

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 중 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. $\mu g^{-1}$ ), $R_{Clad}$ : 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/calanoïd)

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> , <b><i>Colurella spp.</i></b> , <b><i>Trichocerca spp.</i></b>	<i>Brachionus angularis</i> , <i>Brachionus calyciflorus</i> , <i>Keratella cochlearis</i> , <i>Keratella valga</i> , <i>Polyarthra vulgaris</i> , <b><i>Trichocerca capucina</i></b> , <b><i>Mytilina trigona</i></b> , <b><i>Lepadella oblonga</i></b> , <b><i>Euchlanis dilatata</i></b> , <b><i>Testudinella patina</i></b>
Cladocerans	<i>Bosmina longirostris</i> , <i>Bosminopsis deitersi</i> , <i>Moina macrocopa</i> , <i>Daphnia sp.</i> , <i>Diaphanosoma brachyurum</i>	<b><i>Alona rectangula</i></b> , <i>Bosmina longirostris</i> , <i>Bosminopsis deitersi</i> , <b><i>Chydorus sphaericus</i></b>

\*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.