KJEE 56(1): 70-82 (2023)
https://doi.org/10.11614/KSL.2023.56.1.070
ISSN: 2288-1115 (Print), 2288-1123 (Online)

Original article

호소생태계 건강성 평가를 위한 동물플랑크톤 MMI의 국내 적용 연구

최예림* · 오혜지 · 김현준 · 홍근혁 · 이대희 · 곽인실[1,2] · 지창우[2] · 박영석[3] · 김용재[4] · 장광현*

경희대학교 환경학및환경공학과, [1]전남대학교 해양융합과학과, [2]전남대학교 수산과학연구소, [3]경희대학교 생물학과, [4]대진대학교 생명과학과

Application of Zooplankton Index for Korean Lake Health Assessment; Verification of Community Index for Lake Assessment Using Multi Metric. *Yerim Choi** (0000-0002-8600-1391), *Hye-Ji Oh* (0000-0003-2098-8485), *Hyunjoon Kim* (0000-0002-7573-985X), *Geun-Hyeok Hong* (0000-0001-5771-7238), *Dae-Hee Lee* (0000-0002-4701-9409), *Ihn-Sil Kwak*[1,2] (0000-0002-1010-3965), *Chang Woo Ji*[2] (0000-0001-6133-9399), *Young-Seuk Park*[3] (0000-0001-7025-8945), *Yong-Jae Kim*[4] (0000-0003-3326-8372) *and Kwang-Hyeon Chang** (0000-0002-7952-4047) (*Department of Environmental Science and Engineering, Kyung Hee University, Yongin 17104, Republic of Korea; [1]Department of Ocean Integrated Science, Chonnam National University, Yeosu 59626, Republic of Korea; [2]Fisheries Science Institute, Chonnam National University, Yeosu 59626, Republic of Korea; [3]Department of Biology, Kyung Hee University, Seoul 02447, Republic of Korea; [4]Department of Life Science, Daejin University, Pocheon 11159, Republic of Korea*)

Abstract Recently, Korean government has introduced Multi Metric Indices (MMI) using various bio-community information for aquatic ecosystem monitoring and ecosystem health assessment at the national level. MMI is a key tool in national ecosystem health assessment programs. The MMI consists of indices that respond to different target environmental factors, including environmental disturbance (e.g. nutrients, hydrological and hydraulic situation of site etc.). We used zooplankton community information collected from Korean lakes to estimate the availability of candidate zooplankton MMI indices that can be used to assess lake ecosystem health. First, we modified the candidate indices proposed by the U.S. EPA to suit Korean conditions. The modified indices were subjected to individual index suitability analysis, correlation analysis with environmental variables, and redundancy analysis among indices, and 19 indices were finally selected. Taxonomic diversity was suggested to be an important indicator for all three taxonomic groups (cladoceran, copepod, rotifer), on the other hand, the indices using biomass for large cladocerans and copepods, while the indices using abundance were suggested for small cladocerans and rotifers.

Key words: zooplankton index, Multi Metric Index, biological index, statistical analysis, MMI development

서 론

생태계 건강성은 생태계의 변화와 문제를 파악하여 그 원인과 해결 방안을 모색하기 위해 도입된 개념으로, 건강한 생태환경은 안정적이고 지속 가능한 생태계로 정의된다(Schaeffer *et al.*, 1988; Faber and Rapport, 1992; Rapport

Manuscript received 14 March 2023, revised 30 March 2023, revision accepted 30 March 2023
* Co-corresponding authors: Tel: +82-31-201-3399, E-mail: cyl0124@naver.com
Tel: +82-31-201-2977, E-mail: chang38@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.

et al., 1998). 생태계 건강성 개념의 도입 이후 유럽, 미국 등의 다양한 국가에서 다중 지표를 이용한 생태계 건강성 평가 지수를 개발 및 적용하고 있다(Moss *et al.*, 2003; US EPA, 2009; Jeppesen *et al.*, 2011; US EPA, 2016). 생태계에 가해지는 다양하고 복합적인 환경 변화 스트레스로 인해 생태계 교란이 일어날 시 생물 군집은 1차생산성의 비정상적인 감소 및 증가, 민감종의 감소, 개체 활동성 감소 등의 종합적인 변화 반응을 나타낸다(Rapport *et al.*, 1998). 따라서 생태계의 기능 장애 원인 파악 및 해결 방안 모색이라는 건강성 평가의 목적을 위해서는 단일 지표보다 다중 지표를 통해 평가 지수를 구성하는 것이 더 효과적이다(Davis, 1995; Barbour, 1999; Klemm *et al.*, 2003). 이에 따라 대부분의 국가에서는 생태계 건강성 평가에 있어 종합지수인 Multi Metric Index (MMI) 형태의 평가 방식을 채택하여 사용하고 있다(US EPA, 2009; Jeppesen *et al.*, 2011).

MMI란 담수 및 기수 생태계의 건강성을 평가하는 데에 일반적으로 사용되는 도구로써, 다양한 생물학적 측정과 생물들에 대한 지식에 기반하여 생물군집에 대한 통합적인 분석을 제공하는 것이 목적으로, 서로 다른 환경 요인에 반응하는 지수들의 조합으로 구성된 종합지수이다(Karr and Chu, 1999; Hughes and Oberdorff, 2020; Hering *et al.*, 2006). MMI는 예측 가능하고 합리적인 범위 내에서 특정 환경 변화 및 교란에 반응하는 지표들을 선정해 만든 단일 지수들로 구성되어 있다. MMI는 수생태계에 대한 여러 영향을 고려하여 선별한 개별 지수들(예: Saprobic 지수, 다양성 지수 등)을 단위가 없는 점수로 환산 후 결합한 형태로, 대상 지역의 전체적인 건강 상태를 평가하는 데 사용할 수 있다(Hering *et al.*, 2006). 다양한 환경 조건 및 군집의 측면을 반영하는 여러 범주의 지수들(종 다양성, 종 풍부도, 민감종 및 내성종의 비율, 영양 구조)을 결합함으로써 MMI는 단일 지수만을 기반으로 하는 평가 방법보다 더 신뢰할 수 있는 도구로 간주된다(Barbour *et al.*, 1999; Klemm *et al.*, 2003). 국내 하천, 하구 수생태계 건강성 평가에서도 어류와 같은 주요 분류군의 지수는 MMI로 나타내고 있으며, 호소 건강성 평가에서도 이와 같은 MMI의 구성이 필요하다(Ministry of Environment, 2019a, b).

호소생태계 건강성 평가에 있어 동물플랑크톤은 매우 유용한 평가 지표라고 할 수 있다(Bruce *et al.*, 2006). 동물플랑크톤은 식물플랑크톤과 박테리아 개체군을 섭식하는 2차 생산자이면서, 상위 포식자인 어류에게는 질 좋은 먹이 공급원이기 때문에 생태계의 기능과 안정성에 큰 영향을 미치는 중요 유기체로써 작용할 수 있다(Jeppesen *et al.*, 2011). 동물플랑크톤 군집은 호소 내 총인 농도 증가, 어류의 생체량 변화, 유역 내 인위적 토지 이용 증가 등에 따라 대형 지각류의 생체량, 소형/대형종의 비율, 윤충류 개체밀도와 같은 지표가 변화하게 된다(Jeppesen *et al.*, 2000). MMI 형태로 결합된 동물플랑크톤 군집 지표는 호소의 생태학적 수질을 평가할 수 있도록 만든 지수로써 다수 제시되고 있으며, 대표적인 지수에는 식물플랑크톤에 대한 동물플랑크톤의 포식압을 측정할 수 있는 지수(Grazing Potential Index), 윤충류, 지각류, 요각류의 개체밀도 또는 생체량을 이용하여 호소의 부영양화를 측정할 수 있는 지수(TSIROT, TSICR) 등이 있다(Ejsmont-Karabin, 2012; Ejsmont-Karabin and Karabin, 2013; Stamou *et al.*, 2019). 이처럼 종합적인 생태계의 건강 상태를 나타낼 수 있는 동물플랑크톤 지수는 먹이망 내의 생물학적 상호작용을 통한 에너지 흐름, 물질 흐름 등 호소 환경에 대한 정보를 파악함으로써 호소생태계 건강성 평가에 효과적으로 활용될 수 있다. 호소생태계 건강성 파악에 필요한 동물플랑크톤 평가 방법을 기후, 생태계 구성환경이 다양한 수계에 적용하기 위해서는 채집 방법, 출현종 등 동물플랑크톤 군집에서 도출되는 지수를 지역환경에 맞게 수정할 필요가 있다(Ochocka, 2021). 따라서 국내 호소에 적합한 동물플랑크톤 MMI 개발을 위해서는 국내 호소의 기후, 서식생물 종, 생태계를 구성하는 환경 등에 적합한 지수의 사용이 매우 중요하다.

미국의 EPA는 수생태계 건강성 평가를 위해 'National Aquatic Resource Surveys'를 시행하여 국가 차원의 건강성 평가에 사용가능한 동물플랑크톤 MMI의 개발과정 및 적용 결과에 대한 연구 논문과 지침화된 지표를 개선, 공표하고 있다(US EPA, 2009, 2016). 따라서 본 연구는 미국 EPA에서 제시한 동물플랑크톤 MMI 후보지표들의 국내 적용 가능성을 검토하고, 실제 국내 호소의 동물플랑크톤 군집을 채집, 분석하여 지수 산정 및 통계적 검증을 통해 국내 호소생태계 건강성 평가 지표로써 동물플랑크톤의 활용 가능 여부를 판단하였다.

재료 및 방법

1. 연구대상지 선정

본 연구에서는 동물플랑크톤 종 조성, 수질 및 주변 환경이 다른 국내 3개 저수지를 분석 대상지로 선정하였다. 다양한 환경의 호소를 포함하기 위해 수심이 얕은 소형호인 신갈지(37°14′30.4″N 127°05′45.4″E), 수심이 얕은 중형호인 예당지(36°37′44.8″N 126°48′03.9″E), 수심이 깊은 대형호인 주암댐(35°03′37.3″N 127°14′19.3″E) 3개 저수지에서 채집한 동물플랑크톤을 대상으로 분석을 진행하였다.

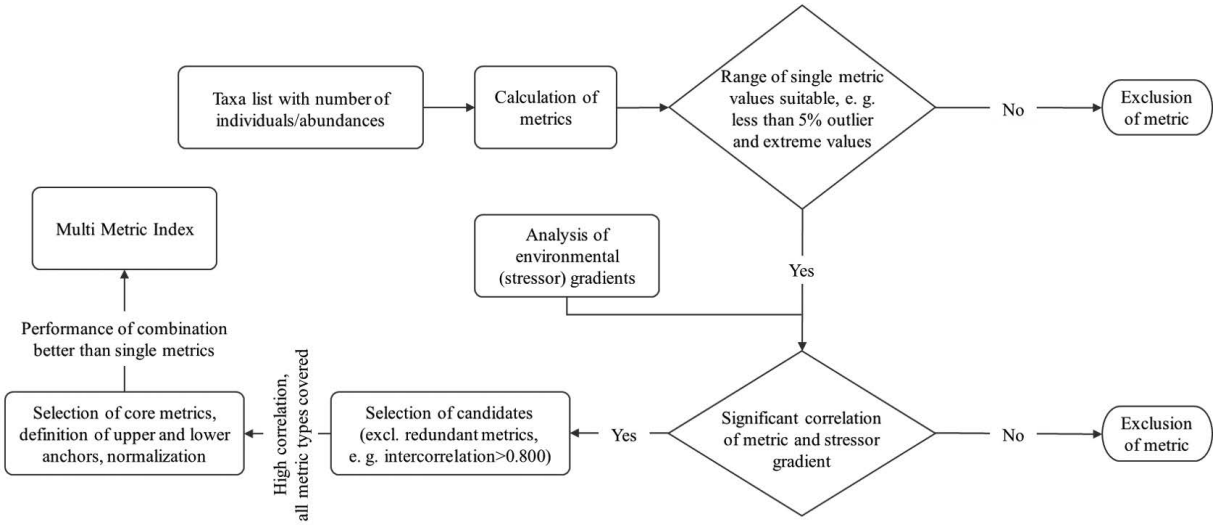

Fig. 1. Overview of MMI development based on environmental conditions and clustering information (Hering *et al.*, 2006).

2. 수질 및 동물플랑크톤 조사

대상지의 수질 및 동물플랑크톤은 2020년 4월부터 2022년 10월까지 측정하였다. 신갈지의 경우 월별 측정하였으며, 예당지와 주암댐의 경우 매년 4월과 10월 2번에 걸쳐 측정하였다.

수질 환경 파악을 위해 수심, 투명도, 수온, 용존산소(DO), pH, 전기전도도(EC), 총유기탄소(TOC), 총질소(TN), 총인(TP), 부유물질(SS), 클로로필a, 아질산성질소(NO_2-N), 질산성질소(NO_3-N), 암모니아성질소(NH_3-N), 인산염인(PO_4-P), 용존총유기탄소(DTOC), 용존총질소(DTN), 용존총인(DTP), 화학적산소요구량(COD) 19가지 항목의 이화학적 수질 요인을 측정하였다. 수온, 용존산소(DO), pH, 전기전도도(EC)는 Horriba u-20 (Horriba, Japan)을 사용하여 현장 측정하였으며, 이외의 항목들은 수질오염 공정시험법에 따라 실내분석을 통해 측정하였다(Ministry of Environment, 2018). 분석에 사용한 동물플랑크톤의 현장 채집은 채집 네트(망목: 60 μm, 90 μm)를 이용하여 전층 수직끌기 방법으로 채집, 125 mL의 플라스틱 통에 넣고 현장에서 포르말린(Formaldehyde) 용액을 사용하여 최종 농도 4%로 고정하였다. 채집된 시료는 실내에서 광학현미경(CKX 41; Olympus, German)을 이용하여 종 또는 속 수준으로 동정하고 계수하였다. 동물플랑크톤 개체 크기의 평균값은 도립현미경(CKX 41; Olympus, Germany), 현미경 디지털 카메라(FX-500; Olympus, Japan)와 이미지 뷰어 프로그램(ImageView)을 이용하여 직접 측정하였으며, 직접 측정이 어려운 개체는 도감 및 논문을 참고하였다(Mizuno and Takahashi, 1999).

3. 통계분석

EPA의 동물플랑크톤 MMI 개발 과정에서 사용되었던 236개의 후보 지수를 ① 국내 적용이 어려운 지수, ② 수정 후 적용 가능한 지수, ③ 국내 적용 가능한 지수, 세 가지 기준으로 분류한 후 국내 적용이 어려운 지수의 제외 및 수정 과정을 통해 국내 적용에 가장 적절한 지수를 선별하였다. 앞서 선별된 지수들을 MMI 개발 개요에 따라 ① 개별 지수의 적합성 평가, ② 수질 및 부영양화 지수와의 상관성 평가, ③ 메트릭화를 위한 범주 내 지수 간 중복성 평가를 거쳐 최종 후보 지수로 선별하였다(Fig. 1) (Hering *et al.*, 2006).

비율 지수(예: 지각류의 생체량/총 생체량, 요각류의 개체수/총 개체수)가 아닌 개체수 지수와 생체량 지수(예: 지각류의 생체량, 요각류의 개체수)의 계산 시 $\log_{10}$를 취하여 정규화 후 사용하였다. 지수의 선별을 위하여 이상치 및 극단치 분석, 상관관계 분석을 수행하였으며, 분석은 R 및 R studio (ver.4.1.2)의 관련 패키지를 이용하여 수행하였다.

결 과

1. EPA 동물플랑크톤 MMI 지수 중 국내 적용 가능한 지수의 선별 기준 설정

EPA에서 제시한 236개의 후보지수 중 83개의 지수는 미국 내 동물플랑크톤 고유종을 이용한 지수(예: 동물플랑크톤 고유종의 비율, Bosminidae과에서 고유종에 속하는 종의 비율 등)로 외래종의 침입에 대한 고유종의 군집

Table 1. Modifying the U.S. EPA's candidate zooplankton indices for Korea

Metric category	Metric	Revised metric
Abundance/ Biomass/ Density	− Biomass of fine mesh net (50 μm) taxa − Density of individuals collected in coarse mesh net (150 μm)	− Biomass of fine mesh net (60 μm) taxa − Density of individuals bigger than 150 μm
Cladoceran	− Biomass represented by large cladoceran individuals in 300-count subsamples − Biomass represented by large cladoceran individuals	− Biomass represented by large cladoceran individuals
Richness/ Diversity	− % of fine mesh netc (50 μm) taxa	− % of fine mesh net (60 μm) taxa
Copepod	− % of biomass in dominant copepod taxon (300 count subsamples)	− % of biomass in dominant copepod taxon
Rotifer	− % of distinct taxa that are within the rotifer family Asplanchnidae in 300-count subsamples (coarse and fine net samples combined)	− % of distinct taxa that are within the rotifer family Asplanchnidae
Trophic	− % of total density represented by herbivorous copepods − % taxa that are omnivorous copepods	− % of total density of Calanoid copepods − % taxa of Cyclopoid copepods

변화 평가를 위한 지수이다. 미국은 약 10억년 이상의 역사를 가진 자연 형성 호소에서 지속적으로 동물플랑크톤을 대상으로 한 고유종 및 외래종 연구가 진행되어 이들의 구분이 뚜렷이 제시되어 있기 때문에 이를 이용한 지수의 개발 및 적용이 가능하다(Mills *et al.*, 1994; Work and Gophen, 1999; Havens *et al.*, 2000; Frisch and Weider, 2013; Mussels *et al.*, 2014). 그에 반해 대부분의 국내 호소는 관개 용수를 위해 인공적으로 조성된 저수지 혹은 댐이 대부분이며, 그중 약 55%가 70년 이내에 만들어진 호소로 국내에서는 담수 동물플랑크톤을 대상으로 한 외래종 연구가 거의 진행되지 않았다(Hwang *et al.*, 2003). 또한, 국내 동물플랑크톤 고유종은 종 동정에 사용되는 도감의 제한적 정보활용 등으로 인해 동정에 한계가 있어 고유종을 이용한 지수의 범용적 사용이 어렵다. 따라서 동물플랑크톤 고유종을 이용한 83개의 지수가 제외되었다.

호소생태계에서 수변식생 환경은 다양한 생물들에게 먹이 및 서식처를 제공하며 어류의 포식압을 탈피할 수 있는 은신처를 제공한다(Kairesalo *et al.*, 1998; Joo *et al.*, 2013). 특히, 동물플랑크톤은 이러한 수변의 수생식물 군락을 효과적인 은신처로써 활용하고 있는 것으로 알려져 있다(Nurminen and Horppila, 2002). 따라서 수변식생이 잘 조성된 호소는 수변식생이 발달하지 않은 호소와 비교했을 때, 보다 다양한 생물(특히 동물플랑크톤)이 서식할 수 있는 기회를 제공함으로써 동물플랑크톤의 종 풍부도 및 다양성 변화에 긍정적인 영향을 미칠 수 있다(Cortez-Silva *et al.*, 2020; Forio *et al.*, 2020). 수변식생 환경과의 관계에 따라 미국 EPA에서 제시한 후보 지수들 중 수변 식생에 고착, 부착하여 서식하는 개체들을 이용한 지수의 검토가 필요하나, 국내 존재하는 대부분의 호소는 인공적으로 조성된 저수지 혹은 댐으로 연안 식생환경이 발달하지 않은 지역이 다수를 차지하며, 지수에 포함되어 있는 부착성 동물플랑크톤 종 또한 국내에서 자주 등장하지 않는 종(예: Sididae과, Collothecaceae과 등)이기 때문에 이에 관련한 지수들은 국내 적용이 어렵다고 판단해 17개의 지수가 제외되었다.

2. 선별된 동물플랑크톤 지수와 국내 적용 안

앞서 선별된 후보 지수들은 ① 풍부도, 생체량, 개체밀도에 관련된 지수, ② 지각류를 이용한 지수, ③ 다양도지수, ④ 요각류를 이용한 지수, ⑤ 윤충류를 이용한 지수, ⑥ 영양단계에 관련된 지수, 6가지 범주로 구분되어 있다.

미국에서는 호소 조사 시 망목의 크기가 50 μm와 150 μm인 두 가지 네트를 사용해 동물플랑크톤 시료를 채집하여 시료가 fine net sample, coarse net sample 두 가지로 구분된다. 국내 담수생태계 조사의 경우 일반적으로 망목 60 μm의 네트를 이용하여 동물플랑크톤을 채집한다. 이러한 망목 크기 기준에 따른 조사방법 차이 고려시, 직접적인 지수 적용의 한계에 따라 후보 지수 중 50 μm의 네트로 채집된 동물플랑크톤을 이용한 지수는 60 μm의 네트로 채집

Table 2. 49 candidate indices before analyzing suitability for domestic application through statistical analysis.

Metric category	Metric name	Description
Abundance/ Biomass/ Density	FINE_DEN	Biomass of individuals of fine mesh net (60 μm) taxa (total zooplankton)
	FINE_BIO	Density of individuals of fine mesh net (60 μm) taxa (total zooplankton)
	LGZOO_DEN	Density of individuals bigger than 150 μm
	LGZOO_PBIO	% biomass of individuals bigger than 150 μm
	LGZOO_BIO	Biomass of individuals bigger than 150 μm
Cladoceran	LGCLAD_BIO	Biomass represented by large cladoceran individuals
	LGCLAD_DEN	Density represented by large cladoceran individuals
	LGCLAD_PIND	% individuals represented by large cladoceran individuals
	SMCLAD_BIO	Biomass represented by small cladoceran individuals
	SMCLAD_PBIO	% biomass represented by small cladoceran individuals
	SMCLAD_PDEN	% density represented by small cladoceran individuals
	HPRIME_CLAD	Shannon diversity based on number of cladoceran individuals (absolute value). Calculated as SUM{p(i)*Log[p(i)]}, where p(i) is proportion of individuals of taxon i, and Log = natural logarithm.
	CLAD_BIO	Biomass represented by cladoceran individuals
Richness/ Diversity	FINE_NTAX	Number of distinct taxa collected only in the fine mesh net (60 μm) (total zooplankton)
	GEN_NTAX	Number of genera represented by distinct taxa
	DOM5_PBIO	Percent of total biomass represented in top 5 taxa
	LGZOO_PTAX	Percent of distinct taxa bigger than 150 μm
	LGCLAD_PTAX	Percent of distinct large cladoceran taxa
	SMZOO_PTAX	Percent of distinct small cladoceran taxa
	SIMPSON_DEN	Simpson diversity based on number of individuals. Calculated as SUM{p(i)*p(i)}, where p(i) is the proportion of taxon i in the sample.
Copepod	CALAN_DEN	Total density of individuals within the copepod order Calanoida
	DOM1_COPE_PBIO	Percent of rotifer biomass in dominant copepod taxon
	COPE_DEN	Density represented by individuals within the subclass Copepoda
	COPE_BIO	Biomass represented by individuals within the subclass Copepoda
	CALAN_NTAX	Number of distinct native taxa within the copepod order Calanoida
	CALAN_PDEN	Percent of total density represented by individuals of native taxa within the copepod order Calanoida
	COPE_PDEN	% density represented by individuals within the subclass Copepoda
	CALAN_PTAX	Percent of distinct native taxa within the copepod order Calanoida
	CYCLO_PTAX	Percent of distinct native taxa within the copepod order Cyclopoida
	COPE_RATIO_NIND	Number of Calanoida individuals/ (Number of cladoceran individuals + Number of Cyclopoida individuals)
	COPE_RATIO_BIO	Biomass of Calanoida individuals/ (Biomass of cladoceran individuals + Biomass of Cyclopoida individuals)
	CALAN_BIO	Biomass of individuals within the copepod order Calanoida
	CALAN_PBIO	% biomass of individuals within the copepod order Calanoida
	CYCLO_PBIO	% biomass of individuals within the copepod order Cyclopoida
	COPE_NTAX	Number of distinct copepod taxa
	COPE_PTAX	Percent of distinct copepod taxa
Rotifer	ROT_PBIO	% biomass represented by rotifer individuals
	ROT_NTAX	Number of distinct rotifer taxa
	HPRIME_ROT	Shannon diversity based on number of rotifer individuals(absolute value). Calculated as SUM{p(i)*Log[p(i)]}, where p(i) is proportion of individuals of taxon i, and Log = natural logarithm.
	SIMPSON_ROT	Simpson Diversity based on the number of rotifer individuals. Calculated as SUM{p(i)*p(i)} where p(i) is the proportion of taxon i in the sample.
	DOM1_ROT_PBIO	Percent of rotifer biomass in dominant rotifer taxon
	DOM3_ROT_PDEN	Percent of rotifer density in top 3 rotifer taxa
	DOM5_ROT_PDEN	Percent of density in top 5 rotifer taxa
	ROT_PTAX	Percent distinct rotifer taxa

Table 2. Continued.

Metric category	Metric name	Description
	OMNI_PTAX	Percent of distinct taxa that are omnivorous
	OMNI_PDEN	Percent of total density represented by omnivorous individuals
Trophic	ROT_OMNI_BIO	Biomass represented by rotifer individuals that are omnivores
	ROT_OMNI_PTAX	Percent of distinct rotifer taxa that are omnivorous
	ROT_OMNI_PDEN	Percent of rotifer density represented by omnivores

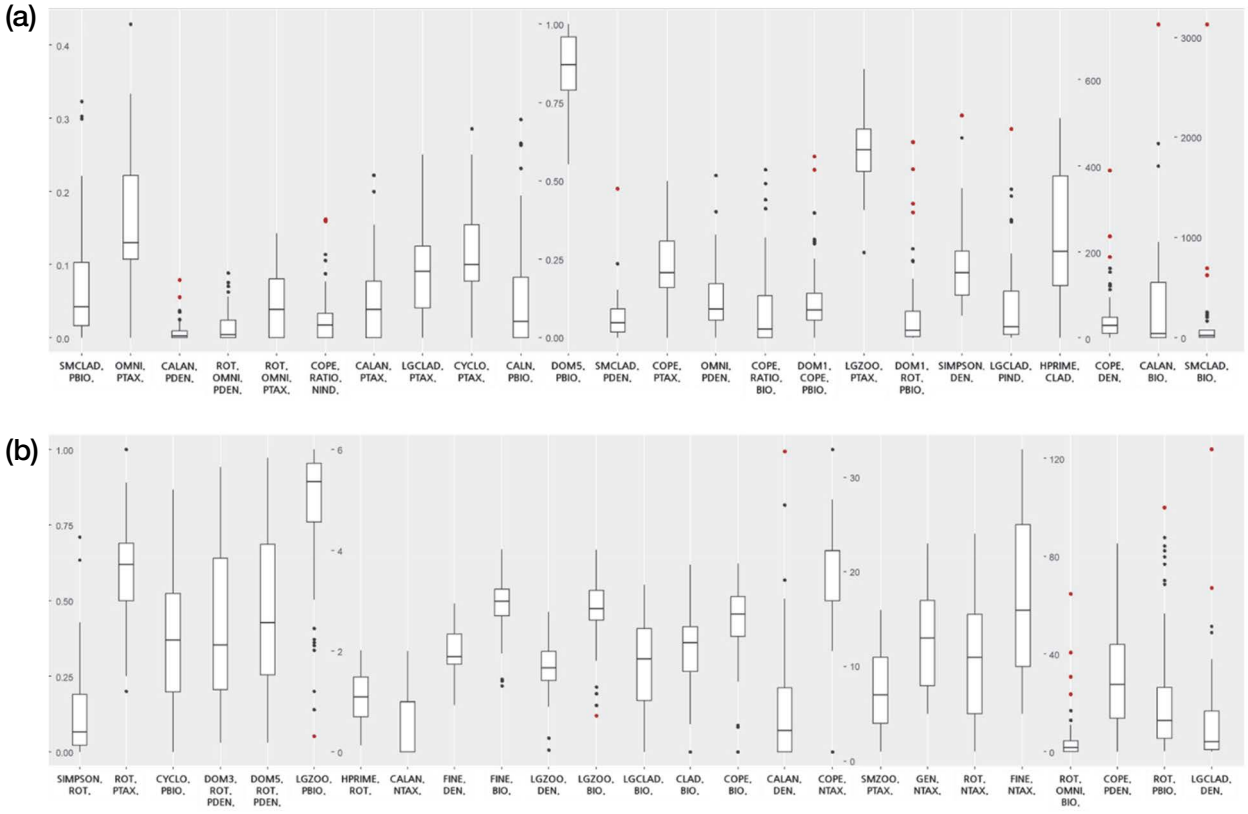

Fig. 2. Boxplot for analyzing the distribution of individual indices. Black dots are outliers, red dots are extremes.

된 동물플랑크톤을 이용한 지수로 대체되었고, 150 μm의 네트로 채집된 동물플랑크톤을 이용한 지수는 개체 크기의 평균이 150 μm를 넘는 개체를 이용한 지수로 대체되었다.

300-count subsamples은 부차시료 내 300개 이상의 개체가 확인된 시료를 말하는데, 생물 평가 목적의 시료 검정 시 권장되는 방법으로, 시료 검정으로부터 얻은 분류군에 대한 정보가 전체 분류군의 풍부도 및 다양도를 충분히 대표할 수 있도록 하는 시료 검정 방법이다(Flotemersch *et al.*, 2006). 그러나 이 분석 방법은 국내 시료 분석 시 사용하지 않는 방법이기 때문에 300-count subsamples 부분을 삭제하고 그로 인해 발생하는 중복된 지수는 두 개의 지수 중 한 개의 지수만 남기고 제외되었다(Table 1). 이 과정을 거쳐 총 136개의 지수 중 49개의 지수가 선별되었다(Table 2).

3. 선별된 동물플랑크톤 지수의 유효성 검증

1) 개별 지수의 적합성 평가

건강성 평가 적용에 있어 수치적으로 부적합한 지수들이 식별되어 제외되었다. 일반적으로 MMI 구성 시 개별 지수 값의 범위가 매우 좁거나 다수의 이상치 및 극단치를

가진 지수는 부적합한 것으로 판단되어 제외된다(Hering *et al.*, 2006). 본 연구에서는 개별 지수의 적합성을 평가하기 위해 boxplot을 이용하여 각 지수의 분포도 평가를 수행하였다. 5% 이상의 이상치 및 극단치를 가지는 지수는 제거되었다. 총 22개의 지수가 부적합한 것으로 판단되어 27개의 지수가 선별되었다(Fig. 2).

2) 수질 및 부영양화 지수와의 상관성 평가

지수가 ① 높은 시간적 및 또는 공간적 변동성을 가져 교란의 영향과 자연적 변동성 사이를 구별하기 어려운 경우, ② 교란의 영향을 반영하지 않고 거의 관계가 없는 경우, ③ 생태학적 원리와 이해에 기반을 두고 있지 않은 경우에는 부적절한 지수로 간주된다(Hering *et al.*, 2006). 따라서 신뢰할 수 있고 해석 가능하며 자연적 변동과 구분이 가능한 교란 요인의 구배에 걸쳐 적절한 반응 변화를 보여주는 지수를 선택해야 한다. 교란 요인의 영향을 정량적으로 설명하기 위해서 인 및 질소 화합물의 농도와 같이 호소의 영양상태를 설명하는 데이터, 호소의 형태학적 환경을 특징 지을 수 있는 데이터(예: German Structure Index) (Feld, 2004; Lorenz *et al.*, 2004) 등이 사용 가능하다. 본 연구에서는 교란의 요인으로 호소의 영양 상태를 설명할 수 있는 수질 및 부영양화 지수를 사용하였다.

$$\text{종합 } TSI_{KO} = TSI_{KO}(COD) + 0.5\,(TSI_{KO}(Chl\text{-}a)) + 0.25TSI_{KO}(TP)$$

$$\triangleright\, TSI_{KO}(COD) = 5.8 + 64.4\log(COD\ mg\ L^{-1})$$

$$\triangleright\, TSI_{KO}(Chl\text{-}a) = 12.2 + 38.6\log(Chl\text{-}a\ mg\ m^{-3})$$

$$\triangleright\, TSI_{KO}(TP) = 114.6 + 43.3\log(TP\ mg\ L^{-1})$$

각 지수와 수질 및 부영양화 지수와의 상관관계 분석 결과 모든 환경변수와의 Spearman의 상관계수가 0.3 이하 혹은 −0.3 이상으로 분석되는 지수를 제외하였다. 분석 결과 요각류의 개체밀도 비율 지수(COPE_PDEN)와 cyclopoida의 생체량 비율 지수(CYCLO_PBIO)가 제외되었다(Fig. 3).

3) 메트릭화를 위한 범주 내 지수 간 중복성 평가

종합지수의 구성 시 같은 범주 안에서 지수들 간 상관관계가 높게 분석되면 한 지수를 다른 지수와의 함수관계로 표시할 수 있게 되어 두 지수가 하나의 환경 변화를 동시에 설명하는 지표가 될 수 있다(Hering *et al.*, 2006). 따라서 서로 강한 상관관계(Spearman의 상관계수 > 0.8)를 보이는 지수들은 중복으로 판단되어 한 지수만 남기고 제외하였다. 중복 지수 중 제외할 지수를 선정할 때 같은 범주

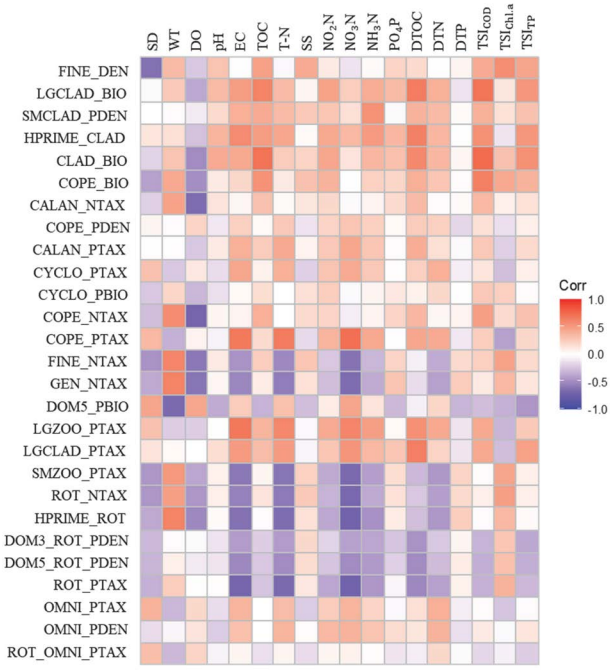

Fig. 3. Correlation between water quality indicators and zooplankton indices.

의 다른 지수들과의 상관관계 평균을 계산하여 평균 상관관계가 더 높은 지수를 제외하였다(Hering *et al.*, 2006). 지각류 범주에서는 대형 지각류의 생체량 지수(LGCLAD_BIO)와 지각류의 생체량 지수(CLAD_BIO) 간 상관계수가 0.93으로 분석되어 같은 범주 내 타 지수들과의 상관계수 절대값의 평균을 비교한 결과 LGCLAD_BIO는 0.63, CLAD_BIO는 0.68로 CLAD_BIO가 더 높은 평균값을 가져 제외되었다(Table 4).

다양도 범주 내 지수들 간 상관관계를 분석한 결과 총 종 수 지수(FINE_DEN), 총 속 수 지수(GEN_NTAX), 소형 동물플랑크톤의 종 수 비율 지수(SMZOO_PTAX) 간 상관계수가 모두 0.9 이상으로 매우 높은 중복성을 가지는 것으로 분석되었다. 같은 범주 내 타 지수들과의 상관계수 절대값의 평균을 비교한 결과 0.61로 가장 낮은 평균을 보이는 FINE_NTAX를 제외하고 각각 0.62, 0.70의 평균값을 보인 GEN_NTAX와 SMZOO_PTAX는 최종 선별 지수에서 제외되었다(Table 5).

요각류 범주에서는 Calanoida의 종 수 지수(CALAN_NTAX)와 요각류의 종 수 지수(COPE_NTAX)의 상관계수가 0.80으로 분석되었다. 같은 범주 내 타 지수들과의 상관계수 절대값의 평균을 계산한 결과 CALAN_NTAX는 0.28, COPE_NTAX는 0.45로 COPE_NTAX 지수가 제외

Table 3. Water quality results at the sites.

	Juam		Yedang		Shingal	
	Avg ± SD	Min-Max	Avg ± SD	Min-Max	Avg ± SD	Min-Max
WD (m)	26.9 ± 11.4	9.9-45.2	5.1 ± 1.8	2.5-8.3	5.1 ± 1.2	2.7-7.3
SD (m)	1.7 ± 0.5	0.8-2.4	1.4 ± 0.9	0.4-2.9	1.4 ± 0.8	0.5-3.3
WT (°C)	21.8 ± 5.8	13.1-29.0	20.7 ± 6.0	15.5-33.1	21.9 ± 6.4	6.7-29.6
DO (mg L^{-1})	11.7 ± 5.7	5.3-24.0	11.2 ± 3.9	1.5-21.8	11.0 ± 3.0	5.1-18.7
pH	7.37 ± 1.00	5.80-8.75	8.76 ± 1.37	6.80-11.68	8.25 ± 1.12	6.29-10.39
EC (μS cm^{-1})	0.095 ± 0.030	0.027-0.144	0.267 ± 0.042	0.201-0.314	0.570 ± 0.180	0.176-0.800
TOC (mg L^{-1})	2.24 ± 0.40	1.60-2.90	4.36 ± 1.11	2.80-5.30	3.78 ± 0.82	2.50-5.20
T-N (mg L^{-1})	0.74 ± 0.25	0.30-1.12	0.96 ± 0.21	0.71-1.27	4.67 ± 1.24	2.78-6.62
T-P (mg L^{-1})	0.02 ± 0.02	0.01-0.07	0.03 ± 0.01	0.02-0.04	0.03 ± 0.01	0.02-0.06
SS (mg L^{-1})	3.45 ± 2.41	1.30-7.80	6.50 ± 6.28	1.00-15.80	6.43 ± 5.62	0.80-18.90
Chl-a (mg m^{-3})	13.9 ± 6.5	6.9-26.2	26.7 ± 27.9	5.90-83.10	16.6 ± 10.6	1.2-43.6
NO_2-N (mg L^{-1})	0.008 ± 0.003	0.004-0.011	0.025 ± 0.012	0.015-0.052	0.157 ± 0.05	0.059-0.234
NO_3-N (mg L^{-1})	0.357 ± 0.214	0.066-0.774	0.480 ± 0.220	0.214-0.754	2.306 ± 0.672	1.176-3.377
NH_3-N (mg L^{-1})	0.038 ± 0.018	0.012-0.065	0.069 ± 0.025	0.044-0.125	1.205 ± 0.906	0.115-3.62
PO_4-P (mg L^{-1})	0.006 ± 0.004	0.003-0.016	0.006 ± 0.005	0.000-0.016	0.009 ± 0.009	0.03-0.035
DTOC (mg L^{-1})	1.88 ± 0.30	1.50-2.50	3.36 ± 0.98	2.50-4.90	3.43 ± 0.57	2.40-4.30
DTN (mg L^{-1})	0.55 ± 0.25	0.22-0.85	0.84 ± 0.18	0.68-1.09	4.98 ± 1.04	3.60-6.42
DTP (mg L^{-1})	0.04 ± 0.11	0.00-0.39	0.01 ± 0.01	0.01-0.03	0.02 ± 0.01	0.01-0.05
COD (mg L^{-1})	4.00 ± 0.74	3.00-5.20	7.53 ± 1.92	4.80-10.60	6.2 ± 1.3	4.6-8.4

WD, Water Depth; SD, Secci Disk depth; WT, Water Temperature; DO, Dissolved Oxygen; EC, Electrical Conductivity; TOC, Total Organic Carbon; TN, Total Nitrogen, TP, Total Phosphorus; SS, Suspended Solid; DTOC, Dissolved Total Organic Carbon; DTN, Dissolved Total Nitrogen, DTP; Dissolved Total Phosphorus; COD, Chemical Oxygen Demand.

Table 4. Correlation analysis between indices in the Cladoceran category.

	LGCLAD_BIO	SMCLAD_PDEN	HPRIME_CLAD	CLAD_BIO	AVG_SC
LGCLAD_BIO	1	0.28	0.68	**0.93**	0.63
SMCLAD_PDEN	0.28	1	0.61	0.42	0.43
HPRIME_CLAD	0.68	0.61	1	0.70	0.66
CLAD_BIO	**0.93**	0.42	0.70	1	0.68

AVG_SC, average of indices in same category.

Table 5. Correlation analysis between indices in the Richness/Diversity category.

	FINE_NTAX	GEN_NTAX	DOM5_PBIO	LGZOO_PTAX	LGCLAD_PTAX	SMZOO_PTAX	AVG_SC
FINE_NTAX	1	**0.97**	−0.75	−0.32	−0.10	**0.93**	0.61
GEN_NTAX	**0.97**	1	−0.73	−0.36	−0.14	**0.91**	0.62
DOM5_PBIO	−0.75	−0.73	1	0.27	0.15	−0.73	0.53
LGZOO_PTAX	−0.32	−0.36	0.27	1	0.64	−0.61	0.44
LGCLAD_PTAX	−0.10	−0.14	0.15	0.64	1	−0.33	0.27
SMZOO_PTAX	**0.93**	**0.91**	−0.73	−0.61	−0.33	1	0.70

AVG_SC, average of indices in same category.

Table 6. Correlation analysis between indices in the Copepod category.

	COPE_BIO	CALAN_NTAX	COPE_PDEN	CALAN_PTAX	CYCLO_PTAX	CYCLO_PBIO	COPE_NTAX	COPE_PTAX	AVG_SC
COPE_BIO	1	0.37	0.49	0.12	0.29	0.71	0.73	0.24	0.42
CALAN_NTAX	0.37	1	0.08	0.79	−0.36	0.20	**0.80**	0.08	0.38
COPE_PDEN	0.49	0.08	1	0.05	0.52	0.56	0.32	0.47	0.35
CALAN_PTAX	0.12	0.79	0.05	1	−0.20	−0.02	0.51	0.42	0.35
CYCLO_PTAX	0.29	−0.36	0.52	−0.20	1	0.28	0.06	0.78	0.35
CYCLO_PBIO	0.71	0.20	0.56	−0.02	0.28	1	0.48	0.18	0.35
COPE_NTAX	0.73	**0.80**	0.32	0.51	0.06	0.48	1	0.27	0.45
COPE_PTAX	0.24	0.08	0.47	0.42	0.78	0.18	0.27	1	0.35

AVG_SC, average of indices in same category.

Table 7. Correlation analysis between indices in the Rotifer category.

	ROT_NTAX	HPRIME_ROT	DOM3_ROT_PDEN	DOM5_ROT_PDEN	ROT_PTAX	AVG_SC
ROT_NTAX	1	**0.83**	0.29	0.36	0.68	0.54
HPRIME_ROT	**0.83**	1	0.39	0.50	0.59	0.58
DOM3_ROT_PDEN	0.29	0.39	1	**0.99**	0.71	0.60
DOM5_ROT_PDEN	0.36	0.50	**0.99**	1	0.75	0.65
ROT_PTAX	0.68	0.59	0.71	0.75	1	0.68

AVG_SC, average of indices in same category.

Table 8. Correlation analysis between indices in the Trophic category.

	OMNI_PTAX	OMNI_PDEN	ROT_OMNI_PTAX	AVG_SC
OMNI_PTAX	1	0.30	0.67	0.48
OMNI_PDEN	0.30	1	−0.14	0.22
ROT_OMNI_PTAX	0.67	−0.14	1	0.40

AVG_SC, average of indices in same category.

되었다(Table 6).

윤충류 범주에서 윤충류의 종 수 지수(ROT_NTAX)와 윤충류의 Shannon 다양성 지수(HPRIME_ROT) 간 상관계수가 0.83으로, 윤충류 중 3위까지의 우점종 개체밀도 비율 지수(DOM3_ROT_PDEN)와 윤충류 중 5위까지의 우점종 개체밀도 비율 지수(DOM5_ROT_PDEN) 간 상관계수가 0.99로 분석되어 같은 범주 내 타 지수들과의 상관계수 절대값의 평균 비교 결과 HPRIME_ROT와 DOM5_ROT_PDEN이 제외되었다(Table 7).

영양단계 범주에서는 중복지수가 없는 것으로 분석되었다(Table 8).

최종적으로 총 19개의 지수, 각 범주별 최대 5개의 지수가 국내 호소 건강성 평가에 적절한 지수로 선별되었다(Table 9). 모든 분류군에서 종 다양성에 관한 지수가 선별되었으며, 대형 지각류와 요각류를 이용한 지수는 생체량 지수, 소형 지각류와 윤충류를 이용한 지수는 개체 밀도 지수가 최종적으로 선별되었다.

고 찰

본 연구에서 최종적으로 선별된 지수들의 구성 요소를 살펴보면, 지각류, 요각류, 윤충류 세 분류군 모두 종 다양도 관련 지수가 포함되어 동물플랑크톤을 이용한 건강성 평가에 있어 각 분류군의 다양도가 중요한 지표로써 활용 가능할 것으로 판단된다. 또한 대형 지각류와 요각류를 이

Table 9. The 19 candidate indices that were selected after all statistical analysis.

Metric category	Metric name	Description
Abundance/ Biomass/ Density	FINE_DEN	Biomass of individuals of fine mesh net (60 μm) taxa (total zooplankton)
Cladoceran	LGCLAD_BIO	Biomass represented by large cladoceran individuals
	SMCLAD_PDEN	% density represented by small cladoceran individuals
	HPRIME_CLAD	Shannon diversity based on number of cladoceran individuals (absolute value) Calculated as SUM{p(i)*Log[p(i)]}, where p(i) is proportion of individuals of taxon i, and Log = natural logarithm.
Richness/ Diversity	FINE_NTAX	Number of distinct taxa collected only in the fine mesh net (60 μm) (total zooplankton)
	DOM5_PBIO	Percent of total biomass represented in top 5 taxa
	LGZOO_PTAX	Percent of distinct taxa bigger than 150 μm
	LGCLAD_PTAX	Percent of distinct large cladoceran taxa
Copepod	COPE_BIO	Biomass represented by individuals within the subclass Copepoda
	CALAN_NTAX	Number of distinct native taxa within the copepod order Calanoida
	CALAN_PTAX	Percent of distinct native taxa within the copepod order Calanoida
	CYCLO_PTAX	Percent of distinct native taxa within the copepod order Cyclopoida
	COPE_PTAX	Percent of distinct copepod taxa
Rotifer	ROT_NTAX	Number of distinct rotifer taxa
	DOM3_ROT_PDEN	Percent of rotifer density in top 3 Rotifer taxa
	ROT_PTAX	Percent distinct rotifer taxa
Trophic	OMNI_PTAX	Percent of distinct taxa that are omnivorous
	OMNI_PDEN	Percent of total density represented by omnivorous individuals
	ROT_OMNI_PTAX	Percent of distinct rotifer taxa that are omnivorous

용한 지수는 생체량, 소형 지각류와 윤충류의 경우에는 개체수가 중요한 지표로써 선정되었다. 동물플랑크톤은 50 μm 이하의 작은 종부터 15 mm가 넘는 종까지 종별 개체 크기 차이가 매우 다양하기 때문에 생체량이 아닌 개체수 기준으로 평가 지수 구성 시 개체 크기가 큰 종의 경우 생태계 기능에 대한 종의 역할과 기여도가 과소평가될 가능성이 있다(Walz *et al.*, 1995; Branstrator, 1998; Ku *et al.*, 2022). 따라서 분류군별 지수 개발 시 분류군의 개체 크기를 고려하여 개체밀도 혹은 생체량이 적합하게 적용된 지수 구성이 필요하다.

MMI는 다양한 교란 요인을 생물 군집의 변화로써 통합적으로 해석하는 것이 가능하기 때문에 담수 생태계의 건강성을 평가하는 데 유용한 도구로써 사용될 수 있다(Böhmer and Zenker, 2004). 최근까지 진행된 동물플랑크톤 MMI에 관한 대부분의 연구에서는 교란 정도에 대한 지수의 반응 평가 시 대부분 부영양화 지수 혹은 수체 내 영양염류의 농도 등 수체의 이화학적 정보를 기준으로 사용하였다(Kane *et al.*, 2009; Ochocka *et al.*, 2021). 그러나 동물플랑크톤 군집은 수체 내 영양염류의 농도뿐만 아니라, 경도 변화(Tessier *et al.*, 1990), 수온 변화(Beaver *et al.*, 2014) 어류의 포식압 변화(Jeppesen *et al.*, 2000), 집수역의 인위적인 토지 이용량 증가(Van Egenen *et al.*, 2011) 등 다양한 교란에 의해 변화하기 때문에, MMI 개발 시 교란의 요인에 호소 내·외부의 생물학적 요인, 구조적 요인 등을 포함하여 분석한다면 호소생태계의 전반적인 건강 상태를 보다 종합적으로 평가하는 것이 가능할 것으로 사료된다.

본 연구에서는 국내 호소생태계 건강성 평가에 활용될 수 있는 동물플랑크톤 MMI의 구성에 적합한 지수를 선별해내고자 하였다. 호소 내 먹이망 변화 및 집수역 전체의 정보를 포함하는 보다 종합적인 호소 건강성 평가 지수 개발을 위해서 지속적인 후속 연구가 필요한 것으로 보이며, 향후 이를 바탕으로 한 호소생태계 동물플랑크톤 건강성 평가 지수 개발에 있어 본 연구에서 제시된 지수가 중요하게 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

적 요

본 연구에서는 국내 3개 호소에서 채집된 동물플랑크톤을 이용하여 호소생태계 건강성 평가에 적합한 동물플랑크톤 지수를 선별해내고자 하였다. 미국 EPA의 National Lake Assessment에서 사용된 후보지수를 국내 적용에 적합하도록 변형하였다. 변형된 지수를 MMI 개발 개요에 맞춰 개별 지수의 적합성 평가, 교란 요인에 대한 반응성 평가, 각 범주 내 중복 지수의 제거 과정을 거쳐 최종적인 후보지수를 선별하여 제시하였다. 6개 범주 내에서 범주별 최대 5개의 지수가 선별되어 최종적으로 19개 지수가 제시되었으며, 모든 분류군에서 종 다양성이, 대형 지각류와 요각류의 경우 생체량이, 소형 지각류와 윤충류의 경우에는 개체밀도가 효과적인 평가 지표로써 사용될 수 있는 것으로 분석되었다. 본 연구에서는 동물플랑크톤을 이용한 국내 호소 건강성 평가 지수의 개발에 있어 적합한 방법을 제시하여 이후 동물플랑크톤 MMI 연구에 활용될 수 있도록 하였다.

저자정보 최예림(경희대학교 환경학및환경공학과 박사과정), 오혜지(경희대학교 환경학및환경공학과 박사수료), 김현준(경희대학교 환경학및환경공학과 석사과정), 홍근혁(경희대학교 환경학및환경공학과 학부생), 이대희(경희대학교 환경학및환경공학과 학부생), 곽인실(전남대학교 해양융합과학과 교수), 지창우(전남대학교 수산과학연구소 박사 후 연구원), 박영석(경희대학교 생물학과 교수) 김용재(대진대학교 생명과학과 교수), 장광현(경희대학교 환경학및환경공학과 교수)

저자기여도 개념설정: Y. Choi & K.H. Chang, 방법론: Y. Choi, H.J. Oh & K.H. Chang, 자료수집: Y. Choi, D.H. Lee & G.H. Hong, 자료 관리: Y. Choi, H.J. Oh & H.J. Kim, 분석: Y. Choi & G.H. Hong, 원고 초안작성: Y. Choi, 원고 교정: I. S. Kwak, C.W. Ji, Y.J. Kim & K.H. Chang, 원고 편집: Y. Choi & K.H. Chang, 과제관리: Y.S. Park, 연구비 수주: Y.S. Park

이해관계 이 논문에는 이해관계 충돌의 여지가 없습니다.

연구비 본 결과물은 환경부의 재원으로 한국환경산업기술원 수생태계 건강성 확보 기술개발사업의 지원을 받아 연구되었습니다(과제번호: 2020003050003).

REFERENCES

Barbour, M.T. 1999. Rapid bioassessment protocols for use in wadeable streams and rivers: periphyton, benthic macroinvertebrates and fish. US Environmental Protection Agency, Office of Water.

Beaver, J.R., C.E. Tausz, T.R. Renicker, G.C. Holdren, D.M. Hosler, E.E. Manis, K.C. Scotese, C.E. Teacher, B.T. Vitanye and R.M. Davidson. 2014. The late summer crustacean zooplankton in western USA reservoirs reflects ecoregion, temperature and latitude. *Freshwater Biology* **59**(6): 1173-1186.

Böhmer, J., C. Rawer-Jost and A. Zenker. 2004. Multimetric assessment of data provided by water managers from Germany: assessment of several different types of stressors with macrozoobenthos communities. Integrated Assessment of Running Waters in Europe, 215-228.

Branstrator, D.K. 1998. Predicting diet composition from body length in the zooplankton predator Leptodora kindti. *Limnology and Oceanography* **43**(3): 530-535.

Bruce, L.C., D. Hamilton, J. Imberger, G. Gal, M. Gophen, T. Zohary and K.D. Hambright. 2006. A numerical simulation of the role of zooplankton in C, N and P cycling in Lake Kinneret, Israel. *Ecological Modelling* **193**(3-4): 412-436.

Cortez-Silva, E.E., G. de Souza Santos, M.G.P. Leite and E.M. Eskinazi-Sant'Anna. 2020. Response of cladoceran assemblages to restoration of riparian vegetation: A case study in a tropical reservoir of Brazil. *Limnologica* **85**: 125822.

Davis, W.S. and T.P. Simon (Eds.). 1995. Biological assessment and criteria: tools for water resource planning and decision making. CRC Press.

Ejsmont-Karabin, J. 2012. The usefulness of zooplankton as lake ecosystem indicators: rotifer trophic state index. *Polish Journal of Ecology* **60**(2): 339-350.

Ejsmont-Karabin, J. and A. Karabin. 2013. The suitability of zooplankton as lake ecosystem indicators: crustacean trophic state index. *Polish Journal of Ecology* **61**(3): 561-573.

Faber, M. and D. Rapport. 1992. Ecosystem health: new goals for environmental management. Island Press.

Feld, C.K. 2004. Identification and measure of hydromorphological degradation in Central European lowland streams. Integrated Assessment of Running Waters in Europe, 69-90.

Flotemersch, J.E., K. Blocksom, J.J. Hutchens Jr and B.C. Autrey. 2006. Development of a standardized large river bioassessment protocol (LR-BP) for macroinvertebrate assemblages. *River Research and Applications* **22**(7): 775-790.

Forio, M.A.E., N. De Troyer, K. Lock, F. Witing, L. Baert, N.D. Saeyer, G. Rîşnoveanu, C. Popescu, F.J. Burdon, B. Kupilas, N. Friberg, P. Boets, M. Volk, B.G. McKie and P. Goethals. 2020. Small patches of riparian woody vegetation enhance biodiversity of invertebrates. *Water* **12**(11): 3070.

Frisch, D., J.E. Havel and L.J. Weider. 2013. The invasion history of the exotic freshwater zooplankter Daphnia lumholtzi (Cladocera, Crustacea) in North America: a genetic analysis. *Biological Invasions* **15**: 817-828.

Havens, K.E., T.L. East, J. Marcus, P. Essex, B. Bolan, S. Raymond and J.R. Beaver. 2000. Dynamics of the exotic Daphnia lumholtzii and native macro-zooplankton in a subtropical chain-of-lakes in Florida, USA. *Freshwater Biology* **4**(51): 21-32.

Hering, D., C.K. Feld, O. Moog and T. Ofenböck. 2006. Cook book for the development of a Multimetric Index for biological condition of aquatic ecosystems: experiences from the European AQEM and STAR projects and related initiatives. The ecological status of European rivers: Evaluation and intercalibration of assessment methods, 311-324.

Hughes, R.M. and T. Oberdorff. 2020. Applications of IBI concepts and metrics to waters outside the United States and Canada, p. 79-93. *In*: Assessing the sustainability and biological integrity of water resources using fish communities, CRC Press.

Hwang, S.J., S.K. Kwun and C.G. Yoon. 2003. Water quality and limnology of Korean reservoirs. *Paddy and Water Environment* **1**: 43-52.

Jeppesen, E., P. Noges, T.A. Davidson, J. Haberman, T. Noges, K. Blank, T.L. Lauridsen, M. Søndergaard, C. Sayer, R. Laugaste, L.S. Johansson, R. Bjerring and S.L. Amsinck. 2011. Zooplankton as indicators in lakes: a scientific-based plea for including zooplankton in the ecological quality assessment of lakes according to the European Water Framework Directive (WFD). *Hydrobiologia* **676**: 279-297.

Jeppesen, E., J. Peder Jensen, M. Søndergaard, T. Lauridsen and F. Landkildehus. 2000. Trophic structure, species richness and biodiversity in Danish lakes: changes along a phosphorus gradient. *Freshwater Biology* **45**(2): 201-218.

Joo, G.J., Choi, J.Y., S.K. Kim, S.W. Hong, K.S. Jeong and G.H. La. 2013. Zooplankton Community Distribution and Food Web Structure in Small Reservoirs: Influence of Land Uses around Reservoirs and Kittoral Aquatic Plant on Zooplankton. *Korean Journal of Ecology and Environment* **46**(3): 332-342 [Korean literature]

Kairesalo, T., I. Tátrai and E. Luokkanen. 1998. Impacts of waterweed (Elodea canadensis Michx) on fish-plankton interactions in the lake littoral. *Internationale Vereinigung für theoretische und angewandte Limnologie: Verhandlungen* **26**(4): 1846-1851.

Kane, D.D., S.I. Gordon, M. Munawar, M.N. Charlton and D.A. Culver. 2009. The Planktonic Index of Biotic Integrity (P-IBI): an approach for assessing lake ecosystem health. *Ecological Indicators* **9**(6): 1234-1247.

Karr, J.R. and E.W. Chu, 1999. Restoring Life in Running Waters: Better Biological Monitoring. Island Press, Washington, DC 200pp.

Klemm, D.J., K.A. Blocksom, F.A. Fulk, A.T. Herlihy, R.M. Hughes, P.R. Kaufmann, D.V. Peck, J.L. Stoddard, W.T. Thoeny, M.B. Griffith and W.S. Davis. 2003. Development and Evaluation of a Macroinvertebrate Biotic Integrity Index (MBII) for Regionally Assessing Mid-Atlantic Highlands Streams. *Environmental Management* **31**(5): 656-669.

Ku, D., Y.J. Chae, Y. Choi, C.W. Ji, Y.S. Park, I.S. Kwak, Y.J. Kim, K.H. Chang and H.J. Oh. 2022. Optimal Method for Biomass Estimation in a Cladoceran Species, Daphnia Magna (Straus, 1820): Evaluating Length-Weight Regression Equations and Deriving Estimation Equations Using Body Length, Width and Lateral Area. *Sustainability* **14**(15): 9216.

Lorenz, A., D. Hering, C.K. Feld and P. Rolauffs. 2004. A new method for assessing the impact of hydromorphological degradation on the macroinvertebrate fauna of five German stream types. *Hydrobiologia* **516**: 207-127.

Mills, E.L., J.H. Leach, J.T. Carlton and C.L. Secor. 1994. Exotic species and the integrity of the Great Lakes. *BioScience* **44**(10): 666-676.

Ministry of Environment. 2018. Official Testing Method with Respect to Water Pollution Process.

Ministry of Environment. 2019a. Guidelines on how to survey and assess the health of aquatic ecosystems_Hydrology_Fv.

Ministry of Environment. 2019b. Guidelines on how to survey and assess the health of aquatic ecosystems_Estuaries_Fv.

Mizuno, T. and E. Takahashi. 1999. An illustrated guide to freshwater zooplankton in Japan. Tokai Univ. Press, Tokyo, 532pp.

Moss, B., D. Stephen, C. Alvarez, E. Becares, W.V.D. Bund, S.E. Collings, E.V. Donk, E.D. Eyto, T. Feldmann, C. Fernández-Aláez, M. Fernández-Aláez, R.J.M Franken, F. García-Criado, E.M. Gross, M. Gyllström, L.A. Hansson, K. Irvine, A. Järvalt, J.P. Jensen, E. Jeppesen, T. Kairesalo, P. Kornijów, T. Krause, H. Künnap, A. Laas, E. Lill, B. Lorens, H. Luup, M.R. Miracle, P. Nõges, T. Nõges, M. Nykänen, I. Ott, W. Peczula, E.T.H.M. Peeters, G. Phillips, S. Romo, V. Russell, J. Salujõe, M. Scheffer, K. Siewertsen, H. Smal, C. Tesch, T. Timm, L. Tuvikene, I. Tonno, T. Virro, E. Vicente and D. Wilson. 2003. The determination of ecological status in shallow lakes—a tested system (ECOFRAME) for implementation of the European Water Framework Directive. *Aquatic Conservation: Marine and Freshwater Ecosystems* **13**(6): 507-549.

Mussels, Z., E. Watermilfoil, S. Lamprey, P. Loosestrife, R. Goby and E. Ruffe. 2014. Lake Superior Aquatic Invasive Species Complete Prevention Plan.

Nurminen, L.K. and J.A. Horppila. 2002. A diurnal study on the distribution of filter feeding zooplankton: Effect of emergent macrophytes, pH and lake trophy. *Aquatic Sciences* **64**: 198-206.

Ochocka, A. 2021. ZIPLAS: Zooplankton Index for Polish Lakes' Assessment: a new method to assess the ecological status of stratified lakes. *Environmental Monitoring and Assessment* **193**(10): 664.

Rapport, D.J., R. Costanza and A.J. McMichael. 1998. Assessing

ecosystem health. *Trends in Ecology & Evolution* **13**(10): 397-402.

Schaeffer, D.J., E.E. Herricks and H.W. Kerster. 1988. Ecosystem health: I. Measuring ecosystem health. *Environmental Management* **12**: 445-455.

Stamou, G., M. Katsiapi, M. Moustaka-Gouni and E. Michaloudi. 2019. Grazing potential—A functional plankton food web metric for ecological water quality assessment in Mediterranean lakes. *Water* **11**(6): 1274.

Tessier, A.J. and R.J. Horwitz. 1990. Influence of water chemistry on size structure of zooplankton assemblages. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences* **47**(10): 1937-1943.

US EPA (US Environmental Protection Agency). 2009. National lakes assessment: a collaborative survey of the nation's lakes. Washington, DC: U.S., Environmental Protection Agency, Office of Water and Office of Research and Development, 118.

US EPA (US Environmental Protection Agency). 2016. National Rivers and Streams Assessment 2008-2009: a collaborative survey. Washington, DC: U.S., Environmental Protection Agency, Office of Water and Office of Research and Development, 131.

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.

Walz, N., S.S. Sarma and U. Benker 1995. Egg size in relation to body size in rotifers: an indication of reproductive strategy?. In Rotifera VII: Proceedings of the Seventh Rofifer Symposium, held in Mikołajki, Poland, 6-11 June 1994 (p. 165-170). Springer Netherlands.

Work, K. and M. Gophen 1999. Environmental variability and the population dynamics of the exotic Daphnia lumholtzi and native zooplankton in Lake Texoma, USA. *Hydrobiologia* **405**: 11-23.