Korean Journal of Environmental Agriculture

Korean J Environ Agric. 2018;37(1):66-72. Korean
Published online 2018 March 30. https://doi.org/10.5338/KJEA.2018.37.1.08

Online ISSN: 2233-4173
Print ISSN: 1225-3537

Research Article

Open Access

굴패각에 의한 인 처리가 인공습지의 수명에 미치는 영향

김성헌[1†], 김홍출[2†], 박종환[3], 류성기[1], 강세원[4], 조주식[4], 서동철[1*]

[1]경상대학교 농화학식품공학과&농업생명과학연구원, [2]경남과학기술대학교 제약공학과,
[3]루이지애나주립대학교 식물환경토양과학부, [4]순천대학교 생물환경학과

Effect of Phosphorus Removal by Oyster Shell on Longevity of Constructed Wetlands

Seong-Heon Kim[1†], Hong-Chul Kim[2†], Jong-Hwan Park[3], Seong-Ki Ryu[1], Se-Won Kang[4], Ju-Sik Cho[4] and Dong-Cheol Seo[1*] ([1]Department of Agricultural Chemistry and Food Science & Technology & Institute of Agriculture and Life Science, Gyeongsang National University, Jinju 52828, Korea, [2]Department of Pharmaceutical Engineering, Gyeongnam National University of Science and Technology, Jinju 52725, Korea, [3]School of plant, Environmental and Soil Sciences, Louisiana State University Agricultural center, Baton Rouge, LA 70803, USA, [4]Department of Bio-Environmental Sciences, Sunchon National University, Suncheon 57922, Korea)

Received: 14 March 2018 / Revised: 22 March 2018 / Accepted: 26 March 2018

ORCID
Seong-Heon Kim
https://orcid.org/0000-0001-8132-5015
Hong-Chul Kim
http://orcid.org/0000-0002-7541-1483
Jong-Hwan Park
http://orcid.org/0000-0001-7296-0439
Seong-Ki Ryu
http://orcid.org/0000-0002-4012-5188
Se-Won Kang
http://orcid.org/0000-0003-2038-5465
Ju-Sik Cho
http://orcid.org/0000-0001-9610-5373
Dong-Cheol Seo
http://orcid.org/0000-0001-8515-0670

Abstract

BACKGROUND: Constructed wetlands are low-cost alternatives for treating domestics sewage. However, previous study has reported that the removal of phosphorus in constructed wetlands was limited. Therefore, a new alternative was needed to extend the life of the constructed wetlands. The purpose of this study was to evaluate the effect of total phosphorus removal by oyster shell on longevity of constructed wetlands for treating domestic sewage.

METHODS AND RESULTS: The changes of total phosphorus concentration and treatment efficiency in two constructed wetlands (CWs) classified as system A (coarse sand 100%) and system B (coarse sand 90%+oyster shell 10%) were investigated for 6 years. The actual saturation time of total phosphorus in the systems A and B was estimated to be longer than that of theoretical saturation by adsorption isotherm experiment. In particular, the saturation pattern of phosphorus in system A was maintained at a certain concentration level in the initial stage of operation, and finally saturation was reached as the saturation gradually progressed from the breaking point. In system B, the saturation period of phosphorus was prolonged as compared with system A due to the addition of oyster shells.
CONCLUSION: Our results suggest that the longevity of the constructed wetlands can be extended due to the

[†]These authors contributed equally to this work.
*Corresponding author: Dong-Cheol Seo
Phone: +82-55-772-1963; Fax: +82-55-772-1969;
E-mail: dcseo@gnu.ac.kr

phosphorus saturation by adding the oyster shells to the coarse sands in constructed wetlands.

Key words: Constructed wetland, Longevity, Oyster shell, Phosphorus

서 론

인공습지는 자연습지의 수생식물, 토양 및 미생물을 이용하여 수처리 능력을 향상시킨 습지로 그 동안 다양한 종류의 폐하수를 처리하는 연구가 진행되어져왔으며(Vymazal, 2007), Seidel (1961)의 연구를 시초로 다양한 오폐수처리를 위한 시스템형 인공습지가 개발되었다. 대표적으로 VF (vertical flow)-HF (horizontal flow), VF (vertical flow)-VF (vertical flow), HF (horizontal flow)-VF (vertical flow) 및 VF (vertical flow)-VF (vertical flow) 조합형 인공습지 등이 있으며, 이러한 조합별 인공습지는 오폐수의 이화학적 특성에 따라 다양한 형태로 적용이 되어져 왔다. 이에 본 연구진은 다양한 시스템형 인공습지 중 국내 생활하수 성상에는 맞는 VF-HF 조합형을 기반으로 한 이중통풍형 인공습지를 개발하였으며, 이들 연구결과에 의하면 BOD, COD, T-N 및 T-P 제거효율 평균이 각각 94.3, 95.1, 68.4 및 94.3%로 높은 정화효율을 제시한 바 있다(Seo *et al.*, 2009).

이러한 시스템형 인공습지에서 인 제거의 메커니즘은 크게 식물에 의한 제거(Greenway and Woolley, 1999), 미생물에 의한 고정(Newbold *et al.*, 1983; Reddy *et al.*, 1999), 침전(Diazo *et al.*, 1994) 및 여재에 대한 흡착(Tanner *et al.*, 1998) 등이 있으나, Seo *et al.* (2009)의 연구에 의하면 시스템형 인공습지에서 처리되는 인의 대부분은 흡착에 의한 것으로 알려져 있고, 이러한 이유로 인이 인공습지 내에 축적되어 포화에 도달할 경우 여재를 세척 및 교체하지 않는 이상 포화된 인이 인공습지내 여재로부터 역으로 유출되게 되어 더 이상 인공습지를 운전할 수 없게 되는 것으로 알려져 있다. 따라서 인은 인공습지의 수명과 밀접한 연관이 있기에 여재의 인 흡착능력은 인공습지 설계에서 여재 선택 시 핵심인자로 고려된다(Richardson and Craft, 1993; Mann,1997; Johansson, 1999).

일반적인 인공습지에서 인의 처리기작은 식물을 통한 무기인의 흡수, 미생물을 통한 흡수 및 미생물의 성장과 같은 생물학적 단기 처리과정과 침강, 광물과의 침전 및 퇴적과 같은 비생물적 반응인 장기 처리과정으로 구분되며, 대부분의 처리는 장기저장과정이며 전체의 50～70% 정도로 보고된 바 있다(Richardson, 1999; Kadlec and Wallace, 2009; Reddy and Delaune, 2008). 하지만 수처리를 목적으로 한 시스템형 인공습지는 비생물학적 장기저장방법에 초점을 두고 운영되고 있으며, 그 중에서도 인 보유능력이 높은 여재에 초점을 두고 개발되어 오고 있다. 이에 본 연구팀은 인공습지에서 굴패각, 제강슬래그, 제올라이트, 쇄석, 왕사 및 방해석 등의 인 흡착능력을 평가하여 최적 여재를 선정한 바 있으며, 인 흡착능력을 극대화하여 인공습지의 수명을 연장하기 위해 굴패각을 인공습지에 적용한 바 있다(Lee *et al.*, 2003).

하지만 굴패각을 적용한 인공습지에서 인 흡착능력 증가가 인공습지의 수명연장효과에 대한 연구는 등온흡착 및 컬럼실험을 이용해 인 포화예측 연구(Seo *et al.*, 2005)가 진행

Table 1. Physicochemical characteristics of filter media used in the study

Items	Filter media in system A (Coarse sand only)	Filter media in system B (Coarse sand+Oyster shell)
Physical property		
Porosity (%)	37.0±1.08	37.5±1.02
Bulk density (g cm^{-3})	1.58±0.67	1.20±0.89
D_{10} (mm)	1.50±0.21	1.50±0.13
D_{60} (mm)	3.00±0.18	2.95±0.21
Uniformity coefficient (D_{60}/D_{10})	2.00±0.24	1.96±0.37
Chemical property		
pH (1:5 H_2O)	7.9±0.87	7.6±0.98
EC (dS m^{-1})	0.05±0.01	0.05±0.01
O.M (%)	0.79±0.12	0.66±0.09
TN (mg kg^{-1})	8.50±2.37	70.8±3.4
TP (mg kg^{-1})	2.10±0.28	35.3±2.1
Ca (mg kg^{-1})	790±69.4	38,500±2,750
Mg (mg kg^{-1})	215±18.1	402±18
Al (mg kg^{-1})	1.97±0.2	1.82±0.3
Fe (mg kg^{-1})	750±37	710±54

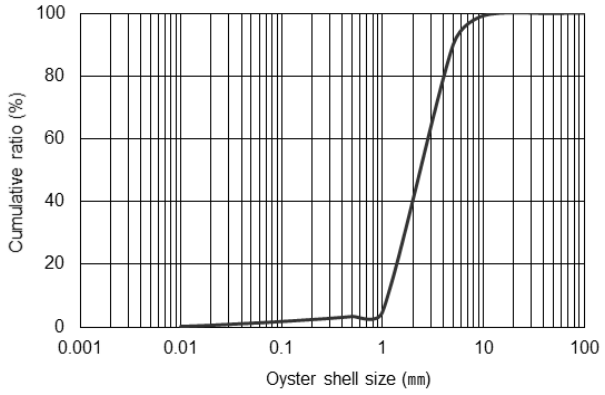

Fig. 1. Particle distributions of the oyster shell used.

된 바 있다. 또한 굴패각을 적용한 인공습지 하수처리장에서 2-3년 정도의 짧은 기간 동안 수처리 효율 평가에 중점을 두고 연구가 진행된 적 있다. 다양한 lab-scale의 연구에서 인 흡착능에 기반한 수명예측이 진행된 적은 있지만 아직까지 실제 인공습지에서의 인 포화기간이나 인 포화량을 명확하게 제시하지 못하고 있다. 특히 본 실험은 선행연구된 lab-scale의 인 포화 예측연구와 실제 장기간 운영된 습지의 결과를 비교하여 예측치의 정확도와 오류를 구명하는 측면에서 매우 중요한 가치가 있을 것으로 판단된다.

따라서 본 연구는 시스템형 인공습지에서 굴패각의 적용 유무가 인 처리효율에 미치는 영향과 인의 포화가 인공습지 수명 연장에 미치는 영향에 대해 알아보고자 하수 처리를 위한 VF-HF 조합형 인공습지에서 6년간 인공습지의 유입수와 유출수 중 인의 농도 변화와 처리효율을 장기간 모니터링 하였고, 굴패각의 적용유무가 인 처리효율에 미치는 영향에 대해 알아보았다.

재료 및 방법

공시재료

본 연구에 사용되어진 생활하수는 경상남도 진주시 수곡면에 위치한 요산마을에서 배출되는 생활하수를 이용하였으며, 이화학적 특성은 다음과 같다. pH 7.09±0.14 및 EC 0.53 ±0.13 dS m^{-1}였으며, BOD, SS, T-N 및 T-P함량은 각각 75.5 ±51.5, 59.0±54.6, 38.83±20.26 및 3.8±2.1 mg L^{-1}이었다.

인공습지에 사용된 여재는 왕사와 굴패각이었고, 사용된 여재의 이화학적 특성은 Table 1과 같고, 굴패각의 입경분포도는 Fig. 1에서 보는 바와 같다.

VF-HF 조합형 인공습지의 설계 및 제작

본 실험에 사용되어진 인공습지는 Fig. 2에서 보는 바와 같이 수직흐름조(VF; Vertical flow)와 수평흐름조(HF; Horizontal flow)로 구성된 인공습지이며 여재로 왕사만 100% 충진한 system A와 왕사와 굴패각을 9:1의 비율로 혼합하여 충진한 system B로 구분하여 제작되었다. System B의 경우 굴패각은 입경이 2-4 mm인 굴패각을 사용하였으며,

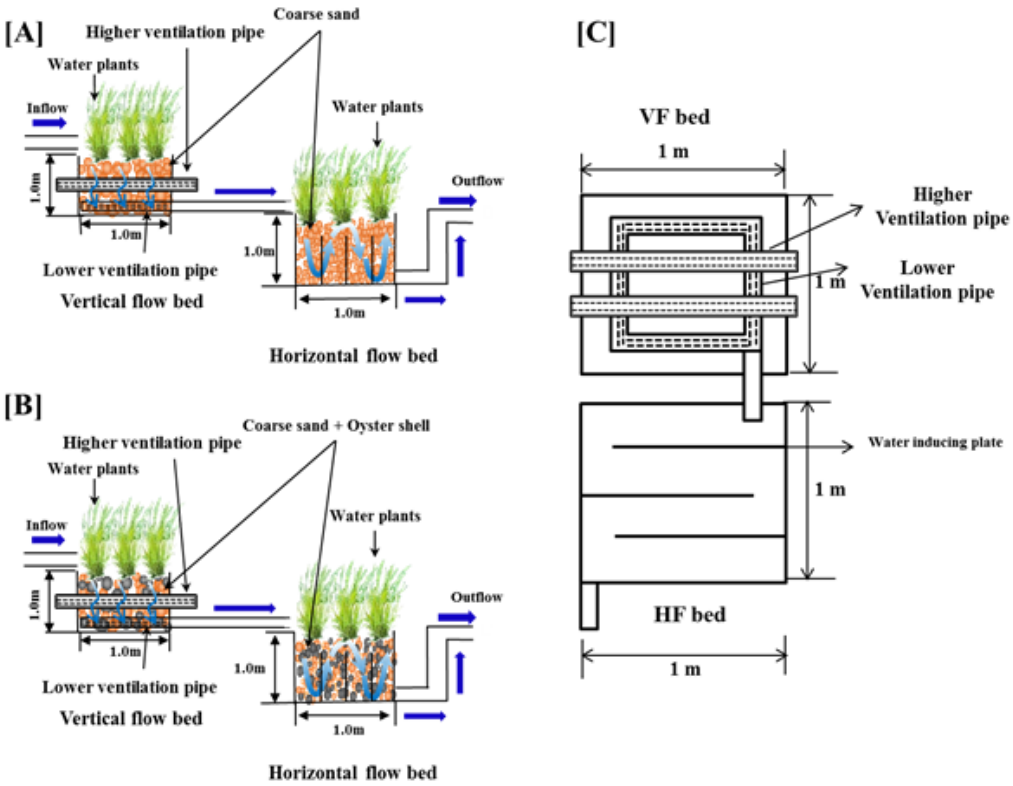

Fig. 2. Diagram of VF-HF hybrid constructed wetlands for treating domestic sewage produced from agricultural village.

추가적인 굴패각의 물리화학적 특성은 Seo *et al.* (2005)에서 제시되었다. 왕사와 굴패각의 최적 혼합비율은 Lee *et al.* (2003)의 선행연구에 따라 왕사와 굴패각 혼합 비율을 9 : 1로 선정하였다. 하수처리를 위한 인공습지의 수직흐름조와 수평흐름조는 각각 1.5 mm 두께의 고밀도 폴리에틸렌을 이용하여 1.0 m (width)×1.0 m (length)×1.0 m (height)의 크기로 제작되었으며, 총 부피는 1.0 m^3이었다. 본 연구에 사용되어진 고밀도 폴리에틸렌의 경우 내약품성, 내화학성, 내구성 등이 우수하여 쓰레기 매립장, 폐기물 처리시설 및 인공습지 등에 오염물의 유출입을 막는 역할로 광범위하게 사용되고 있으며(Hawkins *et al.*, 1997), 이에 본 실험에서도 인공습지의 차수막 역할로 고밀도 폴리에틸렌을 바닥재로 사용하였다. 수직흐름조는 호기성 조건을 만들기 위해 통풍관을 바닥과 바닥에서 50 cm 지점에 설치하였고, 수평흐름조는 처리조 내의 체류시간을 극대화하기 위해 처리수의 흐름을 5개의 구간으로 나눈 후 지그재그 방향으로 흐르게 제작하였다. 제작된 인공습지에 이식된 수생식물은 수직흐름조의 경우 *Phragmites communis* 를 이식하였고, 수평흐름조는 *Iris pseudoacorus*를 각각 이식하였다.

실험방법

하수처리를 위한 인공습지에서 인 제거효율은 2012년 1월 1일부터 2017년 12월 31일까지 6년간 매월 1회씩 채취하여 분석하였으며 System A와 B로 구성된 인공습지에서 유입수, 1차 처리조(수직흐름조) 처리수와 2차 처리조(수평흐름조) 처리수의 총 인 농도를 6년 동안 조사하였다. 인공습지내의 인 함량 변화를 모니터링한 후 그 결과를 활용하여 연도별 및 시스템별 단계별 처리수중의 총 인의 농도를 분석하고 이들 결과를 토대로 하여 굴패각이 인공습지 수명에 미치는 영향을 평가하였다.

인공습지에서 단계는 각 시스템에서 인의 변화가 일어나는 지점과 포화를 기준으로 설정하였다. System A를 기준으로 인이 포화가 되기 전을 stage Ⅰ, 인 포화가 되기 시작한 시기부터 완전 포화가 되기 전까지를 stage Ⅱ, 완전 포화가 된 이후를 stage Ⅲ으로 구분하였다.

분석방법

수질분석은 수질오염공정시험법과 APHA의 standard method에 준하여 다음과 같이 분석하였다(APHA, 2005). pH는 초자전극법, EC는 EC meter (Orion, Model 160, Germany)로 분석하였으며, 용존산소 및 BOD는 용존산소-적정법, SS는 유리섬유여과법, T-N은 자외선/가시선 분광법-산화법 및 T-P는 자외선/가시선 분광법으로 분석하였다.

여재의 분석은 토양화학분석법에 준하여 다음과 같이 하였다. 여재의 pH는 초자전극법, EC는 EC meter (Orion, Model 160, Germany)로 분석하였고, 유기물은 Tyurin법, 총질소는 Kjeldahl법, 총인은 Vanadomolybdate법으로 분석하였다. 그리고 K, Ca, Mg 및 Na의 분석은 습식분해액으로 분해시킨 여액을 필요에 따라 희석하여 ICP (OPTIMA 4300DV. PerkinElmer)를 통해 분석하였다.

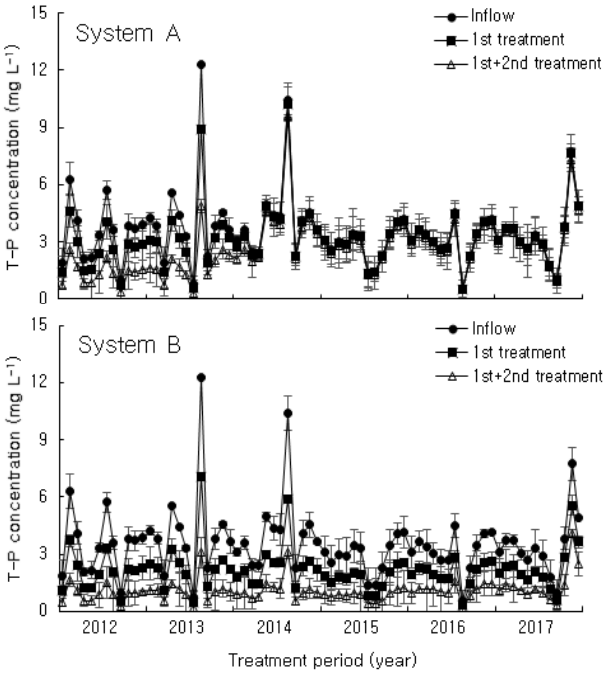

Fig. 3. The concentration of TP in system A and system B in the water in VF-HF hybrid CWs for treating domestic sewage under different years.

결과 및 고찰

연도별 인의 농도 변화

인공습지 운영 6년간 연도별 T-P 함량은 Fig. 3에서 보는 바와 같다. 6년 동안 유입수의 T-P 함량은 0.53-12.3 mg L^{-1} 범위로 다소 편차가 심하였으며, 평균 3.56±1.82 mg L^{-1}이었다. 유입수 중 T-P 함량은 2016년 8월 (0.53 mg L^{-1})에 가장 낮았으며, 전반적인 장마기간인 7-8월에 가장 낮은 수치를 보임을 알 수 있었다. 이와 같은 결과는 Seo *et al.* (2010)에서도 보고된 바와 같이 7월과 8월에 집중된 강우에 의해 유입되는 인의 농도가 희석되었기 때문으로 판단된다. 유입수 중 T-P 함량 중 2013년 9월 (12.3 mg L^{-1})과 2014년 9월이 특이적으로 높았는데, 이는 마을에서 배출된 하수를 채수하는 과정에서 인 함량이 높은 하수가 유입되었을 것으로 판단된다. 하지만 이는 마을에서 배출되는 인 농도 범위 안에 드는 수준으로 판단되며, Seo *et al.* (2009)의 연구에서 제시된 유입수중 인의 함량은 7.19~15.08 mg L^{-1}범위 이었다.

System A와 B에서의 연도별 T-P의 처리효율은 Fig. 4와 같다. System A의 T-P 처리효율은 2012년과 2013년의 경우 각각 61.10±1.39 (제거농도 25.3 mg L^{-1}) 및 55.07±9.47% (제거농도 28.3 mg L^{-1})로 처리효율이 일정하게 유지가 되었으나 2014년부터 system A에서는 T-P 처리효율이 12.54±9.03%로 급격히 감소되는 경향을 보였다.

이와 달리 system B에서는 연평균 처리효율로 보았을 때

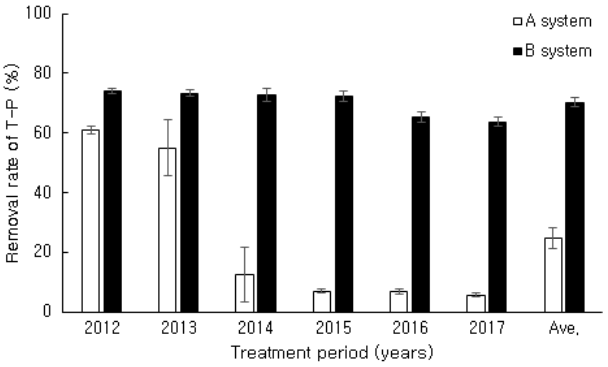

Fig. 4. The removal rates of TP in effluent in VF-HF hybrid CWs for treating domestic sewage under different years.

2012년 73.91±0.85% (제거농도 30.7 mg L^{-1}), 2013년 73.35±1.11% (제거농도 37.2 mg L^{-1}), 2014년 72.82±2.21% (제거농도 36.2 mg L^{-1}), 2015년 72.32±1.68% (제거농도 25.1 mg L^{-1}), 2016년 65.26±1.63% (제거농도 24.4 mg L^{-1}) 및 2017년 63.75±1.48% (제거농도 24.7 mg L^{-1})로 운영 초기부터 4년까지 큰 차이 없이 일정하게 유지되는 것을 확인하였으며 그 이후 약간 감소되었지만 감소폭이 system A에 비해 적었다. System A는 여재를 왕사만 사용하였기에 운영 후 2년이 경과함에 따라 여재에 흡착될 수 있는 인이 포화치에 도달되어 총 인 처리효율이 급격히 감소한 것으로 판단된다. System B는 여재에 굴패각을 10% 첨가하여 운영함으로 여재의 인 흡착능력이 향상되어 계속적으로 흡착에 의한 인 처리가 가능한 것으로 판단되며, 본 연구진의 왕사에 굴패각 함량별 인 흡착능력 변화에 대한 batch 실험결과와도 일치되는 경향을 보였다(Lee *et al.*, 2003).

굴패각의 적용이 인 흡착능의 향상에 영향을 미치는 이유는 본 연구진의 선행연구에 따르면, 굴패각에 의한 인 흡착은 Al-P, Mg-P 및 Fe-P 형태보다 Ca-P 형태로 대부분 흡착된다고 하였으며, 이러한 이유는 일반적으로 굴패각의 Ca 함량이 30-40%범위로 다른 무기성분에 비해 상당히 높기 때문으로 보고된 바 있다(Seo *et al.*, 2005). 본 실험에 사용한 굴패각 중 Ca 함량도 일반적인 굴패각과 유사하였으며, Ca함량이 약 37%정도였으며, 왕사에 굴패각을 10% 혼합한 혼합여재 중 Ca함량은 3.8%정도로 Al, Mg 및 Fe에 비해 최소 약 50배에서 최대 약 20,000배 정도 월등히 높았다.

굴패각이 혼합된 여재와 혼합되지 않은 여재를 비교해 볼 때(Table 1), Al, Mg 및 Fe의 함량을 포함한 이화학적 특성간에는 큰 차이 없었으나, Ca 함량은 약 48배 정도 차이가 나기 때문에 굴패각의 첨가로 Ca함량을 효과적으로 높인 것으로 판단된다. 또한 이러한 Ca함량의 증가는 결과적으로 Ca-P를 기반으로 한 hydroxyapatite의 난용성 염을 생성(Seo *et al.*, 2005)하여 하수처리장에서 여재로부터 용출에 의한 2차 오염을 줄일 수 있을 것으로 판단된다.

하지만 여재에 화학약품인 Ca를 첨가한 선행연구결과(Lee *et al.*, 2003)에서 보면, 인 흡착에 대한 유의적인 상승

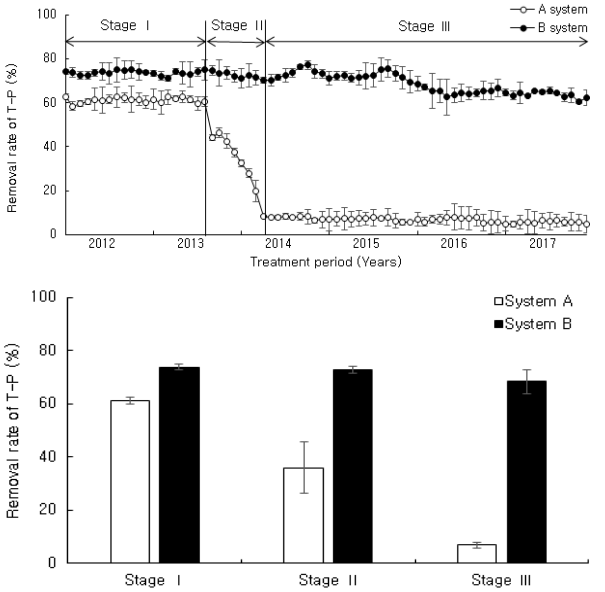

Fig. 5. The removal rates of TP in effluent in VF-HF hybrid CWs for treating domestic sewage under different operating stage.

효과가 없었기 때문에 인공습지에서 안정적인 인 처리를 위해서는 정석탈인법에 기초한 특수한 여재를 선발하는 것이 효과적인 것으로 판단된다.

인공습지에서 처리단계별 인 처리효율

System A와 system B에서의 T-P의 처리효율의 변화가 생기는 시점을 기점으로 3 stage로 분리하여 T-P의 처리효율을 분석한 결과는 Fig. 5와 같다. 먼저 6년간의 system A와 B의 전체 처리효율은 각각 24.69 및 70.23%로 system B의 처리효율이 높았다. Stage Ⅰ에서 system별 T-P의 평균 처리효율은 system A가 61.18%였고, system B가 73.67%로 굴패각을 10% 혼합하여 사용한 system B가 약간 더 높은 인 제거효율을 보였다. Stage Ⅱ에서는 system A의 왕사가 인으로 포화되어감에 따라 인 처리효율이 급격히 감소되어 system A의 인 처리효율은 35.81%이었고, system B의 인 처리효율은 72.86%로 stage Ⅰ과 큰 차이 없는 것으로 보아 여재가 인으로 포화에 도달하지 않은 것을 확인할 수가 있었다. Stage Ⅲ에서는 system A의 인 처리효율이 6.74%로 인의 처리효율이 매우 낮아 거의 처리가 이루어지지 않았으나, system A와 달리 system B의 인 처리효율은 평균 68.33%로 운전초기부터 6년 동안 일정한 수준으로 유지가 되는 것을 알 수 있었다. 본 연구진의 선행연구에 따르면 굴패각은 kg 당 833 mg 이상의 높은 인 흡착능을 보유한 것으로 제시되었으며(Lee *et al.*, 2003) 이로 인해 기존의 왕사만 충진된 system A보다 굴패각이 10% 혼합된 system B가 장기간 인을 안정적으로 처리할 수 있는 것으로 판단된다.

System A와 system B에서 BOD, COD, SS 및 T-N의 제거효율을 모니터링 기간내 조사한 결과 system A의 경우 각각 97.9±2.1, 84.4±8.1, 98.9±1.3 및 56.9±28.4 mg L^{-1}이

었으며, system B에서는 각각 97.4±2.1, 90.1±4.8, 99.2±0.7 및 58.8±13.1 mg L^{-1}으로 굴패각이 다른 오염물질의 처리효율에는 큰 영향을 미치지 않는 것으로 확인되었다.

굴패각이 인 처리효율에 미치는 영향 평가

인공습지 하수처리장에서 굴패각이 인 처리효율에 미치는 영향을 알아보기 위해 batch와 column실험을 통해 알려진 왕사 및 왕사 : 굴패각(9:1)의 이론적 여재 g 당 인 제거량(Lee *et al.*, 2003; Park *et al.*, 2017)과 본 실험의 g 당 인 제거량을 비교하여 인공습지의 수명을 평가하였다.

본 연구진의 선행연구인 batch 실험을 통한 왕사의 최대 인 흡착능(Lee *et al.*, 2003; Park *et al.*, 2017)을 고려하여 system A에서 인이 포화에 도달하는 예상시간은 202 day로 예측되었으나, 본 실험에서 실제 운영한 결과 인의 처리효율이 600 day부터 급격히 감소하였고, 인이 완전히 포화된 시간은 810 day로 이론적 포화와 실제 포화와는 4배 이상 차이가 나는 것으로 평가되었다.

Batch 실험을 통한 왕사와 굴패각 혼합여재의 최대 인 흡착능(Lee *et al.*, 2003; Park *et al.*, 2017)을 고려하여 system B에서 인이 포화에 도달하는 예상시간을 예측한 결과 864 day이었으나, 본 실험에서 운영 6년 후인 2,160 day가 지난 후에도 포화치에 도달하지 않고 계속하여 인이 처리되고 있는 것으로 확인되었다.

이러한 이론적 인 포화시기와 실제 인 포화시기와의 차이는 인공습지에서 인의 처리기작이 여재 이외에도 식물체 및 미생물 등에 의한 다양한 인 처리기작이 존재하기 때문으로 판단된다(Richardson, 1999; Kadlec and Wallace, 2009; Mitsch and Gosselink, 2007). 다시 말하면, 실험실에서 진행된 batch나 column실험에 의한 인의 흡착능 실험은 단순한 환경에서 여재의 흡착능만 조사되었지만, 실제 인공습지에서는 다양한 환경조건이 관여하기 때문에 이론적인 인 포화시기 보다 실제 인공습지에서 인이 포화에 도달하는 시기가 더 늘어나는 것으로 판단된다.

요 약

본 연구는 하수처리를 위한 VF-HF 조합형 인공습지에서 굴패각이 인공습지 수명에 미치는 영향을 조사하기 위해, 6년간 인공습지에서 총인의 농도 변화를 장기간 모니터링 한 후 이를 토대로 굴패각이 인공습지의 수명 연장에 미치는 영향을 종합적으로 평가하였다.

왕사만 사용한 system A에서 인이 실제 포화에 도달하는 시간은 최대 인 흡착능력에 기반한 이론적 포화치에 비해 4배 이상 긴 것으로 평가되었으며, 특히 인의 포화패턴은 운영 초기에는 일정농도 수준으로 유지되다가 흡착에서 파과점과 같은 지점을 통과하면서 서서히 포화가 진행되어가면서 최종적으로 포화에 도달하였다. 굴패각과 왕사를 혼합한 여재를 사용한 system B에서도 이론적 포화예상시간을 초과하여 안정적으로 인이 처리됨을 확인하였고, 굴패각의 첨가로 system A에 비해 인의 포화시기가 연장됨을 확인하였다. 이상의 결과를 미루어 볼 때 실제 인공습지 여재에 굴패각을 혼합하면 여재의 인 흡착량을 증가시켜 이론적인 포화치보다 인의 포화시기를 더 늘릴 수 있으며, 최종적으로 인공습지의 수명을 연장 시킬 수 있다고 판단된다. 또한 굴패각을 사용하는 것은 굴 양식장에서 발생하는 부산물인 굴패각을 재활용하는 것으로서 폐기물의 재활용 측면에서 환경오염을 줄이기 위한 방안으로도 활용될 수 있을 것이다.

Note

The authors declare no conflict of interest.

Acknowledgment

This work was supported by Gyeongnam National University of Science and Technology Grant 2017.

References

Diazo, A., Reddy, K. R. & Moore, P. A. (1994). Solubility of inorganic P in stream water as influenced by pH and Ca concentration. Water Research, 28(8), 1755-1763.

Greenway, M. & Woolley, A. (1999). Constructed wetlands in Queensland: performance efficiency and nutrient bioaccumulation. Ecological engineering, 12(1-2), 39-55.

Hawkins, W. B., John, H. R., Gillespie, W. B., Dunn, P. B., Dom, P. B. & Cano, M. L. (1997). Design and construction of wetlands for aqueous transfers and transformations of selected metals. Ecotoxicology and Environmental Safety, 36, 238-248.

Johansson, L. (1999). Industrial by-products and natural substrata as phosphorus sorbents. Environmental Technology, 20(3), 309-316.

Kadlec, R. H. & Wallace, S. (2009) Treatment Wetlands, 1-1020. 2nd ed. CRC Press. Broken Sound Parkway New York, USA.

Lee, H. J., Seo, D. C., Cho, J. S. & Heo, J. S. (2003). Screening of the optimum filter media in the constructed wetland systems through phosphorus adsorption capacities, Korean Journal of Environmental Agriculture, 22(2), 148-152.

Mann, R. A. (1997). Phosphorus adsorption and desorption characteristics of constructed wetland gravels and steelworks by-products. Soil Research, 35(2), 375-384.

Newbold, J. D., Elwood, J. W., O'Neill, R. V. & Sheldon, A. L. (1983). Phosphorus dynamics in a woodland stream ecosystem: a study of nutrient spiralling. Ecology, 64(5), 1249-1265.

Park, J. H., Kim, S. H., Delaune, R.D., Kang, B. H., Kang, S. W., Cho, J. S., Ok, Y. S. & Seo, D. C. (2016). Enhancement of phosphorus removal with near neutral pH utilizing steel and ferronickel slags for application of constructed wetlands. Ecological Engineering, 95, 612-621.

Reddy, K. R., Kadlec, R. H., Flaig, E. & Gale, P. M. (1999). Phosphorus retention in streams and wetlands: a review. Critical Reviews in Environmental Science and Technology, 29(1), 83-146.

Reddy, K. R. & Delaune, R. D. (2008). Biogeochemistry of wetlands: science and applications, CRC press, USA.

Richardson, C. J. & Craft, C. B. (1993). Effective phosphorus retention in wetlands: fact or fiction. Constructed Wetlands for Water Quality Improvement, 271-282.

Richardson, C. J. (1999). Phosphorus biogeochemistry in sub-tropical ecosystems, The role of wetlands in storage, release, and cycling of phosphorus on the landscape: a 25-year retrospective (eds. Reddy, K. R., o'Connor, G. A., Schelske, C. L.), pp. 47-68, Lewis Publishers, Boca Raton London New York Washington, D. C., USA.

Seo, D. C., Cho, J. S., Lee, H. J. & Heo, J. S. (2005). Phosphorus retention capacity of filter media for estimating the longevity of constructed wetland. Water Research, 39(11), 2445-2457.

Seo, D. C., Delaune, R. D., Park, W. Y., Lim, J. S., Seo, J. Y., Lee, D. J., Cho, J. S. & Heo, J. S. (2009). Evaluation of a hybrid constructed wetland for treating domestic sewage from individual housing units surrounding agricultural villages in south korea. Journal of Environmental Monitoring, 11(1), 134-144.

Seo, D. C., Park, J. H., Cheon, Y. S., Park, S. K., Kim, A. R., Lee, W. G. & Heo, J. S. (2010). Treatment efficiency of pollutants in constructed wetlands under different hydroponic wastewater injection methods and characteristic of filter media. Korean Journal of Environmental Agriculture, 29(2), 146-151.

Siedel, K. (1961). Zur problematik der keim-und pflanzengewasser. Verh. Internat. Verein. Limnology, 14, 1035-1039.

Tanner, C. C., Sukias, J. P. & Upsdell, M. P. (1998). Relationships between loading rates and pollutant removal during maturation of gravel-bed constructed wetlands. Journal of Environmental Quality, 27(2), 448-458.

Vymazal, J. (2007). Removal nutrients in various types of constructed wetlands. Science of Total Environment, 380(1-3), 48-65.