

동·식물플랑크톤 군집에 미치는 빛: 영양염 비의 영향

전만식·유광현²·김문숙·박주현¹·박제철^{2,*}

(강원발전연구원, ¹국립환경과학원, ²금오공과대학교 환경공학과)

Effect of Light : Nutrients Ratio on the Zooplankton and Phytoplankton Community. Jun, Mansig, Kwanghyun Ryu², Moonsook Kim, Juhyun Park¹ and Jechul Park^{2,*} (National Kangwon Development Research Institute; ¹National Institute of Environmental Research; ²Environmental Engineering, Kumoh National Institute of Technology)

This study was conducted to identify the influences of light-to-nutrients ratio on the zooplankton and phytoplankton community. Various experiment conditions such as HL (high-light and without zooplankton), HLZ (high-light and with zooplankton), LL (low-light and without zooplankton), and LLZ (low-light and with zooplankton) were adjusted. Changes in biomass of phytoplankton species with the incubation time showed a similar tendency in the continuous cultures, but the change of species composition in the continuous cultures was detected. Cyanophyceae (*Phormidium* sp.) seems to be affected by the existence of zooplankton. Also, the predominant species were Chlorophyceae (*Staurastrum* spp., *S. dorsidentiferum*, *Coelastrum cambricum*, *Chlorella* sp., *Krichneriella* sp.) in a high-light environment and Bacillariophyceae (*Melosyra granulata*, *Synedra acus*, *Fragilaria crotonensis*) in a high-light environment. The estimated mean POC concentration (after twenty days) in a high-light environment was two times higher than that for a low-light environment. P : C ratio of seston component in a low-light environment was higher than that for a high-light environment. Changes in biomass of zooplankton species during the incubation time were higher than that for a high-light environment.

Key words : Light-to-Nutrients ratio, zooplankton and phytoplankton community

서 론

온대지방의 호수에 있어서 플랑크톤 군집구조는 계절 별로 명백한 차이를 보이는데, 수온, 빛 조건, 영양염류, 종간의 경쟁, 포식, 박테리아 및 바이러스의 기생 등의 영향이 복합적으로 작용한다. 이와 같은 수중생태계의 복잡성을 고려하면, 현장에서 일어나고 있는 현상을 여러 가지 환경요인과의 상관관계를 동시에 고찰하는 것은 한계가 있다.

식물플랑크톤이 이용하는 인 및 질소 등의 영양염은

수중생태계 내에서 순환하며, 재이용이 가능한 물질이다. 반면에 빛은 식물플랑크톤에 있어서 유일한 에너지원이며, 태양으로부터 윤택하게 공급받지만 인 및 질소 등의 물질과는 반대로 재이용이 불가능하다. 식물플랑크톤이 받는 빛 에너지의 공급량은 기후 및 기상조건, 수체의 투명도 등의 영향을 받는다. 또한 수중에서 식물플랑크톤의 발달은 물의 혼합층 및 호수의 깊이, 최대 수심 등에 의해서도 영향을 받는 등 시·공간적으로 매우 다양하고 복잡하다. 이러한 빛의 복잡성 때문에 빛의 강도가 동·식물플랑크톤의 종조성 및 생산에 미치는 영향에 대한 연구는 거의 없는 실정이다. 식물플랑크톤이 하루에 받는

* Corresponding author: Tel: 054) 478-7633, Fax: 054) 478-7859, E-mail: pjc1963@kumoh.ac.kr

빛 에너지량은 동일하나 조사 주기의 간격 변화에 따른 종간의 경쟁에 대한 연구는 많이 이루어져 있다. 이들 대부분의 연구는 식물플랑크톤 종들의 광합성 및 호흡과 관련한 생리생태적인 것으로 종들의 성장률에 관한 것이 대부분이다(Sommer, 1984; Suttle *et al.*, 1987; Litchman, 1998; Litchman and Klausmeier, 2001).

이외에도 식물플랑크톤에 공급되는 빛:영양염의 비에 따라 동물플랑크톤의 생산에 미치는 영향에 대해서 활발한 연구가 이루어졌다(Elser and Henssen, 1992; Sommer, 1992; Sterner, 1992; Urabe and Watanabe, 1992; Urabe *et al.*, 2002). 이들의 연구는 동물플랑크톤의 영양특성과 먹이인 식물플랑크톤의 영양상태에 따른 성장 및 생산특성의 변화를 “생태학적 화학량론”의 관점에서부터 해석하였다. 동물플랑크톤의 성장 및 생산은 먹이가 되는 식물플랑크톤의 현존량만이 아닌 세포 내의 인 및 질소의 함유량에 의해 큰 영향을 받는다는 것이 명백히 밝혀졌다. 즉, 동물플랑크톤 현존량은 빛이 제한된 환경에서 빛의 강도가 증가할수록 증가한다. 이것은 식물플랑크톤의 증식량과 비례하여 동물플랑크톤의 현존량도 증가한다. 그러나, 빛 에너지량이 증가하여 빛보다는 영양염(특히, 인)이 제한이 되는 조건이 되면 빛의 강도가 높아질수록 식물플랑크톤의 현존량은 증가함에도 불구하고 동물플랑크톤의 증식은 감소한다. 이것들은 동물플랑크톤의 증식에는 먹이원인 식물플랑크톤의 양은 물론 질(P:C 비)에도 영향을 받는 것이기 때문이다. 빛이 충분히 있으면, 식물플랑크톤은 광합성을 하여 무기탄소를 유기물로써 고정한다. 그러나 인 등의 영양염이 적으면 세포 내의 인 함량이 탄소에 비하여 적어지므로 포식자의 먹이원으로서의 가치는 적어진다. 즉, 식물플랑크톤과 포식자 사이의 생태전환 효율은 식물플랑크톤에 대한 빛:영양염 공급의 비율에 의존한다. 지금까지의 많은 연구 결과에서도 영양염 공급이 적은 경우에는 빛의 증가가 식물플랑크톤의 성장을 촉진시키지만, 동물플랑크톤의 생장은 오히려 저하된다는 것이 실증되었다.

인 함량이 낮은 식물플랑크톤을 먹이원으로 하였을 때 *Daphnia*는 생장에 제한을 받았으며(Sterner *et al.*, 1993), *Bosmina*의 생장은 *Daphnia*에 비하여 인 요구량(식물플랑크톤의 인 함량)이 낮게 나타났다(Schulz and Sterner, 1999). 이와 같이 각 동물플랑크톤 종들의 생장에는 이와 같이 먹이의 질에 영향을 받으나 각 종마다 인 요구량은 다를 것이고, 또한 식물플랑크톤(먹이)의 종 구성에 따라 서로 차이를 보일 것으로 예상된다. 그럼에도 불구하고 지금까지의 연구는 대부분이 포식자(*Daphnia* 또는 *Bosmina*) 1종, 피식자(*Scenedesmus*) 1종을 이용한 단지

먹고 먹히는 관계에서의 결과들이다. 실제 자연 수생태계에서의 먹고 먹히는 관계는 2종에서의 관계와는 달리 매우 복잡하다. 한 예로, 식물플랑크톤이 동물플랑크톤으로 직접 영양이 전달되는 경로가 있지만, 박테리아나 원생동물의 경로를 거쳐 동물플랑크톤의 증식에 더욱 영향을 준다는 보고가 있다. 또한, 식물플랑크톤 종들의 세포크기, 체적, 세포의 표면적/체적 비 등의 형태적인 것도 동물플랑크톤의 증식에 중요한 영향을 미칠 것으로 사료된다. 이러한 복잡한 플랑크톤 군집은 단지 먹고 먹히는 2종만의 관계로의 해석만으로는 수계에서 일어나는 현상을 올바르게 평가하지 못할 것이다.

따라서 본 연구에서는 식물플랑크톤 종조성, 동물플랑크톤 증식 및 먹이망 구조에 미치는 빛과 영양염의 공급 효과에 대하여 알아보았다. 빛과 영양염의 공급에 따른 기존의 가설 및 2종만(포식자 1종, 피식자 1종)을 이용한 연구 결과와 본 연구의 플랑크톤 군집을 이용한 연구 결과에 대해서도 고찰하였다.

재료 및 방법

연속배양 실험은 일본 교토대학 생태학연구센터에 설치되어 있는 60 리터(직경 40 cm, 깊이 60 cm) 스테인레스 탱크를 이용하였다. 배양은 COMBO 배지를 1/2.5배로 희석하여 사용하였으며(Kilham *et al.*, 1998), 무기인과 무기질소 농도는 비와호의 평균 총인 및 총질소농도 수준인 0.5 μM 및 40 μM 로 조절하였다. 빛의 조건은 배양수의 수면 바로 아래를 51~57(약광) 및 285~335 $\mu\text{E m}^{-2} \text{s}^{-1}$ (강광)로 조절하였다. L:D cycle은 14:10시간, 온도는 $20 \pm 0.3^\circ\text{C}$, 배양수의 희석율은 0.07 day^{-1} 로 조절하였다. 탱크의 밑면에는 100 μm 공극의 스크린을 설치하여 동물플랑크톤이 계외로의 이동을 방지하였으며, 100 μm 이하의 생물군집과 배양액은 사이폰으로 배출되도록 설치하였다.

실험에 사용한 플랑크톤은 비와호 중심부 표층(0~10 m)의 자연군집을 이용하였다. 동물플랑크톤이 존재하는 조건의 탱크에는 인공배지 53리터에 20 μm 플랑크톤 네트로 호소수 60리터를 약 1리터로 농축한 것과 20 μm 이하의 여과액 6리터를 접종하였다. 동물플랑크톤이 없는 조건은 인공배지 53리터에 20 μm 이하의 여과액 6리터와 호소수 60리터를 약 1리터로 농축한 것을 질소 가스로 2시간 동안 노출시켜 동물플랑크톤을 사멸시킨 후 접종하였다. 즉 실험은 빛 에너지의 강약과 동물플랑크톤 유무의 4가지 조건(약광: LL, 약광+동물플랑크톤: LLZ,

강광: HL, 강광+동물플랑크톤: HLZ)에서 같은 조건을 3 개씩 총 12탱크에서 실시하였다.

배양은 70일간 이루어졌으며, 시료채취는 주 2회(화요일, 금요일) 실시하였다. 시료의 채취는 탱크 내를 균일하게 혼합한 후 1리터를 채취하여 식물플랑크톤, POC 및 영양염류의 분석에 사용하였다. 동물플랑크톤의 시료는 12리터(금요일) 또는 16리터(화요일)를 100µm 네트를 사용하여 채취하였으며, 네트를 통과한 여과액은 탱크 내로 다시 넣어 주었다. 동물플랑크톤을 포함한 100µm 이상의 생물 및 detritus의 제거량은 3일 또는 4일간 유입한 배지의 양과 동일하다. 동물플랑크톤의 종조성 및 생체량 조사를 위한 시료는 4% sucrose-formalin으로 고정하였다. 대형 동물플랑크톤의 건조 중량은 Culner *et al.* (1985) 및 Kawabata and Urabe (1998)이 제시한 체장-체중 식을 이용하여 계산하였다. 채취한 1리터 시료의 일부는 유리섬유 여과지(Whatman GF/F)로 여과하여 여과지의 seston은 엽록소 *a* 및 입자성유기탄소(POC)를 측정하였고, 여과액은 무기영양염 분석에 사용하였다. 엽록소 *a* 농도는 90% 아세톤으로 24시간 추출하여 형광광도계로 측정하였으며, POC 및 PON은 CHN 분석기(Perkin-Elmer model 2400)를 이용하여 측정하였다. 용존무기인(DIP)의 분석은 ascorbic acid법으로(APHA, 1995), 총인(TP)과 용존총인(DTP)은 각각 시료 원수와 GF/F로 여과된 여과액을 potassium persulfate로 분해(120°C)한 후 ascorbic acid법으로 측정하였다. 입자성 유기인(POP)은 총인과 용존총인의 차로써 계산하였다.

식물플랑크톤의 계수용 시료는 Lugol's iodine 용액으로 최종농도 2%되도록 첨가하여 침강 농축하여 이용하였다. 식물플랑크톤 종의 분류는 광학현미경을 이용하여 속명 또는 종명의 수준까지 Mizuno (1975)의 분류 체계를 기준으로 하였다. 세포체적은 Ichise *et al.* (1995)를 이용하였으며, 이외의 종에 대해서는 50세포 이상의 길이를 측정하여 Willen (1976) 및 Wetzel and Likens (1990)의 계산방법을 이용하였다.

결 과

강광 조건에서의 평균(20일 이후) POC 농도는 약광의 조건보다 약 2배 높은 농도를 보였다(Fig. 1). 반면에 seston의 P/C 비는 약광의 조건이 강광의 조건보다 다소 높은 값을 보였다. 또한 강광(HL, HLZ) 조건에서 P/C 비는 배양 초기의 0.01 이상에서 10일 후에는 0.004로 급격히 낮아졌으며, 약광(LL, LLZ) 조건에서는 낮아지는 시기가

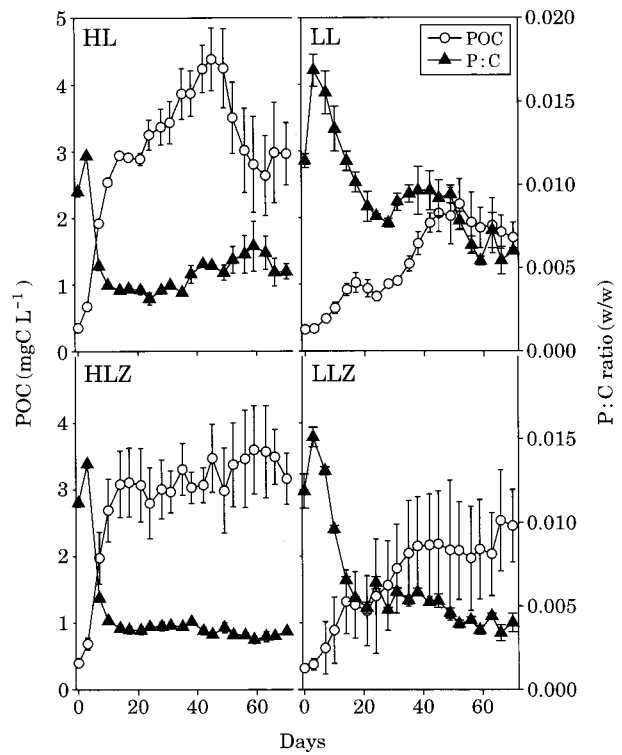


Fig. 1. Changes in POC concentrations and P : C ratio of particulate organic matter during the incubation time. Vertical lines represent standard deviations on the mean of three samples. HL: High-Light and without zooplankton; HLZ: High-Light and with Zooplankton; LL: Low-Light and without zooplankton; LLZ: Low-Light and with Zooplankton.

다소 늦어졌다.

배양시간에 따른 식물플랑크톤의 총 체적은 모든 배양 조건에서 거의 같은 경향을 보였다(Fig. 2). 또한 출현하는 종의 종류는 배양조건과 배양시간에 따라 차이를 보였으나, 우점종의 종류는 배양조건에 따라 큰 차이는 없어, Fig. 2에 제시한 9종이 총 현존량의 95% 이상을 차지하였다. 그러나 종별로의 현존량은 배양조건에 따라 현저한 차이를 보였다.

강광의 조건에서는 녹조류인 *Staurastrum* spp. (주로 *S. dorsidentiferum*), *Coelastrum cambricum* 그리고 작은 단세포인 *Chlorella* sp. 및 *Krichneriella* sp.가 우점을 하였다. 반면에 약광의 조건에서는 규조류인 *Melosyra granulata*, *Synedra acus* 및 *Fragilaria crotonensis*가 우점하였다. 중심목 규조류인 *Stephanodiscus* sp. 및 *Cyclotella* sp.는 낮은 현존량이었지만 배양기간 내내 안정하게 유지하였다. 즉 녹조류는 강광의 조건에서, 규조류는 약광의 조건에서 우점하는 것으로 나타났다. 사상체 남조류

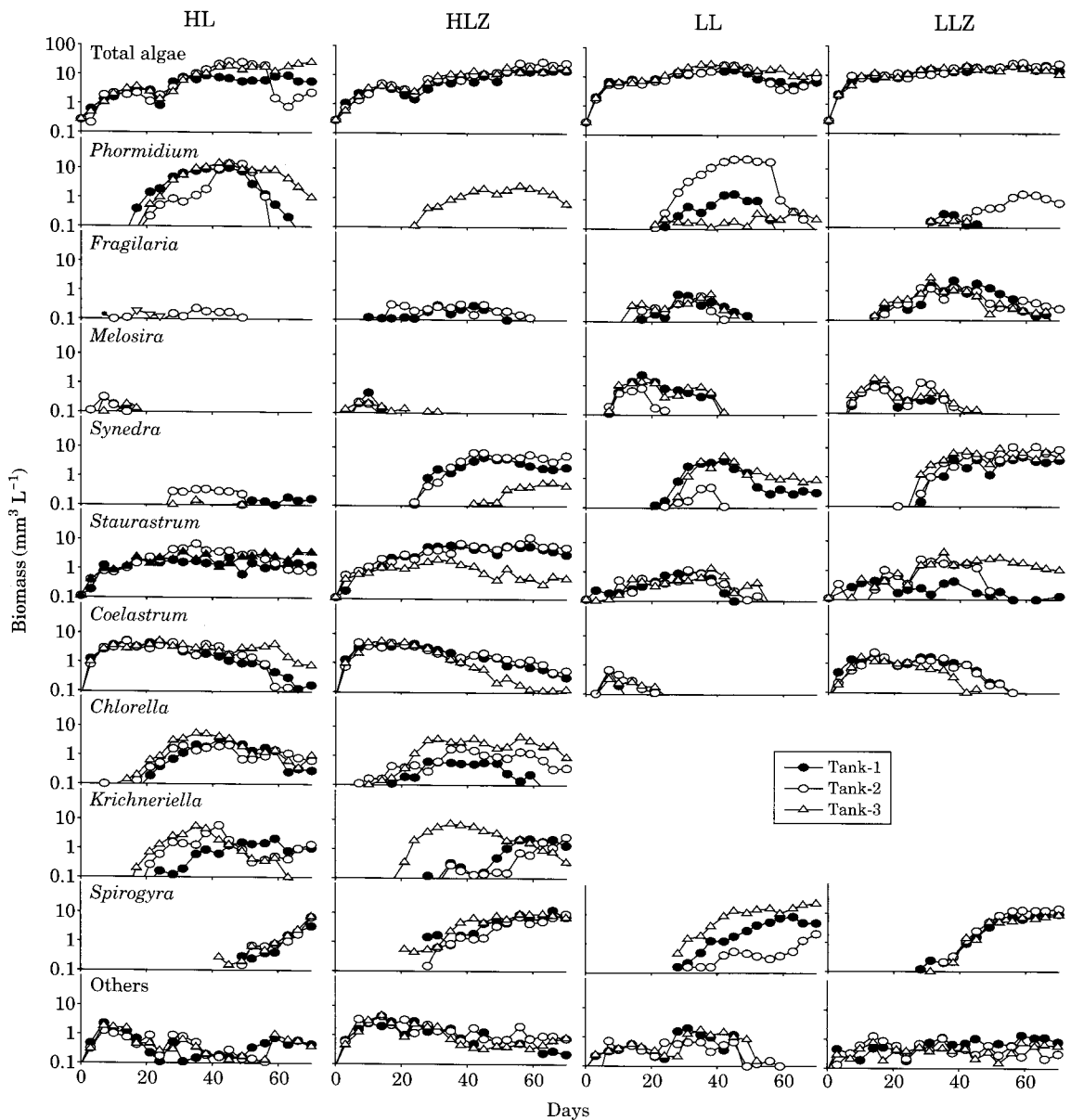


Fig. 2. Changes in biovolume of algal species during the incubation time.

인 *Phormidium* sp.의 현존량은 빛의 강약보다는 동물플랑크톤 유무의 영향을 받아 동물플랑크톤이 없는 조건(HL, LL)에서 있는 조건(HLZ, LLZ)보다 현저히 높은 현존량을 보였다.

따라서 녹조류와 규조류는 빛의 강도에 영향을 받았고, 남조류(*Phormidium* sp.)는 포식자에 의한 영향을 크게 받았다. 본 배양에서 우점하는 9종의 현존량은 배양시간에 따라 3가지 종류의 패턴을 보였다. *Staurastrum*, *Coelastrum*과 같이 배양초기부터 증식하여 배양 끝까지 안

정하게 현존량을 유지하는 종, *Synedra*, *Spirogyra*와 같이 배양도중에 증식하여 안정화하는 종, *Fragilaria*, *Melosira* 및 약광 조건에서의 *Coelastrum*과 같이 초기에 증식하였다가 배양 중간에 소멸하는 종으로 구분되었다. HL 및 HLZ 조건에서의 *Staurastrum*과 HLZ 및 LLZ 조건에서의 *Synedra*, 모든 조건에서의 *Spirogyra*를 제외하면 배양 약 40일 후부터 대부분의 식물플랑크톤 현존량이 현저히 감소하는 경향을 보였다. 이 중에서 특히 배양 30~40일 후부터 증식한 사상체 녹조류인 *Spirogyra*는 배양

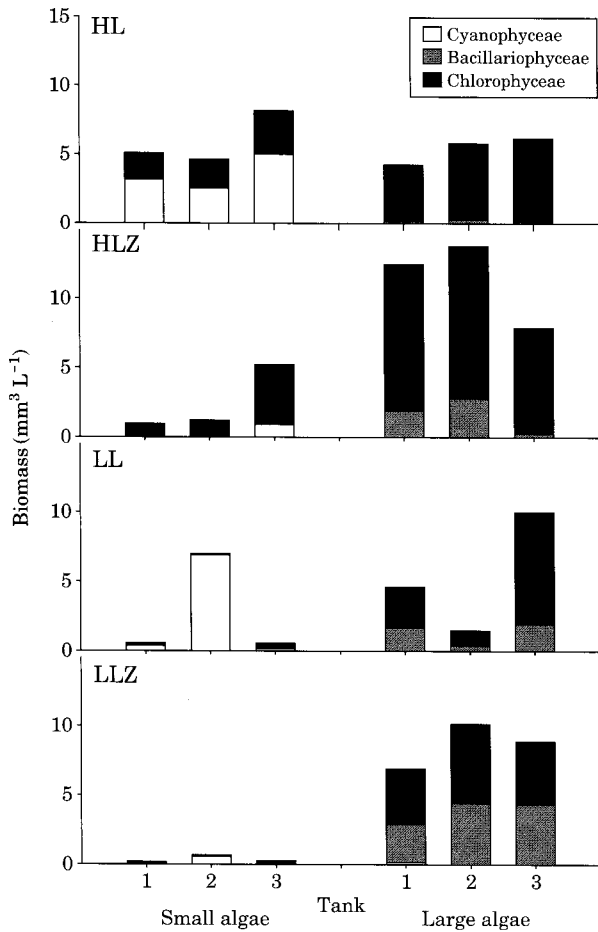


Fig. 3. Average biomass of algal group (phylum) with the individual algal biovolume of cell, colony or filament from 20 to 70 days.

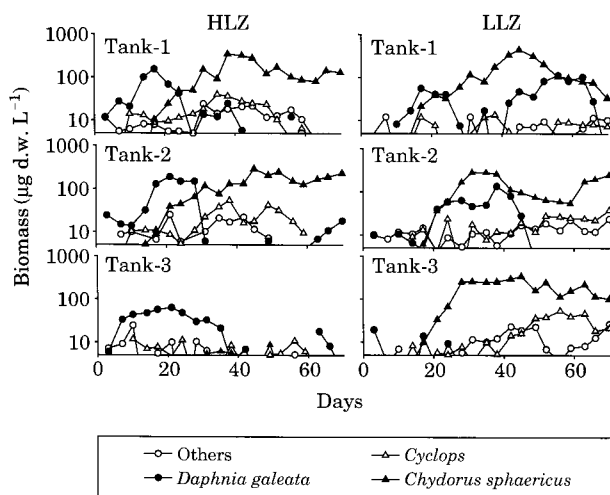


Fig. 4. Changes in total and three dominant zooplankton biomass during the incubation time.

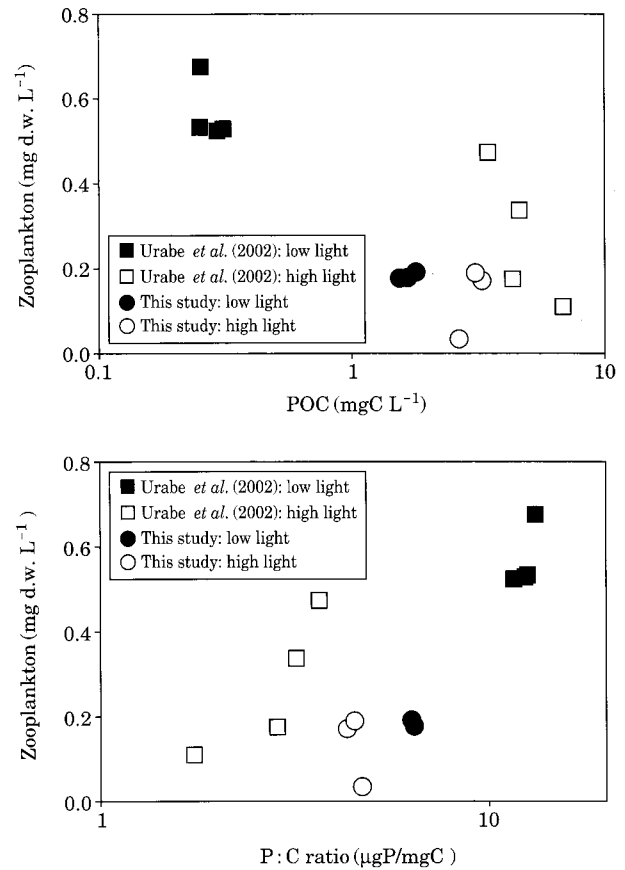


Fig. 5. Relationships between POC and P:C ratio, and zooplankton biomass in this study and previous study (Urabe et al., 2002). Data was used average value 9 to 69 days during the culture period.

최종일까지 점차 현존량이 증가하였다. Fig. 3은 배양 조건별로 동물플랑크톤이 포식하기 용이한 ($< 3,000 \mu\text{m}^3$) 식물플랑크톤 현존량과 크기가 커 용이하지 못한 ($> 3,000 \mu\text{m}^3$) 식물플랑크톤 현존량을 종류별 (phylum)로 구분하였다. HL 조건에서 작은 크기의 식물플랑크톤 현존량은 $5 \text{ mm}^3 \text{L}^{-1}$ 의 수준으로 다른 조건보다 현저히 높게 나타났으며, 남조류와 녹조류가 대부분을 차지하였다.

약광의 조건에서 LL의 tank-2를 제외하면, 작은 세포의 식물플랑크톤의 현존량은 매우 적은 것으로 나타났다. 또한 동물플랑크톤이 들어 있는 조건에서는 (HLZ, LLZ) 없는 조건보다 (HL, LL) 크기가 큰 식물플랑크톤 종류의 현존량이 높게 나타났다.

대형 동물플랑크톤의 총 생체량 및 우점종별 생체량을 Fig. 4에 제시하였다. 부착성 생물 및 detritus를 주로 섭식하는 *Chydorus*를 제외하면, *Daphnia*와 *Cyclops*의 평균 생체량은 총 생체량의 각각 83%와 79%를 차지하였

다. HLZ 조건에서의 대형 동물플랑크톤 현존량은 배양 전반기에 많은 반면, LLZ 조건에서는 배양 후반기에 높은 현존량을 보였다. HLZ 조건에서의 tank-2에서 대형 동물플랑크톤 현존량은 배양 15~35일 사이에 평균 $145 \mu\text{g d.w. L}^{-1}$ 으로 상대적으로 현저히 높은 값을 보였다.

Fig. 5는 단지 먹고 먹히는 관계의 2종만(*Scenedesmus*, *Daphnia*)을 이용한 경우와 자연군집을 이용한 경우의 POC 및 P:C 비와 동물플랑크톤 현존량과의 상관관계를 나타낸 것이다. 낮은 광 조건에서 2종만의 배양에서는 비록 먹이원인 식물플랑크톤(POC)의 현존량이 적음에도 불구하고, 동물플랑크톤의 현존량은 높은 광 조건에서 보다 높게 나타났다. 반대로 빛의 강도가 높은 조건에서는 동물플랑크톤의 먹이원은 풍부하지만 동물플랑크톤의 현존량은 낮게 나타났다. POC의 농도에 영향을 받은 P:C 비는 빛이 강할 때 낮고, 약할 때 높은 값을 보였다. 본 연구(자연군집)에서는 빛의 강약에 영향 없이 동물플랑크톤의 현존량은 $0.2 \text{ mg d.w. L}^{-1}$ 의 수준으로 낮게 나타났다. 또한 2종만의 실험 결과에서는 빛:영양염 비에 따라 POC 농도 및 P:C 비는 많은 차이를 보인 반면에 자연군집의 경우에는 2종만의 결과와 같은 경향은 있지만 확연한 차이는 볼 수 없었다.

고 찰

본 연구에서는 빛:영양염 비 및 동물플랑크톤 유무의 조건에 관계없이 식물플랑크톤의 총 현존량은 거의 같은 경향을 보였다. 이러한 이유는 약광의 조건에서도 식물플랑크톤이 빛에 의한 제한보다는 인에 의한 제한이 크게 작용했기 때문으로 사료된다. 즉, 강광의 조건은 물론 약광의 조건에서도 유입되는 물질(인)을 모두 이용하여 생체량의 증식에 이용했기 때문으로 사료된다. 또한 HLZ 조건에서의 평균 P:C 비는 0.0041, LLZ 조건에서의 P:C 비는 0.005의 값을 보였다. 이 값은 Redfield 비의 0.024보다 매우 낮은 수준으로 약광의 조건에서도 빛보다는 인에 의한 제한이 크게 작용하였다는 것을 알 수 있었다. 더구나 본 P:C 비는 식물플랑크톤만의 P:C 비가 아니고 동물플랑크톤, 박테리아를 포함한 수중의 모든 생물군집과 detritus가 포함된 P:C 비로, 식물플랑크톤만의 P:C 비를 고려한다면 현재의 값보다 더욱 낮아질 것으로 예상된다. 이와 같이 약광의 조건에서도 P:C 비가 낮은 이유 중의 하나는 배양수의 회석율이 0.07 day^{-1} 로 배양조 내로 들어오는 빛 에너지보다 상대적으로 인의 양이 적었기 때문으로 사료된다. 또한 부착생물군집의 증식이 식

물플랑크톤 P:C 비를 낮추게 하였던 하나의 원인으로 사료된다. 부착조류를 포함한 부착생물군집의 발달은 상대적으로 식물플랑크톤이 이용할 수 있는 물질(인)의 양이 적어졌기 때문이었다.

식물플랑크톤의 총 현존량은 거의 동일하나 배양조건에 따라서는 종별 현존량은 현저한 차이를 보였다. 높은 빛:영양염 비의 조건에서는 녹조류가 낮은 빛:영양염 비의 조건에서는 규조류가 우점하였다. 식물플랑크톤의 우점 군집은 포식자보다는 빛:영양염 비에 의한 영향을 크게 받은 것으로 나타났다. 그러나 사상체 남조류인 *Phormidium* sp.는 빛:영양염 비보다는 포식자에 의한 영향을 크게 받았다. 빛의 강도에 따른 식물플랑크톤의 우점 군집이 온대지역 담수에서의 혼합층 깊이에 따른 계절적인 식물플랑크톤의 천이 양상과 비슷한 결과를 얻었다. 즉 혼합층이 깊은 시기인 봄에는 식물플랑크톤이 받는 빛의 절대적인 양은 낮아지기 때문에 약광의 조건, 수온 약층이 발달한 시기에는 혼합층의 깊이가 낮은 여름이 강광의 조건과 비슷하게 된다. 즉 온대지방에서는 혼합층의 깊이가 깊어지는 시기인 봄과 가을에 규조류가 우점하는 경우가 많은데, 본 연구의 약광의 조건과 같으며, 혼합층의 깊이가 낮은 시기인 여름에는 녹조류 또는 남조류가 우점하는 경우가 많은데, 본 연구의 강광 조건에서와 거의 일치하였다. 자연계에서의 식물플랑크톤 발달에 대한 제한요인은 강광의 조건에서 약광의 조건보다 상대적으로 인의 제한이 크게 나타난다. 본 연구에서는 강광의 조건에서 *Chlorella* sp. 및 *Kirchneriella* sp.와 같은 작은 단세포가 매우 높은 현존량(세포수)을 보였다. 세포의 체적은 각각 $65 \mu\text{m}^3$ 와 $100 \mu\text{m}^3$ 로 나타났는데, 이와 같은 작은 세포의 녹조류는 큰 세포의 식물플랑크톤보다 체적당 표면적이 넓어 인이 강하게 제한되는 수역에서 우점하는 경우가 많다(Shuter, 1978; Schlesinger *et al.*, 1981; Smith and Kalff, 1982; Sommer, 1986). 또한, 강광의 조건에서 규조류 중에서 단지 *Synedra*만이 공존을 하였는데, 이중 세포의 크기는 크지만 인이 제한되는 환경에서 다른 조류와의 경쟁에서 유리하다는 많은 보고가 있다(Tilman, 1977; Sommer, 1983, 1985; Kilham, 1986).

동물플랑크톤은 영양특성과 먹이인 식물플랑크톤의 영양상태에 따라 성장 및 생산특성의 변화를 "생태학적 화학량론"의 관점으로부터 해석한 연구가 활발하게 진행되어 왔다(Elser and Henssen, 1992; Sommer, 1992; Sterner, 1992; Urabe and Watanabe, 1992; Urabe *et al.*, 2002). 동물플랑크톤의 성장 및 생산은 먹이가 되는 식물플랑크톤의 현존량 뿐만이 아닌 세포 내의 인 및 질소의 함유량에 의해 큰 영향을 받는다는 것이 명백히 밝혀졌다. 또

한, 식물플랑크톤의 인 함유량이 질소 함유량에 비해 적은 경우 동물플랑크톤은 인은 흡수하지만 여분의 질소는 배설하는 등, 먹이와 소비자의 화학조성 불일치가 담수에서의 물질순환을 변화시킨다. 담수생태계에 있어서 빛과 영양염의 환경변화가 식물플랑크톤의 인 및 탄소 등의 화학조성의 변화를 가져오고 동물플랑크톤의 생산 및 군집구조에 영향을 미칠 것이다. Urabe and Sterner (1996)의 보고에 의하면, *Daphnia*의 현존량은 약광의 조건에서 강광의 조건보다 높게 나타났다. 이것은 비록 현존량은 적지만 높은 P:C 비에 따른 먹이의 질이 좋기 때문이고, 반대로 강광에서는 먹이의 양은 많지만 낮은 P:C 비로 질이 나쁘기 때문이다. 그러나 본 연구에서는 빛의 강약에 관계없이 동물플랑크톤의 현존량은 단일종을 이용한 연구 결과보다 상대적으로 낮게 나타났다. 또한 빛:영양염 비에 따른 POC 및 P:C 비는 단일종을 이용하였을 때보다 현저한 차이는 볼 수 없었다. 이러한 원인은 첫째로 동물플랑크톤의 포식에 따른 영향으로 식물플랑크톤 종조성의 변화이다. 즉, 동물플랑크톤에 잡아먹히기 어려운 형태 및 크기의 식물플랑크톤이 발달을 하고 먹히기 쉬운 식물플랑크톤은 적어지기 때문이다. 동물플랑크톤은 선호하는 크기의 식물플랑크톤을 선택적으로 포식하여 식물플랑크톤 종조성의 변화를 가져왔던 것으로 사료된다 (Porter, 1977; Vanni, 1987). 반대로, 피드백 효과에 의해 동물플랑크톤 군집 자신은 식물플랑크톤의 종조성의 영향을 받아 종에 따라 소멸하거나, 증식하였기 때문이었다. 둘째로는 약광의 조건에서도 잘 증식할 수 있는 종들이 증식하였기 때문으로 사료된다. 즉, 식물플랑크톤은 종에 따라 빛의 최적 요구량이 다르게 나타나는데, 주어진 약광의 조건에서도 증식하기에 인보다도 상대적으로 충분한 빛 에너지는 공급을 받았을 것으로 사료된다.

본 연구에서는 동물플랑크톤의 유무에 관계없이 *Chydorus sphaericus*가 모두 출현하였으며, 현존량도 다른 동물플랑크톤에 비하여 현저히 높게 나타났다. 동물플랑크톤이 없는 조건에서도 출현한 원인은 질소 가스에 의한 질식사하지 않았을 가능성과, 배양 중에 알이 부하하여 증식한 것으로 사료된다. 온대지방 호수 및 저수지의 연안대에서는 크기가 작은 *Chydorus sphaericus* 및 *Bosmina* spp. 등의 갑각류가 크기가 큰 *Daphnia* spp.와 같은 종보다는 일반적으로 현존량이 많다. 그럼에도 불구하고, 대부분의 연구는 크기가 큰 갑각류에 대해서 집중되고 있는 실정이다. 따라서 연안대에서는 상대적으로 물질순환 및 수생태계에 미치는 중요도가 높음에도 불구하고 작은 크기의 갑각류에 대한 연구는 매우 미비한 상태이다. 부영양 호수에서는 가끔 동물플랑크톤의 먹이원이 조

류보다 detritus에 부착한 박테리아가 중요한 역할을 차지하는 경우가 있다 (Mann 1988; Meijer et al., 1990; Gons et al., 1992). *Chydorus sphaericus*는 물속에서 움직임이 둔하고 바닥층이나 수생식물과 같은 기질을 기어다니며 활동을 한다. 따라서 *Chydorus sphaericus*는 부유하는 식물플랑크톤은 잘 섭식 못하고 부착생물 막이나 detritus를 먹을 것으로 사료된다. 예를 들어, Tjeukemeer호에서는 detritus가 80%, 식물플랑크톤이 20%의 비중을 차지하여, detritus가 *Chydorus sphaericus*에 있어서 좋은 먹이원이 되는 것으로 나타났다 (Vijverberg, 1989).

본 연구의 자연군집을 이용한 실험적 결과는 기존의 "빛:영양염 비에 따른 동물플랑크톤의 증식"에 대한 이론적인 가설 및 실험적 결과와 일치하지 않았다. 그것은, 동물플랑크톤 현존량의 감소는 실질적으로 식물플랑크톤의 현존량을 높이는 결과를 가져왔고, 먹기 쉬운 식물플랑크톤은 감소하고 먹기 어려운 큰 크기의 식물플랑크톤이 증가하였다. 특히 약광 조건에서 작은 크기의 식물플랑크톤은 감소하고 큰 크기의 식물플랑크톤은 증가하였으며, 또한 약광에서도 잘 증식할 수 있는 능력을 가진 큰 크기의 식물플랑크톤은 결국 낮은 P:C 비를 갖게 되는 결과를 초래하였다.

적 요

본 연구에서는 식물플랑크톤 종조성, 동물플랑크톤 증식 및 먹이망 구조에 미치는 빛:영양염 비에 대한 영향을 알아보았다. 실험조건은 빛 에너지의 강약과 동물플랑크톤 유무(약광: LL, 약광+동물플랑크톤: LLZ, 강광: HL, 강광+동물플랑크톤: HLZ)등의 다양한 방법으로 조절하였다. 배양시간에 따른 식물플랑크톤의 총 현존량은 모든 배양조건에서 유사한 경향을 보였으나, 종조성은 배양조건에 따라 차이를 보였다. 녹조류(*Staurastrum* spp., *S. dorsidentiferum*, *Coelastrum cambricum*, *Chlorella* sp., *Krichneriella* sp.)는 강광의 조건에서, 규조류(*Melosyra granulata*, *Synedra acus*, *Fragilaria crotonensis*)는 약광의 조건에서 우점하는 것으로 나타났지만, 남조류(*Phormidium* sp.)는 포식자에 의한 영향을 크게 받는 것으로 조사되었다. 강광 조건에서의 평균 POC 농도(20일 이후)는 약광의 조건보다 약 2배 높은 농도를 보였다. 반면에 seston의 P/C 비는 약광의 조건이 강광의 조건보다 높게 나타났다. 배양시간에 따른 동물플랑크톤의 총 현존량은 강광의 조건이 약광의 조건보다 높게 나타났다.

사 사

본 연구는 “금오공과대학교 국외장기연수지원비”에 의해 수행되었음.

인 용 문 헌

- APHA. 1992. Standard methods for the examination of water and wastewater, 18th ed.. American Public Health Association, Washington, DC.
- Bergquist, A.M., S.R. Carpenter and J.C. Latino. 1985. Shifts in phytoplankton size structure and community composition during grazing by contrasting zooplankton assemblages. *Limnol. Oceanogr.* **30**: 1037-1045.
- Kawabata, K. and J. Urabe. 1998. Length-weight relationships of eight freshwater planktonic crustacean species in Japan. *Freshwater Biology.* **39**: 199-206.
- Kilham, S.S. 1984. Silicon and phosphorus growth kinetics and competitive interactions between *Stephanodiscus minutus* and *Synedra* sp. *Verh. Int. Ver. Limnol.* **22**: 435-439.
- Kilham, S.S., D.A. Kreeger, S.G. Lynn, C.E. Goulden and L. Herrera. 1998. COMBO: a defined freshwater culture medium for algae and zooplankton. *Hydrobiologia* **377**: 147-159.
- Litchman, E. 1998. Population and community responses of phytoplankton to fluctuating light. *Oecologia* **117**: 247-257.
- Litchman, E. and C.A. Klausmeier. 2001. Competition of phytoplankton under fluctuating light. *Am. Nat.* **157**: 170-187.
- Mizuno, T. 1975. Illustrations of the freshwater plankton of Japan (in Japanese). Hoikusha Publishing Co., LTD.
- Porter, K.G. 1977. The plant-animal interface in freshwater ecosystems. *Am. Sci.* **65**: 159-170.
- Schlesinger, D.A., L.A. Molot and B.J. Shuter. 1981. Specific growth rates of freshwater algae in relation to cell size and light intensity. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.* **38**: 1052-1058.
- Schulz, K.L. and R.W. Sterner. 1999. Phytoplankton phosphorus limitation and food quality for *Bosmina*. *Limnol. Oceanogr.* **44**: 1549-1556.
- Shuter, B.J. 1978. Size dependence of phosphorus and nitrogen subsistence quotas in unicellular microorganisms. *Limnol. Oceanogr.* **23**: 1248-1255.
- Smith, R.E.H. and J. Kalff 1982. Size-dependent phosphorus uptake kinetics and cell quota in phytoplankton. *J. Phycol.* **18**: 275-284.
- Smith, R.E.H. and J. Kalff. 1983. Competition for phosphorus among co-occurring freshwater phytoplankton. *Limnol. Oceanogr.* **28**(3): 448-464.
- Sommer, U. 1983. Nutrient competition between phytoplankton species in multispecies chemostat experiments. *Arch Hydrobiol.* **96**: 399-416.
- Sommer, U. 1984. The paradox of the plankton: Fluctuations of phosphorus availability maintain diversity of phytoplankton in flow-through cultures. *Limnol. Oceanogr.* **29**(3): 633-636.
- Sommer, U. 1986. Phytoplankton competition along a gradient of dilution rates. *Oecologia* **68**: 503-506.
- Sommer, U. 1992. Phosphorus-limited *Daphnia*: Intraspecific facilitation instead of competition. *Limnol. Oceanogr.* **37**: 966-973
- Sterner, R.W. 1993. *Daphnia* growth on varying quality of *Scenedesmus*: Mineral limitation of zooplankton. *Ecology* **74**: 2351-2360
- Sterner, R.W., D.D. Hagemeier, W.L. Smith and R.F. Smith. 1993. Phytoplankton nutrient limitation and food quality for *Daphnia*. *Limnol. Oceanogr.* **38**(4): 857-871.
- Suttle, C.A., J.G. Stockner and P.J. Harrison. 1987. Effects of nutrient pulses on community structure and cell size of a freshwater phytoplankton assemblage in culture. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.* **44**: 1768-1774.
- Tilman, D. 1977. Resource competition between planktonic algae: an experimental and theoretical approach. *Ecology* **58**: 338-348.
- Urabe, J., M. Kyle, W. Makino, T. Yoshida, T. Andersen and J.J. Eser. 2002. Reduced light increases herbivore production due to stoichiometric effects of light: nutrient balance. *Ecology* **83**: 619-627.
- Urabe, J. and R.W. Sterner. 1996. Regulation of herbivore growth by the balance of light and nutrients. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*, **93**: 8465-8469.
- Vanni, M.J. 1987. Effects of nutrients and zooplankton size on the structure of a phytoplankton community. *Ecology* **68**: 624-635.
- Wetzel, R.G. and G.E. Likens. 1990. Limnological analyses. 2nd edition. Springer-Verlag, New York.
- Willen, E. 1976. A simplified method of phytoplankton counting. *Br. Phycol. J.* **11**: 265-278.

(Manuscript received 10 July 2009,
Revision accepted 2 September 2009)