광주천 고수부지에 조성한 자유수면인공습지의 인 제거

양홍모

전남대학교 조경학과

Phosphorous Removal in a Free Water Surface Wetland Constructed on the Gwangju Stream Floodplain

Yang, Hong-Mo

Dept. of Landscape Architecture, Chonnam National University

ABSTRACT

Removal rates of $\text{PO}_4\text{-P}$ and TP in a free water surface wetland system were investigated. The system was established in 2008 on a floodplain in the middle reach of the Gwangju Stream flowing through Gwangju City. Its dimensions were 46 meters in length and 5 meters in width. Two year old *Typha angustiflora* L. growing in pots were planted on half of the area and *Zizania latifolia* Turcz on the other half in 2008. Stream water was funneled into the wetlands by gravity flow, and its effluent was discharged back into the stream. The influent volume was controlled by valves and water depth was adjusted by wires. Volume and water quality of inflow and outflow were analyzed from January to December in 2010. Inflow into the system averaged approximately $710\text{m}^3/\text{day}$ and hydraulic residence time was about 1.5 hours. Average influent and effluent $\text{PO}_4\text{-P}$ concentration were 0.144 and 0.103mg/L, respectively, and $\text{PO}_4\text{-P}$ abatement amounted to 28.6%. Influent and effluent TP concentration averaged 0.333 and 0.262mg/L, respectively, and TP retention reached to 20.7%. $\text{PO}_4\text{-P}$ removal rate(%) during plant growing season(31.448) was significantly high($p<0.001$) when compared with that during plant non-growing season(25.829). TP abatement rate(%) during plant growing season(27.230) was also significantly high($p<0.001$) when compared with that of the non-growing season(14.856). Major phosphorous removals in the system resulted from adsorption of phosphorous in the litter-soil layers; sedimentation of particulate phosphorous and Ca, Al, Fe bounded phosphates; and absorption of phosphorous by emergent plants. The adsorption and sedimentation occurred throughout the year, however, the absorption took place during plant growing season. This resulted in higher removals of $\text{PO}_4\text{-P}$ and TP during plant growing season.

Key Words: Free Water Surface Wetlands, Emergent Plants, Sorption, Sediment, Residual Burial

국문 초록

하천수를 정화하는 자유수면인공습지의 정수식물 성장기(4~9월)와 비성장기(1~3월과 10~12월)의 $\text{PO}_4\text{-P}$ 와 TP 제거율을 비교 연구하였다. 실험 습지 시스템은 광주광역시를 흐르는 광주천 중류 고수부지에 2008년 조성되었으며, 길이

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

46m, 폭 5m 규모이다. 2008년 포트에서 2년 자란 부들(*Typha angustiflora* L.)과 줄(*Zizania latifolia* Turcz.)을 시스템의 1/2씩 각각 식재하였다. 광주천의 물이 자연유하로 시스템에 유입되며, 처리수는 광주천으로 방류된다. 유입수의 양과 수심은 밸브와 위어(weir)로 조절할 수 있다. 유입수 및 유출수의 인 농도를 2010년 1월부터 12월까지 7~10일 간격으로 조사 분석하였다. 하루에 약 710m³의 하천수가 시스템으로 유입되어, 체류시간은 약 1.5hr이었다. 조사기간 유입수와 유출수의 PO₄-P 평균농도는 각각 0.144, 0.105mg/L이었으며, PO₄-P 평균제거율은 28.1%였다. 유입수와 유출수의 TP 평균농도는 각각 0.144, 0.105mg/L이었으며, TP 평균제거율은 20.7%를 보였다. *t* 검정결과, 정수식물 성장기의 PO₄-P 제거율(31.448)이 비성장기 PO₄-P 제거율(25.829)보다 높았으며($p<0.001$), 정수식물 성장기의 TP 제거율(27.230)도 비성장기의 TP 제거율(14.856)보다 높게($p<0.001$) 나타났다. 인공습지에서 인 제거는 잔재물-토양 층의 흡착, 입자성 인과 Ca, Fe, Al과 결합된 인산염의 침전, 그리고 정수식물의 흡수가 중요하다. 정수식물 성장기가 비성장기보다 PO₄-P와 TP의 제거율이 상대적으로 높은 원인은 흡착과 침전에 의한 인 제거는 계절에 관계없이 일어나나, 정수식물의 흡수는 정수식물 성장기에만 일어나기 때문이다.

주제어: 자유수면습지, 정수식물, 수탁, 침전, 잔여물 묻힘

I. 서론

자연습지가 가지고 있는 수질정화 기능을 효율적으로 활용하기 위해 인위적으로 조성한 습지를 수질정화 인공습지 또는 인공습지라고 부른다. 자유수면인공습지(free water surface constructed wetlands)는 높이 약 1m 제방으로 습지 셀(cell)을 구획하고, 습지바닥에 정수식물을 심으며, 수심을 약 0.2~0.3m로 유지시켜 운영한다. 자유수면인공습지를 자유수면습지(free water surface wetlands)라고도 부른다. 자유수면습지는 수질정화 기능 이외에 야생동물 서식처 제공, 비오름 조성, 휴식 및 자연학습 공간 제공, 경관개선 등의 부가적 기능을 제공할 수 있는 장점이 있으며, 이런 부가적 기능을 고려하여 설계한다.

자유수면습지는 하·폐수를 2차처리수준으로 정화하는 하수처리장의 방류수나 2차처리수준의 수질정화 연못시스템의 방류수를 정화하기 위해 주로 사용하여 왔으며, 하천수와 강우유출수를 정화하기 위해서도 활용하고 있다. 오염농도가 상대적으로 낮은 하천수를 정화하는 자유수면습지는 질소(N)와 인(P)을 정화하는데 일차적 목적을 두고 있다. 인공습지의 인 제거율은 질소 제거율에 비해 상대적으로 낮은 경우가 대부분이다(Kadlec, 1989). 습지에서 질소는 생물화학적 순환기간이 짧고, 이동성이 높으며, 대기 중으로 이동하는 양이 많은데 비해, 인은 생물화학적 순환기간이 길고, 이동성이 낮으며, 대기 중으로 이동하는 양이 거의 없기 때문이다. 인순환과 질소순환의 이런 차이에도 불구하고, 인공습지의 인 제거율은 효과적인 수준이다(Richardson and Craft, 1993).

인공습지에서 인이 제거되는 중요한 기작은 수탁(sorption), 생체저장(biomass storage), 잔여물 묻힘(residual burial), 침전(sedimentation), 변환(transformation), 저장장소 간 이동(movement)이다. 수탁은 흡착(adsorption)과 흡수(absorption)를 포함

하는 개념이다. 흡착과 생체저장은 처리용량에 한계가 있어 한계에 도달하면 더 이상 처리가 불가능하나, 묻힘은 처리용량에 한계가 없어 지속적인 처리가 가능하다(Kadlec and Wallace, 2009).

최근 하천살리기 및 하천복원 사업에서 하천수를 정화하여 하천수질을 개선할 수 있는 인공습지 조성 기법에 관심이 높아지고 있다. 하천수정화 인공습지는 제내지 즉 하천제방 밖의 부지에 조성하는 방법과 제외지인 고수부지에 조성하는 방법이 있다. 국내의 경우, 하천주변에 주거지, 도로, 농지 등 토지 이용이 이미 진행되어 제내지에 인공습지 조성 부지를 확보하기가 매우 어려운 실정이어서 고수부지에 조성하고 있으며, 이들 인공습지를 대부분 조경분야가 설계 및 시공을 하고 있는 추세이다.

국내 하천환경 조건에 적합한 고수부지 수질정화 인공습지 모델개발과 설계인자의 도출을 위해서는 고수부지에 조성되어 운영 중인 하천수정화 인공습지의 오염물질 처리기작과 처리율에 관한 연구가 지속적으로 필요하다. 본 연구는 고수부지에 조성된 하천수를 정화하는 자유수면습지의 인 제거를 분석하고, 정수식물 성장기와 비성장기의 인 제거를 비교 연구하는데 목적이 있다.

II. 재료 및 방법

1. 실험 자유수면습지 구조

실험 자유수면습지 시스템은 광주광역시를 흐르는 광주천 종류의 고수부지에 2008년 6월에 조성되었다. 광주천 복원사업 일환으로 조성된 시스템이며, 수질정화 이외에 시민들의 휴식 및 자연학습 공간을 제공하는 기능을 한다. Figure 1은 실험 시

시스템의 개념도이다. 시스템의 규모는 습지바닥기준 길이 46m, 폭 약 5m로 면적이 약 230m²이다. 고수부지 표고 아래에 조성된 습지로 사면의 경사는 약 1:2이다. 광주천 하천수가 시스템 상류에 위치한 수중보로부터 자연유하로 유입되며, 시스템 처리수는 광주천으로 방류된다. 유입부에는 유량조절 밸브가, 유출부에는 수위조절 장치(weir)가 설치되어 있어 수심과 유량을 조절할 수 있다. 시스템 내부를 관찰할 수 있도록 징검다리가 두 곳에 놓여있다. 2008년 6월에 포트(pot)에서 2년 성장한 부들(*Typha angustiflora* L.)과 줄(*Zizania latifolia* Turcz.)을 약 30cm 간격으로 식재하였다. 유입부 쪽으로 시스템의 1/2에는 부들을, 유출부 쪽으로 시스템의 1/2에는 줄을 식재하였다.

2. 처리수준 및 정수식물생장 조사

2010년 1월부터 2010년 12월까지 1년간 유입수와 유출수를 약 일주일에 한 번씩 샘플링하여 수질오염공정시험방법(환경부, 2003)을 기준으로 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 격자 틀을 이용하여 2010년 5월, 7월, 10월에 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 2010년 1~3월과 10~12월의 6개월간 수질분석자료와, 정수식물이 성장하는 2010년 4~9월의 6개월간 수질분석자료를 기초로 정수식물 성장기와 정수식물 비성장기의 PO₄-P와 TP의 처리효율을 비교분석하였다. t-Test 등 통계분석에는 PC용 Excel 프로그램과 Excel에서 운영되는 통계 프로그램인 DDXL(Data Desk/XL, Version 2004)을 사용하였다.

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

III. 결과 및 고찰

인공습지에서 연구하는 인의 형태는 수질분석에서 정의하고 있는 인의 형태에 집중되어 있다. 수질분석에서 여지(4.5μm)를 통과한 인을 용해인(dissolved phosphorous, DP)으로, 통과하지 못하는 인을 입자상 인(particulate phosphorous, PP)으로 구분한다. DP를 용해무기인(dissolved inorganic phosphorous, DIP)과 용해유기인(dissolved organic phosphorous, DOP)으로 구분하며, PP를 입자상 무기인(particulate inorganic phosphorous, PIP)과 입자상 유기인(particulate organic phosphorous, POP)으로 구분한다(APHA, 1999; 환경부, 2003). 총인(total phosphorous: TP)은 DIP, DOP, PIP, POP를 합한 개념이다. 인공습지의 수질분석에서 일반적으로 DIP를 의미하는 인산염인(PO₄-P)과 TP를 분석한다(Refer to Figure 7). DIP는 조류(algae)와 수생식물이 곧바로 흡수할 수 있는 형태이다. 무기인은 다양한 인광석의 분해, 비료, 비누 등 세제, 유기인의 무기화 등으로 발생하며, 유기인은 죽은 식물의 분해, 동물의 배설물, 동식물 사체의 분해 등으로 발생한다.

인은 다양한 인산(phosphoric acid)과 인산염(phosphate)을 형성한다. 인산의 가장 단순한 형태가 오르도인산(H₃PO₄)이며, H₃PO₄를 오르도인산염 혹은 정인산이라고도 부른다. 오르도인산이 두 개 이상 응축하여 축합다중 인산이 형성된다. 이들 인산이 Fe, Ca, Al 등의 금속이온과 결합하여 다양한 인산염이 생성된다. 오르도인산은 pH에 따라 형태가 달라진다. pH<2인 강산성인 경우 H₃PO₄로 존재하며, pH>12.5인 강알칼리성인 경우 인산이온(PO₄³⁻)으로 존재한다. 전형적인 습지의 pH 수준(4<pH<9)에서는 H₂PO₄⁻와 HPO₄²⁻로 존재한다. 따라서 인공습지의 정수식물은 주로 H₂PO₄⁻와 HPO₄²⁻의 형태로 인을 흡수한다(Reddy and DeLaune, 2008). 인은 핵산, ADP, ATP 등의 구성물질로 생명체에 필수적인 요소이다.

미국 EPA는 1993년 북미에서 운영하고 있는 203개 수질정화 인공습지의 데이터베이스(North American Treatment Wetland Database, NADB)를 구축하였다. 이들 인공습지는 주로 2차처리장의 방류수와 연못시스템의 방류수를 정화하는 시스템들이다. NADB 중 모니터링 자료가 비교적 양호한 40개 자유수면 습지를 추출하여 기술평가 데이터베이스(Technology Assessment Database, TADB)를 구축하고, TADB를 기초로 인공습지 기술검토서가 1999년 작성되었다(EPA, 1999). 인공습지의 인 제거 모형에 관한 연구(Kadlec and Knight, 1996; Kadlec and Wallace, 2009; EPA, 1999; Richardson *et al.*, 1997)는 대부분 NADB, TADB에 기초를 두고 있다.

인공습지의 인 제거 연구는 질소 제거 연구에 비해 상대적으로 적다. 하천수를 정화하는 인공습지의 인 제거에 대한 연구는 더욱 적다. Mitsch *et al.*(1998), Narin and Mitsch(2000)는

제내지에 조성한 하천수정화 인공습지의 인 제거를 연구하였으며, Richardson and Marshall(1986), Howard-Williams(1985), Richardson and Craft(1993), Richardson *et al.*(1997)은 인공습지의 인 저장 기작과 모형을 제시하였다. Kadlec(1994)은 인 퇴적 모형을 연구하였으며, Kadlec(1999)은 습지의 인 제거 한계를 연구하였다. 노희영 등(2002)은 하천수를 정화하는 인공습지의 갈대가 흡수하는 인을 연구하였고, 양홍모(2003), 변찬우(2010)는 고수부지에 조성된 하천수를 정화하는 인공습지의 인 제거를 연구하였다.

1. 정수식물 생장

시스템을 시공한 2008년 식재한 부들과 줄은 2009년을 거치면서 비교적 양호한 활착과 성장을 보였다. 2009년 겨울에 부들과 줄의 지상부가 죽어 잔재물이 되었다. 2010년 1월에는 부들과 줄의 잔재물 중 일부는 습지바닥에 쌓이고 일부는 수면위를 덮고 있었다. 2010년 4월에 부들과 줄의 새줄기가 나오기 시작하였다.

부들 식재구간의 St1(유입부), St2(중간부), St3(유출부)에서 5월의 부들 평균분지수는 각각 35.2, 34.6, 33.9(평균 34.6) stems/m²이었으며, 7월의 평균분지수는 St1, St2, St3에서 각각 45.3, 44.3, 43.4(평균 44.3) stems/m²을 보였고, 성장을 멈추고 시들어가는 10월에는 St1, St2, St3의 평균분지수가 각각 49.5, 49.2, 47.9(평균 48.9) stems/m²을 보였다(Refer to Figure 2). 부들의 평균초장은 5월에 St1, St2, St3에서 각각 96.4, 94.1, 85.6cm(평균 92.0cm)이었고, 7월에는 각각 161.0, 152.5, 148.1cm(평균 153.9cm)를 보였으며, 10월에는 각각 144.0, 138.6, 134.2cm(평균 139.0cm)를 나타냈다(Refer to Figure 3).

줄 식재구간의 St1(유입부), St2(중간부), St3(유출부)에서 줄의 평균 분지수는 5월에 각각 40.3, 38.4, 37.5 stems/m²(평균 38.7 stems/m²)이었으며, 7월에는 각각 48.1, 47.4, 48.3

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*

stems/m²(평균 48.0 stems/m²)을 보였고, 성장을 멈추고 시들어가는 10월에는 각각 53.9, 52.6, 53.1 stems/m²(평균 53.1 stems/m²)을 나타냈다(Refer to Figure 4). 줄의 평균초장은 5월에 St1, St2, St3에서 각각 109.7, 115.1, 112.7cm(평균 112.5 cm)를 보였고, 7월에는 각각 176.5, 169.7, 175.3cm(평균 173.8

cm)를 보였으며, 10월에 각각 153.8, 151.8, 157.1cm(평균 154.2 cm)를 나타냈다(Refer to Figure 5).

조사결과 줄의 초장이 부들보다 크게 나타났으며, 줄의 분지수가 부들의 분지수보다 많았다. 조사에서 정수식물 성장기인 4~9월 사이에 부들과 줄의 성장이 양호하였음을 알 수 있다. 부들과 줄의 초장이 7월보다 10월이 작은 이유는 7월 조사 이후에 새로운 줄기가 나와 성장하였기 때문이다. Figure 3에서 부들의 초장은 St1(유입부)에서 St3(유출부)로 이동할수록 낮아진다. 이는 유입수에 함유된 부유물과 입자상 영양염류가 유입부에 침전되어 유입부에 영양분이 상대적으로 많기 때문이다. 인은 인공습지의 유입부에 상대적으로 많이 침전되어 유입부가 유출부보다 인의 함량이 높으며, 유입부에서 유출수로 이동할수록 토양과 물기둥의 인 농도가 점점 낮아지는 경향을 보인다(Reddy and DeLaune, 2008).

인공습지에서 부들, 줄, 고랭이, 갈대 등 정수식물은 인 제거 역할을 한다. 물속에 잠긴 줄기와 잎은 유입수의 유속을 느리게 하여 직경이 큰 입자들의 침전을 도와준다. 정수식물은 주로 10~30cm 깊이의 토양공극의 물로부터 인을 흡수하여 인을 제거한다. 정수식물의 줄기와 잎은 죽어서 잔재물이 되어 습지 바닥에 쌓이며, 잔재물이 분해되어 유기쇄설물이 된다. 잔재물이 미생물에 의해 분해되면 잔재물 속에 있던 인의 일부가 물기둥으로 되돌아온다. 잔재물 중 일부는 분해되지 않고 화학구조상 안정적인 잔여물이 되어 영구히 표토층에 묻히게 되며, 잔여물이 되는데 약 1년에서 2년이 걸린다. 분해가 어려운 죽은 뿌리와 근경의 일부도 잔여물이 된다. 이들 잔여물의 구조에 인이 함유되어 인의 묻힘이 발생한다(Refer to Figure 7).

부유식물과 침수식물은 인의 변환율이 빨라 인의 저장에 단기간이며 흡수한 인의 대부분이 분해와 함께 물기둥으로 용출된다. 정수식물은 부유식물과 침수식물보다 뿌리와 근경이 많아 인의 저장 능력이 크며, 지하부가 지상부보다 생체량이 많아 인의 저장이 많다. 식물이 흡수한 인 중에서 잔여물로 습지 바닥에 묻히는 양이 차지하는 비율은 낮지만 인공습지의 지속적인 인 제거에 가장 중요한 역할을 한다. 정수식물 생체에 부동화된 인은 죽음과 분해과정에서 다시 방출되나, 약 10~20%가 분해되지 않고 잔여물 속에 남게 된다(Kadlec and Wallace, 2009). 수질정화 인공습지에서 잔여물로 인이 장기간 저장되는 양은 $0.73 \sim 1.95 \text{ gP/m}^2 \cdot \text{yr}$ 로 알려져 있다(Klopatek, 1978; Hocking, 1989).

2. 인 처리수준

조사기간 시스템의 유입수 평균유량은 약 $710 \text{ m}^3/\text{day}$ 였으며, 수심을 약 25cm가 유지되도록 운영하여 평균 체류시간은 약 1.5hr였다. $\text{PO}_4\text{-P}$ 와 TP을 중심으로 인 제거율을 분석하였다.

$\text{PO}_4\text{-P}$ 와 TP분석에서 이들이 저농도일 경우 소숫점 3자리까지 활용하여 분석하고 있으며(Mitsch *et al.*, 1998; Kadlec and Wallace, 2009), 본 연구에서도 소숫점 3자리까지를 활용하여 분석하였다.

1) 외국 자유수면습지의 인 처리수준

Table 1은 미국과 캐나다에 조성된 자유수면습지의 TP 제거율(%)을 보여준다. 시스템의 위치, 체류시간, 유입수 농도에 따라 처리율에 차이를 보이고 있다. 이들 시스템은 2차처리장 방류수 혹은 연못시스템 방류수를 정화하는 습지로 평균체류시간이 5~10일이다. 유입수의 TP 농도는 $0.270 \sim 2.580 \text{ mg/L}$ 범위이며, TP 처리율은 25.9~74.6%로 범위가 넓다.

Table 2는 미국과 일본에 조성된 하천수를 정화하는 자유수면습지의 TP 제거율과 $\text{PO}_4\text{-P}$ 제거율(%)을 나타낸다. Des Plaines 인공습지를 제외하고는 유입수의 TP농도는 $0.09 \sim 0.40 \text{ mg/L}$ 범위이며, TP 제거율은 6.2~47.3% 범위이다. 유입수 체류시간은 1시간에서 2.5일로 범위가 넓다. Des Plaines 인공습지는 체류시간이 1~2주로 매우 길며, TP 처리율이 80.0%로 매우 높다. Table 2에서 보듯이 자유수면습지의 체류시간이 길면 인의 처리율이 높아진다.

식 1은 인공습지의 TP 제거모형으로 북미에서 운영 중인 20여 개 인공습지의 유입수 및 유출수의 양과 유입수와 유출수의 TP농도를 기초로 작성한 것이다(Kadlec and Knight, 1996). 북미에서 운영 중인 20여 개의 인공습지 k 값은 $2.4 \sim 23.7 \text{ m/year}$ 범위이며, 평균 k 값은 12.1 m/year 이다. 식 1에서 수리학적

Table 1. TP removal(%) from free water surface wetlands in North America purifying effluent from municipal treatment plants or treatment pond systems

System	Area (ha)	Plants	TP in (mg/L)	TP out (mg/L)	TP removal(%)
Arlington (South Dakota)	3.4	Mixed	0.850	0.630	25.9
Cobalt (Ontario)	0.1	Mixed	1.678	0.774	53.9
Eastern Service (Florida)	121	Mixed	0.270	0.090	66.6
Great Meadow (Massachusetts)	22	Mixed	1.996	0.507	74.6
Leaf River (Mississippi)	0.1	Mixed	2.580	1.720	33.3
Listowel (Ontario)	0.1	Mixed	1.909	0.717	62.4
Reddy Creek (Florida)	35	Mixed	1.330	0.690	48.1

Sources: Kadlec and Knight, 1996

Table 2. Removal of TP and PO₄-P from free water surface wetlands purifying stream water in USA and Japan

System	Area (ha)	Plants	Inflow (m ³ /day)	DT	PO ₄ -P in (mg/L)	PO ₄ -P out (mg/L)	PO ₄ -P removal (%)	TP in (mg/L)	TP out (mg/L)	TP removal (%)
Des Plaines (USA)	10.13	Thypa	4,635	1~2 wk	-	-	-	0.100	0.020	80.0
Olentangy Rivera (USA)	1.0	Thypa	1,000	2.5 d	0.082	0.027	67.1	0.186	0.098	47.3
Hurugawa (Japan)	1.9	Zizania, Thypa	17,280	1.7 d	-	-	-	0.080	0.050	37.5
Seimigawa (Japan)	0.14	Phragmitis, Zizania	777	9 hr	-	-	-	0.400	0.240	40.0
Seimigawa (Japan)	0.38	Phragmitis	2,500	5 hr	-	-	-	0.185	0.147	20.5
Sannougawa (Japan)	0.56	Phragmitis, Thypa	18,240	5 hr	-	-	-	0.230	0.140	39.1
Watarase (Japan)	20	Phragmitis	216,000	4.5 hr	-	-	-	0.097	0.091	6.2
Bio-Park (Japan)	0.34	Nasturtium, Mint	7,514	1 hr	-	-	-	0.110	0.090	18.2

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

Sources: Kadlec and Knight, 1996; Mitsch et al, 1998; 河川環境管理財團, 2000.

부하율은 체류시간과 밀접한 관계가 있으며, 체류시간이 길수록 인의 제거량이 높아진다.

$$\ln\left(\frac{C_o}{C_i}\right) = -\frac{k}{q}$$

식 1

C_i = 유입수의 총인농도(g/m³)C_o = 유출수의 총인농도(g/m³)

q = 수리학적 부하율(m/yr)

k = 제거상수 값(m/yr)

2) 수온의 변화와 인 제거

Figure 6은 조사기간 시스템의 유입수 및 유출수 월평균 수온을 나타낸다. 조사기간 유입수와 유출수의 평균수온은 각각 16.5℃, 15.9℃로 유출수의 수온이 유입수의 수온보다 0.5℃ 낮았다. 이는 시스템에 개수부(open water)가 없고, 정수식물인 부들과 줄이 습지를 덮고 있어 그늘로 인하여 습지의 수온이 내려간 것으로 사료된다. 정수식물 성장기인 4~9월 6개월 동안의 유입수와 유출수의 평균 수온은 각각 23.0, 22.5℃를 보였으며, 정수식물 비성장기인 1~3월, 10~12월 6개월 동안의 유입수와 유출수의 월평균 수온은 각각 10.0, 9.4℃이었다.

인공습지에서 오염물을 분해하는 미생물의 활동은 수온에 영향을 받는다. 미생물의 활동은 20~25℃에서 높으며, 15℃ 이하와 30℃ 이상에서는 둔화되는 경향을 보인다(Yang, 1998). Figure 6에서 정수식물 성장기인 5월, 6월, 7월, 8월, 9월 처리수의 월평균 수온은 각각 18.8, 25.1, 26.4, 27.1, 23.6℃를 나타냈

Figure 6. Monthly average temperature of influent and effluent in 2010

다. 인의 분해에 영향을 미치는 미생물의 활동에 적합한 수온이었다. 정수식물 비성장기인 1월, 2월, 3월, 10월, 11월, 12월의 처리수 월평균 수온은 각각 4.8, 6.6, 10.8, 16.1, 10.4, 5.9℃로 미생물의 활동에 적합하지 않은 수온이었다.

Figure 8과 Figure 9에서 정수식물 성장기인 4~9월의 PO₄-P와 TP 제거율 추세는 Figure 6에서 4~9월의 수온의 추세와 유사한 경향을 보이고 있다. POP, PIP, DOP가 미생물에 의해 분해되어 DIP로 전환(Refer to Figure 7)이 이뤄질 수 있는 수온이었으며, 이런 수온조건에서는 미생물, 조류, 부착생물, 습지식물의 활동과 성장이 왕성하여 용해 무기인의 흡수량이 많아져 인의 제거율이 높아진다.

수온이 낮은 겨울철에도 인 제거율은 상당한 수준으로 알려져 있다(Gover, 1993). Figure 8과 Figure 9에서 정수식물 비성

장기인 1~3월, 10~12월의 $\text{PO}_4\text{-P}$ 와 TP의 제거율 추세는 Figure 6의 월평균 수온의 추세와는 다른 모습을 보이고 있다. 정수식물 비성장기인 1월, 2월, 11월, 12월의 처리수 수온은 각각 4.8, 8.8, 10.8, 7.1℃로 온도 변화가 크나, 1월, 2월, 11월, 12월의 $\text{PO}_4\text{-P}$ 제거율은 각각 25.5, 26.7, 26.7, 23.3%로 처리율의 변화가 적다. 1월, 2월, 11월, 12월의 TP 제거율도 14.4, 12.6, 14.7, 13.7%로 변동이 적다. 수온이 낮은 시기에도 $\text{PO}_4\text{-P}$ 와 TP의 제거가 상당한 수준으로 일어나는 이유는 낮은 수온에서도 침전과 흡착으로 인이 제거되기 때문이다. 입자상 인의 침전, 토양입자표면과 잔체물 및 유기체표면 표면에 인의 흡착, Fe, Al, Ca와 결합한 인산염의 침전은 수온이 낮아도 일어난다. 일부 녹조는 겨울철 낮은 수온에서도 성장하며, 이들 녹조가 DIP를 흡수하여 인이 제거되기도 한다.

3) 정수식물 성장기·비성장기 인 제거

조사기간 1년 동안 유입수와 유출수의 $\text{PO}_4\text{-P}$ 평균농도는 각각 0.144mg/L, 0.103mg/L로 $\text{PO}_4\text{-P}$ 평균제거율은 28.6%를 나타냈다(Refer to Table 3). 유입수와 유출수의 평균 TP 농도는 각각 0.333mg/L, 0.262mg/L로 TP 평균제거율은 20.7%를 보였다(Refer to Table 3). 실험 자유수면습지가 운영 초기단계이고, 체류시간이 1.5 hr로 짧았으며, 수온이 낮은 겨울철이 조사기간에 포함된 점을 고려하면 $\text{PO}_4\text{-P}$ 와 TP 처리율은 비교적 양호하다. Table 2에서 하천수를 정화하는 자유수면습지의 체류시간이 5~9 hr인 경우, TP 제거율이 6.2~40.0%를 보이고 있다. Table 2에서 체류시간이 1 hr인 자유수면습지의 TP 처리율은 18.2%이다. 실험습지의 TP 제거율 20.7%는 비교적 높은 수준이다.

Figure 8은 유입수 및 유출수 $\text{PO}_4\text{-P}$ 월평균 농도와 $\text{PO}_4\text{-P}$ 월평균 제거율을 보여준다. Figure 9는 유입수 및 유출수 TP 월평균 농도와 TP 월평균 제거율을 나타낸다. 정수식물 성장기간 6개월(4~9월)의 $\text{PO}_4\text{-P}$ 평균제거율은 31.4%였으며, 정수식물 비성장기 6개월(1~3월, 10~12월)의 $\text{PO}_4\text{-P}$ 평균제거율은 25.8%로 정수식물 성장기의 제거율이 5.6% 높게 나타났다. 조사기간 $\text{PO}_4\text{-P}$ 월평균 제거율이 높은 달은 5월, 6월, 7월, 8월로 각각 34.8, 38.5, 31.7, 31.6%였고, $\text{PO}_4\text{-P}$ 월평균 제거율이 낮은 달은 12월, 1월, 2월, 3월로 각각 23.4, 25.5, 26.7, 23.4%의 처리율을 보였다.

정수식물 성장기(4~9월)의 TP 평균제거율은 27.2%였으며, 비성장기(1~3월, 10~12월) TP 평균제거율은 14.9%로 정수식물 성장기의 TP 제거율이 12.3% 높게 나타났다. 조사기간 TP 월평균 제거율이 높은 달은 5월, 6월, 7월, 8월로 제거율이 각각 26.7, 34.8, 30.1, 28.1%를 보였고, TP 월평균 제거율이 낮은 달은 11월, 12월, 1월, 2월로 각각 14.7, 13.7, 14.4, 12.6%를 나타냈다. 정수식물이 성장을 멈추거나 지상부의 줄기와 잎이 마른 달의 $\text{PO}_4\text{-P}$ 와 TP 제거율이, 정수식물이 성장하는 달의

제거율보다 낮게 나타났다.

$\text{PO}_4\text{-P}$ 월평균 제거율은 TP 월평균 제거율에 비해 정수식물이 성장하는 달과 성장하지 않는 달의 차이가 크지 않으며, 수온이 높은 달과 낮은 달의 차이도 크지 않다. 반면, TP 월평균 제거율은 $\text{PO}_4\text{-P}$ 월평균 제거율에 비해 정수식물이 성장하는 달과 성장하지 않는 달의 차이가 크며, 수온이 높은 달과 낮은 달의 차이가 크게 나타났다.

인공습지에서 인은 다양한 기작으로 제거된다(Refer to Figure 7). 유입수에 함유된 POP와 PIP는 중력에 의해 침전되어 제거된다. 토양표면 위의 잔체물과 유기체표면으로 형성된 침전층 사이를 유입수가 흐르면서 인이 흡착되어 제거된다. 토양공극의 물에 함유된 DIP 이온(H_2PO_4^- , HPO_4^{2-} , PO_4^{3-})은 토양입자의 표면에 흡착되어 제거된다. 흡착된 DIP는 탈착(desorption)되어 물기둥으로 돌아오기도 한다. 물기둥과 토양공극의 물에 함유된 DIP는 Fe, Al, Ca와 결합하여 FePO_4 , AlPO_4 , CaHPO_4 등 인산염이 되어 이들이 침전되어 인이 제거된다. 침전된 인산염은 재 용해되기도 한다. 토양입자 표면에 흡착되어 저장되는 인은 시간이 지나면 포화상태에 이른다(Reddy *et al.*, 1998). 인공습지 조성 시 습지토양 (표면에서 약 30cm 깊이) 자체에 인이 많이 함유되어 있는 경우 유출수의 인 농도가 유입수의 인 농도보다 증가하는 경우도 있다.

정수식물은 토양입자 사이의 공극에 들어있는 물에 함유된 DIP를 뿌리와 근경을 통해 흡수하여 인을 제거한다. 정수식물의 성장은 계절에 따른 인공습지의 인 저장과 용출에 영향을 미친다. 정수식물의 인 흡수는 봄부터 여름의 성장기에 많고 가을에는 감소하다 겨울에는 정지한다. 가을에 정수식물이 노

Figure 7. Phosphorous transformation, movement, and removal in free water surface wetlands

In: inflow; Out: Outflow; PMI: plants and microbiota; Mif: microfilm (attached microorganisms); PIP: particulate inorganic phosphorus; POP: particulate organic phosphorus; DOP: dissolved organic phosphorus; DIP: dissolved inorganic phosphorus; $\text{PO}_4\text{-P}$: phosphate; CBP: chemically bounded phosphorus; DIPP: DIP in porewater; DIPS: DIP sorbed to soil; Pre: precipitation; Sed: sedimentation; Sor: sorption; Dsor: desorption; Up: uptake; Lif: litter fall; Dec: decomposition; Lea: leaching

Table 3. Summary of PO₄-P and TP measurements and removals (%) at the wetlands

Species	Group (mg/L)	Mean(SD)	N	Removal(%)	
				Mean(SD)	N
PO ₄ -P	Influent	0.144(0.019)	46	28.638(5.297)	46
	Effluent	0.103(0.014)	46		
TP	Influent	0.333(0.043)	46	20.706(7.637)	46
	Effluent	0.262(0.025)	46

Figure 8. Monthly average removal(%) of PO₄-P(left vertical axis) and monthly average PO₄-P concentration of influent and effluent(right vertical axis) in 2010

Figure 9. Monthly average removal(%) of TP(left vertical axis) and monthly average TP concentration of influent and effluent(right vertical axis) in 2010

화기에 접어들면 인이 줄기로부터 뿌리로 이동하여 초봄의 성장기에 사용한다.

다양한 녹조(부착조류, 유형녹조, 저서녹조)는 인을 빠르게 흡수하여 인이 제거된다. 부착생물(녹조, 박테리아, 타가영향 미생물의 혼합체)은 수중의 식물 줄기와 잎, 잔재물, 유기체설물의 표면에 미생물막(biofilm)을 형성하며, 미생물막에 DP와 PP가 흡착되거나 흡수되어 인이 제거된다(Vymazal, 1995). 녹조와 부착생물은 생명순환이 비교적 짧아 이들이 흡수한 인은 대부분 DP와 PP로 되돌아오며, 장기적인 문힘은 매우 적다. 미생물은 유기물의 분해, 영양염류의 재사용과 순환에서 중요한

역할을 하나, 생명순환이 매우 짧아 미생물이 흡수한 인은 DP와 PP로 되돌아온다(Prenger and Reddy, 2004).

4) 인 제거 효과 *t*-검정

정수식물이 성장하는 시기와 정수식물이 성장하지 않은 시기의 PO₄-P와 TP 처리율(%)에 차이가 있는지 알아보기 위해 *t*-검정을 수행하였다. Table 4에서 PO₄-P 제거율에 대한 *t*-검정결과 'Ho: 조사기간 정수식물 성장기와 정수식물 비성장기의 PO₄-P 제거율(%)의 평균이 같다.'라는 귀무가설이 유의수준 $\alpha=0.01$ 에서 기각되어($p<0.001$), 정수식물 성장기의 PO₄-P 제거율(31.448)이 정수식물 비성장기의 제거율(25.829)보다 높다고 볼 수 있다. TP 제거율에 대한 *t*-검정결과에서도 유의수준 $\alpha=0.01$ 에서 귀무가설 'Ho: 조사기간 정수식물 성장기와 정수식물 비성장기의 TP 제거율(%)의 평균이 같다.'가 기각되어($p<0.001$), 정수식물 성장기의 TP 제거율(27.230)이 정수식물 비성장기의 TP 제거율(14.856)보다 높다고 볼 수 있다. 정수식물 성장기에 PO₄-P와 TP 제거가 효율적임을 알 수 있다.

자유수면습지에서 분해와 이동으로 인의 상당부분이 용출되지만 침전-토양 층에 쌓이는 잔여물의 증가로 인이 지속적으로 제거된다. 자유수면습지의 인 제거는 토양과 침전물에 흡착된 인과 침전된 인의 양이 상대적으로 많아야 한다. 침전, 토양 및 침전물에 흡착은 정수식물 성장기와 비성장기에 관계없이 일어나는 기작이며, 정수식물의 흡수에 의한 인의 제거는 정수식물 성장기에 일어난다. 정수식물 성장기가 비성장기보다 인 제거율이 상대적으로 높게 나타난 일차적 원인이 여기에 있다고 사료된다. 정수식물 성장기의 수온이 비성장기보다 높아 녹조와 부착생물의 활동이 상대적으로 높은 것도 정수식물 성장기의 인 제거율에 어느 정도는 기여했을 것으로 판단된다.

IV. 결론

본 연구는 하천수를 정화하기 위해 고수부지에 조성한 자유수면습지에서 2010년 1월부터 2010년 12월까지 1년간의 수질조사를 기초로 정수식물 성장기와 비성장기의 PO₄-P와 TP

Table 4. Summary of *t*-test statistics for PO₄-P and TP removal (%) at the wetlands during emergent plant growing period with non-growing one

Species	Period	Mean(S.D.)	S.D.	N	<i>t</i> Value	df	<i>p</i>
PO ₄ -P	GP	31.448	5.229	23	4.214	44	<0.001
	NGP	25.829	3.680	23			
TP	GP	14.856	2.684	23	10.507	44	<0.001
	NGP	27.230	5.076	23			

GP: plant growing period, NGP: plant non-growing period
p-value obtained by *t*-test assuming equal variance.

제거율을 비교분석하였다. 2008년 6월에 식재한 부들과 줄은 2009년을 거치면서 비교적 양호한 활착을 보였으며, 2010년 4월부터 새줄기가 수면위로 나와 양호한 성장을 하였다. 2번의 겨울을 거치면서 실험 자유수면습지의 바닥에는 정수식물의 잔재물 층이 어느 정도 형성되었다.

실험기간 유입수 평균유량은 $710\text{m}^3/\text{day}$ 였고, 평균 체류시간은 1.5 hr였으며, 유입수와 처리수 평균수온은 각각 16.5°C , 15.9°C 였다. 실험기간 유입수와 처리수의 $\text{PO}_4\text{-P}$ 평균농도는 각각 0.144mg/L , 0.103mg/L 로 28.6%의 $\text{PO}_4\text{-P}$ 제거율을 보였고, 유입수와 처리수의 TP 평균농도는 각각 0.333mg/L , 0.262mg/L 로 20.7% TP 제거율을 보였다. 시스템이 운영초기 단계였고, 체류시간이 1.5 hr로 짧았으며, 수온이 낮은 겨울철의 조사기간이 포함된 점을 고려하면 $\text{PO}_4\text{-P}$ 과 TP 처리율은 비교적 양호한 편이다.

정수식물 성장기의 $\text{PO}_4\text{-P}$ 평균제거율은 31.4%였으며, 비성장기의 $\text{PO}_4\text{-P}$ 평균제거율은 25.8%였다. 정수식물 성장기의 TP 평균제거율은 27.2%였으며, 비성장기 TP 평균제거율은 14.9%로 나타났다. t -검정 결과, 유의수준 $\alpha = 0.01$ 에서 정수식물이 성장하는 시기의 $\text{PO}_4\text{-P}$ 제거율(31.448)이 정수식물이 성장하지 않는 시기의 $\text{PO}_4\text{-P}$ 제거율(25.829)보다 높았고, 유의수준 $\alpha = 0.01$ 에서 정수식물 성장기의 TP 제거율(27.230)도 정수식물 비성장기의 TP 제거율(14.856)보다 높았다. 정수식물 성장시기의 $\text{PO}_4\text{-P}$ 과 TP 제거가 정수식물 비성장기보다 효과적이었다.

인의 단거저장은 습지식물과 부착생물에 의한 흡수와 습지식물 잔재물 조직에 결합을 들 수 있으며, 장기축적은 습지식물 잔여물 분해, 토양에 흡착 및 흡수, 유기물 및 무기물에 부착, Al, Fe, Ca 등과의 결합을 통한 침전을 들 수 있다. 정수식물 성장기의 $\text{PO}_4\text{-P}$ 과 TP 제거율이 비성장기보다 높은 이유는 정수식물이 성장하면서 인을 흡수한데 일차적 원인이 있으며, 정수식물 성장기에 녹조와 미생물 활동에 적합한 수온이 형성되어, 녹조와 미생물에 의한 인 흡수도 정수식물 성장기의 처리효율에 어느 정도 기여했을 것으로 사료된다.

실험기간 홍수로 시스템이 2번 잠겨 부들과 줄의 일부가 도복되었으나 도복된 부들과 줄은 새 줄기가 올라왔고 시스템의 운영에는 지장이 없었다. 고수부지에 자유수면습지를 조성할 경우 홍수 시 퇴적이 될 되고 토양유실이 거의 없으며, 자연유하로 유입수가 유입되어 처리수가 하천으로 방류될 수 있어야 하고, 정수식물의 도복이 가능한 적게 발생하는 장소를 선정할 필요가 있다.

본 실험에서 조사분석한 자유수면습지 시스템은 현장 실험 규모였으며, 시스템을 조성한 후 1년 반이 지난 초기 운영 단계의 1년간 수질분석에 기초를 두고 있다. 실험규모의 인공습지에서 정수식물이 수년 간 성장을 거쳐 생태적으로 안정되고, 습

지바닥에 정수식물 잔재물이 쌓이고 유기체설물과 부유물의 침전으로 습지바닥에 침전-토양층이 발달한 후의 정수식물 성장기와 비성장기의 비교연구는 본 연구의 미비점을 보완할 수 있을 것이다.

인용문헌

1. 노희영, 최우정, 이은주, 윤석인, 최영대(2002) 시화지구 인공습지에서 갈대에 의한 질소와 인 흡수. 한국생태학회지 25(5): 359-364.
2. 변찬우(2010) 경안천 고수부지에 조성한 금어천 생태적수질정화비오통 시스템의 수질정화 및 생태복원 효과. 한국환경복원녹화기술학회지 13(3): 23-35.
3. 양홍모(2003) 하천고수부지 수질정화 자유수면습지의 초기운영단계 인 제거. 한국환경농학회지 22(4): 251-254.
4. 환경부(2003) 수질오염공정시험방법.
5. APHA(American Public Health Association)(1999) Standard method for the examination of water and wastewater.
6. EPA(U.S. Environmental Protection Agency)(1999) Free Water Surface Wetlands for Wastewater Treatment: A Technology Assessment.
7. Gover, N.(1993) Constructed wetlands operate despite winter chill. Small Flows 7: 1-5.
8. Hocking, P. J.(1989) Seasonal dynamics of production, nutrient accumulation, and cycling by *Phragmites australis* (Cav.) Trin ex Stuedel in a nutrient enriched swamp in inland Australia. Part I: Whole Plants. Australian Journal of Marine and Freshwater Research 40: 421-444.
9. Howard-Williams, C.(1985) Cycling and retention of nitrogen and phosphorus in wetlands: A theoretical and applied perspective. Freshw. Biol. 15: 39-45.
10. Kadlec, R. H.(1989) Wetlands for treatment of municipal wastewater. In: Majumdar, S. K., Brooks, R. P., Brenner, F. J., Tiner, R. W. Jr. (Eds.), Wetlands Ecology and Conservation: Emphasis in Pennsylvania. The Pennsylvania Academy of Science, PA. pp. 300-314.
11. Kadlec, R. H.(1994) Phosphorous uptake in Florida marshes. Wat. Sci. Technol. 30: 225-234.
12. Kadlec, R. H. and R. L. Knight(1996) Treatment Wetlands. Boca Raton: CRC Press.
13. Kadlec, R. H.(1999) The limits of phosphorous removal in wetlands. Wetlands Ecology and Management 7: 165-175.
14. Kadlec, R. H. and S. D. Wallace(2009) Treatment Wetlands. Boca Raton: CRC Press.
15. Klopatek, M.(1978) Nutrient dynamics of freshwater riverine marshes and the role of emergent macrophytes. In: Freshwater Wetlands: Ecological Processes and Management Potential, Good R. E., Whigham D. F., Simpson R. L. (eds.) Academic Press: New York, pp. 195-216.
16. Mitsch, W. J., X. Wu, R. W. Narin, P. E. Weihe, N. Wang, R. Deal, and C. E. Boucher(1998) Creating and restoring wetlands: A whole-ecosystem experiment in self-design. BioScience 48(2): 1019-1030.
17. Narin, R. W. and W. J. Mitsch(2000) Phosphorous removal in created wetland ponds receiving river overflow. Ecological Engineering 14(2000): 107-126.
18. Prenger J. P. and K. R. Reddy(2004) Microbial enzyme activities in a freshwater marsh after cessation of nutrient loading. Soil Science Society of America Journal 68: 1796-1804.
19. Reddy, K. R., G. A. O'Conner, and P. M. Gale(1998) Phosphorous sorption capacities of wetland soils and stream sediment impacted by dairy effluent. J. Environ. Qual. 27: 438-447.
20. Reddy, K. R. and R. D. DeLaune(2008) Biochemistry of Wetlands. Boca Raton: CRC Press.

21. Richardson, C. J. and C. B. Craft(1993) Efficient phosphorus retention in wetlands: Fact or fiction? In: Moshiri, G.A. (Ed.), *Constructed Wetlands for Water Quality Improvement*, Boca Raton: CRC Press, pp. 271-282.
22. Richardson, C. J. and P. E. Marshall(1986) Process controlling movement, storage and export of phosphorous in a fen peatland, *Ecological Monographs* 56:279-302.
23. Richardson, C. J., S. Qian, C. B. Crafr and R. G. Qualls(1997) Predictive models for phosphorous retention in wetlands, *Wetlands Ecology and Management* 4: 159-175.
24. Yang, H.(1998) *Ecological Design of Estuarine Environment for a Sustainable Urban Ecosystem*, Ph.D Dissertation, University of California at Berkeley.
25. Vymazal, J.(1995) *Algae and Nutrient Cycling in Wetlands*, Boca Raton: CRC Press.
26. 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.

원 고 접 수 일: 2012년 2월 7일
 심 사 일: 2012년 2월 14일(1차)
 게 재 확 정 일: 2012년 2월 20일
 3 인 의 명 심 사 필