

Original article

외래어류가 우리나라 하천생태계 어류 군집에 미치는 영향: 떡붕어(*Carassius cuvieri*), 배스(*Micropterus salmoides*), 블루길(*Lepomis macrochirus*)을 대상으로

이대성 · 이다영 · 지창우¹ · 곽인실¹ · 황순진² · 이혜진³ · 박영석*

경희대학교 생물학과, ¹전남대학교 수산과학연구소, ²건국대학교 환경보건과학과,
³국립환경과학원 물환경공학연구과

Impacts of Introduced Fishes (*Carassius cuvieri*, *Micropterus salmoides*, *Lepomis macrochirus*) on Stream Fish Communities in South Korea. Dae-Seong Lee (0000-0001-7288-0156), Da-Yeong Lee (0000-0002-2457-2041), Chang Woo Ji¹ (0000-0001-6133-9399), Ihn-Sil Kwak¹ (0000-0002-1010-3965), Soon-Jin Hwang² (0000-0001-7083-5036), Hae-Jin Lee³ (0000-0002-0380-7024) and Young-Seuk Park* (0000-0001-7025-8945) (Department of Biology, Kyung Hee University, Seoul 02447, Republic of Korea; ¹Fisheries Science Institute, Chonnam National University, Yeosu 59626, Republic of Korea; ²Department of Environmental Health Science, Konkuk University, Seoul 05029, Republic of Korea; ³Water Environmental Engineering Research Division, National Institute of Environmental Research, Incheon 22689, Republic of Korea)

Abstract Three introduced fish species, Japanese white crucian carp (*Carassius cuvieri* Temminck and Schlegel, 1846), bass (*Micropterus salmoides* Lacepède, 1802) and bluegill (*Lepomis macrochirus* Rafinesque, 1819), are dominant fishes in Korean freshwater ecosystem. In this study, we analyzed habitat environment conditions of these three species and their impacts to fish communities in streams across South Korea. Fish community data were obtained from the database of the Stream/River Ecosystem Survey and Health Assessment program maintained by the Ministry of Environment and the National Institute of Environmental Research, Korea. Our results showed that species richness and Shannon diversity of fish were higher at the presence sites of introduced fish than at the absence sites. However, when the abundance of these introduced fish species was increased, the species richness and abundance of fish were decreased. An association analysis showed that the introduced fish species had a low similarity in their appearance with some indigenous fishes such as *Siniperca scherzeri* and *Channa argus* and some endemic fishes of Korea such as *Zacco koreanus*, *Sarcocheilichthys variegatus wakiyae*, and *Acheilognathus yamatsutae*. In addition, the introduced fish species had a low appearance similarity with a large number of fishes in their association networks. Finally, our results presented that these introduced fish species influenced the negative impacts to the stream fish communities, and they were potential risk factors for fish community in Korean freshwater ecosystem. Therefore, it is necessary that continuous monitoring and establishment of management strategy for introduced fish species to preserve fish resource and biodiversity in the Korean streams.

Manuscript received 29 August 2020, revised 23 September 2020,
revision accepted 25 September 2020

* Corresponding author: Tel: +82-2-961-0946, Fax: +82-2-961-0244
E-mail: parkys@khu.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.

Key words: introduced fish, impact of invasive species, stream ecosystem, fish community, association analysis, fish network

서 론

외래종의 유입은 세계화 시대의 국가 간 교역 증가, 기후변화로 인한 생물 분포의 변화로 인해 많은 국가에서 빈번하게 나타나는 현상이다(Meyerson and Mooney, 2007; Francis and Chadwick, 2012; Bellard *et al.*, 2013). 자연적으로 혹은 인위적으로 발생한 외래종의 유입은 유입 지역 생태계의 예기치 못한 변화를 일으킨다. 특히 하천생태계에서 외래종의 유입으로 인한 생태계 교란이 자주, 그리고 크게 발생한다(Sala *et al.*, 2000; Strayer, 2010). 외래종의 유입은 하천생태계 내 생물의 다양성과 군집 구성을 변화시키고, 하천 서식지 환경의 변화, 하천 기능의 변화 등을 유발한다(Cambray, 2003; Latini and Petrere Jr, 2004; Dextrase and Mandrak, 2006; Francis and Chadwick, 2012; Kim *et al.*, 2019).

하천생태계에 유입되는 다양한 외래종 중 어류는 상위 영양단계에 있으면서 다른 생물군에 비해 하천생태계에 막대한 변화를 야기한다(Orians, 1995; Simon and Townsend, 2003; Strayer, 2010). 외래어류는 포식과 경쟁적 치환 과정을 통해 하천 내 어류 및 저서 생물의 개체수를 감소시키고, 행동의 변화를 유발한다(McDowall, 2003). 미국 오대호 내 멸종위기종의 46%가 유입된 외래어류(잉어; Asian carp)의 영향을 받았으며(USFWS, 2012), 호주 하천생태계 내 심각한 위협에 처한 토착어류종 중 2/3가 외래종과 결정적인 연관이 있는 것으로 추정되었다(Jackson *et al.*, 1993; Australian Society for Fish Biology, 2001).

우리나라에서도 외래종의 유입은 빈번히 발생한다. 국립생태원이 운영하는 한국 외래생물 정보시스템에 따르면, 2020년 기준 국내 전체 외래종은 총 2,162종으로 이 중 어류가 885종(40.9%)을 차지한다(NIE, 2020). 우리나라 하천에서 서식하는 주요 외래어류로는 잉어과(Cyprinidae) 떡붕어(*Carassius cuvieri*)와 검정우럭과(Centrachidae) 배스(*Micropterus salmoides*)와 블루길(*Lepomis macrochirus*) 등이 있다(NIER, 2007; NIE, 2014; Yoon *et al.*, 2018). 이들은 모두 국내 담수 양식 자원 조성을 위해 인위적으로 도입한 것으로, 떡붕어는 1970년대 초반 일본으로부터, 배스는 1973년 미국으로부터, 블루길은 1969년 일본으로부터 도입되었다(ME, 2006; NFRDI, 2009). 국내 도입 이후, 댐호와 저수지를 중심으로 서식하

며 연결된 하천을 통해 확산되었다. 또한 하천에서 이루어지는 어획의 낚시 대상어종(game fish)으로 각광받으면서 레저어획(recreational fishing)을 위해 전국 담수역으로 인위적 확산이 발생하였다(NIER, 2007; NFRDI, 2009; NIE, 2018).

우리나라 하천생태계에 서식하는 담수어류는 총 213종이 기록되어 있으며, 환경부에서 수행한 조사에선 28과 130종의 담수어류가 관찰되었다(NIBR, 2011; Yoon *et al.*, 2018). 국내 유입된 외래어류는 대부분 하천 내 포식자이거나 서식 환경 범위가 넓어 국내 서식하는 담수어류에 피해가 우려되며, 이미 일부 종에서는 외래어류에 의한 생태계 교란으로 인해 피해가 발생하고 있다. 2011년 환경부 조사에서 배스는 안동호, 주남저수지에서, 블루길은 파로호에서 급격한 개체수의 증가가 나타났고(NIER, 2011), 국내 하천에서 배스에 의한 붕어 개체군의 교란이 발생하였다는 연구 결과가 보고되었다(Lee *et al.*, 2013). 배스와 블루길은 1998년 생태계 교란생물로 지정되어 환경부에 의한 지속적인 모니터링이 수행되어 오고 있다(NIE, 2014).

많은 연구에서 외래어류에 의한 하천생태계 내 영향이 보고되고 있다(Latini and Petrere Jr, 2004; Strayer, 2010). 다만 아직까지 이와 관련된 대부분의 연구가 외래어류의 단순 증가 또는 단일 어류 개체군에 대한 외래어류 영향 평가 위주로 수행되어, 외래어류가 어류 군집 수준에 미치는 영향에 대한 연구는 부족한 실정이다. 특히 우리나라에서는 외래어류가 하천생태계 어류 군집에 미치는 영향에 대한 연구가 미미하다. 따라서 본 연구에서는 우리나라 하천 내 주요 외래어류 3종(떡붕어, 배스, 블루길)에 대해 국내 분포 특성과 우리나라 하천생태계 내 어류 군집에 미치는 영향을 분석하였다.

재료 및 방법

우리나라 하천 내 어류 군집 자료와 서식지 환경 자료를 수집하고, 어류 군집에 대한 외래어류 3종(떡붕어(*Carassius cuvieri* Temminck and Schlegel, 1846), 배스(*Micropterus salmoides* Lacepède, 1802), 블루길(*Lepomis macrochirus* Rafinesque, 1819))의 영향을 분석하였다.

1. 생물 및 환경 자료 수집

본 연구에서는 국립환경과학원(환경부) 주관으로 수행된 ‘하천 수생태계 현황조사 및 건강성 평가 조사’ 사업을 통해 구축된 자료 중 어류 자료(2009년~2016년)를 활용하였다(NIER, 2020). 해당 자료는 한강, 낙동강, 금강, 섬진강, 영산강 수계 및 제주도 내 전체 1,159지점에서 투망(망목 7×7 mm)과 족대(망목 5×5 mm)를 사용해 채집 후 개체수를 기록한 것이다(NIER, 2019). 어류 자료뿐만 아니라 해당 조사 지역의 하천 내 물 흐름 양상(여울, 흐름, 소) 비율, 하천의 물리적 환경(평균 수폭, 평균 수심, 평균 유속), 이화학적 수질특성(용존산소량, pH, 전기전도도, 탁도, 생화학적 산소요구량, 총 질소, 총 인) 등을 수집하였다(NIER, 2019). 또한 지리정보시스템(ArcGIS 10.1, ESRI)을 이용하여 각 지점의 고도 및 하천 차수를 산출하였다. 고도는 국토지리정보원(<https://www.ngii.go.kr/>)에서 제공하는 수치 표고 모형을 사용하여 추출하였고, 하천차수는 국가수자원관리 종합정보시스템(<http://www.wamis.go.kr/>)에서 제공하는 하천차수도를 이용하였다.

수집한 환경자료는 총 4개 항목 15개 변수(하천 흐름 양상 비율(3개), 하천의 물리적 환경 자료(3개), 하천의 지리적 요소(2개), 이화학적 수질 자료(7개))이며, 이를 각 조사 지점의 서식지 환경 변수로 사용하였다. 연도별 생물 군집 및 환경 자료는 각 조사지점에 대한 평균을 계산한 후 분석에 사용하였다.

2. 분석 절차 및 방법

1) 서식 환경 분석

먼저 수집한 어류 군집 자료에서 연구 대상 외래어류 3종의 출현 지점을 확인하고, 각 종의 서식 환경 특성을 분석하였다. 각 종의 지점별 풍부도를 이용한 가중 평균 방법(weighted averaging method)을 사용하여(Ter Braak and Barendregt 1986) 각 환경 변수에 대한 각 종의 최적값 및 내성 범위를 추정하였다. 다음으로 가중 평균 방법에 따라 산출된 각 종의 서식지의 고도와 하천차수를 기준으로, 전체 조사 지점 중 각 종별 서식 가능 지점을 선택하였다. 하천차수의 경우, 떡붕어 3~7차, 배스 및 블루길 4~8차, 고도의 경우 떡붕어 60 m 이하, 배스 및 블루길 75 m 이하인 지점을 선택하였으며, 선택된 지점을 해당 외래어류가 출현한 지점(presence site)과 출현하지 않은 지점(비출현; absence site)으로 구분하였다.

2) 어류 군집 분석

외래어류 출현 지점과 비출현 지점 간 차이를 확인하

기 위해, 각 외래어류 종별 출현 및 비출현 지점 간 출현 어류의 종수와 개체수, 어류 군집 종다양도 지수(자연 로그를 이용한 Shannon 다양도 지수)를 비교하였다. 그리고 어류 군집에 대한 외래어류의 직접적인 영향을 파악하고자, 각 외래어류 출현 지점의 출현 어류 종수와 개체수, 종다양도 지수와 각 외래어류의 출현 개체수 사이 선형 회귀 및 상관 분석을 수행하였다. 또한 출현 어류종을 섭식 성향에 따라 초식종(herbivores)과 충식종(insectivore), 잡식종(omnivores), 육식종(carnivores)의 섭식무리(feeding guilds)로 구분하고, 출현 지점 및 비출현 지점 내 각 섭식무리의 출현 비율을 비교하였다. 통계 검정 방법으로는 비모수 통계 검정법인 Mann-Whitney U 검정을, 상관 분석은 스피어만 순위 상관계수(Spearman rank correlation coefficient)를 이용하였다.

3) 연관성 분석 및 유사도 지수 계산

외래어류의 출현 지점과 비출현 지점 간 어류 군집 구성의 차이를 확인하기 위해, 외래어류 3종의 종별 출현 및 비출현 지점 내 어류 군집 자료를 이용하여 연관성 분석(association analysis)을 수행하고 유사도 지수(similarity index)를 계산하였다. 연관성 분석은 어떤 대상(개체 혹은 집단)이 반복적으로 보이는 자료에서 일정한 규칙성을 찾는 방법으로(Agrawal *et al.*, 1993; Borgelt and Kruse, 2002), 규칙성을 통해 특정 대상 이후 나타날 다음 대상을 추론할 수 있다. 본 연구에서는 각 조사 지점의 어류 군집에서 출현한 어류 간 연관 규칙(association rule)을 찾기 위해, 선형적 알고리즘(apriori algorithm)을 이용하여 연관성 분석을 진행하였다(Agrawal *et al.*, 1993). 연관성 분석을 통해 찾은 다수의 연관 규칙 중 일정 지지도(support)와 신뢰도(confidence) 이상의 규칙만을 선택하여 사용하였다(Borgelt and Kruse, 2002). 연관 규칙 내 지지도와 신뢰도는 다음의 방식을 통해 계산하였다(Agrawal and Srikant, 1994). 군집 내 임의의 두 어류 중 A와 B의 지지도는 A와 B가 동시에 포함된 지점 수를 전체 지점 수로 나누어 구하였고($P(A \cap B)$), 종 A에 대한 신뢰도는 종 A가 나타난 지점 중 종 B가 나타난 지점의 비율로 계산하였다($P(B|A)$). 본 연구에서는 연관 규칙이 가지는 최소 지지도는 0.10, 최소 신뢰도는 0.95로 설정하여 규칙을 선택하였다(Agrawal *et al.*, 1993).

어류 간 연관 규칙을 선택한 이후, 연관 규칙을 구성하는 두 어류 종에 대해 Bray-Curtis 거리를 계산하여 유사도 지수를 산출하였다. Bray-Curtis 거리는 생태학 분야에서 널리 사용되는 방법 중 하나로 지점 간 출현 개체수 및 종수를 고려하여 유사도를 정량화하는 방법이다(Bray and

Curtis, 1957). 본 연구에서는 어류에 대하여 출현한 지점 및 지점 내 개체수를 이용하여 Bray-Curtis 거리를 계산하였고, Bray-Curtis 거리는 비유사도 지수이기 때문에 유사도 지수로 변환하여 사용하였다(유사도 = 1 - 비유사도).

이후, 연관성 분석 결과 및 유사도 지수를 이용하여 어류 군집 내 생물 연결망을 구성하였다. 연결망을 구성하는 정점(node; vertex)과 연결선(link; edge)은 연관 규칙을 형성하는 어류 종 간 관계를 반영한다. 연결선의 굵기(width)는 각 어류 종 간 유사도 지수 값에 비례하며, 정점의 크기(size)는 해당 지점 내 평균 개체수에 비례한다. 연결망 내 어류 간 연결 관계(연관 규칙)는 연결망의 인접 행렬(adjacency matrix)을 통해 분석하였다. 또한 연결망을 구성하는 연관 규칙에서 대상 외래어류 종이 포함된 규칙을 추출한 후, 유사도 지수를 기준으로 정리하여, 연결망 내 대상 외래어류와 다른 어류 종 간 출현 유사성을 확인하였다.

4) 분석 통계 프로그램

본 연구에서 자료의 비교 및 분석은 R 프로그램을 이용하여 수행하였다(R Core Team, 2020). 가중 평균 방법을 이용한 최적값 및 내성범위는 R 프로그램 내 analogue 패키지(Simpson and Oksanen, 2020)를, 비모수 통계 검정 및 선형 회귀, 스피어만 상관 분석은 stats 패키지(R Core Team, 2020)를 사용하였다. 연관성 분석은 arules 패키지(Hahsler *et al.*, 2013), 유사도 지수 계산은 vegan 패키지

(Oksanen *et al.*, 2019)를 이용하였다. 연결망과 인접 행렬은 igraph 패키지(Csardi and Nepusz, 2006)와 corrplot 패키지(Wei and Simko, 2017)를 이용하여 구성 및 시각화하였다.

결 과

1. 외래어류 3종의 서식 환경 특성

2009년부터 2016년까지 조사된 자료에서 기록된 외래어류 3종(떡붕어, 배스, 블루길)의 국내 분포 지역은 Fig. 1과 같다. 전국적으로 떡붕어는 145개 지점에서, 배스는 481개 지점, 블루길은 278개 지점에서 출현하였다.

각 외래어류의 하천 내 서식 환경에 대한 최적값 및 내성(서식)범위는 Fig. 2와 같다. 하천 내 흐름 양상 중 여울의 비율이 떡붕어는 8.6% (0.0~26.1%), 배스는 10.8% (0.0~28.8%), 블루길은 8.7% (0.0~24.9%)였으며, 흐름 비율은 떡붕어는 78.9% (45.8~100.0%), 배스는 59.2% (19.7~98.6%), 블루길은 60.4% (20.1~100.0%)였다. 또한 소비율이 떡붕어는 12.5% (0.0~43.1%), 배스는 30.0% (0.0~70.8%), 블루길은 30.9% (0.0~72.2%)였다(Fig. 2a-c). 서식지의 하천차수는 떡붕어가 3~7차수, 배스와 블루길이 4~8차수 범위이며, 고도에서 떡붕어(0~57.6 m)는 배스(7.5~71.8 m)와 블루길(7.5~70.8 m)보다 낮은 곳

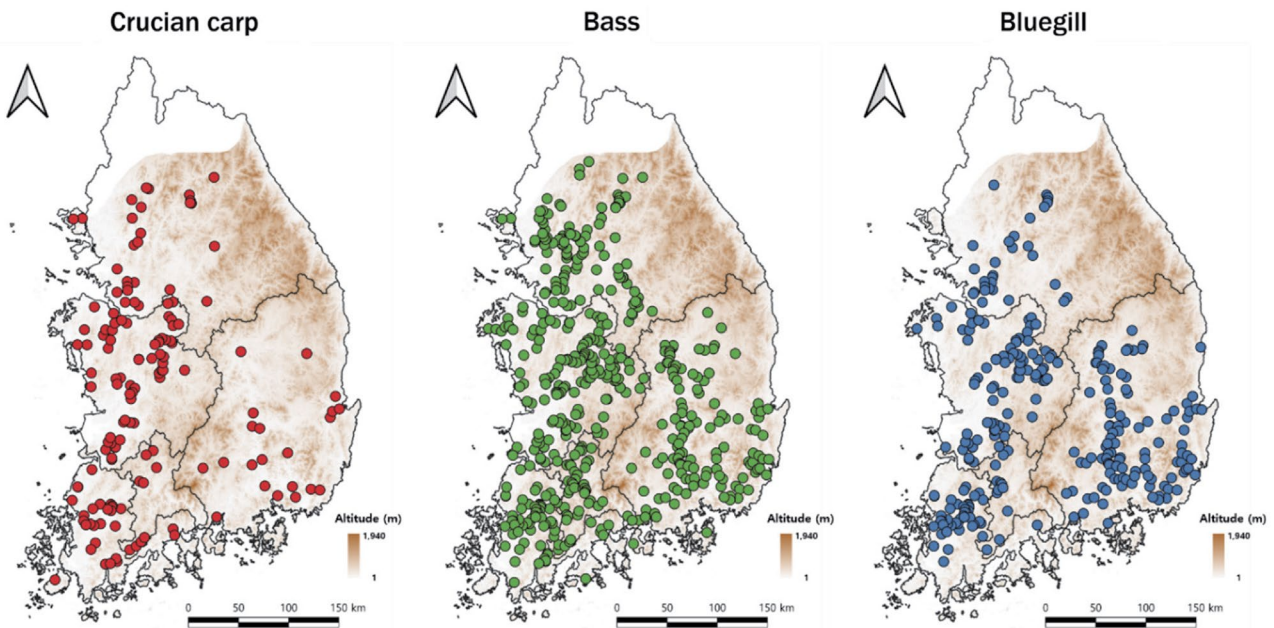


Fig. 1. Distribution of three introduced fish species in the South Korea streams surveyed from 2009~2016. Crucian carp means Japanese white crucian carp (*Carassius cuvieri*), Bass is *Micropterus salmoides*, Bluegill is *Lepomis macrochirus*.

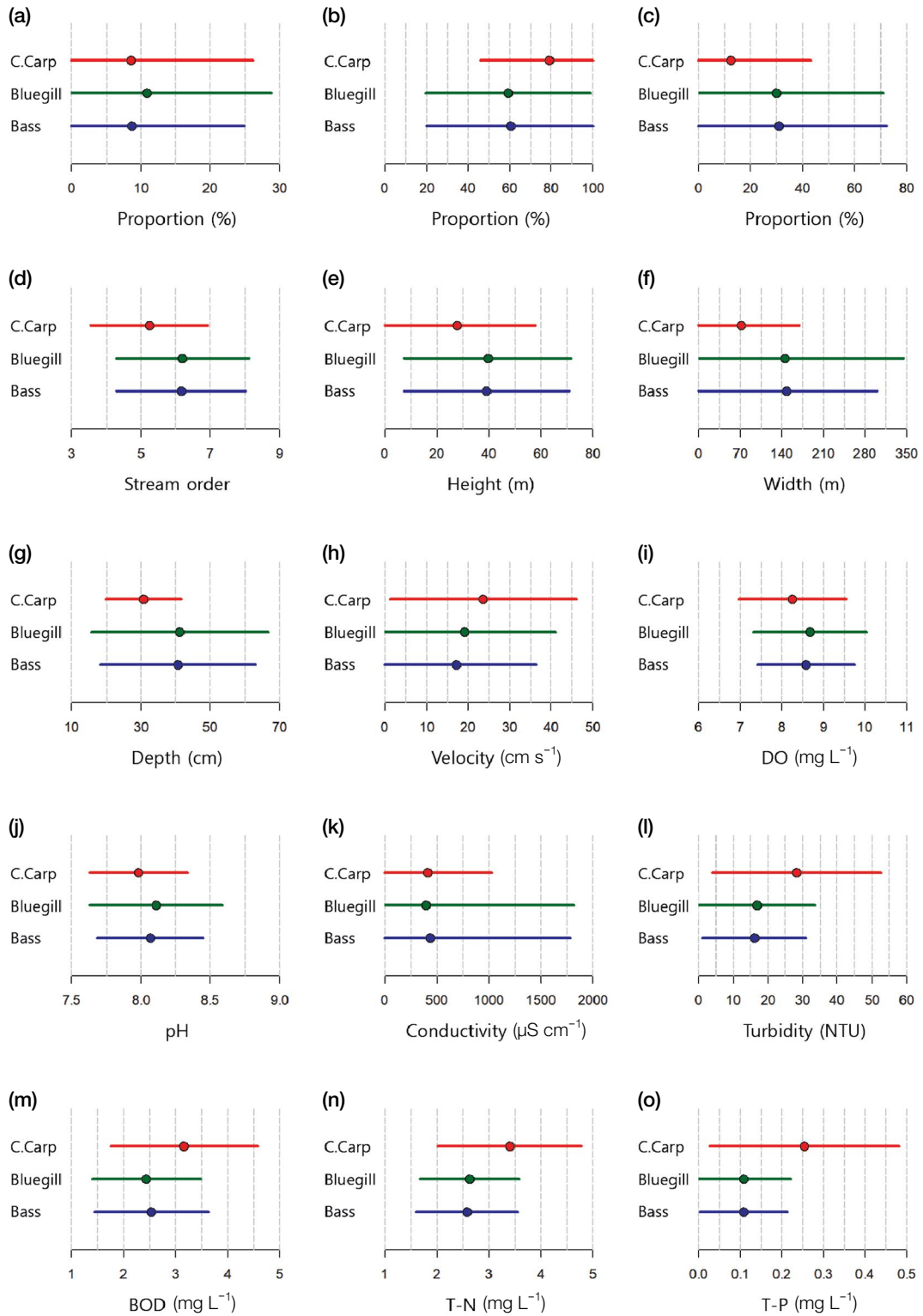


Fig. 2. Habitable conditions of three introduced fish species. C.Carp means *C. cuvieri*, Bass is *M. salmoides*, and Bluegill is *L. macrochirus*. Points indicate optimum values, and lines present tolerance range. (a-c) Proportion of stream flow types, (d, e) geographical factors, (f-h) physical factors, and (i-o) water quality factors. (a) Proportion of riffle, (b) proportion of run, (c) proportion of pool, (d) stream order, (e) altitude, (f) average stream width, (g) average stream depth, (h) average current velocity, (i) dissolved oxygen (DO), (j) pH, (k) electric conductivity, (l) turbidity, (m) biochemical oxygen demand (BOD), (n) total nitrogen (T-N), and (o) total phosphorus (T-P).

에 위치하였다(Fig. 2d, e). 하천의 물리적 요소 중 평균 유수속은 떡붕어가 71.2 m (0.0~169.4 m)로 가장 적었으며, 배스와 블루길은 각각 144.6 m (0.0~344.2 m)와 147.5 m (0.0~301.1 m)였다. 반면 평균 유속은 떡붕어가 23.5 cm s⁻¹ (1.1~45.9 cm s⁻¹)로, 배스 19.2 cm s⁻¹ (0.0~40.9 cm s⁻¹)와 블루길 17.2 cm s⁻¹ (0.0~36.2 cm s⁻¹)보다 높게 나타났다(Fig. 2f-h). 한편, 외래어류 3종의 서식지 내 이화학적 수질범위는 다음과 같다(Fig. 2i-o). 3종의 서식지 모두 용존산소량은 7.0~10.0 mg L⁻¹, pH는 7.6~8.6의 범위로 나타났다. 전기전도도의 범위는 배스(0.0~1814.7 μS cm⁻¹)와 블루길(0.0~1778.6 μS cm⁻¹)이 떡붕어(0~1023.0 μS cm⁻¹)보다 더 넓었고, 이와 반대로 탁도와 생화학적 산소요구량, 총 질소, 총 인에서는 떡붕어의 서식지가 배스와 블루길보다 더 큰 최적값과 넓은 서식범위를 보였다.

2. 외래어류 3종의 출현 지점과 비출현 지점 간 어류 군집 차이

하천차수와 고도를 기준으로 구분한 각 외래어류 종의 서식 가능 지점을 해당 외래어류의 출현 지점과 비출현 지점으로 구분하여 비교하였다(Fig. 3). 각 외래어류의 출현 지점과 비출현 지점 간 출현 어류 종수는 통계적으로 유의한 차이를 보이며(Mann-Whitney U 검정, 떡붕어 및 배스: $p < 0.001$, 블루길: $p < 0.01$), 평균적으로 출현 지점에서 더 많이 나타났다(Fig. 3a). 외래어류의 출현 지점과 비출현 지점 간 출현 어류의 개체수 또한 통계적으로 유의한 차이를 보이나(떡붕어 및 배스: $p < 0.05$, 블루길: $p < 0.001$), 외래어류 출현 지점의 어류 전체 개체수가 비출현 지점보다 적었다(Fig. 3b). 어류 군집의 종다양도 지수는 외래어류 3종 모두 출현 지점과 비출현 지점 사이 유의한 차이를 보

이며($p < 0.001$), 평균적으로 각 외래어류의 출현 지점에서 더 높게 나타났다(Fig. 3c).

각 외래어류의 출현 지점에서 지점별 어류 출현 종수와 어류 개체수는 각 외래어류의 개체수가 증가할 때 감소하는 양상을 보이며, 종다양도 지수는 배스를 제외하고 떡붕어와 블루길에서 각 외래어류의 개체수가 증가할 때 감소하였다(Fig. 4). 또한 이 중 어류 출현 종수는 떡붕어와 블루길 개체수와, 출현 어류 개체수는 배스와 블루길 개체수와 유의한 음의 상관관계를 보였다($p < 0.05$, $r < 0$).

각 외래어류 종의 출현 지점과 비출현 지점 간 섭식무리의 비율 차이는 Fig. 5와 같다. 떡붕어와 배스, 블루길의 출현 지점 및 비출현 지점 모두 잡식성의 비율이 가장 높았고, 다음으로 충식종, 육식종 순이었다. 떡붕어의 출현 지점과 비출현 지점은 섭식무리 중 초식종을 제외한 나머지 섭식무리 비율에서 통계적으로 유의한 차이를 보였다(초식종: $p \geq 0.05$, 충식종, 잡식종 및 육식종: $p < 0.001$). 배스는 초식종을 제외한 나머지 섭식무리 비율에서 출현 지점과 비출현 지점 간 통계적으로 유의한 차이가 나타났다(초식종: $p \geq 0.05$, 충식종, 잡식종 및 육식종: $p < 0.001$). 블루길의 출현 지점과 비출현 지점은 잡식종을 제외한 나머지 섭식무리 비율에서 통계적으로 유의한 차이를 보였다(초식종, 충식종, 육식종: $p < 0.001$, 잡식종: $p \geq 0.05$).

3. 외래어류 3종의 출현 지점과 비출현 지점 간 생물 연결망 차이

각 종별 출현 지점과 비출현 지점의 어류 군집에 대해 연관성 분석 및 유사도 지수 산출 결과를 통해 어류 군집 내 어류 간 관계를 나타내는 연결망을 구성하였다(Fig. 6, Table 2). 떡붕어 출현 지점은 54종의 어류와 214개의 연관

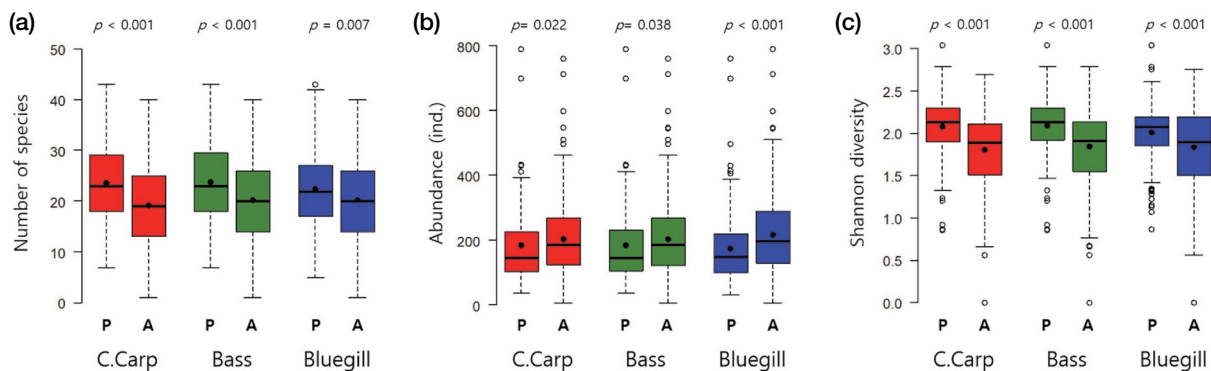


Fig. 3. Differences of fish community indices between presence (P) and absence (A) of each introduced fish species. (a) species richness (number of species) in each site, (b) abundance, and (c) Shannon diversity index. C.Carp means *C. cuvieri*, Bass is *M. salmoides*, Bluegill is *L. macrochirus*. Horizontal line in box means median, and point in box shows average. p -value was calculated using Mann-Whitney U test.

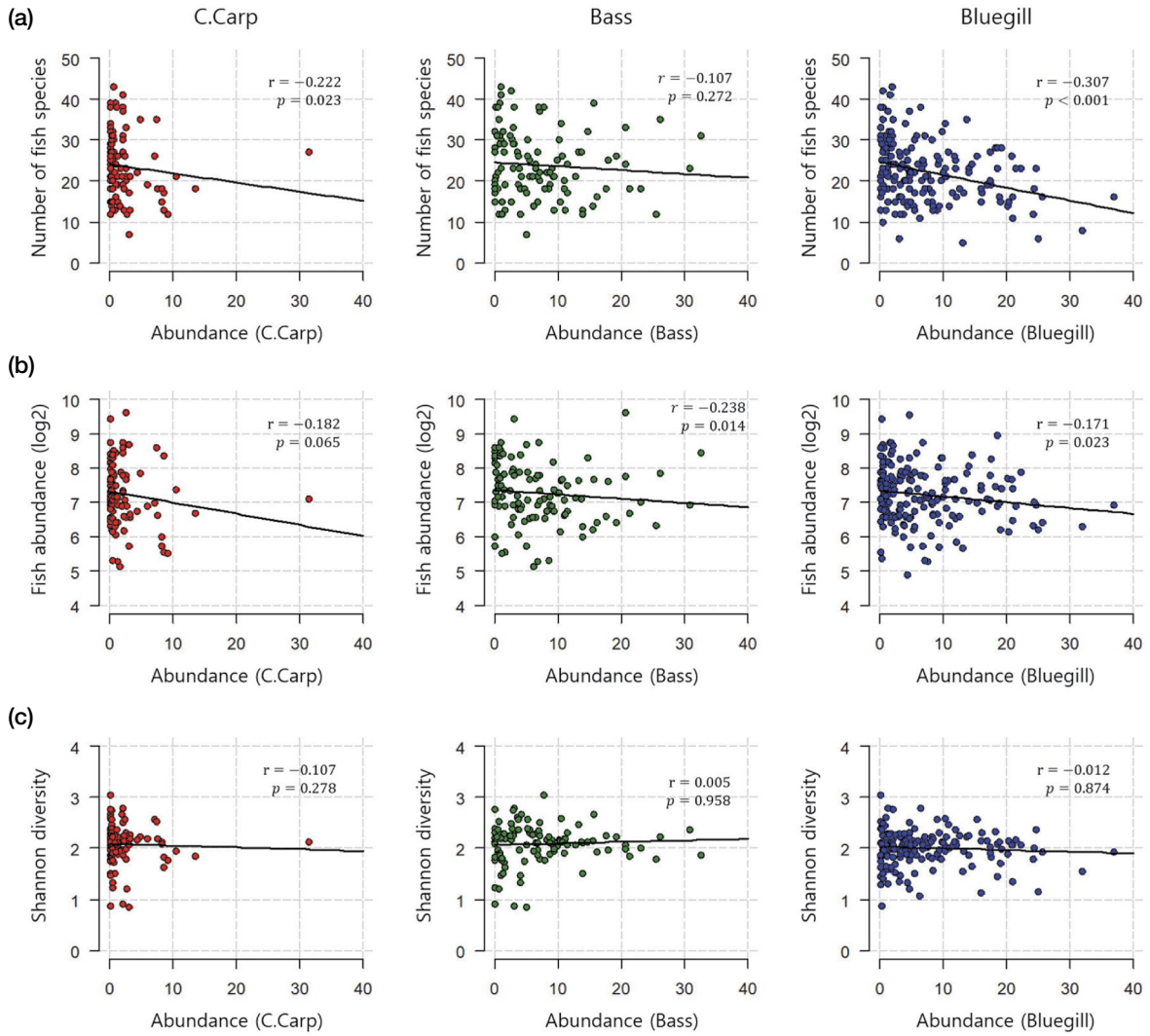


Fig. 4. Changes of community indices against to the abundance of three introduced fish species. (a) number of fish species, (b) whole fish abundance, and (c) Shannon diversity index. C.Carp means *C. cuvieri*, Bass is *M. salmoides*, Bluegill is *L. macrochirus*. *r* and *p* mean result of spearman rank correlation analysis (coefficient and *p*-value).

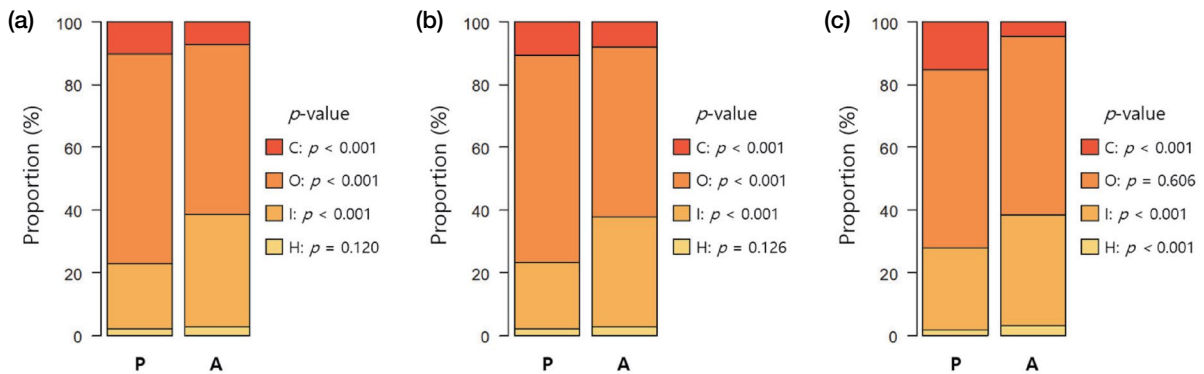


Fig. 5. Difference of feeding guild groups in fish community between presence (P) and absence (A) of each introduced species. (a) Japanese white crucian carp (*C. cuvieri*), (b) bass (*M. salmoides*), (c) bluegill (*L. macrochirus*). C: carnivore, O: omnivore, I: insectivore, and H: herbivore. *p*-value was calculated using Mann-Whitney U test.

Table 1. List of fish species used in the fish network analysis.

No.	Scientific name	Acronym*	No.	Scientific name	Acronym	No.	Scientific name	Acronym
1	<i>Abbottina rivularis</i>	O1	24	<i>Iksookimia koreensis</i>	I8	47	<i>Pseudobagrus koreanus</i>	I17
2	<i>Abbottina springeri</i>	O2	25	<i>Iksookimia longicorpa</i>	I9	48	<i>Pseudogobio esocinus</i>	I18
3	<i>Acanthorhodeus chankaensis</i>	O3	26	<i>Koreocobitis rotundicaudata</i>	O14	49	<i>Pseudorasbora parva</i>	O20
4	<i>Acheilognathus koreensis</i>	O4	27	<i>Leiocassis usuriensis</i>	I10	50	<i>Pungtungia herzi</i>	I19
5	<i>Acheilognathus lanceolata intermedia</i>	O5	28	<i>Lepomis macrochirus</i>	I11	51	<i>Rhinogobius brunneus</i>	I20
6	<i>Acheilognathus macropterus</i>	O6	29	<i>Liobagrus andersoni</i>	I12	52	<i>Rhinogobius giurinus</i>	O21
7	<i>Acheilognathus rhombeus</i>	O7	30	<i>Liobagrus mediadiposalis</i>	I13	53	<i>Rhodeus notatus</i>	O22
8	<i>Acheilognathus yamatsutae</i>	O8	31	<i>Microphysogobio longidorsoalis</i>	H1	54	<i>Rhodeus ocellatus</i>	O23
9	<i>Aphyocypris chinensis</i>	O9	32	<i>Microphysogobio yaluensis</i>	O15	55	<i>Rhodeus uyekii</i>	O24
10	<i>Carassius auratus</i>	O10	33	<i>Micropterus salmoides</i>	C4	56	<i>Rhynchocypris oxycephalus</i>	I21
11	<i>Carassius cuvieri</i>	O11	34	<i>Misgurnus anguillicaudatus</i>	O16	57	<i>Sarcocheilichthys nigripinnis morii</i>	I22
12	<i>Channa argus</i>	C1	35	<i>Misgurnus mizolepis</i>	O17	58	<i>Sarcocheilichthys variegatus wakiyae</i>	I23
13	<i>Cobitis hankuensis</i>	I1	36	<i>Monopterus albus</i>	C5	59	<i>Silurus asotus</i>	C9
14	<i>Cobitis nalbanti</i>	I2	37	<i>Mugil cephalus</i>	H2	60	<i>Siniperca scherzeri</i>	C10
15	<i>Coreoleuciscus splendidus</i>	I3	38	<i>Odontobutis interrupta</i>	C6	61	<i>Squalidus chankaensis tsuchigae</i>	O25
16	<i>Coreoperca herzi</i>	C2	39	<i>Odontobutis platycephala</i>	C7	62	<i>Squalidus gracilis majimae</i>	I24
17	<i>Cyprinus carpio</i>	O12	40	<i>Opsarichthys uncirostris amurensis</i>	C8	63	<i>Squalidus japonicus coreanus</i>	O26
18	<i>Erythroculter erythropterus</i>	C3	41	<i>Orthrias nudus</i>	I14	64	<i>Squaliobarbus curriculus</i>	O27
19	<i>Gnathopogon strigatus</i>	I4	42	<i>Orthrias toni</i>	I15	65	<i>Tridentiger brevispinis</i>	I25
20	<i>Hemibarbus labeo</i>	I5	43	<i>Oryzias latipes</i>	O18	66	<i>Zacco koreanus</i>	I26
21	<i>Hemibarbus longirostris</i>	I6	44	<i>Oryzias sinensis</i>	O19	67	<i>Zacco platypus</i>	O28
22	<i>Hemiculter eigenmanni</i>	O13	45	<i>Plecoglossus altivelis</i>	H3	68	<i>Zacco temminckii</i>	I27
23	<i>Hypomesus nipponensis</i>	I7	46	<i>Pseudobagrus fulvidraco</i>	I16			

*C: carnivore, O: omnivore, I: insectivore, and H: herbivore

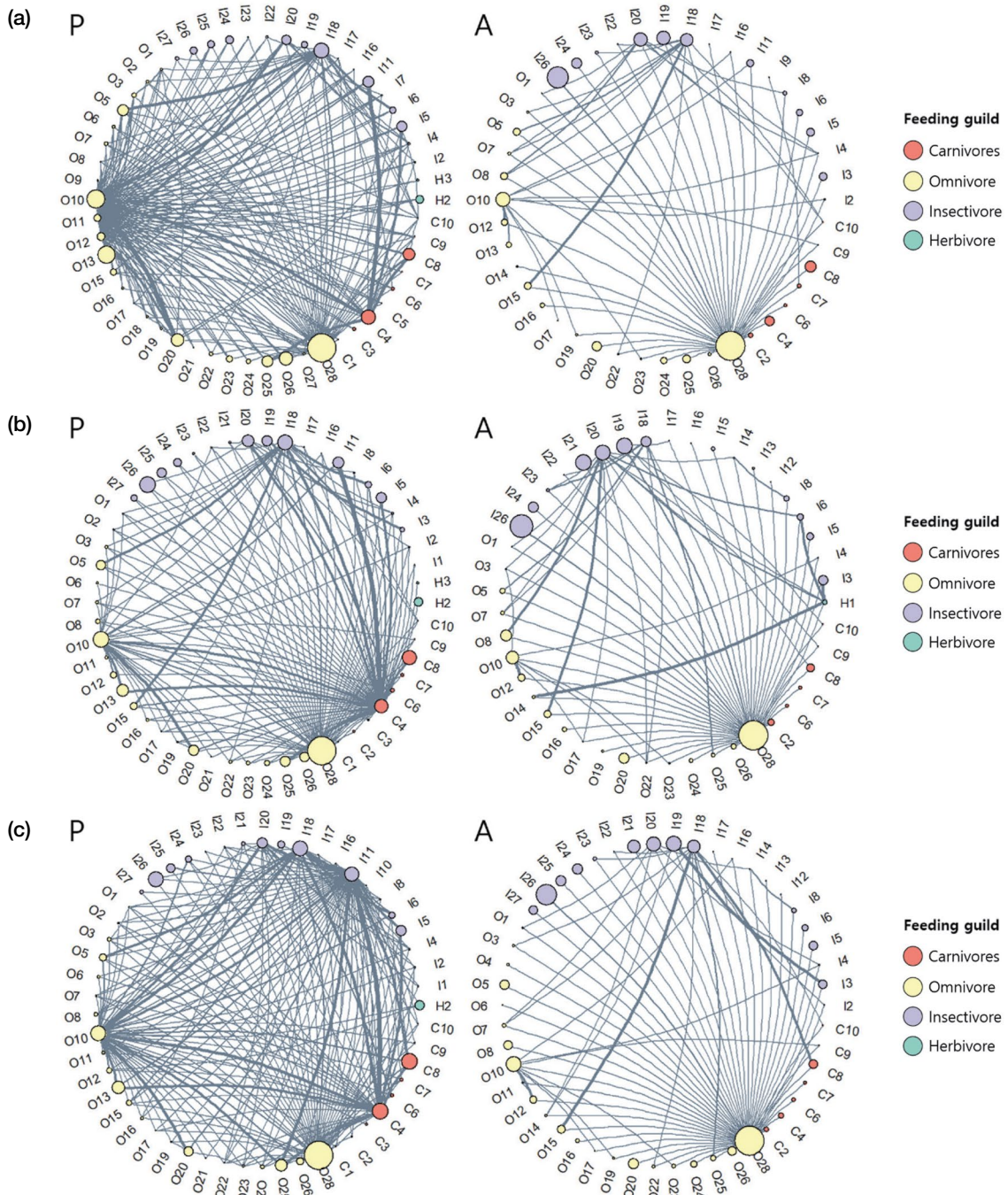


Fig. 6. Fish network in presence (P) and absence (A) sites for introduced fish species. (a) Japanese white crucian carp (*C. cuvieri*), (b) bass (*M. salmoides*), and (c) bluegill (*L. macrochirus*). Nodes in the networks present fish species and links appear association between species. Node size is proportionate to average abundance of species, and link width is proportionate to similarity index between species. Expression of node name is shown in Table 1 (Japanese white crucian carp: O11, Bass: C4, Bluegill: I11).

규칙으로, 떡붕어 비출현 지점은 44종의 어류와 66개의 연관규칙으로 연결망이 구성되었다. 또한 배스 출현 지점의 연결망은 54종의 어류와 144개의 연관 규칙으로, 비출현 지점의 연결망은 45종의 어류와 76개의 연관 규칙으로 구

성되었다. 블루길의 연결망의 경우, 출현 지점은 53종의 어류와 194개의 연관 규칙으로, 비출현 지점은 50종의 어류와 76개의 연관 규칙으로 구성되었다.

떡붕어(O11)의 출현 지점과 비출현 지점 내 생물 연결망

Table 2. Species showing high and low similarity with each introduced fish species.

Similarity	Crucian carp (<i>C. cuvieri</i>)	Bass (<i>M. salmoides</i>)	Bluegill (<i>L. macrochirus</i>)
High	<i>Acanthorhodeus chankaensis</i> (0.282)	<i>Lepomis macrochirus</i> (0.608)	<i>Micropterus salmoides</i> (0.680)
	<i>Micropterus salmoides</i> (0.280)	<i>Squalidus chankaensis tsuchigae</i> (0.422)	<i>Squalidus chankaensis tsuchigae</i> (0.409)
	<i>Cyprinus carpio</i> (0.274)	<i>Pseudogobio esocinus</i> (0.411)	<i>Pseudogobio esocinus</i> (0.402)
	<i>Pseudorasbora parva</i> (0.273)	<i>Carassius auratus</i> (0.386)	<i>Carassius auratus</i> (0.399)
	<i>Lepomis macrochirus</i> (0.228)	<i>Opsariichthys uncirostris amurensis</i> (0.371)	<i>Opsariichthys uncirostris amurensis</i> (0.359)
Low	<i>Monopterus albus</i> (0.019)	<i>Channa argus</i> (0.007)	<i>Leiocassis ussuriensis</i> (0.007)
	<i>Zacco koreanus</i> (0.026)	<i>Siniperca scherzeri</i> (0.013)	<i>Channa argus</i> (0.008)
	<i>Sarcocheilichthys variegatus wakiyae</i> (0.027)	<i>Silurus asotus</i> (0.026)	<i>Siniperca scherzeri</i> (0.013)
	<i>Siniperca scherzeri</i> (0.029)	<i>Rhinogobius giurinus</i> (0.027)	<i>Sarcocheilichthys variegatus wakiyae</i> (0.026)
	<i>Squaliobarbus curriculus</i> (0.033)	<i>Pseudobagrus fulvidraco</i> (0.028)	<i>Pseudobagrus fulvidraco</i> (0.027)

The numbers in the parenthesis are similarity between introduced species and selected species. Crucian carp means Japanese white crucian carp.

에서는 공통적으로 모래무지 (*Pseudogobio esocinus*; I18)와 붕어 (*Carassius auratus*; O10), 피라미 (*Zacco platypus*; O28), 끄리 (*Opsariichthys uncirostris amurensis*; C8)의 개체수가 많이 출현하였다. 떡붕어 출현 지점에서는 치리 (*Hemiculter eigenmanni*; O13)와 참붕어 (*Pseudorasbora parva*; O20), 참물개 (*Squalidus chankaensis tsuchigae*; O25), 물개 (*Squalidus japonicus coreanus*; O26) 등이, 비출현 지점에서는 참갈겨니 (*Zacco koreanus*; I26)와 밀어 (*Rhinogobius brunneus*; I20) 등이 많이 나타났다 (Fig. 6a). 베스(C4)의 출현 지점과 비출현 지점 모두 연결망 내 모래무지 (I18)와 밀어 (I20), 참갈겨니 (I26), 붕어 (O10), 피라미 (O28)의 개체수가 풍부하였다. 또한 베스 출현 지점은 블루길 (I11)과 치리 (O13), 끄리 (C8) 등이, 비출현 지점에서는 돌고기 (*Pungtungia herzi*; I19)와 줄납자루 (*Acheilognathus yamatsutae*; O8) 등의 개체수가 많이 나타났다 (Fig. 6b). 블루길 (I11)의 출현 지점과 비출현 지점에서는 모래무지 (I18)와 참갈겨니 (I26), 붕어 (O10), 피라미 (O28)의 개체수가 많이 나타났고, 블루길의 출현 지점은 치리 (O13)와 참물개 (O25), 베스 (C4), 끄리 (C8) 등이, 비출현 지점은 돌고기 (I19)와 버들치 (*Rhynchocypris oxycephalus*; I21) 등이 연결망 내 다수의 개체수를 보였다 (Fig. 6c). 외래어류의 출현 지점과 비출현 지점에서 공통적으로 출현하는 고유어종의 평균 개체수 차이를 계산한 결과, 떡붕어는 고유어종 14종 중 8종에서, 베스는 16종 중 9종이, 블루길은 15종 중 11종이 외래어류 출현 지점에 비해 비출현 지점에서 출현 개체수가 더 많이 나타났다.

각 외래어류와 연결망을 형성하는 다른 어류 종과의 유사도 지수를 계산한 결과 (Table 2), 떡붕어는 가시납자리 (*Acanthorhodeus chankaensis*; 유사도 지수: 0.282)와 출현 유사도가 가장 높았고, 다음으로 베스 (0.280), 참붕어

(0.273), 블루길 (0.228)과 높았고 참갈겨니 (0.026), 참중고기 (*Sarcocheilichthys variegatus wakiyae*; 0.027), 쏘가리 (*Siniperca scherzeri*; 0.029)와는 유사도가 매우 낮았다. 또한 떡붕어 출현 지점에서 떡붕어와 출현 유사도가 낮은 (유사도 지수 0.1 이하) 연결망 내 어류 종수는 총 20종이었다. 베스는 블루길 (0.608)과 참물개 (0.422), 모래무지 (0.411), 붕어 (0.386) 등과 유사한 출현 양상을 보였고, 가물치 (*Channa argus*; 0.007)와 쏘가리 (0.013), 메기 (*Silurus asotus*; 0.026) 등과는 낮은 출현 유사성을 보였다. 베스와 연결망을 형성하는 어류 중 유사도 지수가 0.1 이하인 종은 총 26종이었다. 블루길은 베스 (0.680)와 참물개 (0.409), 붕어 (0.399) 등과 높은 출현 유사도를, 가물치 (0.008)와 쏘가리 (0.013), 참중고기 (0.026) 등과는 낮은 유사도를 보였다. 블루길 출현 지점의 연결망을 구성하는 어류 중 총 27종이 블루길과 출현 유사성이 낮게 나타났다.

고찰

본 연구는 우리나라 하천에서 주요 외래어류 3종 (떡붕어, 베스, 블루길)의 국내 서식 환경과 출현 지점의 어류 군집의 특징을 확인하고, 외래어류 3종이 하천 내 어류 군집에 미치는 영향을 분석하였다.

1. 외래어류 서식 환경 및 출현 지점 특징

본 연구의 연구 대상인 외래어류 3종은 모두 국내 유입된 지 50여 년 가까이 지나 하천 내 각 종의 분포가 고착화된 상태이며, 본 연구에서는 다년간의 모니터링 자료를 평균하여 사용하였다. 따라서 본 연구는 각 외래어류의 국내 서식 및 출현 지점을 평가할 수 있었다.

떡붕어는 하천 내 흐름역이 많고, 영양염류가 풍부한 중상류 하천에 주로 분포하였다. 반면, 배스와 블루길은 하천 내 소의 비율과 용존산소, 전기전도도가 높은 중하류 하천에서 주로 분포하였다(Fig. 2). 떡붕어는 배스와 블루길보다 수질 오염에 대한 더 강한 내성을 보였다. 또한 동일한 하천차수와 고도 조건을 가진 조사 지점에서, 외래어류 3종의 출현 지점은 비출현 지점에 비해 어류의 종수가 풍부하고, 종다양도 지수가 높게 나타났고, 이는 통계적으로 유의하였다. 다만 출현 어류의 개체수는 비출현 지점에 비해 적었다(Fig. 3).

비록 본 연구에서 사용한 자료로는 본 연구의 분석 결과와 각 외래어류 출현 간 인과 관계를 명확히 규명할 수는 없으나, 외래어류의 서식 특성과 외래어류에 의한 토착어류의 영향 등을 보고한 기존 연구 결과를 참고하면(Gratwicke and Marshall, 2001; Yonekura *et al.*, 2004; KEI, 2007; Hermoso *et al.*, 2011), 외래어류가 출현한 지점에서 출현 어류 종수가 많고 종다양도가 높은 것은 외래어류에 의한 긍정적인 영향이 아닌, 출현 어류가 다양하고 종다양도가 높은 지역에서 각 외래어류가 서식하고 있는 것으로 이해된다. 각 외래어류 출현 지점에서 비출현 지점에 비해 적은 평균 출현 어류 개체수는 외래어류에 의한 긍정적인 영향으로 볼 수 없기에 이러한 해석을 뒷받침한다. 출현 어류가 많고 종다양도 지수가 높다는 것은 해당 지역은 먹이원 및 하천 환경 등이 어류 서식에 적합한 환경임을 의미하며, 이는 외래어류에게도 마찬가지일 것이다.

본 연구에서는 각 외래어류의 출현 지점과 비출현 지점에서 출현하는 어류 군집에 대해 생물 연결망을 구성하여 군집 내 각 어류 종 간 연관성 및 출현 유사성을 나타냈다. 각 외래종의 출현 및 비출현 지점에서 어류 군집 내 연결망은 출현 지점이 비출현 지점에 비해 더 많은 연관 규칙을 가져, 다양한 어류 간 상호작용을 보였다(Fig. 6). 이는 앞서 이야기한 바와 같이 다양한 어류가 서식하는 곳에 외래어류가 서식하고 있음을 의미한다. 잡식종인 떡붕어 출현 지점의 연결망에서 잡식종의 수는 26종이고, 비출현 지점의 연결망에서는 20종이었다. 또한 육식종인 배스의 출현 지점에서 연결망 내 육식종은 9종, 비출현 지점에서는 6종으로 나타나, 각 외래어류의 출현 지점은 해당 외래어류의 섭식무리에 해당하는 종의 수가 많이 나타났다. 이는 외래어류가 출현한 출현 지점이 부재 지점에 비해 해당 섭식무리의 어류종이 살기 적합한 지역임을 보여준다.

2. 어류 군집에 대한 외래어류의 영향

각 외래어류의 출현 지점에서 외래어류의 개체수가 증

가할 때 출현 어류의 종수와 개체수는 뚜렷이 감소하며, 떡붕어와 블루길의 개체수는 어류 출현 종수와, 배스와 블루길 개체수는 출현 어류 개체수와 유의한 음의 상관관계를 보였다(Fig. 4). 따라서 하천 내 외래어류의 개체수가 증가한다면 외래어류 출현 지점에서 서식하는 출현 어류 종수와 개체수는 감소할 것으로 예상된다.

국내에서 생태계 교란생물로 지정된 배스와 블루길의 경우, 많은 연구에서 해당 외래어류에 의한 국내 토착어종의 감소를 경고한 바 있으며, 이미 이로 인한 하천 내 어류에 대한 교란 및 피해사례가 보고되고 있다(Jang *et al.*, 2006; KEI, 2007; Ko *et al.*, 2008; Lee *et al.*, 2013). 또한 각 외래어류는 출현 어류의 섭식무리 비율에도 영향을 미쳤다. 외래어류 3종의 출현 지점은 비출현 지점에 비해 평균적으로 더 낮은 초식종과 충식종의 비율, 높은 잡식종과 육식종의 비율을 보였다(Fig. 5). 초식종과 잡식종의 비율은 외래어류 3종 모두에서 공통적으로 유의미한 통계적 차이를 보였으며, 이러한 어류 섭식무리의 비율 차이는 외래어류의 식성 및 토착어종과의 경쟁으로 인한 영향으로 추정된다(McDowall, 2003; Jang *et al.*, 2006; ME, 2006).

각 외래어류 출현 지점의 생물 연결망에서는 우리나라 고유어종 중 각시붕어(*Rhodeus uyekii*)와 긴물개(*Squalidus gracilis majimae*), 돌마자(*Microphysogobio yaluensis*), 몰개, 참갈겨니, 참몰개, 치리 등이 많이 서식하였다. 또한 각 외래어류 비출현 지점의 연결망에서는 출현 지점에 비해 긴물개, 꺾지(*Coreoperca herzi*), 쉬리(*Coreoleuciscus splendidus*), 줄납자루, 참갈겨니, 참종개(*Iksookimia koreensis*), 참중고기 등 다수의 고유어종에서 더 많은 출현 개체수를 보였다. 고유어종의 개체수 차이는 고유어종의 서식지 분포 등이 영향을 미칠 수 있으나 본 연구에서는 고유어종 출현 지점 간 평균 개체수를 계산하여 사용하였다. 따라서 이러한 비교 결과는 각 외래어류 출현이 고유어종에 미치는 영향으로 간주할 수 있다. 구성된 연결망에서 두 종 간 낮은 출현 유사성은 두 종 사이의 피식과 포식관계 또는 생태적 지위에 따른 경쟁관계를 의미한다. 외래어류의 개체수가 증가하게 되면 연결망 내 외래어류와 출현 유사성이 낮은 어류는 출현 유무 또는 개체군 크기에 부정적인 영향을 받게 될 것이다. 따라서 이를 통해 외래어류에 의한 잠재적 피해 어류와 그로 인한 어류 군집의 변화를 유추할 수 있다. 또한 3종의 외래어류는 출현 지점의 연결망을 구성하는 다수의 어류들과 낮은 출현 유사성을 보여(떡붕어 37.0%, 배스 48.1%, 블루길 50.9%), 잠재적으로 외래어류에 의한 어류 군집 내 피해(교란)가 크게 나타날 수 있음을 시사하였다.

고유어종 중 기름종개(*Cobitis hankugensis*)와 왜매치

(*Abbottina springeri*) 등은 각 외래어류의 출현 지점에서만 생물 연결망을 구성하며, 각 외래어류와 출현 유사도가 매우 낮았다. 따라서 이들 어종은 외래어류와 서식지를 공유하면서도 앞으로 외래어류에 의한 피해를 직접적으로 받을 잠재적 피해 고유어종으로 예상된다. 그리고 고유어종 중 새코미꾸리(*Koreocobitis rotundicaudata*), 자가사리(*Liobagrus mediadiposalis*), 통가리(*Liobagrus andersoni*) 등은 각 외래어류 비출현 지점의 생물 연결망에서만 출현하였는데, 본 연구 결과만으로는 해당 고유어종이 외래어류에 의해 영향을 받았는지 또는 지리적 분포 차이로 이와 같이 나왔는지 판단할 수 없다. 따라서 추후 외래어류가 해당 어류에 영향을 미치는지 확인할 필요가 있다.

우리나라는 이미 육상생태계와 수생태계에 많은 외래종이 유입되어 막대한 생태학적, 경제적 피해가 발생하고 있다(ME, 2006; Lee *et al.*, 2019; Lee and Park, 2019). 이에 환경부는 외래생물 관리 강화 및 확산 방지를 위한 ‘제2차 외래생물 관리계획’을 수립하여 대응해오고 있다(ME, 2019). 본 연구의 결과, 국내 하천생태계 내 유입된 지 50년 가까이 지난 외래어류 3종은 여전히 하천 내 어류 군집과 국내 고유어종에 부정적인 영향을 미치며, 잠재적으로 많은 어류 종에 영향을 미칠 것으로 확인되었다. 따라서 하천생태계 내 외래종 관리 방안 마련 시, 신규 유입주의 생물에 대한 관리뿐만 아니라 기존 하천 내 외래어류에 대한 지속적인 모니터링과 관리가 요구된다. 그리고 기존 연구 및 본 연구의 결과에서 밝힌 것과 같이, 각 외래어류는 각기 다른 서식지 적합 환경을 가지고 있기에(Kim *et al.*, 2013; Yoon *et al.*, 2018), 외래어류 종별 또는 서식 환경별 맞춤형 관리 방안 마련이 필요하다.

본 연구에서는 어류 군집에 대한 외래어류의 영향뿐만 아니라 연결망을 통해 외래어류 3종의 잠재적 피해 어류 종을 파악하였다. 차후 본 연구에서 다른 외래어류뿐만 아니라 다양한 외래어류 및 하천생태계 내 다양한 생물분류군에 대한 통합적 연구가 수행된다면, 하천생태계 전반에 대한 외래어류의 영향 평가를 통해 고유어종 보존과 내수면 어류 자원 관리 등에 대한 구체적인 생물 자원 보존 및 관리 방안 마련이 가능할 것으로 생각된다.

적 요

본 연구는 우리나라 하천 내 주요 외래어류 종인 떡붕어(*Carassius cuvieri*), 배스(*Micropterus salmoides*), 블루길(*Lepomis macrochirus*)에 대한 국내 서식 환경을 확인하고, 어류 군집에 대한 영향을 분석하였다. 해당 외래어류종

은 모두 어류 종수가 많고 종다양성이 높은 곳에 주로 서식하였다. 각 외래어류의 개체수가 증가할 때, 전체 어류의 출현 종수 및 개체수는 감소하여 어류 군집에 부정적인 영향을 보여주었다. 또한 생물 연결망을 구성한 결과, 하천 내 떡붕어는 쏘가리와 우리나라 고유종인 참갈겨니, 참중고기 등과, 배스와 블루길은 가물치 및 쏘가리와 고유종인 참중고기와 줄납자루 등과 낮은 출현 유사성을 보였다. 그리고 외래어류 3종 모두 각각의 연결망을 구성하는 다수의 어류들과 낮은 출현 유사성을 보여, 잠재적으로 외래어류에 의한 어류 군집 내 피해 및 교란이 크게 나타날 것으로 예상되었다. 본 연구의 결과, 국내 하천생태계 내 유입된 지 50년 가까이 지난 외래어류 3종은 여전히 하천 내 어류 군집과 국내 고유어종에 부정적인 영향을 미치고 있었다. 따라서 하천 내 외래어류에 대한 지속적인 모니터링과 관리가 요구된다. 차후 다양한 외래어류 및 하천생태계 내 생물분류군에 대한 통합적 연구가 수행된다면, 하천생태계 전반에 대한 외래어류의 영향 평가 및 구체적인 생물 자원 관리 방안 마련이 가능할 것이다.

저자정보 이대성(경희대학교 대학원 박사과정), 이다영(경희대학교 대학원 박사과정), 지창우(전남대학교 박사 후 연구원), 광인실(전남대학교 교수), 황순진(건국대학교 교수), 이혜진(국립환경과학원 연구사), 박영석(경희대학교 교수)

저자기여도 연구설계: 박영석, 광인실, 자료 수집 및 관리: 이다영, 이대성, 황순진, 이혜진, 자료분석: 이대성, 지창우, 원고작성: 이대성, 박영석, 과제관리: 황순진, 이혜진, 원고 수정 및 검토: 모든 저자

이해관계 본 연구는 이해관계의 충돌 여지가 없습니다.

연구비 본 연구는 한국연구재단 연구과제(NRF-2016R1A2B4011801, NRF-2018R1A6A1A03024314 & NRF-2019R1A2C1087099)와 국립환경과학원 연구과제(NIER-2019-04-02-050)의 지원을 받아 수행되었습니다.

REFERENCES

- Agarwal, R. and R. Srikant. 1994. Fast algorithms for mining association rules. pp. 487-499 in: Proc. of the 20th VLDB Conference.
- Agrawal, R., T. Imieliński and A. Swami. 1993. Mining association rules between sets of items in large databases. pp. 207-216 in: Proceedings of the 1993 ACM SIGMOD international conference on Management of data.
- Australian Society for Fish Biology. 2001. Threatened species

- supplement. *Australian Society for Fish Biology Newsletter* **31**: 37-41.
- Bellard, C., W. Thuiller, B. Leroy, P. Genovesi, M. Bakkenes and F. Courchamp. 2013. Will climate change promote future invasions? *Global Change Biology* **19**: 3740-3748.
- Borgelt, C. and R. Kruse. 2002. Induction of association rules: Apriori implementation. pp. 395-400 in: *Compstat*. Springer.
- Bray, J.R. and J.T. Curtis. 1957. An ordination of the upland forest communities of southern Wisconsin. *Ecological monographs* **27**: 326-349.
- Cambray, J.A. 2003. Impact on indigenous species biodiversity caused by the globalisation of alien recreational freshwater fisheries. *Hydrobiologia* **500**: 217-230.
- Csardi, G. and T. Nepusz. 2006. The igraph software package for complex network research. *InterJournal, Complex Systems* **1695**: 1-9.
- Dextrase, A.J. and N.E. Mandrak. 2006. Impacts of alien invasive species on freshwater fauna at risk in Canada. *Biological Invasions* **8**: 13-24.
- Francis, R.A. and M.A. Chadwick. 2012. Invasive alien species in freshwater ecosystems: a brief overview. pp. 23-41 A handbook of global freshwater invasive species. Routledge.
- Gratwicke, B. and B. Marshall. 2001. The relationship between the exotic predators *Micropterus salmoides* and *Serranochromis robustus* and native stream fishes in Zimbabwe. *Journal of Fish Biology* **58**: 68-75.
- Hahsler, M., C. Buchta, B. Gruen, K. Hornik, I. Johnson, C. Borgelt and M.M. Hahsler. 2013. arules: Mining Association Rules and Frequent Itemsets (R package version 1.6-6.).
- Hermoso, V., M. Clavero, F. Blanco-Garrido and J. Prenda. 2011. Invasive species and habitat degradation in Iberian streams: an analysis of their role in freshwater fish diversity loss. *Ecological Applications* **21**: 175-188.
- Jackson, P.D., J.D. Koehn and R. Wager. 1993. Appendix 1: Australia's threatened fishes 1992 listing - Australian Society for Fish Biology. pp. 213-227 Sustainable Fisheries through Sustaining Fish Habitats (Ed. D.A. Hancock). Australian Society for Fish Biology Workshop Proceedings Victor Harbour, SA, 12-13 August (Bureau of Resource Sciences, AGPS, Canberra).
- Jang, M.H., G.J. Joo and M. Lucas. 2006. Diet of introduced largemouth bass in Korean rivers and potential interactions with native fishes. *Ecology of Freshwater Fish* **15**: 315-320.
- Kim, H.-M., J.-H. Kil, E.-H. Lee and K.-G. An. 2013. Distribution characteristics of largemouth bass (*Micropterus salmoides*) as an exotic species, in some medium-to-large size Korean reservoirs and physico-chemical water quality in the habitats. *Korean Journal of Ecology and Environment* **46**: 541-550.
- Kim, S.H., H.-J. Baek and G.B. Yang. 2019. Report on settlement of alien species red swamp crawfish (*Procambarus clarkii*) in Korea. *Korean Journal of Ecology and Environment* **52**: 333-339.
- Ko, M.-H., J.-Y. Park and Y.-J. Lee. 2008. Feeding habits of an introduced large mouth bass, *Micropterus salmoides* (Perciformes; Centrarchidae), and its influence on ichthyofauna in the lake Okjeong, Korea. *Korean Journal of Ichthyology* **20**: 36-44.
- Korea Environment Institute (KEI). 2007. Research on establishment of risk information delivery system, education, and publicity plan for alien species. KEI, Sejong, Korea.
- Latini, A. and M. Petrere Jr. 2004. Reduction of a native fish fauna by alien species: an example from Brazilian freshwater tropical lakes. *Fisheries Management and Ecology* **11**: 71-79.
- Lee, D.-S., Y.-S. Bae, B.-K. Byun, S. Lee, J.K. Park and Y.-S. Park. 2019. Occurrence prediction of the citrus flatid planthopper (*Metcalfa pruinosa* (Say, 1830)) in South Korea using a random forest model. *Forests* **10**: 583.
- Lee, D.-S. and Y.-S. Park. 2019. Evaluation of potential distribution area of the red swamp crayfish (*Procambarus clarkii*) in South Korea. *Korean Journal of Ecology and Environment* **52**: 340-347.
- Lee, J.-W., J.-H. Kim, S.-H. Park, K.-R. Choi, H.-J. Lee, J.-D. Yoon and M.-H. Jang. 2013. Impact of Largemouth Bass (*Micropterus salmoides*) on the Population of Korean Native Fish, Crucian Carp (*Carassius auratus*). *Korean Journal of Environmental Biology* **31**: 370-375.
- McDowall, R. 2003. Impacts of introduced salmonids on native galaxiids in New Zealand upland streams: a new look at an old problem. *Transactions of the American Fisheries Society* **132**: 229-238.
- Meyerson, L.A. and H.A. Mooney. 2007. Invasive alien species in an era of globalization. *Frontiers in Ecology and the Environment* **5**: 199-208.
- Ministry of Environment (ME). 2006. Research for classification of ecosystem risk level, and current state of introduced species in Korea. ME, Sejong, Korea.
- Ministry of Environment (ME). 2019. Establishment of medium and long-term plan for alien species and detailed implementation plan. ME, Sejong, Korea.
- National Fisheries Research and Development Institute (NFRDI). 2009. Distribution, Utilization and Management strategy of Introduced Freshwater Fish NFRDI, Busan, Korea.
- National Institute of Biological Resources (NIBR). 2011. Red Data Book of Endangered Fishes in Korea. NIBR, Incheon, Korea.
- National Institute of Ecology (NIE). 2014. Monitoring of Invasive Alien Species Designated by the Act on the Conservation and Use of Biological Diversity (I). NIE, Seochon, Korea.
- National Institute of Ecology (NIE). 2018. Monitoring of Invasive Alien Species Designated by the Act on the Conservation and Use of Biological Diversity (V). NIE, Seochon, Korea.

- National Institute of Ecology (NIE). 2020. Information of Korean Alien Species. <https://kias.nie.re.kr> (Access date: June 23 2020). Seocheon, Korea.
- National Institute of Environmental Research (NIER). 2007. Detailed studies on invasive alien species and their management (II). NIER, Incheon, Korea.
- National Institute of Environmental Research (NIER). 2011. Monitoring of Invasive Alien Species Designated by the Wildlife Protection Act (V) NIER, Incheon, Korea.
- National Institute of Environmental Research (NIER). 2019. Guidelines for Survey and Assessment of Stream/River Ecosystem Health (Stream). NIER, Incheon, Korea.
- National Institute of Environmental Research (NIER). 2020. Water Environment Information System. <http://water.nier.go.kr> (Access date: June 23 2020). NIER, Incheon, Korea.
- Oksanen, J., F.G. Blanchet, M. Friendly, R. Kindt, P. Legendre, D. McGlinn, P.R. Minchin, R.B. O'Hara, G. L. Simpson, P. Solymos, M.H.H. Stevens, E. Szoecs and H. Wagner. 2019. vegan: Community Ecology Package (R package version 2.5-6.).
- Orians, G.H. 1995. Thought for the morrow: cumulative threats to the environment. *Environment: Science and Policy for Sustainable Development* **37**: 6-36.
- R Core Team. 2020. R: A Language and environment for statistical computing R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria.
- Sala, O.E., F.S. Chapin, J.J. Armesto, E. Berlow, J. Bloomfield, R. Dirzo, E. Huber-Sanwald, L.F. Huenneke, R.B. Jackson and A. Kinzig. 2000. Global biodiversity scenarios for the year 2100. *Science* **287**: 1770-1774.
- Simon, K.S. and C.R. Townsend. 2003. Impacts of freshwater invaders at different levels of ecological organisation, with emphasis on salmonids and ecosystem consequences. *Freshwater Biology* **48**: 982-994.
- Simpson, G. and J. Oksanen. 2020. analogue: Analogue matching and Modern Analogue Technique transfer function models (R package version 1.6-6.).
- Strayer, D.L. 2010. Alien species in fresh waters: ecological effects, interactions with other stressors, and prospects for the future. *Freshwater Biology* **55**: 152-174.
- Ter Braak, C.J. and L.G. Barendregt. 1986. Weighted averaging of species indicator values: its efficiency in environmental calibration. *Mathematical Biosciences* **78**: 57-72.
- U.S. Fish and Wildlife Service (USFWS). 2012. The cost of invasive species. USFWS, Washington, D.C., U.S.A.
- Wei, T. and V. Simko. 2017. R package "corrplot": Visualization of a Correlation Matrix (Version 0.84). Retrieved from, <https://github.com/taiyun/corrplot>.
- Yonekura, R., M. Kita and M. Yuma. 2004. Species diversity in native fish community in Japan: comparison between non-invaded and invaded ponds by exotic fish. *Ichthyological Research* **51**: 176-179.
- Yoon, J.-D., J.-H. Kim, S.-H. Park and M.-H. Jang. 2018. The distribution and diversity of freshwater fishes in Korean Peninsula. *Korean Journal of Ecology and Environment* **51**: 71-85.