

Original article

담수산 지각류 *Simocephalus serrulatus* (Koch, 1841) 생체량 산정 방법 연구

오혜지* · 홍근혁 · 최예림 · 장광현*

경희대학교 환경학및환경공학과

Study of Biomass Estimation Methods for the Freshwater Cladoceran Species, *Simocephalus serrulatus* (Koch, 1841). Hye-Ji Oh* (0000-0003-2098-8485), Geun-Hyeok Hong (0000-0001-5771-7238), Yerim Choi (0000-0002-8600-1391) and Kwang-Hyeon Chang* (0000-0002-7952-4047) (Department of Environmental Science and Engineering, Kyung Hee University, Yongin 17104, Republic of Korea)

Abstract The medium-large cladoceran species *Simocephalus* spp. predominantly occur in habitats with developed aquatic vegetation. Accordingly, due to *Simocephalus*' high contribution to zooplankton community biomass in the lake's littoral zone and wetland habitats, estimating their biomass is important to understand the matter cycling based on biological interactions within the aquatic food web. In this study, we reviewed the length-weight regression equations used previously to estimate *Simocephalus* biomass, directly measured *S. serrulatus*' body specification (length, width and area) and their biomass (dry weight) using instruments such as a microscopic digital camera and a microscale, and performed regression analysis between each other. When *S. serrulatus* biomass was estimated using the equation (Kawabata and Urabe, 1998) presented in 『Biomonitoring Survey and Assessment Manual』, Korea, errors between estimates and measures were relatively large compared to the *S. serrulatus* species-specific biomass estimate equation developed by Lemke and Benke (2003). In addition, both equations showed not only increasing trends in error (estimate-measure) with increasing *S. serrulatus*' body length, but also in error variance among similar-sized individuals. The results of regression analysis with dry weight by body specifications indicated that the most appropriate equation for estimating the biomass of *S. serrulatus* was derived from the width-dry weight exponential regression equation ($R^2=0.9555$). The review and development study of such species-specific biomass estimation equations for zooplankton can be used as a tool to understand their role and function in aquatic ecosystem food webs.

Key words: zooplankton, dry weight, length-weight regression, width, area

서 론

Manuscript received 20 June 2023, revised 28 June 2023,
revision accepted 28 June 2023
* Co-corresponding author: Tel: +82-31-201-3392, Fax: +82-31-204-8114
E-mail: ohg2090@naver.com
Tel: +82-31-201-2977, Fax: +82-31-204-8114
E-mail: chang38@khu.ac.kr

동물플랑크톤 군집 분석은 일반적으로 개체수를 기준으로 이루어지고 있으나, 이 경우 종에 따른 크기 차이가 고려되지 않아 생태계 기능 측면에서 각 종의 역할과 기여 정도가 과대/과소평가될 우려가 있다(USEPA, 2014; Zhang *et al.*,

© 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.

2018; Ku *et al.*, 2022). 생물 개체의 체측값(body specification; e.g., 체장, 너비, 면적 등)과 밀접한 연관이 있는 생체량(biomass)은 종별 크기 차이가 반영되기 때문에 수생태계 먹이망 내 동물플랑크톤의 기능을 보다 객관적으로 평가하고 여러 수체 간 상대적인 비교를 용이하게 할 수 있다(Kane *et al.*, 2009; Beaver *et al.*, 2020). 동시에 동물플랑크톤 생체량은 2차 생산(secondary productivity)의 정량화에 필수적인 요소로, 식물플랑크톤에 의한 1차 생산(primary productivity)과 상위 영양 단계 생물의 물질량 사이의 매개로써 저차-고차 생물 간 에너지 전달 효율을 산정하고 먹이망 내 물질 및 에너지 흐름을 추적하는 데 활용된다(Brucet *et al.*, 2020; Ku *et al.*, 2022). 동물플랑크톤의 총 생체량은 군집을 구성하는 종들의 조성 및 개체수에 영향을 받으며(Lombardo *et al.*, 2015), 이러한 요소들은 서식처 환경 변화에 민감하게 반응하기 때문에 생체량을 기반으로 한 수생태계 건강성 평가 지수의 개발도 활발하게 이루어지고 있다(Stamou *et al.*, 2019; Zhan *et al.*, 2019; Yao *et al.*, 2021; Stamou *et al.*, 2022). 수생태계 먹이망 내 생물 군집 동태 및 물질의 생물 농축을 예측하는 생태 모델(e.g., AQUATOX) 분야에서도 동물플랑크톤 생체량이 필수 정보로써 다루질 만큼 그 중요성은 커져가고 있지만(Park *et al.*, 2008; Long *et al.*, 2018; Cremona *et al.*, 2021), 기술적 한계 및 작업과 관련한 노력의 필요성으로 인해 종별 생체량 측정/추정은 아직까지 도전 과제로 남아 있다. 특히 국내의 경우, “생물 측정망 조사 및 평가지침(국립환경과학원 공고 제2017-439호) 보구간편”에서 동물플랑크톤 생체량의 정량적 산출을 위한 자료를 제공하고 있으나, 국내 출현종에 대한 연구 결과가 미흡하여 미국 환경보호청(United States Environment Protection Agency, USEPA)에서 제시하고 있는 산정 방법을 기반으로 하고 있다(USEPA, 2003; NIER, 2017).

수생식물이 발달한 호소의 수변부, 습지 등은 식물애착성(phytophilous)을 가지는 부착성 지각류 및 윤충류 개체의 밀도가 증가함에 따라 호 내와 상이한 종 조성을 가진다(Dumont *et al.*, 1975; Burks, 2001; Kim and Choi, 2022). 수변부 및 습지 서식처에서 주로 출현하는 대표적인 지각류는 *Alona* spp., *Chydorus* spp., *Simocephalus* spp. 등이 있으나(Choi *et al.*, 2012; Oh *et al.*, 2022), *Alona* spp.와 *Chydorus* spp. 같은 소형종들은 동물플랑크톤 군집 생체량에 기여하는 정도가 상대적으로 낮기 때문에, 해당 서식처에서의 먹이망 내 생물학적 상호작용을 기반으로 한 물질 순환을 이해하기 위해서는 *Simocephalus* spp.와 같은 중대형 종들의 생체량 산정이 매우 중요하다. *Simocephalus* spp.는 일반적으로 1~2 mm 체장 범위를 가지는 중대형 지각류로 다

양한 크기의 식물플랑크톤을 주 먹이원으로 섭식하는 1차 소비자이며(Choi *et al.*, 2013; Chang *et al.*, 2016), 비오톱 의존적(biotope-dependent)인 형태학적 가변성을 가지고 있어 서식처 내 영양 상태, 물리적인 자극 등이 이들의 생체량 변동을 유발하는 요인으로 알려져 있다(Dumont *et al.*, 1975). 국내에서는 *S. congner*, *S. exspinosus*, *S. mixtus*, *S. serrulatus* 그리고 *S. vetulus*로 총 5종의 *Simocephalus*종들이 출현하는 것으로 보고되어 있다(NIER, 2016; NIBR, 2019).

본 연구에서는 국내 서식하는 주요 *Simocephalus*종인 *S. serrulatus*를 대상으로 국외에서 선행 연구되어진 *Simocephalus* spp. 생체량 산정식을 국내 출현 개체에 적용했을 때 그 적합 정도를 평가하고, *S. serrulatus* 개체의 다양한 체측값을 이용해 생체량(건중량)과의 회귀 분석을 수행하여 설명력 높은 회귀식을 도출, 보다 정확한 생체량 추정 방법을 제시하고자 하였다.

재료 및 방법

본 연구를 위한 *Simocephalus serrulatus* 개체들은 전라북도 군산 소재의 강정제(36°02'21.1"N, 126°50'35.7"E)에서 2023년 4월 채집하였다. 저수지 수변부에서 동물플랑크톤 네트(망구 30 cm, 망목 60 µm)를 이용, 사선끌기 방법(3 m×1회)을 통해 채집해 곧바로 실험실로 운반, 해부현미경(SZ; Olympus, Japan)하에서 *S. serrulatus* 개체들을 분리(sorting)하여 체측값과 건중량을 측정하기 직전까지 4°C에서 냉장 보관하였다. 이때, *S. serrulatus*의 다양한 크기 정보를 수집하기 위해 최대한 넓은 체장 범위의 개체들을 대상

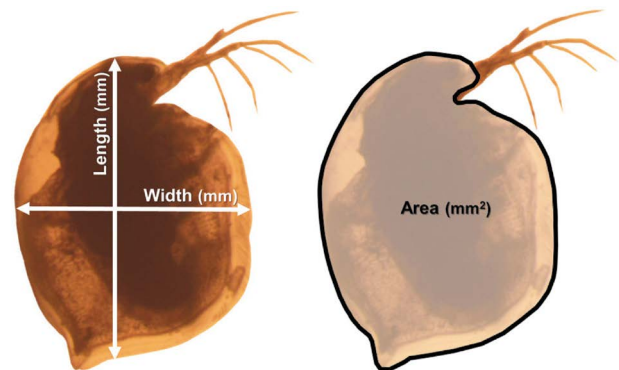


Fig. 1. Measurements of *Simocephalus serrulatus* individuals' body specifications - Length (mm): from the head to the end of the body excluding the apical spines, Width (mm): carapace width, Area (mm²): lateral area including the area of the apical spines.

으로 분리하였다(n=94).

이후 도립현미경(CKX41; Olympus, Japan)을 이용하여 분리된 *S. serrulatus* 개체들 중 체장(Length; 머리 끝부터 꼬리 가시를 제외한 몸 끝까지의 길이, mm), 너비(Width; 측면 부에서 가장 넓은 길이, mm) 및 면적(Area; 측면부의 면적, mm²)을 측정했으며(Fig. 1), 측정 시 정확도를 높이기 위해 현미경 디지털 카메라(FX-500; Olympus, Japan)와 이미지 뷰어 프로그램(ImageView)을 사용했다. 이 과정에서 개체의 포란 여부에 따라 체측값 및 건중량이 달라질 수 있기 때문에 포란 개체와 비포란 개체를 구분하여 작업하였다.

체측값 측정이 이루어진 개체들은 사전에 60°C 오븐에서 건조 후 계량된 틴 캡슐(Tin capsules pressed ultra-light weight 6×4 mm; Elemental Microanalysis, UK)에 한 개체씩 넣어 동일 조건의 오븐에서 24시간 건조한 후 다시 계량하여 개체의 건중량을 측정하였다. 틴 캡슐의 계량은 0.001 mg 단위까지 측정 가능한 미세 저울(MYA 2.4Y; RADWAG, Poland)을 사용하여 이루어졌으며, 보다 정확한 건중량 계산을 위해 건조 전후의 틴 캡슐은 각 3회씩 계량하여 그 평균값을 사용하였다(3회 측정값 표준 편차 범위: 0.000~0.004 mg). *S. serrulatus*의 건중량, 즉 생체량은 다음과 같이 계산되었다.

$$\text{건중량 실측치}(\mu\text{g}) = \frac{(W_b)\text{avg.} - (W_a)\text{avg.}}{1000}$$

W_a = 사전 계량된 틴 캡슐의 무게(mg)

W_b = 개체 건조 후 계량된 틴 캡슐의 무게(mg)

*S. serrulatus*의 생체량 산정에 사용되고 있는 기존 길이-무게(i.e., 체장-건중량) 회귀식의 타당성을 검증하기 위해 산정식을 통한 생체량 추정치와 미세 저울을 이용한 실측치 간 오차(추정치 - 실측치)를 산출하였다. 비교 대상식으로는 국내 『생물측정법 조사 및 평가지침 - 보구간편』에서 *Simocephalus* spp. 생체량 환산식으로 제안하고 있는 Kawabata and Urabe (1998)의 *S. expinosus* 체장-건중량 회귀식(Eq (1))과 Lemke and Benke (2003)가 도출한 *S. serrulatus*종 특이적 체장-건중량 회귀식(Eq (2))을 선정하였으며(Table 1), 각 식을 통해 타 *Simocephalus*종으로부터 도출된 회귀식의 *S. serrulatus* 적합 정도와 국내 서식 개체에 적용 가능

성을 검토하고자 하였다. 이때, 정확성을 평가하기 위해 평균절대오차(Mean Absolute Error), 즉 오차 값(±)들을 절대값으로 변환한 뒤 합산하여 평균을 구한 값을 사용하였다.

또한, *S. serrulatus*의 체측값과 건중량 실측치는 해당 종의 생체량 추정을 위한 최적의 회귀식 도출에 사용되었다. 회귀 분석은 유사한 체측값을 가지는 개체들의 평균 체측값 및 건중량 실측치를 사용하여 수행되었으며, 이때 결정계수(multiple R-squared) 값이 1에 가까울 때 도출된 회귀식의 신뢰도가 극대화되기 때문에 적합성 평가에 이를 고려하여 최적의 *S. serrulatus* 생체량 산정식을 제안하고자 하였다.

결과 및 고찰

1. *Simocephalus serrulatus*의 크기 분포 및 건중량 변화 경향

본 연구에서 *Simocephalus serrulatus* 개체들(n=94)은 0.79~2.16 mm 범위의 체장(L) 값을 보였으며, 이 중 70.2% 이상(66개체)이 1.0~1.2 mm 혹은 1.4~1.8 mm 체장 범위에 속했다. 너비(W)와 면적(A)은 각각 0.57~1.65 mm와 0.38~2.75 mm²의 범위를 보였으며, 1.0~1.2 mm 너비 범위와 1.0~1.5 mm² 면적 범위에서 높은 개체 빈도를 나타냈다(Fig. 2).

전체적인 체장-너비/단면적 분포를 봤을 때, 체장이 증가할수록 너비와 단면적 또한 증가하는 경향을 보였으나, 유사한 체장을 가지는 개체들 사이에서 너비 및 단면적의 차이가 크게 나타났다. 체장 증가에 따른 너비 및 단면적의 개체 간 차이 변화를 파악하기 위해 임의적으로 다섯 구간으로 나누어 구간 내 너비와 단면적 각각의 변동계수(Coefficient of Variation, CV)를 산출한 결과, 두 항목 모두 2구간(L 1.00~1.30 mm)에서 개체 간 차이가 가장 크게 나타났다. 이후 구간들(3구간; L 1.30~1.55 mm, 4구간; L 1.55~1.8 mm, 5구간; L 1.8 mm~)에서는 점차적으로 변동계수가 증가하는 경향을 보여, 체장이 증가할수록 유사 체장 개체 간 너비 및 단면적 차이가 커지는 것으로 분석되었다. 한편, 포란 개체의 너비 및 단면적이 비포란 개체 대비 클 것이라 예측하였으나 실제 대체적으로 포란 여부가 큰 영향을 끼치지 않거나 오히려 너비 및 단면적이 작게 나타나기도 하였다(Fig. 3).

Table 1. Length-weight regression equations used to estimate the biomass (dry weight) of *Simocephalus serrulatus* (W: μg, L: mm).

Equation	Characteristic	Reference
(1) $\ln(W) = 2.47 + 1.91 \times \ln(L)$	Derived using <i>S. expinosus</i> individuals reared in the laboratory	Kawabata and Urabe, 1998
(2) $\ln(W) = 2.568 + 2.192 \times \ln(L)$	Derived using <i>S. serrulatus</i> individuals collected from wetland	Lemke and Benke, 2003

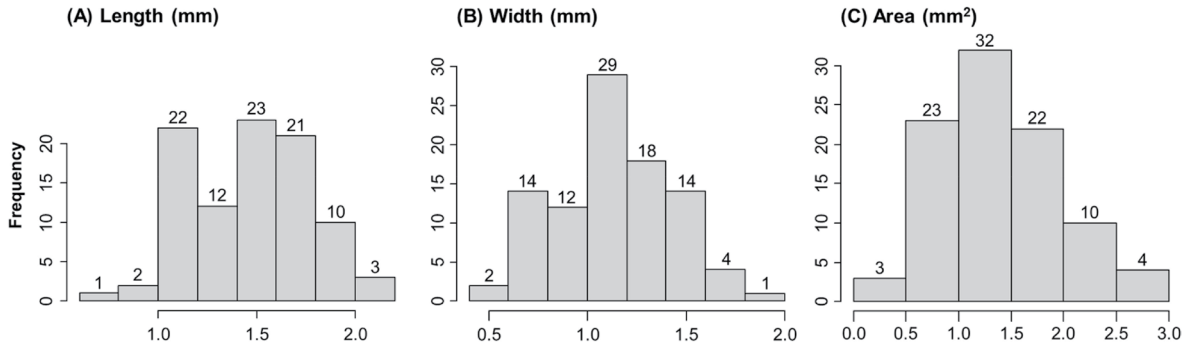


Fig. 2. Histogram of the body specifications - (A) length, (B) width, and (C) area of *Simocephalus serrulatus* (n = 94).

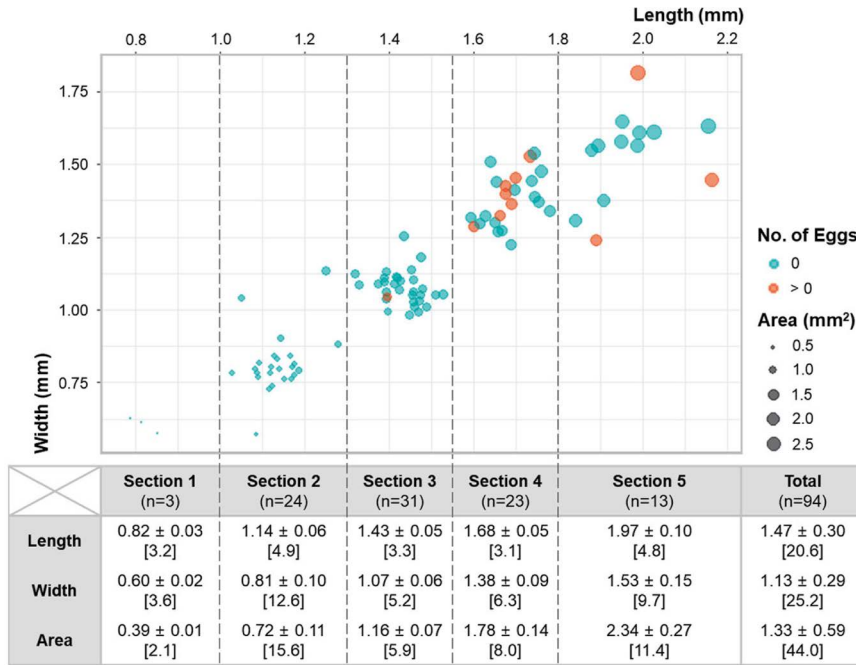


Fig. 3. Trends in width (y-axis) and area (bubble) as a function of *Simocephalus serrulatus* individual length (x-axis): Length (mm) range of each bin: Section 1 < 1.00, Section 2 < 1.30, Section 3 < 1.55, Section 4 < 1.80, and Section 5 > 1.80. Color of points indicates whether they are egg-bearing (blue: individuals without eggs, red: egg-bearing individuals), and the table shows the average ± standard deviation [CV%] of body specifications by section.

실제 측정된 *S. serrulatus* 개체들의 생체량 (건중량)은 9.67~147.67 μg 의 범위를 보였다. 체장 1.2 mm 이하, 너비 0.9 mm 이하, 면적 0.9 mm^2 이하의 개체들 간에는 비교적 건중량 차이가 크게 나타나지 않았으나, 이후 개체의 체장, 너비 및 면적이 증가함에 따라 건중량 값이 대체로 점진적인 증가 경향을 나타냈다. 이때, 체장/너비/면적이 증가할수록 유사 체측값을 가지는 개체 간 건중량 차이가 크게 나타났으며, 유사 체측값을 가지는 개체 간 포란 여부에 따른 건중량 차이는 뚜렷이 보이지 않았다(Fig. 4).

2. *Simocephalus serrulatus* 생체량 실측치를 이용한 기존 생체량 산정식 검토

국내 서식 *S. serrulatus* 개체에 기존의 생체량 산정식 (Eq (1)-Kawabata and Urabe 산정식 및 Eq (2)-Lemke and Benke 산정식; Table 1)의 정확성을 평가하기 위해 추정치와 실측치 간 오차를 Fig. 5와 같이 나타냈다. 전 구간의 추정치와 실측치 간 평균절대오차를 비교한 결과, Eq (2)에서 상대적으로 작은 값을 보여 종 특이적 산정식을 사용했을

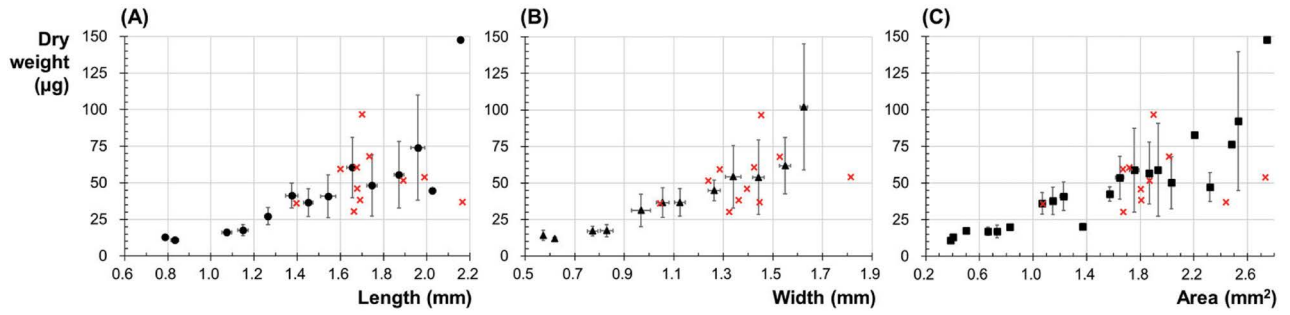


Fig. 4. Trends in biomass (dry weight) with increasing body specifications - (A) length, (B) width, (C) area of *Simocephalus serrulatus* individuals: ●, ▲, and ■ represent the average \pm standard deviation of dry weight of individuals without eggs grouped based on length, width, and area divisions of 0.1 mm or mm². × indicates values for egg-bearing individuals (the average number of eggs: 4.8 ± 3.0).

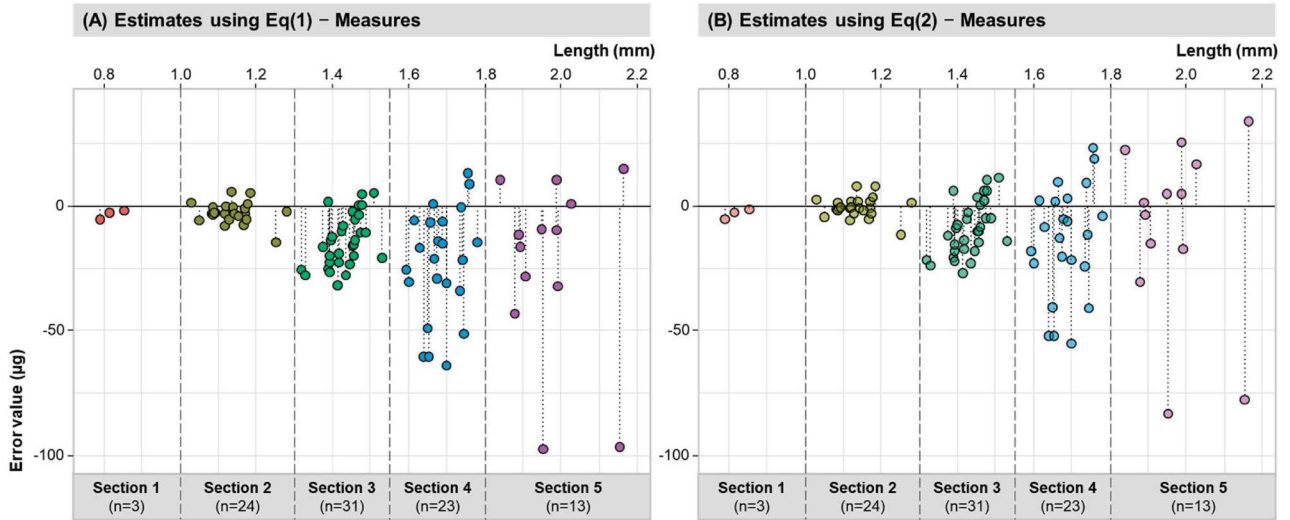


Fig. 5. Trends in the degree of error between biomass (dry weight) estimates and measures according to the length of *Simocephalus serrulatus*: Estimates was calculated using the length-weight regression equations proposed by (A) Kawabata and Urabe (1996) and (B) Lemke and Benke (2003), respectively. Length (mm) range of each bin: Section 1 < 1.00, Section 2 < 1.30, Section 3 < 1.55, Section 4 < 1.80, and Section 5 > 1.80.

때 보다 정확한 *S. serrulatus*의 생체량 추정이 가능한 것으로 나타났다. 산정식에 관계없이 개체 체장이 1.3 mm 이하 일 때(구간 1 및 2) 가장 낮은 평균절대오차 값을 보였으며(약 3~4 µg), 이후 그 값은 점차적으로 증가해 구간 5(L: 1.8 mm~)에서는 Eq (1)과 Eq (2) 각각 최대 29.32 µg, 25.83 µg의 평균절대오차 값을 나타냈다. 이와 동시에 절대오차의 표준편차 또한 구간 1부터 구간 5로 진행될수록 그 값이 증가하여, *S. serrulatus* 개체의 체장이 증가할수록 산정식의 정확도가 감소하고 개체 간 오차 편차가 보다 크게 나타나는 것으로 분석되었다(Fig. 5; Table 2A). 한편, *S. serrulatus* 개체의 체장을 이용해 생체량을 추정할 때 그 값은 주로 실측치 대비 과소평가되는 것으로 확인되었다(Fig. 5; Table 2B).

3. 국내 서식 개체의 체측값을 사용한

Simocephalus serrulatus 생체량 산정식 도출

국내에 서식하는 *Simocephalus serrulatus* 개체들의 생체량(건중량) 추정에 보다 적합한 산정식을 도출하기 위해 총 94개체 중 포란 개체(11개체)를 제외한 83개체를 대상으로 체장/너비/면적과 건중량 간의 관계를 선형(linear), 로그(logarithmic) 및 지수(exponential) 함수꼴로 회귀 분석하였다(Fig. 6). 체장-건중량 회귀식의 경우, 선형, 로그 및 지수 함수꼴일 때 결정계수(multiple R-squared, R²) 값이 각각 0.6503, 0.5807 및 0.8789로 분석되었으며(Fig. 6A~C), 너비-건중량 회귀식에서는 차례로 0.8551, 0.7809 및 0.9555(Fig. 6D~F), 면적-건중량 회귀식에서는 0.7652, 0.6367 및

Table 2. Summary of error information between biomass (dry weight) estimates and measures of *Simocephalus serrulatus* by length bin shown from Fig. 5: Eq (1) and Eq (2) used to calculate the biomass estimates of *S. serrulatus* are the length-weight regression equations proposed by Kawabata and Urabe (1996) and (B) Lemke and Benke (2003), respectively.

Error value (Estimates – Measures)	Section 1 n=3	Section 2 n=24	Section 3 n=31	Section 4 n=23	Section 5 n=13	
(A) Mean ± Std. of Absolute Error	Eq (1)	3.49 ± 1.48	3.91 ± 3.13	16.27 ± 18.41 14.98 ± 9.12	25.21 ± 19.23	29.32 ± 30.75
	Eq (2)	3.14 ± 1.58	3.02 ± 2.76	13.32 ± 15.43 11.96 ± 7.12	20.17 ± 16.52	25.83 ± 25.28
(B) Range (Min~Max)	Eq (1)	- 5.50 ~ - 1.96	- 14.87 ~ 5.44	- 97.19 ~ 14.71 - 31.79 ~ 5.31	- 64.1 ~ 12.94	- 97.19 ~ 14.71
	Eq (2)	- 5.26 ~ - 1.49	- 11.71 ~ 7.6	- 83.09 ~ 33.91 - 26.85 ~ 11.51	- 54.95 ~ 23.06	- 83.09 ~ 33.91

Length (mm) range of each section: Section 1 < 1.00, Section 2 < 1.30, Section 3 < 1.55, Section 4 < 1.80, and Section 5 > 1.80.

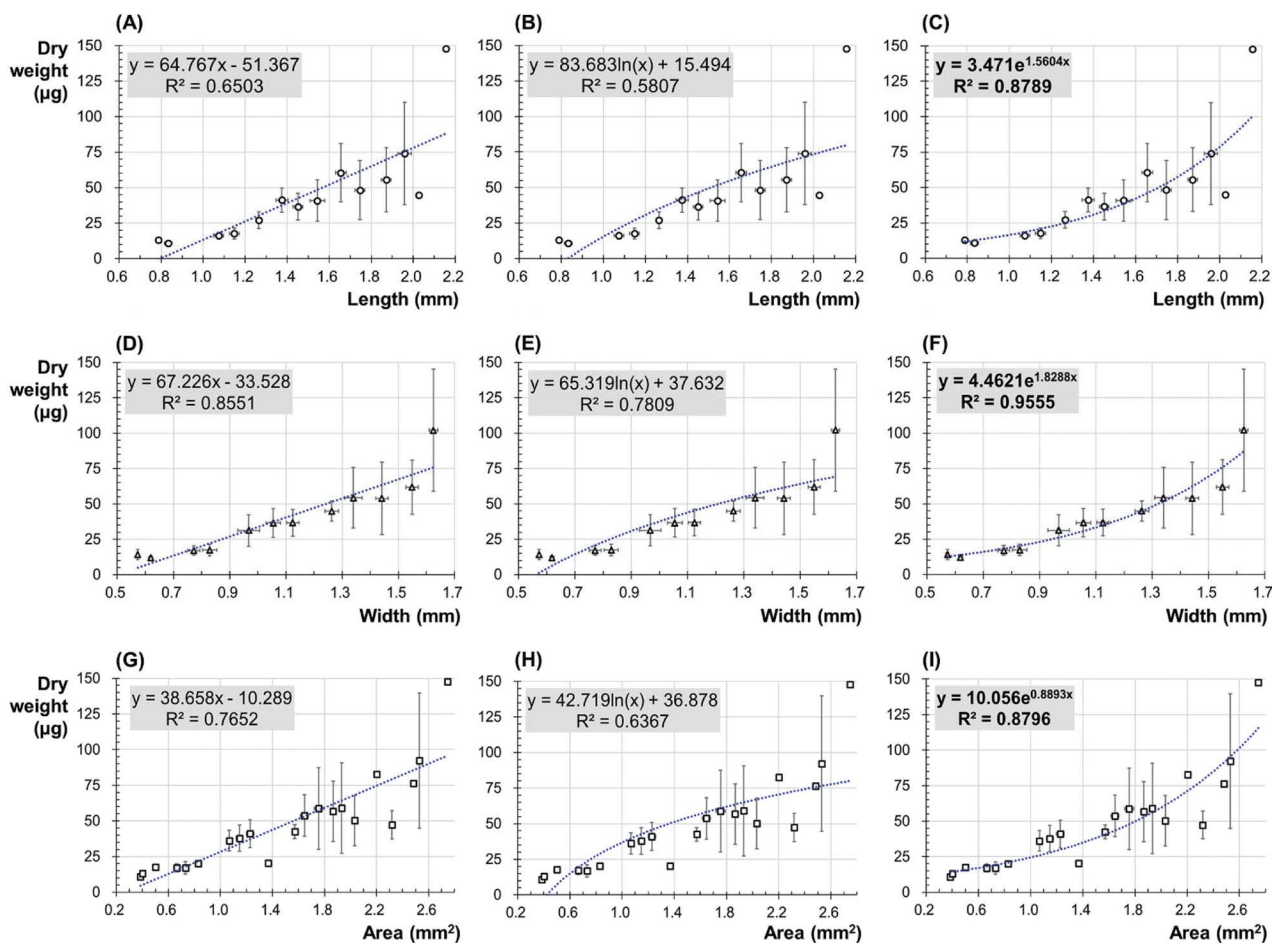


Fig. 6. Regression analyses and fitting results between the body specifications of *Simocephalus serrulatus* individuals (length, (A~C); width, (D~F); area, (G~I)) and their biomass measurements. Bold: regression equation with the highest multiple R² value among the linear, logarithmic and exponential functions according to body specification factor.

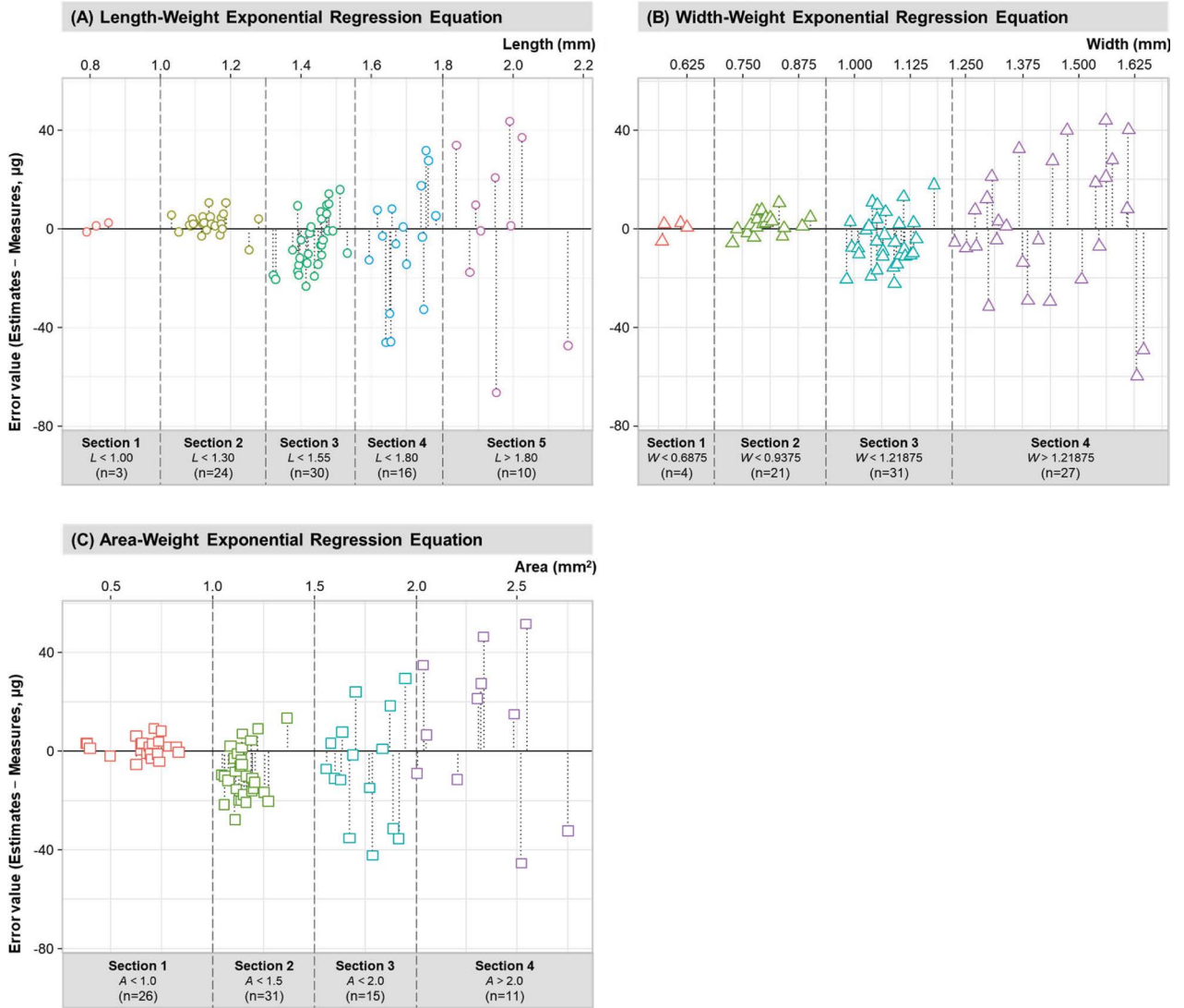


Fig. 7. Trends in the degree of error between biomass (dry weight) estimates derived from (A) length-weight, (B) width-weight, and (C) area-weight exponential regression equations and measures according to each body specification of *Simocephalus serrulatus*.

0.8796의 결정계수 값을 나타냈다(Fig. 6G~I). *S. serrulatus* 체측값의 종류에 상관없이 지수 > 선형 > 로그 회귀식 순으로 높은 결정계수 값을 보여, 지수 함수꼴이 *S. serrulatus* 체측값 증가에 따른 건중량 증가 경향을 가장 잘 반영하는 것으로 나타났으며(Fig. 6), 그중에 너비-건중량 지수 회귀식이 약 96%로 가장 높은 설명력을 보였다(Fig. 6).

본 연구에서 *S. serrulatus*의 체측값 및 건중량 실측치를 이용해 도출한 회귀식들 중 체측값의 종류와 상관없이 가장 높은 설명력을 가졌던 지수 회귀식의 정확성 검토를 위해 각 체장/너비/면적-건중량 지수 회귀식을 이용해 계산된 추정치와 실측치 간 오차를 Fig. 7과 같이 나타냈다. 기존에 Kawabata and Urabe (1998)와 Lemke and Benke (2003)가

제시한 *Simocephalus* 생체량 산정식(체장-건중량 로그 회귀식)으로 계산한 추정치와 실측치 간 절대오차가 개체의 체장 증가에 따라 그 값과 개체 간 편차 또한 증가하는 경향을 보였던 것과 같이, 체장/너비/면적-건중량 지수 회귀식들 또한 체측값이 증가함에 따라 절대오차의 평균±표준편차 값이 증가하는 것으로 나타났다. 하지만 각 구간 및 전 구간의 추정치와 실측치 간 절대오차의 평균±표준편차를 비교했을 때, 그 값이 기존 산정식 대비 새롭게 도출된 체장/너비/면적-건중량 지수 회귀식들에서 상대적으로 낮은 값을 나타냈다(Fig. 7; Table 3). 특히 가장 높은 설명력을 보였던 너비-건중량 지수 회귀식의 경우에는 평균절대오차 값이 11.48 µg으로(Table 3B), Kawabata and Urabe 산정식과

Table 3. Summary of error information between biomass (dry weight) estimates derived from our own regression equations and measures of *Simocephalus serrulatus* by each bin shown from Fig. 7.

Error value (Estimates – Measures)		Section 1	Section 2	Section 3	Section 4	Section 5
	No. of individuals	3	24	31	23	13
(A) Length-Weight Exponential Regression Equation	Mean ± Std. of Absolute Error	1.65 ± 0.57	3.76 ± 2.90	11.86 ± 13.14 10.43 ± 6.17	18.52 ± 14.94	27.97 ± 20.38
	Range (Min~Max)	-1.13~2.45	-8.56~10.79	-66.52~43.73 -23.20~15.96	-45.82~31.99	-66.52~43.73
	No. of individuals	4	21	31	27	
(B) Width-Weight Exponential Regression Equation	Mean ± Std. of Absolute Error	2.69 ± 1.45	3.52 ± 2.60	11.48 ± 12.08 9.44 ± 5.80	21.33 ± 15.56	-
	Range (Min~Max)	-4.99~2.66	-5.79~10.77	-59.47~44.00 -21.92~18.15	-59.47~44.00	
	No. of individuals	26	31	15	11	
(C) Area-Weight Exponential Regression Equation	Mean ± Std. of Absolute Error	2.87 ± 2.23	11.87 ± 6.75	12.27 ± 12.08 18.27 ± 13.20	27.42 ± 15.31	-
	Range (Min~Max)	-5.10~9.31	-27.64~13.65	-45.30~51.77 -42.04~29.57	-45.30~51.77	

(A) Length (mm) range of each bin: Section 1 < 1.00, Section 2 < 1.30, Section 3 < 1.55, Section 4 < 1.80, and Section 5 > 1.80. (B) Width (mm) range of each bin: Section 1 < 0.6875, Section 2 < 0.9375, Section 3 < 1.21875, and Section 4 > 1.21875. (C) Area (mm²) range of each bin: Section 1 < 1.0, Section 2 < 1.5, Section 3 < 2.0, and Section 4 > 2.0.

Lemke and Benke 산정식의 평균절대오차 값이 각각 16.27 µg, 13.32 µg이었던 것과 비교하면 추정치와 실측치 간 오차를 최소화하여 생체량 추정이 가능할 것이라 판단된다(Table 3A). 또한 새롭게 도출된 체장/너비/면적-건중량 지수 회귀식을 사용할 경우, 생체량 실측치 대비 추정치의 극단적인 과소/과대평가가 발생하지 않는 것으로 보여진다(Fig. 7).

결과적으로 회귀 분석 결과의 설명력과 회귀식을 이용해 생체량을 추정했을 때 발생할 수 있는 실측치와의 오차 정도를 모두 고려했을 때, 국내 출현 *S. serrulatus*의 경우, 본 연구에서 제시된 너비-건중량 지수 함수($y = 4.4621 \times e^{1.8288x}$)을 사용할 때 보다 정확도 높은 생체량 산정이 가능할 것으로 판단된다(Fig. 6F).

결론

수생태계 먹이망 연구를 수행하는 데 있어 동물플랑크톤의 생체량의 중요성이 높아짐에 따라, 보다 정확한 생체량 추정을 목표로 정밀도 높은 저울을 이용한 반복 측정,

영상 분석 등의 발전된 방법들을 통해 동물플랑크톤 생체량 산정식의 보완이 지속적으로 이루어지고 있다(Færøvig *et al.*, 2002; Alcaraz *et al.*, 2003; Vakkilainen *et al.*, 2004; Maia-Barbosa and Bozelli, 2005; Burgess *et al.*, 2015; Ku *et al.*, 2022). 본 연구에서는 국내 서식 개체에 보다 적합한 *Simocephalus serrulatus*의 생체량 추정 방법을 개발하기 위해 기존 선행 산정식(체장-건중량 회귀식)을 검토하고 개체의 체측값에 따른 건중량과의 회귀 분석을 통해 새로운 회귀식을 도출하였다.

강정제로부터 채집된 *S. serrulatus* 개체들의 건중량을 계산하는 과정에서 건조 전후의 턴 캡슐 무게를 3회 반복 측정하여 그 평균값을 사용하였는데, 이때 모든 개체들의 변동계수 평균값이 0.01% 미만으로 매우 낮게 나타나 본 연구에서 사용한 미세 저울의 정밀도 문제로 건중량을 계산하는 데 있어 오류가 발생했을 가능성은 희박한 것으로 나타났다. *Simocephalus* spp.는 지각류 사이에서 상대적으로 두꺼운 외골격(exoskeleton)을 가지고 있는 것으로 알려져 있는데(Mitchell and Williams, 1982), 실제로 본 연구에서 사용된 *S. serrulatus* 개체들(체장 범위: 0.79~2.16 mm)의 건

중량 범위는 9.67~147.67 μg 으로, 유사한 체장을 가지는 *Daphnia magna* 개체들의 건중량(최대 약 60 μg)과 비교했을 때 큰 차이를 보였다(Ku *et al.*, 2022). 이를 통해 지각류를 비롯한 새각강(Branchiopoda) 종들의 생체량 변동에 외골격 두께가 영향 요인으로 작용할 수 있음을 확인하였다.

국내 지침에서 제시하고 있는 *Simocephalus* spp. 생체량 산정식(Kawabata and Urabe 산정식)과 *S. serrulatus*종 특이적 생체량 산정식(Lenke and Benke 산정식)을 사용하여 국내 강정제에서 채집된 *S. serrulatus* 개체들의 생체량 추정치를 계산한 결과(Fig. 5; Table 2), 두 식에서 모두 개체 체장이 길어질수록 추정치-실측치 간 오차가 크게 나타났으며, 유사 체장 개체 간 편차도 함께 증가하는 것으로 분석되었다. 두 산정식을 비교했을 때, Kawabata and Urabe 산정식 대비 Lenke and Benke의 *S. serrulatus*종 특이적 생체량 산정식에서 실측치와의 차이가 상대적으로 작게 나타났으며, 이는 *Simocephalus*종들의 생체량 추정에 종 특이적 산정식의 도출 및 적용의 필요성을 시사한다.

S. serrulatus 개체들의 체측값별 생체량 산정을 위한 회귀식 도출 결과, 기존 산정식에서 생체량을 추정하는 데 사용했던 개체의 체장에 비해 너비 및 면적-건중량 회귀식의 설명력이 상대적으로 높게 나타났다(Fig. 6). 너비 기반의 회귀식과 면적 기반의 회귀식을 비교했을 때, 개체의 측부 면적이 체장과 너비 정보를 모두 포함하고 있음에도 불구하고 면적 기반의 회귀식에 비해 너비 기반 회귀식에서 상대적으로 높은 결정계수 값을 나타냈으며, 세 가지 함수꼴의 너비-건중량 회귀식 중 지수 함수꼴에서 가장 높은 설명력을 보였다(Fig. 6D~I). 이는 *S. serrulatus* 개체의 체측값 중 너비 증가에 따른 건중량 증가 경향이 가장 안정적인 경향을 보였기 때문에 도출된 결과로 판단된다(Fig. 4). *Daphnia* spp. 또한 종에 따라 생체량과 밀접한 연관을 보이는 체측값이 상이하게 나타난다는 연구 결과가 있으며(Ku *et al.*, 2022), 이는 *Simocephalus*속의 경우에도 종에 따라 개체 성장 과정에서 개체의 형태와 체측값이 발달하는 정도에 차이가 있을 수 있기에 동물플랑크톤의 군집 생체량을 보다 정확하게 추정하기 위해서는 이와 같은 종 특이적 생체량 산정식의 도출이 필요할 것으로 판단된다(Færøvig *et al.*, 2002).

한편, 선행 연구된 *Simocephalus*종들의 생체량 산정을 위한 회귀식을 도출하는 데 사용된 개체들의 체장은 Kawabata and Urabe 산정식과 Lenke and Benke 산정식에서 각각 0.6~2.6 mm와 0.40~1.38 mm 범위로, 본 연구에서 사용된 *S. serrulatus* 개체들의 체장 범위(0.79~2.16 mm)와 비교했을 때 0.8 mm 이하의 소형 및 2.2 mm 이상의 대형 개체들의 확보가 미흡했던 것으로 확인되었다. 또한, 본 연구에서는 포란 개체가 충분히 확보되지 않아 결과로서 최적의 *S.*

serrulatus 생체량 산정식으로 제시하고 있는 너비-건중량 지수 회귀식($y = 4.4621 \times e^{1.8288x}$)의 포란 개체 적용 적합 정도에 대한 평가가 불가능하였다.

적 요

Simocephalus spp.는 수생식물이 발달한 호소의 수변부 및 습지 서식처에서 우점 출현하는 중대형 지각류로, 해당 서식처의 동물플랑크톤 군집 생체량(biomass)에 기여하는 정도가 높아 먹이망 내 생물학적 상호작용을 기반으로 한 물질 순환을 이해하기 위해서는 *Simocephalus*종들의 생체량 산정이 중요하다. 본 연구에서는 *S. serrulatus*의 생체량 추정에 사용되어지고 있던 기존의 선행 산정식을 검토하고, 현미경 디지털 카메라와 미세 저울 같은 장비를 사용하여 개체의 다양한 체측값(체장, 너비 및 면적)과 생체량(건중량)을 직접 측정하여 상호 간 회귀 분석을 실시하였다. 국내 『생물측정망 조사 및 평가지침 - 보구간편』에서 제시하고 있는 *Simocephalus* spp.의 생체량 산정식(Kawabata and Urabe, 1998)을 사용하여 *S. serrulatus* 생체량을 추정했을 때, Lemke and Benke (2003)에 의해 개발된 *S. serrulatus*종 특이적 생체량 산정식 대비 추정치-실측치 간 오차가 상대적으로 크게 나타났으며, 두 산정식에서 모두 개체 체장 증가에 따른 오차 증가 및 유사 체장 개체 간 오차 편차 증가 경향이 보여졌다. 체측값별로 건중량과 회귀 분석을 실시한 결과, *S. serrulatus* 생체량 추정에 가장 적합한 산정식은 너비-건중량 지수 회귀식($R^2 = 0.9555$)으로 도출되었다. 이 같은 종 특이적 생체량 산정식의 검토 및 개발 연구는 수생태계 먹이망 내 동물플랑크톤 역할 및 기능 파악하는 데 도구(tool)로써 활용될 수 있다.

저자 정보 오혜지(경희대학교 박사수료), 홍근혁(경희대학교 학부생), 최예림(경희대학교 박사과정), 장광현(경희대학교 교수)

저자 기여도 개념설정: H.J. Oh & K.H. Chang, 방법론: H.J. Oh & K.H. Chang, 자료수집: H.J. Oh, G.H. Hong & Y. Choi, 자료 관리: H.J. Oh, 분석: H.J. Oh, 원고 초안작성: H.J. Oh, 원고 교정: H.J. Oh, K.H. Chang, 원고 편집: H.J. Oh, 과제관리: H.J. Oh, 연구비 수주: H.J. Oh

이해관계 이 논문에는 이해관계 충돌의 여지가 없습니다.

연구비 이 논문은 2023년 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단 기초연구사업의 지원을 받아 수행된 연구임(No. 2021R1A6A3A13039786).

REFERENCES

- Alcaraz, M., E. Saiz, A. Calbet, I. Trepas and E. Broglio. 2003. Estimating zooplankton biomass through image analysis. *Marine Biology* **143**: 307-315.
- Beaver, J.R., C.E. Tausz, K.M. Black and B.A. Bolam. 2020. Cladoceran body size distributions along temperature and trophic gradients in the conterminous USA. *Journal of Plankton Research* **42**: 613-629.
- Brucet, S., D. Boix, X.D. Quintana, E. Jensen, L.W. Nathansen, C. Trochine, M. Meerhoff, S. Gascón and E. Jeppesen. 2020. Factors influencing zooplankton size structure at contrasting temperatures in coastal shallow lakes: Implications for effects of climate change. *Limnology and Oceanography* **55**: 1697-1711.
- Burgess, S., E.W. Jackson, L. Schwarzman, N. Gezon and J.T. Lehman. 2015. Improved estimates of calanoid copepod biomass in the St. Lawrence Great Lakes. *Journal of Great Lakes Research* **41**: 484-491.
- Burks, R.L., E. Jeppesen and D.M. Lodge. 2001. Littoral zone structures as *Daphnia refugia* against fish predators. *Limnology and Oceanography* **46**: 230-237.
- Chang, K.H., D.I. Seo, S.M. Go, M. Sakamoto, G.S. Nam, J.Y. Choi, M.S. Kim, K.S. Jeong, G.H. La and H.Y. Kim. 2016. Feeding behavior of crustaceans (Cladocera, Copepoda and Ostracoda): food selection measured by stable isotope analysis using R package SIAR in mesocosm experiment. *Korean Journal of Ecology and Environment* **49**: 279-288.
- Choi, J.Y., S.K. Kim, G.H. La, K.S. Jeong, H.W. Kim, T.K. Kim and G.J. Joo. 2012. Microcrustacean community dynamics in Upo Wetlands: impact of rainfall and physico-chemical factor on microcrustacean community. *Korean Journal of Limnology* **45**: 340-346.
- Choi, J.Y., G.H. La, S.K. Kim, K.S. Jeong and G.J. Joo. 2013. Zooplankton community distribution in aquatic plant zone: influence of epiphytic rotifers and cladocera in accordance with aquatic plants cover and types. *Korean Journal of Ecology and Environment* **46**: 86-93.
- Cremona, F., K. Blank and J. Haberman. 2021. Effects of environmental stressors and their interactions on zooplankton biomass and abundance in a large eutrophic lake. *Hydrobiologia* **848**: 4401-4418.
- Dumont, H.J., I. Van de Velde and S. Dumont. 1975. The dry weight estimate of biomass in a selection of Cladocera, Copepoda and Rotifera from the plankton, periphyton and benthos of continental waters. *Oecologia* **19**: 75-97.
- Færøvig, P.J., T. Andersen and D.O. Hessen. 2002. Image analysis of *Daphnia* populations: Non-destructive determination of demography and biomass in cultures. *Freshwater Biology* **47**: 1956-1962.
- 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 Indicator* **9**: 1234-1247.
- Kawabata, K. and J. Urabe. 1998. Length-weight relationships of eight freshwater planktonic crustacean species in Japan. *Freshwater Biology* **39**: 199-205.
- Kim, S.K. and J.Y. Choi. 2022. Selective consumption of pelagic cladocerans by bluegill sunfish (*Lepomis macrochirus* Rafinesque) contributes to dominance of epiphytic cladocerans. *Water* **14**: 3781.
- 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.
- Lemke, A.M. and A.C. Benke. 2003. Growth and reproduction of three cladoceran species from a small wetland in the south-eastern USA. *Freshwater Biology* **48**(4): 589-603.
- Lombardo, A., A. Franco, A. Pivato and A. Barauss. 2015. Food web modeling of a river ecosystem for risk assessment of down-the-drain chemicals: A case study with AQUATOX. *Science of The Total Environment* **508**: 214-227.
- Long, S.X., P.B. Hamilton, Y. Yang, S. Wang, C. Chen and R. Tao. 2018. Differential bioaccumulation of mercury by zooplankton taxa in a mercury-contaminated reservoir Guizhou China. *Environmental Pollution* **239**: 147-160.
- Maia-Barbosa, P.M. and R.L. Bozelli. 2005. Length-weight relationships for five cladoceran species in an Amazonian Lake. *Brazilian Archives of Biology and Technology* **48**: 303-308.
- Mitchell, B.D. and W.D. Williams. 1982. Population dynamics and production of *Daphnia carinata* (King) and *Simocephalus exspinosus* (Koch) in waste stabilization ponds. *Australian Journal of Marine and Freshwater Research* **33**: 837-64.
- NIBR, National Institute of Biological Resources. 2019. National species list of Korea. II. Vertebrates, Invertebrates, Protozoans. National Institute of Biological Resources, Yangpyeong, Korea: Designzip. 908pp.
- NIER, National Institute of Environmental Research. 2016. Cladocera : a practical guide to common freshwater zooplankton. Han-River Environment Research Center, Yangpyeong, Korea: 42-48.
- NIER, National Institute of Environmental Research. 2017. Biomonitoring Survey and Assessment Manual. National Institute of Environmental Research. National Institute of Environmental Research, Incheon, Korea.
- Oh, H.J., Y. Choi, H. Kim, G.H. Hong, Y.S. Park, Y.J. Kim and K.H. Chang. 2022. Validation of suitable zooplankton enumeration method for species diversity study using rarefaction curve and extrapolation. *Korean Journal of Limnology* **55**(4): 274-284.
- Park, R.A., J.S. Clough and M.C. Wellman. 2008. AQUATOX: Modeling environmental fate and ecological effects in aquatic ecosystems. *Ecological Modelling* **213**: 1-15.

- Stamou, G., M. Katsiapi, M. Moustaka-Gouni and E. Michaloudi, E. 2019. Grazing potential - A functional plankton food web metric for ecological water quality assessment in Mediterranean lakes. *Water* **11**: 1274.
- Stamou, G., A.D. Mazaris, M. Moustaka-Gouni, M. Spoljar, I. Ternjej, T. Drazina, 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.
- USEPA, US Environmental Protection Agency. 2003. Standard Operating Procedure for Zooplankton Analysis-LG403. United States Environmental Protection Agency, Chicago, USA.
- USEPA, US Environmental Protection Agency. 2014. Modeling environmental fate and ecological effects in aquatic ecosystems; Volume 1, User's manual, EPA-820-R-14-005. United States Environmental Protection Agency Office of water, Washington D.C., USA.
- Vakkilainen, K., T. Kairesalo, J. Hietala, D.M. Balayla, E. Bécares, W.J. Van de Bund, E. Van Donk, M. Fernández-Aláez, M. Gyllström, L.-A. Hansson, M.R. Miracle, B. Moss, S. Romo, J. Rueda and D. Stephen. 2004. Response of zooplankton to nutrient enrichment and fish in shallow lakes: A pan-European mesocosm experiment. *Freshwater Biology* **49**: 1619-1632.
- Yao, N., B. Feng, M. Zhang, L. He, H. Zhang and Z. Liu. 2021. Impact of industrial production, dam construction, and agriculture on the Z-IBI in river ecosystems: A case study of the wanan river basin in China. *Water* **13**(2): 123.
- Zhan, H., Z. Duan, Z. Wang, M. Zhong, W. Tian, H. Wang and H. Huang. 2019. Freshwater Lake ecosystem health assessment and its response to pollution stresses based on planktonic index of biotic integrity. *Environmental Science Pollution Research* **26**: 35240-35252.
- Zhang, L., J. Cui, T. Song and Y. Liu. 2018. Application of an AQUATOX model for direct toxic effects and indirect ecological effects assessment of Polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in a plateau eutrophication lake, China. *Ecological Modelling* **388**: 31-44.