Korean J. Limnol. 42 (1) : 1~8 (2009)

Mesocosm을 이용한 습지에서의 인 거동 분석

손장원 · 윤춘경* · 김형철 · 함종화[1]

(건국대학교 환경과학과, [1]한국농어촌공사 농어촌연구원)

Analysis of the Phosphate Movement Using the Mesocosm in the Wetland. ***Son, Jang-Won, Chun G. Yoon*, Hyung-Chul Kim and Jong-Hwa Haam[1] (Department of Environmental Science, Konkuk University, Seoul 143-701, Korea; [1]Rural Research Institute, KRC, Gyeonggi 426-908, Korea)***

This study used a mesocosm which presumes movement of the nutrient (especially PO_4-P) in the wetland. After setting up the mesocosm inside the wetland and adding the PO_4-P, observed the movement of the PO_4-P every hour. We analyzed the variables which had the possibility of affecting PO_4-P concentration in the wetland-flora, absorbing rate of algae, settling rate, release rate. Immediately after adding PO_4-P, the concentration of the TP in water column at each mesocosm was 0.48, 12.4, 20.4, 23.6 mg L^{-1}, after 21 days they were 0.6, 1.92, 6.97 and 6.94 mg L^{-1} respectively. The concentration of the TP in water column at the mesocosm decreased on average 73.7 %. The concentration of the PO_4-P inside reed, algae and sediment in the mesocosm was increased from 0.73 mg gDW^{-1}, 3.81 mg gDW^{-1}, 466.1 mg kg^{-1} to 0.83 mg gDW^{-1}, 4.57 mg gDW^{-1} and 813.3 mg kg^{-1} respectively. Algae is more sensitive than reeds in absorption of the nutrient. TP removal by settling was highest. Budgeting of TP indicated that P moved from particulates in the water column to sediment and algae. Immediately after adding PO_4-P, water column (24.2%) and sediment (49.0%) dominated TP storage, with algae (10.3%) and reed (16.4%) holding smaller proportions of TP. After 21 days, Sediment (59.0%) and algae (17.9%) dominated TP storage, with water column (7.1%) and reed (15.8%) holding smaller proportions of TP. Estimation of phosphate movement using mesocosms is an appropriate method because wetlands have many controlling factors. Analysed data can be compared to background data for wetland construction and management.

Key words : algae, mesocosm, phosphorus, reed, release, settling, wetland

서 론

습지는 전 세계 육지면적의 약 6%를 차지하며, 육지와 수계를 연결하는 위치에 있다(Richadson, 1995). 습지에는 각종 수생식물과 이를 서식처로 하는 많은 동물들이 있는데, 수생식물의 표면이나 이들의 부니 질 표면은 미생물, 원생동물, 부착조류 등이 서식할 수 있는 장소를 제공하여 수체내 유기물 분해를 촉진한다(Hammer, 1995). 습지의 이러한 역할은 유입된 오염물 처리에 많은 도움을 줄 수 있어 선진국에서는 습지의 생태학적 역할에 관한 연구와 습지를 오염저감시설로써 활용하는 방법에 관한 연구가 활발히 진행되고 있다(Moshiri, 1993; Mitsch and Gosselink, 1996). 하지만 습지의 저질토의 경우 각

* Corresponding author: Tel: 02) 450-3747, Fax: 02) 446-2543, E-mail: chunyoon@konkuk.ac.kr

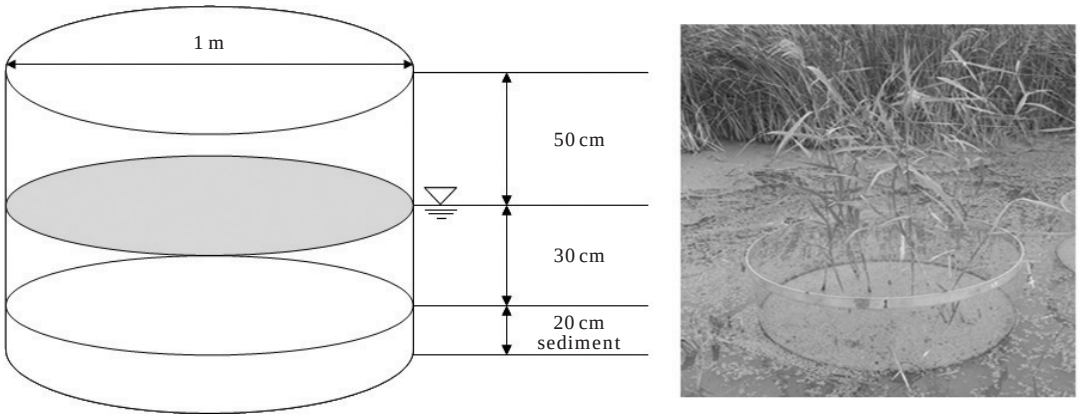

Fig. 1. Profile of mesocosm unit in wetland.

종 유입 오염물이 침전되어 생성된 것으로, 물리적, 생화학적 조건에 따라 수체로 질소와 인이 용출됨으로써 영양염을 재공급하는 역할을 한다(Salomons *et al*., 1987; Forsberg, 1989).

일반적으로 습지에서 인은 산화된 음이온 형태로 뿌리 흡수를 통해 식물체내로 들어와 단백질과 결합한다. 인은 salt marshes에서 보다는 담수습지에서 큰 성장제한요소이며, 습지에서 인의 중요성은 수체가 가지는 지형학적, 구조적인 특성 그리고 환경이나 계절에 따라 다양하다. 퇴적물의 인순환의 주경로는 침전 쪽으로 진행되지만, 토양조건이 혐기성으로 될 때는 용존 인이 증가한다. 수생식물은 생장을 통해 퇴적물로부터 인을 흡수함으로써 수체로 영양소를 이동시키는 작용을 하지만, 수생식물과 부착조류가 왕성하게 번성하는 기간에는 영양소의 수용부가 되기도 하고, 이와 반대로 식물 쇠퇴기에는 다시 공급원의 기능을 가진다. 수생식물의 경우 자신이 유기물을 생산하여 저토에 퇴적시킬 뿐만 아니라 물의 유동을 억제하여 외부로부터 유입되는 물질을 퇴적시키며, 저토의 침식을 감소시킴으로써 퇴적작용을 촉진한다. 식물이 저토나 물로부터 흡수하여 생물량(biomass)에 포함된 영양소는 지하부로 전이(translocation)되거나 용탈(leaching)되거나 고사한 낙엽 속에 포함되어 유리되므로 생태계에서 재순환된다(Horne and Goldman, 1994). 또한, 사상성부착조류(filamentous periphytic algae)는 수중으로 뻗어 나가며 성장하므로 수체내 인에 대한 이용효율이 높고 비표면적이 크다. 전체 덩어리는 분해미생물에 방대한 매질을 제공하여 유기물의 분해활동을 촉진함으로써 수중의 자연정화능력을 증대시키게 되며, 수생식물에 비해서 성장속도가 빨라 영양염의 제거(흡수)율이 높다(황, 1998).

습지는 담수의 부영양화를 억제하여 수자원의 효율적인 관리와 사용에 많은 도움을 줄 수 있다. 그러나 이러한 목적을 위해서는 유기물과 조류성장의 제한 영양소인 인의 농도 증가를 억제해야 하며, 따라서 습지관리를 위해 인의 존재형태와 농도, 순환과정을 통한 거동 등에 대한 연구가 선행되어야 한다. 본 연구는 인공습지에서의 인 거동을 추정하기 위해 수행되었으며, mesocosm을 이용하여 인의 메카니즘을 파악하는 데 그 목적이 있다.

재료 및 방법

1. 실험 개요

대상지역인 석문습지는 2002년부터 2008년 현재까지 7년간 운영 되어온 인공습지로써, 현재 식생피복상태가 거의 100%에 이르러 식생이 완벽히 정착되었다고 판단되며, 습지 유입수의 평균 TP 농도는 0.3 mg L^{-1}을 나타냈고, 평균 TP 처리율은 40% 정도이다(한국농어촌공사 농어촌연구원, 2007).

본 실험에 사용된 mesocosm은 지름 1.0 m, 높이 1.0 m로서, 습지의 자연 상태와 유사한 조건을 유지하기 위해 빛의 차단이 없는 아크릴로 제작하였고 수체내의 원활한 거동을 위해 정방형이 아닌 원형으로 제작하였다(Fig. 1). 동일 지점에 4개의 mesocosm을 설치한 후, 수심은 습지가 일반적으로 운영되어 왔던 20~30 cm를 유지시켜 주었다. 인의 농도에 따른 mesocosm내 거동을 알아보기 위해 각각의 mesocosm에 M1은 control, M2, M3, M4는 약 10, 20, 30 mg L^{-1}의 농도를 설계하였으며 이를 위해 H_2PO_4를 Table 1에서와 같은 농도로 용해시킨 1 L의 용액을 인위적으로 첨가하여 9월 3일부터 9월 10일

Table 1. PO_4-P addition and mesocosm concentration (mg L^{-1}).

	Mesocosm 1	Mesocosm 2	Mesocosm 3	Mesocosm 4
PO_4-P additive concentrations	Control	3,140	6,280	9,420
Mesocosm concentration	0.24	10.25	20.35	30.24

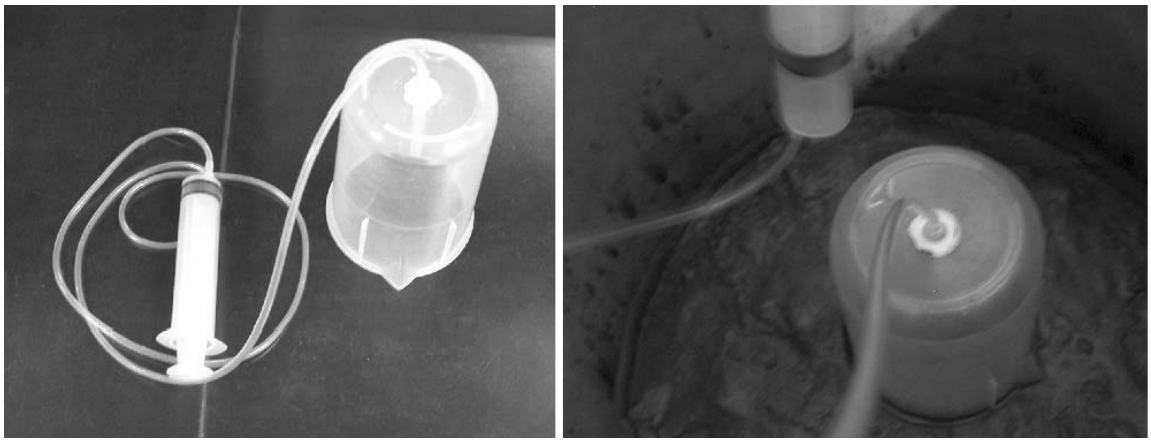

Fig. 2. Equipment for sampling release water.

까지 9월 17일부터 10월 8일까지 두 번의 실험을 실시하였다. 7일 간격으로 수체시료를 채취하여 분석을 실시하였고, 습지내 인 농도에 영향을 미칠 수 있는 인자인 수생식물, 부착조류의 흡수량 및 퇴적물에서의 침전량과 용출량을 분석하였다. 용출수의 경우, 퇴적물내에서 수체로 용출되거나 이온화되는 시료를 채취할 수 있는 기기를 제작하여 PO_4-P를 투여하기 전 mesocosm내에 설치하였다. 외부와 차단된 공간을 만들어 주사기로 시료를 채취 후 분석하여 부피비로 용출량을 계산하였다(Fig. 2).

2. 식물체 분석

각각의 mesocosm에서 각각 1주 씩 갈대를 뿌리부분까지 채취하여 전체를 잎, 줄기, 뿌리로 구분하였으며, 줄기의 경우 등간격으로 3등분(뿌리에서 멀어질수록 줄기1, 줄기2, 줄기3으로 구분)하여 총 다섯 부분으로 분리 하여, 72°C 고온 건조기에서 2일 동안 건조하였다. 건조된 갈대의 각 부분에 대해 건중량(dry weight)을 평량한 후, 분쇄하여 영양염류 분석에 이용하였다.

부착조류는 수중에 가라앉은 갈대와 수중식물(charophyte, 차축조식물)에서 각각 채취한 후, 고온 건조기에서 2일 동안 건조한 후 건중량을 측정하였다.

부착조류는 수중에 가라앉은 갈대와 수중식물(Charophyte, 차축조식물)에서 각각 채취하여, 실험실 내에서 칫솔로 긁어모은 후 일정량으로 정량하여 20 mL은 Lugol 용액(최종농도, 1%)으로 고정하여 부착조류 종 분석에 사용하였고, 나머지는 비이커에 담아 고온 건조기에서 2일 동안 건조한 후 건중량을 측정하였다. 수생식물에 부착된 부착조류는 수생식물을 일정량 분리하여 200 mL Bottle에 담아 증류수를 넣어 여러 번 격렬하게 흔들어 분리하였다. 위 과정을 3회 정도 반복하여 100～150 mL 정도로 정량하여, 갈대의 부착조류 처리와 같은 방법으로 분석하였다.

갈대와 부착조류내에 함유된 인의 함량은 건조된 시료 중에서 일정량의 무게를 측정한 후 3차 증류수 5 mL 분해시약($K_2S_2O_7$) 0.5 mL 넣어 고압반응솥에서 2시간 분해한 후 ascorbic acid method에 의하여 측정하였다(APHA, 1995).

결과 및 고찰

1. 용존산소와 pH의 변화

Table 2는 PO_4-P 투여 후 각각의 mesocosm내 표층수와 퇴적물의 상층부 용존산소농도의 변화와 평균 pH 값을 나타낸 표이다. 퇴적물에서의 용존산소농도는 실험 기

Table 2. Change of DO and pH in mesocosm during experiment (21 days).

		Mesocosm 1	Mesocosm 2	Mesocosm 3	Mesocosm 4
DO (mg L^{-1})	Surface	2.25 → 3.89	2.22 → 2.66	1.90 → 0.81	1.94 → 0.89
	Sediment	1.71 → 1.82	1.71 → 1.19	1.32 → 0.52	1.45 → 0.57
pH	Surface	8.4	8.6	8.0	7.7
	Sediment	8.3	8.7	7.9	7.7

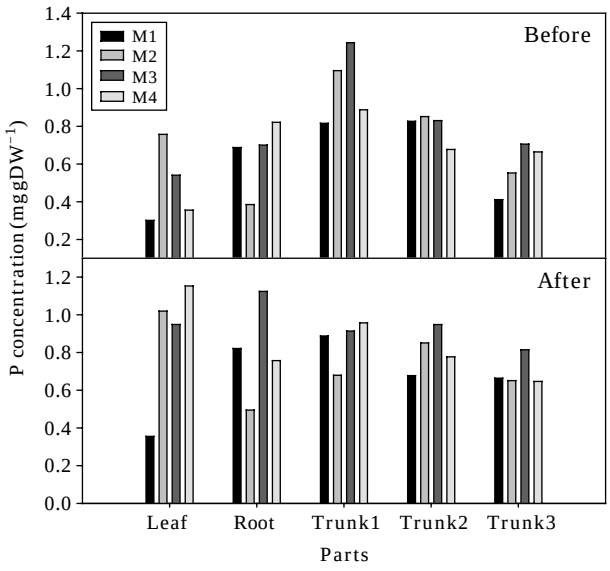

Fig. 3. P concentration in Reed (mg gDW^{-1}) before and 21 days after adding PO_4-P

간 중 대조구와 처리구 모두 1.5 mg L^{-1} 이하로 유지되었다. 이는 선행 연구 결과에서 인공습지의 식생의 피도가 100%에 가까우며 이에 따른 수체내 고사한 식물체에 의하여 습지의 용존산소는 감소하는 결과를 가져왔다 (김 등, 2008). 대조구의 경우 퇴적물에서의 용존산소농도가 실험 조기에 비하여 증가한 반면, 처리구에서는 모두 감소하였고, 특히 부착조류가 모두 사멸한 M3와 M4에서의 감소폭이 높게 나타났다. M3, M4의 경우 표층수의 용존산소농도 또한 1.0 mg L^{-1} 이하로 혐기성에 가까운 상태를 유지되었다. 이는 고농도의 인의 첨가와 수체내 용존산소의 농도, 부착조류의 생장과 상관성이 있다고 사료된다.

pH의 경우 모든 mesocosm에서 중성의 범위를 나타냈으며, M1과 M2에서의 pH가 M3과 M4보다 비교적 높은 값을 나타냈는데, 함 등(2004)은 식물성 플랑크톤의 광합성 작용으로 인해 수중의 HCO_3와 H_2CO_3 등이 소모되어 습지에서 pH가 상승한다고 보고하였다. 즉, 부착조류가 모두 사멸한 M3, M4의 경우 HCO_3와 H_2CO_3의 소모가 적어 상대적으로 낮은 pH를 보였으며, M2의 경우 증가한 부착조류에 의해 HCO_3와 H_2CO_3의 소모됨으로써 pH가 소폭 상승했다고 판단된다.

2. 갈대와 부착조류의 인 함량 변화

갈대의 부위별로 인 함량의 분포는 PO_4-P 투여 전후에 다른 양상을 보였다. 대조구에서는 투여 전후 모두 줄기, 뿌리, 잎의 순서로 인 함량 분포가 높았다. 처리구에서는 투여 전 대조구와 같은 결과를 보였으나, 투여 7일 후에는 잎에서 가장 높은 함량을 보였고 그 다음으로 줄기, 뿌리의 순서를 보였다. PO_4-P가 투여 되면서 갈대 각 기관의 인 함량 분포가 생장기와 유사한 경향을 보였는데, 생장기에 갈대 각 기관의 인 함량은 잎에서 가장 높고, 뿌리에서 가장 낮다 (문 등, 1999) (Fig. 3).

갈대 전체 조직내의 인 함량은 처리구에서는 증가한 반면, 대조구에서는 감소하였다. PO_4-P 투여 전 처리구에서 갈대조직내 인 함량은 평균 0.73 mg gDW^{-1}이었으며, 투여 후에는 0.83 mg gDW^{-1}으로 12.3% 증가하였으나, 대조구에서는 PO_4-P 투여 전 0.77 mg gDW^{-1}에서 투여 후 0.74 mg gDW^{-1}로 4.25% 감소하였다. Dykyjova (1978)는 생육초기에 대형 수생식물의 인의 함량이 높다가 후반부에 감소하는 것으로 보고하였다. 본 연구에서도 대조구를 통해 실험 기간에 식생이 최대 생장기를 지나 쇠퇴기에 이르는 기간이라는 것을 확인했지만, PO_4-P 투여한 처리구에서 갈대내 인 함량이 증가하고, 갈색으로 고사해가는 대조구의 갈대와 달리 처리구의 갈대는 고사하지 않는 것이 육안으로도 확연히 차이가 났기 때문에, PO_4-P 투여가 식생의 고사를 억제 했다고 판단된다.

부착조류의 경우 Fig. 4와 같이 대조구에서는 PO_4-P 투여 전후 전체 부착조류의 인 함량의 변화가 미미하지만, 처리구인 M2의 경우 차축조식물에 부착된 조류의 인 함량이 급격히 증가하여, 단위 건중량 당 평균 인 함량은 PO_4-P 투여 전에 부착조류 (3.81 mg gDW^{-1})가 식물 (0.73 mg gDW^{-1})에 비해 5.2배 높았으며, PO_4-P 투여 후에 부착조류 (4.57 mg gDW^{-1})가 식물 (0.83 mg gDW^{-1})에 비해 약 5.5배 더 높게 나타났다. 이는 영양염의 흡수에 조류

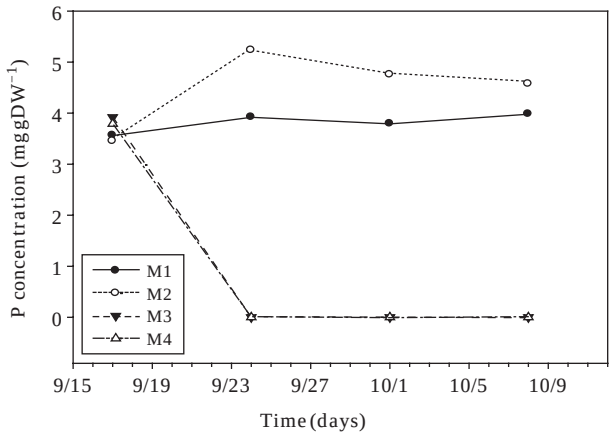

Fig. 4. P concentration in algae (mg gDW^{-1}).

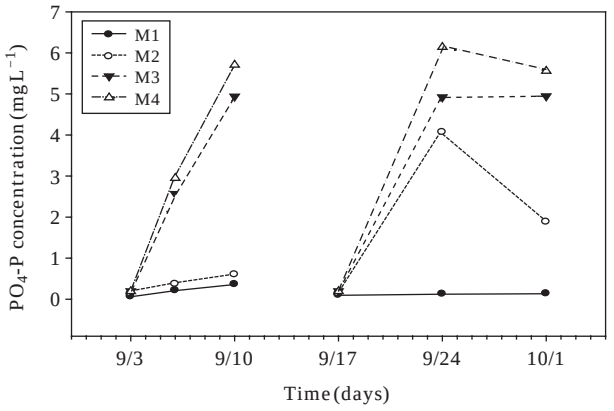

Fig. 5. Variation of PO_4-P concentration in elution water.

가 식물보다 더 민감하다는 것을 의미한다. 황 등(1999)은 수생식물과 사상성부착조류의 영양염 제거효율을 비교할 때, 사상성 부착조류에 의한 수질정화효율이 수생식물에 의한 영양염 제거율보다 높고, 비교적 적은 면적에도 불구하고 높은 생물량을 유지할 수 있으며, 상대적으로 수생식물에 비해 짧은 세대교번주기도 부착조류의 장점으로 평가하였다. 그러나 PO_4-P를 20.0 mg L^{-1} 이상 높여준 처리구인 M3, M4에서는 수체의 용존산소 농도까지 1.0 mg L^{-1} 이하로 감소하여, PO_4-P 투여 후 부착조류가 모두 사멸하는 결과를 보였다.

3. 용출수와 퇴적물의 인 농도 변화

PO_4-P 투여 전 각 mesocosm의 용출수의 PO_4-P농도는 평균 0.07 mg L^{-1}이었으며, PO_4-P 투여 후 각각의 mesocosm의 농도는 0.25, 1.75, 4.75, 5.37 mg L^{-1}이었다(Fig. 5). 유 등(2003)은 인의 용출율이 혐기성에서 10.0～31.7 mg m^{-2} day^{-1}의 범위와 호기성에서 7.31～22.98 mg m^{-2} day^{-1}의 범위를 가진다고 보고되었다. 본 연구의 결과를 단위면적당, 단위시간당 용출율로 표시하면 0.52～37.6 mg m^{-2} day^{-1}의 범위로 PO_4-P 투여 전 용출율값은 문헌보다 낮지만, PO_4-P 투여 후 용출율값은 문헌의 최대값과 유사한 값을 보였다. 저층 퇴적물내의 인은 주로 퇴적물 입자에 포함되어 있으며, 퇴적물 입자와 퇴적물 공극수 간에 교환이 이루어지고(김, 2002), 또한 인은 용존산소에 대한 의존도가 크며 혐기상태와 높은 pH에서 인의 용출이 활발한 것으로 알려져 있다(Istvanovices, 1994). 따라서 처리구내 용존산소의 농도가 PO_4-P 투여 후 1 mg L^{-1} 이하의 혐기성 상태와 유사한 형태로 유지되고, 퇴적물에 침전된 고농도의 PO_4-P가 공극수를 통해 이동함으로써, 높은 용출률을 보인 것으로 판단된다.

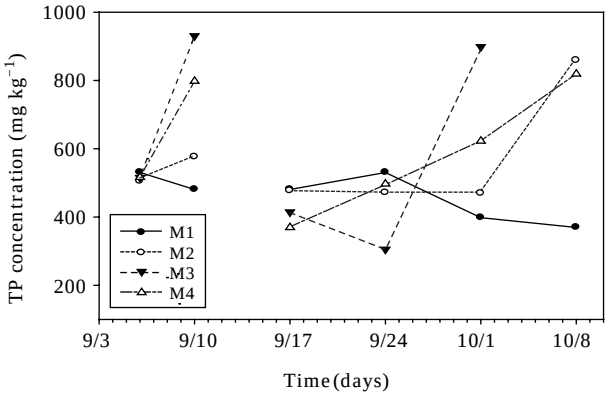

Fig. 6. Variation of TP concentration in Sediment.

수체로 유입된 인중 일부 입자성 인은 바닥으로 침전되며, 칼슘 또는 철과 결합된 인산염은 부유성 콜로이드 입자로 침전되어 혐기성 상태에서는 수층으로 재용출되고 나머지 일부는 저층 퇴적물에 영구히 퇴적된다(김 등, 2004). Fig. 6에서 PO_4-P 투여 전에는 각 mesocosm내 퇴적물의 평균 TP농도는 505.6, 490.7, 464.8, 442.7 mg kg^{-1} 이었으며, PO_4-P 투여 후에는 대조구의 경우 425.0 mg kg^{-1}로 감소한 반면, 처리구의 경우는 717.0, 914.5, 808.5 mg kg^{-1}으로 증가 되었는데, 이는 수체내 TP농도가 0.5 mg L^{-1} 정도인 대조구의 경우 용출이 주로 일어난 반면, 수체내 TP의 농도가 10 mg L^{-1} 이상 되는 처리구에서는 용출보다 침전이 더 이루어졌다고 판단된다.

4. 수체내의 질소와 인 농도 변화

처리구와 대조구 모두 수체내의 질소는 7일 이후 거의

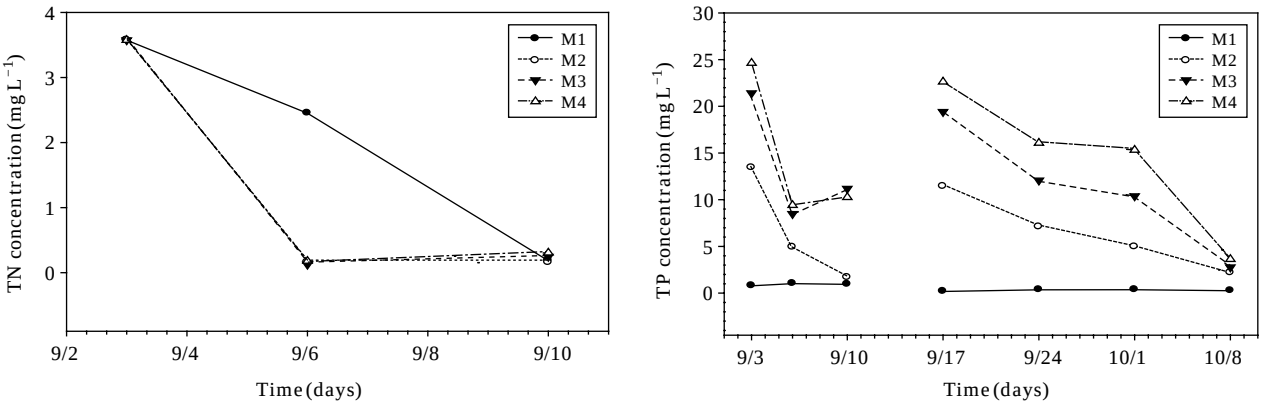

Fig. 7. Variation of TN, TP concentration in water column.

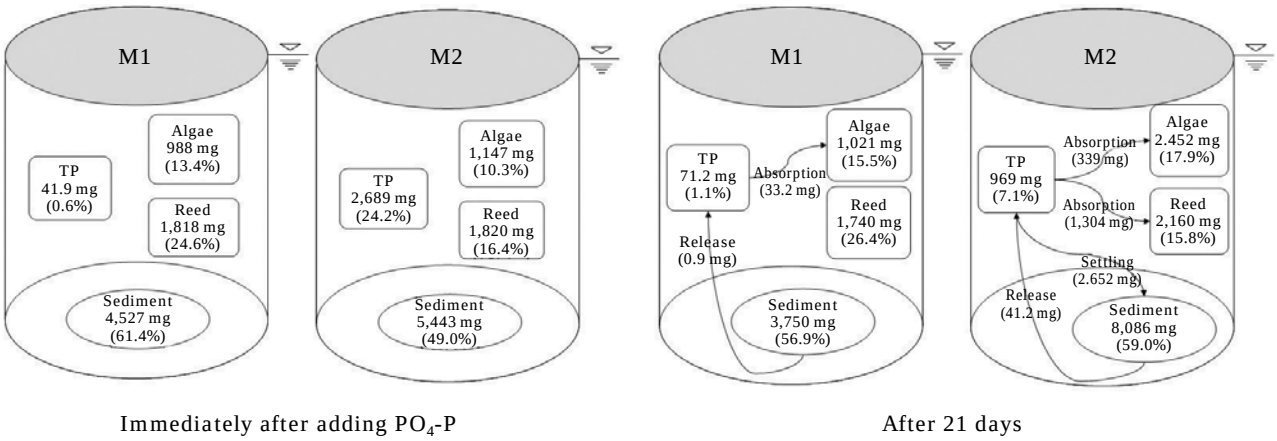

Fig. 8. Mass balance of PO_4-P in mesocosm.

존재하지 않았다. PO_4-P 투여 전 처리구에서 수체내 TN 농도는 3.57 mg L^{-1}이었으며, 투여 후 7일 이후에는 0.22 mg L^{-1}으로 3.35 mg L^{-1} (93.7%) 만큼 감소하였다 (Fig. 7). 습지에서 제거되는 질소의 주요경로는 크게 식물과 부착미생물에 의한 흡수, 암모니아 휘발 그리고 질산화 및 탈질화 등이 있는데, 질산화와 탈질화가 습지에서 주요 질소 제거 기작이다 (Kadlec and Knight, 1996). 본 연구에서 대조구에서는 TN이 93.7% 감소하는데 7일이 소요된 반면, 처리구에서는 3일이 소요되었다. mesocosm내 퇴적물 상부의 용존산소 농도를 측정한 결과 1 mg L^{-1} 이하의 혐기성 상태를 보여 대조구에서의 TN 감소는 탈질화 반응이 일어난 것으로 판단된다. 처리구에서 식물체내의 TN 함량이 증가한 것으로 볼 때, 처리구에서의 TN 감소는 탈질화와 더불어 제한요소인 인의 증가로 식물체의 질소 흡수량이 증가했다고 추정된다.

PO_4-P 투여 직후 두 실험에서의 수체의 평균 TP농도는 각 mesocosm에서 0.48, 12.4, 20.4, 23.6 mg L^{-1}이었으며, 21일 후 0.6, 1.92, 6.97, 6.94 mg L^{-1}으로 변화하였다.

Mesocosm내 수체의 TP농도는 대조구인 M1에서는 0.48 mg L^{-1}에서 0.6 mg L^{-1}으로 증가한 반면, 처리구인 M2, M3, M4에서는 12.4, 20.4, 23.6 mg L^{-1}에서 1.92, 6.97, 6.94 mg L^{-1}로 감소되었고 TP 감소율은 M2, M3, M4에서 각각 84.5, 65.8, 70.6%로 평균 73.7%의 감소율을 보였다. 20.0 mg L^{-1} 이상의 PO_4-P가 투여된 M3, M4의 경우 7.0 mg L^{-1} 정도의 감소 한계를 보였다 (Fig. 7). 이는 M3, M4에서 용출되는 PO_4-P의 농도가 높았으며, 부착조류의 사체가 분해됨으로써 인의 공급이 이루어졌기 때문이라 판단된다.

5. Mesocosm내 인의 물질수지

실험 중 mesocosm내의 수위 변화와 부착조류와 갈대

Table 3. Comparison of PO_4-P concentration with literature cited.

PO_4-P contentration	This study	Mun *et al.* (1999)	Jay (2000)	Hwang (1998)	Yu *et al.* (2003)
Algae absorption (mg gWD^{-1} hr^{-1})	0.76	–	–	0.5 ~ 3.4	–
Reed absorption (mg gWD^{-1} hr^{-1})	0.1	0.15 ~ 0.68	–	0.64	–
Sediment settling (mg kg^{-1} day^{-1})	326.8	–	257	–	–
Elution Water (mg m^{-2} day^{-1})	37.08	–	0.4 ~ 8.2	–	10.0 ~ 31.7

의 생물량을 같이 조사하여, 각 항목에 대한 21일 전후의 인 부하량을 계산하여 물질수지를 구하였다. 처리구중 부착조류가 사멸하지 않은 M2의 전체적인 물질수지를 살펴보면, PO_4-P 투여 직후에는 수체의 인이 전체의 24.2%를 차지했고, 토양은 49.0%, 갈대와 부착조류는 각각 16.4%와 10.3%를 차지했다. PO_4-P 투여 후 14일이 경과했을 때 인의 변화 비율을 보면, 수체의 경우 7.1%로 줄고, 토양의 경우 59.0%, 갈대와 부착조류가 각각 15.8%와 17.8%로 증가하였다. 반면, 대조구인 M1의 전체적인 물질수지를 살펴보면, PO_4-P 투여 직후에는 수체의 인이 전체의 0.6%를 차지했고, 토양은 61.4%, 갈대와 부착조류는 각각 24.6%와 13.4%를 차지했다. PO_4-P 투여 후 21일이 경과했을 때 인의 변화 비율을 보면, 토양의 경우 56.9%로 감소하였으며, 수체의 경우 1.1%로 갈대와 부착조류가 각각 26.4%와 15.5%로 증가하였다(Fig. 8). 기존의 연구(Gregory *et al.*, 2003)에서는 18일간의 실험에서 토양의 인이 차지하는 비율이 62%였으며, 수체내 인은 10%, 식물플랑크톤은 12%를 차지했다고 보고된 바 있다.

국내외 연구에서 보고되어진 조류와 갈대의 흡수량과 침전량, 용출량의 값은 Table 3에 나타난 바와 같다. 본 연구의 결과를 문헌과 비교해 볼 때, 조류와 갈대의 흡수량은 문헌에서 보고하는 값보다 낮은 값을 보였고, 침전량과 용출량은 비교적 높은 값을 나타냈다. 이처럼 차이가 생기는 것은 자연 상태보다 인위적으로 인을 첨가해 줌으로써 침전량과 용출량의 값이 높게 나왔으며, 또한 식물의 최대 생장기 이후 실험을 수행하였기 때문이라 판단된다. 따라서 추후 연구에서는 생물의 생장초기와 최대생장기에서의 생물 생장주기에 따른 추가적인 연구를 통하여 습지에 인 거동을 분석할 필요가 있다고 사료된다.

적 요

본 연구에서는 mesocosm을 이용하여, 습지내 인의 거동을 살펴보기 위한 현장실험 자료를 고찰하였으며, 결과를 요약하면 다음과 같다. Mesocosm내 수체의 TP농도는 대조구인 M1에서는 0.48 mg L^{-1}에서 0.6 mg L^{-1}으로 증가한 반면, 처리구인 M2, M3, M4에서는 12.4, 20.4, 23.6 mg L^{-1}에서 1.92, 6.97, 6.94 mg L^{-1}로 감소되었고 TP 감소율은 M2, M3, M4에서 각각 84.5, 65.8, 70.6%로 평균 73.7%의 감소율을 보였다. 처리구 중 부착조류가 사멸하지 않은 M2와 대조구인 M1의 전체적인 물질 수지를 비교해 보면, M1의 경우는 부착조류에서의 인의 양이 소량 증가하였고, 갈대와 퇴적물에서의 인의 양은 소량 감소하였다. M1에서 부착조류의 인의 양이 늘어난 것은 대형수생식물이 고사기에 접어들어 습지내의 광조건이 충분해지면서 조류의 증가가 일어난 것이라 판단된다. M2의 경우엔 퇴적물내의 인의 총양은 5,443 mg에서 8,086 mg으로 증가하였고, 부착조류와 갈대 역시 각각 1,147 mg, 1,740 mg에서 2,452 mg, 2.160 mg으로 증가하였다. 이로써 습지내 인의 거동에 있어 부착조류와 거대조류에 의한 인의 흡수와 침전 및 식물체에 의한 흡수가 주된 역할을 한다고 판단되며, 부착조류의 흡수가 활발했던 M2의 경우 TP 감소율이 85%에 이르고 부착조류의 흡수가 없었던 M3, M4에서 70% 이하의 TP 감소율을 나타낸 것을 볼 때, 침전과 식물체에 의한 흡수가 병행되는 것이 고농도의 TP처리에 상당히 효과적이라 생각된다. Mesocosm을 이용한 인의 이동경로 추정은 영향인자가 많은 습지내 오염물질 거동을 규명하는 매우 유용한 방법이라 판단되며, 그 결과는 인공습지를 조성하여 활용하는 데 필요한 기초자료로서 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

사 사

이 논문은 2007학년도 건국대학교의 지원에 의하여 연구되었음.

인 용 문 헌

김도회. 2002. 영양염 용출 측정에 관한 고찰. 한국환경과학회지 **11**: 1333-1337.

김호섭, 황순진. 2004. 얕은 부영양 저수지의 육수학적 특성-

계절에 따른 수질변화. 한국육수학회지 **37**: 180-192.

김형철, 윤춘경, 엄한용, 김형중, 함종화. 2008. 인공습지 내 개방수역 조성에 따른 처리효율분석. 한국물환경학회지 **24**(6): 709-717.

문형태, 남궁정, 김정희. 1999. 대형수생식물의 물질생산과 질소와 인의 흡수량. 환경생물 **17**: 27-34.

유태종, 현 미, 조재현. 2003. 영산강유역 하천 저질토의 영양염류 용출률 측정. 상하수도학회지 **17**: 409-418.

함종화, 윤춘경, 구원석, 김형철, 신현범. 2004. 인공습지를 이용한 하구담수호 유입하천수 수질개선 현장실험결과 분석. 한국농공학회논문집 **46**(5): 141-153.

한국농어촌공사 농어촌연구원. 2007. 인공습지에 의한 수질개선 기법개발.

황순진, 공동수. 1999. 습지의 인 Sink 기능에 영향을 미치는 생물학적 요인들. 한국육수학회지 **32**(2): 79-91.

황순진. 1998. 습지내 인산제거를 위한 미생물의 역할. 경기연구 **3**: 95-117.

APHA. 1995. Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater 19th Ed.

Dykyjova, D. 1978. Nutrient uptake by littoral communities of helophytes. In Pond littoral ecosystem, pp. 257-284.

Forsberg, C. 1989. Importance of sediment in understanding nutrient cyclings in lakes. *Hydrobiologia* **176/177**: 263-277.

Gregory, B.N., J.S. Leonard, T. Jonathan, L.C. Daniel and D.J. Ronald. 2003. Phosphorus cycling and partitioning in an oligotrophic Everglades wetland ecosystem: a radioisotope tracing study. *Freshwater Biology* **48**: 1993-2008.

Hammer, D.A. 1995. Water quality improvement function of wetland, pp. 485-516. *In*: Encyclopedia of environmental biology (Nierenberg, W.A. ed.). Academic Press.

Horne, A.J. and C.R. Goldman. 1994. LIMNOLOGY, 2nd. Ed. McGraw-Hill, Inc.

Istvanovices, V. 1994. Fractional composition, adsorption and release of sediment phosphorus in the Kis-Balaton Reservoir. *Water Res*. **28**(3): 717-726.

Jay, S.W., E.B. Suzanne and P.J. Curtis. 2000. Sediment Storage of phosphorus in a northern prairie wetland receiving municipal and agro-industrial wastewater. *Ecological Engineering* **14**: 127-138.

Kadlec, R.H. and R.L. Knight. 1996. Treatment Wetlands. CRC Press, FL.

Mitsch, W.J. and J.G. Gosselink. 1996. Wetlands. Van Nostrand Reinhold, New York.

Moshiri, G.A. 1993. Constructed wetlands for water quality improvement. Chelsea, Mich., Lewis Publishers.

Richardson, C.J. 1995. Wetlands ecology, pp. 535-550. *In*: Encyclopedia of Environmental Biology (Nierenberg, W.A. ed.). Academic Press.

Salomons, W., N.M. de Rooij and J. Bril. 1987. Sediments as a source for contaminants. *Hydrobiologia* **149**: 13-30.

(Manuscript received 22 August 2008,
Revision accepted 23 February 2009)