

Review

다양한 수생태계에 적용 가능한 유해물질의 영양확대계수 (trophic magnification factor, TMF) 연구 - 생활화학제품에서 기인한 성분과 어류조사를 중심으로

원은지^{1,2} · 조하은² · 김도균² · 홍성진³ · 신경훈^{1,2,*}

¹한양대학교 해양대기과학연구소, ²한양대학교 해양융합과학과, ³충남대학교 해양환경과학과

A Direction of the Monitoring of Household Chemical Products in Aquatic Environments: The Necessities for a Trophic Magnification Factor (TMF) Research on Fish. Eun-Ji Won^{1,2} (0000-0001-6766-6307), Ha-Eun Cho² (0000-0002-2075-7399), Dokyun Kim² (0000-0002-5369-569X), Seongjin Hong³ (0000-0002-6305-8731) and Kyung-Hoon Shin^{1,2,*} (0000-0002-3169-4274) (¹*Institute of Ocean & Atmospheric Science, Hanyang University, Ansan 15588, Republic of Korea*; ²*Department of Marine Sciences and Convergent Technology, Hanyang University, Ansan 15588, Republic of Korea*; ³*Department of Ocean Environmental Sciences, Chungnam National University, Daejeon 34134, Republic of Korea*)

Abstract The risk of various hazardous substances in aquatic environment comprises not only the concentration of substances in the environmental medium but also their accumulation in fish through complex food web and the health risks to humans through the fish. In Korea, the monitoring of residual toxicant in aquatic ecosystems began in 2016 following the enforcement of the Acts on registration and evaluation for the management of chemicals used in daily life (consumer chemical products), and attention has been paid to potentially hazardous substances attributed to them. Recently, studies have been carried out to investigate the distribution of these hazardous substances in the ecosystem and calculate their emission factors. These include the accumulation and transport of substances, such as detergents, dyes, fragrances, cosmetics, and disinfectants, within trophic levels. This study summarizes the results of recently published research on the inflow and distribution of hazardous substances from consumer chemical products to the aquatic environment and presents the scientific implication. Based on studies on aquatic environment monitoring techniques, this study suggests research directions for monitoring the residual concentration and distribution of harmful chemical substances in aquatic ecosystems. In particular, this study introduces the directions for research on trophic position analysis using compound specific isotope analysis and trophic magnification factors, which are needed to fulfill the contemporary requirements of selecting target fish based on the survey of major fish that inhabit domestic waters and assessment of associated health risk. In addition, this study provides suggestions for future biota monitoring and chemical research in Korea.

Key words: consumer chemical products, aquatic environment, compound specific isotopes, trophic position, trophic magnification factor

Manuscript received 16 August 2022, revised 13 September 2022,
revision accepted 16 September 2022

* Corresponding author: Tel: +82-31-400-5536, Fax: +82-416-6173
E-mail: shinkh@hanyang.ac.kr

© The Korean Society of Limnology. All rights reserved.

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, provide the original work is properly cited.

서 론

우리가 사용하고 있는 생활화학제품에는 다양한 물질이 함유되어 있으며 이러한 물질들은 제조, 사용 과정, 사용 후 배출 등의 단계에서 환경으로 노출되고 있다(Kim *et al.*, 2022). 2018년 이후 대한민국은 화학물질등록평가법(화평법) 개정으로 제도적 발판을 마련한 가운데 생활화학제품의 위해성 평가를 위해 제품 첨가 화학물질의 유해성 정보를 확보하고 나아가 환경을 대상으로 하는 모니터링을 통한 감시와 규제로 환경과 생태계 관리에 주목하고 있다(NIER, 2021). 그 예로 2016년 집중적으로 수행된 생활화학제품 전수조사를 통해 시중에 판매되고 있는 제품 중 사용금지 물질이 함유된 제품이 적발되어 판매 중지 및 회수조치 되었다(MOE, 2016).

제품에 함유된 물질에 대한 관심과 우려는 인체뿐만 아니라 환경으로 노출되는 경로 상의 여러 생태계도 주목하게 한다(USEPA, 2000; Kim *et al.*, 2020). 특히 수환경은 복합적인 물질이 배출, 혼합되어 최종적으로 도달하는 곳으로(Jeong *et al.*, 2017; Kim *et al.*, 2020), 세계적으로 많은 화학제품의 사용 및 유통의 증가와 함께 가정뿐만 아니라 일반·전문 사업장으로부터의 다양한 화학물질의 종류와 배출의 증가가 보고되고 있다(Jeong *et al.*, 2017). 국내 하수처리장 역시 배출수에서 분석된 화학물질의 다양성이 제품의 사용량과 함께 증가하고 있으며(Institute of Public Health and Environment, 2014), 여기에는 새롭게 합성된 물질이나 하수처리장으로부터 완벽하게 처리되지 않는 성분들이 포함된다(Jeong *et al.*, 2017). 대부분의 생활화학제품에 기인하는 화학물질의 농도는 하수처리장 주변에서 높은 농도를 보이고 혼합과 희석에 의해 처리장으로부터의 거리가 증가함에 따라 낮아지는 농도 분포를 보인다고 알려져 있다. 하지만 이러한 물질의 하천으로의 유입은 일정하지 않으며 수환경 내 농도와 거동은 발생량 및 배출 패턴에 의존적이다. 또한 생태계의 조건에 따라 환경 매체나 생물체 내에 잔류하게 되어 장기적으로 수생태계와 인간에게 심각한 영향을 초래할 수 있음이 지적되고 있어 이를 모니터링하기 위한 꾸준한 조사와 연구가 요구된다. 대한민국은 2019년 1월 1일 살생물제와 화학물질 함유제품을 규제하는 『생활화학제품 및 살생물제의 안전관리에 관한 법률(화학제품안전법)』을 별도로 제정, 시행하고 있으며, 2020년에는 생활화학제품에 함유되어 있는 유해물질 관리를 위한 평가, 정량화 기술을 위한 배출계수와 잔류농도 모니터링, 그리고 생태계 축적 계수를 산정하는 등의 물질의 관리를 목적으로 하는 연구사업이 협약되어 수행되고 있다[한국환경산업기술원 생활화학제품 안전관리 기

술개발사업].

제품에 사용되는 물질의 규제 및 수생태계에서 장기적인 모니터링이 수행되었던 대표적인 예로 세제에 이용되었던 노닐페놀(nonylphenol)을 들 수 있다. 노닐페놀은 계면활성제의 원료로 2006년 화학물질의 등록 및 평가 등에 관한 법률에 의거하여 소비자 용도가 규제되고 0.1% 이상 함유한 혼합물을 제한물질로 하였다. 그리고 제조, 수입, 사용이 단계적으로 금지되었고 최근에는 수환경 내 유해물질의 거동과 생태계 영향을 검토하기 위한 목적의 연구로 이어지고 있다(Kim *et al.*, 2019). 현재는 노닐페놀을 포함하는 알킬페놀류를 감시항목으로 지정해 산업폐수 실태 조사를 실시하고 있으며 주요 하수처리장 주변 오염 현상을 파악하는 등 수생생물에 미치는 영향에 대응할 수 있는 조사를 수행하고 있다.

최근에는 하수종말처리장 배출수역에서 페놀 이외의 의약품을 비롯한 화학제품기인 유해물질에 대한 조사가 진행되고 있다. 그 예로 화장품이나 세제 등에 사용되는 물질인 합성 머스크(synthetic musk)와 실록산(siloxane)에 대해 생물 및 생태계 유해성에 대한 보고가 있었으며, 환경 매체(토양 및 물) 및 생물체 내에서 잔류하고 있다는 최근 연구는 이러한 물질의 배출과 잔류성, 그리고 위해성에 대한 지속적인 조사의 필요성을 보여주었다(Kim *et al.*, 2022). 그러나 국내에서 수행된 하수처리장 배출수역에서의 외인성 물질의 농도 분포와 생태계 기반의 수생태계 조사는 군집 수준에서의 모니터링 정도로 서식 종의 다양성을 분석하거나 생활사에서 관찰되는 개체의 특성을 관찰하고 환경에 의한 영향을 측정하기 위한 생물의 세포 및 분자 수준에서 조사 연구가 주를 이루고 있다(MOE, 2010; Park *et al.*, 2019; Kim and An, 2020).

본 총설에서는 수생태계 모니터링에 있어서 생활화학제품에서 기인하는 유해물질을 대상으로 하는 국내 수환경 조사 연구를 소개하며 특히, 수환경 모니터링을 위한 생물축적 연구와 섭식을 통한 유해물질의 전달을 파악하기 위해 필요한 영양단계(trophic position, TP) 해석의 중요성을 언급하고자 한다. 그리고 이를 위해 아미노산의 안정동위원소비 활용을 소개하고 장점을 논의함으로써 유해물질의 수생태계 모니터링 연구 방향에 대해 제언하고자 하였다.

수환경 내 유해성분에 대한 연구

하천은 인간활동에 의해 발생한 물질들이 흘러 들어오는 곳으로 수환경 내 유해화학물질에 대한 관심은 식수, 식량자원, 수생태계 보존의 이유로 관심을 받아왔다(Jeong

et al., 2017; Kim *et al.*, 2020). 특히 가정과 사무실 그리고 다중이용시설 등 일상적인 생활공간에서 사용되고 있는 생활화학제품에서 기인한 물질들은 대부분 사용과정에서 생활하수로 유입되고 있으며 그 성분이 다양해짐에 따라 환경 내 농도를 관리하기 위한 노력이 더욱 강조되고 있다. 따라서 제품으로부터 기인한 물질의 처리장 내 효율을 평가하기 위한 연구뿐만 아니라 제품의 제조과정에서의 물질 규제 등 여러 방향에서 관리가 시도되고 있다.

그러나 대한민국은 일부 제품에 기인한 유해물질이 하수처리장에서 완전히 처리되지 못하고 주변 수계로 배출되고 있는 경우가 있음에도 불구하고 유해물질의 배출과 잔류농도, 그리고 생태계 위해성에 대해서는 연속적인 모니터링 연구가 수행되고 있지 않으며 배경농도 (Background concentration) 평가 역시 미흡한 실정이다. 그리고 소독제와 같은 일부 물질의 경우에는 승인 기준과 사용 규정에 따라 제조, 사용되었음에도 불구하고 잔류에 의한 인체 및 환경 위해성에 대한 논란과 우려가 있기도 했다(MOE, 2021). 수계로 유입되는 물질은 물과 퇴적물로부터 생물체 내에 축적되고 먹이단계를 따라 전달될 수 있어 (Kim *et al.*, 2020), 생물체 내의 축적된 물질의 정도와 위해성을 판단하는 것은 수환경 및 생태계 관리를 위한 근거와 방향을 설정하는 데 있어 반드시 필요하다(USEPA, 2000). 하지만 아직까지 이러한 유해물질의 수환경 유입과 생물 내 잔류성을 모니터링하기 위한 연구는 부족하며 먹이망을 통한 수생태계 내에서의 거동에 대한 연구는 전무하다.

1. 수환경 모니터링 연구

유해화학물질 모니터링은 주로 환경 내 물질의 잔류 및 거동에 대한 이해를 목적으로 수행된다. 유해화학물질은 환경학적 개념으로 오염물질에 포함되며 대표적인 오염물질인 중금속이나 잔류성이 높은 유기오염물질에 대해서는 산업화 이후 여러 환경을 대상으로 지속적인 관측이 진행되고 있다. 그 중 수환경은 하수처리장으로부터 물질이 집결, 배출되는 곳으로 의약 및 생활화학제품기인 물질 (PPCP, pharmaceutical & personal care products)에 의한 영향을 가장 높은 농도로 받을 수 있는 환경이다(Kasprzyk-Hordern *et al.*, 2009; Cho *et al.*, 2010; Jeong *et al.*, 2017). 특히 수환경에서는 먹이망(먹이단계)의 기저에 있는 생물(식물성/동물성 플랑크톤, 수서곤충 등)부터 궁극적으로 최상위 먹이사슬 단계에 있는 어류의 조직에 오염물질이 농축될 수 있다. 이는 개체, 나아가 섭식관계와 먹이망 구조에 영향을 주며 크기는 인간에게까지 그 영향이 미칠 수

있기 때문에 축적된 농도와 경향을 분석하는 것은 물질 관리의 목적에서 반드시 필요하다(USEPA, 2000). 그러나 국외에서는 1990년 이후 제품 기인 유해물질의 수생태 유입에 대한 생태학적 독성 및 생물 축적 관련 연구가 증가하고 있는 반면, 국내의 경우 일부 유해물질(PFCs, OPFR, BDE, SMCs, and siloxane, etc.)에서 매체 및 수생생물 체내에 대한 잔류 농도 해석에 그쳐 있다(Cho *et al.*, 2010; Kim *et al.*, 2012; Hong *et al.*, 2015; Choo *et al.*, 2018; Kim *et al.*, 2022).

Table 1은 국내의 수환경에서 조사된 생활화학제품 기인 유해화학물질 성분과 농도를 보여준다. 손 세정제나 소독제, 살균제 등에 포함되는 성분(클로로자이레놀, chloroxylenol, PCMX; 벤잘코늄클로라이드, benzalkonium chloride, BAC; 염화디데실디메틸암모늄 didecylidimethyl ammoniumchloride, DDAC), 방수, 방오, 발유 특성으로 제품에 이용되는 과불화화합물(Perfluorinated compounds, PFCs), 화장품이나 세제의 성상과 향을 위한 첨가물인 실록산(siloxane)이나 합성향료(예, synthetic musk), 그 밖에 난연제로서 이용되는 유기인계 난연제(OPFR)와 브롬계 난연제(polybrominated diphenyl ethers, PBDE) 등이 그 예이다. 이들 연구는 대부분 주변 환경으로부터 유입되는 농도, 수환경 내 분포, 수계 내 존재하는 잔류량이나 수처리 시설의 정화 효율을 확인하기 위한 목적으로 수행되었으며, 농도는 환경에 따라 수십 ng L^{-1} 에서 수만 $\mu\text{g L}^{-1}$ 까지 넓은 범위를 보이고 있다. 일반적으로 처리장이나 사용량이 많은 특정 시설 주변에서 높은 농도가 관찰되는 것을 확인할 수 있으며(Kasprzyk-Hordern *et al.*, 2009), 물을 비롯해 퇴적물, 심지어 연안 환경에서도 그 농도가 관찰되고 있다(Hu *et al.*, 2011). 살생제의 하나인 BAC에 대해서는 의약제조산업단지가 위치해 있는 지역에서 하천으로의 배출된 결과가 조사된 바 있으며, 환경 조사 외에도 물벼룩과 송사리를 이용한 급, 만성 독성 결과는 BAC의 내분비교란 가능성과 함께 높은 생태학적 위험을 지적하며 수생태계에서의 장기적 모니터링의 필요성을 보여주고 있다(Kim *et al.*, 2020).

수생태계에서 물질의 유입은 늘 일정하지 않으며, 이는 환경 매체 내 유해물질의 농도 분석이 조사한 시점의 결과만을 보여준다는 것을 의미한다. 하지만 앞서 언급한 연구들 즉, 증가한 사용량과 함께 관찰되는 환경 매체 내의 높아진 잔류 농도 및 이들 물질이 수생물에 미치는 영향에 대한 결과들은(Juergensen *et al.*, 2000; Cho *et al.*, 2010; Won *et al.*, 2022) 물과 퇴적물 등 환경 매체에 잔류하는 농도를 분석하는 것만으로는 생태계 영향을 파악하고 관리하는데 부족할 수 있음을 보여준다.

Table 1. Examples of studies on the environmental concentrations of consumer product derived compounds detected in waters and sediments samples in aquatic environments.

Chemicals	Study sites	Objectives	Media (Samples)	Measured (or studied) range	Reference
Chloroxylenol (PCMX)	River Ely, South Wales, UK	Evaluating the efficiency of wastewater plant technology	Wastewater and adjacent surface waters	WWTP Coslech Influent: 7811~65381 $\mu\text{g L}^{-1}$ Effluent: < 84~888 $\mu\text{g L}^{-1}$ Upstream: < 30~99 $\mu\text{g L}^{-1}$ Downstream: < 30~358 $\mu\text{g L}^{-1}$	Kasprzyk-Hordern <i>et al.</i> , 2009
	River Taff, South Wales, UK			WWTP (Cilfynydd) Influent: 4068~33974 $\mu\text{g L}^{-1}$ Effluent: 441~3010 $\mu\text{g L}^{-1}$ Upstream: < 30~254 $\mu\text{g L}^{-1}$ Downstream: < 30~225 $\mu\text{g L}^{-1}$	
	Guangzhou, China	Screening	Drinking waters and urban stream waters	1.62~9.57 $\mu\text{g L}^{-1}$	Tan <i>et al.</i> , 2021
	Eighteen marine sites, Kuwait	Monitoring and develop screening techniques	Sea waters from offshore sites	0.06~43,070 $\mu\text{g L}^{-1}$	Smith <i>et al.</i> , 2015
Benzalkonium chloride (BAC)	Hwaseong, Korea Inf. / Eff.	Monitoring & Ecological risk assessment	Surface (stream) water WWTP	0.0115~57.4 (C12 + C14) $\mu\text{g L}^{-1}$ 61.5 / 0.493 (C12 + C14) $\mu\text{g L}^{-1}$	Kim <i>et al.</i> , 2020
	Long Island Sound, NY	Monitoring	Estuarine sediments	30 $\mu\text{g kg}^{-1}$	Li and Brownawell, 2009
	Bowery Bay, NY Estuarine Sediment			5325 $\mu\text{g kg}^{-1}$	
	Forge River, Moriches Bay, NY		River sediments	55 $\mu\text{g kg}^{-1}$	
Didecyldimethylammoniumchloride (DDAC)	Fraser River, British Columbia	Screening	Surface water sediments	11449 $\mu\text{g g}^{-1}$ 0.57 to 1.26 $\mu\text{g g}^{-1}$ dw	Szenasy, 1998
	Three different locations along the Northeast coast of England	Screening	Seawaters	120~270 ng L^{-1}	Bassarab <i>et al.</i> , 2011
	Fraser River, British Columbia, Canada	Screening	Sediments	0.57 to 1.26 $\mu\text{g g}^{-1}$ dw	Juergensen <i>et al.</i> , 2000

Table 1. Continued.

Chemicals	Study sites	Objectives	Media (Samples)	Measured (or studied) range	Reference
Perfluorinated compounds (PFCs)	Gulpo stream, Korea	Screening 12 compounds of PFCs	Upper stream	ND~39.4 ng L ⁻¹ PFOS, ΣPFCs = 52.8	Cho <i>et al.</i> , 2010
			SWTP drainage	ND~50.2 ng L ⁻¹ PFOS, ΣPFCs = 61.2	
			Down stream	ND~53.6 ng L ⁻¹ PFOS, ΣPFCs = 70.4	
			Sediments	ND~2.19 ng g ⁻¹ dw PFOS, ΣPFCs = 4.24	
Siloxane	10 sites from three major rivers (Namhan, Yeongsan, and Nakdong, Korea)	Screening both cyclic and linear siloxanes in rivers	Waters	1495 ng L ⁻¹ in river water	Wang <i>et al.</i> , 2021
			sediments	39.2 ng g ⁻¹ dw. in sediment	
	Dalian coasts, China	Screening of cyclic methyl siloxanes in marine environments	Waters	46.1 ± 27.2 ng L ⁻¹	Hong <i>et al.</i> , 2014
			sediments	12.4 ± 5.39 ng g ⁻¹ dw	
	Geum rivers, Korea	Screening Upper region with WWTP and downstream near estuary	Waters	20~190 ng L ⁻¹	Kim <i>et al.</i> , 2022
			sediments	Upper: 294 ng g ⁻¹ dw Downstream: 3.6 ng g ⁻¹ dw	
Synthetic musks	Geum river, Korea	Screening Upper region with WWTP and downstream near estuary	River waters	ΣSMCs 14.8 (downstream)~384 (upper stream near WWTP) ng L ⁻¹	Kim <i>et al.</i> , 2022
			sediments	ΣSMCs 0.95 (Estuary)~71.5 (upper stream near WWTP) ng g ⁻¹ dw	
	Haihe River, China	Screening SMCs concentrations in aquatic environments	Waters	ΣSMCs 5.9~120.6 ng L ⁻¹	Hu <i>et al.</i> , 2011
			sediments	ΣSMCs 1.7~58.8 ng g ⁻¹ dw	
Organophosphorus flame retardant (OPFR)	Shihwa Lake	Monitoring and evaluate the source of OPFR in water and sediments of Lake Shihwa near industrial complex	Waters	ΣOPFR in water (ng L ⁻¹) and sediments (ng g ⁻¹ dw)	Lee <i>et al.</i> , 2018
			Creeks	597~16,000 ng L ⁻¹ , 21.2~3800 ng g ⁻¹ dw	
			Inshore	86.3~738 ng L ⁻¹ , 6.56~59.2 ng g ⁻¹ dw	
			Offshore	28.3~831 ng L ⁻¹ , 2.99~42.8 ng g ⁻¹ dw	
			Near WWTP	164~627 ng L ⁻¹ , 6.85~61.3 ng g ⁻¹ dw	
Polybrominated diphenyl ethers (PBDE)	Wastewater treatment plant in HongKong	Monitoring the temporal and spatial contamination of PBDEs	WWTP influent	1~254 ng L ⁻¹	Deng <i>et al.</i> , 2015
			WWTP effluent	12~27 ng L ⁻¹	
	Rivers in China	A nationwide study on PBDE distribution in surface sediments of Rivers	Sediments	ΣPBDEs ND 1.89 × 10 ⁴ ng g ⁻¹ dw, with an average concentration of 401.1 ng g ⁻¹ dw (a median value of 97.67 ng g ⁻¹ dw)	Lu <i>et al.</i> , 2021

2. 수생 생물 축적 및 위해성 연구

생물을 이용한 유해물질 연구의 목적과 방법은 화학물질에 대한 유해성을 확인하기 위한 노출 평가와 현장에서 채집된 생물체 내에 축적된 유해물질의 농도를 분석해 환경을 평가하는 것으로 나뉘볼 수 있다. 두 방법 모두 물질의 특성과 생물반응에 대해 알게 하여 물질의 위해성을 판단하는데 이용될 수 있으며 물질에 대한 정보와 사용을 위한 기준을 정하는 데에도 활용될 수 있다. 또한 유해물질의 환경 내 거동과 사용-배출-처리와 같은 관리, 생태계를 포함하는 환경 예측이 연구의 목적이 될 수 있다(화학물질 위해성평가의 구체적 방법 등에 관한 규정, 국립환경과학원 고시 제2021-13호). 지금까지 유해물질 관리 방안 수립을 위해 수행되어온 일반적인 위해성 평가방법으로는 화학구조의 유사성을 기반으로 화학적 거동을 예측하는 방법인 구조활성 예측 프로그램(Quantitative structure-activity relationship models, QSAR models)과 위해성지수(risk quotient, RQ)가 있으며(OECD, 1996; USEPA, 1998), 특히 RQ 방법은 환경 중 화학물질의 농도와 독성시험에 대한 결과를 비교하는 방법으로 농약 등의 유해물질에 대한 독성을 예측하고 비교하는데 활용되었다(USEPA, 1998).

또 다른 방법 중 하나인 생물체 내 축적된 유해물질의 농도를 측정하는 방법은 그 환경에 서식하고 있는 생물을 이용해 환경을 진단하는 방법으로 여겨진다. 최근까지 보고된 조사 및 연구로는 미국을 비롯한 캐나다, 유럽 등의 환경 선진 국가에서 하천 및 호소 등 수생태계에 영향을 미칠 수 있는 유해물질(예를 들어 중금속)의 농도 분포 현황을 조사하기 위해 어류의 조직을 이용한 분석 연구가 있다. 미국 환경부(US EPA)는 어류가 수환경 내 유해물질에 장기적으로 노출되며 유해물질을 축적할 수 있다는 점에서 어류조직 분석을 정규 모니터링(Routine Monitoring) 항목으로 지정해 오염 실태 조사에 이용하고 있기도 하다(USEPA, 2000; Cunningham *et al.*, 2019). 이는 중금속 농축 현황 분석을 위한 어류채취 모니터링 기법, 어류조직 분석법, 조사지점 선정법 등의 개발을 포함하고 있으며 체계적인 어류 조직 모니터링으로 유역 별, 수계 별, 중금속 농축 현황 분석 DB구축 및 농도 기준을 설정하고 있다(USEPA, 2000; USGS, 2004). 이는 1970년대 후반 연안해역을 중심으로 수행된 ‘mussel watch’와도 유사한데, 수역의 유해물질 오염의 정도를 파악하게 하여 수계로 유입되는 물질의 관리나 생태계 복원, 회복을 목적으로 하는 데에 활용될 수 있다. 하지만 대한민국의 경우 유해물질의 조사 및 평가는 유해물질의 독성 값에 기초한 현장 권고치

산정 등에 한정되어 이루어지고 있으며, 생물 축적을 포함하는 현장 모니터링이나 유해물질의 평가 관리는 미흡한 실정이다(Cho *et al.*, 2010).

수환경에 잔류하는 유해물질은 영양학적 관계를 통해 상위 영양단계로 전달될 수 있고, 궁극적으로 수산 생물을 섭취하는 인간의 건강에 영향을 미칠 수 있기 때문에 그 연구가 중요하다(Savoca and Pace, 2021). 그럼에도 불구하고 국내의 생물을 이용한 환경조사 연구는 생물상 조사와 일부 생물 지표 연구에 그쳐 있었으며, 2020년 이후에서야 생활화학제품에 함유되어 있는 유해물질의 생태계 축적 계수 산정을 포함하는 배출계수 및 잔류 농도 모니터링 사업이 착수되어 수행되고 있다[한국환경산업기술원 생활화학제품 안전관리 기술개발사업].

한국 4대강을 비롯한 주요 수계에서 수행된 수생태계 건강성 조사에서 생물을 대상으로 하는 항목은 어류, 저서성 대형무척추동물, 부착조류의 생물상 조사이며, 이 결과를 바탕으로 개체 수, 출현 종의 다양성과 우점도 등을 산정하고 해석하는 것에 중점을 두고 있다. 그 중 일부 연구에서 개체 수준에서 관찰되는 생물 지표를 연구하기도 하였는데, 화학적 분석 결과와 함께 생물상 및 개체, 그리고 조직 수준에서 관찰되는 변화를 이용해 환경에 의한 영향을 예측하고자 하였다. 그 예로, 하수처리장의 배출수가 수생물에 미칠 수 있는 영향에 대한 유역 내 조사가 대표적이다(An *et al.*, 2007; Kim and An, 2020). An *et al.* (2007)은 영산강 하수처리장 배출 수역에 유기물 오염에 대한 내성종으로 알려진 어류의 서식(e.g., 종조성)과, 종다양도 지수, 그리고 풍부도가 보이는 수질과의 높은 관계(e.g., 특정 종의 우점)를 통해 이러한 어류상이 환경을 평가하는 지표가 될 수 있음을 보여주었다. 또 다른 연구는 하수처리장 배출수역과 대조지역에 서식하는 피라미(freshwater minnow, *Zacco platypus*)에서 유해물질에 의한 개체의 보호 기작 및 노출(세포 손상)에 대한 지표의 유의한 차이가 분석된 예이다(Kim and An, 2020). 실제로, 어류의 생물학적 조직과 분자 수준의 생물지표를 이용한 평가 방법은 환경 및 생태계 손상에 대한 조기경보로 활용되며, 개체, 개체군, 군집의 건강을 평가하는 데에 환경 스트레스의 복합적인 영향 및 수생태계의 변화 또는 손상의 원인에 대하여 과학적인 정보를 제공해줄 수 있다는 장점을 갖는다. 이러한 이유에서 미국의 US Geological Survey (USGS)는 1999년에 Biomonitoring of Environmental Status and Trends (BEST) Program을 개발하여 다양한 생물지표와 주요 오염물질 분석을 통한 수생태계 위해성 평가를 수행해 환경 스트레스를 확인할 수 있는 방법을 제시하였다. 국내에서도 이 같은 목적으로 국내 토종어종인 피라미(*Z. platypus*)

를 실험생물로 하여 다중생물지표를 표준화하고 수생태계의 건강도 평가에 활용하기 위한 연구가 수행되기도 했다(MOE, 2010).

수환경으로 유입된 유해물질들은 수생태계에 서식하는 생물의 개체 수준에 영향을 미치는 것뿐만 아니라 체내 축적되어 생태계의 먹이망(Food web)을 따라 전달되는데, 특히 하위 영양단계에서 상위 영양단계로 올라갈수록 축적되고 확대(magnified)되는 유해물질에 대한 조사와 연구는 생태계 내 물질의 거동의 특성과 환경 내 물질 관리 필요의 유무를 판단할 수 있다는데 의미가 있다. 또한 생물체 내 유해물질의 농도와 위해성에 대한 자료는 최종적으로 사람이 섭취할 수 있는 수산물의 일일 섭취 허용량을 산정하는데 이용될 수도 있다. 미국의 경우 중금속 오염이 심한 대도시의 주 정부(State)에서는 어종 별 인체영향을 평가하여 섭취에 대한 가이드라인을 제시하고 있는데, 뉴저지 주에서는 largemouth bass와 smallmouth bass에 대해 1달에 1회 이상의 섭취를 제한하며, 심지어 striped bass는 뉴저지 지정 수역에서 식용으로 판매를 금지하고 있는 등 어업이 이루어지는 수역 별 기준이 존재한다(The New Jersey Department of Environmental Protection and the New Jersey Department of Health). 반면 한국은 4대강에 많은 종의 어류가 서식하고 어업활동에 의해 섭취될 수 있음에도 불구하고 어류 체내 유해화학물질 농도를 비롯해 수역 별 물질의 거동에 대한 파악이 되지 않는 등 환경 및 국민 건강을 위한 유해물질 관리가 미흡한 실정이다. 따라서 생활화학제품에서 기인한 다양한 물질이 배출되고 있는 시점에서 국민 보건에 대한 관심과 인체노출 지수 개발 및 연구가 시급히 요구된다.

어류를 이용한 생물 축적 연구

1. 생물 축적 연구의 중요성 및 생물 확대 계수

1) 어류를 이용한 수환경 조사

어류는 수생태계 연구에 있어 중요한 지표 생물 중 하나로 수중생태계에 존재하는 생산자와 하위소비자를 섭식하는 상위단계소비자이다(Odum, 1975). 어류의 다양성이나 천이와 같이 군집에서 관찰되는 어류상의 결과는 서식환경과 직접적으로 관계가 있으며, 이러한 결과를 바탕으로 생태적 건강성, 기능회복에 대한 추정이 가능하게 한다. 따라서 어류상을 조사하는 것은 생태계 조사에 있어 기본적인 항목으로 여겨지고(An *et al.*, 2007; Kim and An, 2020), 많은 연구들이 어류의 생물학적 특징, 특히 군집 생태적 측면 중 종 다양성, 생태계 구조, 서식처다양성을 활용한

수생태계 평가나 변환된 평가법을 이용한 연구를 시도하고 있다(USDA, 1998; MOLIT, 2001). 최근에는 어류의 조직이나 세포, 분자 수준의 생물지표를 이용한 접근 방법을 이용하여 환경손상에 대한 조기경보를 제공하기 위한 연구가 수행되고 있다(MOE, 2010).

한국은 하천을 포함해 호수, 연안 등의 수환경에서 어류 조사가 수행되고 있다. 이는 군집 수준에서 개체 수준에 이르는 다양한 항목을 포함하며 군집 수준의 정보는 종조성과 상대풍부도 그리고 서식하는 종에 따라 보호종, 내성종, 외래종 등의 특징으로 기술된다. 그리고 이러한 결과는 다양성지수(Diversity index), 균등도 지수(Evenness index)와 같이 수치를 기반으로 하는 지표로 생태계 평가에 활용될 수 있다(Table 2). 개체 수준에서의 연구는 대상은 물리화학적 요인들이나 외인성 물질, 즉 유해물질에 의한 변화로 병변이나 기형, 운동성과 생식률의 변화 그리고 세포나 분자 수준에서의 변화(biomarker)가 포함될 수 있으며, 이러한 개체의 변화를 해석하는 데 있어 생물체 내 축적된 오염물질의 농도는 변화에 대한 근거자료가 될 수 있다(Kim and An, 2020; Guo *et al.*, 2021). 하지만 우리나라에서 수환경을 대상으로 수행된 모니터링 사업은 수질과 퇴적물의 유해물질을 정기적으로 조사하는 것 외에 생물체 내 오염물질 분석과 같은 생물학적 관측을 정기적으로 수행한 자료가 전무한 실정이다.

국외의 경우 수생태계를 대상으로 하는 유해물질 모니터링에 어류가 많이 활용되고 있는데, 이는 어류가 생산자나 중간소비자를 대상으로 하는 것보다 체내 유해물질의 축적률이 높기 때문이다. 또한 어류의 긴 생활사로 인해 비록 관심을 가지고 있는 물질이 환경 내 농도가 낮더라도 어류에 축적된 농도가 검출될 수 있어 잔류 여부를 판단하는 데에 용이하며 나아가 물질에 대한 보수적 평가가 가능하게 한다(Jeziarska and Witeska, 2006). 그리고 시료 채집과 분석에 있어 생물 크기로 인한 제약이 적고, 종을 동정하는 것에서 일반화된 작업과 신뢰성 있는 결과 축적이 가능하다는 장점이 있다(Gadzała-Kopciuch *et al.*, 2004). 더욱이 어류는 수산 자원으로서 섭취로 이어질 수 있어 건강과 관련된 연구 확장의 가능성을 가지고 있어 유해물질 축적에 대한 연구 대상으로서의 중요성이 강조된다.

2) 유해물질의 생물 축적과 생물 확대

수환경 내 유해물질의 생물 축적에는 물이나 퇴적물과 같은 매체를 통한 흡수와 섭식과 같은 생물을 통한 축적을 포함하는데, 섭식 관계에서의 물질의 이동을 'trophic transfer (섭식간 이동(전이))'라고 하며 수생태계 내 영양단계(TP) 해석은 이러한 유해물질의 생물 축적과 확대 여

Table 2. Various parameters and indexes used for ecology and environmental research using fish.

Study level	Parameters	Index / Analysis	Providing information
Community structures	Richness, dominant species, abundances, evenness, cohabitation species	Dominance index, diversity index, richness index, Fish Assessment Index, Species Biotic Index, Multi-metric Fish Assessment Index	Ecosystem characteristics and status
Environmental factors	Physical and chemical factors (Temp., DO, BOD, COD, TSS, water flow, water mass, bed structure, dam etc)	Qualitative Habitat Evaluation Index, Habitat Suitability Index	Habitat suitability
Guilds	Benthic, water column, subsurface	Habitat guild analysis	Ecosystem and food web structure
	omnivore, insectivore, herbivore, carnivore	Trophic guild analysis	
	Tolerance species, Intermediate species, Sensitive species	Tolerance guild analysis	
Species characters	Endemic species, Endangered species, Natural monument specie, alien species	-	Ecosystem characteristics and status
Individual level	Necropsy	Necropsy-Based Health Assessment Index	Biological impacts and environmental risks
Chemical analysis	Accumulated concentrations of pollutants	Bioconcentration factor, Biomagnification factor, Trophic magnification factor	

부를 판단하는 데에 중요한 자료가 된다. 유해물질의 확대(magnification)는 물질이 흡수되는 것에 비해 낮은 배출율과 높은 잔류율로 발생하며, 생태계를 구성하는 생물 간 섭식 관계에서 유해물질의 먹이망 구조 내 전달과 생태계 내 확대 가능성을 해석할 수 있도록 하는 것이 생물확대계수(Trophic magnification factor, TMF)이다. TMF는 생태계 내 영양단계(TP)에 따른 유해물질 농도의 증가 여부로 확인할 수 있고, 대부분의 수생태계 연구에서는 유해물질의 최종 전달자(최상위 소비자)인 어류를 대상으로 분석된다(Oost *et al.*, 1996; Kim *et al.*, 2022). 대표적으로 수은(Hg)과 다염화바이페닐(PCB)이 수생태계 먹이망 구조에서 생물확대가 잘 되는 물질로 오랜 기간 연구되어왔다(Oost *et al.*, 1996; Atwell *et al.*, 1998).

생물의 영양단계(TP)를 산정하기 위한 방법 중 장기간 섭식에 대한 누적된 정보를 제공한다고 알려진 탄소와 질소의 안정동위원소 분석기법은 생물의 대사에 의해 먹이원과 섭식자 간의 탄소 및 질소안정동위원소비가 일정한 비율로 무거워지는 원리를 이용한다(Minagawa and Wada, 1984; Oh *et al.*, 2019). 이 분석 방법은 야생 동물 연구에 있어 높은 공복률에 의한 위 내용물 연구의 어려움을 보완할 수 있고, 상대적으로 긴 시간 반영된 섭식 관계를 수

치적 정보로 제공한다는 장점으로 국내외적으로 활발하게 활용되고 있다(Vander Zanden *et al.*, 1999; Choi *et al.*, 2020). 안정동위원소를 이용한 먹이망 연구 결과를 이용해 생태계 모델에 보다 정확한 생물학적 관계에 대한 정보를 제공할 수도 있는데 섭식관계와 먹이 기여도를 산정할 수 있는 mixing model이 그 대표적인 예이다(Phillips *et al.*, 2014).

2. 어류의 유해물질 축적 연구의 현재와 시사점

1) 어류 체내 유해물질 분석 연구

지금까지 수환경을 대상으로 하는 생물체 내 유해물질의 농도 측정 및 모니터링 연구는 환경 오염에 의한 생물의 오염실태 조사를 목적으로 하였다. 이러한 연구는 수환경에서의 물질 거동과 유해물질의 관리에 필요한 물질에 대한 지역 특성과 같은 정보를 제공하기도 한다. 예를 들어 생물체 내 지질 성분에 잘 흡착하는 물질은 체외로 쉽게 배출되기 어렵고 섭식 과정을 통해 영양단계를 따라 전달되기 쉬우며 축적되는 비율이 높아 상위 영양자인 생물을 포함하는 생태계 위해성 연구가 필요함을 확인할 수 있다(An *et al.*, 2020). 또한 퇴적물이나 입자에 흡착이 잘 되

는 물질은 저서성의 생물에게 높은 농도로 축적될 수 있어 환경 관리에서 이들 물질의 흡착 기질에 대한 관리 방향을 설정할 수 있다(Cho *et al.*, 2010). 실제로 2009년 하수처리장의 최종 방류수가 유입되는 하천에서 수행된 어류 체내 과불화합물 농축 특성에 관한 연구는 매체 별로 다르게 존재하는 과불화합물의 분포를 통해 수계 내 물리적 환경 인자의 중요성을 보여주었다.

그러나 어류를 이용한 지금까지의 연구는 조사 대상 어류가 수생태계 구조(먹이망) 내에서 영양단계 정보를 고려하지 않고 있다는 한계를 갖는다. 이는 대상 어종 선정의 중요성을 보여주는데, 어류 체내 유해물질의 농도 결과를 이용할 때 어류의 서식환경과 성장, 그리고 섭식 전략에 따라 체표를 통한 유해물질 노출과 유기물의 섭식에 의한 노출의 정도가 축적 결과의 차이를 발생시킬 수 있기 때문이다(An *et al.*, 2020). 또한 어류는 성장함에 따라 선택적 또는 비선택적으로 먹이를 달리함에 따라 생태적 지위(TP, 영양단계)가 달라질 수 있어 정확한 종과 후보먹이가 판별된 시료라고 하더라도 연구를 수행하는 정점이나 환경의 변화에 따라 해석이 달라질 수도 있다(Keppeler *et al.*, 2020). 특히 수계에 따라 다르게 구성되는 영양학적(섭식) 관계는 넓은 범위의 영양단계(TP)를 갖게 할 수 있는데 이러한 결과는 생태계에서 상위영양자이면서 비선택적인 섭식을 하는 어류에게서 관찰될 수 있다. 예를 들어 강한 포식압을 갖는 bass(배스)는 어류와 수서곤충 등 여러 수생생물을 비선택적으로 섭식하기 때문에 먹이가 될 수 있는 크기의 어류의 우점이나 서식환경에 따라 넓은 범위의 영양단계(TP)를 가질 수 있다(Murphy *et al.*, 2019). 그렇기 때문에 어류 체내 유해물질의 축적 및 이를 이용한 TMF 연구를 위한 정확한 해석을 위해서는 수생태계 구조와 대상어종의 성장 및 공서종과의 섭식관계에 대한 이해가 필요하다.

그러나 지금까지 어류의 체내 유해물질 농도 분석은 국가의 '건강한 먹거리 제공'을 목표로 하는 수산물 일일 섭취량 및 잠재적 위해성 평가를 위한 목적으로 활용되었기 때문에 상업성 어종의 '성체'에 한해 가식부를 이용한 연구가 주를 이루고 있으며(Kim *et al.*, 2012; Hung *et al.*, 2019), 유해물질의 축적에 대해 패류, 갑각류, 그리고 어류 등 수생물을 대상으로 하는 농도 분석, 국외 사례와의 비교, 그리고 수역 내에서의 TMF나 BCF(BSAF)와 같은 연구는 그 예가 극히 드물다(Choo *et al.*, 2018; Kim *et al.*, 2022). 특히, 모니터링을 위한 연구 중 생활화학제품 기인 유해물질의 어류 체내 축적 농도에 대한 국내 연구는 일부 유해물질에 대해서만 보고된 바 있으며, 특히 영양단계에 따른 유해물질의 확대 여부를 분석한 예는 Kim *et al.*

(2022)를 제외하고 전무하다(Table 3).

2) 어류를 이용한 영양확대계수(TMf) 연구

어류를 이용한 TMF 연구는 해당 수역의 생태계 내에서 물질의 전달과 위해성을 예측하게 한다(Kim *et al.*, 2022; Yang *et al.*, 2022). 특히 유해물질의 축적과 전달의 경향을 확인하기 위한 TMF 연구에서 생태계 내 영양단계 값은 물질의 농도 이상으로 중요한 요소가 되는데(Won *et al.*, 2018), 영양단계와 유해물질과의 관계식에서 그래프의 기울기 값을 이용하여 TMF를 계산할 수 있기 때문이다(Borgå *et al.*, 2012) (식 1).

$$\log Conc. = a + b \times TP$$

$$TMF = 10^b \quad (1)$$

이는 어류의 영양단계 정보를 일반적인 섭식 특성을 기초로 그 자료를 제공하는 'Fishbase (<https://www.fishbase.org/search.php>)'나, 일부 수역에서 조사된 섭식관계에서 해석된 수치(예를 들어, 동물플랑크톤(TP=2)를 먹는 작은 물고기(TP=3)를 잡아먹는 배스의 영양단계는 4이다)가 다른 수역에 그대로 이용될 수 없음을 의미한다. 특히, 지금까지 어류의 영양단계를 나타내기 위한 방법 중 위 내용물에 대한 광학적 식별이나 DNA 시퀀스(DNA metabarcoding)를 활용한 먹이 추정 방법은 '누가 누구를 먹는가'에 대한 정확한 섭식관계를 보여주는 직접적인 접근방식이다. 하지만 현장 시료의 높은 공복률을 비롯해 위에 잔류하는 생물 정보만을 확인할 수 있어 순간의 정보에 의존해 영양단계를 추정하게 되는 등의 한계를 가진다(Ishikawa *et al.*, 2018). 이에 반해, 안정동위원소비를 활용한 해석은 보다 긴 시간 동안 누적된 먹이 정보를 제공하며 특히 다양한 먹이를 섭식하는 경우 먹이의 기여율이 반영된 영양단계가 계산될 수 있어 기존의 접근법에서 산정할 수 있는 단순한 수치로 표현되는 영양단계보다 정확한 TMF를 계산하는데 유용하다고 할 수 있다.

그럼에도 불구하고 최근 상위 영양자를 대상으로 하는 연구에서 총 탄소 및 질소의 안정동위원소비를 활용한 기법의 불확실성이 보고되기도 하였는데, 첫 번째는 수환경에서 시공간적 변동성으로 인해 생산자의 질소안정동위원소비가 달라져 상위 영양자의 질소안정동위원소비의 값이 변동되거나, 생물의 생리에 따라 먹이와 섭식자 간의 trophic discrimination factor (TDF)가 달라질 수 있다는 것이다(Scharnweber *et al.*, 2021). 두 번째는 섭식 특성에 따라 잡식, 포식어종으로 구분되는 생물상과 생물간 섭식 관계가 시공간적 조건에 따라 달라지거나 복잡해질 수 있다는 점이다(Choi *et al.*, 2020). 영양학적 흐름(trophic

Table 3. Studies on bioaccumulation of household product (consumer products) derived pollutants in aquatic environment of Korea.

Target pollutants	Study area	Organisms	Concentrations	Remarks	Reference
Perfluorinated compound (Σ PFCs)	Gulpo stream	Common carp	54.7~233.15 (ng g ⁻¹ wet-wt.)		Cho <i>et al.</i> , 2010
		Crucian carp	0.70~300.09 (ng g ⁻¹ wet-wt.)		
PFC (PFAA)	4 west coasts and 2 rivers (Geum and Yeongsan)	Fish bivalve crustacean worm	3.2~180 ng g ⁻¹ ww 5.1~47 ng g ⁻¹ ww 2.6~135 ng g ⁻¹ ww 32~71 ng g ⁻¹ ww		Hong <i>et al.</i> , 2015
Siloxane	Three major rivers	Crucian carp (n=106)	ND~480 ng g ⁻¹ ww (Σ Cyclic) ND~11.9 ng g ⁻¹ ww (Σ linear) ND~481 ng g ⁻¹ ww (Σ Siloxane)		Wang <i>et al.</i> , 2021
Siloxane (D4, D5, D6)	Geum river (upper stream and estuary)	14 fish species	40.5~576 ng g ⁻¹ lw	TMF: 0.7~0.8	Kim <i>et al.</i> , 2022
Synthetic musks (HHCB, AHTN, MK)			18.3~39000 ng g ⁻¹ lw	TMF: 1.0~2.3	
	Nakdong river	Bivalve	56.2~1110 (HHCB ng g ⁻¹ lipid wt) ND~360 (AHTN ng g ⁻¹ lipid wt)		Lee <i>et al.</i> , 2014
OPFR	Nakdong river	Crucian carp	4.23~7.75 ng g ⁻¹ ww in Muscle 6.22~18.1 in Liver 3.08~7.70 in Gonad 31.1~256 in whole body	BCF: 1.06 × 10 ⁴ ~1.83 × 10 ⁴ BSAF: 3.49~6.89	Choo <i>et al.</i> , 2018
Σ PBDE	Gwangyang bay	11 aquatic organisms (fish, bivalve, and crustacean)	16000 ± 21000 (pg g ⁻¹ lipid wt) in edible tissue 5500 ± 4300 (pg g ⁻¹ lipid wt) in liver		Kim <i>et al.</i> , 2012

cascade) 또는 영양학적 길드(trophic guild)로 설명되는 시공간적 섭식 관계의 다양성은 에너지와 물질의 먹이망 내 흐름에 있어 복잡성을 보여주며, 하나의 수생태계 조사 결과에서 확보한 정보가 여러 환경 요소를 반영하지 않을 수도 있음을 의미한다. 이는 비록 같은 실험 생물 종이라고 하더라도 그것들의 분포, 계절 및 공간적인 차이에 따라서 $\delta^{15}\text{N}$ 값이 다르게 측정될 수 있음을 뜻하며 (Jennings and van der Molen, 2015), 최근 보고된 Choi *et al.* (2020)의 연구는 동종의 어류라 하더라도 환경에 따라 생태학적 영역(ecological niche)과 영양학적 흐름을 달리하게 됨에 따라 영양단계가 달라질 수 있음을 보여주었다. 이 연구에서는 서로 다른 서식처에서 채집된 두 어종(큰입배스 *Micropterus salmoides*, 모래무지 *Pseudogobio esocinus*)이

서식지에 따라 다른 영양단계를 나타냈고, 특히 총질소안정동위원소비($\delta^{15}\text{N}_{\text{bulk}}$)로 산출된 영양단계의 넓은 범위는 이들의 생태학적 지위(영양단계)에 정확하지 않은 결과를 야기할 수 있음을 지적하고 있다. 이같은 대상 생물체의 총질소안정동위원소비 분석을 통한 불확실한 연구 사례는 영양단계를 해석하기 위한 새로운 연구방법에 대한 필요성을 제기하게 하였다(Choi and Shin, 2018).

3) 아미노산 안정동위원소비 분석을 활용한 영양단계 해석 기법

안정동위원소비를 이용한 영양단계 해석이 가능한 것은 질소안정동위원소비가 영양단계에 따라 일정하게 증가한다고 여겨지고 있기 때문이며 (TDF, Fig. 1a), 1984년

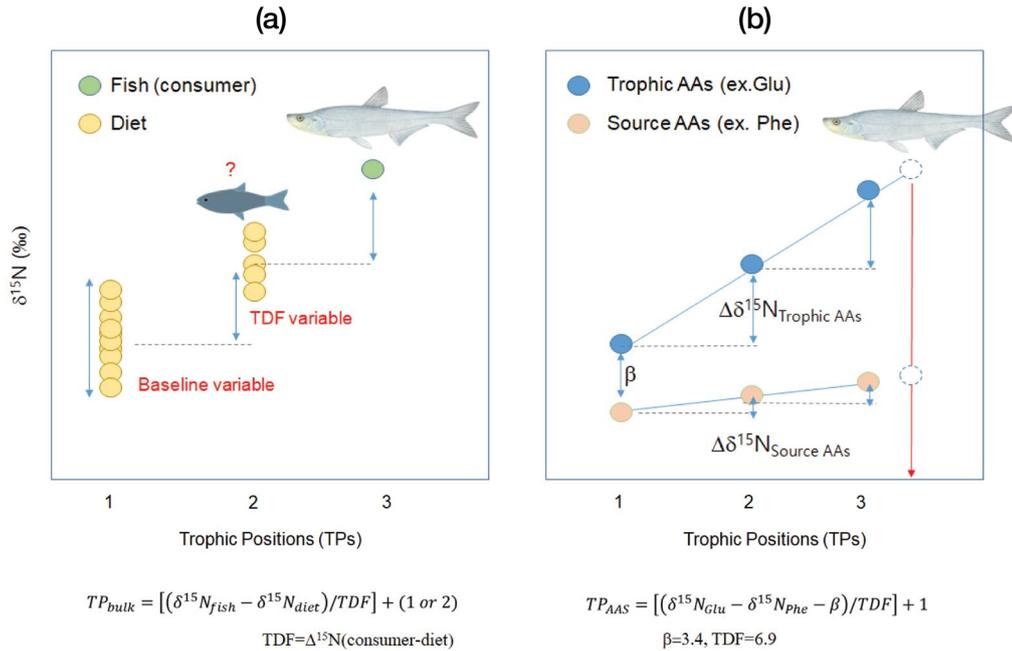


Fig. 1. Comparisons of two approaches for calculating trophic position using stable isotope analysis (a) bulk nitrogen isotope approach required both diet and target organism and (b) approach using compound specific isotope analysis (CSIA) of amino acids of target fish (Permission granted/ illustrated by Kim In Young, author of <http://fishillust.com/home>).

Minagawa and Wada에 의해 3.4 ± 0.1 (TDF)로 제안된 후 큰 변동 없이 이용되고 있으나 (Minagawa and Wada, 1984) 최근 제안되고 있는 생물체 내 화합물의 안정동위원소비 (Compound specific isotope analysis, CSIA)를 이용한 심화된 접근 방법은 기존의 방법이 가지고 있는 한계를 보완할 수 있다는 점에서 각광받고 있다 (Chikaraishi *et al.*, 2007; Won *et al.*, 2020).

아미노산의 안정동위원소비를 이용한 접근법의 원리는 생물의 체내 대사에 따라서 (1) 동위원소비의 변화가 거의 없어 먹이 (source, 에너지) 기원을 보여주는 아미노산 (source amino acid)과, (2) 개체 내 대사에 의해 그 값이 무거워지는 아미노산 (trophic amino acid)의 동위원소비의 차이를 이용한다 (Fig. 1b) (식 2). 해당 식에서 trophic amino acid로 이용된 glutamic acids의 $\delta^{15}\text{N}$ 는 영양단계에 따라 약 8.0‰ 정도 비교적 크게 증가하는데, 이는 개체 내 glutamic acid의 대사 과정에서 아민기 (NH_3)기를 떨어뜨리는 대사 과정에 의해 상대적으로 무거운 질소가 남은 아미노산이 체내에 남게 되고 먹이연쇄에 따라 전달되기 때문에 결과적으로는 섭식에 대한 정보를 제공한다. 반면, source amino acid로 이용된 phenylalanine은 대사 과정에서 동위원소비의 변화가 없으며 섭식을 통한 전이 과정에서도 거의 변화되지 (0.4‰) 않아 먹이원에 대한 정보를 제

공할 수 있다. 이 방법은 하나의 개체에서 분석한 결과로 기저 먹이원 동위원소 계수 (β)와 영양단계 분별계수 (TDF, Fig. 1b)를 이용해 보다 정밀하게 영양단계를 계산할 수 있다는 점에서 기존의 총질소의 안정동위원소비 ($\delta^{15}\text{N}_{bulk}$)를 이용한 방법의 불확실성을 보완한다.

실제로 생산자나 낮은 단계의 소비자를 포함하는 먹이 생물을 시료로 함께 분석해야 했던 기존의 방법은 현장 조사 시 생태계를 구성하고 있는 먹이 (후보) 시료를 함께 채집해야 하는 어려움을 갖는데 반해 아미노산의 안정동위원소비는 목표로 하는 대상 시료만을 이용해 영양단계를 산출해 낼 수 있어 수역의 상위영양자에 초점을 두고 연구를 수행할 수 있다는 장점을 갖는다. 특히 한국은 수역 별 우점하는 어종이나 상업성 어종, 그리고 최상위 육식어종에 대한 조사 결과가 풍부하며 이러한 조건에서 어류를 대상으로 하는 일반화된 채집 및 동정 방법을 적용하는 것이 가능하기 때문에 다양한 수환경에서 신뢰성 높은 영양단계 해석이 가능함을 나타낸다.

$$TP_{AAS} = [(\delta^{15}N_{Glu} - \delta^{15}N_{Phe} - \beta)/TDF] + 1 \quad (2)$$

둘째로 배경질소 값의 다양성과 생물의 생리에 따라 변할 수 있는 TDF가 야기하는 영양단계의 변동성을 배제할 수 있다는 것이다 (Fig. 1a). 총질소를 이용한 영양단계 해

석은 기초생산자의 질소 값과 섭취 과정에서의 TDF에 따라 달라지는데 이 두 요소는 외부적 요소(외인성의 무/유기물)의 유입과 먹이질 및 생리 상태에 따라 영향을 받을 수 있다.

다시 말해 아미노산의 질소안정동위원소비를 이용한 영양단계 산출법은 실험자가 현장에서 고려해야 하는 부분에 대한 비중을 낮춰주면서도 대상 개체의 생태계 내 위치를 보다 정확하게 계산할 수 있다는 점에서 해당 생태계 내에서 유해물질의 생태계 내 거동과 축적에 대한 정보를 제공하는 데에 있어 유용하다(Choi *et al.*, 2017; Kim *et al.*, 2022; Yang *et al.*, 2022). 최근 많은 연구에서 이를 기반으로 하는 영양단계 및 유해물질의 TMF 산출 법이 높은 정확성과 활용 가능성을 가진 분석 기법임을 확인할 수 있었다(Won *et al.*, 2020).

요약 및 결론: 유해물질 모니터링 연구의 방향

화학제품에서 기인한 다양한 유해물질이 수환경으로 유입되어 생태계에 영향을 줄 수 있다는 우려에도 불구하고 국내에서는 유해물질의 환경 매체 내 잔류량을 분석하는 모니터링 이외에 생태계 관점에서의 평가 연구가 수행되고 있지 못한 실정이다. 또한 생물체 내 축적된 유해물질의 농도 분석 결과 역시 그 수치를 제시하고 비교하는 것에 그쳐 있다. 수생태계 내 유해물질 연구를 위한 생물 축적 연구는 영양단계에 따른 유해물질의 증가 여부를 고려해 생태계 내에서의 위해성을 판단할 수 있는 TMF 연구가 방향이 될 수 있다. 유해물질의 TMF 연구는 유해물질의 생물 축적과 먹이망을 통한 전달 가능성을 이해하고 생태계 위해성을 평가하는데 중요한 정보를 제공할 수 있으며 나아가 환경 내 유해물질의 거동에 대한 정보로 물질 관리를 위해서도 이용될 수 있다. 그럼에도 불구하고 제품으로부터 기인한 유해물질에 대한 TMF는 활발하게 연구되지 못했으며 이는 TMF 연구가 유해물질의 잔류 농도를 제시하고 있는 기존의 연구들 보다 생물정보와 생태계 내 영양학적 관계에 대한 이해를 요구하기 때문이라고 할 수 있다. 지금까지 정확한 TMF 연구를 위해 정밀한 유해물질의 분석 기법 개발과 함께 생태계 내 영양단계의 신뢰도와 정확성을 향상시키기 위한 기술적 노력이 있어왔으며, 특히 생물의 영양단계를 파악하는 데 있어 획기적인 방법으로 여겨지는 아미노산의 질소안정동위원소비는 까다로운 분석 절차와 필요 장비(Gas chromatography combustion isotope ratio mass spectrometry, GC/C/IRMS) 등 아직까지

접근성이 높지 않다는 단점에도 불구하고 최근 국내외에서 여러 생태계를 대상으로 많은 연구가 시도되고 있다. 이와 병행하여 이미 확보되어 있는 국내 풍부한 어류시료 및 조사 결과는 아미노산 안정동위원소비를 이용한 영양단계 해석 연구에 있어 대상 시료 선정 등에 적극 활용될 수 있을 것으로 기대된다. 실제로 우점종 및 섭식관계에 있어 상위 영양단계에 위치하는 후보 대상 어종 정보에 특정 유해물질에 대한 수역 별 연구 대상 어종을 선택하는데 이용되며 수역에 따라 다르게 관찰될 수 있는 결과를 해석할 수 있는 정보를 제공할 수 있다.

TMF 연구에 있어 이러한 기술적 가능성과 축적된 정보는 다양한 유해물질을 관리하고 생태계 위해성을 평가하는 데에 있어 물질 별, 수역 별, 그리고 생태계 특성이 고려된 TMF 산출로 이어져 보다 정확한 수생태계 평가를 가능하게 할 것이다. 특히 국내의 여러 수생태계에서 수행된 어류 조사는 이미 여러 항목을 바탕으로 그 생태계의 구조와 건강성을 평가하기에 충분하며 이러한 결과를 보다 잘 활용하기 위해 안정동위원소비, 특히 아미노산의 안정동위원소비를 이용한 영양단계 산출은 다양한 수환경에 적용할 수 있는 접근방법으로서 향후 유해물질의 모니터링 방향을 위한 최신 기법으로 제안될 수 있을 것이다. 또한 이를 위해 앞으로 수환경 조사를 위한 어류조사는 이와 같은 화학적 평가의 활용을 감안한 어종 선정, 최상위 포식자의 영양단계 변동에 영향을 주는 서식처 환경요인에 대한 이해와 TMF 연구에 있어 정확성을 높여주기 위한 시료 채취 등에 활용될 새로운 조사 방법 등이 추가적으로 제시될 필요성도 있을 것이다.

적 요

수환경 내 다양한 유해물질의 위해성에 대한 관심은 환경 매체 내 물질의 농도뿐만 아니라 복잡한 먹이단계를 통한 어류 체내의 축적과 어류를 통한 인체 위해성으로 이어진다. 국내의 경우 2016년 이후 생활에서 사용되고 있는 화학제품(생활화학제품) 기인 위해 우려물질의 관리를 위한 등록과 평가 등에 관한 법률 개정과 함께 이들 물질의 환경 배출이 주목받게 됨에 따라 수생태계 내 잔류여부에 대한 조사도 수행되기 시작했다. 최근에는 이러한 물질의 관리를 위한 생태계 내 분포 조사 및 배출 계수 산정을 위한 연구사업이 수행되고 있는데 해당 연구 사업에서는 세정제, 접착제, 염색제, 방향제 등을 비롯한 화장품이나 세제 등에 포함되는 성분과 살균·소독제를 대상으로 영양단계 내 축적과 전달을 이해하기 위한 물질의 축적과 확대를

포함한다. 본 논문은 최근 발표된 생활화학제품기인 유해물질의 수환경 유입 및 분포에 대한 연구 결과를 정리하고 그 과학적 의미를 제시하며 또한 국내외 수행되고 있는 수환경 모니터링 기법에 대한 연구의 예를 바탕으로 현재 유해화학물질의 수환경 내 잔류 농도 및 분포, 생태계 모니터링을 위한 연구의 방향을 제안하고자 한다. 특히 어류를 대상으로 하는 조사에서 국내 수역에 서식하는 주요 어류 조사 및 이를 바탕으로 한 대상 어류 선정의 필요성과 인체 위해성 연구의 필요성 등 시기적으로 요구되는 연구를 위한 영양단계 해석과 생물확대계수 연구의 방향을 소개하며 향후 국내에서 수행되고 있는 생물상 모니터링과 화학물질 연구에 대한 제언을 포함한다.

저자정보 원은지 (한양대학교 해양대기과학연구소 창의융합교육원 교수), 조하은 (한양대학교 해양융합학과 연구원), 김도균 (한양대학교 해양융합학과 박사과정), 홍성진 (충남대학교 해양환경학과 교수), 신경훈 (한양대학교 해양융합학과 교수)

저자기여도 원고설계: 원은지, 홍성진, 신경훈, 자료 수집 및 정리: 조하은, 김도균, 초안작성: 원은지, 원고 수정 및 검토: 원은지, 조하은, 김도균, 홍성진, 최종원고검토: 모든 저자, 연구비수주: 신경훈

이해관계 본 논문에는 이해관계 충돌의 여지가 없음.

연구비 본 연구는 2022년 환경부에서 지원하는 생활화학제품 안전관리 기술개발사업을 통해 한국환경산업기술원 (KEITI)의 지원을 받았습니다 [2020002970007, 1485018715].

REFERENCES

- ABC Laboratories Inc. 1989a. Soil/sediment adsorption-desorption of 14C-didecyldimethylammoniumchloride (14C-DDAC). ABC Final Report Number 37009. Submitted to Lonza Inc., Fair Lawn, NJ.
- An, K.-G., K.-I. Kim and J.-H. Kim. 2007. Biological water quality assessments in wastewater-impacted and non-impacted streams. *Korean Journal of Limnology* **40**(1): 82-92.
- An, Y., S. Hong, Y. Kim, M. Kim, B. Choi, E. Won and K.-H. Shin. 2020. Trophic transfer of persistent toxic substances through a coastal food web in Ulsan Bay, South Korea: Application of compounds-specific isotope analysis of nitrogen in amino acids. *Environmental Pollution* **266**: 115160.
- Atwell, L., K.A. Hobson and H.E. Welch. 1998. Biomagnification and bioaccumulation of mercury in an arctic marine food web: insights from stable nitrogen isotope analysis. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences* **55**(5): 1114-1121.
- Bassarab, P., D. Williams, J.R. Dean, E. Ludkin and J.J. Perry. 2011. Determination of quaternary ammonium compounds in seawater samples by solid-phase extraction and liquid chromatography-mass spectrometry. *Journal of Chromatography A* **1218**(5): 673-677.
- Borgå, K., K.A. Kidd, D.C.G. Muir, O. Berglund, J.M. Conder, F.A. Gobas, J. Kucklick, O. Malm and D.E. Powell. 2012. Trophic magnification factors: considerations of ecology, ecosystems, and study design. *Integrated Environmental Assessment and Management* **8**(1): 64-84.
- CCME, Canadian Council of Ministers of the Environment. 1999. Canadian water quality guidelines for the protection of aquatic life: DDAC. In: Canadian environmental quality guidelines, 1999, Canadian Council of Ministers of the Environment, Winnipeg.
- Cho, C., J.G. Cho, I. Eom, B. Lee, S. Kim, K. Choi and J. Yoon. 2010. Bioconcentration of perfluorinated compounds in fish from Gulpo stream. *Environmental Health & Toxicology* **25**(3): 229-240.
- Choi, B. and K.-H. Shin. 2018. Applications and prospects of stable isotope in aquatic ecology and environmental study. *Korean Journal of Ecology and Environment* **51**(1): 96-104.
- Choi, B., C. Lee, Y. Takizawa, Y. Chikaraishi, H.-J. Oh, K.-H. Chang, M.-H. Jang, H.-W. Kim, K.-L. Lee and K.-H. Shin. 2020. Trophic response to ecological conditions of habitats: Evidence from trophic variability of freshwater fish. *Ecology and Evolution* **10**: 7250-7260.
- Choi, H., B. Choi and K.-H. Shin. 2017. Determination of trophic position using nitrogen isotope ration of individual amino acid in the Geum estuary. *Korean Journal of Ecology and Environment* **50**(4): 432-440.
- Choo, G., H.-S. Cho, K. Park, J.-W. Lee and P. Kim. 2018. Tissue-specific distribution and bioaccumulation potential of organophosphate flame retardants in crucian carp. *Environmental Pollution* **239**: 161-168.
- Cunningham, P.A., E.E. Sullivan, K.H. Everett, S.S. Kovach, A. Rajan and M.C. Barber. 2019. Assessment of metal contamination in Arabian/Persian Gulf fish: A review. *Marine Pollution Bulletin* **143**: 264-283.
- Deng, D., H. Chen and N.F.Y. Tam. 2015. Temporal and spatial contamination of polybrominated diphenyl ethers (PBDEs) in wastewater treatment plants in Hong Kong. *Science of The Total Environment* **502**: 133-142.
- Gadzala-Kopciuch, R., B. Berecka, J. Bartoszewicz and B. Buszewski. 2004. Some considerations about bioindicators in environmental monitoring. *Polish Journal of Environmental Studies* **13**(5): 453-460.
- Grand View Research. 2020. Surface Disinfectant Market Size, Share & Trends Analysis Report By Composition (Chemical, Biobased), By Form (Liquid, Wipes), By End-use

- (HORECA, Hospitals), By Application, And Segment Forecasts, 2022-2030, Report ID: GCR-4-58038-721-6.
- Guo, J., J. Mo, Q. Qi, J. Peng, G. Qi, M. Kanerva, H. Iwata and Q. Li. 2021. Prediction of adverse effects of effluents containing phenolic compounds in the Ba River on the ovary of fish (*Hemiculter leucisculus*) using transcriptomic and metabolomic analyses. *Science of The Total Environment* **801**: 149554.
- Hirose, R., R. Bandou, H. Ikegaya, N. Watanabe, T. Yoshida, T. Daidoji, Y. Naito, Y. Itoh and T. Nakaya. 2021. Disinfectant effectiveness against SARS-CoV-2 and influenza viruses present on human skin: model-based evaluation. *Clinical Microbiology and Infection* **27**(7): 1042. e1-1042.e4.
- Hong, S., J.S. Kim, T. Wang, J.E. Naile, J. Park, B.-O. Kwon, S.J. Song, J. Ryu, G. Codling, P.D. Jones, Y. Lu and J.P. Giesy. 2015. Bioaccumulation characteristics of perfluoroalkyl acids (PFAAs) in coastal organisms from the west coast of South Korea. *Chemosphere* **129**: 157-163.
- Hong, W.J., H. Jia, C. Liu, Z. Zhang, Y. Sun and Y.F. Li. 2014. Distribution, source, fate and bioaccumulation of methyl siloxanes in marine environment. *Environmental Pollution* **191**: 175-181.
- Hu, Z., Y. Shi and Y. Cai. 2011. Concentrations, distribution, and bioaccumulation of synthetic musks in the Haihe River of China. *Chemosphere* **84**(11): 1630-1635.
- Hung, M.D., N.H. Lam, H.J. Jeong, G.H. Park, P.J. Kim, J.E. Oh and H.S. Cho. 2019. Perfluoroalkyl substances (PFASs) in ten edible freshwater fish species from major rivers and lakes in Korea: distribution and human exposure by consumption. *Toxicology and Environmental Health Sciences* **10**: 307-320.
- Institute of Public Health and Environment. 2014. A study on ecotoxicity of public sewage treatment plants in Incheon using *Daphnia Magna*. Report (in Korean).
- Ishikawa, N.F. 2018. Use of compound-specific nitrogen isotope analysis of amino acids in trophic ecology: assumptions, applications, and implications. *Ecological Research* **33**(5): 825-837.
- Jennings, S. and J. van der Molen. 2015. Trophic levels of marine consumers from nitrogen stable isotope analysis: Estimation and uncertainty. ICES. *Journal of Marine Science* **72**(8): 2289-2300.
- Jeong, D.-H., S.-Y. Ham, W. Lee, H. Chung and H. Kim. 2017. Study on occurrence and management of organic micro-pollutants in sewer systems. *Journal of Korean Society of Water and Wastewater* **31**(6): 551-566.
- Jeziarska, B. and M. Witeska. 2006. The metal uptake and accumulation in fish living in polluted waters. *Soil and Water Pollution Monitoring, Protection and Remediation* 3-23.
- Juergensen, L., J. Busnarda, P.-Y. Caux and R.A. Kent. 2000. Fate, behavior, and aquatic toxicity of the fungicide DDAC in the Canadian environment. *Environmental Toxicology* **15**(3): 174-200.
- Kasprzyk-Hordern, B., R.M. Dinsdale and A.J. Guwy. 2009. The removal of pharmaceuticals, personal care products, endocrine disruptors and illicit drugs during wastewater treatment and its impact on the quality of receiving waters. *Water Research* **43**: 363-380.
- Keppeler, F.W., C.G. Montaña and K.O. Winemiller. 2020. The relationship between trophic level and body size in fishes depends on functional traits. *Ecological Monographs* **90**(4): e01415.
- Kim, D., H.-E. Cho, E.-J. Won, H.-J. Kim, S. Lee, K.-G. An, H.B. Moon and K.-H. Shin. 2022. Environmental fate and trophic transfer of synthetic musk compounds and siloxanes in Geum River, Korea: Compound-specific nitrogen isotope analysis of amino acids for accurate trophic position estimation. *Environment International* **161**: 107123.
- Kim, H.-J. and K.-G. An. 2020. Impacts of stream water quality and fish histopathology by effluents of wastewater treatment plant. *Korean Journal of Environmental Biology* **38**(4): 678-690.
- Kim, S., K. Ji, H. Shin, S. Park, Y. Kho, K. Park, K. Kim and K. Cho. 2020. Occurrences of benzalkonium chloride in streams near a pharmaceutical manufacturing complex in Korea and associated ecological risk. *Chemosphere* **256**: 127084.
- Kim, S., K.-J. Roh and D.-M. Kim. 2019. Behavior characteristics of nonylphenol in the downstream of river in Busan, Korea. *Korean Journal of Fisheries and Aquatic Sciences* **52**(1): 74-80.
- Kim, Y.-H., H.-S. Kim, H.-G. Choi, H.-S. Cho and H.-B. Moon. 2012. Contamination and bioaccumulation of polybrominated diphenyl esters (PBDEs) in Gwangyang Bay, Korea. *Toxicology and Environmental Health Sciences* **4**(1): 42-49.
- Lee, I.S., U.J. Kim, J.E. Oh, M. Choi and D.W. Hwang. 2014. Comprehensive monitoring of synthetic musk compounds from freshwater to coastal environments in Korea: with consideration of ecological concerns and bioaccumulation. *Science of The Total Environment* **470-471**: 1502-1508.
- Lee, S., H.-J. Cho, W. Choi and H.-B. Moon. 2018. Organophosphate flame retardants (OPFRs) in water and sediment: Occurrence, distribution, and hotspots of contamination of Lake Shihwa, Korea. *Marine Pollution Bulletin* **130**: 105-112.
- Li, X. and B.J. Brownawell. 2010. Quaternary ammonium compounds in urban estuarine sediment environments - A class of contaminants in need of increased attention?. *Environmental Science & Technology* **44**: 7561-7568.
- Li, J., Y. Wang, H.S. Xiong, Z.-J. Tan, Z. Lü, K.-K. Zheng, L.X. Zou, G.B. Luo, L. Ye, Z.H. Zhang and M. Wang. 2020. Investigation and optimization strategy on the operation of disinfection facilities in municipal WWTPs. *China Wa-*

- ter & Wastewater* **36**(8): 7-19 (in Chinese).
- Lu, Q., Y. Liang, W. Fang, K.L. Guan, C. Huang, X. Qi, Z. Liang, Y. Zeng, X. Luo, Z. He, B. Mai and S. Wang. 2021. Spatial Distribution, Bioconversion and Ecological Risk of PCBs and PBDEs in the Surface Sediment of Contaminated Urban Rivers: A Nationwide Study in China. *Environmental Science & Technology* **55**(14): 9579-9590.
- Minagawa, M. and E. Wada. 1984. Stepwise enrichment of ^{15}N along food chains: further evidence and the relation between $\delta^{15}\text{N}$ and animal age. *Geochimica et cosmochimica acta* **48**(5): 1135-1140.
- Ministry of Environment (MOE). 2010. The Development of ecological risk/health assessment in aquatic systems using multiple fish bioindicators and fish stressor identification methodology. Risk assessment and management technology. Report (in Korean).
- Ministry of Environment (MOE). 2016. An announcement of the result on complete review for every consumer chemical products (<https://www.me.go.kr>).
- Ministry of Environment (MOE). 2021. Detailed instructions for the safe use of disinfectant products.
- Ministry of Land, Infrastructure and Transport (MOLIT). 2001. Development of close-to-nature river improvement techniques. Report (in Korean).
- Murphy, C.A., I. Arismendi, G.A. Taylor and S.L. Johnson. 2019. Evidence for lasting alterations to aquatic food webs with short-duration reservoir draining. *PLoS ONE* **14**(2): e0211870.
- Nabi, G., Y. Wang, Y. Hao, S. Khan, Y. Wu and D. Li. 2020. Massive use of disinfectants against COVID-19 poses potential risks to urban wildlife. *Environmental Research* **188**: 109916.
- Nixon, W.B. 1998. Wildlife International Ltd. memorandum to Gerald R. Schoenig, toxicology consultant to Lonza Inc. Re: DDAC octanol/water partition coefficient test. August 14, 1998.
- Odum, E.P. 1975. *Fundamentals of Ecology*, New York. 1-574.
- Oh, H.-J., M.-Y. Jin, B. Choi, K.-H. Shin, G.-H. La, H.-W. Kim, M.-H. Jang, K.-L. Lee and K.-H. Chang. 2019. Analysis of food web structure of Nakdong river using quantitative food web parameters obtained from carbon and nitrogen stable isotope ratios. *Korean Journal of Ecology and Environment* **52**(1): 56-64.
- Oost, R., A. Opperhuizen, K. Satumalay, H. Heida and N.P.E. Vermeulen. 1996. Biomonitoring aquatic pollution with feral eel (*Anguilla anuilla*) I. Bioaccumulation: biota-sediment ratios of PCBs, OCPs, PCDDs, and PCDFs. *Aquatic Toxicology* **35**(1): 21-46.
- Park, Y.J., S.-J. Lee and K.G. An. 2019. Analysis of fish ecology and water quality for health assessments of Geum-River watershed. *Korean Journal of Environment and Ecology* **33**: 187-201.
- Phillips, D.L., R. Inger, S. Bearhop, A. Jackson, J. Moore, A. Par-
nell, B. Semmens and E. Ward. 2014. Best practices for use of stable isotope mixing models in food-web studies. *Canadian Journal of Zoology* **92**(10): 823-835.
- Savoca, D. and A. Pace. 2021. Bioaccumulation, biodistribution, toxicology and biomonitoring of organofluorine compounds in aquatic organisms. *International Journal of Molecular Sciences* **22**(12): 6276.
- Scharmweber, K., M.L. Andersson, F. Chaguaceda and P. Eklöv. 2021. Intraspecific differences in metabolic rates shape carbon stable isotope trophic discrimination factors of muscle tissue in the common teleost Eurasian perch (*Perca fluviatilis*). *Ecology and Evolution* **11**: 9804-9814.
- Smith, A.J., T. McGowan, M.J. Devlin, M.S. Massoud, M. Al-Enezi and A.-S. Al-Zaidan. 2015. Screening for contaminant hotspots in the marine environment of Kuwait using ecotoxicological and chemical screening techniques. *Marine Pollution Bulletin* **100**: 681-688.
- Szenasy, E. 1998. Assessing the potential impact of the antiseptics DDAC and IPBC, chemicals of concern in the Fraser River. FRAP Report No. 1998-07. Environment Canada, Environmental Conservation Branch, Fraser River Action Plan, Vancouver.
- Tan, J., H. Kuang, C. Wang, J. Liu, Q. Pang, Q. Xie and R. Fan. 2021. Human exposure and health risk assessment of an increasingly used antibacterial alternative in personal care products: Chloroxylenol. *Science of The Total Environment* **786**: 147524.
- The New Jersey Department of Environmental Protection and the New Jersey Department of Environmental Protection and the New Jersey Department of Health, 2021, A guide to Health Advisories for Eating Fish and Crabs Caught in New Jersey Waters (<https://www.FishSmartEatSmartNJ.org>).
- USDA. 1998. Stream Corridor Restoration: Principles, Practices, and Processes, Federal Interagency Stream Restoration Working Group, USA.
- USEPA. 1998. A Comparative Analysis of Ecological Risks from Pesticides and Thier uses: Background, Methodology & Case Study, Environmental Fate & Effects Division, Office of Pesticide Programs, US EPA, Washington D.C., USA.
- USEPA. 2000. Guidance for assessing chemical contaminant data for use in fish advisories, US EPA, Washington D.C., USA.
- USGS. 2004. Biomonitoring of environmental status and trends (BEST) program: Environmental contaminants and their effects on fish in the Rio Grande Basin. USGS Scientific Investigation Report 2004-5108.
- Vander Zanden, M. and J.B. Rasmussen. 1999. Primary consumer $\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^{15}\text{N}$ and the trophic position of aquatic consumers. *Ecology* **80**(4): 1395-1404.
- Wang, W., H.-S. Cho, K. Kim, K. Park and J.-E. Oh. 2021. Tissue-specific distribution and bioaccumulation of cyclic

- and linear siloxanes in South Korean crucian carp (*Carassius Carassius*). *Environmental Pollution* **288**: 117789.
- Won, E.-J., B. Choi, S. Hong, J.S. Khim and K.-H. Shin. 2018. Importance of accurate trophic level determination by nitrogen isotope of amino acids for trophic magnification studies: A review. *Environmental Pollution* **238**: 677-690.
- Won, E.-J., B. Choi, C.H. Lee, S. Hong, J.-H. Lee and K.-H. Shin. 2020. Variability of trophic magnification factors as an effect of estimated trophic position: Application of compound-specific nitrogen isotope analysis of amino acids. *Environment International* **135**: 105361.
- Won, E.-J., E. Byeon, Y.H. Lee, H. Jeong, Y. Lee, M.-S. Kim, H.-W. Jo, J.-K. Moon, M. Wang, J.-S. Lee and K.-H. Shin. 2022. Molecular evidence for suppression of swimming behavior and reproduction in the estuarine rotifer *Brachionus koreanus* in response to COVID-19 disinfectants. *Marine Pollution Bulletin* **175**: 113396.
- Yang, Y.H., S.Y. Kwon, M.T.K. Tsui, L.C. Motta, S.J. Washburn, J. Park, M.-S. Kim and K.-H. Shin. 2022. Ecological traits of fish for mercury biomonitoring: Insights from compound-specific nitrogen and stable mercury isotopes. *Environmental Science & Technology* **56**(15): 10808-10817.
- Zhang, H., W. Tang, Y. Chen and W. Yin. 2020. Disinfection threatens aquatic ecosystems. *Science* **368**(6487): 146-147.
- Zhang, Z., Y. Zhou, L. Han, X. Guo, Z. Wu, J. Fang, B. Hou, Y. Cai, J. Jiang and Z. Yang. 2022. Impacts of COVID-19 pandemic on the aquatic environment associated with disinfection byproducts and pharmaceuticals. *Science of The Total Environment* **811**: 151409.
- Zheng, G., G.M. Filippelli and A. Salamova. 2020. Increased indoor exposure to commonly used disinfectants during the COVID-19 pandemic. *Environmental Science & Technology Letters* **7**: 760-765.