

미량 및 신종유해물질의 국내 방류 환경에서의 위해성 평가: 환경부 지정 1순위 80종 대상으로

이재엽^{1a,2a} · 박새롬^{1b} · 김일호^{1c,2b,*}

¹한국건설기술연구원 국토보전연구본부 · ²과학기술연합대학원대학교 건설환경공학과

Risk Assessment of Micro and Emerging Contaminants in Domestic Effluent Environment: Targeting on 80 First-class substances assigned by Ministry of Environment

Lee Jai-Yeop^{1a,2a} · Park Saerom^{1b} · Kim Ilho^{1c,2b,*}

¹Department of Land, Water and Environment Research, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology

²Department of Construction Environment Engineering, University of Science & Technology

(Received 16 September 2021, Revised 22 November 2021, Accepted 30 November 2021)

Abstract

In 2018, total 263 micro and emerging contaminants were selected as target substances by the Ministry of Environment, and 80 of them were first-class substance including endocrine disruptors, residual Pharmaceuticals and Personal Care Products (PPCPs), residual organic pollutants, pesticides and heavy metals. In this study, in order to evaluate the Hazard Quotient (HQ) of the 80 types in the domestic water environment the concentration of discharged effluent and nearby water environment reported by Korean institutes since 2010 was investigated. There were 45 substances reported to be detected, and Measurement Environment Concentration (MEC) were obtained by collectively converting them into water environment concentration. For biotoxicity, half maximal Effective Dose (EC50) to *Daphnia magna*, a water fleas species widely adopted in Material Safety Data Sheet (MSDS) was applied. As for the biotoxicity level, the Predicted No-Effect Concentration (PNEC) was obtained by applying the Assessment Factor (AF) and the HQ was derived by dividing it from the MEC. As a result of calculating the HQ, more than 1 substances were Cabamazepine, Mefenamic acid, Acetaminophen, Ibuprofen, Nonylphenol, Nickel, Erythromycin, Acetylslic acid, etc. Meanwhile, perfluorinated compounds were identified as hazardous substances in the water environment, with 5 out of 14 species included in the 20 ranks of first-class substance.

Key words : Emerging contaminants, Hazard quotient, Micropollutants, PNEC, Risk assessment

^{1a,2a} 수석연구원(Senior Researcher), 부교수(Associate Professor), pas2myth@kict.re.kr, https://orcid.org/0000-0002-4663-1890

^{1b} 전임연구원(Research Specialist), srpark@kict.re.kr, https://orcid.org/0000-0002-2826-9023

^{1c,2b} Corresponding author, 연구위원(Research Fellow), 교수(Professor), ihkim@kict.re.kr, https://orcid.org/0000-0002-2136-7712

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.

1. Introduction

국내에서는 물환경 내 유기물질에 의한 오염을 나타내는 지표가 화학적산소요구량(Chemical Oxygen Demand, COD)에서 총유기탄소(Total Organic Carbon, TOC)로 바뀌고 있다. 2013년부터 환경정책기본법시행령의 수질 및 수생태계 환경기준에 TOC 기준이 신설되었다. 2020년 개정된 「하수도법시행규칙」에서는 공공하수처리시설·간이공공하수처리시설의 방류수수질기준에도 TOC가 적용되는 기준이 제시되어 있다. 해당 기준은 지역에 따라 TOC 15~25 mgL⁻¹를 제시하고 있다.

TOC는 COD보다 수질 내 난분해성오염물질을 잘 나타내고 있으나 개별 물질에 대한 분석 기술이 발달한 근래에는 개별 물질을 타겟으로 한 신중유해물질이 주목을 받고 있다.

환경부에서는 2018년 상·하수도 혁신 기술개발사업을 통해 미량 및 신중오염물질 263종을 대상물질로 선정하였다(ME, 2018). 이후 환경기술개발사업 등에 해당 대상물질을 반영하여 난분해성 유해물질, 폐수내 미량오염물질 처리를 위한 수생태계 건강성 확보 기술개발사업까지 적용하였다(ME, 2019). 미량 및 신중오염물질 263종은 냄새유발물질, 소독부산물, 내분비계장애물질, 잔류의약품, 잔류성유기오염물질 및 농약류, 금속 및 무기물로 구성되어 있으며 중요도에 따라 1순위 80종, 2순위 64종, 3순위 116종으로 구분되었다.

국립환경과학원에서는 국내 물환경 또는 폐수처리공정 방류수 내에 잔존하는 내분비계 장애물질, 잔류의약품 등 수중 유해물질을 지속적으로 모니터링하여 조사해왔다(NIER, 2010; NIER, 2011; NIER, 2016a; NIER, 2016b; NIER, 2017; NIER, 2018). 각 보고서에서는 폐수처리장 방류수 또는 공단 인근의 방류 하천에서 선정 물질이 유의한 농도로 존재하고 있는 것으로 조사되었다. 2019년부터 운영 중인 낙동강 왜관수질측정센터에서는 204종의 농약류, 산업용 용제 및 합성재료, 중금속, 의약품 등을 모니터링하여 118종이 검출되고 있는 것이 보고되었다(ME, 2020). 한편 국내 하수처리장에서 잔류의약품의 거동을 모니터링한 결과, 2차 및 3차 처리 이후에도 분석 대상 물질이 잔존하는 것으로 보고되었다(Lee and Kim, 2020). 이는 고도처리를 포함한 생물학적 처리공정으로 잔류의약품에 대한 분해가 이루어지지 않다는 것을 시사한다.

기존 연구에서는 상기한 미량 및 신중오염물질에 대해 선정된 물질과 조사 대상 지점, 농도가 개별로 이루어졌다. 조사 대상 지점은 방류수 및 방류 하천에 한정되었지만 상대적인 시급성, 유해성 우위를 판단하는 생물독성 정보가 없다. 또한 매체 및 농도 단위가 다르므로 바로 비교할 수 없다.

한편 2021년 2월에 「화학물질 위해성평가의 구체적 방법 등에 관한 규정」이 2021년 2월 시행되어 화학물질의 위해성의 정량적 평가에 대한 기준이 제시되었다. 향후 화학물질의 위해성은 해당 기준을 통해 통합적인 평가 및 관리가 가능해졌으나, 시급성이 제기된 상기 유해물질에 대해서는 국내 방류 환경에서의 재평가가 필요하다.

본 연구에서는 미량 및 신중오염물질 263종 중에서 1순위로 지정된 80종 관점에서 국립환경과학원을 비롯한 연구조사

보고서, 논문 등에 국내에서 보고된 방류수 및 방류 하천에서의 농도를 통해 측정환경농도(MEC)를 산출하였다. 또한 유해성 관점에서 평가하기 위해 생물독성 기준으로 널리 사용되는 물벼룩인 *Daphnia magna* (*D. magna*)의 반수영향농도(Half maximal effective concentration, EC50)을 통해 예측무영향농도를 산출하였다(Lee and Ko, 2019). 산출된 두 값에서 유해성 지표(Hazard Quotient, HQ)를 도출하여 1순위 물질 80종의 유해성을 정량하고 비교하였다.

2. Materials and Methods

2.1 환경부 지정 80종에 대한 측정환경농도

본 연구에서는 환경부 지정 신중유해물질 1순위 80종에 대한 측정 환경농도를 조사·정리하였다. 80종에 대한 국내 방류수 및 방류 하천의 농도를 확보하기 위해 각 물질의 조사 결과가 제시된 최근 10년 이내의 관련 보고서를 인용하였다. 농도 기준은 평가계수(AF)를 도입하여 MEC로 통일하였다. 방류수계에서 조사된 경우에는 물환경에서의 부하량을 고려하여 AF를 10으로 설정하여 나누었다(Bound and Voulvoulis, 2004). 미량 및 신중유해물질 특성상 보고서의 조사 대상 물 환경 매체는 폐수처리시설 방류수 또는 인근 하천, 공단 인근 하천이었다. 다음 Table 1에 인용된 문헌의 조사지점 및 물환경매체를 정리하였다.

참고문헌에서 수치는 조사한 사례의 대푯값을 나타내지만 본 연구에서 조사한 사례가 전수라고 할 수 없으므로 각각의 사례의 평균이 아닌 최댓값으로 선정하였다.

2.2 예측무환경농도

예측무환경농도(PNEC)는 특정 유해물질 환경에서 대상 생물의 독성 또는 만성 독성이 나타나지 않는 최대 농도, 즉, 유해물질의 허용농도를 나타낸다. 급성 독성을 나타내는 반수영향농도(EC50)이나 만성 독성을 나타내는 무영향관찰농도(No Observed Effect Concentration, NOEC)에 AF를 나누어 산출하며, 급성의 경우 1000, 만성의 경우 AF는 50을 적용한다(Park et al., 2020).

본 연구에서는 일괄 적용, 비교하기 위해 동일한 생물종으로서 물벼룩 계통의 시험군인 *D. magna*에 대한 급성 독성 농도인 EC50을 적용하였다. *D. magna*는 연구문헌 외에 물질안전보건자료(MSDS)에도 제시되어 있다. 또한 화학구조식에 기반한 QSAR (quantitative structure activity relationship)라는 독성 예측 모델식이 정립되어 있다(Dearden, 2002; OECD, 1995). 즉, 연구문헌이나 MSDS에서 찾을 수 없는 물질의 경우 QSAR 모델식을 이용하여 도출하였다.

2.3 유해지수 도출

본 연구에서 위해성 정량 지표는 유해지수(HQ)를 통해 얻었다. 독성지수(Toxic Unit, TU)는 물질 자체의 독성을 나타내는 수치이므로 환경 농도를 포함하지 않으며, 생물농축농도(Bio-Concentration factor, BCF)는 생체 내 오염물질 농도 정보가 필요한데 EC50에 비해 연구된 사례가 적다. 반면 HQ는

Table 1. The class, region and effluent/environment of the references

Reference	Wastewater class	Region	Effluent/Environment
NIER, 2018	STP (Pharmacy)	Incheon	Effluent
	STP (Hospital)	Goyang	Effluent
	STP (Sewage)	Suwon	Effluent
	STP (Chemistry)	Seongnam	Effluent
NIER, 2017	Industrial complex	Unknown	Environment
NIER, 2016a	Pharmacy	Unknown	Environment
	Near River	Unknown	Environment
NIER, 2016b	Resin and Plastic	Unknown	Effluent
NIER, 2011	Environment	Four major river	Environment
ME, 2020 (Waegwan)	Industrial complex	Gumi complex	Environment
KEITI, 2020	Industrial complex	Dalsung	Effluent
KEITI, 2019	Sewage	Icheon	Effluent
	Wastewater	Kyongsan	Effluent
KEITI, 2014	Municipal complex	Yongin	Effluent
Kim et al., 2010 (Busan water Authority)	Industrial complex	Nakdong river	Environment
	Sewage	Nakdong river	Environment

생물독성지표인 EC50이나 NOEC를 사용하여 연구 사례가 많으며, 해당 수치가 없어도 독성 예측 모델인 QSAR를 활용할 수 있어 수치 도출이 가능하다.

HQ는 Fig. 1과 같이 MEC를 PNEC로 나누어 얻는다(Park et al., 2020). 유해지수는 1 이상인 경우 생태 위해성이 있다고 본다. 생물독성 한계치보다 환경측정농도가 크면 유해하다고 보는 것이다.

$$HQ = MEC / PNEC$$

본 연구에서는 MEC와 PNEC 정보를 얻을 수 있는 신종유해물질에 대해 유해지수 HQ를 산출하고 국내 물환경에서의 상대적 유해성을 제시하고자 해당 순위를 함께 제시하였다.

3. Results and Discussion

3.1 국내 물환경 신종 미량오염물질 검출 보고 현황

국내 물환경 또는 폐수처리시설 방류수에서 검출되는 미량오염물질은 국립환경과학원의 연구과제를 통해 진행되어 왔

다. 이미 2010년부터 본 환경부 지정 미량 및 신종유해물질을 대상으로 모니터링해왔으며 당시 사회적으로 이슈가 되었던 내분비계 장애물질, 잔류의약품질이 검출되었음을 보고하였다.

국립환경과학원에서 2018년에 수행한 「하수처리시설 미량오염물질 물질수지 분석 및 관리방안 연구(I)」에서는 의약품질 공장, 병원 인근, 화학물질 제조 공장 등 특정 분야 폐수 배출 시설에 위치한 4개의 하수처리장에서 배출되는 방류수 내 잔류의약품질을 분석하였다(NIER, 2018). 모니터링 결과 Ibuprofen 등 대부분 잔류의약품질로 16종이 미량으로 검출되었다. 해당 연구를 통해 처리시설에서 방류된 종류별 폐수가 하수처리장에 미치는 영향과 농도 수준을 볼 수 있었다.

국립환경과학원에서 2017년에 발행한 「유해물질 노출실태 파악을 위한 환경매체별 모니터링 연구」에서는 공업단지 인근 물환경에서 13종의 미량 잔류의약품질이 검출되었다. 2016년에 발행한 「위해우려 의약품질의 생태위해성평가 연구」에서는 의약품 및 위생용품 제조업체 인근 물환경에서의 잔류의약품질을 분석하였으며 10종이 검출되었다(NIER, 2016a). 2011년 발행한 「잔류의약품질 분석방법 연구 및 실태조사」에서는 국내 주요 물환경 하천수에서 17종이 검출되었다(NIER, 2011). 2010년 발행한 「내분비계장애물질에 대한 생물학적 분석법 적용연구」에서는 하폐수처리시설 방류수에서 검출되는 내분비계 장애물질을 모니터링하여 미량의 페놀류 및 에스트로겐성 물질의 검출을 확인하였다(NIER, 2010). 국립환경과학원의 보고는 폐수처리시설 방류수와 인근 물환경 조사를 통해 처리시설 후의 방류수가 인근 수계에 미치는 영향을 조사하였으며, 선정 물질이 유의미하게 인근 물환경에 분포하는 것으로 나타났다.

최근 국립환경과학원에서는 낙동강에 왜관수질측정센터를 설치하여 204종의 산업용, 의약품질, 농약류의 미량오염물질을 모니터링한 결과 118종이 검출되었으며 본 80종 내에는 잔류성 유기오염물질 포함 13종이 검출된 것으로 보고되었다

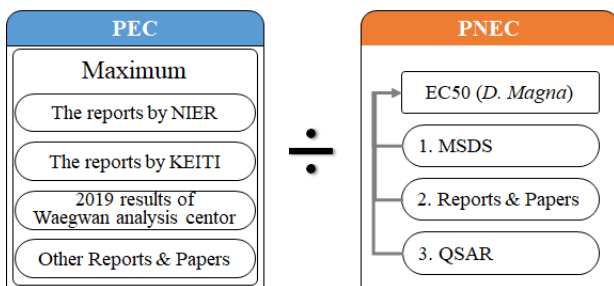


Fig. 1. HQ resources in this study.

(ME, 2020).

환경산업기술원에서는 내분비계 장애물질, 잔류의약품물질 뿐 아니라 최근의 잔류성 유기오염물질에 대한 모니터링 결과를 제거 기술 개발과 함께 보고하였다. 2019년 보고된 「생물학적 공정 개선을 통한 하·폐수 미량유해물질 처리효율 향상 기술 실증화 최종보고서」에서는 이천하수처리장, 경산폐수처리장의 방류수를 분석하여 13종의 신종유해물질이 검출되는 것을 확인하였다(KIETI, 2019). 특히 본 잔류성 유기오염물질 중에서 6종이 검출되어 미량유해물질에 대한 감시 체계를 구축하고 발생원에 대한 추적을 제안하였다. 2014년에 발행한 「청정 방류수 확보를 위한 영양물질 및 난분해성 미량물질 등 초고도 처리 핵심 기술 개발」에서는 폐수처리시설 방류수 내 5종 중에서 3종의 잔류의약품물질이 검출되었음을 보고하였다(KIETI, 2014).

소독 부산물은 부산 상수도사업본부에서 조사한 2010년 공단 인근의 낙동강 수계 상류 하수처리장의 방류수를 측정한 조사 결과를 참고하였다. 기타 중금속류와 Perchlrate류는 국립환경과학원과 환경산업기술원에 조사된 자료를 참고하였다(KIETI, 2020; NIER, 2016b).

이상 국내 폐수처리시설 또는 공단 인근의 하수처리장 등의 방류수, 방류수계에서 조사된 농도를 측정환경농도 MEC로 나타내었다. 각 물질마다 농도 편차가 커서 x축은 로그 스케일로 변환하였다.

80종 중에서 폐수처리장 인근에서 발견된 물질은 45종이었다. 국내 물환경에서 가장 많은 농도로 측정된 물질은 Acetaminophen로 $3.4 \times 10^2 \mu\text{g/L}$ 였으며 그 다음으로 Chlortetracycline, Acetylsalicylic acid, Mefenamic acid, Ibuprofen, Carbamazepine, Diclofenac 등 대부분 잔류의약품 물질이었다. 그 다음은 Perchlorate, 잔류성 유기오염물질 및 농약류였으며 특히 Perfluorohexanesulfonic acid (PFHxS), Perfluorooctanoic acid (PFOA), Perfluorohexanoic acid (PFHxA) 순으로 농도가 높았다.

상기 결과에서 잔류의약품물질은 생활에서 사용빈도가 높은 물질이 주로 검출되었으며 산업계 물질인 Perchlorate나 잔류성 유기오염물질도 다른 물질에 비해 다소 높게 분포하고 있는 것으로 조사되어 이에 대한 대책이 시급할 것으로 보인다.

다. 다만 다음 절에서 다룰 생물독성은 물질마다 역시 다르므로 시급성이나 위해성은 위해성 지수를 도입하여 평가되어야 할 것으로 보인다.

3.2 환경부 1순위 물질 80종에 대한 측정환경농도 및 유해지수 우선순위

국내 방류수 및 물환경에 검출되었다고 보고된 물질과 각 문헌에서의 수치와 이로부터 Fig. 2의 MEC와 *D. magna*의 PNEC, 두 수치로부터 HQ 및 순위를 Table 2에 나타내었다. 하이픈(-)은 해당 보고서에서 다루지 않은 물질이며, Not Detected(N.D.)는 검사항목에 있었지만 검출되지 않았음을 의미한다.

해당 표를 통해 하폐수 및 배출원별 방류수 내 미량의 신종유해물질의 위해성 비교를 상대적 순위와 함께 확인할 수 있었다. 방류수와 방류수계의 농도를 평가계수를 통해 비교하였으며, 동일한 지표생물의 생물독성으로부터 일관된 위해성을 도출할 수 있었다.

유해성 관점에서 HQ가 가장 높은 물질로는 Cabamazepine, Mefenamic acid, Acetaminophen, Ibuprofen, Nonylphenol, Nickel, Erythromycin, Acetylsalicylic acid 등의 순이었으며, 이들 8개 물질은 HQ가 1 이상이었다.

순위가 높은 물질은 대부분 잔류의약품물질이었으며 Acetaminophen, Ibuprofen 등의 물질은 COVID-19로 인해 사용량이 늘어나기 이전에도 물환경 농도 뿐 아니라 유해성 지수가 높았던 것으로 확인되었다. 한편 잔류성 유기오염물질 및 농약류 중에서 과불화화합물 계열의 물질은 80순위에 포함된 14종 중에서 PFOS (13), PFOA (10), PFHxS (17), PFHxA (15), PFNA (9)등 5종이 20 순위 안에 들 정도로 물환경 내의 유해성이 시급한 물질군으로 확인되었다. 팔호는 순위를 나타낸다.

상기 언급된 물질 외에 20순위에 든 유해물질은 Clarithromycin (11), Perchlorate (12), Bisphenol A (14), Caffeine (16), Erythromycin (18), Chlortetracycline (19), Cefradine (20)이었다. 소독 부산물은 2010년도 자료를 인용하였으나 NDMA 등 5의 HQ는 물론 순위에서도 23~15순위로 상대적으로 유해하지는 않았다.

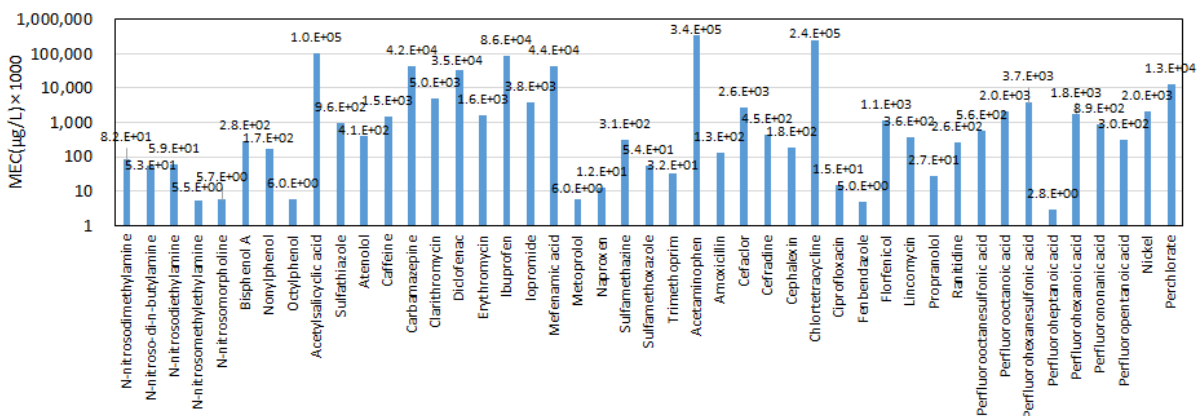


Fig. 2. The MEC in domestic wastewater facility (.E → × 10^).

Table 2. The MEC($\mu\text{g/L}$), PNEC and HQ in domestic water environment

No	Compounds	Abb.	Cas No.	NIER, 2018				NIER, 2017	NIER, 2016a		NIER, 2016b	NIER, 2010		ME, KETI, 2020	KEITI, 2019		KEITI, 2014	Kim et al. 2010		Max. (ng/L^{-1})	EC50 PNEC MEC (ng/L^{-1})	HQ	Ranks	Ref. EC50
				pharm	hos-pital	STP	che-mical		pharm, enviro.	2016a		2016b	Sihwa		Banwol	STP		WWTP	com-plex					
7	N-nitrosodimethylamine	NDMA	62-75-9	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	8.2×10^2	8.2×10^2	6.3×10^6	8.2×10^1	1.3×10^5	42	
8	N-nitroso-di-n-butylamine	NDBA	924-16-3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	5.3×10^2	5.3×10^2	4.0×10^4	5.3×10^1	1.3×10^5	23	
9	N-nitrosodiethylamine	NDEA	55-18-5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	5.9×10^2	5.9×10^2	1.3×10^6	5.9×10^1	4.7×10^5	38	
11	N-nitrosomethylethylamine	NMEA	10595-95-6	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	5.5×10^3	5.5×10^3	2.9×10^6	5.5×10^0	1.9×10^6	43	
12	N-nitrosomorpholine	NMOR	59-89-2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	5.7×10^3	5.7×10^3	6.5×10^6	5.7×10^0	8.7×10^7	45	
15	Bisphenol A		80-05-7	-	-	-	-	-	-	-	-	7.1×10^{-4}	N.D.	-	1.5×10^{-1}	2.8×10^{-1}	-	2.8×10^{-1}	1.0×10^1	1.0×10^4	2.8×10^2	2.7×10^2	14	MSDS
16	Nonylphenol		25154-52-3	-	-	-	-	-	-	-	-	2.8×10^{-3}	2.3×10^{-4}	-	5.0×10^{-2}	1.7×10^{-1}	-	1.7×10^{-1}	3.9×10^1	1.7×10^2	4.4×10^0	5		
19	Ocetylphenol		140-66-9	-	-	-	-	-	-	-	-	6.8×10^{-5}	N.D.	-	-	-	-	6.0×10^{-3}	1.8×10^5	6.0×10^0	3.3×10^{-5}	39		
23	Acetylsalicylic acid		50-78-2	7.2×10^{-4}	4.6×10^3	1.0×10^2	7.9×10^4	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1.0×10^2	1.0×10^2	1.0×10^5	1.0×10^5	1.0×10^0	8	MSDS
24	Sulfathiazole		72-14-0	-	-	-	-	8.9×10^3	N.D.	4.0×10^2	9.6×10^1	-	-	-	-	-	-	9.6×10^1	1.5×10^6	9.6×10^2	6.4×10^4	27		
25	Atenolol		29122-68-7	7.0×10^3	2.2×10^2	2.2×10^2	7.2×10^3	-	-	-	-	4.1×10^1	-	-	-	-	-	4.1×10^1	4.4×10^2	4.4×10^5	4.1×10^2	9.4×10^4	25	Cleuvers, 2005
26	Caffeine		58-08-2	1.1×10^3	3.2×10^3	5.6×10^4	1.2×10^3	-	-	-	-	1.5×10^0	-	-	-	-	-	1.5×10^0	6.7×10^4	1.5×10^3	1.5×10^2	2.2×10^2	16	
27	Carbamazepine		298-46-4	1.1×10^2	1.8×10^2	1.8×10^2	1.1×10^2	4.2×10^1	-	-	-	3.4×10^1	-	-	-	-	-	4.2×10^1	4.1×10^1	4.1×10^2	4.2×10^4	1.0×10^2	1	MSDS
28	Clarithromycin		81103-11-9	2.1×10^2	6.2×10^2	1.2×10^1	7.0×10^2	2.6×10^0	2.5×10^0	5.0×10^0	-	-	-	-	-	-	-	5.0×10^0	2.6×10^1	2.6×10^4	5.0×10^3	1.9×10^1	11	Isidori, 2005
29	Diclofenac		15307-86-5	1.3×10^2	3.2×10^3	2.2×10^2	1.3×10^2	3.0×10^1	1.0×10^1	3.8×10^1	-	-	-	-	-	-	-	3.5×10^1	2.2×10^1	2.2×10^4	3.5×10^4	1.5×10^0	7	Ferrari, 2003
30	Erythromycin		114-07-8	1.8×10^4	3.2×10^3	5.6×10^3	1.8×10^4	1.6×10^0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1.6×10^0	1.3×10^5	1.3×10^5	1.6×10^5	1.2×10^2	18	

No	Compounds	Abb.	Cas No.	NIER, 2018			NIER, 2017	NIER, 2016a		NIER, NIER, 2016b	NIER, 2010		ME, KEITI, 2020	KEITI, 2019		KEITI, 2014	Kim et al. 2010		Max. (ngL ⁻¹)	EC50 (ngL ⁻¹)	PNEC MEC (ngL ⁻¹)	HQ	Ranks	Ref. EC50	
				pharm	hospital	STP		chemical	pharm, enviro.		2010a	2010b		STP	WWTP		com-plex	STP							
31	Ibuprofen		15687-27-1	5.9×10 ⁻²	1.7×10 ⁻¹	1.3×10 ⁻¹	7.2×10 ⁻²	3.7×10 ¹	8.6×10 ¹	-	N.D.	-	-	-	2.2×10 ¹	-	-	-	8.6×10 ¹	9.1×10 ⁰	9.1×10 ³	8.6×10 ⁴	9.5×10 ⁰	4	MSDS
32	Iopromide		73334-07-3	1.5×10 ²	8.3×10 ²	2.6×10 ²	5.3×10 ²	-	3.8×10 ⁰	-	3.8×10 ⁰	-	-	-	-	-	-	-	3.8×10 ⁰	2.6×10 ⁹	3.8×10 ³	1.4×10 ⁶	44		
34	Mefenamic acid		61-68-7	-	-	-	-	1.6×10 ¹	4.4×10 ¹	-	1.9×10 ⁰	-	1.6×10 ²	-	-	-	-	-	4.4×10 ¹	1.7×10 ³	4.4×10 ⁴	2.6×10 ¹	2		
35	Metoprolol		37350-58-6	-	-	-	-	-	6.0×10 ³	-	6.0×10 ³	-	-	-	-	-	-	-	6.0×10 ³	2.3×10 ⁵	6.0×10 ¹⁰	2.6×10 ⁵	40		
36	Naproxen		22204-53-1	3.3×10 ⁻³	1.2×10 ²	2.6×10 ³	3.5×10 ³	-	-	-	N.D.	-	-	-	-	-	-	-	1.2×10 ²	1.7×10 ⁵	1.2×10 ¹⁰	7.3×10 ⁵	34	Cleuvers, 2003	
38	Sulfamethazine		57-68-1	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	6.3×10 ³	6.0×10 ³	-	3.1×10 ¹	-	5.1×10 ²	-	-	-	-	-	3.1×10 ¹	1.5×10 ⁶	3.1×10 ¹⁰	2.0×10 ⁴	30		
39	Sulfamethoxazole		723-46-6	3.3×10 ⁻³	1.5×10 ²	6.8×10 ³	3.5×10 ³	-	1.3×10 ³	-	5.4×10 ²	-	2.2×10 ²	2.3×10 ²	5.0×10 ³	-	-	-	5.4×10 ²	2.4×10 ⁶	5.4×10 ¹⁰	2.3×10 ⁵	41		
40	Trimethoprim		738-70-5	2.8×10 ⁻³	8.3×10 ³	3.8×10 ³	3.0×10 ³	-	3.2×10 ²	-	3.2×10 ²	-	9.7×10 ³	2.4×10 ²	4.0×10 ³	-	-	-	3.2×10 ²	9.2×10 ¹	9.2×10 ⁴	3.5×10 ⁴	29	MSDS	
42	Acetaminophen		103-90-2	3.8×10 ⁻³	2.9×10 ³	N.D.	5.4×10 ³	4.7×10 ⁰	1.8×10 ¹	-	9.7×10 ¹	-	-	5.0×10 ³	7.7×10 ²	N.D.	-	-	3.4×10 ²	2.0×10 ¹	3.4×10 ⁴	1.7×10 ¹	3	Han, 2006	
43	Amoxicillin		26787-78-0	-	-	-	-	1.3×10 ¹	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1.3×10 ¹	1.3×10 ⁶	1.3×10 ¹⁰	1.0×10 ⁴	33		
44	Cefaclor		53994-73-3	-	-	-	-	2.6×10 ⁰	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	2.6×10 ⁰	4.5×10 ⁶	2.6×10 ¹⁰	5.8×10 ⁴	28		
46	Cefradine		38821-53-3	3.3×10 ⁻³	2.9×10 ³	6.8×10 ⁴	3.5×10 ³	-	4.5×10 ¹	-	4.5×10 ¹	-	-	-	-	-	-	-	4.5×10 ¹	1.0×10 ²	4.5×10 ⁵	4.5×10 ³	20	Kim, 2017	
47	Cephalexin		23325-78-2	-	-	-	-	-	1.8×10 ¹	-	1.8×10 ¹	-	-	-	-	-	-	-	1.8×10 ¹	3.8×10 ⁶	1.8×10 ¹⁰	4.8×10 ⁵	37		
48	Chlortetracycline		57-62-5	-	-	-	-	-	8.0×10 ³	-	8.0×10 ³	-	-	-	-	-	-	-	2.4×10 ²	4.8×10 ⁷	2.4×10 ⁵	5.0×10 ³	19		
49	Ciprofloxacin		85721-33-1	1.5×10 ⁻²	4.6×10 ³	2.6×10 ³	1.1×10 ²	-	-	-	N.D.	-	-	-	-	-	-	-	1.5×10 ²	1.0×10 ¹	1.5×10 ⁴	1.5×10 ³	21	Li, 2019	
52	Fenbendazole		43210-67-9	-	-	-	-	-	5.0×10 ³	-	5.0×10 ³	-	-	-	-	-	-	-	5.0×10 ³	3.6×10 ³	5.0×10 ⁰	1.4×10 ³	22		
53	Flortfenicol		73231-34-2	-	-	-	-	7.0×10 ¹	1.1×10 ⁰	-	1.1×10 ⁰	-	-	-	-	-	-	-	1.1×10 ⁰	9.3×10 ⁶	1.1×10 ¹⁰	1.2×10 ⁴	31		

No	Compounds	Abb.	Cas No.	NIER, 2018			NIER, 2017	NIER, 2016a pharm, envir.	NIER, NIER, 2016b	NIER, 2010		ME, KETI, 2020	KEITI, 2019		KEITI, 2014	Kim et al. 2010		Max. (ngL ⁻¹)	EC50 PNEC MEC (ngL ⁻¹)	HQ	Ranks	Ref. EC50
				pharm	hos-pital	STP				che-mical	NIER, 2010		Sihwa wol	KEITI, 2019		WWT P	com-plex					
54	Lincomycin		154-21-2	-	-	-	3.6× 10 ⁻¹	-	-	1.4× 10 ⁻¹	-	-	-	-	-	-	-	3.6× 10 ⁻¹	5.6× 10 ⁶	6.5× 10 ⁵	35	
57	Propranolol		525-66-6	2.1× 10 ⁻³	9.0× 10 ⁵	9.0× 10 ⁵	2.6× 10 ²	-	-	2.7× 10 ²	-	-	-	-	-	-	-	2.7× 10 ²	3.7× 10 ⁴	7.3× 10 ⁴	26	
58	Ranitidine		66357-35-5	-	-	-	-	-	-	-	2.6× 10 ⁻¹	-	-	-	-	-	-	2.6× 10 ⁻¹	4.3× 10 ⁶	6.1× 10 ⁵	36	
59	Perfluorooctanesulfonic acid	PFOS	1763-23-1	-	-	-	-	-	-	-	-	9.0× 10 ⁻²	5.6× 10 ¹	-	-	-	-	5.6× 10 ⁻¹	1.7× 10 ⁴	3.3× 10 ²	13	
60	Perfluorooctanoic acid	PFOA	335-67-1	-	-	-	-	-	-	-	1.7× 10 ⁻³	6.9× 10 ⁻¹	2.0× 10 ⁰	-	-	-	-	2.0× 10 ⁰	7.4× 10 ³	2.7× 10 ¹	10	
61	Perfluorohexanesulfonic acid	PFHxS	355-46-4	-	-	-	-	-	-	-	-	3.7× 10 ⁰	1.2× 10 ⁻¹	-	-	-	-	3.7× 10 ⁰	1.9× 10 ⁵	1.9× 10 ²	17	
63	Perfluoroheptanoic acid	PFHpA	375-85-9	-	-	-	-	-	-	-	2.8× 10 ⁻³	-	-	-	-	-	-	2.8× 10 ⁻³	2.5× 10 ⁴	1.1× 10 ⁴	32	
64	Perfluorohexanoic acid	PFHxA	307-24-4	-	-	-	-	-	-	-	6.8× 10 ⁻³	1.8× 10 ⁰	1.4× 10 ⁰	-	-	-	-	1.8× 10 ⁰	7.9× 10 ³	2.2× 10 ²	15	
65	Perfluorononanoic acid	PFNA	375-95-1	-	-	-	-	-	-	-	-	3.5× 10 ⁻¹	8.9× 10 ⁻¹	-	-	-	-	8.9× 10 ⁻¹	2.2× 10 ³	4.0× 10 ¹	9	
66	Perfluoropentanoic acid	PFPA	2706-90-3	-	-	-	-	-	-	-	-	2.3× 10 ⁻¹	3.0× 10 ¹	-	-	-	-	3.0× 10 ⁻¹	2.5× 10 ⁵	1.2× 10 ³	24	
77	Nickel		7440-02-0	-	-	-	-	1.6× 10 ⁰	-	-	2.0× 10 ⁰	-	-	-	-	-	-	2.0× 10 ⁰	5.1× 10 ¹	4.0× 10 ⁰	6	MSDS
80	Perchlorate		14797-73-0	-	-	-	-	1.3× 10 ¹	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1.3× 10 ¹	3.4× 10 ⁵	3.7× 10 ²	12	Nagel, 2021

4. Conclusion

신중 미량유해물질 중에서 환경부가 지정한 1순위 80종 중에서 국내 폐수처리시설 방류수 및 방류 하천 인근에서 유해지수를 도출하고 상대적인 순위를 비교하였다. 본 연구를 통해 얻은 결론을 다음과 같이 정리하였다.

- 1) 80종 중에서 국내 하폐수처리시설 폐수 방류수 및 방류수 인근 하천에서 발견된 물질은 45종이었다. 발견된 물질에서 가장 높은 농도를 보이는 물질은 Acetaminophen이었으며 그 다음으로 Chlortetracycline, Acetylsalicylic acid, Mefenamic acid, Ibuprofen, Carbamazepine, Diclofenac 등 대부분 잔류의약품물질이었다.
- 2) 환경 농도와 생물 독성을 종합한 위해성 순으로는 Cabamazepine, Mefenamic acid, Acetaminophen, Ibuprofen, Nonylphenol, Nickel, Erythromycin, Acetylsalicylic acid의 순이었으며, 이들 물질은 HQ가 1 이상으로 유해성이 시급한 물질이었다.
- 3) 유해지수 순으로 20순위 안에 드는 물질군은 잔류의약품물질 11종, 잔류성 유기오염물질 5종, 내분비계장애물질 2종, 금속 및 무기물 2종으로 잔류의약품물질과 과불화화합물 계열이 많았다.
- 4) 잔류성유기화합물 및 농약류 중에서 과불화화합물 계열의 물질은 80순위에 포함된 14종 중에서 PFOS, PFOA, PFHxS, PFHxA, PFNA 등 5종이 20 순위 안에 들 정도로 물환경 내의 유해성이 시급한 물질군으로 대두되고 있었다.

본 연구는 최근 환경부에서 발표되어 시급성에서 주목받고 있는 신중유해물질 1순위에 대해 국내에서 조사된 보고 사례를 검토하여 유해지수와 상대적 순위를 도출하였다. 신중유해물질에 대응하기 위한 방안으로는 관련 물질의 사용과 배출을 제한하는 정책적인 접근과 방류 이전 무해 처리를 통한 기술적 해결 방안이 고려된다.

본 연구에서 다룬 내용은 이를 위한 국내 배출원 중심의 조사 사례를 근거로 한 선제적인 조치이다. 신중 유해물질을 배출하는 폐수처리장에 대해 전국 단위의 배출원별 방류 사례를 중심으로 환경 농도와 위해성을 동일 선상에서 비교하였다. 이는 상기 정책 접근과 기술 해결 접근을 고려할 때 상대적 비교에 근거한 물질 선정이라는 토대로 이후의 과정을 위한 기초 자료로 활용될 수 있을 것이다.

Acknowledgement

Authors are very grateful for the funds [project: 2021003 040001] provided by the Korea Ministry of Environment.

References

Bound, J. P. and Voulvoulis, N. (2004). Pharmaceuticals in the aquatic environment a comparison of risk assessment strategies, *Chemosphere*, 56, 1143-1155.

Cleuvers, M. (2003). Aquatic ecotoxicity of pharmaceuticals including the assessment of combination effects, *Toxicology Letters*, 142, 185-194.

Cleuvers, M. (2005). Initial risk assessment for three b-blockers found in the aquatic environment, *Chemosphere*, 59, 199-205.

Dearden, J. (2002). Prediction of environmental toxicity and fate using quantitative structure activity relationships (QSARs), *Journal of the Brazilian Chemical Society*, 13(6), 754-762.

Ferrari, B., Paxeus, N., Giudice, R., Pollio, A., and Garric, J. (2003). Ecotoxicological impact of pharmaceuticals found in treated wastewaters: Study of carbamazepine, clofibrac acid, and diclofenac, *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 55, 359-370.

Han, G., Hur H., and Kim S. (2006). Ecotoxicological risk of pharmaceuticals from wastewater treatment plants in Korea: Occurrence and toxicity to *Daphnia magna*, *Environmental Toxicology and Chemistry*, 25, 265-71.

Isidori, M., Lavorgna, M., Nardelli, A., Pascarella L., and Parrella A. (2005). Toxic and genotoxic evaluation of six antibiotics on non-target organisms, *Science of the Total Environment*, 346, 87-98.

Kim B., Ji K., Kho Y., Kim. P. Park, K. Kim, K. Kim, Y., Kim K., and Choi, K. (2017). Effects of chronic exposure to cefadroxil and cefradine on *Daphnia magna* and *Oryzias latipes*, *Chemosphere*, 185, 844-851.

Kim, G., Roh, J., Bin, J., and Kim, C. (2010). Investigating of nitrosamines in small tributary rivers, sewage treatment plants and drinking water treatment plants, *Journal of Korean Society on Water Environment*, 26(3), 446-453. [Korean Literature]

Korea Environmental Industry & Technology Institute (KIETI). (2014). *Development of advanced treatment systems for high quality effluent removed nutrient and trace of non-degradable matters*, GT-11-B-01-005-0, Korea Environmental Industry & Technology Institute. [Korean Literature]

Korea Environmental Industry & Technology Institute (KIETI). (2019). *Saengmulhageog Gongjeong Gaeseon-Eul Tonghan Ha-Pyesu Milyang-Yuhaemuljil Cheolihyoyul Hyangsang Gisul Siljeunghwa Choejongbogoseo*, 2016000200008, Korea Environmental Industry & Technology Institute. [Korean Literature]

Korea Environmental Industry & Technology Institute (KIETI). (2020). *Yuhaehwahagmuljil Suhwangyeong Yuchul Moniteoling Mich Yuchulbangji Siseutem Gaebal Tonghabhyeong Gwaje Choejongbogoseo*, 2017001960001, Korea Environmental Industry & Technology Institute. [Korean Literature]

Lee, J. and Kim, I. (2020). Comparison of elimination performance of pharmaceuticals and personal care products (PPCPs) by 254 nm and 185/254 nm lamps in UV-AOP process of the tertiary sewage treatment, *Journal of the Korean Society of Urban Environment*, 20(3), 165-170.

Lee, J. and Ko, T. (2019). Application of *Daphnia magna* monitoring system for real-time ecotoxicity assessment,

- Journal of Digital Convergence*, 17(10), 1-12.
- Li, Y. Zhang, L., Liu, X., and Ding, J. (2019). Ranking and prioritizing pharmaceuticals in the aquatic environment of China, *Science of the Total Environment*, 658, 333-342.
- Ministry of Environment (ME). (2018). *Gisulhyeogsin-Eulo Sanghasudo Seobiseu Gaeseon...1,882Eog-Won Tuja*, Press-Description, 2018. 09. 17. [Korean Literature]
- Ministry of Environment (ME). (2019). 2019 *Nyeondo Hwangyeong-Gisulgaebalsa-Eob Singyugwaje Seonjeong Gong-Go*, Ministry of Environment Notice 2019-4. [Korean Literature]
- Ministry of Environment (ME). (2020). *Nagdong-Gang Milyanghwahagmuljil Josa, Gugnaeoe Sujilgijun 39Jong Gijun Inae*, Press release, 2020. 12. 18. [Korean Literature]
- Nagel, A., Cuss, C. Goss, G., Shotyky W., and Glover C. (2021). Chronic toxicity of waterborne thallium to *Daphnia magna*, *Environmental Pollution*, 268 115776.
- National Institute of Environmental Research (NIER). (2010). *Application of Bioassay for Endocrine Disrupting Chemicals (III)*, NIER NO. 2010-53-1228, National Institute of Environmental Research. [Korean Literature]
- National Institute of Environmental Research (NIER). (2011). *Janlyuuiyagmuljil Bunseogbangbeob Yeongu Mich Siltaejosa (IV)*, National Institute of Environmental Research. [Korean Literature]
- National Institute of Environmental Research (NIER). (2016a). *Risk Assessment of Pharmaceuticals with Potential Ecological Risks*, NIER-SP2016-221, National Institute of Environmental Research. [Korean Literature]
- National Institute of Environmental Research (NIER). (2016b). *Survey on the water pollutants list in industrial wastewater by industrial classification*, NIER-RP2016-279, National Institute of Environmental Research. [Korean Literature]
- National Institute of Environmental Research (NIER). (2017). *Monitoring of hazardous substances in environmental media for exposure assessment*, NIER-SP2017-307, National Institute of Environmental Research. [Korean Literature]
- National Institute of Environmental Research (NIER). (2018). *A Study on mass balance and management measures of micropollutants in the public sewage treatment works (I)*, NIER-RP2018-207, National Institute of Environmental Research. [Korean Literature]
- Organization for Economic Cooperation and Development (OECD). (1995). *Overview of SAR for Environmental Endpoints*, Contract #EV5V-CT92-0211.
- Park, S., Kang, H., Shin, H., Ryoo, I., Choi, K., Kho, Y., Park, K., Kim, K., and Ji, K. (2020). Ecological risk assessment of pharmaceuticals in the surface water near a pharmaceutical manufacturing complex in Korea, *Journal of Environmental Health Sciences*, 46(1), 45-64.