

식물플랑크톤의 세포외배출유기물을 고려한 소양호의 1차생산과 유기물 부하

남궁현 · 김범철* · 황길순¹ · 최광순 · 김철구

(강원대학교 환경과학과, ¹농업기반공사 농어촌연구원)

Organic Matter Sources in a Reservoir (Lake Soyang); Primary Production of Phytoplankton and DOC, and External Loading. *Namkung, Hyun, Bomchul Kim*, Gilson Hwang¹, Kwangsoon Choi and Chulgoo Kim (Department of Environmental Science, Kangwon National University Chunchon, 200-701, ¹Korea Agricultural & Rural Infrastructure Corporation, Rural Research Institute)*

The autochthonous and allochthonous organic carbon loading were measured in Lake Soyang, to estimate the amount of carbon loading into the lake and the contribution of their sources to the lake's carbon loading. Autochthonous carbon loading was estimated from phytoplankton primary production with the extracellular organic carbon (EOC). Allochthonous loading was determined by measuring dissolved organic carbon (DOC) and particulate organic carbon (POC) concentration in the main inflowing Soyang River. Both autochthonous and allochthonous organic carbon loading were high during the summer, from July to September, and accounted for 43.2% and 71.7% of the annual loading, respectively. Primary productivity was elevated up to 1,000 mgC m⁻² d⁻¹ during summer and lowest in winter. EOC production from phytoplankton was also large in summer, resulting in a high DOC concentration in the lake water. Primary production of phytoplankton and allochthonous organic matter loading from the watershed contributed to 53.6% and 46.4% of total loading, respectively. The EOC production accounted for 4.4~21.2% of POC primary production, implying that EOC production of phytoplankton must be considered in estimation of primary production.

Key words : Primary production, EOC, Organic carbon loading, Lake Soyang

서 론

수중생태계의 유기물은 궁극적으로 1차생산자의 광합성에 근원을 두고 있으며 외부기원유기물(allochthonous organic matter)과 내부생성유기물(autochthonous organic matter)로 구분된다. 외부에서 유입되는 유기물은 상류의 식물플랑크톤의 1차생산과 유역 육상식물의 광합성에서 기인된다. 또한 다른 유역의 광합성 산물이 사료나 식량의 형태로 이용됨으로써 동물의 배설물 등에

의해서 발생되기도 한다. 내부생성유기물은 식물플랑크톤, 수생식물, 부착조류, 광합성 세균 등의 광합성 생물에 의해서 생성되며, 호수에서는 대부분 식물플랑크톤과 수생식물에 의해서 이루어진다(Wetzel, 1983). 호수에서 1차생산은 식물플랑크톤의 광합성에 의한 유기물 생산을 의미하기 때문에 결국 호수 내에서 1차생산이 증가한다는 것은 호수의 영양상태가 증가한다는 것을 의미한다. 이러한 이유로 1차생산은 호수의 수질 및 영양단계를 판정하는데 중요한 지표로 이용되고 있으며, 수체 내의 유기물 수지를 파악하는데 있어서 필수적인 조사항목이

*Corresponding author: Tel: (033) 250-8572, Fax: (033) 251-3991, E-mail: bomchkim@kangwon.ac.kr

다 (Likens, 1975).

호수에서 유기물 부하에 대한 외부기원과 내부생성의 상대적인 기여도는 수리학적 체류시간, 연안대의 발달정도, 부영양화도, 유역환경 등에 의해 좌우된다 (Wetzel and Likens, 1991). 일반적으로 유속이 빠른 하천에서는 외부로부터 유입되는 유기물이 주요한 공급원이 되며, 유속이 느린 하천의 하구나 호수에서는 내부생성유기물이 주요 공급원이 된다 (Wetzel, 1983). 국내의 많은 하천과 하구에는 대형 인공호가 건설되어 유속이 느려지고 체류시간이 증가함에 따라 호수의 1차생산에 의해서 생성된 내부생성유기물의 비중이 높아지고 있다 (황 등, 1994; 김 등, 1996). 팔당호나 경포호와 같이 수위변동이 적고 가장자리의 경사가 완만하여 수심이 얕은 호수에서는 수초가 호수 내 유기물의 내부생성에서 많은 비중을 차지한다 (김과 김, 1990; Kim *et al.*, 1991). 반면 소양호와 같은 대형 인공호는 연중 수위변화가 심하여 수초의 발달이 거의 없으므로 유기물의 내부생성은 대부분 식물플랑크톤에 의해서 이루어지고 있다 (황 등, 1994; 김 등, 1999; Kim *et al.*, 2000).

일반적으로 식물플랑크톤이 죽게 되면 자가분해 (autolysis)에 의해 수중으로 용존유기탄소 (dissolved organic carbon, DOC)가 배출되지만 (Hansen *et al.*, 1986), 건강한 식물플랑크톤에서도 광합성을 하는 동안 광합성산물의 일부가 DOC 형태로 배출된다 (Mague *et al.*, 1980; Søndergaard *et al.*, 1985; Jørgensen, 1986). 이러한 식물플랑크톤의 DOC 배출을 세포외배출유기탄소 (extracellular organic carbon, EOC)라고 한다. EOC의 화학적인 구성과 양은 식물플랑크톤의 생리적인 단계 (Nalewajko and Lean, 1972)와 식물플랑크톤의 종 조성 (Chrost and Faust, 1980) 등에 의해서 좌우된다. 식물플랑크톤의 광합성 과정에서 EOC로 배출되는 비율은 10% 이하로써 그다지 크지 않은 것으로 알려져 있다 (Berman, 1976; Covency, 1982; Riemann, 1982). 하지만 호수의 부영양화도와 식물플랑크톤의 종 조성 그리고 계절에 따라서 EOC로 배출되는 비율이 높게 보고된 예도 있다. Gulf of Maine에서 연구한 Mague *et al.* (1980)에 의하면, 식물플랑크톤이 동화한 C-14의 74% 이상이 EOC로 배출되었다. 대청호에서는 총 광합성량 중 EOC의 비율이 봄철에 42.6%로 높았으며 (Cho *et al.*, 1997), 과부영양상태인 남아프리카공화국의 Hartbeespoort Dam에서도 32.4%로 높게 보고되었다 (Robarts and Sephton, 1989).

호수와 하천에서 식물플랑크톤의 1차생산에 관한 연구는 그동안 많이 이루어졌지만, EOC를 고려한 1차생산의 평가에 대해서는 미비하였다. 또한 호수와 하천의

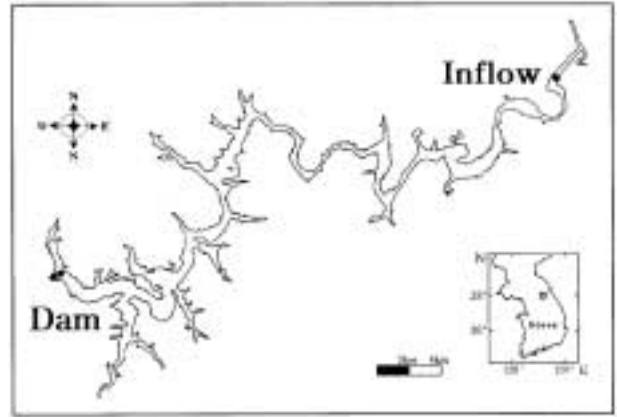


Fig. 1. Map showing sampling stations in Lake Soyang.

유기물 수지에 관한 연구에서 EOC가 고려되지 않은 1차생산력이 사용되었기 때문에 유기물 부하의 산정에서 내부생성유기물의 기여도가 과소평가 되었을 것이다. 본 연구에서는 식물플랑크톤의 1차생산력과 광합성 과정에서 배출되는 DOC를 함께 측정하여 EOC를 고려한 1차생산력을 계산하였다. 또한 광합성량 중 EOC가 차지하는 비율을 이용하여 식물플랑크톤에 의한 내부생성유기물을 계산하였다. 유입하천을 통한 유역으로부터의 유입량과 가두리양어장에서 사료의 투입과 물고기의 배설에 의해 발생하는 유기물 배출량을 조사하여 소양호의 유기물 부하를 평가하였다.

재료 및 방법

1. 조사지점 및 기간

소양호는 북한강 상류의 소양강에 만들어진 최대 수심 110 m의 국내 최대의 인공호이다. 유역의 대부분이 인구밀도가 낮은 산간지방이므로 규모가 큰 점오염원이 없다. 소양호 유역으로부터 유입되는 유입수량의 90% 이상은 인제 기점의 소양강을 통하여 유입되기 때문에 인제기점의 유입부에서 측정된 수질자료는 소양호 유입수를 대표한다고 볼 수 있다 (황, 1996).

소양호의 유기물 부하 조사는 1986년부터 2000년까지 15년간의 자료를 이용하였다. 외부기원유기물을 측정하기 위한 유입수의 시료채취는 강원도 인제의 사구미교 지점에서 채취하였다 (Fig. 1). 비강우시기에는 1주간격으로 조사하였으며, 유량의 변동이 큰 강우시기에는 1일 3회 이상 조사하였다. 내부생성유기물을 산정하기 위한 식물플랑크톤의 1차생산은 소양호 댐앞 지점에서

매월 시료를 채취하여 측정하였다 (Fig. 1).

2. 유역으로부터의 유기물 부하량

본 연구기간 중 1986년부터 1995년 10월까지의 유입수의 유기물 농도를 COD (chemical oxygen demand; 중크롬산칼륨법)로 측정하였기 때문에 산소단위의 COD를 유기탄소 농도로 환산하였다. COD_{Cr}법의 유기물 분해율이 80~100%라는 보고 (신과 김, 1986)를 근거로 하여 본 연구에서는 90%가 분해되는 것으로 추정하고 유기탄소 농도로 환산하였다. 즉 유입수의 1일 유기물 부하량은 COD 농도를 0.9로 나누고, C/O₂의 분자량 비인 12/32를 곱한 후 유입수량을 곱하여 계산하였다. 1995년 11월부터 2000년까지의 1일 유기물 부하량은 유입수의 수질을 DOC와 POC로 구분하여 측정 후 이들의 합인 TOC에 유입수량을 곱하여 구하였다. 측정자료가 없는 기간의 1일 유기물 부하량은 유량과 COD 또는 유량과 DOC, POC의 상관관계식으로부터 구한 유기물 농도를 이용하여 계산하였다. 상관관계식은 SPSS Inc.의 Sigma-Plot for Windows Version 5.00을 이용하여 $\log(Y) = a + b \times \log(X)$ 의 linear regression 형태로 모델화하였다.

DOC와 POC의 구분은 GF/F여과지를 통과한 여과수를 DOC로 그리고 여과지에 남아 있는 부분을 POC로 정의하였다. DOC 측정은 480°C에서 미리 태운 GF/F여과지에 일정량의 시료를 여과한 후 여과수를 냉장보존 (Chen and Wangersky, 1996) 하였다가 고온 촉매산화 (high temperature catalytic oxidation, HTCO)법을 이용한 TOC 분석기 (Shimazu TOC 5000A)로 측정하였고, POC는 여과 후 GF/F여과지를 건조기 (50~60°C)에서 건조시킨 후 CHN analyzer (Yanaco MT-5)로 측정하였다. 유입수량 자료는 수자원공사에서 작성한 1일 유량자료를 이용하였다.

3. 가두리양어장으로부터의 유기물 부하량

가두리양어장에서 배출되는 유기물량은 연간 사료 투여량에 따른 어류 사육사료의 COD 부하량으로부터 계산하였다. 가두리 단위면적 (m²)당 연간 사료 투여량은 120 kg으로 보았으며 (조 등, 1990), 소양호 내의 가두리양어장 허가면적인 47,800 m²을 곱하여 연간 사료 투여량을 5,736 ton으로 산정하였다. 사육사료의 원단위 COD 부하량인 사료 1 kg당 380 gO₂ (조 등, 1990)를 이용하여 소양호 가두리양어장으로부터의 연간 유기물 부하량은 908 tC yr⁻¹로 계산하였다. 가두리양어장의 유기물 배출량은 사료 투여량에 따라 매년 달라질 수 있지

만 정확한 사료 투여량 자료가 없고, 양어장의 면적에 변화가 없으므로 매년 같은 양의 유기물이 배출되는 것으로 가정하였다. 다만 소양호의 가두리양어장은 1998년을 전후하여 모두 철거하였기 때문에 양어장으로부터의 유기물 배출은 어류양식이 본격적으로 시작된 1987년부터 1997년까지만 이루어진 것으로 계산하였다.

4. 내부생성 유기물 부하량

식물플랑크톤의 1차생산력 (mgC m⁻² d⁻¹)은 광합성-광도 (photosynthesis-irradiance) 곡선법 (Platt *et al.*, 1980)과 Kim (1987)의 방법에 따라 실시하였다. 엽록소 *a* 농도는 Lorenzen (1967)의 방법에 따라 측정하였다. 1차생산력 산정을 위한 총 무기탄소 (TCO₂)는 Gran 적정법 (Gran, 1952)으로 알칼리도를 측정한 후 수온과 pH의 계수를 곱하여 구하였다 (Wetzel and Likens, 1991). 1차생산력이 측정되지 않은 날의 생산력은 매달 측정된 광합성-광도 모델의 매개변수와 광소산계수를 내삽법으로 계산하고 여기에 매일의 시간별 광도자료를 입력하여 계산하였다. 1일 1차생산력 (mgC m⁻² d⁻¹)에 매일의 수위에 따른 소양호 전체의 수표면적을 곱하여 내부생성 유기물량을 산정하였다.

식물플랑크톤의 EOC 배출율은 2000년 6월부터 10월까지 2주일 간격으로 측정하였다. 소양호 댐 앞 지점의 시료를 채수하여 즉시 실험실로 옮겨서 200 µm net을 이용하여 동물플랑크톤을 제거하였다. 시료 400 ml에 NaH¹⁴CO₃ 10 µCi를 첨가한 후 배양용기에 50 ml씩 8개로 각각 분배하여 표층수온으로 조절된 수조에서 2시간 동안 배양하였다. 배양이 끝난 시료는 빛이 차단된 상자에 옮기고 0.2 µm polycarbonate membrane 여과지로 여과한 후 여과수 10 ml를 취해서 scintillation vial에 담았다. 여과수에 남아 있는 무기 C-14를 제거하기 위해서 1 N HCl 0.1 ml를 시료에 첨가한 후 24시간 방치하였다. 1, 4-dioxane-based scintillation cocktail 10 ml를 첨가하여 식물플랑크톤이 EOC로 배출한 C-14의 양을 측정하였다. EOC 배출율은 단위 면적당 1차생산력과 동일한 방법으로 계산하였다. 총 광합성량 중에서 EOC가 차지하는 비율을 계산한 후 모든 1일 1차생산력에 대한 보정을 실시하였다.

결과 및 고찰

1. 소양강유입수에서 유기물 농도의 계절 및 년 변화

소양강 유입하천의 유기물 농도는 0.1~10.8 mgC L⁻¹

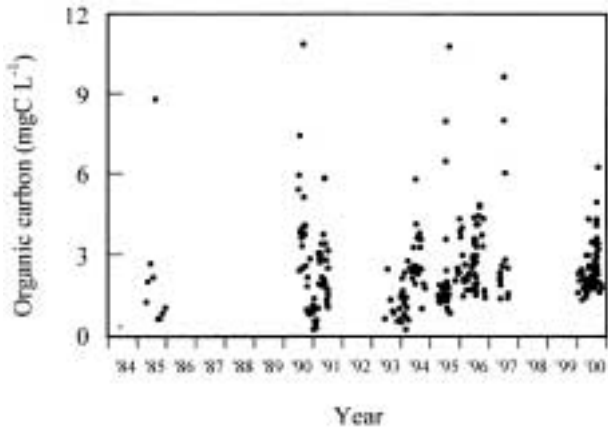


Fig. 2. Variation of organic carbon concentration in the inflowing river water of Lake Soyang from 1984 to 2000.

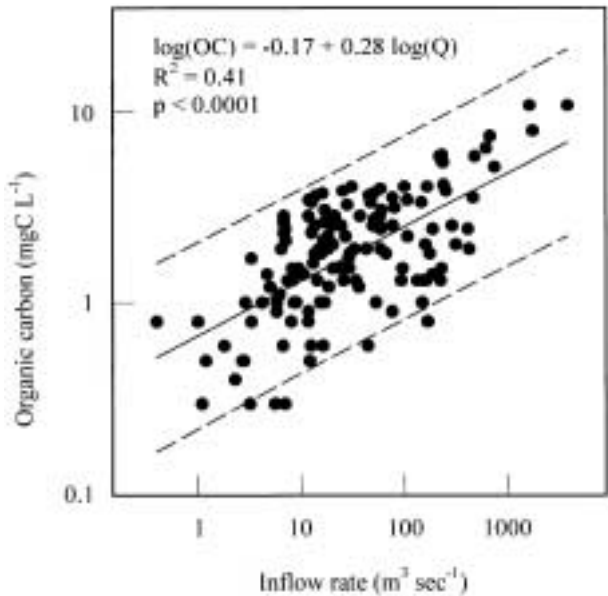


Fig. 3. A relationship between inflow rate and organic carbon concentration in the inflowing river water of Lake Soyang. Organic carbon concentrations were converted from COD concentrations. Solid line and broken lines indicate regression and 95% C.I. for individual predictions, respectively.

의 범위를 보였다. 연도별로는 1990년과 1997년이 다른 해에 비해서 높은 농도를 보였으며, 1993년과 1995년은 비교적 낮았다(Fig. 2). 유입수의 수질은 계절에 따라 큰 변화를 보이는 것으로 나타났다. 유입수의 유기물 농도는 갈수기인 겨울철에는 평균 1.0 mgC L^{-1} 수준이었고, 강우시기인 여름철에는 평균 3.0 mgC L^{-1} 이상으로 높았

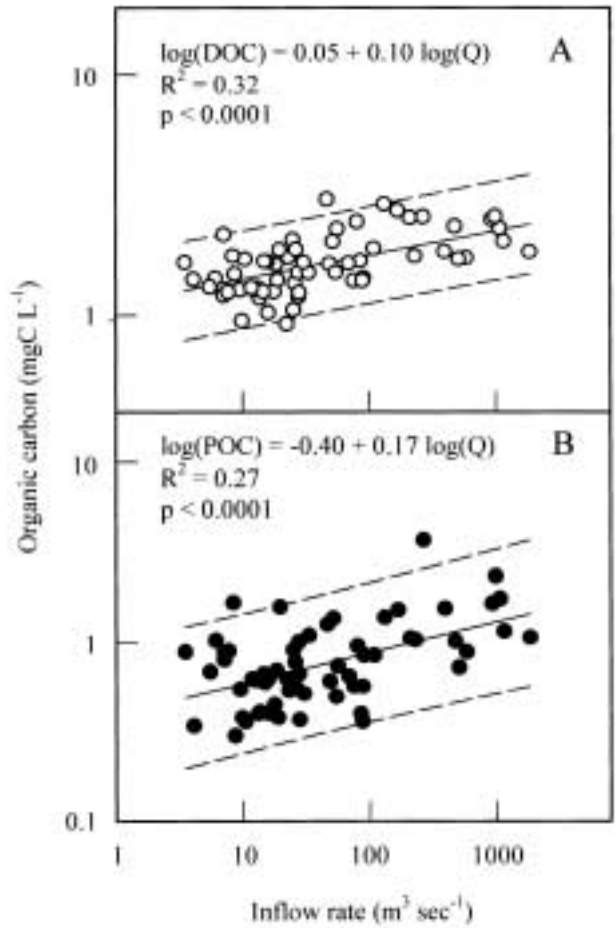


Fig. 4. Relationships between inflow rate and DOC (A) or POC (B) in the inflowing river water of Lake Soyang. Solid lines and broken lines indicate regression and 95% C.I. for individual predictions, respectively.

다. 특히 집중강우가 내리는 시기에는 유기물 농도가 6.0 mgC L^{-1} 이상으로 크게 증가하였다. 우리나라와 같이 여름철에 강우가 집중되는 지역에서는 유입수량과 유기물 농도가 함께 증가하는 것으로 보고되고 있다(최와신, 1998; Kim *et al.*, 2000). 소양강의 유입수량과 COD로부터 환산한 유기물 농도의 상관분석을 한 결과, 양의 상관성이 있는 것으로 나타났다(Fig. 3). 이러한 양의 상관관계는 강우시 유역의 농경지와 삼림지대로부터 많은 양의 유기물이 일시적으로 하천으로 들어오기 때문으로 사료된다. 유기물의 존재형태에 따라서 DOC와 POC로 구분하여 측정한 유입수의 유기물 농도와 유입수량도 모두 양의 상관성이 있는 것으로 조사되었다(Fig. 4). 유입수량의 증가에 따른 유기물의 농도의 증가는 회귀직선의 기울기에서 보듯이 DOC보다 POC가 더 큰 영향

을 받는 것으로 나타났다. 베네수엘라의 Orinoco River에서는 비강우시기에 비하여 강우시기에 유역으로부터의 POC 유출이 DOC의 유출보다 더 높다고 보고되었다 (Nemeth *et al.*, 1982). 다른 지역에서도 유사한 결과가 보고된 바 있다 (Wetzel and Manny, 1977; Dahm *et al.*, 1981; Thurman, 1985).

2. 식물플랑크톤의 1차생산의 계절변화 및 다년간 변동

매일 측정된 식물플랑크톤의 1차생산력은 23~3,876 mgC m⁻² d⁻¹의 범위를 보였다 (Fig. 5). 계절에 따른 1차생산력의 변화는 매우 큰 것으로 조사되었다. 혼합수심이 깊어지는 11월부터 다음해 3월까지의 상대적으론 낮은 값을 보였으며, 여름철에는 1,000 mgC m⁻² d⁻¹를 초과하는 경우가 대부분이었다. 연도별 1차생산력의 변동은 1986년부터 매년 증가하는 경향을 보였다. 특히 1990년대가 되면서 여름철에 1차생산력이 1,000 mgC m⁻² d⁻¹ 이상을 보이는 기간이 길어졌다. 부영양화의 기준을 1,000 mgC m⁻² d⁻¹로 정의한 Wetzel (1983)의 기준에 따르면 소양호는 1990년부터 부영양상태에 있는 것으로 볼 수 있다. 1992년과 1993년에 가장 높은 1차생산력을 보였으며, 1994년도 비교적 높은 1차생산력을 보였다. 반면 1999년과 2000년에는 전반적으로 크게 감소하였으며, 특히 여름철에 1,000 mgC m⁻² d⁻¹ 이상을 보인 기간이 짧아졌다. 이러한 최근의 1차생산력의 감소는 1998년을 전후로 하여 소양호에서 가두리양어장이 완전히 철거된 것과 시기가 일치하는 것으로 보아 가두리로부터의 인 배출이 없어졌기 때문인 것으로 사료된다.

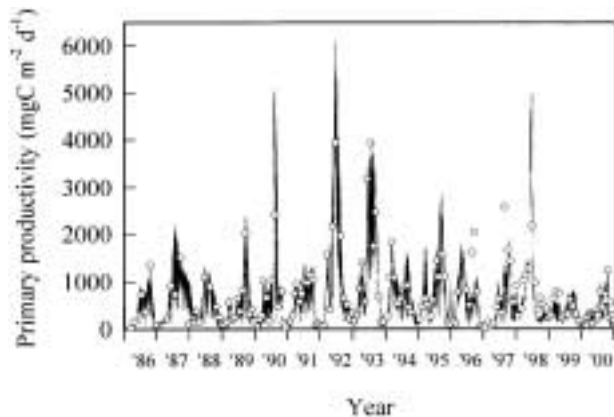


Fig. 5. Variations of primary productivity with the extracellular organic carbon in Lake Soyang. Open circle and solid line indicate measured and calculated data, respectively.

3. 식물플랑크톤에 의해 배출되는 EOC의 양과 계절변화

식물플랑크톤의 EOC 배출율은 32~143 mgC m⁻² d⁻¹의 범위로 9월에 최대치를 보였으며, 이외의 기간에는 평균 49 mgC m⁻² d⁻¹로 1차생산력에 비하여 변화가 크지는 않았다 (Fig. 6). 동일한 기간에 측정된 1차생산력은 평균 545 mgC m⁻² d⁻¹이었다. 6월에 300 mgC m⁻² d⁻¹ 이하로 비교적 낮았으며, 10월에 1,142 mgC m⁻² d⁻¹로 최대치를 보였다. 식물플랑크톤의 EOC 배출은 빛의 양 (Berman and Holm-Hansen, 1974; Verity, 1981; Zlotnik and Dubinsky, 1989), 영양염류의 제한 (Lancelot, 1983), 생리적인 단계 (Ignatiades and Fogg, 1973)와 같은 극한 환경에 따라서 변화한다. 따라서 EOC 배출율의 측정은 계절에 따른 환경의 변화에 의해서 차이를 보일 수 있다. 본 연구에서는 EOC 배출율의 측정이 여름철을 중심으로 5개월 동안 이루어졌기 때문에 연중 변화를 파악할 수는 없었다. 그러나 부영양한 남아프리카공화국의 Hartbeespoort Dam에서 5년 동안 이루어진 연구에 의하면 EOC의 계절변화가 1차생산력의 계절변화와 유사한 것으로 나타났다 (Robarts and Sephton, 1989). Hama and Handa (1983)와 Fukushima *et al.* (1996)은 일본의 호수에서 조류가 대량번식을 하는 기간과 그 이후에 EOC 배출과 관련하여 수중의 DOC 농도가 높은 것으로 보고하였다.

식물플랑크톤의 일차생산 중 EOC가 차지하는 비율은 평균 12.4%이었다. EOC가 차지하는 비율은 6월에 20.0%와 21.2%의 높았으며, 1차생산력이 높았던 10월에는 6.2%와 4.4%로 낮았다. 미국, Michigan주의 Lawrence

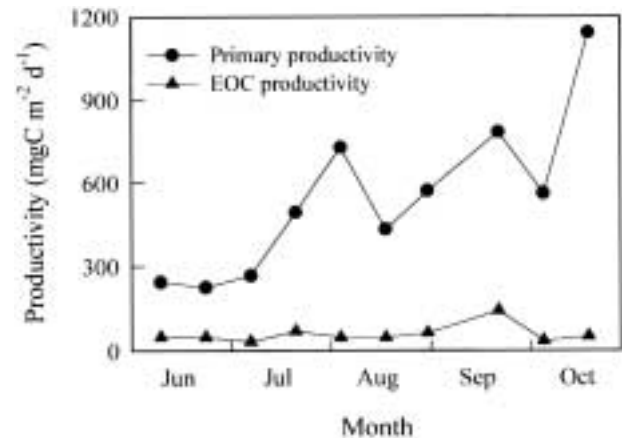


Fig. 6. Variations of primary productivity and extracellular organic carbon in Lake Soyang, 2000.

Lake는 EOC의 비율이 5%로 조사되었으며 (Wetzel *et al.*, 1972), 덴마크의 Lake Mossø는 4.8%로 보고되었다 (Riemann, 1982). 이렇게 EOC가 차지하는 비율이 작은 호수에서 EOC로 배출되는 DOC는 호수의 유기물 순환에 대한 기여도가 작으므로 무시할 수 있다. 하지만 EOC가 차지하는 비율이 높은 호수에서는 EOC를 내부생성유기탄소의 일부분으로서 고려하여 유기물 순환에 포함시켜야 한다. 미국, Wisconsin주의 Lake Mendota에서는 EOC의 비율이 42.1%로 매우 높게 보고되었으며 (Brock and Clyne, 1984), 스웨덴의 Lake Erken에서도 27.2%로 높게 보고된 예가 있다 (Bell and Kuparinen, 1984). 만약 이러한 호수에서 식물플랑크톤의 EOC를 고려하지 않은 상태에서 1차생산력은 과소평가가 될 수 있으며, 유기물의 내부생성량과 유기물 부하량의 계산에서도 많은 오차를 갖게 된다.

식물플랑크톤의 EOC 배출비율은 본 연구에서 측정된 것보다 더 클 가능성도 있다. 본 연구에서는 2시간의 짧은 배양 후에 식물플랑크톤의 세포 내에 머물러 있는 C-14의 양과 세포 외에 존재하는 C-14을 포함하는 DOC의 양을 측정한 것이다. 즉, 광합성이 일어나는 광조건하에서 광합성과 동시에 발생하는 세포밖으로의 유기물 배출량을 측정하는 것이다. 그러나 낮에 광합성에 의해 유기물로 환원되어 세포 내에 머물러 있기 때문에 POC 생산으로 측정된 탄소 중에는 광합성이 일어나지 않는 야간에 서서히 세포 외로 배출되는 것도 존재할 가능성이 있다 (Mague *et al.*, 1980; Robarts and Sephton, 1989). 따라서 2시간의 측정에서는 POC 생산으로 측정되었지만 장시간을 통하여 본다면 POC 생산의 일부는 EOC 생산으로 배출될 수도 있기 때문에 실제로 호수에서 EOC 생산의 기여도는 본 연구에서 측정된 것보다 더 클 수 있다.

4. 소양호의 유기물 부하량

소양호의 내부생성유기물과 외부기원유기물의 월별 부하량은 계절에 따라서 큰 변화를 보였다 (Fig. 7). 외부기원유기물은 유입수의 유기물 농도가 높고 유량이 증가한 6~9월에 큰 폭으로 증가한 것으로 나타났다. 내부생성유기물도 외부기원유기물이 증가한 시기와 동일한 시기에 높았다. 이것은 우기에 유역으로부터 유기물과 함께 많은 양의 무기영양염류가 유입되기 때문이며, 또한 수온과 영양염류와 같은 조건이 식물플랑크톤의 성장에 적합한 환경을 제공하기 때문으로 사료된다. 1992년과 1993년에는 여름철에 높은 단위 면적당 1차생산력

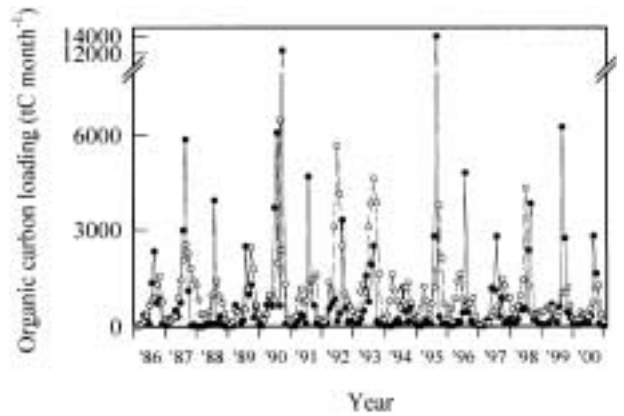


Fig. 7. Monthly variations of organic carbon loading from the watershed and fish farms (allochthonous, ●) and primary production by phytoplankton (autochthonous, ○).

Table 1. The organic carbon loading from each source in Lake Soyang; primary production, watershed. Values within the parentheses are a percentage of each source.

Year	Autochthonous		Allochthonous		Total loading tC yr ⁻¹
	Phytoplankton tC yr ⁻¹ (%)	Watershed tC yr ⁻¹ (%)	Fish farms tC yr ⁻¹ (%)	Watershed tC yr ⁻¹ (%)	
1986	6,850 (52.5)	6,210 (47.5)	0 (0.0)		13,060
1987	14,723 (52.9)	12,175 (43.8)	908 (3.3)		27,807
1988	7,979 (58.7)	4,713 (34.7)	908 (6.7)		13,601
1989	9,036 (52.5)	7,272 (42.2)	908 (5.3)		17,215
1990	16,028 (37.8)	25,486 (60.1)	908 (2.1)		42,421
1991	10,181 (53.6)	7,920 (41.7)	908 (4.8)		19,009
1992	21,099 (72.3)	7,174 (24.6)	908 (3.1)		29,181
1993	21,626 (71.0)	7,918 (26.0)	908 (3.0)		30,451
1994	9,941 (70.9)	3,179 (22.7)	908 (6.5)		14,027
1995	13,723 (42.4)	17,726 (54.8)	908 (2.8)		32,357
1996	8,839 (54.7)	6,420 (39.7)	908 (5.6)		16,167
1997	7,407 (47.6)	7,258 (46.6)	908 (5.8)		15,572
1998	11,506 (55.9)	9,060 (44.1)	0 (0.0)		20,566
1999	7,671 (39.4)	11,776 (60.6)	0 (0.0)		19,447
2000	6,191 (52.7)	5,562 (47.3)	0 (0.0)		11,754
Mean	11,520 (53.6)	9,323 (43.3)	666 (3.1)		21,509

을 보였지만 호수의 내부생성유기물 증가는 이에 비례하지는 않았다 (Figs. 5, 7). 이것은 1차생산력은 높았지만 여름철에 소양호 수위를 낮게 유지하여 광합성이 가능한 수면적이 감소하였기 때문인 것으로 볼 수 있다 (황, 1996).

유기물의 내부생성량은 1차생산력이 높았던 1992년과 1993년에 20,000 tC yr⁻¹ 이상으로 매우 높았으며,

1987년과 1990년에도 각각 $14,723 \text{ tC yr}^{-1}$ 와 $16,028 \text{ tC yr}^{-1}$ 로 높게 나타났다 (Table 1). 반면 2000년에는 $6,191 \text{ tC yr}^{-1}$ 로 매우 적은 부하량을 보였다. 유역으로부터 유입되는 유기물 부하량은 유역의 강우량이 많았던 1990년과 1995년에 각각 $25,486 \text{ tC yr}^{-1}$ 와 $17,726 \text{ tC yr}^{-1}$ 로 높았다. 반면 1988년과 1994년에는 다른 해에 비하여 매우 적은 $4,713 \text{ tC yr}^{-1}$ 와 $3,179 \text{ tC yr}^{-1}$ 가 유입하천을 통하여 유입되었다.

내부생성유기물이 총유기물 부하량에서 차지하는 비율은 1차생산력이 높았던 1992년과 1993년으로 각각 72.3%와 71.0%이었다. 또한 1차생산력이 높지는 않았지만 유역으로부터의 유기물 부하량이 적었던 1994년에도 내부생성유기물은 70.9%의 높은 기여도를 보였다. 외부기원유기물은 1990년과 1995년에 각각 62.2%와 57.6%로 높은 기여도를 보였다. 1999년에는 유역으로부터의 유입량이 $11,776 \text{ tC yr}^{-1}$ 로서 다른 해에 비해 가장 많은 편은 아니었으나, 내부생성유기물이 상대적으로 적었기 때문에 총부하량의 60.6%로 높은 기여도를 보였다. 양어장으로부터 배출되는 유기물이 총유기물 부하량에서 차지하는 비율은 2.1~6.7%로서 높지 않았다. 그러나 양어장에서는 많은 인공사료가 투입되며 이를 먹고 성장하는 물고기의 배설물에는 많은 양의 인과 질소와 같은 무기영양염류가 포함되어 있으므로 간접적으로는 식물플랑크톤의 성장을 촉진하여 유기물 내부생성량의 기여도를 높이는 영향을 주었을 것으로 사료된다 (허 등, 1992).

조사기간동안 소양호의 유기물 부하에 대한 기원별 기여도를 보면 식물플랑크톤의 1차생산이 평균 53.6%이었으며, 외부기원유기물로서 유역과 가두리양어장이 각각 43.3%와 3.1%를 차지하였다. 그러므로 소양호의 총유기물 부하량에서 식물플랑크톤의 광합성의 기여도가 외부기원유기물보다 큰 것으로 확인되었다. 소양호의 연간 유기물 부하량은 여름철에 집중되는 것으로 나타났다. 1차생산력이 높은 7~9월에 연간 내부생성유기물의 43.2%가 생성되었으며, 외부기원유기물도 같은 기간에 유입수량의 증가에 의해서 연간 부하량의 71.7%가 유입되었다. 이 3개월간 외부기원유기물과 내부생성유기물의 합계인 총유기물 부하량은 $182,203 \text{ tC}$ 으로 연간 총유기물 부하량 $322,636 \text{ tC}$ 의 56.5%를 차지하였다. 낙동강에서도 엽록소 *a* 농도가 높고 유입수량이 크게 증가한 7~8월에 연간 총부하량의 58.6%가 유입되는 것으로 보고되었다 (김 등, 1996). 대청호에서는 1차생산에 의한 유기물 부하가 총유기물 부하량의 68%를 차지하는 것으로 조사되었다 (황 등, 1994).

식물플랑크톤의 1차생산 이외에도 연안대의 수초지대가 발달한 호수에서는 대형 수생식물이 유기물 생성량의 큰 비중을 차지하고 있다. 경포호에서는 1차생산의 45%가 수생식물에 의하여 이루어지고 내부생성유기물이 총유기물의 64%를 차지하는 것으로 조사되었다 (Kim *et al.*, 1991). 팔당호의 경우에도 수초대가 발달하여 내부생성유기물에 대한 수초의 기여도가 34%로 높게 나타났다 (김과 김, 1990). 이는 우리나라의 많은 호수에서 유기물 부하가 유역으로부터 들어오는 외부생성유기물과 함께 호수 내에서 수초나 식물플랑크톤에 의해 생성되는 유기물도 많은 부분을 차지하는 것을 의미한다.

식물플랑크톤의 EOC 배출량을 고려하여 내부생성유기물을 계산한 결과, EOC를 고려하지 않은 김 등 (1999)의 결과와 차이를 보였다. 본 연구에서 1986년부터 1995년까지의 1차생산에 의한 유기물 부하량은 EOC가 차지하는 비율을 고려한 결과 김 등 (1999)이 계산한 $11,497 \text{ tC}$ 보다 $1,622 \text{ tC yr}^{-1}$ 가 증가한 $13,119 \text{ tC yr}^{-1}$ 로 계산되었다. 또한 내부생성유기물의 총유기물 부하량에 대한 기여도도 51.4%에서 54.9%로 증가하였다. 식물플랑크톤의 EOC 배출량을 고려하여 유기물 부하를 산정함으로써 내부생성유기물의 계산에서 EOC에 의해서 존재하던 오차를 제거할 수 있었다.

본 연구에서 소양호의 1차생산이 유기물 부하량의 1/2을 차지하는 것으로 조사되었으나 실제로 생태계에 미치는 영향은 이보다 월등히 클 것으로 생각된다. 외부기원유기물은 대부분 육상에서 머물러 있는 동안 미생물의 분해를 거치고 남은 물질이므로 대부분 부식질로 이루어진 난분해성물질들이다. 따라서 분해속도가 매우 느리고 호수 내에서 미생물에 의해 충분히 분해되지 않고 생물의 에너지원으로 기여하지 못한 채 하류로 흘러나가게 된다 (Choi *et al.*, 2001). 게다가 외부기원유기물 부하는 여름 홍수에 집중되며 이 홍수 유출수는 호수 표층수보다 수온이 낮아 수심 20m 이하의 깊은 곳으로 흘러들어가므로 표층층으로의 확산이 억제된다. 댐의 방류구 전방류구의 수심이 이 깊이에 해당하므로 여름에 방류수에 포함된 유기물은 주로 외부기원유기물이라고 볼 수 있다. 따라서 호수내 생물의 대부분은 생분해성이 높은 식물플랑크톤의 광합성에 의존하게 되며, 결과적으로 호수 내에서 타기영양생물에 의해 이용되고 분해되어 에너지원으로 기여하는 물질은 대부분 표층층의 1차생산에 의해 생성된 유기물이므로 1차생산의 호수생태계에 대한 기여도는 총유기물 부하량에 대한 상대적 기여도로부터 계산된 것보다 월등히 크다.

호수에서 유기물의 근원을 파악하는 것은 부영양화에

대한 대책을 세우는데 필요한 기초적인 조사이다. 이와 더불어 호수에 존재하는 유기물의 분해, 유출경로까지 파악을 한다면 수질관리의 목표를 설정하는데 매우 유용한 자료로 이용될 수 있을 것이다. 따라서 호수의 유기물이 수생물의 호흡에 의한 분해와 침강에 의한 퇴적, 그리고 방류구를 통한 유출경로 등을 포함한 좀 더 포괄적인 호수의 유기물 순환에 대한 연구가 이어져야 할 것이다.

적 요

소양호로 유입되는 유기탄소량을 측정하였으며, 유기탄소 부하량에 대한 유기물 기원의 기여도를 계산하기 위해서 내부생성유기탄소와 외부기원유기탄소를 측정하였다. 내부생성유기탄소는 EOC를 고려한 식물플랑크톤의 1차생산력으로부터 계산하였으며, 외부기원유기탄소는 유입수의 유기탄소 농도와 양어장의 유기탄소 배출량으로부터 구하였다. 1차생산력은 가두리 양식장이 설치된 1987년부터 증가하여 1995년까지 높은 분포를 보였으며 가두리가 철거된 1998년 이후 급격히 감소하였다. 내부생성유기탄소와 외부기원유기탄소의 부하는 여름철에 집중되었으며, 7~9월에 연간 부하량의 43.2%와 71.7%가 각각 유입되었다. 1차생산력은 여름철에 1,000 mgC m⁻² d⁻¹ 이상으로 증가하였으며 겨울철에 비교적 낮았다. 식물플랑크톤의 EOC 배출율도 1차생산이 증가하여 수체의 DOC 농도가 높은 여름철에 높았다. 전체조사기간동안 내부생성과 외부기원유기물의 평균적인 기여도는 각각 총부하량의 53.6%와 46.4%를 차지하였다. EOC 배출율은 1차생산력의 4.4~21.2%를 차지하였으며, 1차생산력 산정에서 식물플랑크톤의 EOC 배출율이 고려되어야 할 것으로 보인다.

사 사

본 연구는 학술진흥재단의 1997년도 대학 부설 연구소 과제 (0897086-1-3)로 수행되었습니다.

인 용 문 헌

김동섭, 김범철. 1990. 팔당호의 1차생산. 한국육수학회지 23: 167-179.
 김범철, 김동섭, 황길순, 최광순, 허우명, 박원규. 1996. 부영양한 낙동강수계에서 유기물오염에 대한 조류 1차생산의

기여도. Algae 11: 213-237.
 김범철, 황길순, 김동섭. 1999. 소양호의 1차생산과 유기탄소 수지. 한국육수학회지 32: 200-206.
 신정환, 김영환. 1986. 산소소비량 (OC) 분석법. "환경오염측정 분석법 수질분야 2; DO, BOD, OC 측정분석법"에서. 녹원출판사, 서울.
 조규송, 김범철, 안태석. 1990. 내수면 양식업의 수질오염 영향에 관한 연구. 한국환경과학연구협의회 연구보고서.
 최지용, 신은성. 1998. 농업지역 비점오염원 관리방안 연구. 한국환경정책·평가연구원 연구보고서.
 허우명, 김범철, 안태석, 이기중. 1992. 소양호 유역과 가두리로부터의 인 부하량 및 인수지 (Phosphorus Budget). 한국육수학회지 25: 207-214.
 황길순. 1996. 소양호의 1차생산력과 부영양화에 관한 연구. 강원대학교 박사학위청구논문.
 황길순, 김동섭, 허우명, 김범철. 1994. 대청호의 1차생산과 가두리양어장 및 유역으로부터의 유기물부하량. 한국육수학회지 27: 299-306.
 Bell, R.T. and J. Kuparinen. 1984. Assessing phytoplankton and bacterioplankton production during early spring in Lake Erken, Sweden. Appl. Environ. Microbiol. 48: 1221-1230.
 Berman, T. 1976. Release of dissolved organic matter by photosynthesizing algae in Lake Kinneret, Israel. Freshwater Biol. 6: 13-18.
 Berman, T. and O. Holm-Hansen. 1974. Release of photo-assimilated carbon as dissolved organic matter by marine phytoplankton. Mar. Biol. 28: 305-310.
 Brock, T.D. and J. Clyne. 1984. Significance of algal excretory products for growth of epilimnetic bacteria. Appl. Environ. Microbiol. 47: 731-734.
 Chen, W. and P.J. Wangersky. 1996. Rates of microbial degradation of dissolved organic carbon from phytoplankton cultures. J. Plankton Res. 18: 1521-1533.
 Cho, J.C., M.W. Kim, D.H. Lee, and S.J. Kim. 1997. Response of bacterial communities to changes in composition of extracellular organic carbon from phytoplankton in Daechung Reservoir (Korea). Arch. Hydrobiol. 138: 559-576.
 Choi, K., B. Kim, and U.H. Lee. 2001. Characteristics of dissolved organic carbon in three layers of a deep reservoir, Lake Soyang, Korea. Internat. Rev. Hydrobiol. 86: 63-76.
 Chrost, R.J. and M.A. Faust. 1980. Molecular weight fractionation of dissolved organic matter (DOM) released by phytoplankton. Acta Microbiol. Pol. 29: 79-88.
 Covency, M.F. 1982. Bacterial uptake of photosynthetic carbon from freshwater phytoplankton. Oikos 38: 8-20.
 Dahm, C.N., S.V. Gregory, and P.K. Park. 1981. Organic

- carbon transport in the Columbia River. *Estuar. Coast. Shelf Sci.* **13**: 645–658.
- Fukushima, T., J.C. Park, A. Imai, and K. Matsushige. 1996. Dissolved organic carbon in a eutrophic lake; dynamics, biodegradability and origin. *Aquat. Sci.* **58**: 139–157.
- Gran, G. 1952. Determination of the equivalence point in potentiometric titrations. *Part II. Analyst* **77**: 661–671.
- Hama, T. and N. Handa. 1983. The seasonal variation of organic constituents in a eutrophic lake, Lake Suwa, Japan. Part II. Dissolved organic matter. *Arch. Hydrobiol.* **98**: 443–462.
- Hansen, L., G.F. Krog, and M. Spondergaard. 1986. Decomposition of lake phytoplankton. 1. Dynamics of short-term decomposition. *Oikos* **46**: 37–44.
- Ignatiades, L. and E.G. Fogg. 1973. Studies on the factors affecting the release of organic matter by *Skeletonema costatum* (Greville) Cleve in culture. *J. Mar. Biol. Ass. (U.K.)* **53**: 937–956.
- Jørgensen, N.O.G. 1986. Fluxes of free amino acids in three Danish lakes. *Freshwat. Biol.* **16**: 255–268.
- Kim, B. 1987. An ecological study of phytoplankton in Lake Soyang. Ph. D. Thesis. Seoul National University.
- Kim, B., D.S. Kim, G. Hwang, and K.S. Cho. 1991. Primary production of phytoplankton and macrophytes in an eutrophic lagoon, Lake Kyungpo, Korea. *Rep. Suwa Hydrobiol.* **7**: 99–103.
- Kim, B., K. Choi, C. Kim, U.H. Lee, and Y.H. Kim. 2000. Effects of the summer monsoon on the distribution and loading of organic carbon in a deep reservoir, Lake Soyang, Korea. *Wat. Res.* **34**: 3495–3504.
- Lancelot, C. 1983. Factors affecting phytoplankton extracellular release in the Southern Bight of the North Sea. *Mar. Ecol. Prog. Ser.* **12**: 115–121.
- Likens, G.E. 1975. Primary production of inland aquatic ecosystem, In: Primary productivity of the biosphere (H. Lieth and R.H. Whittaker eds.). Springer Verlag, New York.
- Lorenzen, C.T. 1967. Determination of chlorophyll and phaeo-pigments. Spectrophotometric equation. *Limnol. Oceanogr.* **12**: 343–346.
- Mague, T.H., E. Friberg, D.J. Hughes, and I. Morris. 1980. Extracellular release of carbon by marine phytoplankton: a physiological approach. *Limnol. Oceanogr.* **25**: 262–279.
- Nalewajko, C. and D.R.S. Lean. 1972. Growth and excretion in planktonic algae and bacteria. *J. Phycol.* **8**: 361–366.
- Nemeth, A., J. Paolini, and R. Herrera. 1982. Carbon transport in the Orinoco River: Preliminary results, In: SCOPE/UNEP Transport of carbon and Minerals in Major World Rivers, 52, (Degens, E.T., ed.), 357–364. University of Hamburg, Hamburg.
- Platt, T., C.L. Gallegos, and W.B. Harrison. 1980. Photoinhibition of photosynthesis in natural assemblages of marine phytoplankton. *J. Mar. Res.* **38**: 687–701.
- Riemann, B. 1982. Carbon metabolism during a spring diatom bloom in the eutrophic Lake Mossø. *Int. Rev. Gesamten Hydrobiol.* **67**: 145–185.
- Robarts, R.D. and L.M. Sephton. 1989. Phytoplankton extracellular dissolved organic carbon production in a hypertrophic African Lake. *Hydrobiologia* **182**: 137–148.
- Spondergaard, M., B. Riemann, and N.O.G. Jørgensen. 1985. Extracellular organic carbon (EOC) released by phytoplankton and bacterial production. *Oikos* **45**: 323–332.
- Thurman, E.M. 1985. Organic geochemistry of natural waters (ed.). Martinus Nijhoff/Dr W. Junk Publishers, Dordrecht, Netherlands.
- Verity, P.G. 1981. Effects temperature, irradiance, and daylength on the marine diatom *Leptocylindrus danicus* Cleve. II. Excretion. *J. exp. mar. Biol. Ecol.* **55**: 809–834.
- Wetzel, R.G. 1983. Limnology. Saunders College Publishing, Orlando.
- Wetzel, R.G. and B. Manny. 1977. Seasonal changes in particulate and dissolved organic carbon and nitrogen in a hardwater stream. *Arch. Hydrobiol.* **80**: 20–39.
- Wetzel, R.G. and G.E. Likens. 1991. Limnological analyses. 2nd ed. Springer Verlag, New York.
- Wetzel, R.G., P.H. Rich, M.C. Miller, and H.L. Allen. 1972. Metabolism of dissolved and particulate detrital carbon in a temperate hard-water lake. IBP-UNESCO symposium. *Mem. Ist. Ital. Idrobiol.* **29** Supp: 185–243.
- Zlotnik, I. and Z. Dubinsky. 1989. The effect of light and temperature on DOC excretion by phytoplankton. *Limnol. Oceanogr.* **34**: 831–839.

(Received 25 May 2001, Manuscript accepted 16 Aug. 2001)