시설하우스 폐양액 처리를 위한 소형 인공습지의 최적 조합방법, 여재깊이 및 폐양액 부하량

박우영^{1)†} · 서동철^{2)†} · 임종서¹⁾ · 박성규¹⁾ · 조주식^{3)**} · 허종수^{1,4)*} · 윤혜숙⁵⁾

¹⁾경상대학교 응용생명과학부, ²⁾루이지애나주립대 습지생물지구화학연구소, ³⁾순천대학교 생명환경과학부,

⁴⁾경상대학교 농업생명과학원, ⁵⁾경상남도 농업기술원

(2008년 6월 18일 접수, 2008년 9월 16일 수리)

Optimum Configuration, Filter Media Depth and Wastewater Load of Small-scale Constructed Wetlands for Treating the Hydroponic Waste Solution in Greenhouses

Woo-Young Park^{1)†}, Dong-Cheol Seo^{2)†}, Jong-Sir Lim¹⁾, Seong-Kyu Park¹⁾, Ju-Sik Cho^{3)**}, Jong-Soo Heo^{1,4)*} and Hae-Suk Yoon⁵⁾ (¹⁾Division of Applied Life Science, Gyeongsang National University, Jinju, 660-701, Korea, ²⁾Wetland Biogeochemistry Institute, Louisiana State University, Baton Rouge, LA 70802, USA, ³⁾Division of Applied Life and Environmental Sciences, Sunchon National University, Suncheon, 540-742, Korea, ⁴⁾Institute of Agriculture and Life Sciences, Gyeongsang National University, Jinju, 660-701, Korea, ⁵⁾Department of Gyeongnam-do Agricultural Research and Extension Services, Jinju, 660-985, Korea)

ABSTRACT: To obtain optimum configuration, depth and load of constructed wetlands(CWs) for treating of hydroponic waste solution(HWS) which was produced in greenhouses, the study was conducted with 4 kinds of combined systems such as Vertical flow(VF)-Horizontal flow(HF), VF-VF, HF-VF and HF-HF CWs. In four configurations of CWs, the treatment efficiency of pollutants from HWS under depth of HF and VF beds, HWS loading and HWSs were investigated. Removal rate of pollutants under different depth of VF and HF in 2-stage hybrid CWs was in the order of 50 cm < 70 cm regardless of CWs configuration. Removal rate of pollutants under HWS loading in 2-stage hybrid CWs was in the order of 150 L m⁻² day⁻¹ < 300 L m⁻² day⁻¹ < 450 L m⁻² day⁻¹. The optimum depth and HWS loading were 70 cm and 300 L m⁻² day⁻¹ in four configurations of CWs, respectively. Using this optimum condition, for various HWSs (cucumber, paprika and strawberry HWS), removal rate of pollutants in HF-HF CWs was higher than that in HF-VF CWs. Optimum configuration of 2-stage hybrid CWs for treating hydroponic waste solution in greenhouses was found out to be HF-HF CWs. Therefore, under the optimum conditions, removal rate of BOD, COD, SS, T-N and T-P in HF-HF CWs were 84, 81, 84, 51 and 93%, respectively.

Key Words: hydroponic waste solution, hydroponic greenhouses, 2-stage hybrid, constructed wetlands, VF-HF CWs, VF-VF CWs, HF-VF CWs, HF-HF CWs.

서 론

우리나라의 양액재배 시설은 1993년 23 ha에서 2003년

811 ha로 급증하고 있으며, 현재 양액을 사용하는 방식은 비순환방식이 89%를 차지하고 있다¹⁾. 특히, 비순환방식에서 배출하는 폐양액은 공급액의 약 20% 정도로서 2003년 811 ha의 양액재배시설에서 배출되는 폐양액은 8,110 ton day⁻¹ 정도이며, 매년 증가되고 있는 추세이다. 이러한 폐양액은 대체로 질소가 200 mg L⁻¹ 및 인이 20 mg L⁻¹ 정도로 함유되어 있으며^{1,2)}, 특히 질소는 작물에 흡수되고 약 33~43% 정도가 폐양액으로 배출되고 있어 인근 수계 부영양화의 주요 인이 되고 있다^{3,4)}.

국내 시설하우스 농가는 대부분 폐양액을 처리공정 없이

*연락처:

Tel: +82-55-751-5470 Fax: +82-55-757-0178

E-mail: jsheo@gsnu.ac.kr

**공동연락처:

Tel: +82-61-750-3297 Fax: +82-61-750-3890

E-mail: chojs@sunchon.ac.kr

†공동 제1저자

그대로 인근 수계에 방류하고 있어 수질오염을 가중시키고 있으며, 일부 농가에서 부레옥잠 등을 이용하여 단순처리 후 방류하고 있으나, 폐양액이 거의 처리 되지 않고, 특히 겨울철 부레옥잠의 고사로 인해 폐양액 정화를 기대하기 힘든 실정이다. 이러한 문제를 해결하기 위해 몇몇 연구자에 의해 모래여과, 제올라이트와 미생물을 이용한 폐양액 정화기술을 이용해 처리하는 공법이 개발되고 있으나⁵⁾, 이들 공법은 대부분 처리효율이 낮고, 시공경비 및 유지관리비가 과다하게 소요되며, 대부분 기계식 공법으로 국내의 농촌환경에 부적합한 실정이다.

현재 재순환방식은 양액이용률의 극대화 및 재배지역 주변의 환경문제 해결이라는 측면에서 많은 농가에서 이용되고 있으나, 재활용되는 양액 내의 무기이온 농도가 센서 등을 통해 정확하게 측정되어야 하므로 전문기술력이 필요한 실정이며, 폐양액이 병원균에 오염되었을 경우 이를 제거하기 위해서 열처리 소독기, 오존 소독기, 박막여과법 등 양액 여과기가 이용되고 있지만 대부분 고가장비로 실제 농민들이 사용하기에 부적합하다^{6,7)}.

현재 시설하우스의 폐양액은 수질환경보전법상 산업체 폐수로 분류되어 배출 기준으로 규제되고 있으며, 특히, 총 질소 60 mg L^{-1} , 총 인 8 mg L^{-1} 이하로 규제하고 있다⁸⁾. 앞으로 우리나라에서도 폐양액 배출에 대한 강화된 규제가 시행될 것으로 예상되고 있으며, 특히 양액 공급량, 횟수 및 계절별로 작물에 사용하는 양액의 조성이 매우 다양해지고 있어 국내 재배작물별 배출되는 폐양액에 광범위하게 사용될 수 있는 폐양액 처리기술 개발이 절실히 요구된다. 이에 시설하우스에서 배출되는 폐양액 중 고농도의 질소와 인 등을 효과

적으로 처리할 수 있고, 간단하게 설치 유지할 수 있으며, 유지관리비가 소요되지 않고, 반영구적으로 사용할 수 있는 우리나라 농촌 시설하우스 특성에 맞는 자연정화공법에 의한 폐양액 처리기술을 개발해야 할 것이다.

따라서 본 연구는 시설하우스 폐양액 처리를 위한 소형 폐양액처리장치 개발을 위해 소형 폐양액처리장치를 VF-HF, VF-VF, HF-VF 및 HF-HF 조합형으로 구분하여 조합방법별, 여재깊이별 및 폐양액 부하량별로 각각 수처리 효율을 조사하였으며, 개발된 시설하우스 폐양액처리장치의 적용성을 검증하기 위해 상기 최적조건하에서 실제 오이, 파프리카 및 딸기 시설하우스에서 배출되는 폐양액의 수처리효율을 조사하였다.

재료 및 방법

공시재료

본 소형 폐양액처리장치에 사용된 공시 폐양액은 경남 농업기술원내 오이, 파프리카 및 딸기 재배를 위한 시설하우스에서 배출되는 폐양액을 사용하였으며, 공시 여재는 여재채취장에서 채취한 여재를 사용하였다. 공시 폐양액 및 여재의 이화학적 특성은 각각 Table 1-3에서 보는 바와 같다. 소형 폐양액처리장치에 사용된 여재는 왕사와 쇠석의 비율이 3:1인 혼합여재를 사용하였다. 혼합여재의 유효입경(여재를 입경 순으로 나열하였을 때 작은 입경으로부터 중량 10%되는 부분의 여재의 입경; d_{10})은 1.2 mm 이었으며, 균등계수(여재를 입경 순으로 나열하였을 때 작은 입경으로부터 중량 60%되는 입경과 10%되는 입경과의 비; d_{60}/d_{10})는 2.92이었다.

Table 1. Chemical characteristics of the hydroponic waste solution used

Hydroponic waste solution	pH	EC (dS m^{-1})	DO	BOD	COD	SS	T-N	$\text{NH}_4\text{-N}$	$\text{NO}_3\text{-N}$	$\text{NO}_2\text{-N}$	T-P	$\text{PO}_4\text{-P}$
Cucumber	6.5	1.27	6.5	8.1	31.1	13.5	103	1.71	86	1.11	14.1	10.2
Paprika	6.9	1.87	6.7	11.7	40.3	21.3	122	1.01	109	1.38	18.8	6.4
Strawberry	7.0	1.32	6.7	8.6	31.8	13.7	113	1.19	98	1.05	15.8	12.8

Table 2. Chemical characteristics of filter media used

Filter media	pH (1:5 H_2O)	EC (dS m^{-1})	O.M (%)	T-N	T-P	K	Ca	Mg	Na	Fe	Mn	Cu	Zn
Mixed filter media	7.9	0.04	0.03	32.3	28.2	1,003	1,035	1,144	140	2,028	58.3	2.91	10.6

Mixed filter media (coarse sand : broken stone = 3 : 1).

Table 3. Physical characteristics of filter media used

Filter media	Porosity (%)	Bulk density (g cm^{-3})	d_{10} (mm)	d_{60} (mm)	Uniformity coefficient (d_{60}/d_{10})
Mixed filter media	29	1.58	1.2	3.5	2.92

Mixed filter media (coarse sand : broken stone = 3 : 1).

본 소형 폐양액처리장치에 이식한 수생식물은 본 연구자들의 선행연구를 바탕으로 호기성조에는 갈대를, 혐기성조에는 노랑꽃창포를 각각 이식하였으며, 이들은 모두 식물원에서 생육한 것을 구입하였다⁹⁾.

소형 폐양액처리장치 설계 및 시공

자연정화공법에 의한 소형 폐양액처리장치는 Fig. 1과 같이 수직흐름조(Vertical flow(VF); 호기성조)와 수평흐름조(Horizontal flow(HF); 혐기성조)를 이용하여 VF-HF, VF-VF, HF-VF 및 HF-HF 조합형의 총 4개 조합으로 설계 및 시공하였다. 수직흐름조 및 수평흐름조의 크기는 각각 지름 0.60 m × 높이 0.72 m인 플라스틱 원통을 사용하여 용량이 0.20 m³ 되게 제작하였다. 소형 폐양액처리장치의 수평흐름조와 수직흐름조에 각각 왕사와 쇠석이 3:1의 비율로 혼합된 혼합여재를 주입하였다. 수직흐름조에는 통기관을 각조의 밑바닥과 하부로 부터 0.35 m 위치에 각각 설치하여 자연통풍이 되게 하였다.

VF-HF 조합형 소형 폐양액처리장치는 Fig. 1A와 같이 수직흐름조와 수평흐름조를 연결하여 연속적인 폐양액 처리가 가능하게 제작하였다. VF-HF 조합형 소형 폐양액처리장치에서 폐양액의 흐름은 호기성조에 폐양액을 유입시켜 상부에서부터 하부로 수직여과방식으로 처리하여 유출된 수직흐름조 처리수는 자연유하식으로 수평흐름조로 유입되게 하였고, 수평흐름조에 유입된 폐양액은 수평흐름조에서 체류시간을 증가시키기 위해 수평방향으로 지그재그로 흐르게 하였다. VF-VF(Fig. 1B), HF-VF(Fig. 1C) 및 HF-HF(Fig. 1D) 조합형 소형 폐양액처리장치는 각 호기성조와 혐기성조의 설계 및 제작은 동일하나 수직흐름조와 수평흐름조의 조합방법을 각각 달리하였으며, 각 조합방법별 폐양액은 수직흐름조의 경우 자연유하식의 수직여과방식에 의해 흐르게 하였고, 수

평흐름조의 경우 차수막을 통한 지그재그의 수평여과방식으로 흐르게 하였다.

소형 폐양액처리장치 운전조건 및 조사시기

소형 폐양액처리장치의 수처리 효율 조사는 소형 폐양액처리장치 개발을 위한 최적조건을 조사하기 위해 여재 깊이 별, 폐양액 부하량별 및 폐양액 종류별 오염물질의 처리효율을 조사하였다. 여재의 깊이에 따른 수처리 효율 조사는 자연정화공법에 의한 소형 폐양액처리장치를 VF-HF, VF-VF, HF-VF 및 HF-HF 조합형의 4개 조합방법으로 나누어 설계 및 시공하여 혼합여재의 깊이를 50 및 70 cm로 달리한 후 딸기 시설하우스에서 배출되는 폐양액을 300 L m⁻² day⁻¹ 되게 유입하여 BOD, COD, SS, T-N 및 T-P의 처리효율을 각각 조사하였다.

폐양액의 부하량에 따른 수처리 효율 조사는 여재 깊이에 따른 수처리 효율의 최적 깊이 하에서 폐양액 부하량에 대한 대응성을 조사하기 위해 소형 폐양액처리장치를 VF-HF, VF-VF, HF-VF 및 HF-HF 조합형의 4개 조합방법으로 구분한 후 딸기 시설하우스에서 배출되는 폐양액 부하량을 150, 300 및 450 L m⁻² day⁻¹ 되게 달리 유입하여 BOD, COD, SS, T-N 및 T-P의 처리효율을 각각 조사하였다.

폐양액의 종류에 따른 수처리 효율 조사는 여재 깊이에 따른 수처리 효율의 최적 깊이와 폐양액의 부하량에 따른 수처리 효율의 최적 부하량 하에서 폐양액 종류에 대한 적용성을 조사하기 위해 소형 폐양액처리장치를 가장 높은 처리효율 보였던 HF-HF 및 HF-VF 조합형으로 선정한 후 오이, 파프리카 및 딸기 시설하우스에서 배출되는 폐양액을 300 L m⁻² day⁻¹로 동일하게 주입하여 BOD, COD, SS, T-N 및 T-P의 처리효율을 각각 조사하였다.

소형 폐양액처리장치에서의 수처리 효율조사는 2007년 4월

Fig. 1. Diagrams of small-scale hybrid constructed wetlands for treating the hydroponic waste solution in greenhouses.

부터 2007년 12월 31일까지 매달 실시하였으며, 한 조건에서 한 달간 운전하였다. 시료의 채취는 처음 3주간은 1주 1회, 마지막주에는 격일로 4회 분석하여, 총 7회 분석한 결과를 평균하여 각 조건에서의 수처리 효율을 조사하였다.

분석방법

수질 분석은 수질오염공정시험법 및 APHA의 standard method 준하여 다음과 같이 하였다^{10,11}. 수질의 pH는 초차전극법, EC는 EC meter (Orion, Model 160, Germany), DO 및 BOD는 윙클러 아지드화나트륨 변법, COD는 산성 KMnO_4 법, SS는 유리섬유여과지법, T-N은 자외선 흡광광도법, $\text{NH}_4\text{-N}$ 은 인도페놀법, $\text{NO}_3\text{-N}$ 은 부루신법 및 T-P는 아스코르빈산 환원법으로 각각 분석하였다.

결과 및 고찰

여재 깊이별 수처리 효율

여재 깊이별 방류수 중의 수처리 효율은 Fig. 2와 같이 BOD, COD, SS, T-N 및 T-P 모두에서 깊이가 깊어짐에 따

라 증가하였다. 여재깊이 70 cm에서 모든 조합의 BOD, COD 및 T-P는 각각 평균 87, 84 및 90% 이상으로 조합방법에 따라 큰 차이 없이 안정적인 수처리 효율을 보였다.

BOD 처리효율은 70 cm 깊이에서 $\text{VF-VF} \geq \text{HF-VF} \approx \text{VF-HF} \geq \text{HF-HF}$ 의 경향으로 전반적으로 VF-VF 조합형이 89%로 타 조합방법에 비해 약간 높았으나 큰 차이는 없었다. Seo 등 (2006)은 하수처리를 위한 인공습지에서 유기물 처리효율이 가장 높은 조합방법은 VF-VF 조합형으로 보고하였는데, 본 폐양액처리장치에서는 유기물농도가 높지 않아 조합방법별로 큰 차이가 없었다¹². COD 처리효율은 수직흐름조(VF)가 수평흐름조(HF)에 비해 처리효율이 높는데, 이는 수직흐름조내 통기관의 자연통풍과 수생식물에 의한 원활한 산소공급으로 인해 유기물 처리효율이 높았기 때문으로 판단되었다¹³. 하지만 T-N의 경우 조합방법에 따라 수처리 효율의 차이가 크게 나타나, HF-VF 및 HF-HF 조합형의 처리효율이 타 조건에 비해 높았다. 특히, 수평흐름조(HF; 혐기성조)가 많아질수록 총 질소 처리효율이 높아지는 경향이 있었다. 일반적으로 자연정화공법에 의한 질소의 처리는 호기성 미생물에 의해 유기성 질소 및 $\text{NH}_4\text{-N}$ 이 $\text{NO}_3\text{-N}$ 으로 전환

Fig. 2. Removal rate of BOD, COD, SS, T-N and T-P in the effluent according to the depth of filter media in small-scale hybrid constructed wetlands. □ : 50 cm depth, ▣ : 70 cm depth, VF : Vertical Flow, HF : Horizontal Flow).

되며, 질산화작용으로 생성된 $\text{NO}_3\text{-N}$ 은 혐기성상태인 침토로 확산되어 혐기성 미생물에 의하여 탈질화가 일어나면서 N_2 와 N_2O 로 전환되어 이들이 대기 중으로 이동하여 질소가 처리되는 것으로 알려져 있다¹⁴⁾. T-P의 경우 수평흐름조(HF)가 수직흐름조(VF)에 비해 처리효율이 약간 높은 것은 수평흐름조가 수직흐름조에 비해 폐양액의 체류시간이 상대적으로 길게 설계되었기 때문으로 사료된다. T-P의 처리기작은 인산염의 침전, 기질에 의한 흡착, 수생식물에 의한 흡수 및 조류와 세균에 의한 흡수 등으로 예상할 수 있다. 일반적으로 인공습지에서 인 처리는 대부분 흡착과 침전에 의해 주로 처리되며, 식물흡수에 의한 것이 미생물에 의한 처리량에 비해 전반적으로 매우 낮은 것으로 알려져 있다¹⁵⁾. 여재 깊이별 SS 처리효율은 모든 조합방법에서 여재깊이가 깊어질수록 전반적으로 약간 증가하는 경향이었으며, 조합방법별 SS 처리효율은 50 cm 깊이의 경우 조합방법에 따라 별 차이 없이 71-76% 이었고, 70 cm 깊이의 경우도 50 cm 깊이와 유사한 경향으로 조합방법에 따라 별 차이 없이 81-84% 정도이었다. SS의 처리는 자연정화공법에 의한 인공습지에서 여재에 의한 여과 작용이 주된 처리이기 때문에 1차 처리수와 2

차 처리수의 SS 처리효율이 다른 항목에 비해서 큰 차이가 없었다. 이러한 SS성분의 여과는 궁극적인 처리가 아니고 물리적인 분리과정이기 때문에 여과된 SS를 일으키는 현탁물질은 입자상태로 처리조내에 잔류하게 된다. 이렇게 잔류하는 현탁입자들은 대개가 무해하지만 오염성분들은 미생물에 의한 생물학적 분해, 용해된 후 식물에 의한 흡수 및 기타 화학반응을 거치면서 궁극적으로 처리된다^{13,16)}. 따라서 시설하우스 폐양액처리장치의 최적 여재깊이는 70 cm 이상이었고, HF-VF 및 HF-HF 조합형의 오염물질 처리효율이 전반적으로 다른 조합형에 비해 약간 높았다.

폐양액의 부하량별 수처리 효율

폐양액의 BOD, COD, SS, T-N 및 T-P의 부하량별 수처리 효율은 $150 \approx 300 > 450 \text{ L m}^{-2} \text{ day}^{-1}$ 순으로 폐양액의 부하량이 증가함에 따라 수처리 효율이 점점 감소하였다(Fig. 3). 폐양액 부하량 $300 \text{ L m}^{-2} \text{ day}^{-1}$ 이하에서의 BOD 및 COD의 처리효율은 각각 84-89 및 81-88% 이상으로 조합방법에 따라 별 차이 없이 안정적인 수처리 효율을 보였다. 하지만 폐양액 부하량 $450 \text{ L m}^{-2} \text{ day}^{-1}$ 부터는 BOD 및 COD

Fig. 3. Removal rate of BOD, COD, SS, T-N and T-P in the effluent according to hydroponic waste solution loading in small-scale hybrid constructed wetlands. □ : $150 \text{ L m}^{-2} \text{ day}^{-1}$, ▨ : $300 \text{ L m}^{-2} \text{ day}^{-1}$, ▩ : $450 \text{ L m}^{-2} \text{ day}^{-1}$, VF : Vertical Flow, HF : Horizontal Flow).

의 처리효율이 각각 66-79 및 70-75%로 약간 감소하는 경향이 있었다. 조합방법별 유기물 처리효율은 수직흐름조(호기성조)가 수평흐름조(혐기성조)에 비해 약간 높았음에도 불구하고 전체적인 BOD 처리효율은 큰 차이가 없었다. 이와 같은 결과는 폐양액 내에 유기물 함량이 적어서 1차와 2차 처리를 거치는 동안 모든 유기물이 처리되었기 때문으로 사료된다. T-N 및 T-P의 경우도 폐양액 부하량이 증가함에 따라 수처리효율이 감소하는 경향이었으나, BOD와 COD에 비해 감소폭이 적었다. 또한, 모든 폐양액 부하량에서의 오염물질 처리효율은 HF-VF 및 HF-HF 조합형이 다른 조합형에 비해 높았으며, 특히 총 질소의 경우 HF-HF 조합형이 가장 높은 처리효율을 보였다. 일반적으로 폐양액 중 질소는 $\text{NH}_4\text{-N}$ 과 $\text{NO}_3\text{-N}$ 으로서 구분할 수 있지만 대부분이 $\text{NO}_3\text{-N}$ 으로 존재한다. $\text{NO}_3\text{-N}$ 은 $\text{NH}_4\text{-N}$ 과 달리 음전하이기 때문에 음하전인 토양입자에 부동화 되지 않으므로 훨씬 더 유동성이 크며, 침투수와 함께 잘 이동하는 특징이 있다¹⁷⁾. 따라서 인공습지에 의한 폐양액처리장치에서 효과적인 T-N 처리를 위해서는 여재의 흡착에 의한 처리보다는 호기, 혐기 조건에 따른 생물학적 탈질에 의해 처리해야 할 것으로 사료된다.

따라서 시설하우스 폐양액처리장치에서 최적의 폐양액 부하량은 $300 \text{ L m}^{-2} \text{ day}^{-1}$ 이하이었고, HF-VF 및 HF-HF 조합형의 오염물질 처리효율이 다른 조합형에 비해 약간 높았다.

폐양액 종류별 수처리 효율

시설하우스 폐양액처리장치에서의 깊이별 및 부하량별 최적조건인 HF-VF 및 HF-HF 조합형에서 깊이 70 cm와 폐양액 부하량 $300 \text{ L m}^{-2} \text{ day}^{-1}$ 하에서 폐양액 종류에 따른 처리시일별 수처리 효율을 조사한 결과는 Fig. 4에서 보는 바와 같다.

오이, 파프리카 및 딸기 폐양액의 처리시일에 따른 폐양액 원수 중 BOD는 각각 7.35-8.63, 10.19-13.12 및 7.24-9.78 mg L^{-1} 범위이었고, 방류수 중 BOD는 HF-VF 조합형의 경우 각각 평균 1.73, 1.73 및 1.65 mg L^{-1} 이었고, HF-HF 조합형의 경우 각각 평균 1.41, 1.21 및 1.44 mg L^{-1} 로 조합방법 및 폐양액 종류에 따라 큰 차이가 없었다. 또한 두 조합형 모두에서 BOD는 처리단계와 처리시일이 증가함에 따라 점점 감소되면서 안정화되었다. 폐양액 종류에 따른 처리시일별 COD는 전반적으로 BOD와 유사한 경향이었다. 오이, 파프리카 및 딸기 폐양액의 처리시일에 따른 폐양액 원수 중 SS 함량은 각각 12.6-14.9, 18.8-24.6 및 12.5-14.9 mg L^{-1} 범위이었고, 방류수 중 SS 함량은 폐양액 종류 및 조합방법에 따라 별 차이 없이 각각 2.2-3.8, 2.3-3.6 및 2.3-3.8 mg L^{-1} 범위로 안정적으로 처리되었다. 이는 SS의 경우 미생물이나 수생식물의 영향보다 여재에 의한 여과 및 흡착이 주된 처리이기 때문이다.

오이, 파프리카 및 딸기 폐양액의 처리시일에 따른 폐양액 원수 중 T-N 함량은 각각 94-113, 113-132 및 98-115 mg L^{-1} 범위이었고, 방류수 중 T-N 함량은 HF-VF 조합형의 경

우 각각 평균 68, 77 및 71 mg L^{-1} 이었고, HF-HF 조합형의 경우 각각 평균 63, 68 및 65 mg L^{-1} 로 두 조합형 모두 처리단계가 증가함에 따라 점점 감소하였고, HF-HF 조합형이 HF-VF 조합형에 비해 미미하게 높았다. 현재 시설하우스에서 배출되는 폐양액은 수질환경보전법상 산업체 폐수로 분류되어 T-N 배출기준인 60 mg L^{-1} 로 규제되고 있는데, 본 소형 폐양액처리장치 중 가장 처리효율이 좋았던 HF-HF 조합형에서 방류수중의 T-N 함량은 운전초기에는 T-N 배출기준을 약간 초과하였으나, 1개월 이후부터는 60 mg L^{-1} 이하로 배출되었다. 하지만 앞으로 폐양액 배출에 대한 강화된 규제가 시행될 것으로 예상됨에 따라 본 소형 폐양액처리장치에서 T-N 처리효율은 좀 더 향상되어야 할 것으로 판단된다.

오이, 파프리카 및 딸기 폐양액의 처리시일에 따른 폐양액 원수 중 T-P 함량은 각각 12.5-16.3, 17.2-20.5 및 13.4-18.1 mg L^{-1} 범위이었고, 방류수 중 T-P 함량은 HF-VF 조합형의 경우 각각 평균 1.53, 2.26 및 1.57 mg L^{-1} 이었고, HF-HF 조합형의 경우 각각 평균 1.20, 1.82 및 1.31 mg L^{-1} 로 두 조합형 모두 처리단계가 증가함에 따라 점점 감소하였고, HF-HF 조합형이 HF-VF 조합형에 비해 미미하게 높았다.

이상의 결과를 미루어 볼 때 HF-VF 및 HF-HF 조합형은 모두 유기물 및 부유물질 처리에는 적합하였으나, 폐양액내 질소(공농도 질산성질소) 및 인의 안정적인 처리를 위해서는 이들의 처리효율이 높은 HF-HF 조합형을 사용해야 할 것으로 판단된다.

요 약

시설하우스 폐양액 처리를 위한 소형 폐양액처리장치 개발을 위해 소형 폐양액처리장치를 VF-HF, VF-VF, HF-VF 및 HF-HF 조합형으로 구분하여 조합방법별, 여재깊이별 및 폐양액 부하량별로 각각 최적 조건을 조사하였으며, 개발된 시설하우스 폐양액처리장치의 적용성을 검증하기 위해 상기 최적조건하에서 실제 오이, 파프리카 및 딸기 시설하우스에서 배출되는 폐양액의 수처리효율을 조사하였다.

여재 깊이에 따른 오염물질의 수처리 효율은 BOD, COD, SS, T-N 및 T-P 모두에서 깊이가 깊어짐에 따라 수처리효율이 점점 증가하였으며, 여재깊이 70 cm에서 모든 조합의 BOD, COD 및 SS의 처리효율은 각각 87, 84 및 82% 이상으로 조합방법에 따라 큰 차이 없이 안정적인 수처리 효율을 보였다. T-N 및 T-P의 경우 HF-HF 및 HF-VF 조합형의 처리효율이 타 조합방법에 비해 약간 높았다. 폐양액 부하량에 따른 BOD, COD, SS, T-N 및 T-P의 처리효율은 $150 \text{ L m}^{-2} \text{ day}^{-1} \approx 300 \text{ L m}^{-2} \text{ day}^{-1} > 450 \text{ L m}^{-2} \text{ day}^{-1}$ 순으로 폐양액의 부하량이 증가함에 따라 수처리 효율이 점점 감소하였다. 모든 폐양액 부하량에서의 오염물질 처리효율은 HF-VF 및 HF-HF 조합형이 다른 조합형에 비해 높았으며, 특히 총 질소의 경우 HF-HF 조합형이 가장 높은 처리효율을 보였다.

이상의 결과를 미루어 볼 때 시설하우스 소형 폐양액처리

Fig. 4. Variation of BOD, COD, SS, T-N and T-P content in the water under different hydroponic waste solutions in hybrid constructed wetlands. (◆ : Raw water of cucumber, ◇ : Effluent water of cucumber, ■ : Raw water of paprika, □ : Effluent water of paprika, ▲ : Raw water of strawberry, △ : Effluent water of strawberry, VF : Vertical flow, HF : Horizontal flow).

장치의 최적 여재깊이는 70 cm이상이었고, 최적 폐양액 부하량은 $300 \text{ L m}^{-2} \text{ day}^{-1}$ 이상이었으며, 최적 조합방법은 HF-HF 조합형이었다.

감사의 글

본 연구는 2007년도 농촌진흥청 농업특정연구개발사업(과제번호:20070101033037)의 지원에 의해 이루어진 것임. 또한 본 연구는 2004년도 농림부의 농림기술개발사업과제

“지속농업을 위한 시설원예지대 비점오염원 오염용수의 자연정화기술 개발”과 2006년 정부(교육인적자원부)의 재원으로 한국학술진흥재단의 지원을 받아 수행된 연구임(KRF-2006-214-F00003).

참고문헌

1. MAF (2004) *Agricultural and forestry statistical year-book*. Ministry of Agriculture and Agriculture

- and Forestry, Gyeonggi-do, Korea, p.1-316.
2. Lee, G. J., Kang, B. G., Lee, K. Y., Yun, T., Park, S. G., and Lee, C. H. (2007) Chemical Characteristics of Ground Water for Hydroponics and Waste Nutrient Solution after Hydroponics in Chungbuk Area. *Kor. J. Environ. Agric.* 26(1), 42-48.
 3. Lee, K. B., Lee, D. B., Kang, J. G. and Kim, J. D. (1999) Seasonal variation in water quality of mankyeong river and groundwater at controlled horticulture region. *J. Kor. Soc. Soil Fert.* 32(3), 223-231.
 4. Lee, D. B., Lee, K. B. and Rhee, K. S. (1996) Changes of chemical contents in groundwater at controlled horticulture in honam area. *Kor. J. Environ. Agric.* 15(3), 348-354.
 5. Lee, S. Y., Lee, S. J., Seo, M. W., Lee, S. W. and Sim, S. Y. (1999) Reusing techniques of Nutrient Solution for recycling hydroponic culture of lettuce. *J. Bio. Env. Con.* 8(3), 172-182.
 6. Seo, B. S. (1999) Future prospects and countermeasures for hydroponics in 21C. *Kor. J. Hort. Sci. Technol.* 17, 796-802.
 7. Moliter, H. D. (1990) The European prospective with emphasis on subirrigation and recirculation of water and nutrients, Symposium on bedding and pot plant culture, *Acta Horti.* 272, 165-174.
 8. MOE (1999) *Water Conservation Act*, Ministry of Environment, Gyeonggi-do, Korea, p.1-150.
 9. Seo, D. C., Jang, B. I., Jo, I. S., Lim, S. C., Lee, H. J., Cho, J. S., Kim, H. C., and Heo, J. S., (2006) Selection of Optimum Water Plant in Constructed Wetland by Natural Purification Method for Municipal Sewage Treatment. *Kor. J. Environ. Agric.* 25(1), 25-33.
 10. APHA, AWWA, WCF (1995) *Standard methods for the examination of water and wastewater*. 19th ed. American Public Health Association, Washington, DC.
 11. Ministry of Environment (2000) The standard method of water analysis. Ministry of Environment. Seoul (in Korea).
 12. Seo, D. C., Lee, B. J., Hwang, S. H., Lee, H. J., Cho, J. S., Lee, S. W., Kim, H. C., (2006) Treatment Efficiency of Existing Forms of Pollutants in Sewage Treatment Plant by natural purification method. *Kor. J. Environ. Agric.* 25(2), 129-137.
 13. Seo, D. C. (2002) Development of sewage treatment apparatus by natural purification method. Master Thesis. Gyeongsang National University of Education, Korea.
 14. Brock, T. D. and Madigan, M. T. (1991) *Biology of Microorganisms*, 6th ed., Prentice-Hall.
 15. Lee, H. J., Seo, D. C., Cho, J. S., and Heo, J. S. (2003) Screening of the Optimum Filter Media in the Constructed Wetland Systems through Phosphorus Adsorption Capacities. *Kor. J. Environ. Agric.* 22(2), 148-152.
 16. Yoon, C. G., Kwun, S. K., and Kwun, T. Y. (1998) Feasibility Study of Constructed Wetland for the Wastewater Treatment in Rural Area. *The Korean Society of Agricultural Engineers* 40(3), 83-93.
 17. Yang, L., Chang, H. T. and Huang, M. L. (2001) Nutrient removal in gravel and soil based wetland microcosmos with and without vegetation. *Ecological Engineering*, 18, 91-105.