

국내 남부권역 주요 수계 농수로의 어류 군집 특성

지성민, 성무성¹, 김정훈², 박준휘³, 김현구³, 안광국^{1,*}

고려대학교 생명공학부, ¹충남대학교 생물학과

²영남대학교 생명학과, ³한림대학교 생명학과

Fish distribution and community characteristics of agricultural waterways in the southern region of Korean watersheds

Sung-Min Ji, Mu-Sung Sung¹, Jeong-Hun Kim², Joon-Hwi Park³,
Hyun-Gu Kim³ and Kwang-Guk An^{1,*}

Division of Biotechnology, Korea University, Seoul 02841, Republic of Korea

¹Department of Biological Sciences, Chungnam National University, Daejeon 34134, Republic of Korea

²Department of Life Sciences, Yeungnam University, Gyeongsan 38541, Republic of Korea

³Department of Life Science, Hallym University, Chuncheon 24252, Republic of Korea

*Corresponding author

Kwang-Guk An

Tel. 042-821-6408

E-mail. kgan@cnu.ac.kr

Received: 14 December 2019

First Revised: 10 March 2020

Second Revised: 12 March 2020

Revision accepted: 12 March 2020

Abstract: The objective of our study was to analyze the distribution and composition of fish species and their community characteristics in agricultural waterways in the six water systems—Mankyung River, Seomjin River, Namhae Region, Tamjin River, Yeongsan River, and Dongjin River—during 2017–2018. Little is known about the distributions and community characteristics of the aquatic biota of agricultural waterways in Korea, even if the water bodies have important roles as spawning areas or habitats for fish. In this study, we identified 3,633 fish individuals in the waterways, belonging to 53 species, eleven families, and six orders (dominant species: *Tanakia koreensis*, *T. lanceolate*) and 7,108 fish individuals in the main rivers, belonging to 57 species, fifteen families, and nine orders. Moreover, three endangered wildlife (designated by the Ministry of Environment, Korea)—*T. somjinensis*, *Acheilognathus majusculus* and *Coreoperca kawamebari*—were found in the waterways. By fish guild analysis, we found that many waterways had a lower proportion of sensitive species and a higher proportion of omnivore species than those of the main rivers, which indicates a feature of a disturbed environment. In addition, by grouping with environmental variables, we found the group of waterways with high substrate complexity had a higher diversity index (Shannon index) and a lower dominance index (Simpson index) than that of simple substrate complexity. Overall, our study represents the characteristics of fish habitats in agricultural waterways and suggests the need to manage them and study further.

Keywords: agricultural waterway, endangered fish species, fish fauna, community characteristics, fish guilds

서 론

농수로의 주요 기능은 농업에 필요한 물을 운반하는 기능을 갖지만, 그 외에도 인접 하천 및 습지에 수리수문학적 물 공급, 생물의 이동통로 역할 (Herzon and Helenius 2008), 소형 어류의 먹이원이 되는 동물성 플랑크톤 공급 및 산란장과 같은 다양한 생태계 기능에 중요한 역할을 담당하는 것으로 알려져 있다 (Hata 2002; Katano *et al.* 2003). 특히, 잉어 (*Cyprinus carpio*), 메기 (*Silurus asotus*), *Gasterosteus aculeatus aculeatus* 등은 성어가 농수로로 오가며 산란하고, 치어는 성장기 동안 서식하며, 일부 납자루아과 (Acheilognathinae) 어류들은 농수로에서 일생을 보내는 것으로 알려져 있다 (Hata 2002). 그뿐만 아니라 일본에서 멸종위기종인 납자루아과 어류 (*Rhodeus atremius suigensis*)는 농수로가 종의 서식지 중 하나라고 알려졌다 (Nakata *et al.* 2017). 즉, 농수로는 육수 생태계의 규모 측면에서 소형이지만, 어류 산란지 기능 등 생태 기능에 중요성이 있다고 알려져, 일본과 핀란드 등의 여러 국가에서 다각적인 농수로 연구를 시도하고 있다. 국내에서는 한국농어촌공사에서 이러한 생태적 기능의 중요성을 인지하고 물이 담긴 논, 논 배수로, 소형하천을 연결하는 생태통로에 관한 연구가 진행되고 있다 (Jang *et al.* 2009).

우리나라의 농경지는 2018년 기준 국토 면적의 약 8.5%에 달하는 규모이며 (Statistics Korea 2019) 농수로라고 정의할 수 있는 용수로와 배수로의 총연장은 183,000 km로 조사되었다 (Jang *et al.* 2009). 우리나라에서는 지천 및 본류 하천과 연결되는 수많은 농수로 수체가 존재하나, 농수로에서 서식하는 소형 어류, 저서동물 등의 종 조성 및 군집 특성에 관한 연구는 미미한 실정이다 (Moon and An 2007; Jang *et al.* 2009; Kim *et al.* 2011b).

본 연구는 우리나라 남부권역 주요 수계의 농수로 수체 (Water body)를 연구 대상으로 하며, 만경강 수계 (전북 완주군, 전주시), 섬진강 수계 (전북 임실군, 남원시, 전남 보성군), 남해권 수계 (전남 광양시), 탐진강 수계 (전남 장흥군), 영산강 수계 (광주광역시), 동진강 수계 (전북 정읍시)에 있는 농수로 지점을 선정한 후 어류 서식지의 물리적 특성을 분석하였다. 이를 기반으로 농수로 내 어종 조성, 어류 길드, 군집 특성을 분석하여 농수로 수체에 관한 기초자료를 제공하고자 하였다. 본 연구 대상 지역은 환경부 주관 조사사업 (전국자연환경조사, 육수 생태계 건강성 조

사) 및 국토부 조사사업 (소하천 정비사업) 등에서 인접 하천의 어류 조사가 시행되었으나 (Nam *et al.* 2009; Lee *et al.* 2013; Park and Joo 2015; Jang 2019; Kang *et al.* 2019; Na *et al.* 2019), 농수로는 국가 차원 및 개인 연구 단위에서 조사가 거의 이루어지지 않은 실정이다. 따라서 본 연구는 미개척 생태연구에 이바지를 할 수 있다.

연구 방법

1. 조사 지점 및 기간

본 연구는 지도 조사를 통해 남부권역을 중심으로 본류와 연결된 용수로인 농수로를 탐색하였다. 그리고 사전 현장 조사를 통해 수심 0.1 m 이상의 농수로를 선택했다. 그 중 연중 최소 수량이 유지되지 않은 곳은 연구에서 제외하였다. 그렇게 해서 만경강 수계 2개 지점, 섬진강 수계 3개 지점, 남해권 수계 1개 지점, 탐진강 수계 1개 지점, 영산강 수계 1개 지점, 동진강 수계 2개 지점을 포함한 총 10곳을 조사 지점으로 선정하였고 행정구역상 지명 (Location = L; L1~L10)은 다음과 같다 (Fig. 1).

- L1: 전라북도 완주군 봉동읍 고천리 (만경강 수계)
- L2: 전라북도 전주시 덕진구 산동동 (만경강 수계)
- L3: 전라북도 임실군 관촌면 방수리 (섬진강 수계)
- L4: 전라북도 남원시 이백면 남계리 (섬진강 수계)
- L5: 전라남도 보성군 노동면 옥마리 (섬진강 수계)
- L6: 전라남도 광양시 광양읍 우산리 (남해권 수계)
- L7: 전라남도 장흥군 부산면 기동리 (탐진강 수계)
- L8: 광주광역시 광산구 사호동 (영산강 수계)
- L9: 전라북도 정읍시 농소동 (동진강 수계)
- L10: 전라북도 칠보면 무성리 (동진강 수계)

본 연구에서 계절별로 총 4회 (1~4차) 현장 조사가 시행되었다 (L10은 3~4차만 실시). 1차 조사는 추계 (2017년 9월 30일~10월 3일), 2차 조사는 동계 (2018년 1월 26일, 2월 3~4일, 2월 17~18일), 3차 조사는 춘계 (2018년 5월 5~7일), 4차 조사는 하계 (2018년 8월 2~5일)에 진행되었다. 하계 조사는 집중호우를 고려하여 3주 내 큰 강우가 없었던 시기를 선정했다. 농수로 조사의 경우 동계 조사 기간 중 결빙된 L2와 L4는 결측 처리되었다. L10의 경우 3차 조사부터 추가되었다. 농수로 조사는 모든 조사에서 시행

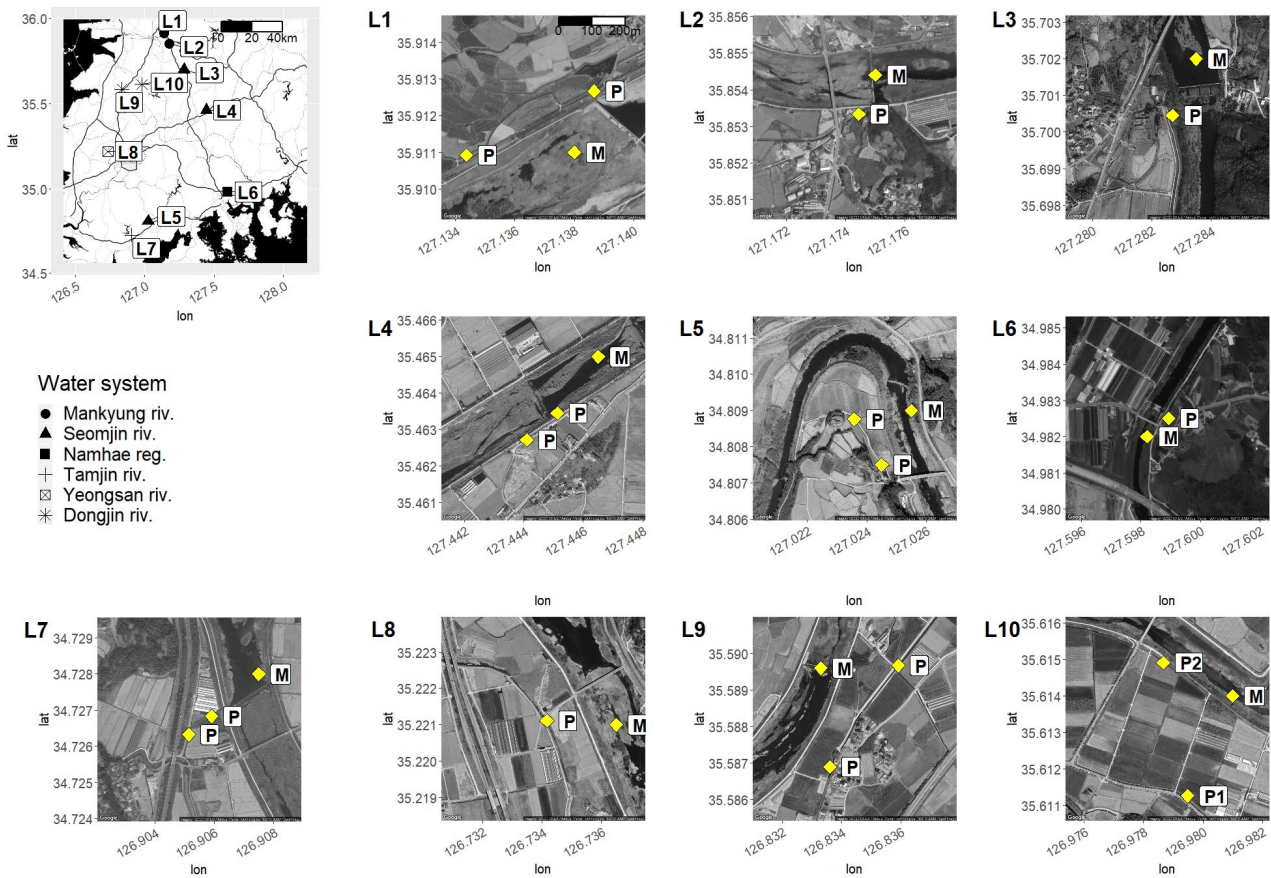


Fig. 1. Map showing the sampling locations (L1–L10). The map was obtained from Google Maps. The axes of the graphs represent decimal degrees of latitude (lat) and longitude (lon). M: the point of the survey of the main river; P: the points of the survey of the agricultural waterway.

되었지만, 본류 조사는 1차, 4차 조사에서 시행되었다. 1차 조사인 10월 1~2일, 3차 조사인 5월 6~7일에 조사 도중 강우가 있었지만, 조사에 큰 지장이 없어서 그대로 진행하였다.

2. 서식지 환경 조사

조사 대상 농수로의 수로 벽(Bank) 재질과 수로 폭 너비, 수심, 하상의 깊이, 하상 구조(Substrate structure), 수온, 담수성 이매패류(Freshwater bivalves)의 서식 여부를 기록하였다. 수로 벽 재질은 크게 콘크리트, 석축, 흙으로 구분하였다. 그리고 Katano *et al.* (2003)의 방법에 의거하여 조사 지점의 일부가 콘크리트 재질이더라도 석축이나 흙 부분이 있으면 석축이나 흙 재질로 간주하였다. 많은 인공 농수로는 바닥이 콘크리트 재질로 이루어져 있지

만, 강이나 주변 토지에서 유입된 퇴적물이 쌓여있다. 하상의 깊이는 이러한 퇴적물의 깊이를 말한다. 하상 구조는 Wentworth (1922)의 기준을 참고하여, 실트와 고운 모래(Silt and fine sand; SF, 입자 크기 0.25 mm 미만), 모래(Sand; Sa, 0.25~2 mm), 자갈(Gravel and pebbles; GP, 2~64 mm), 호박돌과 전석(Cobbles and boulders; CB, 64 mm 초과), 맨 콘크리트 바닥(Concrete bed; C)의 범주로 범주별 비율을 기록하였다. 농수로의 수온은 휴대용 수온 측정계를 이용하여 측정하였고, 본류의 수온은 물환경정보시스템(<http://water.nier.go.kr>)에서 각 조사 지점과 인접한 동일 수계의 관측 자료를 획득하여 사용하였다. 담수성 이매패류는 농수로 안에서 살아있는 개체와 껍데기 수집을 통해 조사되었고, 동정은 속 수준까지 이루어졌으며 Kwon *et al.* (2013)과 Kondo *et al.* (2007)을 사용했다.

3. 어류 조사

농수로 조사는 분류와 같은 기준의 CPUE (Catch per unit effort)가 적용되기 어려워서, 일본 내 농수로 연구에서 수행된 방법을 참고하였다(Katano *et al.* 2003; Ohira *et al.* 2015). 먼저, 농수로의 분류 유입지점과 50~1000 m의 구간 중 접근이 쉽고, 분기점이 없는 곳을 선택했다. 그리고 농수로의 폭과 길이를 고려하여 50 m²의 면적을 설정하였다. 그다음, 수로의 한쪽에 개울 막이 통발(4×4 mm 또는 1×1 mm)을 설치하여 어류의 이동을 막았다. 개울 막이 통발은 뜰채로 조사하는 중 소상하여 도망가는 물고기를 잡을 수 있다(Ohira *et al.* 2015). 설치 직후, 반대쪽에서 뜰채(4×4 mm)와 족대(4×4 mm)를 이용하여 30분 동안 어류 채집을 진행하였다. 조사 인원은 한 지점 당 3인이 투입되었다. 한편, 수로 폭이 상대적으로 좁은 지점은 조사 길이를 고려하여 25 m²의 면적 두 곳을 선택하여 조사하였다(L4, L5, L6이 해당; 단, L6은 총구간이 짧아 한 곳을 조사함; Fig. 1). 이 경우 조사 인원을 2인으로 조정하였다. 반면, 수로 폭이 상대적으로 넓은 지점은 조사 길이가 지나치게 짧아져서 100 m²을 조사하였다(L8, L9가 해당). 이 경우 조사 인원을 5인으로 조정하였다. 분류 조사방법은 Hyun *et al.* (2012)에 의거하였고, 족대(4×4 mm), 투망(7×7 mm)를 사용하여 조사자 3인이 1시간 동안 조사하는 CPUE를 적용하였다.

채집한 어류 개체는 20 mm 이상 개체만 수집하여 기록하였다. 어류의 동정은 종 수준까지 이루어졌으며 Kim and Park (2005)과 그 외 자료를 참고하였다(Park and Kim 2010; Vasil'eva *et al.* 2016). 분류 체계와 증명 기재는 Nelson *et al.* (2016)과 Chae *et al.* (2019)에 의거했다. 한반도 고유종 수는 고유 아종(Endemic subspecies)을 포함하여 산정하였다.

4. 어류 길드 및 군집 분석

전체 조사 자료를 이용하여 농수로와 분류의 종 구성과 어류 생태 특성 분석을 시행했다. 한편, 각 조사 지점별 농수로와 분류를 비교하는 분석에서는 비교의 형평성을 위해 1차와 4차 조사 자료를 추출하여 분석하였다(단, L10의 1차 조사 자료는 결측 처리함). 내성도 특성, 섭식 특성 분석은 Lee *et al.* (2016)에 제시된 내성도 길드(Tolerance guilds), 트로픽 길드(Trophic guilds)를 이용하였다. 그리

고 군집 분석을 위해 군집 우점도 지수(Simpson index; λ ; Simpson 1949), 종 다양도 지수(Shannon index, H' ; Shannon 1948), 종 풍부도 지수(Margalef's richness index, d ; Margalef 1958), 종 균등도 지수(Pielou's evenness index, J' ; Pielou 1975)를 계산하였다.

i) 군집 우점도 지수

$$\lambda = \sum_{i=1}^S \frac{N_i(N_i - 1)}{N(N - 1)} \quad (\text{Eq. 1})$$

ii) 종 다양도 지수

$$H' = - \sum_{i=1}^S \ln \frac{N_i}{N} \quad (\text{Eq. 2})$$

iii) 종 풍부도 지수

$$d = \frac{(S - 1)}{\ln N} \quad (\text{Eq. 3})$$

iv) 종 균등도 지수

$$J' = \frac{H'}{\ln S} \quad (\text{Eq. 4})$$

S: 방형구 당 출현 어종수, N: 방형구 당 출현 어류 개체수, N_i : i번째 어종 개체수

군집 분석 결과와 환경적 요소의 관계를 통계적으로 분석하기 위해 농수로를 환경적인 기준에 따라 분류하였다. Katano *et al.* (2003)은 농수로의 퇴적물 깊이와 수로 벽 형태, BOD 등 환경적 변수에 따른 농수로 내 어류의 종 다양성과 생물량의 상관관계를 분석하였다. 본 연구에서는 Katano *et al.* (2003)의 기준을 참고하여 수로 폭과 하상에 대한 분류표를 작성하였다(Table 1). 그리고 군집 분석 결과를 표본으로 하여 각 범주의 차이에 대한 유의성 검정을 시행했다. 표본의 정규성이 보장되지 않기 때문에 비모수적 검정법인 맨-휘트니 U 검정(Mann-Whitney U test)과 순열 검정(Permutation test)을 사용했다. 이때 귀무가설 아래 두 범주의 확률 분포가 같다는 가정을 하였다. 즉, 검정 대상이 아닌 다른 요소들의 영향을 배제하였다. 유의수준(Significance level)은 0.05로 설정하였다. 순열 검정에서 그룹을 무작위로 지정하여 값을 계산하는 모의 실험 횟수는 1000회로 설정하였다(Manly 2006). 조사 자료는 'xlsx' 파일로 기록하였으며, 모든 자료의 처리와 분

Table 1. The definition of categories regarding the environmental variables of the agricultural waterways

| Variables | n | Category 1 | Category 2 |
|---------------------|----|---|---|
| Stream width | 10 | Narrow; ≤ 1.4 m (3) | Wide; > 1.4 m (7) |
| Substrate structure | 10 | Simple; The thickness of sediment is less than 1 cm or the proportion of Silt and Fine sand is over than 50% (4) | Complex; The thickness of sediment is over than 1 cm and the proportion of Silt and Fine sand is less than 50% (6) |

Numbers in parenthesis indicate the number of samples collected at the corresponding location.

Table 2. Physical habitat characteristics of the agricultural waterways

| Site | Bank type | Width (m) | Water dep. (m) ¹ | Sd. thick. (cm) ² | Substrate structure (%) |
|------------------|-----------|-----------|-----------------------------|------------------------------|--|
| L1 | Concrete | 2.7 | 0.5 | > 1 | SF (36), Sa (36), GP (20), CB (8) ⁴ |
| L2 | Concrete | 2.0 | 0.5 | < 1 | SF (50), Sa (33), GP (10), CB (3), C (3) |
| L3 | Stone | 2.0-2.2 | 0.6 | > 5 | SF (40), Sa (20), GP (20), CB (20) |
| L4 | Concrete | 0.6-1.4 | 0.35 | > 1 | Sa (62), GP (16), SF (12), CB (10) |
| L5 | Concrete | 0.7 | 0.3 | < 1 | SF (34), GP (25), Sa (19), CB (18), C (5) |
| L6 | Concrete | 0.6 | 0.3 | < 1 | GP (41), Sa (30), SF (25), CB (5) |
| L7 | Concrete | 1.5 | 0.4 | > 5 | Sa (34), CB (25), GP (24), SF (13), C (5) |
| L8 | Concrete | 4.0-7.0 | 0.8 | > 5 | GP (29), Sa (25), CB (25), SF (18) |
| L9 | Concrete | 1.5-6.0 | 0.5 | > 1 | SF (27), Sa (43), GP (17), CB (11), C (2) |
| L10 ³ | Soil | 2.0 | - | > 5 | SF (70), Sa (20), GP (10) |
| L10 ³ | Concrete | 2.0 | 0.35 | > 5 | SF (50), Sa (30), GP (20) |

¹The data of water depth was measured at 4th survey; ²The thickness of sediment on the stream bed; ³The first point (P1) was conducted at 3rd survey, while the second point (P2) was conducted at 4th survey (Fig. 1); ⁴SF: Silt and Fine sand (particle size: <0.25 mm), Sa: Sand (0.25-2 mm), GP: Gravel and Pebbles (2-64 mm), CB(>64 mm): Cobbles and Boulders

석, 도표 작성은 R version 3.6.3 (2020 The R Foundation for Statistical Computing)과 RStudio version 1.2.5033 (2009-2019 RStudio, Inc.)를 이용하였다.

결 과

1. 물리적 서식지 특성

농수로 조사 지점은 L3, L10 (3차 조사)를 제외하면 모두 콘크리트 재질로 되어 있었다 (Table 2). 농수로의 하폭 (Stream width)과 유수 폭 (Width of flowing water)은 수로의 폭에 따라 결정되고 구간을 따라 일정한 크기를 갖는 경우가 많았다. 한편, L8과 L9의 경우 유수 폭의 크기가 퇴적물과 수변 식물에 의해 일정하지 않았다. L4, L5, L6은 0.6~1.3m의 좁은 하폭을 가졌으며, L1, L2, L3, L8, L9, L10은 2~7m의 넓은 하폭을 갖는 것으로 나타났다. 하폭은 넓

을수록 수로의 총 용량이 증가하기 때문에 수량과 관련이 있는 것으로 추측되었다. 조사된 농수로 하상 깊이는 L2, L5, L6의 경우 1 cm 미만으로, 조사된 구간 면적의 대부분이 콘크리트 바닥 위에 얇은 퇴적물 층이 있는 형태였다. L1, L4, L9의 하상 깊이는 1 cm 이상이며, 수로 구간에 따라 퇴적물이 불규칙하게 쌓여있어서 하상 깊이가 일정하지 않았다. L3, L7, L8, L10의 하상 깊이는 조사된 구간 면적의 대부분이 5 cm 이상이었다. 조사된 농수로에서 실트 (SF)와 모래 (Sa)의 비율이 높은 하상 구조가 주로 관찰되었다. 한편, L3, L6, L7, L8의 경우 자갈 (GP), 호박돌과 전석 (CB)의 비율이 40% 이상으로 나타났다. 하상 깊이와 하상 구조를 고려하면 L3, L6, L8은 비교적 하상 구조가 복잡하여 수생 생물의 미소 서식지가 발달한 것으로 사료된다. 농수로의 수온은 4차 조사 (하계)에 가장 높았고 그다음에 1차 조사 (추계), 3차 조사 (춘계), 2차 조사 (동계) 순으로 나타났다 (Fig. 2).

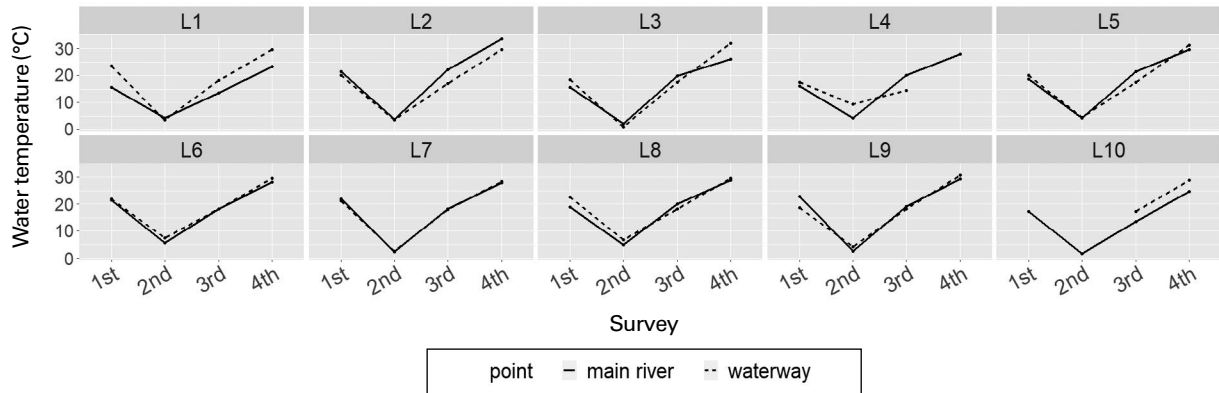


Fig. 2. Water temperature of the sampling locations.

2. 어종 조성 및 분포 특성

본 연구의 모든 농수로 조사에서 총 6목 11과 53종 3,633개체의 어류가 출현했다(Appendix 1). 우점종과 아우점종은 칼납자루(*Tanakia koreensis*, RA: 12.8%)와 납자루(*T. lanceolata*, 11.9%)였다. 가장 많은 지점에서 출현한 종은 모든 지점에서 출현한 피라미(*Zacco platypus*)였다. 농수로 조사 지점에 출현한 법정 보호종은 3종 241개체로 나타났다. 환경부에서 멸종위기 야생생물 I급으로 지정된 임실납자루는 섬진강 수계인 L3과 L5의 농수로에서 총 225개체가 출현하였다. 멸종위기 야생생물 II급으로 지정된 큰줄납자루(*Acheilognathus majusculus*)는 L3의 농수로에서 12개체가 출현하였으며, 멸종위기 야생생물 II급으로 지정된 꺾저기(*Coreoperca kawamebari*)는 L5와 탐진강 수계인 L7의 농수로에서 총 4개체가 출현하였다. 한편, 한반도 고유종은 17종 1,445개체(39.8%)로 나타났다. 외래종(Exotic species)은 2종 18개체(0.5%)가 출현했다.

모든 분류 조사에서는 총 9목 15과 57종 7,108개체의 어류가 출현했다(Appendix 2). 분류 조사의 우점종과 아우점종은 피라미(31.2%)와 납자루(10.1%)로 나타났다. 분류 조사 지점에서 법정 보호종은 5종 158개체(2.2%)로 나타났다. 분류에서 멸종위기 야생생물 II급인 다묵장어(*Lethenteron reissneri*)는 섬진강 수계인 L4에서 2개체가 출현하였고, 임실납자루는 L3과 L5에서 총 100개체가 출현하였다. 큰줄납자루는 L3과 L5에서 총 32개체, 멸종위기 야생생물 I급인 통사리(*Liobagrus obesus*)는 영산강 수계인 L8에서 3개체, 꺾저기는 L5와 L7에서 총 21개체가 출현하였다. 한편, 한반도 고유종은 21종 2,731개체(38.4%)로 나

타났고 외래종은 2종 296개체(4.2%)가 출현했다.

농수로 조사 결과를 수계별로 분류하여 분석한 결과, 분포가 섬진강 수계에 국한되는 것으로 알려진 임실납자루는 섬진강 수계인 L3과 L5에서 국한되어 출현하였으며 17.9%의 비교적 높은 상대 풍부도를 나타냈다(Table 3; Chae *et al.* 2019). 분포가 섬진강 수계와 낙동강 수계로 보고된 큰줄납자루와 왕종개(*Iksookimia longicorpa*)는 L3에서 국한되어 출현하였다(Chae *et al.* 2019). 분포가 영산강과 탐진강으로 국한되는 것으로 알려진 남방종개(*I. hugowolfeldi*)는 탐진강 수계인 L7에서 국한되어 출현하였다(Chae *et al.* 2019).

조사 지점별로 우점종과 아우점종을 분석한 결과, 농수로 내에서 납자루아과에 속하는 어종이 우점종 또는 아우점종으로 나타난 곳은 6지점으로 나타났다(Table 4). 피라미가 우점종 또는 아우점종으로 나타난 지점은 4지점이었다. 한편, L3, L5, L8, L9, L10의 경우 분류에서 우점종이나 아우점종으로 나타난 종이 농수로에서 우점종이나 아우점종으로 나타나지 않았다. 특히, 분류 조사의 L9에서 블루길(*Lepomis macrochirus*)이 아우점종으로, L10에서 칼납자루가 아우점종으로 나타났지만, 같은 지점의 농수로 조사에서 한 개체도 출현하지 않았다. 한편, 본 연구 지점과 같은 하천을 조사한 선행 연구에서 본 연구의 분류 조사 결과와 상당히 일치하는 경우가 있었지만(Jang 2019; Kang *et al.* 2019; Na *et al.* 2019), L8의 인근 구역을 포함하는 Lee *et al.* (2013)의 황룡강 조사 지점의 결과와 같이 농수로에서 아우점종으로 나타난 모래무지(*Pseudogobio esocinus*)가 선행 연구에서 우점종으로 나타난 경우가 있었다. 또한, 본 연구의 L3, L4, L5, L7, L10과 인접한 지점의

Table 3. Locally found fish species in the agricultural waterways classified according to the water system

| | Mankyung riv. | Seomjin riv. | Namhae reg. | Tamjin riv. | Yeongsan riv. | Dongjin riv. |
|-----------------------|-------------------------------|---|-------------|---|--|-----------------------------|
| Locally found species | <i>A. chankaensis</i> (0.011) | <i>T. somjinensis</i> (17.9) <i>A. majusculus</i> (1.0) <i>C. splendidus</i> (0.2) <i>S. chankaensis tsuchigae</i> (0.2) <i>I. longicorpa</i> (1.1) | | <i>A. yamatsutae</i> (2.3) <i>I. hugowolfeldi</i> (3.7) <i>S. scherzeri</i> (1.4) | <i>A. rivularis</i> (0.3) <i>H. leucisculus</i> (0.3) | <i>R. oxycephalus</i> (0.6) |

Numbers in parenthesis indicate relative abundance of the fish in each item (%).

Table 4. Comparison of dominant species and subdominant species between the survey locations

| | | Mankyung ¹ | | Seomjin | | |
|------------|---------------------|------------------------------|-------------------------------|------------------------------|------------------------------|-----------------------------------|
| | | L1 | L2 | L3 | L4 | L5 |
| Waterway | Dominant species | <i>T. lanceolata</i> (34.7) | <i>T. lanceolata</i> (42.3) | <i>T. koreensis</i> (16.2) | <i>Z. platypus</i> (35.3) | <i>R. uyekii</i> (37.6) |
| | Subdominant species | <i>Z. platypus</i> (17.7) | <i>Z. platypus</i> (16.3) | <i>T. lanceolata</i> (15.0) | <i>P. herzi</i> (17.6) | <i>R. brunneus</i> (24.2) |
| Main river | Dominant species | <i>Z. platypus</i> (28.5) | <i>Z. platypus</i> (45.8) | <i>A. chankaensis</i> (31.9) | <i>Z. koreanus</i> (45.6) | <i>Z. koreanus</i> (35.4) |
| | Subdominant species | <i>L. macrochirus</i> (20.9) | <i>R. uyekii</i> (17.2) | <i>Z. platypus</i> (25.5) | <i>P. herzi</i> (17.0) | <i>T. somjinensis</i> (18.6) |
| | | Namhae | Tamjin | Yeongsan | Dongjin | |
| | | L6 | L7 | L8 | L9 | L10 |
| Waterway | Dominant species | <i>T. koreensis</i> (69.0) | <i>H. longirostris</i> (23.4) | <i>P. herzi</i> (18.0) | <i>R. uyekii</i> (27.9) | <i>M. mizolepis</i> (42.7) |
| | Subdominant species | <i>Z. platypus</i> (9.9) | <i>Z. temminckii</i> (12.5) | <i>P. esocinus</i> (15.5) | <i>T. lanceolata</i> (25.5) | <i>M. anguillicaudatus</i> (31.6) |
| Main river | Dominant species | <i>Z. temminckii</i> (25.9) | <i>Z. temminckii</i> (16.2) | <i>L. macrochirus</i> (37.6) | <i>Z. platypus</i> (40.5) | <i>T. lanceolata</i> (27.2) |
| | Subdominant species | <i>Z. platypus</i> (22.8) | <i>T. lanceolata</i> (11.3) | <i>Z. platypus</i> (31.6) | <i>L. macrochirus</i> (31.3) | <i>T. koreensis</i> (21.7) |

*The result is calculated from the data of 1st and 4th survey; ¹Mankyung, Seomjin, Namhae, Tamjin, Yeongsan, Dongjin: The name of river system of the locations; Numbers in parenthesis indicate relative abundance of the fish in each item (%).

선행 연구의 결과가 본 연구와 다소 차이 있는 예도 있었다(Nam et al. 2009; Park and Joo 2015; Kang et al. 2019). 이러한 차이는 선행 연구와 일치하지 않은 조사 지점에 따르는 것에 기인할 가능성이 있다. 하지만 본 연구는 어종의 분포에 중요한 유속을(Moon et al. 2019) 조사하지 않았기 때문에 농수로와 본류의 종 조성 차이 분석은 유속 등 서식지 환경에 대한 추가적인 조사가 필요할 것으로 사료되었다.

3. 내성도 및 섭식 특성 분석

내성도와 섭식 특성 분석 결과는 개체 수를 이용한 상대 풍부도로 나타났다. 전체 농수로에서 조사된 어류의 내성도 길드는 민감종(Sensitive species; SS)이 5.2%, 중간종(Intermediate species; IS)이 82.2%, 내성종(Tolerant species; TS)이 12.6%로 나타났으며, 트로픽 길드의 경우 육식종(Carnivore species; C)이 1.9%, 충식종(Insectivore

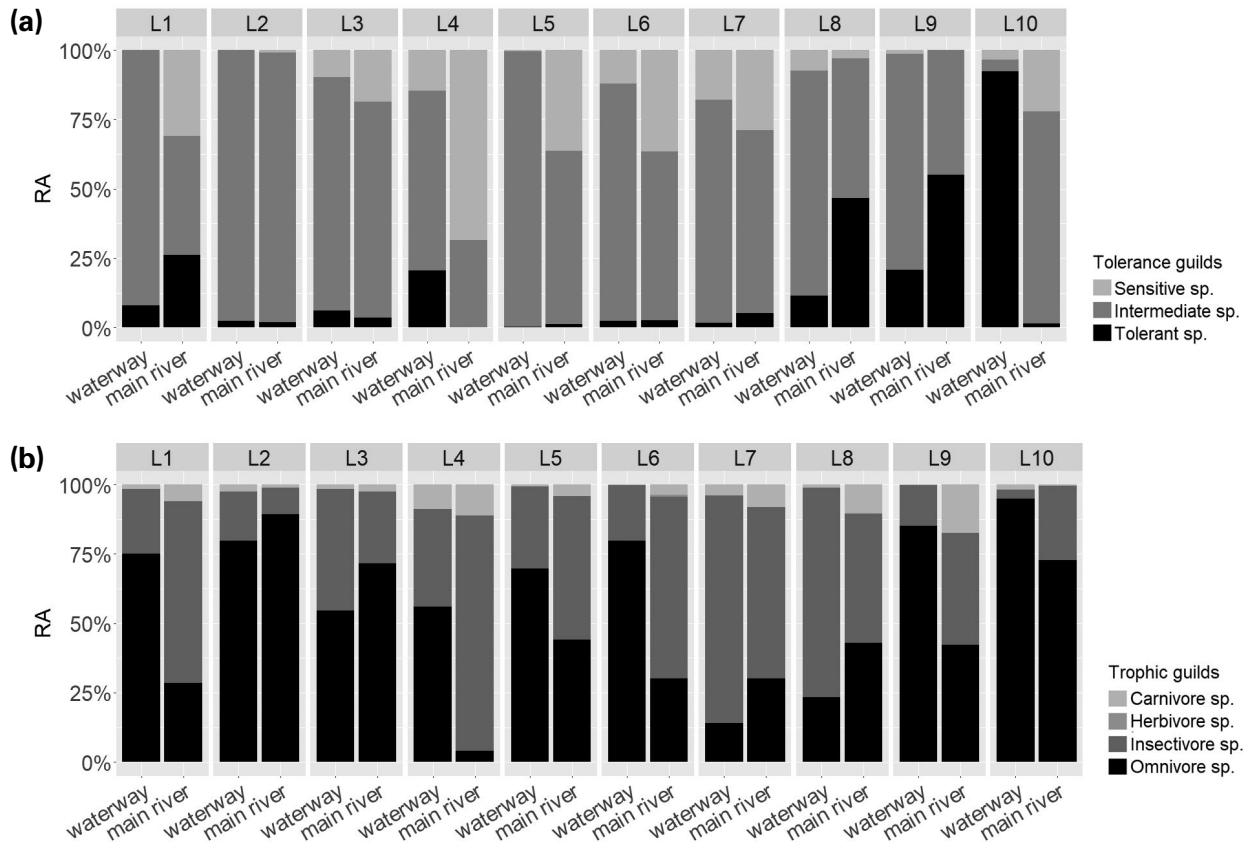


Fig. 3. Relative abundance of tolerant guilds (a) and trophic guilds (b) in the sampling locations with data collected in the 1st and 4th surveys.

species; I)이 31.3%, 잡식종(Omnivore species; O)이 66.8%로 나타났다. 전체 본류 조사에서 조사된 어류의 내성도 길드는 민감종이 14.4%, 중간종이 79.4%, 내성종이 6.2%로 나타났으며, 트로픽 길드의 경우 육식종이 3.3%, 충식종이 28.1%, 잡식종이 68.6%, 초식종(Herbivore species)이 0.04%로 나타났다. 어류의 내성도 및 트로픽 길드는 일반적으로 수질과 환경에 큰 영향을 받으므로, 1차와 4차 조사의 자료를 각 조사 지점별로 나누어 비교하였다(Fig. 3). 민감종의 경우 L8을 제외한 모든 지점에서 본류보다 농수로가 낮은 비율을 나타냈다(Fig. 3a). L1의 경우 민감종의 개체 수가 본류에서 30.9%로 나타났지만, 농수로에서 출현하지 않았고, L5의 경우 민감종이 본류에서 36.3%로 나타났지만, 농수로에서 0.3%로 나타났다. 한편, 내성종의 경우 이러한 경향이 뚜렷하게 나타나지 않았다. 이는 L1의 경우 본류에서 내성종인 블루길(Bluegill)이 20.9%로 아우점종으로 나타났지만, 농수로에서 중간종이 우점종과 아우점종으로 나타났고, L8의 경우 본류에서 블루길(Bluegill)이 37.6%로 우점

종으로 나타났지만, 농수로에서 중간종이 우점종과 아우점종으로 나타난 것에 기인한다고 분석되었다. 한편, L4와 L10에서 내성종의 비율이 본류보다 농수로가 높게 관찰되었다. 한편, 잡식종의 경우 L1, L4, L5, L6, L9, L10에서 본류보다 농수로가 높은 비율로 관찰되었다(Fig. 3b).

4. 군집 구조 특성

군집 분석은 1차와 4차 조사 자료를 이용하였다(Table 5). 농수로의 군집 우점도 지수(λ)는 L6에서 0.50으로 가장 높았는데 상대 풍부도가 69.0%인 갈납자루의 영향으로 분석된다(Table 4). 농수로의 종 다양도 지수(H')는 L3이 2.57로 가장 높았고 L6에서 1.10으로 가장 낮았다. 그리고 L7, L8에서 2.42~2.48의 비교적 높은 수치를, L5, L10에서 1.48~1.58의 비교적 낮은 수치를 나타냈다. 종 풍부도 지수(d)는 L7에서 3.92로 가장 높았고, L6에서 1.38의 가장 낮았다. 종 균등도 지수(J')는 L3과 L7에서 0.83으로 비

Table 5. The results of fish community analysis

| | | L1 | L2 | L3 | L4 | L5 | L6 | L7 | L8 | L9 | L10 |
|-------------|------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| λ^a | Waterway | 0.18 | 0.22 | 0.09 | 0.17 | 0.26 | 0.50 | 0.11 | 0.11 | 0.17 | 0.30 |
| | Main river | 0.17 | 0.27 | 0.20 | 0.26 | 0.20 | 0.17 | 0.08 | 0.26 | 0.29 | 0.16 |
| H' | Waterway | 2.10 | 2.02 | 2.57 | 2.15 | 1.58 | 1.10 | 2.48 | 2.42 | 2.15 | 1.48 |
| | Main river | 2.00 | 1.82 | 2.07 | 1.75 | 2.00 | 2.14 | 2.71 | 1.59 | 1.52 | 2.13 |
| d | Waterway | 3.53 | 3.28 | 3.81 | 3.03 | 2.03 | 1.38 | 3.92 | 3.27 | 2.88 | 1.68 |
| | Main river | 2.18 | 3.37 | 3.53 | 2.14 | 3.61 | 3.12 | 4.23 | 1.84 | 1.94 | 3.17 |
| J' | Waterway | 0.73 | 0.67 | 0.83 | 0.79 | 0.60 | 0.50 | 0.83 | 0.82 | 0.74 | 0.67 |
| | Main river | 0.78 | 0.55 | 0.63 | 0.70 | 0.64 | 0.73 | 0.83 | 0.69 | 0.61 | 0.70 |

^aThe result is calculated from the data of 1st and 4th survey; ^b λ : Dominance index (Simpson index), H' : Diversity index (Shannon index), d : Margalef's species richness index, J' : Pielou's evenness index

Table 6. The results of the Mann-Whitney U test and permutation test by grouping according to category

| Index ^a | Width M. ^c | | Sub. M. ^c | | Man-Whitney T. ^d | | Permutation T. ^d | |
|--------------------|-----------------------|-----------------|----------------------|------|-----------------------------|---------|-----------------------------|---------|
| | G1 ^b | G2 ^b | G1 | G2 | Width | Sub. | Width | Sub. |
| λ | 0.31 | 0.17 | 0.32 | 0.14 | 0.183 | **0.010 | 0.075 | **0.005 |
| H' | 1.61 | 2.17 | 1.54 | 2.31 | 0.267 | **0.010 | 0.100 | **0.005 |
| d | 2.15 | 3.19 | 2.09 | 3.41 | 0.117 | 0.067 | 0.083 | *0.019 |
| J' | 0.63 | 0.76 | 0.61 | 0.79 | 0.183 | **0.010 | 0.083 | **0.005 |

^aThe result of community analysis (Table 5); ^bGroup 1 & Group 2 according to the categories (Table 1); ^cThe mean value of the group of width or substrate; ^dThe p -value of the Mann-Whitney U test or Permutation test; *: p -value < 0.05, **: p -value < 0.01, ***: p -value < 0.001 (Two sided tests)

교적 높은 수치를 나타냈고 L5과 L6에서 0.5~0.6의 비교적 낮은 수치를 나타냈다. 종합적으로 L3과 L7이 높은 다양도 지수와 풍부도 지수, 균등도 지수를 나타내어 비교적 안정적인 군집구조를 형성하는 것으로 분석되었다(Kang et al. 2019). 본류의 경우 군집 우점도 지수가 L9에서 가장 높았으며, 상대 풍부도 합이 71.8%인 피라미와 블루길에 영향을 받은 것으로 분석된다. 종 다양도 지수는 L7에서 2.71로 가장 높았고, L9에서 1.52로 가장 낮았다. L7의 경우 농수로와 본류의 다양도 지수, 풍부도 지수, 균등도 지수가 높게 나타나 일치된 경향을 나타냈다. 한편, L3은 L6과 L10보다 농수로 분석에서 높은 다양도 지수와 낮은 우점도 지수를 나타냈지만, 본류 분석에서는 다양도 지수가 2.07~2.14, 우점도 지수가 0.16~0.20으로 큰 차이를 나타내지 않았다.

5. 물리적 서식지 특성과 군집 구조의 관계

수로 폭과 하상의 범주로 농수로 군집 분석 결과를 본류

Table 7. The list of freshwater bivalves found in the agricultural waterways

| Site | Freshwater bivalves |
|------|--|
| L1 | <i>Unio</i> sp., <i>Lanceolarias</i> sp., <i>Corbicula</i> sp. |
| L2 | <i>Unio</i> sp., <i>Anodonta</i> sp. |
| L3 | <i>Unio</i> sp. |
| L4 | <i>Corbicula</i> sp. |
| L5 | <i>Unio</i> sp., <i>Pronodularia</i> sp., <i>Corbicula</i> sp. |
| L6 | <i>Unio</i> sp. |
| L7 | <i>Unio</i> sp. |
| L8 | <i>Unio</i> sp., <i>Anodonta</i> sp., <i>Lanceolarias</i> sp. |
| L9 | <i>Unio</i> sp. |
| L10 | Not found |

하고 각 그룹의 평균값을 계산했다(Table 6). 그 결과, 수로 폭이 넓은 그룹(G2: L1, L2, L3, L7, L8, L9, L10) 또는 하상이 복잡한 그룹(G2: L1, L3, L4, L7, L8, L9)이 그렇지 않은 그룹(G1: G2가 아닌 지점)보다 낮은 군집 우점도 지수, 높

은 종 다양도와 풍부도, 균등도 지수의 평균값을 가졌다. 하상 범주의 분류에 따른 그룹의 차이는 맨-휘트니 U 검정 결과, 군집 우점도 지수, 종 다양도와 균등도 지수 항목에 대해서 유의했다 (Table 6; $p < 0.05$). 순열 검정 결과, 앞의 검정과 같은 검정 항목에 대해 유의한 결과를 나타냈고, 종 풍부도 지수에 대해서도 두 그룹의 차이가 유의했다 ($p < 0.05$). 한편, 수로 폭 범주의 분류는 두 검정 모두 유의한 결과가 나타나지 않았다.

고 찰

연구 결과, 농수로에서 납자루아과의 어종이 우점종과 아우점종으로 나타난 지점이 6곳이었다. 다수의 농수로 지점에서 담수성 이매패류의 출현이 나타났고 (Table 7), 납자루아과의 서식에는 담수성 이매패류의 존재가 중요하다는 것을 미루어 보아 (Kim *et al.* 2011a; Park and Joo 2015) 농수로가 납자루아과의 서식에 적합한 환경이라고 사료된다. 그리고 농수로에서 멸종위기 야생생물 I급인 임실납자루와 멸종위기 야생생물 II급인 큰줄납자루와 꺾저기 서식이 확인되어, 섬진강과 탐진강 수계의 농수로에서 종 보전을 위한 관리가 필요할 것으로 사료되었다. 한편, 어종에 따라 유영 속도가 다르며, 선호하는 유속이 달라서 (Moon *et al.* 2019), 농수로의 유속은 어류의 분포에 큰 영향을 미칠 것으로 사료된다. Nakata *et al.* (2017)은 농수로 내 *R. atremius suigensis*의 보전을 위해 침수성 수생 식물 군락과 완만한 유속 확보를 제안했다. 또한, Kadowaki *et al.* (2017)는 농수로 내 어류의 번식을 위해 완만한 수역 확보가 필요하다고 분석했다. 따라서 농수로의 어종과 군집 관리를 위해 이러한 요소들이 고려될 필요가 있다고 사료된다.

내성도 및 섭식 특성 분석 결과, 농수로는 대체로 본류보다 민감종 출현이 적었다. 또한, 잡식종의 비율이 비교적 높은 지점이 많았다. 일반적으로 하천에서 유기물 오염이나 서식지 파괴가 일어나면 내성도 길드 분석 결과 민감종의 종 수 및 개체 수가 감소하고, 내성종의 종 수 및 개체 수가 증가한다 (Na *et al.* 2019). 트로픽 길드의 경우 하천의 자연성 및 서식환경이 나빠지면 충식종의 상대 비율이 감소하고 잡식종이 증가하는 것으로 알려져 있다 (Na *et al.* 2019). 이러한 분석 결과는 농수로가 본류보다 교란된 환

경을 갖는 것에 기인한다고 사료되었다. L3을 제외한 모든 농수로는 논과 근접하게 위치하기 때문에 논이 주요한 오염원으로 추측된다. 농수로는 어류의 먹이가 되는 동물성 플랑크톤이 풍부하지만 (Katano *et al.* 2003), 침출된 영양염류와 유기물이 미세조류의 대발생에 원인이 되고 (Nam *et al.* 2013) 수질을 악화시키기 때문에, 수질에 민감한 어종의 분포가 제한된다고 사료된다.

일반적으로 하상 구조의 다양성은 서식처의 복잡성에 영향을 미치며, 복잡한 하상 구조로 조성된 미소 서식지는 어류와 수서곤충을 포함한 하천 생물 다양성에 직접적인 영향을 미치는 것으로 보고된다 (Yoon *et al.* 2014). 따라서 L3, L7, L8의 농수로가 다른 지점보다 안정적인 군집이 나타난 것은 비교적 복잡한 하상 구조를 갖는 점에 기인하는 것으로 사료된다. 반면, 농수로에서 높은 우점도 지수와 낮은 다양도 지수를 나타낸 L6, L10, L5의 결과는 단순한 하상 구조에서 기인하는 것으로 사료된다.

환경적 변수 분석에서는 맨-휘트니 검정과 순열 검정 결과, 복잡한 하상 구조를 갖는 그룹이 비교적 안정적인 군집을 갖는다고 분석되었다. 하상이 발달한 곳은 하상이 발달하지 않은 곳보다 어류의 산란에 적합하며, 납자루아과 등의 번식에서 중요한 담수성 이매패류의 서식에도 적합하다고 생각된다 (Katano *et al.* 2003). 따라서 하상 형태는 농수로의 어류 군집에 의미 있는 영향을 미친다고 추론된다. 그러나 본 연구의 표본 지점은 10개에 불과하며, 본 연구에서 사용한 맨-휘트니 검정과 순열 검정은 한가지 변수에 대해서만 검정하기 때문에, 다른 변수의 영향으로 가정이 위반된다면 신뢰성을 확보하기 어렵다. 동일 수계에서 40개의 표본을 조사한 Katano *et al.* (2003)에 따르면 퇴적물 깊이, 하폭, BOD, 논과의 연결성 등이 종 다양성에 영향을 미친다고 생각된다. 또한, 침수성 수생 식물의 피도 (Cover degree)도 유의한 인자라고 생각된다 (Kadowaki *et al.* 2017; Nakata *et al.* 2017). 따라서 향후 농수로 어류 군집 연구에서 다수의 표본 자료를 수집하고, 다양한 환경적 변수를 동시에 고려하여 분석할 필요가 있다고 사료되었다.

한편, 본 연구는 하천과 연결성이 떨어지는 농수로나 수량이 미미한 곳을 배제하였기 때문에 연구 결과가 국내의 모든 농수로에 적용되기 어렵다. 실제 많은 농수로는 연중 수량이 유지되지 않으며 하천과 연결성이 떨어진 곳이 많은 까닭에 (Katano *et al.* 2003; Jang *et al.* 2009), 다양한 종이

서식하기 적합하지 않다(Katano *et al.* 2003). 향후, 논 생태계의 관리와 보전을 위한 연구와 사업을 위하여, 다양한 지역의 농수로에서 체계적인 생물 군집 조사가 필요할 것으로 사료된다.

적 요

본 연구는 국내 주요 수계 중 만경강, 섬진강, 남해권 수계, 탐진강, 영산강, 동진강과 연결된 농수로 어류의 종 조성과 어류 길드 특성, 군집 특성을 분석하였다. 2017년 9월부터 2018년 8월까지 4회에 걸쳐 현지 조사를 시행한 결과, 어류는 농수로에서 6목 11과 53종 3,633개체가 출현하였고 분류에서 9목 15과 57종 7,108개체가 출현했다. 농수로의 우점종과 아우점종은 칼납자루(*Tanakia koreensis*)와 납자루(*T. lanceolata*)로 나타났으며, 납자루아과의 어종이 우점하는 지점이 10지점 중 6지점으로 나타났다. 이는 담수성 이매패류의 서식에 기인한다고 사료된다. 그리고 환경부 지정 멸종위기 야생생물 I급 임실납자루(*T. somjinensis*)가 섬진강 수계의 농수로에서 출현했고, 멸종위기 야생생물 II급 큰줄납자루(*Acheilognathus majusculus*)와 꺾저기(*Coreoperca kawamebari*)가 각각 섬진강 수계, 섬진강과 탐진강 수계의 농수로에서 출현했다. 지점별로 어류 길드 분석 결과, 대체로 농수로가 분류보다 낮은 민감종의 비율을 나타냈다. 군집 분석 결과 하상 구조가 복잡하게 나타난 지점에서 비교적 안정적인 군집을 보였으며, 환경적 변수에 따른 분석 결과 하상 구조가 복잡한 농수로 그룹이 높은 다양도 지수와 낮은 우점도 지수를 나타냈다. 결과적으로 본 연구는 농수로의 어류 서식 특성을 나타내고, 향후 연구와 관리의 필요성을 제시했다.

사 사

본 연구는 생명다양성재단의 2017 야생동식물 연구 및 학술지원(과제명: “농수로에 서식하는 어류의 다양성 조사”)으로 수행됨. 본 연구 진행에 많은 조언과 도움을 주신 생명다양성재단 관계자분들, 정이준 학생, 최이든 학생과 그 가족 그리고 그 외 여러 선배 연구자분들에게 감사의 말씀을 드립니다.

REFERENCES

- Chae BS, HB Song, JY Park, GH Cho, IS Kim and SJ Cho. 2019. A Field Guide to the Freshwater Fishes of Korea. LG Evergreen Foundation, Seoul.
- Hata K. 2002. Perspectives for fish protection in Japanese paddy field irrigation systems. JARQ-Jpn. Agric. Res. Q. 36:211-218.
- Herzon I and J Helenius. 2008. Agricultural drainage ditches, their biological importance and functioning. Biol. Conserv. 141:1171-1183.
- Hyun JO, HR Na, G Park, JW Kim, HT Im, JM Hwang, YB Jo, HB Song, SC Lee, OS Jeong and HS Oh. 2012. Guidelines for the Fourth Nationwide-Survey of the Nature and Environment of Korea (translated by authors). National Institute of Environmental Research. Incheon, Korea.
- Jang CS. 2019. Species composition of fishes in the inland waters in Gwangyang, Korea. MS. thesis. Chonnam National University. Gwangju, Korea.
- Jang KS, JO Kim, HJ Kim, SH Lee, KJ Ji, JH Jeong, JB Seo and JH Choi. 2009. A Study on the Development of Ecological Infrastructure to Improve Bio-Diversity in Paddy Wetlands. Korea Rural Community Corporation. Suwon, Korea.
- Kadowaki Y, Y Kubota, S Sanuki and K Nakata. 2017. Habitat preference of freshwater fishes inhabiting an agricultural channel with restoration methods during the active and wintering seasons. Transact. Jpn. Soc. Irrig. Drain. Rural Eng. 85:61-70.
- 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.
- Katano O, K Hosoya, K Iguchi, M Yamaguchi, Y Aonuma and S Kitano. 2003. Species diversity and abundance of freshwater fishes in irrigation ditches around rice fields. Environ. Biol. Fishes 66:107-121.
- Kim CH, WO Lee, JH Lee and JM Beak. 2011a. Reproduction study of Korean endemic species *Acheilognathus koreensis*. Korean J. Ichthyol. 23:150-157.
- Kim IS and JY Park. 2005. Freshwater Fishes of Korea. Kyohak Publishing. Seoul.
- Kim JO, HS Shin, JH Yoo, SH Lee, KS Jang and BC Kim. 2011b. Distribution of fish in paddy fields and the effectiveness of fishways as an ecological corridor between paddy fields and streams. Korean J. Limnol. 44:203-213.
- Kondo T, H Yang and SH Choi. 2007. Two new species of unionid mussels (*Bivalvia*: Unionidae) from Korea. VENUS 66:69-73.

- Kwon SJ, YC Jun and JH Park. 2013. Benthic Macroinvertebrates. Nature & Ecology. Seoul.
- Lee JG, JA Lee, SH Kim, JS Mun, DR Kwon, BG Kang, NR Song and SH Kim. 2016. Biomonitoring Survey and Assessment Manual. National Institute of Environmental Research. Incheon, Korea.
- Lee JH, JH Han, Lim BJ, JH Park, JK Shin and KG An. 2013. 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.
- Manly BFJ. 2006. Randomization, Bootstrap and Monte Carlo Methods in Biology. CRC Press. Boca Raton, FL.
- Margalef R. 1958. Information theory in biology. Gen. Syst. 3:36–71.
- Moon WK and KG An. 2007. Environmental characteristics and fish community of small first-order stream. Korean J. Limnol. 40:163–170.
- Moon WK, DY Bae, DH Kim, HB Shin, JB Suh, KH Lim, EH Lee, JS Yoo, KG An and JK Kim. 2019. Assessment of fish fineness ratios passing through a fishway. Korean J. Environ. Biol. 37:726–734.
- Na HH, SJ Lee and KG An. 2019. The influence of chemical water quality on fish trophic guilds, pollution tolerance, and multi-metric ecological health in the main streams of Manyeong river. Korean J. Environ. Biol. 37:8–18.
- Nakata K, Y Miyatake, K Kawai, S Kobayashi, SN Ham, M Saito and AOE Hiroshi. 2017. Habitat preference by the endangered bitterling fish *Rhodeus atremius suigensis* in an agricultural channel in southern Okayama, western Japan. Ecol. Civ. Eng. 19:117.
- Nam DW, SS Cha, CG Choi, JB Lee and HY Lee. 2009. Ichthyofauna and habitat type of the fish in Tamjin river system, Korea. J. Environ. Sci. 18:1001–1010.
- Nam GS, EH Lee, M Kim, YS Pae and HY Eum. 2013. Characteristics of aquatic environment and algal bloom in a small-scaled agricultural reservoir (Jundae reservoir). Korean J. Environ. Biol. 31:429–439.
- Nelson JS, TC Grande and MVH Wilson. 2016. Fishes of the World (5th ed.). John Wiley & Sons. Hoboken, NJ.
- Ohira M, H Tsunoda, K Nishida, Y Mitsuo and Y Senga. 2015. Niche processes and conservation implications of fish community assembly in a rice irrigation system. Aquat. Conserv. -Mar. Freshw. Ecosyst. 25:322–335.
- Park JY and SH Kim. 2010. *Liobagrus somjinensis*, a new species of torrent catfish (Siluriformes: Amblycipitidae) from Korea. Ichthyol. Explor. Freshw. 21:345.
- Park SK and HS Joo. 2015. Fish fauna in the Seomjin river, Korea. Korean J. Environ. Biol. 33:314–329.
- Pielou EC. 1975. Ecological Diversity. John Wiley & Sons. New York.
- Shannon CE. 1948. A mathematical theory of communication. Bell Syst. Tech. J. 27:379–423.
- Simpson EH. 1949. Measurement of diversity. Nature 163:688–688.
- Statistics Korea. 2019. Agricultural land area. Daejeon, Korea. Available at: kostat.go.kr
- Vasil'eva ED, D Kim, VP Vasil'ev, MH Ko and YJ Won. 2016. *Cobitis nalbanti*, a new species of spined loach from South Korea, and redescription of *Cobitis lutheri* (Teleostei: Cobitidae). Zootaxa 4208:577–591.
- Wentworth CK. 1922. A scale of grade and class terms for clastic sediments. J. Geol. 30:377–392.
- Yoon SJ, JK Choi and HG Lee. 2014. Comparison of fish distribution characteristics by substrate structure in the 4 streams1a. Korean J. Environ. Ecol. 28:302–313.

Appendix 1. The fish fauna in the agricultural waterways

| Species name | Tolerance guilds | Trophic guilds | L1 | L2 | L3 | L4 | L5 | L6 | L7 | L8 | L9 | L10 | RA (%) |
|---|------------------|----------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|--------|
| <i>Tanakia koreensis</i> * | IS | O | | | 81 | | | 382 | 1 | | | | 12.8 |
| <i>Tanakia lanceolate</i> | IS | O | 45 | 197 | 42 | | 40 | | 3 | | 103 | | 11.8 |
| <i>Rhodeus uyekii</i> | IS | O | | 38 | 2 | | 253 | | 4 | 4 | 105 | 2 | 11.2 |
| <i>Zacco platypus</i> | IS | O | 23 | 68 | 26 | 42 | 15 | 42 | 9 | 74 | 22 | 3 | 8.9 |
| <i>Rhinogobius brunneus</i> | IS | I | 29 | | 3 | | 185 | | 17 | 14 | 27 | | 7.6 |
| <i>Tanakia somjinensis</i> *† | IS | O | | | 53 | | 172 | | | | | | 6.2 |
| <i>Misgurnus anguillicaudatus</i> | TS | O | 5 | 1 | 2 | 12 | | 5 | 1 | 8 | 135 | 38 | 5.7 |
| <i>Pungtungia herzi</i> | IS | I | 1 | 14 | 34 | 40 | 13 | 24 | 21 | 48 | 10 | | 5.6 |
| <i>Acheilognathus rhombeus</i> | IS | O | 20 | 29 | 6 | | | | 6 | 22 | 27 | | 3.0 |
| <i>Pseudogobio esocinus</i> | IS | I | 13 | 28 | 5 | 3 | 2 | | | 38 | 10 | | 2.7 |
| <i>Zacco temminckii</i> | SS | I | | | 14 | 1 | | 38 | 24 | 22 | | | 2.7 |
| <i>Carassius auratus</i> | TS | O | 4 | 4 | | 5 | | | | 8 | 38 | 16 | 2.1 |
| <i>Hemibarbus longirostris</i> | IS | I | | 4 | 25 | 2 | 2 | | 33 | | 5 | | 2.0 |
| <i>Misgurnus mizolepis</i> | TS | O | 1 | 2 | | | | 5 | | 1 | | 59 | 1.9 |
| <i>Pseudobagrus koreanus</i> * | IS | I | 3 | | 7 | 1 | 19 | | 21 | 12 | | | 1.7 |
| <i>Sarcocheilichthys nigripinnis morii</i> * | IS | I | 3 | 6 | | | | | 3 | 37 | | | 1.3 |
| <i>Zacco koreanus</i> * | SS | I | 1 | | 12 | 22 | | 7 | 2 | | 5 | | 1.3 |
| <i>Cobitis nalbanti</i> | IS | I | 2 | 3 | | | | | 2 | 30 | 4 | | 1.1 |
| <i>Gnathopogon strigatus</i> | IS | I | 3 | 10 | | 1 | | | | 12 | 10 | | 1.0 |
| <i>Sarcocheilichthys variegatus wakiyae</i> * | IS | I | | | 17 | | | | 17 | | | | 0.9 |
| <i>Microphysogobio yaluensis</i> * | IS | O | | | | | 1 | 1 | 22 | | 1 | | 0.7 |
| <i>Odontobutis interrupta</i> * | IS | C | 2 | 8 | 10 | | | | | 5 | | | 0.7 |
| <i>Rhodeus notatus</i> | IS | O | | 23 | | | | | 1 | | | | 0.7 |
| <i>Aphyocypris chinensis</i> | TS | O | | | | 8 | | | | | 13 | 2 | 0.6 |
| <i>Pseudobagrus fulvidraco</i> | TS | I | 2 | 1 | 3 | | | 3 | 1 | 4 | 6 | | 0.6 |
| <i>Hemibarbus labeo</i> | TS | I | 2 | | 13 | | 2 | | | 2 | | | 0.5 |
| <i>Iksookimia longicorpa</i> * | IS | I | | | 10 | 4 | | | | | | | 0.4 |
| <i>Acheilognathus majusculus</i> *† | IS | O | | | 12 | | | | | | | | 0.3 |
| <i>Coreoperca herzi</i> * | SS | C | | | 2 | 6 | | 1 | 2 | | | | 0.3 |
| <i>Lepomis macrochirus</i> ‡ | TS | I | | 1 | | | | | | 10 | | | 0.3 |
| <i>Iksookimia koreensis</i> * | IS | I | 6 | 2 | | | | | 1 | | | | 0.2 |
| <i>Squalidus gracilis majimae</i> * | IS | I | | 7 | | 1 | | | 1 | | | | 0.2 |
| <i>Iksookimia hugovolfeldi</i> * | SS | I | | | | | | | 8 | | | | 0.2 |
| <i>Silurus asotus</i> | TS | C | 1 | 1 | 1 | | | | 1 | 2 | 2 | | 0.2 |
| <i>Acheilognathus chankaensis</i> * | IS | O | 1 | 6 | | | | | | | | | 0.2 |
| <i>Liobagrus somjinensis</i> * | SS | I | | | 3 | | | | 4 | | | | 0.2 |
| <i>Micropterus salmoides</i> ‡ | TS | C | | 4 | | | | | | 3 | | | 0.2 |
| <i>Odontobutis platycephala</i> * | SS | C | | | | 3 | 2 | | | 2 | | | 0.2 |
| <i>Acheilognathus macropterus</i> | IS | O | | | | | 4 | | 2 | | | | 0.2 |
| <i>Cobitis tetralineata</i> * | IS | I | | | 2 | 3 | | 1 | | | | | 0.2 |
| <i>Macropodus ocellatus</i> | TS | I | | | | | | 5 | | 1 | | | 0.2 |
| <i>Acheilognathus yamatsutae</i> * | IS | O | | | | | | | 5 | | | | 0.1 |
| <i>Coreoperca kawamebari</i> † | IS | C | | | | | 2 | | 2 | | | | 0.1 |
| <i>Monopterus albus</i> | TS | C | | | | | | | | 2 | | 2 | 0.1 |
| <i>Pseudorasbora parva</i> | TS | O | | | | | 1 | | | | 1 | 2 | 0.1 |
| <i>Rhynchocypris oxycephalus</i> | SS | I | | | | | | | | | | 4 | 0.1 |
| <i>Coreoleuciscus splendidus</i> * | SS | I | | | | 3 | | | | | | | 0.1 |
| <i>Cyprinus carpio</i> | TS | O | 1 | | | | | | | 2 | | | 0.1 |
| <i>Siniperca scherzeri</i> | IS | C | | | | | | | 3 | | | | 0.1 |
| <i>Squalidus chankaensis tsuchigae</i> * | IS | O | | | | | 3 | | | | | | 0.1 |
| <i>Abbottina springeri</i> * | TS | O | | 1 | | | | | | | 1 | | 0.1 |
| <i>Abbottina rivularis</i> | TS | O | | | | | | | | 1 | | | <0.1 |
| <i>Hemiculter leucisculus</i> | TS | O | | | | | | | | 1 | | | <0.1 |
| Total number of individuals | | | 167 | 459 | 385 | 157 | 716 | 514 | 217 | 365 | 525 | 128 | 3633 |
| Total number of species | | | 20 | 24 | 24 | 17 | 16 | 12 | 28 | 26 | 19 | 9 | 53 |

*: Endemic species; †: Endangered species; ‡: Exotic species

Appendix 2. The fish fauna in the main rivers

| Species name | Tolerance guilds | Trophic guilds | L1 | L2 | L3 | L4 | L5 | L6 | L7 | L8 | L9 | L10 | RA (%) |
|---|------------------|----------------|-----|------|------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|--------|
| <i>Zacco platypus</i> | IS | O | 71 | 1374 | 400 | 5 | 70 | 73 | 40 | 42 | 119 | 22 | 31.2 |
| <i>Tanakia lanceolata</i> | IS | O | | 493 | 32 | | 3 | | 42 | | | 150 | 10.1 |
| <i>Zacco koreanus</i> * | SS | I | 38 | 11 | 263 | 78 | 158 | 23 | 35 | | | 40 | 9.1 |
| <i>Acheilognathus chankaensis</i> * | IS | O | | 78 | 500 | | | | | | | 60 | 9.0 |
| <i>Rhodeus uyekii</i> * | IS | O | | 517 | | | 18 | | 10 | | | 22 | 8.0 |
| <i>Pungtungia herzi</i> | IS | I | 2 | 20 | 64 | 29 | 47 | 61 | 38 | | | 6 | 3.8 |
| <i>Acheilognathus rhombeus</i> | IS | O | | 103 | 70 | | 1 | | 5 | | 1 | 17 | 2.8 |
| <i>Lepomis macrochirus</i> † | TS | I | 52 | | | | 1 | | | 50 | 92 | | 2.7 |
| <i>Tanakia koreensis</i> * | IS | O | | | 46 | | 1 | 15 | 3 | | | 120 | 2.6 |
| <i>Squalidus gracilis majimae</i> * | IS | I | | 118 | 15 | 2 | | 15 | 27 | | | | 2.5 |
| <i>Zacco temminckii</i> | SS | I | | | 10 | | | 83 | 60 | | | | 2.2 |
| <i>Micropterus salmoides</i> † | TS | C | 8 | | 18 | | | | 19 | 12 | 44 | | 1.4 |
| <i>Tanakia somjinensis</i> *† | IS | O | | | 17 | | 83 | | | | | | 1.4 |
| <i>Rhynchocypris oxycephalus</i> | SS | I | | 16 | | | | | | | | 80 | 1.4 |
| <i>Rhodeus notatus</i> | IS | O | | 74 | | | 4 | | 7 | | | | 1.2 |
| <i>Rhinogobius brunneus</i> | IS | I | 12 | 11 | | | 5 | 11 | 8 | 6 | 3 | | 0.8 |
| <i>Coreoleuciscus splendidus</i> * | SS | I | 32 | | 6 | 15 | 1 | 1 | | | | | 0.8 |
| <i>Iksookimia koreensis</i> * | IS | I | 16 | 30 | | | | | | | | 6 | 0.7 |
| <i>Sarcocheilichthys variegatus wakiyae</i> * | IS | I | | | 13 | | 17 | | 20 | | | | 0.7 |
| <i>Hemibarbus labeo</i> | TS | I | 5 | | 19 | | | | | | 16 | | 0.6 |
| <i>Coreoperca herzi</i> * | SS | C | 6 | | 7 | 15 | 1 | 5 | 3 | | | | 0.5 |
| <i>Carassius auratus</i> | TS | O | | 19 | 5 | | 2 | 3 | | | 1 | 5 | 0.5 |
| <i>Squalidus chankaensis tsuchigae</i> * | IS | O | | | 14 | | 2 | | 3 | 15 | 1 | | 0.5 |
| <i>Acheilognathus majusculus</i> *† | IS | O | | | 25 | | 7 | | | | | | 0.5 |
| <i>Hemibarbus longirostris</i> | IS | I | | 8 | 6 | | | | 15 | | | 1 | 0.4 |
| <i>Cobitis nalbanti</i> | IS | I | | 16 | | | | | 9 | 1 | | 3 | 0.4 |
| <i>Gnathopogon strigatus</i> | IS | I | 2 | 20 | | | | | | 2 | 5 | | 0.4 |
| <i>Microphysogobio yaluensis</i> * | IS | O | | 15 | 9 | | | 4 | 1 | | | | 0.4 |
| <i>Pseudobagrus koreanus</i> * | IS | I | 4 | 5 | | 2 | 1 | | 9 | | 3 | 5 | 0.4 |
| <i>Pseudogobio esocinus</i> | IS | I | | 14 | 4 | | | 6 | 1 | | | 2 | 0.4 |
| <i>Iksookimia longicorpa</i> * | IS | I | | | 3 | 15 | | 1 | | | | 5 | 0.3 |
| <i>Odontobutis interrupta</i> * | IS | C | | 23 | | | | | 1 | | | | 0.3 |
| <i>Coreoperca kawamebari</i> † | IS | C | | | | | | 16 | 5 | | | | 0.3 |
| <i>Odontobutis platycephala</i> * | SS | C | 1 | | 5 | 4 | 5 | 1 | 2 | 1 | | 2 | 0.3 |
| <i>Macropodus ocellatus</i> | TS | I | | 13 | | | 4 | | | | | | 0.2 |
| <i>Pseudorasbora parva</i> | TS | O | | 7 | 4 | | 1 | 2 | | | | 1 | 0.2 |
| <i>Opsarichthys uncirostris amurensis</i> | TS | C | | 5 | | | | | | | 7 | | 0.2 |
| <i>Channa argus</i> | TS | C | | | 10 | | | | | | | | 0.1 |
| <i>Cobitis tetralineata</i> * | IS | I | | | 3 | 1 | 5 | | | | | | 0.1 |
| <i>Iksookimia hugowolfeldi</i> * | SS | I | | | | | | | 6 | | | | 0.1 |
| <i>Liobagrus somjinensis</i> * | SS | I | | | | 3 | | 1 | 1 | | | | 0.1 |
| <i>Acheilognathus macropterus</i> | IS | O | | | | | | 4 | | | | | 0.1 |
| <i>Oryzias sinensis</i> | TS | O | | 4 | | | | | | | | | 0.1 |
| <i>Silurus asotus</i> | TS | C | | 4 | | | | | | | | | 0.1 |
| <i>Liobagrus obesus</i> *† | SS | I | | | | | | | | 3 | | | <0.1 |
| <i>Plecoglossus altivelis</i> | IS | H | | | 1 | | 2 | | | | | | <0.1 |
| <i>Rhodeus ocellatus</i> | IS | O | | | | | | | | | | 3 | <0.1 |
| <i>Sarcocheilichthys nigripinnis morii</i> * | IS | I | | 3 | | | | | | | | | <0.1 |
| <i>Lethenteron reissneri</i> † | SS | O | | | | 2 | | | | | | | <0.1 |
| <i>Siniperca scherzeri</i> | IS | C | | | | | 2 | | | | | | <0.1 |
| <i>Squalidus japonicus coreanus</i> * | TS | O | | | | | | | | | 2 | | <0.1 |
| <i>Abbottina springeri</i> * | TS | O | | 1 | | | | | | | | | <0.1 |
| <i>Acheilognathus yamatsutae</i> * | IS | O | | | | | | | 1 | | | | <0.1 |
| <i>Anguilla japonica</i> | IS | C | | | | | | | | 1 | | | <0.1 |
| <i>Cyprinus carpio</i> | TS | O | | | | | | | | | | 1 | <0.1 |
| <i>Misgurnus mizolepis</i> | TS | O | | | | | | | | | | 1 | <0.1 |
| <i>Pseudobagrus fulvidraco</i> | TS | I | | 1 | | | | | | | | | <0.1 |
| Total number of individuals | | | 249 | 3003 | 1569 | 171 | 320 | 446 | 371 | 133 | 294 | 552 | 7108 |
| Total number of species | | | 13 | 28 | 27 | 12 | 19 | 23 | 26 | 10 | 12 | 21 | 57 |

*: Endemic species; †: Endangered species; ‡: Exotic species