

## 팔당호 생태계에서 동물플랑크톤과 식물플랑크톤의 섭식관계

엄 성 화 · 황 순 진\*

(건국대학교 환경과학과)

Grazing Relationship between Phytoplankton and Zooplankton in Lake Paldang Ecosystem. Uhm, Seong Hwa and Soon-Jin Hwang\* (Department of Environmental Science, Konkuk University, Seoul 143-701, Korea)

This study was conducted to understand the phytoplankton-zooplankton trophic linkage in Lake Paldang ecosystems (Paldang Dam and Kyungan Stream) from April to December 2005. Zooplankton were filtered as two size groups (microzooplankton (MICZ): 60~200  $\mu\text{m}$ , macrozooplankton (MACZ): >200  $\mu\text{m}$ ), and their clearance rates and C-fluxes on phytoplankton were measured. Grazing experiments were performed in the laboratory with the different zooplankton densities (0, 2, 4, 8x of ambient density, n=2). Diatoms, such as *Aulacoseira* and *Cyclotella* were dominant phytoplankton taxa at both sites. Among phytoplankton communities, total carbon biomass of phyflagellates was much higher than others at both sites. Rotifers numerically dominated zooplankton community, while cladocerans dominated carbon biomass. Both phytoplankton and zooplankton density and biomass were high in spring, but decreased markedly after summer monsoon season. Plankton biomass at Kyungan Stream was significantly higher than that of Paldang Dam. Zooplankton clearance rate and amount of C-flux were relatively high in the spring and then decreased after summer at both sites. Seasonal change of C-flux was similar to that of zooplankton biomass ( $P < 0.001$ , n=7). MACZ clearance rate and C-flux were higher than those of MICZ. Water residence time and physical disturbance in summer appeared to affect zooplankton grazing on phytoplankton at the study sites. Our results indicate phytoplankton were an important energy source for zooplankton in Lake Paldang ecosystem. Furthermore, C-flux of plankton food web is affected by not only biological components but also physical parameters.

**Key words :** C-flux, clearance rate, Lake Paldang, phytoplankton, trophic linkage, zooplankton

### 서 론

수중생태계에서 동물플랑크톤의 섭식활동은 부유 미생물 간의 에너지 흐름의 주요한 역할을 담당하고 (Keckeis *et al.*, 2003) 식물플랑크톤의 생물량과 종구성에 많은 영

향을 미치는 것으로 파악되고 있다 (Reynolds, 1984; Sommer *et al.*, 1986; Sterner, 1989; Kagami *et al.*, 2002). 높은 여과 효율을 가진 *Daphnia*와 같은 대형동물 플랑크톤의 밀도 증가는 식물플랑크톤의 총 생물량 감소 및 종구성을 변화시켜 투명도를 증가시키며 (Brook, 1985; Gawler *et al.*, 1988), 봄 기간 동안의 일시적인 clear wa-

\* Corresponding author: Tel: 02) 450-3748, Fax: 02) 456-5062, E-mail: sjhwang@konkuk.ac.kr

ter phase를 발생시킨다(Lampert *et al.*, 1986; Sommer *et al.*, 1986; Vanni and Temte, 1990; Kim *et al.*, 2003). 동물플랑크톤의 선택적 섭식에 의한 식물플랑크톤 종구성 변화(Thys *et al.*, 2003), 수체의 수리학적 특성(Keckeis *et al.*, 2003), 영양상태(Heath *et al.*, 2003), 먹이망을 구성하는 요소들(Reynolds, 1994)에 따라 동물플랑크톤의 역할 정도의 차이가 나타나기 때문에 먹이망 관련 연구 결과의 분석은 수질과 생태계 보전을 위해 활용될 수 있는 양질의 자료를 제공한다.

1970년대 이후 국내 대형하천 중·하류 부분에 조성된 다목적댐과 하구언 등의 인공호들은 하천과 저수지의 혼합형 성격을 띤 수문학적 경향을 나타내어 자연호와 비교할 때 매우 상이한 생태·육수학적 특성을 보인다. 1987년 이후 조성된 낙동강 하구언으로 인하여 낙동강 하류 지역은 강의 형태적, 수리학적 변경으로 인한 플랑크톤 군집 구조의 변화를 가져왔다(Kim *et al.*, 1998; Kim and Joo, 2000). 국내 뿐만 아니라 호주의 Murray-Darling River 시스템 내에서도 인공댐에 의한 하천의 수문학적 조절에 따른 플랑크톤 먹이망 동태의 변동이 나타난 바 있다(Shiel and Walker, 1984). 국내에서 인공댐에 의해 수문학적 요인 등이 조절되는 하천에서 부유성 플랑크톤 군집들 간의 기능적 상호작용을 규명하기 위한 연구는 낙동강에서 동물플랑크톤에 의한 박테리아와 식물플랑크톤 섭식 연구(Kim *et al.*, 2000, 2002; 국립환경연구원, 2003), 소양호에서 동물플랑크톤에 의한 식물플랑크톤 섭식연구(Hwang *et al.*, 2004) 정도로 매우 제한적이다.

본 연구는 하천과 호수의 복합적인 수리학적 특성을 나타내는 팔당호 생태계에서 식물플랑크톤-동물플랑크톤의 영양적 연계성을 이해하기 위하여, 팔당댐앞과 경안천을 대상으로 동물플랑크톤 군집 크기별 섭식율과 C-flux 분석하였다.

## 재료 및 방법

### 1. 조사지점 개황 및 조사시기

팔당호는 1973년에 발전과 용수공급을 목적으로 한강 수계의 남한강과 북한강 및 경안천이 합류되는 지점에 댐을 축조하여 형성된 인공호수(Fig. 1)로서 23,800 km<sup>2</sup>에 달하는 유역면적을 가지며, 만수면적은 38.2 km<sup>2</sup>, 총저수 용량은 244만 톤이고 체류시간은 연평균 4.5일로 하천형 특성을 가진 인공호이다(김 등, 2005). 팔당호는 넓은 유역면적과 짧은 체류시간으로 인해 유역의 강우와

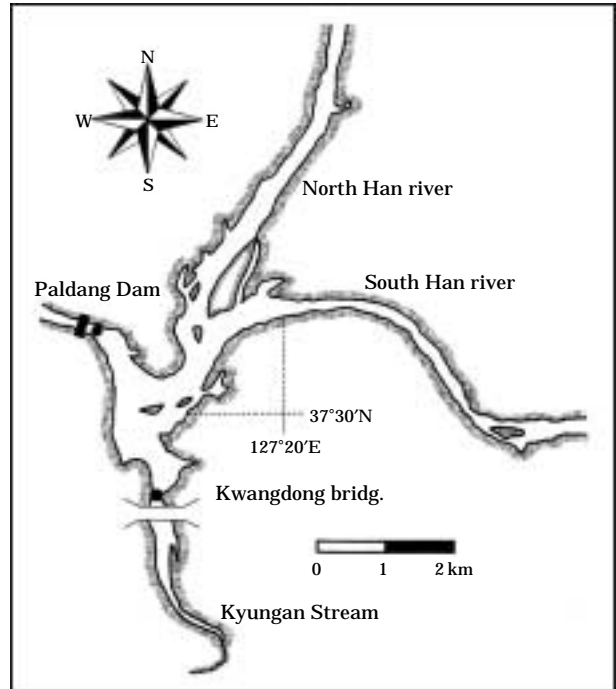


Fig. 1. Map showing Lake Paldang and Kyungan Stream.

오염물질의 부하에 직접적인 영향을 받고 있다(서 등, 1989; 김 등, 2002). 수체의 점진적인 부영양화로 인해 식물플랑크톤의 종 구조는 1980년대 초반에 규조류 중심에서(정과 이, 1981; 이와 정, 1983), 1990년대 이후 경안천을 중심으로 겨울철에 *Cyclotella* spp. 등의 규조류가 여름철에는 *Microcystis* spp. 등의 남조류의 국지적인 대량발생 현상이 나타나고 있다(국립환경연구원, 1996). 동물플랑크톤 섭식율 조사실험 지점은 팔당댐앞과 경안천(광동교 아래)을 선정하였으며, 조사는 2006년 4월부터 12월에 걸쳐 월주기(7, 9월 제외)로 실험을 실시하였다. 강우량 자료는 국가 수자원관리 종합시스템 자료를 이용하였다.

### 2. 식물플랑크톤과 동물플랑크톤 분석

식물플랑크톤은 현장에서 표층수 100 mL을 Lugol 용액으로 고정하고 Sedgwick-Rafter 계수판을 이용하여 독립현미경하( $\times 200 \sim 400$ )에서 주요 식물군집별로 구분하여 동정·계수하였으며, 외편모조류(Dinophyceae)와 은편모조류(Cryptophyceae)는 출현빈도 및 밀도가 낮아 두 분류군 모두를 편모조류(flagellate algae)에 포함하였다. 식물플랑크톤 생물량은 동정 시 출현종의 가로, 세로 길이를 측정하여 Kellar *et al.* (1980)이 제시한 공식으로

체적 ( $V: \mu\text{m}^3$ )을 계산하였고, 규조류는  $10^{(-0.427+0.784 (\log V_{\mu\text{m}^3}))} \mu\text{gC}$ , 녹조류와 남조류는  $10^{(-0.460+0.866 (\log V_{\mu\text{m}^3}))} \mu\text{gC}$  (Mullin *et al.*, 1966) 그리고 편모조류는  $200 \text{ fgC} \cdot \mu\text{m}^{-3}$  (Starthmann, 1967) 부피당 탄소 환산계수를 이용하여 Carbon 생물량을 계산하였다.

동물플랑크톤은 망목의 크기가  $64 \mu\text{m}$ 인 네트를 이용해 수심 8 m에서 수직 예인한 후 sucrose-formaline을 최종 농도 5%로 고정하고, Sedgwick-Rafter 계수판을 이용하여 광학현미경 ( $\times 100$ )하에서 대형 (지각류, 요각류), 소형 (윤충류, 요각류 유생)으로 동정 및 계수하였다 (Stemberger, 1979; Balcer *et al.*, 1984; 조, 1993). 관찰 시 출현 종에 대한 가로, 세로 길이를 모두 측정하였으며, 평균값을 생물량 계산에 이용하였다. 윤충류 체적은 Downing and Rigler (1984)가 제시한 식에 따라 계산하였고, 동물플랑크톤의 비중을 1.025로 가정하여 습중량을 구하고, 습중량의 10%를 건중량으로 계산하였다 (Hall *et al.*, 1976). 지각류와 요각류의 건중량은 Length-Dry weight 관계식을 이용하여 계산하였고 (Culver *et al.*, 1985), 동물플랑크톤 생물량 ( $\mu\text{gC} \cdot \text{L}^{-1}$ )은 건중량의 48%를 탄소량으로 고려하여 (Anderson and Hessen, 1991) 산출하였다.

### 3. 동물플랑크톤 여과율 (Clearance rate) 및 탄소전달율 (C-flux)

동물플랑크톤-식물플랑크톤 간의 섭식관계 및 탄소전달율 (C-flux) 측정은 Lehman and Sandgren (1985)의 방법에 따라 동물플랑크톤의 생물량을 조절하여 증가되는 동물플랑크톤의 섭식으로 인해 감소되는 식물플랑크톤의 밀도를 측정하여 계산하였다. 동물플랑크톤 개체의 크기에 따라 소형동물플랑크톤 (Microzooplankton, 윤충류와 nauplii,  $60 \sim 200 \mu\text{m}$ )과 대형동물플랑크톤 (Macrozooplankton, 요각류 및 지각류 성체,  $>200 \mu\text{m}$ )로 구분하여 실험을 실시하였다.

채집된 동물플랑크톤을  $200 \mu\text{m}$ 와  $60 \mu\text{m}$  네트를 연속적으로 통과시켜 동물플랑크톤 크기별로 현장 밀도의 0 배 (control, 동물플랑크톤 제거구. 즉,  $60 \mu\text{m}$  네트로 여과한 시료), 2, 4, 8 배로 각 용기에 첨가하고 현장 여과수 ( $<60 \mu\text{m}$ : MICZ섭식실험,  $<200 \mu\text{m}$ : MACZ섭식실험)로 2 L 용량을 맞춘 후 암실에서 24시간 동안 섭식을 허용하였다. 섭식실험은 2회 반복으로 수행되었으며 24시간 후 50 mL의 subsample을 채취하여 Lugol 용액으로 식물플랑크톤을 고정한 후 나머지 시료는  $60 \mu\text{m}$ 와  $200 \mu\text{m}$  네트로 거른 후 용기 내에 포함된 동물플랑크톤의 전량

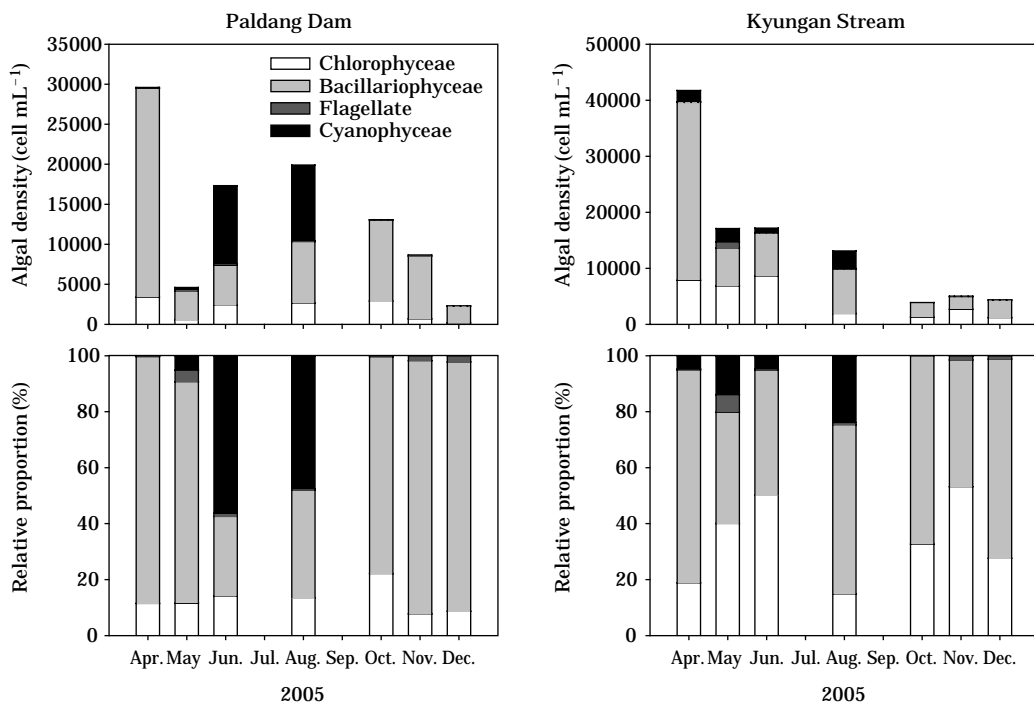


Fig. 2. Phytoplankton community abundance and relative proportion of major groups at Paldang Dam and Kyungan Stream.

을 계수하였다. 각각의 동물플랑크톤 밀도 조절구에서 24 시간 동안 감소된 식물플랑크톤 밀도를 측정하여 지수성장률을 다음 식에 의해 계산하였다.

$$r = (\ln N_t - \ln N_0) / t$$

r = the rate of population growth (day<sup>-1</sup>)

N<sub>t</sub> = final cell density (cells · mL<sup>-1</sup>)

N<sub>0</sub> = initial cell density (cells · mL<sup>-1</sup>)

t = duration of incubation (day)

여과율 (Clearance rate)은 조절구 내의 동물플랑크톤 생물량과 지수성장률간의 직선회귀 관계를 통해 기울기로 평가하였고 C-flux는 다음 식을 이용하여 계산하였다.

$$ACF = CR \times A \times Z$$

ACF = algal C-flux to zooplankton (µgC · L<sup>-1</sup> · hr<sup>-1</sup>)

CR = clearance rate (mL · µgdw<sup>-1</sup> · hr<sup>-1</sup>)

A = algal carbon biomass (µgC · L<sup>-1</sup>)

Z = ambient zooplankton biomass (µgdw · L<sup>-1</sup>)

#### 4. 통계 분석

각 조사 항목간의 상관관계 분석은 Pearson's correlation analysis를 이용하였으며, 항목별 지점간 유의성 (P <

0.05)은 ANOVA를 이용하여 평가하였다 (SPSS 10.0).

## 결 과

### 1. 식물플랑크톤 생물량과 군집조성

식물플랑크톤 밀도는 봄과 초여름 동안 높았고 여름철 집중강우 이후 점차적으로 감소하였다 (Fig. 2). 식물플랑크톤의 밀도와 생물량은 계절적인 차이가 뚜렷하였고, 그 정도는 경안천에서 상대적으로 높게 나타났다 (P < 0.05, n=7, ANOVA). 팔당댐앞에서 식물플랑크톤 우점종은 *Aulacoseira* spp., *Cyclotella* spp., *Merismopedium glaucum*, *Microcystis aeruginosa*, *Scenedesmus* spp., *Chlamydomonas* spp., *Cryptomonas ovata* 등으로 나타났다. 조사기간 동안 평균밀도는 규조류 8,911 ± 8,000 cell · mL<sup>-1</sup> (n=7), 남조류 2,777 ± 4,600 cell · mL<sup>-1</sup> (n=7), 녹조류 1,633 ± 1,180 cell · mL<sup>-1</sup> (n=7), 편모조류 120 ± 60 cell · mL<sup>-1</sup> (n=7) 순으로 나타났다. 상대적 점유율은 규조류 66%, 남조류 21%, 녹조류 12%, 편모조류 1% 순으로 나타났다. 규조류는 4월에 90%로 가장 높았으나 6월과 8월에 남조류의 증가와 함께 감소하였고 10월과 11월에 *Aulacoseira* spp.의 급격한 증가로 인해 80% 이상

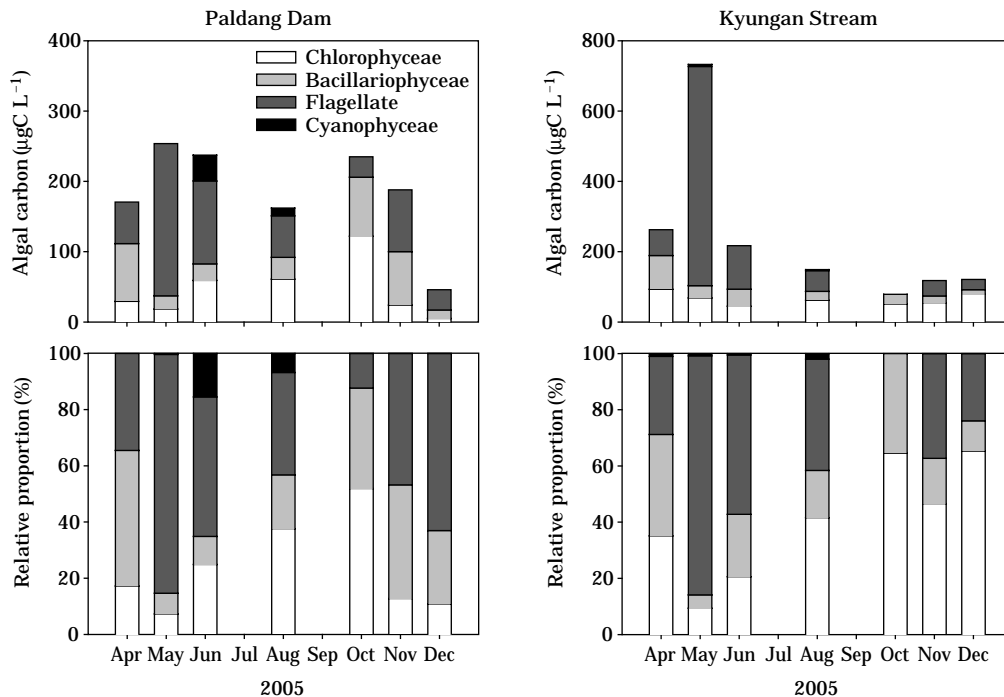
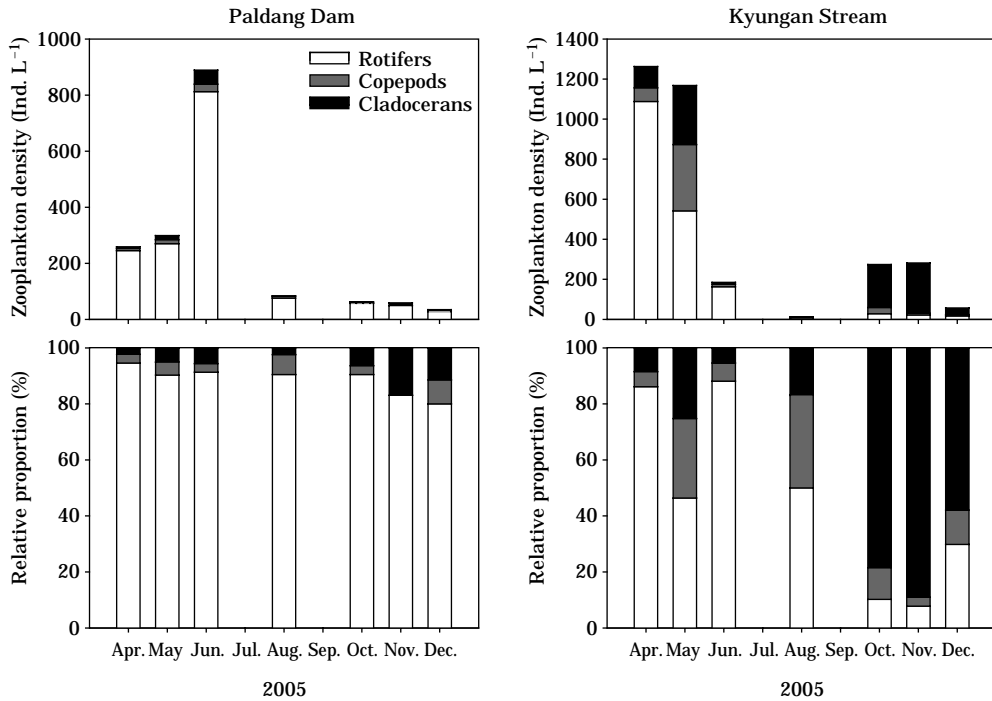


Fig. 3. Phytoplankton carbon biomass and relative proportion of major groups at Paldang Dam and Kyungan Stram.



**Fig. 4.** Zooplankton community abundance and relative proportion of major groups at Paldang Dam and Kyungan Stream.

의 높은 점유율을 나타냈다. 탄소 생물량은 밀도와는 다르게 편모조류에서 높게 나타났다 (Fig. 3).

조사기간 동안 경안천에서는 *Aulacoseira* spp., *Cyclorella* spp., *Microcystis aeruginosa*, *Actinastrum hantzschii*, *Micractinium pusillum*, *Scenedesmus* spp., *Cryptomonas ovata* 등이 우점하였다. 군집별 평균 밀도는 규조류  $8,880 \pm 10,400 \text{ cell} \cdot \text{mL}^{-1}$  (n=7), 남조류  $1,180 \pm 1,300 \text{ cell} \cdot \text{mL}^{-1}$  (n=7), 녹조류  $4,350 \pm 3,300 \text{ cell} \cdot \text{mL}^{-1}$  (n=7), 편모조류  $210 \pm 380 \text{ cell} \cdot \text{mL}^{-1}$  (n=7) 순으로 나타났고, 상대적 점유율은 규조류 61%, 녹조류 30%, 남조류 8%, 편모조류 1%로 나타났다 (Fig. 2). 남조류의 경우 4월부터 8월까지 지속적으로 출현함으로써 팔당댐앞과는 차이가 있었다. 조사기간 동안에 탄소 생물량은 편모조류가 비교적 높게 나타났고 5월에 *Cryptomonas ovata*로 인해 가장 높은 생물량을 나타냈다 (Fig. 3).

**2. 동물플랑크톤 생물량과 군집조성**

동물플랑크톤 밀도는 두 지점에서 봄 동안에 높았고 다른 시기에는 상대적으로 매우 낮게 나타났다 (Fig. 4). 여름철 집중강우 시기에 총 동물플랑크톤 밀도가 크게 감소하였다. 지점별로는 경안천에서 더 높은 생물량을 나타냈다 ( $P < 0.05$ , n=7, ANOVA).

팔당댐앞에서 우점그룹은 *Brachionus*, *Keratella*, *Polyathra*, *Pompholyx*, *Daphnia*, *Diaphanosoma*, *Nauplii*으로 이들은 전체 출현종 총 밀도의 90% 이상을 차지하였다. 평균밀도에서는, 윤충류  $192 \pm 280 \text{ ind. L}^{-1}$  (n=7), 지각류  $11 \pm 17 \text{ ind. L}^{-1}$  (n=7), 요각류  $8 \pm 10 \text{ ind. L}^{-1}$  (n=7)로 나타나, 윤충류가 수적으로 크게 우점하였다 (>90%). 총 동물플랑크톤 밀도 변화와는 달리 탄소 생물량은 지각류 군집에서 높게 나타났다 (Fig. 5).

경안천은 *Brachionus*, *Keratella*, *Polyathra*, *Bosmina*, *Daphnia*, *Copepodid*, *Nauplii* 등이 높은 밀도를 보였다. 평균밀도에서는, 윤충류  $233 \pm 410 \text{ ind. L}^{-1}$  (n=7), 지각류  $58 \pm 119 \text{ ind. L}^{-1}$  (n=7), 요각류  $114 \pm 122 \text{ ind. L}^{-1}$  (n=7)로 팔당댐앞과 마찬가지로 윤충류가 수적으로 높았다 (Fig. 4). 윤충류의 전체 동물플랑크톤 밀도에 대한 상대적 점유율은 58%로 팔당댐앞 보다는 낮게 나타났고, 지각류와 요각류는 각각 28, 14%로 팔당댐앞보다 대형동물플랑크톤이 풍부하였다. 특히 지각류의 경우 8월 이후에는 *Bosmina longirostris*와 *Daphnia* sp.의 급격한 증가로 인해 60~80%의 높은 점유율을 보였다. 생물량은 지각류가 높게 나타났으며 (Fig. 5) 특히 5월에 *Daphnia*의 밀도 증가로 인해 가장 높은 생물량을 나타냈다. *Daphnia*의 높은 생물량 발현은 팔당댐앞과 시기적으로 차이가 있었고, 8월 이후에 생물량은 전체의 90%를 초과하였

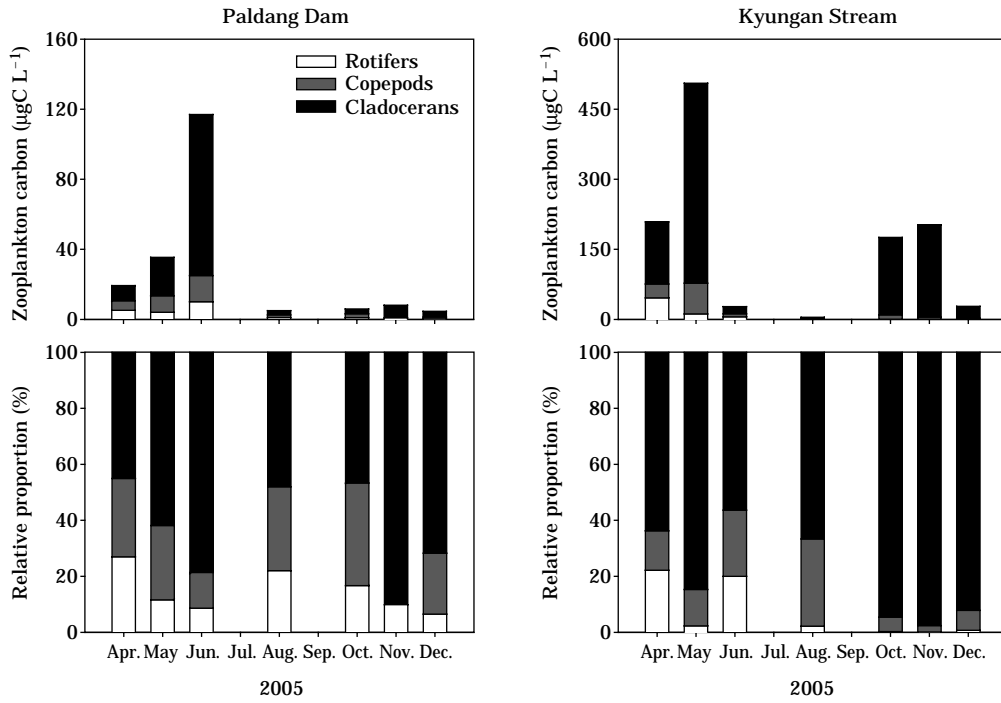


Fig. 5. Zooplankton carbon biomass and relative proportion of major groups at Paldang Dam and Kyungan Stream.

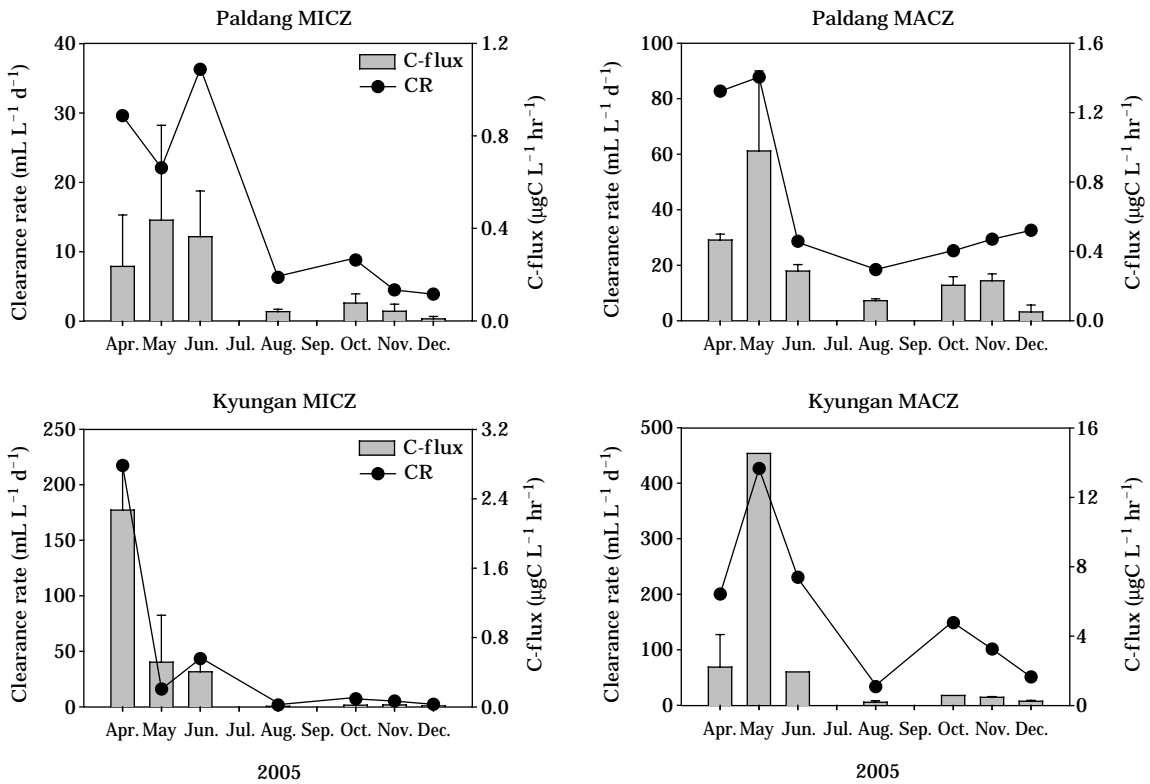


Fig. 6. Seasonal change of zooplankton clearance rate (CR) and carbon flux at Paldang Dam and Kyungan Stream.

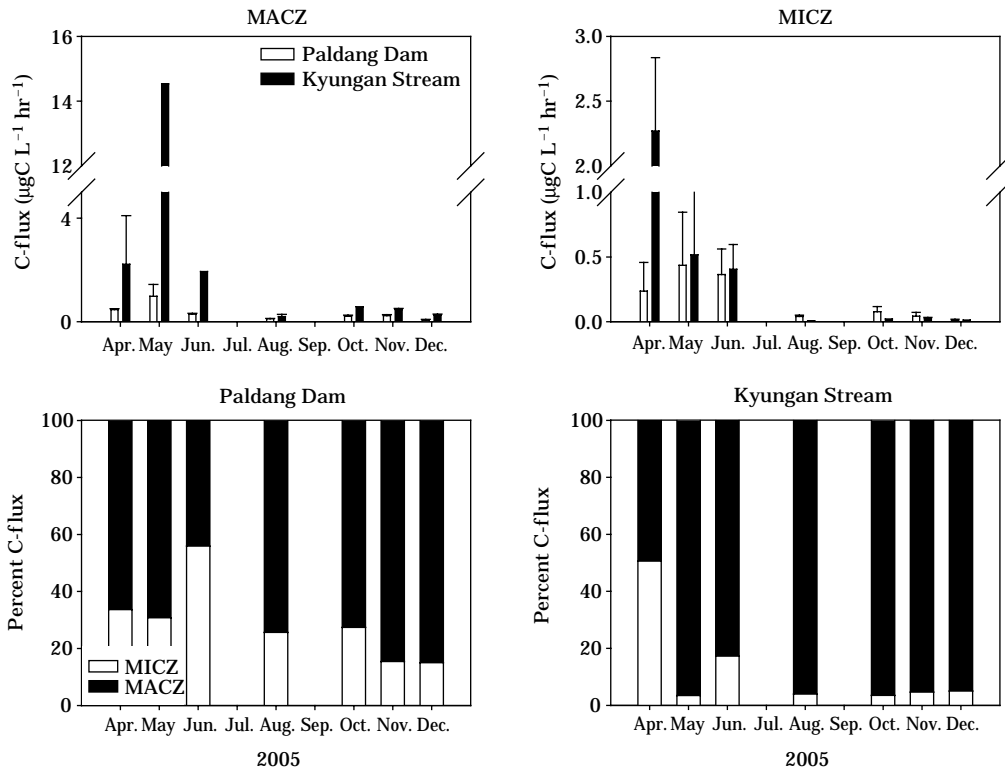


Fig. 7. C-flux change and relative proportion of MACZ and MICZ at Paldang Dam and Kyungan Stream.

다.

3. 동물플랑크톤 여과율 및 탄소전달율 (C-flux)

동물플랑크톤의 여과율은 두 지점 모두 봄에 높았고 여름 이후에 낮아져 동물플랑크톤 생물량의 변화와 비슷한 양상을 나타냈다 ( $r=0.820, n=7, P<0.001$ ) (Fig. 6). 대형동물플랑크톤 (MACZ)이 소형동물플랑크톤 (MICZ)보다 군집 여과율이 높았다. 팔당댐앞에서 MICZ의 여과율은  $3.9\sim36.3 \text{ mL} \cdot \text{L}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$  (평균  $15.9 \pm 13.3 \text{ mL} \cdot \text{L}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$ ,  $n=7$ )을 보였고 MACZ는  $18.4\sim87.8 \text{ mL} \cdot \text{L}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$  (평균  $43.5 \pm 28.9 \text{ mL} \cdot \text{L}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$ ,  $n=7$ )를 나타냈다. 경안천에서 MICZ는  $1.6\sim217.3 \text{ mL} \cdot \text{L}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$  (평균  $41.8 \pm 78.7 \text{ mL} \cdot \text{L}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$ ,  $n=7$ ), MACZ는  $33.4\sim426.4 \text{ mL} \cdot \text{L}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$  (평균  $170.2 \pm 134.4 \text{ mL} \cdot \text{L}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$ ,  $n=7$ )를 나타냈다.

식물플랑크톤에서 동물플랑크톤으로의 C-flux는 경안천에서 높게 나타났고 (Fig. 7), 연중 변화는 여과율 변화와 유사하게 나타났다 ( $r=0.855, n=7, P<0.001$ , Fig. 6). 팔당댐앞에서 MICZ에 대한 C-flux는  $0.04\sim0.44 \text{ } \mu\text{gC} \cdot \text{L}^{-1} \cdot \text{hr}^{-1}$  (평균  $0.172 \pm 0.17 \text{ } \mu\text{gC} \cdot \text{L}^{-1} \cdot \text{hr}^{-1}$ ,  $n=7$ ),

MACZ는  $0.05\sim0.98 \text{ } \mu\text{gC} \cdot \text{L}^{-1} \cdot \text{hr}^{-1}$  (평균  $0.333 \pm 0.31 \text{ } \mu\text{gC} \cdot \text{L}^{-1} \cdot \text{hr}^{-1}$ ,  $n=7$ )를 나타냈다. 경안천에서 MICZ에 대한 C-flux는  $0.01\sim2.27 \text{ } \mu\text{gC} \cdot \text{L}^{-1} \cdot \text{hr}^{-1}$  (평균  $0.465 \pm 0.82 \text{ } \mu\text{gC} \cdot \text{L}^{-1} \cdot \text{hr}^{-1}$ ,  $n=7$ ), MACZ의 C-flux는  $0.25\sim14.53 \text{ } \mu\text{gC} \cdot \text{L}^{-1} \cdot \text{hr}^{-1}$  (평균  $2.882 \pm 5.2 \text{ } \mu\text{gC} \cdot \text{L}^{-1} \cdot \text{hr}^{-1}$ ,  $n=7$ )을 나타냈다. 지점 별로 비교할 때 두 지점 모두 MACZ로의 C-flux가 MICZ보다 높게 나타났으며 팔당댐 앞에서는 평균 2배, 경안천에서는 7배의 차이를 나타냈다.

고 찰

팔당호 생태계에서 조사된 동물플랑크톤의 여과율은 여러 선행연구 결과의 값과 비교할 때 비슷한 범위에 있었다 (Table 1).

팔당호 생태계에서 식물플랑크톤 섭식에 대해 대형동물플랑크톤 (MACZ: 요각류와 지각류)은 소형동물플랑크톤 (MICZ: 윤충류) 보다 중요한 역할을 하였다. 이는 대형동물플랑크톤이 소형에 비해 개체당 훨씬 높은 여과율을

**Table 1.** Comparison of clearance rate ( $\text{mL} \cdot \text{L}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$ ) and C-flux ( $\mu\text{gC} \cdot \text{L}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$ ) of zooplankton on phytoplankton.

Predator	Prey	Clearance rate	C-flux	References
MICZ (< 200 $\mu\text{m}$ )	phytoplankton		1.1~22.6	Akiyoshi <i>et al.</i> (2003)
zooplankton	phytoplankton		0.3~11.2	Carrick and <i>et al.</i> (1991)
zooplankton	phytoplankton		2.1~264	Scavia and Fahnenstiel (1987)
MACZ (> 200 $\mu\text{m}$ )	phytoplankton	1.2~70.0	0.03~8.77	Hwang (1995)
MICZ (40~200 $\mu\text{m}$ )	phytoplankton	2.4~275.5	0.05~19.60	
zooplankton	phytoplankton	2.3~18.4	0~264.4	Hwang <i>et al.</i> (2004)
MICZ (< 157 $\mu\text{m}$ )	phytoplankton	Avg. 151±262		Kim <i>et al.</i> (2000)
MACZ (> 157 $\mu\text{m}$ )	phytoplankton	Avg. 22±65		
zooplankton	phytoplankton		3~224	Keckeis <i>et al.</i> (2003)
MACZ (> 200 $\mu\text{m}$ )	phytoplankton	18.4~87.8	2.9~23.5	This study (Paldang)
MACZ (> 200 $\mu\text{m}$ )	phytoplankton	33.4~426.3	4.6~348.7	This study (Kyungan)
MICZ (60~200 $\mu\text{m}$ )	phytoplankton	4.5~36.3	1.0~10.6	This study (Paldang)
MICZ (60~200 $\mu\text{m}$ )	phytoplankton	1.6~217.3	0.24~54.5	This study (Kyungan)

가짐으로써 상대적으로 낮은 밀도에도 식물플랑크톤에게 상당한 섭식 압력을 줄 수 있고 (Kim *et al.*, 2003), 이로 인해 MICZ의 섭식은 MACZ에 의한 섭식으로 인해 크게 쇠약해지기 때문이다 (Burkill *et al.*, 1995). 하지만 *Keratella cochlearis*와 *Brachionus sp.*가 팔당댐앞과 경안천에서 각각 크게 증가하였을 때와 일치하여, 팔당댐앞에서 6월, 경안천에서는 4월에 MICZ에 대한 C-flux가 MACZ와 비슷하게 나타났다. 이 결과는 MICZ가 MACZ보다 비록 섭식효율은 낮지만 크게 발달할 경우 수생태계에서 중요한 섭식자가 될 수 있음을 시사한다. MACZ 중에 가장 중요한 섭식자는 *Daphnia sp.* 같은 지각류였다. 식물플랑크톤에 대한 MACZ 섭식의 중요성은 다른 수 환경에서도 여러 차례 연구되어 왔다 (Gilbert, 1989; Wickham and Gilbert, 1991; Pace and Vaqu , 1994; Brett *et al.*, 1994). 큰 몸집을 가지고 여과섭식을 하는 지각류가 작은 몸집을 가진 윤충류보다 더욱 효과적으로 식물플랑크톤의 생물량을 조절하며 (Dawidowicz, 1990), 또한 지각류는 먹이 경쟁을 통한 간접적인 방해나 상처를 입히는 직접적인 방해로 윤충류들을 억제할 수 있다 (David *et al.*, 2000). 본 연구에서도 지각류의 섭식효율이 가장 높게 나타났다.

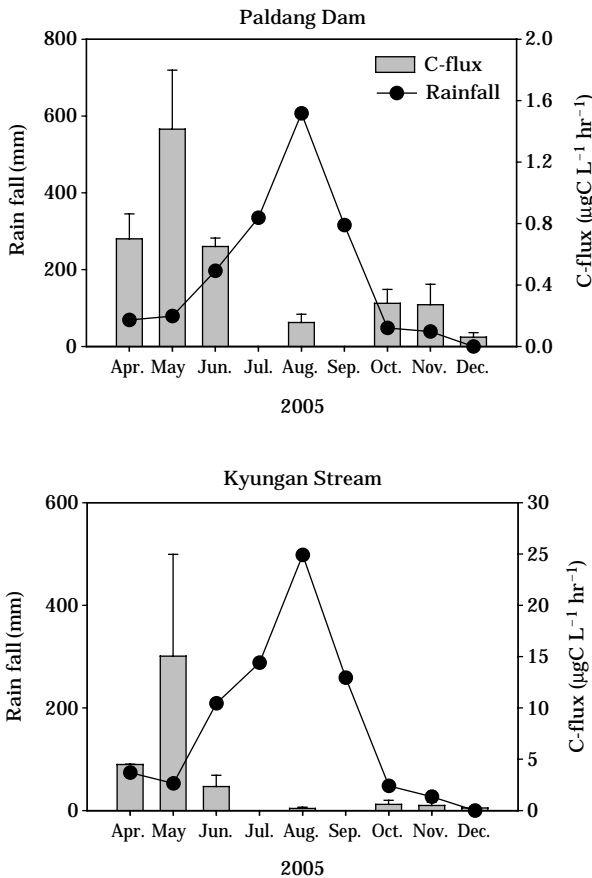
동물플랑크톤과 식물플랑크톤간의 섭식관계의 강도는 간접적으로 수체의 영양 수준에 의해 영향을 받는다 (Pirjo *et al.*, 1999). 본 연구에서 상대적으로 높은 영양 수준을 나타내는 경안천에서 (한 등, 2002) 비교적 높은 식물플랑크톤 생물량이 유지되어, 동물플랑크톤의 섭식율이 대체로 높게 나타났다. 포식자에 의한 섭식의 강도는 계절적으로 변하며 식물플랑크톤의 종구성 및 밀도와 1차생산의 수준을 반영한다 (Perissinotto, 1992; Landry *et al.*, 1994; Ward *et al.*, 1995). 팔당댐앞에서 MICZ의 높

은 밀도와 대발생한 *Aulacoseira spp.*의 종구성이 8월 이후의 전체 섭식율에 큰 영향을 미친 것으로 사료된다. 지각류가 수체에서 우점할 때는 윤충류보다 조류 생물량과 1차 생산력이 더욱 낮아지므로 (Kitchell and Carpenter, 1996), 8월 이후에 경안천에서 우점하였던 지각류로 인해 식물플랑크톤 생물량이 낮게 나타난 것으로 추정할 수 있으며 이에 따라 봄철보다 상대적으로 낮은 MICZ의 섭식율이 나타난 것으로 파악된다.

플랑크톤 먹이망 내의 섭식은 생물학적 요인 이외에도 수체의 물리적인 작용에 의해 영향을 받을 수 있다 (David *et al.*, 2000). 특히 팔당호 생태계에서 식물플랑크톤-동물플랑크톤 섭식 관계는 강우에 의한 영향이 있었던 것으로 관찰되었다 (Fig. 8). 조사기간 동안 두 지점에서 C-flux와 강우는 상반된 경향을 나타냈다. 강우가 적었던 봄에는 C-flux가 높게 나타났으나 강우량이 많아지기 시작하는 6월에 C-flux의 감소를 보였고 최대 강우량을 나타낸 8월에도 C-flux의 감소가 지속되면서 최소값을 나타냈다. 8월 이후 가을로 접어들면서 강우는 큰 폭으로 감소하였지만 C-flux는 봄철에 기록된 수준에 미치지 못하는 못하였다. 기온이 큰 폭으로 감소하는 12월에는 강우기 수준의 C-flux를 기록하였다. 봄~여름 동안에 나타났던 강우와 C-flux간의 상반된 경향은 여름 이후 겨울까지는 나타나지 않았다.

몬순기후 지역에서 집중강우로 인한 대규모의 하천수의 유입은 서식지 크기 (Stanley *et al.*, 1997), 추이대 지역 (Johnston and Naiman, 1987; Holland, 1996), 영양염 동태 (Quintana *et al.*, 1998a), 수생태계 군집 (Dickman, 1969)을 심각하게 변화시키는 결과를 가져올 수 있다. 본 연구에서도 8월의 집중강우에 의해 수체의 수리학적 상태가 변하고 (Keckeis *et al.*, 2003) 댐 방류로 인해 체류시





**Fig. 8.** Seasonal change of C-flux and rainfall pattern at Paldang Dam and Kyungan Stream.

간이 짧아지고 썩겨 내려감으로써 (Baranyi *et al.*, 2002; Muylaert and Vyverman, 2006; Walz and Welker, 1998) 섭식자인 동물플랑크톤이 급격히 감소하였다. Quintana *et al.* (1998b)와 Margalef (1997)는 강우로 인한 물리적인 교란이 생물 간의 섭식관계를 불안정하게 한다고 보고한 바 있다. 또한 짧은 기간의 집중강우는 몇 주 동안 지속적으로 플랑크톤의 간의 섭식관계에도 해로운 영향을 미친다 (Descy, 1993; Muylaert *et al.*, 2001). 이는 본 연구에서 강우기 동안 동물플랑크톤의 섭식효율이 매우 낮았던 결과와 일치하였다.

결론적으로, 본 연구의 결과는 팔당호 생태계에서 식물플랑크톤은 동물플랑크톤에 대한 중요한 에너지원으로서 역할을 함을 보여주었다. 아울러 탄소전달율은 식물플랑크톤 생물량과 동물플랑크톤 종조성과 같은 생물적 요인과 함께 강우와 같은 물리적인 요인에 따라 달라짐을 알 수 있었다.

**적 요**

2005년 4월부터 12월까지 팔당호 생태계에서 식물플랑크톤-동물플랑크톤 간의 영양적 관계를 파악하기 위하여 플랑크톤 구조 분석과 섭식실험을 실시하였다. 동물플랑크톤은 소형 (MICZ: 60~20 µm)과 대형동물플랑크톤 (MACZ: >200 µm)으로 구분하여 각기 식물플랑크톤에 대한 여과율과 탄소전달율을 측정하였다. 섭식실험은 현장 동물플랑크톤의 0, 2, 4, 8배로 농도 차이를 두어 2회 반복 실험을 실시하였다. 두 지점에서 식물플랑크톤 군집은 규조류 (*Aulacoseira*, *Cyclotella*)가 수적으로 우점하였으나, 탄소생물량은 편모조류 (*Cryptomonas ovata*)가 높았다. 두 지점 모두 동물플랑크톤 군집 내에서 윤충류 (*Brachionus*, *Keratella*, *Polyathra*)가 수적으로 크게 우점하였으나, 탄소생물량은 지각류 (*Daphnia*)가 가장 높았다. 동물플랑크톤은 봄에 높은 밀도와 탄소생물량을 보였고 여름철 집중강우 시기를 기점으로 크게 감소하였다. 지점별로는 경안천에서 상대적으로 높은 탄소생물량이 나타났다. 동물플랑크톤 여과율과 탄소전달율은 두 지점 모두 봄 동안에 높았으나 여름 이후에 낮아졌으며, 탄소전달율의 변화는 동물플랑크톤 생물량의 변화와 유사하게 나타났다. 군집여과율과 식물플랑크톤에 대한 탄소전달율은 MACZ가 MICZ보다 높았고, 그 정도는 경안천에서 더 높게 나타났다. 여름철의 집중강우로 인한 짧은 체류시간과 수체의 교란이 동물플랑크톤의 섭식에 영향을 미치는 것으로 파악되었다. 팔당호 생태계에서 식물플랑크톤은 동물플랑크톤의 중요한 먹이원이며, 또한 플랑크톤 먹이망 내에서 탄소전달율은 먹이원과 섭식자의 생물량 및 종조성과 같은 생물적 요인과 함께 강우와 같은 물리적인 요인에 영향을 받는 것으로 파악되었다.

**사 사**

본 연구는 2005년 “한강수계 환경기초조사사업”의 지원에 의해 수행되었음.

**인 용 문 헌**

국립환경연구원. 1996. 호소내 오염하천 유입부의 식물에 의한 정화처리 연구 (II), NIER No. 96-17-488.  
 국립환경연구원. 2003. 낙동강수계 수중생태계 모델인자 조사.

- 최종보고서.
- 김종민, 노혜란, 허성남, 양희정, 박준대. 2005. 강우 및 유입 하천수가 팔당호 수질에 미치는 영향분석. *한국물환경학회지* **21**: 277-283.
- 김종민, 박준대, 노혜란, 한명수. 2002. 소양호와 팔당호의 수질의 수직 및 계절적 변화. *육수지* **35**: 10-20.
- 서윤수, 이길철, 김동근, 유재근, 이인선, 송준상, 허성남. 1989. 수질환경기준달성 최적화 방안에 관한 연구 (I): 팔당댐 유역수질 및 유출부하량. *국립 환경연구원보* **11**: 143-152.
- 이 경, 정영호. 1983. 한강 중심수역의 구조류에 대한 계절적 소장과 분포에 따른 상관관계, 성심여자대학 논문집 **14**: 37-47.
- 정영호, 이 경. 1981. 팔당댐 수역을 중심으로 한 식물성플랑크톤의 현존량과 생산력, 자연보존연구보고서 **3**: 383-390.
- 조규승. 1993. 한국담수동물플랑크톤 도감. 아카데미서적.
- 한명수, 홍성수, 어윤열. 2002. 팔당호의 생태학적 연구 4. 경안천 하류의 영양염 및 입자태 유기물 거동과 식물플랑크톤 천이. *육수지* **35**: 1-9.
- 환경부. 1996. 수질오염공정시험방법.
- Akiyoshi, S., S. Ban and T. Ikeda. 2003. Seasonal change in nano/micro-Zooplankton herbivory and heterotrophic nano-flagellates bacterivory off Cape Esan, Southwestern Hokkaido, Japan, *J. of Oceanogr.* **59**: 609-618.
- Andersen, A. and D.O. Hessen. 1991. Carbon, nitrogen, and phosphorus contents of freshwater zooplankton. *Limnol. Oceanogr.* **36**: 807-814.
- APHA-AWWA-WEF. 1995. Standard methods for the examination of water and wastewater. 19th ed., APHA-AWWA-WEF. Washington D.C. USA.
- Balcer, M.D., N.L. Korda and S.I. Dodson. 1984. Zooplankton of the great lakes. 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. *Freshwat. Biol.* **47**: 473-482.
- Brett, M.T., K. Wiackowski, F.S. Lubnow, A. Mueller-Solger, J.J. Elser and C.R. Goldman. 1994. Species-dependent effects zooplankton on planktonic ecosystem processes in castle lake, California. *Limnol. Oceanogr.* **75**: 2234-2254.
- Brock, T.D. 1985. A Eutrophic Lake, Lake Mendota, Wisconsin. Springer-Verlag. New York. p. 308.
- Burkill, P.H., E.S. Edwards and M.A. Sleight. 1995. Microzooplankton and their role in controlling phytoplankton growth in the marginal ice zone of the Bellingshausen Sea. *Deep Sea Res II.* **42**: 1277-1290.
- Carrick, H.J., G.L. Fahnenstiel, E.F. Stoermer and R.G. Wetzel. 1991. The importance of zooplankton-protozoan trophic coupling in Lake Michigan. *Limnol. Oceanogr.* **36**: 1335-1345.
- Culver, D.A., M.M. Boucherle, D.J. Bean and J.W. Flethcer. 1985. Biomass of freshwater crustacean zooplankton from Length-Weight regressions. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.* **42**: 1380-1390.
- David, G.A., M. Alvarez-Cobelas, C. Rojo and S. Sánchez-Carrillo. 2000. The significance of water inputs to plankton biomass and trophic relationships in a semi-arid freshwater wetland (central Spain). *J. Plankton Res.* **22**: 2075-2093.
- Dawidowicz, P. 1990. Effectiveness of phytoplankton control by large-bodied and small-bodied zooplankton. *Hydrobiol.* **200/201**: 43-47.
- Descy, J.-P. 1993. Ecology of the phytoplankton of the river Moselle-effects of disturbances on community structure and diversity. *Hydrobiol.* **249**: 111-116.
- Dickman, M. 1969. Some effects of lake renewal on phytoplankton productivity and species composition. *Limnol. Oceanogr.* **14**: 660-666.
- Downing, J.A. and F.H.R. Rigler. 1984. A manual on methods for the assessment of secondary productivity in freshwaters. Blackwell Scientific Publications. p. 247-249.
- Gawler, M., G. Balvay, P. Blanc, J.-C. Druat and J.P. Pelletier. 1988. Plankton ecology of Lake Geneva: a test of the PEG-model. *Arch. Hydrobiol.* **114**: 161-174.
- Gilbert, J.J. 1989. The effect of daphnia interference on a natural rotifer and ciliate community: short term bottle experiments. *Limnol. Oceanogr.* **34**: 606-617.
- 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.
- Heath, R.T., S.J. Hwang and M. Munawar. 2003. A hypothesis for the assessment of the importance of microbial food web: Linkages in nearshore and offshore habitats of the Laurentian Great Lakes. *Aquatic Ecosystem Health & Management* **6**(3): 231-239.
- Holland, M.M. 1996. Wetlands and environmental gradients. *In*: Mulamootil, G., B.G. Warner and E.A. McBean (eds), Wetlands: Environmental Gradients, Boundaries and Buffers. CRC Lewis Publishers, Boca Raton. p. 19-43.
- Hwang, S.J. 1995. Carbon dynamics of plankton communities in nearshore and offshore Lake Erie: The significance of the microbial loop for higher trophic

- levels. PhD Dissertation, Kent State University, Kent, OH.
- Hwang, S.J., H.S. Kim, J.K. Shin and J.M. Oh. 2004. Grazing effects of a freshwater bivalve (*Corbicula leana* Prime) and large zooplankton on phytoplankton communities in two Korean lakes. *Hydrobiol.* **515**: 161-179.
- Johnston, C.A. and R.J. Naiman, 1987. Boundary dynamics at the aquatic-terrestrial interface: The influence of beaver and geomorphology. *Landscape Ecol.* **1**: 47-57.
- Kagami, M., T. Yoshida, T.B. Gurung and J. Urabe. 2002. Direct and indirect effects of zooplankton on algal composition in *in situ* grazing experiments. *Oecologia* **133**: 356-363.
- 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. *J. Plankton Res.* **25**: 243-253.
- Kellar, P.E., S.A. Paulson and L.J. Paulson. 1980. Methods for biological, chemical and physical analyses in reservoirs. Technical Report, Lake Mead Limnological Research Center, University of Nevada, Las Vegas, p. 234.
- Kim, H.W. and G.J. Joo. 2000. The longitudinal distribution and community dynamics of zooplankton in a regulated large river: a case study of the Nakdong River (Korea). *Hydrobiol.* **438**: 171-184.
- Kim, H.W., K. Ha and G.J. Joo. 1998. Eutrophication of the lower Nakdong River after the construction of an estuarine dam in 1987. *Internat. Rev. Hydrobiol.* **83**: 65-72.
- Kim, H.W., K.H. Chang, K.S. Jeong and G.J. Joo. 2003. The spring metazooplankton dynamics in the river-reservoir hybrid system (Nakdong River, Korea): Its role in controlling the phytoplankton biomass. *Korean J. Limnol.* **36**: 420-426.
- Kim, H.W., S.J. Hwang and G.J. Joo. 2000. Zooplankton grazing on bacteria and phytoplankton in a regulated large river (Nakdong River, Korea). *J. Plankton Res.* **22**: 1559-1577.
- Kim, H.W., S.J. Hwang, K.H. Kim, M.H. Jang, G.J. Joo and N. Walz. 2002. Longitudinal difference in zooplankton grazing on phyto- and bacterioplankton in the Nakdong River (Korea). *Internat. Rev. Hydrobiol.* **87**: 281-293.
- Kitchell, J.F. and S.R. Carpenter. 1996. Cascading trophic interaction. In S.R. Carpenter & J.F. Kitchell (eds), *The trophic cascade in Lakes*. Cambridge University Press. p. 1-14.
- Lampert, W., W. Flecker, H. Rai and B.E. Taylor. 1986. Phytoplankton control by grazing zooplankton: A study on the spring clear-water phase. *Limnol. Oceanogr.* **31**: 478-490.
- Landry, M.R., C.J. Lorenzen and W.K. Peterson. 1994. Mesozooplankton grazing in the Southern California Bight. II. Grazing impact and particulate flux. *Mar Ecol Prog Ser.* **115**: 73-85.
- Lehman, J.T. and C.D. Sandgren. 1985. Species-specific rates of growth and grazing loss among freshwater algae. *Limnol. Oceanogr.* **30**: 34-46.
- Margalef, R. 1997. *Our Biosphere*. Excellence in Ecology 10. Ecology Institute, Oldenburg/Luhe, Germany.
- Marker, A.F.H. 1972. The use of acetone and methanol in the estimation of chlorophyll in the presence of phaeophytin. *Freshwat. Biol.* **2**: 361-385.
- Mullin, M.M., P.R. Sloan and R.W. Eppley. 1966. Relationship between carbon content, cell volume, and area in phytoplankton. *Limnol. Oceanogr.* **11**: 307-310.
- Muylaert, K. and W. Vyverman. 2006. Impact of a flood event on the planktonic food web of the Schelde estuary (Belgium) in spring 1998. *Hydrobiol.* **559**: 385-394.
- Muylaert, K., J.V. Wichelen, K. Sabbe and W. Vyverman, 2001. Short-term phytoplankton dynamics in a freshwater tidal estuary. *Arch. Hydrobiol.* **150**: 269-288.
- Pace, M.L. and D. Vaqu . 1994. The importance of Daphnia in determining mortality rates of protozoans and rotifers in lakes. *Limnol. Oceanogr.* **39**: 985-996.
- Perissinotto, R. 1992. Mesozooplankton size-selectivity and grazing impact on the phytoplankton community of the Prince Edward Archipelago (Southern Ocean). *Mar Ecol Prog Ser.* **79**: 243-258.
- Pirjo, S.H., M.T. Brett and C.R. Goldman. 1999. Temporal and vertical dynamics of phytoplankton net growth in Castle Lake, California. *J. Plankton Res.* **21**: 373-385.
- Quintana, X.D., R. Moreno-Amich and F.A. Com n. 1998a. Nutrient and plankton dynamics in a Mediterranean salt marsh dominated by incidents of flooding. Part 1: Differential confinement of nutrients. *J. Plankton Res.* **20**: 2089-2107.
- Quintana, X.D., F.A. Com n and R. Moreno-Amich. 1998b. Nutrient and plankton dynamics in a Mediterranean salt marsh dominated by incidents of flooding. Part 2: Response of a zooplankton community to disturbances. *J. Plankton Res.* **20**: 2109-2127.
- Reynolds, C.S. 1984. *The ecology of freshwater phytoplankton*. Cambridge University Press, Cambridge.
- Reynolds, C.S. 1994. The ecological basis for the successful biomanipulation of aquatic communities. *Arch. Hydrobiol.* **139**: 1-33.
- Scavia, D. and G.L. Fahnenstiel. 1987. Dynamics of Lake

- Michigan phytoplankton: Mechanisms controlling epilimnetic communities. *J. Great Lakes Res.* **13**: 103-120.
- Shiel, R.J. and K.F. Walker. 1984. Zooplankton of regulated and unregulated rivers: The murray darling river system, Australia. In 'Regulated Rivers.' (Eds. Lillehammer, A. and S.J. Saltveit) p. 263-270 (University of Oslo Press: Oslo).
- Sommer, U., Z.M. Gliwicz, W. Lampert and A. Duncan, 1986. The PEG-model of seasonal succession of planktonic events in fresh waters. *Arch. Hydrobiol.* **106**: 433-471.
- Stanley, E.H., S.G. Fisher and N.B. Grimm. 1997. Ecosystem expansion and contraction in streams. *Bio Science* **47**: 427-435.
- Stemberger, R.S. 1979. A guide to rotifers of the Laurentian Great Lakes. EPA-600/4-79-021.
- Sterner, R.W. 1989. The role of grazers in phytoplankton succession. In Sommer U (ed) Plankton ecology: succession in plankton communities. Springer, Berlin Heidelberg New York, p. 107-170.
- Strathmann, R.R. 1967. Estimating the organic carbon content of phytoplankton from cell volume or plasma volume. *Limnol. Oceanogr.* **12**: 411-418.
- Strickland, J.D. and T.R. Parsons. 1972. A practical handbook of seawater analysis. *Bulletin of Fisheries Research Board of Canada* **167**: 65-70.
- Thys, I., B. Lesporcq and J.P. Descy. 2003. Seasonal shifts in phytoplankton ingestion by *Daphnia galeata*, assessed by analysis of marker pigments. *J. Plankton Res.* **25**: 1471-1484.
- Vanni, M.J. and J. Temte. 1990. Seasonal patterns of grazing and nutrient limitation of phytoplankton in a eutrophic lake. *Limnol. Oceanogr.* **35**: 697-709.
- Walz, N. and M. Welker. 1998. Plankton development in a rapidly flushed lake in the River Spree system (Neuendorfer See, Northeast Germany). *J. Plankton Res.* **20**: 2071-2087.
- Ward, P., A. Atkinson, A. Murray, A.G. Wood, R. Williams and S.A. Poulet. 1995. The summer zooplankton community at South Georgia: biomass, vertical migration and grazing. *Polar Biol.* **15**: 195-208.
- Wickham, S.A. and J.J. Gilbert. 1991. Relative vulnerabilities of natural rotifer and ciliate communities to cladocerans: laboratory and field experiments. *Freshwater Biol.* **26**: 77-86.

(Manuscript received 10 July 2006,  
Revision accepted 11 September 2006)