

## 시설하우스 농업배수 처리를 위한 인공습지에서 여재종류, 조합방법 및 부하량에 따른 오염물질 정화효율 평가

이동진<sup>†</sup> · 박종환<sup>1,†</sup> · 김성현<sup>1</sup> · 윤찬웅<sup>1</sup> · 조주식<sup>2,\*\*</sup> · 이성태<sup>3</sup> · 허종수<sup>1</sup> · 서동철<sup>2,\*</sup>

국립환경과학원, <sup>1</sup>경상대학교 응용생명과학부 (BK21 program) & 농업생명과학연구원, <sup>2</sup>순천대학교 생물환경학과, <sup>3</sup>경상남도 농업기술원

**Evaluation of Removal Efficiency of Pollutants in Constructed Wetlands for Treating Greenhouse Wastewater Under Different Filter Media, Configuration Methods and Agricultural Water Loading.** Lee, Dong-Jin<sup>†</sup>, Jong-Hwan Park<sup>1,†</sup>, Seong-Heon Kim<sup>1</sup>, Chan-Woong Yoon<sup>1</sup>, Ju-Sik Cho<sup>2,\*\*</sup>, Seong-Tae Lee<sup>3</sup>, Jong-Soo Heo<sup>1</sup> and Dong-Cheol Seo<sup>2,\*</sup> (National Institute of Environmental Research, Incheon 404-708, Korea; <sup>1</sup>Division of Applied Life Science & Institute of Agriculture and Life Science, Gyeong Sang National University, Jinju 660-701, Korea; <sup>2</sup>Department of Bio-Environmental Sciences, Suncheon National University, Suncheon 540-742, Korea; <sup>3</sup>Gyeongnam Agricultural Research and Extension Services, Jinju 660-370, Korea)

**Abstract** To obtain optimum filter media, configuration method and greenhouse wastewater loading in small-scale constructed wetlands (CWs) for treating greenhouse wastewater, the apparatuses were constructed with 4 kinds of combined systems such as vertical flow (VH)-Horizontal flow (HF), HF-VH, HF-VF-HF, VF-HF-HF CWs. The efficiencies of pollutants in greenhouse wastewater were investigated in various CWs under different filter media, configuration methods and agricultural water loading. Removal rates of pollutants under different filter media were in the order of coarse sand > broken stone = calcite = mixed filter media for COD, broken stone > mixed filter media > coarse sand > calcite for T-N, and calcite > mixed filter media > broken stone > coarse sand for T-P. The removal rates of pollutants in HF-VH-HF CWs at different configuration methods were higher than those in other configuration methods. The removal rates of pollutants were higher in the order of 150 L m<sup>-2</sup> day<sup>-1</sup> = 300 L m<sup>-2</sup> day<sup>-1</sup> > 600 L m<sup>-2</sup> day<sup>-1</sup> under different greenhouse wastewater loading. Therefore, optimum configuration method was HF-VH-HF CWs, the optimum filter media was mixed filter media (coarse sand : broken stone : calcite = 1 : 1 : 1), and the optimum greenhouse wastewater loading was 300 L m<sup>-2</sup> day<sup>-1</sup> in HF-VH-HF CWs.

**Key words:** constructed wetland, greenhouse, horizontal flow, vertical flow, greenhouse wastewater

Manuscript received 8 November 2013, revised 8 December 2013,  
revision accepted 27 March 2014

<sup>†</sup>These authors contributed equally to this work.

\* Corresponding author: Tel: +82-61-750-3297, Fax: +82-61-752-8011,  
E-mail: drseodc@gmail.com

\*\* Co-Corresponding author: Tel: +82-61-750-3297,  
Fax: +82-61-752-8011, E-mail: chojs@sunchon.ac.kr

© The Korean Society of Limnology. All rights reserved.

This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/>), which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provide the original work is properly cited.

## 서 론

우리나라의 농경지 면적은 해마다 조금씩 감소하고 있지만, 전 국토면적의 약 20%에 해당한다. 이 중 시설재배는 1951년경 김해지방에 염화비닐하우스로 시작된 이래 1954년 폴리에틸렌의 국내 생산과 함께 급속도로 성장하여 2000년에는 시설작물재배 면적이 1,005,758 ha에 달했다(Ministry of Environment, 2005). 이러한 시설재배면적의 급증과 더불어 재배작형이 다양화되었고, 시설재배작물의 생산성 증대를 위한 각종 비료 및 가축분 퇴비의 무분별한 시용과 작물의 연작은 토양 내 염류 직접을 초래하였다. 그 결과 염류의 용탈이 지하수의 오염을 가속화시키고 있는 실정이다. 이는 토양 내 축적된 염류의 성분 중 음전하를 띤 성분은 토양 내 잔류성이 적고, 이동성이 크므로 지하수오염으로 직결된다. 이들 성분 중 일부는 영양염류로서 비점오염원의 잠재성을 지니게 된다(Kwon, 1998; Lee *et al.*, 2011).

비점오염 발생원 중 시설원예지대에서 발생하는 농업배수의 처리는 아직까지 체계적인 연구가 이루어지지 않고 있으며, 다만 환경부에서 2004년부터 비점오염원 관리종합대책을 수립하고 실행해 나가고 있는 실정으로 선진국에 비해 비점오염원의 관리가 매우 미흡한 상태이다(Park *et al.*, 2008).

시설원예지대에서 발생하는 오염된 농업배수는 대도시의 일반 생활하수나 농촌에서 발생하는 하수와 달리 유출량이 일정하지 않고, 기후와 강수량에 따라 많은 영향을 받으며, 효율적인 관리에 많은 어려움이 있다(CH2M HILL, 1990; Jung *et al.*, 2004).

비점오염원의 저감을 위한 관리기술은 매우 다양하다. 비점오염원에 대한 국내에 적용 가능한 처리공법 중 저류형은 연못, 저류지, 이중연못저류조(유수지활용), 인공

습지, 침투형은 침투조, 침투도랑 및 침투성포장이 있고, 식생형은 식생여과대 및 식생수로가 있으며, 여과장치형은 강우여과조(Storm filter), 모래여과조(Sand filter)가 있다. 하지만 이러한 처리공법들은 처리효율이 매우 낮은 실정이다. 하수처리형 공법은 초고속 응집침전시설, 생물학적 처리시설(접촉안정법, 폭기식 라군법, 살수여상법 및 회전원판법)등이 대표적인 처리공법들은 설치비 및 운영비가 비싸고, 전문인력이 필요하다는 단점이 있다(Jung *et al.*, 2004; Kim *et al.*, 2011; Park *et al.*, 2012).

이에 고농도의 무기 염류, 질소 및 인 등의 고농도 오염물질을 효과적으로 처리할 수 있고, 시설비 및 유지관리비가 저렴하고, 한번 설치로 반영구적으로 사용할 수 있으며, 농촌 주변 환경과 조화를 이룰 수 있는 인공습지 정화시스템이 적용되기 시작하였다(Kim, 2010; Choi *et al.*, 2011). 하지만 인공습지 정화시스템은 각종 폐수에 대해서 다양한 연구가 진행되었지만(Seo, 2005; Kim, 2008; Park *et al.*, 2008; Park *et al.*, 2011), 아직까지 시설하우스 농업배수에 대한 연구는 미흡한 실정이다.

이에 본 연구는 시설하우스 비점오염원으로 인해 발생하는 오염된 농업배수 처리를 위한 인공습지에서 여재종류, 조합방법 및 부하량에 따른 오염물질 정화효율을 평가하여 시설하우스에서 배출되는 오염된 농업배수를 인공습지에서 효과적으로 처리하기 위한 기반기술을 확보하고자 하였다.

## 재료 및 방법

### 1. 공시재료

본 실험에 사용된 공시 오염된 농업배수는 경남 진주시 주변 농업배수 조사에서의 수질분석결과를 이용하여 실제 오염된 농업배수와 동일한 인공농업배수를 제조하

**Table 1.** Chemical characteristics of polluted agricultural water used.

pH	EC	COD	T-N	NH <sub>4</sub> -N	NO <sub>2</sub> -N	NO <sub>3</sub> -N	T-P	PO <sub>4</sub> -P
	(dS m <sup>-1</sup> )							
7.2	0.37	50	35	2.2	0.80	32	3.0	3.0

**Table 2.** Physical characteristics of filter media used.

	Porosity (%)	Bulk density (g cm <sup>-3</sup> )	d <sub>10</sub> (mm)	d <sub>60</sub> (mm)	Uniformity coefficient (d <sub>60</sub> d <sub>10</sub> <sup>-1</sup> )
Coarse sand	29	1.58	1.2	3.5	2.92
Broken stone	38	1.47	1.3	2.7	2.07
Calcite	36	1.60	1.4	3.0	2.14

**Table 3.** Chemical characteristics of filter media used.

	pH (1:5H <sub>2</sub> O)	EC (dS m <sup>-1</sup> )	O.M (%)	T-N		T-P		
				(mg kg <sup>-1</sup> )				
Coarse sand	7.9	0.05	0.54	15.9		23.0		
Broken stone	7.8	0.04	0.85	3.9		20.6		
Calcite	8.9	0.12	0.20	11.0		72.8		
	K	Ca	Mg	Na	Fe	Cu	Mn	Zn
	(mg kg <sup>-1</sup> )							
Coarse sand	1,638	2,212	489	464	2,428	0.2	51	15
Broken stone	1,394	1,031	1,942	154	4,955	2.4	264	18
Calcite	32	107,540	9,555	153	5,251	2.7	214	150

였으며, 인공농업배수의 제조에 사용된 시약은 Sodium acetate (CH<sub>3</sub>COONa · H<sub>2</sub>O; 113.40 mg L<sup>-1</sup>), Ammonium chloride (NH<sub>4</sub>Cl; 8.41 mg L<sup>-1</sup>), Sodium nitrite (NaNO<sub>2</sub>; 3.94 mg L<sup>-1</sup>), Potassium nitrate (KNO<sub>3</sub>; 271.09 mg L<sup>-1</sup>), Potassium phosphate (KH<sub>2</sub>PO<sub>4</sub>; 13.26 mg L<sup>-1</sup>)을 사용하였다. 공시 여재는 함양군에 소재한 채석장에서 채취한 여재를 사용하였다.

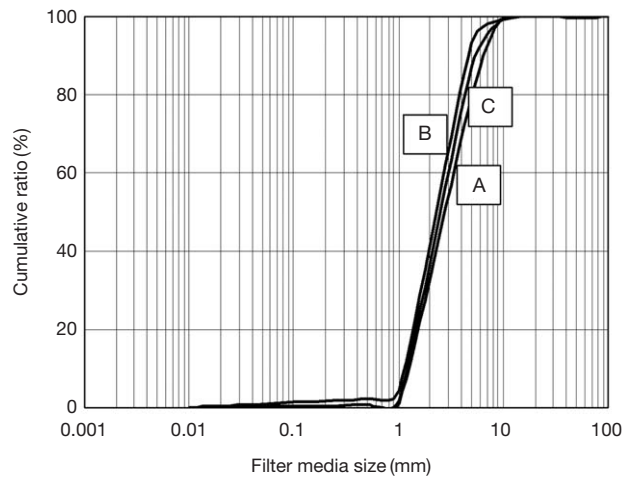
공시 인공농업배수의 이화학적 특성은 Table 1과 같고, 소형 농업배수처리장치에 사용한 여재의 이화학적 특성은 Table 2 및 3에서 보는 바와 같다. 소형 농업배수처리장치에 사용된 여재는 왕사, 쇠석, 방해석 및 혼합여재(왕사: 쇠석: 방해석=1:1:1)의 총 4종류를 사용하였고, 여재의 입도분포도는 Fig. 1에서 보는 바와 같이 된 여재인 왕사, 쇠석 및 방해석의 유효입경(여재를 입경 순으로 나열하였을 때 작은 입경으로부터 중량 10% 되는 부분의 여재의 입경; d<sub>10</sub>)은 각각 1.2, 1.3 및 1.4 mm이었으며, 균등계수(여재를 입경 순으로 나열하였을 때 작은 입경으로부터 중량 60%되는 입경과 10%되는 입경과의 비; d<sub>60</sub>/d<sub>10</sub>)는 각각 2.92, 2.07 및 2.14이었다.

그리고 소형 농업배수처리장치에 이식한 수생식물은 다년생 수생식물인 갈대, 노랑꽃창포, 샷갯사초 및 큰고랭이 등 4종이었으며, 모든 수생식물은 야외노지에서 성장한 수초를 분주하여 이식하였다.

**2. 실험장치**

소형 농업배수처리장치는 수직흐름조(Vertical flow; VF)와 수평흐름조(Horizontal flow; HF)를 수직-수평흐름 조합형, 수평-수직흐름 조합형, 수평-수직-수평흐름 조합형 및 수직-수평-수평흐름 조합형으로 하여 총 4개의 조합으로 설계 및 시공하였다.

조합방법에 사용된 수직흐름형과 수평흐름형 습지는 Seo et al. (2005)에서 제시한 시스템과 동일하며, 일반적



**Fig. 1.** Particle distributions of the filter media used. A: Coarse sand, B: Broken stone, C: Calcite.

으로 수직흐름형 습지(vertical flow constructed wetland)는 유입수가 지하로 바로 침투하여 수직여과되는 방식으로 처리되어지고, 호기성 상태를 유지하므로 유기물처리 및 질산화 과정에 적합한 습지이며, 수평흐름조 습지(horizontal flow constructed wetland)는 유입수가 전부 하부층으로 흘러들어 습지표면까지 수위를 유지하는 시스템으로 혐기성 상태를 유지하므로 탈질과정에 적합한 습지이다(Vymazal, 2007).

수직-수평흐름 조합형 소형 농업배수처리장치는 Fig. 2A와 같이 수직흐름조와 수평흐름조를 연결하여 1개조로 하여 운전이 가능하게 제작하였다. 수직흐름조와 수평흐름조의 크기는 각각 지름 1.0 m×0.8 m인 플라스틱 원통을 사용하여 용량이 0.63 m<sup>3</sup>되게 제작하였다. 소형 농업배수처리장치의 수직흐름조 및 수평흐름조에 왕사, 쇠석, 방해석 및 혼합여재(왕사: 쇠석: 방해석=1:1:1)를 사용하였고, 여재 종류별 주입위치는 각 여재를 하부

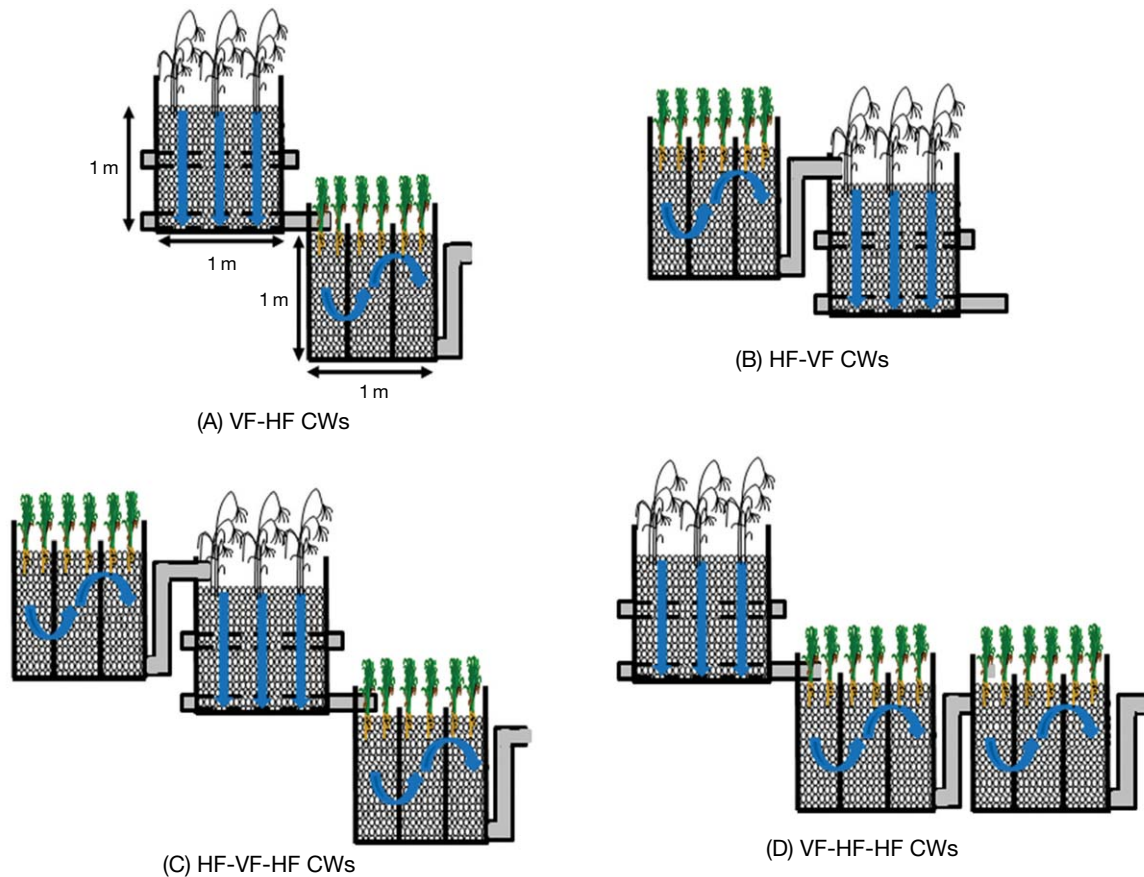


Fig. 2. Diagrams of small-scale constructed wetlands for treating greenhouse wastewater.

에서 높이 0.8 m까지 충전하였다. 수직흐름조에는 통기관을 각조의 밑바닥과 하부로부터 0.4 m 위치에 각각 설치하여 자연통풍이 되게 하였고, 수평흐름조에는 체류 시간을 최대화하기 위해 수평흐름조를 3등분하였다. 소형 농업배수처리장치에서 농업배수의 흐름은 수직흐름조에 농업배수를 유입시켜 위로부터 아래로 수직여과방식으로 처리하여 유출된 수직흐름조 처리수는 자연유하식으로 수평흐름조로 유입되게 하였고, 수평흐름조에 유입된 농업배수는 3등분된 수평흐름조에서 수평의 지그재그 방향으로 흐르게 하였다.

수평-수직 조합형 농업배수처리장치는 Fig. 2B와 같이 수평흐름조와 수직흐름조를 연결하여 1개조로 하여 운전이 가능하게 제작하였다. 수평흐름조와 수직흐름조 각 크기, 여재종류 및 여재주입 위치는 상기 수평-수직 흐름 조합형 농업배수처리장치와 동일하게 하였다. 농업배수처리장치에서 농업배수의 흐름은 수평흐름조에 농업배수를 유입시켜 3등분된 수평흐름조에서 수평의 지그재그 방향의 수평여과방식으로 처리하여 유출된 수평

흐름조 처리수는 자연유하식으로 수직흐름조로 유입되게 하였고, 수직흐름조에 유입된 농업배수는 수직여과방식으로 처리하여 유출되게 하였다.

수평-수직-수평흐름 조합형 농업배수처리장치는 Fig. 2C와 같이 수평흐름조, 수직흐름조 및 수평흐름조를 연결하여 1개조로 하여 운전이 가능하게 제작하였다. 수평흐름조와 수직흐름조 각각의 크기, 여재종류 및 여재주입 위치는 상기 수직-수평흐름 조합형 농업배수처리장치와 동일하게 하였다. 농업배수처리장치에서 농업배수의 흐름은 수평흐름조에 농업배수를 유입시켜 3등분된 수평흐름조에서 수평의 지그재그 방향의 수평여과방식으로 처리하여 유출된 수평흐름조 처리수는 자연유하식으로 수직흐름조로 유입되게 하였고, 수직흐름조에 유입된 농업배수는 수직여과방식으로 처리하였으며, 유출된 수직흐름조 처리수는 자연유하식으로 수평흐름조로 유입되게 하였고, 수평흐름조에 유입된 농업배수는 3등분된 수평흐름조에서 수평의 지그재그 방향으로 흐르게 하였다.

수직-수평-수직흐름 조합형 농업배수처리장치는 Fig. 2D와 같이 수직흐름조, 수평흐름조 및 수평흐름조를 연결하여 1개조로 하여 운전이 가능하게 제작하였다. 혐기성조와 호기성조 각각의 크기, 여재종류 및 여재주입 위치는 상기 수직-수평흐름 조합형 농업배수처리장치와 동일하게 하였다. 농업배수처리장치에서 농업배수의 흐름은 수직흐름조에 농업배수를 유입시켜 수직여과방식으로 처리하여 유출된 수직흐름조 처리수는 자연유하식으로 수평흐름조로 유입되게 하였고, 수평흐름조에 유입된 농업배수는 3등분된 수평흐름조에서 수평의 지그재그 방향으로 흐르게 하였으며, 수평흐름조 처리수는 다시 자연유하식으로 수평흐름조로 유입되게 하여 수평의 지그재그 방향으로 흐르게 하였다. 습지조별 수리학적 체류시간은 호기성조의 경우 1~2 hr이었으며, 혐기성조의 경우는 0.8~1.07 day이었다. 또한 각 처리조별 생물막을 형성하기 위해 운영중인 인공습지에서 미생물을 배양하여 주입하고 6개월간 시운전을 실시한 이후에 실험을 진행하였다.

**3. 실험방법**

여재 종류별 및 조합방법에 따른 수처리 효율 조사는 인공습지 소형 농업배수처리장치를 수직흐름조 (Vertical flow; VF)와 수평흐름조(Horizontal flow; HF)를 수직-수평흐름 조합형, 수평-수직흐름 조합형, 수평-수직-수평흐름 조합형 및 수직-수평-수평흐름 조합형으로 총 4개 조로 구분하여 설계 및 시공하였으며, 내부에 충전되는 여재를 왕사, 쇄석, 방해석 및 혼합여재 (왕사: 쇄석: 방해석=1:1:1)를 구분하여 충전한 뒤 농업배수 부하량을  $300 \text{ L m}^{-2} \text{ day}^{-1}$ 로 한 조건하에서 COD, T-N 및 T-P의 처리효율을 각각 조사하였다.

농업배수의 부하량에 따른 수처리 효율 조사는 상기 여재종류 및 조합방법에 따른 수처리 효율 조사결과 최적으로 선정된 여재 및 조합방법 하에서 농업배수 부하량에 대한 대응성을 조사하기 위해 최적으로 선정된 시스템에서 농업배수 부하량을  $150, 300$  및  $600 \text{ L m}^{-2} \text{ day}^{-1}$ 로 달리하여 COD, T-N, T-P,  $\text{NO}_3\text{-N}$  및  $\text{NH}_4\text{-N}$ 의 처리효율을 각각 조사하였다. 농업배수의 부하량별 처리 효율 조사는 미생물 분포특성 및 활성도가 동일한 습지에서 부하량만 달리 적용하여 처리효율을 비교하였다.

**4. 분석방법**

수질분석은 수질오염공정시험법과 APHA의 standard

method에 준하여 다음과 같이 하였다(APHA, 2005; Ministry of environmental, 2011). COD는 산성 과망간산 칼륨법 (적정법), 총 질소는 알칼리성 과황산칼륨을 넣고 Autoclave에서  $120^\circ\text{C}$ , 30분 동안 반응시킨 뒤 자외선/가시광선 분광법 (산화법)으로 측정하였으며, 총 인은 4% 과황산칼륨을 넣고 autoclave에서  $120^\circ\text{C}$ , 30분 동안 반응시킨 뒤 자외선/가시광선 분광법으로 분석하였다. 또한  $\text{NH}_4\text{-N}$ 은 자외선/가시선 분광법-인도페놀법,  $\text{NO}_3\text{-N}$ 은 자외선/가시선 분광법-부루신법으로 각각 측정하였다.

**결과 및 고찰**

**1. 여재 종류 및 조합방법에 따른 수처리 효율**

소형 농업배수처리장치에서의 수직, 수평흐름 조합방법에 따른 농업배수 중 COD 처리효율을 조사한 결과는 Fig. 3에서 보는 바와 같다. 수직, 수평흐름 조합방법에 따른 COD 처리효율은 조합방법에 따라 별 차이 없이 전반적으로 약 83~93% 정도로 매우 높았으나, 수평-수직-수평흐름 조합형이 다른 조합방법에 비해 미미하지만 약간 높은 처리효율을 보였다. 수평-수직-수평흐름 조합형의 COD 처리효율은 왕사, 쇄석, 방해석 및 혼합여재가 각각 92, 93, 89 및 91%로 쇄석>왕사>혼합여재>방해석 순이었다. 이와 같이 왕사와 쇄석의 COD 처리효율이 높은 것은 이들 여재의 표면이 여러 무기성 분들로 구성되어 있어 미생물 생육에 필요한 영양분의 공급이 용이하고, 여재표면이 거칠기 때문에 미생물의 활착이 용이하기 때문으로 사료되며, 이들 결과는 Seo *et al.* (2008)의 인공습지 하수처리장에서도 유사한 결과가 보고된 바 있다. Seo *et al.* (2008)에 의하면 자연정화 공법을 이용한 인공습지에서 COD와 같은 유기물의 제거는 수생식물 뿌리부의 미생물에 의해 여재 표면으로부터 1.5 cm 깊이 사이에서 주로 분해된다고 보고한 바 있으며, 이와 같은 결과는 반응기질과 산소가 풍부하여 박테리아의 성장과 활력이 가장 좋기 때문인 것으로 알려져 있다.

반면에 방해석의 COD 처리효율이 다른 여재에 비해 낮았는데, 이는 방해석의 주성분이  $\text{CaCO}_3$ 로 구성되어 있어서 pH가 약 9 정도로 약간 높고, 여재표면에 Ca를 제외하면 다른 무기원소가 거의 없어 미생물 생육이 용이하지 않기 때문으로 판단된다(Kim *et al.*, 2011).

따라서 소형 농업배수처리장치에서 수직, 수평흐름 조

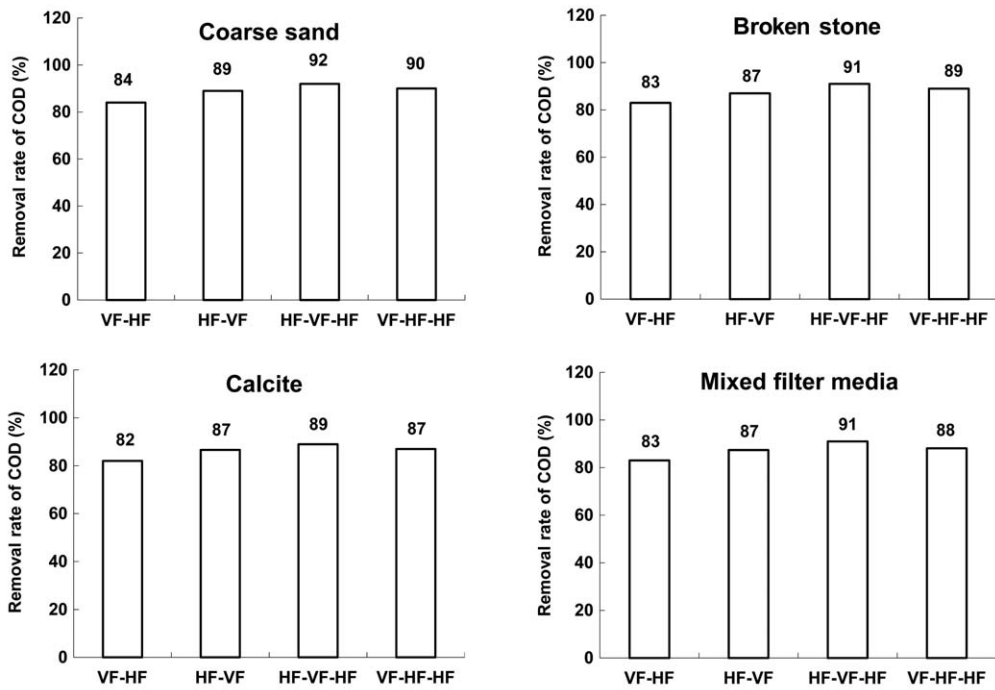


Fig. 3. Removal rate of COD in effluent under different filter media and configuration methods in small-scale constructed wetlands.

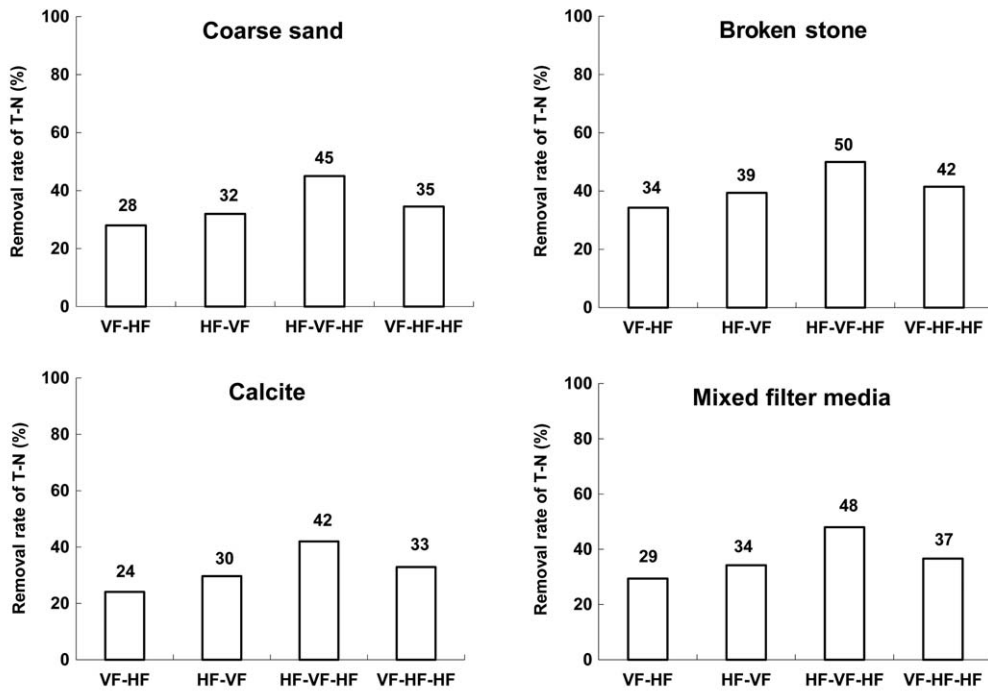


Fig. 4. Removal rate of T-N in effluent under different filter media and configuration methods in small-scale constructed wetlands.

합방법에 따른 농업배수 중 COD 처리효율은 쇄석을 여재로 사용하고 수직, 수평흐름 조합방법은 수평-수직-수평흐름 조합형이 적합할 것으로 사료된다.

소형 농업배수처리장치에서의 수직, 수평흐름 조합방법에 따른 농업배수 중 총 질소처리효율을 조사한 결과는 Fig. 4에서 보는 바와 같다. 수직, 수평흐름 조합방법

에 따른 농업배수 중 총 질소 처리효율은 전반적으로 쇠석>혼합여재>왕사>방해석 순이었다.

수직, 수평흐름 조합방법에 따른 쇠석의 농업배수 중 총 질소 처리효율은 수직-수평흐름 조합형, 수평-수직흐름 조합형, 수평-수직-수평흐름 조합형 및 수직-수평-수평흐름 조합형이 각각 34, 39, 50 및 42%로 수평-수직-수평흐름 조합형이 다른 조합형에 비해 약간 높은 경향이였다.

특히, 총 질소 처리효율은 수평-수직흐름 조합형 및 수평-수직-수평흐름 조합형이 수직-수평흐름 조합형 및 수직-수평-수평흐름 조합형에 비해 매우 높았는데 이는 시설배지대 농업배수 중 대부분의 질소화합물이 질산성 질소 형태로 존재하기 때문에 수직흐름조에 농업배수를 유입하는 것보다 수평흐름조에 농업배수를 먼저 유입하여 질산성 질소를 생물학적인 탈질과정에 의해 우선적으로 처리되기 때문으로 사료된다.

이와 대조적으로 암모니아성 질소가 대부분인 축산폐수 및 생활하수의 경우 인공습지를 이용한 생물학적 탈질은 수직흐름조에서 암모니아성 질소를 질산화시키는 기작이 필요하고, 이를 다시 수평흐름조에서 N<sub>2</sub>O와 N<sub>2</sub>로 탈질시키는 기작이 필요한 것으로 알려져 있다(Seo et al., 2006; Park et al., 2011).

따라서 소형 농업배수처리장치에서 수직, 수평흐름 조합방법에 따른 농업배수 중 총 질소의 처리효율은 수평-

수직-수평흐름 조합형이 다른 조합형에 비해 가장 높았기 때문에 농업배수처리장 설계 시 수평-수직-수평흐름 조합형으로 설계하는 것이 바람직할 것으로 사료된다.

시설하우스의 경우 과다하게 투입된 각종 비료 및 퇴비들로 인해 질소, 인 및 영양염류 등이 과다하게 증가되고 있으며(Ok et al., 2006), 이 중 질소는 암모니아성 질소와 질산성 질소로서 구분할 수 있지만 대부분이 질산성 질소로 존재한다. 질산성 질소는 암모니아성 질소와 달리 음전하이기 때문에 (-)하전이 토양입자에 부동화 되지 않으므로 훨씬 더 유동성이 크며, 식물이나 미생물에 잘 흡수되지 않고, 침투수와 함께 잘 이동하는 특징이 있다(Ji et al., 2008; Kim et al., 2008). 따라서 시설원지대 농업배수의 경우 총 질소의 처리는 여재의 흡착에 의한 처리보다는 수직, 수평흐름 조건에 따른 미생물의 산화, 환원 작용에 의한 생물학적 탈질에 의해 처리해야 할 것으로 사료된다.

소형 농업배수처리장치에서 수직, 수평흐름 조합방법에 따른 농업배수 중 총 인의 처리효율을 조사한 결과는 Fig. 5에서 보는 바와 같다. 수직, 수평흐름 조합방법에 따른 총 인 처리효율은 왕사, 쇠석, 방해석 및 혼합여재가 각각 약 32~61, 35~66, 80~93 및 76~85%로 전반적으로 방해석>혼합여재>쇠석>왕사 순이었다.

수직, 수평흐름 조합방법에 따른 방해석의 농업배수 중 총 인 처리효율은 수직-수평흐름 조합형, 수평-수직

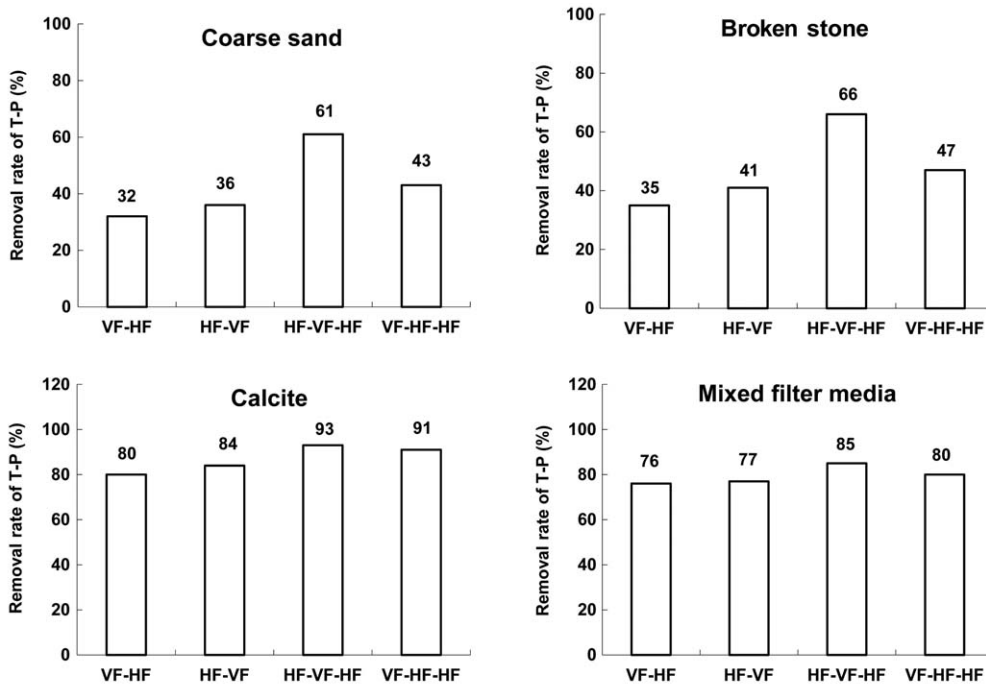


Fig. 5. Removal rate of T-P in effluent under different filter media and configuration methods in small-scale constructed wetlands.

흐름 조합형, 수평-수직-수평흐름 조합형 및 수직-수평-수평흐름 조합형이 각각 80, 84, 93 및 91%로 수평-수직-수평흐름 조합형이 다른 조합형에 비해 약간 높은 경향이였다. 이와 같이 방해석의 총 인 처리효율이 높은 것은 방해석의 주성분이 대부분 CaCO<sub>3</sub> 형태로 이루어져 있으므로 정석법에 의해 인이 처리되기 때문으로 사료된다. 정석탈인법을 이용한 인 처리는 인을 함유하는 물에 인산칼슘으로 되는 동종동계종의 화합물과 접촉시키면 탈인제인 방해석 위에 인산칼슘이 생성, 정석하는 현상을 이용한 정석탈인법으로 수중의 인은 Ca 이온과 반응하여 난용성인 hydroxyapatite[Ca<sub>5</sub>(OH)(PO<sub>4</sub>)<sub>3</sub>]로 처리되는 것으로 알려져 있다(Heyman, 1988; Lahmann, 1989).

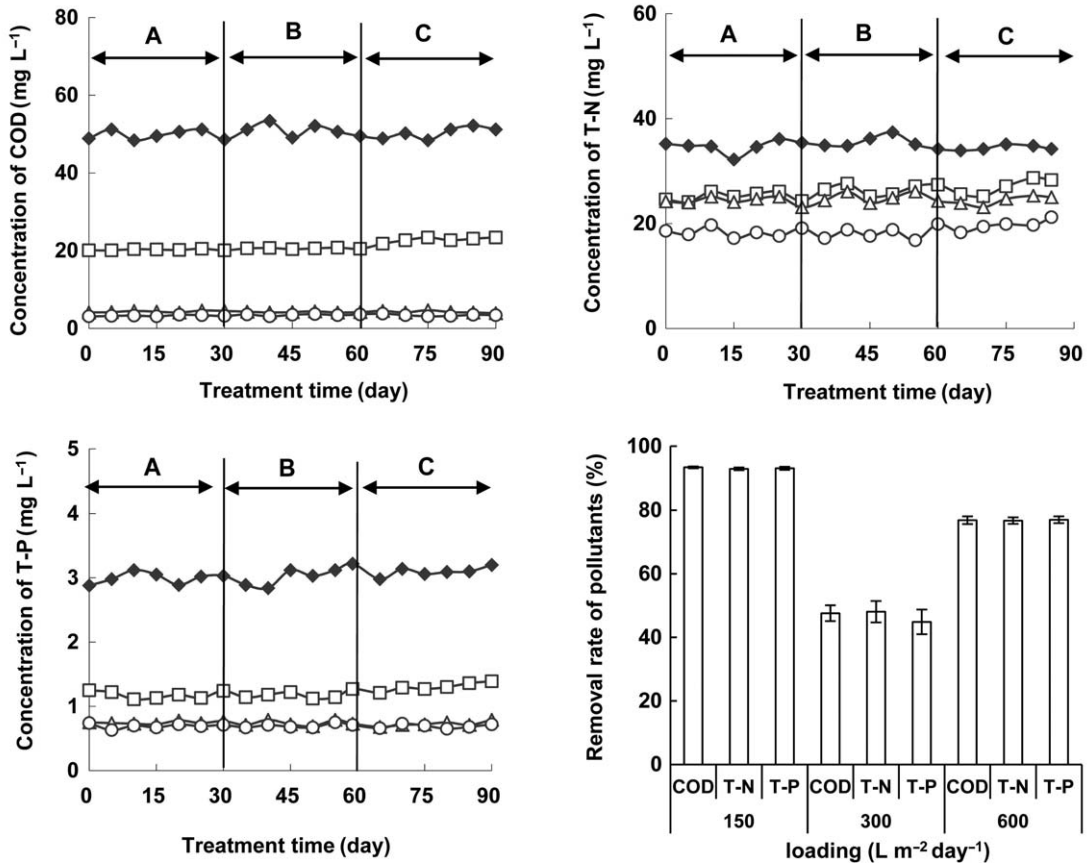
따라서 소형 농업배수처리장치에서 수직, 수평흐름 조합방법에 따른 농업배수 중 총 인의 처리효율은 조합방법에 따라 별 차이 없었으며, 여재종류별 총 인의 처리효율은 방해석이 다른 여재에 비해 약간 높아 농업배수 처리장에서 인의 처리를 위해서는 방해석을 첨가 여재

로 사용하는 것이 가장 효과적이나, 많은 비용이 소요되는 단점이 있다. 이에 인공습지 오폐수처리장의 설계 시 공시 인의 흡착능이 우수한 여재 선정과 경제성 부분을 고려한 많은 연구결과가 보고되었고(Seo *et al.*, 2003; Kim *et al.*, 2011), 그 결과 인의 흡착능이 우수한 방해석을 일정 비율로 왕사나 쇄석과 혼합하는 것이 효과적이라고 보고하였으며, 본 연구결과와도 동일한 경향이였다.

이상의 결과를 미루어 볼 때 시설원예지대 농업배수 처리를 위한 최적 조합방법은 수평-수직-수평흐름 조합형이었으며, 최적여재는 혼합여재(왕사:쇄석:방해석=1:1:1)이었다.

### 2. 농업배수 부하량에 따른 수처리효율

농업배수 부하량에 따른 수처리효율은 최적조건인 혼합여재로 충전된 수평-수직-수평흐름 조합형에서 농업배수 부하량에 대한 대응성을 조사하기 위해 농업배수 부하량을 150, 300 및 600 L m<sup>-2</sup> day<sup>-1</sup>로 달리하여 조사



**Fig. 6.** Concentrations and removal rate of COD, T-N and T-P in the water according to greenhouse wastewater loading in small-scale constructed wetlands {A, 150 L m<sup>-2</sup> day<sup>-1</sup>; B, 300 L m<sup>-2</sup> day<sup>-1</sup>; C, 600 L m<sup>-2</sup> day<sup>-1</sup>; ◆, Raw agricultural water; □, HF bed (1<sup>st</sup> treatment); △, VF bed (1<sup>st</sup>+2<sup>nd</sup> treatment); ○, HF bed (1<sup>st</sup>+2<sup>nd</sup>+3<sup>rd</sup> treatment)}.



하였다.

농업배수 원수의 pH는 7.2로 중성부근이었으며, 농업배수 원수의 EC는 약 0.37 dS m<sup>-1</sup>이었고, 농업배수 부하량에 따라 별 차이 없이 원수와 비슷한 경향이었다. 처리시일 동안 농업배수의 수온은 22~27°C 범위였다.

소형 농업배수처리장치에서 농업배수 부하량에 따른 COD 처리효율을 조사한 결과는 Fig. 6에서 보는 바와 같다. 농업배수 원수의 COD는 50 mg L<sup>-1</sup>이었으며, 1차 처리인 수평흐름조를 통과하면서 약 20.1~23.4 mg L<sup>-1</sup> 정도로 처리되어 COD 처리효율이 약 53.2~59.8% 정도이었으며, 농업배수 부하량이 150 및 300 L m<sup>-2</sup> day<sup>-1</sup>까지는 안정적으로 처리되는 경향이었으나, 농업배수 부하량이 600 L m<sup>-2</sup> day<sup>-1</sup>가 되면서 1차 처리수의 농도가 미미하지만 약간 증가하는 경향이었고, 2차 및 3차 처리수의 COD는 각각 약 3.9~4.7 및 3.1~3.8 mg L<sup>-1</sup> 정도로 매우 안정적으로 처리되었다. 따라서 COD의 처리효율은 농업배수 부하량이 증가함에 따라 약간씩 감소하는 경향이었다.

소형 농업배수처리장치에서 농업배수 부하량에 따른 T-N 처리효율을 조사한 결과는 Fig. 6에서 보는 바와 같다. 농업배수 원수의 T-N 함량은 35 mg L<sup>-1</sup>이었으며, 1차, 2차 및 3차 처리수의 T-N 함량은 각각 24.1~28.7, 23.1~26.1 및 17.2~19.9 mg L<sup>-1</sup> 정도로서 T-N 처리효율이 각각 약 18.0~31.1, 25.4~34.0 및 43.1~50.8% 정도이었으며, 농업배수 부하량에 따라 별 차이가 없는 경향이었다.

소형 농업배수처리장치에서 농업배수 부하량에 따른 T-P 처리효율을 조사한 결과는 Fig. 6에서 보는 바와 같다. 농업배수 원수의 T-P 함량은 3 mg L<sup>-1</sup>이었으며, 농업배수 부하량에 따라 별 차이 없는 경향이었다. T-P 함량은 1차, 2차 및 3차 처리수에서 각각 1.11~1.39, 0.69~0.79 및 0.63~0.75 mg L<sup>-1</sup>이었으며, 특히 3차 처리수에서는 T-P 처리효율이 약 76% 이상의 처리효율을 보였다.

다. Park *et al.* (2011) 및 Kim *et al.* (2011)의 연구결과에서 인공습지 축산폐수 및 폐양액 처리장에서 혼합여재 이용시 인에 대한 처리효율은 90% 이상의 높은 처리효율을 보고한 바 있는데 그에 비해서는 처리효율이 낮은 편이었다. 이는 습지로 유입되는 농업배수의 인의 농도가 매우 낮기 때문으로 판단되며, 기존의 인공습지 축산폐수 및 폐양액처리장치와 설계구조 및 폐수의 유입성상이 다르므로 처리장치에 따른 직접적인 처리효율 비교는 불가능 할 것으로 판단된다.

COD, T-N 및 T-P의 오염부하량에 따른 일일 제거량은 COD의 경우 일일 유입량이 평균 7.47, 15.30, 30.24 g COD day<sup>-1</sup>로 증가할 때 유출수는 각각 0.49, 1.04, 2.04 g COD day<sup>-1</sup>로 COD 부하량에 따른 제거량은 각각 6.98, 14.26, 28.2 g COD day<sup>-1</sup>이었다. T-N의 경우 일일 유입량이 평균 5.10, 10.62, 20.76 g T-N day<sup>-1</sup>로 증가할 때 유출수는 각각 2.75, 5.46, 11.58 g T-N day<sup>-1</sup>로 COD 부하량에 따른 제거량은 각각 2.35, 5.16, 9.18 g T-N day<sup>-1</sup>이었다. T-P의 경우 일일 유입량이 평균 0.45, 0.91, 1.86 g T-P day<sup>-1</sup>일 때 유출수는 각각 0.10, 0.21, 0.41 g T-P day<sup>-1</sup>로 T-P 부하량에 따른 제거량은 각각 0.35, 0.70, 1.45 g T-P day<sup>-1</sup>이었다.

이상의 결과에서 농업배수 부하량이 600 L m<sup>-2</sup> day<sup>-1</sup> 이상일 경우 수처리 효율이 전반적으로 약간씩 감소되는 경향으로 안정적인 농업배수 처리를 위해서는 농업배수 부하량을 300 L m<sup>-2</sup> day<sup>-1</sup>로 주입하는 것이 적합할 것으로 사료되었다.

소형 농업배수처리장치에서 농업배수 부하량에 따른 NH<sub>4</sub>-N 및 NO<sub>3</sub>-N의 함량을 조사한 결과는 Table 4에서 보는 바와 같다. 농업배수 원수의 NH<sub>4</sub>-N 함량은 1.2 mg L<sup>-1</sup>이었으며, 농업배수 부하량에 따라 별 차이 없었고, 1차 처리인 수평흐름조에서는 농업배수 원수에 비해 약간 증가하는 경향이었고, 1차 처리 후 2차 처리인 수직흐름조에서는 1차 처리수에 비해 약간 감소하는 경향이

**Table 4.** The concentrations of NH<sub>4</sub>-N and NO<sub>3</sub>-N in the water according to greenhouse wastewater loading in small-scale constructed wetlands.

Filter media	Raw water	Greenhouse wastewater loading (L m <sup>-2</sup> day <sup>-1</sup> )								
		150			300			600		
		1 <sup>st</sup> HF	2 <sup>nd</sup> VF	3 <sup>rd</sup> HF	1 <sup>st</sup> HF	2 <sup>nd</sup> VF	3 <sup>rd</sup> HF	1 <sup>st</sup> HF	2 <sup>nd</sup> VF	3 <sup>rd</sup> HF
NH <sub>4</sub> -N (mg L <sup>-1</sup> )										
Average	2.20	1.96	0.95	1.34	2.09	1.12	1.64	2.11	1.24	1.42
S.D.	0.21	0.11	0.21	0.17	0.16	0.24	0.16	0.26	0.19	0.32
NO <sub>3</sub> -N (mg L <sup>-1</sup> )										
Average	32.0	24.2	23.7	17.2	24.3	23.1	17.6	25.2	23.4	18.3
S.D.	2.6	4.2	2.7	1.6	2.1	3.2	2.6	4.2	3.5	2.6

었으며, 1차, 2차 처리 후 3차 처리인 수평흐름조에서는 2차 처리수에 비해 약간 증가하는 경향이였다.

이와 같은 경향은 혐기성조건의 수평흐름조와 호기성 조건의 수직흐름조 때문인 것으로 판단된다. Seo (2002)에 의하면, VF-HF 시스템에서 하수처리시 수직흐름조를 통과한 처리수의 용존산소 농도는  $6 \sim 8 \text{ mg L}^{-1}$  정도로 수직흐름조는 호기성상태이며, 수평흐름조를 통과한 처리수의 용존산소 농도는  $2 \text{ mg L}^{-1}$  이하로 수평흐름조는 혐기성상태이었다고 보고한 바 있다.

농업배수 원수의  $\text{NO}_3\text{-N}$  함량은  $32 \text{ mg L}^{-1}$ 이었으며, 농업배수 부하량에 따라 별 차이 없었고, 농업배수 원수의 대부분이  $\text{NO}_3\text{-N}$ 이므로 T-N의 처리효율과 비슷한 경향이였다. 1차 처리인 수평흐름조에서  $\text{NO}_3\text{-N}$ 이 농업배수 원수에 비해 약간 감소하여 약 21.3~24.4% 정도 처리되었으며, 2차 처리인 수직흐름조에서는  $\text{NO}_3\text{-N}$ 이 거의 처리되지 않았고, 3차 처리인 수평흐름조에서 다시  $\text{NO}_3\text{-N}$ 이 처리되어 42.8~46.3% 정도 처리되었다. 이와 같이 질산성 질소의 대부분이 수평흐름조에서 처리되는 것은 수평흐름조의 혐기성 미생물에 의해 탈질되어 질소가 처리되기 때문으로 사료된다.

## 적 요

본 연구는 시설하우스에서 비점오염원으로 인해 배출되는 오염된 농업배수를 인공습지에서 효과적으로 처리하기 위한 기초자료를 확보하기 위해 인공습지에서 여재종류, 조합방법 및 부하량에 따른 오염물질 정화효율을 평가하였다. 인공습지의 조합방법은 수직-수평흐름조, 수평-수직흐름조, 수평-수직-수평흐름조 및 수직-수평-수평흐름조로 구분하여 설계 및 시공하였으며, 여재는 왕사, 쇄석, 방해석 및 혼합여재로 구분하여 각 조에 충전하였다. 또한 농업배수 부하량을  $150, 300, 600 \text{ L m}^{-2} \text{ day}^{-1}$ 으로 달리하여 오염물질의 처리효율을 조사하였다. 조합방법별 수처리효율은 HF-VF-HF 조합방법이 다른 조합방법에 비해 높은 처리효율을 보였으며, 최적여재는 COD 처리효율은 왕사가 가장 높았고, T-N은 쇄석, T-P는 방해석이 가장 높았다. 하지만 모든 처리효율과 경제성 부분을 고려하였을 때 최적여재는 혼합여재가 가장 효과적일 것으로 판단된다. 농업배수의 부하량에 따른 처리효율 결과 COD는 농업배수 부하량  $600 \text{ L m}^{-2} \text{ day}^{-1}$ 까지 안정적인 처리효율을 보였으나, T-N 및 T-P는  $150 \text{ L m}^{-2} \text{ day}^{-1} \approx 300 \text{ L m}^{-2} \text{ day}^{-1} > 600 \text{ L m}^{-2} \text{ day}^{-1}$ 의 순으로 농업배수의 부하량이 증가함에 따라 약간 감소하는

경향이였다. 따라서 시설하우스 농업배수 처리를 위한 인공습지 농업배수처리장의 최적조건은 HF-VH-HF 조합형 인공습지에 왕사, 쇄석 및 방해석이 혼합된 혼합여재로 충전하고 부하량  $300 \text{ L m}^{-2} \text{ day}^{-1}$  이하의 농업배수를 주입하는 것이 최적일 것으로 판단된다.

## 사 사

본 연구는 농림축산식품부 생명산업기술개발사업 (112014-3)과 농촌진흥청 공동연구사업 (과제번호: PJ0 07358)에 의해 수행되었음.

## REFERENCES

- APHA, AWWA, WCF. 2005. Standard methods for the examination of water and wastewater, American Public Health Association. Washington. DC.
- CH2M HILL, Inc. 1990. Nonpoint source impact assessment: Assessment report. WPCF Research Foundation Report 90-95. WPCF Foundation, Alexandria, Virginia.
- Heyman, A.M. 1988. Self-Financed resource, a direct approach to maintaining marine biological diversity. Paper presented at workshop on economics. IUCN General assembly. *Costarica* 234-235.
- Ji, M.K., W.S. Jung, A. Bhatnagar and B.H. Jeon. 2008. Modeling of the nitrate adsorption kinetics onto  $\text{ZnCl}_2$  treated granular activated carbon. *Korean Society of Soil and Groundwater Environment* 13: 21-26.
- Jung, Y.J., K.H. Nam and K.S. Min. 2004. Generation and discharge characteristics of non-point pollutants from farmlands of small watershed for Nak-dong River. *Journal of Korean Society on Water Quality* 20(4): 333-338.
- Kim, A.R., H.C. Kim, D.C. Seo, J.H. Park, S.H. Kim, S.T. Lee, T.U. Jeong, J.H. Choi, H. Kim, J.S. Cho and J.S. Heo. 2011. Selection of optimum filter media in small-scale livestock wastewater treatment apparatus by natural purification method. *Korean Journal of Soil Science and Fertilizer* 44: 285-292.
- Kim, E.Y., D.C. Koh, K.S. Ko and I.W. Yeo. 2008. Prediction of nitrate contamination of groundwater in the northern nonsan area using multiple regression analysis. *Korean Society of Soil and Groundwater Environment* 13: 57-73.
- Kim, H.J. 2008. Development of a Natural Purification Technology for Sewage Treatment of a Detached House in Agricultural Villige. Master Thesis. Gyeongsang National University, Korea.
- Kwun, S.K. 1998. Management improvement and perspective on nonpoint sources of water pollution in Korea. *Journal of*

- Korean Society Environmental Engineers* **20**: 1497-1510.
- Lahmann, E. 1989. Formulacion de un proyecto de conservacion de los recursos naturales Para la Zonade manglaves de Estero Real, Nicaragua. Mineographeol report, IUCN, San Joes, Costa Rich, 25.
- Lee, S.G., D.C. Seo, S.W. Kang, I.W. Choi, B.J. Lim, J.H. Park, K.S. Kim, J.B. Lee, J.S. Heo and J.S. Cho. 2011. Evaluation of wastewater treatment efficiency in Dongbokcheon constructed wetland for treating non-point source pollution at different treatment time and wastewater loading. *Korean Journal of Soil Science and Fertilizer* **44**: 929-936.
- Ministry of Environment. 2005. White paper of Environment, Korea.
- Ministry of Environmental. 2011. White Paper of Environmental, Korea.
- Ok, J.H., K.H. Lee and C. Yu. 2006. Runoff characteristics of nutrients from greenhouse site. *Journal of Agriculture & Life Science* **40**: 33-38.
- Park, D.G. 1999. Development of Environment of friendly cropping systems to be reduce the soil-sickness in the cultivation of fruit vegetables, Symposium on the improvement of environment and reducing of physicological disorders in the green housed horticulture, Yeongnam Agricultural Experiment Station.
- Park, J.H., D.C. Seo, A.R. Kim, S.H. Kim, S.T. Lee, T.U. Jeong, J.H. Choi, H.O. Kim, J.S. Cho and J.S. Heo. 2011. Optimum configuration method and livestock wastewater loading for treating livestock wastewater inconstructed wetlands by natural purification method. *Korean Journal of Soil Science and Fertilizer* **44**(2): 278-284.
- Park, J.H., D.C. Seo, A.R. Kim, S.H. Kim, S.T. Lee, T.U. Jeong, J.H. Choi, S.W. Lee, J.S. Cho, H.O. Kim and J.S. Heo. 2011. Optimum pre-treatment method in constructed wetland by natural purification method for treating livestock wastewater. *Korean Journal of Soil Science and Fertilizer* **44**(2): 425-433.
- Park, W.Y., D.C. Seo, J.S. Im, J.K. Park, J.S. Cho, J.S. Heo and H.S. Yoon. 2008. Optimum configuration filter media depth and wastewater load of small-scale constructed wetlands for treating the hydroponic waste solution in greenhouse. *Korean Journal of Environmental Agriculture* **27**: 217-224.
- Seo, D.C. 2002. Development of sewage treatment apparatus by natural purification method. Master Thesis. Gyeongsang National University, Korea.
- Seo, D.C., H.J. Lee, J.S. Cho, H.G. Park, H.K. Kim and J.S. Heo. 2003. Selection of optimum pebbles size in sewage treatment plant by natural purification method. *Korean Journal of Environmental Agriculture* **22**: 26-35.
- Seo, D.C., W.Y. Park, J.S. Lim, C.H. Park, H.J. Lee, H.C. Kim, S.W. Lee, D.J. Lee, J.S. Cho and J.S. Heo. 2008. A study on the improvement of treatment efficiency for nitrogen and phosphorus by improved sewage treatment process in constructed wetland by natural purification method. *Korean Journal of Environmental Agriculture* **27**(1): 27-34.
- U.S.E.P.A. 1989, Nonpoint sources, Agenda for the Future, U.S., Environmental Protection Agency, Office of Water, Washington.
- Vymazal, J. 2007. Removal of nutrients in various types of constructed wetland. *Science of The Total Environment* **380**: 48-68.