislation for controlling micropollutants by enhanced WWTP effluent treatment in Switzerland (Ref. Meier et al., 2018).

위스 인구의 50% 이상의 오염부하량을 처리하므로, 오염물질 부하 저감 차원에서 강화된 처리를 도입한다. 2) 담당 인구수 2만 4천명 이상이며 호수에 방류하는 하수처리시설은 상수원 수질을 보호하기 위해 강화된 처리를 도입한다. 3) 담당 인구수 8천명 이상인 방류수역의 유량 중 하수처리수가 10% 이상인 구역은 방류수역에서 독성에 취약한 생물을 보호하기 위해 강화된 처리를 도입한다.

하수처리시설 강화처리 도입 및 운영 비용은 오염 유발자 부담의 원칙(polluter pays principle)에 따라 강화처리 도입 대상 하수처리시설을 이용하는 거주 구역 주민을 대상으로 1인당 연간 9 스위스프랑(약 11,000원)을 부담하도록 하여 확보한다. 해당 비용은 방류수 강화처리를 도입하지 않은 대상 하수처리시설의 담당 구역 주민들에게만 징수한다. 방류수 강화처리를 도입한 하수처리시설의 담당 구역 주민들은 해당 비용을 납부하지 않아도 되지만 대신 방류수 강화처리를 도입하여 증가한 하수처리시설의 증가한 운영 비용을 감당해야 한다 (Meier, 2018).

미량오염물질 관리의 근거가 되는 물 보호법 개정은 방류수 강화처리 도입에 대한 기술적 근거를 마련하고, 사회적 합의를 이끌어내기 위한 10여년간의 준비 과정을 통해 이뤄졌다 (Meier, 2018). Fig 6은 스위스에서 물 보호법 개정을 위해 진행된 기술적·사회적 준비 과정을 나타낸다. 스위스 당국은 2006년까지 진행된 파일럿 테스트를 통해 오존과 활성탄을 이용한 방류수 강화처리의 기술적 적용가능성을 확인하였다.

또한, 재원 마련과 사회적 합의를 위해 2009년에 조례 개정, 2012년에 법 개정에 대한 국민과 이해관계자를 포함한 공개 협의에 나섰다. 비용-편익 분석 등을 통해 방류수 강화처리의 이점을 국민에 홍보한 결과 80%의 시민이 개정안에 대하여 찬성하는 긍정적인 반응을 이끌어냈다 (Logar et al., 2014). 높은 대중적 지지를 바탕으로 2013년 법 개정안이 스위스 연방 의회에 상정되었고 2014년 75퍼센트의 찬성율로 가결되어 2016년 이래로 개정된 물 보호법의 효력이 발생하여 지속되고 있다.

● 독일: 독일은 스위스와 더불어 미량오염물질 관리를 위한 방류수 강화처리가 시행되고 있는 대표적인 국가이다. 국가 차원의 미량오염물질 규제 정책은 없으나 미량오염물질 저감 방안과 하수처리시설의 강화 및 재정 조달 방안에 관한 연구를 진행하였다 (Ahting et al., 2018; Gawel et al., 2015). 중앙 정책과는 별개로 지방정부 차원에서 라인강 변에 접하고 있는 Baden-Württemberg와 Nordrhein-Westfalen 주는 미량오염물질 저감을 위하여 하수처리시설의 방류수 강화처리를 도입하였다.

Baden-Württemberg 주는 방류수 강화처리를 통한 미량오염물질 관리에서 스위스와 유사한 접근 방식을 택했다. 우선, 방류수 강화처리를 적용할 하수처리시설이 주 환경청 차원의 지침과 가이드라인을 통하여 선정되었다. Baden-Württemberg 주의 하수처리시설 중 처리 담당 구역의 인구가 50만명 이상이거나 담당 구역 인구가 1만명 이상인면서 1) 처리수를 호수에 방류



하는 경우, 2) 처리수를 지하수로 주입하는 경우, 3) 방류된 처리수가 방류 수역 유량의 50% 이상을 차지하는 경우, 4) 석회암 지대(카르스트)로 유출되는 경우 중 어느 하나라도 해당되면 방류수 강화처리 도입 대상으로 선정하였다. 그 결과, 지역 하수처리시설 906개 중 125개 하수처리장이 상기 기준에 해당되었다. 선정된 하수처리시설은 7종의 지표물질(Table 3)에 대하여 최소 80%의 제거율 달성을 목표로 하고 있다. 2019년 기준 바덴-뷔르템베르크 주는 15개소 하수처리장에 활성탄 흡착 고도처리공정을 적용 및 운영 중이며, 추가로 17개의 하수처리시설에 오존 및 활성탄을 이용한 방류수 강화처리를 적용할 준비 단계에 있다 (Acosta, 2019).

Nordrhein-Westfalen 주는 독일 최대의 공업지대이면서 최대의 인구밀집지역이기도 하다. 산업용, 의약품, 화학물질이 상수원으로 쓰이는 라인강 중하류 유역으로 유입되었고, 이로 인한 상수원 수질 우려가 방류수 강화처리 도입의 압력으로 작용했다 (Kosek et al., 2020). 그 결과 Nordrhein-Westfalen 주는 2018년 기준 11개의 하수처리시설에서 미량오염물질 저감을 위한 방류수 강화처리를 도입하여 운영 중이며, 19개의 하수처리시설에 대하여 추가로 방류수 강화처리를 도입할 계획이다. 또한, 126개의 하수처리시설에서 방류수 강화처리에 대한 적합성 평가가 진행 중이며, 다양한 방류수 강화처리 기법을 하수처리 상황별로 구체화하여 연구하는 17개의 프로젝트가 별도로 진행되고 있다 (Kompetenzzentrum Mikroschadstoffe. NRW, 2018).

### 3.1.2 물 재이용에서 미량오염물질 관리 정책

물이 부족하고 새로운 수원을 개발하기 어려운 지역에서는 하수 처리수를 재처리하여 공업용, 관개용, 음용수 등 다양한 용도로 사용하는 물 재이용이 활발히 이루어지고 있다. 그러나, 하수는 다양한 오염물질들을 포함하고 있기 때문에 재사용할 수 있는 수준의 수질로 만들기 위해서는 강화된 처리가 요구된다. 특히, 하수를 처리하여 음용수로 사용하는 먹는물 재이용(potable reuse)에서는 위생 및 보건, 사용자의 인식 등의 이유로 보편적인 먹는물 수질기준 이상의 강화된 기준이 적용되고 있다. 물 재이용의 수질 규제는 위험도 평가(risk assessment) 기반으로 병원균 및 화학물질에 의한 위해성을 최소화하는 방향으로 접근하게 되고, 강화된 평가 기준을 만족시키기 위해 고도처리

가 적용된다. 선진국이지만 강수가 부족한 지역이 많이 분포한 미국과 호주에서는 먹는물 재이용을 위한 수질관리 정책이 발전되어 왔다. 따라서, 이 장에서는 미국과 호주의 정책 사례를 통하여 물 재이용에서 미량오염물질 관리 및 고도처리 관련 정책을 살펴보았다.

● **미국:** 미국에서는 하·폐수 방류수에 요구되는 미량오염물질 규제는 없는 것으로 파악된다 (Audenaert et al., 2014). 그러나, 고도처리된 하·폐수를 먹는물로 재이용 시 안전한 식수법(safe drinking water act)에 따른 먹는물 수질기준과 생물학적 및 화학적 위험을 고려한 위험 평가 기준을 준수해야 한다. 즉, 먹는물 재이용수는 먹는물과 동일한 수준의 수질 규제 및 평가 기준이 적용된다. 먹는물 재이용에 별도로 요구되는 미량오염물질 규제는 없으나, 국립물환경연구소(National Water Research Institute, NWRRI)에서는 먹는물 재이용을 위한 고도처리 공정에서의 제거율 모니터링 대상 11개 미량오염물질과 하·폐수 원수에서 발견될 경우 최종 처리 후 모니터링 대상이 되는 6종의 미량오염물질을 포함하는 수질 기준을 제시하였다. (Table 3, WaterReuse Research Foundation, 2015). 또한, 미국 환경청(United States Environmental Protection Agency, US EPA)에서 배포한 물재이용 가이드라인(US EPA, 2012)은 용도별 물 재이용 수질기준 및 강화처리 기준에 대한 상세한 도움말을 제공하고 있다.

미국의 주(州) 중에서 물 재이용 역사가 오래되었으며 현재도 물 재이용 제도에 관한 활발한 논의가 진행되고 있는 캘리포니아 주의 제도가 주목할 만하다. 캘리포니아는 1970년대부터 상수원 수원으로 지하수를 하수 처리수로 충전하는 간접 먹는물 재이용(indirect potable reuse)을 시행하여 2017년 기준 160만명에 달하는 주민들이 처리된 지하수를 수원으로 공급하는 지역에 거주하고 있다.

캘리포니아에서 시행 중인 간접 먹는물 재이용은 역삼투/고도산화처리 연계 공정을 표준 처리공정으로 채택하고 있으며, 미량오염물질을 위시한 화학적, 생물학적 위험을 포괄한 CEC(constituents of emerging constituents)를 고려한 수질기준을 규정하고 있다. CEC 모니터링 항목은 과불화화합물처럼 실제 위해성을 띠는 물질과 연관된 건강관련 지표(Health-based), 여성호르몬 활성(estrogenicity) 같은 생물학적 활성을 검사하는 생물학적 검사지표(bioanalytical screening), Sucarlose처럼 위해성은 아직 알려지지 않았으나 일반

적인 하수처리에서 잘 제거되지 않아 고도처리공정의 성능을 평가하기 좋은 성과 지표(performance indicator), 즉시 분석이 어려운 미량오염물질 대신 DOC(dissolved organic carbon), UV 흡광도처럼 빠르게 측정 가능한 대리지표(surrogate)로 이루어져 있다 (Table 3). 각각의 모니터링 항목은 재이용수 내 미량오염물질로 인한 위해성과 고도처리 공정의 효율을 평가하는 데 이용된다. 재이용수 내 CEC 모니터링은 재이용 플랜트의 초기 운영 단계에서는 측정할 CEC 지표를 선정하고 지표의 제거율이 충분히 확보되는지 판단하는 데 사용되며, 운영 단계에서는 안정적인 공정 운영과 수질 문제 발생 여부를 판단하는 데 쓰인다.

● **호주:** 호주 대부분의 지역은 강우량이 적은 건조 기후이기 때문에 물 재이용이 활성화되어 있으며, 주요 도시의 물 부족 현상으로 인해 먹는물 재이용도 비교적 활발히 일어나고 있다. 현재 서호주(Western Australia) 주의 중심도시 퍼스에서는 하수를 처리하여 지하대수층에 주입해 주민 10만명 분의 수원으로 사용하고 있으며, 뉴사우스웨일스 주의 헉스베리-네펀 강 상류의 Saint Marys 하수처리시설에서는 하류의 수질 보호를 위해 하수를 고도처리 후 강에 방류하여 하류의 도시에서 상수원으로 취수하는 사실상의 먹는물 재이용(de facto potable reuse)이 이뤄지고 있다 (Khan and Anderson, 2018).

이러한 먹는물 재이용은 국가 수질관리 전략의 일환으로 배포된 호주 물 재이용 가이드라인의 지침을 준수하여 이루어졌다. 특히, 호주에서는 하수를 처리하여 지하수에 충전하는 경우뿐 아니라, 상수원에 직접 공급하거나 상수원에 영향을 주는 강에 방류하는 경우 모두 호주의 먹는물 재이용 가이드라인에 따라 관리하도록 하고 있다 (NRMMC, 2008; NRMMC, 2009).

호주 먹는물 재이용수(이하 재이용수)의 수질 규제는 위험도 평가 방식으로 이뤄지며, 미생물과 화학물질에 대한 위험 요소 규명과 인체 노출량을 기반으로 재이용수 사용에 따른 실질적 위험을 평가한다 (NRMMC, 2006). 이중 이차침전지 유출수에서 검출된 소독부산물 14종, 농약 43종, 의약품 및 대사물질 79종, 난연제 2종, 다이옥신류 화합물 8종, 기타 유기물질 4종에 대하여 최대 검출농도와 각 물질별 위해성을 고려한 모니터링 권고기준치를 제시하였다 (NRMMC, 2008). 또한, 호주 당국은 현재 주로 사용되는 자외선, 염소, 오존, 역삼투 및 나노여과(Nanofiltration, NF), 분리막 생물반응기

(Membrane Bioreactor, MBR) 등의 물 재이용 공정에 대한 검증 프로토콜을 정립하였다 (Australian Water Recycling Centre of Excellence, 2017).

### 3.2 국내 미량오염물질 규제 및 관리 정책 동향

국내 하·폐수처리시설의 미량오염물질 관리는 「물환경보전법」 및 그 시행규칙 (MOE, 2020a)과 「수질오염물질 지정 등에 관한 지침」 (NIER, 2018a)에 따라 이뤄진다. 산업폐수배출시설, 공공폐수처리시설, 산업폐수가 유입되는 공공하수처리시설, 이들 주변 공공수역(공단천)이 규제의 대상이 되며, 「물환경보전법 시행규칙」에 따라 수질오염물질과 특정수질오염물질의 배출 기준을 준수해야 한다. 새로운 후보 물질은 국립환경과학원이 지정한 우선순위물질 연차별 모니터링을 통해 배출실태를 파악하고, 국내외 검출빈도와 위해도 등을 검토하여 지속적으로 감시할 필요가 있다고 인정되는 물질에 대하여 감시항목으로 지정하도록 환경부 장관에 요청할 수 있다. 그러나 생활하수의 오염부하량과 그에 따른 미량오염물질 배출이 큰 공공하수처리시설은 폐수 연계처리를 하는 경우를 제외하고는 감시 대상에 포함되어 있지 않고, 수질오염물질 및 우선순위물질 목록도 의약품, 농약, 산업용물질 등 광범위한 미량오염물질이 미포함되어 있는 실정이다.

공공하수처리시설에서 처리되는 방류수의 수질기준을 규정한 「하수도법」 (MOE, 2021)과 하수 재처리수의 수질기준을 규정한 「물 재이용 촉진 및 지원에 관한 법률」 (MOE, 2020b)에도 미량오염물질 관련 규정은 없는 것으로 파악된다. 먹는물 재이용의 경우 하수처리수로 지하수를 충전할 경우 처리수가 먹는물 수질기준에 부합해야 한다는 규정이 있어 먹는물 수질기준에 명시된 미량오염물질 규제 기준을 맞춰야 하지만, 현재까지는 국내에서 지하수 충전으로 먹는물 재이용을 시도한 경우가 없는 것으로 파악된다. 상류에서 방류된 하수가 하천에 유입된 후 하류 지역에서 취수하는 사실상의 재이용(de facto reuse)이 하수재이용과 관련될 수 있으나, 이 경우에 대한 규제나 지침은 아직 마련되어 있지 않다.

비록 현행 제도에서 미량오염물질 제거를 목적으로 하수 방류수 강화처리를 도입해야 하는 규정은 없으나, 하수 재이용 활성화 및 엄격해지는 방류수 수질관리의 정책 기조에 따라 최종 방류수에 대한 강화처



리가 진행될 수도 있다. 일례로, 물 재이용법 시행령에 따르면 1일 하수처리 용량이 5,000 m<sup>3</sup> 이상인 하·폐수처리시설은 1일 처리량의 10% 이상을 의무적으로 재이용해야 하므로, 국내 다수의 하수처리시설에서 장내용수, 하천 유지용수, 농업용수, 공업용수 등의 목적으로 하수를 재이용하고 있다. 하천 등의 유지용수, 친수용수로 사용되는 사례처럼 하수 재이용 시 일반적인 하수 방류수보다 엄격한 수질기준을 요구할 경우 기존의 생물학적 처리 및 응집처리보다 강화처리가 요구될 수 있다. 실제로 환경부가 발간한 「2018 하수도통계」에 따르면 하천 등 유지용수, 공업용수에서 재이용 목적으로 사용하는 물에 대해서는 막여과, 오존, 활성탄 등의 강화된 하수처리를 적용하고 있는 사례를 찾아볼 수 있다 (MOE, 2019a).

보다 일반적인 경우로, 유기물, 총인, 소독 등 일반적인 수질 항목에 대한 기준 강화로 하수 방류수의 고도처리를 고려해야 할 수도 있다. 2019년 개정된 물환경보전법 시행령 및 시행규칙 (MOE, 2020a)에 따라 하·폐수 내 유기물질 지표가 화학적 산소요구량 (Chemical Oxygen Demand, COD)에서 총유기탄소 (Total Organic Carbon, TOC)로 2022년까지 단계적으로 전환될 예정이다. TOC는 COD보다 난분해성 유기물질을 정확히 반영할 수 있는 지표이기 때문에, TOC로 수질기준을 전환하면 하수 성상에 따라 유기물을 추가적으로 저감하기 위해 오존, 활성탄 등의 고도처리가 필요할 수도 있다.

한편으로는 미량오염물질 관리제도 도입 시 근거 마련을 위한 사전연구가 활발히 이뤄지고 있다. 우선 미량오염물질 관리에 대한 기초연구가 활발히 진행 중이다. 국립환경과학원에서는 산업폐수 업종별 수질 오염물질 배출목록 조사 (NIER, 2018b), ‘신규 수질오염물질 적정 처리기술 및 관리방안 연구’ (NIER, 2015), ‘하수처리시설 미량오염물질 물질수지 분석 및 관리방안 연구’ (NIER, 2018c) 등 하·폐수처리시설에서 미량오염물질의 분포와 거동 파악을 위한 연구가 진행되고 있다. 또한, 미량오염물질 관리 및 저감을 위한 민간 연구지원도 활발히 이뤄지고 있다. 대표적으로 한국환경산업기술원에서 지원하는 ‘상하수도 혁신 기술개발사업’은 미량 및 신종오염물질 최적관리 기술 분야 8개의 기술과제에서 미량오염물질 측정 및 분석기술, 하수처리공정에서 미량오염물질의 거동 평가 및 제거 예측기술, 정수 및 하수대상 최적 처리기

술 등 미량오염물질의 거동을 파악하고 효율적 관리를 위한 기술개발 연구를 지원하고 있다.

지역적 특성상 현행 제도 이상의 미량오염물질 관련 규제 및 고도처리 도입이 요구되어 하·폐수처리의 강화를 추진 중인 낙동강 유역의 사례도 주목할 만하다. 낙동강 유역은 국내에서 사실상의 먹는물 재이용 (unplanned potable reuse or de facto potable reuse)이 일어나는 대표적인 지역이다. 낙동강 중상류에 위치한 대도시인 대구, 공업도시인 구미를 비롯한 여러 도시에서는 하·폐수를 방류하고, 하류의 부산과 경남의 도시들은 이러한 낙동강물을 수원으로 이용한다. 2008년부터 2012년까지의 강의 물이 저수량보다 적은 1-3월의 저수기 동안 낙동강의 유량에서 하·폐수처리시설의 방류수가 차지하는 비중은 평균 23.6%에 달할 정도로 높기 때문에 낙동강 물을 취수하는 하류 도시를 중심으로 고질적인 상수원 수질 악화에 대한 우려가 제기되어 왔다 (Lee et al., 2015). 낙동강 유역 도시의 먹는물 수질 문제를 해결하기 위해 환경부는 낙동강 통합 물관리를 추진하고 있다. 그 노력의 일환으로 2020년 낙동강 통합 물관리 방안 연구를 진행하였고 지역주민 및 각계의 의견을 수렴하기 위한 토론회를 개최하였다. 본 연구에서는 공업폐수를 재처리해 사용하는 폐수 무방류시스템 도입과 대형 공공하수처리 시설 대상 고도처리 추진 등의 방안이 제시되어 현행보다 엄격한 미량오염물질 관리 정책이 수립될 것으로 전망된다 (KWSSES et al., 2020).

#### 4. 신종 미량오염물질 관리체계의 현황과 방향

국내외적으로 수중 미량오염물질에 대한 문제 인식이 확대되며 미량오염물질 모니터링 및 관리가 요구되고 있다. 미량오염물질 및 신규오염물질 등에 관한 관리는 수계 잔류농도를 조사하는 모니터링과 환경위해성 평가로 구성되며, 그 결과를 바탕으로 해당 미량오염물질에 대한 조사 지속 및 감시항목으로 지정 여부를 결정한다. 국내에서도 US EPA와 동일한 방식인 우선 관리대상물질 선정 절차에 따라 (Prioritizing contaminants for monitoring and management), 수질오염물질의 지정 및 배출허용 기준을 설정하고 있으나, 신종 미량오염물질의 경우 그 분석 및 생태 독성 자료

pp. 187-196

pp. 197-204

pp. 205-225

pp. 227-235

pp. 237-246

의 부족으로 관리대상물질 선정이 어려운 경우도 있다 (Jeong et al., 2017). 따라서, 이 장에서는 현행되는 미량오염물질 분석방법 및 위해성 평가 방법을 살펴보고 향후 개선 방향에 대해 논의하였다.

#### 4.1 미량오염물질 모니터링 및 분석방법

미량오염물질 분석방법에 대해 살펴보면, 2000년대 이후부터 시료 농축·정제기술과 결합된 tandem MS (mass spectrometry) 같은 질량분석기를 활용하여 다양한 미량오염물질의 검출이 가능하였다 (Choi, 2012; Jeon et al., 2016). 특히, 의약품과 같은 생활유래 미량오염물질은 오염물질의 표준물질 확보가 가능하여 표적분석기법(target screening)을 통해 정성·정량분석이 실시되었다 (Jeon et al., 2016). 한편 표적분석법의 경우 순도 높은 표준물질의 확보가 사전에 요구되는데, 일반적으로 이러한 표준물질의 확보에 많은 시간과 비용이 소요된다. 또한, 표적분석 시 분석의 정밀도와 정확도를 개선하기 위해 안전동위원소기법(stable isotope analysis)을 이용하는데 이때 첨가되는 동위원소 표준물질은 일반적으로 1 mg에 백만원 이상의 가격으로 판매되며 분석비용을 높이는 문제를 초래하였다 (Baek et al., 2021). 최근 국내에서 표적분석 시 주입되는 동위원소 표준물질을 대체하기 위해 기계학습(machine learning)을 활용한 표적분석법에 대한 연구가 보고되었다 (Baek et al., 2021). 해당 연구에서는 MS에서 검출되는 특정한 유기물 피크가 동위원소 표준물질과 일정한 상관관계를 가질 것으로 가정하여 기계학습 모델을 개발하였으며, sulphiride, metformine, benzotriazole, niflumic acid, tebuconazole과 같이 5개의 미량오염물질에 대해 0.84의 높은 평균 결정계수를 보였다 (Baek et al., 2021). 분석화학과 인공지능의 융합 연구는 향후 개선되어 확증된 정보 수준의 신뢰성을 가지는 것을 목표로 연구될 것으로 보이며, 이러한 시도는 분석의 진입장벽을 낮추고 기관별 통일된 분석법 확보에 일조할 것으로 사료된다.

한편, 환경 시료 내 대상물질은 다양한 하수처리공정을 거치며 변환체(Transformation Products, TP)나 대사체(metabolites)를 형성하게 된다. 이러한 변환체는 일반적으로 모화합물 대비 독성이 낮으나, 일부 농약류와 같은 미량오염물질은 독성이 더 증가한다고 보고되었다 (Jeon et al., 2016). 이처럼 모화합물과 분해

산물의 종합적인 모니터링 및 위해성 평가가 요구되지만, 미지물질에 대한 표준물질 확보의 어려움과 같은 분석기법 정립에 대한 한계점이 존재하였다. 최근, 알려진 오염물질이지만 표준물질이 없는 경우 또는 다양한 경로를 통해 분자구조가 바뀐 변환체나 대사체와 같은 미지물질의 경우, 오비트랩(orbitrap) 또는 비행시간형(Time of Flight, TOF) 고분해능질량분석기(High Resolution Mass Spectrometry, HRMS)를 활용하여 화합물의 원자구조 및 분자식을 추정하여 환경 내 미지의 물질 탐색에 활용되고 있다 (Choi, 2012; Jeon et al., 2016). 이러한 분석기법은 존재가 의심되는 물질의 예측 여부에 따라 추정(suspect) 또는 비표적(nontarget screening) 분석으로 분류되며 표준물질 없이도 그 존재 확인이 가능하다. 최근 낙동강 중류에 위치한 하수처리시설에서 방류되는 미량오염물질에 대해 표적/추정/비표적 분석을 실시한 연구에 따르면, 보고되지 않았던 telmisartan과 같은 약물이 높은 농도로 검출되며 위해성 지수가 높게 나타났다 (Choi et al., 2020). 이와 관련하여 환경부 지원‘상하수도 혁신 기술개발사업’에서는 표적/비표적 분석기법을 활용하여 미확인(unknown) 미량오염물질을 측정 및 분석할 수 있는 기술을 개발하고 그 분석결과를 데이터베이스화하는 작업을 진행 중이다. 향후 고분해능 질량분석 기술은 미량오염물질 모니터링 목적으로 확대 적용될 것으로 예상된다.

#### 4.2 미량오염물질 위해성 평가방법

미량오염물질의(환경 및 먹는물) 위해성 평가 시 분석을 통한 오염물질의 농도정보와 더불어(생태 및 인체) 독성에 대한 정보가 필수적이다. 전통적으로 통합 독성평가(Whole Effluent Toxicity test, WET test)에 사용되는 지표생물은 어류, 조류, 물벼룩 등의 시험생물 종이 이용되고 있으며 최소 2종 이상의 결과를 종합하여 평가하는 것이 일반적이다 (Ryu et al., 2010). 이러한 독성평가 기법은 시료 내 오염물질의 혼합독성과 미지의 오염물질에 대한 독성을 종합적으로 평가 가능하며, US EPA에서는 현재까지 조사된 화학물질에 대한 수생생물, 육상 생물 및 야생 동물에 대한 환경 독성 데이터를 정리하여 ECOTOX에 게시하였다. 하지만 여전히 신중오염물질 및 보고되지 않은 화학물질에 대한 정보는 부족하며 최근 많은 수의 동물을 독성 시험에 이용하는 것에 대한 윤리적 우려 또한



제기되고 있다 (Johnson et al., 2020). 관련하여 세포를 (cell) 이용하여 화학물질의 독성 효과를 측정하고 검출하는 *in vitro* 바이오 수질 분석법(bioanalytical method) 주목받고 있다. 대표적으로 chemical activated luciferase gene expression (CALUX) 분석법은 네덜란드에서 수질 평가를 위한 생물학적 도구로 이용되고 있다 (Been et al., 2021). 이런 *in vitro* 바이오 수질 분석법은 통합독성평가와 달리 특정 수용체에 대한 총활성도를 측정할 수 있으며, 대용량 시료 처리 시스템의(High Throughput Screening, HTS) 형태로 자동화 할 수 있어 대규모 모니터링 목적으로도 적합하다는 장점이 있다 (Jeong et al., 2019). 또한, 2007년부터 미국 내 여러 연방기관의 협력으로 Tox21이라는 독성평가 연구를 진행 중인데, 현재 수천 종의 화학물질에 대해 *in vitro* 분석기법으로 평가하여 독성 데이터베이스를 구축하였으며, 이를 바탕으로 광범위한 화학물질에 대한 독성을 예측할 수 있는(QSAR 기반) 프로그램들도 개발하였다 (Ha and Kim, 2009; Jeong et al., 2019). 이러한 화학물질에 대한 독성 데이터베이스 및 독성 예측 기법들은 향후 미량오염물질 관리 및 규제의 근거로서 적극 활용될 것으로 사료된다.

## 5. 요약 및 제언

여러 국내외 사례에서 하수 방류수가 수계 미량오염물질의 주요 배출원의 하나임을 알 수 있었다. 국내 하수처리장 방류수 모니터링 결과 niflumic acid, cimetidine, metformin, tramadiol, carbamazepine, benzotriazole 등의 미량오염물질이 1 µg/L 이상의 비교적 고농도로 검출되었고, telmisartan, mefenamic acid, cimetidine, metformin, PFOA, 유기인 계열 난연제 등 물질이 위해성을 나타낼 수 있을 정도의 농도로 검출되었다. 미량오염물질은 상수원 수질에도 영향을 미칠 수 있으며, 수생태계에도 악영향을 미칠 수 있다. 따라서, 하수 방류수에 대한 지속적이고 체계적인 모니터링이 필요하며 상수원 수질 영향 및 생태계 위해성 평가에 근거해 필요시 방류수 수질 강화처리 도입 및 방류수 수질 규제 강화 등과 같은 관리 방안이 요구된다. 특히 신종 미량오염물질에 대한 모니터링 및 관리를 위해 1) high resolution mass 기술을 활용하여 미지의 모하합물과 더불어 하수 처리 공정 중 형성되는 변환체나 대사체를 검출하며, 2) 세포 기반의 *in vitro* 바이오 수질 분석법을 통해 특정 독성

기작에 대한 평가를 진행하여 향후 미량오염물질 관리 및 규제의 근거로서 위해성 기반의 우선관리 대상물질 선정에 활용 가능할 것으로 사료된다.

국내에서는 비계획적 재이용(Unplanned or *De facto reuse*)이 상시 이뤄지고 있는 낙동강 유역을 중심으로 하수 방류수 강화처리 도입을 고려해 볼 수 있다. 이미 방류수 강화처리를 도입한 서유럽 국가의 사례가 참고할 만한데, 스위스, 독일 등의 국가에서는 모니터링 및 위해성 평가 결과를 바탕으로 미량오염물질 저감 목표를 세우고 방류수 강화처리를 도입할 하수처리장을 선정하였다. 또한, 강화처리 도입 시 하수처리장별로 경제성, 오염물질 제거율, 독성 부산물 생성, 연계처리를 고려하도록 하여 적합한 처리공정과 공정 운영 조건을 도출하고 방류수 강화처리에 실적용하고 있다. 이러한 서유럽 국가 사례를 보았을 때, 방류수 강화처리에 기반한 미량오염물질 관리 정책을 도입하기 위해서는 오랜 기간의 기술적(적용 공정의 적합성 평가, 강화처리 기술 지원 등), 그리고 정책적(재정 마련, 국민적 지지 확보, 법 개정 등) 준비 과정이 선행되어야 함을 알 수 있다.

하수방류수 강화처리를 통한 미량오염물질 관리 정책을 추진하기 위해서는, 도입에 따른 이득과 비용 분석이 선행되어야 하며, 강화 처리 기준이나 처리 기술의 국내 적용 가능성 및 기술 선정 등에 대한 여러 측면에서의 준비가 필요하다. 특히, 방류수 강화처리의 도입에 따른 비용을 어떻게 마련할 것인지가 중요한데, 서유럽 사례를 보면 인구 80,000명 규모의 대규모 하수처리시설 기준 오존이나 활성탄의 방류수 강화처리 도입에 따라 기존 하수처리 비용대비 10-20% 정도 증가하는 것으로 평가하고 있다. 이러한 하수 비용 증가를 이해당사자가 수용할 것인지가 매우 중요하며 관련하여 이해당사자 간 논의가 사전에 충분히 이뤄져야 할 것이다. 정책 추진 입장에서는 일반 시민의 이해와 지지를 이끌어내기 위한 여러 홍보 전략도 필요할 것으로 사료된다. 방류수 강화 처리 기술의 종류와 특징, 적합도 등에 대한 내용은 후속 논문에서 다루고자 한다.

## 사 사

본 결과물은 환경부의 재원으로 한국환경산업기술원의 상수도도 혁신 기술개발사업의 지원을 받아 연구되었습니다. (2019002710004).

pp. 187-196

pp. 197-204

pp. 205-225

pp. 227-235

pp. 237-246

## References

- Achermann, S., Falås, P., Joss, A., Mansfeldt, C.B., Men, Y., Vogler, B. and Fenner, K. (2018). Trends in micropollutant biotransformation along a solids retention time gradient, *Environ. Sci. Technol.*, 52(20), 11601-11611.
- Acosta, L. (2019). "Micropollutant removal on municipal WWTPs - Current situation in Baden-Württemberg, Germany", *Aquatech Amsterdam*, 2-5 November, 2019, Amsterdam, Netherland.
- Ahting, M., Brauer, F., Duffek, A., Ebert, I., Eckhardt, A., Hassold, E., Helmecke, M., Kirst, I., Krause, B., Lepom, P., Leuthold, S., Mathan, C., Mohaupt, V., Moltmann, J. F., Mueller, A., Noeh, I., Pickl, C., Pirtke, U., Pohl, K., Rechenber, J., Suhr, M., Thierbach, C., Tietjen, L. Von der Ohe, P. Winde, C. and Umwelt Bundesamt. (2018). Umweltbundesamt: Empfehlungen zur Reduzierung von Mikroverunreinigungen in den Gewässern., 1-59.
- Alder, A.C., Schaffner, C., Majewsky, M., Klasmeier, J. and Fenner, K. (2010). Fate of  $\beta$ -blocker human pharmaceuticals in surface water: comparison of measured and simulated concentrations in the Glatt Valley Watershed, Switzerland, *Water Res.*, 44(3), 936-948.
- Audenaert, W., Chys, M., Auvinen, H., Dumoulin, A., Rousseau, D. and Van Hulle, S. (2014). (Future) regulation of trace organic compounds in WWTP effluents as a driver of advanced wastewater treatment, *Ozone News*, 42(6), 17-23.
- Australian Water Recycling Centre of Excellence. (2017). A national framework for validating water-recycling technology.
- Baek, S.S., Choi, Y., Jeon, J., Pyo, J., Park, J. and Cho, K.H. (2021). Replacing the internal standard to estimate micropollutants using deep and machine learning, *Water Res.*, 188, 116535.
- Barbosa, M.O., Moreira, N.F., Ribeiro, A.R., Pereira, M.F. and Silva, A.M. (2016). Occurrence and removal of organic micropollutants: An overview of the watch list of EU Decision 2015/495, *Water Res.*, 94, 257-279.
- Been, F., Pronk, T., Louisse, J., Houtman, C., Van der Velden-Slootweg, T., van der Oost, R. and Dingemans, M.M. (2021). Development of a framework to derive effect-based trigger values to interpret CALUX data for drinking water quality, *Water Res.*, 193, 116859.
- Bendz, D., Paxéus, N.A., Ginn, T.R. and Loge, F.J. (2005). Occurrence and fate of pharmaceutically active compounds in the environment, a case study: Höje River in Sweden, *J. Hazard. Mater.*, 122(3), 195-204.
- Bourgin, M., Beck, B., Boehler, M., Borowska, E., Fleiner, J., Salhi, E., Teichler, R., Von Gunten, U., Siegrist, H. and McArdell, C.S. (2018). Evaluation of a full-scale wastewater treatment plant upgraded with ozonation and biological post-treatments: Abatement of micropollutants, formation of transformation products and oxidation by-products, *Water Res.*, 129, 486-498.
- California Water Boards. (2018). Policy for water quality control for recycled water, 49, [https://www.waterboards.ca.gov/water\\_issues/programs/water\\_recycling\\_policy/](https://www.waterboards.ca.gov/water_issues/programs/water_recycling_policy/) (February 26, 2021).
- Campo, J., Masiá, A., Picó, Y., Farré, M. and Barceló, D. (2014). Distribution and fate of perfluoroalkyl substances in Mediterranean Spanish sewage treatment plants, *Sci. Total Environ.*, 472, 912-922.
- Carballa, M., Omil, F., Lema, J. M., Llompart, M., García-Jares, C., Rodríguez, I., Gomez, M. and Ternes, T. (2004). Behavior of pharmaceuticals, cosmetics and hormones in a sewage treatment plant, *Water Res.*, 38(12), 2918-2926.
- Carmona, E., Andreu, V. and Picó, Y. (2017). Multi-residue determination of 47 organic compounds in water, soil, sediment and fish—Turia River as case study, *J. Pharm. Biomed.*, 146, 117-125.
- Choi, J. (2012). Analysis of Triazines in water using orbitrap high resolution and accurate mass spectrometer, *KSFEA*, 15(4), 282-291.
- Choi, K., Kim, Y., Park, J., Park, C.K., Kim, M., Kim, H.S. and Kim, P. (2008). Seasonal variations of several pharmaceutical residues in surface water and sewage treatment plants of Han River, Korea, *Sci. Total Environ.*, 405(1-3), 120-128.
- Choi, Y., Lee, J.H., Kim, K., Mun, H., Park, N. and Jeon, J. (2021). Identification, quantification, and prioritization of new emerging pollutants in domestic and industrial effluents, Korea: Application of LC-HRMS based suspect and non-target screening, *J. Hazard. Mater.*, 402, 123706.
- Chuang, Y.H. and Mitch, W.A. (2017). Effect of ozonation and biological activated carbon treatment of wastewater effluents on formation of N-nitrosamines and halogenated disinfection byproducts, *Environ. Sci. Technol.*, 51(4), 2329-2338.
- Clara, M., Kreuzinger, N., Strenn, B., Gans, O. and Kroiss, H. (2005). The solids retention time—a suitable design parameter to evaluate the capacity of wastewater treatment plants to remove micropollutants, *Water Res.*, 39(1), 97-106.
- Commission Implementing Decision (EU). (2015). 2015/495





- Of 20 March 2015.
- Commission Implementing Decision (EU). (2018). 2018/840 of 5 June 2018 establishing a watch list of substances for Union-wide monitoring in the field of water policy pursuant to Directive 2008/105/EC of the European Parliament and of the Council and repealing Commission Implementing Decision (EU) 2015/495.
- Drewes, J.E. and Khan, S.J. (2015). Contemporary design, operation, and monitoring of potable reuse systems, *J. Water Reuse Desal.*, 5(1), 1-7.
- Eggen, R.I., Hollender, J., Joss, A., Schärer, M. and Stamm, C. (2014). Reducing the discharge of micropollutants in the aquatic environment: the benefits of upgrading wastewater treatment plants, *Environ. Sci. Technol.*, 48(7), 7683-7689.
- Federal Office for the Environment (FOEN). (2017). *Gewässerqualität: Revision der Gewässerschutzverordnung*.
- Foster, A.L. (2007). Occurrence and Fate of Endocrine Disruptors through the San Marco Wastewater Treatment Plant, Thesis of Master of Science, Texas State University.
- Gawel, E., Köck, W., Schindler, H., Holländer, R., Lautenschläger, S., Schimpke, J. and Seim, S., Umwelt Bundesamt. (2015). *Mikroverunreinigungen und Abwasserabgabe*, UBA-Texte 26/2015, 1-132.
- Göbel, A., Thomsen, A., McArdell, C.S., Joss, A. and Giger, W. (2005). Occurrence and sorption behavior of sulfonamides, macrolides, and trimethoprim in activated sludge treatment, *Environ. Sci. Technol.*, 39(11), 3981-3989.
- Gómez, M.J., Bueno, M.M., Lacorte, S., Fernández-Alba, A.R. and Agüera, A. (2007). Pilot survey monitoring pharmaceuticals and related compounds in a sewage treatment plant located on the Mediterranean coast, *Chemosphere*, 66(6), 993-1002.
- Ha, M.H. and Kim, S. (2009). Current uses and research activity regarding non-testing methods including (Q)SARs in various chemical regulatory programs, *J. Environ. Toxicol.*, 24(3), 261-270.
- Herzog, B., Lemmer, H., Helmreich, B., Horn, H. and Müller, E. (2014). Monitoring benzotriazoles: a 1 year study on concentrations and removal efficiencies in three different wastewater treatment plants, *Water Sci. Technol.*, 69(4), 710-717.
- Hollender, J., Zimmermann, S.G., Koepke, S., Krauss, M., McArdell, C.S., Ort, C., Singer, H., Von Gunten, U. and Siegrist, H. (2009). Elimination of organic micropollutants in a municipal wastewater treatment plant upgraded with a full-scale post-ozonation followed by sand filtration, *Environ. Sci. Technol.*, 43(20), 7862-7869.
- Jeon, J., Park, N. and Lee, S.H. (2016). Application of target, suspect, nontarget screening methods based on high resolution mass spectrometry for the identification of micropollutants and their transformation products in aquatic environments: A review, *J. Korea Soc. Environ. Anal.*, 19(4), 225-245.
- Jeong, D., Ham, S., Lee, W., Chung, H. and Kim, H. (2017). Study on occurrence and management of organic micropollutants in sewer systems, *J. Korean Soc. Water Wastewater*, 31(6), 551-566.
- Jeong, J., Lim, C., Jung, D.W. and Choi, J. (2019). ToxCast™ program for high throughput screening of environmental chemical toxicity, a review, *J. Korea Soc. Environ. Anal.*, 22(2), 77-83.
- Jim, T.Y., Bouwer, E.J. and Coelhan, M. (2006). Occurrence and biodegradability studies of selected pharmaceuticals and personal care products in sewage effluent, *Agric. Water Manag.*, 86(1-2), 72-80.
- Johnson, A.C., Jin, X., Nakada, N. and Sumpter, J.P. (2020). Learning from the past and considering the future of chemicals in the environment, *Sci.*, 367(6476), 384-387.
- Joss, A., Andersen, H., Ternes, T., Richle, P. R. and Siegrist, H. (2004). Removal of estrogens in municipal wastewater treatment under aerobic and anaerobic conditions: consequences for plant optimization, *Environ. Sci. Technol.*, 38(11), 3047-3055.
- Joss, A., Zabczyński, S., Göbel, A., Hoffmann, B., Löffler, D., McArdell, C.S., Ternes, T.A., Thomsen, A. and Siegrist, H. (2006). Biological degradation of pharmaceuticals in municipal wastewater treatment: proposing a classification scheme, *Water Res.*, 40(8), 1686-1696.
- Kang, D., Jeon, J., Song, M. and Ra, J. (2019). Verification of Automatic Water Sampling System for Chemical Spill Events, *J. Environ. Anal. Health Toxicol.*, 22, 126-134.
- Kasprzyk-Hordern, B., Dinsdale, R.M. and Guwy, A.J. (2009). The removal of pharmaceuticals, personal care products, endocrine disruptors and illicit drugs during wastewater treatment and its impact on the quality of receiving waters, *Water Res.*, 43(2), 363-380.
- Khan, S. (2013). *Submission to the State Development, Infrastructure and Industry Committee Inquiry*.
- Khan, S.J. and Anderson, R. (2018). Potable reuse: Experiences in Australia, *Curr. Opin. Environ. Sci. Health*, 2, 55-60.
- Khan, S.J. and Ongerth, J.E. (2005). Occurrence and removal of pharmaceuticals at an Australian sewage treatment plant,

- Water, 32(4), 80-85.
- Kim, H., Ahn, J.H. and Hong, Y. (2013). A study on the management of micropollutants in water system considering climate change and other potential effects, *Korean Chem. Eng. Res.*, 51(6), 645-654.
- Kim, M.S., Lee, K. and Lee, C. (2020). Advanced oxidation technologies for the treatment of nonbiodegradable industrial wastewater, *J. Korean Soc. Water Wastewater*, 34(6), 445-462.
- Kimura, K., Hara, H. and Watanabe, Y. (2007). Elimination of selected acidic pharmaceuticals from municipal wastewater by an activated sludge system and membrane bioreactors, *Environ. Sci. Technol.*, 41(10), 3708-3714.
- Kompetenzzentrum Mikroschadstoffe.NRW (2018). [https://nrw-mikro.amit-services.de/fileadmin/user\\_upload/Tatenbank/Projektsteckbriefe\\_PDF/180528\\_Karte\\_inklListe\\_Webseite.pdf](https://nrw-mikro.amit-services.de/fileadmin/user_upload/Tatenbank/Projektsteckbriefe_PDF/180528_Karte_inklListe_Webseite.pdf) (February 25, 2021).
- Korea Federation of Water Science and Engineering Society (KWSES). (2020). <http://www.me.go.kr/home/file/readDownloadFile.do;jsessionid=k9s90AfOvQqR-uvsvj1kZO?do.mehome1?fileId=199468&fileSeq=3> (March 1, 2021).
- Lee, C., Lee, S. and Jang, I. (2009). Occurrence of priority pollutants in the midstream of Nakdong river basin, *J. Korean Soc. Environ. Eng.*, 31(6), 401-408.
- Lee, Y., Park, J., Shin, S. and Kim, K. (2015). Wastewater Effluent Discharge Status and Problems in Nakdong River, Yeongnam Area Water Resources Policy Research Association, 1-25.
- Lin, A.Y.C., Tsai, Y.T., Yu, T.H., Wang, X.H. and Lin, C.F. (2011). Occurrence and fate of pharmaceuticals and personal care products in Taiwan's aquatic environment, *Desalin. Water Treat.*, 32(1-3), 57-64.
- Lindqvist, N., Tuhkanen, T. and Kronberg, L. (2005). Occurrence of acidic pharmaceuticals in raw and treated sewages and in receiving waters, *Water Res.*, 39(11), 2219-2228.
- Lishman, L., Smyth, S.A., Sarafin, K., Kleywegt, S., Toito, J., Peart, T., Lee, B., Servos, M., Beland, M. and Seto, P. (2006). Occurrence and reductions of pharmaceuticals and personal care products and estrogens by municipal wastewater treatment plants in Ontario, Canada, *Sci. Total Environ.*, 367(2-3), 544-558.
- Liu, W., Zhang, J., Liu, H., Guo, X., Zhang, X., Yao, X., Cao, Z. and Zhang, T. (2021). A review of the removal of microplastics in global wastewater treatment plants: Characteristics and mechanisms, *Environ. Int.*, 146, 106277.
- Loganathan, B., Phillips, M., Mowery, H. and Jones-Lepp, T.L. (2009). Contamination profiles and mass loadings of macrolide antibiotics and illicit drugs from a small urban wastewater treatment plant, *Chemosphere*, 75(1), 70-77.
- Logar, I., Brouwer, R., Maurer, M. and Ort, C. (2014). Cost-benefit analysis of the swiss national policy on reducing micropollutants in treated wastewater, *Environ. Sci. Technol.*, 48(21), 12500-12508.
- Loos, R., Carvalho, R., António, D.C., Comero, S., Locoro, G., Tavazzi, S., Paracchini, B., Ghiani, M., Lettieri, T., Blaha, L. and Gawlik, B.M. (2013). EU-wide monitoring survey on emerging polar organic contaminants in wastewater treatment plant effluents, *Water Res.*, 47(17), 6475-6487.
- Luo, Y., Guo, W., Ngo, H.H., Nghiem, L. D., Hai, F.I., Zhang, J., Liang, S. and Wang, X.C. (2014). A review on the occurrence of micropollutants in the aquatic environment and their fate and removal during wastewater treatment, *Sci. Total Environ*, 473, 619-641.
- Mao, H., Li, H., Li, Y., Li, L., Yin, L. and Yang, Z. (2020). Four typical personal care products in a municipal wastewater treatment plant in China: Occurrence, removal efficiency, mass loading and emission, *Ecotox. Environ. Safe*, 188, 109818.
- Maurer, M., Escher, B.I., Richle, P., Schaffner, C. and Alder, A.C. (2007). Elimination of  $\beta$ -blockers in sewage treatment plants, *Water Res.*, 41(7), 1614-1622.
- McArdell, C.S. (2019). "Progress made and challenges in abatement technologies for municipal wastewater: the Swiss case", *Norman / AQUAlity workshop*, 6 March, 2019, Paris, France.
- Meier, A., Grelot, J. and Abegglen, C. (2018). "Full-scale micropollutant removal from municipal wastewater in Switzerland", *EU Workshop on Emerging Pollutants Brussels*, 24 October, 2018, Brussels, Belgium.
- Meynet, P., Davenport, R.J. and Fenner, K. (2020). Understanding the Dependence of Micropollutant Biotransformation Rates on Short-Term Temperature Shifts, *Environ. Sci. Technol.*, 54(19), 12214-12225.
- Miklos, D.B., Hartl, R., Michel, P., Linden, K.G., Drewes, J.E., and Hübner, U. (2018a). UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> process stability and pilot-scale validation for trace organic chemical removal from wastewater treatment plant effluents, *Water Res.*, 136, 169-179.
- Ministry of Environment (MOE). (2006). National water environment management plan: A masterplan of water quality conservation at 4 major river basins (2006-2015).
- Ministry of Environment (MOE). (2020a). Water Environment



- Conservation Act, Act No. 17007, 18 February 2020, other laws amended.
- Ministry of Environment (MOE). (2020b). Water Reuse Promotion and Support Act, Act No. 17326, 5 January 2021, partially amended.
- Ministry of Environment (MOE). (2021). Sewerage Act, Act No. 17852, 5 January 2021, partially amended.
- Na, T.W., Kang, T.W., Lee, K.H., Hwang, S.H., Jung, H.J. and Kim, K. (2019). Distribution and ecological risk of pharmaceuticals in surface water of the Yeongsan river, Republic of Korea, *Ecotoxicol. Environ. Saf.*, 181, 180-186.
- Nakada, N., Tanishima, T., Shinohara, H., Kiri, K. and Takada, H. (2006). Pharmaceutical chemicals and endocrine disrupters in municipal wastewater in Tokyo and their removal during activated sludge treatment, *Water Res.*, 40(17), 3297-3303.
- National Institute of Environmental Research (NIER). (2006). Development of analytical method and study of exposure of pharmaceuticals and personal care products in environment, 178-181.
- National Institute of Environmental Research (NIER). (2010). A study on management of unregulated trace hazardous compounds in drinking water (I).
- National Institute of Environmental Research (NIER). (2015). Estimation of the Treatability and Management Practices to treat Water Pollutant Candidates(IV), NIER-RP2015-378, 1-29.
- National Institute of Environmental Research (NIER). (2018a). A study on management of unregulated hazardous compounds in drinking water, NIER-RP2018-206, 1-42.
- National Institute of Environmental Research (NIER). (2018b). Survey on the water pollutants list in industrial wastewater by industrial classification, NIER-RP2016-279, 1-32.
- National Institute of Environmental Research (NIER). (2018c). A study on mass balance and management measures of micropollutants in the public sewage treatment works (I), NIER-RP2018-207, 1-80.
- National Resource Management Ministerial Council (NRMMC). (2006). In National guidelines for water recycling: managing health and environmental risks (Phase 1), 2006, Environment protection and Heritage Council, and National Health and Medical research Council.
- National Resource Management Ministerial Council (NRMMC). (2008). In National guidelines for water recycling: managing health and environmental risks (Phase 2) - agumentation of drinking water supplies, 2008, Environment protection and Heritage Council, and National Health and Medical research Council.
- National Resource Management Ministerial Council (NRMMC). (2009). In National guidelines for water recycling: managing health and environmental risks (Phase 2) - managed aquifer recharge, 2009, Environment protection and Heritage Council, and National Health and Medical research Council.
- Nguyen, N.B., Kim, M.K., Le, Q.T., Ngo, D.N., Zoh, K.D. and Joo, S.W. (2021). Spectroscopic analysis of microplastic contaminants in an urban wastewater treatment plant from Seoul, South Korea, *Chemosphere*, 263, 127812.
- Pal, A., Gin, K.Y.H., Lin, A.Y.C. and Reinhard, M. (2010). Impacts of emerging organic contaminants on freshwater resources: review of recent occurrences, sources, fate and effects, *Sci. Total Environ.*, 408(24), 6062-6069.
- Park, N. and Jeon, J. (2021). Emerging pharmaceuticals and industrial chemicals in Nakdong River, Korea: Identification, quantitative monitoring, and prioritization, *Chemosphere*, 263, 128014.
- Oulton, R.L., Kohn, T. and Cwiertny, D.M. (2010). Pharmaceuticals and personal care products in effluent matrices: a survey of transformation and removal during wastewater treatment and implications for wastewater management, *J. Environ. Monit.*, 12(11), 1956-1978.
- Paxeus, N. (2004). Removal of selected non-steroidal anti-inflammatory drugs (NSAIDs), gemfibrozil, carbamazepine, b-blockers, trimethoprim and triclosan in conventional wastewater treatment plants in five EU countries and their discharge to the aquatic environment, *Water Sci. Technol.*, 50(5), 253-260.
- Peng, X., Yu, Y., Tang, C., Tan, J., Huang, Q. and Wang, Z. (2008). Occurrence of steroid estrogens, endocrine-disrupting phenols, and acid pharmaceutical residues in urban riverine water of the Pearl River Delta, South China, *Sci. Total Environ.*, 397(1-3), 158-166.
- Quintana, J.B., Weiss, S. and Reemtsma, T. (2005). Pathways and metabolites of microbial degradation of selected acidic pharmaceutical and their occurrence in municipal wastewater treated by a membrane bioreactor, *Water Res.*, 39(12), 2654-2664.
- Radcliffe, J.C. (2015). Water recycling in Australia-during and after the drought. *Environ. Sci.: Water Res. Technol.*, 1(5), 554-562.
- Reemtsma, T., Quintana, J.B., Rodil, R., Garcı, M. and Rodrı, I. (2008). Organophosphorus flame retardants and plasticizers in water and air I. Occurrence and fate, *Trends Analyt. Chem.*, 27(9), 727-737.

pp. 187-196

pp. 197-204

pp. 205-225

pp. 227-235

pp. 237-246

- Roberts, P.H. and Thomas, K.V. (2006). The occurrence of selected pharmaceuticals in wastewater effluent and surface waters of the lower Tyne catchment, *Sci. Total Environ.*, 356(1-3), 143-153.
- Rodriguez, I., Quintana, J.B., Carpinteiro, J., Carro, A.M., Lorenzo, R.A. and Cela, R. (2003). Determination of acidic drugs in sewage water by gas chromatography-mass spectrometry as tert.-butyldimethylsilyl derivatives, *J. Chromatogr. A*, 985(1-2), 265-274.
- Rosal, R., Rodríguez, A., Perdígón-Melón, J.A., Petre, A., García-Calvo, E., Gómez, M. J., Agüera, A. and Fernández-Alba, A.R. (2010). Occurrence of emerging pollutants in urban wastewater and their removal through biological treatment followed by ozonation, *Water Res.*, 44(2), 578-588.
- Ryu, T.K., Cho, J.G., Kim, K.T., Yang, C.Y., Joung, K.E., Yoon, J. and Choi, K. (2010). Ecotoxicity test of wastewater by a battery of bioassay and toxicity identification evaluation, *Environ. Health Toxicol.*, 25(3), 207-214.
- Salgado, R., Marques, R., Noronha, J.P., Carvalho, G., Oehmen, A. and Reis, M.A.M. (2012). Assessing the removal of pharmaceuticals and personal care products in a full-scale activated sludge plant, *Environ. Sci. Pollut.*, 19(5), 1818-1827.
- Santos, J.L., Aparicio, I., Callejón, M. and Alonso, E. (2009). Occurrence of pharmaceutically active compounds during 1-year period in wastewaters from four wastewater treatment plants in Seville (Spain), *J. Hazard. Mater.*, 164(2-3), 1509-1516.
- Schueth, C. (2014). MARSOL: demonstrating managed aquifer recharge as a solution to water scarcity and drought, May, 2014, In EGU General Assembly Conference Abstracts, 9073.
- Seo, C., Choi, J., Yoo, P., Jang, S. and Son, H. (2015). Occurrence of UV filters in Nakdong river basin: Mainstreams, tributaries and STP effluents, *J. Korean Soc. Environ. Eng.*, 37(8), 472-479.
- Seo, C., Yoom, H., Song, M., Kim, K., Kim, S. and Son, H. (2020). Occurrence and behavior of residual pharmaceuticals in the Nakdong river basin, *J. Korean Soc. Environ. Eng.*, 42(4), 177-187.
- Sim, W.J., Lee, J.W. and Oh, J.E. (2010). Occurrence and fate of pharmaceuticals in wastewater treatment plants and rivers in Korea, *Environ. Pollut.*, 158(5), 1938-1947.
- Singh, S., Kumar, V., Chauhan, A., Datta, S., Wani, A.B., Singh, N. and Singh, J. (2018). Toxicity, degradation and analysis of the herbicide atrazine, *Environ. Chem. Lett.*, 16, 211-237.
- Son, H. and Jang, S. (2011). Occurrence of residual pharmaceuticals and fate, residue and toxic effect in drinking water resources, *J. Korean Soc. Environ. Eng.*, 33(6), 453-479.
- Spongberg, A.L. and Witter, J.D. (2008). Pharmaceutical compounds in the wastewater process stream in Northwest Ohio, *Sci. Total Environ.*, 397(1-3), 148-157.
- Stasinakis, A.S., Mermigka, S., Samaras, V.G., Farmaki, E. and Thomaidis, N.S. (2012). Occurrence of endocrine disruptors and selected pharmaceuticals in Aisonas River (Greece) and environmental risk assessment using hazard indexes, *Environ. Sci. Pollut.*, 19(5), 1574-1583.
- Statistics Korea (KOSTAT). (2018). Survey of distribution of chemicals, 58-59.
- Stumpf, M., Ternes, T.A., Wilken, R.D., Rodrigues, S.V. and Baumann, W. (1999). Polar drug residues in sewage and natural waters in the state of Rio de Janeiro, Brazil, *Sci. Total Environ.*, 225(1-2), 135-141.
- Suárez, S., Carballa, M., Omil, F. and Lema, J.M. (2008). How are pharmaceutical and personal care products (PPCPs) removed from urban wastewaters?, *Rev. Environ. Sci. Biotechnol.*, 7(2), 125-138.
- Taxe-Wuersch, A., De Alencastro, L.F., Grandjean, D. and Tarradellas, J. (2005). Occurrence of several acidic drugs in sewage treatment plants in Switzerland and risk assessment, *Water Res.*, 39(9), 1761-1772.
- Ternes, T.A., Joss, A. and Siegrist, H. (2004). Peer reviewed: scrutinizing pharmaceuticals and personal care products in wastewater treatment, *Environ. Sci. Technol.*, 38(20), 392A-399A.
- Thomas, P.M. and Foster, G.D. (2005). Tracking acidic pharmaceuticals, caffeine, and triclosan through the wastewater treatment process, *Environ. Toxicol. Chem.*, 24(1), 25-30.
- Trautwein, C., Berset, J.D., Wolschke, H. and Kümmerer, K. (2014). Occurrence of the antidiabetic drug Metformin and its ultimate transformation product Guanylurea in several compartments of the aquatic cycle, *Environ. Int.*, 70, 203-212.
- Vieno, N.M., Tuhkanen, T. and Kronberg, L. (2005). Seasonal variation in the occurrence of pharmaceuticals in effluents from a sewage treatment plant and in the recipient water, *Environ. Sci. Technol.*, 39(21), 8220-8226.
- Vieno, N., Tuhkanen, T. and Kronberg, L. (2007). Elimination of pharmaceuticals in sewage treatment plants in Finland, *Water Res.*, 41(5), 1001-1012.
- Virkutyte, J. and Varma, R. (2010). *Treatment of micropollutants*



- in water and wastewater*. IWA Publishing, 1-51.
- WaterReuse California. (2019). <https://wateruse.org/wp-content/uploads/2015/01/WRCA-> (February 26, 2021), California WaterReuse Action Plan, 1-12.
- Wang, Y., Fenner, K. and Helbling, D.E. (2020). Clustering micropollutants based on initial biotransformations for improved prediction of micropollutant removal during conventional activated sludge treatment, *Environ. Sci. Water Res. Technol.*, 6(3), 554-565.
- WaterReuse Research Foundation. (2015). Framework for direct potable reuse, <https://wateruse.org/wp-content/uploads/2015/09/14-20.pdf> (February 26, 2021).
- Watkinson, A.J., Murby, E.J. and Costanzo, S.D. (2007). Removal of antibiotics in conventional and advanced wastewater treatment: implications for environmental discharge and wastewater recycling, *Water Res.*, 41(18), 4164-4176.
- Weigel, S., Berger, U., Jensen, E., Kallenborn, R., Thoresen, H. and Hühnerfuss, H. (2004). Determination of selected pharmaceuticals and caffeine in sewage and seawater from Tromsø/Norway with emphasis on ibuprofen and its metabolites, *Chemosphere*, 56(6), 583-592.
- Wick, A., Fink, G., Joss, A., Siegrist, H. and Ternes, T.A. (2009). Fate of beta blockers and psycho-active drugs in conventional wastewater treatment, *Water Res.*, 43(4), 1060-1074.
- Xu, W., Zhang, G., Li, X., Zou, S., Li, P., Hu, Z. and Li, J. (2007). Occurrence and elimination of antibiotics at four sewage treatment plants in the Pearl River Delta (PRD), South China, *Water Res.*, 41(19), 4526-4534.
- Yasojima, M., Nakada, N., Komori, K., Suzuki, Y. and Tanaka, H. (2006). Occurrence of levofloxacin, clarithromycin and azithromycin in wastewater treatment plant in Japan, *Water Sci. Technol.*, 53(11), 227-233.
- Zhang, W., Zhang, Y., Taniyasu, S., Yeung, L.W., Lam, P.K., Wang, J., Li, X., Yamashita, N. and Dai, J. (2013). Distribution and fate of perfluoroalkyl substances in municipal wastewater treatment plants in economically developed areas of China, *Environ. Pollut.*, 176, 10-17.
- Zietzschmann, F., Aschermann, G. and Jekel, M. (2016). Comparing and modeling organic micro-pollutant adsorption onto powdered activated carbon in different drinking waters and WWTP effluents, *Water Res.*, 102, 190-201.
- Zorita, S., Mårtensson, L. and Mathiasson, L. (2009). Occurrence and removal of pharmaceuticals in a municipal sewage treatment system in the south of Sweden, *Sci. Total Environ.*, 407(8), 2760-2770.

pp. 187-196

pp. 197-204

pp. 205-225

pp. 227-235

pp. 237-246