

## 2차처리장 방류수 정화 부들습지셀의 초기운영단계 질산성질소 제거

양홍모

전남대학교 조경학과

(2004년 11월 7일 접수, 2004년 12월 3일 수리)

### Nitrate Removal of a Cattail Wetland Cell Purifying Effluent from a Secondary-Level Treatment Plant During Its Initial Operating Stage

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

**ABSTRACT :** Nitrate removal was examined from May to October 2003 of a surface flow treatment wetland cell, which was a part of a treatment wetland system composed of four wetland cells and a distribution pond. The system was established on rice paddy near the Kohung Estuarine Lake located in the southern part of the Korean Peninsula. Effluent from a secondary-level night soil treatment plant was funneled into the system. The investigated cell, 87 m in length and 14 m in width, was created in April 2003. An open water was designed at its center, which was equivalent to 10 percent of its total area. Cattails (*Typha angustifolia*) were transplanted from natural wetlands into the cell and their stems were cut at about 40 cm height from their bottom ends. Average 25.0 m<sup>3</sup>/day of effluent from the treatment plant was funneled into the cell by gravity flow and average 24.1 m<sup>3</sup>/day of its treated effluent was discharged into the Sinyang Stream flowing into the lake. Its water depth was maintained about 0.2 m and its hydraulic detention time averaged 5.2 days. Average height of the cattail stems was 42.5 cm in May 2003 and 117.7 cm in September 2003. The number of stems averaged 9.5 stems/m<sup>2</sup> in May 2003 and 16.4 stems/m<sup>2</sup> in September 2003. The growth of cattails was good. Temperature of influent and effluent averaged 25.9 and 26.7°C, respectively. NO<sub>3</sub>-N loading rate of influent and effluent averaged 176.67 and 88.09 mg/m<sup>2</sup> · day, respectively. Removal of NO<sub>3</sub>-N averaged 89.58 mg/m<sup>2</sup> · day and its removal rate by mass was about 50%. Considering its initial operating stage in which cattail rhizomes and litter layer on the bottom were not fully established, the NO<sub>3</sub>-N removal rate of the cell was rather good.

**Key words:** surface flow, nitrification, denitrification, tertiary treatment level.

## 서 론

자연습지의 수질정화기능을 활용하기 위해 인위적으로 조성한 습지를 인공습지라 부른다. 1970년대부터 미국을 중심으로 습지의 수질정화 기작에 대한 활발한 연구와 더불어 조성 기술이 발전해 오면서 인공습지의 활용도가 점점 높아지고 있다. 국내에서도 최근들어 하천, 호수, 담수호의 수질개선을 위해 인공습지를 활용하는 방안이 관심이 높아지고 있다. 수질정화 인공습지를 자유수면(surface flow)습지와 지하흐름(subsurface flow)습지로 대별하며, 자연습지와 모습이 유사하고 친환경적 기능을 제공하는 자유수면습지가 상대적으로 많이 활용되고 있다.

생활하수나 산업폐수 등 점원오염물을 1차처리한 후 그 방류수를 2차처리수준으로 정화하기 위해 인공습지를 주로 활용하여 왔다. 최근에는 2차처리장 방류수를 3차처리수준으로 정화하기 위해 인공습지를 활용하고 있으며<sup>1)</sup>, 이 경우 질소와 인의 제거가 인공습지 조성의 주 목적이 된다. 설계와 운영이 적절할 경우 인공습지는 2차처리장 방류수의 T-N(총질소)을 약 3 mg/L로 정화할 수 있다<sup>2)</sup>.

기존에 운영 중인 2차처리수준의 처리장을 질소와 인을 제거하기 위해 3차처리수준으로 증설운영하는데는 많은 비용이 소요된다. 인공습지를 활용하여 2차처리장 방류수를 정화할 경우, 조성 및 운영 비용이 덜 들며, 하수처리장에 비해 친환경적인 기능이 월등히 높다. 인공습지는 수질정화이외에 야생동물의 서식처를 제공할 수 있고, 시민 휴식공간으로 활용이 가능하며, 학생 및 시민들의 자연학습공간으로 활용이 가능하다. 2차처리장 방류수를 정화하는 인공습지는 이런 친환경적

\*연락처:

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

E-mail: hmy@chonnam.ac.kr

기능을 고려하여 조성하는 추세이다.

인공습지에서 질소는 주로 탈질화와 정수식물의 흡수에 의해 제거된다<sup>3,4)</sup>. 인공습지에서 제거되는 질소총량에서 탈질화로 제거되는 양이 약 60~70%를 차지하며, 식물이 흡수하여 제거되는 양은 약 25%이다<sup>5)</sup>. 반면에 침전, 여과, 흡착으로 제거되는 질소의 양은 상대적으로 낮다. 유입수에 함유되어 인공습지로 들어온 질소는 시스템에서 시스템 밖으로 제거되는 양이 많아야 유출수에 적게 함유되어 제거율이 높아진다. 시스템 내에 저장되어 제거되는 질소는 저장력의 한계를 넘어서면 유출수에 함유되며, 식물이 흡수한 질소도 습지 내에 존재하여 식물이 죽어 유기쇄설물로 전환되면 습지의 물로 되돌아올 가능성이 높다. 탈질화로 질산성질소( $\text{NO}_3\text{-N}$ )가 질소 가스나 아산화질소로 전환되어 습지에서 대기 중으로 이동하면, 이동한 양만큼 습지에서 질소가 제거된다. 탈질화가 인공습지의 질소제거에서 중요한 역할을 하며, 최근들어 인공습지 연구에서 질산성질소 제거에 관심이 높아지고 있는 이유도 여기에 있다.

본 연구는 2차처리장 방류수를 정화하는 인공습지모델을 연구하기 위해 조성한 습지시스템을 구성하고 있는 부들습지셀(cell)의 초기운영단계  $\text{NO}_3\text{-N}$  제거량을 연구하는데 목적이 있다.

### 재료 및 방법

#### 실험재료 및 장치

전라남도 고흥군 고흥분뇨처리장 방류수의 전량을 처리하는 인공습지 시스템을 고흥 담수호 주변의 간척개답지에 조성하였다. 고흥분뇨처리장은 2차처리수준으로 분뇨를 처리하여 방류하고 있다. 시스템을 습지셀 4개와 저류조 1개로 구성하였다. 저류조는 분뇨처리장 방류수를 각 습지셀로 분할 유입시키는 역할을 한다. 4개의 습지셀 중 본 실험연구에서는 부들 습지셀 1개를 조사분석하였다.

Table 1. Structure of the cattail wetland cell

Length (m)	Width (m)	Water depth (m)	Area (m <sup>2</sup> )	Plant species	Berm		
					Height (m)	Surface Width (m)	Slope
87	14	0~0.7	1,218	<i>Typha angustifolia</i>	1	2	1:2

실험습지 셀은 2003년 4월말에 조성이 완료되었으며, 자유수면습지로 길이 87 m, 폭 14 m, 면적이 1,218 m<sup>2</sup>이다(Fig. 1, Table 1). 습지셀 독의 높이는 1 m로, 경사는 1 : 2로 설계하였으며, 수심은 0.7 m까지 조정할 수 있도록 설계하였다. 셀의 중앙에 정수식물이 성장할 수 없는 길이 14 m, 폭 8.5 m의 개수부(open water)를 설치하였다. 개수부는 유입수의 단기이동을 완화하고, 대기와 수면의 접촉으로 질산화가 촉진되어 질소정화 효율을 높이고, 새들의 서식공간을 제공하는 역할을 한다. 습지셀에는 애기부들(*Typha angustifolia*)을 채취하여 뿌리에서 약 40 cm 높이를 절단한 후 약 0.3 m 간격으로 식재하여, 줄기수 밀도는 약 9 개/m<sup>2</sup>였다. 본 실험 습지셀의 정수식물로 애기부들을 선정된 이유는 실험 습지셀 주변에 애기부들이 군락으로 자라고 있어 채취가 용이하고, 시스템을 구성하고 있는 갈대 습지셀과 정수식물의 차이에 따른 정화 정도를 차후에 비교분석하기 위해서 선정하였다. 유입수는 저류조부터 자연유하로 습지셀에 유입되며 유입부와 유출부는 확산유입과 확산유출 이 되도록 설계하였다.

#### 실험방법

2003년 4월말 식재 후 2003년 5월부터 10월까지 부들이 성장하는 기간동안 유입수와 유출수를 7~10일에 한번씩 샘플링하여 환경부 수질오염공정시험방법<sup>6)</sup>을 기준으로 미국공중보건협회(APHA)의 수질분석방법<sup>7)</sup>을 참고하여  $\text{NO}_3\text{-N}$ , T-N 등을 분석하였다. 수온은 현장에서 Scott pH-Meter(CG 347)로 측정하였다. 습지셀의 유입량 및 유출량은 매일 2~3회 유입

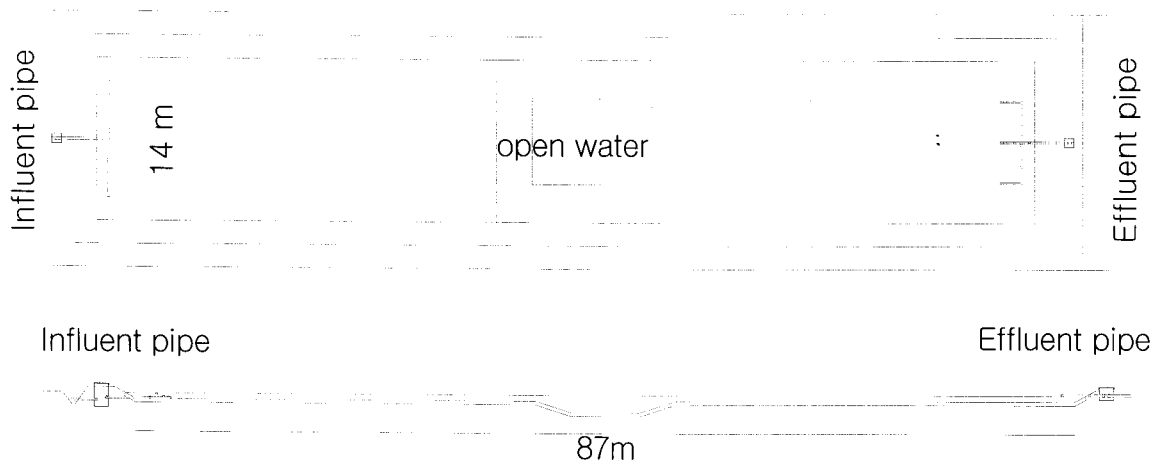


Fig. 1. Schematic plan and section of the cattail wetland cell purifying effluent from a secondary-level treatment plant.

부와 유출부에서 1분 동안 흐르는 양을 3회 받아서 평균 유입량 및 유출량을 산출하였다.

유입 및 유출수의 NO<sub>3</sub>-N의 농도, 유입량 및 유출량, 습지면적 등을 기초로 실험습지셀의 초기운영단계 NO<sub>3</sub>-N 제거량을 산출하였다. 인공습지의 오염물제거 정도를 유입수와 유출수의 %농도를 기준으로 나타내는 경우가 많으나, 단위시간당, 단위면적당 제거량으로 나타내는 것이 보다 합리적이다. 유입수의 오염물 10 mg/L가 습지에서 1 mg/L로 처리된 경우와 오염물 100 mg/L가 습지에서 10 mg/L로 처리된 경우 농도 제거율은 다 같이 90%이나, 단위시간당, 단위면적당 제거량으로 나타내면 달라지기 때문이다.

식재한 부들의 성장조사는 1 m × 1 m 격자 틀을 이용하여 초장과 분지수를 측정하였다. 조사지점은 시스템의 유입부, 중앙 개수부 인접부, 유출부에서 각각 3군데씩 선정하였다. 분지수는 격자틀 내의 전수를 조사하였으며, 평균초장은 격자틀 내의 10개체를 3회 측정하여 평균값으로 나타냈다.

**결과 및 고찰**

조사기간 습지셀 유입수의 평균유량은 25.0 m<sup>3</sup>/day였으며, 유출수의 평균유량은 24.1 m<sup>3</sup>/day였다. 식재한 부들의 초기활착을 위해 수심을 0.2 m로 운영하였으며, 습지셀의 평균체류시간은 약 5.2 days였다. Table 2는 2003년 4월말 식재 후 2003년 5월, 7월, 9월에 조사한 부들의 초장과 분지수를 나타낸다. 5월의 평균초장 42.5 cm가 7월에 78.8 cm로 성장하여 약 85%의 성장율을 보였으며, 9월의 초장은 160.2 cm로 5월에 비해 약 277%의 성장을 보였다. 평균분지수는 5월에 9.5 stems/m<sup>2</sup>였으며, 7월에 14.2 stems/m<sup>2</sup>로 70%의 증가를 보였다. 9월에는 16.4 stems/m<sup>2</sup>로 5월에 비해 78% 증가하였으나, 7월에 비해서는 약 16%가 증가하여 분지수의 증가가 둔화되었다. 실험기간 식재한 부들의 성장이 비교적 양호한 편이었다.

**Table 2. Growth of *Typha angustifolia* in the wetland cell**

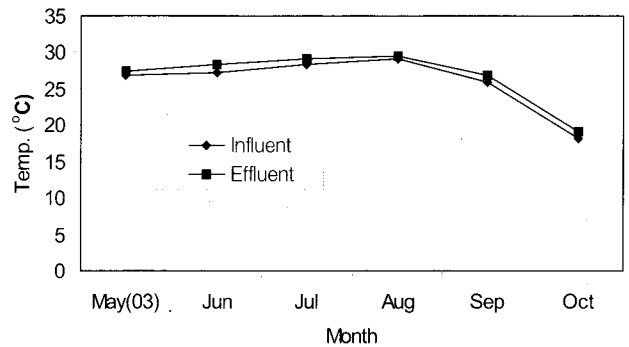
	Height (cm)	Number of Stem (stems/m <sup>2</sup> )	Height increase between measurements (cm)	Stem increase between measurement (stems/m <sup>2</sup> )
2003.5.10. (a)	42.5	9.5	-	-
2003.7.12.	78.8	14.2	36.3 (85%)	4.7 (70%)
2003.9.13. (b)	160.2	16.4	81.4 (103%)	2.2 (16%)
Total increase (b-a)	117.7 (277%)	6.9 (76%)	-	-

(%): increase rate

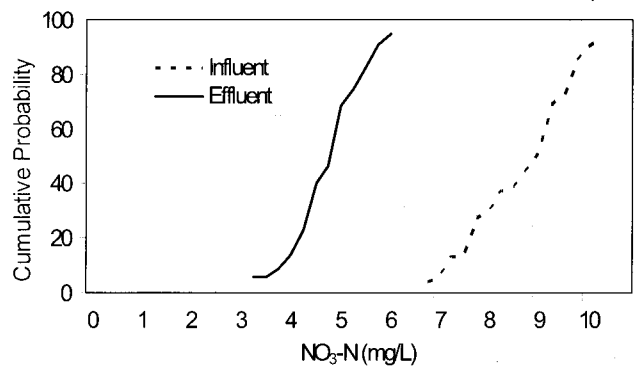
조사기간 유입수와 유출수의 평균수온은 각각 25.9, 26.7°C로 유출수가 0.8°C 높았다(Fig. 2). 이는 습지셀의 수심이 낮고 부들이 그늘을 충분히 제공하지 못하여 햇빛이 습지수면 일부에 도달한데 원인이 있다고 생각한다. 5월~8월은 수온이 완만하게 상승하였으며, 유입수와 유출수의 월평균 수온은 각각 26.8~29.2°C, 27.5~29.5°C의 범위를 보였다. 9월에는 유입수와 유출수의 수온이 다소 내려가 각각 25.9, 26.9°C였으며, 10월에는 각각 18.1, 19.1°C로 내려갔다.

유입수와 유출수의 NO<sub>3</sub>-N 평균부하율은 각각 176.67, 88.09 mg/m<sup>2</sup>·day로 NO<sub>3</sub>-N 평균제거량은 88.58 mg/m<sup>2</sup>·day였다(Table 3). 제거량을 기준으로 습지셀의 NO<sub>3</sub>-N 평균제거율은 약 50%였다. 유입수와 유출수의 T-N 평균농도는 각각 27.35, 10.86 mg/L이었으며, 유입수와 유출수의 T-N 평균부하율은 각각 583.95, 225.14 mg/m<sup>2</sup>·day로, T-N 평균제거량은 358.81 mg/m<sup>2</sup>·day였다. 제거량을 기준으로 시스템의 T-N 평균제거율은 약 61%였다.

Fig. 3은 유입수와 유출수의 NO<sub>3</sub>-N농도 누적확률을 나타낸다. 유입수와 유출수의 NO<sub>3</sub>-N 농도의 범위는 각각 6.46~9.09, 3.44~5.72 mg/L를 보였다. 조사기간 유입수와 유출수의 NO<sub>3</sub>-N 평균농도는 각각 8.46, 4.58 mg/L였고, 표준편차는 각각 1.12, 0.71 mg/L였다. 유출수의 NO<sub>3</sub>-N 농도가 유입수보다 변화가 적어 습지셀이 안정되어 감을 알 수 있다.



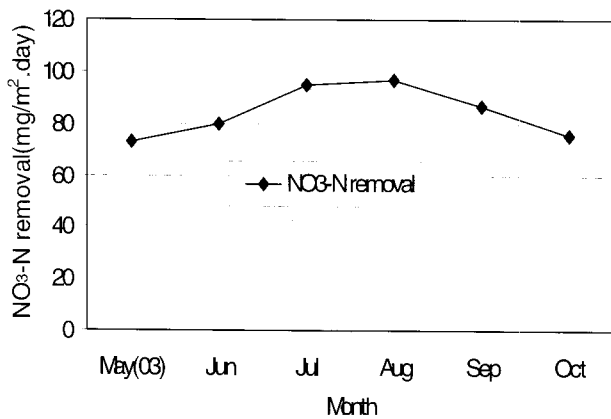
**Fig. 2. Monthly average water temperature of influent and effluent of the wetland cell.**



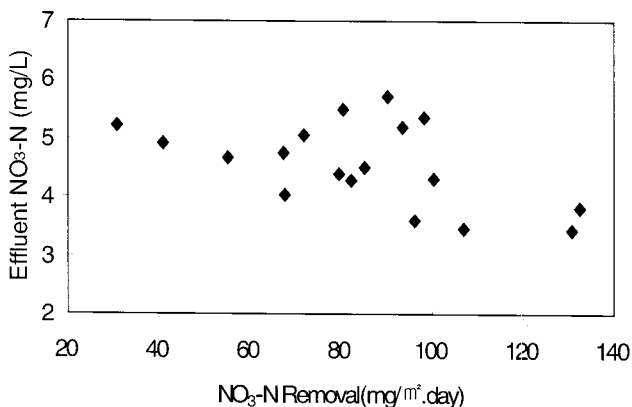
**Fig. 3. NO<sub>3</sub>-N cumulative probability values of influent and effluent of the wetland cell.**

**Table 3. Average hydraulic loading, NO<sub>3</sub>-N and T-N removal for the wetland cell from May through October 2003**

Parameters	Units	Value
Approximate area	m <sup>2</sup>	1,218
Inflow	m <sup>3</sup> /day	25.0
Outflow	m <sup>3</sup> /day	24.1
Inflow NO <sub>3</sub> -N concentration	mg/L	8.46
Outflow NO <sub>3</sub> -N concentration	mg/L	4.58
Inflow NO <sub>3</sub> -N loading	mg/m <sup>2</sup> · day	176.67
Outflow NO <sub>3</sub> -N loading	mg/m <sup>2</sup> · day	88.09
NO <sub>3</sub> -N removal	mg/m <sup>2</sup> · day	88.58
NO <sub>3</sub> -N removal rate by mass	%	50
Inflow T-N concentration	mg/L	27.35
Outflow T-N concentration	mg/L	10.86
Inflow T-N loading	mg/m <sup>2</sup> · day	583.95
Outflow T-N loading	mg/m <sup>2</sup> · day	225.14
T-N removal	mg/m <sup>2</sup> · day	358.81
T-N removal rate by mass	%	61



**Fig. 4. Average monthly removal of NO<sub>3</sub>-N in the wetland cell.**



**Fig. 5. NO<sub>3</sub>-N removal versus effluent NO<sub>3</sub>-N concentration of the wetland cell.**

조사기간 월평균 NO<sub>3</sub>-N 제거량은 5월에 73.05 mg/m<sup>2</sup> · day였으며, 6월에 79.81 mg/m<sup>2</sup> · day로 약간 증가했다가, 7월과 8월에는 각각 95.04, 96.78 mg/m<sup>2</sup> · day로 높아졌다. 9월과 10월에는 87.02, 75.56 mg/m<sup>2</sup> · day로 낮아졌다(Fig. 4).

Fig. 5는 습지셀의 NO<sub>3</sub>-N 제거량과 유출수의 NO<sub>3</sub>-N 농도와 의 상호관계를 보여준다. 제거량이 높을수록 유출수의 NO<sub>3</sub>-N 농도가 낮아지는 경향을 보이고 있다. 습지셀이 초기운영단계여서 아직은 높은 상관성을 보이지 않고 있다.

인공습지에서 질소는 생물화학적 변형, 식물의 흡수, 물리적 작용으로 제거된다. 이 중 생물화학적 변형은 대부분 미생물에 의해 이루어지며, 습지의 질소계에서 중요한 역할을 한다. 유입수에 함유되어 습지로 유입된 유기질소는 암모니아화, 질산화 과정을 거쳐 질산성질소로 전환되며, 질산성질소는 탈질화 과정을 거쳐 질소가스와 아산화질소로 전환되어 대기중으로 이동한다<sup>8,9)</sup>. 유입수의 질소 중 NO<sub>3</sub>-N 함유비율이 높을수록 질소 제거율이 높아지는 경향을 보이며, NO<sub>3</sub>-N의 제거량으로 습지의 탈질화 정도를 간접적으로 추정할 수 있다.

인공습지의 NO<sub>3</sub>-N 제거량은 6~4,000 mg/m<sup>2</sup> · day로 범위가 매우 넓은데<sup>10)</sup>, 본 실험 습지셀의 NO<sub>3</sub>-N 제거량은 비교적 낮은 범위에 속한다. NO<sub>3</sub>-N 제거량이 높은 인공습지는 수온이 적절히 유지되고, 정수식물의 성장과 근권발달이 양호하고, 습지바닥에 잔재물층이 형성되어 있는 시스템이다.

질소제거에 관여하는 미생물의 활동은 온도에 영향을 받는다. 암모니아화, 질산화, 탈질화 미생물의 활동은 20~25℃에서 높으며, 15℃이하와 30℃이상에서는 둔화된다<sup>11)</sup>. Fig. 2에서 조사기간 습지셀의 수온은 10월을 제외하고는 이들 미생물의 활동에 적합한 조건이었다. Fig. 3의 NO<sub>3</sub>-N 월별 평균제거량 추이는 Fig. 2의 월별평균수온과 유사한 경향을 보이고 있다. 습지셀이 어느 정도 안정된 6월부터 10월 사이의 유출수 월평균수온과 습지셀의 NO<sub>3</sub>-N 월평균 제거량과의 상관분석 결과, R<sup>2</sup>=0.6727로 습지셀의 NO<sub>3</sub>-N 제거량은 수온에 영향을 받을 수 있었다. 10월의 NO<sub>3</sub>-N 제거량이 적은 이유는 낮은 수온에 일차적 원인이 있는 것으로 판단된다.

탈질화 과정은 전자를 제공하는 유기탄소원이 필요하며<sup>12)</sup>, 습지식물이 죽어 형성된 잔재물과 유기체살물이 탄소공급원 역할을 한다<sup>13)</sup>. 탄소공급원이 원활하지 못하면 NO<sub>3</sub>-N 제거량이 낮아지게 된다<sup>14)</sup>. 실험기간 습지셀은 부들이 초기성장단계로 습지바닥에 잔재물층이 형성되지 못한 상태였다. 부들을 약 0.3 m 간격으로 식재한 후, 겨울철을 거쳐 1년정도 지나면 겨울철에 죽은 부들의 잎과 줄기가 습지바닥에 쌓여 잔재물층이 형성되기 시작한다. 실험습지셀의 NO<sub>3</sub>-N 제거량이 낮은 원인은 습지바닥에 잔재물층이 형성되지 않아 탈질화에 필요한 탄소공급원이 원활하지 못한데도 원인이 있는 것으로 생각된다.

정수식물의 통기조직을 통해 대기중의 산소가 뿌리에 도달하면 뿌리주변에 호기성 근권이 형성되고, 뿌리와 뿌리사이에는 혐기층이 형성된다. 호기성 근권에서는 암모니아화, 질산화가 일어나며, 혐기층에서는 탈질화가 일어난다. 조사기간 식재한 부들은 활착단계로 근권발달이 원활하지 못하여 NO<sub>3</sub>-N 처리

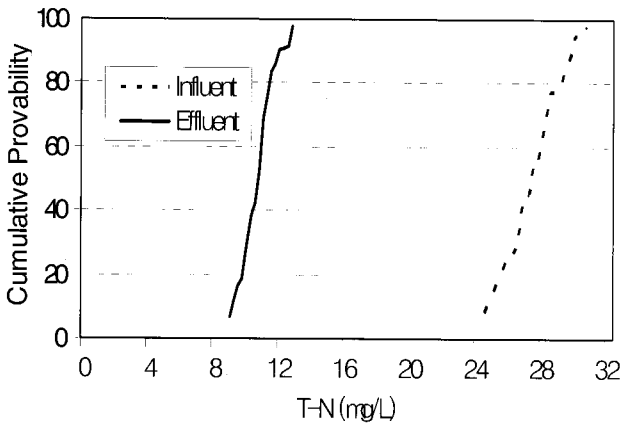


Fig. 6. T-N cumulative probability values of influent and effluent of the wetland cell.

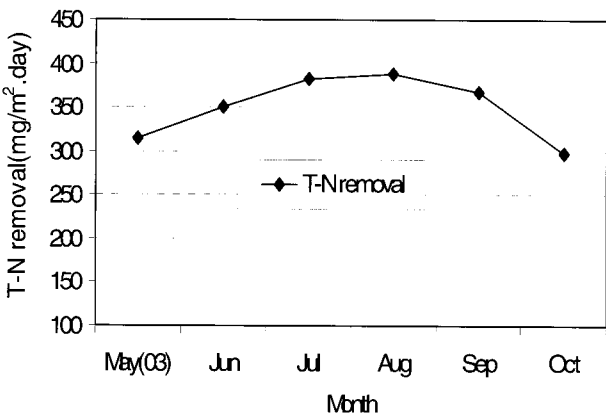


Fig. 7. Monthly average T-N removal in the wetland cell.

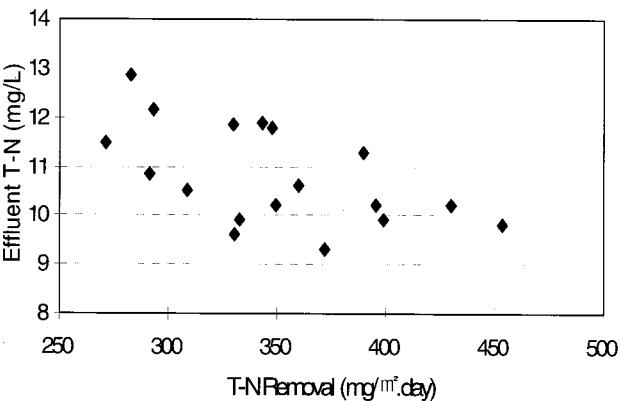


Fig. 8. T-N removal versus effluent T-N concentration of the wetland cell.

율이 다소 낮게 나타난 것으로 사료된다.

Fig. 6은 유입수와 유출수의 T-N농도 누적확률치를 나타낸다. 유입수와 유출수의 T-N 농도의 범위는 각각 24.42~31.40, 9.30~12.86 mg/L를 보였다. 조사기간 유입수와 유출수의

T-N 평균농도는 각각 27.35, 10.86 mg/L였으며, 표준편차는 각각 2.06, 1.02 mg/L였다. NO<sub>3</sub>-N 농도처럼 유출수의 T-N 농도도 유입수보다 변화가 적다.

조사기간 T-N 월평균 제거량은 5월에 315.10 mg/m<sup>2</sup>·day였으며, 6월에 349.44 mg/m<sup>2</sup>·day로 약간 증가했다가 7월과 8월에는 각각 383.02, 387.73 mg/m<sup>2</sup>·day로 높아졌다. 9월과 10월에는 366.55, 297.95 mg/m<sup>2</sup>·day로 낮아졌다(Fig. 7). 습지셀이 어느 정도 안정된 6월~10월 사이의 유출수 월평균수와 습지셀의 T-N 월평균 제거량과의 상관분석 결과, R<sup>2</sup>=0.6829로 습지셀의 T-N 제거량도 수온에 영향을 받을 수 있었다. 10월의 T-N 제거량이 낮은 이유는 NO<sub>3</sub>-N처럼 낮은 수온에 원인이 있는 것으로 판단된다.

Fig. 8은 습지셀의 T-N 제거량과 유출수의 T-N 농도와 의 상호관계를 보여준다. 제거량이 높을수록 유출수의 T-N 농도가 낮아지는 경향을 보이고 있다.

습지에서 질소는 침전, 여과, 흡착에 의해서도 제거된다<sup>15,16</sup>. 직경이 큰 유기질소 입자들은 습지바닥으로 침전되며, 잔재물층은 유기질소 입자를 여과하여 제거하는 역할을 한다. 수중의 정수식물 줄기와 잎, 잔재물의 표면에는 미생물막(biofilm)이 형성되며, 유기질소 입자들이 미생물막에 흡착되어 제거되기도 한다. 실험기간 시스템의 체류시간이 5.2 days로 침전에 의한 유기질소의 제거가 가능한 조건이었으며, 부들의 줄기와 잎에 형성된 미생물막도 질소제거에 기여하였을 것으로 생각된다.

결론

조사기간 습지셀 유입수의 평균유량은 25.0 m<sup>3</sup>/day였으며, 평균체류시간은 약 5.2 days였다. 식재한 부들은 9월에 평균 초장이 160.2 cm로 5월에 비해 약 277% 성장하였으며, 평균 분지수는 9월에 16.4 stems/m<sup>2</sup>로 5월에 비해 76%증가하였다. 실험기간 식재한 부들의 초기성장이 비교적 양호한 편이었다.

유입수와 유출수의 평균수온은 각각 25.9, 26.7°C였으며, 조사기간 수온은 10월을 제외하고는 질소제거 미생물의 활동에 비교적 적합한 조건이었다. NO<sub>3</sub>-N과 T-N 월평균제거량은 수온이 낮아지면 적어지고 수온이 높아지면 많아지는 추이를 보였다. 유입수와 유출수의 NO<sub>3</sub>-N 농도의 범위는 각각 6.46~9.09, 3.44~5.72 mg/L였으며, 유입수와 유출수의NO<sub>3</sub>-N 평균농도는 각각 8.46, 4.58 mg/L였다. 유입수와 유출수의 T-N 농도는 각각 24.42~31.40, 9.30~12.86 mg/L 범위였으며, 유입수와 유출수의 T-N 평균농도는 각각 27.35, 10.86 mg/L였다. 유출수의 NO<sub>3</sub>-N, T-N 농도는 유입수보다 변화가 적어 시스템이 안정되어 감을 알 수 있었다.

조사기간 유입수와 유출수의 NO<sub>3</sub>-N 평균부하율은 각각 176.67, 88.09 mg/m<sup>2</sup>·day로 NO<sub>3</sub>-N 평균제거량이 88.59 mg/m<sup>2</sup>·day였으며, NO<sub>3</sub>-N 평균제거율은 약 50%을 보였다. 유입수와 유출수의 T-N 평균농도는 각각 27.35, 10.86 mg/L였으며, T-N 평균제거량은 358.81 mg/m<sup>2</sup>·day로, T-N 평균

제거율은 약 61%를 나타냈다. 실험습지셀의 NO<sub>3</sub>-N, T-N 제거량이 높을 경우 유출수의 NO<sub>3</sub>-N, T-N 농도가 낮아지는 경향을 보였다. 습지셀이 안정된 6월~10월 사이의 유출수 월평균수온과 습지셀의 NO<sub>3</sub>-N 월평균제거량, T-N 월평균제거량과의 상관분석 결과, R<sup>2</sup>가 각각 0.6727과 0.6829로 습지셀의 NO<sub>3</sub>-N과 T-N 제거량은 수온에 영향을 받을 수 있었다. 실험습지셀이 초기운영단계로 탈질화에 중요한 근권발달과 잔재물층이 형성되지 못한 점을 고려하면, NO<sub>3</sub>-N과 T-N의 제거율은 비교적 양호한 편이라 판단된다. 식재한 부들이 2회의 성장기를 거치면서 부들의 근권이 발달하고 습지셀 바닥에 잔재물층이 형성되면 NO<sub>3</sub>-N과 T-N의 제거율이 높아질 것으로 판단된다.

### 참고문헌

1. EPA (U.S. Environmental Protection Agency) (2000) *Manual: Constructed Wetlands Treatment of Municipal Wastewaters*, Office of Research and Development, Cincinnati, Ohio, p.1-29.
2. EPA (U.S. Environmental Protection Agency) (1999) *Free Water Surface Wetlands for Wastewater Treatment: A Technology Assessment*, p.4-30~4-32.
3. Mitsch, W. J. and Gosselink, J. G. (1999) *Wetlands*, 2nd ed., Van Nostrand Reinhold, New York.
4. 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.
5. 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.
6. Korean Ministry of Environment (2000) *Standard method for water and wastewater analysis*.
7. APHA (American Public Health Association) (1998) *Standard method for the examination of water and wastewater*.
8. Reed, S. C., Middlebrooks, E. J. and Crites, R. W. (1988) *Natural Systems for Waste Management and Treatment*, McGraw-Hill, New York.
9. 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.
10. Bachand, P. A. M. and Horne, 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.
11. Yang, H. (1992) Ecological Design of estuarine environment for a sustainable urban ecosystem, Ph.D. Dissertation, University of California at Berkeley.
12. EPA (U.S. Environmental Protection Agency) (1993) *Manual - Nitrogen control*, Office of Research and Development, Washington, D.C.
13. Broadbent, F. E. and Clark, F. E. (1965) Denitrification, *Agronomy* 10, 344.
14. 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.
15. EPA (U.S. Environmental Protection Agency) (2000) *Manual: Constructed Wetlands Treatment of Municipal Wastewaters*, Office of Research and Development, Cincinnati, Ohio, p.30-48.
16. 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.