韓國環境復元技術學會誌 14(1) : 121～132(2011)
J. Korean Env. Res. Tech. 14(1) : 121～132(2011)

노랑꽃창포 자유수면습지의 계절에 따른 질소제거 비교

양 홍 모

전남대학교 조경학과

Comparison of Seasonal Nitrogen Removal by Free-Water Surface Wetlands Planted with *Iris pseudacorus L.*

Yang, Hongmo

Dept. of Landscape Architecture, Chonnam National University

ABSTRACT

Removal rates of NO_3-N and TN in the free-water surface wetland system during winter; December, January, February and March, spring and fall; April, May, October and November, and summer; Jun, July, August and September were investigated. The system was established on floodplain in the downstream reach of the Gwangju Stream in 2008. It measures 50 meters in length and 5.5 meters in width. *Iris pseudacorus L.* grown in pots for about two years were planted in the system. The water stream was funneled in by gravity and its effluent was discharged back in. Volumes and water quality of inflow and outflow were analyzed from December 2008 to November 2010. The inflow was averaged approximately 350 m^3/day and hydraulic residence time was about 3 hours. Average influent and effluent NO_3-N concentration was 3.75 and 3.35 mg/L, respectively and NO_3-N retention was amounted to 10.6%. Influent and effluent TN concentration were averaged 4.93 and 4.30 mg/L, respectively and TN abatement reached to 12.9%. One-way ANOVA statistics claimed that the average removal rates of NO_3-N and TN during winter, spring and fall, and summer were not always the same (p< 0.001). The t-Tests of three pairs among NO_3-N removal rates of winter, spring and fall, and summer illustrated that the removal rates of winter (5.04±1.94), spring and fall (10.53±2.24), and summer (18.61±2.26) were significantly different each others (p<0.001). Among TN removal rates, the

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

Received : 31 January, 2011. **Revised** : 18 February, 2011. **Accepted** : 21 February, 2011.

three pairs of *t*-Tests of three seasons showed that the removal rates of winter (5.21±2.51), spring and fall (11.71±3.12), and summer (21.53±4.86) were significantly different from each others ($p<0.001$).

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

I. 서 론

습지는 유입수에 함유되어 있는 다양한 오염물질을 저감시켜주는 기능을 한다. 습지가 가지고 있는 이런 수질정화기능을 효율적으로 활용하기 위해 인위적으로 조성한 습지를 수질정화 인공습지 혹은 인공습지라고 부른다. 인공습지는 수리학적 측면에서 자유수면습지, 여과습지, 부유식물습지로 분류한다. 자유수면습지는 일반적으로 1~2 m 높이의 습지 둑을 조성한 후, 습지 바닥에 부들, 고랭이, 줄, 갈대, 꽃창포 등의 정수식물을 식재하고, 수심을 약 20~30 cm 깊이로 유지시켜 운영하며, 유입수가 습지표면과 정수식물 사이를 느린 속도로 이동하면서 오염물질이 정화된다.

인공습지는 2차처리장 혹은 연못시스템의 방류수를 정화하기 위해 주로 활용하여 왔으며, 최근 들어 오염하천수를 정화하기 위해서도 활용하고 있다. 하천수정화 인공습지의 경우 국내에서는 제내지에 인공습지를 조성할 부지를 확보하기 어려워 고수부지에 인공습지를 조성하고 있는 추세이다. 최근 중소규모 하천복원사업은 물론 4대강 살리기 사업에서도 고수부지에 수질정화 인공습지를 조성하고 있다. 고수부지에 하천수 정화 인공습지를 조성할 경우, 부지확보에 비용이 들지 않고 자연유하로 하천수를 유입시킬 수 있어 에너지가 필요하지 않는 장점이 있으나, 홍수로 인공습지에 토사가 퇴적되고 정수식물이 도복되는 경우가 발생하여 인공습지운영에 지장을 주는 단점이 있다. 고수부지에 조성하는 인공습지는 대부분 자유수면 습지이며, 수질정화 기능 이외에 시민휴식 및 자연학습 공간 제공, 하천경관의 개선, 야생동물서식처 제공 등의 기능을 고려하여 조성하고 있다.

인공습지에서 질소는 생물화학적 반응인 암모니아화-질산화-탈질화와 식물에 의한 흡수, 침전, 흡착 등 다양한 기작을 통하여 제거된다(EPA, 1993, 1999; Mitsch and Gosselink, 2000; 양홍모, 2003, 2005, 2008). 습지에서 제거되는 질소의 총량 중에서 탈질화로 제거되는 양이 약 60~70%이며, 식물에 흡수되어 제거되는 양은 약 10~20% 정도이다(Faulkner and Richardson. 1989; Spiels and Mitsch, 2000). 물리적 반응인 침전과 흡착에 의해 제거되는 질소의 양은 상대적으로 적다(Gersberg et al., 1985).

인공습지에서 질소의 정화는 미생물에 의한 분해가 가장 중요하며, 미생물의 활동은 수온에 영향을 받는다. 질소제거에 중요한 박테리아의 활동은 일반적으로 수온이 10℃ 이하에서는 낮아지며, 15~20℃에서는 활동이 원만하고, 20~30℃에서는 활동이 왕성하며, 35℃ 이상이 되면 활동이 둔화된다. 수온이 낮아지면 미생물의 활동이 저하되어 습지의 질소 정화효율이 낮아지는 경향을 보인다. 여름철 수온이 높은 기간에 조사한 처리율을 습지의 연평균 처리율로 사용하는 것은 바람직하지 않다.

인공습지의 정수식물은 주로 부들, 고랭이, 줄, 갈대를 사용하고 있다. 꽃창포는 이들 정수식물보다 정화율이 상대적으로 낮으나 꽃이 피었을 때 아름다운 시각적 효과 때문에 정수식물로 활용하고 있으며(Vymazal, 1998), 홍수 시 도복이 덜 되는 장점이 있어 고수부지 인공습지에 활용하고 있다. 실규모 부들, 고랭이, 줄, 갈대 인공습지의 정화효율에 관한 연구는 많으나, 실규모 꽃창포 인공습지에 관한 연구는 거의 없다.

하천수를 정화하기위해 고수부지에 조성한 수

질정화 인공습지에 대한 연구는 상대적으로 적으며, 특히 고수부지에 조성된 꽃창포 인공습지에 대한 연구는 찾아보기 힘들다. 고수부지 인공습지에 관한 연구를 통하여 고수부지 인공습지 조성에 필요한 기술개발이 절실히 요구된다. 본 연구는 광주광역시를 흐르는 광주천 중류부의 고수부지에 수질정화를 목적으로 조성한 노랑꽃창포 자유수면 인공습지의 질소 제거율을 분석하고, 습지수온을 고려한 계절별 질소제거율에 차이가 있는지를 비교분석하는데 목적이 있다.

II. 자유수면 인공습지의 질소제거

1. 질소제거율

미국 EPA는 북미에서 운영하고 있는 203개 수질정화 인공습지의 데이터베이스(North American Treatment Wetland Database, NDBA)를 1993년 구축하였다. 이들 인공습지는 주로 2차처리장 혹은 연못시스템 방류수를 정화하는 시스템들이다. NDBA자료를 기초로 Kadlec and Knight(1996)은 자유수면 인공습지의 TN 제거율을 분석하였다. NDBA 중 약 40개 자유수면습지의 자료가 기술평가 데이타베이스(Technology Assessment Database, TADB)로 선정되어 1999년 인공습지 기술검토서가 작성되었다(EPA, 1999). 인공습지의 TN(총질소)제거 모형과 설계인자 값은 NDBA와 TADB 자료를 기초로 작성된 것이 많다. Kadlec and Wallace(2009)는 최근 북미에서 운영하고 있는 인공습지의 TN과 NO_3(질산성질소)의 처리율을 분석하였다.

표 1은 북미에 조성된 자유수면 인공습지의 TN과 NO_3 제거율(%)을 보여준다. 시스템의 구조, 설치위도, 체류시간, 유입수 농도 등에 따라 처리율에 차이를 보이고 있다. 이들 습지는 평균 체류시간이 5~10일이다. TN의 경우 유입수의 농도가 6.5~27.2 mg/L로 범위가 크며, 처리율도 23~63.6%로 범위가 넓다. NO_3은 유입수의 농도가 0.26~2.65 mg/L 범위이며, 처리율은 42.3~43.8%를 보이고 있다.

표 2는 미국과 일본에서 하천수를 정화하는 자유수면 인공습지의 TN 제거율(%)를 나타낸다. 유입수의 TN농도는 1.29~4.62 mg/L 범위이며,

Table 1. TN and NO_3 removal (%) of free-water surface wetlands in North America purifying effluent from municipal treatment plants or treatment pond systems.

System	Area (ha)	Plants	NO_3 In (mg/L)	NO_3 Out (mg/L)	NO_3 Removal (%)	TN In (mg/L)	TN Out (mg/L)	TN Removal (%)
Tres Rios (Arizona)	0.92	Scirpus				6.5	4.4	32.3
Imperial (California)	9.2	Typha	2.65	1.49	43.8	6.6	3.8	42.4
Lakeland (Florida)	81	Mixed				11.0	4.0	63.6
Brighton (Ontario)	6ha	Typha				13.0	10.0	23.1
Listowel (Ontario)	0.04	Mixed				19.0	11.0	42.1
Orlando (Florida)	494	Mixed	0.26	0.13	50.0	27.2	15.3	43.8

Sources : Kadlec and Wallace, 2009.

Table 2. Removal of Total Nitrogen in free-water surface wetlands purifying stream water in USA and Japan.

System	Area (ha)	Plants	Inflow (m^3/day)	DT	TN In (mg/L)	TN Out (mg/L)	TN Removal (%)
Des Plaines (USA)	10,13	Typha	4,635	1~2 wk	2.73	1.34	51
Olentangy River (USA)	1.0	Typha	1,000	2.5 d	4.62	2.52	44
Hurugawa (Japan)	1.9	Zizania, Typha	17,280	1.7 d	1.29	0.80	38
Seimeigawa (Japan)	0.14	Phragmites, Zizania	777	9 hr	3.00	2.10	30
Sannogawa (Japan)	0.56	Phragmites, Typha	18,240	5 hr	3.40	2.30	32
Snagawa (Japan)	0.375	Phragmites, Zizania	86,400	3 hr	2.14	1.50	30

DT : Detention Time, wk : week, d : day, hr : hour.
Sources : Mitsch and Gosselink, 2000; Kadlec and Knight, 1996; 河川環境管理財團, 2000.

TN 제거율은 30~51% 범위이다. 유입수 체류시간은 3 hr~2 week로 범위가 넓다.

2. 정수식물의 질소제거 역할

인공습지의 질소제거에서 중요한 기작은 질산화와 탈질화이다. 정수식물의 뿌리는 습지토양에 호기층과 혐기층이 공존하도록 만들어 질산화와 탈질화가 동시에 일어날 수 있는 환경을 조성해 주는 중요한 역할을 한다.

물속에서 산소는 공기 중의 산소보다 3×10^6배 느린 속도로 확산된다(Drew, 1979). 따라서 습지토양의 표토층 아래는 산소결핍 혹은 혐기 상태가 된다. 근경과 뿌리를 혐기층 토양으로 내려 성장하는 정수식물은 대기 중의 산소가 근경과 뿌리에 도달할 수 있도록 통기조직이 발달해 있다. 근경과 뿌리에 도달한 산소는 뿌리와 근경의 호흡에 이용되며, 뿌리표면으로부터 누출된 산소는 뿌리 주변의 혐기층에 호기층을 형성해 주는 역할을 한다(Vymaza, 1998). 습지토양의 호기층에서는 호기성 미생물에 의해 유기물이 분해되고 질산화 박테리아가 성장하면서 질산화가 일어난다. 뿌리로부터 떨어진 근권의 혐기층에서는 혐기성 미생물에 의한 탈질화가 일어난다.

물속에 잠긴 습지식물의 줄기와 잎은 유입수의 유속을 느리게 하여 부유물의 침전을 도와주며 유입수와 식물표면의 접촉 시간을 증가시켜준다. 물에 잠긴 습지식물의 잎과 줄기에는 많은 면적의 미생물막(biofilm)이 형성되며 유기물과 무기물 입자들이 미생물막과 접촉하여 분해된다. 인공습지의 정수식물은 거의 수확을 하지 않는다. 따라서 식물이 흡수한 질소의 일부는 분해과정을 거쳐 습지의 물로 되돌아오게 된다. 분해가 되지 않은 잔재물과 분해가 어려운 화합물의 질소는 습지시스템에 저장된다(Brix, 1996).

김유선(2008)은 0.2×1.2×0.2 m 스티로폼 수경재배 상자를 사용하여 노랑꽃창포와 창포의 질소정화 능력을 비교하였으며, Radoux(2005)는 0.96 m^3 pond 5개를 cascade 형태로 연결하여 수질정화 실험을 수행하였으며, 실험결과 부들의 질소제거율이 노랑꽃창포보다 높게 나타났다.

노랑꽃창포가 부들, 고랭이, 줄, 갈대보다 질소정화효율이 낮은 이유는 뿌리의 구조에 원인이

있다. 부들, 고랭이, 줄, 갈대는 뿌리부에서 새줄기가 나오기도 하지만, 근경이 옆으로 뻗으면서 근경의 마디에서 새줄기가 올라오고 뿌리가 땅속 약 70~80 cm까지 자란다. 노랑꽃창포는 근경이 발달하지 않고 수염뿌리 모양이며 뿌리부에서 새줄기가 나오고 뿌리는 땅속 약 30~40 cm까지 자란다. 노랑꽃창포가 습지토양에 형성하는 호기층과 혐기층의 체적은 부들, 고랭이, 줄, 갈대보다 상대적으로 적어 질산화와 탈질화의 양이 상대적으로 적다(Thunhorst, 1997; Reed et. al., 1995).

3. 질소제거 기작

질소는 -3가에서 +5가로 변하면서 다양한 형태로 존재한다. 습지 유입수의 유기물에 함유된 유기태 N이 무기태 N, 즉 NH_4^+-N(암모니아태 질소)으로 전환되는 과정을 암모니아화라고 부른다. 암모니아화 반응은 호기 상태에서 빠르며, 조건성 상태나 혐기 상태에서는 반응이 급격히 느려진다.

질산화는 호기성 미생물에 의해 NH_4^+-N가 NO_3^--N(질산태 질소)로 전환되는 것을 말하며 이때 전자 6개가 이동하여 N은 -3가 (NH_4^+)에서 +3가 (NO_2^-)로 변한다. 질산화 과정의 중간에 NO_2^--N(아질산태 질소)가 생성된다. 질산화 박테리아는 NH_4^+과 NO_2^-(아질산)를 산화시키는 과정에서 성장에 필요한 에너지를 얻으며, 산소가 전자수용체가 된다. NO_2^-를 산화시키는 박테리아는 아질산과 탄소원이 혼재하는 환경에서 활동하며 산소가 없는 상태에서도 어느 정도 활동할 수 있다. 이 때 전자 2개가 이동하여 N은 +3가 (NO_2^-)에서 +5가 (NO_3^-)로 변한다. 질산화 박테리아는 20~35℃ 범위에서 활동이 활발하며, 10℃ 이하에서는 활동이 둔화된다(Vymazal, 1998).

산소가 없는 혐기성 상태 혹은 산소가 부족한 조건성 상태에서 NO_3^-가 N_2로 전환되는 과정을 탈질화라고 부르며(Broadbent and Clark, 1965), 질소는 +5가 (NO_3^-)에서 0으로 변한다. 탈질화 과정에서 질소는 몇 개의 단계를 거쳐 N_2 가스로 환원된다. 탈질화가 일어나려면 전자를 공급해주는 유기물이 있어야 한다. 습지 바닥에 쌓인 정수식물의 잔재물은 미생물에 의해 유기쇄설물이 되며, 유기쇄설물이 탈질화과정에서 전자를 공급해주는 역할을 한다. 탈질화는 온도가 5℃가 되면 급격히 느려진다. 습지토양 혐기층에서 NO_3-N가 N_2와 N_2O로 전환되어 이들이 대기로 이동한다(Faulker and Richardson 1989). 식물이 흡수한 질소는 잔재물의 분해과정을 통해 습지의 물로 되돌아올 수 있으나, 탈질화로 NO_3-N가 N_2와 N_2O로 전환되어 습지에서 대기 중으로 이동하면, 이동한 만큼 습지에서 질소가 제거된다.

III. 재료 및 방법

1. 실험시스템 구조

노랑꽃창포 자유수면습지는 광주광역시를 흐르는 광주천의 고수부지에 광주천 복원사업의 일환으로 2008년 6월에 조성되었다. 그림 1은 실험습지의 개념도이다. 습지바닥의 규모는 길이 50 m, 폭 5.5 m로 면적이 약 275 m^2이며, 사면의 경사는 약 1 : 2이다. 시민들이 습지를 관찰할 수 있도록 목재 덱(deck)이 두 군데 설치되어 있다. 2008년 6월에 포트(pot)에서 2년 성장한 노랑꽃창포(*Iris pseudacorus L.*)를 약 30cm 간격으로 습지바닥에 식재하였다. 광주천 하천수가 수중보로부터 자연유하로 시스템에 유입되며, 처리수는 광주천으로 방류된다. 유입부에는 유량을 조절할 수 있는 밸브가 있으며, 유출부에는 시스템의 수위를 조절할 수 있는 장치가 설치되어 있다.

2. 처리수준 및 식생생장 조사

2008년 12월부터 2010년 11월까지 2년간 유입수와 유출수를 7~10일에 한 번 샘플링하여 수질오염공정시험방법(환경부, 2003)을 기준으로 NO_3-N과 TN 등을 분석하였다. 수온은 현장에서 Scott pH-Meter(CG 347)로 측정하였다. 시스템의 평균 유입량은 2개월에 한번 유입부에서 1분

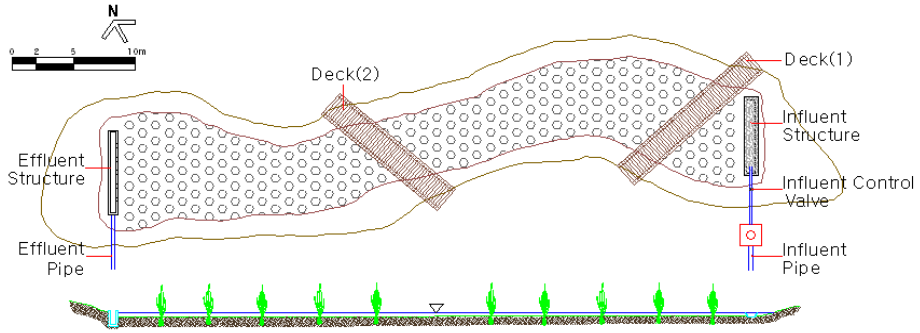

Figure 1. Schematic plan and section of the free surface-flow treatment wetlands established on floodplain in the Gwangju stream.

동안 흐르는 양을 받아서 산출하였다.

노랑꽃창포의 초장과 분지수의 조사는 1m× 1m 격자 틀을 이용하여 2009년과 2010년 5월 말과 10월 초에 조사하였다. 유입수가 흐르는 방향을 기준으로 유입부(St1), 중앙부(St2), 유출부(St3)에서 각각 3군데씩 총 9군데를 조사하였다. 분지수는 격자틀 내의 전수를 조사하였으며, 초장은 격자틀 내의 10개체를 측정하였다. 초장과 분지수는 유입부, 중앙부, 유출부에서 조사한 3개 격자틀의 평균값으로 나타냈다.

수온차이에 따른 TN, NO_3-N의 처리효율을 비교분석하기위해 활용한 One-Way ANOVA와 t-Test 등 통계분석에는 PC용 Excel 프로그램과 Excel에 연결하여 운영되는 통계 프로그램인 DDXL(Data Desk/XL)을 사용하였다.

IV. 결과 및 고찰

1. 정수식물의 생장

2008년 6월에 식재한 노랑꽃창포는 비교적 양호한 활착을 하다가 10월에는 성장이 둔화되었다. 2009년과 2010년에는 4월에 수면 위로 새줄기가 나오기 시작하여 성장을 계속하다 10월에 성장이 둔화되었다. 겨울철에 노랑꽃창포의 줄기와 잎의 일부는 녹색을 유지하였으나 성장은 하지 않았으며, 죽은 줄기와 잎은 잔재물이 되어 습지바닥에 쌓였다.

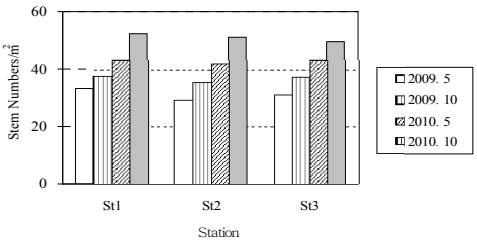

Figure 2. Average stem numbers of *Iris pseudacorus L.* per square meter.

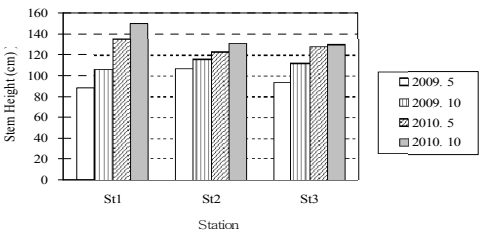

Figure 3. Average stem height of *Iris pseudacorus L.*

노랑꽃창포 평균분지수는 2009년 5월에 St1(유입부), St2(중간부), St3(유출부)에서 각각 33.2, 29.5, 31.3 stems/m^2을 보였으며, 10월에는 St1, St2, St3에서 각각 38.1, 35.7, 37.5 stems/m^2 나타냈다. 2010년에는 5월에 평균분지수가 St1, St2, St3에서 각각 43.2, 42.1, 43.1 stems/m^2였으며, 10월에 St1, St2, St3에서 각각 52.3, 51.2, 49.5 stems/m^2을 보였다(그림 2). 2010년의 분지수가 2009년 보다 증가하였다.

평균초장은 2009년 5월에 St1, St2, St3에서 각각 88.2, 106.6, 93.4 cm이었으며, 10월에는 St1, St2, St3에서 각각 106.3, 116.1, 111.8 cm를 보였다. 2009년에는 5월에 St1, St2, St3에서 각각 135.2, 123.5, 128.2 cm를 보였으며, 10월에는 St1, St2, St3에서 각각 149.8, 130.9, 131.5 cm를 보였다(그림 3). 2010년의 평균초장이 2009년 보다 높게 나타났다. 평균분지수와 평균초장의 조사에서 노랑꽃창포의 성장이 양호하였음을 알 수 있다.

2. 수온의 변화

그림 4는 조사기간 실험습지의 처리수 월평균 수온을 나타낸다. 2008년 12월부터 2009년 11월까지(12개월)의 평균수온은 16.30℃였으며, 2009년 12월부터 2010년 11월까지(12개월)의 평균수온은 16.39℃를 나타냈다. 2008년 12월~2010년 11월까지 2년 실험기간 중 12월, 1월, 2월, 3월(이하 겨울)의 평균수온은 7.37℃였으며, 월평균 수온은 4.33℃~9.81℃의 범위를 나타냈다. 이 기간에는 노랑꽃창포의 지상부 성장이 멈춘 시기이다. 실험기간 4월, 5월, 10월, 11월(이하 봄가을)의 평균수온은 16.16℃였으며, 월평균수온의 범위는 12.51℃~18.83℃의 범위를 보였다. 4월에는 노랑꽃창포의 새줄기가 나오기 시작하였고 10월에는 노랑꽃창포의 성장이 둔화되었다. 실험기간 6월, 7월, 8월, 9월(이하 여름)의 평균수온은 25.49℃였으며 월평균수온의 범위는 23.43℃~27.67℃였다. 이 시기는 노랑꽃창포의 성장이 왕성한 시기였다.

온대권에서 습지미생물의 활동은 여름에 가장 높고, 겨울에 가장 낮으며, 봄과 가을에는 중간정도의 수준을 보인다(Kadlec and Wallace, 2009). 실험인공습지 겨울의 월평균수온은 미생물활동이 어려운 조건이었으며, 봄가을의 월평균수온은 미생물활동이 어느 정도 가능한 조건이었고, 여름의 월평균수온은 미생물활동이 왕성한 조건이었다.

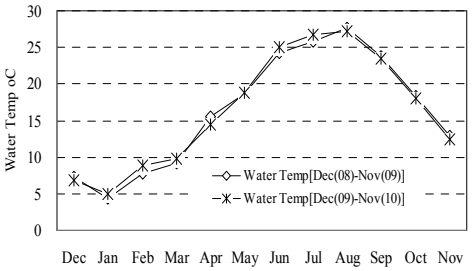

Figure 4. Monthly average temperature of effluent.

3. 질소 처리수준

1) 계절별 처리수준 변화

조사기간 실험습지의 유입수 평균유량은 약 350 m^3/day였으며, 수심을 약 25 cm가 유지되도록 운영하여, 평균 체류시간은 약 3 hr였다. 수질분석결과 유입수와 유출수의 NH_3-N(암모니아성질소), NO_2-N(아질산성질소)의 농도가 매우 낮아 이들을 제외하고, NO_3-N과 TN을 중심으로 질소제거율을 분석하였다. NO_3-N과 TN 분석에서 이들이 저농도일 경우 소숫점 2자리까지 활용하여 분석하고 있으며(Kadlec and Knight, 1996; Bachand and Horne, 2000) 본 연구에서도 소숫점 2자리까지를 활용하여 분석하였다.

그림 5는 2008년 12월부터 2009년 11월까지(12개월) 실험습지의 유입수와 유출수의 월평균 NO_3-N 농도와 월평균 NO_3-N 제거율(%)을 나타낸다. 12개월 동안 유입수와 유출수 NO_3-N 평균농도는 각각 3.59 mg/L, 3.21 mg/L였으며, NO_3-N 평균제거율은 약 10.58%를 나타냈다. 그림 5에서 겨울, 봄가을, 여름의 NO_3-N 평균제거율은 각각 4.88, 10.19, 16.15%를 나타냈다. 그림 6은 2009년 12월부터 2010년 11월까지(12개월) 유입수와 유출수의 월평균 NO_3-N 농도와 월평균 NO_3-N 제거율(%)을 보여준다. 1년간 유입수와 유출수 NO_3-N 평균농도는 각각 3.91 mg/L, 3.49 mg/L였으며, NO_3-N 평균제거율은 약 11.39%였다. 그림 6에서 겨울, 봄가을, 여름의 NO_3-N 평균제거율은 각각 5.16, 11.18, 17.84%

를 보였다.

그림 7은 2009년 12월부터 2010년 11월까지 (12개월) 유입수와 유출수의 월평균 TN 농도와 월평균 TN 제거율(%)을 나타낸다. 12개월 동안 유입수와 유출수 TN 평균농도는 각각 4.82 mg/L, 4.22 mg/L였으며, TN 평균제거율은 약 12.4%를 나타냈다. 그림 7에서 겨울, 봄가을, 여름의 TN 평균제거율은 각각 4.74, 11.70, 20.85%를 나타냈다. 그림 8은 2009년 12월부터 2010년 11월까지(12개월) 유입수와 유출수의 월평균 TN 농도와 월평균 TN 제거율(%)을 보여준다. 1년간 유입수와 유출수 TN 평균농도는 각각 5.05 mg/L, 4.38 mg/L였으며, TN 평균제거율은 약 13.25%였다. 그림 8에서 겨울, 봄가을, 여름의 TN 평균제거율은 각각 5.53, 12.15, 22.08%를 보였다.

2009년 12월부터 2010년 11월까지 12개월간(2년차)의 NO_3-N과 TN 처리율이 일 년 전인 2008년 12월부터 2009년 11월(1년차)의 NO_3-N과 TN 처리율보다 약간 높다. 이는 노랑꽃창포의 생장이 2년차가 1년차보다 양호한데(그림 2, 그림 3) 원인이 있는 것으로 판단된다. 실험 2년 동안의 NO_3-N과 TN의 평균처리율은 각각 10.99와 12.83 %를 보였다. 정수식물이 노랑꽃창포이고 체류시간이 3 hr로 짧으며, 시스템이 초기운영 단계이고 수온이 낮은 겨울철이 조사기간에 포함된 점을 고려하면 NO_3-N과 TN의 처리율이 비교적 양호한 편이다.

TN 제거율 추세(그림 7, 그림 8)는 NO_3-N 제거율 추세(그림 5, 그림 6)와 유사한 경향을 보이고 있다. 이는 습지에서 TN 제거는 탈질화에 의한 NO_3-N의 제거에 영향을 받기 때문이다. 그림 5와 그림 6의 NO_3-N 월평균제거율과 그림 7과 그림 8의 TN 월평균제거율 변화추이는 그림 4의 처리수 월평균수온의 변화추이와 유사한 경향을 보이고 있다. 이는 습지에서 NO_3-N과 TN의 제거는 수온과 관련이 높기 때문이다. 수온은 질소를 정화하는 습지미생물의 활동에 영향을 미친다.

표 2서 체류시간이 3 hr으로 실험습지의 체류시간과 비슷한 Snagawa 습지의 TN 평균제거율이 30%로 실험습지의 TN 평균제거율보다 다소 높다. Snagawa 습지는 정수식물이 갈대와 줄이고 조성한지 오래되었으며, 정수식물이 성장하는 기간에 조사한 처리율이다. 실험습지의 2년차 정수식물 성장기의 TN처리율은 22.08%이다. 실험습지의 정수식물이 질소정화 효율이 상대적으로 낮은 노랑꽃창포이고, 초기단계의 처리율인 점을 고려하면 비교적 양호한 처리율이다.

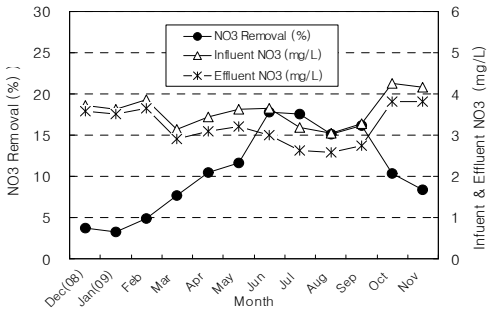

Figure 5. Monthly average removal (%) of NO_3-N (left vertical axis) and monthly average NO_3-N concentration of influent and effluent (right vertical axis) from December 2008 through November 2009.

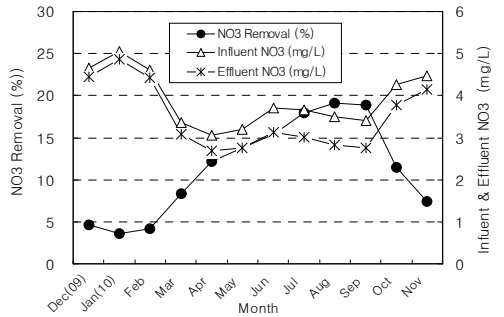

Figure 6. Monthly average removal (%) of NO_3-N (left vertical axis) and monthly average NO_3-N concentration of influent and effluent (right vertical axis) from December 2009 through November 2010.

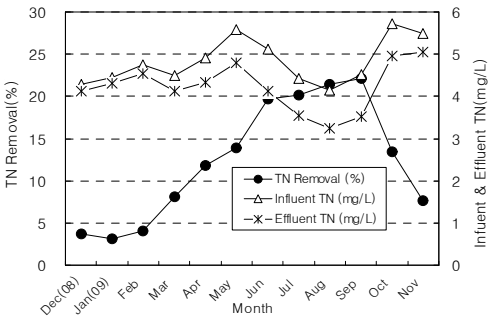

Figure 7. Monthly average removal (%) of TN (left vertical axis) and monthly average TN concentration of influent and effluent (right vertical axis) from December 2008 through November 2009.

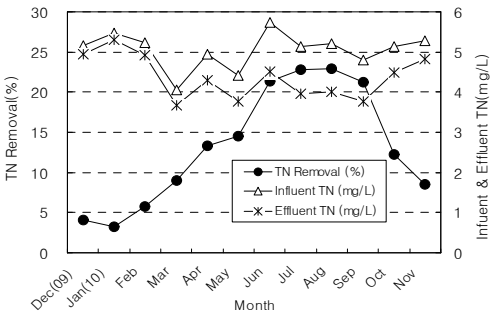

Figure 8. Monthly average removal (%) of TN (left vertical axis) and monthly average TN concentration of influent and effluent (right vertical axis) from December 2009 through November 2010.

2) 질소제거율 비교 ANOVA, *t*-Test

겨울, 봄가을, 여름의 NO_3-N과 TN 처리율(%)에 차이가 있는지 알아보기 위해 One-Way ANOVA를 수행하였다. 표 3는 겨울, 봄가을, 여름의 NO_3-N과 TN 제거율에 대한 ANOVA 결과를 나타낸다. ANOVA 분석결과 'H_o : 조사기간 겨울, 봄가을, 여름의 NO_3-N 제거율의 평균이 같다.'라는 귀무가설이 유의수준 α=0.01에서 기각되어 (p<0.001), '겨울, 봄가을, 겨울의 NO_3-N 제거율의 평균값 중 적어도 하나는 다른 평균값과 다르다.' 라고 말할 수 있다. TN 제거율에 대한 ANOVA 분석결과에서도 유의수준 α=0.01에서 귀무가설이 기각되어 '겨울, 봄가을, 여름의 TN 제거율의 평균값 중 적어도 하나는 다른 평균값과 다르다.' 라고 말할 수 있다.

겨울과 봄가을, 봄가을과 여름, 겨울과 여름의 NO_3-N과 TN 제거율(%)에 차이가 있는지 알아보기 위해 t-검정을 수행하였다. t-검정은 ANOVA의 통계량에서 제공하지 않는 각 Sample의 평균과 표준편차를 제공해 주는 장점이 있다. 표 4에서 NO_3-N 제거율에 대한 t-검정결과 'H_o : 조사기간 겨울과 봄가을의 NO_3-N 제거율(%)의 평균이 같다.'라는 귀무가설이 유의수준 α=0.01에서 기각되어(p<0.001), '겨울과 봄가을의 NO_3-N 제거율이 다르다.'라고 말할 수 있다. 따라서 봄가을의 NO_3-N 제거율(10.53±2.24)이 겨울의 NO_3-N 제거율(5.04±1.94)보다 높다고 말할 수 있다. 봄가을과 여름, 겨울과 여름의 NO_3-N 제거율 t-검정결과에서도 유의수준 α=0.01에서 귀무가설이 기각되어(p<0.001) '봄가을과 여름, 겨울과 여름의 NO_3-N 제거율이 다르다'라고 말할 수 있다. 여름의 NO_3-N 제거율(18.61±2.26)이 봄가을의 제거율(10.53±2.24)과 겨울의 제거율(5.04±1.94)보다 높다고 말할 수 있다.

TN 제거율에 대한 t-검정결과에서도 겨울과 봄가을, 봄가을과 여름, 겨울과 여름 모두 귀무가설이 유의수준 α=0.01에서 기각되어(p<0.001), '겨울과 봄가을, 봄가을과 여름, 겨울과 여름 모두 TN 제거율이 다르다'라고 말할 수 있다. 따라서 TN 제거율의 경우 봄가을(11.71±3.12)이 겨울(5.21±2.51)보다 높고, 여름의 제거율(21.53±4.86)은 봄가을, 겨울보다 높다고 말할 수 있다. 수온이 높은 기간에 NO_3-N와 TN 제거가 효율적임을 알 수 있다.

V. 결 론

하천수를 정화하기 위해 고수부지에 조성한 노랑꽃창포 자유수면습지에서 2008년 12월부터

Table 3. Summary of ANOVA statistics for NO_3-N and TN removal (%) from the wetlands during winter (December, January, February, and March), spring and fall (April, May, October, and November) and summer (Jun, July, August, and September). Normality test of the sample data sets showed that their distributions were approximately normal.

NO_3-N Removal (%)	Summary	Groups	Count	Sum	Average	Variance		
		W	30	151.33	5.04	3.79		
		SF	30	315.96	10.53	5.01		
		S	30	558.52	18.61	5.12		
	ANOVA	Source of Variator	*SS*	*df*	*MS*	*F*	*P-value*	*F crit*
		Between Groups	2797.14	2	1398.57	300.94	<0.001	3.10
		Within Groups	404.30	87	4.64			
TN Removal (%)	Summary	Groups	Count	Sum	Average	Variance		
		W	30	156.41	5.21	6.30		
		SF	30	351.31	11.71	9.75		
		S	30	645.94	21.53	3.47		
	ANOVA	source of Variator	*SS*	*df*	*MS*	*F*	*P-value*	*F crit*
		Between Groups	4049.20	2	2024.60	310.89	<0.001	3.10
		Within Groups	566.55	87	6.51			

W : winter, SF : spring and fall, S : summer.
F crit : F Critical.

Table 4. Summary of *t*-test statistics for NO_3-N and TN removal (%) from the wetlands during winter (December, January, February and March), spring and fall (April, May, October and November), and summer(Jun, July, August and September). Normality test of the sample data sets showed that their distributions were approximately normal.

Parameters	Groups	N	Mean ± S.E.	*t Value*	*p-Value*
NO_3-N Removal (%)	W	30	5.04 ± 1.94	-10.12	< 0.001
	SF	30	10.53 ± 2.24		
	SF	30	10.53 ± 2.24	-13.90	< 0.001
	S	30	18.61 ± 2.26		
	W	30	5.04 ± 1.94	-24.88	< 0.001
	S	30	18.61 ± 2.26		
TN Removal (%)	W	30	5.21 ± 2.51	-8.87	< 0.001
	SF	30	11.71 ± 3.12		
	SF	30	11.71 ± 3.12	-13.90	< 0.001
	S	30	21.53 ± 3.86		
	W	30	5.04 ± 1.94	-28.57	< 0.001
	S	30	21.53 ± 4.86		

W : winter, SF : spring and fall, S : summer.
N : sample numbers, S.E. : standard Error.
p-values obtained by t-tests assuming equal variance.

2010년 11월까지 2년간 수질조사를 기초로 겨울(12월, 1월, 2월, 3월), 봄가을(4월, 5월, 10월, 11월), 여름(6월, 7월, 8월, 9월)의 NO_3-N과 TN 제거율을 비교분석하였다. 2008년 6월에 식재한 노랑꽃창포는 비교적 양호한 활착을 보였고, 2009년과 2011년에는 4월부터 새줄기가 수면위로 나와 양호한 성장을 하였며 10월에는 성장이 둔화되었다.

실험기간 겨울은 평균수온이 7.37℃였으며, 습지 미생물의 활동이 둔화되고 노랑꽃창포의 지상부 성장이 정지한 시기였다. 봄가을의 평균수온은 16.16℃였으며, 이 시기는 미생물의 활동이 비교적 양호한 조건이었으며, 4월에 노랑꽃창포의 새줄기가 나오기 시작하였고 10월에는 노랑꽃창포의 성장이 둔화되었다. 여름의 평균수온은 25.49℃였으며, 여름철 수온은 미생물의 활동이 활발하게 일어날 수 있는 조건이었으며, 노랑꽃창포의 성장에 적합한 조건이었다.

실험기간 유입수 평균유량은 350 m^3/day였고, 평균 체류시간은 3 hr였으며 처리수 평균수온은 16.35℃였다. 실험기간 유입수와 처리수의 NO_3-N 평균농도는 각각 3.75 mg/L, 3.35 mg/L로 10.6%의 NO_3-N 제거율을 보였고, 유입수와 처리수의 TN 평균농도는 각각 4.93 mg/L, 4.30 mg/L로 12.9% TN 제거율을 보였다. 체류시간이 3 hr로 짧고 겨울철의 제거율이 포함되었고, 정수식물이 질소제거율이 상대적으로 낮은 노랑꽃창포이며, 초기운영 단계라는 점을 고려하면 NO_3-N과 TN 처리율은 비교적 양호한 편이다.

실험기간 겨울, 봄가을, 여름의 NO_3-N 처리율(%)에 대한 ANOVA 분석결과 귀무가설이 유의수준 α=0.01에서 기각되어(p<0.001), 겨울, 봄가을, 겨울의 NO_3-N 제거율 평균값 중 적어도 하나는 나머지 두 개의 평균값과 다르게 나타났다. TN 처리율(%)에 대한 ANOVA 분석결과에서도 귀무가설이 유의수준 α=0.01에서 기각되어(p<0.001), TN 제거율 평균값 중 적어도 하나는 나머지 평균값과 다르게 나타났다.

겨울과 봄가을, 봄가을과 여름, 겨울과 여름의 NO_3-N 제거율(%)에 대한 t-검정결과 각각의 경우 귀무가설이 모두 유의수준 α=0.01에서 기각되어(p<0.001), 겨울의 제거율(5.04±1.94), 봄가을의 제거율(10.53±2.24), 여름의 제거율(18.61±2.26)에 차이를 보였다. TN 제거율에 대한 t-검정결과에서도 겨울과 봄가을, 봄가을과 여름, 겨울과 여름 모두 귀무가설이 유의수준 α=0.01에서 기각되어(p<0.001), 겨울의 제거율 (5.21±2.51), 봄가을의 제거율(11.71±3.12), 여름의 제거율(21.53±4.86)에 차이를 보였다. 수온이 높은 기간에 NO_3-N와 TN 제거율이 높음을 알 수 있다.

여름의 NO_3-N과 TN 제거율이 겨울과 봄가을과보다 높은 이유는, 수온이 TN, NO_3-N의 제거에 영향을 미치는 질산화 및 탈질화 미생물의 활동이 왕성한 조건인데 일차적 원인이 있으며, 노랑꽃창포가 성장하는 시기로 통기조직을 통하여 대기 중의 산소가 뿌리에 도달하여 뿌리 주변에 호기층이 형성되어 질산화가 원활하게 일어난 데도 원인이 있다. 여름은 노랑꽃창포의 성장이 왕성한 시기로 노랑꽃창포가 성장에 필요한 질소를 흡수 것도 TN, NO_3-N의 제거에 어느 정도 기여한 것으로 사료된다.

본 실험에서 조사분석한 노랑꽃창포 인공습지는 현장실험규모 (meso-scale) 였으며, 시스템을 조성한 후 초기 운영 단계의 2년간 조사에 기초를 두고 있다. 노랑꽃창포가 수년의 성장을 거쳐 생태적으로 안정된 실규모(full-scale)의 인공습지에서 NO_3-N과 TN 제거율에 대한 연구는 본 연구의 미비점을 보완할 수 있을 것이다.

인 용 문 헌

김유선. 2008. 노랑꽃창포와 창포의 수질정화 능력평가. 한국원예학회지 26(2) : 72-176.

양홍모. 2008. 자유수면습지의 잔재물층에 의한 하천수 질소제거 비교. 한국환경복원녹화학회지 11(6) : 120-129.

양홍모. 2005. 하천수를 정화하는 갈대습지의 개수부에 의한 질소제거 비교. 한국환경복원녹화학회지 8(1) : 37-44.

양홍모. 2003. 고수부지에 조성한 수질정화 자유수면습지의 초기 운영단계 질소제거. 한국환경복원녹화학회지 6(6) : 41-48.

환경부. 2003. 수질오염공정시험방법.

河川環境管理財團. 2000. 植生淨化施設の現狀と事例, 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. 1996. Role of macrophytes in constructed treatment wetlands (In Proc. 5th Internat. Conf. Wetland systems for water pollution control, Keynote address 2).

Broadbent, F. E., and F. E. Clark. 1965. Denitrification. Agronomy 10 : 344.

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.

Drew, M. C. 1979. Plant responses to anaerobic conditions in soil and solution culture, Curr. Adv. Plant. Sci. 36 : 1-13.

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) Lewis Publishers, Inc. Chelsea, Michigan. pp.41-72.

Gersberg, R. M. Elkins, S. R., Lyons, S. R., & Goldman, C. R. 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. Van Nostrand Reinhold. New York.

Kadlec, R. H., and R. L. Knight. 1996. Treatment wetlands. CRC Press, Inc. Boca Raton. pp. 717-737.

Kadlec, R. H., and S. D. Wallace. 2009. Treatment wetlands 2nd ed. CRC Press, Inc. Boca Raton. pp.267-348.

Radoux, M. 2005. The impact of Typy Latifolia L. on the treatment of wastewater by surface-flow constructed wetland (In Vymal, J. ed. Natural and constructed wetlands : nutrients, metals and management). Backhuys Publishers, Leiden, The Netherlands. pp.271-280.

Reed, S. C., E. J. Middlebrooks and R. W. Crites. 1995. Natural systems for waste management and treatment. McGraw-Hill, New York.

Spiels, D. J., and W. J. Mitsch. 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.

Thunhorst, G. A. 1997. Wetland planning guide for the northeastern United States. Environmental Concern, INC.

Vymazal, J. 1998. Removal mechanisms and types of constructed wetlands (In Vymal, J. ed. Natural and constructed wetlands : nutrients, metals and management) Backhuys Publishers, Leiden, The Netherlands. pp.17-66.