

팔당호 동물플랑크톤 군집의 시공간적 분포

심연보 · 정현기¹ · 임종권* · 윤석제 · 변명섭 · 유순주

국립환경과학원 한강물환경연구소, ¹국립환경과학원 유역생태연구팀

Spatial and Temporal Distribution of Zooplankton Communities in Lake Paldang. Sim, Youn-Bo (0000-0003-2317-8146), Hyun-Gi Jeong¹ (0000-0002-5162-7175), Jong-Kwon Im* (0000-0003-3994-5127), Seok-Jea Youn (0000-0003-1045-4754), Myeong-Seop Byun (0000-0003-0997-2415) and Soon-Ju Yoo (0000-0002-1860-131X) (Han River Environment Research Center, National Institute of Environmental Research, Yangpyeong 12585, Republic of Korea; ¹Watershed Ecology Research Team, National Institute of Environmental Research, Incheon 22689, Republic of Korea)

Abstract The zooplankton community and environmental factor were investigated on a weekly basis from March to November 2015 in Lake Paldang, Korea. The seasonal succession of zooplankton community structure was influenced by hydraulic and hydrological factors such as inflow, outflow and rainfall. However, the hydraulic retention time in 2015 (16.3 day) was affected by the periods of water shortage that had continued since 2014 and increased substantially compared to 2013 (7.3 day). Therefore, the inflow and outflow discharge were decreased, and the water quality (COD, BOD, TOC, TP, Chl-*a*) of Lake Paldang (St.1) was the same characteristics as the river type Bukhan river (St.3), compared with the lake type Namhan river (St.2) and Gyeongan stream (St.4). Zooplankton community dominated by rotifers (*Keratella cochlearis*, *Synchaeta oblonga*) in spring (March to May). However, Copepod (Nauplius) and Cladoceran (*Bosmina longirostris*) dominated in St.4. In summer (June to August), there was a few strong rainfall event and the highest number of individuals dominated by *Keratella cochlearis* (Rotifera) and *Diffugia corona* (Protozoa) were shown during the study period. In autumn (October to November), the water temperature was decreased with decrease in the total number of individuals showing Nauplius (Copepoda) as the dominant species. As a result of the statistical analysis about zooplankton variation in environmental factors, the continuous periods of water shortage increased the hydraulic retention time and showed different characteristic for each site. St.1, St.3 and St.2, St.4 are shown in the same group ($p < 0.05$), showing the each characteristics of river type and lake type. Therefore, the water quality of catchment area and distribution of zooplankton community would be attributed to hydraulic and hydrological factors.

Key words: zooplankton, community dynamics, hydraulic and hydrological factors, spatial and temporal change, Lake Paldang

서 론

Manuscript received 29 October 2018, revised 12 December 2018,
revision accepted 18 December 2018
* Corresponding author: Tel: +82-31-770-7271, Fax: +82-31-773-2268,
E-mail: limjkjk80@korea.kr

우리나라는 기후학적으로 온대지역에 위치하여 계절의 영향을 크게 받는다. 계절성 기후의 영향은 수리·수문학적으로 여름 장마기간의 집중호우와 태풍 그리고 가을과 봄

© 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.

의 갈수현상 같은 자연적 현상으로 나타나며, 이러한 요인들은 지속기간이나 크기, 빈도에 따라 수환경 및 생물량에 시공간적으로 영향을 미칠 수 있다(Ford, 1990; Thornton *et al.*, 1990; Winston and Criss, 2002).

담수생태계에서 수환경변화에 민감한 반응을 보이는 생물군 중, 동물플랑크톤은 식물플랑크톤 등 미소생물을 먹이원으로 섭취하고 수서곤충이나 어류와 같은 상위 단계의 소비자에게 에너지를 전달함으로써 수생태계에서 중요한 역할을 한다. 특히 온대지역 내에 서식하는 담수동물플랑크톤은 봄에 크기가 작고 증식이 빠른 윤충류가 우점하는 반면, 계절이 지나면서 상대적으로 크기가 큰 요각류나 지각류로 천이되는 양상을 보인다. 뿐만 아니라 여름에 발생하는 집중강우에 따른 댐 방류량 변화 등은 동물플랑크톤 개체수 및 군집변화에 영향을 주는 주요한 요인으로 작용하며, 이후 수체가 안정될 때 성장이 빠른 윤충류를 중심으로 군집이 회복되는 양상을 보인다(Keckeis *et al.*, 2003; You *et al.*, 2012).

우리나라의 인공호는 수리형태학적으로 호수형 호수와 하천형 호수로 나뉜다(Kim and Hong, 1992). 이 두가지 형태의 호수는 수생태계의 구조와 기능이 서로 다르다. 하천형 호수는 체류시간이 짧아 성층의 발달이 미약하고 유역 환경 영향을 직접적으로 받으며, 호수형 호수는 체류시간이 길고 성층현상이 뚜렷하여 자연호와 비슷한 특성을 갖는다(Kong *et al.*, 1996). 팔당호는 이러한 특성을 가지는 호수로서 한강의 중하류에 위치하며, 유역 환경과 유량이 서로 다른 남한강과 북한강이 합류한 후 하류 쪽에서 지류인 경안천이 유입되므로 각 수계는 팔당호의 수환경 변화에 중요한 영향을 미치게 된다. 팔당호는 1973년에 홍수방제와 취수를 목적으로 건설되었으며, 평균 수심이 약 6.5m 이고, 상류의 댐들과 보에 의해 유속과 유량이 조절됨으로써 크게 영향을 받는다. 또한 여름 강우기 유입되는 유량을 그대로 방류하여 평균 체류시간이 짧아 연중 수층별 수질의 차이가 크지 않은 하천형 호수의 특징을 보인다(Kim and Hong, 1992; Kim *et al.*, 2002; HRERC, 2016). 이러한 특성에 따라 팔당호 내 수환경은 여름 장마시기에 강우량의 정도에 따라 하천 혹은 호수의 성향을 보이는 이중적인 복합 수계의 특성을 보여준다(Kong, 1997). 따라서 팔당호에서 출현하는 동물플랑크톤 군집은 온대 몬순기후에 의해 시·공간적으로 서로 다른 수계의 이화학적 특성과 수리·수문학적 영향에 따라 다양한 군집 양상 및 유형이 예측된다.

본 연구는 팔당호 수생태계에서 수역별 4개 지점을 대상으로 동물플랑크톤 군집에 영향을 미치는 수리·수문학적 요인과 이화학적 요인의 변화를 파악하여 복합적 수계의

동물플랑크톤 군집 특성을 확인하는 데 목적이 있다.

재료 및 방법

1. 조사 지점 및 조사시기

조사지점 및 시기는 팔당댐앞(St.1), 남한강합류수역(St.2), 북한강합류수역(St.3), 경안천합류수역(St.4)을 선정하여 2015년 3월부터 2015년 11월까지 주 1회(결빙기 제외) 조사하였다(Fig. 1).

2. 강수량 및 수문자료 조사

강수량은 기상청 양평기상대에서 관측한 일 자료를 사용하였고, 유입량, 방류량, 수위 등 수문자료는 국가수자원관리종합정보시스템(Korea Water Management Information System, WAMIS)을 이용하였다. 수집한 기초자료는 요인



Fig. 1. Map showing the localities and studying sites in the lake Paldang. St.1: Lake Paldang, St.2: Namhan River, St.3: Bukhan River, St.4: Gyeonggi stream.

별로 결측 또는 이상치를 제외하였고, 최종적으로 확인된 자료를 분석하였다.

3. 시료수집 및 분석

1) 이화학적 요인

이화학적 요인은 매주 조사 시에 수온, pH, 용존산소(DO), 전기전도도(EC), 탁도, 투명도는 현장수질측정기(YSI-6600D, YSI Inc., Yellow Springs, OH, USA)를 이용하여 현장에서 측정하였으며, 표층수를 채수하여 실험실로 옮겨 생물학적산소요구량(BOD), 화학적산소요구량(COD), 부유물질(SS), 총질소(TN), 총인(TP), 용존성총질소(DTN), 암모니아성질소(NH₃-N), 질산성질소(NO₃-N), 용존총인(DTP), 인산염인(PO₄-P), 클로로필-*a*(Chl-*a*) 항목을 수질오염공정시험기준(MOE, 2014)에 따라 분석하였다.

2) 생물학적 요인

동물플랑크톤은 네트(망목 60 µm)를 이용하여 수심별로 수직 예망하여 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 200 mL로 맞추어 검경하였다. 정량 및 정성분석은 Sedgwick-Rafter counting chamber를 이용하여 위상차 현미경(Nikon eclipse, Nikon, Tokyo, Japan)에서 ×100~×1,000배로 검경하였으며, 개체수 단위는 리터당 개체수(Ind. L⁻¹; individuals L⁻¹)로 환산하였다. 종동정은 요각류는 Chang and Min (2005), 지각류는 Jeong *et al.* (2014), 윤충류는 Segers (1995a, b)를 참조하였다.

3) 통계분석

팔당호에서 지점별 이화학적 요인의 차이를 알아보기 위해 ANOVA를 실시하였으며, 사후분석은 Turkey's HSD test를 이용하였다. 환경요인과 동물플랑크톤 간의 상관분석은 Pearson's correlation test를 이용하였고, 전체적인 통계 처리는 SPSS 20 (IBM Corp., Armonk, NY, USA)를 이용하여 분석하였으며, 유의성은 $p < 0.05$ 로 확인하였다. 또한 복합적인 팔당호 내의 환경요인에 따른 동물플랑크톤 군집의 양상을 알아보기 위해 Canonical correspondence analysis (PC-ORD5, Lincoln city, OR, USA)를 실시하였으며, 자료의 처리는 동물플랑크톤 개체수는 $\log(x + 1)$ 를 취하였으며, 군집의 지점별 특성분석을 위하여 상대 출현 빈도를 이용하여 1% 미만의 종은 제거하여 총 32종의 동물플랑크톤 종을 선별하였다.

결과 및 고찰

1. 강우 및 수문학적 특성

본 연구기간(2015년 3월~2015년 11월) 동안 팔당호 유역의 총 강수량은 734.6 mm였으며, 동일기간 2014년(742.1 mm)과 비슷한 수준이었으나, 2013년(1571.0 mm)에 비해 50% 미만으로 2년간 심한 강우부족현상을 보였다(Fig. 2). 또한 여름(6~8월)에 45% 이상의 강수량이 집중되어 있는 온대 몬순기후의 특징을 보였다. 2014년부터 지속된 이러한 강우부족현상은 남조류를 포함한 식물플랑크톤의 번성을 야기시킬 수 있는데, 이는 식물플랑크톤을 먹이원으로 하는 윤충류 또는 요각류의 증식을 초래할 수 있다(Bouvy *et al.*, 2001). 팔당호의 수위는 연구기간 동안 평균 해발 25.2 m였으며, 최대 25.4 m, 최소 25.2 m로 수위의 변동은 크지 않았으며, 유입량과 방류량 또한 각각 연평균 184.4 CMS (Cubic meters per second), 184.8 CMS로 항시 수문조절에 의해 일정한 수위를 유지하고 있는 것으로 나타났다(Fig. 2). 팔당호 유입·방류량은 강우사상과 관련되어 있으며, 여름 집중강우에 크게 증가하여 수리학적 체류시간에 변화가 심하게 나타난다(HRERC, 2016).

조사기간 동안 팔당호의 평균 체류시간은 16.3일 이었으며, 동일기간 2013년 7.3일, 2014년 11.7일에 비해 크게 증가한 것으로 나타났다(Fig. 2). 이는 2014년부터 이어진 적은 강수량으로 인한 갈수현상으로 상류 댐들의 방류량 감소로 인해 팔당호로 유입되는 유입량이 줄어들었고, 이에 따라 체류시간이 증가한 것으로 나타났다. 이러한 체류시간의 증가는 수체의 안정화를 초래하여 크기가 작고 세대교번이 빠른 윤충류의 급증 및 총동물플랑크톤의 현존량 증가에 기여할 것으로 판단된다(You *et al.*, 2012).

2. 지점별 이화학적 특성

팔당호 내 조사지점 간의 이화학적 환경요인을 비교하기 위하여 ANOVA (Tukey's HSD test)를 실시하였다. 수온은 전 지점에서 4.0~28.9°C의 범위로 나타났으며, 지점 간의 큰 차이를 나타내지 않았고, 계절에 따른 변동을 보였다. 탁도는 St.4에서 평균 9.2(1.5~30.1) NTU로 가장 높게 나타났으며, 다른 세 지점 St.1: 3.8(1.7~14.7), St.2: 3.9(1.4~27.6), St.3: 2.1(0.6~11.1) NTU와 유의한 차이를 보였다($p < 0.05$). 투명도는 St.1, St.3에서 각각 평균 2.4(0.6~5.5), 2.7(0.9~4.7) m로 다른 두 지점 St.2: 1.7(0.4~5.9), St.4: 1.1(0.3~2.7) m에 비해 높아 차이를 나타냈다(Fig. 3). 특히 St.4에서 높은 탁도와 함께 낮은 투명도를 나타내며 다른 지점들과 유의한 차이($p < 0.05$)를 보였다.

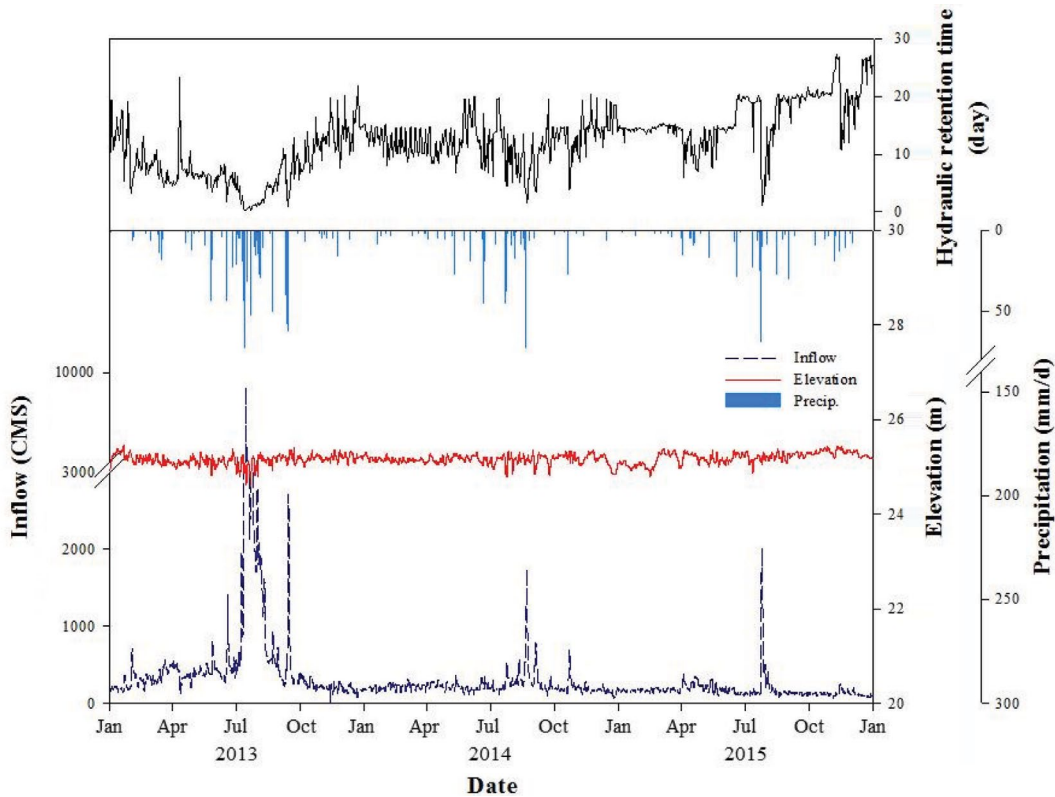


Fig. 2. Seasonal change of inflow, elevation, precipitation and HRT in Lake Paldang from 2013 to 2015.

BOD와 COD의 평균값 중 BOD는 St.1과 St.3에서 각각 1.3 (0.5~2.4), 1.0 (0.4~1.9) mg L^{-1} , COD는 3.7 (2.4~5.5), 3.2 (1.8~5.3) mg L^{-1} 으로 비슷한 특성을 나타냈으며, St.4에서 BOD 2.8 (1.1~5.8), COD 5.9 (2.9~11.2) mg L^{-1} 으로 다른 세 지점에 비해 상대적으로 높은 값을 나타내 유의한 차이 ($p < 0.05$)를 보였다 (Fig. 3). BOD와 COD는 단발성 강우 후에 급증하며, 연속되는 강우 후에는 급감하는 양상을 보이는 것으로 알려져 있어 강우량이 적었던 2015년에 지류인 St.4에서 높게 나타난 것으로 판단된다 (Hwang *et al.*, 2016). 이와 유사하게 SS와 EC 또한 St.4에서 상대적으로 높은 값을 보이며 BOD와 COD의 결과와 같이 유의한 차이 ($p < 0.05$)를 보였다. 영양염류는 TN, DTN, $\text{NH}_3\text{-N}$, $\text{NO}_3\text{-N}$ 모두 St.4에서 2.775 (1.278~5.900), 2.639 (1.131~5.566), 0.224 (0.006~1.102), 1.888 (0.532~3.886) mg L^{-1} 으로 다른 세 지점과 유의한 차이를 보였으며, TP, Chl-*a*는 St.1과 St.3, St.2와 St.4가 비슷한 특성을 나타냈다 (Fig. 3). 영양염류 중 인의 경우 St.2와 St.4에서 다른 두 지점에 비해 높은 농도를 보였으며, 특히 St.4에서 높게 나타났다 (Fig. 3). 이는 팔당호에서 질소의 경우 강우량이 적었던 2014~2015년에 적은 강우에도 지류인 경안천유역 (St.4)은 고농도의 질소가

유입되어 변화 폭과 농도가 컸으며, 인의 경우는 강우량이 많아 유입량이 증가했던 2012년~2013년에 전체적으로 농도가 높아 상류로부터 유입된 입자성 물질에 주로 영향을 받는 것으로 나타났고, St.4에서는 지류의 상류로부터 지속적인 인의 공급이 유지되어 연중 높게 유지되는 것으로 보였다 (Hwang *et al.*, 2016).

팔당댐 앞 지점 (St.1)은 일반적으로 유입량에 따라 남한강, 북한강, 경안천 순으로 이화학적 요인에 영향을 받으며 유입량이 가장 큰 남한강 유입수에 의해 이화학적 요인이 결정될 수 있으며, 경안천 유입수는 영향이 미미한 것으로 알려져 있다 (Kim *et al.*, 2006). 하지만 조사기간인 2015년에는 2014년부터 이어진 갈수기로 인해 강우기를 비롯하여 유입량이 크게 감소한 것으로 나타났다. 이에 따라 St.1의 이화학적 요인은 유입량이 가장 큰 남한강유역 지점인 St.2보다는 북한강 유역인 St.3 지점과 BOD, COD, SS, TP 등을 비롯한 이화학적 요인이 유사한 ($p < 0.05$) 것으로 나타났다. 이는 갈수기에 체류시간이 증가함에 따라 하천형 특성을 가진 북한강의 유량이 많아 호소형 특성을 가진 남한강보다 팔당댐 앞 지점의 이화학적 요인에 영향을 미친 것으로 사료된다.

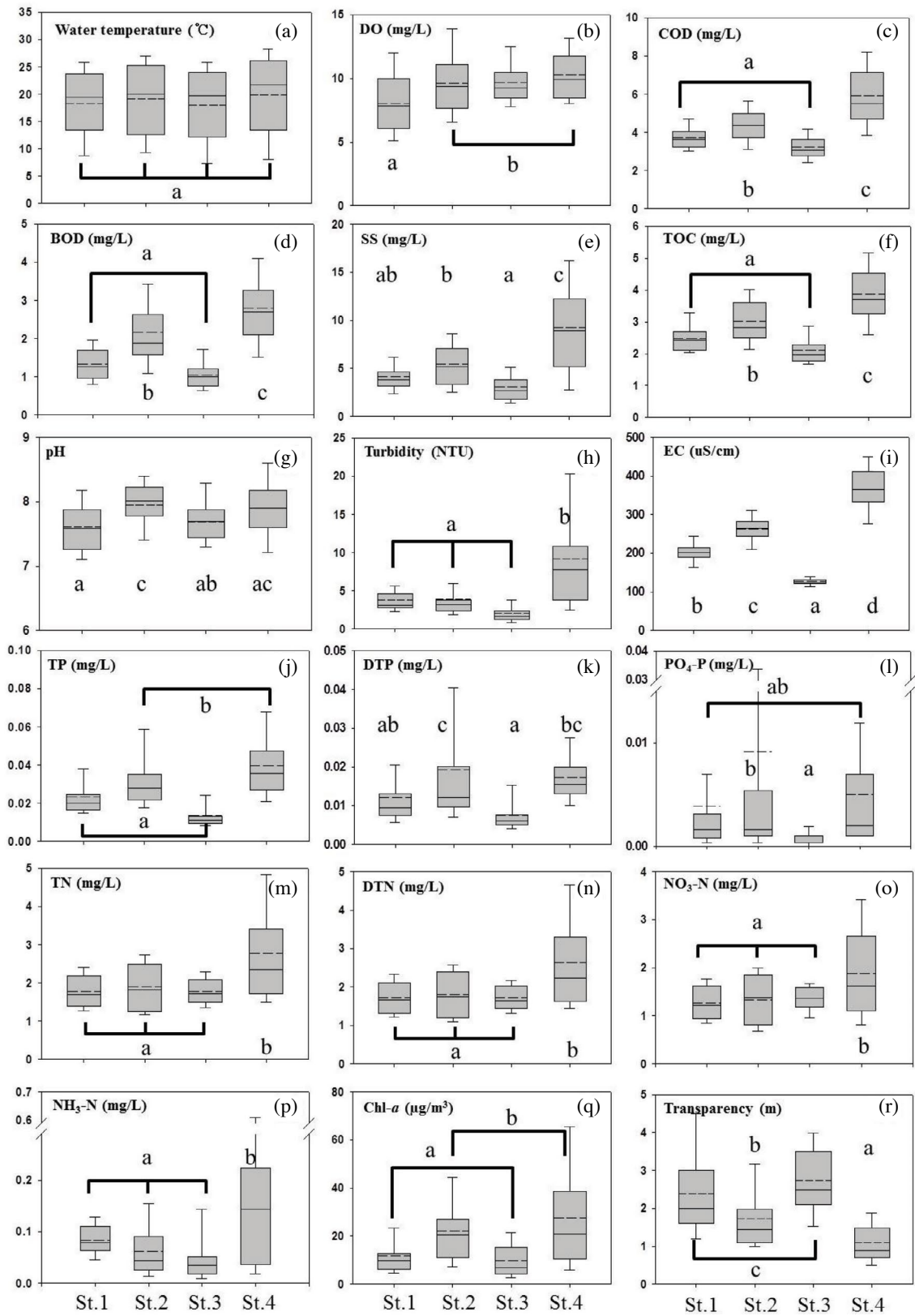


Fig. 3. Environmental variables showing significant differences among four sites by ANOVA of Lake Paldang in March to November 2015. Small alphabets (a, b, c and d) were Tukey's HSD test (dash line: average, straight line: median).

3. 동물플랑크톤 군집

1) 동물플랑크톤 군집 변화 양상

조사기간 동안 지점별 동물플랑크톤 개체수는 평균 St.1: 256.5 (40.4~781.7), St.2: 398.2 (9.4~1,562.7), St.3: 417.1 (21.7~2,039.4), St.4: 525.7 (12.7~2,001.2) Ind. L⁻¹으로 St.4에서 연중 높은 현존량을 나타냈다. 대부분의 지점에서 여름에 가장 높은 현존량을 나타냈으며, St.1: 8월 466.1, St.2: 9월 996.2, St.3: 8월 1,022.3, St.4: 7월 1,173.6 Ind. L⁻¹으로 이 시기의 지점별 우점종은 소형 윤충류인 *Keratella cochlearis*가 우점한 St.3 외에는 모두 원생동물인 *Diffugia corona*가 35% 이상의 높은 우점율을 보였다(Tables 1, 2). 이는 주로 호소 저층의 식물잔해나 퇴적층 표면에 주로 서식하는 *Diffugia*가 강우 이후 유입량이 증가하며 수체가 혼합되어 높은 개체수를 보였던 것으로 사료된다(Daniel and Sônia, 2006). 전 지점에서 계절별 현존량 변화는 봄(3~5월)에 윤충류가 증식하며 현존량이 증가하였고, 여름 강우에 의해 St.4를 제외한 세 지점에서 현존량이 감소하다가 이후 원생동물과 윤충류가 증식하며 회복하는 경향을 나타냈다. St.4에서는 다른 3지점에 비해 강우에 의해 하류로 떠내려가거나, 증식이 억제되어 현존량이 감소하는

현상을 보이지 않았다. 이는 여름철 장마시기에 북한강과 남한강의 유입량이 증가함에 따라 경안천 유입량은 상대적으로 적어 댐 쪽으로 흐름이 정체되는 것으로 알려져 있으며(Kim *et al.*, 2006), 이에 따라 강우에 의한 영향이 적어 현존량 변동이 적은 것으로 판단된다. 가을에는 현존량 감소를 보였으며, 요각류의 상대 우점도가 증가하는 양상을 나타냈다. 특히 St.1과 St.3에서는 요각류 유생(Nauplius)의 개체수가 증가하여 각각 8, 9월(28.5, 26.0%)과 9, 10월(18.0, 20.6%)에 우점하는 것으로 나타났으며, 11월에는 St.1과 St.2에서 윤충류인 *Synchaeta oblonga*가 50% 이상의 우점율을 보이며 우점하였다(Table 1). 온대호수에서 수온이 낮아지는 가을철 이후에는 동물플랑크톤의 먹이원이 되는 식물플랑크톤의 현존량이 줄어들어 성장이 느린 요각류가 유생과 성체로 존재하는 것으로 알려져 있다(Agbeti and Smol, 1995). 또한 *Synchaeta*의 경우 16°C 이하의 저수온에서도 다른 윤충류에 비해 적응력이 높은 것으로 알려짐에 따라 수온이 낮은 11월에 우점하는 것으로 사료되었다(Stelzer, 1998). 이에 따라 가을 이후 봄~여름에 우점했던 윤충류와 원생동물의 개체수가 현저하게 감소하였으며(Fig. 4), 수온이 낮아지는 가을 이후에 윤충류 *S. oblonga*와 요각류 Nauplius가 우점하며 천이를 보였다(Table 1).

Table 1. Monthly dominant species and relative abundance (%) in Lake Paldang from March to November 2015.

	St.1	St.2	St.3	St.4
	Species name (taxon, relative abundance (%))			
Mar	<i>Synchaeta oblonga</i> (RO, 24.3)	<i>Notholca labis</i> (RO, 34.5)	<i>Synchaeta oblonga</i> (RO, 31.6)	Nauplius (CP, 52.0)
Apr	<i>Keratella cochlearis</i> (RO, 51.0)	<i>Synchaeta oblonga</i> (RO, 46.6)	<i>Keratella cochlearis</i> (RO, 66.0)	Nauplius (CP, 27.0)
May	<i>Keratella cochlearis</i> (RO, 61.3)	<i>Synchaeta oblonga</i> (RO, 47.7)	<i>Keratella cochlearis</i> (RO, 75.2)	<i>Bosmina longirostris</i> (CL, 33.1)
Jun	<i>Pompholyx complanata</i> (RO, 22.5)	<i>Keratella cochlearis</i> (RO, 20.8)	<i>Diffugia corona</i> (PR, 77.0)	<i>Brachionus angularis</i> (RO, 42.4)
Jul	<i>Diffugia corona</i> (PR, 39.1)	<i>Polyarthra vulgaris</i> (RO, 15.1)	<i>Diffugia corona</i> (PR, 46.6)	<i>Diffugia corona</i> (PR, 37.5)
Aug	<i>Diffugia corona</i> (PR, 52.5)	Nauplius (CP, 17.1)	<i>Diffugia corona</i> (PR, 44.2)	<i>Keratella valga</i> (RO, 24.2)
Oct	Nauplius (CP, 28.5)	<i>Keratella cochlearis</i> (RO, 27.8)	<i>Diffugia corona</i> (PR, 19.2)	<i>Diffugia corona</i> (PR, 26.3)
Sep	Nauplius (CP, 26.0)	<i>Keratella cochlearis</i> (RO, 28.5)	Nauplius (CP, 18.0)	<i>Keratella cochlearis</i> (RO, 39.3)
Nov	<i>Synchaeta oblonga</i> (RO, 50.1)	<i>Synchaeta oblonga</i> (RO, 53.2)	Nauplius (CP, 20.6)	<i>Daphnia galeata</i> (CL, 49.0)

RO: rotifera, CP: copepoda, CL: cladocera, PR: protozoa

Table 2. Monthly zooplankton abundance and relative abundance (%) in lake Paldang from March to November 2015.

Site	Taxon	Month										
		Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Oct	Sep	Nov		
St.1	Rotifera	130.7 (88.8)	232.8 (76.9)	346.1 (81.5)	91.0 (53.9)	37.3 (22.3)	112.3 (24.1)	129.4 (39.4)	38.3 (24.2)	89.5 (61.7)		
	Cladocera	0.2 (0.2)	1.8 (0.6)	15.5 (3.6)	32.8 (19.4)	34.4 (20.6)	23.0 (4.9)	32.6 (9.9)	36.0 (22.8)	16.9 (11.6)		
	Copepoda	6.2 (4.2)	24.4 (8.1)	38.3 (9.0)	15.6 (9.2)	24.9 (14.9)	53.7 (11.5)	112.2 (34.1)	61.4 (38.9)	26.5 (18.2)		
	Protozoa	10.1 (6.9)	43.7 (14.4)	24.6 (5.8)	29.5 (17.5)	70.8 (42.3)	277.1 (59.5)	54.6 (16.6)	22.2 (14.1)	12.2 (8.4)		
	Total	147.2 (100)	302.7 (100)	424.4 (100)	168.8 (100)	167.5 (100)	466.1 (100)	328.9 (100)	157.9 (100)	145.1 (100)		
St.2	Rotifera	133.5 (72.3)	157.8 (70.7)	408.4 (95.7)	200.2 (54.4)	183.1 (62.6)	391.2 (55.8)	569.1 (57.1)	174.4 (70.6)	102.0 (70.0)		
	Cladocera	0.1 (0.1)	1.1 (0.5)	7.6 (1.8)	137.9 (37.5)	28.0 (9.6)	81.2 (11.6)	31.1 (3.1)	15.5 (6.3)	2.6 (1.8)		
	Copepoda	25.8 (14.0)	37.6 (16.8)	9.6 (2.2)	20.1 (5.5)	45.1 (15.4)	151.8 (21.7)	116.6 (11.7)	45.1 (18.3)	7.6 (5.2)		
	Protozoa	25.1 (13.6)	26.7 (12.0)	1.1 (0.3)	9.5 (2.6)	36.1 (12.4)	76.5 (10.9)	279.5 (28.1)	11.9 (4.8)	33.5 (23.0)		
	Total	184.7 (100)	223.1 (100)	426.6 (100)	367.7 (100)	292.3 (100)	700.7 (100)	996.2 (100)	247.0 (100)	145.7 (100)		
St.3	Rotifera	345.0 (96.7)	474.6 (91.1)	558.2 (88.5)	86.7 (16.5)	44.8 (30.2)	324.2 (31.7)	224.2 (53.7)	48.7 (50.1)	17.8 (49.3)		
	Cladocera	0.5 (0.1)	5.8 (1.1)	26.0 (4.1)	22.4 (4.3)	22.4 (15.1)	49.1 (4.8)	8.3 (2.0)	2.2 (2.2)	2.6 (7.4)		
	Copepoda	7.0 (2.0)	25.5 (4.9)	22.0 (3.5)	3.9 (0.8)	3.2 (2.2)	116.8 (11.4)	64.6 (15.5)	22.2 (22.8)	9.0 (24.9)		
	Protozoa	4.1 (1.2)	15.3 (2.9)	24.2 (3.8)	411.0 (78.4)	77.6 (52.4)	532.1 (52.1)	120.6 (28.9)	24.2 (24.9)	6.6 (18.4)		
	Total	356.6 (100)	521.2 (100)	630.4 (100)	524.0 (100)	148.0 (100)	1022.3 (100)	417.8 (100)	97.3 (100)	36.0 (100)		
St.4	Rotifera	87.5 (29.7)	31.8 (15.5)	193.2 (29.4)	695.6 (73.2)	390.5 (33.3)	285.3 (62.7)	314.1 (45.0)	109.8 (59.1)	22.1 (19.8)		
	Cladocera	14.0 (4.7)	69.0 (33.6)	305.6 (46.5)	104.5 (11.0)	170.0 (14.5)	56.2 (12.4)	45.9 (6.6)	19.1 (10.3)	60.9 (54.6)		
	Copepoda	175.5 (59.6)	94.2 (45.9)	153.7 (23.4)	86.9 (9.1)	145.2 (12.4)	103.1 (22.7)	150.6 (21.6)	43.0 (23.2)	24.5 (22.0)		
	Protozoa	17.7 (6.0)	10.4 (5.1)	4.0 (0.6)	63.8 (6.7)	468.0 (39.9)	10.2 (2.2)	187.8 (26.9)	13.7 (7.4)	4.2 (3.7)		
	Total	294.6 (100)	205.4 (100)	656.6 (100)	950.7 (100)	1173.6 (100)	454.8 (100)	698.3 (100)	185.6 (100)	111.7 (100)		

2) 지점별 환경요인과 동물플랑크톤 군집의 상호 관계

동물플랑크톤 군집과 환경요인과의 상관성을 파악하기 위하여 CCA를 실시하였다. 분석결과, 지점별 특성은 이화학적 요인에 따라 ANOVA 분석결과와 유사하게 두 그룹

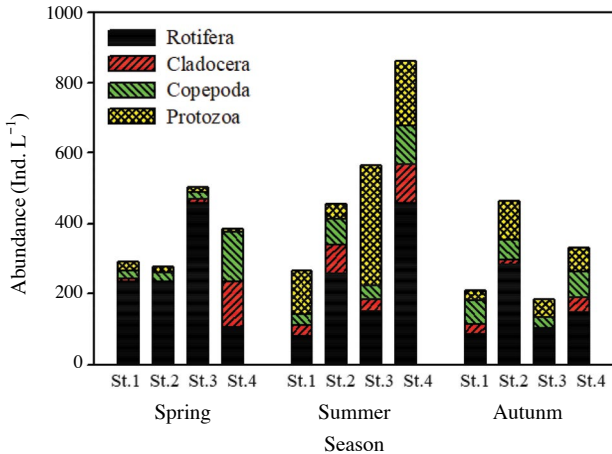


Fig. 4. Seasonal change of zooplankton abundance in Lake Paldang from 2015 (Spring: March~May, Summer: June~August, Autumn: October~November).

으로 나뉘었다. Axis1을 기준으로 위쪽으로는 St.2와 St.4, 아래쪽으로는 St.3, 그리고 Axis1을 중심으로 팔당댐 앞 지점인 St.1이 구분되어 분포하였다. St.2, St.4 지점들은 ANOVA 분석결과에서 높은 평균값을 보이며 다른 두 지점과 차이를 나타낸 BOD, TP, EC 등의 요인이 CCA 분석결과에서도 연관성이 높게 나타나 분포가 나뉘어진 것으로 사료되었다. 나머지 두 지점인 St.1과 St.3 또한 이화학적 요인의 연관성에 따라 분포가 나뉘어졌으며, 팔당댐 앞 지점인 St.1은 ANOVA에서 다른 3지점의 중간 값을 보이던 특성이 CCA 분석결과에서도 반영되어 나타난 것으로 판단된다(Fig. 5).

지각류 *Daphnia galeata*, *Daphnia longispina*는 투명도와 연관성이 있는 것으로 나타났으며, 상관분석에서도 지각류의 상대풍부도와 투명도는 유의한 상관관계($r=0.250, p < 0.01$)가 있는 것으로 나타났다(Appendix 1, Fig. 5). 특히 지점별 지각류 개체수와 투명도와의 상관성은 하천형 특성이 강한 St.3 ($r = -0.019$)을 제외하고, St.1에서 유의한 상관관계를 보였다. 이는 과거 You *et al.* (2012) 등 팔당호에서 동물플랑크톤의 섭식활동에 의한 투명도 증가와 같은 결과로 사료되며, 지각류 점유율은 Chl-a와 음의 상관관계($r =$

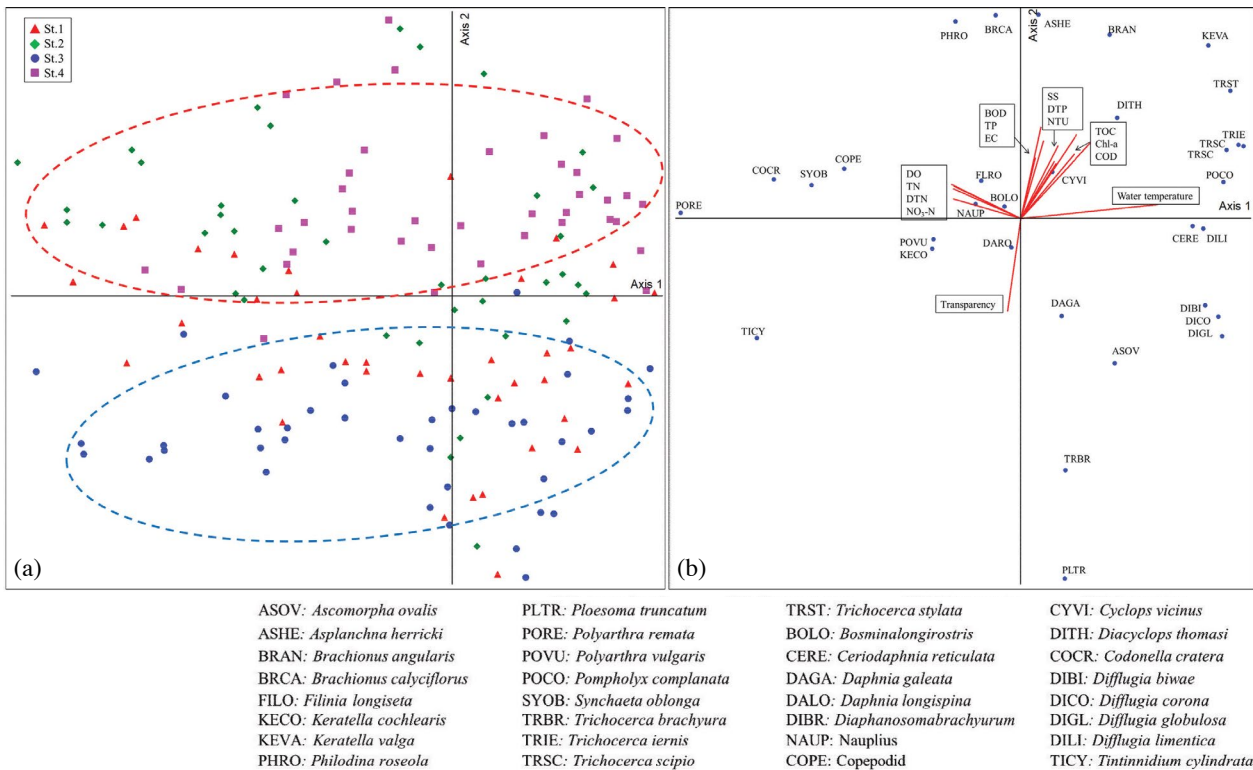


Fig. 5. Ordination diagram showing the distribution of four sites in Lake Paldang from March to November 2015 (a), Ordination of zooplankton species selected by the IndVal analysis with significant environmental variables (b).

-0.157, $p < 0.05$)를 보여 청수현상 시 나타나는 Chl-*a* 농도 감소와 투명도 증가, 동물플랑크톤의 현존량 증가와 연관성이 있는 것으로 사료되었다(Droscher, 2008). 원생동물인 *Diffugia*는 DO, TN, DTN과 음의 연관성을 보였으며, Axis2를 기준으로 오른쪽에 뭉쳐서 분포하여 나타났다. 또한 상관분석에서도 원생동물 상대풍부도는 DO, TN, DTN을 포함하여 BOD 등과 유의한 음의 상관관계 ($p < 0.05$)를 보였다. 이는 단발적인 강우 이후에는 영양염류와 BOD의 농도가 증가하지만, 연속되는 강우 후에는 감소하는 양상을 나타내는 것으로 알려져 있음에 따라(Hwang, 2016) 원생동물은 연속되는 강우 이후 유입량의 증가에 따라 수체가 혼합되었을 때 유기물의 증가와 함께 현존량이 증가할 수 있는 것으로 판단된다(Appendix 1, Fig. 5).

윤충류 *Asplanchna herricki*, *Brachionus angularis*, *Keratella valga*는 Chl-*a*, TOC, SS 등과 연관성이 있는 것으로 나타났으며, St.2, St.4에서 주로 출현한 것으로 나타났다. 이는 소형 윤충류의 먹이가 되는 식물플랑크톤의 증식과 함께 현존량이 증가하는 것으로 알려져 있으며, Chl-*a*의 농도가 높게 나타났던 St.2, St.4 지점에서 봄철 높은 현존량을 보이며 나타났다. 상관분석 결과에서도 Chl-*a*와 윤충류 현존량은 유의한 양의 상관관계($r = 0.298, p < 0.01$)을 보여 팔당호에서 You *et al.* (2010, 2012)의 윤충류 현존량 증가와 Chl-*a* 증가의 관련성과 같은 결과로 사료된다. 체류시간은 현존량과 유의한 상관관계를 보이지 않았으나, 윤충류 점유율의 감소, 그리고 요각류와 원생동물의 점유율 증가와 유의한 상관관계 ($p < 0.01$)를 보여 수체가 안정된 여름철 원생동물과 가을철 요각류의 우점현상과 연관성을 나타냈다(Appendix 1).

적 요

강우부족현상이 지속되었던 2015년 팔당호에서의 이화학적 요인과 동물플랑크톤 군집 특성은 선행연구에서의 몬순기후에 의한 강우와 수리·수문학적 요인의 영향을 받아 변화하던 동물플랑크톤 군집과 다른 양상을 나타냈다. 조사 기간 동안 팔당호의 수리학적 체류시간은 2014년부터 지속된 강우부족현상에 영향을 받아 2013년대비 크게 증가하였다. 이에 따라 유입·방류량이 감소하여 팔당댐앞(St.1)의 이화학적 수질은 호소형 특성의 남한강수역(St.2) 수질보다 하천형 특성의 북한강수역(St.3) 수질과 비슷한 특성이 나타났다. 동물플랑크톤의 군집변화는 봄(3~5월)에는 주로 소형 윤충류(*Syncheata*, *Keratella*)가 우점하였으며, 여름(7~9월)에는 집중호우가 적어 연중 가장 높은 현존량을 기

록했으며 우점종은 윤충류인 *Keratella cochlearis*와 원생동물인 *Diffugia corona*로 나타났다. 가을(9~11월)에는 수온이 감소함에 따라 윤충류와 원생동물의 현존량이 감소하고 요각류 유생(Nauplius)이 우점하는 천이를 보였다. 통계분석 결과 복합적 수계의 특성을 보여주는 팔당호에서 북한강수역은 하천형, 남한강수역과 경안천수역은 호소형 특성으로 지점별 상이하게 구분되며, 이에 따라 동물플랑크톤 군집 또한 영향을 받을 수 있음을 나타냈다.

사 사

본 연구는 환경부 한강수계관리위원회의 환경기초조사사업(과제명: 한강수계 호소환경 및 생태조사)에 의해 지원되었음.

REFERENCES

- Agbeti, M.D. and J.O. Smol. 1995. Winter limnology: Comparison of physical, chemical and biological characteristics in two temperate lakes during ice over. *Hydrobiologia* **304**: 221-234.
- Bouvy, M., M. Pagano and M. Troussellier. 2001. Effects of a cyanobacterial bloom (*Cylindrospermopsis raciborskii*) on bacteria and zooplankton communities in Ingazeira reservoir (northeast Brazil). *Aquatic Microbial Ecology* **25**: 215-227.
- Chang, C.Y. and G.S. Min, 2005. Key to the Korean freshwater cyclopoid copepods and their DNA taxonomy. Junghaeng-Sa Publish 1-153.
- Chang, K.H., H.W. Kim, G.H. La, K.S. Jeong and G.J. Joo. 2004. Prey preference of juvenile fish based on the laboratory experiments and its impact on zooplankton community of the Nakdong River. *Korean Journal of Limnology* **37**: 130-136.
- Daniel, J.G.L. and Sônia, G.B.C.L. 2006. Morphology, biometry, ecology and biogeography of five species of *Diffugia* Leclerc, 1815 (Arcellinida: Diffugiidae), from Tiete River, Brazil. *Acta Protozoologica* **45**: 77-90.
- 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.
- Ford, D.E. 1990. Reservoir transport process. In: Reservoir Limnology-Ecological Perspectives (Thornton, K.W., B.L. Kimmel and F.E. Payne, eds). John Wiley & Sons, Inc. pp: 15-41.

- Han River Environment Research Center (HRERC). 2004. Study of environment in Lake Paldang.
- 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-Gyeongang Stream, Korea. *Korean Journal of Ecology and Environment* **49**: 334-342.
- 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.
- Joo, G.J. and D.A. Francko. 1995. Limnological characterization of the tristate oxbow wetland (Ohio, Indiana). *The Ohio Journal of Science* **95**: 316-320.
- 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.
- Kim, J.M., S.N. Heo, H.R. Noh, H.J. Yang and D.I. Jeong. 2006. Water quality fluctuation study of Paldang reservoir affected by Gyeongang stream inflow according to rainfall. *Korean Journal of Limnology* **39**(2): 236-244.
- Kong, D.S., I.B. Yoon and J.K. Ryu. 1996. Hydrological characteristics and water budget of Lake Paldang. *Korean Journal of Limnology* **29**(1): 51-64.
- Kong, D.S. 1997. Limnological and ecological characteristic of a river-reservoir (Paldang), Korea. *Korean Journal of Limnology* **30**(Suppl.): 524-535.
- Ministry of Environment (MOE). 2014. Standard Methods for the Examination Water Quality. Ministry of Environment.
- Segers, H. 1995a. Rotifera 2. The Lecanidae (Monogononta). *In: Guides to the Identification of the Microinvertebrates of the Continental Waters of the World* 6. SPB Academic (Nogrady, T. and H.J. Dumont, eds.). The Hague, The Netherlands.
- Segers, H. 1995b. World records of Lecanidae (Rotifera: Monogononta). *Studiedocumenten van het Koninklijk Belgisch Instituut voor Natuurwetenschappen* **81**: 114.
- Shin, J.K., J.L. Cho, S.J. Hwang and K.J. Cho. 2000. Eutrophication and water pollution characteristics of the kyongan stream to Paltang reservoir. *Korean Journal of Limnology* **33**(4): 387-394.
- Stelzer, C.P. 1998. Population growth in planktonic rotifers. Does temperature shift the competitive advantage for different species? *Hydrobiologia* **387/388**: 349-353.
- Thornton, K.W., B.L. Kimmel and F.E. Payne. 1990. Reservoir Limnology-Ecological Perspectives. A Wiley Interscience Publication, John Wiley & Sons, Inc. 246pp.
- Winston, W.E. and R.E. Criss. 2002. Geochemical variations during flash flooding, Meramec River basin, May 2000. *Journal Hydrology* **265**: 149-163.
- You, K.A., H.K. Park, D.S. Kong and S.J. Hwang. 2010. Structure and succession of zooplankton community in several artificial lakes in the Han river system. *Journal of Korean Society on Water Quality* **26**(5): 850-859.
- 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.

Appendix 1. Correlation coefficient between physico-chemical and zooplankton factors in lake Paldang.

Variables	WTE	pH	DO	CON	BOD	COD	SS	TOC	TN	DTN	NH ₃ -N	NO ₃ -N	TP	DTP	PO ₄ -P	Chl- <i>a</i>	TRAN	TUR	HRT	Rainfall
RO-Ind	.210**	.287**	.145	.079	.310**	.275**	.061	.291**	-.179*	-.193*	-.155	-.256**	-.051	-.055	-.105	.298**	-.121	-.009	-.128	-.107
CL-Ind	.245**	.084	-.187*	.279**	.106	.184*	.015	.211**	.015	.019	-.002	-.058	.059	.099	.032	.026	.035	.013	-.031	.068
CO-Ind	.289**	.125	-.055	.339**	.392**	.485**	.304**	.442**	.113	.103	.086	.075	.181*	.122	-.003	.347**	-.288**	.233**	.066	-.045
PR-Ind	.324**	.127	-.129	-.060	-.010	.127	-.045	.097	-.179*	-.178*	-.121	-.165*	-.064	-.018	-.082	.054	-.007	-.030	.141	.070
TO-Ind	.417**	.284**	-.039	.147	.282**	.372**	.076	.363**	-.178*	-.187*	-.142	-.241**	-.016	.005	-.100	.282**	-.125	.027	.007	-.018
RO-RA	-.296**	.176*	.399**	-.204**	.090	-.126	-.124	-.112	-.060	-.065	-.138	-.082	-.124	-.120	-.047	.033	-.003	-.135	-.315**	-.179*
CL-RA	.139	-.074	-.281**	.253**	-.089	-.013	-.009	.031	.071	.084	.069	.043	.042	.070	.041	-.157*	.250**	.020	.066	.130
CO-RA	-.053	-.173*	-.052	.387**	.137	.220**	.303**	.190*	.344**	.339**	.351**	.357**	.228**	.109	.065	.117	-.310**	.282**	.217**	.034
PR-RA	.338**	-.047	-.280**	-.234**	-.159*	.013	-.059	-.019	-.248**	-.248**	-.143	-.205**	-.043	.022	-.019	-.005	.037	-.051	.216**	.115

* $p < 0.05$, ** $p < 0.01$. WTE, water temperature; DO, dissolved oxygen; CON, conductivity; BOD, biochemical oxygen demand; COD, chemical oxygen demand; SS, suspended solids; TOC, total organic carbon; TN, total nitrogen; DTN, dissolved total nitrogen; NH₃-N, ammonia nitrogen; NO₃-N, nitrate nitrogen; TP, total phosphorus; DTP, dissolved total phosphorus; PO₄-P, phosphate phosphorus; Chl-*a*, chlorophyll-*a*; TRAN, transparency; TUR, turbidity; HRT, hydraulic retention time; RO, rotifera; CL, cladocera; CO, copepoda; PR, protozoa; TO, total; Ind, individuals; RA, relative abundance.

Appendix 2. Monthly dominant zooplankton species in lake PaIdang from March to November 2015.

Site	Taxon	Month									
		Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Oct	Sep	Nov	
St.1	Rotifera	<i>Synchaeta oblonga</i>	<i>Keratella cochlearis</i>	<i>Keratella cochlearis</i>	<i>Pompholyx complanata</i>	<i>Pompholyx complanata</i>	<i>Brachionus angularis</i>	<i>Keratella cochlearis</i>	<i>Keratella cochlearis</i>	<i>Keratella cochlearis</i>	<i>Synchaeta oblonga</i>
	Cladocera	<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>
	Copepoda	Nauplius	Nauplius	Nauplius	Nauplius	Nauplius	Nauplius	Nauplius	Nauplius	Nauplius	Nauplius
	Protozoa	<i>Codonella cratera</i>	<i>Codonella cratera</i>	<i>Tintinnidium cylindrata</i>	<i>Diffugia corona</i>	<i>Diffugia corona</i>	<i>Diffugia corona</i>	<i>Diffugia corona</i>	<i>Diffugia corona</i>	<i>Tintinnidium cylindrata</i>	<i>Tintinnidium cylindrata</i>
St.2	Rotifera	<i>Notholca labis</i>	<i>Synchaeta oblonga</i>	<i>Synchaeta oblonga</i>	<i>Keratella cochlearis</i>	<i>Polyarthra vulgaris</i>	<i>Polyarthra vulgaris</i>	<i>Keratella cochlearis</i>	<i>Keratella cochlearis</i>	<i>Keratella cochlearis</i>	<i>Synchaeta oblonga</i>
	Cladocera	<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>
	Copepoda	Nauplius	Nauplius	Nauplius	Nauplius	Nauplius	Nauplius	Nauplius	Nauplius	Nauplius	Nauplius
	Protozoa	<i>Codonella cratera</i>	<i>Codonella cratera</i>	<i>Vorticella campanula</i>	<i>Diffugia limnetica</i>	<i>Diffugia corona</i>	<i>Diffugia corona</i>	<i>Diffugia corona</i>	<i>Diffugia corona</i>	<i>Diffugia corona</i>	<i>Tintinnidium cylindrata</i>
St.3	Rotifera	<i>Synchaeta oblonga</i>	<i>Keratella cochlearis</i>	<i>Keratella cochlearis</i>	<i>Ploesoma truncatum</i>	<i>Ploesoma truncatum</i>	<i>Pompholyx complanata</i>	<i>Keratella cochlearis</i>	<i>Keratella cochlearis</i>	<i>Ploesoma truncatum</i>	<i>Keratella cochlearis</i>
	Cladocera	<i>Bosmina longirostris</i>	<i>Bosmina longirostris</i>	<i>Daphnia galeata</i>	<i>Daphnia galeata</i>	<i>Daphnia galeata</i>	<i>Daphnia galeata</i>	<i>Ceriodaphnia reticulata</i>	<i>Daphnia pulex</i>	<i>Daphnia galeata</i>	<i>Daphnia galeata</i>
	Copepoda	Nauplius	Nauplius	Nauplius	Nauplius	Nauplius	Nauplius	Nauplius	Nauplius	Nauplius	Nauplius
	Protozoa	<i>Tintinnidium cylindrata</i>	<i>Tintinnidium cylindrata</i>	<i>Tintinnidium cylindrata</i>	<i>Diffugia corona</i>	<i>Diffugia corona</i>	<i>Diffugia corona</i>	<i>Diffugia corona</i>	<i>Diffugia corona</i>	<i>Tintinnidium cylindrata</i>	<i>Tintinnidium cylindrata</i>
St.4	Rotifera	<i>Synchaeta oblonga</i>	<i>Polyarthra vulgaris</i>	<i>Keratella cochlearis</i>	<i>Brachionus angularis</i>	<i>Brachionus calyciflorus</i>	<i>Keratella valga</i>	<i>Pompholyx complanata</i>	<i>Keratella cochlearis</i>	<i>Keratella cochlearis</i>	<i>Keratella cochlearis</i>
	Cladocera	<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>
	Copepoda	Nauplius	Nauplius	Nauplius	Nauplius	Nauplius	Nauplius	Nauplius	Nauplius	Nauplius	Nauplius
	Protozoa	<i>Codonella cratera</i>	<i>Codonella cratera</i>	<i>Tintinnidium cylindrata</i>	<i>Diffugia corona</i>	<i>Diffugia corona</i>	<i>Diffugia corona</i>	<i>Diffugia corona</i>	<i>Diffugia corona</i>	<i>Diffugia corona</i>	<i>Epistylis sp.</i>