

Note

황강생태계 동물플랑크톤 군집의 장기변화

고의정 · 허유지¹ · 주기재² · 김현우^{1,*}

국립생태원 생태자연도팀, ¹순천대학교 환경교육과, ²부산대학교 생명과학과

Long-term Studies on Zooplankton Community in the Hwang River Ecosystem. Eui-Jeong Ko (0000-0002-6098-7877), Yu-Ji Heo¹ (0000-0002-6721-5482), Gea-Jae Joo² (0000-0002-5617-7601) and Hyun-Woo Kim^{1,*} (0000-0003-3898-5864) (Team of Ecological and Natural Map, National Institute of Ecology, Seocheon 33657, Republic of Korea; ¹Department of Environmental Education, Suncheon National University, Suncheon 57922, Republic of Korea; ²Department of Biological Science, Pusan National University, Busan 42641, Republic of Korea)

Abstract The research was based on long-term studies on the major physico-chemical and hydrological factors and zooplankton community dynamics in the Hwang River. We had 341 times survey and collected zooplankton samples in the Hwang River of mid-Nakdong River from 1995 to 2013. We identified 97 zooplankton species, including 77 rotifers, 16 cladocerans, and 4 copepods. The total zooplankton abundance and species diversity were shown distinctive temporal variation (ANOVA, $p < 0.001$). Annual average of zooplankton population density was $58.4 \pm 3.2 \text{ ind L}^{-1}$ ($n = 341$) and the lowest was $17.0 \pm 3.8 \text{ ind L}^{-1}$ (1996, $n = 20$), while the highest was $151.5 \pm 32.3 \text{ ind L}^{-1}$ (2010, $n = 22$). For zooplankton, small rotifer groups (e.g., *Keratella* sp., *Brachionus* sp., *Trichotria* sp.) dominated the study site for 19 years survey. Statistical analysis revealed that there were positive relationships with SiO_2 ($p = 0.002$) and water level ($p < 0.001$) for the high abundance of rotifer community. There were considerable variations both the total cladocerans population and the number of cladocerans' species concerning annual precipitation. Despite the appearance of various zooplankton in the Hwang River, the mean population density remained low. Due to the lateral structures in the Nakdong River, the downstream basin of the Hwang River is inevitably affected. The zooplankton community in our study site is considered to be mainly influenced by external factors that can stably increase and maintain the volume of the water body and internal factors that induce an increase in food sources through the inflow of nutrients into the water body.

Key words: zooplankton, long-term, Hwang River, tributary, rotifer

서론

낙동강은 다수의 황구조물(보) 및 하굿둑 건설 등으로 인해 정수역의 특성을 보이는 곳으로 변화하였다(Chang *et al.*, 2003; Ko *et al.*, 2022). 특히 낙동강 중하류는 경사가 완

만하여 유속이 느리며(Lim *et al.*, 1997), 집수역에서 유입되는 영양염류로 인해 정체된 구간을 중심으로 조류 번성이 연중 발생하고 있다(Kim *et al.*, 2010; Shin and Park, 2018). 조류 번성은 독성성분, 이취물질을 동반하는 담수 수질오염의 대표적인 현상이다(Shin and Park, 2018). 낙동강 유역 지역주민들의 약 80%가 낙동강 원수를 직접 취수하여 이용하기 때문에(Kim *et al.*, 2001), 조류의 번성은 지역주민들의 실질적인 문제로 대두되고 있다. 낙동강에서는 여름부터 겨

Manuscript received 28 November 2022, revised 14 December 2022, revision accepted 14 December 2022
* Corresponding author: Tel: +82-61-750-3384, Fax: +82-61-750-3384
E-mail: hwkim@suncheon.ac.kr

올까지 잦은 조류 번성이 발생하며 (Lee *et al.*, 2009), 봄에는 비교적 그 강도가 낮는데, 이는 동물플랑크톤의 섭식 효과에 의한 변화라는 연구가 있다 (Kim *et al.*, 1998; Kim and Joo, 2000). 동물플랑크톤은 상위 포식자로 에너지를 전달하는 중간 매개체로서 (Ko *et al.*, 2019), 낙동강 본류 및 지류 수생태계 건강성 향상을 위해서는 플랑크톤 동태 파악에 대한 연구는 매우 중요하다.

강에서 동물플랑크톤의 발달은 호소와 같은 상류의 정체 수역의 영향을 받는다 (Brook and Rzoska, 1954; Saunders and Lewis, 1989; Walks and Cyr, 2004). 낙동강은 지류가 발달하여 10개의 국가하천이 직접적으로 본류와 연결되어 있으며, 대부분 하류의 홍수나 가뭄과 같은 수재해 및 농업 등의 용수 공급을 위해 댐 혹은 보가 설치되어, 이는 결과적으로 낙동강 본류의 동물플랑크톤 군집 동태에 영향을 미칠 수 있다.

황강은 낙동강 중류에 위치한 국가하천으로서 남강과 함께 낙동강 하류의 대체상수원 및 수질개선을 위해 논의되는 하천이다. 최근 ‘낙동강유역 통합물관리방안’으로 2022년 6월 ‘낙동강 유역 안전한 먹는 물 공급체계 구축사업’이 정부 사업으로 확정되며, 낙동강 중하류 수생태계에 미치는 황강의 중요성이 재확인되었다 (MOE, 2022).

황강은 상류에 합천댐이 자리하여 방류 및 발전과 같은 수리수문학적인 연구가 주로 진행되었다 (Shin and Julien, 2011; Choi, 2014). 수생태계 연구로는 부차구조 및 영양 단계 평가 (Lee and Kim, 1995), 저서성대형무척추동물 군집 확인 (Kim *et al.*, 2013), 수질변이 특성 분석 (Kang *et al.*, 2019) 그리고 어류상 변화 (Jang and Bae, 2020)가 수행되었다. 그러나 낙동강수계 호소환경 및 생태조사 (Nakdong River Basin Management Committee, 2009, 2012, 2015)를 제외하고 유수생태계로서의 황강에서는 생산자로부터 상위 포식자에게 에너지 전달을 매개하는 동물플랑크톤에 대한 연구는 아직 제대로 수행된 바 없다. 따라서 본 연구의 목적은 황강에서 지난 1995년부터 2013년까지 동물플랑크톤 군집과 수질 환경이 장기적인 시간 경과에 따라 어떠한 상관성을 가지고 변화하는지 확인하고자 하였다. 아울러 황강 하류의 동물플랑크톤 군집과 국내 주요 하천 및 호소의 군집을 비교하여 황강의 특성을 비교하고자 하였다.

재료 및 방법

낙동강은 대한민국에서 가장 긴 하천으로 길이는 525 km 유역면적은 23,717 km²이다 (Ko *et al.*, 2022). 황강은 낙동강의 제1지류 중 하나로 국가하천에 해당되며, 길이는 111 km

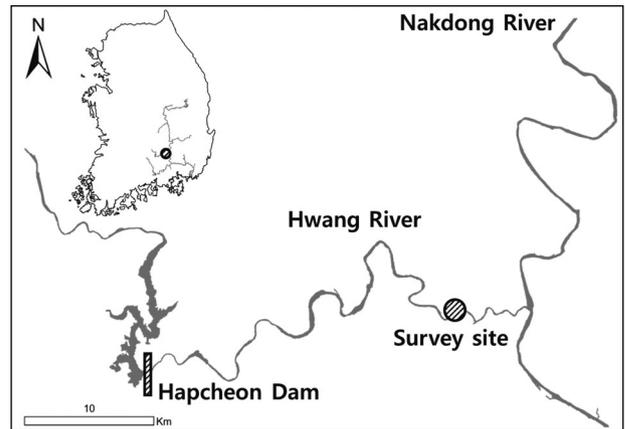


Fig. 1. Map of study site in the Nakdong River (dot: study site; square: dam).

유역면적 1,332 km²로 상류에 합천댐이 위치한다. 본 연구를 위해 황강과 낙동강의 합류지점으로부터 7 km 떨어진 상류지점 (황강교; 35°34'18.8"N 128°17'34.8"E)에서 1995년부터 2013년까지 격주 간격으로 조사를 실시하였다 (Fig. 1).

동물플랑크톤 채집과 수질측정은 함께 진행되었으며, 이 화학적 특성을 확인하기 위해 표층수 (수면으로부터 50 cm 지점)의 수온 (water temperature (WT), °C), 용존산소량 및 수중산소포화도 (dissolved oxygen (DO), mg L⁻¹ or %, YSI Incorporated, 550A), pH (Thermo Scientific, Orion Star A221), 전기전도도 (electrical conductivity (EC), μS cm⁻¹, YSI Incorporated, 30)는 현장에서 측정하였다. 분석이 필요한 수질항목을 위해 채수한 시료는 저온 (8°C 이하)을 유지하여 실험실로 운반하였다. 실험실에서는 탁도 (turbidity (TUR), NTU, HF Scientific, Micro 1000 Turbidimeter), 알칼리도 (alkalinity (AK), mg L⁻¹), 클로로필-a (chlorophyll-a (CHL), μg L⁻¹), 총질소 (total nitrogen (TN), mg L⁻¹), 총인 (total phosphorus (TP), μg L⁻¹) 그리고 이산화규소 (silica (SI), mg L⁻¹)를 측정하였다 (Kim *et al.*, 2020). 수문학적 요인 중 수위 (water level (WL), m)는 낙동강 홍수통제소의 수문조사연보 (1995~2008)와 국가수자원종합정보시스템 (<http://wamis.go.kr>)에서 2009년부터 2013년까지의 황강교 지점의 일단위 측정자료를 사용하였다. 강수량 (precipitation (PRE), mm)은 기상청 (<http://weather.go.kr>)의 합천 (무) 지점에서의 1995년부터 2013년까지의 일자료를 활용하여 일 단위 강수량을 계산하였다.

동물플랑크톤 채집은 60 μm 망목 (Wildco 48 C60)을 활용하여 표층수 20~40 L를 여과 후 10% sucrose-formalin으로 고정하여 동정, 계수하였다. 종 동정은 광학 및 도립현미경 (×40, ×100)을 통해 수행하였으며, 400~1,000배로 확

대하여 동정에 필요한 형태와 저작기 등을 확인하였고, 분류는 속 또는 종 범위에 한해 분류하였으며 Koste (1978), Smirnov and Timms (1983), Einsle (1993)의 분류기에 따라 실시하였다.

황강에서의 장기 동물플랑크톤 군집 변화 중, 윤충류와 저작류 및 요각류 우점 시기와 수질 변화 간의 유의성을 확인하기 위해 Mann-Whitney u test를 사용하였다. 통계분석은 PAST version 4.05를 사용하였으며(Hammer *et al.*, 2001), 유의확률(p) 0.05에서 검정하였다.

결과 및 고찰

1. 기초 이화학적 및 수문학적 요인 변화

조사기간 중 수질 측정은 19년 동안 격주 간격으로, 총 341회 측정하였다. 수온은 평균 $15.2 \pm 0.8^\circ\text{C}$ 로 나타났으며, 2009년 1월에는 표층수의 결빙이 2회 연속 측정되었다(Table 1). 평균 수온이 가장 낮은 시기는 1월이었으며, 가장 높은 시기는 8월이었다. 용존산소량은 평균 10.4 mg L^{-1} 이었으며, 평균 수온의 최고 및 최저 시기에 월평균 용존산소량 값이 가장 낮거나 높았으나(1월 평균 DO: 13.3 mg L^{-1} ; 8월 평균 DO: 7.7 mg L^{-1}), 산소포화도는 용존산소량 변화와는 상이한 양상이 나타났다. 황강 표층수의 산소포화도는 평균 100.5%로 과포화상태였고(Table 1), 여름 기간(6월~9월)을 제외하면 월평균 100% 이상으로 나타났다. pH는 평균 7.6 ± 0.4 를, 전기전도도는 평균 $107.3 \pm 5.8 \mu\text{S cm}^{-1}$ 으

로 나타났다. 알칼리도는 평균 $32.7 \pm 1.8 \text{ mg L}^{-1}$ 으로, 월평균 알칼리도가 가장 높은 시기는 8월인 것으로 파악됐다. 탁도는 연 평균 $11.4 \pm 0.6 \text{ NTU}$ 로, 0.3 NTU~145.1 NTU의 분포를 보였고 4월부터 8월까지 지속적으로 탁도가 증가하는 경향을 보였다(Table 1). 클로로필-a의 경우 평균 $4.0 \mu\text{g L}^{-1}$ 으로 나타났다. 월평균 클로로필-a는 1월부터 4월까지와 9월부터 12월까지 지속적으로 상승하는 경향성을 보였다. 총질소의 경우는 평균 $2.0 \pm 0.1 \text{ mg L}^{-1}$, 총인은 $76.5 \pm 4.1 \mu\text{g L}^{-1}$, 이산화규소는 평균 $6.8 \pm 0.4 \text{ mg L}^{-1}$ 인 것으로 파악됐다(Table 1). 황강교의 평균 수위는 $0.6 \pm 0.03 \text{ m}$ 로 나타났고, 연 평균 강수량은 $1320.1 \pm 302.8 \text{ mm}$ 로 최소 767.0 mm에서 최대 1,862.7 mm까지의 범위인 것으로 파악됐다(Table 1).

합천댐에서 수행한 6년(1996~2001) 간의 장기수질조사와 비교했을 때(Choi *et al.*, 2003), 하류인 황강교는 총질소와 총인 농도는 높고, 클로로필-a의 농도는 낮았다. 낙동강 중하류의 황강 합류 직후 본류에서 장기수질모니터링 조사와 비교했을 때 평균 수온, 용존산소량, pH는 유사한 범위로 나타났다(Kim *et al.*, 2011). 8개 수질 항목(DO(%), EC, AK, TUR, CHL, TN, TP 그리고 SI)은 황강 하류가 평균적으로 낮았다. 황강과 유사하게 낙동강 제1지류이며, 대구광역시를 통과하는 금호강의 장기수질모니터링 조사와 비교했을 때(Ko *et al.*, 2020), 황강은 수온·전기전도도·총인·총질소·클로로필-a는 낮으며, 용존산소량 및 pH는 유사했다. 인공 댐으로 인해 형성된 호수들은 상류 수역의 점·비점오염원에 의해 10~30년 경과 시에는 부영양화 상태로 변화하는 것으로 알려져 있으나(Yoon *et al.*, 2000), 본 조사 결

Table 1. Water quality and hydrological factors during 1995 to 2013.

Category	Factors	N	Minimum	Maximum	Mean \pm S.E.
Water quality	WT	341	0.0	33.6	15.2 ± 0.8
	DO (mg L^{-1})	341	3.6	16.4	10.4 ± 0.6
	DO (%)	341	39.0	150.4	100.5 ± 5.4
	pH	341	6.2	9.4	7.6 ± 0.4
	EC	341	52.4	410.7	107.3 ± 5.8
	AK	341	10.0	100.0	32.7 ± 1.8
	TUR	341	0.3	145.1	11.4 ± 0.6
	CHL	341	0.0	55.2	4.0 ± 0.2
	TN	341	0.2	11.4	2.0 ± 0.1
	TP	341	0.0	741.8	76.5 ± 4.1
	SI	341	1.0	17.4	6.8 ± 0.4
Hydrological factor	WL	320	-0.3	5.6	0.6 ± 0.03
	PRE (annual)	19	767.0	1,862.7	$1,320.1 \pm 302.8$

WT: water temperature, $^\circ\text{C}$; DO: dissolved oxygen; EC: electric conductivity, $\mu\text{S cm}^{-1}$; AK: alkalinity, mg L^{-1} ; TUR: turbidity, NTU; CHL: chlorophyll-a, $\mu\text{g L}^{-1}$; TN: total nitrogen, mg L^{-1} ; TP: total phosphorus, $\mu\text{g L}^{-1}$; SI: silica, mg L^{-1} ; WL: water level, m; PRE: precipitation, mm; S.E.: standard error

과에서 황강은 낙동강 본류 및 금호강보다 깨끗한 수질로 확인되었다. 기존의 낙동강 수계의 수질 조사 결과에서도 BOD 기준으로 황강은 좋은 수질(Ib; 수질환경기준)로 판단되었고, 낙동강 본류의 수질을 개선시키는 역할을 하는 것으로 나타났다(Lim *et al.*, 1999). 이는 지속적으로 문제가 되고 있는 낙동강의 여름철 유해조류(*Microcystis aeruginosa*) 및 겨울철 규조류(*Stephanodiscus hantzschii*) 번성 조절을 위한 댐 방류 시기 조절에 있어(Jeong *et al.*, 2006), 상류에 합천댐이 위치한 황강이 낙동강으로 유입되는 유량을 조절하는 역할을 할 수 있을 것이다.

2. 출현 종 수 및 개체수의 변화

19년에 걸쳐 황강에서 확인된 동물플랑크톤은 총 97종으로, 윤충류 77종, 지각류 16종, 요각류 4종인 것으로 파악됐다. 합천댐에서 3년간 수행된 호소조사와 비교했을 때(Nakdong River Basin Management Committee, 2009, 2012, 2015), 황강 하류의 동물플랑크톤 군집은 지각류나 요각류와 같은 중형 및 대형종의 비중이 낮았다. 이는 낙동강에서도 보 건설 후에 저수지화가 이루어져 지각류와 요각류의 비중이 늘어난 것과 유사했다(Ko *et al.*, 2022). 황강의 경우 합천호와 달리 표층수를 여과하는 방법으로 동물플랑크톤이 채집되었고, 이에 따라 중층과 저층에 분포하는 중형, 대형 동물플랑크톤이 과소평가되었을 수 있기 때문에 추가적으로 연구 방법 간의 차이를 고려할 필요가 있을 것이다. 동물플랑크톤은 유체의 흐름을 따라 이동하며(Pachepsky *et al.*, 2005), 황강은 동일 하천 내에서 합천댐 건설로 인해 일부 구간 정체구역이 존재하지만 한 방향으로 흐른다. 따라서 상류에서부터 하류로 동물플랑크톤은 군집 유사성을 나타낼 수 있어(Malazarte *et al.*, 2017), 합천댐과 황강교 조사지점 간에 조사 방법을 통일한다면 분야별 종 수 및 밀도의 차이를 직접적으로 파악할 수 있을 것이다.

조사기간 동안의 황강의 평균 동물플랑크톤 밀도는 58.4 ind L⁻¹ (n=341)인 것으로 파악되었으며, 주요 분류군으로는 윤충류 45.6 ind L⁻¹, 지각류 8.9 ind L⁻¹, 요각류 3.9 ind L⁻¹으로 나타났다. 황강 하류는 19년 동안 동물플랑크톤 밀도는 최고 1,165.7 ind L⁻¹ (2007년)이며, 분류군별로는 윤충류 686.4 ind L⁻¹ (2010년), 지각류 1,062.8 ind L⁻¹ (2007년), 요각류 132.5 ind L⁻¹ (2013년)으로 나타났다.

평균 밀도가 가장 높은 우점종은 *Keratella valga*로 총 114회 출현하였으며, 10.1 ind L⁻¹의 밀도를 나타냈다. 장기 조사를 통한 낙동강 중하류(하굿둑에서 25 km 상류 지점부터 강정고령보 상류 1 km 지점 사이의 6개 지점)의 우점종이 *Polyarthra vulgaris* (1회 평균 출현 밀도: 76.5 ind L⁻¹)인

것을 고려할 때(Ko *et al.*, 2022), 황강에서 유입되는 주요 우점종은 그 밀도가 낮기 때문에 낙동강 본류의 동물플랑크톤 우점종 변화에 영향을 미치지 않을 것으로 사료된다. 황강 하류의 동물플랑크톤은 밀도가 매우 적고 크기가 작은 윤충류로 구성된 점을 고려했을 때, 여과 섭식률이 높은 지각류 및 요각류가 출현하는 기간을 제외하면 황강 및 낙동강 본류의 식물플랑크톤 군집 번성에 미치는 영향이 낮을 것으로 예측된다(Lampert and Sommer, 1993). 그러나 낙동강 하류에서 수행된 동물플랑크톤 분류군별 섭식률에 대한 기존 문헌에 따르면(Kim *et al.*, 2000), 윤충류의 높은 비율로 인해 중대형 분류군들보다 섭식률이 두 배 가까이 높은 것은 황강에서도 실제 출현 분류군별 군집 밀도가 특정 개체의 출현보다 섭식률 증감에 중요한 요소가 될 수 있을 것이다.

지난 19년 동안 황강 하류의 동물플랑크톤 그룹은 윤충류가 우점하는 것으로 확인되어, 기존에 국내에서 수행된 담수 동물플랑크톤 관련 연구 결과들과 유사하였다(Kim and Joo, 2000; Kim *et al.*, 2018; Ko *et al.*, 2021). 황강에서 동물플랑크톤이 출현한 302회의 조사시기 중 윤충류의 상대 풍부도가 50% 미만인 횟수는 총 45회로, 지각류 또는 요각류가 높은 빈도를 보였던 시기도 확인되었다. 윤충류가 우점하는 시기에 뚜렷하게 높은 값을 보면 수질항목은 이산화규소였으며($p=0.002$), 수위도 유의미하게 높았다($p<0.001$). 인근 상류에 위치한 지류인 금호강의 경우에도 유량이 많은 시기에 윤충류가 극우점하는 동일한 현상을 나타냈다(Ko *et al.*, 2020). 낙동강 본류 내에서도 수체가 정체될수록 윤충류의 비중이 높아지는 것으로 알려져 있으며(Kim and Joo, 2000), 이는 윤충류가 다른 동물플랑크톤 군집에 비해 오염에 내성이 강한 종이 많고 먹이원에 대한 영향을 적게 받는 특성이 반영된 것으로 판단된다(Lim, 1992; Vandysch, 2004).

3. 연도별 및 계절별 변화

동물플랑크톤 주요 분류군에 따른 출현 빈도는 연별로 다른 양상을 보였다(Fig. 2). 출현 종 수의 경우 지각류는 2002년과 2010년에서 감소 및 증가가 뚜렷하게 나타났다(Fig. 2a). 2002년의 지각류 종 수의 감소는 13년 동안의 전년 대비 연강수량 차이가 548 mm로 최대폭으로 증가한 해였다. 2010년에는 연강수량의 차이가 전년 대비 481.1 mm로 두 번째로 큰 폭으로 증가한 해였지만, 전혀 다른 양상을 나타냈다.

밀도는 2007년에 지각류의 평균 밀도가 급격히 높은 것을 확인할 수 있었으며, 2010년에는 동물플랑크톤 세 분류군 모두 일시적으로 평균 밀도가 상승한 것을 확인할 수 있었

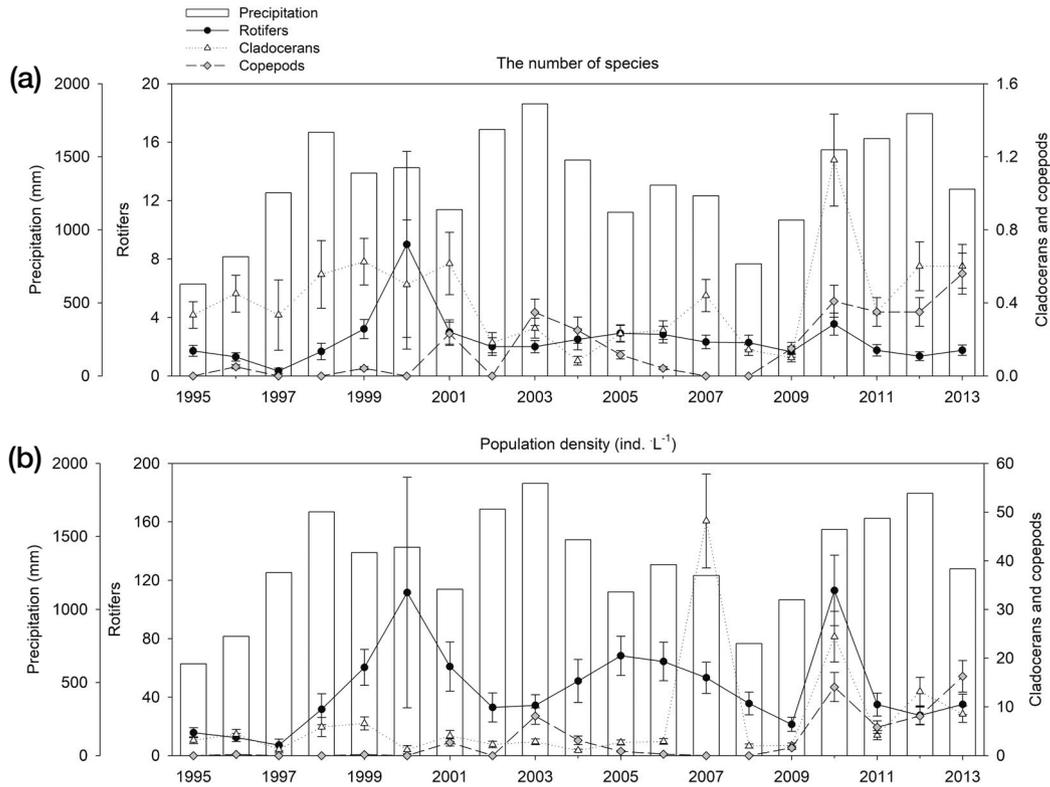


Fig. 2. Annual variation of precipitation and zooplankton community with standard error (a: the number of species in zooplankton with precipitation; b: population density of zooplankton with precipitation).

다(Fig. 2b). 2007년은 안정된 강수량이 다년간 지속되어 지각류의 밀도가 증가하였지만, 2008년 갑작스러운 가뭄에 의해 밀도는 급감하였다. 강수량은 수심과 체류시간에 영향을 미치며, 또한 유역의 영양분이 수환경으로 유입되는 데 중요한 역할을 하기 때문이다(Havens *et al.*, 2016). 2010년의 운충류는 *K. valga*가 우점했다. 해당 연도는 2009년에 비해 강수량은 크게 늘고 수체 내 연평균 총질소 및 총인의 농도가 타해에 비해 매우 낮게 나타나, 조사지점의 영양염분 농도가 식물플랑크톤에서 동물플랑크톤으로 이어지는 수적 증가에 영향을 미친 것으로 보인다. 수질이 개선됨에 따라 평균 밀도가 급격히 감소한 금호강의 사례와(Ko *et al.*, 2020), 보 건설 이후 수체가 정체된 낙동강 중하류의 동물플랑크톤 평균 밀도의 증가 현상은(Ko *et al.*, 2022), 호수와 같이 정체되고 영양염류가 높은 담수생태계에서 동물플랑크톤의 성장 및 발생이 다소 높은 것으로 보여진다.

4. 황강 하류의 동물플랑크톤 군집 특성

황강 하류와 국내 주요 담수생태계에서 수행된 동물플랑크톤 군집들을 비교했을 때, 황강 하류 지점의 특이성이 확인되었다(Table 2). 황강 하류는 금호강과 장기간 출현한 누

적 출현 종 수는 비슷하였으나, 하천 준설 발생과 상관 없이(2010~2012 금호강, Table 2; Ko *et al.*, 2020) 밀도는 현저히 낮았다. 합천댐은 동물플랑크톤이 서식하기 적합한 정수생태계임에도 불구하고, 금호강의 밀도와 큰 차이를 나타냈다. 황강 하류가 합류되는 낙동강 본류의 중하류 지점들은 보(강정고령보, 달성보, 합천창녕보, 창녕함안보) 건설과 관계 없이 종 수 및 밀도가 높았다. 이는 영산강 본류의 조사지점과 비교했을 때도 동일하였다. 국내에서 수행된 50개 주요 저수지 조사 결과에서, 호수별 동물플랑크톤 출현 종은 각각 연평균 39종(낙동강수계), 20종(영산강·섬진강수계)으로 합천댐과 유사한 경향성을 나타냈으나, 밀도는 현저히 높았다.

황강 하류는 다른 하천의 동물플랑크톤 군집과 유사한 수준의 출현 종 수를 보였으나, 밀도는 국내 다양한 담수생태계에 비해 현저히 낮은 것으로 확인되었다. 이는 하천 내 포함된 영양염류가 제한요인으로 작용했을 것으로 고려된다(Ko *et al.*, 2020). 수질이 악화되거나(금호강, 2007~2010), 정체된 수역은(낙동강 중하류, 2012~2018) 수질이 개선되거나(금호강, 2012~2015) 보 설치 이전 시기(낙동강 중하류, 2002~2008)에 비해 동물플랑크톤 밀도가 높은 것을 확

Table 2. Structure of zooplankton communities in major freshwater ecosystems in the South Korea.

Category		Accumulated number of species		Mean population density (ind L ⁻¹)	
		Seungchon	Juksan	Seungchon	Juksan
Hwang R.	1995 to 2013	97		58	
Hapchon dam*	2009, 2012 and 2015	42		224	
Geumho R. ** (Ko <i>et al.</i> , 2020)	Entire period	85		1,061	
	2007 to 2010	58		2,130	
	2010 to 2012	35		83	
	2012 to 2015	68		501	
6 sites of Mid-low Nakdong R.*** (Ko <i>et al.</i> , 2022)	Entire period	164		751	
	2002 to 2008	137		288	
	2012 to 2018	104		1,226	
Seungchon and Juksan weirs in Yeongsan R.****	2010 to 2019	115	113	912	1,011
30 reservoirs in Nakdong R. basin*****	2008 to 2020	39		398	
20 reservoirs in Yeongsan and Seomjin R. Basins*****	2008 to 2020	20 (data of 9 reservoirs)		319	

*Nakdong River Basin Management Committee, 2009, 2012, 2015; ** Ko *et al.*, 2020; *** Ko *et al.*, 2022; **** Yeongsan and Seomjin River Systems Management Committee, 2018, 2019a; ***** Nakdong River Basin Management Committee 2008, 2010, 2011, 2012, 2014, 2015; Daegu Competent River Basin Environmental Office, 2019, 2020; ***** Yeongsan and Seomjin River Systems Management Committee, 2019b, 2020; Yeongsan River Basin Environmental Office, 2020

인할 수 있다(Table 2; Ko *et al.*, 2020, 2022). 합천댐 구간에서조차 동물플랑크톤 밀도가 낮은 것은 하천이라는 환경요인과 영양염류 요인이 동물플랑크톤 서식에 주요한 요인으로 작용할 것으로 사료된다. 영양염류는 1차 생산자인 식물플랑크톤 군집을 형성하는 주요 요인이며, 이는 황강 하류의 클로로필-a가 낙동강 중하류 및 금호강에 비해 상대적으로 낮은 것을 고려하면, 먹이원의 부족이 동물플랑크톤 군집 크기를 제한하는 주요 원인이 될 수 있다. 강은 주로 외부 요인으로부터 영향을 받으며 호수는 강보다 고립되어 내부의 생물적 요소로부터 영향을 받는 것과 같이(Dent *et al.*, 2002), 황강 하류는 상류 및 주변으로부터의 영향이 다소 낮아 현재의 상태가 유지되는 것으로 보인다. 인접 상하류에 설치된 보의 영향으로 인해 황강 하류 지역의 유속이 감소하여 동물플랑크톤의 밀도가 증가할 수도 있다. 그러나 근본적으로 영양염류 유입을 통해 먹이원이 증가하지 않는다면 동물플랑크톤 밀도의 상승 폭은 적을 것으로 판단된다.

적 요

본 연구는 황강의 주요 이화학적 및 수문학적 요인과 동물플랑크톤 군집 변화에 대한 장기조사를 기반으로 수행하

였다. 1995년부터 2013년까지 낙동강 중류에 위치한 황강에서 341회 조사를 통해 확인된 동물플랑크톤은 총 97종으로, 윤충류 77종, 지각류 16종, 요각류 4종이 출현하였다. 전체 동물플랑크톤 출현밀도와 종 수는 뚜렷한 시간적 변화를 보였다. 연평균 동물플랑크톤 밀도는 58.4 ± 3.2 ind L⁻¹ (n=341)이었으며, 최저 17.0 ± 3.8 ind L⁻¹ (1997, n=20), 최대 151.5 ± 32.3 ind L⁻¹ (2010, n=22)으로 확인되었다. 19년의 조사기간 동안 동물플랑크톤 군집 중 크기가 작은 윤충류(*Keratella* sp., *Brachionus* sp., *Trichotria* sp.)가 우점하였다. 윤충류 밀도가 50% 이상을 차지하는 우점 기간은 이산화규소($p=0.002$) 및 수온($p<0.001$)과의 양의 상관성이 나타났으며, 연강수량 변동폭 및 강수 기간에 따라 지각류는 종 수 및 밀도의 큰 변화를 보였다. 본 연구를 통해 황강에서 동물플랑크톤 종 수가 다양함에도 불구하고, 평균 밀도는 지속적으로 낮은 수준을 유지하는 것을 확인할 수 있었다. 황강 하류의 동물플랑크톤 군집은 수체의 부피가 안정적으로 증가하고 유지될 수 있는 외적 요인과 수체 내 영양염류 유입을 통해 먹이원의 증가를 유도하는 내적 요인에 의해 영향을 받는 것으로 판단된다.

저자정보 고의정 (국립생태원 생태자연도팀 전임연구원), 허유지(순천대학교 환경교육과 박사과정), 주기재(부산대학

교 생명과학과 교수), 김현우(순천대학교 환경교육과 교수)

저자기여도 개념설정: 고의정, 김현우, 자료수집: 고의정, 허유지, 자료관리: 김현우, 주기재, 원고 초안작성: 고의정, 허유지, 최종원고 검토: 김현우, 과제관리: 김현우

이해관계 본 연구에 참여한 모든 저자들은 학술 출판에 있어 어떠한 이해충돌의 여지가 없습니다.

연구비 이 논문은 2022년 순천대학교 학술연구비(과제번호: 2022-0313) 공모 과제로 연구되었습니다.

REFERENCES

- Brook, A.J. and J. Rzoska. 1954. The influence of the Gebel Aulia Dam on the development of Nile plankton. *The Journal of Animal Ecology* **25**(1): 101-114.
- Chang, K.H., K.S. Jeong, G.J. Joo and H.W. Kim. 2003 The spring metazooplankton dynamics in the river-reservoir hybrid system (Nakdong River, Korea): Its role in controlling the phytoplankton biomass. *Korean Journal of Ecology and Environment* **36**: 420-426.
- Choi, H.S., I.C. Cho, J.H. Byun, B.H. Moon and J.S. Heo. 2003. Estimation of water quality and trophic state in the Hapcheon lake. *Korean Journal of Environmental Agriculture* **22**(1): 1-6.
- Choi, Y.K. 2014. A study on power generation analysis of floating PV system considering environmental impact. *International Journal of Software Engineering and its Applications* **8**(1): 75-84.
- Daegu Regional Environmental Office. 2019. Lake environment and ecological survey in the Nakdong River watershed.
- Daegu Regional Environmental Office. 2020. Lake environment and ecological survey in the Nakdong River watershed.
- Dent, C.L., G.S. Cumming and S.R. Carpenter. 2002. Multiple states in river and lake ecosystems. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series B: Biological Sciences* **357**(1421): 635-645.
- Einsle, U. 1993. Crustacea, Copepoda, Calanoida und Cyclopoida. Susswasswefauna von Mitteleuropa, vol. 8, part 4-1. Gustav Fisher Verlag, Stuttgart.
- Hammer, Ø., D.A. Harper and P.D. Ryan. PAST: 2001. Paleontological statistics software package for education and data analysis. *Palaeontologia Electronica* **4**(1): 9.
- Havens, K.E., R.S. Fulton, J.R. Beaver, E.E. Samples and J. Colee. 2016. Effects of climate variability on cladoceran zooplankton and cyanobacteria in a shallow subtropical lake. *Journal of Plankton Research* **38**(3): 418-430.
- Jang, C.R. and Y.S. Bae. 2020. Changes in Ichthyofauna of Hapcheon lake and characteristics of the bluegill, *Lepomis macrochirus* population. *Korean Journal of Environment and Ecology* **34**(6): 543-550.
- Jeong, K.S., D.K. Kim and G.J. Joo. 2006. Delayed influence of dam storage and discharge on the determination of seasonal proliferations of *Microcystis aeruginosa* and *Stephanodiscus hantzschii* in a regulated river system of the lower Nakdong River (South Korea). *Water Research* **41**(6): 1269-1279. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2006.11.054>
- Kang, Y.J., S.J. Lee and K.G. An. 2019. Long-term (2002-2017) eutrophication characteristics, empirical model analysis in Hapcheon reservoir, and the spatio-temporal variabilities depending on the intensity of the monsoon. *Korean Journal of Environment and Ecology* **33**(5): 605-619.
- Kim, D.K., D.G. Hong, H.W. Kim, G.J. Joo and K.S. Jeong. 2011. Longitudinal patterns in limnological characteristics based on long-term ecological research in the Nakdong River. *Journal of Ecology and Environment* **34**(1): 39-47.
- Kim, H.G., S.W. Hong, D.K. Kim and G.J. Joo. 2020. Drivers shaping episodic and gradual changes in phytoplankton community succession: Taxonomic versus functional groups. *Science of The Total Environment* **734**: 138940.
- 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 south-western parts of Korea. *Korean Journal of Environmental Biology* **28**(2): 86-94.
- Kim, H.W., K. Ha and G.J. Joo. 1998. Eutrophication of the lower Nakdong River after the construction of an estuarine dam in 1987. *International Review of Hydrobiology* **83**: 65-72.
- Kim, H.W. and G.J. Joo. 2000. Longitudinal distribution and community dynamics of zooplankton in a regulated large river: a case study of the Nakdong River (Korea). *Hydrobiologia* **438**: 171-184.
- Kim, H.W., S.J. Hwang and G.J. Joo. 2000. Zooplankton grazing on bacteria and phytoplankton in a regulated large river (Nakdong River; Korea). *Journal of Plankton Research* **22**(8): 1559-1577.
- Kim, J.S., H.G. Lee and J.K. Choi. 2013. An ecological comparison of benthic macroinvertebrate community in downstream region of large dams. *Korean Journal of Environment and Ecology* **27**(1): 52-63.
- Kim, M.S., B. Kim and M.S. Jun. 2018. Long term variations and environment factors of zooplankton community in lake Soyang. *Korean Journal of Ecology and Environment* **51**(1): 29-39.
- Kim, Y.J., J.L. Kim, J.H. Son and S.M. Lee. 2001. Environmental decision making of Nakdong River basin by the environmental accounting. *Journal of the Korean Environmental Sciences Society* **10**(2): 85-90.
- Ko, E.J., D.K. Kim, E.S. Jung, Y.J. Heo, G.J. Joo and H.W. Kim. 2020. Comparison of zooplankton community patterns in relation to sediment disturbances by dredging in the Guemho River, Korea. *Water* **12**: 3434.
- Ko, E.J., E.S. Jung, Y. Do, G.J. Joo, H.W. Kim and H. Jo. 2022.

- Impact of river-reservoir hybrid system on zooplankton community and river connectivity. *Sustainability* **14**: 5184.
- Ko, E.J., G.Y. Kim, G.J. Joo and H.W. Kim. 2019. Similarity of zooplankton community structure among reservoirs in Yeongsan-Seomjin River basin. *Korean Journal of Ecology and Environment* **52**(4): 285-292.
- Koste, W. 1978. Rotatoria. Die Radertiere Mitteleuropes begrunder von Max Voigt, 2nd edn., Vol. 1. Textband, p. 673, Vol. 2. Tafelband, p. 234, Borntraeger, Stuttgart.
- Lampert, W. and U. Sommer. 1993. Limnoökologie. Georg Thieme, Stuttgart, Germany.
- Lee, J.H. and Y.J. Kim. 1995. Epilithic diatoms and trophic states of dam lakes in the Nakdong River system. *Korean Journal of Environmental Biology* **14**(1): 18-28
- Lee, S., J.M. Choi and K.S. Jeong. 2009. Water quality simulation at Mulgeum of the Nakdong River using zooplankton community data. *Journal of Korean Society on Water Quality* **25**(6): 832-839.
- Lim, B.J. 1992. Ecological studies on zooplankton community in the lower Han River system, Korea. Doctoral dissertation. Hanyang University.
- Lim, B.J., B.C. Kim, K.I. Yoo and J.K. Ryu. 1997. Changes in zooplankton community during the blue-green algal bloom in the Nakdong River. *Korean Journal of Limnology* **30**(4): 337-346.
- Lim, Y.S., J.S. Cho, Y.H. Lee, B.K. Sohn and J.S. Heo. 1999. Status of water quality in Nakdong River districts. *Korean Journal of Environmental Agriculture* **18**(2): 126-134.
- Malazarte, J.M., H. Lee, H.W. Kim and Y. Sin. 2017. Spatial and temporal dynamics of potentially toxic cyanobacteria in the riverine region of a temperate estuarine system altered by weirs. *Water* **9**: 819.
- Ministry of Environment. 2022. Nakdong River basin safe drinking water supply system establishment project passed preliminaries. Press release June 30 2022.
- Nakdong River Basin Management Committee. 2008. Survey of environment and ecosystem of lakes in the Nakdong River system.
- Nakdong River Basin Management Committee. 2009. Survey of environment and ecosystem of lakes in the Nakdong River system.
- Nakdong River Basin Management Committee. 2010. Survey of environment and ecosystem of lakes in the Nakdong River system.
- Nakdong River Basin Management Committee. 2011. Survey of environment and ecosystem of lakes in the Nakdong River system.
- Nakdong River Basin Management Committee. 2012. Survey of environment and ecosystem of lakes in the Nakdong River system.
- Nakdong River Basin Management Committee. 2014. Survey of environment and ecosystem of lakes in the Nakdong River system.
- Nakdong River Basin Management Committee. 2015. Survey of environment and ecosystem of lakes in the Nakdong River system.
- Pachepsky, E., F. Lutscher, R.M. Nisbet and M.A. Lewis. 2005. Persistence, spread and the drift paradox. *Theoretical Population Biology* **67**(1): 61-73.
- Saunders, J.F. and W.M. Lewis. 1989. Zooplankton abundance in the lower Orinoco River, Venezuela. *Limnology and Oceanography* **34**(2): 397-409.
- Shin, J.K. and Y. Park. 2018. Spatiotemporal and longitudinal variability of hydro-meteorology, basic water quality and dominant algal assemblages in the eight weir pools of regulated river (Nakdong). *Korean Journal of Ecology and Environment* **51**(4): 268-286.
- Shin, Y.H. and P.Y. Julien. 2011. Effect of flow pulses on degradation downstream of Hapcheon Dam, South Korea. *Journal of Hydraulic Engineering* **137**(1): 100-111.
- Smirnov, N.N. and B.V. Timms. 1983. A revision of the Australian Cladocera (Crustacean). *Records of the Australian Museum Supplement* **1**: 1-132.
- Vandysh, O.I. 2004. Zooplankton as an indicator of the state of lake ecosystems polluted with mining wastewater in the Kola Peninsula. *Russian Journal of Ecology* **35**(2): 110-116.
- Walks, D.J. and H. Cyr. 2004. Movement of plankton through lake-stream systems. *Freshwater Biology* **49**(6): 745-759.
- Yeongsan and Seomjin River Systems Management Committee. 2018. Aquatic Ecosystem Monitoring in Weirs of the Yeongsan River.
- Yeongsan and Seomjin River Systems Management Committee. 2019a. Aquatic Ecosystem Monitoring in Weirs of the Yeongsan River.
- Yeongsan and Seomjin River Systems Management Committee. 2019b. Survey on Lake Environment in the Yeongsan and Seomjin River Basins.
- Yeongsan and Seomjin River Systems Management Committee. 2020. Survey on Lake Environment in the Yeongsan and Seomjin River Basins.
- Yeongsan River Basin Environmental Office. 2020. Survey on Lake Environment in the Yeongsan and Seomjin River Basins.
- Yoon, T.K., T.I. Yoon, C. Gyun and S.J. Park. 2000. The application of URC process for water quality management of an artificial eutrophicated lake. *Journal of Korean Society of Environmental Engineers* **22**(11): 2025-2036.