

주암호에서 수질과 식물플랑크톤 군집에 미치는 광 차단효과

이 용 운¹ · 이 학 영*

(¹전남대학교 건설지구환경공학부, 생명과학부)

Effects of Light-Blocking on Water Quality and Phytoplankton Community in Lake Juam.
Lee, Yong Woon¹ and Hak Young Lee* (¹Department of Civil, Earth & Environmental
Engineering, Department of Biological Sciences, Chonnam National University, Gwangju,
500-757, Korea)

This study was carried out to assess inhibitory effects of light-blocking on water quality and phytoplankton community in Lake Juam from August to November 2000. The values of water temperature, DO, TN, NO₃-N, NH₄-N, TP, DIP, COD, SS and pH did not show clear differences between inside and outside light-blocked areas. Concentrations of Chl-*a* decreased -6.6~40% (mean 14.7%) from inside of the light-blocked area by light blocking. During the study, 55 species of phytoplankton were identified, and the dominant species were *Microcystis aeruginosa*, *Aulacoseira granulata*, *Peridinium* sp., *Synedra* spp., *Oscillatoria* sp., *Fragilaria construens*, and *Trachelomonas* sp. The successional pattern of dominant phytoplankton was diatoms (July) → diatoms/cyanophytes (August-September) → cyanophytes (October) → diatoms (October-November). The standing crop of phytoplankton showed maximum density in 22 September with 1.1×10^4 cells/L, and minimum in 25 October with 4.7×10^3 cells/L. The decreasing efficiency of standing crop by light-blocking was 8~38% (mean 19.9%). Through this study we found that blocking light seems to have a decreasing effect on the density of phytoplankton.

Key words : Lake Juam, light-blocking, water quality, Chl-*a*, phytoplankton, dominant species

서 론

오늘날 인류는 인구 증가에 따른 용수수요의 확대와 수질오염으로 인한 이용가능한 물의 감소로 인해 많은 나라에서 물기근을 겪고 있으며 이는 인류에게 새로운 위기가 되고 있다 (Barnes and Mann, 1991; Wetzel, 1999). 강우의 하계 편중이 심한 우리나라도 용수확보를 위한 대책이 요구되어 수자원 개발을 목적으로 하는 많은 인공호가 건설되어 왔는데, 이들 인공호가 주로 인구 밀집지역이나 농업, 축산폐수의 유입이 많이 이루어지는

지역에 위치하여 댐과 호소들에서 부영양화로 인한 식물플랑크톤의 과다성장이 일어나면서 여러 가지의 문제점이 유발되고 있다 (Cho *et al.*, 1991; 김 등, 1997, 1998, 1999, 2001a).

식물플랑크톤의 과잉번식으로 수중 식물플랑크톤의 개체수가 증가하면 이들 식물플랑크톤이 호수의 표수층에 넓게 떠 있는 연녹색의 녹조대를 형성하게 되는데 이러한 현상이 발생하면 호소수에서 이취미가 발생하고 시각적으로도 불쾌감을 주어 용수사용자들로 하여금 물에 대한 신뢰를 상실하게 한다 (Harper, 1992; Graham and Wilcox, 2000). 이러한 문제점들 외에도 식물플랑크

* Corresponding author: Tel: 062) 530-3401, Fax: 062) 530-3409, E-mail: haklee@chonnam.ac.kr

톤의 과잉번식은 투명도 저하 뿐만 아니라 호수의 물을 원수로 사용하는 정수장의 정수처리비용을 증가시키고 처리수의 수질도 떨어지게 하는 결과를 초래하며 (Harper, 1992; Frid and Dobson, 2002), 일부 식물플랑크톤은 대량으로 발생하면서 각종 조류독소 (algal toxin)를 생성하여 이차적인 오염을 유발하기도 한다 (Harper, 1992; Graham and Wilcox, 2000). 따라서 수자원의 효율적인 관리를 위해서는 식물플랑크톤의 과잉번식을 막는 대책을 강구해야 한다.

호소에서 과도한 식물플랑크톤의 번식을 방지하기 위한 방법으로는 식물플랑크톤의 성장에 필요한 영양물질인 질소 및 인의 호소 유입을 막는 것과 식물플랑크톤성장을 직접 제어하는 방법이 있다 (Harper, 1992; Lampert and Sommer, 1997; Huppert *et al.*, 2002). 호소에서의 식물플랑크톤 증식이 이루어지려면 식물플랑크톤이 이용할 수 있는 영양 물질이 충분하여야 하고, 동시에 적당한 수온과 햇빛의 조건이 만족되어야 한다 (Sze, 1998; Wetzel, 1999; Frost and Elser, 2002). 여기에서 단 한가지의 증식 유발 요인만이라도 제어할 수 있다면 호소에서 식물플랑크톤이 과다하게 증식되는 것을 효과적으로 억제할 수 있을 것이다. 식물플랑크톤의 증식을 일으키는 영양물질의 호소 내 유입을 차단하는 것은 가장 효과적이고 근본적인 대책이기 때문에 많이 시행되고 있으나, 이미 호소내로 유입되어 호소내에서 생지화학적순환을 하고 있는 영양물질을 제어하기는 쉽지 않다 (Harper, 1992; Horne and Goldman, 1994). 따라서 영양물질의 유입량을 저감하기 위한 중·장기적인 대책이 효과를 거두기 전까지는 기회적으로 발생하는 호소내 식물플랑크톤의 과잉번식을 방지하기 위한 한시적인 대책이 필요하다.

호소의 식물플랑크톤증식을 일시적으로 억제하는 방법 중의 하나로 식물플랑크톤의 성장에 필요한 광 에너지를 차단하는 방법이 있다. 즉, 식물플랑크톤은 광합성을 통하여 에너지를 획득하는 1차 생산자이기 때문에 성장에 빛에너지가 필수적으로 요구되는데 (Graham and Wilcox, 2000, Huisman *et al.*, 2002; Stephens *et al.*, 2003), 광을 차단하면 광합성 효율이 떨어져 식물플랑크톤의 과다번식이 저해되기 때문이다 (Lampert and Sommer, 1997; Diehl, 2002; Diehl *et al.*, 2002).

본 연구에서는 광 차단에 의한 식물플랑크톤증식의 억제효과를 분석하기 위하여 광 차단 수단으로 polyester 차광볼 (sunlight blocking ball)을 호소표면에 덮었을 때의 식물플랑크톤 발생량의 저감 정도와 수질변화를 차광을 하지 않은 지점과 비교, 분석하여 그 결과를

보고한다.

재료 및 방법

1. 실험장치

본 연구는 주암호의 주요 유입수인 동북천과 외남천이 합류하는 지점에서 하류로 약 10 km 떨어진 주암호 유입부 동경 127° 10' 13", 북위 34° 58' 22"의 북교 지점 (Fig. 1)에서 2000년 8월부터 11월 사이에 수행되었다. 조사지점의 수심은 조사기간동안 8~10 m였다. 차광을 위한 장치는 수표면에 놓여진 차광볼과 실험장치 내부로 식물플랑크톤 유입을 방지하기 위한 식물플랑크톤 유입 방지막으로 구성되었다. 실험장치가 차지한 수표면의 면적은 600 m²로 가로 20 m, 세로 30 m의 장방형이나 상류 쪽에 약간의 유선형 구조를 만들어 홍수 시에 강물의 흐름에 대한 저항을 줄일 수 있게 하였으며 네 모서리에는 수위에 따라 변동하는 고정추를 바닥에 내려 유수에 의한 이동을 방지하였다.

본 실험에서 사용한 차광볼은 polyester로 만들어졌으며 직경은 10 cm이고, 무게는 40 g이었다. 볼의 색은 빛을 흡수하여 수면하를 가장 어렵게 할 수 있는 검은색으로 하였다. 볼의 직경은 10 cm이나 부력이 커서 물에 잠기는 부분은 1~2 cm 정도이고, 나머지 부분은 물위로 노출되기 때문에 태양이 남중하여 태양광선의 유입각도가 수직이 되는 시간대를 제외한 대부분 낮 시간동안은 수표면에 햇빛이 차단된다. 그러나 차광볼이 구형이므로 수표면에 놓이면 3개의 볼 사이마다 빈 공간이 형성되며, 이 공간을 통해 기체교환은 활발하게 일어날 수 있다.



Fig. 1. The map showing the study site (Bokgyo) in Lake Juam.

차광장치의 내부로 식물플랑크톤의 유입을 방지하기 위한 식물플랑크톤 차단막은 수면과 수직방향으로 설치하였는데, 식물플랑크톤의 수직이동성을 감안하여 깊이를 5 m로 하였다. 또 방지막이 물위로 뜨는 것을 막기 위하여 수심 5 m 깊이의 막 끝 부분에 철봉을 넣어 고정시켰다.

2. 실험방법

차광장치에 의한 식물플랑크톤 발생의 저감 효과 및 수질 변화를 조사하기 위하여 장치의 내부지점과 외부지점에서 식물플랑크톤의 출현종과 현존량, Chlorophyll-*a* (Chl-*a*)의 농도, 그리고 Suspendid solids (SS), pH, Dissolved oxygen (DO), Chemical oxygen demand (COD), Total-nitrogen (TN), NH₄-N, NO₃-N, Total-phosphorous (TP), Dissolved inorganic phosphorous (DIP), 투명도, 수온, 기온, 강수량, 상대습도 등의 항목에 대해 측정하였다. DO와 pH는 Checkmate (Corning, Checkmate Deluxe)로 측정하였고, 온도, 습도, 투명도는 수온온도계, 건습온도계, Secchi disc를 이용하여 현장에서 측정하였으며, SS, COD, TN, NH₄-N, NO₃-N, TP, DIP의 항목은 얼음으로 채워진 Ice Box에 채취시료를 넣어 실험실로 운반한 후 SS는 여과지 무게차이를 이용하여 측정하였고, COD는 과망간산칼륨법, TN은 환원증류 킬달법, NH₄-N는 인도페놀법, NO₃-N는 부루신법, TP는 아스코르빈산 환원법, 그리고 DIP는 염화제일주석 환원법으로 각각 측정하였다(환경부, 1996).

Chl-*a*의 농도측정은 90% Alkaline Acetone 용액으로 chlorophyll을 추출한 후 UV/Visible Spectrophotometer로 흡광도를 측정하여 Monochromatic Method로 계산하였다(Wetzel and Likens, 2000).

식물플랑크톤 분석을 위한 재료수는 Lugol's solution으로 고정한 후 Utermöhl (1957)의 방법으로 농축하여 광학현미경으로 200~400배로 관찰 및 동정을 하였다.

결과 및 고찰

조사기간동안 기온은 20.1~30.8°C의 범위를 보여주었다(Fig. 2a). 전체적으로 조사후반으로 갈수록 기온이 감소했는데 9월 22일과 9월 29일의 기온이 10월 6일보다 낮은 것은 조사가 이루어졌던 때에 날씨가 흐렸었기 때문이다. 수온은 16.5~27.3°C의 범위를 나타냈으며 기온의 분포와 밀접하게 연동하여 기온의 변화패턴과 유

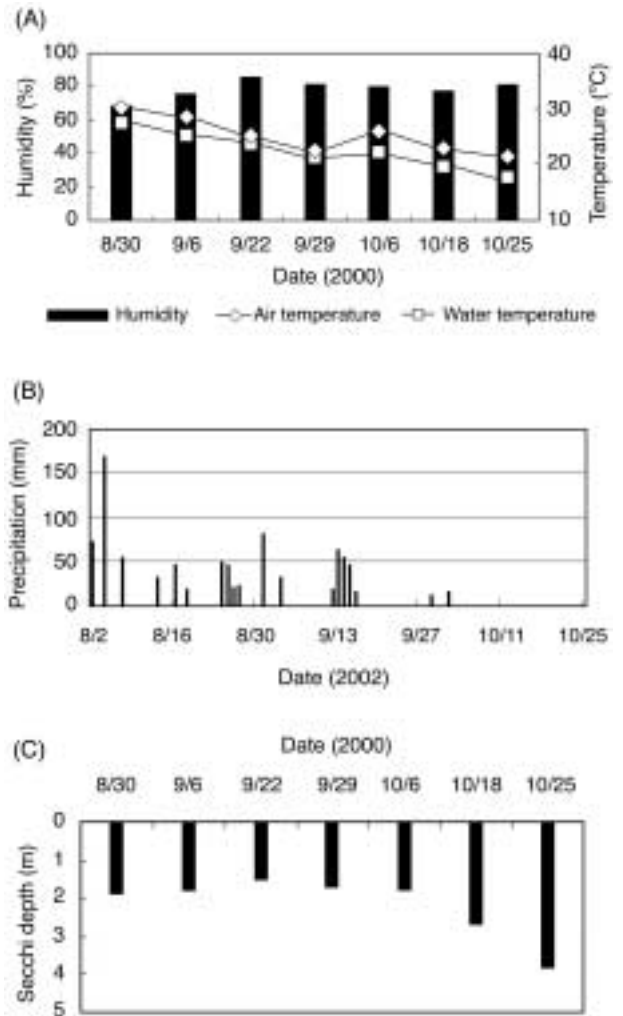


Fig. 2. Variations of air temperature, surface water temperature, relative humidity, precipitation, and Secchi depth during this study at Bokgyo, Lake Juam.

사한 경향을 나타냈다. 상대습도는 68.5~83.2%의 범위로 일조시간이 길었던(8.6 hr) 8월 30일의 조사(68%)를 제외한 전 조사기간동안 75% 이상의 높은 상대습도를 나타냈다.

조사가 이루어진 2000년에는 하계의 강수량이 많았는데, 8월에만 527.5 mm의 집중적인 강수량을 기록했으며 8월 4일에는 하루동안에만 167.5 mm의 강수량을 기록했다(Fig. 2b). 많은 강수량과 빈번한 강우는 태풍에 의한 교류(turbulence)와 공조하여 수괴의 안정성을 파괴하였는데, 조사지역의 수괴는 8월 30일 조사에서 성층이 소멸되어 수체의 수직혼합이 이루어지고 있음을 확인할

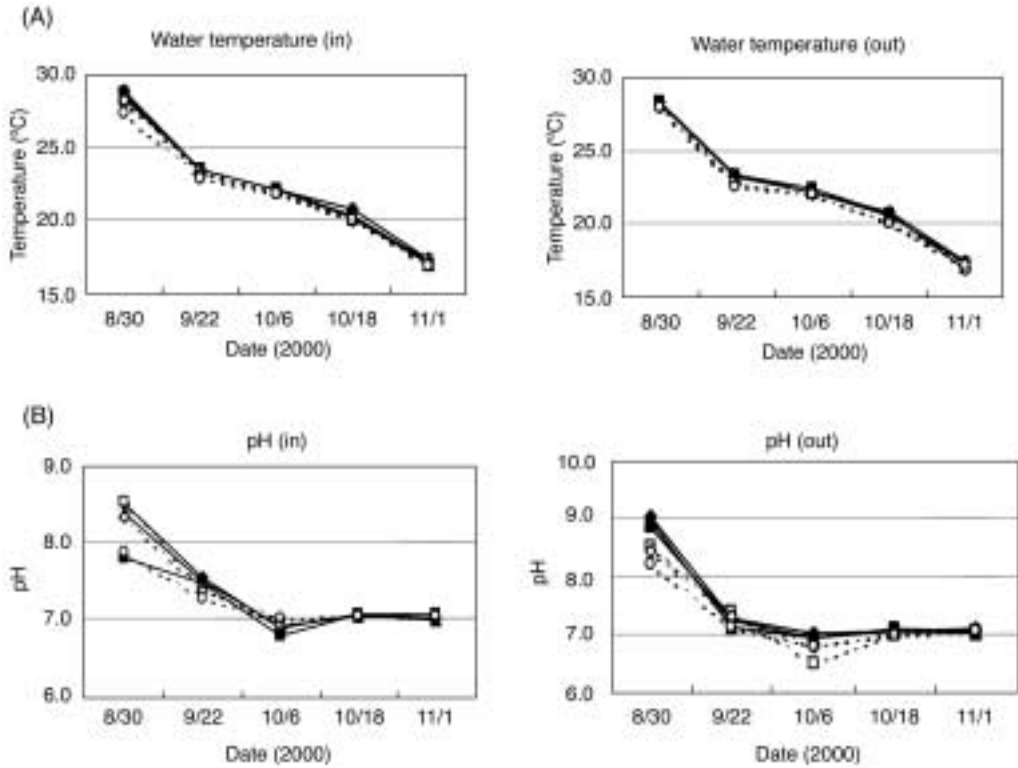


Fig. 3. Comparisons of water temperature and pH between inside (in) and outside (out) of light-blocked area (-◆-; 0 m, -■-; 1 m, -▲-; 2 m, -□-; 3 m, -◇-; 4 m, -○-; 5 m).

수 있었다.

조사기간동안 투명도 (Secchi depth)는 1.5~3.8 m의 범위를 나타냈다 (Fig. 2c). 강우로 부유물의 유입이 많았던 8월 30일과 9월 6일, 그리고 식물플랑크톤의 개체군 밀도가 높았던 9월 22일과 10월 6일에 투명도가 낮았고, 강우의 영향이 해소되고 식물플랑크톤의 밀도가 낮아지면서 투명도는 높아졌다.

차광장치 내부와 외부에서 수심별로 측정된 수온은 표층수의 수온 변화 패턴과 동일한 양상을 나타냈으며 차광장치에 의한 수온의 변화는 거의 없는 것으로 나타났다 (Fig. 3a). 이것은 차광이 이루어져도 차광수역이 협소하여 내부지역의 수체가 외부지역과 접하는 면이 넓었으며 수체의 수직이동이 일어나 수괴의 동질성을 유지시킨 때문으로 보인다.

pH는 8월 30일에는 7.78~9.04, 9월 22일에는 7.14~7.54의 범위로 상대적으로 높게 나타났으며, 그 후로는 평균적으로 중성인 7 정도로 측정되었다 (Fig. 3b). 그러나 차광장치 내·외부 지역의 pH 값은 거의 동일하게 나타났다. 일반적으로 호수에서 식물플랑크톤의 광합성이 활발하게 일어나는 시기에는 식물플랑크톤에 의해

HCO₃⁻나 CO₃²⁻가 소모되고 OH⁻가 방출되기 때문에 수중의 pH는 높아지지만 (Graham and Wilcox, 2000), 본 조사에서 8월에 pH가 7을 훨씬 초과하다가 7 정도로 낮아진 것을 식물플랑크톤 증식의 차이 때문이라고 단정하기는 어렵고, 다른 요인과의 복합적인 작용에 의한 것으로 보는 것이 타당할 것으로 판단된다.

차광장치 내부와 외부에서 DO의 함량은 거의 차이가 없었으며 유사한 양상으로 변동하였다 (Fig. 4a). 이것은 차광장치가 수표면에서 일어나는 기체교환을 크게 저해하지 않았음을 의미한다. DO의 평균값은 식물플랑크톤의 대변성이 있었던 10월 6일에 차광장치 내부와 외부에서 최고를 나타냈고 8월 30일에 최저를 나타냈다. 그러나 DO의 농도는 외부에서는 4.1~6.9 mg/L, 내부에서는 4.5~7.1 mg/L의 범위로 나타나 조사기간동안 DO의 변동은 미미했다. 수심에 따른 DO의 패턴에서는 주암호의 댐앞에서 나타났던 DO의 감소나 중층최저층의 발달 (김 등, 2001a)은 나타나지 않았다.

총질소 (TN)의 농도는 차광장치의 내부와 외부에서 각각 0.7~2.4 mg/L와 0.7~1.6 mg/L의 범위로 변동하였다 (Fig. 4b). 내부와 외부에서 총질소의 농도는 유사한

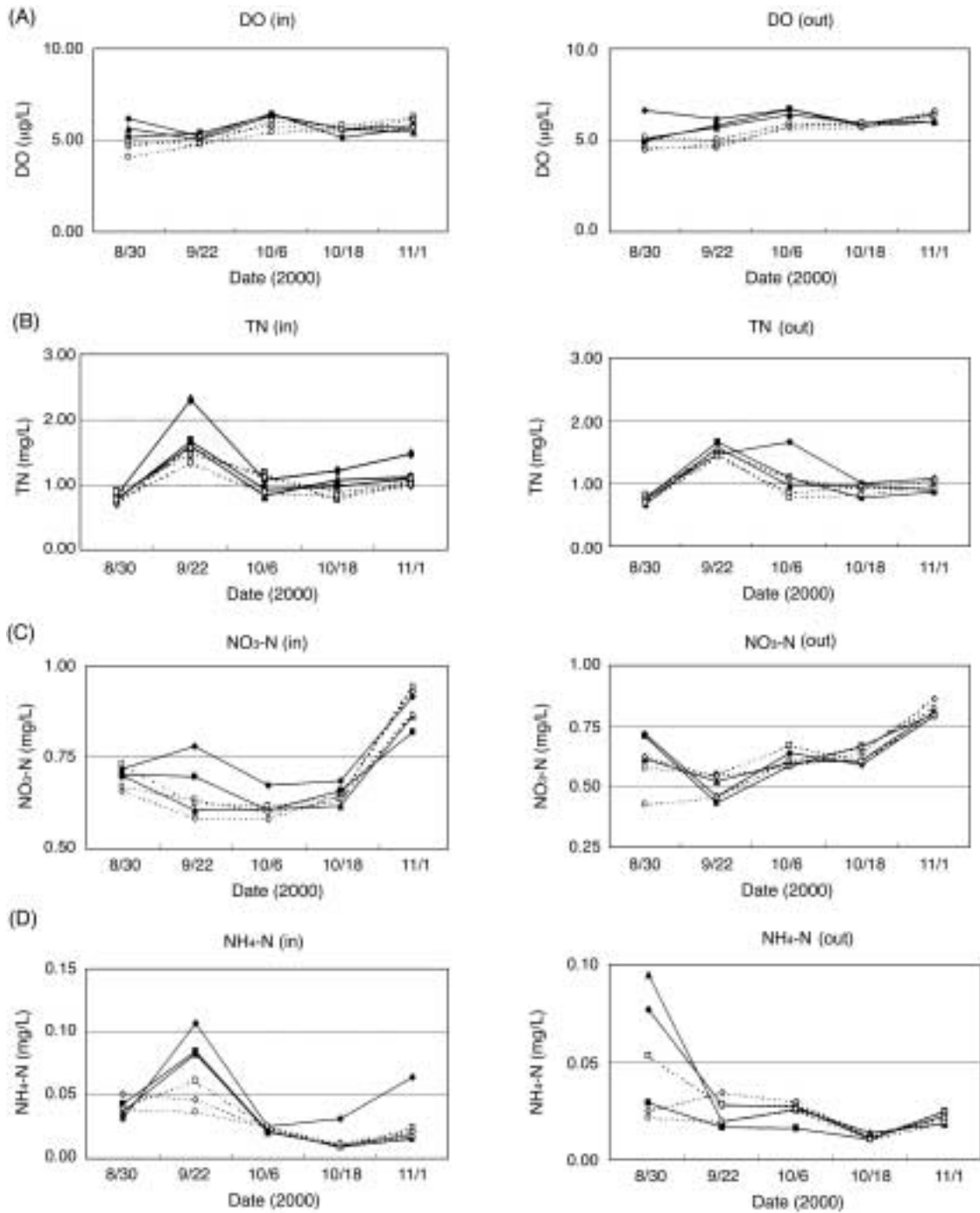


Fig. 4. Comparisons of DO, TN, NO₃-N, and NH₄-N between inside (in) and outside (out) of light-blocked area (—◆—; 0 m, -■-; 1 m, -▲-; 2 m, ···□···; 3 m, ···◇···; 4 m, ···○···; 5 m).

패턴을 보이며 변동하였으나 표층에서 내부와 외부 사이에 농도의 차이가 나타났는데, 내부에서는 9월 22일에 2.4 mg/L로 최고의 농도를 나타냈고 외부에서는 10월 6

일에 1.6 mg/L로 최고의 농도를 나타냈다. 전체적으로 9월 22일의 조사에서 농도가 높게 나타났다. 특히 내부의 표층 총질소 농도는 차광장치 외부나 다른 조사(김 등,

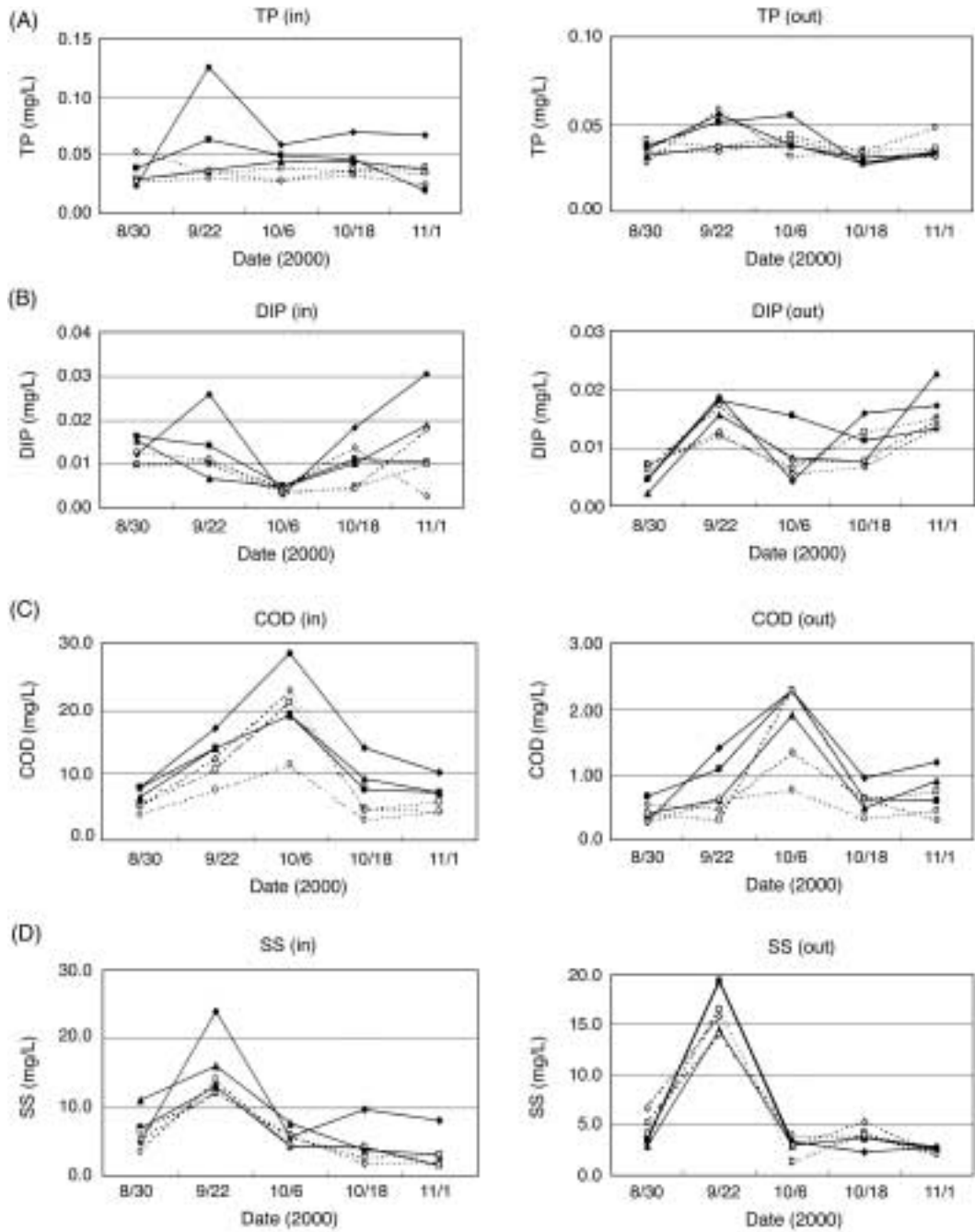


Fig. 5. Comparisons of TP, DIP, COD, and SS between inside (in) and outside (out) of light-blocked area (—◆—; 0 m, - - -; 1 m, -▲-; 2 m, ...□...; 3 m, ...◇...; 4 m, ...○...; 5 m).

2001a, b)에서 나타난 값보다 훨씬 높았는데, 이것은 차광장치 내의 수괴에서 외부에서보다 식물플랑크톤의 현존량이 적어 총질소의 이용율이 감소된 것도 하나의 요인으로 작용한 것으로 추측된다 (Lampert and Sommer, 1997; Graham and Wilcox, 2000).

질산성질소 ($\text{NO}_3\text{-N}$)의 농도는 8월 30일과 9월 22일의 조사에서 차광장치의 내부와 외부에서 약간의 차이가 나타났다 (Fig. 4c). 특히 9월 22일에는 내부에서는 표층과 수심 1 m 지점에서 농도가 높게 나타났으나 외부에서는 수심 3~4 m 지점에서 최고의 농도를 나타냈고

표층과 수심 1 m에서 최저의 농도를 나타냈다.

식물플랑크톤의 성장에 중요한 암모니아성질소($\text{NH}_4\text{-N}$)의 농도도 8월 30일과 9월 22일 조사에서 차광장치의 내부와 외부 사이에 약간의 차이가 있었다 (Fig. 4d). 차광장치의 외부수역에서 암모니아성질소의 농도는 8월 30일에 수심 2 m와 표층에서 높은 농도를 나타냈으나 식물플랑크톤의 밀도가 증가하면서 급격히 감소하였다. 그러나 식물플랑크톤의 밀도에 변화가 없었던 내부에서는 9월 22일의 조사에서 최대의 농도를 나타냈다.

총인 (TP)의 농도는 차광장치 내부의 표층에서 급격한 변화를 나타냈으나 내부의 나머지 수심과 외부의 전체 수심에서는 큰 차이가 없었다 (Fig. 5a). 차광장치 외부의 수역에서 총인의 농도는 식물플랑크톤의 밀도가 높았던 9월 22일과 10월 6일에 약간 더 높게 나타났다. 이것은 식물플랑크톤의 발생량이 총인의 농도에 영향을 줄 정도가 아니었기 때문으로 볼 수 있다 (門田, 1987; Horne and Goldman, 1994; Sze, 1998).

용존무기인 (DIP)의 농도는 조사기간동안 변이가 심했다 (Fig. 5b). 특히 수심 0~2 m 사이에서 큰 변동을 나타냈으며 *Microcystis aeruginosa*가 우점했던 10월 6일에 최저의 농도를 나타냈고 이후 농도가 증가하는 경향을 보여주었다. 인이 온대호수의 식물플랑크톤 성장에 제한요인이 되는 경우가 많다는 사실 (Sze, 1998; Kisand et al., 2001)과 식물플랑크톤 성장에 용존무기인이 이용된 본 조사의 결과에서 볼 때 본 수계도 유기인과 부유유기물에 의한 인의 공급의 제한과 용존무기인 농도의 저감을 통한 식물플랑크톤의 성장조절이 가능할 수 있음을 알 수 있었다 (Frid and Dobson, 2002).

화학적산소요구량 (COD)은 식물플랑크톤의 밀도가 가장 높았던 10월 6일의 조사에서 차광장치 내부와 외부 모두에서 가장 높은 값을 나타냈다 (Fig. 5c). 수심별 COD의 분포는 표층에서 가까울수록 높은 경향을 보여주었다. 부유물의 농도가 높았던 9월 22일 보다 10월 6일의 COD가 더 높게 나타난 것은 9월 22일의 부유물의 주성분이 무기물에 의한 것임을 시사한다고 볼 수 있다.

본 연구에서 측정된 SS 농도의 변화는 Fig. 5d와 같다. 일반적으로 호소내 SS를 구성하는 고형물은 호소내에서 생성되었거나 사멸된 식물플랑크톤, 유기물의 잔존물, 그리고 강우시 호소의 외부지역에서 유입되는 유·무기성 부식토사 및 미립자 등이 대부분이며 강우시를 제외하고는 호소내 SS를 유발하는 물질의 거의 대부분은 식물플랑크톤으로 알려져 있다 (Harper, 1992; Horne and Goldman, 1994). 하지만 본 조사에서 나타난 SS의

농도변화는 식물플랑크톤의 현존량 변화와 상관성이 높지 않은 것으로 나타났다. 이것은 이 지역의 SS의 주성분이 식물플랑크톤이 아님을 의미하는데, 실제로 SS를 이루는 주성분은 무기물과 유기물 잔존물이 대부분인 것으로 나타났다. 그러나 차광지역 내부에는 홍수와 태풍에 의해 유입된 유기체설물과 수표면 쪽으로 올라온 남조류가 차광에 의한 빛의 차단으로 충분한 광합성 작용을 할 수 없어서 침전되지 못하고 그대로 상부층에 머무르면서 농축되어 조사기간동안 외부지역보다 훨씬 높은 SS 농도를 나타냈다. 수심별 SS 농도의 변화에서는 수표면에 가까울수록 차광장치 내부지역의 SS 농도가 외부지역보다 더 높게 나타났는데, 이것도 광 차단에 의해 수표면으로 올라와 농축된 식물플랑크톤 때문으로 추정된다. 표층 아래층을 보면 내·외부지역의 SS 농도가 거의 비슷하거나 외부지역이 약간 높은 경향을 보이고 있는데, 그 이유는 차광물 설치지역 외부에서는 상부층에서 광합성 작용으로 밀도가 높아진 남조류가 아래로 침전하였거나 깊은 수심까지 유광층 (euphotic zone)이 조성되면서 식물플랑크톤이 하부층까지 분포하면서 SS의 농도를 증가시켰기 때문으로 추측된다 (Barnes and Mann, 1991; Wetzel, 1999).

전체적으로 볼 때 Chl-*a*를 제외한 대부분의 수질항목의 수심 0 m 지점에서의 농도는 본 조사기간 동안 차광장치의 내부지역이 외부지역보다 약간 높게 나타났다. 이러한 원인의 첫째로는 내부의 식물플랑크톤 발생량이 외부지역보다 적어 C, N, P의 소모량이 더 낮았던 것과 둘째로 방지막 내부의 물이 거의 간혀 있는 상태에서 사멸된 식물플랑크톤의 제거가 원활하지 못했으며 셋째로 홍수 때 유입된 유기물의 분해에 의한 때문으로 설명할 수 있다. 그러나 그 차이는 크지 않았으며 특히 1~5 m 지점에서는 실험장치 내·외부 지역의 농도차가 뚜렷하게 나타나지 않아 차광장치에 따른 호숫물의 정체성으로 인한 수질의 변화는 거의 없는 것으로 판단된다 (Frost and Elser, 2002).

식물플랑크톤 생물량의 지표가 될 수 있는 Chl-*a* (chlorophyll *a*)의 농도는 차광장치의 내부가 외부에서 보다 더 낮게 나타났다 (Fig. 6a). 차광장치 외부의 조사 지점에서 Chl-*a*의 평균농도는 10월 6일에 최고의 농도 ($9.9 \pm 3.2 \mu\text{g/L}$)를 나타냈고 10월 18일에 최저의 농도 ($4.2 \pm 0.35 \mu\text{g/L}$)를 나타냈다. 대부분 조사지점에서 수심별 Chl-*a*의 농도는 큰 차이가 없었는데, 특히 9월 6일, 9월 29일, 10월 18일, 10월 25일의 조사에서는 전체 조사수심에서 균일한 Chl-*a* 농도를 나타냈다. 이것은 이 기간동안 조사수심까지의 수괴가 순환하였고, 몇 차례의

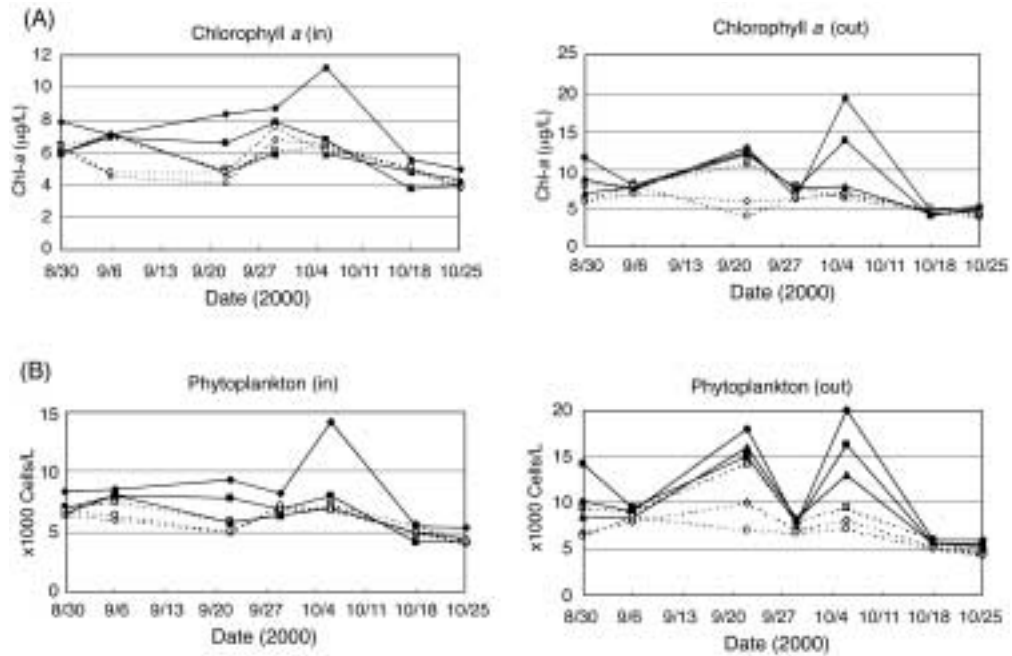


Fig. 6. Comparisons of Chl-*a* and phytoplankton standing crop between inside (in) and outside (out) of light-blocked area (-◆-; 0 m, -■-; 1 m, -▲-; 2 m, □□□; 3 m, ◇◇◇; 4 m, ○○○; 5 m).

태풍이 수괴의 교란을 촉진하였으며, 높은 투명도로 깊은 곳까지 식물플랑크톤이 분포할 수 있었기 때문인 것으로 추측된다 (Wetzel, 1999). 전체적으로 조사기간동안 Chl-*a*의 농도는 다른 조사나 국내의 다른 호수에서보다 낮았는데 (김 등, 1997, 1998, 1999, 2001a), 이것은 2000년에 한반도에 영향을 주었던 대형 태풍인 Bilis (10호; 8월 27~28일), Prapiroon (12호; 8월 31일~9월 1일), Saomai (14호; 9월 15일~16일)의 영향과 집중적인 강우, 투명도 감소, 그리고 장기간의 흐린 날씨로 인해 수온이 하강하여 식물플랑크톤의 성장환경이 악화되었기 때문인 것으로 보인다 (Gomes and Miranda, 2001; Huisman et al., 2002). 그러나 10월 6일의 채집에서는 차광지역 외부수역에서 Chl-*a*의 농도가 19 µg/L를 초과하여 전체 조사기간 중 최고의 농도를 나타내었다. 이때 차광시설 외부수역 표층(epilimnion)에서의 주요 식물플랑크톤은 *Microcystis aeruginosa*로 최우점종으로 출현하고 있었다. 10월 18일 이후에는 설치지역 외부의 수역에서 Chl-*a*의 농도가 급격히 감소하여 전체 수괴가 거의 일정한 낮은 (5 µg/L 이하) Chl-*a* 농도를 나타내었다. 한편, 차광장치 내부수역에서의 Chl-*a* 농도는 외부수역에서 보다 약간 낮게 나타났다. 내·외부지점 사이에 가장 큰 Chl-*a* 농도 차이는 9월 22일에 관찰되었

는데 내부가 외부보다 약 40%나 낮은 농도를 나타내었다. 9월 22일은 *Microcystis aeruginosa*의 급격한 성장으로 외부의 Chl-*a* 농도가 최대였던 시점이므로 차광에 의한 Chl-*a*의 저감효율은 Chl-*a*의 농도가 높을 때 더 효과적인 것으로 추측된다. 그러나 식물플랑크톤의 대변성이 일어나는 시기인 5월부터 8월 사이에 반복적인 조사가 이루어져야만 더 정확한 결론을 내릴 수 있을 것으로 판단된다. Chl-*a*의 농도가 낮았던 9월 29일에는 내부에서의 농도가 외부에서보다 약 6% 높게 나타나기도 하여 생물량이 적을 때는 차광의 효과가 없는 것으로 나타났다.

채집일에 따른 Chl-*a*의 농도는 외부지점에서는 9월 22일에 최고 19.4 µg/L를 기록하였고 10월 25일에 4.3 µg/L로 최소를 기록하였다. 내부지점에서는 8월 30일에 7.9 µg/L로 최고를, 그리고 10월 25일에 4.2 µg/L로 최소를 기록하였다. Chl-*a* 농도의 수직분포 패턴에서 차광에 의한 Chl-*a*의 농도감소는 표층수에서 더욱 뚜렷하게 나타났다. 특히 *Microcystis aeruginosa*가 우점했던 9월 22일에 표층수에서의 차광에 의한 농도감소가 뚜렷했는데, 이것은 우리나라의 인공호수들에서 문제가 되는 남조류인 *M. aeruginosa*가 차광에 의해 어느 정도 성장에 저해를 받음을 의미한다. 수온강하로 식물플랑크톤의 양

이 적었던 10월 18일 이후를 제외한 조사기간동안 차광지역에서의 Chl-*a*의 농도감소 효율은 -6.6~40% (평균 14.7%)로 나타났다.

그러나 차광시설 내부에서도 미미하지만 외부의 Chl-*a* 농도와 연관된 증가 (synchronized increasing)의 양상이 표층수에서 나타났다. 그 이유는 식물플랑크톤 유입 방지막이 설치된 수심 5 m 지점의 아래쪽에서 식물플랑크톤의 수직이동 (vertical migration)이나 수체의 교류 (turbulence)에 의해 차광장치지역의 내부로 들어온 식물플랑크톤이 차광에 의한 광부족 (light limitation)으로 표층수에서만 광합성을 할 수 있었고, 남조류인 *M. aeruginosa*가 광합성 작용을 원활하게 하지 못해 gas vesicles 내의 팽압이 감소하지 않아 표층수 아래로 침전되지 못하고 상부층에 그대로 머물러 있었기 때문이라 추정된다 (Sze, 1998; Graham and Wilcox, 2000). 이러한 현상은 차광장치 내·외부의 Chl-*a* 농도의 비교에서 더욱 명확하게 나타났다. 즉, 수심 2 m 이상의 깊이에서 측정된 Chl-*a* 농도가 2 m 이하의 깊이에서보다 차광장치 내·외부 지역 사이의 연관된 성장이 더 뚜렷했다.

조사기간 동안에 동정된 식물플랑크톤은 1문 5강 11목 21과의 55종이었다. 대형호수의 식물플랑크톤상으로 55종은 매우 다양도가 낮은 값인데 (김 등, 1997, 1998, 1999, 2001a, b), 출현종의 조성이 이처럼 빈약한 것은 조사지역이 한 지점으로 고정되어 있고 짧은 기간 동안의 조사이며 소수의 특정종이 절대 우점했던 시기에 조사가 이루어졌기 때문으로 보인다 (Graham and Wilcox, 2000).

주요 우점종은 *Microcystis aeruginosa*, *Aulacoseira granulata*, *Peridinium* sp., *Synedra* spp., *Oscillatoria* sp., *Fragilaria construens*, *Trachelomonas* sp. 등으로 나타났다. 이들 종은 주암호의 우점종으로 보편적으로 출현하는 종들이다 (김 등, 2001a, b). 조사기간 동안 상대우점종의 변화를 보면 본 연구의 예비조사가 이루어진 7월에는 규조류 (특히 *A. granulata*)가 우점하였다가 8~9월에 규조류-남조류 (*M. aeruginosa*) 혼재기를 거쳐 10월의 남조류의 우점이 있는 후 10~11월에 다시 규조류가 우점하였다. 조사시기에 따른 식물플랑크톤의 주요 우점종은, 8월 30일에는 내·외부 지역 모두에서 *A. granulata*와 *O. sp.*가 우점하였으며 *F. construens*가 외부지역의 2 m 깊이에서 우점하였다. 9월 6일에는 외부에서 *S. sp.*와 *A. granulata*가 우점하였고 내부에서는 뚜렷한 우점종이 없었으며 전체 개체수도 매우 적었다. 9월 22일에는 외부에서 절대 우점종은 없었으나 *Eudorina elegans*, *P. sp.*, *A. granulata* 등이 다수 나타났고 내

부에서는 *T. sp.*가 우점하였다. *Trachelomonas* 속의 종들은 유기물을 섭취하여 영양을 얻을 수 있는 혼합영양 생물 (mixotrophs)이어서 광조건이 열악한 투명도가 낮은 수역이나 유기물의 농도가 높은 수역에서 흔히 발견되는데 (Wetzel, 1999; Graham and Wilcox, 2000), 차광지역은 광부족에 의해 성장저해를 받는 종들에 비해 경쟁적으로 유리한 이 종이 우점하기에 적합한 환경을 갖는 것으로 보인다. 9월 29일에는 외부에서 *M. aeruginosa*가 출현하기 시작하였고 내·외부 지역에 *A. granulata*가 가장 많은 개체수를 나타내는 우점종이었다. 한편 내부에서는 *P. sp.*가 우점하였는데 이 종도 *Trachelomonas*처럼 혼합영양의 능력을 갖는 식물플랑크톤이다. 10월 6일에는 차광장치 외부지역의 표층수에서 *M. aeruginosa*가 절대 우점종으로 나타났다. 그밖에 *P. sp.*와 *A. granulata*가 우점하였다. 그러나 차광장치 설치지역의 내부에서는 *M. aeruginosa*가 *P. sp.*와 *A. granulata*와 더불어 우점하였으나 개체수는 외부에서 보다 적었다. 10월 18일에는 *A. granulata*와 *M. aeruginosa*가 외부에서 우점하였는데 *M. aeruginosa*의 양은 10월 6일에 비해 매우 낮은 양이었다. 내부에서는 *T. sp.*와 *A. granulata*가 우점하였다. 10월 25일에는 외부에서 *A. granulata*가 압도적으로 우점하였다. 또 *F. construens*가 많이 출현하였다. 그러나 내부에서는 뚜렷한 우점종이 없었다.

식물플랑크톤의 현존량은 9월 22일 차광시설 외부지역에서 최고 (1.1×10^4 cells/L)를, 10월 25일 내부 (4.7×10^3 cells/L)와 외부 (4.9×10^3 cells/L)에서 최저를 나타냈다 (Fig. 6b). 전체적으로 차광시설 외부에서 보다 내부에서 낮은 현존량을 나타내 차광효과에 의한 개체수 감소가 있음을 알 수 있었다. 식물플랑크톤의 발생량이 적었던 10월 18일 이후를 제외하면 차광시설에 의한 현존량 저감율은 9월 22일에 약 38%로 최고의 효율을 나타냈고 9월 29일에 약 8%로 최소의 효율을 나타냈으며 평균 약 20%의 저감효과가 나타났다. 수심에 따른 저감 효율은 9월 22일에 표층수를 중심으로 약 30%의 저감 효율을 나타내어 최고를 기록했다. 이 시기는 *Microcystis aeruginosa*가 차광시설 외부에 우점하였던 시점이므로 차광시설이 남조류의 대발생에 어느 정도의 저감 효과가 있었음을 알 수 있었다.

본 조사에서 차광장치의 내부 지역에서의 Chl-*a* 농도와 식물플랑크톤의 현존량이 외부 지역과 비교했을 때 전체적으로 큰 차이는 보이지 않았는데, 그것의 한 이유는 본 조사가 이루어진 수역의 주요 식물플랑크톤이 규조류와 남조류이었기 때문으로 추측된다. 즉, 규조류와

남조류는 보조색소를 많이 함유하여 광부족이나 Chl-*a*와 Chl-*b*에 의해 흡수되는 파장의 범위를 벗어난 대역의 빛이 많이 투입되는 차광구역에서 보조색소를 이용하여 빛을 집적한 후 Chl-*a*로 전달할 수 있기 때문이다 (Graham and Wilcox, 2000; Markager and Vincent, 2001). 또 수심이 얇은 수역에서 실험이 이루어져 수심이 얇은 수계에 혼한 상향반사 (upwelling radiance)에 의해 차광장치 내부의 식물플랑크톤 현존량에 영향을 미쳤기 때문으로 추측된다 (Mobley and Sundman, 2003; Mobley et al., 2003). 따라서 차광장치는 차광의 효과가 극대화 될 수 있는 녹조류에 의한 식물플랑크톤의 대변성을 제어하는데 가장 효과적일 것으로 판단되며, 식물플랑크톤 유입방지막이 깊을수록, 수심이 깊을수록, 그리고 유수의 교류가 적을수록 효과적일 것으로 판단된다.

적 요

광 차단에 의한 식물플랑크톤 발생량의 저감효과와 수질변화를 분석하기 위하여 주암호의 복교 지점에서 2000년 8월부터 11월까지 수질, Chl-*a* 농도, 그리고 식물플랑크톤 종조성과 현존량을 측정하였다. 수온, 투명도, DO, TN, NO₃-N, NH₄-N, TP, DIP, COD, SS, pH 등의 수질항목의 농도는 차광장치 내부지역과 외부지역에서 약간의 차이가 나타났으나 그 차이는 크지 않아 차광장치에 따른 정체로 인한 수질의 변화는 거의 없는 것으로 판단된다. Chl-*a*의 농도는 차광장치의 내부에서 더 낮게 나타났는데, 차광지역에서의 Chl-*a*의 농도감소 효율은 -6.6~40% (평균 14.7%)였다. 차광에 의한 Chl-*a*의 저감효율은 Chl-*a*의 농도가 높을 때 더 효과적인 것으로 나타났다. 본 조사기간에 동정된 식물플랑크톤은 1문 5강 11목 21과의 55종이었다. 주요 우점종은 *Microcystis aeruginosa*, *Aulacoseira granulata*, *Peridinium* sp., *Synedra* spp., *Oscillatoria* sp., *Fragilaria construens*, *Trachelomonas* sp.였으며, 우점종의 변화는 7월의 규조류 우점 → 8~9월에 규조류-남조류 혼재기 → 10월의 남조류 우점 → 10~11월의 규조류 우점으로 나타났다. 식물플랑크톤의 현존량은 9월 22일 차광시설 외부지역에서 최고 (1.1 × 10⁴ cells/L)를, 10월 25일 내부 (4.7 × 10³ cells/L)에서 최저를 나타냈다. 차광시설에 의한 식물플랑크톤 현존량 저감율은 8~38% (평균 19.9%)로 나타났다. 이상의 결과에서 차광은 식물플랑크톤의 현존량 저감에 어느 정도 효과가 있음을 알 수 있었다.

인 용 문 헌

김범철, 박주현, 임병진, 허우명, 황길순, 채기숙, 최광순. 1998. 국내 주요호수의 육수학적 조사 (2): 합천호. 한국육수학회지 **31**: 312-327.

김범철, 박주현, 임병진, 허우명, 황길순, 최광순, 채기숙. 1997. 국내 주요호수의 육수학적 조사 (1): 옥정호. 한국육수학회지 **30**: 431-449.

김범철, 박주현, 허우명, 임병진, 황길순, 최광순, 채기숙. 1999. 국내 주요호수의 육수학적 조사 (3): 진양호. 한국육수학회지 **32**: 111-126.

김범철, 박주현, 허우명, 임병진, 황길순, 최광순, 채기숙. 2001a. 국내 주요호수의 육수학적 조사 (4): 주암호. 한국육수학회지 **34**: 30-44.

김종민, 김성수, 장남익, 김설희. 2001b. 영산강대권역 주요호수의 조류 발생현황 조사 (II). 국립환경연구원. 서울.

門田, 元. 1987. 淡水赤潮. 恒星社厚生閣版. 東京.

환경부. 1996. 수질오염공정시험법.

APHA, AWWA, AEF. 1992. Standard methods for the examination of water and wastewater. 18th ed. APHA. Washington.

Barnes, R.S.K. and K.H. Mann. 1991. Fundamentals of Aquatic Ecology. Blackwell Scientific Publications. Oxford.

Cho, K.S., B. Kim, W.M. Heo, and D.S. Kim. 1991. Eutrophication of the major reservoirs in Korea. *Rep. Suwa Hydrobiol.* **7**: 21-29.

Diehl, S., S. Berger, R. Ptacnik, and A. Wild. 2002. Phytoplankton, light, and nutrients in a gradient of mixing depths: Field experiments. *Ecology.* **83**(2): 399-411.

Diehl, S. 2002. Phytoplankton, light, and nutrients in a gradient of mixing depths: Theory. *Ecology.* **83**: 386-398.

Frid, C. and M. Dobson. 2002. Ecology of Aquatic Management. Prentice Hall. London.

Frost, P.C. and J.J. Elser. 2002. Effects of light and nutrients on the net accumulation and elemental composition of epilithon in boreal lakes. *Freshwater Biol.* **47**: 173-183.

Gomes, L.C. and L.E. Miranda. 2001. Hydrologic and climatic regimes limit phytoplankton biomass in reservoirs of the Upper Parana River Basin, Brazil. *Hydrobiologia.* **457**: 205-214.

Graham, L.E. and L.W. Wilcox. 2000. Algae. Prentice Hall. Upper Saddle River.

Harper, D. 1992. Eutrophication of Freshwaters - Principles, Problems and Restoration - Chapman and Hall. London.

- Horne, A.J. and C.R. Goldman. 1994. *Limnology*. 2nd Ed. McGraw-Hill, Inc. New York.
- Huisman, J., M. Arrayas, U. Ebert, and B. Sommeijer. 2002. How do sinking Phytoplankton species manage to persist? *American Nat.* **159**: 245-254.
- Huppert, A., B. Blasius, and L. Stone. 2002. A model of phytoplankton blooms. *American Nat.* **159**: 156-171.
- Kisand, V., I. Tuvikene, and T. Noges. 2001. Role of phosphorus and nitrogen for bacteria and phytoplankton development in a large shallow lake. *Hydrobiologia*. **457**: 187-197.
- Lampert, W. and U. Sommer. 1997. *Limnoecology-The Ecology of Lakes and Streams*. Oxford University Press. Oxford.
- Markager, S. and W.F. Vincent. 2001. Light absorption by phytoplankton: development of matching parameter for algal photosynthesis under different spectral regimes. *J. Plankton Res.* **23**: 1373-1384.
- Mobley, C.D. and L.K. Sundman. 2003. Effects of optically shallow bottoms on upwelling radiances: Inhomogeneous and sloping bottoms. *Limnol. Oceanogr.* **48**: 329-336.
- Mobley, C.D., H. Zhang, and K.J. Voss. 2003. Effects of optically shallow bottoms on upwelling radiances: Bidirectional reflectance distribution function effects. *Limnol. Oceanogr.* **48**: 337-345.
- Stephens, F.C., E.M. Louchard, R.P. Reid, and R.A. Maffione. 2003. Effects of microalgal communities on reflectance spectra of carbonate sediments in subtidal optically shallow marine environments. *Limnol. Oceanogr.* **48**: 535-546.
- Sze, P. 1998. *A Biology of the Algae*. 3rd Ed. WCB McGraw-Hill. Boston.
- Utermohl, H. 1957. Zur Vervollkommung der quantitativen Phytoplankton-Methodik. *Mitt. Int. Ver. Limnol.* **9**: 38.
- Wetzel, R.G. and G.E. Likens. 2000. *Limnological Analyses*. Springer. New York.
- Wetzel, R.G. 1999. *Limnology: Lake and River Ecosystems*. 3rd Ed. Academic Press, San Diego.

(Received 11 Mar. 2003, Manuscript accepted 25 May 2003)