

상수원 이용 호소(대청호) 내 니트로페놀류 및 살충제류 모니터링(부산대)



◀ 오정은, 문해란(부산대)

RuO_2/Ti 양극과 TiO_2 nanotube 음극을 이용한
고농도 암모니아 전기분해(서울과기대)

제올라이트와 황화철(FeS) 여재의 중금속 흡착 특성
(서울과기대, 두레환경건설)

Microbially Powered Electrochemical Systems
Coupled with Membrane-based Technology
for Sustainable Desalination and
Efficient Wastewater Treatment
(Amity Univ., Sharda Univ.,
BITS Pilani, Chonnam Natl. Univ.)



건설의 한계를 넘어선 태영의 창조본능

건설을 넘어 환경, 레저, 물류까지 태영의 가능성은 끝이 없습니다

TAEYOUNG

태영건설

46th
TAEYOUNG
태영건설 창립 46주년
www.taeyoung.com

편집인의 말

JKSEE는 “J-K-SEE (제이-케이-씨)”로 불러주십시오.
JKSEE는 지금도 발전하고 있고 앞으로도 발전합니다.

회원 여러분 안녕하세요? 신종 코로나바이러스 감염증(코로나19)의 전국적인 재확산으로 ‘슬기로운 비대면 생활’을 이어가시는 회원여러분께 기쁜 소식을 전해드립니다. 대한환경공학회지가 한국학술지인용색인(KCI)에서 제공하는 ‘KCI 2019 인용지수’ 기준 KCI Impact Factor(2년 기준) 및 중심성지수(3년 기준) 지표 모두에서 환경공학분야 영예의 1위를 차지했습니다. 회원 여러분의 성원과 노고로 대한환경공학회지는 지속적으로 발전하고 있으며, 앞으로도 환경공학분야를 대표하는 국문학술지로서 명성을 이어가도록 노력하겠습니다.

대한환경공학회지는 학회지의 질적 개선과 국제적 수준의 도약을 위해 e-Journal 발행을 통해 오픈 액세스 저널(Open access journals)로 발간하고 있으며, 이러한 노력을 인정받아 이미 지난 5월에 DOAJ(Directory of Open Access Journals)에 등재된 바 있습니다. 이를 통해 대한환경공학회지는 명실상부한 국제 규격을 갖춘 학술지로 인정받고 있으며, 구글 스칼라(Google Scholar)와 같은 메타데이터베이스와 연동되어 국문학술지 임에도 불구하고 국제적인 인용사례가 최근 증가 추세에 있습니다. 또한 저희 편집위원들은 이에 만족하지 않고 2021년에는 SCOPUS 등재 신청을 준비하고 있어 국문으로도 세계적인 학술지로 성장할 수 있도록 학술지의 국제화에 더욱 박차를 가하도록 하겠습니다. 향후 몰아칠 유사분야 학술지 통폐합을 대비해 질적으로 우수한 논문의 투고 및 게재를 더욱 장려하고 선진적인 온라인 투고 관리 시스템(manuscript management system), 편집보조 시스템(reference management system)의 개발 및 도입을 게을리 하지 않을 계획입니다. 이러한 모든 것은 회원 여러분의 관심과 성원이 없이는 불가능하오니 지속적인 관심과 성원 부탁드립니다.

이번 달도 4편의 소중한 논문을 투고해 주신 연구자와 귀중한 시간을 할애하여 논문심사를 해 주신 12분의 심사자에게 다시 감사드립니다. **여러분들이 있기에 JKSEE가 우리 곁에 있습니다.**

2020년 8월
편집위원장 정 승 우 (군산대)



부 편집위원장



이원태 (금오공대)



주진철 (한밭대)



정석희 (전남대)



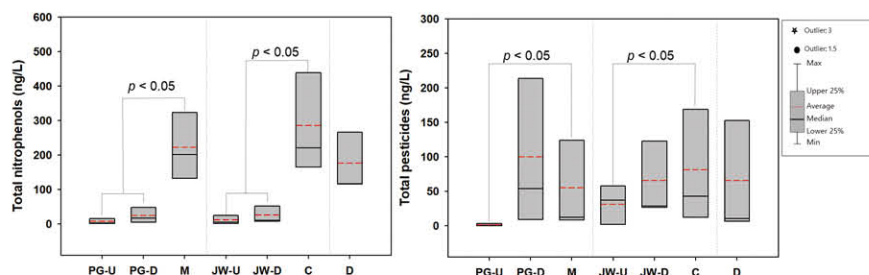
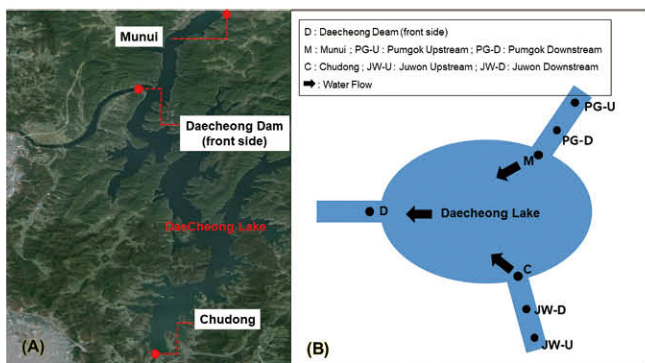
김상현 (연세대)



이경빈 (환경부)

이달의 연구자

2020년 7월호 『이달의 연구』논문은 “상수원 이용 호소(대청호) 내 니트로페놀류 및 살충제류 모니터링(문해란, 김다혜, 김기용, 심원진, 오정은)”입니다.



(a) Schematic diagram of the studied sampling location

(b) The concentration of three nitrophenols and five pesticides in each site.

대청호 수역의 미량오염물질 검출 및 거동과 원인규명

본 연구는 인구 3,470,000명 이상인 세종특별자치시, 대전광역시, 충청남·북도 22개 시군, 전라북도 13개 시군, 경상북도 상주시, 경기도 안성시 등 다양한 권역의 상수원으로 사용되어 ‘특정수질유해물질배출시설설치제한지역’으로 지정된 대청호 수역의 유해물질 검출 및 거동 파악을 위해 2015년 6월부터 10월까지 대청호 내 7개 지점에서 니트로페놀류 3종(4-nitrophenol, 2,4-dinitrophenol, 2-methyl-4,6-dinitrophenol) 및 살충제류 5종(acetamiprid, dinotefuran, thiacloprid, triflururon, chlorfluazuron)을 모니터링하였다.

LC/MS/MS를 사용하여 분석하였으며 대청호 내 니트로페놀류 3종의 검출 빈도는 71.4~100%, 총 농도는 ND(불검출)~487 ng/L로 나타났으며 미환경청 먹는물 수질기준(EPA Water Quality Criteria, 2,4-dinitrophenol: 70 µg/L; 4-nitrophenol: 13 µg/L; 2-methyl-4,6-dinitrophenol: 60 µg/L) 대비 약 1,000배 이상 낮은 수준으로 검출되었다. 살충제 5종의 총 농도는 ND~253ng/L였으며 이들 중 네오니코티노이드계(acetamiprid, dinotefuran, thiacloprid)와 벤조일우레아계(triflururon, chlorfluazuron)의 검출빈도는 각각 28.6~100%, 0~28.6% 수준으로 나타났다. 네오니코티노이드계의 평균 검출 빈도가 72.2%로 높은 수준을 보였으나 미환경청 acetamiprid 식수안전 기준치(497 µg/L)와 비교했을 때 약 1% 수준으로 검출되었다. 시료 채취 지점 간 농도 경향성을 통계적 방법(Mann-

Whitney U 검정)을 사용해 확인한 결과 산림 위주의 단일 피복 지인 하천 상류로부터 논, 밭, 주거, 교통 등의 복합피복지인 하천 하류 및 호소로 갈수록 농도가 증가하는 경향을 확인할 수 있었다. Spearman 상관 계수를 이용하여 강수량과 각 지점에서 검출된 농도의 상관관계를 비교한 결과 강수량 증가에 따라 니트로페놀류 및 살충제류 모두 농도가 증가하는 경향을 나타냈다. 더불어 단일 물질의 월별 농도 변화 경향을 통해 주원천 상류 및 분류 3개 지점에서 특정 시기에 dinotefuran 농도가 약 20배 이상 증가하였는데, 이는 소나무 재선충 매개역할을 하는 솔수염하늘소 산란시기와 철쭉에 발생하는 심식충, 방패벌레, 응애류 등 병충해 방지를 위한 농약 살포시기와 유사하여 살균제 사용이 금지된 ‘상수원보호구역’ 내 직접적 농약 살포 가능성이 있는 것으로 추정되어 추후 원인 규명이 필요한 것으로 판단된다.

본 편집위원회는 상수원 내 유해물질 검출 및 거동 파악을 위해 미량오염물질의 검출과 거동을 조사하여 통계분석을 실시하여 원인을 규명하고자 하는 본 논문의 새로운 접근방법의 우수성과 타당성을 고려하여 이달의 논문으로 선정하였다. 미량오염물질의 발생원, 이동 경로, 검출한계 등이 매우 다양하고 복잡한 특성을 고려 시 본 논문을 통해 대청호 수역 내 미량오염물질 발생원과 이동경로를 규명 시에 유익한 논문으로 판단된다.

이달의 연구자



문해란

부산대학교 환경·에너지연구소에 전임연구원으로 재직 중에 있으며 부산대학교 오정은 교수 연구실(이하 환경화학보전 연구실)에서 석사학위를 취득하였다. 수환경 및 식품을 대상으로 미량유해화학물질 분석 연구를 수행하고 있다.



오정은

부산대학교 교수로 재직 중이며 포항공과대학교에서 박사학위를 취득하였다. 미 EPA, 조지아텍에서 박사후 연구원으로 근무하였으며 현재 한국연구재단 전문위원 및 대한환경공학회 영문지 “EER” 편집위원 등으로 활동 중이다. 2020년 Elsevier 출판사에서 ‘Emerging Halogenated Flame Retardants in the Environment, Volume 88 (1st Edition)’을 편찬하였다.

이달의 탐방 ...

부산대학교 환경화학보건의연구실



환경 및 인체에서의 미량유해물질 규명과 위해성을 선도하다.

대한환경공학회지에서 이번에 탐방한 연구팀은 『이달의 연구자』 문해란 연구원이 소속된 부산대학교 사회환경시스템공학과 『환경 화학보건연구실(지도교수: 오정은)』이다.

2004년 9월에 시작된 환경화학보건연구실은 질량분석기를 사용하여 미량유해물질의 분석법을 확립하고 환경 및 인체에서의 미량유해물질을 모니터링하고 거동을 평가하는 연구를 수행하고 있다. 최근에는 고분해능 질량분석기(GC-Q-TOF/MS, LC-Q-TOF/MS, LC-orbitrap/MS)를 사용하여 추정/비표적(suspect/nontarget) 분석을 통한 미지물질을 규명하는 연구와 하수역학을 이용한 항정신성의약품 및 오남용 물질 사용량을 추정하는 연구 등 기존 표적 스크리닝 개념에서 확장된 다중검색기법을 적용하여 유해물질로 인한 환경 및 인체 위해성을 평가하는 연구로 범위를 확장해 나아가고 있다.

본 연구실은 지도교수인 오정은 교수를 중심으로 현재 연구원 2명, 박사후 연구원 1명, 박사과정 4명, 석사과정 4명, 학부연구생 2명이 연구를 수행하고 있으며, 오정은 교수는 학생들의 연구력을 증진시키기 위해 외국 파견을 통한 국제 협력 연구, 국내/국제 학회 발표,

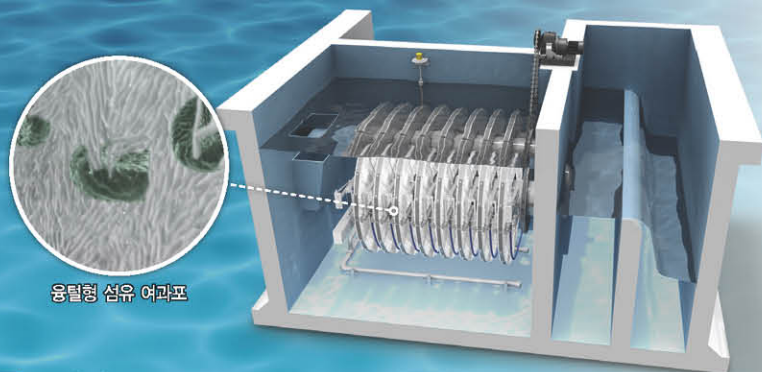
중국 상해 교통대학과 복수학위 취득 등 다양한 지원을 하고 있다. 이러한 아낌없는 지원에 힘입어 오정은 교수는 연구실에서 현재 31명(박사 7명, 석사 24명)의 연구 인력이 배출되어 환경 관련 전문기업과 국가연구소에서 유해화학물질 관련 환경 전문가로써 활동하고 있다.

본 연구실은 미량유해물질을 분석하기 위한 최첨단 질량분석기를 다양하게 보유하고 있을 뿐 아니라 2018년 11월 과학기술정보통신부 ‘안전관리 우수연구실’로 선정되어 안전을 기반으로 한국연구재단, 한국환경산업기술원, 식품의약품안전처, 국립환경과학원, 국립수산물과학원 등의 연구개발과제를 성공적으로 수행하고 있다. 특히 관련 연구 사업을 통해 2018년 낙동강수계에서 검출된 과불화화합물의 조기저감 조치 시행 뿐 아니라 수질에서의 미량유해화학물질 관리 정책 수립에 기여한 공로로 2020년 “제25회 환경의 날” 기념 정부포상 대상자로 선정되어 근정포장을 받았다. 이외에도 피인용지수(이하 Impact factor) 9 이상 저명한 국제학회지 논문 게재를 포함하여 최근 5년 이내 SCI 논문을 35편 이상을 게재하였다. 이처럼 본 연구실은 국내 뿐 아니라 국제적으로 환경 및 인체에서의 미량유해물질 관련 제반 연구를 선도하는 그룹이 되기 위해 지속적으로 연구에 매진하고 있다.

GRENEX®

뛰어난 성능! 비용절감!

디스크형 섬유여과기 GDisk®



용탈형 섬유 여과포

(주)그레넥스

본사: 06173 서울특별시 강남구 테헤란로 103길 6, 605호(삼성동) Tel. 02-3453-9166 Fax. 02-3453-3913 / 공장 및 기업 부설연구소: 전라북도 진안군 진안읍 거북바위로 3길 15-38 Tel. 063-433-9131 Fax. 063-433-9132



조달청 우수제품지정 중소벤처기업부 성능인증 환경부 녹색기술인증



성능인증제품



녹색인증

디스크형 섬유여과기 (GDisk®)는 부유물질(SS)을 제거하는 3차처리 여과설비로서, 화학적 처리와 연계하여 유기물, 인, 색도 등을 제거할 수 있는 24시간 연속식 여과기입니다.

운전 개요

하·폐수 3차처리 및 처리수 재이용 등을 위한 여과 방법 중에서 섬유상 여과포를 이용하는 여과기, 유입수는 중력에 의해 여과포를 통과하며 여과된 처리수는 디스크 내부를 지나 배출구로 흘러나가고 여과포 표면에 쌓인 고형물에 의해 조내 수위가 상승하면 수위센서에 의해 자동으로 역세공정이 운영됩니다.

특·장점

- 국제 특허 등록(한국, 미국, 캐나다, 중국 등)
- 고농도 고형물 부하 여과 가능
- 다양한 종류의 여과포로 다단 여과 가능
- 역세공정에만 가동되어 동력비 절감
- 중소벤처기업부 성능인증, 조달청 우수제품 획득
- 전체 여과면적을 활용하여 설치면적 최소화
- 간단한 구조로 유지관리가 매우 용이
- 화학적 총인제거 ChemDisk® 공법에 적용

www.grenex.co.kr

2020년 JKSEE 논문인용현황

No.	교신저자	소속	SCI(E)저널
1	정승우	군산대학교	Sci. Total Environ.
2	정승우	군산대학교	Chemosphere
3	정승우	군산대학교	Environ. Geochem. Health
4	주진철	한밭대학교	Water
5	주진철	한밭대학교	Water
6	강석태	한국과학기술원	Environ. Geochem. Health
7	김권래	경남과학기술대학교	Appl. Biol. Chem.
8	김양곤	목포해양대학교	J. Mar. Sci. Eng.
9	박준우	안전성평가연구소	Ecotoxicol. Environ. Saf.
10	박현주	서울대학교	Desalin. Water Treat.
11	오정은	부산대학교	Sci. Total Environ.
12	홍승우, 허태영	한국전자통신연구원, 충북대학교	Water
13	황유훈	서울과학기술대학교	Membr. Water Treat.
14	Qi, Jingyao, Liu, Yulei	Harbin Institute of Technology, Dongguan University of Technology	Sep. Purif. Technol.

편집위원회가 알리는 말

긴급논문 1차 심사기간을 15일로 당기겠습니다.

대한환경공학회지는 기존 1차 심사기간 30일을 15일로 더욱 앞당겨 저자들의 애타는 심정을 헤아리는 편집위원회가 되겠습니다. 많은 긴급논문 투고 바랍니다.

연말에 『우수 심사자상』과 『국제 논문 인용상』을 드립니다.

대한환경공학회지는 수많은 익명의 심사자에 의해 논문이 더욱 다듬어 집니다. 심사를 빨리, 많이 그리고 성심 성의껏 해 주시는 우수 심사자를 발굴하여 시상합니다. 또한, 국제 등재지가 될 수 있도록 여러분이 만들어 주십시오. 많이 인용해 주시는 분 시상하겠습니다.

회원동정

임명

김인수 / 광주과학기술원(GIST) 지구·환경공학부

우리 학회 회원이신 김인수 교수가 대통령직속 제3기 국가과학기술자문회의
심의위원으로 위촉



김준하 / 광주과학기술원(GIST) 지구·환경공학부

우리 학회 회원이신 김준하 교수가 8월 12일 대통령직속 국가물관리위원회
위원으로 위촉



독자공간



이달의 퀴즈 /

추첨하여 아메리카노 쿠폰을 보내드립니다.

이달의 연구자이신 오정은 교수님 연구실의 공식 명칭은?

① 환경위해성연구실

② 환경생태연구실

③ 환경화학보건연구실

정답을 9월 15일까지 ksee@kosenv.or.kr로 성함, 소속, 휴대 전화 번호를 보내주시면 추첨하여 아메리카노
1잔 쿠폰을 보내드립니다.

기획위원회

기획 : 강석태(기획위원회 위원장, KAIST)

Water AI (I) : 패러다임 전환

경희대학교 환경공학과 유창규 교수

부강테크 Water AI 팀장 박민석

세계적으로 데이터 정보의 중요성이 강조되고 세계시장에서 물산업 분야의 기술들이 소프트웨어 기술 및 저비용 고효율 기술 분야로 이동하는 추세이다. 이에 따라 국내외 물 환경 시스템 분야의 패러다임은 기술응용에서 원천기술 개발로 전환되어야 한다. Water digitalization을 통해 세계 물시장을 선점하고 패러다임 변화 주도과 신시장 창출을 위해 전통적 엔지니어링에 4차 산업혁명 기술 (AI, 빅데이터, AR/VR, 드론 등)을 적용하는 것이 현재 글로벌 트렌드로 자리를 잡아가고 있다[1]. 물 산업 분야에서 AI 응용 분야는 크게 관거/관망, 정수 및 하수처리시설, 수계로 나눌 수 있고 본 기고에서는 하수 Water AI을 중점적으로 다루고자 한다.

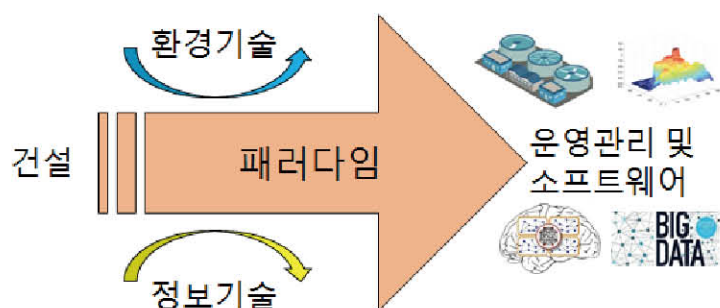


Fig 1. 물 산업 분야 패러다임 변화

스마트 물 산업 (Smart Water Industry)은 Water industries에 AI 주요 기술인 ICT, 설비 및 자동화 솔루션이 융합돼 시장과 물산업 수요자가 요구하는 시점에 물을 생산하여 제공 그리고 및 운영자가 처리할 수 있도록 실시간 의사결정과 운영체계가 최적화된 인공 지능형 물 생산 및 처리하는 산업을 지칭한다[2,3]. 스마트 물 생산 및 스마트 물처리 시스템은 그림 2에 물리적시스템과 연결된 디지털 트윈 인프라 개념과 Cyber-Physical System (CPS)상에서 정합성에 기반한 상세 Virtual Model을 통한 가능하다. 이러한 Water Digital Twin은 물산업에 인공지능 기반 Planning/Design/Construction/Main-

tenance/Operation을 제공하여 반도체 제조산업에서 설비 인프라와 같은 역할을 한다[4]. 특히, 설계 및 Project Management (PM)분야에 AI·빅데이터를 활용한 지능화/정보화 및 3D 설계 분야와 CPS 시뮬레이션 활용을 통한 Smart Operation & Management (O&M)분야가 물 산업에서 인공지능기술이 가장 적용이 용이한 분야이다. 3D BIM기법을 도입한 설계 및 시공관리 분야가 EPC사업에 중요성이 대두되고 있어서 3D BIM 하수처리시설 자동설계 (Water AI Design)[1]와 하수처리시설 CPS 개념을 적용한 하수처리시설 운영관리 (Water AI O&M)를 개발되고 있다[5].

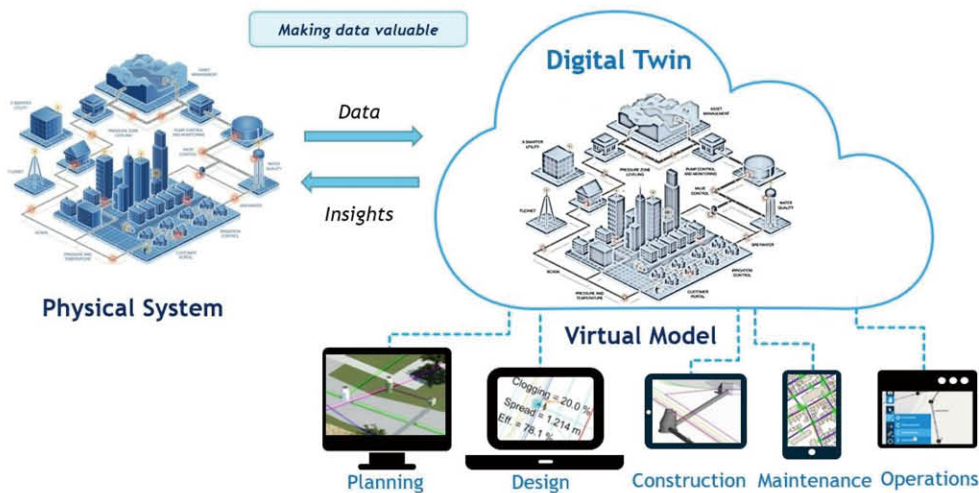


Fig. 2. Digital Twin infrastructure—Delivering Maximum Value for the Water Industry [4]

Water AI Design 개념은 하수처리 시설 기본설계를 위해 필요한 최적 공정 선정 및 공사비, 유지관리비, 도면 등의 성과물을 자동으로 제공하는 개념이다. 설계담당자 또는 사업을 검토하는 담당자가 먼저 해당 프로젝트의 기본적인 유입 및 유출 수질을 입력한다. 이후 수온정보, 약품 및 응집제 투입여부, 계열화 여부 등의 선호사항 및 기초 정보를 추가하면 된다. Water AI Design는 입력 정보를 토대로 하수처리장 설계에 필요한 다양한 단위공정의 조합을 사용자에게 제시하게 된다. 다음으로 추가

적인 상세정보를 입력하고 해당 프로젝트의 계획부지를 배경으로 구조물을 3D기반으로 레이아웃 배치를 하면 시공에 필요한 수준의 3D도면과 공사비 등의 내역서를 정확하게 자동으로 산출할 수 있다.

Water AI기반 3D 자동설계 프로그램은 실제 하수처리시설 운영 및 Worst scenario에 대한 가상운영 결과 데이터를 종합하여 최적 운영방안 도출이 가능하게 한다. Water AI Design은 하수처리시설 가상물리시스템기반의 하수 인공지능 운영 (Water AI O&M)와 연계하여 Water big data 및 Smart Water Factory에 필요한 주요 기능을 제공할 수 있다. 그림 3에 하수처리 Smart Water Factory 구축에 필요한 물 환경 빅데이터 및 Water AI 주요 원천기술이 설명되어 있다.

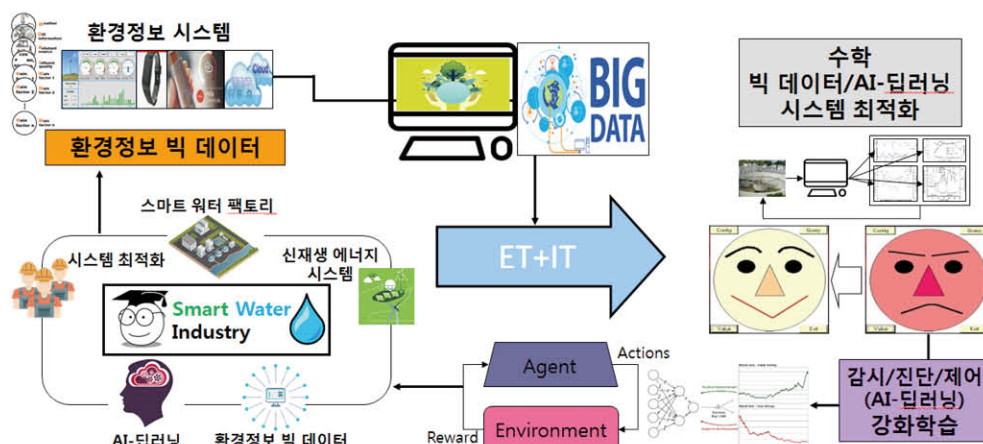


Fig. 3. 환경정보 빅 데이터 및 Water AI기반 Smart Water Factory 개념도

물 환경 분야는 Veolia나 Suez와 같은 세계적 규모의 환경기업이 환경 AI 시장을 선도하고 있으나, 유역 및 관거/관망등 인프라 관리 측면의 개발이 집중되고 있다. 따라서 맑은물 공급을 위한 핵심설비인 하수처리시설 설계/운영 분야는 대한민국이 환경시장의 4차 산업혁명을 선도할 수 있는 분야이다. 낮은 산이지만, 우리가 먼저 Point source 하수처리 분야에 AI 깃발을 선점할 수 있다면, 환경산업의 특성상 상수/관망/관거/수계/담수화등 다양한 물환경 타 분야로의 Water AI 확산 파급효과를 기대할 수 있을 것이다.

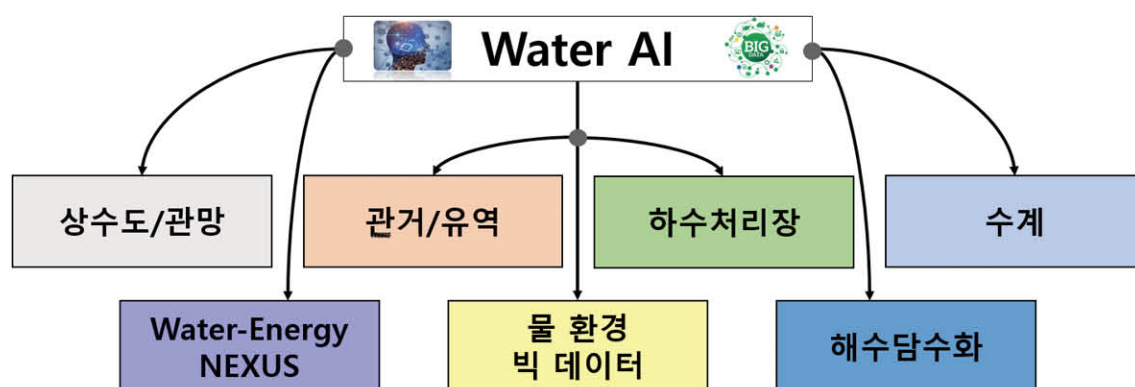


Fig. 4. Water AI 응용 분야

참고문헌

- [1] Sarni, W. et al., Digital Water, International water association (IWA), 2019
- [2] Benyon H.R., Digital Water—Capitalizing on the commercial opportunities, UK water partnership, 2020
- [3] WATER 4.0, German water partnership, 2019
- [4] Paul Boulos, Digital Twin infrastructure—Delivering Maximum Value for the Water Industry, 2019
- [5] KJ Nam†, SK Heo†, and CK Yoo*, An autonomous operational trajectory searching system for MBR plant using deep reinforcement learning, Water Science and Technology, 81(8), 1578, 2020 (Editor's choice: 표지논문)

저자약력



유창규

포항공대에서 박사학위를 받았으며 현재 경희대학교 환경공학과에서 교수로 재직 중이다 (경희 Fellow). Water AI기반 설계/제어/최적화/자율제어에 대한 원천기술 연구하고 있고, 2019년부터 (주) 삼성전자 환경안전 연구소 자문교수로서 친환경기술 부문을 겸직하고 있다.



박민석

부강테크 Water AI 팀장으로 재직 중이며, 하수처리분야 제안/설계 자동화프로그램 'WAI Design' 및 하수처리시설에 가상물리시스템(CPS) 기법을 적용한 'WAI Operation' 프로그램 개발을 총괄하고 있다.

기획위원회

기획 : 강석태(기획위원회 위원장, KAIST)

미래 먹는물 수질 평가 기술로서 in vitro bioassay 활용

광주과학기술원, 지구·환경공학부

이윤호

안전하고 깨끗한 먹는물 제공은 매우 중요한 공공 서비스 중 하나이다. 현대사회는 수많은 화학물질을 생산 및 소비하고 있으며, 그 결과 화학물질은 환경매체 어디에나 존재한다. 상수원에도 미량이지만 다양한 종류의 화학물질이 존재하며 흔히 '미량오염물질 (micropollutants)'이라고 부른다. 이들 화학물질 상당수가 유기 화합물이므로 '유기 미량오염물질 (organic micropollutants)'로 명하기도 한다. 미량오염물질은 하폐수 등의 점오염원이나 농업이나 강우 등의 비점오염원에서 유래하며, 자연적·인공적 물순환을 통해 인간 및 수생태계에 영향을 끼치게 된다.

먹는물 수질 관리를 위해 수질기준이 존재하며 휘발성 유기화합물, 용매, 농약류, 소독부산물 등의 전통적 유기 오염물질이 관리되고 있다. 이에 더하여 많은 종류의 화합물이 수질감시항목으로 지정되어 모니터링 되고 있으며, 수도사업자들도 수심 중 이상의 유기 화합물에 대해 정기적 수질 검사를 시행하고 있다. 이러한 수질 모니터링에는 질량분석기술이 많이 활용되고 있으며 화학적 수질 분석 기술로 볼 수 있다. 질량분석 기술의 발전은 수백종 이상의 미량오염물질을 동시 분석 가능하게 하였다.

고도로 발달한 화학적 분석기술을 활용한 결과, 상수원 및 먹는물에는 비록 (극)미량이지만 다양한 화합물들이 존재한다는 것을 알게 되었다. 이러한 모니터링이 가능하게 된 것은 큰 발전이지만, 다음과 같은 의문이 여전히 남게 된다. 1) 많은 오염물질이 분석되고 있긴 하지만 놓치고 있는 미지의 오염물질이 있지 않을까? 2) 미량의 오염물이지만 위해성은 없는 건가? 어느 농도 기준까지 허용해야 하는 건가? 3) 개별 오염물의 농도는 미량이라 무시할 수 있더라도, 이러한 미량 오염물질이 수십개 이상 함께 존재한다면 그때도 위해성을 무시할 수 있을까? 이러한 화학적 수질 분석기술의 한계점을 보완할 수는 없을까?

In vitro bioassay는 주로 세포나 미생물을 이용한 생물학적 분석법으로, 앞서 언급한 화학적 분석법의 한계점들을 보완해줄 수 있는 수질 분석법으로 최근 많은 관심을 받고 있다. 오염물질은 세포 내 DNA나 단백질 및 지질과 결합하거나 반응하면서 분자/세포 수준에서 이상 효과(adverse effect)를 야기하는데 이것이 회복되지 못하고 축적될 경우 독성으로 나타나게 된다. In vitro bioassay는 이러한 작용 기작(mode of action)에 기반하여 오염물질의 잠재적 위해성(toxic potential)을 정량적으로 측정한다. 이 분석기법의 장점은 해당 bioassay의 작용 기작을 가지는 모든 오염물질을 검출할 수 있고 그 잠재적 위해성을 정량적으로 나타낼 수 있다는 것과, 세포나 미생물을 활용하기 때문에 자동화 시스템으로 구성하여 대용량의 시료를 처리(high-throughput)할 수 있다는 것이다.

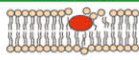
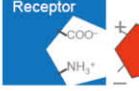
	Mode of action	Assay	Targeted chemicals
Non specific toxicity 	Baseline toxicity	Bioluminescence inhibition assay	All chemicals
	General cytotoxicity	Mammalian cell lines, MTS and NRU	All chemicals
Specific toxicity 	Acetylcholinesterase AChE inhibition	AChE (neurotox)	Organophosphates, carbamates
	Photosynthesis inhibition	I-PAM (phytotox)	Triazine and phenylurea herbicides
	Estrogenic effects	E-SCREEN	Estrogens, estrogenic industrial chemicals
Reactive toxicity 	Genotoxicity	umuC (genotox)	Aromatic amines, PAH, hard electrophiles (e.g., MMS)
	Protein damage	E.coli GSH±	soft electrophiles (e.g., Seanine)
	Oxidative stress	Induction of Nrf2 in AREc32	quinones, reactive oxygen species

그림 1. 작용기작 (mode of action)에 기반한 in vitro bioassays

(From Beate I. Escher, Helmholtz Center for Environmental Research, Germany)

최근 in vitro bioassay를 활용한 화학물질 독성 평가와 먹는물 수질 분석의 사례가 늘고 있다. US EPA에서는 이미 9000종 이상의 화학물질에 대하여 in vitro bioassay로 평가하였고 그 정보를 데이터베이스로 제공하고 있는데 (<https://actor.epa.gov/dashboard/>), 먹는물에서 검출되는 미량오염물질 위해성 평가에도 유용하게 활용될 수 있을 것으로 기대된다. 상수원수나 수돗물 수질 평가에는 주로 수용체 결합과 관련된 효과(specific toxicity)와 유전물질이나 단백질과 반응으로 인한 효과(reactive toxicity)를 측정할 수 있는

bioassay들이 적용되었다 (그림 1). 중요한 결과들을 살펴보면, 1) 상수원에는 specific toxicity들이 주로 검출되고 reactive toxicity는 낮으며, 정수처리를 거치면서는 specific toxicity는 줄어듦과 reactive toxicity는 증가하는 경향을 보였는데, 이는 상수원에 존재하는 특정 미량오염물질이 정수처리를 거치면서 제거되는 반면 염소 소독과정에서 발생하는 소독부산물에 의해 reactive toxicity가 증가하는 것으로 해석된다, 2) 화학적 분석과 in vitro bioassay를 동시에 적용하여 본 결과, specific toxicity는 검출한 특정 미량오염물질로 대부분 설명이 가능하나, 반면 reactive toxicity의 경우 검출한 소독부산물들로 설명할 수 없었다. 즉, 소독을 거친 수돗물의 reactive toxicity는 미지의 소독부산물에 의해 상당 부분 야기된다는 것이다, 3) 상수원수 및 수돗물에 in vitro bioassay의 잠재적 위해성 효과가 검출되긴 했지만 그 농도는 대체적으로 매우 낮았고 특히 수돗물의 경우 잠정 기준치보다 낮았다 (그림 2).

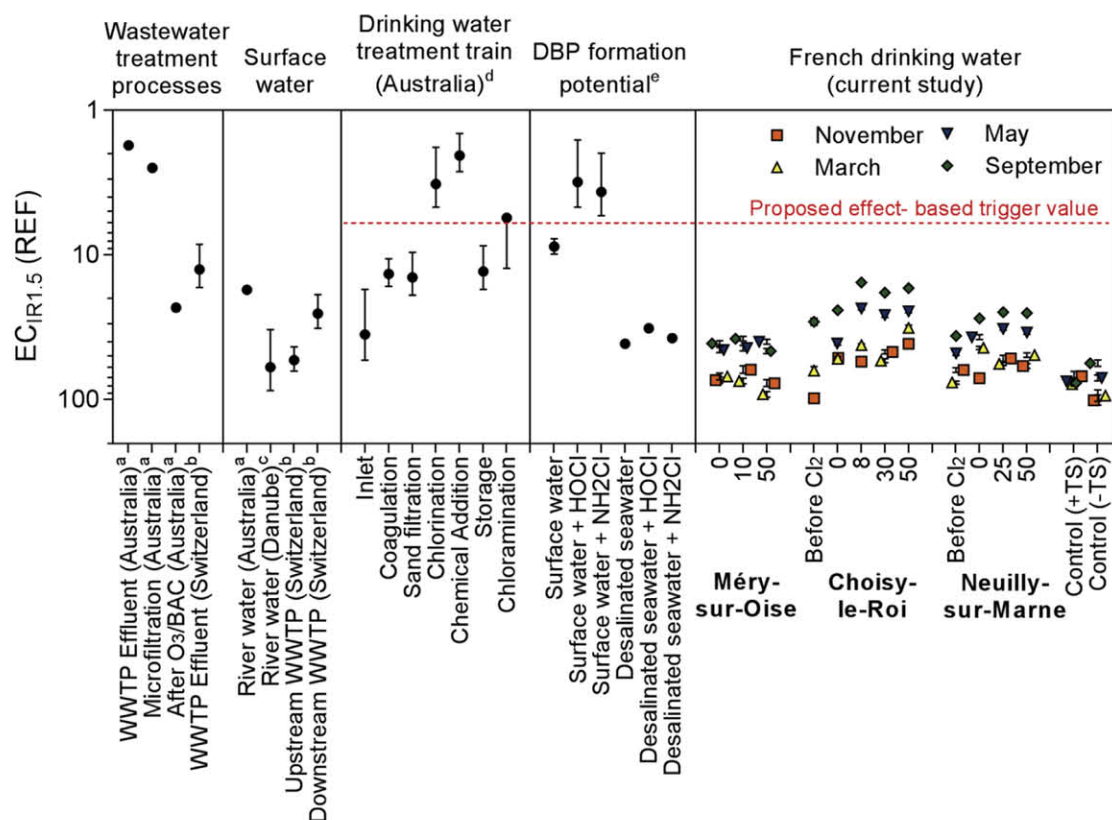


그림 2. In vitro bioassay를 이용한 하수유출수, 지표수, 정수처리 공정수, 수돗물의 산화 스트레스 반응 (oxidative stress response) 측정 사례 (From Hebert et al, Water Research, 2018, 132, 340–349)

먹는물의 수질 평가에서 in vitro bioassay가 가지는 여러 보완적 장점에 주목하여, 현재 관련한 연구들이 활발히 진행되고 있다. 주요 연구 주제로는, 1) 어떤 종류의 bioassay가 유용한지, 2) bioassay 효과별 적절한 수질 기준치는 어떻게 되는지, 3) 시료를 높은 배율로 농축 전처리 하는 것이 필요한데 어떻게 하면 오염물질을 놓치지 않고 방해작용 없이 시료 전처리를 할 것인지, 등이 있다. 한편, in vitro bioassay를 활용한 생물학적 수질 분석기법은 먹는물 뿐만 아니라 하폐수, 지표수, 지하수 등 다양한 수환경 매체에도 적용될 수 있으며, 실제로 이들 분야에서도 연구가 활발히 진행되고 있다.

In vitro bioassay를 이용한 생물학적 수질 분석기술의 발전과 적용으로 안전하고 깨끗한 먹는물 제공 서비스가 한단계 도약하기를 기대한다.

저자약력



이윤호

서울대 화학생물공학부 박사학위와 스위스 물환경연구소 Eawag에서 박사 후 과정을 밟았으며, 2011년부터 광주과학기술원 지구환경공학부 교수로 재직 중이다. 먹는물 수질 및 수처리, 고도산화 및 소독, 미량오염물질 수처리 공정 거동 및 제어, 물재이용 및 하수강화처리 기술 등의 주제로 연구하고 있다. IWA와 대한환경공학회 미량오염물질 전문가 그룹 위원으로 활동하고 있으며, J.Environ.Chem.Eng. (Elsevier) 편집장을 맡고 있다.