

Review

## 국내 담수어류 45종의 먹이원 분석(문헌자료 분석을 중심으로)

지창우 · 이대성<sup>1</sup> · 이다영<sup>1</sup> · 관인실<sup>2,\*</sup> · 박영석<sup>1,\*</sup>

전남대학교 수산과학연구소, <sup>1</sup>경희대학교 생물학과, <sup>2</sup>전남대학교 해양융합과학과

**Analysis of Food Resources of 45 Fish Species in Freshwater Ecosystems of South Korea (Based on Literature Data Analysis).** Chang Woo Ji (0000-0001-6133-9399), Dae-Seong Lee<sup>1</sup> (0000-0001-7288-0156), Da-Yeong Lee<sup>1</sup> (0000-0002-2457-2041), Ihn-Sil Kwak<sup>2,\*</sup> (0000-0002-1010-3965) and Young-Seuk Park<sup>1,\*</sup> (0000-0001-7025-8945) (Fisheries Science Institute, Chonnam National University, Yeosu 59626, Republic of Korea; <sup>1</sup>Department of Biology, Kyung Hee University, Dongdaemun, Seoul 02447, Republic of Korea; <sup>2</sup>Department of Ocean Integrated Science, Chonnam National University, Yeosu 59626, Republic of Korea)

**Abstract** We analyzed food sources of 45 fish species in 28 genera of 12 families based on literature data in freshwater ecosystems of South Korea. The food sources of 45 fish species included in a total of 26 phyla, 42 classes, 94 orders, 189 families and 294 genera. Among them, animal food sources were 16 phyla, 24 classes, 54 orders, 126 families and 212 genera, whereas plant food sources were relatively small with 10 phyla, 18 classes, 42 orders, 63 families and 82 genera. The animal food sources were classified into Arthropod, Insecta, Diptera and Chironomidae according to taxa. Meanwhile, Bacillariophyta, Bacillariophyceae, Cymbellales and Cymbellaceae were the most abundant among the plant sources. Self-Organized Map (SOM) and network analysis were conducted the food sources were classified into taxonomic groups and the feeding types of fish : 45 fish species were divided into five groups, characterizing 1) fishvores, 2) invertebratevores, planktivores including 3) zooplankton and 4) phytoplankton, and 5) omnivores. The network analysis presented link association between fishes and food sources. Macroinvertebrate including diptera and ephemeroptera were revealed as hub food sources based on network analysis. This literature study would expect that the application model with the food source of fish could be utilized for the evaluation of the food network or chain in freshwater ecosystems.

**Key words:** freshwater fishes, food sources, self-organized map, network analysis

## 서 론

담수생태계에서 생산자와 소비자는 종내 경쟁뿐만 아니라

종간 경쟁, 포식(predation), 공생 등으로 연결되어 있다. 특히 포식자의 섭식 활동은 군집 구조에 직접적인 영향을 주기 때문에 상대적으로 중요한 요소이다(Carreón-Martínez and Heath, 2010). 그러므로 수생태계에서 상위 영양단계에 위치하는 어류의 포식-피식 상호작용을 연구하는 것은 담수생태계의 먹이망과 먹이연쇄 분석에 기초 정보가 되며 성장이나 타종과의 먹이 경쟁 등 생태적인 특

Manuscript received 18 November 2020, revised 9 December 2020, revision accepted 10 December 2020

\* Corresponding author: Tel: +82-61-659-7148, Fax: +82-61-653-6620

E-mail: iskwak@chonnam.ac.kr

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.

성을 이해하는 데 유용하게 사용될 수 있다. 또한 자원 어종이나 희귀종의 보전 및 복원과도 밀접한 관련이 있어 종보존에도 도움이 된다(Baek *et al.*, 2008).

우리나라 어류는 4강 45목 223과 724속 1,291종(National Institute of Biological Resources 2019)이 보고되어 있으며, 이 중 담수어류는 기수종을 포함하여 39과 216종(Lee *et al.*, 2018b)이 알려져 있으며, 환경부에서 수행한 전국자연환경조사에서는 28과 130종의 담수어류가 기록되었다(Yoon *et al.*, 2018). 우리나라에서도 어류 먹이원 연구의 중요성을 인식하여 연안-하구-담수 생태계에서 먹이원에 관한 문헌자료를 분석하였다(Choi and Shin, 2018; Jo *et al.*, 2019b). Jo *et al.* (2019)은 우리나라 연안과 하구에서 서식하는 101편의 어류 먹이원 문헌을 수집하였고 조사지 공간 및 종별 분포와 방법론적 특성을 분석하였다. 그러나 이 연구에서도 연안-하구 어류의 먹이원 분석 방법과 문헌의 주제 분석에 그쳐 실제 어류 군집의 먹이원에 관한 정량적 해석은 이루어지지 않았다. 또한 수집된 문헌 중 남해와 광양만, 조간대 갯벌 등 연안 어류 위주로 분석이 되어 담수어류의 먹이원에 대한 분석은 부족하였다.

먹이원 분석과 같은 섭식생태 연구는 생태계 내에서 각종의 영양단계와 생태계의 기능적 역할을 이해하는 데 중요한 요소이다(Brodeur and Pearcy, 1992; Wootton, 2012). 하지만 어류의 먹이원 연구는 담수생태계 연구의 다른 주제에 비해 상대적으로 자료가 부족하다. 국내 어류의 데이터베이스 구축 연구(Kim *et al.*, 2011b; Jung *et al.*, 2014)에서도 어류의 전장과 같은 형태적 특징, 물리적·이화학적 서식환경, 지리적 분포와 같은 정보는 자세히 제공하고 있으나 먹이원이나 섭식 특성은 섭식길드(예; 충식성)와 같이 짧게 서술하는 것으로 그치거나 종에 따라서는 없는 경우도 많다. 이는 어류 정보가 가장 많은 'FishBase' (<http://www.fishbase.in/>)에서도 다른 생물적 정보에 비해 먹이원 정보는 짧게 서술되거나 없는 경우도 있다. 따라서 담수생태계의 먹이망과 연관 연구를 위해서는 상위 소비자인 어류의 먹이원 연구 자료에 대한 수집-정리-분석이 필요하다.

해양 어류와 연안 및 하구 어류의 먹이원 연구에 대한 문헌 자료는 Kim (2017)과 Jo *et al.* (2019b)에 수집 및 정리되어 있으나, 수집된 어류의 먹이원에 대한 정량적 분석은 이루어지지 않는 않았다. 더욱이 국내 담수어류의 먹이원 자료는 아직 목록조차 정리되어 있지 않으며 대부분 단일종(대부분 멸종위기종 또는 천연기념물)의 생태지위와 생물학적 특성 조사에 집중되어 있다. 어종 간 섭식관계와 먹이 경쟁에 관한 연구는 극히 소수에 불과하며 일부 문헌(Ko *et al.*, 2018)에서 동소출현종을 기록하여 먹이 분할에

대한 추론에 그치고 있다. 종간 먹이 경쟁 분석을 하기 위해서는 각 생물의 먹이원 정량화 및 상호 비교가 필요하다(Horn, 1966).

본 연구에서는 국내 담수 어류의 먹이원 문헌을 수집하여 어류의 섭식 특성을 분석하고자 하였다. 담수 생태계의 군집구조를 이해하고 생물다양성을 보존 및 지속시키기 위해서는 수생태계에서 상위영양 단계에 있는 어류의 섭식관계 연구가 매우 중요하다. 이러한 중요성에도 불구하고 어류의 영양구조를 분석한 연구는 극히 소수이며, 일부 해양 어류 군집 연구에서 위 내용물 분석 결과와 문헌 자료를 이용하여 영양 구조를 분석한 바는 있다(Choi *et al.*, 2008; Rahman and Lee, 2012). 그러나 담수 생태계의 생물간 포식-피식 관계를 밝히고 생태계 먹이망 구조를 해석하기 위한 연구는 거의 없으며, 배스(*Micropterus salmoides*)와 같은 외래 유입 단일종의 위 내용물을 분석하여 담수생태계의 간접적 군집 피해 조사에 그치고 있다(Kim *et al.*, 2013). 따라서 본 연구에서는 담수생태계 먹이망 및 에너지 흐름, 먹이 경쟁 연구 등의 기초 자료를 확보하기 위해 그 간의 담수 어류 먹이원 자료를 수집-정리-분석하였다.

## 재료 및 방법

수집된 어류의 먹이원을 비교하여 섭식율이 높은 중요 먹이원을 정리하였고 먹이원 종류에 따른 어류의 섭식 형태를 유형화하였다. 또한 네트워크 분석을 통해 담수 군집의 먹이망 구조의 모식화를 시도하였다. 어류가 섭식한 먹이원의 양을 산출하기 위해 분류군별 먹이원을 섭식하는 어류의 종 수와 그 비율(%N)을 계산하였다. 조사된 먹이원의 특성을 분석하기 위해 자기조직망(Self-Organized Map; SOM)을 이용하여 먹이원에 따른 어류의 섭식 형태를 유형화하였다. 또한 네트워크 분석(network analysis)을 이용하여 어류와 먹이원의 연결관계를 분석하였고 허브 점수(hub score)를 이용하여 어류와 먹이원의 연결 강도를 파악하였다.

### 1. 국내 담수어류 먹이원 연구 문헌 수집 및 정량분석

본 연구는 국내 담수에 서식하는 216종의 어류 먹이원 문헌을 학술 데이터베이스인 NDL (National Digital Library)과 KISS (Korean studies Information Service System), KISTI (Korea Institute of Science and Technology Information), Google Scholar에서 학명을 입력하여 관련 문헌을 수집하였다. 이를 통해 담수어종과 먹이원의 차이

가 클 것으로 판단되는 2차 담수어(secondary freshwater fishes) (Kim *et al.*, 2005)와 같은 기수종을 제외한 45종의 1차 담수어(primary freshwater fishes) (Kim *et al.*, 2005)의 먹이원 문헌을 선택하였다(Table 1). 수집된 문헌은 29편의 학술논문과 7편의 학위논문, 2편의 연구보고서로 어류의 위 내용물을 분석한 자료만 사용하였다. 먹이원의 종류를 생물 분류군 단위(예, 속, 과, 목)로 판단이 어려운 동위원소 분석과 같은 문헌은 제외하였다. 수집한 어류의 섭식길드는 National Institute of Environmental Research (2019)를 참조하여 포식성 어류(Carnivore), 충식성 어류(Insectivore), 초식성 어류(Herbivore), 잡식성 어류(Omnivore)로 분류하였으며, 어류의 평균 체장(Body length)은 National Institute of Environmental Research (2016)을 참조하였다.

어류의 먹이원 분석 방법은 시대에 따라 다소 차이가 있다(Jo *et al.*, 2019b). 이에 따라 분석 방법이 다른 논문이 있을 경우에는 다음과 같은 방법으로 먹이원을 취합하였다. 1990년대 이후 어류의 먹이원 분석은 대부분 상대중요성지수(IRI, Index of Relative Importance) 지표를 사용하고 있으나(Jo *et al.*, 2019b), 일부 오래된 문헌(예, Byeon *et al.*, 1995)의 경우 먹이원의 개체수 또는 개체수 비율(%N)만 보고하기도 하였다. 본 연구에서는 가급적 많은 어류종의 먹이원을 분석하기 위해 개체수 비율을 이용하여 먹이원을 정량 분석하였다. 식물플랑크톤과 같이 먹이원의 개체수가 너무 많아 구간(예; +++: 250~500)으로 표시한 먹이원은 중간값을 취하여 분석하였다. 일부 문헌(예, Park 2016)에서는 먹이원의 전체 비율을 제시하지 않고 동물류와 식물류 먹이를 별도의 비율로 표시하였기 때문에 본 조사에서도 가급적 많은 문헌을 포함하기 위해 같은 방법으로 개체수 비율(%N)을 구하였다. 치어와 성어 등의 연령에 따른 먹이원 분석(예, Park, 2008)은 성어를 기준으로 하여 먹이원을 취합하였고, 계절 및 장소에 따른 먹이원 분석(예, Byeon and Jeon, 1997)의 경우에는 가장 많은 먹이원을 섭식한 자료를 취합하였다. 먹이원 자료를 취합한 45종의 먹이원 분석은 먹이원의 분류군에 따라 각 먹이원을 섭식한 어류의 종수와 그 먹이를 먹은 어류의 전체 먹이원 개체수에서 그 먹이원의 개체수 비율을 구하였다.

## 2. 먹이원에 따른 담수어류 섭식 특성 유형화와 네트워크 분석

어류의 섭식 특성을 유형화하기 위해 비지도학습 방법 중 자기 조직화지도(SOM, Self-Organized Map) (Kohonen, 1990; Park *et al.*, 2003; Lee *et al.*, 2018a)을 이용하였다. 먹

이원 유형화를 위한 학습은 한 종류의 먹이만 먹어서 편향된 결과를 유도할 수 있는 갈따구류만 섭식한 흰수마자(를 제외하고 44종을 실행하였다. 학습을 위한 입력자료는 과(family) 수준에서는 미분류된 먹이원이 많아 목(order) 수준의 자료를 사용하였고 일부 목(order) 수준에서 미분류된 먹이원은 강(class)과 문(phylum)의 자료를 사용하였다. SOM의 결과를 제시해 주는 출력층은 어류를 먹이원에 따라 유형화하기 위해 44종의 절반에 가까운 6각형 형태의 4×6 (24개)로 구성된 출력인자를 사용하였다. 이때 SOM의 학습율은 초기 0.05에서 0.01까지 감소하며, 전체 학습횟수는 1,000회로 설정하였다. 최종적으로 SOM을 학습한 후 얻어진 각 어류별 가중치를 이용하여, 섭식 특성을 유형화하였다. 학습된 SOM은 Bray-Curtis 거리와 Ward 연결방법을 사용한 계층적 군집화(hierarchical clustering)를 통해 세부 그룹으로 구분하였다.

어류 44종과 먹이원과의 관계를 평가하기 위하여 네트워크 분석을 수행하였다(Csardi and Nepusz, 2006; Bae and Park, 2019). 전체 어류와 먹이원을 정점(node)으로, 어류와 먹이원의 관계를 연결선(link)으로 네트워크를 구성하였다. 이때, 네트워크 내 연결선의 굵기(width)는 각 어류와 해당 먹이원 간 섭식 비율을 의미한다. 네트워크 분석의 경우에도 자기 조직화지도와 마찬가지로 목(order) 수준으로 입력자료를 표준화하여 사용하였다.

본 연구에서 수행한 모든 분석은 R 프로그램(version 3.6.3; <https://www.r-project.org/>) 상에서 이루어졌으며, SOM은 kohonen (Wehrens and Krusselbrink, 2018), SOM 출력층 세분화는 vegan (Oksanen *et al.*, 2019), 네트워크 분석은 igraph (Csardi and Nepusz, 2006) 등의 패키지를 이용하였다.

## 결 과

### 1. 담수어류의 먹이원 정량 분석

본 연구에서는 국내 담수 어류 8목 12과 28속 45종의 먹이원을 문헌 조사를 통해 수집하였다(Table 1). 수집한 어류 중 가는돌고기(PT)를 포함한 20종은 천연기념물 또는 멸종위기종 어류였으며, 국내 고유종은 34종인 것으로 나타났다. 외래종은 블루길(PL)과 배스(MS) 두 종으로 조사되었다. 수집된 어류의 섭식길드는 ‘수생태계 현황 조사 및 건강성 평가 방법 등에 관한 지침’ (National Institute of Environmental Research, 2019)을 참조하여 분류하였는데, 육식성 어류는 배스(MS)를 포함한 5종이었으며 충식성 어류는 가는돌고기(PT)를 포함한 28종, 잡식성 어류는

**Table 1.** List of fish species which food sources have been reported in the literature. Trophic guild and body length were from 'National Ecosystem Survey' (Ministry of Environment, 2009~2019) and on-line database of 'National Institute of Biological Resources'. Species are abbreviated by the initial of the genus and first letters of the specific epithet (e.g., PT, *Pseudopungtungia tenuicorpa*)

Order	Family	Genus	Scientific name	Abbreviation	Trophic guild	Endangered species and natural monument	Endemic species	Reference	
Cypriniformes	Cyprinidae	<i>Pseudopungtungia</i>	<i>P. tenuicorpa</i>	PT	I	O	O	Kang (2011a)	
			<i>P. nigra</i>	PN	I	O	O	Inland Aquaculture Research Center (2009)	
		<i>Rhodeus</i>	<i>R. uyekii</i>	RU	O		O		Kim <i>et al.</i> (2015)
			<i>R. kungangensis</i>	RK	I	O	O		Choi <i>et al.</i> (2006)
		<i>Gobiobotia</i>	<i>G. macrocephala</i>	GM	I	O	O		Choi <i>et al.</i> (2004)
			<i>G. brevibarba</i>	GB	I	O	O		Choi <i>et al.</i> (2001)
			<i>G. nakdongensis</i>	GN	I	O	O		Kim <i>et al.</i> (2014)
		<i>Opsarichthys</i>	<i>O. uncirostris</i>	OU	C				Kang (2011b)
		<i>Hemibarbus</i>	<i>H. labeo</i>	HL	I				Choi <i>et al.</i> (2016)
			<i>H. mylodon</i>	HM	I	O	O		Cultural Heritage Administration (2011)
		<i>Squalidus</i>	<i>S. japonicus</i>	SJ	O		O		Byeon (2012)
		<i>Acheilognathus</i>	<i>A. signifier</i>	AS	O	O	O		Baek and Song (2005)
		<i>Microphysogobio</i>	<i>M. longidorsalis</i>	ML	H		O		Song and Son (2003)
			<i>M. rapidus</i>	MR	O		O		Hong (2014)
<i>Coreoleuciscus</i>	<i>C. splendidus</i>	CS	I		O		Inland Aquaculture Research Center (2009)		
<i>Phoxinus</i>	<i>P. phoxinus</i>	PP	I		O		Baek <i>et al.</i> (2002)		
<i>Hemiculter</i>	<i>H. eigenmanni</i>	HE	O		O		Lee <i>et al.</i> (2013)		
Balitoridae	<i>Orthrias</i>	<i>O. nudus</i>	ON	I				Byeon (2010b)	
		<i>I. hugowolfeldi</i>	IHA	I		O		Park (2016)	
	<i>Iksookimia</i>	<i>I. pumila</i>	IPA	O	O	O		Inland Aquaculture Research Center (2009)	
		<i>I. pacifica</i>	IPB	I	O	O		Ko (2015)	
		<i>I. yongdokensis</i>	IY	I		O		Ko <i>et al.</i> (2018)	
		<i>I. longicorpa</i>	IL	I		O		Kim and Go (2004)	
		<i>I. koreensis</i>	IHB	I		O		Ko <i>et al.</i> (2009)	
		<i>C. choii</i>	CC	I	O	O		Ko and Bang (2018)	
	<i>C. tetralineata</i>	CT	I		O		Kim and Go (2004)		
	<i>Koreocobitis</i>	<i>K. rotundicaudata</i>	KR	O		O		Byeon (2007)	
<i>K. nakdongensis</i>		KN	O	O	O		Hong <i>et al.</i> (2011)		
<i>Kichulchoia</i>	<i>K. brevifasciata</i>	KB	I	O	O		Kim <i>et al.</i> (2011a)		
	<i>K. multifasciata</i>	KM	O		O		Chong (1986)		

Table 1. Continued.

Order	Family	Genus	Scientific name	Abbreviation	Trophic guild	Endangered species and natural monument	Endemic species	Reference
Siluriformes	Bagridae	<i>Pseudobagrus</i>	<i>P. koreanus</i>	PK	I		O	Inland Aquaculture Research Center (2009)
			<i>P. brevicarpus</i>	PB	I	O	O	Kwak (2019)
Siluriformes	Amblycipitidae	<i>Liobagrus</i>	<i>L. somjinensis</i>	LS	I		O	Kim and Park (2014)
			<i>L. mediatiposalis</i>	LM	I		O	Inland Aquaculture Research Center (2009)
			<i>L. andersoni</i>	LA	I		O	Yoon <i>et al.</i> (2007)
			<i>L. obesus</i>	LO	I	O	O	Son and Byeon (2005)
Salmoniformes	Salmonidae	<i>Brachymystax</i>	<i>B. lenok</i>	BL	C	O	O	Yoon <i>et al.</i> (2013)
Petromyzontiformes	Petromyzontidae	<i>Lethenteron</i>	<i>L. reitssneri</i>	LR	O	O	O	Moon (2012)
Osmeriformes	Osmeridae	<i>Hypomesus</i>	<i>H. nipponensis</i>	HN	I			Byeon (2010a)
Scorpaeniformes	Cottidae	<i>Cottus</i>	<i>C. hangiongensis</i>	CH	I	O	O	Baek <i>et al.</i> (2008)
Belontiiformes	Adrianchthyoidea	<i>Oryzias</i>	<i>O. sinensis</i>	OS	O			Park (2008)
Perciformes	Centropomidae	<i>Siniperca</i> <i>Coreoperca</i>	<i>S. scherzeri</i>	SS	C			Song <i>et al.</i> (2017)
			<i>C. herzi</i>	PC	C		O	Byeon (2017)
Perciformes	Centrarchidae	<i>Lepomis</i> <i>Micropterus</i>	<i>L. macrochirus</i>	PL	I			Byeon and Jeon (1997)
			<i>M. salmoides</i>	MS	C			Lee <i>et al.</i> (2009)

물개(SJ)를 포함한 11종이었으나 초식성 어류는 배가사리(ML) 1종만 먹이원이 보고되었다.

어류의 먹이원 정량 분석은 먹이원의 각 분류군에서 동물류 먹이와 식물류 먹이를 나누어 분석하였다(Table 2). 수집한 45종의 먹이원은 총 26문 42강 94목 189과 294속으로 조사되었으며 동물류 먹이원은 16문 24강 54목 126과 212속으로 식물류 먹이원 10문 18강 42목 63과 82속에 비해 상대적으로 다양하였다. 동물류 먹이원 중 문(Phylum) 수준에서 가장 많은 어류가 먹는 먹이원은 절지동물(Arthropoda)이었으며 45종의 어류 중 39종의 어류가 섭식하였다. 절지동물이 동물류 먹이원 중 39종의 어류에서 차지하는 비율은 약 86.5%로 조사되었다. 두 번째로 많이 먹는 먹이원은 척삭동물(Chordata)로 어류를 포식하는 포식어류인 조기어강(Actinopterygii)이었으며 8종의 어류에서 차지하는 비율은 약 26%로 조사되었다. 7종의 어류가 윤형동물(Rotifera)을 섭식하였으며 환형동물(Annelida), 선형동물(Nematoda) 순으로 먹이원 선호도가 높았다. 식물류 먹이원은 돌말류(Bacillariophyta)가 17종에서 약 62%의 비율로 가장 높았으며, 녹조류(Chlorophyta), 윤조류(Charophyta), 남조류(Cyanobacteria) 순으로 높았다. 남조류의 경우, 윤조류보다 먹는 어종이 1종 적었으나 먹이원으로써 차지하는 비율은 윤조류보다 높은 13%를 차지하였다.

강(Class)에서 10종 이상의 어류가 먹은 먹이원은 동물류 먹이원에서는 곤충강(Insecta, 35종), 새각강(Branchiopoda, 12종), 소악강(Maxillopoda, 10종)으로 조사되었으나 곤충강이 차지하는 비율은 약 82%로 다른 먹이원에 비해서 높았다. 식물류 먹이원 중 10종 이상의 어류가 먹은 먹이원은 율돌말강(Bacillariophyceae, 16종), 접합조강(Conjugatophyceae, 13종), 남조강(Cyanophyceae, 12종), 체돌말강(Coscinodiscophyceae, 11종), 녹조강(Chlorophyceae, 11종) 순이었으나 율돌말강이 차지하는 비율은 약 55%로 10% 정도인 다른 먹이원에 비해 높게 나타났다.

동물류 먹이원 중 목(order) 수준에서 가장 많은 어류가 먹은 먹이원은 파리목(Diptera)과 하루살이목(Ephemeroptera)으로 각각 35종과 31종의 어류가 섭식하였으나 비율은 파리목이 51.7%로 21.4%인 하루살이목에 비해 차지하는 비율은 다소 차이가 있었다. 식물류 먹이원 중 가장 많은 어류가 먹은 먹이원은 반달돌말목(Cymbellales, 16종, 15.2%), 김발돌말목(Fragilariiales, 15종, 15.8%), 쪽배돌말목(Naviculales, 15종, 14.6%) 순으로 조사되었으며 상위 3목의 먹이원은 모두 돌말류(Bacillariophyta) 먹이원으로 나타났다.

과(family)에서는 파리목 중, 갈따구과(Chironomidae)와 먹파리과(Simuliidae), 애기각다귀과(Limoniidae) 순으로 높은 비율을 보였다. 하루살이류에서는 꼬마하루살이과(Baetidae), 납작하루살이과(Heptageniidae), 미분류 하루살이목(Unidentified Ephemeroidea)의 비율이 높았다. 먹이원 비율로서는 갈따구류가 44.4%로 다른 먹이원에 비중이 높게 나타났다. 식물류 먹이원은 반달돌말과(Cymbellaceae), 김발돌말과(Fragilariaceae), 쪽배돌말과(Naviculaceae) 순으로 나타나 목 수준과 비슷한 패턴을 보였다. 속(gene) 수준에서는 동물류 먹이원 중 미분류 갈따구류를 26종의 어류가 섭식하였으며, 식물류 먹이원은 반달돌말속(Cymbella), 김발돌말속(Fragilaria), 대바늘돌말속(Synedra)의 순으로 반달돌말과가 1개의 먹이원인 반면 김발돌말과에서는 김발돌말속과 대바늘돌말속이 2개의 속이 높게 나타났다.

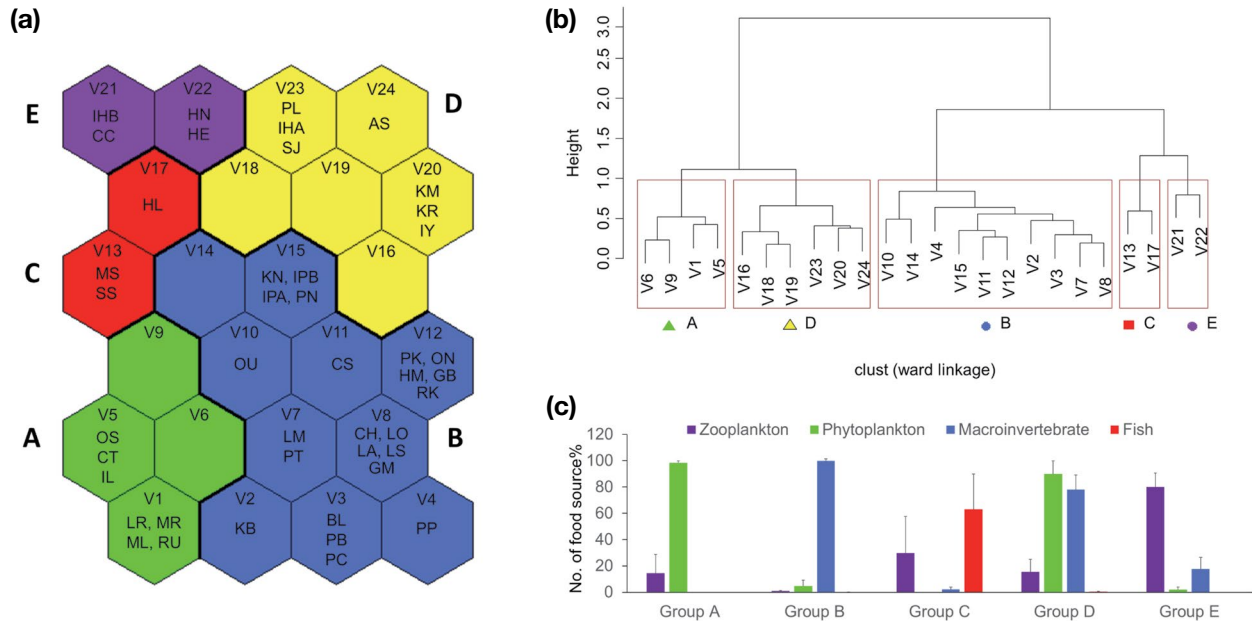
## 2. 먹이원에 따른 담수어류 섭식 특성 유형화와 네트워크 분석

SOM을 이용한 44종 어류의 먹이원 유형화한 결과 5개 그룹(A-E)으로 구분되었다(Fig. 1). 그룹 A에는 대륙송사리(OS), 줄종개(CT), 왕종개(IL), 다목장어(LR), 여울마자(MR), 배가사리(ML), 각시붕어(RU)의 7종이 유형화되었으며, 블루길(PL), 부안종개(IHA), 물개(SJ), 묵납자루(AS), 수수미꾸리(KM), 새코미꾸리(KR), 동방종개(IY)의 7종이 유형화된 그룹 D와 상대적으로 유사한 관계를 보였다(Fig. 1A, 1b). 가장 많은 어류가 포함된 그룹 B는 쯤수수치(KB) 외 22종이 포함되었으며 상대적으로 그룹 C와 E에 가까운 것으로 나타났다. 그룹 C에는 배스(MS), 쏘가리(SS), 누치(HL) 세 종이 유형화되었으며, 그룹 E에는 참종개(IHB), 미호종개(CC), 빙어(HN), 치리(HE) 네 종이 유형화되었다.

어류의 먹이원 비율은 5개 그룹에 따라 서로 다른 특징을 보였다(Fig. 1c). 그룹 A에 유형화된 7종 어류의 먹이 비율은 식물플랑크톤류가 98.4%로 가장 많았으며 동물플랑크톤도 다소(14.4%) 섭식하는 것을 보였다. 그룹 B의 경우에는 저서무척추동물 섭식 비율(99.7%)이 가장 높았으며 식물플랑크톤 섭식은 4.5%에 불과하였다. 그룹 C의 경우에는 먹이원 중 어류의 비율이 63%로 가장 높았으며 동물플랑크톤이 29.8%로 나타났고 저서무척추동물 섭식 비율은 2.3%를 보였다. 잡식성 어류가 유형화된 그룹 D의 경우에는 식물플랑크톤(89.9%)이 가장 높았고 저서무척추동물(78.1%)의 섭식량도 많았다. 이는 재료 및 방법에서도 언급하였듯이 동물류 먹이와 식물류 먹이를 별도로 비

**Table 2.** Food sources of 45 fish species based on the literature in Table 1. 'No. of fish' indicate the number of fish species feeding the sources. 'Ratio (standard error)' is the average (%) of the food sources fed by fishes.

Classification Group	Phylum	No. of fish	Ratio	Class	No. of fish	Ratio	Order	No. of fish	Ratio	
Animal	Arthropoda	39	85.5 (±28.1)	Insecta	35	82.6 (±31.3)	Diptera	35	51.7 (±5.1)	
	Chordata	8	25.9 (±37.3)	Branchiopoda	12	21.8 (±29.4)	Ephemeroptera	31	21.4 (±2.8)	
	Rotifera	7	11.8 (±16.3)	Maxillopoda	10	12.4 (±13.6)	Trichoptera	25	16.6 (±2.1)	
	Annelida	5	1.6 (±2.0)	Malacostraca	5	17.9 (±29.9)	Coleoptera	12	2.5 (±0.4)	
	Nematoda	5	1.6 (±1.3)	Actinopterygii	8	25.9 (±37.2)	Plecoptera	11	3.3 (±0.4)	
	Amoebozoa	5	4.0 (±6.1)	Eurotatoria	7	11.8 (±16.3)	Anomopoda	10	23.6 (±2.4)	
	Nematomorpha	4	0.2 (±0.1)	Clitellata	4	0.6 (±0.6)	Unidentified Branchiopoda	6	2.7 (±0.2)	
	Mollusca	4	9.3 (±6.7)	Nematoda	5	1.6 (±1.3)	Unidentified Maxillopoda	6	8.4 (±0.8)	
	Tardigrada	2	9.5 (±7.8)	Tubulinea	5	4.0 (±6.1)	Unidentified Actinopterygii	7	7.7 (±0.8)	
	Acanthocephala	1	53.2	Gordioida	4	0.2 (±0.1)	Ploima	7	11.4 (±1.1)	
	Plant	Bacillariophyta	17	62.0 (±24.5)	Bacillariophyceae	16	55.6 (±23.7)	Cymbellales	16	15.1 (±1.4)
		Chlorophyta	13	12.3 (±12.9)	Conjugatophyceae	13	8.7 (±10.1)	Fragiliales	15	15.7 (±1.3)
		Charophyta	13	9.0 (±10.6)	Cyanophyceae	12	13.0 (±10.4)	Naviculales	15	14.6 (±1.3)
		Cyanobacteria	12	13.0 (±10.4)	Coscinodiscophyceae	11	9.2 (±5.4)	Oscillatoriales	11	7.2 (±0.8)
Euglenophyta		7	3.2 (±2.9)	Chlorophyceae	11	5.2 (±4.9)	Sphaeroleales	10	3.0 (±0.2)	
Rhodophyta		3	2.4 (±1.1)	Euglenophyceae	7	3.2 (±2.9)	Desmidiiales	10	9.3 (±1.0)	
Magnoliophyta		2	0.5 (±0.2)	Ulvoephyceae	5	5.9 (±5.5)	Achnanthales	9	10.8 (±0.9)	
Dimophyta		2	5.1 (±4.8)	Trebouxiophyceae	4	5.5 (±3.6)	Melosirales	9	8.9 (±0.7)	
Ochrophyta		1	0.4	Mediophyceae	3	3.7 (±3.1)	Bacillariales	8	6.3 (±0.4)	
Ascomycota		1	0.01	Porphyridiophyceae	3	2.4 (±1.1)	Peridiales	6	5.1 (±0.2)	
Animal		Chironomidae	31	44.4 (±4.9)	Unidentified Chironomidae	26	50.6 (±4.8)	Unidentified Chironomidae	26	50.6 (±4.8)
		Simuliidae	11	5.5 (±0.6)	<i>Hydropsyche</i>	14	9.2 (±1.1)	<i>Hydropsyche</i>	14	9.2 (±1.1)
		Limoniidae	10	2.8 (±0.4)	<i>Baetis</i>	14	12.7 (±1.2)	<i>Baetis</i>	14	12.7 (±1.2)
		Tipulidae	9	1.3 (±0.1)	Unidentified Ephemeroidea	13	10.9 (±1.3)	Unidentified Ephemeroidea	13	10.9 (±1.3)
	Baetidae	19	9.5 (±1.2)	<i>Epeorus</i>	12	5.0 (±0.4)	<i>Epeorus</i>	12	5.0 (±0.4)	
	Heptageniidae	17	4.6 (±0.5)	<i>Ecdyonurus</i>	10	4.1 (±0.4)	<i>Ecdyonurus</i>	10	4.1 (±0.4)	
	Unidentified Ephemeroidea	13	10.9 (±1.3)	<i>Ephemera</i>	10	1.2 (±0.1)	<i>Ephemera</i>	10	1.2 (±0.1)	
	Ephemeridae	11	1.4 (±0.1)	<i>Antocha</i>	9	3.2 (±0.4)	<i>Antocha</i>	9	3.2 (±0.4)	
	Ephemerellidae	9	3.8 (±0.5)	<i>Baetella</i>	8	5.3 (±0.4)	<i>Baetella</i>	8	5.3 (±0.4)	
	Hydropsychidae	17	9.0 (±1.3)	Unidentified Actinopterygii	7	7.7 (±0.8)	Unidentified Actinopterygii	7	7.7 (±0.8)	
	Plant	Cymbellaceae	16	13.0 (±1.2)	<i>Cymbella</i>	16	13.6 (±1.3)	<i>Cymbella</i>	16	13.6 (±1.3)
		Fragilariaceae	15	6.4 (±0.6)	<i>Fragilaria</i>	13	6.4 (±0.6)	<i>Fragilaria</i>	13	6.4 (±0.6)
		Naviculaceae	12	13.0 (±1.1)	<i>Synedra</i>	13	8.4 (±0.7)	<i>Synedra</i>	13	8.4 (±0.7)
		Oscillatoriaceae	12	5.5 (±0.8)	<i>Navicula</i>	12	13.4 (±1.1)	<i>Navicula</i>	12	13.4 (±1.1)
Melosiraceae		10	8.9 (±0.7)	<i>Melosira</i>	10	8.9 (±0.7)	<i>Melosira</i>	10	8.9 (±0.7)	
Desmidiaceae		10	3.2 (±0.2)	<i>Closterium</i>	10	3.6 (±0.4)	<i>Closterium</i>	10	3.6 (±0.4)	
Closteriaceae		10	2.6 (±0.2)	<i>Cocconeis</i>	9	8.0 (±0.6)	<i>Cocconeis</i>	9	8.0 (±0.6)	
Cocconeidaceae		9	8.0 (±0.6)	<i>Scenedesmus</i>	9	3.2 (±0.2)	<i>Scenedesmus</i>	9	3.2 (±0.2)	
Scenedesmacaceae		9	3.0 (±0.2)	<i>Cosmarium</i>	9	5.4 (±0.4)	<i>Cosmarium</i>	9	5.4 (±0.4)	
Gomphonemataceae		8	3.1 (±0.2)	<i>Gomphonema</i>	8	3.1 (±0.2)	<i>Gomphonema</i>	8	3.1 (±0.2)	



**Fig. 1.** Characterizing of 44 fishes according to the food sources by SOM (a) and cluster distance according to the Ward's linkage method (b). (c) indicate the average food sources with 4 different major food taxa in each cluster. The abbreviations in (a) can be seen in Table 1. Error bar on (c) indicates standard error.

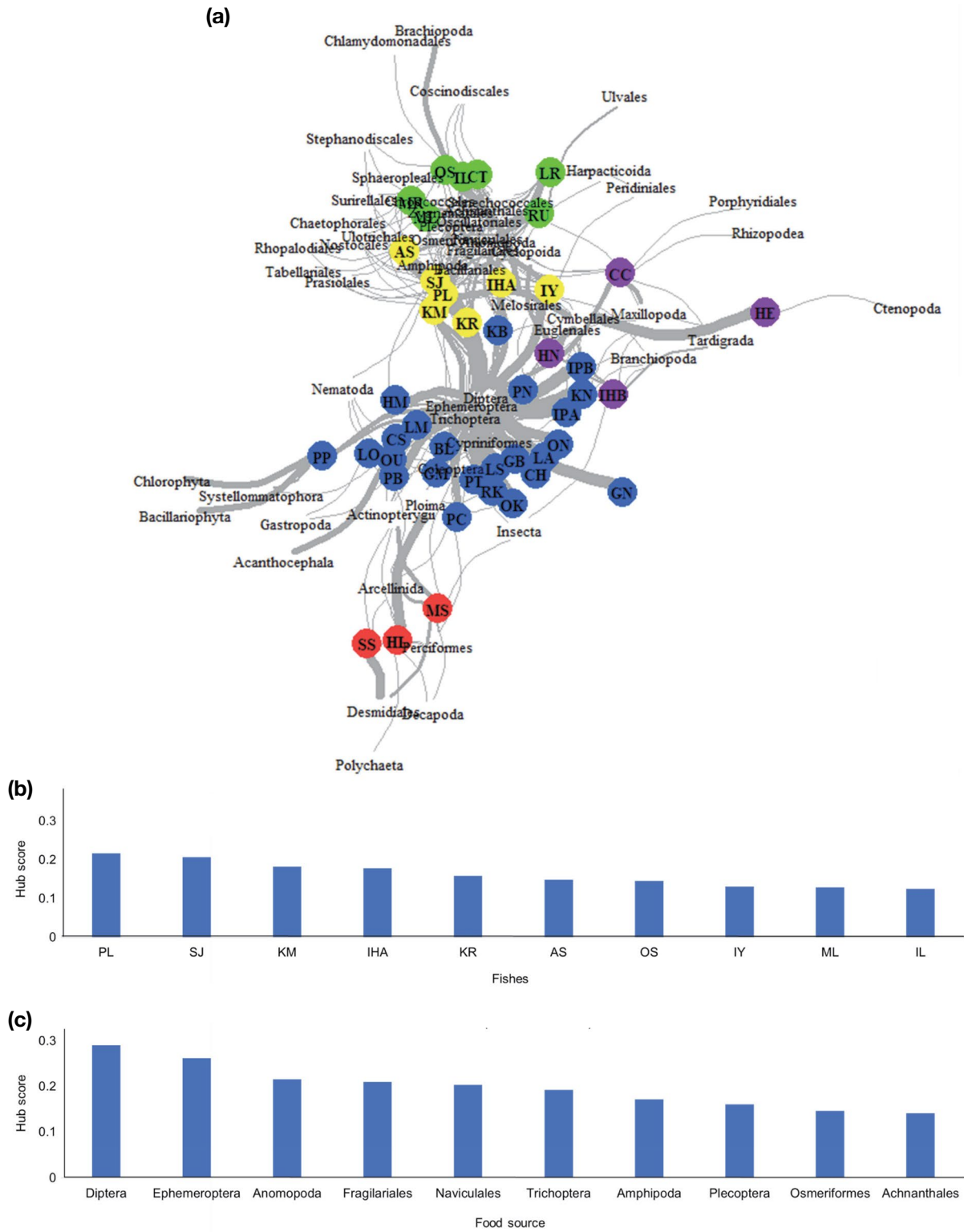
교하여 두 먹이원이 높은 비율로 나타난 것으로 판단된다. 그룹 E는 동물플랑크톤 섭식 비율이 80.1%로 다른 그룹에 비해 높았으며 저서무척추동물 섭식 비율은 17.6%를 보였다. 이상의 결과는 Table 1에 정리된 기존의 섭식길드와 다소 차이를 보였다. 초식성 어류는 배가사리(ML)이었으나 본 연구에서는 배가사리 외에도 6종의 어류가 식물플랑크톤을 주로 섭식하는 어류로 나타났다. 또한 기존의 섭식길드 분류 방식으로는 11종이 잡식성 어류로 분류되었으나 본 연구에서는 7종만이 잡식성 어류로 분류되어 다소 간의 차이가 있었다. 또한 기존의 분류 방식으로는 동물플랑크톤만을 섭식하는 어류 길드는 없으나 본 연구에서는 참종개(IHB)를 포함한 4종의 먹이원 중 동물플랑크톤이 차지하는 비율은 80% 이상으로 나타났다.

어류와 먹이원의 네트워크 분석을 수행하였다(Fig. 2). 어류 노드의 경우 약자와 함께 등근 원으로 표시하였으며 먹이원 노드는 목(order)로 표기하였다. 일부 목 수준에서 미분류된 먹이원은 상위분류군인 강(class)과 문(phylum)으로 표기하였다. 육식성 어류인 배스(MS), 쏘가리(SS), 누치(HL)는 전체 네트워크 아래쪽에 위치하며 바다빙어목(Osmeriformes)과 강하게 연결되어 있는 것이 특징이다(Fig. 2a). 저서무척추동물을 섭식한 어류는 연준모치(PP)를 포함하여 파란색으로 표시되었으며 파리목(Diptera), 하루살이목(Ephemeroptera), 날도래목

(Tricoptera), 강도래목(Plecoptera)과 연결이 강하였다. 동물플랑크톤을 주로 섭식한 어류는 보라색으로 표시되었으며 이지목(Anomopoda)과 같은 지각류(Cladocera) 동물플랑크톤과 연결이 강하였다. 네트워크 가장 위에 위치한 식물플랑크톤을 섭식한 어류군은 반달돌말목(Cymbellales), 김발돌말목(Fragilariiales), 쪽배돌말목(Naviculales)과 같은 돌말류 식물플랑크톤과 연결이 강하였으며, 노란색으로 표시된 잡식성 어류는 앞서 언급된 돌말류 식물플랑크톤을 포함하여 저서무척추동물인 파리목, 하루살이목, 날도래목, 강도래목과도 연결이 강하게 나타나는 특징을 보였다.

네트워크 분석 결과 계산된 허브 점수로서 각각 어류와 먹이원의 상위 10 항목의 종과 분류군을 나타내었다(Fig. 2b, c). 어류에서 허브 점수가 높은 상위 10개 종은 순서대로, 블루길(PL, 0.217), 물개(SJ, 0.206), 수수미꾸리(KM, 0.182), 남방종개(IHA, 0.178), 새코미꾸리(KR, 0.158), 묵납자루(AS, 0.148), 대륙송사리(OS, 0.145), 동방종개(IY, 0.13), 배가사리(ML, 0.128), 왕종개(IL, 0.125), 줄종개(CT, 0.125) 순으로 나타났다. 가장 높은 값을 보인 블루길의 경우 0.217이었으며 45종의 어류 중 가장 낮은 값을 보인 어류는 쏘가리(SS, 0.006)이었다. 먹이원의 허브 점수는 파리목(Diptera, 0.291), 하루살이목(Ephemeroptera, 0.262), 이지목(Anomopoda, 0.215), 김발돌말목





**Fig. 2.** Fishes and food sources network. (a) Colored nodes with abbreviation in the network present fish species and link appear association between fishes and food sources. The link width is proportionate to fed frequency. (b) Hub score of top 10 fishes. (c) Hub score of top 10 food sources. PL: *L. macrochirus*, SJ: *S. japonicus*, KM: *K. multifasciata*, IHA: *I. hugowolfeldi*, KR: *K. rotundicaudata*, AS: *A. signifier*, OS: *O. sinensis*, IY: *I. yongdokensis*, ML: *M. longidorsalis*, IL: *I. longicorpa*.

(Fragilariales, 0.209), 쪽배돌말목(Naviculales, 0.203) 등이 0.2 이상을 보였다. 가장 낮은 허브 점수를 보인 먹이원은 빈모류(Polychaeta)로 0.0007이었다.

## 고찰

국내 담수어류는 216종이 보고되었으나 먹이원이 보고된 담수 어류는 그 1/5 수준인 45종에 불과하다. 45종 중에는 천연기념물 4 종과 국내 멸종위기 어류 27종 중 17종이 포함되었다. 국내 고유종도 45종의 어류 중 34종으로 조사되었으나 외래어종은 생태계교란 외래어종으로 지정된 12종 중 블루길, 배스 2종에 불과하다. 이상의 문헌 수집 결과를 볼 때, 국내 담수어류 먹이원 연구는 종 또는 자원 보존에 치우쳐 있는 것으로 판단이 된다. 2009년부터 2016년까지의 환경부 수생태 건강성 평가(National Institute of Environmental Research, 2016)에서 조사된 국내 담수 어류의 조사 자료에서 전국 상위 우점 10종의 어류는 순서대로 피라미(*Zacco platypus*), 참갈겨니(*Zacco koreanus*), 붕어(*Carassius auratus*), 돌고기(*Pungtungia herzi*), 버들치(*Rhynchocypris oxycephalus*), 모래무지(*Pseudogobio esocinus*), 밀어(*Rhinogobius brunneus*), 긴물개(*Squalidus gracilis*), 쉬리(*Coreoleuciscus splendidus*), 갈겨니(*Zacco temminckii*)로 조사되었다. 본 연구에서 먹이원이 수집된 어류 중에서는 쉬리가 9번째로 우점한 종으로 나타나며, 상위 우점 20종 중 먹이원이 조사된 종은 쉬리, 배스, 끄리, 치리, 금강모치, 블루길 5종에 불과하다. 그러므로 차후의 먹이원 연구는 담수생태계의 폭 넓은 군집 연구를 위해 그간의 종 또는 자원 보전적 관점에서 벗어나 국내 담수에 우점하고 있는 어류에 대한 조사가 필요한 것으로 판단된다.

어류가 가장 많이 섭식한 동물 먹이원은 깔따구류였다(Table 2). 31종의 어류가 깔따구류를 섭식하였지만 속(gene)까지 분류는 거의 이루어지지 않았다. 역설적이게도 가장 중요한 먹이가 가장 확인이 어렵다. 그러므로 먹이원을 정확하게 조사하기 위해서는 기존의 방법을 벗어난 새로운 방법을 시도할 필요가 있다. 안전성동위원소(isotope analysis) 분석은 상대적으로 적은 양의 샘플을 이용하여 조사 생물의 먹이사슬 위치를 정량적으로 알 수 있는 장점이 있다(Choi and Shin, 2018). 따라서 기존의 육안 분석과 같이 활용하면 생태학적 지위 연구의 정확성을 증진시킬 수 있다. 하지만 안전성동위원소 분석 방법도 종(species) 또는 속(gene) 수준의 하위 분류군에 대한 확인을 하기 어렵다는 단점이 있다. 이를 극복하기 위해 최근 들어 DNA

metabarcoding을 이용하여 위내용물 분석과 비교(Jo *et al.*, 2019a)하기도 하였다. Jo *et al.* (2019)도 eDNA 분석과 육안 분석을 통한 위내용물 정량 분석과 함께하면 보다 높은 연구결과를 얻을 수 있을 것이라 논하였다(Jo *et al.*, 2019b).

본 연구결과에서 나타난 어류의 먹이원에 따른 유행화(Fig. 1)는 기존의 섭식길드(Table 1)와 다소 차이가 있었다. 특히 잡식성 어류는 기존 섭식길드 분류 방식으로는 11종이나 본 연구에서는 7종으로 나타났다. 또한 끄리(OU)의 경우 기존 섭식길드 분류 방식으로는 육식성 어류이나 본 연구에서는 저서무척추동물 섭식 어류로 분석되기도 하였으며 누치(HL)의 경우에는 역으로 충식성 어류가 포식성 어류로 분석되기도 하였다. 이러한 차이는 본 연구에서 먹이원의 개체수(N)가 아닌 동식물 먹이원의 별도 개체수 비율(%N)로 분석을 하였기 때문인 것으로 판단된다. 먹이원을 단순한 비율이 아닌 개체수 또는 그것을 변환한 생체량으로 분석하면 결과는 개선될 것으로 예상된다. 또한 담수생태계 군집의 에너지 흐름과 같은 연구를 위해서는 생체량이 필수적이며 이는 개체수 비율만으로는 계산을 할 수 없고 직접적인 개체수 정보가 필요하다. 하지만 아쉽게도 45종의 어류의 먹이원 문헌 중, 개체수 비율이 아닌 실제 먹이원 개체수를 표기한 어류는 절반 정도인 26종에 불과하였다. 더욱이 비교적 오래된 문헌(Chong, 1986; Byeon *et al.*, 1997; Baek *et al.*, 2002; Song and Son, 2003)뿐만 아니라 최근의 먹이원 연구(Byeon, 2017; Song *et al.*, 2017)에서도 먹이원의 실제 개체수를 표기하지 않은 경우도 있어 관련 연구자들의 세심한 주의가 필요할 것으로 판단된다.

본 연구에서는 국내 담수 어류 45종의 먹이원을 먹이원에 대한 정량적 분석과 모델 적용을 시도하였다. 차후 담수어류의 먹이원 연구는 그동안의 종 보전적 관점에서 벗어나 국내 우점하는 어류와 새로 유입된 외래 어류에 대한 먹이원 분석이 필요할 것으로 판단이 된다. 또한 분류가 어려운 먹이원에 대해서는 DNA metabarcoding과 같은 새로운 분석법 도입이 필요할 것으로 예상되며, 모델 적용의 정확성을 위해 분석한 먹이원의 생체량 또는 개체수를 명확히 제시해야 할 필요성을 발견하였다. 이상의 문제점을 보완하면 차후 먹이원 연구의 결과는 생태 군집 모델 분석에 큰 도움이 될 것으로 판단된다.

## 적요

국내 담수 어류 12과, 28속, 45종의 먹이원을 문헌 조사한 결과, 동물류 먹이원은 16문, 24강, 54목, 126과, 212속

으로 조사되었으며 식물류 먹이원은 10문, 18강, 42목, 63과, 82속으로 나타났다. 동물류 먹이원 중 가장 많은 어류가 섭식한 먹이원은 분류군에 따라 절지동물문, 곤충강, 파리목, 갈따구과로 조사되었으며, 식물류 먹이원은 돌말문, 옷돌말강, 반달돌말목, 반달돌말과로 조사되었다. SOM을 이용하여 45종 어류의 유형화 결과, 어류를 주로 포식하는 어류와 저서무척추동물을 포식하는 어류, 동물플랑크톤을 섭식하는 어류, 식물플랑크톤을 섭식하는 어류, 잡식성 어류 5가지 유형으로 나타났다. 네트워크 분석의 허브 점수가 높은 상위 5종의 어류는 블루길, 물개, 수수미꾸리, 남방종개, 새코미꾸리 순으로 나타났으며 먹이원 중 허브 점수가 높은 상위 5 종류의 먹이원은 파리목, 하루살이목, 이지목, 김발돌말목, 쪽배돌말목 순으로 조사되었다.

**저자정보** 지창우(전남대학교 박사 후 연구원), 이대성(경희대학교 대학원 박사과정), 이다영(경희대학교 대학원 박사과정), 광인실(전남대학교 교수), 박영석(경희대학교 교수)

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

**이해관계** 본 연구는 이해관계의 충돌 여지가 없습니다.

**연구비** 본 결과물은 환경부의 재원으로 한국환경산업기술원 수생태계 건강성 확보 기술개발사업의 지원(과제번호: 2020003050003)과 한국연구재단의 지원(NRF-2018R1A6A1A03024314 & NRF-2019R1A2C1087099)을 받아 연구되었습니다.

## REFERENCES

Bae, M.-J. and Y.-S. Park. 2019. Evaluation of precipitation impacts on benthic macroinvertebrate communities at three different stream types. *Ecological Indicators* **102**: 446-456.

Baek, H.-M., H.-S. Sim, H.-N. Youn and H.-B. Song. 2008. Feeding ecology of endangered *Cottus hangiongensis* in the Hosan stream, Korea. *Korean Journal of Ichthyology* **20**: 279-284.

Baek, H.-M. and H.-B. Song. 2005. Digestive apparatus and food of the Korean bitterling, *Acheilognathus signifer* (Cyprinidae). *Korean Journal of Ichthyology* **17**: 57-63.

Baek, H.-M., H.-B. Song, H.-S. Sim, Y.-G. Kim and O.-K. Kwon. 2002. Habitat segregation and prey selectivity on cohabita-

tion fishes, *Phoxinus phoxinus* and *Rhynchocypris kumgangensis*. *Korean Journal of Ichthyology* **14**: 121-131.

Brodeur, R.D. and W.G. Pearcy. 1992. Effects of environmental variability on trophic interactions and food web structure in a pelagic upwelling ecosystem. *Marine Ecology Progress Series* **84**(2): 101-119.

Byeon, H.-K. 2007. Ecology of *Koreocobitis rotundicaudata* (Cobitidae) in the Naerin stream, Korea. *Korean Journal of Ichthyology* **19**: 299-305.

Byeon, H.-K. 2012. Population ecology of *Squalidus japonicus coreanus* (Cyprinidae) in the Namhan river, Korea. *Korean Journal of the Environmental Ecology* **26**: 367-373.

Byeon, H.-K. 2017. Studies on the feeding habits of Korean aucha perch, *Coreoperca herzi* in the Geum eiver, Korea. *Korean Journal of the Environmental Ecology* **31**: 472-478.

Byeon, H.-K. and S.-R. Jeon. 1997. Feeding habit of bluegill, *Lepomis macrochirus* introduced in Korea. *Korean Journal of Environmental Biology* **15**: 165-174.

Byeon, H.-K., H.-S. Sim, J.-S. Choi, Y.-M. Son, J.-K. Choi and S.-R. Jeon. 1995. Feeding habit of the river sculpin, *Cottus poecilopus* from the streams at Mt. Chiak, Korea. *Korean Journal of Ichthyology* **7**: 160-170.

Byeon, H.-K., H.-B. Song, S.-R. Jeon and Y.-M. Son. 1997. Feeding habit of bluegill, *Lepomis macrochirus*, introduced at lake Paldang. *Korean Journal of Limnology* **30**: 75-84.

Byeon, H.K. 2010a. Ecological characteristics of land-locked and anadromous populations of *Hypomesus nipponensis* (Osmeridae). *Korean Journal of Ichthyology* **22**: 249-255.

Byeon, H.K. 2010b. Ecology study of *Orthrias nudus* (Balitoridae) in the Eoron stream of Korea. *Korean Journal of Ichthyology* **22**: 162-167.

Carreon-Martinez, L. and D. D. Heath. 2010. Revolution in food web analysis and trophic ecology: diet analysis by DNA and stable isotope analysis. *Molecular Ecology* **19**: 25-27.

Choi, B. and K.-H. Shin. 2018. Applications and prospects of stable isotope in aquatic ecology and environmental study. *Korean Journal of Ecology and Environment* **51**: 96-104.

Choi, H.C., J.M. Park, G.W. Baeck and S.H. Huh. 2016. The summer diet of a juvenile barbell steed, *Hemibarbus labeo*, in the surf zone of the Nakdong river estuary, Korea. *Journal of the Korean Society of Marine Environment and Safety* **22**: 766-772.

Choi, J.-S., O.-K. Kwon, J.-H. Park and H.-K. Byeon. 2001. Feeding habit of *Gobiobotia breuibarba* (Cyprinidae) from the Hongcheon river, Korea. *Korean Journal of Ichthyology* **13**: 230-236.

Choi, J.-S., Y.-S. Jang, K.-Y. Lee and O.-K. Kwon. 2004. Feeding habit of *Gobiobotia macrocephala* (Cyprinidae) from the Namhan river, Korea. *Korean Journal of Ichthyology* **16**: 165-172.

Choi, J.S., K.Y. Lee, Y.S. Jang, J.H. Park and O.K. Kwon. 2006.

- Feeding habit of *Rhynchocypris kumgangensis* (Cyprinidae) from the Hongcheon river, Korea. *Korean Journal of Environmental Biology* **24**: 29-37.
- Choi, Y.M., J.T. Yoo, J.H. Choi, K.H. Choi, J.K. Kim, Y.S. Kim and J.B. Kim. 2008. Ecosystem structure and trophic level to the oceanographic conditions around the waters of Jeju Island. *Journal of Environmental Biology* **29**: 419-425.
- Chong, D.-S. 1986. Morphological and bionomical studies of *Niwaella multifasciata* (WAKIYA et MORI). Cheonbuk National University.
- Csardi, G. and T. Nepusz. 2006. The igraph software package for complex network research. *InterJournal, Complex Systems* **1695**: 1-9.
- Cultural Heritage Administration. 2011. Propagation and restoration research of natural monument fish (*Gonoprokopterus mylodon*) Cultural Heritage Administration.
- Hong, Y.-K. 2014. Studies of the conservation biology of an endangered freshwater fish, *Microphysogobio rapidus* (Cyprinidae). Soonchunhyang University.
- Hong, Y.-K., H. Yang and I.-C. Bang. 2011. Habitat, reproduction and feeding habit of endangered fish *Koreocobitis naktongensis* (Cobitidae) in the Jaho stream, Korea. *Korean Journal of Ichthyology* **23**: 234-241.
- Horn, H.S. 1966. Measurement of "overlap" in comparative ecological studies. *The American Naturalist* **100**: 419-424.
- Inland Aquaculture Research Center. 2009. Investigation of the impact of habitat modification on freshwater ecosystem. National Fisheries Research & Development Institute.
- Jo, H., E. Jeppesen, M. Ventura, T. Buchaca, J.-S. Gim, J.-D. Yoon, D.-H. Kim and G.-J. Joo. 2019a. Responses of fish assemblage structure to large-scale weir construction in riverine ecosystems. *Science of the Total Environment* **657**: 1334-1342.
- Jo, H., D.-K. Kim, K. Park, W.-O. Lee and I.-S. Kwak. 2019b. A literature review of fish feeding research in the Coast - Estuary areas of Korean peninsula. *Korean Journal of Ecology and Environment* **52**: 126-135.
- Jung, J.-H., J.-Y. Park, Y.-H. Yoon, H.-M. Lim and W.-J. Kim. 2014. A Survey on fish habitat conditions of domestic rivers and construction of its database. *Journal of Korean Society of Environmental Engineers* **36**: 221-230.
- Kang, D.-W. 2011a. Feeding ecology of the endangered species, slender shinner (*Pseudopungtungia tenuicarpa*) from Korea. Chonnam National University.
- Kang, Y.H. 2011b. Fish fauna and structural change of the fish community in the Nakdong River. Kyungpook National University.
- Kim, E.-J., I.-S. Kim and N. Onikura. 2011a. Size-related changes in food of dwarf loach, *Kichulchoia brevifasciata* (Kim & Lee, 1995). *Folia Zoologica* **60**: 295-301.
- Kim, H.-S., H. Yang and Y.-K. Hong. 2014. Population ecology of endangered fish *Gobiobotia naktongensis* inhabiting the Gamcheon stream, Nakdonggang river (Pisces: Gobiinae). *Korean Journal of Ichthyology* **26**: 1-10.
- Kim, H.S., J.G. Ko, W.S. Choi and C.Y. Park. 2015. Population ecology of Korean rose bitterling, *Rhodeus uyekii* (Pisces: Acheilognathinae) in the Bong-seocheon, Mankyonggang (River), Korea. *Korean Journal of Ichthyology* **27**: 78-85.
- Kim, I.-S. and M.-H. Go. 2004. Ecological research of *Cobitis tetralineata* and *Iksookimia longicarpus* in Sumjin river. Pages 427-428 in Proceedings of the Korean Aquaculture Society Conference. The Korean Society of Fisheries and Aquatic Science.
- Kim, I.S., Y. Choi, C.R. Lee, Y.J. Lee, B.J. Kim and J.H. Kim. 2005. Primary color Korean fishes encyclopedia. Kyohak.
- Kim, I.S., J.Y. Park, H. Yang, H.H. Lee, Y.S. Seo and G.P. Park. 2011b. Construction of Korean freshwater fishes DB. Korea Institute of Science and Technology Information.
- Kim, I.-T., J.-R. Park and W.-J. Kim. 2013. Indirect evaluation of aquatic animal diversity in Ilsan lake through the analysis of the growing condition and stomach contents of largemouth bass, *Micropterus salmoides*. *Journal of Korean Society of Environmental Engineers* **35**: 953-959.
- Kim, S.H. and J.Y. Park. 2014. Prey preference of *Liobagrus somjinensis* in Yo stream, Somjin river, Namwon-si, Korea. *Korean Journal of Ichthyology* **26**: 118-124.
- Kim, S.-T. 2017. Application of next generation sequencing (NGS) technique for the stomach content analysis of marine fish. Pukyong National University.
- Ko, M.-H. 2015. Habitat characteristics and feeding ecology of the Korean endemic species, *Iksookimia pacifica* (Pisces: Cobitidae) in the Bukcheon (stream), Korea. *Korean Journal of Ichthyology* **27**: 275-283.
- Ko, M.-H. and I.-C. Bang. 2018. Feeding ecology of the endangered Korean endemic miho spine loach, *Cobitis choii* (Pisces: Cobitidae) in Geumgang river, Korea. *Korean Journal of Ichthyology* **30**: 92-99.
- Ko, M.-H., H.-J. Kim, R.-Y. Myung and Y.-J. Won. 2018. The activity period and feeding ecology of the Korean eastern spined Loach, *Iksookimia yongdokensis* (Pisces: Cobitidae). *Korean Journal of Ichthyology* **30**: 27-35.
- Ko, M.-H., J.-Y. Park and S.-H. Kim. 2009. Habitat environment and feeding habitat of *Iksookimia koreensis* and *Cobitis lutheri* (Pisces: Cobitidae) in the Manyeong river, Korea. *Korean Journal of Ichthyology* **21**: 253-261.
- Kohonen, T. 1990. The self-organizing map. Pages 1464-1480 in Proceedings of the IEEE.
- Kwak, Y.-H. 2019. Studies of the conservation biology of an endangered freshwater fish, *Pseudobagrus brevicarpus*. Soonchunhyang University.
- Lee, D.Y., D.S. Lee, M.J. Bae, S.J. Hwang, S.Y. Noh, J.S. Moon and Y.S. Park. 2018a. Distribution patterns of odonate assemblages in relation to environmental variables in streams of South Korea. *Insects* **9**(4): 152.
- Lee, E.-H., M. Kim, H.-M. Kim, M. Son, K.-H. Chang and G.-S. Nam. 2013. Ecological characteristics and distribution of

- fish in the downstream region of Gyeongan stream. *Environmental Biology Research* **31**: 478-485.
- Lee, W.-O., M.-Y. Song and H.W. Park. 2018b. Freshwater fish status and management plan for Inland fishery resources. *The Korean Society of Fisheries and Aquatic Science*: p. 86.
- Lee, W.-O., H. Yang, S.-W. Yoon and J.-Y. Park. 2009. Study on the feeding of *Micropterus salmoides* in lake Okjeong and lake Yongdam, Korea. *Korean Journal of Ichthyology* **21**: 200-207.
- Moon, S.J. 2012. Distribution and population ecology of the far eastern brook lamprey *Lethenteron reissneri* in Korea. Soonchunhyang University.
- National Institute of Biological Resources (NIBR). 2019. National species list. National Institute of Biological Resources (NIBR), Incheon, Korea.
- National Institute of Environmental Research. 2016. Stream/River ecosystem survey and health assessment (IX). National Institute of Environmental Research.
- National Institute of Environmental Research. 2019. Guidelines for survey and assessment of stream/river ecosystem health (Stream). National Institute of Environmental Research, Incheon, Korea.
- Oksanen, J., F.G. Blanchet, M. Friendly, R. Kindt, P. Legendre, D. McGlenn, 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).
- Park, C.-W. 2016. Ecology of the endemic Korean Southern king spine loach, *Iksookimia hugowolfeldi*. Chonbuk National University.
- Park, M.-K. 2008. The ecological study on Korean ricefish, *Oryzias latipes* and its possibility as a new model to assess ecological toxicity. Chonbuk University.
- Park, Y.-S., R. Céréghino, A. Compin and S. Lek. 2003. Applications of artificial neural networks for patterning and predicting aquatic insect species richness in running waters. *Ecological Modelling* **160**: 265-280.
- Rahman, S. and C.-I. Lee. 2012. Long term changes pattern in marine ecosystem of Korean waters. *Journal of the Korean Society of Marine Environment & Safety* **18**: 193-198.
- Son, Y.-M. and H.-K. Byeon. 2005. Feeding habits of bull-head torrent catfish, *Liobagrus obesus* from the Geum river, Korea. *Korean Journal of Ichthyology* **19**: 215-219.
- Song, H. and Y. Son. 2003. Population ecology of *Microphysogobio longidorsalis* (Cyprinidae) from Korea. *Korean Journal of Ichthyology* **15**: 303-310.
- Song, M.-Y., S.-Y. Kim, Y.-K. Hong and W.-O. Lee. 2017. Studies on the feeding habits of Mandarin fish, *Siniperca scherzeri* in the Soyang lake, Korea. *Korean Journal of Ichthyology* **29**: 124-129.
- Wehrens, R. and J. Kruisselbrink. 2018. Flexible Self-Organising Maps in kohonen 3.0. *Journal of Statis* **87**: 1-18.
- Wootton, R.J. 2012. Ecology of teleost fishes. Springer Science & Business Media.
- Yoon, H.-N., J.-M. Kim, Y.-S. Bae and B.-S. Chae. 2007. Feeding habits of Korean torrent catfish *Liobagrus andersoni* in a tributary of the Namhan river, Korea. *Korean Journal of Ichthyology* **19**: 236-245.
- Yoon, H.-N., K.-D. Kim, Y.-L. Jeon, J.-H. Lee and Y.-J. Park. 2013. Stomach contents of the Manchurian trout (*Brachymystax lenok tsinlingensis*) and river salmon (*Oncorhynchus masou masou*) in the Odae mountain, Gangwondo. *Korean Journal of Ichthyology* **25**: 90-105.
- 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.