

유해화학물질 분석을 위한 생태조사 기반의 타깃 후보어종 선정법

김지윤, 진상현, 조민재, 최혜지, 안광국*

충남대학교 생명시스템과학대학 생명과학과

Target candidate fish species selection method based on ecological survey for hazardous chemical substance analysis

Ji Yoon Kim, Sang-Hyeon Jin, Min Jae Cho, Hyeji Choi and Kwang-Guk An*

Department of Biological Science, College of Bioscience and Biotechnology, Chungnam National University, Daejeon 34134, Republic of Korea

Contribution to Environmental Biology

- The selection of target candidate fish species is important for research of hazard chemicals.
- This research contributes to environmental biology.

*Corresponding author

Kwang-Guk An
Tel. 042-821-6408
E-mail. kgan@cnu.ac.kr

Received: 16 February 2023

First revised: 8 March 2023

Second revised: 28 March 2023

Revision accepted: 15 May 2023

Abstract: This study was conducted to select target fish species as baseline research for accumulation analysis of major hazardous chemicals entering the aquatic ecosystem in Korea and to analyze the impact on fish community. The test bed was selected from a sewage treatment plant, which could directly confirm the impact of the inflow of harmful chemicals, and the Geum River estuary where harmful chemicals introduced into the water system were concentrated. A multivariable metric model was developed to select target candidate fish species for hazardous chemical analysis. Details consisted of seven metrics: (1) commercially useful metric, (2) top-carnivorous species metric, (3) pollution fish indicator metric, (4) tolerance fish metric, (5) common abundant metric, (6) sampling availability (collectability) metric, and (7) widely distributed fish metric. Based on seven metric models for candidate fish species, eight species were selected as target candidates. The co-occurring dominant fish with target candidates was tolerant (50%), indicating that the highest abundance of tolerant species could be used as a water pollution indicator. A multi-metric fish-based model analysis for aquatic ecosystem health evaluation showed that the ecosystem health was diagnosed as "bad conditions". Physicochemical water quality variables also influenced fish feeding and tolerance guild in the testbed. Eight water quality parameters appeared high at the T1 site, indicating a large impact of discharging water from the sewage treatment plant. T2 site showed massive algal bloom, with chlorophyll concentration about 15 times higher compared to the reference site.

Keywords: chemical pollution, fish contamination, ecological stream health, fish tolerance

1. 서 론

수생태계에 유입되는 주요 유해화학물질들은 금속, 플라스틱, 섬유 제품 등의 산업폐수 및 생활하수 등이 처리되는 하수종말처리장(Wastewater treatment plant, WTP)에서 유입되는 것으로 잘 알려져 있다(Lee *et al.* 2005). 하수종말처리장이 보급됨에 따라 공공수역의 수질이 개선되어 위생적인 부분뿐만 아니라 점오염원 관리 측면에서도 매우 효과적인 결과를 가져왔다(Kim *et al.* 2017). 그럼에도 불구하고 도시집중화 현상이 심화되어 생활 및 공업용수로 사용된 물이 증가함에 따라 배출수에 잔류성유기오염물(POPs)뿐만 아니라 질소, 인 등 영양염류 및 유기물이 수계에 유입되고 있어(Lee *et al.* 2008; MOE 2009), 하천에 서식하는 어류는 하천수 및 하천 퇴적물의 잔류성 유해화학물질 및 각종 수질오염에 노출되어 직접적인 영향을 받는 것으로 보고되고 있다(Cho *et al.* 2000).

잔류성 유기오염물질 중 PCBs (Polychlorinated biphenyls), OCPs (Organochlorine pesticides) 등과 같은 유기염소계화합물의 경우에는 물리적, 화학적으로 안정되어 환경 중에 유입될 시 잔류성이 높은 물질로 보고되고 있다(UNEP 2003). 유해화학물질에 대한 수생태계 건강성은 이화학적 수질에 의한 영향뿐만 아니라 하천에 서식하는 생물지표(Bio-indicator) 및 하상구조의 퇴적물에 복합적인 영향을 주는 것으로 알려져 있다(Mullins 1999; Dyer and Wang 2002). 이런 하천 내의 오염물 거동은 강우 등과 같은 일시적인 다양한 요인들에 의해 민감하게 반응하여 장기간의 영향을 주기 때문에 생태적인 문제점을 파악하기 어렵다. 이런 수생태계의 다양한 요인들로 인해 국내 하수종말처리장에서 처리된 배출수가 수계에 방류되었을 때 수생태계 및 수생생물에 미치는 영향에 대한 생태건강성 평가 및 독성평가 연구는 미진한 상태이다(Ra *et al.* 2005). 반면, 해외에서는 지속적으로 하수종말처리장과 같은 점오염원이 하천에 미치는 영향에 대한 연구를 수행하고 있고, 최적의 생물지표 타깃종을 선정하여 유해화학물질의 영향을 분석해 오고 있다(US EPA 1991; Chapman 2000).

정부에서는 하천에 유입되는 배출수의 영향을 줄이기 위해 하수종말처리장에서 배출되는 다양한 수질항목들에 대해 규제하는 노력을 기울이고 있으며, 특히 총인은 조류 성장제한요인으로서 규정하여 BOD와 더불어 2011~2015년의 기간 동안 제2단계 수질오염총량관리 대상물질로 관

리되고 있다(Park *et al.* 2011). 그러나, 최근 유해화학물질의 발생 및 유통량 증가로 인해 중금속을 포함한 각종 유해화학물질이 수계에 유입되고 있으며(Abdel-Baki *et al.* 2011), 이런 화학 물질들은 위해성이 높아 수생태계 전반에 영향을 끼치는 것으로 알려져 있다(US EPA 1999, 2000). 특히, 수생태계 내의 최상위 포식자인 어류는 장기간의 유해화학물질의 노출에 의해 다양한 장기에 축적되기 때문에 생리적, 기능적 장애뿐만 아니라(Kim and An 2020) 생물 먹이연쇄를 통해 수생태계 교란에 직접적으로 관여하는 것으로 보고되고 있다(Chung and Yoo 1990). 따라서 유해화학물질에 대한 수생태 영향을 분석하기 위해서는 1차적으로 수생태의 장기간 특성을 잘 반영하는 타깃종 선정이 선행되어야 하나, 지금까지 국내 연구자들은 경험적으로 타깃종을 선정해 유해화학물질 분석에 대한 해석이 모호한 결과를 초래하고 있는 실정이다.

이를 위해서 선행되어야 하는 가장 중요한 연구는 유해오염물질에 노출 및 농축이 가장 잘 되는 타깃 후보어종(Target candidate fish species)의 선정이다. 미국 환경부(US EPA)에서는 어류의 잔류성 유해화학물질에 대한 분석을 수행하기 위해서 노출농도 및 농축 타깃 후보어종을 선정하는 선행 연구가 필요함을 제시한 바 있다(US EPA 1991). 미국 환경부에서는 어류의 잔류성 유해화학물질을 분석할 때 현장 기반의 최적 타깃 후보종을 선정하고 있으며, 선정에 대한 다양한 모델을 제시하고 있다. 따라서 우리나라의 다양한 생태계 영향을 평가하기 위해서는 1차적으로 어종의 섭식 특성(Lee *et al.* 2013a), 오염지표종 특성(Lee *et al.* 2022) 및 실제적으로 생태계의 타 생물종 및 인체에 영향(Lee *et al.* 2013b)을 줄 수 있는 후보 어종 선정법의 연구가 절실히 요구되고 있다.

미국 환경부에서는 수자원 및 종합적인 수생태계 평가를 위한 도구로써 식물 플랑크톤(Algae), 저서생물(Benthos), 어류 등을 활용한 생물지표 기법(Biological Criteria)을 도입하고 있으며(US EPA 1988; Van Putten, 1989), 국내에서는 *Daphnia magna*와 *Euglena agilis*를 이용하여 폐수에 함유된 유해화학물질의 축적 정도를 평가한 바 있다(Lee and Park 2016). 이와 같은 모델들은 시공간적 변이가 많은 단순한 화학적인 평가의 문제를 보완하여(An and Kim 2005) 전체적인 생태계 건강성을 평가할 수 있는 장점이 있다(Bae and An 2006). 특히, 어류는 하천 생태계의 최상위 포식자로서 하천 생태계를 가장 적절히 반영하며, 장기

적인 환경변화를 반영할 수 있다(Tashla *et al.* 2018). 또한, 어류는 화학적 수질 특성뿐만 아니라 유해화학물질에 대한 생물 농축과 과거의 오염 특성, 서식지 파괴 등 물리적 변화까지 반영하여 효율성이 매우 높은 것으로 알려져 있다(Piria *et al.* 2019).

따라서 본 연구에서는 어류를 이용한 유해화학물질 분석 시 적절한 후보 타깃어종 선정에 위해 유해화학물질이 수생태계 및 어류 지표에 미치는 수질 특성 및 생태 특성을 분석하여 타깃종 선정 다변수 모델을 개발하여 제시하고, 유해화학물질에 대한 수생태계 및 수생생물 관리 및 평가 시의 기초자료로서 활용하고자 하였다.

2. 재료 및 방법

2.1. 조사지점 및 조사시기

본 연구를 위해 금강수계 중 테스트배드 두 지점(T1, T2)과 참조하천(Ref.) 지점을 선정하였고, 각 지점은 대전하수종말처리장 하류부분(T1) 및 금강하구언(T2), 참조하천으로는 갑천 상류지점(Ref.)을 선정하였다(Fig. 1). T1의 경우, 도심(대전광역시)에 위치하고 있으며 국내 하수종말처리장 중 일일 방류량이 5위에 들 정도로 하수 처리량이 막대하여 수계에 영향을 미칠 것으로 예상되기에 선정하였으며, T2는 금강수계의 모든 지류가 합류되어 바다로 유입되는 금강의 말단부로서 수계에 유입된 화학물질의 총량이 매우 높을 것으로 예상되어 선정하였다. 또한, Ref.는 금강수계 중 오염원의 영향이 거의 없는 지점을 선정하였다. 각 지점에 대한 상세한 위치는 다음과 같다.

T1: 대전광역시 유성구 전민동

(36°23'54.80"N, 127°24'44.09"E)

T2: 전라북도 군산시 성산면 성덕리

(36°01'44.88"N, 126°46'24.65"E)

Ref.: 대전광역시 서구 용촌동

(36°15'04.02"N, 127°19'06.68"E)

2.2. 이화학적 수질 분석

이화학적 수질 자료는 환경부 물환경정보시스템(<http://water.nier.go.kr>)에서 제공하는 2017년 1월부터 2019년 12월까지 총 3년간 측정된 월별 자료를 이용하여 분석하

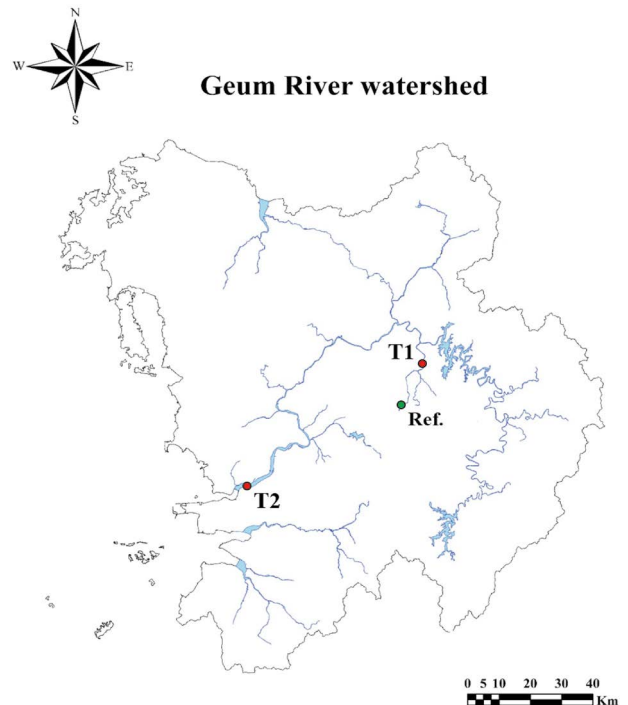


Fig. 1. A map showing the reference site (Ref.) as least-impacted clean location and impacted sampling sites, T1 and T2, influenced by the wastewater disposal plants and all non- and point-sources, respectively.

였다. 수질 측정 지점은 테스트배드 지점 수질에 직접적인 영향을 미치는 지점으로 선정하였으며, 수온, pH, 용존 산소(Dissolved Oxygen, DO), 생물학적 산소요구량(Biochemical Oxygen Demand, BOD), 화학적 산소요구량(Chemical Oxygen Demand, COD), 총부유물질(Total Suspended Solids, TSS), 총인(Total Phosphorus, TP), 용존총인(Total Dissolved Phosphorus, TDN), 인산염인($\text{PO}_4\text{-P}$), 총질소(Total Nitrogen, TN), 용존총질소(Total Dissolved Nitrogen, TDN), 암모니아성질소($\text{NH}_4\text{-N}$), 질산성질소($\text{NO}_3\text{-N}$), 전기전도도(Conductivity, EC) 및 클로로필-a(Chlorophyll-a, Chl-a) 등 총 15개의 수질 변수를 대상으로 하여 각 지점의 수질 특성을 분석하였다.

2.3. 어류 현장 조사

어류 현장 조사는 환경부 생물측정망 조사 및 평가지침을 따랐다(NIER 2017). 2020년에 봄철(5~6월) 및 가을철(9월) 연 2회 조사를 실시하였으며, 채집 도구로는 투망(망목 7×7 mm), 족대(망목 4×4 mm)를 이용하여 조사하였

다. 채집지점의 물리적인 특징 및 현장 상황에 따라 정치망 (삼각망: 유도망 길이 20 m, 높이 2 m, 망목 4×4 mm/일각망: 유도망 길이 10 m, 높이 1 m, 망목 4×4 mm) 및 자망(길이 50 m, 높이 1 m)을 추가적으로 이용하였다. 정치망으로 채집한 어류는 현장에서 동정 후 바로 풀어주는 것을 원칙으로 하였고, 실험에 필요한 일부 어류들은 부패를 막기 위해 얼음이 있는 아이스박스에 넣어 냉동상태로 보관 후 실험실에서 해부하였다. 채집된 어류의 개체수 산정은 어류체장이 20 mm 이하의 동정이 불가능한 치어의 경우는 제외하였다. 비정상 개체의 감별은 기형(Deformity, DE), 지느러미 손상(Erosion, EF), 피부 손상(Lesions, LE), 종양(Tumor, TU)의 4가지 분류기준에 따랐으며, 어류의 검색 및 분류체계는 Nelson (2006)의 방법에 의거하여 정리하였다.

2.4. 다변수 어류 평가지수 모델(FAI)을 이용한 수생태계 건강성 평가

하천 수생태계의 건강성 평가는 환경부의 어류다변수생태모형(Fish Assessment Index, FAI; NIER, 2017)을 기반으로 실시하였다. 총 8개의 메트릭으로 구성되어 있으며 각 메트릭은 “0”, “6.25”, “12.5”로 구분하여 점수를 산정하였고, 일부 메트릭은 하천차수(Stream order)에 따라 차등 평가하여 모델값을 산정하였다. 합산한 최종값을 바탕으로 어류평가지수에 따라 매우 좋음(Excellent), 좋음(Good), 보통(Fair), 나쁨(Poor), 매우나쁨(Very poor)의 5개 등급으로 구분하여 평가하였다.

2.5. 통계 분석

각 지점의 이화학적 수질 변수에 대해 기술 통계 분석을 실시하였다. 레퍼런스 지점 및 T1, T2 지점 간 수질 농도 구배를 확인하기 위해 통계프로그램 IBM SPSS Statistics 26 (ver. 26)을 이용하여 일원분산분석(one-way ANOVA test)을 실시하였다. 각 지점 간 유의한 수준의 차이를 검증하기 위해 Tukey's HSD의 방법으로 사후 검증을 실시하여 각 지점별 차이를 검증하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 유해화학물질 분석을 위한 타깃 후보종 선정 모델 개발 및 메트릭 속성

유해화학물질 분석을 위한 타깃 후보종 선정을 위해 7

개 다변수 메트릭 모델을 개발하였으며, 세부 메트릭 속성은 Table 1과 같다. 평가 메트릭 항목으로는 사람들이 많이 섭취하는 어류인 경우(F1), 다른 어류를 섭식하여 체내 축적되는 물질의 농도가 더 높아지는 어류일 경우(F2), 유기물을 주로 섭식하여 하상이나 유기물들에 침적된 유해물질이 체내에 농축될 확률이 더 높은 어종일 경우(F3), 내성도가 높아 오염된 지역에서 더 오래 살아 유해물질에 더 긴 시간 노출될 수 있는 어류일 경우(F4), 개체수가 풍부하여 채집이 용이할 경우(F5), 계절에 상관 없이 반복적인 조사에서도 채집될 수 있는 어종일 경우(F6), 마지막으로 우리나라 수계에서 광범위하게 분포하여 빈번하게 채집되는 어종일 경우(F7) 등을 고려하여 메트릭을 선정하였다. 총 7개의 메트릭으로 구성된 각 메트릭은 기본적으로 “1”, “3”, “5”점으로 구분하여 점수를 산정하였다. 특히, 각 메트릭의 중요도를 고려하여 타깃종 선정 시 유해물질 축적에 대한 영향이 높을 것으로 판단되는 M1-M4 메트릭은 가중치를 두어 1.5배의 점수를 부여하는 것으로 설정하였으며, 최저점인 “0”점을 추가하였다.

개발된 타깃 후보종 선정 다변수 메트릭 모델을 이용하여 선정된 상위 5순위 타깃 후보종 평가 결과, T1에서는 잉어(37.5점, *Cyprinus carpio*), 붕어(35.5점, *Carassius auratus*), 누치(27.5점, *Hemibarbus labeo*), 눈불개(26.5점, *Squaliobarbus curriculus*), 강준치(26점, *Erythroculter erythropterus*)가 타깃종 후보로서 선정되었다. 잉어와 붕어, 눈불개, 누치의 경우, 하상구조에 붙어있는 유기물을 주로 섭식하고 개체의 크기가 커지며, 크게 이동하지 않아 어떤 지점에서 일정 물질에 노출되는 경우 축적계수를 계산하기에 용이한 종으로서 유기물에 대한 화학물질 침적을 추적할 수 있는 어종으로 사료된다(Chi *et al.* 2007; Rajeshkumar and Li 2018; Xie *et al.* 2020). 강준치의 경우, 잉어나 붕어와 달리 광범위한 이동성을 가지고 있으며, 포식압이 매우 높은 육식성 어류로서 해당 수계에 서식하는 다른 어류들에 농축된 화학물질이 체내에 농축되어 있을 확률이 높고, 개체의 크기가 1 m까지 커지는 어종으로서 타깃 후보종으로 적합한 것으로 사료된다(Hung *et al.* 2018).

금강 하구언에 위치한 테스트배드 T2에서는 잉어(37.5점), 붕어(35.5점), 가숭어(29.5점, *Chelonia haematocheilus*), 눈불개(26.5점), 가물치(25.5점, *Channa argus*)가 타깃 후보종으로 선정되었다. 가숭어는 하구언에서 주로 발견되는 어종이나 분류 종류까지 올라갈 정도로 이동성이 매우

Table 1. Target candidate species selection metric model in the two testbeds and data analysis based on candidate fish species

F	Indicator	Metric Model Value							Testbed T1							Testbed T2						
		5	3	1	0	Cs1	Cs2	Cs4	Cs5	Cs6	Cs1	Cs2	Cs3	Cs5	Cs7	Cs1	Cs2	Cs3	Cs5	Cs7		
F1	Commercially useful or edible fish Indicator	Widely use	Partial use	Rare use	None	7.5	7.5	7.5	7.5	0	7.5	7.5	7.5	0	7.5	7.5	7.5	7.5	7.5	7.5		
F2	Top carnivore indicator	Large size/ High predation pressure	Medium size/ Medium predation pressure	Small size/ Small predation pressure	None	0	0	0	0	7.5	0	0	0	7.5	0	0	0	0	0	7.5		
F3	Organic matter indicator	Large size/ Feeding on organic matter	Midium size/ Feeding on organic matter	Small size/ Feeding on organic matter	None	7.5	7.5	7.5	7.5	0	7.5	7.5	7.5	0	7.5	7.5	7.5	7.5	7.5	0		
F4	Tolerance of target species Indicator	High	Medium	Low	Unknown	7.5	7.5	7.5	4.5	7.5	7.5	7.5	4.5	7.5	7.5	7.5	7.5	4.5	7.5	7.5		
F5	Population dominance indicator	High dominance	Medium dominance	Low dominance	-	5	5	1	1	1	5	1	1	1	5	5	5	1	1	1		
F6	Sample collectability indicator	High potential	Medium potential	Low potential	-	5	3	1	5	5	5	3	1	5	5	3	1	5	1	1		
F7	Distribution range characteristics index	Wide range distribution	Partial range distribution	Rare distribution	-	5	5	3	1	5	5	5	1	5	5	5	1	1	1	1		
Metric Model Value									37.5	35.5	27.5	26.5	26	37.5	35.5	29.5	26.5	26.5	25.5			

Cs1: *Cyprinus carpio*, Cs2: *Carassius carassius*, Cs3: *Chelon haematocheilus*, Cs4: *Hemibarbus labeo*, Cs5: *Squaliobarbus curriculus*, Cs6: *Erythroculter erythropterus*, Cs7: *Channa argus*

크고, 개체의 크기가 매우 커지며 유기물을 섭식하는 어종으로(Kim *et al.* 2015) 체내에 화학물질이 농축될 가능성이 높은 어류로서 타깃 후보종으로 선정되었다. 가물치의 경우, 개체의 크기가 크며, 매우 높은 포식압을 가진 육식성 어류로(Saylor *et al.* 2012) 다른 어종들을 섭식함에 따라 체내에 타 어류들로부터 물질 농축이 진행될 것으로 사료되며 실제로 높은 수준의 생물농축이 보고된 바 있어(Zhang *et al.* 2014) 타깃 후보종으로 가치가 높을 것으로 판단된다. 상기 타깃 후보종 중 강준치를 제외한 잉어, 붕어, 눈볼개, 누치, 가승어, 가물치는 식용으로 이용되며 인간이 섭취에 의해 중금속, 농약 등과 같은 유해화학물질에 피해를 입을 가능성이 존재하기 때문에 중요도가 높다고 판단하였다(Rahman *et al.* 2012; Cui *et al.* 2015). 또한, 평가 순위에는 포함되지 못했으나 큰입배스(*Micropterus salmoides*)의 경우 국내 수계에 광범위하게 분포하고 있고(Jang *et al.* 2002), 각 지역에서의 채집 및 비교 평가가 가능하며, 포식압 및 내성도가 높아(Maezono *et al.* 2005; Kang *et al.* 2019) 유해화학물질의 농축과 영향을 파악하기 용이하여 타깃 후보종으로 이용될 수 있을 것으로 판단되었다.

3.2. 어류상 및 분포 특성 분석

본 연구기간 조사된 어류는 12과 44종으로서 종 풍부도가 높게 나타났으며, 이는 보고된 금강수계 전체 어종(76종, NIER 2020)의 약 58%로서 어종이 풍부한 것으로 나타났다. 또한, 유해화학물질이 배출되는 방류수 영향을 받는 하류역(T1)은 레퍼런스 지점(Ref.)에 비해 내성종(Tolerant sp.) 풍부도 및 잡식종(Omnivore sp.) 풍부도

가 뚜렷하게 높게 나타나 방류수 영향의 결과로 나타났다(Table 2). 하수종말처리장의 비점오염원 및 점오염원이 없는 상류역의 레퍼런스 지점에서는 18종이 출현하였으며, 내성도 지표(Tolerance guilds) 측면에서 오염에 대한 중간종 우점현상(83%), 민감종 출현(6%) 및 내성종의 풍부도가 낮은 것(12%)으로 나타났다(Fig. 2). 한편, 섭식 길드(Trophic guilds) 분석에 따르면, 일반적으로 맑은 상류역에서 높은 빈도로 나타나는 것으로 알려진 총식종의 빈도(US EPA 1993)가 38%로서 나타나 레퍼런스 하천의 특성을 잘 반영하는 것으로 분석되었다. 다만, 일반적으로 레퍼런스 하천의 경우 민감어종의 상대풍부도가 아주 높으며, 상대적으로 내성종의 상대풍부도가 극히 낮은 특성을 보이는데(Karr 1991), 본 지역의 상류역의 레퍼런스 지점(Ref.) 인근에 논밭과 같은 경작지가 분포하고 있어 이에 대한 영향 및 인간의 간섭이 있는 것으로 사료되었다.

한편, 하수종말처리장의 영향을 받는 구간(T1 지점)에서는 총 22종으로 상류 레퍼런스 구간(18종)에 비해 다양한 종이 서식하는 것으로 나타났으나, 수질오염이 가중된 수역에서 우점현상을 보이는 내성종 상대 비율이 전체 어종의 약 40%를 차지하여 수환경의 생물학적 악화현상을 보이는 것으로 분석되었다(Karr *et al.* 1985; Bae *et al.* 2002). 또한, 내성종의 높은 빈도(40%) 및 잡식종의 높은 빈도(80%)는 레퍼런스 하천과 극명하게 대조되어 유기물 오염에 의한 영향이 뚜렷하게 있는 것을 간접적으로 시사하고 있다. 이런 현상은 이런 1차 조사뿐만 아니라 2차 조사에서도 잡식종의 상대 비율이 73%의 높은 비율을 보여 1차 조사와 유사한 경향으로 보여 방류수 영향이 큰 것으로 판단되었다(Fig. 3). Karr *et al.* (1985)에 따르면, 산업폐

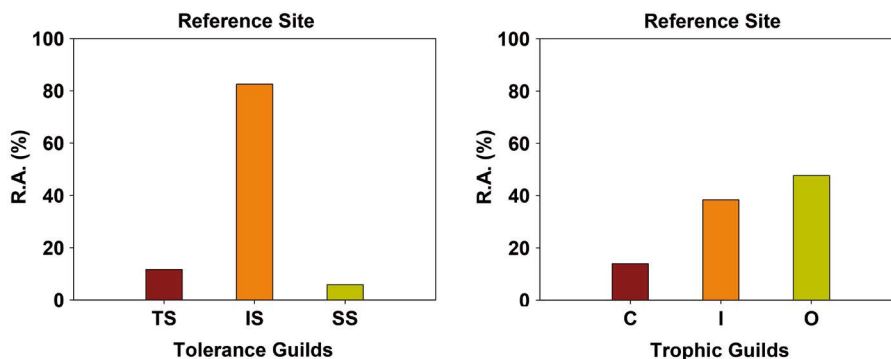


Fig. 2. Pollution indicator analysis as tolerance guild indicator (TS: Tolerance species, IS: Intermediated species, SS: Sensitive species) and trophic guild indicator (C: Carnivore, I: Insectivore, O: Omnivore) at the reference site. R.A. indicates Relative abundance.

Table 2. Sampled fishes and relative abundance at each site

Species name	Tolerance guild	Trophic guild	Habitat guild	Endemic species	Smapping sites						Total	R.A. (%)
					Ref.		T1		T2			
					1 st	2 nd	1 st	2 nd	1 st	2 nd		
FAMILY ENGRAULIDAE												
<i>Coilia nasus</i>	IS	C	-	-						6	6	0.39
FAMILY CYPRINIDAE												
<i>Cyprinus carpio</i>	TS	O	-	-			60	3	1		64	4.14
<i>Carassius auratus</i>	TS	O	-	-			50	35	43	10	138	8.92
<i>Acheilognathus lanceolatus</i>	IS	O	-	-		2		7		7	16	1.03
<i>Acheilognathus koreensis</i>	IS	O		O	13						13	
<i>Acanthorhodeus macropterus</i>	IS	O	-	-				105	159	22	286	18.49
<i>Pseudorasbora parva</i>	TS	O	-	-			1		17	1	19	1.23
<i>Pungtungia herzi</i>	IS	I	-	-	14	10	5	8			37	2.39
<i>Coreoleuciscus splendidus</i>	SS	I	RB	O		1					1	0.06
<i>Sarcocheilichthys nigripinnis morii</i>	IS	I	-	O				1		3	4	0.26
<i>Gnathopogon strigatus</i>	IS	I	-	-			8	31			39	2.52
<i>Squalidus gracilis majimae</i>	IS	I	-	O	1		7				8	0.52
<i>Squalidus japonicus coreanus</i>	TS	O	-	O				2	11	76	89	5.75
<i>Hemibarbus labeo</i>	TS	I	-	-		1	1	14	14	62	92	5.95
<i>Hemibarbus longirostris</i>	IS	I			1	4					5	
<i>Pseudogobio esocinus</i>	IS	I	-	-				8		1	9	0.58
<i>Abbottina rivularis</i>	TS	O	-	-					1		1	0.06
<i>Microphysogobio yaluensis</i>	IS	O	RB	O	9	8					17	1.10
<i>Microphysogobio jeoni</i>	IS	I	-	O					1	6	7	0.45
<i>Aphyocypris chinensis</i>	TS	O	-	-						2	2	0.13
<i>Zacco koreanus</i>	SS	I	-	O	18	3					21	1.36
<i>Zacco platypus</i>	IS	O	-	-	7	28	41	93			169	10.92
<i>Opsarichthys uncirostris amurensis</i>	TS	C	-	-		3	1	1	3	26	34	2.20
<i>Squaliobarbus curriculus</i>	IS	O	-	-			2	3	1	43	49	3.17
<i>Erythroculter erythropterus</i>	TS	C	-	-			2		18	65	85	5.49
<i>Hemiculter eigenmanni</i>	TS	O	-	O					133	31	164	10.60
FAMILY COBITIDAE												
<i>Misgurnus anguillicaudatus</i>	TS	O	-	-		2				3	5	0.32
<i>Iksookimia koreensis</i>	IS	I	-	O		1					1	0.06
<i>Cobitis lutheri</i>	IS	I	-	-	2	11					13	0.84
FAMILY BAGRIDAE												
<i>Pseudobagrus fulvidraco</i>	TS	I	-	-					3	7	10	0.65
<i>Leiocassis nitidus</i>	TS	I	-	-					7	11	18	1.16
FAMILY MUGILIDAE												
<i>Mugil cephalus</i>	TS	H	-	-					1		1	0.06
<i>Chelon haematocheilus</i>	TS	H	-	-					14	2	16	1.03

Table 2. Continued

Species name	Tolerance guild	Trophic guild	Habitat guild	Endemic species	Smapping sites						Total	R.A. (%)
					Ref.		T1		T2			
					1 st	2 nd	1 st	2 nd	1 st	2 nd		
FAMILY ADRIANICHTHYIDAE												
<i>Oryzias sinensis</i>	TS	O	-	-			3				3	0.19
FAMILY HEMIRAMPHIDAE												
<i>Hyporhamphus sajori</i>	IS	H	-	-					2		2	0.13
FAMILY CENTROPOMIDAE												
<i>Siniperca scherzeri</i>	IS	C	-	-			1				1	0.06
FAMILY CENTRACHIDAE												
<i>Lepomis macrochirus</i>	TS	I	-	-			1				1	0.06
<i>Micropterus salmoides</i>	TS	C	-	-	1	4	1		41	1	48	3.10
FAMILY ODONTOBUTIDAE												
<i>Odontobutis platycephala</i>	SS	C	-	O		1					1	0.06
<i>Odontobutis interrupta</i>	IS	C	-	O		4		1			5	0.32
FAMILY GOBIIDAE												
<i>Rhinogobius giurinus</i>	TS	O	-	-					7		7	0.45
<i>Rhinogobius brunneus</i>	IS	I	RB	-	3	2		24		9	38	2.46
<i>Tridentiger brevispinis</i>	IS	I	RB	-						1	1	0.06
FAMILY CHANNIDAE												
<i>Channa argus</i> Cantor	TS	C	-	-					1		1	0.06
Total number of individuals					10	16	14	16	20	22	44	
Total number of species					69	85	183	337	478	395	1547	

R.A.: Relative abundance

수에 포함된 염소(Cl⁻) 및 암모니아(NH₃)와 같은 하천 오염물은 어류들 중 내성종 및 잡식종의 상대풍부도를 현저히 증가시킨다는 연구 결과와 유사한 것으로 나타났다.

금강수계로 유입되는 모든 하천의 유기물 및 유해화학물질이 유입되는 금강 하구언(T2) 구역에서는 1차 및 2차 조사에서 각각 20종, 22종이 출현하였고, 내성도 길드 분석에서 내성종 우점현상(1차, 2차 각각 66%, 75%), 섭식 길드에서는 잡식종 우점현상(1차, 2차 각각 78%, 49%)을 보여 잡천의 하수종말처리장(T1) 구역과 유사한 양상을 보였다(Fig. 3). 또한 민감종(Sensitive sp.)은 출현하지 않아 유기물 오염은 이런 민감종의 분포에 영향을 주는 것으로 나타났다(Preziosi and Pastorok 2008; Lee et al. 2013; Park et al. 2019).

3.3. 타깃 후보종에 대한 공서종 분석

금강수계의 2개의 테스트배드(T1, T2)에서 타깃 후보종이 동시에 출현하는 공서종(Co-occurring species)을 분석하기 위하여 과거 조사된 2008~2018년도까지의 11년 기간 동안의 어류상을 분석하였다. 분석에 사용된 자료는 환경부 물환경측정망의 생물측정망 자료를 이용하여 분석하였다. 타깃 후보종으로 선정된 후보 어류는 가물치, 가숭어, 강준치, 누치, 눈불개, 배스, 붕어, 잉어였고, 이들과 함께 공서하는 어종 중 높은 비율로 출현한 종을 10종까지 비교 분석한 결과는 Table 3과 같다. 타깃 후보종과 공서하는 어종으로 가장 빈도가 높은 어종은 피라미(*Zacco platypus*)로서 가장 높은 개체수(163,843 개체)로 출현하였고, 그 다음으로 모래무지(*Pseudogobio esocinus*; 31,507), 붕어(23,187),

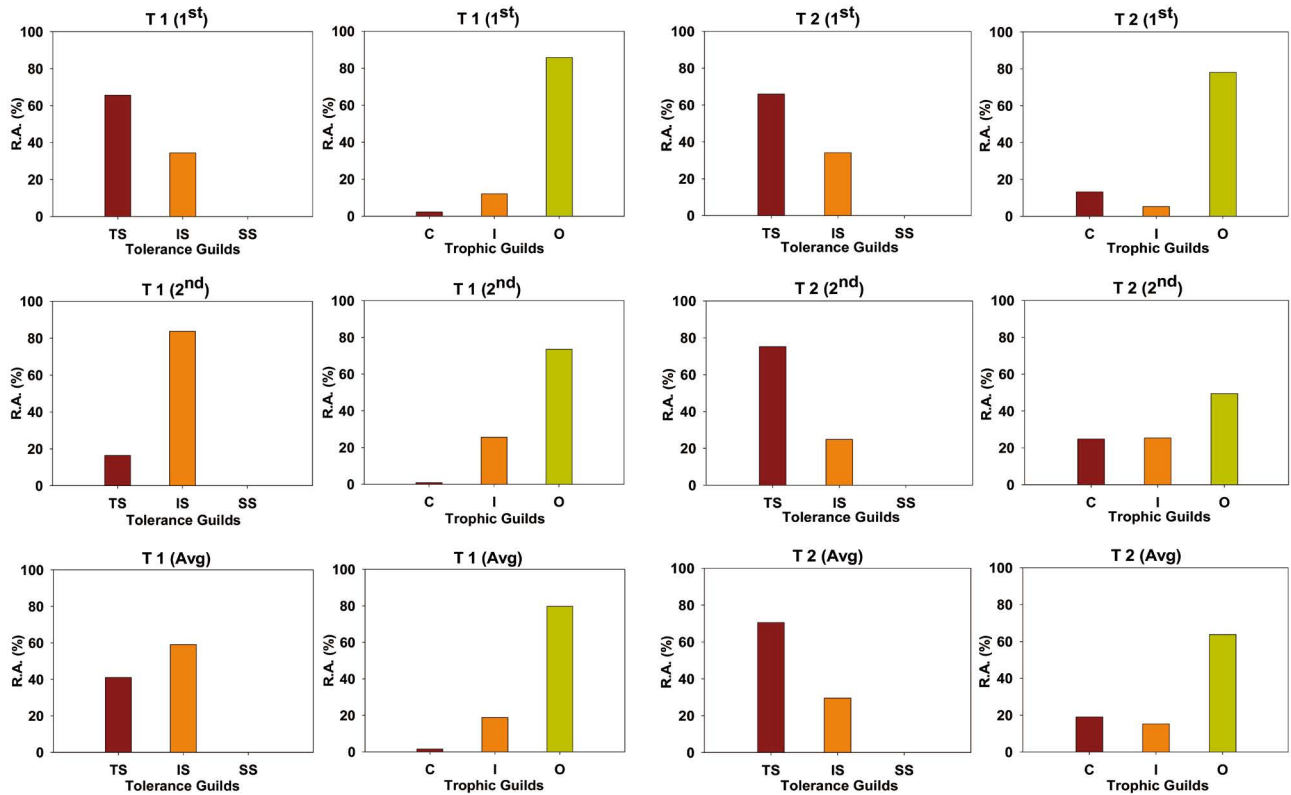


Fig. 3. Comparison of tolerance guilds (TS: Tolerance Species, IS: Intermediated Species, SS: Sensitive Species) and trophic guilds (C: Carnivore, I: Insectivore, O: Omnivore) for two testbeds of T1 and T2. R.A. indicates Relative abundance.

치리 (*Hemiculter eigenmanni*; 21,738), 꼬리 (*Opsariichthys uncirostris amurensis*; 17,311) 순으로 나타났다. 이는 금강 본류의 어류군집 분석 결과, 이전의 문헌에서 제시한 바와 같이 피라미가 단연 우점한 결과와 동일하며 (Han and An 2013), 수질오염을 반영하는 내성종 우점 (Lee *et al.* 2014), 퇴적물의 유기물 오염의 중요한 지표인 잡식종 우점 그리고 수체류 시간이 길어 물의 부영양화도가 증가하는 정수성 어종의 우점현상과 일치하는 것으로 나타났다 (Park *et al.* 2019). 반면, 타깃 후보종 중 하구연에서 주로 발견되는 가승어와 공서하는 어종 중 꼭저구 (*Chaenogobius urotaenia*)가 가장 높은 개체수로 출현하는 것으로 나타났다.

본 연구에서 조사한 각 테스트베드 T1과 T2에서 채집된 타깃 후보종과 공서종의 내성도 길도 및 섭식 길드를 분석한 결과 (Table 4), 붕어와 함께 나타나는 어종들은 내성종 우점현상 (60%)을 보였고, 특이하게 충식종과 잡식종이 같은 비율 (충식종 40%, 잡식종 40%)로 출현하였다. 일반적

으로 내성종이 더 많으면 잡식종이 더 높게 나타나는데, 이는 붕어의 서식 환경 특성의 영향으로 잡식종과 충식종의 상대풍부도가 유사하게 나타난 것으로 사료되었다 (Kwon *et al.* 2013). 한편, 잉어의 공서종은 내성종 (60%) 및 잡식종 (50%)이 우점하는 것으로 나타났다. 잉어가 선호하는 환경은 퇴적 유기물의 축적이 높고, 부영양화 (N, P)가 가중되는 하천으로 일반적으로 내성종과 잡식종이 함께 나타날 확률이 높은 것으로 사료된다. 가물치의 경우 잉어와 같이 내성종 75%, 잡식종 70%로 나타났고, 가승어 (내성종 70%, 잡식종 40%)와 강준치 (내성종 70%, 잡식종 50%)에서도 유사한 양상을 보였다. 즉, 잉어는 잡식종으로 장시간 하천 저질토의 유기물을 섭식하기 때문에 유해화학물질에 노출될 가능성이 매우 높다. 가물치 및 강준치는 최상위 육식종으로서 치어, 소형, 중형 어류를 섭식함으로써 유해화학물질이 농축될 가능성이 매우 높아 타깃 후보종으로 선정하기 매우 적합한 어종으로 사료되었다. 특히, 큰입배스의 경우 공서종은 내성종 60%, 잡식종이 50%로 나타났고,

Table 3. Comparison of co-occurring fish species with target candidate species at sampling sites during 2008–2018

Species name	Cs1	Cs2	Cs3	Cs4	Cs5	Cs6	Cs7	Cs8	Total
<i>Zacco platypus</i>	17,733	73,366	280	31,008	3,089	1,570	4,967	31,830	163,843
<i>Pseudogobio esocinus</i>	3,825	10,593		7,732	1,573	835	311	6,638	31,507
<i>Carassius auratus</i>	8,818		197	4,734	1,154	867	548	6,869	23,187
<i>Hemiculter eigenmanni</i>	3,979	8,728			1,047	915	300	6,769	21,738
<i>Opsarichthys uncirostris amurensis</i>	1,304	3,624		5,012	2,413	1,034		3,924	17,311
<i>Acheilognathus lanceolatus</i>	2,031	5,169		4,412	634		233	3,252	15,731
<i>Pseudorasbora parva</i>	2,140	5,881	78				474	2,387	10,960
<i>Rhinogobius brunneus</i>	1,592	4,104		2,108			371	2,764	10,939
<i>Hemibarbus labeo</i>		3,491			1,304	1,048		2,619	8,462
<i>Micropterus salmoides</i>	1,636	4,347	130						6,113
<i>Squalidus japonicus</i>				3,161	1,445	906			5,512
<i>Zacco koreanus</i>	1,374	3,848							5,222
<i>Squalidus chankaensis</i>				2,290	612				2,902
<i>Tridentiger brevispinis</i>			198					2,320	2,518
<i>Hemibarbus longirostris</i>				2,279					2,279
<i>Pungtungia herzi</i>				2,090					2,090
<i>Rhodeus ocellatus</i>							1,786		1,786
<i>Microphysogobio jeoni</i>					921	575			1,496
<i>Chaenogobius urotaenia</i>			622						622
<i>Squaliobarbus curriculus</i>						605			605
<i>Mugil cephalus</i>						481			481
<i>Abbottina springeri</i>							410		410
<i>Lepomis macrochirus</i>			82				235		317
<i>Synechogobius hasta</i>			141						141
<i>Hemiculter leucisculus</i>			85						85
<i>Acanthogobius lactipes</i>			64						64

Cs1: *Cyprinus carpio*, Cs2: *Carassius carassius*, Cs3: *Chelon haematocheilus*, Cs4: *Hemibarbus labeo*, Cs5: *Squaliobarbus curriculus*, Cs6: *Erythroculter erythropterus*, Cs7: *Channa argus*, Cs8: *Micropterus salmoides*

큰입배스가 출현하는 지점에서는 총식종도 다수 공존하는 것으로 분석되었다. 생태교란종인 큰입배스가 선호하는 서식처는 물 흐름이 느린 정수역의 호소 및 하천이기 때문에, 내성종의 비율이 높게 나타난 것으로 판단되었다(Kang et al. 2019).

한편, 누치의 경우, 공서종은 중간종 우점(60%) 및 잡식종 우점(50%) 현상을 보였고, 눈불개이의 경우(장마기 때 일부 갑천 하류역까지 이동) 공서종은 잡식종(60%)이 우점하는 것으로 분석되었다(Han and An 2013). 상기 공서종의 종합적인 분석에 따르면, 타깃 후보종의 섭식 길드 특성은 육식종 3종(가물치, 강준치, 큰입배스), 잡식종 3종(눈

불개, 잉어, 붕어), 초식종 1종(가승어), 그리고 총식종 1종(누치)으로 다양하게 구성된 것으로 나타났다. 그러나 공서종의 상대풍부도를 분석한 결과 잡식종(50%)의 비율이 높은 것으로 나타났다. 타깃 후보종과 함께 출현하는 공서종의 경우, 민감종은 4%로 낮은 출현빈도를 보였으며, 중간종이 46%, 내성종이 50%를 차지하는 것으로 나타났다. 타깃 후보종 중 누치를 제외한 모든 어류는 내성종이며, 유사한 내성도 길드를 가진 어류가 높은 빈도로 출현하는 것으로 분석되었다. 타깃 후보종과 공서하는 종들 역시 유기물 오염 및 유해화학물질의 오염이 가중되는 서식지에서 주로 출현하는 내성종들로 나타나 유해화학물질 분석을

Table 4. Results of guild analysis of target candidate species and co-occurring fish species

Species name	To.G.	Tr.G.	Co-occurring To.G. (%)			Co-occurring Tr.G. (%)		
			TS	IS	SS	O	I	C
<i>Carassius auratus</i>	TS	O	60	30	10	40	40	20
<i>Cyprinus carpio</i>	TS	O	60	30	10	50	30	20
<i>Channa argus</i>	TS	C	75	25	0	70	30	0
<i>Chelon haematocheilus</i>	TS	H	70	30	0	40	50	10
<i>Erythroculter erythropterus</i>	TS	C	70	30	0	50	30	20
<i>Hemibarbus labeo</i>	TS	I	40	60	0	50	40	10
<i>Squaliobarbus curriculus</i>	IS	O	60	40	0	60	30	10
<i>Micropterus salmoides</i>	TS	C	60	40	0	50	40	10
Total			50	46	4	42	46	12

To.G.: Tolerant guilds, Tr.G.: Trophic guilds, TS: Tolerant species, IS: Intermediate species, SS: Sensitive species, O: Omnivores, I: Insectivores, C: Carnivores

Table 5. Ecological river health assessment of testbed based on the multi-metric fish model of Fish Assessment Index (FAI)

Category	Metric	Scoring Criteria			Score					
		12.5	6.25	0	Ref.-1 st	Ref.-2 nd	T1-1 st	T1-2 nd	T2-1 st	T2-2 nd
Species richness & compositions	M ₁ : Total number of native species	Expectations of M ₁ vary with stream order			12.5	12.5	6.25	12.5	12.5	12.5
	M ₂ : Total Number of riffle-benthic species	Expectations of M ₂ vary with stream order			6.25	12.5	0	6.25	0	6.25
	M ₃ : Total Number of sensitive species	Expectations of M ₃ vary with stream order			0	6.25	0	0	0	0
	M ₄ : Proportion of individuals as tolerant species	<30	30-70	>70	12.5	12.5	6.25	12.5	6.25	0
Trophic compositions	M ₅ : Proportion of individuals as omnivore species	<30	30-70	>70	6.25	6.25	0	0	0	6.25
	M ₆ : Proportion of individuals as insectivore species	>45	20-45	<20	12.5	6.25	0	6.25	0	6.25
Fish abundance & conditions	M ₇ : Total number of native individuals	Expectations of M ₇ vary with stream order			6.25	6.25	12.5	12.5	12.5	12.5
	M ₈ : Proportion of individuals as abnormal species	0	0-1	>1	12.5	12.5	12.5	12.5	12.5	12.5
				68.75 (Good)	75 (Good)	37.5 (Poor)	62.5 (Good)	43.75 (Fair)	56.25 (Fair)	

수행할 때 공서종의 동시 분석은 타깃종의 유해화학물질 농도의 분석에 추가적으로 유용한 정보를 제공할 것으로 판단되었다. 또한 어종의 생태적 특성에 따라 공서종의 출현 또한 유사한 것으로 나타나 향후 타깃 후보종 채집이 어려울 경우, 상기 제시한 공서종들을 이용하여 분석하여도 가능할 것으로 사료되었다(Schulz *et al.* 1999).

3.4. 테스트베드에서 다변수 어류 모델 기반의 수생태계 건강성 평가

본 연구에서 적용한 어류 다변수 생태모델(FAI) 분석에 따르면(Table 5), 레퍼런스 지점에서 모델값은 각각 68.75, 75점으로 ' 좋음등급(Good)'으로 평가되었고, 테스트베드

T1 지점에서는 각각 37.5 (나쁨등급), 62.5 (좋음등급), 테스트배드 T2 지점에서는 각각 43.8, 65.3으로서 “보통등급”으로 평가되었다. T1 (1차 37.5), T2 (1차 43.8) 지점에서 낮은 생태건강도는 레퍼런스 지점(Reference)에 비해 평균 46%까지 악화되는 것으로 분석되었는데, 이는 공서종의 지표종 특성과도 일치하는 것으로 나타났다.

다변수 생태모델의 매트릭별 특성에 따르면, 국내종의 총 종수(M1)/개체수(M7) 매트릭은 대부분 12.5점으로 나타나 모든 지점에서 서식하는 어종이 다양하고 개체수가 풍부한 것으로 평가되어 종의 특성 측면에서는 큰 문제가 없는 것으로 나타났다. 반면, 민감종수 매트릭은 레퍼런스 지점을 제외한 T1과 T2 지점에서 모델값은 “0”으로 나타나 유기물 및 유해화학물질의 축적이 민감성 어종에 악영향을 미친 것으로 판단되었다. 실제 국내에서 보고된 바에 따르면 하수처리장 방류구 하류지점에서 용존산소의 고갈에 따라 어류가 폐사하는 사례가 보고된 바 있으며(Bae *et al.* 2002), 배출수에 존재하는 염소가 수생태계의 건강성을 악화시키는 원인이 될 수 있다는 연구 결과가 이를 뒷받침하고 있다(Karr *et al.* 1985). 섭식지표의 경우, 하수종말처리장의 방류수의 직접적인 영향을 받은 T1 지점은 악화된 것으로 평가되었고, T2 지점에서는 강준치, 배스와 같은 육식종 비율이 높아 T1 지점과 비교하여 상대적으로 높은 평가 점수를 받은 것으로 판단되었다. 이는 하수종말처리장에서 직접적으로 영향을 받는 지점에서 잡식종의 비율이 높은 것으로 보고된 선행 연구(Ra *et al.* 2007)와 일치한다.

3.5. 테스트배드와 레퍼런스 하천의 이화학적 수질 특성

본 연구 대상지인 테스트배드(T1, T2) 및 레퍼런스 하천(Ref.) 지점을 대상으로 최근 3년간(2017~2019) 수질 자료를 이용하여 어류 섭식 및 내성도에 영향을 주는 화학적 수질인자 분석을 실시하였다(Fig. 4). 평균 수온은 16~18°C로 어류섭식에 적정한 수온이었으며, 특히 T1은 하수처리장의 방류수의 영향을 받아 가장 높은 수온 범위를 보이는 것으로 나타났다. 용존산소(DO)의 경우 일반적으로 5 mg L⁻¹ 이하에서 어류의 건강성에 악영향을 미치는 것으로 알려져 있으나(Dean and Richardson 1999), 본 연구지점에서는 최소 6 mg L⁻¹ 이상 수준으로 나타나 어류 섭식에 제한요인으로 작용하지 않는 것으로 분석되었다.

수질 오염도를 나타내는 11개 항목(BOD, COD, TSS, 전기전도도 등)은 테스트배드에서 극명하게 레퍼런스 하천

보다 높게 나타나, 수질이 악화된 것으로 나타났다(Fig. 4). ANOVA test에 따르면, T1은 T2와 레퍼런스 지점보다 TP, TDP, PO₄-P, TN, TDN, NH₄-N, NO₃-N, 전기전도도 등 9개 수질 항목에서 높은 값을 보이는 것으로 분석되었으며 ($p < 0.05$), 특히 전기전도도는 T1 지점에서 다른 두 지점에 비해 높게 나타나, 극명한 차이를 보였다. 이는 하수종말처리장의 방류수가 생활하수의 음식물 속에 포함된 각종 이온들(Na, Cl)의 영향을 직접적으로 받기 때문에 T1 지점에서 높은 것으로 사료되며, 유해화학물질의 영향뿐만 아니라 어류의 삼투조절에 관여하는 이온농도에도 직간접적으로 영향을 미칠 것으로 판단되었다(Hart *et al.* 1990).

T2에서는 부영양화의 지표인 총인(TP)의 농도가 가장 높은 것으로 나타났는데, 이는 금강의 지류 및 분류가 합류되어 하구로 유입되는 강의 말단부이기 때문으로 판단된다. 이처럼 높은 농도의 총인은 클로로필(Chlorophyll-a) 값에 직접적인 영향을 미치는 것으로 사료된다. 레퍼런스 지점과 비교하여 약 15배 이상 높게 나타나 통계적으로 유의한 수준에서 차이를 보이는 것으로 분석되었다(Fig. 4). 향후 증식된 조류가 사멸하며 하상에 유기물이 축적됨에 따라 유기물 오염이 심화된 것으로 판단되며, 이는 잉어, 붕어 등과 같은 잡식성 어종의 상대 비율에 영향을 미친 것으로 사료되었다.

즉, 수계로 유입되는 하수종말 처리장의 방류수 및 비점/점오염원에서 유래한 하천수는 영양염류(N, P) 및 유기 오염물(BOD, COD)과 함께 유해물질의 농도를 높이고(Hora *et al.* 2020), 배출된 물질이 수생태계의 퇴적물 및 수질에 영향을 미쳐 어류의 종조성에도 영향을 미치는 것으로 알려져 있어(Jang *et al.* 2008; Jeong *et al.* 2017), 유해화학물질에 대한 연구를 수행할 때 타깃 후보종의 선정과 함께 이런 수질 화학적인 연구도 동시에 추가될 경우 타깃종의 종 선정에 기여할 것으로 사료된다.

3.6. 타깃 어종 선정 시 고려사항

수생태계 유해화학물질에 대한 영향을 연구할 때 타깃 어종의 선정 시 고려되어야 하는 것들 중 하나는 어류의 트로픽 단계(Trophic level) 및 어류종의 수질오염 내성도(Tolerance) 특성이다(Table 1: F2, F4). 먼저, 어종의 트로픽 레벨은 먹이사슬에서 유해화학물질이 어떻게 전달되는지 이해하기 위함으로, 특히 잔류성 유해화학물질이 생물농축으로 인해 먹이 사슬에서 상위에 위치한 종에서 더 많

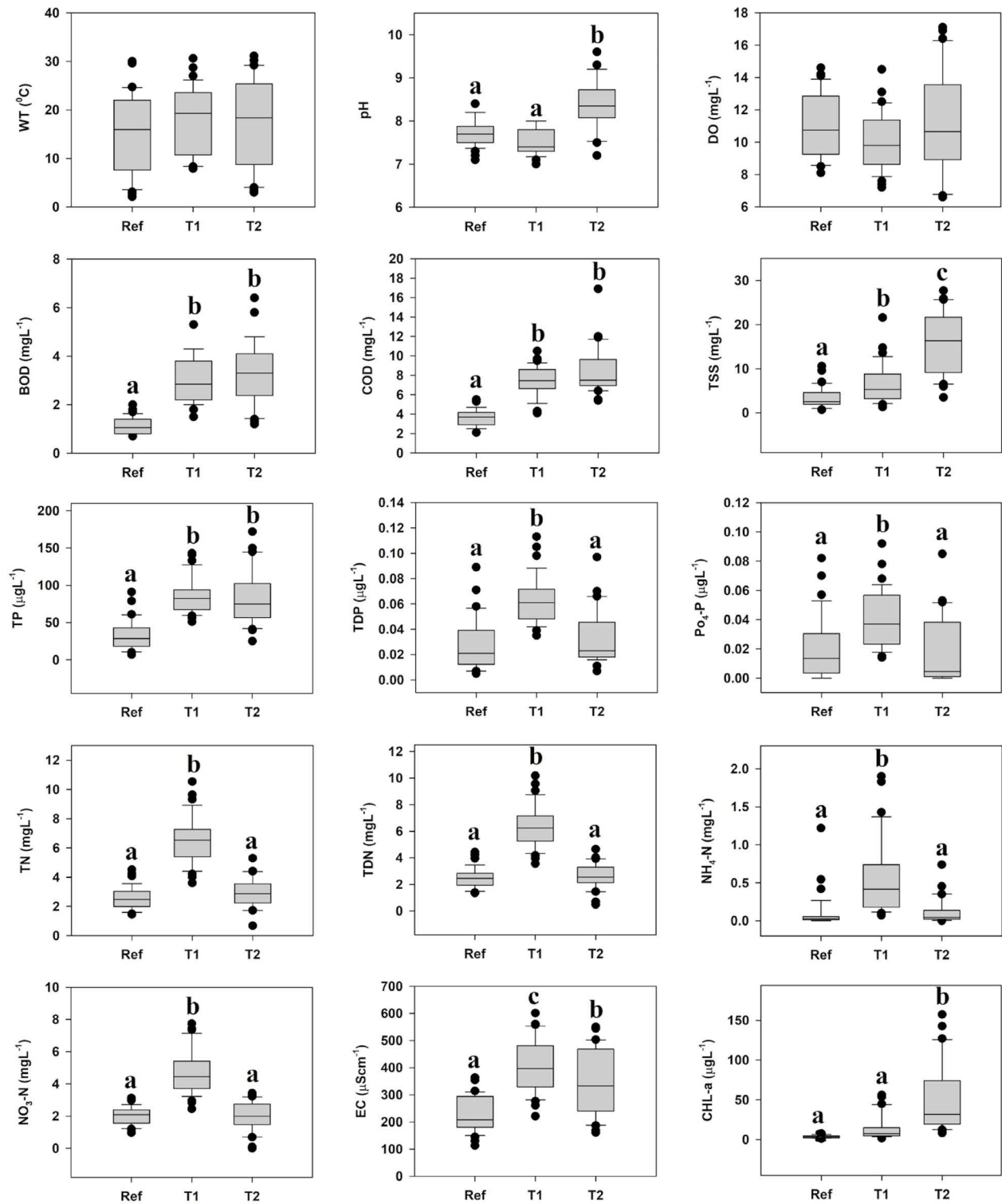


Fig. 4. Comparison of water quality between sampling site of reference (Ref.) and testbeds (T1, T2). Different letters (a, b, c) above bars indicate statistically different groups (significance level at $p < 0.05$). WT: Water temperature; DO: Dissolved Oxygen; BOD: Biochemical Oxygen Demand; COD: Chemical Oxygen Demand; TSS: Total Suspended Solids; TP: Total Phosphorus; TDP: Total Dissolved Phosphorus; PO₄-P: Phosphate; TN: Total Nitrogen; TDN: Total Dissolved Nitrogen; NH₄-N: Ammonia Nitrogen; NO₃-N: Nitrate Nitrogen; EC: Conductivity; CHL-a: Chlorophyll-a.

이 농축되므로(US EPA 1999), 육식종을 우선적으로 고려하여야 한다. 또한, 다양한 화학물질이 농축되는 양상을 다각도로 확인하기 위해서는 낮은 단계(low level)의 트로픽 특성을 보이는 어종을 선정하는 것도 중요하다. 따라서, 어종 선정 시 다양한 트로픽 단계의 특성을 고려하여 농축된 유해화학물질을 분석할 수 있는 적절한 어종을 선택해야 한다(US EPA 1993, 1999, 2000). 본 연구에서 제시한 바와 같이 어류 조사지점에 대한 테스트배드의 선정으로서 레퍼런스 하천(Ref.) 및 오염지점의 선정(T1, T2)도 매우 중요한 요소이다(Fig. 1). 어떤 특정 지점은 어류가 서식해도 화학물질의 농도가 아주 낮아서 이런 곳에 테스트배드를 선정할 경우 화학물질의 영향이 과소평가될 수 있기 때문에 하수종말처리장, 폐수처리장(공장) 혹은 집약 농업지역과 같이 화학물질 농도가 높을 가능성이 있는 후보 지점을 선정하는 것이 매우 중요하다(Kosmala *et al.* 1998).

다음으로 타깃 어종의 선정 시 생태적 중요성(Ecological importance) 혹은 경제적 중요성(상업적 어종)도 고려하는 것이 중요하다(Table 1: F1, F2; Linde *et al.* 1996). 하천 생태계에서 중요한 역할을 하는 어종(최상위 포식종, 생태교란종 등)을 고려하여 타깃종을 선정하면 수생태계의 군집구조, 생물 다양성 및 생태계 기능의 역할에 대한 기능적 측면도 분석될 수 있기 때문이다. 그리고 식용으로 빈번히 이용되어 경제성 측면에서 유용한 어종일 경우(메기, 붕어, 잉어 등), 사람에게 화학물질이 유입되어 인체에 영향을 미칠 가능성이 있기 때문에 이러한 부분도 우선적으로 고려되어야 한다.

다른 한편으로, 타깃 후보종 선정 시 선정된 종의 분석 가능성, 채집 용이성 등에 대한 실현 가능성(Feasibility)도 고려되어야 한다(Table 1: F6, F7). 즉 타깃 후보종이 생태적, 경제적 중요성이 적합한 경우에도, 채집하기 어렵거나 다루기 어려울 수 있기 때문에 데이터의 이용가능성(Data availability) 또한 고려되어야 한다(Rodriguez-Cea 2003). 특히, 유해화학물질 농도에 대한 기존 데이터가 있는 어종의 경우, 유해화학물질의 영향을 보다 정확하게 평가할 수 있는 장점이 있다. 또한, 타깃 후보종과 공서종의 과거정보(Table 3)를 이용할 수 있는 경우, 수환경의 오염 및 생물종에 대한 오염 내성도 특성을 분석하는 것이 가능하다. 본 연구에서 분석된 테스트배드의 수질 특성 지표(Fig. 4) 또한 타깃 후보종의 선정 시 이용될 수 있으며, 타깃종 서식지의 수질오염도를 이해하는 데 기여할 것으로 사료된다.

적 요

본 연구는 우리나라에서 수생태계에 유입되는 주요 유해화학물질 축적 분석을 위한 타깃 후보종 선정과 이에 따른 어류 군집의 영향을 분석하였다. 레퍼런스 하천 선정과 함께 유해화학물질 유입의 영향을 직접적으로 받는 하수종말처리장(T1)과 수계로 유입된 유해화학물질이 집중되는 금강하구연(T2)의 테스트배드를 분석하였다. 유해화학물질 분석을 위한 타깃 후보종 선정을 위해 7-메트릭 다변수 모델을 개발하였으며, 세부항목은 (1) 상업적으로 유용하며 식용으로 이용하는 어종, (2) 최상위 육식종 어종, (3) 유기물 섭취 어종, (4) 내성도가 높은 어종, (5) 개체수가 풍부한 어종, (6) 채집 가능성이 높은 어종, (7) 광범위하게 분포하는 어종 등 총 7개 메트릭으로 구성되었다. 타깃 후보어종에 대한 7개 메트릭 모델을 기반으로 8종이 대상 후보로 선정되었다. 타깃 후보종과 함께 공서하는 우점어종은 내성종(50%)이었으며, 이는 수질 오염 지표로 자주 사용되는 내성종의 풍부도가 가장 높은 것으로 나타났다. 또한, 수생태계 건강성 평가를 위한 다변량 어류 기반 모델 분석에서는 생태계 건강성이 “나쁨 상태”까지 진단되는 것으로 나타났다. 이화학적 수질 변수는 테스트배드에서 섭식 및 내성길드에 영향을 미치는 것으로 나타났다. 8개의 수질 변수는 T1 지점에서 높게 나타나 하수처리장의 방류수에 따른 영향이 컸으며, T2 지점은 대규모 녹조 현상이 나타나 클로로필 농도가 레퍼런스 지점보다 약 15배 높은 것으로 나타났다.

CRedit authorship contribution statement

JY Kim: Conceptualization, Formal analysis, Investigation, Writing - Original Draft. SH Jin: Investigation, Data Curation, Writing - Review & Editing. MJ Cho: Investigation, Formal analysis, Visualization. HJ Choi: Data Curation, Visualization, Writing - Review & Editing. KG An: Conceptualization, Resources, Supervision.

Declaration of Competing Interest

The authors declare no conflicts of interest.

사 사

본 결과물은 환경부의 재원으로 한국환경산업기술원

수생태계 건강성 확보 기술개발사업의 지원을 받아 연구되었습니다(2020003050004).

REFERENCES

- Abdel-Baki AS, MA Dkhil and S Al-Quraishy. 2011. Bioaccumulation of some heavy metals in tilapia fish relevant to their concentration in water and sediment of Wadi Hanifah, Saudi Arabia. *Afr. J. Biotechnol.* 10:2541-2547.
- An KG and JH Kim. 2005. A diagnosis of ecological health using a physical habitat assessment and multimetric fish model in Daejeon stream. *Korean J. Limnol.* 38:361-371.
- Bae DY and KG An. 2006. Stream ecosystem assessments, based on a biological multimetric parameter model and water chemistry analysis. *Korean J. Limnol.* 39:198-208.
- Bae KS, GB Kim, HK Kil, BT Yu and MY Kim. 2002. Long-term changes of the fish fauna and community structure in the Jungang Creek, Seoul, Korea. *Korean J. Limnol.* 35:63-70.
- Chapman PM. 2000. Whole effluent toxicity testing-usefulness, level of protection, and risk assessment. *Environ. Toxicol. Chem.* 19:3-13. <https://doi.org/10.1002/etc.5620190102>
- Chi QQ, GW Zhu and A Langdon. 2007. Bioaccumulation of heavy metals in fishes from Taihu Lake, China. *J. Environ. Sci.* 19:1500-1504. [https://doi.org/10.1016/S1001-0742\(07\)60244-7](https://doi.org/10.1016/S1001-0742(07)60244-7)
- Cho JL, SJ Hwang, KJ Cho and JK Shin. 2000. Eutrophication and water pollution characteristics of the Kyongan Stream to Paltang Reservoir. *Kor. J. Limnol.* 33:387-394.
- Chung SJ and KB Yoo. 1990. A study on the heavy metal contents of fresh water fishes in the Keum river. *Korean J. Environ. Biol.* 8:59-69.
- Cui L, J Ge, Y Zhu, Y Yang and J Wang. 2015. Concentrations, bioaccumulation, and human health risk assessment of organochlorine pesticides and heavy metals in edible fish from Wuhan, China. *Environ. Sci. Pollut. Res.* 22:15866-15879. <https://doi.org/10.1007/s11356-015-4752-8>
- Dean TL and J Richardson. 1999. Responses of seven species of native freshwater fish and a shrimp to low levels of dissolved oxygen. *N. Z. J. Mar. Freshw. Res.* 33:99-106. <https://doi.org/10.1080/00288330.1999.9516860>
- Dyer SD and X Wang. 2002. A comparison of stream biological responses to discharge from wastewater treatment plants in high and low population density areas. *Environ. Toxicol. Chem.* 21:1065-1075. <https://doi.org/10.1002/etc.5620210524>
- Han JH and KG An. 2013. Chemical water quality and fish community characteristics in the mid- to downstream reach of Geum river. *Korean J. Environ. Biol.* 31:180-188. <https://doi.org/10.11626/KJEB.2013.31.3.180>
- Hart BT, P Bailey, R Edwards, K Hortle, K James, A McMahon, C Meredith and K Swadling. 1990. Effects of salinity on river, stream and wetland ecosystems in Victoria, Australia. *Water Res.* 24:1103-1117. [https://doi.org/10.1016/0043-1354\(90\)90173-4](https://doi.org/10.1016/0043-1354(90)90173-4)
- Hora PI, SG Pati, PJ McNamara and WA Arnold. 2020. Increased use of quaternary ammonium compounds during the SARS-CoV-2 pandemic and beyond: consideration of environmental implications. *Environ. Sci. Technol. Lett.* 7:622-631. <https://doi.org/10.1021/acs.estlett.0c00437>
- Hung MD, NH Lam, HH Jeong, HJ Jeong, DJ Jeong, GH Park, PJ Kim, JE OH and HS Cho. 2018. Perfluoroalkyl substances (PFASs) in ten edible freshwater fish species from major rivers and lakes in Korea: Distribution and human exposure by consumption. *Toxicol. Environ. Health Sci.* 10:307-320. <https://doi.org/10.1007/s13530-018-0379-8>
- Jang MH, JG Kim, SB Park, KS Jeong, GI Cho and GJ Joo. 2002. The current status of the distribution of introduced fish in large river systems of South Korea. *Int. Rev. Hydrobiol.* 87:319-328. [https://doi.org/10.1002/1522-2632\(200205\)87:2/3<319::AID-IROH319>3.0.CO;2-N](https://doi.org/10.1002/1522-2632(200205)87:2/3<319::AID-IROH319>3.0.CO;2-N)
- Jang SH, CI Zhang, JH Na and JH Lee. 2008. Analysis of trophic structures and energy flows in aquatic ecosystem of the lower reaches of the Nakdong river. *Korean J. Environ. Biol.* 26:292-302.
- Jeong DH, SY Ham, W Lee, H Chung and H Kim. 2017. Study on occurrence and management of organic micropollutants in sewer systems. *J. Korean Soc. Water Wastew.* 31:551-566. <https://doi.org/10.11001/jksww.2017.31.6.551>
- Kang YJ, SJ Lee and KG An. 2019. Physical habitat and chemical water quality characteristics on the distribution patterns of ecologically disturbing fish (Largemouth bass and Bluegill) in Dongjin-river watershed. *Korean J. Environ. Biol.* 37:177-188. <https://doi.org/10.11626/KJEB.2019.37.2.177>
- Karr JR. 1991. Biological integrity: A long neglected aspect of water resource management. *Ecol. Appl.* 1:66-84. <https://doi.org/10.2307/1941848>
- Karr JR, RC Heidinger and EH Helmer. 1985. Effects of chlorine and ammonia from wastewater treatment facilities on biotic integrity. *J. Water Pollut. Control Fed.* 57:912-915.
- Kim HJ and KG An. 2020. Impacts of stream water quality and fish histopathology by effluents of wastewater treatment plant. *Korean J. Environ. Biol.* 120:678-690. <https://doi.org/10.11626/KJEB.2020.38.4.678>
- Kim IJ, HJ Kim, DH Han, GB Kim and HE Kwak. 2017. A Study on Rational Improvement of Public Sewage Treatment Facility

- Management System for Advancement of Public Waters Quality. Korean Environment Institute. Sejong, Korea. pp. 5-17.
- Kim MK, KS Choi, MK Shin, BP Kim and KN Han. 2015. Age and growth of redlip mullet (*Chelon haematocheilus*) in the Han River estuary, Korea. Korean J. Ichthyol. 27:133-141.
- Kosmala A, B Migeon, P Flammarion and J Garric. 1998. Impact assessment of a wastewater treatment plant effluent using the fish biomarker ethoxyresorufin-O-deethylase: field and on-site experiments. Ecotox. Environ. Saf. 41:19-28. <https://doi.org/10.1006/eesa.1998.1662>
- Kwon HH, JH Han, J Yoon and KG An. 2013. Influence of fish compositions and trophic/tolerance guilds on the fishkills in Geum-river watershed (Backje weir). Korean J. Environ. Biol. 31:393-401. <https://doi.org/10.11626/KJEB.2013.31.4.393>
- Lee EH, KH Chang, DI Seo, JY Choi, GJ Joo, M Kim, JH Shin, M Son and GS Nam. 2014. The characteristics of fish community and food web in eutrophic agricultural reservoir, Jeondae. Korean J. Environ. Biol. 32:319-326. <https://doi.org/10.11626/KJEB.2014.32.4.319>
- Lee EH, M Kim, HM Kim, M Son, KH Chang and GS Nam. 2013b. Ecological characteristics and distribution of fish in the downstream region of Gyeongan Stream. Korean J. Environ. Biol. 31:478-485. <https://doi.org/10.11626/KJEB.2013.31.4.478>
- Lee EH, SH Yoon, JH Lee and KG An. 2008. Total mercury contents in the tissues of *Zacco platypus* and ecological health assessments in association with stream habitat characteristics. Korean J. Limnol. 41:188-197.
- Lee J and DK Park. 2016. Toxic effects of metal plating wastewater on *Daphnia magna* and *Euglena agilis*. Korean J. Environ. Biol. 34:116-23. <https://doi.org/10.11626/KJEB.2016.34.2.116>
- Lee JH, H Han, JY Lee, YS Cha and SJ Cho. 2022. Ecological health assessment of Yangjaecheon and Yeouicheon using biotic index and water quality. Korean J. Environ. Biol. 40:172-186. <https://doi.org/10.11626/KJEB.2022.40.2.172>
- Lee JH, JH Han, BJ Lim, JK Shin and KG An. 2013c. Comparative analysis of fish fauna and community structures before and after the artificial weir construction in the mainstreams and tributaries of Yeongsan river watershed. Korean J. Ecol. Environ. 46:103-115. <https://doi.org/10.11614/KSL.2013.46.1.103>
- Lee JW, JH Kim, SH Park, KR Choi, HJ Lee, JD Yoon and MH Jang. 2013a. Impact of Largemouth Bass (*Micropterus salmoides*) on the Population of Korean Native Fish, Crucian Carp (*Carassius auratus*). Korean J. Environ. Biol. 31:370-375. <https://doi.org/10.11626/KJEB.2013.31.4.370>
- Lee MH, JS Lee and SK Ham. 2005. A study on the distribution property of organic pollutants in effluents from domestic sewage treatment plans throughout Youngsan river. J. Korean Soc. Environ. Eng. 27:1332-1339.
- Linde AR, P Arribas, S Sanchez-Galan and E Garcia-Vazquez. 1996. Eel (*Anguilla anguilla*) and brown trout (*Salmo trutta*) target species to assess the biological impact of trace metal pollution in freshwater ecosystems. Arch. Environ. Contam. Toxicol. 31:297-302.
- Maezono Y, R Kobayashi, M Kusahara and T Miyashita. 2005. Direct and indirect effects of exotic bass and bluegill on exotic and native organisms in farm ponds. Ecol. Appl. 15:638-650. <https://doi.org/10.1890/02-5386>
- MOE. 2009. Feasibility Study on the Application of Physicochemical Process for Phosphorous Removal in Environmental Facilities Located in Upper Reaches of the Watershed Lake (Ordinance of the Ministry of Environment No. 3). Ministry of Environment. Sejong, Korea.
- Mullins WH. 1999. Biotic Integrity of the Boise River Upstream and Downstream from Two Municipal Wastewater Treatment Facilities, Boise, Idaho, 1995-96 (No. 98-4123). United States Geological Survey. <https://doi.org/10.3133/wri984123>
- Nelson JS. 2006. Fishes of the World. 4th edition. John Wiley & Sons. New Jersey.
- NIER. 2017. Biomonitoring Survey and Assessment Manual. National Institute of Environmental Research. Incheon, Korea.
- NIER. 2020. Stream/River Ecosystem Survey and Health Assessment (2020). National Institute of Environmental Research. Incheon, Korea.
- Park H, SM Park, KC Lee, SJ Yu, OS Kwon and SJ Kim. 2011. Survey of physicochemical methods and economic analysis of domestic wastewater treatment plant for advanced treatment of phosphorus removal. J. Korean Soc. Environ. Eng. 33:212-221. <https://doi.org/10.4491/KSEE.2011.33.3.212>
- Park YJ, SJ Lee and KG An. 2019. Analysis of fish ecology and water quality for health assessments of Geum-river watershed. Korean J. Environ. Ecol. 33:187-201. <https://doi.org/10.13047/KJEE.2019.33.2.187>
- Piria M, P Simonović, D Zanella, M Čaleta, N Šprem, M Paunović, T Tomljanović, A Gavrilović, M Pecina, I Špelić, D Matulić, A Rezić, I Aničić, R Safner and T Treer. 2019. Long-term analysis of fish assemblage structure in the middle section of the Sava river - The impact of pollution, flood protection and dam construction. Sci. Total Environ. 651:143-153. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.09.149>
- Preziosi DV and RA Pastorok. 2008. Ecological food web analysis for chemical risk assessment. Sci. Total Environ. 406:491-502. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2008.06.063>
- Ra JS, SD Kim, KG An and NI Chang. 2005. The Whole effluent toxicity tests of wastewater discharged from various wastewater treatment plants and their impact analyses on biological component. J. Korean Soc. Environ. Eng. 27:353-361.

- Ra JS, SD Kim, NI Chang and KG An. 2007. Ecological health assessments based on whole effluent toxicity tests and the index of biological integrity in temperate streams influenced by wastewater treatment plant effluents. *Environ. Toxicol. Chem.* 26:2010–2018. <https://doi.org/10.1897/06-542R.1>
- Rahman MS, AH Molla, N Saha and A Rahman. 2012. Study on heavy metals levels and its risk assessment in some edible fishes from Bangshi river, Savar, Dhaka, Bangladesh. *Food Chem.* 134:1847–1854. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2012.03.099>
- Rajeshkumar S and X Li. 2018. Bioaccumulation of heavy metals in fish species from the Meiliang Bay, Taihu Lake, China. *Toxicol. Rep.* 5:288–295. <https://doi.org/10.1016/j.toxrep.2018.01.007>
- Rodriguez-Cea A, F Ayllon and E Garcia-Vazquez. 2003. Micro-nucleus test in freshwater fish species: an evaluation of its sensitivity for application in field surveys. *Ecotox. Environ. Safe.* 56:442–448. [https://doi.org/10.1016/S0147-6513\(03\)00073-3](https://doi.org/10.1016/S0147-6513(03)00073-3)
- Saylor RK, NWR Lapointe and PL Angermeier. 2012. Diet of non-native northern snakehead (*Channa argus*) compared to three co-occurring predators in the lower Potomac River, USA. *Ecol. Freshw. Fish* 21:443–452. <https://doi.org/10.1111/j.1600-0633.2012.00563.x>
- Schulz EJ, MV Hoyer and DE Canfield Jr. 1999. An index of biotic integrity: a test with limnological and fish data from sixty Florida lakes. *Trans. Am. Fish. Soc.* 128:564–577. [https://doi.org/10.1577/1548-8659\(1999\)128<0564:AIOBIA>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1577/1548-8659(1999)128<0564:AIOBIA>2.0.CO;2)
- Tashla T, M Žuža, T Kenjaveš, R Prodanović, D Soleša, V Bursić, A Petrović, D Ljubojević Pelić, J Bošković and N Puvača. 2018. Fish as an important bio-indicator of environmental pollution with persistent organic pollutants and heavy metals. *J. Agron. Technol. Eng. Manag.* 1:52–56.
- UNEP. 2003. Master List of Actions: On the Reduction and/or Elimination of the Releases of Persistent Organic Pollutants. 5th edition. United Nations Environment Programme. Geneva, Switzerland.
- US EPA. 1988. WQS Draft Framework for the Water Quality Program. Draft 11-8-88. United States Environmental Protection Agency. Washington, D.C.
- US EPA. 1991. Technical Support Document for Water quality based toxics control (EPA 505-2-90-001). United States Environmental Protection Agency. Washington, D.C.
- US EPA. 1993. Fish field and laboratory methods for evaluating the biological Integrity of Surface Waters (EPA 600-R-92-111). United States Environmental Protection Agency. Washington, D.C.
- US EPA. 1999. the national survey of mercury concentrations in fish: data base summary 1990-1995 (EPA 823-R-99-014). United States Environmental Protection Agency. Washington, D.C.
- US EPA. 2000. Quality Assurance Project Plan for Analytical Control and Assessment Activities in the National Study of Chemical Residues in Lake Fish Tissue (EPA/823-R-02-006). United States Environmental Protection Agency. Washington, D.C.
- Van Putten M. 1989. Issues in applying water quality criteria. pp. 175–177. In: *Water Quality Standards for the 21st Century* (Flock GH ed.). United States Environmental Protection Agency. Washington, D.C.
- Xie W, J Zhao, Q Zhang, C Ye, G Zheng, Q Shan, L Li and X Shao. 2020. Occurrence, distribution and bioaccumulation of alkylphenols in the Pearl River networks, South China. *Ecol. Indic.* 110:105847. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2019.105847>
- Zhang G, Z Pan, A Bai, J Li and X Li. 2014. Distribution and bioaccumulation of organochlorine pesticides (OCPs) in food web of Nansi Lake, China. *Environ. Monit. Assess.* 186:2039–2051. <https://doi.org/10.1007/s10661-013-3516-5>