

최 종
연구보고서

부착조류시스템을 이용한 농촌유역
수질개선기법 개발

Development of a Water Quality Improvement
Technique using Periphytic Algal System

연 구 기 관
건 국 대 학 교

농 립 부

제 출 문

농림부 장관 귀하

본 보고서를 “부착조류시스템을 이용한 농촌유역 수질개선 기법 개발” 과제의 최종보고서로 제출합니다.

2003 년 7 월 27 일

주관연구기관명 : 건국대학교

총괄연구책임자 : 황 순 진

세부연구책임자 : 윤 춘 경

연구 원 : 공 동 수

이 정 호

김 호 섭

연구 보조원 : 박 구 성

최 광 현

박 정 환

이 우 향

유 영 선

여 백

요 약 문

I. 제 목

부착조류시스템을 이용한 농촌유역 수질개선 기법 개발

II. 연구개발의 목적 및 필요성

생활수준의 향상과 더불어 국민들의 환경의식 강화에 따라 환경을 이용하는 문제와 함께 보전에 대한 요구가 증대하여 친환경적인 정서가 비등하고 있다. 그러나 식량문제의 해결에 필요한 농업생산을 유지·관리하기 위해서는 비료나 농약의 사용을 완전히 배제할 수 없으므로 농업 용배수의 수질개선은 매우 중요한 문제로 대두되고 있다. 우리나라에서 연간 사용하는 수자원의 약 53%가 농업용수로 이용되고 이들이 거의 대부분 벼 재배에 사용된다는 점을 고려하면 농업 용배수의 수질개선은 저수지나 하천의 부영양화를 방지하고 농촌유역의 수생태계 보전을 위해서도 적극 해결해야 하는 농업분야의 중요한 환경문제이다.

농촌유역의 수질문제는 축산폐수나 생활하수 등 점원오염원과 함께 농지에서 유출되는 비점원오염원인 농지배수가 주요한 원인으로 작용하고 있다. 농촌지역으로부터 유출되는 물질들은 수역의 부영양화나 녹조현상의 발생에 직접적인 원인이 되는 질소와 인을 상당부분 함유하고 있어 주로 유기물 처리에 국한되고 있는 일반 하·폐수처리시스템을 중심으로 한 기존의 공학적 배이스의 여러 가지 기술들로는 영양물질 제거의 높은 효율성을 기대하기 어렵고, 다량으로 발생되는 비점오염원인 특성으로 인해 기술적 처리로서는 경제성문제를 해결할 수 없다. 농지배수에 의한 하류의 수질오염, 농업용 저수지나 하구담수호의 부영양화는 지속적인 농업생산을 저해하고 수자원 가치를 감소시키며 그로인해 오염된 물을 정화하는데 많은 비용이 소요되며, 특히 상수원이나 지하수로 유입되는 경우 그 영향은 더욱 커진다.

비점오염원 제어를 위해 수생식물을 이용하는 방법들이 연구되고 있으나, 식물체는 미생물에 비해 질소와 인과 같은 영양물질 흡수에 있어서 효율이 크게 떨어지고 노화 및 고사기간에는 도리어 오염원으로 작용하므로 관리에 큰 노력이 필요하다. 농지 용배수로나

소하천에서 일반적으로 발견되는 사상성 부착조류(filamentous attached algae)는 영양물질 제거능력이 우수하며, 동시에 박테리아와 같은 미생물의 부착매질을 제공하는 생물막(Biological filter)의 기능을 하고 빠른 성장속도로 인해 수중 영양염 대한 이용효율이 높으며 처리수의 영양물질 농도 고저에 관계없고 계절적인 영향이 적다는 장점이 있다. 또한, 2차적인 오염의 유발 없이 생태계 내 물질순환 고리의 안정성을 유지시키며, 비용편익적으로도 기계적 처리에 비해 큰 우위에 있다는 점에서 적용가능성과 실용성이 높아 농촌유역 수질개선을 위한 경제적인 기술로서의 개발이 기대된다.

본 연구의 목적은 생태공학적 수질개선 기법인 사상성부착조류 수로시스템을 개발하여 농촌유역에서의 수질오염을 저감하고 농업발전의 기반조성에 기여하는 것이다.

III. 연구개발 내용 및 범위

본 연구과제는 농촌유역 농배수로에 적용가능한 자연정화공법의 하나인 사상성부착조류 시스템을 이용한 생태공학적 수질개선 기법을 개발하여 농촌유역에서의 수질오염을 저감하고 농업발전의 기반조성에 기여하고자 다음과 같은 내용을 수행하였다. 본 연구의 목적을 달성하기 위해서 실내순환수로 및 야외 pilot수로 시스템을 제작하여 설계인자 및 처리효율을 평가하였고, 수로시스템의 현장실험을 통한 적용성 및 처리효율을 평가 분석하였다.

1. 사상성부착조류 수로시스템 분석 및 이용기술 개발

가. 실내 순환수로 실험

- 1) 순환수로의 제작 설치 (2조)
- 2) 배양 조건확립
- 3) 부착조류의 성장과 영양염 제거 효과 측정

나. 야외 Pilot 수로 실험

- 1) 야외 Pilot 수로 설치 (3조)
- 2) 부착조류의 성장과 영양염 제거 효과 측정

- 3) 농업 배수 수질 특성별 최적 적용 사상조류 선발
 - 4) 실내 및 야외 Pilot실험을 통한 부착조류 수로시스템 설계인자 도출
 - 5) 수질 특성, 유속, 매질에 따라 활용 가능한 사상조류의 적용 기법 개발
2. 사상성부착조류 수로시스템에 의한 수질개선기법의 현장 적용기술 개발
- 가. 현장 농수로 실험 설계
 - 나. 부착조류의 성장과 영양염 제거 효과 측정
 - 다. 현장실험을 통한 부착조류 수로시스템 설계인자 도출
 - 라. 생태공학적 자연정화방법에 의한 수질개선 사례연구
 - 마. 농배수로에 적용가능한 자연정화방법 및 효율 비교분석
 - 바. 농배수로에 활용 가능한 사상조류의 적용 기법 개발

IV. 연구개발 결과 및 활용에 대한 건의

1. 사상성부착조류 수로시스템 분석 및 이용기술 개발
- 가. 사상성부착조류의 성장특성
- 1) 서로 다른 유속과 매질, 유입수내 영양염 농도와 부하량에 따른 사상성부착조류의 성장을 평가하였다.
 - 2) 유속 5~15cm/s의 범위를 이용했을 때, 사상성 부착조류는 10cm/s의 유속에서 가장 높은 성장률을 보였다. 생물량 증가로 평가할 때 상대적으로 느린 5cm/s 유속에 비해 10cm/s의 유속에서의 사상성부착조류의 건중량(ash free dry weight)은 3~4배, Chl.-a는 6~8배, 조체 내 질소와 인은 3배 이상 높은 성장량을 나타냈다. 상대적으로 높은 15cm/s 유속에서는 10cm/s 유속의 사상성부착조류의 성장량과 큰 차이를 보이지 않았다. 10cm/s 유속에서의 평균 성장률은 5cm/s의 유속에 비해 2배 이상 빨랐다.

- 3) 사상성부착조류의 성장에 적합한 매질은 실내 순환수로에서는 자연섬유망, 현장 Pilot 수로에서는 철망으로 나타났다. 현장 Pilot 수로에서 10mm망목 철망, 20mm망목 철망, 자연섬유망을 동시에 이용하였을 때, 사상성부착조류의 성장은 20mm망목 철망에서 가장 높았으며, 자연섬유망에 비해 생물 성장량이 적었던 겨울(11월)에는 1.5배, 생물량의 성장이 많았던 봄(4월)에는 3~4배 높게 나타났다. 부유물질의 농도가 낮은 실내수로 조건에서는 물 흐름 방향에 대해 수직으로 설치한 자연섬유망과 철망이 흐름방향과 수평으로 설치하였던 자갈과 타일에 비해 높은 성장량을 나타냄으로써, 사상성부착조류의 부착과 성장이 매질의 종류보다는 매질의 설치 방향이 더 중요한 것으로 나타났다.
- 4) 인 농도를 0.1~1mg/ℓ로 조절한 실내 배양실험에서는 인 농도가 높을수록 사상성 부착조류의 성장률이 높았으며, 1mg/ℓ에서 가장 높은 성장을 보였다. 마찬가지로 현장실험에서도 인 농도가 높아질수록 사상성 부착조류의 성장율이 높게 나타났다. 인 농도에 따른 사상성 부착조류 종들의 성장률 비교 할 때, 0.05mg/ℓ와 0.1mg/ℓ에서는 *Spriggyra* 종이, 0.1mg/ℓ 이상의 인 농도에서는 *Rhizoclonium* 종이 높은 성장을 보였다.

나. 사상성부착조류의 영양염 제거효율

- 1) 유속과 매질, 부착조류 생물량, 유입수 내 영양염 농도에 따른 부착조류시스템 내에서의 제거효율과 현장에서 채취된 부착조류 종간의 인 제거율을 평가하였다.
- 2) 시스템에서 조절된 유속의 범위 내에서 유속이 빠를수록 영양염의 제거율이 높았다. Pilot 수로 10, 15cm/s의 유속에서 영양염의 제거율은 5cm/s의 유속에서보다 높았고, 특히 부유성고형물(SS), 질산염(NO₃-N), 총인(TP), 용존성무기인(DIP)에 대한 제거율이 다른 영양염의 제거율보다 높았다. Pilot 수로에서 용존성 무기인의 최대제거율은 10mg/s 유속에서 261mgP/gChl.a/hr로 나타났으며, 5cm/s 유속에서 최대 127mg P/gChl.a/hr을 보인 농수로 실험에서보다 2배 이상 높았다. 다른 영양염의 제거율도 낮은 유속을 적용한 농수로보다 높은 유속을 적용한 Pilot 수로에서 상대적으로 높았다.

- 3) 매질에 따른 영양염의 제거율은 사상성 부착조류의 성장이 좋았던 20mm 망목 철망에서 가장 높게 나타났다. 20mm 망목 철망을 사용한 경우에 평가된 모든 항목에서 지속적인 영양염 제거가 나타났으며, 자연섬유망에 비해 DIP, SS, TN, TP의 제거율이 높게 나타났다.
- 4) 실내 배양실험에서 처리 대상 시료 내의 인 제거율은 DIP 농도 $1\text{mg}/\ell$ 까지는 농도가 높을수록 제거율도 높게 나타났다. DIP 농도 $0.1\text{mg}/\ell$ 와 비교할 때 $1.0\text{mg}/\ell$ 에서 평균제거율은 $0.73\mu\text{gP}/\mu\text{g Chl.a/day}$ 로 4배 이상 높았다.
- 5) 단위생물량당 인 제거율은 적용된 사상성부착조류 3종 (*Rhizoclonium* sp., *Spriogyra* sp., *Oedogonium* sp.) 모두 인의 농도에 따라 증가하였고, *Spriogyra*가 가장 높은 제거율을 나타냈다. 시료 내 인 농도가 0.5 와 $1.0\text{mg}/\ell$ 일 때 제거율은 각각 0.39 , $0.36\mu\text{gP}/\mu\text{gChl.a/day}$ 로 나타났으며, 0.05 와 $0.1\text{mg}/\ell$ 일 때의 제거율 0.08 , $0.10\mu\text{gP}/\mu\text{gChl.a/day}$ 에 비해 4배 정도 높았다. 유속이 배제된 조건하에서 사상성부착조류 생물량과 인 제거율과의 관계를 조사하기 위해 인 농도를 $0.05\sim 0.5\text{mg}/\ell$ 의 범위에서 조절하였을 때, 인농도가 가장 낮았던 배지에서 생물량증가에 따른 인 제거율의 큰 차이는 없는 것으로 나타났으나 배지 내 인 농도가 $0.1\text{mg}/\ell$ 이상이었을 때는 $0.094\text{gDW}/\ell$ 의 생물량이 투입된 곳에서 가장 높은 인 제거율을 나타냈다.
- 6) 생물량에 대한 영양염의 제거효과는 효율(%)과 단위면적당 생물량에 대한 제거율로 평가하였다. 인과 부유물질 농도는 생물량 증가에 따라 제거효율이 증가하였지만, 생물량에 따른 질소제거효율의 증가는 관찰되지 않았다. 그러나, 단위면적당 생물량에 대한 제거율은 모든 수질항목에서 생물량 증가에 따라 감소하는 경향을 보였다. 이러한 결과들은 생물량이 높을수록 영양염 제거효율이 증가됨을 의미하지 않으며, 수질정화효과를 높이기 위해서는 사상성부착조류의 생물량을 조절할 필요가 있음을 제시한다.

2. 사상성부착조류 수로시스템에 의한 수질개선기법의 현장 적용기술 개발

가. 현장 농수로 실험

- 1) 충청남도 아산시 신정호 부근 (Bio-Park 내 수로 이용)의 길이 20m 수로를 선정하여 1m 혹은 2 m 간격으로 망목의 크기가 20mm 인 철망과 자연섬유망을 설치하여 부착조류의 성장 및 영양염 제거효과를 평가하였다.
- 2) 현장수로에서의 실험은 유속에 따른 영양염제거효율과 현장적용에 따른 문제점의 대책마련을 위한 목적으로 수행되었다.
- 3) 자연섬유망과 망목 20mm 철망에서의 부착조류 성장률은 각각 $16.7\text{mgChl.a}/\text{m}^2/\text{day}$ 와 $0.36\text{mgChl.a}/\text{m}^2$ 로 자연섬유망의 경우에 약 330배 정도 높게 나타났다. 자연섬유망은 매질의 특성상 접촉면적이 넓어 전체 매질에 매트형 미생물막이 형성되어 높은 성장률이 나타났다.
- 4) 부착조류 성장에 따른 영양염 제거효과는 조사된 모든 수질항목에서 나타났으며, 적용한 0.5~5cm/s 사이의 유속에서는 상대적으로 가장 빠른 5cm/s 유속에서 가장 높은 제거율을 보였다.
- 5) 유입수의 농도에 따른 인의 제거율은 일정한 경향을 나타내지 않았으나, 인 농도 $50\ \mu\text{g}/\ell$ 부근에서 가장 높았다.
- 6) 부착조류의 생물량은 인의 농도가 높아질수록 증가하는 것으로 나타났다. DIP 농도는 $0\sim 0.35\text{mg}/\ell$ 범위에서 인의 농도가 높아질수록 생물량이 증가하였으나, TP의 경우 $0\sim 3.0\text{mg}/\ell$ 범위중 $1.5\text{mg}/\ell$ 의 농도에서 가장 높은 성장량을 나타냈다.

나. 생태공학적 자연정화방법에 의한 수질개선 사례연구

- 1) 생태공학적 방법을 이용하여 수질을 개선하는 기법은 공학적인 수질개선 방법에 비

해 에너지 소모가 적으며, 유지관리가 용이하고, 소요경비가 낮으며, 오니발생량이 적어 2차 오염의 가능성이 적은 장점을 가진다.

- 2) 생태공학적 방법을 이용하여 대상유역의 오염원을 관리하고 수질을 개선하기 위해서는 처리효율이 지속적이고 유지관리가 용이해야 하며, 자연정화능력을 최대한 활용할 수 있어야 한다.
- 3) 농촌유역에 적용 가능한 자연정화방법으로는 농업용 저수지와 관련된 방법으로서 식생정화시스템(바이오톱), 인공습지, 저류지 등이 있으며, 유입수로공법으로는 접촉산화수로 등이 적용되고 있다.

다. 농배수로에 적용가능한 자연정화방법 및 효율 비교분석

- 1) 농배수로나 소하천에 적용 가능한 자연정화방법과 부착조류시스템과의 효율비교를 위해서 농업용수 수질개선 시험사업으로 충남 신정호 인근에 설치된 습지와 복합접촉산화수로 그리고 끈상접촉여재수로를 대상으로 검토하였다.
- 2) 효율은 설치면적, 정화효과 그리고 수생식물간의 정화능을 통해 비교하였다.
- 3) 부착조류시스템의 설치면적은 끈상접촉여재수로 내 접촉여재의 표면적 567m²(초사천)과 283.7m²(황산천)과 비교해서 매우 적은 면적이 소요됨에도 불구하고 영양염 제거효율은 다른 자연공법에 비해 상대적으로 높게 나타나 시설설치에 있어 장점이 제시되었다.
- 4) 부착조류 수로시스템에서의 영양염 제거효율은 TN 2.0gN/m²/d, TP 0.3gP/m²/d로 나타났다. 이에 반해, 비교적 넓은 면적의 부지를 요구하는 습지의 경우에는 질소와 인 제거율이 각각 0.1gN/m²/d, -0.5gP/m²/d로 상대적으로 낮았으며, 하천정화공법인 복합접촉산화수로나 끈상접촉여재수로의 경우에는 질소 제거율은 나타나지 않았고 인 제거율은 각각 0.1과 0.6gP/m²/d 이었다.

5) 자연정화공법 중에서 비교적 유사한 공법으로 간주할 수 있는 수생식물과 사상성부착조류의 영양염 제거효율을 비교 할 때, 환경조건이 서로 다른 상황이지만 현장수로에 적용된 사상성 부착조류에 의한 수질정화 효율이 수생식물에 의한 영양염 제거율보다 높은 것으로 나타났다. 비교적 적은 면적에도 불구하고 높은 생물량을 유지할 수 있으며, 상대적으로 수생식물에 비해 짧은 세대교번주기도 부착조류시스템의 장점으로 평가 할 수 있다.

라. 농배수로에 활용 가능한 사상조류의 적용기법 개발

1) 유속

영양염제거율은 부착조류의 성장에 영향을 주는 유속과 관련이 있었으며, 적절한 유속을 최대한 유지하는 것이 시스템의 최적운동을 위해 중요한 요인으로 나타났다. 또한 수로 내 유속은 시스템 관리의 한 방법으로 운영될 수 있어, 최적의 시스템운동을 위해 주기적으로 유속을 모니터링을 하면서 유속감소시 생물을 수확하여 적정 유속으로 조절하는 등의 관리방안이 필요하다.

2) 매질

서로 다른 환경에 재질과 망목의 크기가 다른 매질을 적용하여 실험한 결과를 토대로 할 때, 환경에 따른 매질 선택 시 다음과 같이 고려할 수 있다.

- ① 자연섬유망이나 망목의 크기가 작은 매질 - 순환수로와 Pilot 실험에서 비교적 생물량이 적은시기와 흐름이 저해받지 않는 환경에 적합한 것으로 나타났다. 부유물질이 적고 부착조류의 성장이 영양염에 의해 제한되는 장소나 부착조류의 성장이 느린 시기에 적용할 수 있다.
- ② 망목의 크기가 큰 매질 - 자연섬유망이나 망목의 크기가 작은 매질이 적용되는 환경보다는 상대적으로 영양염이 풍부하여 조류 성장이 영양염에 의해 제한받지 않으나, 부유물질이 유입되거나 조류나 생물막에 의해 망목이 폐색되어 흐름이 저해받을 수 있는 장소에 적용을 고려할 수 있다.

3) 유입 수 인 농도 및 매질설치 방향

시스템으로 유입되는 인의 농도를 조절하는 것은 어려우므로 유입수내 인 농도는 시설 설치 장소 선정시 고려되어야 하는 인자이다. 매질의 설치방향은 수로의 통수기능과 부착조류의 성장을 위해서 매우 중요하며 환경과 조건에 따라 유동적으로 설치할 필요가 있다.

4) 이용가능한 부착조류 종

본 연구에서 사용된 부착조류(*Rhizoclonium* sp., *Spriogyra* sp., *Oedogonium* sp.) 종들은 농수로나 소하천에서 쉽게 관찰되는 종으로, 인 농도 0.05~0.1mg/ℓ 범위에서는 *Oedogonium* sp.의 성장률이 높았지만 0.5~1.0mg/ℓ에서는 *Rhizoclonium* sp.의 성장률이 높았다. 그러나, 비록 다른 두 종에 비해 성장률은 적었지만 인제거율에 있어서는 *Spriogyra* sp.가 가장 높게 나타났다. 시스템이 현장에서 운영된다는 것을 감안할 때에는, 계절별로 자생하는 우점부착조류 종을 그대로 사용하는 것이 바람직 할 것으로 판단된다.

5) 수확된 생물의 재이용방안

시스템으로부터 수확된 생물은 인과 질소가 풍부하고 구조적으로 부드럽기 때문에 특별한 퇴비화 과정을 거치지 않고 그대로 인근 농지에 비료로 이용하거나, 주변에 환원할 수 있는 농지가 없는 경우에는, 수로주변에 식생대를 조성한 후 그곳에 매립하여 식물들이 성장하면서 영양분으로 이용할 수 있다. 적절한 가공과정을 거친다면 사료로 이용할 가능성도 있을 것으로 판단되어 향후 검토가 필요한 부분이다.

6) 여름철 집중 강우시 운영방안

여름철 집중강우 시에는 유역으로부터 많은 토사 유입과 유량, 유속 증가에 따른 부착조류의 탈리, 부유물질 흡착에 의한 부착조류의 성장저해 및 수로의 통수기능 억제 등의 문제점이 제기될 수 있다. 실제로 이러한 시기에 있어 수로 내의 구조물은 수질개선 목적으로 위해 사용이 거의 불가능하며 더욱이 수리적 측면에서 통수능에 제한을 주게 된다. 이러한 시기를 위해 부착매질 구조를 움직일 수 있도록 설계(한쪽 만 고정)하여 특정 유속 이상에서는 열리도록 하여 물의 흐름에 제한을 주지 않고 또한 구조물이 유

실되는 것을 방지하는 방안도 고려할 필요가 있다. 한편으로 이 경우 매질을 움직일 수 있는 구조로 설계하여 수로 바닥에 설치하는 것도 고려할 만 하다. 만약 조건이 허락된다면 이러한 시기에는 수로 부근에 추가적으로 통수용 수로를 건설하여 운영하는 것이 더 좋은 방법으로 판단된다. 가장 중요한 문제는 이러한 시기에는 자연상태에서 수질개선을 기대할 수 있는 어떠한 생물학적기법도 적용하기 어렵다는 것을 인정해야 한다.

7) 다른 생태공학적 기술과의 연계성 검토

주된 수질정화기작이 식물보다는 유속감소에 따른 침전, 여과, 고착 및 미생물 분해활동에 의해 유지되는 습지시스템과 조류에 의한 영양염 흡수가 주된 수질정화기작인 부착조류시스템과의 연계 방안이 검토되었다. 사상성부착조류의 영양물질 흡수능은 습지내 식물에 비해 매우 높아 습지 내외부에서 유입되는 영양물질을 효과적으로 제거할 수 있으므로 수질정화효과를 극대화 할 수 있다. 시설의 운영과 관리적인 측면에서도 부착조류의 성장을 저해할 수 있는 부유물질이 습지에서 대부분 제거되기 때문에 부유물질에 의한 탈리를 억제할 수 있으며 연 중 유량이 유지되어 시설을 가동할 수 있다는 점에서 매우 유리하다.

SUMMARY

I . Topic

Development of a water quality improvement technique using periphytic algal system

II. Purpose and Background of the Study

As the public awareness on the importance of sustaining sound environment grows stronger, their demand on conserving the nature, as well as utilizing it, have been increased. The management of the agricultural drainage water quality, however, is a difficult task due to use of fertilizers and pesticides for the promising harvest in the agricultural industry. No treatment of such substances in the agricultural water resource would jeopardize secure support of provisions.

The 53% of nation's annual water resource is used for agricultural purpose and among them substantial portion goes to the paddy field. Such facts imply the importance of the managing agricultural drainage water quality in order to prevent the eutrophication and subsequential pollution of the aquatic ecosystem in the agricultural watershed and down streams.

A main sources of water pollution in the agricultural watershed is point source, such as wastewater from livestock farms and domestic wastewater, and nonpoint source from farmlands. Such pollutants trigger eutrophication for: (1) the wastewater from the agricultural watershed contains considerable amount of nitrogen and phosphorous, (2) the engineering approach of treating the swage water targets mainly on the organic matters, not the nutrients, and (3) the characteristics of the nonpoint source, that it occurs in extensive area, makes it difficult to achieve economical reasonability for initiating a project to treat the nonpoint source in an engineering manner.

However, discharging of the pollutants in the upstream causes eutrophication of the downstream and thus, reduces the value of water usage and causes expensive water purification practices, especially when they inflows to drinking water and underground water resource. Although ecotechnological method using macrophyte for the nonpoint source treatment has been attempted, it was not as efficient in removing nutrients as microorganism and also needed substantial effort of managing at the end of its life cycle to prevent the secondary pollution that occurs when they are decaying in the water.

Filamentous periphytic algae (FPA), being easily observed in the agricultural drainages and small streams, are fast growing, highly efficient nutrient uptaker and provide biological filter for microorganisms such as bacteria. They also have high potential to utilize nutrients in water regardless of the their concentrations with the minimum seasonal effect. The merits of using FPA include sustaining the efficient matter cycling in the ecosystem without producing the secondary pollution and with relatively inexpensive cost when compared with the engineering techniques and thus anticipate that it will be an economically and environmentally efficient water treatment system in the agricultural watershed.

The purpose of this research is to develop an ecotechnological water treatment system 'filamentous periphytic algae treatment system' to reduce the pollutants in the agricultural watershed and thus contribute to establish a foundation for the development of agricultural industries.

III. Contents and Scope of the Study

This research has been carried out as follow with the purpose of developing a 'filamentous periphytic algae treatment system (FPATS)' as an ecotechnological water treatment method to reduce the pollutants in the agricultural watershed and contribute to establish a foundation for the development of agricultural industries. Laboratory and outside artificial pilot channels have been designed and used to

establish the design factor for the 'FPATS' and the efficiency and applicability of the system has been tested at in-situ environment.

1. Analysis of PFATS and development of its using technique

1) In-lab circulation channel experiment

- (1) Designing and making the circulation channel
- (2) Establishing the cultivating condition
- (3) Measuring the growth and nutrient removal rate of the filamentous periphytic algae

2) Outside pilot channel experiment

- (1) Designing and making the artificial channel at the outside
- (2) Measuring the growth and nutrient removal of filamentous periphytic algae
- (3) The selection of most applicable filamentous periphytic algae according to the characteristics of agricultural drainage.
- (4) Establishing the cultivating condition
- (5) Developing the applicable filamentous periphytic algae system according to the characteristics of the water, water velocity, substrata.

2. Developing the in-situ 'PFATS' for the water quality improvement

- (1) Designing the in-situ experiment
- (2) Measuring the growth and nutrient removal of filamentous periphytic algae
- (3) Establishing the cultivating condition
- (4) Case study of ecotechnological water treatment methods
- (5) Comparison of ecotechnological methods applicable to agricultural watershed

IV. Results and suggestions

1. Analysis of PFATS and development of its using technique

A. Growth dynamics of filamentous periphytic algae (FPA)

- (1) The growth of FPA in different water velocity, substrata, nutrient concentration of inflow water and nutrient load has been evaluated.
- (2) In the 5~15cm/sec range of water velocity, the highest growth rate of FPA was observed at the water velocity of 10cm/sec. In terms of biomass, the ash free dry weight of FPA was relatively 3~4 times higher in 10cm/sec than that of 5cm/sec; Chl. *a* was 6~8 times higher and cellular nitrogen and phosphorous content was more than 3 times higher. In the faster water velocity of 15cm/sec did not show noticeable outgrow than that of FPA in 10cm/sec. The average growth rate of FPA in 10cm/sec was more than 2 times faster than that of FPA in 5cm/sec.
- (3) In the substrata test, natural fiber net was the most favorable substrata according to the result of the lab experiment and at the outside pilot test it turned out to be the iron net. In terms of mesh size of the iron net, the highest growth rate was measured in 20mm than that of 10mm net. The growth rate of FPA in varied water velocity, the highest growth was evident in 10cm/sec regardless of the mesh size. The FPA growth in the water with low suspended solid concentration, natural fiber net showed 2 times and 20 times higher growth than that of iron net and both tile and gravel, respectively. The highest growth of FPA appeared on 10mm mesh iron net when 10mm, 20mm mesh and natural fiber net was tested at the outside pilot experiment. The growth rate on 10mm net was 1.5 times greater than that of

natural fiber filter during winter (November) and 3~4 times greater during spring (April). When 20mm mesh iron net and natural fiber net were provided, the higher growth rate of FPA was evident in 20mm mesh iron net.

- (4) The FPA growth was tested in varied phosphorous concentrations, ranging 0.1~1mg/ℓ. The FPA growth was greater as the concentration was higher and in the both outside and in lab experiment, the greatest FPA growth was in 1mg/ℓ. The highest growth for *Spirogya* was evident at 0.05mg/ℓ and 0.1 mg/ℓ and for *Rhizoclonium*, it was 1mg/ℓ.

B. Nutrient removal efficient of FPA

- (1) The phosphorous removal efficiency of FPA in different water velocity, substrata, biomass of FPA, nutrient concentration of inflow water and nutrient load and between the FPA species has been evaluated.
- (2) In the system with adjusted water velocity, the higher nutrient removal rate was shown as the water velocity increases. The nutrient removal rate in the pilot test was higher in 10 and 15 cm/s than that of 5cm/s; suspended solids (SS), nitrate (NO₃-N), total phosphorus (TP), and dissolved inorganic phosphorus (DIP) was more efficiently removed than other nutrients. The maximum removal rate of DIP at the pilot channel was more than 2 times higher than that of in situ experiment, showing the 261mgP/gChl.a/hr and 127 mgP/gChl.a/hr removal rate at the water velocity of 10mm/s and 5mm/s, respectively. Removal rate of other nutrients were also higher in faster water velocity.
- (3) Among the various substrata, nutrient removal rate was highest at the 20mm mesh iron net on which the highest growth rate was shown. Continuous

nutrient removal were evident in all the measured nutrients when 20mm iron net was used, and DIP, SS, TN, and TP removal rate was higher than the natural fiber net.

- (4) DIP removal rate of FPA was positively correlated with DIP concentration in the laboratory incubation experiment with the DIP concentration range of 0.1 mg/ℓ ~1.0mg/ℓ. The average removal rate at DIP concentration of 1.0mg/ℓ was 0.73μgP/μg Chl.a/day, more than 4 times higher than the removal rate at 0.1mg/ℓ.
- (5) Phosphorous removal rate per unit biomass increased in all three species (*Rhizoclonium* sp., *Spriogyra* sp., *Oedogonium* sp.) as phosphorus concentration increases. *Spriogyra* showed the highest in removal rate, with 0.39, 0.36μgP/μgChl.a/day and 0.08, 0.10 μgP/μgChl.a/day at 0.5 and 1.0mg/ℓ and 0.05 and 0.1mg/ℓ, respectively. When manipulated P in the range of 0.05~0.5 mg/ℓ, the highest P removal rate appeared in the P concentration higher than 0.1mg/ℓ with 0.094gDW/ℓ of biomass addition. However, there was no difference of P removal rate in the medium with the lowest P concentration, in response of biomass increase
- (6) The removal rate on NO₃-N, NH₄-N, DIP increased with pollutants load. The removal rate on NO₂-N, however, was increasing up till relatively low concentration of <2g/hr.
- (7) Removal efficiency (%) and removal rate per biomass were used as the measure for assessing the nutrient removal effect by FPA. Biomass and nutrient removal rate was positively correlated for phosphorous, but did not show correlation for nitrogen. The highest nutrient removal appeared at the fastest flow within the tested velocity range of 0.5~5cm/s. The removal rate

per biomass, however, was decreasing as the biomass increase. These results indicate that the biomass increase of FPA doesn't necessarily increase the nutrient removal rate, and thus the controlling of the biomass to achieve the most efficient water treatment was suggested.

2. Developing the 'PFATS' for the water quality improvement in-situ

A. In-situ experiment

- (1) In-situ experiment was conducted at the drainage channel near the Sinjung Reservoir (Asan, Chungcheongnam-do), in which 20m was used. Natural fiber net and 20mm iron net were used to test the growth rate and nutrient removal rate of the FPA. The nets were placed at 1~2m intervals.
- (2) The main objective of the in-situ experiment was to work out the countermeasures for the problems on nutrient removal rate according to water velocity and any problems that may encounter in application of the system.
- (3) The growth rate of FPA in natural fiber net and 20mm iron net was 16.7mg Chl.a/m²/day and 0.36mgChl.a/m², showing roughly 170 times higher growth in natural fiber filter.
- (4) Nutrient removal related to the growth of FPA was evident in all the parameters (i.e., TP, NO₃, NO₂, NH₄, TP, SRP, SS, COD and BOD). The most effective nutrient removal rate was observed at the water velocity of 5cm/s in the range of 0.5cm/s~5cm/s.
- (5) Although the nutrient removal rate varied with the concentration of inflow water, the highest removal rate was shown around 50µg/ℓ of P concentration.

B. Case study of water quality improvement using ecotechnological methods

- (1) Compared to the engineering methods, ecotechnological methods consume less amount of energy, less expensive to establish, easier to maintain and manage, and does not produce secondary pollution such as sludge.
- (2) In order to apply the ecotechnological methods, the methods must maintain the expected efficiency on treating the pollutant, easy to maintain, and fully utilize the natural purification mechanism.
- (3) Ecotechnological water treatment methods applicable to agricultural reservoirs are plant purification system (Biotope), artificial wetlands, detention pond; applicable to the inflowing water is a contact oxidation channel.

C. Natural purification techniques applicable to agricultural watershed and analysis of its efficiency

- (1) For the efficiency assessment of ecotechnological methods applicable to agricultural drainage channels and small streams, we analyzed bio-park, combined contact oxidation channel, and lope-type contact medium channel which were established near the Singjung Reservoir.
- (2) Efficiency has been evaluated through the demanded area for each techniques, pollutant removal efficiency, and purification capability.
- (3) The area needed for the FPA channel system appeared to be much smaller than the lope-type contact medium channel (567m² in Chosanchun stream, and 283.7m² in Hwangsanchun stream) but performed relatively higher efficiency.

- (4) The nutrient removal rate of FPA channel system was 2.0gN/m²/d, and 0.3gP/m²/d for TN and TP, respectively. The nutrient removal rate of a wetland system, a system that need much larger land, was 0.1gN/m²/d, and 0.5gP/m²/d for TN and TP; for combined contact oxidation channel, and lobe-type contact medium channel, it was 0.1gP/m²/d and 0.6gP/m²/d for phosphorus and nitrogen was not removed.
- (5) A similar ecotechnological method to the FPATS is macrophyte treatment system. However, nutrients were much more efficiently removed in the FPATS than in the macrophyte treatment system that demands larger land area than that of FPATS. The short life cycle of FPA than macrophyte is assessed to be another merit of the FPATS.

D. Development of FPATS applying for the agricultural drainage channel

(1) Water velocity

The water velocity and the nutrient removal rate of FPA is closely related. Therefore, maintaining appropriate water velocity is the most crucial factor for managing the system. For the most efficient management of the system, periodical monitoring on the water velocity and management (eg. harvesting FPA when water velocity is too slow) is necessary.

(2) Substrata

Based upon the experiments carried out in different environmental conditions, when selecting substrata according to a given environment, following factors should be taken into account.

- ① Natural fiber net and nets with small mesh- Appropriate to use when water velocity is slow, SS and nutrient concentration is low and biomass of FPA is

small.

- ② Nets with large mash size—Appropriate to use when SS and nutrient concentration is high and biomass of FPA is large in order to prevent from blocking the water flow with the over grown FPA.

(3) P concentration of the inflowing water and the placement of the substrata, The Phosphorus concentration of inflowing water is a factor to consider when determining the place to applying FPA system. In situ experiment results showed that the growth of FPA was increasing as the phosphorous concentration increases. The growth rate increased with the increase of DIP (in the range of 0~0.35mg/ℓ) and it was 1.5mg/ℓ in the range of 0~3.0mg/ℓ for TP. The placement of substrata (ie, the direction, and shape) affect the FPA growth and water flow. It should be designed according to the condition of the channel.

(4) Applicable FPA species

Three species, namely *Rhizoclonium* sp., *Spriogyra* sp., *Oedogonium* sp. were used for this study. These species are easily found in the paddy fields and small streams. In the phosphorous concentration ranging 0.05~0.1mg/ℓ, the growth rate of *Oedogonium* sp. was relatively high while it was *Rhizoclonium* sp. in the phosphorous concentration range of 0.5~1.0mg/ℓ. Although *Spriogyra* sp. was the slowest growing FPA among three, its phosphorous removable rate was the highest. It is proper to use species that are growing adjacent to the objective channel.

(5) Recycle of the harvested FPA

The harvested FPA can be used as a fertilizer with out composting process due to its soft and phosphorous and nitrogen rich tissue.

(6) Management of FPA system during monsoon and storm water period

Soil particles, and boosted water volume and fast water velocity suppress the FPA growth and even detach them from the substrata during monsoon season. FPA filter also can block the water flow of the channel. Because of such problems, FPA system is not appropriate to use during monsoon season and specially designed substrata (removable, or unfixed on outside to put aside during flood and monsoon season) are needed.

(7) Possibility of combination with other ecotechnological method

The possibility of combination of FPATS with artificial wetland. Plants in wetlands are not major component of nutrient removal (uptake) but more likely supporter of stabilizing soils and substrates for microbial attachment. The main mechanism of matter removal in the wetlands takes place through physical and biochemical processes. Thus, a combination of physico-chemical process in the wetland with biological process of FPATS would maximize water quality improvement in polluted water.

CONTENTS

SUMMARY (KOREAN)	3
SUMMARY (ENGLISH)	13
CONTENTS	29
Chapter 1. Introduction	35
Section 1. Background the study	35
Section 2. Necessity of the study	38
1. Technical aspect	38
2. Economical and industrial aspect	39
3. Social and cultural aspect	39
4. Current trend and problems of the related technology	40
5. Prospect	42
Section 3. Objectives and scope of the study	44
1. Objectives and scope of the study	44
2. Annual objectives and scope of the study	48
Section 4. Expected effects	51
1. Technical aspect	51
2. Economical and industrial aspects	51

Section 5. Practical use strategy	52
Section 6. Composition of the study team	53
1. Composition of the study team	53
2. Corresponding tasks	54
Chapter 2. Environmental problems and restoration of agricultural ecosystem	57
Section 1. Characteristics of rural districts	57
1. Present status of rural districts	57
2. Major pollutants and their sources in rural districts	57
3. Properties of land use in rural districts and its relation to water quality	58
Section 2. Importance of maintenance and restoration of rural environment	60
1. Necessity of maintenance of rural environment	60
2. Principles for maintenance of rural environment	60
3. Prospects of creation and management of rural environment	63
Section 3. Water resource and pollution in rural districts	64
1. Status of water resource use	64
2. Status of facilities of agricultural water use	65
3. Status of water pollution	66
4. Effects of agricultural activities on water quality	69
5. Effects of water pollution on agricultural activities	70
6. Management strategy of water resource and water quality in rural districts ..	71

Section 4. Application of ecothechnology for the restoration of rural environment	75
1. Definition and principles of ecothechnology	75
2. Classification of ecotechnological methods	79
3. Ecotechnologies applicable for rural districts	83
Chapter 3. Characteristics of morpho-physiology and nutrients removal by filamentous periphytic algae (FPA)	99
Section 1. Morpho-physiology of FPA in rural districts	99
Section 2. Growth and nutrient removal ability of FPA	116
Chapter 4. Analysis and development of filamentous periphytic algae treatment system (FPATS) application	123
Section 1. Growth rate and phosphorus uptake ability of FPA species	123
1. Materials and methods	123
2. Results	125
Section 2. Evaluation of nutrient removal efficiency with FPATS	136
1. Designing and making of the channel for the FPATS	136
2. Sampling and analysis methods	139
3. Growth rate and nutrient removal of FPA according to water velocity	141
4. Growth rate and nutrient removal of FPA according to substrata	152

Chapter 5. Application of FPATS system for water quality improvement ... 187

Section 1. Selection of in situ experiment site and composition of the system ... 187

- 1. Selection of agricultural drainage and status of the watershed 187
- 2. Status of inlet water 188
- 3. Contents of study and composition of the system 188
- 4. Sampling and analysis methods 189

Section 2. Growth rate and water quality improvement rffect in the FPATS 193

- 1. Comparison of the growth rates according to substrata 193
- 2. Water quality improvement by FPATS 197
- 3. Water quality improvement according to biomass in different substrata 207
- 4. Removal efficiency by FPA biomass and nutrient load 208

Chapter 6 Applicability of the FFAST and best management practices 219

Section 1. Economical reasonability of the FPATS 219

- 1. Efficiency comparison of ecotechnologies applicable to rural districts 220
- 2. Comparison of area required to apply ecotechnologies 221
- 3. Comparison of efficiency of applicable organism 222

Section 2. Design factors for the FPATS 223

- 1. Characteristics of the designing factors and their relationships 223
- 2. Management strategy 236

Section 3. Best management strategy for FPAST	238
1. Water velocity	238
2. Substrata	239
3. Phosphorus concentration of inflowing water	241
4. Applicable FPA species	241
5. Installing direction of substrata	243
6. Harvesting and recycling of FPA	245
7. Management strategy for monsoon and flood season	246
8. Selection of application area and conjunction of the FPA system with other ecotechnological systems	247
Chapter 7. Summery and results	255
References	261
Appendix : Water quality and FPA data	273

목 차

요 약 문	3
SUMMARY	13
CONTENTS	29
제 1 장 서 론	35
제 1 절 연구의 배경	35
제 2 절 연구개발의 필요성	38
1. 기술적 측면	38
2. 경제·산업적 측면	39
3. 사회·문화적 측면	39
4. 국내·외 관련기술의 현황과 문제점	40
5. 앞으로 전망	42
제 3 절 연구목표 및 내용	44
1. 연구개발 목표와 내용	44
2. 연차별 연구개발 목표와 내용	48
제 4 절 기대효과	51
1. 기술적 측면	51
2. 경제·산업적 측면	51
제 5 절 활용방안	52
제 6 절 연구진의 구성	53
1. 연구원의 구성	53
2. 주요 업무 내용	54

제 2 장 농촌환경 문제와 생태공학적 복원	57
제 1 절 농촌지역의 특성	57
1. 농촌지역의 일반적 현황	57
2. 농촌지역 주요 오염원과 오염물질	57
3. 농촌지역의 토지이용 특성과 하천 수질과의 관계	58
제 2 절 농촌환경정비 및 복원의 중요성	60
1. 농촌환경정비의 필요성	60
2. 농촌환경 정비의 방향	60
3. 농촌환경 창조와 관리의 전망	63
제 3 절 농촌의 수자원 및 수질오염	64
1. 수자원이용현황	64
2. 수리시설현황	65
3. 수질오염 현황	66
4. 농업활동이 수질에 미치는 영향	69
5. 수질오염이 농업활동에 미치는 영향	70
6. 농촌지역 수자원확보 및 수질관리방향	71
제 4 절 농촌환경 복원을 위한 생태공학의 이용	75
1. 생태공학의 정의 및 원리	75
2. 생태공학적 방법의 분류	79
3. 농촌지역에 적용가능한 생태공학적 기술	83
제 3 장 사상성부착조류의 형태적·생리적 특성 및 영양염류 제거능	99
제 1 절 농촌유역 부착조류의 생리·형태학적 특성	99
제 2 절 사상성부착조류의 성장과 영양염 흡수(제거)능	116

제 4 장 사상성부착조류 수로시스템 분석 및 이용 기술 개발 연구	123
제 1 절 부착조류 종간의 성장 및 인 흡수능 비교	123
1. 실험 재료 및 방법	123
2. 연구 결과	125
제 2 절 사상성부착조류 수로시스템을 통한 처리효율 평가	136
1. 수로시스템을 위한 수로 제작	136
2. 시료 채취 및 분석 방법	139
3. 유속에 따른 사상성 부착조류 성장 및 영양염 제거	141
4. 매질에 따른 사상성부착조류 성장 및 영양염 제거	152
제 5 장 사상성부착조류 수로시스템에 의한 수질개선기법의 적용연구	187
제 1 절 현장 대상지 선정 및 시스템 구성	187
1. 현장 농배수로 선정 및 유역현황	187
2. 유입수 현황	188
3. 조사내용 및 시스템 구성	188
4. 시료 채취 및 분석방법	189
제 2 절 사상성부착조류 수로시스템에서 부착조류의 성장과 수질개선효과	193
1. 농수로 내 매질에 따른 부착조류의 성장 비교	193
2. 농수로 부착조류시스템 유입, 유출수의 질소와 인의 비율 및 수질 개선 효과	197
3. 부착조류시스템 내 서로 다른 매질에서의 생물량에 따른 수질개선효과	207
4. 서로 다른 유속 조건에서 생물량과 오염부하량에 따른 제거효율	208
제 6 장 사상성부착조류 수로시스템의 적용타당성 및 최적관리방안	219
제 1 절 사상성부착조류 수로시스템의 경제적 타당성	219
1. 농촌유역에 적용가능한 자연정화공법의 효율비교	220
2. 농촌유역에 적용가능한 자연정화공법의 시설설치 면적 비교	221

3. 이용대상 생물의 정화능력비교	222
제 2 절 사상성부착조류 수로시스템의 최적설계 인자	223
1. 사상성부착조류 수로시스템 설계 인자별 특성과 상호관계	223
2. 유지관리 방안	236
제 3 절 사상성부착조류 수로시스템 최적 운영 방안	238
1. 유속	238
2. 매질	239
3. 유입수내 인 농도	241
4. 이용 가능한 부착조류 종	241
5. 매질의 설치방향	243
6. 생물량 수확 및 처리	245
7. 홍수기시 관리방안	246
8. 적용대상 지역 선정 및 타 공법과의 연계	247
제 7 장 요약 및 결론	255
참 고 문 헌	261
Appendix : 수질 및 생물량 Data	273

제 1 장

서 론

여 백

제 1 장 서 론

제 1 절 연구의 배경

물은 수자원 및 용수로서의 이용 뿐 만 아니라 자연환경의 일부로서 매우 중요한 기능을 수행하며 이에 따라 다양한 혜택을 제공한다. 우리나라에서 1970년대 이후로 사회경제의 발전에 따른 농업생산여건의 변화와 함께 소비 및 생활수준의 향상은 오염물질과 폐기물의 증가를 가져왔으며, 이러한 상황은 농촌지역에서도 예외가 아니어서 하천과 호소를 비롯한 농업용수원의 수질오염이 계속 심화되어가고 있다. 국내에 분포하는 농업용저수지 중에서 수질측정망 대상저수지는 2002년까지 492개로 확대되었고, 그 중에서 23%에 해당하는 114개 저수지가 농업용수수질기준(COD 기준)을 상회한 것으로 나타났고(농림부 농업기반공사, 2002), 특히 정체수역의 부영양화를 유발시키는 인(phosphorus)과 그 결과로 나타나는 녹조현상의 지표인 엽록소(chlorophyll-*a*)에 따라 판정할 때 부영양 상태가 50%를 상회하고 있다. 관개용수의 오염은 여러 가지 형태로 농업생산에 피해를 미치게 되는데 그중에는 토양질의 악화, 농업시설물 훼손, 농작물의 생육과 안정성에 대한 피해등이 포함된다(농림부 농업기반공사, 2002).

농촌유역에서 수질오염을 야기시키는 오염원은 축산폐수나 생활하수 등의 점오염원과 농지에서 유출되는 농지배수 등의 비점오염원을 들 수 있다. 유역의 여러 곳에 분포하고 있는 논, 밭, 가축 사육 시설 등으로부터의 질소와 인의 유출은 비료시비와 가축분뇨로부터 발생하며, 폐쇄성 수역의 경우 영양물질의 약 80%가 비점오염원에 의한 것으로 계산되고 있다. 환경부(1997)의 전국유역조사의 결과에 따르면 전체 오염발생부하량에 대한 비점오염원의 기여율이 BOD 16%, 질소 50%, 인 26%로 나타나고 있다. 그러나 비점오염원의 종류와 이들이 실제로 유역에서 다양한 경로로 영향을 미치는 점을 감안하면 실제로 기여도는 더욱 증가할 것으로 추측된다. 최근에는 농경지에서의 비료 사용량 증가와 가축분뇨의 시비화로 인하여 많은 부분이 유역에 잔재하여 호소나 하천에 유입되고 있는 실정이다.

국내의 수질오염관리 정책이나 기술로 볼 때 축산폐수나 생활하수와 같은 점오염원이 주된 처리대상으로 관리되어 왔으며, 비점오염원에 대한 연구와 대책은 매우 미비한 실정

이다. 농촌유역의 넓은 지역에서 불규칙한 형태로 발생하는 비점오염원에 대한 중요성은 최근에 와서야 비로소 인식되어 정부를 포함한 관련기관에서 적절한 대책을 세우기 위하여 노력을 하고 있다. 중장기적으로는 용수의 수질개선을 위하여 비점오염원의 관리가 보다 중요하게 부각될 것으로 전망된다. 오염원관리정책에서 비점오염원의 부각은 선진국의 경우에도 나타나고 있다. 현재 우리나라 총 수자원의 50%가 농업용수로 이용되고 있어 농업활동으로 야기되는 수질오염은 안정적인 농업생산기반확보에 상당한 부담으로 작용할 가능성도 내포하고 있다.

농촌유역에서 상대적으로 더욱 중요한 부분을 차지하는 대규모 비점오염원의 관리와 처리는 현실성·경제성의 관점에서 볼 때 공학적 처리는 거의 불가능하다. 따라서 자연정화의 방법을 채택하는 것이 바람직하며 필요에 따라 공학적 기술도 접목할 수 있을 것이다. 자연정화의 원칙은 생물의 생존을 위해 물질을 섭취하고 또 다른 생물에게 먹힘으로써 물질이 이동되는 생태학적 기능에 있다(류 등, 2002). 따라서 대상오염물질의 이용과 관련된 대상 생물후보종을 찾아내고 이를 기술적으로 이용하는 것이 생태공학적 자연정화기술의 목표가 된다.

농촌유역에서 발생하는 질소와 인은 수역의 부영양화와 녹조현상의 원인이 되는 주요한 영양염류이므로, 영양염의 처리와 제거가 수질개선의 매우 중요한 대상이다. 수계에서의 영양염은 생물학적으로는 조류(algae)와 수생식물 등을 비롯한 1차생산자와 세균과 같은 미생물들이 성장을 위해 직접적으로 흡수하며, 물리화학적으로는 여과, 침전, 고착, 불활성화와 같은 과정을 거치면서 수체에서 감소 또는 제거된다. 따라서 용존성 및 입자성 영양염의 제거를 위한 방법은 이러한 생물물리화학적 메커니즘을 최대한 효율적으로 이용하여야 하고, 최근 환경분야에서 이러한 측면을 종합적으로 고려하는 생태공학적 기법들이 적극 이용되고 있다. 외국의 적용사례와 결과들은 생물과 생태계의 기능적 측면을 기본적으로 이용하는 생태공학적 기술들이 비점오염원의 관리와 처리에 가장 경제적인 방법으로 입증되고 있다(Etinier and Guterstam, 1996).

우리나라의 경우 생태공학적 기술로서 인공습지, 식물, 저류지 등이 수질의 정화에 이용되고 있으나 아직 생물학적 정화의 메커니즘을 충분히 이해하지 못하여 기술적인 측면에 의존하는 부분이 상대적으로 크다. 특히, 인공습지와 관련하여 식물을 이용한 영양염 제거 연구는 국내에서도 상당한 자료를 축적하고 있으며(공 등, 1996; 농림부 농업기반공사, 1999), 대형 저수지나 댐의 유입부 그리고 오염하천의 주변에서 유입수의 수질정화를

위해 적용을 시도하고 있다. 그러나 소규모 오염원이 널리 산재한 농촌지역의 소하천이나 농지배수를 대상으로 한 생태공학적 연구사례는 매우 미흡하며 더욱이 조류와 같이 관속 식물에 비해 영양염 제거효율이 훨씬 높은 생물을 이용한 사례는 거의 없다.

본 연구에서는 영양염 흡수능이 우수한 사상성부착조류를 이용하여 농경지 등으로부터 유출되는 영양물질을 저감시키는 생태공학적 기법을 개발하여 농촌유역의 수질오염 저감에 기여하고자 한다.

제 2 절 연구개발의 필요성

1. 기술적 측면

농촌유역의 수질문제는 축산폐수나 생활하수 등 점원오염원과 함께 농지에서 유출되는 비점원오염원이 주요한 원인으로 작용하고 있다(권, 1998). 농촌지역으로부터 유출되는 물질들은 수역의 부영양화나 녹조현상의 발생에 직접적인 원인이 되는 질소와 인을 상당부분 함유하고 있어 주로 유기물 처리에 국한되고 있는 일반 하·폐수처리시스템을 중심으로 한 기존의 공학적 베이스의 여러 가지 기술들로는 영양물질 제거의 높은 효율성을 기대하기 어렵고, 다량으로 발생되는 비점오염원인 특성으로 인해 기술적 처리로서는 경제성문제를 해결할 수 없다.

우리나라에서 연간 사용하는 수자원의 약 53%가 농업용수로 이용되고 이들이 거의 대부분 벼 재배에 사용된다는 점을 고려하면 농업 용배수나 소하천에서의 수질개선은 저수지나 하천의 부영양화를 방지하고 농촌유역의 수생태계 보전을 위해서도 적극 해결해야 하는 농업분야의 중요한 환경문제이다. 농업용수의 수질오염이 농업에 미치는 영향은 농작물의 수확량 감소와 품질 저하와 같은 직접적인 피해뿐만 아니라 오염물질에 의한 토양 오염 및 토양미생물에 대한 생리·생태적 피해를 통해 생태계의 건강성에 영향을 미치는 등 간접적인 피해가 복합적으로 나타날 수 있다. 이에 따라 용수량이 매우 큰 농촌지역에서의 수질개선 및 환경관리는 매우 중요하며 이에 대한 연구의 활성화가 크게 요구되고 있다.

농촌지역에서의 비점오염원(유사비점오염원 포함) 제어를 위해 수생식물을 이용하는 방법들과 자연형하천공법들이 연구·적용되고 있으나, 식물체는 질소와 인과 같은 영양물질 흡수에 있어서 미생물에 비해 효율이 크게 떨어지고 노화나 고사기간에는 도리어 오염원으로 작용하므로 관리에 상당한 노력이 요구한다. 그러나 농업 용배수로나 소하천에서 일반적으로 발견되는 사상성 부착조류(filamentous periphytic algae)는 빠른 성장속도에 따른 영양물질 흡수능력이 우수하며(황과 공, 1999), 동시에 박테리아와 같은 미생물의 부착매질을 제공하는 생물막의 기능을 한다. 이들은 수중영양염 대안 이용효율이 높기 때문에 적절한 관리기술이 수반된다면 수질개선을 위한 매우 큰 잠재력을 가지고 있으며 특히, 처리수의 영양물질 농도 고저에 크게 관계없고 계절적인 영향이 적어 경제적인 농

촌유역 수질개선 기술로서의 적용잠재성이 크다.

2. 경제·산업적 측면

비점오염원에 의한 수질오염, 농업용저수지나 하구담수호의 부영양화는 지속적인 생산 기반 및 농업생산을 저해하므로 농촌유역에서의 수질관리는 중요한 현안사항인 동시에 이에 대한 처리가 요구되고 있다. 또한, 농업활동에 의한 수질오염 발생물질 뿐만 아니라 농약과 같은 화학물질 오염성분의 유입은 하류의 수자원 가치를 크게 감소시키게 된다. 이 결과 오염된 물을 정화하는데 많은 비용이 소요되며, 특히 상수원이나 지하수로 유입되는 비점오염물질이 경제적 측면의 정수처리에 미치는 영향은 상당히 클 것이다.

소규모 오염원이 널리 산재한 농촌지역의 농지배수나 소하천에 대한 기계적 고도처리는 기술적·경제적으로 적용성이 크게 떨어지는 반면에, 사상성부착조류와 같은 생물을 포함한 생태계의 자연정화능력을 극대화한 생태공학기술은 기계적 처리에 비해 비용편익적으로 큰 우위에 있어 적용성과 실용성을 기대할 수 있다. 본 연구결과에 의한 생태공학기술은 농촌유역을 포함하여 비점오염물질 전반에 대한 수질환경 개선에 기여할 수 있을 뿐만 아니라 실용화될 경우 경제성도 기대할 수 있다.

3. 사회·문화적 측면

최근 들어 생활수준의 향상과 더불어 국민들의 환경의식 강화는 환경을 이용하는 문제와 함께 보전에 대한 요구가 증대하여 친환경적인 정서가 비등하고 있다. 그러나 식량문제의 해결에 필요한 농업생산을 유지·관리하기 위해서 현실적으로 농지에서 비료와 농약의 사용을 완전히 중단할 수 없는 만큼 농업 용배수의 수질개선은 중요한 사안이다. 오염원의 분포가 광대한 농촌유역의 용배수에 대한 처리와 관리가 매우 미흡한 현실을 감안할 때, 농업생산의 지속성과 환경보전의 양면성을 동시에 해결해야하는 농업문제는 앞으로 발전과 전망에 대해 상당한 부담을 가지고 있으므로 농촌유역 용배수의 수질개선에 대한 방안과 처리대책이 시급히 마련되어야 한다.

종래의 기계적 고도처리는 오염물질을 다른 형태로 이전하는 것에 불과한 반면, 부착조류와 같은 생태계의 구성원에 의한 수질정화 방법은 2차적인 오염을 별로 유발하지 않으

며 생태계내 물질순환 고리의 안정성을 유지시킨다는 점에서 크게 유리한 친환경적인 수질개선 방법이다. 혐오시설로 여겨지는 기계적 처리시설에 비해 자연정화시스템은 오히려 자연계의 생물상을 풍부하게 하고 심미적인 경관을 제공함으로써 사회적 측면에서도 유익하다. 또한 물질을 쓰고 버린 것을 모아서 버리는 일방향 개념인 기계적 처리의 환경문화로부터 버린 것을 자원으로 이용하여 생물상을 발달시키고 수거된 생물을 다시 자원으로 환원시키는 재순환의 환경문화로 전환하는 기반을 마련할 수 있다.

4. 국내·외 관련기술의 현황과 문제점

생물을 이용하여 오염된 물을 정화하는 방법은 생태공학적(ecological engineering) 수질개선기법의 범주에 속하며, 여기에는 수생관속식물, 조류(algae), 어류, 대형 동물플랑크톤 등이 대상이 된다. 오염된 물에 포함된 영양염류의 제거를 통한 수질개선은 이를 직접 흡수하는 식물이나 조류와 같은 일차생산자(primary producer)에만 국한된다. 생물을 이용하여 수질을 개선하는 기술은 생물의 관점에서 본다면 오염된 물로부터 생물들이 영양물질을 흡수하여 성장하는 것이지만, 이용자의 관점에서 본다면 이들 생물의 최적 성장 조건을 조성하고 관리함으로써 오염물질을 제거할 수 있다.

생물을 이용하는 수질개선 분야에서 부레옥잠, 갈대, 생이가래, 줄, 꽃창포, 부들, 미나리 등과 같은 다양한 수생관속식물들이 외국에서 뿐 만 아니라 최근 국내에서도 다양하게 연구되고 있으며(변 등, 1985; 공 등 1996; 김 등 1991; 안과 공 1995; 조 등 1994), 처리 환경과 식물의 종류에 따라 어느 정도의 수질개선 능력이 있다고 보고되었다. 식물의 이용은 일반적으로 바이오톱(대부분 인공습지: 윤 등, 1999; 윤 등, 2000; Yoon et al. 2001)과 같은 생물과 그의 서식지가 포함되는 공간 내에서 이루어지는데(류 등, 2002), 습지에서 영양물질의 제거는 식물에 의한 제거 뿐 만 아니라 토양에 의한 흡착, 침전, 여과, 탈질 등의 이화학적인 기작과 박테리아와 부착성조류와 같은 미생물에 의한 흡수(공과 천, 1999; 황과 공, 1999) 등 다양한 방법에 의한다. 특히 식물은 미생물에 비하여 성장속도가 느리기 때문에 물질의 이용효율이나 흡수속도가 낮아 습지 내에서 식물 그 자체는 영양염 제거에 주된 역할을 하지 못한다. 일반적으로 습지생태계 내에서의 물질제거는 생물에 의한 것 보다는 이화학적인 루트를 통한 제거가 상당히 큰 부분을 차지한다(Mitsch and Gosselink, 1986; Reddy et al. 1997).

국내에서 부착성생물에 의한 수질정화연구는 하수처리과정에서 영양염의 고도처리를 위해 생물막을 이용하는 환경공학적인 기술을 제외하고는 일반 하천이나 호소 등 수역에서의 사례는 거의 찾아보기 어렵다. 그러나 최근에 일본의 오염하천에서 적용되고 있는 흡착매질이용기술이 국내에 도입되어 응용되고 있다. 이 방법은 미생물들이 부착할 수 있는 접촉면적이 큰 매질을 이용하여 부착성미생물군집(생물막)이 발달할 수 있는 여건을 조성함으로써 이들에 의한 수질정화를 도모하는 기술로서 접촉매질은 끈상 또는 매트형태로 개발되고 있다. 농촌유역에서의 이용사례는 소하천에서 조류매트를 이용한 영양염 제거 연구가 보고된 바 있으며(김과 김, 2000), 그 외 지자체 단위로 도시 오염하천에서의 일부 적용사례가 있을 뿐 이다(군포시, 1997). 외국에서 부착생물군집에 의한 수질정화에 관한 주요 연구로서는 부영양 하천에서의 생물막내 조류의 비율과 성장량 측정(Aizaki, 1978, 1979, 1980), 부착매질을 설치한 순환수로에서의 하천수 유기물 제거(Tachibana *et al.*, 1988; Okada *et al.*, 1984) 등 일부연구가 보고된 바 있다.

수처리공학적이거나 오염하천의 정화적 측면에서 생물막 전체를 구성하는 부착생물군집(periphyton)을 수질개선에 이용하는 것과 비교할 때, 사상성부착조류만을 대상으로 수질개선 연구에 이용한 사례는 매우 미비하다. 단지 수로에서 인공적인 매질을 투입하고 거기에서 발달된 부착조류 군집을 이용하여 영양염 제거를 시도한 연구(Vymazal, 1988), 사상성 조류매트를 이용한 영양염 제거연구(김과 김, 2000), 인공수로와 오염소하천에서의 부착매질을 이용한 물질제거연구(공과 천, 1999) 등이 관련연구로 포함될 뿐이다. 국내에서 수행된 부착조류에 관한 일반적인 연구는 하천수의 유기오염이나 영양상태 판정(Choi and Chung, 1990; 김 등, 1992; 이와 김, 1996)과 같이 생물학적 지표로서의 부착조류 이용연구가 주를 이루어 왔다. 그 외의 부착조류의 현존량 및 turnover rate (김, 1978), 인공매질에 따른 부착조류의 부착능(조, 1994), 하상 부착조류의 일차생산성(신과 조, 1998)이 조사된 바 있으며, 부착조류와 식물플랑크톤 및 박테리아의 증식속도와 인흡수능력이 비교·고찰된 바 있다(황과 공, 1999).

오염된 소하천이나 농배수로에서 우점종으로 나타나는 사상성부착조류는 단세포조류와 마찬가지로 수중의 영양염을 체표면 전체로 흡수하며, 부착매질에 고착하여 생활하는 단세포성 조류에 비해 수중으로 뿔어나가며 성장하므로 수중영양염에 대한 이용효율이 높다. 자연계에서 사상성 부착조류는 물의 유동에 의해 접촉되는 부분의 영양염만 흡수하므로 정체수역보다는 하천형 수계에서 증식정도와 물질흡수능이 높다. 특히 농·축산폐

수에 다량 포함되어 수계의 부영양화에 큰 영향을 미치는 인산염 등의 무기영양염에 대한 제거 효과는 사상성부착조류의 생태적 특성을 감안한다면 그 효과가 대단히 클 것으로 기대된다.

사상성부착조류의 영양염 이용능력 및 이들의 적용기술을 현재 많이 이용하고 있는 수생식물의 특성과 비교할 때 다음과 같은 장점들이 있다: 1) 사상성부착조류는 부영양화 등의 2차 수질오염 문제를 유발할 가능성이 낮다. 부레옥잠과 같은 고등수생식물을 이용하는 방법은 그 자체가 수질악화의 원인으로 작용할 수 있는 가능성을 지니고 있다. 2) 사상성부착조류는 증식속도가 매우 빨라 수중의 무기영양염 흡수효율이 뛰어나다. 이들의 인산염 흡수력은 일반 수생식물의 약 10~100배에 까지 달한다(Hwang *et al.*, 1998; 황과 공, 1999). 3) 사상성부착조류는 비교적 낮은 영양염 농도수준에서도 생육이 활발하다. 농경지 등 비점오염원의 하·폐수에서 흔히 발생하는 생육에 불리한 조건에서도 인산염 흡수기능을 충분히 발휘할 수 있다. 4) 생육가능 수온범위가 넓어 수온 5℃ 이하의 저수온 기에도 생육이 가능하다. 부레옥잠과 같은 관속식물은 수온 5℃ 이하에서는 동사하게 되어, 매년 동절기 이전에 재배된 총량 모두를 제거하거나 혹은 난방 조건에서 별도로 관리하여야 하기 때문에 추가 경비의 소비가 필연적이다. 5) 사상성부착조류는 부착 증식하는 매질의 조작이 간편하므로, 생육 정도의 제어가 용이하다. 6) 사상성부착조류는 영양가가 높기 때문에 활용 후 남는 양을 가축의 사료나 비료의 형태로 활용할 수 있는 가능성이 있다.

5. 앞으로 전망

우리나라의 여건상 지금까지는 수질오염 문제의 해결을 환경기초시설을 통한 점오염원 처리에 역점을 두어왔다. 그 결과 유기물(BOD)를 중심으로 하는 오염물질의 처리율은 전국적으로 상당부분 향상되었고, 앞으로도 생활하수 처리율의 증대를 위해서 지속적인 투자가 계획되고 있다. 그러나 1998년 정부의 한강수계 상수원 수질관리 특별대책에서도 나타났듯이, 비점오염원이 전체 오염발생량에 기여하는 부분이 상당하며, 비점오염배출량과 수계유출 메카니즘이 정확하게 밝혀지지 않은 이유로 인해 비점오염원에 대한 관리와 처리는 현실적으로 매우 미흡하다. 따라서 하천이나 호소, 농업용 저수지의 전반적인 수질개선을 위해서 중장기적으로는 비점오염원의 관리가 관건이 될 것으로 전망된다.

이와 같은 비점오염원관리로의 오염원 관리정책의 변화는 선진외국의 경우에서 어렵지 않게 찾아볼 수 있다(Muscutt *et al.*, 1993; Rekolainen *et al.* 1993; van Dunne, 1996).

농촌유역에서 배출되는 오염물질은 광역적인 비점오염원이며 현재 우리나라 수자원의 약 50% 이상이 농업용수로 이용되고 있기 때문에 장기적으로 수질문제의 해결에 농업이 차지하는 비중과 부담이 커질 것으로 판단된다. 비점오염물질의 처리는 현실성과 경제성 관점에서 볼 때 기계적인 처리가 거의 불가능하므로 자연정화방법과 연관된 생물을 이용하는 기술의 이용이 필요하며, 하나의 기법의 적용보다는 침전지, 식생수로, 습지 등과 같은 방법과 연계 적용함으로써 효율을 향상시킬 수 있을 것이다. 따라서 수역의 부영양화와 녹조현상의 원인이 되는 질소와 인과 같은 영양물질의 이용효율이 높고 성장속도가 빠른 사상성부착조류를 이용하는 기술의 개발과 적용을 통해 농촌지역의 수질오염을 방지하여 지속가능한 농업생산의 기반조성이 필요하다. 농지배수, 농업용 저수지 유입수로, 소하천에서의 영양물질 제거를 위한 부착조류시스템의 이용은 자연정화의 또 다른 대안으로서 이용이 가능하다. 자연계의 생물이용기술은 기후적 제약, 수확물의 처리와 같은 제반 문제점이 따르고 있으나, 부착조류를 이용하는 기술은 이러한 한계점을 극복하기가 어렵지 않고, 적절한 조건에 적용될 경우 물리화학적 처리의 한계점을 보완함은 물론 균형적인 자연의 순환 고리를 지속시킬 수 있는 장점을 가지고 있다.

제 3 절 연구목표 및 내용

1. 연구개발 목표와 내용

본 연구에서는 사상성부착조류를 이용한 생태공학적 수질개선 기법개발을 위하여 이용 가능한 사상성부착조류를 선정하고 이들의 시스템화와 최적성장을 유도할 수 있는 부착매질, 유속 및 다양한 환경조건에 따른 성장특성과 영양염 흡수능력을 파악하고, 오염물질의 농도와 부하량에 따른 제거효율을 실내, pilot 및 현장수준에서 검토하였다. 또한 사상성부착조류의 이용시 중요한 조작 및 관리적 요인들이 될 수 있는 인자들의 특성을 파악하고 제시하였으며, 향후 사상성부착조류와 연계하여 적용할 수 있는 관련된 생태공학적 시스템을 제안하였다.

본 연구의 목적을 달성하기 위하여 다음과 같은 연구목표와 내용을 수행하였다.

가. 사상성부착조류 수로시스템 분석 및 이용기술 개발

1) 실내 순환수로 실험

(가) 순환수로의 제작 설치 (2조)

- 투명 염화비닐판 순환수로 제작(30cm 폭 x 300cm 길이 x 50cm 높이)
- 유입부와 유출부에 수위조절판 설치
- 1m 간격으로 부착조류 매질을 물 흐름(水流)에 직각되게 설치
- 다양한 부착매질 포함: 자갈, 플라스틱 재질의 망, 스테인레스망, 자연성 식물섬유망, 타일
- 매질 공극의 크기를 다양하게 조절 (자갈: 1~5cm, 망목: 5, 10, 20mm)
- 수심(5, 10, 20cm, 그 이상 경우도 고려)과 유속(5, 10, 20cm/sec) 조절

(나) 배양 조건의 확립

- 질소와 인 농도를 농지배수 농도와 유사하도록 인공배양액을 조성하여 수로 내에 연속순환

- 광조건은 식물재배용 형광등(조도 약 2000 Lux)를 이용

(다) 부착조류의 성장과 영양염 제거 효과 측정

- 사상성 부착조류가 각 매질 또는 어느 한 매질에 완전히 성장한 후 노쇠 하여 떨어질 때까지 측정
- 각 매질, 수심, 유속의 차이에 대한 차별적인 부착조류 성장측정
- 부착조류의 Chl.a 량 및 건중량 측정
- 순생산량, 성장속도, 조체(藻體)내 인과 질소함량 측정
- 순환수로 내 질소와 인의 농도변화 측정

2) 야외 Pilot 수로 실험

(가) 야외 Pilot 수로 설치 (3조)

- 아크릴 재질 Pilot수로 제작 (30cm 폭 x 50cm 깊이 x 8m 길이)
- 농지배수와 영양염의 농도가 비슷한 하수처리수를 이용
- Pilot 수로를 하수처리장 방류구에 설치
- 총 3조 수로에 control 1조와 처리수로(반복) 2조에 대해 동일 분배조의 하수처리수 이용
- 1m 간격으로 철망을 수류에 직각되게 설치 (5mm, 10mm, 20mm 망목 중 1개 선정, 순환수로 실험결과에 따라 가장 좋은 매질을 선택하여 집중 분석)
- 수로 내 수심 및 유속은 순환수로 실험의 결과에 따라 조절

(나) 농수로 또는 농촌소하천 하상에서 채취한 사상성 부착조류를 고르게 현탁하여 각 수로의 선두부에 고르게 수회 접종

(다) 부착조류의 성장과 영양염 제거 효과 측정

- 사상성 부착조류가 각 매질 또는 어느 한 매질에 완전히 성장한 후 노쇠하여 떨어질 때까지 수일 간격으로 각 수심, 매질 및 유속조건에서 측정
- 부착조류 성장측정

- 부착조류의 Chl.a 량 및 건중량 측정
- 순생산량, 성장속도, 조체(藻體) 내 인과 질소함량 측정
- 수로 유입수와 유출수의 질소(총질소, 질산, 아질산, 암모니아)와 인(총인, 무기인)의 농도변화 측정

(라) 최적 적용 사상조류 선발

- 여러 지역의 농업 배수에서 생육과 영양염 흡수능력이 높은 사상조류 채취
- 분리 배양하여 각 수질 조건에 대한 적용 가능한 다양한 조류종 확보

(마) 실내 및 야외 Pilot실험을 통한 부착조류시스템 설계인자 도출

(바) 수질 특성, 유속, 매질에 따라 활용 가능한 사상조류의 적용기법 개발

나. 사상성부착조류 수로시스템의 현장실험을 통한 적용성 및 처리효율 평가 분석

1) 현장 농배수로 실험 설계

- Pilot 인공수로와 비슷한 규모의 Lining된 배수로 선정
- 대상지역: 충청남도 아산시 신정호 부근 (Bio-Park 내 수로 이용)
- 길이 20m 정도를 선정하여 1 혹은 2m 간격으로 망목의 크기가 20mm인 스테인레스와 자연섬유망을 설치
- 현장 근처에서 채집된 부착조류의 접종

2) 부착조류의 성장과 영양염 제거 효과 측정

- 부착조류의 Chl.a 량 및 건중량 측정
- 순생산량, 성장속도, 조체(藻體) 내 인과 질소함량 측정
- 수로 유입수와 유출수의 질소(총질소, 질산, 아질산, 암모니아)와 인(총인, 무기인)의 농도변화 측정
- 부하량에 따른 영양염 제거율 측정

3) 현장실험을 통한 부착조류 수로시스템 설계인자 도출

- 홍수기에 시설물이 유지되도록 내구성 고려
- 농배수로의 통배수 기능을 유지하도록 설계
- 상기한 조건에서의 적절한 처리조건의 모색

4) 농배수로에 활용 가능한 사상조류의 적용 기법 개발

5) 생태공학적 자연정화방법에 의한 수질개선 사례연구

6) 농배수로에 적용가능한 자연정화방법 및 효율 비교분석

다. 사상성 부착조류 시스템에 의한 수질개선기법의 현장 적용기술 개발

2. 연차별 연구개발 목표와 내용

각 연차별 구체적인 연구 개발 목표과 내용은 표 1.1과 같다.

【표 1.1】 연차별 연구개발 목표와 내용

구분	연구개발목표	연구개발 내용 및 범위
1 차 년 도	<ul style="list-style-type: none"> ○ 농촌유역 수질관리 관련 자료수집 ○ 부착조류 관련 자료수집 ○ 실험 및 분석체계 구축 ○ 순환수로 시작품 제작 ○ 순환수로 내 부착조류 생육범위 및 영향조건 분석 ○ Pilot 수로 시스템 설치 ○ Pilot 수로 내 부착조류 성장 및 영양 제거효과 분석 ○ 농배수로에 적합한 사상성 부착조류 선발 ○ 적용가능한 부착조류의 분리 배양 	<ul style="list-style-type: none"> ○ 비점원오염원 농지배수 관리 관련 국내외 문헌수집 ○ 사상성 부착조류의 성장, 영양염류 흡수/제거 관련 국내외 문헌수집 ○ 수질 및 부착조류 관련 실험설계 및 분석방법 구축 ○ 실내 순환수로 설계인자 검토 및 시작품 제작 ○ 순환수로 내 매질, 수심, 유속에 따른 사상성 부착조류 성장여건 및 생산량 측정 ○ 순환수로 조체(藻體)내 질소 및 인 함량 분석 ○ Pilot 인공수로 설계인자 검토, 제작, 설치 ○ Pilot수로 내 각 처리수로에서의 사상성 부착조류 성장여건 및 생산량 측정 ○ Pilot 수로 내 매질, 수심, 유속에 따른 질소, 인 제거율의 변화분석 ○ Pilot 수로 내 최적 성장 부착조류 동정 ○ 농배수로 내 사상성 부착조류 채집 및 동정 ○ 부착조류의 분리 배양

【표 1.1. 계속】

구분	연구개발목표	연구개발 내용 및 범위
2 차 년 도	<ul style="list-style-type: none"> ○순환수로 내 부착조류 생육범위 및 영향조건 분석 ○Pilot 수로 내 부착조류 성장 및 영양염 제거효과 분석 	<ul style="list-style-type: none"> ◦ 순환수로 내 매질, 수심, 유속에 따른 사상성 부착조류 성장여건 및 생산량측정 ◦ 조체(藻體)내 질소 및 인 함량분석 ◦ Pilot수로 내 매질, 수심, 유속에 따른 사상성 부착조류 성장여건 및 생산량측정 ◦ Pilot 수로 내 부착조류 성장에 따른 질소, 인 제거율 변화분석
	<ul style="list-style-type: none"> ○현장 농배수로 장소선정 및 실험 조건 setup ○현장 농배수로 내 조류 및 수질분석 ○부착조류 수로시스템 설계인자 및 운영방안 제시 ○농배수로에 적합한 사상성 부착조류선발 ○적용가능한 부착조류의 분리 배양 	<ul style="list-style-type: none"> ◦ Pilot 수로 내 매질, 수심, 유속에 따른 질소, 인 제거율 변화분석 ◦ Pilot 수로 내 최적 성장 부착조류동정 ◦ 현장 농배수로 선정 및 실험조건 setup ◦ 농배수로 내 부착조류의 성장 및 생산량측정 ◦ 농배수로 유입, 유출수에 대한 이화학적 환경 요인 및 영양염류분석 ◦ 농지배수로 유출수 내 질소와 인의 비율측정 ◦ 농지배수로 내 질소와 인 부하량에 따른 제거율분석 ◦ 질소와 인 부하량에 따른 제거율분석 ◦ 부착조류의 분리배양

【표 1.1 계속】

구분	연구개발목표	연구개발 내용 및 범위
3 차 년 도	<ul style="list-style-type: none"> ○농지배수 현장수로 내 조류성장 및 수질개선 효과 분석 ○사상성 부착조류 수로시스템 이용기법 완료 ○최적 부착조류 수로시스템 설계인자 및 운영방안 제시 ○생태공학적 자연정화방안 사례연구 ○자연정화방법의 효율 비교분석 	<ul style="list-style-type: none"> ◦농배수로 내 부착조류의 성장 및 생산량 측정 ◦농배수로 유입, 유출수에 대한 이화학적 환경요인 및 영양염류 분석 ◦농배수로 유출수 내 질소와 인의 비율 측정 ◦농배수로 내 질소와 인 부하량에 따른 제거율 분석 ◦부착조류 수로시스템 설계인자 도출 ◦메질의 내구성 및 유지관리 방안 제시 ◦농배수로 통배수 기능의 유지방안 제시 ◦부착조류 시스템 처리공정 선별 및 처리효율 평가 분석 ◦부착조류 시스템 내 수확물 처리 및 재활용방안 제시 ◦사상성 부착조류 수로시스템 적용 및 운영방안 제시 ◦사상성 부착조류 수로시스템 경제성 분석 ◦생태공학적 자연정화방안 사례연구 ◦자연정화방법의 효율 비교분석

제 4 절 기대효과

1. 기술적 측면

가. 사상성부착조류 자연정화시스템 이용기법 개발

- 농배수로 및 소하천에 적용가능한 자연정화방법의 개발
- 농지배출부하량 저감으로 인한 수계의 수질오염 방지
- 농촌유역에 적합한 저기술, 고효율형 자연정화기법의 적용
- 부착조류 적용방안 및 설계인자 제시
- 농촌지역의 비점오염원 관리방안 제시
- 농업용수 수질개선을 위한 중요한 기초자료 제공

나. 농업용수 수질개선을 통한 농업생산성 증대 및 하류 수질오염 저감 기대

다. 기타 생태공학적 수질정화 방법과 연계가능성 모색

2. 경제·산업적 측면

가. 저비용 및 유지관리가 용이한 부착조류 수질개선 시스템 개발

- 농업용수의 자연적 정화로 처리비용의 절감 기대
- 2차적인 오염유발 저감 및 처리의 저비용 고효율 기대

나. 기질조작이 간편하고 생육조절이 용이한 기술개발

다. 농업용수 수질개선에 대한 인식 제고를 통해 농업생산의 기반구축에 기여

라. 오염도가 높은 일반 소하천에 적용가능하며 높은 처리효과 기대

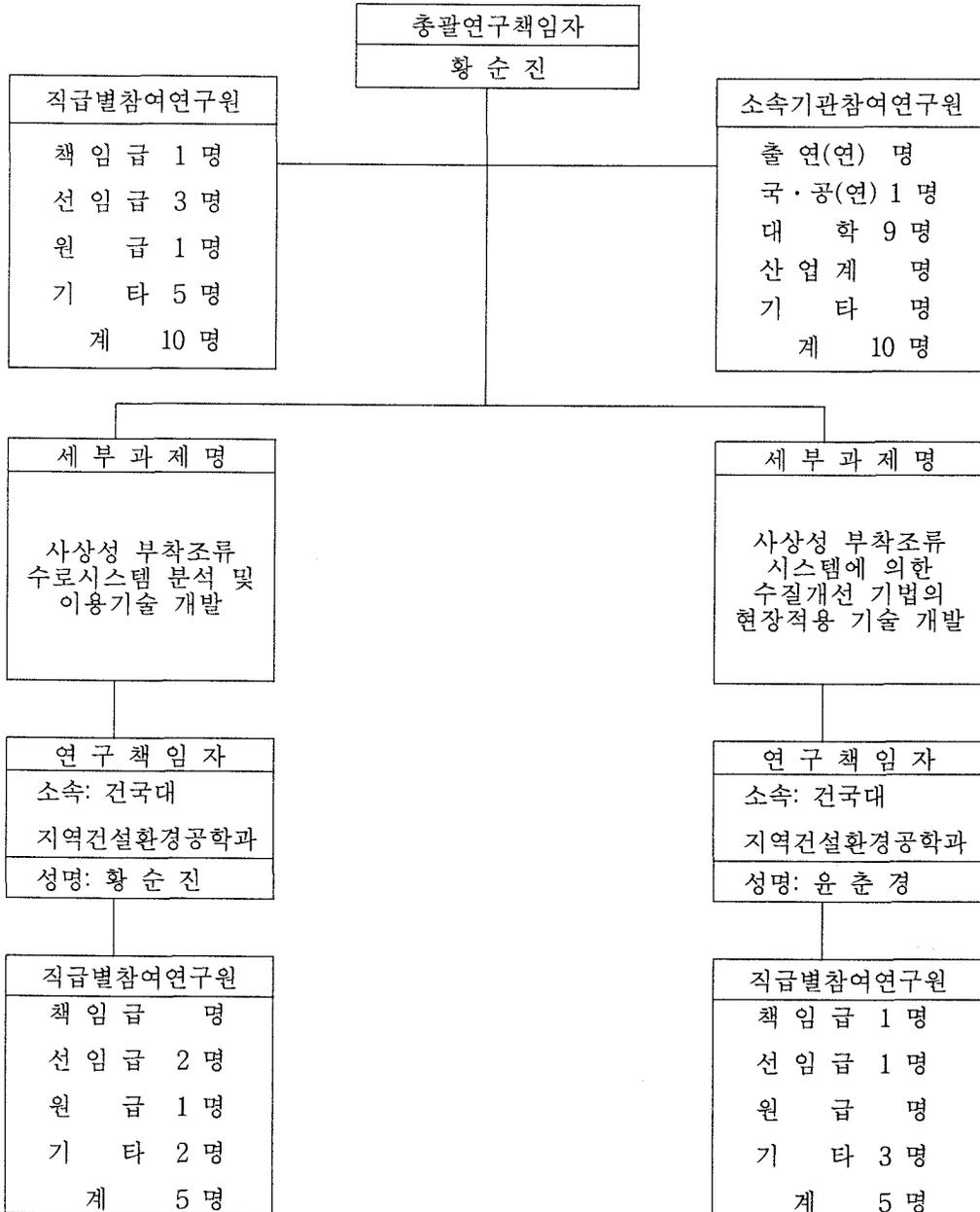
마. 수로시스템에서 발생하는 부착조류를 가축사료나 비료로 활용

제 5 절 활용방안

1. 부착조류를 이용한 생태공학적 수질개선 기법의 적용 및 운영에 대한 매뉴얼 활용
2. 농업용수 수질보전을 위한 유역의 비점오염원 관리기법으로 활용
3. 농업환경정책 수립 및 운영의 정책자료로 활용
4. 효과적인 농업용수 관리 및 수질개선 대책수립의 기초자료로 활용
5. 공학적 수처리 방법의 대안으로 활용
6. 기존의 생태공학적 수처리 및 자연정화방법의 대체기술로 활용

제 6 절 연구진의 구성

1. 연구원의 구성



2. 주요 업무 내용

세부과제명 (담당연구내용)	성명	소속기관 및 부서	직위	연구 참여 직급	전 공 및 학 위				참여율 (%)
					학위	년도	전 공	학 교	
(사상성 부착조류 수로시스템 분석 및 이용기술 개발)	황순진	건국대 농공학과	조교수	선임	박사	1995	육수 생태학	Kent 주립대	20
	이정호	대구대 과학교육학부	전임강사	선임	박사	1993	조류학	경북대	20
	김호섭	건국대 농공학과	박사과정	연구원	석사	1998	육수 생태학	강원대	30
	박구성	건국대 농공학과	석사과정	보조원	학사	1999	농공학	건국대	40
	이우향	건국대 농공학과	학부과정	보조원	학사	2001	농공학	건국대	30
(사상성 부착조류 시스템에 의한 수질개선 기법의 현장적용 기술 개발)	윤춘경	건국대 농공학과	부교수	책임	박사	1994	환경 공학	릿거스대	10
	공동수	국립환경 연구원	연구원	선임	박사	1993	육수 생태학	고려대	10
	최광현	건국대 농공학과	석사과정	보조원	학사	1999	농공학	건국대	35
	박정환	건국대 농공학과	학부과정	보조원	학사	2001	농공학	건국대	30
	유영선	건국대 농공학과	학부과정	보조원	학사	2001	농공학	건국대	30

제 2 장

농촌환경문제와 생태공학적 복원

여 백

제 2 장 농촌환경 문제와 생태공학적 복원

제 1 절 농촌지역의 특성

1. 농촌지역의 일반적 현황

농촌지역의 인구는 1960년대 총 인구의 50%이상인 1,500만 명에서 2001년에 8.3% 수준인 390만 명으로 감소하였으며 최근에도 지속적인 감소세로 특히, 농림업에 종사하고 있는 인구수는 170여만 명에 지나지 않는다. 농촌지역은 도시에 비해 인구밀도가 낮고, 선진국 대비 농외소득 또한 낮은 상태이다. 지역적인 특성에 따라 토지이용 비율이 다르게 나타나고 있으나, 전국적으로 농경지의 면적이 감소하고 있는 반면 축산농가와 토지이용에 대한 규제완화로 인해 농촌에 골프장을 포함한 체육용지, 공원, 유원지 등의 면적비율이 지속적으로 증가하고 있으며 공장이나 물류형창고시설이 급증하고 있어 농촌지역의 환경문제에 있어 주요한 원인이 되고 있다.

2. 농촌지역 주요 오염원과 오염물질

농촌지역에서의 오염원은 일반적으로 배출형태에 따라 점원, 비점원으로 구분하고 있으며 오수는 생활하수, 산업폐수, 축산폐수, 농경지 유출수 등으로 구분하고 있다.

농촌지역에서 발생하는 생활하수는 도시에 비해 발생량이 상대적으로 적고 특정시간에 집중되어 배출되는 특성을 가지고 있으며, 주요 오염물질로는 BOD, TN, TP, 부유물질 등이 있다. 아직까지는 농촌지역의 하수관거 보급률이 현저히 낮기 때문에 농촌지역의 생활환경 개선 뿐 아니라 하천수질 관리를 위해 하수종말처리장 건설이나 위락시설, 식당 등에 대한 오수처리시설의 설치와 유지관리 강화는 적극적으로 확대되어야 한다.

산업시설에 의한 폐수관리는 시설들이 농촌지역에 산재해 있는 경우가 많아 관리가 어렵고 불법방류가 쉽게 이뤄지고 있는 실태이다.

축산업이 대규모화됨에 따라 축산폐수 문제가 새롭게 환경문제로 대두되고 있다. 축산농가가 밀집한 지역을 지나면서 하천에 암모니아성 질소농도와 인산염, BOD농도가 급격

히 상승하고 강우 시에는 축산관련지점의 오염물질농도가 높지만 비강우 시에는 지속적인 생활하수의 배출로 비축산관련 지점에서 높게 나타난다. 축산폐수의 오염물질 농도는 축사의 관리에 따라 배출량 및 배출수 내에서 크게 변하기 때문에 체계적인 관리를 요하며, 퇴비·액비화 하여 비료로 사용하거나 또는 정화처리 등의 방법을 이용하여 처리하는 것이 필요하다. 또한 축분퇴비를 임시로 두었을 경우 강우시 높은 농도의 폐액이 발생하므로 관리도 중요하다. 현재 축산분뇨의 처리를 위해 퇴비화한 후 농지로 환원하는 것을 권장하고 있고 실제 대다수의 축산농가에서 퇴비화방법을 택하고 있으나, 아직까지 우리나라에서는 축분퇴비의 시용기준이 작물의 시비기분과 관련되어 설정되어 있고, 축분퇴비 살포농지로부터 오염물질의 유출부하량과 관련된 기준이나 연구가 극히 미비하여 적절한 퇴비사용 및 사후관리가 어려운 실정이다.

비점오염원은 오염물질이 강우시 유출수와 함께 불특정하게 배출되는 장소 또는 지역을 의미하며 주로 토지이용형태와 밀접한 관계를 가지고 있다. 농촌지역에서의 비점오염원으로는 농지, 도로, 산지, 대기오염물질 강하 등을 포함할 수 있으며, 배출량 및 오염물질의 농도변화가 매우 크고 점오염원과 달리 처리를 통한 관리가 거의 불가능하기 때문에 사전에 오염물질의 거동을 최소화하는 것이 중요하다. 농촌지역 비점오염원에서 발생하는 오염물질의 종류와 농도는 오염원의 종류, 관리 등에 의해 크게 변하며 오염생물로는 농약류와 퇴비에 포함되어 있는 대장균 등이 있다. 비점오염원으로부터의 오염물질의 유출은 강우 사상과 밀접한 관련이 있기 때문에 밭이나 과수원 등의 농지에서는 강우 시에만 유출되고, 논에서는 관개기간 동안에 배출되며 비담수 기간, 비생육기간에는 오염물질의 배출이 없다는 특징이 있다

3. 농촌지역의 토지이용 특성과 하천 수질과의 관계

농촌지역 토지이용 특성은 배출되는 오염물질의 종류와 부하특성과 관계가 있는 것으로 나타나고 있다. DO, BOD, COD, SS, 인산염, 질소화합물 및 중금속은 토지이용과 상관성이 없으나 경도, 염소, NH₄-N, 산도, 철, 온도는 주거 및 시가지 면적 비율과 상관있고 밭 면적이 증가할수록 인산염농도가 증가하는 것으로 보고 되고 있다.

우리나라 경지면적은 2001년 약 188만ha이고 논은 61%정도인 약 115만 ha로 농촌지역에서 일반적으로 산지를 제외하고 가장 높은 비율을 차지하고 있다. 논으로부터의 오염물

질 유출부하량과 농도는 시기별로 큰 차이가 있으며, 농촌지역 수질관리에 있어 중요한 요인으로 고려되고 있다(표 2.1). 1년간의 화학비료, 관개수 중의 유입량, 대기 강하량 등의 총 유입량과 수확물, 침투 및 유출수 중의 총유출량을 고려할 때 단위면적당 부하량이 많은 것이 특징이다.

【표 2.1】 시기별 논에서의 유출수 중 총질소와 총인의 농도 범위 (단위:mg/ℓ)

시기별 구분	총질소	총인
영농기(5-8월)	6.0-20.0	0.2-0.3
강우기(6-7월)	7.0-12.0	0.2-0.25
휴경기(10-3월)	3.5-5.0	0.15-0.20
경운기(3-4월)	4.0-6.0	0.18-0.22

출처: 농림부 농업기반공사, 2002. 농업용수 수질오염이 벼 생육에 미치는 영향연구(1)

밭은 논에 비해 단위면적 당 시비량이 높은 편이라 유출수가 발생하면 토사와 함께 높은 농도의 영양염류가 배출된다. 멀칭재배로 인해 유출량이 감소하면 영양염류 및 부유물질 배출량이 감소하며 발작물 재배면적이 적으면 오염물질 배출량의 기여도가 낮고 많으면 유출수와 토양유실 방지를 위해 각종 관리방안이 요구된다.

산지에서 오염물질 배출량은 적고 인위적이 행위가 없을 경우 배출부하는 자연부하로 인식되고 있지만 산지를 농지 또는 목장 등으로 사용하면 오염물질 배출량이 급격히 증가하게 된다.

농촌지역에서의 유출율은 도시지역에 비해 상대적으로 낮는데 유출은 주로 도로 등에서 일어나고 밭이나 과수원 등에서는 일어나지 않으나 강우 시에는 사상이 종료되고 나서도 도시지역에 비해 유출이 상대적으로 오래 동안 지속된다. 도로나 주거지역은 포장된 불투수성 지표면이므로 강우 시 유출률이 높으며 주거지역에서 하수가 처리되지 않고 하천으로 유입되고 있으며, 주거지역에 축산농가가 있으면 강우 시 유출수에 의해 오염물질이 인접한 지역으로 흘러 들어가게 된다.

제 2 절 농촌환경정비 및 복원의 중요성

1. 농촌환경정비의 필요성

1960~70년대 이후로 식량증산시기와 고도경제성장기 동안에는 농업의 생산성이 강하게 요구되었으며, 기반정비에 있어서는 기존의 환경과의 조화에 대한 충분한 배려없이 정비가 선행되어 농촌환경을 구성하는 각 요소들간의 균형이 파괴되고 생태계가 교란되는 결과를 낳았다. 농촌환경은 다양하고 아름다운 경관과 생태계가 존재하고 있으며, 이들의 특징을 충분히 살림과 동시에 지역의 특성을 바탕으로 한 농촌환경을 적극적으로 보존, 창출하기 위한 환경정비가 요구되고 있다.

농촌(산림 포함)의 다면적기능과 역할은 주민들의 생활과 생산활동에 의하여 실현되므로 농촌에 있어서 안정적인 생산활동과 거주를 보장하는 사회적 조건의 정비가 필요하다. 농촌의 과소화와 과도한 개발이 진행되는 현재의 상황은 지구환경의 보전관점에서 볼 때 큰 손해이므로 환경보전을 위한 정비와 거주민의 생활의 질을 제고하기 위한 정책이 지원되어야 한다. 앞으로 건강한 생태계와 아름다운 경관으로서 농촌의 기능이 증가됨과 함께 많은 이용이 기대되므로 농촌공간의 종합적 계획에 의한 환경의 정비는 시급한 사안이다. 자원순환의존형 생태계인 농촌생태계가 가지는 자연적·경관적 기능을 최대한 살리기 위해서는 정비의 기술과 방법적 측면에서 자연과의 조화를 바탕으로 하는 생태공학의 원칙과 전략이 적용되는 것이 가장 바람직할 것이다.

2. 농촌환경 정비의 방향

자연생태계로서의 농촌환경은 근래에 들어 도시적 생활관습과 소비형태의 확산으로 커다란 환경적 피해를 받고 있다. 그 문제점들을 ① 도시형 생활폐탄의 도입으로 에너지와 물질의 대량소비, ② 생산활동과 생활에서 생산된 막대한 양의 폐기물과 오염물질이 버려진 결과 자원의존형 사회의 붕괴, ③ 축산폐기물, 농약, 화학비료, 생활쓰레기, 오폐수, 폐비닐 등 환경오염물질들로 인한 수질오염, 토양오염 등 환경오염의 만연, ④ 환경오염으로 인한 농촌생태계의 환경용량과 자정능력의 저하 등으로 요약될 수 있다. 따라서 농촌환경 정비의 중요한 역할은 이와 같은 기본적인 할 수 있는 문제의 해결에 공헌하는 것

이다. 생태공학적 의미에서의 농촌환경 정비는 환경정비와 경관의 정비, 창출을 모두 포함한다. 앞으로의 농촌환경정비는 건전한 농업과 농촌의 창출에 공헌해야하며, 그러기 위해서는 다음과 같은 사항들이 중요하게 고려되어야 한다(농어촌환경기술연구소, 2000).

- 농촌환경의 개별기능성이나 효율성을 특성화하지 않아야 한다. 농촌지역에 부존하는 풍부한 생태계와 아름다운 경관을 배려한 정비가 필요하다.

- 농촌환경을 종합적으로 이해해야 한다. 농촌지역은 생산과 생활의 기능이 합쳐진 지역으로, 생산기반과 생활환경을 일체적으로 정비하는 것이 필요하다.

- 시설의 설계나 도입에 있어 규격화와 획일화를 피해야 한다. 쾌적한 환경만들기에 있어 지역경관의 기반으로 되어 있는 농업용수, 농업시설 등을 활용한 정비나 지역에서 생산되는 소재를 이용하는 정비가 필요하다.

- 계획수립시 주민의 참가를 통한 계획과 이용의 효율화를 도모해야 한다. 농촌지역은 지역적으로 여러 가지 상황이 다르고 특성이 있고, 또한 지역특성을 가장 잘 이해하는 사람들이 거주민이다. 따라서 지역정비를 효율적으로 수행하기 위해서는 주민이 계획과 정비과정에 참여하여야 한다.

농촌환경정비는 농업생태계를 포함한 지역특성을 충분히 이해한 후 현지기술의 활용이나 기술자의 창의적 연구를 살리면서 자연과의 공생이라는 생태공학적 원리에 입각하여 추진해 나가는 것이 필요하다. 앞으로 농촌환경정비는 가치관, 이념, 계획과정, 환경보전 기술이라고 하는 측면에서 종래의 기반정비와는 상당히 다르다는 것을 인식할 필요가 있다. 그러나 농촌환경정비는 농업본연의 목적과 무관하게 추진할 수 없으므로 생산기반정비와 관계없다고 볼 수 없다. 농촌환경정비가 개개의 물적 환경정비에서 '친환경적, 경관적 측면을 포함하는 아름다운 농촌만들기'를 실현하는 시책으로서 중요성을 부여하여 앞으로 생산기반정비에서도 환경과의 조화가 더욱 요구될 것이다.

자연생태계의 중요한 부분으로서 자원순환형 사회를 목표로 한 농촌생태계의 환경정비와 경관의 창출은 그 접근방법에 있어 생태공학의 원리와 기술을 매우 중요하게 고려하여야 함은 당연하다. 이러한 측면에서 생태공학은 환경 및 토목공학 분야의 이론적, 기술적 부분에 공헌할 수 있으며 건전한 농촌환경정비를 위한 상호보완적 기능을 담당한다고 보겠다. <표 2.2>은 농촌환경의 정비를 위한 각 관점에서 고려되는 생태공학적 기술과 내용을 정리하였다.

【표 2.2】 농촌환경정비의 관점과 생태공학적 내용

관 점	지역단위 내용	지구단위 내용	생태공학적 기술과 내용
생태학적 측면 (경관계)	<ul style="list-style-type: none"> • 생태학적 잠재력 • 자연조건의 배열 • 경관의 창출 • 토지이용의 배분 • 지역(zone)의 설정과 위치 	<ul style="list-style-type: none"> • 구성요소의 배치 • 구성요소들간 상호작용 • 네트워크화 • 식생배치유형, 평가 	<ul style="list-style-type: none"> • Biotope • 수변의 생물공간화 (구조, 소재, 수질개선) • 농용림의 보전, 관리 • 농경지주변 식생관리 • 친환경적 하천정비
생태학적 측면 (물질순환계)	<ul style="list-style-type: none"> • 수계이용 • 토지이용 • 생물이용 	<ul style="list-style-type: none"> • 마을 용배수정비 • 환경관리용수개선 • 저수지 관리 및 수질개선 	<ul style="list-style-type: none"> • 농경지에 의한 수질정화 • 지형연쇄를 이용한 수질정화 (바이오툼, 수변지역, 산화지, 산화수로 등) • 습지, 저류지를 이용한 하천, 호소 수질개선 • 어패류 등의 생물을 이용한 수질정화
쾌적성 측면	<ul style="list-style-type: none"> • 행동권 • 토지이용 • 환경개선 	<ul style="list-style-type: none"> • 일상행동권과 공간구성 • 자연환경의 이용 	<ul style="list-style-type: none"> • 수변의 친수공간화 (구조, 수질개선) • 농용림의 휴식공간화 (구조, 식생관리)

출처 : 황순진, 2002. 생태공학의 이해와 전망(II)

3. 농촌환경 창조와 관리의 전망

농촌환경정비의 목표는 생산기능을 충분히 유지하며 그 중에서 환경보전기능이나 경관, 친수의 기능을 배려하면서 또한 농촌공간의 자연생태계를 보전해 나가는 것이다. 예를 들면, 수질개선사업은 농촌이 가지고 있는 자연정화기능을 충분히 활용하되 단순히 오수의 처리만으로 끝나는 것이 아니라, 자원과 에너지의 순환이라는 관점에서 설계 및 시행되어야 하고 그 과정에서 경관적인 배려도 충분히 되어야 한다. 또한 농촌에는 농업수리관련의 다양한 용배수 시설이 존재하지만 그 기능의 유지, 향상과 함께 수질보전기능이나 친수기능, 또한 자연생태계의 보전과 경관이 배려된 정비가 필요하다. 자연정화기능과 물질순환이라는 농촌생태계의 가장 큰 특징을 최대한 활용하여 환경을 개선하기 위해서는 농촌생태계의 구조와 기능에 대한 충분한 이해가 선행되어야 한다. 또한 농촌환경의 건전한 영속성을 보존하기 위해서는 다양한 인간활동에 의해 농촌지역의 물, 토양, 물질 및 에너지의 동태가 어떻게 변화하는지를 이해하여야 한다. 궁극적으로 도시생태계의 부양과 보완기능으로서의 농촌생태계에 대한 환경친화적 정비에 이론적, 기술적 전략으로서 생태공학의 활용이 필요할 것이다.

제 3 절 농촌의 수자원 및 수질오염

1. 수자원이용현황

우리나라는 연평균 강수량이 1,274mm로 세계 평균 970mm의 약 1.3배로 총량적으로는 풍부한 편이나 인구 1인당 강수량은 연간 2,900m³로 세계 평균 26,800m³의 약 11%에 불과한 수자원빈국에 포함되고 있다. 일반적으로 1인당 가용수자원량이 1,700m³이하면 물부족국가로, 1,000m³이하가 되면 물 기근국가로 분류되고 있는데, 우리나라는 1인당 가용수자원량이 1995년에 1,650m³로 물 부족국가에 포함되어 있으며, 2025년에 1,215m³ 그리고 2050년에는 1,170m³으로 지속적으로 감소할 것으로 예측됨에 따라 물부족현상은 더욱 심화될 전망이다.

농촌지역의 수자원 수요량은 총 수자원 이용량 301억m³/년의 약 50%에 해당하는 149억m³/년으로 가용수자원 중에서 차지하는 비중이 매우 크다. 전국농업용수 수요는 2011년 162억m³으로 추정되고 있으며 이와 같은 수요의 증가는 논 용배수로 분리, 수리답 및 발판개 증가, 이앙재배에서 직파 재배, 온실재배에 의한 사계절 용수공급 등 새로운 영농방식에 기인하고 있다(표 2.3). 특히 단기간에 많은 양의 용수를 필요로 하고 있는 벼농사에는 강우를 최대한 이용하고 있으며 부족분만 취수하여 사용하고 있고 작물의 증발산량과 지하수로 유입되는 손실량을 제외하고는 대부분 배수로를 통하여 하천으로 환원되고 용수계통 단위 및 하천 상·하류 수계단위에서 반복 이용되고 있다. 농촌지역의 수자원이용에 따른 변화의 또 다른 요인은 영농방식의 변화로 물소비가 적은 이앙재배로부터, 농촌인구의 노령화와 농업인구의 감소로 인하여 건답 직파와 답수직파 재배면적이 확대되고 있으며, 건답직파는 이앙재배보다 10%, 답수직파는 이앙재배보다 30%정도 물 수요량이 많은 영농재배 방법인데 1997년 이후 건답·답수직파 재배면적은 매우 빠른 속도로 증가하고 있는 추세이다. 2011년에는 직파재배에 의한 영농방식의 변화로 농업용수 순 증가량은 약 9억m³정도가 될 것으로 예상하고 있다. 또한 근년에 들어와서 기존의 저수지를 보강하거나 신규로 설치할 때, 하천수질 및 기존하천 생태계에 미치는 영향을 고려하여 유효저수량에 하천유지용수를 추가하여 반영하고 있으므로 앞으로 농촌용수 수요는 이보다 더 늘어나게 될 것이다. 또한, 농촌지역의 농지가 인위적인 용수공급인 관개에 대부분을 의존하고 있어 용수수요분야별 용수확보를 위한 경쟁이 치열해지고 용수부족 현상이 이

미 시작되었고(김, 2003) 가까운 장래에 물을 확보하기 위한 수리권분쟁과 더불어 오염총량제 실시에 따른 공유수면에 대한 지자체간의 개발과 보전에 대한 분쟁 또한 치열해 질 것으로 예측된다.

【표 2.3】 농촌용수 수요량 및 공급계획 현황

구분	1997년	2001년	2006년	2011~2020년
계	15,809 (23,717)	15,875 (23,277)	15,986 (23,229)	16,193 (23,797)
논	13,006	13,272	13,620	13,967
수리답	10,553	11,584	12,491	13,053
수리불안전답	2,453	1,688	1,129	914
밭	2,572	2,669	2,790	2,930
관개선	94	251	447	644
비관개선	2,478	2,418	2,343	2,286
축산용수	231	241	259	274
양축용수	200	209	226	240
가공용수	31	32	33	34
수요절감량	-	307	683	978
수로구조물화	-	300	600	800
자동물관리시스템	-	7	83	178
1996년	-	15,027	15,226	15,150
수자원장기계획	-			
증감	-	848	760	1,043

출처: 농림부농어촌진흥공사, 1999. 농촌용수수요량 조사 보고서.

- (1) 제주도를 포함한 전국
- (2) 농촌용수의 ()의 수치는 강수량에서 직접이용되는 유효우량을 포함한 수요량임
- (3) 수리안전답은 이양재배와 직파재배로 구분, 관개전과 비관개전을 구분
- (4) 2011년 이후는 계획이 제시되지 않아 2011년과 동일한 수요량을 설정하였음.

2. 수리시설현황

농업용수 수리시설로는 저수지, 양수장, 배수장, 양·배수장, 보, 집수암거, 관정 및 기타시설로써 1976년도에 67,875개소로 가장 많았으며 점차 감소하다가 1996년부터 증가하

시 시작하여 2001년말 현재 주수원공은 43,121개소, 보조부속수원공은 24,461개소로 전체 시설수는 67,582개소이다(농업기반공사, 2002). 지역별로는 경상북도가 전체의 22.9%인 15,444개소로 가장 많은 수리시설을 가지고 있으며 영남권, 호남권, 충청군의 순으로 수혜 면적으로 보면 저수지가 61.9%로 가장 많은 비중을 차지한다.

3. 수질오염 현황

농촌지역의 생활수준의 향상과 더불어 농업용수 뿐 만 아니라 생활용수 및 공업용수 등 농업 이외의 타 목적 용수의 수요가 증가하고 있다. 농촌지역 내 필요한 수자원의 확보를 위한 개발과 더불어 환경문제와 관련된 각종 협약이 확대되고 국내외적으로 환경문제가 주요 정책과제로 대두되고 있는 가운데, 농업분야에 있어서도 농업환경보전을 증대시키고 농업으로 인한 환경오염을 경감시킬 수 있는 환경친화적인 농업이 요구되고 있다.

우리나라는 지난 30여 년 간 지속적인 고도성장을 이루는 과정에서 산업화와 도시화로 인한 대기오염물질, 수질오염물질, 폐기물 등의 각종오염원이 크게 증가하고 다량으로 오염물질을 배출함으로써 도시환경은 물론 농어촌환경까지 오염이 확산되어 오고 있는 실정이다. 과거에 수질오염은 대도시 및 공단지역의 하천에서 국지적으로 나타났던 오염현상이 이제는 본류와 지류를 막론하고 오염이 확산되어 있으며, 대기오염도 국지적으로 심화되어 있고, 각종 폐기물은 그 처리가 미흡하거나 방치와 방류로 인하여 대기, 수질 및 토양오염까지 확산되어 우리의 생활환경을 악화시키고 있다. 이렇게 악화되고 있는 도시와 공장지대의 환경오염은 농어촌의 환경에도 점점 확산되어 농촌 용수의 수질오염, 농경지의 폐기물오염, 농촌쓰레기, 축산폐수에 의한 수질오염, 농약 및 비료에 의한 농작물 및 농경지 오염 등이 농촌 환경오염을 심화시키고 있다. 1990년 이후 농촌지역의 활성화를 위한 정주생활권 개발, 문화마을 조성, 농촌생활하수처리사업 등 생활수준의 향상을 위한 사업과 농공단지 조성, 관광휴양단지 조성 등 농업외 소득원 개발사업의 필요성이 점차 커지면서 농촌용수의 효율적인 개발과 합리적인 공급, 배분 및 관리가 주요 현안으로 대두되고 있다. 그러나, 농촌지역에서도 생활오수, 공장폐수, 축산폐수 및 분뇨 등이 적절하게 처리되지 않은 상황에서 하천으로 유입되는 사례가 있고 또한, 화학비료, 농약의 과다 사용 등으로 전국의 소하천도 수질오염에 노출되고 있는 실정이다. 소하천의 수질악화와 함께 오염원으로 부터의 침출수 등에 함유된 오염물질 때문에 농촌지역에서도 수질 측면

에서 안전하고 위생적인 생활, 농업용수의 확보가 어려운 것이 현실이다.

농촌지역에서 발생된 오염물질이 하천을 통해 호소로 유입될 때 유입량은 유역 내 오염원 현황과 강우강도와 밀접한 관련이 있다. 유역의 토양에 축적되어 있던 오염물이 강우로 침식되는 경우에는 오염도가 증가하게 되고, 용존상태의 오염물질은 강우에 의해 희석되어 농도가 낮아지거나 증가가 크지 않은 특징을 보이며, 반면에 입자상 물질은 유속에 비례하여 유출되므로 강우시에 유출량이 크게 증가하는 행태를 나타낸다. 비료의 주요 성분 중 질소와 칼륨은 물에 잘 녹는 물질이므로 용존형태로 유출이 되는 반면에 인은 용존형으로도 유출될 뿐만 아니라 토양에 흡착되어 축적되어 있다가 표토의 침식과 더불어 입자상으로 유출되므로 강우시 10배 이상 증가하는 경향을 나타내게 된다. 입자상으로 유출되는 인은 수중의 용존인과 평형을 이루며 용존무기인 농도를 지속적으로 높이는 효과를 가져오며 이것이 호수에서 조류의 왕성한 번성을 일으키는 요인이 되고 있다. 또한 우리나라 강우의 특성상 폭우시 유량도 크게 증가하므로 총 배출량이 크게 되어 호소에서는 폭우 후 조류의 대번성이 나타나는 경향이 크다. 담수호 부영양화의 주된 원인물질인 인은 질소와 달리 기체상을 갖지 않으므로 유역 내의 인이 외부로 방출되는 경로가 적고, 다만 토양에 흡착되어 영구 퇴적되는 것이 유일한 제거 기작이다. 그러나 표토에 축적되어 있는 인의 함량이 점차 높아지고 강우시 표토의 침식이 일어나면 많은 양의 인을 방출하게 되므로 인의 유출은 일정치가 않고 지역에 따른 차이가 크다. 1980년도에 230kg/ha/yr이던 비료사용량이 1996년에 450kg/ha/yr로 증가하여, 소비된 비료로부터 계산된 인의 발생은 133,000톤으로 전국 인 발생량의 56%를 차지한다(김 등, 1997). 하구언이나 방조제에 의해 막힌 담수호는 내부에 다량의 유기물 및 영양물질을 저류시키게 되므로 부영양화 현상이 나타난다.

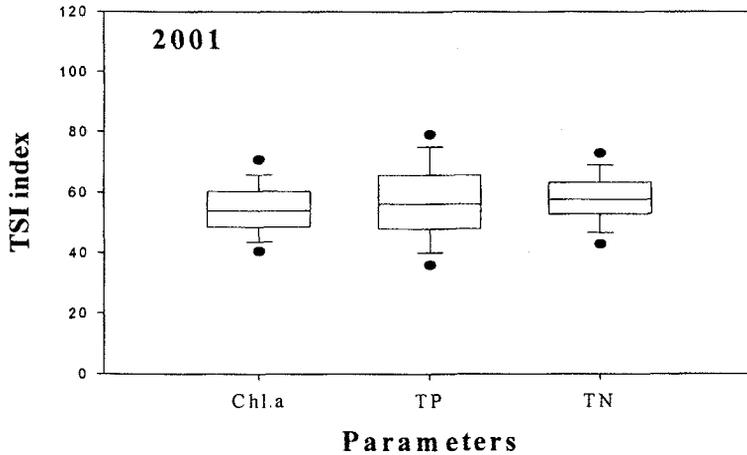
농림부와 농업기반공사에서 1990년부터 전국 64,543개소 농업용수 수리시설중 수질관리가 필요한 주요 농업용수원을 중심으로 농업용수 수질보전 및 수질개선을 위해 주요 시설들에 대해서 수질측정망을 지정하여 운영, 관리하고 있다. 전국 6만여개에 달하는 농업용수리시설은 대부분 농촌산간지역이나 계곡에 위치하고 있어 유역내 오염원에 대한 관리가 소홀할 뿐 만 아니라 시설의 노후화로 인해 농업용수원의 상당수가 오염되어 있는 실정이다. 또한 그동안 시설관리자가 구농조, 시·군, 구 농어촌진흥공사 등 여러기관에 분산되어 있어 효율적이고 체계적인 관리가 어려웠으며 정부의 음용수나 생활용수 위주의 물관리정책에 의해 상대적으로 농업용수의 수질관리는 낙후되어 있다.

환경정책기본법 제 10 조 호소수질환경기준(COD 기준)에 의해 등급을 평가한 결과 I 등급에 해당하는 시설은 없고, III등급이 전체시설의 47.7%(235개소)로 가장 많이 차지하고 있으며, 농업용수 수질기준을 상회하는 시설이 114개소(23.2%)로 충청남도에 위치한 시설이 33개소로 오염우려 시설이 가장 많은 것으로 조사되었다. Vollenweider(1968)의 총인과 총질소를 기준으로 하는 영양상태 분류법에 따르면 2002년 조사결과 수질간이 측정망 19개소를 제외한 473개 시설 중 60개소(12.7%)가 부영양상태였고, 부영양화 전 단계인 중부영양호 상태가 242개소(51.1%)로 우리나라 농업용수원의 상당수가 부영양화가 진행되고 있는 것으로 조사되었다(표 2.4). Carlson(1971)이 제안한 엽록소 a 농도를 기준으로 한 영양상태 지수에서는 2001년도 자료를 기준으로 할 때(총 609개 자료) 부영양기준인 53이상을 상회하는 경우는 325개로 측정된 자료수의 53.4%로 조사되었다(그림 2.1).

【표 2.4】 수질판정기준에 따른 등급 및 영양상태에 따른 수질현황

수질환경기준 ¹			Vollenweider ¹ (1968)			Carlson (1977) ²		
등급	시설수	%	구분	시설수	%	구분	자료수	%
I	-	0	극빈	4	0.8	극빈	0	0
II	72	14.6	빈중	21	4.3	극빈-빈	2	0.3
III	236	48.0	중	189	38.4	빈	21	3.4
IV	99	20.1	중부	212	43.1	빈-중	60	9.8
V	43	8.8	부	66	13.4	중	109	17.9
V 이상	42	8.5				중-부	92	15.1
						부	170	27.9
						부-과	121	19.9
						과	34	5.6

1. 2001년 측정시설의 평균값 이용, Vollenweider 기준 적용 시 저수지, 담수호 시설에 대해서만 평가
2. 2001년 측정지점의 평균값 이용 (엽록소 a 농도), 측정지점을 기준으로 시설수를 산정함에 따라 실제 측정 시설수(402개소) 보다 자료수가 많음(예; 부남호의 경우 부남호 1과 2로 구분하였기 때문에 측정시설은 1이지만 측정지점은 2개로 고려됨)



【그림 2.1】 영양상태 평가 (Trophic State Index, Carlson 1977)

4. 농업활동이 수질에 미치는 영향

공공수역으로 유입되는 오염물질은 크게 점오염원과 비점오염원으로 구분된다. 점오염원은 가정하수와 공장폐수 등으로 구성되며 일정한 배출특성을 나타낸다. 반면에, 비점오염원은 넓은 면적에 분포하는 오염물질로서 산림, 초지, 건설지, 농경지 등의 부하를 포함하며, 강우시 유출되기 때문에 일간, 계절간 배출량 변화가 크며 예측과 정량화가 어렵다.

유역으로부터 유입되는 영양염류의 농도와 양은 유역의 형태, 기후, 인간활동 등의 영향을 받는다. 유역에 산재되어 있는 각종오염원 중 질소와 인의 배출원은 공장, 생활계, 축산, 농지, 산림 등으로 구분할 수 있다. 특히, 유역의 여러 곳에 분포하고 있는 논, 밭, 가축사육시설 등으로 부터의 질소와 인의 유출은 비료시비와 가축분뇨로부터 발생하며, 유역에서의 토지이용이 수질에 미치는 영향은 제방이나 댐 건설로 인한 폐쇄성 수역의 경우 영양물질의 80% 이상이 비점오염원에 의한 것으로 계산되고 있다(Novotny and Chester, 1981). 최근에는 농경지에서의 비료 사용량이 증가하고 있으며 농민들이 화학비료를 선호함에 따라 수요가 줄어 유역에 그대로 방치되고 있는 실정이다. 현재까지 우리나라의 비료소비량은 계속 증가하고 있는 실정으로 연도별 단위면적당 총비료 소비량을 보면 1982년도에는 233 kg/ha/yr에서 1994년도에는 440 kg/ha/yr로 약 2배정도 증가하였다. 사료 생산량도 꾸준한 증가 추이를 보이고 있는데 1991년도에 약 1,100 만 톤에서 1996년

도에 약 1,600 만 톤으로 증가한 것으로 나타났다(심, 1998). 특히, 대규모 축산을 위해 수입되는 사료를 양이 증가하고 있으며 이로 인해 외국으로부터 들여온 사료가 우리나라의 물질순환과 재이용을 저해하고 궁극적으로는 농촌유역 수질오염에 상당히 기여하는 결과를 낳고 있다.

5. 수질오염이 농업활동에 미치는 영향

국내에서 관개용수의 수질에 따른 작물피해는 1990년대 총 49건으로 하천수나 호소수 등 지표수를 관개수로 이용하는 논 벼에 대한 피해사례가 가장 많았으며, 대부분 지하수를 취수하여 관개하는 밭작물에 대한 피해사례는 거의 없는 것으로 나타났다(농림부 농업기반공사, 2002). 생활하수와 축산폐수는 성분간 농도의 차이는 크나 성분양상은 비슷하여 농작물에 주는 피해양상이 유사하게 나타나며 농작물에 급격한 피해를 발생하지는 않는다(표 2.5). 그러나, 산업폐수는 대체적으로 고농도의 염류, 유기성 폐수, 강산성폐수, 강알칼리성 폐수, 고열성폐수로 되어있어 산업폐수에 노출시 농작물에 단기간에 극심한 피해를 준다. 또한, 광산폐수는 대부분이 중금속을 함유하고 있어 중금속 특유의 피해증상을 나타나며 농작물에 직·간접적인 영향을 미친다. 각종 오폐수의 유입으로 토양 물리성 악화에 따른 농작물에 직접적인 피해를 주는 것 뿐 만 아니라 과번무, 농작물의 연약화 및 도복 등으로 기계화 작업의 곤란을 초래하고 오수의 유입으로 인한 노동 의욕의 감퇴와 농업용 구조물의 부식 및 기능저하를 가져오며, 병충해 구제를 위해 과잉의 농약 살포 등 제반 농업환경을 악화시키는 간접적인 영향이 크다고 할 수 있다. 국내에서 농작물에 대한 피해사례는 1993년도에 축산폐수 유입으로 인한 벼농사 피해, 1994년도에 폐기물침출수 유입과 석분폐수로 인한 벼 피해, 양계장 폐수유입으로 인한 관개용수 수질오염으로 인한 벼농사 피해 등 1998년도 이후부터 매년 5건 이상의 농작물 피해가 보고 되고 있다(농림부 농업기반공사, 2002).

【표 2.5】 오염발생원에 의한 농작물 피해양상

발생원	구성성분	주요 피해양상
생활하수	질소, 인 유기물질류	<ul style="list-style-type: none"> ▶ 질소과잉으로 과번무, 도복, 등숙불량, 병충해 발생 ▶ 유기물 유입으로 근권 토양의 환원화에 따른 유해물질 생성 및 용존산소와 토양 내 산화물 등의 감소
축산폐수	유기물질류 질소, 인	<ul style="list-style-type: none"> ▶ 과번무에 따른 농산물 수량 및 품질저하 ▶ 조류 등의 이상 증식에 의한 물리적인 출아장애, 괴불현상의 발생 및 수온의 상승저해 등 생육저해
공장(산업)폐수	고농도의 염류 유기성 폐수 강산성 폐수 강알칼리성 폐수	<ul style="list-style-type: none"> ▶ 염류집적의 피해양상과 비슷함 ▶ 유류 접촉부의 고사 및 휘발에 의한 가스 접촉부의 생육저해 ▶ 중금속, 미량성분의 과다 용출 ▶ 뿌리생육 억제 및 미량성분의 불용화
광산폐수	중금속류 비금속광물류 강산성폐수	<ul style="list-style-type: none"> ▶ 식물체 및 잎의 황화 및 적갈색 고사현상 ▶ 함황물질에 의한 직접적인 뿌리의 고사현상 ▶ 알루미늄 및 중금속류의 가용화

출처: 농림부, 2002. 농업용수 수질오염이 벼 생육에 미치는 영향연구(I)

6. 농촌지역 수자원확보 및 수질관리 방향

가. 수자원확보방향

농촌의 수리시설 중 저수지, 양수장 등의 수원공은 대부분 소규모 단순시설이고, 저수지도 설치된 후 30년이나 지나 기능이 저하된 저수지가 76%나 된다. 저수지 이외의 다른 수원공시설과 수로의 정비도 미흡하여 적정물관리가 어렵고 물 손실도 과도하게 발생하고 있다. 수리시설과 농업용수관리기술, 관리체제상의 문제들이 종합적으로 작용하여 현재의 관개효율은 매우 낮은 수준에 있어 용수수요의 공간적, 시간적 변화에 신속성있게

대처할 수 있는 물관리의 개선이 요구된다. 또한, 용수관리기법을 적용해서 용수를 절약하고 아껴서 남는 물로 유지용수를 방류함으로써 농촌생태계 유지와 환경보전에 기여할 수 있다. 용수절약의 일환으로 관개조직의 운영에 있어 작물에 필요한 시기에 필요로 하는 물을 포장에 공급하고, 작물의 필요수량을 충족시키기 위하여 수원공에서 관개손실을 고려한 용수량을 간선수로로 흘려보내서 각 지선수로에서 필요한 시간에 필요한 양을 취수할 수 있게 해야 하며 동시에 지선수로는 각 분수관에서 필요한 유량을 안정적으로 분수하며 과다취수로 인한 지거수로를 월류하는 일이 발생하지 않도록 적정수위를 유지해야 한다. 그러나, 농민들은 관개수의 부족을 염려하여 양을 필요량보다 부풀려 요구하고 있어 기존의 기상자료나 예보치를 근거로 관개담당기관에서 관개량을 측정할 때 기상예보기간, 예측치의 갱신빈도, 기상조건의 변화, 작물의 생육기간 등에 따라 차이가 발생한다. 그리고 수로의 시점에서 분수하는 지점까지 수로가 길어져 통과하는 시간이 늘어나면 모든 수로에서 필요한 유량이 흐르도록 하는 것이 불가능해 지고, 1개소 이상의 수원에서 유입되는 여러개의 수로의 유량을 받아들여 물을 공급하거나 저류지를 두어 유량을 조절하는 것은 어려움이 있다. 이러한 문제점들을 해결하는 방법으로 전자나 컴퓨터 기술을 도입한 기술개발로 재래식 물관리 방법을 개선하여 필요수량에 근접한 용수량을 관개할 수 있게 하고 사용하는 기술에 따라 차이는 있겠지만 공급수량을 필요수량에 접근시키는 효율적인 조절시스템을 개발하여 이용하는 것이다. 자동물관리 시스템으로 용수의 수급을 계획관리하면 원활한 용수의 균등 분배 뿐 만 아니라, 기상정보와 자료DB를 이용하여 용수공급에 대한 농민의 신뢰도를 높여 과잉취수를 자제하게 됨으로써 유효수량을 증가시킬 수 있어 가뭄예방 뿐 만 아니라 현장의 급수상황을 실시간으로 모니터링 함으로써 홍수피해 경감에도 기여할 수 있을 것이다(김, 2003).

나. 수질관리방향

농촌 용수원으로는 저수지, 보, 양배수장 같은 지표수를 사용하거나 관정을 통한 지하수를 사용하고 있어 지하수와 함께 지표수의 수질이 문제가 되고 있다. 지표수의 오염은 농약과 비료의 과다사용과 축산폐기물의 방치 등에 의한 비점오염과 공업단지와 도시 등에서 기인하는 점오염에 의해 야기되고 있다. 농업용수는 수량이 많고 오염정도가 오폐수에 비해 상대적으로 낮으며 유역에 걸쳐 산재되어 있기 때문에 공학적인 종합처리시설에

의한 수질개선이 경제성이나 기술적으로 비현실적이다. 따라서, 오염물질의 유입원을 억제하여 오염을 사전에 방지하고, 일단 오염된 수질은 자연의 정화능력에 의해 개선시키는 것이 현실적인 방법이다.

(1) 사전 대책

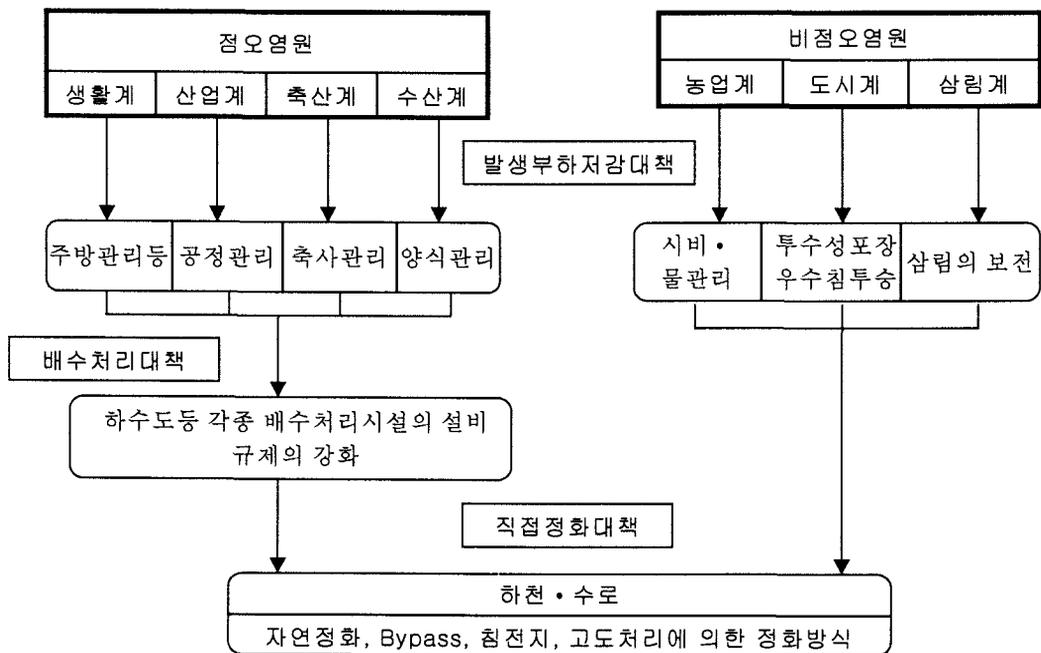
경작활동에 따라 발생된 오염물질 중 하천과 호수에서의 부영양화 원인물질인 질소와 인과 같은 영양물질의 제어는 현실적으로 환경기초시설에 의해 관리하기가 어렵기 때문에, 호수의 관리를 어렵게 만드는 요인으로 작용하고 있다. 따라서 비점오염원에 대해 강우량과 수질, 특히 강우기와 비강우기의 강우특성 및 초기강우의 특성을 고려하고 토지이용의 형태에 기초하여 수질에 영향을 줄 수 있는 인자 즉, BOD, 질소, 인 농도간의 상관성을 면밀하게 분석하여 대처해야 한다. 유역 내에서의 경작 시 시비량을 조절하는 과학영농법을 도입하여 화학비료나 농약에 의한 수질오염을 최대한 저감해야 하며 훼손된 산림은 토사유입을 방지하기 위해 시급히 복구하고, 나무를 식재하는 등의 노력이 있어야 한다. 농업활동이 이루어지고 있는 유역으로부터 인이 많이 함유된 농경배수의 유입을 억제하는 방안으로서 늪, 숲 혹은 초지로 이루어진 보호지역 즉 완충지대(Buffer-strip)을 설치하는 방법이 있다. 그러나, 이러한 방법은 실험적으로만 적용되고 있을 뿐이며, 오염원의 규모에 따라 그 효과는 달라지게 되며 토지가 인산염으로 포화된 후에야 효과를 얻을 수 있다. 유입원에 대한 또 하나의 관리방안으로서 농촌용수의 공급원인 저수지, 취입보, 양배수장, 집수암거, 관정 등이 환경오염으로 수질이 악화되는 것을 방지하기 위하여 지점별로 모니터링 시설을 설치하여 중앙관리실에서 수집된 자료를 분석하여 대책을 신속하게 수립하여 오염방기지능이 활성화되어야 한다.

(2) 사후대책

유역으로부터 발생된 오염물질이 유입되는 경계부분에서의 수질관리 방안으로서는 수계로 유입되는 영양물을 침전지의 설치를 통해 침강이나, 화학약품을 통해 침강시켜 침전물을 준설함으로써 오염부하량을 저감시킬 수 있다(그림 2.2). 이러한 방법들에 의한 영양물 제거율은 수리학적인 체류시간과 유입된 물의 영양물 농도에 따라 좌우된다. 침전조

의 설치는 간단하고 저니의 제거 외에는 다른 관리가 거의 필요 없다는 장점을 가지고 있다. 이러한 방법들은 농촌과 같이 사용 공간이 상대적으로 넓은 지역에 유리하며 과거로부터 사용해 오던 방법으로는 침출지, 안정지, 지면사포처리 등이 있다.

오염된 수질에 대한 처리방법으로서 이용할 수 있는 자연정화시스템이란 토양, 식물 또는 미생물과 같은 자연요소들의 자정능력을 이용하여 오염물질을 제거하는 시스템으로 인공적으로 건설된 종합적인 처리시설에 비해 에너지 소모가 적고 유지관리가 용이하여 소요경비가 낮고 2차 오염의 우려가 적다는 장점이 있다. 근래에 개발되고 있는 방법으로는 부생식물을 이용한 수중처리와 정수식물을 이용한 저수지 처리 등이 있는데 여기서 사용되는 식물들을 안정지의 성능향상과 영양염의 제거기능 때문에 관심을 받고 있다. 호수로 유입되는 하천들 중에서 오염기여도가 가장 큰 소하천에 수생식물을 이용하여 어느 정도 영양염류와 유기물을 제거한 후 호수로 유입시키면 호수 전체적인 부하는 상당히 감소될 수 있다.



【그림 2.2】 농촌지역에서 오염물질의 발생 사전·후 대책 (출처: 류 등, 2002)

제 4 절 농촌환경 복원을 위한 생태공학의 이용

1. 생태공학의 정의 및 원리

농촌 유역에서 비점오염원을 관리하고 수질을 개선시키기 위한 생태공학적 정화방법은 최근에 많이 적용되고 있다. 생태공학적 정화방법이란 토양, 식물, 또는 미생물과 같은 자연자원들의 정화능력을 이용하여 오염된 환경을 개선하는 방법이다. 생태공학은 환경문제를 접근함에 있어 생태계의 특성을 이용한다는 점에서 기존의 환경공학적 개념이나 원칙과는 다른 점을 보여준다. 생태공학은 자연의 구조와 기능을 다루는 생태학과 오염물질을 제거하는 기술적 측면을 다루는 공학(환경공학, 토목공학)이 합쳐진 학문이다(표 2.6). 따라서 생태공학은 기존의 기술적 측면만으로 다루는 공학과는 기본 원칙과 개념이 다르다. 생태공학의 기본 개념들은 다음과 같은 원리를 포함한다(Jorgensen and Mitsch, 1989)

① 생태계는 자기 계획적인 시스템(self-designing system)이다. 자연의 자기 계획적 능력을 더 많이 이용할수록 그 시스템을 유지하는 에너지 비용은 적어진다.

생태공학은 자연과 생태계의 자기계획적 능력에 의존한다. 생태계의 규칙과 피드백 기작들은 환경에 대한 적응과 자기계획적 능력을 부여하며 생태계 기능에 있어서의 변화를 최소화한다. 교란에 의한 변화가 발생할 때 생태계 내의 생물종들은 그에 적응하고 또한 대체되며 최종적으로 먹이사슬의 구조와 기능이 변하게 된다. 각각의 종들이 분류될 때 새로운 환경에 적응하는 일부는 선택되지만 그렇지 못한 일부는 도태된다. 생태공학적 입장에서 인간은 환경과 잘 조화되고 적응할 수 있는 초기 종들을 선택하지만, 나머지는 자연 스스로의 진행해 간다. Odum (1989)은 이 능력을 '자기조직화(self-organization)' 라고 하였으며, Ma and Yan (1989)은 '자정능력(self-purification)'으로 표현하였다.

② 원소(element)들은 생태계 내에서 순환한다. 순환경로에서 인간과 생태계의 조화는 궁극적으로 오염의 영향을 저하시킨다.

원소는 모든 생태계에서 순환한다. 생태계 내에서 각 원소의 순환과 그의 속도를 이해하는 것이 생태공학에 적용에 있어 매우 중요한 사항이다. 더욱 중요하게 재순환(recycling)을 이용하는 생태공학적 접근은 오염영향을 저감시키고 자원을 절약한다는 것이다. 예를 들면, 영양물질 재순환을 위한 육상생태계의 이용은 최소의 비용으로 연약한

생태계를 보호하는 효과적인 수단이 될 수 있으며 수생태계로 방류될 수 있는 자원의 복구를 유도한다.

모든 생태계는 태양에너지에 의존하기 때문에 그들은 스스로의 유지가 가능하다. 그리고 자연적이든 인위적이든 일단 만들어진 생태계는 자기계획능력을 통해 어느 정도의 외부교란에도 지속가능하다. 태양에너지에 의해 운영되는 생태계는 전통적인 기술에 의한 해결책에 비해 많은 화석연료가 필요하지 않다. 만일 시스템 자체가 지속성이 없다면 이는 생태공학이 자연과 환경을 적절하게 조화시키지 못했다는 의미가 된다. 현대의 환경기술은 대부분 분야에서 재생불가능한 에너지에 의해 지탱되는 원리에 근거를 두고 있다. 그러나 생태공학은 초기에는 화석연료에 얼마간 의존하지만 최종적으로 태양에너지와 자원의 재순환의 원칙으로 전환하게 된다.

【표 2.6】 환경공학 기술과 생태공학 기술의 비교

구 분	환 경 공 학 (Environmental engineering)	생 태 공 학 (Ecological engineering)
단 위	처리 및 부대시설 (폐하수, 분뇨처리장, 하수관거 등)	생물, 생태계, 지역
학문적 원리	환경공학	생 태 학
가동 에너지원	화석연료	자연, 태양에너지
처리대상 물질	유기물, 부유성 고형물질(SS), 영양염	유기물, 부유성 고형물질, 영양염류, 중금속, 병원균
정화효과에 대한 수질기준	BOD, COD, DO, SS	BOD, COD, DO, SS, TN, TP, 중금속, 대장균
운전조건	어 려 움	쉬 어 움
처리효율	높 음	낮음~높음
기술상의 장점	<ul style="list-style-type: none"> · 보편화된 방법 · 대규모 처리 가능 	<ul style="list-style-type: none"> · 유기물 이외에 부영양화 원인 물질인 인산과 질소 처리 가능 · 유지 관리비가 적게 듦 · 설치비가 상대적으로 적음
기술상의 단점	<ul style="list-style-type: none"> · 설치비와 유지비가 많이 듦 · 관리를 위한 전문지식 필요 · 운전조건 조작 필요 · 영양염류 제거 곤란, 효율적인 유기물질의 처리 후에도 부영양화 가능성 큼 	<ul style="list-style-type: none"> · 기존 처리시설에 비해 넓은 부지 필요 · 아무 곳이나 설치하기 어려움 · 개발과 적용사례의 부족

출처 : 황, 2002. 생태공학의 이해와 전망(I)

③ 생태계의 항상성(homeostasis)은 생물학적 기능과 화학적 조성의 조화를 요구한다.

생물체 내에서 화학적 조성은 반드시 고정된 농도에서 일어나는 것이 아니라 어떤 범위를 가지게 된다고 할지라도, 살아 있는 생물의 생화학적인 기능은 원소들의 화학적 조성을 결정한다. Shelford의 내성의 법칙에 의하면, 생물들은 반드시 어떠한 범위 내에서만 환경내성을 조절할 수 있으며, 이러한 원칙이 생태공학의 이용에 있어 반드시 고려되어야 한다. 생태공학적인 방법들의 성공은 이러한 원칙을 이해하여야 가능하다. 예를 들면, 화석연료의 사용결과 나타나는 이산화황(SO₂)의 방출로 야기되는 호수산성화의 결과는 이러한 원칙을 위배한 것으로 설명 가능하다. 구미 각국의 호소에서 관찰되는 낮은 pH 값은 호수 내에서 광합성을 위한 무기탄소의 부족을 야기한다. 따라서 이 경우 호수는 극빈영양 상태로 변하게 되며, 전체 먹이사슬이 영향을 받고, 호수 생물상이 매우 빈약하게 된다.

④ 생태계의 과정들은 큰 정도로 변하는 특징적인 시간적 규모(time scale)를 보유한다. 생태계의 조절은 생태계 규모의 동태학에 적응되어야 한다.

시간적 스케일에 대한 고려의 부족으로 인한 잘못된 환경관리의 예들이 피식-포식관계의 인식부족에서 발견된다. 인간들은 포식자를 자주 해로운 동물로 생각하며, 따라서 초식동물들을 보호하기 위해 육식동물들을 제거해 왔다. 그러나 단기이익이 장기적 패턴을 희생하였기 때문에 이러한 전략은 실패로 나타났다. 즉, 서로 다른 시간스케일이 고려되지 못했다. 포식자의 수가 감소될 때, 피식자의 수는 빠르게 증가한다. 그러나 초식동물들은 그들의 먹이원을 이용하는데 있어 다른 시간적 스케일을 가지고 있으며, 포식자의 부족시 그들의 수용능력 이상으로 증가하게 된다. 결과적으로 과도한 섭식과 많은 수가 굶게 되는 결과를 초래한다. Hutchinson (1961)에 의해 제기되었던 “플랑크톤의 모순적 역설(paradox of plankton)” 즉, 수생태계에 있어 수많은 플랑크톤이 제한된 한 공간에 존재하는 현상 역시 시간적 스케일의 중요성을 보여주는 것이다.

⑤ 생태계 구성인자들은 특징적인 공간적 스케일을 보유한다. 생태계의 조절을 이용하여 원하는 결과를 성취하기 위해서는 해당 목적에 필요한 적절한 크기를 고려해야 한다.

빠른 인구증가는 농사를 짓기 위한 땅의 요구를 증가시키는 결과를 가져왔으며, 습지의 배수와 산림벌채는 이러한 요구에 부응하기 위해 광범위하게 이용되었다. 벌채로 인한 사막화현상이나 습지 제거의 결과로 인해 오염물질이 수계로 직접 전달되는 것과 같은 문제들은 생태학적으로 건전한 관리를 방해하며, 이러한 문제들은 자원의 공간적인 유형이

고려되어야만 극복할 수 있다. 또한 생태공학은 환경보전에 대한 윤리를 강조한다. 예를 들어, 습지가 홍수조절과 수질개선 등의 환경적 가치를 지니고 있음을 인식한다면, 습지를 관리하고 복원시키려는 노력은 많은 호응을 이끌어 낼 수 있다. 즉, 생태공학을 통한 생태계의 보전에 대한 인식은 생태계 보전에 정당성을 부여해줄 수 있다.

⑥ 화학적, 생물학적 다양성은 생태계의 수용능력에 공헌한다. 생태계를 디자인 할 때, 생태계의 자기 설계능력을 향상시킬 수 있는 부분들에 대해 광범위한 다양성을 도입해야만 한다.

생태공학은 기본적으로 생태계 전체에 대한 관심을 강조한다. Odum (1989)은 생태공학은 소규모의 개별적인 또는 분석적 실험으로 목적을 성취하기 어렵다고 주장하였다. 생태계의 설계와 그 진행이 각 부분들의 합한 기능으로서는 예측하기 매우 어렵기 때문에 모델링이나 편익분석과 같은 기법들이 이용된다. 따라서 개별적인 종 수준의 조절과 관리라 할지라도 생태공학은 최종적으로 시스템 전체를 다루어야 하며, 이를 위해 생태계를 디자인하는 많은 연구와 조사가 병행되어야 한다. Jordan *et al.* (1987)은 어떤 시스템을 이해하는 최선의 방법은 그 시스템을 모방하거나 수정, 적용하여 그것이 제대로 운영되도록 하는 것이며, 따라서 생태공학은 기본적인 생태학적 연구에 부가하여 시스템적 접근을 통해 적용하는 것으로 보았다.

⑦ 생태계는 지형학적으로 그들의 가장자리 부분에서 가장 취약하다. 생태학적 관리는 생태계와 그의 지형학적으로 최적의 범위에 존재하는 생물상을 이용하여야 한다.

생태적 추이대(ecotone)는 생태계들간의 전이지대에 형성된다. 인간의 거주지와 자연간에 공간적으로 존재하는 접촉영역은 연속적이고 점진적인 지역으로 계획되어야 하며, 급격한 변화가 있는 경계로 되어서는 안된다. 생태계들은 또한 다른 생태계와 연결되어 있다. 이러한 연결은 가능한 언제나 유지되어야 하며, 주변의 다른 생태계들과 격리되어서는 안된다. 또한 생태계 내의 각 구성요인들은 모두 밀접하게 연결되어 있다. 따라서 다른 부분에 영향을 주지 않고는 생태계 내의 한 구성요인을 관리하기가 불가능하다.

생태공학은 현대의 환경문제의 심각성과 그를 해결하는 공학일변도 방법의 한계를 극복하고자 하는 사회적, 문화적, 경제적 요구로부터 나타난 새로운 분야이며, 그의 학문적 근간을 생태학에 두고 있다. 미국의 시스템 생태학자 Odum(1962, 1963)은 생태공학이라는 용어를 처음 정의한 사람의 하나였으며, 그는 생태공학을 '시스템을 제어하기 위한 부가적인 에너지가 자연자원으로부터 얻어지는 인간에 의한 환경적 조절'이라고 정의하였

다. 그 이후 그는 생태공학의 개념을 좀 더 발전시켜, '자연의 관리'가 생태공학이며, 기존의 공학적인 측면에 대한 보완적인 노력으로 보았다. 이 과정에서 '자연과의 공조 또는 협력관계'를 강조하였다(Odum 1971). 그는 역저 Systems Ecology (1983)에서 새로운 생태계 설계에 대한 공학적 측면은 주로 스스로 조직화(self-organization) 또는 스스로 지탱(self-support)이 가능한 시스템을 이용하는 분야라고 설명하였다. 이후 생태공학은 다른 학자들(Ma 1985, Straskraba 1984)에 의해 그 정의가 보완, 확대되었으며 이들은 모두 생태학적 원리들을 적용하는 방향으로 공헌하였다. 예를 들면, 생태공학은 생태계 관리를 위한 기술적인 수단이며, 실행의 비용과 환경에 대한 피해를 최소화시키는 생태학적 이해에 기초를 둔다고 정의하고 있다. 비교적 최근에 Mitsch and Jorgensen (1989)은 생태공학을 '인간사회와 자연환경 양쪽의 이득을 추구하는 지속가능한 생태계의 디자인'으로 정의하였다.

이러한 여러 가지 의미의 정의를 고려할 때, 생태계의 기능을 강화하고 파괴된 생태계를 복원하여 생태계의 기능을 이용하는 것을 생태공학(Ecological Engineering, Ecotechnology)이라고 하며, 이것은 인간과 자연의 공생을 가능토록 하는 기술이다. 바꾸어 말하면 생태공학은 지구나 환경에 친화적이고 부드럽게 접근하는 기술로서 미래의 환경문제를 다루게 될 가장 중요한 분야라 볼 수 있다. 따라서 생태공학의 목표는 1) 환경오염이나 경관의 교란과 같이 인간에 의해 파괴된 생태계의 복원, 2) 인간사회와 생태계의 가치를 동시에 추구하는 지속가능한 생태계의 보전이라고 볼 수 있다. 화학공학(Chemical Engineering)은 화학에, 생물공학(Biotechnology)은 분자생물학이나 유전학에 기초가 있듯이 생태공학의 기초는 생태학이다. 생태공학은 생물공학과는 근본적으로 다르며 생태계의 기능을 제어하여 생태계를 보전·복원하는 기술을 다룬다.

2. 생태공학적 방법의 분류

가. 적용방법에 의한 구분

생태공학은 자연과 생태계를 포함한 경관적 디자인을 위한 여러 가지의 응용방법을 포함하고 있으며, 이러한 응용범위에는 환경문제와 인간과 자연의 친화적 공생을 위한 새로운 생태계, 바이오톱(biotope)의 건설에서부터 현존하는 생태계를 이용하는 방안까지를

포함한다.

<표 2.7>은 적용방법에 따른 생태공학의 분류와 사례를 나타내고 있다. 각각의 응용방안은 나름대로 주된 목표와 특징이 있으나 이들간에는 서로 중복되는 기능을 겸하고 있음을 간과해서는 안된다. 즉, 그 목표가 환경오염문제의 해결이든 경관적 차원의 문제이든 이들 모두 생태계와 자연의 공간적 일부를 대상으로 하고 있기 때문에 이들의 기능은 상호보완적이고 또한 상호밀접하게 연결되어 있다.

【표 2.7】 활용방법에 따른 생태공학적 목표와 세부내용

활 용 방 안	내 용 및 사 례	비 고
생태계에 악영향을 미칠수 있는 오염문제를 감소시키거나 해결하기 위한 생태계의 이용	<ul style="list-style-type: none"> • 습지를 이용한 폐수처리 • 슬러지 재순환, 재이용 	환경 및 경관문제 대상
자원을 줄이거나 해결하기 위하여 기존의 생태계를 모방	<ul style="list-style-type: none"> • 인공습지 • 어류연못 • 저류조 	
파괴된 생태계의 복구	<ul style="list-style-type: none"> • 석탄광산의 복원 • 호소와 강의 복원 • 유해폐기물 매립장의 복원 	
환경문제를 해결하기 위하여 생태적으로 건전한 방법으로 현존하는 생태계의 변형	<ul style="list-style-type: none"> • 자연친화형 하천 • 부영양 생태계 내의 생물학적 조절 • 식생, 어패류, 조류 등을 이용한 수질정화 	
생태적 평형을 해치지 않는 한도 내에서 인간의 이익을 위한 생태계의 이용	<ul style="list-style-type: none"> • 지속가능한 농업생산 • 재생가능한 자원의 수확 • 산림생태계의 관리 	
자연경관 형성을 통한 자연과 인간의 친화적 공생을 위한 생태계의 창출	<ul style="list-style-type: none"> • 바이오톱의 창출 • 수변구역 • 지역생태계, 경관의 자연친화적 관리 	

출처 : 황, 2002. 생태공학의 이해와 전망(II)

나. 구조에 따른 구분

역사적 관점에서 볼 때 생태공학은 중국, 인도, 한국 등 동양권에서는 고대로부터 지속된 농업, 수산업, 임업 등 1차 산업의 유지관리를 위한 기술적 요소들에서 그 유래를 찾을 수 있다. 즉, 논의 홍수조절 및 수질정화기능, 자원의 재순환을 이용한 어류 양식목적의 통합연못시스템, 수생식물의 환경적, 경관적 이용, 산림의 간벌을 통한 관리 등 자연과의 친화적 파트너쉽을 활용하는 차원에서 시작되었다고 볼 수 있다(류재근 등, 2002). 중국에서는 물고기의 양식이나 작물재배에서부터 폐수처리, 해안선의 보호 등에 이르기까지 다양한 범위의 생태공학을 응용하고 있다.

그에 비해 서구에서 초기의 생태공학은 대규모의 응용보다는 실험적인 생태계 개발에 주력하였다(Mitsch and Jorgensen, 1989). 최근 들어 일부 좀 더 명확한 실험들이 진행되었고, 현재는 습지를 중심으로 하여 생물조절, 호소 및 하천복원, 수변구역조성, 바이오토포 창출 등과 같은 보다 세부적인 측면들에 대한 연구들이 진행중이다.

생태공학에서 시도되고 있는 다양한 접근방법들과 시스템은 구조적으로 Mesocosm, 생태계, 지역시스템으로 구분할 수 있다. Mesocosm은 인공적인 닫힌 계(enclosed system)이나 그 규모에 있어 실험실 규모에서부터 대형(예를 들면, Arizona의 Biosphere II)에 이르기 까지 매우 다양하다. 생태계의 응용은 습지나 수계오염 조절용 시스템 등이 있으며 이러한 규모가 현재 수행되고 있는 생태공학적 시도의 주류를 차지하고 있다. 지역시스템의 응용은 생태계의 다양성을 창조하거나 복원하는 쪽에 역점을 두며, 보다 다양한 지역적 문제의 해결을 대상으로 하고 있다. 따라서 지역시스템의 응용은 생태공학적 요소기술들의 종합이며 자연친화적 경관의 창출과 나아가 환경문제 해결과도 직접적으로 연결되어 있다. <표 2.8>는 생태공학적 방법들을 구조와 적용방법에 따라 구분하고 각 방법에 대한 내용을 정리하였다.

【표 2.8】 생태공학의 분류와 사례

구조적·방법적 분 류	사례 또는 종류	사례별 목적
Mesocosm	Biosphere II (Oracle, Arizona)	지구를 시뮬레이션하고 우주공간에서의 생물(인간)의 거주가능성 시험
	실험실 규모의 어항, 연못, 습지, 수로 등	기존의 생태계를 축소하여 자연생태계에서의 현상을 조절과 관리를 통해 분석 및 예측
생태계	저류지	저류 및 침전을 통한 오염물질 저감
	습지	자원의 재순환, 환경오염저감 및 처리(오폐수, 석탄광, 중금속)
	식재토양시스템	중금속, 화학합성물질 제거(phytoremediation)
	인공연못	어패류양식을 통한 오염물질 재순환
	인공부도	호소위의 경관 창출 및 수질개선, 생물서식지 제공
	바이오톱	생물서식공간 및 다양성 확보, 먹이사슬을 통한 환경정화
지역시스템	생태공원	생물서식공간 및 다양성 확보
	농업생태계 (농경지, 용배수로)	수변경관의 복원, 경관창출, 수질개선
	산림생태계	토양침식방지, 산림의 효율적 관리
	갯벌생태계	생태계 복원
	하천생태계	수변경관의 복원, 수질개선
	호소생태계	수변경관의 복원, 수질개선
구조물 또는 설비	토양침식방지 펜스	토양침식 방지
	부도	경관창출, 수질오염저감
	접촉여재생물막	하천수질오염 저감
	녹조펜스	호소의 녹조제어
	인공폭기시스템	호소의 녹조제어, 유기물 분해
	인흡착설비	인 흡착, 제거를 통한 부영양화 저감
	라이밍(Liming)	수중의 pH 상승을 통한 환경회복
	차광막	호소 녹조성장 억제
생물	패류	호소의 조류제어
	어류	호소의 부영양화 및 조류제어
	부착조류	하천, 호소의 영양염 제거
	동물플랑크톤	호소의 조류제어
	저서생물	먹이사슬을 통한 유기물 제거

출처 : 황, 2002. 생태공학의 이해와 전망(II)

3. 농촌지역에 적용가능한 생태공학적인 기술

가. 농촌지역의 환경특성과 생태공학적인 방법의 밀접성

생태공학적인 기술은 공학적인 방법과는 달리 생물과 환경이 포함된 자연 생태계 또는 생태계 내의 생물적 구성요소들을 이용하며, 생태계의 가장 중요한 기능중의 하나인 물질의 순환과 이에 관련된 자연의 정화작용(self-purification)을 이용하는 방법이다. 물질순환고리의 근간은 생태계 내의 생물에 의한 먹이사슬이며 이를 통해 물질은 흡수되고 이동하면서 제거된다. 전술하였듯이 생태공학에서 이용되는 공간적 시스템은 생물의 다양성 확보가 기본적으로 요구된다. 농촌지역은 근본적으로 자연성이 부여된 공간으로 다양한 생물들이 서식하고 있으며 부대적인 자원이 풍부하여 생태공학적인 방법을 이용하기에 매우 유리한 자연환경을 보유하고 있다. 예를 들면, 농촌공간은 부지의 활용이 용이하고 또한 생태공학적인 기술에 필요한 후보생물 선택과 활용이 용이하며 자연에 대한 접근성이 편리하여 재활용(recycling)이 용이하다 장점이 있다. 한편, 생태공학적인 기술의 특성은 공학적 처리방법에 비해 조작과 관리에 경제성이 뛰어나므로 오염물질의 농도가 높지 않고 다량으로 배출되는 특성을 가지는 농촌지역에서의 비점오염원 처리에 적합하다.

나. 생태공학적인 정화기법

삼림, 초지, 습지, 호소, 하천, 연안 등 생태계의 창출·재생·복원과 함께 지속성이 있는 농업생태계의 개발을 위하여 생태계의 기능을 근간으로 기술개발을 해나가는 것이 생태공학의 중심이다. 지금까지의 환경기술은 생태계를 무시하고 개발하였으며, 따라서 생태계나 자연과는 단절되어 있었으나 생태공학에서는 인간의 사회와 자연생태계가 공생할 수 있는 틀을 모색하고 있다.

생태공학은 수권이나 토양권의 환경보전 뿐만 아니라 수산, 임업, 농업 등 산업적 측면에도 도입될 수 있는 방법으로서 이미 경험적으로 생태공학이 도입되어 있는 경우도 있으나 환경적 측면에서는 도입단계로서 앞으로의 기초를 확립할 필요가 크다. 생태공학적인 방법을 이용하여 대상유역의 오염원을 관리하고 수질을 개선하기 위해서는 처리효율이 지속적이고 유지관리가 용이해야 하며, 자연정화능력을 최대한 활용하며 주변 경관과 조

화를 이룰 수 있어야 한다.

발생원에서 미처리된 오·폐수나 처리장의 방류수, 토지이용에 따른 각종 비점오염원에 대한 자연정화 처리방법은 크게 2가지로 유입수로나 저수지 내 처리로 나뉘어 진다. 최근에 연구되고 있는 자연정화방법은(표 2.9와 2.10) 와 같은 특성들을 가지고 있으며 이들을 통해서 실제로 자연정화방법이 농촌유역에 많이 적용되고 있으며, 농촌 유역에 적용 가능한 자연정화방법으로는 저수지 내 처리방법으로 식생정화시스템이나, 인공습지, 저류지등이 있으며, 유입수로공법들로서 접촉산화수로 등이 도입되고 있다(표 2.11). 이와 함께 앞으로 새로운 생물종을 개발하고 이들의 효율성과 적용성을 검증하여 새로운 생태공학적인 기법으로 활용하는 부분에 많은 노력이 요구된다. 여기에는 생물조절에 의한 수질 개선 또는 환경복원이 해당되며, 예를 들면 조류(algae), 동물성 플랑크톤, 어패류 등의 이용이 포함된다.

【표 2.9】 생태공학을 활용한 정화기법의 처리대상 물질과 능력비교

치 리 기 법	BOD	SS	T-N	T-P	초기비용	유지비용	농촌지역 적용성
접촉재 충전 생물막 산화법	○	○	●	●	○	○	●
역간접촉산화법	○	◎	●	●	●	●	●
바이패스식접촉폭기법	◎	◎	○	●	●	●	●
수경재배전화법	○	◎	○	○	◎	○	◎
습지활용식생정화법	◎	◎	◎	○	○○	○	◎
식생정화법	●	●	○	○	◎	○	◎
토양정화법	○	◎	●	◎	○	○	◎
다자연형 하천공법	○	○	○	●	●	○	◎
산화지법	◎	◎	○	○	○	◎	◎
호소폭기법	●	●	○	○	○	○	○
토양펜스법	◎	◎	○	◎	○	○	◎
생물 조절법	조류(algae)	○	●	◎	◎	◎	◎
	동물성플랑크톤	◎	◎	○	○	◎	◎
	어류	○	◎	○	○	◎	◎
	패류	○	◎	◎	◎	◎	◎

(주) ◎ 유리; ○ 조건적 유리; ● 불리

조류의 경우 T-N, T-P는 무기질소 와 무기인으로 고려함. 동물플랑크톤 및 어패류의 경우 SS는 부유성 조류를 포함함.
출처 : 류재근 등, 2002. 환경생태공학.

【표 2.10】 자연정화법에 대한 제거 특성 비교

구분	공법	개요	장점	단점	처리효율	설계계획
안정지법	산화지(Oxidation pond) + 모래여과	<ul style="list-style-type: none"> ○ 산화조와 후속의 모래여과처리에 의한 원수에 포함된 영양물질 제거를 위한 고차처리 시스템 ○ 산화조의 주된 Mechanism은 algae에 의한 무기 영양물질의 고정이다. 	<ul style="list-style-type: none"> ○ 2차 유출수의 고도처리에 적합 	<ul style="list-style-type: none"> ○ 산화조에 algae 성장을 위한 충분한 체류시간 및 광합성 작용 ○ 넓은 부지 필요 ○ 역 세척시 동력 사용 	SS : 97~100% TN : 24~37% TP : 32~75%	시설면적 : 140,000m ² 체류시간 : 15일 처리수량 : 3,000m ³ /d
	Pond 침전법	<ul style="list-style-type: none"> ○ 2-3개의 pond system을 갖는 인 침강법으로 pond 유입 전에 응집제를 첨가하여 침전에 의한 영양물질 및 유기물질이 제거됨 	<ul style="list-style-type: none"> ○ 인 제거 처리 효율이 높다 ○ 고농도 폐수에 적합 	<ul style="list-style-type: none"> ○ pond에 침전된 sludge제거를 위한 배수 관계 제거기술 요구 ○ 슬러지로 인한 혐기성 및 냄새발생 ○ 고분자 응집제 사용 	BOD : 68~85% TN : 70~95% TP : 80~93%	시설면적 : 30,000m ² 체류시간 : 6일 처리수량 : 4,000m ³ /d
	부레옥잠 침전지 (식생산화지)	<ul style="list-style-type: none"> ○ 원수의 유속을 감소시키고 정지시켜 원수중의 부유물을 동력에 의해 침전제거하는 방법 ○ 식물인 부레옥잠을 이용하여 기질제공 및 영양물질 흡수 등으로 처리되는 식생산화 공법 병행 	<ul style="list-style-type: none"> ○ 시설비 및 유지관리비가 저렴 ○ 수표면에 식생으로 인한 조류발생 억제 ○ 침전조울 여러개 두어 병행하여 사용(sludge 제거 용역) 	<ul style="list-style-type: none"> ○ 강우시 침전효과 제하 ○ 수중식물 수확처리 문제 	TN : 40~60% TP : 30~70%	시설면적 : 30,000m ² 체류시간 : 6일 처리수량 : 10,000m ³ /d

출처: 건설기술연구원, 1997. 일산호의 최적 수질관리연구.

【표 2.10】 계속

구분	공법	개요	장점	단점	처리효율	설계계획
前湖水法		○ 유입수가 본호수로 유입하기 이전에 한번 체류시키기 위한 소규모 호수로써 여기서 생물생산이 왕성하게 행하여져 있는 생물체	○ 호수의 기능을 겸한 수처리방법	○ 장기간의 체류시간 (15일 이상) ○ 계절별 처리효율이 일정치 않음	PO ₄ -P 제거율 (15일 체류시) -동계 : 0~30% -하계 : 60~80%	시설면적 : 70,000m ² 체류시간 : 15일 처리수량 : 9,000m ³ /d
갈대밭 처리		○ 오염 물질의 흡수작용 및 수생식물의 줄기나 잎의 주변에 부착, 계면에서의 흡착 질산화, 탈질등의 작용에 의해 정화	○ 시설비 및 부지관리비 저렴	○ 넓은 부지면적 소요 ○ 처리효율이 일정치 않음 ○ 갈대 수확물 처리 문제발생	SS : 30~80% TN : 10~50% TP : 10~60%	시설면적 : 80,000m ² 체류시간 : 6일 처리수량 : 4,000m ³ /d
토양처리		○ 토양이 갖는 정화능력인 여과, 흡착, 이온교환, 분해 시물의 섭취 등으로 물리, 화학, 생물학적인 복합적 과정에 의해 정화	○ 유지관리비 저렴	○ 넓은 부지면적 소요 ○ 처리효율이 일정치 않음 ○ 지하수 오염 가능성	TN(sol) : 30~95% TP(sol) : 50~90% TP(insol) : 60~95% SS : 30~95%	시설면적 : 100,000m ² 처리수량 : 10,000m ³ /d
역간접축산화법		○ 자연정화에 의한 하천수질을 정화하기 위해 하상의 부착생물막을 다층으로 한 접촉표면의 미생물에 의해 유기물, 부유물질, 암모니아성 질소제거	○ 건설비가 저렴 ○ 하천의 고수부지, 공터, 소규모 유휴지등을 이용	○ 영양물질 제거효율이 아주낮음 ○ 접촉 표면제의 미생물량 인위적으로 조절	BOD : 5% SS : 85%	시설면적 : 20,000m ² 처리수량 : 5,000m ³ /d

출처: 건설기술연구원, 1997. 일산호의 최적 수질관리연구.

【표 2.11】 생태공학적 수질개선 방법들의 종류와 특성 비교

구분	유용 및 화훼식물 이용	수생식물 이용	인공습지	생태공원	인공부도	생물조절 (biomanipulation)
대상처리수	가정, 소규모 직장우수	호수, 하천수, 가정하수	가정하수, 축산폐수, 호수수질	오염된 호수	호수수질, 양어장 배출수	연못, 호수, 저수지
이용 동식물	깨꽃, 부꽃, 미나리, 부들, 갈대	갈대, 주물, 부들, 기타 습지 식물	부레옥잠, 정수식물 (갈대, 주물, 부들, 미나리)	꽃, 유용 습지식물	갈대 및 정수식물	어류, 동물플랑크톤
효율성	좋음	좋음	좋음	좋음	보통	경우에 따라 다름
경제성	경제적	보통	경제적	비경제적(유지관리비 많음)	비경제적	경제적
적용가능 지역	가정, 소규모 공장, 농촌	호수 및 하천 수변, 생활하수	농촌, 군부대, 공장 주변, 호수수변, 매립지	호수변 공원 조성 지역	호수, 수변 침식 지역	Algal bloom이 일어나는 호수나 저수지, 연못
장점	화단 조성 및 정원 활용 가능, 오수 발생지에서 수질정화	홍수시 호수내 토사 유입 방지, 호수수변 공원화	효율적 오폐수 정화, 시설설치 및 유지관리비 저렴, 다양한 적용가능	정꽃, 야채 재배, 시민휴식공간 제공, 호수수질 개선	시설 설치를 위한 부지 불필요, 습지, 식생이용 불가능 지역에 적용 가능	경제적
단점	넓은 부지소요	넓은 부지소요	넓은 부지소요, 모기발생	비경제적, 동절기 관리 및 처리효율 제한	처리효율 제한	부영양화가 심한 곳에서는 효율성 낮음
국내 적용사례		양재천,	홍천군 군부대내 인공습지	서울공고내 생물서식공간, 울산생태공원	팔당호에서 미생물과 함께 시험 적용중	없음
적용사례		과천 양재천변	시화호유입부 반월천, 삼화천	반월저수지, 갈치저수지 유입부	갈치저수지, 반월저수지, 마산저수지, 팔당호	없음
외국 적용사례		일본 가스미가우라 호수 연안	미국 오하리오 주립대학내 습지, 일본 수와호	일본 가스미가우라 호수변	독일, 일본의 가스미가우라호	
비고		수경재배로 활용 가능		환경교육장으로 활용성 큼.	Ukishima(일본) 또는 floating island로 불림, 페타이어 이용 가능함.	공학적 처리에 의한 외부오염물질, 또는 내부 오염물질 저감 후 적용효과 큼.

출처: 황순진, 1998. 수질관리를 위한 생태학적 접근방안.

(1) 인공습지

인공습지는 동식물의 서식지, 홍수량의 조절의 기능을 하며, 습지의 생태계는 물리적, 화학적, 생물학적 작용에 의해 수질을 정화한다. 특히 갈대, 줄, 애기부들 등 수생식물이 서식하는 습지에서는 습지와 수생식물의 스크린 효과에 의해 상류로부터 유입된 오염된 폐수를 일시적으로 저장하여 유입된 부유물질을 침전·제거시키고, 수생식물의 체내로 인과 질소를 흡수하며, 수생식물 몸체에 부착된 미생물과의 접촉에 의해 유기물이나 영양염류를 흡수·분해한다.

인공습지는 표면유하방식 습지와 침투유하방식 습지로 나누어진다. 표면유하방식 습지는 유출수가 표면흐름으로서 유입하고 토양과 수생식물과 접촉하여 수중 현탁물질의 침전을 쉽게 하거나 수생식물의 표면에 사는 미생물이 유기물을 분해 하여 상부에서 처리수가 유출되어 지는 것이며, 침투유하방식 습지는 유출수가 수생식물의 뿌리 부분에 들어가 토양과 뿌리 부분에서의 여과와 흡착에 의해, 또한 뿌리 부분에 사는 미생물이 유기물을 분해하거나 질화·탈질화를 진행하여 폐수를 정화하고 하부에서 처리수가 유출하여 가는 것을 말한다.

대다수 수질개선용 인공습지로는 표면유하방식 습지가 사용되어지며, 침투 유하방식 습지는 대부분이 2-3년이 지나면서 심한 막힘 현상이 발생하며, 암모니아 질소 제거를 위한 충분한 용존산소를 유지 할 수 없는 문제가 있다. 인공습지는 현재 소규모 도시나 마을에서 발생하는 하수, 광산폐수, 도시유출수, 축산폐수, 정화조 유출수, 매립장 침출수, 제지공장이나 통조림공장의 폐수등 기타 소규모 사업장의 폐수를 처리하는 곳에서 사용되고 있다.

(2) 저류지

침전은 수처리 중 가장 중요한 조작중의 하나로, 물보다 무거운 입자는 정체된 물 또는 극히 흐름이 느린 물에서 침강하여 물과 분리되는데 이러한 원리를 이용하는 시설이 저류지이다. 홍수시 유출을 지연시켜 하류 하천의 홍수피해를 줄이기 위해 사용되어온 구조물로서 저류지는 저수지나 호소 유입부에 초기유출과 같이 오락부하가 많은 유입하천수를 일시 저류하여 유속 저하 등에 의해 자연중력침전을 촉진시켜 고액분리를 하여 상등

수를 방류하는 방법으로 입자성분의 비율이 높은 인, COD 등의 처리에 유효한 시설이다.

저류지 내의 침강속도는 입자의 크기, 밀도, 형상, 수온 등에 따라 결정 된다. 대부분의 저류지에서는 바람에 의한 난류, 유입수의 현탁물 농도에 의해 생기는 밀도류의 영향을 받아서 흐름이 일정하지 않게 되는데, 저류지내의 흐름을 가능한 일정하게 하고 정류가 되도록 하기 위해 유입, 유출부의 여러 가지 구조물이나 정류 구조물등도 고려되기도 한다.

(3) 접촉산화수로

접촉산화수로공법은 자갈, 쇠석, 페타이어 등 접촉여재를 이용하여 하천수를 정화하는 공법으로 부착성 미생물이 서식할 수 있는 접촉면을 증가시켜 유기물을 침전·흡착되게 하여 접촉면에 서식하는 미생물에 의해 분해 되게 하는 작용을 응용한 생물반응처리이다. 접촉산화수로 공법의 정화 기구는 세 종류로 크게 구별된다.

① 접촉침전

접촉여재 사이에는 크고 작은 틈새가 연속되어 있다. 이 공간을 물이 통과하면서 물속의 부유물질이 접촉여재와 접촉하여 침전이 촉진된다. 여재사이의 공간이 상당히 작기 때문에 침전거리가 짧고, 자연하천에 비하여 상당히 침전되기 쉽다.

② 여재 표면의 미생물에 의한 흡착, 흡수, 산화, 분해

여재표면에 서식하는 미생물에 의해 물속의 유기물질이 흡착, 흡수되어 생분해가 일어난다. 이론적으로는 유기성물질은 물과 탄산가스 상태까지 분해되지만, 그러기 위해서는 유입 유기물량에 상응하는 충분한 생물량, 용존산소 및 체류시간이 필요하다.

③ 퇴적 슬러지의 이동과 분해·감량

수로 내에서는 여재사이에 부유물질이 침전된다. 그러나 이 침전은 여재사이에 공극이 작기 때문에 물의 흐름에 의해 횡축으로 이동된다.

(4) 끈상접촉여재수로(미생물의 이용)

끈상접촉여재를 이용한 수질정화는 하천의 흐름을 크게 방해하지 않으며, 하천수로에 바로 고정하므로 시공·보수가 용이하며, 접촉재의 구조가 고리상, 소계상의 입체구조로 되어 있어 호기성균과 혐기성균의 공존이 가능하고 수류에 의한 미생물의 이탈이 일어나지 않아 오염물질이 안정적으로 제거될 수 있다. 또한 오락부하 제거량에 비해 오니 발생량이 적으며, 접촉재를 교체하지 않고 수년간 사용할 수 있고, 동력경비가 불필요하고, 물의 흐름에 미생물막의 이탈이 적어 안정적인 제거효과를 기대 할 수 있다.

미생물, 특히 박테리아에 의한 유기물질의 분해는 하천의 자정작용에 근간이 되는 기작이다. 미생물들은 에너지를 얻기 위하여 유기물 분해라는 생물화학적 과정을 필연적으로 거치기 때문에 하수나 폐수, 분뇨의 환경공학적 처리과정에서도 필수적으로 이용된다.

오염된 (소)하천이나 복개된 하천 또는 호수에서 특별히 다른 처리과정 없이 미생물을 이용하여 유기물을 분해시키는 방법은 일본에서는 이미 보편적으로 이용되고 있다. 박테리아 자체를 투입하는 것이 아니라 박테리아나 다른 미생물들의 흡착을 용이하게 하는 접촉재라고 불리는 로프상의 물질을 하천바닥이나 호수 중에 띄워 수질을 정화하는 공법이다. 일본 건설성에서는 하천 정화정책의 일환으로 로프형 미생물 접촉체를 이용하여 정화공법을 시공한 예가 약 170여 곳에 이르며, 100m 설치시 약 20-40%의 정화효율이 있는 것으로 알려져 있다. 국내의 경우 군포시의 당정천(100m구간)과 산본천(60m구간)에 설치된 접촉재는 BOD 6~23%, COD 9~16%, 부유물질(SS) 2~10%, 암모니아 0~16%의 제거율을 나타내었다. 전반적으로 처리효과가 10%내외 정도로 파악되었다(군포시, 1998). 접촉산화재 효율의 차이는 하수내 유기물의 농도와 관련이 크기 때문에 BOD가 매우 높은 경우에는 산화효율이 저하되는 단점이 있다.

자연 미생물을 이용한 수질정화 방법은 일차적으로 하수처리 공정을 마친 폐하수나 유기물농도가 극단적으로 높지 않은 소하천이나 복개천에서의 수질정화에 중요한 방법으로 평가된다.

(5) 식생 정화시스템(Bio-Park)

수생식물은 무기 혹은 유기영양물질을 흡수 또는 흡착하며, 수생식물의 표면이나 이들

의 사체 및 뿌리질 표면은 미생물, 원생동물, 부착조류 등의 서식장소를 제공하여 수중에 유기물 분해를 촉진한다.

식생 정화시스템은 이러한 수생식물을 이용하여 수질을 개선하는 공법으로서 수생식물이 영양염류의 흡수하며, 수생식물의 줄기와 뿌리 등에 미생물들이 부착하여 많은 미생물들에 의한 유기물의 분해와 여과와 부유물질의 침전, 기질에서의 흡착등 수질처리에 이용한다. 또한 이러한 수생식물의 수질처리와 함께 경관향상의 기능을 가지고 있어 친수휴식 공간으로 이용할 수가 있으며, 일부식물은 식용과 약용으로 이용된다. 식물발화를 위한 일부 뿌리부분을 제외한 나머지 부분은 비료로서의 가치를 가지고 있어 수확하여 비료로 이용되기도 한다.

수질정화를 위해 적용된 식물은 정수식물인 갈대, 부들류를 비롯하여 부수식물인 부레옥잠이나 개구리밥에 이르기까지 매우 다양하다(표 2.12). 이들 각 식물들은 생활형에 따라 오염물질의 흡수·제거능과 재배, 수집, 운반의 용이성 및 재이용성에 따라 각각 장단점을 가지고 있다. 정수식물은 발달도가 높고 밀생하여 미생물에 대한 부착 매질로서 양호한 조건을 제공해 주고 통기조직을 통한 산소의 공급을 통해 유기물의 분해나 탈질을 유도함에 반해 체내의 질소, 인 함량이 낮고 성장속도가 낮아 영양염류의 흡수능이 미약하며, 수거가 어려운 반면 사료나 비료로서의 재이용성은 큰 편이다. 부수식물은 여러 면에서 수처리에 적합한 식물이나 과밀하게 성장된 경우는 수표면에서 공기와 산소유통을 차단하여 용존산소를 걸썩시키며, 내한성이 낮아 국내의 자연수연수역에서는 적용이 시기적으로 제한적이고 수분함량이 높아 운반이 쉽지가 않다. 부엽식물과 침수식물은 자연 습지에서 영양구조의 한 구성원으로서 중요한 역할을 하나 수처리로는 효과가 적은편이다.

수생식물을 이용한 수질 정화실험은 지금까지 많이 실시되어 왔고, 갈대·줄 등에서 N 0.5, P 0.05~0.08g/m²·day의 제거가 기대되는 등 상당한 종류의 식물에 대해서 제거능력이 알려지고 있다. 부레옥잠은 성장의 최성기에는 N 1~2, P 0.2~0.5g/m²·day의 높은 제거능력을 보이는 것으로 알려져 있다(류재근 등, 2002). 그러나, 생활하수 기본 원단위로 판단할 때 TN이나 TP가 각각 12g/사람·일, 1.43g/사람·일 발생하므로, 이 최성기의 부레옥잠조차도 한사람의 생활하수를 처리하는데에 10m² 정도의 면적이 필요하게 된다. 수중으로부터 식물에 의한 영양염 제거는 식물이 성장함에 따라 체내로 흡수되기 때문이지만, 제거능력은 그 식물체에 포함되는 N, P 함량과 식물체의 성장속도에 의해 제한된

다. 갈대군락의 생산량은 건조중량 $2\text{kg}/\text{m}^2 \cdot \text{년}$ (이중 1/4는 지하부의 생산량)이 알려지고 있다. 갈대는 수중으로부터의 영양염 제거능력이 높은 것으로 생각되지만, 수확을 년 1회 밖에 행할 수 없고, 그 군락의 유지를 생각하면 영양분이 지하경으로 전류하는 시기가 끝난 겨울에만 수확을 할 수 밖에 없어 큰 기대를 할 수 없다. 부레옥잠의 경우는 고밀도로 형성된 군락에서 식물체를 순차적으로 제거해 주면, 생산속도를 높게 유지할 수 있고, 영양염의 제거능력도 약해지지 않는다. 그러나, 이러한 식물재료를 이용할 경우, 실제로는 성장단계가 다른 군락을 준비하고 순차적으로 수확하여야 하므로, 정화시스템으로 가동 시키기에는 상당한 면적을 필요로 하게 된다. 따라서, 수생식물을 이용한 정화는 어디까지나 공학적인 하수처리의 보완적인 역할 또는 다른 생태공학적 기술과 연계하여 처리효율을 향상시킬수 있는 방법으로 평가된다.

① 일본 가스미가우라호의 바이오 파크

가스미가우라호의 수질정화를 위해 건설된 $3,400\text{m}^2$ (가로 78m X 세로 46.5m) 면적의 바이오 파크는 호수의 경관과 조화된 공원으로 꽃과 여러 가지 친수성 식물을 재배하여 부영양화된 호수물을 정화시키는 시설이다. 이 시설로 유입되는 유량은 하루 10,000톤 정도로 2대의 펌프에 의해 유입된다. 바이오 파크 내의 많은 미생물에 의한 유기물의 분해와, 식물뿌리 및 미생물에 의한 영양물질의 흡수, 여과와 부유물질의 침전, 기질에서의 흡착 등을 거쳐 정화된 물이 다시 호수로 방류되도록 설계되었다. 바이오 파크내에서 성장한 식물들은 주로 화훼와 같은 유용식물로서 공원과 같은 경관을 조성하며 시민들의 휴식공간으로 활용된다. 이들 식물들은 높은 비료효율을 가지고 있어 수확 후 퇴비나 비료로 이용되기도 한다. 바이오 파크에서 나타난 수질정화효과는 부유물질과 BOD가 약 70%, 인과 질소는 약 30%의 제거율을 나타냈다(강원대 환경연구소, 1997).

② 우리나라 바이오 파크의 사례

우리나라에는 일본의 가스미가우라에서의 예처럼 공원을 조성하여 호수 수질을 정화하고 휴식공간으로 활용한 예는 아직 없다. 그러나 최근 건설된 경기도 일산의 호수공원은 호수 수변을 공원화하여 시민들의 휴식공간으로 이용한 좋은 사례로 평가받고 있다. 일산 호수공원의 건설 목적이 수질정화는 아니지만 차후 주변의 공간을 이용, 꽃과 유용식물을 식재하고 호수 물을 통과하게 함으로써 수질정화와 휴식공간의 제공이라는 이중의 목적

을 달성할 수 있도록 바이오 파크의 개념을 도입할 수 있는 여지가 크다고 판단된다. 향후 우리나라의 수자원관리가 점차 하천에서 호수관리 측면으로 나가야 하는 만큼 바이오 파크는 자연생태계의 보호와 호수 부영양화의 방지, 상수원의 보호 등 호수형 수질관리에 좋은 방안으로 개발될 수 있다.

【표 2.12】 수질정화에 이용되는 식물들의 장·단점

구분항목	세부항목	정수식물				부엽식물		침수식물		부수식물		
		갈대	줄	애기부들	미나리	마름	연꽃	새우가래	검정말	좁개구리밥	생이가래	부레옥잠
유기물 제거능	근대발달도	○	○	○	○	△	△	×	×	△	△	○
	산소결핍도	△	△	△	×	○	○	○	○	○	○	×
	잔사생물 부착도	○	○	○	○	△	△	△	△	×	×	△
영양염류 제거능	생체량	○	○	○	△	△	△	△	△	×	×	○
	질소, 인 함량	×	×	×	△	△	△	○	○	○	○	○
	증식속도	×	×	×	△	△	×	×	×	○	○	○
재배	지하경	×	×	×	○	△	×	△	△	○	○	○
	내한성	△	△	△	○	△	△	△	△	○		×
수집	생육수심	△	△	△	○	×	×	×	×	○	○	○
운반	수분함량	○	△	△	△	△	△	×	×	×	×	×
재이용	사료, 비료 전환도	○	△	△	△	△	△	△	△	○	○	○

○ 양호 △ 보통 × 불량

출처: 공동수, 1998. 제1회 군포환경포럼.

(6) 인공부도

인공부도는 말 그대로 인위적으로 만든 구조물을 호수나 저수지에 띄워 그 위에 식물을 식재하여 수질정화에 이용하는 시설로서 일본에서는 Ukishima, 미국에서는 Floating islands, 독일에서는 Schwimmkampen으로 불린다. 인공부도는 철재 구조물 속에 발포 스티로폴을 이용하여 물에 뜨게 하고 철재 격자사이에 식물 식재용으로 스폰지를 설치한 후 전체를 네트로 덮어 완성한다. 이후 갈대나 부들 등의 수생식물을 식재하게 된다. 인공부도의 설치 목적은 수질정화, 경관조성, 그 외에 호안의 침식방지, 작은 치어들의 도피 혹은 큰 고기류의 산란장소로 이용될 수 있다. 식물들이 자란 후에는 새들의 집이나 유용 곤충들의 산란장소로도 이용될 수 있다.

일본 가스미가우라호에서 1992년 처음 시도된 인공부도는 호수의 수질정화와 수산자원 보호에 큰 효과가 있다고 보고하고 있다(Muller 등, 1996). 미국에서의 인공부도는 또 다른 단계로 발전하여 U.S. Geological Survey에서 구조물 설치의 경비를 절감하는 방법을 고안하고 있다. 페타이어를 이용하는 방법이 그것인데 설치 경비는 타이어 당 약 10달러 정도로 계산하고 있다. 페타이어를 이용하는 인공부도의 효율성은 아직 검증 중에 있으며 타이어를 이용하여 좀 더 대규모의 부도를 만드는 방법도 고안하고 있다.

인공부도의 이용은 호수관리에서 새롭게 시도되는 방법의 하나이다. 우리나라의 많은 인공호수는 연안대의 경사가 심하고 육상부와 수계의 구분이 확연해 수위의 큰 변화에 식생이 적응하기 어려운 공통점을 가지고 있다. 이러한 지형에 적용되는 인공부도는 호안의 침식방지와 수질개선 효과에 적합할 것이라 판단된다. 그러나 수질정화의 효율은 크게 기대하기 어렵다.

(7) 어류에 의한 생물조절(Biomanipulation)

수질관리나 부영양화의 조절이 생물이 섭취하는 영양물질의 감소라는 아래서부터의 조절(bottom-up control)이라면 생물조절은 수중 먹이연쇄의 상위에 위치하는 고기의 조절을 통하여 그의 영향이 아래에까지 미치게 하는 소위 위에서부터의 조절(top-down control)이다. 1975년 Shapiro *et al.*(1975)에 의해 처음 제기된 생물조절방법은 먹이망의 조절(food web manipulation)로도 불린다. 수중 생물의 피식과 포식에 의한 먹이망의 구

조와 기능적 관계를 이용하는 이 방법은 오직 생물만 이용하는 생물학적인 조절 (biological control) 방법이다. 생물조절의 궁극적인 목적은 호수수질의 정화이다. 방법 자체가 생물을 이용하는 것이기 때문에 최종적인 수질정화는 수중의 조류와 같은 생물감소에 의한 수질정화이지만 이들 조류의 생태에 영향을 미치는 또는 조류에 의해 유발되는 무생물적인 영향도 포함할 수 있다. 호수의 투명도나 영양물질의 감소와 같은 예를 무생물적인 영향으로 구분할 수 있다.

생물조절에 관해서 외국에서는 이미 20년 이상 연구를 축적하고 실제 호수관리에 이용해오고 있다(EPA, 1990). 세계 각지의 많은 크고 작은 그리고 영양상태가 다른 호수들에서 이 생물조절의 성공과 실패 사례들이 보고 되고 있다. 호수의 투명도의 증대, 조류의 번성 저감, 질소 또는 인과 같은 영양물질의 저감 등이 생물조절의 주된 효과이다.

다른 생태공학적인 수질개선 방법은 효율성의 고저에 따라 성패를 구분하지만 생물조절의 방법은 효과의 유무로 성패가 구분되고 있다. 이는 대상 호수의 영양상태나 지형의 조건 또는 유입수의 성격에 따라 생물의 분포가 다르고 그에 따라 생물간의 생태학적인 작용의 정도가 다르기 때문이다. 생물들은 그의 본성에 따라 환경에 대한 적응성의 정도가 다르고 시간이 지남에 따라 적응(도피도 포함됨)의 정도가 높아지는 것이 보통이므로 물리·화학적인 방법들보다는 효과의 변이가 크다. 이런 이유로 현재에 와서는 생물조절의 방법이 다른 물리·화학적인 방법과 혼용되는 경우가 많아 졌고 그에 따른 효율성의 증대도 보고되고 있다. 특히, 부영양화가 매우 심한 호수에서는 많은 경우 생물조절의 효과가 저하되는 것으로 보고되고 있다(Matena *et al.*, 1994).

소규모의 연못이나 늪지에서 단순한 플랑크톤을 섭식하는 작은 고기류를 제거하거나 다른 화학적인 방법과 혼용하여 이용한 예를 제외하고는, 우리 나라에서 생물조절의 방법을 실제 적용하여 호수 수질관리에 이용한 예는 거의 없었다. 아직 학문적인 기초조사와 사전 적용실험이 충분히 수행되지 않아 그 효과를 검증할 수단이 없었던 것이 가장 큰 이유중의 하나라고 생각된다. 생물조절의 방법은 거의 비용을 들이지 않는 것과 부작용이 거의 없다는 장점이 있고, 중~빈영양상태의 호수나 부영양상태의 호수라 할지라도 다른 방법과 혼용하면 그 효과를 기대할 수 있다.

여 백

제 3 장

사상성부착조류의 형태적 · 생리적 특성 및 영양염류 제거능

여 백

제 3 장 사상성부착조류의 형태적 · 생리적 특성 및 영양염류 제거능

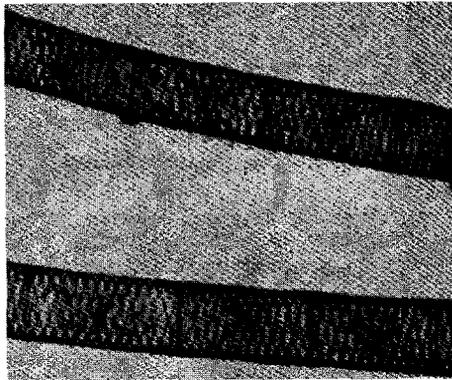
제 1 절 농촌유역 부착조류의 생리 · 형태학적 특성

유수생태계에서의 부착조류는 주요 1차생산자로서 다양한 기질에 부착하여 높은 생물량과 물질생산성을 유지함으로써(조, 1994) 생태계의 군집생산과 소비정도를 결정하는 중요한 지표이며 먹이사슬의 근간을 이룬다(하 등, 1997). 부착조류의 성장은 영양염과 수중 광량, 온도, 유속 및 포식자 등에 의해 영향을 받으며 여러 숙주식물들과 영양소를 공급하거나 섭식방어 효과를 주는 등 공생관계를 하기도 하며 때로는 숙주식물의 분비 물질이나 추출물에 의해 생장이 저해되는 등의 생태학적인 경쟁관계를 갖기도 한다.

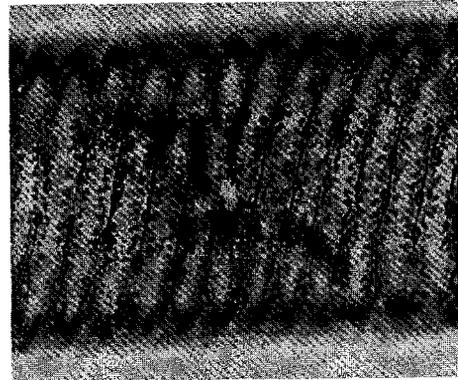
대표적인 부착조류 그룹중의 하나인 사상성부착조류(Filamentous Periphytic Algae)는 단세포 조류와 마찬가지로 수중의 영양염을 체표면 전체에서 흡수하며 최대 성장 시에는 그 길이가 수 미터(m)에 이르기기도 한다. 부착기질에 고착하여 생활하는 단세포성 조류에 비해 사상성부착조류는 수중으로 뻗어 나가며 성장하므로 수중 영양염에 대한 이용효율이 높고 비표면적(specific surface area)이 커서 전체 덩어리는 분해미생물에 방대한 매질을 제공하여 유기물의 분해활동을 촉진함으로써 수중의 자연정화 능력을 증대시키게 된다. 수생관속식물에 비해서 성장속도가 빨라 영양염의 제거(흡수)율이 높다. 자연계에서 사상성부착조류는 물의 유동에 의해 접촉되는 부분의 영양염을 이용하므로 정체수역 보다는 흐름이 있는 하천에서 증식도와 영양물질의 흡수율이 높다.

농배수로나 농촌유역 소하천에 널리 분포하는 사상성부착조류들로는 *Spirogyra*(해감), *Oedogonium*(붓뚜정말), *Mougeotia*(판해감), *Rhizoclonium*(헛뿌리말), *Cladophora*(대마디말), *Nostoc*(염주말), *Oscillatoria*(흔들말), *Phormidium*(가죽흔들말) 등이 있으며, 그 외에 논이나 주변에서 피플현상과 관련되는 사상성 또는 군체성 부착조류가 존재한다. 이들의 종류도 상당히 다양하며 다음과 같은 생리적 · 형태학적 특성을 가지고 있다.

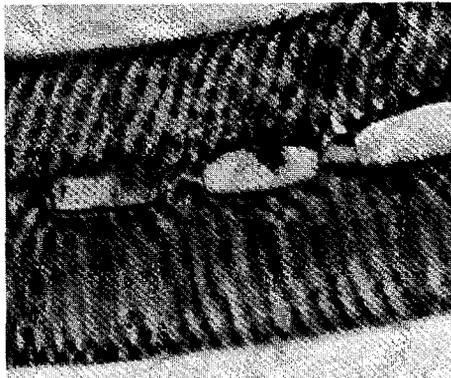
1. Spirogyra(해감) : *Spirogyra turfosa* Gay



사상체



세포내의 나선형 형태의엽록체



접합관 형성과정



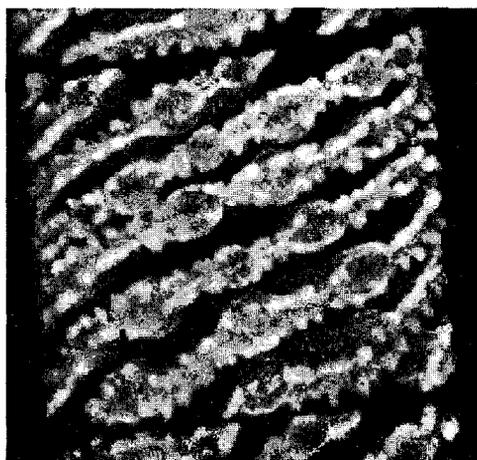
사상체 집합

【그림 3.1】 *Spirogyra turfosa* 세포의 형태와 성장모습

가. 형태

사상체 녹조류로서 전 세계적으로 400여종 이상이 발견되고 있다. 엽록체(Chloroplast), 피레노이드(pyrenoids), 투명한 세포 핵(transparent nucleus), 가느다란 섬유질(fine strands), 및 원형질들(protoplasm)과 외벽으로 구성되어있다. 세포 내의 나선형 모양의 엽록체의 배열에서 그 이름이 유래된 *Spirogyra*의 구조는 엽록체는 광합성을 주관하는 주요기관으로 톱니와 같은 외벽을 가지고 있으며 나선형으로 3-4본이 1.5-4 회전하며 서

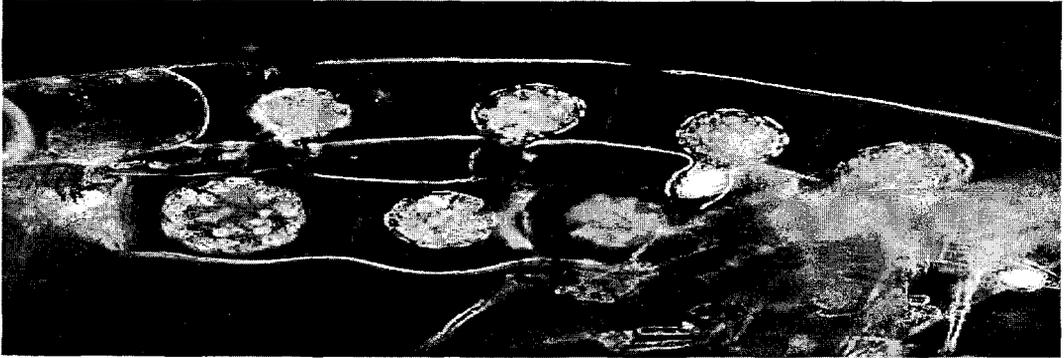
로 연결되어있다(그림 3.2). 피레노이드는 엽록체 안에 존재하는 구형의 물질로 녹말(starch)의 생성을 관장하며, 투명한 세포핵 과 섬유질 및 여러 가지 원형질들로 구성되어 있다. 세포의 폭은 68-78 μm , 길이는 68-350 μm 정도이다. 세포는 긴 타원형이다. 결합 시에는 사다리형 결합을 하며 사상체는 분지하지 않는다.



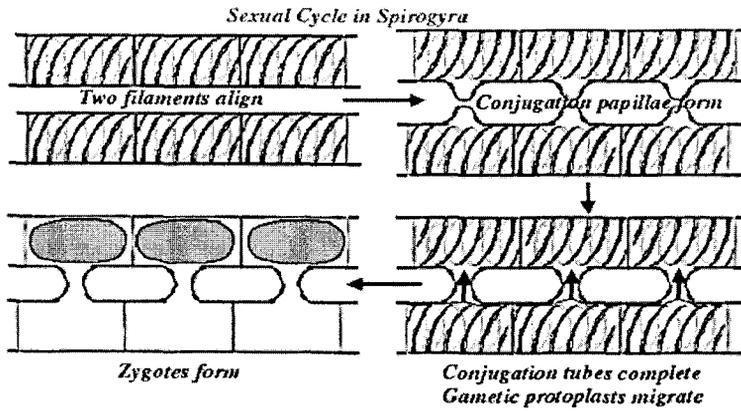
【그림 3.2】 *Spirogyra*의 엽록소 배열

나. 생태

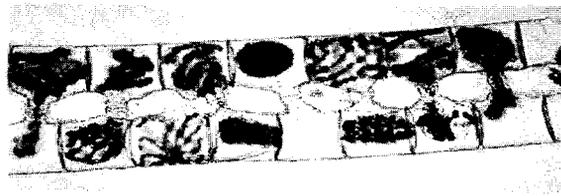
*Spirogyra*는 5월 중순에서 6월 중순 사이에 유성생식을 한다. *Spirogyra*는 생육단계 전반에 걸쳐 유동성이 미비하다. 즉, 난세포와 정충(ova or sperm) 및 유주자(zoospores) 등을 통한 먼 지역까지의 번식이 불가능 하며, 근접한 거리에서의 암수의 세포의 접합(그림 3.3)에 의해서 번식 하는 것으로 알려져 있다. 두개의 사상체는 근접한 거리에 위치하며 세포가 증식하여 사상체의 chamber 간에 연결관(conjunction tube)를 만들게 된다. 결합통로가 형성이 되면 수컷 또는 기부자(donor)의 세포속의 원형질체가 수컷의 세포로 짧은 시간 안에(분) 이동하게 된다. 이와 같은 과정을 거쳐 형성된 결합자(zygotes)는 두터운 외벽을 형성한 후 휴면기에 들어가게 되며(그림 3.4과 3.5) 적당한 시기에 감수분열하며 발아하게 된다. 자연상태에서의 암수의 구별은 육안으로도 가능하며, 군집 형태에 따라 병렬로 흐트러져 늘어진 형태로 존재하는 다발을 암컷으로, 그 외의 것들은 수컷으로 구분한다. 해캄은 무성생식을 하지 않는다.



【그림 3.3】 Spirogyra의 생식과정 중 형성된 conjugation tube

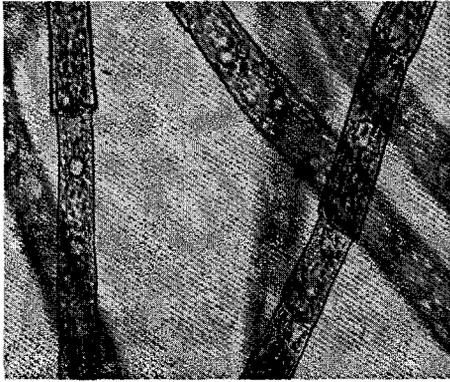


【그림 3.4】 Spirogyra의 생식 단계

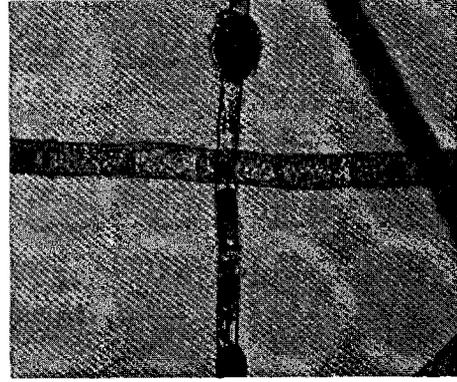


【그림 3.5】 Spirogyra의 conjugation tube를 통해 원형질체가 이동하는 모습

2. Oedogonium(붓뚜껑말) : *Oedogonium foveolatum* Wittrock



세포분열과 세포막 형성과정



생란기



사상체

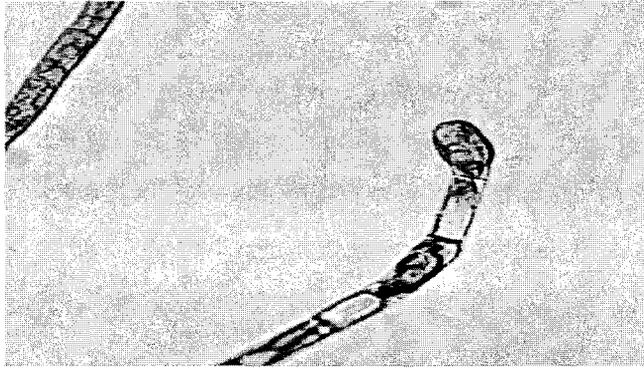
【그림 3.6】 *Oedogonium foveolatum* 세포의 형태와 성장모습

가. 형태

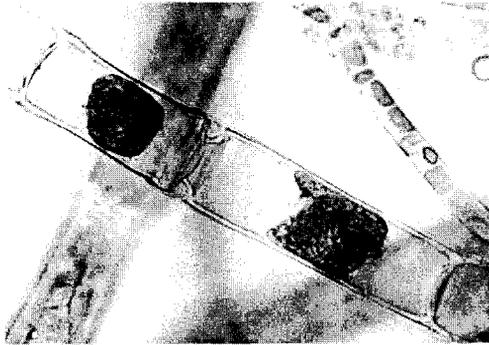
사상 녹조류로서 자웅동주 이면서 대형 응체성이다. 사상체 세포의 폭은 14-23 μm 이고, 길이는 35-115 μm 이다. 생란기는 구형 또는 도란형으로서 폭이 37-49 μm , 길이가 38-57 μm 이다. 생란기의 개구는 위쪽에 위치한다. 난포자는 구형 또는 횡타원형으로서 폭이 33-46 μm 이고 길이가 34-48 μm 이다. 조정기는 1-7개이고 폭은 15-19 μm , 길이가 8-12 μm 이다. 세포가 분열할 때에는 세포막 내층의 셀룰로스층이 신장한 후 외층인 펙틴층이 형성된다.

나. 생태

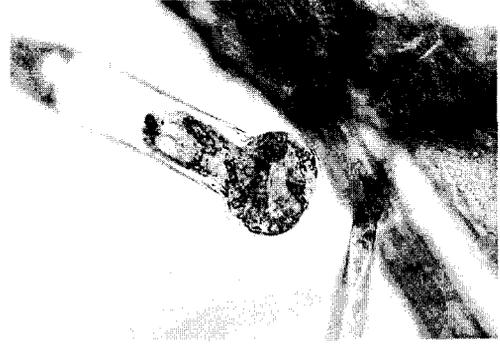
*Oedogonium*은 녹조류 중 번식방법에 있어 가장 진화된 종으로 무성생식과 유성생식을 모두 한다. 두가지의 생식방법 모두 세포의 분열에 의해 이루어지며, 유성생식은 긴 조체의 끝의 측막(側膜)의 잔여물로 머리세포(cap cell)라 불리는 섬유질 구를 형성하여 이루어지며(그림 3.7), 무성생식은 운동성이 있는 유주자를 형성하여 번식하기도 한다. 격벽을 열고 밖으로 방출된 유주자는 발아한 후 부착기를 형성하고 결국 가근이 만들어진 다(그림 3.8). 논에서 흔히 볼 수 있는 사상성 녹조류이다.



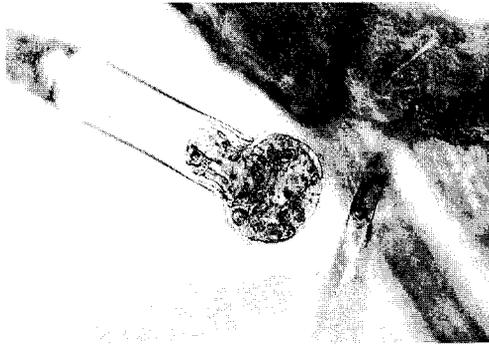
【그림 3.7】 *Oedogonium*의 cap cell의 형성



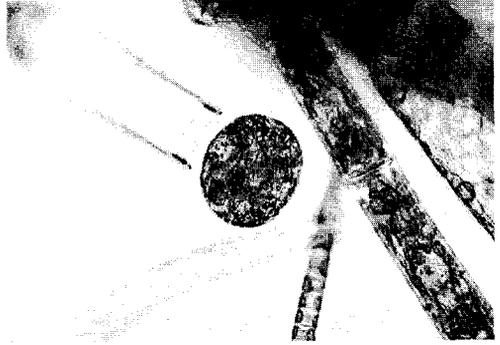
① 유주자의 이동 과정



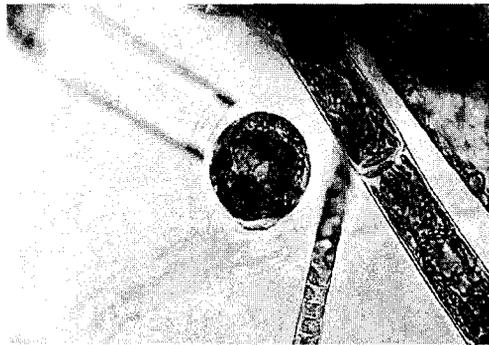
② 사상체밖로부터 유주자의 이탈 과정



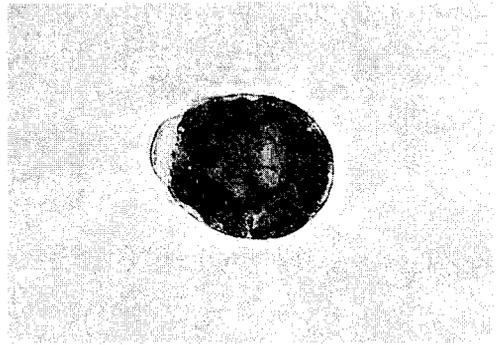
③ 사상체밖로부터 유주자의 이탈 과정



④ 사상체밖로부터 유주자의 이탈과정

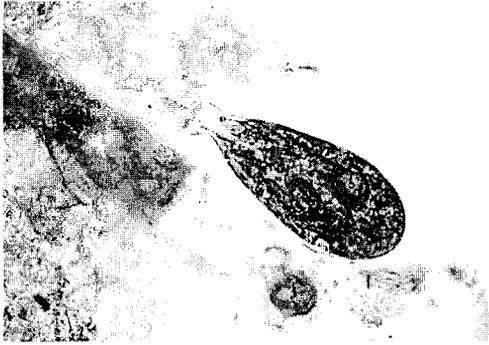


⑤ 안점(eyespot) 형성과정



⑥ 유주자의 유영

【그림 3.8】 *Oedogonium*의 무성생식과정



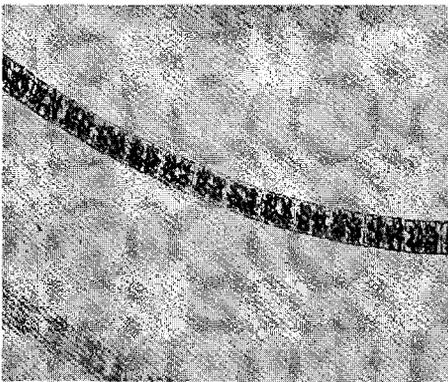
⑦ 안점의 변형 및 착상시작



⑧ 착상과정

【그림 3.8】 계 속

3. Mougeotia(판해감) : *Mougeotia genuflexa* (Dillwyn) Agardh



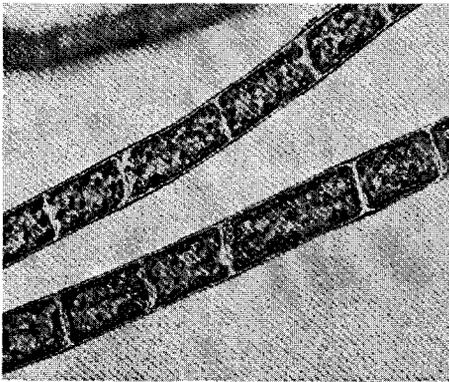
【그림 3.9】 *Mougeotia genuflexa* 세포의 성장모습

사상체 녹조류로 세포의 폭은 25-38 μm , 길이는 50-225 μm 이다. 세포내에는 다수의 피레노이드가 산재해 있다(그림 2.9). 결합은 대체로 사다리 모양으로 한다. 접합포자는 구형 또는 횡타원형으로서 폭이 30-40 μm 이다. 사상체는 분지하지 않으며 1개의 판상 엽록체를 가지고 있다. 논이나 저수지 등에 널리 분포한다.

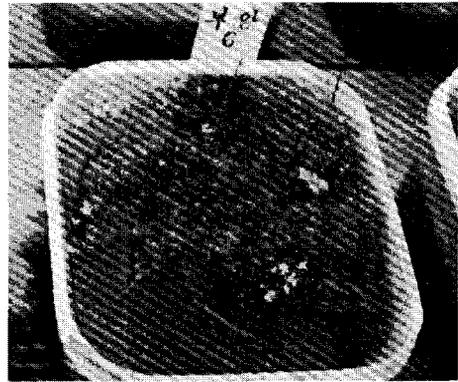
4. Rhizoclonium(헛뿌리말): *Rhizoclonium riparium* (Roth) Harvey

유안으로 보아 긴 사상엽록체로 세포는 원주형으로서 망목상의 엽록체와 다수의 피레노이드를 가지고 있다(그림 3.10). 세포 길이는 30~70 μm 이고 직경은 20~30 μm 정도 된다.

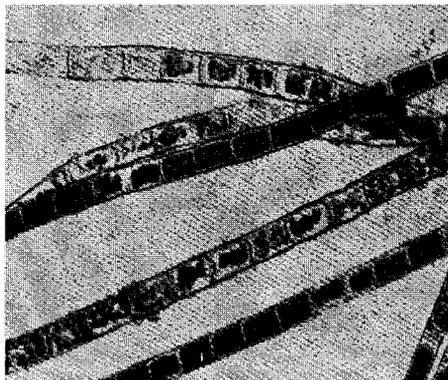
눈에 발생할 때에는 구형집단으로 보이는 경우가 많으며 세포 분열에 의해 세포를 무성적으로 증식시키거나 배우자에 의한 유성생식도 한다. 전국적으로 넓게 분포되어 있으며 눈에도 많이 발생한다.



사상체



수면에 부유한 군집

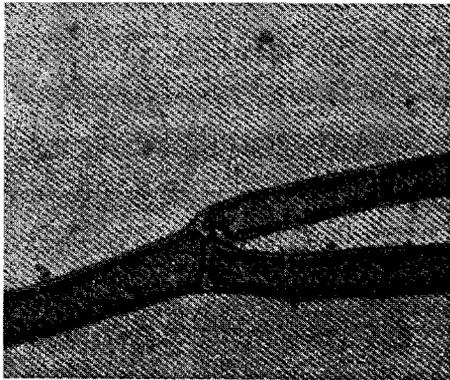


제초제 처리 후 세포의 파괴상태

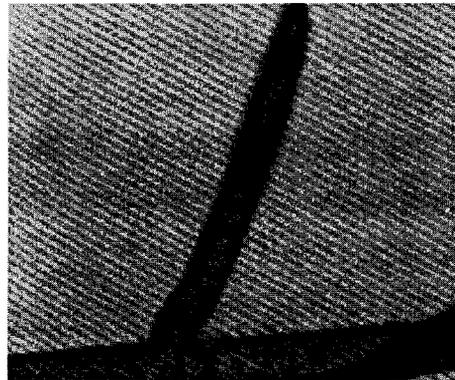
【그림 3.10】 *Rhizoclonium riparium* 세포의 형태와 성장모습

5. Cladophora(대마디말): *Cladophora sauteri* (Nees) Kuetzing f. *sauteri*

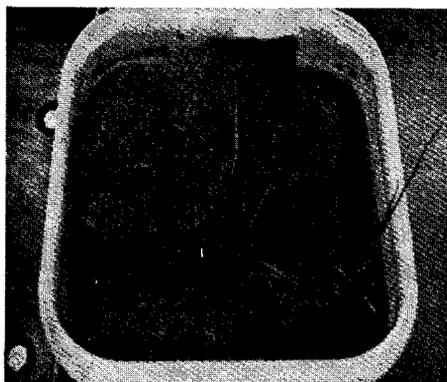
육안으로 보아 사상체이고 구형집단을 이루고 있다. 소형의 구형집단은 공간이 없이 차 있으나 큰 집단에는 속에 빈 공간이 있다. 사상체는 여러가닥으로 갈라져 서로 엉켜 있다 (그림 3.11). 세포는 원주형으로서 폭이 45~80 μm 이고 길이는 직경의 6~9배 정도이다. 세포는 망목상의 엽록체와 다수의 피레노이드를 가지고 있다. 유주자에 의해서 무성생식을 하기도 하고 배우자의 합체에 의한 유성생식을 하기도 한다. 일반적으로 오염소하천이나 논에 많이 발생한다.



사상체



사상체의 분지

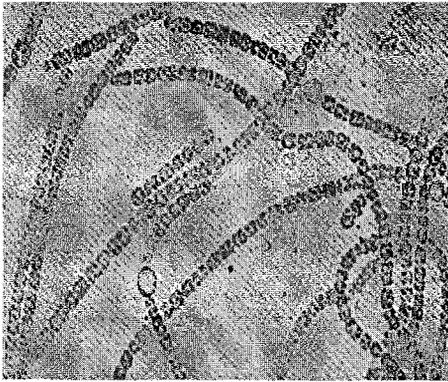


수면에 부유한 군집

【그림 3.11】 *Cladophora sauteri* (Nees) Kuetzing f. *sauteri* 세포의 형태와 성장모습

6. Nostoc(엽주말): *Nostoc commune* Vaucher

수면에 주정형으로 넓게 퍼져 있는 엽록체이다. 구생을 이루는 점액질은 부드러운 한천 질(寒天質) 모양으로 건조한 표면부는 흑록색 또는 흑색을 띠지만 내부의 수분이 포함된 부분이나 표면부에도 수분을 공급하면 바로 청록색이 된다(그림 3.12). 손으로 문지르면 쉽게 가루모양으로 분쇄된다. 사상체는 굽어있고 불규칙하게 엉켜있다. 세포는 구형 또는 짧은 원통형으로서 폭은 4~5 μm 이고 길이는 폭과 비슷하다.



사상체와 이형세포

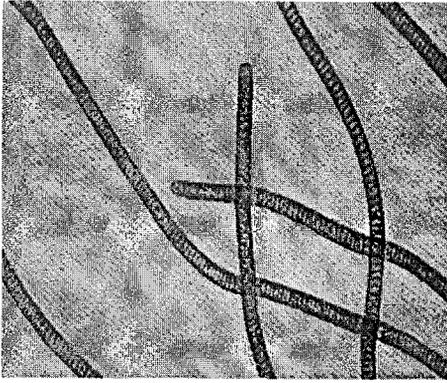


수면에 부유해 있는 군집형태

【그림 3.12】 *Nostoc commune*의 형태와 성장모습

7. Oscillatoria(흔들말): *Oscillatoria* spp.

논에서 가장 흔히 볼 수 있는 사상성/군체성 남조류로서 군집을 이루고 있을 때는 어두운 청녹색을 띤다. 세포의 접합부분이 오목하지 하지 않기 때문에 직선형의 사상체로 나타난다(그림 3.13). 세포의 길이는 3~5 μm 으로서 폭의 1/6~1/3정도이나 사상체의 폭은 15-20 μm 이고 선단부가 좁아지지 않는다. 수중에서 유영생활을 하기도 하지만 보통 부영양 호소나 논에 발생하고, 대량발생시에는 남색의 피부를 일으키는 원인종이며 실내 양어 수조나 저수탱크에 까지 발생하여 수질을 오염시키는 등 방제대상이 되기도 하며 수질의 오염지표생물로 이용되기도 한다.



사상체

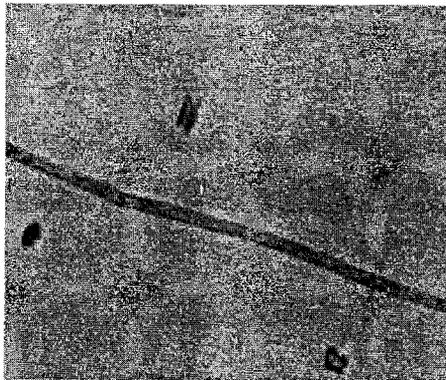


군집형성모습

【그림 3.13】 *Oscillatoria* spp. 세포의 형태와 성장모습

8. Phormidium(가죽흔들말): *Phormidium treleasei* Gomont

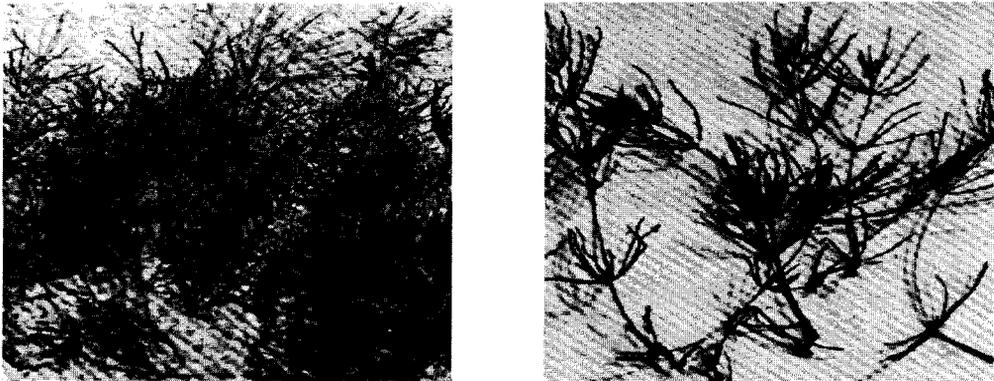
흔들말과 비슷한 형태이지만 세포의 직경이 가늘고 길이가 긴 형태의 사상성 남조류이다(그림 3.14). 올리브녹색을 띠고 사상체는 점액질로 된 막을 가지고 있다. 사상체는 담청녹색으로서 폭이 $0.6\sim 0.8\mu\text{m}$ 이고 길이는 폭의 약 11배이다. 부영양상태의 호소나 논에서 생활한다.



【그림 3.14】 *Phormidium treleasei* 의 사상체

9. Chara(쇠뜨기말): *Chara braunii* Gmelin

크기가 40cm에 달하는 대형 조류로서 하나의 본체에 대략 8-11개의 3-4마디로 구성된 작은 가지울 가지고 있으나 본체 자체가 분지(分枝)하지는 않는다(그림 3.15). 전국에 널리 분포하며 연못, 저수지, 개울, 논 등에 발생한다. 쇠뜨기말류 중에서 *Chara braunii* 는 가장 일반적인 종으로 배양이 용이하여 원형질의 변화와 관련된 실험에 사용되기도 한다. 쇠뜨기말은 담수나 염분농도가 높은 간척지에도 발생한다. 수소이온 농도로 보아 중성을 선호하지만 약알칼리성에서도 잘 성장한다. 음식식물의 특성을 가지고 있어서 빛이 적은 환경에서도 잘 성장하는 특징이 있다. 자연상태에서는 침수식물로 오해받을 수 있으며, 빛이 있는 조건에서 성장하므로 깊은 정체성 수역에서는 수중의 투명도가 높아야만 발달이 가능하다. 그래서 수질 지표종으로 이용되기도 한다.

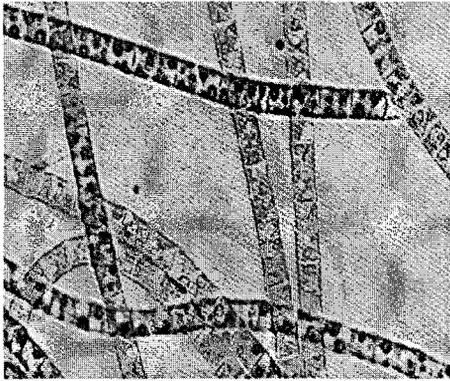


성체 모습

【그림 3.15】 *Chara braunii*의 형태와 성장 모습

10. Ulothrix(주름말): *Ulothrix tenuissima* Kuetzing

육안으로 관찰이 가능한 사상성 녹조류로 세포는 짧은 원주형으로서 사상체는 세포의 연결부분이 좁아지지 않는 직선형으로 나타난다(그림 3.16). 세포의 직경은 18~28 μm 이고 길이는 10~15 μm 이다. 엽록체는 1개이고 여러개의 피레노이드를 가지고 있다.



사상체



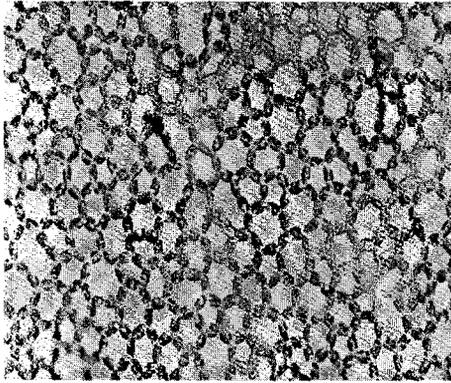
수생식물에 부착한모습

【그림 3.16】 *Ulothrix tenuissima* 세포의 형태와 성장모습

11. Hydrodictyon(그물말): *Hydrodictyon reticulatum* (Linneus) Lagerheim

군체를 형성하는 세포는 6각형 또는 5각형의 공간을 만들면서 규칙적으로 배열하여 전체적으로 그물형태로 되어 있는 녹조류이다. 세포는 원주형이고 엽록체는 강목상(綱目狀)이며 세포에는 다수의 피레노이드가 있다(그림 3.17). 세포는 끝 부분끼리 서로 접합되어 그물구조를 형성한다. 세포의 폭은 $200\mu\text{m}$ 이고 길이는 1cm 정도까지 되는 경우가 있다.

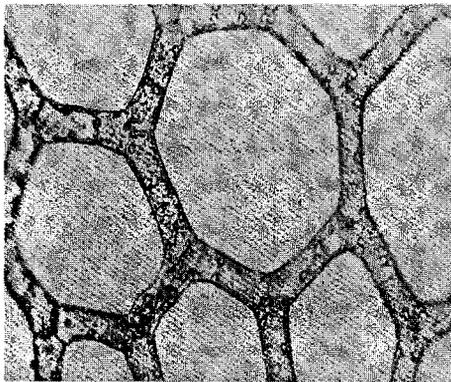
모세포 내에서 형성된 어린 망상구조는 시일이 지나면 모체 밖으로 나와 세포가 성장하여 새로운 큰 망상체를 이루게 된다. 망상체의 각 세포 내에 유주자가 만들어지면 망상구조는 깨어지고 새로운 망상구조의 유체가 만들어진다. 그물말은 무성생식 과정 외에도 배우자 접합에 따른 유성생식도 한다. 그물말은 물에서 유영생활을 하며 해캄(*Spirogyra* spp.)들과 공존하는 경우가 많다. 흐름이 비교적 적은 얇은 수역(습지)이나 농경지 부근에서 관찰된다.



망상구조



군체상태



성숙한 *Hydrodictyon reticulatum*의 망상구조

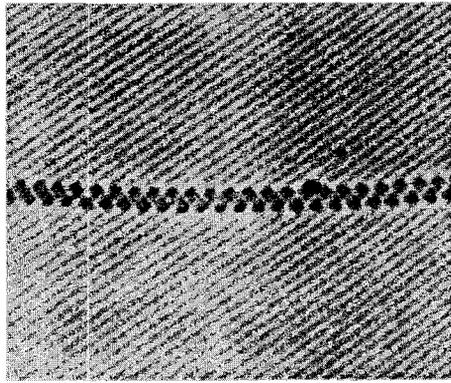


망상구조의 해체

【그림 3.17】 *Hydrodictyon reticulatum*의 형태와 성장 모습

12. Spirulina(나선말): *Spirulina major* Kuetzing f. *major*

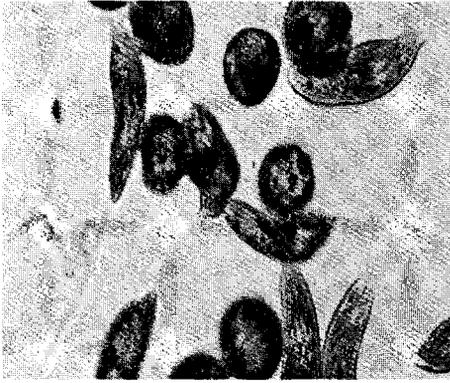
사상체가 규칙적인 나선형태의 남조류이다. 나선은 서로 떨어져 있으며 부착되어 있지 않다(그림 3.18). 세포는 청록색이고 폭은 1~2 μm 이다. 나선의 폭은 2.5~4 μm 이고 나선의 간격은 2.7~5 μm 이다. 주로 수중생활을 하며 부영양호소, 일반농경지 및 간척지 논에도 발생한다.



【그림 3.18】 *Spirulina major*의 사상체

13. Euglena(유글레나): *Euglena proxima* Dangeard

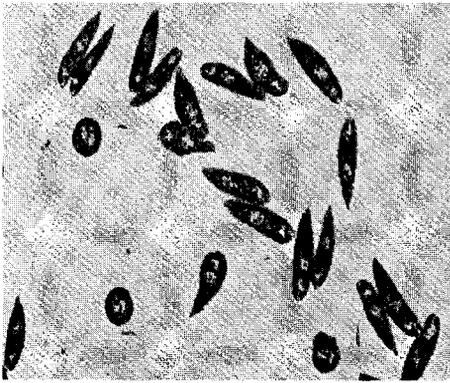
엽록체를 가진 원생동물로서, 엽록체는 불규칙한 형으로서 원반형이고 피레노이드는 없다. 세포의 폭은 $14.5\sim 19\mu\text{m}$ 이며 길이는 $50\sim 95\mu\text{m}$ 이다. 수면위에서 부유생활을 하고 대량발생하면 녹색, 적색, 흑색 등으로 물꽃을 형성한다. 눈물에 질소 성분이 많으면 증식되어 대량 발생한다. 세포분열 시에는 착상상태로 되며 투명한 한천질의 점액막이 세포를 둘러싸고 있다. 수면에 부유한 유글레나를 현미경으로 관찰해 보면 구형으로서 한천질 피막에 둘러싸인 적색 유글레나가 보인다. 이시기는 포막형성기로서 세포내에 haematochrome이라고 하는 적색색소가 형성되어 있기 때문이다. 이 때는 수면에 붉은 벽돌가루를 뿌린 것처럼 적색 수화현상을 나타낸다.



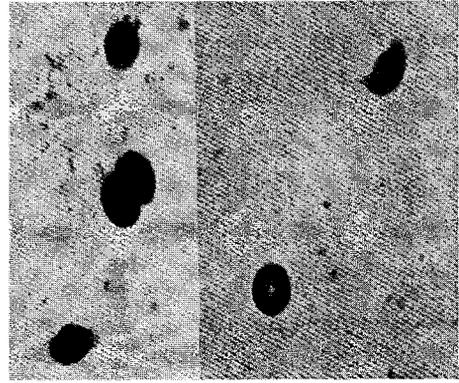
*Euglena proxima*의 세포



*Euglena proxima*의 군집상태



흑색으로 변환 *Euglena proxima*세포



분열기의 *Euglena proxima* 세포

【그림 3.19】 *Euglena proxima* 세포의 형태 및 성장 모습

제 2 절 사상성부착조류의 성장과 영양염 흡수(제거)능

생물에 의한 인의 흡수는 생산성 또는 생체량과 직접적인 관계가 있기 때문에 자연계에서의 인을 비롯한 영양염 동태학에 있어 부착조류의 중요성은 부착조류가 서식하는 수심에서 빛이 이용될 수 있느냐 하는 문제가 관건이다(Sand Jensen and Borum, 1991; Wetzel, 1996). 대체로 부착조류가 식물플랑크톤이나 박테리아만큼 인을 빨리 흡수하지는 못하지만(Hwang *et al.*, 1998) 빛을 충분히 이용함으로써 빠른 성장을 할 수 있고 이로 인해 충분한 생체량을 확보할 경우에는 부유성 생물과도 충분히 경쟁할 수 있다.

부착성조류의 영양염 흡수(제거)능은 이들의 최대흡수율과 반포화상수로 구성되는 영양염흡수역학(uptake kinetics)을 이용하여 나타낼 수 있으며, 이를 위해 일반적으로 Michaelis-Menten 모델을 이용한다. Michaelis-Menten 모델은 흡수속도 (V)와 수중의 인농도 (S)의 관계에 의해, $V=V_{max} \cdot [S/(K_s+S)]$ 의 식으로 표현되며, 이 관계를 결정짓는 중요한 변수는 최대흡수율(V_{max})과 반포화농도상수(K_s)이다.

아래의 <표 3.1>은 다양한 조건에 서식하는 부착조류들의 인흡수능 대한 역학적 결과를 나타내었다. 인이 충분히 공급되는 조건에서는 높은 최대흡수율(V_{max})을 가진 부착조류일수록 경쟁적으로 우세하고 많은 양의 잉여부분의 인을 세포내에 축적할 수 있다 (luxury uptake). 따라서 그러한 생리적 특성을 가진 후보종을 이용성 특면에서 일차적으로 고려할 수 있을 것이다. 그러나 만약 다른 조건이 성장을 제한하게 된다면 그 조건도 반드시 고려하여야 할 것이다. 반포화농도상수(K_s)는 최대흡수율의 1/2이 되는 부분에서의 해당 시료 내의 인농도를 의미한다. 따라서 반포화농도상수는 낮을수록 부착조류는 영양염 흡수속도가 빨라 경쟁적으로 우세하게 된다. 낮은 반포화농도상수는 해당 부착조류가 빨리 최대성장속도에 이르게 하므로 상대적으로 영양염 농도가 낮은 조건에서 유리할 수 있다. 조류의 성장역학에 관련된 변수들은 생리적으로 우세한 후보종을 선발하는데 중요한 지표로 이용될 수 있다. 그러나 해당 부착조류에 대하여 이러한 자료가 없을 경우에는 흡수역학 실험을 따로 수행할 필요가 있지만 반드시 필요한 의무조건은 아니며, 단순한 성장률이나 흡수율 실험을 통해서도 그 능력을 평가할 수도 있다. <표 3.1>에서 나타난 각각의 부착조류 종들에 대해서 절대적인 순위를 결정하기는 어려우나 인농도가 높은 대상하천에서 활용을 우선적으로 고려할 수 있는 종류로는 *Stigeoclonium tenue*, *Cladophora*(대마디말), *Chara*(쇠뜨기말), *Spirogyra*(해캄)등을 꼽을 수 있겠으나, 이들의

성장에 미치는 요인들을 종합적으로 고려해야함은 당연하다.

【표 3.1】 Michaelis-Menten 식을 이용한 부착조류의 인 흡수능 비교

Species or Communities	K_s ($\mu\text{g}/\ell$)	V_{\max} ($\mu\text{gP} \cdot \text{gdrywt}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$)	Reference	Note
부착조류				
<i>Spirogyra fluviatilis</i>	9.3~46.5	322~803	Borchardt et al. (1994)	A
<i>Stigeoclonium tenue</i>	91	5,736	Rosemarin (1982)	B
<i>Cladophora glomerata</i>	15.5~86.5	62~166	Lohman and priscu (1992)	A
<i>Cladophora glomerata</i>	31~251.1	167~1,875	Auer and Canale (1982)	A
<i>Chara</i>	3.2	360	Steinman et al. (1997)	
River periphyton	0.5~7.2	542~5,429	Bothwell (1985)	A,C
Epipellic algae(natural)	3.1		Bjork-Ramberg (1985)	
Epipellic algae (fertilized)	15.5~21.7		Bjork-Ramberg (1985)	
Lake Okeechobee				
Epiphyton	0.1~15.3	193~7,916	Hwang et al. (1998)	A,C

Note : (A) 다른 정도의 영양염 제한이 나타나는 수계에서의 결과. (B) Anderson and Hassen, (1991)에 의거, 건중량의 48%가 탄소량으로 고려하였음. (C) Bothwell (1985)에 의거하여 C : Chl.a (w/w) 비율을 97로 계산하여 적용하였음.

출처 : 황과 공.1999. 습지의 인 Sink 기능에 영향을 미치는 생물학적 요인들.

수중의 부착조류의 성장은 유속, 부착매질, 영양염, 온도, 광도 등 많은 환경인자에 영향을 받는다. 이러한 환경인자가 부착조류의 성장에 미치는 영향과 부착조류의 성장과 관련하여 영양염의 제거측면에서 연구결과들은 부착조류를 이용한 수질개선의 기법을 개발하는데 있어 기초자료로 활용이 가능하다

(1) Horner *et al.*(1990)는 유속, 부유물질, 인의 농도 등의 변화에 따른 부착조류 반응에 대하여 연구를 수행하였다. 다양한 유속(20~80cm/s) 범위 내에서 부착조류의 성장은 60cm/s에서 가장 크게 나타났고, 고정된 각 유속에서의 평균 생물 손실량은 0.5mgChl.a/m²/hr 이하로 크게 다르지 않았다. 특히, 부유물질이 첨가된 경우가 첨가되지 않은 경우보다 생물 손실량이 증가됨을 보고하였다. 인 흡수율은 50 $\mu\text{g}/\ell$ 이하의 농도에서 인 농도와

함께 증가하였고 35cm/s의 유속 이상까지 증가하였다. 면적당 평균 생물량에 대한 흡수율은 생물량이 많아질수록 낮아지는 경향을 보고하였다.

이 연구의 결과는 사상성부착조류의 성장에 큰 영향을 미치는 유속의 조건은 고정된 것이 아니며 해당 환경에 따라 상당히 큰 범위로 나타날 수 있음을 제시한다. 그러나 일반적으로 어느정도까지는 빠른 유속이 성장에 유리함을 보여주고 있다. 또한 단위면적당 생물량에 대한 흡수율이 생물량이 많아질수록 감소하였던 결과는 부착조류가 영양염을 최대한 흡수하는 최적성장상태가 있음을 시사하는 것이다.

(2) McIntire and Phinney(1965)는 부착조류에 영향을 미치는 환경인자에 대한 연구를 수행하였으며, 그 결과 부착조류의 초기 착생 시에는 낮은 유속이 좋으며 장기간의 성장에 있어서는 유속이 빠를수록 생물 축적량이 높았음을 보고하였다. 생물 축적량은 수중의 광량과 직접적인 관련 있었고 또한 (광량×유속)에 비례함을 보여주었다. 일정한 유속에서의 부착조류의 손실율과 공급수의 높은 탁도에 관련한 부분에서는 높은 탁도 기간동안 손실률이 낮은 탁도 기간동안보다 현저히 크다는 것을 발견하였다.

이 연구의 결과는 부착조류 초기 착생시기부터 정상적인 장기간 성장에 이르기까지 최적성장에 필요한 유속이 항상 일정하지는 않음을 시사하며, 수중의 부유성 현탁물질이 부착조류 성장에 부정적 영향을 미침을 보여주고 있다.

(3) McIntire(1996)는 유수환경에서 부착조류의 생산량과 군집 물질대사에 관한 연구를 수행하였다. 조절된 유속범위(0~50cm/s)에서 유속에 따른 생물량 축적과 각각의 유속이 조류 집단의 종 구성에 미치는 영향에 대하여 보고하였다. 유속에 따른 차별적인 부착조류 우점종을 발견하였고, 유속이 38cm/s에서는 규조류가 우점하였고, 9cm/s에서는 사상성 녹조류가 우점하였다고 보고하였다.

이 연구의 결과는, 고정된 것은 아니지만 부착조류의 종류별로 최적성장에 필요한 유속 범위가 존재함을 시사하고 있다.

(4) Whitford and Schumacher(1964)는 담수조류의 호흡과 무기물의 흡수에 대한 유속의 영향에 관해 연구하였다. 부착조류의 인 흡수율은 흐름에 노출 되었을 때가 정지된 상태보다 높았음을 보고하였다. 유속의 증가가 조류에 미치는 영향은 유속의 증가에 따라

마찰전단력이 더해짐으로써, 기질에 대한 부착의 방해와 기질 표면에 붙어 성장하는 큰 생물량의 일부가 제거된다는 것을 발견하였다.

이 연구의 결과는 미생물의 영양염이용은 생물자체의 능력과 함께 용존성 영양염의 확산에 크게 의존함을 보여준다. 특히, 유수성 환경의 경우는 지속적으로 물의 흐름에 의해 접하는 면적과 시간이 커지기 때문에 상대적으로 높은 흡수율을 나타내는 것이다.

(5) Thomas and David(1983)는 부착조류가 부착매질로 이용하는 자연적이거나 인위적인 유수 침수식물에서 부착조류의 특징에 대해 비교·연구하였다. 특징적으로 차이가 교차되는 분포는 같지 않았으나 인공적인(플라스틱) 침수식물과 자연적인 침수식물에 대한 부착조류의 부착 성장량은 거의 비슷하였고, 조류 종들의 유사성 비율도 높게 나타났다. 이 연구의 결과는 매질에 대한 부착조류의 부착은 그 매질의 자연성 또는 인공성에 따른 것이 아니라 매질의 구조적 차이(예를 들면, 거침정도, 크기, 높이 등)에 기인하며 적절한 조건을 갖춘 인공매질도 자연매질에 상응하는 부착조류의 부착과 성장조건을 부여할 수 있음을 나타나고 있다.

(6) Sand-Jensen(1983)은 부착조류 군집구조와 성장에 미치는 물리·화학적 인자들에 대하여 연구하였다. 낮은 하수 농도에 0%에서는 *Diatoma*, 2%에서는 *Horomidium*, 12%에서는 사상성 박테리아가 우점하였음을 보고하였다. 하수의 농도가 0~12%의 범위에서 호수의 영양단계에 따라 빈영양 호소에서는 하수 농도가 증가할수록 생물량이 증가하며, 반면에 부영양 호소에서는 하수의 농도가 증가할수록 생물량이 감소하는 결과를 보여주었다.

이 연구의 결과는 부착조류나 세균과 같은 미생물이 최적 성장하여 군집을 우점할 수 있는 인의 농도가 서로 차이가 있음을 나타내고 있다. 그러나 일반적으로 인 농도가 과다하게 높지 않은 조건에서는 인의 농도가 증가할수록 생물량이 증가함을 시사하고 있다.

(7) Vymazal(1988)은 오염 하천에서 부착조류 군집을 이용한 영양염 제거에 관한 연구를 수행하였다. 유속을 약 0.08cm/s로 매우 느리게 조절하여 체류시간을 길게 하여 만든 나무재질의 인공수로에서 플라스틱 스크린, 유리, 나무 매질에 따른 부착조류 군집의 성장은 플라스틱 스크린에서 가장 높게 나타났으며, 영양염 제거효율(%)은 암모니아와 인

산염의 경우 최고 80%와 70%, COD는 35%, BOD 54%의 제거효율을 나타냈음을 보고한다.

이 연구의 결과는 부착조류의 영양염 흡수(제거)효율이 매우 우수함을 보여주며, 오염수 내 영양염제거를 위해 부착성조류의 이용가능성을 시사한다. 그러나 실험조건이 유속이 거의 없는 정체성 수로로 만들어져 약간 높은 유속 조건에서의 가능성에 대한 부분은 의심스럽다. 그러나 정체성 수역에서의 적용가능성을 충분히 보여주고 있다.

(8) 최근 공과 천(1999)은 유기오염 및 부영양화 제어를 위한 생태공학적 오염하천 정화기술의 하나로서 사상성 부착조류의 적용성 및 이용가능성을 Pilot 시스템과 현장수로에서 검토하였다. 사상성 부착조류의 성장량은 5~15cm/s의 유속 범위에서 10cm/s 내외의 유속에서 가장 좋았으며, 매질(4mm 망목, 수세미, 자갈)에 따른 성장량은 4mm 망목의 그물망에서 가장 높은 성장을 보였다. 용존무기인의 제거율은 유입수 인 농도, 유속, 부착조류의 현존량과 함께 증가함을 보고하였다. 사상성부착조류에 의한 평균 용존산소 증가율은 $7.7\text{g O}_2\text{ m}^{-2}\text{hr}^{-1}$ 였으며, 물질제거율은 BOD_5 $4.4\text{g O}_2\text{ m}^{-2}\text{hr}^{-1}$, 총질소 $1.7\text{ gN m}^{-2}\text{hr}^{-1}$, 총인과 인산염인 각각 278, 85 $\text{mgPg m}^{-2}\text{hr}^{-1}$ 로 나타났음을 보고하였다.

이 연구의 결과는 사상성부착조류가 용존산소 공급, 유기물질 및 영양염류 제거에 모두 탁월한 능력을 가진 것을 보여주며 그에 따라 오염수의 수질개선에 대한 사상성부착조류의 활용잠재성이 매우 큼을 시사한다. 그러나 이 실험결과는 소규모 실험에 국한되어 있어 실용화를 위해서는 다양한 현장조건에서의 연구가 필요하며 농업용 수로의 경우 용수로와 배수로의 통배수능을 유지하는 조건에서 적절한 처리조건의 모색과 조체의 수확 및 재이용 기술과 관련된 연구가 필요함을 제시하고 있다.

제 4 장

사상성부착조류 수로시스템 분석 및 이용 기술 개발 연구

여 백

제 4 장 사상성부착조류 수로시스템 분석 및 이용 기술 개발 연구

제 1 절 부착조류 종간의 성장 및 인 흡수능 비교

1. 실험 재료 및 방법

가. 인 농도에 따른 사상성부착조류의 성장

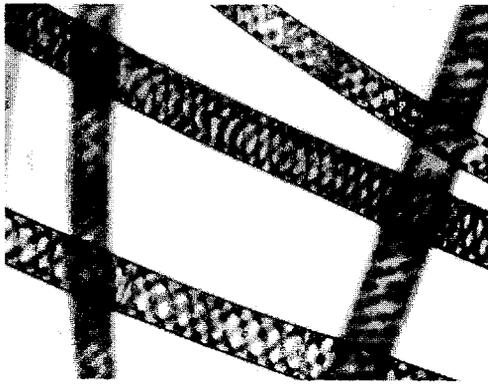
Pilot 수로와 야외농수로에서 채집한 부착조류를 이용하여 인 농도에 따른 성장률과 부착조류 종간의 성장률 및 용존성 무기인의 흡수제거 능력을 실내 배양실험을 통해 분석하였다. 실험은 STM배지를 제조하여 배양액으로 사용하였으며(표 4.1), 인 농도에 따른 부착조류 성장 변화를 조사하기 위해 *Rhizoclonium* 종을 인이 없는 배지와 인이 2mg/ℓ로 조절된 배지에서 일주일 동안 배양한 후 짧게 잘라 인 농도가 0.05, 0.5, 1.0mg/ℓ로 조절된 300ml 배양액에 일정량을 넣어 실험하였다. 배양은 광도 158mol/m²으로 연속 조사되고 온도 20℃로 조절된 Shaking Incubator(회전속도 120rpm)에서 8일 동안 실시하였다.

【표 4.1】 STM배지 조성

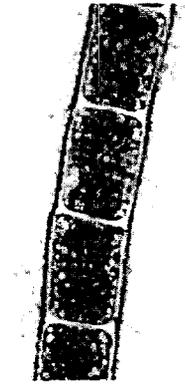
Macro nutrients (mg/ℓ)		Micro nutrients (μg/ℓ)	
NaNO ₃	25.5	H ₃ BO ₃	186
NaHCO ₃	15.0	MnCl ₂	264
K ₂ HPO ₄	1.04	ZnCl ₂	3.27
MgSO ₄ · 7H ₂ O	14.7	CoCl ₂	0.78
MgCl ₂	5.7	CuCl ₂	0.009
CaCl ₂ · 2H ₂ O	41.4	Na ₂ MoO ₄ · 2H ₂ O	7.26
		FeCl ₃	9.6
		Na ₂ EDTA · 2H ₂ O	300

나. 부착조류 종간의 성장률과 인 흡수능 비교

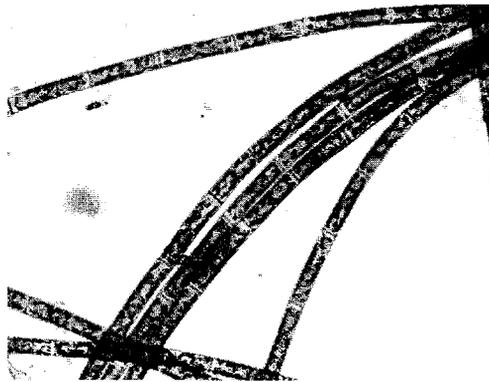
부착조류 종간의 성장률과 인 흡수 능력을 비교하기 위해 현장에서 채집된 3종 (*Rhizoclonium* sp., *Spriogyra* sp., *Oedogonium* sp.)을 인이 없는 배지에서 일주일 동안 배양한 후 짧게 잘라 동일한 양을 인 농도가 각각 0.05, 0.1, 0.5, 1.0mg/l의 배양액 300ml에 넣은 후 Shaking Incubator에서 배양하였다(그림 4.1). 샘플링은 이틀 간격으로 20ml을 추출하여 Chl.a와 배양액 내의 용존성 무기인 농도를 측정하였다.



(a) *Spriogyra* sp.



(b) *Oedogonium* sp.



(c) *Rhizoclonium* sp.

【그림 4.2】 실험에 사용된 사상성 부착조류

다. 사상성부착조류 생물량에 따른 인 흡수능

사상성부착조류의 생물량에 따른 인 흡수능력을 비교하기 위해서 현장 농수로에 채집된 *Oedogonium* 종을 인이 없는 배지에서 배양하였다. 습윤중량은 현장수로 실험에서 생물량이 0.1~9.8mgChl.a/cm²(Wet Weight 0.007~0.29g)로 나타났기 때문에, 10개의 매질에 부착된 생물량으로 환산한 범위에서 부착조류의 양을 각각 0.2, 0.5, 1.0g로 조절한 후 1~2cm로 길게 잘라 인 농도가 각각 0.05, 0.1, 0.2, 0.5mg/l의 배양액 1ℓ에 넣었다. 실험 시간은 약 2cm/s의 유속으로 10m를 통과하는 데 걸리는 시간인 10분 동안 인 흡수율을 측정하였다.

라. 사상성 부착조류의 인 흡수 지속시간

부착조류의 생물량과 인 농도에 따른 인 흡수율의 시간에 따른 변화를 조사하기 위해서 생물량 0.002g, 0.027g 그리고 0.054g(건중량)을 인 농도 0.1, 0.5mg/l으로 조절된 STM배양액에 첨가하였고, 생물 첨가 후 1시간 동안의 배양액내 인 농도를 측정하였다.

2. 연구 결과

가. 인 농도에 따른 사상성부착조류의 성장과 인 흡수율

사상성부착조류의 성장률과 인흡수율은 인농도에 따라 달라질 수 있으며, 수체 내 조류의 인에 대한 결핍정도와 관련이 있을 수 있다. 이에 따라 본 실험에서는 배양 실험 전에 인이 포함되어 있지 않은 조건(Starvation)과 2mg/l의 인을 포함한 배지(Cultivation)에서 각 일주일 동안 배양된 사상성부착조류 *Rhizoclonium* sp.을 이용하여 인 농도에 따른 부착조류의 성장률과 인 흡수율을 비교하였다.

부착조류 성장률은 초기 배양 조건과 상관없이 인의 농도가 높을수록 증가하였으며, 인을 경험하지 않은 부착조류에 비해 초기에 인을 경험한 조류에 있어서 생물량의 증가는 4일 이후 빠른 성장을 보인 반면에 인의 없는 배지에서 적응된 경우는 6일 이후에 빠 성장을 보였다(표 4.2, 그림 4.2).

인 농도 0.1과 0.5mg/ℓ에서는 사상성부착조류의 인 흡수율은 차이가 없었으나, 1.0mgP/ℓ의 농도에서는 인이 존재하는 초기배양조건을(Cultivation) 경험한 부착조류의 흡수율이 0.73μgP/μgChl.a/day으로 인이 존재하지 않은 배지에서 적용된 부착조류보다 단위생물량당 인 흡수율이 1.5배정도 높게 나타났다(그림 4.3, 표 4.3). 이러한 차이는, 조류가 성장을 위해서는 먼저 세포내 인의 충분하게 흡수한 후 성장을 하기 때문에 상대적으로 초기배양조건에서 세포내 인이 축적된 부착조류는 그만큼 세포분열이 빠르게 진행되고 그에 따라 성장에 많은 양의 인을 소비하기 때문에 나타난 결과로 생각할 수 있다.

이러한 결과를 토대로 할 때 초기의 환경조건 즉, 부착조류의 인 존재 환경에 대한 경험여부는 성장속도의 차이를 나타낼 수 있고, 생물량의 차이는 인 농도에 따라 달라질 수 있으며 현장에서 부착조류에 의한 인제거를 위해서는 인이 제한되는 시기를 경험하는 환경보다는 인이 지속적으로 유지되는 환경에 적용되는 것이 바람직하다고 판단할 수 있다.

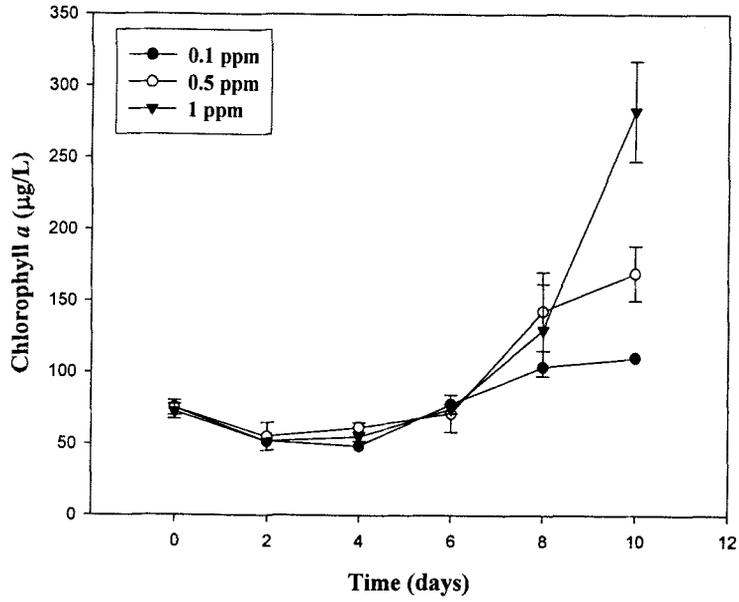
【표 4.2】 서로 다른 용존무기인(DIP) 농도에서 시간에 따른 생물량 변화

Incubation Time (day)	Chlorophyll <i>a</i> (μg/ℓ)					
	Starvation			Cultivation		
	0.1 mg/ℓ	0.5 mg/ℓ	1.0 mg/ℓ	0.1 mg/ℓ	0.5 mg/ℓ	1.0 mg/ℓ
0	75.3	75.3	72.7	85.7	84.4	85.9
2	51.9	55.2	51.9	55.2	91.4	45.5
4	48.7	61.7	55.2	61.7	68.2	61.7
6	77.9	71.4	74.7	93.8	133.1	139.6
8	103.9	142.9	128.9	116.9	172.1	237.0
11	110.4	169.5	282.5	162.3	163.6	207.4

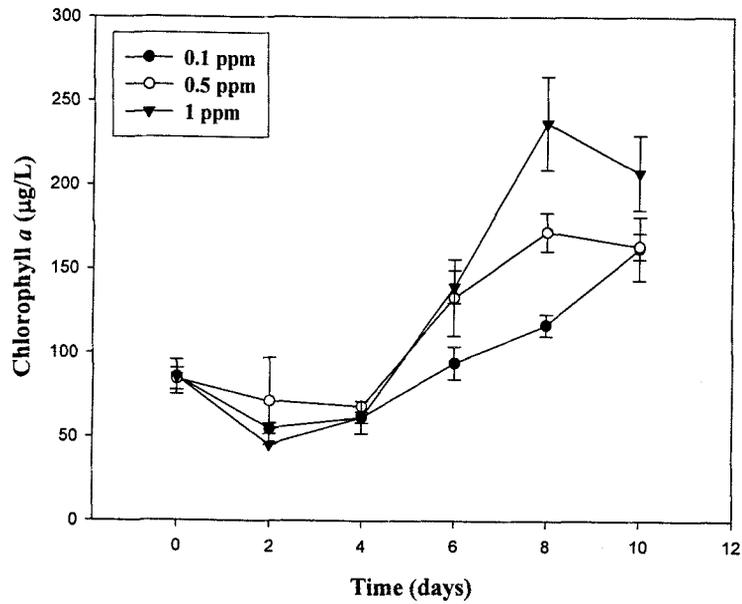
【표 4.3】 사상성 부착조류에 의한 DIP 농도의 평균 감소율

초기배양조건	DIP Removal Rate (μgP/μgChl.a/day)		
	0.1 mg/ℓ	0.5 mg/ℓ	1.0 mg/ℓ
Starvation	0.18	0.46	0.54
Cultivation	0.19	0.44	0.73

(a)

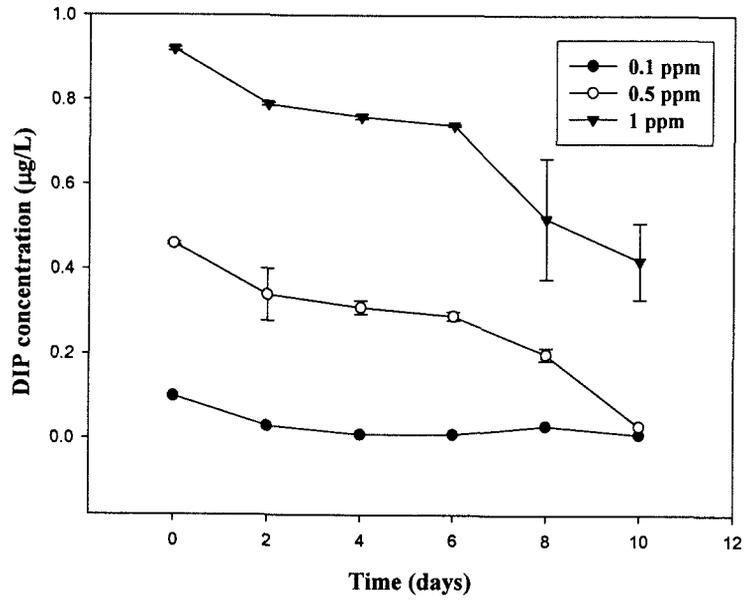


(b)

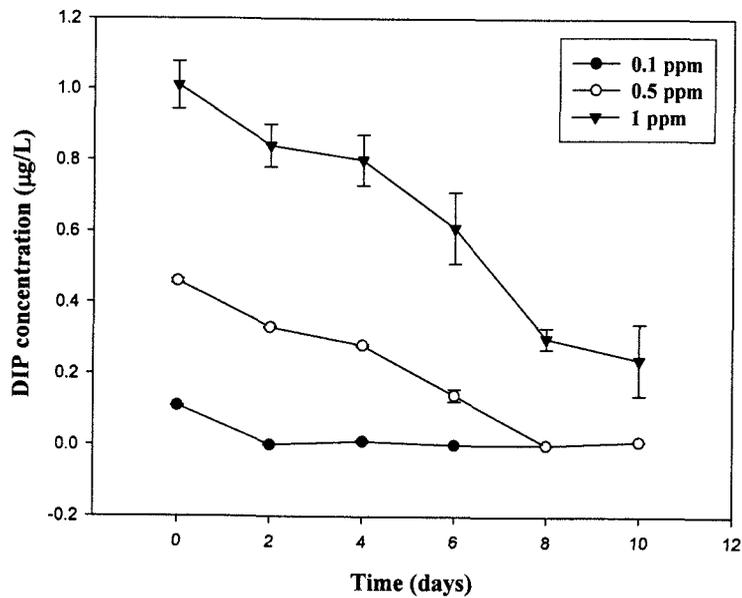


【그림 4.2】 서로 다른 초기 배양조건에 적응한 부착조류의 DIP 농도에서 시간에 따른 생물량변화. (a) 인이 없는 배지에서 적응된 부착조류(starvation), (b) 인 농도가 2mg/l 인 배지에서 적응된 부착조류(cultivation)

(a)



(b)



【그림 4.3】 서로 다른 초기 조건의 배양액의 DIP농도 변화. (a) 인이 없는 배지에서 적용된 부착조류(starvation), (b) 인 농도가 2 mg/l 인 배지에서 적용된 부착조류(cultivation)

나. 사상성부착조류 종간의 성장률과 인 흡수능

실험에 사용된 3종은 모두 현장에서 채집된 것으로 농배수로나 소하천 등지에서 쉽게 관찰되는 종이다. 사상성 부착조류 3종 모두 $1\text{mg}/\ell$ 의 농도에서 가장 높은 성장률을 나타냈으며, 인의 농도가 높아질수록 생물량도 증가하는 경향을 보였다. 인의 농도가 낮은 경우에는 *Spriogyra* sp.의 생물량이 많았고 인의 농도 높은 경우에는 *Rhizoclonium* sp.의 생물량이 가장 많았다. 인 농도에 대한 최대 성장률은 *Spriogyra* sp.가 $0.05\text{mgP}/\ell$ 에서는 $295.5 \mu\text{gChl.}a/\ell$, $0.1\text{mgP}/\ell$ 에서는 $360.4 \mu\text{gChl.}a/\ell$ 로 나타나 동일한 인 농도 조건에서 각각 $188.3 \mu\text{gChl.}a/\ell$, $298.7 \mu\text{gChl.}a/\ell$ 의 성장을 보인 *Oedogonium* sp.과 $146.1 \mu\text{gChl.}a/\ell$, $165.6 \mu\text{gChl.}a/\ell$ 의 성장률을 보인 *Rhizoclonium* sp.보다 약 2배 이상의 높았다. 인의 농도가 $0.1\text{mg}/\ell$ 이상으로 조절된 경우에는 *Rhizoclonium* sp.가 $607.1 \mu\text{gChl.}a/\ell$ 으로 *Oedogonium* sp. ($409.1 \mu\text{gChl.}a/\ell$)나 *Spriogyra* sp. ($513.0 \mu\text{gChl.}a/\ell$)보다 높은 성장률을 나타냈다(그림 4.4).

평균 성장률에 있어서는 낮은 인 농도 $0.05\text{mg}/\ell$ 와 $0.1\text{mg}/\ell$ 조건에서 가장 높은 성장률은 나타낸 *Spriogyra* sp.에 비해 *Oedogonium* sp.이 각각 25.2, $33.4 \mu\text{gChl.}a/\ell/\text{day}$ 으로 높게 나타난 반면, 높은 농도 $0.5\text{mg}/\ell$ 와 $1.0\text{mg}/\ell$ 에서는 *Rhizoclonium* sp.이 최대 생물량을 나타내면서 각각 54.1, $64.5 \mu\text{gChl.}a/\ell/\text{day}$ 으로 가장 높은 증가율을 나타냈다(표 4.4).

모든 인 농도에 있어서 *Spriogyra* sp.에 의한 인 제거율이 가장 높게 나타났으며, 초기 인 농도가 $0.5\text{mg}/\ell$ 인 상태에서 평균 제거율이 $0.39 \mu\text{gP}/\mu\text{gChl.}a \ell/\text{day}$ 로 가장 높게 나타났다(그림 4.5, 표 4.3). 부착조류에 의한 인 흡수율은 인의 확산 정도 및 부착조류 생리적 활성도와 관련이 있으며, 이러한 과정은 수체내 인의 농도와 유속에 의해 영향을 받을 수 있다. 일반적으로 낮은 농도에서 보다 높은 농도에서 인 흡수율이 높게 나타나는 것으로 보고되고 있는데, 이는 높은 인 농도 조건에서 활발하게 성장하는 것과 관련이 있다(Horner *et al.*, 1983; Horner *et al.* 1990).

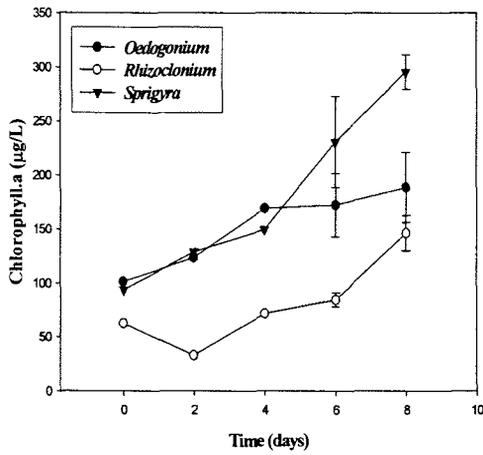
그러나 부착조류의 인 흡수율에 영향을 줄 수 있는 인 농도와 유속 모두를 고려할 때 유속이 존재하는 수로에서는 부착조류에 의한 인 제거효과는 높은 인 농도보다 낮은 인 농도에서 더 명확하게 나타날 수 있다. 빠른 유속은 세포 표면에 상대적으로 부족한 영양염의 확산이 증가되어 더 많은 영양염을 이용할 수 있는 환경이 조성되어(Horner *et al.*, 1990) 상대적으로 영양염이 적은 환경에서 특별히 조류에게 유리하게 작용할 수 있기 때

문이다.

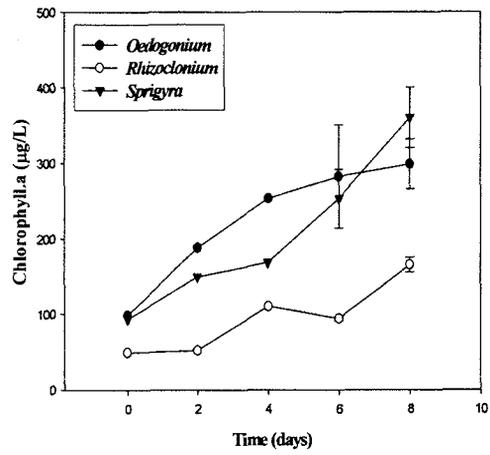
이러한 결과를 토대로 할 때, 높은 성장률이 반드시 높은 인 제거율을 의미하는 것은 아니며, 수체로부터 부영양화 원인물질인 인을 제거함에 있어 0.1mg/ℓ 이하의 농도에서 최대 성장량을 나타냈고, 본 연구에서 조성된 모든 인 농도에서 가장 높은 인 흡수율을 나타낸 *Spriogyra* sp.가 부착조류시스템에 인위적인 접종을 시도하는 경우에는 우선적으로 이용할 수 있는 종으로 나타났다.

【표 4.4】 인 농도에 따른 사상성 부착조류 종간의 평균 성장률

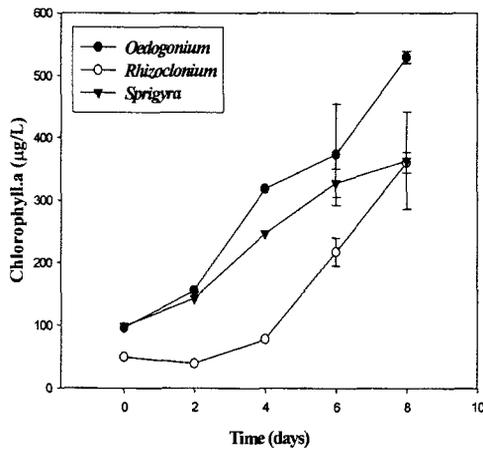
Species	Mean growth				Mean removal rate			
	0.05	0.1	0.5	1.0	0.05	0.1	0.5	1.0
	mg/ℓ	mg/ℓ	mg/ℓ	mg/ℓ	mg/ℓ	mg/ℓ	mg/ℓ	mg/ℓ
	$\mu\text{gChl. a}/\ell/\text{day}$				$\mu\text{gP}/\mu\text{gChl. a}/\text{day}$			
<i>Rhizoclonium</i>	10.88	25.00	54.14	64.53	0.02	0.03	0.15	0.33
<i>Spriogyra</i>	14.20	15.56	40.18	43.02	0.08	0.10	0.39	0.36
<i>Oedogonium</i>	25.24	33.36	33.12	51.46	0.02	0.03	0.17	0.18



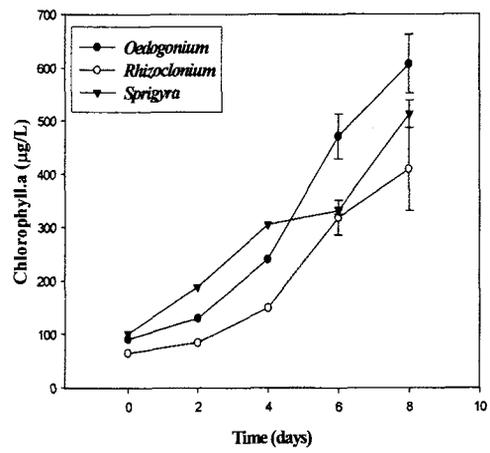
DIP농도 : 0.05 mg/ℓ



DIP농도 : 0.1 mg/ℓ

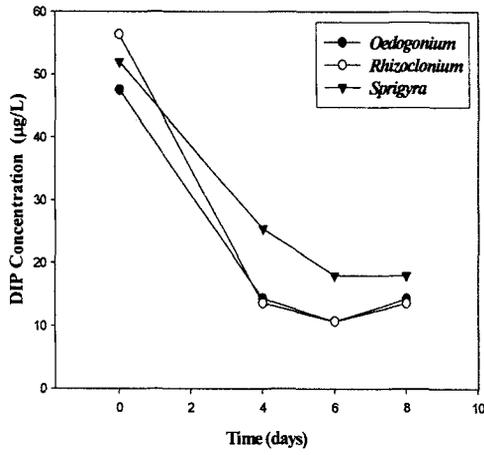


DIP농도 : 0.5 mg/ℓ

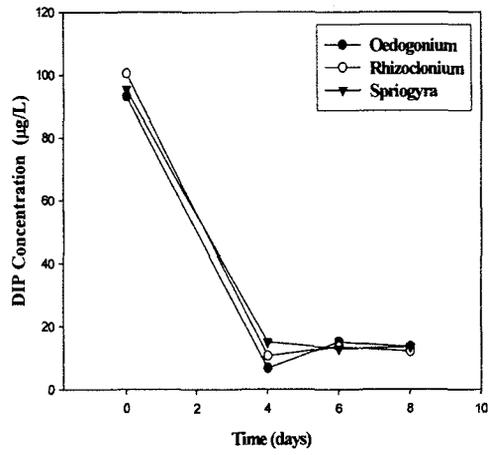


DIP농도 : 1.0 mg/ℓ

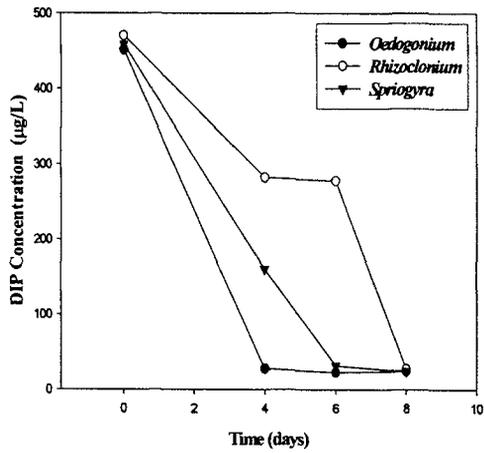
【그림 4.4】 인의 농도에 따른 부착조류 종간의 성장



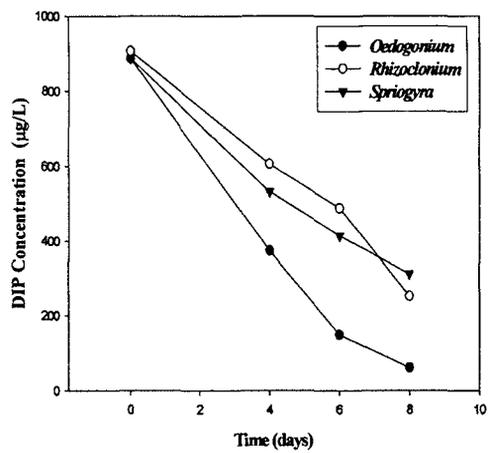
$<0.05 \text{ mg/l}>$



$<0.1 \text{ mg/l}>$



$<0.5 \text{ mg/l}>$



$<1.0 \text{ mg/l}>$

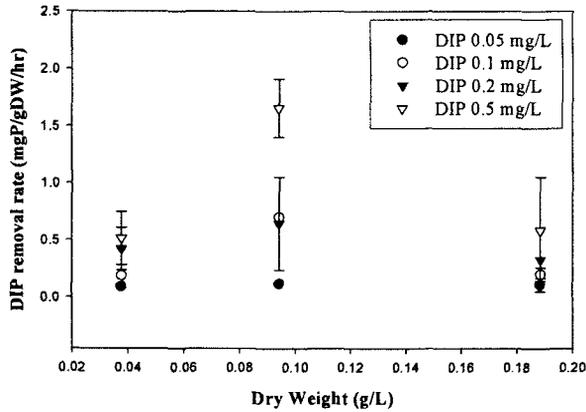
【그림 4.5】 배양액 내에서 인농도에 따른 부착조류 종간의 DIP 농도 감소

다. 생물량에 따른 인 흡수능

유속이 배제된 조건하에서 사상성부착조류 생물량과 인 제거율과의 관계를 조사하기 위해 배지에서 인 농도를 인위적으로 조절하였을 때(0.05~0.5mg/l), 가장 낮은 인 농도로 조성된 배지 내에서는 생물량증가에 따른 인 제거율의 큰 차이가 거의 없는 것으로 나타났다(그림 4.6). 이와는 달리 인 농도가 0.1mg/l 이상으로 조절된 조건하에서는 0.094gDW/l의 생물량이 투입되었을 때 가장 높은 인 흡수율을 나타냈다.

부착조류가 성장할 때 생물량의 차이가 기질 표면의 피복정도 보다는 조류매트의 두께에 따라 나타날 수 있다. 생물량이 증가할수록 인 흡수율이 동시에 증가하지 않는 것은 부착조류에 의한 인 흡수가 일차적으로 표면에서 나타나는 현상이고 기질에 부착된 부착조류 매트 안쪽면에서의 영양염 흡수가 표면 층 만큼 활발하지 않음을 의미한다. McIntire(1968)는 저서부착생물 군집 내에서 광합성이 활발한 젊은 세포는 바깥부분에 조성되고 안쪽부분에는 분해가 일어나는 노화된 세포들이 위치한다고 보고하였다. 부착조류 매트 안쪽에 위치한 노화된 세포들의 활성도는 낮을 것이고 이로 인해 영양염 흡수는 감소하게 될 것이며, 인 농도가 낮은 환경에서는 부착조류의 분해나 포식자에 의한 섭식 과정 중에 인이 수체로 배출되어 공급원으로 작용할 수 있다. 안쪽에 위치한 세포에 의한 영양염 흡수는 확산과정에 의해 조절될 수 있다. 유속이 일정하게 유지되는 환경속에서 물질은 분자확산으로 부착조류에게 전달되며 이러한 과정을 통한 물질전달은 상대적으로 속도가 느리다(Geankoplis, 1972). 전달속도에 비해 조류의 흡수능력이 빠르기 때문에 부착조류와 수체의 접촉면에서 멀어질수록 물질의 농도가 증가할 수 있다(Grady and Lin, 1980). 반대로, 부착조류와 수체의 접촉을 기준으로 매트 표면으로부터 안쪽으로 갈수록 공급되는 인의 농도는 점차적으로 감소하게 된다. 결과적으로 조류 매트 안쪽 부분에서 영양염 농도는 조류매트 표면에서 만큼 높게 되지는 않을 것이며 그로 인해 낮은 흡수율로 나타난다.

이러한 결과들은 생물량이 증가가 비례적인 인 제거율의 증가를 의미하는 것이 아니며, 부착조류시스템을 이용하여 농수로내 인의 제거효과를 얻기 위해서는 적절한 생물조절이 필요함을 의미한다.

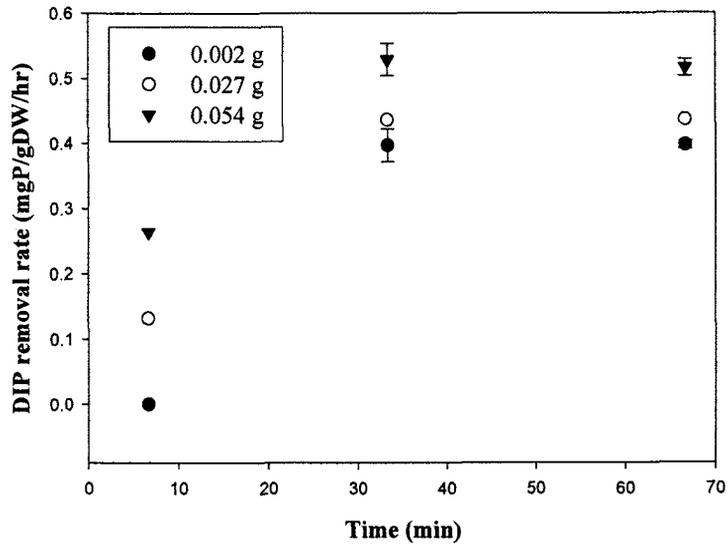


【그림 4.6】 서로 다른 인 농도에서 사상성부착조류의 생물량에 따른 인 제거율

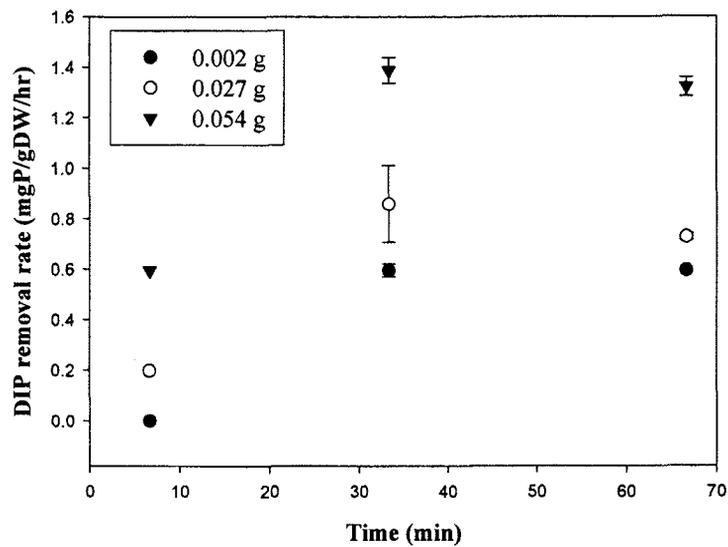
라. 사상성 부착조류의 인 흡수 지속시간

부착조류의 생물량과 인 농도에 따른 인 흡수율의 시간에 따라 어떻게 변화하는가를 조사하기 위해서 0.002g, 0.027g, 0.054g(건중량)의 생물량을 인 농도 0.1, 0.5mg/ℓ로 조절된 배양액에 첨가하였고, 첨가 후 1시간 동안의 배양액 내 인 농도 변화를 측정하였다. 3종 부착조류의 생물량에 따른 흡수율에서 나타난 결과와 마찬가지로 생물량이 높을수록 인 흡수율이 높게 나타났으며, 인 농도가 낮은 경우보다는 높은 경우에 처리구간의 인 흡수율의 큰 차이가 나타났다. 시간에 따른 흡수율의 변화는 실험 시작 후 30분 내에 최대 흡수율을 나타냈고 이후 1시간까지 흡수율의 변화는 없었다. 그러나, 이러한 결과가 부착조류가 인을 수체로부터 지속적으로 흡수하여 성장에 이용한다는 것을 의미하는 것은 아니다. 그것은 실제 환경조건하에서는 빛이 있는 동안에만 성장을 위한 인의 흡수가 나타나며, 수온이나 섭식자, 부착조류 매트 두께, 유속 등과 같은 많은 인자의 영향이 복합적으로 작용할 수 있기 때문이다. 따라서, 단기간 실험을 통해 나타난 결과를 시스템 전체로 확대 해석하는 것은 바람직하지 않을 수 있으며, 부착조류의 생리적인 특성과 관련된 추가적인 연구가 수행될 필요가 있다.

a)



b)



【그림 4.7】 생물량과 인 농도가 다른 조건에서(a) 0.1, b) 0.5mg/L) 시간에 따른 인 제거율의 변화.

제 2 절 사상성부착조류 수로시스템을 통한 처리효율 평가

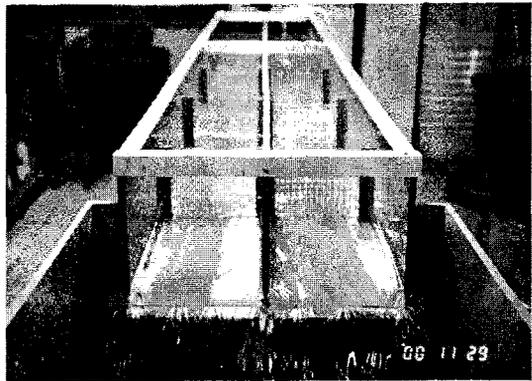
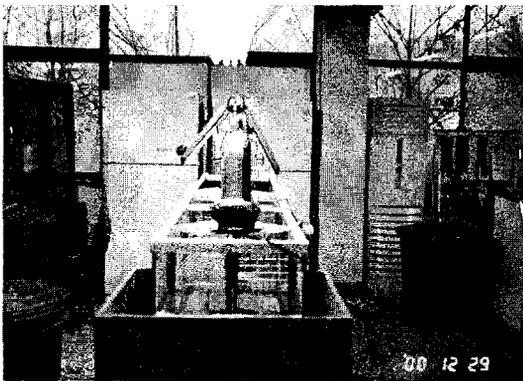
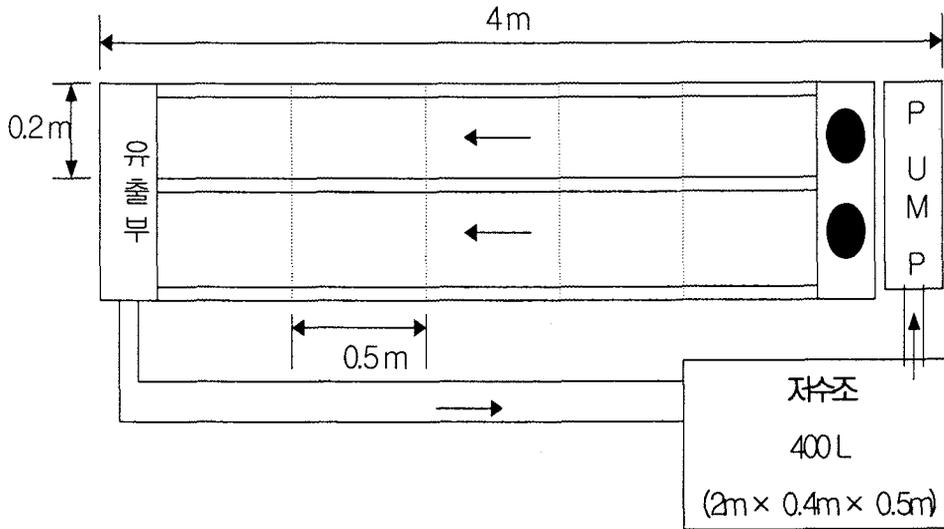
1. 수로시스템을 위한 수로 제작

가. 실내 순환수로

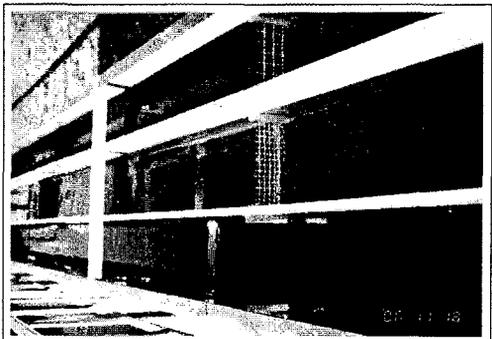
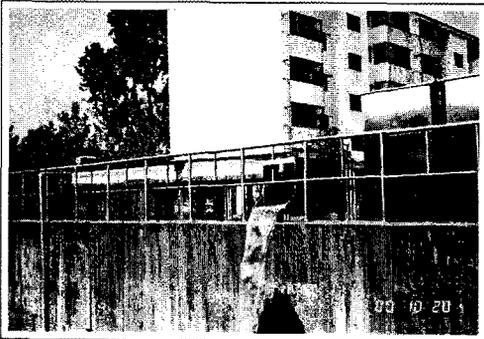
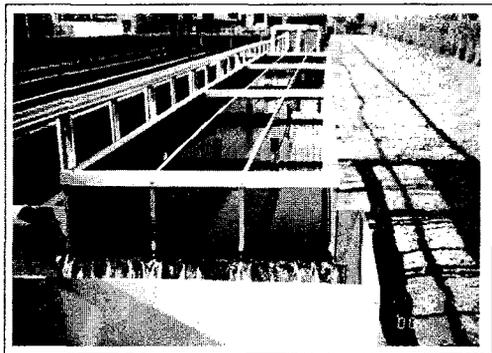
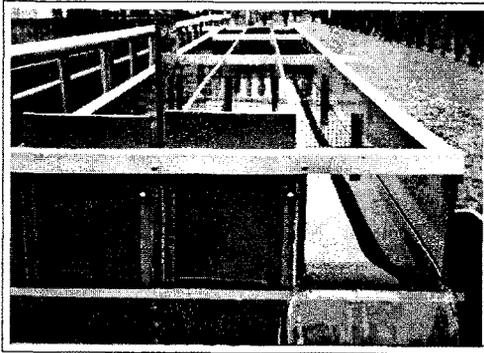
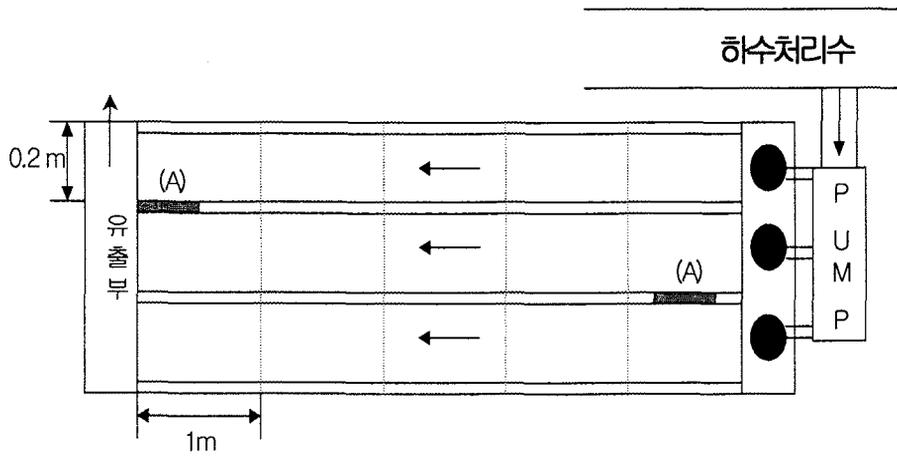
실내순환수로는 폭 20cm × 길이 4m × 높이 30cm 규모로(2조)는 아크릴로 제작하여 실험실 내에 설치하였고, 배양액은 하수처리장 방류수를 200 μ m 크기의 망으로 여과하여 큰 부유물입자를 제거한 후 사용하였다(그림 4.8).

나. 야외 pilot 수로

Pilot 수로는 폭 20cm × 길이 5m × 높이 30cm 규모로(3조) 아크릴로 제작하여 하수처리장 처리수 방류부에 설치하였으며, 방류수를 펌핑하여 유입수로 사용하였다. 유입수내 부유물질의 혼입을 최소화하기 위해 처리수가 펌핑되는 파이프 유입구 부분에 T자형 PVC에 구경이 1cm인 스크린 망을 설치하였고, 유입부와 유출부에는 각각 정류판과 수위조절판을 설치하였다. Pilot 수로 개요도에서 2곳을 개폐할 수 있도록 하여(A부분) 필요시 수로의 총 길이를 15m로 연장할 수 있도록 제작하였다(그림 4.9).



【그림 4.8】 실내 순환수로 및 개요도



【그림 4.9】 현장 Pilot 수로 및 개요도

2. 시료 채취 및 분석 방법

가. 수질환경 분석항목 및 방법

유입·유출수 시료는 미리 세척된 GF/F 여과지로 여과하였으며, 여과액은 용존 무기 영양염 분석에 사용되었다. 원시료는 입자성영양염 분석을 위해서 각각 2N 염산으로 세척된 250ml 플라스틱 용기에 담아 -20℃에서 냉동 보관하였다. 시료분석을 일주일 이내에 모두 이루어졌다. 유입·유출수의 Chl.a 는 일정량의 시료를 GF/F여과지로 여과하였 100% 메탄올을 넣어 24시간 동안 냉암소에 보관하여 엽록소를 추출한 후 흡광광도계를 이용하여 측정하여 Marker가 제시한 식에 따라 계산하였다(Maker, 1972; Maker et al., 1980). 수온은 현장에서 측정되었으며 부유물질(SS)은 증량법으로 측정하였다 (APHA et al., 1995). 용존무기인(Dissolved inorganic phosphorus; DIP)은 ascorbic acid 법으로 분석하였고, 암모니아(NH₃-N)와 아질산성 질소(NO₂-N), 질산성 질소(NO₃-N)는 각각 phenate (4500 NH₃-F, APHA et al., 1995), Colorimetric (4500 NO₂-B, APHA et al., 1995) 그리고 카드뮴 환원법으로 측정하였다. 총인(Total Phosphorus)은 과망간산칼륨(persulfate)으로 분해한 후, ascorbic acid 법으로 용존무기인 농도를 측정하였으며, 총질소(Total Nitrogen)는 과망간산칼륨으로 분해한 후 카드뮴 환원법으로 질산성질소의 농도를 정량하였다.

【표 4.5】 수질측정 항목 및 방법

측정항목	측정방법
수온(Temperature)	수온온도계
pH	pH meter(RS-232/SDI-12)
부유물질	증량법
Nitrogen(TN, NO ₃ -N)	카드뮴 환원법
NH ₃ -N	인도페놀법
NO ₂ -N	디아조법
Phosphorus (TP, DIP)	아스코르빈산법

나. 부착조류의 생물량 분석방법

수로의 각 매질의 일정면적에서 채취된 부착조류는 증류수로 수회 세척하면서 부착조류 외 불순물을 핀셋으로 제거하였다. 시료 전량은 미리 무게가 측정된 GF/F여과지에 여과하였고, 여과된 시료 일부는 무게(Wet weight)를 측정한 후 엽록소 a 와 건조량(Dry weight; D.W) 측정에 사용되었다. 엽록소 a 농도는 여과지에 90% 아세톤을 가하고 막자사발로 마쇄한 후 냉장보관 하였다. 냉암소에서 2시간 이상 추출한 엽록소를 흡광광도계를 이용하여 흡광도를 측정하였고, Lorenzen(1967)이 제시한 식으로 농도를 계산하였다 (APHA *et al.*, 1995). 부착조류 생체 내 함유된 인, 질소 함량은 100℃에서 건조된 시료의 일부를 사용하여 수체 분석에 사용된 방법과 동일한 방법으로 측정하였다. 매질에 부착한 부착조류의 총 생물량은 단위면적당 생물량에 시료 채취 일의 수로내 설치된 망목에서 부착조류가 부착되었던 전체 부착면적을 곱해 줌으로써 계산하였다.

다. 부착조류의 증가율계산

매질에 부착된 부착조류의 건조량, 엽록소 a 그리고 조체 내 인(Phosphorus in cell), 질소 함량(Nitrogen in cell)으로부터 계산된 단위면적당 생물량을 시간에 따른 증가율로 계산하였다.

라. 영양염 제거효과 평가

사상성부착조류에 의한 수질개선효과는 다음의 두 가지 방법 평가되었다.

1) 수로내 유입구와 유출구에서 채수된 시료의 농도차에 의한 평가방법 (제거효율 %)

일반적으로 많이 사용되는 방법이나 유입수 농도가 매우 높거나 부착조류의 생물량이 낮은 경우 그리고 수로 내 수체의 체류시간이 짧은 경우에는 효과의 검증이 어려울 수 있다.

2) 부착조류의 생물량 변화를 고려한 평가방법

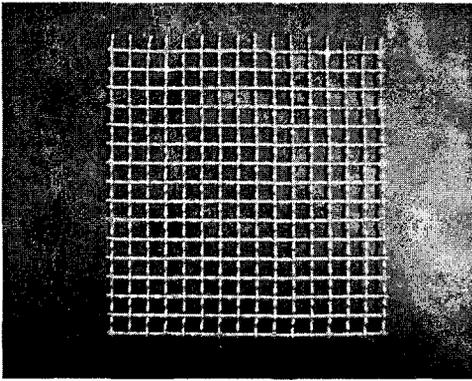
본 평가 방법은 1) 평가방법에서 제시된 문제점을 보완하기 위한 방법이다. 수체내 영양염 농도가 서로 다른 환경에서 단지 유입·유출수의 농도를 이용하여 평가하는 경우 객관적인 방법으로서 채택하기 어려운 점이 있다. 따라서 본 연구에서는 생물량을 고려한 단위면적당 생물량에 의한 제거율로 평가하였다.

3. 유속에 따른 사상성 부착조류 성장 및 영양염 제거

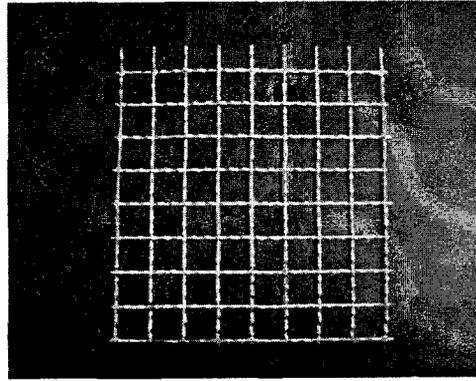
가. 연구 방법

유속에 따른 사상성 부착조류 성장실험 및 영양염 제거실험에서는 유속을 각각 5, 10, 15cm/s로 조절하여 적용하였고, 매질은 10mm망목의 철망, 20mm망목의 철망을 이용하였다(그림 4.10). 수위조절판을 설치하여 수로전체에서 평균 10cm 수심을 유지하도록 조정된 수로에 매질을 수직으로 설치하였다. 실험에 사용한 사상성부착조류는 유입수가 통과하는 과정에서 자연적으로 부착되도록 하였다.

실험은 2회에 걸쳐 수행되었으며, 1차 실험(2001년 4월)은 10mm 망목의 철망을 1m 간격으로 한 수로에 3개씩 설치하였고, 유속을 각각 5cm/s, 10cm/s, 15cm/s로 달리 적용하여 사상성부착조류의 성장량을 조사하였다. 2차 실험(2001년 7월)은 20mm망목의 철망을 사용하여 1차 실험과 같은 실험조건으로 실험하였다. 부착조류 성장분석을 위해 생물 샘플링은 각각의 망에서 4cm²(2cm × 2cm)씩 총 12cm²의 면적에서 물의 흐름방향으로 성장한 사상성 부착조류를 채취하였고, 물은 유입수를 채취한 후에 각각의 유속으로 수로를 통과한 시간이 흐른 후에 유출수를 각각 1ℓ를 채취하여 수질을 분석하였다.



(a) 10mm 망목 철망



(b) 20mm 망목 철망

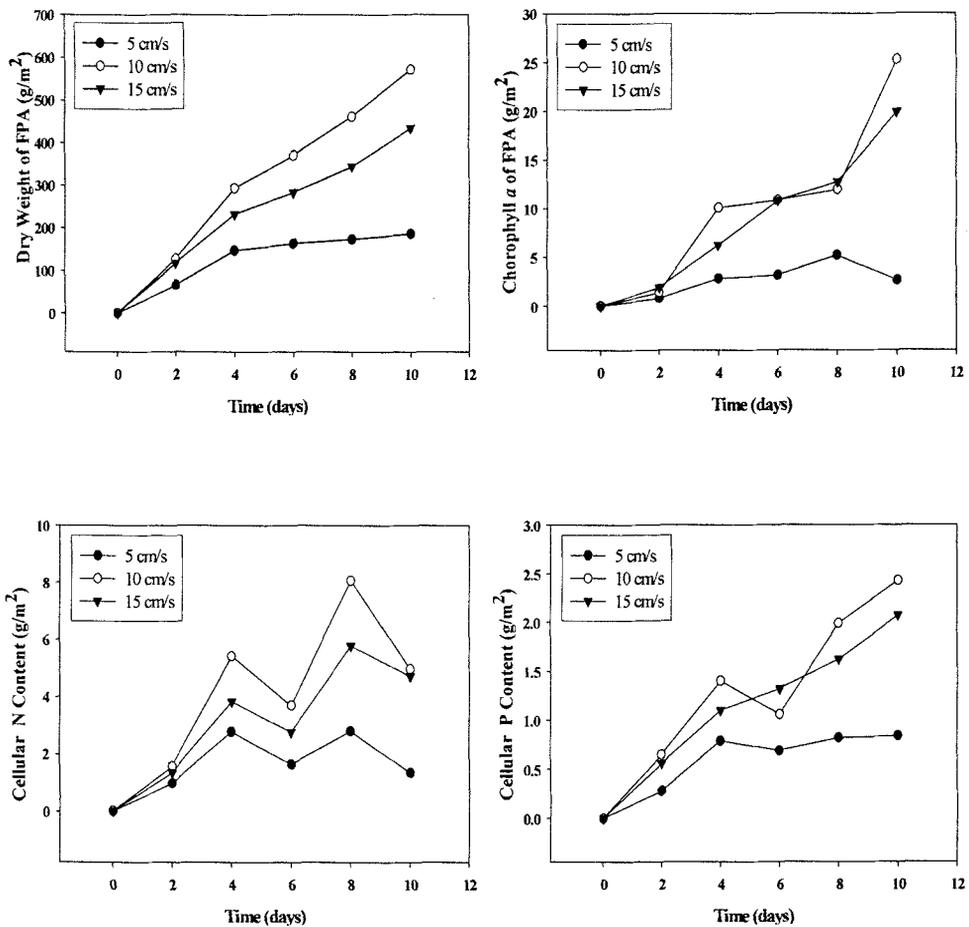
【그림 4.10】 실험에 사용한 매질

나. 유속에 따른 단위면적당 생물량의 변화

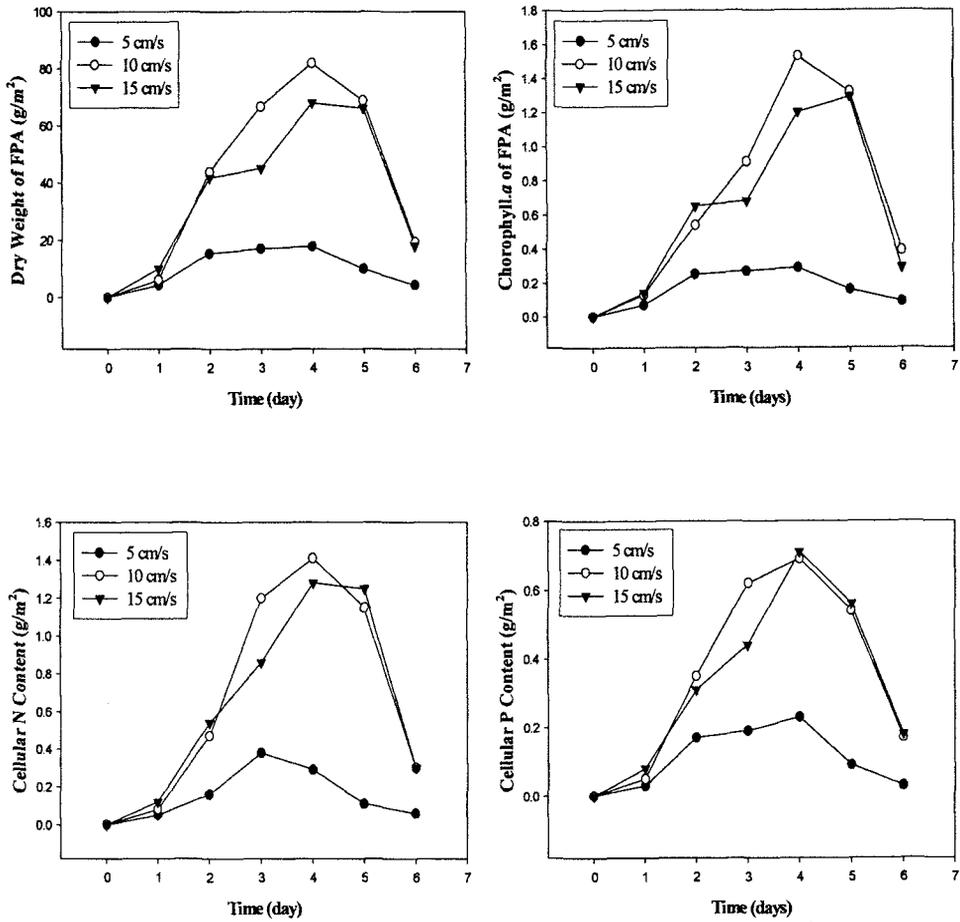
망목의 크기가 10mm인 철망을 이용한 경우 서로 다른 유속으로 조절된 수로 내 단위면적당 부착조류의 건중량과 조체 내 인과 Chl.a 함량은 시간에 따라 지속적으로 증가하였고, 증가량과 증가율은 유속에 따라 차이를 보였다(그림 4.11). 유속 10cm/s로 조절된 수로에서 가장 높은 생물량을 나타냈으며 5cm/s로 가장 느리게 조절된 수로에서 가장 낮은 생물량이 나타났다. 실험 종료(10일)시에 유속이 10cm/s로 조절된 수로에서의 단위면적당 생물량(Chl.a)은 유속이 5cm/s로 조절된 수로에서 보다 약 8배, 건중량과 조체 내 질소와 인은 3배 이상 높은 생물량을 나타냈으며, 상대적으로 유속이 15cm/s로 높게 조절된 수로의 생물량과는 큰 차이를 나타내지 않았다. 부착조류 세포 내 질소와 인의 함량은 비록 실험기간 동안 증감이 있었으나, 서로 다른 유속조건에서 건중량이나 Chl.a 증가와 마찬가지로 10cm/s로 유속이 조절된 수로에서 가장 높았다.

2001년 7월 20mm철망이 사용된 실험에서도 부착조류의 건중량, Chl.a, 조체 내 인과 질소함량 모두 선행 실험의 결과와 같이 유속이 5cm/s로 조절된 수로보다는 10cm/s와 15cm/s로 조절된 수로에서 높게 나타났다(그림 4.12). 실험 시작 2일 이후에 빠른 증가를 보였으며, 실험 시작 후 4일 이후에 각다구(*Chironomus*) 유충의 다량 발생과 동시에 부착조류 생물량과 세포 내 영양염류 함량에 있어 급격한 감소가 나타났다. 실험 4일째, 10cm/s

로 유속이 조절된 수로에서 성장한 부착조류의 생물량은 유속이 5cm/s로 조절된 수로에 비해 건중량은 81.9g/m²로 4배, Chl.a와 조체 내 질소는 각각 283.9, 1409.9mg/m²로 6배, 조체 내 인은 690.7mg/m²로 3배 이상 높게 나타난 반면에, 15cm/s 유속에서의 생물량과는 큰 차이를 보이지 않았다.



【그림 4.11】 망목 10mm 철망이 설치된 Pilot 수로 내 서로 다른 유속에서 시간에 따른 단위면적당 생물량 및 조류세포 내 질소, 인 함량 변화 (April, 2001). FPA는 Filamentous Periphytic Algae를 의미함.



【그림 4.12】 망목 20mm 철망이 설치된 Pilot 수로 내 서로 다른 유속에서 시간에 따른 단위면적당 생물량 및 조류세포 내 질소, 인 함량 변화(July, 2001). FPA는 Filamentous Periphytic Algae를 의미함.

다. 유속에 따른 사상성부착조류의 평균 증가율 변화

유속이 다르게 조절된 수로 내 단위 면적당 부착조류의 평균 증가율(성장률)은 두 기간 모두에서 유속 10, 15cm/s로 조절된 수로 모두에서 시간에 따라 지속적으로 증가하였고, 유속이 10cm/s로 조절된 수로에서 건중량과 Chl.a, 조체 내 질소와 인 함량 모두의 평균 증가율이 가장 높게 나타났다(표 4.6).

2001년 4월 실험에서 10cm/s의 유속에서의 부착조류의 평균 증가율은 5cm/s 유속보다 2배 이상 높게 나타났고, 15cm/s 유속과 비교해서는 큰 차이는 없었다. 2001년 7월 실험에서는 부착조류의 건중량을 바탕으로 생물량 증가율은 10cm/s와 15cm/s 유속조건 하에서 비슷한 수준으로 높았으나 Chl.a를 기준으로 했을 때, 10cm/s 유속 조건이 15cm/s 유속조건보다 1.5배 높게 나타났다.

계절별로는 7월 보다는 4월에 부착조류의 성장률이 상대적으로 높게 나타났는데, 이러한 계절적인 변화는 부착조류의 생리적 특성, 매질 그리고 유입수질의 농도변화와 본 연구에서 7월에 나타난 깔다구와 같은 포식동물의 출현과 같이 복합적인 원인에 의해 나타난 결과로 생각된다.

【표 4.6】 Pilot 수로 내 서로 다른 유속에 따른 사상성부착조류의 평균 증가율

Date	Parameter	Unit	Velocity		
			5 cm/s	10 cm/s	15 cm/s
April, 2001	Dry Weight	g/m ² /day	27.4	62.6	50.2
	Chlorophyll <i>a</i>		0.51	1.18	1.58
	N in Cell		0.39	0.86	0.65
	P in Cell		0.13	0.27	0.24
July, 2001	Dry Weight	g/m ² /day	4.5	20.5	17.0
	Chlorophyll <i>a</i>		0.012	0.071	0.046
	N in Cell		0.039	0.086	0.065
	P in Cell		0.013	0.027	0.024

라. 유속에 따른 사상성부착조류의 수질개선효과

유속이 각각 5, 10, 15cm/s로 조절되고 망목의 크기가 20mm인 철망을 부착조류 매질로 사용한 pilot 수로에서 부착조류의 성장에 따른 고형성 부유물질(SS), 총인, 용존무기인에 대해 뚜렷한 제거 효과가 나타났다(표 4.7~4.14).

질소의 제거율은 시기적으로 감소와 증가가 반복되었으나 인의 경우는 거의 모든 시기에 제거되는 것으로 나타났다. 조절된 유속 조건 중 5, 15cm/s 유속하에서 수질개선효과가 높게 나타났으며, 본 연구에서 용존무기인에 대한 제거율은 거의 모든 유속조건하에서 유사하게 나타났다. 유속 5cm/s로 조절된 수로에서는 다른 유속조건에 비해 상대적으로 생물량이 적었음에도 불구하고 높은 수질개선효과가 나타난 것은 매질에 부착조류에 의한 매트가 형성되면서 유입수내 포함된 많은 입자성물질이 통과되지 못하고 침전되어 나타난 결과로 판단된다. 수질분석항목 중 부유물질과 관련된 총질소, 총인에서 나타난 높은 제거율은 이를 뒷받침한다. 이와는 반대로 유속이 가장 빠른 15cm/s로 조절된 수로에서는 부유물질에 대한 제거율은 낮았지만, 총인에 대한 높은 제거율이 나타났고, 아질산성질소와 질산성질소와 같은 용존 형태의 질소의 제거율이 높게 나타났다. 그러나 용존형태 질소의 감소는 부착조류에 의한 흡수로 인해 나타난 결과이기 보다는 질소 형태 중 조류가 가장 선호하는 형태인 암모니아성 질소가 충분히 존재하기 때문에 질산화 과정에 의한 결과로 생각할 수 있다. 부착조류가 매질에 두꺼운 매트를 형성할 정도로 부착되는 경우에는 매트의 표면은 빠른 흐름으로 인해 대기로부터의 용존산소의 확산이 다른 유속 조건에 비해 잘 이루어질 수 있기 때문에 호기적 상태를 유지한다 하더라도 매트 안쪽면은 세포의 노화에 따른 분해 활동이 활발히 진행됨으로써 혐기적상태를 나타낼 수 가능성이 있다. 따라서 대기로부터의 산소공급 속도 증가로 아질산성질소의 질산화에 따른 소실과 수체가 매트를 통과하는 동안 탈질화로 인해 질소기체 형태로 대기 중으로 확산됨으로써 나타난 결과로 생각할 수 있다.

유속과 생물량이 상이한 조건도 질소에 비해 높은 용존무기인에 대한 제거율은 총인 부하량의 감소 측면에서도 지속적으로 제거되는 것으로 나타났으나, 상대적으로 용존무기인에 비해 용존유기인과 입자성인의 형태가 많았기 때문에 부유물질에 대한 제거율이 가장 높았던 유속이 5cm/s로 조절된 수로에서 높게 나타났다(표 4.15, 그림 4.13).

이러한 결과를 토대로 할 때 용존물질에 대한 부착조류의 흡수에 따른 제거와 더불어

매질에 부착된 부착조류가 여과기능을 수행함으로써 입자성물질에 대한 제거 기능까지 수행할 수 있다는 측면에서, 유입환경 즉 유입수내 용존물질 혹은 입자성물질 중 어느 것이 저감대상물질이 된다하더라도 생물학적으로 처리가능하다는 장점이 있음이 제시되었다.

【표 4.7】 20mm망목 철망을 이용한 pilot 수로에서 서로 다른 유속조건하에서의 수질개선효과 요약(July, 2001)

	Parameter							
	Water Vel.	SS	TN	NH ₃ -N	NO ₃ -N	NO ₂ -N	TP	DIP
	cm/s	kg/m ³ /hr	kg/m ³ /hr	kg/m ³ /hr	g/m ³ /hr	mg/m ³ /hr	g/m ³ /hr	g/m ³ /hr
Range	5	0~0.39	0.29~-0.42	0.10~-0.22	6.8~-1.7	50.8~-84.7	13.6~0.0	1.0~-0.3
	10	0~0.33	0.11~-0.15	0.20~-0.31	5.1~1.7	50.2~-85.7	5.0~0.0	1.0~-0.3
	15	0~0.17	0.12~-0.08	-0.03~-0.28	13.5~1.7	67.6~-118.3	8.4~-3.4	0.8~-0.3
Ave.*	5	0.09	0.19	0.10	3.7	50.6	5.4	0.39
	10	0.09	0.10	0.20	3.4	41.9	3.9	0.37
	15	0.04	0.11	0.00	4.8	67.6	5.9	0.36

* Ave.는 제거 효과가 보이지 않는 경우를 제외한 평균값임.

*. (-) 제거율은 실제로는 증가율을 의미하며 제거율로서 고려될 수 없으나 측정된 자료이므로 제시하였음. 이하동일.

【표 4.8】 20mm망목 철망을 이용한 pilot 수로에서 서로 다른 유속조건하에서의 총질소 제거율(July, 2001)

Day	Inlet	5cm/s		10cm/s		15cm/s	
	mg/ℓ	g/gDW/hr	g/m ³ /hr	g/gDW/hr	g/m ³ /hr	g/gDW/hr	g/m ³ /hr
1	18.9	15.9	67.8	-8.4	-51.4	-3.5	-35.2
2	22.7	18.7	288.0	-2.0	-85.7	-1.3	-52.9
3	19.8	-24.7	-423.5	-2.2	-150.7	-1.9	-84.5
4	23.1	-1.9	-33.9	-0.2	-16.7	1.7	118.3
5	17.4	20.2	203.3	1.2	83.7	-0.5	-33.8
6	13.7	-27.7	-118.6	6.1	117.2	0.0	0.0

【표 4.9】 20mm망목 철망을 이용한 pilot 수로에서 서로 다른 유속조건하에서의 아질산성질소 제거율(July, 2001)

Day	Inlet	5cm/s		10cm/s		15cm/s	
	$\mu\text{g}/\ell$	mg/gDW/hr	mg/m ³ /hr	mg/gDW/hr	mg/m ³ /hr	mg/gDW/hr	mg/m ³ /hr
1	23.6	-8.0	-33.9	-14.0	-85.7	-3.5	-35.2
2	19.3	0.0	0.0	-1.6	-68.6	-2.1	-88.1
3	10.6	0.0	0.0	-0.5	-33.5	0.0	0.0
4	10.8	2.8	50.8	0.4	33.5	-0.7	-50.7
5	73.9	0.0	0.0	0.7	50.2	-1.8	-118.3
6	75.4	-19.8	-84.7	-0.9	-16.7	3.8	67.6

【표 4.10】 20mm망목 철망을 이용한 pilot 수로에서 서로 다른 유속조건하에서의 질산성질소 제거율(July, 2001)

Day	Inlet	5cm/s		10cm/s		15cm/s	
	mg/ ℓ	g/gDW/hr	g/m ³ /hr	g/gDW/hr	g/m ³ /hr	g/gDW/hr	g/m ³ /hr
1	0.23	1.2	5.1	0.8	5.1	0.4	3.5
2	0.19	0.1	1.7	0.0	1.7	0.0	1.8
3	0.13	0.4	6.8	0.1	5.0	0.1	6.8
4	0.11	0.2	3.4	0.0	3.3	0.0	1.7
5	0.54	-0.2	-1.7	0.0	1.7	0.0	1.7
6	0.65	0.4	1.7	0.2	3.3	0.8	13.5

【표 4.11】 20mm망목 철망을 이용한 pilot 수로에서 서로 다른 유속조건하에서의 암모니아성 질소제거율(July, 2001)

Day	Inlet	5cm/s		10cm/s		15cm/s	
	mg/ℓ	g/gDW/hr	g/m ³ /hr	g/gDW/hr	g/m ³ /hr	g/gDW/hr	g/m ³ /hr
1	16.6	-27.9	-118.6	-16.8	-102.9	-24.6	-246.6
2	19.5	-14.3	-220.2	-7.0	-308.6	-6.7	-281.9
3	19.5	-1.0	-16.9	-2.4	-167.4	-3.0	-135.2
4	21.2	-7.6	-135.5	2.5	200.9	-1.0	-67.6
5	16.2	10.1	101.6	-0.2	-16.7	-1.8	-118.3
6	12.9	-7.9	-33.9	-1.7	-33.5	-1.9	-33.8

【표 4.12】 20mm망목 철망을 이용한 pilot 수로에서 서로 다른 유속조건하에서의 총인 제거율(July, 2001)

Day	Inlet	5cm/s		10cm/s		15cm/s	
	mg/ℓ	g/gDW/hr	g/m ³ /hr	g/gDW/hr	g/m ³ /hr	g/gDW/hr	g/m ³ /hr
1	0.29	3.2	13.6	0.6	3.4	0.0	0.0
2	0.54	0.0	0.0	0.1	3.4	0.1	3.5
3	0.61	0.1	1.7	0.0	0.0	0.0	0.0
4	1.01	0.4	6.8	0.0	0.0	0.0	0.0
5	0.18	0.3	3.4	0.1	5.0	0.1	8.4
6	0.4	0.4	1.7	0.0	0.0	-0.2	-3.4

【표 4.13】 20mm망목 철망을 이용한 pilot 수로에서 서로 다른 유속조건하에서의 용존 무기인 제거율(July, 2001)

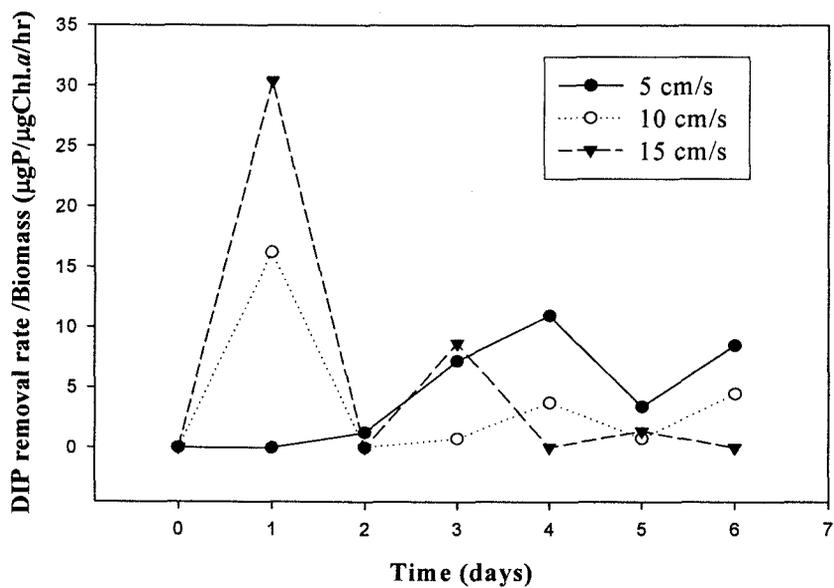
Day	Inlet	5cm/s		10cm/s		15cm/s	
	$\mu\text{g}/\ell$	mg/gDW/hr	mg/m ³ /hr	mg/gDW/hr	mg/m ³ /hr	mg/gDW/hr	mg/m ³ /hr
1	55.6	-63.8	-271.1	47.7	291.4	44.0	440.4
2	99.9	8.8	135.5	-12.9	-565.7	-3.8	-158.6
3	117.2	32.7	559.1	1.9	134.0	18.3	828.0
4	206.8	55.0	982.6	11.9	971.2	0.0	0.0
5	21.9	15.2	152.5	2.2	150.7	2.3	152.1
6	63	35.6	152.5	14.7	284.7	-15.0	-270.4

【표 4.14】 20mm망목 철망을 이용한 pilot 수로에서 서로 다른 유속조건하에서의 부유 물질제거율(July, 2001)

Day	Inlet	5cm/s		10cm/s		15cm/s	
	mg/ ℓ	g/gDW/hr	g/m ³ /hr	g/gDW/hr	g/m ³ /hr	g/gDW/hr	g/m ³ /hr
1	4.3	23.9	101.6	16.8	102.9	0.0	0.0
2	7.0	3.3	50.8	1.2	51.4	0.0	0.0
3	8.3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
4	10.7	0.0	0.0	0.8	67.0	2.5	169.0
5	5.3	38.8	389.6	4.9	334.9	0.8	50.7
6	4.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

【표 4.15】 20mm망목 철망을 이용한 pilot 수로에서 서로 다른 유속조건하에서의 총인 부하량에 따른 제거효율(July, 2001)

Day	5cm/s			10cm/s			15cm/s		
	유입 부하량 (g/hr)	유출 부하량 (g/hr)	제거효율 (%)	유입 부하량 (g/hr)	유출 부하량 (g/hr)	제거효율 (%)	유입 부하량 (g/hr)	유출 부하량 (g/hr)	제거효율 (%)
1	1.7	1.2	27.6	2.1	1.9	6.9	2.4	2.4	0.0
2	3.1	3.1	0.0	3.9	3.7	3.7	4.5	4.3	3.7
3	3.5	3.5	1.6	4.4	4.4	0.0	5.1	5.1	0.0
4	5.8	5.6	4.0	7.3	7.3	0.0	8.4	8.4	0.0
5	1.0	0.9	11.1	1.3	1.1	16.7	1.5	1.1	27.8
6	2.3	2.2	2.5	2.9	2.9	0.0	3.3	3.5	-5.0



【그림 4.13】 서로 다른 유속조건하에서의 용존무기인 제거율

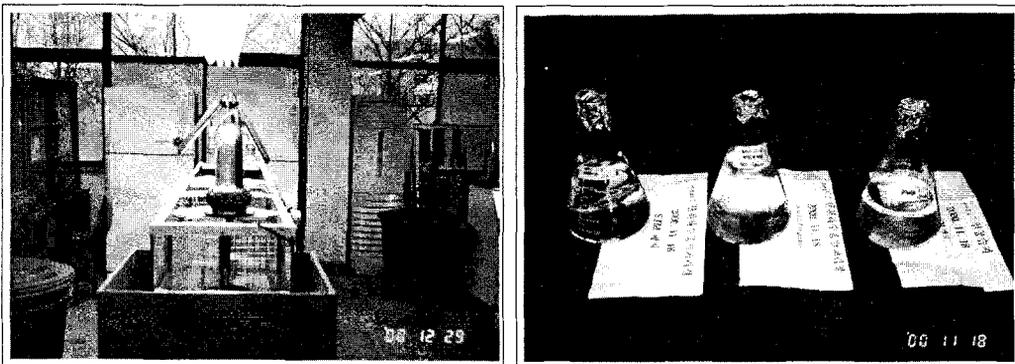
4. 매질에 따른 사상성부착조류 성장 및 영양염 제거

가. 실험내용 및 방법

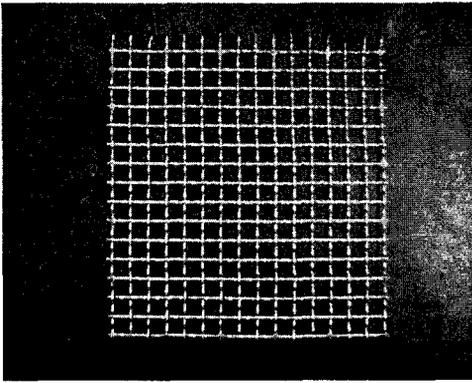
1) 실내 순환수로 실험

순환수로 내 유속은 10cm/s를 유지하였고, 유출부에 수위조절판을 설치하여 수심은 10cm로 유지하였다. 2조의 수로에 10mm철망, 섬유망은 수로에 직각으로 설치하였고, 자갈과 타일은 수로 바닥에 설치하였다. 매질은 50cm간격으로 유입구 쪽에서 자갈, 천연섬유, 10mm철망, 타일 순으로 배열하였다(그림 4.14와 4.15). 성장실험에 사용된 물 시료는 하수처리장 방류수이며, 부유물질을 제거하기 위해 2일 동안 침전시킨 후 200 μ m망에 여과 한 후 사용하였다.

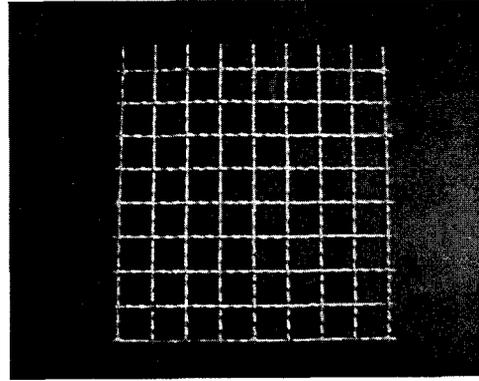
하수처리장 방류구에서 채취한 사상성 부착조류(*Oedogonium* sp.)를 증류수로 수회 세척한 후 잘게 잘라 약 2시간동안 방치하여 순환수로의 매질에 부착하도록 하였다. 실험기간동안 수온은 25 $^{\circ}$ C를 유지하였다. 실험기간동안 1일 증발되는 양이 약 20 ℓ 로 실험 시작할 때 사용한 물을 2일에 40 ℓ 씩을 보충해주었고, 물을 보충하기 전과 후의 시료를 채취하여 분석하였다. 광도는 수로 50cm 위에 형광등을 설치하여 24시간 유지하였다(70 μ mol/m 2).



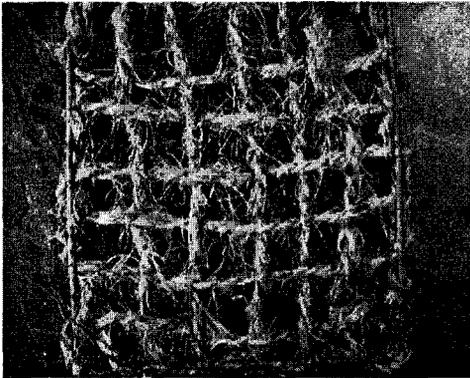
【그림 4.14】 실내 순환수를 이용한 매질에 따른 부착조류 성장실험



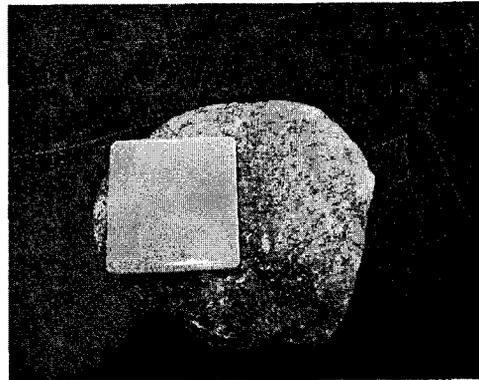
(a) 10mm 망목 철망



(b) 20mm 망목 철망



(c) 자연섬유망(황마)



(d) 타일과 자갈

【그림 4.15】 실험에 사용된 매질 종류

2) Pilot 수로 실험

Pilot 수로 실험은 동일한 유속(10 cm/s)조건에서 (1) 망목크기(10mm 철망, 20mm 철망)에 따른 부착조류의 성장과 (2) 부착 매질의 종류에 따른 부착조류의 성장률과 그에 따른 수질 개선 효과를 연구하는 것으로 철망(10mm 철망, 20mm 철망)과 자연 섬유망을 이용하여 실시하였다 (표 4.16).

망목의 크기에 따른 실험에서는 10mm, 20mm 철망을 각각의 수로에 1m 간격으로 설치 3개를 설치하였고, 유속은 10cm/s로 동일하게 유지하였으며, 수심은 평균 10cm로 조절하였다. 수로 맨 앞에 5mm 스크린망을 설치하여 크기가 큰 입자성 부유물질이 부착조류 성장

에 미치는 영향을 최소화하였다.

매질에 따른 성장률 실험은 10mm, 20mm 철망, 섬유망을 각각의 수로에 1m 간격으로 3개를 동시에 설치하여 성장률을 비교하였고, 또한 중앙부분의 수로 앞뒤를 개폐하여 수로 전체 길이를 15m 만들어 20mm 철망과 자연섬유망 중 한 종류의 매질만을 1m 간격으로 10개씩 설치하여 비교하였다. 수질분석을 위한 시료는 유입수와 유출수 채수하여 분석하였고 생물량은 각각의 땅에서 4cm²(2cm×2cm) 면적을 채취하여 분석하였다.

【표 4.16】 매질에 따른 사상성부착조류의 성장과 수질 개선 효과 실험기간 및 조건

구분	조 사 기 간	목 적	실 험 조 건
1	2000년 10월 28일 ~ 11월 18일	○ Pilot 수로 실험 ○ 망목의 크기가 다른 매질 사이의 부착조류 성장 증가율 분석	○ 수로 길이 : 5m ○ 매질 : 10mm, 20mm 망목 철망 ○ 유속 : 10 cm/s ○ 하수처리수 이용
2	2001년 2월 12일 ~ 2월 28일	○ Pilot 수로 실험 ○ 망목의 크기가 다른 매질 사이의 부착조류 성장 및 증가율 분석	○ 수로 길이 : 15m ○ 매질 : 10mm, 20mm 망목 철망 ○ 유속 : 10 cm/s ○ 하수처리수 이용
3	2001년 8월 12일 ~ 8월 22일	○ 실내 순환수로에서 매질에 따른 부착조류 성장률 분석 ○ Pilot 수로 실험	○ 수로 길이 : 5m ○ 매질 : 20mm 망목 철망, 20mm 망목 자연섬유망, 자갈, 타일 ○ 유속 : 10 cm/s ○ 하수처리수 이용
4	2001년 11월 6일 ~ 11월 14일	○ Pilot 수로 실험 ○ 자연섬유망에서의 부착조류 성장률 분석 ○ 수로 연장 15m의 수로 환경에서의 수질개선효과	○ 수로 길이 : 15m ○ 매질 : 자연섬유망 ○ 유속 : 10 cm/s ○ 하수처리수 이용
5	2001년 11월 14일 ~ 11월 27일	○ Pilot 수로 실험 ○ 서로 다른 매질에서 부착조류 성장률 분석 ○ 수로 연장 5m의 수로 환경에서의 수질개선 효과	○ 수로 길이 : 5m ○ 매질 : 10mm, 20mm 망목 철망, 섬유망 ○ 유속 : 10 cm/s ○ 하수처리수 이용
6	2002년 3월 21일 ~ 3월 27일	○ Pilot 수로 실험 ○ 서로 다른 매질에서의 부착조류 성장률 분석 ○ 수로연장 5m 길이의 수로 환경에서의 수질개선 효과	○ 수로 길이 : 5m ○ 매질 : 10mm, 20mm 망목 철망, 자연 섬유망 ○ 유속 : 10 cm/s ○ 하수 처리수 이용
7	2002년 3월 27일 ~ 4월 4일	○ 20mm 철망에서 부착조류 증가율 및 수질개선 효과	○ 수로 길이 : 15m ○ 매질 : 20mm 망목 철망 ○ 유속 : 10 cm/s ○ 하수 처리수 이용

나. 실내 순환수로 실험 결과

1) 매질에 따른 부착조류의 성장량

서로 다른 4종(자연섬유망, 10mm 망목 철망, 자갈, 타일)의 매질 중에서 자연섬유망과 10mm 망목 철망에서 실험기간동안 지속적인 부착조류의 성장을 나타냈으나, 상대적으로 자갈과 타일에서의 부착조류 성장은 실험시작 6일 이후에 관찰되었으나 매우 적은 성장을 나타냈다. 생물 지표로 분석된 모든 항목(건중량, Chl.a, 조체 내 인과 질소함량)은 자연섬유망에서 실험 시작 이후 8일에서 각각 14.3g/m², 63.3, 58.9, 249.4mg/m²로 가장 높은 성장량을 보였으며, 건중량은 10mm 망목의 철망에 비해 1.5배, 자갈과 타일에 비해서는 10배 이상의 높게 나타났다(그림 4.16).

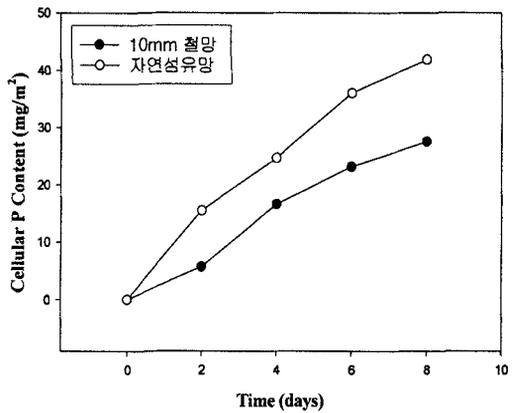
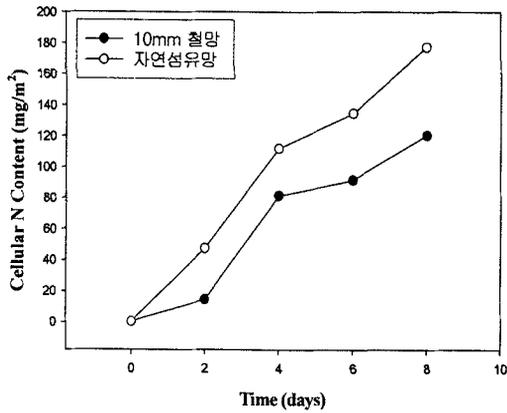
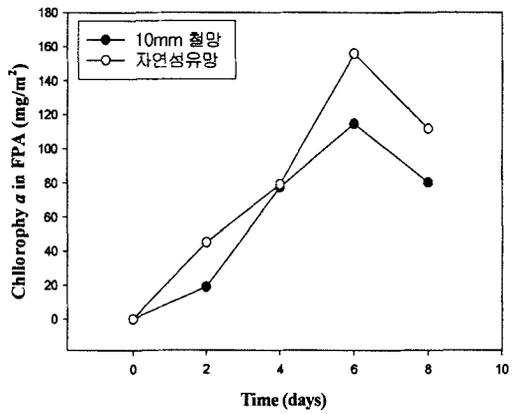
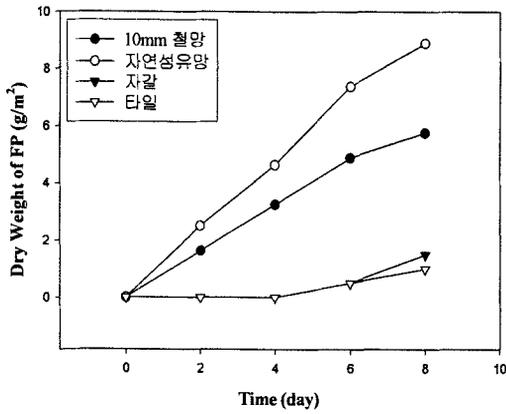
부착조류의 건중량, Chl.a, 조체 내 인과 질소 함량은 자연섬유망에서 평균 부착조류 생물 증가량이 가장 높게 나타났다. 건중량은 철망보다 2배, 자갈보다는 20배 이상의 높은 성장률을 보였고, Chl.a와 조체 내 질소, 인 함량에서도 10mm철망에 비해 2배 정도 높았다(표 4.17).

이러한 결과는 자연섬유망의 경우 부착조류의 부착이 용이하며 유속에 의한 생물량의 손실가능성이 다른 매질에 비해 상대적으로 적기 때문에 나타난 것으로, 부착조류의 성장이 느리거나 유속이 느린 정체성 수역 또는 부착조류의 성장이나 물의 흐름을 저해할 수 있는 부유물질이 적은 환경에서 사용이 가능성을 제시한다.

【표 4.17】 순환수로 내 서로 다른 매질에서의 부착조류의 평균 증가율

Parameter	Unit	실험 시작일 기준			
		철망	섬유망	자갈	타일
Dry Weight	g/m ² /day	1.31	2.54	0.14	0.11
Chlorophyll a		6.21	12.47	*	*
N in Cell	mg/m ² /day	15.05	22.16	*	*
P in Cell		3.44	5.24	*	*

* 분석에 이용할 수 있을 만큼의 충분한 시료확보가 되지 않았음.

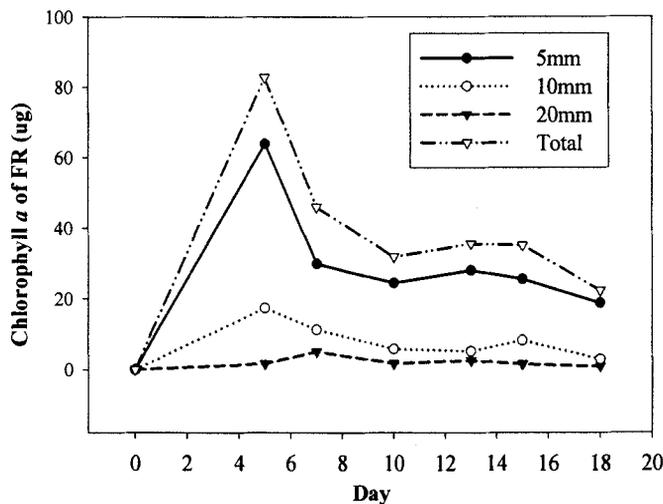


【그림 4.16】 순환수로 내 서로 다른 매질에서의 부착조류의 성장량 및 조류세포 내 인, 질소 함량 변화. 자갈과 타일에서는 분석에 이용할 수 있을 만큼의 충분한 시료가 확보되지 않아 분석하지 않았음. FPA는 Filamentous Periphytic Algae를 의미함.

2) 망목의 크기에 따른 부착조류의 성장량

크기가 다른 3종류의(5mm, 10mm, 20mm) 철망 매질에서 엽록소 a 와 조체내 질소 함량에서 의해 계산된 부착조류의 성장량 변화에서는 실험에 사용된 매질 중 망목이 가장 작았던 5mm망에서 가장 높은 성장량을 나타냈으며 실험시작 후 5일까지 빠르게 증가한 후, 이후 감소하는 시간에 따른 변화가 나타났다(그림 4.17). 20mm망에서의 증가율의 증가는 거의 나타나지 않았다. 엽록소 a 와 조체 내 포함된 질소의 함량으로부터 계산된 부착조류의 평균 증가율은 엽록소 a 로 계산된 부착조류의 평균 증가율은 5mm 망목이 가장 크게 나타나며, 20mm 망목에 비해 2배정도 높았다(표 4.18).

망목의 크기가 작은 매질에서의 높은 성장률은 앞선 순환수로내 자연섬유망을 이용한 실험에서의 결과와 마찬가지로 유속에 대한 생물량의 손실가능성이 망목의 크기가 작을수록 유리하기 때문이며, 비교적 부유물질이 적은 수환경이나 조류의 성장률이 낮은 시기에 적용가능할 것으로 판단된다.



【그림 4.17】 순환수로 내 망목크기가 다른 매질에서의 부착조류의 엽록소 a 농도와 조체 내 질소농도로 계산된 성장량 변화

【표 4.18】 순환수로 내 망목크기가 다른 매질에서의 부착조류 평균증가율 비교

Parameter	Unit	Mesh size		
		5mm	10mm	20 mm
Chlorophyll <i>a</i>	$\mu\text{g}/\text{day}$	1.30	-1.14	0.56

3) 부착조류의 성장에 따른 배양액 내 수질변화

실험에 사용된 배양액은 하수 처리수로서 본 연구에 사용하기에는 탁도가 높고, 인, 질소 농도가 높았다. 따라서, 실험 전에 200 μm 의 망으로 여과한 후 증류수로 3배 정도 희석하여 초기 주입농도를 질소 44 mgN/ ℓ , 인 2.08mgP/ ℓ 으로 조절하였다.

실험이 진행되는 동안 증발에 의한 배양액의 감소가 많아 2일에 한번씩 실험 초기에 사용했던 배양액을 증발양 만큼 넣어주었고, 배양액 첨가 전후에 배양액의 농도를 측정하였다. 실험 기간동안 배양액의 질소의 농도는 18.4~44.0 mgN/ ℓ 이었고 인의 농도는 0.29~2.08 mgP/ ℓ 범위였다.

부착조류의 성장과 함께 총질소와 암모니아는 감소한 반면 질산성질소와 아질산성 질소는 증가하는 경향을 나타냈다(표 4.19). 총질소의 감소는 부착조류의 성장에 기인한 것으로 생각되기보다는 배양액이 순환수로 내에서 펌프에 의해 순환되는 동안 유기질소가 산화되어 무기형태로 전환된 결과로 판단된다. 또한 총인과 무기인 역시 시간에 따라 감소하는 경향을 나타냈으나, 부착조류의 증가율이 배양액내 인의 감소율에 비해 상대적으로 낮았기 때문에 부착조류 성장에 따른 감소와 함께 일부는 수로 내 물리적 흡착에 의해 감소된 가능성도 배제할 수 없다(공과 천, 1999).

【표 4.19】 순환수로 내 영양염류의 감소율

(Unit : %)

	TN	NO ₃ -N	NO ₂ -N	NH ₃ -N	TP	DIP
Mean	3.9	-0.41	-0.68	3.6	0.25	0.20

다. Pilot 수로 실험 결과

1) 망목 크기에 따른 사상성 부착조류의 성장

겨울조건(2000년 11월과 2001년 2월)의 경우 망목의 크기가 10mm과 20mm로 서로 다른 조건에서의 부착조류의 성장은 동일한 철망재질의 경우 망목의 크기가 작은 것이 부착조류의 성장에 유리한 것으로 나타났다.

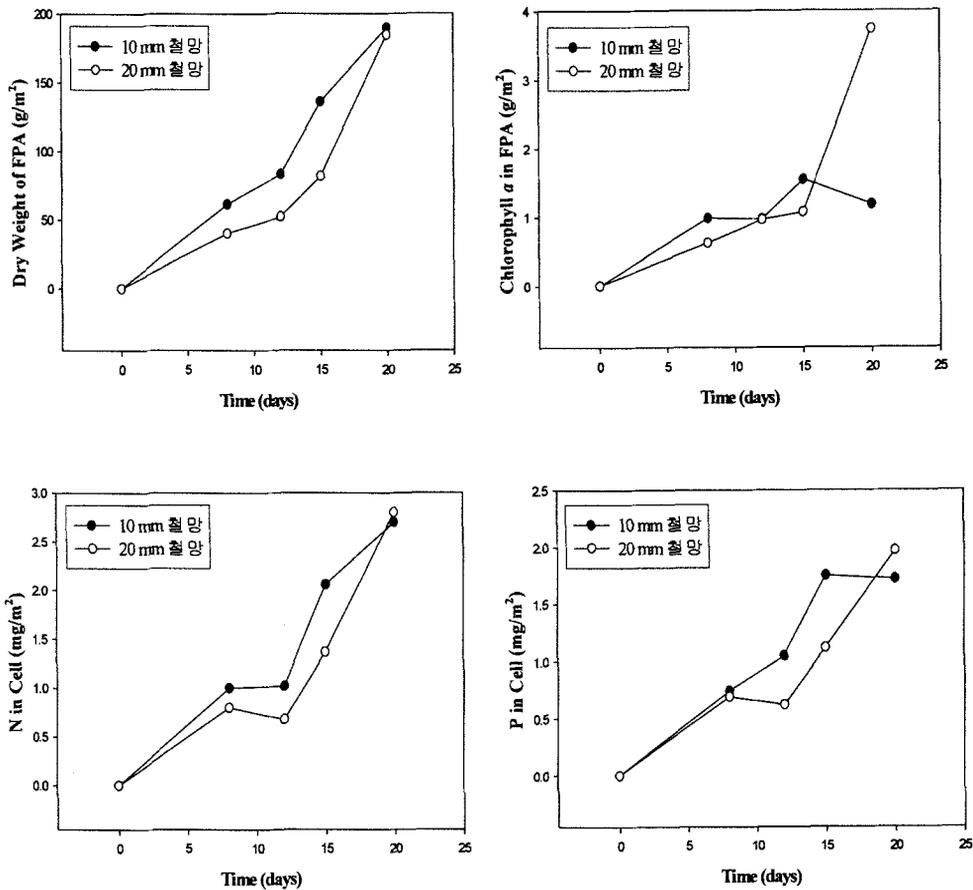
2000년 11월에 실시된 실험에서, 시간에 따른 단위면적당 부착조류의 건중량, 조체 내 인과 질소, Chl.a는 지속적인 증가를 나타냈다. 건중량과 조체 내 인과 질소의 변화는 매질 크기에 따라 큰 차이는 없었지만, 단위 면적당 Chl.a는 실험 종료 시(20일) 20mm망목 철망이 3.73mg/m²로 10mm망목 철망의 1.18mg/m²보다 3배 이상 높은 값을 보였고(그림 4.18) 시간에 따른 건중량과 조체내 인, 질소함량의 증가율이 10mm철망에 비해 높았다.

2000년 11월에 비해 단위면적 당 생물량의 성장양이 적었던 2001년 2월 실험에서 매질 사이에 조체 내 인함량을 제외하고는 시간에 따른 부착조류의 건중량, Chl.a, 조체 내 질소 함량 모두 10mm망목 철망에서 보다 높았고(그림 4.19), 건중량, 조체 내 인과 질소에 의한 평균 증가율은 20mm망목 철망에 비해 약 2배, Chl.a에 의한 증가율은 1.5배 이상 높았다(표 4.20).

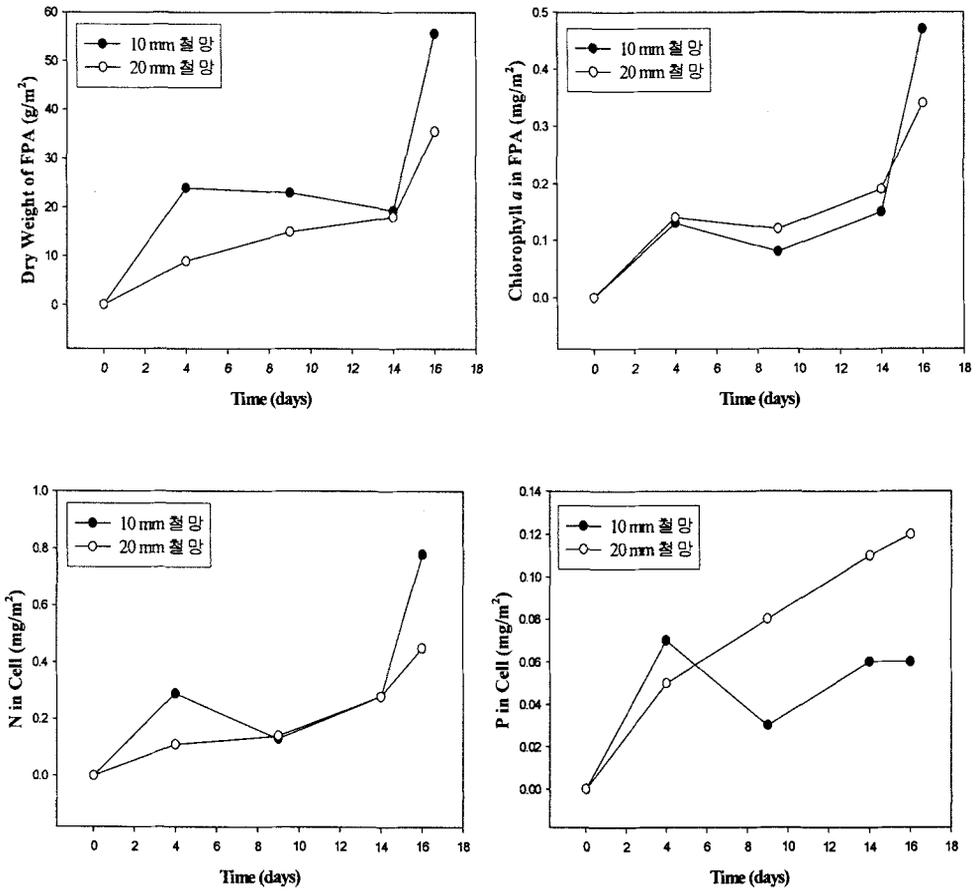
【표 4.20】 Pilot 수로 내 철망의 망목 크기에 따른 부착조류의 평균 증가율

	Parameter	Unit	Mesh size	
			10 mm	20 mm
November, 2000	Dry weight	g/m ² /day	12.1	13.0
	Chlorophyll <i>a</i>		0.048	0.027
	P in Cell		0.098	0.130
	N in Cell		0.173	0.194
February, 2001	Dry weight	g/m ² /day	5.8	3.2
	Chlorophyll <i>a</i>		0.049	0.030
	P in Cell		0.080	0.037
	N in Cell		0.034	0.014

매질의 크기가 작은 것이 부착조류의 성장에 유리하게 나타난 것은 부착조류의 성장량이 적은 시기에는 매질의 크기가 작을수록 유속에 의한 조류의 손실이 적기 때문에 나타난 결과로 판단되며, 11월에 비해 부착조류의 성장량이 적었던 2월에 망목의 크기가 작은 매질에서 부착조류의 성장과 증가율이 모두 높게 나타난 것이 이를 뒷받침한다.



【그림 4.18】 Pilot 수로 내 망목의 크기가 다른 철망에서 시간에 따른 단위면적당 생물량 및 조류세포 내 인, 질소 함량변화(November, 2000). FPA는 Filamentous Periphytic Algae를 의미함.



【그림 4.19】 Pilot 수로 내 철망 망목의 크기에 따른 단위면적당 생물량 및 세포내 인 질소 함량변화(February, 2001). FPA는 Filamentous Periphytic Algae를 의미함.

2) 매질에 따른 사상성부착조류의 성장

2001년 11월과 2002년 3월에 실시된 순환수로 실험에서 부착조류의 성장에 가장 유리한 것으로 나타난 자연섬유망과 10mm망목의 철망, 20mm망목의 철망에서의 성장률을 고정된 유속조건(10 cm/s)하에서 비교하였다.

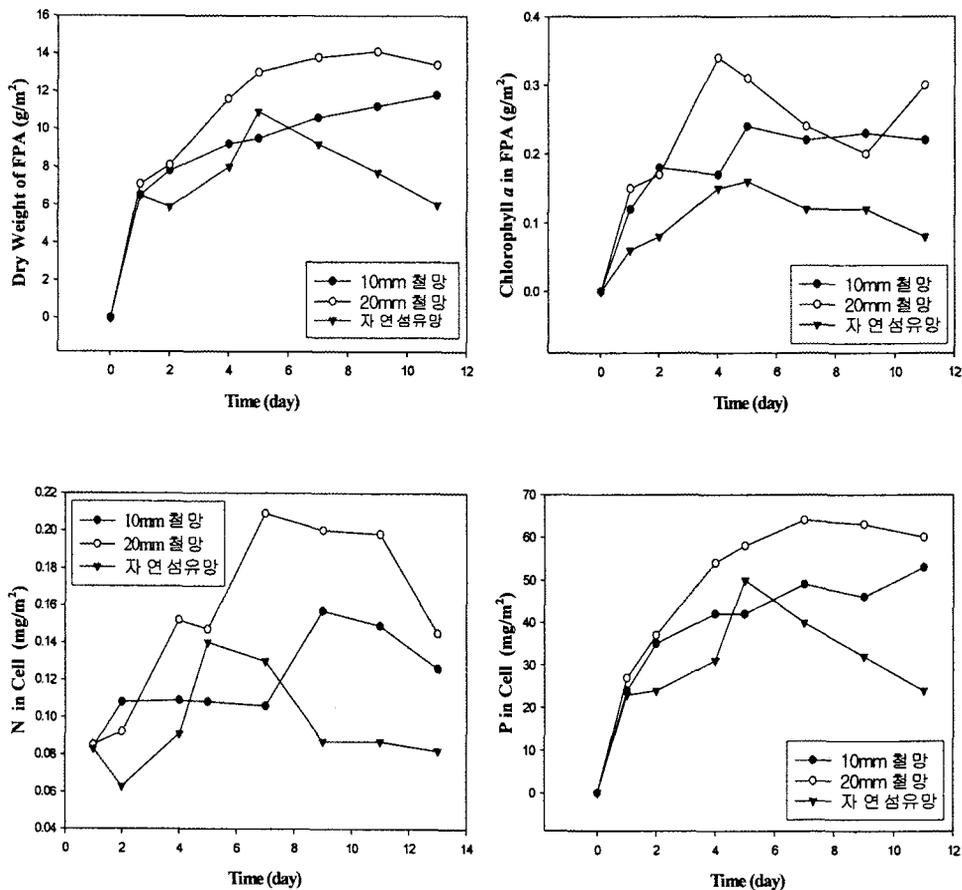
2001년 11월에는 시작 후 4일까지 모든 매질에서 생물량의 빠른 증가를 나타냈으며, 7일 이후에 느리게 감소하는 경향을 나타냈다. 자연섬유망은 실험 시작 후 5일까지 증가하다가 이후에 급속히 감소하는 경향을 보였다. 매질에 따른 부착조류의 성장은 20mm망목의 철망에서 가장 높게 나타났으며, 다음으로 10mm망목의 철망, 자연섬유망 순으로 나타났다. 10mm망목의 철망은 생물량이 가장 많았던 7일째에 건중량 13.8mg/m², 조체 내 인 64.0 mg/m², 조체 내 질소 209.0mg/m²로 자연섬유망에 비해 1.5배 이상 높은 성장을 보였다(그림 4.20).

2003년 3월의 실험에서도 모든 매질에서 부착조류 생물량은 지속적으로 증가하였고, 2001년 11월 실험 결과와 동일하게 20mm망목 철망, 10mm망목 철망, 자연섬유망의 순으로 높게 나타났다(그림 4.21). 20mm망목의 철망의 생물량은 건중량 124.8g/m², 조체 내 인 1.5g/m², 조체 내 질소 2.6g/m²로 자연섬유망에 비해 4배 정도 높은 성장량을 나타냈고, Chl.a는 3.4g/m²로 3배 이상의 높은 성장량을 나타냈다.

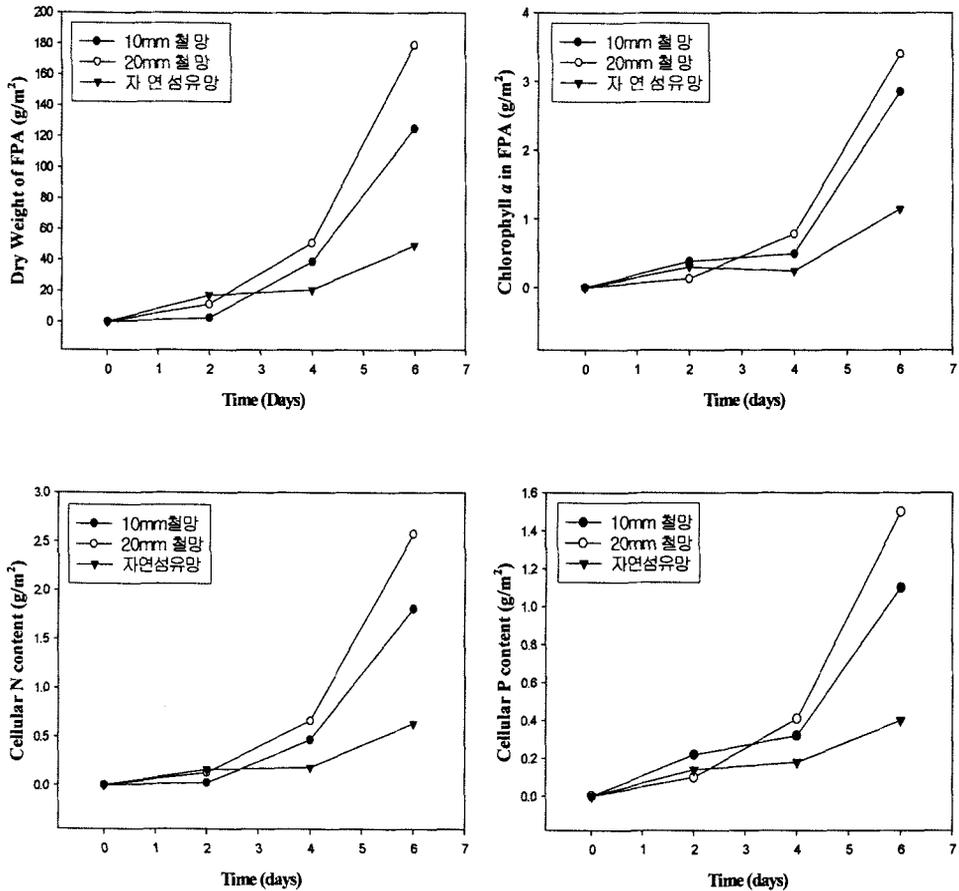
【표 4.21】 Pilot 수로 내 서로 다른 매질에서 사상성부착조류의 평균 증가율(유속 10cm/s, 수로길이 15m)

Parameter	November (2001)			March (2002)		
	10mm철망	20mm철망	자연섬유망	10mm철망	20mm철망	자연섬유망
	g/m ² /day	mg/m ² /day		g/m ² /day		
Dry Weight	2.4	2.8	2.1	20.8	29.8	8.2
Chlorophyll a	9.6	10.4	4.7	0.47	0.57	0.19
N in cell	18.5	24.5	18.0	0.30	0.43	0.11
P in cell	9.1	10.5	9.6	0.17	0.25	0.07

서로 다른 매질을 이용한 실험에서 부착조류의 평균 증가율은 실내 순환수로에서 자연 섬유망에서 가장 높은 평균 증가율을 나타낸 것과는 달리, 10mm, 20mm망목의 철망이 건조량과 Chl.a, 조체 내 인과 질소 모든 항목에서 자연 섬유망보다 높은 평균 증가율을 나타냈고, 부착조류의 평균 증가율은 20mm망목의 철망이 비교된 다른 두 매질에 비해 높게 나타났다(표 4.21). Chl.a 농도에 의한 부착조류의 평균 증가율에 있어서 2000년 11월에는 망목의 크기가 다른 두 철망에서의 차이는 적었으나 자연섬유망과 비교해서는 약 2배 이상 높은 증가율을 보였고, 2001년 11월과 마찬가지로 20mm철망이 자연섬유망에 비해 약 3배 높은 것으로 나타났다(표 4.21).



【그림 4.20】 Pilot 수로 내 서로 다른 매질에서 시간에 따른 단위면적당 생물량 변화 및 조체세포 내 인, 질소 함량변화(November, 2001). 유속은 10cm/s로 동일하게 적용하였음. FPA는 Filamentous Periphytic Algae를 의미함.



【그림 4.21】 Pilot 수로 내 서로 다른 매질에서 시간에 따른 단위면적당 생물량 변화 및 조체세포 내 인, 질소 함량변화(March, 2002). 유속은 10cm/s로 동일하게 적용하였음. FPA는 Filamentous Periphytic Algae를 의미함.

서로 다른 유속조건 하의 Pilot 실험에서 부착조류의 성장에 가장 좋은 조건의 유속으로 나타난 10cm/s에서 실내순환수로와 Pilot 수로에서 부착조류의 성장이 양호했던 자연섬유망과 20mm망목 철망을 Pilot수로의 길이를 15m로 연장한 후 1m 간격으로 설치하여 부착조류 생물량의 변화를 조사하였다.

2001년 11월에 자연섬유망을 이용한 실험에서는 실험 기간 동안 부착조류의 성장의 지속적으로 증가하였고 실험 종료일(10일)의 건조량은 12.0g/m², Chl.a는 43.9mg/m², 조체 내

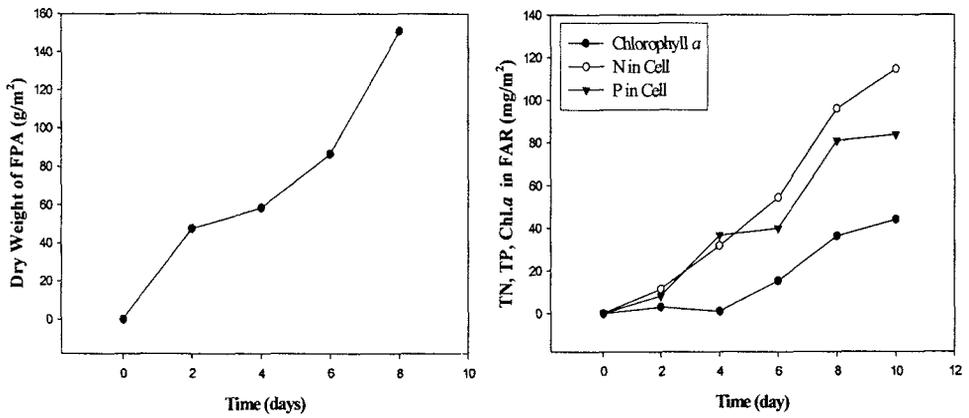
질소는 114.5mg/m², 조체 내 인은 83.7mg/m²로 나타났다(그림 4.22a). 2002년 4월에 20mm 망목 철망을 이용한 실험에서는 실험 시작 4일 이후에 빠르게 성장하였고, 최대 건중량은 150.1g/m², Chl.a는 1.04g/m², 조체 내 질소는 2.34g/m², 조체 내 인은 1.78g/m²였다. 수로의 길이를 15m로 연장한 상태에서 철망이 이용된 3월 실험에서의 생물량이 자연섬유망에 이용했던 11월의 생물량에 비해서 건중량은 150.8g/m²로 10배, Chl.a는 1.04g/m²로 25배, 조체 내 질소는 2.4g/m²로 30배, 조체 내 인은 1.8g/m²로 20배 이상 높게 나타났다(그림 4.22). 부착조류의 평균 증가율은 20mm망목 철망이 자연섬유망에 비해 건중량은 24배, Chl.a는 19배, 조체 내 질소는 15배, 조체 내 인은 11배 이상의 높은 평균 증가율을 나타냈다(표 4.22).

자연섬유망에 비해 20mm망목 철망에서의 높은 부착조류 성장률을 계절적인 영향을 무시한 채 단지 매질에 따른 차이로만 생각하는 것은 2001년 11월과 2002년 3월에 동일한 20mm철망을 사용한 경우의 증가율이 11월에 비해 3월에 약 50배 높았기 때문에 무리가 있을 수 있다(표 4.21). 그러나, 2001년 11월에 서로 다른 매질에서의 단위면적당 최대 생물량이 20mm철망에서 약 0.35g/m²였던 것에 비해 자연섬유망에서는 0.12g/m²으로 약 3배 정도의 낮았기 때문에(그림 4.20과 4.22) 15m 수로를 이용한 실험에서 나타난 자연섬유망과 20mm철망 사이에서의 부착조류 성장의 차이는 계절적인 영향 뿐 만 아니라 매질에 따른 차이로 생각할 수 있다.

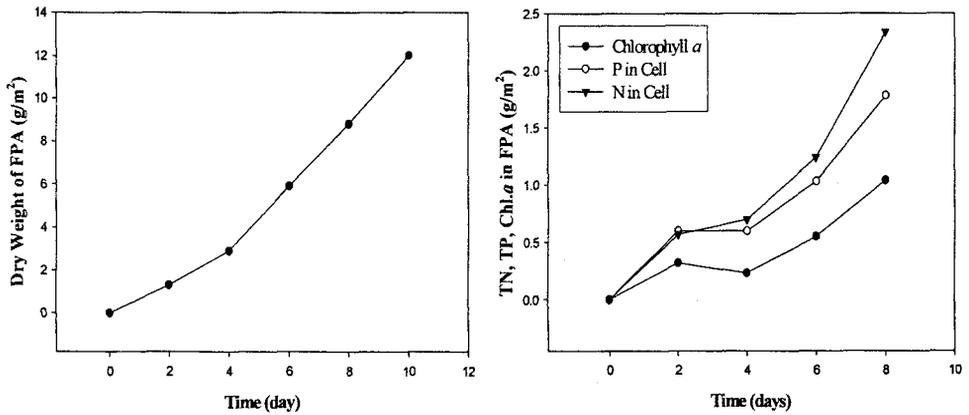
【표 4.22】 서로 다른 매질에 따른 부착조류 평균 성장률

	April (2002) 20mm 철망 g/m ² /day	November (2001) 섬유망 g/m ² /day
Dry Weight	26.9	1.6
Chlorophyll <i>a</i>	0.19	0.01
N in Cell	0.29	0.02
P in Cell	0.22	0.02

a)



b)



【그림 4.22】 Pilot 수로 내 매질에 따른 단위면적당 생물량 변화 및 조체세포 내 인, 질소 함량변화. 수로의 길이를 15m로 연장한 상태에서 유속은 10cm/s로 동일하게 적용하였음. a) 20mm망목 철망(March, 2002), b) 자연섬유망(November, 2001). FPA는 Filamentous Periphytic Algae를 의미함.

3) 매질에 따른 사상성부착조류의 영양염 제거

2001년 11월 세 종류의 10mm망목 철망, 20mm망목 철망, 자연섬유망 매질을 이용한 수로에서 부착조류의 성장에 따른 수질 개선효과를 분석하였다. 수로로 유입되는 유입수의 수온은 평균 16.6℃이었고, 총질소는 26mg/ℓ, 총인이 0.2mg/ℓ 이상으로 일반적으로 담수환경에서 관찰되는 농도보다 훨씬 높은 수준이었으며, 실험기간 동안 TN/TP비가 17~110으로 유입수내 수질의 변화가 크게 나타났다(표 4.23~30). 수질개선효과를 유입수와 유출수내 농도의 차이로 평가함에 있어 비록 유출수의 농도가 증가하는 경우도 있었지만 사상성부착조류와 영양염이 접촉할 수 있는 시간이 짧고 유입수의 농도가 높았음에도 불구하고 실험에 사용된 모든 매질에서 수질개선효과가 나타났다. 시간에 따른 일시적인 유출수의 농도 증가는 부착조류의 성장이 증가할수록 유입수내 유기물질이 매질에 부착될 가능성이 높아지고 시간이 지날수록 축적되어 분해되거나 일시적으로 매질로부터 탈리되어 수질에 영향을 주었을 가능성이 높다.

서로 다른 매질이 설치된 수로에서 부유물질에 대한 가장 높은 제거율은 20mm철망이 설치된 수로에서 나타났지만 그 외 다른 항목에 대한 제거율은 사용된 매질 중 가장 성장률이 낮았던 자연섬유망에서 나타났다(표 4.23~30). 조사된 항목 중 부유물질에 대한 제거율은 사용된 매질 모두에서 30.3g/m²day이상으로 비교적 높은 제거율을 나타냈는데 이것은 유입수내 부유물질이 부착조류의 성장과 더불어 망목의 크기가 감소함에 따라 매질에 부착되거나 매질 전후부에서 유속 감소로 침전되어 나타난 결과로 판단된다.

수로내에서 부유물질의 감소는 용존 인이나 용존무기질소와 같은 용존성 물질의 감소가 적었던 것에 비해 총인이나 총질소의 감소경향이 두드러진 이유가 될 것이다. 입자성 물질이 대부분 침전이나 여과지에 부착되어 감소하는 것과 달리 용존성 물질은 부착조류가 성장에 직접적으로 이용함으로써 수중에서 감소하게 되는데, 체류시간이 짧고 유입되는 용존성 물질 농도가 높은 환경에서 부착조류의 이용에 따른 용존성 인과 질소의 큰 감소효과를 기대하기에는 어려움이 있다.

【표 4.23】 유속이 10cm/s로 동일하게 적용된 Pilot 수로(5m)내 매질에 따른 수질개선효과 비교 (November, 2001)

		Parameter						
Mesh		SS	TN	NH ₃ -N	NO ₃ -N	NO ₂ -N	TP	DIP
		g/m ² /hr	kg/m ³ /hr	kg/m ³ /hr	g/m ² /hr	g/m ² /hr	g/m ² /hr	g/m ² /hr
Ran.	10mm철망	0~109.1	0.4~-0.3	0.6~-1.2	4.2~-56.7	0.2~-5.4	14.6~-8.7	0.0~-48.0
	20mm철망	0~101.4	0.3~-0.1	0.8~-1.0	13.2~-47.6	0.1~-4.4	12.2~-7.4	1.0~-47.7
	섬유망	0~96.0	0.4~-0.1	0.4~-0.7	12.5~-20.2	1.1~-2.1	9.6~-6.2	1.0~-49.0
Ave.*	10mm철망	34.5	0.20	0.21	3.2	0.09	5.4	0.5
	20mm철망	43.1	0.16	0.33	4.5	0.05	3.4	1.0
	섬유망	30.3	0.23	0.19	5.4	0.09	5.4	0.5

* Ave.는 제거 효과가 보이지 않은 경우를 제외한 평균값

(-)제거율은 실제로 증가율을 의미하며 제거율로 고려할 수 없으나 측정된 자료로 제시하였음. 이하동일.

【표 4.24】 유속이 10cm/s로 동일하게 적용된 Pilot 수로(5m)내 매질에 따른 총질소 제거율 (November, 2001)

Day	Inlet	10 mm 철망		20 mm 철망		자연섬유망	
	mg/ℓ	g/gDW/hr	g/m ² /hr	g/gDW/hr	g/m ² /hr	g/gDW/hr	g/m ² /hr
1	27.6	-0.8	-54.5	1.8	127.1	0.0	0.0
2	26.5	-3.6	-283.6	-1.7	-137.6	-2.3	-133.7
4	26.8	0.2	21.8	0.7	84.7	4.7	374.4
5	28.5	3.9	370.9	2.5	328.2	2.5	268.8
7	28.4	-0.7	-73.0	0.5	71.0	-0.9	-86.4
9	28.8	1.7	187.8	1.5	213.0	5.7	441.6
11	26.4	0.2	20.9	0.6	81.1	3.2	192.0
13	26.2	3.1	344.3	1.1	111.5	1.7	105.6

【표 4.25】 유속이 10cm/s로 동일하게 적용된 Pilot 수로(5m)내 매질에 따른 아질산성 질소 제거율 (November, 2001)

Day	Inlet	10 mm 철망		20 mm 철망		천연 섬유	
	$\mu\text{g}/\ell$	$\text{mg}/\text{gDW}/\text{hr}$	$\text{mg}/\text{m}^3/\text{hr}$	$\text{mg}/\text{gDW}/\text{hr}$	$\text{mg}/\text{m}^3/\text{hr}$	$\text{mg}/\text{gDW}/\text{hr}$	$\text{mg}/\text{m}^3/\text{hr}$
1	177.2	0.8	54.5	-0.3	-21.2	16.7	1085.9
2	135.1	-4.8	-370.9	-4.2	-338.8	-5.6	-329.1
4	73.2	-58.1	-5345.5	-38.2	-4436.5	-26.8	-2140.8
5	148.7	1.7	163.6	0.7	84.7	1.0	105.6
7	114.7	1.2	125.2	0.4	50.7	0.1	9.6
9	91	0.2	20.9	0.9	131.8	1.9	144.0
11	62.7	-1.0	-114.8	-0.2	-20.3	-1.1	-67.2
13	20.1	-0.3	-31.3	0.2	20.3	-0.5	-28.8

【표 4.26】 유속이 10cm/s로 동일하게 적용된 Pilot 수로(5m)내 매질에 따른 질산성 질소 제거율 (November, 2001)

Day	Inlet	10 mm 철망		20 mm 철망		천연 섬유	
	mg/ℓ	$\text{g}/\text{gDW}/\text{hr}$	$\text{g}/\text{m}^3/\text{hr}$	$\text{g}/\text{gDW}/\text{hr}$	$\text{g}/\text{m}^3/\text{hr}$	$\text{g}/\text{gDW}/\text{hr}$	$\text{g}/\text{m}^3/\text{hr}$
1	1.78	-0.1	-4.4	0.0	1.1	0.0	1.2
2	1.45	0.1	4.4	0.0	2.1	0.0	2.1
4	0.76	-0.6	-56.7	-0.4	-47.6	-0.3	-20.2
5	1.46	-0.0	-3.3	-0.0	-4.2	-0.0	-1.9
7	1.22	0.0	4.2	0.1	13.2	0.1	12.5
9	0.93	0.0	2.1	-0.0	-2.0	-0.0	-1.9
11	0.62	0.0	3.1	0.0	2.0	-0.1	-5.8
13	0.24	0.0	2.1	0.0	4.1	0.1	5.8

【표 4.27】 유속이 10cm/s로 동일하게 적용된 Pilot 수로(5m)내 매질에 따른 암모니아 성질소 제거율 (November, 2001)

Day	Inlet	10 mm 철망		20 mm 철망		천연 섬유	
	mg/ℓ	g/gDW/hr	g/m ³ /hr	g/gDW/hr	g/m ³ /hr	g/gDW/hr	g/m ³ /hr
1	24.7	1.0	65.5	1.5	105.9	0.5	35.4
2	20.8	-4.2	-327.3	-7.3	-592.9	-3.1	-185.1
4	15.0	-12.6	-1156.4	-4.9	-571.8	-2.8	-220.8
5	21.3	-2.4	-229.1	-3.0	-391.8	-1.9	-211.2
7	24.3	0.7	73.0	1.2	172.4	1.0	96.0
9	25.3	5.5	615.7	5.6	791.0	4.5	345.6
11	20.7	-1.0	-114.8	-7.6	-1014.1	-12.0	-720.0
13	24.8	0.9	104.3	2.4	233.2	1.6	96.0

【표 4.28】 유속이 10cm/s로 동일하게 적용된 Pilot 수로(5m)내 매질에 따른 총인 제거율 (November, 2001)

Day	Inlet	10 mm 철망		20 mm 철망		자연섬유망	
	ppm	mg/gDW/hr	g/m ³ /hr	mg/gDW/hr	g/m ³ /hr	mg/gDW/hr	g/m ³ /hr
1	0.97	100.7	6.5	14.9	1.1	72.6	4.7
2	1.25	-111.9	-8.7	-91.5	-7.4	-104.6	-6.2
4	0.70	0.0	0.0	18.3	2.1	-12.0	-1.0
5	0.24	11.5	1.1	0.0	0.0	-17.6	-1.9
7	0.27	0.0	0.0	14.7	2.0	0.0	0.0
9	1.12	28.0	3.1	-36.0	-5.1	-24.9	-1.9
11	0.96	106.1	12.5	90.8	12.2	160.0	9.6
13	2.43	131.6	14.6	31.4	3.0	31.5	1.9

【표 4.29】 유속이 10cm/s로 동일하게 적용된 Pilot 수로(5m)내 매질에 따른 용존무기인 제거율 (November, 2001)

Day	Inlet	10 mm 철망		20 mm 철망		자연섬유망	
	mg/ℓ	mg/gDW/hr	g/m ³ /hr	mg/gDW/hr	g/m ³ /hr	mg/gDW/hr	g/m ³ /hr
1	0.69	0.0	0.0	-14.9	-1.1	0.0	0.0
2	1.09	-14.0	-1.1	0.0	0.0	0.0	0.0
4	0.47	11.9	1.1	-9.1	-1.1	12.0	1.0
5	0.98	0.0	0.0	-8.1	-1.1	-8.8	-1.0
7	1.14	-19.7	-2.1	-7.3	-1.0	-10.4	-1.0
9	0.98	-9.3	-1.0	7.2	1.0	0.0	0.0
11	0.68	0.0	0.0	0.0	0.0	16.0	1.0
13	2.27	-432.4	-48.0	-491.4	-47.7	-802.6	-49.0

【표 4.30】 유속이 10cm/s로 동일하게 적용된 Pilot 수로(5m)내 매질에 따른 부유물질 제거율 (November, 2001)

Day	Inlet	10 mm 철망		20 mm 철망		천연 섬유	
	mg/ℓ	g/gDW/hr	g/m ³ /hr	g/gDW/hr	g/m ³ /hr	g/gDW/hr	g/m ³ /hr
1	6.00	0.0	0.0	0.0	0.0	0.9	59.0
2	6.00	0.0	0.0	0.7	52.9	0.0	0.0
4	7.00	1.2	109.1	0.5	52.9	0.0	0.0
5	6.00	0.3	27.3	0.4	52.9	0.2	24.0
7	6.00	0.0	0.0	0.7	101.4	0.5	48.0
9	6.75	0.2	26.1	0.1	8.1	0.1	7.7
11	4.75	0.4	43.8	0.1	8.1	0.1	7.7
13	7.67	0.6	69.9	0.7	67.9	1.6	96.0

길이가 15m 연장된 수로에 자연섬유망과 20mm 철망을 이용하여 수질개선효과를 평가하였다. 앞선 실험과 동일하게 유출수 내 농도가 증가하는 시기가 있었으나 상대적으로 부유물질의 감소가 적었음에도 불구하고 총질소와 총인의 감소율이 더 높게 나타났다. 시기적인 차이는 있으나 자연섬유망에 비해 부착조류의 생물 성장이 양호했던 20mm 철망을 이용한 경우에 높게 나타나 부유물질의 경우 19.2g/m³/hr, TN은 15.6g/m³/hr 그리고 총인의 경우 1.12g/m³/hr였고, 수로가 짧은 조건에서 나타나지 않았던 용존무기인에 대한 제거율도 12.4g/m³/hr로 나타났다(표 4.31~44).

비록, 수로의 길이가 짧고 유입수의 농도가 높아 영양염 감소 효과를 기대하는 것이 어려움이 있지만, 수로를 5m로 한 경우보다 15m 로 연장한 경우 감소되는 경향이 더 뚜렷하게 나타남으로써 부착조류의 영양염 흡수에 따른 수질개선이 확인되었다.

【표 4.31】 Pilot 수로(15m)에서 서로 다른 매질에 따른 수질 개선 효과비교 (유속은 10cm/s로 동일하게 조절하였음).

Date		평균 제거율						
		SS	TN	NH ₃ -N	NO ₃ -N	NO ₂ -N	TP	DIP
		g/m ³ /hr						
Nov, 2001 자연 섬유망	범위	6.5~-0.9	95.1~-34.8	73.9~-92.4	10.6~-6.2	1.2~-0.3	1.1~-0.5	0.3~-0.7
	평균*	5.5	10.5	43.9	5.4	0.6	0.9	0.2
Mar, 2002 20mm 철망	범위	35.3~0.0	31.7~-2.2	-	0.9~-0.2	0.04~-0.06	0.46~2.3	83.6~-146.5
	평균*	19.2	15.6	-	0.5	0.02	1.12	12.4

* 제거효과가 나타나지 않은 자료를 제외한 평균값.

(-)제거율은 실제로 증가율을 의미하며 제거율로 고려할 수 없으나 측정된 자료로 제시하였음. 이하동일.

【표 4.32】 자연섬유망이 설치된 Pilot 수로(15m)에서의 총질소 제거율 (November, 2002.) (유속은 10cm/s로 조절됨).

Day	유입수 농도 (mg/ℓ)	유출수 농도 (mg/ℓ)	유입부하량 (g/hr)	유출부하량 (g/hr)	제거율		
					g/gDW/hr	g/m ² /hr	(%)
1	27.5	24.0	198.0	172.8	73.1	95.1	12.7
3	24.3	25.3	175.0	182.2	-9.4	-27.2	-4.1
5	25.2	26.4	181.4	190.1	-4.8	-28.6	-4.8
6	27.3	27.6	196.6	198.7	-0.8	-6.9	-1.1
8	26.7	28.3	192.2	203.8	-2.9	-34.8	-6.0

【표 4.33】 자연섬유망이 설치된 Pilot 수로(15m)에서의 아질산성질소 제거율 (November, 2001) (유속은 10cm/s로 조절됨).

Day	유입수농도 (mg/ℓ)	유출수농도 (mg/ℓ)	제거율		
			mg/gDW/hr	mg/m ² /hr	(%)
1	185.7	187.1	-29.3	-38.0	-0.8
3	169.9	181.1	-104.9	-304.3	-6.6
5	264.4	214.1	203.3	1199.2	19.0
6	245.6	246.1	-1.3	-11.4	-0.2
8	165.3	164.3	1.8	21.8	0.6

【표 4.34】 자연섬유망이 설치된 Pilot 수로(15m)에서의 질산성질소 제거율 (November, 2001) (유속은 10cm/s로 조절됨).

Day	유입수농도 (mg/ℓ)	유출수농도 (mg/ℓ)	제거율		
			g/gDW/hr	g/m ² /hr	(%)
1	1.58	1.57	0.2	0.3	0.6
3	1.50	1.11	3.7	10.6	26.0
5	1.98	2.24	-1.1	-6.2	-13.1
6	2.11	2.25	-0.4	-3.2	-6.6
8	1.73	1.74	-0.0	-0.2	-0.6

【표 4.35】 자연섬유망이 설치된 Pilot 수로(15m)에서의 암모니아성질소 제거율 (November, 2001) (유속은 10cm/s로 조절됨).

Day	유입수농도 (mg/ℓ)	유출수농도 (mg/ℓ)	제거율		
			g/gDW/hr	g/m ² /hr	(%)
1	24.3	21.8	52.2	67.9	10.3
3	18.5	21.9	-31.9	-92.4	-18.4
5	22.8	19.7	12.5	73.9	13.6
6	24.5	23.2	3.4	29.7	5.3
8	24.5	24.3	0.4	4.4	0.8

【표 4.36】 자연섬유망이 설치된 Pilot 수로(15m)에서의 총인 제거율 (November, 2001)
(유속은 10cm/s로 조절됨).

Day	유입수농도 (mg/ℓ)	유출수농도 (mg/ℓ)	유입부하량 (g/hr)	유출부하량 (g/hr)	제거율		
					g/gDW/hr	g/m ³ /hr	(%)
1	0.59	0.55	4.2	4.0	0.8	1.1	6.8
3	0.78	0.80	5.6	5.8	-0.2	-0.5	-2.6
5	1.11	1.13	8.0	8.1	-0.1	-0.5	-1.8
6	1.62	1.59	11.7	11.4	0.1	0.7	1.9
8	1.06	1.08	7.6	7.8	-0.0	-0.4	-1.9

【표 4.37】 자연섬유망이 설치된 Pilot 수로(15m)에서의 용존무기인 제거율 (November, 2001) (유속은 10cm/s로 조절됨).

Day	유입수농도 (mg/ℓ)	유출수농도 (mg/ℓ)	제거율		
			g/gDW/hr	g/m ³ /hr	(%)
1	0.52	0.51	0.2	0.3	1.9
3	0.78	0.78	0.0	0.0	0.0
5	1.17	1.20	-0.1	-0.7	-2.6
6	1.28	1.28	0.0	0.0	0.0
8	0.82	0.81	0.0	0.2	1.2

【표 4.38】 자연섬유망이 설치된 Pilot 수로(15m)에서의 부유물질 제거율 (November, 2001) (유속은 10cm/s로 조절됨).

Day	유입수농도 (mg/l)	유출수농도 (mg/l)	제거율		
			g/gDW/hr	g/m ² /hr	(%)
1	5.30	5.70	-8.4	-10.9	-7.5
3	5.00	6.00	-9.4	-27.2	-20.0
5	4.20	4.30	-0.4	-2.4	-2.4
6	5.20	5.00	0.5	4.6	3.8
8	5.50	5.20	0.5	6.5	5.5

【표 4.39】 20mm 철망이 사용된 Pilot 수로(15m)에서의 총질소제거율 (March, 2002.) (유속은 10cm/s로 조절됨).

Day	유입수농도 (mg/l)	유출수농도 (mg/l)	유입부하량 (g/hr)	유출부하량 (g/hr)	제거율		
					g/gDW/hr	g/m ² /hr	(%)
2	23.1	22.9	166.3	164.5	9.68	24.6	1.1
		23.6	166.3	169.9	-4.64	-44.3	-2.1
		23.5	166.3	169.4	-2.84	-37.2	-1.9
4	22.6	22.0	162.5	158.6	1.25	57.6	2.4
		23.3	162.5	168.0	-1.65	-84.3	-3.4
		22.9	162.5	165.2	-1.92	-39.5	-1.7
6	25.5	25.0	183.4	179.9	0.34	55.9	1.9
		25.8	183.4	186.0	-0.21	-37.8	-1.4
		25.4	183.4	182.6	0.20	9.9	0.4

【표 4.40】 20mm 철망이 사용된 Pilot 수로(15m)에서의 아질산성질소제거율 (March 2002.) (유속은 10cm/s로 조절됨).

Day	유입농도 ($\mu\text{g}/\ell$)	유출농도 ($\mu\text{g}/\ell$)	제거율		
			mg/gDW/hr	mg/m ² /hr	(%)
2	106.6	103.3	129.73	329.0	3.1
		103.1	33.16	316.2	3.3
		103.1	23.29	304.7	3.3
4	210.8	209.2	3.71	171.0	0.8
		209.0	3.79	192.9	0.8
		209.2	8.07	166.1	0.8
6	157.2	156.7	0.37	60.6	0.3
		156.1	0.62	110.7	0.7
		156.5	1.29	63.7	0.4

【표 4.41】 20mm 철망이 사용된 Pilot 수로(15m)에서의 질산성질소제거율 (March, 2002.) (유속은 10cm/s로 조절됨).

Day	유입농도 (mg/ ℓ)	유출농도 (mg/ ℓ)	제거율		
			g/gDW/hr	g/m ² /hr	(%)
2	0.77	0.78	-0.31	-0.8	-1.1
		0.77	-0.04	-0.4	-0.6
		0.72	0.32	4.2	6.3
4	1.43	1.47	-0.09	-4.0	-2.6
		1.46	-0.07	-3.7	-2.3
		1.43	-0.01	-0.2	-0.1
6	1.23	1.20	0.02	3.4	2.4
		1.23	0.00	0.0	0.0
		1.61	-0.69	-33.9	-30.7

【표 4.42】 20mm 철망이 사용된 Pilot 수로(15m)에서의 총인제거율 (March, 2002.) (유속은 10cm/s로 조절됨).

Day	유입수농도 (mg/l)	유출수농도 (mg/l)	유입부하량 (g/hr)	유출부하량 (g/hr)	제거율		
					mg/gDW/hr	g/m ³ /hr	(%)
2	0.66	0.66	4.8	4.8	-110.34	-0.3	-0.4
		0.66	4.8	4.8	-26.78	-0.3	-0.4
		0.65	4.8	4.7	35.05	0.5	0.8
4	0.81	0.78	5.8	5.6	58.96	2.7	3.1
		0.78	5.8	5.6	54.17	2.8	3.1
		0.81	5.8	5.8	4.71	0.1	0.1
6	1.56	1.56	11.2	11.2	2.44	0.4	0.2
		1.56	11.2	11.2	2.04	0.4	0.2
		1.59	11.2	11.4	-52.97	-2.6	-1.9

【표 4.43】 20mm 철망이 사용된 Pilot 수로(15m)에서의 용존무기인제거율 (March, 2002.) (유속은 10cm/s로 조절됨).

Day	유입수농도 ($\mu\text{g/l}$)	유출수 농도 ($\mu\text{g/l}$)	제거율		
			mg/gDW/hr	mg/m ³ /hr	(%)
2	109.6	111.4	-68.76	-174.4	-1.6
		109.6	0.00	0.0	0.0
		113.2	-23.44	-306.8	-3.2
4	142.3	142.3	0.00	0.0	0.0
		142.3	0.00	0.0	0.0
		142.3	0.00	0.0	0.0
6	311.2	314.7	-2.46	-404.2	-1.1
		311.2	0.00	0.0	0.0
		313.9	-4.85	-238.7	-0.9

【표 4.44】 20mm 철망이 사용된 Pilot 수로(15m)에서의 부유물질제거율 (March, 2002.)
(유속은 10cm/s로 조절됨).

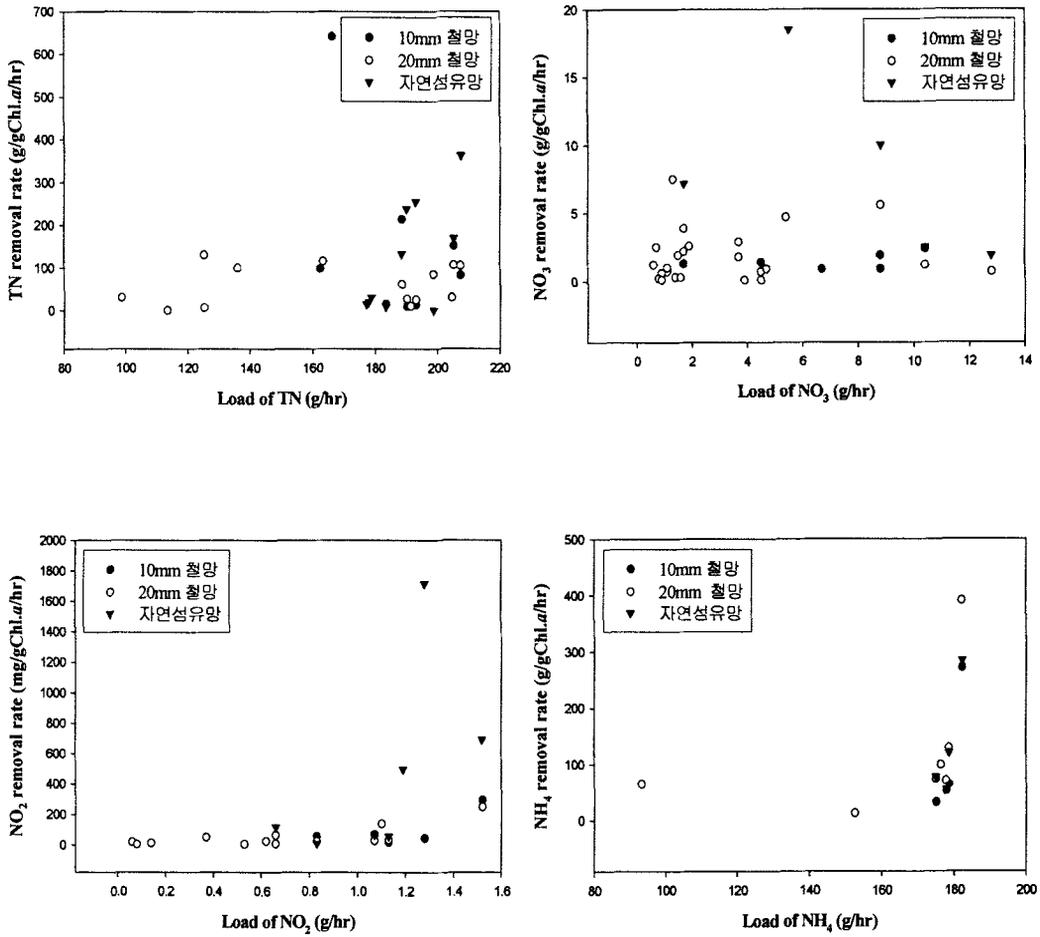
Day	유입농도 (mg/ℓ)	유출농도 (mg/ℓ)	제거율		
			g/gDW/hr	g/m ² /hr	(%)
2	7.00	6.33	25.93	65.8	9.5
		6.00	9.44	90.0	14.3
		5.67	8.84	115.7	19.0
4	5.67	5.00	1.56	72.0	11.8
		4.67	2.15	109.5	17.7
		5.00	3.40	69.9	11.8
6	7.00	5.67	0.93	152.4	19.0
		5.33	0.97	173.9	23.8
		6.33	1.22	60.0	9.5

4) 서로 다른 매질에서 오염물질 부하량에 따른 사상성부착조류의 영양염 제거효과

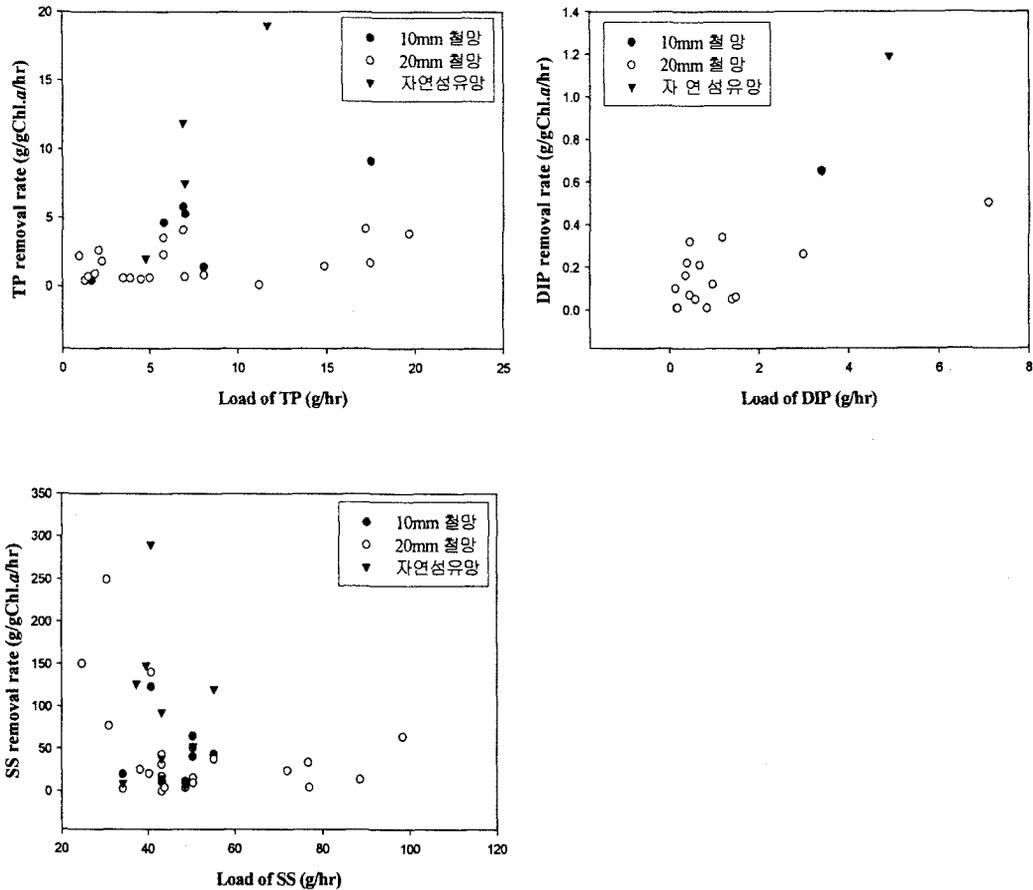
10, 20mm철망과 자연섬유망에서 시간에 따른 부착조류의 성장과 유입부하량에 따른 수질정화효과를 평가하였다. 매질에 따른 영양물질 제거효과는 비교된 모든 항목에서 매질 중 성장률이 가장 적었던 자연섬유망에서의 부하량에 따른 제거효율이 높게 나타났다(표 4.21)(그림 4.23). 부하량 증가에 따른 제거율의 증가는 용존인(DIP)에서 관찰된 반면, 부유물질은 부하량 증가에 따라 제거율의 감소하였고, 그 외 비교항목에 있어서는 부하량에 따른 제거율의 변화가 없는 것으로 나타났다.

사용된 매질 중에서 부착조류의 성장이 적었던 자연섬유망에서의 제거율이 비교적 높게 나타난 것은 많은 생물양이 반드시 높은 제거율을 나타내는 것은 아님을 제시한다. 또한 DIP를 제외하고 부하량에 따른 제거율의 변화가 없었던 것은 본 실험이 이루어진 pilot수로는 총 길이가 5m 에 불과한 반면 고 농도의 인과 질소가 유입되기 때문에 단위 면적당 제거량은 부유물질이 20mm철망에서 평균 43.1g/m²/hr, 총 질소가 자연섬유망에서

0.23kg/m²/hr 그리고 총인이 10mm철망에서 평균 5.4g/m²/h로 높게 유지된다 하더라도, 제거되는 총량에 있어서는 제한되기 때문인 것으로 판단된다(표 4.30).



【그림 4.23】 Pilot(하수처리수)에서 오염물질부하량에 따른 영양염 제거율



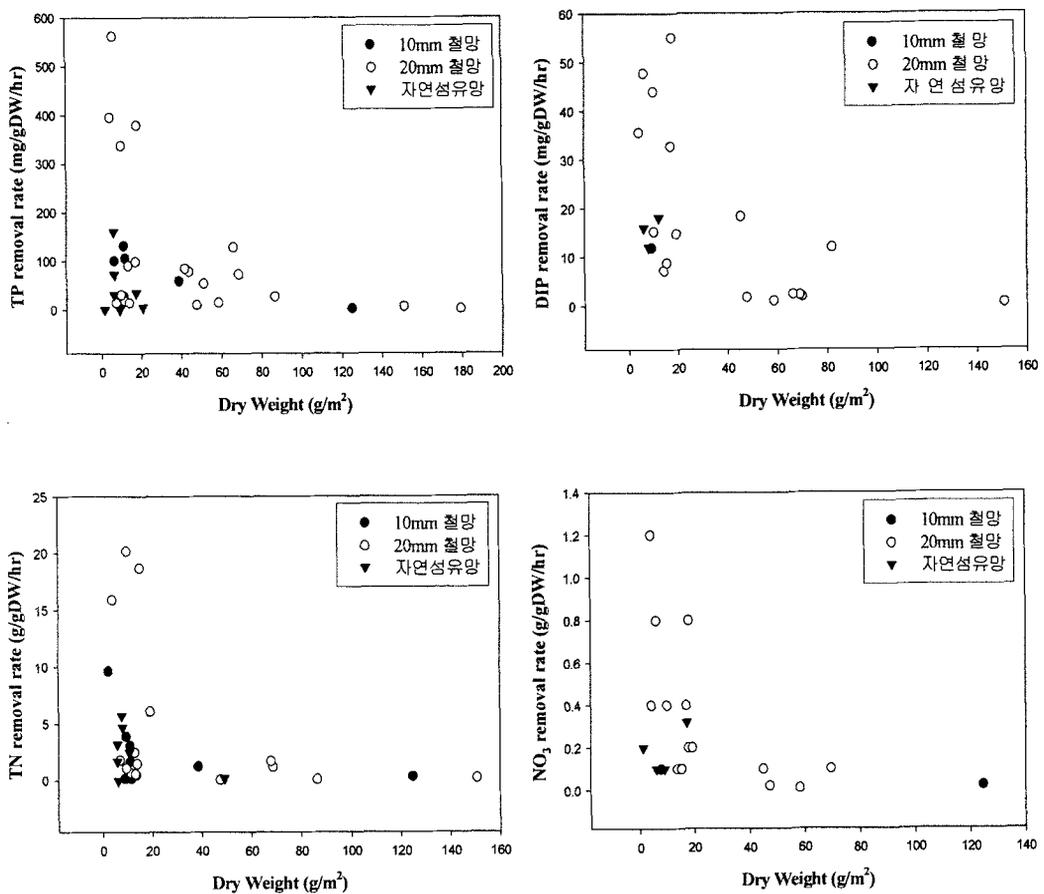
【그림 4.23】 계속

5) 서로 다른 매질에서 사상성 부착조류 생물량에 따른 영양염 제거율 비교

10, 20mm철망과 자연섬유망을 이용한 pilot실험에서 부착조류 생물량과 그에 따른 영양염 제거율을 평가하였다(그림 4.24). 일반적으로 사상성 부착조류 생물량 증가에 따라 영양염의 제거효율(%)은 증가하는 경향을 나타내지만, 일정 생물량 이상에서는 제거효율의 증가가 동반되지 않는 것으로 알려져 있다(Vymazal, 1988). 본 연구에서도 단위면적당 생물량 증가시 영양물질 제거율에 있어 뚜렷하게 감소하는 경향을 보였다.

본 연구에서 생물량이 적은 시기 즉 시스템이 운영된 초기에 제거율이 높게 나타난 것

과 마찬가지로 Horner *et al.* (1990)은 생물량과 인 제거율의 관계는 세포의 활성도와 수체 내 영양염의 확산과 관련하여 매질에 부착조류가 부착되는 초기에 분명하게 나타나는 것으로 보고하였다. 결과적으로, 생물량이 높다고 해서 반드시 영양염 제거효과가 높은 것은 아니며 본 연구에서 실험이 진행 될 수록 처리율이 감소한 원인으로 생각할 수 있다.



【그림 4.24】 Pilot(하수처리수)에서 부착조류 생물량에 따른 영양염 제거율

여 백

제 5 장

사상성부착조류 수로시스템에 의한 수질개선기법의 현장적용 연구

여 백

제 5 장 사상성부착조류 수로시스템에 의한 수질개선기법의 현장적용 연구

제 1 절 현장 대상지 선정 및 시스템 구성

1. 현장 농배수로 선정 및 유역현황

농업용 배수로의 선정에 있어 유량이 년 중 유지되는 곳을 선정하기가 거의 불가능 했으며, 일부 가능한 곳 또한 연 중 유량변화가 크고, 시설 설치를 위해 유량을 조절하는 경우에는 강우시 인근 농경지로 유입되어 농사에 피해를 초래할 수 있었기 때문에 현재 농업용 저수지로 사용되고 있으며 유량과 유속을 인위적으로 조절할 수 있는 곳으로 충청남도 아산시 소재의 마산저수지(신정호) 인근에 농업기반공사에서 설치한 Bio-park내 수로를 선정하였다(이하에서는 농수로로 명칭 함). 신정호는 농업용저수지로 부영양상태의 수질을 보유하여 농촌유역에서 전형적인 수질상태로 판단할 수 있으며, 본 연구에서 적용하는 시스템을 이용하는데 무리가 없는 것으로 판단하여 선정하였다. 수로는 폭은 0.5m, 높이는 0.7m로서 본 연구에서는 20m 구간을 사용하였다.

신정호는 삼교호로 유입되는 준용하천 곡교천의 지류인 오목천의 상류에 위치하며 유역면적 1,791ha, 수표면적 91ha, 저수량 3,037천톤의 농업용 저수이다(표 5.1).

신정호의 유역의 경계는 북단으로 신정동, 동남으로 용화동(초사동) 서쪽으로는 신창면 창암리로 되어 있으며, 주 유입하천으로는 초사동 황산(EL. 347.8m)에서 발원하는 준용하천인 초사천과 덕암산(EL. 260.5)에서 발원하는 준용하천인 황산천 2개로 구성되어 있다. 마산저수지의 수질은 1997년 이후 연간 COD변화가 감소추세를 보이거나 여전히 농업용수질을 초과하고 있다. 2001년 3월과 8월에 측정된 결과는 각각 9.7, 10.2mg/l 였으나, 주 오염원으로는 축산폐수가 그 원인으로 평가되고 있다(농림부, 2001)

【표 5.1】 마산저수지(신정호)의 제원

구 분	유역면적	만수면적	총저수량	평균수심	관개면적	준공연도
마산저수지	1,791 ha	91ha	3,037천톤	3.5m	566ha	1928. 3. 31

2. 유입수 현황

Bio-park는 농업용수 수질개선 시범사업 일환으로 수생식물을 통해 농업용저수지의 수질을 개선을 위해 조성된 것으로 총 2구역으로 나누어져 식물재배지가 조성되어 있다. 본 연구에서 부착조류시스템으로 유입되는 유입수는 신정호 심층수를 인위적으로 펌핑한 후 접근수로, 양수장, 송수관, 침전조, 식물재배지를 거친 후 중간수로 통과한 물을 사용하였다. 따라서, 실험기간 동안 시스템으로 유입되는 유입수질은 부유물질의 경우 침전조와 식물재배지를 거치면서 어느 정도 제거되었고, 식물플랑크톤이나 수생식물에 의해 쉽게 이용될 수 있는 형태의 영양염 보다는 난분해성 물질이나 식물재배지에서 분해활동에 따른 부산물들도 포함되었을 것으로 판단된다.

3. 조사내용 및 시스템 구성

2001년 8월 20일 ~ 9월 13일까지는 자연섬유망을 이용하여 부착조류 성장 및 수질개선효과를 조사하였다. 유속은 10cm/s로 조절하였고 가로 0.48m, 높이 0.3m, 망목의 크기가 20mm인 섬유망을 1m 간격으로 설치하여 실험하였다(그림 5.1).

2001년 10월 8일~10월 18일에는 자연 섬유망 매질 10개를 2m 간격으로 설치하여 실험하였다.

2002년 9월 4일 ~ 9월 14일에는 20m 길이의 수로에 1m 간격으로 20mm 철망을 20개 설치하였다(그림 5.2). 수로 맨 뒷부분에 모래주머니를 쌓아 수심은 평균 20cm를 유지하도록 하였다. 2002년 9월 4일부터 5일 동안은 부착조류의 성장률을 분석하였고 2002년 9월 9일부터 14일까지는 유속에 따른 부착조류 성장과 그에 따른 수질개선효과를 조사하였다. 유속은 평균 수심을 유지한 상태에서 유량을 조절하여 0.5cm/s, 1cm/s, 5cm/s로 조절

하여 수행하였으며, 유속은 높은 유속에서 낮은 유속 순으로 조절하여 실험하였다. 자연적으로 부착되는 사상성 부착조류의 양이 매우 적어, 인근에서 채집한 사상성부착조류를 잘게 잘라 수로 내에 뿌린 후 부착 성장하도록 하였다. 실험은 접종 후 1시간 이후에 수행하였다.

4. 시료 채취 및 분석방법

2001년 8월 자연섬유망을 사용한 실험에서는 생물량에 따른 제거효율과 수로시스템 전체에 걸친 부착조류의 성장상태를 평가하기 위해서 수로 유입·유출부 뿐 만 아니라 중간지점에서도 생물량과 수질분석을 위한 시료를 채취하였다. 부착조류의 생물량 측정을 위한 시료를 8월 실험에서는 1, 3, 5번째 망(Inlet), 8, 10, 12번째 망(Middle), 16, 18, 20번째 망(Outlet)에서 채취하여 분석하였고, 수질의 조사를 위한 시료는 유입수(Inlet)과 10번째 망 뒤(Middle), 그리고 20번째 망 뒤(Outlet)에서 바닥의 교란이 일어나지 않도록 주의해서 채취하였다.

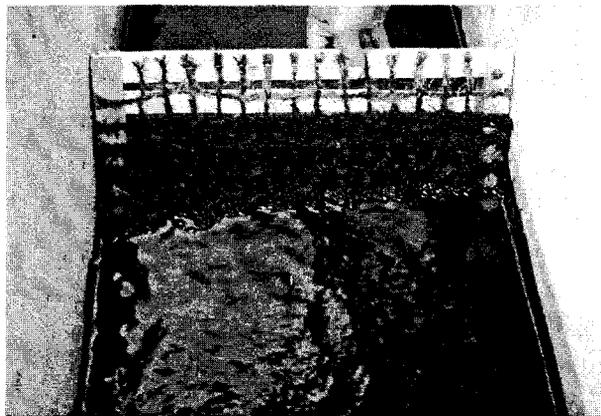
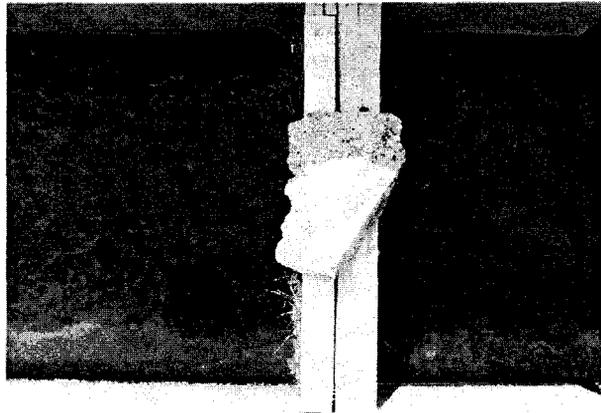
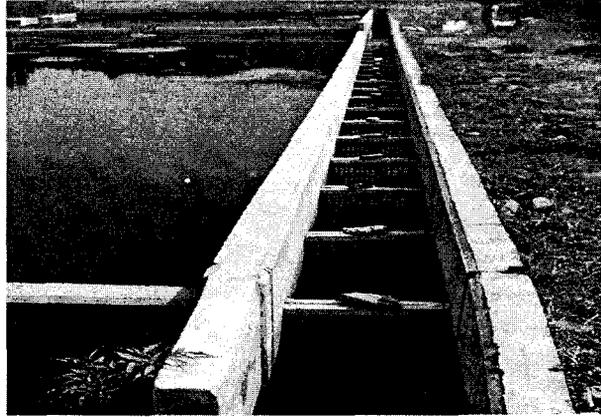
10월 실험에서는 부착조류 생물량 조사를 위한 시료는 2, 3번째 망(Inlet)과 5, 6번째 망(Middle) 그리고 8, 9번째 망(Outlet)에서 채취하였고, 수질분석을 위한 시료는 유입수(Inlet), 5번째 망 뒤(Middle), 그리고 10번째 망 뒤(Outlet)에서 채취하였다.

20mm철망을 이용한 성장률 실험에서는 유속을 각각 0.5, 1.0, 5cm/s로 조절하여 영양염 제거효율을 측정하였고, 각 유속에 대한 체류시간을 고려하여 유출수는 0.5cm/s 유속에서는 66분 40초, 1cm/s 유속에서는 33분 20초, 5cm/s 유속에서는 6분 40초 시간의 간격으로 채수하였다. 전체 실험은 동일한 방법으로 두 번에 걸쳐 진행되었다.

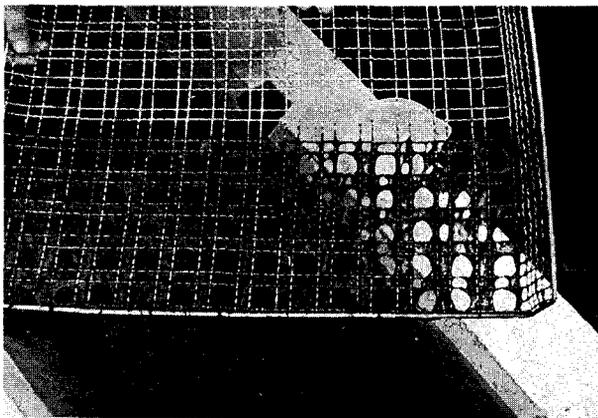
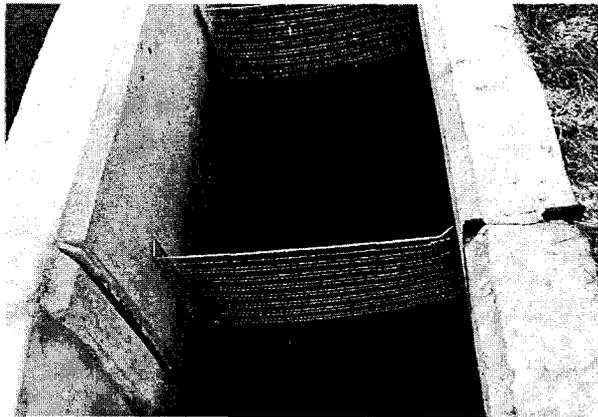
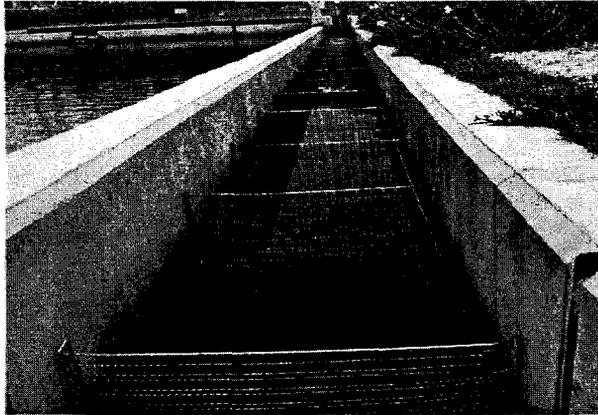
부착조류의 성장량은 매질의 일정 면적내에 부착된 조류를 채취하여 건중량과 엽록소 a 농도를 측정하여 계산하였다. 생물 및 화학적 요인들은 수질오염공정시험법(환경부, 1997) 및 미국표준수질시험법(APHA *et al.*, 1995)을 기초로 분석하였다. 현장에서 pH meter (Istack)와 Conductivity meter (Isteck)를 이용해 수소이온농도(pH)와 전기전도도를 측정하였으며, 수온은 수온온도계로, 용존산소는 azide 변법으로 측정하였다(APHA *et al.*, 1995). 수질분석을 위해 채수된 시료는, 미리 산 세척된(2N HCl) 7L 폴리에틸렌 담아 실험실로 운반하였다. 실험실에 운반된 시료는 부유물질 측정을 위해 일정량의 시료를 미리 세척된 GF/F 여과지로 여과하였으며, 여과액은 용존 무기영양염 분석을 위해, 그리고

원수는 입자성영양염 분석을 위해서 각각 2N 염산으로 세척된 250ml 플라스틱 용기에 담아 분석 전 까지 -20°C 에서 냉동 보관하였다. 분석은 일주일 이내에 모두 이루어졌다. 부유물질(SS)은 여과전 여과지의 무게와 여과후 100°C Dry oven에서 건조된 여과지의 무게차로 부터 계산하였다(APHA *et al.*, 1995). 용존무기인(Dissolved Inorganic Phosphorus)은 Ascorbic acid 법으로 분석되었고, 암모니아($\text{NH}_3\text{-N}$)와 아질산성($\text{NO}_2\text{-N}$), 질산성 질소($\text{NO}_3\text{-N}$)는 각각 phenate ($4500 \text{ NH}_3\text{-F}$, APHA *et al.*, 1995), Colorimetric ($4500 \text{ NO}_2\text{-B}$, APHA *et al.*, 1995) 그리고 카드뮴 환원법으로 측정하였다. 총인 (TP)은 과망간산칼륨 (persulfate)으로 분해한 후, ascorbic acid 법으로 측정하였으며, 총질소 (TN)는 과망간산칼륨으로 분해한 후 카드뮴 환원법으로 질산성질소의 농도를 정량하였다. 화학적 산소요구량(COD_{Mn})은 알칼리성 과망간산법으로 측정하였다(환경부, 1996). 생물학적 산소요구량(BOD)는 시료를 20°C 암조건에서 5일간 배양한 후에 azide변법으로 용존산소농도를 측정하여, 배양전의 용존산소 농도와의 차이로부터 산출하였다(APHA *et al.*, 1995).

엽록소 *a* 농도 측정을 위해 일정량의 시료를 GF/F여과지로 여과하였고, 여과지에 100% 메탄올을 넣어 24시간 동안 냉암소에 보관한 후, 추출된 엽록소의 흡광도를 흡광광도계를 이용하여 측정하여 Maker가 제시한 식에 따라 계산하였다(Maker, 1972; Maker *et al.*, 1980).



【그림 5.1】 섬유망을 이용한 부착조류 수로 시스템 실험사진



【그림 5.2】 20mm 철망을 이용한 부착조류 수로 시스템 실험사진

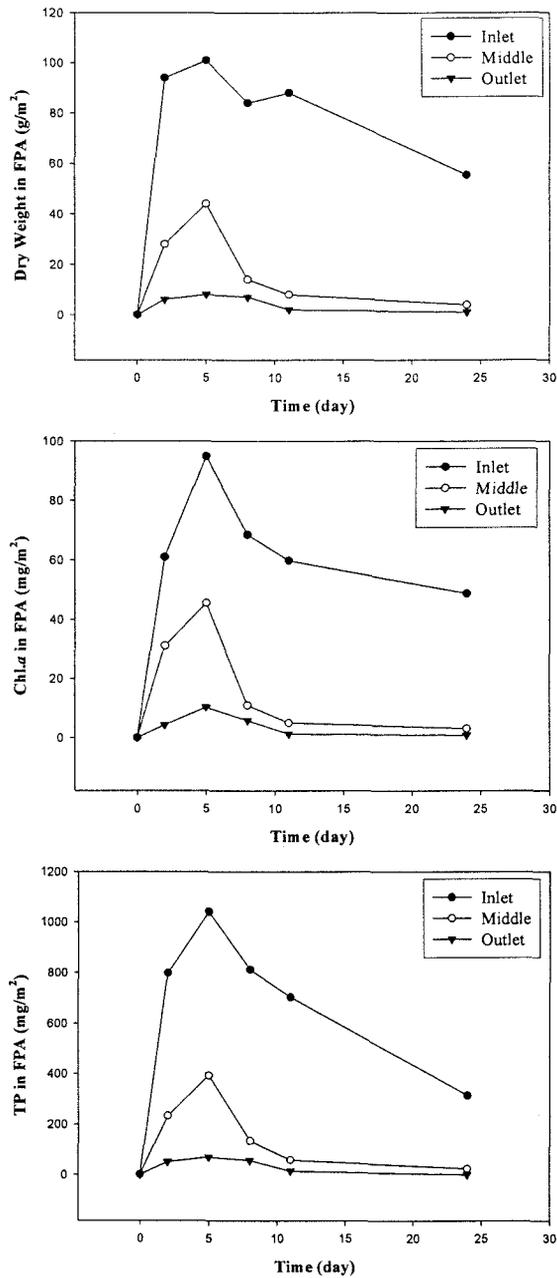
제 2 절 사상성부착조류 수로시스템에서 부착조류의 성장과 수질개선효과

1. 농수로 내 매질에 따른 부착조류의 성장 비교

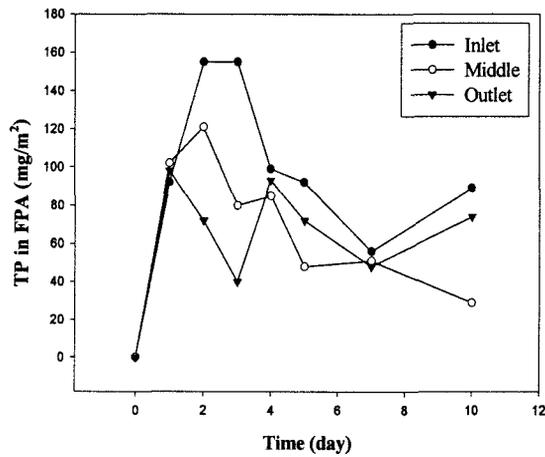
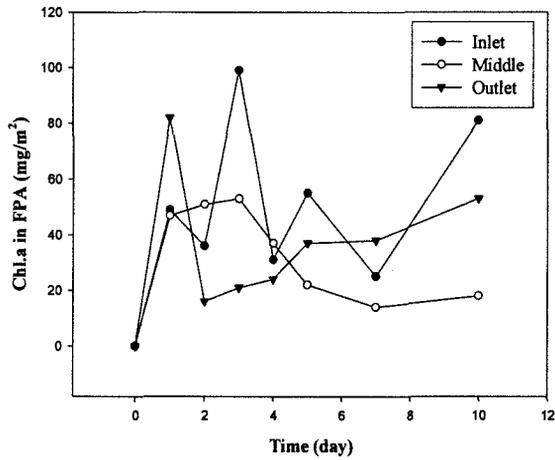
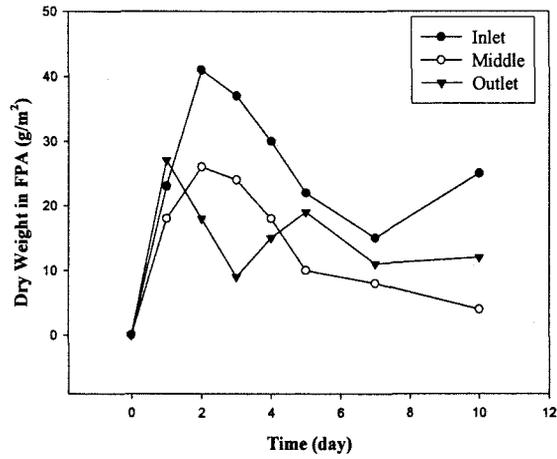
가. 자연 섬유망

8월 실험에서 실험 시작 이후 5일까지는 생물량이 증가하다가 5일 이후에는 깔다구 유층의 출현과 부유물질의 부착조류와의 착상과 더불어 감소하는 경향을 나타냈다(그림 5.3). 부착조류 섭식생물의 출현은 직접적인 섭식 외에도 섭식 과정 중에 매질로부터 탈리를 증가시켜 시간에 따른 생물량의 감소를 야기할 수 있으며, 유입수가 유입되는 동안에 식물재배지로부터 재부유된 식물사체나 토사 등이 유입되어 부착조류에 부착함으로써 빛의 이용성을 감소시키고 여과지를 폐색시킴으로써 성장이 감소되었을 가능성 또한 제기될 수 있다. 미세 황토 등과 같은 부유물질이 매질로부터 부착조류를 탈리시키는 영향은 일정한 유속조건에서 보다 탁도가 높은 시기에 현저히 증가되는 것으로 보고 되고 있다(McIntire & Phinney, 1965). Horner *et al.* (1990)은 부유물질 첨가에 의한 손실율의 증가가 유속의 급작스러운 변동시 나타나는 손실율에 비해 매우 작았으나, 유속의 증가와 더불어 부유물질이 동시에 영향을 주는 조건에서는 단지 유속만이 증가된 곳에 비해 대략적으로 2배 가량의 순간적인 손실율이 나타남을 제시하였다.

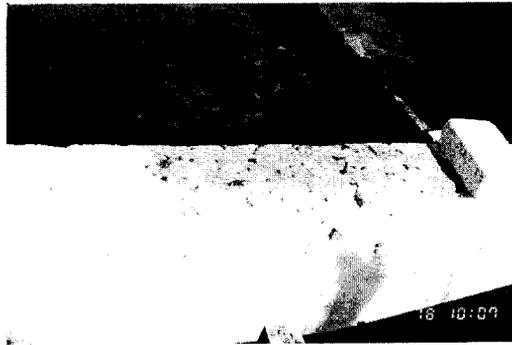
10월 실험에서는 실험 시작 이틀까지는 생물량이 지속적으로 증가하였으나 이후에 감소와 증가가 반복되었다(그림 5.4). 실험 이틀 후부터는 부착조류의 성장량이 양호했던 수로 앞부분에 설치된 매질에서 달팽이들이 높은 밀도(1마리/cm²)로 관찰되었고(그림 5.5), 매질에 부착된 조류를 섭식한 후 다른 매질로 이동하는 것이 확인되었다. 매질 내에서 달팽이는 부착조류에 대한 높은 섭식율을 나타냈고, 이는 시간과 수로 내 공간적 위치에 따른 부착조류 생물량 변화의 주된 요인 중의 하나였을 것으로 판단된다. 또한, 유입수가 2일 간격으로 야간에 10시간 정도 중단되어(Bio-Park 조작관련 문제) 수로 내에서 수위저하가 나타난 것도 부착조류 성장의 저해요인으로 작용했을 것이다. 수로 내에서의 부착조류 생물량의 증가율은 달팽이의 섭식으로 인해 시간과 공간적 위치에 따른 생물량의 변화가 두드러졌던 10월보다는 8월에 조사되었다(표 5.2).



【그림 5.3】 농수로 내 천연섬유 망에서의 부착조류 생물량 변화(2001 년 8월) (Inlet, Middle, Outlet는 각각 1, 3, 5번째 망과 8, 10, 12번째 망 그리고 16, 18, 20번째 망의 평균 값)



【그림 5.4】 농수로 내 천연섬유 망에서의 부착조류 생물량 변화(2002년 10월)(Inlet Middle, Outlet은 각각 2, 3번째 망과 5, 6번째 망 그리고 9, 10번째 망에서의 평균값)



【그림 5.5】 2001년 10월 농수로내에서 발생한 달팽이

【표 5.2】 농수로 내 섬유망에서 부착조류의 평균 생물량 증가율

Month	Parameter	Unit	실험 시작일 기준		
			Inlet*	Middle*	Outlet*
8	Dry Weight	g/m ² /day	17.6	5.1	1.1
	Chlorophyll <i>a</i>	mg/m ² /day	66.6	16.2	4.5
10	Dry Weight	g/m ² /day	10.3	6.7	7.0
	Chlorophyll <i>a</i>	mg/m ² /day	18.3	15.2	16.7

*: Inlet, Middle, Outlet에 대한 설명은 본문 및 (그림 5.3) 참조

나. 20mm 철망

2002년 9월 4일부터 5일 동안 자연섬유망 대신 망목의 크기가 20mm인 철망이 농수로내에 설치되었다. 실험 4일 이후부터 생물량의 증가가 나타났으며 실험 5일째 0.36mgChl.*a*/m²로 가장 높은 생물량을 나타냈으며, 이때의 성장률은 0.05mg Chl.*a*/m²/day로 비교적 매질간의 부착조류 성장률이 일정하였던 2001년 10월에 자연섬유망에서 나타난 성장률 16.7mgChl.*a*/m²/day와(표 5.2) 비교해서 330배 정도 낮았다(표 5.3).

【표 5.3】 농수로 내 20mm철망에서 시간에 따른 부착조류의 생물량 증가율

Time (day)	Dry Weight	Chl.	N in Cell P in Cell		DW/ Chl.a	N / Chl.a	P /Chl.a
	g/m ²	mg/m ²	mg/m ²	mg/m ²	mg/mg		
1	5.61	0.09	0.09	0.01	65.96	1.07	0.13
3	7.72	0.13	0.15	0.02	58.79	1.11	0.14
4	12.71	0.16	0.21	0.03	77.16	1.30	0.17
5	30.51	0.36	0.39	0.06	88.54	1.09	0.17

2. 농수로 부착조류시스템 유입, 유출수의 질소와 인의 비율 및 수질 개선 효과

2001년 8월과 10월의 유입수 수온은 약 5~11℃의 차이를 나타냈다. TN/TP비는 11~13였으며, 질소와 인 대부분이 유기물 형태로 존재하고 있었다. 부착조류의 성장에 이용할 수 있는 용존 형태의 인과 질소 비는 1~6의 비율로 상대적으로 질소에 비해 인의 비율이 높게 나타났다(표 5.4).

자연섬유망을 이용한 실험에서 섭식자에 의한 생물량 감소가 나타나기 전 시점에서는 암모니아성 질소와 아질산성 질소 그리고 용존무기인을 제외하고는 수질개선 효과가 나타났다. 현장에 설치된 부착조류 시스템에서의 수질개선효과는 생물량이 성장이 양호한 앞부분(Inlet 으로 표기되어 있음)에서 높게 나타났으며, 10월에는 8월과 수질 개선이 나타난 항목에 있어서 유사한 경향을 나타냈다(표 5.5~5.19).

현장 수로에서 실험되는 기간 동안에 나타난 깔다구와 달팽이와 같은 포식자가 공존하는 동안에 부착조류에 의한 수질개선효과는 섭식자의 섭식활동에 의해 감소될 수 있다. 일반적으로 동물플랑크톤이 혹은 패류가 식물플랑크톤을 섭식하는 과정 중에 일차적으로 분해산물로 배출되는 영양염은 암모니아성 질소와 용존무기인으로, 본 실험동안에 질산성 질소를 제외한 용존성 질소와 용존무기인의 농도가 시기적으로 유출수에서 증가한 이유를 설명할 수 있을 것이다. 섭식활동에 의한 암모니아성 질소의 배출은 호기적 조건에서 아질산성질소와 질산성 질소의 증가를 야기하게 된다. 그러나, 본 연구에서는 질산성 질소의 경우는 8월과 10월에 몇몇 경우를 제외하고는 감소되는 것으로 나타났다. 질산화 과정은 호기적 조건에서 나타나는 반면에 질산성 질소의 손실은 환원환경에서 대기중으

로의 탈질이나 생물에 의한 이용에 의해 감소한다. 동일한 시스템에서 서로 다른 환경이 조성 될 수 없다면, 비록 섭취자의 활동에 의한 질소의 재배출로 인해 암모니아성 질소가 증가하였고 질산화 과정을 통해 중간산물이 아질산성의 질소가 증가하였다 하더라도, 최종산물인 질산성질소는 부착조류의 흡수에 의해 감소된 것으로 판단할 수 있다.

【표 5.4】 자연섬유망이 설치된 농수로의 유입수 농도 변화 (2001년)

Month		환경요인 및 수질항목									
		Temp.	pH	EC	SS	TN	NH ₃ -N	NO ₃ -N	NO ₂ -N	TP	DIP
		℃		μS/cm	mg/ℓ	mg/ℓ	μg/ℓ	μg/ℓ	μg/ℓ	μg/ℓ	μg/ℓ
8*	범위	25.8	8.9	152.0	10.7	1.47	11.2	7.0	2.8	114.1	19.1
		~	~	~	~	~	~	~	~	~	~
		27.1	9.5	165.4	26.5	1.73	127.9	144.3	62.1	157.1	42.0
	평균	26.9	9.4	163.9	18.7	1.59	50.7	57.7	22.2	144.2	35.4
	SD(±)	0.1	0.0	0.04	5.6	0.09	46.5	53.9	22.5	16.4	8.9
10*	범위	14.7	7.3	119.6	11.0	1.29	3.1	34.2	9.3	98.3	8.7
		~	~	~	~	~	~	~	~	~	~
		22.0	9.2	158.5	22.0	1.44	117.2	199.9	16.3	140.3	23.4
	평균	17.0	7.7	147.7	15.1	1.4	40.4	74.6	17.2	124.5	11.4
	SD(±)	1.4	0.6	11.1	2.7	0.1	43.6	52.7	10.9	13.6	5.0

* 8* : 2001년 8월 20일 ~ 9월 13일, 10* : 2001년 10월 8일 ~ 10월 18일

【표 5.5】 농수로내 자연섬유망에서의 부착조류성장에 따른 수질개선효과 요약(2001년 8, 10월)

		Parameter								
월		SS	TN	NH ₃ -N	NO ₃ -N	NO ₂ -N	TP	DIP		
		g/m ³ /hr	g/m ³ /hr	g/m ³ /hr	mg/m ³ /hr	mg/m ³ /hr	g/m ³ /hr	mg/m ³ /hr		
8*	범위	Middle	3.5~58.1	0.65~-2.93	0.12~-0.37	337.0~-218.7	1.4~-93.4	0.06~-0.11	6.5~-83.6	
		Outlet	7.3~57.1	0.15~-0.87	0.08~-0.33	198.8~-336.3	0.0~-84.1	0.13~-0.08	212.6~-35.6	
	평균	Middle	30.1	-0.69	-0.08	85.1	-31.9	0.017	-24.5	
		Outlet	32.2	-0.41	-0.12	-42.7	-26.2	0.040	28.0	
	10**	범위	Inlet	63.8~22.8	14.1~-6.4	0.13~-0.63	1.0~-2.2	68.4~-72.3	0.26~-0.13	132.4~-29.9
			Middle	12.7~49.7	7.5~-0.5	0.33~-0.05	2.3~-1.9	29.8~-67.3	0.09~-0.08	76.3~-17.4
Outlet			11.3~56.8	4.1~-4.3	0.34~-0.77	0.5~-0.6	54.8~-77.3	0.20~0.07	85.7~-68.2	
평균		Inlet	26.1	2.68	-0.10	-0.18	10.6	0.047	40.0	
		Middle	32.1	2.93	-0.02	0.08	-6.0	0.014	18.1	
		Outlet	40.8	0.89	-0.09	0.05	-9.3	0.112	6.5	

8* : Middle-10번째 망 뒤, Outlet: 20번째 망 뒤

10** : Inlet-3번째 망 뒤, Middle-5번째 망 뒤, Outlet-10번째 망 뒤

(-) 제거율은 실제로 증가율을 의미하며 결과에서 제거율로 고려할 수 없으나 측정된 결과이므로 자료를 제시하였음(이하동일).

【표 5.6】 농수로내 자연섬유망에서의 부착조류성장에 따른 총질소 제거율(2001년 8월)

Day	Inlet (mg/ℓ)	Middle (# 10)				Outlet (# 20)			
		Middle (mg/ℓ)	제거율			Outlet (mg/ℓ)	제거율		
			g/gDW/hr	g/m ² /hr	(%)		g/gDW/hr	g/m ² /hr	%
2	1.57	1.57	0.000	0.000	0.0	1.54	0.003	0.145	1.9
5	1.55	1.61	-0.014	-1.162	-3.9	1.60	-0.010	-0.571	-3.2
8	1.73	1.70	0.010	0.650	1.7	1.73	0.000	0.000	0.0
11	1.63	1.84	-0.042	-2.926	-12.9	1.72	-0.017	-0.870	-5.5
24	1.47	1.47	0.000	0.000	0.0	1.58	-0.025	-0.738	-7.5

#. 20m 수로에 1m 간격으로 설치된 총 20개 망 중 위치를 의미함.

【표 5.7】 농수로내 자연섬유망에서의 부착조류성장에 따른 아질산성질소 제거율(2001년 8월)

Day	Inlet (μg/ℓ)	Middle (# 10)				Outlet (# 20)			
		Middle (μg/ℓ)	제거율			Outlet (μg/ℓ)	제거율		
			mg/gDW/hr	mg/m ² /hr	(%)		mg/gDW/hr	mg/m ² /hr	%
2	10.4	10.2	0.02	1.41	1.9	10.4	0.00	0.00	0.0
5	2.8	3.3	-0.12	-9.68	-17.9	4.3	-0.30	-17.14	-53.6
8	3.8	4.7	-0.31	-19.51	-23.7	4.8	-0.32	-13.19	-26.3
11	31.9	38.6	-1.33	-93.35	-21.0	40.6	-1.68	-84.07	-27.3
24	62.1	66.2	-0.95	-38.26	-6.6	64.6	-0.57	-16.77	-4.0

【표 5.8】 농수로내 자연섬유망에서의 부착조류성장에 따른 질산성질소 제거율(2001년 8월)

Day	Inlet ($\mu\text{g}/\ell$)	Middle (# 10)				Outlet (# 20)			
		Middle ($\mu\text{g}/\ell$)	제거율			Outlet ($\mu\text{g}/\ell$)	제거율		
			mg/gDW/hr	mg/m ² /hr	(%)		mg/gDW/hr	mg/m ² /hr	%
2	97.4	57.4	3.83	281.06	41.1	69.6	2.44	134.68	28.5
5	17.4	0.0	4.16	336.95	100.0*	0.0	3.54	198.84	100.0*
8	7.0	3.5	1.22	75.86	50.0	7.0	0.00	0.00	0.0
11	22.6	38.3	-3.12	-218.73	-69.5	57.4	-6.73	-336.28	-154.0
24	144.3	149.6	-1.23	-49.46	-3.7	175.7	-7.17	-210.65	-21.8

#. 20m 수로에 1m 간격으로 설치된 총 20개 망 중 위치를 의미함.

*. 5일째 100% 증가율은 검출될 수 있는 농도 이하였기 때문에 나타난 결과임.

【표 5.9】 농수로내 자연섬유망에서의 부착조류성장에 따른 암모니아성질소 제거율(2001년 8월)

Day	Inlet ($\mu\text{g}/\ell$)	Middle (# 10)				Outlet (# 20)			
		Middle ($\mu\text{g}/\ell$)	제거율			Outlet ($\mu\text{g}/\ell$)	제거율		
			mg/gDW/hr	mg/m ² /hr	(%)		mg/gDW/hr	mg/m ² /hr	%
2	12.8	13.6	-0.08	-5.62	-6.2	14.4	-0.14	-7.75	-12.5
5	11.2	12.8	-0.38	-30.98	-14.3	16.1	-1.00	-56.00	-43.8
8	20.5	14.8	1.99	123.55	27.8	14.8	1.81	75.18	27.8
11	81.3	107.6	-5.22	-366.42	-32.3	110.9	-5.73	-286.03	-36.4
24	127.9	141.4	-3.14	-125.98	-10.6	177.8	-11.39	-334.76	-39.0

#. 20m 수로에 1m 간격으로 설치된 총 20개 망 중 위치를 의미함.

【표 5.10】 농수로내 자연섬유망에서의 부착조류성장에 따른 총인 제거율(2001년 8월)

Day	Inlet ($\mu\text{g}/\ell$)	Middle (# 10)				Outlet (# 20)			
		Middle ($\mu\text{g}/\ell$)	제거율			Outlet ($\mu\text{g}/\ell$)	제거율		
			mg/gDW/hr	mg/m ² /hr	(%)		mg/gDW/hr	mg/m ² /hr	%
2	155.4	153.8	0.15	11.24	1.0	144.0	1.00	55.23	7.3
5	157.1	153.8	0.79	63.91	2.1	153.8	0.67	37.71	2.1
8	155.4	153.0	0.84	52.02	1.5	151.3	1.30	54.08	2.6
11	139.1	147.2	-1.61	-112.85	-5.8	147.2	-1.57	-78.27	-5.8
24	114.1	106.4	1.79	71.86	6.7	94.8	4.41	129.48	16.9

#. 20m 수로에 1m 간격으로 설치된 총 20개 망 중 위치를 의미함.

【표 5.11】 농수로내 자연섬유망에서의 부착조류성장에 따른 용존무기인 제거율(2001년 8월)

Day	Inlet ($\mu\text{g}/\ell$)	Middle (# 10)				Outlet (# 20)			
		Middle ($\mu\text{g}/\ell$)	제거율			Outlet ($\mu\text{g}/\ell$)	제거율		
			mg/gDW/hr	mg/m ² /hr	(%)		mg/gDW/hr	mg/m ² /hr	%
2	42.0	42.7	-0.07	-4.92	-1.7	43.3	-0.11	-6.30	-3.1
5	42.0	43.3	-0.31	-25.17	-3.1	44.7	-0.55	-30.85	-6.4
8	41.3	42.0	-0.24	-15.17	-1.7	44.0	-0.86	-35.61	-6.5
11	32.6	38.6	-1.19	-83.59	-18.4	10.6	4.26	212.59	67.5
24	19.1	18.4	0.16	6.53	3.7	19.1	0.00	0.00	0.0

#. 20m 수로에 1m 간격으로 설치된 총 20개 망 중 위치를 의미함.

【표 5.12】 농수로내 자연섬유망에서의 부착조류성장에 따른 부유물질 제거율(2001년 8월)

Day	Inlet ($\mu\text{g}/\ell$)	Middle (# 10)				Outlet (# 20)			
		Middle ($\mu\text{g}/\ell$)	제거율			Outlet ($\mu\text{g}/\ell$)	제거율		
			mg/gDW/hr	mg/m ² /hr	(%)		mg/gDW/hr	mg/m ² /hr	%
2	15.0	14.5	0.05	3.51	3.3	13.5	0.13	7.27	10.0
5	23.0	20.0	0.72	58.10	13.0	18.0	1.02	57.14	21.7
8	26.5	24.0	0.87	54.19	9.4	23.5	0.95	39.57	11.3
11	18.5	17.5	0.20	13.93	5.4	14.5	0.77	38.65	21.6
24	10.7	8.5	0.51	20.53	20.6	8.0	0.62	18.11	25.2

#. 20m 수로에 1m 간격으로 설치된 총 20개 망 중 위치를 의미함.

【표 5.13】 농수로내 자연섬유망에서의 부착조류성장에 따른 총질소제거율(2001년 10월)

Day	Inlet (mg/ℓ)	Middle 1(# 3)			Middle 2(# 5)			Outlet(# 10)		
		# 3 (mg/ℓ)	제거율		# 5 (mg/ℓ)	제거율		# 10 (mg/ℓ)	제거율	
			g/m ² /hr	%		g/m ² /hr	%		g/m ² /hr	%
1	1.29	1.30	-0.425	-0.8	1.31	-0.498	-1.6	1.33	-0.909	-3.1
2	1.44	1.22	9.358	15.3	1.14	7.473	20.8	1.29	3.409	10.4
3	1.41	1.42	-0.425	-0.7	1.37	0.996	2.8	1.23	4.090	12.8
4	1.34	1.27	2.993	5.2	1.28	1.490	4.5	1.29	1.133	3.7
5	1.41	1.56	-6.413	-10.6	1.39	0.497	1.4	1.60	-4.306	-13.5
7	1.44	1.45	-0.441	-0.7	1.18	6.615	18.1	1.37	1.622	4.9
10	1.41	1.10	14.104	22.0	1.26	3.924	10.6	1.36	1.191	3.5

#. 20m 수로에 2m 간격으로 설치된 총 10개 망 중 위치를 의미함.

【표 5.14】 농수로내 자연섬유망에서의 부착조류성장에 따른 아질산성질소 제거율 (2001년 10월)

Day	Inlet ($\mu\text{g}/\ell$)	Middle 1(# 3)			Middle 2(# 5)			Outlet(# 10)		
		# 3	제거율		# 5	제거율		# 10	제거율	
		$\mu\text{g}/\ell$	$\text{mg}/\text{m}^2/\text{hr}$	%	$\mu\text{g}/\ell$	$\text{mg}/\text{m}^2/\text{hr}$	%	$\mu\text{g}/\ell$	$\text{mg}/\text{m}^2/\text{hr}$	%
1	11.1	9.7	59.55	12.6	10.4	17.44	6.3	10.4	15.91	6.3
2	43.2	44.9	-72.31	-3.9	45.9	-67.25	-6.2	46.6	-77.26	-7.9
3	15.6	15.2	17.01	2.6	15.9	-7.47	-1.9	18.3	-61.36	-17.3
4	16.3	17.3	-42.76	-6.1	17.3	-24.83	-6.1	18.0	-38.53	-10.4
5	15.4	13.8	68.41	10.4	14.2	29.80	7.8	14.5	20.40	5.8
7	9.7	8.8	39.71	9.3	9.2	12.72	5.2	8.8	20.85	9.3
10	9.3	9.2	4.55	1.1	9.4	-2.62	-1.1	7.0	54.80	24.7

#. 20m 수로에 2m 간격으로 설치된 총 10개 망 중 위치를 의미함.

【표 5.15】 농수로내 자연섬유망에서의 부착조류성장에 따른 질산성질소 제거율(2001년 10월)

Day	Inlet ($\mu\text{g}/\ell$)	Middle 1(# 3)			Middle 2(# 5)			Outlet(# 10)		
		# 3	제거율		# 5	제거율		# 10	제거율	
		$\mu\text{g}/\ell$	$\text{mg}/\text{m}^2/\text{hr}$	%	$\mu\text{g}/\ell$	$\text{mg}/\text{m}^2/\text{hr}$	%	$\mu\text{g}/\ell$	$\text{mg}/\text{m}^2/\text{hr}$	%
1	34.2	22.4	501.93	34.5	42.5	-206.74	-24.3	20.8	304.51	39.2
2	199.9	251.8	-2207.63	-26.0	106.6	2323.97	46.7	206.6	-152.26	-3.4
3	45.9	72.7	-1139.97	-58.4	69.3	-582.86	-51.0	72.7	-609.02	-58.4
4	64.3	40.9	1000.48	36.4	44.2	499.16	31.3	52.6	265.15	18.2
5	40.9	39.2	72.68	4.2	39.2	42.22	4.2	39.2	38.53	4.2
7	69.3	55.9	591.21	19.3	52.6	424.90	24.1	47.6	502.77	31.3
10	67.9	69.3	-63.70	-2.1	142.0	-1938.30	-109.1	67.6	7.15	0.4

#. 20m 수로에 2m 간격으로 설치된 총 10개 망 중 위치를 의미함.

【표 5.16】 농수로내 자연섬유망에서의 부착조류성장에 따른 암모니아성질소 제거율 (2001년 10월)

Day	Inlet ($\mu\text{g}/\ell$)	Middle 1(# 3)			Middle 2(# 5)			Outlet(# 10)		
		# 3	제거율		# 5	제거율		# 10	제거율	
		$\mu\text{g}/\ell$	$\text{mg}/\text{m}^2/\text{hr}$	%	$\mu\text{g}/\ell$	$\text{mg}/\text{m}^2/\text{hr}$	%	$\mu\text{g}/\ell$	$\text{mg}/\text{m}^2/\text{hr}$	%
1	9.1	7.5	68.06	17.6	2.6	161.91	71.4	0.0	206.80	100.0
2	117.2	132.1	-633.79	-12.7	139.0	-543.01	-18.6	151.3	-774.92	-29.1
3	0.0	0.7	-29.78	0.0	0.0	0.00	0.0	0.0	0.00	0.0
4	7.1	9.6	-106.89	-35.2	15.5	-208.61	-118.3	20.9	-312.75	-194.4
5	3.1	0.0	132.54	100.0	0.0	76.99	100.0	3.6	-11.33	-16.1
7	65.4	68.8	-150.01	-5.2	64.9	12.72	0.8	67.4	-46.34	-3.1
10	81.2	80.2	45.50	1.2	68.4	334.82	15.8	66.9	340.72	17.6

#. 20m 수로에 2m 간격으로 설치된 총 10개 망 중 위치를 의미함.

【표 5.17】 농수로내 자연섬유망에서의 부착조류성장에 따른 총인 제거율(2001년 10월)

Day	Inlet ($\mu\text{g}/\ell$)	Middle 1(# 3)			Middle 2(# 5)			Outlet(# 10)		
		# 3	제거율		# 5	제거율		# 10	제거율	
		$\mu\text{g}/\ell$	$\text{mg}/\text{m}^2/\text{hr}$	%	$\mu\text{g}/\ell$	$\text{mg}/\text{m}^2/\text{hr}$	%	$\mu\text{g}/\ell$	$\text{mg}/\text{m}^2/\text{hr}$	%
1	128.4	131.5	-131.86	-2.4	131.5	-77.22	-2.4	125.3	70.45	2.4
2	140.3	136.5	161.64	2.7	136.5	94.65	2.7	132.7	172.71	5.4
3	135.8	136.5	-29.78	-0.5	136.5	-17.44	-0.5	132.7	70.45	2.3
4	130.5	128.9	68.41	1.2	128.9	39.73	1.2	125.9	104.25	3.5
5	127.4	128.2	-34.20	-0.6	128.2	-19.87	-0.6	123.6	86.12	3.0
7	111.1	105.1	264.72	5.4	109.6	38.17	1.4	107.4	85.73	3.3
10	98.3	97.6	31.85	0.7	96.8	39.24	1.5	90.1	195.38	8.3

#. 20m 수로에 2m 간격으로 설치된 총 10개 망 중 위치를 의미함.

【표 5.18】 농수로내 자연섬유망에서의 부착조류성장에 따른 용존무기인 제거율(2001년 10월)

Day	Inlet ($\mu\text{g}/\ell$)	Middle 1(# 3)			Middle 2(# 5)			Outlet(# 10)		
		# 3	제거율		# 5	제거율		# 10	제거율	
		$\mu\text{g}/\ell$	$\text{mg}/\text{m}^3/\text{hr}$	%	$\mu\text{g}/\ell$	$\text{mg}/\text{m}^3/\text{hr}$	%	$\mu\text{g}/\ell$	$\text{mg}/\text{m}^3/\text{hr}$	%
1	8.8	7.3	63.80	17.0	9.5	-17.44	-8.0	9.5	-15.91	-8.0
2	23.4	23.4	0.00	0.0	23.4	0.00	0.0	26.4	-68.17	-12.8
3	8.8	9.5	-29.78	-8.0	9.5	-17.44	-8.0	9.5	-15.91	-8.0
4	10.3	11.0	-29.93	-6.8	9.5	19.87	7.8	9.5	18.13	7.8
5	9.1	6.6	106.89	27.5	7.3	44.70	19.8	8.1	22.66	11.0
7	10.9	7.9	132.36	27.5	7.9	76.33	27.5	7.2	85.73	33.9
10	8.7	7.9	36.40	9.2	7.9	20.93	9.2	7.9	19.06	9.2

#. 20m 수로에 2m 간격으로 설치된 총 10개 망 중 위치를 의미함.

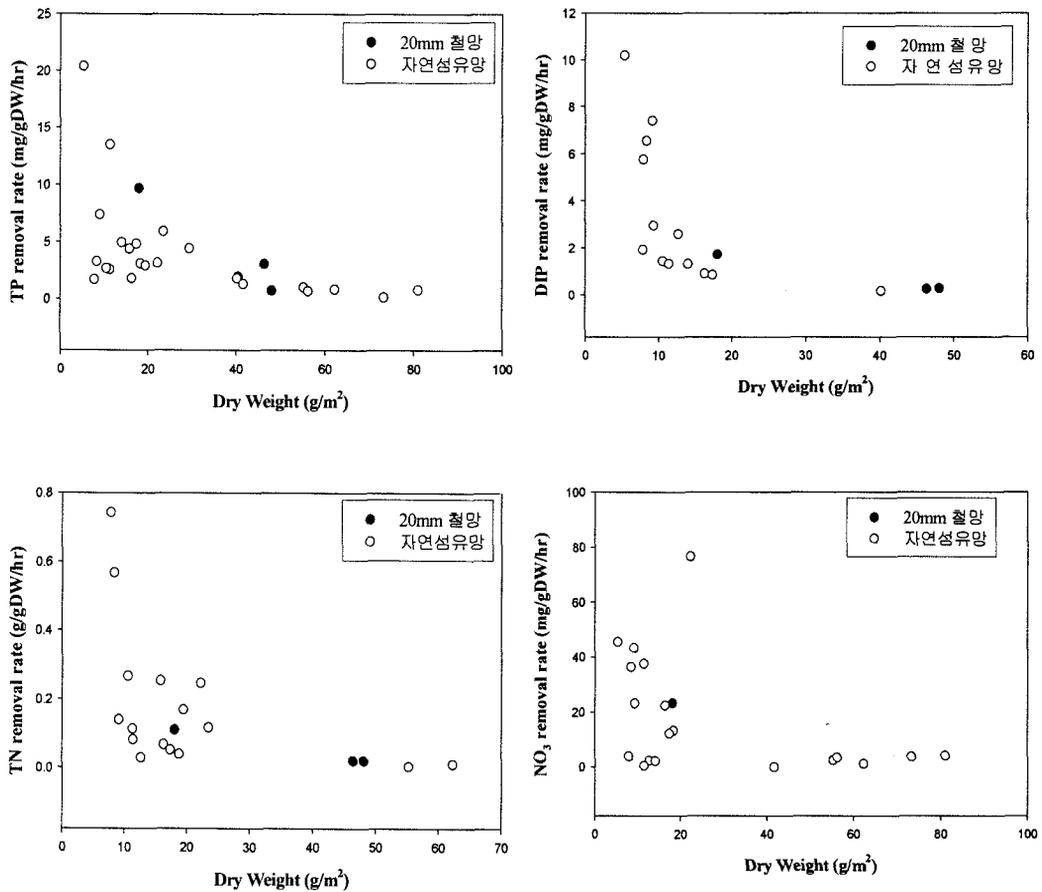
【표 5.19】 농수로내 자연섬유망에서의 부착조류성장에 따른 부유물질 제거율(2001년 10월)

Day	Inlet (mg/ℓ)	Middle 1(# 3)			Middle 2(# 5)			Outlet(# 10)		
		# 3	제거율		# 5	제거율		# 10	제거율	
		mg/ℓ	$\text{g}/\text{m}^3/\text{hr}$	%	mg/ℓ	$\text{g}/\text{m}^3/\text{hr}$	%	mg/ℓ	$\text{g}/\text{m}^3/\text{hr}$	%
1	15.0	14.0	42.54	6.7	13.5	37.36	10.0	12.5	56.81	16.7
2	20.0	18.5	63.80	7.5	18.5	37.36	7.5	17.5	56.81	12.5
3	17.0	17.0	0.00	0.0	15.5	37.36	8.8	15.0	45.45	11.8
4	15.0	13.7	55.58	8.7	13.0	49.67	13.3	13.0	45.33	13.3
5	15.0	14.5	21.38	3.3	13.5	37.25	10.0	14.5	11.33	3.3
7	12.5	12.0	22.06	4.0	12.0	12.72	4.0	10.5	46.34	16.0
10	11.0	11.5	-22.75	-4.5	10.5	13.08	4.5	10.0	23.83	9.1

#. 20m 수로에 2m 간격으로 설치된 총 10개 망 중 위치를 의미함.

3. 부착조류시스템 내 서로 다른 매질에서의 생물량에 따른 수질개선효과

유속이 최대 5cm/s인 수로 내 20mm철망과 자연섬유망을 이용한 실험에서 총인과 용존 무기인, 총 질소 그리고 질산성 질소제거율은 생물량 증가에 따라 감소하는 것으로 나타났다(그림 5.6). 이러한 결과는 수로의 길이가 5m로짧은 Pilot수로 실험에서 나타난 결과와 일치한다. 생물량이 약 10gDW/m² 정도에서 제거율이 높게 나타났으며, 매질에 따른 제거율의 차이는 비교될 수 있는 자료의 수적 차이로 인해 판단하기 어려웠다.



【그림 5.6】 농수로에서 부착조류 생물량에 따른 영양염 제거율

4. 서로 다른 유속 조건에서 생물량과 오염부하량에 따른 제거효율

가. 생물량에 따른 제거효율변화

2002년 9월 자연섬유망에 비해서 부착조류 생물량의 증가율이 낮았던 20mm망목의 철망을 이용하여 서로 다른 유속의 조건에서 생물량 증가에 따른 영양염 제거효율을 조사하였다. 20mm망목의 철망에서 영양물질 제거율은 생물량의 증가에 따라 일정한 증가 경향을 보이지 않았으나 생물량 증가에 따른 영양염 제거효율은 모든 항목에서 나타났다. 제거효율($\% = (\text{유입수 농도} - \text{유출수 농도}) / \text{유입수 농도} * 100$)은 생물량에 따라 증가하는 경향을 보였으며, 일정한 생물량에 도달한 이후에는 일정 효율이 유지되거나 감소하는 경향을 나타냈다(그림 5.7~5.11).

농수로내에 조절된 유속의 범위 0.5~5cm/s 내에서 생물량당 영양염의 제거율은 유속이 가장 빠른 5cm/s 유속에서 가장 많은 제거율을 보였으며, 유속이 가장 느린 0.5cm/s에서 가장 적은 제거율을 보였다(그림 5.7~5.11). 유속의 증가는 상대적으로 정체된 상태의 층과 성장하는 표면에 근접한 laminar 경계층의 영양염 고갈을 감소시킴으로서 조류 성장을 향상시킨다(Geankoplis, 1972; Grady and Lin, 1980; Stevenson, 1983; Sand-Jensen, 1983). 결과적으로, 유속이 빠를 수록 확산경사와 그리고 그로 인한 경계층을 따른 분자 확산율이 증가한다(Whitford, 1960). Whitford and Schumacher(1964)와 Lock(1979)은 부착조류가 흐름 상태에 노출될 때 ^{32}P 흡수율이 정지상태의 조건하에서 보다 높다는 것을 발견하였고, Horner and Welch(1981)와 Horner *et al.*(1983)은 유속의 증가로 잠재적으로 영양염 이용률의 증가의 결과로 인해 생물량의 축적이 증가됨을 제시하였다. Whitford and Schumacher (1964)는 확산 경사에 대한 뚜렷한 영향을 받기에 15cm/s보다 더 빠른 유속이 요구된다는 것을 제시하였다. 그러나, 어느 정도 이상의 유속 증가는 흐름방향의 전단력을 만들고, 부착조류 군집형성 방해와 표면에 부착된 생물량 많은 부분의 제거를 초래한다. 영양염 전달에 대한 유속의 영향은 높은 전달율이 높은 흡수율을 야기함에 따라서 흡수율과 관련이 있을 것이다.

TP는 5cm/s의 유속에서 가장 높은 제거율을 나타냈으며, 최대 5.5mg/gDW/hr의 제거율을 보였다(그림 5.7). 1cm/s와 5cm/s의 유속에서 생물량이 13g/m²까지는 제거율이 증가하다가 이후 일정한 경향을 보였다. 제거효율(%)은 1cm/s와 5cm/s에서 생물량에 따라 증가

하는 경향을 보였고 1cm/s 유속에서 최대 14%의 제거효율을 나타냈다. DIP의 제거율은 TP의 경향과는 다르게 생물량이 증가할수록 감소하는 경향을 보였고, 제거율은 5cm/s 유속에서 생물량이 5gDW/m²일 때 가장 좋게 나타났으며, 최고 1.7mg/gDW/hr의 제거율을 보였다(그림 5.7). TP와 달리 DIP에서 생물량에 따른 제거율의 감소는 현장실험시 출현한 깔따구와 물달팽이와 같은 포식자의 섭식활동이 부착조류가 많을 수록 왕성해 짐으로써 나타난 결과로 생각할 수 있다. DIP 제거효율은 모든 유속에서 생물량의 증가에 따라 증가하는 경향을 나타냈으며, 1cm/s의 유속에서 최고 5.5% 제거효율을 보였다.

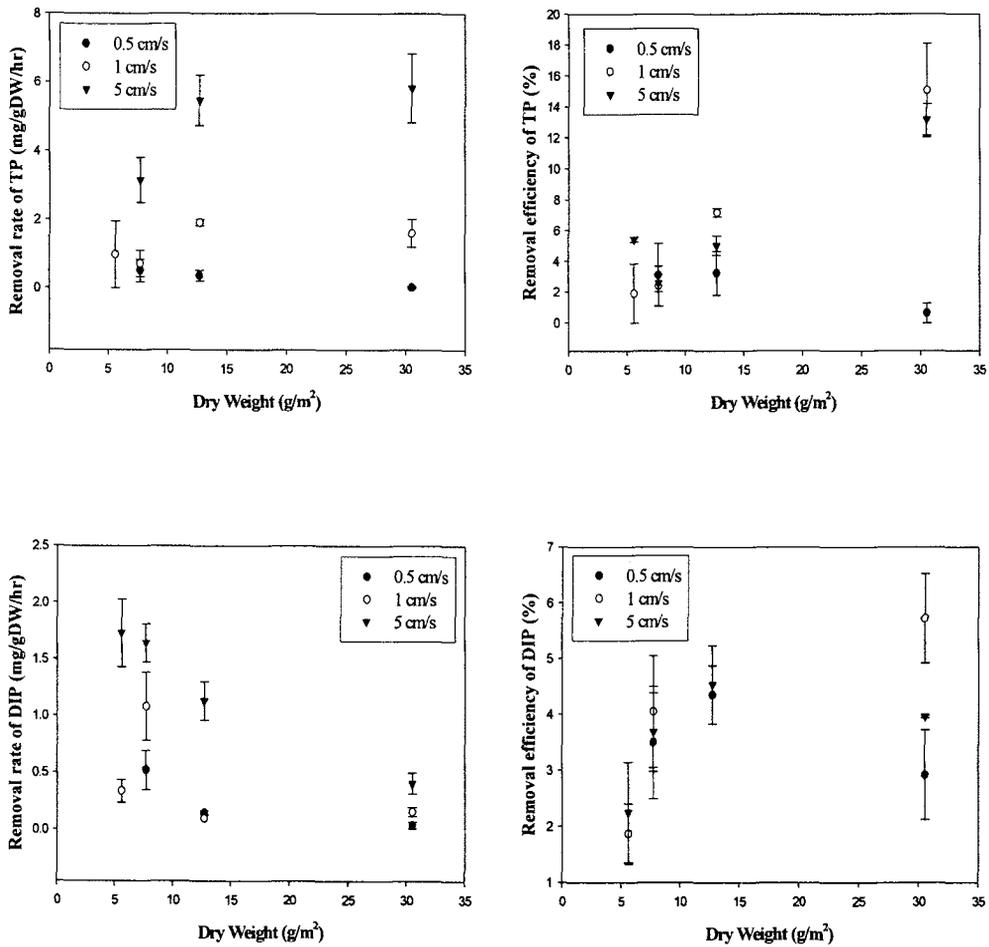
TN은 5cm/s의 유속에서만 생물량의 증가에 따라 증가하는 경향을 나타냈고, 최대 0.06g/gDW/hr의 제거율을 나타냈고 최대 제거효율은 생물량이 30gDW/m² 일 때 13%로 나타났다. NO₃-N은 5cm/s의 유속에서 가장 높은 제거율을 나타냈고, 용존무기인에서 나타난 결과와 동일하게 생물량에 따른 제거효율은 모든 유속조건에서 생물량이 많을수록 높게 나타났으나, 단위면적당 생물량에 대한 제거율은 생물량 증가시 감소하는 것으로 나타났다(그림 5.8).

NO₂-N 또한 유속이 가장 빨랐던 5cm/s 조건에서 가장 높은 제거율을 나타냈으며 생물량이 어느한계 이상 증가 전까지는(13gDW/m²) 감소하다가 생물량이 30gDW/m²인 상태에서 최대 6.5%의 감소효율을 나타냈다. 이와는 달리 NH₄-N는 비록 5cm/s의 유속에서 가장 좋은 제거효율을 보였으나, 단위면적당 제거율에 있어서는 다른 유속조건과 비교해 큰 차이없이 생물량 증가에 따라 감소하는 것으로 나타났다(그림 5.9).

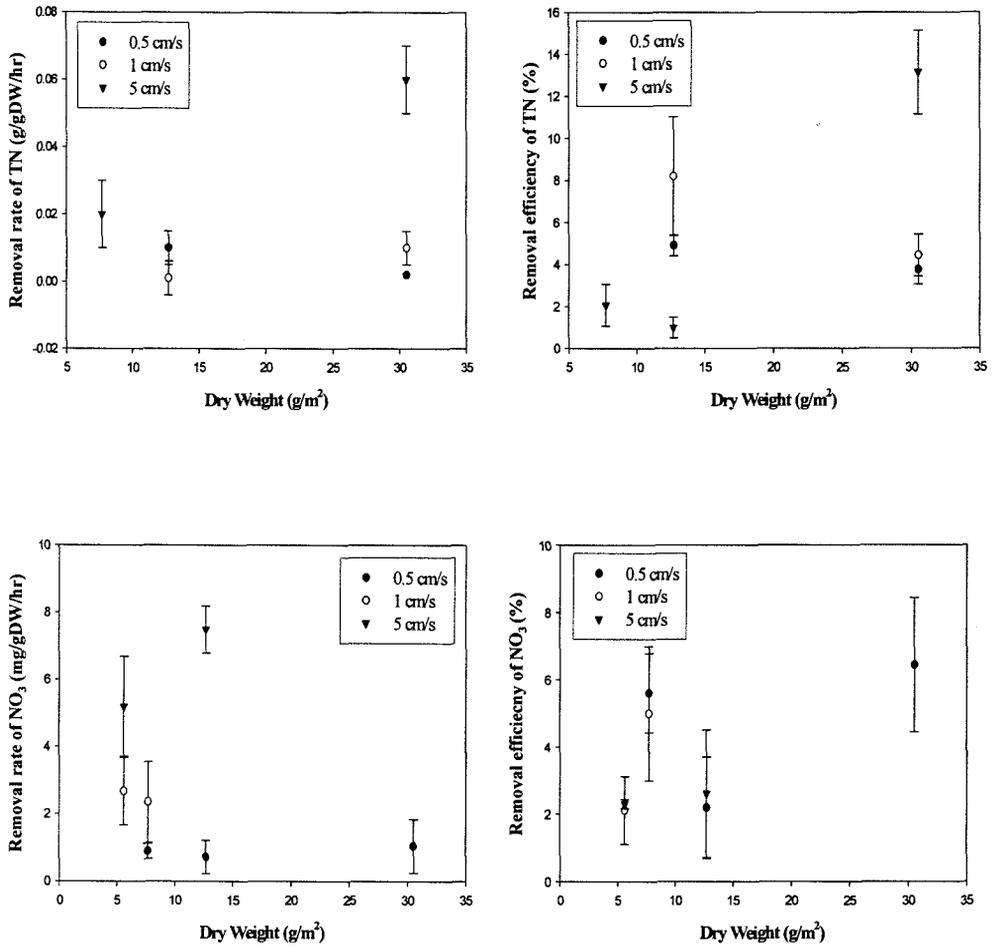
생물량 증가에 따른 부유물질 제거율 5cm/s의 유속에서 가장 높게 나타났으나 유속과 생물량에 따른 어떤 일정한 제거율은 나타나지 않았다(그림 5.10). 반면에, 제거효율은 생물량의 증가에 따라 지속적으로 증가하는 경향을 나타냈고, 1cm/s의 유속에서 최고 33%의 제거효율을 나타냈다. 이러한 결과는 비록 유속이 5cm/s로 조절된 조건에서 보다 생물량은 적었지만, 상대적으로 초기의 유속도 느렸고 부착조류 성장에 따른 망목 크기의 감소로 인해 매질 전후에 일시적인 유속 감소가 나타남으로써 침전율이 증가된 결과로 생각할 수 있다. 생물량 증가와 섭식자의 섭식활동에 따른 영양염류의 용출은 생물량 증가에 따른 무기이온 농도의 처리율 감소와 더불어 BOD에 대한 제거율이 생물량이 증가할수록 감소하는 결과에서도 나타났다. BOD에 대한 제거율과 제거효율은 낮은 생물량이 유지되는 시기에 유속이 가장 빠른 조건에서 높게 나타났다(그림 5.10).

COD 제거율은 SS의 제거율과 비슷한 경향을 보였으며, 5cm/s의 유속에서 5gDW/m²의

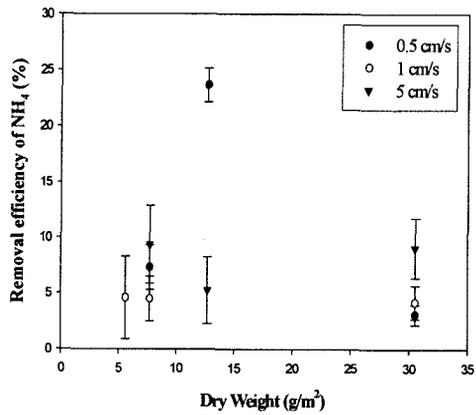
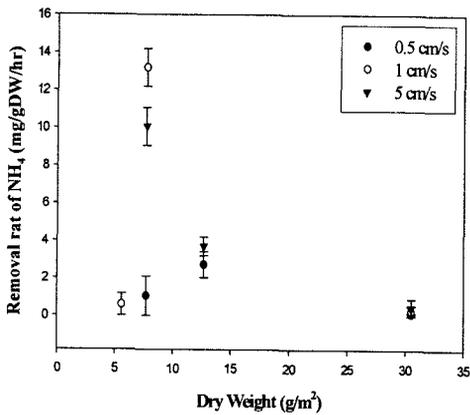
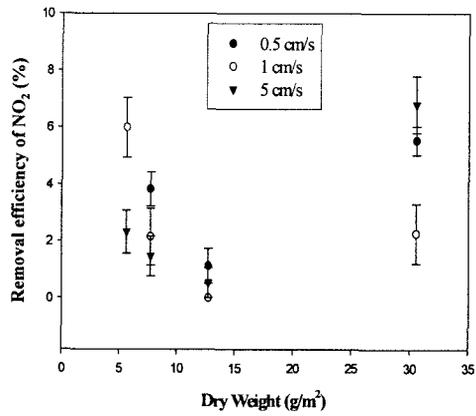
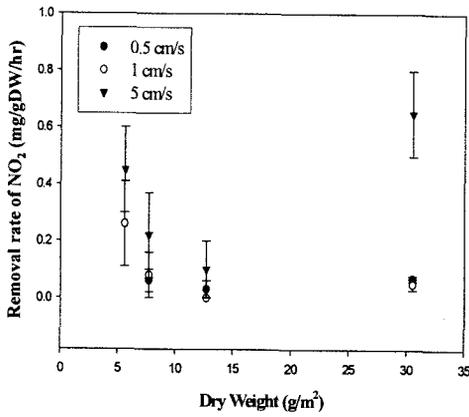
생물량에서 가장 높은 0.39g/gDW /hr의 제거율을 보였다(그림 5.11). 제거효율은 5cm/s의 유속조건에서 생물량이 30gDW/m²일 때 6%의 제거효율을 보였다. 다른 유속(0.5, 1cm/s)에서는 13.0gDW/m²까지 증가하다가 이후 감소하는 경향을 보였다.



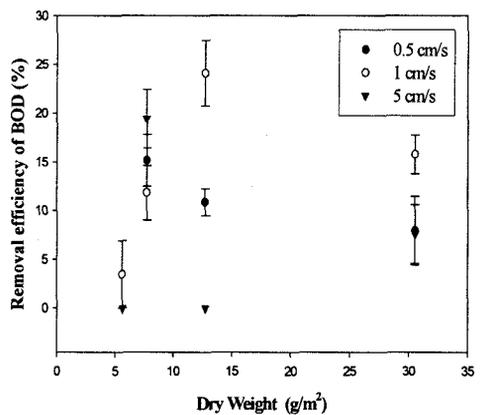
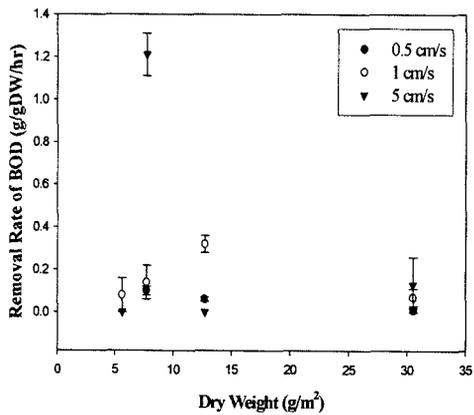
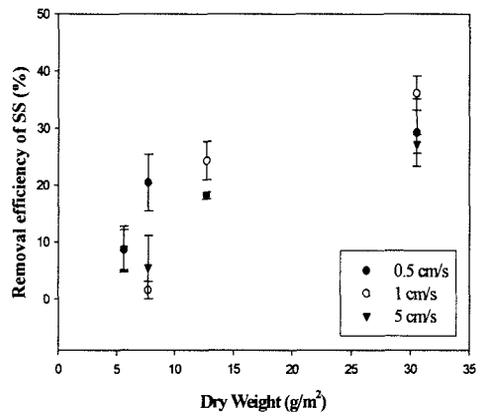
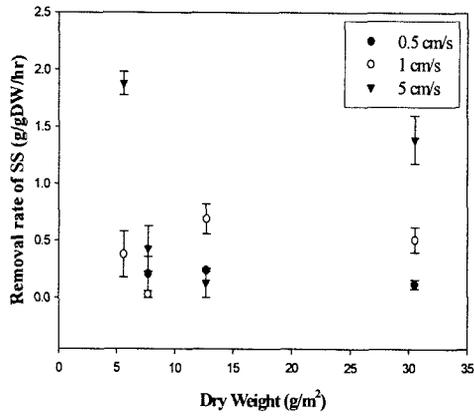
【그림 5.7】 서로 다른 유속에서 생물량에 따른 사상성 부착조류의 총인과 용존무기인 제거율(removal rate) 및 제거효율(removal efficiency)(농수로 실험, 2002년 9월)



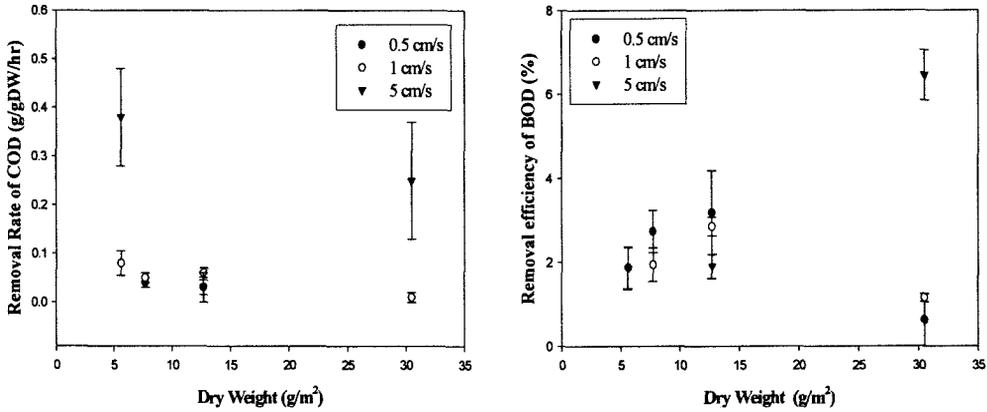
【그림 5.8】 서로 다른 유속에서 생물량에 따른 사상성 부착조류의 총질소와 질산성질소 제거율(removal rate) 및 제거효율(removal efficiency)(농수로 실험, 2002년 9월)



【그림 5.9】 서로 다른 유속에서 생물량에 따른 사상성 부착조류의 아질산성질소와 암모니아성 질소 제거율(removal rate) 및 제거효율(removal efficiency)(농수로 실험, 2002년 9월)



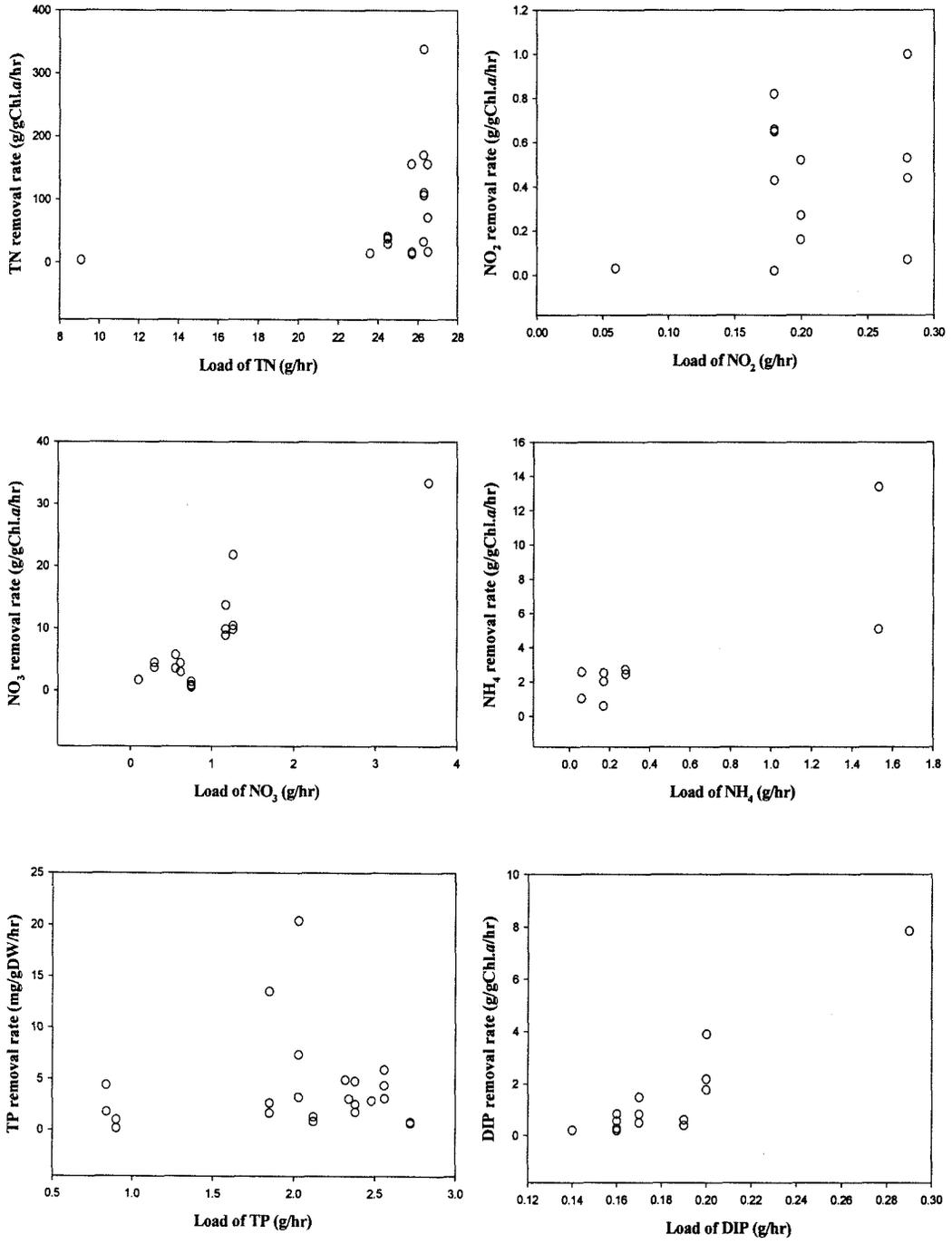
【그림 5.10】 서로 다른 유속에서 생물량에 따른 사상성 부착조류의 부유물질과 생화학적산소요구량 제거율(removal rate) 및 제거효율(removal efficiency) (농수로 실험, 2002년 9월)



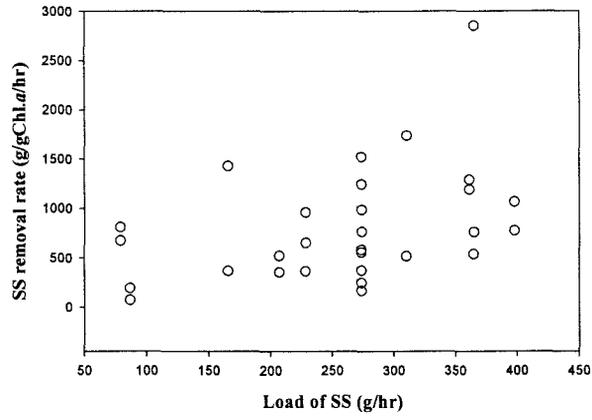
【그림 5.11】 서로 다른 유속에서 생물량에 따른 사상성 부착조류의 화학적산소요구량 제거율(removal rate) 및 제거효율(removal efficiency)(농수로 실험, 2002년 9월)

나. 오염부하량에 따른 제거효율 변화

부하량과 영양염 제거율과의 관계에서 용존무기형태의 질소는 아질산성형태를 제외하고는 부하량 증가에 따라 제거율이 증가하는 경향을 나타낸 반면, 총 질소의 경우에는 부하량 증가에 따른 제거율의 증가는 명확하지 않았다(그림 5.12). 총인은 부하량 증가가 제거율의 증가를 나타내지 않았으나 DIP는 부하량이 증가함에 따라 제거율이 뚜렷하게 증가 하는 경향을 나타냈다. 부하량 증가에 따른 용존형태의 영양염류($\text{NO}_3\text{-N}$, $\text{NH}_3\text{-N}$, DIP)의 제거율 증가는 시스템 내 부착조류의 흡수에 의한 결과로 판단할 수 있으며, 이와는 달리 입자성형태의 영양염류(TN, TP, SS)에서 부하량과 제거율 간의 일정한 경향이 나타나지 않은 것은 시스템내 입자성 형태의 영양염류는 대부분이 수로 내에서 침전과정을 거치면서 나타나기 때문에 유입부하량에 대한 제거율은 조사 당시 매질부근에서의 흐름을 저하시킬 수 있는 생물량에 영향을 받는 것으로 생각할 수 있다.



【그림 5.12】 농배수로에서 오염물질부하량에 따른 영양염 제거율



【그림 5.12】 계속

제 6 장

사상성부착조류 수로시스템의 적용타당성 및 최적관리방안

여 백

제 6 장 사상성부착조류 수로시스템의 적용타당성 및 최적관리방안

제 1 절 사상성부착조류 수로시스템의 경제적 타당성

수질환경개선을 위해서 추진되는 사업들의 대부분이 막대한 예산과 노력을 투자해야 한다는 판단으로 나타나는 결과적 피해는 상당히 크고 장기적이므로 정부의 공공투자사업은 시행 전 충분한 검토와 분석이 이루어져야 하고 그에 기초한 현명한 선택이 필요하다. 사업의 시행에 있어 현명한 결정을 위해서 사업의 경제성 평가부분에 환경이 미치는 영향을 고려하여 사회적으로 사람들의 후생에 미치는 정도를 반영하는 확대된 비용편익분석이 보편적으로 적용되고 있다. 그러나 이러한 비용편익 분석의 결과는 구체적인 수치로 표현되어 상당한 설득력을 유도하는 환상적 작용을 할 수 있어 그 수치가 나오기 까지 과정에서 어떤 오류나 잘못이 있을 경우 수치로 표현된 결과는 크게 잘못될 가능성이 있는 약점이 있다. 특히, 여러 공법간의 비용편익분석시 기계적인 공법의 경우 크게 순공사비와 지급자재 대 용지매수보상비, 측량설계시, 공사감독비, 관리비 그리고 기타 여비비 등으로 구성되어 있으며, 현재의 물가정보지를 토대로 산출이 가능하지만 자연정화공법들간의 적용은 이용되는 생물의 생활사나 주변환경조건 등에 의해 효율이 좌우될 수 있기 때문에 보편적인 기준을 토대로 평가하는 것은 매우 어렵다. 오염된 환경의 개선 측면에서 효과가 유동적인 가운데 단지 공사비와 관리비 등 설치비만을 비교하여 경제성 검토를 하는 것은 어려움이 있다. 따라서, 본 연구에서의 경제성 평가는 설치비용과 더불어 관리의 효율성 및 수질개선효과를 타 공법과 비교함으로써 이루어졌다.

1. 농촌유역에 적용가능한 자연정화공법의 효율비교

농촌유역에 적용될 수 있는 여러 자연정화공법과 사상성부착조류 수로시스템의 영양염 제거효율을 비교하였다(표 6.1). 부착조류 수로시스템에서의 질소와 인의 제거효율은 TN이 2.0gN/m²/d 이었고 TP는 0.3gP/m²/d이었다. 이에 반해 비교적 넓은 면적의 부지를 요구하는 습지의 경우에는 질소와 인 제거율이 각각 0.1gN/m²/d과 -0.5gP/m²/d로 상대적으로 낮은 제거율을 보였으며, 하천정화공법인 복합접촉산화수로나 끈상접촉여재수로의 경우에는 질소 제거율은 없었고 질소와 인 제거율도 각각 0.1과 0.6gP/m²/d 이었다. 끈상접촉여재수로에서의 인 제거율을 제외하고는 인과 질소 측면에서 부착조류 수로시스템의 농촌지역에 적용할 수 있는 자연정화공법과 비교해 효율이 높게 나타남으로써 효율적 측면에서의 우월성이 제시되었다.

【표 6.1】 자연정화 공법들의 효율 비교

자연정화방법		제거율	COD	TN	TP	용존무기인
			(g/m ² /d)	(g/m ² /d)	(g/m ² /d)	(g/m ² /d)
인공습지			0.1	0.1	-0.5	-
식생정화시스템(Bio-Park)			2.8	0.6	0.1	-
복합접촉산화수로			17.3	-1.7	0.1	-
끈상접촉여재수로			18.7	-0.2	0.6	-0.2
부착조류 수로시스템 (본 연구)	2001년 10월		-	1.7	0.2	0.01
	2002년 5월		-	2.2	0.3	0.05
	평균		-	2.0	0.3	0.03

비교자료: 농림부, 농업용수 수질개선 시험사업보고서, 2000.

2. 농촌유역에 적용가능한 자연정화공법의 시설설치 면적 비교

비교대상으로 선정한 습지와 복합접촉산화수로 그리고 끈상접촉여재수로 는 본 연구에서 부착조류시스템이 적용된 충남 신정호 인근에 농림부 농업용수 수질개선 시험사업으로 설치되었다. 복합접촉산화수로는 폭 2.0m, 길이 40m로 총 2개조가 처리용량이 2000m³/일의 규모로 신정호 유입하천인 초사천에 설치되었으며 끈상접촉재수로는 초사천과 황산천에 100m 구간에 걸쳐 설치되었다. 습지는 면적 5,500m²의 부지에 설치되었으며 수심은 10cm로 유지하였고 식물은 갈대와 줄로 1999년 9월 27일 조사시 갈대 현존량이 3.2kg/m², 줄은 2.8kg/m²이었다. 본 연구에서 이용된 부착조류시스템의 설치면적은 실제 매질의 표면적을 비교할 수 있는 끈상접촉여재수로내 접촉여재의 표면적 567m²(초사천)과 283.7m²(황산천)과 비교해서 매우 적은 면적이 소요됨에도 불구하고 효율적 측면에서 다른 자연공법과 비교해 높게 나타나 시설설치 면적에 있어 상대적인 장점으로 제시되었다(표 6.2).

【표 6.2】 신정호 인근에 설치된 자연정화공법의 설치현황

자연정화방법	설치구간		접촉재 설치 사양			
	폭(m)	길이(m)	폭(m)	길이(m)	평균간격(m)	
끈상접촉여재수로						
	초사천	10	100	9	70	0.1
	황산천	6	100	4~5	70	0.1
복합접촉산화수로 ¹						
	초사천	2.5	61.2	2	40	
인공습지	5,500 m ²		-	-	-	
부착조류수로시스템 (본 연구)	0.5	20	0.2m ³		1-2	

1. 설치된 2개 복합접촉산화수로 중 1개의 사양임.
2. 조성된 습지의 표면적
3. 매질의 단면적으로 평균수위 0.4m를 적용하여 계산함.

비교자료 : 농림부, 농업용수 수질개선 시험사업보고서, 2000.

3. 이용대상 생물의 정화능력 비교

자연정화공법 중에서 비교적 유사한 공법으로 간주할 수 있는 습지 생태계내 식재되는 일반적인 수생식물과 사상성부착조류의 영양염 제거 효율을 비교 할 때(표 6.3), 서로 환경 상태와 조건이 다른 상황이지만, 현장수로에 적용된 사상성부착조류에 의한 영양염 제거율이 높은 것으로 나타났다. 수생식물 가운데 처리효율이 좋은 물미나리와 비교하면, TN 약 35배, TP 약 14배 정도의 효율을 나타내었다. 인과 질소 농도가 높은 하수 처리수를 적용한 pilot 수로의 효율과 비교하면 질소의 경우 약 100배, 인의 경우 약 500배 높은 효율을 나타냈다. Pilot수로에서 높은 영양염으로 인해 부착조류 생물량이 매우 높았던 점을 감안하여 생물량 단위로 표준화 한다면 이보다 낮아질수는 있으나 부착조류의 탁월한 영양염 흡수능을 짐작할 수 있다. 이러한 이유는 뿌리로 흡수하는 수생식물에 비해 사상성 부착조류도 일반 조류와 마찬가지로 수중의 영양염을 체표면 전체에서 흡수하기 때문이다. 단위면적당 총인과 총질소에 대한 제거효율의 큰 차이는 탈질작용과 수생식물과 부착조류의 서식에 요구되는 면적의 차이에 기인된 것으로 생각할 수 있다. 비교적 적은 면적에도 불구하고 높은 생물량을 유지할 수 있으며, 상대적으로 수생식물에 비해 짧은 세대교번주기도 부착조류시스템의 장점으로 평가 할 수 있다.

【표 6.3】 사상성 부착조류 및 수생식물의 영양염 제거율 비교

대상 식물	제거율(g/m ² .d)	
	TN	TP
사상성 부착조류 (본 연구)	2,800 (pilot수로) 104.4 (현장수로)	81.6 (pilot수로) 2.2 (현장수로)
갈대	0.2-0.5	0.029-0.078
물미나리	0.09-0.19	0.009-0.029
물옥잠	0.01-2.7	0.03-0.5
꽃창포	0.066-0.082	0.005-0.008
애기부들	0.006-0.072	0.001-0.011
개구리밥	0.2-0.6	0.038-0.119

비교자료 : 공동수, 1998. 제 1 회 군포시 환경포럼.

제 2 절 사상성부착조류 수로시스템의 최적설계 인자

1. 사상성부착조류 수로시스템 설계 인자별 특성과 상호관계

가. 유속과 부착조류 성장률

유속에 따른 사상성 부착조류의 높은 성장률은 상대적으로 빠른 유속에서 나타났다. 유속은 사상성 부착조류의 형태와 생리에 큰 영향을 미치므로 부착조류의 성장과 종의 변화를 가져온다(Aizaki, 1979). Mcintire (1996)는 유속의 범위 0~50cm/s에서 부착조류 집단의 종 구성에 미치는 영향은 유속이 38cm/s인 경우에는 규조류가 우점하며, 대략 9cm/s의 유속에서는 사상성 녹조류가 우점을 한다고 보고하였다. 본 연구에서 조절된 수로내 유속의 범위 5~15cm/s내에서 사상성 부착조류의 성장률은 모든 실험에서 상대적으로 높은 10cm/s와 15cm/s 유속에서의 생물량이 상대적으로 낮은 5cm/s 유속에서의 성장 생물량보다 높게 나타났다. 사상성 부착조류의 성장이 양호했던 3월의 Pilot 수로 실험에서 각각의 유속에 따른 사상성 부착조류의 길이 성장을 보면 10, 15cm/s 유속으로 조절된 수로에서 실험 8일째 대략 100cm정도까지 길이 성장을 한 반면 5cm/s 유속으로 조절된 수로에서 대략 15cm 정도로 유속에 따라 대략 6배 이상 차이를 보였다. 따라서 사상성부착조류가 수중에서 길이 성장과 높은 생물량을 유지하기 위해서는 최소 10cm/s 이상의 유속이 필요한 것으로 판단된다.

나. 매질의 망목 크기 및 재질과 생물량

본 연구의 실내 순환수로 실험에서 사상성 부착조류는 자연 섬유망과 철망에서 자갈과 타일에 비해 훨씬 높은 성장을 나타냈다. Thomas and David(1983)에 따르면 매질에 따른 부착조류의 성장률은 인공적인 매질(플라스틱 인조식물)과 자연적인 매질(수생식물) 간에 생물량이 높게 나타나는 시기적 차이는 있지만 그 양의 크기는 비슷한 경향을 나타냈다고 보고한 바 있고, 매질 표면이 거칠거나 매끄러운 것에 따른 부착조류 생물량의 차이는 크지 않은 것으로 알려져 있다(Goldsborough and Hickman, 1991). 그러나 물 흐름 방향에 대해 수직으로 설치한 자연섬유망과 철망의 매질이 흐름방향과 수평으로 설치한

자갈과 타일의 매질에 비해 높은 성장량을 나타냄으로써, 매질의 종류보다는 흐름과 수직으로 접하는 매질의 설치 방향이 사상성부착조류의 부착과 성장에 중요한 것으로 고려된다.

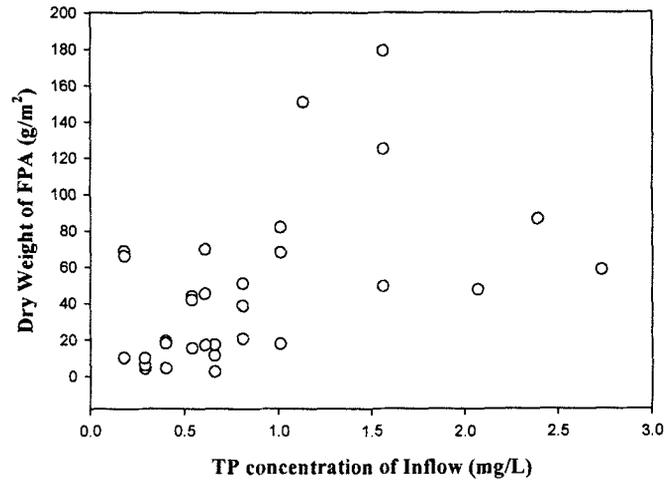
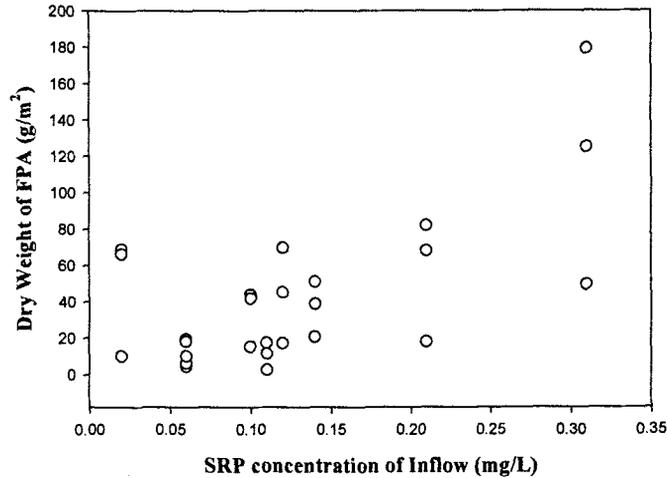
매질의 재질과 망목 크기의 선택에 있어서는 시스템내에서 매질의 폐색을 억제하고 부착조류의 성장을 유리하게 하는 측면에서 고려될 필요가 있다. 매질의 폐색은 유입수 내 부유물질 농도와 매질에서의 부착조류의 성장속도 그리고 부착조류의 성장에 영향을 주는 유속에 의해 결정될 수 있다. 유입수 내의 부유물질이 적은 동일한 조건의 환경에서는 부착조류의 성장률이 느린 시기에는 비교적 망목의 크기가 적은 매질이 부착조류 성장에 유리한 반면, 부유물질이 많고 성장률이 빠른 시기에는 망목의 크기가 크고, 부유물질의 부착이 용이한 자연섬유망 보다는 철망이 유리한 것으로 나타났다. 유입수 내 부유물질은 부착조류의 성장에 영향을 미칠 뿐 만 아니라 부유물질이 매질에 흡착하여 사상성부착조류 착상을 불량하게 만들어 조류의 손실을 증대시키고, 망목 폐색현상의 발생으로 유속의 감소를 초래하여 사상성부착조류의 성장에 악영향을 주게 된다(Horner *et al.*, 1990). 따라서 이러한 환경에서는 착상이 유리하고 망목의 크기가 큰 매질이 선택되는 것이 바람직하다. 아주 흐름이 느려 정체성 수역의 특징을 보이는 수역에서는 부착조류가 길이 성장보다는 매트 형태로 생물막을 형성하므로 이경우에는 부착면적이 큰 자연섬유망의 이용이 유리할 것으로 판단된다.

다. 유입수 영양염 농도와 생물량

일반적으로 담수환경에서 제한영양염으로 나타나는 인과 부착조류의 성장과의 관계에 대한 본 연구의 평가에서 유입수내 인 농도가 증가할수록 사상성 부착조류의 성장은 일정량 증가하였으나 적정농도 이상에서는 더 이상의 생물량의 증가는 나타나지 않았다. 본 연구에서 사상성부착조류의 생물량에 영향을 주는 유입수내 용존무기인 농도가 $0.35\text{mg}/\ell$, 총인 농도는 $1.5\text{mg}/\ell$ 일 때가 생물량이 최대가 되는 적정농도로 제시되었다(그림 6.1). Horner (1990)는 부착조류 성장에 미치는 용존무기인 농도의 영향에 대한 연구에서 유속에 따른 부착조류의 성장률이 $10\mu\text{g}/\ell$ 이하에서는 증가하는 경향을 보였으나, 그 이상의 용존무기인 농도에서는 생물량이 증가 경향을 나타내지 않는 것으로 보고하였다. 이러한 차이는 Horner (1990)가 실험에 사용한 용존무기인 농도는 최대 $40\mu\text{g}/\ell$ 로 본 연구에서

나타난 유입수 내 인 농도에 비해 상대적으로 낮은 조건에서 이루어졌기 때문에 대상수체와 이용된 부착조류 종이 다른 상태에서 비교하는 것은 무리가 있다.

이러한 결과들을 종합할 때, 부착조류가 성장을 위해 요구되는 적정 영양염 농도가 환경에 따라 그 범위가 달라질 수 있고, 결과적으로 부착조류가 종류에 따라 영양염을 최대로 흡수하여 성장하는 최적성장상태가 있음을 제시한다.



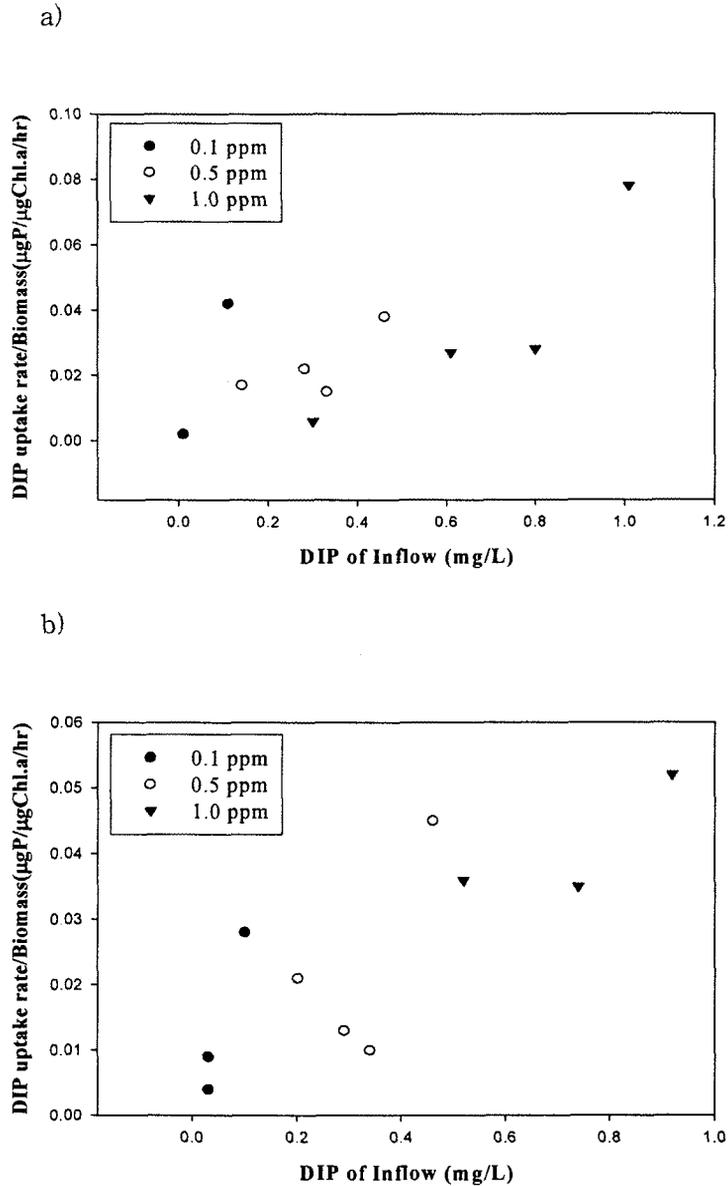
【그림 6.1】 유입수 인 농도에 따른 사상성 부착조류 성장. FPA는 Filamentous Periphytic Algae(사상성부착조류)를 의미함.

라. 유입수 내 인 농도와 제거율

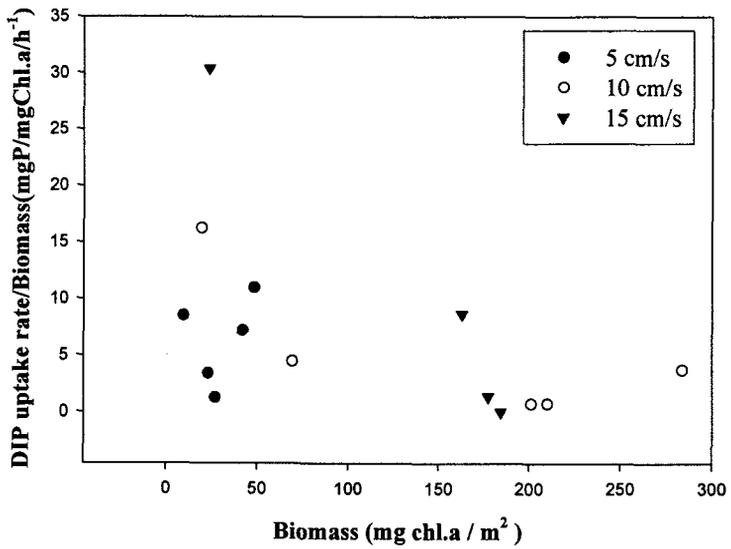
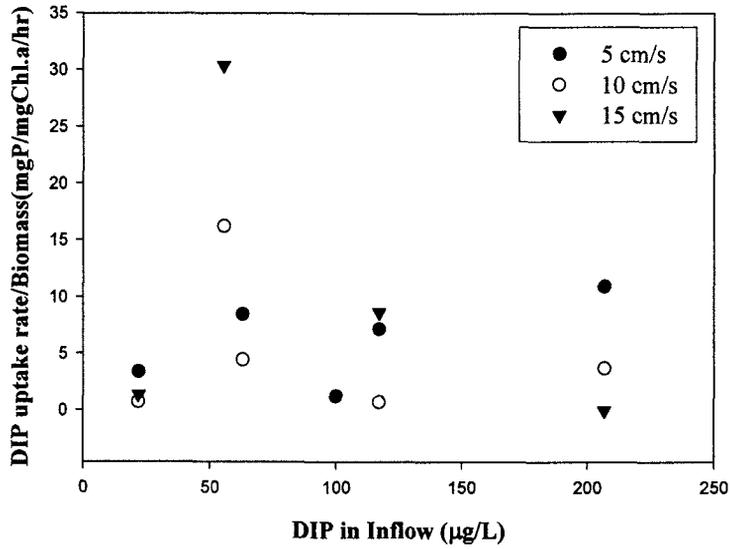
본 연구에서 사상성부착조류의 인 제거율은 다른 조건이 동일한 경우 유속과 생물량에 따라 증가하는 것으로 나타났다. 유속 0.5~5cm/s 범위에서 총 질소를 제외한 모든 분석 항목이 5cm/s의 유속에서 영양염 제거율이 가장 높게 나타났다. 0.5~5cm/s 유속 범위의 현장농수로 실험에서 용존무기인(DIP)의 제거율은 5cm/s 유속에서 최대 127mg P/gChl.a/hr을 나타냈고, 5~15cm/s 유속범위의 Pilot 수로실험에서는 10cm/s 유속에서 1.19gP/gChl.a/hr로 가장 높은 DIP 제거율을 보였다. 농수로보다 Pilot 수로에서 DIP의 제거율이 높았던 이유는 부착조류의 성장이 상대적으로 좋았으며, DIP 부하량이 평균 4.19g/hr로 농수로 0.26g/hr에 비해 20배 이상 높았고 부하량에 따른 단위면적당 생물량에 의한 DIP의 제거율 또한 부하량이 높을수록 높게 나타났기 때문인 것으로 판단된다. 다른 연구결과들과 비교할 때, 10~50cm/s 범위에서 유속에 따른 DIP의 제거율은 48cm/s 유속에서 가장 높은 2.9mgP/gChl.a/hr을 보였고(Horner, 1990), 5~15cm/s 유속에서 DIP 제거율은 15cm/s 유속에서 196mgP/gChl.a/hr로 가장 높은 제거율을 보였다(공과 천, 1999).

본 연구의 실내 배양실험에서 용존무기인 농도에 따른 인 제거율은 인이 없는 상태를 경험한 조류와 인이 풍부한 상태를 경험한 부착조류의 경우 모두에서 용존무기인 농도가 높을수록 제거율은 증가하는 경향을 나타냈다(그림 6.2a). 유입수 인 농도에 따른 인 제거율은 인 농도 $50\mu\text{g}/\ell$ 에서 효율이 가장 높게 나타났다(그림 6.3). 생물량과 인 제거율의 관계는 세포의 활성도와 수체 내 영양염의 확산과 관련하여 매질에 부착조류가 부착되어 성장하는 초기단계에 분명하게 나타나며, Horner *et al.*(1990)는 용존무기인 농도가 0~50 $\mu\text{g}/\ell$ 인 범위에서는 인 농도가 증가할수록 인의 제거율은 높아짐을 보고한 바 있다. 사상성부착조류의 성장과 더불어 매질에 매트가 형성되면, 수중에 인이 부착조류에게 이용되기 위해서는 매트의 경계층을 통과해야 하며(Stevnson, 1983), 이러한 경계층을 통한 인의 분자확산은 상대적으로 느린 과정으로 이루어지기 때문에 생물량이 많다고 해서 반드시 인의 제거율이 상승하는 것은 아니다(Geankoplis, 1972). 본 연구에서도 유입수의 인 농도에 따른 제거율이 생물량에 따라 증가하지 않았고 성장초기에 높은 인 제거율을 보였다. 이것은 사상성부착조류가 길이 성장을 하여 매트를 형성하기 전 단계에서는 조체 전체에서 인을 흡수 할 수 있는 반면, 부착조류의 양이 증가하면서 두꺼운 매트형태가 형

성되면 안쪽의 부착조류는 상대적으로 영양염, 빛 등의 이용이 저하되고, 세포조직의 노화로 인한 영양염의 이용이 저하되기 때문에 판단된다.



【그림 6.2】 실내배양실험에서 용존무기인(DIP) 농도와 단위생물량당 사상성 부착조류의 DIP 제거율. a) 실험 전 인이 있는 충분한 상태를 경험한 부착조류, b) 실험 전 인이 없는상태를 경험한 부착조류.

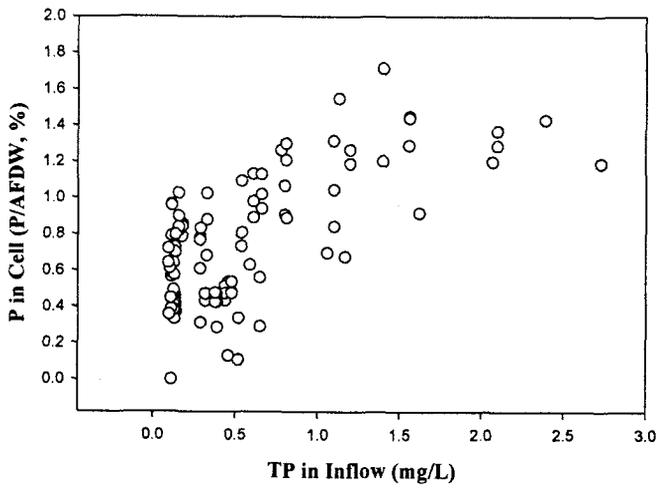
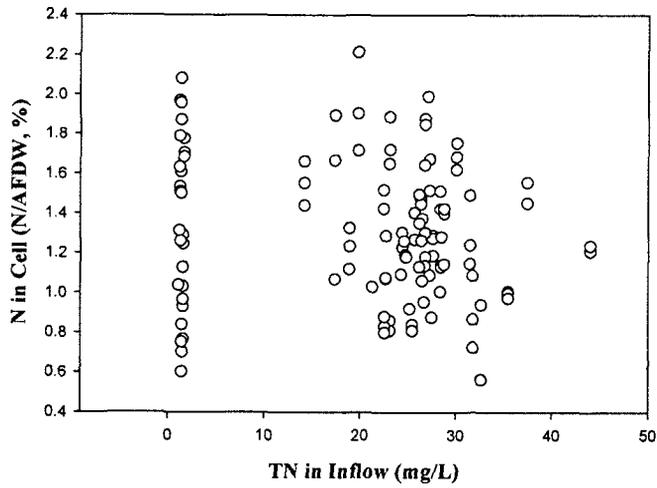


【그림 6.3】 Pilot 수로 실험에서 용존무기인(DIP) 농도와 단위생물량당 사상성부착조류의 DIP 제거율

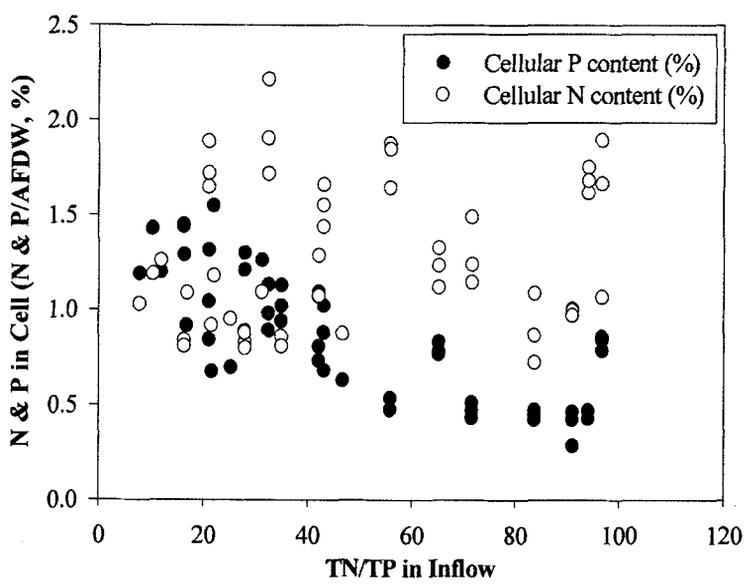
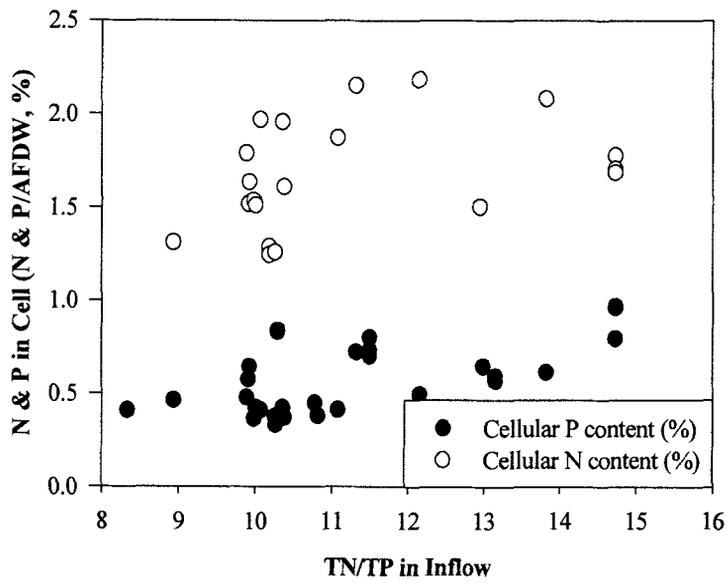
마. 유입수내 질소, 인 농도에 따른 부착조류 조체 내 질소와 인 함량

부착조류 건조량에 대한 질소의 함유율(%)은 질소 농도의 증가에 따라 일정한 경향을 보이지 않았으며, 농도와 상관없이 전체적으로 0.8~2.2%의 범위의 값을 나타냈다. 조체 내 인의 함유율은 수중 TP의 농도가 증가함에 따라 약간 증가하는 경향을 나타냈으며, 최대 1.6% 조체 내 인의 함유율을 나타냈고, 1.0mg/ℓ의 농도 이후에 일정한 값을 보였다(그림 6.4). 조체 내의 질소는 유입수 농도에 상관없이 일정한 범위를 유지하며 일정량의 질소를 흡수하지만, 유입수의 인 농도가 증가할수록 조체 내 인의 함량이 높아지는 것은 조체가 흡수하는 양이 많기 때문으로 판단된다.

부착조류의 성장은 수체내 영양염류, 빛, 수리·수문학적 특성, 경쟁 및 포식작용 의해 좌우되며 영양염 측면에서는 생물체의 요구에 비하여 생태계 내에서 가장 결핍된 원소의 양에 의해 결정된다(Wetzel, 2001). 일반적으로 조류의 성장에 있어 적정 질소/인 비율은 대체로 10~20(적정비율 16; Redfield, 1958)로 알려져 있다. 적정 비율을 기준으로 부착조류의 질소와 인의 이용율은 달라질 수 있으며, 조체내 포함된 질소와 인의 함량도 변화되게 된다. 유입수 내 TN/TP 비에 따른 조체 내 질소의 함유율은 유입수 내 TN의 농도에 따른 조체 내 질소의 경향과 비슷하게 나타난 반면, TN/TP 비에 따른 조체 내 인의 함유율은 TN/TP의 비가 20정도까지는 조체 내의 인의 함유율이 큰 차이는 없었으나 이후에 감소하는 경향을 나타냈다(그림 6.5). 유입수내 질소 농도와 TN/TP 비에 상관없이 조체의 질소의 일정한 함유율과 유입수내 인 농도 증가에 따른 조체 내 인 함량의 증가와 더불어 TN/TP 증가에 따른 조체 내 인 함량의 감소는 본 시스템이 사용된 환경에서의 인 제한을 의미한다. 이 결과는 적정한 질소/인 비율에서 부착조류 세포내 인 보유량이 가장 높고, 인에 비해 질소의 농도가 상대적으로 높아지면 부착조류 세포내 인 함유량이 저하됨을 제시한다. 또한 질소에 비해 사상성부착조류에 의한 인 흡수의 변이가 상대적으로 큼을 시사한다.



【그림 6.4】 유입수 내 TN, TP 농도에 따른 조체 내 질소, 인 함유



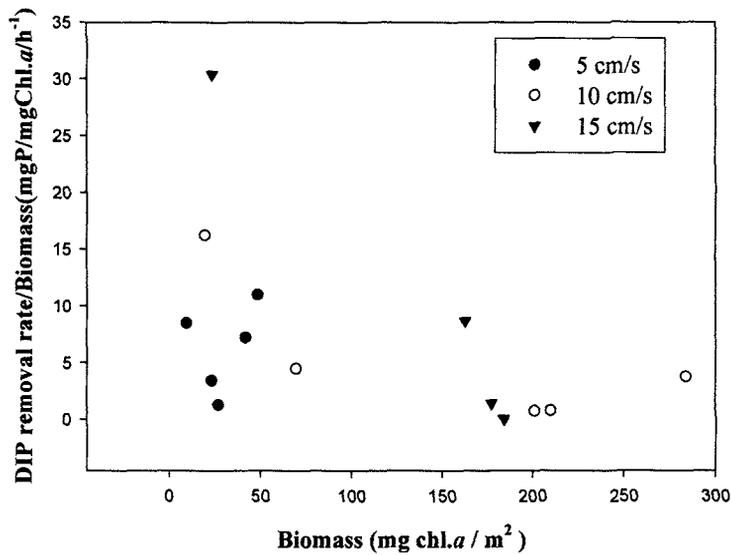
【그림 6.5】 유입수 TN/TP 비에 따른 조체 내 질소, 인 함유율

바. 부착조류 생물량과 영양염 제거효과

부착조류 시스템에서 영양염의 제거효과는 제거효율(%)과 단위면적당 생물량증가에 따른 제거율로 평가하였다. TP, DIP, TN 그리고 부유물질 만이 생물량이 증가에 따라 제거효율이 증가하는 것으로 나타났다. TP, DIP의 생물량 증가에 따른 최대 제거효율은 생물량이 약 $10\text{gDW}/\text{m}^2$ 정도에서 각각 14%, 5.6%였고, TN은 13%, 부유물질은 최대 32%로 조사되었다(그림 5.6~5.10). 세포의 활성도와 수체 내 영양염의 확산과 관련하여 부착조류 인 제거율은 매질에 부착조류가 부착 성장하는 초기단계에 높게 나타났다(그림 6.6) (Horner *et al.*, 1990).

유속과 영양염 제거효율과의 관계에서는 유속이 빠를수록 생물량에 따른 제거효율도 높게 나타났다(그림 6.6). Pilot 수로의 20mm 망목 철망에서 시간에 따른 인 제거율은 생물량이 많았던 $10\text{cm}/\text{s}$ ($19.6\text{mg}/\text{m}^2$), $15\text{cm}/\text{s}$ ($23.6\text{mg}/\text{m}^2$)로 조절된 수로에서 초기단계에 가장 높은 제거율을 나타냈다. 유속 증가와 함께 사상성부착조류 생물량 증가에 따라 영양염의 제거효율(%)은 일반적으로 증가하는 경향을 나타내지만, 일정 생물량 이상에서는 제거효율의 증가가 동반되지 않는 것으로 알려져 있다(Vymazal, 1988). 서로 다른 매질과 유속 조건하에서 실시된 실험결과에서도 단위면적당 생물량 증가시 영양물질 제거율에 있어 뚜렷하게 감소하는 경향을 보였다.

결과적으로, 높은 생물량은 일정범위에서 유속이 빠를수록 유지되며, 부착조류에 의한 영양염 제거효과는 반드시 높은 생물량을 필요로 하는 것이 아니기 때문에, 효율적으로 시스템을 운영하는데 있어 생물량의 증가를 위해서는 어느 정도 빠른 유속이 필요하나 영양염 제거효과를 최대한으로 유지시키기 위해서는 부착조류의 생물량을 적절하게 조절할 필요가 있음이 제시되었다.



【그림 6.6】 부착조류 생물량과 단위면적당 용존무기인(DIP) 제거율과의 관계

사. 오염물질 부하량에 따른 제거율

부착조류 시스템에서의 유입부하량에 따른 영양염 제거율은 서로 다른 수질상태의 유입수를 대상으로 한 실험 결과를 토대로 평가하였다. 농업용수저수지(신정호)와 하수처리장 방류수의 부하량 조건의 실험에서 영양염류의 유입 부하량은 부유물질을 제외하고는 모든 항목에서 신정호에 비해 하수처리장 방류수에서 높았다.

오염부하가 높은 하수처리장 방류수를 이용한 실험에서는 부착조류의 성장이 적었던 자연섬유망에서 부유물질과 암모니아를 제외하고는 모든 항목에서 높은 제거율이 나타나 많은 생물량이 반드시 높은 제거율을 나타나는 것은 아님을 제시되었다(표 4.23).

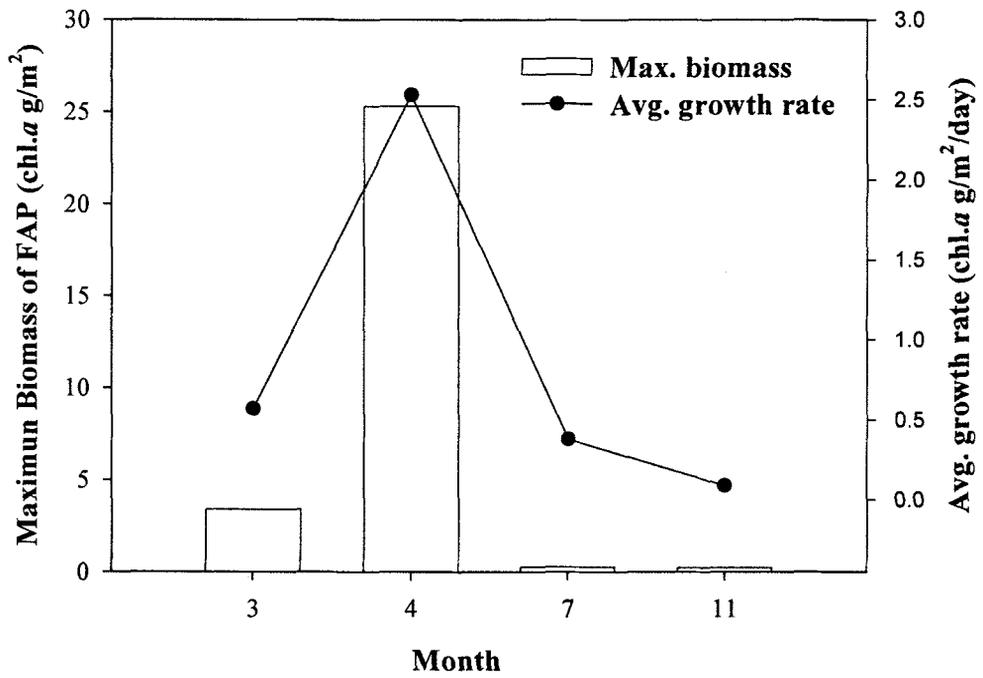
하수방류수에 비해 물질부하량이 적었던 신정호 물을 유입수로 이용한 실험에서는 용존무기형태의 질소는 아질산성질소 형태를 제외하고는 부하량 증가에 따라 제거율이 증가하는 경향을 나타낸 반면, 총 질소의 경우에는 부하량 증가에 따른 제거율의 증가는 관찰되지 않았다(그림 5.12). 총인은 부하량 증가가 제거율의 증가를 동반하지 않았으나 용존무기인(DIP)은 부하량이 증가함에 따라 제거율이 뚜렷하게 증가 하는 경향을 나타냈

다. 용존형태의 영양염류($\text{NO}_3\text{-N}$, $\text{NH}_3\text{-N}$, DIP)에서 부하량 증가에 따른 제거율 증가는 시스템 내 부착조류의 흡수에 의한 결과로 예측될 수 있으며, 이와는 달리 입자성형태의 영양염류 (TN, TP, SS)는 부하량과 제거율 간의 일정한 경향이 나타나지 않은 것은 시스템 내 입자성 형태의 영양염류는 대부분이 수로 내에서 침전과정을 거치면서 나타나기 때문에 유입부하량에 대한 제거율은 조사 당시 매질부근에서의 흐름을 저하시킬 수 있는 생물량의 영향을 받는 것으로 생각할 수 있다.

이러한 결과를 토대로 할 때, 시스템에서 처리될 수 있는 유입부하량은 수로의 길이와 수로내 생물이 부착할 수 있는 매질의 수 그리고 부착조류의 생물량을 조절함에 있어 중요한 인자로 제시될 수 있다. 용존성 물질의 제거를 위해서는 많은 생물량 보다는 성장 초기의 생물량을 현장실험을 통해 결정하여 유지할 수 있도록 조절하는 것이 필요하며, 입자성물질의 제거를 위해서는 매질내 부착조류의 생물량을 증가시켜 유속을 감소시키거나 인위적으로 수로내 유속을 저하시켜 침전이나 매질에 부착되어 제거될 수 있도록 유지관리하는 것이 필요한 것으로 제시되었다.

아. 계절에 따른 부착조류 성장량 차이

부착조류의 생물량은 계절에 따라 수온, 영양염 농도, 포식자의 유무 등에 의해 차이를 나타낼 수 있기 때문에 계절적인 양상을 이해하는 것은 시스템내 생물량을 조절함에 있어 매우 중요할 수 있다. 3월부터 11월까지 Pilot실험에서 조사된 결과를 토대로 할 때, 부착조류의 성장에 가장 적절한 것으로 나타난 유속과 매질이었던 10cm/s, 20mm철망에서의 계절에 따른 최대생물량과 증가율은 봄에 가장 높게 나타났다(그림 6.7). 4월에 최대생물량 25.3g/m²로 7월과 8월에 비해 10배 이상 높았으며, 성장률(2.53 g/m²/d) 또한 가장 성장률이 낮았던 11월(0.09 g/m²/d)과 비교해서는 30배 정도 높았다. 계절에 따른 성장률의 차이는 유입수의 조건, 섭식자의 출현여부 등 여러 가지 요인이 복합적으로 작용했을 것으로 판단된다.



【그림 6.7】 Pilot 수로에서 계절별 최대생물량과 성장률(10cm/s, 20mm철망)

2. 유지관리 방안

가. 부착조류 수로시스템의 통배수 기능 유지

1) 쓰레기와 토사유입관리

농촌지역에 농경활동으로 인한 폐비닐 등의 쓰레기가 유입되거나 홍수시 많은 양의 토사가 유입되는 경우 유입하천의 경관이나 배수기능, 그리고 수질개선 효과 뿐만 아니라 매질의 파손도 초래할 것이다. 이러한 물질들의 유입을 방지하기 위해서는 스크린을 설치하거나 부착조류 수로시스템에 자동으로 유량을 조절할 수 있는 시설(자동문비) 설치, 그리고 매질의 설치방법 등을 고려할 수 있다. 스크린의 경우에는 홍수시와 같이 일시적으로 많은 토사나 부유물질이 유입되는 경우 그 기능을 상실하게 되는 문제점이 있다. 자동문비 설치 시에는 자동문비 주변에 토사가 많이 축적되는 조건이 형성되므로 부착조류 수로시스템에는 토사 유입이 줄어들 것으로 판단되나 자동문비의 기능회복을 위해서 주기적으로 토사를 제거할 필요가 있다. 토사의 제거는 국부적으로 자동문비 주변만 제거하고 수로 주변에 사토장을 마련하고 주기적인 준설하는 방안이 검토되어야 할 것으로 판단된다.

매질의 설치방향은 부착조류의 기질로서의 역할 뿐 만 아니라 본 시스템에서 통수기능을 유지함에 있어 매우 중요하게 고려되어야 할 인자이며, 유입수 조건에 따라 각기 수평, 수직 그리고 하상 설치 방법들이 검토될 필요가 있다.

2) 부착조류 생물량 관리

어떤 식물을 이용하여도 노쇠한 식물체를 방치하면, 식물체에 저장하고 있던 영양물질이 다시 수중으로 회귀하므로, 계 밖으로 가지고 나오지 않는 한 시스템 전체로서의 정화는 이루어질 수 없다는데 문제가 있다. 갈대를 비롯하여 수생식물을 이용한 진정한 정화 과정은 ① 영양물질을 흡수하여 성장한 식물체를 계 밖으로 흘려보내거나, ② 혐기성의 진흙 속에서 탈질이 일어나, 질소가 대기중으로 방출되는 과정, 그리고 ③ 식물의 유체나 침전된 유기물이 매몰되어 통상의 물질순환계에서 벗어나 버리는 3가지 과정이 있다. 즉

본 시스템이 비록 수질정화능력이 있다하더라도 궁극적으로 생물량을 회수하여 처리하지 않는다면 부착조류의 분해에 의해 다시 수계로 오염물질이 유입되게 된다. 또한, 부착조류의 과도한 성장은 수로시스템의 배수기능을 약화시켜 오히려 유속의 감소에 따른 성장 억제하는 등의 문제를 야기할 수 있다.

따라서 자연적으로 발생하는 수서생물들인 깍다구 유충이나 달팽이들을 이용하여 생물량을 조절하거나 인위적으로 주기적인 관리를 통해 조절하는 등의 방법이 검토되어야 한다. 그러나 전자의 경우 수서생물들의 배설 등으로 인한 영양염 농도의 증가 등 다른 문제점이 발생할 가능성이 있으므로, 인위적인 관리를 통해 조절하는 것이 효과적이라 판단된다. 인위적으로 수거된 생물량은 인과 질소가 많이 함유되어 있기 때문에 단순한 퇴비화과정을 거쳐도 비료로서의 가치가 매우 높을 것으로 판단되기 때문에 재이용에 대한 방안이 동시에 고려될 필요가 있다.

나. 유입수질의 급변

본 시스템은 농수로의 수질을 정화하는 것을 목표로 하기 때문에 농경지에서 과도한 농약 살포 및 홍수기에 탁류의 유입 등으로 시설의 충격과 유입수에서 처리 효율의 감소가 나타날 수가 있다. 따라서 통수 기능유지와 더불어 생물량 조절이 년 중 일정하게 유지되기 보다는 유입수 수질이 악화된 시점에서는 부착조류의 성장이 상대적으로 증가될 수 있기 때문에 더 짧은 주기의 수확을 수행할 필요가 있으며, 토사가 다량으로 함유된 탁류가 일시에 유입되는 홍수기에는 시스템 운영 자체를 보류할 필요가 있다.

제 3 절 사상성부착조류 수로시스템 최적 운영 방안

1. 유속

유속 5~15cm/s의 범위에서 사상성부착조류의 성장은 10cm/s의 유속에서 가장 좋은 성장을 나타냈다. 두 번의 실험에서, 낮은 5cm/s 유속에서 사상성부착조류의 생물량에 비해 10cm/s의 유속에서 사상성부착조류의 생물량은 건중량은 3~4배, 엽록소 a 는 6~8배, 조체 내 질소와 인은 3배 이상 높은 증가량을 나타냈다. 상대적으로 높은 15cm/s의 유속에서는 10cm/s 유속의 사상성 부착조류의 성장량과 큰 차이를 보이지 않았다. 10cm/s의 유속에서의 평균성장률은 5cm/s의 유속에 비해 2배 이상 빠르게 나타나 부착조류의 성장에 있어 빠른 유속 환경이 유리한 것으로 나타났다.

유속과 영양염의 제거율과의 관계에서는 유속이 빠를수록 영양염의 제거율도 높은 것으로 나타났다. 유속에 따른 영양염의 제거율은 Pilot 수로에서 적용한 5~15cm/s 범위의 유속에서는 10, 15cm/s의 유속이 5cm/s의 유속에서보다 제거율이 높았고 SS, $\text{NO}_3\text{-N}$, TP, DIP 항목의 영양염 제거율이 다른 영양염의 제거율보다 좋았다. 농수로 실험에서 모든 항목의 영양염 제거가 이루어졌으며, 적용한 0.5~5cm/s 사이의 유속에서는 가장 빠른 5cm/s 유속에서 가장 높은 제거율을 보였다. 높은 유속을 적용한 Pilot 수로에서 용존성 무기인의 최대 제거율은 10mg/s 유속에서 261mgP/gChl.a/hr로 5cm/s 유속에서 최대 127mg P/gChl.a/hr을 보인 농수로 실험에서보다 2배 이상 높았고, 다른 영양염의 제거율도 낮은 유속을 적용한 신정호 농수로보다 높은 유속을 적용한 Pilot 수로에서 상대적으로 높았다.

이러한 결과를 토대로 할 때 영양염 제거율은 부착조류의 성장에 영향을 주는 유속과 관련이 있었으며, 유속을 최대한 유지하는 것이 시스템의 최적운동을 위해 중요한 요인으로 나타났다. 수로 내 유속은 시스템의 관리 측면에서도 한 방법으로 운영될 수 있어, 최적의 시스템운동을 위해 지속적으로 유속을 모니터링을 하면서 유속 감소시 생물량을 수확하여 적정 유속으로 조절하는 등의 관리방안이 검토될 수 있을 것이다.

2. 매질

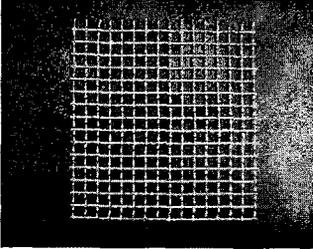
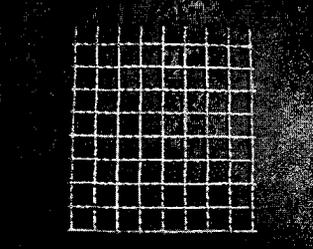
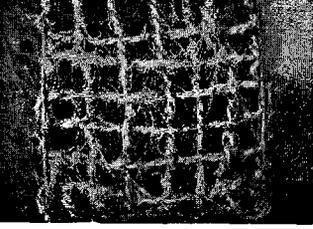
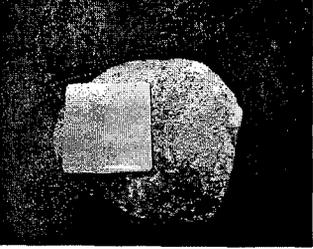
사상성 부착조류의 성장에 적합한 매질은 실내 순환수로에서는 자연섬유망이 우위를 보였고, 현장 Pilot 수로에서는 철망이 우위를 보였으며, 철망의 망목 크기에 대해서는 10mm보다는 20mm에서 성장량이 좋았다. 서로 다른 유속으로 조절된 Pilot 수로에서 사상성 부착조류의 성장률은 망 크기에 상관없이 10cm/s의 유속에서 가장 높았다. 부유물질의 농도가 낮은 실내수로 실험에서는 자연섬유망이 철망에 비해 2배, 타일, 자갈에 비해 20배 이상 높게 성장하였다. 현장 Pilot 수로에서 10mm망목 철망, 20mm망목 철망, 자연섬유망을 동시에 이용한 사상성 부착조류의 성장률 실험에서 20mm망목 철망이 모두 성장이 좋았으며, 자연섬유망에 비해 생물 성장량이 적었던 겨울(11월)에는 1.5배, 생물량의 성장이 많았던 봄(4월)에는 3~4배 높게 성장하였다. 20mm망목 철망과 자연섬유망의 매질을 각각 한 종류씩만을 설치한 경우에서도 20mm망목 철망에서 사상성 부착조류의 성장이 더 높았다. 매질에 따른 영양염의 제거율은 사상성 부착조류의 성장이 좋은 20mm 망목 철망에서 가장 높게 나타났다. 20mm망목 철망을 사용한 경우에 모든 항목에서 지속적인 영양염의 제거가 나타났으며, 자연섬유망에 비해 DIP, SS, TN, TP의 제거율이 높게 나타났다.

서로 다른 환경에서 재질과 망목의 크기가 다른 매질을 적용하여 조사한 결과를 토대로 할 때, 매질 선택 시 다음과 같이 고려할 수 있다(표 6.4).

(1) 자연섬유망이나 망목의 크기가 작은 매질 : 순환수로와 Pilot 실험에서 비교적 생물량이 적은시기와 망목의 폐색에 따른 흐름이 저해받지 않는 환경에 적합한 것으로 나타났다. 따라서, 부유물질이 적고 부착조류의 성장이 영양염에 의해 제한되는 장소나 부착조류의 성장이 느린시기에 적용할 수 있다.

(2) 망목의 크기가 큰 매질 : 상대적으로 자연섬유망이나 망목의 크기가 작은 매질이 적용되는 환경보다는 영양염이 풍부하여 조류 성장이 영양염에 의해 제한받지 않으나, 부유물질 유입이나 조류의 성장속도가 빨라 망목의 폐색에 따른 흐름이 저해받을 수 있는 장소에 적용할 수 있다.

【표 6.4】 부착조류시스템에 적용가능한 매질과 장·단점 비교

매 질	장·단점
	<p>10mm 철망</p> <ul style="list-style-type: none"> ○ 부착조류의 부착이 용이하며 탈리에 의한 생물량 감소가 적음. ○ 망목의 폐색이 빠름. ○ 부착조류의 성장이 느리고 유입수내 부유물질이 적고 수질이 양호한 경우에 사용 가능.
	<p>20mm 철망</p> <ul style="list-style-type: none"> ○ 부착조류의 부착이 10mm철망이 비해 용이하지 않음. ○ 망목의 폐색이 상대적으로 느림. ○ 유속의 변화나 외부요인에 의한 탈리가 용이. ○ 부착조류의 성장이 빠르고 부유물질로 인해 망목의 크기가 작은 매질의 경우 폐색 가능성이 있는 환경에서도 사용 가능.
	<p>자연섬유망</p> <ul style="list-style-type: none"> ○ 부착조류의 부착이 용이하며 유속에 의한 탈리가능성이 가장 적음. ○ 망목의 폐색이 빠름. ○ 부착조류의 성장이 느리고 유입수내 부유물질이 적고 수질이 양호한 경우, 정체성수역에서 사용가능.
	<p>자갈 타일 등</p> <ul style="list-style-type: none"> ○ 사상성 부착조류의 부착이 어렵고 탈리가능성이 가장 높음. ○ 통수기능은 우수하나 토사유입시 매물됨. ○ 유입수 수질이 양호하고 유속이 완만한 지역에 다른 매질과 같이 적용될 수 있음.

3. 유입수내 인 농도

시스템으로 유입되는 인의 농도를 조절하는 것은 매우 어려운 일이며, 단지 유입수내 인 농도는 시설설치 장소 선정시 고려되어야 하는 인자로서 고려될 수 있을 것이다. 유입수내 인의 농도는 부착조류의 성장과 관련이 있었다. 인 농도 범위가 0.1~1mg/ℓ 인 실내 배양 실험에서는 인의 농도가 높을수록 사상성 부착조류의 성장이 좋게 나타났고, 1mg/ℓ 에서 가장 높은 성장을 나타냈으며 현장 실험에서도 인의 농도가 높아질수록 사상성 부착조류의 성장이 좋게 나타났다. 0~0.35mg/ℓ 범위의 용존무기인 농도에서는 인의 농도가 높아질수록 생물량이 증가하였으며, 0~3.0mg/ℓ 범위의 TP 농도에서는 인의 농도가 1.5mg/ℓ 정도에서 가장 높은 성장량을 나타냈다.

생물량 증가에 따른 제거효율은 생물량의 증가에 따라 TP는 14%, DIP는 5.6%가 제거되는 것으로 나타났으나 단위면적당 제거율은 유입수 농도 증가에 따라 오히려 감소하는 경향을 나타냄으로써 많은 생물량이 반드시 높은 제거율을 의미하는 것은 아닌 것으로 나타났다. 본 연구에서 가장 높은 제거효율은 생물량이 10gD.W/m²로 유지되는 동안에 나타났으며, 이러한 생물량은 환경에 따라 각기 다른 조건에서 나타날 수 있다. 유입수 인 농도에 따른 인 제거율은 인 농도가 50μg/ℓ 에서 효율이 가장 좋게 나타났고(그림 6.3), 실내 배양실험에서도 용존무기인 농도가 높을수록 제거율은 증가하는 경향을 나타냈다(그림 6.2a).

4. 이용 가능한 부착조류 종

인 농도에 따른 사상성 부착조류 성장 실험에서, *Spriogyra* sp.는 0.05mg/ℓ 와 0.1mg/ℓ 에서 높은 성장을 보였으며, 0.1mg/ℓ 이상의 인 농도에서는 *Rhizoclonium* sp.이 우세한 성장을 보였다.

생태공학을 이용한 수질 정화방법들 중에 수생식물을 이용한 식재정화법으로는 망바구니에 여과재를 충전하여 식재한 수로에 연속 설치하여 정화하는 바이오지오피터, 콘크리트 등의 타설면에 식재한 후 하수를 유하시켜 정화하는 수경생물여과법, 중소 연못에서 부유식물인 부레옥잠을 활용한 방법과 인공부도에 추수식물을 번성시켜 영양염을 흡수하는 방법 등이 있다. 식재에 쓰이는 파피루스, 갈대, 물미나리, 물옥잠, 개구리밥 등 식물의

정화능 중 TN, TP, BOD의 제거율을 비교해보면, TN 제거속도는 각각 0.7, 0.2, 3.0, 0.9, 2.7g/m²·d, TP 제거속도는 각각 0.09, 0.03, 0.16, 0.13, 0.10g/m²·d, BOD 제거속도는 각각 1, 3, 12, 2, 0g/m²·d로 나타났다(류재근 등, 2002). 본 연구 결과에서 나타난 사상성 부착조류에 의한 영양염의 제거율을 보면, 유속, 매질, 계절에 따라 제거율의 차이가 있지만, Pilot 수로에서 TN, TP의 평균 제거율은 0.36~5.32kg/m²·d, 21.6~141.6g/m²·d로 관속 수생식물들에 비해 월등히 높은 제거율을 보였으며, 농수로에서의 TN, TP의 제거율은 각각 16.2~192.6g/m²·d, 1.2~3.2g/m²·d로 30~100배 정도 높은 제거율을 보였다. 뿌리나 줄기로 영양염을 흡수하는 대부분의 수중식물에 비해서 사상성 부착조류는 수중 내에서 조체 전체에서 영양염을 흡수하므로 영양염의 제거효율이 높고, 단위면적에 대한 생물량의 현존량 또한 매우 높기 때문에 수생식물과 비교해서 제거율 측면에서 큰 장점을 가진다. 실험기간 동안 사상성부착조류의 건중량에 대한 엽록소 *a*의 함량은 건중량의 0.4~4.0% (평균 1.4%)로, 다른 식물플랑크톤 건중량에 대한 엽록소 *a* 함량으로 알려진 0.5~2.0%의 범위와 유사하였다(Reynolds, 1984). 그러나, 단위면적 당 엽록소 *a*의 함량은 2001년 4월 현장 Pilot 수로 실험에서는 실험 10일째 10cm/s의 유속으로 조절된 수로에서 최대 5.06 gChl.*a*/m²까지 나타났고, 이러한 높은 생물량은 자연계에서 일반적으로 보고되고 있는 부착조류 현존량 최대현존량인 약 1gChl.*a*/m² (Aizaki, 1980)보다 약 5배 높은 것이었다.

부착조류 종별로 생리적 특성에 따라 영양염을 흡수하는 능력의 차이가 나타나지만 그 정도가 매우 큰 것은 아니다. 황과 공(1999)의 조사에서 나타난 결과에 따르면(표 3.1), *Spriogyra* (해캄)을 비롯하여 대마디말, 쇠뜨기말 등이 인이 상대적으로 높은 수질에서 적용가능성이 크다고 나타났으나, 자연계에서 한 종만이 매질에 부착하여 매트나 군체를 이루는 경우는 거의 없으므로, 일반적으로 오염하천이나 농지주변에서 발견되는 부착조류는 모두 활용가능성이 있다고 판단된다. 특히, 아무리 영양염 흡수능이 뛰어난 종이랄지라도 해당 환경에서 잘 성장하지 못하면 의미가 없으므로 이들의 성장에 미치는 환경요인이나 조건들도 중요하게 고려되어야 한다.

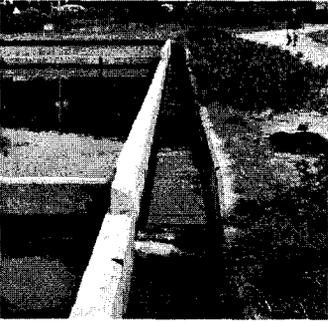
【표 6.5】 부착조류 종에 따른 용존무기인(DIP)의 평균 제거율

참고문헌	우점종	용존무기인 제거율	
		mgP/gChl. a/hr	mgP/gDW/hr
본 연구	<i>Rhizoclonium</i> sp. (사상성 녹조류)	295	13.03
공 등(1996)	<i>Oedogonium</i> sp. (사상성 녹조류)	89	0.37
Horner <i>et al.</i> (1990)	<i>Phormidium</i> (사상성 남조류)	3.2	
Bothwell(1985)	일반 부착조류		2.92
Hwang <i>et al.</i> (1998)	일반 부착조류		4.05

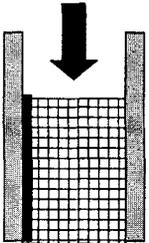
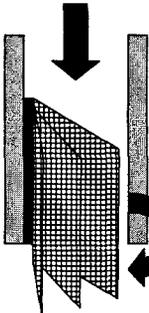
5. 매질의 설치방향

본 시스템 내 매질은 부착조류의 성장을 위한 기질로서 매우 중요하지만, 쓰레기나 부착조류에 의한 망목 폐색시에는 수로의 통수기능이 억제되고 유속저하에 따라 부착조류 성장도 억제됨으로써 수질정화시스템으로서의 기능을 상실하게 된다. 매질의 설치방향은 수로의 통수기능과 부착조류의 성장을 위해서 매우 중요한 것으로 환경과 조건에 따라 유동적으로 설치할 필요가 있다(표 6.6). 만약 본 연구에서와 같이 흐름방향에 직각으로 매질을 설치하는 경우는 유입수로 전반부에 쓰레기와 같은 물질을 제거할 수 있는 스크린이 반드시 설치되어야 한다. 그러나, 시간에 따른 매질의 폐색은 부착조류의 성장을 증가와 더불어 나타날 것이며 그에 따른 관리가 수반되어야 한다. 흐름방향에 수평적으로 매질을 설치하는 경우는 부착조류의 부착면적이 상대적으로 감소하지만, 물의 흐름이 오랫동안 유지될 수 있다. 하상에 기질을 설치하는 경우는 물의 흐름이 유지되고 부착 면적 또한 넓어지지만, 수심에 따라 빛의 제한과 더불어 토사 유입시 매몰될 수 있는 근상접촉수로에서 나타난 단점들이 제기될 수 있다. 따라서, 매질의 설치방법은 환경에 따라 달리 적용될 수 있으며, 유입수 수질과 유지관리 가능성 여부가 중요한 판단기준이 될 것이다.

【표 6.6】 부착조류시스템내 매질 설치방법에 따른 장·단점 비교

설치 방법	장·단점
	<p>수직형</p> <ul style="list-style-type: none"> ○ 부착조류의 부착표면적이 넓음. ○ 부착조류의 부착이 용이. ○ 부착조류외 다른 수생생물의 서식공간제공 ○ 매트형성과 쓰레기 유입에 따른 폐색이 용이. ○ 유속 증가시 탈리 용이. ○ 홍수기와 같은 유입수량이 많은 시기에 사용 불가. ○ 유입수내 부유물질이 적고 유속이 빠르며 수위변동이 큰 경우에 적용가능
	<p>하상부착형</p> <ul style="list-style-type: none"> ○ 수로의 통수기능이 우수. ○ 수생생물의 서식공간 제공. ○ 유입수량이 많은 시기에도 사용가능 ○ 부착조류의 부착표면적이 적음. ○ 부착조류의 수체와의 접촉면적 감소로 수질개선효과 감소. ○ 수위가 높은 지역에 적용불가 ○ 홍수시 유실 및 토사에 의한 매몰 가능성 있음. ○ 유입수내 부유물질이 많고 유속이 완만하며 수로내 수심이 얇은 경우에 적용에 적용가능.
	<p>직립형</p> <ul style="list-style-type: none"> ○ 수로의 통수기능이 우수. ○ 수생생물의 서식공간 제공. ○ 유입수량이 많은 시기에도 사용가능 ○ 부착조류의 부착표면적이 작음. ○ 부착조류의 수체와의 접촉면적 감소로 수질개선효과 감소. ○ 홍수시 유실가능성. ○ 유입수내 부유물질이 많고 유속이 완만하며 수위변동이 큰 경우에 적용가능.

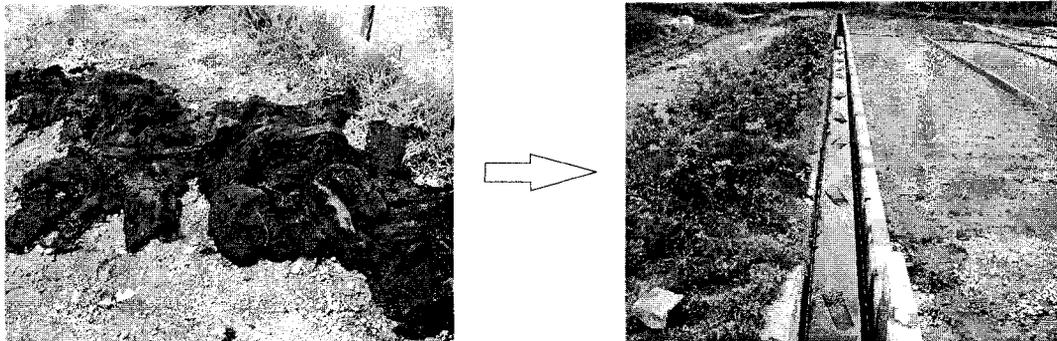
【표 6.6】 계속

설치 방법	장 · 단점
<div style="display: flex; justify-content: space-around;"> <div style="text-align: center;"> <p>평수기</p>  </div> <div style="text-align: center;"> <p>홍수기</p>  </div> </div>	<p>자동 개폐형</p> <ul style="list-style-type: none"> ○ 수직형과 기능 동일 ○ 통수기능이 가장 우수 ○ 홍수기에도 사용가능 ○ 유실가능성이 거의 없음 ○ 생물량 수확시기를 알려주는 역할 수행 ○ 시설설치 비용이 다른 방법에 비해 높음 ○ 개폐기능 이상 유무에 대한 주기적인 점검 필요

6. 생물량 수확 및 처리

부착조류시스템에서의 수질정화기작은 수체 내에서 부착조류에 의한 용존영양염 흡수와 증가된 생물량의 회수과정으로 이루어진다. 따라서 시스템에서 수질정화능력은 수체 내 용존물질의 농도 감소와 더불어 수확된 생물량이 동시에 평가되어야 한다. 수확된 생물량은 그대로 외부에 방치하는 경우 부패에 따른 악취발생과 경관상에 문제를 야기할 수 있으며, 강우시 다시 수체로 유입될 수 있기 때문에 적절한 처리를 통해 수체로의 유입을 억제해야 한다. 시스템으로부터 수확된 생물은 인과 질소가 풍부하기 때문에 퇴비화 과정을 거쳐 인근 농지로 환원하거나, 주변에 환원할 수 있는 농지가 없는 경우에는, 수로주변에 식생대를 조성한 후 그곳에 매립하여 식물들이 성장하면서 영양분을 이용함으로써 처리될 수 있도록 하는 방법이 있다(그림 6.8). 1996년 팔당호에서는 제거된 수생식물전량을 인근 농가에 토양개량용으로 공급하였고 수생식물의 유기비료화 사업이 관계기관 및 농민협회에 의해 추진된 바 있다. 유기비료화는 축분과 수생식물을 발효효소와 혼합하는 공정으로 유기비료공장이 시설되었고 수생식물 야적장 등의 부대시설이 추진된 바 있다. 비료화의 대형화가 어려운 곳에서는 수로 주변에 살포하는 방법을 선택할 수 있으나, 너무 많은 양의 수확물을 한곳에 매립하는 경우에 부패되는 동안에 각종 박테리아와 미생물이 발생하고 식물의 근권에 환원환경이 조성되어 식물 성장이 억제될 수 있으

므로 한곳에 집중적으로 매립되지 않도록 해야하며 가능한 적절한 퇴비화과정을 거쳐 처리하는 것이 바람직할 것으로 판단된다.

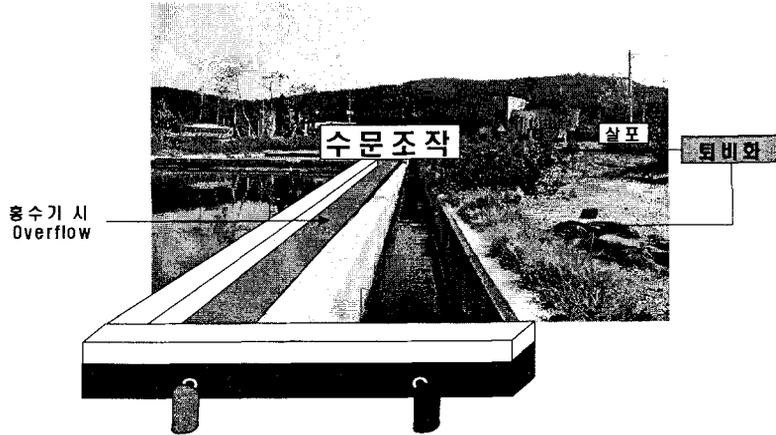


【그림 6.8】 수로에 부착된 부착조류의 수확 및 처리방안

7. 홍수기시 관리방안

본 연구에서 농업용수수질개선을 위해 시도된 부착조류시스템은 부착조류가 성장에 필요한 영양염을 수체로부터 이용함으로써 최종적으로 수체에서의 영양염 농도를 감소시키는 원리를 이용한 것이다. 부착조류의 성장을 위해서 가장 중요한 요인으로는 적절한 유속을 유지하는 것이었으며, 부착된 조류의 탈리를 증가시키고 성장을 억제하는 요인으로는 유속감소와 유입수내 부유물질의 유입이 가장 중요한 문제로 나타났다. 우리나라의 강우 특성상 여름철 집중강우시에는 유역으로부터 많은 토사가 유입되고 유량과 유속이 증가한다. 부착조류의 탈리와 부유물질 흡착에 의한 빛 제한으로 부착조류의 성장이 억제되며 매질에 부유물질이 대량으로 부착됨으로써 수로의 통수기능이 억제되는 문제점이 제기될 수 있다. 이러한 시기에는 보안책 마련을 하거나 시스템 운영자체를 자제하는 것이 바람직 할 것으로 판단된다. 일시에 유입되는 많은 토사와 부유물질이 시스템 내부로 유입되는 것을 억제할 수 있는 방법은 유입수의 일부를 시스템 외부로 바로 흘려보내는 방법과 시스템 전반부에 저류지를 설치하는 방법 등이 있을 수 있다(그림 6.9). 전반부에 저류지를 설치하는 경우에는 유입수량 등을 고려하여 규모가 결정될 수 있지만 많은 면적이 소요될 것으로 예상되기 때문에 저류지 건설이 계획되어있지 않은 곳에서 시설설치

는 어려움이 있을 것이다. 따라서, 저류지 설치보다는 수로 부근에 유입수량이 많은 경우에 수로로 활용할 수 있는 부가적인 수로를 건설하여 운영하는 것이 더 좋은 방법으로 판단된다.



【그림 6.9】 홍수기시 부착조류 시스템 관리

8. 적용대상 지역 선정 및 타 공법과의 연계

부착조류시스템에서 가장 중요한 설계인자로는 부착조류의 성장을 유지할 수 있는 적절한 유속을 유지하는 것이었다. 농업용 수로의 유량이 유지되는 시기는 강우시와 논에 물빠기를 하는 시기를 제외하고는 거의 없는 것이 실정이다. 따라서 농업용 수로에서 부착조류를 설치 운영하는 것은 한시적인 적용에 불과하며 설치장소는 유량이 유지될 수 있는 곳에 한정되게 된다. 따라서, 본 시스템은 농업용 수로에 유량이 유지되지 않는 시기에는 농업용수를 처리할 수 있는 지역 즉, 농업용 수로가 인근에 위치한 지역을 대상지역으로 선정해야 한다. 농업용 수로에 유량이 존재하는 시기에는 농경지로부터의 배출수를 처리하고, 그 외 기간동안에는 농업용저수지 또한 오염하천수 정화용으로 사용함으로써 부착조류 시스템의 활용을 극대화 할 필요가 있다. 그러나, 이러한 경우에는 저수지 물을 펌핑하기 위한 동력비가 소요되며, 기계적 방법과 비교해 효율이 장기간에 걸쳐 나타난다는 점에서 단지 부착조류시스템 만을 적용하기 보다는 타 공법과 연계하거나, 시스템의 적용을 위해 수로가 아닌 유량이 일정하게 유지될 수 있는 시설물을 설치하는 것이 바람직 할 것이다.

부착조류시스템과 연계하여 사용할 수 있는 자연정화방법으로는 비교적 넓은 면적을 필요로 하는 습지를 생각할 수 있다. 습지는 갈대, 주울, 부들 등의 습지식물과 습지식물을 지지하고 미생물의 부착의 매체인 자갈, 토양, 그리고 오염물질 분해 등 수질 정화에 가장 중요한 기능을 수행하는 미생물로 구성된다(Stowell *et al.*, 1980). 습지에서의 수질정화는 무생물학적인 요인(침전과 흡착)과 생물학적 요인(생물에 의한 흡수)으로 구분된다(황과 공, 1999). 침전과 흡착에 의한 물질제거는 입자형태의 물질이 저층으로 가라앉거나 식물체의 표면에 부착하여 제거되는 형태로서 습지에서 가장 중요한 정화기작이며, 이렇게 제거된 물질들은 생물에 의해 직접 흡수되지 않고 미생물에 의한 분해과정을 거쳐 이용된다. 영양염류는 처리시설 내에 생육하는 식물에 의해 직접 흡수되고 유기물은 토양이나 수중의 미생물 등에 의해 분해되는 정화과정을 거쳐 처리된다. 수생식물에 의한 수질 개선은 토양이라는 매질 속에서 식물과 미생물이 상호 공생을 통한 물리·생물·화학적 반응에 의하여 이루어지며, 수생식물 그 자체는 수 처리에 있어 큰 기여를 하지 않으며 수처리 능력을 향상시키기 위한 환경을 제공한다(Tchobanoglous, 1987).

습지의 정화기작은 주로 식생에 의한 흡수보다는 유속감소에 따른 침전과 미생물분해에 있는 반면에 부착조류 시스템의 주요 정화기작인 조류의 영양염 흡수에 있다는 점에서 두 정화방법을 연계한 시스템을 생각할 수 있다.

가. 부착조류 시스템 구조적 제안

1) 원리 : 유량과 설치면적을 넓혀주고 부착조류의 광합성이 유지될 수 있는 수심을 시스템 내에 유지함으로써 부착조류에 의한 흡수능과 부유물질의 침전을 동시에 유도하여 수질정화효과를 극대화 한다(그림 6.10).

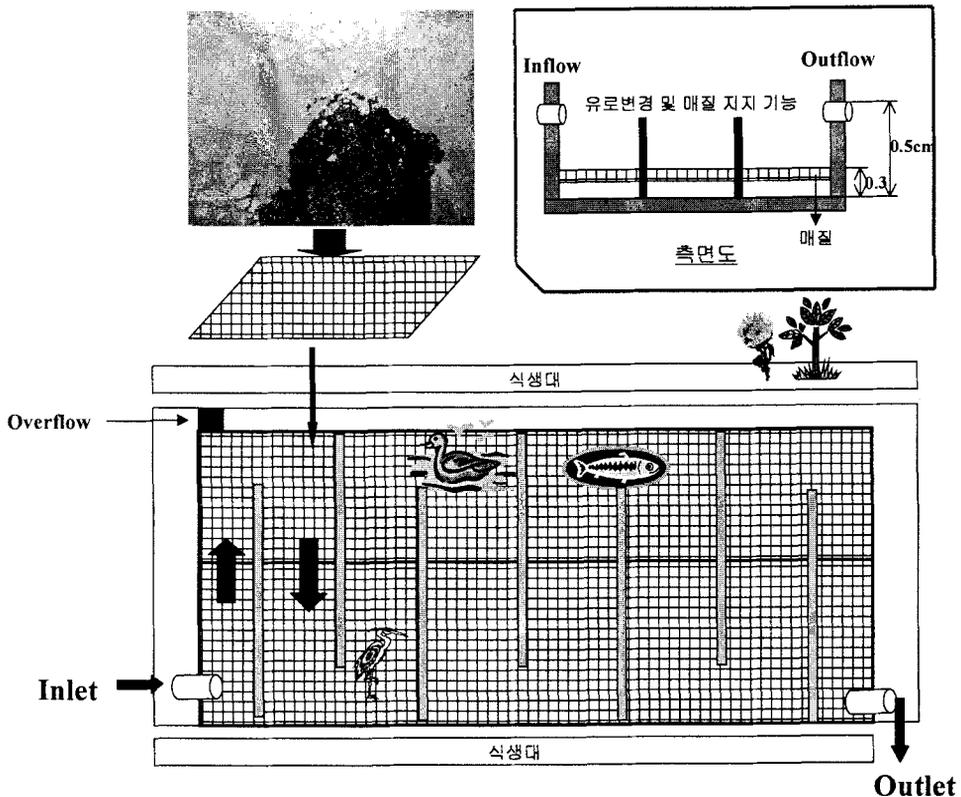
2) 시스템 구성

유량을 조절할 수 있도록 설치하며 강우시에 많은 양의 탁류가 유입되어 부착조류가 매몰되는 경우를 대비하여 우회수로를 설치한다. 시설물 주변에서 경관을 고려하여 식생대를 조성하고 부착조류 시스템에서 수확된 생물들은 적절한 퇴비화 과정을 거쳐 식생대의 비료로 사용한다. 부착조류가 착생하고 부유물질 침전에 의해 매몰되는 것을 방지하며 부착조류 생물량 수확을 용이하게 하기 위해서 하상으로부터 이격하여 매질을 설치한다.

시스템에서의 유속을 최대한 유지할 수 있도록 칸막이를 설치하여 흐름을 조절한다.

3) 장점

유량이 연 중 유지될 수 있으며, 사상성부착조류가 부착할 수 있는 면적을 극대화하고 침전에 의한 부유물질의 제거 및 생물량의 수확이 용이하다. 시스템이 자연적이기 때문에 자연적으로 부착조류가 착생하고, 여러 수생생물의 서식지를 제공하게 되며, 부착조류와 이를 먹이원으로 하는 생물간의 먹이망이 형성되어 생물량이 생태계에 의해 조절될 수 있다.



【그림 6.10】 부착조류 시스템 구조적 제안(I)

4) 문제점 및 해결방안

독립된 시설로 설치할 경우 경관상으로 좋지 않을 수 있으며, 겨울철 결빙시에는 운영할 수 없다. 과도한 생물량 증가로 인해 수체가 부패되어 악취발생 우려가 있으며 여러유충들의 산란장소로 이용함으로써 인근 주민이 해충발생에 따른 민원이 제기될 수 있다. 따라서, 해충방지를 위한 대안 마련이 반드시 수립될 필요가 있으며 그 대안으로는 해충을 섭식할 수 있는 치어를 동시에 투입하는 방안이 검토될 수 있다.

나. 연계 시스템 구조적 제안

1) 원리

유입수는 습지를 통과하면서 부착조류의 성장을 억제하는 부유물질을 우선적으로 침전 과정을 통해 제거하고, 습지에서 미생물분해에 의해 배출되는 무기영양염을 부착조류시스템에서 제거한다(그림 6.11).

2) 시스템 구성

인공습지와 부착조류 시스템을 연계하며, 부착조류 시스템의 유속은 습지로 부터의 배출유량을 조절함으로써 유지시킨다. 강우시 일시에 많은 양의 탁류가 유입되어 부착조류가 매몰되는 경우를 대비하여 우회수로를 설치한다. 시설물 주변에서 경관을 고려하여 식생대를 조성하고 부착조류 시스템에서 수확된 생물들은 적절한 퇴비화 과정을 거쳐 식생대의 비료로 사용한다. 부착조류가 착생하고 부유물질 침전에 의해 매몰되는 것을 방지하며 부착조류 생물량 수확을 용이하게 하기 위해서 하상으로부터 이격하여 매질을 설치한다. 시스템에서의 유속을 최대한 유지할 수 있도록 칸막이를 설치하여 흐름을 조절한다.

3) 장점

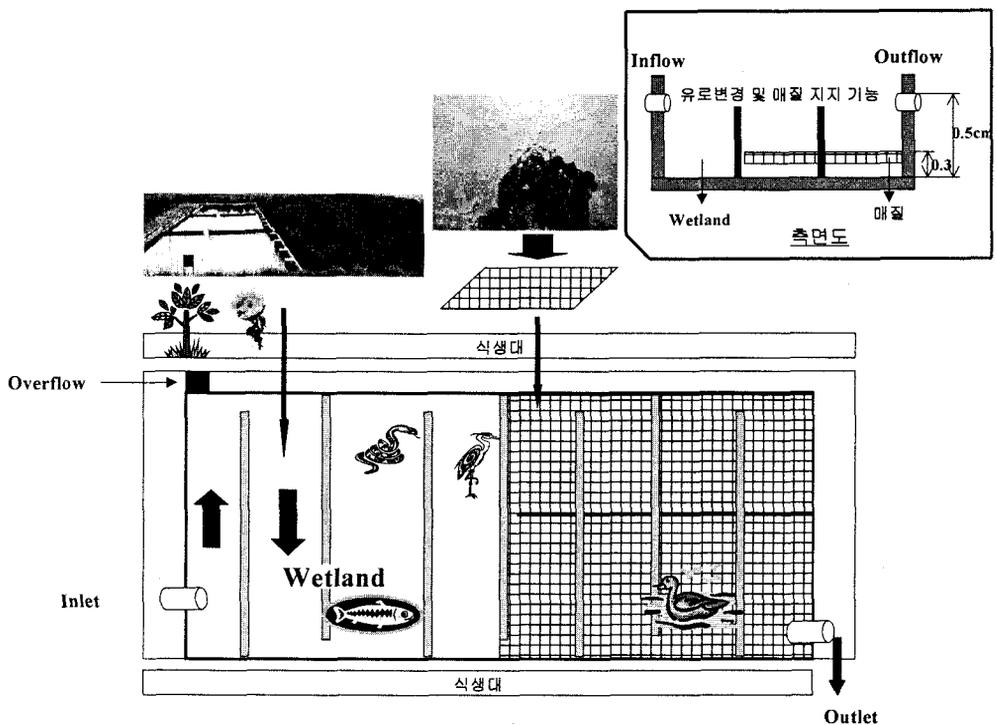
앞서 부착조류 시스템구조적 제안에서 제시된 장점 외에도 사상성부착조류의 영양물질 흡수능이 습지내 식물에 비해 매우 높고, 습지 식물의 경우 단지 뿌리에 의존하여 영양염을 흡수하는 반면 부착조류는 비록 생물량은 수생식물에 비해 작으나 생물량에 대한 인 흡수 면적이 넓고 성장률이 빠르기 때문에 습지에서 용출되는 영양물질을 효과적으로 흡수할 수 있으므로 정화효과를 극대화 할 수 있다. 시설 운영 관리적인 측면에서도 부착조

류의 성장을 억제할 수 있는 부유물질이 습지에서 대부분 제거되기 때문에 부유물질에 의한 탈리를 억제할 수 있으며 연 중 유량이 유지되어 시설을 가동할 수 있다는 점에서 매우 유리한 적용방법이다. 또한 여러 수생, 육상생물의 서식지로 활용될 수 있으며, 생태 공법 적용의 견학장소로서 이용될 수도 있다.

4) 문제점 및 해결방안

부착조류 시스템 구조적 제안에서 제시된 문제점 외 습지내에서 혐기적 환경이 조성되는 경우 부착조류 시스템내로 유입되는 수체가 혐기적 상태를 나타냄으로써 부착조류의 성장이 억제될 수 있으며 또한 생물학적 분해 가능한 물질이 대부분 습지에서 이용된 후 남은 난분해성 물질만이 유입되는 경우에도 성장이 저해될 수 있다.

혐기성상태의 유입을 억제하기 위해서는 습지에서 시스템으로 유입되는 부분의 낙차공을 크게 두어 유입되는 동안 대기와의 접촉을 통해 산소를 공급하는 방법과 습지 하단부의 물의 흐름을 빠르게 유지할 수 있도록 경사고를 두어 시설을 설계하는 방법이 있을 수 있다.



【그림 6.11】 부착조류 시스템 구조적 제안(II)

여 백

제 7 장

요약 및 결론

여 백

제 7 장 요약 및 결론

본 연구는 농촌유역 수질개선을 위한 부착조류시스템 개발을 위하여 2개 세트의 인공 수로를 제작하여 시스템의 주요 설계인자인 유속, 매질, 매질의 망목의 크기, 영양염 농도에 따른 부착조류의 성장특성과 수질개선효과를 파악하였다. 도출된 설계인자들을 토대로 적용 가능한 부착조류시스템기법을 도출하여 현장에 적용하였으며 수질개선 효과를 검증하였다. 본 연구에서 도출된 수질개선 효과는 농촌지역에 적용 가능한 여러 가지 생태공학적인 기법들과의 비교를 통해 경제적 타당성을 평가하였으며, 최종적으로 부착조류시스템의 효율적 운영을 위한 방안과 다른 공법과의 연계적용성을 검토하였다.

본 연구에서 나타난 결과의 결론을 요약하면 다음과 같다.

1. 본 연구에서 이용된 5~15cm/s의 유속범위에서, 사상성 부착조류의 성장은 유속이 빠른 조건에서 높은 성장률을 보였고 사용된 매질에 있어서는 부유물질의 농도가 낮은 실내수로 조건에서는 물 흐름 방향에 대해 수직으로 설치한 자연섬유망과 철망이 흐름방향과 수평으로 설치하였던 자갈과 타일에 비해 높은 성장량을 나타냄으로써 매질의 종류보다는 매질의 설치 방향이 중요한 것으로 판단되었다. 매질의 망목의 크기는 부착조류의 성장이 상대적으로 빠른 조건에서는 망목의 크기가 큰 것이 사상성부착조류의 부착과 성장에 유리한 반면, 유입수 내에 매질의 폐색을 야기할 수 있는 부유물질량이 적거나 상대적으로 겨울철과 같이 부착조류의 성장이 느린 시기에는 망목의 크기가 작은 것이 성장에 유리하게 나타나 부착조류 시스템에서의 매질과 망목의 크기 그리고 설치방향은 수로의 통수기능과 부착조류의 성장을 위해서 매우 중요하며 환경과 조건에 따라 유동적으로 설치할 필요가 있다.
2. 서로 다른 환경에서 재질과 망목의 크기가 다른 매질을 적용하여 실험한 결과를 토대로 할 때, 환경에 따른 매질 선택 시 다음과 같이 고려할 수 있다.
 - 가. 자연섬유망이나 망목의 크기가 작은 매질 - 순환수로와 Pilot 실험에서 비교적 생물량이 적은시기와 흐름이 저해 받지 않는 환경에 적합한 것으로 나타났다. 부

유물질 량이 적고 부착조류의 성장이 영양염에 의해 제한되는 장소나 부착조류의 성장이 느린 시기에 적용할 수 있다.

나. 망목의 크기가 큰 매질 - 자연섬유망이나 망목의 크기가 작은 매질이 적용되는 환경보다는 상대적으로 영양염이 풍부하여 조류 성장이 영양염에 의해 제한받지 않으나, 부유물질이 유입되거나 조류나 생물막에 의해 망목이 폐색되어 흐름이 저해 받을 수 있는 장소에 적용을 고려할 수 있다.

3. 담수환경에서 일반적으로 조류의 제한영양염으로 나타나는 인 농도와 사상성 부착조류의 성장에 대한 현장실험의 결과에서는 인 농도가 높아질수록 사상성 부착조류의 성장율이 높게 나타났다. 실험을 위해 조성된 인 농도 범위 내에서(0.05~1.0mg/l) 농촌지역 수로나 농경지에서 주로 발견되는 부착조류 종간의 인 농도에 따른 성장률은 비교적 낮은 농도인 0.05mg/l 와 0.1mg/l 에서는 *Spriogyra* 종이 높았으며, 0.1mg/l 이상의 인 농도에서는 *Rhizoclonium* 종이 높은 성장을 보였다. 그러나 인의 제거능력에 있어서는 *Spriogyra* sp.가 높은 인 농도범위에서 가장 높게 나타나 수중 내 인 제거에 있어서 적합한 종으로 나타났다. 그러나 자연계에서 한 종만이 매질에 부착하여 매트나 군체를 이루는 경우는 거의 없고, 아무리 영양염 흡수능이 뛰어난 종이라 할지라도 해당 환경에서 잘 성장하지 못하면 의미가 없으므로 이들의 성장에 미치는 환경요인이나 조건들도 중요하게 고려되어야 한다. 따라서 일반적으로 오염하천이나 농지주변에서 발견되는 부착조류는 모두 활용가능성이 있다고 판단된다.

4. 본 연구에서 이용된 서로 다른 유속 조건하에서 부착조류가 성장하는 동안 수체로부터의 영양염 제거율은 유속이 빠를수록 높았다. 고 농도의 유입수를 이용한 Pilot 수로에서는 10, 15cm/s의 유속 조건에서의 영양염 제거율이 5cm/s의 유속에서보다 높았고, 부유성고형물(SS), 질산염(NO₃-N), 총인(TP), 용존성무기인(DIP)에 대한 제거효과가 높게 나타났다. 매질에 따른 영양염의 제거율은 사상성 부착조류의 성장이 좋았던 20mm 망목 철망에서 가장 높게 나타났다. 유속과 매질에 따른 영양염 제거율은 결과적으로 생물량과 관련이 있는 것으로 생물량과 영양염 제거효율과의 관계에서 인과 부유물질 농도는 생물량 증가에 따라 효율이 증가하였지만, 생물량에 따른 질

소 제거효율의 증가는 관찰되지 않았고 단위면적당 생물량에 대한 제거율 또한 모든 수질항목에서 생물량 증가에 따라 감소하는 경향을 보였다. 결과적으로 높은 생물량은 일정범위에서 유속이 빠를수록 유지되며, 부착조류에 의한 영양염 제거효과는 반드시 높은 생물량을 필요로 하는 것이 아니기 때문에, 효율적인 시스템을 운영은 생물량의 증가를 위해서는 어느 정도 빠른 유속이 필요하나 영양염 제거효과를 최대한으로 유지시키기 위해서는 부착조류의 생물량을 적절하게 조절할 필요가 있음이 제시되었다. 또한 수로 내 유속은 시스템 관리의 한 방법으로 운영될 수 있어, 최적의 시스템운영을 위해 주기적으로 유속을 모니터링을 하면서 유속 감소시 생물을 수확하여 적정 유속으로 조절하는 등의 관리방안이 필요하다.

5. 농배수로나 소하천에 적용 가능한 자연정화방법과 부착조류시스템과의 경제적 타당성에 대한 검토는 설치면적, 제거효율측면에서 이루어졌다. 부착조류시스템의 설치면적은 실제 매질의 표면적을 비교할 수 있는 끈상접촉여재수로 내 접촉여재의 표면적 567m²(초사천)과 283.7m²(황산천)과 비교해 매우 적은 면적이 소요됨으로써 설치면적에 있어 경제적 우위를 보였다. 영양염 제거효율 측면에서는 비교적 넓은 면적의 부지를 요구하는 습지에서 질소와 인이 각각 0.1gN/m²/d, -0.5gP/m²/d이었고, 하천정화공법인 복합접촉산화수로나 끈상접촉여재수로의 경우 질소 제거율은 없었고 인 제거율은 각각 0.1과 0.6gP/m²/d 이었던 반면에 부착조류시스템에서는 TN 2.0gN/m²/d, TP 0.3gP/m²/d로 나타나 비교적 적은 면적에서 높은 제거효율을 보임에 따라 타공법과의 효율적 측면에서 경제적 타당성이 제시되었다.
6. 자연정화공법 중에서 비교적 유사한 공법으로 간주할 수 있는 수생식물과 사상성부착조류의 영양염 제거효율을 비교 할 때, 환경조건이 서로 다른 상황이지만 현장수로에 적용된 사상성 부착조류에 의한 수질정화 효율이 수생식물에 의한 영양염 제거율보다 월등히 높은 것으로 나타났다. 비교적 적은 면적에도 불구하고 높은 생물량을 유지할 수 있으며, 상대적으로 수생식물에 비해 짧은 세대교번주기도 부착조류시스템의 장점으로 평가 할 수 있다.
7. 부착조류시스템의 적절한 운영을 위해서는 생물량에 대한 조절이 필요하며, 이를 위

해 시스템으로부터 수확된 생물에 대한 처리방안 역시 고려되어야 한다. 부착조류는 인과 질소가 풍부하고 구조적으로 부드럽기 때문에 특별한 퇴비화 과정을 거치지 않고 그대로 인근 농지에 비료로 이용하거나, 주변에 환원할 수 있는 농지가 없는 경우에는, 수로주변에 식생대를 조성한 후 그곳에 매립하여 식물들이 성장하면서 영양분으로 이용할 수 있다. 적절한 가공과정을 거친다면 사료로 이용할 가능성도 있을 것으로 판단되어 향후 검토가 필요한 부분이다.

8. 여름철 집중강우 시에는 농경지로부터 많은 토사유입과 유량, 유속 증가에 따른 부착조류의 탈리, 부유물질 흡착 등으로 인해 부착조류의 성장억제 및 수로의 통수기능 억제 등의 문제점이 제기될 수 있다. 이러한 시기를 위해 부착매질 구조를 움직일 수 있도록 설계(한쪽 만 고정)하여 특정 유속 이상에서는 열리도록 하여 물의 흐름에 제한을 주지 않고 또한 구조물이 유실되는 것을 방지하는 방안도 고려할 필요가 있다. 한편으로 이 경우 매질을 움직일 수 있는 구조로 설계하여 수로 바닥에 설치하는 것도 고려할 만 하다. 수로 부근에 추가적으로 통수용 수로를 건설하는 것도 운영방안이 될 수 있다.

9. 연 중 유량이 유지되기 어려운 농업용 수로에서 부착조류시스템의 운영을 위한 유입수량 확보방안으로 습지와 연계된 공법을 검토하였다. 사상성부착조류의 영양물질 흡수능은 습지 내 식물에 비해 매우 높고, 습지 식물의 경우 단지 뿌리에 의존하여 영양염을 흡수하는 반면 부착조류는 비록 생물량은 수생식물에 비해 작으나 생물량에 대한 인 흡수 면적이 넓고 성장률이 빠르기 때문에 습지 내외부에서 유입되는 영양물질을 효과적으로 제거할 수 있으므로 수질정화효과를 극대화 할 수 있다. 시설의 운영과 관리적인 측면에서도 부착조류의 성장을 저해할 수 있는 부유물질이 습지에서 대부분 제거되기 때문에 부유물질에 의한 탈리를 감소시킬 수 있으며 연 중 유량이 유지되어 시설을 가동할 수 있다는 점에서 매우 유리한 것으로 판단되었다.

참고문헌

여 백

참 고 문 헌

- 강원대 환경문제 연구소. 1997. 제 2회 한·일 지방간 생태공학적 수질개선공법에 관한 심포지엄 논문집.
- 건설기술연구원. 1997. 일산호의 최적 수질관리연구.
- 공동수, 천세억, 규재근. 1996. 대형수생식물 및 부작조류를 이용한 효수질정화 및 수확물의 재이용. 한·일 지방간 생태공학적 수질개선 공법에 관한 심포지엄 논문집. 115-154.
- 공동수. 1998. 수변환경의 보전과 복원을 위한 제 1회 군포시 환경포럼. p85-115. 군포시 범시민 환경대책협의회.
- 공동수, 천세억. 1999. 인공수로내 사상성 부작조류의 증식속도 및 영양물질 제거능. 한국육수학회지, **32** : 217-232.
- 군포시. 1997. 군포시 하천정화 연구사업 보고서. 효성 T&C 바이오텍 사업부.
- 권순국. 1998. 우리나라 비점원 수질오염 관리의 문제점과 개선방안. 대한환경공학회지. **20**: 1497-1510.
- 김맹기, 김종원, 이학영. 1992. 양산천의 부작조류군집에 대한 연구. 한국생태학회지 **7**: 158-169.
- 김범철, 최광순, 심수용. 1997. 비점오염원으로부터의 인의 홍수유출. 하천,호수의 수질보전과 유역관리에 관한 한일 공동 세미나 논문집. 167-177 강원대학교 환경연구소.
- 김복영, 이상규, 권장식, 소규호, 윤근호. 1991. 부레옥잠에 의한 생활오수의 정화효과. 한국환경농 학회지, **7** :111-116.
- 김선주. 2003. 생명의 물 살리기 운동정책심포지엄. pp38-42. 환경정의시민연대 생명의물 살리기 운동본부.
- 김을배. 1978. 천지천산 부작조류의 현존량과 그 회전속도에 대하여. 한국육수학회지 **8** :1-6.
- 김완중, 김영철. 2000. 사상성 조류메트공법을 이용한 농어촌 소하천수의 영양염 제거특성에 관한 연구. 한국물환경학회지 **16**: 335-344.
- 농림부 농어촌진흥공사. 1999. 농촌용수수요량 조사 보고서.

- 농림부 농어촌진흥공사. 1999. 습지의 특성 및 관리대책연구(IV).
- 농림부 농업기반공사. 2000. 농업용수 수질개선 시험사업보고서
- 농림부 농업기반공사. 2001. 농업용수 수질측정망 조사 보고서.
- 농림부 농업기반공사. 2002. 농업용수 수질측정망 조사보고서
- 농림부 농업기반공사. 2002. 농업용수 수질오염이 벼생육에 미치는 영향연구 (I).
- 농촌환경기술연구소. 2000. 농촌환경정비의 과학. p.255.
- 류재근, 정명숙, 박혜경, 황순진. 2002. 환경생태공학. 도서출판 그루.
- 변종영, 김문규, 이종식. 1985. 수생식물을 이용한 수질오염원 제거에 관한 연구. 제 1보, 부레옥잠의 유기물제거 효과 및 생장에 미치는 제한요인. 한국잡초학회지, 5: 143-148.
- 신재기, 조경재. 1998. 대청천에서 부착조류의 1차 생산성. 한국육수학회지 31:294-302.
- 심수용. 1998. 우리나라의 비료와 사료에 기인하는 비점오염원의 질소, 인 배출량. 강원대학교 이학석사논문.
- 이정호, 김형재. 1996. 낙동강 수계 댐호의 부착규조 및 영양단계 평가. 환경생물학회지 14: 18-28.
- 안윤주, 공동수. 1995. 생이가래를 이용한 영양물질의 제거방안 연구. 대한환경공학회지, 18: 593-603.
- 유재근, 정명숙, 박혜경, 황순진. 2002. 환경생태공학. p. 42.
- 윤춘경, 권대영, 우선호. 1999. 오수처리용 인공습지내의 토양의 이황락적 특성 조사. 한국농촌계획학회 5: 24-30.
- 윤춘경, 권순국, 함종화, 노재경. 2000. 인공습지 오수처리시설의 처리성능에 관한 연구. 한국농공학회지 42: 96-105.
- 이인선, 이종빈, 정연태, 김백호, 최민규, 1996. 수질오염 판정을 위한 기법 개발(I). 부착조류 군체화에 미치는 기질특이성 연구. 환경생물학회지 14: 95-111
- 정부합동. 1998. 팔당호 등 한강수계 상수원 수질관리 특별종합대책: 맑은 한강- 새천년의 대계
- 조경재. 1994. 인공기질을 이용한 부착조류 조사. 한국육수학회지 27: 47-57
- 하경, 박성배, 김현우, 김진수, 주기재. 1997. 부산·경상남도의 상류하천의 물리·화학적 특성과 부착조류 생체량의 분포. 한국육수학회지. 30: 393-403
- 환경부. 1997. 환경백서

- 황순진, 공동수. 1999. 습지의 인 Sink 기능에 영향을 미치는 생물학적 요인들. 한국육수학회지 32: 79-91
- 황순진. 1998. 수질관리를 위한 생태학적 접근방안. 경기21세기 7/8월호. pp. 77-95. 경기개발연구원.
- 황순진. 2002. 생태공학의 이해와 전망 (I). 한국농공학회지 44(3): 33~47.
- 황순진. 2002. 생태공학의 이해와 전망 (II). 한국농공학회지 44(4): 3~17.
- Aizaki, M. 1978. Seasonal changes in standing crop and production of periphyton in the Tamagawa River. *Jap. J. Ecol.* 28:123-134.
- Aizaki, M. 1979. Growth rate of microorganisms in a periphyton community. *Jap. J. Limnol.* 40: 10-19.
- Aizaki, M. 1980. Changes in standing crop and photosynthetic rate attendant on the film development of periphyton in a shallow eutrophic river, *Jap. J. Limnol.* 41: 225-234.
- Amblard, C., Couture, P. & Bourdier, G. 1990. Effects of pulp and paper mill effluent on the structure and metabolism of periphytic algae in experimental streams. *Aquat. Toxicol.* 18: 137-62.
- Auer, M. T. and R. P. Canale. 1982. Ecological studies and mathematical modeling of *Cladophora* in Lake Huron. 2. The dependence of growth rates on internal phosphorus pool size. *J. Great Lakes Res.* 8: 93-99.
- APHA, AWWA, and WEF. 1995. Standard methods for the examination of water and wastewater, 19th ed., APHA-AWWA-WEF, Washington, D. C., USA.
- Bjork-Ramberg, S. 1985. Uptake of phosphate and inorganic nitrogen by a sediment-algal system in a subarctic lake. *Freshwater Biology* 15: 175-183.
- Blindow, I. 1987. The composition and density of epiphyton on several species of submerged macrophytes-the neutral substrate hypothesis tested. *Aquat. bot.* 29: 157-68.
- Borchardt, M. A. 1996. Nutrients. *In: Algal Ecology-Freshwater and benthic ecosystems* (Stevenson, R.J., M.L. Bothwell, and R.L. Rowe, eds.). pp. 183-227. Academic Press, New York.

- Bothwell, M. L. 1985. Phosphate limitation of lotic periphyton growth rates: an intersite comparison using continuous-flow troughs (Thompson River system, British Columbia). *Limnol. Oceanogr.* **30**: 527-542.
- Brown, H. D. 1976. A comparison of the attached algae communities of a natural and an artificial substrate. *J. Phycol.* **12**: 301-6.
- Carlson, R. E. 1997. A trophic state index for lakes. *Limnol. Oceanogr.* **22**: 361-369.
- Cattaneo, A. 1979. Primary production of algae growing on natural and artificial macrophytes in Lake Memphremagog (Que. & Vt.). *Hydrobiologia* **60**: 135-44.
- Choi, J.S. and J. Chung. 1990. An assessment of water quality by epilithic diatoms of Nachun water system. *Kor. J. Phycol.* **5**: 173-191.
- Cronk, J. K., and Mitsch, W. J. 1994a. Periphyton productivity on artificial and natural surfaces in constructed freshwater wetlands under different hydrologic regimes. *Aquat. Bot.* **48**: 325-341.
- Davis, L. S., Hoffmann, J. P. & Cook, P. W. 1990. Production and nutrient accumulation by periphyton in a wastewater treatment facility. *J. Phycol.* **26**: 617-623.
- Elwood, J. W. & Nelson, D. J. 1972. Periphyton production and grazing rates in a stream measured with a ³²P material balance method. *Oikos* **23**: 295-303.
- Eminson, D. & Moss, B. 1980. The composition and ecology of periphyton communities in freshwaters. I. The influence of host type and external environment on community composition. *Br. Phyco. J.* **15**: 429-46.
- EPA. 1990. The Lake and Reservoir Restoration Guidance Manual. pp. 130-133. EPA-440/4-90-006. U.S. Environmental Protection Agency. Washington, D.C. USA.
- Etnier, C. and B. Guterstam (Ed.). 1996. Ecological Engineering for Wastewater Treatment (2nd Ed.). CRC Lewis Publishers. Boca Raton, Florida.
- Geankoplis, C. J. 1972. Mass Transport Phenomena. Holt Reinhart and Winston, New York.
- Goldsborough, L. G. & Hickman M. 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.
- Goldsborough, L. G., Robinson, G. G. C. & Gurney, S. E. 1986. An enclosure substratum system for *in situ* ecological studies of periphyton. *Arch. Hydrobiol.* **106**: 373-93.
- Grady, C. P. L., and H. C. Lin, 1980. Biological Wastewater Treatment. Marcel Dekker, Inc., New York.
- Horner R. R., and E. B. Welch. 1981. Stream periphyton development in relation to current velocity and nutrients. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences* **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. *Periphyton of freshwater Ecosystems*. pp. 121-134. (Ed. R. G. Wetzel) Dr w. Junk Publishers, The Hague.
- Horner R. R., E. B. Welch, M. R. Seeley, and J. M. Jacoby. 1990. Responses of periphyton to changes in current velocity, suspended sediment and phosphorus concentration. *Freshwater biology* **24**: 215-232.
- Hutchinson, G. E. 1961. The paradox of plankton. *Am. Nat.* **95**: 137-146.
- 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.
- Jan Vymazal. (1988). The use of periphyton communities for nutrient removal from polluted streams. *Hydrobiologia.* **166**: 225-237.
- Jordan, W. R., M. E. Gilpin, and J. D. Arber. 1987. Restoration ecology: A synthetic approach to ecological research. Cambridge Univ. Press. Cambridge.
- Jorgensen, S. E. and W. Mitsch. 1989. Ecological Engineering Principles. In W. Mitsch and S.E. Jorgensen. ed. *Ecological Engineering: An Introduction to ecotechnology*. John Wiley & Sons. New York. pp 21-55.
- Kevern, N. R., Wilhm, J. L. & Van Dyne, G. M. 1966. Use of artificial substrata to estimate the productivity of periphyton. *Limnol. Oceanogr.* **11**: 499-502

- Lock, M. A. 1979. The effect of flow patterns on uptake of phosphorus by river periphyton. *Limnology and Oceanography* **24**: 376-383.
- 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.
- Ma, S. 1985. Ecological engineering: application of ecosystem principles. *Environmental Conservation* **12**: 331- 335.
- Marker, A. F. H., 1972. The use of acetone and methanol in the estimation of chlorophyll in the presence of phaeophytin. *Freshwaer Bio.* **2**: 361-385.
- Matena, J., V. Vyhnalek, and K. Simek. 1994. Food web management. pp.97-102. In: M. Eiseltova (ed.) Restoration of lake Ecosystems. IWRB Publication. UK.
- McIntire, C. D. 1966. Some effects of current velocity on periphyton communities in laboratory streams. *Hydrobiologia*, **27**: 559-70.
- McIntire, C. D. 1973. Periphyton dynamics in laboratory streams: a simulation model and its implications. *Ecol. Monogr.* **43**: 399-420.
- Mitsch, W. J. and J. G. Gosselink. 1986. Wetlands. Van Nostrand Reinhold, N York. p.537.
- Mitsch, W. and S.R. Jorgensen. 1989. Ecological engineering: An introduction to ecotechnology. John Wiley & Sons. New York. p.472.
- Muller, G., J. Sartoris, K. Nakamura, and J. Boutwell. 1996. Ukishima, floating islands, or schwimmkampen Lakeline vol. 16, No. 3.
- Muller, P. (1980). Effects of artificial acidification on the growth of periphyton. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.* **37**: 355-63.
- Muscutt, A. D., G. L. Harris, S. W. Bailey, and D. B. Davids. 1993. Buffer zones to improve water quality: a review of their potential use in UK agriculture. *Agriculture, Ecosystems and Environment* **45**: 59-77.
- Novotny, V. and Chesters, G. Handbook of Nonpoint Pollution sources and Management, Van Nostrand Reinhold, 1981.
- Odum, H. T. 1962. Man in the ecosystem. In Proceedings Lockwood Conference on the

- Suburban Forest and Ecology. Bull. Conn. Agr. Station 652. Storrs, CT, pp.57-75.
- Odum, H. T. 1971. Environment, Power and Society. Wiley, New York, p.331.
- Odum, H. T. 1989. Ecological Engineering and self organization. In W. Mitsch and S.E. Jorgensen. eds. Ecological engineering: An introduction to ecotechnology. John Wiley & Sons. New York. pp. 70-101.
- Odum, H. T., W.L. Siler, R.J. Beyers, and N. Armstrong. 1963. Experiments with engineering of marine ecosystems. Publ. Inst. Marine. Sci. Uni. Texas 9: 374-4-3.
- Okada, M. and R. Sudo. 1984. Submerged filter streams as applied to gray water treatment. Res. Rep. *Nat'l. Environ. Stud.* 55.
- Phinney, H. K. & McIntire, C. D. 1965. Effect of temperatures on metabolism of periphyton communities developed in laboratory streams. *Limnol. Oceanogr.* 10: 341-344
- Reddy, K. R., G. A. O'Connor, and C. L. Schelke. 1997. Phosphorus biogeochemistry in subtropical ecosystems. Lewis Publishers, Boca Raton, FL. p.707.
- Rekolainen, S., M. Posch, and E. Turtola. 1993. Mitigation of agricultural water pollution in Finland: an evaluation of management practices. *Wat. Sci. Tech.* 28: 529-538.
- Richard R. Horner, Eugene B, Welch, Marguerite R. Seeley and Jean M. Jacoby. 1990. Responses of periphyton to changes in current velocity, suspended sediment and phosphorus concentration. *Freshwater Biology* 24: 215-232.
- Sand-Jensen. K. & Sondergaard, M. 1981. Phytoplankton and epiphyte development and their shading effect on submerged macrophytes in lakes of different nutrient status. *Int. Revueges. Hydrobiol.* 66: 529-552.
- Shapiro, J., V. Lamarra, and M. Lynch. 1975. Biomanipulation: An ecosystem approach to lake restoration. p85-96. In: P.L. Brezonik and J.L. Fox (eds.) Symposium on Water Quality Management and Biological Control. Univ. Florida, Gainesville.
- Steinman, A. D., E. H., Meeker, A. J. Rodusky, W.P. Davis, and C.D. McIntire. 1997. Spatial and temporal distribution of algal biomass in a large, subtropical lake.

- Arch. Hydrobiol.* **139**: 29-50.
- Stevenson, R. J. 1983. Effects of current and conditions simulating autogenically changing microhabitats on benthic diatom immigration. *Ecology* **64**: 1514-1281.
- Stowell, R., R. Ludwig, J. Colt and G. Tchobanoglous. 1980. Toward the rational design of aquatic treatment systems. Presented at the American Society of Civil Engineers Spring Convention, Portland, Oregon 43.
- Straskaraba, M. 1984. New ways of eutrophication abatement. In M. Straskaraba, Z. Brandl, and P. Procalova, eds. Hydrobiology and water quality of reservoirs. *Acad. Sci. Ceske Budejovice, Czechoslovakia*, pp. 37-45.
- Tchobanoglous, G. 1987. Aquatic plant system for wastewater treatment engineering considerations, pp.27-48. In : Aquatic plants for water treatment and resource recovery (Reddy, K. R. and W. H. Smith, eds). Magonlia Publishing Inc. Orlando, Florida.
- Thomas, D. Fontaine, III and David G. Nigh. 1990. Characteristics of epiphyte communities on natural and artificial submersed lotic plants: Substrate effects. *Arch. Hydrobiol.* **3**: 293-301.
- Tuchmann, M. L. & Stevenson, R. J. 1980. Comparison of attached algal communities on natural and artificial substrata along a thermal gradient. *Br. Phycol. J.* **14**: 243-54.
- Tchobanoglous, G. 1987. Aquatic plant system for wastewater treatment engineering considerations, pp.27-48. In : Aquatic plants for water treatment and resource recovery (Reddy, K.R. and W.H. Smith, eds). Magonlia Publishing Inc. Orlando, Florida.
- van Dunne, J. M.(Ed.) 1996. Non-point source river pollution. The case of the River Meuse. Kluwer Law International, London. p.245.
- Vollenweider, R. A. 1968. Water Management Research; Scientific Fundamentals of the Eutrophication of Lakes and Flowing Waters, with particular reference to Nitrogen and Phosphorus as factors in Eutrophication. OECD, Paris, Technical Report DAS/CSI/68. 27.

- Vymazal, J. 1988. The use of periphyton communities for nutrient removal from polluted streams. *Hydrobiologia*. **166**: 225-237
- Whittford, L. A. G. J. Schumacher, 1961. Effect of current on mineral uptake and respiration of freshwater algae. *Limnol. Oceanogr.* **6**: 423-425.
- Whittford, L. A. & Schumacher, G. H. 1964. Effect of current on respiration and mineral uptake in *Spirogyra* and *Oedogonium*. *Ecology* **45**: 168-170.
- Whittford, L. A. 1960. The current effect and growth of freshwater algae. *Trans. Am. micr. Soc.* **79**: 302-309.
- Yoon, C .G., S. K. Kwun, and J. H. Ham. 2001. Feasibility study of a constructed wetland for sewage treatment in a Korean rural community. *J. Envi. Health* **36**: 1101-1112.

여 백

== 附 錄 ==

여 백

수질 및 생물량 분석자료

< 단위 면적당 사상성 부착조류 생물량 >

1. Pilot 수로 (November, 2000)

Time (days)	Mesh size (mm)	Dry	chlorophyll	P in Cell	N in Cell	DW /Chl. <i>a</i>	P/Chl. <i>a</i>	N/Chl. <i>a</i>
		Weight	<i>a</i>					
		g/m ²	mg/m ²	mg/m ²	mg/m ²	mg/mg	mg/mg	mg/mg
8	10	61.4	0.98	0.74	1.00	62.7	0.76	1.02
	20	40.2	0.62	0.69	0.80	64.8	1.11	1.29
12	10	83.1	0.97	1.05	1.02	85.7	1.08	1.05
	20	52.2	0.96	0.62	0.68	54.4	0.65	0.71
15	10	136.0	1.54	1.75	2.06	88.3	1.14	1.34
	20	81.9	1.07	1.12	1.37	76.5	1.05	1.28
20	10	189.6	1.18	1.72	2.70	160.7	1.46	2.29
	20	184.5	3.73	1.97	2.80	54.75	0.58	0.83

2. Pilot 수로 (February, 2001)

Time (days)	Mesh size (mm)	Dry	chlorophyll	P in Cell	N in Cell	DW /Chl. <i>a</i>	P/Chl. <i>a</i>	N/Chl. <i>a</i>
		Weight	<i>a</i>					
		g/m ²	g/m ²	g/m ²	g/m ²	g/g	g/g	g/g
4	10	24.0	0.13	0.07	0.29	184.6	0.54	2.23
	20	8.9	0.14	0.05	0.11	63.6	0.36	0.79
9	10	23.0	0.08	0.03	0.13	287.5	0.38	1.63
	20	14.9	0.12	0.08	0.14	124.2	0.67	1.17
14	10	19.3	0.15	0.06	0.28	128.7	0.40	1.87
	20	18.0	0.19	0.11	0.28	94.7	0.58	1.47
16	10	55.6	0.47	0.06	0.78	118.3	0.13	1.66
	20	35.5	0.34	0.12	0.45	104.4	0.35	1.32

3. Pilot 수료 (March, 2001)

Incubation Time (day)	Water Velocity (cm/s)	Standing Crop						
		Dry Weight	Chlorophyll <i>a</i>	P in Cell	N in Cell	DW /Chl. <i>a</i>	P/Chl. <i>a</i>	N/Chl. <i>a</i>
		g/m ²	g/m ²	g/m ²	g/m ²	g/g	g/g	g/g
2	5	65.6	0.8	0.3	1.0	80.7	0.35	1.20
	10	126.5	1.4	0.7	1.6	91.0	0.47	1.13
	15	117.4	1.9	0.6	1.4	61.4	0.29	0.70
4	5	147.4	2.8	0.8	2.8	52.1	0.28	0.98
	10	293.0	10.1	1.4	5.4	29.1	0.14	0.54
	15	232.3	6.3	1.1	3.8	37.2	0.18	0.61
6	5	162.6	3.2	0.7	1.6	51.6	0.22	0.52
	10	370.1	10.8	1.1	3.7	34.1	0.10	0.34
	15	283.1	10.8	1.3	2.8	26.3	0.12	0.26
8	5	172.8	5.2	0.8	2.8	33.2	0.16	0.54
	10	460.8	11.9	2.0	8.1	38.6	0.17	0.68
	15	343.6	12.7	1.6	5.8	27.0	0.13	0.45
10	5	186.3	2.6	0.8	1.4	70.4	0.32	0.51
	10	572.0	25.3	2.4	5.0	22.6	0.10	0.20
	15	434.1	19.9	2.1	4.7	21.8	0.10	0.24

4. Pilot 수로 (July, 2001)

Incubation Time (day)	Velocity (cm/s)	DW	Chl. <i>a</i>	N in Cell	P in Cell	DW /Chl. <i>a</i>	N/Chl. <i>a</i>	P/Chl. <i>a</i>
		g/m ³	mg/m ³	mg/m ³	mg/m ³	mg/mg	mg/mg	mg/mg
1	5	4.3	11.0	47.6	33.3	390.9	4.33	3.03
	10	6.1	19.6	80.9	50.9	311.2	4.13	2.60
	15	10.0	23.6	123.7	77.1	423.7	5.24	3.27
2	5	15.4	56.9	164.8	168.4	270.7	2.90	2.96
	10	43.8	91.9	471.3	354.0	476.6	5.13	3.85
	15	41.8	98.6	537.7	306.8	423.9	5.45	3.11
3	5	17.1	42.0	378.8	193.8	407.1	9.02	4.61
	10	66.7	201.1	1197.2	621.2	331.7	5.95	3.09
	15	45.1	162.7	860.1	442.8	277.2	5.25	3.11
4	5	17.9	48.3	294.7	234.9	370.6	6.10	4.86
	10	81.9	283.9	1409.9	690.7	288.5	4.97	2.43
	15	68.0	184.2	1283.7	710.2	369.2	6.67	3.86
5	5	10.0	23.1	107.2	86.2	432.9	4.46	3.73
	10	68.8	210.0	1146.2	541.4	327.6	5.46	2.58
	15	66.1	177.3	1251.6	557.0	372.8	7.06	3.14
6	5	4.3	9.4	61.7	29.3	457.4	6.56	3.12
	10	19.3	69.3	299.8	170.0	278.5	4.33	2.45
	15	18.0	48.8	299.5	184.8	368.9	6.14	3.79

5. 실내 순환수로 (August, 2001)

Incubation Time (day)	Mesh	DW	Chl. <i>a</i>	N in Cell	P in Cell	DW /Chl. <i>a</i>	N/Chl. <i>a</i>	P/Chl. <i>a</i>
		g/m ³	mg/m ³	mg/m ³	mg/m ³	mg/mg		
2	철망	3.0	12.5	34.0	13.4	197.4	2.24	0.88
	섬유망	7.7	38.3	102.6	33.6	201.0	2.68	0.88
	자갈	0.0						
	타이루	0.0						
4	철망	5.7	25.7	117.3	24.0	221.8	4.56	0.93
	섬유망	9.9	45.6	191.8	42.3	217.1	4.21	0.93
	자갈	0.0						
	타이루	0.0						
6	철망	7.2	35.5	120.7	30.5	202.8	3.40	0.86
	섬유망	12.3	68.4	201.7	54.2	197.8	2.95	0.79
	자갈	0.5						
	타이루	0.5						
8	철망	8.8	39.1	150.4	34.4	225.1	3.85	0.88
	섬유망	14.3	63.3	249.4	58.9	225.9	3.94	0.93
	자갈	1.5						
	타이루	1.0						

6. 농수로 (August, 2001)

Incubation Time (day)		DW	Chl. <i>a</i>	N in Cell	P in Cell	DW /Chl. <i>a</i>	N/Chl. <i>a</i>	P/Chl. <i>a</i>
		g/m ³	mg/m ³	mg/m ³	mg/m ³	mg/mg		
2	Inlet	94.0	61.0	97.1	78.9	1541.0	12.9	12.9
	Middle	28.0		27.0	23.3			
	Outlet	6.0	4.3	5.7	5.0	1395.3	13.3	11.6
5	Inlet	101.0	94.8	130.8	104.1	1065.4	13.8	11.0
	Middle	44.0	45.5	54.4	39.3	967.0	12.0	8.6
	Outlet	8.0	10.3	8.0	6.9	776.7	7.8	6.7
8	Inlet	84.0	68.5	149.5	81.2	1226.3	21.8	11.9
	Middle	14.0	11.0	23.7	13.4	1272.7	21.6	12.2
	Outlet	7.0	5.8	11.9	5.6	1206.9	20.5	9.7
11	Inlet	88.0	59.8	67.4	70.3	1471.6	11.3	11.8
	Middle	8.0	5.0	90.0	58	1600.0	18.0	11.6
	Outlet	2.0	1.3	2.3	1.4	1538.5	17.7	10.8
24	Inlet	55.4	48.7	38.8	31.4	1137.6	8.0	6.5
	Middle	3.9	3.0	2.3	2.3	1258.1	7.4	7.4
	Outlet	1.0	0.9	9.5	8.4	1111.1	10.0	9.3

7. 농수로 (October, 2001)

Incubation Time (day)	Velocity (cm/s)	DW	Chl.a	N in Cell	P in Cell	DW /Chl.a	N/Chl.a	P/Chl.a
		g/m ³	mg/m ³	mg/m ³	mg/m ³		mg/mg	
1	Inlet	23	47	443	92	489.4	9.43	1.96
	Middle	18	47	269	102	383.0	5.72	2.17
	Outlet	27	81	410	98	333.3	5.06	1.21
2	Inlet	41	36	310	155	1138.9	8.61	4.31
	Middle	26	49	344	121	530.6	7.02	2.47
	Outlet	18	15	182	72	1200.0	12.13	4.80
3	Inlet	37	98	717	155	377.6	7.32	1.58
	Middle	24	52	378	87	461.5	7.27	1.67
	Outlet	9	22	141	40	409.1	6.41	1.82
4	Inlet	30	30	375	99	1000.0	12.50	3.30
	Middle	18	37	317	85	486.5	8.57	2.30
	Outlet	15	23	237	93	652.2	10.30	4.04
5	Inlet	22	56	416	92	392.9	7.43	1.64
	Middle	10	21	213	48	476.2	10.14	2.29
	Outlet	19	37	463	72	513.5	12.51	1.95
7	Inlet	15	24	218	56	625.0	9.08	2.33
	Middle	8	15	174	51	533.3	11.60	3.40
	Outlet	11	18	239	48	611.1	13.28	2.67
10	Inlet	25	80	664	89	312.5	8.30	1.11
	Middle	4	18	86	29	222.2	4.78	1.61
	Outlet	12	51	282	74	235.3	5.53	1.45

8. Pilot 수로 (November, 2001)

Incubation Time (day)	DW	Chl.a	N in Cell	P in Cell	DW /Chl.a	N/Chl.a	P/Chl.a
	g/m ³	mg/m ³	mg/m ³	mg/m ³		mg/mg	
2	1.3	3.0	11.4	8.2	433.3	3.8	2.7
4	2.9	11.0	31.7	36.6	263.6	2.9	2.4
6	5.9	15.2	54.3	39.9	388.2	3.6	2.6
8	8.8	36.1	95.8	80.7	243.8	2.7	2.2
10	12	43.9	114.5	83.7	273.3	2.6	1.9

9. Pilot 수로 (November, 2001)

Incubation Time (day)	Mesh	DW	Chl.a	N in Cell	P in Cell	DW /Chl.a	N/Chl.a	P/Chl.a
		g/m ²	mg/m ²	mg/m ²	mg/m ²	mg/mg		
1	10mm 철망	6.5	24	84	24	270.8	3.5	1.0
	20mm 철망	7.1	30	85	27	236.7	2.8	0.9
	섬유망	6.5	9	83	23	722.2	9.2	2.6
2	10mm 철망	7.8	33	108	35	236.4	3.2	1.1
	20mm 철망	8.1	32	92	37	253.1	2.9	1.2
	섬유망	5.9	17	63	24	347.1	3.7	1.4
4	10mm 철망	9.2	20	109	42	460.0	5.5	2.1
	20mm 철망	11.6	39	152	54	297.4	3.9	1.4
	섬유망	8.0	19	91	31	421.1	4.8	1.6
5	10mm 철망	9.5	60	108	42	158.3	1.8	0.7
	20mm 철망	13.0	53	147	58	245.3	2.8	1.1
	섬유망	10.9	26	140	50	419.2	5.4	1.9
7	10mm 철망	10.6	45	106	49	235.6	2.4	1.1
	20mm 철망	13.8	35	209	64	394.3	6.0	1.8
	섬유망	9.2	20	130	40	460.0	6.5	2.0
9	10mm 철망	11.2	51	157	46	219.6	3.1	0.9
	20mm 철망	14.1	43	200	63	327.9	4.7	1.5
	섬유망	7.7	26	87	32	296.2	3.4	1.2
11	10mm 철망	11.8	48	149	53	245.8	3.1	1.1
	20mm 철망	13.4	52	198	60	257.7	3.8	1.2
	섬유망	6.0	28	87	24	214.3	3.1	0.9
13	10mm 철망	11.1	33	126	50	336.4	3.8	1.5
	20mm 철망	9.7	35	154	43	277.1	4.1	1.2
	섬유망	6.1	20	82	27	305.0	4.1	1.4

10. Pilot 수로 (March, 2002)

Time (day)	DW			Chlorophyll <i>a</i>			N in Cell			P in Cell		
	10mm	20mm	섬유망	10mm	20mm	섬유망	10mm	20mm	섬유망	10mm	20mm	섬유망
	철망	철망		철망	철망	망	철망	철망	망	철망	철망	망
	g/m ²			g/m ²			g/m ²			g/m ²		
2	25.42	11.42	17.24	0.38	0.13	0.30	0.26	0.13	0.16	0.22	0.10	0.14
4	38.61	50.97	20.26	0.49	0.78	0.24	0.47	0.66	0.18	0.32	0.41	0.18
6	124.78	178.5	49.33	2.84	3.40	1.14	1.81	2.58	0.64	1.01	1.50	0.40

	DW / Chl- <i>a</i>			N / Chl- <i>a</i>			P / Chl- <i>a</i>		
2	66.89	87.85	54.47	0.68	1.00	0.53	0.58	0.77	0.47
4	78.80	65.35	84.42	0.96	0.85	0.75	0.65	0.53	0.75
6	43.94	52.50	43.27	0.64	0.76	0.56	0.36	0.44	0.35

11. Pilot 수로 (March, 2002)

Time (days)	Dry Weight	Chl. <i>a</i>	N in Cell	P in Cell	DW / Chl. <i>a</i>	N/Chl. <i>a</i>	P/Chl. <i>a</i>
	g/m ²	g/m ²	g/m ²	g/m ²	g/g		
2	47.54	0.32	0.57	0.60	147.1	1.76	1.85
4	58.41	0.23	0.70	0.60	250.0	2.98	2.58
6	86.51	0.55	1.24	1.03	158.7	2.27	1.89
8	150.80	1.04	2.34	1.78	144.9	2.25	1.71

12. 실내 배양 실험 (April, 2001)

Incubation Time (day)	Chlorophyll. <i>a</i> (µg/l)											
	<i>Oedogonium</i>				<i>Rhizoclonium</i>				<i>Spriogyra</i>			
	0.05	0.1	0.5	1.0	0.05	0.1	0.5	1.0	0.05	0.1	0.5	1.0
	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l
0	101.3	98.7	96.1	90.9	62.3	49.4	49.4	64.9	93.5	93.5	98.7	101.3
2	123.4	188.3	155.8	129.9	32.5	52.0	38.9	84.4	128.6	150.0	142.9	188.3
4	168.8	253.3	318.2	240.3	71.4	110.4	77.9	149.4	149.4	168.8	246.8	305.2
6	172.1	282.5	373.4	470.8	84.4	94.2	217.5	318.2	230.5	253.3	327.9	331.2
8	188.3	298.7	529.2	607.1	146.1	165.6	360.4	409.1	295.5	360.4	363.6	513.0

13. 농수로 (September, 2002)

Time (days)	Dry Weight	Chl.	N in Cell	P in Cell	DW/ Chl.a	N / Chl.a	P /Chl.a
	g/m ²	mg/m ²	mg/m ²	mg/m ²		mg/mg	
1	5.61	0.09	0.09	0.01	65.96	1.07	0.13
3	7.72	0.13	0.15	0.02	58.79	1.11	0.14
4	12.71	0.16	0.21	0.03	77.16	1.30	0.17
5	30.51	0.36	0.39	0.06	88.54	1.09	0.17

<수질 측정 자료>

1. Pilot 수로 (November, 2000)

Date	SS	TN		NO ₃		TP		DIP		Temp	pH	Cond.
	mg/ℓ	mg/ℓ	STD	mg/ℓ	STD	mg/ℓ	STD	mg/ℓ	STD			uS/cm
10.28	10.0	18.4	0.28	0.5	0.01	0.4	0.01	0.23	0.01	20.0	7.60	573
11.6	8.0	27.1	0.06	2.9	0.01	1.4	0.00	0.63	0.00	19.0	7.20	544
11.10	6.3	24.4	1.19	2.1	0.02	1.2	0.02	0.61	0.00	19.0	8.10	598
11.13	5.3	27.3	1.22	4.4	0.03	2.1	0.03	1.02	0.00	18.0	7.90	559
11.15	7.0	26.9	0.32	2.8	0.04	1.0	0.00	0.48	0.00	18.0	7.40	575
11.18	5.0	22.5	0.23	2.8	0.00	0.8	0.00	0.55	0.00	17.0	7.30	557

2. Pilot 수로 (February, 2001)

Date	SS	TN		NO ₃		NO ₂		NH ₄		TP		DIP		Temp	pH	Cond
	mg/ℓ	mg/ℓ	STD	mg/ℓ	STD	mg/ℓ	STD	mg/ℓ	STD	mg/ℓ	STD	mg/ℓ	STD	℃		uS/cm
2.12	0.5	40.5	0.09	0.57	0.000	0.17		28.9	0.76	0.73	0.007	0.59	0.014	6	7.3	138
2.13	14.0	45.0	0.00	0.42	0.002	0.14	0.001	33.7	1.13	1.53	0.071	0.96	0.007	10	7.28	145
2.14	6.0	45.5	0.00	0.51	0.004	0.16	0.002	34.9	0.10	1.24	0.004	0.86	0.025	11	7.75	755
2.16	2.5	44.0	0.00	0.41	0.012	0.14	0.002	34.3	3.99	0.65	0.082	0.51	0.004	10	7.6	661
2.17	15.0	40.4	0.00	0.49	0.002	0.17	0.003	29.4	0.83	0.99	0.014	0.53	0.004	10	7.2	661
2.19	23.0	38.2	0.00	0.58	0.002	0.19	0.002	25.9	1.70	0.70	0.149	0.20	0.000	11	7.2	779
2.21	8.0	32.7	0.22	0.43	0.010	0.14	0.001	26.0	0.07	0.46	0.004	0.09	0.004	12	7.2	612
2.23	2.5	30.2	0.00	0.13	0.000	0.06	0.001	25.1	0.02	0.60	0.014	0.38	0.004	12	7.5	691
2.26	7.0	37.5	0.01	0.19	0.000	0.08	0.001	25.7	1.91	0.29	0.004	0.10	0.004	12	7.3	629
2.28	7.0	25.7	0.00	0.68	0.008	0.23	0.002	18.0	0.57	0.52	0.021	0.26	0.007	10	7.6	530

3. Pilot 수로 (April, 2001)

Date	SS	TN		NH ₄		NO ₃		NO ₂		TP		DIP		Temp	pH	Cond
	mg/ℓ	mg/ℓ	STD	mg/ℓ	STD	ug/L	STD	ug/L	STD	mg/ℓ	STD	mg/ℓ	STD	℃		μS/cm
4.18	-	31.2	0.89	28.5	0.32	27.3	9.47	53.1	0.00	0.36	0.007	0.18	0.015	18.0	7.20	707
4.19	-	32.1	0.39	24.9	0.32	19.7	1.89	48.1	0.00	0.33	0.000	0.15	0.000	19.0	7.42	704
4.20	-	31.5	0.86	30.8	0.62	21.6	7.57	46.4	0.00	0.44	0.000	0.25	0.000	19.0	7.54	713
4.22	-	26.8	4.42	25.1	0.47	17.8	3.79	31.1	0.00	0.48	0.007	0.28	0.004	19.0	7.44	695
4.24	-	35.5	2.12	34.1	0.27	19.7	13.25	62.5	0.85	0.39	0.007	0.20	0.004	19.0	7.50	658
4.26	-	30.1	0.45	27.7	1.61	15.9	5.68	56.5	0.00	0.32	0.003	0.15	0.000	19.0	7.18	626
4.28	-	31.8	0.84	28.2	0.17	17.8	0.00	52.3	0.85	0.38	0.010	0.19	0.000	-	7.46	647

4. Pilot 수로 (July, 2001)

Date	SS	TN		NH ₄		NO ₃		NO ₂		TP		DIP		Temp	pH	Cond.
	mg/l	mg/l	STD	mg/l	STD	mg/l	STD	μg/l	STD	mg/l	STD	μg/l	STD	℃		uS/cm
7.17	3.0	17.2	0.22	15.2	0.37	0.15	0.002	16.2	0.16	0.40	0.029	70.3	0.00	20.8	7.18	542
7.18	4.3	18.9	0.04	16.6	0.17	0.23	0.000	23.6	0.33	0.29	0.004	55.6	0.00	23.0	7.17	564
7.19	7.0	22.7	0.09	19.5	0.32	0.19	0.012	19.3	0.00	0.54	0.004	99.9	0.00	23.5	7.19	629
7.20	8.3	19.8	0.17	20.4	0.07	0.13	0.008	10.6	0.16	0.61	0.008	117.2	0.82	26.0	7.19	585
7.21	10.7	23.1	1.48	21.2	3.80	0.11	0.002	10.8	0.00	1.01	0.016	206.8	0.00	25.0	7.10	609
7.22	5.3	17.4	0.82	16.2	0.13	0.54	0.002	73.9	0.00	0.18	0.012	21.9	0.82	25.6	7.05	490
7.23	4.0	14.2	0.00	12.9	0.37	0.65	0.002	75.4	0.16	0.33	0.020	63.0	0.82	26.0	6.90	357

5. 농수로 (August, 2001)

Date	SS		TN		NH3		NO3		NO2		TP		DIP		Temp	pH	Cond.	DO
	mg/l	mg/l	STD	μg/l	STD	μg/l	STD	μg/l	STD	μg/l	STD	μg/l	STD	μg/l	STD	°C		μS/cm
8.20	17.5	1.7	0.02	34.3	0.41	262.6	0.00	37.8	0.00	173.5	1.64	60.8	0.00	-	-	-	-	-
8.22	15.0	1.6	0.00	12.8	1.62	97.4	1.74	10.4	0.17	155.4	1.64	42.0	0.00	27.0	9.36	-	6.5	
8.25	23.0	1.6	0.01	11.2	0.81	17.4	1.74	2.8	0.00	157.1	0.00	42.0	0.00	27.8	9.4	167.6	7.9	
8.28	26.5	1.7	0.03	20.5	4.46	7.0	5.22	3.8	0.00	155.4	0.00	41.3	0.67	27.2	9.74	160.9	8.8	
8.31	18.5	1.6	0.13	81.3	0.41	22.6	0.00	31.9	0.00	139.1	0.00	32.6	0.00	27.2	9.45	160.3	8.0	
9.13	10.7	1.5	0.00	127.9	0.00	144.3	10.43	62.1	0.00	114.1	2.32	19.1	0.00	25.8	8.93	165.4	-	

6. 농수로 (October, 2001)

Date	SS		TN		NH ₄		NO ₃		NO ₂		TP		DIP		Temp	pH	Cond.	DO	Vel.	광도
	mg/l	mg/l	STD	μg/l	STD	μg/l	STD	μg/l	STD	μg/l	STD	μg/l	STD	μg/l	STD	℃		μS/cm	mg/l	cm/s
10.08	16.5	1.38	0.04	-	-	62.6	3.35	-	-	137.0	0.78	7.9	0.00	22.0	9.15	158.5	12.40	5.8	431.3	
10.09	15.0	1.29	0.02	9.1	4.45	34.2	1.67	11.1	0.00	128.4	0.00	8.8	0.73	18.2	7.48	149.6	7.80	-	-	
10.10	20.0	1.44	0.28	117.2	1.98	199.9	0.00	43.2	0.35	140.3	0.00	23.4	2.20	17.6	7.31	119.6	8.80	-	429.0	
10.11	17.0	1.41	0.05	N.D	0.00	45.9	3.35	15.6	0.00	135.8	0.00	8.8	0.73	17.7	7.57	150.7	-	-	-	
10.12	23.0	1.34	0.10	7.1	2.47	64.3	8.37	16.3	0.35	130.5	0.76	10.3	0.73	17.3	7.90	152.4	9.40	-	161.0	
10.13	15.5	1.41	0.03	3.1	3.46	40.9	1.67	14.5	0.35	127.4	0.76	8.1	0.00	16.8	7.25	148.6	8.67	-	123.3	
10.15	12.5	1.44	0.31	65.4	2.46	69.3	3.35	9.7	0.18	111.1	1.51	10.9	1.47	17.2	7.61	153.2	8.47	5.4	253.0	
10.18	11.0	1.41	0.26	81.2	4.43	67.6	1.67	9.3	0.18	98.3	0.75	8.7	0.73	14.7	7.42	144.7	8.65	-	-	
10.22	13.5	1.65	0.00	65.9	0.00	47.0	0.00	7.2	0.18	97.6	0.00	6.5	0.00	16.1	7.31	153.4	7.09	-	-	

7. Pilot 수로 (November, 2001)

Date	SS		TN		NH ₄		NO ₃		NO ₂		TP		DIP		Temp	pH	Cond.	DO	Vel.
	mg/ℓ	mg/ℓ	STD	mg/ℓ	STD	mg/ℓ	STD	μg/ℓ	STD	mg/ℓ	STD	mg/ℓ	STD	℃		uS/cm	mg/ℓ	cm/s	
11.06	4.8	25.0	0.03	23.8	0.00	1.09	0.00	128.0	6.50	0.47	0.01	0.47	0.01	19.3	7.18	614	-	10	
11.07	5.3	27.5	0.00	26.9	0.20	1.58	0.02	185.7	0.50	0.59	0.01	0.52	0.01	18.6	7.17	608	6.11	10	
11.09	5.0	24.3	0.93	18.5	0.80	1.50	0.01	169.9	1.25	0.78	0.01	0.78	0.00	18.7	7.13	605	5.54	10	
11.11	4.2	25.2	0.00	23.4	0.00	1.98	0.01	264.4	0.25	1.11	0.00	1.17	0.02	18.4	6.98	616	5.20	10	
11.12	5.2	27.3	0.65	24.5	2.19	2.11	0.01	245.6	1.25	1.62	0.02	1.28	0.00	17.9	6.98	589	5.50	10	
11.14	5.5	26.7	0.11	25.2	0.52	1.73	0.00	165.3	1.25	1.06	0.00	0.82	0.01	17.5	7.00	597	5.05	10	

8. Pilot 수로 (November, 2001)

Date	SS		TN		NH ₄		NO ₃		NO ₂		TP		DIP		Temp	pH	Cond.	DO	Vel.
	mg/ℓ	mg/ℓ	mg/ℓ	STD	mg/ℓ	STD	mg/ℓ	STD	μg/ℓ	STD	mg/ℓ	STD	mg/ℓ	STD	℃		μS/cm	mg/ℓ	cm/s
11.14	5.5	26.7	0.11	24.7	0.00	1.78	0.01	177.2	0.71	1.06	0.00	0.82	0.01						
11.15	6.0	27.6	0.28	24.7	0.15	1.82	0.03	176.7	0.18	0.97	0.02	0.69	0.01	17.0	7.04	606	5.34	10	
11.16	6.0	26.5	0.79	20.8	0.07	1.41	0.04	138.5	0.18	1.25	0.16	1.09	0.00	17.0	7.05	618	5.48	10	
11.18	7.0	26.8	0.00	15.0	0.45	1.28	0.00	122.5	1.24	0.70	0.06	0.47	0.00	16.7	7.04	712	4.90	10	
11.19	6.0	28.5	0.56	21.3	2.02	1.49	0.00	142.4	1.24	1.17	0.12	0.98	0.01	16.7	7.18	690	5.47	10	
11.21	6.0	28.4	0.98	24.3	0.94	1.18	0.02	114.7	0.36	1.34	0.06	1.14	0.00	16.6	7.18	705	5.12	10	
11.23	6.8	28.8	1.97	25.3	0.38	0.91	0.00	91.0	1.63	1.12	0.01	0.98	0.00	16.7	6.93	739	5.46	10	
11.25	4.7	26.4	1.07	20.7	0.80	0.59	0.00	62.7	0.54	0.96	0.13	0.68	0.00	16.7	7.01	725	5.93	10	
11.27	7.7	26.2	0.00	24.8	1.34	0.22	0.00	20.1	0.00	2.43	0.11	2.72	0.02	15.6	6.94	738	5.58	10	

9. Pilot 수로 (March~April, 2002)

Date	SS		TN		NO ₃		NO ₂		TP		DIP		Temp	pH	Cond.	DO
	mg/ℓ	STD	mg/ℓ	STD	mg/ℓ	STD	μg/ℓ	STD	mg/ℓ	STD	mg/ℓ	STD	℃		uS/cm	mg/L
3.23	7.00	-	23.1	0.17	0.8	0.01	106.6	0.18	0.7	0.01	0.11	0.00	15.1	5.92	558	6.1
3.25	5.67	-	22.6	0.08	1.4	0.02	210.8	0.00	0.8	0.01	0.14	0.00	15.4	6.8	533	5.4
3.27	7.00	-	25.5	0.17	1.2	0.00	157.2	0.18	1.6	0.02	0.31	0.00	16.0	6.87	582	-
3.29	10.00	-	24.6	0.28	0.5	0.01	153.3	0.18	2.1	0.00	0.42	0.00	16.0	7.2	582	14.0
3.31	13.67	-	21.3	0.61	0.2	0.00	52.0	0.35	2.7	0.01	0.56	0.00	16.5	7.49	598	15.0
4.02	10.50	-	24.7	0.28	0.2	0.00	35.0	0.00	2.4	0.03	0.46	0.00	17.0	7.35	694	6.0
4.04	10.67	-	24.8	0.41	0.5	0.00	91.6	0.00	1.1	0.00	0.20	0.00	17.2	6.07	634	5.5

10. 농수로 (May, 2002)

Date	SS		TN		NO3		NO2		NH4		TP		DIP		COD		Temp	pH	Cond	DO	광도
	mg/l	mg/l	STD	μg/l	STD	μg/l	STD	μg/l	STD	μg/l	STD	μg/l	STD	μg/l	STD	mg/l	STD	℃	μS/cm	mg/l	μmol/m'
5.10	10.5	5.3	0.15	937.3	2.23	56.7	0.25	36.7	0.95	115.4	0.00	13.3	0.73	14.7	0.67	19.3	-	199.1	12.3	489.4	
5.12	12.5	6.3	0.17	524.9	2.23	48.8	0.50	11.0	11.41	114.7	2.21	11.1	0.00	15.6	0.12	23.3	9.11	176.3	12.8	-	
5.13	14.0	7.0	0.14	384.8	2.23	52.8	0.25	3.4	0.00	108.1	0.00	8.1	0.00	16.2	0.04	22.4	-	210.2	13.0	1064.0	
5.14	13.5	6.8	0.02	461.9	2.23	53.7	0.00	32.9	0.00	115.4	7.35	8.9	0.73	15.2	0.06	22.1	-	-	11.5	542.0	
5.16	13.5	6.8	0.22	370.6	2.23	58.9	0.25	176.9	20.44	130.1	1.47	3.7	0.00	16.1	0.26	18.3	-	-	8.6	-	

11. 농수로 (September, 2002)

Date	Vel	SS		TN		NH ₄		NO ₃		NO ₂		TP		DIP		BOD		COD		수온	pH	Cond	DO	광도
	cm/s	mg/L	STD	mg/L	STD	μg/l	STD	mg/L	STD	μg/l	STD	μg/l	STD	ug/L	STD	mg/L	STD	mg/L	STD	℃		uS/cm	mg/L	μmol/m'
9.09		13.0	0.00	1.6	0.00	12.1	0.00	0.9	0.00	16.2	0.2	133.0	0.00	54.8	0.00	9.2	7.90	11.8	0.00	26.0	7.58	160.1		472.4
9.10	1	12.9	1.63	1.5	0.03	17.3	3.85	1.2	0.37	13.5	0.7	167.1	2.90	61.3	1.15	7.3	0.05	13.2	0.30	27.7	8.22	153.1	8.69	641.7
	5	13.1	1.13	1.5	0.07	9.3	0.25	1.5	0.13	12.9	0.1	167.5	1.85	51.4	0.35	7.1	0.25	13.5	0.15	26.8	7.90	153.5	8.81	649.3
9.12	0.5	8.5	1.00	1.3	0.01	117.0	9.50	0.1	0.01	14.3	0.1	140.7	0.35	65.9	1.15	5.6	0.00	12.9	0.05	25.5	7.30	156.1	6.64	
	1	7.6	0.38	1.4	0.04	154.4	47.70	0.2	0.02	16.0	0.3	136.7	1.45	59.0	4.20	5.3	0.40	13.0	0.05	25.3	7.23	157.5	6.22	
	5	9.6	0.63	1.3	0.04	103.2	21.20	0.2	0.00	16.8	0.2	141.8	1.45	51.4	1.15	6.0	1.20	13.3	0.15	26.0	7.01	162.3	6.19	
9.13	0.5	24.1	0.13	2.3	0.02	204.3	5.20	0.6	0.00	39.6	0.6	201.6	0.35	60.9	0.75	9.7	0.15	15.6	0.15	24.5	8.70	194.3	8.43	320.5
	1	22.5	1.00	2.4	0.06	170.4	1.10	0.6	0.00	42.2	1.0	212.1	2.20	65.9	4.95	10.4	0.20	15.8	0.55	24.4	8.70	194.6	7.95	253.5
	5	23.5	0.50	2.4	0.06	130.2	8.40	0.6	0.01	38.1	0.3	215.0	1.45	49.8	0.40	10.3	0.35	17.0	0.30	24.4	8.10	185.2	8.85	329.8
9.14	0.5	16.8	1.75	2.2	0.04	180.4	2.35	0.7	0.01	50.4	1.0	172.2	0.70	62.8	1.15	6.0	0.35	16.1	0.15	23.8	8.67	177.8	7.81	209.3
	1	26.3	0.25	2.2	0.18	60.0	0.40	0.6	0.02	41.5	0.6	197.6	10.85	54.4	3.40	8.5	0.10	17.1	0.30	23.9	8.58	180.5	7.42	
	5	23.8	2.25	2.1	0.01	38.6	14.90	0.6	0.00	43.6	2.2	193.2	20.30	47.9	9.90	8.3	0.35	17.8	0.15	23.8	8.76	177.5	7.62	