

몬순기후로 인한 수리수문학적 변화가 팔당호 동물플랑크톤 군집에 미치는 영향

유 경 아* · 변 명 섭¹ · 황 순 진²

(국립환경과학원 물환경연구부, ¹국립환경과학원 한강물환경연구소,
²건국대학교 환경과학과)

Effects of Hydraulic-hydrological Changes by Monsoon Climate on the Zooplankton Community in Lake Paldang, Korea. You, Kyung-A*, Myeong-Seop Byeon¹ and Soon-Jin Hwang² (Water Environment Research Department, National Institute of Environmental Research, Environmental Research Complex, Kyungseo-dong, Seo-gu, Incheon, Korea; ¹Han River Environment Research Center, National Institute of Environmental Research; ²Department of Environmental Science, Konkuk University)

The zooplankton community of Lake Paldang, Korea, was investigated on a weekly basis from 2004 to 2006. The seasonal succession of zooplankton community structure was influenced by hydrological factors such as rainfall pattern and efflux in Lake Paldang. According to the monsoon climate, spring, fall and winter had reduced precipitation, so that zooplankton dynamics of the lake showed a typical succession pattern. In spring, small sized and faster growing rotifera rapidly increased, and copepods and cladocera noticeably increased thereafter. Rotifera dominated the zooplankton community, occupying more than 90% of total zooplankton abundance. Among rotifera, *Keratella cochlearis* was extremely dominant in spring. Copepoda were mainly present as Copepodid and Nauplius. Among cladoceran species, *Bosmina longirostris* was dominant. In summer, during the rainy season, zooplankton were flushed out by an associated dam. After the rainy season, rotifera increased rapidly when the water column of the lake was stable. During the fall, zooplankton abundance gradually reduced in accordance with decreasing water temperature. However, the occupation rate of copepod (Copepodid, Nauplius) increased relatively. Zooplankton dynamics were influenced by meteorological changes and hydraulic-hydrological factors, because Lake Paldang is a completely closed ecosystem.

Key words : zooplankton, Lake Paldang, monsoon climate, hydraulic-hydrological factors

* Corresponding author: Tel: 031) 770-7272, Fax: 031) 773-2268, E-mail: angelka@korea.kr

서론

수환경의 변화를 유도하는 환경 요인에는 크게 물리·화학적 및 생물학적 영향이 포함된다. 이들은 밀접한 상호 관련성을 가지고 있으며, 그 중에서 강수량과 유량을 중심으로 한 물리적 수문 요인의 영향이 매우 중요하다 (Parks and Baker, 1997; Winston and Criss, 2002). 우리나라는 기후학적으로 온대에 위치하여 사계가 뚜렷하고, 대륙과 해양의 중간에 위치하여 계절성 기후의 영향이 강하다. 이러한 계절성 기후의 영향은 수문학적으로 볼 때, 여름철의 장마, 집중호우 및 태풍의 자연적 요인이 가장 중요하게 선택될 수 있으며, 수문인자의 발생기간, 빈도 및 크기는 수환경에 시공간적으로 다양한 영향을 미칠 수 있다 (Thornton *et al.*, 1990; Winston and Criss, 2002).

일반적으로 온대 호수에서 동물플랑크톤의 계절적인 변화는 먹이원으로 이용할 수 있는 식물플랑크톤이 적고 수온이 낮은 겨울에는 성장률이 느린 요각류 유생과 소수의 성체만이 존재하며, 지각류는 퇴적층에서 휴지기를 보내기 때문에 거의 출현하지 않는다 (Agbeti and Smol, 1995). 봄이 되면 수온상승으로 동물플랑크톤 활동성이 증가하고, 먹이원으로 이용되기 쉬운 식물플랑크톤의 증가로 연중 최대 생물량을 나타내게 된다. 그러나 동물플랑크톤의 계절적인 천이는 먹이농도와 종류 그리고 환경의 계절적 변화로 인해 동물플랑크톤의 종조성과 현존량이 변화함으로써 나타난다 (Kim *et al.*, 2003). 수심이 얇은 부영양 호수에서는 동·식물플랑크톤의 계절적인 천이 뿐만 아니라 생물 간의 상호작용과 무생물학적 요인과의 상호관계의 결과에 따라 다르게 나타날 수 있다 (Sommer *et al.*, 1986; Kim *et al.*, 2003). 체류시간이 짧은 팔당호는 구조적으로 바람에 의한 불규칙한 혼합, 유역으로부터 유입되는 오염물질, 그리고 집중호우 시에 높은 희석율 등의 특징을 가지고 있기 때문에 동물플랑크톤 종 조성과 생물량 변화는 계절적 요인과 더불어 수체가 가지는 구조적·지형적 특징, 그리고 유역 환경 특성 등이 복잡하게 연계되어 나타나게 된다.

팔당호는 유역 면적에 비해 저수 면적이 매우 작을 뿐만 아니라 평균 수심이 6.4 m로 얕고 평균 수리학적 체류시간이 2.6~9.0일로 짧아 연중 수질의 수층별 차이가 크지 않은 특성을 보이는 전형적인 하천형 호수에 속한다 (Kim and Hong, 1992; Kim *et al.*, 2002a). 따라서 강수량 정도에 따라 유량이 풍부한 여름철 풍수기에는 하천의 성격이 현저하나, 유량이 빈약한 저수기 또는 갈수기에는 호수의 성향을 강하게 보이는 이중적 복합수계로 볼

수 있다 (Kong, 1997).

팔당호는 한강 중하류에 위치하며, 유역의 특성이 상이하고 유량이 서로 다른 남한강, 북한강, 경안천의 세 하천이 팔당댐 건설로 합류되면서 형성된 호수이다. 또한 인공 댐호의 일반적인 수지형 (dendritic type) 형태를 하고 있으며, 유입하천과 호수의 경계가 명확하지 않으며 남한강, 북한강 수계의 중·상류에 대형 댐들이 위치하고 있어 자연하천과는 달리 상류 댐의 수문조절에 의해 하류하천의 유속과 유량이 크게 영향을 받고 이는 곧 팔당호로의 영향으로 이어질 가능성이 높다 (Park *et al.*, 2004). 이러한 인공호에서의 생물학적 특성 역시 일차적으로 수문학적 현상(수리학적 체류시간)에 의해 좌우되는 것으로 알려져 있고 (Shin *et al.*, 2003a), 따라서 팔당호에서의 동물플랑크톤 군집 변화 역시 수리·수문학적 변화에 크게 영향을 받을 것으로 예측할 수 있다.

따라서 본 연구에서는 팔당호에서의 동물플랑크톤 군집 변화를 이해하기 위하여 몬순 기후에 의한 강우 사상 (rainfall pattern)과 팔당댐의 유량변화가 동물플랑크톤의 개체수와 종 조성 및 천이양상에 미치는 영향을 알아 보고자 하였다.

재료 및 방법

1. 조사지점 및 조사시기

본 연구는 남한강, 북한강 및 경안천이 합류되어 호수를 이루는 팔당호 (37° 30'N, 127° 20'E)를 대상으로 하였다. 팔당댐은 남·북한강 합류점에서 하류 7 km, 서울의 북방 35 km 지점에 위치하고 있다. 팔당호는 1972년 12월부터 수력발전용 목적으로 담수를 시작하였으나, 현재는 홍수 조절, 하천유지용수 공급 및 광역상수원의 기능이 추가되어 다목적 댐호로 이용되고 있다 (KHNP, 2001). 유역의 총면적은 약 23,800 km²이고 남한강 (60%), 북한강 (37%), 경안천 (3%)의 유역을 포함하고 있으며, 팔당호의 수표면적은 36.5 km²로서 유역면적/저수면적의 비는 652에 달하는데 이로 인하여 유역으로부터의 오염물질 유입에 취약한 구조를 가진다. 연 강수량은 1,105 mm, 연간 유입량과 방류량은 각각 227,570 m³ yr⁻¹, 214,729 m³ yr⁻¹이며, 총저수량은 244.0 × 10⁶ m³, 유효저수량은 18.0 × 10⁶ m³이다 (WAMIS, 2007). 평균 수심은 6.4 m이고, 최대 수심은 25.5 m로서 하천 유입부에서 얕고, 댐 부근에서 가장 깊으며, 평균 수리학적 체류시간은 약 1주일로 짧고 상류수계의 유입량과 댐의 수문조절에 따라 수리학적 체류시간이 크게 변화하는 호수이다 (HIRERC, 2004).

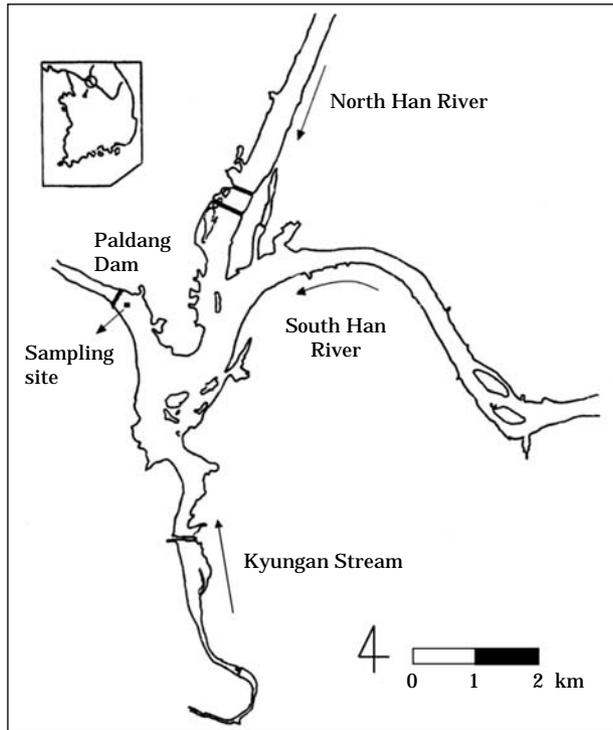


Fig. 1. Map showing sampling site in Lake Paldang.

조사지점은 팔당댐 앞을 정점으로 하여 2004년 3월부터 2006년 12월까지 매주 1회 조사하였고 동절기 결빙 시기인 1~2월은 제외하였다 (Fig. 1).

2. 연구방법

팔당댐 앞 대표지점에서 매주 조사 시에 수온, pH, 용존 산소 (DO), 전기전도도, 투명도는 현장측정기 (Hydrolab-minisonde 4e, YSI-6600D)를 이용하여 현장에서 측정하였으며, 표층수를 채수하여 실험실로 옮긴 후 Standard method (APHA, 1994)에 따라 Chlorophyll *a* 농도를 측정하였다. 90% 아세톤을 용매로 하여 암냉소에서 색소를 추출한 후 흡광도 663 nm, 645 nm, 630 nm, 750 nm에서 측정하였다 (PerkinElmer, USA). 팔당댐의 강수량, 유입량, 방류량 자료는 국가수자원관리종합정보시스템 (www.wamis.go.kr)에 게재된 댐 운영정보의 일 자료를 이용하였다.

동물플랑크톤은 키타하라식 정량 플랑크톤 넷(망목: 0.06 mm)를 이용하여 하층부터 표층까지 수직 예망하여 채집하였다. 채집 동물플랑크톤 시료는 폴리에틸렌 병에 담아 현장에서 중성 포르말린액 (20%)을 이용하여 최종농도 5%로 고정하였다. 24시간 이상 침전시킨 후 상정액 (上澄液)을 제거하고 시료의 양을 200 mL로 맞추어

검정하였다. 동물플랑크톤의 정량·정성분석은 동물플랑크톤을 Sedgwick-Rafter 계수판에 넣고 광학 현미경 하에서 40~200배의 배율로 윤충류, 요각류, 지각류로 구분하여 각 종별로 동정 및 계수하였다 (Stemberger, 1979; Balcer *et al.*, 1984; Cho, 1993).

결과 및 고찰

1. 물리·화학적 수환경 변화

2004년부터 2006년 동안 팔당호의 수리·수문학적 요인의 조사 결과, 연중 유역 강수량은 2004년에 1,204 mm, 2005년에 1,512 mm, 2006년에 1,475 mm로 2005년에 팔당호의 총 유역 강수량이 가장 많았으며 50 mm 이상의 강우가 내린 횟수 역시 10회로 가장 많았다. 그러나 5 mm 이상의 강우빈도는 2004년이 53회로 연중 적은 양의 강우가 넓게 분포하였으며 100 mm 이상의 집중호우는 발생하지 않았다. 반면, 2005년에는 7~8월 동안 100 mm 이상의 집중호우가 2번 있었고 연간 강수량의 53%가 집중되었으며 9월 중순에는 태풍 '나미'가 발생하여 50 mm 이상의 유역 강우가 일주일 동안 지속되었다. 또한, 2006년에는 7월 중순에 260 mm의 집중호우가 내려 연중 최대의 강우량을 보였으며 7월 동안 집중호우가 수차례 반복하여 연간 강수량의 61%가 집중되었다. 우리나라의 강우사상은 몬순기후에 의해 6월 중순 이후 강우가 시작되어 여름 동안 연간 강수량의 50% 이상이 집중된다. 최근에는 이상기후의 영향에 따라 여름 강우기간의 단축과 강우량의 감소를 보이고 있으나 오히려 국지성 집중호우는 빈도와 수량이 증가하여 여름철 강우 집중현상은 더욱 증가하고 있다. 여름철 (6~8월) 강우사상은 2004년에 연 강수량의 56%, 2005년에 64%, 2006년에 77%를 나타내어 여름철 강우 집중현상이 점차 심화되는 것으로 나타났다. 팔당호의 연간 수리학적 체류시간은 2004년에 3.8일, 2005년에 4.2일, 2006년에 3.4일 이었으며 특히, 여름철에는 강우 집중도의 영향으로 1일 미만의 수리학적 체류시간을 보였다 (Fig. 2).

팔당댐의 유입량과 방류량의 변화는 강우사상과 밀접한 관련을 나타내어 강우가 집중되는 여름 동안 유입·방류량 역시 크게 증가하였다. 특히, 집중호우가 발생하는 시점에는 강우와 유입·방류량 간의 일 변화가 동일하게 나타나 유역에 집중되는 많은 양의 강우와 상류댐 수문조작에 의한 유량이 팔당댐 수문을 통해 그대로 하류로 방류되는 특성을 보였다. 강우가 집중되는 7~8월 동안에 $1,000 \text{ m}^3 \text{ sec}^{-1}$ 이상의 유입·방류량을 기록하여

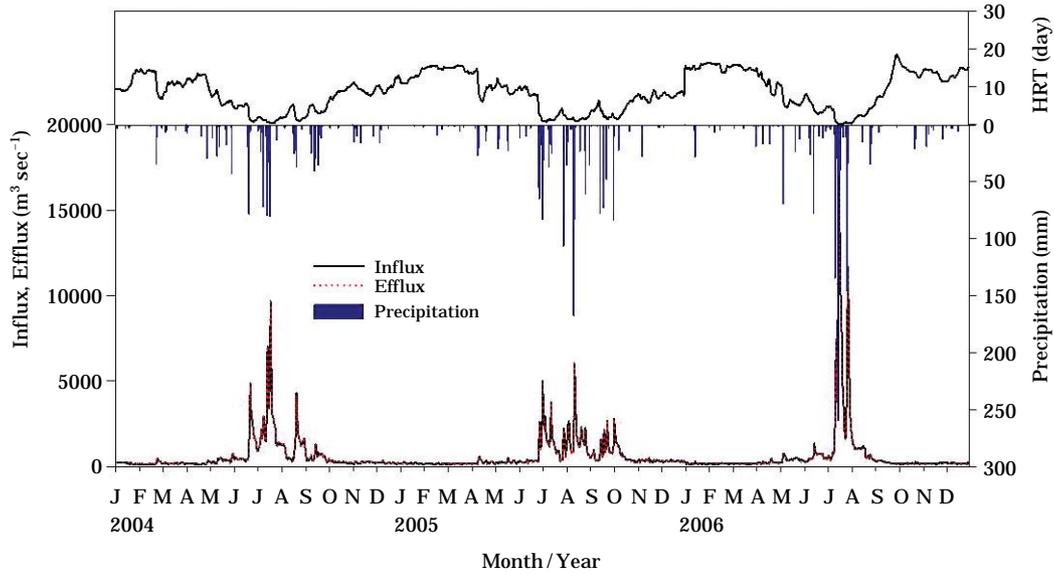


Fig. 2. Seasonal change of influx, efflux, precipitation and hydraulic retention time (HRT) in Lake Paldang from 2004 to 2006.

Table 1. Mean values ($\pm 1SD$) of environmental factors in Lake Paldang from 2004 to 2006 (Parenthesis values indicate standard deviation, maximum and minimum).

Factors	Years			Total
	2004	2005	2006	
Influx ($m^3 sec^{-1}$)	616.2 \pm 988.8 (9,675.2/115.1)	598.2 \pm 743.3 (6,006.7/126.7)	697.2 \pm 1,905.6 (18,952.1/124.4)	637.2 \pm 1,310.9 (18,952.1/115.1)
Efflux ($m^3 sec^{-1}$)	616.3 \pm 988.5 (9,647.7/123.4)	559.6 \pm 745.8 (6,069.8/123.1)	659.2 \pm 1,908.8 (19,289.0/123.2)	611.7 \pm 1,312.8 (19,289.0/123.1)
Precipitation ($mm day^{-1}$)	3.3 \pm 10.8 (80.5/0.0)	4.1 \pm 15.9 (167.5/0.0)	4.0 \pm 19.5 (259.5/0.0)	3.8 \pm 15.8 (259.5/0.0)
Water temp. ($^{\circ}C$)	17.3 \pm 5.5 (26.8/4.6)	17.4 \pm 6.5 (26.7/3.4)	16.1 \pm 7.1 (26.5/2.1)	16.9 \pm 6.4 (26.8/2.1)
pH	8.5 \pm 0.8 (9.5/7.1)	8.0 \pm 1.0 (9.7/6.1)	8.1 \pm 0.8 (9.5/6.2)	8.2 \pm 0.9 (9.7/6.1)
DO ($mg L^{-1}$)	11.1 \pm 2.0 (15.1/6.9)	10.5 \pm 1.9 (14.5/7.4)	11.7 \pm 2.1 (16.0/7.0)	11.1 \pm 2.1 (16.0/6.9)
Conductivity ($\mu s cm^{-1}$)	146.1 \pm 28.1 (195.0/93.2)	145.3 \pm 30.9 (214.0/99.6)	151.4 \pm 26.4 (193.0/80.5)	147.8 \pm 28.4 (80.5/214.0)
Transparency (m)	1.1 \pm 0.5 (2.0/0.1)	1.3 \pm 0.7 (3.4/0.2)	1.1 \pm 0.4 (2.0/0.2)	1.2 \pm 0.6 (3.4/0.1)
Chl. <i>a</i> ($\mu g L^{-1}$)	27.0 \pm 16.9 (73.0/1.4)	20.8 \pm 13.6 (51.6/2.3)	24.8 \pm 15.8 (72.4/1.9)	24.1 \pm 15.5 (73.0/1.4)

강우량의 변동과 일치하였고 특히, 침투유량은 일 최대 강우량과 동일하였으며 유입·방류량 간의 차이는 없었다. 연평균 방류량은 2004년에 $616 m^3 sec^{-1}$, 2005년에 $560 m^3 sec^{-1}$, 2006년에 $659 m^3 sec^{-1}$ 로 조사되어 국지성 집중

호우가 많았던 2006년에 최대 방류량을 나타냈으며 일 최대 방류량은 2006년 7월 16일에 $19,289 m^3 sec^{-1}$ 로 조사되어 일 최대 강우량의 변동과 일치하였다(Table 1). 하절기 집중강우는 유역으로부터의 높은 인 부하 및 식

Table 2. Seasonal average and dominant values of zooplankton abundance in Lake Paldang from 2004 to 2006.

Year	Taxon	Season				
		Abundance (Ind. L ⁻¹) (Dominant value (%))				
		Total	Spring	Summer	Fall	Winter
2004	Rotifera	117 (75)	200 (80)	168 (77)	18 (57)	13 (82)
	Copepoda	12 (13)	19 (7)	16 (12)	4 (29)	2 (12)
	Cladocera	24 (13)	42 (13)	32 (11)	5 (14)	1 (6)
	Total	152 (100)	261 (100)	216 (100)	26 (100)	15 (100)
2005	Rotifera	122 (81)	277 (91)	56 (73)	66 (83)	90 (87)
	Copepoda	12 (12)	20 (7)	12 (18)	8 (11)	2 (6)
	Cladocera	6 (7)	7 (2)	8 (9)	5 (6)	2 (6)
	Total	141 (100)	304 (100)	77 (100)	80 (100)	94 (100)
2006	Rotifera	156 (82)	240 (90)	69 (79)	200 (80)	26 (59)
	Copepoda	13 (10)	12 (5)	9 (14)	25 (10)	8 (22)
	Cladocera	13 (8)	16 (4)	8 (7)	21 (10)	11 (19)
	Total	183 (100)	268 (100)	86 (100)	246 (100)	45 (100)
Average	Rotifera	119 (79)	239 (86)	98 (80)	95 (73)	43 (79)
	Copepoda	12 (12)	17 (7)	12 (12)	13 (18)	4 (11)
	Cladocera	13 (9)	22 (7)	16 (8)	10 (9)	4 (10)
	Total	143 (100)	278 (100)	126 (100)	118 (100)	51 (100)

물플랑크톤 증가를 야기하기 때문에 강우사상이 계절적으로 편중된 지역에서는 기후의 영향이 수생태계의 수질 변화와 생태계의 기능에 매우 중요한 영향을 미칠 수 있다 (Faithful and Griffiths, 2000; Shin *et al.*, 2003a). 또한, 기후와 관련된 수문학적 특성, 특히 인공 댐호에서 수문 조작에 따른 물의 방류도 호내의 수질변화에 상당한 영향을 미치는 인자이다 (Thornton *et al.*, 1990; Shin *et al.*, 2003b).

조사기간 동안 팔당호의 연평균 수온 변화는 2004년에 17.3°C, 2005년에 17.4°C, 2006년에 16.1°C로 여름 집중 호우가 많았던 2006년에 가장 낮았다. 한강의 경우 결빙일은 꾸준히 늦어지고 있는 반면에 해빙일은 점차 빨라지고 있으며 (NIMR, 2009), 한강의 중하류에 위치한 팔당호 역시 동일한 결과를 보이고 있었다. 연도별 pH의 변화는 2004년에 8.5로 가장 높았고 2005년에 8.0으로 가장 낮았다. DO의 변화는 2006년에 11.7 mg L⁻¹로 가장 높았고 2005년에 10.5 mg L⁻¹로 가장 낮았다. 전기전도도의 변화는 2006년에 151.4 $\mu\text{S cm}^{-1}$ 로 가장 높았고 2004년에 146.1 $\mu\text{S cm}^{-1}$ 로 가장 낮았다. 투명도의 경우 1.1~1.3m로 변화하여 큰 차이가 없었으며, Chl. *a*의 변화는 2004년에 27.0 $\mu\text{g L}^{-1}$ 로 가장 높았고 2005년에 20.8 $\mu\text{g L}^{-1}$ 로 가장 낮았다 (Table 1). 강우량이 가장 적었던 2004년에 pH와 Chl. *a*가 높았고 투명도가 낮았으며, 강우량이 가장 많았던 2005년에 pH와 Chl. *a*가 낮았고 투명도가 높았다.

2. 동물플랑크톤 군집 변화

2004년부터 2006년 동안 팔당호 동물플랑크톤의 연평균 개체수 변화는 2004년에 152 Ind. L⁻¹였으며 2005년에는 141 Ind. L⁻¹, 2006년에는 183 Ind. L⁻¹로 출현하여 2006년에 가장 많은 개체수를 보였다 (Table 2).

동물플랑크톤 군집을 윤충류, 요각류, 지각류로 나누어 연중 상대우점도를 비교한 결과, 2004년에는 윤충류가 연중 75%의 점유율을 나타냈으며 요각류가 13%, 지각류가 13%의 비율로 존재하였다. 2005년에는 윤충류가 81%의 점유율을 보였고 요각류 12%, 지각류 7%였다. 2006년에는 윤충류 82%, 요각류 10%, 지각류 8%로 나타나 윤충류의 상대우점도가 점차 증가한 것으로 조사되었다 (Table 2).

팔당호는 수심이 얕아 1~2월 동절기 동안에는 결빙상태였지만 인과 질소의 농도가 높고 식물플랑크톤 중 저온성 규조류 현존량이 많기 때문에 해빙과 동시에 수온이 상승하고 일조량이 증가함에 따라 식물플랑크톤의 증식이 빠르게 나타났다 (HRERC, 2004). 일반적으로 봄이 되면 수온상승으로 동물플랑크톤의 활동성이 증가하고, 먹이원이 되는 식물플랑크톤이 증가하여 동물플랑크톤 밀도는 연중 최대를 나타낸다 (Sommer *et al.*, 1986; Kim *et al.*, 1999). 팔당호에서도 2월 말 해빙됨과 동시에 수온상승과 먹이원 증가에 의해 윤충류가 빠르게 증식하며 동물플랑크톤 군집 개체수가 급속도로 증가하였고 4~5월에 연중 최대 개체수를 보였다. 최대 개체수 시기는 2004년

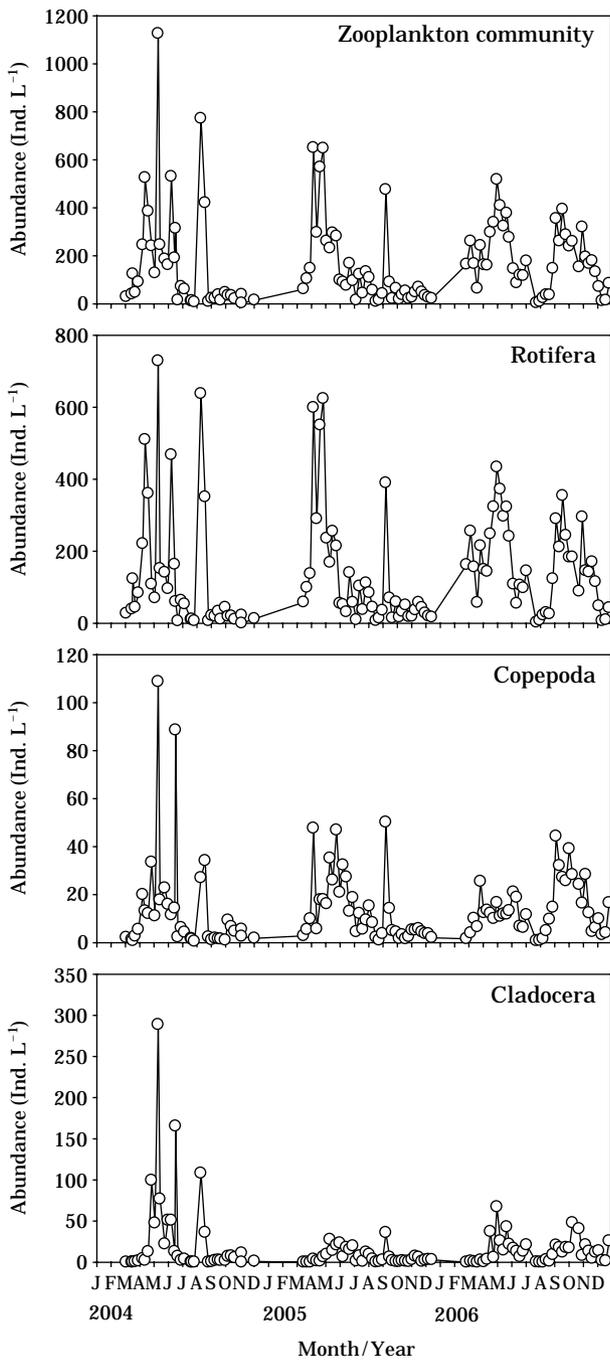


Fig. 3. Seasonal change of zooplankton community in Lake Paldang from 2004 to 2006.

에는 5월 초에 1,125 Ind. L⁻¹, 2005년에는 4월 초에 650 Ind. L⁻¹, 2006년에는 5월 초에 517 Ind. L⁻¹였다(Fig. 3). 봄에 동물플랑크톤이 최대 개체수를 보였던 1~2주 동안에는 동물플랑크톤의 섭식활동에 의해 팔당호의 투명도가 2.0m 이상(최대 3.4 m) 증가하며 일시적으로 청수 현

상(clear-water phase)이 나타났다.

봄에는 윤층류가 90% 이상의 우점율을 보였으며 주요 우점종은 *Keratella cochlearis*, *Polyarthra vulgaris*로 조사되었다. 윤층류 중에서 봄에 우점율이 가장 큰 종은 *Keratella cochlearis*로 동물플랑크톤 군집에서 25% 이상의 점유율을 나타냈다(Fig. 4). 세대교번이 빠른 윤층류의 대량 증식 이후 동물플랑크톤 군집 개체수는 감소하였다가 6월에 수온이 20°C 이상으로 상승하면서 요각류와 지각류의 개체수가 증가하였고 여름 강우가 시작되기 전까지 윤층류도 재증식하는 양상을 보였다. 요각류는 유생(Copepodid, Nauplius)의 출현비율이 높은 가운데 성체 중에서는 *Cyclops vicinus*가 주로 출현하였으며 지각류는 *Bosmina longirostris*, *Bosminopsis deitersi*, *Daphnia galeata*가 주로 출현하였는데 수온이 상승함에 따라 고온에서 주로 출현하는 *Diaphanosoma brachyurum*의 개체수도 증가하였다.

집중호우가 빈번했던 7~8월에는 하루에도 수 회 이상 수체가 완전히 교체되는 수리학적 특성을 보였고, 이로 인해 동물플랑크톤은 하류로 떠내려가거나 성장이 억제되어 개체수가 크게 감소하였다. 여름에 동물플랑크톤 군집 개체수는 2004년에 216 Ind. L⁻¹, 2005년에 77 Ind. L⁻¹, 2006년에는 86 Ind. L⁻¹였다. 2004년에는 여름에 집중호우가 없어 봄과 여름 동안 윤층류 개체수의 차이가 비교적 적었으나, 2005년과 2006년에는 집중호우의 영향으로 봄과 여름 동안 윤층류 개체수가 4~5배의 차이를 보였다(Table 2).

강우 이후에는 수체가 안정화되면서 소형 동물플랑크톤인 윤층류를 중심으로 개체수가 다시 증가하였으며 가을에는 윤층류 가운데 *Polyarthra vulgaris*의 점유율이 높게 나타났다. 가을에 동물플랑크톤 군집 개체수는 2004년에 26 Ind. L⁻¹, 2005년에 80 Ind. L⁻¹, 2006년에는 246 Ind. L⁻¹였다. 2004년과 2005년에는 가을에 태풍 및 강우에 의한 수체 교란으로 팔당호의 수리학적 체류시간이 각각 7일과 4일로 봄과 같은 동물플랑크톤 증식이 나타나지 않았다. 반면, 2006년에는 가을에 강우가 적어 팔당호의 수리학적 체류시간이 13일로 길어짐에 따라 봄과 같이 동물플랑크톤 증식이 크게 나타났다.

온대호수에서 수온이 낮은 겨울에는 동물플랑크톤이 먹이원으로 이용할 수 있는 식물플랑크톤이 적고 성장률이 느린 요각류 유생과 소수의 성체만이 존재하며, 지각류는 퇴적층에서 휴지기를 보내기 때문에 거의 출현하지 않는다고 하였다(Agbeti and Smol, 1995). 본 연구의 결과, 겨울로 갈수록 수온 하강에 의해 동물플랑크톤 군집 개체수는 점차적으로 감소하였고 세 분류군 가운데 상대우점도

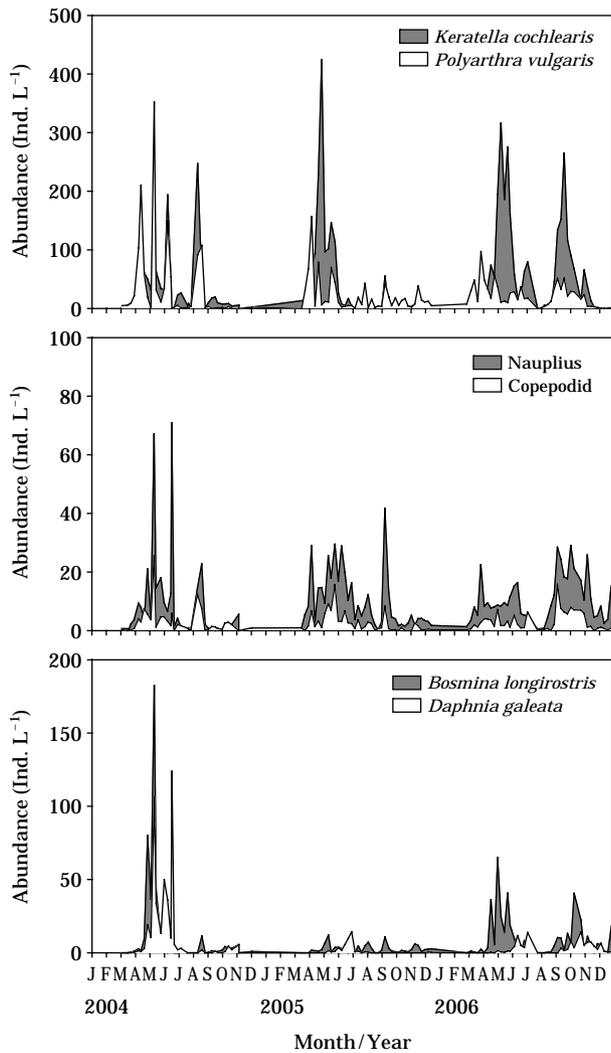


Fig. 4. Seasonal change of dominant species of zooplankton community in Lake Paldang from 2004 to 2006.

가 컸던 윤충류의 감소폭이 두드러졌다. 겨울 동안 윤충류는 평균 43 Ind. L⁻¹였으며 요각류와 지각류는 4 Ind. L⁻¹ 이하의 적은 개체수를 보였다. 윤충류는 *Synchaeta oblonga*가 주로 출현하였고 요각류는 유생 (Copepodid, Nauplius)의 형태로 존재하였으며 지각류는 *Bosmina longirostris*가 주로 출현하였다.

팔당호 동물플랑크톤의 연평균 생체량(biomass) 변화는 2005년에 21 µgC L⁻¹였으며 2006년에는 29 µgC L⁻¹였다. 2005년에는 윤충류 31%, 요각류 26%, 지각류 43%의 점유율을 보였고 2006년에는 윤충류 17%, 요각류 20%, 지각류 62%로 지각류의 상대우점도가 증가하여 개체수 변화와는 다른 결과였다 (Fig. 5). 2005년에는 동물플랑크톤 생체량이 봄에 41 µgC L⁻¹로 가장 많았으며 여름에 20

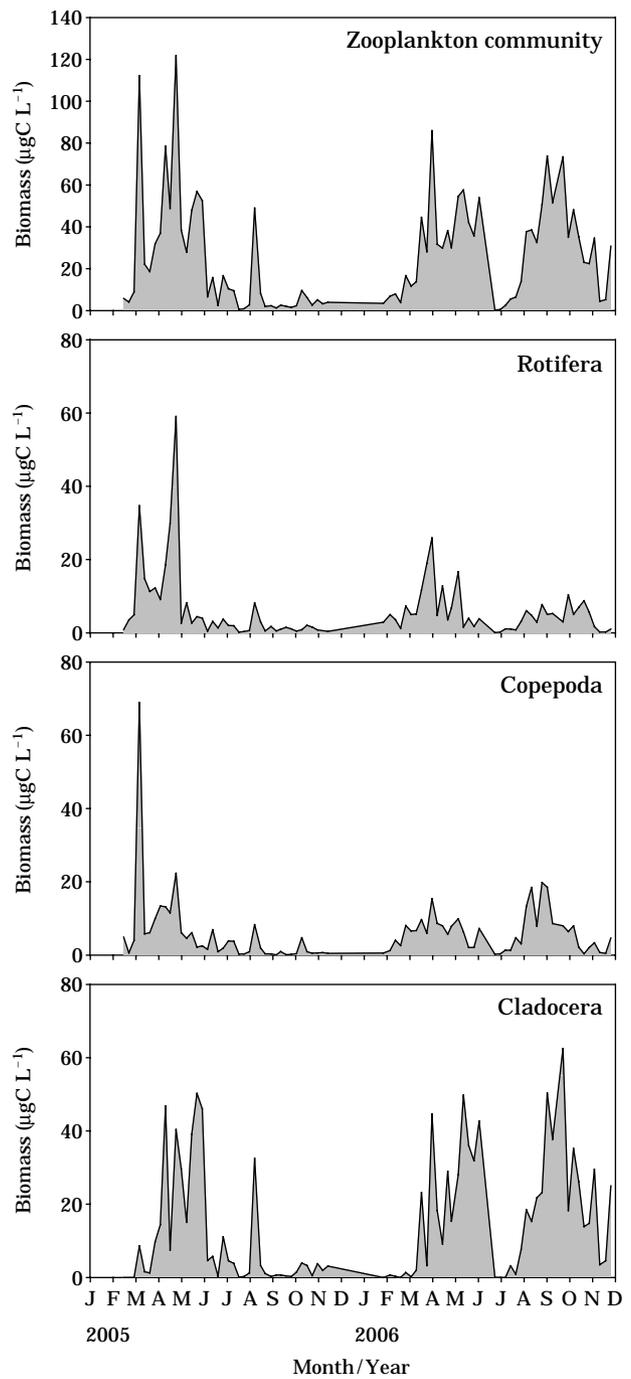


Fig. 5. Seasonal change of zooplankton biomass in Lake Paldang from 2005 to 2006.

µgC L⁻¹, 가을에 7 µgC L⁻¹, 겨울에 3 µgC L⁻¹였다. 2006년에는 봄에 25 µgC L⁻¹, 여름에 27 µgC L⁻¹, 가을에 46 µgC L⁻¹, 겨울에 19 µgC L⁻¹로 가을에 가장 많았다. 생체량으로 평가한 우점종은 봄에는 지각류 *Bosmina longirostris*였으며 가을에는 지각류 *Daphnia galeata*였다. 특히, 2006

Table 3. Correlation analysis between zooplankton community and environmental factors according to seasonal change in Lake Paldang.

Season	Coefficient	Environmental factors			
		Water temp.	Efflux	Precipitation	Chl. <i>a</i>
Spring	r	0.399*	0.097	0.166	-0.024
	p-value	0.014	0.563	0.318	0.886
	n	38	38	38	38
Summer	r	-0.254	-0.376*	-0.326*	-0.071
	p-value	0.130	0.022	0.049	0.677
	n	37	37	37	37
Fall	r	0.284	-0.364*	-0.325	0.335*
	p-value	0.098	0.032	0.057	0.049
	n	35	35	35	35

* $p < 0.05$

년 가을에는 지각류 생체량이 $31 \mu\text{gC L}^{-1}$ 로 66%의 점유율을 보였다. 수질환경을 나타내는 지각류/윤충류 출현비율은 2005년보다 2006년에 2배 이상 증가하였다. 2006년에는 봄과 가을에 동물플랑크톤 발생이 많았고 상대적으로 지각류 개체수도 많아 체적이 큰 지각류의 생체량이 윤충류에 비해 크게 증가하였다.

3. 환경인자와의 통계적 분석

팔당호는 남한강, 북한강, 경안천의 세 하천이 합류되어 팔당댐에 의해 체류되면서 형성된 호수로 수심이 얕고, 저수량이 적을 뿐만 아니라 한강의 중하류부에 위치하고 있어 유역으로부터 공급되는 유량의 계절적 변동이 매우 큰 호수이다(HRERC, 2004). 본 연구 기간 동안 팔당호의 수리학적 체류시간은 3.8일로 계절에 따라 유량 변동이 컸으며 이러한 수체의 변화는 수생태계를 구성하는 생물군 중 동물플랑크톤의 천이 과정에도 큰 영향을 미쳤을 것으로 판단된다.

팔당호에서의 동물플랑크톤 군집 천이는 평수기 및 갈수기에는 수리학적 체류시간의 증가로 온대호수의 계절적 천이 과정과 유사하였다. 반면에 여름철 강우가 집중되는 시기에는 유역 강우량과 팔당댐 수문기작에 따른 방류량 변화에 따라 크게 달라지는 것으로 나타났다. 따라서 팔당호의 동물플랑크톤 천이 양상에 가장 크게 영향을 주는 인자라고 판단된 수온, 팔당댐 방류량, 동물플랑크톤의 주요 먹이원인 식물플랑크톤 현존량(Chl. *a*)과 동물플랑크톤 개체수간의 상관관계를 계절에 따라 분석하였다(Table 3).

3~5월까지의 봄 동안은 팔당호의 유역 강우가 미약하였기 때문에 팔당댐의 방류량이 적었고 수리학적 체류시

간이 20일 정도로 길어짐에 따라 수체가 안정화되어 있어 동물플랑크톤의 증가는 수온 상승과 양의 상관성($r = 0.339$)을 보였다(Table 3).

6~8월까지의 여름 동안은 유역 강우에 따른 팔당댐 방류량의 변화가 동물플랑크톤 개체수와 음의 상관성($r = -0.376$)을 보였고, 방류량이 많을수록 동물플랑크톤이 하류로 떠내려가 크게 감소하는 특성을 보였다. 몬순기후 지역에서 집중강우는 수체의 수리학적 상태를 변화시키고(Keckeis *et al.*, 2003), 댐 방류로 인해 체류시간이 짧아지고 씻겨 내려감에 따라 동물플랑크톤이 급격히 감소한다고 하였다(Baranyi *et al.*, 2002; Muylaert and Vyverman, 2006). 2004년에는 6월 하순과 8월 중순에 내린 강우의 영향으로 팔당댐 방류량이 증가하여 동물플랑크톤 개체수는 $9 \sim 13 \text{ Ind. L}^{-1}$ 의 범위를 보였다. 2005년에는 6월 하순과 7월 하순에 내린 강우의 영향으로 동물플랑크톤 개체수가 $9 \sim 15 \text{ Ind. L}^{-1}$ 였으며, 2006년에는 7월 중순부터 하순까지 집중호우가 내려 동물플랑크톤 개체수는 $3 \sim 9 \text{ Ind. L}^{-1}$ 로 조사기간 중 최저를 보였다(Fig. 6). 연도별로 여름 동안 팔당댐 방류량과 동물플랑크톤 개체수와의 회귀분석 결과 집중호우의 영향이 가장 컸던 2006년에 팔당댐 방류량과의 상관성이 가장 높게 나타났다(Fig. 7).

9월에는 일시적으로 태풍의 영향이 있었으나 이후 수체가 안정화되면서 식물플랑크톤이 증가하여 Chl. *a* 농도가 8월에 비해 $10 \mu\text{g L}^{-1}$ 증가하였다. 팔당호에서 봄과 여름에는 bacteria를 먹이로 하는 microbial food chain이 나타나고, 가을에는 식물플랑크톤을 먹이로 하는 grazing food chain이 중요한 기능을 갖는다고 하였다(Noh and Han, 2008). 본 연구 결과에서 가을 동안의 Chl. *a* 농도는 동물플랑크톤 개체수와 양의 상관성($r = 0.335$)을 보여

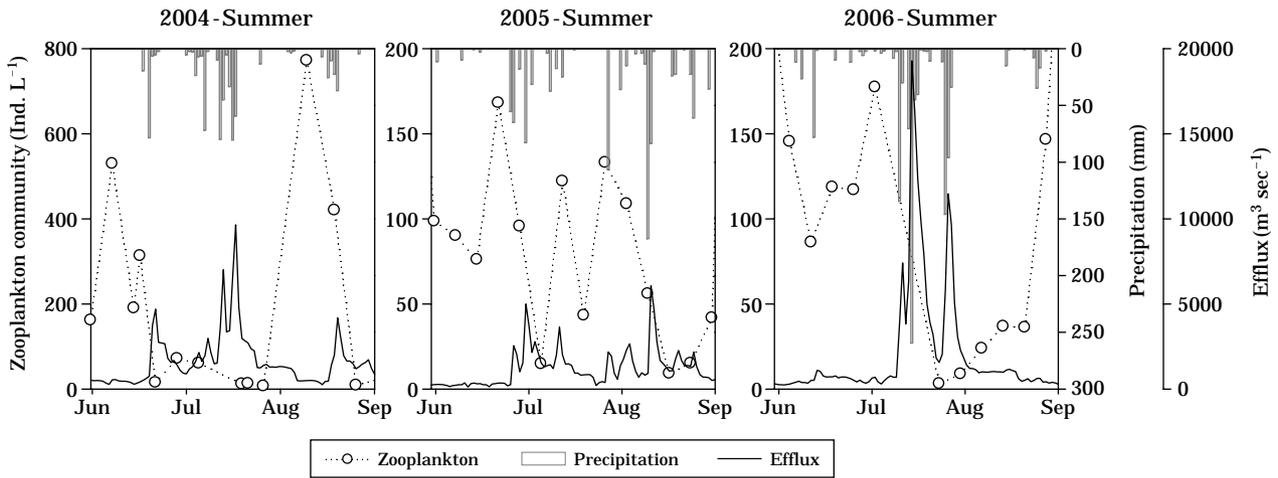


Fig. 6. Change of zooplankton, precipitation, efflux during summer in Lake Paldang from 2004 to 2006.

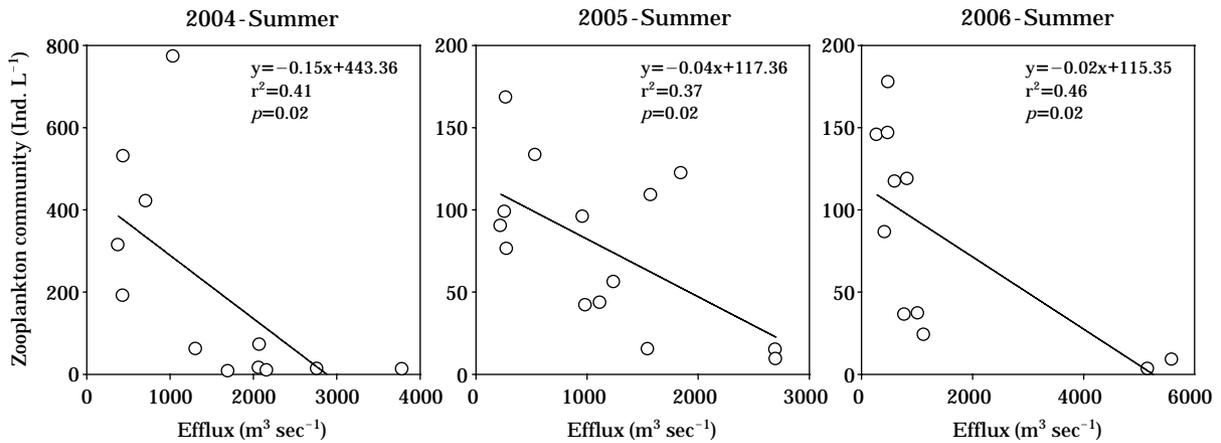


Fig. 7. Regression analysis between zooplankton community and efflux during summer in Lake Paldang from 2004 to 2006.

식물플랑크톤 현존량의 증가가 동물플랑크톤 증식에 영향을 미친 것으로 조사되었다 (Table 3).

적 요

팔당호에서의 동물플랑크톤 군집 구조와 천이는 몬순 기후에 의한 강우사상의 변화와 수리·수문학적 요인의 영향을 크게 받았다. 봄과 가을, 겨울 동안에는 강우량이 적은 평수기 혹은 갈수기로 팔당호의 수리학적 체류시간이 길어짐에 따라 수체가 안정되어 동물플랑크톤 군집 변화는 온대호수에서의 계절적인 천이 과정을 그대로 반영하였다. 봄철에 크기가 작고 세대교번이 빠른 윤충류가 급속히 증가하여 연중 최대 개체수를 나타냈으며, 이후 몸

체가 큰 요각류와 지각류로 천이되었다. 봄에는 윤충류가 우점하여 점유율이 90% 이상으로 나타났으며 제1우점종은 *Keratella cochlearis*였다. 요각류는 주로 유생 (Copepodid, Nauplius)의 형태로 존재하였으며 지각류는 *Bosmina longirostris*가 주로 출현하였다. 여름에는 집중호우의 영향으로 수체가 교란되고 팔당댐의 수문조작에 따른 방류량 증가로 동물플랑크톤이 하류로 떠내려가 동물플랑크톤 개체수는 급감하였다. 집중호우 이후 수체가 안정화됨에 따라 동물플랑크톤 군집 회복은 성장이 빠른 윤충류를 위주로 이루어졌으며 가을 이후 수온 변화에 따라 동물플랑크톤 군집 밀도가 점차 감소하고 겨울에는 요각류 유생 (Copepodid, Nauplius)의 우점 비율이 증가하였다. 불완전한 개방형 생태계를 이루고 있는 팔당호의 특성상 동물플랑크톤 군집 변화는 기상 변화와 수리·수문

학적 요인에 크게 영향을 받고 있었으며, 특히 여름에는 국지성 집중호우의 빈도와 수량에 따라 동물플랑크톤의 군집 변화가 크게 좌우되었다.

인 용 문 헌

- Agbeti, M.D. and J.O. Smol. 1995. Winter limnology: Comparison of physical, chemical and biological characteristics in two temperate lakes during lakes during ice over. *Hydrobiologia* **304**: 221-234.
- Andersen, A. and D.O. Hessen. 1991. Carbon, nitrogen, and phosphorus contents of freshwater zooplankton. *Limnology Oceanography* **36**: 807-814.
- APHA. 1994. Standard methods for the examination of water and wastewater, 18th ed. American Public Health Association. Washington, D.C. USA.
- Balcer, M.D., N.L. Korda and S.I. Dodson. 1984. Zooplankton of the greatlakes. A guide to the identification and ecology of the common crustacean species. The university of Wisconsin Press.
- Baranyi, C., T. Hein, C. Holarek, S. Keckeis and F. Schiemer. 2002. Zooplankton biomass and community structure in a Danube River floodplain. *Freshwater Biology* **47**: 473-482.
- Cho, K.S. 1993. Illustration of the freshwater zooplankton of Korea. Academybook.
- 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.
- Downing, J.A. and F.H.R. Rigler. 1984. A manual on methods for the assessment of secondary productivity in freshwaters. Blackwell Scientific Publications. 247-249.
- Dumont, H.J., L.V. 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* **91**: 75-97.
- Faithful, J.W. and D.J. Griffiths. 2000. Turbid flow through a tropical reservoir (Lake Dalrymple, Queensland, Australia): Responses to summer storm event. *Lakes & Reservoir Management* **5**: 231-247.
- Hall, D.T., S.T. Threlkeld, C.W. Burns and P.H. Crowley. 1976. The size-efficiency hypothesis and the size structure of zooplankton communities. *Annual Review of Ecology and Systematics* **7**: 177-208.
- Han River environment research center (HRERC). 2004. Study of environment in Lake Paldang.
- 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, 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**: 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 Limnology* **36**(3): 286-294.
- Kim, J.K. and W.H. Hong. 1992. Studies on the physical environmental factor analysis for water quality management in man-made lake of Korea. *Korean Journal of Environment Science* **1**(2): 49-57.
- Kim, J.M., J.D. Park, H.R. Noh and M.S. Han. 2002. Changes of seasonal and vertical water quality in Soyang and Paldang river-reservoir system, Korea. *Korean Journal of Limnology* **35**(1): 10-20.
- Kong, D.S. 1997. Limnological and ecological characteristic of a river-reservoir (Paldang), Korea. *Korean Journal of Limnology* **30**(supplement): 524-535.
- Korea hydro&nuclear power co., LTD. <http://www.khnp.co.kr>
- Muylaert, K. and W. Vyverman. 2006. Impact of a flood event on the planktonic food web of the Schelde estuary (Belgium) in spring 1998. *Hydrobiologia* **559**: 385-394.
- National institute of meteorological research(NIMR). 2009. Understand of climate change III, Climate change of Seoul.
- Noh, S.Y. and M.S. Han. 2008. Carbon dynamics of plankton communities in Paldang Reservoir. *Korean Journal of Limnology* **41**(2): 174-187.
- Pace, M.L. and J.D. Orcutt. 1981. The relative importance of protozoans, rotifers, and crustaceans in a freshwater zooplankton community. *Limnology Oceanography* **26**: 822-830.
- Park, H.K., M.S. Byeon, E.K. Kim, H.J. Lee, M.J. Chun and D.I. Jung. 2004. Water quality and phytoplankton distribution pattern in upper inflow rivers of Lake Paldang. *Journal of Korean Society on Water Quality* **20**(6): 615-624.
- Park, S.J. and L.A. Baker. 1997. Sources and transport of organic carbon in an Arizona River-Reservoir system. *Water Research* **31**: 1751-1759.
- Shin, J.K., C.K. Kang and S.J. Hwang. 2003. Daily variations of water turbidity and particle distribution of high turbid-water in Paltang Reservoir, Korea. *Korean Journal of Limnology* **36**(3): 257-268.

- Shin, J.K., S.J. Hwang, C.K. Kang and H.S. Kim. 2003a. Limnological characteristics of the river-type Paltang Reservoir, Korea: hydrological and environmental factors. *Korean Journal of Limnology* **36**(3): 242-256.
- 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.
- Stemberger, R.S. 1979. A guide to rotifers of the Laurentian Great Lakes. EPA-600/4-79-021.
- Thornton, K.W., B.L. Kimmel and F.E. Payne. 1990. Reservoir Limnology-Ecological Perspectives. A Wiley Interscience Publication, John Wiley&Sons, Inc. 246pp.
- Water management information system. <http://www.wamis.go.kr>
- Winston, W.E. and R.E. Criss. 2002. Geochemical variations during flash flooding, Meramec River basin, May 2000. *Journal Hydrology* **265**: 149-163.

(Manuscript received 6 March 2012,
Revised 24 April 2012
Revision accepted 2 July 2012)