

# 오염부하량 및 유하거리가 인공습지에 의한 폐수처리 효율에 미치는 영향

## Effect of Pollutant Loading and Flow Distance to Wastewater Treatment Efficiency in the Constructed Wetland System

김 형 중\* · 김 선 주\* · 윤 춘 경\*  
Kim, Hyung Joong · Kim, Sun Joo · Yoon, Chun Gyeong

### Summary

Natural wastewater treatment systems using the constructed wetland system were evaluated for the wastewater from the industrial complex in rural areas. For the treatment of wastewater from the industrial complex in rural area, a pilot plant of the constructed wetland system was installed at Baeksuk agri-industrial complex in Chunahn-City, Chunchungnam-Do. The experiment with this pilot plants was performed for 1996 and 1997.

Results of the study were summarized as follows.

For the BOD and COD, when the pollutant loading of them was about  $13.8\text{g}/\text{m}^2\cdot\text{day}$  (the concentration was  $124.0\text{mg}/\ell$ ) and  $24.4\text{g}/\text{m}^2\cdot\text{day}$  (the concentration was  $220.0\text{mg}/\ell$ ), the removal rate of them was high, 90.2% and 93.4%, respectively.

For the SS, the effluent concentration was consistently lower than the water quality standard even though the influent concentration varied significantly, which showed that SS was removed by the system effectively which consist of soil and plants. For the T-N and T-P, when the influent pollutant loading of them were moderately high,  $2.8\text{g}/\text{m}^2\cdot\text{day}$  to  $7.4\text{g}/\text{m}^2\cdot\text{day}$  (concentration  $25.0\text{mg}/\ell$  to  $49.7\text{mg}/\ell$ ) for T-N and  $1.0\text{g}/\text{m}^2\cdot\text{day}$  to  $2.6\text{g}/\text{m}^2\cdot\text{day}$  (concentration  $8.6\text{mg}/\ell$  to  $14.7\text{mg}/\ell$ ) for T-P, the removal rate of them were 86.5% and 94.0%, respectively. The removal rate by the flow distance increased rapidly in the first 4m from the inlet zone, and gradually there after. The width of system was 2m.

Overall, the result showed that constructed wetland system is a feasible alternative for the treatment of wastewater from industrial complex in rural areas. Compared to exist-

\* 건국대학교 농과대학

키워드 : 인공습지, 오염부하량, 유하거리, 수리  
부하율, 제거율

ing systems, this system is quite competitive because it requires low capital cost, almost no energy and maintenance, and therefore, very cost effective.

## I. 서 론

전 세계적으로 환경문제에 대한 관심이 높아지고 있는 가운데 우리나라에서도 환경을 보전해야 한다는 전국민적인 공감대가 형성되었으나, 경제논리 우선 정책에 따른 환경정책의 부재, 일관성 없는 환경정책, 전통적인 식문화 등이 개선되지 않아 환경문제가 점점 악화되고 있다.

도시에서는 녹지공간이 사라지고, 하천이나 호소의 수질오염은 점점더 심각해지고 있으며, 자동차나 공장에서 내뿜는 매연은 도시생활에 지친 사람들의 가슴을 조여오고 있다. 또한 자연환경이 넓게 분포하고 있는 농촌지역도 개발논리에 의해 환경이 파괴되고 있으며, 수질오염 문제도 점점 심각해지고 있는 실정이다.

물맑고 신선한 공기가 충분한 푸르른 자연을 보전하여 농촌주민들의 생활을 윤택하게 하고, 도시민들에게 휴식처를 제공해줄 수 있도록 인류의 생존이라는 차원에서 농어촌 환경문제에 접근해야 할 것이다.

따라서 현재 추진되고 있는 농어촌 환경정비사업은 풍부한 자연을 최대한 보전할 수 있으며, 주위의 자연환경과 조화를 이루도록 하는 것이 바람직할 것이다.

오폐수 처리시설도 마찬가지로 자연의 정화기능을 최대한 활용하여 혐오시설이라는 인식을 갖지 않도록 경관을 아름답게 유지하면서 수질도 보전할 수 있는 시설이 되도록 해야 할 것이다. 최근 농어촌 지역에 조성되고 있는 농공단지에서 배출되는 오폐수도 농촌지역의 환경을 최대한 살릴 수 있는 방법으로 추진되어야 할 것이다. 이러한 조건을 만족시킬 수 있는 방법의 하나로서 많은 관심이 집중되

고 있는 것이 저습지를 이용한 오수처리 시스템(wetland system)이다.

구미 각국에서 연구와 개발을 통하여 저습지 시설을 적절히 설계·운영하면 충분히 오폐수처리에 적합하다는 것이 입증되어 관련부서의 허가 및 지원을 받아 낮은 비용으로 오폐수를 처리하고 있다.<sup>11)</sup>

저습지에는 다양한 박테리아, 균류, 그리고 수중동식물들이 서식하기 때문에 BOD<sub>5</sub>와 TSS를 효과적으로 제거해 준다고 하였으며<sup>7)</sup>, BOD<sub>5</sub>의 제거효율은 체류기간이 5일 이하이면 낮아지고<sup>6)</sup>, 날씨가 추운지역에서는 7일 정도가 적당하며<sup>10)</sup>, 수리부하율이 8cm/day 이상이면 처리효율이 낮아진다고 하였다.<sup>11)</sup>

TSS의 제거효율에 대해 Knight(1987)는 150kg/ha·day까지는 지속적으로 높으며, 70% 이상의 제거효율을 나타내기 위해서는 체류기간이 5일 이상이 되어야 한다고 보고하였다.

Tchobanoglous(1987), Cooper(1987) 등은 지하흐름형에서 필요한 단면적을 계산하는 식을 제시하였으며, U.S. EPA(1988)는 지하흐름형 저습지의 BOD<sub>5</sub>의 제거에 관한 1차 감소함수식을 제시하였다. BOD<sub>5</sub>의 제거율은 모기와 악취문제를 고려할 때 100kg/ha·day를 최대처리율로 설정하고, 일반적으로는 60~80kg/ha·day 정도를 권장하기도 하고<sup>7)</sup>, U.S. EPA(1988), Watson(1989) 등은 자유수면형과 지하흐름형 모두에 110~120kg/ha·day를 권장하기도 한다. 또한 TSS는 BOD<sub>5</sub>를 기준으로 설계하면 유출수의 TSS 농도는 BOD<sub>5</sub> 유출수와 비슷하다고 한다.<sup>11)</sup>

농공단지 오폐수 처리시설에는 비교적 오폐수의 유입량이 많아 저습지와 같은 자연정화방법을 도입하면 처리시설의 면적이 넓어지는 단점이 있으나, 이러한 농공단지와 같은 산업

시설은 유지관리인을 상주시킬 수 있는 여력이 있기 때문에 보다 높은 처리효율을 기대할 수 있다.

그러나 저습지처리와 같은 자연정화방법은 겨울철에는 처리효율이 떨어진다는 단점이 있으므로 겨울철에도 일정수준 이상의 처리효율을 유지할 수 있도록 하는 것이 중요한 과제이다.

본 연구는 농촌지역의 오폐수 처리시설로서 농촌지역에 풍부하게 분포하고 있는 자연의 자정작용을 도입하기 위하여 자연정화방법 중 처리효율이 높은 것으로 알려진 인공저습지처리(constructed wetland system)에 의한 BOD, COD, SS 및 T-N, T-P 등의 정화능력을 정량화하여 그 적용 가능성을 조사하였다. 특히 인공저습지처리는 자연의 식생을 이용한 처리방법이기 때문에 겨울철에 온도가 떨어지면 식물 및 미생물의 식생활동이 둔화되어 처리효율이 떨어져 항구적인 오수처리시설로서 채용할 수 없게 된다. 따라서 처리시설내·외의 온도변화 및 수온과 처리효율과의 관계를 분석하여 최소의 비용으로 일정한 처리효율을 올릴 수 있는 방안을 모색하였다.

그리고 수리부하율 및 유하거리와 처리율과의 관계, 폐수의 오염부하량과 처리율과의 관계 등을 구명하여 농촌지역의 오폐수 처리시설로서 자연정화 방법을 적용하는데 이바지하고자 하였다.

## II. 재료 및 방법

### 1. 연구용 인공습지시설의 구조

농공단지 폐수처리를 위한 인공습지시설은 충청남도 천안시에 있는 백석농공단지에 설치되었다. 백석농공단지는 346,500m<sup>2</sup>의 대지에 1987년 11월 착공하여, 1988년 12월 준공되었다.<sup>1,3)</sup>

입주업체로부터 배출된 폐수는 하수관을 통

해서 폐수종말처리장에 유입되어 활성오니법으로 처리되고 있으며, 雨水를 배수하기 위한 관로가 따로 설치되어 있었기 때문에 강우가 유입수의 농도에 큰 영향을 미치지 않았다.

농공단지에서 배출되는 폐수를 정화하기 위한 인공습지 처리시설은 겨울철의 보온을 위해 2중 온실로 하였는데, 외부보온시설과 내부보온시설의 구조를 요약하면 다음과 같다

#### 1) 외부 보온시설

-형태 : 양지붕 단동

-규격 : 폭 6m, 처마높이 3m,

지붕높이 4.5m, 길이 18m

-면적 : 108m<sup>2</sup>

-골재 : 철골

-외부 피복재 : P.C판

-측벽 : 개폐식 비닐(수동)

#### 2) 내부 보온시설

-피복재 : 비닐

-형태 : 양지붕 단동

-규격 : 폭 4m, 높이 2m, 길이 17m

-면적 : 68m<sup>2</sup>

본 실험시설은 하수종말처리장으로 유입하는 하수관의 도중에 설치되어 있는 맨홀에 수중펌프를 설치하여 폐수를 양수하여 유입수 저류조에 저류했다가 처리시설로 보내도록 하였다.

일단 저류조에 들어온 폐수는 저류조 하단에 설치되어 있는 관로를 통하여 각 처리시설에 자연유하시켰다.

농공단지 폐수처리를 위한 실험시설은 지하흐름형 인공습지 시스템(SFS, subsurface flow constructed wetland system)으로서 Fig. 1과 같이 2m(넓이)×15m(길이)×1m(높이)의 콘크리트 반응조로 이루어져 있다. 이 처리조에는 60cm의 깊이로 모래를 채운 후挺水식물(학명 : *Zizania latifolia*, 英名 : Manchurian wild rice)을 심고, 한쪽 끝에서 폐수원액을 유입시키면 식물의 뿌리와 모래로 구성된 처

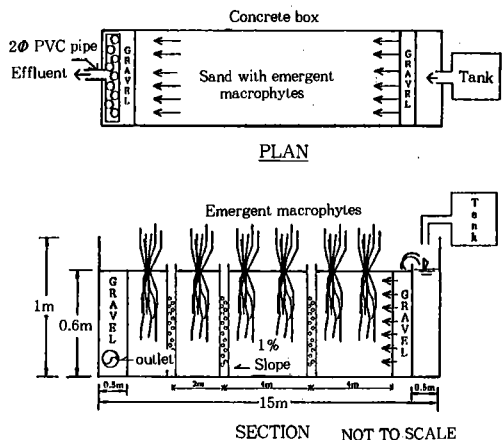


Fig. 1. Schematic diagram of the treatment tank in Baeksuk Nongkong Danzi

리층을 수평으로 통과하여 다른 쪽 끝의 배출구로 유출되며, 이 과정에서 흡착, 여과, 생분해 등의 처리가 이루어진다. SFS 저습지처리 시설에 이용된 모래는 입도분석 결과 삼각분류법(textural triangle)에 의하면 sand이고, USCS(unified soil classification system, 통일분류법)에 의하면 SP(poorly graded sand)로 분류된다. 저습지의 체류시간과 관계가 큰 공극율은 0.357이었으며, 그 외에 비중 2.49, 겉보기 비중 2.61, 흡수량 1.83, 건조단위 중량 1.60g/cm<sup>3</sup>이었다. 처리조에서 실제 처리에 사용되는 부분은 폭 2m×길이 13.5m×높이 0.6m에 채워진 모래층으로 표면적은 약 27m<sup>2</sup>이다. 1996년도에는 오폐수의 유입량을 약 5.5m<sup>3</sup>/day로 일정하게 유입시켰는데, 이때의 수리부하율은 약 0.2m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>·day로써 모래층의 공극율(0.357)을 고려한 이론적인 처리시설내 체류시간은 약 1.05일 정도이다.

1996년도의 기초실험 결과 자연정화 방법의 적용 가능성이 확인되어, 1997년도에는 농공단지 관리사무소에 설치되어 있는 3단 정화조의 2단에서 오수를 양수하여 농공단지 폐수에 혼합시켜 유입원수의 농도를 변화시키는 동시에 수리부하율을 변화시키면서 적정 오염

부하량을 추정하기 위한 연구를 중심으로 실시하였다.

유하거리별 처리효율을 조사하기 위하여 Fig. 1과 같이 유입구로부터 4, 8, 10m지점에 샘플을 채취하기 위한 유공파이프를 매설하고, 체류시간을 고려하여 유입수가 각 지점을 통과하는 시간이 되었을 때 채취하여 유하거리별로 농도를 비교분석하였다.

## 2. 측정방법

### 가. 수질 측정항목 및 방법

폐수원액 및 처리수는 PVC통에 담아 온도를 측정 후 실험실로 즉시 운반하여 4℃로 보관하며 BOD, COD, SS, T-P, TKN, NO<sub>2</sub><sup>-</sup>, NO<sub>3</sub><sup>-</sup> 등을 Standard methods<sup>5)</sup>에 의거하여 분석하였다.

DO(dissolved oxygen, 용존산소량)는 Azide Modification(SM 4500-O C)방법으로 분석하였고, BOD(biochemical oxygen demand, 생물화학적 산소요구량)는 5-Day BOD Test(SM 5210-B)방법으로 분석하였다. COD(chemical oxygen demand, 화학적 산소요구량)는 Open Reflux(SM 5220-B)방법으로 분석하였다. SS(suspended solids, 부유물질량)는 Total Suspended Solids Dried at 103-105℃(SM 2540-D) 방법으로 측정하였고, TKN(total kjeldahl nitrogen)은 Semi-Micro-Kjeldahl Method(SM 4500-NO<sub>org</sub>-C) 방법으로 측정하였다. NO<sub>2</sub><sup>-</sup>, NO<sub>3</sub><sup>-</sup>는 Ion Chromatography(SM 4110-B) 방법으로 측정하였는데, 측정기기는 Dionex DX-100 Ion Chromatograph를 사용하였다. 이렇게 하여 구한 질소성분들을 합하면 TKN+NO<sub>2</sub><sup>-</sup>+NO<sub>3</sub><sup>-</sup>=T-N(total nitrogen, 총질소)이 된다. T-P는 Vanadomolybdophosphoric Acid Colorimetric Method(SM 4500-P C)로 분석하였는데, autoclave로 분해한 다음 Hewlett Packard 8452A UV Spectrophotometer로 측정하였다.

### 나. 기온 및 수온의 측정

기온 및 수온 측정은 영국의 Grant Instruments사의 Grant Datalogger SQ1258에 온도계측용 백금센서를 연결하여 자동계측하였다. 자료의 출력 및 분석은 Grant Taskwise Analysis Software로 실시하였다. 기온 및 수온은 실험시설의 외부온도, 실험시설의 단일 피복 내부온도, 2중 비닐하우스의 내부 온도를 중앙부에서 측정하였고, 습지와 수중처리조의 유입구와 유출구에서 수온을 측정하여 하우스 내·외부의 온도 및 수온의 차이를 분석하여 물옥잠과 갈대가 겨울에도 지장없이 생육할 수 있는 최소난방 부하를 산정하였다.

## III. 결과 및 고찰

### 1. 갈대의 성장상태

본 연구를 위해 설치한 인공습지를 이용한 농공단지 폐수처리시설의 처리조에는 1996년 8월 1일 팔당호에 자라고 있는 갈대를 이식하였는데, 이식과정에서 입과 줄기가 부러지거나 손상된 부분이 많아 정상적으로 자랄 수 없을 것으로 예상되어 뿌리를 제외한 부분의 길이가 30.0cm~40.0cm가 되도록 줄기를 잘라내고 이식하였는데, 8월 말에 완전히 성장하여 이삭이 돌아났으나, 일평균 기온이 약 10.0℃로 떨어지기 시작한 10월 중순부터 시들기 시작한 갈대는 갑자기 최저기온이 영하로 떨어진 10월 하순에 시들음이 심화되고, 11월 중순이 되어 거의 대부분이 시들었고, 12월 중순경에는 대부분 고사하였다.

겨울 동안 처리시설의 개폐식 측벽을 닫고 보온을 하였으나, 시설내의 기온이 낮아 단일 피복만으로는 식생이 자라기에 불충분하다고 판단되어, 1997년 2월 4일 처리시설 내에 비닐로 이중피복을 하고, 고사한 줄기를 잘라내 준 결과 외부 기온이 평균 2.8℃로 낮음에도 불구하고 이중피복 내의 기온이 평균 14.5℃

로 유지되어 2월 말부터 갈대의 새싹이 돌아나기 시작하여 외부에 있는 갈대는 아직 새싹이 나오지도 않은 4월 초에 시스템내의 갈대는 이미 2.0m 정도로 자라 줄기를 잘라 주어야 할 정도로 성장하였다.

따라서 겨울에도 갈대가 정상적으로 자라기 위해서는 갈대가 시들기 시작한 일평균기온인 10.0℃ 이상으로 유지해 주어야 할 것으로 판단된다.

## 2. 오염부하 및 유하거리별 처리효율

1997년 4월에 유입수의 수리부하율을 0.23m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>·day, 0.18m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>·day, 0.14m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>·day, 0.11m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>·day로 변화시키며 거리별 처리효율을 분석한 결과 0.11m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>·day인 경우의 처리효율이 대부분 높은 것으로 나타나 0.11m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>·day의 수리 부하율에 대해 한번더 분석하였다.

BOD는 Fig. 2와 같이 수리부하율이 0.11m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>·day이고, 오염부하량이 13.8g/m<sup>2</sup>·day로 가장 낮을 때 제거율이 90.2%로 가장 높게 나타났다으며, 이때의 유입수 농도는 124.0mg/l이었으나, 유출수는 방류수 수질기준치인 30.0 mg/l 보다 낮은 12.2mg/l로 낮아졌다. 수리

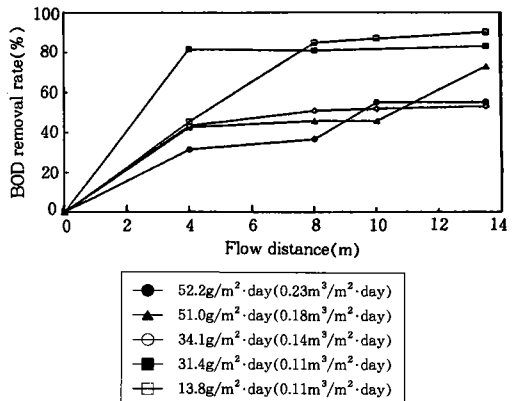


Fig. 2. BOD removal rate with flow distance and pollutant loading

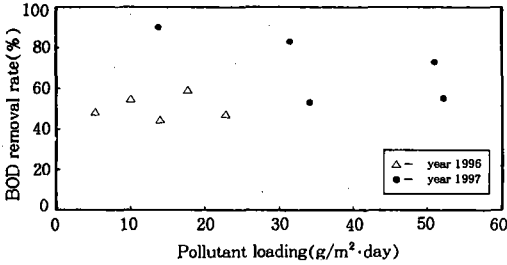


Fig. 3. Relationships between pollutant loading and BOD removal rate

부하율이  $0.11\text{m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{day}$ 이고, 오염부하량이  $31.4\text{g}/\text{m}^2 \cdot \text{day}$ 인 경우 유입수의 농도가  $282.9\text{mg}/\ell$ 이었으나, 유출수의 농도는  $48.0\text{mg}/\ell$ 로 낮아져 BOD 제거율이 83.0%로 높게 나타났다. 그 외 오염부하량이  $51.0\text{g}/\text{m}^2 \cdot \text{day}$ 인 경우가 72.8%,  $52.2\text{g}/\text{m}^2 \cdot \text{day}$ 인 경우가 55.1%,  $34.1\text{g}/\text{m}^2 \cdot \text{day}$ 인 경우가 53.0%의 제거율을 나타냈다.

1996년도 8~11월과 1997년도 4월의 실험 결과를 종합하여 오염부하량과 제거율의 관계를 살펴보면 Fig. 3과 같이 BOD 부하량이 약  $51.0\text{g}/\text{m}^2 \cdot \text{day}$ 에서도 72.8%의 제거율을 보이는 등 인공습지가 높은 BOD 부하에서도 효율적으로 BOD를 제거해줌을 알 수 있다.

또한 거리별 제거율은 Fig. 2와 같이 오염부하량이  $13.8\text{g}/\text{m}^2 \cdot \text{day}$ 인 경우 총제거율 90.2% 중 4.0m 지점에서 45.3%가 제거되고, 그 이후에는 제거율이 원만하게 감소하였다가 증가하는 경향을 보였는데, 이는 4m 지점에서 깨끗히 정화된 물이 흘러가는 동안 처리시설내에 있던 오염물질이 재용출되었기 때문으로 생각된다. 8.0m 지점에서 84.8%가 제거되어 방류수 수질기준치  $30.0\text{mg}/\ell$  보다 낮은  $18.8\text{mg}/\ell$ 로 낮아졌고,  $31.4\text{g}/\text{m}^2 \cdot \text{day}$ 인 경우는 처리시설 내에서의 총제거율 83.0% 중 4.0m 지점에서 농도가  $52.0\text{mg}/\ell$ 로 낮아져 81.6%가 제거되었고,  $52.2\text{g}/\text{m}^2 \cdot \text{day}$ 인 경우는 총제거율 55.1% 중 31.3%가,  $51.0\text{g}/\text{m}^2 \cdot \text{day}$ 인

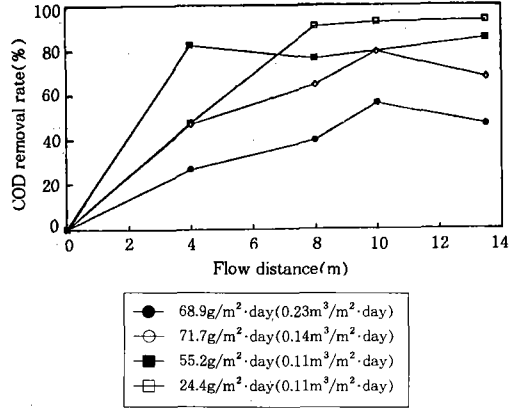


Fig. 4. COD removal rate with flow distance and pollutant loading

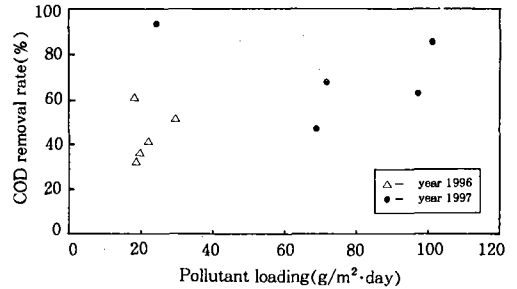


Fig. 5. Relationships between pollutant loading and COD removal rate

경우는 총제거율 72.8% 중 42.5%가,  $34.1\text{g}/\text{m}^2 \cdot \text{day}$ 인 경우는 총제거율 53.0% 중 43.3%가 4.0m 지점에서 제거되었다.

COD는 Fig. 4에서 보는 바와 같이 수리부하율이  $0.11\text{m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{day}$ 이고, 오염부하량이  $24.4\text{g}/\text{m}^2 \cdot \text{day}$ 로 가장 낮은 경우에 제거율이 93.4%로 가장 높게 나타났다. 이때의 유입수 농도는  $220.0\text{mg}/\ell$ 이었으나, 유출수의 농도는  $14.6\text{mg}/\ell$ 로 감소하여 방류수 수질기준치  $40.0\text{mg}/\ell$ 보다 낮게 나타났다. 수리부하율이  $0.11\text{m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{day}$ 이고, 오염부하량이  $55.2\text{g}/\text{m}^2 \cdot \text{day}$ 인 경우는 유입수 농도가  $496.4\text{mg}/\ell$ 이던 것이 유출수의 농도는  $73.0\text{mg}/\ell$ 로 낮아져 85.3%의 제거율을 나타냈다. 그외의 오염부

하랑에서는 오염부하량에 관계없이 46.7%~67.6%의 제거율을 보였다. 1996년도와 1997년도의 조사결과를 종합해보면 Fig. 5와 같이 부하량이 약 100.0g/m<sup>2</sup>·day까지 제거율이 지속적으로 증가하는 경향을 보였다.

또한 거리별 제거율은 Fig. 4와 같이 오염부하량이 24.4g/m<sup>2</sup>·day인 경우 총제거율 93.4% 중 4.0m 지점에서 47.6%, 8.0m 지점에서 90.1%의 제거율을 나타냈다. 오염부하량이 55.2g/m<sup>2</sup>·day인 경우는 총제거율 85.3% 중 82.4%가 4.0m 지점에서 제거되었으며, 오염부하량이 68.8g/m<sup>2</sup>·day인 경우는 총제거율 46.7% 중 26.7%가, 97.3g/m<sup>2</sup>·day인 경우는 총제거율 62.6%보다 높은 70.7%가, 71.7g/m<sup>2</sup>·day인 경우는 총제거율 67.6% 중 47.1%가 4.0m지점에서 제거되었다.

SS의 경우는 Fig. 6에서 보는바와 같이 오염부하량에 관계없이 높은 제거율을 나타내 유출수는 모두 방류수 수질기준치인 30.0mg/ℓ 보다 낮아졌다. 오염부하량이 7.1g/m<sup>2</sup>·day인 경우는 제거율이 47.5%로 낮았는데, 이는 유입폐수의 부유물질의 농도가 40.0mg/ℓ 로 낮았기 때문에 처리효율이 낮아진 것으로 생각된다. 반면 비슷한 오염부하량인 6.9g/m<sup>2</sup>·day인 경우는 처리효율이 높게 나타났다. 이는 유입수의 수리부하율이 0.11m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>·day로 낮았기 때문으로 생각된다. 1996년도와 1997년도의 실험결과를 종합하여 오염부하량과 제거율의 관계를 살펴보면 Fig. 7에서 보는바와 같이 부하량이 증가함에 따라서 제거율도 증가하여 부하량이 약 11.7g/m<sup>2</sup>·day에서 최고 94.2%의 제거율을 보였고, 그 이후에는 제거율이 감소하였으나, 18.8g/m<sup>2</sup>·day의 높은 부하에서도 75.6%의 높은 제거율을 나타내는 등 높은 부하에서도 안정적인 처리효율을 보였다.

또한 거리별 제거율은 Fig. 6과 같이 오염부하량이 6.9g/m<sup>2</sup>·day인 경우 4.0m 지점에서

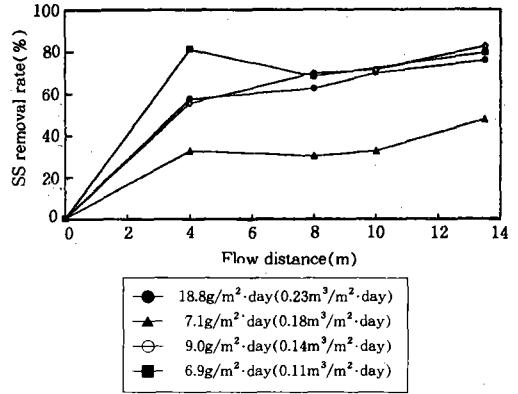


Fig. 6. SS removal rate with flow distance and pollutant loading

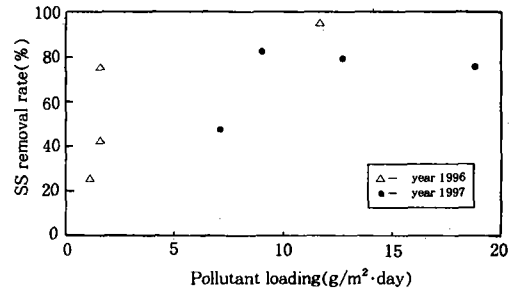


Fig. 7. Relationships between pollutant loading and SS removal rate

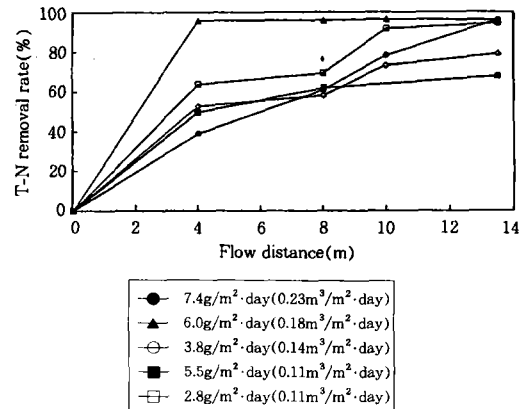


Fig. 8. T-N removal rate with flow distance and pollutant loading

80.8%의 높은 제거율을 나타낸 후 그 뒤에는 오히려 제거율이 완만하게 감소했다가 증가하

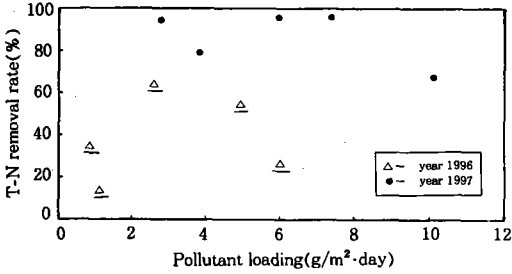


Fig. 9. Relationships between pollutant loading and T-N removal rate

는 경향을 보였는데 이는 4m지점에서 이미 깨끗히 정화된 물이 흘러가는 동안 처리시설 내에 있던 오염물질이 재용출되었기 때문으로 생각된다. 그외 18.8g/m²·day가 총제거율 75.6% 중 57.3%, 7.1g/m²·day인 경우가 47.5% 중 32.5%, 9.0g/m²·day인 경우는 82.4% 중 55.2%가 4.0m지점에서 제거되었다.

또한 T-N은 Fig. 8과 같이 오염부하량에 관계없이 전체적인 평균제거율은 86.5%로 높은 값을 보였다. Fig. 9에서 보는바와 같이 부하량이 약 7.4 g/m²·day에서 96%의 가장 높은 제거율을 보였으며, 실험기간중 부하량이 10.1g/m²·day로 가장 높은 경우에도 67.7%의 제거율을 보였다. 또한 유하거리별 제거율은 Fig. 8에서 보는바와 같이 2.8g/m²·day인 경우 총제거율 94.4% 중 63.8%가, 5.5g/m²·day인 경우 총제거율 67.6% 중 49.7%가, 3.8g/m²·day인 경우 총제거율 78.9% 중 52.9%가, 6.0g/m²·day인 경우는 총제거율 95.8%가 모두 4m 지점에서 제거되어 이 지점에서 높은 처리율을 보여 거의 정화되었기 때문에 그 이후에는 거의 변화가 없었다. 7.4g/m²·day인 경우는 총제거율 95.9% 중 4.0m 지점에서 39.1%가 제거되고, 8.0m 지점에서 60.9%의 제거율을 보였다.

질소의 이온성분인 아질산성 질소, 질산성 질소 등이 거의 검출되지 않고, 암모니아성 질소의 농도를 나타내는 TKN이 대부분인 것

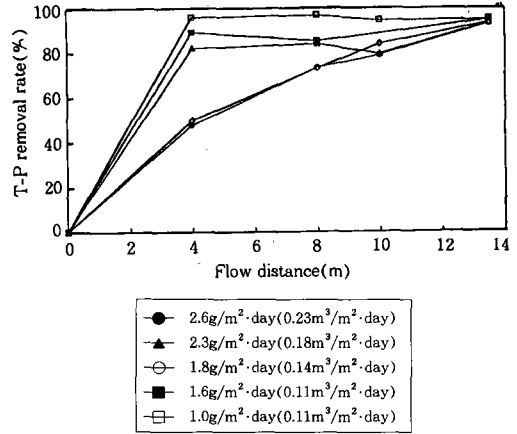


Fig. 10. T-P removal rate with flow distance and pollutant loading

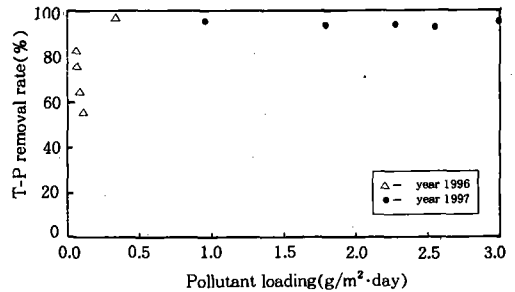


Fig. 11. Relationships between pollutant loading and T-P removal rate

으로 보아 이 암모니아성 질소가 아질산성 질소, 질산성 질소로 질산화되기 전에 갈대에 흡수된 것으로 생각된다. 즉, 본 실험이 시행된 기간동안 2중 비닐하우스 내의 평균기온이 23.6℃로 유지되어 갈대가 왕성하게 자라는 시기였기 때문에 암모니아성 질소가 질산화되기 전에 갈대에 흡수된 것으로 생각된다. 따라서 유입폐수의 T-N 농도가 도시하수의 평균 총질소 농도인 20.0~40.0mg/l 인 경우는 처리조의 상류 4.0m 이내에서 갈대에 의해 대부분 흡수·제거될 수 있을 것으로 생각된다.

T-P의 경우 Fig. 10과 같이 오염부하량이 1.0g/m²·day로 가장 낮은 경우에 95.1%의



가장 높은 제거율을 나타냈고, 오염부하량이 증가할수록 제거율이 조금씩 감소하는 경향을 보였으나, 평균 94%의 높은 제거율을 보여 모두 방류수 수질기준치인 8.0mg/l를 만족하여 인공저습지의 총인 제거율이 높은 것을 알 수 있다. 또한 Fig. 11과 같이 부하량에 관계 없이 높은 제거율을 보였으며, 부하량이 약 3g/m<sup>2</sup>·day에서도 95.2%의 대단히 높은 제거율을 보였다.

T-P의 유하거리별 제거율도 Fig. 10과 같이 평균제거율 94% 중 4.0m 지점에서 72.9%가 제거되었다.

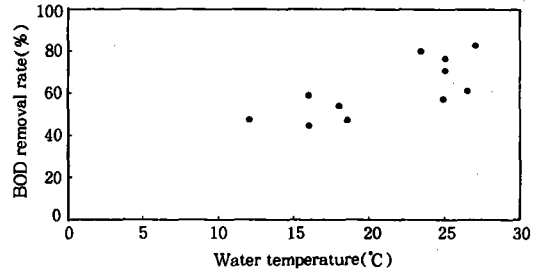
이상과 같이 오염부하량에 따른 처리율은 오염부하량이 낮다고 해서 반드시 처리율이 높게 나타나는 않았으며, 거리별 제거율은 폭이 2m인 경우 대부분 유입구로부터 4.0m (길이 : 폭의비 2 : 1) 지점에서 높은 제거율을 보였다. 따라서 배출되는 오염부하량에 따른 적정 처리시설 면적 등을 산정하여 오폐수 특성에 맞게 처리시설을 설계하는 것이 중요할 것으로 생각된다.

### 3. 수온과 제거율의 관계

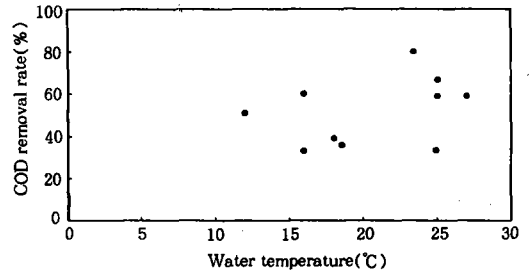
수온에 따른 오염성분의 제거율을 살펴보기 위해 12.0℃~27.0℃사이의 유출수를 대상으로 조사한 결과 BOD의 경우는 Fig. 12(a)와 같이 온도가 상승함에 따라 처리율이 증가하는 경향을 보였고, COD의 경우도 Fig. 12(b)와 같이 측정자료가 분산된 형태를 나타냈으나, 전반적으로는 수온이 상승함에 따라 처리율이 완만히 높아지는 경향을 보였다. 또한 SS도 Fig. 12(c)와 같이 수온이 상승함에 따라 처리율이 전체적으로 증가하는 경향을 나타냈다.

### 4. 온도변화와 난방부하

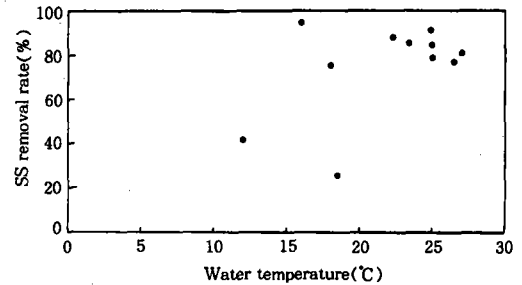
기온이 떨어지는 겨울에는 갈대의 생육이 저하되거나 정지되어 처리효율이 떨어질 것으



(a) BOD



(b) COD



(c) SS

Fig. 12. Relationships between water temperature and removal rate

로 예상되어 단일피복만으로 갈대가 시들기 시작할 때의 평균기온인 10.0℃ 이상을 유지할 수 있는지 알아보기 위해, 1996년 11월부터 1997년 1월까지 시설의 개폐식 측벽을 닫고, 이중피복을 하지 않은 상태에서 식생의 생육 상태를 조사하였으나, 이 기간동안 단일피복 내부의 기온이 영하로 떨어져 갈대가 고사하였다. 따라서 단일피복만으로는 겨울동안 식

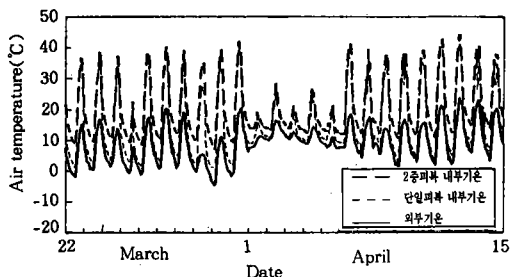


Fig. 13. Changes of the air temperature in treatment facility

생에 의한 처리효율을 기대할 수 없는 것으로 판단되어, 1997년 2월 4일 시설내부에 비닐로 이중피복을 하여 갈대의 생육상태를 조사한 결과 외부기온이 평균 2.8°C로 낮음에도 불구하고 이중피복 내부의 평균기온이 14.5°C로 유지되어 2월말부터 새싹이 돋아나기 시작하였다.

시설내에 이중피복을 한 3월부터 4월까지의 기간중 24일(총 575시간) 동안의 외부기온, 단일피복 내부기온, 2중피복 내부기온을 측정 한 결과 Fig. 13과 같았다.

측정기간 중 외부기온의 평균치는 8.6°C였고, 단일피복의 경우 내부기온의 평균치는 15.6°C였으며, 2중피복의 경우는 평균기온이 20.2°C였다. 갈대가 일정한 처리효율을 유지하면서 성장하기 위해서 필요한 최저기온을 10.0°C로 보고 난방부하를 계산하면<sup>2)</sup> 단일피복인 경우 총난방부하량은 216,000kcal이며, 이중피복의 경우는 35,000kcal가 되므로 이중피복으로 하면 단일피복의 경우에 비해 약 84%의 연료비를 절감할 수 있게 된다.

또한 1년 중 평균외기온이 10.0°C 이하로 떨어져 난방을 필요로 하는 기간을 11월부터 다음해 3월까지의 5개월로 보았을 때, 1996년 11월부터 1997년 3월까지의 기상자료를 통해서 분석한 결과 단일피복의 내부기온이 10.0°C 이하로 떨어져 온도를 10°C 이상으로 유지해주기 위해 효율이 0.85인 온풍기를 운

전하기 위한 연료인 경유의 금액으로 概算한 결과 단일피복은 약 201,000원이었고, 이중피복의 경우는 약 122,000원이 소비되어, 이중피복으로 하면 약 39%의 연료비를 절감할 수 있는 것으로 추산되었다.

따라서 자연처리시설을 도입하는 경우 간단한 이중피복만으로도 많은 연료비를 절감하면서 일정한 처리효율을 올릴 수 있으므로 기존의 오폐수처리시설에 비해 상당히 경제적인 처리시설이라고 생각된다. 또한 겨울철에는 일반적으로 오염부하가 낮아지는 점을 감안한다면 인공저습지를 오폐수처리시설로서 도입해도 충분할 것으로 생각된다.

#### IV. 결 론

인공습지를 이용한 농공단지 폐수처리효율을 조사하기 위해 1996년도에 유입폐수의 수리부하율을 0.2m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>·day로 일정하게 하여 유입시키면서 기초실험을 하고, 1997년도에는 유입폐수의 수리부하율을 0.23m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>·day, 0.18m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>·day, 0.14m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>·day, 0.11m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>·day순으로 변화시키면서 유입수 및 유출수의 농도를 비교하고, 유하거리별 농도를 조사하여 다음과 같은 결과를 얻었다.

1. BOD의 경우 1996년도에는 유입수의 농도가 방류수 수질기준치보다 낮은 경우가 많았다. 따라서 보다 정확한 처리효과를 분석하기 위해 1997년도에는 유입수의 농도 및 수리부하율을 변화시키면서 5회 측정하였으나, 유입수농도가 124mg/l 이고, 수리부하율이 0.11m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>·day이며, 오염부하량이 13.8g/m<sup>2</sup>·day인 경우만이 처리수의 농도가 12.2mg/l 로 낮아져 기준치를 만족하였다.

2. COD의 경우도 BOD와 마찬가지로 1997년도에 5회 측정하였는데, 수리부하량이 0.11m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>·day, 농도가 220mg/l 이며 오염부하량이 24.4g/m<sup>2</sup>·day인 경우만이 방류수

수질기준치를 만족시켰다.

3. SS는 유입수의 농도 및 오염부하량에 관계없이 유출수는 모두 방류수 수질기준치인 30.0mg/l 이하로 낮아서 인공저습지의 토양으로 구성된 처리조를 통과하면 SS는 매우 효과적으로 제거됨을 알 수 있었다.

4. T-N은 2.8g/m<sup>2</sup>·day~7.4g/m<sup>2</sup>·day사이의 오염부하량에 대하여 실험되었는데, 평균 86.5%의 높은 제거율을 보였다.

5. T-P도 평균 94.0%의 높은 제거율을 보여 모두 방류수 수질기준치를 만족시켜 인공저습지에서 효과적으로 제거되는 것을 알 수 있었다.

6. 폐수의 유하거리별 처리효율은 폭이 2.0m 인 경우 유입구로부터 4.0m 지점이내에서 급격히 증가한 후 그 이후에는 완만하게 증가하는 경향을 보였다.

7. 오염부하별 처리효율을 살펴볼 때 오염부하량이 낮다고 해서 반드시 처리효율이 높은 것은 아니므로 처리시스템에 따른 적정 부하량에 대한 추가연구가 이루어져야 할 것으로 생각된다.

8. 수온과 제거율사이에는 큰 상관성을 보이지는 않았다. 따라서 겨울철에는 비닐 등으로 간단한 이중피복을 하면 단일피복으로 한 경우에 비해 상당히 낮은 연료비만으로도 10℃ 이상으로 유지해줄 수 있어 일정한 처리효율을 유지할 수 있을 것으로 생각된다.

9. 이상의 연구 결과에 의하면 인공저습지에 의한 오수처리방법은 농공단지 폐수처리에 적용이 가능하다고 판단되며, 농촌지역 오수처리 및 축산폐수처리 등에도 응용범위를 확대할 수 있을 것으로 생각된다.

10. 인공습지에 의한 오폐수처리방법을 농촌지역 오폐수처리에 적용하기 위해 실제 농촌지역의 오염부하에 따른 적정 처리면적, 체류시간에 따른 처리효율, 갈대의 회수 방법과 이의 유효이용, 갈대 외에 오폐수 처리에 유

용하게 이용할 수 있는 식생의 추가 연구가 이루어진다면 농촌지역의 오폐수 처리만이 아니라 아름다운 자연경관을 제공해 줄 수 있는 시설이 될 수 있을 것으로 생각된다.

## 참 고 문 헌

1. 농림수산부, 1995, 농공단지 지정 및 개발 현황.
2. 矢吹萬壽, 이석건, 1992, 농업환경조절공학, 교보문고, 135-143.
3. 이동필, 이상문, 1996, 농어촌지역의 유형구분과 농공단지 개발사업의 활성화 방안, 한국농촌경제연구원 정책연구보고 P16.
4. Cooper, P. F., A. G. Boom, 1987, "The Use of Phragmites for Wastewater Treatment by the Root Zone Method : The UK Approach." In "Aquatic Plants for Water Treatment and Resource Recovery." K. R. Reddy and W. H. Smith (Eds.), Magnolia Pub., Inc., Orlando, Fla., 153.
5. Eaton, A. D., L. S. Clesceri, and A. E. Greenberg, Standards Methods for the Examination of Water and Wastewater, 1995, 19th ed. American Public Health Association, Washington, DC.
6. Knight, R. L., et al., 1987, "Performance of a Natural Wetland Treatment System for Wastewater Management." J. Water Pollut. Control Fed., 59, 746.
7. Tchobanoglous, G., 1987, "Aquatic Plant Systems for Wastewater Treatment Engineering Considerations." In "Aquatic Plants for Water Treatment and Resource Recovery." K. R. Reddy and W. H. Smith(Eds.), Magnolia Pub. Inc., Orlando, Fla.
8. U. S. EPA, 1988, Design Manual : Con-

- structed Wetlands and Aquatic Plant Systems for Municipal Wastewater Treatment, EPA/625/1-88/022, Cincinnati, OH.
9. Watson, J. T., et al., 1989, "Performance Expectations and Loading Rates for Constructed Wetlands." In "Constructed Wetlands for Wastewater Treatment," D. Hammer (Ed.), Lewis Pub., Inc., Chelsea, Mich.
  10. Wile, I., et al., 1987, "Design and Use of Artificial Wetlands." In "Start-up and Operation of an Evaporative Wetlands Facility." P.J. Godfrey et al., (Eds.), "Ecological Considerations in Wetlands Treatment of Municipal Wastewaters." Van Nostrand Reinhold Co., New York, N. Y. 290.
  11. WPCF(Water Pollution Control Federation), 1990, Natural Systems for Wastewater Treatment, Manual of Practice FD-16, Alexandria, VA.