

갈대 및 부들 습지셀의 연못시스템 방류수 질소제거 비교

양홍모

전남대학교 조경학과

(2004년 11월 7일 접수, 2004년 12월 7일 수리)

Comparison of Nitrogen Removal Between Reed and Cattail Wetland Cells in a Treatment Pond System

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

ABSTRACT : NO₃-N and T-N removal rates of cattail wetland cells were compared with those of reed wetland cells. The examined cells were a part of a pond-wetland system composed of two ponds in series and six wetland cells in parallel. Each wetland cell was 25 m in length and 6 m in width. Cattails (*Typha angustifolia*) were transplanted into three cells and reeds (*Phragmites australis*) into another three ones in June 2000. Water of Sinyang stream flowing into Kohung Estuarine lake located in the southern part of the Korean Peninsula was pumped into the primary pond, its effluent was discharged into the secondary pond. Effluent from the secondary pond was funneled into each cell. Two cattail and reed cells were chosen for this research. Water quantity and quality of influent and effluent were analyzed from May 2001 through October 2001. The volume of influent and effluent of the cells averaged about 20.0 m³/day and 19.3 m³/day, respectively. Hydraulic retention time was approximately 1.5 days. Influent NO₃-N concentration for the four cells averaged 2.39 mg/L. Effluent NO₃-N concentration for the cattail and reed cells averaged 1.74 and 1.78 mg/L, respectively. Average NO₃-N retention rate for the cattail and reed cells by mass was 30 and 29%, respectively. Influent T-N concentration for the four cells averaged 4.13 mg/L. Effluent T-N concentration for the cattail and reed cells averaged 2.55 and 2.61 mg/L, respectively. Average T-N retention rate for the cattail and reed cells by mass was 39 and 38%, respectively. NO₃-N and T-N concentrations in effluent from the cattail cells were significantly low ($p = 0.04$), compared with those from the reed cells. Cattail wetland cells were more efficient for NO₃-N and T-N abatement than reed ones.

Key words: surface flow wetlands, nitrification, denitrification, rhizomes, pond system.

서론

자연습지가 인간활동으로부터 발생한 수질오염물질을 정화하는 기능을 가지고 있다는 사실은 오래 전부터 알려져 왔다. 이런 자연습지의 수질정화기능을 활용하기 위해 인위적으로 조성한 습지를 인공습지라 부른다. 1970년대부터 미국 등 서구선진국을 중심으로 인공습지의 수질정화기작에 대한 연구와 기술개발이 활발히 진행되면서 보다 효율적인 인공습지들이 조성되어 오고 있다¹⁾. 최근 들어 국내에서도 인공습지 활용에 관심이 높아지고 있다.

인공습지는 자유수면습지(surface flow wetlands)와 여과습지(subsurface flow wetlands)로 대별할 수 있으며, 자연습지

의 모습과 유사한 자유수면습지를 상대적으로 많이 활용하고 있다²⁾. 자유수면습지는 높이 1 m 정도의 독을 조성하고 정수 식물을 식재하며, 수심을 약 0.2~0.3 m로 유지시켜 수질을 정화한다. 여과습지는 0.6~1 m 깊이 콘크리트박스를 설치하고 자갈과 모래 등 매질을 넣고 정수식물을 식재하며, 유입수가 매질사이를 흐르면서 정화된다. 자유수면습지는 여과습지에 비해 조성비용이 적게 소요되나 상대적으로 넓은 부지면적을 필요로 한다.

인공습지는 연못시스템 혹은 하수처리장에서 1차처리수준으로 정화된 하수를 2차처리수준으로 정화하기 위해 주로 활용되어 왔으며, BOD제거가 습지조성의 주목적이 된다³⁾. 최근 들어 연못시스템 혹은 하수처리장에서 2차처리수준으로 처리된 하수를 3차처리수준으로 정화하기 위해 인공습지를 활용하고 있으며, 오염정도가 낮은 하천수나 강우유출수를 정화하기 위해서도 인공습지를 활용하고 있는데, 질소와 인의 제거

*연락처:

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

E-mail: hmy@chonnam.ac.kr

가 습지조성의 1차적 목적이다. 자유수면습지는 수질정화기능 이외에 다양한 친환경적 기능을 제공하는 장점이 있다. 야생동물의 서식처 제공, 훼손된 습지복원, 시민휴식 및 자연학습 공간으로 활용이 가능하다. 자유수면습지의 정수식물로 갈대, 부들, 고랭이를 가장 많이 활용하고 있다. 갈대와 고랭이는 뿌리가 비교적 깊게 발달하여 여과습지의 정수식물로 활용되기도 한다. 이들 수종은 0.3~0.6 m 간격으로 식재하였을 경우 1년이 지나면 습지를 덮을 정도로 성장한다. 수질정화 정수식물로 북미에서는 부들과 고랭이를, 유럽에서는 갈대를 상대적으로 많이 활용하고 있으며⁴⁾, 국내에서는 갈대와 부들을 많이 이용하고 있다. 국내의 경우 자연습지에 갈대와 부들이 군락으로 자라고 있어 이들의 근경을 채취하여 인공습지에 식재하는 것이 비교적 용이하다.

인공습지에서 질소는 암모니아화-질산화-탈질화로 제거되며, 정수식물의 흡수에 의해서도 제거되는데⁵⁾, 습지에서 제거되는 질소의 총량에서 탈질화로 약 60~70%가 제거되며, 식물의 흡수에 의해 제거되는 양은 약 25%이다⁶⁾. 식물이 흡수한 질소는 식물을 수확하지 않으면 습지 내에 존재하며, 식물이 죽어 유기체물질로 전환되면 식물에 흡수되었던 질소가 습지의 물로 되돌아올 수 있다. 탈질화로 질산성질소($\text{NO}_3\text{-N}$)가 질소 가스나 아산화질소로 전환되어 습지에서 대기 중으로 이동하면, 이동한 양만큼 질소가 제거된다. 따라서 탈질화가 인공습지의 질소제거에서 중요한 기능을 하여, 최근 들어 습지연구에서도 질산성질소의 제거에 관심이 높아지고 있다. 인위적으로 조성한 인공습지의 탈질화로 대기오염이 야기될 가능성이 지적되고 있으나, 강우유출수나 오염하천수의 일부가 자연습지에서 자정작용으로 정화될 경우를 고려하면 큰 문제는 아니라고 본다.

본 연구는 간척사업으로 조성된 담수호의 수질개선을 위해 담수호로 유입되는 하천수를 정화하는 연못-습지 시스템 모델을 연구하기 위해 조성한 연못-습지 시스템의 갈대습지셀과 부들습지셀의 질소제거를 비교연구하는데 목적이 있다.

재료 및 방법

실험재료 및 장치

하천수정화 연못-습지 시스템을 전라남도 고흥군 간척개답지에 조성하였다. 연못 2개와 습지셀 6개로 시스템을 설계하였으며(Table 1), 고흥담수호로 유입되는 신양천 물을 펌핑하여 시스템에 유입시켰다. 유입수는 1차연못에서 2차연못으로 이동한 후, 2차연못의 처리수가 각 습지셀에 유입되도록 설계하였다. 본 연구에서 조사분석한 습지셀 4개는 자유수면습지로 각각 길이 25 m, 폭 6 m, 바닥면적 약 150 m^2 로 설계하였다. 유입관을 통해 유입수가 습지셀에 확산유입이 되도록 설계하였으며, 수심을 0.6 m까지 조절할 수 있도록 유출부에 수문을 설치하였다.

2000년 6월에 시스템 주변에 자생하고 있는 부들(*Typha angustifolia*)과 갈대(*Phragmites australis*)를 채취하여 근부로부

Table 1. Structure of the pond-wetland system (cell 1, 2 and cell 4, 5 were examined for this study)

Components	Dimensions				Plant species	Remarks
	Length (m)	Width (m)	Water depth (m)	Area (m^2)		
Primary and secondary pond	16	16	1.5~2	256	-	Surface area
Wetland cell 1, 2	25	6	0.3~0.6	150	<i>Typha angustifolia</i>	Bottom area
Wetland Cell 4, 5	25	6	0.3~0.6	150	<i>Phragmites australis</i>	Bottom area

터 약 40 cm 높이로 줄기를 절단한 후, 약 0.3 m 간격으로 습지셀 2개(cell 1, 2)에는 부들을, 그리고 또 다른 습지셀 2개(cell 4, 5)에는 갈대를 식재하였다. 식재한 부들과 갈대는 겨울철에 잎과 줄기가 죽고 이듬해 봄에 새줄기가 나오기 시작하여 2001년 5월에는 습지의 바닥을 덮을 정도로 성장하였다. 따라서 식재직후 초기운영단계의 습지셀 $\text{NO}_3\text{-N}$ 제거보다 비교적 생태적으로 안정된 습지셀의 $\text{NO}_3\text{-N}$ 제거를 연구할 수 있는 조건이 되었다.

실험방법

2001년 5월부터 11월까지 갈대셀 2개(cell 1, 2)와 부들셀 2개(cell 4, 5)의 유입수와 유출수를 분석하였다. 유입수와 유출수를 7~10일에 한번씩 샘플링하여 환경부 수질오염공정시험방법⁷⁾과 미국공중보건협회(APHA)의 수질분석방법⁸⁾을 참고하여 $\text{NO}_3\text{-N}$ 와 T-N을 분석하였고, 수온은 현장에서 Scott pH-Meter(CG 347)로 측정하였다. 습지셀의 유입량 및 유출량은 매월 2~3회 유입부와 유출부에서 1분 동안 흐르는 양을 3회 받아서 평균 유입량 및 유출량을 산출하였다.

유입수 및 유출수의 월평균농도, $\text{NO}_3\text{-N}$ 과 T-N의 월평균농도는 부들셀 2개와 갈대셀 2개의 평균값으로 나타냈다. $\text{NO}_3\text{-N}$ 과 T-N의 월평균제거량은 월평균 유입수와 유출수의 농도, 월평균 유입수 및 유출수의 양, 습지면적을 고려하여 산출하였다. 부들셀과 갈대셀의 $\text{NO}_3\text{-N}$ 과 T-N 정화에 차이가 있는지 여부를 검증하기 위해 부들셀과 갈대셀의 유출수 $\text{NO}_3\text{-N}$ 과 T-N 농도를 이용하여 *t*-검정을 수행하였으며, *t*-검정에는 PC용 SAS(Ver. 8.1)를 활용하였다.

결과 및 고찰

조사기간동안 각 습지셀의 평균 유입수량은 약 20.0 m^3/day 이었으며, 부들셀과 갈대셀의 조사기간 평균유출량은 각각 약 19.31와 19.34 m^3/day 로 차이가 거의 없었다. 조사기간 각 습지셀의 평균수심을 0.3 m로 관리하였고, 각 습지셀의 평균체류시간은 약 1.5일이었다. Table 2는 2000년 6월말 식재 후 약 1년이 지난 2001년 5월, 7월, 10월에 조사한 부들의 초장과 분지수를 나타낸다. 2001년 5월의 평균초장 96.5 cm가 7월에

Table 2. Growth of *Typha angustifolia* planted in the two cattail cells

	Height (cm)	Stem (No./m ²)	Height increase between measurements (cm)	Stem increase between measurement (No./m ²)
2001.5.7. (a)	96.5	50.2	-	-
2001.7.6.	141.4	69.6	44.9 (47%)	19.4 (39%)
2001.10.8. (b)	167.9	86.9	26.5 (38%)	17.3 (25%)
Total increase (b-a)	71.4 (73%)	36.7 (73%)	-	-

(%): bimonthly increase rate.

Table 3. Growth of *Phragmites australis* planted in the two reed cells

	Height (cm)	Stem (No./m ²)	Height increase between measurements (cm)	Stem increase between measurement (No./m ²)
2001.5.7. (a)	56.6	45.7	-	-
2001.7.6.	87.3	132.5	30.7 (54%)	86.8 (190%)
2001.10.8. (b)	108.5	162.3	21.2 (24%)	29.8 (22%)
Total increase (b-a)	51.9 (92%)	116.6 (255%)	-	-

(%): bimonthly increase rate.

141.4 cm로 성장하여 약 47% 성장율을 보였으며, 10월의 초장은 167.9 cm로 5월에 비해 약 73% 성장을 보였다. 평균분지수는 5월에 50.2 개/m²였으며, 7월에 69.6개/m²로 39% 증가를 보였으며, 10월에는 86.9 개/m²로 5월에 비해 73% 증가하였다.

Table 3은 갈대의 성장조사 결과로, 2001년 5월의 평균초장 56.6 cm가 7월에 87.3 cm로 성장하여 약 54% 성장율을 보였으며, 10월의 초장은 108.5 cm로 5월에 비해 약 92% 성장을 보였다. 평균분지수는 5월에 45.7개/m²에서, 7월에 132.5개/m²로 190% 증가를 보였으며, 10월에는 162.3 개/m²로 5월에 비해 255% 증가하였다. 조사기간 부들은 갈대에 비해서 초장이 긴 반면, 갈대는 단위면적당 분지수가 부들보다 많아, 갈대가 습지바닥을 덮는 피복도가 부들보다 높았다. 조사기간 부들과 갈대의 성장이 양호하였다.

조사기간동안 유입수의 평균수온은 22.6°C였으며, 부들셀과 갈대셀의 유출수 평균수온은 각각 23.7과 23.1°C였다. Fig. 1에서 5월부터 8월 사이 갈대셀의 유출수 월평균수온은 유입수와 거의 동일하게 나타났다. 5월~8월의 부들셀 유출수 월평

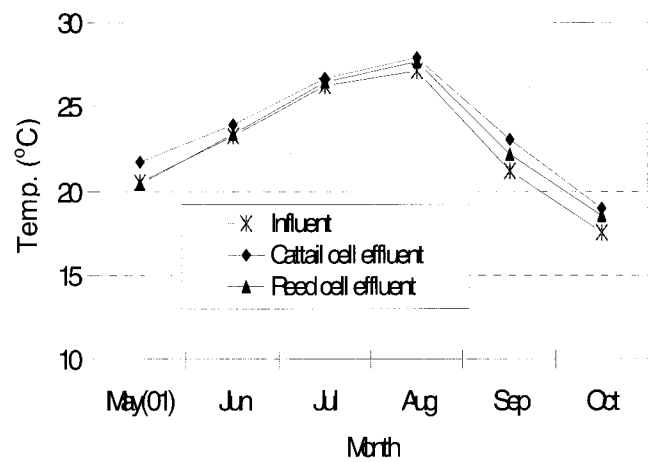


Fig. 1. Monthly average water temperature of influent and effluent of cattail and reed cells.

균수온은 각각 21.7, 23.9, 26.7, 27.9°C였으며, 갈대셀은 각각 20.4, 23.4, 26.5, 27.7°C였다. 9월부터 10월 사이의 습지셀의 유출수 월평균수온이 유입수보다 약간 높게 나타났다. 9월~10월의 부들셀 유출수 월평균수온은 각각 23.7, 19.0°C였으며, 갈대셀은 22.1, 18.5°C였다. 조사기간동안 부들셀의 유출수 월평균수온이 갈대셀보다 약간 높게 나타났는데, 이는 부들 앞은 수직방향에 가깝게 자라는 반면 갈대 앞은 수평방향에 가깝게 자라고, 조사기간동안 부들의 단위면적당 분지수가 갈대보다 적어, 부들의 습지바닥 피복도가 갈대보다 상대적으로 낮아 부들셀 수면 일부에 햇빛이 도달한데 원인이 있는 것으로 판단된다.

2차연못의 방류수가 부들셀과 갈대셀에 유입되어 유입수의 NO₃-N 평균농도는 2.39 mg/L로 동일하였으며, NO₃-N 평균부하율은 318.4 mg/m²·day로 같았다(Table 4). 부들셀과 갈대셀 유출수의 NO₃-N 평균농도는 각각 1.74과 1.78 mg/L였으며, 유출수의 NO₃-N 평균부하율은 각각 224.0과 229.1 mg/m²·day로 부들셀과 갈대셀의 NO₃-N 평균제거량은 각각 94.4와 89.3 mg/m²·day였다. 제거량을 기준으로 부들셀과 갈대셀의 NO₃-N 평균제거율은 각각 30와 29%로, 조사기간동안 부들셀의 NO₃-N 평균제거량이 갈대셀보다 5.1 mg/m²·day 높았다.

Fig. 2에서 조사기간동안 부들셀의 NO₃-N 월평균제거량이 갈대셀보다 약간 높게 나타났다. 5월에는 두 셀의 NO₃-N 제거량이 비슷한 수준을 보였으며, 6월~7월에는 부들셀의 제거량이 점점 높아지고, 8월~10월에는 제거량의 차이가 점점 적어졌다. 부들셀과 갈대셀의 NO₃-N 월평균제거량은 8월에 각각 113.7과 108.8 mg/m²·day로 가장 높았고, 10월에 각각 67.5과 64.9 mg/m²·day로 가장 낮았다.

인공습지의 NO₃-N 제거량의 범위는 6~4,000 mg/m²·day로 매우 넓은데⁹⁾, 실험 부들셀과 갈대셀의 NO₃-N 제거량은 낮은 범위에 속한다. NO₃-N 제거량이 높은 습지들은 정수식물의 근권발달이 양호하고, 운영기간이 길어 습지바닥에 잔체

Table 4. Average hydraulic loading, NO₃-N and T-N removal for the cattail and reed cells from May through October 2000

Type	Species	Parameter	Unit	Value	
Cattail cells	-	Approximate area	m ²	150.0	
		Inflow	m ³ /day	20.0	
		Outflow	m ³ /day	19.3	
		NO ₃ -N	Inflow concentration	mg/L	2.39
			Outflow concentration	mg/L	1.74
			Inflow loading	mg/m ² · day	318.4
			Outflow loading	mg/m ² · day	224.0
			Removal	mg/m ² · day	94.4
		Removal rate by mass	%	30	
		T-N	Inflow concentration	mg/L	4.13
Outflow concentration	mg/L		2.55		
Inflow loading	mg/m ² · day		550.2		
Outflow loading	mg/m ² · day		332.9		
Removal	mg/m ² · day		217.3		
Removal rate by mass	%	39			
Reed cells	-	Inflow concentration	mg/L	2.39	
		Outflow concentration	mg/L	1.78	
		NO ₃ -N	Inflow loading	mg/m ² · day	318.4
			Outflow loading	mg/m ² · day	229.1
			Removal	mg/m ² · day	89.3
		Removal rate by mass	%	29	
		T-N	Inflow concentration	mg/L	4.13
			Outflow concentration	mg/L	2.61
			Inflow loading	mg/m ² · day	550.2
			Outflow loading	mg/m ² · day	339.9
Removal	mg/m ² · day		210.3		
Removal rate by mass	%	38			

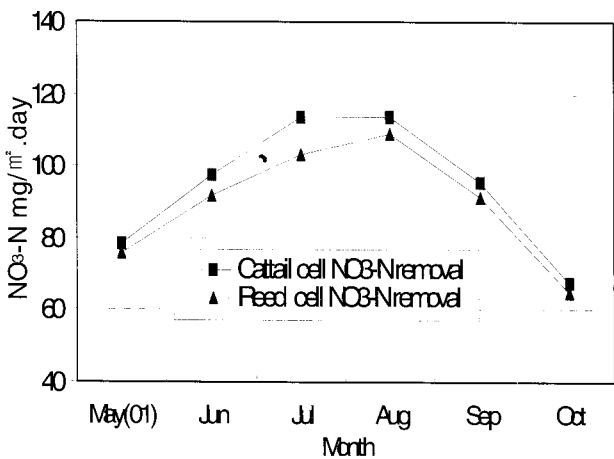


Fig. 2. Monthly average NO₃-N removal for cattail and reed cells.

물층의 형성이 양호한 시스템들이다. 유입수에 함유된 유기질소는 암모니아화와 질산화 과정을 거쳐 질산성질소로 전환되며, 질산성질소는 탈질화 과정을 거쳐 질소가스와 아산화질소

로 전환되어 대기중으로 이동한다¹⁰⁾. 따라서, NO₃-N의 제거량으로 습지의 탈질화 정도를 간접적으로 추정할 수 있다.

습지에서 탈질화는 혐기상태가 형성되어야 하고, 미생물의 활동에 적합한 수온이 유지되어야 하며, 전자를 공급해주는 유기탄소원이 존재해야¹¹⁻¹²⁾ 원활히 수행된다. 부들과 갈대의 통기조직은 대기중의 산소를 뿌리로 전달할 수 있다. 산소가 뿌리에 도달하면 뿌리주변에는 호기성 근권이 이루어지고, 뿌리와 뿌리사이에는 혐기상태가 형성된다. 호기성 근권에서는 암모니아화와 질산화가 일어나며, 혐기층에서는 질산성질소가 질소가스와 아산화질소로 전환되어 일부는 통기조직을 통하여 대기 중으로 이동한다. 실험 부들셀과 갈대셀의 부들과 갈대의 성장이 비교적 양호하여 통기조직이 NO₃-N 제거에 미친 영향은 비슷했을 것으로 판단된다.

질산화와 탈질화에 작용하는 미생물은 20~25°C에서 활동성이 높으며, 15°C이하와 30°C이상에서는 활동성이 둔화된다. 따라서 20~25°C의 수온에서 습지의 질소 제거량이 상대적으로 높아진다. Fig. 1의 유출수 수온의 변화는 Fig. 2의 NO₃-N 월별제거량과 비슷한 경향을 보이고 있어 NO₃-N 제거는 수온에 영향을 받음을 알 수 있다. Fig. 1에서 5월~9월의 습지셀 수온은 이들 미생물의 활동에 적합한 조건이었으며, 부들셀과 갈대셀의 10월 NO₃-N 제거량이 낮은 이유는 수온이 낮았던데 원인이 있는 것으로 생각된다.

실험 부들셀의 부들은 겨울철에 죽어 줄기와 잎이 습지바닥에 쌓여 약 2 cm 두께의 잔재물층이 형성되었으나, 갈대셀의 갈대는 다음 해까지 죽은 줄기가 서있고 마른 잎의 일부가 줄기에 붙어있어 잔재물층 형성과정이 느렸다. 탄소공급원이 원활하지 못하면 NO₃-N 제거량이 낮아지게 되는데¹³⁾, 부들셀이 갈대셀보다 NO₃-N 제거량이 다소 높은 이유는 잔재물층이 형성되어 탈질화 과정에 필요한 전자공급원이 유리한 조건이었기 때문으로 판단된다.

2차연못의 방류수가 부들셀과 갈대셀에 유입되어 부들셀과 갈대셀의 유입수 T-N 평균농도도 4.13 mg/L로 동일하였으며, T-N 평균부하율도 550.2 mg/m² · day로 같았다. 부들셀과 갈대셀의 유출수 T-N 평균농도는 각각 2.55와 2.61 mg/L였으며, 유출수 T-N 평균부하율은 각각 332.9와 339.9 mg/m² · day로 부들셀과 갈대셀의 T-N 평균제거량은 각각 217.3과 210.3 mg/m² · day였다(Table 4). 제거량을 기준으로 부들셀과 갈대셀의 T-N 평균제거율은 각각 39%와 38%였다. 조사기간 부들셀의 T-N 평균제거량이 갈대셀보다 7.0 mg/m² · day 높았다.

인공습지에서 질소는 물리적 작용인 침전, 여과, 흡착에 의해서도 제거되는데^{14,15)}, 직경이 큰 유기질소 입자들은 중력에 의해 습지바닥에 침전되며, 습지바닥에 형성된 잔재물층은 유기질소 입자를 여과하여 제거한다. 수중의 식물줄기와 잔재물의 표면에 형성된 미생물막(biofilm)에 유기질소 입자들이 흡착되어 제거되기도 한다. 실험습지의 부들과 갈대의 줄기와 잎에 형성된 미생물막은 질소제거에 기여하였을 것으로 생각되며, 부들셀의 잔재물층 형성이 갈대셀보다 양호하여 부들셀의 잔재물층에 의한 유기질소입자의 여과가 다소 높았을 것으로 판단된다.

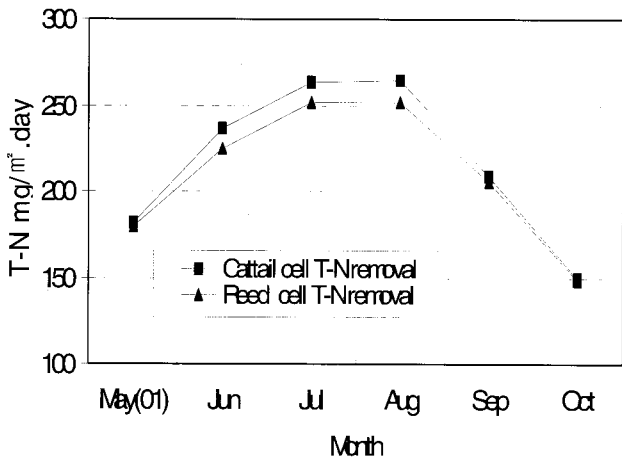


Fig. 3. Monthly average T-N removal for cattail and reed cells.

Fig. 3에서 조사기간 부들셀의 T-N 월평균제거량이 갈대셀보다 약간 높게 나타났다. 5월과 10월의 부들셀과 갈대셀의 T-N 월평균제거량은 거의 같은 수준이었다. 6월~8월에는 부들셀의 T-N 월평균제거량이 점점 높아지는 경향이였으며, 9월에는 제거량 차이가 적어지는 경향을 보였다. 부들셀과 갈대셀의 T-N 월평균제거량은 8월에 각각 264.1과 206.0 mg/m²·day로 가장 높았고, 10월에 각각 149.5와 148.2 mg/m²·day로 가장 낮았다. Fig. 3의 T-N 월별제거량의 변화는 Fig. 1의 유출수 수온의 변화와 비슷한 경향을 보이고 있어 T-N 제거량은 수온에 영향을 받았으며, 부들셀과 갈대셀의 10월 T-N 월평균제거량이 적은 이유는 낮은 수온에 1차적 원인이 있는 것으로 판단된다.

정수식물 수종을 제외하고는 부들셀과 갈대셀의 구조를 동일하게 조성하였고, 조사기간 2차연못으로부터 동일한 NO₃-N과 T-N 농도의 유입수가 부들셀과 갈대셀에 유입되었으며, 부들셀과 갈대셀의 유입수 양도 같도록 운영하였다. 조사기간 동안 부들셀과 갈대셀의 유출수 NO₃-N과 T-N 농도의 평균에 대한 t-검정을 통하여 부들셀과 갈대셀 간에 NO₃-N과 T-N 제거에 차이가 있는지를 분석하였다(Table 5).

부들셀과 갈대셀 유출수의 NO₃-N 농도에 대한 t-검정에서 'H₀: 실험기간 부들셀과 갈대셀 유출수 NO₃-N 농도의 평균이

같다.'라는 귀무가설이 유의수준 α=0.05에서 기각되어(p = 0.0435, p < 0.05) 부들셀과 갈대셀 유출수 NO₃-N 농도는 다르다고 말할 수 있다. 따라서 부들셀 유출수의 NO₃-N 평균농도(1.7397±0.0134)는 갈대셀 유출수의 NO₃-N 평균농도(1.7786±0.0132)보다 낮아, 부들셀의 NO₃-N 제거가 갈대셀의 NO₃-N 제거보다 높다고 말할 수 있다.

유출수의 T-N 농도에 대한 t-검정에서 'H₀: 실험기간 부들셀과 갈대셀 유출수 T-N 농도의 평균이 같다.'라는 귀무가설이 유의수준 α=0.05에서 기각되어(p = 0.0304, p < 0.05) 부들셀과 갈대셀 유출수 T-N 농도는 다르다고 말할 수 있다. 따라서, 부들셀 유출수의 T-N 평균농도(2.5507±0.0196)는 갈대셀 유출수의 T-N 평균농도(2.6139±0.0163) 보다 낮다고 볼 수 있어, 부들셀의 T-N 제거가 갈대셀보다 높다고 말할 수 있다. t-검정 결과, 부들셀의 NO₃-N과 T-N 제거가 갈대셀보다 다소 높음을 알 수 있었다.

결론

부들과 갈대를 6월에 식재한 후 겨울철을 거쳐 이듬해 새 줄기가 완전히 나온 5월부터 실험을 수행하여 비교적 생태적으로 안정된 습지셀의 NO₃-N과 T-N 제거를 연구할 수 있는 조건이었다. 조사기간동안 습지셀의 평균 유입수량은 약 20.0 m³/day이었으며, 평균체류시간은 약 1.5일이었다. 유입수의 평균수온은 22.6℃였으며, 부들셀과 갈대셀의 유출수 평균수온은 각각 23.7와 23.1℃였다.

유입수의 NO₃-N 평균농도는 2.39 mg/L였으며, 부들셀과 갈대셀의 유출수 NO₃-N 평균농도는 각각 1.74와 1.78 mg/L였다. 부들셀과 갈대셀의 NO₃-N 평균제거량은 각각 94.4와 89.3 mg/m²·day였으며, NO₃-N 평균제거율은 각각 30와 29%였다. 유입수 T-N 평균농도는 4.13 mg/L였으며, 부들셀과 갈대셀의 유출수 T-N 평균농도는 각각 2.55와 2.61 mg/L였다. 부들셀과 갈대셀의 T-N 평균제거량은 각각 217.3과 210.3 mg/m²·day였으며, T-N 평균제거율은 각각 39와 38%였다. t-검정 결과, 유의수준 α=0.05에서 부들셀 유출수의 NO₃-N 평균농도(1.7397±0.0134)가 갈대셀 유출수의 NO₃-N 평균농도(1.7786±0.0132)보다 낮게 나타났다. α=0.05에서 부들셀 유출수의 T-N 평균농도(2.5507±0.0196)도 갈대셀 T-N 평균농도(2.6139±0.0163) 보다 낮게 나타났다. 부들셀의 NO₃-N과 T-N 제거가 갈대셀보다 높게 나타나, 부들이 갈대보다 NO₃-N과 T-N 제거에 효과적임을 알 수 있었다. 조사기간 동안 부들셀이 갈대셀보다 NO₃-N 제거량이 다소 높은 이유는 잔재물층이 형성이 빨라 탈질화 과정에 필요한 전자공급원이 유리한 조건이었던데 1차적 원인이 있는 것으로 판단된다.

참고문헌

1. EPA (U.S. Environmental Protection Agency) (1999) *Free Water Surface Wetlands for Wastewater Treatment: A*

Table 5. T-test for NO₃-N and T-N concentrations of effluents from cattail and reed wetland cells

Pollutant	Wetland cell types	n ^{a)}	Mean±S.E. ^{b)}	t Value	p ^{c)}
NO ₃ -N	Cattail Cell	36	1.7397±0.0134	-2.06	0.0435
	Reed Cell	36	1.7786±0.0132		
T-N	Cattail Cell	36	2.5507±0.0196	-2.21	0.0304
	Reed Cell	36	2.6139±0.0163		

^{a)}n: sample numbers, ^{b)}S.E.: standard error, ^{c)}p: p-values obtained by t-tests assuming equal variance.

- Technology Assessment*, p.1-1~1-13.
2. Kadlec, R. H. and Knight, R. L. (1996) *Treatment Wetlands*, CRC Press, Inc, Boca Raton.
 3. EPA (U.S. Environmental Protection Agency) (2000) *Manual: Constructed Wetlands Treatment of Municipal Wastewaters*, Office of Research and Development, Cincinnati, Ohio, p.1-29.
 4. Reed, S. C., Middlebrooks, E. J. and Crites, R. W. (1988) *Natural Systems for Waste Management and Treatment*, McGraw-Hill, New York.
 5. Yang, H. M. (2003) Nitrate removal rate of free-water-surface treatment wetland system constructed on floodplain during its initial operating stage, *J. Korean Env. Res. & Reveg. Tech.* 6(6), 41-48.
 6. Spiels, D. J. and Mitsch, W. J. (2000) The effects of seasons and hydrologic and chemical loading on nitrate retention in constructed wetlands : a comparison of low- and high-nutrient riverine systems, *Eco. Eng.* 14, 77-91.
 7. Korean Ministry of Environment (2000) Standard method for water and wastewater analysis.
 8. APHA (American Public Health Association) (1998) Standard method for the examination of water and wastewater.
 9. Bachand, P. A. M. and Home, A. J. (2000) Denitrification in constructed free-water surface wetlands I: very high nitrate removal rates in a macrocosm study, *Ecol. Eng.* 14, 9-15.
 10. 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.
 11. Broadbent, F. E. and Clark, F. E. (1965) Denitrification. *Agronomy* 10 : 344.
 12. EPA (U.S. Environmental Protection Agency) (1993) *Manual - Nitrogen control*. Office of Research and Development, Washington, D.C.
 13. Zhu, T. and Sikora, F. J. (1994) Ammonium and nitrate removal in vegetated and unvegetated gravel bed microcosm wetlands in Proc. *4th Int. Conf. on Wetland Systems for Water Pollution Control*, Guangzhou, China, p.355-366.
 14. EPA (U.S. Environmental Protection Agency) (2000) *Manual: Constructed Wetlands Treatment of Municipal Wastewaters*, Office of Research and Development, Cincinnati, Ohio, p.30-48.
 15. Yang, H. M. (2002) Preliminary nitrogen removal rates in close-to-nature constructed stream water treatment wetland, *Kor. J. Environ. Agric.* 21(4), 269-273.