

물옥잠을 이용한 수중처리방법에 의한 농공단지 폐수처리에 관한 연구

Study on the Wastewater Treatment by Floating Aquatic Plant System Using Water Hyacinth for the Industrial Complex in Rural Area

윤 춘 경* · 김 형 중* · 류 재 현* · 여 운 식**
Yoon, Chun Gyeong · Kim, Hyung Joong · Ryu, Jae Hyeon · Yo, Woon Shik

Summary

Floating aquatic plant system using water hyacinth was applied to examine feasibility as a wastewater treatment system for the industrial complex in rural area. The wastewater from the industrial complex does not likely contain toxic pollutants because the industries which generate wastewater with toxic compounds are not allowed to move in. Pilot plant was installed at Baeksuk Nongkong Danzi in Chunahn-City, Chunchungnam-Do, and field study was performed during summer and fall of 1996. Hydraulic loading rate was $0.19\text{m}^3/\text{m}^2\cdot\text{day}$. The effluent concentration of DO was higher than influent, and it implies that 0.6m depth reactor was reaerated enough to increase DO level. The influent concentration of BOD varied significantly from less than 30 to $120\text{mg}/\ell$ during the study period, however, effluent concentrations were generally lower than the water quality standard and removal efficiency was up to 85%. The influent concentration of COD also showed wide variation from less than 40 to $160\text{mg}/\ell$, and effluent concentration was higher than water quality standard when influent concentration was over $100\text{mg}/\ell$. The influent concentrations of T-N and T-P were lower than water quality standard and no further treatment was required, and these compounds were also removed in the system. Although some improvement and refinement are still required, overall, the floating aquatic plant system was proved to be feasible to apply to treat wastewater from industrial complex in rural area.

* 건국대학교 농과대학

** 농어촌진흥공사 농어촌연구원

키워드 : wastewater treatment, floating aquatic
plant system, water hyacinth

I. 서 론

농어촌 소득원개발을 촉진함으로써 농가의 농외소득원을 증대하고 농어촌소득구조를 다변화하여 농어촌지역의 균형 있는 발전을 도모한다는 목적으로 제정된 “농어촌소득원 개발촉진법(1983.12)”에 의해 1984년부터 시범적으로 조성되기 시작한 농공단지는 매년 증가하여 1996년말 현재 285개소가 지정되었고 그 가운데 260개소는 부지조성이 완료되어 가동중이다. 이와 같이 증가하는 농공단지가 농어촌지역의 오염원으로 작용하여 수질을 오염시키는 것을 방지하기 위하여 환경부가 농공단지의 환경에 관련된 관리 및 지원을 담당하여 공해업종 입주제한 및 환경기준을 설정하고, 시·도, 지방환경청이 입주기업의 환경성을 검토하여 관리하고 있으며, 건설비의 30~70%를 보조하고 70~30%를 용자 지원하여 종합 폐수종말처리장을 건설하고 있다. 특히 1984년에 제정된 『농공단지 개발시책 통합지침』에 의하면 농공단지의 확장, 입주기업의 공장증설 또는 생산공정 변동 등으로 폐수종말처리시설을 증설하는 경우 종래는 건설비를 입주기업이 부담토록 되어 있었으나, 공영개발 농공단지인 경우 신규 폐수처리시설비 지원기준에 따라 국고에서 지원하고 있다.^{2,3,5)}

농공단지의 폐수종말처리장은 단지 내에서 발생하는 폐수의 특성 및 주변여건에 적합하도록 충분히 파악하여 처리방법을 결정해야 하는데, 지금까지는 거의 활성오니법 위주의 폐수처리시설이 거의 표준모델로 건설되어 왔다. 활성오니법은 일반적으로 초기비용이 높지 않고 필요한 공간도 상대적으로 적으며 안정된 처리효율을 유지하는 장점이 있으나, 미생물에 의한 처리방법이기 때문에 환경에 예민한 미생물의 관리에 각별한 주의가 필요하고, 많은 에너지가 필요하며, 전문인력에 의한 유지관리가 필요하고, 다량의 오폐수생산량 등

불편한 점들도 있다. 이와 같은 방법은 전제조건이 일정량 및 농도이상의 오폐수가 지속적으로 처리시스템에 유입되어 미생물이 번식할 수 있는 충분한 영양분을 계속 공급하는 것이기 때문에 폐수 발생량 자체가 부족하거나 농도가 너무 낮아 영양물질의 부하량이 낮으면 시스템자체의 처리기능이 원활하지 못하게 된다. 만약에 가동중인 농공단지 중에서도 발생량이 시스템의 설계량보다 현격히 낮거나 유입되는 폐수의 농도가 활성오니법에 의해 처리할 필요가 없을 정도로 낮은 경우에는 기존에 설치된 활성오니법의 처리기능이 충분히 활용되지 못할 것이다.

농공단지는 다른 공업단지와 달리 농어촌지역에 위치하고 있다는 특징이 있으므로 주변의 상대적으로 풍부한 자연과 이 자연이 갖는 정화능력을 최대한 이용하면 농공단지의 폐수처리 가능성도 있다. 일반적으로 오수와의 달리 폐수의 자연정화처리에는 의견을 달리하는 경우도 있으나, 중요한 것은 오수인지 폐수인지가 아니고 자연정화에 부적합한 성분이 함유되었는지 여부이다. 그런데 농공단지에는 입주업체를 선정할 때 주변의 농지 및 환경오염을 우려하여 공해성 업체는 배제하였기 때문에, 폐수에 유독성물질의 함유가능성이 낮고 주로 유기물이나 영양염류 성분을 함유하여 자연정화에 의한 처리가 가능할 것으로 판단된다. 자연정화방법이란 토양, 식물 또는 미생물과 같은 자연요소들의 자정능력을 이용하여 오폐수를 처리하는 방법을 말하는데, 이 방법은 인공적으로 건설한 종합적인 오폐수처리시설에 비해 에너지소모가 적고, 저기술형이라서 유지관리가 용이하며, 소요경비가 적게 들고, 오폐수 발생량이 적어서 2차 오염의 우려가 작은 장점들을 지니고 있다. 이러한 자연정화방법을 이용한 대표적인 오폐수처리 방법으로서는 습지를 이용한 방법, 토양을 이용한 방법, 水中처리방법 등이 있는데 본 연

구에서는 이중 浮生식물을 이용한 水中처리방법을 중심으로 살펴보고자 한다.^{7,10)}

水生식물이란 「물을 토대로 해서 발아하고, 생육기간중 어느 기간에 적어도 완전 수중상태 혹은 擬水상태에서 생육하는 식물」로서 수면에 떠있어 햇빛의 침투를 막아 藻類(algae)의 번식을 억제하고, 오폐수성분을 직접 흡수하여 처리하기도 한다. 뿌리를 통해서 산소를 공급하여 미생물에게 서식처를 제공하는 역할을 하며, 많은 미생물들이 뿌리 주위에 서식하여 이들로 하여금 오염물질을 신속하고 효과적으로 처리하게 한다. 대표적인 水生식물로서는 물옥잠, 창포, 갈대, 부들, 검정말 등이 있는데, 이중 수생식물에 의한 수질 정화능력을 현존량, 생산량, 염류의 함유량, 재배·수확관리의 난이도 등을 종합적으로 평가 했을 때 한냉기 문제를 제외하면 부유성 수생식물, 즉 浮生식물인 물옥잠(water hyacinth)이 가장 우수하다고 평가된다. 실내의 실험에 의한 다수의 연구 보고서에 그 우수성이 많이 기술되어 있고 문헌 중에서의 인용율도 가장 높다.^{4,9)} 물옥잠은 번식력이 왕성하며 부유성이기 때문에 회수제거가 용이하다는 장점을 가지고 있는데, 예전부터 폐수중의 유기물을 처리하는데 이용되어 왔으나 최근에는 질소·인의 제거를 목적으로 한 고도처리에 이용하는 보고가 많아지고 있다.¹⁾ 물옥잠은 다른 수생식물에 비해서 수역으로부터의 영양염류의 흡수능력이 높고, 인위적인 재배가 가능하다. 또한 회수가 비교적 용이하고, 수확물을 유효하게 이용할 수 있으며, 푸른 잎과 보라색 꽃이 아름다운 경관을 구성한다. 물옥잠이 번식하면 그만큼 호수 등의 영양염을 흡수하고, 수중으로 투과하는 태양 빛을 차단하기 때문에 藻類의 번식을 억제하고, 수중에 있는 물옥잠의 뿌리는 많은 미생물이 부착해 있어 물 속의 유기물을 분해하여 정화시킨다.^{7,10)}

물옥잠의 생육은 기상조건, 수질조건 및 재

배관리에 따라서 영향을 받는데, 일반적으로 수온 18~32℃, pH 7부근에서 가장 발육이 좋으나, 추위에는 약해 10℃이하에서는 생육이 정지하기 때문에 겨울에는 수질정화를 기대할 수 없으므로 이에 대한 보완이 이루어져야 할 것이다. 물옥잠의 영양염류 최저 흡수 가능 농도는 T-N이 0.8~2.0mg/ℓ, T-P는 0.04~1.0mg/ℓ 라고 한다. 그러나 통상은 기온 및 유입수 수질 등의 조건을 제어하기는 어렵기 때문에 물옥잠의 재배는 밀도관리가 중요하다. 물옥잠의 밀도와 성장률의 관계에서 일반적으로 최대신선중량(20~25kg/m²)을 넘으면 생육저해가 발생하므로 20~25kg/m²를 기준으로 해서 수확하는 것이 좋다.⁸⁾

본 연구에서는 농공단지의 폐수처리에 자연정화방법중의 하나인 물옥잠을 이용한 水中처리방법의 적용가능성을 현장실험을 통하여 검토하고자 한다.

II. 재료 및 방법

1. 처리시스템

현장실험을 위한 시작품은 충청남도 천안시에 위치한 백석농공단지에 설치하였다. 이 단지는 대지가 약 35ha이며 1987년 11월 착공하여 1988년 12월 준공되었다. 본 단지에는 전기전자 17개 업체, 기계금속 19개 업체, 섬유봉제 3개 업체, 화공 7개 업체, 식품 1개 업체, 기계 3개 업체가 입주하여 가동되고 있으며, 이들 업체로부터 배출된 폐수는 관로를 통해 폐수종말처리장에 유입되어 활성오니법에 의해 처리된다.

실험장치는 Fig. 1과 같이 단지 내 종말처리장으로 유입되는 하수관로 도중에 설치되어 있는 맨홀에서 수중펌프를 설치하여 폐수를 양수해 처리시설의 유입수 저장탱크에 저류했다가 처리시설로 보내도록 하였다. 처리조는 콘크리트 박스형으로 토양은 없으며 통과

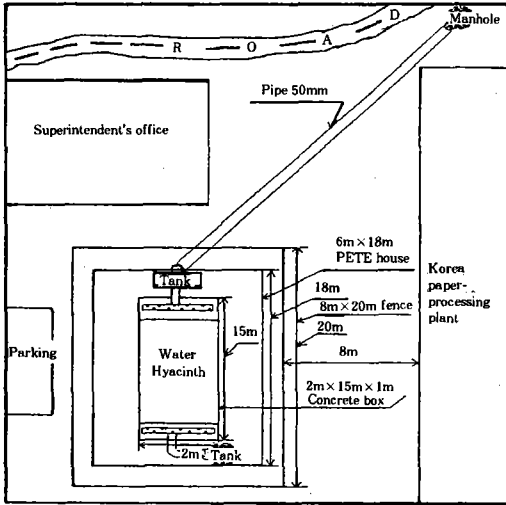


Fig. 1. Layout of the pilot plant at Baeksuk Nongkong-Danzi

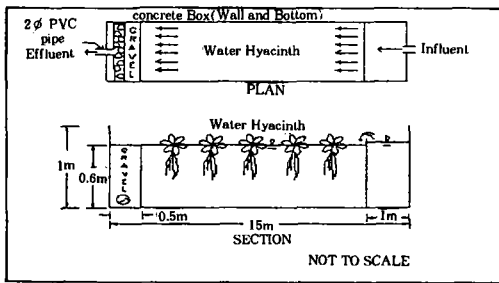


Fig. 2. Schematic plan and section of the treatment system

하는 폐수원액에서 직접 자라는 물옥잠(학명 : *Eichhornia crassipes*, 英名 : Water hyacinth)의 잘 발달한 뿌리와 그에 서식하는 미생물들의 여과, 흡수, 그리고 생물학적분해 등에 의한 水中처리를 한다. 처리조의 규모는 2m(넓이)×15m(길이)×1m(높이)이며 Fig. 2에서 보는 바와 같이 수심이 60cm인데, 실제 처리에 사용되는 부분은 폭 2m×길이 13.5m×높이 0.6m에 채워진 수중부분으로서 표면적은 27m² 정도이다. 폐수의 유입량은 약 5m³/일로써 이론적인 처리시설내 체류기간은 약 3.24일 정도로써 실험을 위한 유입수와 유

출수의 시료채취에도 이 만큼의 시간간격을 두어 유입한 폐수가 유출할 시기에 측정하여 이들 사이의 농도차이로 처리효과를 검토하였다. 단위면적당 유입량은 약 0.19m³/m²·day이다.

저류조에서 나온 폐수는 처리조 상류단에 있는 감세공에 저류되었다가 월류보를 통하여 전단면에 걸쳐서 균일하게 월류하여 처리조에 흘러 들어가게 하였고, 유출수는 처리조의 하류단 바닥부분에 설치한 유공관을 통하여 균일하게 집수되어 나가도록 하였다. 각 처리조의 유입수 및 유출수의 유량은 유입구 및 유출구에 설치한 밸브로 조절하였다. 처리조에서 흘러나온 유출수는 저장탱크에 모았다가 일정한 양이 되면 자동으로 양수하여 실험용 폐수를 양수하는 지점보다 하류에 배출시켜 실험시설에 유입되는 폐수의 농도에 영향을 주지 않도록 하였다. 또한 처리조는 유입한 오폐수의 원활한 흐름을 위하여 콘크리트 바닥에 1%의 경사를 주었다. 물옥잠은 200개를 구입하여 27m² 면적의 처리조에 8월 9일 식재하였는데, 8월 말에는 약 60% 그리고 9월 말에는 약 90%의 처리조 표면적을 덮었으며, 11월초부터 시들기 시작하여 본격적인 겨울이 시작되는 12월에는 완전히 고사하였다. 실험 기간에는 물옥잠을 수확해주거나 오니를 제거하지 않았다.

2. 수질분석방법

폐수원수 및 처리수는 PVC통에 담아 온도를 측정 한 후 일정한 온도를 유지하면서 실험실로 운반하여 측정항목을 각각 Table-1과 같이 Standard Methods¹¹⁾에 의해 분석하였다.

III. 결과 및 고찰

농공단지를 포함한 오폐수처리시설에서 방류수수질기준 규제항목인 BOD, COD, SS,

Table-1. Constituents and analysis methods

항 목	방 법	비 고
용존산소량 (DO, dissolved oxygen)	SM 4500-O C	Azide Modification 방법
생물화학적 산소요구량 (BOD, biochemical oxygen demand)	SM 5210-B	5-day BOD test
화학적산소요구량 (COD, chemical oxygen demand)	SM 5220-B	
부유물질 (SS, suspended solids)	SM 2540-D	
총질소 (T-N, total nitrogen)		
TKN (total kjeldahl nitrogen)	SM 4500-NO _{org} -C	BUCHI 435와 B-316
NO ₂	SM 4110-B	Dionex DX-100
NO ₃	SM 4110-B	Dionex DX-100
총인 (T-P, total phosphorous)	SM 4500-P E	HP8452A Spectrophotometer

T-N, T-P의 방류수 수질기준치는 각각 30, 40, 30, 60, 8mg/l 이다. 방류수기준에는 포함되지 않았지만 일반적으로 지표수에서 물고기의 활발한 서식을 위해서 필요한 DO기준치를 5mg/l 이상으로 규정하고 있다. 유입수와 유출수시료의 채취 및 분석은 이론적인 체류기간만큼의 시간적인 간격을 두어서 유입한 폐수가 이론적인 체류기간이 지난 후 유출하는 시점을 고려하여 유출수를 채취하였으며 그림에 표기된 날자는 유입수시료의 채취시기이다.

DO는 Fig. 3과 같이 유입수는 5mg/l 보다 낮은 경우가 많으나 처리수는 모두 5mg/l 보다 훨씬 높아서 처리과정에서 대기로부터 재폭기(re-aeration)가 자연적으로 이루어져서 본 처리조와 같이 0.6m 정도 깊이까지의 경우에 산소공급이 원활함을 알 수 있다. 특히 8월 24일은 1.77mg/l 에서 8.57mg/l 로 증가하여 약 384%의 큰 증가율을 보였다.

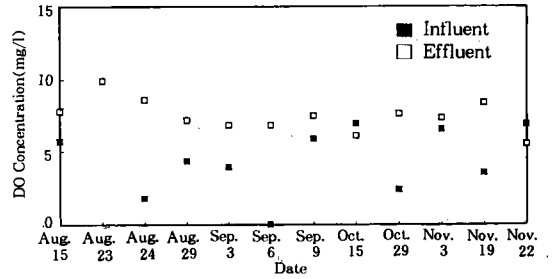


Fig. 3. DO concentrations of influent and effluent

BOD의 경우는 Fig. 4와 같이 유입되는 폐수원액의 농도가 10월 이전에는 대부분 방류수 기준치인 30mg/l 보다 낮았으나 10월 29일 이후는 크게 증가하여 폐수농도에 변동이 많음을 알 수 있다. 처리수의 BOD는 대부분 기준치보다 낮았으며 처리율은 9월 6일과 같은 경우에 최고 약 85%까지 나타났으며, 11월 22일의 경우는 112mg/l 의 유입수가 처리된 후에는 기준치보다 낮은 26.5mg/l 를 나타내기도 하였다. 그러나 10월 이후에는 처리수의 BOD농도가 서서히 증가하였는데 이는 유입되는 폐수원액의 농도는 증가한 반면 기온이 떨어져 물속잠 및 미생물의 활동이 둔화되어 처리효율이 감소한 것으로 생각된다.

COD의 경우는 Fig. 5와 같이 10월 이전에는 유입수는 방류수 수질기준치인 40mg/l 를 초과하는 경우가 있었으나 처리수는 대부분 40mg/l 보다 낮았고, 처리효과는 8월 24일과

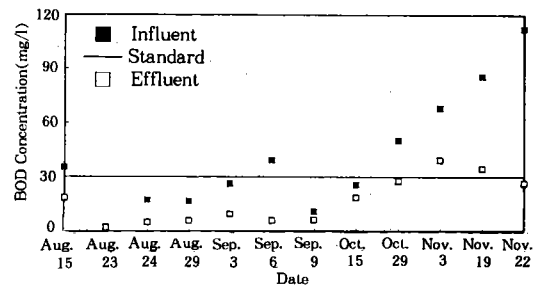


Fig. 4. BOD concentrations of influent and effluent

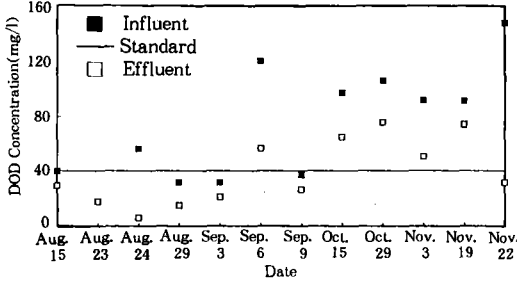


Fig. 5. COD concentrations of influent and effluent

같은 경우에 90%의 높은 처리율을 보였으며, 유입수의 농도가 147.28mg/l로 특히 높았던 11월 22일에도 처리수의 농도는 31.09mg/l로 기준치를 만족시켰다. 그러나 BOD의 경우와 마찬가지로 10월 이후에는 유입되는 폐수 원액의 농도가 급격히 증가한 반면 온도가 저하되어 처리효율이 떨어져 처리수의 농도가 대부분 기준치를 상회하여 온도가 떨어졌을 때의 대책이 필요하다는 것을 알 수 있다.

SS는 Fig. 6과 같이 유입수가 방류수기준 30mg/l보다 농도가 높은 경우는 있으나, 유출수는 모두 10mg/l 이하로 크게 낮아져 대부분 70%이상의 제거율을 보였다. 특히 8월 29일은 91%로 가장 높은 제거율을 보였고, 11월 19일의 경우 유입되는 폐수원액의 SS농도가 57.3mg/l이었으나, 처리수는 6mg/l로 감소하여 약 89%의 처리율을 보여 여과 및 침전 등에 의한 SS제거 기능이 우수하며 낮

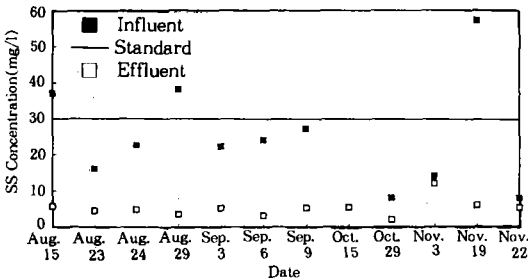


Fig. 6. SS concentrations of influent and effluent

은 온도에서도 크게 영향을 받지 않음을 알 수 있다. SS의 제거에 따른 오니발생량은 폐수처리 실험기간이 약 6개월 지난후에 점점한 결과 평균 약 2cm 정도가 바닥에 쌓여 있었다.

T-N은 방류수 기준이 60mg/l이나 Fig. 7과 같이 유입수의 농도차체가 이보다 훨씬 낮았고 처리수는 유입수보다 더 낮아서 방류수 수질기준치에 비교하면 문제가 되지 않았다. 처리율은 최고 87%까지 나타내어 물옥잠을 이용한 수중처리방법이 일반적으로 어려움을 겪는 질소성분의 제거에 우수한 효과가 있음을 알 수 있고, 이러한 이유 등으로 해서 기존의 하수종말처리시설에서도 근래에 고도처리로써 이러한 방법을 도입하려는 경향이 있다.

T-P의 경우도 Fig. 8과 같이 기준이 8mg/l이나 유입수와 유출수 모두 매우 낮아 거의 무시할 정도의 농도이었으며 처리율은 최고

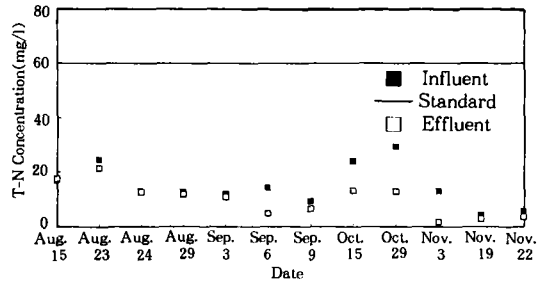


Fig. 7. T-N concentrations of influent and effluent

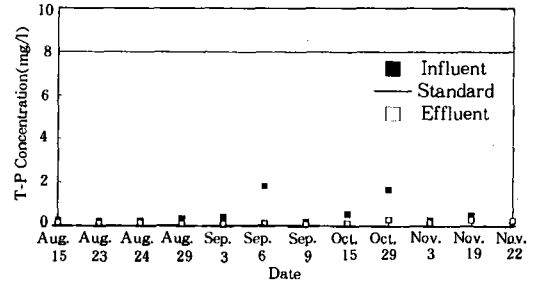


Fig. 8. T-P concentrations of influent and effluent

94%까지 나타났다. T-N과 T-P의 제거는 물욕잡에 의한 흡수, 물욕잡 뿌리에 의한 흡착, 미생물에 의한 분해, 그리고 침전등에 의해서 일어난 것으로 판단되는데, SS의 제거기능이 우수한 것으로 보아서 침전에 의한 제거기능이 많은 역할을 한 것으로 판단된다.

IV. 요약

자연처리방법 가운데 효과가 있는 것으로 문헌상에 널리 알려진 물욕잡에 의한 水中처리방법을 농공단지 폐수처리에 적용가능성 여부를 검토하였다. 천안백석농공단지에 설치한 시작품을 통한 현장실험 연구결과를 요약하면 다음과 같다. 폐수는 전처리없이 원액이 유입되었으며 일일유입량은 약 $0.19\text{m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{day}$ 이고 본문에 표기된 측정기간은 1996년 8월부터 11월까지이다.

1. DO의 경우 유출수의 농도가 유입수의 경우보다 대부분 높아서 0.6m의 얕은 수심의 처리조를 통과하는 동안에 대기로부터 효과적인 재폭기가 이루어짐을 알 수 있다.

2. BOD의 경우는 유입수 농도자체가 방류수수질기준치인 $30\text{mg}/\ell$ 보다 낮아서 특별한 처리가 필요 없을 정도이었으나, 10월부터는 농도가 높아져서 11월에는 $120\text{mg}/\ell$ 까지 나타났는데 이러한 현상은 입주업체의 작업내용에 따라 변동이 심할 수 있음을 보여준다. BOD의 처리율은 최고 약 85%이며 실험기간 동안의 처리수의 농도는 방류수기준치를 대부분 만족시켰다.

3. COD의 경우에도 유입수의 농도에 상당한 변동이 있었는데 처리율은 최고 90%이었으나 처리수농도가 방류수수질기준인 $40\text{mg}/\ell$ 를 초과하는 경우가 많아서 이 방법을 적용하기 위해서는 보완이 필요하다고 생각된다.

4. SS의 경우에도 유입수의 농도는 변동이

심하였으나 처리수의 농도는 80%까지 처리율을 나타내며 모두 방류수수질기준치인 $30\text{mg}/\ell$ 보다 훨씬 낮아서 이 방법이 침전 및 여과 등에 의한 SS 제거에 효과적인 것을 알 수 있다.

5. T-N은 유입수의 농도자체가 방류수수질기준보다 낮아서 처리가 불필요한 정도이었고 처리수는 60% 정도까지의 처리율을 보이며 유입수보다 더욱 낮아서 수질문제에 영향을 주지 않았는데, 이 방법은 일반적으로 처리에 어려움이 있는 질소제거에 유용하게 사용될 수 있음을 알 수 있다.

6. T-P도 유입수의 농도자체가 방류수수질기준보다 낮았는데 처리수는 90% 이상까지의 높은 처리율을 보이며 유입수보다 더욱 낮아 T-P에 의한 수질문제는 일어나지 않을 것으로 판단되었다.

7. 이상의 실험결과에 의하면 물욕잡을 이용한 水中처리방법은 농공단지의 폐수처리에 적용가능성이 있으나, BOD와 COD의 경우에는 유입농도가 높을 때 방류수수질기준을 만족시키지 못할 수 있기 때문에 오염부하량을 감소시키거나 다른 전처리를 병행하거나 하는 등의 보완책에 대한 추가연구가 필요하다. 그런데 이 방법은 기존의 활성오니법에 의한 처리에 비하면 시설비가 훨씬 낮고 에너지 및 유지관리비가 낮아서 매우 경제적이다. 따라서 지속적인 연구를 통하여 이 방법 단독으로, 기존에 설치되어 있는 시설에 이 방법을 접목시켜 보조처리시설로, 또는 영양물질을 제거하고 기타성분도 추가처리가 가능한 고도처리시설로서 적용이 가능하다고 판단된다.

8. 본 연구는 식물이 생장할 수 있는 온도에서 실험하였으며 기온이 낮아지면서 처리효율이 떨어지는 것을 알 수 있었는데, 이러한 방법의 본격적인 도입을 위해서는 물욕잡이 겨울동안 생육할 수 있는 방법에 대한 추가연구가 필요하다.

본 연구는 농림부의 현장애로기술개발 사업과제인 “자연정화방법에 의한 농공단지내 공장폐수의 한국형처리시설 개발에 관한 연구”의 연구비 지원에 의해 수행되었음.

참 고 문 헌

1. 김정규, 1994, 자연정화기능과 환경오염물질 처리, 자연자원환경연구, 2;29-48
2. 농림수산부, 1995, 농공단지 지정 및 개발 현황
3. 이동필, 이상문, 1996, 농어촌지역의 유형구분과 농공단지 개발사업의 활성화방안, 한국농촌경제연구원 정책연구보고 ; 16
4. 정후섭, 1992, 수질보전을 위한 Biofilter 시스템 연구, 선진해외농업 기술현황 공동연구 제1권 ; 235-236
5. 중소기업진흥공단, 상공자원부, 1994, 농

공단지현황

6. 弘文館法研會, 1996, 환경관계법규 II, 수질편, 오수·분뇨 및 축산폐수의 처리에 관한 법률 별표 1 ; 497.
7. 農村環境整備センター, 1994, 農村に適した水質改善手法
8. 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;357-363
9. 青山勳, 1982, 水生植物を利用した水質改善, 用水と廢水, 24, 1;87-94
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. Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, 18th edition, 1992, American Public Health Association, Washington, D. C.

(접수일자 : 1997년 1월 30일)