

Original article

하천-호수 복합시스템에서 청수현상 발생 특성

심연보 · 변명섭¹ · 김재현 · 유순주¹ · 임종권^{1,*} · 황순진*

건국대학교 환경보건과학과, ¹국립환경과학원 한강물환경연구소

Behavior of Clear-water Phase in Hybrid Water System with Fluvial and Lacustrine Characteristics. *Youn-Bo Sim* (0000-0003-2317-8146), *Myeong-Seop Byeon*¹ (0000-0003-0997-2415), *Jae-Hyun Kim* (0000-0003-3782-4356), *Soon-Ju Yoo*¹ (0000-0002-1860-131X), *Jong-Kwon Im*^{1,*} (0000-0003-3994-5127) and *Soon-Jin Hwang** (0000-0001-7983-5036) (Department of Environmental Health Science, Sanghuh College of Life Sciences, Konkuk University, Seoul 05029, Republic of Korea; ¹Han River Environment Research Center, National Institute of Environmental Research, Yangpyeong 12585, Republic of Korea)

Abstract The clear-water phase (CWP) is a notable limnological phenomenon in freshwater systems caused by predatory interactions between large filter-feeding zooplankton and phytoplankton. However, the mechanisms and factors that influence the extent of CWP, particularly in complex water systems with both fluvial and lacustrine characteristics, remain poorly understood. The present study evaluated CWP occurrence patterns at different sites in a large reservoir located in a temperate monsoon region (Lake Paldang, Korea); the relationships among factors associated with CWP occurrence, such as transparency, zooplankton diversity, and chlorophyll *a* concentration were investigated. Transparency exhibited significant correlations with precipitation and retention time, as well as the relative abundance of zooplankton ($p < 0.01$), suggesting that a change in the retention time due to precipitation can alter CWP. Data collected before and after CWP occurrence were analyzed using paired *t*-test to determine variations in CWP occurrence based on the water system characteristics. The results demonstrated that various factors were associated with CWP occurrence in the fluvial-type and lacustrine-type sites. The correlation between zooplankton biomass and transparency was stronger in the lacustrine-type sites than in the fluvial-type sites. The lacustrine-type sites, where cladoceran emergence is common and is associated with long retention times, favored CWP occurrence. The results suggest that lacustrine-type sites, which are conducive to zooplankton development and have relatively long retention times, enhance CWP occurrence. Furthermore, CWP occurrence was notable in spring, and the present study revealed that site-specific CWP could occur throughout the year, regardless of the season.

Key words: clear water phase, Cladocera, reservoir, climate condition

서론

Manuscript received 30 November 2021, revised 13 December 2021, revision accepted 13 December 2021

* Corresponding author: Tel: +82-2-450-3748, Fax: +82-2-456-7240

E-mail: sjhwang@konkuk.ac.kr

Tel: +82-31-770-7271

E-mail: limjk80@korea.kr

청수기(靑水期)는 일반적으로 온대지역의 호수 내에서 봄기간에 식물플랑크톤의 천이에 의해 발생한다. 청수기 동안에는 물의 투명도가 증가하며, 이는 동물플랑크톤 현

© 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.

존량 증가와 식물플랑크톤 현존량의 감소와 동반되어 나타난다(Droscher *et al.*, 2008). 청수기는 빛, 수온, 영양염류 그리고 플랑크톤과 포식자와의 상호관계를 통해 발생하며 (Sommer *et al.*, 1986), 특히 수심이 얇은 호수는 빛의 투과량이 상대적으로 많아 식물플랑크톤의 빠른 증가를 조장하여 청수현상 발생과 밀접하게 나타난다(Lund, 1950; Talling, 1971, 1993; Maberly *et al.*, 1994).

식물플랑크톤은 다양한 크기와 모습으로 발생하며, 동물플랑크톤에 의한 섭식은 주로 크기에 따라 구분한다. 섭식이 선호되는 작은 크기의 세포들이 주로 발생하게 되면 여과섭식을 하는 지각류(Cladocera)의 생물량을 증가시켜 청수현상을 발생시킬 수 있다(Lampert, 1987; George *et al.*, 1990, 2000; Hambright *et al.*, 2007). 이로 인해 Chl-*a*와 동물플랑크톤 생물량의 관계는 반비례한다. 초여름에 청수현상이 주로 발생하는 영국의 Windermere, Esthwaite Water, Blelhan Tarn 호수에서 조사결과, 식물플랑크톤의 현존량이 최저일 때 동물플랑크톤은 주로 지각류 물벼룩(*Daphnia*)의 현존량이 최대로 나타났고, 과거 20년간의 누적데이터 분석에서 총식물플랑크톤 밀도와 대형 동물플랑크톤 밀도 간 음의 상관관계가 높은 것으로 나타났다(Talling, 2002, 2003). 청수현상의 발생은 수환경에서 영양염류 농도의 변화와 식물플랑크톤 군집변화로 이어지며, 지속 기간은 수체가 맑아지는 정도에 따라 매우 짧은 시간 동안 발생되기도 하지만 2주 이상 지속되기도 한다(Lampert *et al.*, 1986). 또한 부영양호에서 청수기는 늦은 봄 또는 초여름에 주로 발생한다(Arndt and Nixdorf, 1991).

온대지역에 위치한 팔당호는 계절성 몬순기후의 영향을 크게 받으며, 여름 장마기간의 집중호우와 태풍 그리고 봄과 가을의 갈수현상이 나타난다. 이러한 현상에 의해 환경요인들은 지속기간이나 크기, 빈도에 따라 유량과 탁도의 급격한 증가, 수층의 혼합 등을 유발시켜 수환경 및 동·식물플랑크톤의 생물량에 영향을 미칠 수 있다(Thornton *et al.*, 1990; Winston and Criss, 2002). 팔당호는 유역 면적에 비해 저수 면적이 작고 평균 수리학적 체류시간이 2.6~9.0일로 짧아 수층별 수질의 차이가 크지 않은 하천형 호수라는 특성을 보인다(Kim and Hong, 1992; Kim *et al.*, 2002). 즉, 강우량의 정도에 따라 유량이 풍부한 여름철에는 체류시간이 짧아 하천의 성격을 띠며, 유량이 적은 갈수기 또는 저수기에는 호수의 성격을 띠는 이중적 복합수계의 특성을 가지고 있다(Kong, 1977). 또한 팔당호는 유량이 서로 다른 남한강, 북한강, 경안천 등 세 개 하천이 합류되어 형성된 인공호로 유입하천과 호수의 경계가 명

확하지 않으며, 남한강과 북한강 중·상류에 댐이 위치하고 있어 상류 댐의 수문조절에 의해 유속과 유량이 크게 변화하고 팔당호에 영향을 미친다(Park *et al.*, 2004). 이러한 인공호에서의 수질 및 생물학적 특성은 일차적으로 수문학적 현상에 의해 영향을 받으며(Hwang *et al.*, 2016, 2017), 유입하천의 특성에 따라서 수환경이 변화를 받는다.

자연호수에서의 청수기 현상의 발생은 일반적으로 봄 동안에 여과섭식성 동물플랑크톤의 성장과 발달에 의한 식물플랑크톤 생물량의 감소가 직접적인 원인으로 나타나고 있으나(Lampert *et al.*, 1986; Sommer *et al.*, 1986), 하천형 특성의 수리·수문학적 영향을 받는 인공호에서의 청수현상에 대해서는 거의 연구된 바가 없다. 복합적인 수리특성을 가지고 있는 팔당호는 시기와 장소에 따라 호수 내에서도 청수현상 발생의 차이를 보일 것으로 예상되며, 그 특성도 다를 것으로 예상된다. 본 연구는 하천과 호수의 이중적인 복합수계의 특성을 보여주는 팔당호 내의 7개 지점을 대상으로 수리·수문학적 요인과 이화학적 요인, 생물학적 요인의 관계 분석을 통해 청수기 발생양상과 원인을 파악하여 복합적 수계의 청수기 특성을 이해하고자 수행하였다.

재료 및 방법

1. 조사 지점 및 조사시기

조사대상 호수인 팔당호는 남한강, 북한강 및 경안천이 합류되어 호수를 이루는 인공호로 수력발전, 하천유지용수 공급, 광역 상수원 기능 등 다목적 댐호이다. 유역의 총면적은 약 23,800 km²이고 남한강(60%), 북한강(37%), 경안천(3%)의 유역을 포함하고 있으며, 수표면적은 36.5 km²로 유역면적 대비 저수면적의 비가 652에 달해 오염물질 유입에 취약한 구조이다. 평균수심은 6.4 m이고, 최대수심은 22 m로 하천의 유입부에서 얇고 댐 앞부분에서 가장 깊으며 평균 수리학적 체류시간(HRT)은 약 7일로 짧게 나타난다(HRERC, 2016).

조사지점은 수심이 가장 깊고 호수형의 특성을 띠는 팔당댐앞(St. 1), 유입하천으로 하천형의 성격을 띠는 남한강수역(St. 2, 3), 북한강수역(St. 4, 5), 상대적으로 작은 하천이며, 수심이 얇은 경안천수역(St. 6, 7)을 선정하였으며, 2015년 3월부터 11월까지 주 1회(결빙기 제외) 조사하였다(Fig. 1). 조사지점별 평균수심은 St. 1은 21.2 m였으며, St. 2는 9.5 m, St. 3은 9.7 m, St. 4는 9.1 m, St. 5는 9.3 m, St. 6은 5.9 m, St. 7은 3.4 m로 측정되었다(Fig. 1).

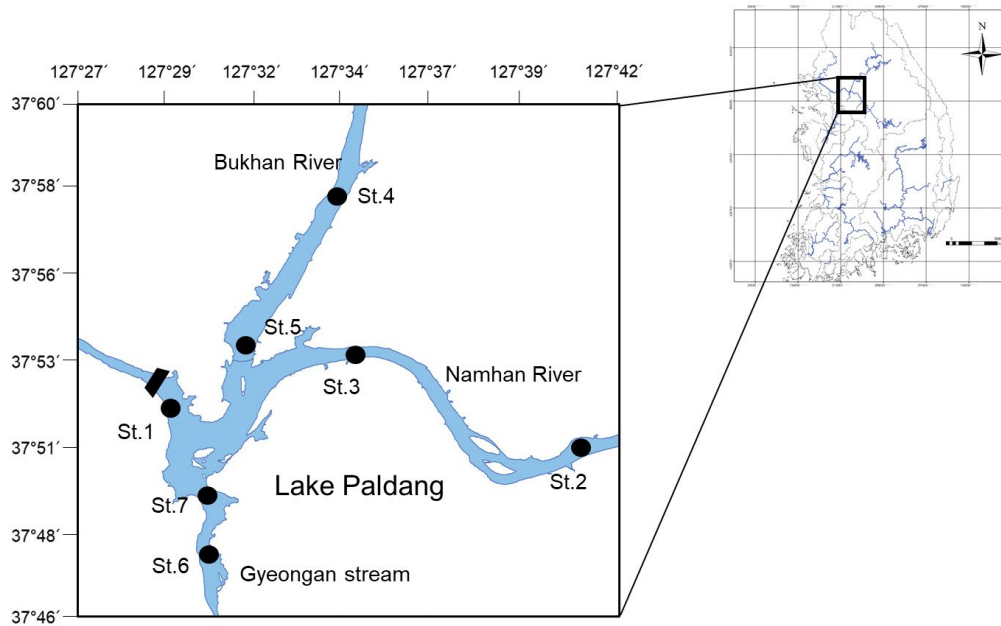


Fig. 1. Map showing the location of Lake Paldang and the study sites including St. 1: Lake Paldang, St. 2, 3: Namhan River, St. 4, 5: Bukhan River, and St. 6, 7: Gyeongan stream.

2. 강수량 및 수문자료 조사

강수량은 기상청 양평기상대에서 관측한 일 자료를 사용하였고, 유입량, 방류량 및 수위 등 수문자료는 국가수자원관리종합정보시스템 (Korea Water Management Information System, WAMIS)의 자료를 이용하였다. 수집한 기초자료는 요인별로 결측 또는 이상치를 제외하였고, 최종적으로 확인된 자료를 분석하였다.

3. 시료채집 및 분석

1) 이화학적 요인

매주 조사 시에 이화학적 요인인 수온, pH, 용존산소 (DO), 전기전도도 (EC), 탁도는 현장 수질측정기 (YSI-EXO, YSI Inc., Yellow Springs, OH, USA)를 이용하여 측정하였으며, 투명도는 지름 20 cm의 투명도판 (Secchi disk Limnological Standard, Wildco., Yulee, FL, USA)을 이용하여 현장에서 측정하였다. 수질분석을 위해 표층수를 채수하여 실험실로 운반한 후 생물학적산소요구량 (BOD), 화학적산소요구량 (COD), 부유물질 (SS), 총질소 (TN), 총인 (TP), 용존성총질소 (DTN), 암모니아성질소 ($\text{NH}_3\text{-N}$), 질산성질소 ($\text{NO}_3\text{-N}$), 용존총인 (DTP), 인산염인 ($\text{PO}_4\text{-P}$), 클로로필-*a* (Chl-*a*) 항목을 수질오염공정시험기준에 따라 분석하였다 (MOE, 2014).

2) 생물학적 요인

동물플랑크톤은 네트 (망목 $60\ \mu\text{m}$)를 이용하여 10 L를 여과하여 채집하였고, 채집된 시료는 폴리에틸렌 용기에 담아 중성포르말린용액 (20%)을 이용하여 최종농도 5%로 고정하였다. 고정된 시료는 24시간 이상 침전시킨 후에 상등액을 제거하고 최종 시료의 양을 10 mL로 맞추어 검경하였다. 식물플랑크톤은 표층수를 채수하여 Lugol's solution (최종 농도 2%)을 첨가 후 고정하였으며, 시료는 counting chamber 위에서 30분 동안 침전시킨 후 검경하였다. 동·식물플랑크톤의 정량 및 정성분석은 Sedgwick-Rafter counting chamber를 이용하여 위상차현미경 (Nikon eclipse, Nikon, Tokyo, Japan)에서 $\times 100 \sim \times 1,000$ 배로 검경하였으며, 동물플랑크톤 개체수 단위는 리터당 개체수 ($\text{individuals L}^{-1}$)로 환산하였고, 식물플랑크톤 세포수 단위는 mL당 세포수 (cells mL^{-1})로 환산하였다. 동물플랑크톤 종동정을 위해 윤충류는 Segers (1995a, b), 요각류는 장 (2005), 지각류는 정 (2014)을 참조하였으며, 식물플랑크톤은 John *et al.* (2002), Wehr *et al.* (2003)을 참조하였다.

4. 청수기 발생 판단

팔당호에서 지점별로 청수기 발생을 파악을 위해 투명도, Chl-*a*, 동물플랑크톤 현존량의 변화를 분석하였다. 발생조건은 Droscher *et al.* (2008)의 청수기 정의에 따른 투

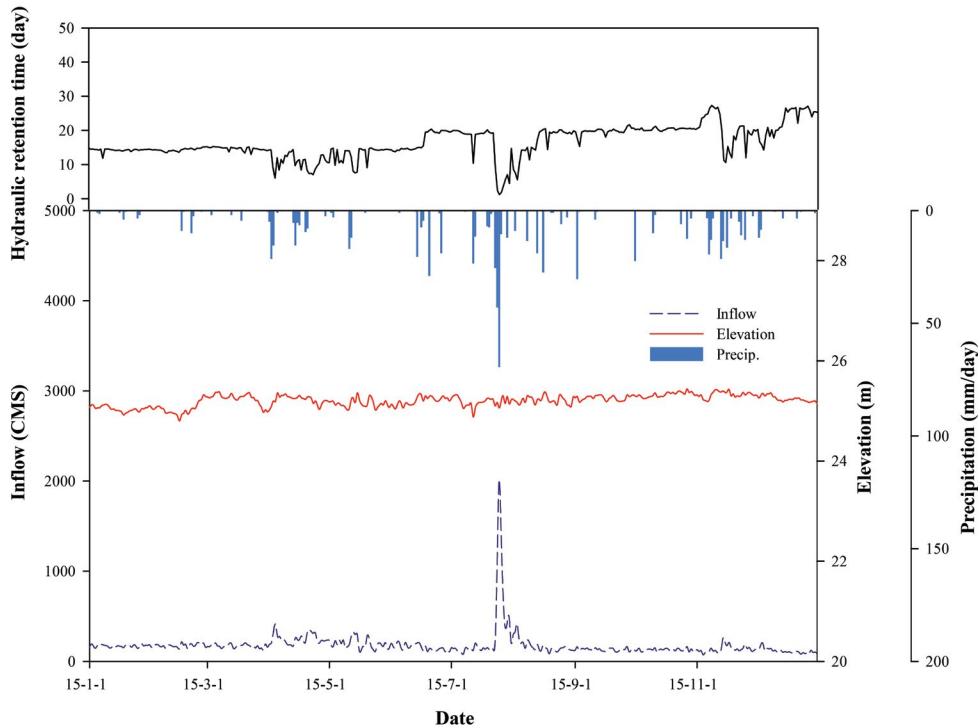


Fig. 2. Seasonal changes in the inflow, elevation, precipitation, and HRT for Lake Paldang from January to December 2015.

명도 증가, Chl-*a*의 감소, 동물플랑크톤 현존량의 증가가 2주간 지속되는 시기를 청수기 발생시기로 판단하였다.

5. 통계분석

팔당호에서 청수현상 전후의 차이를 분석하기 위해 지점별로 Paired *t*-test를 실시하였으며, 통계학적 유의성은 $p < 0.05$ 로 하였다. 또한, 청수현상 발생시 이화학적요인과 생물요인과의 관계를 알아보기 위해 상관분석 (Pearson's correlation test)을 실시하였고, 전체적인 통계 처리는 SPSS 20 (IBM Corp., Armonk, NY, USA)를 이용하여 실시하였으며, 유의성은 $p < 0.05$ 로 확인하였다.

결과 및 고찰

1. 강우 및 수문학적 특성

2015년 1월~2015년 12월까지 팔당호 유역의 총 강수량은 800.3 mm였으며, 2014년부터 지속된 강우 부족현상이 지속되는 추세를 보였다. 조사기간 내 여름철(6~8월) 강수량은 376.5 mm로 총 강수량의 47.0%가 여름철에 집중되었다(Fig. 2).

팔당호의 수위는 조사기간 동안 평균 해발 25.2 m였으며, 최대 25.4 m, 최소 24.8 m로 수위의 변동은 크지 않았으며, 유입량과 방류량 또한 각각 평균 176.3 CMS ($m^3 s^{-1}$), 176.8 CMS로 수문조절에 의해 항상 일정한 수위를 유지하고 있는 것으로 나타났다(Fig. 2).

조사기간 동안 팔당호의 평균 체류시간은 16.6일이었으며, 봄철(3~5월) 12.8일, 여름철(6~8월) 16.1일, 가을철(9~11월) 20.1일, 겨울철(12~2월) 17.2일로 다른 계절에 비해 봄철의 체류시간이 가장 짧았다(Fig. 2). 조사기간 내 봄철 체류시간의 감소는 장마 전 방류량 증가에 의한 결과로 판단되었으며, 이후 여름철 체류시간의 증가는 장마기간 중 상대적으로 적은 강우로 인해 팔당호로 유입되는 유입량이 줄어들어 체류시간이 증가한 것으로 나타났다. 또한 팔당호의 체류시간은 과거에는 2.6~9.0일로 짧은 것으로 나타났으나, 2014년(790.1 mm)부터 이어진 적은 강수량으로 인한 갈수현상으로 인해 상류 댐들의 방류량이 감소하여 팔당호로 유입되는 유입량이 줄어들어 체류시간이 증가한 것으로 나타났다.

체류시간은 윤충류 현존량 및 윤충류, 지각류, 요각류 점유율과 유의한 상관관계를 보였으나, 이들 간의 상관계수는 낮게 나타났다. 이는 몬순기후 지역에 속하는 팔당호에서 집중강우에 의해 수체의 수리학적 변화가 일어나

Table 1. Correlation matrix showing coefficients between factors affecting the clear water phase in Lake Paldang.

Variables	TO-Ind	RO-Ind	CL-Ind	CO-Ind	RO-RA	CL-RA	CO-RA	Chl- <i>a</i>	TRAN	TUR	WTE	TN	TP	HRT	Rainfall
TO-Ind	1														
RO-Ind	0.914**	1													
CL-Ind	0.380**	0.112	1												
CO-Ind	0.492**	0.196**	0.404**	1											
RO-RA	0.290**	0.525**	-0.380**	-0.306**	1										
CL-RA	-0.149*	-0.334**	0.553**	0.033	-0.732**	1									
CO-RA	-0.251**	-0.397**	-0.008	0.428**	-0.657**	0.024	1								
Chl- <i>a</i>	0.181**	0.162**	0.011	0.286**	0.081	-0.202*	0.126*	1							
TRAN	-0.054	-0.102	0.191**	-0.120*	-0.171**	0.396**	-0.218*	-0.466**	1						
TUR	-0.038	-0.065	-0.085	0.146**	-0.042	-0.084	0.143*	0.289**	-0.522**	1					
WTE	0.178**	0.088	0.388**	0.250**	-0.145*	0.250**	0.000	0.440**	-0.013	0.214**	1				
TN	0.043	0.091	-0.191**	-0.059	0.221**	-0.303**	-0.044	-0.135*	-0.233**	0.132*	-0.615**	1			
TP	-0.028	-0.059	0.055	0.099	-0.067	-0.002	0.102	0.253**	-0.403**	0.689**	0.237**	0.275**	1		
HRT	-0.123*	-0.141*	0.030	0.035	-0.195**	0.154**	0.173**	-0.008	0.185**	-0.209**	0.104	-0.687**	-0.377**	1	
Rainfall	-0.147*	-0.144*	0.007	-0.085	-0.068	0.094	0.019	-0.084	-0.217**	0.606**	0.131*	0.116	0.578**	-0.160**	1

* $p < 0.05$, ** $p < 0.01$, WTE: water temperature; TN: total nitrogen; TP: total phosphorus; Chl-*a*: chlorophyll-*a*; TRAN: transparency; TUR: turbidity; HRT: hydraulic retention time; RO: rotifera; CL: cladocera; CO: copepoda; TO: total; Ind: individuals; RA: relative abundance.

며 (Keckeis *et al.*, 2003), 상류 댐의 방류로 인해 체류시간이 감소하게 되어 동물플랑크톤이 flush-out되어 현존량에 영향을 미치는 것으로 판단된다 (Baranyi *et al.*, 2002; Muylaert and Vyverman, 2006). 그러나 체류시간과 영양염류(TN, TP)의 관계는 매우 유의하게 나타나 체류시간이 긴 호수형 특성을 가진 시기 동안 영양염 농도가 높음을 반영하였다. 또한 강우량과 총인의 관계가 높은 양의 상관성을 보인 것은 보수성의 (conservative) 특성을 가진 상류로부터 인이 토사와 함께 유입되어 나타난 결과이다. 투명도는 강우량 및 체류시간과 유의한 상관관계를 나타내 강우로 인한 체류시간의 변화가 청수현상을 종료시킬 수 있음을 반영하였다 (Fig. 2, Table 2).

2. 청수기 발생양상

조사기간 중 청수기 발생에 해당하는 Chl-*a*가 감소하며, 투명도와 동물플랑크톤 현존량이 증가하는 조건에 부합되는 기간은 조사지점마다 상이하였으며, 발생빈도와 강도가 다르게 나타났다. 청수기 발생빈도는 수심이 다른 지점에 비해 깊은 댐앞 지점인 St. 1은 2주 이상 8회, 3주 이상 1회, 호소의 성격이 강한 남한강 수역인 St. 2는 2주 이상 7회, St. 3은 2주 이상 5회, 하천의 성격이 강한 북한강 수역인 St. 4는 2주 이상 3회, St. 5는 5회, 수심이 비교적 얕고 체류시간이 긴 경안천 수역인 St. 6은 2주 이상 4회, 3주 이상 1회, St. 7은 2주 이상 8회로 나타났다 (Fig. 3).

청수기 발생은 St. 1, 2, 7에서 7회 이상으로 정체된 특성을 가진 지점에서 주로 발생하였다. 청수기는 주로 늦봄에서 초여름과 가을에 발생하였으며, 여름철에는 발생이 적은 것으로 나타났다. 이는 여름철에 동물플랑크톤이 온도가 상승함에 따라 지각류보다 세대교번이 빠른 윤충류가 우점하면서 청수현상을 감소시키는 것으로 판단된다 (Işkin *et al.*, 2020).

청수기 발생시 투명도는 남한강수역인 St. 3에서 평균 1.3 m 증가로 가장 높았으며, St. 6 (0.8), St. 5, 7 (0.6), St. 1 (0.5), St. 2 (0.4), St. 4 (0.3) 순으로 나타났다. 수심대비 투명도 증가는 St. 7에서 18.0%, St. 6 (13.3), St. 3 (13.6) 순으로 유속이 느린 정체수역에서 높게 나타났다.

Chl-*a*는 St. 3에서 평균 28.7 mg m⁻³ 감소로 가장 높았으며, St. 6 (18.6), St. 2 (15.4), St. 7 (11.6), St. 1 (7.7), St. 5 (4.8), St. 4 (2.1) 순으로 투명도 감소와 유사하게 나타났으며, 투명도와 Chl-*a*는 상관관계분석에서 $r = -0.466$ ($p < 0.01$)로 매우 유의한 상관성을 보였다 (Fig. 3, Table 2).

동물플랑크톤 현존량의 변화는 경안천수역 St. 6에서 평균 534.3 Ind L⁻¹ 증가로 가장 높았으며, St. 5는 430.9 Ind

Table 2. Data for paired *t*-test on variable factors before and after the clear water phase in lake Paldang.

Parameters (unit)	Site	Before	After	t	p
Transparency (m)	St. 1	2.1 ± 1.0	2.6 ± 1.3	-5.287	0.00114*
	St. 2	1.1 ± 0.3	1.5 ± 0.3	-5.014	0.00242*
	St. 3	1.7 ± 1.4	3.0 ± 1.9	-3.535	0.02411*
	St. 4	2.9 ± 1.2	3.2 ± 1.1	-3.780	0.06341
	St. 5	1.6 ± 0.4	2.2 ± 0.3	-8.485	0.00106*
	St. 6	0.9 ± 0.3	1.7 ± 0.8	-2.720	0.04178*
	St. 7	1.2 ± 0.4	1.8 ± 0.6	-3.300	0.01311*
Total zooplankton (Ind. L ⁻¹)	St. 1	132.6 ± 62.3	246.9 ± 129.0	-4.005	0.00515*
	St. 2	240.7 ± 208.4	492.4 ± 357.4	-3.527	0.01242*
	St. 3	265.7 ± 275.7	546.6 ± 415.1	-4.062	0.01532*
	St. 4	139.4 ± 142.0	356.8 ± 449.9	-1.220	0.34677
	St. 5	407.1 ± 282.9	838.0 ± 758.1	-1.794	0.14722
	St. 6	267.3 ± 279.7	801.6 ± 582.9	-2.916	0.03317*
	St. 7	195.8 ± 177.0	466.4 ± 345.2	-2.995	0.02007*
Chlorophyll- <i>a</i> (mg m ⁻³)	St. 1	18.2 ± 12.9	10.5 ± 8.1	3.652	0.00816*
	St. 2	31.9 ± 17.0	16.4 ± 6.9	2.576	0.04200*
	St. 3	39.0 ± 28.7	10.3 ± 9.9	2.863	0.04578*
	St. 4	9.1 ± 3.5	7.0 ± 3.2	2.097	0.17098
	St. 5	18.8 ± 12.3	14.0 ± 13.2	1.934	0.12528
	St. 6	36.0 ± 19.0	17.4 ± 17.1	3.662	0.01456*
	St. 7	22.8 ± 20.2	11.2 ± 7.6	2.548	0.03820*
Hydraulic retention time (d)	St. 1	17.5 ± 3.5	18.6 ± 3.4	-1.643	0.14440
	St. 2	16.9 ± 4.1	18.1 ± 3.7	-1.180	0.28278
	St. 3	14.5 ± 3.5	15.9 ± 2.8	-1.329	0.25455
	St. 4	15.4 ± 4.5	17.3 ± 3.4	-2.274	0.15079
	St. 5	12.9 ± 4.5	16.0 ± 5.2	-3.389	0.02755*
	St. 6	14.9 ± 4.8	15.6 ± 3.8	-1.075	0.33169
	St. 7	15.6 ± 4.7	16.5 ± 4.5	-1.228	0.25898

L⁻¹, St. 3은 280.8 Ind L⁻¹, St. 7는 270.7 Ind L⁻¹ 순으로 호소형 특성을 가진 지점에서 크게 증가하는 것으로 나타났다. 여과섭식을 하여 청수현상과 밀접한 관련이 있는 것으로 알려진 지각류 또한 St. 6에서 238.6 Ind L⁻¹ 증가로 가장 높았으며, St. 3는 86.3 Ind L⁻¹, St. 7은 83.8 Ind L⁻¹ 순으로 나타났다. 지각류의 경우 현존량($r=0.388$)과 점유율($r=0.250$) 모두 수온과 유의한 양의 상관관계($p<0.01$)를 보였으며, 이는 봄철 수온의 상승이 지각류의 초기 발생과 성장을 촉진하고 포식자의 출현시기를 피해 청수현상 발생에 영향을 줄 수 있었을 것으로 판단되었다(Arfè *et al.*, 2019).

청수현상 발생조건에 해당하는 투명도, Chl-*a*, 동물플랑크톤 현존량의 변화는 경안천수역(St. 6, 7)과 남한강수역

(St. 2, 3)에서 증가와 감소의 폭이 큰 것으로 나타났다. 남한강수역은 북한강수역과 같이 하천형의 특성을 띠는 것으로 알려져 있으나 Sim *et al.* (2018)에서 2014년부터 이어진 갈수기로 상류댐으로부터 유입량이 감소하면서 하천형 특성을 유지하는 북한강수역에 비해 남한강과 경안천수역의 체류시간이 증가함에 따라 호소형의 특성을 보여 청수현상 발생에 더 적합한 환경조건을 보인 것으로 사료된다.

3. 청수기 발생시 특성

청수현상 발생시 투명도와 환경요인 및 생물학적 요인과의 상관성을 파악하기 위하여 Pearson's correlation test

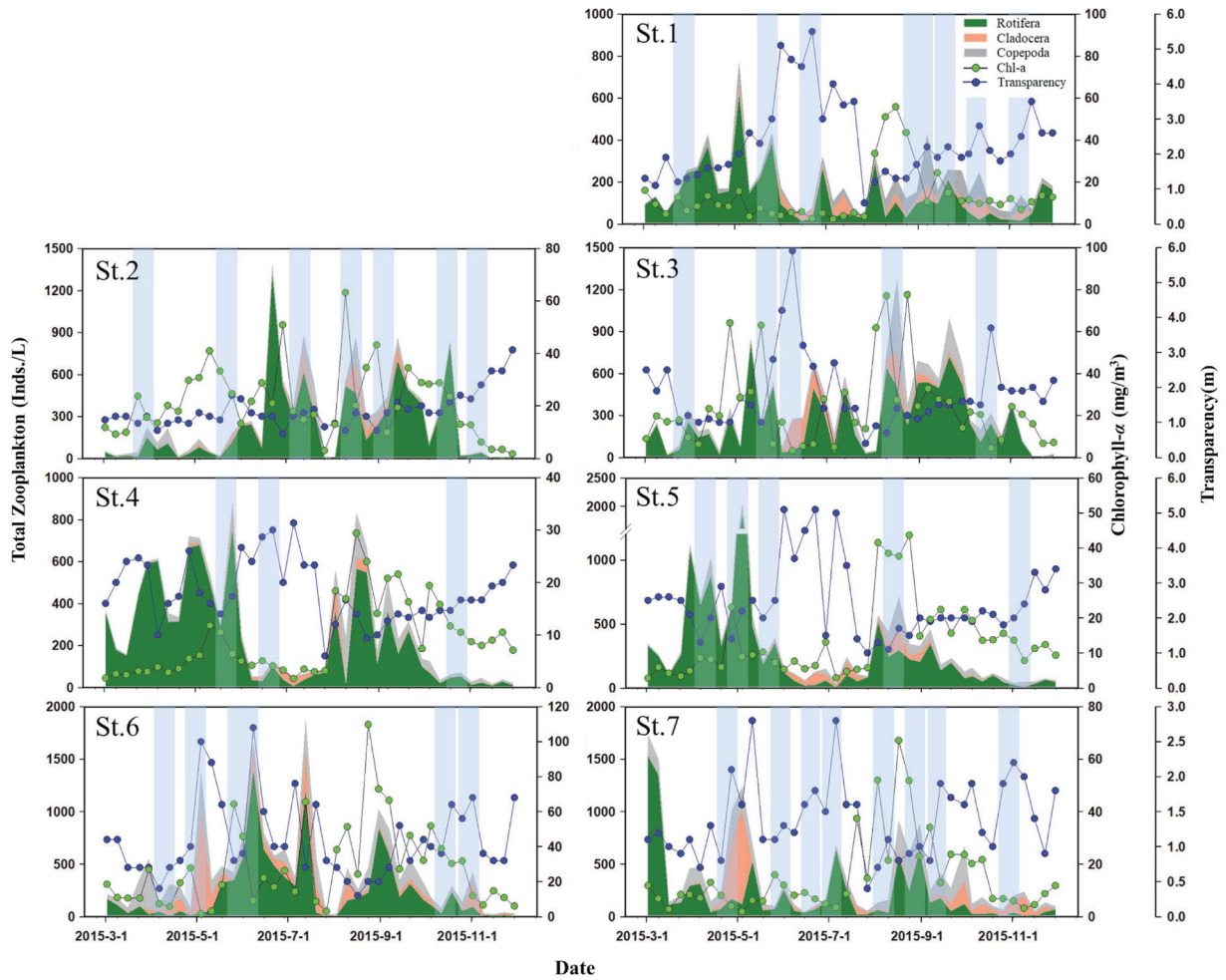


Fig. 3. Environmental variables showing significant differences among the sites in Lake Paldang (St. 1), Namhan River (St. 2, 3), Bukhan River (St. 4, 5) and Gyeongan stream (St. 6, 7) from March to November 2015.

를 실시하였다. 또한, 지점별 청수기 전후의 차이를 확인하기 위해 Paired *t*-test를 실시하였다. 팔당호에서 청수기 발생 판단요인인 투명도, Chl-*a*, 동물플랑크톤 현존량은 요인간에 유의한 상관관계를 보였으며, 탁도와 투명도는 높은 상관관계 ($r = -0.522, p < 0.01$)를 나타냈다. 또한, 청수기 전후 비교에서도 투명도와 Chl-*a*는 북한강유역 지점 (St. 4, 5)을 제외한 전 지점에서 유의한 차이 ($p < 0.05$)를 나타냈으며, 총동물플랑크톤 현존량의 경우도 북한강유역 St. 4 ($p = 0.122$), St. 5 ($p = 0.147$)를 제외한 전지점에서 유의한 차이 ($p < 0.05$)를 보였다. St. 4, 5 지점은 북한강 유역으로 상류 댐의 수문조절에 의해 유속과 유량이 크게 영향을 받는 지점이며 (Park *et al.*, 2004), 체류시간 또한 청수기 전후에 유의한 차이 ($p < 0.05$)를 나타냄에 따라 하천의 특성을 보여 동물플랑크톤의 현존량에 영향을 준 것으로 판단된

다 (Tables 1, 2).

총동물플랑크톤 현존량은 투명도와 유의한 상관관계 ($r = -0.054, p > 0.05$)를 나타내지 않았으며, 이는 윤충류 점유율과 투명도와의 유의한 음의 상관관계 ($r = -0.171, p < 0.01$)가 봄철 윤충류와 Chl-*a*의 증가와 상관관계 ($r = 0.162, p < 0.01$)를 보인 것과 같은 결과로 판단된다. 이는 팔당호에서 You *et al.* (2012)와 Sim *et al.* (2018)의 윤충류 현존량 증가와 Chl-*a* 증가의 관련성과 같은 결과로 사료된다. 동물플랑크톤 중 여과섭식을 하는 지각류와 청수현상은 연관성이 높은 것으로 알려져 있으며 (Droscher, 2008), 총동물플랑크톤 현존량은 투명도와 상관관계가 유의하지 않았지만, 지각류의 현존량 ($r = 0.191$)과 점유율 ($r = 0.396$)은 유의한 상관성 ($p < 0.01$)을 보여 과거 연구에서 지각류 (*Daphnia*)가 청수현상을 일으키는 중

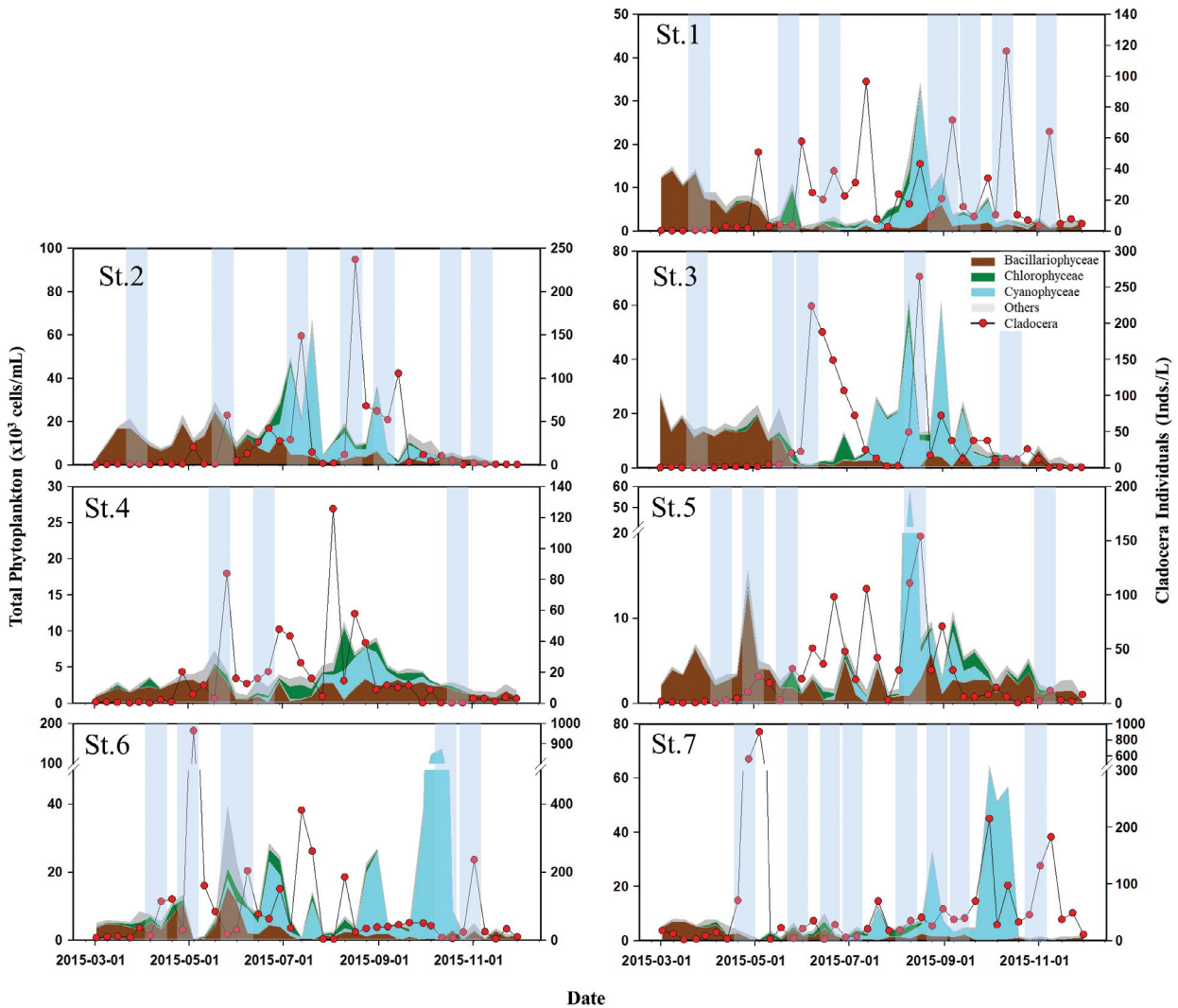


Fig. 4. Relationship between phytoplankton taxa and Cladocera among the sites in Lake Paldang (St. 1), Namhan River (St. 2, 3), Bukhan River (St. 4, 5) and Gyeongan stream (St. 6, 7) from March to November 2015.

요한 원인 (Elser and Goldman, 1990; Jeppesen *et al.*, 2003; Matsuzaki *et al.*, 2020)이라는 연구와 같은 결과로 사료된다 (Tables 1, 2).

팔당호에서 청수현상 발생과 밀접한 관계를 가지는 지각류의 출현은 *Daphnia galeata*, *D. longispina*, *D. pulex*, *Diaphanosoma brachyurum*, *Bosmina longirostris*, *Bosminopsis deitersi* 등이 우점 및 아우점하였으며, 대부분의 지점 및 시기에서 *D. galeata*, *B. longirostris*가 우점하는 것으로 나타났다. 특히, *D. galeata*, *B. longirostris*는 경안천 수역 (St. 6, 7)과 남한강수역 (St. 4, 5)에서 청수현상 발생시 크게 우점하면서 출현하여 청수현상 발생과 밀접한 것으로 판단되었다 (Figs. 3, 4, Table 3)

투명도와 탁도는 영양염류와 유의한 상관성 ($p < 0.05$)을 나타냈으며, 특히 총인 (TP)은 투명도 ($r = -0.403$) 및 탁도 ($r = 0.689$)와 높은 상관성 ($p < 0.01$)을 보여 청수기 발생시 생물체에 포함된 입자성 영양염 농도가 감소하는 것으로 나타났다. 청수현상과 밀접한 투명도와 영양염류의 상관관계는 Winder and Schindler (2004)에 의하면 높은 총인농도는 봄철 식물플랑크톤 발생시기와 청수기 발생을 억제한다고 하고 있으나, Thackeray *et al.* (2013)은 높은 총인농도는 식물플랑크톤 발생시기를 앞당기고 이를 먹이원으로 하는 *Daphnia*의 증가를 야기할 수 있는 가능성을 제시하였다. 한편, Luecke *et al.* (1990)은 낮은 온도와 높은 먹이가용성이 주어졌을 때 *Daphnia* 현존량은 빠르게 증가할

Table 3. Dominant and subdominant cladocera species at different study sites in Lake Paldang from March to November 2015.

Site	Month											
	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Oct	Sep	Nov			
St.1	Dominant	<i>Bosmina longirostris</i>	<i>Bosmina longirostris</i>	<i>Bosmina longirostris</i>	<i>Daphnia galeata</i>	<i>Daphnia galeata</i>	<i>Bosmina longirostris</i>	<i>Daphnia galeata</i>	<i>Daphnia galeata</i>	<i>Daphnia galeata</i>	<i>Daphnia galeata</i>	<i>Daphnia galeata</i>
	Subdominant	–	<i>Daphnia galeata</i>	<i>Daphnia galeata</i>	<i>Bosmina longirostris</i>	<i>Diaphanosoma brachyurum</i>	<i>Diaphanosoma brachyurum</i>	<i>Bosmina longirostris</i>	<i>Daphnia longispina</i>	<i>Daphnia longispina</i>	<i>Daphnia longispina</i>	<i>Daphnia longispina</i>
St.2	Dominant	<i>Bosmina longirostris</i>	<i>Bosmina longirostris</i>	<i>Daphnia galeata</i>	<i>Bosmina longirostris</i>	<i>Diaphanosoma brachyurum</i>	<i>Diaphanosoma brachyurum</i>	<i>Ceriodaphnia reticulata</i>	<i>Diaphanosoma brachyurum</i>	<i>Daphnia galeata</i>	<i>Daphnia galeata</i>	<i>Daphnia galeata</i>
	Subdominant	<i>Leptodora kindtii</i>	<i>Daphnia galeata</i>	<i>Bosmina longirostris</i>	<i>Diaphanosoma brachyurum</i>	<i>Daphnia galeata</i>	<i>Bosmina longirostris</i>	<i>Bosmina longirostris</i>	<i>Daphnia galeata</i>	<i>Daphnia galeata</i>	<i>Bosminopsis deitersi</i>	<i>Bosminopsis deitersi</i>
St.3	Dominant	<i>Bosmina longirostris</i>	<i>Bosmina longirostris</i>	<i>Daphnia galeata</i>	<i>Daphnia galeata</i>	<i>Diaphanosoma brachyurum</i>	<i>Ceriodaphnia reticulata</i>	<i>Bosmina longirostris</i>	<i>Daphnia galeata</i>	<i>Daphnia galeata</i>	<i>Daphnia galeata</i>	<i>Daphnia galeata</i>
	Subdominant	–	–	<i>Bosmina longirostris</i>	<i>Bosmina longirostris</i>	<i>Daphnia galeata</i>	<i>Bosmina longirostris</i>	<i>Diaphanosoma brachyurum</i>	<i>Diaphanosoma brachyurum</i>	<i>Bosmina longirostris</i>	<i>Bosmina longirostris</i>	<i>Bosmina longirostris</i>
St.4	Dominant	<i>Bosmina longirostris</i>	<i>Bosmina longirostris</i>	<i>Daphnia galeata</i>	<i>Daphnia galeata</i>	<i>Daphnia galeata</i>	<i>Bosmina longirostris</i>	<i>Ceriodaphnia reticulata</i>	<i>Daphnia pulex</i>	<i>Daphnia galeata</i>	<i>Daphnia galeata</i>	<i>Daphnia galeata</i>
	Subdominant	<i>Daphnia longispina</i>	<i>Daphnia galeata</i>	<i>Bosmina longirostris</i>	<i>Bosmina longirostris</i>	<i>Bosmina longirostris</i>	<i>Daphnia galeata</i>	<i>Bosmina longirostris</i>	<i>Daphnia galeata</i>	<i>Bosmina longirostris</i>	<i>Bosmina longirostris</i>	<i>Bosmina longirostris</i>
St.5	Dominant	<i>Bosmina longirostris</i>	<i>Bosmina longirostris</i>	<i>Bosmina longirostris</i>	<i>Daphnia galeata</i>	<i>Daphnia galeata</i>	<i>Bosmina longirostris</i>	<i>Diaphanosoma brachyurum</i>	<i>Daphnia galeata</i>	<i>Daphnia galeata</i>	<i>Daphnia galeata</i>	<i>Daphnia galeata</i>
	Subdominant	<i>Daphnia galeata</i>	<i>Daphnia galeata</i>	<i>Daphnia galeata</i>	<i>Bosmina longirostris</i>	<i>Daphnia longispina</i>	<i>Daphnia galeata</i>	<i>Bosmina longirostris</i>	<i>Bosmina longirostris</i>	<i>Bosmina longirostris</i>	<i>Bosmina longirostris</i>	<i>Bosmina longirostris</i>
St.6	Dominant	<i>Daphnia galeata</i>	<i>Bosmina longirostris</i>	<i>Bosmina longirostris</i>	<i>Daphnia galeata</i>	<i>Diaphanosoma brachyurum</i>	<i>Diaphanosoma brachyurum</i>	<i>Daphnia galeata</i>	<i>Daphnia galeata</i>	<i>Daphnia galeata</i>	<i>Daphnia galeata</i>	<i>Daphnia galeata</i>
	Subdominant	<i>Bosmina longirostris</i>	<i>Daphnia galeata</i>	<i>Daphnia galeata</i>	<i>Daphnia longispina</i>	<i>Daphnia galeata</i>	<i>Diaphanosoma brachyurum</i>	<i>Daphnia galeata</i>	<i>Diaphanosoma brachyurum</i>	<i>Daphnia longispina</i>	<i>Daphnia longispina</i>	<i>Daphnia longispina</i>
St.7	Dominant	<i>Bosmina longirostris</i>	<i>Bosmina longirostris</i>	<i>Bosmina longirostris</i>	<i>Daphnia galeata</i>	<i>Daphnia galeata</i>	<i>Diaphanosoma brachyurum</i>	<i>Daphnia galeata</i>	<i>Daphnia galeata</i>	<i>Daphnia galeata</i>	<i>Daphnia galeata</i>	<i>Daphnia galeata</i>
	Subdominant	<i>Daphnia galeata</i>	<i>Daphnia galeata</i>	<i>Daphnia galeata</i>	<i>Daphnia longispina</i>	<i>Diaphanosoma brachyurum</i>	<i>Daphnia galeata</i>	<i>Bosmina longirostris</i>	<i>Daphnia longispina</i>	<i>Daphnia longispina</i>	<i>Daphnia longispina</i>	<i>Daphnia longispina</i>

수 있다고 제시하였다. 또한, Matsuzaki *et al.* (2020)은 수온이 낮을 때 총인이 식물플랑크톤의 발생시기와 생물량 증감에 영향을 미쳐 청수기 발생에 간접적으로 영향을 미친다고 보고하였다. 팔당호 내 전지점에서 식물플랑크톤 현존량은 지각류 (*Daphnia*, *Bosmina*)의 현존량에 따라 증가와 반복이 일어났으며, 특히 정체수역인 남한강수역 (St. 4, 5)과 수심이 얇은 경안천수역 (St. 6, 7)의 경우 녹조류 및 규조류의 현존량 증가 이후 *D. galeata*, *B. longirostris*의 현존량 증가와 함께 청수현상이 발생하는 것으로 나타났다. 이에 따라 팔당호에서의 청수기 발생은 봄철뿐만 아니라 연중 강우로 인한 영양염의 일시적인 증가에 따라 섭식 가능한 작은 크기의 식물플랑크톤의 발생 (Lampert, 1987; Hambright *et al.*, 2007)이 동물플랑크톤 중 특히 지각류 (*Daphnia*, *Bosmina*)의 발달을 야기시켜, 이에 따라 Chl-*a* 이 감소하고, 투명도가 증가하여 청수기가 발생할 수 있는 것으로 사료된다 (Fig. 4, Tables 1, 2).

적 요

팔당호에서 청수현상 발생은 지점별로 다른 양상을 보였으며, 발생시기는 3~12월로 연중 발생하는 것으로 나타났고, 주로 3~6월에 발생하였다. 청수기 발생빈도는 팔당댐앞, 경안천수역, 남한강수역, 북한강수역 순으로 나타났다. 청수현상 발생시 주요 요인인 투명도, 동물플랑크톤 현존량, Chl-*a*와 환경요인 상관분석 결과 수리·수문요인인 강우량, 체류시간은 투명도 및 탁도와 유의한 상관관계를 나타내 강우로 인한 체류시간의 변화가 청수현상을 좌우할 수 있는 것으로 나타났다. 또한 투명도는 청수기를 야기하는 것으로 알려진 동물플랑크톤 중 지각류 현존량 및 점유율과 유의한 상관관계를 나타냈으며, 지각류 현존량 및 점유율은 수온과 유의한 상관관계를 나타내 봄철 수온의 상승에 따른 지각류의 발생이 청수현상 발생을 야기할 수 있는 것으로 나타났다. 이에 따라 수리조건이 정체형 호수와 다른 하천형의 호수에서는 청수현상이 결빙기 이후 봄철뿐만 아니라 동일한 수계 내에서도 지점별 특성에 따라 다르게 나타날 수 있으며, 수체가 안정화될 시에 동물플랑크톤(지각류)의 증가, 식물플랑크톤 현존량 감소, 투명도가 증가하는 청수현상이 조건이 충족될 시 계절에 불문하고 연중 발생할 수 있는 것으로 나타났다.

저자정보 심연보 (건국대학교 환경보건과학과 박사과정), 변명섭 (국립환경과학원 한강물환경연구소 환경연구관), 김재현 (건국대학교 환경보건과학과 석사과정), 유순주 (국

립환경과학원 한강물환경연구소 소장), 임종권 (국립환경과학원 한강물환경연구소 환경연구사), 황순진 (건국대학교 환경보건과학과 교수)

저자기여도 개념설정: 심연보, 임종권, 현장조사: 심연보, 임종권, 자료분석: 심연보, 임종권, 김재현, 변명섭, 황순진, 원고작성: 심연보, 원고수정 및 검토: 심연보, 임종권, 변명섭, 황순진, 유순주

이해관계 본 논문에는 이해관계 충돌의 여지가 없음.

연구비 본 결과물은 환경부의 재원으로 한국환경산업기술원의 ICT기반 환경영향평가 의사결정 지원 기술개발사업의 지원을 받아 연구되었습니다 (2020002990009).

사사 본 논문은 환경부 국립환경과학원의 지원을 받아 수행되었습니다 (NIER-2021-01-01-085).

REFERENCES

- Arfè, A., P. Quatto, A. Zambon, H.J. MacIsaac and M. Manca. 2019. Long-Term Changes in the Zooplankton Community of Lake Maggiore in Response to Multiple Stressors: A Functional Principal Components Analysis. *Water* **11**: 962.
- Arndt, H. and B. Nixdorf. 1991. Spring clear-water phase in a eutrophic lake: Control by herbivorous zooplankton enhanced by grazing on components. *Internationale Vereinigung für theoretische und angewandte Limnologie: Verhandlungen* **30**: 879-883.
- Baranyi, C., T. Hein, C. Holarek, S. Keckeis and F. Schiemer. 2002. Zooplankton biomass and community structure in a Danube River floodplain system: Effects of hydrology. *Freshwater Biology* **47**: 473-482.
- Chang, C.Y. and G.S. Min. 2005. Key to the Korean freshwater cyclopoid copepods and their DNA taxonomy. Jung-haeng-Sa Publish 1-153.
- Dröscher, I., K. Finlay, A. Patoine and P.R. Leavitt. 2008. Daphnia control of the spring clear-water phase in six polymictic lakes of varying productivity and size. *Internationale Vereinigung für theoretische und angewandte Limnologie: Verhandlungen* **30**(2): 186-190.
- Elser, J.J. and C.R. Goldman. 1990. Experimental separation of the direct and indirect effects of herbivorous zooplankton on phytoplankton in a subalpine lake. *Internationale Vereinigung für theoretische und angewandte Limnologie: Verhandlungen* **24**: 493-498.
- George, D.G., D.P. Hewitt, J.W.G. Lund and W.J.P. Smyly. 1990. The relative effects of enrichment and climate change on the long-term dynamics of Daphnia in Esthwaite Water, Cumbria. *Freshwater Biology* **23**: 55-70.

- George, D.G., J.F. Talling and E. Rigg. 2000. Factors influencing the temporal coherence of five lakes in the English Lake District. *Freshwater Biology* **43**: 449-461.
- Hambright, K.D., T. Zohary and H. Güde. 2007. Microzooplankton dominate carbon flow and nutrient cycling in a warm subtropical freshwater lake. *Limnology and Oceanography* **52**: 1018-1025.
- Han River environment research center (HRERC). 2016. Survey on the Environment and Ecosystem of Lakes in the Han River System.
- Hwang, S.J., K.H. Kim, C.H. Park, W.B. Seo, B.G. Choi, H.S. Eum, M.H. Park, H.R. Noh, Y.B. Sim and J.K. Shin. 2016. Hydro-meteorological Effects on Water Quality Variability in Paldang Reservoir, Confluent Area of the South-Han River-North-Han River-Gyeong Stream, Korea. *Korean Journal of Ecology and Environment* **49**: 334-342.
- Hwang, S.J., Y.B. Sim, B.G. Choi, K.H. Kim, C.H. Park, W.B. Seo, M.H. Park, S.W. Lee and J.K. Shin. 2017. Rainfall and Hydrological Comparative Analysis of Water Quality Variability in Euam Reservoir, the North-Han River, Korea. *Korean Journal of Ecology and Environment* **50**: 29-45.
- Işkın, U., N. Filiz, Y. Cao, E.M. Neif, B. Öglü, T.L. Lauridsen, T.A. Davidson, M. Søndergaard, Ü.N. Tavşanoğlu, M. Beklioğlu and E. Jeppesen. 2020. Impact of Nutrients, Temperatures, and a Heat Wave on Zooplankton Community Structure: An Experimental Approach. *Water* **12**: 3416.
- Jeong, H.G., A.A. Kotov and W. Lee. 2014. Checklist of the freshwater Cladocera (Crustacea: Branchiopoda) of South Korea. *Proceedings of the Biological Society of Washington* **127**: 216-222.
- John, D.M., B.A. Whitton and A.J. Brook. 2002. The freshwater algal flora of the British Isles. An identification guide to freshwater and terrestrial algae. Cambridge University Press.
- Jeppesen, E., J.P. Jensen, C. Jensen, B. Faafeng, D.O. Hessen, M. Søndergaard, T. Lauridsen, P. Brettum and K. Christoffersen. 2003. The Impact of Nutrient State and Lake Depth on Top-down Control in the Pelagic Zone of Lakes: A Study of 466 Lakes from the Temperate Zone to the Arctic. *Ecosystems* **6**: 313-325.
- Keckeis, S., C. Baranyi, T. Hein, C. Holarek, P. Riedler and F. Schiemer. 2003. The significance of zooplankton grazing in a floodplain system of the River Danube. *Journal of Plankton Research* **25**: 243-253.
- Kim, J.K. and W.H. Hong. 1992. Studies on the physical environmental factor analysis for water quality management in man-made lake of Korea. *Korean Journal of Environment Science* **1**(2): 49-57.
- Kim, J.M., J.D. Park, H.R. Noh and M.S. Han. 2002. Changes of seasonal and vertical water quality in Soyang and Paldang river-reservoir system, Korea. *Korean Journal of Limnology* **35**(1): 10-20.
- Kong, D.S. 1997. Limnological and ecological characteristic of a river-reservoir (Paldang), Korea. *Korean Journal of Limnology* **30**(supplement): 524-535.
- Lampert, W., W. Fleckner, H. Rai and B.E. Taylor. 1986. Phytoplankton control by grazing zooplankton: A study on the spring clear-water phase. *Limnology and Oceanography* **31**: 478-490.
- Lampert, W. 1987. Laboratory studies on zooplankton-cyanobacteria interactions. *New Zealand Journal of Marine and Freshwater Research* **21**: 483-490.
- Luecke, C., M.J. Vanni, J.J. Magnuson, J.F. Kitchell and P.T. Jacobson. 1990. Seasonal regulation of Daphnia populations by planktivorous fish: Implications for the spring clear-water phase. *Limnology and Oceanography* **35**: 1718-1733.
- Lund, J.W.G. 1950. Studies on Asterionella formosa hass: II. Nutrient depletion and the spring maximum. *Journal of Ecology* **38**: 15-35.
- Maberly, S.C., M.A. Hurley, C. Butterwick, J.E. Corry, S.I. Heaney, A.E. Irish, G.H.M. Jaworski, J.W.G. Lund, C.S. Reynolds and J.V. Roscoe. 1994. The rise and fall of *Asterionella formosa* in the South Basin of Windermere: Analysis of a 45-year series of data. *Freshwater Biology* **31**: 19-34.
- Matsuzaki, S.S., R.C. Lathrop, S.R. Carpenter, J.R. Walsh, M.J.V. Zanden, M.R. Gahler and E.H. Stanley. 2021. Climate and food web effects on the spring clear-water phase in two north-temperate eutrophic lakes. *Limnology and Oceanography* **66**: 30-46.
- Ministry of Environment (MOE). 2014. Standard Methods for the Examination Water Quality. Ministry of Environment.
- Muylaert, K. and W. Vyverman. 2006. Impact of a Flood Event on the Planktonic Food Web of the Schelde Estuary (Belgium) in Spring 1998. *Hydrobiologia* **559**: 385-394.
- Park, H.-K., M.S. Byeon, E.K. Kim, H.J. Lee, M.J. Chun and D.I. Jung. 2004. Water quality and phytoplankton distribution pattern in upper inflow rivers of Lake Paldang. *Journal of Korean Society on Water Environment* **20**: 615-624.
- Segers, H. 1995a. Rotifera 2. The Lecanidae (Monogononta). In Nogrady, T. & H.J. Dumont (eds), Guides to the Identification of the Microinvertebrates of the Continental Waters of the World 6. SPB Academic, The Hague, The Netherlands.
- Segers, H. 1995b. World records of Lecanidae (Rotifera: Monogononta). Studiedocumenten van het Koninklijk Belgisch Instituut voor Natuurwetenschappen 81: 114.
- Sim, Y.B., H.G. Jeong, J.K. Im, S.J. Youn, M.S. Byun and S.J. Yoo. 2018. Spatial and Temporal Distribution of Zooplankton Communities in Lake Paldang. *Korean Journal of Ecology and Environment* **51**: 287-298.
- Sommer, U., Z.M. Gliwicz, W. Lampert and A. Duncan. 1986. The PEG-model of seasonal succession of planktonic events in fresh waters. *Archiv fur Hydrobiologie* **106**: 433-471.

- Talling, J.F. 1971. The underwater light climate as a controlling factor in the production ecology of freshwater phytoplankton: With 14 figures in the text and on 1 folder. *Internationale Vereinigung für Theoretische und Angewandte Limnologie: Mitteilungen* **19**: 214-243.
- Talling, J.F. 1993. Comparative seasonal changes, and inter-annual variability and stability, in a 26-year record of total phytoplankton biomass in four English lake basins. *Hydrobiologia* **268**: 65-98.
- Talling, J.F. 2002. Freshwater phytoplankton—Accessible, microbial, influential population dynamics. *Internationale Vereinigung für theoretische und angewandte Limnologie: Verhandlungen* **28**: 7-28.
- Talling, J.F. 2003. Phytoplankton—Zooplankton seasonal timing and the 'clear-water phase' in some English lakes. *Freshwater Biology* **48**: 39-52.
- Thackeray, S.J., P.A. Henrys, H. Feuchtmayr, I.D. Jones, S.C. Maberly and I.J. Winfield. 2013. Food web de-synchronization in England's largest lake: An assessment based on multiple phenological metrics. *Global Change Biology* **19**: 3568-3580.
- Thornton, K.W., B.L. Kimmel and F.E. Payne. 1990. Reservoir Limnology-Ecological Perspectives. A Wiley Interscience Publication, John Wiley&Sons, Inc.
- Wehr, J.D., R.G. Sheath and J.P. Kociolek. 2003. Freshwater algae of North America: ecology and classification. Academic Press: Elsevier.
- Winder, M. and D.E. Schindler. 2004. Climatic effects on the phenology of lake processes. *Global Change Biology* **10**: 1844-1856.
- Winston, W.E. and R.E. Criss. 2002. Geochemical variations during flash flooding, Meramec River basin, May 2000. *Journal of Hydrology* **265**: 149-163.
- You, K.A., M.S. Byeon and S.J. Hwang. 2012. Effects of Hydraulic-hydrological Changes by Monsoon Climate on the Zooplankton Community in Lake Paldang, Korea. *Korean Journal of Limnology* **45**(3): 278-288.