

시화호 인공습지의 식물 플랑크톤과 갈대 부착조류 군집의 동태

김용재* · 권순국¹⁾

대전대학교 생명과학과, ¹⁾서울대학교 생물자원공학부
(2004년 1월 16일 접수, 2004년 3월 8일 수리)

Dynamics of the Community of Phytoplankton and Periphytic Algae on Reed in the Shihwa Constructed Wetland

Yong-Jae Kim* and Soon-Kuk Kwun¹⁾ (Department of Life Science, Daejin University, Pocheon 487-711, Korea, ¹⁾School of Biological Resources Engineering, Seoul National University, Seoul 151-742, Korea)

ABSTRACT : The Shihwa constructed wetland was established for the treatment of severely polluted water from Banwoul, Donghwa and Samhwa streams. This study was focused on investigating dynamics of phytoplankton communities in open waters and periphytic algae on reed (*Phragmites communis*) planting area at 5 stations from October 2001 to July 2002. The concentration of T-N and T-P of inlet stations from the streams were decreased by flowed through the wetland. However, the TN/TP ratios at all stations were shown as a little over 16 indicating that the T-P will play some role as a limitation factor. Phytoplankton communities were identified as a total 413 taxa which were composed of 375 species, 21 varieties, 2 forma and 15 unidentified species. Standing crops of phytoplankton communities and chlorophyll-a concentrations ranged from 330~36,420 cells/mL and 2.5~170.7 µg/L respectively, and showed the decreasing tendency after flowing through the wetland at almost all stations. Dominant species were 14 taxa at all stations which were *Euglena oblonga* and *Synura spinosa* etc. Periphytic algae on the reed were a total 329 taxa which were composed of 295 species, 13 varieties, 3 forma and 17 unidentified species. The species numbers were recorded in order of Chlorophyceae - Bascillariophyceae - Cyanophyceae - Euglenophyceae - Chrysophyceae. The relative abundance (%) was showed a seasonal variation from Cyanophyceae to Bascillariophyceae and to Chlorophyceae. Chlorophyll-a concentrations, ie. the biomass of periphytic algae were ranged from 5.5~363.8 mg/m². Dominant species were 16 taxa which were *Lyngbya angusta* of Cyanophyceae in the early investigation, and were changed to *Stigeoclonium lubricum* of Chlorophyceae, and *Nitzschia palea* of Bacillariophyceae etc. in the late. Species number, standing crops and chlorophyll-a concentrations of phytoplankton and periphytic algae were shown higher values at the inlet stations than the stations after flowing through the wetland.

Key words: Shihwa constructed wetland, dynamics, phytoplankton, periphytic algae, TN/TP ratio.

서 론

습지는 동, 식물 부양체제와 환경의 기능을 유지하는데 광범위한 역할을 수행해 왔으며, 수자원의 조절, 토양침식 방지, 각종 오염물질 흡수, 조류 및 어패류의 서식처로서 역할을 한다. 또한 인간의 여가 활동의 주된 장소이며^{1,2)}, 육지로부터 유입되는 각종 오염물질을 정화하는 기능을 갖는다. 습지가 각종 개발에 따른 소실 또는 변형됨으로서 습지로서의 기능을 수행하지 못하는 피해가 발생하고 있으며³⁾, 그 중 습지 식물에 의해 자연 정화되어 오던 오수가 그대로 하천이나 호수로

유입되어 수질의 악화가 가속화되고 있다⁴⁾. 도시근교의 습지는 어업과 농업을 위한 주된 자원의 보고이며, 물리, 화학적 처리와는 달리 2차적 오염 발생이 없는 자연 수질정화 기능을 갖고 있어 낮은 비용으로 폐수를 처리할 수 있음을 보고하였다⁵⁾.

방조제 건설에 따른 시화호 유역 내 인구 및 축산업의 증가, 환경기초 시설의 미비, 입주공장의 불법폐수 방류 등으로 본 호수의 수질오염 문제가 발생하였다. 이에 따라 96년 환경기초 시설 증설과 유입 오염원 차단 및 호소 내 수질개선을 주요내용으로 하는 시화호 수질개선 대책을 수립하여 추진해 온 결과 수질이 개선된 것으로 보고 되었으며⁶⁾ 이러한 개선의 일환으로 본 호수의 상류 유입지천을 통해 유입되는 생활 및 축산폐수를 자연정화법으로 처리하기 위해 인공습지를 조성

*연락처:
Tel: +82-31-539-1851 Fax: +82-31-539-1850
Email: yjkim@daejin.ac.kr

하였다⁷⁾.

습지내 개방수역과 수중의 갈대 생물막은 생산자인 식물 플랑크톤과 부착조류, 소비자인 원생동물류와 수서곤충류 및 분해자인 세균류 등 다양한 생물 군집이 농축된 생태계로서 군집 간 상호관계를 통해 높은 자연 정화 능력을 가지고 있다⁸⁾. 정체수역에서 식물플랑크톤의 현존량과 증식속도는 수역의 유량, 크기, 수심, 체류시간 및 수질에 의해 크게 좌우된다. 또한 계절에 따라 서로 다른 것으로 보고하였다⁹⁾. 그리고 부착 미생물 군집은 증식속도가 빠르고 환경조건의 변화에 따라 대사활성의 변화가 크므로 부영양 수계의 생물막은 성장과 탈리를 단기간에 반복하여 현존량의 변화가 크며, 이 중 부착조류는 생산자임과 동시에 수중의 영양염을 흡수하여 저감하는 작용을 하는 것으로 나타났다¹⁾.

공단 및 도시 하수의 유입에 따른 호수 등의 부영양화 방지를 위한 측면에서 수생식물, 부착조류 및 식물플랑크톤을 이용하여 자연 정화 기능을 수질 개선에 적용하고 양질의 수질관리를 하기 위한 연구가 국내외적으로 연구되고 있다^{8,10,11)}. 그러나 이러한 연구는 소규모의 인공수로나 인공습지를 조성하여 연구한 것이며, 실제 시화 인공습지와 같이 여러 하천으로부터 유입되는 오염된 많은 하천수를 대단위 면적의 습지에서 연구된 것은 거의 없는 실정이다.

본 조사는 반월천, 동화천 및 삼화천의 오염된 하천수를 인공습지에 관류시킨 조건에서 환경변화와 함께 식물플랑크톤과 갈대 부착조류의 동태를 조사함으로써 앞으로의 인공습지관리를 위한 기초 자료로 활용하는데 그 목적이 있다.

재료 및 방법

안산시와 반월공단 그리고 주변 농경지로부터 배출되어 반월천을 통해 정점 1과 2에 공급되며, 정점 3과 4는 동화천, 정점 5는 삼화천로부터 하천수가 유입되고 있는 인공습지의 개방수역에 5개의 정점을 선정하여 2001년 10월부터 2002년 6월까지 총 7회 식물플랑크톤 군집의 동태를 조사하기 위하여 시료를 채집하였다(Fig. 1). 수온과 전기전도는 WIW-LF 91 EC meter로, pH는 HI8314 meter를 사용하여 현장에서 직접 측정하였다. 총인과 총질소의 분석은 APHA¹²⁾와 수질오염·폐기물 공정시험법(환경부, 1995)에 준하였다. 엽록소 a 농도($\mu\text{g/L}$)는 시료 1 L 중에 25 mL를 bbe cuvette에 넣어 fluorometer(bbe moldaenke algae analysis)로 측정하였다.

식물플랑크톤의 시료는 1 L용 폴리에틸렌 병을 이용하여 정량 채집하여 중성 formalin으로 고정하고 자연 침전시킨 후 siphon으로 상등액을 제거한 다음 50 mL로 농축시켰다. 농축된 시료를 광학 현미경(Axioscop 20 X300-2,000)하에서 동정 및 분류하였다. 현존량(cells/L)은 정량 채집 후 50 mL로 농축시킨 시료 1 mL를 취해 Sedgwick-Rafter chamber에서 계수하여 산출하였다. 부유성 규조류는 KMnO_4 법¹³⁾으로 세정한 다음 영구표본을 제작하여 종을 동정하였고 현존량은 총 현존량 중에 규조류의 현존량을 영구표본의 각 종에 대한 상대빈도에

대입하여 산출하였다. 우점종은 현존량 중에 평균 현존량을 상회하는 종들 중에 최대 현존량을 나타내는 종으로 선정하였다.

갈대 줄기에 착생하는 부착조류의 시료는 2001년 10월부터 2002년 6월까지 반월천, 동화천 및 삼화천에서 유입되는 인공습지 내의 갈대군집에 5개의 정점을 선정하여 7회 시료를 채집하였다. 시료의 채집은 수중에 있는 갈대 줄기를 20 cm 길이로 잘라서 실험실로 옮겨 증류수가 있는 플라스크에 nylon 재질의 솔로 굵어 최종 150 mL로 정량 채집하였다. 부착조류의 종은 광학현미경(Axioscop 20, X300-2000)하에서 동정과 분류하였다. 부착 규조류는 KMnO_4 법¹³⁾을 사용하여 시료를 세정하고 영구표본을 만든 다음 종을 동정, 분류하였다. 부착조류의 우점종은 500세포 이상을 계수한 다음 상대빈도를 산출하고 평균 상대빈도를 상회하는 종중에 가장 높은 상대빈도를 나타내는 종으로 하였다.

결 과

환경요인

수온은 평균 11.7~12.6°C의 범위로서 정점 2와 3에서 가장 낮았으며 정점 5에서 가장 높았고 변화 폭도 가장 컸다(Table 1). pH는 평균 7.8~8.5의 범위로 약알칼리성이었고 변화 범위는 pH 6.2~9.1로서 정점 1에서 변화 폭이 가장 컸다(Table 1). 전기전도도는 평균 0.69~3.00 dS/m의 범위로서 정점 4에서 가장 낮았으며 정점 5에서 최고였다. 조사동안 변화 폭은 정점 5에서 가장 컸으며, 농도는 4.81 dS/m로 가장 높았다. 본 정점은 다른 정점과 같은 시기에 매립되어 습지가 조성되었지만 습지의 개방수내에 전기전도도가 다른 정점보다 항상 높게 유지되었다(Table 1).

총질소는 평균 4.4~21.3 mg/L의 범위였다. 반월천으로부터 유입된 정점 1에서 최대였으며 갈대습지를 관류한 후에 약간

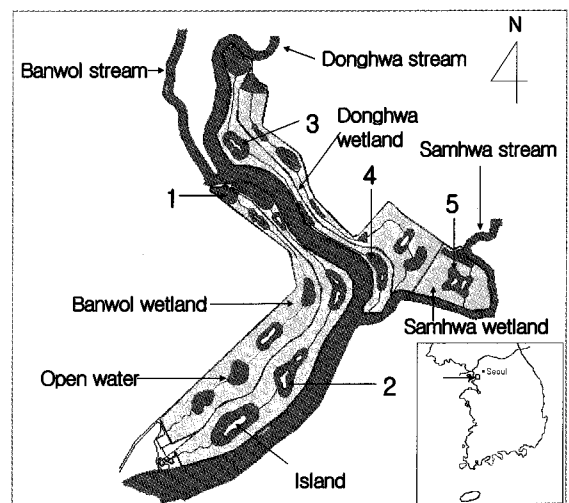


Fig. 1. Map showing the sampling stations in the Shihwa constructed wetland.

Table 1. Environmental factors in the Shihwa constructed wetland

Factors	Water Temp.(°C)	pH	EC (dS/m)	TN (mg/L)	TP (mg/L)	TN/TP ratio
1 mean	12.1±7.3 ^{a)}	7.8±1.0	1.4±0.4	21.3±2.4	0.9±0.3	24.3±7.6
1 range	4.0~22.3	6.2~9.1	0.5~2.1	13.9~30.6	0.4~1.5	11.4~34.8
2 mean	11.7±7.2	7.5±0.4	1.7±0.8	17.6±6.4	0.9±0.4	21.5±9.1
2 range	2.3~20.7	6.8~7.0	0.5~2.5	10.1~27.9	0.5~0.9	10.1~33.2
3 mean	11.7±7.2	7.5±1.0	1.5±0.7	5.9±1.1	0.2±0.0	20.8±19.8
3 range	3.4~21.3	6.9~8.5	0.3~2.0	4.5~7.8	0.2~0.3	17.1~33.9
4 mean	12.0±6.6	8.5±1.1	0.7±0.2	4.4±1.5	0.2±0.1	23.9±5.2
4 range	4.0~20.5	7.2~10.2	0.4~0.9	2.2~6.7	0.1~0.3	16.2~29.4
5 mean	12.6±8.5	8.4±0.1	3.0±1.5	4.6±2.0	0.1±0.0	36.8±24.1
5 range	2.0~22.1	7.4~8.7	1.1~4.8	2.3~7.9	0.1~0.2	16.4~42.3

^{a)}mean±s.d., n=7, Oct. 2001~Jun. 2002.

감소하였다. 동화천의 정점 3에서는 4.5~7.8 mg/L 였고 습지를 관류한 후인 정점 4에서 감소하였다. 5월과 6월을 제외한 다른 조사 시기에 호수 수질 기준¹⁴⁾에 의거하면 부영양상태였다(Table 1). 총인은 평균 0.13~1.00 mg/L의 범위로서 정점 5에서 최저였으며 정점 1에서 최고였다. 조사 동안 정점 1에서 총인은 0.4~2.21 mg/L의 범위로 변화 폭이 컸다. 총인 역시 5월과 6월을 제외한 시기에 부영양상태였다. 반월천의 총인은 0.34~2.19 mg/L의 범위였다. 이와 같은 농도를 함유한 하천수는 정점 1에서 0.4~1.00 mg/L의 범위였으며 갈대습지를 관

류한 후 정점 2에서 0.45~0.91 mg/L의 범위로서 정점 1보다 감소하였다. 동화천의 총인 농도는 0.32~0.69 mg/L의 범위로서 반월천보다 낮았다. 또한 갈대습지를 관류한 후 정점 4에서 농도는 0.09~0.33 mg/L였다. 하천수가 정점 3에 유입된 후에는 0.22~0.45 mg/L였으며, 하천수→개방수역→인공습지를 관류하면서 총인의 농도가 감소하였다(Table 1).

TN/TP비는 평균 20.9~36.8의 범위로 Radfield의 비인 16 이상으로서 총인이 제한 영양염인 것으로 나타났다. 단지 4월에만 TN/TP비가 16 이하로 낮아졌는데 총인의 농도가 정점 1과 2에서 각각 2.21 mg/L과 1.61 mg/L였다. 이것은 총질소 농도의 변화가 거의 없었으나 총인의 농도만 증가함으로써 나타난 결과이다(Table 1).

식물플랑크톤 군집

인공습지의 식물플랑크톤은 총 413종류로서 7강, 16목, 6아목, 36과 110속, 375종, 21변종, 2품종 및 15미동정종으로 구성되어 있다. 이들 중에 녹조강이 241종류(58.4%)였으며 규조강이 140종류(33.9%)였다. 다음으로 유글레나강이 83종류(20.0%), 남조강이 30종류(7.3%), 황갈색조강이 15종류(3.6%), 황녹색조강과 와편모조강이 각각 2종류(0.5%)의 순으로 조사되었다. 계절별 출현 종수는 조사 초기인 가을에 녹조강, 유글레나강 및 규조강의 순이었다. 겨울에는 규조강은 증가하였고 녹조강과 유글레나강 등의 종수는 감소하였다. 봄에는 녹조강과 유글레나강의 종수가 증가하였다. 여름에는 녹조강의 종수가 증가하

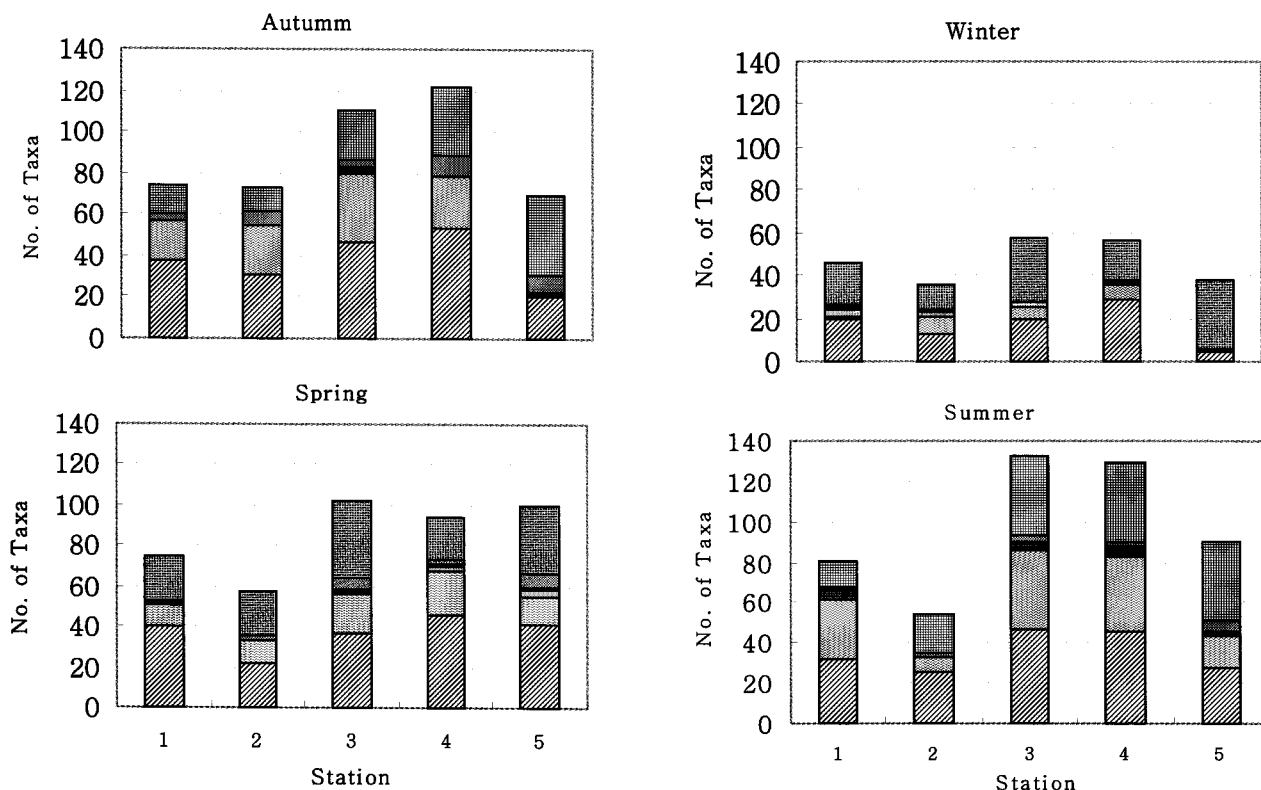


Fig. 2. Seasonal variations of taxa number of phytoplankton communities in the Shihwa constructed wetland. (▨, Chlorophyceae; ▩, Euglenophyceae; ▤, Xanthophyceae; ▥, Chrysophyceae; ▦, Dinophyceae; ▧, Cyanophyceae; ▨, Bacillariophyceae)

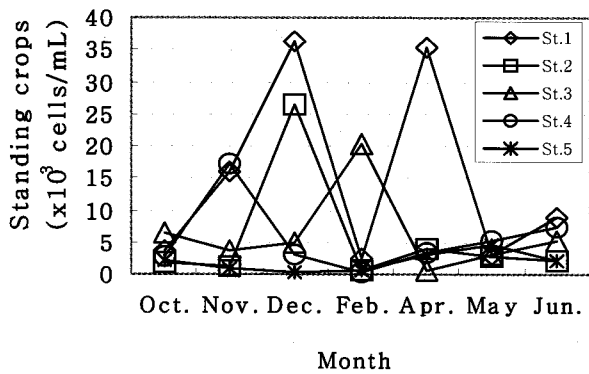


Fig. 3. Variations of standing crops (cells/mL) of phytoplankton communities in the Shihwa constructed wetland.

Table 2. Dominant species of phytoplankton communities the Shihwa constructed wetland

Station	Dominant species (%)	Station	Dominant species (%)
Oct.		Nov.	
1	<i>Euglena oblonga</i> (51.7)	1	<i>Cyclotella meneghiniana</i> (47.2)
2	<i>Cyclotella meneghiniana</i> (73.6)	2	<i>Nitzschia acicularis</i> (32.1)
3	<i>Pandorina morum</i> (47.0)	3	<i>Nitzschia acicularis</i> (39.0)
4	<i>Lyngbya angusta</i> (51.7)	4	<i>Nitzschia acicularis</i> (52.0)
5	<i>Lyngbya angusta</i> (38.6)	5	<i>Nitzschia palea</i> (21.3)
Dec.		Feb.	
1	<i>Synura spinosa</i> (92.2)	1	<i>Stephanodiscus hantzschii</i> f. <i>tenuis</i> (43.3)
2	<i>Synura spinosa</i> (94.4)	2	<i>Nitzschia palea</i> (68.9)
3	<i>Synura spinosa</i> (77.1)	3	<i>Synura spinosa</i> (80.8)
4	<i>Nitzschia acicularis</i> (61.9)	4	<i>Nitzschia palea</i> (35.6)
5	<i>Chlamydomonas pseudopertyi</i> (40.6)	5	<i>Nitzschia palea</i> (21.9)
Apr.		May.	
1	<i>Monoraphidium contortum</i> (21.6)	1	<i>Cyclotella meneghiniana</i> (30.9)
2	<i>Oscillatoria amphibia</i> (54.3)	2	<i>Lyngbya angusta</i> (64.9)
3	<i>Nitzschia acicularis</i> (19.1)	3	<i>Cyclotella meneghiniana</i> (19.8)
4	<i>Cyclotella meneghiniana</i> (26.8)	4	<i>Ulothrix subconstricta</i> (50.1)
5	<i>Lyngbya angusta</i> (69.1)	5	<i>Lyngbya limnetica</i> (73.9)
Jun.			
1	<i>Ochromonas elegans</i> (34.2)		
2	<i>Nitzschia palea</i> (37.9)		
3	<i>Synura spinosa</i> (14.3)		
4	<i>Nitzschia palea</i> (12.2)		
5	<i>Nitzschia palea</i> (13.1)		

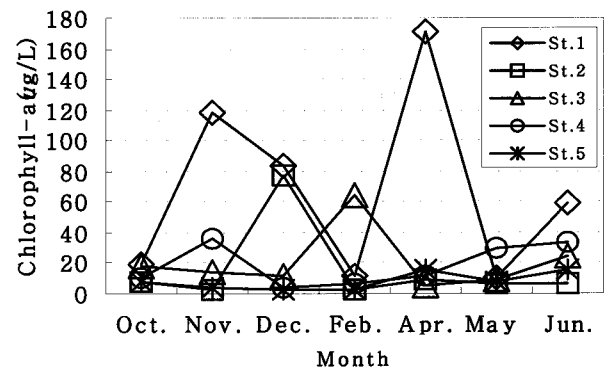


Fig. 4. Variations of chlorophyll-a ($\mu\text{g/L}$) concentration of phytoplankton communities in the Shihwa constructed wetland.

였다(Fig. 2).

식물플랑크톤의 현존량은 2001년 10월에 1,750~6,500 cells/mL의 범위로서 정점 3에서 최대였다. 12월에는 정점 1과 2에서 현존량이 각각 36,420와 26,440 cells/mL로 증가하였다. 2002년 2월에는 12월에 번성하던 *Synura*속이 정점 1과 2에서 급격하게 감소한 반면에 정점 3에서 현존량이 20,410 cells/mL로 증가하였다. 4월에 녹조강의 *Chlamydomonas*속, *Monoraphidium*속 등의 현존량이 증가함으로써 정점 1에서 2001년 12월에 이어 두 번째 증가현상을 나타내었다(Fig. 3). 5월에는 정점 1과 2에서 많은 강우에 의해 습지내의 생태계를 구성하고 있던 군집이 와해됨으로써 종구성뿐만 아니라 현존량도 급격하게 감소였다. 6월에는 수 환경이 안정되면서 개방수역내의 현존량도 점차 증가하였다(Fig. 3). Horn and Goldman¹⁰이 제시한 물꽃현상 기준에 의하면 본 수계는 2001년 10월부터 12월까지 정점 1~4에서, 2002년 2월에는 단지 정점 3에서만 발생되었다. 그리고 4월부터 6월까지 정점 1에서 물꽃현상이 발생되었다(Fig. 3).

엽록소 a 농도는 2001년 10월에 유입정점인 1과 3에서 각각 18.7 $\mu\text{g/L}$ 과 17.5 $\mu\text{g/L}$ 였고 습지를 관류한 후인 정점 2와 4에서 각각 10 $\mu\text{g/L}$ 로 감소하였다. 2001년 11월에 엽록소 농도는 2.5~117.8 $\mu\text{g/L}$ 의 범위로서 10월보다 변화 폭이 컸다. 정2001년 12월에는 *Synura*가 물꽃현상을 발생한 정점 1과 2에서 각각 83.9 $\mu\text{g/L}$ 와 76.8 $\mu\text{g/L}$ 로서 증가하였다. 2002년 2월에 정점 3에서 *Synura*속의 물꽃 현상으로 엽록소 농도는 63.7 $\mu\text{g/L}$ 였다. 2002년 4월에 정점 1에서 녹조강의 *Monoraphidium*과 *Micractinium*속이 대 발생하면서 엽록소 농도는 170.7 $\mu\text{g/L}$ 로 증가하였다. 2002년 6월에 엽록소 a 농도는 5.82~59.23 $\mu\text{g/L}$ 의 범위로서 전월보다 수배 증가하였다(Fig. 4).

본 조사에서 우점종은 Table 2와 같이 2001년 10월에는 유글레나강의 *Euglena oblonga* 규조강의 *Cyclotella meneghiniana*, 녹조강의 *Pandorina morum* 그리고 남조강의 *Lyngbya angusta* 등 다양한 종이 우점을 하였다. 수온이 10°C 이하로 낮아지는 11월에 우점종은 유글레나강과 녹조강에서 규조강의 종으로 변화되었다. 12월에 정점 1~3에서 황갈색조강의 *Synura spin-*

osa가 77.1~94.4%의 높은 비로 우점하였다. 수온이 낮은 2월에 규조강의 *Stephanodiscus hantzschii* f. *tenuis*와 *Nitzschia palea*가 우점종으로 출현하였다. 수온의 증가 등 수계의 물리적 조건이 변화되는 4월에 녹조강이 조사되었다. 6월에 정점 1에서 황갈색조강 중에 크기가 매우 작은 *Ochromonas elegans*가 우점을 하였다(Table 2).

습지내에서 식물플랑크톤의 엽록소 a 농도와 주요 환경인자인 총인, 총질소 및 수온과의 상관관계에서, 총인은 $r^2=0.24$, 총질소는 $r^2=0.13$, 수온과의 관계는 $r^2=-0.004$ 로서 매우 낮았다.

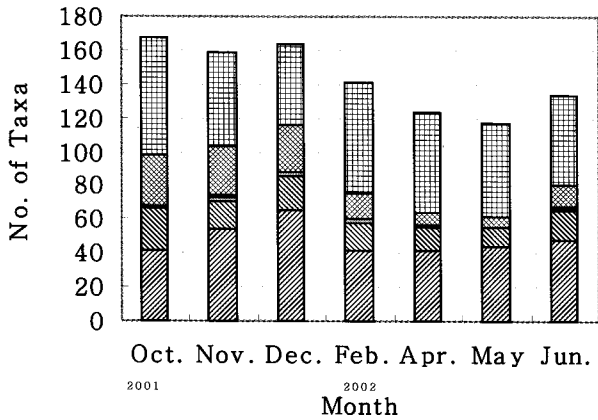


Fig. 5. Composition of the classes of periphytic algae on reed in the Shihwa constructed wetland. (▨, Chlorophyceae; ▩, Euglenophyceae; ▧, Chrysophyceae; ▦, Dinophyceae; ▥, Cyanophyceae; ▤, Bascillariophyceae)

갈대 부착조류

하천 오염물질의 제거를 위해 조성된 인공습지내의 갈대에 착생하는 부착조류는 총 329종류로서 6강, 15목, 7아목, 39과 94속, 295종, 13변종, 3품종 및 17미등정종으로 구성되어있다. 이들 중에 녹조강이 112종류(34%)였으며 다음으로 규조강이 105종류(31.9%), 남조강이 57종류(17.3%), 유글레나강이 45종류(13.7%), 황갈색조강이 9종류 그리고 외편모조강이 1종류의 순으로 조사되었다(Fig. 6). 계절별 변화에서 가을에 출현 종은 총 159~167종류로 규조강이 41.3%, 녹조강이 24.6%, 남조강이 18% 그리고 유글레나강이 15.6% 등의 순이었다. 겨울에는 녹조강의 종류가 39.6%로 최대였으며 다음이 규조강, 남조강, 유글레나강의 순이었다. 수온이 최저로 감소한 2월에도 규조강의 종수가 최대로 증가하였으며 녹조강은 12월보다 약 20여 종류가 감소하였다. 봄에는 갈대 부착조류의 종수는 117~123종류로서 겨울보다 감소하였다. 여름에는 녹조강과 유글레나강의 종수가 증가함으로서 134 종류로 증가하였다(Fig. 5).

갈대 부착조류 군집의 월별 및 강별 상대빈도의 변화는 Fig. 6과 같다. 10월에 출현 종수는 규조강과 녹조강이 많았으나 상대빈도는 남조강이 전체 정점에서 65.2~94.1%의 높은 비를 차지하였다. 그러나 수온이 감소하고 저수량이 증가한 11월과 12월에 정점 1~4에서 남조강의 상대빈도가 감소하였고 역으로 규조강이 증가하였다. 삼화천에서 유입되는 정점 5에서는 남조강의 상대빈도가 매우 높게 유지되었다.

수온이 낮은 조사기간에 군집을 대표하는 주요 종류는 남조강의 *Lyngbya*속, *Phormidium*속이었다. 정점 2에서는 다른

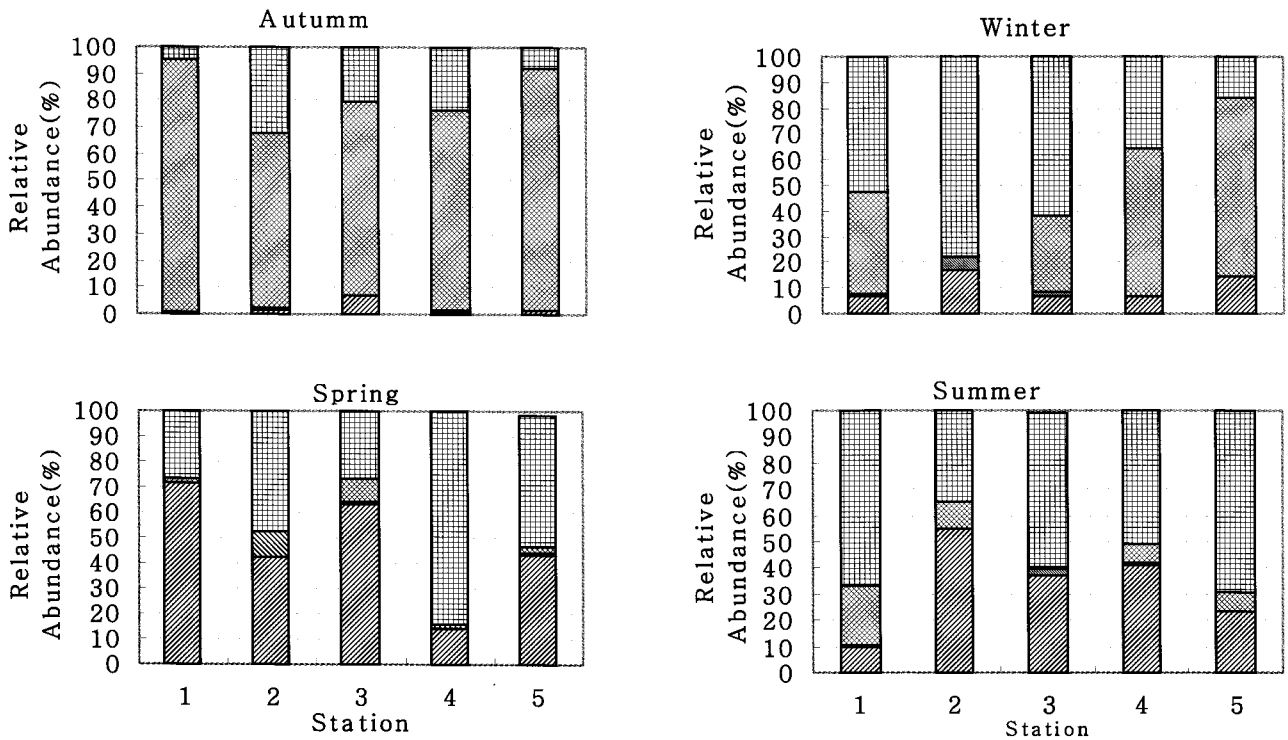


Fig. 6. Relative abundance (%) of periphytic algae on the reed in the Shihwa constructed wetland. (▨, Chlorophyceae; ▩, Euglenophyceae; ▧, Xanthophyceae; ▦, Chrysophyceae; ▥, Dinophyceae; ▤, Cyanophyceae; ▣, Bacillariophyceae)

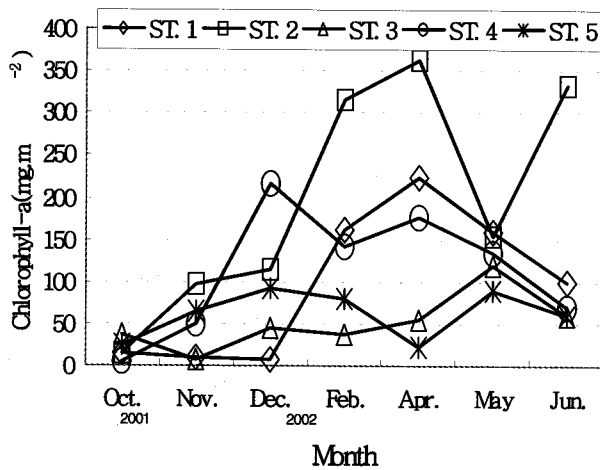


Fig. 7. Variations of chlorophyll-a concentration (mg/m^2) of periphytic algae on reed in the Shihwa constructed wetland.

Table 3. Dominant species of periphytic algae on reed in the Shihwa constructed wetland

Station	Dominant species (%)	Station	Dominant species (%)
Oct.		Nov.	
1	<i>Lyngbya angusta</i> (70.4)	1	<i>Lyngbya angusta</i> (46.2)
2	<i>Plectonema</i> sp. (58.9)	2	<i>Ulothrix cylindrica</i> (51.0)
3	<i>Lyngbya angusta</i> (85.5)	3	<i>Anabaena variabilis</i> (64.5)
4	<i>Lyngbya angusta</i> (66.7)	4	<i>Lyngbya angusta</i> (31.9)
5	<i>Lyngbya angusta</i> (37.3)	5	<i>Calothrix braurii</i> (80.1)
Dec.		Feb.	
1	<i>Lyngbya angusta</i> (73.9)	1	<i>Lyngbya angusta</i> (34.1)
2	<i>Nitzschia palea</i> (26.1)	2	<i>Nitzschia palea</i> (36.7)
3	<i>Phormidium papyraceum</i> (33.8)	3	<i>Nitzschia palea</i> (24.6)
4	<i>Lyngbya angusta</i> (34.2)	4	<i>Phormidium papyraceum</i> (36.9)
5	<i>Lyngbya angusta</i> (48.2)	5	<i>Schizothrix muelleri</i> (22.2)
Apr.		May.	
1	<i>Stigeoclonium lubricum</i> (57.8)	1	<i>Nitzschia palea</i> (41.7)
2	<i>Oedogonium</i> sp. 1 (31.4)	2	<i>Oedogonium</i> sp. 1 (61.9)
3	<i>Oedogonium</i> sp. 1 (41.6)	3	<i>Lyngbya angusta</i> (26.2)
4	<i>Cyclotella meneghiniana</i> (30.7)	4	<i>Nitzschia palea</i> (26.2)
5	<i>Nitzschia frustulum</i> (21.9)	5	<i>Lyngbya angusta</i> (23.1)
Jun.			
1	<i>Gomphonema pseudoaugur</i> (17.5)		
2	<i>Stigeoclonium lubricum</i> (55.0)		
3	<i>Nitzschia palea</i> (21.2)		
4	<i>Navicula minima</i> (15.7)		
5	<i>Achnanthes minutissima</i> (33.9)		

정점과는 다르게 남조강의 *Plectonema*속, 녹조강의 *Ulothrix* 그

리고 규조강의 *Nitzschia*속의 상대빈도가 높았다. 봄에는 남조강보다 녹조강과 규조강의 상대빈도가 증가하였다. 여름에는 규조강과 녹조강과 남조강의 *Oscillatoria* 속이 높은 상대빈도를 나타내었다.

갈대 부착조류의 엽록소 a 농도는 평균 $121.6 \pm 84.5 \text{ mg}/\text{m}^2$ 이며 조사 정점별 및 계절별 차이가 컸다(Fig. 7). 조사 기간 동안 반월천으로부터 유입되는 정점 1에서 평균 엽록소 농도는 $96.5 \pm 70.9 \text{ mg}/\text{m}^2$ 였으며 4월에 $223.6 \text{ mg}/\text{m}^2$ 로 최대였다. 정점 2에서 군집의 평균 엽록소 농도는 $198.6 \pm 136.7 \text{ mg}/\text{m}^2$ 로 정점 1보다 약 2배 정도 증가하였으며 조사 초기부터 점차 증가하여 4월에 $363.8 \text{ mg}/\text{m}^2$ 로 최대였다. 동화천로부터 유입되는 습지인 정점 3에서 평균 엽록소 농도는 $51.7 \pm 34.3 \text{ mg}/\text{m}^2$ 였으며 5월에 $119.8 \text{ mg}/\text{m}^2$ 로 최대였다. 습지를 관류한 이후인 정점 4에서 평균 엽록소 농도는 $112.9 \pm 74.4 \text{ mg}/\text{m}^2$ 로 정점 3보다 약 2배정도 증가하였으며 12월에 $215.0 \text{ mg}/\text{m}^2$ 로 최대였다.

삼화천에서 유입된 정점 5에서 평균 엽록소 농도는 $61.6 \pm 28.5 \text{ mg}/\text{m}^2$ 로 조사 기간별 차이가 가장 작았으며 5월에 $89.8 \text{ mg}/\text{m}^2$ 로 최대였다. 본 조사에서 엽록소 농도는 인공습지의 갈대습지를 관류하기 전보다 그 이후의 정점에서 증가하는 경향을 나타내었다(Fig. 7).

갈대에 biofilm을 형성하는 부착 조류의 우점종은 2001년 10월부터 2002년 2월까지 정점 1에서 남조강의 *Lyngbya angusta*로서 34.1~73.9%의 높은 상대빈도를 점유하였다. 정점 2에서 10월에 우점종은 남조강의 *Plectonema*속이 11월에는 녹조강의 *Ulothrix*속, 12월에는 규조강의 *Nitzschia palea*로 변화되었다. 정점 3, 4와 5에서는 10월부터 2002년 2월까지 남조강의 *Lyngbya*속, *Anabaena*속, *Calothrix*속 그리고 *Phormidium*속 등이 우점을 차지하였다. 2002년 4월의 우점종은 녹조강의 *Stigeoclonium*속, *Oedogonium*속 및 규조강의 *Cyclotella*속, *Nitzschia*속 등으로서 20% 이상의 상대빈도를 점유하였다. 10월에는 전반적으로 생체량이 낮았으나 11월부터 점차 증가하여 대부분의 정점에서 4월에 최대로 증가하였다. 그러나 5월초와 6월에 약 50~60 mm의 강우로 부유물질이 약 $30 \text{ mg}/\text{L}$ 이상 증가함으로써 전체 생체량이 감소하였다. 갈대 습지를 관류한 후 정점 2에 유입된 물은 부유물질이 $10 \text{ mg}/\text{L}$ 이하로 감소하였고 저수량도 풍부하여 *Stigeoclonium*속, *Achnanthes*속, *Navicula*속 및 *Nitzschia*속 등이 증가하였다(Table 3).

고 찰

수질의 관리 목적은 생물의 생육에 영향을 미치지 않으며 다양성을 유지시킬 수 있는 영양상태를 회복시키고 유지시키기 위한 것이다. 이것은 영양염 부하-영양적 반응 관계에 따라 적정 수준의 총인과 총질소의 농도를 저감시키고 유지시킴으로 성취할 수 있다. 수질의 관리는 전적으로 과학적 및 기술적으로만 해결될 수는 없다. 즉, 경제적, 법적 및 정치적인 사고가 이들 문제를 해결할 수 있는 더욱 중요한 부분은

차지한다⁴⁾.

가속화되는 인위적 부영양화와 환경악화는 경제활동의 증가에 의한 영양염의 과부하로부터 온 결과이다. 수계의 가속화되고 바람직하지 않는 부영양화를 관리하는 것은 회복적 및 예방적인 영양염 부하 관리 기준을 위한 재정적 지원을 하는 것이다. 부영양화의 효과적 관리를 위해, 오염원의 배출 유역을 하나의 단위로 설정하고 해당 수계보다도 상류에 위치하는 오염원 배출유역의 영양염 관리 기준을 관리함으로써 실제적인 수질 향상을 기대할 수 있다¹⁵⁾.

조류를 대발생을 일으키는 요인은 보편적으로 질소와 인으로 추정할 수 있다. 무기인의 농도가 10 µg/L 이상의 농도일 때 유해성 조류의 대발생이 일어난다. 또한 질소도 300 µg/L 이상일 때 인과 함께 조류의 생산성 증가를 유발한다. 농업배수는 평균질소와 인의 비가 18정도이며 하수는 더 많은 양의 인을 공급 한다¹⁶⁾.

본 연구 조사 수역의 원수인 반월천, 동화천 및 삼화천은 농업, 공업, 축산 및 생활하수로서 총질소와 총인의 비는 평균 25.5±13.2(n=35)이며 총질소나 총인의 농도는 부영양 수질 기준의 수배에 달하고 있다. TN/TP 비와 엽록소 a 농도와와의 관계를 통해 조류 성장 제한 요소에서 TN/TP<10 및 <20 chl-a µg/L 일 때 질소가 제한 요인이었으며 TN/TP>17 및 <20 chl-a µg/L 일 때 인이 제한요소로 작용한다¹⁵⁾. 인공습지의 TN/TP 비는 전체 10.1~42.3의 범위이며 10월에는 정점 1과 3에서 그리고 11월에는 정점 2, 3과 5에서 인이 제한요인으로 작용하는 것으로 조사되었다. 이 외의 정점에서는 전자의 조건에 부합되는 조건은 없으며 두 요인이 조류 성장에 대해 제한요인으로 작용하지 않을 정도로 풍부한 것으로 사료된다. 이와 같은 높은 농도의 총질소와 총인의 농도는 물리적 환경요인의 영향을 받아 계절에 따라 우점종이 변화되며 수화를 유발시킨다. 인공습지가 조성된 개방수역에서 10월에 정점 1, 3과 4에서 *Euglena*속이 우점을 나타내며 수화를 발생시켰고 11월과 12월에는 정점 1에서 *Synura*속이 대 발생하였다. 본 속들이 수화를 일으킬 때 10월에 정점 1과 3에서 인이 제한요인으로 작용했지만 *Euglena*속은 질소의 농도가 높은 정점에서 수화를 일으켰다. 그러므로 유글레나류는 수온이 낮은 겨울, 초봄 등 계절에 관계없이 부영양 수계에 출현하며 특히 유, 무기 질소가 풍부한 부영양 수계에서 수화를 유발한다^{4,17-18)}. 11월과 12월에 정점 1에서 대 발생을 한 *Synura*속은 보편적으로 약산성의 호수에서 수온이 낮은 계절에 많이 출현하지만 본 조사 정점에 생육하는 *Synura spinosa*는 보편적으로 수온이 낮은 계절에 pH 6.5~8.5의 조건의 부영양 수계에서 출현하지만 약산성의 수계에서는 생육하지 않는 것으로 보고하였다¹⁸⁾. 본 조사에서는 보편적으로 부영양화된 호수나 하천에서 수온이 20°C 이상일 때 수화를 유발시키는 남조류의 *Microcystis*속은 관찰되지 않았다. 본 속은 N/P비가 낮고 수온이 높은 여름에 효율적 성장을 나타내며 수화를 유발한다. 그러나 본 수역에 담수가 되지 얼마 되지 않았고 조사 시기에는 계절적으로 남조류가 수화를 유발될 정도로 수온이 높지 않

았기 때문에 추정된다.

수중에 비치는 광량이 부착조류의 수와 생산에 영향을 미치는 중요한 요인이다. 부착조류는 서식기질을 필요로 하며 영양물질의 섭취를 수층으로부터 하지만 수중식물 수역에서는 이들이 떨어져 나가 죽어서 분해됨으로서 더 많은 영양물질의 혜택을 받게 된다. 또한 부착조류는 영양물질이 풍부한 수계에서 수생식물이 자라는 물의 깊이를 제한한다면 부착조류가 영양염의 증가로 식물플랑크톤 보다 더 빨리 증가한다. 이것은 pH와 이산화탄소 농도의 영향에 의해 수생식물보다 광합성 효율이 증가하기 때문이다¹⁹⁾. 물위로 나오는 유수식물은 조류나 수중식물과 직접적인 경쟁을 하지 않지만 영양물질이 유입됨으로서 성장이 촉진되고 그 수가 증가하는 경향이 있다. 특히 부영양화 된 수계의 갈대는 광합성 효율이 증가하며, 밀도와 길이가 증가한다. 갈대의 증가에 따른 간접적인 효과는 조류 생산이 가속화되고 시간이 지남에 따라 조체의 탈락과 죽음으로서 저질토에 유기물량이 증가하게 된다. 이것은 부착조류의 성장을 역시 촉진시키는 역할을 한다¹⁶⁾. 본 조사 수역에서도 많은 영양염의 유입에 의해 인공습지내의 갈대는 성장이 매우 왕성하고 길이 성장도 왕성하였다. 이와 같은 갈대에 착생하는 부착조류는 담수된 지 얼마 되지 않았고 탁도가 높았기 때문에 성장이 왕성하지 않았으며 군집 중에는 식물플랑크톤의 분류군이 상당히 포함되어 있다. 그러나 11월에는 10월과는 달리 수계가 안정화되어 가는 상태였으며 특히 정점 2에서는 식물플랑크톤보다 부착조류의 생육이 더욱 왕성한 것으로 조사되었다.

부착조류의 동태에서 유입수역보다는 습지를 관류한 후에 생체량이 증가하는 경향을 나타내었다. 이것은 개방수역에 유입된 하천수가 습지를 관류하면서 많은 부유물질 등이 제거되면서 수중의 광량을 증가시킨 결과 정점 2와 4에서 남조류보다는 *Stigeoclonium*속, *Ulothrix*속 등의 녹조류와 *Nitzschia*속의 왕성한 성장을 유도하였다.

본 조사에서 인공습지를 관류하는 수질의 변화와 함께 식물플랑크톤 군집의 종조성, 현존량 및 엽록소 농도 등이 뚜렷한 변화를 나타내었다. 또한 갈대 부착 조류 군집도 유입 정점과 관류한 정점 간의 종조성 및 상대비도 그리고 생체량인 엽록소 농도에서도 차이를 나타내었다. 이와 같은 결과는 유입 정점과 인공습지의 갈대습지를 관류하면서 영양염류인 총인 및 총질소 등의 저감 효과에 따른 영향으로 사료된다.

요 약

인공습지를 이용한 오염수 처리를 위해 조성된 시화 인공습지의 개방수 정점에서 식물플랑크톤과 갈대 조성지의 정점에서 갈대 부착 조류 군집의 동태에 대한 연구를 위해 5개의 정점을 선정하여 2001년 10월부터 2002년 6월까지 조사를 실시하였다. 반월천으로 부터 유입된 오염수는 정점 1을 통해 갈대군락을 관류하면서 정점 2에서 저감 효과를 나타내었다. 총인/총질소 비는 모든 정점에서 16이상으로 약간 상회하였다.

본 수계는 인이 제한 영양염으로 작용하는 것으로 나타났다. 식물플랑크톤은 총 413종류로서 375종, 21변종, 2품종 및 15 미동정이었다. 현존량은 330~36,420 cells/mL의 범위로 정점 5에서 최저였고 정점 1에서 최대였다. 현존량은 정점 1과 2, 정점 3과 4를 관류하면서 영양염류와 같이 감소되는 경향을 나타내었다. 엽록소 농도는 2.5~170.7 $\mu\text{g/L}$ 의 범위로 정점 1에서 최대였고 정점 5에서 최저였다. 엽록소 농도 역시 유입 수부터 습지 관류후의 정점에서 뚜렷한 차이를 나타내었다. 우점종은 *Euglena oblonga*, *Synura spinosa* 등 14종류였으며 정점 1과 2에서는 부영양수역에서 출현율이 높은 종으로 조성되어 있다. 갈대 부착조류는 총 329종류로서 295종, 13변종, 3 품종 및 17미동정종으로 구성되어 있다. 종수는 녹조강-규조강-남조강-유글레나강-황갈조강의 순으로 조사되었다. 상대빈도는 정점 간에 약간의 차이는 있지만 계절적으로 남조강-규조강-녹조강으로 변화되었다. 생체량인 엽록소 농도는 5.5~363.8 mg/m^2 의 범위로 정점 4에서 최저였고 정점 2에서 최대였다. 본 요인은 정점 1에서 2 그리고 정점 3에서 4로 관류된 후에 증가하는 경향을 나타내었다. 우점종은 총 16종류로서 조사 초기에 *Lyngbya angusta* 등 남조강이 조사되었고 이후에는 *Stigeoclonium lubricum* 등 녹조강과 규조강의 *Nitzschia palea* 등도 조사되었다. 본 조사에서 식물플랑크톤의 종수, 현존량 및 엽록소 농도는 유입 정점에서 높았으며 습지를 관류된 후에 감소하였다. 갈대 부착조류는 유입 정점보다 습지 관류 후에 증가하는 경향을 나타내었는데 이것은 습지를 관류하면서 부유물질 등이 습지를 통해 제거됨으로서 부착조류의 생육을 개선시킨 것으로 나타났다.

감사의 글

본 연구는 한국수자원공사의 연구비 지원으로 수행되었음.

참고문헌

- Adamus, P. R. and Stockwell, L. T. (1983) A method for wetland functional assessment: VII. 1. Critical review and evaluation concepts, US Dept. Transportation, Federal Highway Administration, Report FHWA IP: 82-83
- Heyman, J. R. (1988) *Self-Financed Resource Management: A direct approach to maintaining marine biological diversity*, Paper presented at workshop on economics, IUCN General assembly, 4-5 Feb. 1988, Costa Rica, p.234-235.
- Braakhekke, W. G. and Marchand, M. (1987) *Wetlands: The community's wealth*, European Environment Bureau, Brussels, 24.
- OECD (1979) *Eutrophication of Waters, Monitoring, Assessment and Control*, OECD Publ., 153pp.
- Ghosh, D. and Sen, S. (1987) Ecological history of Calcutta's wetland conversion, *Environmental conservation* 14, 219-226.
- KOWACO (2002) Study on Operation and Management of Shihwa Constructed Wetland Project, Korea Water Resources Corporation, 550.
- KOWACO (2001) *Monitoring in the Shihwa Constructed Wetland Project*, Korea Water Resources Corporation, 160.
- Kadlec, R. H. and Knight, R. L. (1996) *Treatment wetlands*, Lewis Publishers, Boca Raton, 893.
- Hwang, G. S., Kim, B. C., Kim, H. S. and Jun, M. S. (2000) Water quality improvement by natural wetland, *Kor. J. of Limnol.* 33, 295-303.
- Horn, A. J. and Goldman, C. R. (1994) *Limnology*, McGraw-Hill, Inc., New York, 115.
- Jun, M. S., Watanabe, Y. and Kim, B. C. (1998) The effects of dilution rate and temperature on phytoplankton growth in stream water, *Kor J. Limnol.* 31, 328-336.
- APHA (1992) Standard methods for the examination of water and wastewater, 18th. Ed., American Public Health Association, Washington, DC.
- Hendey, N. I. (1979) The permanganate method for cleaning freshly gathered diatoms, *Microscopy* 32, 423-426.
- Wetzel, R. G. (1983) *Limnology*, Saunders Coll. Publ., New York, 767.
- Chapra, S. C. (1979) Applying phosphorus model for the Great Lakes, *J. Environ. Eng. Div. ASCE* 103, 147-161.
- Haper, D. M. and Stewart, W. D. P. (1987) The effects of land use upon water chemistry, particularly nutrient enrichment, in shallow lowland lakes: comparative studies of three lochs in Scotland, *Hydrobiologia* 148, 211-229.
- Munawar, M. (1972) Ecological studies of Euglenine in certain polluted and unpolluted environments, *Hydrobiologia* 39, 307-320.
- Takahashi, E. (1966) Studies on general *Mallomonas*, *Synura* and other plankton in freshwater with the electron microscope VI, Morphological and ecological observations on genus *Synura* in ponds and lakes in Yamagata Prefecture, *Bull. Yamagata Univ. Agr. Sci.* 5, 99-118
- Simpson, P. S. and Eaton, J. W. (1986) Comparative studies of the photosynthesis of submerged macrophyte *Elodea canadensis* and filamentous algae *Cladophora*

glomerata and *Spirogyra* sp., *Aquatic Bot.* 24, 1-12.
