

하천수정화 여과습지에서 성장하는 갈대의 영양염류 흡수량

양 홍 모

전남대학교 조경학과

Nutrient Uptake by Reeds Growing in Subsurface-flow Wetland Constructed to Purify Stream Water

Yang, Hongmo

Department of Landscape Architecture, College of Agriculture and Life Science, Chonnam National University.

ABSTRACT

The growth and biomass of reeds(*Phragmites australis*) growing in a subsurface treatment wetland system were investigated from April 2003 to October 2003. Nitrogen(N) and phosphorous(P) concentrations in above-ground(AG) and below-ground(BG) tissues of reeds were examined and the removal rate of N and P by reeds were analyzed. The system, 29 m in length, 9 m in width and 0.65 m in depth, was constructed in June 2001 on a floodplain in the down reach of the Kwangju Stream in Korea in order to purify polluted water of the stream. A bottom layer of 45 cm in depth was filled with crushed granites(15~30 mm in diameter) and a middle layer of 10 cm in depth was filled with pea pebbles(10 mm in diameter). An upper layer of 5 cm contained coarse sand. Reeds were transplanted on the surface of the system, which were dug out of natural wetlands, and their shoots were trimmed 40 cm in height.

The height and density of the shoots averaged 237.7 cm and 244.0 shoot/m², respectively, when the reeds grew fully. The maximum biomass of AG and BG tissues were 1,964 and 1,577 g/m², respectively, and the AG : BG ratio of biomass was 1.26. Mean AG and BG dry weights were recorded as 1,355 and 748 g/m², respectively. The AG and BG tissue concentrations of N averaged 12.37 and 10.01 mg/g, respectively, and those of P 2.37 and 2.03 mg/g, respectively. Inflow to the system averaged 40 m³/day. The concentrations of total nitrogen(T-N) in influent and effluent were 8.4 mg/L and 3.2 mg/L, respectively, and those of total phosphorous(T-P) were 0.73 and 0.38 mg/L, respectively. The total removal of T-N and T-P by the system during the investigation period averaged 140.2 and 9.7 g/m²,

Corresponding author : Yang, Hongmo, Department of Landscape Architecture, College of Agriculture and Life Science, Chonnam National University, Kwang-Ju 500-757,
Tel : +82-62-530-2101, E-mail : hmy@chonnam.ac.kr

respectively, and the total uptake of N and P by the reeds were calculated as 24.39 and 4.73 g/m², respectively. Average removals of about 17% of N and about 49% of P by reeds were recorded. The N and P concentrations in AG tissues were significantly different among the three zones of the system: near to inflow(St1), in the middle of system(St2), and near to outflow(St3). The N and P concentrations in BG tissues were also significantly different among St1, St2 and St3. N and P concentrations in AG and BG tissues of reeds growing in St1 were higher than those in St2 and St3. The height and density of shoots of reeds in St1 were larger than those in St2 and St3. Significant amounts of N and P in the influent were taken up by reeds in St1.

Key Words : *Above-ground biomass, Dry weight, Nutrient uptake, Shoot density, Subsurface flow wetland system.*

I. 서 론

수질을 정화하기 위해 인위적으로 조성한 습지를 인공습지라고 부르며, 구조적 특징에 따라 자유수면습지(surface flow wetlands)와 여과습지(subsurface flow wetlands)로 구분한다(Corbitt and Bowen 1994; 양, 1999). 자유수면습지는 약 1 m 높이로 독을 조성하고 습지바닥에 정수식물을 식재하며, 수심을 20~30 cm로 유지하여 유입수가 습지바닥과 정수식물 사이를 흐르면서 정화된다. 여과습지는 0.6~1 m 깊이 트렌치(trench) 구조물을 땅속에 설치한 후 매질(자갈, 모래 등)을 채우고 표면에 정수식물을 심으며, 유입수가 매질과 식물뿌리 사이를 흐르면서 정화된다. 여과습지의 정수식물로 갈대를 많이 사용하고 있어 여과습지를 갈대상(reed bed)이라고도 부르며, 여과습지의 정수식물은 성장에 필요한 양분을 대부분 유입수에서 흡수하게 된다. 여과습지는 생활하수(Reed, et al., 1988), 산업폐수(Vrhovsek, et al., 1996) 등을 정화하기 위해 주로 사용해 왔으며, 최근에는 오염정도가 상대적으로 낮은 하천수 및 강우유출수(Green and Martin, 1996; Higgins, et al., 1993)를 정화하기 위해서도 활용하고 있다.

인공습지의 정수식물은 다양한 물리적, 생물화학적 기능을 제공한다. 정수식물은 유입수의 흐름을 느리게 하여 미생물이 부착할 수 있는 표면

적을 증가시켜주는 역할을 한다. 햇빛을 차단하여 녹조의 성장을 억제하고, 겨울철에 습지의 온도가 내려가는 현상을 막아주는 역할을 하며, 잔재물층은 단열막 역할을 하여 습지가 동결되는 것을 억제해 준다(Brix, 1997). 정수식물은 성장과 번식에 필요한 영양염류를 뿌리로부터 흡수하여, 인공습지로 부하된 질소와 인을 제거하는 역할을 한다. 정수식물의 통기조직은 대기 중의 산소를 뿌리로 전달할 수 있으며 뿌리로부터 방출된 산소는 뿌리주변에 호기성 상태를 유지시켜 유기물의 분해와 질산화를 높여주는 역할을 한다. 정수식물은 야생동물의 서식처와 시각적 아름다움을 제공해주는 보조적 기능도 가지고 있다.

자연습지에서 자라는 정수식물에 대한 성장, 밀도, 생체량에 관한 연구는 비교적 많으나 인공습지의 정수식물에 대한 연구는 아주 적다. 여과습지에서 성장하는 정수식물의 영양염류 흡수에 대한 연구는 소규모(mesocosm) 실험장치를 설치하여 짧은 성장기간에 수행된 경우가 대부분이어서 실험결과를 실규모 여과습지 구성에 적용하는 데는 한계가 있다. 여과습지에서 성장하는 갈대가 흡수하는 영양염류량에 관한 연구들은 유입수가 점오염원인 생활하수 혹은 산업폐수로 오염농도가 비교적 고농도인 경우가 대부분이며, 오염물농도가 저농도인 하천수를 정화하는 여과습지

의 갈대가 흡수하는 영양염류에 대한 연구는 거의 없다. 국내의 경우 여과습지 정수식물의 생체량과 영양염류 흡수에 관한 연구는 거의 찾아보기 어려운 실정이다. 실규모로 운영중인 여과습지의 정수식물 조사분석을 통하여 국내의 기후 및 환경여건에 적합한 인공습지 설계, 조성, 운영에 정보를 제공할 수 있는 연구가 절실히 요청된다.

오염농도가 상대적으로 낮은 오염하천수, 강우 유출수를 정화하기 위해 인공습지를 조성하는 경우 질소와 인의 제거가 인공습지 조성의 주목적이 되는 경우가 많다. 인공습지에서 정수식물이 흡수하는 질소와 인은 질소와 인의 제거에 중요한 역할을 한다. 하천으로 유입되는 영양염류의 양이 많아지면 부영양화를 야기시켜 하천의 생태계에 나쁜 영향을 미치게 된다. 하천수에 함유되어 있는 질소와 인을 제거하기 위해 다양한 기법들이 활용되고 있으며, 최근 훼손된 하천생태계를 복원하기 위해 자연형하천정비 사업을 추진하면서 하천에 습지를 조성하여 하천수를 자연생태적으로 정화하면서 하천습지를 복원하는 방법에 관심이 높아지고 있다.

인공습지의 오염물질제거량에 관한 연구들은 인공습지로 유입되는 유입수와 인공습지에서 처리되어 방류되는 유출수의 오염물질농도를 기준으로 분석한 경우가 대부분이며, 인공습지의 수질정화에서 중요한 역할을 하는 정수식물에 의해 흡수되어 제거되는 양에 관한 연구는 매우 적다. 본 연구는 오염하천수를 정화하기 위해 하천 고수부지에 실규모로 조성한 여과습지 시스템에서 성장하는 갈대의 초장, 밀도, 생체량을 분석하고, 갈대의 지상부와 지하부에 흡수된 질소와 인의 함량을 분석하여 갈대에 흡수되어 제거되는 질소와 인의 양을 연구하는데 목적이 있다.

II. 재료 및 방법

광주광역시를 흐르는 광주천 하류의 고수부지에 2001년 6월에 여과습지 시스템을 조성하였다.

고수부지 표면으로부터 1 m 아래에 깊이 0.65 m의 콘크리트 박스를 설치하고 쇠석을 45 cm 높이로 채운 후, 콩자갈을 15 cm 깊이로 넣고, 그 위에 굵은 모래를 덮었다. 시스템은 길이 29 m, 폭 9 m로 면적이 260 m²이다(Figure 1). 시스템은 광주천 수중보의 수심 약 20 cm 깊이에서 광주천의 물이 자연유하로 유입되도록 조성하였다. 자생 갈대(*Pragmatis australis*)를 채취하여 근부에서 40 cm 높이로 줄기를 절단한 후 약 30 cm 간격으로 시스템 표면에 식재하였다. 2001년 식재한 갈대는 그해 겨울에 잎과 줄기가 죽었고, 2002년 봄에 새줄기가 나와 성장한 후 겨울철에 다시 줄기와 잎이 죽고, 2003년 4월부터 새줄기가 나오기 시작하였다.

시스템의 유입수와 유출수를 7~10일에 한번 샘플링하여, 환경부 수질오염공정시험방법(환경부, 2000)을 기준으로 미국공중보건협회(APHA, 1998)의 수질분석방법을 참고하여 T-N, T-P를 분석하였다. 2003년 4월부터 9월까지 갈대의 분지수와 초장을 매월 하순 1회 조사하였다. 1 m × 1 m 격자 틀을 이용하여 분지수와 초장을 측정하였으며, 조사지점은 시스템의 유입부(St1), 중앙부(St2), 유출부(St3)에서 횡으로 각각 3군데씩 선정하였다(Figure 1). 분지수는 각 조사지점의 격자틀 내의 전수를 조사하였으며, 초장은 각 조사지점의 격자틀 내 10개체를 3회 반복으로 30개체를 측정하여 평균값으로 나타냈다.

갈대의 지상부(above-ground)와 지하부(below-ground)의 생체량, 건중량, 질소와 인의 함량을 조사하기 위해 갈대가 충분히 성장한 후 성장을 멈추는 2003년 10월 초에 시스템의 유입부, 중앙부, 유출부에서 0.5 m × 0.5 m 방형 3곳의 갈대를 채취하였다(Figure 1). 지상부를 잘라내 이물질을 제거하고, 지하부는 자갈과 모래를 제거한 후 세척하여 무게를 측정하였다. 전년도에 성장한 죽은 줄기와 뿌리는 제거하고 측정하였으며, 건중량은 80℃에서 48시간 이상 건조시켜 측정하였다. 질소와 인의 함량은 채취한 각 방형에서

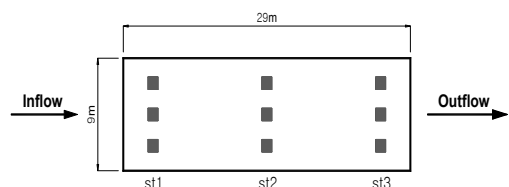


Figure 1. Schematic plane of the subsurface-flow treatment wetland system constructed on a floodplain in the down reach of the Kwangju Stream. Reeds (*Phragmites australis*) were transplanted on the surface of the system. Black squares represent the sampling locations for the examination of shoot height, shoot density, and nutrient uptake by reeds. St1 denotes the zone near to inflow, St2 represents one in the middle of the system and St3 designates one near to outflow.

7개체를 선정하여 건조시켜 분쇄한 후 분석하였다. 질소는 Kieldahl 분해방법을 활용하여 분석하였으며, 인은 Vanadate법을 활용하였다(농업과학기술원, 2000; Allen et al, 1974). 유입부, 중앙부, 유출부의 위치에 따른 지상부와 지하부의 N 함량과 P 함량에 차이가 있는지를 알아보기 위해 Oneway ANOVA 분석을 수행하였으며, 지상부와 지하부의 N과 P 함량에 차이가 있는지를 알아보기 위해 t -검정을 수행하였다. ANOVA와 t -검정에는 Excel(2003)에서 운영 되는 DDXL Program을 활용하였다.

III. 결과 및 고찰

1. 갈대의 성장 및 생체량

조사기간 광주천 하천수가 시스템으로 하루 약 40 m^3 가 유입되도록 운영하였으며, 시스템 수심을 0.6 m로 조절하여 유입수의 평균체류시간은 약 1.5 days였다. 4월 초부터 갈대의 새줄기가 나오기 시작하여 9월 말까지 자랐으며, 10월 초부터 일부 잎이 마르기 시작하였다.

시스템 유입부, 중앙부, 유출부의 4월 평균초장은 각각 72.1, 65.3, 50.6 cm였으며, 7월에는 각각 254.9, 224.4, 199.6 cm로 자랐다. 갈대가 충분

히 자란 9월 말에는 유입부의 초장이 264.5 cm에 달하였으며, 유출부는 218.1 cm로 약 46.4 cm의 차이를 보였다(Figure 2). 유입부, 중앙부, 유출부의 4월 줄기밀도(이하 밀도)는 각각 168.1, 101.9, 87.3 shoot/m²였으며, 7월에는 각각 246.6, 231.3, 208.8 shoot/m²였다. 9월 말에는 유입부와 유출부의 밀도가 각각 263.9, 218.1 shoot/m²로 유입부의 밀도가 45.8 shoot/m² 높았다. 5월의 유입부 밀도는 144.5 shoot/m²로 4월에 비해 23.6 shoot/m² 낮아지는 현상을 보였다(Figure 3). 이는 단일수종 재배에서 개체들이 커지면서 햇빛을 받는 양이 적어 밀도가 낮아지는 현상(self-thinning)에 원인이 있으며, 줄기의 밀도는 낮아지나 개체의 무게는 증가하여 총 생체량은 증가하게 된다(Parr, 1990).

Figure 4는 조사한 갈대의 초장과 밀도를 시스템 평균으로 환산하여 나타낸 것이다. 4월에 평균초장이 62.7 cm에서 7월에 226.3 cm로 왕성한 성장을 한 후 8월~9월에는 완만한 증가를 보였다. 갈대가 충분히 자란 9월 말의 평균초장은 237.7 cm였다. 밀도도 초장과 비슷한 추이를 보였다. 4월에 평균밀도 105.8 shoot/m²에서 7월에 228.9 shoot/m²로 급격히 증가하다가 8월~9월에는 완만히 증가하는 추세를 보였다. 9월 말의 평균밀도는 244.0 shoot/m²였다. 식재한 갈대가 2회의 성장기를 거쳐 3회 성장기인 2003년 4월~9월에 양호한 성장을 보였다.

시스템의 유입부, 중앙부, 유출부의 초장과 밀도는 유입부가 높고 유출부가 낮았으며, 유입부에서 유출부로 갈수록 초장과 밀도가 점점 낮아지는 경향을 보였다(Figure 2, Figure 3). 이는 유입부의 갈대가 유입수에 함유되어 들어오는 영양염류를 먼저 흡수한데 원인이 있다.

수질정화 인공습지에서 성장하는 갈대의 최대 초장은 106~332 cm의 범위를 보이고 있다(Table 1). 범위가 넓은 이유는 유입수의 영양염류 농도와 기후조건이 갈대의 성장에 영향을 미치기 때문이다. 1차처리 하수를 정화하는 여과습지의 갈

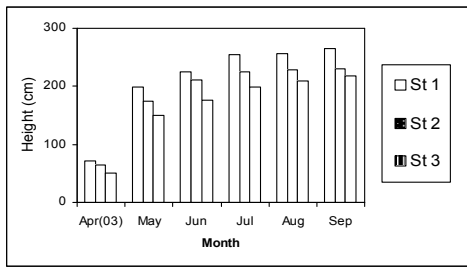


Figure 2. Monthly mean height (cm) of reed shoots at the three locations(St1, St2 and St3).

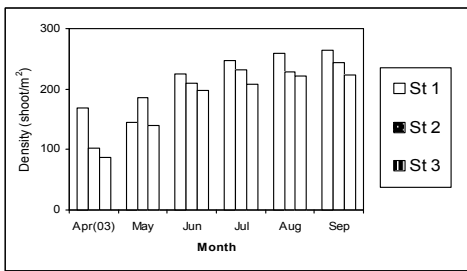


Figure 3. Monthly mean density of reed shoots(shoot/m²) at the three locations(St1, St2 and St3).

대초장은 114~332 cm(Vymazal and Kröpfelová, 2005), 150~220 cm(Gries and Garbe, 1989)를 보였고, 유입수의 농도가 비교적 낮은 시스템의 갈대초장은 106~146 cm를 나타냈다(Greenway, 2002). 본 연구의 갈대 평균초장은 237.7 cm로 Table 1에 제시된 초장의 중간정도 범위에 속한다. 본 연구 시스템의 유입수 농도가 비교적 낮은 것을 고려하면 갈대의 초장은 비교적 양호한 수준이다. 여과습지에서 성장하는 갈대의 밀도도 범위가 넓다. 자갈을 넣고 갈대를 식재한 소규모(mesocosm) Tank(190 l)에 질소의 함량이 높은 축산폐수 1차처리 방류수(T-N 98.5 mg/L)를 주입

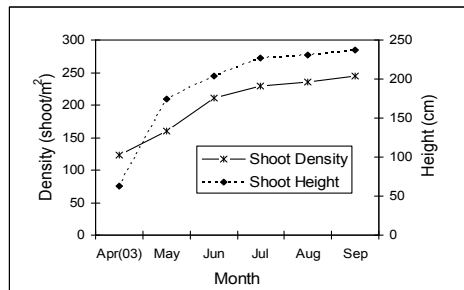


Figure 4. Average monthly height(cm) and density (shoot/m²) of reeds growing on the subsurface wetland system from April 2003 to September 2003. The height and density were calculated from the values of the nine sampling locations(Figure 1).

하였을 경우 갈대의 밀도가 758 shoot/m²에 달하였다(Tanner, 1996). 체코에서 운영 중인 14개 오폐수정화 여과습지의 연구에서 갈대 밀도는 114~332 shoot/m² 범위를 보였으며(Vymazal and Kröpfelová, 2005), 본 연구에서 조사된 갈대 평균밀도는 224.0 shoot/m²는 체코에서 조사된 범위의 중간 정도에 해당된다.

실험 여과습지의 유입부, 중앙부, 유출부의 지상부 생체량은 각각 2,496, 1,852, 1,546 g/m²였고, 지하부 생체량은 각각 2,117, 1,538, 1,078 g/m²였다(Figure 5). 시스템의 지상부와 지하부 평균생체량은 각각 1,964, 1,577 g/m²로 지상부 생체량이 다소 높게 나타났으며, 지하부 : 지상부 생체량비는 0.80를 나타냈다. 외국의 호수 변에서 자라는 갈대의 최대 생체량은 669~4,424 g/m² 범위이며, 국내의 하구나 염습지에서 성장하는 갈대의 최대 생체량은 670~4,650 g/m² 범위를 보이고 있다(Table 2). 외국의 여과습지에서

Table 1. Above-ground biomass of *Phragmites australis* growing in constructed treatment wetlands.

Country	Influent	Length(cm)	Source
Australia	Tertiary	106~146	Greenway, 2002
Poland	Sewage	216	Obarska-Pempkowiak and Ozimek, 2003
Germany	Storm water	150~220	Gries and Garbe, 1989
Czech	Sewage	114~332	Vymazal and Kröpfelová, 2005

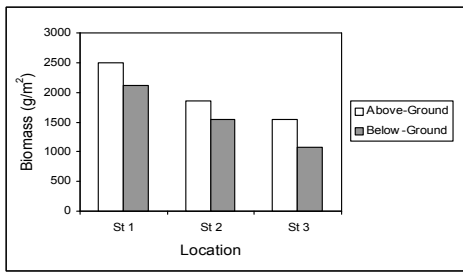


Figure 5. Biomass(g/m²) of the fully-grown reeds in the surface of the subsurface wetland system at the three locations(St1, St2 and St3).

Table 2. Above-ground biomass of *Phygrmites australis* growing in natural and constructed wetlands. The biomass represents maximum values.

Wetland types	Locality	Characteristics	Biomass (g/m ²)
Natural	Scotland ¹⁾	Mesotrophic lake	669
	Scotland ²⁾	Eutrophic lake	3,975
	England ³⁾	Polluted lake	4,424
	Korea ⁴⁾	Estuarine area	670-4,650
	Korea ⁵⁾	Salt marsh	2,980
	Korea ⁶⁾	Estuarine area	3,504
Constructed	Germany ⁷⁾	Subsurface flow	1,360
	Czech ⁸⁾	Subsurface flow	2,088
	Austria ⁹⁾	Subsurface flow	3,100

Source : 1) and 2) : Ho, 1979, 3) : Boar et al., 1989, 4) : 김철수, 1975, 5) : 김준호 · 민병미, 1983, 6) : 문형태 등, 1999, 7) : Gries and Garbe, 1989, 8) : Vymazal et al., 1999, 9) : Harberl and Perfler, 1990.

성장하는 갈대의 지상부 최대 생체량은 1,360 ~ 3,100 g/m² 범위이다. Tanner(1996)의 연구에서 갈대 지상부 생체량은 1,800 g/m²를 보였고, 지하부 : 지상부 생체량 비율은 1.29로 지하부 생체량이 다소 높게 나타났다. Gries and Grabe(1989)의 연구에서는 갈대 지상부 생체량이 1.36 kg/m²였고 지하부 : 지상부의 비율이 0.42로 지하부 생체량이 낮았다. 본 연구의 지상부 평균생체량은 1,964 g/m²는 Table 2에 제시된 여과습지 지상부 생체량의 중간정도에 해당한다.

2. 건중량 및 질소 · 인 함량

유입부, 중앙부, 유출부의 지상부 건중량은 각각 1,570, 1,321, 1,174 g/m²로, 지하부 건중량은 각각 886, 745, 614 g/m²로 조사되었다(Figure 6). 시스템 전체 지상부와 지하부의 평균건중량은 각각 1,355, 748 g/m²였으며, 지상부와 지하부의 건중량을 합한 총 건중량은 2,103 g/m²이다. 지하부 : 지상부 건중량비는 0.83으로 지하부의 건중량이 낮게 나타났다. 분석결과 건중량은 유입부가 중앙부 및 유출부보다 높게 나타났다.

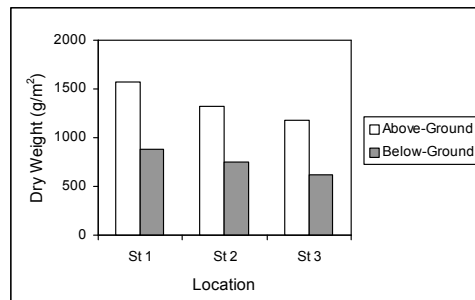


Figure 6. Dry weight(g/m²) of the fully-grown reeds in the subsurface wetland system at the three locations(St1, St2 and St3).

유입부, 중앙부, 유출부의 지상부 질소함량은 각각 18.3, 10.1, 8.7 mg/g로, 지하부 질소함량은 각각 13.5, 9.2, 7.3 mg/g로 분석되었다(Figure 7). 시스템 전체 지상부와 지하부의 평균질소함량은 각각 12.4, 10.1 mg/g로, 지상부의 질소함량이 지하부보다 다소 높게 나타났다. 유입부, 중앙부, 유출부의 지상부 인함량은 각각 3.06, 2.14, 1.91 mg/g였으며, 지하부 인함량은 각각 2.41, 1.95, 1.73 mg/g를 보였다(Figure 8). 시스템 지상부와 지하부의 평균인함량은 각각 2.37, 2.03 mg/g로 인의 함량도 지상부가 약간 높게 나타났다.

2차처리장 방류수를 정화하는 여과습지에 자라는 갈대의 지상부 질소함량은 7.5 mg/g (Adcock and Ganf, 1994)로 다소 낮은 반면, 1차처리장 방류수를 정화하는 여과습지에서 자라는 갈대의 지상부 질소함량은 15~26 mg/g (Burgoon et al.,

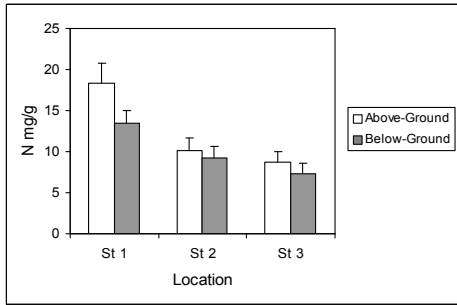


Figure 7. Above-ground and below-ground tissue concentrations of N at the three locations(St1, St2 and St3). The concentrations were obtained from the fully-grown reeds in the subsurface wetland system. Bars represent standard deviations.

1991)로 다소 높게 나타났다. 본 연구의 갈대 지상부 평균질소함량 12.4 mg/g는 이들 범위의 중간 정도에 해당된다. 질소농도가 높은 축산폐수 1차처리장의 방류수를 이용한 실험에서 갈대의 지상부 질소함량은 32 mg/g로 다른 정수식물에 비해 높은 반면, 인의 함량은 2.6 mg/g로 낮게 나

타났다(Tanner, 1996).

DDXL 프로그램의 정규확률 그래프(normal probability plot)와 박스그래프(boxplot)을 활용하여 통계분석에 활용한 데이터의 분포가 정규 분포곡선과 유사함을 확인하였다. 유의수준 $\alpha=0.05$ 에서 유입부, 중앙부, 유출부 간에 지상부 질소함량에 차이가 있는 것으로 분석되었으며 ($p<0.001$), 지상부 인함량도 차이가 있는 것으로 분석되었다($p<0.001$). 세 위치 간에 지하부 질소함량과 인함량도 차이가 있는 것으로 분석되었다($p<0.001$, Table 3). 유입부에서 자라는 갈대의 지상부와 지하부의 질소함량과 인함량이 유출부와 중앙부에서 성장하는 갈대의 질소함량과 인함량보다 높음을 알 수 있다. 이는 유입부에서 성장하는 갈대가 질소와 인을 먼저 흡수하는데 원인이 있다. 유의수준 $\alpha=0.05$ 에서 지상부와 지하부의 질소함량에 차이를 보였고($p=0.0035$), 인함량도 지상부와 지하부간 차이를 보였다($p<0.001$, Table 4).

Table 3. Summary of oneway ANOVA statistics. N and P concentrations in above-ground and below-ground tissues of reeds growing in the subsurface wetland system were tested at three locations. St1 denotes zone near to inflow, St2 represents zone in the middle of the system and St3 designates zone near to outflow.

Elements	Plant Tissue	Locations	Source of Variance	SS	df	MS	F	p
N	Above	St1 St2 St3	Between	1065.829	2	532.9145	156.5464	< 0.001
			Within	204.251	60	3.4041		
	Below	St1 St2 St3	Between	407.8415	2	203.9207	95.7353	< 0.001
			Within	127.8025	60	2.13000		
P	Above	St1 St2 St3	Between	15.4014	2	7.7007	47.3011	< 0.001
			Within	9.7681	60	0.1628		
	Below	St1 St2 St3	Between	5.0723	2	2.5361	17.9568	< 0.001
			Within	48.4742	60	0.1412		

SS : Sum of Squares

MS : Mean Square

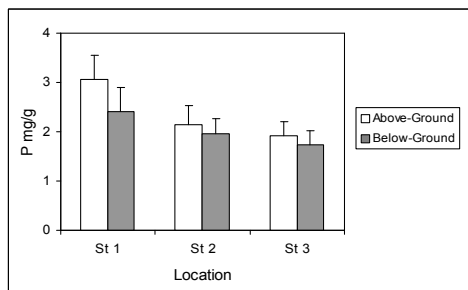


Figure 8. Above-ground and below-ground tissue concentrations of P at the three locations(St1, St2 and St3). The concentrations were obtained from the fully-grown reeds in the subsurface wetland system. Bars represent standard deviations.

2003년 4월부터 9월까지(약 170일) 시스템 유입수의 평균 유입량과 유출량은 각각 약 40, 39 m³였다. 유입수와 유출수의 평균 T-N 농도는 각각 8.4, 3.2 mg/L였으며, T-P 농도는 각각 0.73, 0.38 mg/L였다. 시스템의 T-N과 T-P 평균 제거율은 각각 0.825, 0.057 g/m² · day로 산출되었다. 약 170일간에 시스템에서 제거된 질소와 인의 양은 각각 140.2, 9.7 g/m²이다. 갈대가 충분히 성장한 10월 초에 채취한 갈대의 지상부와 지하부의 평균 건중량은 각각 1,355, 748 g/m²였으며, 지상부와 지하부의 평균 질소함량은 각각 8.7, 7.3 mg/g였고, 지상부 및 지하부 평균 인함량은 3.06, 2.41 mg/g였다. 갈대가 4월 성장기부터 10월 초까지 흡수한 질소와 인의 양은 각각 24.39, 4.73

g/m²로 산출되었다. 시스템에서 제거된 질소의 양(140.2 N g/m²)에서 갈대에 흡수되어 제거된 양(24.39 N g/m²)이 차지하는 비율은 약 17%이며, 시스템에서 제거된 인의 양(9.7 P g/m²)에서 갈대에 흡수되어 제거된 인의 양(4.73 P g/m²)이 차지하는 비율은 약 49%이다. 시스템에서 제거된 질소와 인중에서 갈대에 흡수되어 제거된 양이 상당한 수준임을 알 수 있다. 갈대 채취 전 일부 잎이 시들어 떨어진 양을 고려하면 갈대에 흡수되어 제거된 질소의 양은 다소 높아질 것으로 예측된다.

여과습지 표면에 쌓이는 갈대 잔재물이 분해되어 질소가 다시 수중으로 되돌아오는 데는 수개월 혹은 수년의 장기간이 소요된다(Kadlec and Knight, 1996). 갈대는 통기조직이 발달하여 대기 중의 산소를 뿌리로 전달할 수 있어 뿌리 주변의 근권에서 일어나는 미생물에 의한 암모니아 화와 질산화 작용을 높여주는 역할을 한다. 정수 식물의 근권 밖은 혐기층이 발달하며, 혐기층으로 이동한 질산태질소는 질소가스와 아산화질소로 전환되어 대기로 이동한다. 습지에서 식물에 의해 흡수되는 질소의 양은 약 25% 정도이며, 탈질화에 의해서 제거되는 양이 약 60~70%이다(Spiels and Mitsch, 2000). 갈대는 산소를 공급하여 탈질화의 전단계인 질산화 작용에 중요한 역할을 한다. 여과습지에서 질소와 인은 매질사이에 유기질소와 유기인이 고정되거나 매질표면

Table 4. Summary of *t*-test statistics of N concentrations in above-ground and below-ground tissues of reeds growing in the subsurface wetland system. P concentrations in the above-ground and below-ground tissues of reeds were also tested.

Concentrations	Plant tissues	N	Mean±S.E.	<i>t</i> Value	<i>p</i>
N	Above-ground	63	12.234±0.5702	2.982	0.00355
	Below-ground	63	10.207±0.3703		
P	Above-ground	63	2.372±0.0803	3.512	< 0.001
	Below-ground	63	2.022±0.0589		

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

의 미생물막에 흡착되어 제거되기도 하며, 인은 다양한 인산염의 형태로 침강되기도 한다.

IV. 결 론

실험 여과습지에서 갈대가 충분히 성장한 시기인 9월 말에 갈대의 평균초장은 237.7 cm였고, 평균밀도는 244.0 shoot/m²였다. 갈대의 초장과 밀도는 시스템 유입부 쪽이 높아 9월 말 유입부의 갈대 초장은 263.9cm, 밀도는 264.5 shoot/m²에 달했다. 초장과 밀도 조사에서 시스템에 식재한 갈대의 생육이 양호하였다. 갈대의 지상부 평균생체량은 1,964 g/m²이었으며, 지하부 평균생체량은 1,577 g/m²로 조사되었다. 지상부 : 지하부 생체량의 비율은 1.25로 지상부의 생체량이 다소 높게 나타났다. 유입부의 생체량이 중앙부와 유출부보다 높았으며, 유입부의 지상부와 지하부 생체량은 각각 2,496, 2,117 g/m²를 보였다.

건중량 조사에서 지상부와 지하부 평균 건중량은 각각 1,355, 748 g/m²를 보였다. 지상부 : 지하부 건중량 비는 1.81로 지상부가 높게 나타났다. 갈대의 지상부 평균 질소함량과 인함량은 각각 12.37, 2.37 mg/g였으며, 지하부 평균 질소함량과 인함량은 각각 10.01, 2.03 mg/g였다. 유의수준 $\alpha=0.05$ 에서 시스템의 유입부, 중앙부, 유출부에서 자라는 갈대의 지상부에 함유된 질소와 인의 함량이 차이를 보였으며($p<0.001$), 세 위치간 지하부의 질소와 인의 함량도 차이가 있는 것으로 나타났다($p<0.001$). 유의수준 $\alpha=0.05$ 에서 지상부와 지하부에 함유된 질소의 함량에 차이가 있었으며($p=0.0035$) 지상부와 지하부에 함유된 인의 함량도 차이를 보였으며($p<0.001$). 유입부에서 유출부 쪽으로 갈수록 갈대의 초장과 밀도가 낮아지고 갈대에 함유된 질소와 인의 양도 적어지는 것으로 나타났다. 유입수에 함유된 질소와 인이 유입부의 갈대에서 흡수된 후 중앙부와 유출부로 이동하면서 축적적으로 흡수된데 원인이 있다.

실험기간 시스템에서 제거된 질소와 인의 양은 각각 140.2, 9.7 g/m²로 산출되었으며, 실험기간 갈대가 흡수한 질소와 인의 양은 각각 24.39 g/m², 4.73 g/m²로 산정되었다. 실험기간 시스템에서 처리된 질소와 인의 양에서 갈대가 흡수하여 제거된 질소와 인의 양은 각각 17%와 49%로 나타났다. 갈대가 여과습지의 질소와 인 제거에서 상당한 역할을 하였음을 알 수 있다.

본 연구에서는 갈대의 생체량과 질소와 인의 함량을 갈대가 충분히 성장한 후에 갈대를 채취하여 분석하였다. 정수식물채취가 수질정화에 미치는 교란을 억제하면서 성장기에 수회에 걸쳐 수행한 생체량과 질소의 흡수량 분석은 본 연구의 미비 점을 보완할 수 있을 것으로 사료된다.

인 용 문 헌

- 김준호 · 민병미. 1983. 해안 염생식물군집에 대한 생태학적 연구(III) : 인천 간척지의 토양 환경, 종의 다양성 및 염류순환에 대하여. 한국식물학회지 26 : 53-71.
- 김철수. 1975. 갈대군락의 현존량과 환경요인에 관한 연구. 한국식물학회지 18 : 129-134.
- 농업과학기술원. 2000. 토양 및 식물체 분석법. 문형태 · 남궁 정 · 김정희. 1999. 대형수생식물의 물질생산과 질소와 인의 흡수량. 한국생태학회지 17(1) : 27-34.
- 양홍모. 1999. 수자원보전을 위한 점원 및 비점원 오염물의 자연생태적 친환경적 처리 인공습지 및 연못-습지 시스템. 한국수자원학회지 32(5) : 111-113.
- 환경부. 2000. 수질오염공정시험방법.
- Adcock, P. W., and G. G Ganf. 1994. Growth characteristics of three macrophyte species in a natural and constructed wetland system. Water Science and Technology 29 : 95-102.
- Allen, S. E., J. A. Parkinson., H. M. Grimshaw and C. Quaraby. 1974. Chemical analysis of ecolog-

- ical materials. Backwell Science Publishing : Oxford.
- APHA(American Public Health Association). 1998. Standard methods for the examination of water and wastewater. Washington, D.C. : American Public Health Association.
- Boar, R. R., C. E. Crook and B. Moss. 1989. Regression of *Phragmites australis* reed swamps and recent changes of water chemistry in the Northfolk Broadland, England. Aquatic. Botany 35 : 41-55.
- Burgoon, P. S., K. R. Reddy., T. A. DeBusk and B. Koopman.1991. Vegetated submerged beds with artificial substrates II : N and P removal. J. Environ. Eng. 117 : 394-407.
- Brix, H. 1997. Do macrophytes play a role in constructed treatment wetlands? Water Science Technology. 35(5) : 11-17.
- Corbitt, R. A., and P. T. Bowen. 1994. Constructed wetlands for wastewater treatment(In Kent, D.M. ed., "Applied wetlands science and technology") New York : Publishers Lewis, pp.221-241.
- Green, M. B., and J. R. Martin. 1996. Constructed reed beds clean up storm overflows on small wastewater treatment works. Water Environment Research, 68 : 1054-1060.
- Greenway, M. 2002. Seasonal *Phragmites* biomass and nutrient storage in a subtropical subsurface flow wetland, receiving secondary treated effluent in Brisbane, Australia(In Proceedings of the eighth International Conference on Wetland systems for Water Pollution control, University of Dar es Salaam and IWA) pp. 242-253.
- Gries, C., and D. Garbe. 1989. Biomass, and nitrogen, phosphorus and heavy metal content of *Phragmites australis* during the third growing season in a root zone waste water treatment. Archive Hydrobiology, 117 : 97-105.
- Haberl, R., and R. Perfler. 1990. Seven years of research work and experience with wastewater treatment by a reed bed system (In Cooper, P. F. and B.C. Findlater eds. "Constructed Wetlands in Water Pollution Control"). Pergamon Press : Oxford, U.K. pp.205-214.
- Higgins, M. J., C. A. Rock., R. Bouchard and B. Wengrezynek. 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 pp.359-367.
- Ho, Y. B. 1979. Shoot development and production studies of *Phragmites australis*(Cav.) Trin. ex Steudel in Scottish Lochs. Hydrobiologia, 64 : 215-222.
- Kadlec, R. H., and R. L. Knight. 1996. Treatment Wetlands. CRC Press, Inc. Boca Raton. pp. 717-737.
- Obaraska-Pempkowiak, H., and T. Ozimek. 2003. Comparison of usefulness of three emergent macrophytes for surface water protection against pollution and eutrophication : case study, Bielkowo, Poland(In Vymazal, J. ed. "Wetland-Nutrients, Metals and Mass Cycling"). Backhuys Publishers : Leiden, The Netherlands. pp.215-226.
- Parr, T. W. 1990. Factors affecting reed(*Phragmites australis*) growth in UK reed bed treatment systems(In P.F. Cooper and B.C. Findlater eds. "Constructed Wetlands in Water Pollution Control"). Pergamon Press : Oxford. pp.67-76.
- Reed, S. C., R. W. Crites and E. J. Middlebrooks. 1988. Natural Systems for Waste Management and Treatment. McGraw-Hill : New York. pp.173-232.

- 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. *Ecological Engineering*, 14 : 77-91.
- Tanner, C. C. 1996. Plants for constructed wetland treatment systems-A comparison of the growth and nutrient uptake characteristics of eight emergent species. *Ecological Engineering*, 7 : 59-83.
- Vrhovsek, D., V. Kukanja and T. Bulc. 1996. Constructed wetland for industrial waste water treatment. *Water Research*, 30 : 2287-2292.
- Vymazal, J., J. Dusek, and J. Kvet. 1999. Nutrient uptake and storage by plants in constructed wetlands with horizontal subsurface flow : a comparative study(In Vymazal, J. ed., "Nutrient Cycling and Retention in Natural and Constructed Wetlands") Backhuys Publishers : Leiden, The Netherlands. pp.85-100.
- Vymazal J., and L. Kröpfelová. 2005. Growth of *Phragmites australis* and *Phalaris arundinacea* in constructed wetlands for wastewater treatment in the Czech Republic. *Ecological Engineering*, 25 : 606-621.

接受 2005年 12月 13日