

## 인공습지에 의한 농공단지 폐수처리†

윤춘경 · 임용호<sup>1)</sup> · 김형중

전국대학교 농공학과, <sup>2)</sup>전국대학교 농화학과

### Natural Treatment of Wastewater from Industrial Complex in Rural Area by Subsurface Flow Wetland System

Chun-Gyeong Yoon, Yoong-Ho Lim and Hyung-Joong Kim(Dept. of Agricultural Eng., Kon-Kuk University, Seoul, 143-701 ; <sup>2)</sup>Dept. of Agricultural Chemistry, Kon-Kuk University, Seoul, 143-701)

**Abstract :** Constructed wetland system was studied to treat wastewater from industrial complex in rural area. Pilot plant at the Baeksuk Nongkong Danzi in Chunahn-City was used for field study. For the DO, the effluent concentration was higher than the influent concentration and it implies that natural reaeration supplies enough oxygen to the system. 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 is consist of soil and plants. For the BOD and COD, the average removal rate of them were 56% and 43%, respectively, therefore, the effluent concentration could not meet water quality standards when influent concentration was high. The removal rate of BOD and COD can be improved by supplemental treatment in addition to this system if necessary. For the T-N and T-P, the influent concentration of them were lower than the water quality standards than no further treatment was needed. Overall, the result showed that constructed wetland system is a feasible alternative for the treatment of wastewater from industrial complex in rural area. For actual application of this system, further study on design factors including loading rate, removal mechanism, and temperature effects is required to meet water quality standard consistently. Compared to existing systems, this system is quite competitive because it requires low capital cost, almost no energy and maintenance, and therefore, very cost effective.

## 서 론

농어촌 지역에서 점원오염(point source pollution)으로 배출되는 오폐수가 과거에는 농가에서 배출되는 생활오수와 축사에서 배출되는 축산폐수 정도이었으나, 근래에 농어촌 지역의 소득증대사업의 일환으로 1984년도부터 농공단지가 들어서면서<sup>1-3)</sup> 이들 농공단지에서 배출되는 폐수도 포함하게 되었다. 농공단지에서 배출되는 폐수는 산업폐수의 일종이기 때문에 종래의 농촌에서는 흔하지 않았던 성분을 함유할 수 있으므로 그 처리에 각별한 유의가 필요하다. 농촌에 위치한 농공단지는 만약에 유독성물질에 의한 환경문제를 일으키면 주변의 농지뿐만 아니라 자연생태계에도 영향을 직접 신속하게 미칠 수 있기 때문에 농공단지 폐수처리는 농촌환경 보전측면에서 결코 소홀히 할 수 없는 부분이다.

그런데 농공단지에 건설되는 폐수처리시설은 거의 대부분이 활성오니법을 주처리공정으로 하여 만들어지고 있는데, 이러한 시스템은 적절히 운영하면 안정적인 처리효율을 유지할 수 있으나, 초기의 시설비용 이외에도, 전문인력의 상시관리에 의한 높은 인건비나 폭기 등에 사용되는 에너지

등으로 전반적으로 유지관리비용이 많이 필요하다. 또한 폐수의 유입량이나 오염 부하량이 낮아도 단위공정들을 모두 가동하여야 하는 불편이 있으며, 이런 경우에 폐수배출량이 적은 입주업체에게 부담이 될 수 있다. 따라서, 농공단지의 특성과 폐수의 성분에 맞는 폐수처리의 여러 가지 대체방법에 관한 연구가 필요하다.

농공단지는 농촌지역에 위치하고 있으므로 주변의 산림, 농지, 하천, 용배수로, 호소 등의 자연이 지니고 있는 정화능력을 이용할 수 있는 방법을 활용하여 폐수를 처리할 수 있다면 바람직할 것이다.<sup>10)</sup> 이와 같이 자연의 정화능력을 이용하여 오폐수를 처리하는 방법을 자연정화방법이라고 하는데, 이러한 방법들은 경제적이고 효율적이며 유지관리가 간편하면서도 지역 특성을 최대한 살릴 수 있다는 장점이 있다. 자연정화방법을 적용하기 위해서는 처리하고자 하는 오폐수의 성분에 유독성물질이 적어야 하는데, 농공단지의 경우에 유독성폐기물을 배출하는 업체는 입주를 제한하였기 때문에 폐수성분에 유독성물질 함유로 인한 문제는 크게 우려하지 않아도 될 것으로 판단된다. 산업폐수에서 유독성 물질이 없다면 일반생활오수와 큰 차이가 없는데, 이미 의

† 본 논문은 1996년도 농림부의 현장에로기술개발사업과제 연구비에 의해 연구되었음.

국에서는 생활오수나 축산폐수처리에 적용한 사례들이 많이 발표되고 있으며 구체적인 설계방법까지 만들었다.<sup>5,8,9)</sup>

자연을 이용한 오폐수처리 방법에는 ① 토양을 이용한 처리방식(토양처리법), ② 저수지를 활용한 처리방식(산화지법), ③ 식물을 이용한 수중처리, ④ 습지처리, ⑤ 휴경지를 이용한 처리, ⑥ 산림을 이용한 처리 등이 있다.<sup>10-12)</sup>

이 중 습지처리란 갈대 등의 수생식물이 자라고, 지표면에 가까운 곳에 지표수가 존재하는 토지의 자정작용을 이용하여 오폐수를 처리하는 방법으로서 자연습지를 이용하는 방법과 인공습지를 이용하는 방법이 있다.<sup>13,14)</sup>

본 연구에서는 농공단지에 설치된 시작품을 이용하여 1996년 4월부터 11월까지 현장실험한 결과를 분석하여 농공단지의 폐수처리에 인공습지방법의 적용가능성을 검토하였다.

### 재료 및 방법

#### 오수처리시스템

실험시설은 충청남도 천안시에 있는 백석농공단지에 설치되었는데, 346,500m<sup>2</sup>의 대지에 1987년 11월 착공하여 1988년 12월 준공되었다. 1996년 현재 입주업체는 전기전자 17개 업체, 기계금속 19개 업체, 섬유봉제 3개 업체, 화공 7개 업체, 식품 1개 업체, 기계 3개 업체가 입주하여 이들 여러 업체로부터 배출된 오수가 섞여 하수관을 통해서 폐수종말처리장에 유입되고 있었는데, 본 실험시설은 폐수종말처리장에 유입하기 직전의 오수를 이용하여 실시되었다.

본 실험시설은 Fig. 1과 같이 하수종말처리장으로 운송되는 하수관로 중에 설치되어 있는 맨홀에 수중펌프를 설

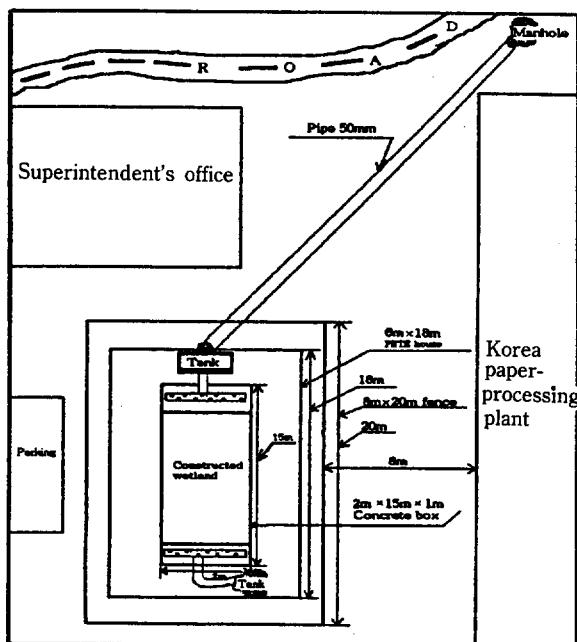


Fig. 1. Layout of the pilot plant at Baeksuk Nongkong-Danzi.

치하여 폐수를 양수해 저장탱크에 저류했다가, 저류조 하단에 설치되어 있는 밸브를 이용하여 유량을 조절하며 전처리가 없는 상태로 처리조로 유입시켰다. 처리조는 지하흐름형(SFS, subsurface flow system) wetland system으로서挺水식물(학명: *Zizania latifolia*, 英名: Manchurian wild rice)을 심은 토양층에 폐수를 통과시켜 처리하는 방법이다. 본 실험에 이용된 처리조는 Fig. 2와 같이 2m(넓이)×15m(길이)×1m(높이)의 콘크리트 반응조로 이루어져 있다. 이 처리조에 60cm의 깊이로 모래를 채운 후挺水식물을 심고, 한쪽 끝에서 폐수원액을 유입시키면 식물의 뿌리와 모래로 구성된 처리층을 수평으로 통과하여 다른 쪽 끝의 배출구로 유출되는데, 이 과정에서 흡착, 여과, 생분해 등의 처리가 이루어진다. 습지처리시설에 이용된 모래는 입도분석 결과 삼각분류법에 의하면 sand이고, USCS(unified soil classification system, 통일분류법)에 의하면 SP(poorly graded sand)로 분류된다. 습지의 체류기간에 관계되는 공극율은 0.357이었으며, 그 외에 비중 2.49, 겉보기 비중 2.61, 흡수량 1.83, 건조단위 중량 1.60이었다.

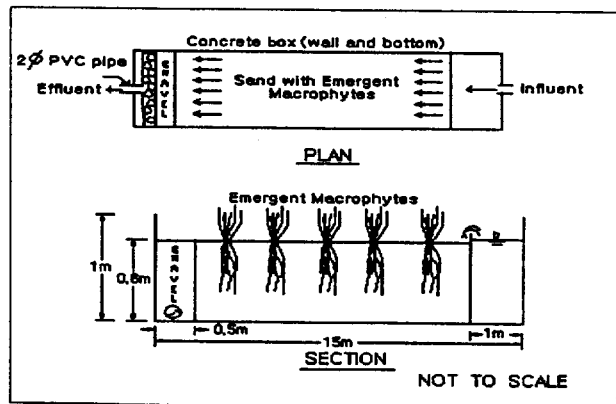


Fig. 2. Schematic plan and section of the treatment system.

저류조에서 유하한 폐수는 처리조 상류단에 있는 감세공에 저류되었다가, 월류보를 통하여 보 전단면에 걸쳐서 균일하게 월류하여 처리조에 흘러 들어가게 하였고, 처리조에서 흘러나온 유출수는 저장탱크에 모았다가 일정한 양이 되면 자동으로 유입수를 양수하는 맨홀의 하류에 배출시켜 유입수의 농도에 영향을 주지 않도록 하였다. 처리조의 유입수 및 유출수의 유량은 유입구 및 유출구에 설치한 밸브로 조정하였으며, 또한 각 처리조는 유입한 오폐수가 잘 흘러가도록 하기 위하여 시멘트 콘크리트 바닥에 1%의 경사를 주었다. 처리조에서 실제 처리에 사용되는 부분은 폭 2m×길이 13.5m×높이 0.6m에 채워진 모래층으로 표면적은 약 27m<sup>2</sup>이다. 오폐수의 유입량은 약 5.5m<sup>3</sup>/일로써 모래층의 공극율(0.357)을 고려한 이론적인 처리시설내 체류기간은 약 1.05일 ((2×13.5×0.6×0.357)÷5.5=1.05)정도이며, 단위면적당 유입량은 약 0.2m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>·day(5.5÷(2×13.5)=0.2)이다.

**수질분석방법**

폐수원수 및 처리수는 PVC통에 담아 온도를 측정 한 후 실험실로 운반하여 4°C로 시료를 보관하며 Table 1과 같이 측정항목들을 Standard Methods for Water and Wastewater<sup>13)</sup>에 의해 분석하였다.

Table 1. Analytical methods 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
COD(chemical oxygen demand)	SM 5220-B	
SS(suspended solids)	SM 2540-D	
T-N(total nitrogen)		
TKN(total kjeldahl nitrogen)	SM 4500-NO <sub>org</sub> -C	BÜCHI 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 phosphorous)	SM 4500-P E	HP8452A Spectrophotometer

**결과 및 고찰**

농공단지를 포함한 폐수처리시설의 방류수 수질기준은 BOD, COD, SS, T-N, T-P 등이 각각 30mg/l, 40mg/l, 30 mg/l, 60mg/l, 그리고 8mg/l이다.<sup>4)</sup> 본 연구에서는 이들 항목의 유입·유출수의 농도를 측정하여 처리율을 분석하였다. DO는 방류수 수질기준 항목에는 포함되지 않았지만 일반적으로 지표수에서 물고기의 서식에 지장이 없기 위해 필요한 DO기준치를 5mg/l 이상으로 규정하고 있는데, Fig. 3과 같이 유입수는 5mg/l보다 낮은 경우도 있었으나, 처리수는 모두 5mg/l보다 훨씬 높아서 처리과정에서 대기로부터 재폭기(re-aeration)가 자연적으로 이루어지는 것을 알 수 있다. 특히 8월 24일은 1.77mg/l에서 6.53mg/l로 높아져 약 260%의 큰 값으로 증가하기도 하였다. 이러한 현상은 처리조의 높이를 0.6m로 하였기 때문에 대기와의 접촉면으로부터 유입된 산소가 바닥까지 용이하게 이동할 수 있었으며, 또한 식물의 뿌리를 통한 산소공급도 DO 증가에 역할을 했다고 생각된다.

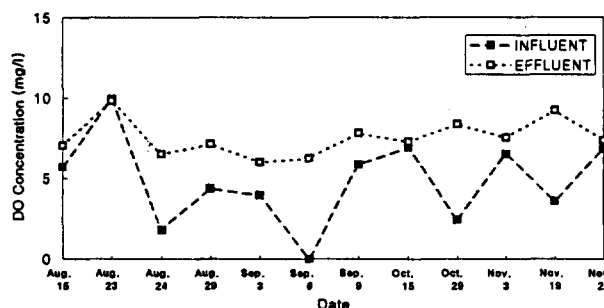


Fig. 3. DO concentrations of influent and effluent.

BOD의 경우는 Fig. 4에서 보듯이 유입되는 폐수원액의 농도는 여름철에는 대부분 농공단지를 포함한 오폐수 처리 시설의 방류수 기준치인 30mg/l보다 낮았으나, 10월 29일 이후는 크게 증가하는 경향을 보였다. 처리율은 9월 6일에는 82%, 그리고 8월 24일에는 80%의 높은 처리율을 나타내기도 하였으나, 전반적으로 평균처리율은 약 56% 정도이었다.

처리수의 농도는 10월 15일 이전에는 모두 수질기준치보다 낮았으나, 10월 29일 이후에는 서서히 증가하였는데, 이유는 유입수 농도는 높아진 반면 기온이 낮아져 미생물 및 식생의 처리효율이 감소했기 때문으로 판단되며 이 경우도 약 50.2%의 처리율을 유지하였다.

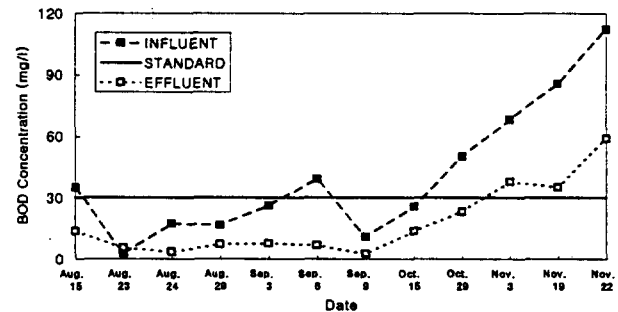


Fig. 4. BOD concentrations of influent and effluent.

COD의 경우에도 Fig. 5와 같이 BOD와 유사한 경향을 나타내고 있다. 10월 이전에는 유입수의 농도가 낮아서 유출수의 농도가 대부분 수질기준치보다 낮았으며, 10월 이후에는 BOD와 마찬가지로 유입수농도는 증가했으나 기온이 낮아서 처리효율이 떨어져 유출수는 대부분 기준치를 초과하였다. 이와 같이 수질기준치를 초과한 경우들을 분석해보면 처리율은 전체 평균처리율과 같은 43% 정도를 유지하였다. 8월 15, 23일은 유출수의 농도가 유입수의 농도보다 높게 나타났는데, 이는 처리조가 미처 안정되지않아 토양속에 있던 유기물들이 유출되었기 때문으로 생각된다. 일반적으로 문헌에 발표된 자료에 의하면 생활하수나 축산폐수의 경우 BOD나 COD의 처리율이 60%~80%인 것에 비하면 상대적으로 낮았다. 그 이유는 공장에서 방출되는 폐수이기 때문에 폐수성분 중에 난분해성 오염물질이 함유되었기 때문이 아닌가 생각된다. 그리고 시작품의 폐수유입량이 5.5m<sup>3</sup>/day로 높은 조건이며, 이론적인 체류기간은 약 1일 정도로

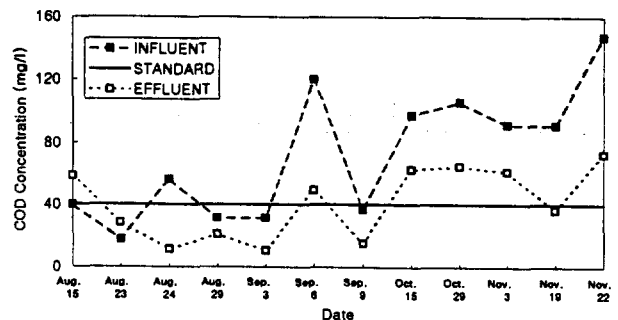


Fig. 5. COD concentrations of influent and effluent.

상대적으로 짧기 때문으로 생각된다. 따라서 인공습지방법을 폐수처리에 적용하기 위해서는 경우에 따라서는 전처리 또는 부하량 조절 등의 추가적인 보완연구가 필요하다는 것을 보여준다. 그러나 인공습지방법은 활성오니법과 달리 에너지와 첨가제, 그리고 전문적인 유지관리가 필요없기 때문에 매우 경제적인 장점이 있어서 추가로 보완처리가 필요하여도 다른 방법에 비해 경쟁력이 있다고 판단된다.

SS는 Fig. 6과 같이 유입수가 방류수 수질기준 30mg/l<sup>4)</sup>보다 농도가 높은 경우는 있으나 유출수는 모두 10mg/l 이하로 현격히 낮아져서 여과 및 침전 등에 의한 인공습지의 SS제거 기능이 탁월함을 알 수 있다. 평균유입수의 농도는 23.3mg/l이고 평균유출수의 농도는 5.0mg/l로 평균처리율은 78%을 나타내었다. 특히 11월 19일의 경우 유입되는 폐수 원액의 SS농도가 57.3mg/l이었으나 처리수는 3.3mg/l로 감소하여 94%의 높은 제거율을 나타냈고, 8월 29일은 90%의 처리효율을 나타내어 인공습지방법에 의하면 폐수가 토양으로 구성된 처리조를 통과할 때 효과적으로 SS가 제거됨을 알 수 있다.

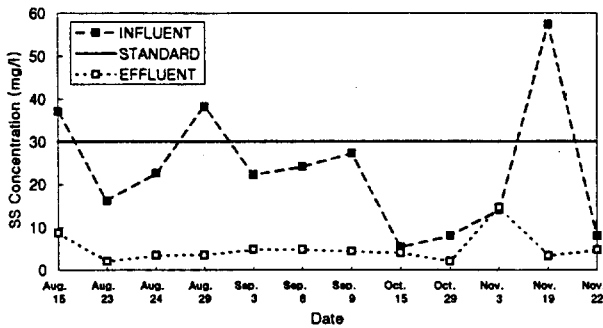


Fig. 6. SS concentrations of influent and effluent.

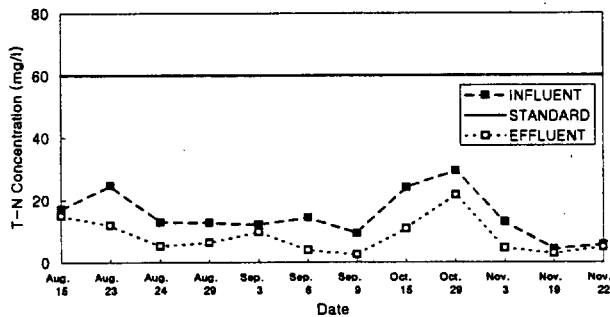


Fig. 7. T-N concentrations of influent and effluent.

T-N은 수질기준이 60mg/l<sup>4)</sup>이나 Fig. 7과 같이 유입수의 농도가 이보다 훨씬 낮았고, 처리수는 유입수보다 더 낮아서 별 문제가 되지 않았다. 유입수의 평균농도는 14.0mg/l이고 유출수의 평균농도는 8.2mg/l로 평균처리율은 약 41%이었다. T-P의 경우는 Fig. 8과 같이 수질기준이 8mg/l<sup>4)</sup>이나 유입수와 유출수의 평균농도가 각각 0.5mg/l와 0.1mg/l로 모두 거의 무시할 정도이었으며, 이와 같이 유입수의 농도가 낮았기 때문에 평균처리효율도 약 50% 정도로 낮게 나타났다.

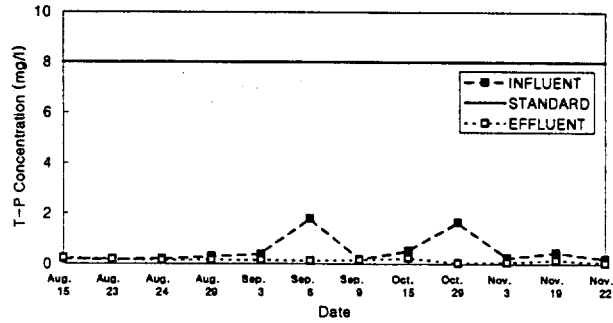


Fig. 8. T-P concentrations of influent and effluent.

이상의 결과에서 나타났듯이 실험지구 농공단지의 경우는 폐수농도 자체가 방류수 수질기준보다 낮은 경우가 많았는데, 이는 업체들의 작업내용에 따라서는 계절성이 있을 수 있다고 생각되며, 수질기준보다 모든 항목의 농도가 낮은 경우에도 활성오니법에 의한 계속적인 종합처리가 필요한지에 대한 의문이 일게된다. 따라서 폐수특성을 고려한 대체 처리방법에 대한 연구의 필요성이 요구된다.

본 연구의 실험지역의 경우에는 특히 T-N과 T-P의 유입수농도가 실험기간 동안 지속적으로 낮아서 수질기준에서 서만 보면 이 부분에 대한 처리가 불필요할 정도이었다. SS의 경우는 유입수의 농도에 관계없이 토양으로 이루어진 처리층을 통과하며 효과적으로 제거되어 유출수는 수질기준치보다 훨씬 낮은 농도를 나타내었다. BOD와 COD는 유입수농도에 변화가 많아 유출수의 농도가 일정하지는 않았으나, 처리효과는 뚜렷하여 필요에 따라 약간의 보완성 추가처리를 병행하면 인공습지방법은 전반적으로 농공단지폐수처리에 적용이 가능할 것으로 판단된다.

## 요 약

자연정화방법 중 처리효과가 널리 알려진 인공습지를 농공단지 폐수처리에 적용할 수 있는지 가능성을 검토하기 위하여 천안시에 위치한 백석농공단지에 시작품을 설치하여 현장실험한 결과를 다음과 같이 요약할 수 있다. 처리조의 폐수유입량은 약 0.2m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>·일이었으며 처리조내의 이론적인 체류기간은 약 1.05일이었다.

1. 유입폐수의 농도가 방류수 수질기준치보다 낮은 경우가 많았는데, 특히 T-N과 T-P는 지속적으로 모두 기준치보다 크게 낮아서 이 부분은 처리가 불필요한 정도이었으며, 평균처리율은 T-N, T-P가 각각 41%, 50% 정도를 유지하였다.
2. DO의 경우는 유입수보다 유출수의 농도가 높아서 깊이 0.6m의 처리조내에 산소가 대기로부터의 재포기를 통하여 원활히 공급되며, 호기성처리에 문제가 없음을 알 수 있다.
3. BOD와 COD는 유입수의 농도 변화폭이 컸는데, 이에 따라 유출수의 농도도 수질기준치를 초과하는 경우가

많았다. 평균처리율이 BOD는 약 56%이며 COD는 약 43%로 처리효과는 뚜렷하였으나, 유입수의 농도가 높으면 수질기준치를 만족시키지 못하였고, 특히 기온이 낮으면 효율이 낮아져 인공습지방법의 본격적인 적용을 위해서는 이 부분을 보완하기 위한 추가연구가 요구된다. 그러나 이와 같이 기온이 떨어지는 시기에도 BOD와 COD가 각각 50.2%와 43%의 처리율을 유지하였다.

4. SS는 유입수의 농도가 60mg/l까지 변화하였으나, 유출수는 지속적으로 15mg/l 이하로 낮아서 인공습지에 토양으로 구성된 처리조를 통과하며 SS는 매우 효과적으로 제거됨을 알 수 있었다.
5. 인공습지에 의한 처리방법을 항구적으로 도입하기 위해서는 온도가 떨어지는 10월 이후의 보온대책을 연구하여 겨울철에도 처리효율을 유지할 수 있는 방법을 강구해야 할 것이다.
6. 본 연구결과에 의하면 전반적으로 인공습지를 농공단지 폐수처리에 적용시킬 수 있다고 판단되며, BOD와 COD 처리의 부족한 부분은 보완성 추가처리를 병행하면 효과적으로 해결할 수 있다고 생각한다. 특히 이 방법에는 시설비, 에너지, 그리고 전문적인 유지관리가 거의 필요없어서 매우 경제적이고 실용적임을 고려하면 농공단지 폐수처리뿐만 아니라 생활오수나 축산폐수 등 응용범위를 확대할 수 있다고 생각한다.

### 참고문헌

1. 농림수산부(1995). 농공단지 지정 및 개발현황.
2. 이동필, 이상문(1996). 농어촌지역의 유형구분과 농공단지 개발사업의 활성화방안, 한국농촌경제연구원 정책연구보고, p. 16.
3. 중소기업진흥공단, 상공자원부(1994). 농공단지현황.
4. 弘文館法研會(1996). 환경관계법규 II, 수질편, 오수 분뇨 및 축산폐수의 처리에 관한 법률 발표 1, 홍문관, p. 497.
5. IAWPRC (International Association on Water Pollution Research and Control) (1990). Constructed Wetlands in Water Pollution Control, Edited by P.F. Cooper and B.C. Findlater, Pergamon Press, UK.
6. Mitsch, W.J. and Gosselink, J.G.(1993). Wetlands, Second Edition, Van Nostrand Reinhold, New York, NY.
7. Standards Methods for the Examination of Water and Wastewater(1995). 19th ed. American Public Health Association, Washington, DC.
8. USEPA(1988). Design Manual: Constructed Wetlands and Aquatic Plant Systems for Municipal Wastewater Treatment, EPA/625/1-88/022, Cincinnati, OH.
9. WPCF(Water Pollution Control Federation) (1990). Natural Systems for Wastewater Treatment, Manual of Practice FD-16, Alexandria, VA.
10. 西口 猛(1986). 農村集落排水のための 汚水處理技術入門. 農業土木學會.
11. 農村環境整備センター(1994). 農村に適した水質改善手法.
12. 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, p. 357-363.
13. 細見正明(1990). 濕地による水質浄化, 用水と廢水, 32, 8, p. 716~719.
14. 中村榮一, 森田弘昭(1987). 低濕地浄化に関する調査, 建設省 土木研究所.