

Original article

## 비메트릭 다변량 척도법과 네트워크 분석을 통한 멸종위기 국내 담수어류 20종의 먹이원 분석

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

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

**Analysis of Food Resources of 20 Endangered Fishes in Freshwater Ecosystems of South Korea using Non-metric Multidimensional Scaling and Network 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), Young-Seuk Park<sup>1,\*</sup> (0000-0001-7025-8945) and In-Sil Kwak<sup>2,\*</sup> (0000-0002-1010-3965) (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** By reviewing previous literature, we analyzed the food sources of 20 out of 29 endangered fish species from freshwater ecosystems in South Korea. A total of 19 studies reported that food sources of 20 endangered fish species included 20 phyla, 31 classes, 58 orders, 116 families, and 154 genera. Arthropod, insecta, diptera, and chironomidae were the most fed animal food sources according to different resolution of taxa index on phylum, class, order and family. Similarity, bacillariophyta, bacillariophyceae, naviculales, and cymbellaceae were the most fed abundant plant sources. A larger number of fish species were reliant on animal food sources than plant food sources. 18 of the endangered fish preyed on arthropods, whereas only 6 species consumed bacillariophyta. To characterize the feeding groups of the 20 fish species, a hierarchical clustering analysis and non-metric multidimensional scaling analysis were conducted. The fish species were divided into two groups: 1) insectivores and 2) planktivores. A network analysis, which associated the link between endangered fishes and food sources, also revealed the same two groups. The highest hub score of food sources was for macroinvertebrates, including diptera (0.47), ephemeroptera (0.42), and trichoptera (0.38), based on the network analysis. Niche breadth was used to calculate the diversity of the food sources. *Phoxinus phoxinus* (0.57) showed the highest food source diversity among the fish species, whereas *Iksookimia pacifica* (0.01) showed the lowest. This study will be utilized for the conservation and restoration of the endangered fish species.

**Key words:** endangered fishes, food sources, network analysis, niche breadth

## 서론

Manuscript received 25 May 2021, revised 14 June 2021,  
revision accepted 15 June 2021

\* Corresponding author: Tel: +82-2-961-0946, Fax: +82-2-961-0244

E-mail: parkys@khu.ac.kr

Tel: +82-61-659-7148, Fax: +82-61-659-7149

E-mail: iskwak@chonnam.ac.kr

우리나라 하천은 댐과 하구둑, 저수지, 보 등의 다양한 공사와 인구 증가, 산업화에 따른 수질 악화 등으로 수중 생물의 서식지 및 산란지의 기능이 약화되었다(Jung

© 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.

et al., 2014; Ko and Bang, 2018). 하천의 수질이 나빠지면 서식 환경조건이 좁은 어류 민감종(Sensitive species)은 감소하고 여러 다른 환경에서도 생존이 가능한 내성종(Tolerant species)은 증가하는 것으로 보고되었다(Ko et al., 2017; An and Lee, 2018; Moyle and Cech, 2000). 예를 들어, 멸종위기종인 한강납줄개(*Rhodeus pseudosericeus*)의 경우 1995년부터 2001년에는 섬강 상류에 넓은 서식 분포를 보였으나 2012년부터 2017년까지의 분포조사에서는 서식이 확인되지 않았다(Ko et al., 2018). 이는 섬강 상류부에 황성댐(2000년 11월 준공) 건설로 인한 서식지 파괴와 육식성 어종인 끄리와 외래종인 배스의 복합적 영향인 것으로 추측되고 있다(Ko et al., 2018). 이외에도 가시고기(*Pungitius sinensis* (Ko, 2016))와 감돌고기(*Pseudopungtungia nigra* (Kim, 2020)), 꼬치동자개(*Pseudobagrus brevicorpus* (Kwak, 2019)) 등 다수의 멸종위기 어류가 서식처 파괴에 따른 개체수 감소가 보고되었다. 따라서 수생태 서식지 파괴에 따른 민감종 및 멸종위기종 보호가 필요하며 보전 및 복원을 위해서는 생태학적 특징 연구가 필수적이다(Ko and Bang, 2018). 특히 먹이원 분석과 같은 섭식생태 연구는 멸종위기종의 사육뿐만 아니라 방류지역 또는 복원지역 선정 및 서식처 복원에도 중요 정보를 제공할 수 있어 보존과 복원 연구에 필수적이다.

어류의 먹이원 연구는 담수생태계의 먹이망 또는 먹이 연쇄 분석에 기초 정보가 되고, 포식-피식 상호작용을 통해 타종과의 섭식 경쟁 등의 생태적인 특성을 이해하는데 유용하다. 특히 포식과 같은 섭식 활동은 군집 구조에 직접적인 영향을 주고받기 때문에 상대적으로 중요한 요소이다(Carreon-Martinez and Heath, 2010). 우리나라에서도 어류의 먹이원 연구는 1969년 풀망둑(*Acanthogobius hasta*)의 먹이 조사를 시작으로 2018년까지 총 101편이 발표되었다(Jo et al., 2019b). 하지만 대부분 연안과 해양에서 서식하는 어류의 먹이원이 주로 보고되었으며 담수 어류의 경우 45종의 1차 담수어(Primary freshwater fishes) (Kim et al., 2005)만이 보고되었다(Ji et al., 2020). 우리나라 담수어류는 기수종을 포함하여 39과 216종(Lee et al., 2018b)이 알려져 있으며, 멸종위기 I급 어류는 감돌고기(*Pseudopungtungia nigra*)를 포함한 11종, II급 어류는 가는돌고리(*Pseudopungtungia tenuicorpa*)를 포함한 16종이 지정되어 있다(Ministry of Environment (ME) 2020). 한편 천연기념물로 지정된 어류는 황쏘가리, 어름치, 미호종개, 꼬치동자개 4종으로 미호종개와 꼬치동자개는 멸종위기종 I급 어류로 중복 지정(Cultural Heritage Administration, 2017)되어 있어 우리나라의 법정 보호종 어류는 총 29종

이 지정되어 있다. 29종의 어류 중 먹이원이 보고된 어류는 20종으로 5목, 7과, 16속에 속한다.

본 연구에서는 국내 담수어류 중 멸종위기 어류의 먹이원 문헌을 수집하여 분석하고자 하였다. 멸종위기 어류를 보존하고 복원하기 위해서는 담수 생태계의 군집구조를 이해하고 섭식관계 연구가 중요하다. 이러한 중요성에도 불구하고 어류의 먹이원 연구는 극히 소수이며, 일부 해양 어류 군집 연구에서 위 내용을 분석을 통해 영양 구조를 분석한 바 있다(Choi et al., 2008; Rahman and Lee, 2012). 우리나라에서 출현하는 어류는 4강 45목 223과 724속 1,291종(National Institute of Biological Resources (NIBR) 2019)이 보고되어 있으며, Jo et al. (2019b)은 연안과 하구에서 서식하는 어류의 먹이원 문헌 101편을 수집하였고, 조사지 공간 및 종별 분포와 방법론적 특성을 분석하였다. 그러나 국내 담수어류의 먹이원에 대한 생태 군집의 관점에서 먹이원에 대한 네트워크 분석이나 관계, 중요 먹이원, 먹이원 폭에 대한 분석은 초보적이다(Ji et al., 2020). 특히 멸종위기 어류의 먹이원에 대한 문헌 연구가 정리되지 않아 국내 담수에 서식하는 멸종위기 어류의 연구 논문 현황에 대한 정리가 필요하다. 따라서 본 연구에서는 멸종위기 어류의 먹이망 및 중요 먹이원, 먹이원 폭 등의 기초 자료를 확보하기 위해 그 간의 멸종위기 어류 먹이원 자료를 수집-정리-분석하였다.

## 재료 및 방법

먹이원이 보고된 20종의 멸종위기 어류의 먹이원을 수집하고 정리하였다(Table 1). 수집된 멸종위기 어류의 먹이원을 분류군에 따라 가장 많은 어류가 섭식하는 상위 먹이원 10개를 정리하였고 어류가 그 먹이원을 먹은 비율(%N)을 정리하였다. 계층적 군집분석(Hierarchical cluster analysis)과 비메트릭 다변량 척도법(Non-metric multidimensional scaling, NMDS)을 이용하여 먹이원 종류에 따른 멸종위기 어류의 섭식 형태를 유형화하였다. 또한 네트워크 분석(Network analysis)을 이용하여 멸종위기 어류와 먹이원의 연결관계를 분석하였고 허브 점수(Hub score)를 통해 중요 먹이원을 파악하였다. 나아가 각 어류의 먹이원 다양성은 Levin's standardized niche breadth (Levins, 1968)을 이용하여 먹이원의 다양성을 계산하였다.

### 1. 국내 담수어류 먹이원 연구 문헌 수집 및 정량분석

국내 담수에 서식하는 29종의 멸종위기 어류 먹이

**Table 1.** List of endangered fishes which food sources have been reported in the literature. Trophic guild(I: insectivore, O: omnivore, C: carnivore) and endemic species were from 'National Ecosystem Survey' (Ministry of Environment, 2009~2019) and on-line database of 'National Institute of Biological Resources'. Abbreviation of species is the initial of the genus and first letters of the specific epithet (e.g., PT, *Pseudopungtungia tenuicorpa*).

Order	Family	Genesous	Scientific name	Abbreviation	Trophic guild	Endemic species	Reference		
Cypriniformes	<i>Pseudopungtungia</i>		<i>P. tenuicorpa</i>	PT	I	O	Kang, 2011		
			<i>P. nigra</i>	PN	I	O	Inland Aquaculture Research Institute, 2009		
	<i>Rhynchocypris</i>		<i>R. kumgangensis</i>	RK	I	O	Choi <i>et al.</i> , 2006		
		<i>Gobiobotia</i>		<i>G. macrocephala</i>	GM	I	O	Choi <i>et al.</i> , 2004	
				<i>G. breviparba</i>	GB	I	O	Choi <i>et al.</i> , 2001	
		<i>G. nakdongensis</i>	GN	I	O	Kim <i>et al.</i> , 2014			
		<i>Hemibarbus</i>		<i>H. mylodon</i>	HM	I	O	Cultural Heritage Administration, 2011	
		<i>Acheilognathus</i>		<i>A. signifer</i>	AS	O	O	Back and Song, 2005	
		<i>Microphysogobio</i>		<i>M. rapidus</i>	MR	O	O	Hong, 2014	
		<i>Phoxinus</i>		<i>P. phoxinus</i>	PP	I		Baek <i>et al.</i> , 2002	
Cobitidae	<i>Iksookimia</i>		<i>I. pumila</i>	IPA	O	O	Inland Aquaculture Research Institute, 2009		
			<i>I. pacifica</i>	IPB	I	O	Ko, 2015		
		<i>Cobitis</i>		<i>C. choit</i>	CC	I	O	Go and Bang, 2018	
		<i>Koreocobitis</i>		<i>K. nakdongensis</i>	KN	O	O	Hong <i>et al.</i> , 2011	
		<i>Kichulchoia</i>		<i>K. brevipasciata</i>	KB	I	O	Kim <i>et al.</i> , 2011	
	Bagridae		<i>Pseudobagrus</i>		<i>P. brevicorpus</i>	PB	I	O	Kwak, 2019
		Amblycipitidae	<i>Liobaerus</i>		<i>L. obesus</i>	LO	I	O	Son and Byeon, 2005
	Salmoniformes	Salmonidae		<i>Brachymystax</i>	BL	C		Yoon <i>et al.</i> , 2013	
				<i>Lethenteron</i>	LR	O		Moon, 2012	
	Scorpaeniformes	Cottidae		<i>Cottus</i>	CH	I	O	Baek <i>et al.</i> , 2008	

원 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(Table 1). 본 조사에서 수집된 문헌은 13편의 학술논문과 4편의 학위논문, 2편의 연구보고서로 멸종위기 어류 20종의 먹이원 종류를 생물 분류군 단위(예, 속, 과, 목)로 보고한 문헌을 사용하였다. 분류군 단위로 판단이 어려운 동위원소 분석과 같은 문헌은 제외하였다.

어류의 위내용물 분석은 시대에 따라 방법이 다소 차이가 있으므로(Jo *et al.*, 2019b), 다음과 같은 방법으로 먹이원을 취합하였다. 최근 어류의 먹이원 분석은 대부분 상대 중요성지수 (IRI, Index of Relative Importance) 지표를 사용하고 있으나(Jo *et al.*, 2019b), 일부 문헌(예, (Baek and Song, 2005))의 경우 먹이원의 개체수 또는 개체수 비율(%N)만 보고하기도 하였다. 그에 따라 본 조사에서는 가급적 많은 멸종위기 어류의 먹이원을 분석하기 위해 개체수 비율을 이용하여 정량 분석하였다. 식물플랑크톤과 같이 구간(예; +++: 250~500)으로 표시한 먹이원은 중간값을 취하여 분석하였고 치어와 성어 등의 연령에 따른 먹이원 분석(예, (Baek and Song, 2005))은 성어를 기준으로 하여 먹이원을 취합하였다. 먹이원 자료를 취합한 20종의 먹이원 분석은 먹이원의 분류군에 따라 각 먹이원을 먹은 어류의 종수와 그 먹이를 먹은 어류의 전체 먹이원 개체수에서 그 먹이원의 개체수 비율을 구하였다.

## 2. 먹이원에 따른 담수어류 섭식 특성 유형화와 네트워크 분석

멸종위기 어류의 먹이원에 따라 멸종위기 어류를 분류하고, 먹이원과의 관계를 확인하기 위해 계층적 군집분석(Dray and Legendre, 2008)과 비메트릭 다변량 척도법(NMDS, (Legendre and Legendre, 2012))을 사용하였다. 계층적 군집분석은 Bray-Curtis 거리(Beals, 1984)를 구한 후 Ward 연결법(Ward Jr, 1963)을 이용하여 먹이원의 유사성에 따라 멸종위기 어류를 그룹화하였다. 계층적 군집분석에서 사용한 자료는 NMDS에 동일하게 적용되어 그룹화된 지점은 NMDS 상에 나타내었고 먹이원도 같이 나타내 주었다. NMDS 분석 방법은 2, 3차원으로 차원을 축소하여 시각화와 해석에 용이하며 여러 자료 타입을 처리할 수 있다는 장점을 가지고 있다(Moon *et al.*, 2020). 계층적 군집분석과 NMDS 분석을 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.

멸종위기 어류와 먹이원과의 관계를 유추하기 위하여 네트워크 분석을 수행하였다(Csardi and Nepusz, 2006; Bae and Park, 2019). 어류와 먹이원을 정점(node)으로 지정하고 어류의 먹이원 섭식 비율을 연결선(link)의 굵기(width)로 네트워크를 구성하였다. 네트워크 분석의 경우에도 앞서의 계층적 군집분석과 NMDS 분석과 마찬가지로 목(order) 수준으로 입력자료를 사용하였다. 본 연구에서 수행한 모든 분석은 R 프로그램(version 3.6.3; <https://www.r-project.org/>) 상에서 이루어졌으며, 계층적 군집분석과 NMDS는 vegan 패키지(Oksanen *et al.*, 2019)를 사용하였다. 네트워크 분석은 igraph(Csardi and Nepusz, 2006) 패키지를 이용하였다.

## 3. 먹이원에 따른 담수어류 먹이폭 분석

수집한 어류 20종의 먹이원 다양성을 구하기 위해 섭식 폭 지수(dietary breadth index, Bi)를 계산하였다. Bi 지수는 레빈 표준 생태지위 폭(Levin's standardized niche breadth) (Levins, 1968)을 이용하여 구하였으며 다음의 식을 통해 계산할 수 있다.

$$\hat{B}_A = \frac{\hat{B} - 1}{n - 1}$$

여기서  $\hat{B}_A$ 는 레빈 표준 생태지위 폭이며 생태지위 폭의 레빈 측정(Levin's measure of niche breadth,  $\hat{B}_A = 1/\sum p_j^2$ )를 이용하여 구한다. 이때,  $p_j$ 는 먹이원  $j$ 를 섭식할 확률이며  $n$ 은 전체 먹이원 종수 또는 종류의 수를 나타낸다. 계산된 지수 값이 1에 가까울 경우 다양한 먹이원을 먹은 어류를 나타내고 0이면 한 종류의 먹이만 먹는 것으로 해석할 수 있다.

# 결 과

## 1. 멸종위기 어류의 먹이원 정량 분석

본 연구에서는 국내 담수 멸종위기 어류 5목, 7과, 16속, 20종의 먹이원을 문헌 조사를 통해 수집하였다(Table 1). 수집한 어류 중 가는돌고기(PT)를 포함한 17종은 국내 고유종으로 조사되었으며 국내 고유종이 아닌 멸종위기 어류는 연준모치(PP)와 열목어(BL), 다목장어(LR) 3종으로 나타났다. 멸종위기 어류 중 먹이원이 조사된 어류는 잉어목(Cypriniformes)에서 잉어과(Cyprinidae) 10종, 미꾸리과(Cobitidae) 5종으로 조사되었다. 메기목 멸종위기 어류에

서는 동자개과(Bagridae)와 통가리과(Amblycipitidae)에서 각 1종의 먹이원이 보고되었고, 연어목(Salmoniformes)에서 열목어(BL) 1종, 칠성장어목(Petromyzontiformes)에서 다목장어(LR) 1종, 쏨뱅이목(Scorpaeniformes)에서 한독중개(CH) 1종의 먹이원이 보고되었다. 수집된 어류의 섭식길드는 '수생태계 현황 조사 및 건강성 평가 방법 등에 관한 지침' (National Institute of Environmental Research (NIER) 2019)을 참조하여 분류하였는데, 육식성 어류는 열목어(BL) 1종이 포함되었으며 충식성 어류는 가는돌고기(PT)를 포함한 14종, 잡식성 어류는 묵납자루(AS)를 포함한 5종으로 나타났다.

멸종위기 어류 20종의 먹이원은 20문, 31강, 58목, 116과, 154속으로 나타났다. Table 2는 멸종위기 어류 20종의 위내용물을 분석·정리 후 분류군에 따라 섭식 어류가 많은 상위 10종류의 먹이원을 보여주고 있다. 문(Phylum) 수준에서 가장 많은 어류가 먹는 먹이원은 절지동물(Arthropoda)이었으며 20종의 어류 중 18종의 어류가 섭식하였으며, 18종 어류의 위내용물에서 절지동물이 차지하는 평균 비율은 약 93%로 조사되었다. 절지동물을 먹지 않은 멸종위기 어류는 여울마자(MR)와 다목장어(LR)로 조사되었다. 식물류 먹이원 중 가장 많은 어류가 먹은 먹이원은 규조류(Bacillariophyta)로 묵납자루(AS), 여울마자(MR), 연준모치(PP), 미호종개(CC), 좁수수치(KB), 다목장어(LR) 6종으로 나타났으며, 6종의 먹이원에서 규조류가 차지하는 평균 비율은 약 53%로 조사되었다. 녹조류(Chlorophyta)를 섭식한 멸종위기 어류는 3종(묵납자루(AS), 여울마자(MR), 연준모치(PP))으로 먹이원 중 녹조류가 차지하는 평균 비율은 약 27%로 나타났으며 그 아래 순으로 연체동물류(Mollusca), 윤조류(Charophyta), 선형충류(Nematomorpha)도 3종의 멸종위기 어류가 먹은 것으로 나타났다.

강(Class)에서 멸종위기 어류 20종이 많이 먹은 먹이원은 곤충강(Insecta), 윗돌말강(Bacillariophyceae), 새각강(Branchiopoda), 복종강(Gastropoda), 접합조강(Conjugatophyceae), 연가시강(Gordioida), 소악강(Maxillopoda), 체돌말강(Coscinodiscophyceae), 녹조강(Chlorophyceae), 남조강(Cyanophyceae) 순으로 나타났다. 가장 많은 어류가 먹은 곤충강의 경우 절지동물과 같은 18종 약 93%로 절지동물류 먹이는 모두 곤충강 먹이로 조사되었다. 규조류는 윗돌말강이 5종 약 12%, 체돌말강이 2종 약 13%로 조사되었다.

목(Order)에서 가장 많은 어류가 먹은 동물류 먹이원은 파리목(Diptera), 하루살이목(Ephemeroptera), 날도래목(Trichoptera), 강도래목(Plecoptera), 딱정벌레목

(Coleoptera)이었으며 이지목(Anomopoda)을 제외한 모두 곤충류 먹이원으로 조사되었다. 파리목은 앞서 절지동물을 먹지 않은 여울마자(MR)와 다목장어(LR)를 제외한 18종의 멸종위기 어류가 모두 섭식하였으며 비율은 약 60%로 나타났다. 하루살이목은 15종의 멸종위기 어류가 섭식하였으며 곤충강을 먹은 멸종위기 어류 중 하루살이목을 먹지 않은 어류는 흰수마자(GN), 미호종개(CC), 묵납자루(AS) 3종으로 조사되었다. 날도래목의 경우 13종의 멸종위기 어류가 섭식하였으며 곤충강을 먹은 어류 중 날도래목을 섭식하지 않은 어류는 묵납자루(AS), 흰수마자(GN), 미호종개(CC), 부안종개(IPA), 북방종개(IPB) 5종으로 조사되었다. 식물류 먹이원에서 가장 비율이 높은 규조류 중 쪽배돌말목(Naviculales)을 5종이 섭식하였으며 앞서의 규조류를 섭식한 6종 중 연준모치(PP)가 섭식하지 않은 것으로 나타났으나, 이는 연준모치(PP) 먹이원 연구 문헌에서 식물류 먹이원을 규조류인 문(Phylum) 수준까지만 조사하였기 때문인 것으로 판단된다.

과(Family)에서 가장 많은 어류가 먹은 먹이원은 갈따구과(Chironomidae)로 17종이 섭식하였고 비율은 약 47%로 조사되었다. 파리목을 섭식한 어류 중 갈따구과를 섭식하지 않은 것으로 나타난 어류는 가는돌고기(PT)로 조사되었으나, 가는돌고기(PT)의 경우도 앞서의 연준모치(PP)와 마찬가지로 먹이원 목(Order)까지만 조사하였기 때문인 것으로 판단된다. 갈따구과를 제외한 나머지 상위 9개의 먹이원도 모두 곤충류 먹이원이었으며 식물류 먹이원은 반달돌말과(Cymbellaceae)와 김발돌말과(Fragilariaceae)가 각각 5종과 4종의 멸종위기 어류가 섭식한 것으로 나타났다.

속(Genus)에서는 미분류 갈따구과가 13종이 섭식하였으며 그 비율은 약 59%인 것으로 조사되었다. 미분류 갈따구과에 들지 않은 갈따구류 먹이원은 갈따구속(*Chironomus* sp.)으로 금강모치(RK)와 묵납자루(AS), 꼬치동자개(PB), 열목어(BL) 4종으로 먹이원으로 차지하는 비율은 약 40%로 조사되었다. 갈따구류를 제외한 곤충류 먹이원은 하루살이목 곤충이 많았으며 하루살이목을 제외한 곤충류 먹이원 중 상위 10위에 드는 먹이원은 날도래목 곤충으로 조사되었다. 식물류 먹이원 중 섭식한 어류가 많은 먹이원은 반달돌말속(*Cymbella* sp.)으로 조사되었으며 5종에서 14%의 비율을 보였다.

## 2. 먹이원에 따른 담수어류 섭식 특성 유형화와 네트워크 분석

계층적 군집분석을 이용한 먹이원에 따른 멸종위기 어

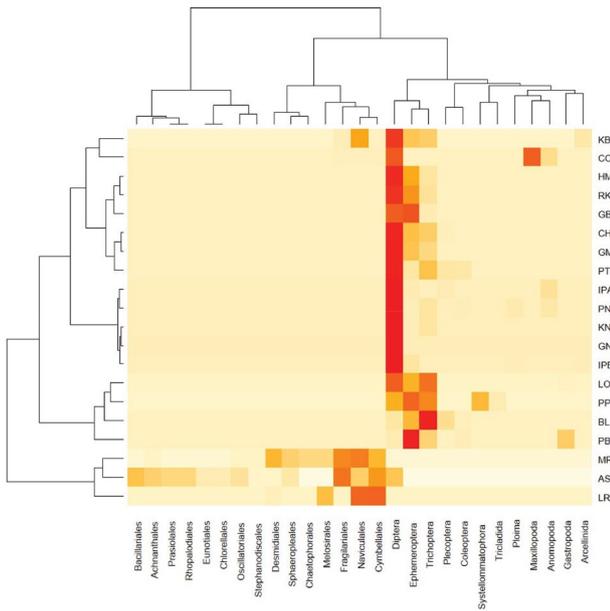
**Table 2.** Food sources of 20 endangered based on the literature in Table 1. 'No. of fish' indicate the number of fish species feeding the sources. 'Ratio (standard error)' is the average (%) of the food sources fed by fishes.

Phylum	Arthropoda	Bacillariophyta	Chlorophyta	Mollusca	Charophyta	Nematomorpha	Cyanobacteria	Nematoda	Amoezoa	Rotifera
Number of fish	18	6	3	3	3	3	2	2	2	2
Average ration (standard error)	92.9 (±8.0)	52.6 (±12.5)	26.5 (±6.8)	10.8 (±2.8)	5.7 (±1.8)	0.2 (±0.1)	4.6 (±1.1)	2.2 (±0.6)	1.5 (±0.5)	1.4 (±0.4)
Class	Insecta	Bacillariophyceae	Branchiopoda	Gastropoda	Conjugatophyceae	Gordioida	Maxillopoda	oscinodiscophyceae	Chlorophyceae	Cyanophyceae
Number of fish	18	5	5	3	3	3	2	2	2	2
Average ration (standard error)	92.9 (±8.0)	47.5 (±11.8)	3.6 (±1.0)	10.8 (±2.8)	5.7 (±1.8)	0.2 (±0.1)	19.0 (±6.0)	12.6 (±3.0)	9.6 (±2.5)	4.6 (±1.1)
Order	Diptera	Ephemeroptera	Trichoptera	Plecoptera	Naviculales	Cymbellales	Coleoptera	Fragilariales	Anomopoda	Desmidiates
Number of fish	18	15	13	7	5	5	5	4	4	3
Average ration (standard error)	60.2 (±8.2)	22.6 (±5.4)	16.7 (±4.3)	1.9 (±0.6)	17.9 (±4.7)	14.5 (±4.4)	1.2 (±0.4)	10.9 (±3.2)	4.5 (±1.2)	5.7 (±1.8)
Family	Chironomidae	Heptageniidae	Baetidae	Hydropsychidae	Ephemeroptera	Simuliidae	Ameletidae	Trichoptera	Ephemerelellidae	Glossosomatidae
Number of fish	17	10	9	8	7	7	7	6	6	6
Average ration (standard error)	47.5 (±8.7)	3.6 (±1.0)	11.1 (±3.31)	6.8 (±2.7)	12.0 (±3.7)	4.3 (±1.5)	2.7 (±1.4)	7.3 (±2.0)	4.4 (±2.0)	3.8 (±1.5)
Genus	Chironomidae	Baetis	Ephemeroptera	Hydropsyche	Epeorus	Ecdyonurus	Trichoptera	Ameletus	Cymbella	Navicula
Number of fish	13	8	7	7	7	7	6	6	5	5
Average ration (standard error)	59.2 (±9.5)	13.0 (±3.5)	12.0 (±3.7)	9.1 (±2.9)	3.2 (±0.8)	2.6 (±1)	7.3 (±2)	0.4 (±0.1)	14.12 (±4.3)	14.0 (±3.5)

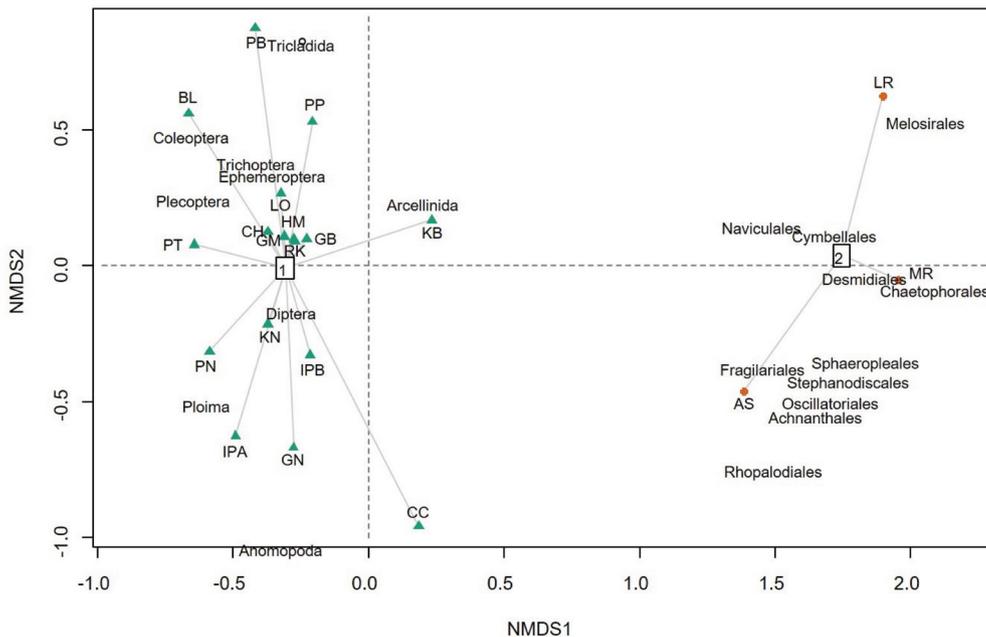
류의 유형화는 크게 2개의 그룹으로 나뉘었다(Fig. 1). 파리를 먹지 않는 어류와 파리를 먹는 어류로 크게 나뉘었으며 파리를 먹지 않는 어류는 여울마자(MR), 묵납자루(AS), 다목장어(LR) 3종이 그림의 아래쪽에 유형화되었

으며 나머지 17종이 3종과 별개로 그룹화되었다. 파리를 먹은 어류 중에서도 통사리(LO), 연준모치(PP), 열목어(BL), 꼬치동자개(PB)는 파리목 섭식율이 비교적 낮게 나타났으며 상대적으로 하루살이목과 날도래목의 영향이 강하게 나타났다. 파리를 먹지 않은 3종의 어류는 김발돌말목(Fragilariiales)과 쪽배돌말목(Naviculales), 반달돌말목(Cymbellales)이 강하게 나타난 특징이 있었다. NMDS에서도 2개의 그룹으로 나뉘었으며 그림의 왼편의 1번 그룹에는 파리를 비롯한 저서무척추동물을 섭식한 어류가 그룹화되었고 오른편 2번 그룹에는 구조류를 섭식한 여울마자(MR), 묵납자루(AS), 다목장어(LR)가 유형화되었다(Fig. 2). 먹이원의 경우 1번 그룹 아래쪽에 파리목이 위치하여 얼룩새코미꾸리(KN), 감돌고기(PN), 북방종개(IPB), 부안종개(IPA)는 날도래목이나 하루살이목보다 파리목과 유형성이 높은 것으로 판단이 된다. 반면 통사리(LO), 연준모치(PP), 열목어(BL), 꼬치동자개(PB)는 1번 그룹 위편에 있는 날도래목과 하루살이목과 위치가 가까워 계층적 군집분석과 유사한 결과를 보였다.

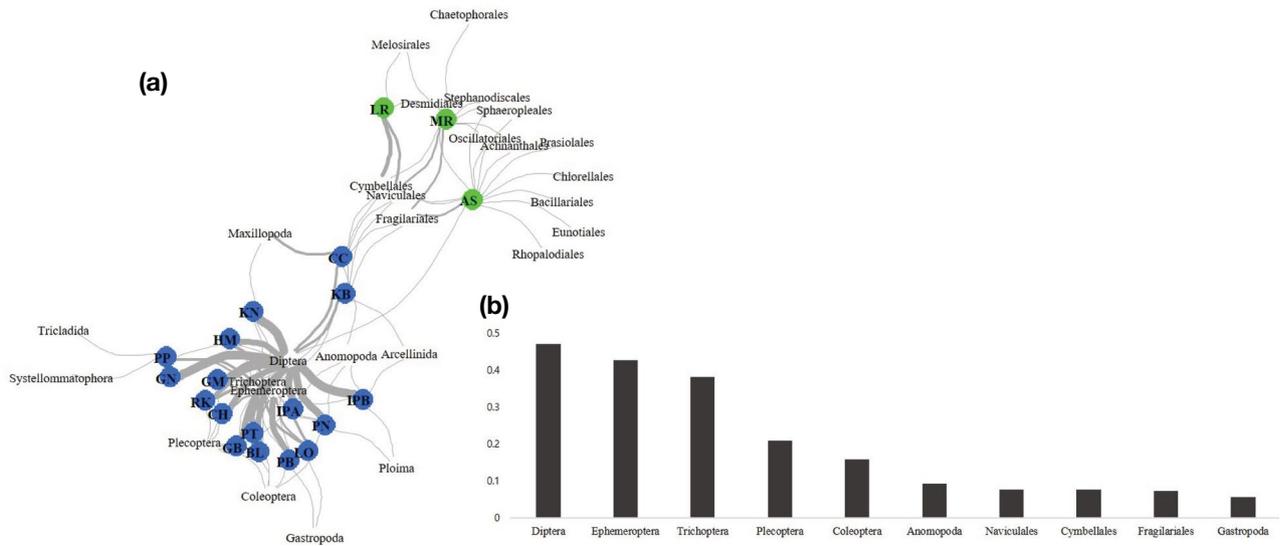
멸종위기 어류와 먹이원과의 네트워크 분석 결과는 Fig. 3a)와 같다. 어류 노드의 경우 약자와 함께 둥근 원으로 표시하였으며 먹이원 노드는 목(order)으로 표기하였다. 일부 목 수준에서 미분류된 먹이원은 상위분류군인 강(class)으로 표기하였다(예, Gastropoda). 계층적 군집분석과 NMDS에서 하나의 그룹으로 유형화된 여울마자(MR),



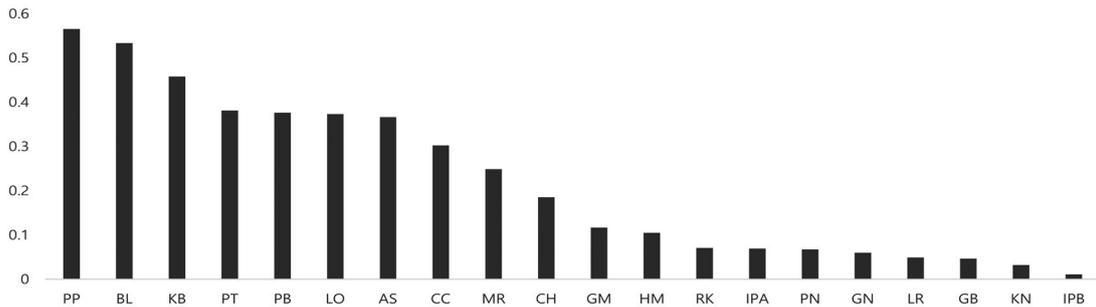
**Fig. 1.** Hierarchical clustering of 20 endangered fishes according to the food sources and cluster distance according to the Bray-Curtis dissimilarity. The abbreviations can be seen in Table 1.



**Fig. 2.** NMDS (Non-metric multidimensional scaling) analysis of 20 endangered fishes according to the food sources and cluster according to hierarchical clustering (Fig. 2). The abbreviations in figure can be seen in Table 1.



**Fig. 3.** (a) 20 endangered fishes and food sources network. Fishes are presented as colored node with abbreviation and link appear association between fishes and food sources. The link width is proportionate to fed frequency. (b) Hub score of top food sources. Hub score is calculated by considering of network result.



**Fig. 4.** Levin's niche breadth index of 20 endangered fishes. The abbreviations of fish names can be seen the full scientific names in Table 1.

목납자루 (AS), 다목장어 (LR)는 네트워크 오른쪽 위편에 위치하고 있다. 다목장어 (LR)의 경우 반달돌말목과 쪽배돌말목과의 연결강도가 상대적으로 높게 나타나나 김발돌말목과는 연결이 없다. 반대로 여울마자 (MR)와 목납자루 (AS)는 쪽배돌말목과 김발돌말목과의 노드 연결이 상대적으로 크지만 반달돌말목과의 연결강도는 낮게 나타났다. 또한 여울마자 (MR)와 목납자루 (AS)는 연결강도가 다소 낮지만 상대적으로 많은 식물플랑크톤류 먹이원과 연결이 있지만 다목장어 (LR)의 경우 반달돌말목, 쪽배돌말목, 원통돌말목 (Melosirales), 테스미디움목 (Desmidiaceae)의 4목과의 연결 밖에 없는 것으로 나타났다. 저서무척추동물을 섭식하는 멸종위기 어류는 네트워크의 왼쪽 아래편에 위치하고 있다. 파리목이 대부분의 어류와 연결강도가 상대적으로 높게 나타났으나 미호종개, 줍수수치의 경우 파리

목과의 연결강도는 다른 어류에 비해 상대적으로 낮고 반달돌말목, 쪽배돌말목, 김발돌말목과도 낮은 연결강도를 보이고 있다. 파리목 다음으로 많은 어류가 섭식했던 날도래목과 하루살이목과 같은 수서곤충 먹이원은 파리목에 대해서는 다소 낮은 연결강도가 낮지만 많은 수의 어류와 연결이 있는 것으로 나타났으며 소악강 (Maxillopoda), 이지목 (Anomopoda), 유각변형충목 (Arcellinida), 유영목 (Ploima)과 같은 동물플랑크톤류 먹이원은 연결강도도 수서곤충에 비해 낮으며 연결된 어류도 미호종개 (CC) 등 연결되어 있는 어류의 수도 작았다.

네트워크 분석 결과 계산된 어류와 먹이원의 연결강도를 고려한 허브점수 상위 먹이원 10 항목은 Fig. 3b와 같다. 가장 높은 값을 보인 파리목 먹이원의 경우 허브점수는 0.47로 조사되었다. 하루살이목이 0.42, 날도래목이

0.38, 강도래목이 0.21, 딱정벌레목이 0.16으로 허브점수 상위 5개 분류군은 모두 수서곤충으로 나타났다. 동물플랑크톤류인 이지목의 경우 0.09로 나타났으며 식물플랑크톤에 해당하는 쪽배돌말목과 반달돌말목, 김발돌말목의 경우 각각 0.76, 0.76, 0.72로 조사되었다. 수서곤충을 제외한 저서무척추동물 중 가장 높은 허브점수를 보인 복족강의 경우 0.05로 나타났다.

### 3. 먹이원 폭 분석

멸종위기 어류 20종의 어류 중 먹이원 폭이 가장 큰 어류는 연준모치(PP)로 0.57의 Bi 지수 값을 보였다(Fig. 4). 다음으로 열목어(BL, 0.53), 줌수수치(KB, 0.46), 가는돌고기(PT, 0.38), 꼬치동자개(PB, 0.37), 통사리(LO, 0.37), 묵납자루(AS, 0.36), 미호종개(CC, 0.3)이 Bi 지수 값이 0.3 이상으로 조사되어 상대적으로 먹이 다양성이 높은 것으로 나타났다. 반면, 금강모치(RK, 0.07), 부안종개(IPA, 0.07), 감돌고기(PN, 0.067), 흰수마자(GN, 0.06), 다목장어(LR, 0.05), 돌상어(GB, 0.046), 얼룩새코미꾸리(KN, 0.03), 북방종개(IPB, 0.01)는 Bi 지수 값이 0.1 이하로 조사되어 먹이원 폭이 낮아 먹이원 선택에 취약성이 있을 것으로 예상된다.

## 고찰

국내 멸종위기 어류 29종 중 먹이원이 보고된 어류는 20종으로 나타났다(Table 1). 보고되지 않은 멸종위기 어류는 농어목의 꺾저기(*Coreoperca kawamebari*)와 남방동사리(*Odontobutis obscura*), 잉어목의 임실납자루(*Acheilognathus somjinensis*)와 한강납줄개(*Rhodeus pseudosericeus*), 모래주사, 백조어(*Culter brevicauda*), 버들가지(*Rhynchocypris semotilus*), 칠성장어목의 칠성장어(*Lethenteron japonicus*), 큰가시고기목의 가시고기(*Pungitius sinensis*) 9종이다. 멸종위기 야생생물 1급으로 지정된 어류 중 먹이원이 보고되지 않은 어류는 남방동사리와 임실납자루 2종이며, 멸종위기 야생생물 2급 어류 중 먹이원이 보고되지 않은 어류는 나머지 7종이다.

20종의 멸종위기 어류는 식물류 먹이원보다 동물류 먹이원을 보다 많이 섭식한 것으로 조사되었다(Table 2). 문에서 절지동물을 먹은 어류는 20종 중 18종으로 조사되었으나 식물류 먹이원인 규조식물문과 녹조식물문을 먹은 어류는 각각 6종과 3종으로 나타났으며 그 먹이원이 차지하는 비율도 절지동물문의 경우 93%인데 비해 규조식물문은 53%로 큰 차이를 보였다. 하위 분류군에서도 같은

경향성을 보여 과 수준에서 상위 10개의 먹이원은 모두 저서무척추동물로 조사되었다. 특히 깔따구류의 경우 과 수준에서 50% 가까운 비율을 보여 다른 먹이원보다 위 내용물에서 차지하는 비중이 높았다.

Ministry of Environment (2010)에서는 멸종위기 어류의 보존 및 복원연구에 방류지 선정 또는 서식처 복원을 강조하고 있다. 해당 연구에서는 우리나라와 중국과 미국의 사례를 들며 서식처 복원을 하지 않은 경우 멸종위기 복원사업이 실패한 경우를 설명하고 있다. 먹이원 연구는 멸종위기 어류의 대량 사육 기술 개발뿐만 아니라 서식처 정보 획득에도 도움이 될 수 있다. 본 조사결과에서 섭식비율이 높았던 저서무척추동물의 경우, 담수생태계에서 종 다양성이 높으며 서식지에 따라 적응방식이 다양하며 영양단계에서는 1차 소비자로서 한편으로는 어류와 같은 2차 소비자의 먹이원으로서 생물다양성 연구 및 생태계 먹이망 연구, 서식처 특성 파악에 용이한 특징이 있다(Huryn *et al.*, 2008; Kwak *et al.*, 2018; Lee *et al.*, 2018a).

앞서 언급하였듯이 멸종위기 어류의 가장 중요한 먹이원은 저서무척추동물인 깔따구류였다(Table 2). 과 수준에서 20종 중 17종이 섭식하였으나 파리목까지만 분류한 가는돌고기(PT)의 경우에도 파리목 먹이원의 대부분은 깔따구류가 차지하고 있을 것으로 예상된다. 또한 속 수준에서도 깔따구는 미분류 과(Chironomidae) 형태로 기재하거나 금강모치(RK)와 묵납자루(AS), 꼬치동자개(PB), 열목어(BL) 4종에서는 *Chironomus* sp.로만 처리하여 깔따구 먹이원에 대한 정확한 정보를 얻기가 힘들었다. 하지만 깔따구는 종 수가 많은 큰 분류군이며 종에 따라 서식처의 특성도 큰 차이가 있는 분류군이다. 깔따구과는 해발 5,600 m의 네팔 빙하에서부터 수심 1,000 m 이상의 바이칼 호는 물론이고 유기물 오염이 된 서식처에까지 분포하는 등 서식처가 다양하고 분포 영역이 넓다(Linevich, 1963; Kohshima, 1985). 또한 우리나라에서는 깔따구아과(Chironominae), 깃깔따구아과(Orthocladinae), 늪깔따구아과(Tanypodinae) 3아과에서 24속 75종이 보고되어 종수도 다양한 편이다(Kwak, 2015). 그러므로 멸종위기 어류의 먹이원을 단순히 깔따구과로 처리하고 정확하게 종 분류를 하지 않는다면 멸종위기 어류의 담수 서식처 특성을 파악하는데에 도움이 되지 않는다.

가장 중요한 먹이원인 깔따구류는 가장 분류가 어려운 종이기도 하다. 그러므로 기존의 육안 분석과 더불어 새로운 방법을 도입하여 분류할 필요가 있다. 안전성동위원소(isotope analysis) 분석은 상대적으로 적은 양의 샘플을 이용하여 조사 생물의 먹이사슬 위치 또는 생태적 지위를 정량적으로 파악할 수 있는 장점이 있다(Choi and Shin,

2018). 하지만 안전성동위원소 분석 방법도 종(species) 또는 속(gene) 수준으로 정확한 동정이 어렵다는 단점이 있다. 최근 들어 DNA metabarcoding을 이용하여 위내용물 정량 분석과 비교(Jo *et al.*, 2019a)하며 보다 정밀한 연구 결과를 얻을 수 있을 것으로 보고되기도 하였다(Jo *et al.*, 2019b).

본 연구결과에서 나타난 어류의 먹이원에 따른 유형화(Figs. 1 and 2)는 기존의 섭식길드(Table 1)와 다소 차이가 있었다. 특히 잡식성 어류는 기존 섭식길드 분류 방식으로는 5종이나 본 연구에서는 미호종개(CC)와 줌수수치(KB) 2종이 잡식하는 것으로 조사되었다(Fig. 3a). 또한 열목어(BL)의 경우, 기존의 섭식길드 정보에는 육식성 어종으로 보고되고 있으나 먹이원 문헌 조사의 결과 충식성 어류로 나타났다. 열목어(BL)의 위내용물을 분석한 원 문헌(Yoon *et al.*, 2013)에도 열목어(BL)의 먹이원 중 곤충강이 99.6%를 차지하고 있으며 나머지 0.4%를 연가시강(Gordioida)과 거미강(Arachnida) 2개의 분류군으로 나타났다. 그러므로 열목어(BL)의 생태적 지위 또는 먹이원을 정확하게 파악하기 위해서는 앞서 언급한 안전성동위원소 분석이 필요할 것으로 사료된다.

먹이원 폭 분석의 경우, 레빈 표준 니체 폭을 이용하여 분석하였다(Fig. 4). 본 연구에서 가장 먹이원 폭이 넓은 어류는 연준모치(PP)로 나타났으며 가장 낮은 먹이원 폭을 보인 어류는 금강모치(RK, 0.07), 부안종개(IPA, 0.07), 감돌고기(PN, 0.067), 흰수마자(GN, 0.06), 다목장어(LR, 0.05), 돌상어(GB, 0.046), 얼룩새코미꾸리(KN, 0.03), 북방종개(IPB, 0.01)로 Bi 지수 값이 0.1 이하로 나타났다. 이상의 결과를 네트워크 분석 결과와 연결지어 볼 때, 북방종개(IPB), 얼룩새코미꾸리(KN), 돌상어(GB)는 파리목 먹이원에 의존성이 높은 것으로 판단이 되며 다목장어(LR)의 경우 반달돌말목과 쪽배돌말목에 대해 의존성이 높은 것으로 예상된다.

일부 문헌의 경우(Yang, 2009), 위내용물 분석을 먹이원의 개체수(N)가 아닌 개체수 비율(%N)만을 제공하여 적용에 한계가 있었다. 앞서의 열목어(BL)와 같이 육식성 어류의 위내용물 비율이 저서성무척추동물이 높은 경우 생체량을 고려하여 섭식특성을 분석해야 하는데, 개체수 비율만 표기한다면 정확한 특성 파악이 어렵다. 또한 담수생태계 군집의 에너지 흐름 연구를 위해서는 먹이원 개체수 및 생체량 정보가 필수적이기 때문에 차후 관련 연구자의 세심한 주의가 필요할 것으로 판단된다.

본 연구에서는 국내 담수 멸종위기 어류 20종의 먹이원을 먹이원에 대한 정량적 분석과 초보적인 모델 적용을 시도하였다. 차후 멸종위기 어류의 먹이원 연구는 아직 먹

이원이 보고되지 않은 9종에 대한 먹이원 정보를 조사해야 할 것으로 판단되며, 멸종위기 어류의 정확한 섭식길드 정보를 획득하기 위해 개체수 정보 또는 안전성동위원소 분석도 도입할 필요가 있을 것으로 사료된다. 또한 DNA metabarcoding과 같은 새로운 분석법을 도입하여 깔따구와 같이 종 분류가 어려운 먹이원에 대한 정확한 먹이원 분석이 필요할 것으로 예상된다. 이상의 문제점을 보완하면 차후 먹이원 연구의 결과는 멸종위기 어류의 대량 사육 및 서식처 특성 분석, 생태 먹이망 분석에 큰 도움이 될 것으로 판단된다.

## 적 요

국내 멸종위기 어류 25종의 먹이원을 문헌 조사한 결과, 먹이원은 20문, 31강, 58목, 116과, 154속으로 나타났다. 먹이원 중 가장 많은 어류가 섭식한 먹이원은 분류군에 따라 절지동물문, 곤충강, 파리목, 깔따구과로 조사되었으며, 식물류 먹이원은 돌말문, 옷돌말강, 반달돌말목, 반달돌말과로 조사되었다. 계층적 군집분석과 NMDS를 이용하여 멸종위기 어류 20종의 먹이원 유형화 결과, 어류를 주로 포식하는 충식성 어류와 식물플랑크톤을 섭식하는 어류 2가지 유형으로 나타났다. 네트워크 분석의 허브 점수가 높은 먹이원은 파리목, 하루살이목, 날도래목, 강도래목, 딱정벌레목으로 나타났으며 식물류 먹이원 중 허브 점수가 높은 쪽배돌말목과 반달돌말목, 김발돌말목으로 조사되었다. 먹이원 폭이 큰 어류는 연준모치(PP)와 열목어, 줌수수치, 가는돌고기, 꼬치동자개, 통사리, 묵잡자루, 미호종개로 Bi 지수 값이 0.3 이상으로 조사되어 다양한 먹이를 먹는 것으로 조사되었다. 반면, 금강모치, 부안종개, 감돌고기, 흰수마자, 다목장어, 돌상어, 얼룩새코미꾸리, 북방종개는 Bi 지수 값이 0.1 이하로 조사되어 먹이원 다양성이 낮게 조사되었다.

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

**저자기여도** 연구설계: 박영석, 광인실, 지창우, 자료 수집 및 관리: 지창우, 이대성, 이다영, 자료분석: 지창우, 이대성, 이다영, 원고작성: 지창우, 이대성, 박영석, 광인실, 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)을 받아 연구되었습니다.

## REFERENCES

- An, K.-G. and S.-J. Lee. 2018. Ecological health assessments, conservation and management in Korea using fish multi-metric model. *Korean Journal of Ecology and Environment* **51**: 86-95.
- 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. 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 cohabitation fishes, *Phoxinus phoxinus* and *Rhynchocypris kumgangensis*. *Korean Journal of Ichthyology* **14**: 121-131.
- 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.
- Beals, E.W. 1984. Bray-Curtis ordination: an effective strategy for analysis of multivariate ecological data. *Advances in Ecological Research* **14**: 1-55.
- 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, 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, 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, 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.
- Csardi, G. and T. Nepusz. 2006. The igraph software package for complex network research. *InterJournal, Complex Systems* **1695**: 1-9.
- Cultural Heritage Administration. 2017. Natural Monument Designation. Retrieved from <http://www.cha.go.kr/korea>. version (12/2017) (in Korean).
- Dray, S. and P. Legendre. 2008. Testing the species traits-environment relationships: the fourth-corner problem revisited. *Ecology* **89**: 3400-3412.
- 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.
- Huryn, A., J. Wallace and N. Anderson. 2008. Habitat, life history, secondary production and behavioral adaptations of aquatic insects, p. 55-103. An introduction to the aquatic insects of North America. 4th edition. Kendall/Hunt Publishing Company, Dubuque, Iowa.
- Inland Aquaculture Research Center. 2009. Investigation of the impact of habitat modification on freshwater ecosystem. National Fisheries Research & Development Institute.
- Ji, C.W., D.-S. Lee, D.-Y. Lee, I.-S. Kwak and Y.-S. Park. 2020. Analysis of food resources of 45 fish species in freshwater ecosystems of South Korea (Based on literature data analysis). *Korean Journal of Ecology and Environment* **53**: 311-323.
- 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. 2011. Feeding ecology of the endangered species, slender shinner (*Pseudopungtungia tenuicarpa*) from Korea. Chonnam National University.
- Kim, E.-J., I.-S. Kim and N. Onikura. 2011. Size-related changes in food of dwarf loach, *Kichulchoia brevifasciata* (Kim & Lee, 1995). *Folia Zoologica* **60**: 295-301.
- 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, K.-R. 2020. Studies for assessment of threatened status and conservation genetics of an endangered fish, Pseu-

- dopungtungia nigra. Soonchunhyang University.
- 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.
- 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. 2016. Distribution status and threatened assessment of endangered species, *Pungitius sinensis* (Pisces: Gasterosteidae) in Korea. *Korean Journal of Ichthyology* **28**: 186-191.
- 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., M.-S. Han and S.-M. Kwan. 2018. Distribution Aspect and Extinction Threat Evaluation of the Endangered Species, *Rhodeus pseudosericeus* (Pisces: Cyprinidae) in Korea. *Korean Journal of Ichthyology* **30**: 100-106.
- Ko, M.-H., Y.-S. Kwan, W.-K. Lee and Y.-J. Won. 2017. Impact of human activities on changes of ichthyofauna in Dongjin River of Korea in the past 30 years. *Animal Cells and Systems* **21**: 207-216.
- Kohshima, S. 1985. Migration of the Himalayan wingless glacier midge (*Diamesa* sp.): slope direction assessment by sun-compassed straight walk. *Journal of Ethology* **3**: 93-104.
- Kwak, I.-S. 2015. Introduction to Chironomidae, a water pollution indicator. Chonnam National University, Gwangju. Korea.
- Kwak, I.-S., D.-S. Lee, C. Hong and Y.-S. Park. 2018. Distribution patterns of benthic macroinvertebrates in streams of Korea. *Korean Journal of Ecology and Environment* **51**: 60-70.
- Kwak, Y.-H. 2019. Studies of the conservation biology of an endangered freshwater fish, *Pseudobagrus brevicarpus*. Soonchunhyang University.
- Lee, D.-Y., M.-J. Bae, Y.-S. Kwon, C.-W. Park, H.M. Yang, Y. Shin, T.-S. Kwon and Y.-S. Park. 2018a. Characteristics of spatiotemporal patterns in benthic macroinvertebrate communities in two adjacent headwater streams. *Korean Journal of Ecology and Environment* **51**: 192-203.
- 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: 86-86.
- Legendre, P. and L. Legendre. 2012. Numerical Ecology.- Amsterdam: Elsevier Sci. BV.
- Levins, R. 1968. Evolution in changing environments: some theoretical explorations. Princeton University Press.
- Linevich, A. 1963. K biologii komarov semeistva Tendipedidae 'Biologiya bespozvonochnykh Baikala'. *Trudy Limnologicheskogo Instituta* **1**: 3-48.
- Ministry of Environment (ME). 2010. Reproduction and restoration research of freshwater endangered fishes of 4 major river.
- Ministry of Environment (ME). 2020. Conservation and Management Laws of Wildlife (Law No. 10977). (in Korea).
- Moon, M.Y., C.W. Ji, D.-S. Lee, D.-Y. Lee, S.-J. Hwang, S.-Y. Noh, I.-S. Kwak and Y.-S. Park. 2020. Characterizing responses of biological trait and functional diversity of benthic macroinvertebrates to environmental variables to develop aquatic ecosystem health assessment index. *Korean Journal Ecology and Environment* **53**: 31-45.
- Moon, S.J. 2012. Distribution and population ecology of the far eastern brook lamprey *Lethenteron reissneri* in Korea. Soonchunhyang University.
- Moyle, P. and J. Cech. Jr. 2000. Fishes: an introduction to ichthyology 4th edition. Davis: Prentice Hall, 612pp.
- National Institute of Environmental Research (NIER). 2019. Guidelines for Survey and Assessment of Stream/River Ecosystem Health (Stream). NIER, 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.).
- 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 fo bull-head torrent catfish, *Liobagrus obesus* from the Geum river, Korea. *Korean Journal of Ichthyology* **19**: 215-219.
- Ward Jr, J.H. 1963. Hierarchical grouping to optimize an objective function. *Journal of American Statistical Association* **58**: 236-244.
- Yang, S.G. 2009. Aquaculture Technology Development in Ornamental fish in a Korean Bitterling and a Korean Stickleback Fish. National Fisheries Research & Development Institute.
- 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. *Korean Journal of Ichthyology* **25**: 90-105.