

미량오염물질로 인한 수질오염에 대한 대응기술: 현황과 발전방향

미량오염물질로 인한 수질오염: 개관

2019년을 기준으로 1억5천만개 이상의 유/무기화합물이 CAS(Chemical Abstracts Service) Registry에 등록되어 있으며, 이중 수십만 종 이상이 오늘날 가정, 산업, 농업 등의 다양한 분야에서 사용되고 있다. 국내에도 4만 종 이상의 화학물질이 등록되어 있으며, 이 수치는 계속해서 늘어나고 있다(환경백서, 2016). 일반적으로 화학물질의 관리는 독성, 잔류성 등 위해성이 큰 화학물질 위주로 관리되어 왔으나, 분석기술의 발달로 기존에는 오염물질로 고려되지 않았던 의약품류 등 수계 내 신종 미량오염물질들의 존재가 확인됨에 따라 점오염원이나 비점오염원으로부터 수계로 유입되는 미량오염물질에 대한 잠재적인 문제와 관리에 대한 관심이 증대되어 왔다.

미량오염물질은 수 ng/L의 극미량으로도 생태계 또는 사람에게 영향을 줄 수 있는 유무기 물질들로 일반적으로 수중에서 수 ng/L - 수 μ g/L 이하로 존재한다. 미량오염물질(micropollutants; 또는 미량유해물질)과 유사한 부류의 환경오염물질을 가리키는 용어로는 표 1에 정리된 것과 같이 신종오염물질(emerging pollutants), 신종환경유해물질(emerging contaminants), 신종 유해오염물질(contaminants of emerging concerns) 등이 있으며, 미량오염물질은 이들의 범주를 모두 포괄할 수 있는 용어이다(Nam 등, 2013).

수계 내 신종오염물질은 표 2와 같이 크게 종류 및 발생원에 따라 구분할 수 있으며, University of South Carolina의 Susan D. Richardson 교수가 2020년에 미국화학회(American Chemical Society; ACS)가 발간하는 저널 Analytical Chemistry에 발표한 논문과 같이 좀 더 세분화된 다음의 11개 그룹으로 구분할 수 있다(Richardson 등, 2020). 1) Antibiotic resistance genes (항생제 내성 유전자), 2) Sucralose and other artificial sweeteners (인공 감미료), 3) Nanomaterials (나노 소재), 4) Per- and polyfluoroalkyl substances (과불화화합물), 5) Pharmaceuticals and hormones (의약 및 호르몬 물질), 6) Disinfection byproducts (소독부산물), 7) Sunscreens/UV Filters (자외선 차단제), 8) Brominated and emerging flame retardants (난연제), 9) Dioxane (다이옥신), 10) Algal toxins (조류독소), 11) Microplastics (미세플라스틱).

미량오염물질은 난분해성, 생물농축성, 독성의 특성을 가진 경우가 많고, 특히 이들 중 의약품 및 개인위생용품(pharmaceuticals and personal care products; PPCPs)들은 특정 생물학 반응을 유도하도록 고안된 물질들로, 아주 적은 농도로도 생물학적으로 생태계에 큰 위해를 줄 수 있다. 이러한 미량오염물질들은 관리방향을 설정함에 있어 규제물질의 선정, 모니터링 방법 및 범위, 처리기술의 타당성 등 기존 관리대상 오염물질들과 다른 방향의 접근이 필요하다.

표 1. 미량오염물질의 다양한 정의(Nam and Zoh, 2013)

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 significantly different than expected.	United States Environmental Protection Agency (US EPA)
Emerging contaminants	Substances that pose a hazard or risk to human health or the environment or are likely to be exposed to pollutants that are newly illuminated in recent years due to the development and use of new chemical substances and the development of analysis technology.	

표 2. 수계 내 미량오염물질의 종류 및 발생원(Luo 등, 2014)

Category	Important subclasses	Major sources	
		Distinct	Nonexclusive
Pharmaceuticals	NSAIDs ^a , lipid regulator, anticonvulsants, antibiotics, β -blockers, and stimulants	Domestic wastewater (from excretion) Hospital effluents Run-off from CAFOs ^b and aquaculture	Sources that are not exclusive to individual categories include: Industrial wastewater (from product manufacturing discharges) Landfill leachate (from improper disposal of used, defective, or expired items)
Personal care products	Fragrances, disinfectants, UV filters, and insect replents	Domestic wastewater (from bathing, shaving, spraying, swimming, and etc.)	
Steroid hormones	Estrogens	Domestic wastewater (from excretion) Run-off from CAFOs and aquaculture	
Surfactants	Non-ionic surfactants	Domestic wastewater (from bathing, laundry, dishwashing, and etc.) Industrial wastewater (from industrial cleaning discharges)	
Industrial chemicals	Plasticizers, fire retardants	Domestic wastewater (by leaching out of the material)	
Pesticides	Insecticides, herbicides, and fungicides	Domestic wastewater (from improper cleaning, run-off from gardens, lawns and roadways, and etc.) Agricultural runoff	

^a NSAIDs: non-steroidal anti-inflammatory drugs

^b CAFOs: concentrated animal feeding operations

국내외 미량오염물질 관리제도 현황

국외 사례

미국의 경우, 안전 음용수법(The Safe Drinking Water Act; SDWA)에 근거해 기본적인 수질 기준 이외에도 독성 및 검출가능성 등을 고려해 공공 상수도 계통에서 검출이 예상되는 물질에 대하여 매 5년마다 오염후보물질 목록 (Contaminant Candidate List; CCL)을 선정하고 있다. 이 오염후보물질 목록 중 일부(30개 이하) 오염물질을 선정해 수질모니터링을 실시하고 인체 위해성 등을 고려해 규제 여부를 판단하는 시스템을 통해 신종오염물질에 대한 지속적인 대응을 하고 있다. 이외에도 국립물환경연구소(National Water Research Institute; NWRI)는 2013년 직접적인 물재이용 시스템을 통해 재이용수를 공공수역으로 방류하지 않고 정수처리시설의 원수로 직접 활용하기 위해서 미량오염물질의 공중보건 기준을 제안하였으며, 의약물질 및 내분비계 장애물질 등 11항목을 관리 지표로 선정하여 권고기준치를 만들어 운영하고 있다(표 3).

유럽에서는 미량오염물질에 관한 연구와 조사를 유럽공동체(EU)를 중심으로 각국이 연계해 수행하고 있으며, 공동으로 설정한 수질기준과 각국의 실정에 적합한 음용수 수질기준을 동시에 마련하고 있다. EU는 2013년 물관리지침(Directive 2013/39/EU)과 2015년 Decision 2015/495을 통해 10종 이상을 미량오염물질 감시목록으로 선정했고, 이들 각각의 대상 물질에 대한 샘플 전처리 및 분석방법, 검출한계를 나타내고 부유물질, 퇴적물 등 다양한 매체의 샘플을 분석하도록 명시하고 있다.

국내 사례

국내에서도 미량오염물질을 관리하기 위한 정부차원의 관리제도와 계획, 조사사업이 수행되고 있다. 대표적으로 (1) 물환경 기본계획, (2) 수돗물 유해물질 실태조사, (3) 새로운 미량유해물질 발견시 처리규정안, (4) 항생제 내성관리 종합대책을 들 수 있으며 구체적으로는 다음과 같다.

표 3. 재이용수의 직접 음용수 이용 시 고려해야 할 오염물질(NWRI, 2013)

Compounds	Criterion	Compounds	Criterion
Cotinine	1 μ g/L	Atenolol	4 μ g/L
Primidone	10 μ g/L	Carbamazepine	10 μ g/L
Phenyltin	2 μ g/L	Estrone (E1)	0.32 μ g/L
Meprobamate	200 μ g/L	Sucralose	150 mg/L
Tris(2-carboxyethyl phosphine) (TCEP)	5 μ g/L	N,N-Diethyl-meta-toluamide (DEET)	200 μ g/L
Triclosan	2.1 mg/L		

1) 물환경 기본계획

‘수질, 수량관리 및 수생태계 보전을 위한 정부 물환경관리 정책의 최상위 계획’으로서 위해성과 생태계 건강성을 종합적으로 관리하는 것을 정책방향으로 설정하고 있으며 대·중·소권역 물환경 관리계획, 오염총량관리기본방침 및 기본시행계획, 비점오염원관리 종합대책 등 주요 물환경 관리 대책 수립과 함께 미량유해물질까지 위해성 관리 내용도 포함하고 있다.

2) 수돗물 유해물질 실태조사

‘먹는물 수질기준항목’ 이외에도 먹는물의 안전성을 확보하기 위해 수돗물에 존재할 것으로 우려되는 오염물질들에 대한 실태조사를 실시하고 있으며, 「먹는물 수질감시항목 운영지침」을 통해 감시항목을 지정하여 정기적인 모니터링을 진행하고 향후 수질기준 설정에 반영하고 있다. 2020년 기준으로 소독부산물, 심미적 영향물질, 자연방사성 물질 등 32개의 항목이 감시항목으로 지정되어 정기적인 모니터링이 진행되고 있다.

3) 새로운 미량유해물질 발견시 처리규정안

수돗물, 하천·호소수에 대한 각종 실태조사에서 발견된 신규 오염물질이 국민건강에 위해를 줄 우려가 있는 경우 필요한 조치를 환경부 훈령인 ‘새로운 미량유해물질 발견시 처리규정안’을 통해 규정하고 있다. 규정안은 미량유해물질 발견 시 1) 발견, 2) 대책, 3) 대응 및 4) 장기대책의 4단계로 필요한 조치를 규정하고, 미량유해물질 발견 시 지방자치단체장의 위해성을 검증과 환경부장관에 대한 보고를 명시하고 있다.

4) 항생제 내성관리 종합대책:

하천수에 대한 잔류 의약품질 실태조사와 하수처리장과 축산 폐수처리장 등 잔류 의약품질의 배출원 및 배출경로를 규명하기 위해 2008년부터 2017년까지 정부차원의 ‘항생제 내성관리 종합대책’이 1,2단계에 걸쳐 진행되었으며, 처리시설의 유입수와 방류수 조사, 해당 물질의 폐수처리방법 및 정수처리공정에 대한 연구가 수행되었다.

수중 미량오염물질 주요 처리기술

화학적 처리

수중 미량오염물질의 화학적 처리는 산화 처리와 환원 처리로 구분되며, 유기오염물질의 경우 주로 산화 처리기술이 많이 연구되었다. 과망간산염(MnO_4^-)이나 6가철(FeO_4^{2-}) 등의 금속 산화제를 투입하여 의약품물질 등을 처리하는 경우도 보고되고 있으나(Hu et al., 2009), 가장 보편적으로 사용되는 공법은 오존(O_3), 펜톤(Fenton), 광반응(photolysis) 등에 기반한 고도산화공정(advanced oxidation process; AOP)이다. 고도산화 공정에서는 수산화라디칼($\cdot OH$)이라는 물질을 생성하여 그 강력한 산화력(산화전위: 2.8 V)을 이용하여 미량오염물질들을 분해시키며 의약품물질 등 많은 미량오염물질들에 대해 높은 반응성($k_{\cdot OH} = 10^9-10^{10} M^{-1}s^{-1}$) (Lian et. al., 2017)을 보인다(그림 1). 수산화라디칼의 주된 반응경로는 전자이동반응(electron transfer reaction), 수소분리반응(hydrogen

abstraction reaction)과 첨가 반응(addition reaction)이며, 비교적 비선택적으로 수중물질들과 반응하기 때문에 동시에 여러 오염물질들을 처리할 수 있다는 장점이 있다(Gligorovski et al., 2015). 일반적으로 고도산화공정에서는 O_3/H_2O_2 , O_3/UV , UV/H_2O_2 , Fenton reaction 등을 활용하여 수산화라디칼을 생성하며, 이러한 공정은 난분해성 독성물질을 함유한 폐수처리, 물재이용공정, 정수처리 및 하수처리공정에 일부 적용되고 있다. 실제로 난분해성 미량오염물질 처리에 고도산화공정을 적용한 사례들을 살펴보면, 고도산화공정이 일반 염소 및 오존 산화에 비해 높은 제거효율을 보이는 여러 연구결과들을 확인할 수 있다. 이외에도, 과산화이황산($S_2O_8^{2-}$) 등을 이용한 $SO_4^{\cdot -}$ 라디칼 기반의 고도산화공정 또한 최근에는 주목받고 있다. $SO_4^{\cdot -}$ ($E = 2.5-3.1 V$; Neta et al., 1977)은 $\cdot OH$ ($E = 1.9-2.7 V$; Buxton et al., 1988)보다 더 높은 산화력을 갖고 있으며 전자이동반응 경로로 주로 반응하는 라디칼이다.

과불화화합물이나 과염소산염(ClO_4^-)과 같은 산화처리 효율성이 낮은 일부 미량오염물질들을 대상으로 환원 처리기술 또한 활발히 연구되고 있다. 영가철(Fe^0) 등의 금속 환원제를 이용한 처리기술도 다수 개발되고 있으며, 최근에는 플라즈마나 광반응에 기반한 고도환원공정(advanced reduction process; ARP)도 주목을 받고 있다. SO_3^{2-} 나 I^- 와 같은 sensitizer에 UV 광원을 조사할 때 발생하는 수화전자(e_{aq}^-)는 매우 강력한 환원제로, 미량오염물질 중에서도 특히 난분해성으로 알려져 있는 과불화화합물도 분해가 되는 것으로 보고되었다(Gu et al.,

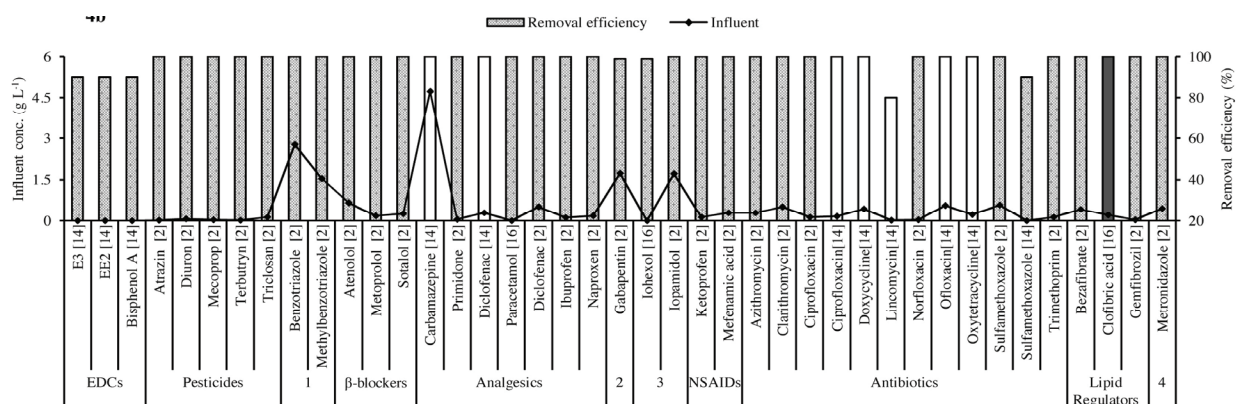


그림 1. 고도산화처리(UV/H₂O₂)의 미량오염물질 처리효율(Ahmed et al., 2017)

2016; Park et al., 2011).

다른 화학적 처리기술로는 전기화학 기반 처리기술이 있다. Boron doped diamond나 doped-SnO₂, PbO₂, doped-TiO₂ 소재의 전극에 전류를 흘려 직접전자전달(direct electron transfer)반응 또는 수산화라디칼 등을 발생시키는 매개전자전달(mediated electron transfer)반응을 통해 다양한 미량오염 물질을 분해한다(Chaplin, 2014). 이외에도 광촉매 기술과 수소를 환원제로 사용하는 금속촉매기반 기술 등 다양한 화학적 기법을 활용한 미량오염물질의 처리기술들이 연구되고 있다.

막여과(Membrane Filtration)

국·내외적으로 다양한 수처리를 위해서 압력식 막여과 공정이 많이 사용되고 있다. 이러한 막여과 공정은 분리막의 기공 크기에 따라 4가지 공정으로 분류될 수 있다. 일반적으로 분리막 내 기공의 크기가 0.1 μ m 이상일 경우 정밀여과(microfiltration), 1 nm 이상 0.1 μ m 이내일 경우 한외여과(ultrafiltration), 2 nm 이하일 경우 나노여과(nanofiltration) 그리고 기공이 없는 경우 역삼투법(reverse osmosis)로 분류된다.

수중 내 미량오염물질은 수백 g/mol 정도의 분자량을 가지고 있어 정밀여과를 이용한 미량오염물질의 효율적인 제거는 거의 불가능에 가깝다. 따라서 한외여과를 이용한 미량오염물질 제거 기술에 대한 연구가 많이 진행되고 있다. 한외여과를 이용한 미량오염물질의 제거는 분리막 특성의 영향을 크게 받는 것으로 나타난다. 특히, 분리막 기공의 크기가 작을수록 미량오염물질의 제거 효율이 증가하는 것을 알 수 있다(Comerton et al., 2017). 또한, 한외여과 분리막의 재질 역시 미량오염물질의 제거 효율에 영향을 미치고 세라믹 분리막보다 고분자 분리막에서 높은 제거 효율이 관찰되는데 이러한 차이는 분리막의 소수성 차이에서 발생하는 것을 알 수 있다(Kaminska et al., 2015).

한외여과보다 더 작은 기공으로 인해 이온 성분의 제거가 가능한 나노여과 및 역삼투를 이용한 미량오염물질 제거 연구가 매우 활발하게 진행되고 있다. 특히, 하수 재이용을 위해서는

하수 내 존재하는 오염물질의 제거가 필수적인데 이를 위해 나노여과나 역삼투 공법이 많이 적용되고 있어 미량오염물질의 동시 제거가 가능하다는 점에서 많은 장점을 가지고 있다. 나노여과와 역삼투법을 비교하면 나노여과 분리막의 기공이 역삼투 분리막보다 더 크기 때문에 제거율이 더 낮다는 것을 알 수 있다(Couarraze et al., 1989). 또한, 동일한 분리막을 사용하더라도 미량오염물질의 제거 효율에서 큰 차이를 보이는 것을 확인할 수 있는데 그 원인은 미량오염물질의 물리화학적 특성의 차이에서 기인한다. 즉, 미량오염물질은 친소수성, 표면 전하, 기능기, 분자량 및 pK_a 등의 특성이 모두 다르기 때문에 각각의 제거 효율에 큰 차이를 나타낼 수 있다(Bellona et al., 2004).

이러한 분리막을 이용한 미량오염물질의 제거 기작은 그림 2와 같이 크게 4가지로 나타낼 수 있다(Ojajuni et al., 2015). 첫 번째는 크기 배제(size exclusion) 효과이다. 유입수는 분리막 기공을 통과하면서 오염물질이 제거되면서 처리된다. 즉, 분리막 기공보다 큰 오염물질들이 쉽게 제거될 수 있다. 두 번째는 소수성 상호작용(hydrophobic interaction)이다. 두 물질의 유사한 소수성을 가지고 있다면 두 물질은 서로 끌어당기게 되고 결국 강하게 결합하게 된다. 즉, 분리막과 미량오염물질의 친소수성이 비슷하다면 미량오염물질이 분리막 표면에 부착되어 유입수로부터 제거된다. 세 번째는 정전기적 상호작용이다. 전하를 가지고 있는 모든 물질들은 같은 성질을 가지고 있으면 인력이 발생하고 다른 성질을 가지고 있으면 척력을 유발한다. 즉, 분리막 표면이 음전하를 띠고 있다면 음이온을 밀어내서 분리막을 통과시키는 것을 방해하게 되고 이로 인해 제거 효율이 향상된다. 마지막으로 막오염층에 의한 흡착 제거이다. 오염물질이 분리막에 의해 제거되면 유입수 내에 농축될 수도 있지만 동시에 분리막 표면에 축적되어 치밀한 막오염층을 형성할 수 있다. 이때 막오염층에 의해서 미량오염물질이 흡착 제거될 수 있다.

앞서 설명된 막여과 공정뿐만 아니라 최근에는 정삼투 및 막증발과 같은 신개념 막여과 공정들이 연구되고 있다. 정삼투법은 역삼투법에 사용될 수 있는 수준의 분리막을 이용하여 고농

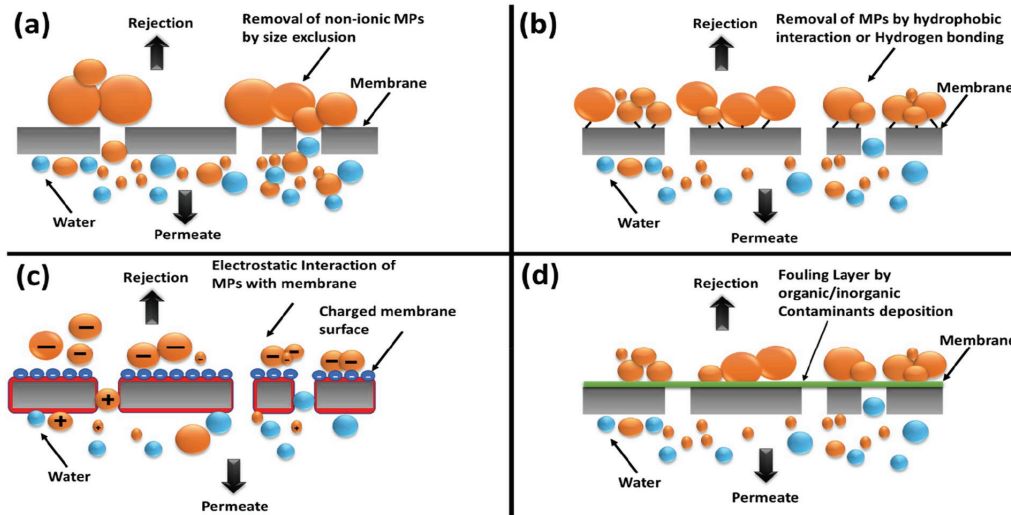


그림 2. 분리막의 미량오염물질 제거 기작 (a) size exclusion, (b) hydrophobic interaction, (c) electrostatic interaction, (d) adsorption by fouling layers.

도 용액과 저농도 용액 사이에 자연적으로 발생하는 삼투압을 이용하여 오염물질이 많이 존재하는 저농도 용액을 처리하는 공정으로 비슷한 분리막을 사용함에도 불구하고 역삼투법보다 더 높은 미량오염물질 제거 효율을 달성할 수 있다(Xie et al., 2012). 막증발법은 다공성의 소수성 분리막을 이용하여 기화된 물 분자의 분압 차이를 이용하여 수처리를 하는 방식이다. 따라서, 물에 녹아있는 오염물질에 대해 매우 높은 제거효율을 확보할 수 있는 장점이 있으나 휘발성 오염물질의 경우 제거가 어렵다(Yao et al., 2018).

흡착(Adsorption)

흡착은 상(phase) 간의 물질이동(mass transfer) 기작 중 하나로, 액체에 용해되거나 공기에 기상으로 존재하는 물질이 고형물인 흡착제(adsorbent)의 표면에 달라붙는 현상이다. 오염물질에 대한 흡착능과 흡착 선택성을 향상시키기 위한 흡착 소재 개발 및 흡착제 개질 연구는 지난 수십년간 상당한 인기를 끌어난 연구 주제이며, 앞으로도 그 추세는 계속 이어질 것으로 전망된다. 탄소나노튜브나 그래핀 계열 물질, metal-organic framework, molecularly imprinted polymer, 바이오차, 가교화 키토산(crosslinked chitosan), 세균·조류기원물질, 제강슬래그 등 지금까지 수많은 흡착제의 개발과 시험이 이루어

져 왔다. 그럼에도 불구하고 실제 수처리 현장에서 사용되는 흡착제는 활성탄, 제올라이트, 이온교환수지 등 한정된 몇 가지 부류로 제한되어 있는데, 이것은 여전히 이들 상용 흡착제들이 새롭게 제안되고 있는 것들보다 경제성, 처리효율, 범용성 등의 측면에서 우위에 있기 때문이다.

수중 미량오염물질의 대부분을 차지하는 유기물질의 처리 용도로는 활성탄이 다른 흡착제보다 압도적으로 높은 비용 대비 효과를 자랑한다. 활성탄은 석탄, 토탄(peat), 코코넛 껍질, 목재 등의 원료를 탄화(carbonization)시킨 후 열적 또는 화학적 활성화 단계를 거쳐 1000 m²/g 수준의 비표면적을 갖는 다공성 물질로 만든 것이다. 수처리에 활용되는 활성탄은 평균입자크기가 20~50 μm인 분말활성탄(powdered activated carbon, PAC)과 평균입자크기 0.5~3 mm인 입상활성탄(granular activated carbon, GAC)으로 나뉜다. 분말활성탄은 오염수에 활성탄을 투입하여 일정 시간 혼화시킨 후 침전을 이용하여 미량오염물질이 흡착된 활성탄을 물로부터 분리하는 방법으로 적용되며, 정수장의 기존 설비에 호환성이 높아 일시적이거나 특정 계절에만 발생하는 미량오염물질 문제에 대응하는 데 효과적이다. 입상활성탄은 주로 여과지(packed bed) 형태로 적용되며, 미량오염물질이 지속적으로 유입되는 환경에서 분말활성탄보다 현저하게 적은 활성탄 소모율(carbon usage rate)로 동일

한 처리효율 달성이 가능하다. 조류기원물질이나 여름철 농약류 유입에 대비하는 것이 주요 목적이었던 과거에는 분말활성탄 공정의 활용성이 높았으나, 소독부산물, 과불화화합물, 내분비계 장애물질, 의약품 및 개인위생·생활용품의 독성영향으로부터 인간과 수생태계를 보호할 필요성이 높아지는 최근의 국내외 현실에서는 입상활성탄 공정을 설치하여 정수장이나 하·폐수처리장의 처리공정을 고도화하는 것이 보다 중점적인 고려 대상이다. 입상활성탄 공정은 신규 활성탄 또는 재생 활성탄을 여과지에 충전한 후 일정 기간(파과점)이 지나기 전까지 대부분의 유기성 미량오염물질에 대하여 매우 높은 제거효율을 나타낸다. 특히, 과불화화합물 등 생물학적·화학적 처리에 대한 저항성이 매우 높은 미량오염물질도 이 파과점 도달 이전까지는 90% 이상의 높은 처리효율을 얻을 수 있는 것으로 알려져 있다.

수중 미량오염물질 처리기술의 한계와 발전방향

화학적 처리

미량오염물질들을 무해한 물질로 분해한다는 뚜렷한 장점을 보이는 화학적 처리기술의 성공적인 적용을 위해서는 극복해야 하는 문제들이 있다. 첫째, 산화환원 반응에 기반한 화학적 처

리는 흡착이나 막여과 공정 등에 비해 상대적으로 반응시간이 길어 이를 극복하기 위해 꾸준히 새로운 소재 및 기술과 공정의 개량화를 통해 반응시간을 향상시키는 시도가 이루어지고 있다. 또한, 화학처리과정에서 소요되는 에너지의 효율성을 향상시킬 필요도 있다. 오존이나 UV/H_2O_2 , $UV/persulfate$ 등의 고도산화처리기술의 경우 요구되는 에너지 소모량이 대체로 1 kWh/m^3 이하이지만 플라즈마나 전기화학 기술의 경우 $1\text{--}100 \text{ kWh/m}^3$ 정도이고 광촉매의 경우에는 100 kWh/m^3 이상이 소요된다. 이는 고가의 설치 및 운영비용으로 이어져 현재까지는 주로 미국, 캐나다, 프랑스, 일본 등 일부 선진국을 중심으로만 운영된 사례가 있다. 최근 들어 우리나라를 비롯해 중국, 이스라엘 등 동아시아, 중동지역 나라들에서도 도입을 검토하고 있고 일부 적용 사례들도 있으나, 고도화화공정 기술의 국내 적용은 아직까지 도입 초기단계라고 할 수 있다.

이외에도 산화처리와 환원처리 둘 다 오염물질을 화학적으로 변화시키므로 일부 분해 반응경로에서는 더 유해한 부산물이 생성될 수 있다. 예를 들어 오존을 투입하였을 때 수중에 Br^- 가 존재하는 경우 브롬산염(BrO_3^-)이 생성될 수 있으며, 전기화학처리기술에서도 염소산염(ClO_3^-)이나 과염소산염(ClO_4^-)이 생성되는 사례가 보고된 바 있다(Hubler et al., 2015). 대부

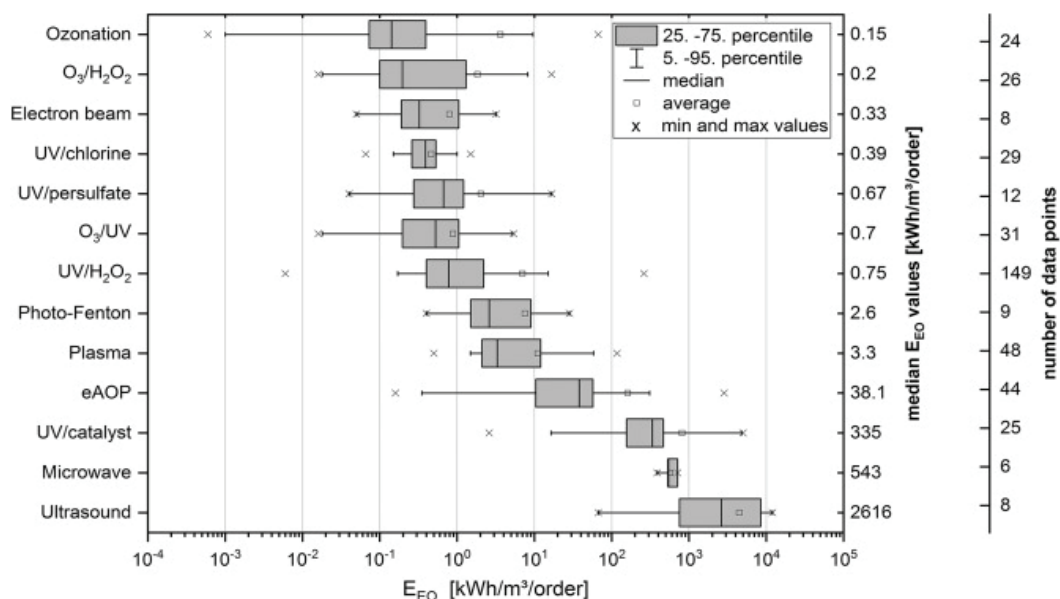


그림 3. 고도산화공정 별 에너지 소모량(Miklos et al., 2018)

분의 부산물 생성은 공정 운영조건의 최적화 및 기술 개량을 통해 최소화할 수 있으며 pilot scale 및 full scale에서 이와 관련된 연구가 지속적으로 이루어져야 한다.

환원기술의 경우 산화처리와 비교하여 다른 경쟁물질의 영향이 없이 비교적 선택적으로 타겟 미량오염물질과 반응할 수 있으나, 수중에 존재하는 용존산소가 경쟁물질로서 함께 환원된다. 이로 인해 처리기술의 효율성이 저감되며, 또한 처리수를 하천이나 자연수계에 방류할 경우에는 폭기 과정을 통해 다시 산소를 충분히 용해시킬 필요가 있다. 그러므로 용존산소와 경쟁하지 않고 선택적으로 오염물질과 반응하는 환원기술 및 반응조 개발과 관련된 연구도 이루어져야 한다.

다른 처리기술과 유사하게 화학처리기술 또한 최근에 주목받고 있는 과불화화합물에 대해서는 아직까지 많은 연구가 필요하다. 과불화화합물 중 대표물질인 perfluorooctanoate(PFOA)와 perfluorooctane sulfonate(PFOS)의 화학적 처리는 여러 논문에서 보고되었으나 탄소길이가 4개 정도의 perfluorobutanoate(PFBA) 등은 처리효율이 낮은 것으로 나타났다(Tenorio et al., 2020). 또한, 과불화화합물로 오염된 지하수 및 하천은 대부분 단일 과불화화합물 물질만 존재하는 것이 아니라 여러 과불화화합물과 그 전구체 물질들이 함께 존재하여 이들을 모두 함께 효율적으로 처리하는 기술 및 공정의 개발이 시급하다.

막여과

앞서 기술한 것처럼 막여과 공정이 수중 내 미량오염물질을 제거하는 데 효과적이라는 기존 연구에도 불구하고 현재 단계에서 막여과 공정의 성공적인 적용을 위해서는 여러 가지 문제점을 극복해야 한다. 한외여과에서 미량오염물질의 제거는 한외여과의 주요 제거 기작인 크기 배제(size exclusion) 효과가 아닌 흡착에 의한 미량오염물질 제거이다(Comerton et al., 2007). 이는 일반적으로 미량오염물질의 분자량에 비해 한외여과 분리막의 상대적으로 큰 기공으로 인해 제거 효율이 높지 않기 때문이다. 따라서, 한외여과의 미량오염물질의 제거 효율을 향상시키기 위해서는 새로운 형태의 분리막 개발이 필요하

다. 실리카 나노입자나 carbon nanotube(CNT), TiO_2 및 graphene oxide(GO) 등을 활용하여 분리막 제조 시 미량오염물질에 대해 80% 이상의 제거율을 달성한 연구들이 보고되었다(Kaminska et al., 2015). 또한 한외여과 및 고도산화의 융합을 통해 미량오염물질의 제거 효율을 향상시킬 수 있다.

나노여과, 역삼투 및 정삼투 분리막은 한외여과 분리막에 비해서 매우 작은 기공을 가지고 있기 때문에 이온성 미량오염물질에 대한 제거율이 매우 높다. 이는 미량오염물질의 제거기작이 그림 2의 크기 배제(size exclusion), 소수성 상호작용(hydrophobic interaction) 및 정전기적 상호작용(electrostatic interaction)이기 때문이다. 그러나 비이온성 미량오염물질의 경우 정전기적 상호작용이 없기 때문에 제거율이 낮다는 문제가 발생한다(Nghiem et al., 2005). 따라서 비이온성 미량오염물질의 제거 효율을 높이기 위해서는 분리막 표면의 물리화학적 특성을 향상시켜야 한다. 실리카 나노입자나 GO를 이용한 역삼투 분리막 표면 개질을 통해 미량오염물질을 제거율을 높일 수 있다(Rakhshan and Pakizeh, 2015). 융합공정 개발 역시 매우 높은 제거율을 확보할 수 있다. 즉, 미량오염물질은 다중 분리막에 의해서 제거되어 순도가 매우 높은 정수를 생산할 수 있다(Xie et al., 2013).

최근 많이 연구되는 신개념 막여과 공정인 막증발법은 앞서 설명한 압력식 막여과 공정과 다르게 미량오염물질의 휘발성이 제거 특성에 대한 가장 큰 영향 인자이다. 따라서, 휘발성이 높은 미량오염물질은 막증발 공정에서 제거가 어렵다고 할 수 있다. 휘발성 미량오염물질을 제거하기 위해서는 막증발법 처리수를 재처리할 수 있는 흡착 및 고도산화와 같은 추가 공정이 필요하다. 또한, 오염물질의 흡착에 의해 분리막의 소수성이 친수화되는 현상을 방지하기 위해서 그래핀이나 CNT와 같은 첨가제를 이용하여 분리막의 소수성을 향상 및 유지시킬 수 있는 방안의 도출이 필요하다.

대부분의 막여과 공정은 미량오염물질의 높은 제거 특성으로 인해 유입수 내 미량오염물질이 농축되어 농도가 매우 높은 농축수가 발생한다. 일반적으로 농축수가 배출허용기준을 만족할

경우, 그대로 하천이나 바다로 배출될 수 있다. 그러나 높은 미량오염물질 농도로 인해 농축수 내 미량오염물질 처리를 위한 흡착이나 고도산화를 적용하거나 농축수의 무방류 혹은 최소방류를 위한 공정의 개발이 필요하다.

흡착

입상활성탄 공정의 미량오염물질 처리효율을 저감시키는 가장 주요한 현장 요인은 용존유기물의 존재이다. 물속에 존재하는 용존유기물 중 저분자 물질은 활성탄의 흡착 site를 두고 미량오염물질과 경쟁하며, 고분자 물질은 활성탄의 기공을 막음으로써 활성탄의 미량오염물질 흡착능을 저감시킨다. 따라서 용존유기물의 존재는 입상활성탄 여과지의 파괴시점을 앞당겨 교체주기를 단축시키고, 궁극적으로 처리의 경제성을 악화시킨다. 용존유기물의 흡착저해 현상과 관련된 가장 치명적인 기술적 한계는 흡착능 저해의 정도가 용존유기물의 농도뿐만 아니라 특성에 따라서도 크게 달라지며, 용존유기물의 농도와 특성이 미량오염물질 흡착능 저해에 미치는 영향이 아직까지 명확히 규명되어 있지 못하다는 점이다. 입상활성탄 여과지에 유입되는 용존유기물의 농도와 특성은 처리장별로 다르며, 한 처리장 내에서도 계절별로 상당한 편차를 보이므로, 몇 개의 대표 시료를 이용한 시험으로 입상활성탄 공정의 미량오염물질 제거 효율과 활성탄 교체주기를 신뢰성 있게 예측할 수 있는 모형을 구축하기는 상당히 어렵다. 실제 수처리 현장에서 역세정, 생물학적 분해 등이 입상활성탄 공정의 효율에 미치는 영향을 실험실 규모 실험에서 재현하는 것 또한 쉽지 않다. 이러한 이유로 실험실 규모 시험연구에서 도출한 미량오염물질의 처리효율 예측치와 활성탄 교체주기가 실제 현장의 결과와 큰 차이를 보이는 경우도 허다하다. 아직까지 파일럿 규모 실험을 수행하지 않고서는 현장규모 장치에서 용존유기물이 미량오염물질 흡착능에 미치는 영향을 정확하게 예측해 내기 어렵다는 것이 학계의 중론이다. 파일럿 규모 실험에 소요되는 예산과 시간을 고려했을 때, 입상활성탄 공정을 현장에 설치할 때마다 파일럿 규모 실험을 실시하는 것 또한 현실적이지 못하다.

현재의 기술 수준에서 입상활성탄 공정은 수중 미량오염물질 제거에서 어떤 공정보다도 경제성과 범용성이 높은 단위공정이므로, 이 공정의 신뢰성과 예측가능성을 높이는 작업은 무엇보다 시급한 일이다. 다행히 복잡한 유기물질 분자를 분석해 내는 기술이 고도화됨에 따라 용존유기물의 특성을 심도 있게 고찰하는 것이 점차 가능해지고 있다. 앞으로 이러한 고도의 유기물질 분석기술로부터 얻어진 결과를 입상활성탄 기공 구조 및 표면 특성, 다양한 용존유기물 종류 및 농도 조건에서의 미량오염물질 흡착특성 시험결과와 결합하여 해석함으로써 용존유기물의 미량오염물질 흡착능 저해 현상에 대한 근본적 이해를 향상시킬 필요가 있다. 이러한 근본적 이해가 충분히 축적되면, 궁극적으로 실험실 실험의 결과를 토대로 실제 현장 입상활성탄 공정의 성능을 신뢰성 있게 예측할 수 있는 모형을 개발할 수 있을 것으로 기대된다. 또한, 입상활성탄 공정의 미량오염물질의 처리효율을 대변하는 경제적이고 간편한 측정인자[지표물질(indicator) 혹은 대체물질(surrogate)]을 개발하고, 이를 공정 운전에 활용하는 현장형 공정 모니터링 기술도 앞으로 지속적인 연구개발이 필요한 분야이다.

단위기술 융합 발전방향

미량오염물질의 효율적인 처리를 위해서 앞서 서술한 기술들을 단일적으로 사용하기보다 융합하여 사용하는 방안 또한 해법이 될 수 있다. 예를 들어, 흡착기술이나 막분리 기술을 이용하여 원수에서 오염물질을 분리 및 농축한 후에, 이를 화학처리로 분해하여 오염물질을 저감시킬 수 있다. 과염소산염과 질산염의 경우 이온교환수지로 수처리를 진행하고 사용된 수지를 재생할 때 발생하는 brine 내의 오염물질들을 촉매환원처리를 통해 처리하는 연구결과가 보고되었다(Bergquist et al., 2016; Liu et al., 2013). 이외에도, 막에 촉매를 담지하여 물리적 분리와 화학적 처리를 동시에 하는 촉매막 기술, 산화-환원 처리를 동시에 하는 광촉매 기술 등에 대한 연구도 활발히 진행될 수 있다. 수질 특성 및 기후 특성이 다른 여러 수처리시설에 적합하게 이러한 단위기술들의 융합이 이루어지기 위

해서는 각 처리공정을 통일된 규격의 모듈로 구성하는 모듈 처리 접근법(modular treatment approach)에 대한 연구 또한 이루어질 필요가 있다(Zodrow et al., 2017).

제언

먹는물 공급과 물환경이 인간의 건강과 삶의 질에 미치는 지대한 영향으로 말미암아 수처리 기술의 현장 적용은 매우 신중하게 이루어지며, 다른 분야에 비하여 성숙도가 높은 기술을 현장에서 선호하는 경향이 강하다. 지금까지의 경험을 통해 인류는 새로운 수처리 기술의 개발, 발전, 적용은 연구자와 엔지니어 그룹의 수많은 성공과 실패 사례가 축적된 산물이며, 어느 한 개인의 특별한 아이디어를 기반으로 단시간 내에 달성될 수 있는 것이 아님을 체득해 왔다. 1910년대에 개발된 활성슬러지 공정은 여전히 하수처리의 주요 단위공정으로 활용되고 있으며, 그사이 수많은 기술개발과 현장적용 경험을 바탕으로 설계와 운영상의 요령, 영양염류 처리효율 향상을 위한 변법 등이 발전되어 왔다. 응집, 여과, 소독 등 현재 정수시설의 근간이 되는 단위공정들 또한 그 발전양상은 활성슬러지 공정과 크게 다르지 않다. 비교적 근래에 개발된 단위공정들도 많은 연구팀과 엔지니어 그룹의 노력으로 기술의 성숙과 현장적용성 향상이 점진적으로 이루어지고 있으며, 그 과정에서 일부 기술들은 상당히 많은 축적된 노력에도 불구하고 점차 도태되어 가기도 한다. 아나모кс, 광촉매 산화, 미생물 연료전지 등 수많은 수처리 기술로부터 우리는 이러한 발전양상을 지금 이 시점에 확인하고 있다.

이러한 수처리 기술의 특징에도 불구하고 정부와 산업체가 수처리 관련 연구개발사업을 지원하고 관리하는 방식이 다른 공학·과학 분야의 방식과 크게 다르지 않은 것은 상당히 안타까운 일이다. 수처리 분야 연구자들이 장기간의 로드맵을 가지고 성공과 실패를 거듭하면서 기술의 성숙도를 꾸준히 향상시킬 수 있도록 지원받는 대신에 기존 연구과제와의 중복성, 정량적인 기술개발 목표의 달성 등 타 산업 분야 연구개발의 핵

심지표로 평가받도록 강제되는 것은 이 분야의 기술개발에 있어 결코 바람직한 일이 아니다. 본 이슈레터에서 소개한, 미량오염물질 처리의 핵심기술(화학적 처리, 막여과, 흡착 등)은 모두 이미 수십년간 발전을 거듭해 온 기술이다. 그럼에도 불구하고, 이들은 여전히 앞으로 수십년간 꾸준한 투자를 통해 발전하고 개선될 필요가 있으며, 각 기술의 장점을 살려 보다 발전적이고 혁신적인 융합기술을 도출하는 전략도 지속적으로 검토되어야 한다. 깨끗한 물 공급과 물환경에 대한 사회적 니즈의 변화, 신규 미량오염물질의 발견과 기존에 알려진 미량오염물질이 미치는 위해성 재발견, 신소재 개발 등 관련 기술의 혁신, 하수 재이용 등으로 인한 미량오염물질 인체 노출경로와 노출량 변화, 온실가스 발생과 에너지 사용량 저감에 대한 국가적 관심도 변화 등 다양한 사회경제적·기술적 변동요인으로 인해 미량오염물질 처리기술들의 적용성은 끊임없이 변화한다. 따라서, 심지어 동일한 기술이라 할지라도 유의한 변동요인이 발생하였다면 그 경제성과 적용성 등이 재평가하기 위한 연구개발이 반복해서 이루어질 필요가 있다.

연구개발사업과 관련한 의사결정을 담당하는 주체들은 미량오염물질로 인한 수질오염에 대한 대응기술이 갖는 이러한 특성을 충분히 이해하고, 이를 연구개발사업의 기획, 지원, 관리, 평가에 적극적으로 고려해야 한다. 3년 내외의 짧은 기간 안에 신규기술의 개발과 현장실증까지를 마무리하고, 설정한 기술개발 정량적 목표(처리효율, 예측 정확도 등)와 과학적 연구개발 성과(논문게재 등)의 동시 달성을 요구하며, 기존의 수처리 기술과 완전히 차별화된 기술의 개발을 요구하는 기존의 연구개발사업 및 연구개발과제 관리 방식에서 벗어나, 연구자들이 각자 중점을 두는 기술개발 단계에 맞춰 소신 있게 연구를 진행할 수 있는 기반을 마련하고 이를 지원해야 한다. 이러한 연구환경의 혁신적 변화가 있을 때, 우리의 힘으로 경쟁력 있는 수질오염 대응기술을 개발하고, 이들 기술의 성숙도를 꾸준히 향상시켜 현장에서 안정적으로 적용될 수 있도록 하며, 그 과정에서 전문인력을 양성함으로써 그들이 관련 기술과 역량의 발전을 선도하는, 이른바 기술과 인재의 선순환이 이루어질 수 있을 것이다.

참고문헌

- Ahmed, M.B., Zhou, J.L., Ngo, H.H., Guo, W., Thomaidis, N.S., Xu, J., 2017. Progress in the biological and chemical treatment technologies for emerging contaminant removal from wastewater: A critical review. *Journal of Hazardous Materials*, vol. 323, Part A, pp. 274–298.
- Bellona, C., Drewes, J.E., Xu, P., Amy, G., 2004. Factors affecting the rejection of organic solutes during NF/RO treatment—a literature review. *Water Research*, vol. 38, no. 12, pp. 2795–2809.
- Bergquist, A.M., Choe, J.K., Strathmann, T.J., Werth, C.J., 2016. Evaluation of a hybrid ion exchange–catalyst treatment technology for nitrate removal from drinking water. *Water Research*, vol. 96, pp. 177–187.
- Buxton, G., 1988. Critical review of rate constants for reactions of hydrated electrons, hydrogen atoms and hydroxyl radicals in aqueous solution. *Journal of Physical and Chemical Reference Data*, vol. 17, no. 2, pp. 513–886.
- Chaplin, B.P., 2014. Critical review of electrochemical advanced oxidation processes for water treatment applications. *Environmental Science: Processes & Impacts*, vol. 16, pp. 1182–1203.
- Anna M. Comerton, Robert C. Andrews, David M. Bagley, Paul Yang, 2007. Membrane adsorption of endocrine disrupting compounds and pharmaceutically active compounds. *Journal of Membrane Science*, vol. 303(1–2), pp. 267–277.
- Gligorovski S., Strekowski, R., Barbati, S., Vione, D., 2015. Environmental implications of hydroxyl radicals (OH). *Chemical Reviews*, vol. 115, no. 24, pp. 13051–13092.
- Gu Y., Dong, W., Luo, C., Liu, T., 2016. Efficient reductive decomposition of perfluorooctanesulfonate in a high photon flux UV/sulfite system. *Environmental Science & Technology*, vol. 50, no. 19, pp. 10554–10561.
- Hu, L., Martin, H.M., Arce-Bulted, O., Sugihara, M.N., Keating, K.A., Strathmann, T.J., 2009. Oxidation of carbamazepine by Mn(VII) and Fe(VI): reaction kinetics and mechanism. *Environmental Science & Technology*, vol. 43, no. 2, pp. 509–515.
- Kaminska, G., Bohdziewicz, J., Calvo, J.I., Prádanos, P., Palacio, L., Hernández, A., 2015. Fabrication and characterization of polyethersulfone nanocomposite membranes for the removal of endocrine disrupting micropollutants from wastewater: Mechanisms and performance. *Journal of Membrane Science*, vol. 493, pp. 66–79.
- Lian, L., Yao, B., Hou, S., Fang, J., Yan, S., Song, W., 2017. Kinetic study of hydroxyl and sulfate radical-mediated oxidation of pharmaceuticals in wastewater effluents. *Environmental Science & Technology*, vol. 51, no. 5, pp. 2954–2962.
- Liu, J., Choe, J.K., Sasnow, Z., Werth, C.J., Strathmann, T.J., 2013. Application of a Re–Pd bimetallic catalyst for treatment of perchlorate in waste ion-exchange regeneration brine. *Water Research*, vol. 47, pp. 91–101.
- Luo, Y., Guo, W., Ngo, H.H., Nghiem, L.D., Hai, F.I., Zhang, J., Liang, S., 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*, vol. 473–474, pp. 619–641.
- Nam, S.W., Zoh, K.D., 2013. Fates and removals of micropollutants in drinking water treatment. *Journal of Environmental Health and Science*, vol. 39, no. 5, pp. 391–407.
- Neta, P., Madhavan, V., Zemel, H., Fessenden, R.W., 1977. Rate constants and mechanism of reaction of sulfate radical anion with aromatic compounds. *Journal of the American Chemical Society*, vol. 99, no. 1, pp. 163,164.
- Ojajuni, O., Saroj, D., Cavalli, G., 2015. Removal of organic micropollutants using membrane-assisted processes: A review of recent progress. *Environmental Technology Reviews*, vol. 4, no. 1, pp. 17–37.
- Park, H., Vecitis, C.D., Cheng, J., Dalleska, N.F., Mader, B.T., Hoffmann, M.R., 2011. Reductive degradation of perfluoroalkyl compounds with aquated electrons generated from iodide photolysis at 254 nm. *Photochemical & Photobiological Sciences*, vol. 10, pp. 1945–1953.
- Rakhshan, N., Pakizeh, M., 2015. Removal of triazines from water using a novel OA modified SiO₂/PA/PSf nanocomposite membrane. *Separation and Purification Technology*, vol. 147, pp. 245–256.
- Nghiem, L.D., Schäfer, A.I., Elimelech, M., 2005. Pharmaceutical retention mechanisms by nanofiltration membranes. *Environmental Science & Technology*, vol. 39, no. 19, pp. 7698–7705.
- Tenorio, R., Liu, J., Xiao, X., Maizel, A., Higgins, C.P., Schaefer, C.E., Strathmann, T.J., 2020. Destruction of per- and polyfluoroalkyl substances (PFASs) in aqueous film-forming foam (AFFF) with UV-sulfite photoreductive treatment. *Environmental Science & Technology*, vol. 54, no. 11, pp. 6957–6967.
- Xie, M., Nghiem, L.D., Price, W.E., Elimelech, M., 2012. Comparison of the removal of hydrophobic trace organic contaminants by forward osmosis and reverse osmosis. *Water Research*, vol. 46, no. 8, pp. 2683–2692.
- Xie, M., Nghiem, L.D., Price, W.E., Elimelech, M., 2013. A forward osmosis-membrane distillation hybrid process for direct sewer mining: System performance and limitations. *Environmental Science & Technology*, vol. 47, no. 23, pp. 13486–13493.
- Yao, M., Woo, Y.C., Tijing, L.D. Choi, J.-S., Shon, H.K., 2018. Effects of volatile organic compounds on water recovery from produced water via vacuum membrane distillation. *Desalination*, vol. 440, pp. 146–155.
- Zodrow, K.R., Li, Q., Buono, R.M., Chen, W., Daigger, G., Dueñas-Osorio, L., Elimelech, M., Huang, X., Jiang, G., and Kim, J.-H., 2017. Advanced materials, technologies, and complex systems analyses: Emerging opportunities to enhance urban water security. *Environmental Science & Technology*, vol. 51, no. 18, pp. 10274–10281.

■ 집필진 소개(가나다 순)



김영진 교수는 현재 고려대학교 환경시스템 공학과에 조교수로 재직 중이며 주요 연구분야는 분리막 기반 담수화 공정 개발, 물-에너지-식량 넥서스를 위한 융합공정 개발, 하·폐수 재이용 공정 개발 등이다. 현재까지 ES&T, Journal of Membrane Science, Desalination, Bioresource Technology 등 국제저명학술지 논문 32편과 국내학술지 논문 2편을 게재하였다.

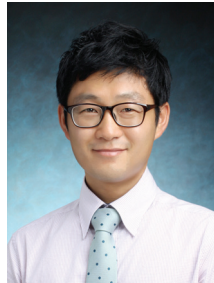


김형일 교수는 현재 연세대학교 건설환경공학과에 조교수로 재직 중이며 주요 연구분야는 신재생에너지를 활용한 수질정화 및 대기오염 물질 저감용 신기술 개발, 미량오염물질 제거를 위한 고도산화기술, 에너지 중립형 수처리 기술 개발, 환경정화용 건설복합 재료 개발 등이다. 현재까지 ES&T, Energy Environ. Sci., Appl. Catal. B: Environ. 등 환경분야 국제저명학술지에 게재된 13건을 포함해 42건의 국제학술지 논문을 게재했다. 산업통상자원부 국가기술표준원 물재이용(ISO/TC282) 전문위원으로 수처리기술 국제표준(ISO 20468-7, 고도산화 수처리기술 성능평가방법)을 제안했으며, 대한환경공학회/대한토목학회 국문편집위원, 대한상하수도학회 이사 등을 역임하고 있다.



최정권 교수는 현재 서울대학교 건설환경공학부 부교수로 재직 중이며 주요 연구 분야는 수처리 및 에너지 회수를 위한 화학적 처리와 지속가능성 평가로, 과불화화합물, 신종약품물질, 과염소산염을 포함한 여러 미량오염물질의 고도환원처리기술 기반의 화학적 분해 효율과 기작 및 부산물 생성 파악에 관련된 연구를 수행하고 있다. 또한, 최근에는 미량오염물질(과불화화합물)을 대상으로

압타머 기반 바이오센서도 개발하고 있다. 현재까지 ES&T와 Water Research 게재논문 11편을 포함하여 환경공학 및 환경화학 분야 국제저명학술지에 28편의 논문을 게재하였으며 한국물환경학회-대한상하수도학회 통합미래위원회 위원, 대한상하수도학회 이사 및 편집위원회 위원, 대한환경공학회 학술위원회 위원, 대한토목학회 국제위원회 위원 등을 역임하고 있다.



최용주 교수는 현재 서울대학교 건설환경공학부에 부교수로 재직 중이며 주요 연구분야는 하·폐수 처리 및 정수공정 미량오염물질 제거를 위한 흡착기술 및 흡착 신소재 개발, 기체투과막을 이용한 하·폐수 내 암모니아 회수기술, 오염 퇴적물 원위치 안정화 기술, 수동형 샘플러를 이용한 자연수계·퇴적물·수처리 시설의 미량오염물질 모니터링 기술 등이다. 현재까지 ES&T 게재논문 6편을 포함한 국제저명학술지 논문 45편과 국내학술지 논문 10편을 게재하였으며 한국물환경학회 이사, 대한상하수도학회 이사, 한국환경준설학회 총무이사, 한국지하수토양환경학회 이사, 응용생태공학회 이사 등을 역임하고 있다.

한국물환경학회-대한상하수도학회 통합 미래위원회

위원장 | 이재우, 최용주

위 원 | 김상현, 김영진, 김이중, 김형일, 명재욱, 박새롬, 박성직, 박제량, 박주영, 배성준, 배효관, 부찬희, 손아정, 윤석환, 이태권, 정석희, 정성필, 조강우, 조경화, 최정권

Water4FutureCity 2021년 1호

한국물환경학회 서울특별시 종로구 삼봉로 81 두산위브 파빌리온 1137호

Tel. 02-389-4250 | Fax. 02-385-3702 | E-mail. kswe@kswe.org

대한상하수도학회 서울특별시 강남구 광평로 280 로즈데일빌딩 1323호

Tel. 02-507-1170 | Fax. 02-502-1170 | E-mail. ksww@ksww.or.kr

※ 본 이슈레터는 2019년 1호부터 한국물환경학회와 대한상하수도학회가 공동으로 운영하는 통합 미래위원회에서 발간합니다.