

## 비점오염원으로부터 오염된 하천수에서 식물플랑크톤 배양을 이용한 영양염류 제거

조안나 · 정다운 · 정유정 · 최승익<sup>1</sup> · 안태석\*

(강원대학교 환경과학과, <sup>1</sup>강원대학교부속 환경연구소)

Removal of Nutrients from Stream Water Polluted with Nonpoint Source Pollution by Cultivation of Phytoplankton. *Cho, Ahnna, Dawoon Jung, You-Jung Jung, Seung-ik Choi<sup>1</sup> and Tae-Seok Ahn\** (Department of Environmental Science, Kangwon National University, Chuncheon 200-701, Korea; <sup>1</sup>Institute of Environmental Research, Kangwon National University, Chuncheon 200-701, Korea)

A phytoplankton cultivation system was installed and operated for removal of nutrients from stream water polluted by nonpoint source pollution. The system was a continuous-flow culture comprising a phytoplankton tank that received inflow from a storage reservoir. When the system was operated as a batch culture for the purpose of determining hydraulic retention time (HRT), the proper HRT value was three days, and the removal rate of TP and TN averaged 70% and 44%, respectively. When the system was operated with the continuous flow from a stream for 45 days, 53.9% of TP and 53.1% of TN were removed as sludge. Due to active growth of phytoplankton, pH and dissolved oxygen in the phytoplankton tank were extremely high, reaching 10.8 and 16 mg L<sup>-1</sup>, respectively. It was concluded that nutrients can be effectively removed from polluted stream waters by cultivating phytoplankton.

**Key words :** nonpoint source pollution, nutrient removal, phytoplankton, phytoplankton cultivation system

### 서 론

국가 차원의 집중관리 대상인 도시 및 산업체의 점오염원들과 달리 국내 농촌지역의 비점오염원들은 관리되지 않고 방치되어 있다. 그 결과, 인과 질소 등 영양염류들이 비점오염원으로부터 소하천을 거쳐 강, 호소 그리고 연안으로 유입되고 부영양화를 초래하고 있다(Kim *et al.*, 1995).

지난 1998년도부터 2000년 사이에 조사된 결과에 따르면 국내 주요 4대강에서 비점오염원의 부하량은 총오염부하량의 22~27%이었으며, 팔당 상수원의 경우 비점

오염원의 부하량이 총오염부하량의 절반 정도인 것으로 조사되었다(정부합동, 2000).

인과 질소는 수계에서 부영양화의 주요 원인물질이나, 우리나라의 하·폐수 처리 시설은 유기물질의 제거를 중심으로 이루어지고 있어 인과 질소의 제거 효율은 낮다(전 등, 2000). 영양염류를 제거하기 위한 방법에는 A<sub>2</sub>O 공법과 같은 환경공학적인 방법(Environmental Protection Agency, 1987)과 인공습지를 이용하는 생태공학적인 방법이 있다(Verhoeven and Meuleman, 1999). 농촌지역과 같이 오염물질의 배출량이 소규모인 지역은 부지 선정이 쉽고 유지관리비용이 저렴한 생태공학적인 방법이 타당하다. 생태공학적인 방법에는 체류지(wet detention pond),

\* Corresponding author: Tel: 033) 250-8574, Fax: 033) 251-3991, E-mail: ahnts@kangwon.ac.kr

저류지(detention pond), 산화지(oxidation pond), 산화구(open ditches), 인공습지(artificial wetland)와 인공식물섬(artificial island) 등이 있다(안 등, 2008). 그러나 이 방법들은 넓은 부지를 필요로 하고 처리 시간이 오래 걸리는 단점이 있다.

본 연구에서는 식물플랑크톤을 배양하여 하천수에서 인과 질소를 제거하였다. 사용된 방법은 고농도의 영양염류를 함유한 점오염원의 처리방법으로 이미 가능성을 확인한 김 등(2001)의 연구는 응용한 것이며, 유사한 방법이 비점오염원으로부터 오염되어 영양염류의 농도가 저농도인 하천 관리에도 적용 가능한 가를 확인하였다. 이 방법은 기존의 생태공학적 방법보다 설치면적이 적고, 설치와 운영이 간단하며 경제적이고, 2차 오염의 우려가 적다(Kim et al., 2003).

본 연구는 비점오염원으로부터 오염물질이 유입되는 소하천을 대상으로 저장조와 식물플랑크톤 배양조를 설치하고, 식물플랑크톤의 정치배양 후 도출된 운영조건을 바탕으로, 2회에 걸쳐 연속배양을 운영하였다. 연속배양 1차 연구에서 영양염류의 제거 가능성을 확인하였고, 2차 연구에서는 식물플랑크톤에 의한 영양염류 제거 효율성을 확인하였다.

## 재료 및 방법

### 1. 처리대상 하천 및 처리시설

처리대상 하천은 강원도 화천군 사창리에 위치한 소하천(38°03'39.50"N, 127°31'21.28"E)으로, 강우시 방출되는 가축의 분뇨와 농경지에서 발생하는 비료 등 다양한 비점오염원에서 오염물질이 처리되지 않은 채 유입되고 있는 것으로 사료되었다.

식물플랑크톤을 이용한 영양염류 제거 시스템은 하천수 저장조와 식물플랑크톤 배양조로 각 1개조로 구성하였다. 저장조는 3 m<sup>3</sup>( $\phi$ =1.48 m, d=1.7 m)규모의 원통구조 이었다. 저장조에는 하천수를 수중펌프를 이용하여 1.67 L sec<sup>-1</sup>의 유속으로 2일에 한 번씩 공급하였다. 식물플랑크톤 배양조는 납작한 원기둥 모양으로 3 m<sup>3</sup>( $\phi$ =2.6 m, d=0.75 m)규모이고, 바닥면은 10°의 경사를 가진 깔때기 모양으로 설계하여 바닥 중앙부에 슬러지가 모일 수 있도록 제작하였다. 식물플랑크톤의 원활한 성장을 위하여 고정 유속 1.67 L sec<sup>-1</sup>인 수중펌프를 사용하여 배양조를 오전 7시부터 오후 7시까지 12시간 동안 교반하였다. 식물플랑크톤 배양조에서 슬러지 발생량은 2 L

day<sup>-1</sup>로 중앙부에 모인 슬러지는 5일 마다 제거해 주었다. 저장조와 배양조는 처리 하천수로부터 약 5 m 떨어진 곳에 설치하였으며, 태양광을 최대한 받을 수 있도록 하였다.

### 2. 식물플랑크톤 접종액(inoculum)의 조제

식물플랑크톤 배양조에 사용할 식물플랑크톤 접종액(inoculum)은 다음과 같이 실험실에서 준비하였다. 먼저, 직육면체 형태의 투명한 배양조(15 L)에 의암호와 공지천이 만나는 지역의 호수물 5 L와 춘천 하수처리장의 유입수 5 L를 섞은 후, 햇빛이 잘 드는 곳에서 19.5±2.5°C를 유지하며 2시간 간격으로 15분씩 교반하여 7일간 배양하였다. 접종액은 현장에서 정치배양(batch culture)과 연속배양(continuous flow culture)에 각각 10 L씩 사용하였다. 접종액은 정치배양과 연속배양 전에 같은 방법으로 만들어 사용하였다.

### 3. 식물플랑크톤 배양조의 운영

접종액을 사용하여 정치배양 1회와 연속배양 2회를 실시하였다. 정치배양은 실험실에서 조제한 접종액을 하천수에 접종하였을 때 식물플랑크톤 생장의 정도를 확인하고 인과 질소의 제거 가능성을 확인할 목적으로 실시하였다.

접종액의 접종 후 배양조의 엽록소 *a* 농도가 안정됨을 확인하고 연속배양을 실시하였다. 연속배양 1차 연구에서는 식물플랑크톤 군집이 지속적으로 유입되는 하천수를 이용하여 인과 질소를 제거하는 가를 확인하였다. 연속배양 2차 연구에서는 식물플랑크톤의 농도 유지와 영양염류의 제거기작을 알아보기 위하여, 배양조의 pH, 용존산소 등 환경변화와 엽록소 *a* 농도를 함께 측정하였다.

정치배양 실험을 위해서, 실험실에서 배양된 식물플랑크톤 접종액 10 L를 하천수 2 m<sup>3</sup>가 담겨있는 식물플랑크톤 배양조에 접종한 후 2007년 8월 16일부터 10일간 정치배양하였으며, 평균수온은 23.3±3.0°C이었다. 정치배양에서 엽록소 *a* 농도를 매일 측정하여 얻은 식물플랑크톤 성장곡선(growth curve)의 성장기와 정체를 고려하여 다음 연속배양에 사용할 체류시간(hydraulic retention time)을 결정하였다. 연속배양은 2회(2007년 8월 26일부터 11월 7일까지 총 25회 조사, 2008년 4월 24일부터 6월 8일까지 총 16회 조사)에 걸쳐 실시하였다. 이 때 배양조의 평균수온은 1차와 2차 각각 20.9±1.3°C, 20.5±0.2°C이었다.

4. 이화학적 분석

하천수 저장조와 식물플랑크톤 배양조의 용존산소와 pH는 현장에서 DO meter (YSI 85, Yellow Spring Instrument Co. Inc., USA)와 pH meter (WTW pH/Cond 340i, Wissenschaftlich-Technische Werkstätten, Germany)를 이용하여 측정하였다. BOD<sub>5</sub>와 엽록소 *a*의 농도는 각각 alkaline iodide azide법과 흡광광도법으로 측정하였다. 총인(TP)과 용존무기인(DIP)을 아스코르빈산 환원법으로, 총질소(TN)와 질산성질소(NO<sub>3</sub><sup>-</sup>)를 자외선 흡광광도법으로 측정하였다(APHA, 2001).

5. 식물플랑크톤 군집 분석

정치배양 종료 후 1차 연속배양 1일차에 식물플랑크톤 군집의 종조성을 정성분석하였다. 연속배양 2차 조사에서 식물플랑크톤 배양조의 우점종 변화를 알아보기 위하여 배양 1일 후와 30일 후에 식물플랑크톤 군집을 분석하였다. 시료 50 mL을 현장에서 Lugol 용액으로 고정한 후, 실험실로 운반하여 계수하였다. 세포의 계수는 Palmer-Maloney counting chamber를 사용하여 400배율 광학현미경으로 검정하였으며, 水野 (1975)의 도감에 의거하여 동정하였다.

결 과

1. 정치배양

접종액의 엽록소 *a* 농도는 124 mg m<sup>-3</sup>이었다. 식물플랑크톤 배양액 10 L를 하천수 2 m<sup>3</sup>에 접종한 후 식물플랑크톤의 생장곡선을 측정하였다. 엽록소 *a*의 농도는 접종 직후 23 mg m<sup>-3</sup>이었고, 3일 동안 지속적으로 증가하여 최대농도는 89 mg m<sup>-3</sup>이었다. 접종 3일 이후부터는 엽록소 *a*의 농도가 평균 84±5 mg m<sup>-3</sup>로 유지되었다. 식물플랑크톤 배양조의 엽록소 *a*의 증가율은 시간에 따른 엽록소 농도의 변화량으로, 성장기(0~3일)에 19~24 mg m<sup>-3</sup> day<sup>-1</sup>이었다(Fig. 1). 이러한 결과를 바탕으로 연속배양에서 체류시간을 3일로 결정하였다.

정치배양의 경우 하천수의 TP와 DIP의 농도는 각각 0.27 mg L<sup>-1</sup>, 0.25 mg L<sup>-1</sup>이었고, TN과 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>는 각각 7.89 mg L<sup>-1</sup>, 5.32 mg L<sup>-1</sup>이었다. 정치배양 10일 후 식물플랑크톤 배양조의 TP와 DIP의 농도는 각각 0.08 mg L<sup>-1</sup>, 0.01 mg L<sup>-1</sup>으로 정치배양에 의한 영양염류 제거율은 TP는 70%, DIP는 97%이었다. TN과 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>의 농도는 각각 4.41 mg L<sup>-1</sup>, 1.34 mg L<sup>-1</sup>로 제거율은 각각 44%와 75%이었다

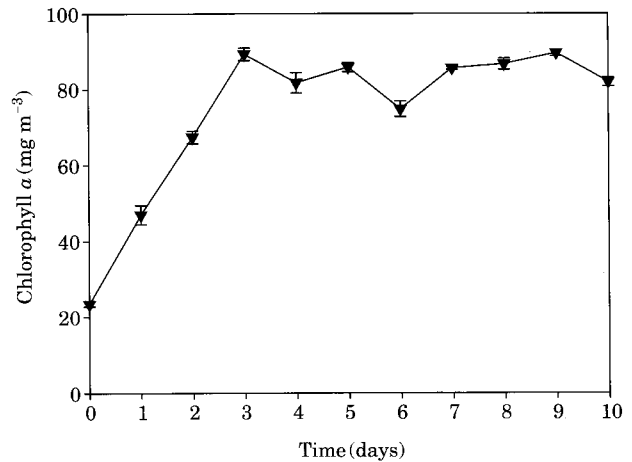


Fig. 1. Change of chlorophyll *a* concentration during batch culture of phytoplankton. Error bars represent standard deviation of triplicate measurements.

Table 1. Concentration (mg L<sup>-1</sup>) and removal rate (%) of nutrients during batch culture.

Item	Target water	Phytoplankton tank*	Removal rate
TP <sup>a</sup>	0.27±0.1	0.08±0.0	70±1.0
DIP <sup>b</sup>	0.25±0.1	0.01±0.0	97±1.5
TN <sup>c</sup>	7.89±0.4	4.41±0.2	44±1.3
NO <sub>3</sub> <sup>-d</sup>	5.32±0.6	1.34±0.1	75±0.6

<sup>a</sup>: total phosphorus, <sup>b</sup>: dissolved inorganic phosphorus, <sup>c</sup>: total nitrogen, <sup>d</sup>: nitrate  
\*Values after 10 days incubation

(Table 1).

2. 연속배양

연속배양 1차 및 2차 연구기간 동안 하천수의 수질은 Table 2와 같다. 연속배양 1차 실험 결과, 하천수의 TP와 DIP의 평균농도는 각각 0.26 mg L<sup>-1</sup>, 0.18 mg L<sup>-1</sup>이었고, 배양조에서는 각각 0.11 mg L<sup>-1</sup>, 0.01 mg L<sup>-1</sup>로 TP와 DIP의 평균 제거율은 각각 65%, 88%이었다. TN과 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>의 평균농도는 하천수에서 각각 6.34 mg L<sup>-1</sup>, 5.34 mg L<sup>-1</sup>이었고, 식물플랑크톤 배양조에서는 각각 2.81 mg L<sup>-1</sup>, 1.14 mg L<sup>-1</sup>이었다. 평균 제거율은 TN은 56%, NO<sub>3</sub><sup>-</sup>은 79%이었다(Fig. 2).

연속배양 2차 결과, 1차 연구 때보다 저장조와 배양조에서 영양염류의 농도가 각각 1.6~3.1배, 1.7~2.6배 높았다. 하천수의 TP와 DIP의 평균농도가 각각 0.65 mg L<sup>-1</sup>, 0.56 mg L<sup>-1</sup>이었고, 배양조에서는 각각 0.29 mg L<sup>-1</sup>, 0.02

**Table 2.** Characteristics of target stream.

Item	1st continuous flow culture	2nd continuous flow culture
Temp (°C)	19.7±5.8	19.3±4.5
pH	7.1±0.3	7.8±0.3
DO <sup>a</sup> (mg L <sup>-1</sup> )	8.4±1.1	3.9±0.7
BOD <sub>5</sub> <sup>b</sup> (mg L <sup>-1</sup> )	4.6±2.0	10.1±1.7
Chl. <i>a</i> <sup>c</sup> (mg m <sup>-3</sup> )	≤0.2*	≤0.2*

<sup>a</sup>: dissolved oxygen, <sup>b</sup>: biological oxygen demand, <sup>c</sup>: chlorophyll *a*  
 \*The detection limit of the chlorophyll *a* concentration is at 0.2 mg m<sup>-3</sup>

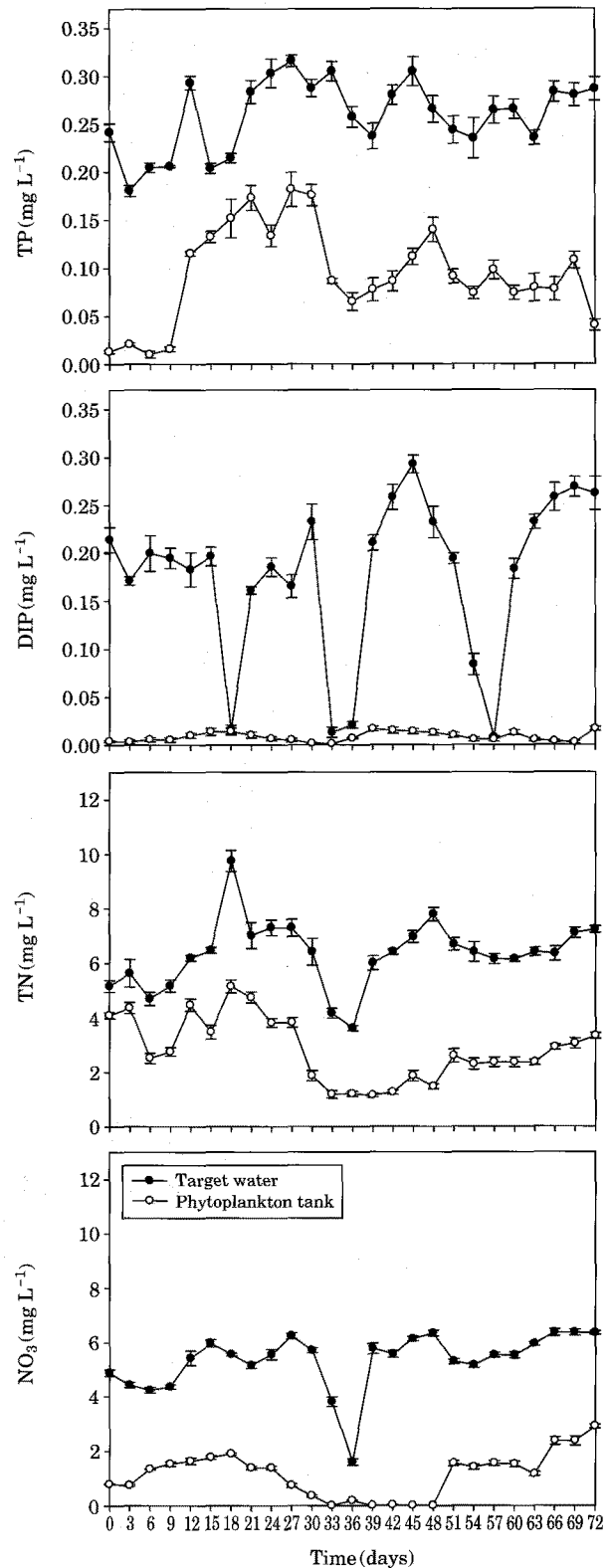
mg L<sup>-1</sup>로 영양염류의 평균 제거율은 TP는 55%, DIP는 97%을 나타내었다. TN과 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>의 농도는 하천수에서 각각 10.5 mg L<sup>-1</sup>, 8.7 mg L<sup>-1</sup>이었고, 배양조에서는 각각 4.8 mg L<sup>-1</sup>, 2.9 mg L<sup>-1</sup>이었다. TN과 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>의 평균 제거율은 각각 53%, 66%을 보였다. DIP/TP의 비율은 저장조에서 배양조로 가면서 급격히 감소하였다 (Table 3).

연속배양 2차 결과에서 영양염류의 물질수지를 산정하였다. 유입된 TP와 TN의 총 양은 각각 29.3 g, 471.3 g이었고, 배양과정에서 제거되는 TP와 TN의 양은 각각 15.8 g, 250.3 g으로 제거율은 각각 53.9%, 53.1%이었다. 이때 식물플랑크톤의 증식을 위한 배양조 내 TP와 TN의 현존량은 각각 0.4 g, 4.2 g이었다.

연속배양 2차 운영기간 동안 용존산소와 pH를 측정 한 결과는 Fig. 3과 같다. 저장조와 식물플랑크톤 배양조의 평균 용존산소농도는 각각 3.9±0.7 mg L<sup>-1</sup>, 16.2±1.4 mg L<sup>-1</sup>이었다. 저장조의 평균 pH는 7.7±0.3이었고, 배양조의 평균 pH는 10.8±0.2이었다. 배양조의 엽록소 *a*의 농도는 84±12 mg m<sup>-3</sup>으로 유지되었다.

**3. 식물플랑크톤 군집의 변화**

연속배양 연구기간 동안 식물플랑크톤 배양조에서 나타난 식물플랑크톤 군집은 Table 4와 같다. 연속배양 1차 연구의 첫날에 정성조사를 한 결과, 녹조류인 *Coelastrum sphaericum*와 *Scenedesmus* sp.가 우점하였다. 또 남조류인 *Lyngbya* sp.가 출현하였다. 연속배양 2차 연구기간 동안 식물플랑크톤의 군집은 초기에 비하여 30일 후 큰 변화가 일어났다. 배양 1일에는 녹조류인 *Scenedesmus* sp.의 개체수가 1.8±0.1×10<sup>7</sup> cell mL<sup>-1</sup>로 우점하였다. 조사 30일 후에는 남조류인 *Lyngbya* sp.가 2.8±0.2×10<sup>6</sup> cell mL<sup>-1</sup>로 우점하고 있었고, 초기에 우점하였던 녹조류인 *Scenedesmus* sp.의 개체수는 1.8±0.1×10<sup>5</sup> cell mL<sup>-1</sup>로 초기보다 약간 감소한 것으로 나타났다. 초기에 적은 개



**Fig. 2.** Concentration of nutrients during the first continuous flow culture. Error bars represent standard deviation of triplicate measurements.

**Table 3.** Concentration (mg L<sup>-1</sup>), ratio (%) and removal rate (%) of nutrients.

Nutrients	1st continuous flow culture			2nd continuous flow culture		
	Target water	Phytoplankton tank*	Removal rate	Target water	Phytoplankton tank*	Removal rate
TP <sup>a</sup>	0.26±0.0	0.11±0.1	65±19	0.65±0.1	0.29±0.1	55±14
DIP <sup>b</sup>	0.18±0.1	0.01±0.0	88±22	0.56±0.1	0.02±0.0	97±4
DIP/TP	69±33	13±12	-	86±11	7±8	-
TN <sup>c</sup>	6.34±1.2	2.81±1.2	56±17	10.5±1.3	4.8±1.0	53±11
NO <sub>3</sub> <sup>-d</sup>	5.34±1.1	1.14±0.8	79±13	8.7±1.2	2.9±1.4	66±18
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> /TN	84±12	38±28	-	83±7.5	61±28	-

<sup>a,b,c,d</sup>; see Table 1 for abbreviations of water quality parameters.

\*Values are mean±standard deviation of daily measurements (n=72 for the 1st continuous flow culture, n=45 for the 2nd continuous flow culture).

**Table 4.** List of phytoplankton species in phytoplankton tank.

Species name	Relative abundance in the 1st continuous flow experiment 1th day*	Abundance in the 2nd continuous flow experiment (mean±SD)**	
		1th day	30th day
<b>Cyanophyceae</b>			
<i>Lyngbya</i> sp.	++	1.5±0.1×10 <sup>3</sup>	2.8±0.2×10 <sup>6</sup>
<i>Oscillatoria</i> sp.	+	ND	ND
<b>Bacillariophyceae</b>			
<i>Asterionella gracillima</i>	+	≤100	ND
<i>Nitzschia frustulum</i>		≤100	ND
<i>Synedra acus</i>	+	ND	ND
<b>Chlorophyceae</b>			
<i>Asterococcus limneticus</i>	+	ND	ND
<i>Chodatella</i> sp.		≤100	ND
<i>Coelastrum sphaericum</i>	+++	ND	ND
<i>Crucigenia</i> sp.	++	≤100	ND
<i>Euastrum</i> sp.	+	ND	ND
<i>Kirchneriella subsolitaria</i>	+	ND	ND
<i>Scenedesmus</i> sp.	+++	1.8±0.1×10 <sup>7</sup>	1.8±0.1×10 <sup>5</sup>

\*The list of phytoplankton species on the first day of the first continuous flow experiment.

Symbols +≤1.0×10<sup>2</sup> mL<sup>-1</sup>, ++≤1.0×10<sup>3</sup> mL<sup>-1</sup>, +++≥2.5×10<sup>6</sup> mL<sup>-1</sup>

\*\*Algal abundance (cell mL<sup>-1</sup>) in the phytoplankton tank during the second continuous flow experiment. ND=not observed in 10 mL sample; ≤100=detection of one individual in 10 mL sample

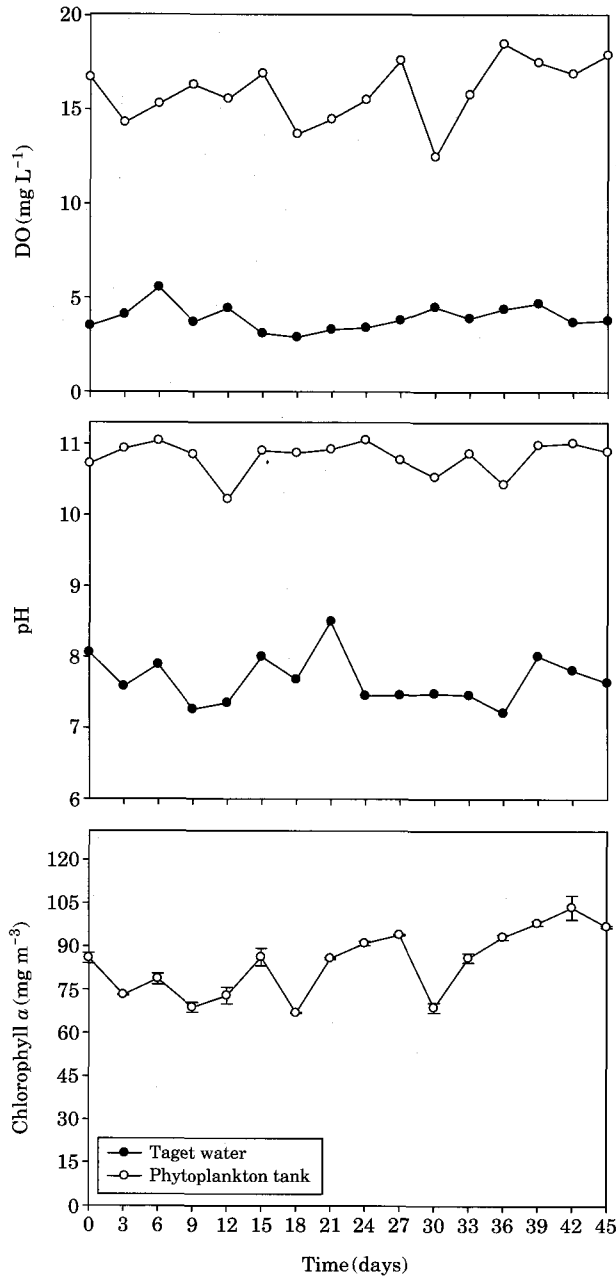
체수를 보였던 규조류는 30일 후에는 출현하지 않았다.

### 고 찰

처리대상 하천수의 엽록소 a 농도는 검출한계농도 수준으로 매우 낮았다. 처리대상 하천의 TP와 TN의 농도는 정치배양과 연속배양 1차, 2차의 연구기간 동안 각각 0.18~0.85 mg L<sup>-1</sup>, 3.61~12.64 mg L<sup>-1</sup>이었고, 배양기간 동안 배양조의 엽록소 a의 농도는 최대 124 mg m<sup>-3</sup>까지 증가하는 등 식물플랑크톤이 성장하기에 영양염류가 충분

분하였다. 그러나 하천에서는 엽록소 a의 농도가 낮았다.

빛과 교반 등 식물플랑크톤 성장에 필요한 물리적 조건이 충분히 충족되고 높은 농도의 영양염류 (TP=0.97 mg L<sup>-1</sup>; TN=11.5 mg L<sup>-1</sup>)에서 엽록소 a의 농도는 최대 1,300 mg m<sup>-3</sup>까지 증식하였다(김 등, 2001). 또, 강 폭이 넓은 하천이나 호수와 같이 개방된 수역에서 TP 농도와 엽록소 a의 농도는 높은 상관관계를 갖는다(Wang et al., 2008). 본 연구에서 사용된 하천수의 TN/TP 비율은 정치배양과 연속배양 1차, 2차에서 각각 29.2, 24.4, 16.2로 Redfield Ratio (C:N:P=106:16:1)보다 높았다(Redfield, 1958). 따라서 하천수에서 식물플랑크톤의 성장 제한요



**Fig. 3.** Dissolved oxygen (DO), pH and chlorophyll *a* concentration during the second continuous flow culture. Error bars represent standard deviation of triplicate measurements.

인은 인이며, 식물플랑크톤 배양조에서 엽록소 *a* 농도는 인의 농도에 의하여 결정되었다고 볼 수 있다. 즉, 하천수에 포함된 TP 농도가 증가하면 배양조의 엽록소 *a* 농도도 증가할 것으로 예상된다.

하천수에서 식물플랑크톤 현존량(엽록소 *a* 농도)이 배양조보다 크게 낮은 이유는 수생식물과의 경쟁(Asaeda

*et al.*, 2001)과 타감작용(Nakai *et al.*, 1996, 1999), 빛의 제한 그리고 물리적 교란(신 등, 2002)에 의한 것으로 사료된다. 따라서, 하천과 달리 수초가 없고, 충분한 태양에너지가 공급되며, 물리적 교란이 없는 배양조에서 식물플랑크톤이 급증한 것으로 사료된다.

연속배양 1차 실험 결과, 배양조 방류수의 TP와 TN의 농도는 각각 0.11 mg L<sup>-1</sup>, 2.81 mg L<sup>-1</sup>로 저장조보다 낮은 것을 확인하였다. 제거율은 TP는 65%, TN은 56%이었는데(Fig. 2 참조), 정치배양과 비교하여 TP의 제거효율이 낮은 것은 연속흐름 방식에서 식물플랑크톤이 인을 효율적으로 활용하지 못하고 방류된 것으로 사료된다.

연속배양 2차 실험에서 영양염류 제거율은 TP와 TN은 각각 55%, 53%로 1차 결과와 유사하였다. 환경변화 조사결과 배양조의 pH는 10.8로 강 알칼리성을 나타내었다. 이는 식물플랑크톤이 증식하면서 활발한 광합성으로 인하여 CO<sub>2</sub> 소모에 인한 것이다. 이러한 pH의 증가는 부영양화 지역인 팔당호 하류에서도(pH 9.5) 나타나고 있다(박 등, 2004).

저장조에서 3.9 mg L<sup>-1</sup>에 불과했던 용존산소농도는 식물플랑크톤 배양조에서 16.2 mg L<sup>-1</sup>까지 증가하였다. 조사기간 중 식물플랑크톤 배양조에서는 광합성이 이루어지는 낮시간 동안 연속하여 교반이 이루어졌고, 식물플랑크톤의 광합성에 의하여 용존산소농도는 16.2 mg L<sup>-1</sup>으로 증가하였다. 배양조의 형태는 납작한 원기둥 모양으로 대기와의 접촉이 활발히 일어나도록 설계하였으며, 낮시간 동안 용존산소농도는 높게 유지되었으므로 혐기성 조건 하에서 일어나는 탈질소반응은 발생하지 않았을 것으로 사료된다. 따라서 식물플랑크톤 배양조에서의 TN제거는 ammonia stripping, 화학적 침전 그리고 식물플랑크톤에 의한 흡수로 인해 제거된 것(Kawasaki *et al.*, 1982)으로 사료된다. 식물플랑크톤 현존량의 증가로 배양조의 pH가 약 11정도로 높아지고 용존산소농도가 높아져 식물플랑크톤의 활발한 생물량 합성이 진행되었고, 교반작용과 ammonia stripping작용에 의해 ammonia가 공기 중으로 휘발되고, 화학반응이 활발해져 화학적 침전이 이루어진 것으로 사료된다.

TP와 DIP는 화학적 침전과 식물플랑크톤의 흡수로 제거된다. 인은 pH 10.5~11.5에 Ca-Mg-PO<sub>4</sub> 혼합물이 생성되어 침전된다(Kawasaki *et al.*, 1982). 인은 생물체의 필수적인 구성물질로 식물플랑크톤은 우선적으로 DIP형태의 인을 선호한다. DIP의 제거효율은 1차와 2차 연구에서 각각 88%, 97%로 질소와 비교하면 매우 높게 나타났다. 식물플랑크톤은 DIP를 과잉섭취(luxury uptake)하여 체내에 저장할 수 있다(Powell *et al.*, 2008). 특히 인이 제한

되는 환경에서 수중내 인은 매우 빠르게 흡수될 수 있다.

물리적 작용으로 제거가 가능한 영양염류는 식물플랑크톤의 사체와 화학반응으로 생성된 침전물로 이는 슬러지로 나타난다. 슬러지는 하루에 약 2L 발생하여 5일에 한번씩 제거해 주었다. 식물플랑크톤 배양조에 유입(input)은 하천수이고 유출(output)은 방류수와 슬러지이다. 연속배양 2차 연구기간인 45일 동안에 배양조로 유입된 TP와 TN의 총량은 각각 29.3 g(100%), 471.3 g(100%)이었고, 유출된 TP와 TN의 총량은 각각 13.1 g(44.7%), 216.8 g(46%)이었다. 연속배양 45일 동안 식물플랑크톤의 농도가 일정하게 유지되고, 용존산소농도와 pH농도가 높게 유지되었다. 이 상태에서 영양염류는 식물플랑크톤에 의한 흡수, 대기로의 휘발, 활발한 화학적 침전으로 인하여 유입된 TP와 TN의 총량 중 50% 이상을 제거하였다.

하수처리장 방류수에 포함된 높은 농도의 인(TP 2.1 mg L<sup>-1</sup>)과 질소(TN 20.2 mg L<sup>-1</sup>)를 식물플랑크톤을 이용하여 제거한 연구에서 TP는 75%, TN은 44%가 제거되었다(김 등, 2001). 본 연구와 비교하였을 때 하천수의 인과 질소의 초기 농도는 각각 3.2~8.1배, 2~3.2배 낮았으나, 제거율의 차이는 크지 않았다. 결론적으로 식물플랑크톤을 이용한 영양염류의 제거는 인과 질소의 농도가 높은 하수와 인과 질소의 농도가 낮은 비점오염원으로 인하여 오염된 하천에 모두 적용 가능한 것으로 사료된다.

본 연구에서 제안된 식물플랑크톤을 이용한 생태공학적인 방법은 영양염류의 고농도와 저농도 모두에서 광범위한 적용이 가능함을 확인할 수 있었다. 또한 기계적 처리공법과 비교하여 운영과 관리가 쉬우며, 인공습지보다 간편하게 운영할 수 있는 장점이 있다. 인과 질소를 흡수하여 성장한 식물플랑크톤은 동물플랑크톤(Kim *et al.*, 2003)과 물고기를 이용하여 제거할 수 있으며, 발생한 슬러지는 비료 등으로 사용가능성을 고려해 볼 수 있다.

식물플랑크톤을 이용한 영양염류 제거법의 단점은 기온의 영향을 많이 받는다는 점이다. 그러나 겨울철 영하의 낮은 온도를 보이는 우리나라 수계와 달리 겨울철 평균 기온이 15°C인 동남아시아 베트남에서는 효과적으로 영양염류를 제거하였다(김, 2007). 따라서, 비닐하우스와 같은 간단한 온실시설에 식물플랑크톤을 배양한다면 기온에 의한 영향을 배제할 수 있다.

## 적 요

비점오염원으로부터 오염된 소하천에서 영양염류를 제

거하기 위하여 식물플랑크톤 배양 장치를 설치하고 운영하였다. 식물플랑크톤 배양조에서 식물플랑크톤 정치배양 결과, 식물플랑크톤의 연속배양을 위한 배양조의 체류시간을 3일로 결정하였으며 TP는 70%, TN은 44%가 제거됨을 확인하였다. 연속배양 결과 45일 동안 배양조에 유입된 TP의 53.9%, TN의 53.1%가 식물플랑크톤에 의한 흡수와 슬러지로 제거되었다. 식물플랑크톤이 성장하면서 배양조의 pH와 용존산소농도는 각각 평균 10.8, 16 mg L<sup>-1</sup>이었다. 결국 비점오염원에 오염된 하천수의 영양염류는 식물플랑크톤의 사체와 화학반응으로 생성된 침전물로 제거되었다. 비교적 설치가 간단하고 경제성이 높은 식물플랑크톤 배양법의 높은 현장적용 가능성을 확인하였다.

## 사 사

이 연구는 환경부의 “차세대핵심환경기술개발사업(Eco-technopia 21 project)”으로 지원받은 과제입니다. 참여 연구자(조안나, 정다운, 정유정)는 2단계 BK21 사업의 지원비를 받았습니다.

## 인 용 문 헌

- 김순래, 정의호, 안태석. 2001. 식물플랑크톤을 이용한 영양염류 제거에 관한 연구. 한국육수학회지 **34**: 133-139.
- 김용진. 2007. 아열대 기후지역에서 폐수처리를 위한 인공 습지 및 인공 먹이 연쇄망의 적용. 강원대학교 이학석사학위논문.
- 신성교, 백정훈, 송미경. 2002. 낙동강 중·하류수역에서 클로로필 *a* 최대농도 출현지역 평가. 한국육수학회지 **35**: 21-27.
- 안태석, 최승익, 김도선, 권오병. 2008. 자연환경을 이용한 생태기술. 한국자연보호학회지 **2**: 10-23.
- 전향배, 김병균, 서인석, 이상형. 2000. MIAP를 이용한 도시하수의 COD 및 질소 제거 특성. 한국물환경학회지 **16**: 57-64.
- 정부합동. 2000. '98, '00 4대강수계 물관리종합대책.
- 水野壽彦. 1975. 日本淡水プランクトン圖鑑. 保育社. pp. 353.
- APHA. 2001. Standard Method for the Examination of Water and Wastewater, 20<sup>th</sup> ed. American Public Health Association, Washington, DC.
- Asaeda, T., V.K. Trung, J. Manatunge and T.V. Bon. 2001. Modelling macrophyte-nutrient-phytoplankton interactions in shallow eutrophic lakes and the evaluation of environmental impacts. *Ecological Engineering* **16**: 341-

- 357.
- Environmental Protection Agency. 1987. Design manual phosphorus removal. EPA/625/1-87/001:6-49.
- Kawasaki, L.Y., E. Tarifeno-Silva, D.P. Yu, M.S. Gordon and D.J. Chapman. 1982. Aquacultural approaches to recycling of dissolved nutrients in secondarily treated domestic wastewaters- I Nutrient uptake and release by artificial food chains. *Water Research* **16**: 37-49.
- Kim, J.G., C.K. Park and S.G. Shin. 1995. The eutrophication modeling for Jinhae Bay in summer. *J. Korean Soc. Environ. Eng.* **17**: 121-135
- Kim, S.R., S.S. Woo, E.H. Cheong and T.S. Ahn. 2003. Nutrient removal from sewage by an artificial food web system composed of phytoplankton and *Daphnia magna*. *Ecological Engineering* **21**: 249-258
- Nakai, S., M. Hosomi, M. Okada and A. Murakami. 1996. Control of algal growth by macrophytes and macrophyte-extracted bioactive compounds. *Wat. Sci. Tech.* **34**: 227-235.
- Nakai, S., Y. Inoue, M. Hosomi and A. Murakami. 1999. Growth inhibition of blue-green algae by allelopathic effects of macrophytes. *Wat. Sci. Tech.* **39**: 47-53.
- Powell, N., A.N. Shilton, S. Pratt and Y. Chisti. 2008. Factors influencing luxury uptake of phosphorus by microalgae in waste stabilization ponds. *Environmental Science & Technology* **42**: 5958-5962.
- Redfield, A.C. 1958. The biological control of chemical factors in the environment. *American Scientist* **46**: 205-221.
- Verhoeven, J.T.A. and A.F.M. Meuleman. 1999. Wetland for wastewater treatment. Opportunities and limitations. *Ecological Engineering* **12**: 5-12
- Wang, H.J., X.M. Liang, P.H. Jiang, J. Wang, S.K. Wu and H.Z. Wang. 2008. TN : TP ratio and planktivorous fish do not affect nutrient-chlorophyll relationships in shallow lakes. *Freshwater Biol.* **53**: 935-944.

(Manuscript received 2 February 2009,  
Revision accepted 26 May 2009)