

# 인공습지의 농촌지역 오수정화시설에 적용가능성 연구

## Feasibility Study of Constructed Wetland for the Wastewater Treatment in Rural Area

윤 춘 경\* · 권 순 국\*\* · 권 태 영\*\*\*  
Yoon, Chun Gyeong · Kwun, Soon Kuk · Kwun, Tae Young

### Summary

Field experiment was performed from August 1996 to January 1998 to examine the applicability of constructed wetland system for wastewater treatment in rural area. The pilot plant was installed in Kon-Kuk University and the school building septic tank effluent was used as an influent to the treatment basin. Hydraulic loading rate was about  $0.16\text{m}^3/\text{m}^2\cdot\text{day}$  and theoretical detention time in the system was 1.38 days. The treatment basin was composed of sand and reed. The influent DO concentration was low and many cases close to zero, but effluent concentration was higher than the influent which implies that oxygen was supplied naturally. The average concentration of influent BOD was  $126\text{mg/L}$ , and with average removal rate of 69% the average effluent concentration was  $40\text{mg/L}$  which satisfied the effluent water quality standard for the system of interest. The average influent concentration of COD was  $201\text{mg/L}$  and average effluent concentration was  $75\text{mg/L}$  with average removal rate of 60%. The performance of BOD and COD tends to deteriorate in the low temperature, and appropriate action needs to be taken during the cold winter time for stable operation. The average influent concentration of SS was  $50\text{mg/L}$ , and effluent was  $11\text{mg/L}$  with average removal rate of 76% which satisfied the effluent water quality standard for the system of interest. The results for the regulated components, BOD and SS, from the experiment showed that constructed wetland system can meet the effluent water quality standards. The average influent concentration of total phosphorus was  $25.6\text{mg/L}$  and average effluent concentration was  $7.8\text{mg/L}$  with average removal rate of 63%. Not like the performance of the above components, average nitrogen removal rate was only 11.2% which is not satisfactory. Although, nitrogen is not regulated at this moment, it can cause many environmental problems including eutrophication. Therefore, nitrogen removal efficiency should be improved for actual application. From the result of the field experiment, constructed wetland system was thought to be an appropriate alternative for wastewater treatment in rural area.

\* 건국대학교 농업생명과학대학  
\*\* 서울대학교 농업생명과학대학  
\*\*\* 건국대학교 대학원

키워드 : 가능성 연구, 오수처리, 농촌지역, 인공습지, 처리효율, 생화학적 산소요구량, 화학적 산소요구량, 부유물질, 질소, 인, 부여양화.

## I. 서 론

농어촌지역에서 배출되는 생활오수는 유기물과 영양물질이 주요 구성성분이며 산업폐수와 달리 유독성물질을 적게 함유하고 있는 특징이 있다. 따라서 이들은 적절한 과정을 거치면 자연계에 무리 없이 환원시킬 수 있으며 이러한 성질을 이용하여 농촌생활오수를 처리하고자 고안한 방법이 자연정화방법이다. 대규모 하수종말처리장에서의 여과, 침전, 생물학적 제거 등도 단위조각 원리를 살펴보면 자연계에서 일어나고 있는 자연정화기능이 좁은 공간에서 이루어지도록 공학적으로 설계한 시설들이라고 할 수 있다.

근래에 농어촌 환경정비사업의 일환으로 오수처리시설들이 전국적으로 도입되고 있는데, 이 중에는 농어촌의 지역적인 특성을 충분히 고려하지 않은 시스템이 적용되는 경우가 있어 기능 및 유지관리상 문제점이 발생하는 사례가 있다. 농어촌 지역에는 이용 가능한 자연자원이 도시에 비해 상대적으로 풍부하게 존재하므로 자연 스스로가 지니고 있는 정화기능을 최대한 활용하면 지역특성에 맞고 유지관리가 용이한 처리시설을 도입할 수 있을 것이다.

여러 가지 자연정화방법 중에서 축조가 용이하고 유지관리가 간편하며 처리효율이 비교적 안정적인 방법으로는 습지(wetland)를 생각할 수 있다. 습지는 토양과 식물, 그리고 미생물 등에 의한 오수정화가 효율적으로 이루어지는 처리시설이다. 토양공극이 물로 거의 포화되어 있어 토양과 대기 사이의 통기성에 제약을 받으나 습지에 생육하고 있는 대부분의 식물들은 보통의 육상식물과는 달리 통기 조직이 발달되어 뿌리 활동에 필요한 산소를 기공을 통해 흡수하고 있다.<sup>1)</sup> 이와 같이 뿌리 부분에 산소를 공급하므로 뿌리 부분은 호기성 상태가 유지되어 호기성 미생물들의 좋은 서식처가 된다. 여기에 서식하는 호기성 미생물들은 오수 중에 있는 영양물질을 흡수·분해하여 오수를 정화하게 되는 것이다.<sup>7-12)</sup>

습지에 유입된 오수중의 오염성분 가운데 입자가 큰 부유물질은 여과되고, 용해상태의 성분은 토양입자나 식물의 뿌리에 흡착되며, 영양물질들은 처리시설대에서 생육하는 식물에 의해 직접 흡수되고, 유기물은 토양이나 수중의 미생물 등에 의해 분해되는 정화과정을 거쳐 처리된다. 이러한 습지의 단위면적당 정화기능은 대규모 처리용 하수종말처리시설보다 낮을 수 있으나 축조 및 유지관리에 소요되는 비용이 낮아서 농어촌지역에 상대적으로 풍부한 자연자원을 지역실정에 맞게 활용하면 소규모 오수정화시설로서 적용이 가능한 대안이 될 수 있다.

습지는 자연습지(natural wetland)와 인공적으로 축조한 인공습지(constructed wetland)로 구분할 수 있는데 최근에는 자연습지의 환경생태적 중요성을 인식하고 그 보전에 많은 노력을 기울이고 있다. 과거에는 쓸모없는 땅으로 외면당해 개발과 훼손으로 축소되어 오던 습지가 최근에는 다양한 생태계, 높은 생산력, 그리고 풍부한 생물다양성을 보유한 중요한 자연자원으로 인식되어 그 경제적·환경적 가치를 인정받고 있다. 이에 따라 국제적으로 습지를 보호하기 위하여 1971년 람사협약을 체결하였으며, 우리나라에서도 습지보전 차원에서 람사협약에 가입을 준비 중이며 습지보전을 위한 정책적 지원도 계획 중이다. 이와 같은 자연습지의 보전 외에도 훼손된 습지를 인공적으로 복원시켜 그 기능을 이용하여 자연계의 물질순환을 원활하게 만들고자 하는 노력도 활발한데 이러한 습지를 인공습지라고 부르며 인공습지를 이용한 오수정화방법에 관한 연구가 국내에서도 수행되고 있다.<sup>2-5)</sup>

인공습지를 이용한 하수처리에 관한 연구는 1980년대부터 유럽에서 활발히 수행되기 시작하여 미국과 호주등지에도 보급되어 실용화단계에 있다. 국내에서는 안동<sup>4)</sup>이 인공습지에 의한 처리를 군부대의 오수정화에 적용한 사례가 있으며, 김<sup>5)</sup>은 농공단지 폐수 및 오수의 인공습지를 이용한 처리에 관하여 연구하는 등 인공습지를

이용한 오수처리분야에 관한 관심이 고조되고 있다. 본 연구에서는 농어촌 지역의 오수처리에 적용가능성을 검토하기 위하여 인공습지의 시작품을 제작하여 1년 6개월 동안 현장처리실험을 수행한 결과를 분석하며 인공습지의 오수처리시설로서 적용가능성을 검토하고자 한다.

## II. 재료 및 방법

본 실험에 사용된 오수는 건국대학교 농과대학 별관에 설치된 3단 정화조의 맨 끝 하류측에서 양수된 1차 처리수이며, 이를 처리시설의 저류조에 유입시킨 다음 저류조 하단에 설치된 유출구를 통하여 처리조에 유입시켰다. 실험에 사용된 오수는 대부분 화장실에서 배출되는 성분이기 때문에 농촌지역에서 발생하는 오수와 비슷하므로 본 실험 결과를 농촌지역의 오수처리에 적용하여도 무리가 없을 것으로 생각된다. 처리조는 Fig. 1 과 같이 2m(폭)×9m(길이)×1m(높이)의 concrete box에 모래를 60cm 높이로 채운 후 갈대를 심은 인공습지로서 흙작, 여과, 생물학적분해 등의 자연정화가 이루어지도록 만든 시설이다.

실제 처리에 사용되는 부분은 폭 2m×길이 8m×높이 0.6m에 채워진 모래층이다. 실험에

사용된 모래는 비중이 2.64이고 공극률(n)이 0.36인데, 입도분석 결과 삼각분류법(textural triangle)에 의하면 sandy loam이고, 통일분류법(unified soil classification system)에 의하면 SM(silty sand)으로 분류된다. 오수의 유입량은 약 2.5m<sup>3</sup>/일로써 모래층의 공극을 고려한 이론적인 처리시설내 체류기간은 약 1.38일 [(2×8×0.6×0.36) 2.5=1.38] 정도이며, 단위면적당 유입량은 약 0.16m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>.day(2.5÷(2×8)=0.16)이다. 수리부하율은 2.5m<sup>3</sup>/16m<sup>2</sup>.day로서 약 15.6 cm/day 정도이다. 저류조에서 나온 오수는 Fig. 1 과 같이 처리조 상류단에 있는 폭 2m×길이 0.5m×높이 0.6m의 자갈층을 통하여 전단면에 걸쳐서 균일하게 처리조에 흘러 들어가게 하였고, 유출수는 처리조의 하류단 바닥부분에 설치한 유공관을 통하여 균일하게 집수되어 배출되도록 하였으며, 처리조의 유입수 및 유출수의 유량은 유입구 및 유출구에 각각 설치한 밸브로 조절하였다. 실험을 위한 유입수와 유출수의 시료채취는 처리조의 이론적 체류시간만큼의 시간간격을 두어 유입한 오수가 유출할 시기에 측정하여 이들 사이

Table 1. Analytical methods used for constituents

Constituents	Methods	Remark
DO(dissolved oxygen)	SM 4500-O C	Azide Modification Method
BOD(biochemical oxygen demand)	SM 5210-B	5-day BOD test K <sub>2</sub> Cr <sub>2</sub> O <sub>7</sub> used
COD(chemical oxygen demand)	SM 5220-B	
SS(suspended solids)	SM 2540-D	
T-N(total nitrogen)		
Organic nitrogen	SM 4500 -NO <sub>org</sub> -C	..
NH <sub>3</sub>	SM 4500 -NH <sub>3</sub> -3	BUCHI 435와 B-316
NO <sub>2</sub> <sup>-</sup>	SM 4110-B	Dionex DX-100
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	SM 4110-B	Dionex DX-100
T-P(total phosphorus)	SM 4500-P E	HP8452A Spectrophotometer

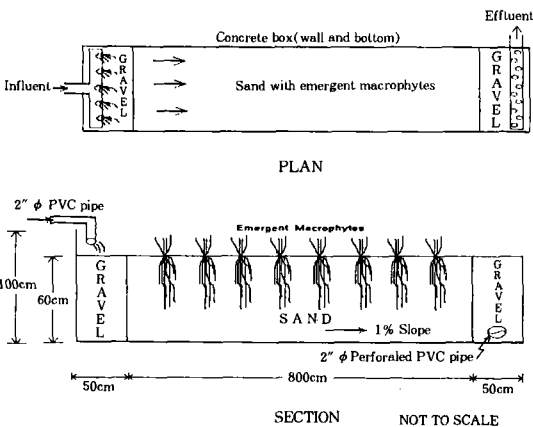


Fig. 1. Schematic plan and section of the constructed wetland system

의 농도차이로 처리효과를 검토하였다. 처리조는 유입된 오수의 원활한 흐름을 위하여 콘크리트 바닥에 1%의 경사를 주었다.

수질분석방법은 Standard Methods<sup>8)</sup>에 의해 실시하였는데 Table 1에 요약되어 있다.

처리시설과 분석방법에 관한 좀더 상세한 내용은 참고문헌<sup>5)</sup>에 기술되어 있다. 위와 같은 처리시설을 이용하여 1996년 8월부터 시작하여 1998년 2월 현재 현장실험이 계속되고 있으며 그 결과를 요약하고 고찰하고자 한다.

### III. 결과 및 고찰

실험결과는 각 항목별로 Fig. 2에서 Fig. 9까지 나타나 있으며 각 항목별로 구분하여 고찰하고자 한다. 그림에서 알 수 있듯이 실험 첫해에 일부 실험자료가 누락되어 있는데 이유는 시설의 미비로 특히 겨울기간을 포함하여 실험을 수행하지 못하였기 때문이다. 두번째 해부터는 시설을 보완하여 지속적으로 수행하였으며 겨울에도 제한적이지만 실험결과를 얻을 수 있었다.

#### 1. 수온과 pH

수온에 관한 실험결과는 Fig. 2에 나타나 있다. 실험시설에는 인위적인 보온이 전혀 포함되지 않았는데, 관찰결과에 의하면 영하의 기온에서도 정화조에서 양수되어 처리조에 들어오는 유입수는 5℃ 이상을 유지하였으며, 계속 흐름 경우 대기 기온이 약 영하 20℃ 정도에서도 처리조를 통과하는 동안 얼지 않고 액체상태로 유출되었다. 이러한 결과는 인위적인 보온시설을 갖추지 않았어도 기온의 강하로 인한 처리기능의 저하는 예상되나 추운 겨울에 처리조가 완전히 얼어 기능을 상실하지는 않는다는 점을 보여준다.

pH 측정결과는 유입수의 평균이 7.91인데 유출수의 평균은 7.12로서 Fig. 3에 나타나 있는바와 같이 처리조를 통과하면서 pH가 하향 조정되어 중성에 가까워지는 것을 알 수 있다. 이러한

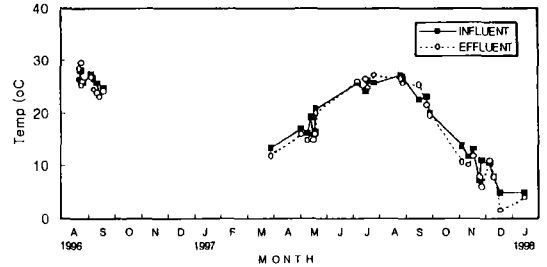


Fig. 2. Water temperature of influent and effluent of the treatment system

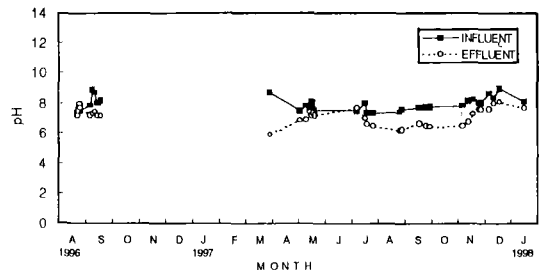


Fig. 3. pH of influent and effluent of the treatment system

현상은 완충기능이 풍부한 자연자원으로 구성된 처리조를 지나면서 오수의 중성화가 진행되는 것으로 추정된다.

#### 2. 용존산소량(DO)

정화조는 일반적으로 산소가 부족한 혐기성상태가 많아 인위적인 폭기가 없을 경우 용존산소가 낮거나 거의 없는 상태이다. 따라서 정화조로부터 양수하여 배관을 통해 처리조에 유입되는 유입수의 DO는 낮다. 그러나 처리조를 통과하면서 불포화모래층에서는 통기성이 좋아 자연적으로 폭기가 원활히 이루어지며, 포화모래층에서는 수면을 통한 자연적인 폭기가 불포화층에 비하여 원활하지는 않으나 갈대의 뿌리를 통한 산소 공급이 더해져서 전반적인 산소공급에는 부족함이 없을 것으로 판단된다. 이러한 현상은 Fig. 4에 나타나 있듯이 유입수 평균이 0.33mg/L인 것에 비하여 유출수 평균이 2.14mg/L로 높은 것에서

알 수 있다.

처리조내에서는 호기성미생물에 의한 생물학적 분해가 일어나면서 다량의 산소가 소모된다. 따라서 오수에 부족한 만큼의 산소공급 외에도 호기성미생물의 활동에 필요한 분량의 산소가 공급되어야 유출수의 DO가 높아진다는 점을 고려하면 처리조내에서의 자연적인 폭기기능이 활발하다는 것을 알 수 있다. 실험기간동안 유입수의 BOD가 약 50~200mg/L이었는데 이 실험결과에 의하면 인공습지를 이용한 오수처리의 경우 일반적으로 인공폭기가 없는 자연상태에서도 처리조내의 호기성 유지에 큰 어려움이 없을 것으로 판단된다. 오수처리시설을 운영하는데 있어서 폭기시설의 유무는 유지관리의 용이성뿐만 아니라 비용면에서도 큰 비중을 차지하므로 인공폭기가 없는 상태에서 인공습지의 활발한 자연적폭기 기능으로 인한 처리조의 호기성유지는 중요한 의미를 갖는다고 할 수 있다. 일반적으로 대규모 하수종말처리장의 생물학적처리조내 DO는 약 2mg/L이상으로 유지하기를 요구하고 있다.

60mg/L, 40mg/L이다.

우리 나라 농촌지역의 자연부락의 규모는 평균 약 20가구 정도이며 근래에 짓고 있는 전원주택 등의 규모도 일반적으로 50가구내외이다. 마을당 규모를 50가구로 기준할 때 1가구 4인 가족으로 환산하면 농촌지역의 마을당 주민수는 약  $50 \times 4 = 200$ 명 정도로 추정할 수 있다. 물론 인근마을까지 합하면 규모가 커질 수 있으나 마을간의 거리가 멀고 지형적으로 차집하여 공동처리하는데 어려움이 있는 경우가 많으므로 단위마을당 처리시설을 대상으로 적용하고자 한다. 1인당 1일 평균 오수발생량이 약 250L로 예상하면 마을당 오수발생량은  $200 \times 250 = 50,000L = 50m^3$  정도이다. 따라서 일반적인 농촌마을의 경우  $100m^3$  이하인 경우의 BOD 방류수 수질기준은 80mg/L가 된다. 농촌마을 자연부락의 경우 규모가 커도 특수한 경우를 제외하고는 오수발생량이  $200m^3$  이상인 경우는 드물 것이며, 이는 200가구 이상으로 주민수가 800명에 달하는 규모에 해당한다. 본 연구에서는  $100 \sim 200m^3$  이하인 경우로서 방류수수질기준이 60mg/L인 경우를 대상으로 하고자 한다.

Fig. 5에 나타나 있듯이 유입수의 BOD농도는 45~193mg/L로서 평균 약 126mg/L이었는데 유출수의 농도는 12~149mg/L로서 평균 약 40mg/L이었다. 처리율은 19~91%까지로서 평균 약 69%의 비교적 안정적인 처리효율을 나타내었다. 유출수의 농도는 전반적으로는 방류수수질기준인 60mg/L 이하로 만족스러웠으나 1997년 12월부터는 유출수의 농도가 기준을 상회하여 기온이 낮은 겨울에는 처리효율이 낮아짐을 알 수 있다. 1998년 1월에는 유출수농도가 다시 기준이하로 낮아졌는데 이는 유입수의 농도가 상대적으로 낮았기 때문이며 처리효율이 높아서 그러한 결과가 나온 것은 아니었다. 그 이유는 겨울동안에는 갈대의 생육이 정지되어 식물에 의한 흡수 및 산소공급이 중단되고, 미생물에 의한 분해 속도가 느리며, 처리조 상부일부는 영하의 대

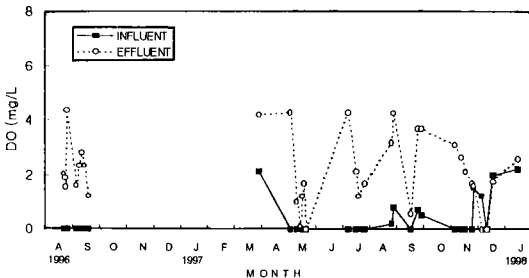


Fig. 4. DO concentration of influent and effluent of the treatment system

### 3. 생물화학적산소요구량(BOD)

BOD는 오수내 생분해가 가능한 유기물질의 농도를 나타내는 지표로서 방류수 수질기준을 정하여 규제하고 있는 항목이다. 오수·분뇨 및 축산폐수의 처리에 관한 법률에 의하면 1일처리용량이  $100m^3$ ,  $100 \sim 200m^3$ ,  $200m^3$  이상, 세 가지 경우에 BOD의 방류수 수질기준<sup>6)</sup>이 각각 80mg/L,

기온도로 인하여 얼어서 처리조의 활용도가 떨어지기 때문에 판단된다.

이와 같이 겨울동안의 저조한 처리율에 대한 대책으로는 오수 유입량을 감소시켜 오염부하량을 낮추는 방법, 처리시설에 최소한의 난방을 공급하여 식물의 생장을 가능하게 하고 처리율을 일정수준 이상으로 유지하는 방법, 또는 처리조의 용량을 충분히 크게하여 12월~2월까지의 동안에 발생하는 오수를 방류하지 않고 저류하였다가 이듬해 봄에 방류를 시작하는 방법 등을 고려해 볼 수 있다. 그런데 에너지를 이용하여 난방을 공급하는 데에는 한계가 있고, 겨울 동안에는 오수발생량이 여름보다 작을 것으로 예상되나 처리조를 크게하여 겨울 동안에 발생한 오수를 저류시킨다는 방법도 부지가 제한되어 있으면 적용이 어려울 것이다. 따라서 인공습지를 본격적으로 오수처리에 적용하기 위해서는 처리조내 BOD 제거과정에 관한 좀더 깊은 연구를 통하여 처리기능을 향상시킬 수 있는 방법, 단위면적당 오염부하량을 줄일 수 있도록 여유있는 처리조의 용량 확보, 태양열 등 자연에너지를 이용한 저렴한 보온의 공급, 그리고 처리조의 모든 부분이 균일하게 처리기능을 할 수 있도록 처리시설을 설계하고 축조하는 등 다각적인 보완연구가 필요하다고 판단된다.

#### 4. 화학적산소요구량(COD)

COD의 실험결과는 Fig. 6에서와 같이 유입수

농도가 77~367mg/L로서 평균 약 201mg/L이었으며 유출수의 농도는 17~194mg/L로서 평균 약 75mg/L이었다. 제거율은 1997년 12월에 -27%를 나타내기도 하였으나 평균 약 60% 비교적 안정적으로 처리하였으며 많은 경우에 90% 이상의 높은 처리율을 나타내었다. 유입수와 유출수의 COD/BOD 비율을 살펴보면 각각 1.64와 2.30으로서 유출수에서 높게 나타났다. 이유는 COD는 난분해성부분까지 포함한 산소요구량인데 처리조를 통과한 유출수의 경우에 미생물에 의해 분해가 가능한 BOD부분이 많이 제거되었으므로 작아져서 비율이 커진 것으로 생각된다. 유입수와 방류수의 농도를 비교해보면 역시 기온이 낮은 겨울에 처리율이 낮음을 알 수 있는데 BOD에서와 같이 저온에서 안정적인 처리율 유지에 관한 추가연구가 필요하다고 판단된다.

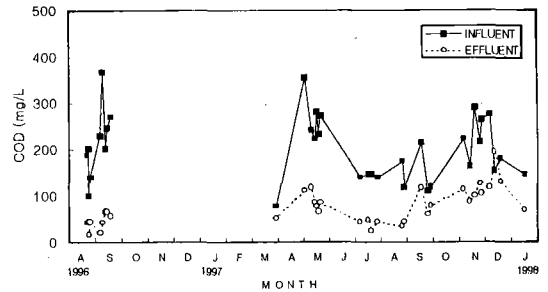


Fig. 6. COD concentration of influent and effluent of the treatment system

#### 5. 부유물질량(SS)

SS는 방류수수질기준에서 규제하고 있는 항목인데 오수·분뇨 및 축산폐수의 처리에 관한 법률에 관한 법률에 의하면 BOD와 같이 처리용량에 따라 기준이 다르다<sup>6)</sup>. 1일처리용량이 100m<sup>3</sup>, 100~200m<sup>3</sup>, 200m<sup>3</sup> 이상일 세가지 경우에 SS의 방류수수질기준은 각각 80mg/L, 60mg/L, 40mg/L이다. SS는 모래로 채워진 길이 8m의 처리조를 통과하는 동안에 효과적으로 여과가 일어나 실험기간동안 모두 유출수의 농도가 60mg/L

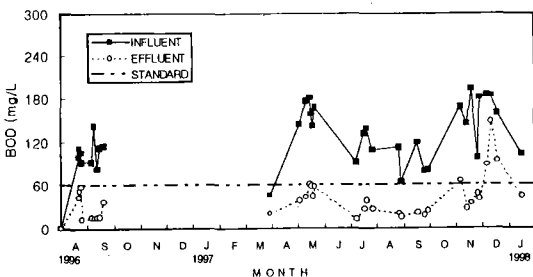


Fig. 5. BOD concentration of influent and effluent of the treatment system

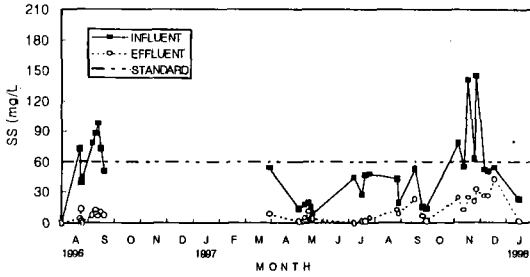


Fig. 7. SS concentration of influent and effluent of the treatment system

보다 이하로서 적용대상의 방류수수질기준을 만족시켰다. Fig. 7에 나타나 있듯이 유입수의 SS 농도는 9~145mg/L로서 평균 약 50mg/L이었는데 유출수의 농도는 0.3~44mg/L로서 평균 약 11mg/L이었다. 처리율은 19~99%까지로서 평균 약 76%의 안정적인 처리효율을 나타내었다.

인공습지에 의한 SS의 처리는 주로 여과기능에 의해 이루어 지는데, 이러한 여과는 궁극적인 제거가 아니고 물리적인 분리과정이기 때문에 여과된 부유물질은 입자상태로 처리조내에 잔류하게 된다. 이렇게 잔류하는 고형물질중에서 오염성분들은 미생물에 의한 생물학적분해, 용해된 후 식물에 의한 흡수, 기타 화학반응 등을 거치면서 궁극적으로 제거된다. 그런데 유입되어 잔류하는 고형물질의 부하량이 처리조내의 제거율을 초과하게 되면 처리조에 고형오염물질이 누적되어 처리조의 전반적인 효율을 감소시킬 수 있다. 부유물질의 농도는 BOD농도와 밀접한 관계가 있는데 처리조내 고형물질의 누적으로 제거기능이 떨어질 뿐만 아니라 오히려 누적된 오염성분이 세척되어 유출하는 경우도 예상할 수 있다. 본 연구에서는 실험 시작 후 약 1년 4개월이 경과한 1997년 11월 중순에 처리조의 모래층의 단면을 점검하였는데 지표로부터 깊이의 약 2/3부분 아래층에는 모래색깔이 약간 변하여 회색을 띠고 있었다. 색깔이 변하기 시작한 부분은 갈대의 뿌리가 접근하지 않은 부분이었는데, 이러한 관측은 식물의 뿌리가 있는 지역이 뿌리를 통한

직접흡수 및 뿌리주변의 활발한 미생물의 분해로 인하여 유기물의 제거가 활발하다는 점을 간접적으로 설명해주는 결과라고 할 수 있다.

## 6. 총 인(TP, total phosphorus)

인은 식물의 생육에 필수요소로서 자연계에서 주로 인산으로 존재하며 인산성분은 질소성분과는 달리 물에 용해가 잘 안되고 토양에 견고하게 부착되어 광물질이나 유기물질들과 복합화합물의 형태를 이루고 있다. 총인은 용해상태와 입자상태의 모든 인산성분을 합한 것으로서 본 연구에서는 총인을 측정하였으며, 일반적으로 하수나 폐수의 방류수 수질기준에서도 인성분은 총인으로 규제하고 있다.

Fig. 8에 나타나 있듯이 유입수의 TP농도는 7.0~58.3mg/L로서 평균 약 25.6mg/L이었는데 유출수의 농도는 0.4~26.0mg/L로서 평균이 약 7.8mg/L이었다. 평균처리율은 약 63%로서 비교적 안정적인 처리율을 보여주고 있다. 총인은 BOD와 SS처럼 오수정화시설이나 정화조의 방류수 수질기준에는 포함되어 있지 않으나 분뇨처리시설 및 축산폐수처리시설의 방류수 수질기준에는 16mg/L로 규제하고 있다. 따라서 본 연구에서 대상으로 하고 있는 오수정화시설에는 해당하지 않으나 참고로 유출수의 농도와 비교해 보면 이 기준도 만족시키는 것을 알 수 있다. 인의 처리기능은 고형입자에 흡착되어 있는 성분의 여과, 용해상태의 성분은 모래입자나 기타 다른 입자에의 흡착, 그리고 식물에 의한 흡수, 미생물에 의한 분해 등으로 예상할 수 있다. 그 중에서 주요기능은 여과와 흡착인데 SS의 경우와 마찬가지로 부하량이 처리조의 용량을 초과할 경우에 누적되었던 인성분이 세척에 의해서 또는 용출되어 오히려 유출수의 농도가 높게 나타날 수 있다. Fig. 8에서 살펴보면 식물의 생장이 활발하고 미생물의 활동이 활발한 기간에는 비교적 처리효율이 높았으나 1997년 11월부터 처리효율이 낮아짐을 알 수 있다. 그 이유는 낮은 기온으로

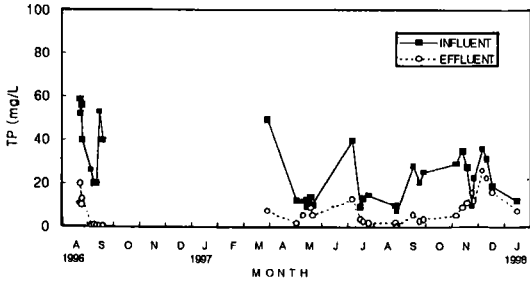


Fig. 8. TP concentration of influent and effluent of the treatment system

인한 처리조의 전반적인 처리효율 저하에 의한 것인지 아니면 1년여의 실험기간 동안에 인성분이 누적되어 처리용량의 한계에 의한 것인지는 봄이 되면서 계속 측정하면 알 수 있을 것이다. 특히 인성분에 관한 연구는 초기에 흡착과 여과에 의한 높은 처리효율을 기준으로 인공습지를 설계하였을 경우에 운영 후 일정기간이 지나서 처리조가 포화되어 어려움을 겪을 수 있으니 각별한 주의를 필요로 한다.

### 7. 총질소(TN)

질소는 인과 함께 식물생장에 필수요소이며 유기성질소(ON<sub>org</sub>-N, organic nitrogen), 암모니아성질소(NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N), 아질산성질소(NO<sub>2</sub>-N), 그리고 질산성질소(NO<sub>3</sub>-N)등의 형태로 자연계에 존재한다. 이중에 유기성질소와 암모니아성질소를 합하여 TKN(total kjeldahl nitrogen)이라고 부르고 TN = TKN + NO<sub>2</sub>-N + NO<sub>3</sub>-N로 구할 수 있다. 질소는 인과 함께 水界에 과다 유입될 경우에 부영양화를 유발하여 수질문제를 일으켜 수자원의 가치를 저하시키는 원인이 된다. Table 2에는 유입수와 유출수 질소의 각 성분별 농도가 요약되어 있다.

TKN은 유입수 평균농도가 105.6mg/L인데 유출수 평균농도가 52.7mg/L로서 이들 간의 비교에 의하면 약 50.0%의 처리율을 나타내고 있으며, NO<sub>2</sub>는 유입수 평균농도가 8.5mg/L인데 유출수 평균농도가 7.2mg/L로서 약 15.3%의

처리율을 나타내고 있다. 그러나 NO<sub>3</sub>의 경우는 유입수 평균농도가 6.7mg/L이었으나 유출수 평균농도가 47.2mg/L로서 약 6배 이상으로 증가하였다. 그 이유는 호기성을 유지하고 있는 처리조를 통과하면서 질산화작용(nitrification)이 일어나 TKN과 NO<sub>2</sub>가 NO<sub>3</sub>으로 바뀌었기 때문이다. 따라서 TKN과 NO<sub>2</sub>의 감소는 제거가 아니고 NO<sub>3</sub>로의 변환이라고 해석해야 한다. TN은 유입수평균농도가 120.7mg/L인데 유출수평균농도는 107.2mg/L이어서 약 11.2% 정도의 저조한 처리율을 나타내고 있다. 표에서 1997년 11월 19일부터는 유출수의 NO<sub>2</sub>와 NO<sub>3</sub>의 농도가 거의 검출되지 않았는데 이유는 기온이 낮아 전반적으로 처리효율이 낮았으며, 미생물들의 활동이 저조하여 질산화 과정도 잘 일어나지 않아서 정화조에서 양수하여 처리조에 유입시킨 상태의 질소성분이 큰 변화없이 그대로 유출된 것으로 생각된다.

총질소는 총인과 같이 오수정화시설이나 정화조의 방류수 수질기준에는 포함되어 있지 않으나 분뇨처리시설 및 축산폐수처리시설의 방류수 수질기준에는 120mg/L로 규제하고 있다. 본 연구에서 대상으로 하고 있는 오수정화시설에는 해당하지 않으나 참고로 유출수의 농도와 비교해 보면 평균유출수의 농도는 이 기준보다 약간 낮다. 그러나 Fig. 9에 나타나 있듯이 120mg/L보다 높은 경우도 많으며 특히 유출수의 농도가 유입수의 농도보다 높은 경우가 많아서 전반적으로 처리효율이 불안정하고 저조함을 알 수 있다.

앞에서 각 성분별로 검토한 내용을 종합적으로 정리해 보면 질소성분을 제외하고는 비교적 안정적으로 처리하여 관련 방류수 수질기준 등을 만족시키고 있음을 알 수 있다. 그리고 질소와 인은 아직은 규제항목은 아니지만 유사한 시설인 분뇨처리시설 및 축산폐수처리시설의 방류수 수질기준과 비교해 볼 때 대체로 만족시키고 있다. 이러한 실험결과는 국내에서 군부대의 오수처리에 적용하여 얻은 처리효율<sup>4)</sup>인 BOD(67%),



Table 2. Nitrogen analysis of the treatment system

Date	TKN(mg/L)		NO <sub>2</sub> (mg/L)		NO <sub>3</sub> (mg/L)		TN(mg/L)	
	Influent	Effluent	Influent	Effluent	Influent	Effluent	Influent	Effluent
1996. 8. 21	105.0	61.6	35.6	14.5	16.7	43.9	157.4	120.0
8. 22	101.2	69.0	0	15.1	48.5	48.5	116.9	132.6
8. 23	78.8	52.0	35.0	19.6	14.7	109.4	128.5	181.0
8. 24	103.1	60.2	0	14.5	16.2	112.4	119.3	187.1
9. 3	133.1	45.7	0	2.1	3.3	44.0	136.3	91.8
9. 6	137.2	44.8	0	2.3	3.2	40.4	140.4	87.5
9. 9	141.4	57.5	3.1	2.2	9.0	68.8	153.5	128.5
9. 12	179.2	53.2	3.4	5.3	8.6	160.6	191.2	219.1
9. 16	184.8	88.2	0	3.6	4.2	14.1	189.0	105.8
1997. 3. 26	35.1	24.8	7.9	3.2	5.2	10.2	48.2	38.2
4. 29	152.6	21.8	28.2	2.7	17.4	8.9	198.2	33.4
5. 6	178.4	61.2	37.2	12.2	14.3	21.4	229.9	94.8
5. 10	152.1	62.4	32.6	12.4	8.9	11.6	193.6	86.4
5. 12	135.3	62.4	26.7	15.9	11.4	21.4	173.4	99.7
5. 14	126.9	52.3	23.2	11.5	5.9	20.7	156.0	84.4
5. 16	88.8	60.8	21.4	7.9	15.2	19.7	125.4	88.4
7. 2	103.1	60.2	0	14.5	16.2	112.3	119.3	187.0
7. 11	54.8	21.5	8.0	3.8	1.3	26.9	64.1	52.2
7. 14	98.8	40.8	0	0	1.0	122.8	99.8	163.6
7. 21	117.6	45.6	0	2.2	1.0	72.9	118.6	120.7
8. 20	71.0	28.0	0	7.6	2.1	115.4	73.1	151.0
8. 22	57.4	19.6	0	10.8	2.2	84.3	59.6	114.7
10. 29	70.0	39.2	0	0	1.7	17.0	71.8	86.2
11. 5	60.2	31.5	0	31.6	1.6	76.2	61.8	139.3
11. 10	140.0	78.4	0	9.1	1.8	26.1	141.8	113.6
11. 17	82.6	76.3	0	0	0	22.3	82.6	98.6
11. 19	110.6	62.3	0	0	1.8	0	112.4	62.3
11. 28	62.0	61.6	0	0	1.8	0	64.8	61.6
12. 3	53.2	53.2	0	0	1.8	0	55.0	53.2
12. 11	97.2	91.4	0	0	1.8	0	99.0	91.4
1998. 1. 7	59.6	47.6	0	0	1.8	0	61.2	50.2
Average	105.6	52.7	8.5	7.2	6.7	47.2	120.7	107.2

COD(66%), SS(67%), TP(35%), 그리고 TN(19%)와 비교할 때 유사한 범위내에 있다. TP의 처리효율은 본 실험에서는 높는데, 그 이유는 본 실험에서 사용한 유입수의 농도가 상대적으로 높아서 처리조를 통과한 유출수의 농도와 비교하여 처리율을 비교할 때, 유입수가 낮은 경우와 비교하여 상대적으로 효율이 높게 나타났기 때문

이다. 본 실험의 결과를 외국문헌에 나타난 인공습지의 경우와 비교하여 Table 3에 정리하였다.

본 실험에 적용한 수리부하율은 문헌상의 범위보다 2배 정도 많았으며, 따라서 처리조 내 체류기간도 상대적으로 적었다. BOD와 SS의 부하율은 일반적인 범위내에 있으며 처리율도 유사하게 나타났다. 그러나 영양물질인 TN과 TP는 부하

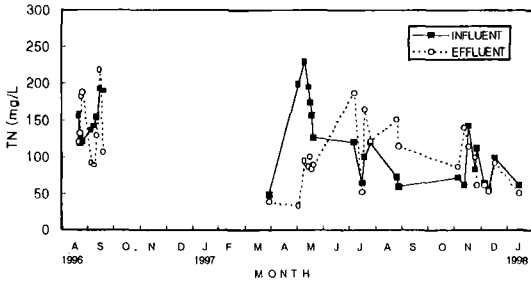


Fig. 9. TN concentration of influent and effluent of the treatment system

Table 3. Comparison of the results with literature values

Component	Values	Test results	Literature values <sup>1,2)</sup>
Hydraulic loading(cm/day)		15.6	6~8
Hydraulic retention time(days)		1.38	5~10
BOD	Loading rate(kg/ha·day)	196.9	up to 300
	Avg. removal rate(%)	69	70~90
SS	Loading rate(kg/ha·day)	78.1	yp to 150
	Avg. removal rate(%)	76	over 70
TN	Loading rate(kg/ha·day)	188.6	up to 80
	Avg. removal rate(%)	11	75~95*
TP	Loading rate(kg/ha·day)	40	up to 28
	Avg. removal rate(%)	63	30~50

율이 높았고 처리율도 다른 양상을 나타내었다. TN의 처리율이 낮게 나타난 이유는 처리조내의 체류기간이 적어서 제거가 이루어지지 못한 상태로 유출되었기 때문으로 생각되며, TP의 처리율이 높은 이유는 유입부하율이 높아서 토양층을 통과하며 처리된 유출수의 농도가 일정수준을 유지할 때 상대적으로 처리율이 높게 나타났기 때문으로 판단된다. 이상의 비교에 의하면 본 실험의 결과는 질소성분을 제외하고는 문헌상에 나타난 일반적인 처리율의 범위에 속하며, 질소성분의 경우는 체류기간을 길게 하면 유사한 결과를 기대할 수 있을 것이다. 이러한 현장실험결과는 인공습지가 축조비용이 적고 운영비용은 무시할 정도로 낮으며, 유지관리가 용이하고, 자연자원을 활용하여 처리하는 환경친화형 오수정화시설

인 점을 고려할 때 농촌지역의 오수처리시설로 적합한 대안 중의 하나가 될 수 있다고 판단된다.

#### IV. 요약

건국대학교 농과대학에 오수정화용 인공습지를 설치하여 1년 6개월 동안 현장실험한 내용을 분석하고, 그 적용가능성을 검토하였는데 결과는 다음과 같이 요약할 수 있다.

1. 기온이 약 영하 20℃인 상태에서도 오수의 흐름이 계속될 경우에 얼지 않고 액체상태로 유출되어 겨울동안 보온시설이 없을 경우에 처리능이 저하되기는 하나 완전히 얼어 처리능을 상실하지는 않을 것으로 판단된다. 한편 pH는 처리조를 통과하는 동안 중성에 가까워져서 토양과 식물로 이루어진 처리조의 완충능이 풍부함을 알 수 있었다.

2. 인위적인 폭기시설이 없어도 유출수의 DO가 유입수보다 높아서 처리조의 자연폭기가 원활히 이루어짐을 알 수 있었다. 인위적인 폭기를 추가하면 처리효율의 개선을 기대할 수 있으나 폭기에 소요되는 비용과 유지관리를 고려하면 일반적인 경우에 인위적인 폭기없이도 인공습지의 운영이 가능하다고 생각된다.

3. BOD와 COD의 처리효율은 각각 평균 약 69%와 60% 정도로서 비교적 안정적이었으며, 규제항목인 BOD의 경우에는 유출수의 농도가 방류수 수질기준을 대체로 만족시켰다. 다만 기온이 낮을 경우에 처리효율이 떨어지는 문제를 개선하기 위해서 특히 겨울철의 최적운영방안에 관한 보완연구가 필요하다.

4. SS의 경우는 실험기간동안 평균 약 76%의 안정적인 처리효율을 나타내었으며, 유출수농도가 모두 방류수 수질기준을 만족시켜서 인공습지에 의한 오수처리의 경우 SS의 제거는 어렵지 않게 이루어질 것으로 생각된다.

5. 총인은 평균제거율 약 63%로서 비교적 안정적인 처리효율을 나타내었으나, 실험기간이 경

과하면서 처리율이 낮아지는 경향이 있어 처리조 내 인성분의 누적가능성이 예상된다. 이러한 현상은 제거율보다 부하율이 초과하였을 경우에 발생하며, 처리능력이 포화된 후에는 오히려 세척이나 용출에 의하여 인 성분이 유출수에 함유될 수 있으므로 설계시 주의가 필요하다.

6. 총질소의 처리효율은 약 11.2%로서 가장 저조하였으며 유입수보다 유출수의 농도가 높은 경우도 있었다. 이와 같이 저조하고 불안정한 질소제거율의 개선을 위한 추가연구가 요구된다. 일정한 효율이상의 질소제거가 반드시 필요한 경우에는 인공습지의 자연정화기능만으로 부족할 수 있으므로 질소제거용 추가시설의 설치도 고려할 수 있을 것이다.

실험결과는 외국문헌상에 나타나 있는 결과와 대체적으로 유사하며, 질소의 경우 처리율이 낮은 편이나 처리조 내 체류기간을 길게하면 문헌상의 처리율과 유사한 결과를 기대할 수 있을 것이다. 이상의 실험에 의하면 인공습지에 의한 오수처리는 오수정화시설로서 방류수 수질기준을 대체로 만족시키며 농촌지역에 적용할 수 있는 대안 중의 하나라고 판단된다. 다만 본격적인 적용을 위해서는 겨울동안의 운영방법, 영양물질들의 적정부하량 산정, 그리고 처리율이 저조한 질소제거 기능의 개선 등 부족한 부분에 관해서 계속적인 연구와 보완이 요구되며, 실제 적용을 위해서는 보다 큰 규모나 full scale의 적용성 실험이 필요하다고 판단된다.

본 연구는 농림부의 첨단농업기술개발사업 과제인 “농촌하천유역의 종합적 수질관리 시스템 개발”의 연구비지원에 의해 수행되었음.

### 참 고 문 헌

1. 김형곤, 1990, 습지생태계 토양의 질소 및 인

산의 동태, 공주사범대학교 박사학위 논문.  
 2. 윤춘경, 권순국, 김형중, 1997, 인공습지에 의한 농촌오수처리에 관한 연구, 한국농공학회지, 39(4), pp. 55-63.  
 3. 윤춘경, 권순국, 김형중, 1997, 인공습지를 이용한 자연정화 오수처리시설에서 영양물질의 변화와 대장균군의 행동, 한국환경농학회지, 16(3), pp. 249-254.  
 4. 과학기술정책관리연구소, 1997, 인공습지를 이용한 군부대 오수정화처리에 관한 연구.  
 5. 김형중, 1997, 자연정화방법을 이용한 농촌지역의 소규모오폐수처리 시스템, 박사학위논문, 건국대학교 농공학과 대학원.  
 6. 홍문관, 1996, 환경관계법규 II, 수질편, 오수·분뇨 및 축산폐수의 처리에 관한 법률 별표 1, p. 497.  
 7. 大橋欣治, 田中康一, 1996, 農村水域における水質保全, 農土誌, 64(4), pp. 357-363.  
 8. 細見正明, 1990, 濕地による水質浄化, 用水と廢水, 32(8), pp. 716-719.  
 9. 細見正明, 須藤隆一, 1991, 濕地による生活排水の浄化, 水質汚濁研究, 14(10), pp. 674-681.  
 10. American Public Health Association, 1992, Sandard Methods 18th Ed., Washington, D. C., USA.  
 11. Metcalf & Eddy, 1991, Wastewater Engineering : Treatment, Disposal, Reuse, Third Ed., McGraw-Hill, New York, NY, USA, pp. 901-982.  
 12. Water Pollution Control Federation, 1990, Natural Systems for Wastewater Treatment, Manual of Practice FD-16, Alexandria, VA, USA, pp. 211-260.