

해수에 잠긴 인공기질 표면에서 미세조류의 부착과 성장 : II. 엽록소와 일차생산력

심재형 · 강정훈 · 조병철 · 김웅서¹ · 배세진¹
서울대학교 해양학과 및 해양연구소, ¹ 한국해양연구소 해양생물연구단

The Microalgal Attachment and its Growth on the Artificial Surfaces Immersed in Seawater: II. Chlorophyll *a* and Primary Productivity

JAE HYUNG SHIM, JUNG HOON KANG, BYUNG CHEOL CHO
WOONG-SEO KIM¹ AND SE JIN PAE¹

Department of Oceanography and Research Institute of Oceanography, Seoul National University, Seoul 151-742, Korea
¹Biological Oceanography Division, Korea Ocean Research and Development Institute, Ansan,
P.O. Box 29, Seoul 425-600, Korea

해수에 잠긴 인공기질 표면에서 노출시간에 따른 부착미세조류의 성장과정을 이해하고자 유리슬라이드에 부착한 미세조류의 수도 변화와 엽록소 농도 변화를, 그리고 커버글래스에 부착한 미세조류의 엽록소 농도 변화와 일차생산력 변화를 인천항내에서 1996년 5월과 6월 그리고 1997년 1~2월에 걸쳐 조사하였다. 유리슬라이드 상의 부착미세조류 군집의 엽록소 농도와 부착미세조류의 수도는 연구기간동안 각각 최대 62.5 mg chl *a* m⁻²와 144 × 10³ cells cm⁻²를 나타냈다. 엽록소 농도는 노출시간에 따라 증가하였으며, 부착미세조류의 수도변화와 유의성 있는 상관관계를 나타냈다 ($r^2=0.79$, $p<0.001$). 커버글래스 상의 엽록소 농도는 5월, 6월에 노출기간동안 각각 최대 31.1 mg chl *a* m⁻²과 65.4 mg chl *a* m⁻²를 나타낸 뒤 감소하였다. 그러나 1~2월에는 98.9 mg chl *a* m⁻² 까지 계속 증가하였다. 일차생산력은 5월과 6월 그리고 1~2월에 각각 최대 63.1 mgC m⁻² h⁻¹, 347.0 mgC m⁻² h⁻¹ 그리고 78.3 mgC m⁻² h⁻¹의 값을 보였다. 5월과 6월의 일차생산력은 엽록소 농도 변화와 같은 양상으로 노출시간에 따라 증가하다가 감소하였다. 그러나 1~2월의 일차생산력은 노출 26일 이후 감소하였고, 엽록소 농도는 계속 증가하였다. 증가하던 일차생산력이 현저히 감소한 두 가지 경우는 엽록소 농도와 광량당 P^B의 감소가 같이 나타난 경우(5월, 6월)와 광저해로 인한 광량당 P^B의 감소에 기인한 것으로 보이는 경우(1~2월)였다. 본 연구결과는 해수에 잠긴 인공기질표면에 부착한 미세조류의 엽록소 농도와 일차생산력 측정을 통해 생물막 형성과정 중에 나타나는 부착미세조류의 생물량과 생리적 상태의 변동을 신속하게 분석할 수 있음을 시사하였다.

To understand the growth of attached microalgae to the immersed artificial surfaces in seawater with exposure time, chlorophyll *a* (chl *a*) concentration and abundance of attached microalgae to glass slides, and primary productivity and chl *a* concentration on coverglasses were investigated in Incheon Harbour in May, June 1996 and January-February 1997. Chl *a* concentrations of microalgae and abundances of diatoms attached to glass slides reached 62.5 mg chl *a* m⁻² and 144×10³ cells cm⁻², respectively, during the study period. Chl *a* concentrations increased with exposure time, and they were significantly correlated with the abundances of attached diatoms ($r^2 = 0.79$, $p<0.001$). The chl *a* concentrations of attached microalgae on coverglass reached the maximum values of 31.1 mg chl *a* m⁻² and 65.4 mg chl *a* m⁻², and then decreased in May, June 1996. But in January-February 1997, the chl *a* concentration increased continuously up to 98.9 mg chl *a* m⁻². The primary productivity reached the maximum values of 63.1 mgC m⁻² h⁻¹, 347.0 mgC m⁻² h⁻¹ and 78.3 mgC m⁻² h⁻¹, respectively, in May, June and January-February. The primary productivity in May and June varied in accordance with chl *a* concentrations. But in January-February, the primary productivity decreased abruptly from 26 days of exposure while chl *a* concentration continued to increase. Two cases that primary productivity decreased abruptly seemed to be caused by decrement of chl *a* and light specific P^B (chl *a* specific primary productivity) (May and June) and by decrement of light specific P^B due to photoinhibition (January-February). The results of present study indicated that chl *a* concentrations and the primary productivity of microalgae attached to artificial surfaces immersed in seawater would expedite analysis of dynamics of biomass and physiological status of attached microalgae during biofilm formations.

서 론

해수에 잠긴 인공기질 표면에 부착한 미세조류 군집의 발달과정을 이해하기 위해 기존에는 주로 수도(abundance)를 조사하였고, 일부 엽록소 농도를 측정하기도 하였다. 이 두 가지 방법으로 노출시간이 증가함에 따라 부착미세조류 군집의 수도와 생물량이 변화하는 양상(Tuchman and Blinn, 1979; 심 등, 1998)을 파악할 수 있었다. 또한 장시간 노출 후에는 미세조류 군집 내에서 미소천이(micro-succession)가 나타나는 현상(Hoagland *et al.*, 1982; 심 등, 1998)도 종 조성에 따른 수도를 통해 확인이 가능하였다. 그러나 노출시간에 따라 증가하는 수도와 종 조성의 변화만으로는 미세조류 군집의 생물막 발달과정에서 물질순환 및 에너지 흐름에 기여하는 기능적 역할을 이해하는데 한계가 있다. 인공기질 표면에서 진행되는 미세조류의 부착 후 발달과정은 환경 요인(예: 광, 수온 등)과 관련되어 나타나는 성장의 결과이므로, 환경요인의 변화에 따른 부착미세조류 군집의 반응을 이해하기 위해서는 일차생산력 측정이 필요하다. 또한 성장과정이 진행되는 동안 교란에 의해 미세조류 군집이 영향을 받아 생물량이 변화하게 되며(Hoagland, 1983), 변화된 부착미세조류 군집은 교란이 있기 전과 상이한 형태로 발달될 것으로 보인다. 이와같이 변화된 미세조류 군집이 환경요인과 관련되어 발달하는 양상을 기능적인 면에서 이해하기 위해서는 일차생산력 측정을 통한 고찰이 필수적이다.

그러나 인공기질 표면에서 노출시간에 따른 부착미세조류 군집의 발달과정 중 초기성장단계의 일차생산력에 관한 자료가 국내외적으로 미약하고, 부착미세조류 군집의 대사작용에 대한 이해도 매우 부족한 상태이다(Burkholder *et al.*, 1990).

특히 국내의 경우, 해양 미생물막의 조절에 필요한 일차생산력의 관련자료가 전무한 상태이다. 따라서 본 연구에서는 엽록소 농도와 $\text{NaH}^{14}\text{CO}_3$ 을 이용한 일차생산력 측정을 통하여 노출시간에 따라 발달하는 부착미세조류 군집의 성장과정과 그 특성을 이해하고자 하였다.

재료 및 방법

기판설치

엽록소 *a*와 일차생산력은 1996년 5, 6월 그리고 1997년 1~2월, 총 3차례에 걸쳐 측정되었으며, 조사정점은 기판설치가 용이하고, 선박표면에 대한 영향을 확인할 수 있는 인천항 내 제 7부두의 한 정점을 택하였다(심 등, 1998). 기판은 아크릴로 제작하여 선박정안 잔교에 줄을 매달아 부이를 띄워 설치하였으며, 기판간 충돌을 방지하기 위해 부이 사이 간격을 일정하게 유지시키고, 기판 노출깊이는 0.7 m로 하였다(Fig. 1). 유리 슬라이드는 부착규조류 수도와 부착미세조류 군집의 엽록소 농도와와의 관계를 조사하고자 이용되었고, 커버글래스는 엽록소 농도와 일차생산력을 측정하기 위해 이용되었다. 커버글래스는 설팅계수병에 넣을 때 손상시키지 않고 원형 그대로 넣을 수 있어서 생물량의 유실 및 세포의 파열로 인한 대사산물의 세포외 방출을 막을 수 있었던 것이 사용시 장점이었다. 또한 일차생산력 측정시 사용된 커버글래스는 분당 붕괴수(dpm) 측정시 커버글래스 자체에 의한 저해효과가 총 dpm의 $0.99 \pm 0.02\%$ 정도로 매우 낮게 나타나 실험에 적절한 인공기질표면으로 판단되었다.

수온, 광량, 영양염

수온은 기판 회수시기마다 수온·염분 측정기(AST500)로 측정하였고, 일차생산력 측정일의 광조건은 광량계(Li-Cor quantum meter, Li-1000)를 사용하여 측정하였다. 기판 회수시기마다 기판이 설치된 주변 표층수를 채수하여 영양염류 분석을 위해 현장에서 GF/F 여과지로 여과하여 10% 염산으로 세척 처리된 20 ml vial에 냉동 보관하였다. 분석은 Grasshoff *et al.*(1983)과 Parsons *et al.*(1984)의 방법을 따라 암모니아(NH_4^+), 질산염($\text{NO}_3^- + \text{NO}_2^-$) 그리고 인산염(PO_4^{3-})을 측정하였다. N/P 비는($\text{NH}_4^+ + \text{NO}_3^- + \text{NO}_2^-$) / (PO_4^{3-})로 구하였다.

엽록소 *a*

90% 아세톤 15 ml을 MgCO_3 용액 2~3 방울과 같이 Whirl -

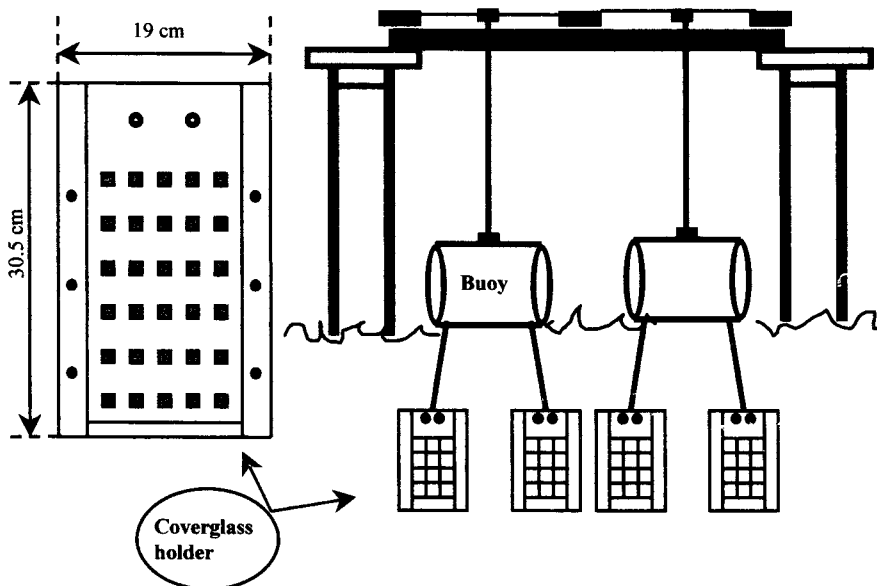


Fig. 1. A diagram showing coverglass holders held to buoys which were tied to a bridge.

pak에 넣은 뒤, 부착미세조류가 붙어있는 유리 슬라이드 2개를 넣고 봉한 뒤 알루미늄 박막(foil)으로 감싸 빛을 차단시킨 다음 4°C 정도의 냉장상태로 보관하였다. 24시간이 경과한 뒤에 분광광도계(Milton Roy, Model Spectronic 1201)로 각 파장에서 흡광도를 측정하여 다음 식을 이용하여 엽록소 a 를 계산하였다 (Franson, 1989).

$$\text{Chlorophyll } a \text{ (mg m}^{-2}\text{)} = [C_a \times \text{volume of extract (l)}] / [\text{area of substrate (m}^2\text{)}],$$

여기서 $C_a = 11.85E_{664} - 1.54E_{647} - 0.08E_{630}$ 이며, E_{664} , E_{647} , E_{630} 은 750 nm의 흡광도로 보정한 각각 664, 647, 630 nm에서의 흡광도이다. 일차생산력 측정에 사용된 커버글래스의 엽록소 농도 측정도 상기사항과 동일하게 하였다. 유리 슬라이드를 이용한 엽록소 농도 측정은 1995년 7월부터 1997년 1~2월까지 총 5차례에 걸쳐 수행되었고, 커버글래스를 이용한 엽록소 농도 측정은 1996년 5월과 6월 그리고 1997년 1~2월에 걸쳐 총 3차례 수행되었다.

일차생산력

일차생산력 측정은 1996년 5월과 6월 그리고 1997년 1~2월에 걸쳐 총 3차례 이루어졌다. 커버글래스(18 mm×18 mm) 50개를 한 개 기판의 50개 구획에 넣어 총 9개의 기판을 해수에 수직으로 노출시켰으며, 노출 시작 일로부터 4~7 일 간격으로 회수하여 부착미세조류 군집의 일차생산력을 측정하였다. 회수시기에 기판을 조심스럽게 해수에서 꺼내어, 건조를 막기 위해 수조에 보관하고, 해수를 채수하여 0.2 μm Nuclepore 막여과지로 걸러 여과해수를 준비하였다. 여과된 해수는 기존의 Hooper and Robinson(1976)의 방법을 개선하여 50 ml씩 Whirl-pak에 넣었다. 커버글래스 5개를 Whirl-pak 하나에 넣어 세개씩 준비하고 암배양용 Whirl-

pak 하나를 같이 준비하였다. 각 Whirl-pak에 최종농도가 3.3 μCi 가 되도록 $\text{NaH}^{14}\text{CO}_3$ 을 주입하고 현장해수가 연속적으로 흐르는 아크릴 수조에서 약 2~3시간(12:00~17:00사이)가량 배양하였다. 배양 후 배양액을 여과한 뒤, 커버글래스를 섬광계수병(scintillation vial)에 넣어 드라이 아이스로 냉동 보관하여 실험실로 운반한 다음 0.5 N HCl 1 ml를 첨가하여 무기탄산염을 제거하고 24시간 경과한 후 섬광액(scintillation cocktail) 10 ml를 첨가하여 섬광 계수기(Packard Tri-Carb, Model 2550)를 이용하여 방사능을 측정하였다. 측정된 dpm은 커버글래스에 의한 quenching 값으로 보정하고, 암배양에서 나온 값을 명배양 한 값으로부터 빼주어 비광합성적 탄소흡수(carbon uptake)를 보정하였다(Booth and Dromgoole, 1984). 여기에서 얻어진 dpm을 동화된 탄소값($\text{mgC m}^{-2} \text{h}^{-1}$)으로 전환할 때, Booth(1987)의 식을 변형한 다음의 식

$$[(\text{동화된 } ^{14}\text{C} \text{ 량}) \times (\text{총 가용 } ^{12}\text{C} \text{ 탄소량}) \times (1.06) \times (3086)] / [(\text{첨가된 } ^{14}\text{C} \text{ 량}) \times (t)]$$

으로 구하였다. 여기서 동화된 ^{14}C 량은 시료의 dpm에서 암배양한 시료의 dpm을 뺀 값이며, 총 가용 ^{12}C 탄소량은 배양액 내(50 ml 내의 총 mgC)의 양이며, 1.06은 미세조류의 광합성시 ^{14}C 보다 ^{12}C 를 더 선호하는 비율이고, t 는 배양시간(hr)이다. 첨가된 ^{14}C 량은 배양 전 배양액에 첨가된 ^{14}C 의 dpm이며, 3086은 1 m^2 에서 얻을 수 있는 시료의 겉수이다.

단위 엽록소 농도당 일차생산력(P^B)은 시간당 일차생산력을 엽록소 농도로 나누어 계산하였고(강 등, 1992), 빛 이용 효율을 의미하는 광합성 효율(photosynthetic efficiency) 즉, 광량당 P^B 는 P^B 를 평균배양광량으로 나누어 계산하였다(Dubinsky, 1980).

Table 1. Nitrogen:phosphorus (N/P) ratios, phosphate concentrations, water temperature and averaged incubation irradiances during 3 experiments

Period	Exposure time (day)	N:P ratio	Phosphate (μM)	Water temp ($^{\circ}\text{C}$)	Irradiance ($\mu\text{E m}^{-2} \text{s}^{-1}$)
1996 2-25, May	1	195.6	0.10	12.1	510
	8	58.0	0.34	15.6	1,393
	12	69.8	0.31	17.4	898
	15	23.5	0.84	18.4	823
	19	35.9	0.48	17.5	542
	24	30.8	0.53	19.3	1,088
1996 11-28, June	5	22.3	0.89	21.1	996
	8	20.6	0.97	22.9	1,440
	12	110.0	0.17	21.4	1,120
	15	22.6	0.89	22.6	482
	18	21.3	0.65	21.4	193
	22	16.0	1.40	21.3	112
1997 24, January - 26, February	8	16.7	1.60	1.9	944
	13	18.3	1.50	1.7	743
	19	15.9	1.60	1.5	515
	26	14.4	1.60	1.7	1,138
	31	17.8	1.50	1.8	937
	41	18.1	1.50	2.6	2,001

결 과

환경요인의 변화

부착미세조류 군집의 일차생산력 측정시 주변수 영양염의 N/P 비는 1996년 5월에 평균 69, 6월에 36, 그리고 1997년 1~2월에는 평균 17로 나타나 겨울철에 가장 낮은 N/P 비를 나타냈다 (Table 1). 수온은 5월에 12~19°C의 범위를 보여 21~23°C의 범위에서 변이를 나타낸 6월에 비해 평균 5°C정도 낮게 나타났다. 1~2월에는 평균 2°C를 나타냈다. 광량은 5월에 모든 실험시기동안 510~1,393 $\mu\text{E m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 의 광량을 나타냈고, 장마기간이었던 6월에는 평균배양광량이 노출후기(112~193 $\mu\text{E m}^{-2} \text{s}^{-1}$)를 제외하면, 482~1,440 $\mu\text{E m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 의 범위를 나타냈다. 1~2월의 평균배양광량은 515~2,001 $\mu\text{E m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 의 범위를 나타냈다.

엽록소 a와 수도

각 실험시기의 노출 기간중 유리 슬라이드에 부착된 미세조류 군집의 엽록소 농도의 변화양상은 증가하면서 감소 또는 정체를 나타냈으나, 전반적으로 노출시간이 경과함에 따라 증가하는 경향을 나타냈다(Fig. 2).

1995년 7월에는 노출 3일 후에 급격히 증가하여 노출 10일째 최대 11.0 mg chl a m^{-2} 를 보이고 그 후 감소하였다. 8월에는 노출 후 8일까지 지수적 증가를 보이다가 노출 11일째 2.4 mg chl a m^{-2} 로 감소한 후, 다시 지수적으로 증가하여 노출 18일째 11.1 mg chl a m^{-2} 로 최대값을 나타냈다.

1996년 5월에는 노출 15일째(24.1 mg chl a m^{-2})까지 지수적 증가를 보인 후 이어 완만히 증가하여 노출 24일째 62.5 mg chl a m^{-2} 로 최대값을 나타냈다. 6월에는 노출 12일째까지 급속히 증가하여 20.4 mg chl a m^{-2} 를 나타냈으며, 이후 다소 감소한 뒤 노출 15일 이후에 다시 증가하여 노출 18일째 62.1 mg chl a m^{-2} 로 최대값을 나타냈다. 그리고 최대값을 나타낸 후 엽록소 농도는 감소하였다.

1997년 1~2월에는 노출 24일째까지 6.4 mg chl a m^{-2} 로 지수적으로 증가하다가, 이후 다소 느리게 증가하여 노출 41일째에는 47.4 mg chl a m^{-2} 로 최대값을 나타냈다.

유리슬라이드상의 부착규조류의 수도변화는 1995년 7월에는 노출 후 6일까지 증가를 보이다가 이후 완만히 증가하여 노출 18일째 최대수도 $57 \times 10^3 \text{ cells cm}^{-2}$ 를 나타냈다. 1995년 8월에는 노출 8일째까지 급증하였다가, 다소 감소한 후 다시 증가하여 노출 14일째 최대수도 $51 \times 10^3 \text{ cells cm}^{-2}$ 를 나타냈다(Fig. 2). 1996년 5월에는 노출 12일째까지 빠르게 증가한 후 약간 감소하였다가 다시 증가하여 노출 19일째 최대수도 $138 \times 10^3 \text{ cells cm}^{-2}$ 를 나타냈다. 1996년 6월에는 노출 12일째까지 급속히 증가한 후 다소 감소하였다가 노출 18일째에 최대수도 $144 \times 10^3 \text{ cells cm}^{-2}$ 를 나타냈다. 1997년 1~2월에는 처음에는 완만히 증가한 후 노출 19일 이후에 초기보다 빠르게 증가하여 노출 31일째에 최대수도 $29 \times 10^3 \text{ cells cm}^{-2}$ 를 나타냈으며 노출 41일째까지 같은 수도로 지속되었다(Fig. 2). 부착규조류의 수도 변화 양상도 엽록소 농도와 유사하였으며, 전반적으로 노출시간이 경과함에 따라 증가하는 경향을 나타냈다.

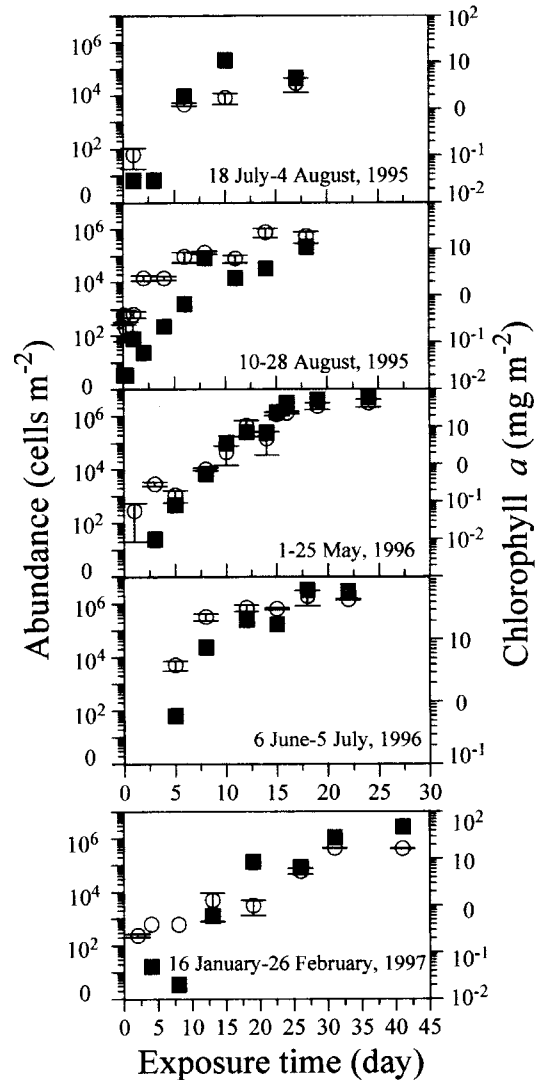


Fig. 2. Abundances of attached diatoms (○) and chlorophyll a (■) of microalgae attached to glass during the study. Bars represent 1 SD.

엽록소 a와 일차생산력

커버글래스에서 발달한 부착미세조류 군집의 엽록소 a 농도는 연구기간동안 노출시간의 증가에 따라 증가후 감소 또는 지속적인 증가를 나타냈다(Fig. 3). 1996년 5월에는 노출 8일째에서 12일째까지 0.02~4.5 mg chl a m^{-2} 로 매우 급속히 증가한 후, 노출 12일째에서 노출 19일째까지 완만하게 지속적으로 증가하여 최대 31.1 mg chl a m^{-2} 을 나타낸 후 다소 감소하였다. 6월에는 노출 8일째까지는 지수적으로 증가하다가(0.6~9.4 mg chl a m^{-2}) 이후 완만히 증가하여 노출 15일째에 최대값 65.4 mg chl a m^{-2} 를 나타낸 후 감소하였다. 1997년 1~2월에는 6.6 mg chl a m^{-2} 을 나타낸 노출 19일째까지는 비교적 빠르게 증가하다가 이후에는 느리게 증가하여 노출 41일째에는 98.9 mg chl a m^{-2} 로 최대값을 나타냈다(Fig. 3).

부착미세조류 군집의 시간당 일차생산력(Fig. 3)은 노출시간이 증가함에 따라 지속적으로 증가하여 최대값을 나타낸 후 급속한 감소를 나타냈다. 1996년 5월에는 노출 8일째에 1.7 mg C m^{-2}

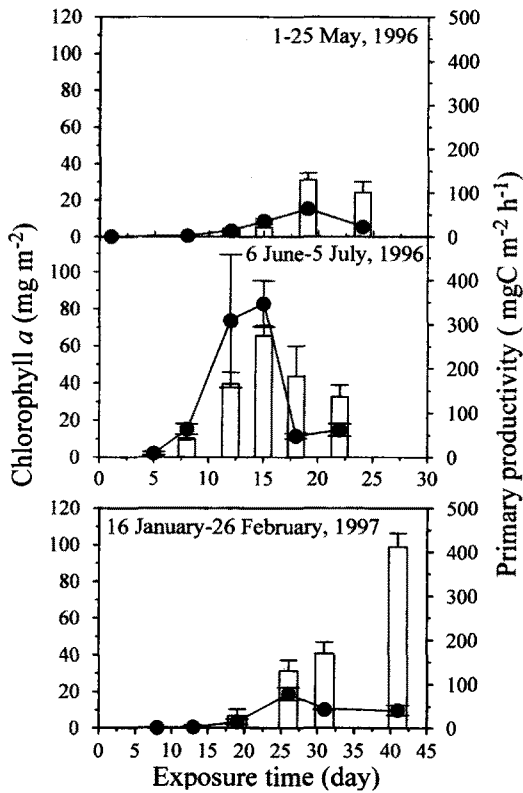


Fig. 3. Chlorophyll *a* (open bars) and primary productivity (●) of microalgae attached to coverglass. Bars represent 1 SD.

h^{-1} 을 나타낸 이후에 증가가 계속 둔화되었고, 노출 19일째에 최대값 $63.1 \text{ mgC m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ 을 나타냈다. 그리고 노출 24일째에 일

차생산력이 감소하였다. 1996년 6월에 최대값은 노출 15일째에 $347.0 \text{ mgC m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ 로 나타났다. 1997년 1~2월에는 노출 13일째에 $1.7 \text{ mgC m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ 를 나타냈고, 그 후 증가는 노출 26일까지 일정하게 유지되었다. 최대값은 노출 26일째에 $78.3 \text{ mgC m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ 를 나타냈으며, 그 후 다소 감소하였다(Fig. 3).

부착미세조류 군집의 일차생산력이 엽록소 농도에 따라 증감을 보인 경우와 달리, 단위 엽록소 농도당 일차생산력(P^B : $\text{mgC mg chl } a^{-1} \text{ h}^{-1}$)은 1996년 5월에 노출 8일째 최대값 $87 \text{ mgC mg chl } a^{-1} \text{ h}^{-1}$ 을 나타낸 후 급감하여 낮은 값을 유지하였다. 6월에는 노출 5일째 최대값 $14.5 \text{ mgC mg chl } a^{-1} \text{ h}^{-1}$ 를 나타낸 후 점차 감소하는 경향을 보였다. 1997년 1~2월에는 전반적으로 5, 6월에 비해 낮은 P^B 값을 보였고, 노출 26일째에 최대값($2.5 \text{ mgC mg chl } a^{-1} \text{ h}^{-1}$)이 나타났으며, 그 후 감소하였다(Fig. 4). 광량 당 P^B [$\text{mgC mg chl } a^{-1} \text{ h}^{-1} / (\mu\text{E m}^{-2} \text{ s}^{-1})$]는 1996년 5월에 최대값(0.0623)이 노출 8일째에 나타난 후, 배양시간에 따라 감소하는 경향을 나타내었다. 6월에는 노출 5일째 0.0149를, 노출 8일째에는 감소된 0.0047을, 그리고 그 후로는 점차적인 증가를 보여 노출 22일째에 0.0169로 가장 높은 값을 보였다. 1~2월에는 전반적으로 5, 6월에 비해 낮은 값을 나타냈고, 노출 19일째에 가장 높은 값(0.0040)을 보인 후 0.0002~0.0022 범위에서 점차적으로 감소하였다.

토 의

5차례의 조사시기에서 유리슬라이드에 나타난 각각의 최대 엽록소 농도는 노출 후 10일(1995년 7월), 18일(1995년 8월, 1996년 6월), 24일(1996년 5월) 그리고 41일(1997년 1~2월)에 나타났다.

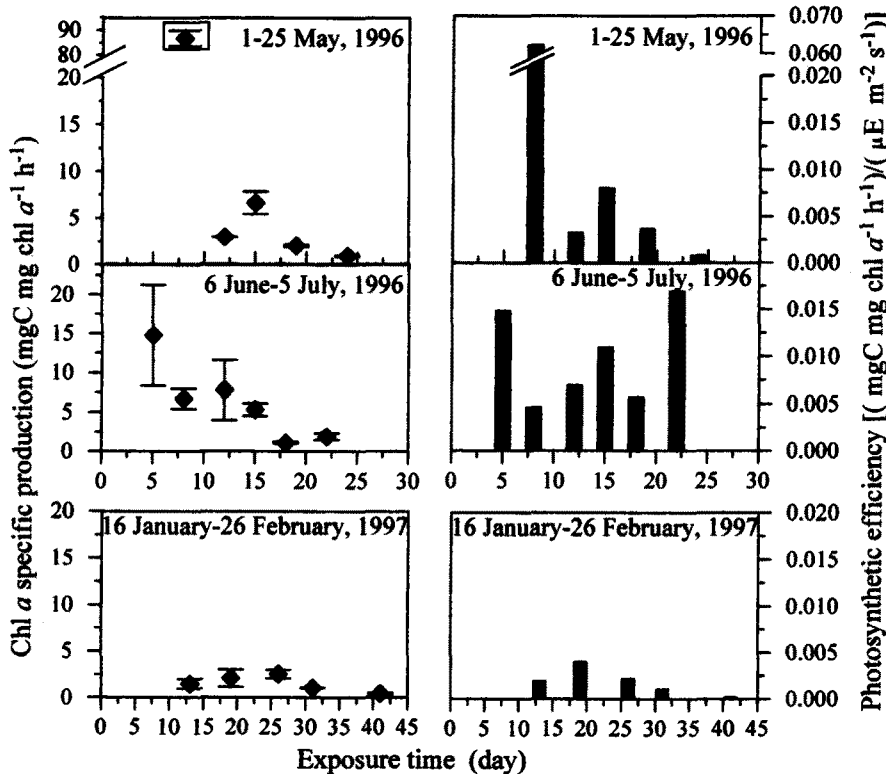


Fig. 4. Variations of chlorophyll *a*-specific primary productivity (P^B) and photosynthetic efficiency of microalgae attached to coverglass during the study. Bars represent 1 SD.

이 최대값 중에 가장 낮은 농도($11 \text{ mg chl } a \text{ m}^{-2}$)를 기록한 시기는 7월이었고, 가장 높은 농도($62.5 \text{ mg chl } a \text{ m}^{-2}$)는 5월에 나타났다. 커버글래스 상에서 $98.9 \text{ mg chl } a \text{ m}^{-2}$ 의 최대 엽록소 농도는 노출기간에 비해 상당히 높게 나타났으며, 한 예로 담수에서 163일의 노출기간동안 나타난 최대 엽록소 농도($36.3 \text{ mg chl } a \text{ m}^{-2}$) 보다 3배 정도 높게 나타났다(Goldsborough and Hickman, 1991). 또한 Cattaneo and Kalff (1979)와 Marcus (1980)는 호수와 저수지에서 노출시간이 각각 120일, 55일이었을 때 최대 엽록소 농도가 각각 $16.4 \text{ mg chl } a \text{ m}^{-2}$, $12 \text{ mg chl } a \text{ m}^{-2}$ 를 나타냈을 뿐이다. 이처럼 짧은 노출기간에 부착미세조류 군집의 엽록소 농도가 높게 나타난 것은 연구수역이 폐쇄된 환경인 것도 한 이유일 것으로 추정된다. Wetzel (1996)은 흐름이 있는 수역에 비해 정체수역에서 부착미세조류 군집의 생물량이 더 높게 나타났음을 보고하였다. Marcus (1980)도 저수지의 지류에서 흐름이 상대적으로 빠른 곳에서 35일 동안 노출된 유리 슬라이드에 나타난 엽록소 *a* 농도가 $0 \sim 5 \text{ mg chl } a \text{ m}^{-2}$ 의 범위에서 점차적으로 증가한 반면에, 흐름이 상대적으로 약한 곳에서는 노출 21, 28, 32일째 각각 30, 80, $176 \text{ mg chl } a \text{ m}^{-2}$ 를 나타내어 흐름이 있는 수역보다 정체수역에서 생물량이 더 높게 나타남을 보고한 바 있다. 또한 부착미세조류 군집의 엽록소 농도가 빠르게 증가한 양상은 부착규조류의 수도가 지속적으로 증가한 양상과 유사하였다($r^2=0.79$, $p<0.001$; Fig. 2). 따라서 짧은 기간동안에 높은 엽록소 농도를 나타낸 것은 높은 부착규조류의 수도와 밀접한 관계가 있음을 알 수 있다. 기존에는 부착미세조류 군집의 발달양상을 확인하기 위해 주로 수도분석이 이용되었다. 그러나 동정과 계수를 포함한 분석 작업을 통해 발달양상을 확인하기까지는 많은 시간이 소요되는 점이 있다. 엽록소 농도 측정은 수도보다 분석시간이 짧고, 수도의 변화를 잘 나타내 주므로 노출시간에 따라 나타나는 발달양상을 곧바로 확인할 수 있는 장점이 있다. 그러므로 향후 연구에서는 수도분석보다 엽록소 농도측정이 효율적인 것으로 판단된다.

한편, 1995년 7월과 8월에 엽록소 농도가 계속적으로 증가하던 도중에 큰 폭으로 감소하였으며, 감소정도는 각각 2.4배, 2.7배였다. 7월에 감소한 시기에는 슬라이드 표면에 따개비가 부착되어 있었고, 이로 인한 부착미세조류 군집의 생물량 감소로 엽록소 농도가 낮게 나타난 것으로 보여진다. 일반적으로 부착미세조류 군집은 노출시간이 지속되면서 초식자의 선택적 섭식, 선택에 의한 교란 그리고 바람에 의한 갑작스런 교란에 영향을 받게 된다(Katoh, 1992). 8월의 경우, 원인은 알 수 없었으나 위에서 언급된 요인들로 인해 생물량의 일부가 소실되어 엽록소 농도가 감소한 것으로 보인다.

커버글래스상에 부착 발달한 미세조류 군집의 일차생산력 증감은 엽록소 농도변화와 유사하게 나타났으나, 항상 유사한 양상을 보이지는 않았다(Fig. 3). 1996년 5월과 6월의 일차생산력 변화양상은 노출시간이 증가함에 따라 엽록소 농도와 같은 양상으로 증가하여 최대값에 도달하였으며, 엽록소 농도의 감소에 따라 감소하였다. 그러나 1997년 1~2월의 일차생산력은 노출기간동안 계속적으로 증가한 엽록소 농도와 달리 노출 26일째에 최대값을 나타낸 후 감소하였다. 겨울철인 1~2월에는 다른 계절(5월, 6월)보다 바람에 의한 갑작스런 교란의 영향이 컸을 것으로 보였으나, 엽록소

농도는 오히려 계속 증가양상을 보여 교란이 부착미세조류 군집에 크게 영향을 미친 것 같지는 않았다. 또한 초식자나 선택에 의한 교란등도 큰 영향을 주지 못한 것으로 보였다.

일차생산력의 변화양상 중에 특징으로 나타난 경우는 두 가지로, 엽록소 농도가 감소하였을 때 일차생산력이 감소한 경우(5월, 6월)와 엽록소 농도는 계속 증가하였으나 도중에 일차생산력이 감소한(1~2월) 경우였다. 일차생산력의 감소는 엽록소 농도가 감소한 경우 외에, 부착미세조류 군집의 광에 대한 이용효율의 감소에 의해서도 나타났다. 각 경우에 일차생산력이 큰 폭으로 감소한 원인을 분석해 보면, 먼저 1~2월에 엽록소 농도가 계속 증가하여 노출 41일째에 가장 높은 값($98.9 \text{ mg chl } a \text{ m}^{-2}$)을 보인 반면, 일차생산력은 노출 26일째($78.3 \text{ mgC m}^{-2} \text{ h}^{-1}$)에 최대값을 나타낸 후 계속 감소하였다. 이와 같은 경우 미세조류의 이용가능한 빛과 영양염이 생물막 내의 하층부까지 도달하는 정도가 표면보다 매우 적기 때문인 것으로 보인다(Stevenson and Glover, 1993). 또한 노출 41일째의 광량당 P^B 가 노출 26일째에 비해 11배 낮게 나타난 것(Fig. 4)으로 보아, 부착미세조류의 광 이용 효율(광량당 P^B)도 이러한 변화를 설명해 주는 것으로 보인다. 엽록소 농도가 노출 26일째에 비해 3배 높게 나타난 노출 41일째 오히려 낮은 일차생산력이 나타난 것은, 2배 높게 나타난 광량($2,001 \mu\text{E m}^{-2} \text{ s}^{-1}$)에 대한 부착미세조류 군집의 광 저해작용이 원인인 것으로 보인다. 본 연구에서 커버글래스 상의 종 조성 및 수도자료는 없었으나, 같은 시기인 1~2월의 유리 슬라이드 상에서는 *Melosira nummuloides*가 우점하여 부착하였다. 같은 재질인 커버글래스에서도 이 종이 우점하였다고 가정한다면, $515 \mu\text{E m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ 이상의 광량과 2°C 이하의 수온을 나타낸 1~2월의 광량당 P^B 가 전반적으로 낮게 나타난 것은 낮은 수온외에도 광 저해에 의한 것으로 생각된다. 기존의 실험결과에 의하면, *Melosira nummuloides*가 포화광도($400 \mu\text{E m}^{-2} \text{ s}^{-1}$)와 10°C 수온에서 보통의 일차생산력을 나타냈음이 제시되었기 때문이다(Booth, 1987). 광량당 P^B (Fig. 4)가 가장 높게 나타난 노출 19일째의 광량은 $515 \mu\text{E m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ 로 다른 시기에 비해 포화광도에 가장 가까운 값으로 Booth(1987)의 결과에 부합되는 것으로 보인다. 따라서 가장 높은 광량이 나타난 노출 41일째에 엽록소 농도가 가장 높게 나타났으나 일차생산력이 낮게 나타난 것은 광저해에 의한 것으로 볼 수 있다.

엽록소 농도감소가 있었을 때 일차생산력이 감소한 경우를 분석해 보면, 먼저 5월의 경우 노출 19일째에서 24일째로 경과하는 동안 광량이 증가하고, N/P비가 감소하며, 수온도 2°C 정도 증가하는 등 환경여건이 좋은 조건으로 변화하였음에도 불구하고 노출 24일째의 일차생산력은 3배 감소하였다(Fig. 3). 이때의 부착미세조류 군집의 엽록소 농도는 노출 19일째에 비해 1.3배 정도만이 감소하였는데, 이는 노출 35일째에서 42일째로 경과하는 동안 1.3배 정도의 엽록소 농도 감소시 1.4배의 일차생산력 감소를 보인 Marcus(1980)의 결과에 비해 다소 큰 폭의 감소였다. 노출 24일째에 나타난 광량당 P^B 는 노출 19일째에 비해 4배이상 감소하였으며, P^B 는 2.2배 감소한 것으로 나타나(Fig. 4), 빛 이용 효율의 저하에 일부 기인한 것으로 추정된다.

6월의 경우도 5월과 유사하여 노출 18일째의 엽록소 농도가 15일째에 비해 약 1.5배 감소하였고 일차생산력은 약 7배 감소하였다. 이는 광량이 약 2.5배 감소함 외에도, 광량당 P^B 가 노출 15

Table 2. Maximum chl *a* concentrations and primary productivities of microalgal community on diverse surface environments

Environments	Study areas	Substrates	Chl <i>a</i> (mg m ⁻²)	Primary productivity (mgC m ⁻² h ⁻¹)	Sources
Marine	Songdo Tidal flat	Sandy-mud	63.2	26.2	Lee, 1991
	Onslow Bay	Sediment	36.4	24.9	Cahoon and Cooke, 1992
	Stellwagen Bank	Sand & Gravel	39.8	20.9	Cahoon <i>et al.</i> , 1993
	Ems-Dollard Estuary	Sediment	140.0	122.0	Colijn and de Jonge, 1984
	Incheon Harbour	Cover glass	65.4	347.0	This study
Freshwater	Lake	Macroalgae	16.4	12.4	Cattaneo and Kalff, 1979
	Reservoir	Glass slide	12.0	22.0	Marcus, 1980

일에 비해 2배 낮게 나타나(Fig. 4), 일차생산력이 감소한 것으로 판단된다. 그리고 노출 18일째에서 22일째로 4일이 경과하는 동안 일차생산력이 계속 진행되었음에도 불구하고 22일째의 엽록소 농도는 18일째에 비해 낮게 나타났다. 이 같은 양상의 원인은 알 수 없으나 계속적인 유실과정이 있었던 것으로 생각된다. 그런데 노출 22일째의 일차생산력은 약간의 증가를 나타냈다. 이는 생물막 하층부분의 부착미세조류 군집이 주변환경의 빛과 영양염에 대해 나타낸 적응정도가 노출 18일째에 비해 다소 증가되었기(Wetzel, 1996) 때문인 것으로 추정된다. 실제로 광량당 P^B의 결과는 22일째의 부착미세조류 군집의 빛 이용 효율이 18일째보다 증가한 것을 보여주고 있다(Fig. 4).

주목할 만한 결과는 5월의 노출 8일째 P^B가 87 mgC mg chl *a*⁻¹ h⁻¹로 매우 높게 나타난 것으로, 이는 지금까지 보고된 담수 부착미세조류에 의한 P^B 값의 범위를 벗어난 값이다. Marcus(1980)의 결과에서는 노출 16일째에 나타난 최대 P^B가 44.4 mgC mg chl *a*⁻¹ h⁻¹로 나타났다. 이와 같이 P^B가 높게 나타난 것은 동시에 측정된 유리슬라이드에서 노출 8일째에 작은 크기의 *Achnanthes* spp.(3.5×10 μm)와 *Nitzschia* spp.(5.5×17.5 μm) 그리고 *Navicula* spp.(5×10.2 μm)가 부착규조류 수도의 70% 정도를 차지한 사실과, 크기가 작은 규조류들의 P^B값이 크기가 큰 종들보다 왕성하다고 한 보고(Findenegg, 1965; Kairesalo, 1980에서 재인용)와 부합한다.

인공기질 표면에 부착 발달한 미세조류 군집의 생물량과 일차생산력은 전반적으로 연안퇴적물상의 저서미세조류 군집보다 풍부한 것으로 보인다(Table 2). 이 같이 생산성이 높은 부착미세조류 군집은 저서성 섭식자에게 좋은 먹이로 제공되며, 이 섭식자는 치자어의 훌륭한 먹이로 이용될 수 있어(Morgan and Kitting, 1984), 해양목장 개발시 어장환경 조성과 지속적인 생산성을 확보, 유지하는 데에도 이용될 수 있는 장점을 내포하고 있다. Microfouling 구성생물중 박테리아(Karande and Srivastava, 1994)와 진균류(fungi)(Gerchakov and Udey, 1984)의 대사산물이 해수에 잠긴 금속표면의 부식에 영향을 미치는 것은 이미 알려져 있다. 규조류는 일반적으로 microfouling 과정중에서 높은 수도와 생물량을 나타내는 것으로 알려져 있으나, 규조류의 대사산물이 금속의 부식에 미치는 영향에 대해서는 잘 알려져 있지 않으므로 향후 연구되어야 할 과제이다.

요약하면, 해수에 잠긴 유리슬라이드 표면에 발달한 부착미세조류 군집의 엽록소 농도는 노출시간에 따라 증가하였으며, 지수적으로 증가한 부착규조류의 수도와 밀접한 관계를 보였다. 따라서 인

공기질 표면에서 발달한 부착미세조류 군집의 엽록소 농도 변화를 측정함으로써 부착규조류의 수도 변화를 파악할 수 있었다. 부착미세조류 군집의 일차생산력이 급감한 두 가지 경우는, 엽록소 농도 감소가 있었을 때 감소한 경우(5월, 6월)와 엽록소 농도가 계속 증가하였으나 일차생산력이 감소한(1~2월) 경우였다. 5, 6월의 일차생산력 감소는 엽록소 농도와 광량당 P^B의 감소와 같이 나타났고, 1~2월의 감소는 광저해로 인한 광량당 P^B의 감소로 설명이 가능하였다. 따라서 부착미세조류 군집의 일차생산력이 증가하다가 감소한 것은 엽록소 농도 감소와 광 이용효율 감소로 인한 것임을 보여주었다.

감사의 글

본 연구는 1994년도 한국과학재단의 연구비 지원으로 수행되었습니다(KOSEF 94-0703-05-01-2). 원고를 검토하여 주신 두 분의 심사위원께 감사드립니다.

참고문헌

- 강연식, 최중기, 정경호, 박용철, 1992. 서해 중동부 연안수역과 경기만에서 일차생산력과 동화계수에 관한 연구. 한국해양학회지, **27**: 237-246.
- 심재형, 강정훈, 조병철, 김용서, 1998. 해수에 잠긴 인공기질 표면에 미세조류의 부착과 성장: I. 부착 및 천이. 한국해양학회지-바다, **3**: 249-260.
- 이창훈, 1991. 인천 송도 조간대 저서미세조류의 일차생산에 관한 연구. 이학석사학위 논문, 서울대학교, 서울, 110 pp.
- Booth, W.E. and F.I. Dromgoole, 1984. Photosynthetic activity of enzymatically separated epiphytic diatoms using an Infra-red Gas Analyzer (IRGA). *Bot. Mar.*, **27**: 319-326.
- Booth, W.E., 1987. Contribution by diatoms to marine algal host-epiphyte photosynthesis. *Bot. Mar.*, **30**: 129-140.
- Burkholder, J.M., R.G. Wetzel and K.L. Klomparens, 1990. Direct comparison of phosphate uptake by adnate and loosely attached microalgae within an intact biofilm matrix. *Appl. Environ. Microbiol.*, **56**: 2882-2890.
- Cahoon, L.B. and J.E. Cooke, 1992. Benthic microalgal production in Onslow Bay, North Carolina, USA. *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, **84**: 185-196.
- Cahoon, L.B., G.R. Beretich Jr, C.J. Thomas and A.M. McDonald, 1993. Benthic microalgal production at Stellwagen Bank,

- Massachusetts Bay, USA. *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, **102**: 179–185.
- Cattaneo, A. and J. Kalf, 1979. Primary production of algae growing on natural and artificial aquatic plants: A study of interactions between epiphytes and their substrate. *Limnol. Oceanogr.*, **24**: 1031–1037.
- Colijn, F. and V.N. de Jonge, 1984. Primary production of microphytobenthos in the Ems-Dollard Estuary. *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, **14**: 185–196.
- Dubinsky, Z., 1980. Light utilization efficiency in natural phytoplankton communities. In: Primary Productivity in the Sea, edited by Falkowsky, P.G., Plenum, New York, pp. 83–97.
- Findenegg, I., 1965. Relationship between standing crop and primary productivity. In: Primary Productivity in Aquatic Environments, edited by Goldman, C.R., University of California Press, Berkeley, pp. 271–290.
- Franson, M.A.H., 1989. Periphyton. In: Standard Method ; For the Examination of Water and Wastewater, edited by Franson, M.A.H., American Public Health Association, Washington, D.C. pp. 1083–1103.
- Gerchakov S.M. and L.R. Udey, 1984. Microfouling and corrosion. In: Marine Biodeterioration: An Interdisciplinary Study, edited by Costlow, J.D. and R.C. Tipper. Naval Institute Press, Annapolis (Maryland), pp. 82–87.
- Goldsborough, L.G. and Hickman M., 1991. A comparison of periphytic algal biomass and community structure on *Scirpus validus* and on a morphologically similar substratum. *J. Phycol.*, **27**: 196–206.
- Grasshoff, K., M. Ehrhardt and K. Kremling (eds.), 1983. Methods of Seawater Analysis. Verlag-Chemie, Weinheim, 419 pp.
- Hoagland, K.D., 1983. Short-term standing crop and diversity of periphytic diatoms in a eutrophic reservoir. *J. Phycol.*, **19**: 30–38.
- Hoagland, K.D., S.C. Roemer and J.R. Rosowski., 1982. Colonization and community structure of two periphyton assemblages, with emphasis on the diatoms. *Amer. J. Bot.*, **69**: 188–213.
- Hooper, N.M. and G.G.C. Robinson., 1976. Primary production of epiphytic algae in a marsh pond. *Can. J. Bot.*, **54**: 2810–2815.
- Kairesalo, T., 1980. Comparison of *in situ* photosynthetic activity of epiphytic, epipellic and planktonic algal communities in an oligotrophic lake, Southern Finland. *J. Phycol.*, **16**: 57–62.
- Karande, A.A. and R.B. Srivastava, 1994. Accelerated corrosion of 304 stainless steel in the presence of marine microbial film. In: Recent Developments in Biofouling Control, edited by Thompson, M.F., R. Nagabhushanam, R. Sarojini and M. Fingerma, A.A. Balkema, Rotterdam, pp. 37–48.
- Kato, K., 1992. Correlation between cell density and dominant growth form of epilithic diatom assemblages. *Diatom Res.*, **7**: 77–86.
- Marcus, M.D., 1980. Periphytic community response to chronic nutrient enrichment by a reservoir discharge. *Ecology*, **61**: 387–399.
- Morgan M.D. and C.L. Kitting, 1984. Productivity and utilization of the seagrass *Halodule wrightii* and its attached epiphytes. *Limnol. Oceanogr.*, **29**: 1066–1076.
- Parsons, T.R., Y. Maita and C.M. Lalli, 1984. A Manual of Chemical and Biological Methods for Seawater Analysis. Pergamon Press, New York, 173 pp.
- Stevenson, R.J. and R. Glover, 1993. Effects of algal density and current on ion transport through periphyton communities. *Limnol. Oceanogr.*, **38**: 1276–1281.
- Tuchman, M. and D.W. Blinn, 1979. Comparison of attached algal communities on natural and artificial substrata along a thermal gradient. *Br. Phycol. J.*, **14**: 243–254.
- Wetzel, R.G., 1996. Benthic algae and nutrition cycling in lentic freshwater ecosystems. In: Algal Ecology: Freshwater Benthic Ecosystems, edited by Stevenson, R.J., M.L. Bothwell and R.L. Lowe, Academic Press, New York, pp. 641–647.

1998년 4월 27일 원고 접수

1999년 4월 22일 수정본 채택