

하천고수부지 수질정화 자유수면인공습지의 초기운영단계 인제거

양홍모

전남대학교 조경학과

(2003년 11월 7일 접수, 2003년 11월 26일 수리)

Phosphorous Removal Rate of a Surface-Flow Treatment Wetland System Constructed on Floodplain During Its Initial Operating Stage

Hong-Mo Yang (Dept. of Landscape Architecture, College of Agriculture and Life Science, Chonnam National University, Kwangju 500-757, Korea)

ABSTRACT : Phosphorous removal rate and emergent plant growth were examined of a surface-flow constructed treatment wetland system, whose dimensions were 31 meter in length and 12 meter in width. The system was established on floodplain in the down reach of the Kwangju Stream in Korea in one and half months from May to June 2001. Cattails(*Typha angustiflora*) were transplanted in the system. They were dug out of natural wetlands and stems were cut at about 40 cm height from their bottom ends. Water of the Kwangju Stream were funneled into it via a pipe by gravity flow and its effluent were discharged back into it. The stems of cattails grew from 45.2 cm in July 2001 up to 186 cm in September 2001 and the number of cattail stems per square meter increased from 22 in July 2001 to 53 in September 2001. The early establishment of cattails was good. Volume and water quality of inflow and outflow were analyzed from July 2001 through December 2001. Inflow averaged 40 m³/day and hydraulic retention time was about 1.5 days. The concentration of total phosphorous in influent and effluent was 0.85 mg/L, 0.41 mg/L, respectively. The average removal rate of total phosphorous in the system was about 52%. The retention efficiency was slightly lower, compared with that in surface-flow wetlands operating in North America, whose retention efficiency was reported to be about 57%. The lower abatement rate could result from the initial stage of the system and inclusion of two cold months into the six-month monitoring period. Root rhizosphere in wetland soils and litter-soil layers on bottoms were not properly developed. Increase of standing density of cattails within a few years will establish both root zones and substrates beneficial to the removal of phosphorous, which may lead to increase of the phosphorous retention rate. The system was submerged one time by heavy storm during the monitoring period. The inundation, however, scarcely disturb its environment.

Key words: surface flow wetlands, total phosphorous, phosphate precipitation, adsorption, phosphorous retention rate.

서 론

자연정화(natural treatment)기법인 수질정화 자유수면습지는 1차처리수준으로 정화된 생활하수 등 점오염원을 정화하기 위해 활용되어 왔으며, 최근에는 오염하천수, 2차처리장 방류수, 강우유출수를 정화하기^{1,3)}위해서도 활용되고 있다. 오염정도가 상대적으로 낮은 오염하천수, 2차처리장방류수를 정화하는 인공습지는 대부분 유입수에 함유된 질소와 인을 정화하기 위해 조성한다. 자유수면습지는 수질정화 이외에 야생동물 서식처 제공, 비오톱 조성, 시민휴식 및 자연학습 공간 제공 등 부가적인 친환경적 기능^{4,6)}을 제공하는 장점이 있다.

*연락처:

Tel: +82-62-530-2101 Fax: +82-62-530-2109
E-mail: hmy@chonnam.ac.kr

수질정화 인공습지를 구조적 특징에 따라 자유수면습지(surface flow wetlands)와 여과습지(subsurface flow wetlands)로 대별한다^{2,9)}. 자유수면습지는 제방으로 습지를 구획하고, 습지바닥에 정수식물을 심으며, 수심을 약 0.2~0.3 m 정도로 유지시킨다. 최근에는 유입수의 흐름을 원활히 하고, 질소 제거율을 높이고, 야생동물의 서식처를 제공하기 위해 정수식물이 성장하지 않는 개수부를 습지내부에 조성하는 추세이다.

최근 자연형 하천정비나 오염하천 정비사업을 추진할 때 습지를 조성하여 오염하천수를 자연생태적으로 정화하면서, 하천습지를 복원하고 비오톱을 조성할 수 있으며, 생물 서식공간을 제공하고 하천경관을 개선할 수 있는 기법에 관심이 높아가고 있다. 하천수질 개선의 측면에서 오염하천수를 정화하는 인공습지는 하천의 제방 밖에 조성하는 방법과 하천의 고수부지에 조성하는 방법이 있다. 국내의 경우 오염하천 주변의 토지는 대부분 주거지가 형성되어 있거나, 기존 토지가

용으로 인하여 수질정화 인공습지를 조성할 부지를 제방 밖에 확보하기가 매우 어려운 실정이다. 따라서 하천 고수부지에 수질정화 인공습지를 조성하여 오염하천수를 정화하는 기법에 관한 연구가 필요한 실정이다. 본 연구는 하천고수부지를 활용하여 오염하천수를 정화하여 하천수질을 개선할 수 있는 자유수면습지의 모델개발과 설계인자 도출을 위해 고수부지에 조성한 자유수면습지의 초기운영단계 인계거를 연구하는데 목적이 있다.

재료 및 방법

시스템 구조

2001년 6월 실험 수행을 위한 자유수면습지 시스템을 광주광역시를 흐르는 광주천 하류의 고수부지에 시공하였다. 광주천 수중보에서 광주천의 물이 자연유하로 시스템에 유입되도록 설계하였다. Fig. 1은 실험 수질정화 자유수면습지 시스템의 평면 및 단면 개념도이다. 시스템의 습지부분은 길이 31 m, 폭 12 m로 면적이 약 370 m² 규모이며, 시스템 중앙에 면적 약 30 m², 습지바닥으로부터 수심 약 1 m의 개수부를 설치하였다. 개수부는 정수식물이 자랄 수 없는 수심이며, 유입수의 단기이동을 완화하여 시스템의 처리효율을 높이는 역할을 하도록 설계하였다. 시스템의 바닥은 황토다짐을 한 후 방수비닐을 깔고, 그 위에 다시 황토다짐을 한 후 고수부지 토양으로 복토하여 유입수의 침투를 방지하고 식재한 정수식물의 성장이 원활하도록 조성하였다. 정수식물은 자생 부들(*Typha angustifolia*)을 채취하여 근부로부터 약 40 cm 상단을 절단한 후 약 30 cm간격으로 6월말에 개수부를 제외한 시스

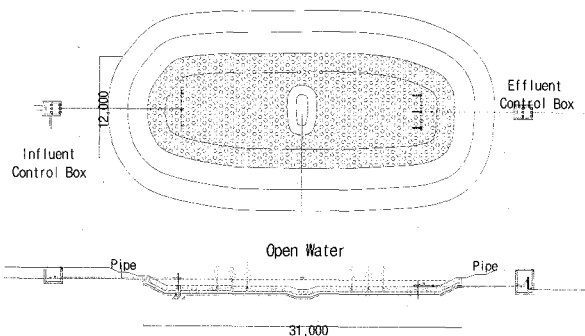


Fig. 1. Schematic plan and section of the surface-flow treatment wetland system constructed on floodplain in the down reach of the Kwangju Stream.

Table 1. Growth of Cattail(*Typha angustifolia*)

Plant Species	2001. 7. 10.		2001. 9. 8.		2001. 11. 8.		Relative increase b-a		Relative increase c-a	
	(a)		(b)		(c)		b-a		c-a	
	Height (cm)	Stem (No./m ²)	Height (cm)	Stem (No./m ²)	Height (cm)	Stem (No./m ²)	Height (cm)	Stem (No./m ²)	Height (cm)	Stem (No./m ²)
<i>Typha angustifolia</i>	45.2	22	168	52	186	53	128.8 (272%)	30 (136%)	140.8 (312%)	31 (139%)

(%): increase rate.

템의 바닥에 식재하였다. 시스템 유입부에 유량조절 밸브를 설치하여 시스템으로 유입되는 유량을 조절할 수 있으며, 유출부에는 수위를 조절할 수 있는 장치를 설치하여 시스템의 수심을 조절할 수 있도록 설계하였다. 시스템의 유입부와 유출부는 확산유입과 확산유출을 유도하기 위해 3개의 밸브를 각각 설치하였으며, 시스템 처리수는 광주천으로 유출되도록 설계하였다. 시스템의 사면은 안전을 고려하여 소단을 조성하고 경사는 1 : 2로 조성하고, 야자섬유망 덮기와 줄폐심기로 사면을 보호하였다.

처리수준 및 식생생장 분석

시공을 한 후 2001년 7월부터 12월까지 6개월 동안 시스템의 유입수와 유출수를 7~10일에 한번씩 조사 분석하였으며, 조사항목은 월평균 값으로 나타냈다. 수질조사 항목은 수온, pH, TP 등을 분석하였다. 수온과 pH는 현장에서 Scott pH-Meter(CG 347)로 측정하였으며, TP분석은 수질 오염공정 시험방법¹⁰⁾을 기준으로 아르코빈산환원법을 활용하여 분석하였다. 식물생장 조사는 1 m × 1 m 격자 틀을 이용하여 분지수와 초장을 측정하였다. 조사지점은 시스템의 유입부, 중앙부, 유출부에서 각각 3군데씩 조사하였다. 분지수는 격자틀 내의 전수를 3반복 조사하였으며, 평균초장은 격자틀 내에 10개의 식물체를 3반복으로 30개체를 측정하여 평균값으로 나타냈다.

결과 및 고찰

시스템 적응

조사기간 시스템의 하루 평균 유입유량과 처리유량은 각각 40 m³/day, 38.5 m³/day였다. 시스템의 수심을 0.25 m로 유지하여 시스템의 평균 체류시간은 약 1.5 day였다. Table 1은 조사시기별 부들의 평균본수와 평균초장을 나타낸다. 2001년 6월 식재 후, 2001년 7월 10일에 본수가 22개, 초장이 45.2 cm였다. 2001년 9월 8일의 본수는 52개, 초장은 168 cm로 7월 10일의 조사와 비교하면 본수는 30개가 증가하여 136%의 증가를 보였고, 초장은 128.8 cm가 증가하여 272%의 증가율을 보였다. 2001년 11월 8일에는 본수가 53개, 초장이 186 cm를 나타냈으며, 7월 10일의 조사와 비교하면 본수는 31개가 증가하여 139%의 증가를 보였고, 초장은 140.8 cm가 증가하여 312%의 증가율을 보였다. 부들의 초기운영단계 성장이 양호한 수준이었다.

시스템 인 처리수준

Fig. 2는 유입수와 유출수의 월평균 수온을 나타낸다. 조사 기간 유입수와 유출수의 평균수온은 각각 17.7, 18.9℃를 나타냈다. 유출수의 수온이 유입수보다 약 1.1℃ 높게 나타났다. 유출수의 수온이 유입수보다 높게 나타난 원인은 시공 후 초기단계로 부들이 시스템에 그들을 충분히 제공하지 못하여 수면에 햇빛이 쬐여 수온이 상승한데 원인이 있다고 생각된다. 7월, 8월, 9월, 10월의 유출수 월평균수온은 각각 25.8, 25.9, 24.1, 18.5℃를 나타냈으며, 11월과 12월의 유출수 월평균 수온은 급격히 낮아져 각각 12.6, 5.3℃를 나타냈다.

Fig. 3은 유입수와 유출수의 월평균 pH를 나타낸다. 조사 기간 유입수와 유출수의 평균 pH는 각각 7.10, 7.08을 나타냈다. 시스템 운영초기인 7월과 8월에는 유출수의 pH가 다소 낮게 나타났으며, 9월과 10월에는 유출수의 월평균 pH가 유입수보다 높게 나타났다. 11월과 12월의 유입수와 유출수의 pH는 유사하게 나타났다. 9월과 10월에 유출수의 pH가 다소 높게 나타난 원인은 시스템에 녹조(algae)가 성장한데 원인이 있는 것으로 사료된다. 9월과 10월에 시스템의 일부에 녹조가 성장하였다. 수중에 녹조가 성장하면 pH가 상승하게 된다¹¹⁾.

Fig. 4는 실험기간 유입수와 유출수의 월평균 TP 농도를 나타낸다. 실험 6개월 동안 유입수와 유출수의 평균 TP 농도는 각각 0.85, 0.41 mg/L로 나타났으며, TP 평균처리율은 약 52%를 나타냈다. 시공직후 초기운영단계로 식재한 부들이 충분히 성장하지 못한 상태였고, 기온이 낮은 11월과 12월이 조사기간에 포함된 점을 고려하면 TP 처리율은 양호한 편이라고 생각된다. 7, 8, 9월의 월평균 TP 처리율은 각각 58, 51,

52%를 나타냈으며, 10, 11, 12월의 월평균 TP 처리율은 각각 49, 48, 50%를 나타냈다. 10~12월의 월평균 TP 처리율이 다소 낮게 나타났다. 북미에서 운영중인 자유수면 인공습지의 평균 TP 처리율은 약 57%이다¹²⁾. 미국 알카타 자유수면습지의 경우 유입수와 유출수의 인농도는 각각 1.5, 0.2 mg/L로 인제거율이 87%를 보이고 있다¹³⁾.

인(phosphorus)은 자연상태의 물에 다양한 인산염(phosphates)의 형태로 존재한다. 수질분석에서 총인(total phosphorous)은 오르도 인산염(orthophosphates, PO₄-P), 축합다중 인산염(condensed (pyro-, meta-, and poly-) phosphates), 유기적으로 결합된 인산염(biologically bound phosphates)을 합한 개념이다. 수질정화 자유수면습지에서 유입수에 함유된 인은 물리화학적 분리(separation)와 화학적 변형(transformation)으로 제거된다. 입자성 인산염은 습지바닥으로 침전되거나, 정수식물 줄기 사이에 고정되거나(entrap), 정수식물 줄기에 미생물과 부착조류가 붙어 형성된 유기막(biofilm)에 흡착되어 제거된다. 용해 인산염은 다양한 인산염의 형태로 침강되며¹⁴⁾, 인산염에 의한 침강이 습지의 인 제거에서 중요한 역할을 한다¹⁵⁾. 습지 물기둥과 습지바닥의 토양 침전층 공극의 물에 존재하는 용해 인산염은 철, 칼슘, 알루미늄 등과 결합하여 불용해성 인산염으로 전환되어 침강한다. 공극의 용해 인산염은 토양입자와 침전층의 잔재물과 유기쇄설물에 흡착되어 제거되기도 한다.

용해성 유기 인산염, 불용성 무기 및 유기 인산염은 용해 인산염의 형태로 변형된다. 이런 변형은 물 속의 부유 미생물, 정수식물의 줄기표면과 습지바닥의 잔재물표면에 형성된 유기막의 미생물에 의해 주로 일어난다. 미생물의 활동성은 온도가 내려가면 낮아진다. 박테리아, 녹조, 부유식물(개구리밥)은 용해 인산염을 빠른 속도로 흡수하지만, 이들이 죽어 분해되면 흡수된 인의 90% 이상이 다시 물로 되돌아온다¹⁶⁾. 용해 인산염의 일부는 정수식물의 뿌리에 의해 흡수되며, 정수식물이 흡수하는 인의 양은 1.8~18 g P/m²/year 범위로 낮은 수준이다¹⁷⁾. 정수식물이 인을 흡수하는 기간은 인 저장고 역할을 한다. 정수식물은 인을 느린 속도로 흡수하며, 정수식물이 흡수한 인이 식물이 죽은 후 분해되어 다시 수중으로 되돌아오는 데는 수개월 혹은 수년의 장기간이 소요된다. 습지바닥에 식물 잔재물층이 지속적으로 새로 형성되면 인의 저장은 어느

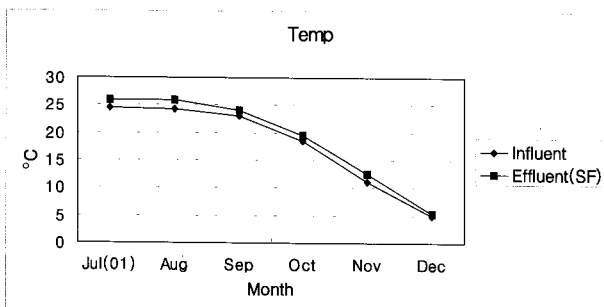


Fig. 2. Monthly average temperature of influent and effluent.

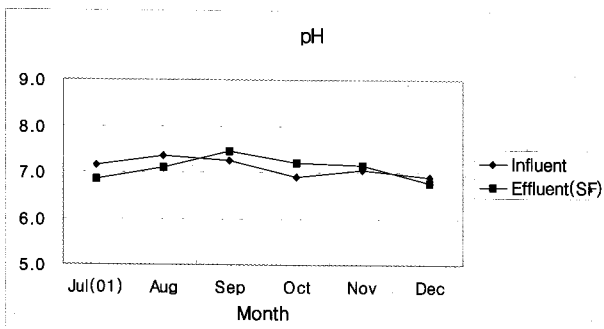


Fig. 3. Monthly average pH of influent and effluent.

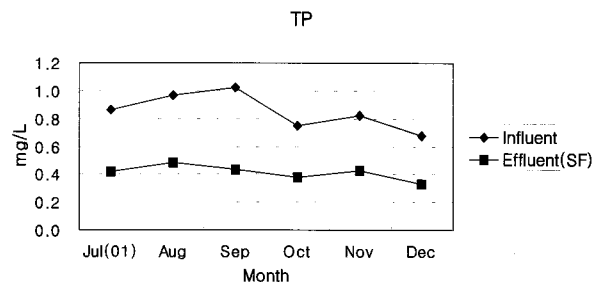


Fig. 4. Monthly average total phosphorous concentration in influent and effluent.

정도 가능하다. Fig. 4에서 10~12월의 TP 처리율이 7~9월의 TP 처리율보다 낮은 원인은 10~12월에 시스템의 수온이 낮아져 인의 분해에 작용하는 미생물 활동이 낮아지고, 정수식물에 의한 인의 흡수가 거의 일어나지 않는 데 원인이 있는 것으로 생각된다.

습지바닥의 토양-침전층의 환원력이 증가하면 칼슘, 철, 알루미늄 등과 결합하여 침강된 인산염이 다시 용출될 수 있으며, 금속이온과 결합된 인산염은 침전-토양층이 미생물의 작용으로 pH가 낮아지면 용출될 수도 있다. 장기적 관점에서 습지에서 인은 침전-토양층에 상당히 많은 양이 저장될 수 있다. 자유수면습지의 초기운영단계는 유입수의 인이 토양-침전층에 침강되어 높은 제거율을 보인다. Fig. 4에서 실험 자유수면습지도 운영초기의 인제거율이 높게 나타났다. 습지의 운영기간이 길어지면 토양-침전층의 인 저장능력이 작아져 인의 제거율이 낮아지는 경우도 있다.

결론

조사기간 홍수로 실험 시스템이 1회 물 속에 잠겼으나, 시스템의 사면이 유실되고 부들이 도복되거나 줄기가 휘는 현상은 나타나지 않았다. 시스템의 운영에는 거의 영향을 미치지 않았으며, 시스템의 사면일부에 매우 적은 양의 세립토가 퇴적되었다. 식재한 부들의 성장조사결과 부들의 초기활착과 성장이 비교적 양호하였다. 조사기간 처리수의 평균수온은 18.9℃이었고, 평균 pH는 7.08이었다. 시스템의 유입수와 유출수의 평균 TP 농도는 각각 0.85, 0.41 mg/L이었으며, TP 평균처리율은 약 52%를 나타냈다. 시스템이 초기운영단계로 부들이 충분히 성장하지 못하고, 기온이 낮은 11월과 12월이 조사기간에 포함된 점을 고려하면 TP 처리율은 비교적 양호하였다. 유입수에 함유된 인산염이 금속이온과 결합하여 습지바닥으로 침강되고, 토양에 인산염이 흡착되어 유입수의 인이 주로 제거된 것으로 사료되며, 유입부와 유출부의 확산유입과 확산유출 구조로 유입수의 흐름이 정상적으로 운영된 것이 TP 처리율에 기여한 것으로 사료된다. 2~3년 후 부들이 정상적으로 성장하여 수중의 줄기와 땅속의 뿌리가 발달하고, 습지바닥에 유기물층이 발달하면 시스템의 TP 처리율은 높아질 것으로 예측된다. 실험결과 고수부지를 활용한 수질정화 자유수면습지는 오염하천수에 함유된 인을 줄일 수 있는 좋은 방안이 될 수 있어, 하천수질개선에 도움을 줄 것으로 사료된다.

참고 문헌

- Green, M. B. and Martin, J. R. (1996) Constructed reed beds clean up storm overflows on small wastewater treatment works, *Wat. Environ. Res.* 68, 1054-1060.
- Higgins, M. J., Rock, C. A., Bouchard, R. and Wengrezynek, B. (1993) Controlling agricultural runoff by use of constructed wetlands. In: Moshiri, G. A. (Ed.), *Constructed Wetlands for Water Quality Improvement*, Lewis Publishers, Boca Raton, FL, p.359-367.
- EPA. (2000) Manual: Constructed wetlands treatment of municipal wastewaters, Office of Research and Development, Cincinnati, Ohio, p.1-9.
- Kadlec, R. H. and Knight, R. L. (1996) *Treatment Wetlands*, CRC Press, Inc, Boca Raton, p.673-676.
- Moshiri, G. A. (Ed.) (1993) *Constructed wetlands for water quality improvement* Lewis, Boca Raton, FL.
- Yang, H. M. (2002) Preliminary nitrogen removal rates in close-to-nature constructed stream water treatment wetland, *Korean J. Environ. Agri.* 21(4), 269-273.
- Corbitt, R. A. and Bowen P. T. (1994) Constructed wetlands for wastewater treatment, in *Applied Wetlands science and technology*, Kent, D. M. (ed.), Publishers Lewis, p.221-241.
- Yang, H. (1999) Constructed wetlands and pond-wetland systems of ecological treatment of point and non-point source pollutants for water quality improvement of lakes and rivers, *Magazine of Korea Water Resources Association* 32(5), 111-113.
- Yang, H. (2002) Nitrate removal rate in cattail wetland cells of a pond-wetland system for stream water treatment, *J. Korean Env. Res. & Reveg. Tech.* 5(6), 24-29.
- Korean Ministry of Environment (2000) Standard method for wastewater analysis
- Yang, H. (1992) Ecological design of estuarine environment for a sustainable urban ecosystem, Ph.D. Dissertation, University of California Berkeley, p.123-125.
- Kadlec, R. H. and Knight, R. L. (1996) *Treatment wetlands*, CRC Press, Inc, Boca Raton, p.727-731.
- Gearheart, R. A. (1993) Phosphorous removal in constructed wetlands, Paper No. AC93-023-001, Presented at the 66th Annual WEFTEC Meeting, Anaheim, CA.
- Faulker, S. P. and Richardson, C. J. (1989) Physical and chemical characteristics of freshwater wetland soils in Hammer, D. A.(ed.) *constructed wetlands for wastewater treatment: Municipal, Industrial and Agricultural*, Lewis Publishers, Inc., Chelsea, Michigan, p.41-72.
- Pant, H. K., Reddy, K. R. and Lemon, E. (2001) Phosphorous retention capacity of root bed media of sub-surface flow constructed wetlands, *Ecological Eng.* 17, 345-355.
- Kadlec, R. H. and Knight, R. L. (1996) *Treatment wetlands*, CRC Press, Inc, Boca Raton, p.449-451.
- EPA. (2000) Manual: Constructed wetlands treatment of municipal wastewaters, Office of Research and Development, Cincinnati, Ohio, p.30-48.