

수질정화용 인공습지 개방수역에서 유입수질에 따른 식물플랑크톤의 광합성특성 및 유기물생산력

최광순* · 황길순¹ · 김동섭 · 김세원 · 김호준 · 조성주² · 박제철²

(한국수자원공사 시화호환경연구소, ¹수환경연구소,
²금오공과대학교 환경공학과)

Photosynthetic Characteristics and Primary Production by Phytoplankton with Different Water Quality of Influent in Open Waters of Constructed Wetlands for Water Treatment. Choi, Kwangsoon*, Gilson Hwang¹, Dong-sub Kim, Sea-won Kim, Ho-Joon Kim, Seong-Ju Joh² and Je-Chul Park² (Lake Sihwa Environmental Reserch Center, Korea Water Resources Corporation, Ansan 426-730; ¹Aquatic Environment Research Institute, Gunpo 435-040; ²Kumoh National Institute of Technology, Department of Environmental Engineering, Gumi 730-701)

The photosynthetic characteristics and primary production by phytoplankton in open waters of two wetlands (the Banwol and the Donghwa wetland) of Sihwa Constructed Wetland with different water chemistry were investigated to provide the information for the wetland management considering the water treatment efficiency. During the study period (from March to October, 2005) the primary productivity in open waters ranged from 481 to 11,275 mgC m⁻² day⁻¹, which is very high compared with the eutrophic level of 600 mgC m⁻² day⁻¹. From the analysis of the photosynthesis-irradiance (P-I) model parameters, the photosynthetic characteristics may be affected by different concentration and ratio of nutrient (N and P) between two wetlands. Assimilation number (AN) was higher in the Donghwa wetland (average AN: 8.5 gC gChl⁻¹ hr⁻¹) with high P and low N/P ratio than the Banwol wetland (average AN: 5.8 gC gChl⁻¹ hr⁻¹) with high N and high N/P ratio. This result indicates that AN may be concerned with phosphorus than nitrogen and low N/P ratio. Positive correlation (R=0.81) was observed between the initial slope and AN, implying that AN was high in case of phytoplankton having more active photosynthesis ability under low light. On the other hand, maximum photosynthesis (Pmax) was related positively with chlorophyll *a* concentration showing correlation coefficient of 0.47. In this study, considering the high primary production through phytoplankton photosynthesis in open waters of Sihwa Constructed Wetland, the produced organic matter by phytoplankton may affect the water quality within wetland and its efficiency of water treatment. Also, the photosynthetic characteristics may be affected by different nutrient enrichment (especially phosphorus) of wetlands. This study suggests that the production by phytoplankton and its characteristics in open water of constructed wetland for water treatment should be considered to improve the removal efficiency of organic matter.

Key words : primary production, photosynthetic paramenters, phytoplankton, open water, constructed wetland

* Corresponding author: Tel: 031) 400-1461, Fax: 031) 400-1465, E-mail: kchoi@kwater.or.kr

서 론

수중식물의 1차생산은 수중생태계내의 에너지고정 및 물질생산의 기초에너지 생산과정으로서 관심의 대상이 되어 왔으며 (Ichimura, 1967; Wetzel *et al.*, 1972; Pierson *et al.*, 1992), 환경학적으로는 부영양화에 의한 수질오염과 관련하여 호수 영양단계의 판정을 위한 방법으로도 많은 연구가 있었다 (Ichimura and Aruga, 1964; Likens, 1975; Wetzel, 2001).

수생태계의 1차생산자는 식물플랑크톤, 부착조류 그리고 수초 등이 있지만 이들의 1차생산에 대한 상대적인 기여도는 체류시간, 탁도, 수위변동, 수심 등 수체의 환경조건에 의해 결정된다 (Thornton, 1990; Wetzel, 2001). 일반적으로 유속이 빠른 하천에서는 부착조류의 1차생산이 큰 반면 유속이 느린 호수에서는 수심대에 따라 식물플랑크톤과 수초에 의한 일차생산의 기여도가 크다. 한편, 인공습지는 수생식물이 식재된 폐쇄수역 (closed water) 과 물고기 및 야생동물의 휴식지와 산소공급인 개방수역 (open water)으로 구성되어 있기 때문에 수생식물과 부착조류 그리고 식물플랑크톤이 모두 습지의 1차생산자가 될 수 있으며, 1차생산에 대한 각각의 기여도는 식재면적과 open water 면적, 수심과 체류시간 등에 의해 결정된다.

일반적으로 인공습지 설계 시 open water의 면적 규모는 전체 습지면적의 15~50%를 적용하는데 (농업기반공사, 2004), 이는 인공습지에서 1차생산에 대한 식물플랑크톤의 기여도가 적지 않음을 시사한다. 특히 수질정화를 목적으로 조성된 인공습지의 경우에는 영양염류가 풍부한 유입수가 공급되기 때문에 기온이 상승하는 시기에 습지의 open water에서 식물플랑크톤의 대량증식을 가져오고 이러한 결과에 의해 습지의 유입수보다 유출수에서 유기물 및 영양염류 농도가 높게 나타나는 경우가 있다 (EPA, 2000). 즉, 인공습지에서 식물플랑크톤의 과도한 1차생산에 의한 유기물증가는 습지의 수처리 효율을 저하시키는 요인이 될 수 있다. 그러므로 인공습지에서 식물플랑크톤에 의한 유기물의 생산력을 산정하고 평가하는 연구는 수질관리 측면에서 매우 중요하다. 그럼에도 불구하고 국내의 인공습지에서 식물플랑크톤에 의한 1차생산력을 조사한 경우는 거의 없다.

식물플랑크톤에 의한 1차생산의 산정에는 Platt *et al.* (1980)의 광합성-광도곡선 (photosynthesis-irradiance curve; P-I curve)을 주로 이용하는데 이 모델을 통해 얻어진 매개변수는 식물플랑크톤의 광합성특성에 관한 정보를

제공한다. Harrison *et al.* (1985)에 의하면 Platt *et al.* (1980)의 P-I 모델에 의해 얻어진 변수로는 첫째, 주어진 배양광도 범위 중에서 가능한 최대광합성속도를 나타내는 Pmax, 둘째, 낮은 광도영역에서의 광합성속도를 나타내는 P-I curve의 초기기울기 (initial slope: α), 셋째, 적응광도 이상의 높은 광도에서 광합성 속도가 감소하는 정도를 나타내는 광저해계수 (photoinhibition coefficient: β)가 있으며, 이들 변수들은 식물플랑크톤이 수온, 빛, 영양염류 등의 환경변화에 대한 적응성과 종변화에 따라 변화하는 것으로 알려져 광합성특성을 이해하는데 도움이 된다 (Harrison and Platt, 1980; Morris, 1980).

수체의 1차생산력을 비교하고 영양단계를 결정하는데 보통 수표면적당 1일 1차생산 (Daily primary productivity: APd) 또는 수표면적당 연간 1차생산력 (Yearly primary productivity: APy)이 많이 이용된다. 기존 연구의 자료에 의하면 수표면적당 1일 1차생산력이 $600 \text{ mgC m}^{-2} \text{ day}^{-1}$ 또는 $1,000 \text{ mgC m}^{-2} \text{ day}^{-1}$ 이상을 부영양 상태라고 보고되었다 (Likens, 1975). 한편 최대광합성속도 (Pmax)를 식물플랑크톤의 chlorophyll *a* (Chl. *a*) 농도로 나누어 식물플랑크톤의 단위 생체량당의 광합성속도로 1차생산력을 표현하는 P-I 곡선의 동화계수 (assimilation number: AN; $\text{Pmax/Chl. } a$)는 식물플랑크톤의 활동도 (광합성효율)를 나타내는 지표로 사용된다 (Dunstan, 1973; Harrison and Platt, 1980). 일반적으로 AN값의 변화는 여러 환경요인 중 영양염류 농도와 관련이 크며 (Gachter *et al.*, 1974; Glooschenko *et al.*, 1974), 수체의 영양상태가 증가할수록 AN 값도 커지는 것으로 보고되었다 (Ichiki, 1986; Nakanish *et al.*, 1988).

본 연구에서는 국내 최대 규모의 수질정화용 시화호 인공습지에서 식물플랑크톤에 의한 광합성특성과 1차생산력 평가를 통하여 식물플랑크톤의 유기물생산이 습지의 수처리 효율에 미치는 영향에 대해 검토하고 이를 토대로 습지의 수면 관리를 위한 방안을 제시하고자 하였다.

재료 및 방법

1. 조사지 개요

시화호 인공습지는 1996년 7월 정부에서 발표한 “시화호 수질개선 종합관리대책”에 의거 시화호 상류 유입지 천인 반월천, 동화천, 삼화천을 통해 유입되는 생활 및 축산폐수 등 비점오염원에서 발생하는 오염물질을 자연적 정화방법을 이용하여 처리 후 시화호로 유입되도록 하기

위하여 조성되었다. 조성당시 시화호 인공습지로 유입되는 3개 하천의 유역토지이용은 전·답이 43.6%로 전국 평균비율 22.5%와 시화호 유역의 36.1 보다 높아 농업이 우세한 유역특성을 보였다(한국수자원공사, 1997).

시화호 인공습지는 면적 75 ha (750,623 m²)로 국내 최대 규모이며, 1997년 9월에 착공하여 2002년 5월에 본격적으로 운영되고 있다. 그리고 시화호 인공습지는 유입하천별 각각 1개의 습지로 구분되어 총 3개의 습지로 구성되어 있으며, 반월천습지와 동화천 습지는 습지 조성지역의 지형 특성상 고습지와 저습지로 구분되는 반면 삼화천은 고·저습지 구분이 없다(Table 1, Fig. 1).

Table 1. Hydrological characteristics of Sihwa constructed wetland.

Wetland	Bed elevation (a.s.l. m)	Area (ha)	Operating depth (cm)	Hydraulic residence time (days)
Banwol Wetland	High	3.5	30~60	5~10
	Low	1.5		Irregular
Donghwa Wetland	High	3.5	30~60	4~8
	Low	1.5		Irregular
Samhwa Wetland	1.5	7		2.5
Total		75		

2. 조사지점 및 기간

본 연구에서 식물플랑크톤에 의한 1차생산력 측정을 위한 조사는 수질특성(인, 질소)이 서로 다르고, 체류시간이 다른 고습지와 저습지로 구분되어 있는 반월천과 동화천의 open water (반월천침전지 포함)를 대상으로 5개 지점을 선정하여 2005년 3월부터 10월까지 총 11회 실시하였다(Fig. 1).

3. 조사방법

식물플랑크톤의 1차생산력은 용존산소에 의한 명암병법을 이용하였으며, BOD병을 광도별로 배치하여 각각의 광도에 따른 광합성량을 측정하고 P-I 곡선법(Platt *et al.* 1980)과 1일 동안의 일사량 및 일조시간을 이용하여 1일 1차생산량을 계산하였다.

시료 채취는 반월천침전지(St. 1)와 반월천고습지(St. 2), 반월천저습지(St. 3), 동화천고습지(St. 4), 동화천저습지(St. 5) 지점의 open water에서 표층수를 채수하고, 300 mL BOD병에 각각의 시료를 담아 St. 1 지점에서 정오 시간대를 전후로 약 2시간 배양하여 광합성량을 측정하였다. 광도별 광합성량 측정은 수심별로 BOD병을 고정할 수 있는 stainless steel로 제작한 배양조를 이용하였다(Fig. 2).

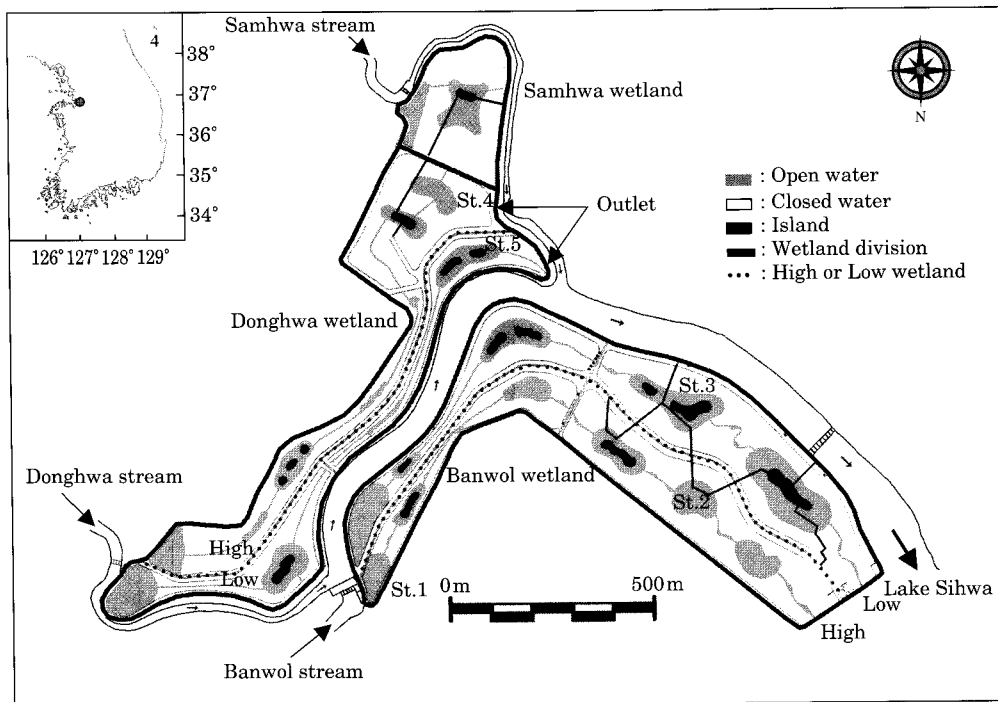


Fig. 1. Map showing the sampling sites for primary production measurement in the Sihwa wetland.

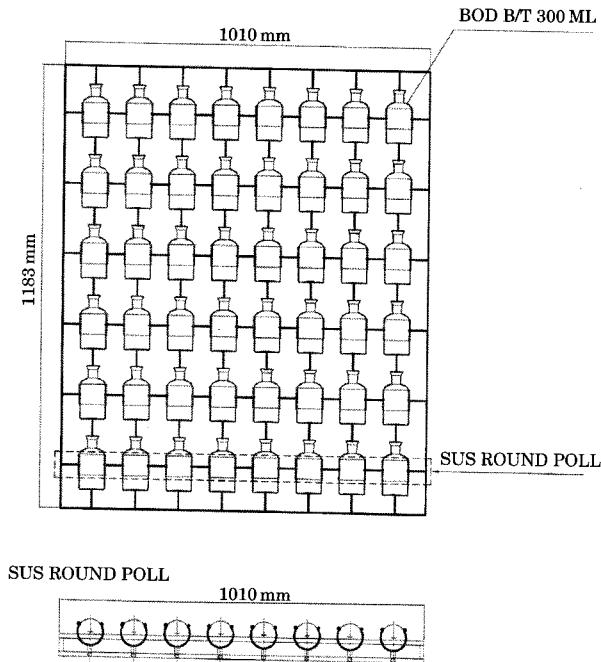


Fig. 2. The apparatus for incubation of BOD bottle with depth in primary production experiment by light-dark bottle method.

식물플랑크톤에 의한 광합성량과 수중에서의 1차생산 및 호흡량을 계산하는 과정은 다음과 같다(Wetzel and Likens, 1991).

- 총생산(GP, gross photosynthesis)

$$\text{mgC m}^{-3} \text{ hr}^{-1} = (\text{LB} - \text{DB}) \times 1000 \times 0.375 / (\text{PQ} \times t)$$
 - 호흡량(R, respiration)

$$\text{mgC m}^{-3} \text{ hr}^{-1} = (\text{IB} - \text{DB}) \times (\text{RQ}) \times 1000 \times 0.375 \times t^{-1}$$
- 여기에서,
- LB : DO (dissolved oxygen concentration in light bottle, mg L^{-1})
 - DB : DO (dissolved oxygen concentration in dark bottle, mg L^{-1})
 - IB : DO (initial dissolved oxygen concentration, mg L^{-1})
 - t : incubation time (hr)
 - PQ : photosynthetic quotient (molecules of oxygen liberated during photosynthesis/molecules of CO_2 assimilation: $+\Delta\text{O}_2 / -\Delta\text{CO}_2 = 1.2$)
 - RQ : respiratory quotient (molecules of CO_2 liberated during respiration/molecules of oxygen consumed: $+\Delta\text{CO}_2 / -\Delta\text{O}_2 = 1.0$)

위의 계산을 통해 얻어진 1일 1차생산량을 하루중의

광량, 엽록소 a 농도, 수심별 광투과도를 이용하여 수표면적당 1일 1차생산량으로 계산하였다. 그리고 시화호 인공습지에서 1일 1차생산력은 수표면적당 1일 1차생산력에 습지의 수표면적을 곱하여 산정하고 해당하는 일의 일수를 곱하고 매월을 합산하여 연간 1차생산으로 산정하였다. 측정하지 않은 1~2월과 12월은 내삽법으로 추정하였다. 위의 단위 수표면적당 1일 1차생산력의 계산 과정을 일련의 모식도는 Fig. 3과 같다.

수표면 및 수심별 광도는 Li-COR의 under water photometer (LI-250A)를 이용하여 10 cm 간격으로 수중광도를 측정하였고, 광도변화의 기울기로부터 흡광계수를 계산하였다. 엽록소 a 농도는 Lorenzen (1967)의 방법에 따라 분석하였고, 용존산소(dissolved oxygen: DO) 농도는 DO meter (YSI 58)를 이용하여 현장에서 측정하였다. 유입수의 부유성고형물(suspended solids: SS), 총인(total phosphorus: TP), 그리고 총질소(total nitrogen: TN)는 공해공정시험법에 의해 측정하였다.

결과 및 고찰

1. 인공습지의 open water내 chl. a 농도 변화

Chl. a 농도는 식물플랑크톤의 생체량을 나타내며, 세포내에서 광합성을 담당하기 때문에 절대량에 따라 1차생산이 차이가 난다. 조사기간 동안 시화호 인공습지의 open water에서 식물플랑크톤의 chl. a 농도는 $9.2 \sim 275.4 \text{ mg m}^{-3}$ 범위를 보였고, 동화천습지($9.2 \sim 188.4 \text{ mg m}^{-3}$)에 비해 반월천습지($13.7 \sim 275.4 \text{ mg m}^{-3}$)에서 높은 값을 보였다(Fig. 4).

고습지와 저습지의 평균 chl. a 농도는 반월천의 경우 저습지가 $132.0 \pm 82.7 \text{ mg m}^{-3}$ 로 고습지의 $88.6 \pm 59.0 \text{ mg m}^{-3}$ 에 비해 높았다(Fig. 4a). 반면 동화천의 경우는 저습지($67.9 \pm 44.7 \text{ mg m}^{-3}$)와 고습지($78.3 \pm 57.3 \text{ mg m}^{-3}$)에서 chl. a 농도는 큰 차이를 보이지 않았지만, 고습지의 chl. a 농도가 저습지에 비해 약간 높았다(Fig. 4b). 다른 습지에 비해 반월천저습지에서 높은 chl. a 농도를 보인 것은 2005년 1월부터 5월까지 반월천저습지 상부에 pilot plant 공사로 인해 물의 유입이 거의 없었고, 이로 인해 이 기간 동안 저습지의 정체환경이 식물플랑크톤의 증식을 가져왔기 때문으로 사료된다. 한편 반월천고습지내 open water의 상·하류간 chl. a 농도분포는 상류부 침전지인 St. 1지점에서 평균 $56.3 \pm 33.7 \text{ mg m}^{-3}$ 로 하류부의 St. 2 지점에 비해 낮았지만 농도의 계절변동은 비슷한 양상을 보였다(Fig. 4a).

1) measure P-I relationship

2) Photosynthesis with light intensity are fitted to P-I model by least square method

$$P = P_s \cdot (1 - e^{-\alpha I}) \cdot e^{-\beta I / P_s}$$

3) diel variation of light intensity

$$I(z) = I_0(1 - R) [\exp(-k \cdot Z)]$$

4) diel variation of productivity is calculated and intergrated

$$P_{zd} = \int_{\text{sunrise}}^{\text{sunset}} P(t) dt$$

5) productivity per area

$$APd = \int_{0m}^{Z_m} P(zd) dz$$

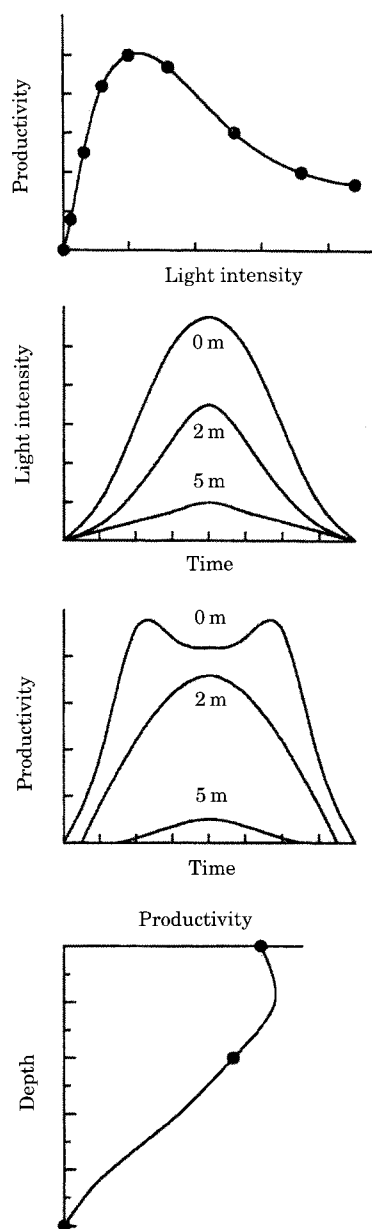


Fig. 3. Schematic diagram showing the measurements and calculation procedure of primary productivity.

습지내 chl. a 농도의 계절변화는 고습지와 저습지간 비슷한 경향을 보였던 반면 반월천습지와 동화천습지 사이에는 다른 경향을 보였다(Fig. 4). 반월천습지의 경우 4월에 급격히 증가하였다가 점차 감소하였고, 7월에 다시 증가하다가 그 이후 감소하는 경향을 보였다(Fig. 4a). 반면, 동화천습지의 경우 7월 고습지를 제외하고 5월에 약간 증가하다가 감소하는 경향을 보였다.

본 연구결과로부터 시화호 인공습지내 open water의 chl. a 농도는 Forsberg and Ryding (1980)이 제시한 부영

양 수준 7 mg m^{-3} 을 모두 상회하는 것으로 나타났으며, 이는 시화호 인공습지에서 식물플랑크톤에 의한 1차생산력이 매우 크다는 것을 시사한다.

2. P-I curve의 모델계수 및 광합성 특성

시화호 인공습지에서 식물플랑크톤의 P-I curve 모델계수는 반월천습지와 동화천습지에서 차이를 보였고, 계절적으로 변동이 컸다(Table 2).

1) 최대광합성속도 (Pmax)와 동화계수 (AN)

조사기간 동안 시화호 인공습지내 5개 open water에서 식물플랑크톤의 최대광합성속도(Pmax)는 42~1,014 mgC m⁻³ hr⁻¹로 chl. a 농도와 마찬가지로 반월천저습지

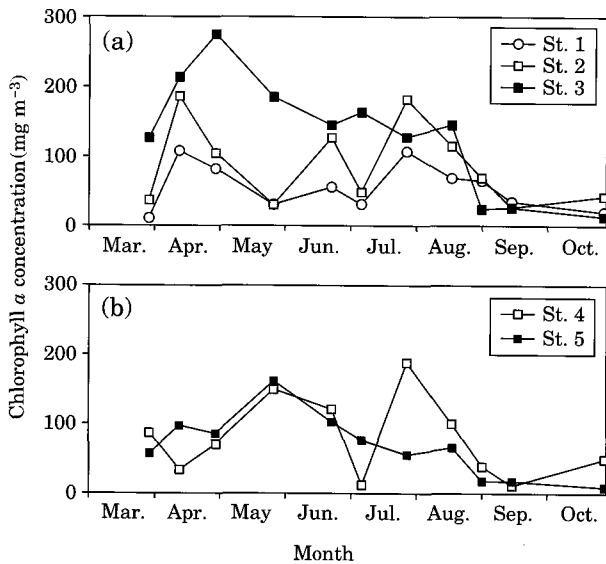


Fig. 4. Seasonal variation of chlorophyll *a* concentration in the Sihwa Constructed Wetland (a: Banwol Wetland, b: Donghwa Wetland).

(St. 3)에서 평균 Pmax가 448 mgC m⁻³ hr⁻¹로 가장 높게 나타났고, 반월천침전지(St. 1)에서 평균 268 mgC m⁻³ hr⁻¹로 가장 낮은 값을 보였다(Table 2). 동화천습지의 Pmax는 고습지(St. 4)에서 평균 439 mgC m⁻³ hr⁻¹, 저습지(St. 5)에서 419 mgC m⁻³ hr⁻¹로 반월천저습지보다 낮은 값을 보였지만 반월천 고습지인 St. 1과 St. 2(평균 Pmax 384 mgC m⁻³ hr⁻¹)보다 높은 값을 보였다. 한편 고습지와 저습지간 Pmax는 반월천 습지에서는 차이가 컸던 반면 동화천습지에서는 비슷한 값을 보였다.

시화호 인공습지 식물플랑크톤의 평균 Pmax는 399.9 mgC m⁻³ hr⁻¹로 소양호의 10년간 식물플랑크톤의 평균 Pmax 12.5 mgC m⁻³ hr⁻¹(황, 1996)보다 수십 배 높은 값을 보였다. Pmax는 수중에서 광합성에 관여하는 식물플랑크톤의 생체량이 많을수록 높게 나타나는데 시화호 인공습지의 경우도 chl. a 농도와 Pmax사이에 양의 상관(R=0.47)을 보인 것으로 보아(Fig. 5a) 시화호 인공습지의 높은 Pmax는 식물플랑크톤의 생체량에 기인된 것으로 판단된다.

한편, 식물플랑크톤의 최대광합성속도를 chl. a 농도로 표준화하여 나타낸 매계변수를 동화계수(AN)라 하며 식물플랑크톤의 광합성효율을 표현하는데 이용된다. 시화호 인공습지 식물플랑크톤의 AN은 0.3~39.2 gC gChl⁻¹ hr⁻¹(평균 6.8 gC gChl⁻¹ hr⁻¹)의 범위로 계절별로 크게

Table 2. P-I model parameters in open water of the Sihwa constructed wetland (Units: Pmax: mgC m⁻³ hr⁻¹, AN: gC gChl⁻¹ hr⁻¹, initial slope (α) and photoinhibition (β): gC m⁻² gChl⁻¹ E⁻¹).

Parameter	Site	Mar. 28	Apr. 11	Apr. 28	May 25	Jun. 22	Jul. 6	Jul. 27	Aug. 17	Aug. 31	Sep. 14	Oct. 27
Pmax	St. 1	42	49	220	96	280	199	687	344	511	336	186
	St. 2	63	52	231	128	523	227	850	606	667	660	219
	St. 3	313	314	975	928	300	570	447	854	309	122	245
	St. 4	119	146	270	654	674	66	1,014	683	649	431	125
	St. 5	106	110	598	594	611	596	796	625	303	85	187
AN	St. 1	3.7	0.5	2.7	3.1	5.0	6.3	6.4	4.9	7.8	9.5	9.1
	St. 2	1.7	0.3	2.2	4.2	4.1	4.6	4.6	5.2	9.5	24.6	5.1
	St. 3	2.5	1.5	3.5	5.0	2.1	3.5	3.5	5.8	12.7	4.6	17.9
	St. 4	1.4	4.3	3.8	4.4	5.6	5.4	5.4	6.8	16.8	39.2	2.5
	St. 5	1.8	1.1	7.0	3.7	6.0	7.8	14.3	9.5	17.0	4.9	20.3
α	St. 1	8.2	3.7	12.4	3.2	9.1	2.9	10.0	11.0	19.7	11.2	15.2
	St. 2	3.1	2.1	4.3	3.8	8.3	3.7	12.0	10.5	18.4	35.0	12.4
	St. 3	10.2	7.4	14.4	16.2	2.5	9.5	7.4	13.8	23.0	8.2	25.0
	St. 4	4.1	7.1	12.2	10.2	10.7	9.2	14.1	16.0	41.0	47.0	3.2
	St. 5	6.0	3.0	26.1	8.9	15.0	24.0	17.6	16.7	45.0	10.3	18.2
β	St. 1	0.07	0.10	0.06	0.60	0.00	0.00	0.76	0.01	0.07	0.14	0.43
	St. 2	0.22	0.03	0.11	0.67	0.09	0.01	0.00	0.00	0.00	0.02	0.00
	St. 3	0.06	0.04	0.01	0.00	0.29	0.06	0.11	0.00	0.00	0.00	1.30
	St. 4	0.21	0.90	0.01	0.27	0.13	0.02	0.09	0.00	0.00	1.23	0.02
	St. 5	0.07	0.05	0.01	0.00	0.16	0.05	0.86	0.00	0.00	0.07	0.96

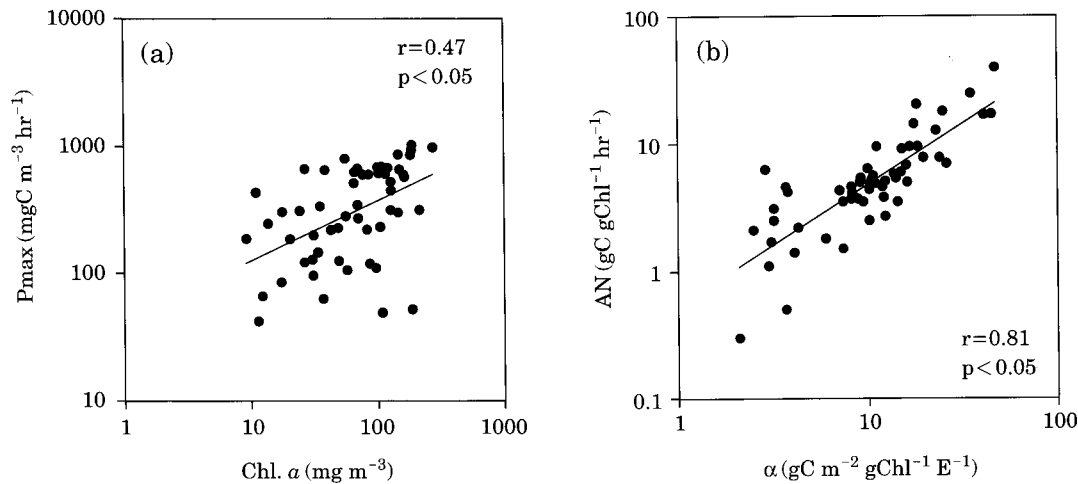


Fig. 5. Relationships between chlorophyll *a* (Chl. *a*) concentration and Pmax, and initial slope (α) and assimilation number (AN).

Table 3. Concentrations of suspended solids (SS), total nitrogen (TN), and total phosphorus (TP) of the inflowing streams into Sihwa constructed wetland, from March to October 2005. Values indicate Mean \pm SD (range) of concentration.

Stream	SS (mg L ⁻¹)	TN (mg L ⁻¹)	TP (mg L ⁻¹)	N/P ratio
Banwol	27.6 \pm 16.3 (10.1~74.7)	9.1 \pm 7.5 (2.0~25.9)	0.299 \pm 0.319 (0.064~1.115)	50.8 \pm 36.0 (5.0~102.2)
Donghwa	22.3 \pm 19.7 (1.0~80.0)	6.2 \pm 2.5 (2.9~10.4)	0.397 \pm 0.202 (0.108~0.800)	19.1 \pm 10.6 (6.5~38.6)

변동하였다(Table 2). 두 습지 모두 고습지와 저습지의 AN 값은 차이를 보이지 않았다. 그러나 동화천습지의 AN값이 평균 8.5 gC gChl⁻¹ hr⁻¹로 반월천습지의 평균 5.8 gC gChl⁻¹ hr⁻¹보다 높은 값을 보여 동화천습지의 식물플랑크톤의 광합성효율이 큰 것으로 나타났다.

일반적으로 식물플랑크톤의 AN값은 수체의 영양염류 농도와 큰 관련이 있으며, 수체의 영양단계가 증가할수록 큰 값을 보이는 것으로 보고되었다(Ichimura and Aruga, 1964; Gachter *et al.*, 1974; Glooschenko *et al.*, 1974). 또한 황(1996)의 연구에 의하면 소양호에서 AN 값이 1986년부터 1989년까지 0.1~8 gC gChl⁻¹ hr⁻¹ 정도의 값을 보이다가 그 이후에는 2~15 gC gChl⁻¹ hr⁻¹로 증가하는 경향을 보였으며, 이러한 AN의 증가를 소양호의 인 농도 증가에 기인되었으며 결과적으로 AN의 연변화는 소양호의 부영양화 과정과 일치한다고 하였다. 시화호 인공습지의 평균 AN 값은 6.8 gC gChl⁻¹ hr⁻¹로 소양호의 10년간 평균 3.7 gC gChl⁻¹ hr⁻¹(황, 1996)보다 컸지만, 팔당댐 하

류 한강의 평균 12.5 gC gChl⁻¹ hr⁻¹보다 작은 값을 보였다. 시화호 인공습지의 영양염류의 농도가 다른 수체에 비해 높음에도 불구하고(Table 3) 낮은 AN을 보인 것은 습지의 탁도유발물질이 많음에 따른 빛 투과도 감소에 기인한 것으로 사료된다.

본 연구에서 두 습지로 유입되는 반월천과 동화천의 영양염류 중 질소와 인의 농도가 매우 상반되는 특성을 보였다(Table 3). 총질소(total nitrogen: TN) 농도는 반월천에서 평균 9.1 mg L⁻¹(2.0~25.9 mg L⁻¹)로 동화천의 6.2 mg L⁻¹(2.9~10.4 mg L⁻¹)보다 높은 값을 보인 반면 총인(total phosphorus: TP) 농도는 역으로 반월천이 0.229 mg L⁻¹(0.064~1.115 mg L⁻¹)으로 동화천의 0.397 mg L⁻¹(0.108~0.800 mg L⁻¹)보다 낮은 특성을 보였다. 두 하천에서 이렇게 상반되는 TN과 TP의 농도는 결국 두 하천의 TN/TP 비의 큰 차이를 보이는 결과를 가져온다(평균 TN/TP 비: 반월천 50.8, 동화천 19.1). 두 하천의 수질특성으로부터 식물플랑크톤의 광합성효율은 질소보다 인 농도 그리고 낮은 TN/TP와 관련이 있는 것으로 사료된다.

2) 광적응 (α)과 광저해 (β) 특성

P-I curve의 낮은 광도 영역에 해당하는 초기 지수증가 부분을 초기기율기(α)라고 하며, 낮은 광에 대한 식물플랑크톤의 광합성능력을 나타낸다. 지금까지 알려진 바로는 초기기율기가 큰 식물플랑크톤 군집에서 대체로 높은 광합성 능력을 보이며, 초기기율기가 크다는 것은 그만큼 활동적이라고 표현할 수 있다(황, 1996). Pickett and Myers(1966)의 보고에 의하면 식물플랑크톤 *Chlorella*

의 광합성에서 초기기율기가 엽록소의 흡광특성에 의해 결정된다고 보고하였다. 식물플랑크톤의 α 값은 해양 플랑크톤의 경우 대부분 $2 \sim 4 \text{ gC m}^{-2} \text{ gChl}^{-1} \text{ E}^{-1}$ (Platt and Jassby, 1976)의 범위였고, 담수인 소양호의 식물플랑크톤의 경우 $1 \sim 30 \text{ gC m}^{-2} \text{ gChl}^{-1} \text{ E}^{-1}$ (황, 1996)의 범위로 환경조건에 따라서도 차이를 보인다. 그리고 황(1996)은 소양호의 경우 초기기율기가 여름이 낮고 겨울에 높은 경향을 보여 계절적으로도 차이를 보인다고 보고하였다.

본 연구에서 시화호 인공습지의 식물플랑크톤의 P-I curve의 초기기율기는 $2.1 \sim 47.04 \text{ gC m}^{-2} \text{ gChl}^{-1} \text{ E}^{-1}$ 로 해양 플랑크톤보다 컸고, 소양호와 비슷한 값을 보였다 (Table 2). 지점별 평균 초기기율기 값은 반월천의 경우 고습지와 저습지에서 각각 $10.3 \text{ gC m}^{-2} \text{ gChl}^{-1} \text{ E}^{-1}$, $12.5 \text{ gC m}^{-2} \text{ gChl}^{-1} \text{ E}^{-1}$ 였고, 동화천습지의 경우는 고습지에서 $15.9 \text{ gC m}^{-2} \text{ gChl}^{-1} \text{ E}^{-1}$, 저습지에서 $17.3 \text{ gC m}^{-2} \text{ gChl}^{-1} \text{ E}^{-1}$ 으로 반월천습지에 비해 동화천습지에서 높은 값을 보였고, 고습지 보다는 저습지에서 높은 경향을 보였다. Heyman (1983)의 연구에 의하면 최적광도 이하의 낮은 광 조건에서 식물플랑크톤의 광합성속도는 영양염류에

의해 크게 제한을 받는 것으로 나타났다. 그러므로 동화천습지의 높은 초기기율기는 AN과 마찬가지로 동화천의 높은 인 농도와 밀접한 관련이 있는 것으로 사료된다. 그리고 시화호 인공습지의 초기기율기와 AN사이에는 높은 양의 상관($R=0.81$)을 보인 것으로 보아 (Fig. 5b) 낮은 광 조건에서 광합성능력이 큰 식물플랑크톤이 광합성효율도 큰 것으로 판단된다.

한편 식물플랑크톤은 최대광합성속도 이상의 높은 광도에서는 광합성이 감소하는 경향이 있는데 이러한 현상을 광저해 (photoinhibition)라고 한다. 본 연구에서 인공습지의 광저해계수 (β)는 평균 $0.18 \text{ gC m}^{-2} \text{ gChl}^{-1} \text{ E}^{-1}$ ($0.00 \sim 1.30 \text{ gC m}^{-2} \text{ gChl}^{-1} \text{ E}^{-1}$)로 반월천습지 ($0.13 \text{ gC m}^{-2} \text{ gChl}^{-1} \text{ E}^{-1}$)보다 동화천습지 ($0.23 \text{ gC m}^{-2} \text{ gChl}^{-1} \text{ E}^{-1}$)에서 높게 나타났다 (Table 2). Vollenweider and Nauwerck (1961)의 보고에 의하면 고광도의 가시광선이 광저해의 원인으로 한낮에만 나타난다고 하였으나, 그 이후의 연구 (Lorenzen and Fast, 1976; Jokiel and York, 1984; 김 등, 1994)는 광저해 현상이 자외선에 의해 영향을 받는다고 하였다. 특히 김 등(1994)의 연구에 의하면

Table 4. Daily primary productivity (APd) in the fresh water ecosystems of Korea and the criteria of trophic state.

Study sites & periods		APd ($\text{mgC m}^{-2} \text{ day}^{-1}$) (mean \pm SD)	References	
Sihwa wetland	St. 1	583 ~ 8,436 (3,535 \pm 2,820)	In this study	
	Banwol wetland	St. 2		481 ~ 8,813 (3,726 \pm 3,047)
	St. 3	1,027 ~ 11,275 (5,143 \pm 3,660)		
	Donghwa wetland	St. 4		612 ~ 10,325 (4,406 \pm 3,469)
	St. 5	742 ~ 6,902 (4,244 \pm 2,751)		
Lake	Soyang (1984 ~ 1988)	100 ~ 1,800	Kim & Kim (1989)	
	(1989 ~ 1995)	50 ~ 5,000	Hwang (1996)	
	Paldang (1987 ~ 1988)	500 ~ 1,000	Kim and Kim (1990)	
(1993 ~ 1994)	730 ~ 2,300	Kim (unpublished)		
Dachong	(1991)	200 ~ 2,490	Hwang <i>et al.</i> (1994)	
	(1993 ~ 1994)	100 ~ 2,470	Kim (unpublished)	
Stream	Han (1993 ~ 1994)	140 ~ 4,980	Kim (unpublished)	
	Nakdong (1986 ~ 1987)	20 ~ 2,600	KOWACO (1987)	
	(1991 ~ 1992)	130 ~ 2,050	Lee <i>et al.</i> (1993)	
Sonakdong (1991 ~ 1992)	280 ~ 12,700	Lee <i>et al.</i> (1994)		
Criteria of trophic state	Eutrophic	> 600	Likens (1975)	
	Mesotrophic	250 ~ 1,000		
	Oligotrophic	< 300		

UV-A의 유무에 따라 식물플랑크톤의 1차생산력이 최고 50%까지 감소된다고 보고하였다. 이러한 광저해 현상은 낮은 광도에 장기간 적응한 경우나 또는 영양염류의 부족과 같은 불리한 환경조건에 있는 경우에도 나타나는 것으로 알려져 있다(Belay and Fogg, 1978; Marra, 1978). 시화호 인공습지의 경우는 영양염류 농도가 비교적 높으므로 영양염류 부족에 의한 광저해 현상 보다는 낮은 광도와 관련이 있는 것으로 사료된다. 실제 인공습지의 광투과도가 20~50 cm에 불과할 정도로 낮고 습지내의 식생대 사이로 물이 흐르면서 수생식물의 줄기와 잎 등에 의하여 빛이 차단된 지역이 넓게 분포하므로 인공습지의 광저해 현상은 낮은 광도조건에 기인된 것으로 사료된다.

3. 식물플랑크톤의 일차생산력 평가

P-I curve에 의하여 산정된 광합성속도는 광도에 따라 달라지고, 하루 중의 일사량도 일출부터 일몰까지 시간에 따른 변화가 크게 나타나므로 한정된 시간에 측정된 값으로 1일 1차생산량을 계산하는 것은 무리가 있다. 따라서 광합성속도는 단지 단위시간당 식물플랑크톤이 고정된 탄소(또는 방출한 산소)를 나타내며, 1차생산으로 나타낸 값은 단위시간당(보통 1일로 표시하며, 낮 시간동안 이 광합성량의 수십배 누적합으로 나타냄) 일정 면적에서 식물플랑크톤에 의해 고정된 총탄소량(또는 방출된 산소량)으로 표시한다(Fig. 3). 단위면적당 1일 1차생산($\text{mgC m}^{-2} \text{day}^{-1}$)은 수계의 영양단체를 구분하는데 이용되기도 하여 $600 \text{ mgC m}^{-2} \text{day}^{-1}$ 이상을 부영양호로 구분한다(Likens, 1975). 수계가 부영양상태에 있다는 것은 유입되는 유기물보다 수체 내부에서 1차생산에 의하여 생성되는 유기물이 많다는 것을 의미한다.

본 연구에서 시화호 인공습지의 1차생산력은 $481 \sim 11,275 \text{ mgC m}^{-2} \text{day}^{-1}$ 로 계절과 지점에 따라 변동이 컸으며, chl. a 농도와 같이 반월천 저습지($1,027 \sim 11,275 \text{ mgC m}^{-2} \text{day}^{-1}$)에서 높은 값을 보였다(Table 4). 대부분 호수와 하천에서의 1차생산력은 연중 대체로 낮고 강우기 이후에 일시적으로 남조류의 대량 발생시에 높게 나타나는 반면에 시화호 인공습지에서는 연중 매우 높은 상태를 유지한다는 점이 특징적이다. 시화호 인공습지의 평균 1차생산력은 $4,211 \text{ mgC m}^{-2} \text{day}^{-1}$ 로 Likens (1975)의 분류에 의하면 부영양화 수준보다 매우 높은 값을 보였다(Fig. 6, Table 4).

지금까지 습지에서의 1차생산은 주로 수생식물을 중심으로 평가되어 왔으며, 수중의 식물플랑크톤에 대한 관심은 낮았다. 따라서 습지의 식물플랑크톤에 의한 1차생산

은 거의 조사된 경우가 없어서 비교할 만한 자료가 없지만 국내 대형호수에 비해 매우 높은 값을 보였고, 남조류의 대량발생으로 극심한 오염상태를 보이던 서낙동강에서 $12,700 \text{ mgC m}^{-2} \text{day}^{-1}$ (이 등, 1994)와 비슷한 생산력을 보이고 있다(Table 4). 이는 시화호 인공습지의 식물플랑크톤은 최대성장에 가까운 밀도와 생산력을 보이고 있으며, 식물플랑크톤에 의한 습지내부의 유기물생산이 습지의 수질에 큰 영향을 미칠 수 있음을 시사한다. 결국 식물플랑크톤의 과도한 1차생산에 의한 습지내 유기퇴적물의 증가는 인공습지의 수질정화기능을 저해할 수 있는 요인이 될 수 있다. 현재 시화호 인공습지는 유입수의 BOD가 평균 10 mg L^{-1} 이하로 낮은 반면 영양염류인 인과 질소의 농도는 매우 높고, 습지의 체류시간이 5일로

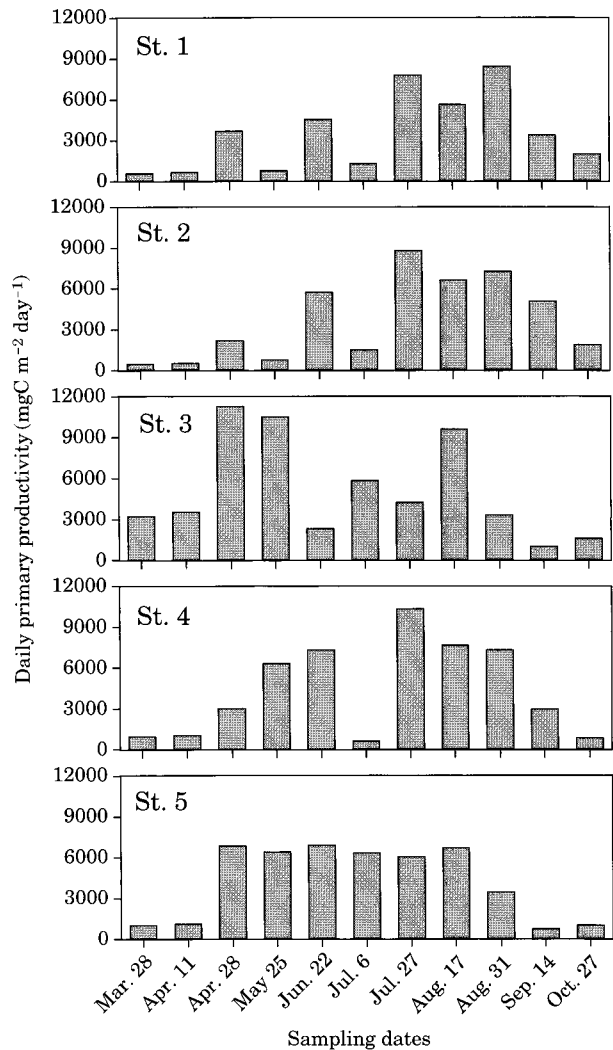


Fig. 6. Daily primary productivity (APd) in open waters of the Sihwa Constructed Wetland.

비교적 긴 편으로 식물플랑크톤의 유기물생산이 활발히 이루어 질 수 있는 환경조건을 가지고 있다. 또한 시화호 인공습지의 경우 전체습지 면적중 open water의 면적이 20%으로 식물플랑크톤에 의한 유기물생산이 습지의 유기물 생산에 큰 기여를 할 것으로 사료된다. 본 연구의 결과로부터 수질정화용으로 조성된 시화호 인공습지의 수처리효율을 향상시키기 위해서는 체류시간을 짧게 해주거나 open water의 면적을 줄여 식물플랑크톤의 증식을 억제하거나 또는 증식한 식물플랑크톤이 습지외부로 유출되지 않도록 관리하여야 할 것으로 본다. 특히 습지 유출부에 위치한 open water의 경우는 유출수의 수질에 직접적인 영향을 미칠 수 있으므로 식물플랑크톤의 증식을 억제하는 관리방안이 필요할 것으로 사료된다.

적 요

본 연구는 국내 최대의 수질정화용 인공습지인 시화호 인공습지의 개방수역(open water)에서 식물플랑크톤에 의한 광합성특성 및 유기물생산력을 조사·평가하여 효율적인 습지관리를 위해 open water 관리방안의 기초자료를 제공하기 위함이다. 식물플랑크톤의 광합성특성 및 1차생산력은 유입수의 수질특성과 체류시간이 다른 반월천습지와 동화천습지의 open water에서 조사되었다. 조사기간 동안 시화호 인공습지내 5개 open water에서 식물플랑크톤에 의한 1차생산력은 $481 \sim 11,275 \text{ mgC m}^{-2} \text{ day}^{-1}$ 의 범위로 연중 부영양화 수준을 보였고 계절과 지점에 따라 변동이 컸다. 시화호 인공습지에서 식물플랑크톤의 P-I curve 모델계수를 통한 광합성특성은 두 습지로 유입되는 유입수의 상반되는 수질특성(인과 질소 농도)에 크게 영향을 받는 것으로 나타났다. 최대광합성속도(P_{max})는 $42 \sim 1,014 \text{ mgC m}^{-3} \text{ hr}^{-1}$ 로 chl. *a* 농도와 양의 상관($R=0.47$)을 보였다. 식물플랑크톤의 광합성효율을 나타내는 동화계수(AN) 두 습지 모두 고습지와 저습지의 AN 값의 차이를 보이지 않았지만 동화천습지의 AN 값이 평균 $8.5 \text{ gC gChl}^{-1} \text{ hr}^{-1}$ 로 반월천습지의 평균 $5.8 \text{ gC gChl}^{-1} \text{ hr}^{-1}$ 보다 높은 값을 보여 인 농도가 높은 동화천습지에서 식물플랑크톤의 광합성효율이 큰 것으로 나타났다. 두 하천의 수질특성으로부터 식물플랑크톤의 광합성효율은 질소보다 인 농도 그리고 작은 TN/TP와 관련이 있는 것으로 사료된다. 낮은 광도에 대한 광합성능력을 나타내는 초기기율기와 동화계수 사이에는 높은 양의 상관($R=0.81$)을 보인 것으로 보아, 낮은 광조건에서 광합성능력이 큰 식물플랑크톤이 광합성효율도 큰 것으

로 나타났다. 본 연구에서 시화호 인공습지의 open water에서 식물플랑크톤에 의한 유기물생산이 매우 높은 것으로 보아 식물플랑크톤이 습지의 수질 및 수처리효율에 영향을 미칠 것을 판단된다. 습지의 수처리효율을 향상시키기 위해서는 체류시간을 짧게 해주거나 open water의 면적을 줄여 식물플랑크톤의 증식을 억제하거나 또는 증식한 식물플랑크톤이 습지외부로 유출되지 않도록 하는 관리방안이 필요할 것으로 본다.

사 사

본 연구는 한국수자원공사의 “2005년도 시화호 인공습지 수질정화기능 향상 연구”의 일환으로 수행되었습니다. 시료채취에 도움을 주신 한국수자원공사 시화호 환경연구소 연구원들께 감사 드립니다.

인 용 문 헌

- 김동섭, 김범철. 1990. 팔당호의 일차생산, 육수지 23(2): 167-179.
- 김동섭, Y. Watanabe, 김범철. 1994. 근자외선(UV-A)에 의한 식물플랑크톤의 광합성저해, 육수지 27(2): 145-153.
- 농업기반공사. 2004. 농업용수 수질개선을 위한 인공습지 설계·관리 요령.
- 산업기지개발공사. 1978. 4개댐 저수지수질 조사 보고서.
- 이진애, 조경제, 권오섭, 정익교, 문병용. 1994. 낙동강 하구 생태계 식물성 플랑크톤의 일차생산성, 육수지 27(1): 69-78.
- 한국수자원공사. 1997. 시화지구개발 반월천, 동화천습지조성조경공사 기본 및 실시 설계보고서.
- 허우명, 김범철, 전만식. 1999. 동해한 석호의 부영양화 평가, 육수지 32(2): 141-151.
- 황길순. 1996. 소양호 1차생산력과 부영양화에 관한 연구, 강원대학교 박사학위청구논문.
- Belay, A. and G.E. fogg. 1978. Photoinhibition of photosynthesis in *Asterionella Formosa* (Bacillariophyceae). *J. Phycol.* 14: 341-347.
- Dunstan, W.M. 1973. A comparison of the photosynthesis-light relationships in phylogenetically different marine microalgae. *J. Exp. Mar. Biol. Ecol.* 13: 181-187.
- EPA. 2000. constructed Wetlands Treatment of Municipal Wastewaters. Cincinnati, Ohio.
- Fosberg, C. and S. Ryding. 1980. Eutrophication parameters and trophic state indices in 30 Swedish waste-receiving lakes. *Archiv fur Hydrobiologie* 89: 189-207.
- Gachter, R., R.A. Vollenweider and W.A. Glooschenko.

1974. Seasonal variations of temperature and nutrients in the surface waters of lakes Ontario and Erie. *J. Fish. Res. Board Can.* **31**: 275-290.
- Glooschenko, W.A., J.E. Moore, M. Munawar and R.A. Vollenweider. 1974. Primary production in lakes Ontario and Erie: A comparative study. *J. Fish. Res. Int. Soc. Gt. Lakes Res.* p. 40-49.
- Harrison, W.G., T. Platt and M.R. Lewis. 1985. The utility of light-saturated models for estimating marine primary productivity in the fiels; A comparison with conventional "simulated" in situ methoss. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.* **42**: 864-872.
- Harrison, W.G. and T. Platt. 1980. Variations in assimilation number of coastal marine phytoplankton; Effects of environmental co-variates. *J. Plankton Res.* **2**: 249-260.
- Heyman, U. 1983. Relationship between production and biomass of phytoplankton in four Swedish lakes of different trophic status and humic content. *Hydrobiologia* **101**: 89-104.
- Ichiki, S. 1986. Primary production measurements in the south basin of Lake Biwa. *Rep. Shiga. Pref. Inst. Pub. Hlth. And Environ. Sci.* **21**: 160-166.
- Ichimura, S. 1964. Environmental gradient and its relation to primary productivity in Tokyo Bay. *Records Oceanogr. Works Japan* **9**: 115-128.
- Ichimura, S. and Y. Aruga. 1964. Photosynthetic natures of natural algal communities in Japanese waters. In: Recent Researches in the Fields of Hydrosphere, Atmosphere nad Nuclear Geochemistry (Miyake, Y. and T. Koyoma eds.), Maruzen, Tokyo.
- Jokiel, P.L. and R.H. York. 1984. Importance of ultraviolet radiation in photoinhibition of microalgal growth. *Limnol. Oceanogr.* **29**: 192-199.
- Kim, B. and D.S. Kim. 1989. Primary productivity by photosynthesis-irradiance model method in Lake Soyang and the behavior of model paramenters. *Korean J. Limnol.* **22**: 167-177.
- Lee, J.A, K.J. Cho, O.S. Kwon and I.K. Chung. 1993. A study on the environmental factors in Naktong Estuarine Ecosystem. *Korean J. Phycol.* **8**: 29-36.
- Likens, G.E. 1975. Primary production of inlandaquatic ecosystems. In: Primary Productivity of the biosphere (Lieth, H. and R.H. Whittaker eds.). Springer Verlag, New York.
- Lorenzen, C.J. 1967. Determination of chlorophyll and pheo-pigments: spectrophotometric equation. *Limnol. Oceanogr.* **12**: 343-346.
- Lorenzen, M.W. and A.W. Fast. 1976. Primary production in the sea. In: Ecology of the sea (Eds D.H. Cushing and J.J. Walsh eds.). Blackwell Scientific Publications, Oxford.
- Marra, J. 1978. Phytoplankton photosynthetic response to vertical movement in a mixed layer. *Mar. Biol.* **46**: 203-208.
- Morris, I. 1980. The Physiological Ecology of Phytoplankton. University of California Press, Berkeley.
- Nakanish, M., T. Narita, N. Suzuki and O. Mitamura. 1988. Assimilation number and primary productivity of phytoplankton in the south basin of Lake Biwa. *Jpn. J. Limnol.* **49**: 175-183.
- Pickett, K. and J. Myers. 1966. Monochromatic light saturation curves for photosynthesis in *Chlorella*. *Plant Physiol.* **41**: 90-98.
- Pierson, D.C., K. Pettersson and V. Istvanovics. 1992. Temporal changes in biomass specific photosynthesis during the summer; The regulation by environmental factors, and the importance of phytoplankton succession. *Hydrobiologia* **243-244**: 119-135.
- 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.
- Platt, T. and A.D. Jassby. 1976. The relationship between photosynthesis and light for natural assemblages of coastal marine phytoplankton. *J. Phycol.* **12**: 421-430.
- Thornton, K.W., B.L. Kimmel and F.E. Payne. 1990. Reservoir Limnology: Ecological Perspectives. John Wiley & Sons, Inc. New York.
- Vollenweider, R.A. and A. Nauwerck. 1961. Some observations on the ¹⁴C method for measuring primary production. *Verh. Internat. Verein. Limnol.* **14**: 134-139.
- Wetzel, R.G. 2001. Limnology. 3th ed., Academic Press, New York.
- Wetzel, R.G. and G.E. Likens. 1991. Limnological Analysis. 2th ed., Springer Verlag., New York.
- Wetzel, R.G., P.H. Rich, M.C. Miller and H.L. Allen. 1972. Metabolism of dissolved and particulate detrial carbon in a temperate hard-water lake. *Mem. Ist. Ital. Idrobiol.* **29**(suppl.): 185-243.

(Manuscript received 6 September 2006,
Revision accepted 12 November 2006)