

소규모 오수발생지역의 고도처리시설을 위한 상·하흐름형 인공습지 개발

Development of Up- and Down-flow Constructed Wetland for Advanced Wastewater Treatment in Rural Communities

김형중* · 윤춘경**† · 권태영*** · 정광욱**

Hyung-Joong Kim · Chun G. Yoon · Tae-Young Kwun · Kwang-Wook Jung

Abstract

The feasibility of the up- and down-flow constructed wetland was examined for rural wastewater treatment in Korea. Many constructed wetland process was suffered from substrate clogging and high plant stresses because of long term operation. The up- and down-flow constructed wetland process used porous granule materials (charcoal : pumice : SSR = 10 : 20 : 70) for promoting intake rate of nutrient to plant, and especially flow type was designed continuously repeating from up-flow to down-flow. BOD₅ and SS was removed effectively by the process with the average removal rate being about 75% respectively. The wetland process was effective in treating nutrient as well as organic pollutant. Removal of TN and TP were more effective than other wetland system and mean effluent concentrations were approximately 7.5 and 0.4 mg L⁻¹ which satisfied the water quality standard for WWTPs. The treatment system did not experience any clogging or accumulations of pollutants and reduction of treatment efficiency during winter period because constructed polycarbonate glass structure prevented temperature drop.

Considering stable performance and effective removal of pollutant in wastewater, low maintenance, and cost-effectiveness, the up- and down-flow constructed wetland was thought to be an effective and feasible alternative in rural area.

Keywords : NEWS, Intermittent trickling biofilter, Constructed wetland, Decentralized Regions, Rural Communities.

* 한국농촌공사 농어촌연구원
 ** 건국대학교 생명환경과학대학 환경과학과
 *** (주)자연과환경
 † Corresponding author. Tel.: +82-2-450-3747
 Fax: +82-2-446-2543
 E-mail address: chunyoona@konkuk.ac.kr

I. 서 론

국내의 하수처리 기술은 수질기준 강화와 고도처리의 필요성 때문에 많은 발전을 이루고 있다. 최근의 하수처리는 물리, 화학적인 처리보다는 생물학적인 처리 원리에 기초한 생물학적 고도처리공법들이 주류를 이루고 있으며, 유기물과 함께 질소·인을 동시에 처리하고자 하는 방향으로 발전되어 왔다. 그 결과 처리효율을 높이고 부지면적을 감소시키는 기술적인 진보를 이루었지만 공정이 복잡해지고 기계장비의 사용이 증가하여 많은 에너지를 사용하게 되었다. 이러한 기술들은 전문인의 관리가 필요하기 때문에 하수종말처리장과 같은 중·대규모의 처리시설에는 적합하지만 소규모 하수처리 기술로 활용하기에는 적합하지 않다. 현재 사용하고 있는 소규모 오수처리시설의 방류수 수질기준은 4대강 특별지역(기타지역)의 경우 BOD₅, TSS, TN, 그리고 TP의 경우 각각 10(20), 10(20), 20(20), 그리고 2(2) mg L⁻¹ 수준으로 강화하여 적용하고 있다. 하지만, 2005년도 상반기 마을하수도 시설 지도·점검결과에 따르면 전국의 마을하수도 845개소에 대한 조사결과, 방류수 수질기준을 초과하는 처리장이 394개소로 나타났다. 기존 마을하수 처리시설은 시설의 노후화와 유입수질의 불안정으로 인해 적절하게 관리되지 못하고 있기 때문에 적극적인 관리와 추가적인 처리시설이 필요한 것으로 나타났다 (Kwon, 2006).

최근 들어 소규모 처리에 적합하고 유지관리가 쉬운 자연정화처리공법에 관한 관심이 커지고 있으며, 그 중에서 인공습지 처리기술은 물리, 화학, 그리고 생물학적 처리 기작들이 복합된 자연정화시스템이므로 유럽과 미국 등지에서 보편적으로 많이 사용되고 있다 (Crites et al., 1997). 인공습지를 이용한 자연정화 기술도 효율을 증가시키기 위한 다수의 연구노력들이 있었으나, 장기적인 운전과 고농도의 하수처리로 인한 공극폐색의 우려가 있으며 (Cooper, 1999) 그로 인한 처리효율과 처리량

이 감소될 수 있으며, 또한 과도하게 축적된 오염물질은 식물에 많은 스트레스를 유발시키고 심할 경우 고사하는 등의 문제점으로 처리효과를 감소시킬 수 있다 (Headley et al., 2005). 그러므로 적절한 처리효율을 얻기 위해 많은 부지면적을 사용하기 때문에 처리효율 증가에는 한계를 나타내고 있다. 특히 계절변화가 뚜렷한 지역의 경우 동절기에는 식물이 휴면에 들어가므로 처리효율이 감소와 오염물질의 축적이 유발되게 된다 (Ham et al., 2002). 또한 식물체를 제거해주는 등의 지속적인 유지관리가 필요하며, 모기 발생 등의 문제로 주민들의 보건상의 우려를 나타내기도 한다 (Ham et al., 2002).

본 연구에서는 기존의 하수처리용 인공습지 형태를 위에서 언급한 문제점을 해결하고자 노력하였으며 국내의 소규모 하수처리 상황에 적용할 수 있도록 개선하여 상·하흐름형 인공습지를 적용하였다. 또한 기존 인공습지의 기반재로 많이 사용되고 있는 자갈과 모래의 공극폐색문제와 처리량의 한계를 극복하기 위해 적절한 기반재를 실험을 통해 선정하였고, 모기문제 해결을 위해 하수가 표면으로 흐르지 않게 설계하였다. 또한 동절기의 안정적인 처리효율의 보장과 안정적 장기처리를 위하여 추가적인 공정과 시설을 설치하였다. 과도한 오염물질 집적을 피하고 안정적인 질소와 인 처리를 2차 처리된 하수를 인공습지 유입수로 이용하여 적용성을 평가하였다.

II. 재료 및 방법

1. 식재기반재 (media) 선정을 위한 기초 실험

인공습지에서 식물의 뿌리를 지지하고 생육을 할 수 있는 기반재는 매우 중요한 역할을 수행한다. 본 연구에서는 새로운 시스템에 적합한 재료들을 선정하기 위하여 기초 실험을 진행하였다. 예비조사를 통해, 정화능력을 가진 것으로 조사된 SSR

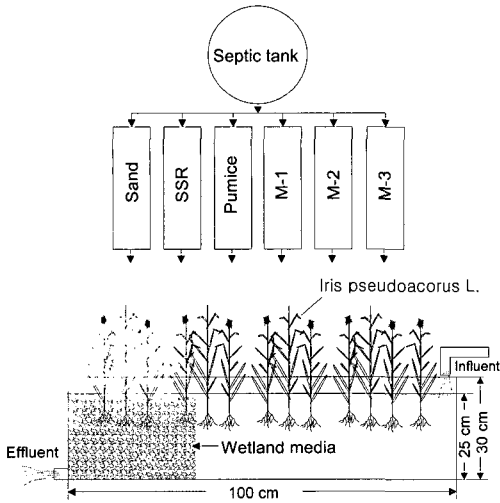


Fig. 1 Schematic diagram of substrate media experiment for up- and down flow constructed wetland

(silica sedimentary rock), pumice, M-1 (charcoal : SSR : pumice = 10 : 20 : 70), M-2 (charcoal : SSR : pumice = 25 : 25 : 50), M-3 (charcoal : SSR : pumice = 25 : 25 : 50), 그리고 대조구로서 모래 (sand)를 사용하였다 (Fig. 1). 각각의 재료들에 Fig. 1과 같이 노랑 꽃창포를 식재하여 생육 가능성 여부와 주요오염물질의 처리효율을 평가하였다.

6개의 식물포트는 방수합판을 이용하여 Fig. 1과 같이 길이 100 cm, 폭 30 cm, 높이 30 cm의 규모로 제작하고, 높이 25 cm씩 여재를 충전하고 각 처리구별로 노랑 꽃창포를 10본씩 식재하였다. 실험에 사용한 유입수는 축산폐수를 다양한 농도로 희석하여 사용하였다. 유입량은 실험시설의 각각의 처리포트에 24 L를 주입하고, 24시간 후에 유출수를 채수하여 정화효과를 실험하였다. 단, 모래의 경우는 공극률이 작아 다른 처리와는 다르게 6 L만을 채워 실험을 실시하였다.

2. 상·하흐름형 인공습지

상·하흐름형 인공습지는 총 규모가 15.75 m³

(폭= 1.5 m, 길이= 10.5 m, 깊이= 1.0 m)이고, 수리학적 체류시간은 12 hr이며, 노랑 꽃창포를 면적 1 m²에 25본씩 총면적 12.75 m²에 식재하였다. 인공습지는 charcoal, SSR, 그리고 pumice를 혼합한 식재기반재를 이용하였다. 기존 인공습지공법의 식재기반재로는 주로 토양, 모래, 자갈, 쇄석 등이 사용되고 있지만, 제한된 면적에서 유입유량을 증가시킬 경우 물이 정체되거나 월류 현상이 발생하는 문제점을 갖고 있다. 또한 공극을 크게 유지시키면 공극 폐색에는 긍정적인 기여를 하지만 여과효율이 떨어지기 때문에 효과적인 처리가 어렵다. 본 연구에서 사용한 식재기반재의 장점은 균일한 입도로 조절되어 단위면적 당 처리유량이 높으면서도 여과효율이 떨어지지 않으며, 자체의 다공성을 가지고 있어 미세공극에 토양미생물의 생장이 용이하다. 또한 비중이 가볍기 때문에 구조물에 영향을 미치지 않으며, 자중에 의한 다짐현상이 적어서 공극폐색의 원인을 보완하는 특징을 갖고 있으며, 식재기반재 선정을 위한 기초실험 결과 영양물질의 제거효율도 높은 것으로 평가되었다.

상·하흐름형 인공습지는 제한된 면적에서 이루어지는 한정된 흐름방식을 벗어나, 단위면적 내에서 최대의 효율을 얻고자 흐름방식을 개선하였다. 상·하흐름형 인공습지는 하수처리를 위한 인공습지의 대표적인 형태인 지표흐름형 및 지하흐름형 인공습지가 수평 또는 수직의 2차원적인 흐름형태로 운영됨에 반하여 수직과 수평의 흐름을 모두 이용하는 3차원적 흐름으로 공간을 확대시키기 때문에 습지 내부의 공간 전체를 효율적으로 활용할 수 있게 하였다. 이러한 상·하흐름을 원활하게 수행하기 위하여 흐름시 발생하는 수두손실을 보상할 수 있는 위치에너지를 확보할 수 있는 수두차를 계단형태로 분산배치 시킴으로써 유량증가에 따른 월류를 방지할 수 있게 되었다. 흐름의 방식은 Fig. 2에서 보는 것과 같이 유입된 유입수가 각 단위공정을 공정의 위쪽으로 유입하여 아래쪽으로 이동하는 흐름방식을 반복하게 되기 때문에 여재의 전체

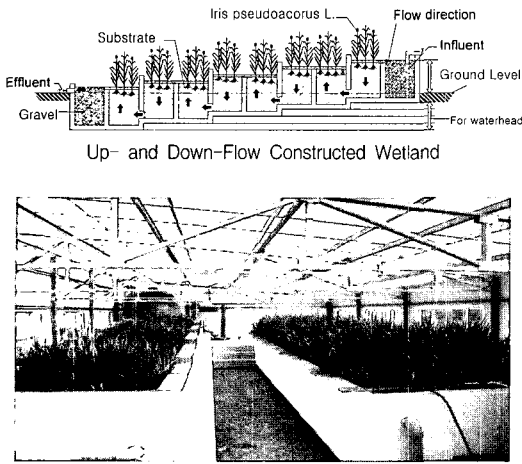


Fig. 2 Schematic diagram and photo of the up- and down-flow constructed wetland

부피를 활용할 수 있어 처리효율이 증가하는 효과를 기대하였다.

Yoon et al. (1999)과 Ham et al. (2002)은 지하흐름형 인공습지를 이용하여 오수를 처리한 결과 생장기 및 동절기에 높은 제거율을 얻을 수 있다고 발표하였으나, 동절기의 높은 제거율에도 불구하고 고농도의 유입수와 낮은 온도 및 갈대의 고사로 인해 유출수의 농도가 상대적으로 높게 나타나 추가적인 관리가 요구된다고 하였다. 인공습지를 이용하여 하수처리수를 처리할 경우 겨울철에 습지식물의 휴면기간을 단축하고, 토양미생물들에 의한 오염물질 분해 능력을 유지시키기 위한 노력이 필요할 것으로 판단된다.

상·하흐름형 인공습지의 유입수는 한국농촌공사 농어촌연구원내에 설치된 바이오필터장치에서 배출되는 2차 수준의 처리수를 사용하였으며, 바이오필터는 처리용량이 $4.31 \sim 8.62 \text{ m}^3 \text{ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ 인 실험시설로서 원유입수는 축산폐수를 희석하여 사용하였다. 습지의 처리용량은 $1 \text{ m}^3 \text{ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ 이고, 체류시간은 12시간으로 운전하였다. 수질분석은 Standard Methods를 이용하였다 (APHA, 1998).

3. 상·하흐름형 인공습지의 처리효율

Brix (1993)는 습지 내 분해제거는 1차 반응을 따르며, 습지 내 흐름은 plug-flow 흐름에 의해 지배된다고 간주하고 유입농도와 유출농도의 관계를 아래와 같이 정리하였다.

$$C_{out} = C_{in} \cdot \exp\left(\frac{-k}{HLR}\right)$$

여기에서 C_{in} : 유입농도 (mg/L)

C_{out} : 유출농도 (mg/L)

k : 1차 반응속도 정수 (m/yr)

HLR: 면적부하속도 (m/yr)

$$k = HLR \cdot \ln\left(\frac{C_{in}}{C_{out}}\right)$$

본 연구에서 사용된 유량은 $1 \text{ m}^3 \text{ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ 이고, HLR은 365 m/yr이다. 위 식을 적용하여 Brix (1993)가 계산한 지하흐름형 인공습지의 1차 반응속도는 kBOD_5 39.3 m yr^{-1} , kT-N 12.7 m yr^{-1} , kT-P 6.6 m yr^{-1} 였다. 본 연구결과의 1차 반응속도는 kBOD_5 609.4 m yr^{-1} , kT-N 544 m yr^{-1} , kT-P 598 m yr^{-1} 이다. Brix (1993)에 의해 조사된 지하흐름형 인공습지의 1차 반응속도와 비교해보면 상·하흐름형 인공습지에서 BOD_5 의 경우 15배, T-N의 경우 43배, T-P의 경우 90배 정도 1차 반응속도 값이 컸다. 따라서 단위면적당 처리하는 용량을 급격하게 증가 시켰기 때문에 소요되는 부지면적을 줄일 수 있었다.

4. 폴리카보네이트 글라스 설치

본 연구에서는 인공습지공정에서 동절기 효율저하의 문제점을 해결하고 식물의 휴면기간을 단축하기 위해 투명 폴리카보네이트 글라스 (polycarbonate glass)지붕과 패널 구조물의 온실을 설치하여 별도의 난방 없이 실험을 진행하였다. 상·하흐름

형 인공습지는 단위면적당 처리효율이 높기 때문에, 다른 생물학적인 처리공정보다 넓은 부지면적을 필요로 하는 인공습지의 단점을 극복할 수 있고 폴리카보네이트 글라스를 설치하여 효율을 높일 수 있었다. 또한 수두손실을 고려한 계단형 설계로 유량증가에 따른 월류를 방지할 수 있었으며, 표면의 하수유출을 막아서, 인공습지의 단점인 모기발생 문제를 개선하는 효과를 기대하였다. 단위면적당 처리효율의 증대로 인해 인공습지를 보호할 수 있는 시설물을 설치하더라도 설치비용을 크게 줄일 수 있었다.

III. 결과 및 고찰

1. 식재기반재 선정을 위한 기초 실험

자연습지나 인공습지 모두 유기물이 축적되는데 (Tanner et al., 1998), 이렇게 축적된 유기물은 탄소, 질소, 그리고 인의 장기적인 저장고로 활용되며, 미생물의 탈질을 위한 탄소원으로 활용된다. 하지만 유기물질의 축적은 습지의 공극폐색을 유발하고 폐수의 체류시간을 짧아지게 하기 때문에 질소와 인의 제거율도 낮아진다.

Fig. 3은 식재기반재 선정을 위한 기초실험 결과로서 주요 오염물질의 제거율을 나타낸 그림이다. BOD₅ 제거효율을 보면 sand, SSR, M-1이 80% 이상의 제거효율을 나타내었으며, SS 제거 효율은 SSR가 가장 높은 제거효율을 나타내었다. TN과 NH₄-N의 처리효율은 SSR이 가장 높은 효율을 보였으며, TP와 PO₄-P의 경우에는 sand와 SSR이 거의 100%의 처리효율을 나타내었다. 실험이 진행되었던 8주 동안의 수온은 9.4~18.2°C, pH 6.8~8.3이었다. 포트 실험결과 SSR의 정화효율은 BOD₅ 92.8%, T-N 96.6%, T-P 96.2% SS 61.2%로 SS를 제외한 나머지 항목에서 제거효율이 가장 효율이 좋았다. SS의 경우 운전시작 초기 동안은 유입수 보다 더 높은 농도의 SS가 유출되었다. 이것은 모래를 제외한 5종류의 기반재에서도

같은 현상을 보였는데, 충전시 발생한 여재가투가 유출되기 때문으로, 안정화 된 후에는 유출수의 SS 농도가 낮아졌다. Sand와 SSR은 PO₄-P 흡착능이 높았으며, 식재기반재가 식물의 생육에 적합한지를 조사하기 위해 식생 포트에 유입유량을 줄이고 관찰한 결과 SSR이 가장 우수한 것으로 평가되었다. 이러한 실험결과를 통해, 기반재의 이온흡착 특성으로 정화기능을 가질 뿐만 아니라 식물의 생육을 지지하는데도 적합한 식재기반재로 SSR이 가장 우수한 것으로 평가되었다. 이러한 실험 결과를 토대로 본 연구의 상·하흐름형 인공습지 식재기반재로 사용될 재료를 charcoal, pumice, SSR 등을 혼합하여 사용하였다. 화산석 계열인 pumice를 선택한 이유는 배수성이 좋고 무수한 다공질 속에 수분을 보유하고 있어서 보수성 또한 뛰어나기 때문이다. 일반적으로 배수성이 좋으면 보수성이 떨어지고 보수성이 좋으면 배수가 불량해지는데, pumice는 다공질의 특성을 가지고 있어 두 가지 요소를 동시에 만족한다. 또한 통기성이 뛰어나 식물 생육이 적당하고 미세한 다수의 공극은 미생물의 서식처를 제공하는 효과가 있을 것으로도 기대된다. 모래의 경우 거의 모든 항목에서 제거효율이 높게 나타났지만 처리유량이 다른 실험재료에 비해 1/4이나 적은 유량을 처리하였으므로 비교하기에는 적합하지 않았다.

본 연구를 통해 charcoal의 양이 25%인 M-2와 M-3가 상대적으로 오염물질의 제거효율이 낮은 것으로 평가되었으며, SSR이 오염물질제거에 매우 효과적인 것으로 나타났다. 따라서 기존 조합실험보다 SSR의 양을 증가시켜 인공습지의 여재로 이용하였으며, 그 최종적인 조성은 charcoal : pumice : SSR = 10 : 20 : 70로 하였다. 사용된 여재의 입경 5~10 mm이었으며, 공극률은 약 59.5%로 모래나 자갈의 공극률 30~40%에 비해 높기 때문에 균일한 유속을 유도할 수 있다고 판단되었다. 식재기반재는 다공질로 비표면적이 크기 때문에 하수와의 접촉기회가 많아지므로 처리효율이 높

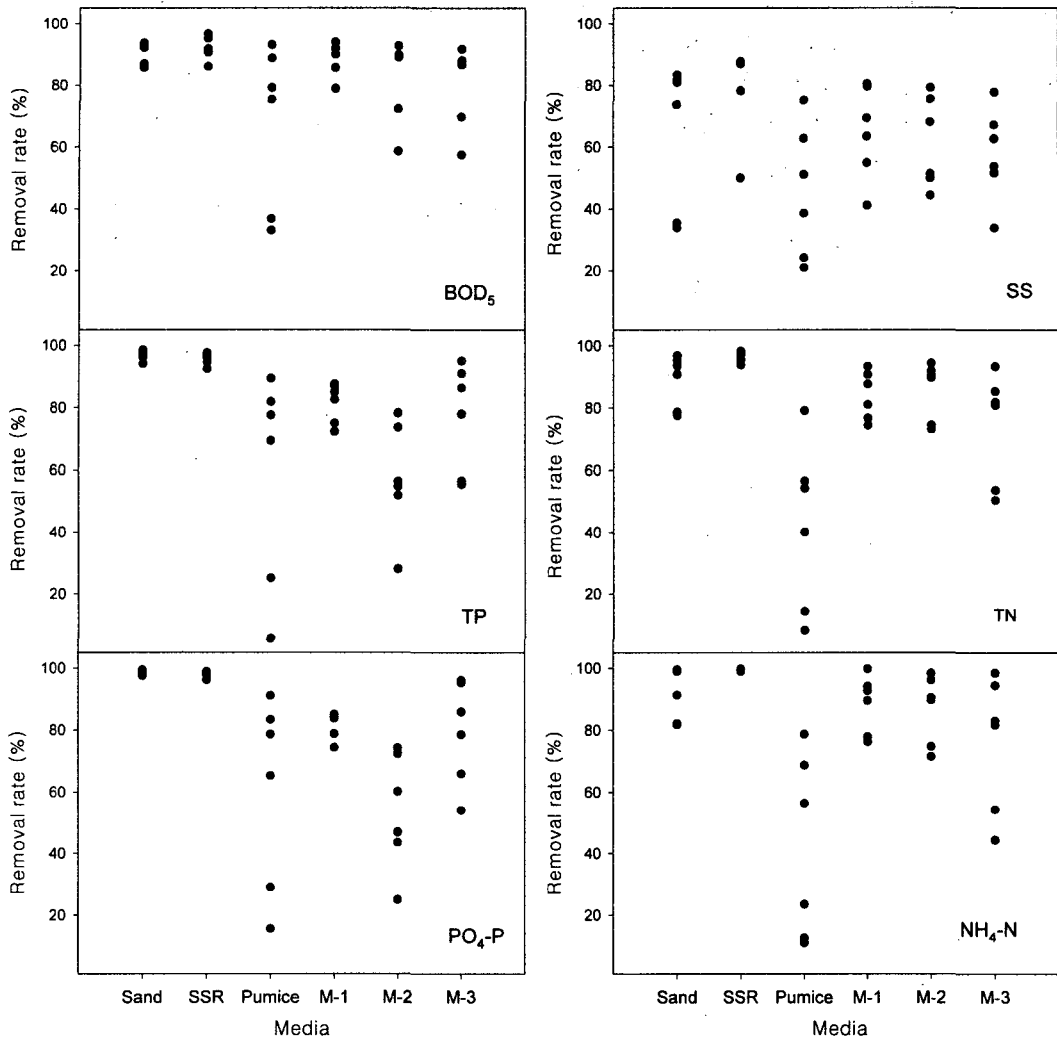


Fig. 3 Removal rate of major pollutants in preliminary experiment for selection of wetland substrate media

을 것으로 기대되었다.

2. 상·하호름식 인공습지의 관리결과

Table 1은 인공습지의 유입수로 사용된 biofilter의 처리수와 습지유출수의 주요수질항목의 농도와 인공습지 유출수의 평균 제거율을 하수처리장 방류수 수질기준과 함께 나타내었다. Biofilter 처리수의 농도는 SS, COD, 그리고 TP의 경우 특별지역

의 수질기준을 만족하는 수준이었으나, BOD₅와 TN의 경우는 수질기준을 만족하지 못하였지만, 인공습지를 통과한 후의 수질은 현재 적용하고 있는 방류수 수질기준을 충분히 만족시키는 것으로 나타났다. 인공습지에서의 평균 처리 효율은 SS와 BOD₅가 약 75% 이었으며, COD가 약 60%의 처리효율을 나타내었다. TN과 TP의 처리효율은 약 70%를 나타내었으며, 질소의 형태별로는 NH₄-N이 약 95%의 높은 처리효율을 나타내었으며

Table 1 Summary of major concentrations and removal rates of major water quality parameters.

Parameter	Wetland influent (mg/L)	Wetland effluent (mg/L)		WWTPs effluent standards
	Conc. ± SD	Conc. ± SD	Removal (%)	
SS	9.5±5.23	2.2±5.85	78.3	10/20*
BOD ₅	20.8±16.25	5.2±17.65	75.8	10/20
TN	26.2±11.97	7.5±3.47	71.4	20/60
NH ₄ -N	17.7±14.34	1.0±1.65	94.4	-
NO ₂ -N	1.8±2.51	0.5±1.44	70.0	-
NO ₃ -N	17.1±14.27	6.2±5.25	63.6	-
PO ₄ -P	1.3±0.47	0.2±0.26	82.6	-
TP	1.7±0.82	0.4±0.31	73.8	2/8

*: WWTP effluent standards of special region (4 big-river regions) / Other regions

NO₂-N과 NO₃-N 도 약 65%의 처리효율을 나타내었다.

Fig. 4는 상·하흐름형 인공습지의 유입수와 유

출수의 주요오염물질의 농도를 나타낸 그래프이다. BOD₅의 유입수 농도는 평균 20.8 mg/L를 타내었으나 처리후에는 평균 5.2 mg/L였다. BOD₅의

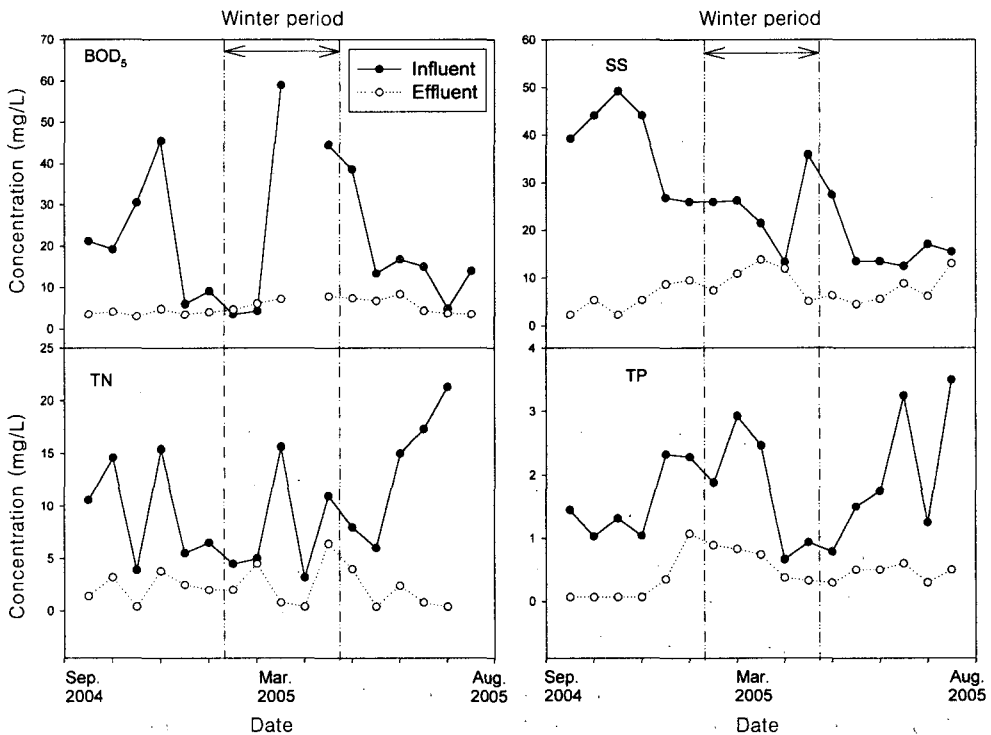


Fig. 4 Concentrations of major pollutants of influent and effluent in up- and down-flow constructed wetland

경우 유출수의 농도가 유입수의 농도보다 높은 경우가 있는데, 이는 유입수로 사용된 biofilter 처리수가 낮았으며 본 연구에서 사용된 인공습지가 배경농도가 약 3~5 mg/L이기 때문인 것으로 판단되며 유입수의 변화에도 안정적인 10 mg/L 이하로 안정적인 유출수 수질을 확보할 수 있었다. 이유는 연구기간동안 미생물과 식물이 성장하기에 적합한 온도를 유지하여 여재를 통해 흡수되거나 정체된 유기물질이 식물에 의한 흡수와 미생물에 의한 분해작용 등이 활발하였기 때문으로 생각된다.

SS의 경우는 평균 9.5 mg/L 유입수 농도에서 2.2 mg/L로 낮아졌다. SS의 처리는 주로 여과기에 의해 이루어지는데, 이러한 여과는 궁극적인 제거가 아니고 물리적인 분리과정이기 때문에 여과된 부유물질은 입자상태로 처리조내에 잔류하게 된다. 이렇게 잔류하는 고형물질 중에서 오염성분들은 미생물에 의한 생물학적 분해, 용해된 후 식물에 의한 흡수, 기타 화학반응을 통해 궁극적으로 제거된다.

TN의 경우에는 유입수의 평균 농도가 26.2 mg/L에서 7.5 mg/L로 감소하였다. 질산화와 탈질에 관여하는 미생물의 종류와 특성이 매우 다양하기 때문에 관여하는 미생물, 폐수 등 여러 조건에 따라 제거 기작이 달라진다. 일반적인 생물학적 질소 제거는 질산화과정과 탈질과정에 의해 이루어지는데, 질산화과정에서 T-N의 5~20%가 제거되며, 탈질산화과정에서 T-N의 70~95%, NO_3^- 의 80~90%가 제거된다 (Metcalf and Eddy, 1991). Katrin and Sabine (1997)은 수직호름형 인공습지에서 COD 제거와 질소변환은 주로 토양층 20 cm에서의 산소공급량과 토양 구성물질의 영향을 받는다고 하였다. 충분한 산소공급이 되는 수직호름형 인공습지에서 COD 제거율과 NH_4^+ 환원율은 90% 이상이었고 T-N 제거율은 50% 정도였다. 준혐기성 인공습지가 조성된 수초골재하수처리장은 C/N비에 따라 T-N 처리율이 45~52% 수준이며 (Chung, 1999), 하천수질정화를 위해 둔치에 조성된 인공습지의 탈질률은 39%로 조사되었다 (Yang,

2003a). Johansson et al. (1997)은 간헐식 수직호름형 인공습지에서 토양여과 후 질산화가 이루어진 폐수에 메탄올을 탄소원으로 공급하여 무기성질소화합물 82%, TN 78% 제거 효과를 얻었다. Platzer (1999)는 수직호름형 인공습지에서 질소 제거를 위해 C/N ratio, 반송률, 그리고 산소공급량 등의 인자를 조절하여 $1\text{g NO}_3^- \text{N m}^{-3} \text{d}^{-1}$ 로 유입하였을 때 최적의 효율을 얻었는데 이때 제거율은 65%라고 보고하고 있다. 본 연구의 유입부하는 평균 $14.64\text{g NO}_3^- \text{N m}^{-3} \text{d}^{-1}$, 최대 $65.84\text{g NO}_3^- \text{N m}^{-3} \text{d}^{-1}$ 이었는데, T-N 제거효율은 71.4%를 나타내어 다른 연구결과보다 상대적으로 높은 처리효율을 나타내었다. 이유는 인공습지의 유입수로 사용된 biofilter 처리수에서 하수의 이온화 및 질산화가 이루어져 질소가 NH_4^+ , NO_3^- 형태로 습지로 유입되기 때문에 식물에 의한 섭취와 탈질이 용이하여 높은 T-N 제거율을 얻었고, 상·하호름 방식을 도입하여 여재에 활용도를 높였기 때문인 것으로 판단된다.

TP의 경우는 유입수의 평균 농도가 1.7 mg/L에서 0.4 mg/L로 낮아졌는데 제거효율 평균 73.8%로써 특정지역의 방류수 수질기준 2 mg/L를 안정적으로 준수하였다. 인 제거에 관한 선행연구들을 고찰해 보면 단순한 자연정화 습지구조에서의 인 처리율은 45% 수준이고, 인공습지 하수처리장의 인 처리율을 살펴보면 미국의 경우 28~85%, 영국은 37~47%, 덴마크는 22~72%로 조사되었다 (Yang, 2003b). 인은 주로 습지토양에 흡착되거나 수중의 입자성 오염물질에 결합되어 침강되는 것이 주 제거작용이며 (Reed et al., 1995, Kadlec and Knight, 1996; Mitsch and Gosselink, 2000), 식물에 의한 흡수는 전체의 5~10% 정도에 불과하다 (Corbitt and Bowen, 1994)고 보고되었다. Sakadevan and Bavor (1999)은 점토여재를 이용한 자유수면호름형 인공습지에서 수리학적 부하 2,000~15,000 L/day로 운전한 결과, T-P 48.9%, T-N 26.3~77.5%의 제거효율을 얻었다. Chung

(2004)은 수초·골재하수처리장에서 유입수 농도가 4~13 mg/L 일 때, 유출수 농도는 0.5~1.0 mg/L로 90%의 인 제거율을 얻었으며, 제거량의 90%가 포설된 골재에 의해 흡착된 것으로 발표하였다. 또한 초겨울에 처리장의 수초를 베어내면 인 총량의 5~10%를 더 제거할 수 있다고 하였다. 본 연구결과에서 TP의 처리효율도 다른 연구보다 높은 효율을 나타내었는데, 인을 잘 흡착할 수 있는 재료의 선정과 식재기반재 전체를 사용할 수 있는 흐름방식이 영향을 준 것으로 판단된다. 이상의 연구결과를 종합해 보면, 상·하흐름형 인공습지의 경우 유기물질인 BOD₅나 부유물질인 SS 뿐만이 아니라 영양물질인 TN과 TP의 경우에도 처리효과가 큰 것으로 나타났다.

Fig. 5는 식재기반재의 사용 전·후 표면을 SEM으로 관찰한 것이다. 인공습지공정에서 식재기반재로 사용된 재료에 대하여 1년 동안 사용 후 표면관찰을 하였다. 습지 내 유기물 퇴적 등에 의한 공극이 막힘 등은 관찰되지 않았고 사용전과 사용후의 큰 차이를 발견하지 못하였다. 또한 일부분 생물막이 형성되었는데, 이 생물막은 오염물질의 처리효율을 높였을 것으로 판단된다. 하지만 장기적인 운전을 통해 전체적인 공정의 안정성을 확인하는 작업이 필요할 것으로 판단된다.

3. 상·하흐름형 인공습지의 동절기 처리효율 분석

Yoon et al. (1999)과 Ham et al. (2002)은

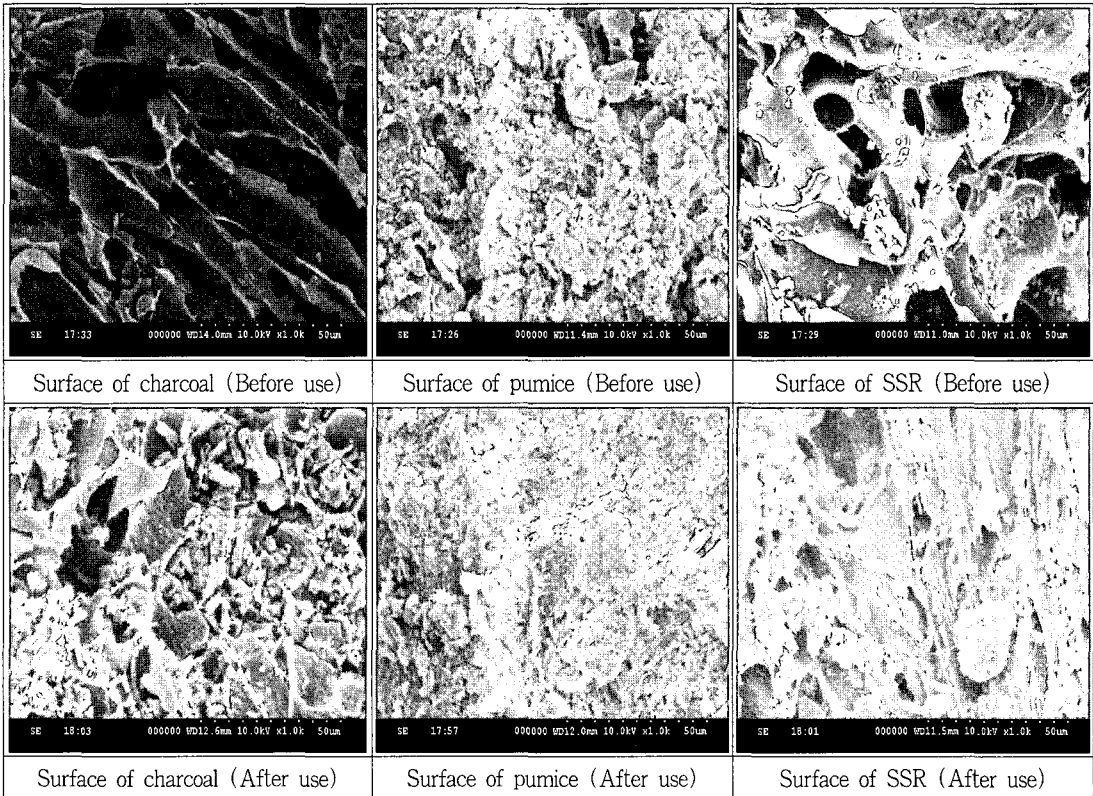


Fig. 5 SEM (Scanning Electron Microscope) of substrate media in the constructed wetland media after one-year operation

지하흐름형 인공습지를 이용하여 오수를 처리한 결과 생장기 및 동절기에 높은 제거율을 얻을 수 있다고 발표하였으나, 동절기의 높은 제거율에도 불구하고 고농도의 유입수와 낮은 온도 및 갈대의 고사로 인해 유출수의 농도가 상대적으로 높게 나타나 추가적인 관리가 요구된다고 하였다. Yoon et al. (1999)는 중부지방인 건국대학교 교내에 위치한 모래를 이용한 지하흐름형 인공습지의 생장기와 동절기의 오수처리 성능을 검토하여 보고하였는데, BOD₅와 SS의 경우 생장기에 77.7%와 72.7%의 처리효율을 보이다가 동절기에는 50.9%와 20.6%로 급격하게 감소하였다고 보고하고 있다. 영양물질인 인의 경우 생장기 처리효율 48.0%에서 20.6%로 절반 이상 감소하였으며, 질소의 경우 생장기에도 낮은 처리효율인 19.2%에서 동절기에는 11.0%로 더욱 감소하였다고 하였다. 또한 상대적으로 높은 부하량으로 운전된 동절기에는 생장기 유출수의 BOD₅, SS, TN, 그리고 TP의 농도가 각각 31.9, 18.0, 84.9, 그리고 6.0 mg/L에서 94.7, 26.0, 10.6, 그리고 110.2 mg/L로 급격하게 증가한 것으로 나타났다. 따라서 인공습지를 이용한 오수처리를 통해서 강화된 소규모 오수처리시설의 방류수 수질기준을 동절기에도 만족시키기 위해서는 겨울철에 습지식물의 고사를 방지하고 미생물들에

의한 오염물질 분해 능력을 유지시키기 위한 노력이 필요할 것으로 판단된다. 본 연구에서는 인공습지공정에서 동절기 효율저하의 문제점을 해결하기 위해 처리장 지붕을 투명 폴리카보네이트 글라스로 설치하여 난방을 하지 않는 온실을 도입하고 12~2월 동안 겨울철 처리장 실내·외 온도 차이를 측정하여 Fig. 4에 나타내었다. 처리장 실내온도가 실외 온도보다 최고 20℃까지 높게 측정되었고, 가장 온도가 낮은 시기에 저녁부터 새벽까지 0℃이하로 내려가는 경향을 나타내었으나 대부분 0℃보다 높은 수준이었다 (Fig. 6). 앞에서 설명한 Fig. 4에서 운전기간동안 제거율 표시는 11월 말부터 3월 초까지를 동절기로 표시하고 있다. 유입수의 농도의 차이는 있었으나 유출수의 농도는 동절기 이외의 기간과 유사한 수준으로 온도가 낮은 시기에도 안정적인 처리효율을 나타내었다. 특히, 동절기에 처리효율이 감소하는 질소와 인의 경우에도 유출수의 농도 증가 없이 방류수 수질기준을 충분히 만족시킬 수 있는 것으로 평가되었다.

IV. 결 론

본 연구에서는 인공습지의 식재기반재를 선정하기 위한 선행연구를 통하여 그들의 조합을 통해 최

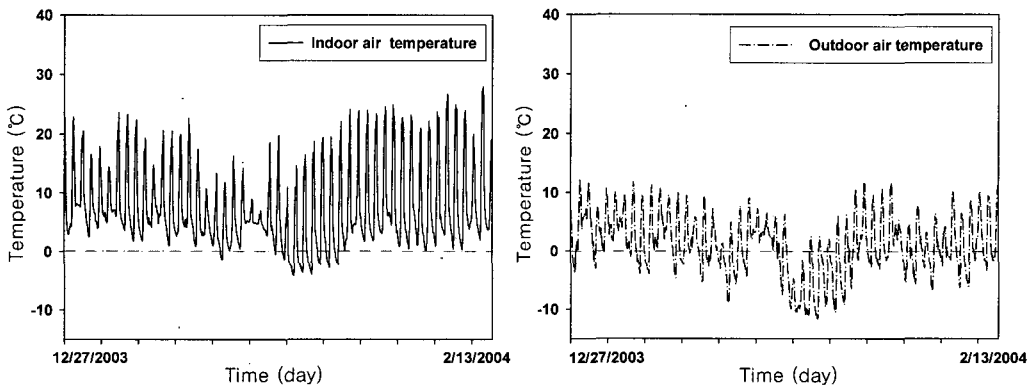


Fig. 6 Air temperature of constructed wetland in house of polycarbonate glass compared with outer temperature

적의 여재를 선정하였으며, 흐름을 상·하 흐름식으로 바꾸어 여재층 전체를 활용할 수 있는 인공습지에 수생식물인 노랑 꽃창포를 식재하여 처리효과를 분석하였다.

식재기반재 선정 연구에서 SSR이 오염물질제거에 매우 효과적인 것으로 나타났으며, 화산석 계열인 pumice는 배수성이 좋고 무수한 다공질 속에 수분을 보유하고 있어서 보수성 또한 뛰어나기 때문이다. 여재의 조성은 charcoal : pumice : SSR = 10 : 20 : 70로 하였다. 사용된 여재의 입경 5~10 mm이었으며, 공극률은 약 59.5%로 모래나 자갈의 공극률 30~40%에 비해 높기 때문에 균일한 유속을 유도할 수 있었다.

여재의 흡착능 실험과 식생포트 실험을 통하여 효율적인 식재기반재를 선정하였고, 같은 부지면적에서 최대한의 효율을 위하여 상·하흐름형 인공습지를 도출하였다. 상·하흐름형 인공습지는 기존 인공습지의 2차원적 습지개념을 3차원으로 확대시킨 것으로, 습지의 처리공간을 넓이와 함께 깊이까지 활용할 수 있어, 공간을 절약하고 효율을 높일 수 있었기 때문에 동절기의 처리효율을 유지하기 위한 폴리카보네이트 그라스의 설치가 가능하였다.

상·하흐름형 인공습지의 유입수로 사용된 bio-filter 처리수의 농도는 SS, COD, 그리고 TP의 경우 특별지역의 수질기준을 만족하는 수준이었으나, BOD₅와 TN의 경우는 수질기준을 만족하지 못하는 상태였다. 하지만, 인공습지를 통과한 후의 수질은 현재 적용하고 있는 방류수 수질기준을 충분히 만족시키는 것으로 나타났다. 상·하흐름형 인공습지에서의 평균 처리 효율은 SS와 BOD₅가 약 75%의 처리효율을 나타내었다. TN과 TP의 처리효율은 약 70%를 나타내었고, 질소의 형태별로는 NH₄-N이 약 95%의 높은 처리효율을 나타내었으며 NO₂-N과 NO₃-N 도 약 65%의 처리효율을 나타내어 모든 항목에서 수질기준을 연중 지속적으로 만족시키는 것으로 나타났다.

본 연구개발 수행에 있어 연구비를 지원한 (주)자연과환경과 연구수행에 장소를 제공해주신 건국대학교와 한국농촌공사 농어촌연구원 관계자 여러분께 감사드립니다.

References

1. APHA. 1998. Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater(19th edition.) American Public Health Association, Washington, D.C., USA.
2. Brix, H., 1993, Wastewater Treatment in Constructed Wetlands: System Design, Removal Processes, and Treatment Performance, Constructed Wetlands for Water Quality Improvement, Moshiri G. A.(eds.), Lewis Publishers, Florida. 9-22.
3. Chung, D. Y., 1999. Development of an environmentally friendly sewage disposal model for agricultural and fishing village areas. *Journal Korean Environmental Research and Revegetation Technology* 2(1): 10-19. (in Korean).
4. Chung, D. Y., 2004, A study on sewage plant with water plants and gravels for treatment of sewage generated in farming and fishing village. *The Society of Korea Practical Arts Education*, 10(1): 222-233. (in Korean).
5. Corbitt, R. A., and P. T. Bowen. 1994. Constructed Wetlands for Wastewater Treatment. Pages 221-241. In D.M. Kent (ed.). *Applied Wetlands Science and Technology*. Lewis Publishers, CRC Press. Boca Raton. FL. 436pp.
6. Cooper, P. F., 1999. A review of the design and performance of vertical flow and hybrid reed bed treatment systems. *Water Science and Technology* 40(3), 1-9.

7. Crites, R. W., Dombeck, G. D., Waston, R. C. and C. R. Williams. 1997. Removal of metals and ammonia in constructed wetlands, *Water Environment Research* 69(2): 132-135.
8. Ham, J. H., C. G. Yoon, J. H. Jeon and M. H. Kim. 2002. Pond system for further polishing of constructed wetland effluent during winter season. *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers* 44(4): 139-148. (in Korean).
9. Headley, T. R., E. Herity and L. Davison. 2005. Treatment at different depths and vertical mixing within a 1-m deep horizontal subsurface-flow wetland. *Ecological Engineering* 25, 567-582.
10. Johansson, L., 1997. The use of leca (Light expanded clay aggregates) for the removal of phosphorus from wastewater. *Water Science and Technology* 35(5): 87-93.
11. Kadlec, R. H. and R. L. Knight. 1996. *Treatment wetlands*. 415-442.
12. Katrin, V. and K. Sabine. 1997. N & COD Removal in vertical flow system. *Water Science and Technology* 35(5): 79-85.
13. Kwun, T. Y., 2006. Development of natural wastewater treatment system for decentralized regions and rural communities. PhD thesis, Department of Rural Engineering, University of Konkuk. (in Korean).
14. Metcalf & Eddy, 1991, *Wastewater Engineering*, McGraw-Hill Book Company.
15. Mitsch, W. J., and J. G. Gosselink. 2000. *Wetlands* 3rd ed., John Wiley & Sons, Inc., N.Y.
16. Platzer, C., 1999. Design recommendations for subsurface flow constructed wetlands for nitrification and denitrification. *Water Science and Technology* 40(3): 257-263.
17. Reed, S. C., Crites, R. W. and E. J. Middlebrooks. 1995. *Natural systems for waste management and treatment*. McGraw-Hill, Inc., Washington DC.
18. Sakadevan, K. and H. J. Bavor. 1999. Nutrient removal mechanism in constructed wetlands and sustainable water management. *Water Science and Technology* 40(2): 121-128.
19. Tanner, C. C., James P., Sukisa, S. and M. P. Upsdell. 1998. Organic matter accumulation during maturation of gravel-bed constructed wetlands treating farm dairy wastewater. *Water Resource* 32(10): 3046-3054.
20. Vymazal, J., 1996. Constructed wetlands for wastewater treatment in the Czech Republic the first 5 years experience. *Water Science and Technology* 34(11): 159-164.
21. Yang, H. M., 2003a, Nitrogen removal rate of free-water-surface treatment wetland system constructed on floodplain during its initial operating stage. *Journal Korean Environmental Research and Revegetation Technology* 6(6): 41-48. (in Korean).
22. Yang, H. M., 2003b, Total phosphorus removal rate of a subsurface-flow wetland system constructed on floodplain during its initial operating stage, *Journal Korean Environmental Research and Revegetation Technology* 6(6): 49-55. (in Korean).
23. Yoon, C. G., S. K. Kwun. and J. H. Ham. 1999. Wetland performance for wastewater treatment in growing and winter seasons. *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers* 41(4): 37-46. (in Korean).