

고수부지활용 수질정화 자유수면 인공습지의 초기처리수준

양 홍 모

전남대학교 조경학과

(2001년 10월 29일 접수, 2001년 12월 7일 수리)

Treatment Efficiency of a Surface-Flow Wetland System Constructed on Floodplain

Hong-Mo Yang (Dept. of Landscape Architecture, Chonnam National University, Kwangju 500-757, Korea)

Abstract : This paper presents treatment efficiency and plant growth of a surface-flow constructed wetland system (30 meter in length and 10 meter in width) over one year after its establishment on a floodplain of a stream. Cattails (*Typha angustiflora*) grown on pots were transplanted on one half of its area from inlets and reeds (*Phragmites australis*) on another half from an outlet. Effluent discharged from a secondary-level treatment plant was funneled into the system. The stems of cattails and reeds emerging in April 2001 grew up to 165.9 cm and 95.3 cm, respectively until July 2001. The number of stems of cattails and reeds in July 2001 increased by 65% and 100%, respectively, compared with that just after their planting. The growth of cattails was better than that of reeds during study period. The removal rates for SS, BOD₅, T-N and T-P was 33%, 43%, 31%, and 51%, respectively. The system was inundated seven times by storms over the monitoring period, which disturbed its environment and led to its lower treatment rates. The increase of SS concentration in effluent after inundation of the system was attributed to the falls of soil particles onto its water surface, which had been attached to the emergent plants by floods. Purification rates for T-N were relatively low for the period of late fall through winter until early spring due to lower water temperature which may have retarded microbial nitrification and denitrification mechanisms. Reduction in T-P concentration during fall and winter was relatively higher than that during summer and spring, which may have resulted from no system perturbations by floods and heavy storms during fall and winter.

Key Words: constructed wetlands, surface flow wetlands, nitrification, denitrification, adsorption

서 론

1960년대 이후 서구 선진국을 중심으로 인공습지 (constructed wetlands)를 이용하여 수질을 정화하는 기술을 개발해오고 있다. 인공습지는 생활하수¹⁾, 산업폐수²⁾, 축산폐수³⁾ 등 점오염원 뿐만 아니라 강우유출수^{4,5)} 등 비점오염원을 정화하기 위해 사용하고 있다. 자연생태적으로 수질을 정화하는 인공습지는 수질정화는 물론 정화된 물의 재활용이 가능한 장점이 있다.

최근에는 자연형 하천정비나 오염하천 정비사업을 추진할 때 습지를 조성하여 하천으로 유입되는 미처리 점원 오염물 혹은 오염된 하천수를 정화하면서 훼손된 습지를 복원하고 비오톱 (bio-top)을 조성하는 방안이 관심이 높아지고 있다. 하천유입 미처리 오염물이나 오염 하천수를 정화하는 습지는 하천의 제방 밖에 조성하는 방법과 하천의 고수부지에 조성하는 방법이 있다. 국내의

경우 오염하천은 도시를 흐르는 하천이거나 하천주변에 주거지가 형성된 경우가 대부분이어서, 제방 밖에 수질정화 습지를 조성할 부지확보가 어려운 실정이다. 따라서 고수부지를 활용한 친환경적 수질정화 습지를 조성하는 방법의 연구가 필요하다.

인공습지를 수리적 특성 (hydraulic characteristics)과 사용한 재질 (media)에 따라 자유수면습지 (surface flow wetlands)와 여과습지 (subsurface flow wetlands)로 대별한다^{6,8)}. 자유수면습지는 식물이 식재된 토양 위로 유입수가 흐르면서 정화되며, 여과습지는 유입수가 자갈 (혹은 모래)과 식물 (갈대 등)뿌리 사이를 흐르면서 정화된다. 자유수면습지의 식물은 성장에 필요한 양분을 일차적으로 식물이 식재된 토양에서 흡수하며, 여과습지의 식물은 성장에 필요한 양분을 대부분 유입수에서 흡수하기 때문에 유입수 오염농도가 식물성장에 지장이 없을 정도여야 한다.

여과습지 시스템은 표면으로 유입수가 흐르지 않아 냄새, 해충발생, 사람에게 오염물 접촉의 기회가 낮아 생활하수, 산업폐수, 축산폐수의 정화에 상대적으로 많이 이용되고 있다. 유입수의 오염농도가 생활하수 정도로 높을 경우 천치리를 한 후에 여과습지

연락처:

Tel: +82-62-530-2101 Fax: +82-62-530-2109

E-mail: hmy@chonnam.ac.kr

에 유입시켜 처리한다. 자유수면습지는 공사비용이 여과습지에 비해 저렴하고 수리조작이 용이하여, 오염된 하천수 및 호수수의 정화, 강우유출수의 정화에 활용되고 있다. 그리고 점오염원(생활하수, 산업폐수, 축산폐수)을 2차처리수준으로 처리하는 하수처리장이나 연못시스템의 방류수를 3차처리수준으로 정화하기 위해 일반적으로 자유수면습지를 활용하고 있다. 이 경우 방류수의 질소와 인 정화가 자유수면습지 조성의 일차적 목적이 된다.

자유수면습지는 수질정화 이외에 다양한 친환경적 기능을 제공할 수 있다. 습지의 제방에 산책로와 휴게공간을 조성하여 시민들이 산책과 휴식을 할 수 있도록 하며, 야생동물 보호공간 및 서식처를 제공할 수 있도록 습지 내에 개수부(open water)나 소규모 섬(islands)을 설계하고 있다. 습지 내부에 관찰 테크(deck)를 설치하여 학술조사는 물론 시민들이 습지 관찰 및 자연학습을 할 수 있도록 조성하고 있다. 이런 친환경적 기능들은 수질정화 습지를 생태공원의 개념으로 조성할 수 있어 수질정화 습지의 사회적 가치를 높이는 역할을 하고 있다.

본 연구는 하천으로 유입되는 하수처리장 방류수와 하수월류수를 정화하기 위해 고수부지에 조성된 자유수면습지의 초기적용과 초기처리수준을 연구하는데 목적이 있다.

재료 및 방법

시스템 구조

자유수면 시스템은 유입수가 저류하는 장소(basin), 유입수의 침출을 막는 제방(berm), 유입수가 흐르는 수로(channel)로 이루어지며, 정수식물이 자라는 수심 0.2~0.6 m의 식재구간(closed water)과 수심이 다소 깊어 정수식물이 자라지 않는 1~1.2 m 개방구간(open water)으로 설계한다. 본 연구의 자유수면습지 시스템은 서울특별시 우면동 양재천 고수부지에 2000년 6월에 설치하였다.

시스템이 설치된 고수부지 우측 제방의 중간높이에 설치되어 있는 하수관거로부터 고수부지 도랑으로 소량의 하수가 월류하고 있으며 도랑에는 일정한 수위로 하수가 고여있다. 2000년 6월 시공 직후 시스템의 유입수는 하수월류수가 고여있는 도랑의 물과 양재천 저수로를 흐르는 물이었으나, 2000년 11월부터 한국교원단체총연합회관 하수처리장의 방류수를 시스템 유입부의 도랑으로 방류시키는 파이프를 시공한 후에는 교총회관 하수처리장 방류수와 도랑으로 유입되는 하수월류수가 혼합되어 시스템으로 유입되고 있다. 하수처리장 방류수가 유입수의 대부분을 차지하고 있다. 유입부에 밸브(valve)를 설치하여 유입량을 조절할 수 있으며, 유출부에 유량통계 파이프를 설치하여 유출량을 조절할 수 있다.

Fig. 1은 연구 시스템의 평면 및 단면 개념도이다. 시스템은 길이 30 m, 폭 7 m이며, 시스템의 바닥은 고수부지로부터 1.2 m 깊이에 설계하였으며, 시스템 바닥으로부터 0.7 m 높이의 수면은 저수로의 평수위와 일치하도록 설계하였다. 갈수기와 홍수기의 저수로 및 도랑의 수위에 따라 시스템의 수심이 변하게 된다. 시

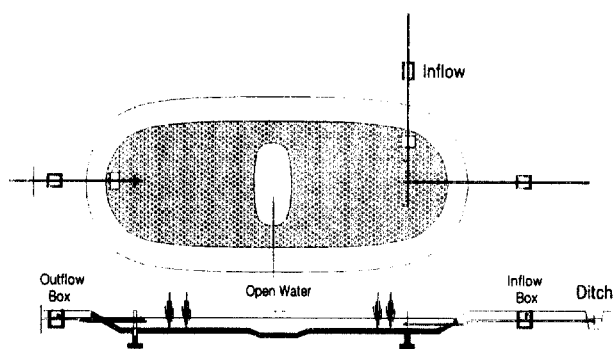


Fig. 1. Schematic plan and section of the surface wetland system constructed on a flood plain.

스템의 수심은 0.3~0.5 m로 조절이 가능하도록 설계하였다. 수심이 0.3 m 일 경우 습지의 체적이 40 m³가 된다. 습지의 평균 유입유량을 20~25 m³/일로 조절하여 유입수의 체류시간이 1.5~2 일이 되도록 설계하였다. 고수부지 폭을 고려하여 사면의 기울기는 1:2로 하였으며 야자섬유망을 시공하여 홍수시 사면 유실을 방지하였다. 홍수시 토사의 퇴적을 고려하여 0.1~0.2 m의 여유깊이를 두었으며 시스템 유입부의 수위와 시스템 최종 유출부의 수위차이가 0.4 m를 유지할 수 있도록 최종유출 지점을 시스템으로부터 약 100 m 아래 쪽 저수로에 설치하였다. 시스템의 중앙부에 수심 1 m를 유지할 수 있는 개수부를 설치하여, 시스템의 질산화작용을 촉진하여 T-N 제거효율을 높이고 생물서식공간을 제공할 수 있도록 설계하였다.

시스템 식재

포트에 재배한 2년생 갈대(*Phragmites australis*)와 부들(*Typha angustifolia*)을 습지 1 m²당 약 9~12포트씩 식재하였다. 개수부로부터 유입부는 갈대를 식재하였으며, 개수부로부터 유출부는 부들을 식재하였다.

시스템의 초기처리수준 분석

2000년 7월 5일부터 2001년 7월 15일까지 약 1년간 시스템 유입수와 유출수를 1~2주에 한번 씩 조사하였다. 수질 샘플은 1회용 무균 플라스틱 채수병에 넣은 후 아이스 박스에 저장하여 운반하였으며 운반 당일 분석에 들어가지 못한 경우는 4℃ 냉장고에 보관한 후 다음날 분석하였다. 수질조사 항목은 수온, BOD₅, SS, T-N, T-P 등을 분석하였다. 수온과 pH는 현장에서 Scott pH-Meter (CG 347)로 측정하였으며, 수질분석은 수질 오염공정시험방법¹⁶⁾을 기준으로 SS는 유리섬유지법, BOD₅는 윙클러-아지드화나트륨변법, T-N은 흡광광도법, T-P는 흡광광도법(아스코르빈산 환원법)을 사용하였다. 분석장비들은 이들 분석방법에서 제시한 분석기기들을 사용하였다.

결과 및 고찰

초기적응 및 식물성장

시공 후 2000년 7월 5일부터 2001년 7월 15일 사이 홍수로 시스템이 설치된 고수부지가 7회 수심 40~80 cm로 잠기면서 시스템도 물에 잠겼으나 시스템의 사면에는 큰 영향이 없었다. 갈대 및 부들에도 피해가 적었으며, 적은 양의 토사가 시스템 내에 쌓였다.

갈대와 부들의 초기생육을 1 m²격자 틀을 이용하여 본수와 초장을 측정하였다. 본수는 격자를 내의 전수를 3반복 조사하였으며, 평균초장은 격자를 내에 10개체의 식물체를 3반복으로 30개체를 측정하여 평균한 값이다. Table 1은 갈대와 부들의 조사시기별 본수와 초장을 나타낸다. 갈대는 2000년 6월 식재 직후 본수는 21개, 평균초장은 35.4 cm였다. 2000년 겨울에 일과 줄기가 죽은 후 2001년 4월 중순부터 새줄기가 나오기 시작하였다. 2001년 5월 8일 새로 나온 줄기의 본수와 초장을 조사하였으며, 2001년 7월 8일 조사에서는 봄에 나왔던 줄기와 2001년 5월 8일 이후 새로 자란 줄기로 구분하여 조사하였다.

2001년 5월 8일의 갈대 본수는 36개로 식재 직후 본수 21개와 비교하여 약 61% 증가하였다. 2001년 7월 8일의 생육조사 결과 봄에 나와서 자란 줄기는 초장이 95.3 cm로 5월의 평균초장 62.8 cm보다 32.5 cm가 성장하였고, 새줄기는 8개가 나왔으며 새줄기의 평균초장은 57.5 cm였다. 7월의 본수는 5월보다 약 22% 증가하였다. 전반적으로 갈대의 초기 성장이 다소 낮은 경향을 보이고 있다. 봄에 새 줄기가 나올 무렵 습지수심이 약 35 cm로 다소 깊고, 습지토양이 갈대성장에 양호한 조건이 아닌 것으로 사료된다.

2001년 5월 8일의 부들의 본수는 28개로 식재 직후 본수 20개와 비교하여 약 40% 증가하였다. 2001년 7월 8일의 생육조사에서 봄에 나와서 자란 줄기는 평균초장이 165.9 cm로 5월의 평균초장

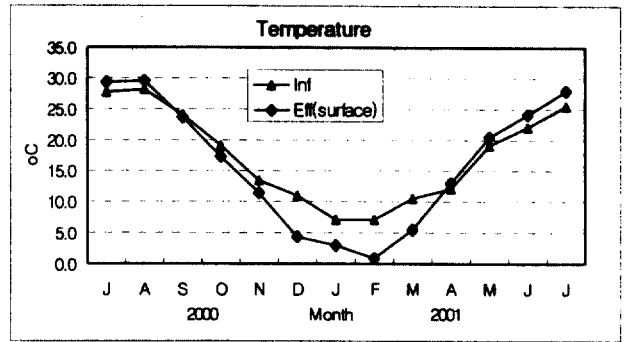


Fig. 2. Monthly average temperature of influent and effluent.

60.5 cm보다 105.4 cm가 성장하여 174%의 증가를 보이고 있다. 새줄기는 5개가 나왔으며 새줄기의 평균초장은 87.5 cm이었다. 7월의 본수는 5월보다 약 18% 증가하였다. 부들의 초기 성장은 양호한 경향을 보이고 있다. 이는 습지의 수심과 토양이 부들의 성장에 적합한 것으로 사료된다.

2000년 겨울에 습지의 표면이 결빙되었다. 기온 영하 10~15°C에서 시스템의 표면에 약 2~3 cm 두께의 얼음이 얼었다. 교총회관 방류수의 평균수온이 약 10°C를 유지하고, 도랑에 설치된 취수부가 수심 30 cm 깊이에 위치하고 있어 취수부가 얼지 않았다. 겨울철에 습지 수심을 50 cm 정도로 유지시켜 습지 표면이 결빙하여도 물 속의 유입파이프와 유출파이프는 결빙하지 않아 유입수와 유출수의 흐름에는 지장이 없었다.

초기처리수준

Fig. 2는 유입수 및 유출수의 수온을 나타낸다. 유입수의 온도는 겨울철에 6~7°C를 유지하였으며 유출수는 1°C까지 내려갔다. Fig. 3~Fig. 6은 시스템 유입수와 유출수의 월평균 SS, BOD₅, T-N, T-P 농도를 나타낸다.

Table 1. Growth of *Phragmites australis* and *Typha angustifolia*

Plant Species	2000.7.10. (a)		2001.5.8 (b)		2001.7.8 (c)		Relative increase c-b		Relative increase c-a		
	Height (cm)	No./m ²	Height (cm)	No./m ²	Height (cm)	No./m ²	Height (cm)	No./m ²	Height (cm)	No./m ²	
<i>Phragmites australis</i>	Stems	35.4	21	62.8	36	95.3	36	32.5 (61%)	0	59.9 (169%)	15 (71%)
	New stems ¹⁾					57.5	8				
	Subtotal		21			42					21 (100)
<i>Typha angustifolia</i>	Stems	36.5	20	60.5	28	165.9	28	105.4 (174%)	0	129.4 (354%)	5 (25%)
	New stems ²⁾					87.5	5				
	Subtotal		20			33					13 (65%)

^{1), 2)} : New stems emerging after May 8, 2001.

(): increasing rate.

Table 2 Treatment efficiency of surface flow wetland systems in North America and Japan

System	Inf	Area (ha)	DT (day)	Inflow (m ³ /d)	HLR (cm/d)	BOD In (mg/L)	BOD Out (mg/L)	SS In (mg/L)	SS Out (mg/L)	T-N In (mg/L)	T-N Out (mg/L)	T-P In (mg/L)	T-P Out (mg/L)
Olentangy Wetlands (OH, USA)	R	1.0	1-1.5	1,000	3.8					4.6	2.5 (46%)	0.2	0.09 (55%)
Des Plaines (IL, USA)	R	10.13	7-10	4,635	4.6			60.1	5.2 (91%)	2.73	1.34 (51%)	0.10	0.02 (80%)
Sannogawa (Japan)	R	0.6	0.2	2,500	0.2					3.4	2.3 (32%)	0.23	0.14 (39%)
Senegawa (Japan)	R	3.8	0.2	18,240	0.2			21.3	15.4 (28%)	2.82	2.35 (17%)	0.185	0.147 (21%)
Cobalt (Ontario, Canada)	M	0.09	5	49	1.8	20.7	4.6 (78%)	36.2	28.0 (23%)	6.98	3.38 (52%)	1.68	0.77 (54%)

R: River water, M: Effluent from wastewater treatment plant, Inf: Influent, DT: Detention Time, HRT: Hydraulic loading rate, (%): Treatment efficiency.

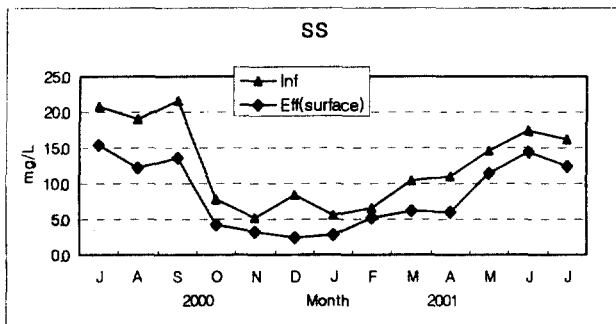


Fig. 3. Monthly average SS concentration of influent and effluent.

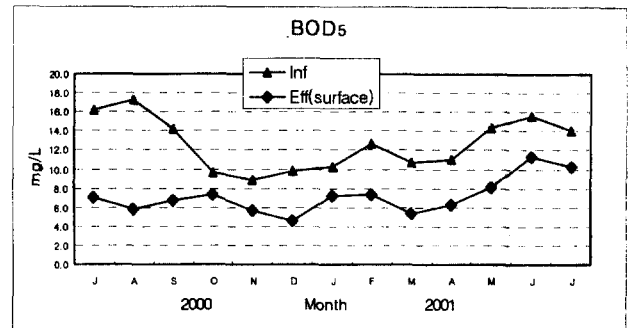


Fig. 4. Monthly average BOD₅ concentration of influent and effluent.

인공습지의 수질정화는 수많은 물리적, 생물화학적 인자들의 작용으로 이루어진다. 수질정화 인공습지의 설계에서 이들 인자의 작용을 모두 고려하는 것은 불가능하며, 일반적으로 고려하는 중요한 인자는 면적, 수심, 온도, 공극률 (porosity), 체류시간 (hydraulic detention time), 수리적 부하율 (hydraulic loading rate), BOD · T-N 부하율 (loading rate) 등이다^{9,10}. 수질정화 인공습지를 조성하고자하는 부지 인근에 운영중인 인공습지의 설계인자 값 및 처리수준에 대한 정보가 없을 경우 비슷한 기후권에서 운영하고 있는 인공습지의 설계인자 값 및 처리수준을 검토하여 활용하게 된다. 인공습지에서 BOD와 T-N의 제거는 미생물의 활동이 중요하며 미생물의 활동은 온도에 영향을 받기 때문이다.

Table 2는 우리나라 기후와 비슷한 온대권 지역의 북미와 일본에서 운영 중인 인공습지의 처리효율을 나타낸다^{11,12,19}. 미국의 Olentangy Wetlands와 Des Plaines 습지는 하천수를 정화하는 습

지로 제방 밖에 설치되어 있으나 1~2년에 한번 범람하는 습지이며, 일본의 산노가와 습지와 세네가와 습지는 가스미가우라 호수로 유입되는 하천수를 정화하는 습지로 홍수로 범람하지 않는 습지이다. 캐나다의 Cobalt 습지는 하수처리장 방류수를 정화하는 습지이다. Table 2에서 일본습지의 체류시간이 미국습지보다 월등히 짧으며 일본습지의 처리율이 상대적으로 낮음을 알 수 있다.

Fig. 3에서 SS는 월평균 26~50%의 처리효율을 보이고 있다. 하수처리장 방류수가 시스템으로 유입된 2000년 11월부터 유입수의 SS농도가 하수 월류수가 고인 도랑의 물이 시스템으로 유입된 2000년 10월까지의 유입수 SS농도보다 낮아지는 경향을 보이고 있다. 7월과 8월에 시스템 유입수와 유출수의 SS가 다소 높은 이유는 강우로 유입부 도랑의 SS농도가 높아지고 홍수로 시스템이 물에 잠긴 후 갈대와 부들의 줄기에 부착된 진흙이 건조한 후 습지수면으로 떨어지는데 원인이 있는 것으로 사료된다. Table 2에

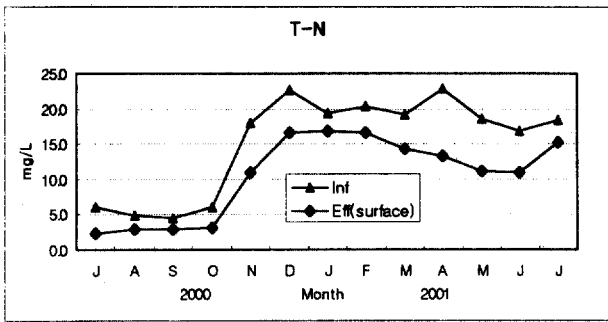


Fig. 5. Monthly average T-N concentration of influent and effluent.

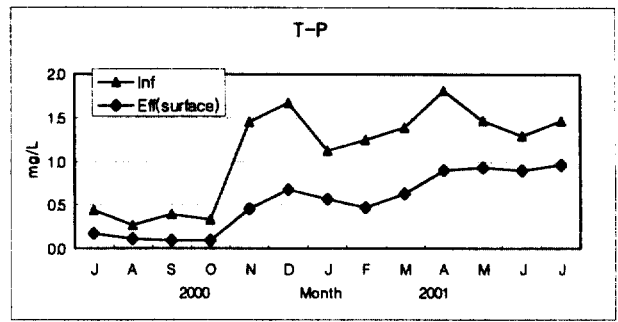


Fig. 6. Monthly average T-P concentration of influent and effluent.

서 Des Plain, Senegawa, Cobalt 습지의 평균 SS 처리율은 각각 91%, 28%, 23%이다.

Fig. 4에서 BOD₅는 월평균 27~56%의 처리율을 나타내며, 2001년 여름철의 처리효율이 다소 낮게 나타나고 있다. 하수처리장 방류수가 시스템으로 유입된 2000년 11월부터 유입수의 BOD₅ 농도가 다소 낮아지는 경향을 보이고 있다. Table 2에서 Cobalt 습지의 BOD 처리율은 78%에 달한다. 습지에서 BOD 제거는 유입수에 함유되어 있는 유기물이 바닥으로 침전되어 BOD가 낮아지며, 침전된 유기물은 바닥층의 미생물에 의하여 분해되거나 토양에 흡수되어 제거된다. 수중의 습지식물 줄기나 잎, 잔재물에 호기성 미생물이 부착되어 형성된 얇은 미생물막 (microbial film)과 유기물이 반응하여 BOD가 제거된다¹³⁾. 여름철 BOD 처리율이 다소 낮은 이유는 홍수로 인하여 정수식물의 잎과 줄기에 형성된 미생물막이 탈피되고, 시스템바닥 표층의 교란과 유실로 표층 미생물의 작용이 원활하지 못한데 원인이 있는 것으로 사료되며, 시스템이 초기적용 단계로 정수식물이 완전히 활착되지 못하여 수중의 정수식물 줄기와 잎, 잔재물의 표면적이 상대적으로 적은데도 원인이 있는 것으로 생각된다.

Fig. 5에서 T-N의 월평균 처리율은 12~60% (연평균 31%)이며 겨울철 (12, 1, 2월)이 낮고 여름철 (6, 7, 8월)이 높다. Fig. 2에서 겨울철 습지수온이 현저하게 낮아져 T-N 처리효율이 저하되는 현상이 나타난 것으로 생각된다. 하수처리장 방류수가 시스템으로 유입된 2000년 11월부터 유입수의 T-N 농도가 급격히 증가하는 경향을 보이고 있다.

Table 2에서 Olentangy, Des Plain, Sannogawa, Senegawa, Cobalt 습지의 평균 T-N 처리율은 각각 46%, 51%, 32%, 17%, 52%을 보이고 있다. 습지에서 T-N 제거는 식물에 의한 흡수보다 질산화와 탈질화가 중요한 역할을 한다. 온도가 낮아 미생물의 활동이 저하되면 질산화와 탈질화의 정도가 낮아진다. 유입수의 유기태 질소 (organic N)가 호기성 미생물에 의한 질산화 (nitrification) 작용으로 질산태 질소 (NO₃-N)로 전환되며, 질산태 질소는 혐기상태인 습지의 토양으로 확산되어 혐기성 미생물에 의하여 탈질화 (denitrification)가 일어나면서 질소 (N₂)와 아산화질소 (N₂O)로 전환되어 이들이 대기중으로 이동하여 질소가 제거된다¹⁴⁾. 습지식물의 근권 (rhizosphere)도 질소 제거에 상당한 역할을

한다. 정수식물은 대기중의 산소 (O₂)를 뿌리로 전달하고 토양에서 발생하는 질소와 아산화질소를 대기중으로 이동시키는 통기조직이 발달되어 있다. 산소가 뿌리로 전달되면 뿌리주변에 얇은 호기상태의 근권이 형성된다. 근권에서는 암모니아화와 질산화가 일어나며, 근권을 둘러싸고 있는 혐기상태의 심토층에서는 탈질화로 질소와 아산화질소가 발생하며, 습지식물의 통기조직을 통하여 대기중으로 이동한다¹⁵⁾.

Olentangy의 체류시간 1~1.5 days는 본 연구 시스템의 체류시간과 비슷하며, Des Plain의 체류시간 7~10 days는 상당히 길며, Sannogawa와 Senegawa의 체류시간은 0.2~0.4 days로 매우 짧다. 체류시간이 길수록 질산화 탈질화 작용이 일어날 수 있는 시간이 길어 T-N 제거율이 높아지게 된다. 연구 시스템의 T-N 제거율이 Olentangy보다 다소 낮은 이유는 연구시스템이 초기단계로 정수식물의 근권형성이 원활하지 못하여 질소의 제거효율이 낮은 것으로 사료된다. 정수식물의 근권이 형성되면 T-N의 처리효율이 높아질 것으로 예측된다.

Fig. 6에서 T-P의 월평균 처리율은 30~68%로 가을 (9, 10, 11월)과 겨울철이 높고 여름철이 낮다. Fig. 6에서 하수처리장 방류수가 유입되기 시작한 2000년 11월부터 유입수의 T-P 농도가 현저히 증가하는 경향을 보이고 있다. 시스템 처리수의 T-P 농도가 2001년 3월부터 완만하게 증가하는 경향을 보이고 있으나 0.1 mg/L 이하로 유지되고 있다. Table 2에서 Olentangy, Des Plain, Sannogawa, Senegawa, Cobalt 습지의 평균 T-P 처리율은 각각 55%, 80%, 39%, 21%, 54%이다. 습지에서 인은 이온과 결합한 인산염 (Ca-phosphate, Fe-phosphate, Al-phosphate)의 상태로 침전되며, 습지식물에 의해 일부는 흡수된다¹⁶⁾. 습지내의 인은 유기물의 침전과 죽은 습지식물의 잔재물이 침전되어 형성된 습지바닥의 침전-잔재물 층 (sediment-litter layer)에 흡착되어 95% 이상이 존재한다¹⁷⁾. 가을과 겨울철의 T-P 제거율이 여름철 보다 높은 이유는 정수식물의 잎과 줄기가 죽어 잔재물이 시스템바닥에 쌓이고 유기물이 시스템 바닥으로 침전되어 형성된 침전-잔재물 층이 적은 경우로 교란되거나 유실되지 않고 존재하여 T-P의 제거가 용이한 반면, 여름철에는 홍수로 시스템 바닥에 형성된 침전-잔재물 층의 교란과 유실로 T-P 제거율이 낮은 것으로 사료된다.

결 론

조사기간 시스템이 홍수로 7회 정도 물에 잠겼다. 홍수로 사면 일부가 유실되고 시스템의 일부에 소량의 퇴적이 일어났으며, 정수식물의 줄기가 휘고 잎의 일부가 훼손되는 현상이 나타났으나 시스템의 운영에는 큰 지장이 없었다. 홍수시 유출부가 쓰레기 등 이물질로 막히는 현상이 발생하였으나 유출파이프의 입구 방향을 물이 흐르는 방향으로 보완한 후에는 유출부가 막히는 현상이 줄어들었다.

붕어 등 물고기가 홍수시 시스템으로 유입되었으며 수심 1 m의 개수부가 물고기 서식처의 역할을 하였다. 수질정화 자유수면 습지를 하천 고수부지에 조성하여 오염하천수 및 하천유입 미처리 오염물을 정화하면서 습지식물의 바이오톱 조성 및 물고기 서식처 제공이 가능할 것으로 사료된다.

시스템에 식재된 갈대와 부들의 초기성장 분석결과 부들의 성장이 갈대보다 양호한 것으로 나타났다. 봄철 시스템의 수심 30~35 cm에서는 갈대의 새줄기가 거의 나오지 않아 시스템의 수심을 10~20 cm로 조절한 후에는 새줄기가 나오기 시작하였다.

실험기간 SS, BOD₅, T-N, T-P의 평균 처리율은 33%, 43%, 31%, 51%를 나타냈다. SS와 T-N의 처리율이 상대적으로 낮게 나타났다. Table 2에서 연구 시스템이 설치된 서울의 기후와 비슷한 지역에 조성된 북미와 일본의 하천수정화 자유수면 인공습지의 T-N, T-P 처리율은 각각 17%~51%, 21%~80%의 범위를 보이고 있다. 본 연구의 자유수면습지의 T-N, T-P 초기처리율 31%, 51%는 비교적 양호한 수준이다. 정수식물이 2~3년 후에 인공습지의 일반적 공극률인 0.65 정도로 성장하고, T-N 정화를 돕는 근권이 형성되고, T-P 제거에 중요한 습지바닥의 침전-잔재물층이 형성되면 T-N, T-P의 처리율이 다소 높아질 것으로 사료된다. 고수부지에 자유수면습지를 조성하여 오염하천수 및 하천유입 오염물에 함유되어 있는 질소와 인을 정화시켜 하천의 부영양화를 줄일 수 있는 방안이 될 수 있을 것으로 판단된다.

참 고 문 헌

1. Reed, S. C., Middlebrooks, E. J. and Crites, R. W. (1988) Natural Systems for Waste Management and Treatment, McGraw-Hill, New York.
2. Vrhovsek, D., Kukanja, V. and bulc, T. (1996) Constructed wet-land (CW) for industrial waste water treatment, *Wat. Res.* 30, 2287-2292.
3. Kern, J. and Idler, C. (1999) Treatment of domestic and agricultural wastewater by reed bed systems, *Ecological Engineering* 12, 13-25.
4. 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.
5. Higgins, M. J., Rock, C. A., bouchard, R. and ezynek, 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.
6. 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.
7. Kadlec, R. H. and Knight, R. L. (1996) *Treatment Wetlands*, CRC Press, Inc, Boca Raton, p.31-46.
8. 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, 111-123.
9. Reed, S. C., Middlebrooks, E. J. and Crites, R. W. (1988) *Natural Systems for Waste Management and Treatment*. McGraw-Hill, New York, p.173-283.
10. Kadlec, R. H. and Knight, R. L. (1996) *Treatment Wetlands*, CRC Press, Inc, Boca Raton, p.181-480.
11. Mitsch, W. J., Wu, X., Naim, R. W., Weihe, P. E., Wang, N., Deal, R. and Boucher, C. E. (1998) Creating and Restrting Wetlands, *BioScience*, 48, 1019-1030.
12. Kadlec, R. H. and Knight, R. L. (1996) *Treatment Wetlands*, CRC Press, Inc, Boca Raton, p.717-737.
13. Brix, H. (1993) Wastewater treatment in constructed wetlands: system design, removal processes, and treatment performance. In: Moshiri, G. A. (Ed.), *Constructed Wetlands for Water Quality Improvement*. Lewis Publishers, Boca Ra-ton, FL, p.9-22.
14. Yang, L., Chang, H. T. and Huang, M. L. (2001) Nutrient removal in gravel- and soil-based wetland microcosms with and without vegetation, *Ecological Engineering* 18, 91- 105.
15. Faulker, S. P. and Richardsosn, 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.
16. Pant, H. K., Reddy, K. R. and Lemon, E. (2001) Phosphorous retention capacity of root bed media of sub-surface flow constructed wetlands, *Ecological Engineering* 17, 345-355.
17. Faulker, S. P. and Richardsosn, 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.

18. 환경부 (2000) 수질오염공정시험방법.

19. 植生淨化施設の現状と事例 (2000) 河川環境管理財團, 河川環境総合研究所, Tokoy, Japan.