

## 질소 및 인에 대한 흡착특성이 다른 여재를 사용한 지하흐름형 인공습지 효율 평가

서준원 · 장형석 · 강기훈<sup>†</sup>

대림산업(주) 기술연구소

## Performance Evaluation of Subsurface-flow Wetland with Media Possessing Different Adsorption Capacities for Nitrogen and Phosphorus

Seo, Jun-Won · Jang, Hyung-Suk · Kang, Ki-Hoon<sup>†</sup>

Technology Research Institute, Daelim Industrial Co., Ltd.

(Received 29 August 2006, Accepted 13 November 2006)

### Abstract

Constructed wetland has been widely used for the treatment of sewage, stormwater runoff, industrial wastewater, agricultural runoff, acid mine drainage and landfill leachate. For the removal of nitrogen and phosphorus, uptake by plants and adsorption to media material are the major processes, and, therefore, the selection of media with specific adsorption capacity is the critical factor for the optimal design of wetland along with the selection of appropriate plant species. In this study, two media materials (loess bead and mixed media) possessing different adsorption characteristics for ammonium and phosphate were selected, and their adsorption characteristics were evaluated. In addition, the performance of subsurface-flow wetland systems employing these media was evaluated in both batch and continuous flow systems. With LB medium, better phosphorus removal was observed, while better ammonia removal was obtained with MM medium. In addition, enhanced removal efficiencies were observed in the wetland systems employing both media and aquatic plants, mainly due to the better environment for microbial growth. As a result, appropriate selection or combination of media with respect to the inflow water quality maybe important factors for the successful design and operation of wetland systems.

**keywords** : Constructed wetland, Media,  $\text{NH}_4^+$ -N,  $\text{PO}_4^{3-}$ -P

### 1. 서론

하수관거의 정비 및 하수종말처리장 건설 등 환경 기초 시설의 지속적인 확충에도 불구하고 수계 수질은 만족스러운 수준으로 개선되지 않고 있으며, 특히 하수도의 보급이 어려운 농어촌 지역으로부터 발생하는 생활오수와 비점오염원이 수질 악화의 주요 원인으로 대두되고 있다. 이러한 지역의 대부분은 유역의 상류부에 위치하고 있어 상수원수의 수질에 중요한 영향을 미치고 있으나, 주로 농촌마을이나 군부대, 소규모 공동주택, 휴양지 등이 분산되어 존재하고 있어 하수도의 보급이 용이하지 않은 실정이다. 또한 지역의 하수 발생특성을 고려한 적정 처리공법이 개발되어야 함에도 불구하고 중대규모 공법의 규모를 축소하거나 일부공정을 생략하여 간소화한 처리공정이 주로 적용되고 있는 실정이다. 이러한 지역에서의 적정 처리방법을 모색하기 위해서는 지역주민들에 의한 유지관리에 어려움이 없어야 하며, 지역특성을 고려한 친환경적인 처리시설의 설치가 바람직할 것이다.

친환경적인 공법으로 개발된 인공습지에 의한 자연정화

방법은 하수 및 폐수, 강우 유출수, 광산배수, 매립지 침출수 등의 처리에 광범위하게 사용되고 있는 처리 방법으로서(Rousseau et al., 2004) 저에너지 사용, 저소음, 유입 유량 및 농도의 변화에 강한 특성 등을 가지고 있어 대부분의 고도처리공법에서 나타나는 고비용과 유지관리의 어려움을 극복함으로써 앞서 언급한 지역의 지역적 특성에 적절한 처리 대안으로서도 효과적으로 활용될 수 있을 것이다. 특히 수생식물과 여재를 이용한 지하흐름형 인공습지는 미생물에 의한 변환 및 분해, 수생식물에 의한 섭취, 침전, 휘발, 흡착 및 고정화 등과 같은 다양한 반응을 통해 오염물질들이 제거되며(Ran et al., 2004; Brix, 1994), 동질기 처리효율 감소와 유층발생 등의 단점도 극복할 수 있는 것으로 평가되고 있다(정, 1999).

반면, 지하흐름형 인공습지에서는 부유 오염물 및 과도한 미생물 성장 등에 의한 공극 폐쇄현상과 여재의 흡착능 포화현상 등이 제한인자로 작용하게 된다. 특히 인 성분의 제거는 식물에 의한 흡수와 침전, 여과 및 흡착 등과 같은 물리적 반응에 의해 처리되므로 식물에 의한 흡수 속도와 물리적 반응, 즉 여과 및 흡착으로 제거되는 속도 사이의 균형이 유지되지 않을 경우 인공습지 내 인 성분의 축적이 포화에 달해 결국 유출수를 통해 유출될 수 있다(Yang et

<sup>†</sup> To whom correspondence should be addressed.  
khkang@daelim.co.kr

al., 2001). 질소의 경우는 식물에 의한 흡수 및 물리적 반응 외에 미생물에 의한 탈질이 추가적인 제거반응으로 작용을 하게 되나, 이 역시 여재에 의해 제거되는 속도와 균형이 인공습지 운전효율에 가장 큰 영향을 미치게 된다 (Brij, 1999). 따라서 수생식물과 여재를 조합하는 지하흐름형 인공습지의 성공적인 운영을 위해서는 유입수의 특성을 고려한 수생식물의 종 및 여재 선정이 중요한 설계인자로 작용하게 된다.

따라서 본 연구에서는 인공습지에 적용 가능한 다양한 여재를 대상으로 질소 및 인에 대한 흡착특성을 평가하기 위한 등온흡착 실험 및 연속 흡착실험을 실시하였다. 또한 이들 여재를 인공습지에 주로 사용되는 수생식물과 조합하여 회분식 처리실험을 수행하였으며, 이러한 결과들을 바탕으로 실험실 규모 지하흐름형 인공습지를 운영하여 이들의 운전효율을 평가하였다. 이로부터 여재의 질소 및 인에 대한 흡착특성이 전체적인 인공습지의 운전효율에 미치는 영향을 평가함으로써 유입수질에 따른 인공습지의 최적 시스템 구성을 위한 방안을 제시하고자 하였다.

## 2. 재료 및 방법

### 2.1. 여재

본 실험에 사용한 여재는 황토를 1,000°C 이상의 고온에서 소성 가공한 황토비드(loess bead, LB)와 black carbon, 부석(pumice), 규산질 화산석 등이 혼합된 혼합여재(mixed media, MM) 두 가지로서 현재 시중에서 시판되고 있는 일반적인 여재들 중에서 선정을 하였다. 이들 여재에 대해 질소 및 인의 흡착특성 및 흡착능을 평가하였으며, 실험실 규모의 회분식 및 연속흐름형 인공습지 실험을 수행하였다. 다음의 Table 1은 각 여재의 물리적 특성은 나타낸 것이다.

### 2.2. 등온흡착 및 연속흡착 실험

여재의 등온흡착 특성을 조사하기 위해 질소(NH<sub>4</sub>Cl) 20 mg-N/L, 인(KH<sub>2</sub>PO<sub>4</sub>) 10 mg-P/L 농도의 표준용액 500 mL에 LB 및 MM 여재를 각각 80, 160, 240, 400 g 충전한 후 Jar Tester를 이용하여 24시간 동안 120 rpm으로 교반한 후 용액중의 질소 및 인 평형농도를 분석하였다.

흡착실험 결과는 Langmuir 및 Freundlich 등온흡착식을 이용하여 흡착특성을 평가하였으며, 각각의 등온흡착식은 다음의 식 (1) 및 (2)와 같다.

$$\frac{x}{m} = \frac{KbC_e}{1 + KC_e} : \text{Langmuir Isotherm} \quad (1)$$

$$\frac{x}{m} : \text{흡착제 표면에서의 평형농도, mg/g}$$

$C_e$  : 액상에서의 평형농도, mg/L  
 $b$  : 최대흡착량, mg/g  
 $K$  : 흡착 강도에 관한 상수, L/mg

$$\frac{x}{m} = kC_e^{1/n} : \text{Freundlich Isotherm} \quad (2)$$

$k$  : 흡착능에 관한 상수, (mg/g)/(L/mg)<sup>1/n</sup>  
 $n$  : 흡착강도에 관한 상수

연속흡착 실험에서는 내경 30 mm, 높이 420 mm의 컬럼에 LB 혹은 MM 여재를 각각 120 g씩 충전하였으며, 이때 충전 높이는 컬럼의 좁은 내경으로 인해 약 350 mm 내외였다. 여재가 충전된 컬럼은 질소(NH<sub>4</sub>Cl) 20 mg-N/L, 인(KH<sub>2</sub>PO<sub>4</sub>) 10 mg-P/L의 표준용액을 1.4 L/day (HRT 1.5 hr) 유속으로 주입하여 포화농도에 도달하는 시간까지 컬럼 유출수의 질소 및 인 농도를 분석하였다.

### 2.3. 회분식 및 연속식 인공습지 실험

회분식 및 연속식 인공습지 실험에서 LB 및 MM 여재와 함께 사용된 수생식물은 큰고랭이(*Scirpus tabernaemontani*, S)와 애기부들(*Typha angustata*, T)로서 60 cm 이상 성장한 것을 선별하여 사용하였다. 회분식 실험에서는 56 L 크기의 반응조(W40 cm × L40 cm × H35 cm)에 여재 및 수생식물을 다음과 같이 6가지로 조합하여 충전하여 진행하였으며, 이로부터 수생식물과 여재를 각각 사용했을 경우와 조합하여 사용했을 경우에 대한 수질정화 능력을 비교 평가하고자 하였다.

1. 반응조 S·T : 큰고랭이와 애기부들을 1:1 (습중량 1 kg) 비율 조합
2. 반응조 LB : LB 여재 15 kg
3. 반응조 MM : MM 여재 15 kg
4. 반응조 S·T + LB : 식물섬(S·T) 및 LB 여재 15 kg
5. 반응조 S·T + MM : 식물섬(S·T) 및 MM 여재 15 kg
6. 대조구(Control) 반응조

\* 반응조 S·T : 큰고랭이와 애기부들을 포트에 식재하여 부유할 수 있도록 식물섬(W25 cm × L25 cm) 형태로 제작.

처리 용량은 40 L로 Table 2에 나타낸 것과 같은 조성을 가지는 인공폐수를 원수로 사용하였으며, 온도는 23~25°C, 조도는 삼파장 램프를 이용하여 5,000 Lux 이상 유지시켜 주면서 오전 8시부터 오후 7시까지만 점등이 되도록 14일간 진행하였다.

**Table 1.** Physical characteristics of the media used in the experiments

Media	Size Distribution, mm	Bulk Porosity, %	Bulk Density, g/cm <sup>3</sup>
Loess Bead (LB)	4.0~6.5	40	1.28
Mixed Media (MM)	2.0~9.0	35	0.87

**Table 2.** Composition of synthetic wastewater used in batch experiments

Chemicals	Quantity in 40 L tap-water (g)	Chemicals	Quantity in 40 L tap-water (g)
Glucose	9.00	KNO <sub>3</sub>	1.66
Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	8.48	NaNO <sub>3</sub>	1.00
KCl	0.84	Na <sub>2</sub> HPO <sub>4</sub>	0.10
NH <sub>4</sub> Cl	3.00	HOOC(CHOH) <sub>2</sub> COOH	0.048
CaCl <sub>2</sub> · 2H <sub>2</sub> O	0.84	FeCl <sub>3</sub> · 6H <sub>2</sub> O	0.01
NaCl	1.50	H <sub>2</sub> BO <sub>3</sub>	0.01
MgSO <sub>4</sub> · 7H <sub>2</sub> O	0.50	NaMoO <sub>4</sub> · 2H <sub>2</sub> O	0.01
KH <sub>2</sub> PO <sub>4</sub>	0.53	C <sub>12</sub> H <sub>25</sub> C <sub>6</sub> H <sub>4</sub> SO <sub>3</sub> Na	0.40

연속실험에서는 LB 및 MM 여재 28 kg을 두 개의 반응조(W10 cm × L160 cm × H35 cm)에 각각 충전한 후 각 반응조에 큰고랭이와 애기부들 1 kg (1 : 1, 습중량)을 식재하여 지하흐름형 인공습지를 구성하였다. 연속실험을 위한 유입 원수는 표준활성슬러지 공법으로 구성된 오수처리장의 2차침전지 월류수를 사용하였다. 60일간 연속실험을 진행하면서 질소 및 인에 대해 다른 흡착능을 가지는 여재를 사용한 각 인공습지로부터의 질소 및 인의 제거 특성을 평가하였다.

**2.4. 분석 방법**

NH<sub>4</sub><sup>+</sup>와 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>, PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>는 Shimadzu사의 Ion Chromatography (LC-10Avp, Japan)로 분석하였으며, TKN은 Velp사의 질소 분석기(DK6/UDK132, Italy)로 분석하였다. 이 외에 총인, COD, SS 등은 Standard Methods(APHA, 1992)에 준하여 분석하였다.

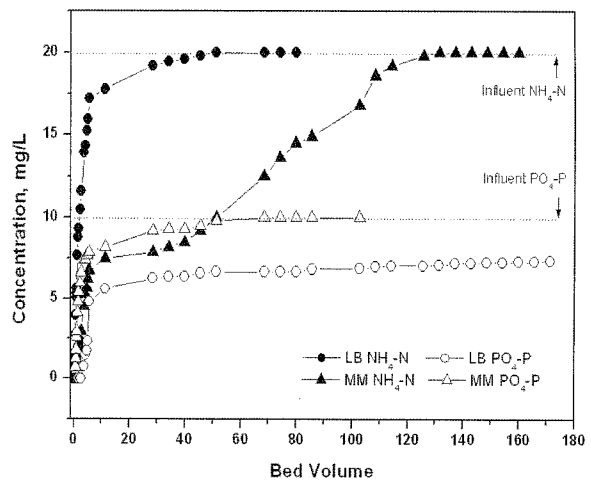
**3. 결과 및 고찰**

**3.1. 질소 및 인의 등온흡착 특성**

LB와 MM 여재의 암모니아성 질소 및 인 흡착특성을 조사하기 위하여 등온흡착 실험을 수행하였으며, 그 결과를 Table 3에 나타내었다. 대체적으로 MM 여재는 암모니아성 질소에 대한 흡착이 우수한 반면, 인에 대한 흡착능은 매우 낮았으며, LB 여재는 이와는 반대로 인에 대한 흡착이 상대적으로 우수한 반면, 암모니아성 질소에 대한 흡착은 매우 낮았다. 이러한 흡착능의 차이로 인해 LB 여재의 경우 암모니아성 질소에 대한 흡착실험 결과는 Langmuir 등온흡착식에 대해 유의성 있는 상관성을 나타내지 않았으며, MM 여재의 경우는 Freundlich 등온흡착식에 대해 유의성 있는 상관성을 나타내지 않았다.

**3.2. 질소 및 인의 연속흡착 특성**

지하흐름형 인공습지는 오염물질이 여재에 의한 흡착 포화상태에 이르게 되면 흡착능력을 상실하게 되고, 오염물질의 유출로 이어지게 된다. 따라서 충전된 여재는 지하흐름형 인공습지에 있어서 필수적인 구성요소로서 여재의 포화에 이르는 시간을 평가해야만 한다. 각각의 여재에 대하여 질소 및 인의 포화농도까지 이르는 시간을 조사하기 위하여 컬럼 실험을 진행하였다. Fig. 1은 공탑 체류시간(Empty bed contact time, EBCT)을 4.2 시간으로 하여 컬럼 실험을 통해 얻어진 유출수의 질소와 인의 농도를 나타내었다. 질소의 경우, MM 여재는 bed volume 131이 경과 후에, LB 여재는 bed volume 51이 경과된 이후에 포화농도에 이르렀으며, 인의 경우에는 MM 여재는 bed volume 11이 경과된 이후에 포화농도에 이르렀으나, LB 여재는 bed volume 171이 경과한 후에도 인의 포화농도인 10 mg/L에 이르지 못하였다. MM 여재는 bed volume 0.6, LB 여재는 bed volume 3.8이 지난 후에 인의 농도가 증가하기 시작했으며, 암모니아성 질소의 농도는 두 여재 모두 bed volume 0.3이 경과한 후 증가하기 시작하였다.



**Fig. 1.** Breakthrough curves for continuous feed of NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N and PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>-P to LB and MM media.

**Table 3.** Adsorption parameters for LB and MM media estimated by isotherm data

Adsorbate	Adsorbent	Freundlich			Langmuir		
		k	1/n	r <sup>2</sup>	b (mg/kg)	K (L/mg)	r <sup>2</sup>
NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> -N	LB	1.78×10 <sup>-5</sup>	0.94	0.95	-	-	-
	MM	0.12	0.24	0.86	227	1.33	0.90
PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> -P	LB	0.060	0.46	0.97	170	0.57	0.92
	MM	-	-	-	22	1.13	0.86

본 연구에서 수행한 LB, MM 여재의 연속흡착특성 실험 결과, 인 처리효율 및 여재의 수명을 고려할 때 LB 여재가 MM 여재에 비해 매우 우수하였으며, 암모니아성 질소는 MM 여재가 LB 여재에 비해 다소 우수한 것으로 조사되었다.

### 3.3. 회분식 인공습지 처리효율

회분식 인공습지 실험에서는 수생식물 혹은 여재만을 단독으로 이용하였을 경우와 수생식물과 여재를 조합하였을 경우의 수질정화능력 차이를 평가하였으며, 실험결과를 COD, 총질소, 총인의 제거효율에 대하여 Fig. 2에 도시하였다. COD 제거효율은 수생식물만을 증진한 경우 약 22.5%이었으며, LB 혹은 MM 여재를 단독으로 증진한 반응조에서는 제거효율이 18.5~18.6%로서 여재간 제거율이 유사하였다. 반면, 수생식물과 여재를 조합한 반응조의 COD 제거효율은 약 63.5~68.5%로서 수생식물과 여재를 단독으로 사용했을 경우의 제거율 단순합보다 약 22.4~27.5% 가량 높게 나타났다.

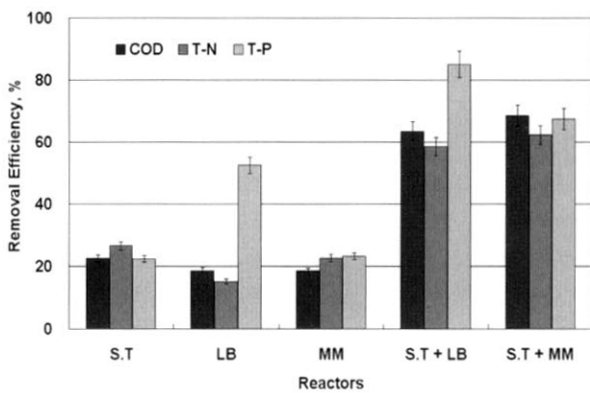


Fig. 2. Removal efficiencies obtained from batch experiments of constructed wetlands containing various combinations of each medium and aquatic plants.

회분식 실험 초기 총질소는 28.8~30.3 mg/L, 암모니아성 질소는 16.2~18.3 mg/L, 질산성 질소는 8.5~9.9 mg/L로서 총질소의 28~34%가 질산성 질소로 존재하였다. 총질소의 경우, 수생식물만을 증진한 경우 제거효율은 26.5%이었으며, LB 혹은 MM 여재를 단독으로 증진한 반응조에서는 각각 15.2와 22.6%로서 MM 여재의 제거율이 다소 우수하였다. 반면, 수생식물과 여재를 조합한 반응조의 총질소 제거효율은 약 58.5~62.3%로서 수생식물과 여재를 단독으로 사용했을 경우의 제거율 단순합보다 약 10.4~22.1% 가량 높게 나타났다.

총질소 성분 중 질산성 질소의 제거효율을 살펴보면, 여재만을 증진한 경우 LB와 MM 반응조에서 각각 제거율이 13.6% 및 4.5%이었다. 이러한 결과는 질산성 질소가 등온흡착 실험에서 어떠한 여재에 대해서도 유의할 만한 흡착능을 보이고 있지 않았던 예비실험 결과와 대조를 이루는 것이다(결과 미제시). 이는 반응조의 DO 농도가 실험 초기 2.2 mg/L에서 점차 감소하여 3일이 경과한 이후 실험 전

기간 동안 0.1~0.2 mg/L 수준으로 유지되었던 점과 원수중에 유기물도 포함되어 있었던 점 등을 고려할 때 질산성 질소의 제거는 탈질에 의한 것이 주된 제거 경로일 것으로 판단된다. 특히, LB 여재의 경우 질산성 질소의 제거효율이 상대적으로 우수하였으며, 이는 LB 여재가 가지는 다공성 구조가 탈질미생물의 성장에 유리한 환경을 제공했기 때문인 것으로 판단된다. 수생식물만을 증진한 반응조에서는 약 17.6%의 질산성 질소 제거율을 나타냈으며, 이 경우도 반응조의 수질조건 등을 고려할 때 식물에 의한 섭취보다는 탈질이 주된 제거 경로인 것으로 판단된다(Ingersoll et al., 1998).

또한 수생식물과 여재를 병용한 S·T+LB 및 S·T+MM 반응조에서의 제거율은 각각 29.3% 및 20.7%이었으며, 이는 수생식물 및 여재를 단독으로 사용했을 경우의 제거율 단순합과 비교할 경우 유의할만한 차이를 나타내고 있지 않음을 알 수 있다.

한편, 암모니아성 질소의 제거효율을 살펴보면, 여재만을 증진한 반응조에서는 LB가 9.8%, MM이 25.0%로서 MM 여재가 다소 높게 나타났으며, 이는 앞선 등온흡착 및 연속흡착 실험결과와 마찬가지로 MM 여재의 암모니아성 질소에 대한 상대적으로 우수한 흡착능에 기인하는 것으로 판단된다. 반면, 수생식물만을 사용한 반응조에서의 제거율은 약 7.7%였으며, 수생식물과 여재를 조합한 S·T+LB 및 S·T+MM 반응조의 제거율은 각각 43.3%와 46.9%로서(총질소 제거효율의 74.0~75.3%) MM 여재를 사용한 경우 제거효율이 다소 우수한 것으로 나타났다.

앞서 언급한 바와 같이 반응조 내의 수질조건을 고려할 때 질산화 가능성은 매우 낮을 것으로 판단되며, 따라서 암모니아성 질소의 주된 제거 경로는 여재에의 흡착 및 식물에 의한 흡수임을 알 수 있다.

총인의 제거효율은 수생식물만을 식생한 반응조(S·T)의 제거효율은 약 22.3%이었으며, LB 혹은 MM 여재를 단독으로 증진한 반응조에서는 제거효율은 각각 52.5% 및 23.2%로서 흡착실험 결과와 마찬가지로 LB 여재의 제거율이 우수하였다. 반면, 수생식물과 여재를 조합한 반응조의 총인 제거효율은 약 67.6~85.2%로서 수생식물과 여재를 단독으로 사용했을 경우의 제거율 단순합보다 약 10.4~22.1% 가량 높게 나타났다.

전체적으로 회분식 실험 결과로부터 유기물질, 질소, 인 등의 제거효율은 수생식물이나 여재를 단독으로 이용했을 경우보다는 수생식물과 여재를 조합하였을 경우 제거효율에 상승효과가 관찰되고 있었다. 이는 여재를 조합해서 사용할 경우 미생물 성장에 보다 유리한 조건이 형성되었으며, 그로 인해 식물에 의한 흡수 작용에 상승효과가 일어나기 때문인 것으로 판단된다(Brix, 1997).

본 회분식 인공습지 실험 결과에서 보듯이 수생식물은 필수적인 구성요소임을 확인할 수 있었으며, 또한 제거효율의 상승효과를 거두는 것으로 조사되었기 때문에, 지하하류형 인공습지 공법을 적용 시에는 수생식물과 여재의 조합뿐만 아니라 수생식물의 종이나 여재 선정은 중요한 설계인자로 고려되어야 할 것이다.

3.4. 연속식 인공습지 운전효율

D사 연구원내 오수처리장의 2차 침전조 상등액을 이용하여 연속실험(HRT 10 hr)을 진행하였다. 반응조 구성은 큰 고랭이와 애기부들을 1 : 1(습중량 1 kg) 비율로 식생하고 이에 LB 혹은 MM 여재를 충전 한 두개의 반응조로 구성하였다. 유입수의 COD(Fig. 3(a))는 10.9~40.0 mg/L로 유입되었으며, COD 제거효율은 LB 여재를 충전한 반응조는 25~84.7%, MM 여재를 충전한 반응조는 24~92.3%로서 MM 여재를 충전한 반응조가 다소 높은 것으로 나타났다. Bed volume 200~217 및 337경에는 COD 유입부하가 일시적으로 낮아져 상대적으로 제거효율이 감소하였으나, 유출수의 COD 농도는 전반적으로 10 mg/L 이하로 유출되었다. 이 기간을 제외하면 LB 및 MM 여재를 충전한 반응조의 COD 제거효율은 평균 70% 정도이며 여재에 따른 제거효율의 차이는 크지 않은 것으로 나타났다.

SS(Fig. 3(b))의 경우 4.2~9.0 mg/L로 유입되었으며, LB 여재가 충전된 반응조의 제거효율은 70.2~93.0%, MM 여재가 충전된 반응조는 72.7~93.7%이며, 여재에 따른 SS 제거효율의 차이는 없는 것으로 나타났다. 유출수의 SS 농도는 2.0 mg/L 미만으로 유출되어 안정적인 제거효율을 보였으며, 운전기간 동안 유입수 SS 농도가 낮게 유입되어 여

재의 공극폐쇄 현상은 일어나지 않았다.

총질소(Fig. 3(c))의 경우 23.8~44.6 mg/L로 다소 높게 유입되었으며, LB 여재를 충전한 반응조의 제거효율은 6.7~30.2%(평균 15.4%), MM 여재를 충전한 반응조는 20.9~65.4%(평균 44.0%)로서 MM 여재가 충전한 반응조가 다소 높은 것으로 나타났다. 회분식 인공습지 실험결과에 비해 연속실험에서의 질소 제거효율이 감소한 이유는 유입수 총질소의 약 80%(17.7~39.9 mg NO<sub>3</sub>-N/L)가 질산성 질소로 존재하였고, 이에 상대적으로 질산성 질소의 제거효율이 낮았기 때문인 것으로 판단된다.

총인(Fig. 3(d))의 경우 3.2~11.2 mg/L로 유입되었으며, LB 여재를 충전한 반응조의 제거효율은 75.0~98.4%(평균 91.7%)의 높은 제거효율을 나타냈으나, MM 여재를 충전한 반응조는 2.8~70.3%(평균 27.6%)로서 시간이 경과할수록 점점 낮은 제거효율을 보이는 것으로 나타났다.

MM 여재를 충전한 반응조에서 인 제거효율 감소의 원인은 인이 포화농도에 이르렀기 때문인 것으로 판단되며, LB 여재를 충전한 반응조의 경우에는 인의 포화가 이루어지지 않고 안정적인 제거효율을 보이는 것으로 조사되었다.

수생식물과 두 종류의 여재를 이용한 연속실험 결과, MM 여재는 총질소 제거시, LB 여재는 총인 제거에 효과

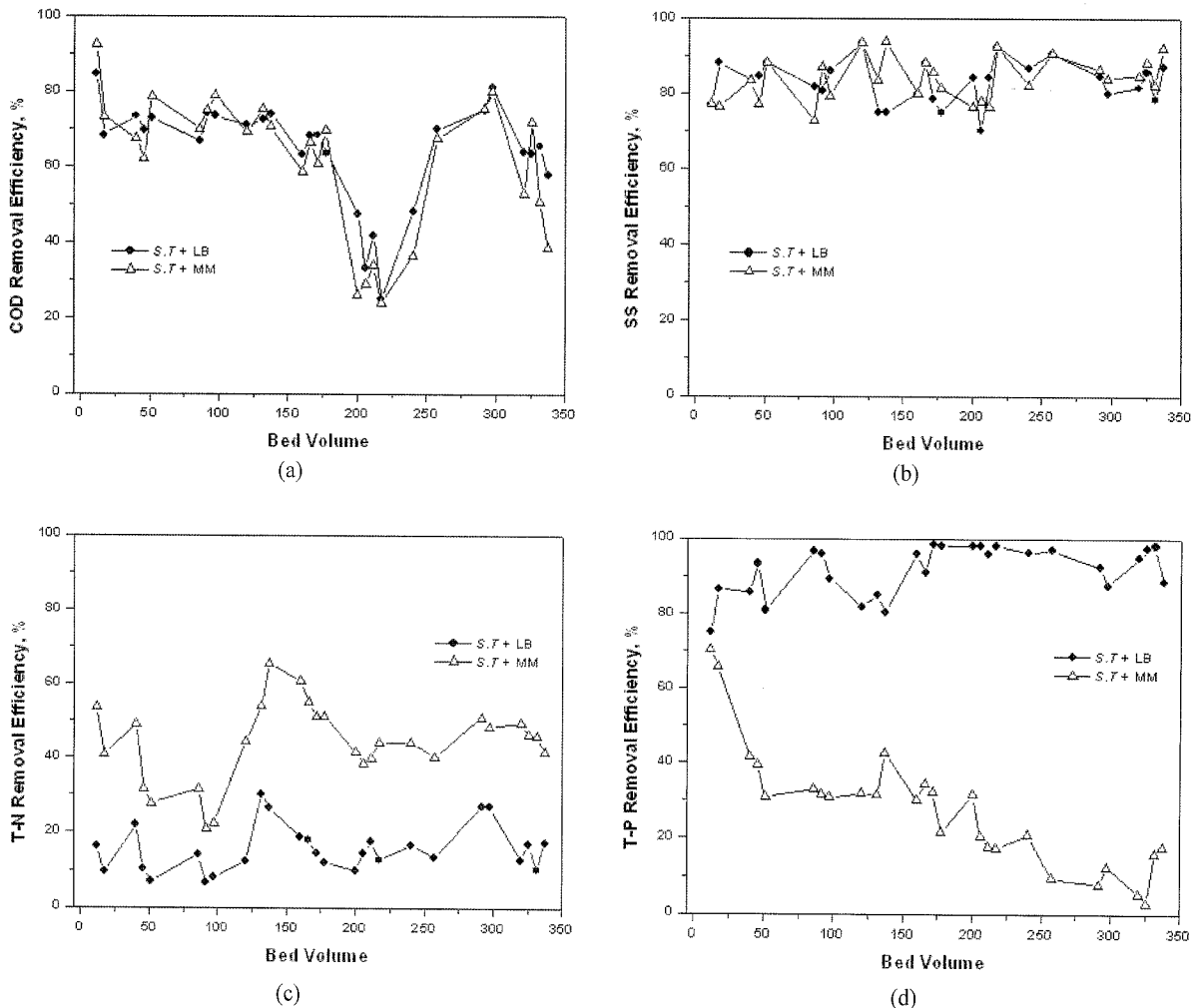


Fig. 3. COD, SS, T-N, T-P removal efficiencies of continuous-flow constructed wetlands.

적인 것으로 나타났으며, LB 여재의 경우 총질소 제거효율이 낮기 때문에 MM 여재와 혼합하여 증진할 경우 총질소 제거효율의 향상을 기대할 수 있을 것으로 판단된다.

#### 4. 결론

지하흐름형 인공습지에 적용 가능한 여재별 질소 및 인 흡착특성을 평가하고, 수생식물과 여재를 이용한 인공습지 회분식 및 연속실험을 통해 얻어진 결론을 요약하면 다음과 같다.

- 1) 지하흐름형 인공습지의 여재로 인한 공극의 폐쇄 및 흡착 포화현상 등의 문제점을 해결하기 위하여 적절한 여재를 선정함에 있어서 여재의 흡착 특성 평가는 무엇보다 중요하다 할 수 있다. 등온흡착식을 이용한 여재의 흡착능 실험 결과, MM 여재는 암모니아성 질소의 흡착에, LB 여재는 인의 흡착에 상대적으로 우수한 효과를 보이는 것으로 조사되었다.
- 2) 컬럼을 이용한 연속흡착 실험에서도 질소의 경우, MM 여재는 131 bed volume 후에, LB 여재는 51 bed volume 후에 포화농도에 이르렀으며, 인의 경우 MM 여재는 11 bed volume 11 후에, LB 여재는 171 bed volume이 경과한 후에도 인의 포화농도인 10 mg/L에 이르지 못하였다.
- 3) 회분식 인공습지 실험에서는 수생식물이나 여재만으로 구성된 단일반응조에 비해 수생식물과 여재를 조합한 반응조에서 COD, 총질소, 총인 등의 제거효율에 상승효과가 관찰되었으며, 이는 여재와 수생식물이 동시에 존재할 때 미생물의 성장에 보다 유리한 환경이 조성됨으로써 미생물에 의한 식물의 흡수작용 및 오염물질의 변환반응(탈질)에 상승효과가 발생하였기 때문인 것으로 판단된다.
- 4) 오수처리장 2차 침전조 상등액을 이용한 연속 처리실험 결과 여재에 따른 차이점은 나타나지 않았으며, 유출수의 COD는 전반적으로 10 mg/L 이하로 유출되었고, 평균 70% 내외의 제거효율을 보였다. 또한 실험이 진행되는 동안 유입수의 SS 농도가 낮아 반응조의 폐색은 발생하지 않았으며, 유출수의 SS 농도는 2.0 mg/L 미만으로 안정적인 제거효율을 보였다.

- 5) 총질소의 경우 LB여재(6.7~30.2%)에 비해 MM 여재의 제거율(20.9~65.4%)이 다소 높았으며, 총인은 LB 여재(75.0~98.4%)가 MM 여재(2.8~70.3%)에 비해 제거율이 우수하였다.

지하흐름형 인공습지 공법을 적용함에 있어서 수생식물과 여재는 필수적인 구성요소로서 유입수의 수질특성 및 여재의 흡착능 등을 고려하여 여재를 선정하거나, 혹은 적절한 혼합을 통해 요구되는 처리수 수질을 달성할 수 있을 것으로 판단된다.

#### 참고문헌

- 정동양, 자연정화형 농어촌 하수처리장 모델 개발, *한국환경복원녹화기술학회지*, **2**(1), pp. 10-19 (1999).
- Al-Duri, B., Khader, Y. and McKay, M., Prediction of Binary Component Isotherms for Adsorption on Heterogeneous Surfaces, *J. Chem. Technol. Biotech.*, **53**, pp. 345-352 (1992).
- APHA, *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*, 18th Edn, Washington D.C. (1992).
- Brij, G., Natural and Constructed Wetlands for Wastewater Treatment : Potentials and Problems, *Water Sci. Technol.*, **40**(3), pp. 27-35 (1999).
- Brix, H., Functions of Macrophyte in Constructed Wetlands, *Water Sci. Technol.*, **29**(4), pp. 71-78 (1994).
- Brix, H., Do Macrophytes Play a Role in Constructed Treatment Wetlands?, *Water Sci. Technol.*, **35**(5), pp 11-17 (1997).
- Ingersoll, T. L. and Baker, L. A., Nitrate Removal in Wetland Microcosms, *Water Res.*, **32**(3), pp. 677-684 (1998).
- Ran, N., Agami, M., and Oron, G., A Pilot Study of Constructed Wetlands using Duckweed(Lemnagibba L.) for Treatment of Domestic Primary Effluent in Israel, *Water Res.*, **38**(9), pp. 2241-2248 (2004).
- Rousseau, D., Vanrolleghem, P., and Pauw, N., Model-based Design of Horizontal Subsurface Flow Constructed Treatment Wetlands : A Review, *Water Res.*, **38**(6), pp. 1484-1493 (2004).
- Yang, L., Chang, H. T. and Huang, M. L., Nutrient Removal in Gravel- and Soil-based Wetland Microcosmos with and without Vegetation, *Ecological Engineering*, **18**, pp. 91-105 (2001).