

생태와
환경

ISSN: 2288-1123 (Online)

Korean Journal of
Ecology and Environment

Vol. 57 No. 1 March 2024 Serial Number 189



Published by **The Korean Society of Limnology** in collaboration with
The Ecological Society of Korea

사단법인 한국하천호수학회 (한국생태학회 협력)

제자(題字): 곁침 신강균



Korean Journal of Ecology and Environment

ISSN : 2288-1123 (Online)

Volume 57-No. 1 March 2024

The Korean Journal of Ecology and Environment (KJEE) is the official publication of the Korean Society of Limnology. The ISO abbreviation of the journal title is Korean J. Ecol. Environ. It was launched in 1968 and publishes 4 volumes annually, with issues released on the last day of each month. The purpose of the journal is to provide research papers and technical information on the results of original research on the ecology, limnology and environment.

All submitted manuscripts are peer-reviewed by three reviewers. The text may be written in Korean or English. The abstract and references should be written in English. Manuscripts should be sent to the editorial office by email. The URL address of the Journal is <http://www.jksl.or.kr>, where full text is available. All publication papers provide online access (<http://www.jksl.or.kr>) for free. This journal was supported by the Korean Federation of Science and Technology Societies (KOFST) Grant funded by the Korean Government and indexed in Database is Korea Citation Index (KCI) and the Korean government, Korean Federation of Water Science and Engineering Society and K-water.

Publication charge and reprint

When the publication of the manuscript is issued, the authors will be charged for the publication. The amount of publication charge is 300,000 Korean won/publication (6 pages). A fee of 50,000 Korean won will be charged for each additional page of publication, and 60,000 Korean won will be charged to reviewer.

Contact information on Inquiry

Kwang-Hyeon Chang

Department of Environmental Science and Engineering, Kyung Hee University

1732, Deogyong-daero, Giheung-gu, Yongin-si, Gyeonggi-do 17104, Republic of Korea

Tel : +82-31-201-2977 e-mail : chang38@khu.ac.kr

Korean Journal of Ecology and Environment

Volume 57, Number 1, March 2024

Korean Journal of Ecology and Environment. All rights reserved

This is identical to the Creative Commons Attribution Non-Commercial License

(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>)

Published on March 31, 2024

Published by

The Korean Society of Limnology

#517, 426, Gonghang-daero, Gangseo-gu, Seoul 07654, Republic of Korea

Tel : +82-2-569-0744 Fax : +82-2-569-0144 E-mail : kslimno@empas.com

Editorial Office of the Korean Journal of Ecology and Environment

Department of Environmental Science and Engineering, Kyung Hee University

1732, Deogyong-daero, Giheung-gu, Yongin-si, Gyeonggi-do 17104, Republic of Korea

Tel : +82-31-201-2977 E-mail : chang38@khu.ac.kr

Printed by Junghaengsa, Inc.

#303, 48, Nangye-ro 28-gil, Dongdaemun-gu, Seoul 02586, Republic of Korea

Tel : +82-2-2232-3281 Fax : +82-2-2232-5874 E-mail : jhpub3213@naver.com

Statement of copyright transfer

To : Editor of Korean Journal of Ecology and Environment

Title of submitted manuscript : _____

I hereby certify that I agreed to submit the manuscript entitled as above to Korean Society of Limnology with the following statement

- This manuscript is original and there is no copyright problem, defamation and privacy intrusion. Any legal or ethical damage should not be directed to the Korean Journal of Ecology and Environment due to this manuscript.
- All authors contributed to this manuscript actually and intellectually and have responsibility equally to this manuscript.
- This manuscript was not published or considered for publication to any other scientific journals in the world. It will not be submitted again to other journals without permission from Editor of Korean Journal of Ecology and Environment if it is accepted for publication.
- Copyright of this manuscript shall be transferred to the Korean Journal of Ecology and Environment if it is published in Korean Journal of Ecology and Environment. It means that if any persons including authors want to use the contents of this manuscript, they should receive the permission from the Society and the source of contents should be clarified.

Date :

Name	Signature

Conflict of interest Disclosure Statement

List any potential conflicts of interests of this manuscript (any financial support or benefits have been received by the author(s) that could affect the work reported in the article) or indicate "None".

◆ 제29대 임원진

- ◆ 회 장: 원두희(생태조사단)
- ◆ 부 회 장: 김현우(순천대학교), 박영석(경희대학교), 이상우(건국대학교), 장민호(공주대학교)
- ◆ 학 술 위 원 장: 김철구(국립생태원)
- ◆ 편 집 위 원 장: 장광현(경희대학교)
- ◆ 기술정보위원장: 황길순(한국수생태복원협회)
- ◆ 총 무 이 사: 윤주덕(국립생태원 멸종위기종복원센터)
- ◆ 재 무 이 사: 김명철(SOKN 생태보전연구소), 박정호(케이에코)
- ◆ 학 술 이 사: 김난영(건국대학교), 도운호(공주대학교), 박영준(국립생태원)
- ◆ 편 집 이 사: 고명훈(고수생태연구소), 김건희(건국대학교), 김동균(K-water), 김민섭(국립환경과학원), 김지운(군산대학교), 전영철(생태자원연구소)
- ◆ 기술 정보 이 사: 김동익(한국수생태복원협회)
- ◆ 감 사: 광인실(전남대학교), 최광순(K-Water)
- ◆ 총 무 간 사: 김정희(에코리서치), 조현빈(부산대학교)
- ◆ 편 집 간 사: 오혜지(경희대학교)

- Chi-Yong Ahn (Korea Research Institute of Bioscience and Biotechnology)
- Sang-Woo Lee (Konkuk University)
- Kwang-Hyeon Chang (Kyung Hee University)
- Min-Ho Jang (Kongju National University)
- Kang-Hyun Cho (Inha University)
- Gea-Jae Joo (Pusan National University)
- Hak-Young Lee (Chonnam National University)
- Soon-Jin Hwang (Konkuk University)
- Tae Kwon Lee (Yonsei University)
- Min-Seob Kim (National Institute of Environmental Research)
- Kyung-Hoon Shin (Hanyang University)
- Jun-Kil Choi (Sangji University)
- Yong-Jae Kim (Daejin University)
- Sovan Lek (University of Toulouse, France)
- Schinich Nakano (Kyoto University, Japan)
- Chuanbo Guo (Chinese Academy of Sciences, China)

편집위원회

- Editor-in-Chief : Kwang-Hyeon Chang (Kyung Hee University)
- Associate Editor : Myeong-Hun Ko (Kosoo Ecology Institute)
Keonhee Kim (Konkuk University)
Dong-Kyun Kim (K-water)
Min-Seob Kim (National Institute of Environmental Research)
- Ji Yoon Kim (Kunsan National University)
- Yung-Chul Jun (Institute for Ecological Resource)
- Young-Han You (Kongju National University)

Manuscript Editor : Hye-Ji Oh (Kyung Hee University)

Board Member

Aquatic Ecology and Environment

- Dongsoo Kong (Kyonggi University)
- Inn-Sil Kwak (Chonnam National University)
- Baik-Ho Kim (Hanyang University)
- Han-Soon Kim (Kyungpook National University)
- Hyun-Woo Kim (Sunchon National University)
- Yong-Sik Shin (Mokpo Maritime National University)

Terrestrial Ecology and Environment

- Jae Geun Kim (Seoul National University)
- Eun Ju Lee (Seoul National University)
- Uh-Ram Song (Jeju National University)
- Chang Seok Lee (Seoul Women's University)
- Sin-Jae Rhim (Chung-Ang University)
- Kwang-Bum Lee (Seoul National University)
- Sei-Woong Choi (Mokpo National University)

학술위원회

위 원 장 김철구(국립생태원)

학술분과

분류생태분과

- 위 원 장 김한순(경북대학교)
- 간 사 김용재(대진대학교)
- 위 원 김백호(한양대학교), 김성덕(충남대학교), 김현우(순천대학교), 배연재(고려대학교), 이상돈(이화여자대학교), 이완옥(국립수산과학원), 이정호(대구대학교), 조강현(인하대학교), 최준길(상지대학교), 최재석(강원대학교)

생태와 환경 학술지 제57권 제1호

발 행 인 : 원 두 희
편 집 인 : 장 광 현

발 행 일 : 2024년 3월 31일

발 행 소 : 한국하천호수학회

(07654) 서울특별시 강서구 공항대로 426, 517호(화곡동, VIP오피스텔)

Tel: 02-569-0744, Fax: 02-569-0144

E-mail: kslimno@empas.com, Home page: http://www.ksl.or.kr

인 쇄 소 : (주)정 행사

서울시 동대문구 난계로 28길 48 303호

Tel: 02-2232-3281/2, Fax: 02-2232-5874

E-mail: jhpub3213@naver.com / Home page: https://blog.naver.com/jhpub3213

Online Publishing System: http://www.jops.co.kr

생태모니터링 분과

위 원 장 이학영 (전남대학교)
 간 사 원두희 (생태조사단)
 위 원 길혜경 (서울시 보건환경연구원), 김구연 (경남대학교),
 김재구 (청록환경생태연구소), 변하근 (서원대학교),
 변명섭 (국립환경과학원), 이 경 (가톨릭대학교),
 이은주 (한국플랑크톤생태연구소), 주기재 (부산대학교),
 장민호 (공주대학교), 전숙례 (한국바이오시스템)

수생태복원 분과

위 원 장 황길순 (한국수생태복원협회)
 간 사 김철구 (수생태복원사업단)
 위 원 김동섭 (한국수자원공사), 김호섭 (코오롱),
 박정호 (동립 P&D), 이상우 (건국대학교),
 이진환 (상명여자대학교), 조성주 (신강하이텍),
 허우명 (강원대학교)

모델링 분과

위 원 장 박영석 (경희대학교)
 간 사 정광석 (부산대학교)
 위 원 나은혜 (국립환경과학원), 신용식 (목포해양대학교),
 이해근 (한국수자원공사), 정세웅 (충북대학교)

생태독성 분과

위 원 장 계명찬 (한양대학교)
 간 사 안윤주 (건국대학교)
 위 원 김상훈 (국립환경과학원), 박명환 (건국대학교),
 안치용 (생명공학연구원), 염동혁 (한국화학연구원),
 이진애 (인제대학교)

생태공학 분과

위 원 장 오희목 (생명공학연구원)
 간 사 남귀숙 (농어촌공사)
 위 원 박제철 (금오공과대학교), 오종민 (경희대학교),
 윤호성 (경북대학교), 최광순 (K-water연구원)

생지화학 분과

위 원 장 신경훈 (한양대학교)
 간 사 허 진 (세종대학교)
 위 원 강혜순 (성신여자대학교), 강호정 (연세대학교),
 김미경 (영남대학교), 박지형 (강원대학교),
 신윤근 (상지대학교), 이영욱 (대구대학교),
 조기안 (조당대학교), 최일환 (한국수자원공사)

수계관리 분과

위 원 장 공동수 (경기대학교)
 간 사 최광순 (한국수자원공사)
 위 원 김재욱 (한국농어촌공사), 김호준 (한국수자원공사),
 박혜경 (국립환경과학원), 윤춘경 (건국대학교),
 이요상 (한국수자원공사), 임병진 (국립환경과학원),
 전만식 (강원발전연구원), 정 근 (강원대학교),
 홍선기 (목포대학교)

한국하천호수학회 평의원 명단

고명수 (고수생태연구소), 공동수 (경기대학교), 광인실 (전남대학교), 권순직 ((주)에일), 권용수 (국립생태원), 권혁영 ((주)솔담엔지니어링),
 김진희 (건국대학교), 김구연 (경남대학교), 김난영 (건국대학교), 김동균 (K-water연구원), 김동섭 ((사)한국수생태복원협회),
 김동영 ((사)한국수생태복원협회), 김명철 (SOKN생태보전연구소), 김미경 (충북발전연구원), 김민섭 (국립환경과학원), 김백호 (한양대학교),
 김법철 (강원대학교), 김상훈 (한강물환경연구소), 김석현 (강원대학교), 김수환 (국립생태원), 김아름 (경기대학교), 김영생 (경북대학교),
 김영효 (한양대학교), 김용석 (국립환경과학원), 김용재 (대진대학교), 김재구 ((주)알파생태연구소), 김재욱 (한국농어촌공사),
 김정희 (주식회사 에코리서치), 김종현 ((주)엔에이피), 김지운 (군산대학교), 김철구 (국립생태원), 김하경 (국립환경과학원),
 김한순 (경북대학교), 김현택 (금강물환경연구소), 김현우 (순천대학교), 김호준 (K-water연구원), 나정은 (전남대학교), 남귀숙 (농어촌연구원),
 도윤호 (공주대학교), 라궁환 (에코랩공생), 문정숙 (국립환경과학원), 박명환 (한양대학교), 박배경 (국립환경과학원), 박상규 (아주대학교),
 박상영 (K-water연구원), 박세린 (건국대학교), 박영석 (경희대학교), 박영준 (국립생태원), 박재홍 ((주)생태자원연구소), 박정호 ((주)케이에코),
 박제철 (금오공과대학교), 박종근 (대구대학교), 박주현 (국립환경과학원), 박지형 (국립환경과학원), 박재홍 (건국대학교),
 박혜경 (국립환경과학원), 배대열 ((주)한국생태네트워크), 배미정 (국립낙동강생물자원관), 변명섭 (국립환경과학원),
 사승환 ((주)미래에이엔이), 성낙필 ((주)생태조사단), 신경훈 (한양대학교), 신용식 (목포해양대학교), 심종훈 ((주)청록환경생태연구소),
 안광국 (충남대학교), 양현 ((주)생물다양성연구소), 오민기 ((주)새봄생태연구원), 오종민 (경희대학교), 원두희 ((주)생태조사단),
 원은지 (한양대학교), 유경아 (국립환경과학원), 윤승운 (전북대학교), 윤조희 (국립환경과학원), 윤주덕 (국립생태원), 윤희남 (국립생태원),
 이경락 (국립환경과학원), 이경희 (한국수자원공사), 이상우 (건국대학교), 이상욱 (K-water연구원), 이승윤 (K-water연구원),
 이재관 (국립낙동강생물자원관), 이정호 (대구대학교), 이학영 (전남대학교), 이한필 ((주)이티위터), 이해숙 (K-water연구원),
 이해진 (국립환경과학원), 이흥현 (연구협동조합이엔이), 이희숙 (K-water연구원), 임주백 (생태와미래지식인협동조합), 장광현 (경희대학교),
 장민호 (공주대학교), 전만식 (강원연구원), 전영철 ((주)생태자원연구소), 정광석 (동주대학교), 정명화 (전남대학교), 정선아 (K-water연구원),
 정선아 (아주대학교), 정세훈 ((주)다운에코), 정현기 (금강물환경연구소), 조윤정 ((주)알파생태연구원), 조현빈 (부산대학교),
 조현진 (건국대학교), 주기재 (부산대학교), 진영현 (한강물환경연구소), 천승필 (SOKN생태보전연구소), 최광순 (K-water연구원),
 최만영 (자연과사람들), 최승호 ((주)한국생태네트워크), 최원석 ((주)다운에코), 최지웅 ((주)다운에코), 허우명 (강원대학교),
 황길순 ((사)한국수생태복원협회), 황순진 (건국대학교)

목 차

제 57 권, 제 1 호 / 통권 제 189 호 2024년 3월

■ 보문

- 제주도 일대 습지에 서식하는 저서성 대형무척추동물의 군집 분포 특성 1
전영철 · 천승필 · 강미숙 · 박재홍 · 이창수 · 권순직
- 전주 도심구간 삼천과 전주천의 어류상 17
임민영 · 신유신 · 박철우 · 김종욱 · 최 윤 · 김은비 · 김재구
- 유입수 조건에 따른 인공습지 수질 정화효율 비교: 경안천 유역을 중심으로 28
이설준 · 은범진 · 김종환 · 최이송 · 오종민
- 안정동위원소 분석을 활용한 멸종위기종 여울마자와 동서종 돌마자의 영양단계 및 생태적 지위 평가 39
이대희 · 오혜지 · 최예림 · 홍근혁 · 백인혁 · 김근식 · 장광현 · 윤주덕

■ 단보

- 습지생태계 평가를 위한 동물플랑크톤 지수 적용 방안 고찰 51
김현우

Cumulative Author Index

(Vol. 57, No. 1)

Baek, InHyuck 39
Chang, Kwang-Hyeon 39
Cheon, Seung Phil 1
Choi, I Song 28
Choi, Yerim 39
Choi, Youn 17
Eun, Beomjin 28
Hong, Geun-Hyeok 39
Im, Min-Yeong 17

Jun, Yung Chul 1
Kang, Mi Suk 1
Kim, Eun-Bi 17
Kim, Hyun-Woo 51
Kim, Jae-Goo 17
Kim, Jong Hwan 28
Kim, Jong-Wook 17
Kim, Keun-Sik 39
Kwon, Soon Jik 1

Lee, Chang Su 1
Lee, Dae-Hee 39
Lee, Seol Jun 28
Oh, Hye-Ji 39
Oh, Jong-Min 28
Park, Cheol-Woo 17
Park, Jae Heung 1
Sin, Yu-Shin 17
Yoon, Ju-Duk 39

Original article

제주도 일대 습지에 서식하는 저서성 대형무척추동물의 군집 분포 특성

전영철 · 천승필¹ · 강미숙¹ · 박재흥 · 이창수² · 권순직^{3,*}

(주)생태자원연구소, ¹SOKN생태보전연구소 (주), ²국립생태원 습지연구팀, ³(주)에일

Spatial Distribution of Benthic Macroinvertebrate Assemblages in Wetlands of Jeju Island, Korea. *Yung Chul Jun* (0000-0003-3888-2275), *Seung Phil Cheon*¹ (0000-0002-4351-607X), *Mi Suk Kang*¹ (0009-0005-2132-3399), *Jae Heung Park* (0009-0005-6318-2571), *Chang Su Lee*² (0000-0003-0327-0463) and *Soon Jik Kwon*^{3,*} (0009-0005-2756-7423) (Institute for Ecological Resource, Seoul 02783, Republic of Korea; ¹SOKN Institute of Ecology and Conservation, Yangpyeong 12563, Republic of Korea; ²Wetlands Research Team, National Institute of Ecology, Changnyeong 50303, Republic of Korea; ³Corporation Aeil, Bucheon, 14676, Republic of Korea)

Abstract Most wetlands worldwide have suffered from extensive human exploitation. Unfortunately they have been less explored compared to river and lake ecosystems despite their ecological importance and economic values. This is the same case in Korea. This study was aimed to estimate the assemblage attributes and distribution characteristics of benthic macroinvertebrates for fifty wetlands distributed throughout subtropical Jeju Island in 2021. A total of 133 taxa were identified during survey periods belonging to 53 families, 19 orders, 5 classes and 3 phyla. Taxa richness ranged from 4 to 31 taxa per wetland with an average of 17.5 taxa. Taxa richness and abundance of predatory insect groups such as Odonata, Hemiptera and Coleoptera respectively accounted for 67.7% and 68.2% of the total. Among them Coleoptera were the most diverse and abundant. Taxa richness and abundance did not significantly differ from each wetland type classified in accordance with the National Wetland Classification System. There were three endangered species (*Clithon retropictum*, *Lethocerus deyrolli* and *Cybister (Cybister) chinensis*) and several restrictively distributed species only in Jeju Island. Cluster analysis based on the similarity in the benthic macroinvertebrate composition largely classified 50 wetlands into two major clusters: small wetlands located in lowland areas and medium-sized wetlands in middle mountainous regions. All cluster groups displayed significant differences in wetland area, long axis, percentage of fine particles and macrophyte composition ratio. Indicator Species Analysis selected 19 important indicators with the highest indicator value of *Ceriagrion melanurum* at 63%, followed by *Noterus japonicus* (59%) and *Polypylis hemisphaerula* (58%). Our results are expected to provide fundamental information on the biodiversity and habitat environments for benthic macroinvertebrates in wetland ecosystems, consequently helping to establish conservation and restoration plans for small wetlands relatively vulnerable to human disturbance.

Key words: benthic macroinvertebrates, distribution, wetlands, Jeju Island, cluster analysis

서론

Manuscript received 23 January 2024, revised 24 February 2024,
revision accepted 27 February 2024
* Corresponding author: Tel: +82-32-545-3670, Fax: +82-31-601-9453
E-mail: triopsidae@naver.com

습지(wetland)는 우리나라 습지보전법 제2조에서 “담수, 기수 또는 염수가 영구적 또는 일시적으로 그 표면을 덮고

© 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.

있는 지역으로서 내륙습지 및 연안습지를 말한다.”로 정의하며 이 중 내륙습지는 육지나 섬에 분포하는 호수와 못, 늪, 하천, 하구 등의 지역을 포함한다. 이와 같은 습지의 개념은 국제적 기준이 되는 람사르협약(Ramsar Convention) Article 1.1에서 밝힌 정의와 크게 다르지 않다. 습지는 육상생태계와 수생태계의 전이지대로서 기본적으로 물의 저장소 및 정화작용, 지하수위 조절과 유지, 기후변화에 대한 완충작용 등의 역할을 함으로써 생태적 중요성이 높다(Mereta *et al.*, 2012). 또한, 습지는 비옥한 퇴적물과 영양물질을 함유하여 생산성이 높고 다양한 생물의 훌륭한 서식처를 제공하는 생태계이다(Rolon and Maltchik, 2006; Reis *et al.*, 2017). 특히 습지는 농경활동을 위한 용수 공급과 풍부한 수산자원 제공, 홍수 피해 저감, 경관적·심미적 효과 등 이용 가치가 높으므로 역사적으로 인간이 점유하여 이용해 왔다(Kingsford *et al.*, 2016). 최근 습지에 대한 인식이 변화하면서 습지 보전과 지속가능한 이용을 위한 많은 노력에도 불구하고 전 세계적으로 습지는 인간의 과도한 이용과 개발로 인하여 변형과 소멸의 지속적인 위협을 받고 있다. 무엇보다도 농업과 도시화는 습지생태계를 파괴하는 가장 큰 원인으로 지목되는데, 이로 인해 지난 한 세기 동안 전 세계 약 50% 정도의 습지가 소멸한 것으로 보고되고 있다(Shine and de Klemm, 1999; Hall *et al.*, 2004; Mereta *et al.*, 2012). 이러한 현상은 우리나라도 예외가 아니며, 관계법령으로 보호받지 못하는 많은 중·소형 습지가 전반적인 생태계 현황 파악을 하기도 전에 다양한 개발위협과 토지소유주 및 지역주민의 요구에 의하여 파괴되거나 사라지고 있다(Kim *et al.*, 2013).

아열대 기후지역에 속하는 제주도는 우리나라 최대 규모의 화산섬으로서 한라산과 해양의 영향으로 고도와 지형에 따라 지역별로 기온과 강수량 등의 기후적 특성이 다양하다(JRMA, 2011). 제주도는 지질학적으로 투수성이 큰 퇴적암층과 현무암 등의 화산암류와 화산쇄설암 등으로 이루어져 있다(Kang *et al.*, 2015). 제주도에 분포하는 하천은 한라산을 중심으로 대부분이 북쪽이나 남쪽 방향의 방사상으로 흐르는데, 현무암이 기반암을 형성하므로 건기에는 유량이 없는 건천이 많으며 강우가 집중되는 시기에만 일시적으로 흐름이 형성된다(JRMA, 2011; Jung *et al.*, 2011; Jung *et al.*, 2014). 그러나 제주도는 산정화구호와 같은 고산습지와 불투수층으로 이루어진 일부 지역에 형성된 습지, 인위적으로 조성한 저수지와 인공수로, 해안선을 따라 분포하는 연안습지 등 다양한 형태의 습지가 도내 전역에 걸쳐 산재한다(Kang *et al.*, 2015). 현재 환경부는 다양한 멸종위기 야생생물과 희귀종이 서식하며 식생 경관 및 형성 과정이 독특하여 생태적 가치가 높은 물영아리오름과 1100고지습지, 물장오리오름습지, 동백동산습지, 숨은물뱅디습지 등 5곳을 습

지보호지역과 람사르습지로 지정·등록하여 관리하고 있다(MOE, 2022). 한편, 중산간 지역에는 목축과 음용을 위해 소형 못의 형태로 조성한 인공습지들이 많은데, 일부 습지는 이용이 점차 감소하면서 방치되어 자연 습지의 모습으로 변하기도 하지만, 용도 변경으로 인하여 매립되거나 오염으로 훼손되는 사례가 빈번하게 발생한다(Oh *et al.*, 2009; Kang *et al.*, 2015). 이처럼 습지는 유수생태계와 달리 대부분 지리적으로 독립된 형태로 존재하여 외부 교란에 취약함에도 불구하고 관련 연구와 현황 파악이 미흡한 실정이다. 이에 습지생태계의 생태적 및 경제적 가치에 대한 중요성을 인식하여 습지 보전을 위한 노력과 제도적 지원이 요구된다.

저서성 대형무척추동물은 수생태계에서 먹이그물의 중심에 위치하여 일차생산력 조절과 유기물 분해, 영양물질 순환, 물질 이동, 오염물질 정화 등 중요한 역할을 한다(Wallace and Webster, 1996; Allan and Castillo, 2007). 또한, 저서성 대형무척추동물은 대부분의 수환경에 광범위하게 분포할 뿐만 아니라 개체수가 풍부하며 수체의 바닥에 비교적 제한되어 서식하고 환경변화에 민감하게 반응하므로 하천 및 정수 환경의 습지와 호수, 해양 등 다양한 수체의 건강성을 평가하는 데 유용한 지표생물로 폭넓게 인정받고 있다(Weisberg *et al.*, 1997; Kashian and Burton, 2000; Diaz *et al.*, 2004; Davis *et al.*, 2006; Jun *et al.*, 2012; Min *et al.*, 2022). 이에 따라서 서식환경에 따른 저서성 대형무척추동물 군집 특성과 이들의 분포 및 다양성에 영향을 미치는 환경인자와의 관계는 오래전부터 국내외 많은 연구에서 다루어진 중요한 관심사이다. 예를 들어 해발고도와 용존산소, 유속, 하상 구조는 유수생태계에서 종의 분포와 풍부도를 결정하는 주요 인자로 잘 알려져 있다(Vannote *et al.*, 1980; Nelson and Lieberman, 2002; Merz and Ochikubo Chan, 2005; Jiang *et al.*, 2010). 또한, 수변식생은 먹이원 공급과 천적에 대한 피난처 제공, 산란처 등의 역할을 하므로 습지와 같은 정수생태계에 서식하는 저서성 대형무척추동물의 다양성과 군집 조성에 직접적인 영향을 미친다(Rolon and Maltchik, 2006; Braich and Kaur, 2017; Gleason *et al.*, 2018). 저서성 대형무척추동물의 분포는 대상지역의 서식환경과 출현종의 생물학적 특성에 따라서 다르게 나타나는데(Braich and Kaur, 2017), 일반적으로 하천에서는 수질환경과 용존산소에 민감한 하루살이목(Ephemeroptera)과 강도래목(Plecoptera), 날도래목(Trichoptera)의 EPT 분류군이, 유속의 영향이 없으며 수변식물이 풍부한 습지에서는 포식자로서 이동능력이 우수하고 내성범위가 상대적으로 넓은 잠자리목(Odonata)과 노린재목(Hemiptera), 딱정벌레목(Coleoptera)의 OHC 분류군의 종구성비가 높다(Williams and Feltmate, 1992; Son *et al.*, 2012; Chung *et al.*, 2020). 이러한 이유로 서식처의 환경

상태에 따른 저서성 대형무척추동물 군집의 분포 특성 연구는 대상 수체의 수환경 상태와 건강성에 대한 유용한 정보를 제공하고 생물다양성 보전 및 복원을 위한 기본적인 정보를 제공할 수 있다는 점에서 의미가 있다(Sharma and Rawat, 2009; Jun *et al.*, 2016; Dalu *et al.*, 2022).

우리나라는 최근 국립생태원이 총면적 1,154.6 km²에 이르는 2,704개소의 내륙습지에 대한 목록을 구축하였고 서식 환경과 식생 조사를 통하여 습지 발육을 지속하고 있다. 습지 발육의 결과로 목록화된 습지는 수문 및 토양, 식생, 지형 특성에 따른 ‘국가습지 유형분류체계(2010)’에 근거하여 35개의 유형으로 분류하여 관리하고 있다(NIE, 2022). 이와 함께 국립생태원은 습지 보전을 위한 기초자료 수집을 목적으로 ‘내륙습지 기초조사’ 사업을 수행하여 습지별 현존식생도와 생물상 목록을 구축하고 있다. 그러나, 예산 및 인력 부족과 장기적인 사업 운영 계획 부재 등으로 인하여 목록화된 습지 수에 비하여 생태계 조사는 제한적으로 시행되고 있으며 대부분이 일회성 조사로 그치기 때문에 생물상 변화를 파악하기에는 무리가 있다. 습지의 생태적 가치와 인간에게 주는 다양한 순기능에도 불구하고 습지 관련 연구는 유수생태계인 하천에 비하여 상대적으로 적다. 더욱이 국내 습지에 서식하는 저서성 대형무척추동물 군집의 분포에 관련된 연구는 대부분이 규모가 크거나 관계 법령으로 지정한 습지 보호지역 또는 람사르습지를 중심으로 이루어졌으며(Bae *et al.*, 2004; Hong and Cheong, 2020; Han *et al.*, 2022), 상대적

으로 규모가 작아서 인위적인 교란에 취약한 중·소형 습지에 대한 연구는 빈약하다. 제주도 습지에서의 저서성 대형무척추동물 연구는 Jeong *et al.* (2010b)과 Jung *et al.* (2011)에 의해서 도내 전역에 분포하는 습지와 하천을 선정하여 이들의 분포와 다양성 조사를 수행하였을 뿐, 대부분은 환경부의 전국자연환경조사와 전국내륙습지조사, 국립생태원의 내륙습지 기초조사 및 내륙습지 정밀조사, 도내 기초학술연구 등 일부 기관에서 단편적으로 진행되었다. 본 연구는 제주도 일대 중·소형 습지 50개소를 대상으로 저서성 대형무척추동물의 다양성과 특이종의 분포를 조사하였으며, 주요 환경 요인과의 관계를 통한 분포 특성을 파악하고자 하였다. 이러한 연구를 통하여 중·소형 습지에 대한 생물상과 서식환경에 대한 정보를 제공하고 향후 습지 보전과 복원을 위한 기초 자료로 활용되기를 기대한다.

재료 및 방법

1. 조사대상 습지 및 현장조사

대상 습지의 기초 환경 및 저서성 대형무척추동물 자료는 국립생태원에서 수행한 “내륙습지 기초조사(21)” 사업의 제주특별자치도 내 습지 조사 결과를 수집하여 분석하였다. 대상 습지는 총 50개소로서 한라산과 주요 오름의 정상부에 위치하는 화구호(volcanic wetlands)에서부터 해안과 인접한

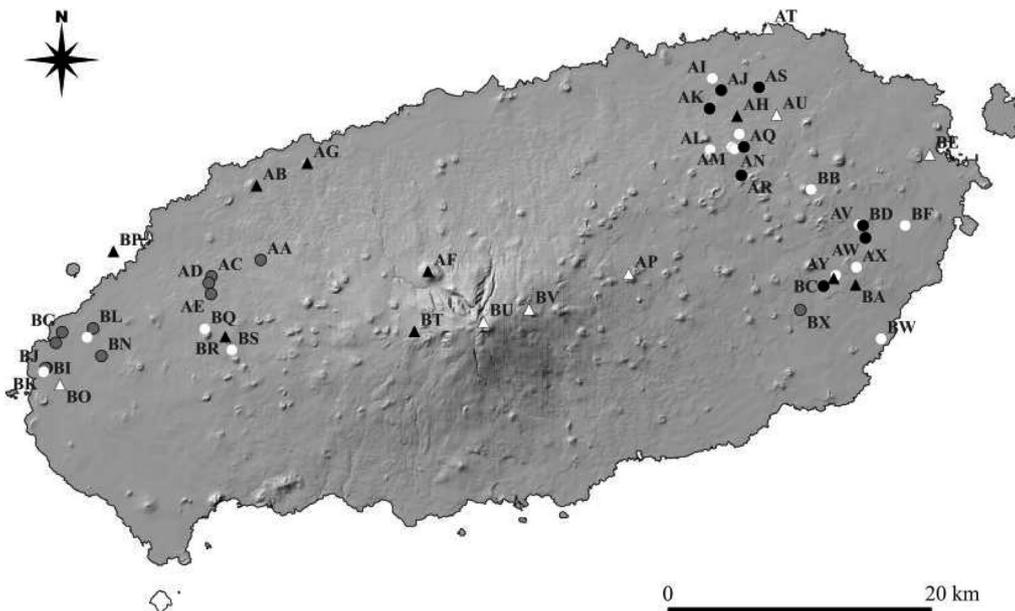


Fig. 1. The geographic location of survey wetlands in Jeju Island. Five macroinvertebrate-based wetland groups were classified as G1a (n = 11, gray circles), G1b (n = 15, white circles), G1c (n = 8, black circles), G2a (n = 9, black triangles) and G2b (n = 7, white triangles) based on Sørensen distance measure cluster analysis.

소택지에 이르기까지 서식환경이 다양하였으며 최대 습지면적 160,000 km² 미만인 정수환경의 중·소형 습지에 해당하였다(Fig. 1). 대상 습지는 NIE (2020)에서 적용하는 ‘국가습지 유형분류체계(2010)’에 따라서 자연호수습지 및 자연발생적 인공호수습지에 해당하는 담수호수습지(freshwater lakes and pools, L3)와 계절적 및 영구적 습원의 특성을 보이는 저층습원(fens, M2), 산지의 관목이 우점하는 늪과 묵논을 포함하는 소택지(swamps, M4), 인공담과 저수지와 같은 인공호수습지(human-made lakes, H1)의 네 유형으로 구분하였다. 제주도 일대 조사대상 습지의 일반적인 현황은 Appendix 1과 같다. 현장조사는 연 2회 실시하였으며 1차 조사는 2021년 3월부터 5월까지, 2차 조사는 8월부터 9월까지의 기간에 각각 기상 여건과 현장 상황을 고려하여 진행되었다.

저서성 대형무척추동물 채집은 기본적으로 내륙습지 조사 지침(NIE, 2020)에 근거하여 수행되었다. 즉, 조사자는 드렛지넷(dredge sampler; 폭 30 cm, mesh size 1 mm)을 이용하여 하상을 끌어내는 방식으로 대상 습지별 각 3회 정량채집하였으며, 이후 다양한 생물상을 확보하기 위하여 여러 미소서식환경에서 정성채집을 병행하였다. 채집된 시료는 현장에서 95% 에탄올로 즉시 고정하여 실험실로 운반하였으며 골라내기(sorting) 작업 후 80% 에탄올로 보존하여 적합한 참고 문헌을 이용하여 동정하였다. 일부 습지에서 임의 표본채집법(random sampling)에 의하여 포획된 멸종위기 야생생물에 해당하는 종은 현장에서 계수한 후 즉시 방사하였다. 한편, 각 대상 습지의 서식환경 요인 중에서 하상구성은 Cummins (1962)의 방법에 따라 분류하였으며 습지의 장축 길이는 거리측정기(Newcon Optik, LRM 1500)를 이용하였다. 이 외에도 해발고도와 습지면적, 수심, 수생식물 구성비의 정보는 국립생태원 에코뱅크의 DB를 이용하였다. 습지별 저서성 대형무척추동물의 개체수와 환경 자료는 평균값을 사용하였다.

2. 군집 분석

제주도 일대 습지에 서식하는 저서성 대형무척추동물의 군집 특성을 파악하기 위하여 대상 습지별 총 출현종수와 개체밀도, 군집지수를 산출하였으며 전체 출현종 중에서 개체밀도 점유율이 가장 높은 우점종을 선정하였다. 이때 군집지수는 정량채집된 자료로부터 우점도지수(Dominance index, DI) (McNaughton, 1967)와 다양도지수(Shannon diversity index, H') (Shannon and Weaver, 1949), 풍부도지수(Richness index, R1) (Margalef, 1958), 균등도지수(Evenness index, E1) (Pielou, 1975)를 산출하였다.

3. 통계 분석

국가습지 유형분류체계(2010)에 따른 습지 유형별 출현

종수와 개체밀도의 차이는 비모수검정인 Kruskal-Wallis test를 적용하여 분석하였다(SPSS 18, SPSS Inc., Chicago, IL, USA). 또한, 저서성 대형무척추동물 군집의 공간적인 분포 특성을 파악하기 위하여 전체 습지를 대상으로 집괴분석(cluster analysis)을 실시하였다. 집괴분석은 모든 습지의 Sørensen distance를 계산하여 flexible beta 방법($\beta = -0.25$)으로 군집 구성의 유사성에 따라 그룹을 분류하는 방법을 적용하였다(McCune and Grace, 2002). 집괴분석으로 분류된 그룹의 유사성을 통계적으로 평가하기 위하여 비모수 통계 방법인 다수응답순열절차(multi-response permutation procedure, MRPP) 검정을 수행하였다(Mielke *et al.*, 1976). 이때 집괴분석 결과 얻어진 각 그룹은 저서성 대형무척추동물 군집 조성의 차이를 비교하기 위하여 다시 한 번 Kruskal-Wallis test를 실시하였다. 집괴분석에 의하여 나누어진 각 그룹을 대표하는 지표종과 지표값은 비계층적 분석 방법인 지표종 분석(indicator species analysis, ISA)을 이용하여 분석하였다(Dufrene and Legendre, 1997). 지표종 분석은 각 조사지점에서 출현한 종의 상대풍부도와 상대출현빈도를 이용하여 산출된 지표값에 근거하여 지표종을 판별하는 방법이다. 이때 지표값은 0부터 100까지의 범위에 있으며 지표값이 높을수록 해당 종의 지표성이 높음을 의미한다(Petersen and Keister, 2003). 지표종 분석 결과는 Monte Carlo test를 시행하여 유의성을 확인하였다.

저서성 대형무척추동물 다양성은 정량 및 정성 조사에 의하여 출현한 종수로 제시하였다. 통계분석은 정량적으로 확보된 자료만을 분석에 이용하였는데, 전체 조사습지에 대하여 점유율이 0.1% 미만을 차지하는 분류군은 rare taxa로 판단하여 제외하였으며 이후 모든 개체수는 일부 우점종에 의한 영향을 완화하고 정규성을 확보하기 위하여 Log(x + 1)로 변환하였다. MRPP와 집괴분석, 지표종 분석은 PC-ORD software (version 4.25)를 이용하였다(McCune and Mefford, 1999).

결 과

1. 저서성 대형무척추동물 다양성

제주도 일대 50개 습지에서 전체 조사시기 동안 확인된 저서성 대형무척추동물은 총 3문 5강 19목 53과 133종이었다. 분류군별 출현종수는 연체동물문이 13종(9.8%), 환형동물문이 6종(4.5%), 절지동물문이 114종(85.7%)이었는데, 절지동물문은 연갑강이 8종(6.0%)이었고 곤충강이 106종(79.7%)이었다. 곤충강은 딱정벌레목이 41종(30.8%)으로 가장 다양하였으며, 그 다음으로 잠자리목이 27종(20.3%)과 노린재

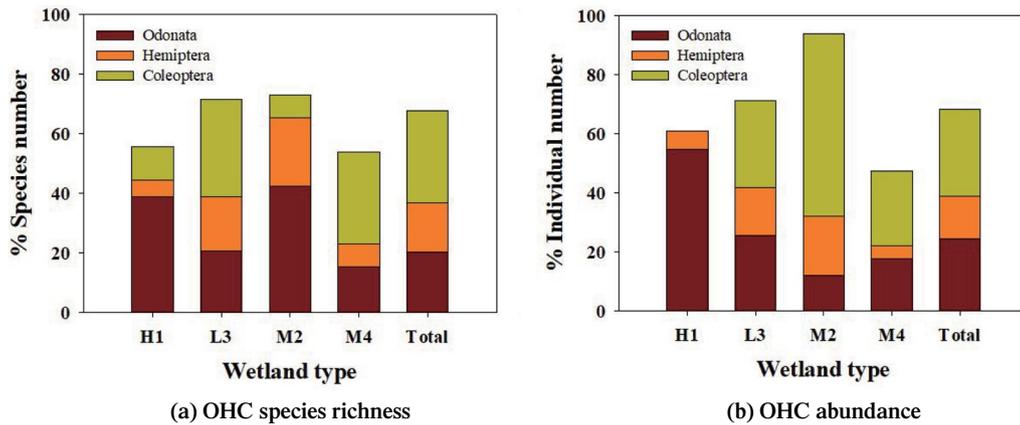


Fig. 2. The ratio of species richness (a) and abundance (b) of Odonata, Hemiptera and Coleoptera (OHC) taxa among wetland types in Jeju Island. Abbreviations for each wetland type indicate human-made lakes (H1), freshwater lakes and pools (L3), fens (M2) and swamps (M4).

Table 1. Comparison of benthic macroinvertebrate taxa richness and abundance among wetland types and former studies in Jeju Island. Average taxa richness and abundance were represented with standard deviation (in parenthesis). Fifty study wetlands were classified based on National Wetland Classification System (NIE, 2020) (H1: human-made lakes, L3: freshwater lakes and pools, M2: fens, M4: swamps). Kruskal-Wallis test revealed that taxa richness and abundance did not significantly differ from each wetland type ($p = 0.282$ and $p = 0.126$, respectively). Because two former studies did not provide detailed species lists per sampling site, it was marked as ‘not available (N/A)’ for range and average of taxa richness and abundance. Jeong *et al.* (2010b) presented only the number of aquatic insect taxa.

Biological attributes	Wetland type				This study (n = 50)	Jeong <i>et al.</i> (2010b) (n = 102)	Jung <i>et al.</i> (2011) (n = 89)
	H1 (n = 2)	L3 (n = 39)	M2 (n = 3)	M4 (n = 6)			
A. The number of major taxonomic groups							
Phylum	2	3	2	3	3	1	5
Class	3	5	2	5	5	1	8
Order	8	18	8	14	19	7	21
Family	13	44	14	31	53	32	84
Species	18	116	26	52	133	100	207
B. Taxa richness							
Range	6~17	4~31	10~17	8~30	4~31	N/A	N/A
Average	11.5 (7.8)	18.4 (7.5)	13.0 (3.6)	15.7 (7.7)	17.5 (7.4)	N/A	N/A
C. Taxa abundance							
Range	130~309	117~1,482	137~597	398~1,372	117~1,482	N/A	N/A
Average	220 (127)	601 (361)	299 (258)	727 (392)	582 (365)	N/A	N/A

목이 22종 (16.5%), 파리목이 12종 (9.0%) 등의 순이었다. 대상 습지별 출현종수는 최소 4종에서 최대 31종의 범위였다. 특히 정수 환경을 선호하는 잠자리목(Odonata)과 노린재목(Hemiptera), 딱정벌레목(Coleoptera)의 OHC 분류군은 전체 출현종수와 개체밀도 대비 각각 67.7%와 68.2%로 구성비가 매우 높았다(Fig. 2).

국가습지 유형분류체계(2010)에 따른 습지 유형별 출현종수는 대상 습지의 수가 가장 많은 담수호습지(L3)가 총 3문 5강 18목 44과 116종으로 가장 다양하였으며 습지별 평균 18.4 (±7.5)종이 출현하였다(Table 1). 이와는 반대로 인공호습지(H1)는 총 2문 3강 8목 13과 18종으로 종다양성이 가장 낮았으며 습지별 평균 11.5 (±7.8)종이 출현하였다. 분류

군별 단위면적당(m²) 평균 개체수는 딱정벌레목이 172개체 (29.5%)로 가장 풍부하였으며 잠자리목이 143개체 (24.5%), 연체동물문이 92개체 (15.8%), 노린재목이 83개체 (14.3%) 등의 순이었다. 습지별 단위면적당 (m⁻²) 개체밀도는 최소 117개체에서 최대 1,482개체의 범위였으며 전체 평균 582.4 (±364.7)개체였다. 그러나 Kruskal-Wallis test 결과 네 개의 습지 유형별 평균 출현종수 ($p=0.282$)와 개체밀도 ($p=0.126$)는 통계적으로 유의미한 차이가 없었다.

2. 특이종

본 연구에서 멸종위기 야생생물 II급에 해당하는 종은 기수갈고둥 (*Clithon retropictum*)과 물장군 (*Lethocerus deyrolli*), 물방개 (*Cybister (Cybister) chinensis*)의 3종이 출현하였다. 또한, 국가 기후변화 생물지표종으로 지정된 남색이마 잠자리 (*Brachydiplax chalybea flavovittata*)는 제주도 서부권

의 연화못과 돛곳물의 두 습지에서 확인되었다. 이 밖의 특이종은 큰누늬왕잠자리 (*Aeschnophlebia anisoptera*)와 도깨비왕잠자리 (*Anaciaeschna martini*), 노랑띠물방개 (*Canthydrus (Canthydrus) politus*), 큰알락물방개 (*Hydaticus (Prodaticus) conspersus*), 제주콩알물방개 (*Platambus stygius*), 맵시등줄물방개 (*Copelatus zimmermanni*)의 6종이 있었는데, 이 종들은 국내에서 제주도에만 분포하거나 주요 서식지가 제주도를 중심으로 남부지방에서만 서식하는 종으로 알려져 있다 (Jung et al., 2011; Jung, 2016). 한편, Jung et al. (2011)과 MOE/NIER (2021)은 한반도 고유종으로 우수생태계를 선호하는 한라하루살이 (*Baetis halla*)를 기록하기도 하였다.

3. 저서성 대형무척추동물 군집 유사성에 따른 습지 유형 분류

저서성 대형무척추동물 군집 조성의 유사성을 기초로 하

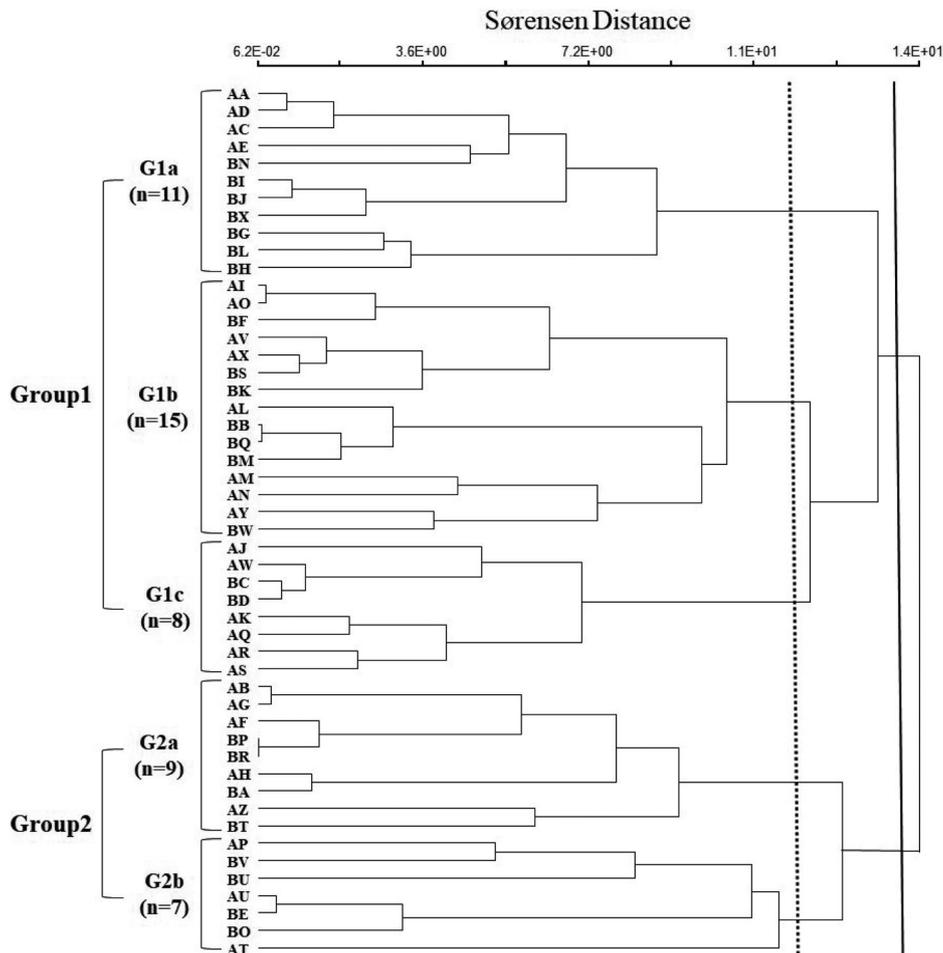


Fig. 3. Dendrogram of macroinvertebrate-based wetland classification using Sørensen clustering method. Five wetland groups were differentiated by the dashed line. More detailed information for each cluster group was enumerated in the text. The abbreviations for 50 survey wetlands are shown in Appendix 1.

Table 2. Comparison of environmental and biological attributes among five cluster groups.

Variables	Cluster group					P
	G1a (n = 11)	G1b (n = 15)	G1c (n = 8)	G2a (n = 9)	G2b (n = 7)	
A. Regional wetland variables						
Altitude (m)	107.3 (102.0) ^a	171.6 (120.5) ^a	153.1 (67.8) ^a	356.6 (473.9) ^{ab}	570.0 (744.0) ^b	0.603
Wetland area (m ²)	2,536.8 (2,584.1) ^a	2,632.1 (3,218.0) ^a	2,556.0 (2,020.6) ^a	22,569.7 (32,255.3) ^b	26,608.1 (41,611.5) ^b	0.001
Long axis (m)	54.1 (26.0) ^a	52.3 (27.5) ^a	57.4 (30.3) ^a	193.3 (173.4) ^b	158.4 (161.6) ^b	0.001
B. Physical variables						
Water depth (cm)	47.3 (35.2) ^a	30.8 (22.2) ^a	45.6 (35.8) ^a	46.7 (42.6) ^a	61.4 (46.2) ^a	0.640
Coarse particles (%)	3.6 (8.1) ^a	4.7 (9.2) ^{ab}	16.3 (31.1) ^{ab}	23.9 (29.6) ^b	10.7 (15.4) ^{ab}	0.123
Fine particles (%)	93.6 (11.2) ^b	95.3 (9.2) ^b	82.5 (34.5) ^{ab}	69.4 (33.0) ^a	66.4 (28.7) ^a	0.020
C. Wetland plant composition						
Macrophyte (%)	10.5 (4.1) ^b	11.6 (3.9) ^b	13.2 (2.9) ^b	4.6 (4.0) ^a	6.0 (4.4) ^a	0.000
Hydrophyte (%)	26.3 (5.1) ^a	32.2 (5.8) ^b	30.4 (4.7) ^{ab}	27.3 (5.9) ^{ab}	25.8 (4.2) ^a	0.031
Xerophyte (%)	63.2 (7.7) ^b	56.2 (4.9) ^a	56.4 (5.1) ^a	68.1 (6.0) ^b	68.2 (8.2) ^b	0.000
D. Benthic macroinvertebrate attributes						
No. Species	18.4 (5.6) ^{bc}	22.8 (6.2) ^c	20.1 (4.1) ^c	7.8 (3.6) ^a	14.1 (5.8) ^b	0.000
No. Individuals (m ⁻²)	620.4 (229.5) ^{bc}	818.5 (379.3) ^c	695.3 (390.9) ^c	225.6 (133.7) ^a	346.9 (214.4) ^{ab}	0.000
Dominance index	0.40 (0.09) ^a	0.43 (0.10) ^a	0.52 (0.09) ^{ab}	0.65 (0.12) ^c	0.61 (0.22) ^{bc}	0.000
Shannon diversity index	3.05 (0.45) ^b	3.28 (0.39) ^b	2.82 (0.34) ^b	2.04 (0.42) ^a	2.22 (0.91) ^a	0.000
Margalef's richness index	1.56 (0.51) ^b	2.03 (0.46) ^c	1.70 (0.33) ^{bc}	0.79 (0.29) ^a	1.13 (0.56) ^a	0.000
Pielou's evenness index	0.90 (0.04) ^b	0.86 (0.06) ^{ab}	0.79 (0.06) ^a	0.88 (0.04) ^b	0.80 (0.17) ^a	0.020
Major dominant species	<i>Diplonychus esakii</i>	<i>Gyraulus convexiusculus</i>	<i>Ceriatrion melanurum</i>	Chironomidae sp.	<i>Ischnura asiatica</i>	

Each line indicates an average with standard deviation (in parenthesis).
 Kruskal-Wallis test was performed with all the variables.
 The same small letters indicate no significant difference based on Duncan's test.

여 집괴분석을 실시한 결과, 제주도 일대 50개 습지는 크게 2개의 그룹과 5개의 하위 그룹으로 나누어졌다(Fig. 3). MRPP 분석 결과 집괴분석에 의하여 나누어진 5개의 그룹은 통계적으로 유의하였다($A=0.121, p<0.01$).

집괴분석에 의하여 나누어진 각 그룹은 저서성 대형무척추동물 군집의 다양성과 풍부성을 결정하는 환경요소 중에서 습지면적과 모래 이하 세립질 입자의 하상 구성비(%), 습지 장축 길이, 수생식물 구성비의 항목에서 통계적으로 유의미한 차이를 보였다($p<0.05$). 결과적으로 Group 1은 평균 고도와 습지면적이 각각 146.4 (± 105.3) m와 2,583.4 ($\pm 2,699.1$) m²인 저지대에 위치하는 소형 못이었으며 수생식물(macrophyte) 구성비가 상대적으로 높았고 하상이 주로 모래 이하의 세립질 입자로 이루어져 있었다(Table 2). 반면, Group 2는 평균 고도가 449.9 (± 594.3) m이었으며 습지면적이 24,336.5 ($\pm 35,380.3$) m²였고 백록담과 사라오름습지와 같은 화구호를 포함하여 대체로 중산간 지역에 위치하는 중형 습지가 많았다. 또한, Group 2는 수생식물 비율이 상대적으로 빈약하였고 모래와 자갈 이상의 조립질 입자가 혼재하였다.

G1a는 남선못을 제외하면 모두 서쪽 지역에 위치하였으며(Fig. 1) 평균 고도(107.3 m)와 습지면적(2,536.8 m²)이 모든 그룹 중에서 가장 낮았다. G1b는 모래 이하의 세립질 입자의 구성비(95.3%)가 가장 높았으며 습지의 장축 길이(52.3 m)가 가장 짧았고, G1c에 속하는 습지는 모두 동쪽에 위치하였으며(Fig. 1) 수생식물 구성비(13.1%)가 상대적으로 가장 높았다. 한편, G2a는 장축 길이(193.3 m)가 가장 길었으며 평균 수생식물 구성비가 4.6%에 불과하였다. G2b는 평균 고도(570.0 m)와 습지면적(26,608.1 m²)이 모든 그룹 중에서 가장 높았으며 세립질 입자의 구성비(66.4%)가 가장 낮았고 평균 수심(61.4 cm)이 깊었다. 모든 그룹 중에서 G1b는 종다양성과 풍부도가 가장 높았으며 또아리물달팽이(*Gyraulus convexiusculus*)가 우점종이었다. 이와는 반대로 G2a는 출현종수와 개체밀도가 빈약하였으며 서식환경이 열악하거나 교란을 받는 수체에서 높은 개체밀도로 출현하는 깔따구류(*Chironomidae* sp.)가 우점하였다(Table 2). 그룹별 생물서식환경 인자와 생물학적 속성은 고도와 수심, 조립질 입자 구성비를 제외한 모든 항목에서 통계적으로 유의미한 차이를 보였다(Kruskal-Wallis test, $p<0.05$).

Table 3. Indicator values (%) for the most important species ($p<0.05$) in each cluster group.

Indicator species	Group 1			Group 2		<i>p</i>
	G1a	G1b	G1c	G2a	G2b	
<i>Polypylis hemisphaerula</i>	58	1	0	0	0	0.001
<i>Gnorimosphaeroma</i> sp.	27	0	0	0	0	0.025
<i>Gammarus</i> sp.	27	0	0	0	0	0.017
<i>Diplonychus esakii</i>	37	6	0	0	2	0.012
Scirtidae sp.	47	7	1	1	0	0.001
<i>Gyraulus convexiusculus</i>	0	45	11	0	0	0.005
<i>Paraplea indistinguenda</i>	0	44	9	0	0	0.007
<i>Noterus japonicus</i>	12	59	5	0	0	0.002
<i>Hydrovatus subtilis</i>	0	25	1	0	0	0.045
<i>Laccobius (Laccobius) bedeli</i>	0	33	0	0	0	0.013
<i>Triaenodes</i> sp.	0	27	0	0	0	0.027
<i>Cloeon dipterum</i>	1	10	36	0	14	0.012
<i>Ceriagrion melanurum</i>	20	5	63	0	0	0.001
<i>Sympetrum eroticum</i>	1	1	33	0	0	0.026
<i>Hydaticus (Prodaticus) conspersus</i>	0	0	25	0	0	0.046
<i>Limnodrilus gotoi</i>	7	5	1	42	0	0.003
Chironomidae sp.	1	14	5	58	1	0.001
<i>Deilelia phaon</i>	0	0	0	0	43	0.001
<i>Microneecta (Basileoneecta) sedula</i>	0	1	0	0	49	0.001

Monte Carlo tests based on 999 permutations were used to assess the significance of each species as an indicator for the respective cluster group (G1a-G2b). Total 78 species whose contribution to total density was higher than 0.1% were analyzed.

4. 지표종 분석

집괴분석을 통해 구분된 각 그룹을 대표하는 지표종을 확인하기 위하여 지표종 분석(ISA)을 수행한 결과, 0.1% 이상의 개체수 점유율을 차지하는 총 78종 중에서 19종의 지표종이 선정되었으며, 그룹별 지표종은 최소 2종(G2a, G2b)에서 최대 6종(G1b)의 범위였다(Table 3). G1c 그룹의 지표종인 노란실잠자리(*Ceriagrion melanurum*)는 지표값이 63%로 가장 높았으며 습지면적($r = -0.442, p < 0.01$) 및 습지의 장축($r = -0.402, p < 0.01$)과 음의 상관관계가 있었고 수생식물 구성비($r = 0.543, p < 0.01$)와 양의 상관관계를 보였다(Table 4). 이는 노란실잠자리가 제주도의 수생식물이 풍부한 소형 습지에서 출현빈도와 개체밀도가 높았음을 뒷받침한다. 또한, 지표값이 59%인 자색물방개(*Noterus japonicus*)는 G1b 그룹의 지표종으로 선정되었으며, 습지면적($r = -0.405, p < 0.01$) 및 습지의 장축($r = -0.383, p < 0.01$)과 음의 상관관계가 있었고 모래 이하의 세립질 입자 구성비($r = 0.379, p < 0.01$) 및 수생식물 구성비($r = 0.377, p < 0.01$)와 양의 상관관계를 보였다(Table 4). 한편, G2a 그룹에서는 내성종으로 구분하는 실지렁이(*Limnodrilus gotoi*)와 깔따

구류(Chironomidae sp.)의 2종이, G2b 그룹에서는 밀잠자리붙이(*Deielia phaon*)와 꼬마물벌레(*Micronecta (Basileonecta) sedula*)의 2종이 지표종에 선정되었다. 이 중에서 밀잠자리붙이는 습지면적($r = 0.459, p < 0.01$)과 습지의 장축($r = 0.405, p < 0.01$)에 대하여 양의 상관관계가 비교적 높았다(Table 4).

고찰

현재까지 저서성 대형무척추동물 군집을 대상으로 한 제주도의 습지 연구는 물영아리오름 및 물장오리오름과 같이 습지보전법에 근거하여 지정된 습지보호지역을 중심으로 이루어졌다(MOE/NIER, 2008; Han et al., 2022). 또한, 대부분의 습지 연구는 특정 수체에 대하여 단편적으로 조사되었으며, 도내 전역에 걸쳐 광범위하게 수행한 연구는 드물다. 이 중에서 Jeong et al. (2010b)은 102개 정수환경의 습지에 서식하는 수서곤충상을 조사한 결과 총 7목 32과 73속 100종을 확인하였으며, Jung et al. (2011)은 89개 습지와 하천에서 총 5문 8강 21목 84과 157속 207종의 목록을 제시하였

Table 4. Pearson correlation coefficients between indicator species and abiotic and biotic environmental variables.

	Indicator species	Altitude	Wetland area	Fine particle (%)	Long axis	Macrophyte composition (%)
G1a	<i>Polypylis hemisphaerula</i>	-0.166	-0.331*	0.229	-0.327*	0.016
	<i>Gnorimosphaeroma</i> sp.	-0.325*	-0.114	0.157	-0.094	-0.115
	<i>Gammarus</i> sp.	-0.314*	-0.223	0.156	-0.210	-0.093
	<i>Diplonychus esakii</i>	-0.062	-0.065	0.139	-0.136	0.268
	Scirtidae sp.	-0.410**	-0.208	0.318*	-0.196	0.004
G1b	<i>Gyraulus convexiusculus</i>	0.029	-0.286*	0.291*	-0.324*	0.384**
	<i>Paraplea indistinguenda</i>	0.119	-0.222	-0.016	-0.251	0.424**
	<i>Noterus japonicus</i>	0.072	-0.405**	0.379**	-0.383**	0.377**
	<i>Hydrovatus subtilis</i>	0.017	-0.195	0.060	-0.148	0.162
	<i>Laccobius (Laccobius) bedeli</i>	0.093	-0.227	0.095	-0.228	0.015
	<i>Triaenodes</i> sp.	0.177	-0.127	0.062	-0.156	0.136
G1c	<i>Cloeon dipterum</i>	0.118	-0.105	0.136	-0.138	0.264
	<i>Ceriagrion melanurum</i>	-0.090	-0.442**	0.160	-0.402**	0.543**
	<i>Sympetrum eroticum</i>	0.069	-0.004	0.173	-0.023	0.032
	<i>Hydaticus (Prodaticus) conspersus</i>	0.019	-0.024	0.015	-0.025	0.208
G2a	<i>Limnodrilus gotoi</i>	-0.013	0.141	0.036	0.131	-0.190
	Chironomidae sp.	0.120	0.242	0.000	0.316*	-0.067
G2b	<i>Deielia phaon</i>	-0.291*	0.459**	-0.101	0.405**	-0.067
	<i>Micronecta (Basileonecta) sedula</i>	0.058	0.218	-0.150	0.148	-0.175

* $p < 0.05$, ** $p < 0.01$

다(Table 1). 본 연구와 상기 선행연구는 대상 분류군이나 생물서식처 유형, 조사시기, 조사지점 수에서 다소 차이가 있음에도 불구하고 공통적으로 제주도의 습지가 정수성 곤충류를 중심으로 저서성 대형무척추동물의 생물다양성이 매우 높음을 강조하였다. 이와는 반대로 MOE/NIER (2021)은 본 연구와 동일한 조사기간 동안 제주 일대 3개 하천(웅포천, 도근천, 동홍천)에서 총 3문 5강 8목 17과 20종의 생물상과 하천별 평균 9종의 출현종수를 기록하였는데, 이는 본 조사의 습지별 평균 17종과 비교하였을 때에도 종다양성이 빈약한 수준이었다. 제주도 내 하천은 화산암과 화산회토 등의 투수성이 높은 지반으로 인하여 대부분이 집중호우에 의해서 짧은 기간 동안만 하천유량을 유지하므로 건천이 많으며 하천 연속성이 단절된 경우가 많고 직류하천의 형태로 인하여 생물서식환경이 단조롭다(JRMA, 2011). 그러나 제주도 습지는 화구호를 비롯하여 연안과 저지대의 중·소형 연못 등 크기와 형태가 다양할 뿐만 아니라 상대적으로 자연성이 높고 서식환경이 대체로 안정적이다(Oh *et al.*, 2009; Jung *et al.*, 2011). 이러한 결과는 하천생태계와 정수환경의 습지생태계가 제주도의 생물다양성 측면에서 현저하게 차이를 보이는 주요한 원인으로 판단된다.

일반적으로 정수환경의 담수서식처는 OHC 분류군의 다양성과 풍부성이 높다(Williams and Feltnate, 1992; Son *et al.*, 2012; Chung *et al.*, 2020). 제주도에는 과거 목장과 마을의 용수 공급을 목적으로 못의 형태로 중간간 지역에 다양한 형태의 습지가 많았는데, 이용 감소로 방치되면서 사초과(Cyperaceae) 및 가래과(Potamogetonaceae) 등 다양한 수생식물이 정착하여 자연성이 높은 서식처로 변화한 사례가 많다(Oh *et al.*, 2009; Kang *et al.*, 2015). 이와 같은 습지 환경은 주요 섭식기능군(functional feeding group)이 포식자(predators)에 해당하는 OHC 분류군의 다양성과 풍부성에 직접적인 영향을 미치는 중요 요인으로 작용하며 이들이 수생식물을 은신처로 하여 먹이활동을 하는 데 유리한 조건이 될 수 있다(Williams and Feltnate, 1992). 본 연구에서 OHC 분류군은 전체 출현종수와 개체밀도에 대하여 각각 67.7%와 68.2%로 구성비가 매우 높았는데(Fig. 2), Jeong *et al.* (2010b)의 연구에서도 제주도 일대 습지에서 출현한 100종 중에서 포식자가 75%를 차지하는 것으로 보고한 바 있다. 습지생태계에서 OHC 분류군은 대체로 파리목(Diptera)을 포함한 무척추동물과 크기가 작은 올챙이를 주요 먹이원으로 하는데, 대부분의 조사습지에서 출현종이 많을수록 상대적으로 OHC 분류군의 다양성이 높았다. 이러한 결과는 제주도 습지를 대상으로 한 선행연구에서도 동일하였으며(Jeong *et al.*, 2010b; Jung *et al.*, 2011), 행정구역이 다른 내륙지역의 정수성 습지를 대상으로 수행한 연구에서도 유사

하였다(Son *et al.*, 2012; Chung *et al.*, 2020).

본 연구에서 확인한 멸종위기 야생생물 중에서 연체동물문(Mollusca)의 갈고둥과(Neritidae)에 속하는 기수갈고둥(*C. retropictum*)은 담수와 해수가 만나는 기수역에 서식하며 오염되지 않은 수체의 흐름이 있는 자갈 이상의 조립질 하상을 기어다니면서 부착조류를 섭식하는 종이다(Lee *et al.*, 2018; Han *et al.*, 2021). 기수갈고둥은 해안의 높은 개발 압력으로 인한 지속적인 서식지 감소와 까다로운 생육조건으로 인하여 1998년 멸종위기 야생생물로 지정하여 현재에 이르고 있다(MOE, 2019; Han *et al.*, 2021; Jeong *et al.*, 2021). 국내에서 보고된 대부분의 기수갈고둥 개체군은 남해안을 중심으로 국지적으로 분포하는 것으로 알려져 있었으나, Noseworthy *et al.* (2012, 2013)이 제주도의 남부와 북부 지역 하천 말단에서 이 종을 최초 보고한 바 있다. 본 연구에서 기수갈고둥은 해안과 인접한 습지에서 비교적 풍부한 개체가 서식하였는데, 화산섬의 지질적 특성에 의한 제주 하천의 분포 양상과 우수 환경을 선호하는 기수갈고둥의 일반적인 생태적 습성을 고려하였을 때 이는 다소 이례적이며 주목할 만한 결과이다. 즉 수서곤충의 물장군(*L. deyrolli*)과 물방개(*C. chinensis*)와 같이 서식처 교란이 있을 때 우수한 비행능력의 도움으로 인근의 서식처로 쉽게 도피하여 재정착할 수 있는 종과는 달리, 본 종은 서식범위가 매우 제한적이고 환경변화에 취약하기 때문에 서식지가 훼손되었을 때 쉽게 사멸할 우려가 크다. 따라서 향후 종 보전과 서식지 보호를 위하여 도내 유사 환경에 대한 분포와 서식환경 특성에 대한 추가적인 연구가 요구된다(Han *et al.*, 2021).

또한, 우리나라에서 국가 기후변화 생물지표종으로 지정된 남색이마잠자리(*B. chalybea flavovittata*)는 인도와 인도네시아, 태국과 같이 주로 고온다습한 열대지역에 서식하는데, 2010년도 제주도에서 최초 기록된 이후 개체수가 점진적으로 증가하고 있으며 최근에는 영산강과 금강 일부 지역으로 서식범위가 확장하는 경향을 보여 기후변화에 따른 지속적인 모니터링과 생태연구가 요구되는 종이다(Choi *et al.* 2020). 이와 함께 제주도에서 내륙의 북부지역으로 서식범위가 점차 확대하는 종으로 도깨비왕잠자리(*A. martini*)와 하나잠자리(*Sympetrum speciosum*), 새노란실잠자리(*Ceriagrion auranticum*)가 있다(Jung, 2016).

제주도는 한라산과 해양의 영향으로 해발고도와 지형에 따라서 한대에서 아열대까지 여러 기후 환경이 공존하므로 다양한 동식물이 서식하며 내륙지역과 비교하여 생물상이 독특하다(JRMA, 2011; FNM, 2021). 아울러 제주도는 외국에서 비래하여 유입된 종이 정착하여 확산하는 중간 기착지로서 생물지리학적으로 중요한 위치에 있는 것으로 판단된다. 특히 제주도 습지는 생물서식환경이 다양하고 풍부하

므로 높은 생물다양성을 지탱하는 데 중요한 역할을 한다 (Jeong *et al.*, 2010b; Kang *et al.*, 2015). 우리나라는 향후 기후변화에 따른 기온 상승과 강수량 증가의 영향으로 생물서식환경의 변화가 예측되고 있다 (JRMA, 2011). 결과적으로 이는 생물다양성과 생물 군집의 조성에 직·간접적인 영향을 미칠 수 있으며, 앞의 남색이마잠자리 사례에서와 같이 비행성이 우수한 분류군을 중심으로 도내에 제한적으로 분포하는 종의 서식범위가 내륙지역으로 점차 확대할 것으로 예상된다 (Choi *et al.*, 2020). 이러한 측면에서 세계적인 이슈인 기후변화가 제주도 일원의 습지환경과 생물다양성에 미치는 영향에 대하여 지속적인 관심과 함께 체계적인 모니터링 프로그램 실행이 필요하다.

저서성 대형무척추동물의 분포와 군집에 영향을 미치는 환경 인자를 규명하는 연구는 대상 수체와 생물다양성 보전을 위하여 필수적이다 (Sharma and Rawat, 2009; Jun *et al.*, 2016; Dalu *et al.*, 2022). 습지생태계에서 저서성 대형무척추동물 군집에 영향을 미치는 주요 환경인자는 습지면적과 고도, 수심, 수질, 수생식물 분포 등이 알려져 있는데 (Stenert and Maltchik, 2007), 본 연구에서 습지면적과 습지의 장축 길이, 모래 이하 세립질 입자의 구성비, 수생식물 구성비는 저서성 대형무척추동물 군집의 유사성에 따라 대상 습지를 구분하는 주요한 환경인자에 해당하였다.

일반적으로 서식지 면적은 저서성 대형무척추동물의 종다양성과 풍부성을 결정하는 중요한 인자로서 면적이 넓을수록 미소서식환경이 다양하며 가용할 만한 생태적 지위가 많고 자원 이용의 기회가 증가하므로 생물다양성이 높다 (Heino, 2000; Stenert and Maltchik, 2007; Stewart and Schriever, 2023). 이러한 관계는 대형 수생식물과 어류에서 밀접한 것으로 알려져 있다 (Tonn and Magnuson, 1982; Oertli *et al.*, 2002; Park *et al.*, 2020). 이와는 반대로 Oertli *et al.* (2002)은 스위스의 80개 연못을 대상으로 면적과 생물다양성에 대한 연구 결과에서 일련의 소형 습지가 동일 면적의 규모가 큰 습지 하나와 비교하여 종다양성과 보전 가치가 높다고 하였다. 그러나 많은 연구에서 습지면적에 대한 저서성 대형무척추동물의 종다양성 변화 양상은 분류군에 따라 차이가 있는 것으로 제시하고 있다. 예를 들어, 잠자리목 (Odonata)과 복족류 (Gastropoda), 갑각류 (Crustacea)는 면적에 대하여 비례적으로 증가하는 반면 (Oertli *et al.*, 2002; Stenert *et al.*, 2008; Maltchik *et al.*, 2010), 딱정벌레목의 물방개과 (Dyticidae)는 감소하였다 (Heino, 2000). 본 연구에서 집괴분석 결과 저서성 대형무척추동물 군집은 습지면적에 따라 차이를 보였음에도 불구하고 출현종수 (Pearson correlation, $r = -0.274$, $p > 0.05$)와 개체밀도 (Pearson correlation, $r = -0.291$, $p < 0.05$)는 습지면적 증가에 따라서 감

소하는 경향을 보이기는 하였으나 개체밀도만이 상관관계가 유의미하였다. 이러한 결과는 제주도 일대 50개 대상 습지의 80%가 면적 10,000 m² 이하의 소형습지에 편중되어 있어 습지면적에 따른 종다양성과 풍부도의 관계를 파악하기에는 자료가 불충분한 것으로 판단된다 (Appendix 1).

수생식물 분포는 수생물 군집의 종다양성에 직접적인 기여를 하며 이러한 관계는 정수환경에서 더욱 명확하다. 다시 말해서 수생식물은 잔사물의 형태 또는 표면에 자라는 부착조류를 통해 먹이원을 제공하거나 산란처와 은신처로서의 역할을 하므로 저서성 대형무척추동물의 다양성 및 풍부도와 밀접한 관계가 있으며 수생식물이 차지하는 면적이 클수록 저서성 대형무척추동물의 출현종수와 밀도가 높다 (Attrill *et al.*, 2000; Bogut *et al.*, 2007). 또한, 저서성 대형무척추동물은 수생식물의 종구성과 생활사에 따라 출현시기와 군집 구조가 결정되기도 한다 (Van den Berg *et al.*, 1997). 화구호와 인공저수지를 포함하는 Group 2는 대체로 해발고도가 높은 산림에 위치하였으며 습지면적에 비하여 유량이 적어 수생식물보다는 건조한 환경을 선호하는 건건생식물 (xerophyte)의 구성비가 높았다. 결과적으로 저서성 대형무척추동물은 Group 2의 습지별 평균 출현종수와 밀도가 각각 10.5종과 278.6개체 m⁻²로서 상대적으로 수생식물이 풍부한 Group 1의 20.7종과 725.4개체 m⁻²에 비하여 적었다. 본 연구에서와 마찬가지로 물장오리오름습지는 수생식물이 차지하는 면적이 증가하는 하절기에 정수성 곤충류인 OHC 분류군을 중심으로 종다양도와 풍부도가 증가하는 것으로 보고된 바 있다 (Han *et al.*, 2022). 그러나 본 연구는 제주도 일대 대상 습지에 대한 수생식물의 세부적인 출현종과 습지 내부를 차지하는 면적에 대한 정량적 자료가 미흡하여 객관적인 연관성을 제시하기에는 어려운 한계가 있으며, 이는 향후 추가적인 연구를 통한 보완이 요구된다.

이 외에도 고도는 우수 및 정수생태계에서 저서성 대형무척추동물의 다양성과 분포에 영향을 미치는 제한요인으로 작용한다 (Oertli *et al.*, 2002; Jeong *et al.*, 2010a; Jun *et al.*, 2016). 즉 종다양성은 대체로 고도가 증가하면서 단조적으로 감소하거나 고봉형의 형태로 중간 고도에서 최대를 보이다가 이후 감소하는 경향을 보인다 (Sanders, 2002). Lawton *et al.* (1987)은 고도에 따른 종다양성 감소 원인으로 높은 고도에서의 서식처 면적 및 이용가능한 자원의 다양성, 생산력 감소와 함께 변화가 심하고 예측이 어려운 환경조건을 제시하였다. 제주도는 해발고도 1,947 m의 한라산을 중심으로 한대에서 아열대까지 기후 환경의 변화가 비교적 뚜렷하며 이는 온도에 민감한 수생물 군집의 분포와 다양성에 직접적인 영향을 미치는 제한요인으로 작용할 수 있다. 다만, 본 연구에서는 습지면적에서와 마찬가지로 고도에 따라 출

현종수(Pearson correlation, $r = -0.265$, $p > 0.05$)와 개체밀도(Pearson correlation, $r = -0.215$, $p > 0.05$)가 감소하는 양상을 보였음에도 불구하고 통계적으로 유의미하지는 않았다. Jeong *et al.* (2010a)은 제주도 내 24개 습지를 대상으로 고도에 따른 수서곤충 다양성 변화를 분석한 연구에서 해발고도 증가에 따라서 출현종수는 감소하였으며 면적 효과를 제거하였을 때 해발고도 약 258.7 m에서 출현종수가 최대인 고봉형(hump-shaped)으로 나타난다고 하였다.

한편, 생물학적 지표종(biological indicators)은 생태계의 전반적인 상태 또는 생태계를 구성하는 환경 요소의 변화를 감지하고 평가하는 데 유용하게 활용하는 개념이다(Jun *et al.*, 2012; Min *et al.*, 2022). 저서성 대형무척추동물은 대부분의 수체에 분포하며 서식범위가 제한적일 뿐만 아니라 수명이 비교적 길고 채집과 동정이 용이하여 담수생태계의 환경 상태를 평가하기 위한 지표생물로 전 세계적으로 널리 활용되는 분류군이다(Rosenberg and Resh, 1993). 본 연구에서 제주도 습지 50개소를 대상으로 지표종 분석을 통하여 선정된 지표종은 총 19종으로 대부분이 딱정벌레목과 잠자리목, 노린재목의 포식성 곤충류가 해당하였다(Table 3). 또한, 수생식물이 풍부하고 세립질 입자의 구성비가 높은 저지대 소형 못을 대표하는 지표종은 15종인 반면, 중산간 지역의 중형 습지에서는 4종에 불과하였다(Table 3). 이 중에서 G2a 그룹은 우리나라 대부분의 담수생태계에 광범위하게 분포하며 환경교란에 대하여 내성범위가 넓어 교란이 심한 수체에서 높은 밀도로 서식하는 실지렁이(*Limnodrilus gotoi*)와 깔따구류(Chironomidae sp.)가 지표생물로 선정되었다(Cooper *et al.*, 2006; Beyene *et al.*, 2009). G2a 그룹은 대체로 화구호의 고산습지 또는 인공적으로 조성한 습지를 포함하였으며 습지면적이 넓고 수생식물의 구성비가 낮은 열악한 환경의 특성을 보였고 출현종수와 개체밀도가 각각 $7.8 (\pm 3.6)$ 종과 $225.6 (\pm 133.7)$ 개체(ind. m^{-2})로 빈약하였다. 본 연구에서 선정된 대부분의 지표종은 습지의 주요 환경 인자와 상관관계가 통계적으로 유의미하였으며 환경 변화를 감지할 수 있는 잠재적인 활용 가치가 높을 것으로 판단되었다(Table 4). 다만, 일부 관계에 대한 상관계수가 낮게 산출되었는데, 이는 연안습지에서부터 화구호에 이르기까지 대상 습지가 다양하였음에도 불구하고 대부분의 조사 습지가 해발고도 200 m 이내의 저지대에 위치하는 면적 3,000 m^2 이하의 소형 못에 편중되었기 때문이다. 이러한 문제는 본 연구와 연계하여 제주도 습지에 대한 지속적인 연구를 통하여 보다 다양한 유형의 습지를 포함하여 지속적으로 조사 자료를 축적한다면 개선될 수 있을 것이다.

제주도는 지질학적 특성으로 인하여 도 전역에 걸쳐 다양한 형태의 습지가 발달하여 있으며 생태적 가치가 높은 다

수의 람사르습지가 지정되어 있다. 그러나 관련 법령으로 보호받지 못하는 많은 습지는 생태계 현황을 파악하기도 전에 도시화와 농경 활동 등의 과도한 개발로 사라지거나 인위적인 교란에 방치되어 있다. 이러한 측면에서 본 연구는 제주도 일대 중·소형 습지를 대상으로 저서성 대형무척추동물의 다양성과 특이종의 분포를 분석하였으며 군집 유사성에 기초한 습지 유형화를 통하여 이들의 분포에 영향을 미치는 환경 요인과의 관계를 고찰하였고 습지생태계의 변화 관찰에 활용할 수 있는 지표종을 제시하였다. 조사 결과는 제주도의 전반적인 습지 현황과 생물다양성의 특성을 이해하는 유용한 자료가 될 수 있을 것이며 향후 습지생태계를 효율적이고 과학적으로 보전하기 위한 생물모니터링과 생물학적 평가에 기초자료로 활용되기를 기대한다.

적 요

습지는 생태적 중요성과 경제적 가치에도 불구하고 인간의 과도한 이용으로 인하여 교란받고 있을 뿐만 아니라 유수생태계인 하천에 비하여 습지 연구는 상대적으로 적다. 본 연구는 아열대 기후의 제주도에 분포하는 중·소형 습지 50개소를 대상으로 저서성 대형무척추동물 군집 특성과 주요 종의 분포 특성을 알아보기 위하여 2021년 현장조사를 실시하였다. 현장조사는 국립생태원의 “내륙습지 조사지침(2020)”에 따라 수행되었다. 조사기간 동안 출현한 저서성 대형무척추동물은 총 3문 5강 19목 53과 133종이었다. 습지별 출현종수는 4~31종의 범위였으며 평균 17.5종이 출현하였다. 포식성 곤충인 잠자리목과 노린재목, 딱정벌레목의 세 분류군은 출현종수와 개체밀도가 각각 전체의 67.7%와 68.2%를 차지하였는데, 특히 딱정벌레목의 구성비가 가장 높았다. 한편, 국가습지 유형분류체계에 따른 습지 유형별 출현종수와 개체밀도는 통계적으로 유의미한 차이가 없었다. 본 연구를 통하여 멸종위기 야생생물은 기수갈고둥과 물장군, 물방개의 총 3종이 확인되었으며 큰무늬왕잠자리를 비롯하여 제주도 내에만 국지적으로 분포하는 다수의 종이 기록되었다. 전체 대상 습지는 저서성 대형무척추동물 군집의 유사성에 따라 5개의 그룹으로 세분되었으며 각 그룹은 습지면적과 세립질 입자의 구성비, 습지 장축 길이, 수생식물 구성비의 항목에서 통계적으로 유의미한 차이를 보였다. 지표종분석(ISA) 결과에서 총 19종의 지표종이 선정되었는데, 노란실잠자리는 지표값이 63%로 가장 높았으며 그 다음으로 자색물방개와 깔따구류의 순이었다. 습지 환경과 생물 자료를 지속적으로 축적한다면 지표종의 환경변화에 따른 반응을 보다 객관적으로 제시할 수 있으며 습지생태계의

현재 상태를 평가하고 관리하기 위한 생물학적 지표 개발에 적용이 가능할 것이다. 본 연구 결과는 중·소형 습지에 대한 저서성 대형무척추동물의 생물다양성과 서식환경에 대한 정보를 제공하고 향후 습지 보전과 복원을 위한 기초자료로 활용되기를 기대한다.

저자정보 전영철 (주식회사 생태자원연구소 책임연구원), 천승필 (SOKN생태보전연구소 주식회사 총괄이사), 강미숙 (SOKN생태보전연구소 주식회사 전임연구원), 박재홍 (주식회사 생태자원연구소 대표이사), 이창수 (국립생태원 전임연구원), 권순직 (주식회사 애일 연구소장)

저자기여도 자료분석 및 초고작성: 전영철, 현장조사 및 실내분석: 천승필, 강미숙, 원고 교정: 박재홍, 과제관리: 이창수, 방법론 및 최종원고 검토: 권순직, 원고초안 검토 및 수정: 모든 저자

이해관계 모든 저자는 본 논문의 결과에 동의하였으며 이해관계 충돌의 여지가 없습니다.

연구비 본 연구는 환경부 국립생태원에서 수행한 “내륙습지 기초조사(NIE-A-2024-18)”에 의해 이루어진 자료를 포함하는 것으로 이에 감사드립니다.

REFERENCES

- Allan, J.D. and M.M. Castillo. 2007. Stream Ecology: Structure and Function of Running Waters. Second edition. Springer Science & Business Media, Dordrecht, The Netherlands.
- Atrill, J.J., J.A. Strong and A.A. Rowden. 2000. Are macroinvertebrate communities influenced by seagrass structural complexity? *Ecography* **23**: 114-121.
- Bae, Y.J., S.I. Jo, D.H. Hoang, H.G. Lee and K.B. Na. 2004. Biodiversity and community composition of benthic macroinvertebrates from Upo wetlands in Korea. *Korean Journal of Environment and Ecology* **18**: 75-91.
- Beyene, A., T. Addis, D. Kifle, W. Legesse, H. Kloos and L. Triest. 2009. Comparative study of diatoms and macroinvertebrates as indicators of severe water pollution: Case study of the Kebena and Akaki rivers in Addis Ababa, Ethiopia. *Ecological Indicators* **9**: 381-392.
- Bogut, I., J. Vidaković, G. Palijan and D. Čerba. 2007. Benthic macroinvertebrates associated with four species of macrophytes. *Biologia* **62**: 600-606.
- Braich, O.S. and R. Kaur. 2017. Temporal composition and distribution of benthic macroinvertebrates in wetlands. *Current Science* **112**: 116-125.
- Choi, J.Y., S.K. Kim, J.C. Kim and S.J. Kwon. 2020. Habitat preferences and trophic position of *Brachydiplax chalybea flavivittata* Ris, 1911 (Insecta: Odonata) larvae in Youngsan River wetlands of South Korea. *Insects* **11**(5): 273. <https://doi.org/10.3390/insects11050273>
- Chung, H.Y., C.M. Yeom, J.H. Kim, S.Y. Park, Y.W. Lee, G.A. Pyo and S.H. Kim. 2020. Species diversity and community characteristics of benthic macroinvertebrates from irrigation ponds in the western CCZ area, Korea. *Korean Journal of Ecology and Environment* **53**(2): 173-184.
- Cooper, M.J., D.G. Uzarski, T.M. Burton and R.R. Rediske. 2006. Macroinvertebrate community composition relative to chemical/physical variables, land use and cover, and vegetation types within a Lake Michigan drowned river mouth wetland. *Aquatic Ecosystem Health and Management* **9**: 463-479.
- Cummins, K.W. 1962. An evaluation of some techniques for the collection and analysis of benthic samples with special emphasis on lotic waters. *The American Midland Naturalist* **67**(2): 477-504.
- Dalu, T., R.N. Cuthbert, M.J. Methi, F. Dondofema, L.D. Chari and R.J. Wasserman. 2022. Drivers of aquatic macroinvertebrate communities in a Ramsar declared wetland system. *Science of The Total Environment* **818**: 151683. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.151683>
- Davis, J., P. Horwitz, R. Norris, B. Chessman, M. McGuire and B. Sommer. 2006. Are river bioassessment methods using macroinvertebrates applicable to wetlands? *Hydrobiologia* **572**: 115-128.
- Diaz, R.J., M. Solan and R.M. Valente. 2004. A review of approaches for classifying benthic habitats and evaluating habitat quality. *Journal of Environmental Management* **73**: 165-181.
- Dufrene, M. and P. Legendre. 1997. Species assemblages and indicator species: the need for a flexible asymmetrical approach. *Ecological Monograph* **67**: 345-366.
- FNM. 2021. Butterflies of Jeju Island. Forklore & Natural Museum Jeju Special Self-Governing Province. Jeju, Korea.
- Gleason, J.E., J.Y. Bortolotti and R.C. Rooney. 2018. Wetland microhabitats support distinct communities of aquatic macroinvertebrates. *Journal of Freshwater Ecology* **33**: 73-82.
- Hall, D.L., M.R. Willig, D.L. Moorhead, R.W. Sites, E.B. Fish, and T.R. Mollhagen. 2004. Aquatic macroinvertebrate diversity of playa wetlands: the role of landscape and island biogeographic characteristics. *Wetlands* **24**: 77-91.
- Han, J.S., C.H. An, J.C. Lim, K.J. Cho and H.G. Lee. 2022. Analysis of benthic macroinvertebrate fauna and habitat environment of Muljangori-oreum wetland in Jeju Island. *Korean Journal of Environmental Biology* **40**(4): 363-373.
- Han, S.P., I.C. Hwang and S.J. Kwon. 2021. Studies on distribution and ecology of *Clithon retropictus* (Martens, 1879) in South Korea. *Journal of Wetlands Research* **23**(4): 317-326.
- Heino, J. 2000. Lentic macroinvertebrate assemblage structure along gradients in spatial heterogeneity, habitat size and water chemistry. *Hydrobiologia* **418**: 229-242.
- Hong, S.J. and S.W. Cheong. 2020. A study on the community

- characteristics and changes of benthic macroinvertebrates in the conservation area of the Shinbulsan wetland. *Journal of Environmental Science International* **29**: 1079-1088.
- Jeong, J.Y., M.K. Sang, J.E. Park, D.K. Song, C.E. Hong, Y.T. Kim, H.J. Sin, H.J. Hwang, S.M. Jung, S.Y. Park, S.W. Kang, J.S. Lee, Y.S. Han, H.S. Park, Y.S. Lee and W.J. Kim. 2021. Molecular phylogenetic study of *Clithon retropictus* using metallothionein gene. *Korean Journal of Malacology* **37**(2): 69-74.
- Jeong, S.B., D.S. Kim, H.S. Jeon, K.S. Yang and W.T. Kim. 2010a. Species richness of aquatic insects in wetlands along the altitudinal gradient in Jeju, Korea: test of Rapoport's rule. *Korean Journal of Applied Entomology* **49**: 175-185.
- Jeong, S.B., H.S. Oh, H.S. Jeon, K.S. Yang and W.T. Kim. 2010b. Aquatic insects fauna and characteristics of distribution on Jeju Island wetlands. *Journal of Wetlands Research* **12**(2): 35-46.
- Jiang, X.M., J. Xiong, J.W. Qiu, J.M. Wu, J.W. Wang and Z.C. Xie. 2010. Structure of macroinvertebrate communities in relation to environmental variables in a subtropical Asian river system. *International Review of Hydrobiology* **95**: 42-57.
- JRMA. 2011. Regional Climate Change Report. Jeju Regional Meteorological Administration. Jeju, Korea.
- Jun, Y.C., D.H. Won, S.H. Lee, D.S. Kong and S.J. Hwang. 2012. A multimetric benthic macroinvertebrate index for the assessment of stream biotic integrity in Korea. *International Journal of Environmental Research and Public Health* **9**: 3599-3628.
- Jun, Y.C., N.Y. Kim, S.H. Kim, Y.S. Park, D.S. Kong and S.J. Hwang. 2016. Spatial distribution of benthic macroinvertebrate assemblages in relation to environmental variables in Korean nationwide streams. *Water* **8**: 27. <https://doi.org/10.3390/w8010027>
- Jung, K.S. 2016. A distributional study and pictorial key of the Odonata (Insecta) from Korea. Ph D. dissertation, Andong University. 185pp.
- Jung, M.H., H.J. Cho, J.H. Yun and H.Y. Lee. 2014. Epilithic diatom communities in streams of Jeju Island. *Korean Journal of Environmental Biology* **32**: 16-25.
- Jung, S.W., Y.J. Park, S.A. Ham, M.C. Kim, H.S. Oh and Y.J. Bae. 2011. Diversity and species composition of benthic macroinvertebrates in Jeju Island. *Entomological Research Bulletin* **27**: 59-69.
- Kang, D.H., E.Y. Yim and M.O. Moon. 2015. Flora of aquatic and wetland habitats on Jeju Island. *Korean Journal of Plant Taxonomy* **45**(1): 96-107.
- Kashian, D.R. and T.M. Burton. 2000. A comparison of macroinvertebrates of two Great Lakes coastal wetlands: testing potential metrics for an index of ecological integrity. *Journal of Great Lakes Research* **26**: 460-481.
- Kim, T., J. Jeong, S. Moon, H. Yang and B. Yang. 2013. Introduction to national mid-term fundamental plan for wetlands conservation and management. *Journal of Wetlands Research* **15**: 519-527.
- Kingsford, R.T., A. Basset and L. Jackson. 2016. Wetlands: conservation's poor cousins. *Aquatic Conservation: Marine and Freshwater Ecosystems* **26**: 892-916.
- Lawton, J.H., M. MacGarvin and P.A. Heads. 1987. Effects of altitude on the abundance and species richness of insect herbivores on bracken. *Journal of Animal Ecology* **56**: 147-160.
- Lee, S.D., M.J. Kim and J.S. Kim. 2018. Ecological characteristic of *Clithon retropictus* inhabiting in Yeoncho River in southern coastal area. *Korean Journal of Environment and Ecology* **32**(6): 591-602.
- Maltchik, L., C. Stenert, C.B. Kotzian and M.M. Pires. 2010. Responses of odonate communities to environmental factors in southern Brazil wetlands. *Journal of the Kansas Entomological Society* **83**: 208-220.
- Margalef, R. 1958. Temporal succession and spatial heterogeneity in phytoplankton. pp. 323-349. In: Perspectives in Marine Biology (Buzzati-Traverso, A.A. ed.). University of California Press, Berkeley.
- McCune, B. and J.B. Grace. 2002. Analysis of ecological communities. MjM Software Design, Gleneden Beach, Oregon, USA.
- McCune, B. and M.J. Mefford. 1999. PC-ORD. Multivariate Analysis of Ecological Data, Vers. 4. User's Guide. MjM Software Design, Gleneden Beach, Oregon, USA.
- McNaughton, S.J. 1967. Relationships among functional properties of California Grassland. *Nature* **216**: 168-169.
- Mereta, S.T., P. Boets, A.A. Bayih, A. Malu, Z. Ephrem, A. Sisay, H. Endale, M. Yitbarek, A. Jemal, L. De Meester and P.L.M. Goethals. 2012. Analysis of environmental factors determining the abundance and diversity of macroinvertebrate taxa in natural wetlands of southwest Ethiopia. *Ecological Informatics* **7**: 52-61.
- Merz, J.R. and L.K. Ochikubo Chan. 2005. Effects of gravel augmentation on macroinvertebrate assemblages in a regulated California river. *River Research and Applications* **21**: 61-74.
- Mielke, P.W., Jr., K.J. Berry and E.S. Johnson. 1976. Multiresponse permutation procedures for a priori classifications. *Communications in Statistics* **A5**: 1409-1424.
- Min, J.K., H. Lee and D. Kong. 2022. Development of a benthic macroinvertebrate predictive model based on the physical and chemical variables of rivers in the Republic of Korea. *Journal of Freshwater Ecology* **37**: 425-453.
- MOE. 2019. The distribution map of *Clithon retropictum* (Marten, 1879). - Kyeongnam Region: Changwon, Goseong, Sacheon, Tongyoung and Geoje -. The Ministry of Environment. Sejong, Korea. 34pp.
- MOE. 2022. Designation Status of Wetland Protection Area in Korea (December 2022). <http://www.me.go.kr>. The Ministry of Environment. (accessed 06/30/2023).

- MOE/NIER. 2008. Intensive Survey on the Wetland Protected Areas. The Ministry of Environment/National Institute of Environmental Research. Incheon, Korea. pp. 129-139.
- MOE/NIER. 2021. Stream/River Ecosystem Survey and Health Assessment. - Youngsan River and Seomjin River -. The Ministry of Environment/National Institute of Environmental Research. Incheon, Korea.
- Nelson, S.M. and D.M. Lieberman. 2002. The influence of flow and other environmental factors on benthic invertebrates in the Sacramento River, USA. *Hydrobiologia* **489**: 117-129.
- NIE. 2020. Survey Guidelines For Inland Wetlands. National Institute of Ecology, Changnyeong, Korea.
- NIE. 2022. Basic Survey on Inland Wetlands ('22). National Institute of Ecology, Seochon, Korea.
- Noseworthy, R.G., H.J. Lee and K.S. Choi. 2013. The occurrence of *Clithon retropictus* (v. Martens, 1879) (Gastropoda: Neritidae) in an unusual habitat, northern Jeju Island, Republic of Korea. *Ocean Science Journal* **48**(3): 259-262.
- Noseworthy, R.G., M.R. Mondol, S.J. Ju and K.S. Choi. 2012. The occurrence of *Clithon retropictus* (von Martens in Kobelt, 1879, Gastropoda: Neritidae) in Jeju Island, Republic of Korea. *Korean Journal of Malacology* **28**(2): 81-90.
- Oertli, B., D.A. Joye, E. Castella, R. Juge, D. Cambin and J. Lachavanne. 2002. Does size matter? The relationship between pond area and biodiversity. *Biological Conservation* **104**: 59-70.
- Oh, S.J., K.L. Zhin and S.C. Koh. 2009. Studies on flora of wetlands on Jeju City for application as nature exploration sites. *Journal of the Environmental Sciences* **18**(4): 411-422.
- Park, S.H., J.H. Kim, S.H. Baek, H.S. Choi, D.W. Kim, E.J. Ko and H.W. Kim. 2020. Characteristics of fish assemblage by reservoir size in Yeongsan-Seomjin River watershed in Korea. *Korean Journal of Ecology and Environment* **53**: 229-240.
- Petersen, W.T. and J.E. Keister. 2003. Interannual variability in copepod community composition at a coastal station in the northern California Current: a multivariate approach. *Deep Sea Research* **50**: 2499-2519.
- Pielou, E.C. 1975. Ecological diversity. John Wiley and Sons, New York.
- Reis, V., V. Hermoso, S.K. Hamilton, D. Ward, E. Fluet-Chouinard, B. Lehner and S. Linke. 2017. A global assessment of inland wetland conservation status. *BioScience* **67**: 523-533.
- Rolon, A.S. and L. Maltchik. 2006. Environmental factors as predictors of aquatic macrophyte richness and composition in wetlands of southern Brazil. *Hydrobiologia* **556**: 221-231.
- Rosenberg, D.M. and V.H. Resh. 1993. Freshwater Biomonitoring and Benthic Macroinvertebrates. Chapman and Hall, London and New York.
- Sanders, N.J. 2002. Elevational gradients in ant species richness: area, geometry, and Rapoport's rule. *Ecography* **25**: 25-32.
- Shannon, C.E. and W. Weaver. 1949. The mathematical theory of communication. University of Illinois Press, Urbana.
- Sharma, R.C. and J.S. Rawat. 2009. Monitoring of aquatic macroinvertebrates as bioindicator for assessing the health of wetlands: a case study in the Central Himalayas, India. *Ecological Indicators* **9**: 118-128.
- Shine, C. and C. de Klemm. 1999. Wetlands, Water and the Law: Using Law to Advance Wetland Conservation and Wise Use. IUCN, Gland.
- Son, J.K., N.C. Kim, M.H. Kim and B.H. Kang. 2012. Community characteristics of benthic macroinvertebrates according to growth environment at rural palustrine wetland. *Journal of the Korean Society of Environmental Restoration Technology* **15**(5): 129-144.
- Stenert, C. and L. Maltchik. 2007. Influence of area, altitude and hydroperiod on macroinvertebrate communities in southern Brazil wetlands. *Marine and Freshwater Research* **58**: 993-1001.
- Stenert, C., R.C. Bacca, C.C. Mostardeiro and L. Maltchik. 2008. Environmental predictors of macroinvertebrate communities in coastal wetlands of southern Brazil. *Marine and Freshwater Research* **59**: 540-548.
- Stewart, N.A. and T.A. Schriever. 2023. Local environmental conditions influence species replacement in Great Lakes inter-dunal wetland macroinvertebrate communities. *Freshwater Biology* **68**: 46-60.
- Tonn, W.M. and J.J. Magnuson. 1982. Patterns in the species composition and richness of fish assemblages in northern Wisconsin lakes. *Ecology* **63**: 1149-1166.
- Van den Berg, M.S., H. Coops, R. Noordhuis, J. van Schie and J. Simons. 1997. Macroinvertebrate communities in relation to submerged vegetation in two *Chara*-dominated lakes. *Hydrobiologia* **342/343**: 143-150.
- Vannote, R.L., G.W. Minshall, K.W. Cummins, J.R. Sedell and C.E. Cushing. 1980. The river continuum concept. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences* **37**: 130-137.
- Wallace, J.B. and J.R. Webster. 1996. The role of macroinvertebrates in stream ecosystem function. *Annual Review of Entomology* **41**: 115-139.
- Weisberg, S.B., J.A. Ranasinghe, D.D. Dauer, L.C. Schnaffer, R.J. Diaz and J.B. Frithsen. 1997. An estuarine benthic index of biotic integrity (B-IBI) for Chesapeake Bay. *Estuaries* **20**: 149-158.
- Williams, D.D. and B.W. Feltmate. 1992. Aquatic Insects. CAB International, Wallingford, Oxon, UK.

Appendix 1. Information on the survey wetlands in Jeju Island, Korea.

Wetland	Type ¹⁾	Abbreviation ²⁾	Altitude	Area (m ²)	Latitude	Longitude
빌레못	L3	AA	257	901	33.40371	126.35110
연화못	L3	AB	69	16,085	33.45457	126.34735
돌개기못	L3	AC	194	1,895	33.39225	126.31092
역고못	L3	AD	210	651	33.38768	126.30886
걸월이못	L3	AE	241	2,662	33.38016	126.31059
어승생오름화구호	L3	AF	1,133	2,935	33.39658	126.48769
수산저수지	H1	AG	50	100,998	33.47016	126.38864
동백로습지	L3	AH	157	1,110	33.50360	126.73992
동북리목장2습지	L3	AI	66	803	33.52939	126.71957
동북리목장3습지	L3	AJ	112	1,597	33.52127	126.72692
반못	L3	AK	125	2,388	33.50866	126.71745
허튼물	L3	AL	274	482	33.48058	126.71794
덕천리목장1습지	L3	AM	263	3,037	33.48229	126.73561
덕천리목장2습지	L3	AN	267	6,211	33.48112	126.73789
북오름습지	L3	AO	212	439	33.49129	126.74171
물차오름습지	M2	AP	684	3,833	33.39554	126.65159
덕천오못	L3	AQ	236	1,651	33.48249	126.74550
몰순이못	L3	AR	284	5,363	33.46299	126.74358
서김녕리목장습지	L3	AS	99	568	33.52333	126.75786
당케해안습지	L3	AT	2	1,295	33.56414	126.76526
모사니물	L3	AU	126	3,005	33.50471	126.77220
쇠선동산습지	L3	AV	132	804	33.42933	126.83972
사려물	L3	AW	120	854	33.42038	126.84503
독자봉길습지	L3	AX	143	902	33.40028	126.83768
긴동산1습지	L3	AY	129	1,252	33.39478	126.82077
긴동산2습지	L3	AZ	125	2,113	33.39264	126.81912
문괴습지	L3	BA	103	2,319	33.38821	126.83704
미나리못	L3	BB	221	4,100	33.45342	126.80059
갈마못	L3	BC	124	2,034	33.38729	126.81084
한못	L3	BD	125	5,993	33.42883	126.84303
시흥리습지	L3	BE	1	40,509	33.47766	126.89744
대나물	L3	BF	75	1,204	33.42897	126.87746
사장밭2습지	M4	BG	9	550	33.35334	126.18924
비비논물옆습지	M4	BH	7	2,673	33.34598	126.18416
광쟁이1습지	M4	BI	12	9,044	33.32878	126.17688
광쟁이2습지	M4	BJ	11	1,057	33.32863	126.17587
도루목이습지	M4	BK	10	939	33.32601	126.17432
판포오름남쪽습지	L3	BL	48	2,874	33.35601	126.21447
수장동습지	L3	BM	32	12,383	33.34984	126.20969
돛곳물	L3	BN	52	415	33.33719	126.22150
용수저수지	H1	BO	26	115,947	33.31741	126.18779
필랑호	L3	BP	4	40,078	33.40891	126.23063
금오름화구호	L3	BQ	382	4,503	33.35616	126.30576
세미소	L3	BR	354	11,006	33.35103	126.32248
정물	L3	BS	352	401	33.34194	126.32788
볼레오름습지	M4	BT	1,214	26,483	33.35540	126.47690
백록담	M2	BU	1,846	11,152	33.36214	126.53326
사라오름습지	M2	BV	1,305	10,516	33.37089	126.57041
고타리못	L3	BW	16	2,022	33.35126	126.85787
남선못	L3	BX	139	5,183	33.37092	126.79196

¹⁾Wetland types were assigned based on National Wetland Classification System (H1: human-made lakes, L3: freshwater lakes and pools, M2: fens, M4: swamps).²⁾Abbreviations means 50 survey wetlands used for cluster analysis in Fig. 3.

Original article

전주 도심구간 삼천과 전주천의 어류상

임민영^{1,†} · 신유신^{1,2,†} · 박철우² · 김종욱² · 최 윤¹ · 김은비¹ · 김재구^{1,2,*}

¹군산대학교 해양생물자원학과, ²주식회사 알파생태연구원

A Study on the Fish Fauna of the Samcheon and Jeonjucheon Stream in Urban Area at Jeonju, Korea. Min-Yeong Im^{1,†} (0000-0001-6728-0834), Yu-Shin Sin^{1,2,†} (0000-0001-9095-6388), Cheol-Woo Park² (0000-0002-0416-4542), Jong-Wook Kim² (0000-0001-5387-8317), Youn Choi¹ (0000-0003-1356-5740), Eun-Bi Kim¹ (0009-0003-3012-2703) and Jae-Goo Kim^{1,2,*} (0000-0003-1626-939X) (¹Department of Marine Biotechnology, Kunsan National University, Gunsan 54150, Republic of Korea; ²Alpha Research Ecology Institute, Gunsan 54151, Republic of Korea)

Abstract This study investigated the fish fauna of Jeonjucheon and Samcheon Streams, flowing through the city of Jeonju, through surveys conducted at 10 sampling sites using kick net and cast net. The fish fauna collected included 10 families and 36 species, with a total of 2,064 individuals. Samcheon had 8 families and 30 species with 1,074 individuals, Jeonjucheon had 8 families and 26 species with 986 individuals. The dominant species was *Zacco platypus* with 1,202 individuals, and a total of 153 individuals of the subdominant were *Pseudogobio esocinus*. In Jeonjucheon Stream, a total of 567 individuals of the dominant species were collected as *Z. platypus* and 99 individuals of the subdominant species were collected as *Pungtungia herzi*, and there was no significant change in the stream environment except for the confluence site. Further expanded research covering the entire Jeonjucheon and Samcheon Streams region, accompanied by regular monitoring, is essential to record and understand fluctuations in fish fauna.

Key words: fish fauna, Samcheon Stream, Jeonjucheon Stream, stream in urban area

서 론

최근 다양한 원인으로 인해 서식지가 파괴되고 하천 생태계가 교란되는 등 하천의 환경에 많은 변화가 있고, 특히 담수어류의 분포상 및 군집에 많은 변화가 있는 것으로 알려져 있다(ISK, 2003; Chae, 2007). 하천에서 어류상에 대한 주기적인 연구는 해당 하천에 서식하는 담수어류의 변화를 파악하고, 하천을 복구하거나 종 복원에 필요한 기

초 자료 등으로 활용될 수 있어 매우 중요하다(Chae *et al.*, 2017).

전주천은 박이피산에서 발원하여 전주의 도심을 관통하여 흐르며 만경강으로 합류된다(Park *et al.*, 2009). 전주천의 지류 중 하나로는 삼천이 있으며, 삼천은 구이면 백여리에서 발원하여 전주 도심의 남쪽을 관통해 흐르다가 전주시 서신동에서 전주천과 합류하여 만경강까지 이른다. 과거 전주천은 1980년 한지 공장 가동으로 수질 오염 및 악취가 심각하였고, 삼천은 1980년대 도시개발 등으로 인해 서식처가 파괴되고 수질이 오염되어 생물이 거의 살 수 없는 하천이었다(Chyung, 1977; Choi *et al.*, 1997; Jang, 2002; Hong and Song, 2003; Lee *et al.*, 2007; Lee *et*

Manuscript received 21 December 2023, revised 26 March 2024, revision accepted 26 March 2024

[†]These authors contributed equally to this work.

* Corresponding author: Tel: +82-70-4099-1400, Fax: +82-70-8280-5800
E-mail: jgkim0909@jbnu.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.

al., 2008). 그러나 2000년대 초반 국민의 환경에 관한 관심 증가로 자연형 하천복원 사업이 전국적으로 추진되었고, 전주천의 경우 2000~2002년 전주천 한벽교부터 삼천 합류지점까지 약 7.2 km 구간의 자연형 하천 조성사업을 시작으로 천년물길 복원사업, 덕진보 철거, 2013~2016년 전주천 고향의 강 사업 등이 진행되었다. 삼천은 2001년 자연형하천 복원사업으로 삼천교부터 추천대교까지 약 8.05 km 구간에 걸쳐 여울 조성, 수질개선시설 및 친수시설이 도입되었고, 2014년부터는 원당교부터 전주천 합류부에 이르는 9.8 km 구간에 생태하천 복원사업이 진행되었다(JERC, 2014). 전주천의 경우 사업 이후 생물다양성이 증가하여 국내 및 일본에서 우수사례로 선정된 바 있다(MOE, 2002; Shin, 2004; Park et al., 2009).

전주천의 어류상에 관한 연구는 복원사업 이전 Kim and Kim (1975), Kim and Jeong (1994), Kim and Lee (1998), EOSJ(1999) 등이 있고, 복원사업 이후로는 Lee et al. (2008), Park et al. (2009)에 의해 연구되었다. 삼천의 어류상은 Kim and Lee (1998)과 Lee et al. (2008)에 의해 연구되었다. 그러나 전주 시내를 관통하는 두 하천의 특성상 과거와 비교하여 어류상이 변화할 것으로 예상되었고, 특히 삼천의 경우 시내 구간에 대한 연구는 과거 일부 구간에 대한 연구만 있을 뿐 최근 연구는 없었다. 따라서 본 연구는 전주 시내를 관통하는 삼천과 전주천에 서식하는 어류의 종

조성을 파악하고, 기존의 연구 결과와 비교하여 전주천 및 삼천의 어류상에 대한 기초 자료 제시와 변화 양상 비교를 목적으로 하였다.

재료 및 방법

1. 조사 지점

본 조사는 2020년 6월부터 10월까지 삼천 5개 지점(SC 1~SC 5), 전주천 5개 지점(JJC 1~JJC 5)을 포함한 총 10개 지점에서 실시하였고, 조사는 해당 지점 내 보나 다리를 기준하여 상·하류 250 m 범위로 총 500m씩 진행하였다. 조사 기간은 2020년 6월부터 10월까지 월 1회씩 총 5회 실시하였으며, 수질은 지점에서 가장 가까운 수질측정망의 자료를 활용하여 전주천과 삼천 상류부터 하류까지 각 3개 지점을 인용하였다(Fig. 1).

2. 조사 방법

각 지점에서 족대 (망목 5×5 mm, 30분)와 투망 (망목 7×7 mm, 10회)을 이용하여 어류를 채집하였고, 어류 동정은 Kim et al. (2005)을 이용하였다. 채집된 어류는 현장에서 동정 및 개체수를 기록한 후 즉시 방류하였다. 고유종

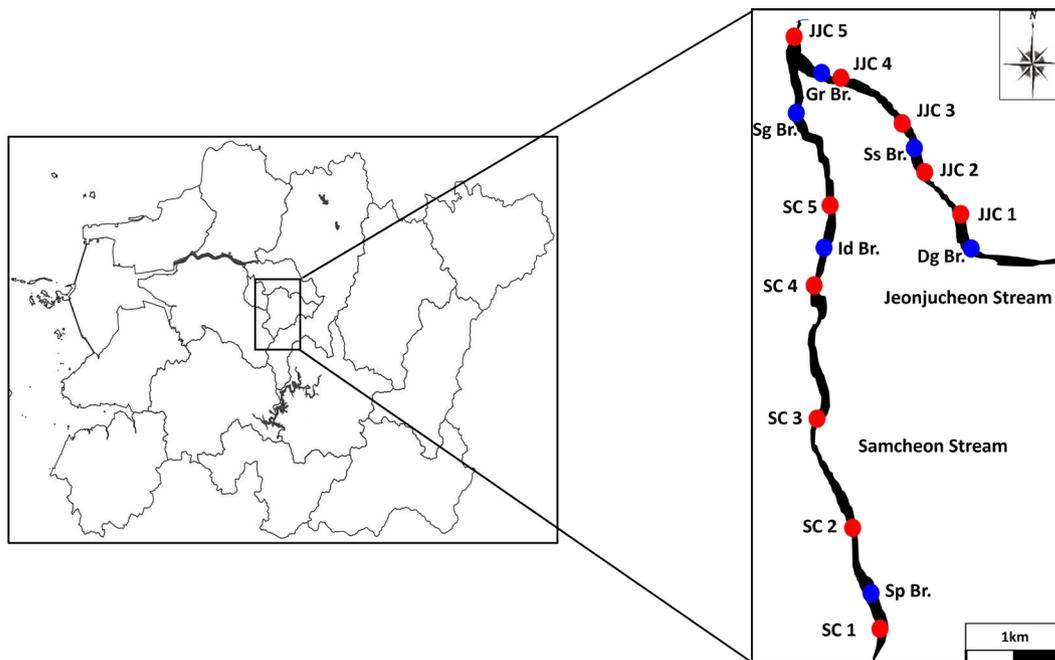


Fig. 1. Map showing the study area (Red spot) and water quality measurement area (Blue spot) in Samcheon Stream and Jeonjucheon Stream, Jeonju, Korea.

표기는 Chae *et al.* (2019)를 따랐으며, 범정보호종 표기는 환경부 멸종위기야생생물 지정고시(MOE, 2022)에 따라 표기하였다. 분류체계는 Nelson (2016)에 따랐다. 군집분석 결과값을 도출하기 위해 풍부도 지수는 Margalef (1958), 균등도 지수는 Pielou (1966), 다양도 지수는 Shannon and Weaver (1963), 우점도 지수는 McNaughton (1967)을 이용하였다. 하상 구조는 어류 군집에 영향을 미치기 때문에 지점별 하상 구조를 파악하였으며, Cummins (1962)에 따라 표기하였다. 수질은 물환경정보시스템 (<https://water.nier.go.kr/>)과 전북특별자치도 보건환경연구원(<https://jihe.jeonbuk.go.kr/>)의 수질측정망 자료를 이용하여 조사 기간인 2020년 6월부터 10월까지 월 1회 측정된 수소이온농도 (pH), 용존산소 (Dissolved Oxygen, DO), 생화학적 산소요구량 (Biochemical Oxygen Demand, BOD), 화학적 산소요구량 (Chemical Oxygen Demand, COD), 부유물질 (Suspended Solids, SS)를 비교하였다. 전주천의 경우 6월과 9월은 결측되어 제외하였다.

3. 자료 분석

채집된 어류에 대해 전체 어류상을 제시하고, 하천별 환경 및 군집지수를 분석하였다. 군집지수는 각 지점별로 산정하여 비교하였고, 총 군집지수는 평균을 도출하여 전주천과 삼천에 대해 비교하였다. 또한 하천별로 과거 조사 자료를 인용하여 어류 군집의 변화를 파악하였다. 삼천은 Kim and Lee (1998)과 Lee *et al.* (2008)의 조사 결과를 인용하였고, 전주천은 Kim and Kim (1975), Kim and Jeong (1994), Kim and Lee (1998), EOSJ (1999), Lee *et al.* (2008), Park *et al.* (2009)를 인용하였다. 과거 출현 자료는 연구별

채집 장소와 조사 방법, 횡수 등에 차이가 있어 직접적인 비교가 어려워 개체수보다는 종의 출현 유무를 통해 연도별 어류상의 변화를 비교하였다.

결과 및 고찰

1. 조사 지점의 환경

조사 지점의 환경은 Table 1과 같다. 삼천 조사 지점(SC 1~SC 5)은 구이저수지 수문 하류 지점인 원당교부터 합수부에서 약 2 km 상류에 위치한 마전교까지이다. 상류 구간인 SC 1과 SC 2는 하상이 돌과 자갈로 이루어지고 여울이 발달하였으며 SS의 수치가 낮았으나, 시내를 관통하는 하류 구간인 SC 3~SC 5는 하상이 주로 모래로 이루어져 있었으며, 유속이 느린 정수역이 주로 형성되었고, SS의 수치가 증가하였다. 삼천은 전체적으로 수변부에 수변 식물이 발달하였다. 전주천 조사 지점(JJC 1~JJC 5)은 한벽보 하류 3 km 지점부터 전주천과 삼천의 합수부 하류까지로, 하상은 주로 자갈로 이루어져 있었으며, 합수부의 하류에는 어도가 없는 보가 존재하였다. 합수부 구간을 제외한 전 구간이 삼천에 비해 유속이 빠르고 여울이 발달하였으며, 하상이 대부분 돌과 자갈로 이루어져 있었다. 유폭은 조사 지점 내에서는 상류부터 하류까지 15~60 m로 일부 구간을 제외하면 큰 차이가 없었고, SS의 경우 상류인 다가교(Dg), 서신교(Ss)의 측정치가 1.70~4.90 mg L⁻¹로, 하류인 가련교(Gr)의 5.8~14.2 mg L⁻¹에 비해 낮은 값을 보였다. 삼천과 전주천 모두 전주 시내를 관통하여 흐르며, 하천 제외지에 친수공간 및 산책로가 조성되어 있었

Table 1. Values of physical factors at each site in the Samcheon Stream and Jeonjucheon Stream, Jeonju, Korea.

Site	Width of stream (m)	Width of flowing water (m)	Depth of water (m)	Bottom structure (%)					
				B	C	P	G	S	M
SC 1	120	15	20~50	10	10	60	20		
SC 2	150	30	30~80		20	50	20	10	
SC 3	150	30	20~70		20	60	10	10	
SC 4	120	50	40~100			30	10	40	20
SC 5	180	30	20~50	10	10	10		60	10
JJC 1	100	30	30~60	10	30	50	10		
JJC 2	80	20~60	20~80	10	20	10	60		
JJC 3	80	15	30~90	10	30	10	40	10	
JJC 4	70	15	20~60	10	20	20	50		
JJC 5	150	60	40~100	10	10	50	20	10	

M: Mud (<0.1 mm), S: Sand (0.1~2 mm), G: Gravel (2~16 mm), P: Pebble (16~64 mm), C: Cobble (64~256 mm), B: Boulder (>256 mm), by Cummins (1962)

Table 2. Measurement of water quality in Jeonjucheon Stream and Samcheon Stream, Jeonju, Korea.

Measurement site	Data	Month					Average	
		6	7	8	9	10		
Jeonjucheon Stream	Daga bridge (Dg)	pH	–	8.00	7.70	–	8.00	7.90
		DO (mg L ⁻¹)	–	9.90	8.70	–	10.60	9.73
		BOD (mg L ⁻¹)	–	0.80	0.60	–	1.10	0.83
		COD (mg L ⁻¹)	–	2.90	3.10	–	3.10	3.03
		SS (mg L ⁻¹)	–	2.80	2.90	–	1.70	2.47
	Seosin bridge (Ss)	pH	–	8.20	7.70	–	8.10	8.00
		DO (mg L ⁻¹)	–	9.20	8.80	–	10.80	9.60
		BOD (mg L ⁻¹)	–	0.70	0.60	–	1.20	0.83
		COD (mg L ⁻¹)	–	3.90	2.90	–	3.30	3.37
		SS (mg L ⁻¹)	–	4.90	2.80	–	2.00	3.23
	Garyeon bridge (Gr)	pH	–	7.70	7.70	–	8.70	8.03
		DO (mg L ⁻¹)	–	7.60	8.70	–	11.90	9.40
		BOD (mg L ⁻¹)	–	1.50	1.40	–	2.70	1.87
		COD (mg L ⁻¹)	–	6.40	5.40	–	6.60	6.13
		SS (mg L ⁻¹)	–	5.80	14.20	–	9.90	9.97
Sinpyeong bridge (Sp)	pH	7.50	7.60	7.50	7.70	7.90	7.64	
	DO (mg L ⁻¹)	8.90	8.70	8.40	8.00	10.40	8.88	
	BOD (mg L ⁻¹)	2.10	1.20	1.60	1.30	0.90	1.42	
	COD (mg L ⁻¹)	5.80	6.00	5.60	5.20	3.60	5.24	
	SS (mg L ⁻¹)	10.20	6.20	12.80	9.00	2.80	8.20	
Samcheon Stream	Idong bridge (Id)	pH	7.60	7.80	7.80	7.80	8.20	7.84
		DO (mg L ⁻¹)	8.70	8.60	8.10	8.00	10.30	8.74
		BOD (mg L ⁻¹)	2.80	1.40	1.20	2.30	0.90	1.72
		COD (mg L ⁻¹)	8.70	7.50	5.80	6.30	3.80	6.42
		SS (mg L ⁻¹)	27.40	15.20	23.00	22.00	4.00	18.32
Seogok bridge (Sg)	pH	7.80	7.70	7.80	7.80	7.90	7.8	
	DO (mg L ⁻¹)	8.90	7.90	8.60	7.60	9.30	8.46	
	BOD (mg L ⁻¹)	1.90	1.60	1.40	1.70	1.10	1.54	
	COD (mg L ⁻¹)	7.90	6.90	6.20	6.80	5.10	6.58	
	SS (mg L ⁻¹)	17.60	14.00	27.40	25.60	4.00	17.72	

Samcheon Stream: Water Environment Information System, <https://water.nier.go.kr/>

Jeonjucheon Stream: Jeonbuk state Institute of Health & Environment Research, <https://jihe.jeonbuk.go.kr/>

다. 수질측정망 자료를 활용하여 비교하였을 때 전주천의 DO 측정 범위는 7.6~11.9 mg L⁻¹로 삼천의 DO 측정 범위인 7.6~10.4 mg L⁻¹에 비해 높게 측정되었으며, 수질이 양호한 것으로 나타났다. 삼천은 하류 구간으로 갈수록 BOD와 COD 및 SS의 측정값이 증가하였고, 도심 구간인 이동교(Id)와 서곡교(Sg) 지점의 BOD와 COD 및 SS의 측정값은 큰 차이가 없었다. 전주천의 수질측정자료도 하류로 갈수록 BOD와 COD 및 SS의 측정값이 증가하였으나, 삼천에 비해 변화 폭이 적었다(Fig. 1, Table 2).

2. 어류상 및 군집지수

1) 전체 지점

삼천과 전주천 10개 지점에 대한 5회 조사결과 4목 10과 36종 2,060개체의 어류가 채집되었다(Table 3). 과별 종 수는 잉어과(Cyprinidae)가 22종으로 가장 높은 출현 빈도를 보였고, 다음으로 검정우렁과(Centrarchidae), 꺾지과(Centropomidae), 미꾸리과(Cobitidae), 동사리과(Odontobutidae), 망둑어과(Gobiidae) 2종, 송사리과(Adr-

Table 3. The list of fishes collected in Samcheon Stream and Jeonjucheon Stream, Jeonju, Korea.

Family	Species	Samcheon Stream						Jeonjucheon Stream						Total	RA (%)	
		SC 1	SC 2	SC 3	SC 4	SC 5	Total	JJC 1	JJC 2	JJC 3	JJC 4	JJC 5	Total			
Cyprinidae	<i>Carassius auratus</i>	3	3	13	17	8	44	1		5	9	12	22	66	3.20	
	<i>Cyprinus carpio</i>			1		3	4			4	4		8	12	0.58	
	<i>Acheilognathus chankaensis</i>					1	1							1	0.05	
	* <i>Acheilognathus koreensis</i>							1	1	1			3	3	0.15	
	<i>Acheilognathus lanceolata intermedia</i>				2	1	3							3	0.15	
	<i>Acheilognathus rhombeus</i>			3		8	4	15						15	0.73	
	* <i>Rhodeus uyekii</i>			8			8					199		8	0.39	
	<i>Gnathopogon strigatus</i>				2	2	4						2	1	5	0.24
	<i>Hemibarbus labeo</i>									1			1	1	1	0.05
	<i>Hemibarbus longirostris</i>			5	2	5	1	13					1	9	22	1.07
	* <i>Microphysogobio yaluensis</i>	1					1				1			2	3	0.15
	<i>Pseudogobio esocinus</i>			8	2	71	59	140	6		1			13	153	7.43
	<i>Pseudorasbora parva</i>					2	2						2		2	0.10
	<i>Pungtungia herzi</i>	5			7		12	24	34	31	12	10		99	123	5.97
	* <i>Sarcocheilichthys nigripinnis morii</i>				1		1								1	0.05
	* <i>Squalidus chankaensis tsuchigae</i>						3	3							3	0.15
	* <i>Squalidus gracilis majimae</i>	1					1				1		67	1	2	0.10
	<i>Rhynchocypris oxycephalus</i>			8			8					11	11	11	19	0.92
	<i>Opsariichthys uncirostris amurensis</i>					1	1					5		5	6	0.29
	<i>Zacco platypus</i>	70	298	56	158	53	635	48	64	234	22	1	567	1,202	58.35	
* <i>Zacco koreanus</i>							17	16	1			13	36	36	1.75	
<i>Hemiculter eigenmanni</i>				7		7							1	8	0.39	
Cobitidae	* <i>Iksookimia koreensis</i>			13	8	1	22	2	3	4	4	17	14	36	1.75	
	<i>Misgurnus anguillicaudatus</i>	1	1	3			5		1		4	16	5	10	0.49	
Siluridae	<i>Silurus asotus</i>			1			1					350		1	0.05	
Bagridae	* <i>Pseudobagrus koreanus</i>	6				1	7		4	4			10	17	0.83	
Adrianichthyidae	<i>Oryzias sinensis</i>				47		47							47	2.28	
Centropomidae	* <i>Coreoperca herzi</i>							16	28	11			55	55	2.67	
	<i>Siniperca scherzeri</i>									1			1	1	0.05	
Centrarchidae	** <i>Lepomis macrochirus</i>	5	3	1	19		28			6			73	101	4.90	
	** <i>Micropterus salmoides</i>	3		2	7	5	17						11	28	1.36	
Odontobutidae	* <i>Odontobutis interrupta</i>	6	4	7	4	2	23		1		2		3	26	1.26	
	* <i>Odontobutis platycephala</i>			2	1		3	1	1	1			4	7	0.34	
Gobiidae	<i>Rhinogobius brunneus</i>				2	1	3				1		14	17	0.83	
	<i>Tridentiger brevispinis</i>			1	2		3							3	0.15	
Channidae	<i>Channa argus</i>											17	17	17	0.83	
Number of species		10	13	18	14	14	36	9	10	16	10	16	26	36		
Number of individuals		101	356	120	343	154	1,074	126	150	288	72	350	986	2,060		

*: Korean endemic species, **: Exotic fish species

ianichthyidae), 동자개과(Bagridae), 가물치과(Channidae) 및 메기과(Siluridae) 1종이 출현하였다.

전체 우점종은 1,202개체 (58.35%)가 채집된 피라미 (*Zacco platypus*)로 나타났고, 아우점종은 153개체 (7.43%)가 채집된 모래무지(*Pseudogobio esocinus*)로 나타났다

(Table 3). 본 조사에서는 SC 5를 제외한 모든 지점에서 피라미가 우점하였다. 피라미는 내성 범위가 넓고 다양한 하천 서식환경에 적응력이 강한 어류로 알려져 있으며(Nam et al., 1999; Kim et al., 2005; Baek et al., 2006), 전주천과 삼천에서도 우점하여 서식하는 것으로 확인되었다. 한편

Table 4. The dominant, subdominant species and fish community indices in Samcheon Stream by sites.

Sites	Dominant species (%)	Subdominant species (%)	Dominance	Diversity	Evenness	Richness
SC 1	<i>Zacco platypus</i> (69.3%)	<i>Pseudobagrus koreanus</i> , <i>Odontobutis interrupta</i> (5.9%)	0.752	1.233	0.536	1.950
SC 2	<i>Zacco platypus</i> (83.7%)	<i>Iksookimia koreensis</i> (3.6%)	0.874	0.806	0.314	2.043
SC 3	<i>Zacco platypus</i> (46.7%)	<i>Carassius auratus</i> (10.8%)	0.575	2.032	0.703	3.551
SC 4	<i>Zacco platypus</i> (46.1%)	<i>Pseudogobio esocinus</i> (20.7%)	0.668	1.656	0.628	2.227
SC 5	<i>Pseudogobio esocinus</i> (38.3%)	<i>Zacco platypus</i> (34.4%)	0.727	1.667	0.632	2.581

SC 5는 모래무지가 우점하였는데, 다른 지점에 비해 하상의 비율이 모래가 60% 정도로 높아 모래가 많은 환경을 선호하는 모래무지의 출현 비율이 38.31%로 높게 나타난 것으로 생각된다(Kim and Park, 2002; Kim *et al.*, 2005).

2) 삼천

조사기간 동안 총 4목 8과 30종 1,074개체가 채집되었다. 출현한 어류는 잉어과 19종, 미꾸리과, 동사리과, 검정우럭과, 망둑어과 2종, 메기과, 동자개과, 송사리과 1종이었다.

본 조사에서 삼천은 피라미가 635개체 (59.12%)로 우점하였고, 모래무지가 140개체 (13.04%)로 아우점하였다. 상류 구간인 SC 1, 2에서는 여울이 발달하여 벼들치 (*Rhynchocypris oxycephalus*)나 참종개 (*Iksookimia koreensis*) 등 해당 환경을 선호하는 어종이 채집되었으며, 시내가 위치한 하류 지점으로 내려갈수록 유량이 증가하고 유속이 감소하며, 수변식생이 잘 발달되었다. 또한 하상이 모래와 진흙의 비율이 증가하였으며, 이러한 환경 변화로 인해 붕어 (*Carassius auratus*), 모래무지, 참붕어 (*Pseudorasbora parva*) 등의 출현 빈도가 증가한 것으로 생각된다. 삼천 출현 어류의 군집 분석 결과 도심에 위치한 하류 구간의 다양도와 풍부도가 상류에 비해 더 높았으며, 종 수가 많은 SC 3에서 다양도 및 풍부도 각각 0.703, 3.551로 가장 높았다(Table 4). 이는 다양도와 풍부도의 경우 유속이 빠르고 수온이 낮아 계류성 어종이 우점하여 출현하는 상류 지역에 비해, 유량이 풍부하며, 유기물의 유입이 많고 다양한 서식처가 확보되어 다양한 어류의 서식에 유리한 중~하류로 갈수록 높게 나타나기 때문으로 생각된다(Choi and Kim, 2004; Lee *et al.*, 2008). 우점도는 SC 2

에서 가장 높게 측정되었으며, 이는 우점종 피라미의 개체 수가 타 어종에 비해 매우 많이 채집된 결과로 생각된다. 균등도는 SC 3에서 2.032로 가장 높았다. 인접 구간에 대한 과거 연구로는 Kim and Lee (1998)와 Lee *et al.* (2008)이 있으며, 각각 본 연구 지점인 SC 3, SC 1과 일치하는 지점이 존재하여 같은 지점에 대하여 비교하였다. SC 1은 과거에 비해 종 수 3종이 감소하였으며, SC 3은 1종이 증가하였다(Table 5). SC 1은 2014년 생태하천 복원사업 대상 구간이며, 과거 우점종은 민물검정망둑 (*Tridentiger brevispinis*), 아우점종은 피라미였으나 현재는 피라미가 우점이며 민물검정망둑과 참종개 등 저서성 어류가 채집되지 않아 하상에 변화가 있었을 것으로 생각된다. 한편 Kim and Lee (1998)는 2001년 삼천 복원사업 이전의 연구 결과이며, SC 3 지점의 과거 하상은 주로 모래와 자갈로 이루어져 있었고 유속이 느리며 떡납줄갱이 (*Rhodeus notatus*) 등 납자루아과 어종이 우점하였으나, 생태하천 복원사업 이후 현재는 여울이 조성되고 하상이 돌과 자갈로 바뀌는 등 환경이 변화하였고, 이에 따른 어류상 역시 변화가 있었던 것으로 생각된다.

3) 전주천

조사기간 동안 총 3목 8과 26종 986개체의 어류가 채집되었다. 출현한 어류는 잉어목 잉어과 14종, 미꾸리과, 농어목 꺾지과, 검정우럭과, 동사리과 2종, 동자개과, 망둑어과 1종이 확인되었다.

전주천에서는 피라미가 567개체 (57.51%)로 우점하였고, 돌고기 (*Pungtungia herzi*)가 99개체 (10.00%)로 아우점하였다. 전주천의 경우 JJC 1~4 지점까지는 하천 내의 환경이 대체로 큰 변화 없이 일정하였으며, 따라서 상류와

Table 5. Comparison of fish fauna by Samcheon Stream through comparison of advance research (1998~2020).

Family	Species	SC 1		SC 3	
		Lee <i>et al.</i> (2008)	Present study (2020)	Kim and Lee (1998)	Present study (2020)
Cyprinidae	<i>Carassius auratus</i>	○	○	○	○
	<i>Cyprinus carpio</i>				○
	<i>Acheilognathus chankaensis</i>			○	
	<i>Acheilognathus macropterus</i>	○			
	<i>Acheilognathus lanceolatus intermedia</i>				○
	* <i>Rhodeus uyekii</i>			○	
	<i>Rhodeus notatus</i>			○	
	<i>Gnathopogon strigatus</i>			○	○
	<i>Hemibarbis longirostris</i>	○			○
	* <i>Microphysogobio yaluensis</i>		○		
	<i>Pseudogobio esocinus</i>			○	○
	<i>Abbottina springeri</i>			○	
	<i>Pseudorabora parva</i>			○	
	<i>Pungtungia herzi</i>		○		○
	* <i>Sarcocheilichthys nigripinnis morii</i>				○
	* <i>Squalidus gracilis majimae</i>		○	○	
	<i>Rhynchocypris oxycephalus</i>	○		○	
	<i>Aphyocypris chinensis</i>			○	
	<i>Zacco platypus</i>	○	○	○	○
	<i>Hemiculter eigenmanni</i>				○
Cobitidae	<i>Cobitis nalbanti</i>	○			
	* <i>Iksookimia koreensis</i>	○			○
	<i>Misgurnus anguillicaudatus</i>	○	○	○	○
Bagridae	* <i>Pseudobagrus koreanus</i>	○	○		
Adrianichthyidae	<i>Oryzias sinensis</i>			○	
Centrarchidae	** <i>Lepomis macrochirus</i>	○	○		○
	** <i>Micropterus salmoides</i>	○	○		○
Odontobutidae	<i>Micropercops swinhonis</i>			○	
	* <i>Odontobutis interrupta</i>		○		○
	* <i>Odontobutis platycephala</i>				○
Gobiidae	<i>Rhinogobius giurinus</i>			○	
	<i>Rhinogobius brunneus</i>	○			○
	<i>Tridentiger brevispinis</i>	○			○
Osphronemidae	<i>Macropodus ocellatus</i>			○	
Number of species		13	10	17	18

*: Korean endemic species, **: Exotic fish species

하류 간 어류상에도 큰 차이를 보이지 않았다. 하지만 전주천과 삼천 합수부의 하류 지점인 JJC 5의 경우 두 하천이 합류하여 유속이 느려지고 하폭이 넓어졌으며, 이러한 환경을 선호하는 블루길의 개체수가 증가하여 아우점종으로 나타난 것으로 생각된다. 전주천 출현 어류의 군집 분석 결과 전주천도 하류 구간에서 다양도 및 풍부도가 증가

하는 경향을 보였으며, 다양도는 JJC 4에서 0.873, 풍부도는 JJC 3에서 2.649로 가장 높았다. 이는 JJC 3이 JJC 4에 비해 많은 종수와 개체수가 확인되었으나, JJC 3에서 피라미가 81.3%의 비율을 차지한 결과로 생각된다. 전주천의 우점도 역시 JJC 3에서 0.854로 가장 높았고, 피라미의 영향으로 높게 측정된 것으로 생각된다(Table 6). 시내 구간

Table 6. The dominant, subdominant species and fish community indices in Jeonjucheon Stream by sites.

Sites	Dominant species (%)	Subdominant species (%)	Dominance	Diversity	Evenness	Richness
JJC 1	<i>Zacco platypus</i> (38.1%)	<i>Pungtungia herzi</i> (27.0%)	0.651	1.579	0.719	1.654
JJC 2	<i>Zacco platypus</i> (42.7%)	<i>Pungtungia herzi</i> (20.7%)	0.633	1.550	0.673	1.796
JJC 3	<i>Zacco platypus</i> (81.3%)	<i>Pungtungia herzi</i> (4.2%)	0.854	0.912	0.329	2.649
JJC 4	<i>Zacco platypus</i> (30.6%)	<i>Rhynchocypris oxycephalus</i> (15.3%)	0.458	2.009	0.873	2.104
JJC 5	<i>Zacco platypus</i> (56.9%)	<i>Lepomis macrochirus</i> (19.1%)	0.760	1.516	0.547	2.561

(한벽보~추천대)에 대한 과거 자료를 비교하였을 때, 전주천 자연형 하천 복원사업이 실시된 2002년 이후인 Lee *et al.* (2008) 이후로 어류의 종 수가 증가하였으며, 조사 지점 및 횡수, 기간이 증가한 Park *et al.* (2009)에서 33종으로 가장 많은 종 수가 채집되었다. 한편 Park *et al.* (2009)의 연구에서 주목되는 종으로 기재된 통사리와 쉬리가 채집되지 않았다. 통사리의 경우 방류 및 채집된 장소(Park *et al.*, 2009)가 한벽루 상류의 승암교 인근으로 본 연구의 조사 지점과 차이가 있어 채집되지 않은 것으로 생각된다. 쉬리의 경우 공사 이후 개체수가 증가하고 서식지가 상류부에서 중·하류부까지 넓어졌다고 보고되었으나, 본 조사에서 채집되지 않았는데, 상류 한벽보(가동보)의 조절에 따라 하천 수위가 수시로 변화하고, 일부 기간에 가뭄과 홍수가 반복되면서 본 조사에서는 확인되지 않은 것으로 판단되어 추후 어류상 조사에 필수적으로 확인할 필요가 있다.

결 론

삼천에서는 30종 1,074개체, 전주천에서는 26종 986개체의 어류가 채집되었다 우점종은 두 하천 모두 피라미로 나타났으며, 삼천의 아우점종은 모래무지, 전주천의 아우점종은 돌고기로 확인되었는데, 이는 하천의 환경에 따른 차이로 파악되었다. 삼천 상류 구간은 하류 구간에 비해 BOD 및 COD, SS가 낮게 측정되었고, 상류는 여울이 조성되고 하상은 돌로 이루어져 있었지만, 도심 구간인 중·하류는 정수역과 하상은 모래로 이루어져 있어 이로 인해 상하류 간 어류상에 있어 차이를 보이는 것으로 생각된다. 전주천의 경우 합수부 인근을 제외한 구간은 환경 및 어류

상에 있어 큰 차이를 보이지 않았다. 복원사업 이전의 과거와 비교했을 때 삼천은 환경이 변화함에 따라 어류상이 일부 변화하였고, 전주천은 종 수가 크게 증가하였다.

생태계교란생물인 블루길과 배스는 삼천과 전주천 두 곳에서 모두 출현하였다. 블루길과 배스와 같은 생태계교란생물이 유입된 하천생태계는 포식압으로 인해 종 다양성이 감소하게 되며, 그로 인해 조류(algae)가 풍부해지는 등 먹이사슬 구조, 생태계의 에너지 흐름 및 서식처 변화 등의 많은 문제가 발생되어 생태계가 교란되는 것으로 알려져 있다(Carpenter and Kitchell, 1993; Garcia-Berthou and Moreno-Amich, 2000; Takaharu *et al.*, 2015). 전주천에서의 블루길과 배스의 최초 출현 기록은 Park *et al.* (2009)의 연구에서 처음 기록되었으며, 2003년에 처음으로 채집된 것으로 확인되었다. Park *et al.* (2009)의 연구에서는 전주천의 하류 구간인 구 덕진보 인근에서 블루길과 배스가 다수 채집되었으며, 본 연구에서는 배스와 블루길 모두 삼천 전 구간 및 JJC 3, 5에서 다수가 채집되어 서식 범위에 변화는 있었으나, 2003년 이후로 블루길과 배스가 전주천과 삼천에 지속적으로 서식하고 있음을 확인할 수 있었다. 삼천은 여울이 전주천에 비해 적어 블루길과 배스의 이동 및 번식이 전주천에 비해 수월하며(Kim *et al.*, 2005) 삼천 상류에 위치한 구이저수지의 영향도 일부 있는 것으로 생각된다. 현재 전주시에서는 금학보 인근에서 인공 산란장을 설치한 뒤 회수하는 방식의 구제를 시행하고 있으며(NPRI, 2020), 인공산란장 설치의 범위를 확대하여 실행하는 등 생태계교란생물의 개체수와 분포 범위가 늘어나지 않게 장기적인 관리가 필요하다.

전주천과 삼천은 상류 일부 구간을 제외한 대부분의 구간이 전주 시내를 관통하여 흐르고, 과거 몇 차례의 복원

Table 7. Comparison of fish fauna by Jeonjucheon Stream in urban area (Hanbeokbo~Chucheondae) through comparison of advance research (1975~2020).

Family	Species	Kim and Kim (1975)	Kim and Jeong (1994)	Kim and Lee (1998)	EOSJ (1999)	Lee <i>et al.</i> (2008)	Park <i>et al.</i> (2009)	Present study (2020)
Study period (year)		1		2		1	4	1
Number of study points		5	1 (Dg-Se)	2	1 Dg-Se	1	4	5
Number of sampling times		5		24		3	16	5
Cyprinidae	<i>Carassius auratus</i>	○	○	○	○	○	○	○
	** <i>Carassius cuvieri</i>						○	
	<i>Cyprinus carpio</i>			○			○	○
	* <i>Acheilognathus koreensis</i>					○	○	○
	<i>Acheilognathus lanceolatus intermedia</i>						○	
	<i>Rhodeus notatus</i>						○	
	<i>Rhodeus ocellatus</i>						○	
	* <i>Rhodeus uyekii</i>						○	
	* <i>Coreoleuciscus splendidus</i>	○				○	○	
	<i>Gnathopogon strigatus</i>						○	○
	<i>Hemibarbus labeo</i>							○
	<i>Hemibarbus longirostris</i>	○		○		○	○	○
	* <i>Microphysogobio yalyensis</i>	○			○		○	○
	<i>Pseudogobio esocinus</i>	○			○	○	○	○
	<i>Pseudorasbora parva</i>	○		○			○	
	<i>Pungtungia herzi</i>	○				○	○	○
	* <i>Squalidus chankaensis tsuchigae</i>	○					○	
	* <i>Squalidus gracilis majimae</i>			○			○	○
	<i>Rhynchocypris oxycephalus</i>	○					○	○
	<i>Opsariichthys uncirostris amurensis</i>							○
<i>Zacco platypus</i>	○		○	○	○	○	○	
* <i>Zacco koreanus</i>					○	○	○	
<i>Hemiculter eigenmanni</i>			○				○	
Cobitidae	<i>Cobitis nalbanti</i>		○				○	
	* <i>Iksookimia koreensis</i>	○				○	○	○
	<i>Misgurnus anguillicaudatus</i>						○	○
	<i>Misgurnus mizolepis</i>						○	
Siluridae	<i>Silurus asotus</i>						○	
Bagridae	* <i>Pseudobagrus koreanus</i>					○	○	○
Amblycipitidae	▲* <i>Liobagrus obesus</i>						○	
Osmeridae	<i>Hypomesus nipponensis</i>						○	
Centropomidae	* <i>Coreoperca herzi</i>					○	○	○
	<i>Siniperca scherzeri</i>							○
Centrarchidae	** <i>Lepomis macrochirus</i>						○	○
	** <i>Micropterus salmoides</i>						○	○
	* <i>Odontobutis interrupta</i>							○
	* <i>Odontobutis platycephala</i>					○	○	○
Gobiidae	<i>Rhinogobius brunneus</i>						○	○
	<i>Tridentiger brevispinis</i>	○						
Channidae	<i>Channa argus</i>							○
Number of species		12	2	8	5	12	33	26

*: Korean endemic species, **: Exotic fish species, ▲: Endangered species
Da: Daga bridge, Se: Seosin bridge

사업을 거쳐 도심 구간은 산책로 조성 등으로 시민들의 휴식처로 이용되고 있다. 그러나 전주천 상류 내 고향의 강 사업 등 복원사업이 지속적으로 진행되고 있고, 이후에도 계속해서 어류 군집의 변화가 있을 것으로 판단된다. 따라서 해당 하천들에 대한 장기적인 어류상 변화에 대한 연구가 필요하며, 사람들의 왕래가 잦고 도심을 흐르는 하천의 특성상 생활하수나 생활쓰레기 등이 유입되거나 급격한 수질오염이 발생할 가능성이 있으므로 이에 따른 대비가 필요하다. 또한 본 조사는 전주 도심을 관통하는 삼천 및 전주천의 일부 구간에 국한하여 조사가 시행되었으나, 차후 멸종위기야생동·식물 I급인 통사리가 발견되었던 승암교 구간과 전주천과 삼천의 최상류 구간과 이후 만경강으로 유입되는 하류 지점까지 포함하면 본 수역의 어류상에 관해 더 자세한 결과를 얻을 수 있을 것으로 생각된다.

적 요

전주 시내를 관통하여 흐르는 전주천과 삼천의 어류상을 연구하기 위해 총 10개 정점을 선정한 뒤 족대와 투망을 이용하여 조사하였다. 출현한 어류는 4목 10과 36종 2,064개체이다. 삼천에서 4목 8과 30종 1,074개체, 전주천에서 3목 8과 26종 986개체가 채집되었다. 전체 우점종은 피라미로 총 1,202개체 (58.35%)가 채집되었고, 아우점종은 모래무지로 총 153개체 (7.43%)가 채집되었다. 삼천의 우점종은 피라미로 총 635개체 (59.12%) 채집되었고, 아우점종은 모래무지로 140개체 (13.04%) 채집되었다. 전주천의 우점종은 피라미로 총 567개체 (57.51%) 채집되었고 아우점종은 돌고기로 총 99개체 (10.00%) 채집되었으며, 합수부를 제외하면 하천의 환경에 큰 변화가 없었다. 복원사업 전 삼천의 전주 시내 구간 어류상은 느린 유속과 모래가 깔린 하상으로 이를 선호하는 어류가 채집되었으나, 복원사업 후 여울이 발달하는 등 환경변화로 인해 어류상의 차이가 있는 것으로 생각되며, 전주천은 복원사업 이전과 비교했을 때 종 수가 크게 증가한 것으로 파악된다. 따라서 도심하천인 전주천과 삼천의 어류군집에 대해서는 좀 더 장기적인 모니터링이 필수적인 것으로 판단된다.

저자정보 임민영 (군산대학교 해양생물자원학과 대학원생), 신유신 (군산대학교 해양생물자원학과 대학원생), 박철우 (주식회사 알파생태연구원 연구원), 김종욱 (주식회사 알파생태연구원 연구원), 최 윤 (군산대학교 해양생물자원학과 교수), 김은비 (군산대학교 해양생물자원학과 대학원생), 김재구 (주식회사 알파생태연구원 대표이사)

저자기여도 연구 구상 및 설계: 임민영, 신유신, 자료 수집: 임민영, 신유신, 김은비, 박철우, 김종욱, 김재구, 최 윤, 분석: 임민영, 신유신, 김재구, 현장조사: 임민영, 신유신, 원고 작성: 임민영, 신유신, 김재구

이해관계 이 논문에는 이해관계 충돌의 여지가 없습니다.

연구비 이 논문은 2020년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단-현장맞춤형 이공계 인재양성 지원사업의 지원을 받아 수행된 연구입니다 (No. 2019H1D8 A1109814).

REFERENCES

- Baek, H.M., H.B. Song and D.H. Cho. 2006. Reproductive ecology of the pale chub, *Zacco platypus* in a tributary to the Han river. *Korean Journal of Ichthyology* **18**: 193-201.
- Carpenter, S.R. and J.F. Kitchell. 1993. Trophic cascade in lakes. Cambridge University Press, Cambridge, 400pp.
- Chae, B.S. 2007. Chief cause menacing the life of freshwater fishes in Korea. Chuncheon Global Water Forum 2007, 23pp.
- Chae, B.S., H.B. Song and J.Y. Park. 2019. A field guide to the freshwater fishes of Korea. LG Evergreen Foundation, 355pp.
- Chae, B.S., S.K. Kim, Y.H. Kang, N.S. Heo, J.M. Park, H.U. Ha and U.W. Hwang. 2017. Ichthyofauna and Fish Community Structure in Upper Reach of the Nakdong River, Korea. *Korean Journal of Ichthyology* **27**: 116-132.
- Choi, J.S. and J.K. Kim. 2004. Ichthyofauna and fish community in Hongcheon river, Korea. *Korean Journal of Environmental Biology* **18**: 446-455.
- Choi, S.S., H.B. Song and S.O. Hwang. 1997. Study on the Fish Community in the Daechong Reservoir. *Korean Journal of Limnological Society* **30**: 155-166.
- Chyung, M.K. 1977. The Fishes of Korea. Il Ji Pub. Co. Ansan, p. 371.
- Cummins, K.W. 1962. An evolution of some techniques for the collection and analysis of benthic samples with special emphasis on lotic waters. *The American Midland Naturalist* **67**: 477-504.
- Ecological Organization for Streams of Jeonju (EOSJ). 1999. Ecological survey for Jeonju-stream. Mid-Report. Jeonju-si, 53.
- Garcia-Berthou, E. and R. Moreno-Amich. 2000. Introduction of exotic fish into a Mediterranean lake over a 90-year period. *Archiv für Hydrobiologie* **149**: 271-284.
- Hong, Y.P. and Y.M. Song. 2003. Studies on the Interspecific Association of Community including *Micropterus salmoides* Population, Introduced fish in Korea. *Korean Journal of*

- Ichthyology* **15**: 61-68.
- Ichthyological Society of Korea (ISK). 2003. The introduced fishes of Korea. Proceedings of 2002 Symposium of the Ichthyological Society, 128pp.
- Jang, M.H. 2002. Ecological study of freshwater fish in Korea: Fish fauna, prey-predator interaction and the responses of cyanobacteria to fish grazing; Fish fauna and food item analysis of exotic fish in major rivers of south Korea, p. 77-155. *In*: A doctoral dissertation. Pusan National University, Pusan, Korea.
- Jeonbuk state Institute of Health & Environment Research, <https://jihe.jeonbuk.go.kr/>
- Jeonju Eco River Council (JERC). 2014. Project Report Jeonju Eco River Council (in Korean).
- Kim, B.M. and C.L. Lee. 1998. A Study on the Fish Community from the Mangyong River System. *Korean Journal of Limnological Society* **31**: 191-203.
- Kim, I.S. and P.J. Jeong. 1994. Water pollution and fish community of Jeonju-cheon. Observation report. Jeonju-si, Jeonju, Korea, 47pp.
- Kim, I.S., Y. Choi, C.L. Lee, Y.J. Lee, B.J. Kim and J.H. Kim. 2005. Illustrated book of Korean fishes. Kyo-Hak Pub. Co, Seoul, p. 615.
- Kim, I.S. and H.G. Kim. 1975. A Study on the Water Pollution and Its Influence on the Fish Community in Jeonju-cheon Creek, Jeonrabug-do Province. *Korean Journal of Limnological Society* **8**: 7-14.
- Kim, I.S. and J.Y. Park. 2002. Freshwater Fishes of Korea. Kyo Hak Pub. Co. Seoul, pp. 1-465.
- Lee, M.W., J.Y. Park, M.S. Beon, B.C. Hwang, D.H. Song, H. Yang. 2007. Characteristics of each section of natural stream in Jeonju and the effectiveness analysis. Jeonbuk Regional Environmental Technology Development Center (in Korean).
- Lee, W.O., K.H. Kim, J.H. Kim and K.E. Hong. 2008. Study of Freshwater Fish Fauna and Distribution of Introduced Species of Mankyeong River, Korea. *Korean Journal of Ichthyology* **20**: 198-209.
- Margalef, R. 1958. Information theory in ecology. *General Systems* **3**: 36-71.
- McNaughton, S.J. 1967. Relationship among functional properties of California grassland. *Nature* **216**: 168-169.
- Ministry of Environment (MOE). 2002. Stream restoration technique of ministry of Environment G-7 for domestic condition 2002. Guideline for Stream Restoration, p. 132.
- Ministry of Environment (MOE). 2022. Conservation and management laws of wildlife (amendment of enforcement regulations) (Law No. 10977).
- Nam, M.M., N.J. Choi, S.W. Kim, K.J. Seok and J.Y. Lee. 1999. Seedling production and rearing of pale chup, *Zacco platypus* (Temminck et Schlegel). *Journal of Aquaculture* **12**: 25-30.
- National Park Research Institute (NPRI). 2020. A study on the management of specific foreign species. National Park Research Institute, Wonju, Korea, 159pp.
- Nelson, J.S. 2016. Fishes of the World (4th ed.). John Wiley and Sons, New York, p. 752.
- Park, J.Y., S.H. Kim, M.H. Ko, M.K. Oh and J.C. Shin. 2009. Change of Ichthyofauna and Fish Community on Natural Stream Restoration In Jeonju-chon stream, Jeollabuk-do, Korea. *Korean Journal of Environment and Ecology* **23**: 381-391.
- Pielou, E.C. 1966. The measurement of diversity in different types of biological collections. *Journal of Theoretical Biology* **13**: 131-144.
- Shannon, C.E. and W. Weaver. 1963. The mathematical theory of communication. University of Illinois Press, Urbana, IL, p. 117.
- Shin, J.C. 2004. A Study of the methods for sustainable stream restoration and management. Master's thesis. Chonbuk National University, Jeonju, Korea, p. 52.
- Takaharu, N., N. Takamura, M. Nakagawa, Y. Kadono, T. Tanaka and H. Mitsuhashi. 2015. Environmental and biotic characteristics to discriminate farm ponds with and without exotic largemouth bass and bluegill in western Japan. *Limmology* **16**: 139-148.
- Water Environment Information System. <https://water.nier.go.kr>

Original article

유입수 조건에 따른 인공습지 수질 정화효율 비교: 경안천 유역을 중심으로

이설준 · 은범진 · 김종환 · 최이송¹ · 오종민^{1,*}

경희대학교 환경응용과학과, ¹경희대학교 환경학 및 환경공학과

Comparison and Management of Water Purification Efficiency of Artificial Wetland according to Inflow Water Conditions: Focusing on the Gyeongancheon Basin. Seol Jun Lee (0009-0009-8129-8294), Beomjin Eun (0000-0003-2715-5283), Jong Hwan Kim (0009-0000-3905-862X), I Song Choi¹ (0000-0001-8809-802X) and Jong-Min Oh^{1,*} (0000-0002-1104-5867) (College of Engineering, Kyung Hee University International Campus, Yongin 17104, Republic of Korea; ¹College of Engineering, Kyung Hee University International Campus, Yongin 17104, Republic of Korea)

Abstract In this study, in order to analyze the water purification efficiency according to the influent water conditions of artificial wetlands, the purification efficiency was compared at two points where sewage treatment water flows in and one point where good effluent flows in. As a result of reviewing the results of the analysis of influent and effluent and the removal efficiency, the T-N and T-P removal efficiency was calculated at 54.7% and 77.4%, respectively, for the two points where sewage treatment water was treated, the treatment efficiency of SS 90.8%, BOD 51.1%, TOC 30.6%, T-N 38.8%, T-P 55.3% was shown. As a result, the efficiency of removing pollutants in the artificial wetland was found to be proportional to the concentration of influent water, and in order to create an efficient artificial wetland, it is judged that thorough review and management at the design stage are necessary considering that the removal efficiency of high-concentration contaminated water was high.

Key words: sewage treatment water, rainfall runoff water, inflow concentration, elimination efficiency

서 론

환경부에서 시행한 수질 및 수생태계 보전에 관한 법률 제 53조 ‘비점오염원의 설치신고제도’에 의거하여 국내에 많은 비점오염저감시설이 설치되었다(MOE, 2016). 비점오염저감시설은 크게 장치형 시설과 자연형 시설로 분류되며, 고가의 설치비용과 지속적인 유지관리가 필요한 장치형 비점오염저감시설보다 최소한의 유지관리와 자연적인 관리방안을 추구하는 인공습지와 같은 자연형 시설의 설치가 계획되

고 있다(Kang and Lee, 2016). 인공습지는 비점오염저감시설 중 하나로, 갈대와 같은 수생 식물을 통해 영양염류를 제거할 뿐만 아니라 최근 문제가 되는 기후변화와 토지이용의 고도화에 따른 문제의 해결에도 기여할 수 있는 자연친화적 기술이라는 점에서 관련 연구 및 기술개발이 진행되었다(Park and Cho, 2023). 습지를 이용한 수질 정화기술은 1970년대 이후 미국을 중심으로 개발되었으며, 서구에서는 인공습지를 점오염원뿐만 아니라 비점오염원 처리에 이용하였다. 우리나라의 경우 1990년대부터 자연형 하천정화기술에 대한 관심이 높아지면서 2010년대 초반 수질오염총량제의 도입으로 비점오염원 저감을 위한 처리기술의 개발 및 관련 정책 시행이 활발하게 이루어졌다(Park *et al.*, 2019). 이후 생태하천 조성사업 추진 및 기후변화와 탄소중립에 대한 정책

Manuscript received 26 February 2024, revised 25 March 2024,

revision accepted 26 March 2024

* Corresponding author: Tel: +82-31-201-2461,

E-mail: jmoh@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.

적 관심 등으로 자연형 정화기술 필요성이 높아지면서 인공 습지의 장점에 따른 관심도 및 기술개발이 크게 증가하였다 (KEM, 2003).

인공습지는 육상생태계 및 수생태계가 복합적으로 형성 되어 있어 물순환, 수질정화, 경관 등 다양한 분야에 적용되고 있으며, 습지가 가지고 있는 다양한 기능을 활용하기 위하여 인위적으로 조성한 습지를 말한다(Lee *et al.*, 2015). 수질정화 및 비점오염원 저감을 위해 조성된 인공습지는 다방면에서의 기능과 장점들이 존재하고 있다. 하지만 현재 국내에서는 하수처리장 방류수의 재처리, 농업배수 및 비점오염원 등과 같은 저농도 고유량(高流量) 처리 그리고 고농도의 비점오염원 처리와 같이 유입수 조건에 따른 인공습지 처리 및 정화효율 관련 추가적인 연구가 필요한 것으로 사료된다 (Jung, 2006). 또한, 인공습지 처리 효율은 유입수의 특성을 비롯하여 유입량 및 유출량, 수심분포, 식생 등 많은 요인에 의해 영향을 받기 때문에 유입수 조건에 따른 인공습지의 정화효율을 고려할 필요가 있다고 판단된다(Choi *et al.*, 2014).

이에 따라 본 연구에서는 2022년 11월 기준 경기도 75곳의 비점오염시설 중 인공습지를 포함한 가장 많이 비점오염저감시설이 설치된 Y시 경안천 유역을 중심으로 유입수 조건에 따른 정화효율을 비교하고자 한다.

분포 현황자료를 활용하여 총 75개소의 비점오염저감시설 중 23개소의 시설이 설치된 Y시 경안천 유역을 주요 조사지로 선정하였다. Y시에는 총 23개의 비점오염저감시설 중 12개의 인공습지가 설치되어 있다(Fig. 1). Y시의 12개 인공습지에 대해 사전조사를 실시하여 각 습지에 대한 특성을 Table 1에 제시하였다.

사전조사를 바탕으로 중요성, 활용성, 지속성, 효율성의 자체적 평가 기준에 따라 중점조사 대상습지 3개(Y-1, Y-2, Y-3)를 선정하였다. 중요성 항목은 방류하천의 수질적 중요

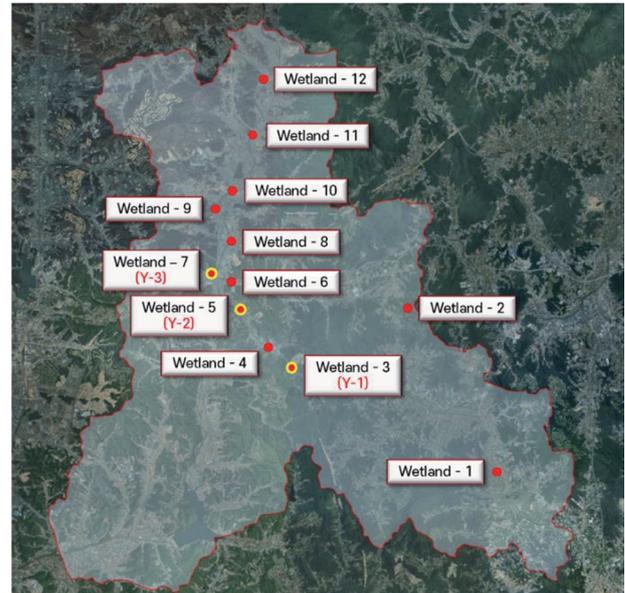


Fig. 1. Location of constructed wetlands in Y city.

자료 및 방법

1. 조사지 개요

본 연구에서는 경기도 내 비점오염저감시설의 지자체별

Table 1. Results of investigation of artificial wetland characteristics in Y city.

Site	Inflow water	Site area (m ²)	Facility area (m ²)	Processing capacity (m ³ day ⁻¹)	Facility capacity (m ³)	Inflow system	Flow state	Discharged stream
Wetland - 1	River water	-	-	-	-	Pumping	Intermittent flow	C stream
Wetland - 2	River water	-	-	-	-	Natural	Periodic flow	G stream
Wetland - 3	Sewage treatment water	37,558	19,443	10,000	9,666	Pumping	Intermittent flow	G stream
Wetland - 4	River water	9,955	3,256	1,123	977	Natural	Periodic flow	G stream
Wetland - 5	Sewage treatment water	36,021	22,484	20,000	11,919	Pumping	Intermittent flow	G stream
Wetland - 6	River water	6,145	1,908	2,780	954	Natural	Periodic flow	G stream
Wetland - 7	River water	3,973	1,207	2,500	853	Natural	Periodic flow	G stream
Wetland - 8	River water	11,465	5,830	5,000	3,068	Natural	Periodic flow	G stream
Wetland - 9	River water	23,271	9,727	8,200	5,394	Natural	Not flowing	G stream
Wetland - 10	River water	32,670	15,097	8,500	7,977	Natural	Not flowing	G stream
Wetland - 11	River water	8,063	4,964	10,000	3,175	Pumping	Intermittent flow	G stream
Wetland - 12	River water	24,441	3,881	4,719	2,142	Natural	Periodic flow	G stream

Table 2. Results of evaluation for selecting intensive constructed wetlands.

Site	Importance	Usability	Sustainability	Efficiency	Score	Rank
Wetland - 1	△	○	△	△	4	6
Wetland - 2	◎	×	◎	○	8	4
Wetland - 3	◎	◎	◎	◎	12	1 (Y-1)
Wetland - 4	◎	○	△	○	7	5
Wetland - 5	◎	◎	◎	○	11	1 (Y-2)
Wetland - 6	◎	○	△	○	8	4
Wetland - 7	◎	○	○	◎	10	2 (Y-3)
Wetland - 8	◎	○	△	○	8	4
Wetland - 9	◎	○	×	△	7	5
Wetland - 10	◎	○	×	△	7	5
Wetland - 11	◎	◎	△	○	9	3
Wetland - 12	◎	○	△	△	8	4

◎: 3 point , ○: 2 point , △: 1 point , X: 0 point

성을 고려하였으며, 활용성 항목의 평가기준은 처리용량 기준 $5,000 \text{ m}^3 \text{ day}^{-1}$ 이상, $2,000 \text{ m}^3 \text{ day}^{-1}$ 이상, $700 \text{ m}^3 \text{ day}^{-1}$ 이상 및 이하로 습지의 규모를 중심으로 평가하였다. 지속성 항목은 수 시료를 외부적 환경에 크게 영향을 받지 않고 지속적으로 취수할 수 있는 구조인지를 기준으로 평가하였다. 구체적으로는 자연유입 구조이면서 지속적 유입이 가능한 경우, 간헐적이지만 안정적이거나 지속적이지만 불안정한 유입인 경우, 간헐적이거나 불안정하지만 확정하기 어려운 경우, 마지막으로 유입이 어려워 취수를 할 수 없는 경우로 구분하여 평가하였다. 효율성 항목의 경우 습지에 대한 일부 정보가 부정확하고 확인이 어려워 조사연구에 영향을 미칠 우려가 있거나 수 시료의 채수 용이점 등을 기준으로 판단하였다. 이를 바탕으로 중점조사 대상 습지 선정을 위해 항목별 3점을 만점으로 점수화를 진행하였고, 항목별 평가기준에 따라 매우 적합하다고 판단되면 3점, 적합하다고 판단되면 2점, 보통의 경우 1점, 부적합하다고 판단되면 0점으로 점수를 산출하여 3곳의 습지(Y-1, Y-2, Y-3)를 선정하였다(Table 2).

2. 현장조사 및 시료 채수

선정된 중점조사 대상 습지의 제거효율을 파악하고자 23년 7~9월 중 3곳의 중점조사 대상 습지에 대해 각 2회 조사를 시행하였다. 하수처리수가 유입되는 Y-1과 Y-2 지점은 Table 1을 통해 일일처리용량과 시설용량을 바탕으로 각각 0.96일(24시간 기준 약 23시간), 0.56일(24시간 기준 약 13시간)로 체류시간을 계산하였다. 체류시간을 고려한 효율적인 유입 및 유출수 채수를 진행하기 위해 펌프시설 작동일지를 바탕으로 주기를 확인하였으나 일정한 시간에 작동하지 않는 것을 파악하였고, 시료 채수 전 펌프가동시간을 정한 후

Table 3. Hourly precipitation at point Y-3 on July 4~5.

Date	Time	Hourly precipitation (mm)	Cumulative precipitation (mm)
July 4th	12:00	0	0
	13:00	0	0
	14:00	0	0
	15:00	6	6
	16:00	5	11
	17:00	1	12
	18:00	0	12
	19:00	2.5	14.5
	20:00	11	25.5
	21:00	7.5	33
	22:00	0.5	33.5
	23:00	3	36.5
	July 5th	0:00	0
1:00		3.5	40
2:00		23.5	63.5
3:00		4	67.5
4:00		1	68.5
5:00		0.5	69
6:00		0	69

30분 간격으로 7회, 습지의 구간별 채수를 진행하였다.

우수 유출수를 처리하는 Y-3 지점은 강우 시 측정을 진행하였으며, 강우가 시작된 시간부터 종료될 때까지 Y시에서 가장 가까운 처인역삼 관측소에서 측정한 시간별 강수량과 누적강수량을 Table 3과 Table 4에 나타냈다. 강우 시 조사의 경우 수위변화에 따라 농도가 변하는 특징이 있어 대상

습지의 기능 및 목적상 강우 시 유출이 발생하는 시점을 기준으로 수질정화 효과를 평가하는 것이 중요하다(Kim *et al.*, 2017). 따라서 기본적으로 환경부에서 제시하고 있는 10 mm 이상의 강우 특성을 대상으로 초기우수 유출수에 대한 처리 효율을 분석하였다. 또한 우리나라 강우 특성을 고려하여 10 mm 이상의 강우사상에 대한 조사가 어려울 경우에는 최소 5 mm 이상에서 유출이 발생할 때 시료를 30분 간격으로 7회 채류시간을 고려하여 조사를 진행하였다.

추가적으로 수질개선 효과에 크게 영향을 미칠 수 있는 요소기술이 적용된 지점(Y-1, Y-2) 내 구간을 추가로 선정하여 시료 채수 후 항목들을 분석하였다.

3. 시료 분석 및 평가방법

시료 분석은 현장측정항목과 실내측정항목을 분류하여 Table 5와 같이 분석하였다. 현장측정항목(pH, Water temperature, EC, DO)은 휴대용 다목적 측정기(Orion Star A329; Thermo, USA)를 이용하여 현장에서 채수한 후 즉시 측정하였고, 실내측정항목(BOD, TOC, SS, T-N, T-P)은 현장에서 2 L 무균채수병을 통해 채수 후 실험실로 운반하여 수질오염공정시험기준(MOE, 2022)에 따라 분석하였다.

결과 및 고찰

Table 4. Hourly precipitation at point Y-3 on September 13~14.

Date	Time	Hourly precipitation (mm)	Cumulative precipitation (mm)
September 13th	8:00	0	0
	9:00	0	0
	10:00	0	0
	11:00	0.5	0.5
	12:00	3.5	4
	13:00	1.5	5.5
	14:00	1	6.5
	15:00	4	10.5
	16:00	4.5	15
	17:00	3.5	18.5
	18:00	7.5	26
	19:00	4	30
	20:00	3.5	33.5
21:00	2.5	36	
22:00	1	37	
23:00	0.5	37.5	
September 14th	0:00	0.5	38

중점조사 대상 습지에 대한 분석항목들의 결과를 Table 6 과 Table 7에 나타냈다. Y-1 지점과 Y-2 지점은 하수처리수가 유입되는 지점으로, 유입수의 EC가 높았으며 인공습지를 거치면서 감소하는 경향을 보였다. 또한 유입수의 DO 농도가 유출수에서 크게 감소하는 경향을 보여 습지 내에서 일어나는 생물학적 작용과 유출 전 침전조 역할을 하는 연못에서 물이 정체되어 DO 농도가 감소한 것으로 사료된다. 반면 Y-3 지점은 하천수가 유입되는 지점으로, 앞선 두 지점과 반대되는 경향을 보였다. 유입수의 EC 값이 낮지만 유출수에서 일부 증가하는 경향을 보였으며, DO 농도도 마찬가지로 증가하는 경향을 보였다. 이는 Y-3 지점의 유입수의 EC 농도가 낮고, 습지를 거치면서 이온성 물질의 농도가 증가한 것으로 판단되며 보다 정확한 분석과 유입수 조건에 따른 처리효율을 파악하기 위해 측정항목들의 결과(Tables 6, 7)를 바탕으로 지점별 수질 특성을 다음과 같이 분석하였다.

1. Y-1 인공습지에서의 수질변화 특성

Y-1 지점의 1·2차 조사는 비강우 시 하수처리수가 유입되

Table 5. Analysis equipment and method by parameters.

Parameter	Measuring instrument	Method	Site
Water temperature	Multi sensor meter (Orion Star A329)	Glass electrode method	Outdoor (Field)
pH	Multi sensor meter (Orion Star A329)	Ion electrode method	Outdoor (Field)
EC	Multi sensor meter (Orion Star A329)	Ion electrode method	Outdoor (Field)
DO	Multi sensor meter (Orion Star A329)	Electrode method	Outdoor (Field)
BOD	Incubator	Winkler-azide variation method	Indoor (Laboratory)
TOC	Total organic carbon analyzer (TOC-V CSN, Shimadzu, Japan)	High temperature combustion method	Indoor (Laboratory)
SS	Electric muffle furnace	Fiberglass paper filtering method	Indoor (Laboratory)
T-N	UV absorption photometry (220 nm)	UV spectrophotometer method	Indoor (Laboratory)
T-P	Ascorbic acid reduction (880 nm)	UV spectrophotometer method	Indoor (Laboratory)

Table 6. Summary of field measurement parameter results.

Parameters	Water temperature						pH			EC			DO				
	0 min	60 min	120 min	180 min	0 min	60 min	120 min	180 min	0 min	60 min	120 min	180 min	0 min	60 min	120 min	180 min	
Site																	
Number of measurements																	
Y-1	in	22.1	22.4	22.5	22.5	7.4	7.4	7.3	7.3	1879	1846	714	1966	7.7	7.7	7.8	7.6
	out	23.4	24.3	25	24.8	7.2	7.1	7.2	7.2	1317	681	789	901	2.9	3.2	3.4	4.1
Second	in	-	-	-	-	7.7	7.8	7.6	7.6	714	773	718	729	9.3	10.3	10.7	9.6
	out	-	-	-	-	7.3	7.6	7.4	7.5	521	536	528	523	6.5	8.8	6.5	8.8
Y-2	in	27	26.6	25.9	28.5	7.1	7.1	7.1	7.1	1748	1755	1758	877	7.0	7.2	7.4	7.2
	out	27.7	26.3	29.7	28.5	6.9	6.9	6.9	6.8	1785	1827	719	727	2.7	3.3	6.3	2.7
Second	in	23.1	23.4	23.3	23.5	7.0	7.2	7.2	7.1	713	703	686	609	6.2	6.2	6.1	6.8
	out	21.9	21.7	22.1	21.8	7.0	6.9	6.9	7.0	485	485	481	482	2.1	1.3	1.4	2.4
Y-3	in	25	25.1	24.9	24.7	9.0	8.6	7.9	7.8	462	462	295	229	8.4	7.3	5.8	6.6
	out	22.6	21.9	22.8	22.4	9.0	7.4	7.9	7.8	461	454	453	512	4.5	3.8	2.4	4.4
Second	in	22.6	22.2	22.2	22.7	7.6	7.8	7.8	7.9	363	290	206	167	9.7	8.9	10.3	9.3
	out	22.8	22.6	21.9	22.5	7.4	7.5	7.5	7.4	432	430	424	423	10.7	9.3	10.2	10.8

Table 7. Summary of indoor measurement parameter results.

Parameters	BOD			TOC			SS			T-N			T-P								
	0 min	60 min	120 min	180 min	0 min	60 min	120 min	180 min	0 min	60 min	120 min	180 min	0 min	60 min	120 min	180 min					
Site																					
Number of measurements																					
Y-1	in	2.0	2.1	1.7	1.6	18.8	4.9	5.1	5.3	2.8	1.2	0.8	0.8	2.93	3.02	3.14	3.02	0.090	0.120	0.146	0.396
	out	3.2	1.9	2.3	2.1	19.8	5.1	5.1	4.9	5.6	3.6	8.4	1.2	13.86	1.76	1.23	0.81	0.328	0.018	0.050	0.028
Second	in	2.2	2.1	2.8	2.1	5.5	5.0	5.1	5.1	0.4	2.0	0.8	0.4	1.68	2.12	1.51	1.91	0.038	0.031	0.045	0.016
	out	2.7	2.2	3.0	2.6	5.9	5.5	5.5	5.4	5.2	3.2	0.8	3.2	1.32	1.05	0.57	0.51	0.028	0.082	0.032	0.003
Y-2	in	1.4	3.1	1.1	1.0	18.3	5.1	5.2	5.1	4.0	9.6	2.8	8.4	3.07	4.77	3.11	2.83	0.104	0.090	0.074	0.082
	out	3.7	4.6	4.2	4.5	19.0	8.0	7.9	8.3	6.0	8.8	2.8	9.2	0.55	0.46	0.62	0.50	0.054	0.048	0.028	0.058
Second	in	1.4	0.9	1.9	0.7	4.9	5.4	5.1	5.0	1.2	0.4	0.4	2.4	1.54	1.95	2.08	1.57	0.109	0.100	0.060	0.102
	out	2.5	1.5	3.1	1.8	5.5	5.7	5.7	5.8	6.4	4.4	3.6	0.4	0.57	0.54	0.53	0.49	0.027	0.051	0.092	0.017
Y-3	in	2.5	3.6	10.1	7.8	2.8	4.2	4.3	3.9	4.0	2.4	56.4	58.4	2.13	3.75	3.03	2.21	0.126	0.268	0.224	0.138
	out	3.5	4.3	5.2	5.8	3.0	2.8	3.0	3.4	7.6	2.4	21.8	1.2	1.91	1.77	2.06	2.04	0.148	0.132	0.134	0.174
Second	in	10.2	7.5	6.9	6.0	5.8	5.4	4.7	3.7	51.6	366.4	194.7	246.0	1.20	2.13	1.17	1.42	0.184	0.323	0.223	0.205
	out	2.4	2.1	1.9	2.0	2.8	3.0	3.4	3.1	10.0	4.0	5.2	2.0	0.72	1.26	0.62	0.77	0.080	0.075	0.083	0.089

는 시점에 조사를 실시하였다. 조사 결과, 유입수와 유출수 평균농도를 비교하였을 때 유기물질 및 SS의 처리효율은 1차 및 2차 모두 유입수 대비 유출농도가 증가하여 음의 효율을 보인 반면 T-N, T-P 항목에 대한 처리효율은 양의 처리효율을 보였다(Table 8). SS 항목의 경우, 하수처리의 공정상 여과작용을 거쳐 SS성 입자물질을 대부분 제거하고 낮은 농도로 방류하여 유입되기 때문에 습지의 여과작용이나 침전 작용 등 SS성 입자물질을 제거하는 기작의 역할이 크게 작용하지 못하였고, 더욱이 습지 내 성장하는 식생의 부스러기나 내부에서 생성된 입자물질이 유출수에 포함되는 경우가 많아 SS 농도가 증가한 것으로 사료된다(Choi *et al.*, 2008). BOD 항목도 유입수보다 유출수의 농도가 더 높았던 것으로 조사되었으며, 이와 같은 결과는 유출수 중 SS 농도의 영향

도 있었을 것으로 판단된다. 습지의 경우 용존성 유기물은 생물작용 등에 의해 제거가 가능하지만 습지를 통과하는 과정에서 증가한 SS물질에는 BOD성 물질도 포함되어 있었기 때문에 증가한 것으로 사료된다. TOC 농도는 유입수와 유출수의 평균농도가 큰 차이를 보이지 않았으며, 이는 습지 내에서 BOD 유발물질이 생성될 수 있지만, TOC를 증가시키는 내부생성 유기물이 많지 않았기 때문인 것으로 사료된다.

반면 T-N, T-P 항목에 대해서는 습지의 처리효율이 상대적으로 높게 나타났으며, T-P의 경우 1차 조사와 달리 2차 조사에서 음의 효율로 나타났는데, 이는 1차 조사 시 0.188 mg L⁻¹였던 유입수 평균농도가 2차 조사 시에는 0.035 mg L⁻¹로 낮아져 제거효율이 감소한 것으로 사료된다. 또한 2차 조사 시 수질개선 효과에 크게 영향을 미칠 수 있는 침전지, 습

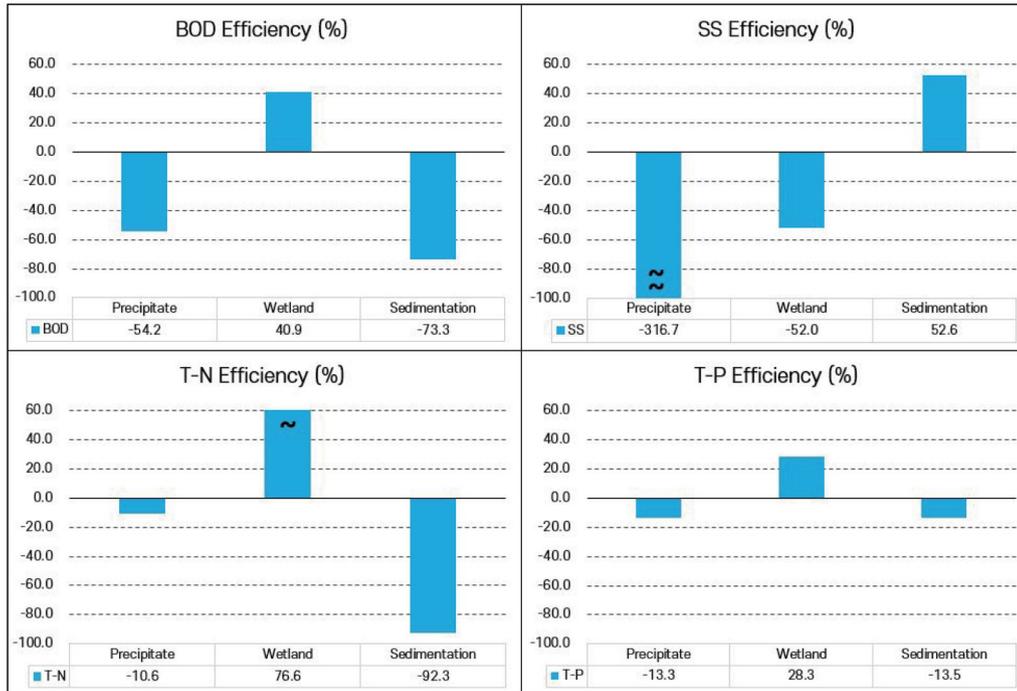


Fig. 2. Removal efficiency of parameters by location at Y-1.

Table 8. Inflow & outflow concentration and reduction efficiency by parameters at Y-1.

Y-1		BOD	TOC	SS	T-N	T-P
First survey	In _{avg} (mg L ⁻¹)	1.9	8.5	1.4	3.03	0.188
	Out _{avg} (mg L ⁻¹)	2.4	8.7	4.7	1.30	0.106
	Efficiency (%)	-29.1	-1.8	-235.7	57.2	43.6
Second survey	In _{avg} (mg L ⁻¹)	2.3	5.1	0.9	1.8	0.033
	Out _{avg} (mg L ⁻¹)	2.6	5.6	3.1	0.86	0.036
	Efficiency (%)	-14.8	-8.3	-244.4	52.2	-11.5

지 및 침강지와 같이 요소기술이 적용된 지점을 선정하여 시료 채수 진행 후 항목들을 분석하였는데, Fig. 2를 통해 알 수 있듯이 침전지와 침강지에 비해 습지에서의 저감효과가 가장 높은 것으로 나타났다.

2. Y-2 인공습지에서의 수질변화 특성

Y-2 지점도 마찬가지로 Y-1 지점과 같은 항목 및 방법으로 분석하였다. 결과적으로 Y-1 지점과 비슷한 경향을 보였다. SS의 평균처리효율은 모두 음의 처리효율을 보였으며 Table 9를 통해 알 수 있듯이, 유입농도가 가장 낮았던 2차 조사에서 처리효율이 가장 낮게 나타났고, 유입농도가 가장 높았던 1차 조사에서 처리효율이 가장 높은 것으로 분석되었다. 이를 통해 인공습지는 유입농도의 영향을 받으며, 하수처리수와 같은 낮은 SS 농도가 유입되는 경우 현재의 인공습지 구

조로는 SS에 대한 양의 처리효율을 기대하기 어려울 것으로 사료된다.

BOD의 저감효율은 -155.6%로 유입수 농도 대비 유출수 농도가 약 2.5배 증가한 것으로 나타났으며, TOC 농도도 습지를 거치면서 증가하였다. T-N의 저감효율은 84.5%, T-P의 저감효율은 46.3%로 높은 처리효율을 나타내기도 하였으며, 2차 조사 결과 또한 1차 조사와 비슷한 경향을 보여 하수처리수에 대한 인공습지의 수질정화 효과는 입자성물질과 유기물보다는 T-N 및 T-P가 높은 것으로 평가되었다. 특히 인에 대한 저감효과가 크게 나타나 공공수역에서의 부영양화 방지에 비교적 유용한 수질 정화기술 중 하나로 판단된다.

2차 조사 시 Y-1 지점과 동일하게 요소기술이 적용된 침강지, 침전지, 습지 침전지를 추가지점으로 선정하여 실내측정 항목에 대한 농도를 분석하였다. 대부분 항목이 침전지와 습

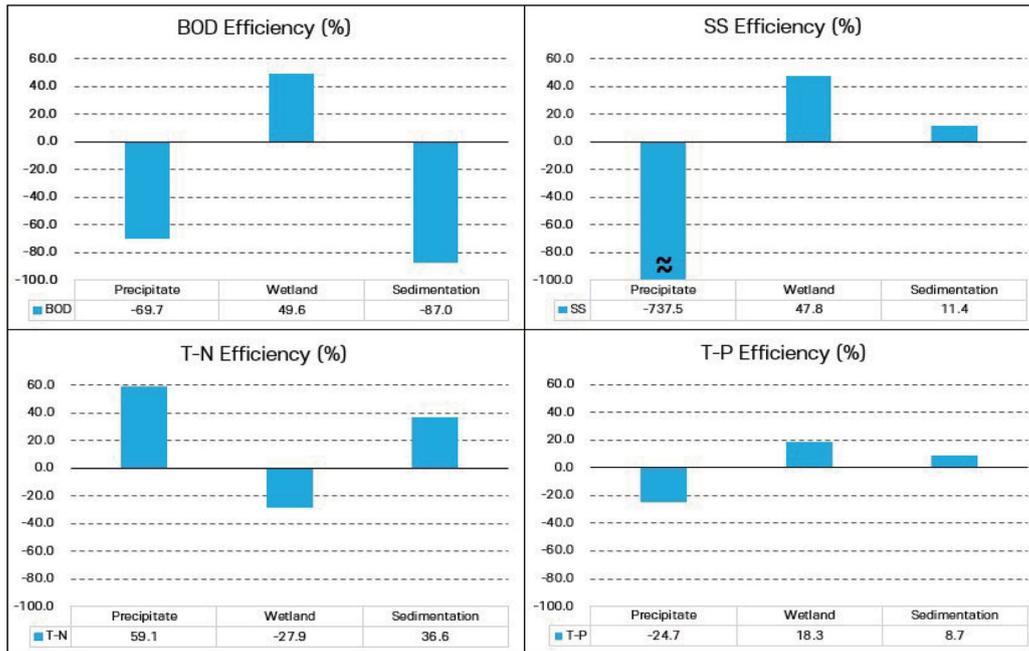


Fig. 3. Removal efficiency of parameters by location at Y-2.

Table 9. Inflow & outflow concentration and reduction efficiency by parameters at Y-2.

Y-2		BOD	TOC	SS	T-N	T-P
First survey	In _{avg} (mg L ⁻¹)	1.7	8.4	6.2	3.45	0.088
	Out _{avg} (mg L ⁻¹)	4.3	10.8	6.7	0.53	0.047
	Efficiency (%)	-155.6	-27.7	-8.1	84.5	46.3
Second survey	In _{avg} (mg L ⁻¹)	1.2	5.1	1.1	1.78	0.093
	Out _{avg} (mg L ⁻¹)	2.2	5.7	3.7	0.53	0.047
	Efficiency (%)	-77.9	-10.9	-236.4	70.3	49.6

지에서 농도가 증가했다가 침강지에서 감소한 것으로 보아 습지에서의 오염물질 제거 효과가 가장 큰 것으로 나타났다 (Fig. 3).

3. Y-3 인공습지에서의 수질변화 특성

Y-3 인공습지 지점은 비점오염물질을 처리할 목적으로 설치하였으며, 강우 시 현장조사를 통해 비점오염물질이 포함된 하천수의 유입수가 인공습지를 통과하면서 어느 정도 처리되는지를 평가하고자 하였다. Y-3 지점의 경우 다른 지점들과 달리 1차, 2차 조사에서 모든 항목(SS, BOD, TOC, T-N, T-P)에 대한 처리효율이 양의 값으로 도출되었다(Table 10). 특히 SS 항목의 경우 시간의 흐름에 따라 처리효율이 크게 증가하였는데, 이는 강우강도가 높아짐에 따라 유입수의 농도가 크게 증가하여 처리효율이 증가한 것으로 사료된다.

1차 조사 시 시간에 따른 유입수의 농도변화는 강우 후 30분이 지난 시점에서 2.4 mg L⁻¹로 가장 낮았고, 2시간이 지난 시점에서 가장 높은 106.4 mg L⁻¹의 농도로 나타났다. 유출수의 농도변화는 유입수와 달리 변동 폭이 크지 않은 것으로 나타나, 유입수 및 유출수의 평균 농도를 토대로 처리효율을 산정한 결과 85.3%인 것으로 나타났다(Fig. 4). 이와 같은 결과는 하천수가 유입되는 Y-3 지점이 강우 시 비점오염의 형

태로 주변 토사 및 협잡물이 다량 하천수에 유입되어 유입농도가 높아지고, 유입된 물질들이 습지 내에서 침전, 여과 등의 다양한 기작에 의해 제거됨으로써 처리효율이 높아진 것으로 판단된다.

2차 조사 시 유입수 및 유출수의 SS 농도 범위가 각각 51.6~143.6 mg L⁻¹, 0.4~10.0 mg L⁻¹인 것으로 조사되었다. 이에 따른 유입수 및 유출수의 평균농도는 각각 100.2 mg L⁻¹, 3.8 mg L⁻¹인 것으로 조사되어 전체적인 처리효율은 96.2%로 높게 나타났다. 이는 SS 항목의 처리효율이 강우특성에 따라 유입수의 농도의 영향을 받고 있으며, 1차 조사와 비교해 보았을 때, 유입수 농도가 약 2.5배 증가한 것 때문인지 전체적인 처리효율이 크게 증가하여 유입농도가 높을수록 처리효율은 크게 증가하는 것으로 판단된다(Fig. 5).

4. 유입수의 농도변화에 따른 인공습지의 처리효율 특성

전체 조사의 유입수 및 유출수 분석 결과와 처리효율을 검토한 결과, 유입수의 종류와 농도에 따라 처리효율 차별성이 나타났다. 우선 SS의 경우 하수처리수와 우수 유출수의 유입수 농도 차가 크게 나타났으며, 주로 비점오염원을 포함한 하천수는 고농도이면서 유입농도의 변동성이 큰 결과를 보였다. 결과적으로 유입수 농도가 높을 때 유출수 농도가 감소하

Table 10. Inflow & outflow concentration and reduction efficiency by parameters at Y-3.

Y-3		BOD	TOC	SS	T-N	T-P
First survey	In _{avg} (mg L ⁻¹)	6.0	3.8	30.3	2.78	0.189
	Out _{avg} (mg L ⁻¹)	4.7	3.1	8.3	1.95	0.147
	Efficiency (%)	22.1	19.6	72.8	29.9	22.2
Second survey	In _{avg} (mg L ⁻¹)	7.7	4.9	214.7	1.48	0.234
	Out _{avg} (mg L ⁻¹)	2.1	3.1	5.3	0.84	0.082
	Efficiency (%)	72.5	37.6	97.5	43.1	65.0

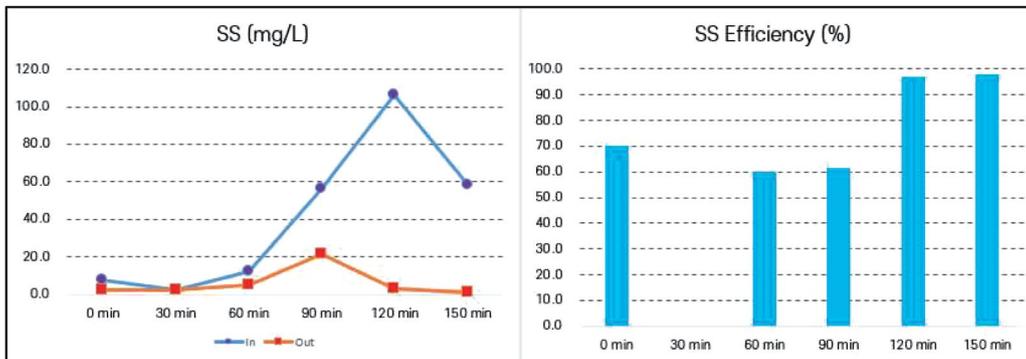


Fig. 4. SS concentration changes and SS efficiency over time in the first survey of Y-3.

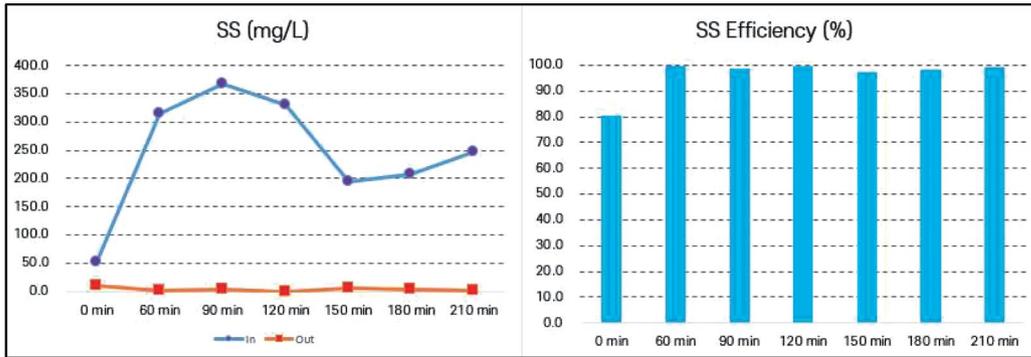


Fig. 5. SS concentration changes and SS efficiency over time in the second survey of Y-3.

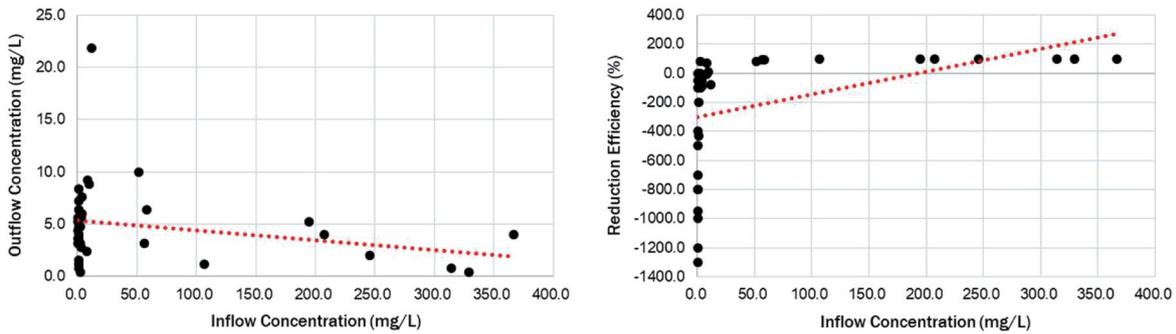


Fig. 6. Relations between inflow & outflow concentration and efficiency in SS,

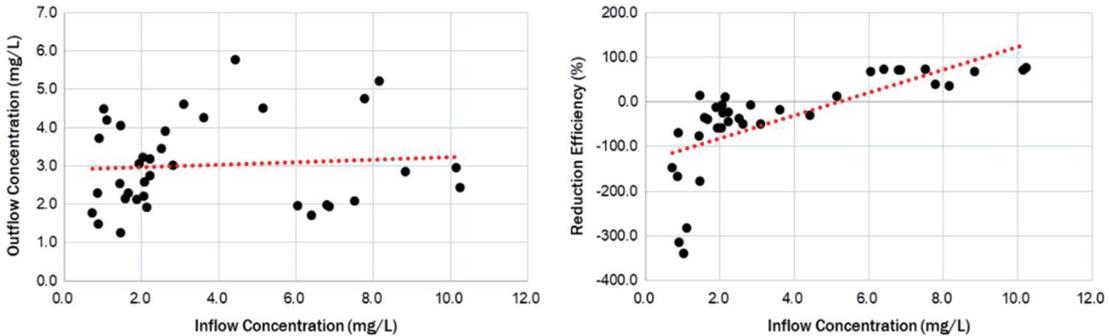


Fig. 7. Relations between inflow & outflow concentration and efficiency in BOD.

는 경향을 나타내고 있었다(Fig. 6). SS의 유입농도가 약 50 mg L^{-1} 이상에서 비교적 높은 처리효율을 나타냈으며, 이에 따라 유입농도가 높을수록 처리효율이 크게 증가하는 결과를 나타냈다.

BOD의 경우 SS와 마찬가지로 유입수의 농도가 대부분 저농도였으나, 고농도에서도 SS만큼 편차가 크지 않은 것으로 나타났다. 유입농도와 유출농도의 관계는 증가하는 경향을 보여 유입농도 증가에 따라 유출농도가 증가하는 것으로 나

타났으며, 유입농도와 처리효율의 관계도 증가하는 직선형태로 나타났다(Fig. 7). 결과적으로 BOD는 SS와 마찬가지로 유입농도가 높아질수록 처리효율이 증가하는 것으로 나타났으며, BOD의 농도가 5 mg L^{-1} 이상일 경우 정상적인 저감효과가 나타나는 것으로 판단된다.

T-N과 T-P도 마찬가지로 유입농도와 유출농도의 관계에서 증가하는 경향을 보였으나, 유출농도의 증가량이 유입농도의 증가량보다 크게 낮았으며, 낮은 농도에서도 비교적 처

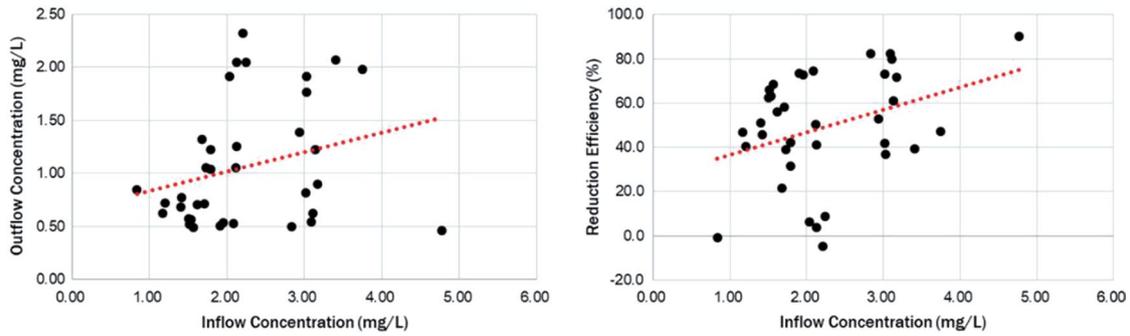


Fig. 8. Relations between inflow & outflow concentration and efficiency in T-N.

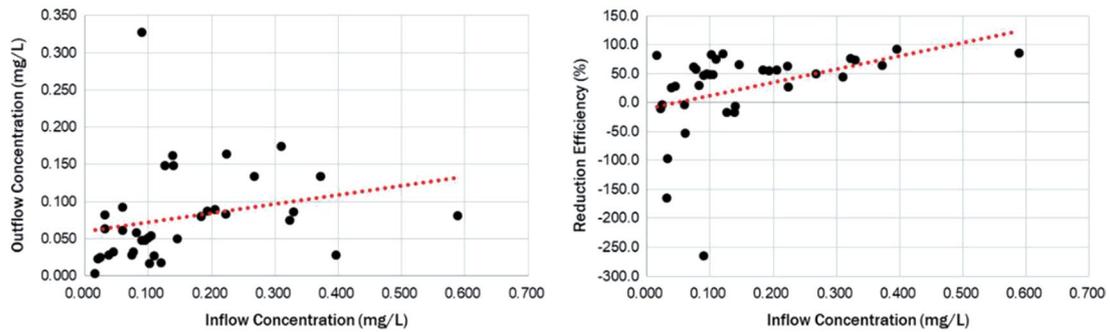


Fig. 9. Relations between inflow & outflow concentration and efficiency in T-P.

리가 잘 이루어지는 것으로 나타났다. 또한 유입농도와 처리 효율의 관계에서도 증가하는 경향으로 나타났으며, 전반적으로 처리효율이 높고 BOD와 SS와 비교했을 때 유입농도의 영향을 상대적으로 적게 받는 것으로 나타났다. 전반적으로 T-N과 T-P는 비슷한 경향을 보였으나, 유입농도에 따른 처리효율은 T-P가 더 크게 영향을 받는 것으로 나타났다 (Figs. 8, 9).

이와 관련된 선행연구(Choi *et al.*, 2011)에서도, 인공습지에 유입되는 오염물질 부하량이 높아짐에 따라 오염물질 처리량도 증가한다는 결과를 통해 인공습지로 유입되는 유입원수의 농도에 따른 처리효율은 상관성이 있음을 확인할 수 있다.

결론

하수처리수가 유입되는 Y-1과 Y-2 지점은 1·2차 조사에서 SS, BOD, TOC의 처리효율이 대부분 음의 값으로 나타나며 유입수 수질농도 대비 유출수의 수질농도가 더 높은 것으로 조사되었다. 이는 하수처리수가 물리적·생물학적 처리를 거쳐 저농도로 유입되기 때문에 처리효율이 저하되며, 특히 인공습지 내 식생의 광합성 작용에 의해 유기탄소가 생산되고

수중으로 방출되어 유출수의 탄소성 유기물질량이 증가한 것으로 사료된다. 그러나 T-N과 T-P의 경우, Y-1과 Y-2 지점의 T-N 처리효율은 평균 54.7%와 77.4%였으며, T-P 처리효율은 평균 16.0%와 47.9%로 양호한 제거효율을 보였다. 질소 및 인은 내부생산이 거의 없고 주로 외부에서 유입된 오염원을 소비하기 때문에 저농도의 유입수에도 유출수의 T-N과 T-P의 농도는 감소한 것으로 판단된다. 또한 질소와 인은 모든 생물체에 필수적인 물질이므로 식생이 성장하는 과정에서 흡수되었거나, 습지 내 토양층에서 흡착 및 입자물질 제거과정에서 공침 등의 영향에 의해 저감된 것으로 판단되기도 하며, 유기물의 분해(조류의 사멸) 시 영양염류를 고려할 필요가 있다고 판단된다.

반면 하천수와 강우 시 초기우수 유출수가 유입되는 Y-3 지점의 경우 모든 항목에서 높은 처리효율을 보였으며, 강우 시 항목별 평균 유입농도에 따른 유출수의 처리효율은 SS 90.8%, BOD 51.1%, TOC 30.6%, T-N 38.8%, T-P 55.3%로 나타났다. 이는 강우 시 초기우수 유출수로서 고농도 유입수로 인해 높은 처리효율이 나타난 것으로 판단된다.

결과적으로 하수처리수가 유입되는 Y-1과 Y-2 지점의 경우 T-N과 T-P 저감효과가 크기 때문에 부영양화 방지에 효과적이며, 하천수와 초기우수 유출수 처리를 목적으로 하는

Y-3 지점은 비점오염원에 의한 초기 유출부하량 감축에 효과적이라고 판단된다. 또한, 인공습지는 생태공간과 인근 주민들의 친수공간으로 활용되며, 난분해성 물질이나 이온성 물질 등에 대한 완충지로서 활용될 수 있다. 이를 통해 효과적인 인공습지 활용을 위해서는 처리대상 물질이 무엇인지에 따라 오염물질에 따른 처리기작을 고려하여 설계에 반영하는 것이 필요하다. T-N과 T-P 제거를 목적으로 인공습지를 조성하는 경우 인공습지의 구조변화를 통해 식생 점유율을 높이는 방법을 고려할 수 있다. 또한, 고농도 오염수에 대한 처리효율이 높았던 점을 고려하였을 때, 초기 고농도의 우수 유출수가 유입될 수 있도록 설계단계에서의 철저한 검토와 원활한 유입을 위한 관리가 필요할 것으로 사료된다.

적 요

본 연구에서는 인공습지의 유입수 조건에 따른 수질정화 효율을 분석하기 위하여 하수처리수가 유입되는 2개 지점과 우수 유출수가 유입되는 1개 지점에 대해 정화효율을 비교하였다. 유입수 및 유출수 분석 결과와 제거효율을 검토한 결과, 하수처리수를 처리하는 2개 지점의 경우 T-N과 T-P 제거효율이 각각 54.7%, 77.4%로 산출되었으며 우수 유출수가 유입되는 1개 지점의 경우 SS 90.8%, BOD 51.1%, TOC 30.6%, T-N 38.8%, T-P 55.3%의 처리효율이 나타났다. 결과적으로 인공습지의 오염물질 제거효율은 유입수 농도에 비례하는 것으로 나타났으며, 효율적인 인공습지를 조성하기 위해서는 고농도 오염수에 대한 제거효율이 높았던 점을 고려하여 설계단계에서의 철저한 검토와 관리가 필요한 것으로 판단된다.

저자 정보 이설준(경희대학교 환경응용과학과 석사과정), 은범진(경희대학교 환경응용과학과 석사과정), 김종환(경희대학교 환경응용과학과 박사과정), 최이송(경희대학교 환경학 및 환경공학과 겸임교수), 오종민(경희대학교 환경학 및 환경공학과 교수)

저자 기여도 개념설정: I.S. Choi, 방법론: I.S. Choi, 자료수집: S.J. Lee, B.J. Eun & J.H. Kim, 자료 관리: S.J. Lee, B.J. Eun, 분석: S.J. Lee, B.J. Eun & J.H. Kim, 원고 초안작성: S.J. Lee, B.J. Eun, 원고 교정: S.J. Lee, B.J. Eun, J.H. Kim, 원고 편집 및 검토: J.M. Oh, I.S. Choi, 과제관리: J.M. Oh, I.S. Choi, 연구비 수주: J.M. Oh, I.S. Choi

이해관계 이 논문에는 이해관계 충돌의 여지가 없습니다.

연구비 본 연구는 경기녹색환경지원센터의 연구비지원(1-70-71-05)의 지원을 받아 이루어졌습니다.

REFERENCES

- Choi, D.H., K.S. Choi, D.S. Kim, S.W. Kim, D.H. Choi, I.S. Hwang, Y.K. Lee and H. Kang. 2008. Temporal and Special Distributions of Water Quality and Evaluation of Pollutant Removal Efficiency in the Sihwa Constructed Wetland. *Journal of the Korean Society of Environmental Engineering* **30**(10): 1013-1020.
- Choi, I.W., S.D. Moon, D.C. Seo, S.W. Kang, B.J. Lim, J.H. Park, K.S. Kim, J.B. Lee, J.S. Heo and J.S. Cho. 2011. Evaluation of treatment efficiencies of pollutants in Bongsan constructed wetlands for treating non-point source pollution. *Korean Journal of Soil Science and Fertilizer* **44**(6): 1089-1094.
- Choi, K.S., S.W. Kim, D.S. Kim and Y.S. LEE. 2014. Operation Status and Improvement Plans of Ten Wetlands Constructed in Dam Reservoirs in Korea. *Journal of Wetlands Research* **16**(3): 431-440.
- Jung, Y.J. 2006. Case Study: Operation of the Juam Constructed Wetland for Effluent from a Sewage Treatment Plant and Diffuse Pollution for Two Years. *Journal of Korean Society on Water Quality* **22**(6): 1031-1037.
- Kang, T.W. and S.J. Lee. 2016. A simulation method for reduction facilities of natural type for non-point pollution by the SWMM. *Journal of Korean Hazard Mitigation Society* **16**(2): 123-131.
- Kim, P.J., E.Y. Han and Y.C. KIM. 2017. A Case Study Stormwater Treatment by Channel-Type Wetland Constructed on the Flood Plane of the Stream. *Journal of Wetlands Research* **19**(1): 80-89.
- Korean Environmental Management Corporation. 2003. A Study on the Creation Of Artificial Wetlands for Natural River Purification.
- Lee, S.Y., J.Y. Choi and L.H. Kim. 2015. Suggestion of appropriate design and maintenance in a constructed wetland using monitoring results. *Journal of Wetlands Research* **17**(4): 428-435.
- Ministry of Environment. 2016. Operation Manual for the Installation and Management of Non-point Pollution Reduction Facilities.
- Ministry of Environment. 2022. Water Pollution Process Test Criteria.
- Park, J.H., J.C. Rye, D.S. Shin and J.K. Lee. 2019. The Effective Approach for Non-Point Source Management. *Journal of Korean Wetlands Research* **21**(2): 140-146.
- Park, P.N. and Y.C. Cho. 2023. Removal Efficiency of Non-point Source Pollutants through Constructed Wetland: Case Study of Annaecheon Wetland in Daechong Reservoir. *Journal of Environmental Impact Assessment* **32**(5): 291-304.

Original article

안정동위원소 분석을 활용한 멸종위기종 여울마자와 동서종 돌마자의 영양단계 및 생태적 지위 평가

이대희 · 오혜지 · 최예림 · 홍근혁 · 백인혁¹ · 김근식¹ · 장광현* · 윤주덕^{1,*}

경희대학교 환경응용과학과, ¹국립생태원 멸종위기종복원센터

Trophic Level and Ecological Niche Assessment of Two Sympatric Freshwater Fish, *Microphysogobio rapidus* and *Microphysogobio yaluensis* Using Stable Isotope Analysis. Dae-Hee Lee (0000-0002-4701-9409), Hye-Ji Oh (0000-0003-2098-8485), Yerim Choi (0000-0002-8600-1391), Geun-Hyeok Hong (0000-0001-5771-7238), InHyuck Baek¹ (0009-0003-7469-7883), Keun-Sik Kim¹ (0000-0002-2081-2589), Kwang-Hyeon Chang* (0000-0002-7952-4047) and Ju-Duk Yoon^{1,*} (0000-0003-1667-327X) (Department of Environmental Science and Engineering, Kyung Hee University, Yongin 17104, Republic of Korea; ¹Research Center for Endangered Species, National Institute of Ecology, Yeongyang 36531, Republic of Korea)

Abstract In ecosystems within limited resources, interspecific competition is inevitable, often leading to the competitive exclusion of inferior species. This study aims to provide foundational information for the conservation and restoration management of *Microphysogobio rapidus* by evaluating species' ecological response to biological factors within its habitat. To understand this relationship, we collected food web organisms from site where *M. rapidus* coexist with *Microphysogobio yaluensis*, a specie ecologically similar to *M. rapidus*, and evaluated the trophic levels (TL), isotopic niche space (INS), and the overlap of INS among fishes within the habitat using stable isotope analysis. Our analysis revealed that the *M. rapidus* exhibited a higher TL than *M. yaluensis*, with TL of 2.6 and 2.4, respectively. *M. yaluensis* exhibited a broad INS, significantly influencing the feeding characteristics of most fish. Conversely, *M. rapidus* showed a narrow INS and asymmetric feeding relationships with other species, in habitats with high competition levels. This feeding characteristics of *M. rapidus* indicate that the increase in competitors sharing the similar resources lead to a decrease in available resources and, consequently, is expected to result in a decrease in their density.

Key words: biological interaction, genus *Microphysogobio*, isotopic niche space, stable isotope analysis, trophic level

서론

Manuscript received 23 March 2024, revised 29 March 2024,
revision accepted 29 March 2024

* Co-corresponding author: Tel: +82-31-201-3399

E-mail: chang38@khu.ac.kr

Tel: +82-54-680-7360

E-mail: grandblue@nie.re.kr

자원(e.g. 먹이, 서식공간)이 한정된 생태계 내에서 두 종 이상이 공존할 경우, 자원에 대한 종간 경쟁(interspecific competition)은 불가피하다. 이와 같은 생물학적 상호작용은 해당 생태계의 종풍부도, 종다양성 등의 군집요인뿐만 아니

라 종의 개체수, 분포를 결정하는 중요한 요인으로 작용한다 (Tilman, 1987; Bolnick *et al.*, 2010; Eurich *et al.*, 2018). 종간 경쟁은 서식지 내 종들의 지위분화(niche partitioning)를 통해 완화되어 공존이 유지될 수 있으며(Gause, 1934) 이러한 분화는 각 종의 생태적 지위의 변화가 동반되어야 한다. 종특이적 전략에 따라 상이하게 나타나는 생태적 지위의 변화는 일반적으로 전문화(specialization)와 일반화(generalization)로 구분된다(Lynch and Gabriel, 1987). 전문화된 섭식특성을 보이는 특화종(specialist)은 타 경쟁종과 중첩되지 않는 좁은 범위의 생태적 지위 폭(niche breadth) 내에서 특정한 자원을 이용하는 반면 일반화된 섭식특성을 보이는 일반종(generalist)은 다양한 환경에서 자원의 이용이 가능하여 이용가능한 자원의 범위가 특화종 대비 넓다(Sexton *et al.*, 2017). 최적섭식이론(Optimal Foraging Theory)은 생물이 에너지 섭취를 최대화할 수 있는 먹이를 선택할 것이라고 가정하기 때문에(Pyke *et al.*, 1977), 두 섭식전략의 차이(전문화, 일반화)는 섭식하는 먹이원과 먹이활동의 범위에 따라 구분될 수 있다. 예를 들어 완전한 육식성향을 나타낸 어류는 잡식성향의 어류보다 좁은 생태지위를 보였는데, 이는 좁은 범위에서 에너지 효율적인 먹이원을 집중적으로 섭식하는 전문화 전략이 반영된 결과임을 알 수 있다(Hayden *et al.*, 2019). 각 종의 섭식특성은 시공간적으로 변화하는 환경에 대해 앞선 세대로부터 물려받은 최적의 생존전략임을 시사하며, 일부 종은 환경변화에 따라 전문화와 일반화 사이에서 선택적으로 전환할 수 있는 유연성을 가져 타 종에 비해 경쟁력 높은 적응능력을 나타내기도 한다(Werner and Hall, 1979; Bolnick *et al.*, 2003).

종간 경쟁과 같이 생태계 내에서 발생하는 생물학적인 상호작용을 정량적으로 이해하고자 최근 안정동위원소 분석을 활용한 다양한 시도들이 이루어지고 있다. 탄소·질소 안정동위원소비는 먹이원 대비 섭식생물 체내에 상대적으로 무거운 동위원소가 일정한 비율로 축적되어 장기간 섭식한 먹이원의 정보를 종합적으로 반영하기 때문에(Peterson and Fry, 1987; Choi and Shin, 2018), 안정동위원소 분석은 먹이망 구조의 시각화 및 영양단계의 산정이 가능할 뿐 아니라 최근 베이지안 통계를 적용하여 먹이원의 상대적인 기여도(Phillips, 2012), 생태지위면적(Swanson *et al.*, 2015)에 대한 확률적인 추정을 바탕으로 생태적으로 발생할 수 있는 불확실성을 정량적으로 포함시켜 분석 종의 섭식특성에 대해 폭넓은 해석이 가능하다(Phillips *et al.*, 2014). 영양단계는 생태계 내 물질·에너지 전달 경로에서 생물종의 수직적인 위치를 의미하기 때문에 섭식특성의 간접적인 추정(e.g. 영양단계 2: 초식성향, 3: 육식성향, 4 이상: 어식성향)이 가능하다(Carscallen *et al.*, 2012). 탄소·질소 안정동위원소를 복합

적으로 이용하여 산정한 생태지위면적은 생태계 내 대상생물이 차지하는 공간적 위치와 기능적 역할을 대변하기 때문에, 생태지위면적의 활용을 통해 생태지위분화, 종간 경쟁 수준과 같은 생물학적인 상호작용을 정량적으로 평가할 수 있다(Andrades *et al.*, 2019). 특히, 종의 생태지위면적 간 중첩되는 정도는 각 생물종들의 자원 이용 능력, 서식지 내 상대 풍부도를 반영하여 서식지별 종간 경쟁 수준의 비교 및 두 종 사이에서 발생하는 경쟁관계 중 상대적으로 열위에 해당하는 종의 식별이 가능하다(Swanson *et al.*, 2015; Pelage *et al.*, 2022).

모래주사속 *Microphysogobio* 어류인 여울마자(*M. rapidus*)는 소형의 저서성 1차 담수어류로 우리나라 고유종이다(Hong *et al.*, 2015). 유속이 빠른 여울지대에 주로 살며 모래나 자갈이 깔린 바닥 가까이에서 부착조류나 수서 곤충 유충을 섭식한다(NIBR, 2019). 여울마자는 2012년 환경부에 의해 멸종위기 야생생물 1급으로 지정되었고, 2019년 한국의 국가생물적색목록(NIBR, 2019)에서 위급종(CR; Critically Endangered Species)으로 해당되며 절멸이 임박한 종으로 평가받고 있다. 여울마자의 개체수 감소 현상에 대해 Yoon *et al.* (2023)은 과거 출현지점과 현재 출현지점의 특징을 비교하여 주변 도시화에 따른 서식지의 물리적, 이화학적 변화가 여울마자의 분포 및 밀도에 미치는 영향을 규명하였지만 여울마자의 출현 서식지 내 유사어종과의 경쟁과 같은 생물학적인 상호작용에 대한 이해는 아직 부족한 실정이다.

여울마자의 주요 서식지인 여울 내 어류의 주된 먹이활동은 부착조류나 곤충 유충 등의 먹이원이 풍부한 저서에서 집중적으로 이루어지며 이에 따라 경쟁이 심화되기 때문에(Zaret and Rand, 1971; Gilliam *et al.*, 1989), 여울마자의 제한적인 분포 현상을 더욱 자세하게 이해하기 위해서는 서식지 내 생물학적 요인에 의한 잠재적인 영향을 파악하는 연구가 요구된다. 돌마자(*Microphysogobio yaluensis*)는 여울마자와 형태적으로 매우 유사할 뿐 아니라 섭식특성 또한 유사하여 여울마자가 출현하는 지점에서 돌마자가 함께 서식하고 있는 경우가 많지만(NIBR, 2019), 돌마자는 서해와 남해로 유입하는 하천에 고루 분포한 반면 여울마자는 낙동강 수계에만 제한적으로 분포하고 있다(Chae and Yang, 1999; Kim *et al.*, 2009). 따라서 본 연구에서는 여울마자의 지속적인 개체군 감소의 원인들 중 생물학적 요인에 대한 탐색을 위해 안정동위원소를 활용하여 영양단계 및 생태적 지위 평가를 수행하였다. 특히, 동일지역에 서식하는 동서종이면서 동일속에 포함되는 유사한 돌마자와 비교를 통하여 서식지의 생물학적인 상호작용에 대한 여울마자와 돌마자의 생태적인 반응을 파악하여 여울마자의 보전, 복원 수립을 위한 기초 자료를 얻고자 하였다.

재료 및 방법

1. 조사대상지 및 유기물·어류 시료 채집

본 연구의 시료 채집은 2023년 9월 15일에 실시되었다. 채집지점은 대상 종인 여울마자와 돌마자가 공서하는 임천-남강의 합류지점(35°28'56.5"N 127°48'33.3"E)을 선정하였다(Fig. 1). 조사지점은 자갈과 모래, 크기가 큰 돌 등의 복합적인 하상구조를 나타냈고 수심이 얕아 여울마자와 돌마자가 공통으로 출현하였다.

조사지점 내 어류들의 먹이원의 기원을 파악하고자 입자성 부유 유기물(SPOM, Suspended Particle Organic Matter)과 입자성 부착 유기물(APOM, Attached Particle Organic Matter)의 시료를 채집하였다. 식물플랑크톤 및 기타 부유성 유기물질을 포함하는 SPOM 시료는 수변부에서 채수한 원수를 500°C에서 2시간 동안 강열건조한 GF/F 여과지(0.7 µm pore size, 47 mm; Whatman, USA)를 이용하여 최소 500 mL에서 최대 1 L 여과(3반복)하여 시료를 확보하였다. 저서 기원의 먹이원을 의미하는 APOM 시료는 수변부에서 돌, 대형 자갈 기질을 채집하여 전체 표면을 브러쉬로 벗겨낸 뒤 부착된 유기물을 농축하였다. 농축한 유기물은 GF/F 여과지를 이용하여 30~100 mL를 여과(3반복)한 시료를 확보하였다.

어류는 투망을 이용하여 채집하였고, 현장에서 동정하였다. 이후 저온 상태로 실험실까지 운반하여 전장(Total length, mm), 무게(weight, g) 측정 및 안정동위원소 분석을 위한 시료채취가 이루어졌다. 조사지점에서 채집된 어류는 대상 종인 여울마자와 돌마자를 포함하여 12종의 어류가 채집되었다. 채집된 어류는 국립환경과학원에서 고시하고 있는 어류의 섭식특성 및 내성도특성을 참고하였고(NIER, 2019) 섭식길드(잡식성: 여울마자, 돌마자, 피라미;

충식성: 기름종개, 긴물개, 돌고기, 모래무지, 참쉬리, 참갈겨니, 참마자, 참중고기; 육식성: 썩지)를 기준으로 구분하였다(Table S1). 멸종위기종의 포획은 낙동강유역환경청으로부터 허가를 취득하였고(허가번호 2023-30호), 국립생태원의 동물실험윤리위원회의 승인을 받아 수행하였다(승인번호 NIEIACUC-2023-006).

2. 안정동위원소 분석

안정동위원소 분석을 위한 어류 시료는 개체 간 생애주기에 따라 발생하는 안정동위원소비 회전율(turnover rate)의 차이 및 개체 크기에 따른 섭식 먹이원의 변화(Won *et al.*, 2023)로 인한 오차를 줄이고자 전장을 기준으로 유사한 크기를 가진 개체를 선별하여 종별로 최대 5개체의 표본을 확보하였다(Table S2). 선별된 어류 시료는 정확한 안정동위원소 분석을 위해 뼈, 혈액, 피부와 같은 기타 조직을 제외하고 지방을 포함하지 않은 등부분의 근육을 1~2 g 채취하여 2 mL 튜브에 냉동 상태로 보관하였다. 입자성 유기물의 여과지 및 생물 시료는 -80°C에서 48시간 이상 동결건조를 수행하였고 건조된 여과지는 BEAD RUPTOR 12 (OMNI International, USA)를 사용하여 균질화하였다. 안정동위원소 분석의 경우, 탄소·질소 안정동위원소비를 동시에 분석하였기 때문에 별도의 무기탄소 및 지질 제거 과정을 수행하지 않았다(Post, 2002). 전처리된 시료의 안정동위원소 분석은 전문기관(서울대학교 농생명과학 공동기원)에 의뢰하였으며 해당 기관에서는 안정동위원소 측정용 질량 분석계(Isotope Ratio Mass Spectrometers, Isoprime, UK)를 이용하여 탄소·질소 안정동위원소비를 측정하였다. 탄소·질소 안정동위원소의 표준물질로 각각 VPDB (Vienna Pee-Dee Belemnite)와 공기를 이용하였으며 표준물질의 원소존재비와 분석시료 내 존재비와의 차이를 천분율로 나타낸 값을 $\delta^{13}\text{C}$, $\delta^{15}\text{N}$ 으로 나타냈다.

$$\delta X_{\text{sample}} = [(R_{\text{sample}} / R_{\text{standard}}) - 1] \times 1000$$

$$X = {}^{13}\text{C} \text{ 또는 } {}^{15}\text{N}$$

$$R = \text{각각 } {}^{13}\text{C}/{}^{12}\text{C} \text{ 또는 } {}^{15}\text{N}/{}^{14}\text{N}$$

sample = 측정시료

standard = 표준시료

3. 안정동위원소비 값의 활용

탄소·질소 안정동위원소비를 각각 x축, y축으로 설정한 2차원 그래프 상에 먹이망 구성생물들의 안정동위원소비를 나타내어 조사지점의 기초먹이망을 시각화하였다. 또한, 탄소, 질소 안정동위원소의 복합적인 활용 및 적용(e.g. 베이지

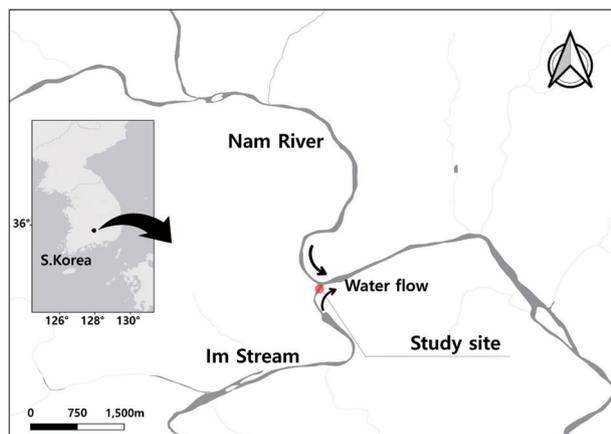


Fig. 1. The map of the study site.

안 통계)을 통해 조사지점 내 생물학적 상호작용 및 어류 종의 섭식특성을 이해하고자 먹이원 기여율, 영양단계 및 생태 지위면적에 대한 정량적인 분석을 수행하였다. 본 연구에서 실시된 안정동위원소 분석은 분석에 따라 요구되는 어류의 최소 개체수가 상이하기 때문에, 분석에 활용되는 종별 개체수가 최소 1개체에서 10개체로 차이가 있었다는 점을 고려하여 채집된 개체수에 따라서 종을 선별하여 분석에 활용하였다(Table S1).

1) 먹이원 기여율 및 영양단계 산출

본 연구에서는 기저생물을 일차생산자인 입자성 유기물로 선정하여 $\delta^{15}\text{N}_{\text{baseline}}$ 와 λ 를 계산하였다. 일차생산자의 질소 안정동위원소비는 시·공간적으로 넓은 변동 범위를 보이기 때문에(Kim *et al.*, 2014), SPOM과 APOM을 모두 고려하여 영양단계를 산출하는 데 있어 평균 질소 안정동위원소비 값을 사용하는데 공간적 이질성이라는 한계가 있다. 따라서, 이를 보완하기 위해 본 연구에서는 어류 종별로 산출된 SPOM 및 APOM 먹이원 기여율을 가중치로 활용하여 보정된 $\delta^{15}\text{N}_{\text{baseline}}$ 값을 통해 영양단계를 산출하였다.

Trophic Level

$$= \{[\delta^{15}\text{N}_{\text{sc}} - (P_{\text{SPOM}} * \delta^{15}\text{N}_{\text{SPOM}} + P_{\text{APOM}} * \delta^{15}\text{N}_{\text{APOM}})] / 3.4\} + 1$$

$\delta^{15}\text{N}_{\text{SPOM}}$ 와 $\delta^{15}\text{N}_{\text{APOM}}$ 는 각각 SPOM 및 APOM의 질소 안정동위원소비 값을 의미하며 P_{SPOM} 과 P_{APOM} 는 각각 대상 어류에 대한 SPOM과 APOM의 기여율을 의미한다. 먹이원 기여율은 베이저안 믹싱모델(Bayesian mixing model)인 R package “simmr”을 이용하여 산출하였다(Parnell *et al.*, 2013). 베이저안 믹싱모델은 먹이망 구성생물의 안정동위원소비 값의 변동성과 같은 불확실성을 고려하여 먹이원 기여율의 추론을 수행하기 때문에 분석 결과의 신뢰성을 높이기 위해 2개체 이상의 개체수가 채집된 종을 대상으로 먹이원 기여율을 산출하였다(Phillips *et al.*, 2014). 또한 믹싱모델 분석은 베이저안 통계를 기반으로 모수를 추정하기 때문에, 측정값은 평균이나 중앙값과 같은 고유값이 아닌 확률 분포추정치를 함께 기술하여(95% Credibility Interval) 측정 오류(measurement error), 분석시료 및 TDF의 변동성의 불확실성을 포함하였다(Phillips *et al.*, 2014). 믹싱모델 분석을 통해 산출되는 먹이원 기여율의 평균값과 확률분포추정치를 $\delta^{15}\text{N}_{\text{baseline}}$ 산정식에 적용하여 영양단계 평균값 및 실현 가능한 영양단계 범위를 계산하였다. 예외적으로 여울마자와 돌마자의 영양단계를 계산하기 위해 입자성 부착 유기물을 기저생물로 하여 일반적인 영양단계 식을 사용하였는데, 이는 대상 종들이 부착조류를 주로 섭식하기 때문에(Hong, 2014;

Ji *et al.*, 2021; Byeon, 2022) 부유성 기원의 먹이원에 대한 고려는 필요하지 않을 것으로 판단하였기 때문이다. 조사시기 동안 1개체가 채집된 종의 경우, SPOM과 APOM의 평균 질소 안정동위원소비 값을 $\delta^{15}\text{N}_{\text{baseline}}$ 로 선정하여 영양단계를 산출하였다.

2) 생태지위면적의 산정 및 생태지위면적 중첩 정도·가능성

생태지위면적은 통계 소프트웨어 R의 SIAR 계열 package “SIBER”를 이용하여 산출 및 시각화하였다(Layman *et al.*, 2007; Jackson *et al.*, 2011). “SIBER”는 탄소·질소 안정동위원소비의 2차원 그래프 위 분석생물들의 안정동위원소 데이터를 연결하여 타원을 생성하고 샘플 수에 따라 타원의 면적과 모양을 보정하여 산정할 수 있기 때문에, 샘플수가 적고 극한 값에 대한 불확실성을 포함하는 생태지위면적(SEAc, standard ellipse areas with corrected sample size)의 산출이 가능하며, 샘플 수가 다른 어류 종의 생태지위면적 간 비교가 가능하다. “SIBER”를 사용하여 생태지위면적을 산출하기 위해서 세 개 이상의 표본이 요구되기 때문에, 채집된 개체수가 3 이상인 어류 종을 대상으로 SEAc값을 산출하였다.

중간 생태지위면적의 중첩 정도 및 중첩가능성은 R package “nicheROVEVR”을 사용하여 산정하였다. 특정 종의 SEAc 값의 40% 예측면적은 안정동위원소비 분포 내 가장 밀집된 부분을 포함하기 때문에(Jackson *et al.*, 2017) 중간 생태지위면적의 중첩 정도는 α 값을 0.4로 설정하여 산출하였다. “nicheROVER”는 MCMC (standard Markov chain Monte Carlo) 샘플링을 활용하여 모집단을 추정하기 때문에 본 분석에서는 베이저안 신용구간 95% ($\alpha=0.95$) 내에서 1,000번의 반복작업을 설정하여 중첩가능성의 사후 확률 분포 평균값을 계산하였다.

결 과

1. 먹이망 구조 및 분류군별 탄소·질소 안정동위원소비

본 조사에서 채집된 모든 어류 종의 안정동위원소를 분석하였으며 5개체 이상 채집된 어류는 잡식성 어류인 긴물개와 피라미로 각각 7, 10개체가 채집되었다(Tables S1, S2). 조사지점에서 채집된 먹이망 구성생물들의 안정동위원소 분석 결과를 활용한 기초먹이망은 종별 안정동위원소비의 차이가 뚜렷한 것으로 나타났다. 입자성 유기물은 SPOM과 APOM간 탄소·질소 안정동위원소비의 뚜렷한 차이를 나타냈는데, APOM의 탄소·질소 안정동위원소비가 SPOM 대비 무거운 것으로 나타났다. 어류들의 평균 탄소 안정동위원소

비의 범위는 -17.7~ -16.0‰을 보였다. 어류의 섭식특성에 따른 분류군 중 충식성 어류의 경우, 기름종개와 참쉬리를 제외한 충식성 어류의 평균 질소 안정동위원소비의 범위는 11.9~12.2‰로 비교적 좁은 범위를 나타냈다. 대상 종인 여울마자의 탄소 안정동위원소비는 서식지 내 어류 중 가장 무거운 평균 탄소 안정동위원소비(-15.2‰)를 보였고 여울마자 개체 간 탄소 안정동위원소비의 범위는 -15.5~15.0‰로 나타났다. 돌마자의 경우, 개체 간 탄소 안정동위원소비의 범위가 -17.7~-14.2‰로 조사지점 내 어류 중 가장 넓은 범위를 보였다. 조사지점 내 여울마자와 돌마자의 평균 질소 안정동위원소비는 각각 12.7‰, 12.1‰로 차이가 크지 않았다 (Fig. 2, Table S2).

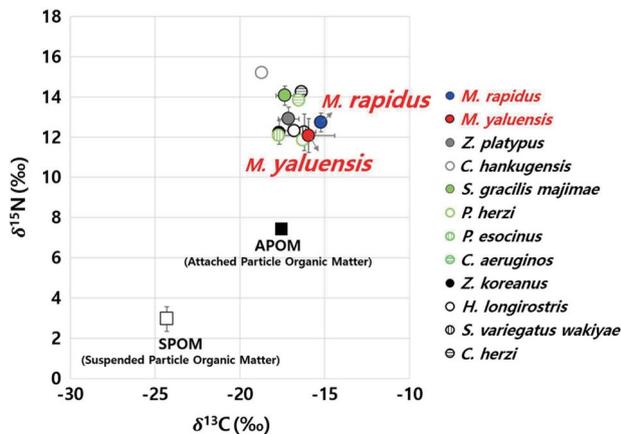


Fig. 2. Food web structure of the study site: carbon and nitrogen isotope ratio-biplot of POM, fish; square: primary producer, circle: fish.

2. 먹이원 기여율 및 영양단계

어류에 대한 입자성 유기물의 먹이원 기여율을 분석한 결과, 믹싱모델을 통해 먹이원에 대한 비율이 계산된 모든 어류들은 APOM에 대해 75% 이상의 의존도를 나타냈다. 특히 대상 종인 여울마자, 돌마자와 동일한 잡식성향의 섭식길드로 분류된 긴몰개와 피라미 모두 APOM에 대해 80% 이상의 먹이원 비율을 보였다. 종특이적인 $\delta^{15}N_{baseline}$ 을 활용하여 산정한 어류 영양단계의 경우, 충식성 어류의 평균 영양단계 범위는 2.5~4.0으로 비교적 넓은 범위를 나타냈으며 채집된 충식성 어류 총 7종 중 4종(모래무지, 참갈겨니, 참마자, 참중고기)이 2~3의 평균 영양단계 범위를 보였다. 충식성 어류인 기름종개는 영양단계 4.0을 보여 조사지점 내에서 가장 높은 영양단계를 나타냈다. 잡식성 어류의 경우 2.4~3.2의 영양단계 범위를 보였다. 특히 APOM을 기저생물로 선정하여 산정한 여울마자와 돌마자의 영양단계는 각각 2.6, 2.4의 영양단계를 보여 두 종간 상이한 값을 나타냈으며 돌마자는 조사지점의 어류 중 가장 낮은 평균 영양단계를 보였다. 믹싱모델을 활용하여 먹이원 기여율의 95% 신용구간을 영양단계 산정에 적용한 결과, 실현가능한 영양단계의 범위는 참마자와 모래무지가 각각 2.5~3.4, 2.4~3.3으로 가장 넓게 나타났다 (Table 1, Fig. 3).

3. 생태지위면적

어류의 생태지위면적을 계산한 결과, 조사지점 내 여울마자의 SEAc 값은 0.5로 타 종 대비 좁은 생태지위면적이 분석된 반면 돌마자는 6.0의 SEAc 값을 보여 조사지점 어류

Table 1. Summary of estimated source proportion (SPOM/APOM, %) and trophic level (average, 95% credibility interval) for fish in the study site.

Species	Diet proportion		Trophic level (feasible trophic level)
	SPOM (%)	APOM (%)	
<i>Microphysogobio yaluensis</i>	—	—	2.4
<i>Microphysogobio rapidus</i>	—	—	2.6
<i>Hemibarbus longirostris</i>	6.9 (3.1~75.7)	93.1 (24.3~96.9)	2.5 (2.5~3.4)
<i>Pseudogobio esocinus</i>	12.0 (5.3~72.3)	88.0 (27.7~94.7)	2.5 (2.4~3.3)
<i>Sarcocheilichthys variegatus wakiyae</i>	23.0 (1.7~40.6)	77.0 (59.4~98.3)	2.7 (2.4~3.0)
<i>Zacco koreanus</i>	24.3 (12.7~33.0)	75.7 (67.0~87.3)	2.7 (2.6~2.8)
<i>Zacco platypus</i>	18.6 (5.8~27.9)	81.4 (72.1~94.2)	2.9 (2.7~3.0)
<i>Pungtungia herzi</i>	—	—	3.0
<i>Squalidus gracilis majimae</i>	19.3 (9.5~30.6)	80.7 (69.4~90.5)	3.2 (3.1~3.4)
<i>Coreoleuciscus aeruginos</i>	—	—	3.5
<i>Coreoperca herzi</i>	—	—	3.7
<i>Cobitis hankugensis</i>	—	—	4.0

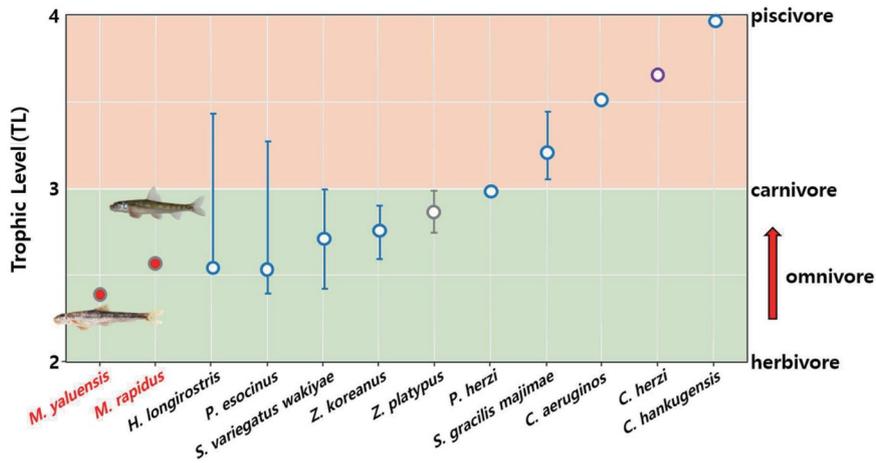


Fig. 3. Trophic level (TL) of fish based on species-specific baseline with “simmr” (Vertical lines denote 95% credibility interval); the color of symbol represents feeding guild categorized by NIER (2019), grey circle: omnivore, blue circle: insectivore, purple circle: carnivore; TL can be interpreted as follows, primary producer: 1, herbivore: 2, omnivore: 2~3, carnivore: ≥3, piscivore: ≥4.

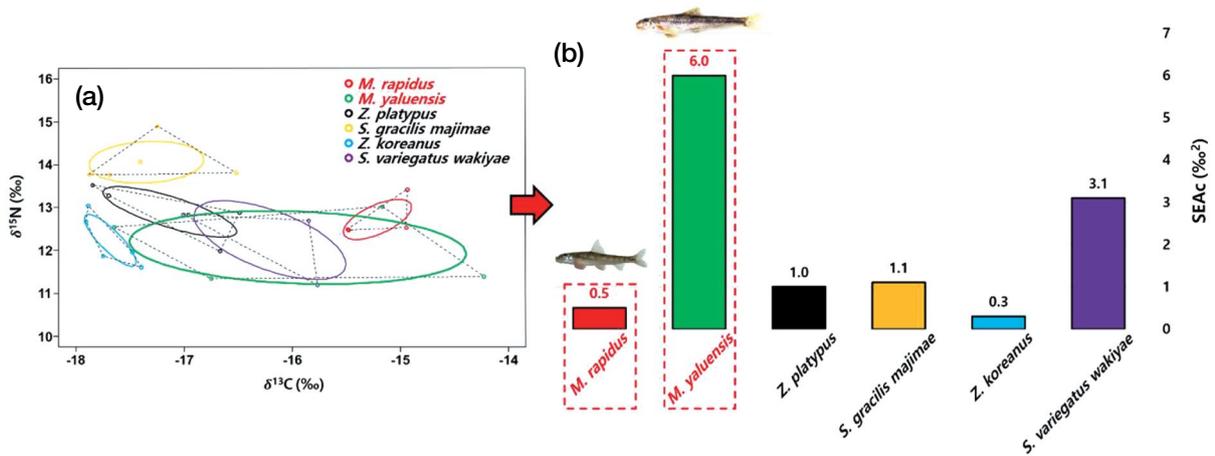


Fig. 4. (a) Isotopic niche space of fishes in the study site. The Standard Ellipse Areas with corrected sample size (SEAc) are indicated by the solid lines, and convex hulls of the total area (TA) are indicated by the dashed lines estimated by “SIBER” analysis, (b) Density plot of the SEAc for the fish in the study site estimated by “SIBER”; number on the plot: SEAc.

Table 2. Summary of pairwise percentages of directional overlap (the degree of overlap for A by B) between fishes calculated in the study site using “nicheROVER”.

A	B					
	<i>Z. koreanus</i>	<i>S. variegatus wakiyae</i>	<i>M. yaluensis</i>	<i>S. gracilis majimae</i>	<i>M. rapidus</i>	<i>Z. platypus</i>
<i>M. yaluensis</i>	6.2%	45.3%	—	0	3.7%	8.6%
<i>M. rapidus</i>	0	0	71.9%	0	—	0

중 가장 높은 값을 보였다. 국내 하천에 광범위하게 서식하는 참갈겨니와 피라미의 SEAc 값은 각각 1.0과 0.3으로 비교적 낮은 값을 보였다(Fig. 4). 여울마자는 돌마자를 제외한

어류들과 생태지위면적의 중첩을 나타내지 않았으며, 여울마자에 대한 돌마자의 중첩 정도는 71.9%가 계산되었다. 돌마자는 긴물개를 제외한 모든 어류들과 생태지위면적의 중

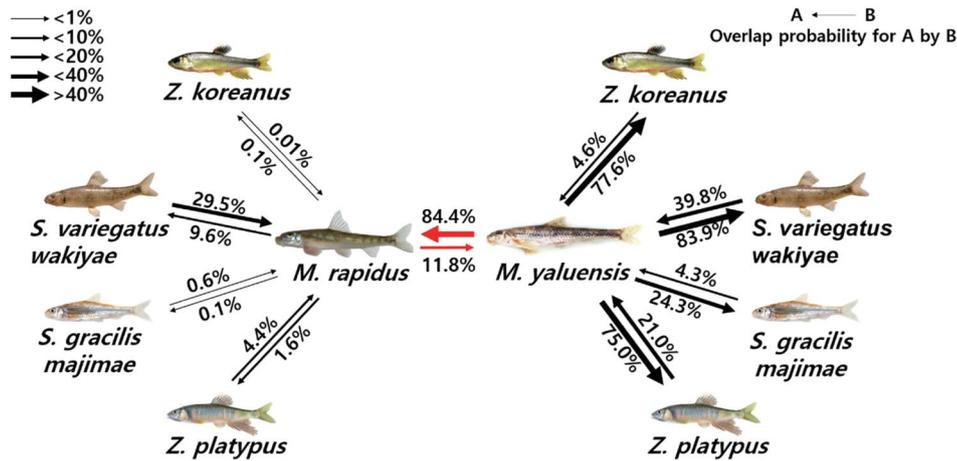


Fig. 5. Diagram of pairwise percentages of directional overlap probability between fishes in the study site using “nicheROVER”: posterior mean ($\alpha = 95\%$).

첩을 보였고 돌마자에 대한 여울마자의 중첩 정도는 3.7%로 계산되었다(Table 2). 95%의 신용구간에서 중간 생태지위면적이 중첩될 가능성을 계산한 결과, 여울마자는 돌마자에 의한 중첩가능성이 가장 높게 계산되었으며(84.4%), 생태지위면적의 중첩을 보이지 않았던 참중고기에 의해서도 29.5%의 중첩가능성을 보였다. 반면에 돌마자와 참중고기에 대한 여울마자의 중첩가능성은 10% 안팎으로 계산되었다. 돌마자는 긴물개를 제외한 타 어종에 대한 중첩가능성이 70% 이상 나타났고 참갈겨니와 피라미에 의해 중첩될 가능성이 각각 4.6%, 21.0%가 계산되었다(Fig. 5).

고찰

본 연구의 대상 종인 여울마자와 돌마자의 섭식특성에 대해 기술한 이전 문헌의 경우, 국립환경과학원(2019)은 부착조류와 저서곤충을 섭식하는 잡식성 어류로 고시하였으나 Hong (2014)과 Ji *et al.* (2021)는 여울마자의 위내용물 분석 및 다변량 군집분석을 통해 완전한 초식성 섭식경향을 확인하였으며 Byeon (2022)은 위내용물 분석을 통해 금강 지류 내 돌마자가 부착조류만 섭식하였음을 밝혀 돌마자를 초식성 어류로 평가하였다. 이와 같은 돌마자와 여울마자의 완전한 초식성향은 해당 종들의 형태적인 특징에서 비롯한다. 여울마자·돌마자가 속한 잉어과(Cyprinidae) 모래무지아과(Gobioninae) 어류는 대부분 복부가 편평하여 바닥에 붙어 있으며 머리 아래쪽에 있는 입과 다양한 형태로 발달한 이빨을 이용하여 부착조류를 주로 뜯어먹는다(Zeng and Liu, 2011). 하지만 본 연구에서 영양단계를 통해 추정된 여

울마자와 돌마자는 각각 2.6, 2.4의 잡식성향을 의미하는 영양단계를 보였다. 모래무지아과 어류는 저서에서 주로 먹이 활동을 하여 부착조류뿐만 아니라 모래나 자갈 사이에 존재하는 소형의 저서곤충도 함께 섭식하는 경우도 있다. 여울마자가 선호하는 서식지인 유속이 빠르고 오염부하가 낮은 자연형 하천의 경우 수서곤충의 출현율이 높고 기능군별로 고르게 분포하며(Jo *et al.*, 2019) 특히 납작하루살이과(Heptageniidae)와 같은 붙는 무리(Clingers)의 출현비율이 높아(Shin *et al.*, 2013) 여울마자와 돌마자가 먹이활동 중 수서곤충을 함께 섭식했을 가능성이 있을 것으로 판단된다.

여울마자와 돌마자는 형태적인 특징, 섭식특성이 매우 유사하기 때문에(Hong *et al.*, 2015) 두 종의 영양단계 간 차이가 크지 않을 것으로 예상되었다. 하지만 대상 종들의 영양단계는 여울마자가 돌마자보다 0.2 높은 영양단계를 보였는데, 이는 여울마자의 육식성 먹이원에 대한 섭식비율이 돌마자보다 20% (영양단계 0.1을 10%로 가정, Page *et al.*, 2013) 높았음을 의미한다. 본 연구가 단일조사 결과로부터 대상 종들에 대한 섭식특성의 해석을 시도하고 있다는 점에서 이와 같은 결과는 단순히 일시적으로 관찰된 차이인지 혹은 두 종의 섭식행동의 차이로부터 나타난 결과인지에 대한 판단이 어렵다. 따라서 두 종의 섭식특성에 대해 보다 깊은 이해를 위해서는 몇 차례의 추가적인 조사를 통해 장기적인 경향을 파악할 필요가 있다. 대상 종 이외 어류들의 경우 총식성 및 잡식성 어류 대부분이 잡식성향의 낮은 영양단계를 보였는데, 이는 육식성 먹이원의 집중적인 섭식이 어류들의 영양단계 증가를 유도한다는 사실을 고려하였을 때 조사지점의 먹이환경이 비교적 제한적인 것을 시사한다.

하지만 이와 같이 영양단계 추정치 결과만으로 서식지 내

생물종들의 섭식특성을 비교하는 것은 대상 생물들이 채집된 장소의 좁은 범위에서 섭식활동을 한다는 가정이 요구되고 어류의 이동성을 고려하지 않기 때문에 어류 간 섭식특성을 비교하기 위해서는 생물의 공간적인 변동을 함께 고려할 필요가 있다. 또한, 믹싱모델의 95% 신용구간을 반영하여 산출한 영양단계의 실현가능한 범위는 일부 어류가 상당히 넓은 범위를 보여 정확한 섭식특성에 대한 해석의 어려움이 있다. 예를 들어, 모래무지는 실현가능한 영양단계가 2.4~3.3의 잡식성향과 육식성향을 동시에 나타내는 결과가 분석되어 연구자 주관적인 해석으로 인해 발생할 수 있는 오류의 위험성이 존재한다. 이와 같은 경향은 대부분 채집 개체수가 적은($n=2, 3$) 어류에게서 나타났기 때문에(Table S2), 믹싱모델 분석의 신뢰성을 높이기 위해서는 적절한 분석 개체수를 확보할 필요가 있다(Phillips *et al.*, 2014). 향후 다양한 서식지에서 충분한 개체수를 확보하여 분석을 진행한다면 대상 종들의 섭식성향에 대해 보다 정확한 파악이 가능할 것으로 판단된다.

생물종의 생태지위면적은 중간 경쟁에 의해 변화한 섭식특성을 반영한 것으로, 한정된 자원에 대해 유사한 먹이원의 섭식특성을 보이는 생물군들이 존재하는 생태계 내에서는 종에 따라 다양한 섭식전략을 나타낸다(Andrades *et al.*, 2019). 조사지점 내 어류들은 APOM 먹이원에 대한 섭식비율이 높았으며 생태지위면적이 분석된 어류 중 곤돌개를 제외한 모든 어류가 잡식성향의 영양단계를 보여 섭식하는 먹이생물이 유사할 것으로 판단된다. 특히 일부 어류 종들의 생태지위면적 간 높은 수준의 중첩가능성을 보였기 때문에, 조사지점은 한정된 자원에 대해 유사한 먹이원을 섭식하여 일부 어류 종간 경쟁 수준이 높은 환경일 것으로 예상된다. 이와 같은 환경에서 돌마자는 채집된 어류 중 가장 낮은 영양단계를 보인 동시에 가로폭(탄소 안정동위원소)이 넓고 세로폭(질소 안정동위원소)이 좁은 범위($\Delta\delta^{15}\text{N}=1.7$)의 가장 넓은 생태지위면적(Fig. 4)을 나타냈다. 돌마자는 타 어종의 섭식특성에 영향을 미칠 가능성이 비교적 높았는데, 이는 영양단계가 유사한 먹이원을 넓은 범위로 섭식하여 종간 경쟁에 대응한 일반화된 섭식전략을 나타낸 것으로 사료된다(Kartzinel *et al.*, 2015).

피라미속(Genus *Zacco*) 어류인 참갈겨니와 피라미는 국내 하천에 광범위하게 분포하며(Choi and Kim, 2004; Lee *et al.*, 2017) 하천생태계의 어류 군집에서 대표적인 우점종에 해당하지만(Lee *et al.*, 2014; Wang *et al.*, 2021), 돌마자와 비대칭적인 생태지위면적 중첩가능성 및 비교적 좁은 생태지위면적을 보였다. 종간 먹이경쟁에 있어 피라미는 타 어종과 중첩되지 않은 먹이원을 제한적으로 섭식하는 경향을 보였기 때문에(Katano *et al.*, 2001), 본 연구에서 관찰된 참갈

겨니와 피라미의 좁은 생태지위면적은 서식지 내 타 어종과의 먹이원 중첩 수준을 최소화한 결과로서 해석이 가능하다. 대상 종인 여울마자는 타 어종에 비해 매우 좁은 생태지위면적과 함께 돌마자 대비 육식성 먹이원에 대한 높은 비율의 섭식 정도를 보여 종간 자원 경쟁에 대한 전문화된 섭식전략을 나타낸 것으로 사료된다. 하지만 여울마자는 참중고기, 돌마자와 비대칭적인 섭식관계를 나타내어 해당 종들의 섭식활동이 여울마자의 섭식활동에 영향을 미칠 가능성이 크지만 여울마자가 해당 종들의 섭식활동에 영향을 미칠 가능성이 적은 것으로 보였다. 채집된 어류 대부분이 잡식성향의 영양단계를 나타내 여울마자와 유사한 먹이를 섭식할 것으로 예상되는데, 이와 같은 환경에서 여울마자의 좁은 생태지위면적과 일부 어류 종과의 비대칭적인 지위면적의 중첩은 조사지점 내 여울마자의 제한적인 섭식특성을 시사한다.

특정 서식지 내 종의 섭식특성은 해당 생태계에서 생물들의 적응력 및 취약성과 직접적인 관계가 있다(Chipps and Garvey, 2007). 본 연구는 여울마자와 돌마자의 출현 서식지에서 안정동위원소를 활용하여 서식지에서 출현한 어류 종의 영양단계·생태지위면적의 중첩 수준을 분석한 결과를 바탕으로 종간 경쟁 수준을 평가하고 여울마자 및 돌마자의 섭식특성을 해석하였다. 높은 종간 경쟁 수준을 보인 서식지 내 여울마자와 돌마자는 상이한 섭식특성을 보였는데, 돌마자는 일반화된 섭식특성이 관찰된 반면 좁은 범위에서 집중적인 먹이활동을 하는 것으로 관찰된 여울마자는 전문화된 섭식특성을 보이는 동시에 섭식활동에 있어 타 어종에 의한 영향이 큰 것으로 분석되었다.

멸종위기종의 경우 분포가 제한되고 개체수 확보가 어려워 본 조사에서도 서식이 확인된 지점에서 1회 조사를 실시하였고 분석에 사용된 개체수도 제한적이었다. 따라서 시간적인 경과에 따른 추가적인 조사를 통해 환경변화에 대한 여울마자와 돌마자의 생태지위면적 변화 경향을 관찰하여 대상 종들의 적응능력을 섭식특성에 근거하여 평가할 필요가 있다. 여울마자의 훼손 원인으로 서식지 구조의 변화 및 오염원에 의한 영향이 주요한 것으로 밝혀졌기 때문에(Yoon *et al.*, 2023), 추가조사 결과를 바탕으로 여울마자 서식지의 수질특성과 생물학적 요인 간 관계의 분석이 이루어진다면 여울마자의 분포에 있어 물리, 이화학적 요인뿐만 아니라 생물학적인 요인을 함께 고려한 포괄적인 평가가 가능할 것으로 기대된다. 본 연구는 생물학적인 상호작용에 대해 종간 경쟁의 관점에서 분석 종의 섭식생태의 이해를 시도하였지만, 잡식성 어류의 경우 종내 개체 간 발생하는 경쟁 역시 생태지위를 결정하는 중요한 요인으로서(Bolnick *et al.*, 2003) 대상 종에 대한 종내 경쟁(intraspecific competition)의 정량적인 추가 분석이 필요할 것으로 판단된다. 차후 이상의 보완을

통해 서식지의 복합적인 요인과 여울마자 개체수 감소 현상 간 인과성에 대한 유추가 가능할 것으로 예상되며 여울마자의 보존 및 복원 관리 방안 수립의 중요자료로 활용될 수 있을 것으로 기대한다.

적 요

중상류 유수 하천의 경우, 빠른 유속의 특징을 가지기 때문에 서식지 내 어류의 섭식활동은 저서에서 집중적으로 일어나고 이에 따라 어류 중간 자원 경쟁이 발생하는데 이와 같은 생물 간 상호작용은 경쟁적 열위에 해당하는 종의 배제라는 결과를 유도한다. 따라서 멸종위기종인 여울마자의 개체수 감소 현상의 이해를 위해서는 서식지 특이적인 생물학적 요인에 의한 영향을 고려할 필요가 있다. 본 연구는 여울마자 및 여울마자와 생태적으로 유사한 종인 돌마자가 공통으로 출현하는 지점을 대상으로 먹이망 구성생물들을 채집하였고 안정동위원소를 기반으로 하여 서식지 내 어류들의 섭식특성 및 경쟁 정도를 정량적으로 분석하였다. 대상 종들의 영양단계의 경우, 여울마자와 돌마자 각각 2.6, 2.4가 분석되어 잡식성향의 영양단계를 보였으나 타 어류에 비해 상대적으로 초식성향이 강한 것으로 나타났다. 안정동위원소 믹싱모델 분석 결과, 모든 어류가 부착성 유기물 기원의 먹이원에 대한 의존도가 높았고 생태지위면적의 경우 돌마자는 가장 넓은 생태지위면적을 보이는 동시에 타 어류 종의 생태지위면적에 중첩되는 정도가 가장 높게 나타났다. 반면, 여울마자는 조사지점에서 생태지위면적이 매우 좁은 것으로 분석되었다. 또한 돌마자, 참중고기와 비대칭적인 생태지위면적의 중첩 정도를 보여 해당 종들에 의해 섭식활동이 제한되는 것으로 분석되었다. 본 연구는 여울마자의 제한적인 분포를 결정하는 주요 요인들 중 생물학적 요인에 초점을 두어 평가한 것으로 향후 본 연구의 결과를 활용하여 서식지의 이화학적 요인과의 복합적인 분석이 수행된다면 여울마자의 개체수 감소에 대한 유추가 가능할 것으로 예상되며 여울마자의 보존 및 복원관리 방안 수립의 중요자료로 활용될 수 있을 것으로 예상된다.

저자 정보 이대희(경희대학교 석사과정), 오혜지(경희대학교 박사수료), 최예림(경희대학교 박사과정), 홍근혁(경희대학교 석사과정), 백인혁(국립생태원 멸종위기종복원센터 전문위원), 김근식(국립생태원 멸종위기종복원센터 선임연구원), 장광현(경희대학교 교수), 윤주덕(국립생태원 멸종위기종복원센터 책임연구원)

저자 기여도 개념설정: 이대희, 장광현, 윤주덕, 방법론: 이

대희, 오혜지, 장광현, 윤주덕, 현장조사 및 자료수집: 이대희, 오혜지, 최예림, 홍근혁, 백인혁, 장광현, 윤주덕, 자료 관리: 이대희, 최예림, 분석: 이대희, 원고 초안작성: 이대희, 원고 교정: 이대희, 오혜지, 장광현, 윤주덕, 김근식, 원고 편집: 이대희, 오혜지, 장광현, 과제관리: 윤주덕, 김근식, 백인혁, 연구비 수주: 윤주덕

이해관계 이 논문에는 이해관계 충돌의 여지가 없습니다.

연구비 본 논문은 환경부의 지원을 받아 수행되었습니다 (NIE-고유연구-2023-47, NIE-B-2024-47).

REFERENCES

- Andrades, R., J.M. Andrade, P.S. Jesus-Junior, R.M. Macieira, A.F. Bernardino and T. Giarrizzo. 2019. Multiple niche-based analyses reveal the dual life of an intertidal reef predator. *Marine Ecology Progress Series* **624**: 131-141.
- Bolnick, D.I., R. Svanbäck, J.A. Fordyce, L.H. Yang, J.M. Davis, C.D. Hulsey and M.L. Forister. 2003. The ecology of individuals: incidence and implications of individual specialization. *The American Naturalist* **161**: 1-28.
- Bolnick, D.I., T. Ingram, W.E. Stutz, L.K. Snowberg, O.L. Lau and J.S. Paull. 2010. Ecological release from interspecific competition leads to decoupled changes in population and individual niche width. *Proceedings Biological Sciences/The Royal Society* **277**: 1789-1797.
- Byeon, H.K. 2022. Ecological Characteristics of *Microphysogobio yaluensis* in Dugye Stream of Geum River Basin, Korea. *Korean Journal of Ecology and Environment* **36**(4): 381-389.
- Carscallen, W.M.A., K. Vandenberg, J.M. Lawson, N.D. Martinez and T.N. Romanuk. 2012. Estimating trophic position in marine and estuarine food webs. *Ecosphere* **3**(3): 1-20.
- Chae, B.S. and H.J. Yang. 1999. *Microphysogobio rapidus*, a new species of gudgeon (Cyprinidae, Pisces) from Korea, with revised key to species of the genus *Microphysogobio* from Korea. *Korean Journal of Biological Sciences* **3**: 17-21.
- Chippis, S.R. and J.E. Garvey. 2007. Assessment of food habits and feeding patterns, p. 473-514. In: Analysis and interpretation of freshwater fisheries data (Christopher, S.G. and L.B. Michael, des.). American Fisheries Society, Bethesda, Maryland.
- Choi, B.H. and K.H. Shin. 2018. Applications and prospects of stable isotope in aquatic ecology and environmental study. *Korean Journal of Ecology and Environment* **51**(1): 96-104.
- Choi, J.S. and J.K. Kim. 2004. Ichthyofauna and Fish Community in Hongcheon river, Korea. *Korean Journal of Environmental Biology* **22**(3): 446-455.

- Eurich, J.G., M.I. McCormick and G.P. Jones. 2018. Direct and indirect effects of interspecific competition in a highly partitioned guild of reef fishes. *Ecosphere* **9**(8): e02389.
- Gause, G.F. 1934. Experimental analysis of Vito Volterra's mathematical theory of the struggle for existence. *Science* **79**: 16-17.
- Gilliam, J.F., D.F. Fraser and A.M. Sabat. 1989. Strong effects of foraging minnows on a stream benthic invertebrate community. *Ecology* **70**(2): 445-452.
- Hayden, B., M.L.D. Palomares, B.E. Smith and J.H. Poelen. 2019. Biological and environmental drivers of trophic ecology in marine fishes - a global perspective. *Scientific Reports* **9**(1): 11415.
- Hong, Y.K. 2014. Studies of the conservation biology of an endangered freshwater fish, *Microphysogobio rapidus* (Cyprinidae). Doctoral thesis, Soonchunhyang University, Asan-si. 163pp (in Korean).
- Hong, Y.K., M.H. Ko, S.Y. Park and I.C. Bang. 2015. Egg Development and Early Life History of the Endangered Species, *Microphysogobio rapidus* (Cyprinidae). *The Ichthyological Society of Korea* **27**(2): 86-94.
- Jackson, A.L., R. Inger, A.C. Parnell and S. Bearhop. 2011. Comparing isotopic niche widths among and within communities: SIBER-stable isotope Bayesian ellipses in R. *Journal of Animal Ecology* **80**: 595-602.
- Jackson, A.L., A.C. Parnell and M.A. Jackson. 2017. Package 'SIBER'. Stable Isotope Bayesian Ellipses in R. R package version 2.1.9. <https://cran.r-project.org/package=SIBER>
- Ji, C.W., D.S. Lee, D.Y. Lee, Y.S. Park and I.S. Kwak. 2021. Analysis of Food Resources of 20 Endangered Fishes in Freshwater Ecosystems of South Korea using Non-metric Multidimensional Scaling and Network Analysis. *Korean Journal of Ecology and Environment* **54**(2): 130-141.
- Jo, M.H., M.J. Lee, E.W. Seo and J.E. Lee. 2019. Analysis of functional habitat groups and community stability of benthic macroinvertebrates before and after Yeongju Dam completion in Korea. *Korean Journal of Environmental Biology* **37**(4): 664-671.
- Kartzinel, T.R., P.A. Chen, T.C. Coverdale, D.L. Erickson, W.J. Kress, M.L. Kuzmina, D.I. Rubenstein, W. Wang and R.M. Pringle. 2015. DNA Metabarcoding illuminates dietary niche partitioning by African large herbivores. *Proceedings of the National Academy of Sciences* **112**(26): 8019-8024.
- Katano, O., S.I. Abe, K. Matsuzaki and K. Iguchi. 2001. Interspecific interactions between ayu, *Plecoglossus altivelis*, and pale chub, *Zacco platypus*, in artificial streams. *Fisheries Science* **66**(3): 452-459.
- Kim, J.G., D.H. Kim and D.S. Reu. 2009. A Study on the Reproductive Cells in Testes of *Microphysogobio yaluensis*. *Korean Society of Microscopy* **39**(3): 245-252.
- Kim, M.S., J.Y. Hwang, B.K. Kim, H.S. Cho, S.J. Youn, S.Y. Hong, W.S. Lee, O.S. Kwon and J.M. Kim. 2014. Determination of the Origin of Particulate Organic Matter at the Lake Paldang using Stable Isotope Ratios ($\delta^{13}\text{C}$, $\delta^{15}\text{N}$). *Korean Journal of Ecology and Environment* **47**(2): 127-134.
- Layman, C.A., D.A. Arrington, C.G. Montana and D.M. Post. 2007. Can stable isotope ratios provide for community-wide measures of trophic structure? *Ecology* **88**: 42-48.
- Lee, S.H., H.G. Lee, S.J. Park, S.H. Lee and J.K. Choi. 2014. Distribution Characteristics of Fish Community to Stream Order in Namhan River Watershed. *Korean Journal of Ecology and Environment* **47**(s1): 100-115.
- Lee, S.H., H.G. Jeong, H.S. Shin, Y. Shin, S.W. Lee and J.K. Lee. 2017. Comparison on Ecological Index Characteristics between *Zacco platypus* and *Zacco koreanus* by Stream order in Korea. *Korean Journal of Ecology and Environment* **50**(4): 403-410.
- Lynch, M. and W. Gabriel. 1987. Environmental tolerance. *The American Naturalist* **129**(2): 283-303.
- NIBR (National Institute of Biological Resources). 2019. Red Data Book of Republic of Korea (Second edition) Volume 3. Freshwater Fishes. Incheon.
- NIER (National Institute of Environmental Research). 2019. Survey and evaluation method for river and stream ecosystem health assessment. National Institute of Environmental Research, Incheon. 313pp (in Korean).
- Page, H.M., A.J. Brooks, M. Kulbicki, R. Galzin, R.J. Miller, D.C. Reed, R.J. Schmitt, S.J. Holbrook and C. Koenigs. 2013. Stable Isotope Reveal Trophic Relationships and Diet of Consumers in Temperate Kelp Forest and Coral Reef Ecosystems. *Oceanography* **26**(3): 180-189.
- Parnell, A.C., D.L. Phillips, S. Bearhop, B.X. Semmens, E.J. Ward, J.W. Moore, A.L. Jackson, J. Grey, D.J. Kelly and R. Inger. 2013. Bayesian stable isotope mixing models. *Environmetrics* **24**: 387-399.
- Pelage, L., L.F. Flávia, N.E. Leandro, L.L. François, A. Bertrand, S.L. Alex and F. Thierry. 2022. Competing with each other: Fish isotopic niche in two resource availability contexts. *Frontiers in Marine Science* **9**: 975091.
- Peterson, B.J. and B. Fry. 1987. Stable isotopes in ecosystem studies. *Annual Review of Ecology and Systematics* **18**: 293-320.
- Phillips, D.L. 2012. Converting isotope values to diet composition: the use of mixing models. *Journal of Mammalogy* **93**: 342-352.
- Phillips, D.L., I. Richard, S. Bearhop, A.L. Jackson, J.W. Moore, A.C. Parnell, B.X. Semmens and E.J. Ward. 2014. Best practices for use of stable isotope mixing models in food-web studies. *Canadian Journal of Zoology* **92**: 823-835.
- Post, D.M. 2002. Using stable isotopes to estimate trophic position: models, methods, and assumptions. *Ecology* **83**(3): 703-718.
- Pyke, G.H., R. Pulliam and E.L. Charnov. 1977. Optimal foraging: a selective review of theory and tests. *The Quarterly Review of Biology* **52**(2): 137-154.
- Shin, S.M., I.K. Choi, E.W. Seo and J.E. Lee. 2013. Community

- Structure of Benthic Macroinvertebrate in the Urban and Nature Stream. *The Korean Environmental Science Society* **22**(12): 1551-1559.
- Swanson, H.K., M. Lysy, M. Power, A.D. Stasko, J.D. Johnson and J.D. Reist. 2015. A new probabilistic method for quantifying *n*-dimensional ecological niches and niche overlap. *Ecology* **96**: 318-324.
- Šaulys, V., O. Survilė and R. Stankevičienė. 2019. An assessment of self-purification in streams. *Water* **12**: 87.
- Sexton, J.P., J. Montiel, J.E. Shay, M.R. Stephens and R.A. Slatyer. 2017. Evolution of ecological Niche breadth. *Annual Review Ecology, Evolution and Systematics* **48**: 183-206.
- Tilman, D. 1987. The importance of the mechanisms of interspecific competition. *The American Naturalist* **129**: 769-774.
- Wang, J.H., W.S. Choi, J.K. Choi and H.G. Lee. 2021. Current status of fish fauna and *Zacco platypus* population in the Cheonggyecheon stream. *Korean Journal of Ecology and Environment* **39**(1): 68-80.
- Werner, E.E. and D.J. Hall. 1979. Foraging efficiency and habitat switching in competing sunfishes. *Ecology* **60**: 256-264.
- Won, E.J., H.E. Cho, D.K. Kim, J.W. Choi, K.G. An and K.H. Shin. 2023. Interpretation of Trophic Positions Using the CSIA Approach: Focusing on the Invasive Fish Lake Sky-gazer *Chanodichthys erythropterus*. *Korean Journal of Ecology and Environment* **56**(3): 218-228.
- Yoon, J.D., K.S. Kim, C.D. Park, D.W. Kang, H.H. Lee, C.H. Lim and N.S. Kim. 2023. Identifying Degradation Causes of Endangered Freshwater Fish, *Microphysogobio rapidus* Using Habitat- Environmental Characteristics. *Korean Journal of Ecology and Environment* **56**(3): 229-241.
- Zaret, T.M. and A.S. Rand. 1971. Competition in tropical stream fishes: support for the competitive exclusion principle. *Ecology* **52**: 336-342.
- Zeng, Y. and H. LIU. 2011. The evolution of pharyngeal bones and teeth in Gobioninae fishes (Teleostei: Cyprinidae) analyzed with phylogenetic comparative methods. *Hydrobiologia* **664**: 183-197.

Table S1. fish species collected in the study site and details of the total length (TL), total weight (TW), trophic guild, tolerance guild, stable isotope analysis utilized based on species sample size; Individual size (average, standard deviation).

Species	n	Individual size		Ecological characteristics		Stable isotope analysis		
		TL (mm)	TW (g)	Trophic guild	Tolerance guild	Contribution of source (n ≥ 2)	Trophic level (n ≥ 1)	Isotopic niche space (n ≥ 3)
<i>Microphysogobio rapidus</i>	4	87.5 (5.0)	6.3 (1.0)	O	SS	o	o	o
<i>Microphysogobio yaluensis</i>	4	64.3 (16.4)	2.4 (1.8)	O	IS	o	o	o
<i>Zacco platypus</i>	10	98.9 (8.0)	7.7 (2.0)	O	IS	o	o	o
<i>Cobitis hankugensis</i>	1	114.0	7.9	I	IS	–	o	–
<i>Squalidus gracilis majimae</i>	7	73.6 (3.6)	3.3 (0.5)	I	IS	o	o	o
<i>Pungtungia herzi</i>	1	51.0	1.1	I	IS	–	o	–
<i>Pseudogobio esocinus</i>	2	66.0 (1.4)	1.8 (0)	I	IS	o	o	–
<i>Coreoleuciscus aeruginos</i>	1	110.0	9.9	I	SS	–	o	–
<i>Zacco koreanus</i>	5	82.0 (10.8)	4.7 (1.9)	I	SS	o	o	o
<i>Hemibarbus longirostris</i>	2	75.0 (7.1)	3.0 (1.1)	I	IS	o	o	–
<i>Sarcocheilichthys variegatus wakiyae</i>	3	78.7 (5.1)	5.5 (0.7)	I	IS	o	o	o
<i>Coreoperca herzi</i>	1	162.0	53.3	C	SS	–	o	–

O: Omnivore, I: Insectivore, C: Carnivore, IS: Intermediate Species, SS: Sensitive Species

Table S2. Summary of carbon and nitrogen isotope ratio of POM, fish samples (average, standard deviation) in the study site.

	Sample	n	Total length (mm)	$\delta^{13}\text{C}$	$\delta^{15}\text{N}$
Fish	<i>Microphysogobio rapidus</i>	4	87.5 (5.0)	–15.2 (0.3)	12.7 (0.5)
	<i>Microphysogobio yaluensis</i>	4	64.3 (16.4)	–16.0 (1.5)	12.1 (0.8)
	<i>Zacco platypus</i>	5	102.6 (9.6)	–17.1 (0.6)	12.9 (0.6)
	<i>Cobitis hankugensis</i>	1	114.0	–18.7	15.2
	<i>Squalidus gracilis majimae</i>	5	75.2 (2.7)	–17.4 (0.5)	14.1 (0.5)
	<i>Pungtungia herzi</i>	1	51.0	–16.3	11.9
	<i>Pseudogobio esocinus</i>	2	66.0 (1.4)	–17.7 (0.2)	12.1 (0.04)
	<i>Coreoleuciscus aeruginos</i>	1	110.0	–16.5	13.9
	<i>Zacco koreanus</i>	5	82.0 (10.8)	–17.7 (0.2)	12.2 (0.6)
	<i>Hemibarbus longirostris</i>	2	75.0 (7.1)	–16.8 (0.6)	12.3 (0.2)
	<i>Sarcocheilichthys variegatus wakiyae</i>	3	78.7 (5.1)	–16.2 (0.7)	12.2 (0.9)
	<i>Coreoperca herzi</i>	1	162.0	–16.4	14.3
POM	SPOM	3	–	–24.3 (0.1)	3.0 (0.8)
	APOM	3	–	–17.6 (0.2)	7.4 (0.1)

Note

습지생태계 평가를 위한 동물플랑크톤 지수 적용 방안 고찰

김현우*

순천대학교 환경교육학과

Consideration on Application of Zooplankton Index for Wetland Ecosystem Evaluation. Hyun-Woo Kim* (0000-0003-3898-5864) (*Department of Environmental Education, Suncheon National University, Suncheon 57922, Republic of Korea*)

Abstract This note summarizes the application of zooplankton indices for water quality management and estimation based on main research topics of articles focusing on wetland ecosystems, topics that are remained poorly investigated in S. Korea. The aquatic ecosystem-based consists of indices that respond to different target environmental factors, including environmental disturbance. Among the major indicator species and biota, we reviewed that management strategy for the wetland environment has to be focused more on small-sizes, in terms of zooplankton ecology and indices. The ecology of zooplankton communities in freshwater ecosystem has been the focus of an increasing number of studies since 2019, and considerable progress has been made in understanding the major mechanisms involved in regulating their abundance, diversity and spatio-temporal patterns. Even though studies on the freshwater ecosystem in Korea have a long history, a few of studies on zooplankton biota were conducted at wetlands. We suggested the candidate zooplankton indices proposed by the U.S. EPA and EU to suit Korean conditions. In the step of selecting metrics, the best available metrics are species-related variables, such as composition and abundance, as well as richness and diversity. Overall, in spite of several limitations, the development of a plankton-based multivariate assessment method in Korea wetlands is possible using mostly field research data. Later, it could be improved based on qualitative metrics on zooplankton, and with the emergence of further survey data. The present information can be used as basic information for researchers who are dealing with aquatic environments and its interaction with organisms.

Key words: zooplankton, rotifer, freshwater, metrics, wetland, multivariate assessment

서 론

수생태계 평가와 관리에 있어서 수질의 중요성은 높으나, 최근 물 환경관리의 기초는 수질 평가 중심에서 다양한 생물

인자를 기반으로 한 수생태계 건강성 평가 방법으로 전환되는 추세이다. Davis and Simon (1995)에 의해서 수환경 건강성 개념이 제시된 이후 수 생물들의 현존량, 종 그리고 지수 등을 포함하는 생태계 평가 방법을 지향하고 있다. 수환경 건강성을 통합적으로 파악하고 보전 가치가 높은 생태계 유지 및 훼손된 서식처 관리를 위해서 생물학적 요인에 대한 지표 항목들을 선별하고 지수화하는 시도가 진행되어져 왔다(Nichols *et al.*, 2000; Cardoso *et al.*, 2005). 하천 및 호수

Manuscript received 23 March 2024, revised 28 March 2024,
revision accepted 28 March 2024
* Corresponding author: Tel: +82-61-750-3384, Fax: +82-61-750-3308
E-mail: hwkim@suncheon.ac.kr/hwkim827@gmail.com

생태계에서의 건강성 지표 항목 선정평가는 유럽의 20개국(WFD: Water Framework Directive) 및 북미에서 수행되어 오고 있다(U.S. EPA, 1998). 지표평가 항목의 세부 분야는 상이하나 하천생태계의 경우에는 북미에서 그리고 호수생태계는 유럽지역에서 전반적으로 효율성이 높은 평가방법으로 향상되어 왔다(U.S. EPA, 1998; Barbour *et al.*, 1999). 이에 비해 상대적으로 소형 인공 저수지 및 습지생태계에 대한 수환경 및 건강성 평가는 미흡한 편으로 지표 항목과 분야도 제한적인 것으로 파악되고 있다. 국내의 경우 농업용 저수지형 습지 환경에서 수질 모니터링이 실시되고 있는 비율은 약 20% 이하이며, 관리 소홀 등으로 인한 노후화와 주요 생물인자 중 부유 생물상에 대한 지속적인 모니터링은 미흡한 실정이다(Lee *et al.*, 2007). 일반적으로 농업용 용수 및 수자원 공급 용도로 조성된 대부분의 인공호 및 저수지형 습지생태계는 물리적 훼손, 수문학적 요인 조절 등 인위적 교란 증가로 인하여 수질평가 뿐만 아니라 수중 생물상을 포함하는 통합적 수환경 평가 방법이 시급히 필요하다.

다양한 수환경 평가를 위한 생물학적 지표 항목으로 어류, 대형무척추동물 및 부착조류 이외에 서식처 유형별 부유 생물상에 대한 중요성이 높아지고 있으며, 특히 동물플랑크톤은 환경변화에 신속하게 대응하며 우점하고, 다양도 및 내성 정도 등의 변화를 나타내어 담수 환경 상태를 잘 대변하는 생물지표로 고려되어 왔다(Christoferson *et al.*, 1993). 담수 환경의 서식 유형 및 특성에 따라 다양한 형태의 동물플랑크톤이 존재하며 이들의 중요한 역할로는 생태계 내 에너지 전달과 먹이망 간의 연결을 들 수 있다(Baines and Pace, 1991). 국외에서는 동물플랑크톤은 정수생태계 먹이사슬을 통한 물질순환의 기능을 결정하는 구조적 부분과 외부 환경의 영향을 종합적으로 평가할 수 있는 주요 생물상으로 활용성이 높은 것으로 평가되어져 왔다(U.S. EPA, 2017). 담수 환경의 영양 상태를 파악할 수 있는 동물플랑크톤 지표종 발굴에 관한 연구, 군집조성과 수질요인 간의 상관성 등 구조 및 기능적인 평가로, 동물플랑크톤은 수생태계 연구 분야에 있어 국내에서 2000년대 이후 중요한 생물상으로 여겨져 왔다. 동물플랑크톤 그룹은 종 특이적 특성과 여과섭식 능력으로 담수 환경의 유기물 순환체계 평가 및 생물-화학-물리적 환경 교란 등을 판별하는 종합적 생물인자로 여겨진다. 현재 파악된 총 동물플랑크톤 종수의 약 10% 이상이 국내에서 출현하는 것으로 보고되었으며(Kim *et al.*, 2018), 아울러 국내에서도 호수생태계에서 동물플랑크톤을 활용한 지수 적용성에 대해 제안된 바 있다(Choi *et al.*, 2023). 동물플랑크톤은 분류군에 따라 상이한 변화를(개체 크기, 생체량, 개체수, 군집구조 등) 나타내며, 비생물적 요인과 생물학적 상호작용에 영향을 받아 교란이 발생했을 경우 군집의 구조가 변화한다.

이러한 군집 조성의 변화 활용과 수생태계 유형에 적합한 지수 적용 등은 효과적인 담수생태계 관리를 위한 필수적인 평가 항목이라 할 수 있다.

국내 호소는 수문학적 요인 등에 의해 계절별로 동물플랑크톤의 군집 조성이 변화할 가능성이 높으며, 이러한 시스템 중 습지 환경은 체류시간이 길고 폐쇄적인 특성을 가지며 생산자에서 기원하거나 외부로부터 유입되는 유기물 등이 생물 먹이망을 통해서 순환되는 특징을 가지고 있다. 특히 인위적으로 조성된 정수생태계의 대부분을 차지하고 있는 소형 저수지와 습지생태계 등에서의 동물플랑크톤에 대한 지수 적용 평가 관련 연구는 미흡한 실정이다(Oh *et al.*, 2021). 따라서, 본 연구는 국내·외 담수생태계에서 동물플랑크톤 관련 연구 논문 및 수생태계 건강성 평가지표 내용을 검토하고 이를 종합하여 습지생태계에서 동물플랑크톤을 활용한 지수 항목들을 도출하기 위한 기초 정보를 제시하고자 한다.

국내·외 동물플랑크톤 연구 문헌 검토

Web of Science (WOS) 검색을 통해 최근 약 30여 년간(1989~2023) 국외 유수 저널에 게재된(약 25 저널) 총 7611 편의 동물플랑크톤 관련 내용을 분석한 결과 연구 논문의 주제, 내용 및 키워드 빈도수 네트워크 분석을 통해서 두 그룹(A, B 그룹)으로 구분되어졌다. 주제어 대상 중에서는 동물플랑크톤과 식물플랑크톤, 어류 등이 주요 단어로 분석되었다(Fig. 1). 서식처 유형별로는 호수에서 동물플랑크톤 연구가 가장 활발히 진행되고 있음을 확인할 수 있었고, 이에 비해 강과 습지생태계 관련 주제어는 네트워크 외곽에 위치하여 출현비율이 현저히 낮은 것으로 분석되었다. A 그룹은 동물플랑크톤의 군집, 다양성, 생물량, 생산성, 지표종, 군집구조, 천이, 종 풍부도 등의 주제어가 네트워크 매개중심성이 높은 중심 주제어로 분석되었다. B 그룹은 동·식물플랑크톤 그리고 어류를 대상으로 부영양화, 기후변화, 플랑크톤 번성, 동위원소, 탄소, 물벼룩, 먹이망, 먹이질, 생물조절 등의 연구 주제어로 구성되어 있었으며 매개중심성은 식물플랑크톤과 어류와 같은 주제어가 높은 것으로 평가되었다(Fig. 1).

국내 수환경 관련 학술지 중 지난 1970년 이후부터 2023년까지 세 종류의 학술지를(생태와환경: 1869편, 생태학회지: 503편, 습지학회지: 728편) 대상으로 평가해 본 결과 동물플랑크톤 관련 연구는 게재된 총 3,100편의 논문 중 약 3.3% 비율을(101편) 나타낸 것으로 분석되었다(Fig. 2A). 이 중 습지생태계 관련 동물플랑크톤 연구 논문은 약 0.8%로 매우 제한적인 것으로 평가되었다. 국내 수환경에 대해 다양한 연구범위를 포괄하는 학술지인 생태와환경(구 한국육

Table 1. The major biological indicators used for aquatic ecosystems health assessments in EU, USA, and S. Korea.

Biological indicators	Examples of main parameters and multi-metric index	Ecosystem			
		River	Lake	Coastal	Wetland
Phytoplankton	Phytoplankton assemblage, Algal toxin, Microcystin, Plankton O/E (Observed over Expected) indices based on the 259 plankton taxa	●	●, ◆	●	◆
Zooplankton	Abundance, Taxonomic richness, Trophic guild, Three taxonomic (cladoceran, copepod, and rotifer)	-	◆	-	-
Fish	Variety and abundance of fish species, Taxonomic richness, Taxonomic composition, Pollution tolerance, Habitat and feeding groups, Spawning habits, The number and percent of taxa that are migratory and the percent of taxa that are native	●, ◆, ◎	●, ◆	◆, ◎	-
Periphyton	Two Rapid Bioassessment: Species composition and/or biomass, Periphyton biomass and coarse-level taxonomic composition (e.g., diatoms, filamentous green, blue-green algae), Metrics of Biotic Integrity (e.g., Species richness, Total number of genera, Total number of divisions, Shannon diversity etc.)	●, ◆, ◎	●	◎	-
Benthic macroinvertebrates	Taxonomic richness, Taxonomic composition, Taxonomic diversity, Feeding groups (e.g., filtering, scraping, grazing or predation), Habits/habitats, Pollution tolerance, Macroinvertebrate Observed/Expected (O/E) Ratio of Taxa loss	●, ◆, ◎	◆	●, ◆, ◎	-
Vegetation	Species composition (species identity, presence, and abundance), Vegetation structure (horizontal and vertical), Vegetation Multi-Metric Index (VMMI), Floristic Quality (FQ) indices	◎	●, ◆	◎	◆

●: EU (Water Frame Directive), ◆: USA (National Aquatic Survey), ◎: KOREA (Ministry of Environment), Modified data by Choi *et al.* (2023), U.S. EPA (2006, 2008~2009, 2011, 2012, 2015), Barbour *et al.* (1999).

영양단계, 에너지 순환, 군집지수, 동물플랑크톤 종 구성, 생체량 등 다양한 요인 및 결과를 반영한 지표선정이 우선시되어야 한다. 이러한 지표선정 과정에서 동물플랑크톤 결과들의 비교 검증 자료를 활용한 환경 변수 간의 공통적인 항목 등을 추출하여야 한다. 최근 들어, 이러한 차이점을 고려한 종합적인 메트릭 지수평가 방안 등이 제안되고 있다(Choi *et al.*, 2023).

동물플랑크톤 지수개발 과정

습지 환경에서의 동물플랑크톤 지수 적용을 위한 변수로는 종조성, 생물량, 군집지수, 탄소생체량, 군집비율 등이 활용될 수 있으며, 상이한 수생태계 요인 비교를 통한 공통적인 항목을 추출하고 이러한 주요 인자들에 대한 적용가능성 절차 과정이 진행되어야 한다. 습지생태계의 동물플랑크톤 자료를 활용한 건강성 지수평가기법 적용을 위한 절차는 습지 환경 상태와 연관성이 있는 변수를 우선 선정 추출하는 작업이 진행되어야 한다. 일반적으로 양적 위주의 성과지표의(예:

종수, 풍부도, 생물량 등) 한계를 극복하고, 측정 결과가 일반적으로 수치화되지 않은 질적지표(예: 지표종, 내성종 등)의 객관성 및 신뢰성 문제를 고려한 대표성이 있는 성과지표를 선정하도록 하여야 한다. 지표선정 과정에서 항목의 종류별로 서식환경 등과 같은 정보와 상관성을 입증하는 평가절차를 거쳐 진행되어야 한다(U.S. EPA, 1998). 국가 및 담수 시스템별 사용되는 지표가 상이하고, 다양한 조합으로 담수환경 평가에 활용된다(Table 2). U.S. EPA (2002)와 EU (WFD)에서 활용성이 높은 지표 내용으로 종조성, 밀도, 군집지수, 생태학적인 기능, 민감성, 복원력 그리고 내성 등에 대해서 언급한 바 있다. 따라서, 이를 바탕으로 국내에서도 습지생태계를 대상으로 효율적인 평가를 위한 건강성 평가안에 대한 고려가 필요하다. 평가지표 항목에 대한 지수화(점수화)가 진행되어야 한다. 국내·외 담수생태계에서 생물상별 적용한 지수는 선정된 항목별로 등급화(3등급~10등급)하여 건강성 평가를 하였다(Nichols *et al.*, 2000; Rothrock *et al.*, 2008; Ministry of Environment, 2009). 국외에서도 생산자 분류군을 대상으로 습지생태계 건강성 평가를 진행하고 있으나(Table 1), 동물플랑크톤을 고려한 생태계별 건강성 평

Table 2. The zooplankton index applied to the evaluation of freshwater ecosystems.

Zooplankton index	Equations	Description and parameters	Reference
Zooplankton Reservoir Trophic Index (ZRTI)	$ZRTI = \sum_{i=1}^n d_i t_i$	Where d_i is the relative density and t_i is the tolerance value of species i . The index uses tolerance (t_i) and optimal values for different genera and species of zooplankton (rotifers, copepods and cladocerans)	Montagud <i>et al.</i> (2019)
Wetland Zooplankton Index (WZI)	$WZI = \frac{\sum_{i=1}^n Y_i T_i U_i}{\sum_{i=1}^n Y_i T_i}$	Where Y_i is the abundance or presence of species i , T_i is the tolerance (1~3), and U_i is the optimum (1~5). The index can therefore range from one (indicative of low quality) to five (indicative of high-quality wetland). Water quality and zooplankton associations with aquatic vegetation (emergent, submergent, and floating-leaf)	Lougheed and Chow-Fraser (2002)
Zoo-IQ Index	$Zoo-IQ = A_{Zoo} + B_{Zoo} + MW_{Zoo} + R_{Clad}$	A_{Zoo} : zooplankton abundance (ind. L^{-1}), B_{Zoo} : biomass ($\mu g L^{-1}$), MW_{Zoo} : body weight (ind. μg^{-1}), R_{Clad} : cladocerans' ratio	Stamou <i>et al.</i> (2022)
Zooplankton Index for Polish Lakes' Assessment (ZIPLAS)	$ZIPLAS = \frac{CA/CY + NZOL + TECTA + IHROT + d}{5}$	CA/CY: Ratio of Calanoida to Cyclopoida individual numbers, NZOL: Zooplankton abundance, TECTA: Percentage of form tecta in population of <i>Keratella cochlearis</i> , IHROT: Percentage of species indicative of high trophy in the indicative group's number, d: Diversity index	Ochocka (2021)
Rotifer TSI index	$TSI = 5.38 \ln(N) + 19.28$ $TSI = 5.63 \ln(B) + 64.47$ $TSI = 0.23 BAC + 44.30$ $TSI = 3.85 (B : N)^{-0.318}$ $TSI = 0.198 TECTA + 48.8$ for dimictic lakes $TSI = 0.144 TECTA + 54.8$ for polymictic lakes $TSI = 0.203 IHT + 40.0$	N: rotifer numbers (ind. L^{-1}), B: total biomass of rotifer community (mg w.wt L^{-1}), BAC: percentage of bacterivores in total rotifer numbers (BAC, %), B:N: ratio of biomass to numbers (B: N, mg w.wt. ind L^{-1}), TECTA: percentage of the tecta form in the population of <i>Keratella cochlearis</i> (TECTA, %), IHT: contribution of species which indicate high trophic state in the indicator group's numbers (IHT, %), The trophic state index (TSI): total numbers and biomass of rotifera, and percentage of bacterivorous species in the rotifer community	Ejsmont-Karabin (2012)

가는 아직 미흡한 실정이다. 국내 습지생태계에서 동물플랑크톤 자료를 활용한 건강성 평가를 위해서는 다양한 항목에 대한 검증이 필요하다. 이를 위해 동물플랑크톤에 대한 질적 및 양적지표에 대한 가중치를 고려하거나 교란지수(예: 서식 환경, 농경, 태풍, 수리수문 등) 활용 방법이 고려될 수 있다 (Gernes and Helgen, 1999; Lopez and Fennessy, 2002). 아울러, 다변량지수(MMIs: Multimetric indices) 방법에 대한 적용성 등 통합적인 지수평가에 대한 검토 등이 진행되어야 할 것으로 판단된다(Choi *et al.*, 2023).

습지생태계 동물플랑크톤 후보 지수(안)

습지생태계는 생산성이 높은 생태계 중 하나이며, 다양한 서식환경 요인과 수중 생물 간의 상호관계 측면에서 중요한 시스템이다(Joo and Francko, 1995). 습지는 다양한 환경요인이 복잡하게 작용하는 생태계이며, 습지 복원 등 생태계 안정성 및 생물다양성 증진을 위한 방안 수립에 동물플랑크톤 자료는 매우 중요하며 지속적인 연구가 필요하다. 동물플랑크톤 군집 변화를 수식화하는 연구는 지속적으로 진행되어지고 있으나, 지표에 대한 항목이 지역, 교란 종류, 동물플랑크톤 특성, 특정 분류군 등 양적·질적 평가의 차이로 인하여 종합적 다변량 평가 지수 적용 방향으로 발전되고 있다. 따라서, 본 내용에 언급된 습지생태계의 동물플랑크톤 관련 양적·질적 지수 항목 등은 추후 국내 습지생태계 다양성 및 생태계 서비스 차원의 주요한 기반 자료로써 활용 가치가 있을 것으로 예상된다.

1. 윤충류 중, 생체량 비율 및 기능적 다양성

윤충류는 습지생태계에 출현하는 가장 흔한 분류군으로

생활사가 짧고 환경변화에 동시에 반응할 수 있어 빠르게 변화하는 환경에서 잘 적응하기 때문에 습지생태계에서의 생물학적 지표로서 잠재력을 가지고 있다(U.S. EPA, 2002; Ejsmont-Karabin, 2012). 영양단계별 및 부영양화 정도에 대한 지표생물로 활용성이 높은 윤충류 군집은 습지생태계 건강성 평가 지수 항목에 적합한 군집이다(Sørensen, 2002; May and O'Hare, 2005; Oh *et al.*, 2017). 윤충류 관련 자료는 습지생태계의 환경변화에 대한 문제점을 파악하고 관리하기 위한 양적 지수 항목으로 우선시되어야 할 것으로 판단된다.

2. 부착성/부유성 동물플랑크톤 비

동물플랑크톤 군집은 서식 형태에 따라 부착성과 부유성으로 구분되며, 습지생태계의 경우 일반적으로 수변부 기질이 풍부한 서식조건으로 부착성 동물플랑크톤의 성장에 적합하다(Table 3; Balayla and Moss, 2003; Taniguchi *et al.*, 2003). 이에 비해 유속의 다양성이 뚜렷한 우수생태계의 경우는 부유성 종이 우점하는 경향을 가진다(Table 3; Lair, 2006). 서식처 이질성과 다양성은 습지생태계의 동물플랑크톤 중 다양성 유지에 주요인으로 고려되어지고 있다(Manatunge *et al.*, 2000). 따라서, 서식처 이질성이 높은 습지생태계에서는 기질의 다양성에 따른 부착성/부유성 동물플랑크톤 중수 및 생체량 비율의 변화에 대한 정보는 에너지 순환 및 다양성 변화 정도를 판단하는 데 주요한 양적 지수 항목으로 사료된다.

3. 지각류 다양성 및 요각류 비율(cyclopoid/calanoid)

지각류 군집은 치어가 선호하는 먹이원으로 수생태계 영양순환과 수질 변화에 중요한 역할을 하며, 습지 환경의 특성

Table 3. Classification of species with relatively high frequency of occurrence by inhabit type.

Taxa	Inhabit type	
	River	Wetland (including Dumbeong)
Rotifers	<i>Brachionus angularis</i> , <i>Brachionus calyciflorus</i> , <i>Keratella cochlearis</i> , <i>Keratella valga</i> , <i>Keratella quadrata</i> , <i>Asplanchna priodonta</i> , <i>Polyarthra vulgaris</i> , <i>Colurella spp.</i> , <i>Trichocerca spp.</i>	<i>Brachionus angularis</i> , <i>Brachionus calyciflorus</i> , <i>Keratella cochlearis</i> , <i>Keratella valga</i> , <i>Polyarthra vulgaris</i> , <i>Trichocerca capucina</i> , <i>Mytilina trigona</i> , <i>Lepadella oblonga</i> , <i>Euchlanis dilatata</i> , <i>Testudinella patina</i>
Cladocerans	<i>Bosmina longirostris</i> , <i>Bosminopsis deitersi</i> , <i>Moina macrocopa</i> , <i>Daphnia sp.</i> , <i>Diaphanosoma brachyurum</i>	<i>Alona rectangula</i> , <i>Bosmina longirostris</i> , <i>Bosminopsis deitersi</i> , <i>Chydorus sphaericus</i>

*Bold strokes were epiphytic zooplankton, Modified data by Kim *et al.* (2005, 2010), Kim and Lee (2007), Kim *et al.* (2012), Pace *et al.* (1992), Lair (2006), Thorp *et al.* (1994)

을 대변하는 생물자원으로 중요하다. 지각류 군집의 시·공간적 분포 경향 등 생물종 자료를 적용한 지각류 지수 항목은 수환경의 먹이질 등 주요 변화 양상을 객관적으로 수치화할 수 있는 지표로써 활용성이 높을 것으로 판단된다(Brooks and Dodson, 1965). 지각류 비율 및 특정종(e.g., *Alona*, *Chydorus*)의 출현 유·무는 습지생태계의 먹이 환경 차이를 잘 대변하는 지표 항목으로 평가된다(Table 3). 그리고 요각류 군집의 cyclopoid/calanoïd 비율과 생물량 자료도 지수평가 항목으로 고려되어져 왔다(Gannon and Stemberger, 1978). 습지생태계 집수역의 교란 및 영양분 농도 변화 등을 반영하는 요각류 자료는 효율적인 지수 항목일 것으로 사료된다(Van Egeren *et al.*, 2011).

4. 서식처 평가 및 교란

정수생태계의 동물플랑크톤 군집은 지리적 요건에 따라 다양한 군집 구조를 나타낸다(Oh *et al.*, 2021). 소규모 수생태계(e.g., Dumbeong)를 포함한 다양한 습지생태계는 서식처 수심이 얇고 독특한 서식환경 요인을 가지므로 수환경 변화에 민감한 동물플랑크톤 군집 동태는 상이하하다(Kim *et al.*, 2011; Kim *et al.*, 2012). 수생태계 서식처 상태에 따라 고유한 생물상이 나타나고 특정 생물의 생활사가 영향을 받는다(Norris and Thomas, 1999; Burks *et al.*, 2002). 따라서, 서식처 교란 요인 등에 대한 동물플랑크톤 출현종 및 비율 관련 지표선정이 고려되어야 한다. 동물플랑크톤과 연관된 다양한 서식처 특성 및 교란에 대한 지수 관련 정보는 습지생태계 복원 및 관리 등에 대한 주요한 자료로써 그 활용성이 높을 것으로 판단된다.

5. 먹이망 구성

정수생태계 먹이망 내에서 동물플랑크톤은 식물플랑크톤과 박테리아 개체군을 통제하는 섭식여과자이며, 치어의 먹이 공급원으로써 생태계의 기능과 안정성에 큰 영향을 미치는 핵심 생물상이다(Romare *et al.*, 1999). 수생태계의 먹이망 구성에서 생산자로부터 소비자로의 탄소 흐름은 환경요인에 따라 다양하며, 동·식물플랑크톤의 구성인자 및 생산비율에 따라 전달 비율이 크게 5~30% 정도 차이가 난다(Lacroix, 1999; Gladyshev *et al.*, 2011; Feniova *et al.*, 2021). 호수생태계의 경우 먹이망 구성인자 중 대형 지각류인 *Daphnia galeata*는 매우 주요한 먹이자원으로 치어에 풍부한 탄소 흐름을 하여 수환경 평가에 적절한 생물상으로 여겨지고 있다(Feniova *et al.*, 2021). 습지생태계는 *Daphnia*에 비해 중·소형 지각류인 *Alona rectangula*, *Bosmina longirostris*, *Chydorus sphaericus* 등이 상대적으로 높은 풍부도를 나

타낸다(Table 3). 따라서, 먹이망 평가지수에서 [부유성 유기물 → 대형지각류(e.g., *Daphnia*) → 치어]로 이어지는 구성보다는 [부유성 또는 부착성 유기물 → 중·소형 지각류(e.g., *Alona*, *Chydorus*) → 치어]로 연결되는 지수 방안이 고려되어야 할 것으로 판단된다. 먹이망 구성에서 중·소형 지각류를 포함한 지수는 다양한 습지 환경에 대한 종합적인 건강성 상태를 비교 평가하는 주요한 지수항목으로 여겨진다.

저자정보 김현우(순천대학교 환경교육과 교수)

저자기여도 개념설정: H.W. Kim, 자료관리 및 분석: H.W. Kim, 초고작성: H.W. Kim, 원고교정 및 최종검토: H.W. Kim, 과제관리 및 연구비 수주: H.W. Kim. 본 논문의 저자는 내용을 면밀히 검토하였고, 전적으로 동의합니다.

이해관계 본 논문에서는 이해관계 충돌의 여지가 전혀 없습니다.

연구비 이 논문은 2023년 순천대학교 학술연구비 공모과제로 연구되었음(2023-0282).

사사 본 논문의 심사과정에서 세밀하게 검토해 주신 익명의 심사위원들에게 감사드립니다.

REFERENCES

- Baines, S.B. and M.L. Pace. 1991. The production of dissolved organic matter by phytoplankton and its importance to bacteria: Patterns across marine and freshwater systems. *Limnology and Oceanography* **36**: 1078-1090.
- Balayla, D.J. and B. Moss. 2003. Spatial patterns and population dynamics of plant-associated microcrustacea (Cladocera) in an English shallow lake (Little Mere, Cheshire). *Aquatic Ecology* **37**: 417-435.
- Barbour, M.T., J. Gerritsen, B.D. Snyder and J.B. Stribling. 1999. Rapid Bioassessment Protocol for Use in Streams and Wadeable Rivers: Periphyton, Benthic Macroinvertebrates, and Fish, Second Edition. EPA 841-B-99-002.
- Brooks, J.L. and S.I. Dodson. 1965. Predation, body size, and composition of plankton. *Science* **150**: 28-35.
- Burks, R.L., D.M. Lodge, E. Jeppesen and T.L. Laudridsen. 2002. Diel horizontal migration of zooplankton: costs and benefits of inhabiting the littoral. *Freshwater Biology* **47**: 343-365.
- Cardoso, A.C., A.G. Solimini and G. Premazzi. 2005. Report on harmonisation of freshwater biological methods. European Commission.
- Choi, Y., H.J. Oh, D.H. Lee, M.H. Jang, K.L. Lee, K.H. Chang and H.W. Kim. 2023. Current Utilization and Further Application of Zooplankton Indices for Ecosystem Health Assess-

- ment of Lake Ecosystems. *Sustainability* **15**: 10950. <https://doi.org/10.3390/su151410950>
- Christofferson, K., B. Riemann, A. Klysner and M. Sondergaard. 1993. Potential role of fish predation and natural populations of zooplankton in structuring a plankton community in eutrophic lake water. *Limnology and Oceanography* **38**: 561-573.
- Davis, W.S. and T.P. Simon. 1995. Biological Assessment and Criteria: Tools for Water Resource Planning and Decision Making. CRC Press, Boca Raton, FL, USA.
- Ejsmont-Karabin, J. 2012. The usefulness of zooplankton as lake ecosystem indicators: Rotifer trophic state index. *Polish Journal of Ecology* **60**: 339-350.
- Feniova, I.Y., M. Karpowicz, M.I. Gladyshev, N.N. Sushchik, V.G. Petrosysa, E.G. Sakharova and A.R. Dzialowski. 2021. Effects of Macrobiota on the Transfer Efficiency of Essential Elements and Fatty Acids From Phytoplankton to Zooplankton Under Eutrophic Conditions. *Frontiers in Environmental Science* **9**. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2021.739014>
- Gannon, J.E. and R.S. Stemberger. 1978. Zooplankton (especially crustaceans and rotifers) as indicators of water quality. *Transactions of the American Microscopical Society* **97**: 16-35.
- Gernes, M.C. and J.C. Helgen. 1999. Indexes of biotic integrity (IBI) for wetlands: vegetation and invertebrate IMI's. Final Report to U.S. EPA, Assistance number CD995525-01. Minnesota Pollution Control Agency, St. Paul, USA.
- Gladyshev, M.I., N.N. Sushchik, O.V. Anishchenko, O.N. Makhutova, V.I. Kolmakov, G.S. Kalachova, A.A. Kolmakova and O.P. Dubovskaya. 2011. Efficiency of Transfer of Essential Polyunsaturated Fatty Acids versus Organic Carbon from Producers to Consumers in a Eutrophic Reservoir. *Oecologia* **165**: 521-531.
- Joo, G.J. and D.A. Francko. 1995. Limnological characterization of the tristate oxbow wetland (Ohio, Indiana). *Ohio Journal of Science* **95**: 316-320.
- Kim, H.A., J.Y. Choi, S.G. Kim, Y. Do, G.J. Joo, D.K. Kim and H.W. Kim. 2012. Observation and Evaluation of Zooplankton Community Characteristics in the Petite Ponds (Dumbeong) for Irrigation: A Case Study in Goseong Region of South Korea. *Korean Journal of Limnology* **45**: 490-498.
- Kim, H.W. and H.Y. Lee. 2007. The Differences of Zooplankton Dynamics in River Ecosystem with and without Estuary Dam in River Mouth. *Korean Journal of Limnology* **40**(2): 273-284.
- Kim, H.W., G.H. La, K.S. Jeong, J.H. Park, Y.J. Huh, S.D. Kim, J.E. Na, M.H. Jung and H.Y. Lee. 2010. Assessing the Plankton Dynamics in Lakes and Reservoirs Ecosystem in the Southwestern Parts of Korea. *Korean Journal of Environmental Biology* **28**(2): 86-94.
- Kim, H.W., H.G. Jeong, J.Y. Choi, S.K. Kim, K.S. Jeong, G.H. La, H.J. Oh and K.H. Chang. 2018. Past History of Freshwater Zooplankton Research in South Korea and Korean Society of Limnology and Future Directions. *Korean Journal of Limnology* **51**(1): 40-59.
- Kim, H.W., K.H. Chang and G.J. Joo. 2005. Characteristics and Inter-annual Variability of Zooplankton Dynamics in the Middle Part of the River (Nakdong River). *Korean Journal of Limnology* **38**(3): 412-419.
- Kim, J.O., H.S. Shin, J.H. Yoo, S.H. Lee, H.S. Jang and B.C. Kim. 2011. Physicochemical and biological properties of constructed small-scale ponds for ecological improvement in paddy fields. *Korean Journal of Limnology* **44**: 253-263.
- Lacroix, G., F. Lescher-Moutoué and A. Bertolo. 1999. Biomass and Production of Plankton in Shallow and Deep Lakes: Are There General Patterns? *Annales De Limnologie-International Journal of Limnology* **35**: 111-122.
- Lair, N. 2006. A review of regulation mechanisms of metazoan plankton in riverine ecosystems: Aquatic habitat versus biota. *River Research and Applications* **22**: 567-593.
- Lee, J.Y., J.H. Lee, K.H. Shin, S.J. Hwang and K.G. An. 2007. Trophic State and Water Quality Characteristics of Korean Agricultural Reservoirs. *Korean Journal of Limnology* **40**: 223-233.
- Lopez, R.D. and M.S. Fennessy. 2002. Testing the floristic quality assessment index as an indicator of wetland condition. *Ecological Application* **12**: 487-497.
- Lougheed, V.L. and P. Chow-Fraser. 2002. Development and use of a zooplankton index of wetland quality in the Laurentian Great Lakes basin. *Ecological Applications* **12**: 474-486.
- Manatunge, J., T. Asaeda and T. Priyadarshana. 2000. The influence of structural complexity on fish-zooplankton interactions: A study using artificial submerged macrophytes. *Environmental Biology of Fishes* **58**: 425-438.
- May, L. and M. O'Hare. 2005. Changes in rotifer species composition and abundance along a trophic gradient in Loch Lomond, Scotland, UK. *Hydrobiologia* **546**: 397-404.
- Ministry of Environment. 2009. Stream/River ecosystem survey and health assessment (III). NIER.
- Montagud, D., M.S. Juan, S.P. Xavier, A. Teresa and V. Eduardo. 2019. A comparative study of four indexes based on zooplankton as trophic state indicators in reservoirs. *Limnetica* **38**: 291-302.
- Nichols, S., S. Weber and B. Shaw. 2000. A proposed aquatic plant community biotic index for Wisconsin lakes. *Environmental Management* **26**(5): 491-502.
- Norris, R.H. and M.C. Thomas. 1999. What is river health? *Freshwater Biology* **41**: 197-209.
- Ochocka, A. 2021. ZIPLAS: zooplankton index for Polish Lakes' assessment: a new method to assess the ecological status of stratified lakes. *Environment Monitoring and Assessment* **193**: 1-15.
- Oh, H.J., K.H. Chang, D.H. Seo, G.S. Nam, E.H. Lee, H.G. Jeong, J.D. Yoon and J.M. Oh. 2017. Zooplankton Community as an Indicator for Environmental Assessment of

- Aquatic Ecosystem: Application of Rotifer Functional Groups for Evaluating Water Quality in Eutrophic Reservoirs. *Journal of Environmental Impact Assessment* **26**(6): 404-417.
- Oh, H.J., Y.J. Chae, Y. Choi, D. Ku, Y.J. Heo, I.S. Kwak, H. Jo, Y.S. Park, K.H. Chang and H.W. Kim. 2021. Review and suggestions for applying DNA sequencing to zooplankton researches: From taxonomic approaches to biological interaction analysis. *Korean Journal of Ecology and Environment* **54**: 156-169.
- Pace, M.L., S.E.G. Findlay and D. Lints. 1992. Zooplankton in advective environments: the Hudson River community and a comparative analysis. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences* **49**: 1060-1069.
- Romare, P., E. Bergman and L.A. Hansson. 1999. The impact of larval and juvenile fish on zooplankton and algal dynamics. *Limnology and Oceanography* **44**: 1655-1666.
- Rothrock, P.E., T.P. Simon and P.M. Stewart. 2008. Development, calibration, and validation of a littoral zone plant index of biotic integrity (PIBI) for lacustrine wetlands. *Ecological Indicators* **8**: 79-88.
- Sørensen, M.V. 2002. On the evolution and morphology of the rotiferan trophi, with a cladistic analysis of Rotifera. *Journal of Zoological Systematics and Evolutionary Research* **40**: 129-154.
- Stamou, G., A.D. Mazaris, M. Moustaka-Gouni, M. Špoljar, I. Ternjej, T. Dražina, Z. Dorak and E. Michaloudi. 2022. Introducing a zooplanktonic index for assessing water quality of natural lakes in the Mediterranean region. *Ecological Informatics* **69**: 101616.
- Taniguchi, H., S. Nakano and M. Tokeshi. 2003. Influences of habitat complexity on the diversity and abundance of epiphytic invertebrates on plants. *Freshwater Biology* **48**: 718-728.
- Thorp, J.H., A.R. Black, K.H. Haag and J.D. Wehr. 1994. Zooplankton assemblages in the Ohio River: seasonal, tributary, and navigation dam effects. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences* **51**: 1634-1643.
- U.S. EPA. 1998. Lake and reservoir bioassessment and biocriteria. Technical Guidance Document. EPA-841-B-98-007.
- U.S. EPA. 2002. Methods for evaluating wetland condition: Developing metrics and indexes of biological integrity. Office of Water, U.S. Environmental Protection Agency. EPA-822-R-02-016.
- U.S. EPA. 2006. Wadeable Streams Assessment: A Collaborative Survey of the Nation's Streams. EPA-841-B-06-002.
- U.S. EPA. 2008~2009. National Rivers and Streams Assessment 2008-2009: A Collaborative Survey. EPA-841-R-16-007.
- U.S. EPA. 2011. National Wetland Condition Assessment 2011 Technical Report. EPA-843-R-15-006.
- U.S. EPA. 2012. A Collaborative Survey of Lakes in the United States. EPA-841-R-16-113.
- U.S. EPA. 2015. National Coastal Condition Assessment 2015: Field Operations Manual. EPA-841-R-14-007.
- U.S. EPA. 2017. National Lakes Assessment 2012: Technical Report.
- Van Egeren, S.J., S.I. Dodson, B. Torke and J.T. Maxted. 2011. The relative significance of environmental and anthropogenic factors affecting zooplankton community structure in Southeast Wisconsin Till Plain lakes. *Hydrobiologia* **668**: 137-146.

Membership Application Form

Name	(Korean) (Sex: M · F)	(Chinese)	(English)
Birth date			
Current address		Zip code	Tel
Work	Institution	Position	Tel
	Address	Zip code/Address E-mail	
Degree/school Major Year earned			
Thesis (Korean & English) Advisor name			

To: The president of Korean Society of Limnology

I, agreed with the purpose of Korean Society of Limnology, would like to become a member of KSL and submit an application form.

Date : 20

Name :

Korean Society of Limnology

생태와 환경 학술지 투고규정

1. 본 학회지는 생태학과 환경과학에 관한 보문(Article), 총설(Review), 단보(Note) 및 기타 학술 논문을 게재함을 목적으로 하며, 다른 출판물에 발표되지 않았거나, 발표될 예정이 없는 논문에 한한다.

2. 투고지는 생태학과 환경과학에 관련된 연구자를 원칙으로 한다.

3. 원고의 작성

1) 원고는 반드시 MS 워드프로세스를 이용하여 A4용지에 작성하며, 30 mm(가로, 세로, 위, 아래)의 여백을 남긴다. 글자체는 한컴바탕, 글자의 크기는 10 pt로 작성하며, 본문은 양쪽맞춤, 장간 간격은 200%(2줄)로 한다.

2) 속명, 종속명 및 균주명, 잡지명은 이탤릭체(또는 밑줄)로, 잡지의 권수 등은 고딕체로 한다.

3) 한글지명의 로마자 표기는 문교부(1959년) 표기지침에 따른다.

4) 도량형의 단위는 국제단위체계(International System of Units : S.I.)를 사용하며 분모가 있는 경우 음의 지수를 사용한다(예: $\mu\text{g L}^{-1}$, $\mu\text{g L}^{-1} \text{hr}^{-1}$). 숫자와 도량형의 사이는 한 칸을 띄운다. 그러나 %, 온도, 위도, 경도 등을 표시하는 단위는 숫자에 붙여 쓴다.

5) 표와 그림의 제목과 설명은 영문으로 작성하며, 사진(plate)은 인화하여 명암이 뚜렷한 것만을 포함하도록 한다. 천연색 사진을 인쇄할 경우 출판 실비는 저자가 부담한다.

4. 원고의 형식

보문은 다음의 순서와 형식으로 작성한다.

1) 제목 및 저자: 논문 제목은 간결하고 집약적으로 작성하며, 저자가 소속된 주소를 쓰고 소속 기관이 다른 공저자일 경우에는 해당 연구자의 이름 왼쪽 상단에 1, 2로 표시하고 그 주소를 명시한다. 모든 저자는 ORCID를 명시한다. 제출된 논문의 교신저자(corresponding author)의 이름 왼쪽 상단에 *을 표시한다.

2) 영문 ABSTRACT: 영문 논문명, 저자, 주소를 위의 제목과 저자의 순서에 따라 작성하고, 영문 초록은 250자를 넘지 않도록 한다. 첫 번째 저자의 경우에는 성(family name)을 먼저 쓴 후 이름을 쓰고, 다른 저자는 이름부터 쓴다. 영문 내용을 표시하는 key words와 running title을 제시한다.

3) Key word: 한글은 20자 내외, 영문은 10자 내외로 최대 5개 단어까지 작성한다. 소제목(running title)은 한글은 20자 내외, 영문은 10단어 내외로 작성한다.

4) 각주(Foot notes): 교신저자의 전화번호, fax 번호 및 e-mail 주소를 표기한다.

5) 본문: 서론(Introduction), 재료 및 방법(Materials and Methods), 결과(Results), 고찰(Discussion), 저자기여도(Author Contributions), 이해관계(Conflicts of Interest), 연구비(Fund-

ing), 사사(Acknowledgement), 인용문헌(References), 표 그림 목차(Table and Figure captions), 표(Table), 그림(Figure)의 순으로 작성한다. 경우에 따라 결과 및 고찰(Results and Discussion)을 둘 수 있다.

6) 국문, 영문 적요는 250자 이내로 한다.

7) 저자자격: 저자는 실질적으로 연구에 기여하여야 하며, 다음과 같은 조건을 만족하여야 한다. 1) 연구 구상 및 설계, 자료 수집, 분석, 해석; AND 2) 초고 작성; AND 3) 최종 원고 검토; AND 4) 최종 원고의 출판 동의. 저자기여도는 다음과 같이 기여 항목을 표기한다. 예) 개념설정: A.A., 방법론: B.B., 분석: A.A. & B.B., 자료제공: C.C., 자료관리: A.A., 원고 초안작성: A.A., 원고 교정: B.B. & C.C., 원고 편집: C.C., 과제관리: A.A., 연구지 수주: A.A. 모든 저자는 논문의 결과에 동의하여야 하며, 출판될 최종본을 검토하고 동의하여야 한다. 자세한 저자 자격에 대해서는 the International Council of Medical Journal Editors(ICMJE)을 따른다.

8) 이해관계: 논문 출판에 영향을 미칠 수 있는 모든 저자의 잠재적 이해관계에 대한 정보를 공개 한다. 잠재적 이해관계의 예는 고용, 자문, 주식 소유권, 사례금, 유료전문증언, 특허 신청/등록, 연구비 수여 또는 지원이 포함된다. 논문 출판에 있어서 이해관계가 없는 경우는 없음을, 있는 경우 해당 사항을 명확하게 밝힌다. 이해관계가 없는 경우 다음과 같이 밝힌다: “이 논문에는 이해관계 충돌의 여지가 없음”. 연구비 지원기관이 연구과제 수행, 연구결과, 논문 출판에 영향을 미친 경우 이를 밝힌다.

9) 연구비(Funding): 연구수행을 위해 지원받은 연구 과제명 또는 과제번호, 지원기관을 밝힌다.

10) 사사: 연구에 기여한 기여자 등을 밝힌다. 연구에 기여를 하였으나 저자 요건을 갖추지 못하는 경우는 기여자에 해당된다.

11) 인용문헌: 반드시 영문으로 기재하며, 인용은 영문 알파벳과 출판 연도의 순서에 따라 아래의 예처럼 기재하며, 학술지의 명칭은 정식명칭(Full name)으로 작성한다.

① Choi, S.K. 1966. Community structure and function of Korean fish, p. 1-20. In: The Korean Freshwater Ecology (Kim, A.B. and C.D. Lee, eds.). Hanyang Press, Ansan.

② Oh, H.E., J.S. Maeng and M.K. Han. 1991. Nitrogen and carbon fixation by a blue green alga. *Korean Journal of Limnology* 29: 1-10.

③ Simpson, C.G. and A. Roe. 1996. Freshwater Ecology. McGraw-Hill Book Co., New York.

12) 학술지 명칭 변경에 따른 문헌표기법

① 학술지의 명칭은 2013년 이전의 모든 논문(1권 1호~45권 4호)은 “Korean Journal of Limnological Society”로 표기하고 “생태와 환경”으로 명칭이 변경된 2013년(46권)부터 출판되는 논문은 문헌 표기 시 다음과 같이 표기한다.

“Korean Journal of Ecology and Environment”

- 13) 표 (Tables), 그림설명 (Figure legend), 그림 (Figures)은 본문 뒤에 순서대로 배치한다.
- 14) 단보는 본문에 준하여 작성하되 적요를 제외한 모든 내용은 별도로 구별하여 작성하지 않고 연속하여 간략하게 기술하며, 국문 요약은 생략한다.
- 15) 총설은 사전에 편집위원장과 상의하여 투고한다.

5. 원고 제출 및 심사

- 1) 원고는 수시로 접수하며 생태와 환경 학술지 홈페이지(www.jksl.or.kr) 온라인 투고시스템을 통해 제출하여야 한다. 채택된 원고의 수정본 제출시에는 수정한 본문과 심사의견 답변서 파일을 함께 제출한다. 투고와 편집에 관한 사항은 편집위원장, 편집부위원장 또는 편집간사에게 문의한다.
- 2) 원고는 표와 그림을 포함하여 8면을 초과하지 않도록 하며, 이를 초과할 경우는 기본료 외에 저자가 실비를 부담하여야 한다.
- 3) 원고의 심사는 관련분야 편집위원이 전문가 2인 이상에게 심사를 의뢰하며, 이로부터 논문 심사 결과를 제출 받아 논문의 수정 및 채택 가능 여부를 편집위원회의 검토를 통하여 최종적으로 편집위원장이 결정한다. 또한 특별호에 대해서는 편집위원장이 위촉한 초빙편집장이 모든 논문에 대한 심사를 진행하고 결과를 편집위원회에 상세히 보고한다.
- 4) 원고의 심사 결과는 게재 가능, 수정 후 게재, 수정 후 심사, 게재 불가로 나뉜다. 게재 불가된 논문은 재투고될 수 없으며, 수정 후 게재 혹은 수정 후 심사 결과 이후 지연 투고 요청이 없이 6개월 이내에 논문 수정본이 재투고 되지 않으면 게재 불가 처리된다.
- 5) 원고의 게재는 투고 순서로 하되, 편집상 전후가 다소 바뀔 수도 있다.
- 6) 게재될 원고의 교정은 3회를 원칙으로 하며, 초교는 반드시 저자가 교정하도록 한다.
- 7) 별쇄는 제공하지 않으며, 저자가 요청하는 경우 별쇄는 저자가 부담한다.

Notice to contributors

Korean Journal of Ecology and Environment covers the entire field of ecology and environment.

Notice to contributors

Manuscripts. All manuscripts should be sent to the online submission system of the Korean Journal of Ecology and Environment in journal homepage (www.jksl.or.kr)

The original drawings should not be sent until the editor requests them. Manuscript should be typed in MS word with a space of 30 mm from upper, lower, left and right margin, 10.0 pt in font size, and line space of 200%.

a) *Title page.* This should include the title, list of author's names (with ORCID), institute or laboratory of origin, name and address of the author to whom proofs should be sent, and an abbreviated title for use as a running head line.

b) *Abstract.* All papers should include an abstract, in short paragraphs, limited to less than 250 words. This should provide a concise statement of the scope of the work and its principal findings and be fully intelligible without reference to the main text.

c) Korean and English abbreviated titles were described (Korean: less than 20 letters, English: less than 10 words).

d) *Introduction.* This should contain a clear statement of the reason for doing the work, outlining essential background information but should not include either the results or conclusions.

e) *Materials and Methods.* This should be concise but provides sufficient details to allow the work to be repeated.

f) *Results.* This should not include material appropriate to the Discussion.

g) *Discussion.* This should highlight the significance of the results and place them in the context of other work.

h) *Author Contributions*

i) *Conflicts of Interest*

j) *Funding*

k) *Acknowledgements*

l) *References*

m) *Tables*

n) *Figure legends*

o) *Illustrations.*

Abbreviations. Full names with uncommon abbreviations must be given with the first mention; new abbreviations should be coined only for unwieldy names and should not be used at all unless the names occur frequently. In the title and abstract unusual abbreviations should be identified, in the introduction and discussion they should be used sparingly.

Units. The International System of Units (S.I.) are required to be used, and the units should be in Roman typesets. When unit appears in a denominator, use negative exponents (e.g., $\mu\text{g L}^{-1} \text{hr}^{-1}$). One space should be inserted between figures and units, except for %, and units of temperature, latitude, or longitude.

Tables, figures and illustrations. Each table must be

typed on a separate sheet, with a fully informative caption as a heading. Tables should be numbered consecutively with Arabic numerals. Column headings should be brief, with units of measurement in parentheses. All illustrations (including photographs) are classified as figures and should be numbered consecutively. Figures should be suitable for 50% reduction and should be drawn or grouped so that on reduction they will fit within the type area (200 × 136 mm). Laser prints or page-size photographs are acceptable for final production: there should be at least 2.5 cm of space at the top of each figure.

Legends to figures should be typed in sequence on a separate sheet.

Each table and figure should have the author's name and the number written on the back in pencil.

The approximate position of table and figures should be indicated in the margin of the typescript.

Author Contributions: Authorship must include and be limited to those who have contributed substantially to the work. Each author are expected to have made substantial contributions to the conception or design of the work; or the acquisition, analysis, or interpretation of data for the work; AND drafting the work or revising it critically for important intellectual content; AND final approval of the version to be published; AND agreement to be accountable for all aspects of the work in ensuring that questions related to the accuracy or integrity of any part of the work are appropriately investigated and resolved. For research articles with several authors, a short paragraph specifying their individual contributions must be provided with following statements "Conceptualization, A.A. & B.B.; Methodology, A.A.; Formal Analysis, A.A.; Investigation, A.A.; Resources, A.A.; Data Curation, B.B. & C.C.; Writing — Original Draft Preparation, A.A.; Writing — Review & Editing, B.B.; Visualization, C.C.; Supervision, A.A.; Project Administration, A.A.; Funding Acquisition, B.B."

Conflicts of Interest: Authors must declare any personal interest that may be perceived as inappropriately influencing the representation or interpretation of reported research results. If there is no conflict of interest, please state "The authors declare no conflict of interest." Any role of the funding sponsors in the choice of research project must be declared in this section. If there is no role, please state "The sponsors had no role in the design, execution, interpretation, or writing of the study".

Funding: Please clearly indicate grants that you have received in support of your research work.

Acknowledgements: Acknowledgements should be brief. Please acknowledge anyone who provided technical help including writing and editing, proofreading, intellectual assistance, or special equipment or materials. Do not include thanks to anonymous referees and editors.

References should be made by giving the author's name

with the year of publication. When reference is made to a work by three or more authors the first name followed by *et al.* should be used on all occasions. If several papers by the same author and from the same year are cited, a, b, c, etc., should be put after the year of publication. References should be listed in alphabetical order at the end of the paper and should be full name of the journal in the following standard form:

- Choi, S.K. 1966. Community structure and function of Korean fish, p. 1-20. *In: The Korean Freshwater Ecology* (Kim, A.B. and C.D. Lee, eds.). Hanyang Press, Ansan.
- Oh, H.E., J.S. Maeng and M.K. Han. 1991. Nitrogen and carbon fixation by a blue green alga. *Korean Journal of Limnology* **29**: 1-10.
- Simpson, C.G. and A. Roe. 1996. *Freshwater Ecology*. McGraw-Hill Book Co., New York.

Titles of journals can be abbreviated, but abbreviations should be in form internationally accepted. Unpublished material, except for MS and Ph.D. theses, should not be included among the references. Personal communications are not accepted.

Word file. The editor will request submission of accepted articles in MS word file. Particular attention should be taken to ensure that articles submitted in this way adhere exactly to the journal style in all respects.

Proofs. Page proofs only will be sent to the authors and these should be returned to the Editor within 3 days. Major alterations to the text cannot be accepted.

Offprints. Offprints of each paper can be purchased by authors and should be ordered when the proofs are returned.

Editorial policy

Publication Ethics

A manuscript will be not considered for publication if the author submits the same contents of research results or figures that have already been published in other scientific journals or periodicals. The authorship should include those who have made substantial contributions to a study such as formulating the problem or hypothesis, structuring the study, designing and conducting the empirical analysis, interpreting the results. For the policies on the research and publication ethics, the journal conforms to the international standards for editor and author at <http://publicationethics.org/internationalstandardseditors-and-authors>. Research misconduct is followed in case of COPE flow chart.

Peer review

All submitted manuscripts are assigned to an associate editor who is expert in the same or close research field, and two peer reviewers are recommended by the associate editor. The review process can be continued by the reviewers' suggestions.

The associate editor decides an overall evaluation of review results based on both reviewers' comments. Editor in Chief can approve the evaluation report provided by the associate editor.

Publication charge and reprint

When the publication of the manuscript is issued, the authors will be charged for the publication. The amount of publication charge is 300,000 Korean won/publication (6 pages). A fee of 50,000 Korean won will be charged for each additional page of publication, and 60,000 Korean won will be charged to reviewer.

Publication type

The Korean Journal of Ecology and Environment (KJEE) is the official publication of the Korean Society of Limnology. The journal publishes original research articles, reviews, notes and opinions on the ecology and environment in all ecosystems.

생태와 환경 학술지 연구윤리규정

제1장 총칙

제1조(목적) 본 규정은 생태와 환경 학술지(이하 “본 학회지”라 한다)에 게재를 요청한 논문에 대하여 연구 수행자의 연구윤리를 확립하고 연구 부정행위를 사전 예방하며, 연구 부정행위에 대해 체계적인 진실성 검증을 수행하기 위하여 필요한 사항을 규정함을 목적으로 한다.

제2조(적용범위) 이 규정은 본 학회지에 투고한 논문의 연구 활동과 직·간접적으로 관련 있는 자에 대하여 적용한다.

제3조(용어의 정의)

- ① 연구부정행위라 함은 다음 각 호의 정의와 같이 연구논문의 위조, 변질, 표절을 말한다.
 1. “위조”는 존재하지 않는 데이터 또는 연구결과 등을 허위로 만들어 내는 행위를 말한다.
 2. “변조”는 연구자료·장비·과정 등을 인위적으로 조작하거나 데이터를 임의로 변형·삭제함으로써 연구내용 또는 결과를 왜곡하는 행위를 말한다.
 3. “표절”이라 함은 자기 또는 타인의 아이디어, 연구내용·결과 등을 정당한 승인 또는 인용 없이 도용하는 행위를 말한다. 기존 학술지에 발표된 그림이나 표를 사전 승인 없이 복제하여 발표하는 행위도 표절에 포함된다.
 4. “부당한 논문저자 표시”는 연구내용 또는 결과에 대하여 과학적·기술적 공헌 또는 기여를 한 사람에게 정당한 이유 없이 논문저자 자격을 부여하지 않거나, 과학적·기술적 공헌 또는 기여를 하지 않은 자에게 감사의 표시 또는 예우 등을 이유로 논문저자 자격을 부여하는 행위를 말한다.
- ② “제보자”라 함은 부정행위를 인지한 사실 또는 관련 증거를 본 학회 윤리위원회에 알린 자를 말한다.
- ③ “피조사자”라 함은 부정행위의 조사대상이된 자를 말하며, 조사과정에서의 참고인이나 증인은 포함되지 않는다.
- ④ “예비조사”라 함은 부정행위의 의혹에 대하여 공식적으로 조사할 필요가 있는지 여부를 결정하기 위한 절차를 말한다.
- ⑤ “본조사”라 함은 부정행위의 의혹에 대한 사실 여부를 입증하기 위한 절차를 말한다.
- ⑥ “판정”이라 함은 조사결과를 확정하고 이를 제보자와 피조사자에게 문서로써 통보하는 절차를 말한다.

제2장 연구의 진실성

제4조(연구의 진실성)

- ① 연구자는 모든 연구행위(연구제안, 연구수행, 연구결과 보고, 발표, 평가)를 진실하게 수행하여야 한다.
- ② 연구자는 연구결과에 대해 객관적이고 정확하게 기술하고, 연구결과를 임의로 변경하지 않아야 한다.
- ③ 연구자는 관련 규정 및 법규를 준수하여야 한다.

제3장 연구자 이해관계

제5조(저자)

- ① 교신저자는 논문 자료 및 결과, 저자 순서 결정 등에 관하여 책임을 진다.

제6조(저자자격 및 저자표시)

- ① 저자는 실질적으로 연구수행에 기여하여야 하며, 기여도의 예는 다음과 같다.
 1. 연구 구상 또는 설계
 2. 자료 수집, 분석, 또는 해석
 3. 초고 작성 또는 편집
 4. 최종 원고 승인 등
- ② ①의 1~4는 모두 만족하여야 한다. 연구에 실질적인 기여를 하지 않은 사람은 저자가 될 수 없다.
- ③ 저자 자격을 갖추지 못하는 기여자는 사사에 그 내용을 기술할 수 있다.

제7조 저자 표시 순서는 저자들 간의 협의에 따라 연구 기여도를 고려하여 공정하게 결정한다.

제8조(이해관계)

- ① 연구 및 논문 출판에 영향을 미칠 수 있는 모든 저자의 잠재적 이해관계에 대한 정보를 공개하여야 한다.
- ② 잠재적 이해관계의 예는 고용, 자문, 주식 소유권, 사례금, 유료전문증언, 특허 신청/등록, 연구비 수여 또는 지원 등이 포함된다.
- ③ 논문 출판에 이해관계가 없는 경우 없음, 있는 경우는 이를 명확하게 밝혀야 한다.

제4장 연구윤리진실성위원회

제9조(기능) 윤리위원회는 다음 각 호의 사항을 심의·의결 한다.

1. 연구윤리·진실성 관련 제도의 수립 및 운영에 관한 사항
2. 부정행위 제보 접수 및 처리부서의 지정에 관한 사항
3. 예비조사와 본조사의 착수 및 조사결과의 승인에 관한 사항
4. 제보자 보호 및 피조사자 명예회복 조치에 관한 사항
5. 검증결과의 처리 및 후속조치에 관한 사항
6. 기타 위원장이 부의하는 사항

제10조(구성)

- ① 본 학회지의 연구윤리 확립과 진실성 검증을 위하여 연구윤리진실성위원회(이하 “윤리위원회”)를 설치·운영한다.
- ② 윤리위원회의 위원은 전임학회장과 부회장을 포함하여 학회 발전에 크게 기여한 중진·원로 정회원으로 구성되며, 위원장은 학회장이 임명한다.
- ③ 당해 조사 사안과 이해갈등 관계에 있는 자를 조사위원회에 포함시켜서는 안된다.
- ④ 위원의 임기는 2년으로 하고 연임할 수 있다.

제11조(위원장 등의 임무)

- ① 위원장은 본 학회지의 윤리위원회를 대표하고, 회의를 주재한다.
- ② 부위원장은 위원장을 보좌하고 위원장 결위 시 그의 직무를 수행한다.
- ③ 위원회에 간사 1인을 두어 회의의 업무수행을 돕는다.

제12조(회의)

- ① 위원장은 위원회의 회의를 소집하고 그 의장이 된다.
- ② 회의는 재적위원 과반수 이상의 출석과 출석위원 3분의 2

이상의 찬성으로 의결한다.

- ③ 위원장은 심의안건이 경미하다고 인정할 때에는 서면 심의로 대체할 수 있다.
- ④ 회의는 비공개로 원칙으로 하되, 필요하다고 인정될 때에는 관계자를 출석케 하여 의견을 청취할 수 있다.

제5장 연구진실성 검증

제13조(부정행위 제보 및 접수)

- ① 제보자는 본 학회지 편집 위원회나 연구윤리위원회에 구술·서면·전화·전자우편 등 가능한 모든 방법으로 제보할 수 있으며 실명으로 제보함을 원칙으로 한다. 단, 익명으로 제보하고자 할 경우 서면 또는 전자우편으로 논문명 및 구체적인 부정행위의 내용과 증거를 제출하여야 한다.

제14조(예비조사의 기간 및 방법)

- ① 예비조사는 신고접수일로부터 12일 이내에 완료하여야 한다.
- ② 예비조사에서는 다음 각 호의 사항에 대한 검토를 실시한다.
 1. 제보내용의 부정행위 해당 여부
 2. 제보내용이 구체성과 명확성을 갖추어 본조사를 실시할 필요성과 실익 여부
 3. 제보일이 시효 기산일로부터 5년을 경과하였는지 여부

제15조(예비조사 결과의 보고)

- ① 예비조사 결과는 위원회의 승인을 받은 후 5일 이내에 학회장과 제보자에게 문서로써 통보하도록 한다.
- ② 예비조사 결과보고서는 1. 제보내용, 2. 조사의 대상이 된 부정행위 의혹 및 관련 연구과제, 3. 본조사 실시 여부 및 판단의 근거, 4. 기타 관련 증거 자료가 포함되어야 한다.

제16조(본조사의 기간 및 방법)

- ① 윤리위원회가 본조사를 실시한다. 본조사는 위원회의 예비조사결과 승인 후 7일 이내에 착수하여야 한다. 본조사는 판정을 포함하여 조사 시작일로부터 60일 이내에 완료하여야 하며, 기간 내 조사완료가 어려울 경우 위원회에 사유를 설명하고 기간요청을 할 수 있다.
- ② 최종 보고서에는 다음 각 호의 사항이 포함되어야 한다.
 1. 제보내용
 2. 조사의 대상이 된 부정행위 의혹 및 관련 연구과제
 3. 해당 연구논문에서의 피조사자의 역할과 연구부정행위 의혹의 사실 여부
 4. 관련 증거 및 증인
 5. 조사결과에 대한 제보자와 피조사자의 이의 제기 또는 변론 내용과 그에 대한 처리결과
 6. 기타 조사결과

제6장 연구진실성 조사 원칙

제17조(출석 및 자료제출 요구)

- ① 윤리위원회는 제보자·피조사자·증인 및 참고인에 대하여 진술을 위한 출석을 요구할 수 있으며, 이 경우 피조사자는 반드시 응하여야 한다.
- ② 조사위원회는 피조사자에게 자료의 제출을 요구할 수 있다.

제18조(제보자와 피조사자의 권리 보호 및 비밀엄수)

- ① 어떠한 경우에도 제보자의 선원을 직·간접적으로 노출시켜서는 아니되며, 제보자의 성명은 반드시 필요한 경우가 아니

면 제보자 보호 차원에서 조사결과 보고서에 포함하지 아니한다.

- ② 부정행위 여부에 대한 검증이 완료될 때까지 피조사자의 명예나 권리가 침해되지 않도록 주의하여야 하며, 부정행위와 무관한 것으로 판명된 피조사자의 명예회복을 위해 노력하여야 한다.
- ③ 제보·조사·심의·의결 및 건의조치 등 조사와 관련된 일체의 사항은 비밀로 하며 조사에 직·간접적으로 참여한 자 및 기관장과 관계 직원은 조사 및 직무 수행 과정에서 취득한 모든 정보에 대하여 누설하여서는 아니된다. 다만 합당한 공개의 필요성이 있는 경우 위원회의 의결을 거쳐 공개할 수 있다.

제19조(이의제기 및 변론의 권리 보장) 윤리위원회는 제보자와 피조사자에게 의견진술, 이의 제기 및 변론의 권리와 기회를 동등하게 보장하여야 하며 관련 절차를 사전에 알려주어야 한다.

제20조(준용) 연구진실성과 관련하여 본 규정에서 정하지 않은 내용은 국가의 진실성 관련 법률 및 규정을 준용하여 적용한다.

제7장 부정행위의 확정 및 재심의 절차

제21조(통보) ① 윤리위원장은 최종보고서의 조사내용 및 결과를 확정하고 서면으로 이를 제보자와 피조사자에게 통보한다.

제22조(판정) 조사내용 및 결과에 대한 합의가 이루어지지 않을 경우 재적위원 과반수 위원의 출석 및 3분의 2 이상의 찬성으로 의결한다.

제23조(부정행위 확정) 조사결과 통보 후 14일이 경과하면 피조사자가 부정행위를 인정한 것으로 한다.

제24조(이의 제기) 제보자 또는 피조사자는 윤리위원회 결정에 이의가 있을 경우, 결정을 통보받은 날로부터 14일 이내에 윤리위원회에 구체적인 이유를 기재하여 서면으로 이의 제기를 할 수 있다.

제25조(재심의) 윤리위원회 결정에 대하여 이의를 제기할 경우에 재심의할 수 있다.

제8장 부정행위 결과 조치

제26조(결과에 대한 조치 및 공개)

- ① 투고된 논문의 심사와 정에서 부정행위가 적발되었을 경우에는 해당 논문의 심사를 즉시 중단한다.
- ② 게재 논문이 부정행위 논문으로 확정된 경우에는 다음 각 호의 조치를 취할 수 있다.
 1. 해당 논문을 취소하고 이 사실을 연구자의 소속기관장에게 서면으로 통고한다.
 2. 이상의 사실을 본 학회지에 1회 이상 게재하고, 필요 시 일간지 등에 보도 자료를 제공할 수 있다.
 3. 해당 논문의 모든 연구자는 4년간 본 학회지에 투고할 수 없다.

제27조(기록의 보관) ① 본 조사와 관련된 기록은 편집위원회에서 보관하며, 조사 종결시점으로부터 5년간 보관하여야 한다.

제9장 보칙

제23조(시행일) 이 규정을 2008년 3월 1일부터 시행한다.

이 규정을 2019년 3월 1일부터 시행한다.

Checklist for original article

Title of the manuscript _____

Please check below items as O mark before submission of the manuscript.

1. General guideline

- Manuscript contained one original manuscript, checklist, statement of copyright transfer, and introduction for authors and was dispatched via email (Statement of copyright transfer should be dispatched via PDF file)
- Manuscript should be typed in MS word with a space of 30 mm from upper, lower, left and right margin, 10.0 pt in font size, and line space of 200%.
- Text consisted of cover page, title page, abstract, main text, references, table and figures in separate pages
- Main text consisted of Introduction, Subject and Methods, and Results and Discussion.

2. Cover page

- Title, name of authors (with ORCID), and affiliation were described both in English and in Korea
- Korean and English abbreviated titles were described (Korean: less than 20 letters, English: less than 10 words)
- In lower area of cover page, the name, address, email, telephone, fax of the corresponding author or presentation in the scientific meeting were described.

3. Abstract and Keywords

- Word count was equal to or less than 250
- A total number of word count was described below abstract.
- Keywords were up to 5 with priority order.

4. Main text

- The order of the subtitle was described according to the Instruction to Authors.
- References in the main text were described according to the Instruction to Authors.

5. Author contributions & Conflicts of interest

- Author contributions were provided according to the Instruction to Authors.
- Conflicts of interest were stated according to the Instruction to Authors.

6. References

- All articles in References were cited in the main text.
- All references were written in English.
- The papers from Korean Journal of Limnology were cited if the content is relevant.
- The reference style was followed by the Instruction to Authors.

7. Tables and Figures

- The titles and legends of tables and figures were written in English.
- Photos were in required format.
- The number of tables and figures were described according to the Instruction to Authors.

Original Articles

- 1-16 **Spatial Distribution of Benthic Macroinvertebrate Assemblages in Wetlands of Jeju Island, Korea**
Yung Chul Jun, Seung Phil Cheon, Mi Suk Kang, Jae Heung Park, Chang Su Lee and Soon Jik Kwon
- 17-27 **A Study on the Fish Fauna of the Samcheon and Jeonjucheon Stream in Urban Area at Jeonju, Korea**
Min-Yeong Im, Yu-Shin Sin, Cheol-Woo Park, Jong-Wook Kim, Youn Choi, Eun-Bi Kim and Jae-Goo Kim
- 28-38 **Comparison and Management of Water Purification Efficiency of Artificial Wetland according to Inflow Water Conditions: Focusing on the Gyeongancheon Basin**
Seol Jun Lee, Beomjin Eun, Jong Hwan Kim, I Song Choi and Jong-Min Oh
- 39-50 **Trophic Level and Ecological Niche Assessment of Two Sympatric Freshwater Fish, *Microphysogobio rapidus* and *Microphysogobio yaluensis* Using Stable Isotope Analysis**
Dae-Hee Lee, Hye-Ji Oh, Yerim Choi, Geun-Hyeok Hong, InHyuck Baek, Keun-Sik Kim, Kwang-Hyeon Chang and Ju-Duk Yoon

Note

- 51-59 **Consideration on Application of Zooplankton Index for Wetland Ecosystem Evaluation**
Hyun-Woo Kim