

몬순지역 대형댐(소양호)에서 동물플랑크톤 군집의 계절천이

김문숙* · 김범철 · 전만식¹

강원대학교 자연과학대학 환경과학과, ¹강원연구원

Seasonal Succession of Zooplankton Community in a Large Reservoir of Summer Monsoon Region (Lake Soyang). Moon Sook Kim* (0000-0003-2076-043X), Bomchul Kim (0000-0003-1687-221X) and Man-Sig Jun¹ (0000-0001-8761-8521) (Department of Environmental Science, Kangwon National University, Chuncheon 24341, Republic of Korea; ¹Research Institute for Gangwon, Chuncheon 24265, Republic of Korea)

Abstract Seasonal succession of zooplankton community and species composition was studied from 2003 to 2014 in a deep reservoir, Lake Soyang, in monsoon climate region, Korea. Annual precipitation was concentrated more than 70% between June and September and it showed remarkably that seasonal variation in water quality. Seasonal variation of water quality in Lake Soyang appeared to be more significant than annual variations, and the inflow of turbid water during the summer rainfall was the most important environmental factor. Zooplankton species composition in Lake Soyang showed obvious tendency through two periods (May to June and August to October) every year. Small zooplankton (rotifer; *Keratella cochlearis*, *Polyarthra vulgaris*) dominated in spring and mesozooplankton such as copepods and crustaceans were dominant in summer and fall. Zooplankton biomass showed the maximum in September after monsoon rainfall, and chlorophyll showed a similar seasonal variation and it showed a high correlation ($r=0.45$). The increase of zooplankton biomass is considered to be a bottom-up effect due to the increase of primary producers and inflow of nutrients and organic matter from rainfall. In this study, we found that the variation of zooplankton community was affected by rainfall in monsoon climate region and inflow of turbid water was an important environmental factor, which influenced the water quality, zooplankton seasonal succession in Lake Soyang. It was also considered to be influenced by hydrological characteristics of lake and environment of watershed. In conclusion, seasonal succession of zooplankton species composition was the same as the PEG model. But seasonal succession of zooplankton biomass differed not only in the temperate lake but also in the monsoon region.

Key words: zooplankton, seasonal succession, monsoon rainfall, Lake Soyang

서 론

호소에서 동물플랑크톤 군집의 변동은 계절에 의한 천

이가 근본적인 요인이 되며, 계절에 따른 동물플랑크톤의 생물량과 종 구성에 대한 시공간적 변화는 지속적으로 연구되어 왔다(Sommer *et al.*, 1986; Kim *et al.*, 1999; Beisner *et al.*, 2009; García *et al.*, 2009; Kim *et al.*, 2010a; Vanderploeg *et al.*, 2012). 동물플랑크톤의 계절천이는 1차적으로 물리·화학적인 요인에 의해 결정되는 것으로 알려져 있으며(Anneville *et al.*, 2007; Sellami *et al.*, 2010), 이

Manuscript received 28 May 2018, revised 26 February 2019, revision accepted 6 March 2019

* Corresponding author: Tel: +82-33-250-2912, Fax: +82-33-250-1339, E-mail: moon153@rig.re.kr

© 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.

외에도 조류의 증식, 종간경쟁, 유기물질 등의 요인에 의한 top-down 효과 및 bottom-up 효과로 일어난다(Carpenter and Kitchell, 1993). 또한 비생물학적 매개변수와 생물학적 매개변수의 복합적인 영향에 의해서도 발생한다(Christou, 1998; Beyst *et al.*, 2001; Dejen *et al.*, 2004; Hidalgo *et al.*, 2010).

동물플랑크톤의 계절천이는 전 세계의 다양한 기후에서 다르게 나타나며(Licandro and Ibanez, 1995), 호수마다 동물플랑크톤의 계절천이를 결정하는 요인 또한 다양하다. 따라서 동물플랑크톤의 계절변동은 수생태계의 변화를 이해하는데 있어 공간분포보다 중요하게 다루어지기도 한다. 일반적으로 온대호수에서 동물플랑크톤의 계절변동은 수온과 식물플랑크톤의 계절천이가 중요한 요인으로 작용한다. 반면 동아시아권 문순지역의 호수에서는 계절적 강우가 담수생태계 변화에 중요한 요인으로 작용하기도 한다(You *et al.*, 2012; Sahu *et al.*, 2013). 문순강우는 아시아의 많은 호수와 저수지 생태계변화에서 주요한 결정요인으로 수리학적 상태와 이화학적 수질특성에 큰 영향을 미치며(An, 2001; An and Kim, 2003; Jeong *et al.*, 2009; Park *et al.*, 2009), 동물플랑크톤 생물량 변동에도 중요한 결정요인으로 작용하는 것으로 보고되었다(Song *et al.*, 2003; Kim *et al.*, 2010b; Choi *et al.*, 2012). 문순지역 호수에서 여름철 강우사상은 동물플랑크톤의 종조성과 생물량의 계절적 천이를 결정하는 중요한 요인이 되며, 이는 수체의 구조적인 특성 그리고 수리학적 체류시간 등에 따라 차이를 보인다(You *et al.*, 2010).

소양호는 우리나라의 최대 인공호로 체류시간이 길고 성층현상이 뚜렷한 수리·수문학적 특성을 가지고 있다. 반면에 연평균 강우의 70% 이상이 6월부터 9월 사이에 집중되어 이에 따른 수리·수문학적 및 이화학적 변화가 크게 나타나는 것으로 알려져 있다(Heo *et al.*, 1992; Park *et al.*, 2011). 소양호에서 계절적 강우에 따른 영향은 주로 수리·수문학적 및 이화학적 관계로 연구가 진행되었으며, 동식물플랑크톤 등 생물군집과 연계한 연구사례는 거의 없는 실정이다. 이 연구에서는 문순지역 대형호수인 소양호에서 동물플랑크톤 군집의 계절천이에 미치는 환경요인을 고찰하고자 하였다.

재료 및 방법

1. 조사지 개요

소양호는 1973년 댐이 건설되면서 만들어진 인공호수로 길이가 60 km, 폭이 0.5 km 인 수지형(dendritic type)을 하

고 있다. 유역면적은 2,663 km², 최대 저수량은 29억 m³, 평균 저수량은 15억 m³이며, 수리학적 체류시간이 0.75년이다. 소양호는 북한강상류에 위치해 있으며, 유역의 대부분은 산림과 농경지로 이루어져 있고 인구밀도가 낮아 유입 오염원이 적은 것이 특징이다. 소양호는 많은 지류를 가지는 나뭇가지 모양의 길고 좁은 호수이므로 물의 수평적 혼합이 매우 제한되고 있으며 수온, 수질 및 플랑크톤 밀도가 국지적으로 큰 차이를 나타내고 있다(Kim *et al.*, 1985). 겨울에 상류수역은 결빙되지만, 하류 수역은 연중 수온이 4°C 이상으로 결빙되지 않는 온대일순환 호수(warm monomictic lake)이다.

2. 환경요인

수질조사는 소양호 댐앞 지점에서 2003년부터 2014년까지 수심별 0 m, 2 m 및 5 m로 월 1회 실시하였다(Fig. 1). 수질은 수온, 탁도, BOD, TP 및 Chl. *a*를 분석하였다. 수온은 현장에서 디지털 온도계를 사용하여 측정하였으며, 탁도는 탁도계(HACH 2100P Turbimeter)로 측정하였다. BOD(Biochemical Oxygen Demand)는 수질공정시험법에 따라 20°C 배양기에서 5일간 배양 후 용존산소의 차이로 측정하였다. Total phosphorus (TP)는 Standard Method의 ascorbic acid법으로 분석하였다. Chl. *a*는 GF/C galss filter로 여과한 후 여과지를 냉동보관 하였다가 2주 이내에 90% acetone으로 추출하여 tissue homogenizer로 분쇄한 후 분광광도계를 이용하여 분석하였다(Lorenzen, 1967).

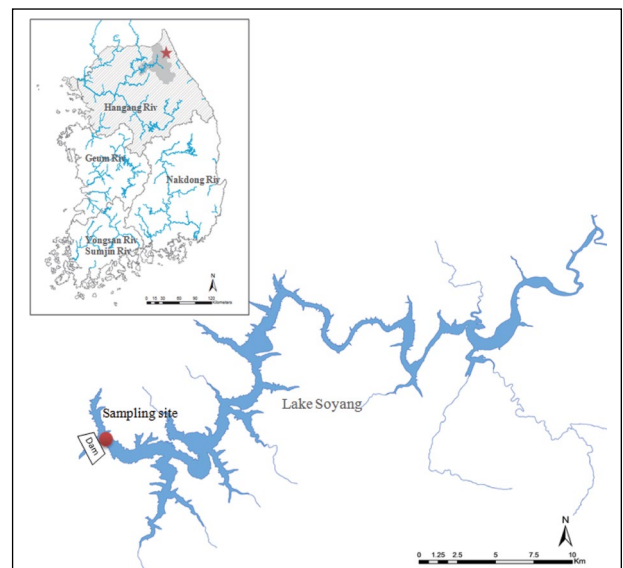


Fig. 1. Map showing the sampling site.

3. 동물플랑크톤 채집 및 탄소량 산정

동물플랑크톤 조사는 소양호 댐앞 지점에서 2003년 6월부터 2014년 12월까지 월 1회로 총 136회 실시하였으며, 동물플랑크톤의 시료는 65 µm plankton net를 이용하여 표층에서 20m까지 수직 예인하였다. 여과된 시료는 폴리에틸렌 250 mL 병에 담아 sucrose-formalin으로 최종 농도가 4%가 되도록 고정하였다. 고정된 동물플랑크톤 시료는 Sedgwick-Rafter 계수판에 넣고 현미경하에서 저배율(60~150배)로 지각류, 요각류, 윤충류 및 원생동물로 구분하여 검정하였다. 검정 후 계수한 종별로 net의 면적(cm²), 예인한 깊이(m), 시료량(mL)을 고려하여 농축배수를 산정한 뒤, 리터(L)당 개체수로 환산하였다(Mizuno, 1991).

동물플랑크톤의 탄소량 산정을 위한 지각류와 요각류의 생체량은 Culver *et al.* (1985) 및 Kawabata and Urabe (1998)가 제시한 길이-무게 관계식($W = aL^b$)을 사용하였다. 윤충류는 Ruttner-Kolisko (1977) 및 Telesh *et al.* (1998)이 제시한 계산식을 사용하였으며, 원생동물의 체적은 Foissner and Berger (1996)가 제시한 계산식을 이용하였다.

동물플랑크톤의 습중량은 비중 1.025를 모두 적용하여 계산하였고(Hall *et al.*, 1976), 건중량은 습중량의 10%인 것으로 가정하였다(Pace and Orcutt, 1981). 예외적으로 윤충류인 *Asplanchna*, *Synchaeta*속의 종들은 다른 종보다 수분함량이 많은 것으로 보고되었으므로 건중량은 습중량의 4%인 것으로 가정하였다(Dumont *et al.*, 1975). 탄소량은 건중량의 48%로 가정하여 산정하였다(Andersen and Hessen, 1991).

결과 및 고찰

1. 물리·화학적 환경요인

우리나라의 몬순기후는 여름에 강우량이 집중되고 이로 인해 하천의 유량이 크게 변동하는 특성을 갖는다. 2003년부터 2014년까지 소양호 유역의 연간 강수량은 705~1,779 mm yr⁻¹로 연도별로 큰 변동을 보였다. 강수량의 계절분포 또한 큰 변동을 보였으며, 6~9월에 총 강수량의 70% 이상을 차지하였다(Fig. 2). 월별로는 7월에 최대를 보여 여름 시기에 강우가 집중되는 것으로 나타났으며, 이 시기에는 소양호의 수위가 19~30 m 상승하여 수리학적 변화에 영향을 미치는 것으로 나타났다(Kim *et al.*, 2018). 또한 여름철 집중 강우시 유입된 다량의 탁수에는 높은 영양염 농도뿐만 아니라 많은 유기물을 포함하고 있어 소양호의 수리학적 변화뿐만 아니라 이화학적 변화에도 크게 영향을 미치는 것으로 보고되고 있다(Heo *et al.*,

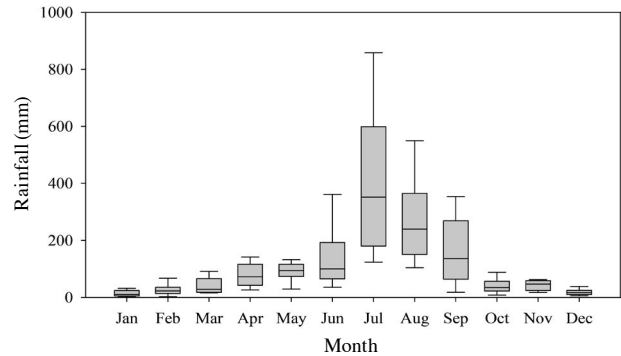


Fig. 2. Variation of monthly means of rainfall during the study period (2003~2014).

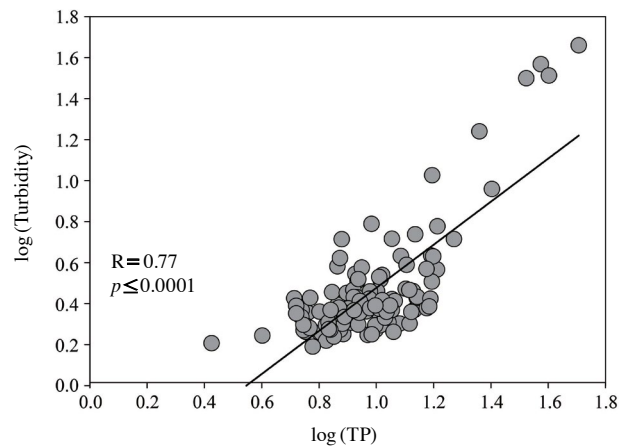


Fig. 3. The result of regression analysis between the turbidity and total phosphorus.

1992, 1998; Choi *et al.*, 2001; Kim and Kim, 2006; Kim and Jung, 2007).

2003년부터 2014년까지 소양호 수질은 계절에 따른 뚜렷한 차이를 보였다(Table 1). 소양호의 수온은 4.0~28.4°C의 범위를 보였으며, 8월에 가장 높고 2월에 가장 낮았다. BOD는 연평균 농도가 1.0 mg L⁻¹ 이하로 연도별 큰 차이가 없는 반면, 8~9월에는 1.0 mg L⁻¹ 이상으로 나타나기도 하였다. Chl. *a* 농도는 1.13~7.51 µg L⁻¹의 범위로 뚜렷한 계절변동을 보였으며, 8월에 가장 높게 나타났다. 소양호에서는 식물플랑크톤의 밀도는 강우 이후인 8~9월에 증가하는 경향을 보이며, 이는 강우 이후 수체가 안정화되면서 유입된 높은 영양염 및 유기물에 의한 영향으로 나타난다(Lee *et al.*, 2002). 2006년 7월의 경우에는 800 mm 이상의 집중강우로 인해 19억 m³의 탁수가 소양호내로 유입되었으며(Jun *et al.*, 2007), TP 농도는 표층 24.3 µg L⁻¹, 중층 250 µg L⁻¹로 큰 변동을 보였다. 집중강

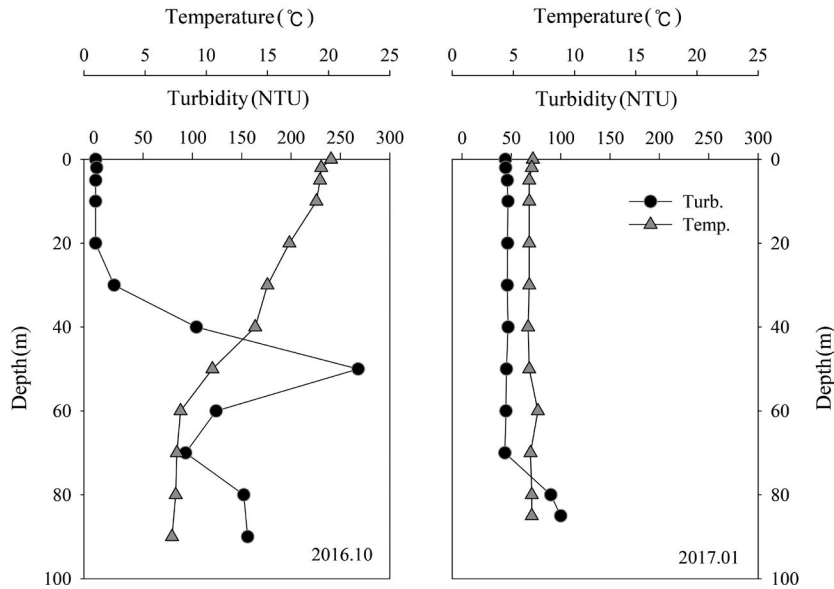


Fig. 4. Turbidity concentration according to the depth when monsoon season and winter (turnover) in Lake Soyang.

Table 1. Seasonal variations of temperature, turbidity, BOD, TP and chlorophyll-*a* in Lake Soyang from 2003 to 2014 (The parameters are representing yearly average using data of 0 m, 2 m and 5 m water depth).

	Temp. (°C)		Turb. (NTU)		BOD (mg L ⁻¹)		TP (μg L ⁻¹)		Chl. <i>a</i> (μg L ⁻¹)	
	Range	Aver.	Range	Aver.	Range	Aver.	Range	Aver.	Range	Aver.
Jan.	4.0~7.9	6.5	0.03~44.6	4.8	0.3~1.1	0.6	4.67~49.89	11.29	0.88~2.70	1.42
Feb.	4.0~6.2	5.0	0.03~31.5	3.9	0.1~1.4	0.7	3.50~39.01	10.83	0.54~2.93	1.40
Mar.	4.7~6.6	6.5	0.7~16.4	2.3	0.4~0.9	0.7	3.00~21.91	7.40	0.42~2.89	1.13
Apr.	6.1~12.2	8.8	0.6~9.6	1.8	0.3~1.3	0.7	1.66~14.67	6.96	1.19~3.57	2.23
May	12.5~21.9	16.6	1.0~2.5	1.5	0.4~1.2	0.9	4.25~10.78	7.86	0.70~3.62	2.22
Jun.	20.4~24.9	23.1	0.6~2.2	1.3	0.6~1.8	1.0	4.75~10.48	6.64	0.97~5.22	2.51
Jul.	21.5~26.8	25.4	0.5~8.1	2.1	0.4~1.6	0.9	4.17~24.31	9.96	1.11~8.73	3.67
Aug.	22.9~28.4	26.1	1.0~4.5	1.9	0.7~2.2	1.3	7.67~14.63	10.47	2.97~18.70	7.51
Sep.	21.4~26.2	23.8	0.8~4.2	1.8	0.6~1.8	1.2	6.46~17.67	11.94	1.74~19.67	6.86
Oct.	16.6~20.0	18.9	0.9~2.9	1.5	0.2~1.5	0.9	6.47~12.24	10.31	2.20~11.38	6.16
Nov.	13.2~16.0	14.8	0.9~30.5	4.8	0.3~1.2	0.6	4.49~32.35	11.50	1.08~6.40	2.83
Dec.	8.6~13.7	10.9	0.8~35.9	4.5	0.1~1.5	0.6	4.47~36.51	11.00	0.53~4.80	2.17
Yearly Aver.	14.7~16.6	15.4	1.16~9.78	2.69	0.69~0.99	0.84	7.00~18.08	9.68	2.32~5.17	3.34

우 이후인 8월부터는 Chl. *a* 농도가 증가하기 시작하여 9월에 19.7 μg L⁻¹로 최대를 보였으며, 강우 이전에 비해 약 4배 증가한 것으로 나타났다. 소양호에서 강우 이후 시기에 Chl. *a* 최대농도는 탁수유입에 따른 TP 농도가 주요 환경요인으로 판단되며, 탁도와 TP 농도는 높은 양의 상관성을 보였다(Fig. 3). 반면 총인과 탁도 농도는 11~1월 최대 농도를 보였으며, 이는 다량의 탁수가 소양호 중층(수심 20~30 m 부근)으로 유입되기 때문이다(Heo *et al.*, 1998; Kim and Jung, 2007). 즉, 강우시 중층으로 유입된 다량의 탁수가 겨울 시기 turnover로 인해 표층으로 공급되어 겨울 시기에 최대 농도를 보인 것으로 판단된다. 2007년 1월

에는 turnover로 인해 호수 전체가 40 NTU 이상을 보여 표층까지 영향을 미쳤으며, TP 농도 또한 0.049 mg L⁻¹으로 증가하였다(Fig. 4). 결과적으로 소양호의 수질은 계절적인 변화가 뚜렷하게 나타났으며 연도별로 차이는 있지만, 여름철 홍수기에 유입된 탁수가 수질 환경에 중요한 요인이 되고 있다.

2. 동물플랑크톤 군집의 계절천이

조사기간 동안 소양호 동물플랑크톤 개체수의 계절변동은 연도별 차이는 있지만, 매년 봄과 여름 두 시기에 거

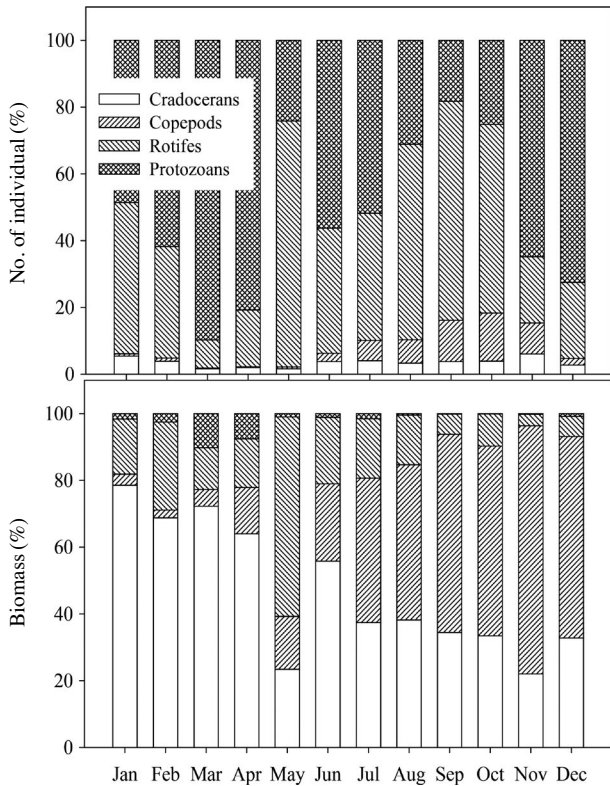


Fig. 5. Monthly variations of relative dominance for zooplankton in lake in Lake Soyang from 2003 to 2014.

쳐 증가하는 경향을 보였다(Fig. 5). 동물플랑크톤 개체수는 수온이 상승하기 시작하는 5월부터 증가하기 시작하여 6월에 최대(248.5 ind L^{-1})를 보였으며, 이후 8월(239.8 ind L^{-1})에 크게 증가한 후 급격히 감소하는 계절변동을 보였다. 증가한 주요 종에는 원생동물인 *Diffugia corona*, *Tintinnidium cylindrata*와 윤충류인 *Polyarthra vulgaris*, *Keratella cochlearis* 등이 출현하였으며, 개체수가 크게 증가하여 우점하였다. 일반적으로 온대호수에서는 봄이 되면 수온상승과 함께 은편모조류 및 작은 중심목 규조류가 번성하여 이를 먹이원으로 하는 윤충류 등 초식성 동물플랑크톤이 증가하며, 동물플랑크톤 밀도는 연중 최대를 나타낸다(Sommer *et al.*, 1986). 소양호에서는 소형 동물플랑크톤의 개체수는 여름철 강우 이후에도 높은 현존량을 보였으며, 윤충류의 경우 총 개체수의 평균 60% 수준을 차지하는 것으로 나타났다(Fig. 5). 이 시기에 윤충류의 개체수 증가는 높은 신진대사 속도를 갖는 윤충류의 특성과 함께 호수의 영양상태 증가로 설명할 수 있다. 문순지역 호수에서는 강우 이후 수체가 안정화되면 윤충류를 중심으로 소형 동물플랑크톤의 개체수가 증가를 보이는데(Kim *et al.*, 2005; You *et al.*, 2010, 2012), 다른 동물플랑크톤보

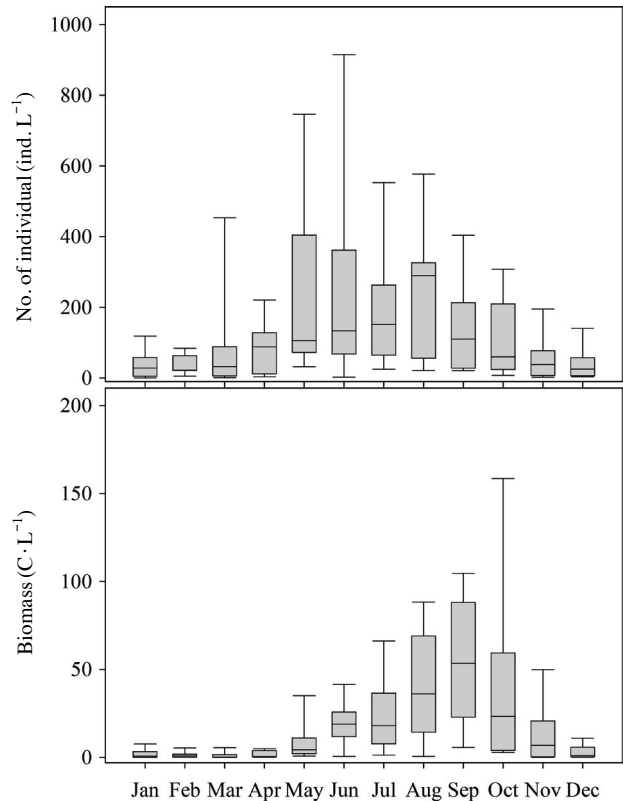


Fig. 6. The annual variations of monthly median and standard deviation of individuals, biomass for zooplankton in Lake Soyang from 2003 to 2014.

다 빠른 생활사를 가진 윤충류가 상대적으로 빠르게 증식하는 것으로 판단된다. 또한 이 시기에는 강우시 유입된 높은 농도의 영양염과 유기물을 포함한 다량의 탁수가 윤충류의 성장에 직간접적인 영향을 준 것으로 판단된다. 연구기간 동안 여름철 집중강우 시 유기물과 영양염 농도는 증가를 보였으며, 2006년 7월 집중강우가 발생한 이후 표층(0~5m 평균)의 총인농도는 약 4배($24.3 \mu\text{g L}^{-1}$)가 증가하였으며, 2011년도 강우 이후에 T-P 및 POC 농도는 강우 전에 비해 약 2배 높은 것으로 나타났다. 수심별 분포 또한 강우 전에 비해 중층에서의 T-P 및 POC 농도가 급격한 증가를 보였다. 많은 연구에서 알려진 바와 같이 소양호는 여름철 집중 강우 시 유역에서 많은 양의 탁수와 함께 다량의 입자성유기물, 인 등이 유입된다(Choi *et al.*, 2001; Kim and Jung, 2007; Park *et al.*, 2011; Jung, 2012). 뿐만 아니라 유기물의 증가로 박테리아도 증가하는 것으로 보고된 바 있다(Ahn, 1998). 따라서 영양염 및 유기물 증가에 따른 bottom-up 효과와 microbial loop를 통해 윤충류 현존량 증가에 영향을 준 것으로 판단된다. 윤충류는 식물플랑크톤뿐만 아니라 박테리아와 원생동물을 먹이원으로 하며

(Ooms-Wilms *et al.*, 1993; Arndt 1993), 영양염 증가와 식물플랑크톤 그리고 박테리아 등 미생물구성원이 운송류의 현존량을 조절하는 것으로 보고된 바 있다(Yoshida *et al.*, 2003; Li *et al.*, 2016).

동물플랑크톤 생물량의 계절변동은 연중 9월에 최대를 보였으며(Fig. 6), 이 시기에는 지각류 및 요각류가 크게 증가하였다. 주요 종에는 지각류인 *Daphnia galeata*, 요각류인 *Mesocyclops leuckarti* 등이 출현하였으며, 지각류와 요각류 생물량은 뚜렷한 계절적 차이를 보였다. 지각류는 봄 시기에 총 탄소량의 50~60%를 차지하였으며, 이른 봄(3~4월)에는 *Bosmina longirostris*가 늦은 봄(6월)에는 *D. galeata*가 우점하였다. 요각류는 여름부터 늦가을까지 우점하였으며 총 탄소량의 43~60% 차지하였다. 소양호에서 동물플랑크톤 생물량의 계절변동은 2006년 강우 이후 9월에 지각류와 요각류의 생물량이 증가하면서부터 뚜렷하게 나타났다. 지각류 및 요각류 생물량의 증가는 수온, Chl. *a* 농도 등 계절적인 영향과 함께 앞서 고찰한 바와 같이 강우시 외부에서 유입된 유기물 및 영양염에 의한 영향으로 설명할 수 있다. 강우 이후 식물플랑크톤 밀도 또한 크게 증가하였으며, 동물플랑크톤과 유사한 계절변동을 보였다($r=0.45$). 또한 Kim *et al.*(2018)은 *D. galeata*와 *M. leuckarti*의 생물량 증가를 미생물, 식물플랑크톤 등 먹이 유용성 증가에 따른 bottom-up 효과와 운송류와의 먹이-포식관계로 설명하였다. 소양호 동물플랑크톤 생물량의 계절변동은 탁수유입에 따른 영양염과 유기물 공급이 주요 요인으로 작용하여 영향을 준 것으로 판단된다.

소양호 동물플랑크톤 생물량의 계절변동을 비교·분석한 결과, 온대지역 호수뿐만 아니라 몬순지역의 호수와도 차이를 보이는 것으로 나타났다. 일반적으로 온대호수에서는 5~6월에 먹이원 증가와 함께 수온 상승에 의한 동물플랑크톤 활동성의 증가로 연중 최대 생물량을 나타내며(Agbeti *et al.*, 1997), 여름 시기인 7~8월에는 식물플랑크톤의 종조성과 현존량의 계절전이에 의해 동물플랑크톤의 생물량이 감소하기도 한다. 또한 PEG 모델에 따르면 동물플랑크톤 생물량은 1차 생산자가 감소하는 늦가을 시기에 먹이부족으로 감소한다. 그러나 소양호에서는 강우 이후 여름 시기에 동물플랑크톤의 생물량이 증가하기 시작하여 가을에 최대를 보였고 11월부터 감소하는 것으로 나타났다. 여름 시기에 동물플랑크톤 밀도의 증가는 강우 이후에 발생하였으며, 이러한 현상은 계절적 강우에 의한 영향을 받는 동아시아 몬순지역 호수에서 나타나고 있다. 크기가 상대적으로 작은 호수에서는 여름철 강우시 동물플랑크톤의 밀도가 크게 감소를 보이며, 강우 이후에는 소형동물플랑크톤의 현존량이 증가하는 군집특성을 보인다(Bais and

Agrawal, 1993; Damotharan *et al.*, 2010; You *et al.*, 2010). 강우시에는 유입유량 변동으로 wash out 현상에 의해 동물플랑크톤 밀도가 감소하는 것으로 보고되었으며, 수심이 낮고 체류시간이 짧은 호수일수록 동물플랑크톤 밀도가 크게 변화하는 것으로 나타났다(You *et al.*, 2007). 반면 소양호와 유사한 수리학적 특성의 호수의 경우에는 강우에 의한 유입유량이 동물플랑크톤 밀도에 크게 영향을 주지 않았으며, 영양상태와 양의 상관성을 보이는 것으로 보고되었다. 그러나 몬순지역 대부분의 호수에서 동물플랑크톤은 강우 이전인 5~7월 시기에 최대 밀도를 보였으며, 강우 이후 9~10월에 동물플랑크톤 밀도가 증가하는 경향을 보이지만, 대부분 최대생물량을 나타내지는 않는 것으로 나타났다(Uhm *et al.*, 2006; La *et al.*, 2008; Yoon *et al.*, 2008; Jeong *et al.*, 2009; You *et al.*, 2010; Joshi, 2011; Sahu *et al.*, 2013). 이는 저수지와 정체성 하천에서도 유사한 것으로 나타났다(Kim *et al.*, 2005; Salve and Hiware, 2010; Kim *et al.*, 2010b; Choi *et al.*, 2011).

소양호 동물플랑크톤 계절변동이 온대호수뿐만 아니라 몬순지역 호수와도 차이를 보이는 것은 호수의 수리·수문학적 특징과 유역환경 특성에 의한 영향으로 판단된다. 소양호는 대형 인공호로 수심이 깊고 체류시간이 길어 다른 인공호에 비해 강우시 유입과 방류량에 의한 수리·수문학적 인자의 영향을 적게 받는다(Jung *et al.*, 2016). 몬순지역의 대부분의 호수에서는 강우시 유량증가에 따른 물리적인 영향으로 동물플랑크톤의 현존량이 일시적으로 감소하는 현상이 뚜렷하게 나타나지만, 소양호에서는 연도별로 차이를 보였다. 또한 소양호 상류유역에는 대규모의 고랭지 농경지가 발달하여 있어 강우시 다량의 탁수가 발생한다. 이러한 다량의 탁수는 중층탁수대를 형성하는데 소양호로 유입되는 TP는 연간 6~14톤, SS는 1~3만톤의 범위인 것으로 나타났다(Eum, 2015). 2006년 경우 여름 강우시 유입된 탁수가 2007년 걸쳐 방류되었는데, 탁도농도 10 NTU 이상이 발생한 기간은 282일(최대탁도 276 NTU)로 나타났다. 더구나 소양호 중층으로 유입된 탁수는 여름 시기뿐만 아니라 겨울 시기 turnover로 인해 표층까지 탁수가 공급되어 봄 시기까지 영향을 미쳤다. 실제로 2007년 turnover 이후 봄 시기에는 TP와 Chl. *a* 농도가 전년도 동일한 시기에 비해 약 2배 높게 나타났으며, 동물플랑크톤 밀도 또한 약 5배가 증가한 것으로 나타났다. 이러한 결과들을 고려할 때, 소양호의 수문학적 특성과 함께 유역에서의 높은 영양염 및 유기물 유입이 동물플랑크톤에게 유리한 환경을 조성하여 9월에 최대생물량을 보인 것으로 생각된다. 즉 소양호 동물플랑크톤 생물량의 계절변동은 강우시 외부유입 공급원과 수심 및 체류시간 등 물리

적인 조건에 의해 결정되는 것으로 판단된다. 동물플랑크톤의 종조성 및 생물량의 계절천이는 수체의 영양상태와 영양염 공급 및 수체의 혼합 시기에 따라 다르며(Sommer *et al.*, 1986), 호수형태 및 유역의 토지이용과 같은 인위적인 요인과 밀접한 관련이 있는 것으로 보고된 바 있다(Van Egeren *et al.*, 2011).

결론적으로 문순지역의 대형호인 소양호 동물플랑크톤 군집은 종별 계절천이는 PEG 모델을 따랐지만, 생물량의 계절천이는 온대호수뿐만 아니라 문순지역의 호수와도 차이를 보였다. 이는 소양호의 유역특성과 구조적인 특징이 동물플랑크톤 생물량의 변동에 직·간접적으로 영향을 준 것으로 판단된다.

적 요

본 연구는 문순지역의 대형호인 소양호를 대상으로 동물플랑크톤의 종 조성과 생물량을 조사하였으며, 군집의 계절천이를 알아보고자 하였다. 또한, PEG 모델과 문순지역에서 다른 호수와의 동물플랑크톤 계절천이를 비교하여 고찰하였다. 조사기간 동안 소양호 유역의 강수량은 705~1,779 mm yr⁻¹의 큰 변동을 보였으며, 70% 이상이 6~9월에 집중되는 것으로 나타났다. 소양호의 수질은 연도별 변화보다 계절적 변화가 뚜렷하게 나타났으며, 문순기후로 인한 여름철 홍수기 탁수유입이 가장 중요한 환경요인으로 작용하였다. 소양호에서 동물플랑크톤 종 조성의 계절천이는 연도별로 차이는 있지만, 매년 두 시기에 걸쳐 뚜렷한 경향을 보였다. 봄 시기에는 소형 동물플랑크톤이 우점하였으며, 여름과 가을 시기에는 크기가 큰 지각류와 요각류가 우점하였다. 동물플랑크톤의 생물량은 집중강우 이후 9월에 최대를 보였으며, Chl. *a* 농도와 유사한 계절변동을 보였다($r=0.45$). 소양호에서 동물플랑크톤의 생물량 증가는 강우 시 유입된 영양염과 유기물에 의한 미생물, 식물플랑크톤 등 먹이유용성 증가에 따른 microbial loop와 bottom-up 효과로 판단된다. 결과적으로, 문순지역의 대형호인 소양호 동물플랑크톤은 종별 계절천이는 PEG 모델을 따랐지만, 생물량의 계절천이는 온대호수뿐만 아니라 문순지역의 호수와도 차이를 보였다. 이는 유역에서 유입된 다량의 유기물 등과 함께 소양호의 수심, 체류시간 등 수리학적 특성에 따른 영향으로 판단된다.

저자기여도 개념설정: 전만식 & 김범철, 방법론 및 분석: 전만식 & 김문숙, 자료제공 및 과제관리: 김범철, 원고 초안작성 및 편집: 김문숙, 원고교정: 전만식 & 김범철. 본 논

문의 공동저자 3인은 논문 최종본을 검토하였으며 결과에 대해 모두 동의하였습니다.

이해관계 본 연구는 한강수계관리위원회의 환경기초조사 사업에 의해 지원되었으며, 강원대학교 환경학과(환경생태학연구실) 연구사업으로 추진되었습니다.

연구비 본 연구는 한강수계관리위원회의 환경기초조사 사업에 의해 지원되었습니다.

사사 본 연구에서의 이화학적 환경요인 분석결과는 강원대학교 환경학과(환경생태학연구실)에서 제공받았습니다.

REFERENCES

- Agbeti, M.D., J.C. Kingston, J.P. Smol and C. Watters. 1997. Comparison of phytoplankton succession in two lakes of different mixing regimes. *Archiv für Hydrobiologie* **140**(1): 37-69.
- Ahn, T.S., S.I. Choi, M.S. Byeon and H.W. Park. 1998. Temporal and Spatial Changes of Bacterial Numbers and their Cell Volume in Lake Soyang. *Korean Journal of Limnology* **31**(3): 186-190.
- An, K.G. 2001. Hydrological significance on inter-annual variability of cations, anions, and conductivity in a large reservoir ecosystem. *Korean Journal of Limnology* **34**(1): 1-8.
- An, K.G. and D.S. Kim. 2003. Response of lake water quality to nutrient inputs from various streams and in-lake fish farms. *Water, Air, and Soil Pollution* **149**(1-4): 27-49.
- Anderssen, A. and D.O. Hessen. 1991. Carbon, nitrogen, and phosphorus contents of freshwater zooplankton. *Limnology and Oceanography* **36**: 807-814.
- Anneville, O., J.C. Molinero, S. Souissi, G. Balvay and D. Gerdeaux. 2007. Long-term changes in the copepod community of Lake Geneva. *Journal of Plankton Research* **29**: 49-59.
- Arndt, H. 1993. Rotifers as predators on components of the microbial web (bacteria, heterotrophic flagellates, ciliates) - a review. *Hydrobiologia* **255**(256): 231-246.
- Bais, V.S. and W.L. Agrawal. 1993. Seasonal Variation of Nutrient content in *Hydrilla verticollata*. *Journal of Freshwater Biology* **3**: 259-265.
- Beisner, B.E. and P.R. Peres-Neto. 2009. Seasonal trophic dynamics affect zooplankton community variability. *Freshwater Biology* **54**: 2351-2363.
- Beyst, B., D. Buisse, A. Dewicke and J. Mees. 2001. Surf zone hyperbenthos of Belgian sandy beaches: seasonal patterns. *Estuarine, Coastal and Shelf Science* **53**: 877-895.
- Carpenter, S.R. and J.R. Kitchell. 1993. Cascading trophic inter-

- actions and lake productivity. *BioScience* **35**: 634-639.
- Christou, E.D. 1998. Interannual variability of copepods in a Mediterranean coastal area (Saronikos Gulf, Aegean Sea). *Journal of Marine Systems* **15**: 523-532.
- Choi, K., B. Kim and U. Lee, 2001. Characteristics of Dissolved Organic Carbon in Three Layers of a Deep Reservoir, Lake Soyang, Korea. *International Review of Hydrobiology* **86**(1): 63-76.
- Choi, J.Y., K.S. Jeong, G.H. La, H.W. Kim, K.H. Chang and G.J. Joo. 2011. Inter-annual variability of a zooplankton community: the importance of summer concentrated rainfall in a regulated river ecosystem. *Journal of Ecology and Field Biology* **34**(1): 49-58.
- Choi, J.Y., S.K. Kim, G.H. La, K.S. Jeong, H.W. Kim, T.K. Kim and G.J. Joo. 2012. Microcrustacean Community Dynamics in Upo Wetlands: Impact of Rainfall and Physiochemical Factor on Microcrustacean Community. *Journal of Korea Limnology* **45**(3): 340-346.
- Culver, D.A., M.M. Boucherle, D.J. Bean and J.W. Flethcer. 1985. Biomass of freshwater crustacean zooplankton from Length-Weight regressions. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences* **42**: 1380-1390.
- Damotharan, P., N.V. Perumal and M. Arumugam. 2010. Seasonal variation of physicochemical characteristics in point Callimore Coastal waters (South East Coast of India). *Middle-East Journal of Scientific Research* **6**(4): 333-339.
- Dejen, E., J. Vijverberg, L.A.J. Nagelkerke and F.A. Sibbing. 2004. Temporal and spatial distribution of microcrustacean zooplankton in relation to turbidity and other environmental factors in a large tropical lake (L. Tana, Ethiopia). *Hydrobiologia* **513**: 39-49.
- Dumont, H.J., I. Van de Velde and S. Dumont. 1975. The dry weight estimate of biomass in a selection of Cladocera, Copepoda and Rotifera from the plankton, Periphyton and Benthos of Continental Waters. *Oecologia* (Berl.) **19**: 75-97.
- Eum, J.S. 2015. Runoff Characteristics of Non-point Source Pollution from Agricultural Watershed and Water Quality Simulations with Crop Change. Doctoral Dissertation of Kangwon National University.
- Foissner, W. and H. Berger. 1996. A user-friendly guide to the ciliates (Protozoa, Ciliophora) commonly used by hydrobiologists as bioindicators in rivers, lakes, and waste water, with notes on their ecology. *Freshwater Biology* **35**(2): 375-482.
- García, C.E., S. Nandini and S.S. Sarma. 2009. Seasonal dynamics of zooplankton in lake huetzalin, Xochimilco (Mexico City, Mexico). *Limnologia* **39**: 283-291.
- Hall, D.J. and S.T. Threlkeld. 1976. The size-efficiency hypothesis and the size structure of zooplankton communities. *Annual Review of Ecology and Systematics* **7**: 177-208.
- Heo, W.M., B.C. Kim, Y.N. Kim and K.S. Choi. 1998. Storm runoff of phosphorus from nonpoint sources into Lake Soyang and transportation of turbid watermass within the lake. *Journal of Korea Limnology* **31**(1): 1-8.
- Heo, W.M., B.C. Kim, T.S. Ahn and K.J. Lee. 1992. Phosphorus loadings from watershed and fish farms into Lake Soyang and the phosphorus budget. *Journal of Korea Limnology* **25**(4): 207-214.
- Hidalgo, P., R. Escribano, O. Vergara, E. Jorquera, K. Donoso and P. Mendoza. 2010. Patterns of copepod diversity in the Chilean coastal upwelling system. *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography* **57**(24): 2089-2097.
- Jeong, H.G., D.H. Hwang, H.J. Lee, J.K. Seoa, Y.S. Yoon and J.K. Lee. 2009. Communities and Vertical Distribution of the Zooplankton with Different Habitats In Artificial Lake. Collected papers of Korean Society of Water and Wastewater-Korean Society on Water Quality (Autumn scientific meeting).
- Joshi, P.S. 2011. Studies on zooplankton of Rajura Lake of Buldhana district, Maharashtra India. *Science Research Reporter* **1**(3): 132-137.
- Jun, M.S. 2007. A Device of Reducing Muddy Water in the Watershed of Soyang Dam. Research Institute for Gangwon (07-18).
- Jung, S.M. 2012. Characteristics of Nonpoint Source Pollution in the Han River and Effects of turbid water on Aquatic. Doctoral Dissertation of Kangwon National University.
- Jung, S.M., M.S. Shin, J.K. Kim, J.S. Eum, Y.K. Lee, J.Y. Lee, Y.S. Choi, K.G. You, J. Owen and B.C. Kim. 2016. The effect of asian summer monsoons on algal blooms in reservoirs. *Inland Waters* **6**(3): 406-413.
- Kawabata, K. and J. Urabe. 1998. Length-weight relationships of eight freshwater planktonic crustacean species in Japan. *Freshwater Biology* **39**: 199-205.
- Kim, B.C. and S.M. Jung. 2007. Turbid Storm Runoffs in Lake Soyang and Their Environmental Effect. *Journal of Korea Society of Environmental Engineers* **29**(11): 1185-1190.
- Kim, B.C., J.O. Kim, M.S. Jun and S.J. Hwang. 1999. Seasonal Dynamics of Phytoplankton and Zooplankton community in Lake Soyang. *Journal of Korea Limnology* **32**(2): 127-134.
- Kim, B.C., K.S. Cho and T.S. Ahn. 1985. A Horizontal variation of primary productivity and environmental factors in Lake Soyang. *Korean Journal of Limnology* **18**: 1-10.
- Kim, H.S., D.S. Kong and S.J. Hwang. 2005. Characteristic community Dynamics of Phyto- and Zooplankton in a Shallow Eutrophic Reservoir. *Journal of Korea Limnology* **38**(1): 18-29.
- 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. 2010a. Assessing the Plankton Dynamics in Lakes and Reservoirs Ecosystem in the Southwestern Parts of Korea. *Journal of Korean*

- Society of Environmental Biology* **28**(2): 86-94.
- Kim, H.W., J.Y. Choi, G.H. La, K.S. Jeong and G.J. Joo. 2010b. Relationship between Rainfall and Zooplankton Community Dynamics in a Riverine Wetland Ecosystem (Upo). *Journal of Korea Limnology* **43**(1): 129-135.
- Kim, M.S., B.C. Kim, M.S. Jun. 2018. Long Term Variations and Environment Factors of Zooplankton Community in Lake Soyang. *Journal of Korean Society of Environmental Biology* **51**(1): 29-39.
- Kim, Y.H. and B.C. Kim. 2006. Application of a 2-Dimensional Water Quality Model (CE-QUAL-W2) to the Turbidity Interflow in a Deep Reservoir (Lake Soyang, Korea). *Lake and Reservoir Management* **22**(3): 213-222.
- La, G.H., H.Y. Lee and H.W. Kim. 2008. The Vertical Changes of Zooplankton Dynamics and Community Filtration Rate in the Artificial Lake (Okjeong Lake). *Journal of Korean Society of Environmental Biology* **26**(4): 392-401.
- Lee, H.W., K.G. An and S.S. Park. 2002. Long-Term Annual Trend Analyses of Epilimnetic Water Qualities and Their Longitudinal Heterogeneities in the Soyang Lake. Collected papers of Korean Society of Water and Wastewater-Korean Society on Water Quality (Autumn scientific meeting).
- Li, J., F. Chen, Z. Liu, X. Zhao, K. Yang, W. Lu and K. Cui. 2016. Bottom-up versus top-down effects on ciliate community composition in four eutrophic lakes (China). *European Journal of Protistology* **53**: 20-30.
- Licandro, P. and F. Ibanez. 1995. Changes of zooplankton communities in the Gulf of Tigullio (Ligurian Sea, Western Mediterranean) from 1985 to 1995. Influence of hydroclimatic factors. *Journal of Plankton Research* **22**: 2225-2253.
- Lorenzen, C.J. 1967. Determination of chlorophyll and pheopigments; spectrophotometric equation. *Limnology and Oceanography* **12**: 343-346.
- Mizuno, T. 1991. An Illustrated Guide to Freshwater Zooplankton in Japan. TOUKAI University Publications.
- Ooms-Wilms, A.L. 1997. Are bacteria and important food source for rotifers in eutrophic lakes? *Journal of Plankton Research* **19**: 1125-1141.
- Pace, M.L. and J.D. Orcutt. 1981. The relative importance of protozoans, rotifers, and crustaceans in a freshwater zooplankton community. *Limnology and Oceanography* **26**(5): 822-830.
- Park, H.K., M.S. Byeon, Y.N. Shin and D.I. Jung. 2009. Sources and spatial and temporal characteristics of organic carbon in two large reservoirs with contrasting hydrologic characteristics. *Water Resources Research* **45**(11): W11418.
- Park, H.K., O.Y. Kwon and D.I. Jung. 2011. Characteristics of Allochthonous Organic Matter in Large Dam Reservoir, Lake Soyang. *Journal of Korean Society on Water Quality* **27**(1): 88-97.
- Ruttner-Kolisko, A. 1977. Suggestions for biomass calculation of plankton rotifers. *Archiv für Hydrobiologie Beiheft Ergebnisse der Limnologie* **8**: 71-76.
- Sahu, B.M., S.K. Baliarsingh, S. Srichandan and K.C. Sahu. 2013. Seasonal variation of zooplankton abundance and composition in Gopalpur Creek: a tropical tidal backwater, east coast of India. *Journal of the Marine Biological Association of India* **55**(1): 59-64.
- Salve, B. and C. Hiware. 2010. zooplankton diversity of Wan reservoir, Nagapur (MS) India. *Journal of Trends Research Science and Technology* **2**(1): 39-48.
- Sellami, I., W. Guermazi, A. Hamza, L. Aleya and H. Ayadi. 2010. Seasonal dynamics of zooplankton community in four Mediterranean reservoirs in humid area (BeniMtir: north of Tunisia) and semi arid area (Lakhmes, Nabhana and Sidi Saâd:center of Tunisia). *Journal of Thermal Biology* **35**: 392-400.
- Sommer, U., Z.M. Gliwicz, W. Lampert and A. Duncan. 1986. The PEG-model of seasonal succession of planktonic events in fresh waters. *Archiv für Hydrobiologie* **106**: 433-471.
- Song, Y.H., W.C. Lee and I.S. Kwak. 2003. Study on Response-Species of Zooplankton to the Seasonal Changes of Precipitation and Temperature. *Journal of Korea Limnology* **36**(1): 9-20.
- Telesh, I.V., M. Rahkola and M. Viljanen. 1998. Carbon content of some freshwater rotifers. *Hydrobiologia* **387/388**: 355-360.
- Uhm, S.H. and S.J. Hwang. 2006. Grazing Relationship between Phytoplankton and Zooplankton in Lake Paldang Ecosystem. *Journal of Korea Limnology* **39**(3): 390-401.
- Vanderploeg, H.A., S.A. Pothoven, G.L. Fahnenstiel, J.F. Cavaletto, J.R. Liebig, C.A. Stow, T.F. Nalepa, C.P. Madenjian and D.B. Bunnell. 2012. Seasonal zooplankton dynamics in Lake Michigan: disentangling impacts of resource limitation, ecosystem engineering, and predation during a critical ecosystem transition. *Journal of Great Lakes Research* **38**: 336-352.
- Van Egeren, S.J., S.I. Doson, B. Torke and J.T. Maxted. 2011. The relative significance of environmental and anthropogenic factors affecting zooplankton community structure in Southeast Wisconsin Till Plain lakes. *Hydrobiologia* **668**: 137-146.
- Yoon, J.S., H.G. Jeong, Y.H. Kwon, C.K. Shin and D.J. Hwang. 2008. Seasonal Changes of Zooplankton Distribution with Environmental Factors in Lake Jinyang. *Journal of Environmental and Sanitary Engineering* **23**(4): 45-54.
- Yoshida, T., M. Kagami, T. Bahadur Gurung and J. Urabe. 2001. Seasonal Succession of zooplankton in the north basin of Lake Biwa. *Aquatic Ecology* **35**: 19-29.
- You, K.A., H.K. Park, M.S. Byeon, J.M. Choi, S.H. Yun and D.S. Kong. 2007. Changes of Zooplankton Community in an

- Artificial Vegetation Island of Lake Paldang. *Journal of Korea Society on Water Quality* **23**(3): 339-347.
- 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. *Journal of Korea Limnology* **45**(3): 278-288.