



국내·외 하수도시설 미량유기물질의 발생 특성 및 관리체계에 대한 이해

Study on occurrence and management of organic micropollutants in sewer systems

정동환¹·함상이²·이원석¹·정현미¹·김현욱^{2*}

Dong-Hwan Jeong¹·Sang-Yee Ham²·Wonseok Lee¹·Hyenmi Chung¹·Hyunook Kim^{2*}

¹국립환경과학원 상하수도연구과, ²서울시립대학교 환경공학과

¹National Institute of Environmental Research, ²University of Seoul

ABSTRACT

As the modern society is rapidly developing and people become affluent in materials, many new chemical compounds in different forms of products (e.g., antibiotics, pesticides, detergents, personal care products and plastic goods) are produced, used, and disposed of to the environments. Some of them are persistently having a harmful impact on the environment and mimicking endocrine properties; in general they are present in the environment at low concentrations, so they are called organic pollutants. These organic micropollutants flow to sewage treatment plants via different routes. In this study, the generation characteristics, exposure pathways, detection levels, and environmental impacts of organic micropollutants were critically reviewed. In addition, currently available risk assessment methods and management systems for the compounds were reviewed. The United States Environmental Protection Agency (US EPA), for example, has monitored organic micropollutants and set the monitoring and management of some of the compounds as a priority. To effectively manage organic micropollutants in sewer systems, therefore, we should first monitor organic micropollutants of potential concern and then make a watch list of specific substances systematically, as described in guidelines on listing water pollutants in industrial wastewater.

Key words: Organic micropollutants, Sewer system, Sewage treatment plant, Generation characteristics, Management system

주제어: 관리체계, 미량유기물질, 발생특성, 하수도시설, 하수처리시설

1. 서론

산업이 고도화됨에 따라 세계적으로 8천 8백만 종의 화학물질이 개발되어 12만 종이 상업적으로 유통되는 것으로 추정된다. 국내에서 사용되는 화학물질은 약 4만 여종 이르며 매년 400 여종의 화학물질이 수입되거나 유통되어 사용이 증가하고 있다(MOE, 2014). 이러한 화학물질 중 의약품(Pharmaceuticals),

내분비계 장애물질(Endocrine disruptors, EDs) 과불화합물(Perfluorinated compounds, PFCs) 등은 자연환경 및 수계에 잔류하여 생태계를 교란하거나 환경오염을 유발하기도 한다. 최근에는 기기분석의 발달로 극미량의 농도까지 검출이 가능하게 되어 새로운 미량 환경오염물질의 존재가 확인되고 있다(Snyder et al., 2008). 이렇게 잔류성이 있는 화학물질은 하천이나 하수처리시설 유입수 등에서 검출되기도 한다. 이러한 미량유기물질은 매우 낮은 농도로 존재하고 있어 제어와 관리를 위한 대책 마련이 쉽지 않다. 따라서 유역 하수도

Received 30 August 2017, revised 26 November 2017, accepted 29 November 2017

*Corresponding author: Hyunook Kim (E-mail: h_kim@uos.ac.kr)

pp. 481-490
pp. 491-499
pp. 501-510
pp. 511-519
pp. 521-527
pp. 529-537
pp. 539-549
pp. 551-566
pp. 567-575
pp. 577-586
pp. 587-597
pp. 599-609
pp. 611-618
pp. 619-628

Table 1. Status of manufacturer for pharmaceuticals, quasi-drugs, and cosmetics (Unit : EA)

Classification	Sum	Pharmaceuticals	Quasi-drugs	Cosmetics
2009	1,835	580	478	777
2010	1,888	593	413	882
2011	2,082	581	533	968
2012	2,172	647	547	978
2013	2,747	684	528	1,535
2014	2,883	612	521	1,750
2015	3,151	586	548	2,017

※ Source : MFDS, 2016.

Table 2. Terminology of organic micropollutants

Item	Definition	Organizations
Micropollutants	Pollutants which exist in very small traces in water.	European environment agency (EEA)
Emerging pollutants	A substance currently not included in routine environmental monitoring programs and which may be candidate for future legislation due to its adverse effects and/or persistency.	Network of reference laboratories for monitoring of emerging environmental pollutants (NORMAN)
Emerging substances	A substance that has been detected in the environment, but which is currently not included in routine monitoring programs and whose fate, behavior, and (eco)toxicological effects are not well understood.	
Contaminants of emerging concerns	Chemicals are being discovered in water that previously had not been detected or are being detected at levels that may be significantly different than expected.	United States Environmental Protection Agency (US EPA)

※ Source : Nam and Zoh, 2013.

로 유입되는 잔류의약품, 알킬페놀(Alkylphenol), 프탈레이트(Phthalates), 다환방향족탄화수소(Polycyclic aromatic hydrocarbons, PAHs), PBDEs(Polybrominated diphenyl ethers) 등의 화합물에 대한 관심이 높아지고 있다(Kim et al., 2013). 1990년 중반 US EPA의 물관리국(Office of Water)은 환경문제를 일으키는 오염물질을 신규오염물질(Contaminants of emerging concern, CECs)로 지정하고 포괄적으로 관리하고 있다(Ankley et al., 2008).

국내에서 사용되고 있는 의약품 및 의약품, 화장품 등의 의약품 및 생활화학 제품(Pharmaceuticals and Personal Care Products, PPCPs)을 생산하는 제조업체 현황은 Table 1과 같다. 전체 제조업체의 수는 2015년 기준 3,151 개이며, 이 중 62 %에 해당하는 제조업체가 서울, 인천, 경기도에 위치하고 있다(MFDS, 2016).

이러한 미량유기물질은 가정이나 공장에서 배출되면 하수관로 및 연계처리를 통해 공공하수처리시설로 유입된다. 공공하수처리시설로 유입된 미량유기물질

은 물리·화학·생물학적 공정을 거쳐 제거되며 일부 미량유기물질은 처리되지 않고 공공수역으로 방류되기도 한다. 이 때 일부 미량유기물질은 잔류성이 강하기 때문에 분해되지 않고 수계 남아 내분비계의 정상적인 기능을 방해하기도 하지만 의약품 및 생활화학 제품(PPCPs)은 아직 물환경에 미치는 장기적인 영향은 밝혀지지 않았다. 따라서 본 연구에서는 미량유기물질이 우리 생활과 물 환경에 미치는 영향에 대한 이해를 돕기 위해 국내외 하수처리시설의 미량유기물질 연구 사례를 통하여 미량유기물질의 발생 특성 및 노출 경로, 발생원에서 검출사례, 환경에 미치는 영향, 해외 미량유기물질 관리체계에 대해 고찰해 보고자 한다.

2. 미량유기물질의 발생 특성 및 노출 경로

미량유기물질은 Table 2에 나타난 것과 같이 미량오염물질, 미량유기오염물질, 신규오염물질을 총칭하는 것을 말한다. 즉 미량유기물질은 ng/L 또는 µg/L 단위의

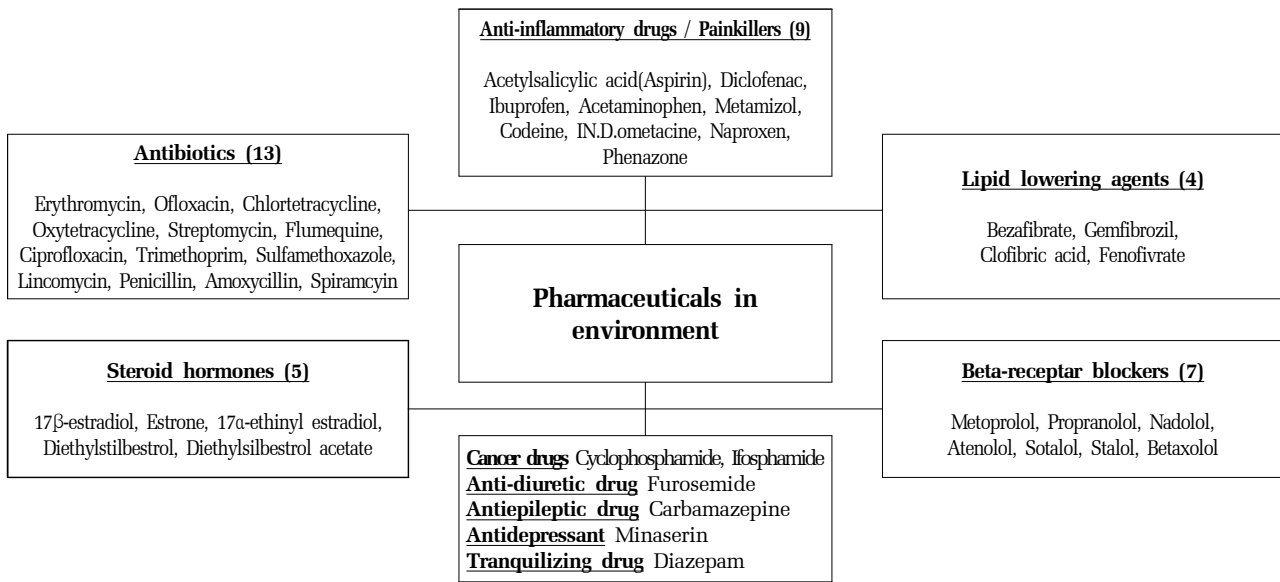


Fig. 1. Pharmaceuticals in environment.
 ※ Source : Nikolaou et al., 2007.

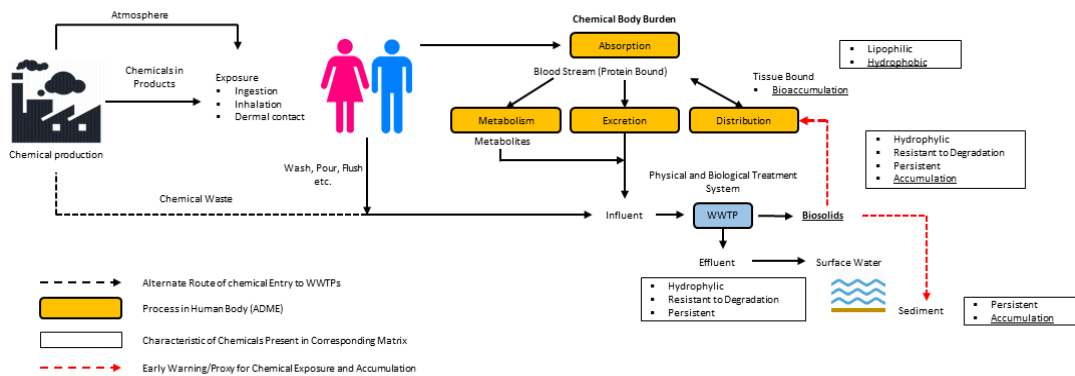


Fig. 2. Sources and release pathways of organic micropollutants in Environment.
 ※ Source : Venkatesan and Halden, 2014.

낮은 농도로 존재하는 유기 오염물질을 의미한다. 미량유기물질에는 여러 가지로 분류되고 있는데, 의약품 및 생활화학 제품(PPCPs)은 환경에 유입되어 생태계에 영향을 미치는 의약품질(품), 개인이 다양한 목적으로 사용하는 생활화학 제품(Personal care products, PCPs), 내분비계 장애물질(Endocrine disruptors, EDs)을 축약하여 나타낸다(Kosma et al., 2014). 의약품 및 생활화학 제품에는 (i) 질병의 예방, 진단, 치료, (ii) 생리적, 정신적, 미적, 정서적 기능의 개선, (iii) 활성 화합물의 조제 등을 목적으로 인간, 동물 혹은 농작물 등에 투여되거나 살포되는 모든 화합물질을 포함한다(Daughton, 2007). 또한 의약품질은 치료 목적에 따라 항생제(Antibiotics), 비스테로이드성 해열제

(Non-steroidal anti-inflammatory), 지질조절제(Blood lipid lowering agents), 베타수용 차단제(Beta-blocker), 암치료제(Cancer therapeutics), 신경치료제(Neuroactive compounds) 등으로 분류할 수 있다(Fig. 1).

의약품질은 인간뿐만 아니라 동물에게 질병 치료를 위해 사용되며 농산물 생산 및 수산물 양식을 위해 광범위하게 사용되고 있다. 그러나 의약품질은 Fig. 2와 같이 사용 후 버려지면 하수처리시설을 거쳐 환경 중으로 유입되어 자연상태에 잔류하게 된다. 최근 들어서 의약품질이 자연상태에서 어떻게 유입되고 어느 정도의 농도로 존재하며, 노출된 인간, 동물 및 식물에 미치는 영향에 관심이 늘어나고 있다. 유럽과 미국, 캐나다 등의

pp. 481-490
 pp. 491-499
 pp. 501-510
 pp. 511-519
 pp. 521-527
 pp. 529-537
 pp. 539-549
 pp. 551-566
 pp. 567-575
 pp. 577-586
 pp. 587-597
 pp. 599-609
 pp. 611-618
 pp. 619-628

Talbe 3. Kinds and effects of endocrine disruptor

Classification	Phthalate	Alkyl phenol	Pesticides	Bisphenol-A	Dioxine	PCBs	Diethylstilbestrol (DES)
Effects	Carcinogenesis	Carcinogenesis, Strong toxicity	Reproductive harm, digestive system abnormalities, inability of calcification	Feminization	Carcinogenesis, immune toxicity, weight loss, reproductive and growthful harm	Immune function reduction	Lack of appetite, nervous disorder, decline of children's space perception

선진국에서는 쓰레기, 지하수, 하천수 등 광범위한 환경 중에 잔류하는 활성상태의 의약품물질에 대한 조사가 활발하게 진행되고 있다(Dai et al., 2014). 이렇게 환경 중에 잔류하는 의약품물질은 다양한 경로를 통해서 생물 체 내로 유입되고, 내분비계 교란 및 만성 독성, 변이성 등을 유발할 수 있다(Nicholson, 2006).

인체 또는 동물에 투여되는 항생물질 중에서 약 30~90%가 소변을 통해 활성물질로서 배출되며 환경 중에 다양한 의약품물질이 존재한다(Lee et al., 2016). 또한 의약품물질의 물리·화학적, 생물학적 특성이 치료 목적에 맞게 조정되기 때문에 환경으로 유입되면 생태계에게 나쁜 영향을 줄 수 있다. 1990년대 인도에서 의약품물질인 디클로페낙(Diclofenac)에 노출되어 독수리 개체가 생물학적 농축을 통해 95% 이상 감소하였다고 한다(Zorrilla et al., 2015). 또한 일부 하수처리시설에서 하천으로 배출된 에스트로젠 물질로 인해서 하천에서 서식 중이던 물고기들이 암수 중간의 성징(intersex)을 갖는다든지 번식능력의 저하가 초래되었다고 한다(Niemuth and Klaper, 2015; Hicks et al., 2016).

이처럼 수계 내 존재하는 미량 의약품물질에 의해서 생태계가 영향을 받는다. 물론 의약품물질은 수중 미생물 등에 의해 자연적으로 분해될 수 있지만 의약품물질이 계속해서 수계로 유입되어 수계 내에는 일정 농도 이상의 의약품물질이 존재하는 것으로 나타났다(Tran et al., 2013). 최근 우리나라에서도 인체 및 동물에 사용되는 소염제, 항생제, 해열제, 진통제 등 다양한 의약품물질이 4대강유역 하천에서 검출된다고 한다(NIER, 2006).

미량유기물질 중 내분비계 장애물질은 내분비계의 정상적인 기능을 방해하는 화학물질을 의미한다. 즉 환경부는 내분비계 장애물질은 생물체 내에 들어가 내분비계(호르몬계)의 정상적인 작용을 방해하여 생식이상, 정자수 감소, 암수변환, 기형, 각종 암 등 생물체 또는 그 자손의 건강에 위대한 영향을 나타낼 수 있는 화학물질로 정의한다(Kim and Hong, 2013). 또한 미국 환경보호청도

내분비계 장애물질을 인체 항상성 유지와 발전과정을 조절하는 생체 내 호르몬의 생산, 분비, 이동, 대사, 결합, 작용 또는 제거를 간섭하는 외인성 물질로 정의하고 있다(US EPA, 1998). 이와 같이 일반적으로 내분비계 장애물질은 인체 내 호르몬의 합성, 저장, 이동, 정화 기능에 장애를 일으키는 것으로 알려져 있다. 내분비계 장애물질은 잔류성, 생물축적성, 미세효과, 상승효과, 장거리 이동성, 생식독성 및 세대간 유전 효과의 특성을 갖고 있다(Kim, 2012).

현재 인체의 내분비계에 장애를 일으킬 수 있다고 추정되는 물질은 각종 산업용 화학물질(원료물질), 살충제 및 제초제 등의 농약, 다이옥신 등의 유기염소계 화학물질, 수은 등과 같은 중금속, 호르몬 유사물질, 의약품물질 등이 있다. 국제동물보호기금(World Wildlife Fund, WWF)에서 1997년 67종, 미국에서 73종, 일본 후생성에서 산업용 화학물질, 의약품, 식품첨가물 등 140여종의 물질, 일본 환경성에서 65종의 물질을 내분비계 장애물질로 분류한 바 있으나, 내분비계 장애가 의심되는 물질이 계속 발견되고 있어 정확한 현황을 말하기 어렵다. 많은 나라에서 이러한 미량유기물질에 대해 연구를 실시하고 있으며 위해성을 규명하기 위해 노력 중에 있다(Jung and Ma, 2016). 또한, 핵안전협약, 스톡홀름 협약(Stockholm convention) 등과 같이 미량유기물질이 환경 중으로 배출되는 것을 억제하기 위한 국제 협약과 규제가 제안되고 있다. 따라서 이러한 국제적인 동향에 발맞추어 국내에서도 환경 중 미량유기물질에 대한 모니터링 및 관리에 관심을 가져야 한다.

3. 국내외 하수도시설의 미량유기물질 검출 사례 및 환경에 미치는 영향

3.1 의약품물질 및 생활화학 제품(PCPs)

의약품물질은 200~1000 Da의 분자량을 갖는 복잡한 분



자이며, 유럽에서만도 4,000종 이상의 의약품질이 환경 중으로 배출되고 있다(Mompelat et al., 2009). 의약품질은 고령화 사회로 접어들어 갈수록 그 사용량이 점점 더 증가되고 있다. 우리나라는 의약품질 중 항생제 사용량이 OECD 국가 중 6번째로 높은 수준으로 하천, 생활하수 및 가축분뇨 등에서 여러 종류의 의약품질이 검출되는 것으로 보고되었다(MFDS, 2008).

일반적으로 하·폐수에서 검출되는 의약품질은 인체나 동식물의 질병 예방, 진단, 치료에 투여되는 화학물질이다. 국내 하·폐수처리시설의 유입수 및 방류수, 하천 지표수 등에서 잔류되는 의약품질을 조사한 연구결과에 따르면 일부 의약품질이 미량 검출되는 것으로 나타났다(NIER, 2010a). 국내 환경 중 의약품질에 대한 연구는 최근 활발히 진행되고 있으며, 주로 검출되는 물질로는 카바마제핀, 설파계 항생물질, 린코마이신, 나프록센, 메페남산, 아세트아미노펜 등이 있다. 또한, X선 조

영제인 아이오프로마이드와 아테놀롤도 비교적 검출빈도가 높은 것으로 알려져 있다(NIER, 2012). 최근 의약품질에서 자외선 차단제, 항균제 등의 생활화학제품(PCPs)으로 점차 조사범위가 확대되는 추세에 있다.

한강수계의 하천을 대상으로 진행한 모니터링 결과를 살펴보면, 상대적으로 소수성을 갖는 카바마제핀 등 일부 의약품질은 화학적 산소요구량(COD)과 유의한 상관성을 갖는 것으로 나타났다(Fig. 3). 이러한 현상은 하수처리시설에서 일부 완전히 제거되지 않은 의약품질이 방류수를 통해 공공수역으로 배출되는 것을 의미한다. 한강 수계의 잔류의약품질 농도(< 1 ng/mL, Choi et al., 2008)는 외국 하천(0.001~10,000 ng/mL, Ebele et al., 2017)에 비하여 높은 농도는 아니지만 꾸준히 검출되고 있다. 특히 공공수역으로 배출된 미량유기물질의 구조변성 대사체(Metabolite)에 대한 분석법 정립 및 거동, 생태계에 미치는 영향은 국

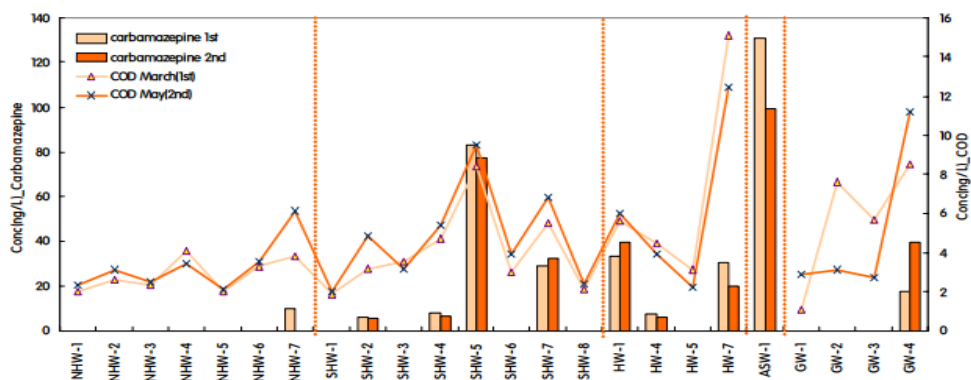


Fig. 3. The status of carbamazepine in the Han-river.
 ※ Source : KEITI, 2012.

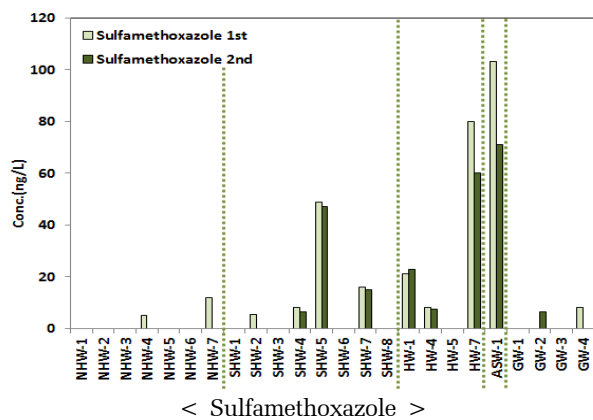
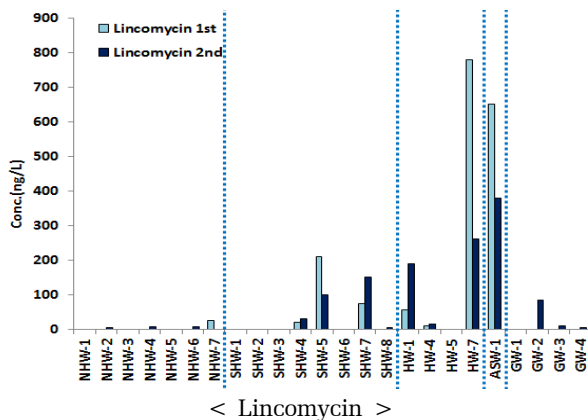


Fig. 4. The status of pharmaceuticals in the Han-river.
 ※ Source : KEITI, 2012.

pp. 481-490
 pp. 491-499
 pp. 501-510
 pp. 511-519
 pp. 521-527
 pp. 529-537
 pp. 539-549
 pp. 551-566
 pp. 567-575
 pp. 577-586
 pp. 587-597
 pp. 599-609
 pp. 611-618
 pp. 619-628

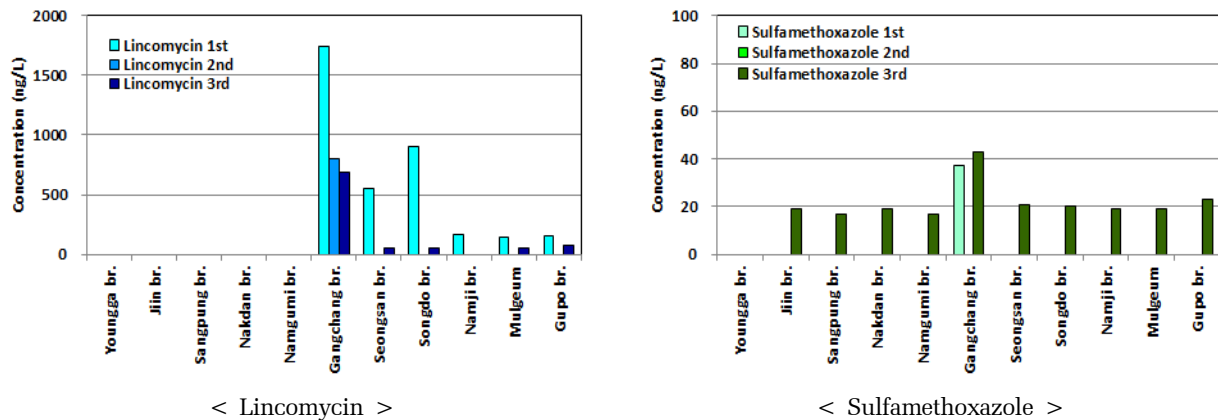


Fig. 5. The status of pharmaceuticals in the Nakdong-river.

※ Source : Nokdong-river Watershed Management Committee(NWMC), 2011.

Table 4. The status of organic micropollutants at influent and effluent of public sewage treatment works(PSTW) in our and foreign countries.

Selected compounds	Sampling sites	Influent (μg/L)	Effluent (μg/L)	Removal (%)
Acetaminophen	Korea, Spain, WB	1.57-56.9	ND-0.03	98.7-100
Diclofenac	EU-wide, Greece, Korea, Sweden, Switzerland, UK, WB	<0.001-94.2	<0.001-0.69	<0-81.4
Ibuprofen	China, EU-wide, Korea, Sweden, UK, US, WB	<0.004-603	ND-55	72-100
Naproxen	Greece, Korea, Spain, Sweden, UK, WB	<0.002-52.9	<0.002-5.09	43.3-98.6
Sulfamethoxazole	EU-wide, France, Korea, Spain, Sweden, Switzerland, UK, WB	<0.003-0.98	<0.003-1.15	4-88.9
Trimethoprim	China, EU- wide, Korea, Spain, UK	0.06-6.80	<0.01-3.05	<0-81.6
Nonylphenol	China, France, Germany, Greece, Italy, Spain, US, WB	<0.03-101.6	<0.03-7.8	21.7-99
Octylphenol	China, France, Germany, Italy, Spain, UK, US	<0.2-8.7	0.004-1.3	<0-96.7
Bisphenol A	China, France, Greece, US, WB	<0.013-2.14	<0.03-1.10	62.5-99.6
DBP	Austria, China	ND-11.8	ND-4.13	73.6-75.5
DEHP	Austria, China, US	0.003-70.0	0.0001-54.0	25-97

※ Source : Luo et al., 2014 revised again.

내에서 많은 연구가 필요한 분야이다.

한강수계에서 인구활동이 적고 하수처리시설이 부족한 북한강수계에 비해 인구가 밀집되어 있고, 하수처리시설이 다수 위치한 남한강유역에서 잔류의약품 농도가 높게 검출되었다(Fig. 4, KEITI, 2012). 최근에 조사된 낙동강유역에서는 잔류의약품 농도가 상류에 비하여 성서·구미 공단과 인구밀집 지역과 같이 하천 하류로 갈수록 증가되는 추세를 보여 의약품의 검출은 인구활동 및 하폐수처리시설의 위치와 매우 밀접한 연관을 가지는 것으로 보인다(Fig. 5, NWMC, 2011). 이에 대한 구체적인 사례로써 아이오프로마이드(Iopromide)의 경우 낙동강 하류에서 0.5 ng/mL까지

검출되었다(Lee et al., 2012)

국내에서 주로 사용되는 의약품질과 유럽에서 사용되는 의약품질 사이에는 종류에서 차이가 없었으며, 유럽의 하수처리시설 유입수 및 배출수에서 의약품질 검출 농도범위는 국내와 유사하거나 경우에 따라 국내 하수처리시설에서 검출된 미량유기물질 농도보다 낮은 것으로 나타났다. 이는 우리나라가 OECD국가 중에서 항생제 등의 의약품질 사용량이 높다는 것을 의미한다.

3.2 프탈레이트 (Phthalates)

1930년대 이래 프탈레이트나 프탈레이트산 에스테



Table 5. Concentration and removal of phthalate in Marne-Aval sewage treatment work in France

Substances	Concentration		Removal efficiency (%)
	Influent	Effluent	
BBP (µg/L)	1.12	0.30	73
DEHP (µg/L)	22.46	5.02	78
DEP (µg/L)	7.71	0.78	90
DMP (µg/L)	0.82	ND	90
DnB (µg/L)	1.00	0.15	86
DnOP (µg/L)	0.10	ND	79
Suspended matter (mg/L)	579	33	94

※ Source : Dargnat et al., 2009.

르는 고분자 가소제로서 살충제, 페인트, 포장재, 화장품, 의류, 전기절연체 등의 산업용 첨가제로 폭넓게 사용되어 왔다. 따라서, 수계로 유입될 가능성이 높은 화합물질이다. 전세계 프탈레이트의 생산량은 1975년 1,800만 톤에서 2006년 4,300만 톤으로 2.4배 증가하였고, PVC 제조용으로 주로 사용되는 디에틸헥실 프탈레이트(DEHP)가 25 % 정도 차지하였다(Peijnenburg and Struijs, 2006).

프탈레이트는 어류와 포유동물에게 내분비계를 교란하거나 생식 독성을 일으키는 유해화학물질이다. 프탈레이트는 고분자 재료와 화학적으로 결합하지 않으므로 생산-사용-처분 중에 쉽게 환경으로 분산된다. 프탈레이트는 증기압이 비교적 높으므로 대기 중으로 휘발하여 구름입자 속에 들어가 빔물이나 우수 유출수 등의 형태로 하수처리시설로 유입된다. 프탈레이트는 용해도가 낮으므로 하수처리 슬러지에 농축되고 슬러지를 퇴비로 사용하게 되면 토양미생물과 미소동물에 노출된다. EU는 2000년 DEHP를 지표수 오염물질 33중에 포함시키고, 지표수의 허용농도를 1.3 µg/L로 설정했으며, 현재 화장품과 식품 포장재중 DEHP 농도를 줄이는 것을 규제하려고 한다(Dargnat et al., 2009).

프랑스 마르네-아발 하수처리시설로 유입되는 6종의 프탈레이트 DEHP, DEP, DMP(디메틸 프탈레이트), BBP(부틸벤질 프탈레이트), DnBP(디-n-부틸 프탈레이트), DnOP(디-n-옥틸 프탈레이트)에 대해 조사한 결과 Table 5와 같다. 유입수에서는 DEHP 22.46 µg/L, DEP 7.71 µg/L, 현탁물질 579 mg/L가 검출되었고, 방류수에서는 DEHP 5.02 µg/L, DEP 0.78 µg/L, 현탁물질 33 mg/L로 나타났다. 각각의 처리효율은 DEHP 78%, DEP 90%, 현탁물질 94%로 조사되었다. DEHP와 DEP

가 다량이고, DnOP가 미량인 것은 프탈레이트를 취급하는 산업체와 관련이 있다(Dargnat et al., 2009). 위에 언급된 프랑스 하수처리시설의 경우와 같이 우리나라 하수처리시설에서도 상당량의 프탈레이트가 유입되고 있다고 판단된다. 따라서, 향후 하수처리시설에 대한 모니터링 사업을 통해 프탈레이트에 대해 정량적인 검출 여부를 확인하는 것이 필요하다.

3.3 과불화합물 (Perfluorinated Compounds)

과불화합물은 긴 잔류성과 독성으로 인해 한번 배출되면 자연적으로 분해되지 않고 오랜 세월 잔존할 수 있기 때문에 환경에 악영향을 미칠 수 있다. 특히, PFOS(과불화옥탄설폰산)와 PFOA(과불화옥탄산)과 같은 긴 사슬 과불화합물은 잔존 기간이 특히 긴 난분해성(Non-biodegradable) 물질로 분류된다. 과불화합물이 인간의 생식 기능에 나쁜 영향을 미치고 종양의 증식을 촉진할 뿐만 아니라, 인간과 동물의 내분비계에도 영향을 미친다.

2015년 그린피스 동아시아 사무소는 국내 청정지역으로 알려져 있는 가평천, 방태천, 부연천, 검룡소, 황지연못 등 5개 지점에서 10개 시료를 채취하여 과불화합물을 조사하였다. 이들 조사지점에서 과불화합물이 모두 검출되었다. 황지연못에서는 조사지점 가운데 긴 사슬 과불화합물의 농도가 가장 높게 나타났고 PFOS보다 PFOA의 농도가 더 높게 나타났다. 그러나 모든 조사지점에서 PFOA농도가 PFOS 농도보다 더 높게 나타났다(Greenpeace East Asia, 2015).

2010년 국립환경과학원은 하수처리시설 5개소, 폐수처리시설 5개소, 산업계 배출수를 연계처리하는 하수처

pp. 481-490
pp. 491-499
pp. 501-510
pp. 511-519
pp. 521-527
pp. 529-537
pp. 539-549
pp. 551-566
pp. 567-575
pp. 577-586
pp. 587-597
pp. 599-609
pp. 611-618
pp. 619-628

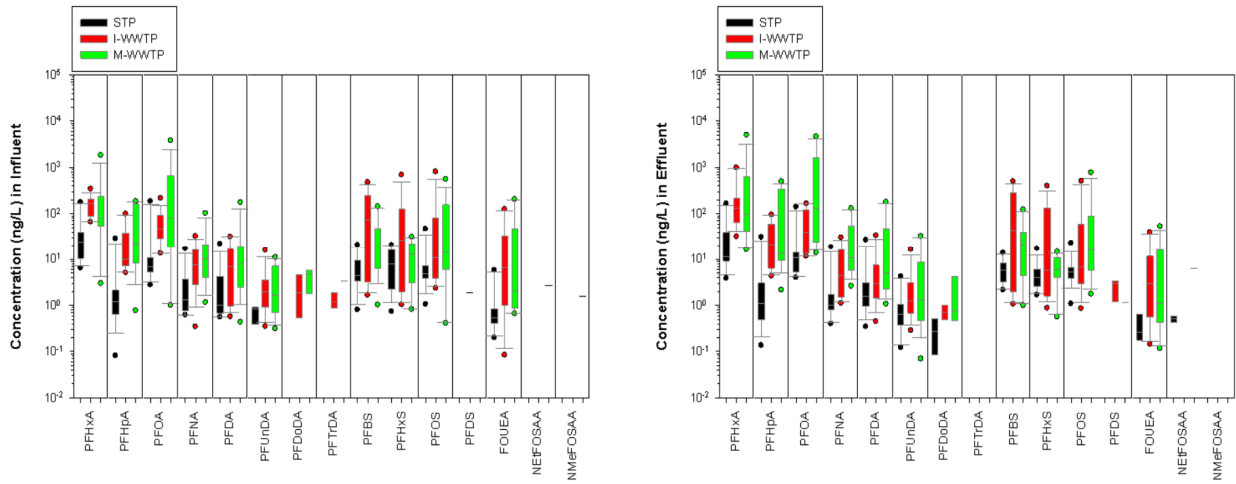


Fig. 6. Comparison for concentration of perfluorinated compounds at influent (left) and effluent (right) of sewage treatment plants (n=15).

※ Source: NIER, 2010a.

리시설 5개소를 선정하여 봄여름가을 3계절 동안 시료 유입수, 방류수, 탈수케이크를 채취하여 과불화합물을 분석하였다(Fig. 6). PFCAs는 산업계 배출수를 연계처리하는 하수처리시설 > 폐수처리시설 > 하수처리시설 순으로 나타났다. PFASs는 산업계 배출수를 연계처리하는 하수처리시설 ≈ 폐수처리시설 > 하수처리시설 순으로 나타났다. 대체적으로 하수처리시설로 유입되는 하수 내 PFCAs는 폐수처리시설로 유입되는 폐수나, 하·폐수 처리시설로 유입되는 하·폐수보다는 5~10배 이상 낮은 농도값을 보인 반면, 대부분 PFCAs에 대해 폐수처리시설의 폐수 유입수는 산업계 배출수를 연계처리하는 하수처리시설로 유입되는 하·폐수보다 2배 정도 낮은 값을 보였다. PFASs 또한 하수처리시설의 유입수 농도는 폐수처리시설 유입수나 산업계 배출수 연계처리하는 하수처리시설 유입수보다 2~20배 이상 낮았다(NIER, 2010b). 그러나, 이들 과불화합물의 경우 폐수처리시설 유입수 농도가 산업계 배출수를 연계처리하는 하수처리시설 유입수 농도보다 다소 높았다. 방류수의 과불화합물 농도 또한 유입수의 과불화합물 농도와 유사한 패턴을 보여 방류수의 과불화합물 농도는 유입수의 과불화합물 농도 특성에 의해 결정됨을 알 수 있다.

3.4 기타 미량유기물질

알킬페놀(Alkylphenol)은 비이온성 계면활성제로 사용되는 알킬페놀폴리에톡실레이트(Alkylphenol Polyethoxylate,

APEO)의 분해산물로서 알킬페놀폴리에톡실레이트가 자연계로 방출되면 에톡시기(Ethoxy group)가 1차적인 생물분해에 의해 쉽게 떨어져 나가 알킬페놀을 생성한다. 인간과 생물에 대한 알킬페놀 화합물(Nonylphenol, LC50 = 0.1 mg/L)의 독성이 크기 때문에 우리나라뿐만 아니라 해외에서도 알킬페놀 화합물에 대한 관리의 필요성이 제기되고 있다. 또한, 알킬페놀 화합물이 인간과 동물의 내분비계에 영향을 미치는 교란 작용에 대한 연구가 추진 중에 있으며 일부 국가에서는 알킬페놀 화합물의 생산과 사용을 금지 또는 제한하고 있다 (http://www.kfsri.or.kr/02_infor/infor_01_02.asp?idx=23).

비스페놀 A(Bisphenol A, BPA)는 폴리카보네이트(PC), 에폭시수지 제조 시 원료로서 우리 생활에서 광범위하게 사용되는 플라스틱 재질이다. 즉, 식품을 오래 보관할 수 있도록 캔이나 플라스틱의 표면에 입히는 코팅제 또는 영수증 등 감열지에 색을 내는 발색 촉매제로 사용되었다. 비스페놀 A가 포함된 제품에는 물병, 젓병, 병마개, CD, 음료 및 통조림 캔 내부, 합성수지, 플라스틱 그릇 등이 있다(Fig. 7, Im and Löffler, 2016).

다환방향족 탄화수소(Polycyclic Aromatic hydrocarbons, PAHs)는 화학연료 및 유기물의 불완전 연소 시 부산물로 발생하며, 식품에서는 굽기, 튀기기, 볶기 등의 조리, 가공 과정에서 탄수화물, 지방, 단백질의 탄화에 의해 발생한다. PAHs는 조리하거나 가공하지 않은 농산물이서도 대기오염 및 토양오염의 영향으로 존재한다. PAHs는 내분비계 장애물질이면서 발암 가능물질로 잔

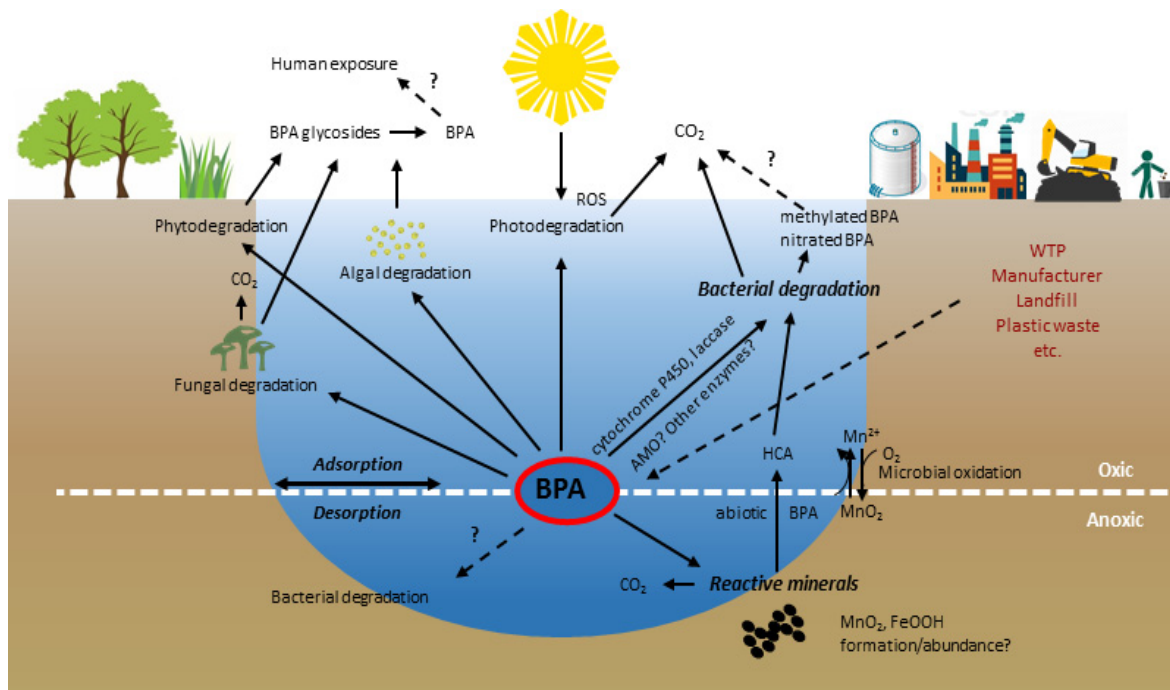


Fig. 7. Major bisphenol A(BPA) sources, sinks and natural attenuation processes in the environment. (AMO : Ammonia monooxygenase, HCA : 4-hydroxycumyl alcohol, ROS : Reactive oxygen species, WTP : Wastewater treatment plant).

※ Source : Im and Löffler, 2016.

류기간이 길고, 독성이 강하여 위해성을 평가하기 위한 우선순위 목록에 포함되어 세계적 관심 대상물질이 되고 있다. 국제암연구소는 벤조피렌을 확인된 인체 발암 물질인 Group 1 등급으로 상향 조정하였다. 현재 PAHs는 식품 제조과정에서 다양한 경로를 통해 위험이 노출되어 있다(Shin and Kim, 2014).

난연제는 재료의 종류에 따라서 반응제와 첨가제로 분류된다. 반응성 난연제는 재료와 화학적으로 결합되어 있으며 스프레이 코팅으로 기판에 적용된다. 첨가성 난연제는 일반 작업이나 공정, 재활용, 연소하는 동안 재료의 표면으로부터 쉽게 자연환경에 누출된다. 폴리브롬화 디페닐 에테르(PBDEs)는 방향성 고리 사이에 산소 원자를 갖는 PCBs(Polychlorinated biphenyls)와 동일한 구조를 갖는 첨가성 난연제이다. 이러한 성분은 PBDEs의 혼합물로서 다양한 브롬화 반응과 함께 상업적으로 유용하게 쓰인다. PBDEs는 지속성이 강하고 생체 축적성, 강한 독성, 위해성을 갖는 것으로 알려져 있다. 이러한 PBDEs는 환경, 동물, 인체에서 검출되고 있으므로 잔류 PBDEs의 농축을 저감하기 위한 효율적인 제거 기술의 개발이 시급하다(Santos et al., 2016).

4. 하수처리시설 신규 미량유기물질의 위해성 평가방법 및 관리체계 고찰

4.1 해외 미량유기물질의 위해성 평가방법

미량유기물질의 위해성 평가방법에는 US EPA에서 사용되고 있는 미량유기물질 모니터링 및 관리를 위한 우선 관리대상물질 선정(Prioritizing contaminants for monitoring and management) 방법, QSARs(Quantitative structure activity relationships) 방법(OECD, 1992; OECD, 2007), 위해성 지수화(Risk quotient) 방법(US EPA, 1998)이 있다. 먼저 미량유기물질 모니터링 및 관리를 위한 우선 관리대상물질 선정방법에 대해 살펴보면, 미량유기물질의 위해성에 기초하여 선별하여 우선순위를 결정하는 도구(Risk-based screening and prioritization tools, <http://actor.epa.gov/dashboard>)를 적용하여 조사 대상물질에 대해 관리를 위한 우선순위를 결정하는데 적용한다. 즉, 노출활성비(Exposure:Activity ratio, EAR)를 도출하여 관리 조치가 필요한 미량유기물질의 우선순위를 정할 수 있다.

pp. 481-490
pp. 491-499
pp. 501-510
pp. 511-519
pp. 521-527
pp. 529-537
pp. 539-549
pp. 551-566
pp. 567-575
pp. 577-586
pp. 587-597
pp. 599-609
pp. 611-618
pp. 619-628

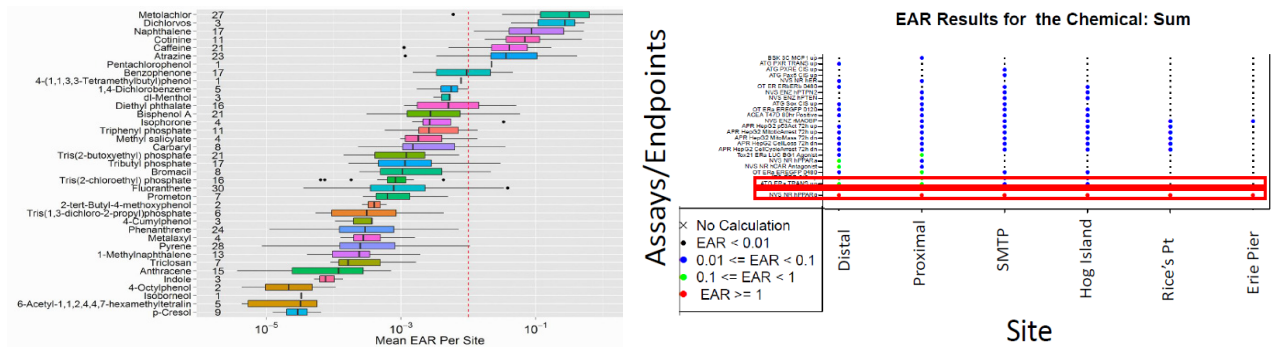


Fig. 8. Analysis for “Exposure : activity ratios (EAR)”.
 ※ Source : Villeneuve, 2016.

Table 6. Predictive results for organic micropollutants using QSAR model (Example case)

No.	Compound	Structure	ECOSAR v1.00 Classes Found	QSAR Modeling result						
				Water Sol. (mg/L)	HENRYs (atm·m ³ /mole)	Log Koa (octanol/air)	Fish (LC ₅₀)	Daphnia (LC ₅₀)	Algae (EC ₅₀)	Log Kow (octanol/water)
1	Acetaminophen	<chem>CC(=O)Nc1ccc(O)cc1</chem>	Phenols Amides Phenol Amines	1.40E+04	6.42E-13	10.85	3,399	1,591	337	0.27
2	Acetylsalicylic acid	<chem>CC(=O)Oc1ccccc1C(=O)O</chem>	Esters-acid	4,600	1.30E-09	8.41	757	393	118	1.13
3	Caffeine	<chem>CN1C=NC2=C1C(=O)N(C(=O)N2C)C</chem>	Imides Substituted Ureas Imidazoles Amides	2.16E+04	3.58E-11	8.99	5,432	2,508	507	0.16
4	Cefadroxil	<chem>Cc1ccc(cc1)C(=O)Nc2cc(O)c(O)c2</chem>	Aliphatic Amines-acid Phenols-acid Benzyl Amines-acid Amides -acid Phenol Amines -acid	1,110	2.88E-21	18.85	15,975	7,172	1,319	-0.08
5	Cephadrine	<chem>Cc1ccc(cc1)C(=O)Nc2cc(O)c(O)c2</chem>	Aliphatic Amines-acid Amides -acid Vinyl/Allyl Amines-acid	2.13E+04	7.55E-16	1.39E+01	5,995	2,853	640	0.41

※ Source : NIER, 2009.

화학물질에 대한 적정 관리방안을 수립하기 위하여 환경 중 노출에 대한 위해성을 평가하는 방법으로 구조 활성 예측프로그램인 QSARs 모델 또는 위해성 지수 (Risk quotient, RQ)를 이용하는 방법이 소개되어 왔다. 이들 기법은 비슷한 화학구조를 가진 화학물질은 비슷한 화학적 거동(Behavior)을 가진다는 가정을 근거로 내세우고 있다. 이들 기법은 유해성 확인(Hazard identification)과 위해성 평가(Risk assessment) 목적으로 사용 가능한 경험적 자료가 충분치 않을 때 특히 유용하다.

먼저 QSARs 방법은 유기물질의 환경적 독성이나 영향을 예측하는데 활용하고 있다(OECD, 1996). 10만 가지가 넘는 화학물질이 환경내로 방출되고 있으나, 이중에 1~5 % 정도만 위해성 정도가 확인되고 있다. 미량유기물질 관리대책 마련에 있어서 이러한 물리, 화학, 생물학적 특성 파악은 매우 중요한 과정이다. 일부 의약품물질에 대해 QSAR 모델을 통해 산출된 물리·화학적 특성과 위해성 정도를 예측한 결과에 대한 예시는 아래 표와 같다(Table 6).

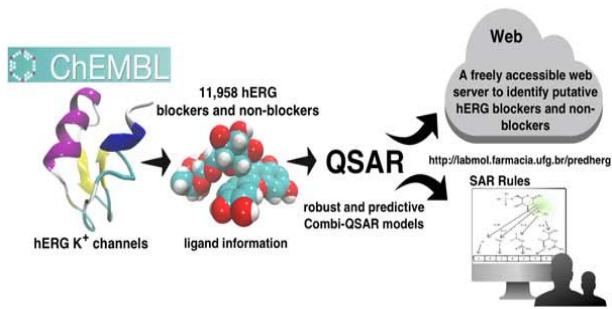


Fig. 9. Use of QSAR model for indicative environmental risk assessment.

※ Source : Braga et al., 2014.

두 번째로 위해성 지수(Risk quotient, RQ) 방법(EPA, 1998)은 주어진 중에 대해 추정된 환경 중 화학물질의 농도(Estimated environmental concentration, EEC)와 독성시험에 대한 영향 수준(Toxicity test effect level, TTEL. 예를 들면 LC50)을 비교하는 것으로 그 결과를 위해성 지수(RQ)라 한다. 즉 EEC를 LC50으로 나눈 값이 위해성 지수가 된다. 위해성 지수가 크면 상대적인 위해도가 높은 것으로 추정할 수 있다. Peterson(2006)은 위해성지수 방법을 이용하여 여러 농약의 독성을 성공적으로 비교하였다.

$$\frac{\text{Estimated Environmental Concentration (EEC)}}{\text{Toxicity Test Effect Level (LC}_{50})} = \text{Risk Quotient}$$

4.2 해외 하수처리시설의 신규 미량유기물질에 대한 관리체계

미국, 유럽 및 일본은 미량유기물질이 공공수역으로 배출되는 것을 억제하기 위하여 REMPHARMAWATER, POSEIDON, KNAPPE 등 다양한 연구 프로젝트를 추진하고 있다(KEITI, 2012). 미국 캘리포니아주에서 시행하고 있는 미량유기물질에 대한 모니터링 및 관리방안을 살펴보면 하수처리시설을 포함하는 수계 관리를 위해 다음과 같은 접근방법으로 모니터링 및 관리체계를 구축하고 있다. 먼저 다양한 미량유기물질 중에서 위해성(Risk) 관리기반의 우선관리 대상물질을 선별하는 과정을 거친 다음 특별관리 및 모니터링 항목을 구성한다. 다음에는 사전 선택된 미량유기물질에 대한 모니터링 및 관리계획을 수립하고 수행한다. 마지막으로 최종 관리대상물질을 선정하고 이렇게 선택된 물질에 대해서는 정책, 관리, 규제 농도 등의 실행 방안을 도출한다(Maruya et al., 2014).

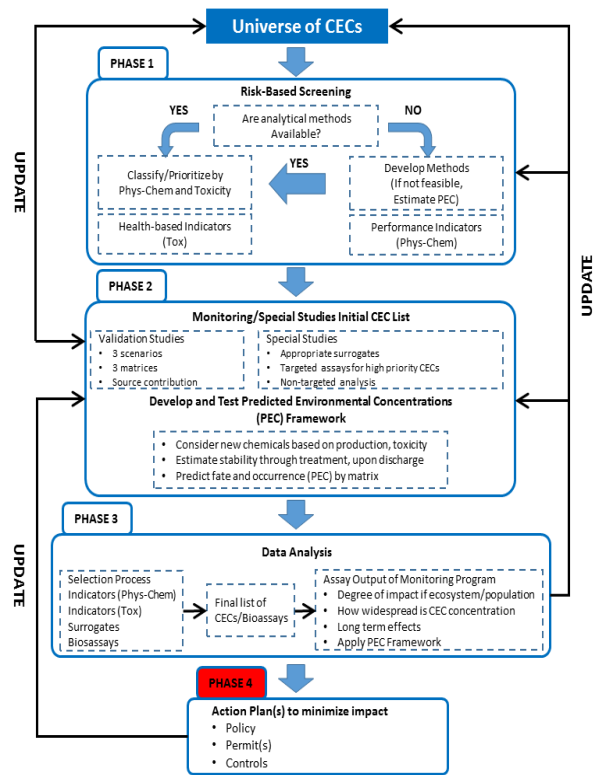


Fig. 10. Plan of monitoring and management measures for organic micropollutants.

※ Source : Maruya et al., 2014.

4.3 국내 산업폐수 등 배출처리 시설에서 신규 미량 유기물질 관리체계

우리나라는 산업폐수배출시설, 공공폐수처리시설, 산업폐수가 유입되는 공공하수처리시설, 이들 주변 공공수역(공단천)에서 발생하는 수질오염물질에 대한 관리를 위하여 「수질오염물질 지정 등에 관한 지침」(MOE, 2017)을 제정하고 있다. 이 규정은 수질오염물질의 지정, 배출허용기준의 설정, 수질오염물질 이외에 감시항목의 지정 및 관리 등을 위한 절차와 방법을 정하고 있다. 그러나 생활수준의 향상으로 생활하수에서도 미량유기물질이 검출되는 것으로 알려져 있으며, 하수처리구역에서 공장에서 산업폐수를 배출하거나 연계처리를 통하여 하수처리시설로 유입되는 경우가 있어 신규 미량유기물질에 대한 감시와 관리가 요구되고 있다.

우리나라 산업폐수에서 수질오염물질 등에 대한 관리체계를 살펴보면, 먼저 수질오염물질은 조사수계 지점(공단천)에서의 검출농도가 현행 수질 및 수생태계

pp. 481-490
pp. 491-499
pp. 501-510
pp. 511-519
pp. 521-527
pp. 529-537
pp. 539-549
pp. 551-566
pp. 567-575
pp. 577-586
pp. 587-597
pp. 599-609
pp. 611-618
pp. 619-628

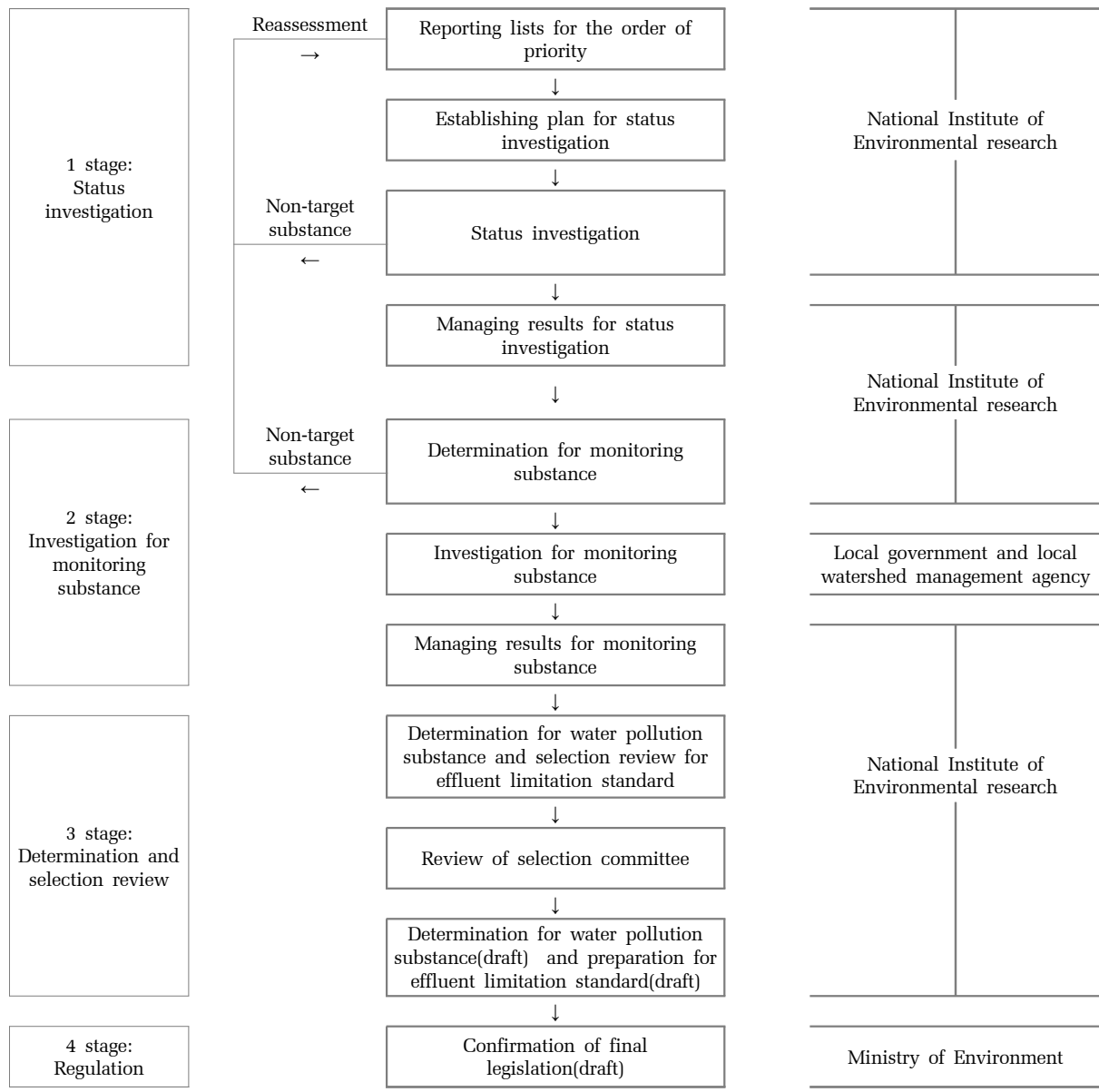


Fig. 11. Flowchart for determination of water pollutants.

환경기준(또는 수질준거치)을 초과하여 검출되는 경우, 또는 조사대상 폐수배출시설, 공공하·폐수처리시설의 유입수 또는 방류수에서 수질 및 수생태계 환경기준(또는 수질 준거치)의 10배를 초과하여 검출되는 경우, 감시항목 조사를 통해 국내에서 사용 또는 배출이 확인되었고, 위원회의 검토 결과 수질오염물질로 지정이 필요하다고 인정되는 경우 등을 고려하여 지정한다. 또한, 특정수질유해물질은 이들 수질오염물질 지정 조건에 해당되는 물질 중에서 다음 사항을 종합적으로 고려하여 「수질 및 수생태계 보전에

관한 법률」 제2조에서 규정한 “특정수질유해물질”로 지정한다. 이 경우 「유해화학물질관리법」 제2조의 “유해화학물질”에 해당하는 경우, 미국 환경청(EPA) 또는 국제암연구소(IARC) 등에서 발암등급 B(발암가능물질) 이상에 해당하는 물질, 미국, EU, 일본 등 선진 외국에서 우리나라의 “특정수질유해물질” 수준으로 관리하는 등 유해성 및 위해성이 있다고 인정되는 경우, 감시항목 조사를 통해 국내에서 사용 또는 배출이 확인되었고, 위원회의 검토 결과, 특정수질유해물질로 관리가 필요하다고 인정되는 경우 등을 고려



하여야 한다(Fig. 11).

향후 공공하수처리시설의 유입수 및 방류수에서 신규 미량유기물질 관리를 위해 산업폐수에서 유래하는 수질오염물질에 대한 현행 관리체계에 맞추어 신규 미량유기물질 관리체계를 마련하여 관리하는 것이 필요하다.

5. 결 론

산업이 발전하고 생활이 윤택해 지면서 많은 화학 물질을 이용하여 항생제, 농약, 세제, 건강용품, 플라스틱 제품을 생산한다. 이렇게 생산된 제품에는 잔류 의약품, 내분비계 장애물질, 과불화합물 등의 미량 유기물질을 포함하고 있다. 이들 물질은 다양한 경로를 통해 하수로 유입되어 하수처리시설을 통해 공공수역으로 배출된다. 지금까지 사람에게 민감한 먹는 물에서 미량유기물질의 함유량을 알기 위한 모니터링이 다양하게 수행되었다. 이제는 인간과 동물에게 사용되고 버려지는 미량유기물질에 대한 관심이 증대하고 있다.

이에 대한 이해를 돕기 위해 국내외 연구사례를 통하여 하수처리시설로 유입되는 미량유기물질의 발생 특성, 노출경로, 검출실태와 환경에 미치는 영향, 위해성 평가방법 및 관리체계를 살펴보았다. 인체와 동물에 흡수된 항생물질과 내분비계 장애물질은 소변의 형태로 대부분 배설되며 생물학적 농축을 통해 자연 생태계에서 잔류하면서 항생제내성균 양성, 생식기능 장애 등을 일으킨다. 우리나라 한강이나 낙동강에서 의약품이 검출되고 있으며, 하수처리시설 유입수 및 배출수에서도 유럽과 유사한 농도의 의약품이 검출된다고 한다. 이렇게 검출되는 미량유기물질에 대한 위해성을 평가방법으로는 미국 EPA의 유기물질의 위해성에 기초하여 선별적으로 우선순위를 결정하는 도구를 적용하는 방법, QASR 모델 및 위해성 지수 방법을 사용하며 신규 미량유기물질에 대해 위해성 정도를 예측평가한다. 미국, 유럽, 일본과 같은 선진국은 신규 미량유기물질 관리를 위한 다양한 프로그램을 운영하고 있으며, 먼저 위해성 관리기반에 근거하여 우선관리대상물질을 선정하고 모니터링을 실시한 다음 관리계획을 수립하여 최종 관리대상물질을 결정한다. 그런 다음 이들 물질에 대한 관리와 규제를 위한 실행방안을 도출하고 있다.

향후 우리나라도 하수처리시설의 유입수에 대한 미량유기물질 관리를 위해서는 우리 실정에 맞는 하수처리시설에서 미량유기물질 유입 실태 및 현황을 파악하고 관리 방법을 모색하는 것이 필요하다. 즉 산업폐수 연계처리 하수처리시설에서 적용하고 있는 수질오염물질 지정 등에 관한 지침(MOE, 2017)에서와 같이 하수처리시설 전반에 걸쳐 유입수 관리를 위한 우선순위물질을 작성하고 장기적인 모니터링을 통하여 감시항목을 정하여 체계적으로 관리하는 것이 필요하다.

약어표

AMO	: Ammonia monooxygenase
APEO	: Alkylphenol polyethoxylate
BBP	: Benzyl butyl phthalate
BPA	: Bisphenol A
CECs	: Contaminants of emerging concern
COD	: Chemical oxygen demand
DEHP	: Diethylhexyl phthalate
DEP	: Diethyl phthalate
DES	: Diethylstilbestrol
DMP	: Dimethyl phthalate
DnBP	: Di-n-butyl phthalate
DnOP	: Di-n-Octyl phthalate
EAR	: Exposure : activity ratios
EC ₅₀	: Half maximal effective concentration
EDs	: Endocrine disruptors
EEA	: European Environment Agency
EEC	: Estimated environmental concentration
HCA	: 4-hydroxycumyl alcohol
hERG	: Human ether-a-go-go-related gene
LC ₅₀	: Half lethal concentration
Log K _{oa}	: Octanol-air partition coefficients
Log K _{ow}	: Octanol-water partition coefficients
NORMAN	: Network of reference laboratories for monitoring of emerging environmental pollutants
OECD	: Organization for Economic Co-operation and Development
PAHs	: Polycyclic aromatic hydrocarbons
PBDEs	: Polybrominated diphenyl ethers
PC	: Polycarbonate

pp. 481-490

pp. 491-499

pp. 501-510

pp. 511-519

pp. 521-527

pp. 529-537

pp. 539-549

pp. 551-566

pp. 567-575

pp. 577-586

pp. 587-597

pp. 599-609

pp. 611-618

pp. 619-628

PCBs	: Polychlorinated biphenyls
PCPs	: Personal care products
PEC	: Predicted environmental concentration
PFAS	: perfluoroalkyl sulfonate
PFCA	: perfluorocarboxylic acid
PFCs	: Perfluorinated compounds
PFOA	: Perfluorooctanoic acid
PFOS	: Perfluorooctanesulfonic acid
POPs	: Persistent organic pollutants
PPCPs	: Pharmaceuticals and personal care products
PSTW	: Public sewage treatment works
QSARs	: Quantitative structure activity relationships
ROS	: Reactive oxygen species
RQ	: Risk quotient
TTEL	: Toxicity test effect level
US EPA	: United States Environmental Protection Agency
WTP	: Wastewater treatment plant
WWF	: World Wildlife Fund

References

- Ankley, G., Erickson, R., Hoff, D., Mount, D., Lazorchak, J., Beaman, J. (2008). Draft white paper: aquatic life criteria for contaminants of emerging concern, part i, general challenges and recommendations. Prepared by the Office of Water and Office of Research and Development Emerging Contaminants Workgroup, Washington, DC: US Environmental Protection Agency.
- Braga, R.C., Alves, V.M., Silva, M.F., Muratov, E., Fourches, D., Tropsha, A., Andrade, C.H. (2014). Tuning HERG out: antitarget QSAR models for drug development, *Current Topics in Medicinal Chemistry*, 14(11), pp. 1399-1415.
- Choi, K., Kim, Y., Park, J., Park, C.K., Kim, M., Kim, H.S., Kim, P. (2008). Seasonal variations of several pharmaceutical residues in surface water and sewage treatment plants of Han River, Korea, *Sci. Total Environ.*, 405, pp. 120-128.
- Dai, G., Huang, J., Chen, W., Wang, B., Yu, G., Deng, S. (2014). Major pharmaceuticals and personal care products (PPCPs) in wastewater treatment plant and receiving water in Beijing, China, and associated ecological risks. *Bulletin of environmental contamination and toxicology*, 92(6), pp. 655-661.
- Dargnat, C., Teil, M.J., Chevreuil, M., Blanchard, M. (2009). Phthalate removal throughout wastewater treatment plant: case study of Marne Aval station (France), *Science of the total environment*, 407(4), pp. 1235-1244.
- Daughton, C.G. (2007). Pharmaceuticals in the environment: Sources and their management, *Comprehensive Analytical Chemistry*, 50, pp. 1-58.
- Ebele, A.J., Abdallah, M.A., Harrad, S. (2017). Pharmaceuticals and personal care products (PPCPs) in the freshwater aquatic environment, *Emerging Contaminants*, 3(1), pp. 1-16.
- Greenpeace East Asia (2015). Report for the status of PFC pollution in local environment.
- Hicks, K.A., Fuzzen, M.L., McCann, E.K., Arlos, M.J., Bragg, L.M., Kleywegt, S., Servos, M.R. (2017). Reduction of intersex in a wild fish population in response to major municipal wastewater treatment plant upgrades, *Environmental Science and Technology*, 51(3), pp. 1811-1819.
- http://www.kfsri.or.kr/02_infor/infor_01_02.asp?idx=23
- Im, J. and Löffler, F.E. (2016). Fate of bisphenol A in terrestrial and aquatic environments, *Environmental Science and Technology*, 50, pp. 8403-8416.
- Jung, H.K. and Ma, J.K. (2016). A study on current situation and laws of regulation of endocrine disruptors: Focus on persistent organic pollutants control act, *Inha Law Review*, 19(2), pp. 95-123.
- Kim, H., Hong, Y., Ahn, J.H. (2013). A study of management of micropollutants in water system considering climate change and other potential effects, *Korean Chem. Eng. Res.*, 51(6), pp. 645-654.
- Kim, H.K. (2012). *Environmental law* (2nd), Hongmoon-sa.
- Kim, S.S. and Hong, Y.G. (2013). Consumer information and education strategy of the endocrine disruptors for effective risk communication, *Crisisonomy*, 9(5), pp. 17-40.
- Korea Environmental Industry and Technology Institute (KEITI) (2012). Development trend for management and treatment technologies of micro pollutants in the watershed.
- Kosma, C.I., Lambropoulou, D.A., Albanis, T.A. (2014). Investigation of PPCPs in wastewater treatment plants in Greece: occurrence, removal and environmental risk assessment, *Science of the Total Environment*, 466, pp. 421-438.
- LaLone, C.A., Villeneuve, D.L., Lyons, D., Helgen, H.W., Robinson, S.L., Swintek, J.A., Ankley, G.T. (2016). Editor's Highlight: Sequence Alignment to Predict Across Species Susceptibility (SeqAPASS): A Web-Based Tool for Addressing the Challenges of Cross-Species Extrapolation



- of Chemical Toxicity, *Toxicological Sciences*, 153(2), pp. 228-245.
- Lee, S.H., Jung, H.W., Jung, J.Y., Min, H.J., Kim, B.R., Park, C.G., Satou, N. (2013). Characteristics of Occurrence of Pharmaceuticals in the Nakdong River, *Journal of Korean Society of Environmental Engineers*, 35(1), pp. 45-56.
- Lee, Y.J., Choi J.H., Chung, H.S., Lee, H.S., Park, B.J., Kim, J.E., Shim, J.H. (2016). Monitoring of veterinary antibiotics in agricultural soils using LC-MS/MS, *Korean Journal of Environmental Agriculture*, 35(3), pp. 166-174.
- Luo, Y., Guo, W., Ngo, H.H., Nghiem, L.D., Hai, F.I., Zhang, J., Wang, X.C. (2014). A review on the occurrence of micropollutants in the aquatic environment and their fate and removal during wastewater treatment, *Science of the Total Environment*, 473, pp. 619-641.
- Maruya, K.A., Schlenk, D., Anderson, P.D., Denslow, N.D., Drewes, J.E., Olivieri, A.W., Snyder, S.A. (2014). An adaptive, comprehensive monitoring strategy for chemicals of emerging concern (CECs) in California's aquatic ecosystems. *Integrated Environmental Assessment and Management*, 10(1), pp. 69-77.
- Ministry of Environment (2017). Guideline for appointment of water pollutants.
- Ministry of Environment (MOE) (2014). Statistical survey of chemical substances in 2014.
- Ministry of Food and Drug Safety (MFDS) (2008). Food and drug statistical yearbook, No.10.
- Ministry of Food and Drug Safety (MFDS) (2016). 2016 Food and drug statistical yearbook.
- Mompelat, S., Le Bot, B., Thomas, O. (2009). Occurrence and fate of pharmaceutical products and by-products, from resource to drinking water, *Environment International*, 35(5), pp. 803-814.
- Nokdong-river Watershed Management Committee (2011). Establishment of primary investigation and management measures for persistent micro pollutants in the Nakdong-river watershed.
- Nam, S.W. and Zoh, K.D. (2013). Fates and removals of micropollutants in drinking water treatment, *Journal of Environmental Health and Science*, 39(5), pp. 391-407.
- National Institute of Environmental Research (2009). A study of discharge source and variation for pharmaceuticals in the environment(II).
- National Institute of Environmental Research (2010a). A study of discharge source and variation for pharmaceuticals in the environment(III).
- National Institute of Environmental Research (2010b). A study of discharge load estimation for Perfluorinated compounds in the environment(I).
- National Institute of Environmental Research (2012). A study of discharge source and variation for pharmaceuticals in the environment(IV).
- National Institute of Environmental Research (NIER) (2006). A study of analytical method and exposed condition for pharmaceuticals in the environment.
- Nicholson, B. (2006). Organic Chemical issues in wastewater quality - A Review of Current Analytical Methods, Australian Water Quality Centre of CRC for Water Quality and Treatment.
- Niemuth, N.J. and Klaper, R.D. (2015). Emerging wastewater contaminant metformin causes intersex and reduced fecundity in fish, *Chemosphere*, 135, pp. 38-45.
- Nikolaou, A., Meric, S., Fatta, D. (2007). Occurrence patterns of pharmaceuticals in water and wastewater environments, *Analytical and Bioanalytical Chemistry*, 387(4), pp. 1225-1234.
- OECD (1992). Environment Monographs No. 58. Report of the OECD workshop on quantitative structure activity relationships (QSARs) in aquatic effects assessment, OECD/GD (92)168.
- OECD (2007). Guidance document on the validation of (quantitative) structure-activity relationship [(Q)SAR] models, OECD Environmental Health and Safety Publications Series on Testing and Assessment No. 69, ENV/JM/MONO(2997)2.
- Peijnenburg, W.J. and Struijs, J. (2006). Occurrence of phthalate esters in the environment of the Netherlands, *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 63(2), pp. 204-215.
- Peterson, R.K. (2006). Comparing ecological risks of pesticides: the utility of a risk quotient ranking approach across refinements of exposure, *Pest Management Science*, 62(1), pp. 46-56.
- Santos, M.S., Alves, A., and Madeira, L.M. (2016). Chemical and photochemical degradation of polybrominated diphenyl ethers in liquid systems-A review, *Water Research*, 88, pp. 39-59.
- Shin, H.S. and Kim, M.J. (2014). Factors that affect the formation of polycyclic aromatic hydrocarbon in foods, *Food Industry and Nutrition*, 19(1), pp. 1-4.
- Snyder, S.A., Vanderford, B.J., Drewes, J., Dickenson, E., Snyder, E., Bruce, G.M. and Pleus, R. (2008). State of Knowledge of Endocrine Disruptors and Pharmaceuticals in Drinking Water, Awwa Research Foundation.
- Tran, N.H., Hu, J. and Ong S.L. (2013). Simultaneous

pp. 481-490

pp. 491-499

pp. 501-510

pp. 511-519

pp. 521-527

pp. 529-537

pp. 539-549

pp. 551-566

pp. 567-575

pp. 577-586

pp. 587-597

pp. 599-609

pp. 611-618

pp. 619-628

- determination of PPCPs, EDCs, and artificial sweeteners in environmental water samples using a single-step SPE coupled with HPLC - MS/MS and isotope dilution, *Talanta*, 113, pp. 82-92.
- US EPA (1998). A Comparative Analysis of Ecological Risks from Pesticides and Their uses: Background, Methodology & Case Study, Environmental Fate & Effects Division, Office of Pesticide Programs, US EPA, Washington D.C., USA.
- Venkatesan, A.K. and Halden, R.U. (2014). Wastewater treatment plants as chemical observatories to forecast ecological and human health risks of manmade chemicals, *Scientific reports*, 4, srep03731.
- Villeneuve, D. (2016). EPA Tools and Resources Webinar: Prioritizing contaminants for monitoring and management, Accessible at https://www.epa.gov/sites/production/files/2016-10/documents/villeneuve_epa_tools_resource_10-26-2016.pdf
- Zorrilla, I., Martinez, R., Taggart, M.A., and Richards, N. (2015). Suspected flunixin poisoning of a wild Eurasian Griffon Vulture from Spain, *Conservation Biology*, 29(2), pp. 587-592.