

## 농업용수 수질관리를 위한 미세조류의 활용

김진호 · 최철만\* · 김원일 · 이종식 · 정구복 · 신중두 · 성정숙<sup>1)</sup> · 이정택 · 윤순강<sup>2)</sup>

농촌진흥청 농업과학기술원 환경생태과, <sup>1)</sup>농촌진흥청 작물과학원 인삼약초과, <sup>2)</sup>농촌진흥청 연구관리과  
(2007년 1월 3일 접수, 2007년 3월 3일 수리)

### Application of Microalgae for Managing Agricultural Water Quality

Jin-Ho Kim, Chul-Mann Choi<sup>\*</sup>, Won-Il Kim, Jong-Sik Lee, Goo-Bok Jung, Joong-Du Shin, Jung-Sook Sung<sup>1)</sup>, Jung-Taek Lee, and Sun-Gang Yun<sup>2)</sup> (Division of Environment & Ecology, National Institute of Agricultural Science & Technology, RDA, Suwon 441-707, Korea, <sup>1)</sup>Division of Ginseong & Medicinal Crop, National Institute of Crop Science, RDA, Suwon 441-857, Korea <sup>2)</sup>Division of Research Management, RDA, Suwon 441-707, Korea)

**ABSTRACT:** The objective of this research was to review the correlation between microalgae and agricultural water quality. Although microalgae has been considered as an essential factor for controlling of water ecosystem, little attention has been paid for evaluating of microalgae as an important factor for water quality management. But it can be use to make us know the water pollution state at saprobic system, LTSI (Lake Tropic State Index), DAIPo (Diatom Assemblage Index to Organic Pollution), and AGP (Algal growth potential). In saprobic system, it is used microalgae such as *Actinastrum hantzschii* var. *fluvatile*, *Asterionella gracillima*, *Coelastrum microporum*, *Synedra acus*, *Dictyosphaerium pulchellum*, *Micractinium pusillum*, *Cyclotella meneghiniana*, *Microcystis aeruginosa*, *Scenedesmus quadricauda*, and *Nitzschia palea* for assessment water quality. In addition, they have ecologically significant characteristics such as dominant species, cosmopolitan species, redtide causative species etc. Also, microalgae such as *Botryococcus braunii*, *B. sp.*, *Chlorella vulgaris*, *C. sp.*, *Phormidium sp.*, *Scenedesmus quadricauda*, *Selenastrum capricornutum*, *Spirulina maxima*, and *S. platensis* have an effect on improvement of water quality.

**Key Words:** Microalgae, Indicator, Agricultural water, Water quality management

## 서론

미세조류(microalgae)는 전 세계적으로는 약 25,000여종이 존재하고 있으며, 우리나라에서는 담수 및 해수에서 약 1,272여종이 존재하는 것으로 알려져 있다<sup>1,2)</sup>. 이들은 현미경적 크기의 원핵(prokaryotic) 및 진핵(eukaryotic) 조류로서 단세포 또는 다세포 생물로 수중에서 광합성을 하는 독립영양생물(autotrophs)을 총칭하며 수체의 유동에 따라 부유하면서 빛과 무기물을 이용하여 광합성을 함으로써 생활에너지를 얻는 유기체인 식물플랑크톤(phytoplankton)과 돌, 수초 등의 매개체에 부착하여 에너지를 얻는 부착조류(periphyton)로 구분할 수 있다<sup>3)</sup>. 이들은 수생태계의 중요한 구성원으로서

시·공간적으로 환경변화에 민감하게 반응하고 먹이 연쇄의 기반을 이루는 1차생산자로서의 중요한 역할을 하므로 수생태계를 이해하기 위해서는 이들의 동태와 군집구조를 우선적으로 파악해야 한다<sup>4)</sup>.

미세조류는 수생태계의 종류와 크기에 따라 종조성이 달라지며 현존량에도 큰 차이를 보이며 미세조류를 연구하는 각 연구자들마다 그 출현종과 주요종에 대한 연구 결과의 차이가 많이 나기도 한다. 우리나라의 중요한 농업생산기반인 논에서 출현하는 미세조류는 남조류 5속 20종, 녹조류 29속 46종, 규조류 13속 21종, 유글레나조류 3속 6종, 윤조류 1속 1종 등 모두 51속 94종이 출현하여 녹조류의 출현비율이 높은 것으로 알려져 있지만<sup>5,8)</sup>, 농업용수원을 대상으로 한 미세조류에 대한 연구는 거의 없는 실정이다. 하지만 농업용수원에서의 경우, 수질오염 지표성 등의 생태적 특성을 가진 미세조류를 이용한다면 관개수의 수질 오염 정도를 파악할 수 있고, 수질을 평가하여 농업용수의 수질을 관리하는데 효과적

\*연락처:  
Tel: +82-31-290-0221 Fax: +82-31-290-0206  
E-mail: strong90@hanmail.net

으로 이용할 수도 있다. 또한 미세조류는 먹이원으로 N, P와 같은 영양염류를 이용하므로 농촌유역에 있어서의 수질 개선에도 이용이 가능하다<sup>9-11)</sup>.

한국 농업은 아시아계절풍대의 온난 다습한 자연조건을 활용하는 벼농사 중심의 농업으로 용수를 얻을 수 있는 경작지를 모두 논으로 개발하여 왔다. 이로 인하여 논 조류에 의한 피해가 급증하여 문제시 되어왔고 남부지역의 일부 기계이앙 논에서 이앙 후 부유조류가 유묘에 부착하여 생육을 저해한다는 사례도 있다<sup>12)</sup>. 그러나 논토양에 유입되는 미세조류가 토양에서 영주하는 것이 아니라 주로 관개수에 의해 직접 유입되어 일시적으로 정착하여 생육하고<sup>13)</sup>, 수도재배법의 개선으로 인해 현재 그 피해는 현저히 줄어들고 있다. 그럼에도 불구하고 부영양화 되고 오염된 관개수가 유입될 때에는 수화 원인 조류에 의한 피해, 미세조류의 독소에 의한 건강상의 장애, 고농도의 질소에 의한 경작 장애, 농산물의 안전성 문제에도 직결되어 중요한 문제로 대두될 수 있기 때문에 관심이 집중된다.

따라서, 본 논고에서는 농업생태계 내에서 중요한 문제로 대두될 수 있는 미세조류에 대하여, 농업용수와 관련한 몇 가지 측면에서 미세조류의 최근의 연구동향과 연구방향을 소개하고 이들의 효율적 활용방안을 모색하고자 하였다.

## 본 론

### 농업용수에서의 미세조류 출현 현황

농업용수의 수원으로 하천, 저수지, 지하수 등이 있는데 정체 수역, 유수 수역 등 수원의 종류에 따라서, 그리고 수원의 크기에 따라서도 출현하는 미세조류의 종조성이 달라지고 현존량에서도 큰 차이가 난다. 유수 수역인 하천에서는 Lee<sup>14)</sup>가 19종으로 가장 적게 출현하였음을 보고한 반면, Moon and Lee<sup>15)</sup>는 208종으로 가장 많이 출현하였음을 보고하였고(Table 1) 정체 수역인 댐, 저수지 및 호수에서는 Cho<sup>16)</sup>가 13종으로 가장 적게 출현하였음을 보고한 반면 Kim and Chung<sup>17)</sup>이 399종으로 가장 많이 출현하였음을 보고한 바 있다. 연구자들마다 언급한 출현종수에 대해서 차이가 크게 났으며 대부분 규조류가 많이 출현하여 논에서의 출현종과는 다소 차이가 있음을 알 수 있다(Table 2).

### 농업용수 수질평가를 위한 미세조류 이용

미세조류를 수질오염 평가에 이용하는 방법은 생물학적 수질계급(saprobic system)에 의한 방법<sup>59-65)</sup>, 영양단계지수(Lake Trophic State Index, LTSI)에 의한 방법<sup>56,66-68)</sup>, 부착 규조 군집에 의한 유기오염평가법<sup>69-71)</sup>, 조류성장잠재력(Algal Growth Potential, AGP)에 의한 수질평가법<sup>72-76)</sup> 등 여러 가지가 있다.

수질계급에 의한 수질평가법을 보면, 수질 오염의 단계는 빈부수성(oligosaprobic, os), β-중부수성(β-mesosaprobic, β-ms), α-중부수성(α-mesosaprobic, α-ms), 강부수성(poly-

Table 1. Comparison of the number of species in streams

References	Total number of species	Number of important species
Lee <sup>14)</sup>	19	-
Moon and Lee <sup>15)</sup>	208	28
Kim and Moon <sup>18)</sup>	47	-
Suh and Park <sup>19)</sup>	22	-
Chung and Lee <sup>20)</sup>	74	9
Chung and Lee <sup>21)</sup>	80	-
Chung et al. <sup>22)</sup>	60	14
Choi and Chung <sup>23)</sup>	80	-
Ahn and Kim <sup>24)</sup>	111	9
Kim et al. <sup>25)</sup>	122	25
Kim et al. <sup>26)</sup>	111	9
Lee and Chung <sup>27)</sup>	182	11
Choi et al. <sup>28)</sup>	96	9
Choi and Kim <sup>29)</sup>	68	9
Lee <sup>30)</sup>	110	22
Lee <sup>31)</sup>	80	-
Choi et al. <sup>32)</sup>	96	17
Cho et al. <sup>33)</sup>	160	22
Chang et al. <sup>34)</sup>	56	16
Kim <sup>35)</sup>	105	8
Kim <sup>36)</sup>	74	6

Table 2. Comparison of the number of species in dams, reservoirs, and lakes

References	Total number of species	Number of important species
Cho <sup>16)</sup>	13	4
Kim and Chung <sup>17)</sup>	399	43
Cho <sup>37)</sup>	34	12
Cho and Park <sup>38)</sup>	54	14
Cho and Ra <sup>39)</sup>	73	15
Yim et al. <sup>40)</sup>	242	4
Kim and Choi <sup>41)</sup>	-	12
Chung et al. <sup>42)</sup>	111	-
Cho et al. <sup>43)</sup>	77	8
Kim and Chung <sup>44)</sup>	234	7
Choi et al. <sup>45)</sup>	130	9
Lee and Cho <sup>46)</sup>	104	16
Kim et al. <sup>47)</sup>	284	18
Kim et al. <sup>48)</sup>	306	4
Chung <sup>49)</sup>	72	8
Lee and Song <sup>50)</sup>	175	14
Han et al. <sup>51)</sup>	60	10
Kim <sup>52)</sup>	305	31
Lee et al. <sup>53)</sup>	327	6
Lee et al. <sup>54)</sup>	-	6
Lee <sup>55)</sup>	109	17
Kim <sup>56)</sup>	352	23
Park et al. <sup>57)</sup>	171	27
Kim et al. <sup>58)</sup>	-	9

saprobic, ps)의 4계급으로 나눌 수 있다. 서식 수역의 수질 계급에 따른 주요 출현 식물플랑크톤으로는, 빈부수성에서는 *Actinastrum hantzschii* var. *fluviatile*, *Asterionella gracillima*, *Coelastrum microporum*, *Synedra acus* 등, β-중부수성에서는 *Dictyosphaerium pulchellum*, *Micractinium pusillum* 등, α-중부수성에서는 *Cyclotella meneghiniana*, *Microcystis aeruginosa*, *Scenedesmus quadricauda* 등, 강부수성에서는 *Nitzschia palea*가 나타난다(Table 3). 생물군에 의한 정확한 수질의 표현이 어려우므로 이것을 정량적으로 표현하기 위하여 본 수질 계급법이 제일 먼저 제안되었고 그 후 여러 연구자들에 의해 여러 가지 방법으로 점점 개선되었다. 이 방법에 의하면, 한 종의 미세조류는 한 수질 계급에만 출현하는 것이 아니라, 오염에 적응되어 있는 정도에 따라 여러 수질 계급에 걸쳐서 출현하므로 어떤 수역에서 수질을 평가하기 위해서는 출현하는 모든 종들에 대한 오염 적응도를 우선 파악해야 한다. 그런데, 우리나라에서는 각 미세조류별로 오염 수역에 대한 출현 기준이 없어 연구자들마다 각 미세조류에 대한 서식 수역도 다르게 나타난다. 그러므로 이들을 일률적으로 적용시키기 어렵고, 출현 양상도 외국 문헌들에만 의존하고 있는 실정이라 우리나라에서 출현하는 미세조류에 대하여 많은 연구자들의 연구결과를 토대로 한 출현 기준 마련이 시급하다고 생각된다.

LTSI의 경우, Lee 등<sup>67)</sup>에 의하면, 우리나라 주요 호수 10개의 LTSI의 연간 평균값은 4.1~8.0의 범위였는데 중영양호(mesotrophic lake)는 안동호(평균 4.1)로 1개소였고, 중부영양호(mesoeutrophic lake)는 광동호, 충주호, 운문호로 3개소(평균 4.9~5.2), 나머지 팔당호, 대청호, 임하호, 안계호, 사연호, 진양호 등 6개소는 평균 5.4 이상으로 부영양호(eutrophic lake)로 평가하였다. 또한 Kim<sup>56)</sup>은 덕동호에서 평가한 바 중영양상태(3.9)~과영양상태(11.4)의 범위였음을 보여주었고 Shin and Jun<sup>68)</sup>은 아산호에서 과영양상태임을 보여주었는데 대체적으로 부영양상태에서 과영양상태로 오염

이 진행되어 가고 있다고 보고하였다. LTSI법은 다른 수계에서 보다 호수나 저수지에서 더 적합한 부영양화 평가방법으로, total phosphate(TP), secchi depth(SD), chlorophyll-a(chl-a)를 이용한 요인분석을 기초로 한 지수로서 나타낸 방법이다. 이 방법은 미세조류의 정성, 정량 분석을 하지 않고도 호수나 저수지에서 미세조류의 제한 인자로 작용하는 영양염류에 의해 부영양 정도를 파악할 수 있다는 장점이 있지만, 일정한 유속이 있는 강, 하천 등의 유수역에서는 chl-a의 측정이 의미하는 바가 적어 이용되기가 어렵고 정체수역에서만 이용가능하다는 단점이 있다.

부착규조 군집에 의한 유기 오염도는 DAIPo(Diatom Assemblage Index to Organic Pollution)에 의해 평가될 수 있는데, 각 규조류의 유기 오염에 대한 내성도를 기준으로 호오염성종(saprophilous taxa), 호청수성종(saproxenous taxa), 광적응성종(indifferent taxa)의 3가지 생태군으로 나누어 규조군집 내 이들 생태군들의 상대빈도를 근거로 구해지는 값이다. Kim<sup>36)</sup>은 신천에서 0.4~15.3으로 조사하여 강부수성임을 보고하였고, Park et al.<sup>70)</sup>은 낙동강 중류에서 30.9~44.6으로 β-중부수성임을 보고하였으며 Choi 등<sup>71)</sup>은 울릉도에서 51.1~77.8로 α-빈부수성~β-빈부수성의 범위였음을 보고한 바 있다. 이 방법은 부착규조 전 출현종에 대한 상대빈도를 구하여 3가지 생태군으로 분류한 후 정점별, 조사시기별 값으로 나타냄으로써 수질 계급법에 의한 방법보다 더 정량적인 수질 평가가 가능하다는 장점이 있는 반면, 수계에서 출현하는 부착조류를 제외한 미세조류는 이용될 수 없다는 단점이 있다.

조류성장잠재력(AGP)은 1966년 Oswald and Golueke에 의해 수체의 영양상태를 파악하는데 처음 사용되었는데 이에 의한 수질 평가는 AGP의 결과가 1 mg/L 이하이면 빈영양수역, 1~10 mg/L이면 중영양수역, 10 mg/L 이상이면 부영양수역으로 판정할 수 있다<sup>72,73)</sup>. Shin and Cho<sup>75)</sup>에 의하면, 국내 호수의 AGP 평균값은 14.1 mg/L, 하천의 평균값은 12.9 mg/L이라 보고하였고, Park<sup>74)</sup>에 의하면, 부암댐은 중영양~부영양 수역에 해당한다고 하였으며, Shin and Cho<sup>75)</sup>는 금강 중·하류의 수질을 *Microcystis aeruginosa*의 조류성장잠재력으로 평가하였는데, 평균값이 38.1 mg/L로서 부영양 수준을 훨씬 초과한 것으로 평가하였고 하류로 갈수록 생장이 둔화되어 AGP값이 낮게 조사되고 갈수기로 갈수록 높게 나타나는 경향을 보인다고 보고하였다. Shin and Hwang<sup>76)</sup>은 평택호에서 평균 54 mg/L로 과영양 수준이었다고 조사하였다. 또한 Shin 등<sup>77)</sup>은 진양호에서는 부영양 수준을 초과하고 남강에서는 진양호의 2.8배였음을 보고하였는데 강의 경우, 저수지에 비해 변동 폭이 매우 컸고 강과 저수지에서의 시공간적 차이가 난다고 보고하였으며 Hwang 등<sup>78)</sup>은 낙동강 수계 인공호에서는 빈영양수준, 강과 하구호는 부영양 수준임을 보고하였는데 대체적으로 볼 때 AGP에 의한 수준은 부영양 상태를 넘어선 과영양의 상태였

Table 3. Saprobic grade of microalgae in agricultural water

Species	Saprobic level
<i>Anabaena spiroides</i>	os, β-ms, α-ms
<i>Asterionella gracillima</i>	os
<i>Aulacoseira granulata</i>	os, β-ms, α-ms
<i>Fragilaria crotonensis</i>	os, β-ms
<i>Melosira varians</i>	os, β-ms, α-ms
<i>Navicula cryptocephala</i>	os, β-ms, α-ms
<i>Nitzschia palea</i>	β-ms, α-ms, ps
<i>Scenedesmus quadricauda</i>	β-ms, α-ms
<i>Synedra acus</i>	os, β-ms
<i>Synedra ulna</i>	os, β-ms, α-ms

음을 알 수 있다. 이 방법은 생물의 증식이 제한영양물질에 지배된다고 하는 리히비히의 최소율의 법칙을 기초로 한 생물검정법으로, 자연수나 폐수 등의 시료에 미세조류를 접종하여 일정한 환경조건에서 미세조류가 정상기에 도달할 때까지 배양한 후 그 증식량을 건조중량(mg/L)으로 표시한 값이다. 이 방법은 단순히 부영양화만 파악하는 것이 아니라 부영양화의 예측 및 제어에 필요한 의견을 얻을 수 있다는 데 장점이 있다. 즉, 폐수처리에 대한 탈질과 탈인 등의 처리조작 효율 판정, 방류 수역의 부영양화에 미치는 폐수의 영향 조절, 자연수 및 폐수에서의 조류 증식의 제한 요인 결정, 수중의 이용가능한 영양염류 추정, 부영양화 정도 조절 및 분철 AGP로부터 하계 조류최대증식량의 예측, 조류 증식에 대한 저해물질 유무 조절 등에 이용될 수 있다. 반면, 여러 종류의 미세조류 중 한 종만을 이용하여 그 종의 성장잠재력을 조사하기 때문에 어느 종류의 미세조류를 선택하여 이용하느냐에 따라 AGP가 다를 수 있다는 단점이 있다.

#### 생태적 특성종의 선정을 통한 농업용수 수질관리

미세조류를 이용하여 수질을 평가하기 위해서는 상기에서 언급된 수질오염 지표종들을 이용할 수 있지만, 수생태계에서 출현하는 미세조류는 수질오염 지표종들뿐 아니라 여러 가지 수생태계의 생태적 특성을 잘 반영할 수 있는 생태적 특성종들, 즉 수역에서 우점하여 출현하는 우점종, 출현빈도가 높은 출현빈변종, 여러 수역에 걸쳐 폭넓게 분포하는 광분포종, 담수에서 수화나 적조를 일으키는 담수적조종 등도 많이 출현한다. 그러므로 수생태계 중의 하나인 농업용수의 수질을 효과적으로 관리하기 위해서는, 수질오염 지표종뿐 아니라 농업용수에서 출현하는 생태적 특성종을 선정하고 이들을 모니터링 할 필요가 있다. 농업용수원인 댐, 저수지, 호수, 하천 등에서 출현하는 주요종들은 Table 1과 2에서 보듯이 많은 연구자들에 의해 다양하게 보고되고 있어 이들을 종합하여 객관화할 필요성이 요구되었다. 따라서 이들을 객관적인 관점에서 종 동정이 용이하고 생태적 특성이 뚜렷한 종들만을 대상으로, 본 연구자들이 조사한 생태적 특성을 가진 종들과 비교, 검토하여 최종적으로 농업용수에서 출현하는 생태적 특성종 10종을 선정하였고(Fig. 1) 향후 이들을 이용하여 농업용수의 수질평가 및 농업용수를 효과적으로 관리하기 위해 이용하고자 하였다. 이들의 생태적 특성을 Table 4에 나타내었다.

#### 농촌유역의 수질 개선을 위한 미세조류 활용

농촌지역으로부터 유출되는 비점오염물질들은 수역의 부영양화나 녹조의 발생 원인인 질소와 인을 함유하고 있다. 이러한 비점오염물질의 공학적 처리는 경제성이 떨어질 뿐 아니라 처리효율도 매우 낮다. 따라서 비점오염원 제어를 위해서 생물을 이용한 오염된 물을 정화하는 여러 가지 생태공학적 수질개선 방법들이 연구되고 있다<sup>79-81)</sup>. 일부 연구자들에 의해

**Table 4. Ecological characteristics of selected species in agricultural water**

Ecologically significant species	Size ( $\mu\text{m}$ )		Ecological characteristics*
	Length	Width	
<i>Anabaena spiroides</i>	9-9.5	4.5-10	D, W
<i>Asterionella gracillima</i>	40	2	C, D, F, R
<i>Aulacoseira granulata</i>	17	15	C, D, F, R, W
<i>Fragilaria crotonensis</i>	80	2	C, D, F, R, W
<i>Melosira varians</i>	40	15	D, W
<i>Navicula cryptocephala</i>	30	8	C, D, F, R, W
<i>Nitzschia palea</i>	30	3	C, D, F, W
<i>Scenedesmus quadricauda</i>	15	5	C, D, F, W
<i>Synedra acus</i>	200	3	D, F, W
<i>Synedra ulna</i>	200	5	D, F, W

\* C: Cosmopolitan species;

D: Dominant species;

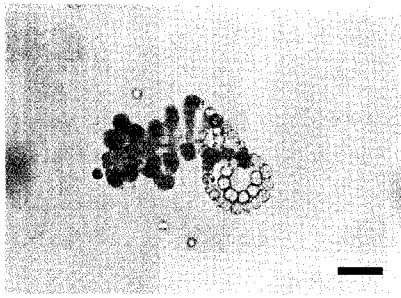
F: Frequently occurrence species;

R: Redtide causative species;

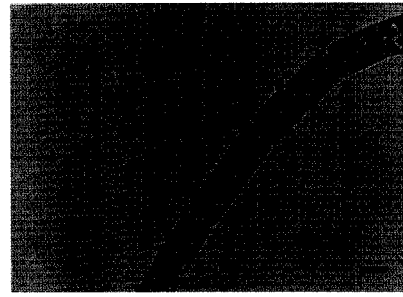
W: Water quality indicator.

수생식물을 이용하는 방법들이 연구되고 있지만, 수생식물은 영양물질 흡수에 있어서 효율이 크게 떨어지며, 식물체가 오히려 2차 오염원으로서 작용할 우려가 있어 관리에 많은 노력이 요구된다. 그러나 농업용 배수로나 소하천에서 일반적으로 발견되는 미세조류인 사상성 부착조류(periphytic algae)는 영양물질 제거 능력이 우수하고 2차적인 오염을 유발하지 않으면서 생태계 내 물질순환 고리의 안정성을 유지시키며 비용 면에서도 기계적 처리보다 저렴하다는 장점이 있다.

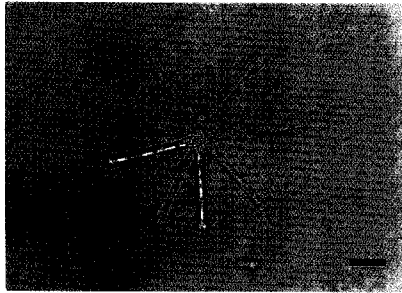
이렇게 수질 개선을 위해 사용되는 미세조류에는 *Botryococcus braunii*, *B. sp.*, *Chlorella vulgaris*, *C. sp.*, *Phormidium sp.*, *Scenedesmus quadricauda*, *Selenastrum capricornutum*, *Spirulina maxima*, *S. platensis* 등이 있는데<sup>82-84)</sup> Ahn 등<sup>82)</sup>에 의하면, 돈분 농도를 달리 첨가한 회분배양에서  $\text{PO}_4\text{-P}$ 는 70~93%, inorganic nitrogen은 67~93%, COD는 80~90%, organic nitrogen은 37~56%의 감소율을 보인다고 보고하였다. Choi 등<sup>83)</sup>에 의하면 미세조류 접종 11일 경에 질소와 인의 처리효율이 각각 89%, 92% 이었음을 보고하였고 Kim 등<sup>8)</sup>에 의하면 접종후 4일 동안에 총질소와 총인인 각각 95.3%, 96.0%의 높은 제거효율을 보였다고 보고하였다. Lee and Lee<sup>9)</sup>는 미세조류를 이용하여 산화지 공법을 적용한 유기물 처리효율에서 TBOD<sub>5</sub>의 평균 제거율이 49~83%, SBOD<sub>5</sub>의 경우는 87~92%로 높은 처리율을 나타내었고 체류시간 15일의 경우에서서 제거율이 높다고 하였다. 이 모든 실험에서 사용된 미세조류들은 대부분 국외에서 분양받은 종으로서 국내의 자연계에서도 이들 종들과 생리학적으로 유사한 종들이 많이 존재할 것으로 생각된다. 따라서 사용가능한 미세조류들을 선별하는 것이 우선적으로 수행되어야 하며 이



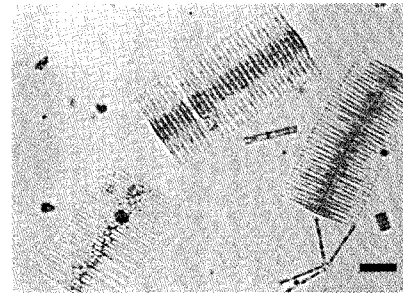
(A) *Anabaena spiroides*



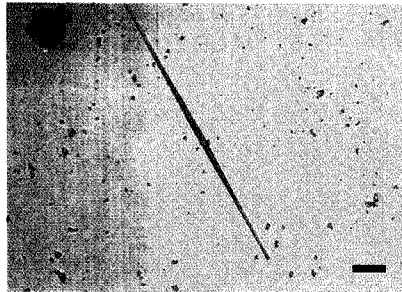
(B) *Melosira varians*



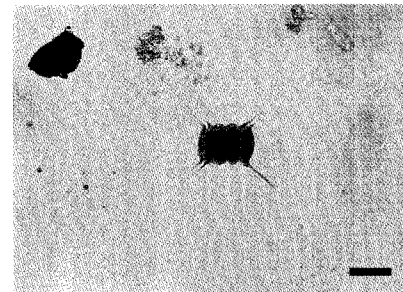
(C) *Asterionella gracillima*



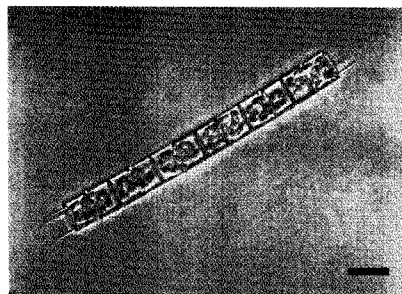
(D) *Fragilaria crotonensis*



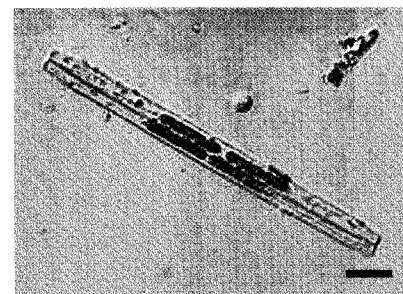
(E) *Synedra acus*



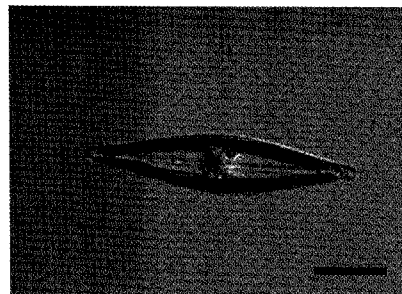
(F) *Scenedesmus quadricauda*



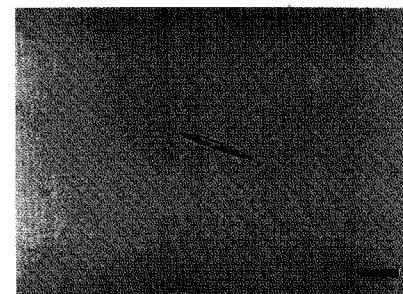
(G) *Aulacoseira granulata*



(H) *Synedra ulna*



(I) *Navicula cryptocephala*



(J) *Nitzschia palea*

Fig. 1. Ecologically significant species in agricultural water.

(X 400, scale bar = 10  $\mu$ m)

들을 대량 배양하는 기술적인 연구가 시급히 요구된다.

### 향후과제

지금까지 농업용수 수질평가 및 수질개선을 위한 미세조류 연구현황 및 활용성에 대하여 검토하였다. 농업용수 수질 오염의 특색은 질소와 인의 농도가 높다는 것이다. 이러한 농촌 소유역에서 배출되는 부하량을 저감시키기 위해서는 물리화학적 처리에는 한계가 있다. 이에 따라 수질개선 방법에도 여러 가지 생물학적인 방법들을 연구해 오고 있다. 자연정화 기능을 이용한 농업용수 수질정화방법으로 인공습지를 이용한 연구<sup>85-87)</sup>를 비롯하여 저류지를 이용한 연구<sup>88-91)</sup>, 인공식물섬을 이용하여 연구해 오고 있다<sup>92-95)</sup>. 국내에서도 인공습지에서 생이가래, 미나리, 달뿌리풀, 갈대에 의한 영양염류 제거 연구<sup>96-100)</sup>, 저류지에서의 영양물질 저감 연구<sup>101-103)</sup> 등을 실시해 오고 있는데 수생식물을 이용하는 방법은 영양물질 흡수에 있어서 효율이 크게 떨어지고 2차 오염에 대한 문제점이 제기되면서, 최근에는 미세조류인 사상성(filamentous) 부착조류(periphytic algae)를 이용하여 영양물질을 제거하려는 연구를 국내외에서 진행해 오고 있다<sup>104-107)</sup>. 하지만 자연 수계에서는 사상성 부착조류만 서식하는 것이 아니라 수많은 종류의 미세조류들이 서식하고 있으므로, 향후에는 이들 중에서 영양염류의 제거효율이 높은 다양한 미세조류를 선별할 필요성이 우선적으로 요구된다. 또한 생물학적 처리 방법들과 함께 여러 가지 다각적인 방법들로 농촌유역에서 현장 적용하여 비점오염 문제를 해결하는데 도움이 되고 물리화학적 처리의 한계를 보완하는 생물정화법으로서의 대안이 될 수 있도록 다양한 연구를 수행할 필요성이 요구된다.

### 참고문헌

1. Lee, I. K. (1997) A century progress of phylogenetic research in Korea. In algae: diversity, environment and human affairs, organizing committee of the fifteenth symposium on plant biology. Pusan. p. 1-13.
2. Oh, H. M., Lee, S. J. and Kim, J. S. (1998) The future of microalgal biotechnology. In proceedings of the future of marine microalgae bank. Pusan. p. 49-65. (in Korean)
3. Zeitzschel, B. (1978) What study phytoplankton? In phytoplankton manual. Edited by Sournia, A. UNESCO. Paris. p. 1-5.
4. Ryther, J. H. (1969) Photosynthesis and fish production in the sea. *Science* 116, 72-76.
5. Agricultural Chemicals Research Institute. (1993) Paddy-field algae illustrated by color. Suwon. p.

- 167.
6. Lee, H. K., Park, J. E., Ryu, G. H., Lee, J. O. and Park, Y. S. (1992) Fresh-water algae occurred in paddy rice fields. II. Identification of blue-green algae. *KJWS* 12(2), 166-172.
7. Lee, H. K., Park, J. E., Ryu, G. H., Lee, J. O. and Park, Y. S. (1992) Fresh-water algae occurred in paddy rice fields. III. Identification and propagation of green algae. *KJWS* 12(4), 335-351.
8. Lee, H. K., Park, J. E., Ryu, G. H., Lee, J. O. and Park, Y. S. (1992) Fresh-water algae occurred in paddy rice fields. IV. Identification of stoneworts, euglenoids and diatoms. *KJWS* 12(4), 352-361.
9. Kong, S. K. and Ahn, S. K. (1997) Effect on nutrients removal of algae in aerobic high rate pond by irradiance period and pH. *J. of the Environmental Sciences Society* 6, 141-152.
10. Kim, S. B., Lee, S. J., Kim, C. K., Kwon, G. S., Yoon, B. D. and Oh, H. M. (1998) Selection of microalgae for advanced treatment of swine wastewater and optimization of treatment condition. *Kor. J. Appl. Microbiol. Biotechnol.* 26, 76-82.
11. Lee, S. H. and Lee, Y. J. (2002) Retreatment of artificial wastewater by using microalgae. *Korean J. Limnol.* 35, 133-140.
12. Lee S. K., Kim, S. H. and Han, K. H. (1986) Algal waterbloom on rice seedling-bed and nuisance phytoplanktonic green algae in rice field. *J. Korean Soc. Soil Sci. Fert.* 19(1), 70-75.
13. Round, F. E. (1981) The ecology of algae. Cambridge University Press. London. p. 29-40.
14. Lee, H. D. (1980) A study on the water pollution level according to the diversity of algae in Moosim stream Cheongjoo, Korea. *Korean J. Limnol.* 13, 1-8.
15. Moon, S. G. and Lee, J. N. (1990) A study of algal flora and saprobiensystem in the Suyeong stream, Pusan, Korea. *Bull. of Kyung Sung University* 11, 31-68.
16. Cho, K. S. (1974) Limnological studies of Soyong multiple-purpose reservoir. 1. On the environmental factors and plankton succession of the first years after impounded. *Korean J. Limnol.* 7, 63-70.
17. Kim, H. S. and Chung, J. (1993) Freshwater algal flora of natural swamps in Changnyong county. *Korean J. Limnol.* 26, 203-221.
18. Kim, J. W. and Moon, S. G. (1980) A taxonomical

- study on the microflora of the Bosu stream. I. Diatom flora. *Bull. of Pusan National University* 30, 111-122.
19. Suh, Y. H. and Park, S. O. (1982) Biological analysis of water quality from the water system of Namcheon river, Kyungsan, Korea. *J. Ecology* 5, 46-53.
  20. Chung, Y. H. and Lee, K. (1982) On the phytoplankton of Odae Cheon. *Korean J. Limnol.* 15, 31-37.
  21. Chung, Y. H. and Lee, I. T. (1983) On the taxonomy and flora of the phytoplanktons from the Yang-yang, Nam-Dae Cheon river. *Korean J. Limnol.* 16, 1-11.
  22. Chung, Y. H., Lee, K. and Noh, K. H. (1987) The phytoplankton of Namdae Cheon in Yang-yang. *Korean J. Environ. Biol.* 5, 33-38.
  23. Choi, J. S. and Chung, J. (1990) An assessment of water quality by epilithic diatoms of Namchun water-system. *K. J. Phycology* 5, 173-191.
  24. Ahn, B. Y. and Kim, S. J. (1991) A ecological study on the epilithic diatom community from Yongrim-Cheon. *Bull. of Wonkwang University* 14, 209-221.
  25. Kim, M. K., Kim, J. W. and Lee, H. Y. (1992) A study on the communities of periphytic diatoms in Yangsan stream. *Korean J. Limnol.* 25, 9-19.
  26. Kim, B. H., Choi, M. K., Choi, K. C., Wui, I. S. and Chung, Y. T. (1992) Ecological study on the epilithic diatom community in Chickso stream, Chollabuk-do, Korea. *Wonkwang J. Environ. Sci.* 1, 49-63.
  27. Lee, J. H. and Chung, J. (1993) Community structure of the epilithic diatoms from the Kwangch'on river in Kyungsangbuk-do province, Korea. *Korean J. Limnol.* 26, 223- 233.
  28. Choi, J. S., Chung, J. and Kim, D. H. (1993) Comparison of water quality by epilithic diatom community in the Sinchun river. *Korean J. Limnol.* 26, 165-173.
  29. Choi, M. K. and Kim, B. H. (1994) An ecological study on the phytoplankton community of the upstreams and three reservoirs in the Mankyong river system. *Korean J. Environ. Biol.* 12, 141-174.
  30. Lee, O. M. (1997) The distribution and standing crops of phytoplankton in the streams flow through Suwon-si. *Basic Sci. Kyonggi Univ.* 10, 223-236.
  31. Lee, O. M. (1998) The phytoplankton list and standing crops of the Sabgyo streams in Hongsong-gun. *Basic Sci. Kyonggi Univ.* 11, 227-237.
  32. Choi, J. S., Kim, H. S. and Kang, M. D. (1998) Seasonal dynamics of epilithic diatom community in the Sinchun. *Korean J. Limnol.* 31, 235-240.
  33. Cho, H. S., Kim, D. H. and Boo, S. M. (1998) Water environment and flora of epilithic diatoms in Yudeungchon stream, Daejeon. *Korean J. Environ. Biol.* 16, 273-280.
  34. Chang, K. H., Kim, H. W., Choi, S. H., Kim, J. G. and Joo, G. J. (1999) Epilithic diatom community dynamics in an urban stream and a mountain stream. *Korean J. Limnol.* 32, 229-237.
  35. Kim, Y. J. (1999) An assessment of water quality by attached diatoms assemblage in the Pochun stream. *Korean J. Limnol.* 32, 135-140.
  36. Kim, Y. J. (2001) An assessment of organic pollution using attached diatom assemblages in the Shinchon streams. *Korean J. Limnol.* 34, 199-205.
  37. Cho, K. S. (1968) A limnological study on the three artificial reservoirs in the north Han river system. ( I ) On the environmental factors and the plankton in Paro lake, Chunchon lake, Uiam lake, in spring season. *Korean J. Limnol.* 1, 25-32.
  38. Cho, K. S. and Park, Y. S. (1969) Limnological studies of the Young-nang lake. *Korean J. Limnol.* 2, 51-66.
  39. Cho, K. S. and Ra, K. H. (1971) Limnological studies of the polluted water in the Uiam reservoir - On the influence of the sewage outflow from Chunchon city on plankton and water conditions. *Korean J. Limnol.* 4, 35-47.
  40. Yim, Y. J., Cho, K. S. and Sin, C. N. (1982) Structure and dynamics of phytoplankton communities in Uiam lake, Korea. *Korean J. Ecology* 5, 132-135.
  41. Kim, K. Y. and Choi, C. I. (1988) Standing crop of phytoplankton in lake Yonsan. *K. J. Phycology* 3, 183-192.
  42. Chung, J., Kim, D. H., Choi, J. S. and Eui, I. S. (1988) Studies on the epilithic diatoms of planned Juam multipurpose Dam. *J. of Environ. Sci. Inst.* 2, 43-58.
  43. Cho, K. S., Kim, B. C., Heo, W. M. and Cho, S. J. (1989) The succession of phytoplankton in lake

- Soyang. *Korean J. Limnol.* 22, 179-189.
44. Kim, Y. J. and Chung, J. (1993) Analysis of phytoplankton community in the Imha lake. *Korean J. Limnol.* 26, 175-196.
  45. Choi, M. K., Kim, B. H., Chung, Y. T. and Wui, I. S. (1994) Occurrence and dynamics of phytoplankton in lake Chuam. *Korean J. Limnol.* 27, 79-91.
  46. Lee, E. J. and Cho, K. S. (1994) Yearly variation of phytoplankton in lake Soyang. *Korean J. Limnol.* 27, 9-22.
  47. Kim, Y. J., Choi, J. S., Kim, D. H. and Chung, J. (1995) Ecological study of phytoplankton community in Imha lake, South Korea. *Korean J. Limnol.* 28, 61-77.
  48. Kim, J. W., Lee, H. Y., Kim, M. K. and Kim, J. A. (1995) A study on phytoplankton community in Choonsan reservoir. *J. of Korean Environmental Sciences Society* 4, 177-186.
  49. Chung, S. J. (1995) A study on the phytoplankton community in Dae-Chong lake. *Korean J. Environ. Biol.* 13, 83-106.
  50. Lee, O. M. and Song, H. Y. (1995) The annual dynamics of standing crops and distribution of phytoplankton of Juam lake in 1993. *Korean J. Limnol.* 28, 427-436.
  51. Han, M. S., Eo, Y. R., Yoo, J. K., Yoo, K. I. and Choi, Y. K. (1995) Ecological studies on Pal'tang river-reservoir system in Korea. 2. Changes in phytoplankton community structure. *Korean J. Limnol.* 28, 335-344.
  52. Kim, Y. J. (1996) Ecological study of phytoplankton community and trophic states using indicators in lake Paltang. *Korean J. Limnol.* 29, 323-345.
  53. Lee, J. W., Lee, H. W., Lee, S. M. and Kang, H. M. (1997) Environmental factors and phytoplankton flora in the Sayon and Daeam reservoirs. *Korean J. Environ. Biol.* 15, 19-38.
  54. Lee, Y. S., Kang, B. S. and Shin, J. K. (1999) Variation of water quality and algal population in lake Okjeong. *Korean J. Limnol.* 32, 189-199.
  55. Lee, J. H. (1999) Dynamics of phytoplankton community in lake Daechung. *Korean J. Limnol.* 32, 358-366.
  56. Kim, Y. J. (1999) An assessment of trophic state by LTSI and phytoplankton community in lake Tokdong. *Algae* 14, 161-167.
  57. Park, J. W., Shin, J. H. and Lee, K. S. (1999) Phytoplankton community structure in lake Imha. *Korean J. Environ. Biol.* 17, 95-115.
  58. Kim, B. C., Park, J. H., Heo, W. M., Lim, B. J., Hwang, G. S., Choi, K. S. and Choi, J. S. (2001) The limnological survey of major lakes in Korea. (4) Lake Juam. *Korean J. Limnol.* 34, 30-44.
  59. Kolkwitz, R. und Marsson, M. (1908) Oekologie der pflanzlichen Saprobien. *Berichte Deutschen Botanischen Gesellschaft* 26, 509-519.
  60. Liebmann, H. (1951) Handbuch d. Frischwasser und Abwasserbiologie. Bd. 1.
  61. Pantle, R. & Buck, H. (1955) Die biologische Überwachung der Gewässer und die Darstellung der Ergebnisse. *Gas u. Wasserfach* 96, 604.
  62. Zelinka, M. and Marvan, P. (1961) Zur Prazisierung der biologischen Klassifikation der Reinheit fließender Gewässer. *Arch. Hydrobiol.* 57, 389-407.
  63. Fjerdingstad, E. (1963) Limnological estimation of water pollution levels. WHO. p. 1- 30.
  64. Tsuda, M. (1964) Biology of polluted waters. Hokuryu-kan Co., Ltd. Tokyo. p. 258.
  65. 鈴木 實. (1991) 淡水指標生物圖鑑. 北隆館. 東京. p. 301.
  66. Yang, J. R. and Dickman, M. (1993) Phosphorus loading and efficiency of biomanipulation. *Verh Internat. Verein. Limnol.* 24, 2482-2488.
  67. Lee, J. H., Park, J. G. and Kim, E. J. (2002) Trophic states and phytoplankton compositions of dam lakes in Korea. *Algae* 17, 275-281.
  68. Shin, Y. K. and Jun, S. H. (2002) Ecological studies on the Asan reservoir. 1. Physicochemical characteristics and trophic status. *Korean J. Limnol.* 35, 181-186.
  69. Watanabe, T. and Asai, K. (1990) Numerical simulation using diatom assemblage of organic pollution in stream and lakes. *Rev. Inquiry and Res.* 52, 99-139.
  70. Park, J. W., Choi, J. S. and Kim, M. K. (2004) Variations of epilithic diatom community and an assessment of water quality by DAİpo in the middle reaches of the Nakdong river. *Korean J. Limnol.* 37, 70-77.
  71. Choi, J. S., Park, J. W., Lee, K. L., Yang, M. S. and Kim, H. S. (2004) Seasonal variation of epilithic diatom community and an assessment of water quality by DAİpo in the water system



- of Ulleung island. *Korean J. Limnol.* 37, 378-384.
72. Sudo, R. (1980) Studies on the water-blooms in lake Kasumigaura. *Jpn. J. Limnol.* 41, 124-131.
73. Lehmusluoto, P. O. (1978) Some aspects on the classification of natural waters by algal assays (AGP), prelude. *Mitt. Internat. Verein. Limnol.* 21, 437-440.
74. Park, J. Y. (2000) A study on water quality, distribution of phytoplankton community and algal growth potential in BuAn lake basin. MS. Thesis, Chonbuk National University. Jeonju.
75. Shin, J. K. and Cho, K. J. (2000) Water quality assessment by algal growth potential (AGP) from midstream to downstream of the Kum river. *Korean J. Limnol.* 33, 244-250.
76. Shin, J. K. and Hwang, S. J. (2003) Algal growth potential test (AGPT) in the stream-reservoir of the Pyeontaek reservoir watershed, Korea. *Korean J. Limnol.* 36, 172-180.
77. Shin, J. K., Lee, O. H. and Cho, K. J. (2003) Application of algal growth potential test (AGPT) on the water quality of the Chinyang reservoir and Nam river. *Korean J. Limnol.* 36, 57-65.
78. Hwang, S. J., You, K. A. and Shin, J. K. (2006) Comparison of algal growth potentials in the large reservoirs and river mainstream of Naktong river watershed. *Korean J. Limnol.* 39, 138-144.
79. Pyon, J. Y., Kim, M. K. and Lee, J. S. (1985) Studies on removal of water pollutants by aquatic plants. I. Removal of organic matter by water hyacinth and factors affecting its growth. *KJWS* 5, 143-148.
80. Kim, B. Y., Lee, S. K., Kwean, C. S., So, K. H. and Yun, E. H. (1991) Studies on the purification of sewage water by water hyacinth (*Eichhornia crassipes*). *Korean J. Environ. Agric.* 7, 111-116.
81. Ahn, Y. J. and Gong, D. S. (1995) A study on the removal strategy of nutrients using *Salvinia natans*. *Kor. J. Environ. Eng.* 18, 593-603.
82. Ahn, J. H., Kim, S. S., Kim, T. H., Lee, J. Y., Ohh, S. J., Lee, J. H. and Lee, H. Y. (1996) Optimizing the process of cultivating photosynthetic microalga, *Spirulina platensis* for efficiently treating swine wastes. *Kor. J. Appl. Microbiol. Biotechnol.* 24, 519-524.
83. Choi, J. W., Kim, Y. K., Ryu, J. H., Lee, W. C., Lee, W. H. and Han, J. T. (2000) Process development of algae culture for livestock wastewater treatment using fiberoptic photobioreactor. *Korean J. Biotechnol. Bioeng.* 15, 14-21.
84. Cho, J. H., Kim, J. K., Kim, J. H., Yoon, S. M., Lee, J. S. and Kim, S. W. (2001) Treatment of high organic wastewater using ecological water treatment system. *Kor. J. Microbiol.* 37, 317-324.
85. Knight, R. L., Rubble, R. W., Kadlec, R. H. and Rees, S. (1993) Wastewater treatment in constructed wetlands: system design, removal processes, and treatment performance. In constructed wetlands for water quality improvement. Edited by Gerald A. Moshiri. Lewis Publishers. Boca Raton.
86. Zhu, T. and Sikora, F. J. (1994) Ammonium and nitrate removal in vegetated and unvegetated gravel bed microcosm wetlands. In proc. 4th int. conf. on wetland system for water pollution control. Guangzhou, China. 355-366.
87. 中里廣幸. (1998) ビオパーク方式による作物生産を通じた浄化. 用水と廃水 40, 867-873.
88. Borden, R. C., Dorn, J. L., Stillman, J. B. and Liehr, S. K. (1998) Effect of in-lake water quality on pollutant removal in two ponds. *J. of Environmental Engineering* 124, 737-743.
89. 大久保卓也. (1998) ため池, 内湖を利用した水質浄化. 用水と廃水 40, 883-893.
90. Oliver, J. L. and Grigoropoulos, S. G. (1981) Control of storm-generated pollution using a small urban lake. *J. Water Pollut. Control Fed.* 53, 594-603.
91. Elliott, A. H. (1981) Model for preliminary catchment-scale planning of urban stormwater quality controls. *J. of Environmental Management* 52, 273-288.
92. Lee, K. G., Jang, J. R., Kim, Y. K. and Park, B. E. (1999) A study on the floating island for water quality improvement of a reservoir. *Korean J. Environ. Agric.* 18, 77-82.
93. Kwon, O. B. (1999) A study on the improvement of water quality and restoration of ecosystem in the lake and marshes with vegetated artificial floating island. MS. Thesis, Hanyang University. Seoul.
94. Park, H. J., Kwon, O. B. and Ahn, T. S. (2001) Water quality improvement by artificial floating island. *J. Kor. Env. Res. Reveg. Tech.* 4, 90-97.

95. Byeon, M. S., Yoo, J. J., Kim, O. S., Choi, S. I. and Ahn, T. S. (2002) Bacterial abundances and enzymatic activities under artificial vegetation island in lake Paldang. *Korean J. Limnol.* 35, 266-272.
96. Park, J. S., Shin, J. D., Han, S. S. and Yoon, D. J. (2002) Phytoremediation technology with using water celery (*Oenanthe stolonifer* DC.) to clean up heavy metals in the contaminated wastewater. *Korean J. Environ. Agric.* 21, 122-129.
97. Park, J. S. (2002) Sewage treatment using water hyacinth (*Eichhornia crassipes*) and watercress (*Oenanthe javanica*). *Korean J. Environ. Agric.* 21, 144-148.
98. Shin, J. E. and Cha, Y. I. (1999) Effect of nutrient concentration and hydraulic retention time on the removal of N and P by *Phragmites japonica* Steudel. *Korean J. Environ. Biol.* 17, 153-158.
99. Shin, J. Y. and Park, S. S. (2001) A study on an estimation of the nutrient removal potential of aquatic plants in natural streams. *J. KSWQ* 17, 201-213.
100. Yang, H. M. (2000) Preliminary nitrogen removal rates in close-to-nature constructed stream water treatment wetland. *Korean J. Environ. Agric.* 21, 269-273.
101. Yang, H. M. (2000) Nitrate removal rate in reed wetland cells of a pond-wetland stream water treatment system. *Korean J. Environ. Agric.* 21, 274-278.
102. Nam, G. S., Park, B. H., Kim, J. O., Lee, K. S., Joo, G. J. and Lee, S. J. (2002) Purification characteristics and hydraulic conditions in an artificial wetland system. *Korean J. Limnol.* 35, 285-294.
103. Park, B. H., Nam, G. S. and Lee, K. S. (2001) Characteristics of water quality improvement in constructed wetlands under high hydraulic loadings. *J. KSWQ* 17, 477-484.
104. Vymazal, J. (1988) The use of periphyton communities for nutrient removal from polluted streams. *Hydrobiologia* 166, 225-237.
105. Aizaki, M. (1980) Changes in standing crop and photosynthetic rate attendant on the film development of periphyton in a shallow eutrophic river. *Jpn. J. Limnol.* 41, 225-234.
106. Tuchmann, M. L. and Stevenson, R. J. (1980) Comparison of attached algae communities on natural and artificial substrata along a thermal gradient. *Br. Phycol. J.* 14, 243-254.
107. Park, K. S. (2002) A study on the growth dynamics and nutrient removal by filamentous periphytic algae. Ph.D. Thesis, Konkuk University. Seoul.