

## 국내 호소의 온전성 평가를 위한 저서성 대형무척추동물 다중계량지수(LBMMI)의 개발

박근용<sup>1a</sup> · 김명철<sup>2</sup> · 공동수<sup>1b,†</sup>

<sup>1</sup>경기대학교 생명과학과 · <sup>2</sup>SOKN생태보전연구소

## Development of Lakes Benthic Macroinvertebrate-based Multi-metric Index (LBMMI) for Biological Integrity Assessment of Korean Lake

Geun-Yong Park<sup>1a</sup> · Myoung-Chul Kim<sup>2</sup> · Dongsoo Kong<sup>1b,†</sup>

<sup>1</sup>Department of Life Science, Kyonggi University

<sup>2</sup>SOKN Institute of Ecology & Conservation

(Received 25 June 2024, Revised 02 September 2024, Accepted 03 September 2024)

### Abstract

Although lakes are an important part of freshwater, research on biological methods for assessing ecological integrity of Korean lakes is insufficient. Therefore, this study aimed to develop Lakes Benthic Macroinvertebrates Multi-Metric Index (LBMMI) to assess the ecological integrity of lakes in Korea to further understand Korean lake's ecosystem. We used biological data from 388 sampling units of national lake monitoring programs from 2022 to 2023 and water quality data from Water Environment Information System (WEIS). As a result, firstly, reference points and disturbed points were selected through Principal Component Analysis (PCA). Secondly, six core metric elements (Pielou's Evenness index (J), Total number of taxa (To.t), Percent of taxa in insecta (% I.t), Percent of individuals in Oligochaeta and chironomidae(tuble) (% OliCht.i), Percent of taxa in Predator (% Pe.t), and Percent of taxa in Clingers (% CL.t) were selected through discriminant analysis and relationship-test. Lastly, LBMMI was calculated for each sampling point by scoring using core metric elements and five grades were assigned for LBMMI scores using a Beta probability distribution model, with the suitability of LBMMI reviewed by comparing it with TSI<sub>KO</sub>. LBMMI developed in this study is expected to appropriately assess ecological integrity of Korean lakes and provide a basis for further research on lake environment conservation.

**Key words** : Benthic macroinvertebrates, Biological assessment, Lakes ecological integrity assessment, Multi-metric index, Water quality

<sup>1a</sup> 석사과정(Master's Student), rmsdyd2470@nate.com, <https://orcid.org/0009-0002-6722-8213>

<sup>2</sup> 소장(Director), mckim119@naver.com, <https://orcid.org/0009-0009-2568-6591>

<sup>1b</sup> Corresponding author, 교수(Professor), dskong@kgu.ac.kr, <http://orcid.org/0000-0001-8438-3229>

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, provided the original work is properly cited.

## 1. Introduction

호소는 높은 생물다양성을 가지고 있으며 담수생태계의 중요한 부분을 차지하지만(Heino et al., 2021), 도시화 · 축산 · 농업 등 주변 유역 토지이용의 증가로 인한 오염물질의 지속적인 유입으로 수질 및 수생태계가 위협받고 있다(Kim and Lee, 1999; Lee and Kim, 2009; Seo, 1998). 이로 인하여 국내 호소의 환경을 보전하기 위한 연구의 필요성이 대두되면서(Kwon, 1988), 호소의 물리 · 화학 · 생물학적 측면을 전부 포함하는 생태학적 온전성을 정기적으로 조사 · 측정 · 분석할 필요성에 대한 인식이 증가하였다(Kim, 2019; ME, 2024).

국내에서는 공공수역 수질 및 수생태계의 실태 파악을 위해 “물환경정보시스템”을 운영하여 호소의 이화학적 요인들을 분석하고 있으나(NIER, 2024), 이는 측정 당시의 수질상태만을 나타내 시간적 변화에 대한 수질환경의 종합적인 대변에 한계가 있다(Kong et al., 2018). 이에 반해, 지표생물(indicator organisms)을 이용한 생물학적 평가방법은 연간 평균 수질 및 과거 오염물질의 임의적 유출에 대한 복합효과 등을 고려한 종합적인 영향을 반영할 수 있다(Kong, 2002). 특히, 저서성 대형무척추동물(benthic macroinvertebrate)은 담수생태계에서 가장 다양하고 풍부한 무리이며 먹이사슬의 저차 소비자의 역할을 하는 구성원이다(Kong et al., 2018). 이들은 생물모니터링 및 생물학적 평가에 대한 지표로서 이용되고 있으며(Resh, 2008), 호소의 생물학적 평가지표로서 권장되었다(Poikane et al., 2016).

최근 유럽의 여러 국가에서는 저서성 대형무척추동물을 이용한 다중계량지수(multi-metric index)를 개발하여 호소의 온전성을 평가하는 추세이다(Lee, 2023; Poikane et al., 2016). 또한, 미국 환경보호국(EPA)은 각 지역을 생태적 특성에 따라 생태권역(ecoregion)으로 나누고 이에 적합한 평가요소로 다중계량지수를 개발하여 호소의 온전성을 평가하고 있다(EPA, 2022). 군집의 구성, 종 풍부도, 섭식 및 서식 기능군 등을 복합적으로 고려하는 다중계량지수를 이용한 평가는 전 세계적인 흐름이라고 할 수 있다(Kim, 2019). 국내에서는 저서성 대형무척추동물을 이용한 호소의 생물학적 평가방법으로 Byun (2023)이 한국 습지 저서생물지수(Korea Wetland Benthic Macroinvertebrate Index, KWBMI)를 제안한 바 있으나, 지수개발에 활용된 평가요소와 수질과의 상관관계가 확인되지 않아 추가적인 연구가 필요하다고 판단된다.

본 연구는 국내 호소의 온전성 평가를 위한 저서성 대형무척추동물 기반 다중계량지수의 개발을 목적으로 수행되었다. 개발된 다중계량지수는 호소의 환경을 종합적으로 평가하는 지표가 될 수 있다고 판단되며, 호소의 온전성을 유지하고 수생태계에 대한 이해를 발전시키는데 기여할 수 있을 것으로 기대된다.

## 2. Materials and Methods

### 2.1 Data collection

본 연구는 국립환경과학원의 “호소 수생태계 현황조사(2022~2023)”의 결과를 활용하여 수행되었다. 조사된 호소는 총 60개이며, 194개의 조사지점(sampling point)의 388개의 표본단위(sampling unit)를 포함한다. 또한, 표본(sample)은 조사지점에 따라 호소 수변부 수초대(aquatic plant)의 정수식물(emerged plant) 부근에서 드렛지(폭 30cm, 망목 0.5mm)로 1m를 3번 끌어 채집되었다. 수질자료는 생물 조사지점과 가장 가까운 환경부 · 물환경정보시스템 · 수질측정망의 지점 연평균 자료를 이용하였다(NIER, 2024).

### 2.2 참조 · 교란지점 선정

#### 2.2.1 담수호 선정

호소는 염도(salinity)의 변화가 자주 일어날수록 생물 정착이 어려워 비교적 단순한 생태계가 형성되며(Kim, 2019), 저서성 대형무척추동물은 염도가 높을수록 생존률이 감소한다(Kang and King, 2012). 이러한 특성으로 인해 염도에 대한 영향을 고려하지 않을 경우, 적합한 평가요소의 선정이 어려울 것으로 판단된다. 이에 따라, 담수호만을 선정하여 이용함으로써 염도가 평가요소에 미치는 영향을 최소화하고자 하였다.

국내에서는 염도의 간접적으로 전기전도도(electrical conductivity)를 이용하여 담수호와 기수호를 구분한 바 있다(Kong, 2019). 본 연구에서는 군집분석(cluster analysis)을 통해 각 호소별 생물군집의 유사도를 확인한 후, 그 거리와 각 호소의 전기전도도 수치를 고려하여 담수호를 선정하였다. 조사된 표본 중 대부분이 일부 분류군의 개체수가 극도로 높게 나타나는 경우가 많아 출현밀도가 상대적으로 낮은 분류군의 출현특성이 무시될 수 있다고 판단되어(Großwendt et al., 2019), 분류군의 출현유무(출현:1, 비출현:0)를 기준으로 군집분석을 실시하였다. 이때, Bray-curtis의 방법을 이용하여 생물군집 유사도를 구분하고 Ward 방법을 이용하여 생물군집 사이의 거리를 계산하였다.

#### 2.2.2 주성분분석(PCA)

주성분분석(Principal Component Analysis, PCA)은 여러 형질을 가진 변수들의 차원(dimension)을 감소시켜 다양하고 복잡한 특성을 갖는 요인들을 해석할 수 있으며, 독립변수들끼리 강한 상관관계가 나타날 수 있는 다중공선성(multi-collinearity)의 문제를 해결할 수 있는 다변량 통계분석 방법이다(Lee, 2023). 이를 통해 도출되는 제1주성분(PC1)을 이용해 참조지점(reference points) 및 교란지점(disturbed points)을 선정하고자 하였다.

총 유기탄소(Total Organic Carbon, TOC), 수소이온농도(pH), 아질산염 질소(nitrite nitrogen), 질산염 질소(nitrate nitrogen), 총 인(Total Phosphorus, T-P), 탁도(turbidity), 세립질 하상 비율(fine-substrate %)은 저서성 대형무척추동물의 성장 및 생물다양성과 음의 상관관계를 나타낸다(Berger

at al., 2017; Kim and Kong, 2019). 수질측정망의 측정항목 중 이를 직·간접적으로 반영할 수 있는 6가지 항목(총 유기탄소, 수소이온농도, 총 질소(Total Nitrogen, T-N), 총 인, 부유물질(Suspended Solids, SS), Chlorophyll-a (Chl-a)]과 현장조사 시 측정된 세립질 하상 비율을 교란요인으로 선정하였다.

선정된 교란요인들에 대하여 정규성을 검토하였으며, 이를 벗어나는 항목은 대수치로 변환하여 분석에 사용하였다. 이 중 pH는 양극단 값일수록 교란의 정도가 크기 때문에 중성인 pH 7과 raw값의 차이를 절대값으로 변환, 세립질 하상 비율은  $\text{asin}\sqrt{x/100}$ 로 변환하여 사용하고 나머지 요인들은 대수변환[ $\ln(x)$ ]하여 사용하였다. 이후 각 교란요인의 최대치와 최소치를 이용한 계량치(Adjustment value, A)를 이용하여 주성분분석을 수행하였다(식 1).

$$A = (V_x - V_{\min}) / (V_{\max} - V_{\min}) \quad (1)$$

A : 각 교란요인의 계량치(the adjusted value of each disturbance variable)

$V_x$  : 각 교란요인의  $x$ 번째 값(the  $x^{\text{th}}$  value of each disturbance variable)

$V_{\min}$  : 각 교란요인의 최소값(the minimum value of each disturbance variable)

$V_{\max}$  : 각 교란요인의 최대값(the maximum value of each disturbance variable)

제1주성분의 크기에 따라 25 백분위수(25<sup>th</sup> percentile value) 이하를 참조지점, 75 백분위수(75<sup>th</sup> percentile value) 이상을 교란지점으로 구분하였다.

### 2.3 핵심 평가요소 선정

#### 2.3.1 후보 평가요소 선정

저서성 대형무척추동물을 이용한 평가에서 주로 사용되는 생물학적 평가요소는 다양성(diversity), 풍부도(richness), 민감도(sensitivity), 내성(tolerance), 개체군 풍부도(abundance), 군집구성(composition), 기능군(functional group) 등의 다양한 범주(category)로 구분된다(Kim, 2019; Lee, 2023).

본 연구에서는 국내의 저서성 대형무척추동물에 기반한 다중계량지수 및 미국의 호소 평가지침(National Lakes Assessment, NLA)을 참고하여, 생물지수(biotic index), 종 풍부도(richness), 분류군 구성비율(composition taxa), 개체밀도 구성비율(composition individuals), 섭식기능군(Functional Feeding Groups, FFGs), 서식기능군(Habitat Orientation Groups, HOGs)의 6가지 범주(category)에 대한 총 67가지 후보 평가요소를 선정하였다(EPA, 2022; Kim, 2019; Lee, 2023)(Table 1). 평가요소는 개체(individual)와 종(species) 수준에서의 자료를 고려하였다.

**Table 1.** List of candidate metric elements with categories for development of LBMMI

No.	Category	Metric elements	Abbreviation
1	Biotic index	McNaughton's Dominance index	DI
2		Shannon's diversity index	H'
3		Margalefs's species richness index	RI
4		Pielou's evenness index	J
5	Richness	Total number of taxa	To.t
6		Total number of individuals	To.i
7		Number of taxa in Insecta	I.t
8		Number of taxa in E.T.O	ETO.t
9		Number of taxa in E.T	ET.t
10		Number of taxa in O.H.C	OHC.t
11		Number of taxa in Ephemeroptera	E.t
12		Number of taxa in Odonata	O.t
13		Number of taxa in Hemiptera	H.t
14		Number of taxa in Coleoptera	C.t
15		Number of taxa in Diptera	D.t
16		Number of taxa in Trichoptera	T.t
17	Composition taxa	Percent of taxa in Oligochaeta	% Oli.t
18		Percent of taxa in Crustacea and Mollusca	% CrMo.t
19		Percent of taxa in Insecta	% I.t
20		Percent of taxa in E.T.O	% ETO.t
21		Percent of taxa in E.T	% ET.t
22		Percent of taxa in O.H.C	% OHC.t

No.	Category	Metric elements	Abbreviation
23		Percent of taxa in Ephemeroptera	% E.t
24		Percent of taxa in Odonata	% O.t
25		Percent of taxa in Hemiptera	% H.t
26		Percent of taxa in Coleoptera	% C.t
27		Percent of taxa in Diptera	% D.t
28		Percent of taxa in Trichoptera	% T.t
29		Composition individuals	Percent of individuals in Oligochaeta and Chironomidae(tuble)
30	Percent of individuals in Crustcea		% Cr.i
31	Percent of individuals in Insecta		% Li
32	Percent of individuals in E.T.O		% ETO.i
33	Percent of individuals in E.T		% ET.i
34	Percent of individuals in O.H.C		% OHC.i
35	Percent of individuals in Epheroptera		% E.i
36	Percent of individuals in Odonata		% O.i
37	Percent of individuals in Hemiptera		% H.i
38	Percent of individuals in Coleoptera		% C.i
39	Percent of individuals in Diptera		% D.i
40	Percent of individuals in Trichoptera		% T.i
41	Percent of individuals in Chironomidaewith Non-tuble		% Cnt.i
42	Percent of individuals in Chironomidae		% Chi.i
43	FFGs	Number of FFgs	FFGs
44		Percent of taxa in Shredders	% Sh.t
45		Percent of individuals in Shredders	% Sh.i
46		Percent of taxa in Scrapers	% Sc.t
47		Percent of individuals in Scrapers	% Sc.i
48		Percent of taxa in Collector-Filterers	% CF.t
49		Percent of individuals in Collector-Filterers	% CF.i
50		Percent of taxa in Collector-Gatherers	% CG.t
51		Percent of individuals in Collector-Gatherers	% CG.i
52		Percent of taxa in Predator	% Pe.t
53		Percent of individuals in Predator	% Pe.i
54		(Sh+Sc) / (CF+CG) of taxa	SdC.t
55	HOGs	Number of HOGs	HOGs
56		Percent of taxa in Clingers	% CL.t
57		Percent of individuals in Clingers	% CL.i
58		Percent of taxa in Burrowers	% BU.t
59		Percent of individuals in Burrowers	% BU.i
60		Percent of taxa in Swimmer	% SW.t
61		Percent of individuals in Swimmer	% SW.i
62		Percent of taxa in Sprawler	% SP.t
63		Percent of individuals in Sprawler	% SP.i
64		Percent of taxa in Climber	% CB.t
65		Percent of individuals in Climber	% CB.i
66		Percent of individuals in Skater	% SK.t
67		Percent of individuals in Skater	% SK.i

2.3.2 관계성 검토(relationship-test)

관계성 검토는 본 연구에서 처음 제시하는 기법으로서 참조·교란 지점에 대한 각 후보 평가요소의 결과(중위값, 평균값)가 선행연구의 특성과 상반되는 경향을 보일 경우, 평가요소 선정에서 제외하는 방법이다. 호소가 부영양화 될수록 정수식물(emerged plant)이 발달하여 수초대 부근의 저서성 대형무척추동물의 생물다양성이 높아지기 때문에(Kaenel et al., 1998), 후보 평가요소의 결과가 왜곡되는 문제점이 야기될 수 있으므로 관계성 검토를 수행하여 이를 최소화하고자 하였다.

2.3.3 판별분석(discriminant analysis)

판별분석은 분류하고자 하는 각 변수의 특성을 대입하여 그 변수들이 속하는 집단을 찾아낼 수 있는 다변량 분석기법이며, 수질평가 및 예측에도 다양하게 활용되었다(Choi et al., 2008). 이를 통해, 참조지점과 교란지점을 변별력 있게 구별하는 평가요소를 선별하고자 하였다.

독립변수들의 변수 선택 방법으로는 변수의 등록 및 제거가 각 단계별로 분석되어 다중공선성의 문제가 적은 단계선택법(stepwise selection)을 이용하였다. 최적의 판별분석을 수행하기 위해서는 독립변수들이 다변량 정규분포로부터 추출된 표본이어야 한다는 가정이 필요하다(Min et al., 2018). 이에 따라, 후보 평가요소 중 정규성을 이루지 않는 항목은 대수변환 하여 분석에 이용하였다.

2.4 지수화

2.4.1 핵심 평가요소 점수화

각각 다른 측정단위를 가지고 있는 평가요소를 통합하여 하나의 지수로써 적용하기 위해서는 무차원적인 점수로의 변환이 필요하다(Jun et al., 2012; Karr, 1991; Kim, 2019). 변환 방법은 평가요소의 상·하위 한계값을 기댓값으로 그 사이의 평가요소 값을 기댓값에 대한 분수로 하여 연속적 등급으로 점수화하는 연속적인 점수화 체계(continuous scoring system) 방법을 적용하였다(Lee, 2023).

본 연구에서는 신뢰성 있는 지수개발을 위해 각 범주가 교란에 대한 영향을 반영하는 정도를 고려하여 총합 100점이 되도록 가산점(k)을 설정하였다(식 1). 이때, 상·하위 한계값은 각 95 백분위수(95<sup>th</sup> percentile value) 및 5 백분위수(5<sup>th</sup> percentile value)로 설정하였다. 또한, 교란의 정도가 클수록 값이 작아지는 평가요소(positive)는 식 2를 적용하고, 값이 커지는 평가요소(negative)는 식 3을 적용하여 계산하였다. 이후, 각 평가요소별 점수(S)를 합산하여 국내 호소의 온전성 평가를 위한 저서성 대형무척추동물 다중계량지수(Lakes Benthic Macroinvertebrate-based Multi-metric Index, LBMMI) 값을 계산하였다(식 4).

$$S = k \times \frac{V - V_5}{V_{95} - V_5}, S = 0 \text{ at } V \leq V_5, S = k \text{ at } V \geq V_{95} \quad (2)$$

$$S = k \times \frac{V_{95} - V}{V_{95} - V_5}, S = 0 \text{ at } V \geq V_{95}, S = k \text{ at } V \leq V_5 \quad (3)$$

$$LBMMI = S_1 + S_2 + \dots + S_n \quad (4)$$

S : 각 평가요소의 점수(the score for each metric)

k : 각 메트릭의 가산점(the additional point for each metric)

V : 각 지점의 메트릭 값(the metric value for each site)

V<sub>5</sub> : V의 5 백분위수 값(the 5<sup>th</sup> value of V)

V<sub>95</sub> : V의 95 백분위수 값(the 95<sup>th</sup> value of V)

2.4.2 다중계량지수 등급화

최종 도출된 LBMMI 점수의 지점별 분포를 확인한 후, 적절한 등급설정을 위해 Kong and Kang (2023)의 확률분포모형을 이용하였다. Kong and Kang (2023)의 확률분포모형은 저서성 대형무척추동물의 분포특성 해석 및 생물학적 평가 지수의 등급화에 이용된 바 있으며(Kong and Yeo, 2023), 다중계량지수의 적절한 등급을 설정하기 위한 방법론적 의의가 있다고 판단된다.

등급설정을 위해 각 지점별 산출된 LBMMI 점수의 99 백분위수(99<sup>th</sup> percentile value)와 1 백분위수(1<sup>th</sup> percentile value)의 사이를 5개의 동일한 크기의 급구간으로 구분하였다. 이후, 상대빈도를 확률질량함수(probability mass function, PMF)로 변형하여 Kong and Kang (2023)의 12개의 확률분포모형 중 최적의 적합도를 보이는 모형을 선정하였다. 모형 선정 방법은 모수 추정 방법을 이용해 누적질량함수(cumulative mass function, CMF)와 누적밀도함수(cumulative density function, CDF)의 표준화 평균 제곱근 오차(normalized root mean squared error, NRMSE)가 최소화 되는 모형을 선택하였다. 또한, LBMMI 점수 분포를 연속적으로 해석하기 위해, 선정된 모형의 확률밀도함수(probability density function, PDF)를 도출하였다. 이후, 급구간에 가까운 점수를 기준으로 “매우 좋음(A)”, “좋음(B)”, “보통(C)”, “나쁨(D)”, “매우 나쁨(E)”의 평가등급을 설정하였다.

3. Results and Discussion

3.1 참조·교란지점 선정 결과

3.1.1 담수호 선정 결과

총 60개 호소 중 53개의 담수호를 선정하였으며, 전기전도도가 모두 3,000 μS/cm 미만인 것으로 나타났다(Table 2).

60개 호소를 대상으로 수행한 1차 군집분석 결과, 14,000 μS/cm 이상의 전기전도도를 가지는 호소들이 별도의 그룹으로 구분되었으나, 매호(13,672 μS/cm), 석문호(4,319 μS/cm) 등 비교적 높은 전기전도도를 가지며 기수산 저서성 대형무척추동물이 다수 출현한 호소들은 구분되지 않았다(Fig. 1) (Kong, 2013; Kwan, 2013). 이는, 출현유무 기반의 군집분석으로 인하여 기수산 저서성 대형무척추동물의 출현특성이 과소평가되었기 때문으로 판단된다. 이에 따라, 강한 기수성을 나타낸다고 판단되는 전기전도도 14,000 μS/cm 이상의 호소들을 포함하여 기수성을 나타낼 것이라고 예상되는 전기전도도 700 μS/cm 이상의 호소들간의 2차 군집분석을 수행하였다(Kong, 2019).

Table 2. Average of annual electrical conductivity for each lake and classified freshwater lakes

Lakes name	Electrical conductivity ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ )	Freshwater lake	Lakes name	Electrical conductivity ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ )	Freshwater lake
Soyang	84	O	Paldang	235	O
Whachon	121	O	Chungpyong	109	O
Chuncheon	121	O	Namyang	1,172	O
Tangeum	239	O	Ahsan	820	O
Woncheon	384	O	Uiam	112	O
Seo	523	O	Whajinpo	20,183	-
Gyongpo	36,948	-	Songji	18,301	-
Goesan	164	O	Hyang	14,806	-
Junam	331	O	Mae	13,672	-
Heoya	358	O	Chungju	229	O
Hoedong	-	O	Jilnal	-	O
Sayeon	154	O	Nakdong	1,122	O
Daeam	341	O	Jinyang	102	O
Seonam	351	O	Bongsan	387	O
Gidong	181	O	Jangcheock	232	O
Dukdong	116	O	Gyongcheon	82	O
Bomun	178	O	Youngchoen	179	O
Angye	172	O	Ohtae	134	O
Yongyeon	240	O	Imha	208	O
Yedang	224	O	Boryong	130	O
Ganwol	1,858	O	Tapjung	137	O
Chopyeong	147	O	Sabgyo	530	O
Songak	224	O	Seokmun	4,319	-
Chungcheon	172	O	Deaho	3,037	-
Buan	71	O	Dongbok	95	O
Jangsung	119	O	Juam	89	O
Damyang	76	O	Sangsa	81	O
Naju	115	O	Sueo	110	O
Daedong	220	O	Hadong	40	O
Gwangju	121	O	Okjeong	131	O

2차 군집분석 결과, 총 3개의 그룹으로 구분되었다(Fig. 2). 전기전도도 평균은 그룹 3(22,560  $\mu\text{S}/\text{cm}$ ) > 그룹 2(5,538  $\mu\text{S}/\text{cm}$ ) > 그룹 1(1,283  $\mu\text{S}/\text{cm}$ )의 순서로 나타났다. 그룹 3의 호소는 1차 군집분석 시 유의하게 구분되었던 전기전도도 14,000  $\mu\text{S}/\text{cm}$  이상의 호소들과 동일하였다. 이에 따라, 그룹 3과 비교하여 가장 낮은 군집 유사도를 보이며, 가장 낮은 전기전도도를 가지는 그룹 1의 3개 호소와 전기전도도 700  $\mu\text{S}/\text{cm}$  미만의 47개 호소를 담수호에 포함하였다.

낙동강하구원은 2차 군집분석 결과 그룹 2에 속하였지만, 그룹 1의 평균보다 낮은 전기전도도를 나타냈다. 또한, 담수산 저서성 대형무척추동물의 개체밀도가 높은 비율을 차지하여 그룹 2 내 다른 호소들과 출현특성이 상이하다고 판단되어 담수호에 포함하였다(Table 3). 질질별과 회동저수지는 수질측정망 자료의 부재로 전기전도도 확인이 불가하였으나, 지리적으로 하천의 상류에 위치하여 해수의 영향을 거의 받

지 않으며, 1차 군집분석 결과 비교적 전기전도도가 낮은 호소들과 유사한 경향을 보여 담수호에 포함하였다.

### 3.1.2 주성분분석 결과

담수호로 구분되며 수질측정망 자료가 있는 53개 호소의 172개 지점에 대하여 주성분분석을 수행하였다. 제1주성분은 고도로 유의( $p < 0.001$ )하였으며, 57%의 설명력을 나타냈다(Fig. 3). Pearson 상관분석 결과 제1주성분은 7가지의 모든 교란요인과 상관성이 있으며, SS의 영향이 상대적으로 큰 것으로 나타났다(Table 4). 도출된 제1주성분 값을 기준으로 각 43개의 참조·교란지점을 구분하였다.

## 3.2 핵심 평가요소 선정 결과

### 3.2.1 관계성 검토 결과

참조지점은 비교적 양호한 생태계 온전성을 갖춘 환경인

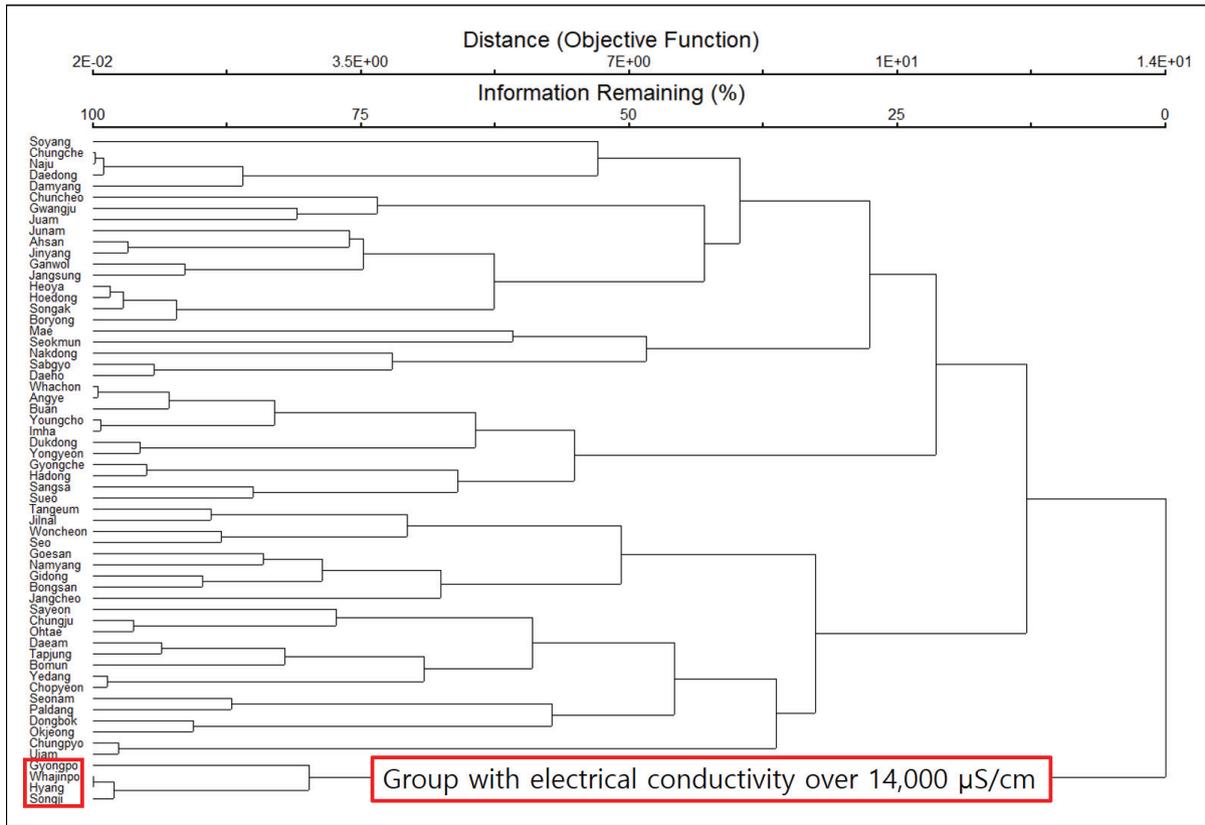


Fig. 1. Results of clustering analysis about 60 lakes based on Bray-Curtis similarity criteria.

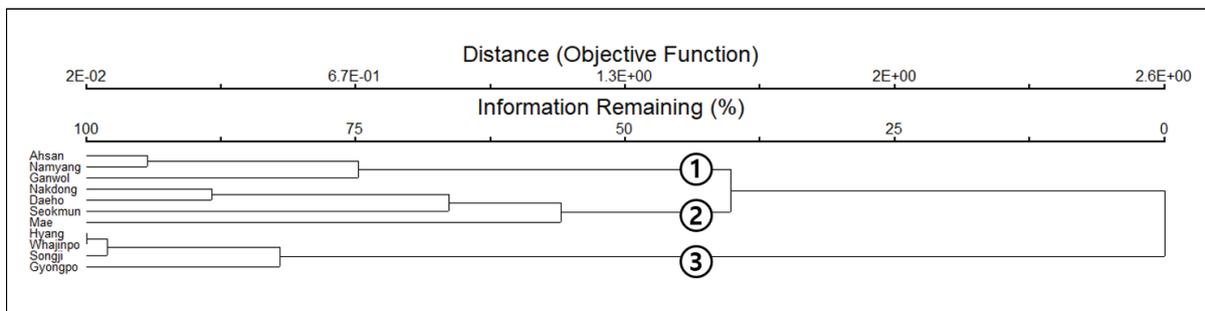


Fig. 2. Results of clustering analysis about lakes with electrical conductivity over 700  $\mu\text{S}/\text{cm}$  based on Bray-Curtis similarity criteria.

Table 3. Emergence of benthic macroinvertebrates in Nakdong river estuary

Scientific name	Population density (individuals/ $\text{m}^2$ )
<i>Semisulcospira forticosta</i>	3.00
<i>Semisulcospira gottschei</i>	0.75
<i>Radix auricularia</i>	2.50
<i>Gyraulus convexusculus</i>	0.50
<i>Limnodrilus gotoi</i>	3.50
Mysidae sp.	4.00
<i>Cyathura (Cyathura) higoensis</i>	0.75
<i>Macrobrachium nipponense</i>	0.50
Chironomidae spp.(non-red type)	1.75

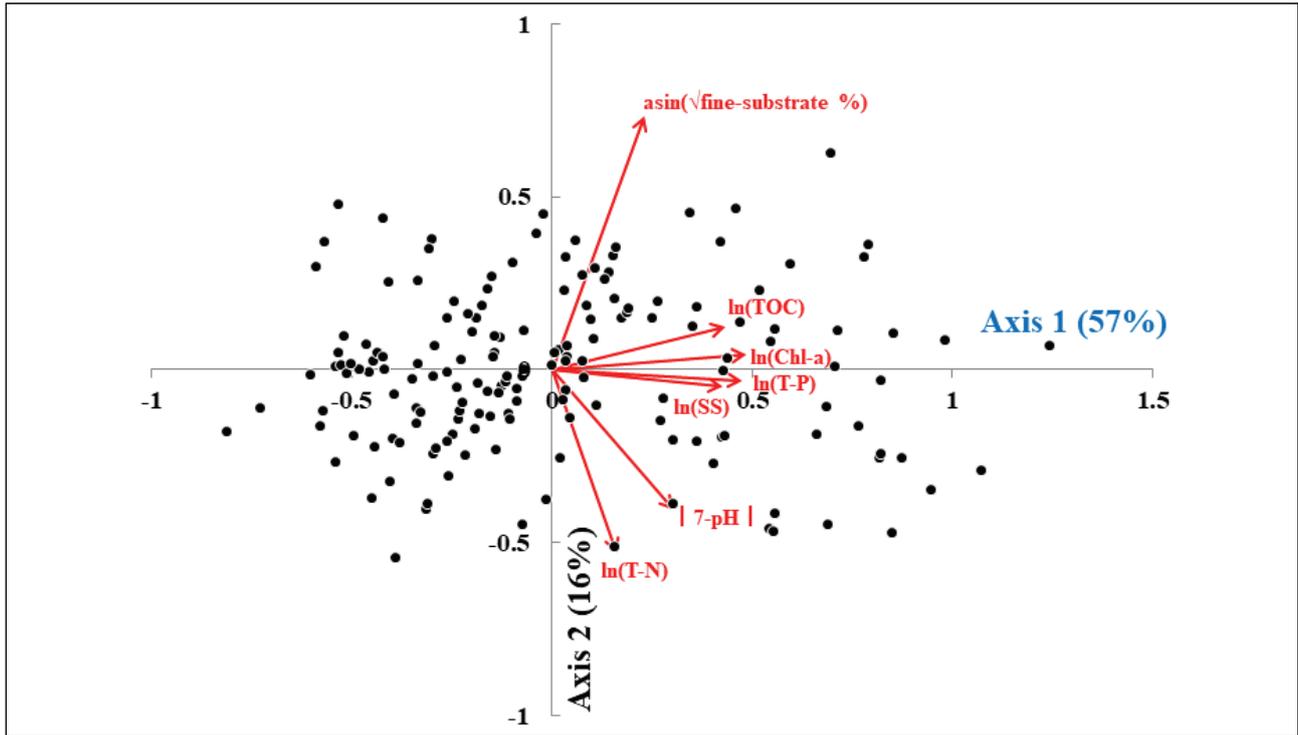


Fig. 3. Results of principal component analysis (PCA) between disturbed factors and 172 sampling points.

Table 4. Results of Pearson correlation analysis between Axis I and disturbed factors

Disturbance factors	Correlation coefficient ( <i>r</i> )	<i>p</i> -value
ln(TOC)	0.843	0.000
7-pH	0.582	0.000
ln(T-N)	0.347	0.000
ln(T-P)	0.895	0.000
ln(SS)	0.909	0.000
ln(Chl-a)	0.903	0.000
asin( $\sqrt{\text{fine-substrate \%}}$ )	0.418	0.000

빈부수성(oligosaprobic) 수역과 유사하다고 판단되며, 교란 지점은 강부수성(polysaprobic) 수역의 특성과 유사하다고 판단하였다. 높은 조립질 하상 비율을 가지며 빈부수성에 가까운 수역일수록 다양도 지수, 종풍부도 지수, 총 분류군 수, 총 개체밀도, 곤충류, 굽어먹는 무리 등이 비교적 자주 출현하는 것으로 알려져 있다. 또한, 높은 세립질 하상 비율을 가지며 강부수성에 가까운 수역일수록 우점도 지수, 빈모류, 파리목, 갈따구류, 주위먹는 무리, 걸러먹는 무리, 굴파는 무리, 주위먹는 무리 등이 비교적 자주 출현하는 것으로 알려져 있다(Berger et al., 2017; Choi et al., 2012; Chun and Ro, 2004; Jhingran et al., 1989; Kim and Kong, 2019; Lee et al., 2017; McNaughton and Wolf, 1970; Park et al., 2011; Rawer-Jost et al., 2000; Usseglio Polatera et al., 2000). 총 67가지 후보평가요소 중 참조·교란지점에 대한 중위값 및 평균값을 검토하여 이와 반대되는 31가지 평가요소를 제외하였다(Table 5).

### 3.2.2 판별분석 결과

36개의 후보 평가요소에 대하여 정규성 검토를 수행하였으며, 정규성을 나타내지 않는 항목은 제외하였다(Table 5). 판별분석 결과 참조·교란 지점의 구분에 유의하며 ( $p < 0.05$ ), 각 단계별 Wilks' lambda가 가장 낮은 평가요소가 선택되었다. 생물지수 및 종 풍부도 범주를 제외한 4개의 범주에서 각각 1개의 평가요소가 선별되었다(Table 6).

### 3.2.3 핵심 평가요소(core metric elements)

통계분석의 결과를 통해 선정되지는 않았지만, 신뢰성 높은 지수개발을 위하여 선별된 평가요소가 없는 범주에서 기초적인 생물학적 온전성 평가에 자주 쓰이며 중요하다고 판단되는 2개의 평가요소를 포함하였다. 균등도(J)는 비교적 낮은 통계적 유의성( $p = 0.069$ )을 나타내었으나, 생물을 이용한 환경평가에 주로 활용되는 기초적인 평가지표 중 하나로써 군집의 균등성을 고려할 수 있다는 장점이 있다고 판단되어 핵심 평가요소에 포함하였다(Balachandran et al., 2012;

Table 5. Relationship-test and Normality test results of candidate metric elements

Category	Metric elements	Reference	Disturbed	Relationship -test rejection	Normality test
		median(average)	median(average)		
Biotic index	DI	0.86(0.85)	0.78(0.77)	O	
	H'	0.89(0.88)	1.20(1.17)	O	
	RI	0.67(0.82)	1.17(1.32)	O	
	J	0.76(0.70)	0.66(0.63)		asin( $\sqrt{x}$ )
Richness	To.t	4.00(4.06)	6.50(7.24)	O	
	To.i	43.00(93.15)	150.00(225.55)	O	
	It	2.50(2.41)	3.00(3.44)	O	
	ETO.t	0.50(0.84)	1.00(1.15)	O	
	ET.t	0.50(0.52)	0.50(0.60)		-
	OHC.t	0.00(0.48)	0.50(1.05)	O	
	E.t	0.00(0.35)	0.50(0.49)	O	
	O.t	0.00(0.31)	0.50(0.55)	O	
	H.t	0.00(0.15)	0.00(0.35)		not possible
	C.t	0.00(0.01)	0.00(0.15)		not possible
	D.t	1.50(1.38)	1.50(1.78)		not possible
	T.t	0.00(0.17)	0.00(0.12)		not possible
Composition taxa	% Oli.t	12.50(13.25)	18.06(19.70)		-
	% CrMo.t	18.06(20.06)	23.81(27.20)		-
	% It	58.33(60.07)	47.73(47.59)		-
	% ETO.t	10.00(14.31)	11.76(14.56)	O	
	% ET.t	7.14(9.11)	5.56(8.69)		asin( $\sqrt{x/100}$ )
	% OHC.t	0.00(8.02)	8.33(10.79)	O	
	% E.t	0.00(6.48)	4.55(7.13)	O	
	% O.t	0.00(5.20)	6.25(5.88)	O	
	% H.t	0.00(2.65)	0.00(3.67)		not possible
	% C.t	0.00(0.17)	0.00(1.24)		not possible
	% D.t	41.67(42.39)	27.14(28.03)	O	
% T.t	0.00(2.63)	0.00(1.55)		not possible	
Composition individuals	% OliCht.i	9.26(12.23)	31.36(32.60)		asin( $\sqrt{x/100}$ )
	% Cr.i	5.00(12.20)	2.60(6.96)	O	
	% Li	73.91(73.34)	59.16(60.58)		asin( $\sqrt{x/100}$ )
	% ETO.i	2.45(6.74)	3.20(6.31)	O	
	% ET.i	0.65(4.73)	1.30(4.35)	O	
	% OHC.i	0.00(5.20)	1.92(4.16)	O	
	% E.i	0.00(3.57)	0.93(3.88)	O	
	% O.i	0.00(2.02)	1.00(1.96)	O	
	% H.i	0.00(3.16)	0.00(1.92)		not possible
	% C.i	0.00(0.03)	0.00(0.28)		not possible
	% D.i	63.33(63.09)	49.24(52.03)	O	
	% T.i	0.00(1.16)	0.00(0.47)		not possible
	% Cnt.i	61.08(57.41)	39.60(41.98)	O	
% Chi.i	61.90(61.63)	46.98(50.37)	O		

Category	Metric elements	Reference	Disturbed	Relationship -test rejection	Normality test
		median(average)	median(average)		
FFGs	FFGs	1.50(1.79)	2.50(2.55)	O	
	% Sh.t	0.00(2.15)	0.00(1.90)		not possible
	% Sh.i	0.00(0.86)	0.00(0.36)		not possible
	% Sc.t	0.00(4.55)	10.80(13.04)	O	
	% Sc.i	0.00(2.26)	3.52(5.95)	O	
	% CF.t	0.00(4.63)	0.00(4.29)		$\text{asin}(\sqrt{x/100})$
	% CF.i	0.00(1.73)	0.00(1.71)		$\text{asin}(\sqrt{x/100})$
	% CG.t	75.00(73.64)	61.11(64.05)	O	
	% CG.i	88.02(85.78)	89.14(84.75)		$\text{asin}(\sqrt{x/100})$
	% Pe.t	0.00(8.04)	13.64(14.61)		-
	% Pe.i	0.00(5.21)	2.86(5.33)		$\text{asin}(\sqrt{x/100})$
	SdC.t	0.00(14.11)	20.00(30.68)	O	
HOGs	HOGs	2.00(2.22)	3.00(3.02)	O	
	% CL.t	0.00(5.86)	19.84(19.71)		$\text{asin}(\sqrt{x/100})$
	% CL.i	0.00(2.50)	5.56(8.19)		$\text{asin}(\sqrt{x/100})$
	% BU.t	57.50(58.88)	45.83(47.35)	O	
	% BU.i	72.68(72.25)	83.31(75.24)		$\text{asin}(\sqrt{x/100})$
	% SW.t	0.00(7.16)	6.25(8.26)		not possible
	% SW.i	0.00(5.60)	0.76(4.92)		not possible
	% SP.t	16.67(18.17)	16.67(18.01)		not possible
	% SP.i	9.09(14.25)	5.18(8.23)		$\text{asin}(\sqrt{x/100})$
	% CB.t	0.00(3.32)	3.85(4.47)		not possible
	% CB.i	0.00(1.43)	0.52(1.62)		not possible
	% SK.t	0.00(0.29)	0.00(0.00)		not possible
	% SK.i	0.00(0.04)	0.00(0.00)		not possible

Table 6. Metric elements for each category selected through discriminant analysis

Step	Metric elements	Tolerance limit	Wilks' lambda	p-value
Biotic index				
-				
Richness				
-				
Composition taxa				
1	% I.t	1.000	0.881	0.001
Composition individuals				
1	% OliCht.i	1.000	0.733	0.000
FFGs				
1	% Pe.t	1.000	0.917	0.007
HOGs				
1	% CL.t	1.000	0.742	0.000

Table 7. Core metric elements of LBMMI

No.	Category	Core metric elements	Direction	k	Ceiling	Bottom
					V <sub>95</sub>	V <sub>5</sub>
1	Biotic index	Pielou's evenness index	Positive(+)	20	0.94	0.23
2	Richness	Number of Total taxa	Positive(+)	20	13.00	2.00
3	Composition taxa	$\sqrt{\text{Percent of taxa in insecta}}$	Positive(+)	20	10.00	4.71
4	Composition individuals	$\sqrt{\text{Percent of individuals in Oligochaeta and Chironomidae(tuble)}}$	Negative(-)	20	8.07	0.00
5	FFGs	$\sqrt{\text{Percent of taxa in Predator}}$	Negative(-)	10	6.49	0.00
6	HOGs	$\sqrt{\text{Percent of taxa in Clingers}}$	Negative(-)	10	6.69	0.00

Blocksom et al., 2002; Lee, 2010; Pielou, 1975). 총 분류군 수(To.t)는 관계성 검토에서 제외되었으나, 생물다양성을 나타내는 가장 대표적이고 중요한 평가지표이며(Lawton, 1994, Thukral, 2017; Wright et al., 1984), 그 값이 커질수록 양호한 생태계 온전성을 갖췄다고 할 수 있어 방향을 positive(+)로 전환하여 핵심 평가요소로 포함하였다.

총 6개의 핵심 평가요소(J, To.t, % I.t, % OliCht.i, % Pe.t, % CL.t)를 선정하였으며, 평가요소가 비율(%)로 구성된 경우 각 값에 제곱근을 취하여 양극단에 가까운 값들이 과대·과소평가되지 않도록 하였다. 현재 국내 저서성 대형무척추동물의 섭식 및 서식기능군에 관한 연구가 Merritt and Cummins (1996)의 체계를 기반으로 속 수준으로 구분하여 진행되고 있어(Chun and Ro, 2004; Kim et al., 2017), 종(species) 수준까지 동정(identification)된 자료를 활용한 본 연구에서 일부 부정확할 가능성이 있다고 판단된다(Chun and Ro, 2004). 이에 따라, 섭식 및 서식기능군 범주의 평가요소는 각 10점을, 나머지 4개 범주의 평가요소는 각 20점의 가중치(k)를 부여하였다(Table 7).

3.3 다중계량지수 개발

각 조사지점별 LBMMI의 점수 분포를 설명하는데 적합한 확률분포모형은 역치값을 포함한 4인자 베타분포(Beta distribution)였으며, 이를 이용하여 지점별 LBMMI의 확률밀도함수를 도출하였다(Fig. 4). 급구간에 가까운 정수로 총 5

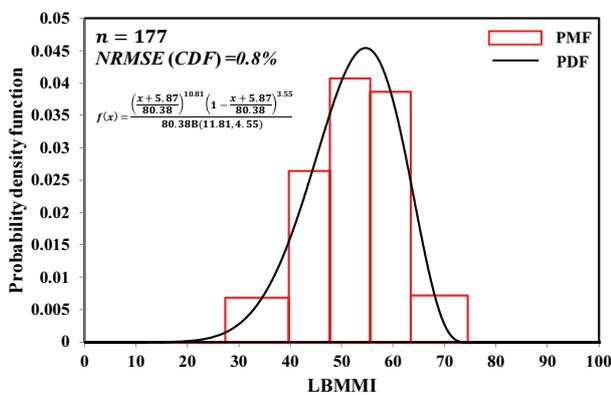


Fig. 4. Probability density function of the best-fit model (Beta model) and LBMMI score of each sampling point.

개의 등급치를 설정하였다(Table 8). 분석에 활용된 177개 지점의 등급화 결과 A, B 등급의 비중이 약 36%였으나(Fig. 5), 국내 83개 주요 호소의 약 60%가 빈영양~중영양 상태를 고려하여 설정한 등급체계가 적합하다고 판단하였다 (Lee et al., 2022).

3.4 다중계량지수 적용성 검토

3.4.1 변별력 검토

LBMMI와 주성분분석에 사용된 7가지 교란요인의 Pearson 상관분석 결과, 모든 교란요인에서 유의한 상관관계가 나타났다(Table 9). 특히, 총 질소 및 세립질 하상비율이 비교적 낮은 상관계수를 나타냈다. 이는 국내 호소가 저서성 대형무척추동물의 생장에 부정적인 영향을 미치는 조류(algae)의 제한영양소로 질소보다는 인이 주로 작용하고, 대

Table 8. Classification of LBMMI for evaluating lake's status

Class	LBMMI	Environmental status
A	63 ≤ ~ 100	very good
B	56 ≤ ~ < 63	good
C	48 ≤ ~ < 56	moderate
D	40 ≤ ~ < 48	bad
E	0 ~ < 40	very bad

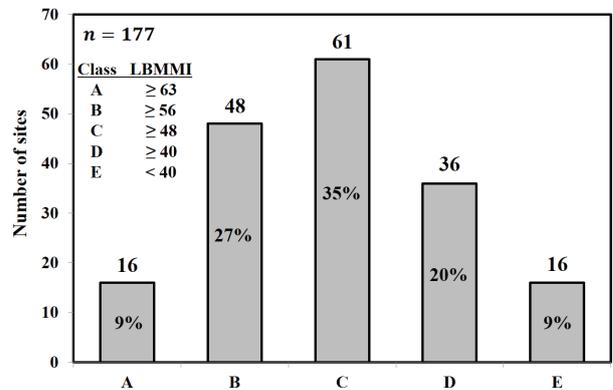
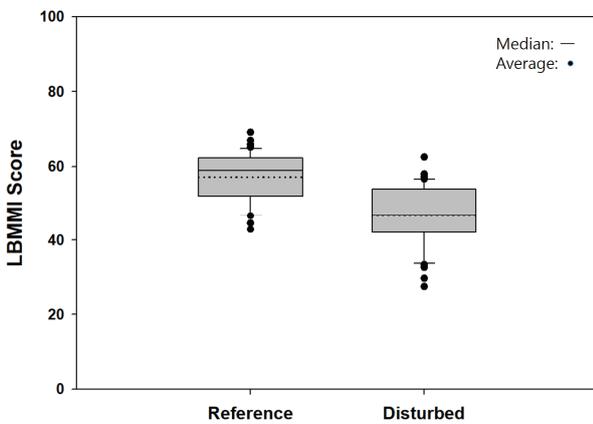


Fig. 5. Number of sampling points per set LBMMI level.

**Table 9.** Results of Pearson correlation analysis between LBMMI scores and disturbed factors

Disturbance factors	Correlation coefficient ( <i>r</i> )	<i>p</i> -value
ln(TOC)	-0.474	0.000
7-pH	-0.423	0.000
ln(T-N)	-0.218	0.004
ln(T-P)	-0.464	0.000
ln(SS)	-0.368	0.000
ln(Chl-a)	-0.416	0.000
asin( $\sqrt{\text{fine-substrate}}$ %)	-0.205	0.007



**Fig. 6.** Comparison of LBMMI score for reference and disturbed points using box-plots.

부분의 하상이 세립질로 구성되어 있어 질소와 세립질 하상 비율에 대한 영향이 비교적 낮게 나타난 것으로 판단된다 (Kim et al., 2007). 또한, 참조·교란지점의 LBMMI 분포를 상자그림을 통해 비교한 결과 두 그룹의 상태를 변별력 있게 비교하는 것을 확인하였다(Fig. 6).

**Table 10.** Results of Pearson correlation analysis between LBMMI score and TSI<sub>KO</sub> score

Type of TSI <sub>KO</sub>	Correlation coefficient ( <i>r</i> )	<i>p</i> -value
TSI <sub>KO</sub>	-0.441	0.000
TSI <sub>KO</sub> (COD)	-0.416	0.000
TSI <sub>KO</sub> (Chl-a)	-0.366	0.000
TSI <sub>KO</sub> (T-P)	-0.459	0.000

**3.4.2 한국형 부영양화 지수(Korean Trophic State Index, TSI<sub>KO</sub>)와의 비교**

부영양화 정도는 호소의 생태 및 이화학적 특성을 나타내며, 저서성 대형무척추동물을 포함한 생물의 다양성에 영향을 끼치기 때문에 LBMMI의 적용성 검토에 대한 간접적으로 사용하기 적합하다고 판단된다(Kim, 2019; Lee et al., 2022). 이에 따라, 호소의 부영양화 정도를 평가하는 NIER (2006)의 TSI<sub>KO</sub>와 LBMMI의 Pearson 상관분석을 수행하였다. LBMMI는 총 4가지 유형의 TSI<sub>KO</sub>와 음의 상관관계를 나타냈으며(Table 10), 개발된 다중계량지수는 부영양화로 인한 영향을 반영할 수 있다고 판단된다.

**3.4.3 국외의 저서성 대형무척추동물 기반 다중계량지수와 비교**

국외의 저서성 대형무척추동물 기반 다중계량지수 개발 연구인 EPA (2022)의 Multi-Metric Index (MMI) 및 Ntislidou et al. (2018)의 Greek Lake Benthic macroinvertebrate Index (GLBiI)와의 비교를 통해 활용성을 검토하였다(Table 11). 본 연구에서는 호소 내의 이화학적 상태만으로 확인이 가능한 환경요인을 교란요인으로 선정하였으나, 국외의 경우 토지이용 유형, 인구밀도 등 호소 외부의 환경요인을 다수 포함하여 선정하였다. MMI는 지역(생태권역)에 따라 유형을 구분하여 지리적으로 가깝고 지형적으로 유사한 지역별로 핵심 평가요소를 선정하였다. 또한, GLBiI는 호소의 아연안대(sublittoral zone) 및 심부대(profundal zones) 등 다양한 수심으로부터 저서성 대형무척추동물을 채집하였다. 이와 비교

**Table 11.** Comparison of MMI and GLBiI and LBMMI characteristics

	LBMMI	MMI EPA (2022)	GLBiI Ntislidou et al. (2018)
Nation	Korea	United States of America	Greece
Disturbed factors	TOC, pH, T-N, T-P, SS, Chl.a, %fine-substrate,	T-P, T-N, Cl, SO4, Turbidity, physical habitat disturbance, Types of land use	lake area, altitude, depth, DO, conductivity, alkalinity, water temperature, T-P, population density, non-natural land cover
Types of category	Biotic index, Richness, Composition taxa, Composition individuals, FFGs, HOGs	Richness, Diversity, Composition, FFGs, HOGs, Tolerance	Richness, Taxonomic composition, Sensitivity, Functional group, Preference for a certain current velocity, Preference for a certain microhabitat, FFGs, HOGs
Characteristic	Distinction between freshwater and brackish water lakes	Lakes are divided into 6 types by eco-region	Sampling at various depths

하여, LBMMI는 동일한 평가요소를 이용해 국내의 모든 유형의 담수호를 평가할 수 있고 조사방법이 비교적 간단하기 때문에 활용성이 높다고 판단된다.

#### 4. Conclusion

본 연구는 저서성 대형무척추동물을 이용하여 호소의 온전성을 평가할 수 있는 다중계량지수의 개발을 위하여 수행되었다. 주성분분석을 수행하여 참조지점과 교란지점을 구분하였으며, 관계성 검토 및 판별분석을 수행하여 호소의 환경을 종합적으로 평가할 수 있는 핵심 평가요소를 선정하였다. 이후, 선정된 핵심 평가요소를 통한 점수화 및 확률분포모형을 이용한 등급화를 진행하여 국내 호소의 온전성 평가를 위한 저서성 대형무척추동물 다중계량지수(Lake Benthic Macroinvertebrate-based Multi-metric Index, LBMMI)를 개발하였다.

- 1) 전기전도도 및 전체 호소에 대한 군집분석 결과를 참고하여 담수호만을 선정하여 이용함으로써, 염분에 의한 저서성 대형무척추동물의 군집 변화가 평가요소에 영향을 미치는 것을 최소화하였다. 또한, 7가지 교란요인(TOC, pH, T-N, T-P, SS, Chl-a, 세립질 하상 비율)을 이용한 참조·교란지점 구분 및 평가요소 선정에 통계분석 결과를 활용하여 객관적으로 핵심 평가요소를 선정하였다. 이에 따라, 선정된 핵심 평가요소는 국내 담수호의 수생태계 평가지표로 활용될 수 있다고 판단된다.
- 2) 개발된 LBMMI는 호소의 부영양화 지수인  $TSI_{KO}$ 와 음의 상관관계를 나타냈다. 설정한 등급에 대한 177개 조사지점의 결과, 국내 83개 주요 호소의 부영양화 수준과 비교하여 유사한 평가등급 분포를 이루었다. 이에 따라, LBMMI는 부영양화가 국내 호소에 미치는 영향을 반영할 수 있는 다중계량지수라고 판단된다.
- 3) 본 연구는 조사자료 부족으로 인하여 기수호에 대한 평가 기준은 제외하였으며, 수초대가 없는 부분을 포함한 호소 전체 환경에 대한 대표성을 나타내는데 한계가 있을 수 있다. 향후 추가적인 연구와 조사결과의 축적을 통해 기수호를 포함한 모든 호소에 활용할 수 있는 다중계량지수로 발전시키는 것이 바람직할 것이다.

#### Acknowledgement

본 논문은 환경부의 재원으로 국립환경과학원의 지원을 받아 수행하였습니다(NIER-2022-04-02-109, NIER-2023-04-02-128).

#### References

Balachandran, C., Dinakaran, S., Alkananda, B., Boominathan, M., and Ramachandra, T. V. (2012). Monitoring aquatic macroinvertebrates as indicators for assessing the health of

lakes in Bangalore, Karnataka, *International Journal of Advanced Life Sciences*, 5(1), 19-33.

Berger, E., Haase, P., Kuemmerlen, M., Leps, M., Schaefer, R. B., and Sundermann, A. (2017). Water quality variables and pollution sources shaping stream macroinvertebrate communities, *Science of the Total Environment*, 587, 1-10. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.02.031>

Blocksom, K. A., Kurtenbach, J. P., Klemm, D. J., Fulk, F. A., and Cormier, S. M. (2002). Development and evaluation of the lake macroinvertebrate integrity index (LMII) for New Jersey lakes and reservoirs, *Environmental Monitoring and Assessment*, 77, 311-333. <https://doi.org/10.1023/a:1016096925401>

Byun, J. S. (2023) *Study of biological assessment method using benthic macroinvertebrate communities within wetland*, Master's thesis, Sahmyook University Graduate School, 28-41. [Korean Literature]

Choi, A. R., Park, S. J., Kim, J. Y., Song, M. Y., and Kong, D. S. (2012). The correlation between water quality and benthic macroinvertebrate community indices in the Jinwi stream, *Korean Journal of Ecology and Environment*, 45(1), 1-10. [Korean Literature]

Choi, C. M., Lee, J. S., Cho, N. J., Ryu, H. Y., Park, S. J., Kim, J. H., Yun, S. G., and Lee, J. T. (2008). Water quality level model using the discriminant analysis for the small streams of rural area in the Han River watersheds, *Korean Journal of Environmental Agriculture*, 27(2), 105-110. [Korean Literature] <https://doi.org/10.5338/KJEA.2008.27.2.105>

Chun, D. J. and Ro, T. H. (2004). Functional feeding group categorization of Korean immature aquatic insects and community stability analysis, *Korean Journal of Ecology and Environment*, 37(2), 137-148. [Korean Literature]

Environmental Protection Agency (EPA). (2022). *National lakes assessment 2017: Technical support document*, EPA, Publication 841-R-22-001, US, 13-194.

Großwendt, A., Röglin, H., and Schmidt, M. (2019). Analysis of ward's method, *Proceedings of the Thirtieth Annual ACM-SIAM Symposium on Discrete Algorithms*, Society for Industrial and Applied Mathematics, USA, 2939-2957. <https://doi.org/10.1137/1.9781611975482.182>

Heino, J., Alahuhta, J., Bini, L. M., Cai, Y., Heiskanen, A. S., Hellsten, S., Kortelainen, P., Kotamaki, N., Kimmo, N. T., Vihervaara P., Vilmi, A., and Angeler, D. G. (2021). Lakes in the era of global change: moving beyond single-lake thinking in maintaining biodiversity and ecosystem services, *Biological Reviews*, 96(1), 89-106. <https://doi.org/10.1111/brv.12647>

Jhingran, V. G., Ahmad, S. H., and Singh, A. K. (1989). Application of Shannon-Wiener index as a measure of pollution of river Ganga at Patna, Bihar, India, *Current Science*, 717-720.

Jun, Y. C., Won, D. H., Lee, S. H., Kong, D. S., and Hwang, S. J. (2012). A multi-metric benthic macroinvertebrate index

- for the assessment of stream biotic integrity in Korea, *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 9(10), 3599-3628. <https://doi.org/10.3390/ijerph9103599>
- Kaenel, B. R., Matthaei, C. D., and Uehlinger, U. R. S. (1998). Disturbance by aquatic plant management in streams: Effects on benthic invertebrates, *Regulated Rivers: Research & Management*, 14(4), 341-356.
- Kang, S. R. and King, S. L. (2012). Influence of salinity and prey presence on the survival of aquatic macroinvertebrates of a freshwater marsh, *Aquatic Ecology*, 46, 411-420. <https://doi.org/10.1007/s10452-012-9410-3>
- Karr, J. R. (1991). Biological integrity: A long-neglected aspect of water resource management, *Ecological Applications*, 1(1), 66-84. <https://doi.org/10.2307/1941848>
- Kim, A. R. (2019). *Study of river integrity assessment methods using benthic macroinvertebrates*, Ph. D. Dissertation, Kyonggi University Graduate School, 40-42. [Korean Literature]
- Kim, H. S., Hwang, S. J., Shin, J. K., An, K. G., and Yoon, C. G. (2007). Effects of limiting nutrients and N: P ratios on the phytoplankton growth in a shallow hypertrophic reservoir, *Eutrophication of shallow lakes with special reference to Lake Taihu, China*, 255-267.
- Kim, J., Kim, A. R., and Kong, D. (2017). Classification of microhabitats based on habitat orientation groups of benthic macroinvertebrate communities, *Journal of Korean Society on Water Environment*, 33(6), 728-735. [Korean Literature] <https://doi.org/10.15681/KSWE.2017.33.6.728>
- Kim, S. J. and Lee, S. H. (1999). The water quality characteristics of fresh water lake by small-scale dairy farm, *Korean Society of Agricultural Engineering Conference Abstracts*, 727-733. [Korean Literature]
- Kim, D. H. and Kong, D. (2019). Analysis of water quality factors for benthic macroinvertebrates streambed index (BMSI) improvement in Korea, *Journal of Korean Society on Water Environment*, 35(6), 539-549. [Korean Literature] <https://doi.org/10.15681/KSWE.2019.35.6.539>
- Kong, D. (2002). Necessity and approach of establishing biological water quality standards, *Korean Journal of Environmental Biology*, 20, 38-49. [Korean Literature]
- Kong, D. (2013). *Ecology guide for benthic macroinvertebrates from Korea*, Ministry of Environment: National Institute of Environmental Research, 24-473. [Korean Literature]
- Kong, D. (2019). Statistical analysis on water quality characteristics of large lakes in Korea, *Journal of Korean Society on Water Environment*, 35(2), 165-180. [Korean Literature] <https://doi.org/10.15681/KSWE.2019.35.2.165>
- Kong, D. and Kang, B. M. (2023). Estimation on altitudinal spectrum of suitability for four species of the mayfly genus ephemera (Ephemeroptera: Ephemeridae) using probability distribution models, *Journal of Korean Society of Water Environment*, 39(4), 302-315. [Korean Literature] <https://doi.org/10.15681/KSWE.2023.39.4.302>
- Kong, D. and Yeo, M. (2023). Development and application of benthic macroinvertebrates genus index for biological assessment on Korean stream environment, *Korean Journal of Water Environment*, 39(4), 269-287. [Korean Literature] <https://doi.org/10.15681/KSWE.2023.39.4.269>
- Kong, D., Son, S. H., Hwang, S. J., Won, D. H., Kim, M. C., Park, J. H., Jeon, T. S., Lee, J. E., Kim, J. H., Kim, J. S., Park, J., Kwak, I. S., Jun, Y. C., Park, Y. S., Ham, S. A., Lee, J. K., Lee, S. W., Park, C. H., Moon, J. S., Kim, J. Y., Park, H. K., Park, S. J., Kwon, Y., Kim, P., and Kim, A. R. (2018). Development of benthic macroinvertebrates index (BMI) for biological assessment on stream environment, *Journal of Korean Society on Water Environment*, 34(2), 183-201. [Korean Literature] <https://doi.org/10.15681/KSWE.2018.34.2.183>
- Kwan, S. J. (2013). *Encyclopedia of underwater creatures*, Nature and Ecology, 24-771. [Korean Literature]
- Kwon, S. G. (1988). Freshwater lake development and water environmental pollution, *Korean Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers*, 30(1), 5-7. [Korean Literature]
- Lawton, J. H. (1994). *What do species do in ecosystems?*, *Oikos*, 71(3), 367-374.
- Lee, D. S., Lee, D. Y., and Park, Y. S. (2022). Classification of major reservoirs based on water quality and changes in their trophic status in South Korea, *Korean Journal of Ecology and Environment*, 55(2), 156-166. [Korean Literature] <https://doi.org/10.11614/KSL.2022.55.2.156>
- Lee, H. J. (2023). *Development of a benthic macroinvertebrate multi-metric index for assessing the integrity of Korean rivers*, Master's thesis, Kyonggi University Graduate School, 28-41. [Korean Literature]
- Lee, M. J. (2010). *Community structure and cluster analysis of the benthic macroinvertebrates in 10 reservoirs of Nakdong river system*, Ph. D. Dissertation, Andong University Graduate School, 6-7. [Korean Literature]
- Lee, S. D. and Kim, S. B. (2009). Ecological characteristics analysis and management plan of freshwater lake basin-a case study on Duryang reservoir at Sacheon, *Journal of the Korean Institute of Landscape Architecture*, 37(1), 50-64. [Korean Literature]
- Lee, S. H., Lee, M. J., Seo, E. W., and Lee, J. E. (2017). Analysis of functional habitat groups of benthic macroinvertebrates according to changes in the riverbed, *Journal of Environmental Science International*, 26(3), 373-380. [Korean Literature]
- McNaughton, S. J. and Wolf, L. L. (1970). Dominance and the Niche in Ecological Systems: Dominance is an expression of ecological inequalities arising out of different exploitation strategies, *Science*, 167(3915), 131-139. <https://doi.org/10.1126/science.167.3915.131>
- Merritt, R. W. and Cummins, K. W. (1996). *An introduction to the aquatic insects of North America*, Kendall Hunt, 29-376.
- Min, J. K., Kim, D. H., Moon, J. S., Kim, J. Y., and Kong, D. (2018). Classification of Korean benthic macroinvertebrate

- types using the TWINSpan clustering and discriminant analysis of environmental factors affecting the distribution of the types, *Journal of Korean Society on Water Environment*, 34(6), 602-620. [Korean Literature] <https://doi.org/10.15681/KSWE.2018.34.6.602>
- Ministry of Environment (ME). (2024). *Water environment conservation act*, Law No. 20172, Ministry of Environment, Chapter 1-2. [Korean Literature]
- National Institute of Environmental Research (NIER). (2006). *A study on the comprehensive assessment methods of water environment - Eutrophication -*, 1-282. [Korean Literature]
- National Institute of Environmental Research (NIER). (2024). *Water environment information system*, <https://water.nier.go.kr/web> (accessed March, 2024). [Korean Literature]
- Ntislidou, C., Lazaridou, M., Tsiaoussi, V., and Bobori, D. C. (2018). A new multimetric macroinvertebrate index for the ecological assessment of Mediterranean lakes, *Ecological Indicators*, 93, 1020-1033. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2018.05.071>
- Park, Y. J., Kim, K. D., Cho, Y. H., Han, Y. G., Kim, Y. J., and Nam, S. H. (2011). Habitat classification and distribution characteristic of aquatic insect functional feeding groups in the Geum River, Korea, *Korean Journal of Environment and Ecology*, 25(5), 691-709. [Korean Literature]
- Pielou, E. C. (1975). *Ecological diversity* (Vol. 165), New York, Wiley, 1-165.
- Poikane, S., Johnson, R. K., Sandin, L., Schartau, A. K., Solimini, A. G., Urbanič, G., Arbaciauskas, K., Aroviita, J., Gabriels, W., Miler, O., Pushch, M. T., Timm, H., and Böhmer, J. (2016). Benthic macroinvertebrates in lake ecological assessment: A review of methods, intercalibration and practical recommendations, *Science of the Total Environment*, 543, 123-134. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.11.021>
- Rawer-Jost, C., Böhmer, J., Blank, J., and Rahmann, H. (2000). Macroinvertebrate functional feeding group methods in ecological assessment, *Hydrobiologia*, 422, 225-232. <https://doi.org/10.1023/A:1017078401734>
- Resh, V. H. (2008). Which group is best? Attributes of different biological assemblages used in freshwater biomonitoring programs, *Environmental Monitoring and Assessment*, 138, 131-138. <https://doi.org/10.1007/s10661-007-9749-4>
- Seo, D. I. (1998). Sihwa Lake's effective water quality management plan Sihwa Freshwater Lake's water pollution status and water quality improvement direction, *Korean Society of Marine Environment and Energy Conference Proceedings*, 63-66. [Korean Literature]
- Thukral, A. K. (2017). A review on measurement of Alpha diversity in biology, *Agricultural Research Journal*, 54(1), 1-10. <https://doi.org/10.5958/2395-146X.2017.00001.1>
- Usseglio-Polatera, P., Bournaud, M., Richoux, P., and Tachet, H. (2000). Biological and ecological traits of benthic freshwater macroinvertebrates: Relationships and definition of groups with similar traits, *Freshwater Biology*, 43(2), 175-205. <https://doi.org/10.1046/j.1365-2427.2000.00535.x>
- Wright, J. F., Moss, D., Armitage, P. D., and Furse, M. T. (1984). A preliminary classification of running-water sites in Great Britain based on macroinvertebrate species and the prediction of community type using environmental data, *Freshwater biology*, 14(3), 221-256. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2427.1984.tb00039.x>