

ORIGINAL ARTICLE

낙동강 하굿둑 개방에 따른 윤충류 중심의 동물플랑크톤 군집 특성 연구

김지수* · 이상원 · 김경아

부산광역시 보건환경연구원

Characteristics of Rotifer-Centered Zooplankton Communities Following the Nakdong River Estuary Weir Opening

Ji-Su Kim*, Sang-Won Lee, Kyoung-A Kim

Busan Metropolitan City Institute of Health & Environment, Busan 46616, Korea

Abstract

This study investigated the effects of the opening of the Nakdong River estuary weir on the zooplankton community structure and their relationships with environmental factors. Zooplankton abundance, water quality parameters, and phytoplankton (diatoms) were compared before (2017-2019) and after (2022-2024) opening. Water temperature, salinity, and dissolved oxygen increased, whereas the biochemical oxygen demand decreased, indicating an overall improvement in water quality. Zooplankton biomass was the highest in spring and summer, with rotifers consistently dominating (>70%). Before opening, the peak abundance occurred in spring (March-May), whereas after opening, it shifted to early summer (April-July) and became more evenly distributed throughout the year. Species diversity and richness also increased, with *Polyarthra*, *Keratella*, and *Synchaeta* spp. emerging as dominant genera. Notably, *Synchaeta* sp. abundance increased after opening, suggesting an adaptation to estuarine conditions. Correlation and regression analyses revealed strengthened relationships between *Aulacoseira*, *Trichocerca* sp., and *Polyarthra* sp., indicating that diatom community shifts substantially influenced rotifer habitats. Overall, opening the weir contributed to a more evenly distributed zooplankton occurrence throughout the year and increased the frequency of smaller rotifer species. These findings provide important insights into ecological responses to weir opening and highlight the need for long-term monitoring to clarify its direct effects.

Key words : Environmental factors, Zooplankton, Rotifer, Nakdong river estuary

1. 서 론

낙동강은 한반도 남동부를 흐르는 주요 하천으로, 풍부한 수자원과 다양한 생물의 서식지를 제공하는 중요한 수계이다. 특히 하굿둑이 위치한 하류 지역은 하천과 해양 생태계가 연결되는 중요한 지점으로서, 수리학적 및 생태적 관점에서 큰 역할을 한다. 그러나 하천 유역의 개발과 산업화로 인해 수질 오염과 생태계 변화 문제

가 지속적으로 대두되고 있으며, 특히 하굿둑 건설 이후 이러한 변화가 더욱 두드러지게 나타나고 있다. 1987년 건설된 하굿둑은 하천과 해수 간 물질 순환을 차단하여 염분, 수온 등 수리적 특성에 중대한 영향을 미쳤으며, 이로 인해 상류 지역의 물 흐름이 정체되고 부영양화 현상이 심화되었다(Lim et al., 1999). 부영양화는 물속 영양염 농도를 증가시켜 식물플랑크톤의 과도한 성장을 유발하며, 결과적으로 물의 탁도 증가, 용존산

Received 11 July, 2025; Revised 19 September, 2025;

Accepted 25 September, 2025

*Corresponding author : Ji-Su Kim, Busan Metropolitan City Institute of Health & Environment, Busan 46616, Korea

Phone : +82-51-309-2786

E-mail : jisua1387@korea.kr

© The Korean Environmental Sciences Society. 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, provided the original work is properly cited.

소량 감소와 같은 수질 악화와 생태계 불균형을 초래하였다(Park et al., 2016). 낙동강 하굿둑은 2019년 6월부터 실증 실험을 시작으로 몇 차례 개방이 이루어졌으며(Noh et al., 2020) 2022년 2월부터 본격적인 상시 개방이 시행되었다. 이를 통해 상류와 하류 간의 염분, 수온, 유속 등의 차이가 점진적으로 해소되고, 하천과 해수 간 상호작용이 활성화될 것으로 예상된다. 특히, 해수 유입으로 인한 염분의 변화는 넓은 염분 범위에 적응할 수 있는 기수성 및 해양성 생물의 유입을 촉진하고, 이를 통해 수생 생물군의 분포와 다양성을 증진시킬 것으로 기대된다.

하굿둑 개방은 동물플랑크톤 군집 구조에도 중요한 영향을 미친다(Choi et al., 2019). 동물플랑크톤은 식물플랑크톤과 유기물을 섭식하여 상위 영양단계로 에너지를 전달하며, 생태계 내에서 중요한 연결 고리 역할을 한다. 또한, 수온과 같은 환경 요인의 변화에 민감하게 반응하여 생태적 상태를 평가하는 지표로 활용될 수 있다(Kim, 2018). 하굿둑 개방에 따른 수질 특성 변화는 동물플랑크톤의 밀도, 분포, 종 조성 등에 변화를 초래할 가능성이 높으며, 이는 하구 생태계의 기능적 다양성에도 영향을 줄 수 있다(Uhm and Hwang, 2006). 낙동강 하류 수역에서는 윤충류(Rotifera)와 요각류(Copepoda)가 주로 출현하는데, 특히 윤충류는 빠른 세대 교체와 높은 번식력을 특징으로 수질 변화에 따라 신속한 반응을 보인다(Agnieszka et al., 2013). 이들은 하천, 호수, 해양 등 다양한 수계에 폭넓게 서식하며, 이러한 넓은 생태적 분포는 윤충류가 다양한 환경 조건에서 수질 변화를 진단할 수 있는 지표 생물로서의 가치를 높인다(Agnieszka et al., 2013). 윤충류는 단순히 수질 변화의 지표를 넘어 생태계 구조와 기능의 변동을 반영하는 주요 생물학적 지표로 활용될 수 있으며, 수질 개선이 이루어질 경우 더욱 다양하고 안정된 군집을 형성해 생태계 건강성 증진에 기여할 것으로 본다(Agnieszka et al., 2013).

본 연구는 낙동강 하굿둑 개방이 동물플랑크톤, 특히 윤충류의 출현 및 다양성에 미치는 영향을 분석하여, 장기적인 수질 변화에 따른 군집 변동 경향을 파악하고자 한다(Oh et al., 2019). 낙동강에서 동물플랑크톤의 분포와 출현 특성에 관한 연구는 활발히 진행되어왔으나, 기존 연구는 주로 호수와 같은 정수 생태계에서 담수성 동물플랑크톤의 단기적 변화를 다룬 경우가 많다(Kim et al., 2015). 이러한 연구들은 단기간의 변동에 초점

을 맞추는 경향이 있어, 장기적인 플랑크톤 군집 변화와 생태적 특성을 다룬 연구는 상대적으로 부족하다. 본 연구는 이를 보완하여 하굿둑 개방이 수생태계 복원과 수질 개선에 미치는 장기적 영향을 평가하고, 낙동강 하류의 지속 가능한 생태계 관리와 보전을 위한 기초 자료를 제공하고자 한다.

2. 재료 및 방법

2.1. 연구지역 및 기간

조사 대상 지점은 하굿둑 개방에 따라 염분 농도의 변화가 예상되는 하류의 두 지점인 구포대교(하굿둑 상류 12 km)와 서부산낙동강교(상류 5 km)로 선정하였으며, 매월 1회씩 수질 및 생태 조사를 실시하였다. 2021년 이전은 구포대교 대신 강서낙동강교(상류 10 km)의 조사 결과를 사용하였다. 모든 분석 결과는 낙동강 하류의 대표성을 고려하여 2개 정점의 조사 결과를 평균하여 분석하였다. 각 정점 간 생물상 및 환경요인의 편차는 존재하나, 본 연구의 목적은 하굿둑 개방 전후의 전반적인 변화를 파악하는 데 있으므로, 평균값을 통해 종합적인 경향을 도출하였다.

조사 기간은 하굿둑에서 해수 유입이 시작된 2019년을 기준으로 개방 전후를 구분하였으며, 개방 전은 2017년 1월부터 2019년 12월까지, 개방 후는 하굿둑 상시 개방 이후인 2022년 1월부터 2024년 12월로 설정하여 총 6개년의 자료를 수집 및 분석하였다(Fig. 1). 또한, 2017년부터 2024년까지 약 8년에 걸친 조사 자료를 통합하여 통계 분석을 수행하였다. 한편, 2018년은 분기 조사를 실시해 일부 결측치가 존재하는데, 계절성을 고려한 보간법으로 이를 해소하였다.

2.2. 연구방법

2.2.1. 현장측정 및 이화학적 분석

이화학적 분석 시료는 수질오염공정시험기준에 따라 선박에서 수직반도체수기를 사용해 표층(수심 0.5 m 이내)에서 채취하였다. 환경 요인으로는 수온, 염분, 용존산소, BOD, 클로로필-a, 총질소, 총인을 설정하였다. 수온, 염분, 용존산소는 시료 채취 시 다항목 수질측정기(M-3000, 기술과 환경)를 사용해 현장에서 즉시 측정하였다. BOD, 클로로필-a, 총질소, 총인은 시료 채취 후 4℃ 냉암소에 보관하여 실험실로 이송한 후, 수

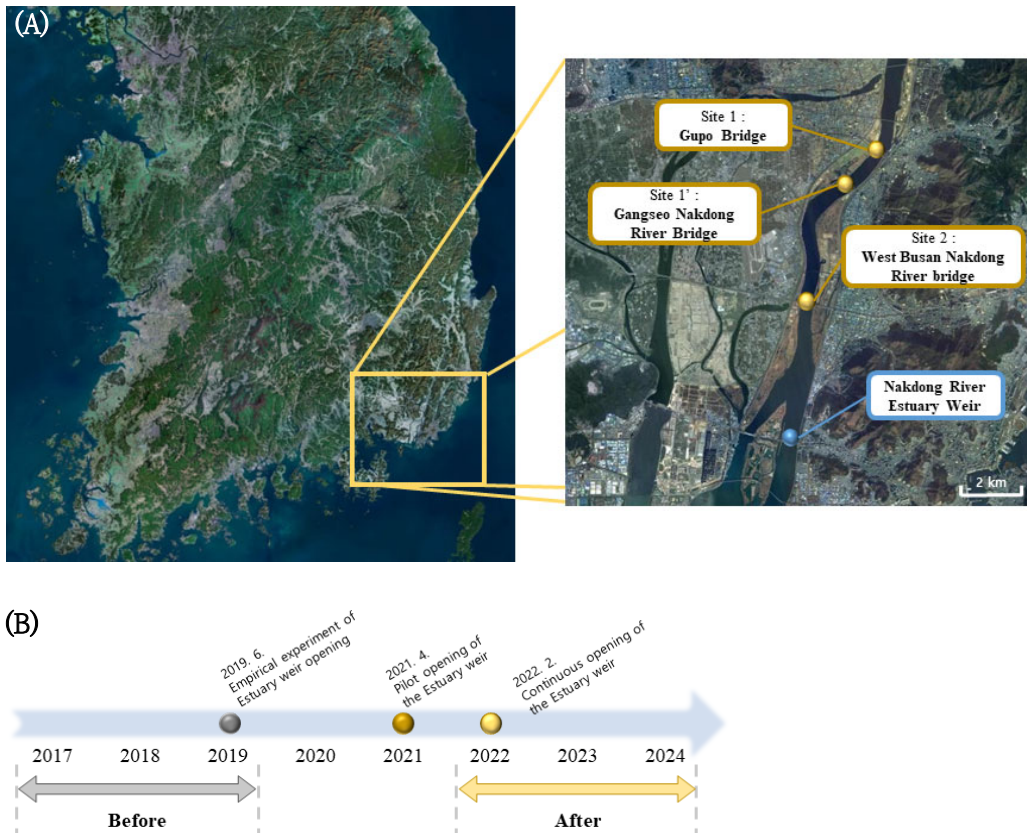


Fig. 1. (A) Sampling sites and (B) period in the study.

질오염공정시험기준에 따라 분석하였다.

2.2.2. 플랑크톤 동정 및 계수

식물플랑크톤 계수를 위해 현장에서 표층수를 반돈 채수기로 채취한 뒤 Lugol 용액(2%)으로 고정하여 실험실로 운반하였다. 고정된 시료는 1 mL 부피의 세드윅-라프터 챔버(Sedgwick-Rafter chamber)에 담아 광학현미경(Axio Observer 7, Carl zeiss)을 이용하여 단위부피(mL)당 세포수를 계수하였다.

동물플랑크톤 시료는 반돈채수기를 이용해 표층수를 채취한 후, 플랑크톤 넷(mesh size, 5 μm)로 농축하였으며, 동물플랑크톤의 경우 Lugol 용액 처리 시 세포 수축이 발생할 수 있어(Oh et al., 2019), 시료 채취 당일 일부를 동정한 후 고정하였다.

채집된 시료는 군집 구조 및 우점종 분석을 위한 정량적 자료로 활용하였다. 동·식물플랑크톤 동정은 현장

여건 및 실용성 측면을 고려하여 속(Genus) 수준까지의 동정을 수행하였다(Cho, 1993; NIER, 2014). 종 수준의 분류는 자료 처리의 복잡성이 크고, 본 연구의 목적상 전반적인 우점 경향 파악에는 속 수준 동정으로도 충분하다고 판단되었다.

2.3. 자료수집

2023년 이전의 수질 및 플랑크톤 자료는 부산광역시 보건환경연구원이 수행한 자체 조사사업의 일환으로, ‘낙동강 하구 통합환경모니터링(연례 수행, 2016년 ~ 현재)’과 ‘낙동강 염분 자동모니터링시스템’을 통해 수집된 데이터를 활용하였다. 전자는 동·식물플랑크톤 및 수질 항목을, 후자는 수온, 염분 등의 수환경 변화를 실시간으로 관측하고 있다.

염분 농도는 두 정점에서 관측된 수심별 자료의 평균값을 활용하였으며, 해수 유입량은 하굿둑 개방 시 낙동

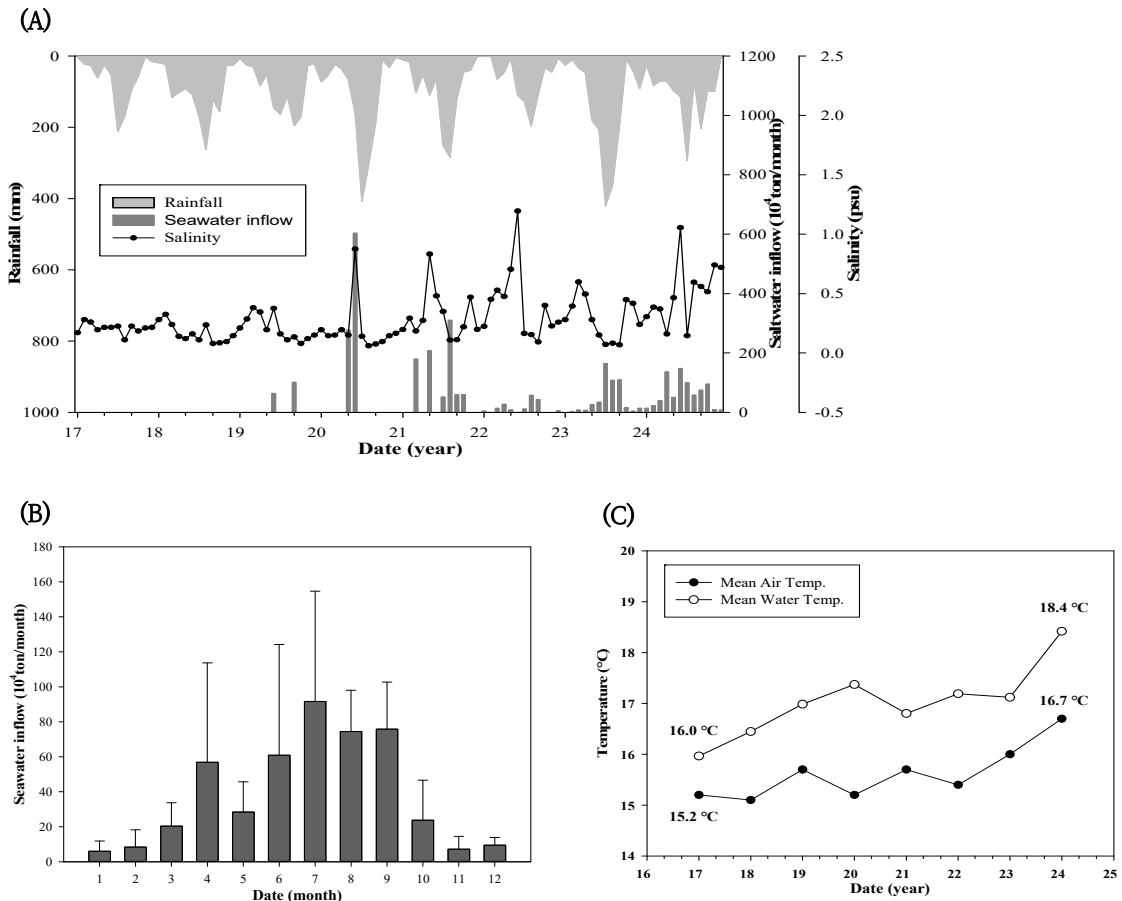


Fig. 2. (A) Monthly trends of rainfall, seawater inflow, and salinity in the lower Nakdong river from 2017 to 2024. (B) Seasonal variation in seawater inflow after the estuary weir opening(2022-2024). (C) Annual mean air temperature in Busan and mean water temperature in the river from 2017 to 2024.

강 하굿둑을 통해 실제 유입된 해수량 자료(한국수자원공사 제공, 일별 수치)를 기반으로 하였다. 기상청에서 제공하는 기온 및 강우량 자료와 국가 수자원관리 종합정보시스템의 부산시(구포대교) 관측소의 유량 자료도 참고하였다.

2.4. 통계처리

동물플랑크톤 군집 특성을 파악하기 위해 수생태계의 건강성을 나타내는 종다양도(Species diversity index, SDI), 종풍부도(Richness index, RI), 우점도(Dominance index, DI), 균등도(Evenness index, EI)를 산출하였다(Shannon and Weaver, 1953; Son, 2013).

자료의 도표 작성에는 SigmaPlot (ver. 12.5)을 사용하였으며, 상관분석 등의 통계처리는 Excel과 SPSS (ver. 12.0K for Windows)를 활용하여 분석하였다.

환경 요인의 장기적인 변화 경향을 파악하기 위해, 수온과 염분을 포함한 수질 인자와 종다양도, 종풍부도와 같은 동물플랑크톤 지표에 대해 Mann-Kendall 검정(Kendall, 1975)을 적용하였다. 이 비모수 검정은 특정한 분포 가정을 필요로 하지 않으며, 연도별 자료의 증가 또는 감소 경향이 통계적으로 유의한지를 평가하는 데 널리 활용된다.

유량 변화의 통계적 유의성 검정을 위해, 정규성 검토 후 비모수 검정인 Wilcoxon signed rank test를 사

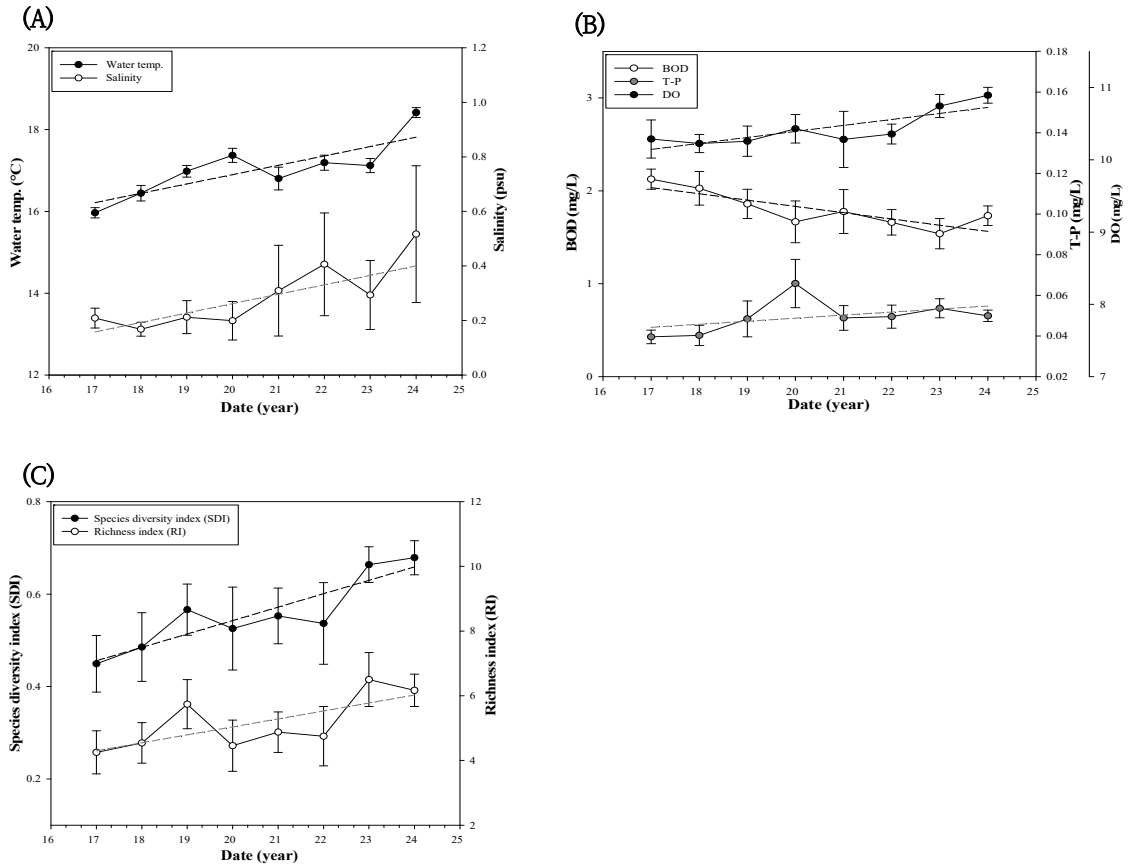


Fig. 3. Trends of (A) water temperature and salinity, (B) DO, BOD and total phosphorus, (C) species diversity index and richness index of zooplankton in the river from 2017 to 2024.

Table 1. Results of the Mann-Kendall test for environmental parameters

Parameter	z-value	Trend	p-value
Water temp.	2.103	Increasing	0.035*
Salinity	2.103	Increasing	0.035*
BOD	-2.103	Decreasing	0.035*
T-N	-0.371	No trend	N.S.
T-P	2.103	Increasing	0.035*
DO	2.103	Increasing	0.035*
Chl-a	1.361	No trend	N.S.
pH	0.124	No trend	N.S.
Species diversity index(SDI)	2.351	Increasing	0.019*
Richness index(RI)	2.103	Increasing	0.035*
Dominance index(DI)	-0.124	No trend	N.S.
Evenness index(EI)	1.113	No trend	N.S.

N.S.: Non Significant, *: p < 0.05

용하였다(Woolson, 2008). 유량 데이터는 개방 전후 일일 평균값을 기준으로 비교하였다.

단순 상관분석(Pearson's correlation analysis)의 환경 요인으로는 수온 등 6개의 수질 인자를, 식물플랑크톤은 낙동강 하류에서 주로 우점하는 규조류의 주요 출현 속(*Aulacoseira*, *Fragilaria*, *Stephanodiscus*)을 선정하였다. 남조류의 경우 유의미한 상관성이 나타나지 않아 분석 변수에서 제외하였다.

다중선형회귀분석(Multiple Linear Regression Analysis)의 분석 방법으로는 단계 선택법(stepwise)을 사용하였다. *Asplanchna*속과 *Synchaeta*속은 환경 요인과의 상관성이 낮아 회귀모형 구축이 불가하여 제외하였으며, 나머지 4종(*Brachionus*, *Keratella*, *Polyarthra*, *Trichocerca*속)를 종속 변수로 설정하고 환경 요인 및 규조류를 독립 변수로 포함하였다. 각 모형의 F통계량 유의확률(p)이 0.05 미만일 경우 유의하다고 판단하며, 수정된 R제곱(Adj. R^2 ; 모형의 설명력)의 경우 일반적으로 환경 및 생태학 연구에서 0.4 이상이면 적합한 모형으로 판단된다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 낙동강 하류 환경의 장기 변화

염분 농도는 낙동강 하류에서 수심별로 측정된 값을 평균하여 분석하였으며, 최소 0.06 psu에서 최대 1.82 psu의 범위를 보였다(Fig. 2-A). 염분 변화의 절대적 폭은 크지 않지만, 기수역 특성의 회복 여부를 판단하고 생태계의 초기 반응을 이해하는 데 있어 유의미한 지표로 해석될 수 있다.

해수 유입량은 2019년 실증 실험 이후 최소 3.00×10^5 톤에서 최대 6.03×10^6 톤까지 관측되었으며, 개방 시점을 전후하여 염분 농도가 최고점에 도달하였다. 특히, 2020년에는 간헐적인 실증 실험을 통해 총 2차례(8.80×10^6 톤)의 해수 유입이 있었던 것으로 확인되었다(Fig. 2-A). 이러한 염분 증가는 초여름(5 ~ 6월)에 주로 나타났고, 이후 강우가 집중되는 시기에 염분이 감소하는 패턴이 관찰되었다. 연간 강우량은 2017년 743.8 mm로 가장 적었으며, 2023년에는 1626.6 mm로 최고치를 기록하였다. 강우는 연중 하절기(6 ~ 9월)에 집중되는 경향이 뚜렷하였으며, 유량은 강우량과 유사한 변화를 보여 분석 대상에서 제외하였다.

Mann-Kendall 검정(Kendall, 1975) 결과, 수온, 염

분, 총인(T-P), 용존산소(DO), 생물화학적 산소요구량(BOD)에서 통계적으로 유의한 변화가 확인되었다(Fig. 3-A, B, Table 1). 수온은 표층수 기준으로 2017년 16.0°C에서 2024년 18.4°C로 꾸준히 상승하였으며, 같은 기간 부산 지역의 연평균 기온도 15.2°C에서 16.7°C로 증가하였다(Fig. 2-C). 이러한 기온 상승은 하천 수온 변화의 주요 요인으로 판단되며, 장기적인 수온 증가는 플랑크톤의 생장과 활동을 촉진할 것으로 예상된다(Yu et al., 2014).

염분은 2017년 평균 0.21 psu에서 2024년 0.52 psu로 상승하였으며, 이는 해수 유입량 증가의 영향이 반영된 것으로 보인다. T-P는 2017년 0.396 mg/L에서 2024년 0.496 mg/L로 증가하였으나, 2021년 시범 개방 이후에는 낮은 농도를 유지하는 경향을 보였다. 이러한 변화는 시범 개방 이전까지 일부 영양염(T-P)의 축적이 있었을 가능성을 시사한다.

DO는 2017년 10.29 mg/L에서 2024년 10.89 mg/L로 증가한 반면, BOD는 2.13 mg/L에서 1.79 mg/L로 감소하여, 하천의 자정 능력이 향상되고 있음을 보여준다. 한편, pH, 총질소(T-N), 클로로필-a 항목에서는 통계적으로 유의미한 변화가 관찰되지 않았다.

3.2. 동물플랑크톤 군집 변동

3.2.1. 낙동강 하류 동물플랑크톤 출현 특성

조사 지점에서 동물플랑크톤 현존량은 최대 5,600 ind./L까지 관찰되었으며 봄과 여름 시기에 가장 높은 값을 보였다. 조사 기간 동안 총 25속의 동물플랑크톤이 동정되었으며, 이 중 윤충류는 18속, 지각류는 5속, 요각류는 2속으로 확인되었다.

총다양도(SDI)는 2017년 0.45에서 2024년 0.68로, 종풍부도(RI)는 2017년 4.3에서 2024년 6.7로 증가하였다(Fig. 3-C). 그러나 2020년부터 2022년 사이에는 두 지표 모두 일시적인 감소를 보였는데, 이는 2020년 T-P 농도의 일시적 증가와 관련이 있을 가능성이 있다(Fig. 3-B). 이러한 양상은 영양염 증가가 총다양도의 감소로 이어졌던 호수 환경의 연구 결과(Vincent et al., 2012)와 일부 유사하다. Mann-kendall 검정 결과(Table 1), 두 지표 모두 통계적으로 유의한 증가 추세를 나타냈으며, 이는 하굿둑 개방 이후 수질 개선 경향에 따라 생태계 스트레스 요인이 완화되고 동물플랑크톤의 성장 환경이 안정화되었음을 보여준다. 한편, 우

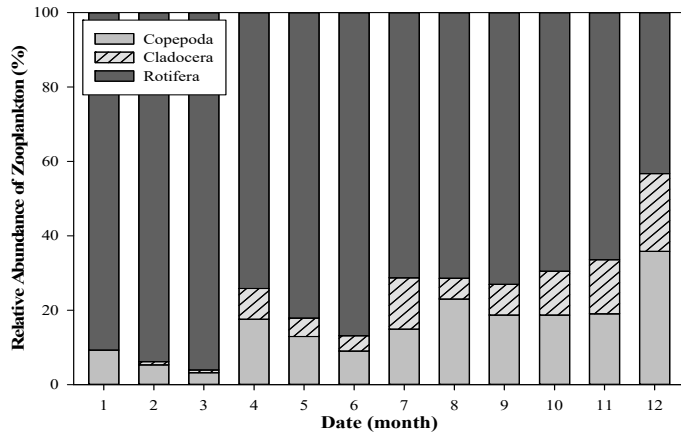


Fig. 4. Zooplankton monthly relative abundance trends in the river observed over 8 years (2017-2024).

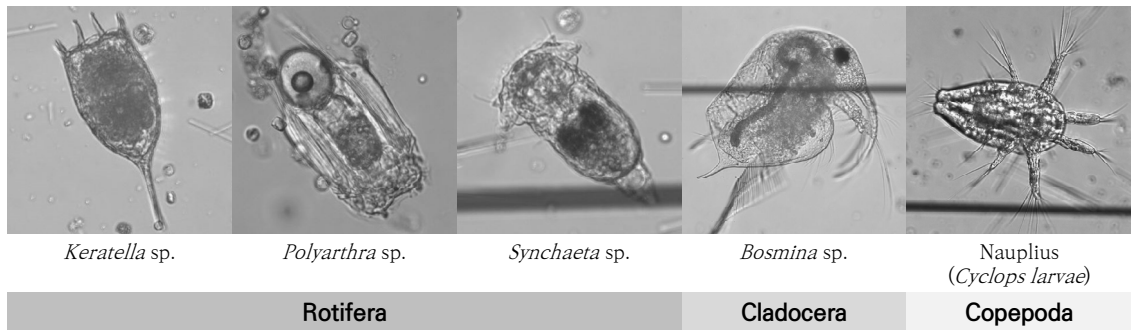


Fig. 5. Zooplankton species observed in the lower Nakdong river.

점도(DI)는 2017년 0.66에서 2024년 0.60으로, 균등도(EI)는 0.68에서 0.83으로 변화하였으나, 두 지표 모두 통계적으로 유의미한 경향은 나타나지 않았다.

상대적 점유율 분석 결과(Fig. 4), 윤충류는 연중 70% 이상의 점유율을 차지하며 군집의 대부분을 구성하였다. 계절별로는 늦겨울에서 초봄(1 ~ 3월)에 윤충류가 90.7 ~ 96.0%로 집중적으로 우점하였으며, 여름부터 초겨울(7 ~ 12월)에는 지각류가 4.1 ~ 14.6%로 다소 출현하였다. 요각류는 봄철(4월)과 여름 이후(8 ~ 12월)에 점진적으로 증가하여 12월에 최대 점유율(35.8%)을 기록하며 계절적 변동성을 보였다.

낙동강의 유속 특성상 부착성보다는 부유성 동물플랑크톤이 대부분이며 윤충류는 *Keratella* 속, *Polyarthra* 속, *Synchaeta* 속 등이 주요 우점종으로 확인되었고, 지각류는 *Daphnia*속, *Bosmina*속이 주로 출현하였다.

요각류는 대부분 유생(Nauplius) 형태로 관찰되었으며, 성체는 주로 *Cyclops*속으로 확인되었다(Fig. 5).

3.2.2. 하굿둑 개방 전후 동물플랑크톤 군집 변화

하굿둑 개방 전(2017 ~ 2019년)과 개방 후(2022 ~ 2024년) 동물플랑크톤 개체수의 월별 평균값 변화를 비교한 결과(Fig. 6-A), 개방 전에는 3 ~ 5월에 1,000 ind./L 이상의 개체수가 빈번히 관측되며 늦은 봄철에 급격한 증식이 발생하였다. 반면, 개방 후에는 해당 기준을 초과하는 개체수가 주로 4 ~ 7월에 관측되어, 출현 시기가 지연되는 양상을 보였다. 이러한 변화는 상시적인 수문 개방으로 인해 하천의 체류시간이 단축되어 특정 시기의 동물플랑크톤 급증을 억제했을 가능성을 보여준다. 다만, 4 ~ 7월의 수문 개방량이 다른 시기에 비해 적지 않았던 점을 고려할 때(Fig. 2-B), 단순한 개방

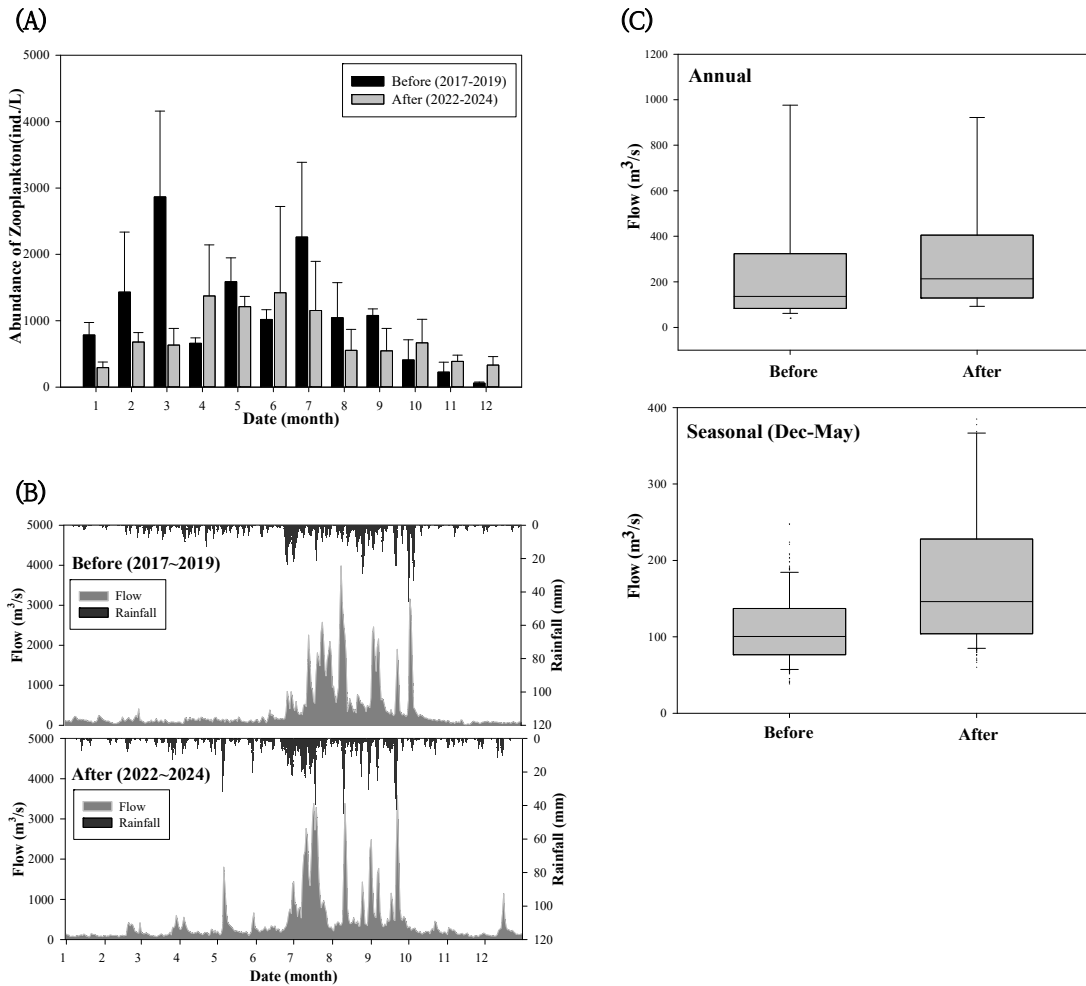


Fig. 6. (A) Monthly changes of zooplankton and (B) flow variations before (2017-2019) and after (2022-2024) the estuary weir opening. (C) Annual and seasonal (Dec-May) river flow comparison before and after the weir opening.

량보다는 계절별 하천 흐름의 양상이나 수질적 특성 차이가 개체수 분포 변화에 영향을 미쳤을 가능성이 있다.

유량 변화 비교 결과(Fig. 6-B, C), 개방 전후 모두 강우에 따른 유량 증가가 관측되었으며, 특히 개방 이후에는 겨울철과 봄철(12 ~ 5월) 동안 유량이 현저히 증가하였다. Wilcoxon signed rank test 결과, 연중 유량 비교에서 통계적으로 유의한 증가가 확인되었고($z = 6.569, p < 0.001$), 겨울 ~ 봄철(12 ~ 5월) 유량 또한 유의하게 증가한 것으로 나타났다($z = 7.174, p < 0.001$). 이러한 유량 증가는 하천 내 물리적 교란과 유속 증가를 유발하여, 특정 시기의 동물플랑크톤의 폭발

적 증식을 억제하고, 개체수의 계절적 집중도를 완화하는 데 영향을 미칠 수 있다.

이와는 별개로, 하굿둑의 상시 개방은 체류시간 단축과 염분 환경 변화 등 하류역의 수질 조건에 간접적인 영향을 미침으로써, 동물플랑크톤 군집 구조의 안정화 및 출현 시기의 분산에 기여했을 것으로 해석된다. 또한, 하천 수역에서 4 ~ 5월 사이에 빈번히 발생하는 청수현상(Blue water phenomenon, Sim et al., 2021)이 일부 완화됨에 따라, 동물플랑크톤 계절적 집중도가 낮아지고 보다 연중 균일한 분포 양상이 관찰된 것으로 판단된다.

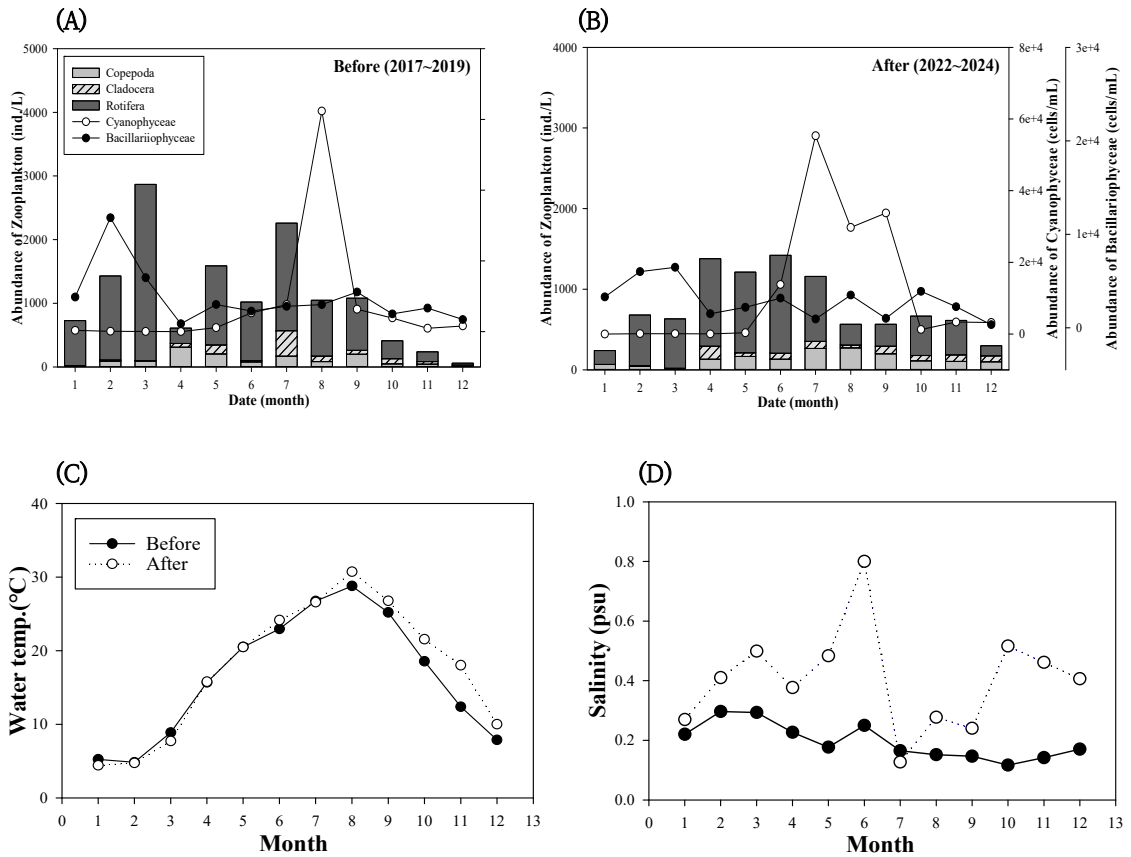


Fig. 7. Seasonal abundance of zoo- and phytoplankton (A) before and (B) after the estuary weir opening. Monthly trends in (C) water temperature and (D) salinity in the before and after the weir opening.

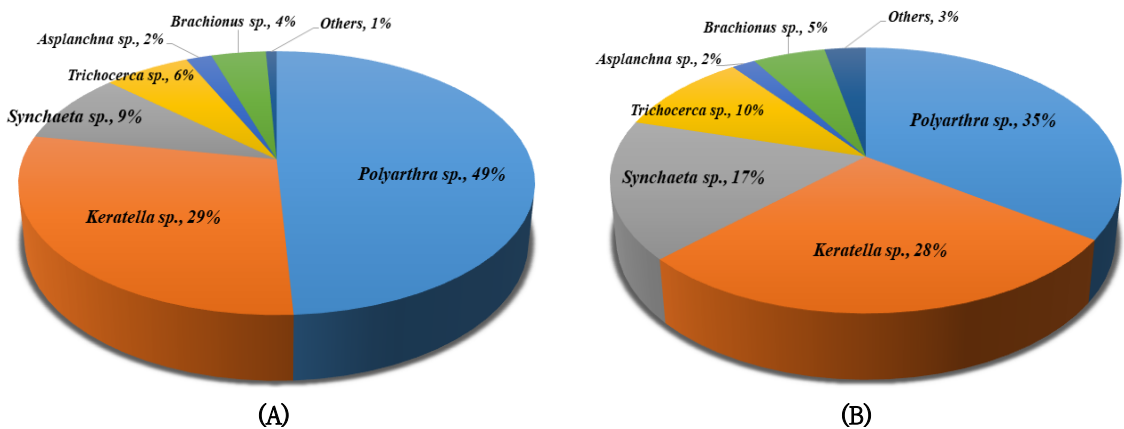


Fig. 8. Comparison of annual occurrence ratios of rotifer genera (A) before and (B) after the estuary weir opening.

하굿둑 개방 전후 동물플랑크톤의 계절별 종조성을 비교한 결과(Fig. 7-A, B), 개방 이후 전체 동물플랑크톤 개체수는 평균 1,111 ind./L에서 787 ind./L로 감소하였다. 그러나 윤충류의 분포는 연중 비교적 고르게 유지되었고, 요각류 및 지각류의 기여도는 24.1%에서 28.6%로 증가하였다. 특히, 요각류와 지각류는 서로 상반된 먹이 환경에 적응하여 반대되는 출현 양상을 보였으며(Katechakis, 2005), 이는 하천 환경 변화에 따른 군집 반응의 다양성을 나타낸다.

식물플랑크톤과의 계절별 연계를 살펴보면, 개방 전에는 규조류(*Stephanodiscus*속)가 1~2월에 번성하고, 이를 주요 먹이로 삼는 윤충류(*Polyarthra*속)와 요각류가 3월부터 급격히 증식하는 전형적인 먹이 연쇄 패턴이 나타났다. 개방 후에도 이 같은 생태적 연쇄는 유지되었으나, 규조류의 번성 시기가 3월로 지연되고 개체수도 감소하면서, 동물플랑크톤의 주요 출현 시기도 4월 이후로 늦춰지고 규모 또한 축소되었다. 이는 하굿둑 개방 이후 체류시간 단축과 영양염(T-P) 농도 감소로 인한 규조류 성장 저해가 먹이원 감소로 이어진 결과로 해석된다.

또한, 남조류(Cyanobacteria)가 우점하는 8~9월에는 개방 전후 모두 동물플랑크톤 개체수가 감소하는 경향이 나타났다. 특히 개방 이후에는 수온 상승의 영향으로 남조류의 출현이 7월부터 조기 시작되어 9월까지 지속되었으며, 이는 번성 기간의 확장으로 인해 동물플랑크톤의 생장과 증식을 억제했을 가능성이 있다. 남조류는 일반적으로 독성을 지니거나 먹이 적합성이 낮아 동물플랑크톤 섭식에 불리하게 작용할 수 있으며, 이러한 특성이 개체수 감소에 영향을 미친 것으로 보인다(Fulton, 1987).

한편, 동절기 동물플랑크톤의 출현 양상을 비교한 결과, 하굿둑 개방 전에는 1~3월에 상대적으로 높은 개체수가 관찰된 반면, 개방 후에는 같은 시기에 저조한 출현을 보였다. 개방 전 1~3월에 현존량이 더 높았던 현상은 장기간의 영양염 축적과 이에 따른 규조류 번성이 충분한 먹이 기반을 제공한 결과로 해석될 수 있다(Fig. 3-B, Fig. 7-A). 반대로, 개방 이후에는 유량 증가와 해수 유입으로 영양염이 희석되면서 먹이 기반이 줄어들어 개체수가 전반적으로 낮아진 것으로 판단된다(Fig. 7-A, B).

또한, 개방 전에는 10~12월에 개체수가 급격히 감소했으나, 개방 후에는 같은 시기 수온이 평균 3°C 이상

높게 유지되면서 일정 수준의 개체수가 지속적으로 관찰되었다. 이는 15°C 이하의 저수온기에도 동물플랑크톤의 대사와 생존 가능성이 유지되어 출현 시기를 앞당기는 데 기여했을 것으로 보인다. 염분 또한 같은 시기에 상승하는 경향을 보였으나(Fig. 7-D), 수온 변화에 비해 그 영향은 제한적인 것으로 판단된다.

3.3. 윤충류 군집 변동

3.3.1. 하굿둑 개방 전후 윤충류 출현 특성

앞선 결과를 바탕으로, 낙동강 하류에서 윤충류가 연중 우점하는 특성이 확인됨에 따라, 하굿둑 개방 전후 윤충류 속별 상대적 출현 비율을 산정하였다(Fig. 8). 개방 전에는 *Polyarthra*속이 49%로 가장 높았으나, 개방 후에는 35%로 감소하였다. 반면 *Keratella*속은 큰 변화가 없었으며, *Synchaeta*속과 *Trichocerca*속 등 다른 윤충류의 비율은 22%에서 37%로 증가하였다. 이는 특정 속이 편중되었던 구조가 완화되고, 다양한 속이 고르게 출현하는 균등한 군집 구조가 나타난 것으로 판단된다.

하굿둑 개방 전후 윤충류의 계절적 우점종 변화를 매트릭스형 버블차트로 Fig. 9에 제시하였다. 개방 전에는 *Polyarthra*속이 군집 내에서 가장 높은 상대우점도를 보였으며, 3월에 최대 9,840 ind./L까지 개체수가 증가하였다. 개방 이후 *Polyarthra*속의 최고 개체수가 3,300 ind./L로 감소하였으나, *Polyarthra*, *Keratella*, *Synchaeta*속 모두 상대우점도가 증가하여 군집 구조가 좀 더 균등하게 분포하는 경향을 보였다. 특히 *Synchaeta* 속은 개방 이후 4월에 최대 3,580 ind./L로 현저한 개체수 증가를 보였으나, 개방 전에는 뚜렷한 증가가 관찰되지 않았다.

남조류가 우점하는 8~9월에는 개방 전후 모두 동물플랑크톤 개체수가 감소하였으나, *Keratella*속과 *Polyarthra*속은 연중 꾸준히 출현하였다. 이는 두 속이 남조류 독소에 일정 수준 내성을 지니며, 남조류가 우점한 환경에서도 이를 먹이로 삼아 생존이 가능함을 알 수 있다. 특히, *Keratella*속은 먹이가 제한적인 환경에서도 생존력이 높은 것으로 알려져 있으며(Kirk, 2002), 본 연구에서도 남조류 번성 시기에 주요 출현종으로 확인되었다.

또한, 개방 이후에는 *Anuraeopsis*속, *Collotheca*속, *Lepadella*속, *Monostyla*속 등 과거 출현 빈도가

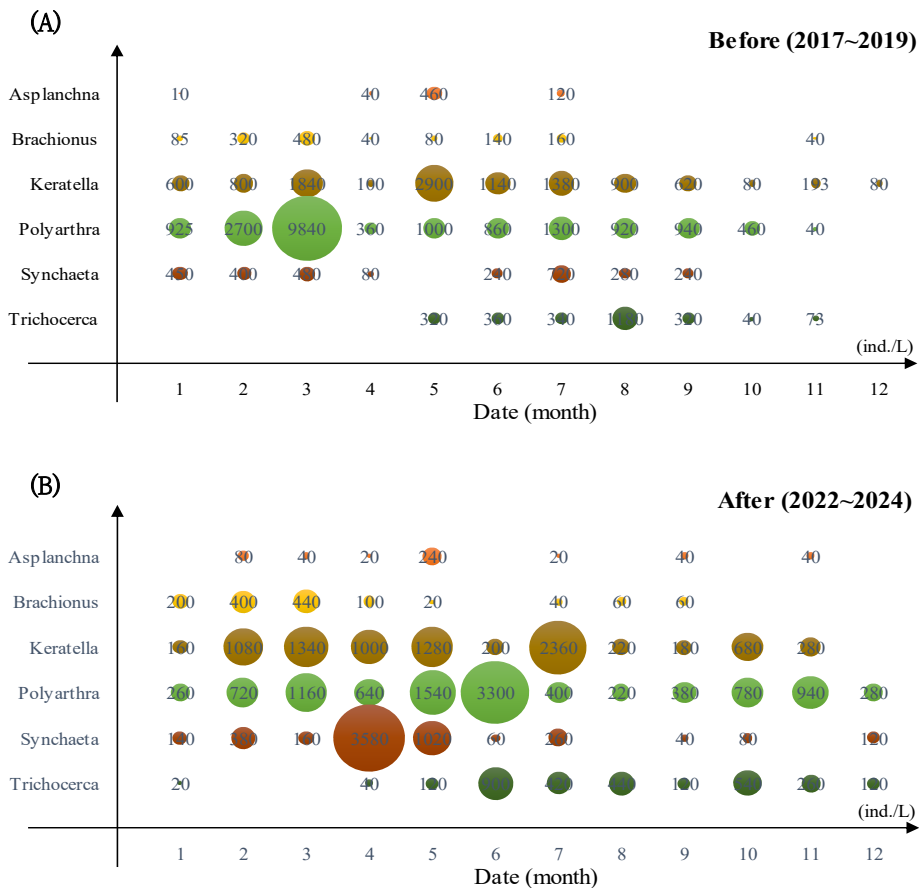


Fig. 9. Seasonal occurrence patterns of rotifers (A) before and (B) after the estuary weir opening.

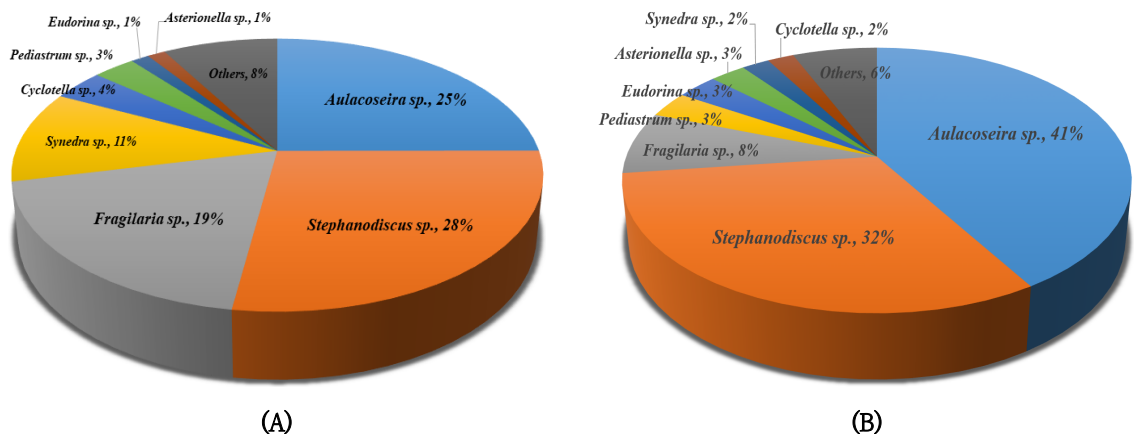


Fig. 10. Comparison of annual occurrence ratios of Bacillariophyceae and Chlorophyceae (*Pediastrum sp.*, *Eudorina sp.*) genera (A) before and (B) after the estuary weir opening.

낮았던 일부 소형 윤충류의 출현이 증가하였다. 이러한 변화는 하굿둑 개방에 따른 환경 변화와 더불어, 개방 이후의 수온 상승과도 관련이 있는 것으로 보인다. 일반적으로 수온 상승은 대사율을 높여 작은 종의 성장과 우점을 촉진하며, 이는 소형 윤충류의 증가를 설명하는 요인 중 하나일 수 있다. 특히 개방 후 10 ~ 12월 수온이 개방 전보다 평균 3°C 이상 높게 유지되면서 저수온기에도 이들의 생존과 번식이 가능했을 것으로 판단된다.

3.3.2. 윤충류와 환경 요인의 상관관계

3.3.2.1. 윤충류-환경 요인 간의 상관성

통계 분석에 앞서, 동물플랑크톤의 성장을 저해할 수 있는 남조류(Kim et al., 2000)를 제외하고, 조사 시기 별로 출현하는 규조류 또는 녹조류의 연중 출현 비율을 산정하였다(Fig. 10). 개방 전에는 *Aulacoseira*속(25%)과 *Stephanodiscus*속(28%)이 주요 출현 속으로 확인되었으며, *Fragilaria*속은 19%를 차지하였다. 그러나 개방 후에는 *Aulacoseira*속의 출현 비율이 41%로 크게 증가하였고, *Stephanodiscus*속도 32%로 소폭 상승한 반면, 담수성에 가까운 *Fragilaria*속은 8%로 감소하였다(Shin, 2013). 이러한 변화는 하굿둑 개방 이후 규조류 군집이 담수성 중심에서 점차 기수성으로 전환되고 있음을 보여준다. 낙동강 하류에서 하절기에 남조류가 집중적으로 우점하는 가운데, 규조류는 연중 지속적으로 출현하여 동물플랑크톤의 안정적인 먹이원으로 작용했을 가능성이 크다.

상관분석 결과(Table 2), *Asplanchna*속은 개방 전 후 공통적으로 환경 요인 및 규조류와 뚜렷한 상관성을 보이지 않았다. *Brachionus*속은 개방 전후 모두 수온과 음의 상관관계를 보였으며, 개방 전($r = -0.417$)보다 개방 후($r = -0.448$)에 그 상관성이 더 강해져, 낮은 수온에서 더욱 우점하는 경향을 나타냈다. 또한, DO와도 개방 전($r = 0.635$)과 개방 후($r = 0.563$) 모두 유의한 양의 상관성을 유지하여, 산소가 풍부한 조건에서 번성하는 경향을 보여준다. 개방 전에는 *Fragilaria*속과 양의 상관관계($r = 0.505$)를 유지했으며, 개방 이후에는 *Stephanodiscus*속($r = 0.647$)으로 상관관계가 변화하였다.

반면, *Trichocerca*속은 개방 전에 수온과 강한 양의 상관관계($r = 0.662$)를 나타내었으며, 개방 후에도 유

의한 상관성($r = 0.418$)을 유지하였다. 여름철에 출현 빈도가 높은 경향(Fig. 9)을 고려할 때, 따뜻한 환경에 적합한 종임을 알 수 있다. 또한, 개방 후 *Aulacoseira*속과 매우 강한 양의 상관관계($r = 0.768$)를 보였으며, 이는 *Aulacoseira*속의 번성이 *Trichocerca*속의 출현을 유도했을 가능성을 나타낸다. 개방 전, *Keratella*속은 *Fragilaria*속과 유의한 양의 상관관계($r = 0.388$)를 보여, 먹이 관계에 있었을 가능성이 있다. 그러나 개방 후 *Fragilaria*속의 출현 빈도가 감소하면서 이들 간의 상관성이 약화되었고, 동시에 다른 먹이원으로의 변경 가능성을 암시한다. 더불어 BOD($r = 0.442$)와 같은 환경 요인의 변화에 더 민감하게 반응하는 경향을 보였다. *Polyarthra*속은 개방 전후 모두 수온과 뚜렷한 상관성을 보이지 않았으나, 개방 전에는 BOD($r = 0.374$)와 T-N($r = 0.335$)과 양의 상관관계를 나타냈다. 개방 이후에도 BOD와의 상관성은 강화($r = 0.483$)되었으며, 특히 *Aulacoseira*속과도 높은 상관성($r = 0.581$)을 나타냈다. 그러나 BOD 농도의 감소와 함께 *Polyarthra*속의 평균 개체수는 1,612 ind./L에서 885 ind./L로 줄어드는 경향을 보였다. 이러한 결과는 먹이원의 변화보다는 유기물 농도의 감소가 *Polyarthra*속의 출현 양상에 더 큰 영향을 미쳤음을 보여준다(Kim et al., 2018).

*Synchaeta*속은 다른 종들에 비해 환경 요인과의 상관성이 뚜렷하지 않았다. 기존 연구에서는 염분이 있는 환경에서도 서식할 수 있는 특성이 보고된 바 있으나(Brownell, 1988), 본 연구기간 동안 월별 염분 변화와 *Synchaeta*속의 출현 양상 간에 뚜렷한 유사성이 확인되지 않았다. 수온, 해수유입량, BOD 등 다른 환경 인자들과의 패턴 비교에서도 명확한 연계성은 나타나지 않았다. 그럼에도 불구하고, 개방 전 평균 241 ind./L에서 개방 후 평균 487 ind./L로 출현 밀도가 증가하였고, 최대 3,580 ind./L까지 출현한 점(Fig. 9)을 고려할 때, 낙동강 하류가 기수역적 특성으로 변화하고 있음을 보여주는 단서로 해석될 수 있다.

3.2.2.2. 윤충류 출현에 미치는 주요 영향 요인 분석

상관분석 결과에 따라 윤충류 주요 종과 환경 요인 간의 정량적 관계를 분석하기 위해 다중선형회귀분석(Multiple Linear Regression Analysis)을 실시하였다. 각 모형의 유의확률(p)은 0.05 미만으로 통계적으로 유의하였으며, *Trichocerca*속의 모형에서 가장

Table 2. Correlation coefficients between rotifer abundance and environmental variables before and after the estuary weir opening

	Water temp.	Salinity	DO	BOD	T-N	T-P	<i>Aulacoseira</i> sp.	<i>Fragilaria</i> sp.	<i>Stephanodiscus</i> sp.
Before (2017 – 2019)									
<i>Asplanchna</i> sp.	N.S.	N.S.	N.S.	N.S.	N.S.	N.S.	N.S.	N.S.	N.S.
<i>Brachionus</i> sp.	-0.418*	N.S.	0.635**	0.472**	0.512**	N.S.	N.S.	0.505**	N.S.
<i>Keratella</i> sp.	N.S.	N.S.	N.S.	N.S.	N.S.	N.S.	N.S.	0.388*	N.S.
<i>Polyarthra</i> sp.	N.S.	N.S.	0.392*	0.374*	0.335*	N.S.	N.S.	N.S.	N.S.
<i>Synchaeta</i> sp.	N.S.	N.S.	N.S.	0.411*	N.S.	N.S.	N.S.	N.S.	N.S.
<i>Trichocerca</i> sp.	0.662**	N.S.	-0.409*	N.S.	-0.545**	N.S.	0.347*	N.S.	N.S.
After (2022 – 2024)									
<i>Asplanchna</i> sp.	N.S.	N.S.	N.S.	N.S.	0.413*	N.S.	N.S.	N.S.	N.S.
<i>Brachionus</i> sp.	-0.448**	N.S.	0.563**	N.S.	0.381*	N.S.	N.S.	N.S.	0.647**
<i>Keratella</i> sp.	N.S.	N.S.	N.S.	0.442**	N.S.	N.S.	N.S.	N.S.	N.S.
<i>Polyarthra</i> sp.	N.S.	N.S.	N.S.	0.483**	N.S.	N.S.	0.581**	N.S.	N.S.
<i>Synchaeta</i> sp.	N.S.	N.S.	N.S.	N.S.	N.S.	N.S.	N.S.	N.S.	N.S.
<i>Trichocerca</i> sp.	0.418*	N.S.	N.S.	0.470**	N.S.	N.S.	0.768**	N.S.	N.S.

Correlation analysis was performed using Pearson's method (*: $p < 0.05$, **: $p < 0.01$)
N.S. indicates non-significant correlation

Table 3. Results of multiple linear regression analysis with adjusted R^2 and standardized beta coefficients for rotifers and environmental variables before and after weir opening

Dependent variable	Time period	Adj. R^2	Standardized β coefficient						
			Water temp.	DO	BOD	T-N	<i>Aulacoseira</i> sp.	<i>Fragilaria</i> sp.	<i>Stephanodiscus</i> sp.
<i>Brachionus</i> sp.	Before	0.483***	N.S.	0.532	N.S.	N.S.	N.S.	0.347	N.S.
	After	0.462***	N.S.	0.315	N.S.	N.S.	N.S.	N.S.	0.487
<i>Keratella</i> sp.	Before	0.126*	N.S.	N.S.	N.S.	N.S.	N.S.	0.388	N.S.
	After	0.322**	N.S.	-0.335	0.454	0.470	N.S.	N.S.	N.S.
<i>Polyarthra</i> sp.	Before	0.129*	N.S.	0.392	N.S.	N.S.	N.S.	N.S.	N.S.
	After	0.490***	N.S.	N.S.	0.310	0.309	0.554	N.S.	N.S.
<i>Trichocerca</i> sp.	Before	0.422***	0.662	N.S.	N.S.	N.S.	N.S.	N.S.	N.S.
	After	0.633***	N.S.	N.S.	0.266	N.S.	0.689	N.S.	N.S.

N.S. indicates non-significant correlation. * $p < 0.05$, ** $p < 0.01$, *** $p < 0.001$
Yellow highlights indicates β coefficients in models with Adj. $R^2 \geq 0.4$

높은 설명력(Adj. $R^2 = 0.633$)이 나타났다. 그 외 모형들도 대체로 유의미한 수준의 설명력을 보였다(Table 3).

Brachionus 속은 개방 전 DO($\beta = 0.532$)와 *Fragilaria* 속($\beta = 0.347$), 개방 후 DO($\beta = 0.315$)와 *Stephanodiscus*속($\beta = 0.487$)과 유의미한 양의 상관성을 보였다. 이는 상관분석 결과와 일치하며, *Brachionus*

속이 산소가 풍부한 환경에서 서식하고 개방 전후로 주요 먹이원이 *Fragilaria* 속에서 *Stephanodiscus* 속으로 변화했음을 시사한다. 개방 전후 Adj. R^2 값은 각각 0.483과 0.462로, 모형의 설명력이 적절한 수준이었다. *Polyarthra* 속은 상관분석과 유사하게 개방 이후 BOD($\beta = 0.310$)와 *Aulacoseira*속($\beta = 0.554$)에서

설명력 49.0%의 양의 상관성을 보였다. 그러나 실제 출현 양상에서는 *Aulacoseira*속이 증가한 반면 *Polyarthra* 속은 감소하여, 먹이원보다는 BOD 감소와 같은 수질 요인이 더 큰 영향을 미친 것으로 해석된다. *Trichocerca*속은 개방 전 수온($\beta = 0.662$)과 높은 상관성을 보였으나, 개방 후에는 상관성이 약화되었고 *Aulacoseira* 속($\beta = 0.689$)이 가장 중요한 설명 변수로 나타났다. 이는 상관분석과 동일하게 *Aulacoseira* 속의 변성이 *Trichocerca*속의 출현을 유도했을 가능성이 높다고 해석할 수 있으며, 모형의 설명력은 63.3%로 가장 높았다. *Keratella*속은 개방 전은 *Fragilaria*속과 유의한 상관성을 보였으나, 개방 후에는 BOD($\beta = 0.454$)와 T-N($\beta = 0.470$)과의 상관성이 확인되었다. 다만, 개방 전후로 Adj. R^2 값이 각각 0.126, 0.322로 설명력이 부족하다고 판단된다.

결론적으로, 회귀분석 결과는 상관분석과 대체로 일치하였다. 개방 전에는 *Fragilaria*속과의 상관성이 두드러졌던 반면, 개방 후에는 *Stephanodiscus*속과 *Aulacoseira*속과의 상관성이 강화되어, 규조류 군집 변화가 윤충류의 출현에 중요한 영향을 미쳤음을 보여준다. 이러한 결과는 하굿둑 개방에 따른 환경 요인 및 식물플랑크톤 변화가 윤충류 군집 구조에 미치는 영향을 정량적으로 규명한 데 의의가 있다.

4. 결론

본 연구에서는 낙동강 하굿둑 개방이 동물플랑크톤, 특히 윤충류의 군집 구조 및 환경 요인 간의 관계에 미치는 영향을 파악하고자 수행되었다. 이를 위해 하굿둑 개방 전(2017 ~ 2019년)과 개방 후(2022 ~ 2024년)를 비교하여 윤충류의 출현 양상과 주요 환경 요인 및 식물플랑크톤(규조류)과의 상관성을 분석하였고 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 2017년부터 2024년까지 조사 결과, 수온, 염분, DO는 증가하고 BOD는 감소하는 등 전반적인 수질 개선 경향이 나타났다. T-P는 소폭 증가하는 추세가 보이나, 2021년 시범 개방 이후 축적이 완화되어 낮은 농도를 유지하는 경향을 보였다.
2. 조사 지점에서 동물플랑크톤 현존량은 봄과 여름에 가장 높았다. 총 25속의 동물플랑크톤이 동정되었으며, 윤충류(70% 이상)가 군집의 대부분을 구성하였고, 계절별로는 봄철에 윤충류가 우점, 겨울철에는

요각류의 출현이 30% 이상 증가하는 것으로 확인되었다. 종다양도와 종풍부도는 증가 추세를 보였으며, *Keratella*·*Polyarthra*·*Synchaeta*속이 주요 우점종으로 나타났다.

3. 동물플랑크톤은 하굿둑 개방 전 봄철(3 ~ 5월)에 폭발적으로 증식하였으나, 개방 후에는 초여름(4 ~ 7월)으로 출현 시기가 지연되고 연중 고르게 분포하는 경향을 보였다. 개방 이후 개체수는 감소하였으나, 윤충류는 연중 안정적인 분포를 보였고, 요각류와 지각류의 기여도가 증가하였다.
4. 윤충류를 중심으로, 개방 전에는 *Polyarthra*속이 49%로 우점했으나 개방 후에는 35%로 감소했으며, *Synchaeta*속과 *Trichocerca*속 등의 출현 비율이 22%에서 37%로 증가하였다. 하굿둑 개방 이후 *Collotheca*·*Monostyla*속 등 소형 윤충류의 출현 빈도가 높아졌다.
5. 상관성 분석 결과, 개방 전은 담수성 규조류인 *Fragilaria*속과 개방 후에는 기수성인 *Stephanodiscus*·*Aulacoseira*속과의 상관성이 강화되어 규조류 군집 변화가 윤충류 서식에 중요한 영향을 미쳤음을 확인하였다. *Synchaeta*속은 담수 및 기수성 윤충류로 개방 전 평균 241 ind./L에서 개방 후 평균 487 ind./L로 증가하여 낙동강 하류의 기수역 변화에 대한 적응을 나타냈다.

하굿둑 개방이 상시적으로 이루어짐에 따라, 낙동강 하류의 염분 농도는 수심 평균 최대 1.82 psu까지 상승하였으나 이는 단독으로 플랑크톤 군집에 직접적인 영향을 주기에는 제한적인 수준으로 판단된다. 그럼에도 불구하고, 수온과 수질 요인 등 다른 환경 변수들과 복합적으로 작용하여 군집 구조 변화에 기여했을 가능성이 크다. 따라서 하굿둑 개방의 효과를 보다 명확히 평가하기 위해서는 장기적인 모니터링과 다변수적 접근이 필요하다는 점을 제안한다.

감사의 글

The authors are grateful to the Republic of Korea National Institute of Environmental Research (NIER) who funded the research reported in this paper.

REFERENCES

- Agnieszka, G., Ewa, P., Ewa, K., 2013, Rotifer trophic state indices as ecosystem indicators in brackish coastal waters, *Oceanologia*, 55(4), 887-899.
- Brownell, C. L., 1988, A New pelagic marine rotifer from the southern Benguela, *Synchaeta hutchingsi*, n. sp., with notes on its temperature and salinity tolerance and methods of culture, *Hydrobiologia*, 162, 225-233.
- Cho, K. S., 1993, Illustrated guide to freshwater zooplankton of Korea, Academy Publishing Co..
- Choi, H. Y., Ryu, M. H., Choi, H. J., 2019, Assessment of environmental value of Nakdong river estuary, *J. Korea Water Resour. Assoc.*, 28.
- Fulton, R. S. III, Paerl, H. W., 1987, Toxic and inhibitory effects of the blue-green alga *Microcystis aeruginosa* on herbivorous zooplankton, *J. Plankton Res.*, 9(5), 837-855.
- Katerchakis, A., 2005, Selected interactions between phytoplankton, zooplankton and the microbial food web: Microcosm experiments in marine and limnic habitats, Dr. Dissertation, Ludwig Maximilian University of Munich, Germany.
- Kendall, M. G., 1975, Rank correlation methods, Charles Griffin, London.
- Kim, H. S., Kim, B. C., Choi, E. M., Hwang, S. J., 2000, Effects of cyanobacterial bloom on zooplankton community dynamics in several eutrophic lakes, *Korean Journal of Limnology*, 33(4), 366-373.
- Kim, M. S., Kim, B. C., Jun, M. S., 2018, Long term variations and environment factors of zooplankton community in lake Soyang, *Korean J. Ecol. Environ.*, 51(1), 29-39.
- Kim, S. K., Hong, D. G., Kang, M. A., Lee, K. L., Lee, H. Y., Joo, G. J., Choi, J. Y., 2015, Zooplankton community dynamic in lentic freshwater ecosystems in the Nakdong river basin, *Korean J. Ecol. Environ.*, 29(3), 410-420.
- Kirk, K. L., 2002, Competition in variable environments: Experiments with planktonic rotifers, *Freshwater Biology*, 47, 1089-1096.
- Lim, Y. S., Cho, J. S., Lee, H. J., Lee, Y. H., Sohn, B. K., Heo, J. S., 1999, Status of water quality in Nakdong river districts, *Korean J. Environ. Agric.*, 18(2), 126-134.
- National institute of environmental research (NIER), 2014, Phytoplankton of the Nakdong river.
- Noh, H. K., Ryu, H. K., Ryu, J. H., Kim, H. Y., Chun, J. H., 2020, Status and plan of 'Operation rule improvement and ecological restoration plan of Nakdong estuary', *J. Korea Water Resour. Assoc.*, 21-22.
- Oh, H. J., Chang, K. H., Jeong, H. G., Go, S. M., La, G. H., Kim, H. W., 2019, Quantitative zooplankton collection methods for various freshwater ecosystem and their applications, *Korean J. Ecol. Environ.*, 52(3), 231-244.
- Park, S. H., Lee, J. Y., Choi, J. U., Heo, N. W., An, S. M., 2016, Study on the long-term changes in water quality and benthic ecology and evaluation on effect of the barrage in Nakdong river estuary, *Journal of Wetlands Research*, 18(1), 58-67.
- Shannon, C. E., Weaver, W., 1953, Recent contributions to the mathematical theory of communication, *ETC: A Review of General Semantics*, 10(4), 261-281.
- Shin, Y. K., 2013, A Ecological study of phytoplankton community in the Geum river estuary, *Korean Journal of Limnology*, 46(4), 524-540.
- Sim, Y. B., Byeon, M. S., Kim, J. H., Yoo, S. J., Im, J. K., Hwang, S. J., 2021, Behavior of clear-water phase in hybrid water system with fluvial and lacustrine characteristics, *Korean J. Ecol. Environ.*, 54(4), 315-326.
- Son, H. J., 2013, The analysis of phytoplankton community structure in the middle-lower part of the Nakdong river, *Journal of Korean Society of Environmental Engineers*, 35(6), 430-435.
- Starkweather, P. L., Kellar, P. E., 1983, Utilization of cyanobacteria by *Brachionus calyciflorus*: *Anabaena flos-aquae*(NRC-44-1) as a sole or complementary food source, *Hydrobiologia*, 104, 373-377.
- Uhm, S. H., Hwang, S. J., 2006, Grazing relationship between phytoplankton and zooplankton in lake Paldang ecosystem, *Korean J. Ecol. Environ.*, 39(3), 390-401.
- Vincent, K., Mwebaza-Ndawula, L., Makanga, B., Nachuha, S., 2012, Variations in zooplankton community structure and water quality conditions in three habitat types in northern Lake Victoria, *Lakes & Reservoirs: Research and Management*, 17(2), 83-95.
- Woolson, R. F., 2008, Wilcoxon signed-rank test, *Wiley Encyclopedia of Clinical Trials*.
- Yu, J. J., Lee, H. J., Lee, K. L., Lyu, H. S., Whang, J. H., Shin, L. Y., Chen S. U., 2014, Relationship between distribution of the dominant phytoplankton species and water temperature in the Nakdong river, Korea, *Korean J. Ecol. Environ.*, 47(4), 247-257.

-
- Researcher. Ji-Su Kim
Busan Metropolitan City Institute of Health &
Environment
jisua1387@korea.kr
 - Researcher. Sang-Won Lee
Busan Metropolitan City Institute of Health &
Environment
leesang92@korea.kr

-
- Researcher. Kyoung-A Kim
Busan Metropolitan City Institute of Health &
Environment
rana@korea.kr