

소양호 원생생물과 동물플랑크톤간의 먹이망 동태

김난영 · 손주연* · 공동수* · 황순진
건국대학교 환경과학과 · *한강물환경연구소

Trophic Dynamics between Protist and Zooplankton in Lake Soyang

KIM, Nan-Young · Ju-Yeon SON* · Dong-Soo KONG* · Soon-Jin HWANG

Department of Environmental Science, Konkuk University

*Han River Environment Research Center

ABSTRACT

To clarify the role of protozoans in the microbial food web of Lake Soyang ecosystem, the clearance rate(CR) and carbon flux(C-flux) of zooplankton assemblage were investigated. Zooplankton were divided into two size groups(microzooplankton (MICZ): 60~200 μm , macrozooplankton (MACZ): >200 μm). Conducted were both quantitative trophic linkage between protist and zooplankton community structure at two sites with different trophic status from April to December, 2006. In carbon flux from protist to zooplankton, and annual range of food contribution to microzooplankton were between 0.0003 in June and 0.0087 $\mu\text{gC} \cdot \text{L}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$ in September, whereas they contributed to macrozooplankton between 0.0423 in December and 1.0823 $\mu\text{gC} \cdot \text{L}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$ in September, respectively. In highlight of sampling time and station, carbon fluxes of protist to macrozooplankton was higher than microzooplankton in both two stations, the front of Dan and Yanggu bridge station. The magnitude of carbon flux between protist and zooplankton in the front of Dam station was relatively high in spring and summer, while that in Yanggu bridge was high in autumn and winter, respectively. Comparing the carbon flux between phytoplankton and protist to their same predator, micro- and macrozooplankton, four times(April, May, October and November) of total seven samplings carried out in the front of Dam station and four times(April, May, October and November) of total eight samplings were relatively high in protist. Therefore, these results indicated that protist was important prey of zooplankton(micro- and macrozooplankton) in Soyang lake.

Key words : C-flux, trophic dynamics, protist, zooplankton, Lake Soyang

서 론

수중 생태계 플랑크톤 먹이망 동태학, 특히 에너지 전달에 대한 문제는 먹이망 영양단계간의 피식-포식작용을 포함한 탄소동태학의 이해를 도모하는 기본적인 분야로서 군집생태학의 중요한 부분을

차지한다. 이 분야의 연구는 1970년대까지도 “식물플랑크톤-동물플랑크톤”간의 직선적인 섭식관계를 통한 “trophic linkage”의 정성적, 정량적 측면에 초점을 맞추어 왔다(Lempert *et al.*, 1986; Sterner, 1989; Vanni and Temte, 1990). 즉, 수중 생태계의 일차 생산에 의한 에너지는 동물플랑크톤에 의해 전적으로 소비되며, 먹이망 상위단계(예를 들면, 어류)로의 에너지 전달과 그들의 생물량은 식물성 플랑크톤의 에너지에 전적으로 의존하는 것으로 보아왔다.

그러나, 식물성 플랑크톤에 의해 생산된 유기물의 상당부분이 박테리아의 에너지원으로 이용(Wetzel, 1972; Pomeroy, 1974)되는 것이 밝혀진 이후로 수생태계 내 미생물의 중요성을 규명하기 위한 자료들이 제시되었고(Sanders *et al.*, 1989; Vaqu  *et al.*, 1992; Hwang and Heath, 1999), 이러한 결과들은 “미생물 먹이환(microbial loop)”(Azam *et al.*, 1983; Porter *et al.*, 1988)의 개념으로 종합되었다. 미생물 먹이환은 수생태계의 생물군집을 통한 탄소(에너지)와 영양물질 순환의 경로를 나타내는 모델로서, 그 안에서 박테리아에 의한 용존유기물질의 섭취와 생물 영양단계들 간의 다양한 피식(pre)-포식(predator) 연결 관계가 존재한다(박테리아-원생생물, 박테리아-동물플랑크톤, 원생생물-동물플랑크톤 등).

지난 20 여년 동안 미생물 먹이환을 중심으로 하는 미생물 먹이망에 대한 연구는 미국과 유럽을 포함하여 많은 부분이 진행되었으며, 현재는 수중생태계의 플랑크톤 먹이망을 식물플랑크톤을 기저로 하는 기존의 식물플랑크톤 먹이망(phytoplankton food web)과 박테리아를 기저로 하는 미생물 먹이망(microbial food web)의 종합으로 인식하게 되었다. 이 두 가지의 먹이망은 총체적으로 하나의 먹이망을 구성하기 때문에 자연계 내에서 이들의 구조와 기능은 매우 복잡하고 에너지 전달에 있어서 상대적 중요성은 먹이생물과 섭식자인 동물플랑크톤의 군집조성과 생물량에 따라 다르게 나타나며(Sherr and Sherr, 1988; Carrick *et al.*, 1991; Vaqu  *et al.*, 1992; Hwang and Heath, 1997), 이들의 차이는 환경조건과 영양상태와 같은 시·공간적인 변이에 의한 것으로 나타났다(Fenchel, 1980; Wylie and Currie, 1991; Weisse and Stockner 1993; Hwang 1995). 따라서 먹이망을 구성하는 영양단계들 간의 상대적인 중요성의 변화는 생태계의 기능을 이해하는데 매우 중요하다(Heath *et al.*, 2003).

원생생물은 수생태계에서 밀도와 생산성이 매우 높을 뿐 아니라, 동물플랑크톤의 중요한 먹이원으로 평가된다(Caron 1983; Bleom *et al.* 1986; Sherr *et al.* 1986; Beaver and Crisman 1989; Berninger *et al.* 1991). Carrick 등(1991)은 Michigan 호의 원생생물 군집에 대한 동물플랑크톤의 여과율은 phytoplankton의 그것과 비슷하다는 것을 보고했으며, 원생생물이 먹이망에 상위 영양단계에 대해서 중요한 먹이원임을 보고했다. 플랑크톤 먹이망내에서 원생생물을 포함하는 먹이망에 대한 연구는 상위 영양단계로의 에너지 전달을 비롯하여 향후 환경 변화와 기후 변화에 대한 수질 변화를 예측하고 생태계를 관리하는데 중요할 뿐만 아니라 건강한 생태계로 유지되는가를 평가하는데 매우 유용하게 활용할 수 있다.

본 연구는 소양호 생태계 먹이망에서 동물플랑크톤의 에너지원으로서 원생생물의 역할 및 중요성을 파악하기 위하여 원생생물이 동물플랑크톤의 주요한 먹이원이 되는가, 대형 동물플랑크톤과 소형 동물플랑크톤 중 어느 군집이 더 중요한 섭식자인가를 평가하고 시공간적인 변화에 따라 에너지의 흐름의 변화를 분석하였다.

재료 및 방법

1. 조사 지점 및 시기

본 연구는 소양댐앞, 양구대교를 대상으로 하였으며(Fig. 1), 소양호 생태계의 수질요인은 월 1회 조사하였으며, 에너지 전달은 3월과 7월을 제외하고 월 1회 조사하였다.

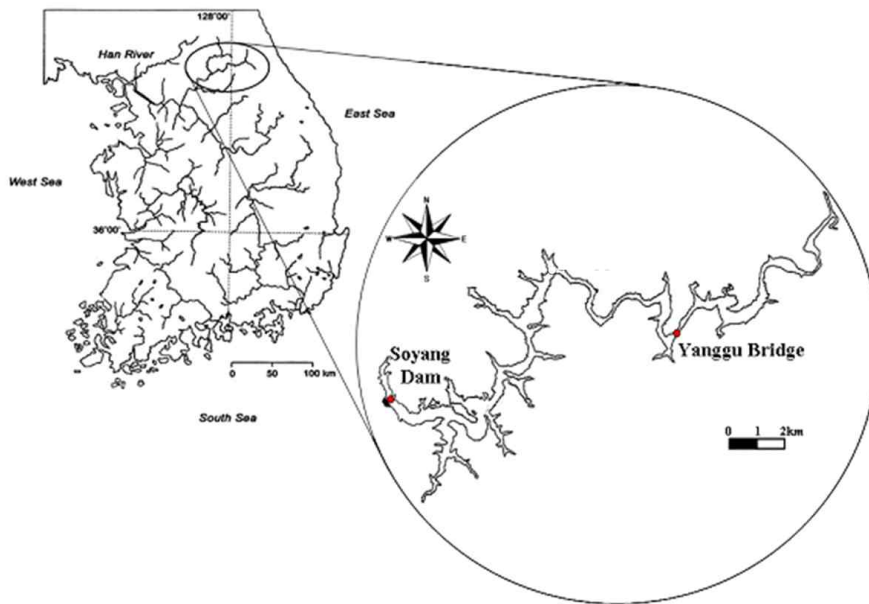


Fig. 1. Map of sampling sites in the Lake Soyang.

2. 조사항목 및 방법

1) 미세먹이망 구성요소들의 종조성, 밀도, 생물량 분석방법

(1) PNAN(Phototrophic nanoflagellates), HNAN(Heterotrophic nanoflagellates), 섬모충(Ciliate)

PNAN과 HNAN 및 섬모충의 계수를 위하여 5 L Van Dorn 채수기로 현장의 표층수를 채수한 후, 멸균된 250 mL 폴리에틸렌 채집병에 시료를 넣고, Glutaraldehyde 용액으로(최종농도 0.5%) 고정하여 실험실로 운반하였다. 시료를 일정량(5~10 mL)을 취해 1.0 μm Black Nuclepore filter로 Primulin (Caron, 1983) 염색 방법을 통해, 형광현미경 (Zeiss, Axiolab, $\times 1000$) 하에서 계수하였다.

탄소량 환산을 위해 각 세포의 크기를 구하여 평균 체적을 구한 후, 체적 대비 탄소량 전환계수를 이용하여 계산하였다. 각각의 탄소량 전환계수로는 autotrophic nanoflagellate(PNAN)는 Strathmann (1967) ($200 \text{ fgC}/\mu\text{m}^3$)을 토대로 전환하였고, heterotrophic nanoflagellate(HNAN)는 $163 \text{ fgC}/\mu\text{m}^3$ 의 전환

계수를 사용하였다(Fenchel, 1982; Laws *et al.*, 1984; Borsheim and Bratbak, 1987의 평균값). Ciliate는 $110 \text{ fgC}/\mu\text{m}^3$ (Weisse, 1991)을 사용하여 전환하였다.

(2) 동물플랑크톤(Zooplankton)

동물플랑크톤은 망목의 크기가 $64 \mu\text{m}$ 인 네트를 이용해 수심 8 m에서 수직 예인한 후 sucrose-formaline을 최종 농도 5%로 고정하였다. 동물플랑크톤의 생물량은 Sedgwick-Rafter 계수판에 넣어 광학현미경(Zeiss, Axiostar plus, $\times 100$)하에서 윤충류, 지각류, 요각류로 분류하여 실시하였다(Stemberger, 1979; Balcer *et al.*, 1984; 조, 1993). 관찰 시 출현 종에 대한 가로, 세로 길이를 모두 측정하였으며, 평균값을 생물량 계산에 이용하였다. 윤충류의 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). 예외적으로 윤충류의 *Asplanchna*는 몸체가 매우 약해서 약간의 충격에도 쉽게 파괴되고 다른 종에 비해 수분함량이 많기 때문에 건중량은 습중량의 4%로 하였다(Dumont *et al.*, 1975). 지각류와 요각류의 건중량은 Length-Dry weight 관계식을 이용하여 계산하였고(Culver *et al.*, 1985), 동물플랑크톤의 생물량($\mu\text{gC/L}$)은 건중량의 48%를 탄소량으로 고려하여(Anderson and Hessen, 1991) 산출하였다.

2) 원생생물-동물플랑크톤 간의 섭식관계 및 에너지 전달을 평가

원생생물-동물성 플랑크톤 간의 섭식관계 및 탄소 전달을 측정은 Lehman & Sandgren(1985)의 방법에 따라 동물플랑크톤의 생물량을 조절하여 증가되는 동물플랑크톤의 생물량에 따라 섭식으로 감소되는 원생생물의 밀도를 측정하여 계산하였다. 동물플랑크톤 개체의 크기에 따라 소형 동물플랑크톤(Microzooplankton, 윤충류와 nauplii 포함, $60 \sim 200 \mu\text{m}$)과 대형 동물플랑크톤(Macrozooplankton, 요각류 및 지각류 성체 포함, $>200 \mu\text{m}$)로 구분하여 독립적인 set로 실시하였다.

현장수를 $60 \mu\text{m}$ mesh로 여과하여 원생생물만이 존재하는 여과수를 2 L 폴리에틸렌 용기에 일정량을 담아놓고 망목의 크기가 $64 \mu\text{m}$ 인 네트를 이용해 수심 8 m에서 수직 예인하여 동물플랑크톤 채집하였다. 채집된 동물플랑크톤을 $200 \mu\text{m}$ 와 $60 \mu\text{m}$ mesh를 연속적으로 통과시켜 size fraction을 한 후 현장 밀도의 0배(control, 동물플랑크톤 제거구. 즉, $60 \mu\text{m}$ Net로 여과한 시료), 2, 4, 8 배로 각 용기에 첨가하고, 현장 여과수($<60 \mu\text{m}$)로 2 L 용량을 맞춘 후 암실에서 24시간 동안 섭식을 허용하였다. 섭식실험은 2반복으로 수행되었으며, 24시간 후 50 mL의 subsample을 채취하여 glutaraldehyde로 고정하고, 나머지 전체시료는 $60 \mu\text{m}$ 망목의 net로 여과하여 용기 내에 포함된 동물플랑크톤 전량을 계수하고 생물량을 측정하였다. 50 mL의 subsample에서 5~20 mL의 양을 다시 채취하여 $1.0 \mu\text{m}$ 의 Black Nuclepore filter에 여과시킨 후 Bergstrom *et al.*(1986) 등에 따라 Primulin으로 염색하여 형광현미경($\times 1000$) 하에서 원생생물을 계수하였다. 표본은 시료당 2개를 준비하였고, 각 표본당 최소한 300개체 이상을 계수 및 세포의 크기를 측정하였다.

원생생물의 cell density (cells/mL)는 계수된 cell 수와 총 filter 면적 및 계수한 filter의 면적을 토대로 다음 식에 의해 계산되었다.

$$N = \frac{C \times FA}{CA \times FV}$$

N = mL당 protist의 수
 C = 계수된 protist의 수
 FA = 총 filter 면적 ($2.01 \times 10^8 \mu\text{m}^2$)
 CA = 계수한 filter의 총 면적
 FV = Filter volume(mL)

여과율의 계산은 각각의 동물플랑크톤 밀도 조절구에서 24시간 동안 감소된 밀도를 측정하였으며, 지수성장률(exponential growth rate: 단위=day⁻¹)은 다음 식에 의해 계산한 후 조절구 내의 동물플랑크톤 생물량과 지수성장률간의 직선회귀 관계를 통해 기울기로 평가하였다.

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

r = The rate of population growth (day⁻¹)
 N_t = Final cell density(cells/mL)
 N_0 = Initial cell density(cells/mL)
 t = Duration of incubation(day)

에너지 전달량은 다음 계산식을 통해 평가하였다.

$$PCF = CR \times P \times Z$$

PCF = Protozoan C-flux to zooplankton ($\mu\text{gC} \cdot \text{L}^{-1} \cdot \text{hr}^{-1}$)
 CR = Clearance rate ($\text{mL} \cdot \mu\text{gdw}^{-1} \cdot \text{hr}^{-1}$)
 P = Protozoan carbon biomass ($\mu\text{gC/L}$)
 Z = Ambient zooplankton biomass ($\mu\text{g} \cdot \text{dw}^{-1} \cdot \text{L}^{-1}$)

3) 통계분석

각 수질 항목간의 상관관계는 Pearson's correlation analysis를 이용하였으며, 항목별 지점간 유의성은 one way ANOVA를 이용하였다(SPSS 10.0).

결과 및 고찰

1. 원생생물과 동물플랑크톤의 종구성, 밀도 생물량

1) 원생생물

조사가기간동안 두 지점에서 나타난 원생생물의 밀도 및 생물량은 6월을 제외하고 소양댐 앞이 높게 나타났으며, 두 지점 모두 HNAN이 90% 이상의 밀도를 나타냈다.

각 정점별 원생생물의 밀도는 소양댐에서 HNAN이 673(4월)~2312 cell/mL(5월), PNAN이 0(6월, 8월)~99 cell/mL(4월), ciliate가 15~63 cell/mL(5월)의 밀도를 보였으며, 양구대교에서는 171(4월)~4,093 cell/mL(5월), PNAN이 25(5월), ciliate가 2~62 cell/mL(8월)의 밀도를 각각 나타냈다.

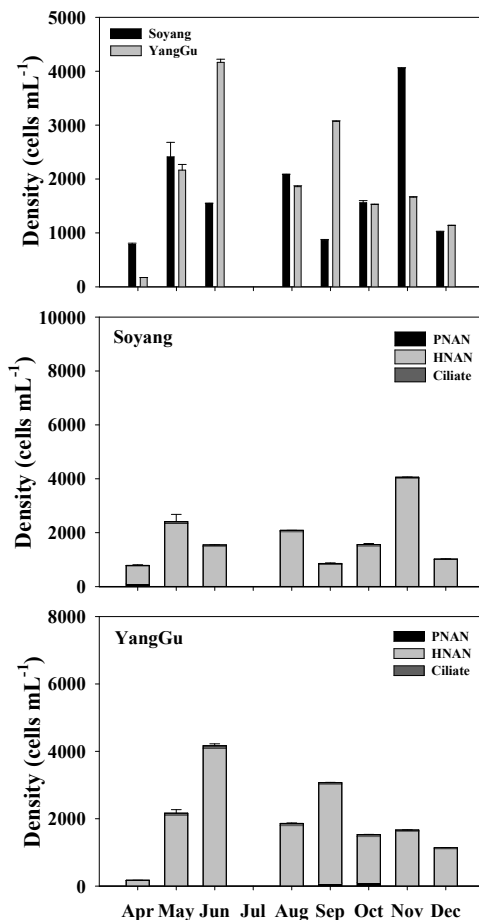
원생생물의 생물량은 소양댐 앞에서 16(4월)~88 $\mu\text{gC/L}$ (5월)의 범위를, 양구대교에서 3(4월)~80 $\mu\text{gC/L}$

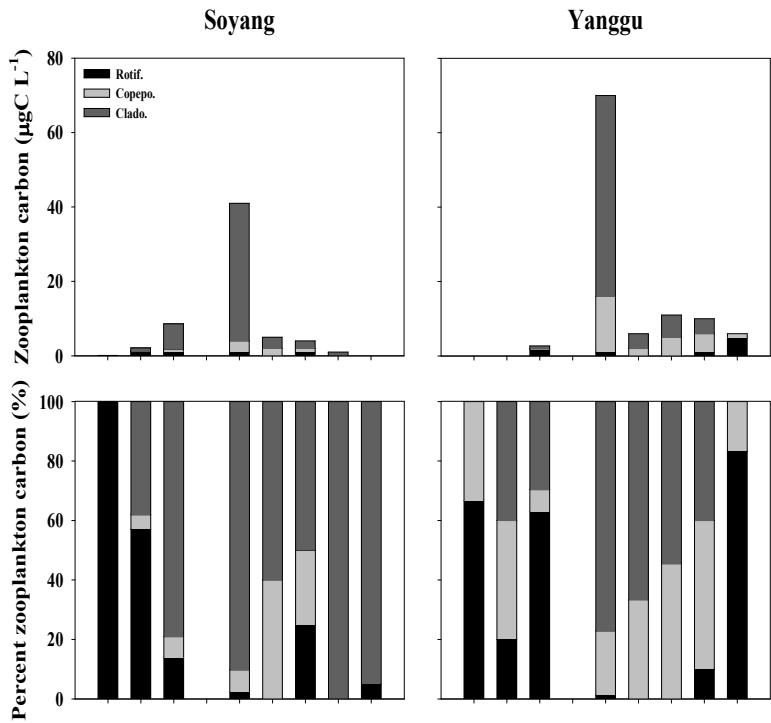
(6월)의 범위를 각각 나타냈으며 두 지점 모두 4월에 생물량이 가장 낮은 것으로 조사되었다.

소양담에서 4월에는 *Dinobryon*의 출현으로 PNAN의 밀도와 생물량이 가장 크게 나타났으며, 5월에는 세포의 크기가 큰(25~30 μm) 섬모충인 *Vorticella*의 출현으로 섬모충의 생물량이 가장 크게 나타났다(Fig. 2). 양구대교에서 주로 출현한 섬모충은 *Strombidium*로 조사되었다.

2) 동물플랑크톤

조사기간 중 4월과 5월에는 두 조사지점 모두에서 지각류나 요각류의 출현이 거의 없었으며, 생물량도 매우 적은 것으로 나타났다. 그러나 6월에 소양담 앞에서 *Daphnia longispina*, 양구대교에서 *Bosmina longirostris* 종이 출현함으로써 생물량이 증가하였고, 8월에는 *Diaphanosoma brachyurum*의 출현으로 인해 생물량이 급격하게 증가하였다. 소양담 앞에서 동물플랑크톤의 밀도와 생물량은 14(4월)~369 ind/L(5월), 0.1(4월)~41.3 $\mu\text{gC/L}$ (8월)로 조사되었으며, 양구대교에서는 1(4월)~151 ind/L(8월)의 범위로 밀도는 소양담보다 낮게 나타났으나, 생물량은 0.1~69.2 $\mu\text{gC/L}$ (8월)로 높게 나타났다(Fig. 3).





2. 원생생물-동물플랑크톤 간의 섭식관계 및 에너지 전달을 평가

본 연구의 여과율 및 C-flux는 대부분 선행 연구 결과의 범위 내에 있었으며, 특히 본 연구와 탄소 전달율의 측정 방법이 유사한 Hwang(1995)의 결과와 가장 유사한 범위를 나타냈다(Table 1).

조사 기간동안 여과율은 대체로 양구대교에서 높은 것으로 나타났다(Table 1).

소양댐앞과 양구대교에서 원생생물에 대한 소형 동물플랑크톤의 여과율은 강우기에 해당하는 6월(소양댐앞, $1.46 \text{ mL} \cdot \mu\text{gdw}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$)과 8월(양구대교, $0.67 \text{ mL} \cdot \mu\text{gdw}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$)에 각각 가장 낮은 여과율을 나타냈으며, 4월에 가장 높은 여과율을 나타냈다(소양댐앞: $16.42 \text{ mL} \cdot \mu\text{gdw}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$, 양구대교: $28.27 \text{ mL} \cdot \mu\text{gdw}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$)(Table. 2).

대형 동물플랑크톤의 여과율은 두 지점 모두 강우기인 8월 가장 낮은 여과율을 보였으며(소양댐 앞: $1.56 \text{ mL} \cdot \mu\text{gdw}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$, 양구대교: $3.31 \text{ mL} \cdot \mu\text{gdw}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$), 9월에 가장 높은 여과율을 나타냈다(소양 댐 앞 $12.46 \text{ mL} \cdot \mu\text{gdw}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$, 양구대교: $38.02 \text{ mL} \cdot \mu\text{gdw}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$)(Table. 2).

원생생물로부터 동물플랑크톤으로의 C-flux는 두 섭식자 모두 9월과 10월을 제외하고는 소양댐앞에서 높은 것으로 나타났다.

두 조사지점에서 소형 동물플랑크톤으로의 C-flux는 소양댐앞은 $0.0016 \mu\text{gC} \cdot \text{L}^{-1} \cdot \text{hr}^{-1}$ (4월)에서 $0.0549 \mu\text{gC} \cdot \text{L}^{-1} \cdot \text{hr}^{-1}$ (5월), 양구대교는 $0.0003 \mu\text{gC} \cdot \text{L}^{-1} \cdot \text{hr}^{-1}$ (6월)에서 $0.0087 \mu\text{gC} \cdot \text{L}^{-1} \cdot \text{hr}^{-1}$ (9월)의 범위를 나타냈다. 각 지점에서의 대형 동물플랑크톤으로의 C-flux는 소양댐앞이 $0.0643 \mu\text{gC} \cdot \text{L}^{-1} \cdot \text{hr}^{-1}$ (9월)에서 $0.5601 \mu\text{gC} \cdot \text{L}^{-1} \cdot \text{hr}^{-1}$ (8월), 양구대교가 $0.0423 \mu\text{gC} \cdot \text{L}^{-1} \cdot \text{hr}^{-1}$ (12월)에서 $1.0823 \mu\text{gC} \cdot \text{L}^{-1} \cdot \text{hr}^{-1}$ (9월)의 범위로 각각 나타났다.

두 지점에서 소형 동물플랑크톤으로의 C-flux는 9월과 10월을 제외하고는 소양댐앞이 높게 나타났으며, 각 지점의 C-flux는 소양댐앞은 $0.0016 \mu\text{gC} \cdot \text{L}^{-1} \cdot \text{hr}^{-1}$ (4월)에서 $0.0549 \mu\text{gC} \cdot \text{L}^{-1} \cdot \text{hr}^{-1}$ (5월), 양구대교는 $0.0003 \mu\text{gC} \cdot \text{L}^{-1} \cdot \text{hr}^{-1}$ (6월)에서 $0.0087 \mu\text{gC} \cdot \text{L}^{-1} \cdot \text{hr}^{-1}$ (9월)의 범위를 나타냈다(Fig. 4).

대형 동물플랑크톤으로의 C-flux는 소형 동물플랑크톤으로의 C-flux에 비해 월등히 높은 것으로 나타나 대형 동물플랑크톤은 원생생물을 섭식하는데 있어서 소형 동물플랑크톤보다 더 중요한 역할을 하는 것으로 나타났다(Fig 4). 이는 MACZ가 MICZ에 비해 높은 섭식율을 가짐으로써(Peter and Downing, 1984; Knoechel and Holby, 1986; Moralities and Lacroix, 1990) 상대적으로 낮은 밀도에서도 먹이 생물에게 상당한 섭식압력을 줄 수 있고(Kim *et al.*, 2003), MACZ의 섭식에 따라 MICZ의 섭식은 크게 쇠약해지기 때문이다(Burkill *et al.*, 1995).

주로 지각류인 MACZ는 큰 몸집을 가지고 여과섭식을 하므로 작은 몸집을 가진 MICZ보다 더욱 효과적으로 먹이 생물의 생물량을 조절하며(Dawidowicz, 1990), 먹이 경쟁을 통한 간접적인 방해나 상처를 입히는 직접적인 방해로 MICZ를 억제할 수 있다(David *et al.*, 2000).

Carrick *et al.*(1991)은 Michigan 호의 원생생물의 군집에 대한 동물플랑크톤의 여과율은 식물플랑크톤에 대한 여과율과 비슷하다는 것을 밝혀 이를 통해 원생생물이 먹이망 상위 영양단계에 대해 중요한 먹이원임을 시사한 바 있다. 본 연구 결과, 소양호 생태계에서 원생생물로부터의 C-flux는 동일한 동물플랑크톤 포식자 그룹에 대한 식물플랑크톤의 C-flux와 비교할 때(한강수계관리위원회, 2006), 댐 앞 지점에서는 총 7회 조사에서 4회(4, 5, 10, 11월), 양구대교에서는 총 8회 조사에서 4회(4, 5, 6, 9월)에 걸쳐 원생생물의 C-flux가 식물플랑크톤에 비해 상대적으로 높게 나타나 소양호 생태계 먹이

망 내에서 상위 영양단계 에너지원으로서 원생생물의 중요성을 보여주었다(Fig 5).

원생생물은 동물플랑크톤에 의해 소비되어 박테리아의 에너지를 classic food chain으로 전달하며 (Lamepert and Sommer, 1997), 이 에너지 흐름은 수생태계 내의 최종섭식자인 어류에게까지 전달이 된다(Stibor *et al.*, 2004). 원생생물로부터 동물플랑크톤으로의 에너지 흐름은 미생물로부터의 에너지 흐름에 대한 규명을 위해 반드시 필요한 부분으로 지속적인 연구가 필요하다.

Table 1. Comparison of literature values of zooplankton clearance rate($\text{mL} \cdot \mu\text{gdw}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$) on protist and protist carbon flux($\mu\text{gC} \cdot \text{L}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$) to zooplankton

Predator	Prey	Clearance rate ($\text{mL} \cdot \mu\text{gdw}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$)	Carbon flux ($\mu\text{gC} \cdot \text{L}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$)	Reference
Macrozooplankton	Nanoflagellate	1.6~6.2	0.008~0.25	Carrick <i>et al.</i> , 1991
<i>Calanus pacificus</i>	Ciliate	12.6~32.4 ^a	6.5 ^b	Fessenden and
<i>Pseudocalanus</i> sp.		4.8~7.4 ^a	4.6 ^b	Cowles, 1994
<i>Centropages abdominalis</i>		1.2~7.1 ^a	0.7 ^b	
<i>Nepcalanus plumchrus</i>	Various protist	16~39 ^a	0.9~1.4 ^b	Gifford and Dagg, 1991
<i>Acartia tonsa</i>	Various protist	-	0.36~1.15 ^b	White and Roman, 1992
Macrozooplankton	Nanoflagellate	0.43~4.03	0.180~3.470	Hwang, 1995 (Nearshore)
Macrozooplankton	Nanoflagellate	3.92~20.99	0.044~0.919	Hwang, 1995 (offshore)
Microzooplankton	Various protist (in situ)	1.46~16.42	0.0016~0.0549	This study (Soyang)
microzooplankton	Various protist (in situ)	0.67~28.27	0.0001~0.0087	This study (Yanggu)
Macrozooplankton	Various protist (in situ)	3.94~12.46	0.0643~0.5601	This study (Soyang)
Macrozooplankton	Various protist (in situ)	1.56~34.13	0.0423~1.0823	This study (Yanggu)
Macrozooplankton	Various protist (in situ)	0.19~9.26	0.048~0.836	Paldang Dam
Macrozooplankton	Various protist (in situ)	0.34~8.38	0.117~4.988	Kyungan Stream
Copepodes	Various protist	-	0.78~2.06	Schnetzer and Caron, 2005
Cyclopoid	Cryptomonas	0.08~0.26	1.3~9.2	Hansen, 2000
Rotifer	Ciliates	0.008~0.029 ^a	0.06~0.04 ^c	Mohr and Adrian, 2002
	HNAN	0.008~0.021 ^a	296~505 ^c	
	PNAN	0.025~0.71 ^a	131~693 ^c	

^a $\text{mL} \cdot \text{ind}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$, ^b $\text{mL} \cdot \text{ind}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$

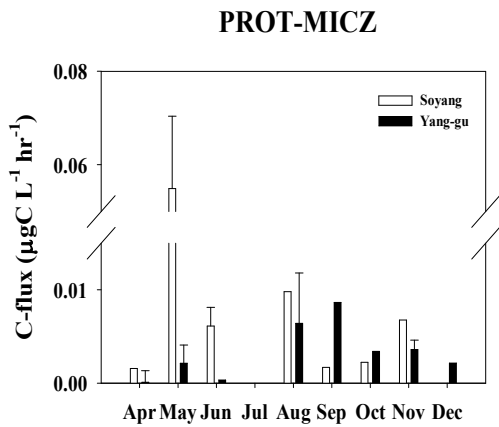
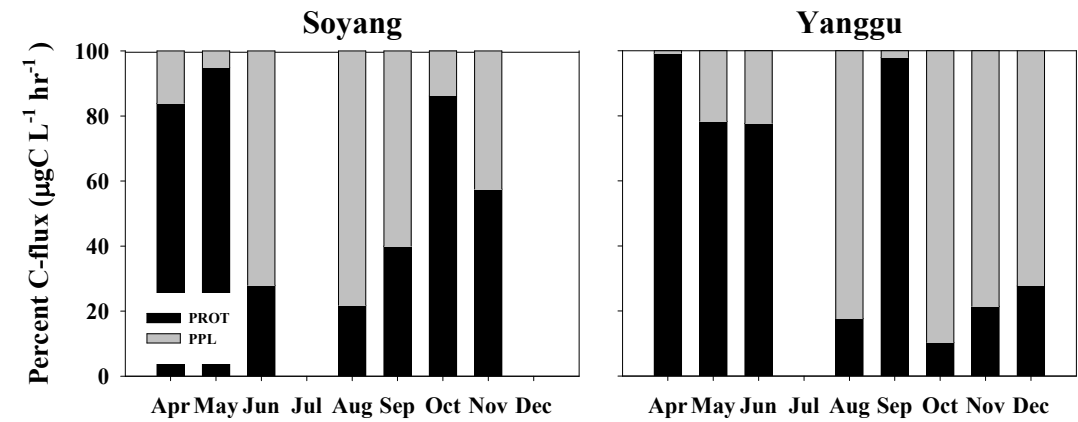


Figure 1. Seasonal change of protomicrobial C-flux in MICZ at Soyung Dam and Yangju Bridge

Table 2. Variation of zooplankton filtering rate (mL · L⁻¹ · d⁻¹) on protists at Soyang Dam and Yanggu Bridge

		Soyang Dam			Yanggu bridge		
		FR	n	r ²	FR	n	r ²
MICZ	Apr	16.42	8	0.78**	28.27	8	0.57*
	May	5.30	8	0.37	26.09	8	0.34
	Jun	1.46	8	0.81***	1.75	8	0.78**
	Aug	2.23	8	0.58*	0.67	8	0.75**
	Sep	3.12	8	0.63*	2.06	8	0.43
	Oct	2.26	8	0.31	3.07	8	0.53*
	Nov	11.59	8	0.46*	5.18	8	0.49*
	Dec	-	-	-	21.75	8	0.64**
MACZ	Apr	-	-	-	-	-	-
	May	-	-	-	-	-	-
	Jun	3.94	8	0.48*	20.83	8	0.64**
	Aug	3.31	8	0.60*	1.56	8	0.68**
	Sep	12.46	8	0.44	38.02	8	0.75**
	Oct	9.50	8	0.45*	2.06	8	0.86***
	Nov	-	-	-	10.37	8	0.94***
	Dec	-	-	-	35.66	8	0.87***

*p<0.05, **p<0.01, ***p<0.001



인용문헌

- 국립환경연구원. 낙동강수계 수중생태계 모델인자 조사.
- 조규송, 1993. 한국담수동물플랑크톤 도감. 아카데미서적.
- 황순진. 2003. 화옹호 조성에 따른 수질오염도 및 생태계 변화추이 조사(II).
- 한강수계관리위원회. 2006. 수중생물 먹이망의 영양동태학 및 에너지 전달.
- Andersen, A. and D. O. Hessen. 1991. Carbon, nitrogen, and phosphorus contents of freshwater zooplankton. *Limnol. Oceanogr.* 36:807-814.
- Azam, F., T. Fenchel, J. G. Field, J. S. Gray, L. A. Meyer-Reil and F. Thngstad. 1983. The ecological role of water column microbes in the sea. *Mar. Ecol. Prog. Ser.* 126:97-102.
- 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.
- Beaver, J. R. and T. L. Crisman. 1989. The role of ciliated protozoa in pelagic freshwater ecosystems. *Microbial Ecol.* 17: 111-136.
- Berninger, U. G., B. J. Finlay and P. Kuuppo-Leinikki. 1991. Protozoan control of bacterial abundances in freshwater. *Limnol. Oceanogr.* 36: 139-147.
- Borsheim, K. Y. and G. Bratbak. 1987. Cell volume to carbon conversion factors for a bacterivorous *Monas* sp. enriched from seawater. *Mar. Ecol. Prog. Ser.* 36: 171-175.
- Caron, D. A. 1983. Technique for enumeration of heterotrophic and phototrophic nanoplankton, using epifluorescent microscopy, and comparison with other procedures. *Appl. Environ. Microbiol.* 46: 491-498.
- Carrick, H. J., G. L. Fahnenstiel, E. F. Stoermer and R. G. Wetzel. 1991. The importance of zooplankton-protozoan trophic couplings 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.
- 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.
- 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.
- Fenchel, T. 1982. Ecology of heterotrophic microflagellates. IV. Quantitative occurrence and importance as bacterial consumers. *Mar. Ecol. Prog. Ser.* 9: 35-42.
- Fessenden, L., T. J. Cowles. 1994. Copepod predation on phagotrophic ciliates in Oregon costal waters. *Mar. Ecol. Prog. Ser.* 107: 103-111.
- Gifford, D. J. and M. J. Dagg. 1991. The microzooplankton-mesozooplankton link: consumption of planktonic protozoa by the calanoid copepods *Acartia tonsa* Dana and *Neocalanus plumchrus*

- Murukawa. Mar Microb. Food Webs 5: 161-177.
- 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.
- Hansen, A. M. 2000. Response of ciliates and *Cryptomonas* to the spring cohort of a cyclopoid copepod in a shallow hypereutrophic lake. J. Plankton Res. 22: 185-203.
- 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.
- Hwang, S. J. and R. T. Heath. 1997. The distribution of protozoa across a trophic gradient, factors controlling their abundance and importance in the plankton food web. J. Plankton Res. 19:491-518.
- 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.
- Hwang, S. J. and R. T. Heath. 1999. Zooplankton bacterivory at coastal and offshore sites of Lake Erie. J. Plankton Res. 21: 699-719.
- 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. Hydrobiologia. 515: 161-179.
- 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 Nackdong River (Korea). Internat. Rev. Hydrobiol. 87: 281-293.
- Laws, E. A., D. G. Redalje, L. W. Haas, P. K. Beinfang and R. W. Eppley. 1984. High phytoplankton growth and production rates in oligotrophic Hawaiian coastal waters. Limnol. Oceanogr. 29: 1161-1169.
- Lehman, J. T. and C. D. Sandgren. 1985. Species-specific rates of growth and grazing loss among freshwater algae. Limnol. Oceanogr. 30: 34-46.
- Mohr, S. and R. Adrian. Effects of *Brachionus calyciflorus* and *Brachionus rubens* on a manipulated freshwater microbial community. J. Plankton Res. 24: 25-31.
- Nagata, T., K. Takai, K. Kawabata, N. Nakanishi and J. Urabe. 1996. The trophic transfer via a picoplankton-flagellate-copepod food chain during a picocyaobacterial bloom in Lake Biwa. Arch. Hydrobiol. 137: 145-160.
- Pomeroy, L. R. 1974. The ocean's web webs: A changing paradigm. Bioscience 24:499-504.
- Porter, K. G., E. B. Sherr, B. F. Sherr, M. Pace, J. Priscu, B. Riemann, D. Scavia and J. Stockner. 1988. Microbial interactions I lake food webs. In: Carpenter, S.R.(ed) Complex interactions in lake communities. 09-227. Springer-Verlag.
- Sanders, R. W., K. G. Porter, S. J. Bennet and A. E. DeBiase. 1989. Seasonal patterns of bacterivory by flagellates, ciliates, rotifers, and cladocerans in a freshwater planktonic community. Limnol. Oceanogr. 34:

673-687.

- Sherr, E. B. and B. F. Sherr. 1988. Role of microbes in pelagic food webs: A revised concept. *Limnol. Oceanogr.* 33: 958-965.
- Sherr, E. B., B. F. Sherr and G. Paffenhofer. 1986. Phagotrophic protozoa as food for metazoans; a missing trophic link in marine pelagic food webs. *Marine Microbial Food Webs*. 1: 61-80.
- Stemberger, R. S. 1979. A guide to rotifers of the Laurentian Great Lakes. EPA-600/4-79-021.
- Strickland, J. D. and T. R. Parsons. 1972. A practical handbook of seawater analysis. *Bulletin of Fisheries Research Board of Canada*, 167: 65-70.
- Vaquer, D. M. Pace and S. Findlay. 1992. Fate of bacterial production in a heterotrophic ecosystem: grazing by protists and metazoans in the Hudson Estuary. *Mar. Ecol. Prog. Ser.* 89: 155-163.
- Weisse, T. and J. G. Stockner. 1993. Eutrophication: the role of microbial food webs. *Mem. Ist. ital. Idrobiol.* 52: 133-150.
- Weisse, T. 1991. The annual cycle of heterotrophic freshwater nanoflagellates: Role of bottom-up versus top-down control. *J. Plankton Res.* 13: 167-185.
- Wylie, J. L. and D. J. Currie. 1991. The relative importance of bacteria and algae as food sources for crustacean zooplankton. *Limnol. Oceanogr.* 36: 708-728.

요 약

본 연구는 소양호 생태계에서 동물플랑크톤이 에너지원으로서의 원생생물의 중요성을 파악하기 위하여 2006년 4월부터 12월까지 총 8회(월 1회)에 걸쳐 소양호 상류부인 양구대교 지점과 댐앞 지점에서 섭식실험을 실시하였으며, 원생생물의 carbon flux의 결과를 식물플랑크톤의 flux 양과 비교·평가하였다. 포식자인 동물플랑크톤은 대형 동물플랑크톤(>200 μ m)과 소형 동물플랑크톤(60~200 μ m)으로 구분하여 섭식실험을 수행하였고 실험방법은 Lehman & Sandgren(1995)과 Hwang(1995)의 방법을 따랐다.

동물플랑크톤에 대한 원생생물의 C-flux를 평가할 때, 소형 동물플랑크톤은 0.0003(6월)~0.0087 μ gC \cdot L⁻¹ \cdot hr⁻¹(9월), 대형동물플랑크톤은 0.0423(12월)~1.0823 μ gC \cdot L⁻¹ \cdot hr⁻¹(9월)의 범위를 나타냈다. 두 지점에서 모두 소형 동물플랑크톤보다 대형 동물플랑크톤으로의 C-flux가 높게 나타났으며, 지점별로는 대체로 봄철과 여름철에는 댐앞에서, 가을철과 겨울철에는 양구대교에서 높은 C-flux를 나타냈다. 동일한 동물플랑크톤 포식자 그룹에 대한 원생생물과 식물플랑크톤의 C-flux를 비교할 때, 댐앞 지점에서는 총 7회 조사에서 4회(4, 5, 10, 11월), 양구대교에서는 총 8회 조사에서 4회(4, 5, 6, 9월)에 걸쳐 원생생물의 C-flux가 식물플랑크톤에 비해 상대적으로 높게 나타나 소양호 생태계 먹이망 내에서 상위 영양단계 에너지원으로서 원생생물의 중요성을 보여주었다.

검색어 : C-flux, 영양동태, 원생생물, 동물플랑크톤, 소양호