

하천수를 정화하는 자유수면습지의 식물 성장기와 비성장기의 질소제거 비교*

양 홍 모

전남대학교 조경학과

Comparison of Nitrogen Removal During Plant Growing Season with Non-Growing One in Free Water Surface Wetlands Purifying Stream Water*

Yang, Hongmo

Dept. of Landscape Architecture, Chonnam National University.

ABSTRACT

Removal rates of NO₃-N and TN in a free water surface wetland system during emergent plant growing season and non-growing were investigated. The system was established on floodplain in the down reach of the Gwangju Stream in 2008. Its dimensions were 46 meters in length and 5 meters in width. *Typha angustiflora* L. growing in pots about two years were planted on the half area of the system and *Zizania latifolia* Turcz on the other half. Water of the stream was funneled into it by gravity flow and its effluent was discharged back into it. Volumes and water quality of inflow and outflow were analyzed from October 2008 to September 2009. Inflow into the system averaged approximately 715 m³/day and hydraulic residence time was about 1.5 hr. Average influent and effluent NO₃-N concentration was 3.37 and 2.74 mg/L, respectively and NO₃-N retention amounted to 18.7%. Influent and effluent TN concentration averaged 4.67 and 3.69 mg/L, respectively and TN abatement reached to 20.9%. NO₃-N removal rate (%) during plant growing season (22.67 ± 3.70, mean ± standard

* 본 논문은 환경부 차세대핵심환경기술개발사업 “택지개발지역에서의 훼손된 수생태계 복원, 창출, 향상 기술개발” 과제의 연구비 일부로 수행되었습니다.

Corresponding author : Yang, Hongmo, Dept. of Landscape Architecture, Chonnam National University, Gwangju 500-757, Korea,
Tel : +82-62-530-2101, Email : hmy@chonnam.ac.kr

Received : 4 January, 2010. **Accepted** : 16 February, 2010.

error) was significantly high ($p < 0.001$) when compared with that during plant non-growing one (15.02 ± 3.23). TN abatement rate (%) during plant growing season (27.42 ± 5.98) was also significantly high ($p < 0.001$) when compared with that during plant non-growing one (13.66 ± 3.08).

Key Words : *Free water surface wetlands, Emergent plants, Nitrification, Denitrification, Rhizomes.*

I. 서 론

습지가 수질을 정화한다는 사실은 오래 전부터 알려져 왔으며 습지가 가지고 있는 이런 수질정화 기능을 효율적으로 활용하기 위해 인위적으로 조성한 습지를 인공습지(constructed wetlands) 혹은 수질정화인공습지(constructed treatment wetlands)라 부른다. 인공습지는 크게 자유수면습지(free water surface wetlands)와 여과습지(subsurface-flow wetlands)로 대별할 수 있다(Corbitt and Bowen, 1994). 자유수면습지는 일반적으로 1~2 m 높이의 습지 독을 조성한 후, 습지 바닥에 정수식물을 식재하고, 수심을 약 20~30 cm 깊이로 유지시켜 운영하며, 유입수가 습지표면을 느린 속도로 흐르면서 정화된다.

2차처리(secondary treatment) 수준으로 수질을 정화하는 시설인 연못시스템이나 하수처리장의 방류수를 3차처리(tertiary treatment) 수준으로 정화하기 위해 인공습지를 주로 활용하여 왔으며, 최근에는 하천수를 정화하기 위해서도 인공습지를 활용하고 있다. 하천수를 정화하는 인공습지는 하천제방 밖의 제내지에 설치하고 있으며, 도시하천의 경우 제내지에 인공습지를 조성할 토지 확보가 어려워 하천 고수부지에 조성하는 경우가 많다.

인공습지에서 질소는 생물화학적 반응인 암모니아화-질산화-탈질화로 주로 제거되며, 정수식물의 흡수에 의해서도 제거된다(EPA, 1993, 1999; Mitsch and Gosselink, 2000; 양홍모, 2005). 습지에서 제거되는 질소의 총량 중에서 탈질화로 제거되는 양이 약 60~70%이며, 식물에 흡수되어 제거되는 양은 약 10~25%이다(Faulkner and

Richardson, 1989; Vymazal et al., 1998, Spiels and Mitsch, 2000). 물리적 반응인 침전, 여과, 흡착에 의해 제거되는 질소의 양은 상대적으로 적다.

온대권에서 겨울철에 죽은 정수식물의 잎과 줄기는 잔재물(litter)이 되어 습지바닥에 쌓이게 된다. 온대권에서는 쌓이는 잔재물의 양이 분해되는 양보다 많아 습지바닥에 잔재물 층이 점진적으로 높아져 습지체적이 줄어든다. 따라서 습지바닥을 여분의 깊이가 있도록 설계하고, 수위를 조절할 수 있도록 조성한다. 바닥에 쌓인 잔재물의 일부는 물속에서 분해되어 유기쇄설물(detritus)이 되며, 유기쇄설물이 분해되는 과정에서 식물에 흡수되었던 질소의 일부가 습지의 물로 되돌아올 수 있다. 식물이 흡수한 질소는 잔재물의 분해과정을 통해 습지의 물로 되돌아올 수 있으나, 탈질화로 $\text{NO}_3\text{-N}$ (질산태질소)가 N_2 (질소가스)와 N_2O (아산화질소)로 전환되어 습지에서 대기 중으로 이동하면, 이동한 만큼 습지에서 질소가 제거된다.

인공습지의 질소제거율(%) 연구는 유입수에 함유된 질소농도와 처리수의 질소농도를 기준으로 분석한 경우가 대부분이며, 수질분석 기간이 6개월 이내인 경우가 대부분이다. 유입수의 체류시간이 1.5일 이상인 인공습지를 대상으로 질소제거를 연구한 경우가 대부분이며, 체류시간이 짧은 인공습지의 질소정화 연구는 매우 드물다. 본 연구는 체류시간이 짧은(1.5 hr) 하천수를 정화하는 자유수면습지를 1년간 조사분석하여, 정수식물이 성장하는 시기와 성장하지 않는 시기의 질소제거율을 비교연구하는데 목적이 있다.

II. 재료 및 방법

1. 실험시스템 구조

실험 자유수면습지 시스템은 광주광역시를 흐르는 광주천 중류의 고수부지에 2008년 6월에 광주천 복원사업의 일환으로 조성되었다. 그림 1은 실험 시스템의 개념도이다. 습지바닥의 규모는 길이 46 m, 폭 약 5 m로 면적이 약 230 m²이며, 사면의 경사는 약 1 : 2이다. 시민들이 습지내부를 관찰할 수 있도록 징검다리(stepping stones)가 두 곳에 놓여있다. 2008년 6월에 포트(pot)에서 2년 성장한 부들(*Typha angustiflora* L.)과 줄(*Zizania latifolia* Turcz.)을 약 30 cm 간격으로 유입부 쪽으로 전체습지의 1/2에는 부들을, 유출부 쪽으로 전체습지의 1/2에는 줄을 식재하였다. 광주천 하천수가 수중보로부터 자연유하로 시스템에 유입되며 처리수는 광주천으로 방류된다. 유입부에는 유량조절 밸브가, 유출부에는 수위조절 장치가 설치되어 있다.

2008년 6월에 식재한 부들과 줄은 정상적으로 성장하다 2008년 10월부터 잎과 줄기가 시들기 시작하였다. 2008년 겨울을 지나 2009년 4월에는 수면위로 잎과 줄기가 올라오기 시작하였고 2009년 9월까지 성장하였다.

2. 처리수준 및 식생생장 조사

2008년 10월부터 2009년 9월까지 1년간 유입수와 유출수를 약 일주일에 한 번씩 샘플링하여 수질오염공정시험방법(환경부, 2003)을 기준으

로 수질을 분석하였다. 수온과 pH는 현장에서 Scott pH-Meter(CG 347)로 측정하였다. 시스템의 평균 유입량은 월 1회 유입부에서 1분 동안 흐르는 양을 받아서 산출하였다.

부들과 줄의 초장과 분지수의 조사는 1m×1m 격자틀을 이용하여 부들과 줄이 성장을 멈추는 2008년 10월말과 이들이 성장하는 2009년 5월말과 8월말에 조사하였다. 부들 식재구역과 줄 식재구역에서 유입수가 흐르는 방향을 기준으로 유입부(St1), 중앙부(St2), 유출부(St3)에서 각각 3군데씩 조사하였다. 분지수는 격자틀 내의 전수를 조사하였으며, 초장은 격자틀 내의 10개체를 측정하였다. 초장과 분지수는 유입부, 중앙부, 유출부에서 조사한 3개 격자틀의 평균값으로 분석하였다.

정수식물이 성장하지 않는 2008년 10월부터 2009년 3월까지 6개월간 수질분석자료와, 정수식물이 성장하는 2009년 4월부터 2009년 9월까지 6개월간 수질분석자료를 기초로 정수식물 성장기와 정수식물 비성장기의 TN, NO₃-N의 처리 효율을 비교분석하였다. t-Test 등 통계분석에는 PC용 Excel 프로그램에 연결하여 운영되는 통계 프로그램인 DDXL(Data Desk/XL)을 사용하였다.

III. 결과 및 고찰

1. 자유수면습지 설계모형

자유수면습지의 설계에서 고려하는 중요한 인자는 수심, 면적, 온도, 공극률, 체류시간, BOD

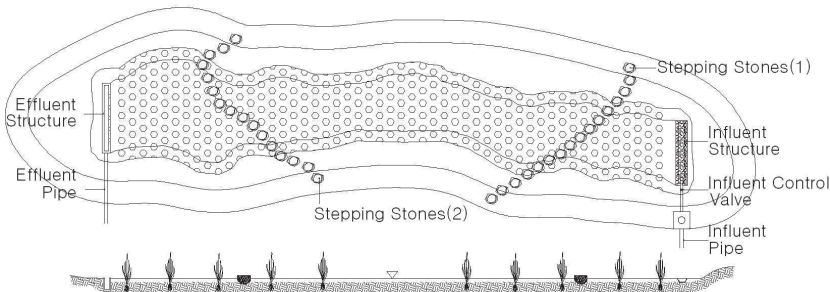


Figure 1. Schematic plan and section of the free surface-flow treatment wetlands established on floodplain in the Gwangju stream.

혹은 TN 부하율 등이다. 인공습지의 소요면적 산출에는 EPA 모델, Kadlec 모델, Reed et al. 모델 등이 활용되고 있으며(Reed et al., 1995; Kadlec and Knight, 1996; EPA, 2000) 이들 중 Reed et al. 모델이 자주 사용된다.

오염물질의 농도가 상대적으로 낮은 하천수 혹은 2차처리장 방류수를 정화하는 자유수면습지는 일반적으로 BOD 보다는 TN 제거를 기초로 개발된 설계공식을 활용하여 조성한다.

아래 식 (1)과 (2)는 TN 제거를 위한 자유수면습지의 소요면적을 산출하는 공식이다(Reed et al., 1995). 식 (2)는 온도보정 상수를 산출하는 공식이다.

$$As = (Q) \ln(Co/Ce) / (K_T)(y)(n) \dots\dots\dots (1)$$

$$K_T = 0.2187(1.048)^{(T-20)} \dots\dots\dots (2)$$

- Ce = 유출수 TN (mg/L), Co = 유입수 TN(mg/L)
- As = 인공습지 면적(m²), y = 수심(m)
- Q = 평균유입 유량(m³/d), n = 시스템 공극율
- K_T = 온도보정 상수(d⁻¹), T = 평균수온

식 (1)에서 인공습지면적이 산정되면 체류시간은 (As)(y)/(Q)로 계산할 수 있다. 습지면적, 유입 유량, 유입수 TN농도, 수심, 수온이 일정하면, 체류시간은 목표수질인 유출수의 TN 농도에 따라 달라진다. 목표수질 TN의 농도를 낮게 설정할수록 체류시간이 길어지며, 체류시간을 짧게 운영하면 처리수의 TN 농도가 높아져 유입수와 처리수의 TN농도를 기준으로 산출하는 TN 처리율은 낮아지게 된다. 그러나 습지에서 처리하는 연간 TN 총량(kg/ha/yr) 관점에서는 적절한 목표수질의 TN 농도와 체류시간을 적용할 필요가 있다.

2. 정수식물의 질소제거 역할

인공습지의 유입수에 함유되어 있는 오염물질을 유기물과 무기물로 구분할 수 있으며, 이들을 크기에 따라 침전이 가능한 입자(직경 > 100 μ m), 콜로이드(직경 10⁻³ ~ 1 μ m), 용해(직경 < 10⁻³ μ m) 상

태로 구분한다. 유기물에 함유된 유기태 N이 무기태 N, 즉 NH₄⁺-N(암모니아태질소)으로 전환되는 과정을 암모니아화(ammonification)라고 부른다. 암모니아화 반응은 산소가 많은 호기상태에서 빠르게 일어나며, 산소가 부족한 조건성(facultative) 상태나 산소가 없는 혐기 상태로 전환되면 반응이 급격히 느려진다. 질산화는 호기성 미생물에 의해 NH₄⁺-N가 NO₃⁻-N로 전환되는 것을 말하며, 질산화 중간과정에서 NO₂⁻-N(아질산태질소)가 생성된다. 질산화 박테리아는 NH₄⁺과 NO₂⁻을 산화시키는 과정에서 활동에 필요한 에너지를 얻으며, 이때 O₂가 전자수용체가 된다.

혐기성 혹은 조건성 상태에서 NO₃⁻가 N₂로 전환되는 과정을 탈질화라고 부르며, 질소는 몇 개의 단계를 거쳐 N₂ 가스로 환원된다. 탈질화 과정은 전자를 공급해주는 유기물이 필요하며, 습지바닥에 쌓인 정수식물의 잔재물이 분해되어 형성되는 유기쇄설물(detritus)이 중요한 전자공급원이 된다(Broadbent and Clark, 1965; EPA, 1993). 탈질화 과정에서는 NO₃⁻가 전자수용체 역할을 한다. 탈질화 박테리아는 조건성 상태에서는 유기물을 CO₂와 H₂O로 산화시키면서 에너지를 얻을 수 있다. 탈질화 박테리아는 조건성 상태와 혐기 상태에서 전자전달과정을 통해 활동에 필요한 에너지를 얻으며, 혐기상태에서 활동이 더욱 활발해진다(Vymazal et al., 1998).

자유수면습지의 정수식물은 수질정화에 중요한 역할을 한다. 물속에서 산소는 용해되는 양이 적고 확산계수가 낮아 공기 중의 산소보다 3 × 10⁶ 배 느린 속도로 확산된다(Vymazal et al., 1998). 따라서 물에 잠겨 있는 습지토양은 낮은 깊이의 표토층을 제외하고는 혐기상태가 된다. 정수식물은 대기 중의 산소를 근경과 뿌리에 도달시키는 통기조직이 발달해 있다. 뿌리와 근경에 도달한 산소는 뿌리와 근경의 호흡에 이용되며, 일부는 뿌리표면으로부터 누출되어 뿌리 주변의 근권(rhizosphere)이 호기상태가 된다. 호기층에서는 질산화 박테리아에 의해 질산화가 일어나며, 호

기성 미생물에 의해 유기물이 분해된다. 정수식물 뿌리표면으로부터 산소누출율은 $10 \sim 160 \text{ ng oxygen/cm}^2$ 로 범위가 넓다(Vymazal et al., 1998). 뿌리표면으로부터 떨어진 습지토양은 산소가 공급되지 않아 혐기상태가 유지된다. 혐기층에서는 탈질화 박테리아에 의해 탈질화가 일어나며, 혐기성 화학반응이 일어난다. 정수식물은 습지토양에 호기층과 혐기층이 공존하도록 만들어주며, 습지토양의 호기층과 혐기층은 질소정화에 중요한 역할을 한다. 통기조직은 탈질화 박테리아에 의해 발생하는 N_2 , N_2O 가스가 습지토양으로부터 대기로 이동하는 통로역할도 한다(Faulker and Richardson 1989).

물속에 잠긴 습지식물의 줄기와 잎은 유입수의 유속을 느리게 하여 직경이 큰 유기질소 입자의 침전을 도와준다. 물속에 잠긴 정수식물 줄기 및 잎의 표면과 습지바닥에 쌓인 정수식물의 잔재물 표면에 미생물막(biofilm)이 형성되며, 유기 및 무기 질소 입자들이 미생물막에 흡착되어 질소가 제거되기도 한다(EPA, 2000). 정수식물은 성장에 필요한 질소를 뿌리로부터 주로 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 형태로 흡수한다. 인공습지의 운영과정에서 대부분 정수식물을 수확하지 않으며, 정수식물이 흡수한 질소의 일부는 잔재물의 분해과정에서 습지의 물속으로 되돌아 올 수 있다(Geosberg et al., 1985). 정수식물을 수확할 경우 습지로부터 제거되는 질소의 양은 약 $200 \sim 2500 \text{ kg/ha/year}$ 이다(Brix and Schierup, 1989). 분해가 덜되거나 분해가 어려운 잔재물은 습지바닥에 쌓이며 이 경우 잔재물에 함유된 질소는 습지에 저장된다.

수질정화 자유수면습지를 조성할 경우 정화효율을 높이기 위해 일반적으로 정수식물인 부들, 고랭이, 줄, 갈대를 식재한다. 대부분 단일 수종으로 식재하며, 부들, 고랭이, 줄을 구역으로 나누어 식재하는 경우가 있다. 수질정화 자유수면습지 조성에서 침수식물은 거의 식재하지 않는다. 조성 후 침수식물이 습지로 유입될 수 있으나, 정수식물이 식재된 수심 $20 \sim 30\text{cm}$ 의 폐수부

(closed water)는 그늘로 인하여 침수식물이 성장하기에는 적합하지 못한 환경이 된다. 수심 약 1 m 깊이의 개수부(open water)에는 침수식물이 성장할 수 있으며, 침수식물의 표면에 형성된 미생물막은 질소제거에 어느 정도 기여할 수 있다. 자유수면습지 설계에서 개수부는 폐수부에 비해 적은 면적을 설계하며, 따라서 침수식물에 의해 제거되는 질소의 양은 상대적으로 적다. 실 규모(full-scale) 혹은 현장 실험규모(meso-scale) 인공습지의 수질정화 연구에서 침수식물에 의한 질소 제거 연구는 거의 없다.

3. 정수식물 생장

2008년 6월 식재한 부들과 줄은 비교적 양호한 활착을 보였으며, 겨울철에는 부들과 줄의 지상부가 죽어 일부는 잔재물이 되어 습지바닥에 쌓였다. 부들 식재구간에서 부들이 성장을 멈추고 시들어가는 2008년 10월에 평균분지수가 St1(유입부), St2(중간부), St3(유출부)에서 각각 20.4, 19.7, 22.3 stems/m²을 보였다. 이듬해 2009년 5월에는 부들 평균분지수가 St1, St2, St3에서 각각 31.5, 28.2, 32.8 stems/m²이었으며, 8월에는 St1, St2, St3에서 각각 42.3, 49.4, 45.1 stems/m²을 보였다(그림 2). 부들의 평균초장은 St1, St2, St3에서 2008년 10월에 각각 84.3, 87.8, 80.9 cm이었으며, 2009년 5월에는 각각 137.4, 132.1, 141.6 cm였고, 2009년 8월에는 각각 125.3, 116.7, 129.5 cm를 보였다(그림 3).

줄 식재구간에서 줄이 성장을 멈추고 시들어가는 2008년 10월에 평균분지수가 St1, St2, St3에서 각각 27.3, 23.1, 20.6 stems/m²을 보였다. 2009년 5월에는 줄의 평균분지수가 St1, St2, St3에서 각각 39.2, 37.8, 35.4 stems/m²이었으며, 8월에는 St1, St2, St3에서 각각 46.7, 50.5, 48.3 stems/m²을 보였다(그림 4). 줄의 평균초장은 St1, St2, St3에서 2008년 10월에 각각 102.6, 106.3, 110.4 cm이었으며 2009년 5월에는 각각 155.2, 142.7, 161.7 cm를, 2009년 8월에는 각각 135.2,

128.6, 143.3 cm를 보였다(그림 5).

부들과 줄의 초장이 2009년 8월에 2009년 5월 보다 작은 이유는 5월 조사 이후에 새로운 줄기가 나와 성장하는 과정에 있었기 때문이다. 조사에서 정수식물 성장기인 2009년 4월 ~ 9월 사이에 부들과 줄의 성장이 양호하였음을 알 수 있다.

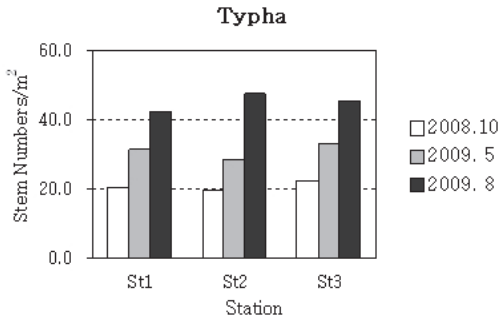


Figure 2. Average stem numbers of *Typha* per square meter.

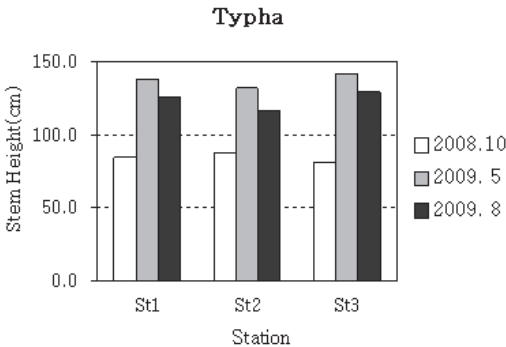


Figure 3. Average stem height of *Typha*.

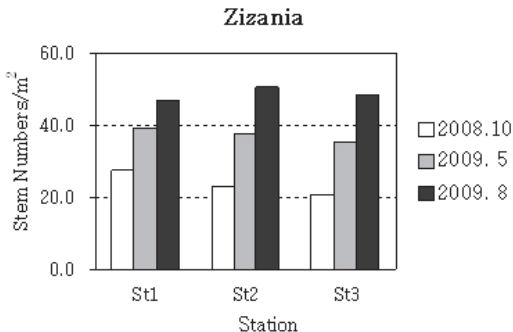


Figure 4. Average stem numbers of *Zizania* per square meter.

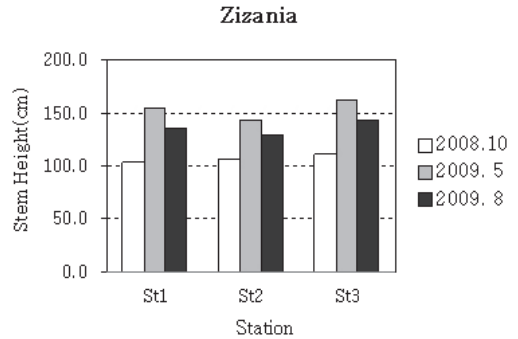


Figure 5. Average stem height of *Zizania*.

4. 질소 처리수준

조사기간 시스템의 유입수 평균유량은 약 715 m³/day였으며, 수심을 약 25 cm가 유지되도록 운영하여 평균 체류시간은 약 1.5 hr였다. 수질분석 결과 유입수와 유출수의 NH₃-N(암모니아태질소), NO₂-N(아질산태질소)의 농도가 매우 낮아 이들을 제외하고, NO₃-N과 TN을 중심으로 질소제거율을 분석하였다. NO₃-N과 TN분석에서 이들이 저농도일 경우 소숫점 2자리까지 활용하여 분석하고 있으며(Kadlec and Knight, 1996; Bachand and Home, 2000) 본 연구에서도 소숫점 2자리까지를 활용하여 분석하였다.

1) 정수식물 성장기 · 비성장기 질소 제거효과

그림 6은 실험습지의 유입수와 유출수 NO₃-N 월평균 농도를 보여준다. 조사기간 유입수와 유출수의 평균 NO₃-N농도는 각각 3.37 mg/L, 2.74 mg/L로 NO₃-N 평균제거율은 약 18.7%를 나타냈다. 그림 7은 실험습지의 유입수와 유출수의 월평균 TN 농도를 나타낸다. 조사기간 유입수와 유출수의 평균 TN 농도는 각각 4.67 mg/L, 3.69 mg/L로 TN 평균제거율은 20.9%를 보였다. 시스템이 초기운영 단계였고, 체류시간이 1.5 hr로 짧았으며, 수온이 낮은 겨울철이 조사기간에 포함된 점을 고려하면 NO₃-N과 TN 처리율은 비교적 양호한 편이라고 사료된다.

그림 8은 시스템에서 제거된 NO₃-N과 TN 제

거울(%)를 나타낸다. 정수식물 성장기 6개월(2009년 4월 ~ 2009년 9월)의 NO₃-N 평균제거율은 22.9%였으며, 정수식물 비성장기 6개월(2008년 10월 ~ 2009년 3월)의 NO₃-N 평균제거율은 14.9%로 정수식물 성장기의 제거율이 8.0% 높게 나타났다. 조사기간 높은 NO₃-N 월평균 제거율을 보인 달은 7월, 8월, 9월로 각각 26.4, 26.7, 25.3%였고, 낮은 제거율을 보인 달은 12월, 1월, 2월로 각각 11.0, 13.8, 12.8%의 처리율을 보였다. 정수식물 성장기의 TN 평균제거율은 28.1%였으며, 비성장기 TN 평균제거율은 13.6%로 정수식물 성장기의 TN 제거율이 14.5% 높게 나타났다. 조사기간 월평균 TN 제거율이 높은 달은 7월, 8월, 9월로 제거율이 각각 32.4, 36.7, 29.0%를 보였고, 낮은 제거율을 보인 달은 12월, 1월, 2월로 각각 10.1, 11.4, 12.8%의 제거율을 보였다. 정수식물이 성장을 멈추거나 지상부의 줄기와 잎이 마른 달의 NO₃-N과 TN 제거율이, 정수식물이 성장하는 달의 제거율 보다 낮게 나타났다.

구원석 등(2004)과 양홍모 (2008)의 인공습지 연구에서도 정수식물 성장기인 7월 ~ 9월의 TN 제거율이 정수식물 비성장기인 12월 ~ 2월보다 높게 나타나고 있다. 그림 8에서 TN 제거율 추세는 NO₃-N 제거율 추세와 유사한 경향을 보이고 있다. 습지에서 TN 제거는 탈질화에 의한 NO₃-N의 제거에 영향을 받기 때문이다.

하천수를 정화하는 자유수면 인공습지에 대한 연구는 상대적으로 적다. 표 2는 미국, 일본, 한국에서 하천수를 정화하는 자유수면 인공습지의 TN 제거율(%)를 나타낸다. 유입수의 TN농도는 1.29 ~ 4.62 mg/L 범위이며, TN 제거율은 30 ~ 51% 범위이다. 유입수 체류시간은 2 weeks ~ 3 hr로 범위가 넓다. 실험습지의 TN 제거율이 20.9%로 다소 낮은 이유는 체류시간이 1.5 hr로 짧은데 일차적 원인이 있는 것으로 사료된다. 미국과 캐나다에 조성된 인공습지의 모니터링자료를 집대성한 NADB(North American Treatment Wetland Database)에 의하면 인공습지의 평균 TN 제거율

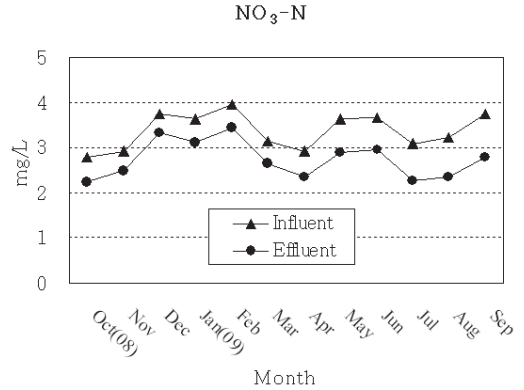


Figure 6. Monthly average NO₃-N concentration of influent and effluent.

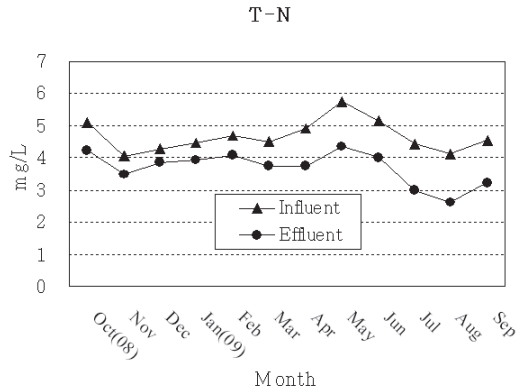


Figure 7. Monthly average TN concentration of influent and effluent.

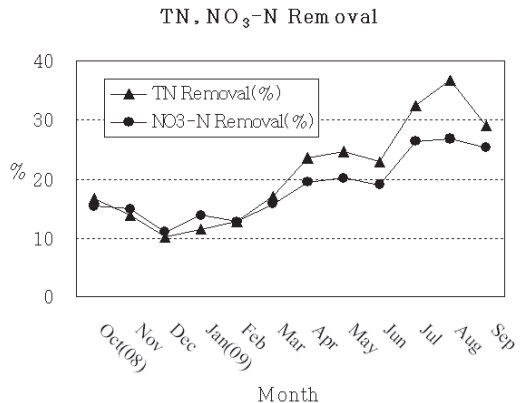


Figure 8. Monthly average removal(%) of TN and NO₃-N.

Table 1. Removal of Total Nitrogen in free surface-flow wetlands purifying stream water in USA and Japan.

System	Area (ha)	Inflow (m ³ /day)	DT	HL	TN In (mg/L)	TN Out (mg/L)	TN Removal (%)
Des Plaines (USA)	10,13	4,635	1 ~ 2 wk	4.6	2.73	1.34	51
Sukmoon Reservoir (Korea)	0.8	500 ~ 1,500	2 ~ 6 d	6.25 ~ 18.75	4.39	2.59	39
Sinyang Stream (Korea)	0.19	120	3.5 d	-	5.77	3.26	47
Olentangy River (USA)	1.0	1,000	2.5 d	3.7	4.62	2.52	44
Hurugawa (Japan)	1.9	17,280	1.7 d	-	1.29	0.80	38
Gwangju Stream (Korea)	0.037	40	1.5 d	-	3.89	2.03	48
Seimeigawa (Japan)	0.14	777	9 hr	-	3.00	2.10	30
Sannogawa (Japan)	0.56	18,240	5 hr	-	3.40	2.30	32
Snagawa (Japan)	0.375	86,400	3 hr	-	2.14	1.50	30

DT : Detention Time, wk : week, d : day, hr : hour

HL : Hydraulic Loading (cm/day)

Sources : Kadlec and Knight, 1996; Mitsch and Gosselink, 2000; 河川環境管理財團, 2000; 양홍모, 2002, 2008; 구원석 등, 2004.

은 약 53%이다(EPA, 1999). NADB의 수질정화 인공습지는 대부분 2차처리장 혹은 연못시스템의 방류수를 정화하는 시스템이다.

2) 수온에 따른 질소제거효과

인공습지에서 오염물을 제거하는 미생물의 활동은 수온에 영향을 받는다. 암모니아의 질산화와 질산태질소의 탈질화에 영향을 미치는 미생물의 활동은 20 ~ 25°C에서 높으며, 15°C 이하와 30°C 이상에서는 급격히 둔화된다. 그림 8의 NO₃-N과 TN 제거율 추세를 그림 9의 처리수 수온의 추세와 유사한 경향을 보이고 있다. 이는 습지에서 NO₃-N과 TN의 제거는 수온과 관련이 높기 때문이다.

그림 9는 조사기간 시스템의 유입수 및 유출수 월평균 수온을 나타낸다. 조사기간 유입수와 유

출수의 평균수온은 각각 17.3°C, 16.9°C를 나타냈다. 유출수의 수온이 유입수의 수온보다 0.4°C 낮은 이유는 시스템에 개수부(open water)가 없고 정수식물이 습지 가장자리까지 덮고 있어 그늘로 인하여 습지의 수온이 내려간 것으로 사료된다. 정수식물 비성장기 6개월의 유입수와 유출수의 평균 수온은 각각 10.6, 10.5°C이었으며, 정수식물 성장기 6개월의 유입수와 유출수의 평균 수온은 각각 24.0, 23.2°C를 보였다.

그림 9에서 정수식물 성장기인 2009년 4월, 5월, 6월, 7월, 8월, 9월 처리수의 월평균 수온은 각각 17.2, 22.8, 23.7, 25.0, 26.6, 23.8°C를 나타냈다. 4월을 제외하고는 NO₃-N과 TN의 분해에 영향을 미치는 미생물의 활동에 적합한 수온이었다. 그림 9에서 5월 ~ 9월에 TN과 NO₃-N의 처리율이 높게 나타났으며, 8월에 NO₃-N과 TN의 처

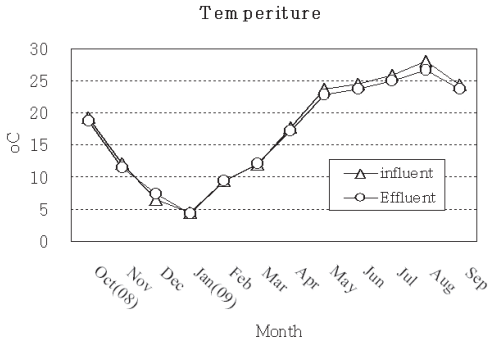


Figure 9. Monthly average temperature of influent and effluent.

리올이 가장 높게 나타난 것은 미생물의 활동에 가장 적합한 수온이었음을 알 수 있다. 정수식물 비성장기인 2008년 10월, 11월, 12월, 2009년 1월, 2월, 3월의 처리수 월평균수온은 각각 18.6, 11.4, 7.3, 4.3, 9.5, 12.2°C로 미생물의 활동에 적합하지 않은 수온이었다. 그림 9에서 TN과 NO₃-N의 처리율이 12월, 1월, 2월에 급격히 낮아진 원인은 수온이 낮아 미생물의 활동이 저하된데 원인이 있는 것으로 사료된다.

3) 질소제거효과 *t*-검정

정수식물이 성장하는 시기와 정수식물이 성장하지 않은 시기의 TN과 NO₃-N 처리율(%)에 차이가 있는지 알아보기 위해 *t*-검정을 수행하였다. 표 2에서 NO₃-N 제거율에 대한 *t*-검정결과 ‘*H*₀ : 조사기간 정수식물 성장기와 정수식물 비

성장기의 NO₃-N 제거율(%)의 평균이 같다.’라는 귀무가설이 유의수준 $\alpha=0.01$ 에서 기각되어($p < 0.001$), ‘정수식물 성장기와 정수식물 비성장기의 NO₃-N 제거율이 다르다.’라고 말할 수 있다. 따라서 식물성장기의 NO₃-N 제거율(22.67 ± 3.70)이 식물 비성장기의 제거율 NO₃-N(15.02 ± 3.23)보다 높다고 볼 수 있다. TN 제거율에 대한 *t*-검정결과에서도 유의수준 $\alpha=0.01$ 에서 귀무가설 ‘*H*₀ : 조사기간 정수식물 성장기와 정수식물 비성장기의 TN 제거율(%)의 평균이 같다.’가 기각되어($p < 0.001$), 정수식물 성장기의 TN 제거율(27.42 ± 5.98)이 정수식물 비성장기의 TN 제거율(13.66 ± 3.08)보다 높다고 볼 수 있다. 정수식물 성장기에 NO₃-N, TN 제거가 효율적임을 알 수 있다.

IV. 결 론

본 연구는 하천수를 정화하기 위해 고수부지에 조성한 자유수면습지에서 2008년 10월부터 2009년 9월까지 1년간의 수질조사를 기초로 정수식물 성장기와 비성장기의 NO₃-N과 TN 제거율을 비교분석하였다. 2008년 6월에 식재한 부들과 줄은 비교적 양호한 활착을 보였으며, 2009년 4월부터 새줄기가 수면위로 나와 양호한 성장을 하였다.

실험기간 유입수 평균유량은 715 m³/day였고,

Table 2. Summary of *t*-test statistics for NO₃-N and TN removal (%) from the wetlands during emergent plant growing period with non-growing one. Normality test of the sample data sets showed that their distributions were approximately normal.

Parameters	Plants	N	Mean ± S.E.	<i>t</i> Value	<i>p</i>
NO ₃ -N Removal (%)	GP	23	22.67 ± 3.70	7.371	< 0.001
	NGP	23	15.02 ± 3.23		
TN Removal (%)	GP	23	27.42 ± 5.98	9.805	< 0.001
	NGP	23	13.66 ± 3.08		

GP : plant growing period NGP : plant non-growing period.

N : sample numbers S.E. : standard error.

p : *p*-values obtained by *t*-tests assuming equal variance.

평균 체류시간은 1.5 hr였으며, 유입수와 처리수 평균수온은 각각 22.0°C, 22.4°C였다. 실험기간 유입수와 처리수의 NO₃-N 평균농도는 각각 3.37 mg/L, 2.74 mg/L로 18.7%의 NO₃-N 제거율을 보였고, 유입수와 처리수의 TN 평균농도는 각각 4.67 mg/L, 3.69 mg/L로 20.9% TN 제거율을 보였다. 초기운영 단계, 1.5 hr의 짧은 체류시간, 수온이 낮은 겨울철의 조사기간 포함 등을 고려하면 NO₃-N과 TN 처리율은 비교적 양호한 편이다.

정수식물 성장기의 NO₃-N 평균제거율은 22.9%였으며, 비성장기의 NO₃-N 평균제거율은 14.9%였다. 정수식물 성장기의 TN 평균제거율은 28.1%였으며, 비성장기 평균제거율은 13.6%로 나타났다. *t*-검정 결과 유의수준 $\alpha=0.01$ 에서 정수식물이 성장하는 시기의 NO₃-N 제거율(22.67 ± 3.70)이 정수식물이 성장하지 않는 시기의 NO₃-N 제거율(15.02 ± 3.23)보다 높았고, 유의수준 $\alpha=0.01$ 에서 정수식물 성장기의 TN 제거율(27.42 ± 5.98)도 정수식물 비성장기의 TN 제거율(13.66 ± 3.08)보다 높았다. 정수식물 성장시기의 NO₃-N과 TN 제거가 정수식물 비성장기보다 효과적이었다.

정수식물 성장기의 NO₃-N과 TN 제거율이 비성장기보다 높은 이유는 정수식물의 통기조직을 통하여 대기 중의 산소가 뿌리로 도달하여 뿌리 주변에 호기층이 형성되어 질산화가 원활하게 일어난데 원인이 있는 것으로 사료된다. 정수식물이 성장하는 시기에 물속의 식물 줄기와 잎에 미생물막이 형성되어 유기질소 입자가 미생물막에 부착되어 분해되는데도 원인이 있는 것으로 사료된다. 정수식물 성장기에 TN, NO₃-N의 제거에 영향을 미치는 미생물의 활동에 적합한 수온이 형성된 것도 정수식물 성장기의 높은 처리효율에 기여했을 것으로 사료된다.

본 실험에서 조사분석한 자유수면습지 시스템은 현장실험규모였으며, 시스템을 조성한 후 초기 운영 단계의 1년간 조사에 기초를 두고 있다. 정수식물이 수년의 성장을 거쳐 생태적으로 안정된 실 규모의 인공습지에서 정수식물 성장기와

비성장기의 비교연구는 본 연구의 미비점을 보완할 수 있을 것이다.

인 용 문 헌

- 구원석 · 윤춘경 · 함종화 · 김형철 · 신현범. 2004. 자유수면습형 인공습지의 시기에 따른 수질개선효과 분석 및 유수지와 연계 가능성 검토. 대한상하수도학회 · 한국물환경학회 2004년 공동 추계학술발표회 논문집. pp.C-1 ~ C-10.
- 양홍모. 2002. 하천수정화 근자연형 인공습지의 초기질소제거. 한국환경농학회지 21(4) : 269-273.
- 양홍모. 2005. 하천수를 정화하는 갈대습지의 개수부에 의한 질소제거 비교. 한국환경복원녹화학회지 8(1) : 37-44.
- 양홍모. 2008. 자유수면습지의 잔재물층에 의한 하천수 질소제거 비교. 한국환경복원녹화학회지 11(6) : 120-129.
- 환경부. 2003. 수질오염공정시험방법.
- 河川環境管理財團. 2000. 植生淨化施設の現状と事例, 河川環境總合研究所, Tokoy, Japan.
- Bachand, P. A. M., and A. J. Horne. 2000. Denitrification in constructed free-water surface wetlands I : very high nitrate removal rates in a macrocosm study. Ecol. Eng. 14 : 9-15.
- Brix, H., and H. H. Schierup. Soil oxygenation in constructed reed beds : The role of microphyte and soil atmosphere interface oxygen transport (In Copper, P. F., and B. C. Finlater. eds., "Constructed Wetlands in Water Pollution Control") Oxford, U.K. : Pergamon Press. pp.53-66.
- Broadbent, F. E., and F. E. Clark. 1965. Denitrification. Agronomy, 10 : 344.
- Corbitt, R. A., and P. T. Bowen. 1994. Constructed wetlands for wastewater treatment, Kent, D.

- M. ed. Applied Wetlands science and technology. New York : Lewis Publishers. pp. 221-241.
- EPA (U.S. Environmental Protection Agency). 1993. Manual-Nitrogen control. Office of Research and Development. Washington, D.C.
- EPA (U.S. Environmental Protection Agency). 1999. Free Water Surface Wetlands for Wastewater Treatment : A Technology Assessment. pp.4-14 ~ 4-21.
- EPA (U.S. Environmental Protection Agency). 2000. Manual : Constructed Wetlands Treatment of Municipal Wastewaters. Office of Research and Development. Cincinnati, Ohio. pp.30-48.
- Faulker, S. P., and C. J. Richardson. 1989. Physical and Chemical Characteristics of Freshwater Wetland Soils (In Hammer, D. A. eds., "Constructed Wetlands for Wastewater Treatment : Municipal, Industrial and Agricultural") Chelsea, Michigan : Lewis Publishers, Inc. pp.41-72.
- Gesberg, R. M., S. R. Elkins, S. R. Lyons and C. R. Goldman. 1985. Role of aquatic plants in wastewater treatment by artificial wetlands. Water Res. 20 : 363-368.
- Mitsch, W. J., and J. G. Gosselink. 2000. Wetlands, 2nd ed. New York : Van Nostrand Reinhold.
- Kadlec, R. H., and R. L. Knight. 1996. Treatment Wetlands. Boca Raton : CRC Press, Inc. pp. 717-737.
- Reed, S. C., E. J. Middlebrooks and R. W. Crites. 1995. Natural Systems for Waste Management and Treatment. New York. : McGraw-Hill.
- Spiels, D. J., and W. J. Mitsch. 2000. The effects of seasons and hydrologic and chemical load-ing on nitrate retention in constructed wetlands : a comparison of low-and high-nutrient riverine systems. Eco. Eng. 14 : 77-91.
- Vymazal, J., H. Brix, F. P. Cooper, H. Raimund, R. Perfler and L. Johannes. 1998. Removal mechanisms and types of constructed wetlands (In Vymazal, J., H. Brix, F. P. Cooper, H. Raimund, M. B. Green and R. Haber eds., "Constructed Wetlands for Wastewater Treatment in Europe"). The Netherlands : Backhuys Publishers. pp.17-66.