

소양호 동물플랑크톤 군집의 장기변동과 환경요인: 2003~2014

김문숙* · 김범철 · 전만식^{1,*}

강원대학교 환경과학과, ¹강원연구원

Long Term Variations and Environment Factors of Zooplankton Community in Lake Soyang. Kim, Moon Sook* (0000-0003-2076-043X), Bomchul Kim (0000-0003-1687-221X) and Man-Sig Jun^{1,*} (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 Long-term variation of zooplankton community and species composition was studied from 2003 to 2014 in a deep reservoir, Lake Soyang, in monsoon climate region, Korea. In addition, we examined the correlation with environmental factors. Annual precipitation of watershed showed a large variation in the 705~1,779 mm yr⁻¹ and more than 70% of it was being concentrated from June to September. The water quality of Lake Soyang was shown a clearly seasonal variations and particularly turbid water flowing into the lake during rainy season was the most important environmental factors. Zooplankton community in Lake Soyang showed a significant difference before and after 2006. Zooplankton biomass has shown a large increase and also showed a change in the zooplankton community structure since 2006. The of zooplankton showed positive correlation with temperature and BOD, Chl. *a*, TP concentration. These results are considered that nutrient and organic matter contained in the turbid water influences the increase in zooplankton biomass and species composition. However, water quality was limited to account for the increase in biomass of zooplankton. For example, increase of small zooplankton density (rotifer; *Keratella cochlearis*, *Polyarthra vulgaris*) in spring which is dominated by diatoms (large size; *Melosira*, *Synedra* etc.) is considered as a bottom-up effect by the microbial loop. And increased density of crustaceans in autumn was considered a top-down effects by the relationship between predator and prey of microzooplankton and mesozooplankton. In other words the inflow of allochthonous organic matter during rainy season also affected to zooplankton food web in Lake Soyang. In conclusion, biomass, diversity and long-term variations of zooplankton in Lake Soyang were determined by physico-chemical factors but also it is considered that biological interactions is important.

Key words: zooplankton, long-term variation, environment factors, Lake Soyang

서 론

동물플랑크톤은 수생태계의 먹이망 (food web) 내에서

식물플랑크톤 및 박테리아를 섭식함으로써 상위영양단계로 에너지를 전달하는 중추적인 역할을 한다 (Wetzel and Linkens, 1983; Kim *et al.*, 2000). 즉 동물플랑크톤은 먹이사슬, 먹이망, 에너지 흐름 및 물질순환과 같은 수생태계의 모든 기능적 측면에서 영향을 미치는 가장 중요한 생물학적 구성요인 중 하나라 할 수 있다 (Murugan *et al.*, 1998; Dadhick and Sexena, 1999; Sinha and Islam, 2002;

Manuscript received 5 January 2018, revised 31 January 2018, revision accepted 13 March 2018
* Corresponding author: Tel: +82-33-250-2912, Fax: +82-33-250-1339, E-mail: moon153@rig.re.kr
Tel: +82-33-250-1324, Fax: +82-33-250-1339, E-mail: jms@rig.re.kr

Park and Shin, 2007). 반면 수생태계에서 동물플랑크톤의 역할은 수체의 수리학적 특성(Keckeis *et al.*, 2003) 및 먹이망을 구성하는 요소(Reynolds, 1994) 그리고 호소의 영양상태(Heath *et al.*, 2003)에 따라 다양하게 나타난다. 이는 동물플랑크톤 군집이 환경변화에 매우 민감하고(Pace, 1986), 호소의 영양단계와 수질 등 화학인자에 반응하기 때문이다(Canfield *et al.*, 1996; Marcus, 2004). 이와 관련하여 그동안 물리·화학적 또는 생물학적 변화와 동물플랑크톤 군집구조와의 관계에 대한 연구는 다수 수행되어져 왔다. 많은 연구들에서는 수질에 의한 이화학적 환경요인(Canfield *et al.*, 1996), 조류의 증식과 조성(Lampert *et al.*, 1986) 및 먹이의 유용성(Chang *et al.*, 2014), 종간경쟁(Nogrady *et al.*, 1993), 포식자(Bunnell *et al.*, 2012) 그리고 강수량(Nilssen, 1984; Sahu *et al.*, 2013)과 수리학적 특징(Keckeis *et al.*, 2003; You *et al.*, 2010) 등 다양한 환경요인과 동물플랑크톤과의 상관관계에 대하여 보고되었다. 또한 수질지표에 관한 연구에서는 동물플랑크톤을 생물학적 지표로서 적합한 것으로 보고한 바 있다(Ji *et al.*, 2013). 이러한 결과들은 동물플랑크톤의 군집구조 및 종조성의 시공간적 변화가 수생태계에서 나타나는 다양한 현상파악을 위한 중요한 역할과 함께 담수 자원의 지속적인 관리에 필수적인 정보를 제공하는 생물인자임을 의미한다(Etilé *et al.*, 2009).

그동안 소양호의 수생태계 변화에서 가장 큰 환경요인에는 1980년대 후반 가두리양식장 오염원에 의한 부영양화와 1990년대 후반부터 심화된 강우에 의한 탁수유입이 있으며, 이들의 요인들은 소양호 내 영양염 증가로 이화학적 수질변화를 가져왔다(Heo *et al.*, 1992; Kim and Heo, 1992; Kim *et al.*, 2007). 소양호의 물리·화학적 영향에 관한 연구는 지속적으로 수행된 반면, 수생태계에 관한 연구는 동·식물플랑크톤 군집 분포 및 계절변동, 미생물군집 및 어류군집 분포 등의 단기적인 변화에 그쳐있다(Choe *et al.*, 1989; Sim and Ahn, 1992; Kim *et al.*, 1999). 특히 호소생태계에서 중요한 생물학적 구성요소이자 지표로서 역할을 담당하는 동물플랑크톤에 대한 장기적인 변동과 환경요인에 관한 연구는 매우 미흡한 실정이다. 호소생태계를 이해하는 데 있어 동물플랑크톤의 장기변동에 관한 연구는 그 자체로서 가지는 의미가 클 뿐만 아니라, 중요한 정보를 제공한다. 실제로 호소생태계의 중요한 정보는 환경요인의 반응에 대한 이해와 함께 장기변동으로부터 얻어졌으며(Fahnenstiel *et al.*, 2010; Mida *et al.*, 2010), 호수에서 물리·화학적 그리고 생물학적 특징들이 복잡하게 결합된 인과관계를 밝히는 데 있어 유용하게 활용되었다(Magnuson *et al.*, 2004).

따라서 이 연구에서는 2003년부터 2014년까지 소양호 동물플랑크톤 군집의 장기적인 변동을 관찰하고 환경요인에 따른 영향을 알아보고자 하였다. 또한, 몬순기후에서의 호수 생태계를 이해하는 데 있어 유용한 정보를 제공하고자 하였다.

재료 및 방법

1. 조사지 개요 및 환경요인

소양호는 1973년 댐이 건설되면서 만들어진 대형 인공호수로 길이가 약 60 km, 폭이 약 0.5 km의 수지형(dendritic type)을 하고 있다. 소양호의 댐앞은 해발고도 83~186 m로서 100 m의 수심을 가지며, 총 저수량은 29억 m³이다. 주변유역은 산림과 농경지로 이루어져 있으며, 유역면적은 2,675 km²이다.

수온, 탁도, BOD, TP, Chl. *a* 등의 환경요인 조사는 소양호 댐 앞 지점에서 2003년부터 2014년까지 수심별 0 m, 2 m 및 5 m로 월 1회 실시하였다(Fig. 1). 수온은 현장에서 디지털 온도계를 사용하여 측정하였으며, 탁도는 탁도계(Turbidity meter)로 측정하였다. BOD (Biochemical Oxygen Demand)는 20°C 배양기에서 5일간 배양 후 용존산소의 차이로 측정하였다. Total phosphorus (TP)는 시료를 persulfate 분해 후에 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). 이외에 환경요인으로 강우량, 소양호 수위 및 방류수 탁도 자료는 각각 기상청 (<http://www.kma.go.kr>), 국가수자원관리종합정보시스템 (<http://www.kma.go.kr>).

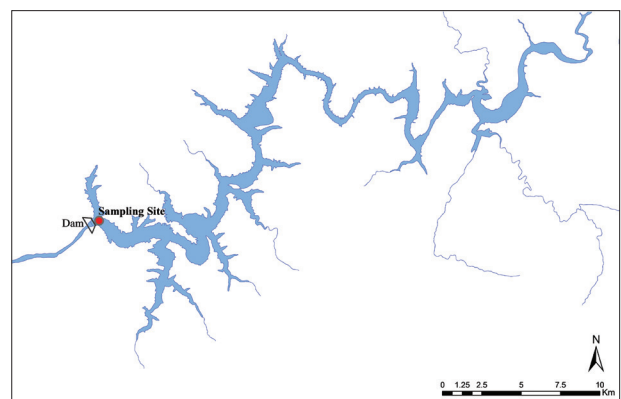


Fig. 1. Map showing the sampling site in Lake Soyang.

wamis.go.kr) 및 춘천시(소양정수장) 자료를 활용하였다.

2. 동물플랑크톤 채집 및 탄소량 산정

시료채취는 소양호 댐앞 지점에서 2003년 6월부터 2014년 12월까지 총 136회 실시하였다(Fig. 1). 동물플랑크톤의 시료는 65 µm plankton net를 이용하여 표층에서 20 m까지 수직 예인하였다. 채집된 시료는 폴리에틸렌 병에 담아 sucrose-formalin으로 최종 농도가 4%가 되도록 고정하였다. 고정된 동물플랑크톤 시료는 Sedgwick-Rafter 계수판에 넣고 현미경 하에서 저배율(60~150배)로 지각류, 요각류, 윤충류 및 원생동물로 구분하고 각 종별로 계수하여 리터(L)당 개체수로 환산하였다(Mizuno, 1991).

동물플랑크톤의 탄소량 산정을 위해 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 수

분함량이 많은 것으로 보고되었으므로 건중량은 습중량의 4%인 것으로 가정하였다(Dumont *et al.*, 1975). 탄소량은 건중량의 48%로 가정하여 산정하였다(Andersen and Hessen, 1991).

결 과

1. 환경요인 분석

2003년부터 2014년까지 소양호 유역의 강수량은 705~1,779 mm yr⁻¹로 연도별 큰 변동을 보였다. 이에 따라 소양호의 수위는 연간 19~30 m의 변동을 보였으며(Fig. 2), 해발고도는 155~193 m의 변동을 보였다. 특히 2006년 7월 강수량은 800 mm 이상으로 강우집중도가 매우 높았으며, 연강수량의 50.0% 이상을 차지하였다. 강우 시 유입된 탁수는 높은 탁도와 TP 농도를 보이는 하천수는 소양호에서 증층으로 유입되어, 댐의 증층에 설치된 발전방류구를 통해 홍수 후 약 3개월에 걸쳐 모두 방출된다(Kim *et al.*, 2007). 그런데 2006년 7월에 유입된 탁수는 10 NTU 이상 발생한 기간이 282일(최대탁도 276 NTU)로 나타났다. 뿐만 아니라 홍수기 유입된 탁수는 인을 많이 함유하고 있으므로 소양호 증층에는 탁도 증가와 함께 TP 농도가 높은

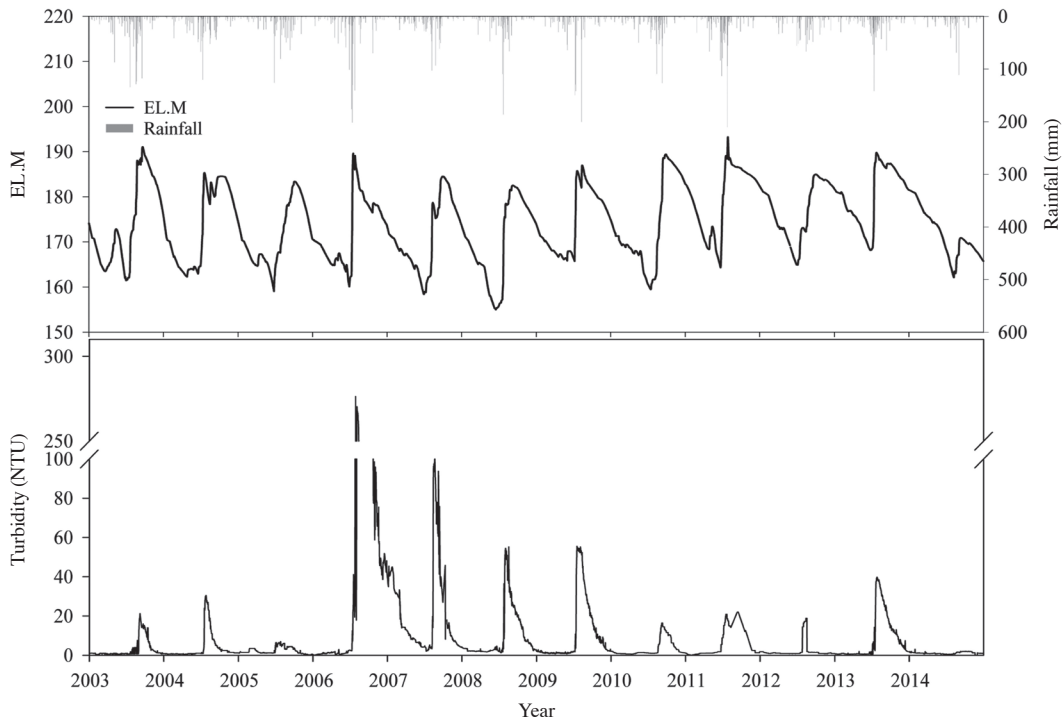


Fig. 2. Rainfall-driven yearly variation of water level in the Lake Soyang (upper) and turbidity of effluence water (lower).

중층이 형성되었다(Fig. 3).

소양호 수질은 연도별로 큰 변동이 없는 것으로 나타난 반면에 계절적으로는 차이를 보였다(Table 1). 연평균 BOD 농도는 1.0 mg L^{-1} 이하로 연도별 큰 변화는 없었으나, 7~9월에는 1.0 mg L^{-1} 이상을 보였다. TP 농도는 $7.0 \sim 18.1 \mu\text{g L}^{-1}$ 의 범위로 나타났으며, 2007년에 가장 높은 농도를 보인 이후 감소하는 경향을 보였다. 시기별로는 4~6월에 가장 낮은 농도를 보였으며, 나머지 시기에서는 $10.0 \mu\text{g L}^{-1}$ 수준으로 비슷한 농도를 나타내었다. Chl. *a*의 연도별 평균농도는 $2.32 \sim 5.17 \mu\text{g L}^{-1}$ 이었으며, 시기별로는 $1.19 \sim 7.51 \mu\text{g L}^{-1}$ 의 범위를 보여 연도별 차이보다는 계절에 따른 변동이 더 큰 것으로 나타났다. 결과적으로 소양호의 수질은 몬순기후로 인한 여름철 홍수기 유입수로 인

해 연도별 변화보다 계절변화가 뚜렷하게 나타났다.

2. 동물플랑크톤의 종 조성

2003년 6월부터 2014년 12월까지의 소양호의 동물플랑크톤은 4분류군 95종으로 지각류 4종, 요각류 7종, 윤충류 52종, 원생동물 32종이 출현하였다. 총 출현종 중 윤충류가 54.7%를 차지하였으며 원생동물 33.7%, 요각류 7.4%, 지각류 4.2%로 나타났다.

연구기간 동안 동물플랑크톤 연평균 개체수는 $13.3 \sim 218.7 \text{ Ind. L}^{-1}$ 의 범위를 보였으며, 윤충류와 원생동물의 점유율이 각각 47.7%, 43.2%로 가장 높게 나타났다. 동물플랑크톤의 탄소량은 $2.19 \sim 32.29 \mu\text{gC L}^{-1}$ 의 범위를 보였으며, 지각류와 요각류가 총 탄소량의 각각 37.7% 및 47.6%를 차지하였다(Table 2). 소양호에서 동물플랑크톤 현존량은 연도별로 차이를 보였으며, 2006년 이전과 이후로 뚜렷하게 나타났다(Fig. 4). 2006년 7월 880 mm의 집중강우 이후에 동물플랑크톤의 개체수가 $680.3 \text{ Ind. L}^{-1}$ 로 급격히 증가하여 연평균 개체수가 2004년과 2005년에 비해 4~11배 차이를 보였다. 이후 매년 여름 집중강우 이후에 동물플랑크톤의 현존량이 크게 증가하는 경향을 보였으며, 2009년에 $218.7 \text{ Ind. L}^{-1}$ 로 연간 최대 개체수를 보였다. 개체수의 증가뿐만 아니라 윤충류 및 원생동물과 같은 소형 동물플랑크톤의 출현종 또한 증가하는 것으로 나타났다. 동물플랑크톤의 탄소량은 2007년 $32.29 \mu\text{gC L}^{-1}$ 로 가장 높게 나타났으며, 이 시기에는 지각류인 *Daphnia galeata*가 총 탄소량의 44.3%를 차지하였다. 2014년의 경우 다른 해에 비해 강우량이 약 2배 적었던 시기로 동물플랑크톤의 현존량도 약 50% 감소를 보였다. 2015년에도 여름 가뭄이 지

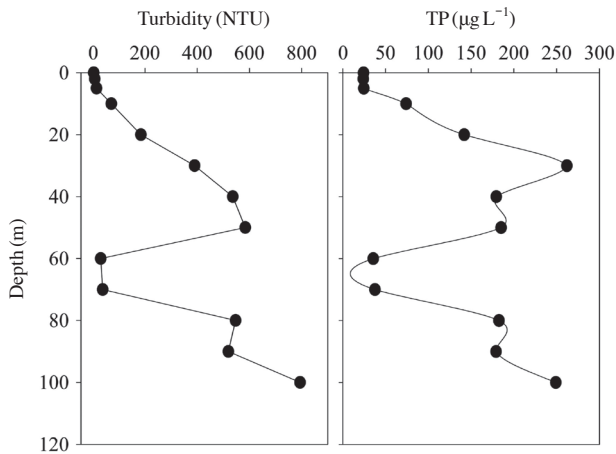


Fig. 3. Turbidity and TP concentration according to the depth when monsoon season in Lake Soyang (2006.7).

Table 1. The results of several limnological parameters in Lake Soyang. The value of each parameters is yearly average from 2003 to 2014 (0, 2, 5 m depth)

Year	Water temp. (°C)		Turbidity (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.
2003	4.7~25.7	15.5	0.77~1.97	1.27	0.13~1.73	0.84	4.75~14.00	8.57	1.13~9.53	2.32
2004	4.7~26.3	15.5	0.88~1.89	1.28	0.15~1.72	0.90	4.17~13.33	10.01	1.43~13.53	3.51
2005	4.0~26.8	14.9	0.83~4.98	1.67	0.25~1.23	0.80	4.67~15.33	8.33	0.90~11.38	3.12
2006	4.1~27.5	14.7	0.75~35.93	7.50	0.10~1.37	0.69	3.00~36.51	13.78	0.74~19.67	5.17
2007	5.5~26.8	15.7	0.83~44.63	9.78	0.28~1.31	0.77	6.00~49.89	18.08	0.67~4.82	2.71
2008	5.0~26.5	15.2	0.77~3.27	1.67	0.40~1.01	0.75	6.31~14.79	9.17	1.29~6.93	2.79
2009	5.5~27.1	15.8	0.48~2.22	1.16	0.27~2.25	0.92	4.99~14.99	8.79	0.73~18.70	3.92
2010	4.8~27.8	15.3	0.61~3.29	1.34	0.41~0.96	0.69	1.66~12.24	7.89	0.86~6.05	2.64
2011	4.7~25.2	14.7	0.03~4.47	1.83	0.29~1.84	0.99	3.50~14.29	8.70	1.19~11.60	3.85
2012	5.9~26.3	16.1	0.78~1.65	1.21	0.27~1.76	0.87	4.47~14.94	7.90	1.17~7.88	3.53
2013	4.3~28.4	15.3	0.89~5.15	2.07	0.36~1.62	0.94	5.81~8.62	7.00	0.79~9.17	2.96
2014	6.0~26.5	16.6	0.83~2.39	1.45	0.46~1.47	0.88	4.25~12.03	7.94	0.97~8.60	3.58

Table 2. The yearly average abundance of zooplankton in Lake Soyang (to 20 m depth, 2004~2014)

Year	Individuals (Ind. L ⁻¹)					Biomass (µgC L ⁻¹)				
	Total	Cl.	Co.	Ro.	Pr.	Total	Cl.	Co.	Ro.	Pr.
2004	34.8	0.7	2.8	16.8	14.5	6.65	1.19	4.54	0.90	0.03
2005	13.3	0.4	0.7	6.7	5.5	2.19	1.17	0.76	0.25	0.01
2006	150.2	1.8	2.0	70.7	75.8	10.56	7.08	1.02	2.33	0.14
2007	128.3	3.1	7.6	61.9	55.7	32.29	15.50	13.05	3.66	0.08
2008	155.3	6.5	14.5	43.4	90.8	27.16	15.37	10.17	1.42	0.21
2009	218.7	5.9	9.6	54.5	148.6	18.59	6.66	9.08	2.59	0.26
2010	175.9	6.1	11.2	69.4	89.3	20.72	5.07	12.03	3.50	0.11
2011	109.0	5.6	8.4	61.2	33.8	25.53	5.97	16.68	2.82	0.06
2012	217.8	9.2	5.6	139.8	63.2	24.97	9.94	10.18	4.60	0.25
2013	139.9	4.6	7.8	99.1	28.4	24.05	7.25	13.36	3.34	0.10
2014	78.2	3.6	4.7	33.4	36.5	11.88	2.20	7.65	1.98	0.06

Cl.: Cladocernas, Co.: Copepoda, Ro.: Rotifers, Pr.: Protozoans

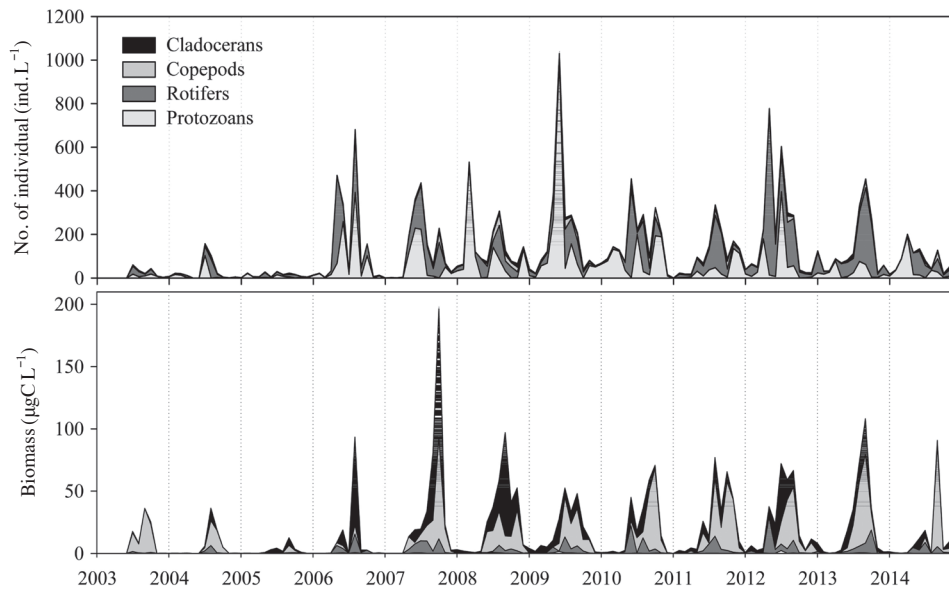


Fig. 4. Monthly Variations of biomass and number of individuals zooplankton by vertical tow (0~20 m) at the dam site in Lake Soyang from 2003.6 to 2014.12.

속된 시기로 동물플랑크톤 현존량이 더욱 감소하였다.

동물플랑크톤의 분류군별 개체수와 탄소량의 분포는 연도별로 차이를 보였다(Fig. 5). 2004년에서 2014년으로 갈수록 동물플랑크톤의 개체수는 원생동물 우점에서 윤충류 우점으로 바뀌었다. 2010년까지는 원생동물이 40.0~70.0%로 가장 높은 비율을 차지한 반면, 2011~2013년에는 윤충류가 55.0% 이상을 차지하였다. 주요 출현종으로 원생동물은 *Tintinnidium cylindrata*, 윤충류는 *Keratella cochlearis*, *Polyarthra vulgaris*로 나타났으며, 2011년 이후에는 *P. vulgaris*의 개체수가 크게 증가하였다. 탄소량은 지각류에서 요각류로 천이되었으며, 탄소량의 상대적인 비율은 큰

강우가 있었던 2006년에 지각류가 크게 증가한 이후 2008년까지 50.0% 이상을 차지하였다. 반면, 2009년부터는 요각류가 50.0% 이상을 차지하는 것으로 나타났다. 주요 출현종으로 지각류는 *Bosmina longirostris*, *D. galeata*, 요각류는 *Mesocyclops leuckarti*, *Thermocyclops hyalinus*로 나타났다.

고찰

장기간 동안 소양호 동물플랑크톤 군집의 현존량은

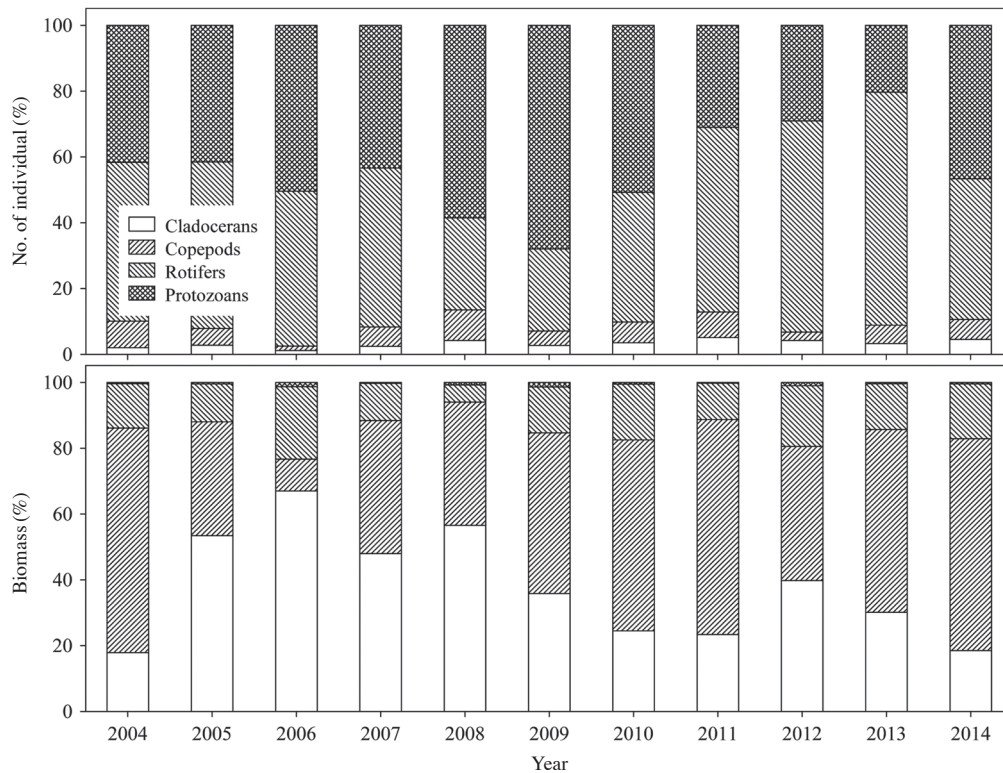


Fig. 5. Ratio of biomass and number of individuals cladocerans: copepods: rotifers: protozoans cop in Lake Soyang from 2004 to 2014.

2006년을 기준으로 이전과 이후로 뚜렷한 차이를 보였다. 2006년 이후 동물플랑크톤 현존량은 크게 증가하였을 뿐만 아니라 군집구조 또한 변동을 보였다. 특히 강우 이후 동물플랑크톤의 급격한 현존량 증가와 소형동물플랑크톤 출현종의 증가는 여름 집중강우 시 외부에서 유입되는 탁수가 동물플랑크톤 군집과 밀접한 관련이 있다는 것을 시사하였다.

그동안 매년 여름 몬순강우에 의한 탁수유입은 소양호의 주요한 환경인자로서 수리·수문학적인 변동뿐만 아니라(Kim *et al.*, 2004; Jun *et al.*, 2010), 유입된 다량의 흙탕물에는 높은 농도의 영양염과 유기물을 포함하고 있어, 이 화학적 수질에도 영향을 미치는 것으로 보고되었다(Choi *et al.*, 2001; Jung, 2012). 몬순강우에 의한 이화학적 수질 변화가 동물플랑크톤에 미치는 영향을 알아보기 위해 상관관계를 분석하였다(Table 3). 소양호에서 동물플랑크톤 현존량은 수온, BOD 및 Chl. *a* 농도와 양의 상관성을 보였으며, TP 농도는 지각류 및 요각류와 양의 상관성을 보였다. 결과적으로 이화학적 환경요인은 계절에 따른 영향과 함께 동물플랑크톤의 생물량 증가에 영향을 준 것으로 나타났다. 이는 강우 시 유입된 높은 농도의 인과 유기물 증가가 동물플랑크톤 성장에 영향을 미친것으로 판단된다.

동물플랑크톤의 생물량을 결정하는 데 있어 수온과 식물플랑크톤(Wang *et al.*, 2007), 영양염(Jose *et al.*, 2015), 유기물(Yoshida *et al.*, 2001) 등은 중요한 역할을 하는 것으로 알려져 있다. 더구나 과거에는 유입된 탁수가 표층까지 영향을 미치지 않은 것과 달리 2006년 이후에는 탁수유입의 증가로 표층까지 영향을 미치는 것으로 나타났다. 뿐만 아니라 turnover시기에는 중층에 체류되어 있던 고농도의 탁수가 표층으로 공급되어 전년도에 비해 TP 및 Chl. *a* 농도가 약 2배 높게 나타났으며, 동물플랑크톤 밀도 또한 약 5배로 증가하였다. 외부에서 유입되는 유기물 등이 수생태계의 종 풍부도 및 군집구조의 변화에 영향을 미친다는 연구결과를 볼 때(Muzaffar and Ahmed, 2007), 소양호에서도 이와 유사한 결과를 보였다.

소양호에서 동물플랑크톤 군집의 변동은 일차적으로 이화학적 환경요인으로 설명할 수 있지만, 연도별로 종 조성과 생물량의 계절변동을 설명하는 데 있어 한계가 있었다. 예를 들어, 소양호에서 윤층류는 5월과 8월 두 시기에 걸쳐 증가하며, *Keratella*, *Polyathra*와 같은 소형동물플랑크톤이 우점을 이룬다. 5월의 경우 Chl. *a* 농도가 낮음에도 불구하고 윤층류 개체수가 크게 증가하였는데, 이 시기에는 주로 *Melosira*, *Aulacoseira*, *Synedra*, *Fragilaria* 및

Table 3. Pearson correlation between physicochemical variables and biomass of zooplankton major groups from Lake Soyang

	Cladocerans	Copepod	Rotifer	Protozoa	Temp.	Turb.	BOD	TP	Chl. <i>a</i>
Crustacean	1								
Copepod	.575**	1							
Rotifer	.657**	.512**	1						
Protozoa	.361**	.154	.247**	1					
Temp.	.580**	.609**	.601**	.234**	1				
Turb.	.002	.077	-.074	-.167	-.056	1			
BOD	.298**	.273**	.402**	.052	.424**	.020	1		
TP	.222*	.267**	.130	-.087	.158	.692**	.120	1	
Chl. <i>a</i>	0.290**	.456**	.360**	.044	.594**	.037	.472**	.228**	1

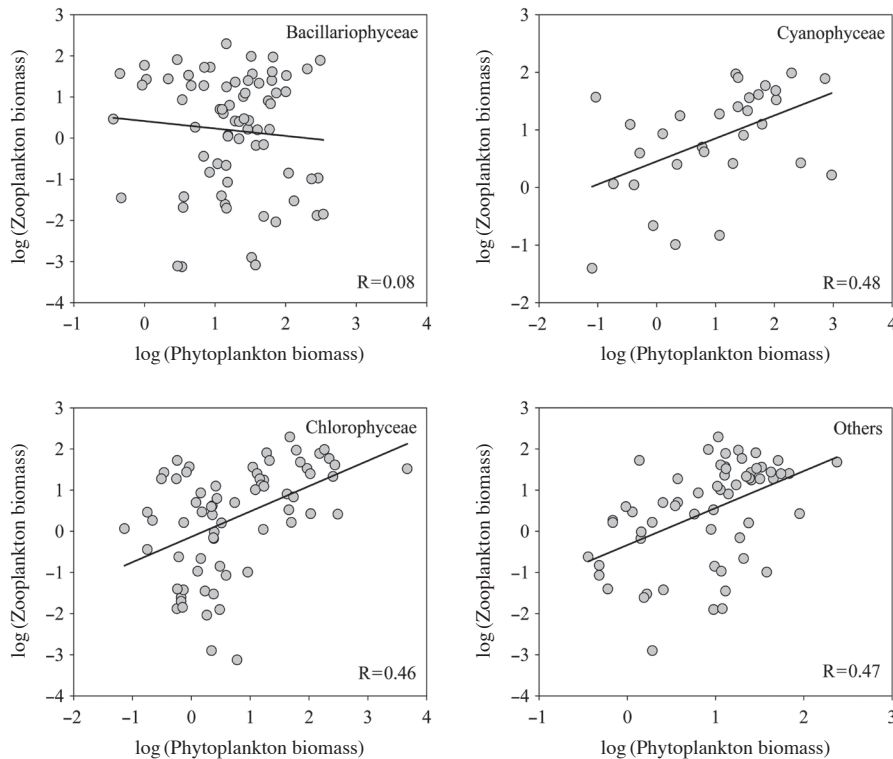


Fig. 6. Correlation analysis of phytoplankton taxon and zooplankton (from June 2003 to Dec. 2009).

*Asterionella*속 등으로 크기가 50~350 μm인 종들이 총 생물량의 90% 이상으로 우점을 이룬다. 이 종들은 큰 크기는 물론 대부분이 군체를 형성하기 때문에 동물플랑크톤이 섭식하기에 용이하지 않는 것으로 알려져 있으며 (Knisely and Geller, 1986), 동물플랑크톤이 먹이원으로 선호하지 않는다 (Urabe *et al.*, 1996). 소양호에서는 2003년부터 2009년까지 동물플랑크톤과 식물플랑크톤의 종 조성과의 상관 분석 결과에서 규조류는 음의 상관관계를 보였다 (Fig. 6). 이는 소형플랑크톤이 큰 크기의 규조류를 먹이원으로 선호하지 않는다는 사실에 근거할 때, 규조류가 윤충류 번성

에 크게 영향을 주지 않는 것으로 추측되었다. 이와 관련하여 소양호에서 봄철 동물플랑크톤의 번성은 규조류 우점에 뒤이어 약 2~3개월 후에 나타나, 규조류가 동물플랑크톤 번성에 직접적인 영향을 미치지 못하는 것으로 보고된 바 있다 (Kim *et al.*, 1999). 정확한 원인에 대한 규명은 어렵지만, 소양호에서 봄 시기에 소형동물플랑크톤 현존량 증가는 식물플랑크톤에 대한 직접적인 섭식보다는 식물플랑크톤에서 배출되는 EOC → bacteria → HNF → 원생동물 → 윤충류의 영양단계에 따른 것으로 판단된다. 소양호에서 세균분포는 식물플랑크톤 현존량 및 EOC와 밀접한 관

련이 있다고 하였으며, Chl. *a* 농도는 세균의 활성과 비례한다고 보고하였다(Ahn *et al.*, 1995). 또한, 강우 시 유입된 유기물의 공급으로 박테리아→HNF→원생동물의 미생물먹이망을 통해 윤충류 현존량 증가에 영향을 준 것으로 판단된다. 여름 강우 시 소양호로 유입된 탁수에는 다량의 입자상유기물과 인, 질소 등의 영양물질이 포함되어 있으며, POC농도는 최고 1,100배 이상의 높은 농도를 보인다(Park *et al.*, 2011). 뿐만 아니라 강우 시 유입된 중층의 탁수는 겨울시기 turnover로 인해 봄 시기까지 영향을 미치는 것으로 나타났다. 특히 2007년에는 4월까지 탁도 및 TP 농도가 전년도 동일한 시기보다 3배 이상 높게 나타났다. 이 시기에는 원생동물의 개체수가 급격한 증가를 보였으며, 이후 윤충류 현존량 증가하는 것으로 나타났다. 이는 유기물 공급에 따른 박테리아 증식과 관련이 있다고 판단된다. 박테리아는 다른 플랑크톤이 직접적으로 이용할 수 없는 DOC를 이용하여 상위 영양단계로 이동되어 물질순환에 기여할 뿐 아니라 원생동물 및 초식성 갑각류에게 직접 먹이로 제공된다(Fukami *et al.*, 1991). 결과적으로 봄 시기(5~6월)에 낮은 Chl. *a* 농도와 섭식에 용이하지 않은 규조류의 우점에도 불구하고 소형 윤충류의 개체수 증가는 규조류의 체외 배출유기물(EOC: excreted organic carbon) 및 외부유기물 공급으로 미생물먹이망(microbial loop)에 의한 bottom-up 효과로 판단된다. bottom-up 조절은 보통 먹이공급이 증가할 때 개체수의 증가로 인해 확인되며, 소양호에서 강우 시 유기물이 공급된 이후 동물플랑크톤의 현존량이 증가하였다. 이는 bottom-up 효과가 빈 영양호에서 강하게 나타나는 것과 일치한다(Conty *et al.*, 2007; Galbraith and Burns, 2010).

여름시기 윤충류의 증가는 식물플랑크톤과 앞서 설명한 바와 같이 외부유기물 공급에 따른 미생물먹이망에 의한 영향으로 판단된다. 소양호에서 강우 이후 8월에 윤충류는 급격한 증가뿐만 아니라 식물플랑크톤의 밀도 또한 최대를 보였으며, 남세균 *Anabaena*와 *Microcystis*가 우점하였다. 이 시기에 윤충류 증가는 일차적으로 식물플랑크톤과 영양상태 증가로 설명할 수 있으며, 또한 박테리아의 물질순환에 따른 미생물 플랑크톤(picoplankton, HNF 등)의 먹이원 공급이 현존량에 영향을 준 것으로 판단된다. Sim and Ahn (1992)의 소양호에서 동물플랑크톤의 섭식행위를 조사한 결과에 따르면, *Anabaena*가 우점하는 8월에는 *Keratella*, *Bosmina*, *Daphnia*가 세균을 포식한다고 보고하였다. 팔당호에서도 봄과 여름에 박테리아를 먹이로 하는 microbial food chain에 의해 동물플랑크톤의 현존량이 조절되는 것으로 보고된 바 있다(Noh and Han, 2008). 소양호에서 동물플랑크톤 현존량 조절의 microbial food

chain의 영향은 *Daphnia*의 생물량 변화에서도 찾아 볼 수 있다. 소양호에서 *Daphnia*의 경우 2006년 이전에는 거의 출현하지 않거나 매우 낮은 생물량(연평균 0.2~1.0 µgC L⁻¹)을 보였으나, 2006년 강우 이후 증가하기 시작하여 2007년에는 연평균 14.29 µgC L⁻¹로 최대를 보였다. 특히, 2007년 10월에는 *Daphnia*의 생물량이 95.9 µgC L⁻¹로 지각류의 총 생물량의 93.0%를 차지하는 것으로 나타났다. *Daphnia*의 생물량 증가는 이 시기에 식물플랑크톤 밀도와 Chl. *a* 농도가 2006년 이전보다 낮았다는 것을 고려할 때, 외부유기물 공급에 따른 박테리아 증가로 설명할 수 있을 것이다. *Daphnia*는 담수 호수생태계에서 가장 중요한 플랑크톤의 섭식자 중 하나이며, 미생물 구성원(박테리아부터 50 µm 크기의 생물까지)에 대한 강한 포식자로 알려져 있다(Gilbert, 1989; Zöllner *et al.*, 2003). 실제로 소양호에서 *Daphnia*가 출현하는 시기에는 세균수가 많았던 다른 시기보다 1/6로 급격히 감소하는 것으로 나타났으며, 또한 표층에서의 세균수는 Chl. *a* 농도 변화와 유사한 반면 2 m 수심에서는 음의 상관관계를 보이는 것으로 보고되었다(Ahn *et al.*, 1995). 따라서 소양호에서 여름시기 *Daphnia* 증가는 식물플랑크톤과 함께 박테리아 등 미생물 플랑크톤의 먹이 유용성 증가에 따른 bottom-up 영향으로 판단된다.

반면, 여름~가을시기 요각류 현존량의 증가는 지각류 및 요각류가 에너지원으로 *Microcystis*의 직접적인 섭식을 회피한다는 사실에 근거할 때(Choe and Lim, 2003; Yang *et al.*, 2006; Lee *et al.*, 2010), 윤충류와 요각류의 먹이-포식관계로 설명할 수 있을 것이다. 이 시기에 소양호에서 우점한 요각류는 주로 *M. leuckarti*로 담수에서 중요한 포식자로 알려져 있으며, 다른 동물플랑크톤에 대한 포식과 먹이 선택과 같은 섭식행동을 한다는 것이 많은 연구에서 알려져 있다(Gophen, 1977; Williamson, 1986; Adrian and Forst, 1992). 소양호에서 요각류는 2009년부터 뚜렷한 증가를 보였으며, 윤충류 또한 2003~2008년 평균탄소량 1.5 µgC L⁻¹에서 2009~2014년 평균탄소량 3.1 µgC L⁻¹로 약 2배 증가한 것으로 나타났다. 반면, Chl. *a* 평균농도는 각각 3.3 및 3.4 µg L⁻¹로 큰 변화가 없는 것으로 나타나, 요각류 증가는 1차 생산자보다 윤충류가 더 관련이 있다는 것으로 추측할 수 있다. 12년간 요각류와 윤충류의 월평균 생물량 변화를 분석한 결과에서 윤충류의 생물량 증가 이후 요각류의 생물량이 크게 증가하는 것으로 나타났다(Fig. 7). 이는 여름 강우시기 윤충류 생물량 증가가 요각류 성장에 영향을 미친 것으로 판단되며, 또한 최근에 생물량의 비율이 지각류에서 요각류로 변동된 원인으로 생각된다. Jürgens *et al.* (1999)은 호소의 영양단계가 증가할

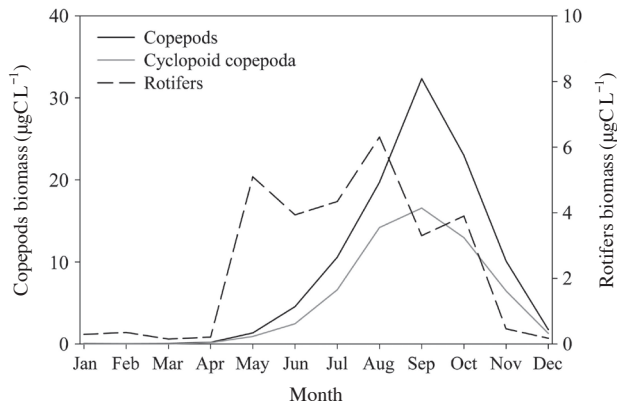


Fig. 7. The variations of monthly mean of biomass rotifers and copepods in Lake Soyang from 2003 to 2014.

수록 Mesozooplankton에 의한 top-down 조절이 강하게 나타난다는 것을 증명한 바 있으며, Diodato and Hoffmeyer (2008)는 Mesozooplankton (지각류, 요각류)이 먹이원으로 식물플랑크톤 중 51%만을 이용한 반면 Microzooplankton (원생동물, 윤충류) 중에서는 약 88%를 이용하는 것으로 보고하였다.

지금까지 소양호에서 동물플랑크톤의 생물량 증가에 있어 bottom-up 효과의 중요성에 대해 고찰하였다. 이외에도 동물플랑크톤의 군집변화에 있어 어류에 의한 top-down 효과는 매우 중요한 요인으로 작용한다. 호수에서 어류는 동물플랑크톤 군집의 구조와 종 조성을 변화시킬 만큼 매우 큰 영향력을 가지며, 어류(planktivorous fish)의 top-down 효과는 몇몇 호수에서 중요하게 보고된 바 있다(Lu and Xie, 2001; Pinto-Coelho *et al.*, 2005). 실제로 소양호에서 겨울시기(1~3월) *Bosmina*의 생물량 증가와 관련하여 빙어의 어획량 변동을 분석한 결과에서는 빙어의 어획량이 감소하기 시작한 2007년부터 *Bosmina*의 생물량이 증가한 것으로 나타났다(Kim, 2016). 이는 겨울시기 *Bosmina*의 생물량 증가는 빙어의 감소에 따른 top-down 효과라고 판단할 수 있다. 수생태계에서 동물플랑크톤 군집의 변화는 다양한 환경요인에 의해 복합적으로 나타나므로 물리·화학적 및 생물학적인 환경요인들이 함께 고려되어야 할 것이다.

결과적으로 소양호 동물플랑크톤의 생물량과 군집구조는 탁수유입에 따른 영양염과 유기물 공급이 1차적인 환경요인으로 작용하였으며, 식물플랑크톤 현존량 및 종 조성 그리고 동물플랑크톤 상호작용이 주요한 결정요인으로 작용한 것으로 판단된다. 몇몇 장기변동 연구결과에서는 동물플랑크톤의 생물량, 종 다양성, 계절변동 등은 물리화학적 환경요인에 의해 영향을 받지만, 생물 상호 간의 작

용에 의해 결정되는 정도가 오히려 더 중요하게 작용하는 것으로 보고되었다(Mihuc, 2012; Vanderploeg, 2012).

적 요

본 연구의 목적은 소양호 동물플랑크톤 군집의 장기적인 변동을 관찰하고 환경요인에 따른 영향을 알아보고자 하였다. 조사기간 동안 소양호 유역 강수량은 705~1,779 mm yr⁻¹의 큰 변동을 보였으며, 이로 인한 호소의 수위변동과 함께 여름철 많은 양의 탁수가 유입되는 것으로 나타났다. 소양호 수질은 몬순기후로 인한 여름철 홍수기 탁수 유입이 가장 중요한 환경요인으로 작용하였으며, 계절적 변화가 뚜렷하게 나타났다. 장기간 동안 소양호 동물플랑크톤 군집의 현존량은 2006년을 기준으로 이전과 이후로 뚜렷한 차이를 보였으며, 강우 이후 동물플랑크톤의 현존량이 급격히 증가하는 것으로 나타났다. 소양호에서 동물플랑크톤은 1차적으로 이화학적 환경요인과 양의 상관성을 보였으며, 강우 시 유입된 높은 농도의 인과 유기물 증가가 동물플랑크톤 성장에 영향을 미친 것으로 판단되었다. 그러나 소양호에서 동물플랑크톤 군집의 변동은 이화학적 환경요인으로만 설명하는 데는 한계가 있었으며, 동물플랑크톤의 생물량 증가를 먹이망 내에서 top-down과 bottom-up 효과로 설명할 수 있었다. 결과적으로 소양호 동물플랑크톤의 생물량과 군집구조는 탁수유입에 따른 영양염과 유기물 공급, 식물플랑크톤 현존량 및 종 조성 그리고 동물플랑크톤 상호작용이 주요한 결정요인으로 작용한 것으로 판단되었다.

사 사

본 연구는 한강수계관리위원회의 환경기초조사 사업에 의해 지원되었음.

REFERENCES

Adrian, R. and T.M. Frost. 1992. Comparative feeding ecology of *Tropocyclops prasinus mexicanus* (Copepoda, Cyclopoida). *Journal of Plankton Research* **14**: 1369-1382.

Ahn, T.S., M.J. Jeong, E.J. Lee and K.S. Cho. 1995. The Effect of Plankton to Bacterial Community in Lake Soyang. *Korean Journal of Limnology* **28**(2): 219-224.

Bunnell, D.B., K.M. Keeler, E.A. Puchala and B.M. Davis.

2012. Comparing seasonal dynamics of the Lake Huron zooplankton community between 1983-1984 and 2007 and revisiting the impact of Bythotrephes planktivory. *Journal of Great Lakes* **38**: 451-462.
- Canfield, T.H. and J.R. Jones. 1996. Zooplankton abundance and biomass, and size distribution in selected Midwestern water bodies and relation with trophic state. *Journal of Freshwater Ecology* **11**: 171-181.
- Chang, C.W., F.K. Shiah, J.T. Wu, T. Miki and C.H. Hsieh. 2014. The role of food availability and phytoplankton community dynamics in the seasonal succession of zooplankton community in a subtropical reservoir. *Limnologia* **46**: 131-138.
- Cho, K.S., Y.C. Park and S.J. Cho. 1989. A Study on the Vertical Distribution of the Zooplankton in Lake Soyang. *Korean Journal of Limnology* **22**(3): 191-197.
- Choe, S.H. and B.J. Lim. 2003. Reproduction of Water Flea by the Culture Conditions. *Korean Journal of Limnology* **36**(2): 208-214.
- Choi, K.S., B.C. Kim and U.H. 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.
- Conty, A., F. García-Criado and E. Bécares. 2007. Changes in bacterial and ciliate densities with trophic status in Mediterranean shallow lakes. *Hydrobiologia* **584**: 327-335.
- Dadhick, N. and M.M. Saxena. 1999. Zooplankton as indicators of trophic status of some desert waters near Bikaner. *Journal of Environment and Pollution* **6**: 251-254.
- Diodato, S.L. and M.S. Hoffmeyer. 2008. Contribution of planktonic and detritic fractions to the natural diet of mesozooplankton in Bahía Blanca Estuary. *Hydrobiologia* **614**: 83-90.
- Etilé, R.N., A.K. Kouassi, M.N. Aka, M. Pagano, V. N'douba and N.J. Kouassi. 2009. Spatio-temporal variations of the zooplankton abundance and composition in a West African tropical coastal lagoon (Grand-Lahou, Côte d'Ivoire). *Hydrobiologia* **624**: 171-189.
- Fahnenstiel, G., S. Pothoven, T. Nalepa, H.A. Vanderploeg and D. Klarer. 2010. Recent changes in primary production and phytoplankton in the offshore region of southeastern Lake Michigan. *Journal of Great Lakes Research* **36**(3): 20-29.
- Fukami, K., B. Meier and J. Overbeck. 1991. Vertical and temporal changes in bacterial production and its consumption by heterotrophic nanoflagellates in a north German eutrophic lake. *Arch Hydrobiologia* **122**: 129-145.
- Galbraith, L.M. and C. Burns. 2010. Drivers of ciliates and phytoplankton community structure across a range of water bodies in southern New Zealand. *Journal of Plankton Research* **32**: 327-339.
- Gilbert, J.J. 1989. The effect of Daphnia interference on a natural rotifer and ciliate community short-term bottle experiments. *Limnology Oceanography* **34**: 606-617.
- Gophen, M. 1977. Food and feeding habits of Mesocyclops leuckarti (Claus) in Lake Kinneret (Israel). *Freshwater Biology* **7**: 513-518.
- Heo, W.M., B.C. Kim, T.S. Ahn and K.J. Lee. 1992. Phosphorus loadings from watershed and fishfarms into Lake Soyang and the phosphorus budget. *Korean Journal of Limnology* **25**: 207-214.
- Ji, G., X. Wang and L. Wang. 2013. Planktonic rotifers in a subtropical shallow lake: succession, relationship to environmental factors, and use as bioindicators. *The Scientific World Journal* p. 14.
- Jose, E.C., E.F. Furio, V.M. Borja, N.C. Gatdula and M.D. Santos. 2015. Zooplankton Composition and Abundance and its Relationship with Physico-chemical Parameters in Manila Bay. *Oceanography* **3**: 136.
- Jun, M.S. and J.W. Kang. 2010. Muddy Water Management and Agricultural Development Measures in the Watershed of Soyang Dam. Research Institute for Gangwon (10-05).
- Jung, S.M. 2012. Characteristics of Nonpoint Source Pollution in the Han River and Effect of turbid water on Aquatic Ecosystem. Kangwon National University.
- Jürgens, K., O. Skibbe and E. Jeppesen. 1999. Impact of meta-zooplankton on the composition and population dynamics of planktonic ciliates in a shallow, hypereutrophic lake. *Aquatic Microbial Ecology* **17**: 61-75.
- Kim, B.C. and W.M. Heo. 1992. Phosphorus discharge from floating-net fishfarms and the eutrophication of lake Soyang. 6th International symposium on River and Lake Environment. Environmental Research Institute. Kangwon National University.
- Kim, B.C., J.O. Kim, M.S. Jun and S.J. Hwang. 1999. Seasonal Dynamics of Phytoplankton and Zooplankton Community in Lake Soyang. *Korean Journal of Limnology* **32**(2): 127-134.
- Kim, B.C. and Y.H. Kim. 2004. Phosphorus Cycle in a Deep Reservoir in Asian Monsoon Area (Lake Soyang, Korea). *Korean Journal of Limnology* **37**(2): 205-212.
- Kim, B.C. and S.M. Jung. 2007. Turbid Storm Runoff in Lake Soyang and Their Environment Effect. *Korean Journal of Environmental Engineers* **29**(11): 1185-1190.
- Kim, H.W., S.J. Hwang and G.J. Joo. 2000. Zooplankton grazing on bacteria and phytoplankton in the regulated Nakdong River (Korea). *Journal of Plankton Research* **22**: 1559-1577.
- Kim, M.S. 2016. Zooplankton long term variations and environmental factors in lake soyang. Kangwon National University.
- Knisely, K. and W. Geller. 1986. Selective feeding of four zooplankton species on natural lake phytoplankton. *Oecologia* **69**: 86-94.
- Lampert, W., W. Flecker, H. Rai and E. Taylor. 1986. Phytoplankton control by grazing zooplankton : A study on

- the spring clear-water phase. *Limnology Oceanography* **31**(3): 479-490.
- Lee, J.Y., J.K. Kim, Y.K. Jung and B.C. Kim. 2010. Isotopic differences among zooplankton taxa and seasonal variation of zooplankton community coexisting with *Microcystis*. *Korean Journal of Limnology* **43**(1): 1-10.
- Lu, M. and P. Xie. 2001. Impacts of filter-feeding fishes on the long-term changes of crustacean zooplankton in a eutrophic subtropical Chinese lake. *Journal of Freshwater Ecology* **16**: 219-228.
- Magnuson, J.J., B.J. Benson and T.K. Kratz. 2004. Patterns of coherent dynamics within and between lake districts at local to intercontinental scales. *Boreal Environment Research* **9**: 359-369.
- Mida, J.L., D. Scavia, G.L. Fahnenstiel, S.A. Pothoven, H.A. Vanderploeg and D.A. Dolan. 2010. Long-term and recent changes in southern Lake Michigan water quality with implications for present trophic status. *Journal of Great Lakes Research* **36**(3): 42-49.
- Mihuc, T.B., F. Dunlap, C. Binggeli, C. Pershyn, L. Myers, A. Groves and A. Waring. 2012. Long-term patterns in Lake Champlain's zooplankton: 1992-2010. *Journal of Great Lakes Research* **38**(1): 49-57.
- Murugan, N., P. Murugavel and M.S. Koderkar. 1998. Freshwater cladocera; Indian Associ. of Aqua. Biologists (IAAB), Hyderabad. pp. 1-47.
- Muzaffar, S.B. and F.A. Ahmed. 2007. The effects of the flood cycle on the diversity and composition of the phytoplankton community of seasonally flooded Ramsar wetland in Bangladesh. *Wetlands Ecology and Management* **15**: 81-93.
- Nilssen, J.P. 1984. Tropical lakes-functional ecology and future development: the need for a process-orientated approach. *Hydrobiologia* **113**: 231-242.
- Nogrdy, T., R.L. Wallace and T.W. Snell. 1993. Rotifera volume 1: Biology, ecology and systematics. SPB Academic Publishing, Hague.
- Noh, S.Y. and M.S. Han. 2008. Carbon dynamics of plankton communities in Paldang Reservoir. *Korea Journal of Limnology* **41**(2): 174-187.
- 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.
- Park, K.S. and H.W. Shin. 2007. Studies on phyto-and-zooplankton composition and its relation to fish productivity in a west coast fish pond ecosystem. *Journal of Environmental Biology* **28**: 415-422.
- Pinto-Coelho, R., B. Pinel-Alloul, G. Methot and K.E. Havens. 2005. Crustacean zooplankton in lakes and reservoirs of temperate and tropical regions: variation with trophic status. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences* **62**(2): 348-361.
- 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.
- Sim, D.S. and T.S. Ahn. 1992. On the Feeding Behavior of Zooplankton in Lake Soyang. *Korean Journal of Microbiology* **30**(2): 129-133.
- Sinha, B. and M.R. Islam. 2002. Seasonal variation in zooplankton population of two lentic bodies and Assam State Zoo cum Botanical garden, Guwahati, Assam. *Ecology Environment and Conservation* **8**: 273-278.
- Urabe, J., K. Kawabata, M. Nakanishi and K. Shimizu. 1996. Grazing and food size selection of zooplankton community in Lake Biwa during BITEK (Biwako transport experiment) '93. *Japanese Journal of Limnology* **57**: 27-37.
- 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.
- Wang, S., P. Xie, S. Wu and A. Wu. 2007. Crustacean zooplankton distribution patterns and their biomass as related to trophic indicators of 29 shallow subtropical lakes. *Limnologia* **37**: 242-249.
- Wetzel, R.G. and G.E. Linkens. 1983. *Limnology* 2nd Saunders College Publishing, Philadelphia. pp. 860.
- Williamson, C.E. 1986. The swimming and feeding behavior of Mesocyclops. *Hydrobiologia* **134**: 11-19.
- Yang, Z., F. Kong, X. Shi and H. Cao. 2006. Morphological Response of *Microcystis aeruginosa* to Grazing by Different Sorts of Zooplankton. *Hydrobiologia* **563**(1): 225-230.
- Yoshida, T. 2001. Relative importance of top-down and bottom-up effects on rotifers in lake: analysis within and among lakes. Center for Ecological Research Kyoto University.
- Yoshida, T., J. Urabe and J.J. Elser. 2003. Assessment of 'top-down' and 'bottom-up' forces as determinants of rotifer distribution among lakes in Ontario, Canada. *Ecological Research* **18**: 639-650.
- 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.
- Zöllner, E., B. Santer, M. Boersma, H. Hoppe and K. Jürgens. 2003. Cascading predation effects of *Daphnia* and copepods on micro-bial food web components. *Freshwater Biology* **48**(12): 2174-2193.