

## 하수처리수를 이용한 인공수로에서 사상성 부착조류의 성장에 영향을 미치는 요인들

박구성 · 황순진\* · 김호섭<sup>1</sup> · 공동수<sup>2</sup> · 신재기<sup>3</sup>

(건국대학교 환경과학과, <sup>1</sup>국립환경과학원 환경총량관리연구부 수질총량과, <sup>2</sup>국립환경과학원 한강물환경연구소, <sup>3</sup>한국수자원공사 수자원연구원)

Factors to Affect the Growth of Filamentous Periphytic Algae in the Artificial Channels using Treated Wastewater. Park, Ku-Sung, Soon-Jin Hwang\*, Ho-Sub Kim<sup>1</sup>, Dong-Soo Kong<sup>2</sup> and Jae-Ki Shin<sup>3</sup> (Department of Environmental Science, Konkuk University, Seoul 143-701, <sup>1</sup>Total Water Pollution Load Research Division, National Institute of Environmental Research, Incheon 404-708, <sup>2</sup>Han River Environment Research Laboratory, National Institute of Environmental Research, Gyeonggi 476-823, <sup>3</sup>Korea Institute of Water and Environment, Korea Water Resources Cooperation, Daejeon 305-730)

This study evaluated the effects of water velocity, substrates, and phosphorus concentrations on the growth of filamentous periphytic algae (FPA) in the two types of artificial channel systems using treated wastewater. Controlled parameters included 5 ~ 15 cm s<sup>-1</sup> for the water velocity; 10 and 20 mm wire meshes, natural fiber net, gravel and tile for the substrates; and 0.05 ~ 1.0 mgP L<sup>-1</sup> for the P concentration. Algal growth rate of FPA was compared using both chl. *a* and dry weight change with time. Under the controlled water velocity range, the growth of FPA increased with the velocity, but the maximum growth rate was shown in the velocity of 10 cm s<sup>-1</sup>. The substrate that showed the maximum growth of FPA differed between the artificial channel and indoor channel, due to the influence of suspended matters which caused the clogging of the meshed substrates. Under the controlled range of P concentration, the growth rates of all three FPA species (*Spirogyra turfosa*, *Oedogonium foveolatum*, *Rhizoclonium riparium*) increased with the P increase, but they showed the differential growth rates among different P concentrations. The results of this study suggest that under the circumstance having an large amount of nutrients FPA develop the biomass rapidly and that even a little increase over the threshold velocity causes the detachment of filamentous periphytic algae. Thus, FPA dynamics in eutrophic streams, such as those receiving treated wastewater, seem to be sensitive to the water velocity. On the other hand, detached algal filaments could deteriorate water quality and ecosystem function in receiving streams or downstream, and thus they need to be recognized as an important factor in water quality management in eutrophic streams.

**Key words :** filamentous periphytic algae, growth rate, current velocity, substrate, phosphorus, artificial channel

\*Corresponding author: Tel: (02) 450-3748, Fax: (02) 456-5062, E-mail: sjhwang@konkuk.ac.kr

## 서 론

부착조류는 하천생태계에서의 주요 1차생산자로서 다양한 기질에 부착 성장하여 높은 생물량과 물질생산을 유지함으로써 생태계의 근집생산과 소비정도를 결정하는 중요한 지표이며 먹이사슬의 근간을 이룬다(조, 1994). 사상성부착조류는 단세포 조류와 달리 수중으로 뿔어나가며 성장하며, 이에 미치는 주요한 환경인자들은 유속, 기질, 광, 영양염 농도 및 존재형태 등으로 알려져 있다(McIntire and Phinney, 1965; McIntire 1966, 1968a; Nalewajko and Lean, 1980; Thomas and David, 1983; Horner *et al.*, 1990; Goldsborough and Michael, 1991; 공과 천, 1999).

사상성 부착조류에 관해서는 성장동태학, 영양염 흡수능(Hwang *et al.*, 1998; 황과 공, 1999), 성장에 영향을 미치는 부착기질, 유속, 계절에 따른 온도와 빛의 영향 등 다양한 환경적 인자들에 대한 연구들이 수행되어 왔다(Stevenson *et al.*, 1996). 부착조류의 생물량은 광량과 유속에 비례하여 증가하나(McIntire and Phinney, 1965; McIntire 1966), 너무 빠른 유속은 부착조류 조체와 수체 사이의 마찰 전단력을 증가시켜 부착조류의 부착을 방해하거나 조류의 일부를 탈리시키기도 한다(Horner *et al.*, 1990; McIntire, 1966, 1968a). 기질의 종류에 따라 부착조류 성장 시기의 차이는 있지만 생물량 증가는 비슷한 경향을 보이며(Thomas and David, 1983), 기질 표면의 거칠기에 따른 생물량 차이는 크지 않은 것으로 알려져 있다(Goldsborough and Michael, 1991). 또한, 담수에서 일반적으로 조류의 성장을 제한하는 것으로 알려진 인 농도가 부착조류 생물량에 미치는 영향은 종간의 성장역학에 있어서의 특이성과 관련된 것으로 알려져 있다(Nalewajko and Lean, 1980).

어떤 하천 환경에서 빛과 유속이 부착조류 성장에 제한요인으로 작용하지 않는다고 가정한다면, 영양염의 증가는 사상성 부착조류의 과도한 성장을 야기하며 이 결과 하천의 수질뿐만 아니라 생태계의 구조와 기능의 변화를 초래할 수 있다. 따라서 부영양상태에서 사상성 부착조류의 성장동태학에 대한 연구는 수질뿐만 아니라 생태계 관리를 위한 중요한 자료로서의 가치가 있다.

국내에서의 부착조류에 대한 기능적 연구로는 인공수로 내 사상성 부착조류의 증식속도 및 영양물질 제거능(공과 천, 1999), 인공기질에 따른 부착조류의 부착능(조, 1994), 하천 내 부착조류의 이입속도 및 기질특이성(정 등, 1996) 하상 부착조류의 일차생산성(신과 조, 1998) 등

이 수행되었으나 사상성 부착조류 성장에 대해 기질과 유속 그리고 영양염 효과 등이 동시에 고려된 연구는 없는 실정이다.

본 연구에서는 영양염 농도가 매우 높은 하수처리장 방류수를 도입한 인공수로에서 사상성 부착조류 성장과 유속과 기질과의 관계를 평가하였다. 또한 인 농도에 따른 사상성 부착조류의 성장에 미치는 영향은 실내배양 실험을 통해 평가하였다.

## 재료 및 방법

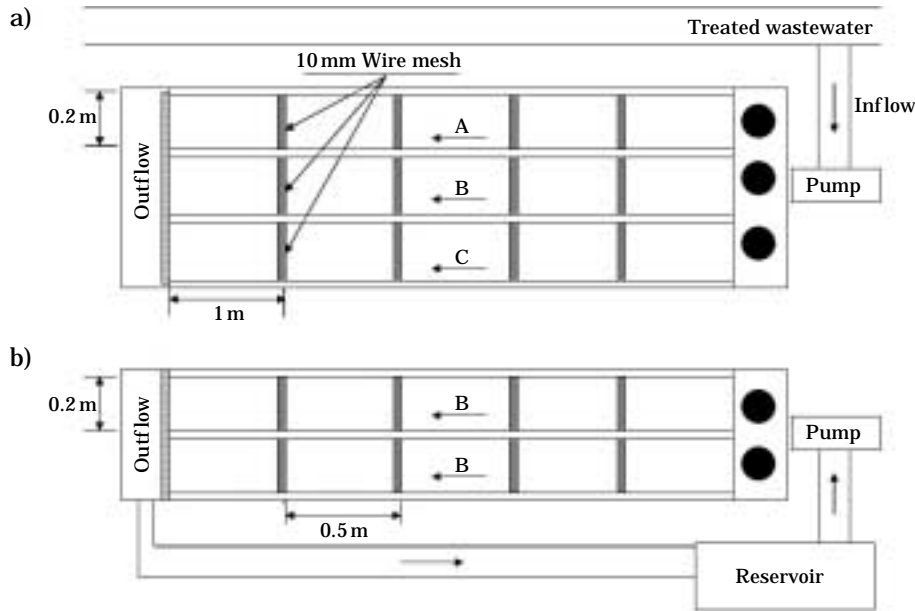
### 1. 유속에 따른 부착조류 생물량

사상성 부착조류 성장에 대한 유속의 영향을 평가하기 위해 아크릴로 제작된 인공수로(폭 20 cm×길이 5 m×높이 30 cm, 3조)에 하수처리방류수를 유입시킨 후 유량 조절밸브(유입구)와 수위조절판(유출구)을 이용하여 유속을 5, 10, 15 cm s<sup>-1</sup>로 조절하였다. 실험에 사용된 기질은 망목이 각각 10 mm인 철망(1 mm wire mesh)을 사용하였고, 수로에 1 m 간격으로 수류에 직각으로 설치하였다(Fig. 1a). 유입수내 부유물질의 혼입을 최소화하기 위해 방류수를 펌핑하는 유입구 부분에 T자형 PVC 파이프를 설치하고 구경 1 cm로 구멍을 뚫어서 만든 스크린 망을 설치하였다. 현장 인공수로 실험은 2001년 4월과 7월에 각각 14, 10일 동안 수행하였다. 실험에 사용된 사상성 부착조류는 하수처리장 방류수에 서식하는 사상성 부착조류를 이용하였으며, 실험기간 동안 주요 우점종은 *Oedogonium foveolatum*이었다(상대풍부도 90% 이상). 인공수로 내 설치된 기질에 사상성 부착조류가 부착하도록 하기 위해서 기질을 설치한 후 하수처리방류수를 수로에 3시간 동안 정체시켰다.

사상성 부착조류의 계절에 따른 성장을 비교하기 위하여, 기질에 따른 부착조류 생물량 실험과 함께 계절별로 각 1회씩 실험을 수행하였다(2001년 4, 7, 11월, 2002년 3월).

### 2. 기질에 따른 부착조류 생물량

기질에 따른 부착조류의 증가율 비교를 위한 실험은 인공수로와 실내에 설치된 아크릴로 제작한 순환수로(폭 20 cm×길이 3 m×높이 30 cm, 2조)(Fig. 1b)에서 수행하였다. 수로 내 유속을 모두 10 cm s<sup>-1</sup>을 유지하였고, 수로 내 수심을 인공수로는 평균 10~15 cm, 순환수로에서는 10 cm를 유지하였다. 인공수로에서 실험은 2001년 11월



**Fig. 1.** Diagram of (a) the artificial channel and (b) indoor channel (A: 15 cm s<sup>-1</sup>, B: 10 cm s<sup>-1</sup>, C: 5 cm s<sup>-1</sup>).

과 2002년 3월에 각각 11, 6일 동안 수행하였다. 실험에 사용된 기질은 망목이 각각 10 mm, 20 mm인 철망 (wire mesh)과, 하천수변 또는 절토면 복원에 일반적으로 이용하는 황마재질을 이용하여 제작한 자연섬유망 (natural fiber net: 망목 크기 20 mm)이며 유속에 따른 생물량 실험과 동일한 방법으로 설치하였다.

순환수로 내에서 사용된 기질은 10 mm 철망, 자연섬유망, 타일 그리고 자갈이며, 10 mm 철망과 자연섬유망은 수류에 직각으로 설치하였고, 자갈과 타일은 수로 바닥에 설치하였다. 기질은 50 cm 간격으로 유입구 쪽에서 자갈, 자연섬유망, 10 mm 철망, 타일 순으로 배열하였다. 순환수로에서 실험수로 사용된 하수처리장 방류수는 실험실로 운반된 후 부유물질을 제거하기 위해 2일 동안 침전시킨 후 200 µm 망으로 여과 한 후 사용하였다. 순환수로에서 사용한 부착조류는 하수처리장 방류구에서 채취한 *Oedogonium foveolatum*으로 실험에 사용하기 전 증류수로 수회 세척하고 1~3 mm 정도로 자른 후 정지된 상태의 순환수로에 2시간동안 방치하여 기질에 자연적으로 부착하도록 하였다. 실험기간 동안 수온은 계속 25°C를 유지하였고, 실험기간 동안 1일 증발되는 시료 양(약 20 L)은 매일 보충해주었다. 광도는 수로 50 cm 상부에 형광등을 설치하여 24시간 70 µmol m<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup>을 유지하였다.

수로 내에 설치된 기질에서 단위면적당 부착조류 순생산성 (Net productivity: µ<sub>A</sub>)은 단위면적당 부착조류의 엽록소 a 함량 혹은 건중량을 이용하여 다음 식에 따라 계

**Table 1.** The composition of STM culture medium for the growth of filamentous periphytic algae.

Macronutrients	mg L <sup>-1</sup>	Micronutrients	µg L <sup>-1</sup>
NaNO <sub>3</sub>	25.5	H <sub>3</sub> BO <sub>3</sub>	186
NaHCO <sub>3</sub>	15.0	MnCl <sub>2</sub>	264
K <sub>2</sub> HPO <sub>4</sub>	1.04	ZnCl <sub>2</sub>	3.27
MgSO <sub>4</sub> · 7H <sub>2</sub> O	14.7	CoCl <sub>2</sub>	0.78
MgCl <sub>2</sub>	5.7	CuCl <sub>2</sub>	0.009
CaCl <sub>2</sub> · 2H <sub>2</sub> O	41.4	Na <sub>2</sub> MoO <sub>4</sub> · 2H <sub>2</sub> O	7.26
		FeCl <sub>3</sub>	9.6
		Na <sub>2</sub> EDTA · 2H <sub>2</sub> O	300

산하였다.

$$\mu_A \text{ (g m}^{-2} \text{ day}^{-1}\text{)} = (B_t - B_0) / \Delta t$$

여기서 B<sub>0</sub>와 B<sub>t</sub>는 배양초기와 t 시간이후의 단위면적당 엽록소 a 혹은 건중량 (g m<sup>-2</sup>)이고, t (day)는 실험시작 후 경과 시간이다.

### 3. 인 농도에 따른 부착조류 성장률

자연하천에서 채집한 3종 (*Spirogyra turfosa*, *Oedogonium foveolatum*, *Rhizoclonium riparium*)의 사상성 부착조류를 대상으로 성장률과 인 흡수능을 비교하였다. 채집한 부착조류는 인을 제거한 STM 배지 (Table 1)에서 일주일 동안 배양한 후 짧게 잘라 동일한 양을 인 농도가 각각 0.05, 0.1, 0.5, 1.0 mg P L<sup>-1</sup>로 조절된 배양액

(300 mL)에 첨가하여, 광도  $158 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ,  $20^\circ\text{C}$ 로 조절된 배양기에서 배양하였다. 2일 간격으로 배양액 20 mL을 추출하여 엽록소 *a* 농도와 배양액 내의 용존성 무기인 농도를 측정하였다. 실험은 3반복으로 수행되었으며 부착조류의 성장률 (Growth rate:  $\mu$ )은 다음 식에 의해 계산하였다.

$$\mu (\text{day}^{-1}) = (\ln C_t - \ln C_0) / (C_0 \times \Delta t)$$

여기서  $C_0$ 와  $C_t$ 는 배양초기와 *t* 시간이후의 엽록소 *a* 농도 ( $\mu\text{g L}^{-1}$ )이고, *t* (day)는 배양시간이다.

부착조류 생물량에 따른 인 흡수율 (P uptake rate:  $R_p$ )은 다음과 같은 식에 의해 계산하였다.

$$R_p (\text{g P g chl. a}^{-1} \text{ hr}^{-1}) = (C_0 - C_t) / (\Delta B \times \Delta t)$$

여기서  $C_0$ 와  $C_t$ 는 배양액내 초기와 *t* 시간이후의 용존 무기인 농도 ( $\mu\text{g L}^{-1}$ )이고, *B*는 엽록소 *a* 함량이며 *t* (day)는 배양시간이다.

#### 4. 생물 및 수질 분석

철망과 천연섬유망 망목의  $2 \text{ cm} \times 2 \text{ cm}$  ( $4 \text{ cm}^2$ ) 면적에 붙어 있는 사상성 부착조류를 가위와 핀셋으로 채취하였고, 자갈과 타일은 칫솔을 이용하여  $4 \text{ cm}^2$  면적을 긁어내어 엽록소 *a* 함량과 조체의 건중량 (dry weight: DW)을 측정하였다. 분석에 앞서 채취된 조류를 증류수로 수회 세척하였고, 핀셋을 이용하여 조류 이외 다른 이물질을 제거하였다. 건중량은  $70^\circ\text{C}$ 에서 72시간 건조시킨 후의 무게를 측정하였고 (APHA, 1995), 엽록소 *a* 농도는 습중량을 측정한 조체의 일부를 100% Methanol에 첨가하여 추출한 후 흡광도를 측정하여 Marker (1972)가 제시한 방법에 따라 계산하였다. 건중량과 엽록소 *a* 농도는 시료가 채취된 단위면적과 분석에 사용된 양을 고려하여 단위면적당 함량으로 환산하였다.

방류수의 암모니아성 질소 ( $\text{NH}_3\text{-N}$ )와 질산성질소의 농도 ( $\text{NO}_3\text{-N}$ )는 Phenate 법과 카드뮴환원법으로 측정하였으며, 용존무기인 (DIP: dissolved inorganic phosphorus)은 ascorbic acid법으로 분석하였다 (APHA, 1995). 총인과

총질소는 각각 persulfate로 분해한 후 ascorbic acid법과 카드뮴환원법을 이용하여 측정하였다 (APHA, 1995).

## 결과 및 고찰

### 1. 하수처리장 방류수 수질

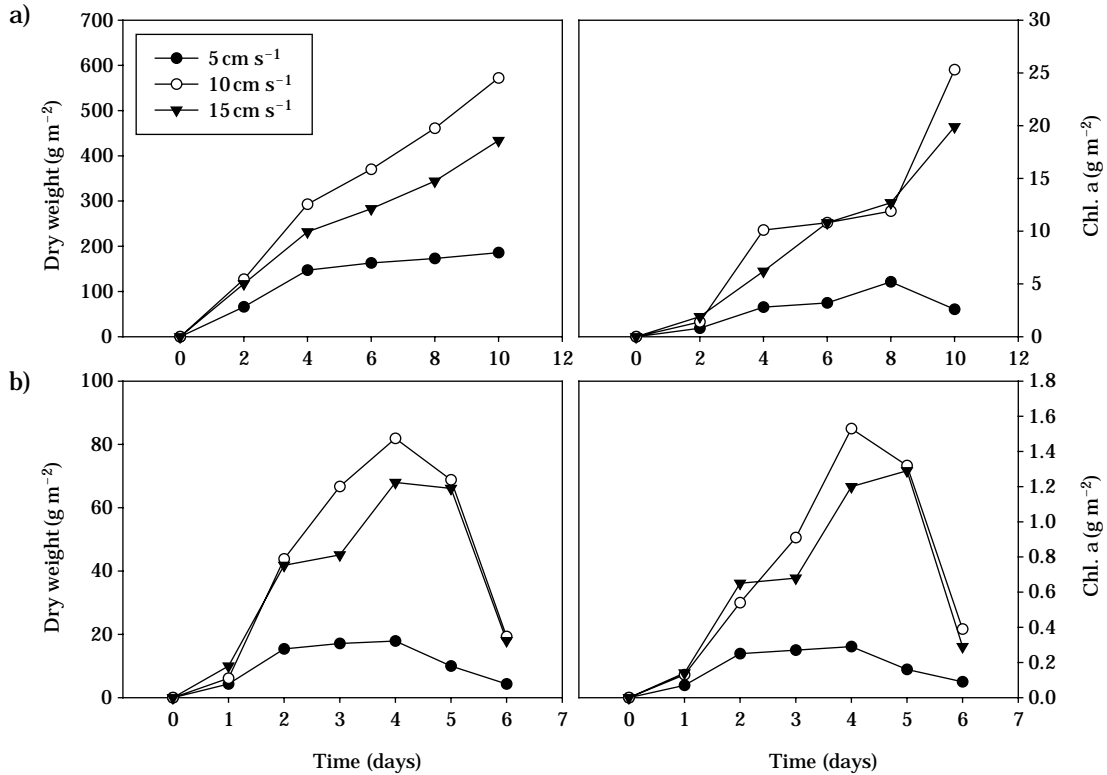
조사기간 동안 인공수로에서 사상성 부착조류 성장에 이용한 하수처리장 방류수 내의 영양염의 농도는 매우 높게 나타났으며, 총질소와 총인은 각각  $14.2 \sim 26.9 \text{ mgN L}^{-1}$ 과  $0.18 \sim 2.70 \text{ mgP L}^{-1}$  범위로 실험기간 동안 상당히 큰 변이를 보였다 (Table 2). 이는 시간에 따른 하수처리장 처리효율이 일정하지 못하였기 때문에 나타난 결과로 추정된다. 방류수 내에 포함된 영양염은 대부분 무기형태로 존재하여 처리장 방류수의 특성을 나타냈다. 인의 경우에는 무기인 (DIP)이 평균 50% (11~100%), 질소는  $\text{NH}_3\text{-N}$ 가 평균 87% (67~94%)을 차지하였다 (Table 2). 수온은 여름 (7월)을 제외하고는  $15 \sim 19^\circ\text{C}$ 의 범위에서 큰 차이가 없었다.

### 2. 유속에 따른 사상성 부착조류의 성장

유속에 따른 부착조류 생물량은 시간에 따라 증가하였고, 순생산성은 본 연구에서 조성된 유속 조건에서 유속이 빠를수록 증가하는 경향을 보였다 (Fig. 2a, Table 3). 망목의 크기 10 mm인 철망을 기질로 이용하였을 때, 건중량에 의한 부착조류의 순생산성은 유속  $10 \text{ cm s}^{-1}$  조건에서  $62.6 \text{ g m}^{-2} \text{ day}^{-1}$ 로 가장 높았으나, 엽록소 *a* 농도에 의한 단위면적당 순생산성은  $15 \text{ cm s}^{-1}$  유속조건에서  $1.58 \text{ g m}^{-2} \text{ day}^{-1}$ 로 가장 높았고, 두 유속 간에 유의한 차이는 보이지 않았다. 반면  $5 \text{ cm s}^{-1}$ 의 유속조건에서는 다른 두 유속조건에 비해 순생산성이 2배 이상 낮게 나타났다. 20 mm 철망을 사용한 조건에서는 건중량 및 엽록소 *a* 농도에 대한 단위면적당 순생산성은 모두  $10 \text{ cm s}^{-1}$  조건의 인공수로에서 높게 나타났다 (Fig. 2b, Table 3). 시간에 따른 부착조류 생물량은 지속적인 성장량을 보인 앞선 실험과 달리 4일 동안의 지속적인 성장 이후 감소

**Table 2.** The ranges of water quality parameters of the treated wastewater used in the artificial channels.

Date	Temp. ( $^\circ\text{C}$ )	TN ( $\text{mgN L}^{-1}$ )	$\text{NH}_3\text{-N}$ ( $\text{mgN L}^{-1}$ )	$\text{NO}_3\text{-N}$ ( $\text{mgN L}^{-1}$ )	TP ( $\text{mgP L}^{-1}$ )	DIP ( $\text{mgP L}^{-1}$ )
Apr. 2001	18.0~19.0	26.8~35.5	24.9~34.1	0.02~0.03	0.32~0.44	0.15~0.28
Jul. 2001	20.8~26.0	14.2~22.7	12.9~21.2	0.11~0.65	0.18~1.01	0.02~0.21
Nov. 2001	17.5~19.3	24.0~28.3	18.5~26.9	1.50~2.11	0.47~1.62	0.47~1.28
Mar. 2002	15.1~17.2	21.3~25.5	-	0.20~1.40	0.70~2.70	0.11~1.72



**Fig. 2.** Temporal variation of dry weight and chl. *a* of filamentous periphytic algae in (a) 10 mm (April 2001) and (b) 20 mm wire mesh (July 2001) in the artificial channels under different water velocities.

**Table 3.** Mean net productivity ( $\text{g m}^{-2} \text{day}^{-1}$ ) of filamentous periphytic algae on the wire mesh substrates under the different water velocities in the artificial channels.

Date	Mesh size	Parameter	Net productivity		
			5 ( $\text{cm s}^{-1}$ )	10 ( $\text{cm s}^{-1}$ )	15 ( $\text{cm s}^{-1}$ )
April, 2001	10 mm	Dry weight	27.4	62.6	50.2
		Chl. <i>a</i>	0.51	1.18	1.58
July, 2001	20 mm	Dry weight	4.5	20.5	17.0
		Chl. <i>a</i>	0.012	0.071	0.046

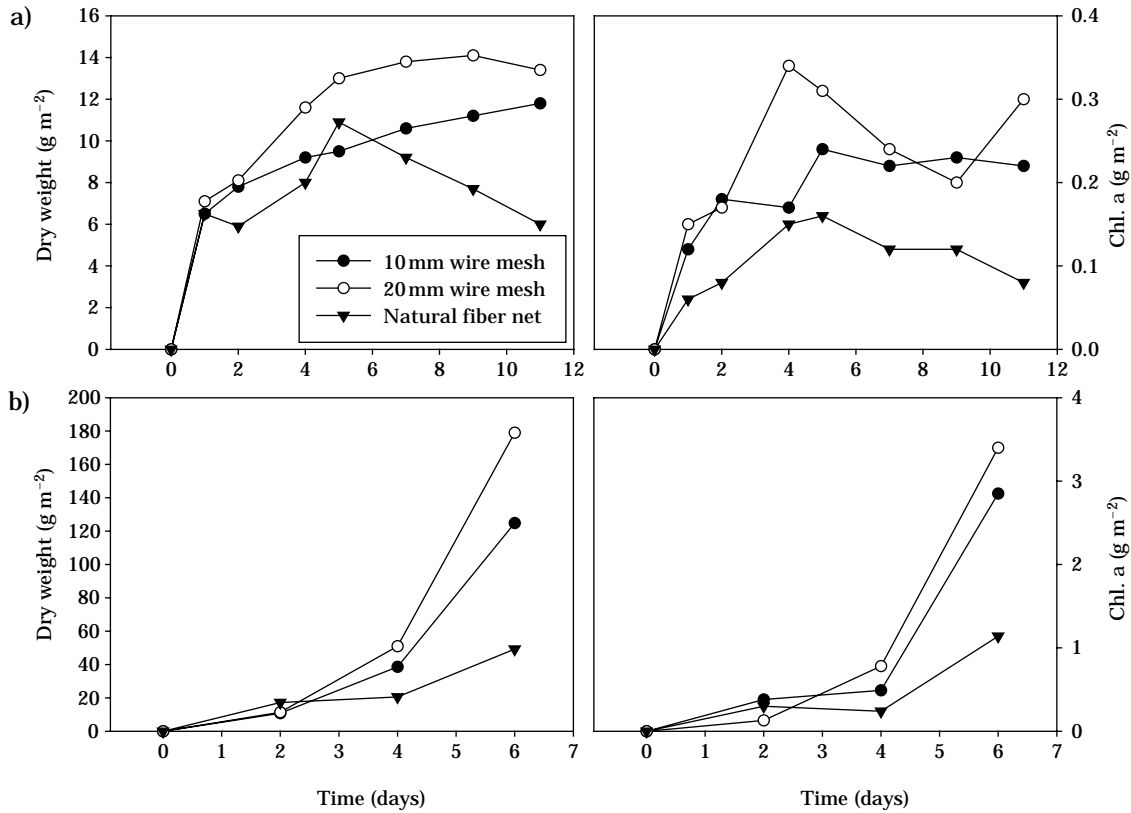
하였는데 이는 이 시기에 기질 내에서 관찰된 높은 밀도의 깔다구 (*Chironomus*) 유충의 섭식에 기인하였다.

유속과 관련된 부착조류 성장의 선행연구들의 결과는 일반적으로 부착조류의 성장이 유속에 비례함을 보여주고 있다. 유속의 증가는 부착조류와 수체와의 접촉면적을 증가시켜 영양염의 이용효율을 높임으로써 조류의 성장을 향상시킨다 (Horner and Welch, 1981; Sand-Jensen and Sondergaard, 1981; Horner *et al.*, 1983; Stevenson, 1983). McIntire (1996)의 결과에서는 0~50  $\text{cm s}^{-1}$ 의 유

속 범위에서 낮은 유속보다는 높은 유속조건에서 부착조류의 증가율이 높게 나타났고, Horner *et al.* (1990)은 20~80  $\text{cm s}^{-1}$ 의 범위 내에서 60  $\text{cm s}^{-1}$ 의 유속에서 부착조류 성장이 가장 높게 나타났음을 보고하였다.

본 연구에서 유속조건으로 조성된 범위 (5~15  $\text{cm s}^{-1}$ )는 기 연구된 문헌에서 제시된 유속에 비해 느리므로 유속이 빠를수록 높은 성장률을 기대하였으나 사상성 부착조류의 성장률은 10  $\text{cm s}^{-1}$  유속에서 가장 높았다. 이는 영양염이 풍부한 조건에서는 사상성 부착조류의 성장이 매우 활발하여 그 결과 발달된 조체의 무게로 인해 15  $\text{cm s}^{-1}$  조건에서 부착조류가 탈리됨으로써 나타난 결과로 판단된다.

기질로부터 부착조류를 탈리시키는 요인으로는 빠른 유속이나 갑작스러운 유속변화 그리고 부유물질 등이 고려될 수 있다 (McIntire and Phinney, 1965; Horner *et al.*, 1990). 너무 빠른 유속은 부착조류 군집형성을 저해하고 기질에 부착된 생물량의 손실을 초래할 수 있으며 (Horner *et al.*, 1990), 동일한 유속조건이라 하더라도 미세 황토 등과 같은 부유물질이 유입되면 기질에 흡착하여 부착조류의 착상을 불량하게 하거나 유속을 감소시킬



**Fig. 3.** Temporal variation of dry weight and chl. *a* of filamentous periphytic algae in the artificial channels under the different substrates in (a) November 2001 and (b) March 2002.

으로써 생물량의 손실을 야기할 수 있다 (McIntire and Phinney, 1965). 또한, 사상성 부착조류의 생물량 손실은 깔다구 (*Chironomus*) 유충이나 물달팽이와 같은 섭식자의 섭식활동에 영향으로 받는다. 이러한 섭식자는 부착조류 매트 내에 서식하면서 부착조류를 섭식하므로 직접적인 생물량 감소뿐만 아니라 사상성 부착조류가 기질에 부착된 부분을 끊음으로써 부착조류의 탈리를 유발하여 생물량 감소에 간접적으로 영향을 미치게 된다.

선행연구의 결과 (Horner and Welch, 1981; Horner *et al.*, 1983)와 비교할 때, 영양염이 풍부한 본 연구의 인공수로 조건에서도 유속은 사상성 부착조류의 성장에 직접적인 영향을 미치는 것으로 나타났다. 즉, 빠른 유속일수록 사상체가 보다 길게 성장하는 결과를 보였다. 4월 인공수로 실험 8일째  $5 \text{ cm s}^{-1}$  유속에서 사상성 부착조류 조체의 총 성장 길이는 15 cm 정도로 나타났던 반면 10,  $15 \text{ cm s}^{-1}$  유속에서는 거의 100 cm 정도로서  $5 \text{ cm s}^{-1}$  유속의 수로에서보다 6배 이상 길었다. 따라서  $10 \text{ cm s}^{-1}$  유속조건보다  $15 \text{ cm s}^{-1}$ 에서의 낮은 성장률은 높은 영양염 조건에서 한정된 기질에 두터운 매트를 형성할 정도로

성장한 부착조류가 기질로부터 쉽게 탈리되었을 가능성이 있다. 즉, 현장 인공수로 실험에서 고농도의 영양염이 함유된 하수처리수를 이용하였기 때문에 사상성 부착조류들은 충분한 영양염을 이용하여 빠른 시간 내에 생물량을 발달시킬 수 있었으나, 과도한 생물량의 발달로 인해 보다 빠른 탈리를 야기하여 결과적으로 부착조류 성장의 제한요인으로 작용하였을 것으로 추정된다.

이 결과로부터 영양염이 풍부한 하천 조건에서는 빠른 유속은 부착조류의 생체량 발달에 도리어 제한 요인이 됨을 유추할 수 있으며, 본 연구의 결과로 볼 때 최대성장률에 대한 유속의 threshold 조건이  $10 \sim 15 \text{ cm s}^{-1}$ 로 나타났다.

계절에 따른 사상성 부착조류의 생물량은 봄철인 4월에서 가장 높았으며, 생물량이 가장 낮은 겨울이 시작되는 11월에 비해 40배 이상 높게 나타났다 (Figs. 2, 3). 이러한 생물량의 차이는 영양염이 풍부한 방류수를 이용하였기 때문에 영양염보다는 수온, 광량 등과 같은 계절적인 요인에 기인된 것으로 판단된다 (Stevenson *et al.*, 1996).

**Table 4.** Mean net productivity ( $\text{g m}^{-2} \text{day}^{-1}$ ) of filamentous periphytic algae in three different substrates under the water velocity of  $10 \text{ cm s}^{-1}$  in the artificial channels.

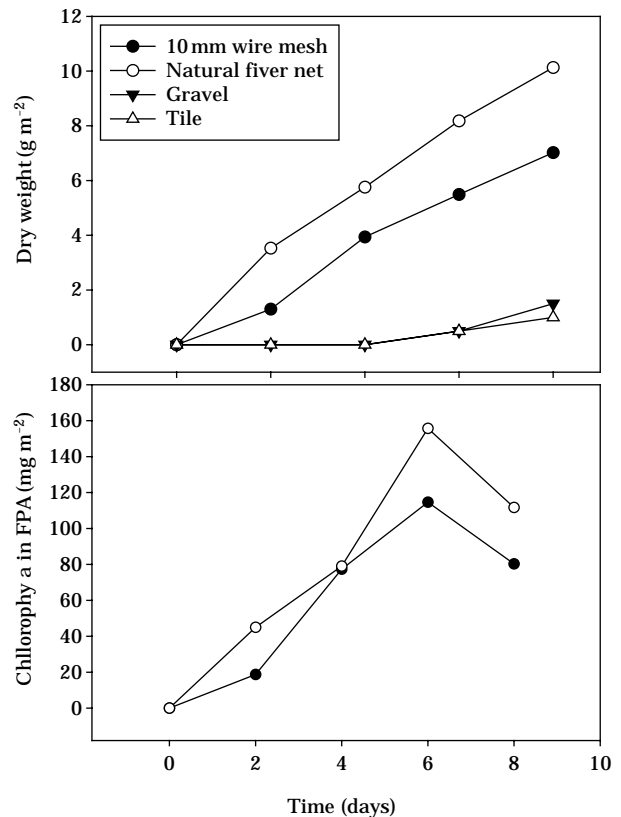
Parameter	Date	November, 2001			March, 2002			
	Substrata	Wire mesh		Natural fiber net	Wire mesh		Natural fiber net	
		mesh-size	10 mm	20 mm	20 mm	10 mm	20 mm	20 mm
Dry weight	$\text{g m}^{-2} \text{day}^{-1}$		1.42	1.65	1.05	20.8	29.8	8.2
Chl. <i>a</i>			0.03	0.03	0.01	0.47	0.57	0.19

3. 기질에 따른 부착조류의 성장

2002년 3월에 모든 기질에서 생물량이 2001년 11월에 비해 높게 나타나 계절적인 차이를 보였으나, 사용된 기질간의 비교에서는 20 mm 철망에서의 생물량이 다른 기질(10 mm 철망, 자연섬유망)에 비해 높게 나타났다(Fig. 3, Table 4). 기질간의 건중량에 의한 부착조류의 순생산성은 생물량이 적은 시기(2001년 11월)에는 큰 차이가 없었으나 생물량이 많은 시기(2002년 3월)에는 10 mm, 20 mm 철망이 자연섬유망에 비해 3배 이상 높았다. 엽록소 *a* 농도에 의한 부착조류 순생산성은 생물량이 적은 시기(2001년 11월)에 10, 20 mm 철망 모두에서  $0.03 \text{ g m}^{-2} \text{day}^{-1}$ 로 자연섬유망( $0.01 \text{ g m}^{-2} \text{day}^{-1}$ )에 비해 높게 나타났다. 생물량이 많은 시기에도 10, 20 mm 철망에서의 순생산성이 각각  $0.47$ 과  $0.57 \text{ g m}^{-2} \text{day}^{-1}$ 로 자연섬유망( $0.19 \text{ g m}^{-2} \text{day}^{-1}$ )에 비해 3배 이상 높았다.

4종류의 기질(자연섬유망, 10 mm 철망, 자갈, 타일)을 사용한 순환수로 실험에서는 부착조류의 건중량은 자연섬유망과 10 mm 철망이 자갈과 타일에 비해 높았다(Fig. 4). 사상성 부착조류 건중량은 자연섬유망에서  $10.13 \text{ g m}^{-2}$ 로, 10 mm 철망에 비해 1.5배, 자갈과 타일에 비해서는 10배 이상 높았다(Fig. 4). 기질에 따른 부착조류의 평균 순생산성은 자연섬유망이  $1.10 \text{ g m}^{-2} \text{day}^{-1}$ 였으며, 철망( $0.95 \text{ g m}^{-2} \text{day}^{-1}$ )에 비해 2배, 자갈( $0.14 \text{ g m}^{-2} \text{day}^{-1}$ )과 타일( $0.11 \text{ g m}^{-2} \text{day}^{-1}$ )과 비교해서는 20배 이상 높았다.

본 연구에서 사상성 부착조류 순생산성이 현장 인공수로에서는 철망 기질에서 높았고, 실내 순환수로에서는 자연섬유망에서 높게 나타난 것은 기질의 세밀함과 수중내 부유물질 함량 그리고 생물량의 차이에 기인한 것으로 판단된다. 현장 인공수로에서 이용한 하수처리수 내의 부유물질의 농도가  $3.0 \sim 10.0 \text{ mg L}^{-1}$ 로 나타나 여과된 실험수가 사용된 실내 순환수로에 비해 상대적으로 높았고 생물량도 많았으며 또한 자연섬유망은 미세한 잔털이 있어 부유물질이나 부착조류의 부착 가능성이 높기 때문



**Fig. 4.** Temporal variation of dry weight and chl. *a* of filamentous periphytic algae at different substrates of the indoor channel.

에 쉽게 폐색되어 생물량이 다른 기질에 비해 적었을 것으로 생각할 수 있다(McIntire and Phinney, 1965; Horner et al., 1990). 망목의 폐색현상은 망목의 크기에 따라 차이가 있으며 망목 크기가 2 mm인 기질의 경우 주로 수중 부유물질에 의해 발생하고, 망목 크기가 4 mm 기질에서는 부유물질과 사상성 부착조류에 의해서 나타남이 보고된 바 있다(공 등, 1996). 따라서 실내 순환수는 부유물질과 기질에 부착한 생물량이 현장수로에 비해 상대적으로 적었기 때문에 기질이 세밀한 자연섬유망이

**Table 5.** The growth rate and mean uptake rate of phosphorus among three species of filamentous periphytic algae in different phosphorus concentrations.

Species	Growth rate (day <sup>-1</sup> )				Mean uptake rate (g P g Chl. a <sup>-1</sup> hr <sup>-1</sup> )			
	0.05*	0.1*	0.5*	1.0*	0.05*	0.1*	0.5*	1.0*
<i>Rhizoclonium</i>	0.10	0.15	0.24	0.22	0.48	0.72	3.60	7.92
<i>Spirogyra</i>	0.14	0.16	0.16	0.20	1.92	2.40	9.36	8.64
<i>Oedogonium</i>	0.07	0.14	0.21	0.24	0.48	0.72	4.08	4.32

\*mgP L<sup>-1</sup>

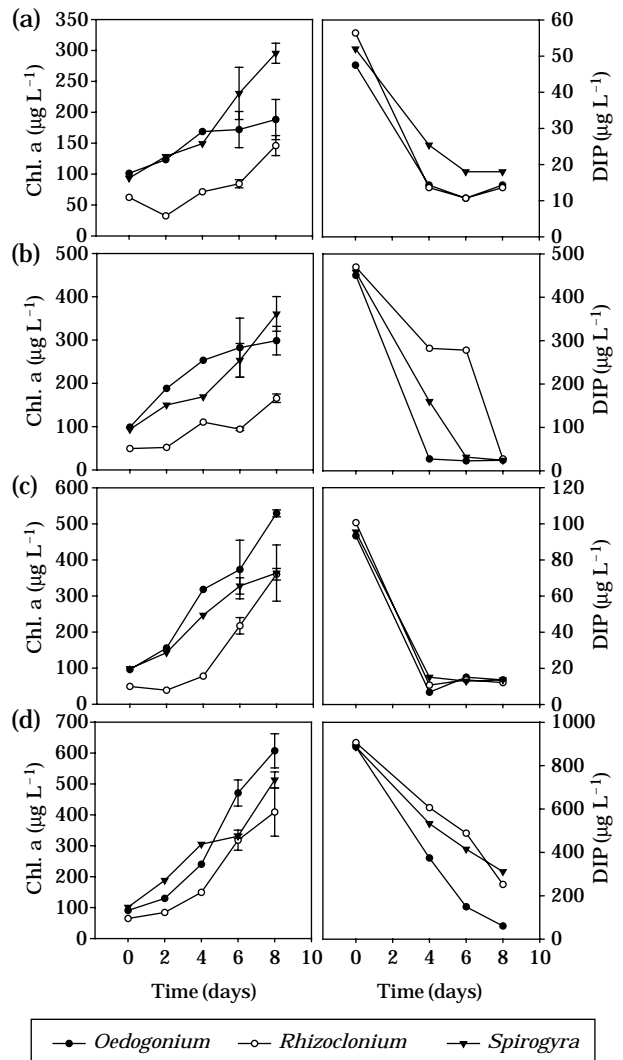
부착조류의 부착과 성장에 유리했을 것이다. 사상체가 아닌 일반적인 부착규조류의 부착과 성장은 기질의 표면 거칠기에 크게 영향을 받지 않으나 (Goldsborough and Michael, 1991), 본 연구의 결과에서 나타났듯이 사상성 부착조류는 수중의 부유물이 성장을 제한할 정도가 아니라 기질의 거칠기에 영향을 받음을 시사한다.

**4. 인 농도에 따른 사상성부착조류의 성장**

실험에 사용된 3종의 사상성 부착조류 *Rhizoclonium riparium*, *Oedogonium foveolatum*, *Spirogyra turfosa*는 인 농도 조건에 따라 서로 다른 성장률의 차이를 보였다 (Fig. 5, Table 5). 실험조건 중 가장 낮은 인 농도인 0.05 mgP L<sup>-1</sup>에서는 *Spirogyra turfosa*의 성장률 (0.14 day<sup>-1</sup>) 이 다른 두 종에 비해 높았고, 0.5 mgP L<sup>-1</sup>에서는 *Rhizoclonium riparium* (0.24 day<sup>-1</sup>), 0.1 mgP L<sup>-1</sup>에서는 *Oedogonium foveolatum*의 성장률 (0.24 day<sup>-1</sup>)로 가장 높았다. 각 종들이 최대 성장률을 보이는 인의 농도는 달랐으나 인 농도의 높고 낮음에 상관없이 최대성장률 간에는 유의한 차이는 나타나지 않았다.

인 농도에 따른 성장률의 차이는 조류 종간의 영양염 이용능력을 나타내는 영양염 반포화상수와 최대의 성장 능력과 관련되는 최대흡수율에 의해 결정되는 특이성에 기인하는 것으로 알려져 있다 (Nalewajko and Lean, 1980). 배양조류들과 현장조류들을 이용한 인 흡수에 관한 선행연구들은 조류 종들이 종 특이적인 반포화상수와 최대흡수율을 가진다는 것을 증명하였다 (예: Borhardt, 1996; 황과 공, 1999). 본 연구의 차별적인 인 농도 조건에서 3종의 사상성 부착조류 성장과 인 제거에 있어 각 종간의 차별적인 결과는 기본적으로 각 종이 가지는 인 흡수에 대한 특성으로 반영된다 (Lohman and Priscu, 1992; Borhardt et al., 1994; Steinman et al., 1997).

본 연구에서 배양액 내 인 농도의 감소량을 토대로 계산된 인 흡수율은, 비교된 3종의 부착조류가 인 농도에 따라 성장률이 상이했던 것과는 달리, 모든 인 농도 조건



**Fig. 5.** The change of chl. a and DIP concentrations of three species of filamentous periphytic algae under the different P concentrations (a: 0.05, b: 0.1, c: 0.5, d: 1.0 mgP L<sup>-1</sup>).

에서 *Spirogyra turfosa*가 가장 높았다. 초기 인 농도 0.5 mgP L<sup>-1</sup> 조건에서 평균흡수율이 9.36 gP gchl. a<sup>-1</sup> hr<sup>-1</sup>로



가장 높았다 (Table 5). *Rhizoclonium riparium*의 인 흡수율은 인 농도가 높을수록 지속적으로 증가한 반면, *Oedogonium foveolatum*와 *Spirogyra turfosa*의 인 흡수율은 0.5 mgP L<sup>-1</sup>까지는 인 농도가 높을수록 증가하였으나 0.5 mgP L<sup>-1</sup> 이상의 농도에서는 감소하거나 약간 증가한 정도로 나타났다. 그러나 실제로 자연 하천생태계에서의 이들의 성장은 기질에 부착된 생물 매트에서 인을 흡수하는 정도에 따라 달라지기 때문에 (Borchardt, 1996), 수체와 접촉하는 조류의 접촉면적을 결정하는 물의 이동, 즉 유속이 매우 중요한 결정인자로 작용할 것으로 판단된다 (Horner et al., 1990).

본 연구는 영양염이 풍부한 하수처리수에서 발달하는 사상성 부착조류의 성장과 이에 영향을 미치는 요인들을 평가하였다. 연구의 결과는 하수처리수가 방류되는 하천에서의 사상성 부착조류의 발달과 이에 미치는 영향을 평가하고 예측하는데 이용될 수 있을 것이다. 이러한 환경에서는 사상체의 발달이 매우 빠르며, 일단 발달되면 유속의 증가나 갑작스러운 변화에 의해 쉽게 탈리되고 다시 성장하여 탈리되는 반복적인 현상이 나타나게 된다. 특히 집중강우가 빈번한 우리나라 기후 특성상 높은 강우강도와 탁수의 영향은 사상체의 탈리를 가중시키는 요인으로 작용할 수 있으며 (Horner and Welch, 1981; Fairchild and Lowe, 1984), 탈리된 사상체들은 다른 하천, 댐 또는 하류로 유입되어 수질과 생태계의 기능을 악화시킬 수 있는 가능성이 높다.

선행연구에 의하면, 사상성 부착조류의 인 흡수능력은 부유성 조류보다 훨씬 높으며 (Hwang et al., 1998), 수생 식물에 비해서는 단위면적당 최소한 수십-수천 배 이상 높아 (황과 공, 1999) 이들을 적절히 활용한다면 인체거를 통한 수질개선 효과를 도모할 수 있다 (Vymazal, 1988; 공과 천, 1999, 농림부, 2003). 따라서 사상성 부착조류의 종 특이성을 고려한 수질개선의 효과를 증가시킬 수 있는 시스템 개발 및 2차 오염 방지 등의 세부적인 연구의 필요성이 제기된다.

## 적 요

본 연구는 영양염이 풍부한 하수처리수를 이용한 인공수로에서 사상성 부착조류의 성장에 미치는 요인들(유속, 부착기질, 인 농도)을 평가하였다. 실험은 하수처리수를 이용한 현장 인공수로와 실내 순환수로에서 부착조류의 성장실험을 수행하였고, 서로 다른 인 농도에서의 사상성 부착조류 종간의 성장률과 인 흡수율을 비교하였

다. 조절된 유속조건 (5 ~ 15 cm s<sup>-1</sup>)에서 사상성 부착조류의 순생산성은 유속이 빠를수록 높았으나 최대의 순생산성은 10 cm s<sup>-1</sup> 유속에서 나타났다. 현장 인공수로와 실내 순환수로 실험 간에 사상성 부착조류의 최대성장은 기질에 따라 다르게 나타났다. 부유물질이 충분히 제거되지 않았던 현장 인공수로 실험에서는 망목이 20 mm인 철망에서, 실내순환수로 실험에서 사상성 부착조류의 성장은 자연섬유망에서 높게 나타났다. 0.05 ~ 1.0 mg P L<sup>-1</sup>로 조절된 인 농도범위에서 3종의 사상성 부착조류 성장률은 인 농도가 높아짐에 따라 증가하였으나, 각 종들은 인 농도에서 따라 차별적인 성장을 나타냈다. 또한 영양염 농도가 매우 높은 환경에서 사상성 부착조류 생물량의 발달이 크면 클수록 높은 유속이 사상체의 탈리를 유발하여 조류의 성장을 감소시키는 제한요인으로 작용할 수 있음이 제시되었다. 탈리된 사상체는 연결된 하천, 저수지, 하류의 수질과 생태계를 악화시킬 수 있기 때문에 하천 수질관리에 있어 중요한 요인으로 고려할 필요성이 크다.

## 사 사

원고의 심사를 통해 본 논문의 내용적 발전에 유익한 의견을 제공해 준 3인의 심사자들에게 심심한 사의를 표합니다. 본 연구는 농림부의 지원 (Project No. 200083-03-3CG000)에 의해 수행되었습니다.

## 인 용 문 헌

- 공동수, 천세억, 류재근, 1996. 대형수생식물 및 부착조류를 이용한 호수수질정화 및 수확물의 재이용. 한·일 지방간 생태공학적 수질개선 공법에 관한 심포지움, 강원대학교 환경연구소, 115-154.
- 공동수, 천세억, 1999. 인공수로내 사상성 부착조류의 증식속도 및 영양물질 제거능. 한국육수학회지 **32**: 217-232.
- 농림부, 2003. 부착조류를 이용한 농촌유역 수질개선 기법개발.
- 정연태, 이종빈, 위인선, 김백호, 최민규, 1996. 수질오염 판정을 위한 기법 개발 (I). 부착조류 군체화에 미치는 기질특이성 연구. 환경생물 **14**: 95-111.
- 신재기, 조정제, 1998. 대청천에서 부착조류의 1차 생산성. 한국육수학회지 **31**: 294-302.
- 조정제, 1994. 인공기질을 이용한 부착조류 조사. 한국육수학회지 **27**: 47-57.
- 황순진, 공동수, 1999. 습지의 인 Sink 기능에 영향을 미치는

- 생물학적 요인들. 한국육수학회지 **32**: 79-91.
- APHA. 1995. Standard Methods for the Analysis of Water and Wastewater, 17th ed. American Public Health Association, Inc., Washington, D.C.
- Borchardt, M.A. 1996. Nutrients. pp. 183-227. *In*: Algal Ecology-Freshwater and benthic ecosystems (Stevenson, R.J., M.L. Bothwell, and R.L. Rove, eds). Academic Press, New York.
- Borchardt, M.A., J.P. Hoffman and P.W. Cook. 1994. Phosphorus uptake kinetics of *Spirogyra fluviatilis* (Charophyceae) in flowing water. *J. Phycol.* **30**: 403-417.
- Fairchild, I.W. and R.L. Love. 1984. Artificial substrates which release nutrients: effects on periphyton and invertebrate succession. *Hydrobiologia*. **114**: 29-37.
- Goldsborough, L.G. and M. Hickman. 1991. A comparison of periphytic algae biomass and community structure on *Scirpus validus* and on a morphologically similar artificial substratum. *J. Phycol.* **27**: 196-206.
- Horner, R.R. and E.B. Welch. 1981. Stream periphyton development in relation to current velocity and nutrients. *Canadian Journal of Fish. and Aquat. Sci.* **38**: 449-457.
- Horner, R.R., E.B. Welch and R.B. Veenstra. 1983. Development of nuisance periphytic algae in laboratory stream in relation to enrichment and velocity. pp. 121-134. *In*: Periphyton of freshwater Ecosystems. (Ed. R.G. Wetzel). Dr w. Junk Publishers, The Hague.
- Horner, R.R., E.B. Horner, M.R. Welch, Seeley and J.M. Jacoby. 1990. Responses of periphyton to changes in current velocity, suspended sediment and phosphorus concentration. *Freshwater Biology*. **24**: 215-232.
- Hwang, S-J., A.D. Steinman and K.E. Havens. 1998. Phosphorus uptake kinetics in a large shallow subtropical lake. *Freshwater Biology*. **40**: 729-745.
- Lohman, K. and J.C. Priscu. 1992. Physiological indicators of nutrient deficiency in *Cladophora* (Chlorophyta) in the Clark Fork of the Columbia River, Montana. *J. Phycol.* **28**: 443-448.
- Marker, A.F.H. 1972. The use of acetone and methanol in the estimation of chlorophyll in the presence of phaeophyton. *Freshwater Biology*. **2**: 361-385.
- McIntire, C.D. 1966. Some effects of current velocity on periphyton communities in laboratory streams. *Hydrobiologia*. **27**: 559-70.
- McIntire, C.D. and H.K. Phinney. 1965. Laboratory studies of periphyton production and community metabolism in lotic environments. *Ecol. Monogr.* **35**: 237-58.
- McIntire, C.D. 1968a. Physiological-ecological studies of benthic algae in laboratory streams. *J. Water Pollut. Contr. Fed.* **40**: 1940-1952.
- Nalewajko, C. and D.R.S. Lean. 1980. Phosphorus. pp.235-258. *In*: The Physiological Ecology of Phytoplankton (I. Morris, ed.). Blackwell, Oxford.
- Sand-Jensen K. and M. Sondergaard. 1981. Phytoplankton and epiphyte development and their shading effect on submerged macrophytes in lakes of different nutrient status. *Int. Rev. Hydrobiologia*. **66**: 529-552.
- Steinman, A.D., E.H. Meeker, A.J. Rodusky, W.P. Davis and S.-J. Hwang. 1997. Ecological properties of Charophytes in a large, subtropical lake. *J. North Am. Benthol. Soc.* **16**: 781-793
- Stevenson, R.J. 1983. Effects of current and conditions simulating autogenically changing microhabitats on benthic diatom immigration. *Ecology*. **64**: 1514-1281
- Thomas, D.F. and G.N. David. 1983. Characteristics of epiphyte communities on natural and artificial submerged lotic plants: Substrate effects. *Arch. Hydrobiol.* **3**: 293-301.
- Vymazal, J. 1988. The use of periphyton communities for nutrient removal from polluted streams. *Hydrobiologia*. **166**: 225-237.

(Manuscript received 25 January 2006,  
Revision accepted 11 March 2006)