

## 양수발전댐의 건설 초기에 발생한 동물플랑크톤군집의 시·공간적인 분포특성

이재용 · 정성민 · 장 군<sup>1</sup> · 김범철\*

강원대학교 자연과학대학 환경학과, <sup>1</sup>한국수력원자력(주) 양양양수발전소

**Spatial and Temporal Distribution Characteristics of Zooplankton Appeared on Early Construction of Pumped Storage Power Plant Dam. Lee, Jaeyong<sup>#</sup>, Sungmin Jung, Kun Chang<sup>1</sup>, Bomchul Kim\***  
(Department of Environmental Science, Kangwon National University, Chuncheon 200-701, Korea; <sup>1</sup>Yangyang Pumped Storage Power Plant, Korea Hydro and Nuclear Power Co.; <sup>#</sup>Present address: Environmental Technological Institute, Nature and Human Co Ltd., Wonju 220-844, Korea)

**Abstract** Spatial and temporal distributions of zooplankton were measured in an oligotrophic pumped storage-type hydroelectric reservoir which was composed of two reservoirs exchanging water daily, with water going up at night and going down during the day. Repetitive diel disturbance of the water column can be a unique feature of this reservoir system. Chl-*a* concentration was highest in the early winter season. Phytoplankton density was lower in summer monsoon due to high flushing rate on rainy days. The zooplankton density was higher in the smaller upper reservoir possibly due to lower fish density in the upper reservoir. In the seasonal variation a time gap was observed between the phytoplankton bloom and the zooplankton bloom (particularly a rotifer, *Keratella cochlearis*). It is likely to that *Keratella* production is partially supported by heterotrophic food sources than phytoplankton. The dominance of a mixotrophic dinoflagellate (*Peridinium bipes* f. *ocultatum*) might have complicated the trophic relationship between phytoplankton and zooplankton. Our results provide some ecological information of zooplankton community in a highly disturbed alpine reservoir ecosystem relying on mostly allochthonous organic matter.

**Key words:** zooplankton, hydroelectric reservoir, chl-*a* concentration, *Keratella cochlearis*

## 서론

댐은 수자원의 활용 및 전력의 생산을 통하여 사회 및 경제적인 부가가치를 창출할 수 있는 기능적인 역할을 가진다. 반면 댐은 생태학적인 측면에서 지역의 수생

태계 및 육상생태계의 변화를 초래하기도 하는데, 육상 동물 및 수서생물이 이동하는 통로의 종적·횡적인 단절을 야기하고 점차적으로 동·식물상의 변화를 야기한다. 댐의 건설 이후 유역환경으로부터 유입하는 비점오염원의 증가는 상수원의 수질 악화에 대한 우려를 낳고 있다 (Kim *et al.*, 1999; Park *et al.*, 2005; Heo *et al.*, 2006). 또한 댐의 건설로 인한 체류시간의 증가는 호수의 부영양화를 촉진시키고 동·식물플랑크톤군집의 변화 (Lee and Han, 2004; Thorp and Mantovani, 2005; Špoljar *et al.*, 2007; Obertegger *et al.*, 2007) 및 먹이사

Manuscript received 7 June 2013, revised 16 October 2013, revision accepted 31 October 2013  
\* Corresponding author: Tel: +82-33-252-4443, Fax: +82-33-251-3991, E-mail: bkim@kangwon.ac.kr

슬의 구조적인 변화 (Kim *et al.*, 2000; Kim *et al.*, 2005; Ibe *et al.*, 2011)와도 밀접한 관련을 가진다.

동물플랑크톤군집의 연간 변화는 호수의 영양상태의 변화와 밀접한 관련을 가지는데, 초식동물플랑크톤(지각류, 요각류)의 감소는 호수의 영양상태에 대한 지표가 되기도 한다. Rojo *et al.* (2007)는 일순환호이면서 중영양호인 콜로라도호에서 동·식물플랑크톤의 계절적인 변동을 파악하였는데, 호수의 부영양화 과정은 초식동물플랑크톤이 섭식하기 어려운 식물플랑크톤(남세균), 대형식물플랑크톤의 증식 그리고 청수현상과 관련이 있는 지각류의 현존량이 감소하는 호수에서 현저하게 나타날 수 있음을 보였다.

양수발전댐은 전기생산을 위해 저지대(하부댐)의 물을 고지대(상부댐)로 양수하여 상부댐과 하부댐 사이의 낙차(819 m)를 통해 발전시키는 시스템으로, 수위변동, 수체의 물리적인 교란이 상시적으로 존재한다. 양수하는 과정은 수체 내 수온성층화를 약화시켜 영양염류를 순환시킬 뿐만 아니라 식물플랑크톤의 침강을 억제시키는 효과를 보이고 있다. 따라서 이와 같은 수질·수문학적 특성인 특성을 갖는 양수발전은 일차생산자뿐만 아니라 이차소비자의 출현과 밀도에도 영향을 미칠 수 있다. 최근 양수발전댐에서 나타나는 수문학적 특성을 활용하여 호수의 부영양화 및 수질개선에 대한 대응기술 중 하나로 수중폭기장치와 관련한 몇몇 연구가 소개되고 있는데, 이들 연구는 수체를 순환시키는 과정을 통해 수생태계를 복원하고자 시도하였다. Heo and Kim (2004)은 달방댐에서 수중폭기장치를 설치 후 식물플랑크톤의 종조성이 남세균에서 규조류로 변화되고 심층의 용존산소 농도를 향상시키는 효과가 있음을 보고한 바 있다. 반면, Lee (2004)는 남세균에 대한 제어의 수단으로써 간헐식 수중폭기장치의 적용에 대한 효과는 분명하지 않았으나 표층수온을 낮추는 효과에 대한 기대를 제시한 바가 있다.

동물플랑크톤은 수환경의 변화를 반영하는 지표생물로서도 중요한 생태적인 지위를 가지고 있다. 하지만 국내에서는 호수생태계에서 일차생산자와 상위소비자의 에너지 이동을 매개하는 일차소비자인 동물플랑크톤에 대한 연구는 극히 드물다(Lee *et al.*, 2013). 특히, 수체의 교란이 주기적이고 지속적으로 발생하는 호수생태계에 대한 연구사례는 거의 없다.

몬순강우의 영향을 받는 국내 호수에서의 동물플랑크톤 군집은 뚜렷한 계절적인 변동을 보인다(Kim *et al.*, 1999; Kim *et al.*, 2003; Lee *et al.*, 2010). 특히, 부영양호에서의 동물플랑크톤군집은 윤충류(*Keratella cochlearis*)

가 봄에 우점하고 여름에는 지각류(*Diaphanosoma brachyurum*, *Bosmina longirostris*)와 요각류 유생의 현존량이 증가하는 계절적인 변동을 보인다고 하였다(Kim *et al.*, 2003; Lee *et al.*, 2008). Lee *et al.* (unpublished data)은 동물플랑크톤의 군집조성은 호수의 투명도에도 직접적인 관련을 가진다고 하였다. 즉, 빈중영양호인 소양호에서 *Daphnia galeata*의 출현이 있을 시에는 청수현상을 보이는데, *B. longirostris*가 우점하는 시기에는 식물플랑크톤의 현존량의 급증과 투명도가 낮아지는 양상을 보인다고 하였다.

본 연구의 목적은 전력생산을 위한 양수과정이 지속적으로 반복되는 과정에서 양수발전댐에 서식하는 동물플랑크톤군집의 시·공간적인 변동을 파악하고자 하였다. 이는 댐이 형성된 초기 이후 동물플랑크톤의 군집에 대한 천이과정을 이해하는 데도 중요한 기초자료로 이용할 수 있을 것이다.

## 재료 및 방법

### 1. 조사 지점

양양양수발전댐(양수발전댐)은 2006년 8월에 준공하여 인근의 전기 공급을 감당하기 위해 건설되었다(Fig. 1). 양수발전댐은 발전용 물을 공급하는 하부댐과 하부

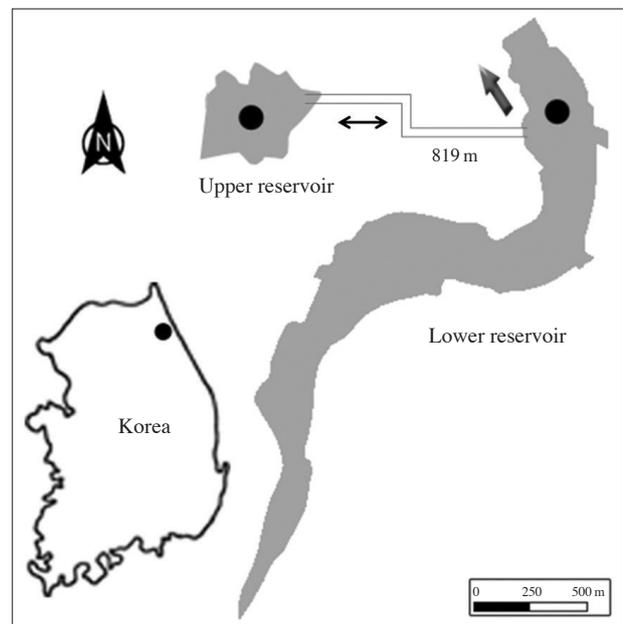


Fig. 1. Map of sampling sites. Arrow indicates water flow direction through water supply pipeline route.

**Table 1.** Land use (km<sup>2</sup>) in Yangyang reservoir.

	Upper reservoir	Lower reservoir
Altitude (m)	937	120
Water surface area (km <sup>2</sup> )	0.20	0.81
Water storage (10 <sup>4</sup> ton)	520	1030
Dry field (km <sup>2</sup> )	—	0.09
Paddy (km <sup>2</sup> )	—	1.86
Forest (km <sup>2</sup> )	5.6	96.36
Others (km <sup>2</sup> )	—	1.68

댐에서 양수한 물을 발전에 이용하는 상부댐으로 이루어져 있다. 양수발전댐에서 상부댐은 전기를 생산하기 위한 물을 저장하는 댐으로, 하부댐에서 양수된 물은 상부댐의 중층으로 나온다.

양수발전소가 위치한 상부댐과 하부댐은 삼림지역으로, 유역으로부터의 오염원이 거의 없다(Table 1).

상부댐은 하부댐에 비해 수위의 급격한 변화를 보이는데, 호안 사면에서 발생하는 탁수의 영향이 상존한다. 하부댐에는 피라미와 참갈겨니가 주로 서식하고 붕어 또한 확인되었으나 상부댐에서는 같은 시기에 어류의 서식이 확인되지 않았다. 본 연구기간에 인공방류를 시행하였는데, 이는 2008년과 2009년 7월에 하류하천에서 증식하는 부착조류, 유기물 및 미세토사를 씻어 내기 위한 방안이었다. 이를 위해 하부댐에서는 2시간 동안 2008년 7월 8일에는 34만 m<sup>3</sup>을 방류하였고, 2009년 7월 2일에는 64만 m<sup>3</sup>을 방류하였다(Park *et al.*, 2012). 댐에서의 방류는 동물플랑크톤의 현존량의 감소에 직접적인 영향을 미쳤을 것으로 사료된다(Thorpe and Mantovani, 2005).

**2. 조사 시기 및 조사 방법**

현장조사는 2007년 9월에서 2009년 12월까지 결빙기(1~3월)를 제외한 시기에 매월 1회 조사를 실시하였다. 조사지역(36° 24'18.39"N, 129° 00'37.54"E)은 양수력발전댐의 상부댐 앞(해발 937 m)과 하부댐 앞(해발 120 m) 두 지점에서 수행하였다. 강우량 및 풍속 자료는 본 연구지역과 비슷한 고도에 위치한 대관령 기상관측소의 자료를 이용하였다. 수위는 양양양수발전댐의 자료를 인용하였다.

수온(Cole Parmer Instrument Co, 93909-62), 용존산소농도(YSI Inc., Yellow Springs, OH, USA), pH(Denver Instrument Co, Arvada, CO, USA) 그리고 탁도(2100P turbidimeter, Hach Co., Ames, IA, USA) 등은 현장측정기기를 이용하여 현장에서 직접 측정하였다. 총인 분석용

시료는 250 mL에 18N 황산 0.25 mL를 첨가하여 냉장보관 후 Standard Methods에 따라 각각 persulfate digestion method로 분해하고 ascorbic acid method에 의한 흡광광도법으로 측정하였다(APHA, 1998). 총질소는 persulfate digestion method로 분해하고 cadmium reduction method에 의해 측정하였다(APHA, 1998).

Chl-*a* 농도는 GF/C 여과지(Whatman, UK)로 여과하여 90% acetone과 여과한 용지를 함께 homogenizer를 이용하여 마쇄하였다. 마쇄한 시료를 원심분리시킨 후 상층액을 분취하여 흡광광도법으로 측정하였다(APHA, 1998).

동물플랑크톤 시료는 정성네트(망목크기 63 µm, 직경 20 cm)를 사용하여 0~15 m를 수직끌기를 하여 채집 농축하였고, 250 mL 폴리에틸렌 병에 담아 sucrose-formalin(최종농도가 4%)으로 고정하였다. 실험실로 운반 후 종 동정하기 전까지 상온 보관하였다. 채집된 동물플랑크톤은 1 mL Sedgwick-Rafter chamber에 subsample을 얻어 광학현미경 하 60~600배에서 종을 파악하였다. 최종 현존량은 종별 개체수로 시료 1리터당 개체수(ind. L<sup>-1</sup>)로 환산하였다. 동물플랑크톤의 종분류는 Mizuno and Takahashi(1999)를 이용하여 속명 또는 종명 수준까지 동정하였다.

**결 과**

**1. 수질 및 수문학적인 특성**

Fig. 2는 4월과 7월에 양수발전댐의 상부댐과 하부댐 각각의 수위변동이다. 4월에는 거의 전력생산을 하지 않는 반면, 전력수요가 많은 7월에는 양수와 방류를 반복적으로 하기 때문에 수위변동폭이 4월에 비해 7월에 상대적으로 크게 나타났다. 하부댐의 수위는 상부댐으로 하부댐의 물을 양수하는 동안(24시에서 12시 사이)에 감소하고, 발전하는 동안에는 증가하는 양상을 보였다(Fig. 2). 이로 인한 수위변동폭은 상부댐에서 4월과 7월에 각각 923.7~930.1 m (926.4±2.4 m), 907.0~931.2 m (923.9±5.3 m)로 최대 24 m 가량의 변동폭을 보였다. 하부댐에서는 4월과 7월에 각각 115.8~118.1 m (117.2±0.8 m), 117.3~121.6 m (119.1±1.0 m)로 최대 4 m 가량의 수위변동폭을 보였다(Fig. 2).

양수발전댐(양수발전댐)에서의 수질은 상부댐과 하부댐이 전반적으로 비슷하였다(Table 2, Fig. 3). 한편, 탁도는 몬순강우가 있는 직후(8월)와 파고가 높아지는 12

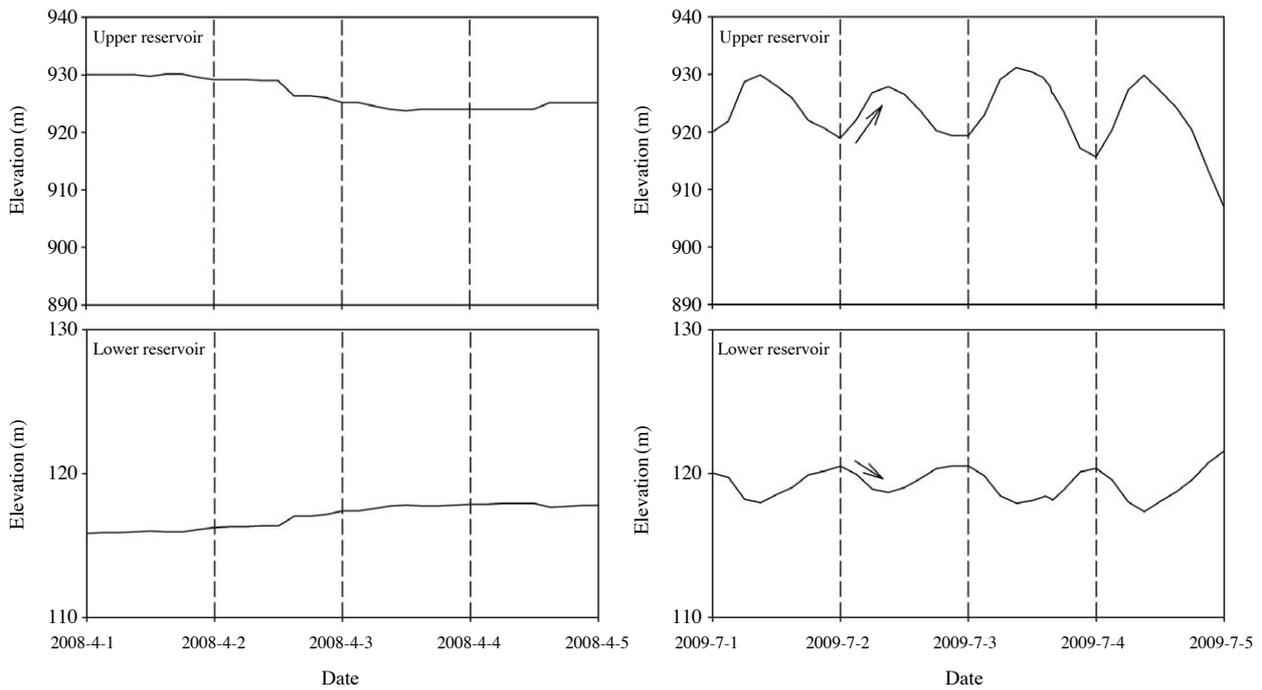


Fig. 2. Fluctuation of water level in the upper reservoir and lower reservoir. Arrow indicates water level change. Dotted line is midnight.

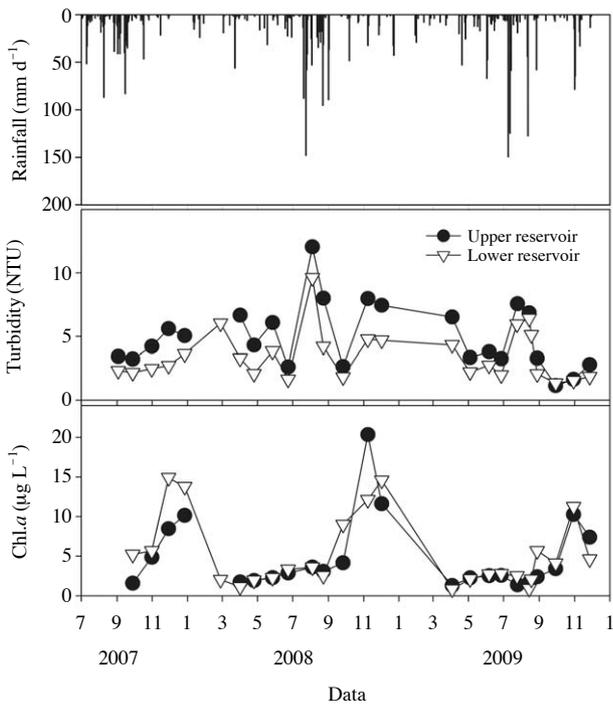


Fig. 3. Spatial and temporal variation of rainfall, turbidity, and chlorophyll-a concentration between upper reservoir (close circle) and lower reservoir (inverted triangle).

Table 2. Environmental parameters in Yangyang reservoir.

	Upper reservoir	Lower reservoir
Water temperature (°C)	13.11 ± 6.33	12.15 ± 6.44
pH	7.13 ± 0.18	7.17 ± 0.23
DO (mg L <sup>-1</sup> )	10.17 ± 1.93	10.83 ± 2.03
TP (µg L <sup>-1</sup> )	13.57 ± 4.07	11.33 ± 3.33
TN (mg L <sup>-1</sup> )	0.91 ± 0.26	0.90 ± 0.23

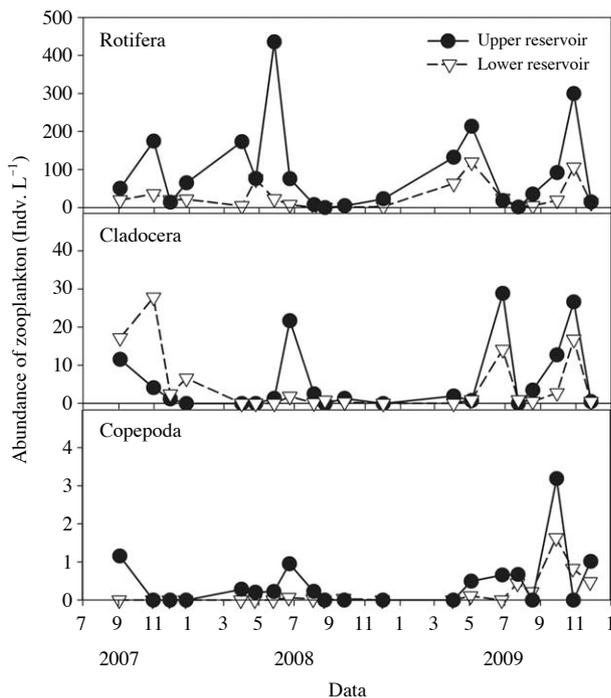
월에 높았는데, 하부댐에 비해 상부댐에서 전반적으로 높게 나타났다. Chl-a 농도는 상부댐과 하부댐 사이에 차이를 보이지 않았다. 11월에서 12월 사이에 매년 높게 나타났고 3월에서 9월 사이에는 낮은 농도를 보였다 (Fig. 3).

### 2. 동물플랑크톤군집의 계절변동

동물플랑크톤군집의 밀도는 하부댐에 비해 상부댐에서 전반적으로 높은 밀도를 보였다 (Fig. 4). 동물플랑크톤군집의 계절에 따른 밀도는 몬순강우 직전인 6월과 몬순강우 이후인 10월에 각각 높게 나타났고 7~9월 사이와 12월 이후 동절기부터는 급격한 감소를 보였다. 특히, 7월에 방류가 있던 시기에는 상부댐과 하부댐 모두에서 동물플랑크톤의 밀도가 급격히 감소하는 양상을

**Table 3.** Dominant zooplankton species in Yangyang reservoir.

Month	2007		2008		2009	
	Upper	Lower	Upper	Lower	Upper	Lower
Apr	—	—	<i>Keratella cochlearis</i>	<i>Keratella cochlearis</i>	<i>Keratella cochlearis</i>	<i>Keratella cochlearis</i>
May	—	—	<i>Keratella cochlearis</i>	<i>Keratella cochlearis</i>	<i>Keratella cochlearis</i>	<i>Keratella cochlearis</i>
Jun	—	—	<i>Ploesoma truncatum</i>	<i>Keratella cochlearis</i>	<i>Bosmina longirostris</i>	<i>Polyarthra</i> spp.
Jul	—	—	—	—	<i>Bosmina longirostris</i>	<i>Bosmina longirostris</i>
Aug	—	—	<i>Polyarthra</i> spp.	<i>Polyarthra</i> spp.	<i>Ploesoma truncatum</i>	<i>Polyarthra</i> spp.
Sep	<i>Polyarthra</i> spp.	<i>Bosmina longirostris</i>	<i>Ploesoma truncatum</i>	<i>Ploesoma truncatum</i>	<i>Polyarthra</i> spp.	<i>Keratella cochlearis</i>
Oct	<i>Polyarthra</i> spp.	<i>Bosmina longirostris</i>	—	—	<i>Ploesoma truncatum</i>	<i>Ploesoma truncatum</i>
Nov	<i>Polyarthra</i> spp.	<i>Polyarthra</i> spp.	—	—	<i>Polyarthra</i> spp.	<i>Polyarthra</i> spp.
Dec	<i>Keratella cochlearis</i>	<i>Keratella cochlearis</i>	<i>Keratella cochlearis</i>	<i>Keratella cochlearis</i>	—	—



**Fig. 4.** Spatial and temporal variation in zooplankton abundance in Yangyang upper reservoir (close circle) and lower reservoir (inverted triangle).

보였다(Fig. 4).

동물플랑크톤군집의 우점종은 상부댐과 하부댐 모두에서 율충류가 우점하는 것으로 나타났다(Table 3). 동물플랑크톤군집에서 출현시기에 따른 우점종의 변화는 겨울(12월)과 봄(1~6월)에는 *Keratella* spp.가, 여름에는 율충류인 *Polyarthra* spp.와 *Ploesoma* sp. 그리고 지각류인 *Bosmina longirostris* (*B. longirostris*)가 몬순강우 이후(2007년) 또는 이전(2009년)에 높은 밀도를 보였다(Table 3). *Polyarthra* spp.는 8~11월 사이에 높은 밀도를 보였고, *Ploesoma* sp.는 2008년부터 6~10월에

높은 밀도를 보였다. *B. longirostris*는 주로 몬순강우 전인 6~7월과 몬순강우 이후인 9~10월 말 사이에 높은 밀도를 나타냈다. 한편 요각류는 일부 copepods의 출현이 있었으나 주로 Nauplius의 출현이 우세하였다.

## 고찰

### 1. 동물플랑크톤군집의 계절변동

양수발전댐에서 동물플랑크톤 밀도의 계절변동은 기존의 연구들에서와 같이 몬순강우를 전후로 하여 봄과 가을에 두 번의 증가를 보이는 몬순기후지역에서의 변동패턴과 비슷하다(Kim *et al.*, 1999; Kim *et al.*, 2005; Uhm and Hwang, 2006).

동물플랑크톤의 밀도는 강우의 영향을 받기 시작하는 7월부터 급격히 감소하는 양상을 보였다(Fig. 4). 더욱이 2008년과 2009년 7월에는 하류하천의 부착조류 및 퇴적물을 제거하기 위해 실시한 인공방류(Park *et al.*, 2012)가 동물플랑크톤의 밀도를 급격하게 감소시키는 상승효과로 작용한 것으로 사료된다(Baranyi *et al.*, 2002; Kim *et al.*, 2005; Hwang *et al.*, 2005; Thorp and Mantovani, 2005). 동물플랑크톤의 감소한 밀도는 대부분의 인공호에서 몬순강우 직후인 9월에 다시 회복되는 경향이 있으나 양수발전댐에서는 이 보다 늦어진 10월 말에 이르러 증가하는 양상을 보였다(Fig. 4). 대부분의 호수에서 나타나는 현상으로 봄과 여름에 두 번의 동물플랑크톤의 밀도 및 생물량 증가는 율충류의 밀도 증가와 더불어 대형지각류인 *Daphnia galeata* 또는 *Diaphanosoma brachyurum* 등의 증가가 크게 기여하기 때문이다. 하지만 양수발전댐에서는 이들 대형지각류의 출현이 확인되지 않았다. 대형지각류가 출현하지 않는 이유 중 하나로 낮은 수온에 의한 영향이 있을 수 있다. 대형지

각류의 밀도가 증가하는 수온은 20°C 이상에서 주로 볼 수 있다. 하지만 양수발전댐의 경우에는 20°C 이상을 상회하는 시기가 거의 없었다 (Table 2). Helland *et al.* (2007)은 빈영양호에서 지각류가 요각류에 비해 더 높은 수온의 수층에 분포하는 것을 보인 바가 있다.

## 2. 서로 다른 수환경과 동물플랑크톤 밀도의 차이

다른 동물플랑크톤의 분류군에 비해 윤충류의 높은 밀도는 탁도, 수체의 지속적인 교란 (수위변동) 그리고 어류의 포식압 등의 영향과 관련이 있는 것으로 사료된다 (Potter and Meyer, 1982). 양수발전댐에서는 동물플랑크톤군집의 밀도는 2007년을 제외하고는 전반적으로 수체의 교란이 심한 상부댐에서 오히려 높은 밀도를 보였다 (Fig. 4). 수체의 교란이 있는 상부댐에 비해 하부댐에서 동물플랑크톤의 밀도가 상당히 낮은 이유로는 몇 가지 원인이 있을 수 있다.

우선, 급격한 수위의 변동에 따른 수체의 지속적인 교란이 윤충류의 밀도를 오히려 증식시키는 요인이 되었을 것으로 사료된다. 상부댐은 하부댐에 비해 상대적으로 높은 탁도를 보였지만 탁도의 차이가 두 댐 사이에서 보이는 동물플랑크톤군집의 밀도 차이를 야기할 수 있는지에 대해서는 본 연구에서는 제시하지 못했다. Thorp and Mantovani (2005)는 윤충류가 소형지각류에 비해 탁한 수체에서 높은 밀도를 보인다고 하였다. 한편 Pollard *et al.* (1998)은 Acton호에서 고탁도와 저탁도에 분포하는 윤충류에 대한 영향을 비교한 결과, 탁도의 차이에 의한 영향이 거의 없음을 보였다. 그럼에도 불구하고 본 연구에서 탁도가 높은 시기에 동물플랑크톤의 밀도는 모든 분류군에서 낮아지는 경향을 보였고, 이들 시기에는 윤충류 중 *Ploesoma truncatum*, *Polyarthra* spp.의 밀도 점유율이 큰 것으로 나타났다 (Table 2).

또 다른 원인으로는 어류에 의한 잠재적인 포식압에 의한 영향이 있을 것으로 사료된다 (Harper and Ferguson, 1982; Potter and Meyer, 1982; Pollard *et al.*, 1998; Chang *et al.*, 2001). 하부댐에서는 어류와 동물플랑크톤이 공존하고 있는 반면, 상부댐은 어류의 서식이 확인되지 않았다. Harper and Ferguson (1982)는 저수지의 준공 직후에는 대형동물플랑크톤 (*Daphnia*)이 우점하다가 소형동물플랑크톤인 *Bosmina*로 우점종이 바뀌는 양상을 보였는데, 이는 어류가 대형동물플랑크톤을 선호적으로 포식하였기 때문이라고 설명하고 있다. 하부댐에서 붕어의 위 내용물을 검사한 결과에서, 붕어는 수서곤충, 동물플랑크톤 그리고 식물플랑크톤에 이르기까지 다양

한 범주의 먹이를 섭식할 수 있는 것으로 나타났다 (Lee *et al.*, unpublished data). 따라서 어류의 서식여부는 동물플랑크톤의 크기 뿐만 아니라 분류군의 밀도에도 영향을 미칠 수 있는 것으로 사료된다.

## 3. 양수발전댐에서 동물플랑크톤의 에너지 흐름

양수발전댐에서는 식물플랑크톤의 현존량 (Chl-*a* 농도)이 높게 나타나는 시기는 매년 몬순강우 이후인 11-12월 사이였다 (Fig. 3). 이 시기에는 다른 시기에 비해 상대적으로 탁도가 높은 시기였다. 일반적으로 몬순강우는 호수생태계에 높은 탁도를 초래하고 수체의 부영양화를 유도하는 원인이 되고 있다 (Park *et al.*, 2005). 양수발전댐에서 Chl-*a* 농도의 계절변동은 대부분 봄과 몬순강우 직후에 높은 농도를 보이는 온대성 호수와는 달리 초겨울에 높은 농도를 보였다 (Potter and Meyer, 1982; Kim *et al.*, 1999; Park *et al.*, 2005). 이는 양수발전댐의 주변 유역이 삼림으로 둘러싸여 인위적인 오염원이 적고, 수온이 낮아 Chl-*a* 농도의 계절변동에 크게 관여하는 *Microcystis*의 출현이 없었기 때문으로 사료된다. 일반적으로 *Microcystis*의 출현은 수온이 높아지고 영양염류의 유입이 있는 대부분의 온대성 호수에서 여름에 급증하는 양상을 보인다 (Heo *et al.*, 2006; Yamamoto, 2009; Lee *et al.*, 2010). 또한 Misson and Latour (2012)는 빛이나 온도의 요인에 비해 수체의 교란이 또한 남세균의 증식을 야기시키고 가속화 시키는 물리적인 요인이 된다고 하였다. 비록 양수발전댐이 양수과정에서 수체의 교란이 크지만 양수발전댐은 연간 수온의 변동이 20°C 이하이고 유역으로부터의 식물플랑크톤의 증식을 초래할 오염원의 유입이 거의 없는 수환경을 유지하고 있다. 따라서 해발고도가 높은 고산에 위치하고 있는 양수발전댐에서는 연중 *Microcystis*가 증식하기에 적합한 환경은 형성되고 있지 않고 있어 기존의 온대성 호수에서의 Chl-*a* 농도의 계절변동과는 다소 차이를 보인 것으로 사료된다.

양수발전댐에서 2009년 이전에는 동물플랑크톤의 밀도가 높아지는 시기는 Chl-*a* 농도가 높아지는 시기에 비해 상당히 이른 시기에 나타났다 (Figs. 3, 4). 양수발전댐에서는 초겨울 (12월) 또는 늦은 봄 (4~6월)에 *K. cochlearis*가 우점하였다. 양수발전댐에서 Chl-*a* 농도가 낮은 봄에 오히려 *K. cochlearis*가 우점하는 양상을 보임은 *K. cochlearis*는 식물플랑크톤을 직접 이용하는 경로 이외에 종속영양 (heterotrophy)을 통한 에너지흐름에도 관여할 가능성이 있음을 시사한다. *K. cochlearis*는 식물플랑

크톤 이외에도 박테리아 또는 detritus를 먹이원으로 이용하는 것으로 알려져 있다(Ooms-Wilms, 1997). Špoljar *et al.* (2007)은 일부 동물플랑크톤의 생물량 Chl-*a* 농도, POM 그리고 DOM 등과 같은 먹이원과 양의 상관성을 보인다고 하였다. 또한 Potter and Meyer (1982)는 댐에서 양수를 시작한 이후 윤층류의 밀도가 급격하게 증가하였음에도 불구하고 식물플랑크톤의 현존량은 양수 이후에도 거의 일정함을 보인 바가 있다. 이는 윤층류가 식물플랑크톤 이외의 먹이원에 의존하고 있음을 시사한다.

Gophen (2012)는 중빈영양호인 Kinneret호에서 *Keratella cochlearis* (*K. cochlearis*)가 수온이 낮은 겨울과 봄 사이에 잘 성장함을 보였는데, 이와 같은 양상은 본 연구에서 *K. cochlearis* 밀도의 계절변동과 거의 일치하는 결과였다 (Conde-Porcuna, 1998). *Keratella*는 식물플랑크톤의 현존량이 낮은 시기에 높은 밀도를 보이기 시작하여 식물플랑크톤이 증식하는 시기에는 낮은 밀도를 보이거나 또는 소멸하는 양상을 보였다. 이는 *Keratella*의 성장이 식물플랑크톤의 현존량에 대해서 제한 받지 않음을 시사한다 (Ooms-Wilms, 1997; Kirk, 2002). 비록 식물플랑크톤이 동물플랑크톤의 먹이원 (Potter and Meyer, 1982)으로 중요하지만, 소형동물플랑크톤 (특히, 윤층류)의 경우, 호수의 영양상태, 수환경 조건 및 계절에 따라서는 식물플랑크톤 이외의 다른 에너지원을 이용할 수 있음을 시사한다 (Conde-Porcuna *et al.*, 2002; Lee *et al.*, 2008). 삼림에 둘러싸인 빈영양호는 일차소비자의 생산량 또는 호흡량에 비해 일차생산량이 오히려 낮은 경우가 많다 (del Giorgio and Peters, 1994). Lee *et al.* (2008)은 같은 동물플랑크톤종이 서식하는 두 삼림호수 각각에서 서로 다른 에너지 흐름에 의존하고 있음을 언급한 바가 있다. 이러한 호수에서는 동물플랑크톤군집이 내부생성유기물 이외에 중속영양동물물을 경유하여 육상에서 기원하는 유기물을 중요한 에너지원으로서 이용할지도 모른다. 따라서, 고산삼림호수이고 지속적인 양수로 인한 수체의 교란과 연중 낮은 수온을 나타내는 양수발전댐에서는 동물플랑크톤군집이 중속영양과 밀접한 관련을 가지고 먹이사슬구조에 적합한 종조성을 형성하는 것으로 사료된다.

본 조사에서는 동물플랑크톤군집에 포함시키지는 않았지만, 양수발전댐의 상부댐에서는 *K. cochlearis*가 증식하는 기간에 혼합영양을 하는 와편모조류 (mixotrophic dinoflagellate)로 *Peridinium bipes* f. *oculatum*도 함께 늦가을에서 겨울에 걸쳐서 번성하는 것으로 나타났다. 와편모조류 (dinoflagellate)는 양수발전댐의 수환경과 같이 지속적으로 교란상태를 보이고 수위의 급격한

변동에 따른 탁수 발생 및 낮은 수온상태에서 다른 동·식물플랑크톤에 비해 생존경쟁에서 유리한 생태적인 특성을 가진다 (Burkholder, 1992).

본 연구는 인위적인 교란이 거의 없는 고산삼림지대에 위치한 빈영양호에서 동물플랑크톤군집은 다른 분류군 (지각류, 요각류)에 비해 소형동물플랑크톤인 윤층류가 높은 밀도를 보이고 계절에 따라 우점하여 출현하는 종이 다름을 보였다. 특히 *K. cochlearis*의 밀도가 증가하는 시기는 식물플랑크톤의 현존량이 낮은 시기와 일치하는 것으로 나타났다 (Fig. 4). *Peridinium bipes* f. *oculatum*의 밀도가 양수발전댐에서 현저하게 많은 원인은, 이들은 식물플랑크톤에 의한 자가영양과 동물플랑크톤의 중속영양을 수환경조건의 변화에 따라 적응하는 플랑크톤으로, 공존하는 다른 동물플랑크톤과 먹이경쟁을 피하여 서식할 수 있기 때문으로 사료된다 (Hitchman and Jones, 2000; Jeong *et al.*, 2010). 다시 말해서 양수발전댐에서는 중속영양생물을 에너지원으로 이용하는 동물플랑크톤이 증식할 수 있는 에너지 경로가 존재할 가능성이 있는 것으로 사료된다. 최근까지도 삼림으로 둘러싸인 고산호수생태계에서 육상에서 기원하는 유기물이 호수생태계와 어떠한 연계구도를 형성하고 있는지에 대한 연구는 국내에서는 빈약한 상태이다. 차후 식물플랑크톤의 현존량이 낮은 시기에 *Peridinium bipes* f. *oculatum*과 *K. cochlearis*의 밀도가 함께 높아지는 양상의 원인을 규명하기 위한 추가적인 연구가 필요하다. 이를 규명하기 위한 몇몇 연구로서, 동물플랑크톤의 체내에 축적된 지방산은 동물플랑크톤 각각의 먹이원이 가지는 지방산의 특성 및 먹이의 질을 파악하는데 유용한 지표로서 이용이 가능하다 (Bourdier and Amblard, 1989; Ederington *et al.*, 1995). 또한 탄소·질소안정동위원소 분석 ( $\delta^{13}\text{C}$ ,  $\delta^{15}\text{N}$ )은 먹이연쇄구조를 파악함에 있어 호수생태계 내 육상기원유기물의 기여 및 포식과 피식의 관계를 규명하는데 활용이 가능하다 (Lee *et al.*, 2002; Lee *et al.*, 2013).

## 적 요

2006년에 준공한 양양양수발전댐에서 동물플랑크톤의 시·공간적인 밀도변동을 파악하기 위해 2007~2009년 월 1회 조사 (결빙기 제외)를 시행 분석하였다. 고산 삼림에 위치한 양수발전댐은 거의 매일 밤에 하부댐에서 양수한 물을 상부댐으로 양수하여 낮에 방류를 통해 전력을 생산하고 있다. 매일 반복되는 수체의 교란은 기존

의 댐과는 다른 독특한 동물플랑크톤의 시공간적인 변동을 초래할 것으로 예상하였다. Chl-*a* 농도는 초겨울에 가장 높은 양상을 보인 한편, 몬순강우 시기에는 가장 낮은 농도를 보이는 일반적인 특성 또한 보였다. 동물플랑크톤의 밀도는 하부댐에 비해 상부댐에서 높게 나타났는데, 이는 하부댐과는 달리 상부댐에는 어류의 포식 압에 의한 영향이 작기 때문으로 사료된다. 율충류(특히, *Keratella cochlearis*)의 출현 시기와 식물플랑크톤의 현존량이 높아지는 시기 사이에 뚜렷한 차이가 있었다. 이는 율충류가 식물플랑크톤 이외에 용존유기물과 박테리아 등과 같은 먹이원에 일부 의존하고 있음을 시사한다. 본 논문에서는 동물플랑크톤에 포함시키지는 않았으나 mixotrophic dinoflagellate (*Peridinium bipes* f. *ocultatum*) 이 상당한 출현을 보였는데 *Peridinium*은 식물플랑크톤과 동물플랑크톤의 사이에 위치하는 혼합영양방식을 가지고 있어 이들 중의 생태적인 특성을 연구하는 것은 외부기원유기물의 기여가 큰 수환경내 물질순환을 이해하는데 중요한 지표가 될 수 있다. 본 논문은 고산에 위치하거나 주변 삼림으로부터 외부기원유기물의 기여도가 높은 저수지 및 인공댐에 서식하는 동물플랑크톤군집에 대한 생태학적인 메커니즘을 이해하는데 기초정보로서 활용될 수 있다.

## 사 사

본 연구는 양양양수발전소, EcoStar수생태복원사업단, 강원대학교 환경연구소의 연구지원에 의해 수행하였음.

## REFERENCES

- APHA (American Public Health Association). 1998. Standard methods for the examination of water and wastewater, 20<sup>th</sup> ed. American Public Health Association, Washington DC.
- 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.
- Bourdier, G.G. and C.A. Amblard. 1989. Lipid in *Acanthodiatomus denticornis* during starvation and fed on three different algae. *Journal of Plankton Research* **11**: 1201-1212.
- Burkholder, J.M. 1992. Phytoplankton and episodic suspended sediment loading: Phosphate partitioning and mechanisms for survival. *Limnology and Oceanography* **37**: 974-988.
- Chang, K.H., S.J. Hwang, M.H. Jang, H.W. Kim, K.S. Jeong and G.J. Joo. 2001. Effect of juvenile fish predation on the zooplankton community in the large regulated Nakdong River, South Korea. *Korean Journal of Limnological Society* **34**: 310-318.
- Conde-Porcuna, J.M., E. Ramos-Rodríguez and C. Pérez-Martínez. 2002. Correlations between nutrient concentrations and zooplankton populations in a mesotrophic reservoir. *Freshwater Biology* **47**: 1463-1473.
- Conde-Porcuna, J.M. and S. Declerck. 1998. Regulation of rotifer species by invertebrate predators in a hypertrophic lake: selective predation on egg-bearing females and induction of morphological defenses. *Journal of Plankton Research* **20**: 605-618.
- del Giorgio, P.A. and R.H. Peters. 1994. Patterns in planktonic P:R ratios in lakes: influence of lake trophy and dissolved organic carbon. *Limnology and Oceanography* **39**: 772-787.
- Ederington, M.C., G.B. McManus and H.R. Harvey. 1995. Trophic transfer of fatty acids, sterols, and a triterpenoid alcohol between bacteria, a ciliate, and the copepod *Acarita tonsa*. *Limnology and Oceanography* **40**: 860-867.
- Gophen, M. 2012. The Ecology of *Keratella cochlearis* in Lake Kinneret (Israel). *Open Journal of Modern Hydrology* **2**: 1-6.
- Harper, D.M. and J.D. Ferguson. 1982. Zooplankton and their relationships with water quality and fisheries. *Hydrobiologia* **88**: 135-145.
- Helland, I.P., J. Freyhof, P. Kasprzak and T. Mehner. 2007. Temperature sensitivity of vertical distributions of zooplankton and planktivorous fish in a stratified lake. *Oecologia* **151**: 322-330.
- Heo, W.M. and B.C. Kim. 2004. The effect of artificial destratification on phytoplankton in a reservoir. *Hydrobiologia* **524**: 229-239.
- Heo, W.M., S.Y. Kwon, Y.G. Kim, W.H. Yih, B.J. Lim and B.C. Kim. 2006. Spatial and Temporal Variations of Environmental Factors and Phytoplankton Community in Lake Yongdam, Korea. *Korean Journal of Limnological Society* **39**: 366-377.
- Hitchman, R.B. and H.L.J. Jones. 2000. The role of mixotrophic protists in the population dynamics of the microbial food web in a small artificial pond. *Freshwater Biology* **43**: 231-241.
- Hwang, G.S., B. Kim, J.O. Kim, J.K. Kim and Y.C. Kim. 2005. The effect of rainfall on the water quality of a small reservoir (Lake Wangkung, Korea). *Korean Journal of Limnological Society* **38**: 39-43.
- Ibe, K., T. Nagata and T. Hanazato. 2011. Experimental analysis of the predation impact of the larvae of pond smelt (*Hypomesus transpacificus nipponensis*) on zooplankton populations established in mesocosms. *Limnology* **12**: 169-174.
- Jeong, H.J., Y.D. Yoo, J.S. Kim, K.A. Seong, N.S. Kang and T.H. Kim. 2010. Growth, feeding and ecological roles of the mixotrophic and heterotrophic dinoflagellates in ma-

- rine planktonic food webs. *Ocean Science Journal* **45**: 65-91.
- 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 Limnological Society* **32**: 127-134.
- Kim, H.S., J.C. Park and S.J. Hwang. 2003. Dynamics of phytoplankton and zooplankton of a shallow eutrophic lake (Lake Ilgam). *Korean Journal of Limnological Society* **36**: 286-294.
- Kim, H.W., G.J. Joo and N. Walz. 2000. Difference of zooplankton development along a lake and a river stretch of the River Spree (Germany). *Korean Journal of Limnological Society* **33**: 197-205.
- Kim, H.W., K.H. Chang and G.J. Joo. 2005. Characteristics and inter-annual variability of zooplankton dynamics in the middle part of the river (Nakdong River). *Korean Journal of Limnological Society* **38**: 412-419.
- Kirk, K. 2002. Competition in variable environments: experiments with planktonic rotifers. *Freshwater Biology* **47**: 1089-1096.
- Lee, J.H. 2004. Effect of hydraulic-gun-aerators on cyanobacterial bloom in a dam reservoir. *Algae* **19**: 23-30.
- Lee, J.Y., B.C. Kim, T. Yoshioka and S. Hino. 2008. The difference isotopic signatures of co-existing zooplankton species in two alpine lakes. *Korean Journal of Limnological Society* **41**: 294-300.
- Lee J.Y., J.K. Kim, J.S. Owen, Y.S. Choi, K.H. Shin, S.M. Jung and B.C. Kim. 2013. Variation in carbon and nitrogen stable isotopes in POM and zooplankton in a deep reservoir and relationship with hydrological characteristics. *Journal of Freshwater Ecology* **28**: 47-62.
- 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 coexisted with *Microcystis*. *Korean Journal of Limnological Society* **43**: 1-10.
- Lee, J.Y., T. Yoshioka and T. Hanazato. 2002. Faunal trophic interaction in an oligotrophic-dystrophic lake (Shirakomaike, Japan) *Limnology* **3**: 151-158.
- Lee, W.S. and M.S. Han. 2004. Community structure of plankton in eutrophic water systems with different residence time. *Korean Journal of Limnological Society* **37**: 263-271.
- Misson, B. and D. Latour. 2012. Influence of light, sediment mixing, temperature and duration of the benthic life phase on the benthic recruitment of *Microcystis*. *Journal of Plankton Research* **34**: 113-119.
- Mizuno, T. and E. Takahashi. 1999. An illustrated guide to freshwater zooplankton in Japan. Tokai University Press.
- Obertegger, U., G. Flaim, M.G. Braioni, R. Sommaruga, F. Corradini and A. Borsato. 2007. Water residence time as a driving force of zooplankton structure and succession. *Aquatic Sciences* **69**: 575-583.
- Ooms-Wilms, A.L. 1997. Are bacteria an important food source for rotifers in eutrophic lakes? *Journal of Plankton Research* **19**: 1125-1141.
- Park, J.W., K.L. Lee, J.S. Choi and H.S. Kim. 2005. Dynamics of Phytoplankton Community after Formation of Turbid Water in Lake Imha. *Korean Journal of Limnological Society* **38**: 429-434.
- Park, M.S., J.Y. Lee, S.M. Jung, C.K. Park, K. Chang and B.C. Kim. 2012. Effects of sand supply and artificial floods on periphyton in the downstream of a Dam (Yangyang Dam, Korea). *Journal of Korean Society on Water Environment* **28**: 418-425.
- Pollard, A.I., M.J. González, M.J. Vanni and J.L. Headworth. 1998. Effects of turbidity and biotic factors on the rotifer community in an Ohio reservoir. *Hydrobiologia* **387/388**: 215-223.
- Potter, D.U. and J.L. Meyer. 1982. Zooplankton communities of a new pumped storage reservoir. *Water Resources Bulletin* **18**: 635-642.
- Rojo, C., M.A. Rodrigo and M.M. Barón-Rodríguez. 2007. Dynamics of the planktonic food web in Colgada Lake (Lagunas de Ruidera Natural Park). *Limnetica* **26**: 251-264.
- špoljar, M., I. Habdija and B. Primc-Habdija. 2007. The influence of the lotic and lentic stretches on the zooseston flux through the Plitvice Lakes (Croatia). *Annales de Limnologie-International Journal of Limnology* **43**: 29-40.
- Thorp, J.H. and S. Mantovani. 2005. Zooplankton of turbid and hydrologically dynamic prairie rivers. *Freshwater Biology* **50**: 1474-1491.
- Uhm, S.H. and S.J. Hwang. 2006. Grazing Relationship between Phytoplankton and Zooplankton in Lake Paldang Ecosystem. *Korean Journal of Limnological Society* **39**: 390-401.
- Yamamoto, Y. 2009. Effect of temperature on recruitment of cyanobacteria from the sediment and bloom formation in the shallow pond. *Plankton and Benthos Research* **4**: 95-103.