

부유식물과 침수식물이 습지의 주요 수 환경에 미치는 영향

이근주 · 성기준+

국립 부경대학교 생태공학과

Effects of Floating and Submerged Plants on Important Water Environments of Wetland

Geun-joo Lee · Kijune Sung+

Department of Ecological Engineering, Pukyong National University

요 약

본 연구에서는 습지식물의 유형에 따라 습지의 주요 수 환경에 미치는 영향을 파악하고자 부유식물로는 부레옥잠(*Eichhornia crassipes*)을 침수식물로는 붕어마름(*Ceratophyllum demersum*)을 인공습지 실험구에 도입한 후 pH, 용존산소, 수온, 산화환원전위, 영양물질 농도 등 주요 수 환경의 변화를 조사하였다. 수 표면에 주로 존재하는 부유식물은 빛이 수체내로 투과하는 것을 막아, 다른 처리구에 비해 수온이 낮게 나타났으며 주야 모두 상·하층 수온의 차이도 관찰되었다. 오염물 유입 후 모든 실험구에서 용존 산소가 일시적으로 감소하였다가 다시 회복되었는데 특히 수중에서 광합성을 하는 침수식물 처리구에서 주기성을 가지면서 증가하였고 상승폭 또한 가장 큰 것으로 나타났다. pH 또한 침수식물 처리구에서 주기성을 가지면서 변동하는 것으로 나타나 용존산소의 경우와 같이 광합성의 영향임을 보여주었다. 본 연구에서 습지토양의 산화환원전위가 수생식물의 유무나 유형에 따라 영향을 받을 수 있음이 관찰되었으며 이와 관련된 생지화학적 기작에도 영향을 줄 수 있는 것으로 판단되었다. 수체 내 총질소와 총인의 농도는 물만 있는 대조구 < 물과 토양이 있는 대조구 < 부유식물 처리구 < 침수식물 처리구의 순으로 감소한 것으로 나타나 식물이 영양물질 제거에도 효과적임을 보여주었다. 부유식물과 침수식물 모두 조류발생을 억제하는 것으로 나타났는데 특히 부유식물의 경우 더 효과적인 것으로 나타났다.

핵심용어 : 생지화학반응, 습지식물유형, 산화환원전위, 습지실험구, 조류억제

Abstract

In this study, two types of wetland plants, *Eichhornia crassipes* (a floating plant) and *Ceratophyllum demersum* (a submerged plant) were introduced to wetland mesocosms to understand how the water properties of wetlands such as pH, dissolved oxygen content, water temperature, oxidation reduction potential, and nutrient concentrations are affected by different types of wetland plant. The floating plant lives on the water surface and can block light penetration; it exhibited the lowest water temperature and temperature difference between lower and upper layers. After the addition of contaminants, the dissolved oxygen (DO) concentration decreased abruptly but recovered continuously in all mesocosms; especially the submerged plants, which photosynthesize in water, showed the largest increases in DO and diel periodicity DO, as well as in pH value. The oxidation-reduction potential in both water and sediment were affected by the presence of wetland plants and plant type and the results suggest that various aspects of wetland biogeochemistry are affected by the presence and type of wetland plants. The total nitrogen and phosphorus concentrations in water decreased in the following order: Water only < Water + Soil < Floating Plants < Submerged Plants. Although both floating and submerged plants can control algal concentrations, the effect was more prominent for floating plants.

Keywords : biogeochemistry, wetland plant type, oxidation and reduction potential, wetland mesocosm, algae control

1. 서론

습지식물은 식물의 생활사 중에 적어도 한시기는 식물체의 전체 또는 일부가 물속에 생육하는 식물로서, 생육하는 수심이나 토양의 수분환경에 따라 정수식물, 부유식

물, 부엽식물, 침수식물로 구분한다(Cronk and Fennessy, 2001). 습지식물은 다양한 생지화학적 기작을 통하여 습지의 수질정화와 물질순환 기작에 영향을 미친다. 습지식물은 오염물질을 직접 흡수하여 식물체내에 축적하며 물과 식물 및 토양 사이에서 일어나는 침전, 흡착,

+ To whom correspondence should be addressed.
ksung@pknu.ac.kr

응집과 같은 습지의 물리·화학적 기작에 영향을 미치고, 습지 미생물의 대사활동에도 관여한다(Reddy and D'Angelo, 1997). 또한 습지식물은 광합성을 통하여 유기물을 생산하는 1차 생산자로서 외부로부터의 유기물 유입이 없을 경우 습지생태계에 유기물을 공급하는 습지생태계의 중요한 생산자로서의 역할을 담당한다. 광합성 과정 중에 수체나 습지토양에 산소를 공급함으로써 수체 내 용존산소의 농도를 높이거나 혐기성인 토양을 호기성 상태로 변화시키기도 한다. 이에 따라 오염물질의 분해와 질산화/탈질 반응을 촉진시켜 습지의 질소 거동에 영향을 미치거나 습지퇴적물에 존재하는 인의 재 용출을 감소시킬 수 있다(Brix, 1997).

습지에 생육하는 습지식물의 조직에 따라 각기 다른 역할을 담당하는데, 식물체 전체가 물속에서 성장하는 침수식물은 다른 습지식물과는 달리 수체와 습지토양에 더 많은 영향을 미칠 수 있다(Yi et al., 2010). 광합성에 필요한 이산화탄소를 대기로 부터 공급받는 정수식물과는 달리 물속에 존재하는 중탄산이온을 이용할 수 있으며 일부 침수식물의 경우에는 이산화탄소 농도가 높은 밤중에 이산화탄소를 고정하여 낮 동안의 광합성에 이용하기도 한다. 또한 자신의 통기조직을 통하여 배출되는 이산화탄소를 재이용하기도 한다(Cronk and Fennessy, 2001). 습지토양은 식물뿌리나 동물의 호흡에 의하여 배출되는 이산화탄소 때문에 수체보다 이산화탄소의 농도가 2배 이상 높다고 알려져 있는데 일부 침수식물은 이러한 습지토양에서 배출되는 이산화탄소를 주로 이용하기도 한다고 알려져 있다(Bowes and Salvucci, 1989). 반면에 물 표면에 떠서 생활하는 부유식물은 뿌리가 습지토양에 고정되어 있지 않기 때문에 정수식물이나 침수식물과 같이 습지 토양에 직접적인 영향을 주지는 않지만, 뿌리가 물속으로 길게 자라고 잘 발달된 잔뿌리로 인하여 뿌리의 표면적이 크기 때문에 수층에서 영양물질을 직접 흡수하거나 부착 미생물이 많이 부착할 수 있는 장소를 제공할 수 있다(Brix, 1994). 습지 저층에 직접 영향을 미치는 침수식물과는 달리 수중으로 빛을 차단함으로써 조류의 성장 및 온도를 감소시키며 대기와 수체간의 기체의 교환을 저해시키면서 간접적으로 저층에 영향을 준다. 습지식물에 의한 광합성과 호흡 작용은 수체 내의 pH의 변화를 일으키며 이와 관련된 생화학적 반응에 영향을 미치며 특히 인의 거동에 영향을 미칠 수 있다(Reddy et al., 1995). 습지에서의 pH 변화는 미생물의 효소활동에 영향을 주게 됨으로 유기물질 제거뿐만 아니라 미생물이 관여하는 다양한 산화환원 기작에 영향을 주게 된다(Paul and Clark, 1989).

최근 비점오염물질 관리하고 강우유출수를 조절하며 생물 서식처를 제공하기 위한 생태공학적인 대안으로 도심지역에 인공습지를 활용하는 방법이 각광받고 있

다(Mitsch and Gosselink, 2000). 습지가 다양한 생태적 서비스를 제공하기 위해서는 다양한 수심을 갖으며 다양한 유형의 습지식물이 생육할 수 있도록 하는 것이 바람직하다. 현재 국내·외에서 인공습지 관련 연구가 주로 수질정화를 중심으로 이루어지고, 이 또한 정수식물을 대상으로 수행한 연구들이 많다(Gersberg et al., 1986; Kim et al., 2007; Yang, 2011). 이는 정수식물의 경우 습지 기질에 고착되어 성장하며 생체량이 크고 다양한 오염물질을 효과적으로 흡수할 수 있어 오염물질 처리효율이나 보유능이 또한 크며, 대부분 다년생 식물이기 때문에 식물관리가 용이하기 때문이다. 하지만 정수식물의 경우 수심이 깊은 곳에서는 성장하기 어렵기 때문에 오염물질의 제거를 주목적으로 하는 지하호흡형 처리습지와 같이 적용의 폭이 제한될 수 있다. 따라서 가능한 깊은 수심을 갖도록 조성하고 더 많은 물을 보유할 수 있도록 하여 강우유출수를 효과적으로 관리하기 위한 습지에는 도입하기 어려울 수도 있다. 또한 정수식물의 경우 생존력이 강하고 확장성이 강하기 때문에 다양한 생물의 서식처를 필요로 하는 곳에서는 오히려 장애요소로도 작용할 수도 있다(Sung et al., 2010). 반면에 부유식물이나 침수식물은 정수식물과 달리 수심이 다소 깊은 곳에서도 성장이 가능하기 때문에 정수식물과 함께 도입하면 다양한 수심과 경관을 갖는 습지 조성이 가능할 수 있다. 도시의 비점원 오염물질과 같이 농도가 높지 않을 경우 침수식물과 부유식물의 정화능 또한 우수한 것으로 보고된바 있어 강우유출수 및 도시비점오염원 관리에 더 적합할 수도 있다(Lee and Sung, 2012).

하지만 아직 정수식물에 비해 침수식물이나 부유식물을 습지에 활용하고자 하는 연구가 많이 진행되지 않은 실정이다. 습지식물의 유형에 따라 수 환경에 미치는 영향이 다르며 오염정화능이나 영양물질 순환과 관련된 습지의 생지화학적 기작 또한 달라질 수 있기 때문에, 습지식물의 유형에 따른 습지 수 환경 변화를 잘 이해하는 것이 필요하다. 따라서 본 연구에서는 습지의 수면에 생육하는 부유식물과 수면아래에서 생육하는 침수식물을 대상으로 이들이 주요 수 환경에 미치는 영향을 파악하여 향후 인공습지 조성 및 운영을 위한 기초자료를 활용하고자 하였다.

2. 연구방법

2.1 식생 유형 및 습지 실험구

실험에 이용된 습지 실험구는 밑면의 지름 45cm, 윗면의 지름 56cm, 높이 62cm 로 된 원기둥 모양의 고무 재질로 제작하였으며 식물 유형별 상층과 하층의 차이를 알아보기 위해 실험구 바닥에서 20cm와 50cm 지점에

밸브를 설치하여 상·하층의 채수가 가능하도록 하였다 (Fig. 1). 일반적으로 인공습지의 수심은 얇은 습지가 10~30cm, 깊은 습지는 30~100cm, 그리고 개방수역은 1m이상으로 조성한다(KMAF, 2004). 본 연구에서는 실험환경 조건 및 부유식물과 침수식물의 생장 등을 고려하여 습지실험구의 수심을 40cm로 유지해 주었으며 부유식물로는 부레옥잠(*Eichhornia crassipes*)을 침수식물로는 붕어마름(*Ceratophyllum demersum*)을 이용하였다. 습지실험구의 토양은 서낙동강에서 채취한 토양과 부산광역시 ○○대학교 내에서 채취한 토양을 3:7의 비로 혼합하여 습지실험구 바닥부터 15cm까지 채워주었다. 예비실험을 토대로 4일간의 안정화 기간을 가진 후 실험을 진행하였다. 실험에 사용된 습지처리구는 물만 있는 대조군, 물과 토양이 있는 처리구, 부유식물 처리구, 침수식물 처리구 등 총 4가지이며 이중 부유식물과 침수식물 처리구는 각각 2개의 반복구를 두어 실험하였다. 부유식물 처리구에는 오염물질을 유입시키기 하루 전에 부레옥잠을 습지실험구에 20개체 씩 넣어 주었다. 침수식물은 물속에서 생활할 뿐만 아니라 잎, 줄기가 연약하기 때문에 직접 식물을 옮겨 심는 방법보다는 종자를 함유한 자연습지토양을 이용하는 방법이 적합하다(Yi et al., 2009). 따라서 실험 전 약 2개월 동안 매 토종자를 함유한 토양에서 침수식물을 발아시켜 사용하였다. 붕어마름뿐만 아니라 말즘과 검정말 등 다양한 침수식물이 발아하였지만 개체수가 가장 많은 붕어마름 외에 다른 침수식물은 제거한 후 붕어마름의 개체수를 35~40로 동일하게 조절하여 실험을 진행하였다. 각 처리구에서 부레옥잠과 붕어마름의 초기 밀도는 건중량으로 $259.2 \pm 30.45\text{g/m}^2$ 와 $172.4 \pm 12.57\text{g/m}^2$ 이었으며, 실험은 온실 내에서 온도 27~32℃, 습도 40~50% 조건에서 이루어졌다. 실험은 14시간:10시간의 광주기(명:암)를 주었으며 각 실험구의 수 표면에서의 광도는 $105\mu\text{mol/m}^2 \cdot \text{s}$ 의 동일한 조건 하에서 실험하였다.

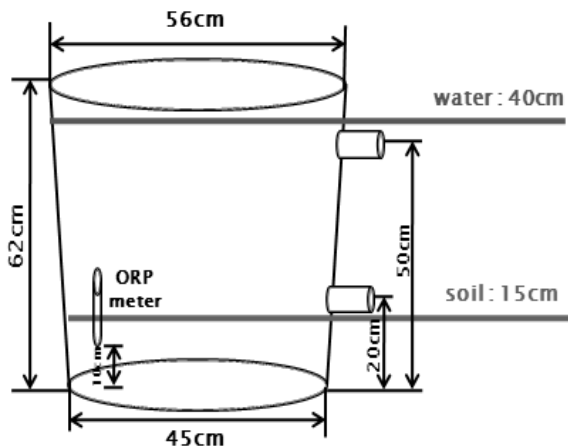


Fig. 1. Wetland mesocosm used in the study.

오염물질 유입 후 수 환경 변화의 차이를 보기 위하여 오염물질로서 질소는 유기질소 형태인 Urea(NH_2CONH_2)를 인은 무기인 형태인 KH_2PO_4 를 각각 120ppm과 24ppm으로 조제하여 각 실험구 당 2L씩 투입하였다. 초기 습지 실험구의 물 온도는 $23.4 \pm 0.74^\circ\text{C}$, pH는 7.2 ± 0.17 이다. 부레옥잠의 경우 실험이 진행되는 가운데 개화 현상을 보아 생장에 적절한 환경을 유지하였음을 알 수 있었다.

2.2 환경요인 분석

수질분석 항목 중 수온, 수소이온농도지수(pH), 용존산소(DO), 산화환원전위(ORP)는 다항목 수질 측정기(YSI-6600)를 이용하여 현장에서 직접 측정하였고, 그 밖의 항목은 폴리에틸렌병에 채수하여 실험실에서 분석하였다. 모든 수질 분석 항목은 수질오염공정시험방법에 따라 실험하였다(KMOE, 2008). 총질소(TN)는 시료 중 질소화합물을 알칼리성 과황산칼륨의 존재하에 120°C 에서 유기물과 함께 분해하여 질산이온으로 산화시킨 다음, 산성에서 흡광도를 Shimadzu사의 UV 1650PC를 이용하여 220nm에서 측정하였고, 암모니아성 질소($\text{NH}_4\text{-N}$)는 시료에 수산화나트륨을 넣어 pH 11~13으로 하여 암모늄이온을 암모니아로 변화시킨 다음 암모니아 이온 전극을 이용하여 측정하였다. 아질산성 질소($\text{NO}_2\text{-N}$), 질산성 질소($\text{NO}_3\text{-N}$)는 시료를 여과한 후, Metrohm사의 761 Compact IC를 이용하여 분석하였다. 용존무기질소(DIN)는 $\text{NH}_4^+\text{-N}$, $\text{NO}_2\text{-N}$, $\text{NO}_3\text{-N}$ 의 합으로 계산하였다. 총인(TP)은 전처리한 시료를 몰리브덴산암모늄과 아스코르빈산, 타르타르산, 안티모닐 칼륨으로 구성된 혼합시약과 반응시킨 후 분광광도계(UV 1650PC, Shimadzu, Japan)를 이용하여 880nm에서 흡광도를 측정하였다. 클로로필-a는 일정량의 시수를 여과한 여과지에 아세톤 용액으로 클로로필 색소를 추출하여 추출액을 분광광도계(UV 1650PC, Shimadzu, Japan)를 이용하여 흡광도를 663nm, 645nm, 630nm, 750nm에서 측정한 값으로 클로로필-a량을 계산하였다. 습지토양의 산화환원전위의 변화를 측정하기 위해 산화환원전위 전극을 습지 토양에 약 5cm정도의 깊이에 고정해 준 다음 시간에 따른 토양의 산화환원전위를 측정하였다.

2.3 통계분석

식물유형에 따른 수환경의 차이 유무를 알아보기 위하여 분산분석(ANOVA)을 실시하였는데 각 처리구간의 차이를 Duncan 다중비교를 이용하여 검정하였다. 또한 동일 처리구 내에서의 상·하층별 차이를 검정하기 위하여 t-검정을 수행하였다. 모든 검정의 유의수준은 95%를 기준으로 하였으며 통계분석을 위하여 SAS 9.1 (SAS Inc.)을 사용하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 수온

본 실험에서 습지 실험구에서의 수온 변화는 낮과 밤의 주기적 변동을 잘 나타내고 있다 (Figs. 2(a) and 2(b)). 물만 있는 대조군의 경우 낮 동안에만 상·하층 수온 차이를 관찰 할 수 있었지만 다른 처리구에서는 주·야간의 수온 차이가 있었다. 특히 부유식물 처리구의 경우 주·야 모두 상·하층의 온도 차이 또한 있는 것으로 관찰되었다(Table 1). 하층 수온의 경우 실험에 사용한 처리구간의 온도 차이 또한 관측되었는데 부유식물 처리구가 4가지 처리구 중에서 온도가 가장 낮은 것으로 조사되었다(Fig. 2(a)). 이는 부레옥잠의 경우 수표면에 존재하는 줄기와 잎이 수 표면에 존재하면서 빛이 수체 내로 투과하는 것을 어렵게 하기 때문이다. 반면에 붕어마름의 경우 같은 수생식물임에도 불구하고 식물 조직이 수체 내에 잠겨 있으므로 수 표면에서의 빛이 투

과가 용이하여 하층의 수온에 영향을 덜 받게 된다. 실제 수 표면에서의 광도를 측정된 결과 식물이 없는 대조군과 붕어마름 처리구의 수표면 하에서의 광도가 $105 \pm 10 \mu\text{mol}/\text{m}^2 \cdot \text{s}$ 로 비슷하게 나타났지만, 이와는 다르게 부레옥잠 처리구 내의 광도는 $95 \pm 10 \mu\text{mol}/\text{m}^2 \cdot \text{s}$ 로 약 $10 \pm 10 \mu\text{mol}/\text{m}^2 \cdot \text{s}$ 가 낮은 것으로 조사되었다.

Hill 과 Payton (2000)의 연구에도 여름철에는 경우 식물이 없는 습지에서 온도도 높고 변동폭도 크지만 겨울철의 경우에는 식물의 밀도가 높을수록 습지에서의 온도가 높다고 보고하여, 수생식물의 유무와 밀도도 습지 온도에 영향을 줄 수 있다고 하였다. 습지에서 식물의 유무는 온도에 영향을 주며 이와 반대로 온도 또한 식물의 생장에 영향을 주기도 한다. 수온은 수체에서 일어나는 여러 가지 생화학적 반응에 영향을 미치는 중요한 요소이므로, 생육하는 식물의 유형에 따라 습지에서 일어나는 반응 또한 다르게 일어날 수 있으며 결국 습지에서의 오염물질의 거동에도 영향을 미치게 된다(Picard et al., 2005; Allen et al., 2002).

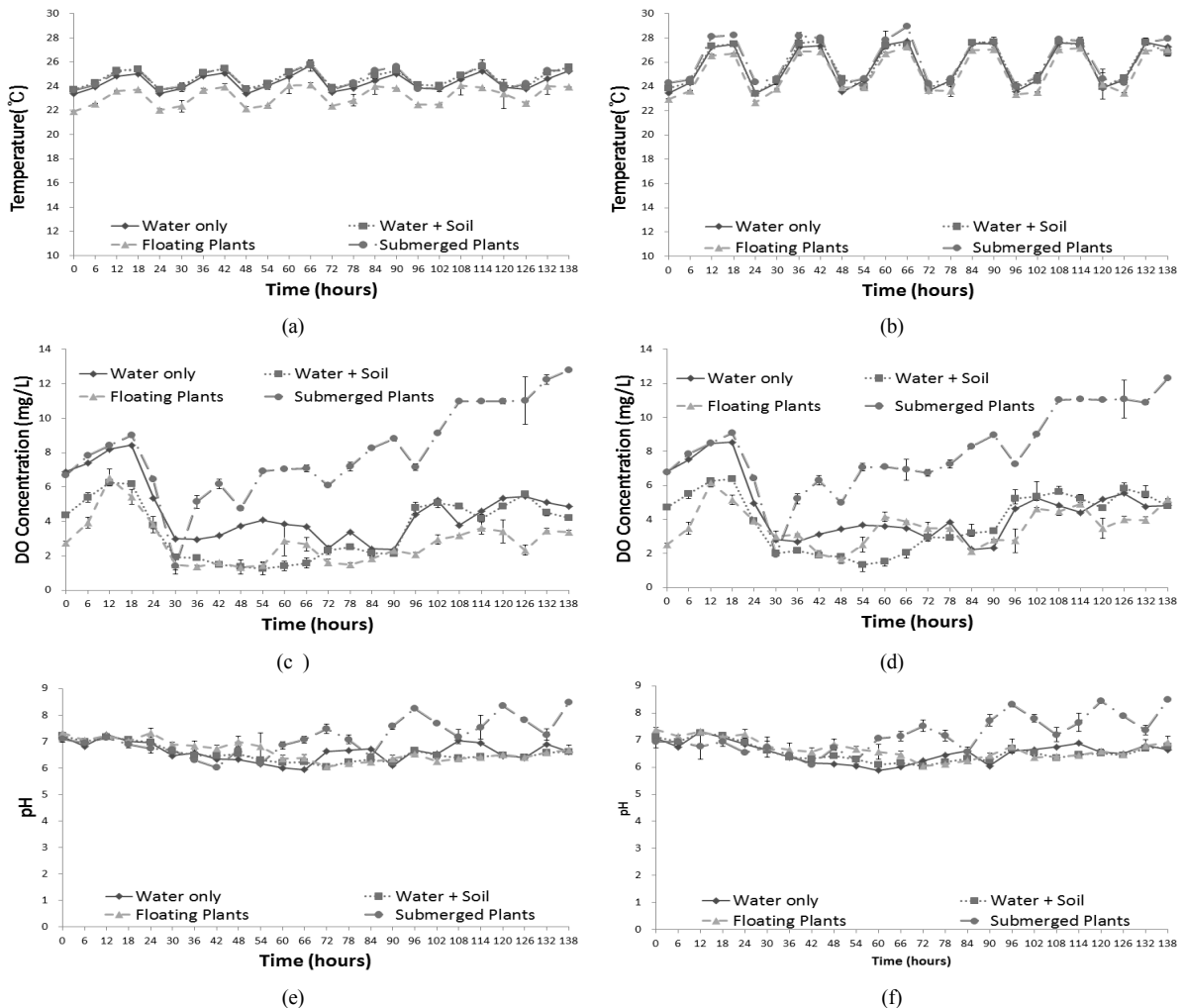


Fig. 2. Changes of important environmental factors during experiment in wetland mesocosms (a) Lower layer temperature (b) Upper layer temperature (c) Lower layer DO (d) Upper layer DO (e) Lower layer pH (f) Upper layer pH.

Table 1. Comparison of various water properties with wetland mesocosms and water depth used in the study. Values are average. Letters in superscripts show significant differences among treatments $\alpha=0.05$

Sampling depth	Treatments	Temperature (°C)	DO (mg/L)	pH	ORP (mV)
Upper layer	Water only	25.69 ^a	4.34 ^b	6.55 ^b	NA
	Water+Soil	25.92 ^a	3.90 ^b	6.52 ^b	NA
	Floating plant	25.35 ^a	3.57 ^b	6.68 ^b	NA
	Submerged plant	26.25 ^a	7.96 ^a	7.18 ^a	NA
Lower layer	Water only	24.55 ^A	4.32 ^B	6.68 ^B	282.45 ^A
	Water+Soil	24.55 ^A	3.47 ^B	6.53 ^B	217.80 ^B
	Floating plant	23.25 ^B	2.86 ^B	6.64 ^B	233.09 ^B
	Submerged plant	24.51 ^A	7.95 ^A	7.15 ^A	244.55 ^{AB}

3.2 용존산소

용존산소(DO)의 경우 물만 있는 대조군에서 초기에 상·하층에서 농도 차이는 없었으며, 오염물 유입 후 지속적으로 감소하여 24시간 후 2.70~2.94mg/L 까지 감소하였다가 이 후 오염 전의 65% 수준으로 회복되었다(Figs. 2(c) and 2(d)). 초기의 용존산소 농도가 물과 토양 혹은 부유식물 처리구보다 높았는데 이는 토양에 의한 산소소모가 없었기 때문으로 판단된다. 물과 토양이 있는 처리구에서도 상·하층의 용존산소 농도의 차이는 없었으며, 오염물 유입 후 감소하기 시작하여 24시간 후 1.24~1.33mg/L 까지 감소하였다가 서서히 증가하여 오염전의 89~93% 수준으로 회복하였다. 부유식물 처리구에서는 오염물 투입 후 하층 보다는 상층에서 용존산소 농도가 더 높은 것으로 나타났는데 특히 광합성을 하는 주간엔 그 차이가 크게 나타났다. 오염물 투입 전 상·하층에서 각각 6.15과 6.54mg/L에서 투입 후 1.98과 1.61mg/L로 감소하였다가 상층은 5.21mg/L로 85% 수준으로 회복했지만 하층은 3.45mg/L로 이전의 53% 수준밖에 회복되지 않아 상층에서의 회복 속도가 더 빠르게 나타났다. 하층에서의 회복속도가 느린 것은 부유식물의 경우 뿌리가 하층부까지 길게 성장하여 뿌리호흡과 부착미생물의 활동으로 산소가 소모되었기 때문인 것으로 판단된다. 침수식물 처리구에서는 상·하층별 용존산소 농도의 차이가 없었는데 이는 침수식물의 성장이 상층부까지 성장하여 처리구에 전체적으로 영향을 미쳤기 때문으로 보인다. 오염물 유입 후 1.40~1.95mg/L 까지 감소하였다가 이 후 지속적으로 증가하여 오염전의 136-152% 수준으로 상승하였다(Figs. 2(c) and 2(d)). 특히 주야의 차이를 가지는 일주기성을 가지며 상승하는 경향을 보여주어 침수식물의 수중 광합성을 통하여 수체에 많은 산소가 공급되고 있음을 알 수 있었다. 처리구간의 농도를 비교하여도 침수식물 처리구가 상·하층에서 모두 다른 처리구보다 용존산소의 농도가 높은 것으로 나타났다(Table 1). 부유식물에 비해 침수식물 처리구에서 용존산소 농

도가 더 크게 증가한 이유는 침수식물의 경우 수체 내에서 줄기와 잎이 존재하여 낮 동안의 광합성을 한 결과 산소를 직접 수체 내에 공급하였기 때문이며 이에 반해 부유식물은 줄기와 잎이 수 표면에 떠있는 형태이므로 표층에만 산소가 공급되며 하층에는 뿌리의 존재로 인하여 오히려 산소가 소모되기 때문인 것으로 판단된다. 실제 환경에서도 본 실험에서와 같이 부유식물과 침수식물 생육 지역에서 용존산소의 농도 차이가 큰 것으로 알려져 있다(Meerhoff et al., 2003).

3.3 pH

모든 처리구에서 상·하층에서의 pH 차이는 없었으며 오염물 투입 후 다소 감소하였다가 다시 상승하는 경향을 나타내었다(Figs. 2(e) and 2(f)). 오염물 유입 후 pH의 감소는 물만 있는 대조군에서 오염물 5.88~5.93로 다른 처리구에 비해 가장 크게 감소하였는데, 이는 처리구내 토양이나 식물과 같이 완충작용을 할 수 있는 것이 없었기 때문이다. 이는 토양이 없는 인공수반이 pH 오염에 취약할 수 있음을 보여준다. 다른 처리구에서는 오염물 유입 후 pH는 6.02~6.06으로 유사한 수준을 보여주었다. pH의 감소는 용존산소와는 달리 서서히 감소하여 회복 또한 더디게 나타났는데, 이는 본 연구에서 pH의 감소가 오염물에 의한 1차적인 영향이 아니라 질산화와 같은 2차적인 영향으로 감소하였기 때문으로 보인다. 이후 pH는 침수식물 처리구를 제외하고는 오염물 유입전의 91-95% 수준으로 회복되었다. 침수식물 처리구의 경우 8.47-8.50 으로 오히려 오염물 유입 전보다 증가하였으며 이러한 pH의 증가는 주기성을 가지면서 나타났는데 이는 침수식물이 물속에서 광합성을 통하여 중탄산염을 흡수함으로써 수체내의 탄산염수지에 영향을 주었기 때문으로 보인다. 실험기간 동안의 평균 pH를 처리구간 비교한 결과 침수식물 처리구에서 상·하층 모두 다른 처리구에 비해 pH가 가장 높은 것으로 나타났다(Table 1). Frodge et al.(1990) 또한 침수식물 생육지역에서 pH의 주기성을 관찰 할 수 있다고 하였으며 수

심이 깊은 지역에서는 침수식물의 수관이 형성되는 수 표면에서 그 변동 폭이 특히 크다고 하였다. 이러한 결과는 습지에서 pH의 변화가 산성 유입물의 직접적인 영향 외에도 영양물질의 유입이나 습지식물의 유형에 따라서도 영향을 받을 수 있음을 잘 보여준다. 습지에서 주요 질소제거 기작인 탈질 반응에 pH는 중요한 영향을 미치는데, pH 6~8이 가장 적합하며 4이하에서는 거의 일어나지 않는 것으로 알려져 있어 본 실험에서의 pH는 대부분 탈질에 적합한 범위인 것으로 나타났다 (Faulwetter, 2009; Vymazal, 2007).

3.4 산화환원전위

습지에서 생화학적 반응은 주로 산화환원전위 (ORP)에 의해 영향을 받게되는데, 보통 산화반응은 +700 ~ +250mV에서 환원반응은 +250 ~ -300mV에서

발생한다. 습지에서는 이러한 산화환원의 차이에 의하여 수체와 토양 사이의 호기성 및 혐기성 경계선이 존재한다(Faulwetter et al., 2009). 산화환원전위의 경사는 주로 수체내의 용존산소 농도나 오염유입 또는 식물에 의해 뿌리지역으로 이송되는 산소의 양에 의해 영향을 받는다(Picard et al., 2005). 본 실험에서는 각 처리구에서 오염물 유입 후 하층수와 토양에서의 산화환원전위의 변화를 알아보았다. 모든 처리구에서 상·하층의 차이는 없었으나 처리구간의 차이는 관찰되었는데 물만 토양이 있는 처리구와 부유식물 처리구에서 가장 낮게 나타났다(Table 1). 오염물 유입 전에는 전체 처리구에서 모두 349~381mV로 유사한 수준을 가졌다가 오염물 유입 후 감소하였다가 다시 증가하는 경향을 나타내었다(Fig. 5). 하지만 시간이 경과에 따라 회복되는 경향은 처리구에 따라 다르게 나타났는데, 물만 있는

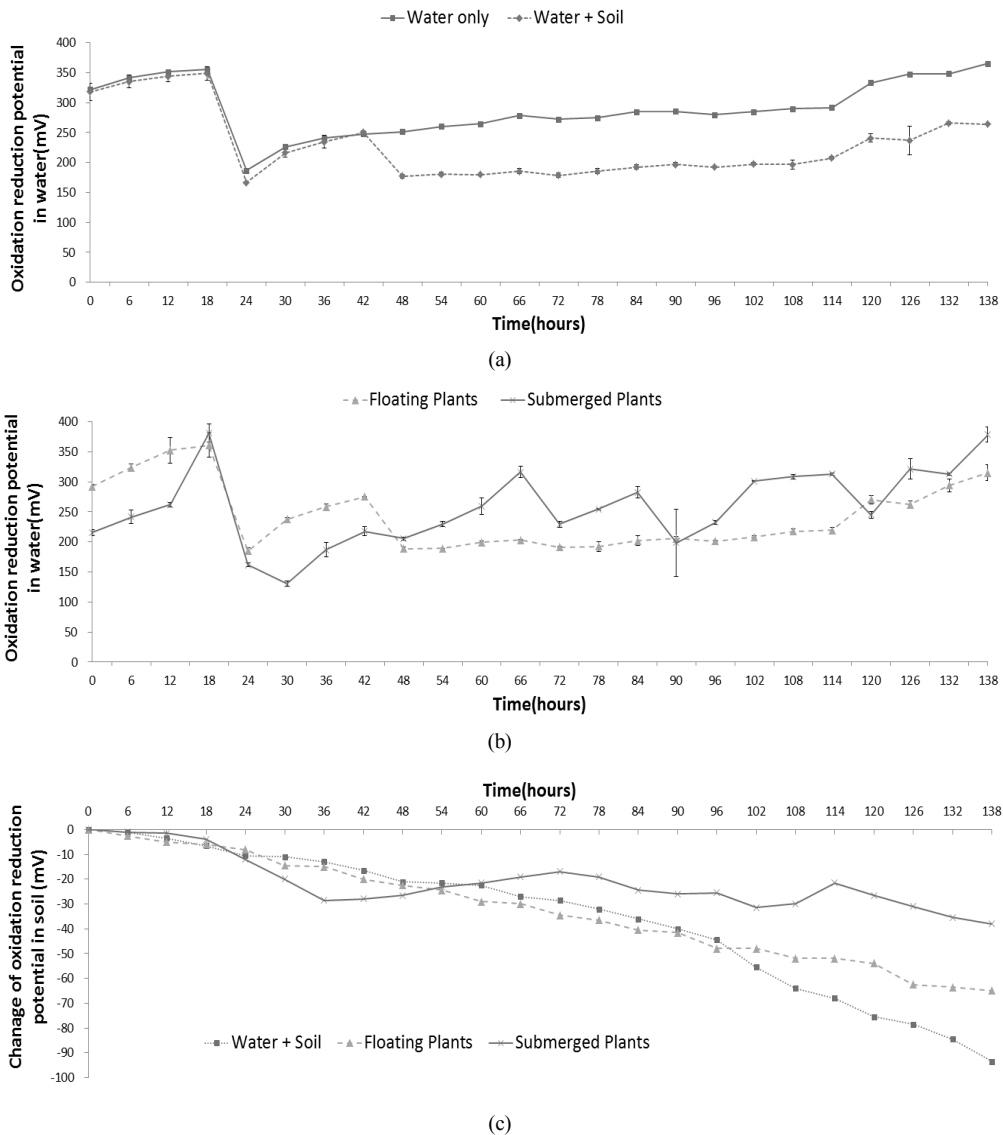


Fig. 3. Oxidation and reduction potential in wetland mesocosms of (a) water only and Water + Soil (b) Floating plants and submerged plants (c) its change of wetland soil.

대조구가 물과 토양이 있는 처리구보다 빠르게 나타났으며 (Fig. 3(a)), 침수식물 처리구에서 부유식물 처리구보다 높게 그리고 주기성을 보이며 증가하는 경향을 보여주었다(Fig. 3(b)).

Fig. 3(c)는 각 처리구 토양에서의 산화환원전위의 변화를 나타낸다. 식물이 없는 처리구에서 가장 감소폭이 컸으며 수체에 산소공급이 가장 원활하게 이루어졌던 침수식물 처리구에서 산화환원전위의 변화가 가장 작게 나타나 습지에 존재하는 수생식물의 종류에 따라서 습지토양의 산화환원전위가 큰 영향을 받을 수 있음을 보여주었다. 일반적으로 뿌리가 잘 발달된 정수식물의 경우 뿌리를 통하여 토양층에 산소를 공급함으로써 근권 토양의 산화환원전위에 영향을 주게 되지만 부유식물의 경우 습지토양으로 직접 산소를 공급하기 보다는 먼저 수체의 용존산소 농도에 영향을 주고 이 후 습지토양과 수체와의 농도구배에 따라 토양의 산화환원전위에 영향을 미치게 된다. 습지토양에 고착하여 살아가는 침수식물은 뿌리와 수체를 통하여 동시에 습지토양에 산소를 공급할 수 있으므로 그 영향은 클 수 있다. 이와 같이 부유식물과 침수식물이 습지토양의 산화환원전위에 미치는 영향은 식물의 광합성과 관련이 있으므로 광합성에 영향을 줄 수 있는 기상 요인이나 계절에 의한 영향을 많이 받게 된다. 따라서 실제 현장 조건에서는 수체나 토양에서의 산화환원전위의 변동 폭도 이보다 크게 나타날 가능성이 높다. 습지토양의 산화환원전위의 변화는 이곳에서 일어나는 질산화와 탈질, 메탄산화 등 다양한 생지화학적 기작에 직접적인 영향을 주게 되며 오염물질의 생지화학적 기작에 전반적인 영향을 미치게 된다.

3.5 영양물질

본 실험에서 질소 오염물질로 사용된 요소는 물속에서 이산화탄소와 암모니아성 질소로 분해되며 이후 암모니아성 질소는 pH에 따라 대기 중으로 휘발되거나 산소의 여부에 따라 질산화과정이 진행되면서 $\text{NO}_2\text{-N}$ 나 $\text{NO}_3\text{-N}$ 로 변화되거나 탈질과정을 통하여 N_2 가스로 대기 중으로 배출된다. 식물은 이러한 질소의 전반적인 제거 기작에도 중요한 역할을 하는 것으로 알려져 있다(Rogers et al., 1991).

실험결과 총질소(TN), 질산성 질소($\text{NO}_3\text{-N}$), 아질산성 질소($\text{NO}_2\text{-N}$) 및 암모니아성 질소($\text{NH}_4\text{-N}$)의 경우 모든 처리구에서 상·하층의 농도 차이가 없었으나 처리구간의 농도 차이는 관찰되었다. Fig. 4 (a) 와 (d)에서 보는 바와 같이 투입된 질소 대부분이 초기에 암모니아성 질소로 존재하고 있음을 알 수 있다. 물만 있는 대조구의 경우 아질산성질소와 질산성질소의 농도는 거의 변화가 없는 것으로 나타났다. 물과 토양이 함께 있는 실험구에서는 $\text{NO}_2\text{-N}$ 농도가 다소 증가하는 추세여서 암모니아 휘발과 더불어 질산화 과정에 따라 $\text{NO}_2\text{-N}$ 로 산화되

면서 암모니아성 질소가 감소하는 것을 보여주었다. 이후 물만 있는 대조구와는 달리 $\text{NO}_3\text{-N}$ 농도의 증감도 나타났는데, $\text{NO}_3\text{-N}$ 의 증가는 질산화에 따른 $\text{NO}_2\text{-N}$ 에서 $\text{NO}_3\text{-N}$ 로 변화되었으며, 이 후 $\text{NO}_3\text{-N}$ 의 감소는 토양 확산 등에 의하여 이루어진 것으로 보인다(Figs. 4 (b) and 4(c)). 특히 $\text{NO}_3\text{-N}$ 의 경우 식물이 있는 처리구와 유사한 주기성을 가지고 증감하며 용존산소의 농도 또한 증가하는 경향을 보이는 것을 보아 (Figs. 2 (c) and (d)), 본 실험에서 측정하지는 않았지만 토양이나 수체에 존재하는 조류의 영향일 가능성도 배제할 수는 없다. 부유식물이나 침수식물 처리구의 경우 물과 토양만 있는 처리구에 비해 $\text{NO}_2\text{-N}$ 이 빠르게 감소하는 것으로 보이는데 이는 식물이 없는 다른 처리구들보다 질산화가 더 빠르게 일어나면서 $\text{NO}_3\text{-N}$ 로 변환하였기 때문이다. 변환된 질산성 질소는 주로 수생식물에 의하여 흡수되면서 수체 내에서 제거되며 광합성과정에 의하여 공급된 산소에 의하여 다시 질산화가 이루어지면서 암모니아성질소와 아질산성 질소의 감소가 빠르게 이루어진 것으로 보인다(Fig. 4). 총질소의 농도감소는 침수식물의 경우 가장 감소폭이 크게 나타났는데 (Fig 4(d)), 이는 본 실험조건에서 침수식물이 실험구의 상층부까지 성장하여 처리구에 전체적으로 영향을 미쳤기 때문으로 보인다.

총인의 경우도 모든 처리구에서 상·하층의 농도 차이는 없었으나 처리구간의 농도 차이는 관찰되었다. 총인 농도의 감소는 물만 있는 대조구 < 물과 토양이 있는 대조구 < 부유식물 처리구 < 침수식물 처리구의 순으로 질소와 유사한 경향으로 감소하였다 (Fig 5). 인의 경우 무기인 형태로 유입하였기 때문에 대부분 인산염인의 형태로 존재하였다. 물만 있는 대조구의 경우 농도기준으로 8.4% 만 감소하였으나, 토양과 함께 있는 대조구의 경우 59.3% 감소되어 인의 감소에 습지토양의 역할이 큼을 보여주었다. 이에 식물이 있는 경우에 제거율은 증가하였는데 부유식물의 경우 86.1%, 침수식물의 경우 91.4%로 특히 침수식물의 경우 오염물 유입전 수준으로 회복하였다. 유기인의 경우 물만 있거나 물과 토양이 있는 대조구에서는 큰 변화가 없었으나 식물이 있는 경우 유기인의 비율이 이들 보다 다소 높게 나타났으며 특히 침수식물의 경우 실험 종료 시 총인이 약 41-57%가 유기인의 형태로 존재하는 것으로 나타나 유입된 인이 상당 부분 흡수된 후 유기인의 형태로 다시 수체로 유입된 것으로 보인다(Fig 5(c)). 습지에서 인의 흡착은 습지 토양내 존재하는 철과 알루미늄의 양과 존재형태 또는 총유기탄소에 영향을 많이 받는 것으로 알려져 있다(Reddy et al., 1995). 특히 침수식물의 경우 식물에 의한 직접 흡수 외에 pH 변화에 따른 침전에 의하여 상당량 제거되는 것으로 보고되어 인공습지에서의 인 제거를 향상시킬 수 있으며(Dierberg et al., 2002), 더 많은 양의 인이 침수식물이 우점하는 습지토양에 축적될 수 있는 것으로 알려져 있다(Knight et al., 2003).

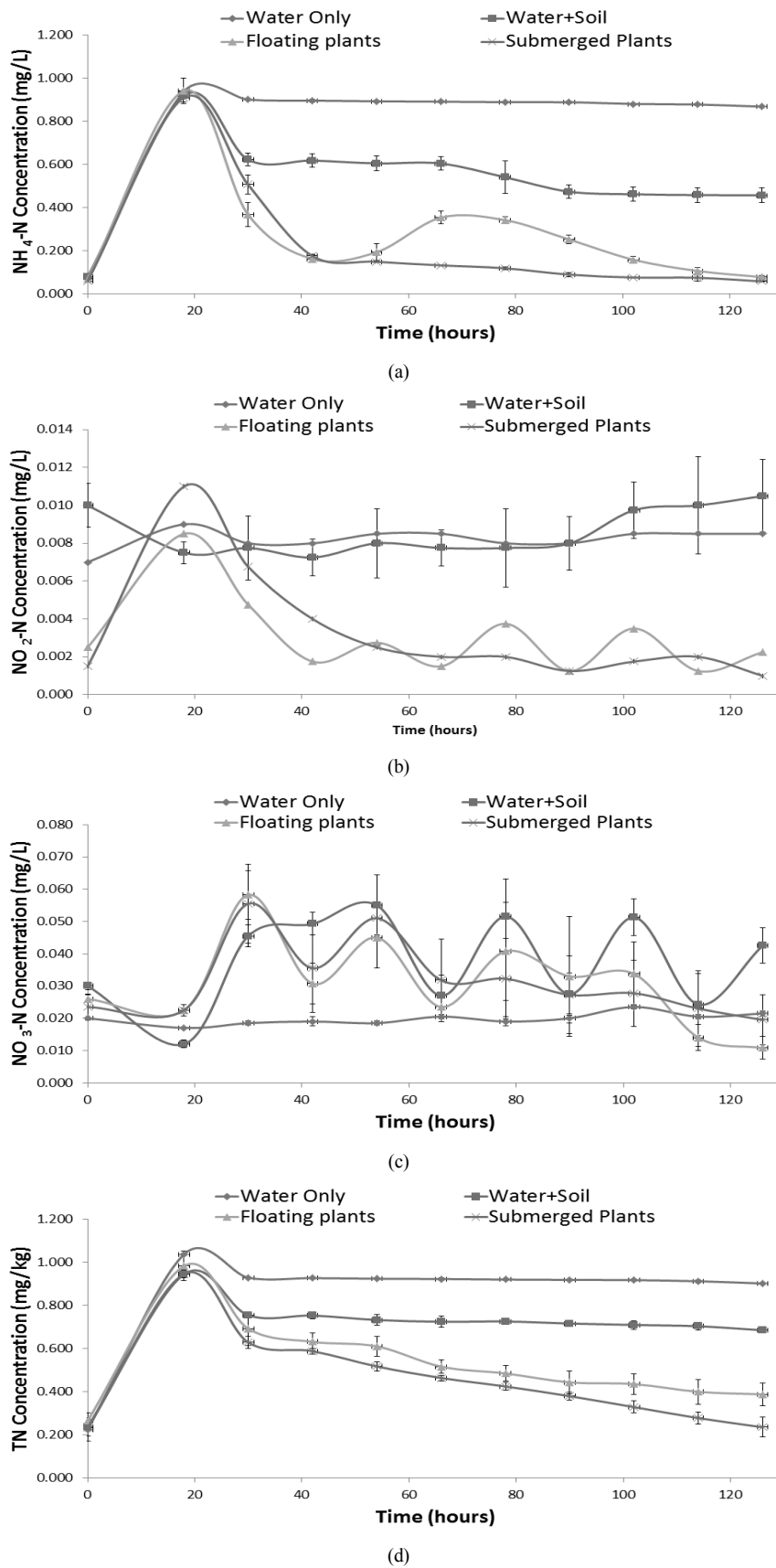
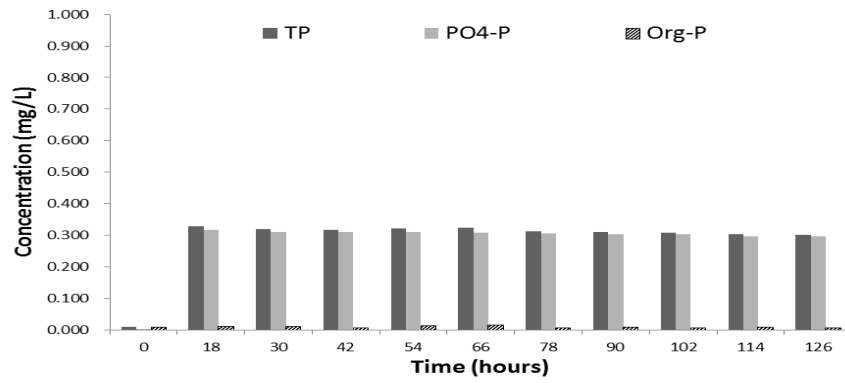
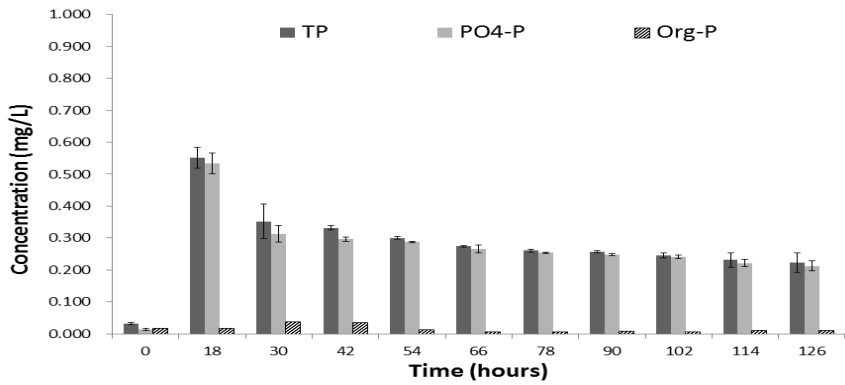


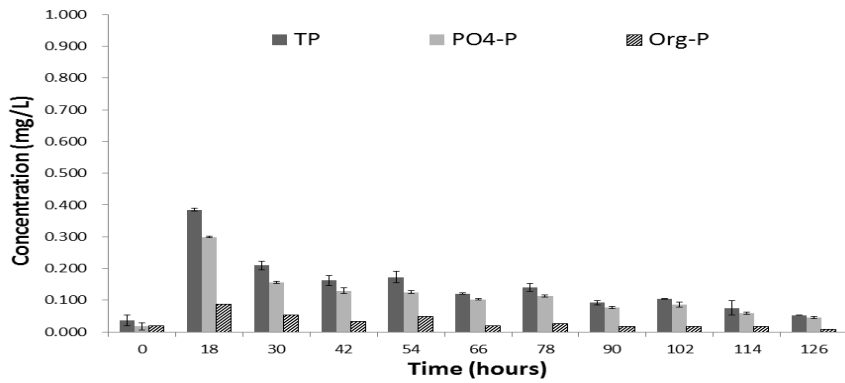
Fig. 4. Nitrogen concentration change during experiment in wetland mesocosms
 (a) NH₄-N (b) NO₂-N (c) NO₃-N (d) Total Nitrogen.



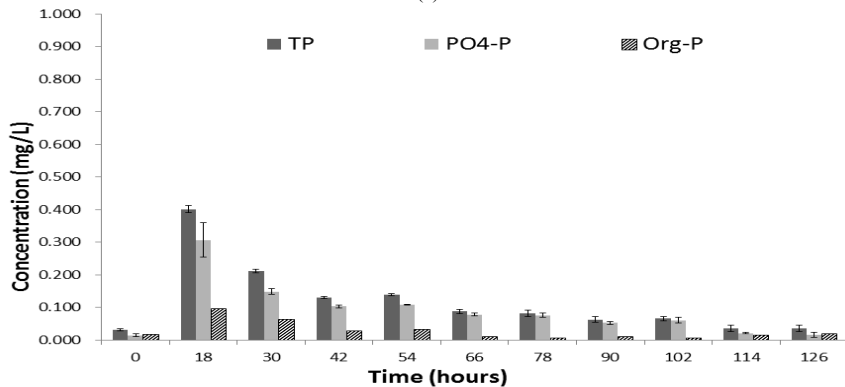
(a)



(b)



(c)



(d)

Fig. 5 Concentration changes of total phosphorous(TP), Inorganic Phosphorous (PO₄-P), and Organic Phosphorous (Org-P) during experiment in wetland mesocosms (a) Water only (b) Water + Soil (c) Floating plants (d) Submerged plants.

3.6 클로로필-a

수체의 온도, pH, 용존산소 등의 물리화학적 특성은 수생식물의 유무 혹은 유형에 따라 영향을 받게 되며 이러한 특성은 다시 수체내의 여러 생물학적 기작에 차이를 유발 할 수 있다. 이러한 수생식물의 존재로 인하여 수체내의 조류농도에 영향을 줄 수 있는데, 부유식물의 경우 수체 내로 유입되는 빛을 차단하고 온도를 낮춤으로써 조류의 발생을 억제할 수 있으며, 침수식물의 경우는 조류의 성장에 필요한 질소와 인을 흡수하여 조류의 발생을 억제할 수 있다 (Jones et al., 2002). 오염물질 유입 후 5일 경과 후 물과 토양이 있는 대조군의 경우 클로로필-a의 농도가 1.92 g/m³에서 8.62±1.35g/m³로, 침수식물의 경우에는 5.35±0.01g/m³에서 8.22±1.34g/m³로 증가하였으나, 부유식물의 경우 1.52mg/m³에서 5일 후 0.37±0.27mg/m³로 오히려 감소하였다(Fig. 6). 이는 부유식물의 경우 빛을 차단하며 조

류가 이용할 수 있는 영양물질 또한 흡수하여 조류의 발생을 효과적으로 억제한 것으로 보인다. 침수식물의 경우도 클로로필-a 농도는 식물이 없는 대조구와 유사한 수준을 나타내었지만, 초기농도와 비교할 때 증가율은 식물이 없이 물과 토양만 있는 처리구의 30% 수준으로, 침수식물의 경우도 조류의 발생을 어느 정도 억제할 수 있는 것으로 나타난다. 하지만 부유식물의 경우와는 달리 주로 수체에 영양물질을 흡수함으로써 조류의 성장을 저해시키는 것으로 보인다. 일반적으로 본 실험조건과 같은 얇은 수체에서 인의 농도가 0.25mg/L 이하의 경우 침수식물에 의한 조류의 발생억제가 가능한 것으로 알려져 있다(Scheffer et al., 2001). 본 실험에서의 총인의 농도가 오염유입 후 이보다 높은 수준이었지만 수생식물이 있는 경우 지속적으로 감소하여 0.1mg/L 이하로 낮아진 것으로 나타나 외부에서의 추가적인 인유입이 없을 경우 조류의 농도는 더 감소할 수도 있을 것으로 보인다.

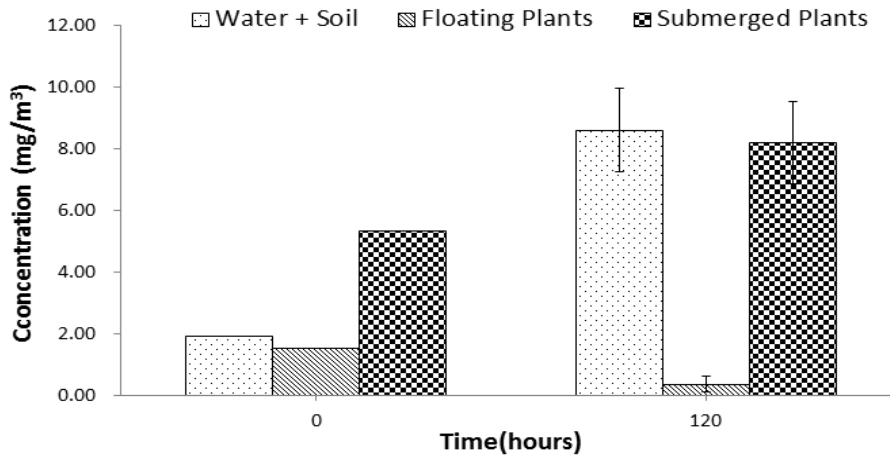


Fig. 6. Effects of wetland plant type on chlorophyll-a concentration in the study.

4. 결론

본 연구에서는 식물의 유형이 수심이 얇은 습지의 수 환경에 미치는 영향을 파악하고자 부유식물로는 부레옥잠(*Eichhornia crassipes*)을 침수식물로는 붕어마름(*Ceratophyllum demersum*)을 인공습지 실험구에 도입한 후 수 환경 변화를 조사하였다. 연구결과를 요약하면 다음과 같다.

- 1) 낮과 밤 수온의 주기적 변동이 관찰되었는데 특히 부유식물 처리구에서 다른 처리구에 비해 온도가 가장 낮았으며 또한 주야 모두 상·하층의 온도 차이가 있었다. 이는 수 표면에 존재하는 부유식물의 줄기와 잎이 빛이 수체내로 투과하는 것을 어렵게 하였기 때문이다.

- 2) 오염물 유입 후 수체의 용존 산소가 일시적으로 감소한 후 회복되었는데 특히 침수식물 처리구에서 용존산소가 주기성을 가지면서 증가하였으며 상승폭 또한 가장 컸다. 이는 침수식물이 수중 광합성을 통하여 수체에 많은 산소가 공급되었기 때문이다.
- 3) pH의 감소는 용존산소와는 달리 서서히 감소하여 회복 또한 더디게 나타났는데, 이는 본 연구에서 pH의 감소가 오염물에 의한 1차적인 영향이 아니라 질산화와 같은 수체 내에서의 2차적인 반응으로 감소하였기 때문이다. 침수식물의 경우 오염물 유입 전보다 더 증가하였으며 이러한 pH의 증가가 주기성을 가지면서 나타나 수중 광합성의 영향을 보여주었다.
- 4) 오염물 유입 후 감소한 산화환원전위의 회복되는

경향은 처리구에 따라 다르게 나타났는데, 물만 있는 대조구가 물과 토양이 있는 처리구보다 높게 나타났으며, 식물이 없는 처리구 보다는 식물이 있는 처리구에서 그리고 같은 식물처리구에서도 침수식물 처리구에서 부유식물 처리구 보다 높게 그리고 주기성을 보이며 증가하는 경향을 보여주었다. 또한 습지에 존재하는 수생식물의 종류에 따라서 습지토양의 산화환원전위 또한 큰 영향을 받을 수 있음을 보여주었다.

- 5) 수체 내 총질소와 총인 모두 상·하층의 농도 차이는 없었으나 처리구간의 농도 차이는 관찰되었다. 총질소와 총인 농도 감소는 물만 있는 대조구 <물과 토양이 있는 대조구 < 부유식물 처리구 < 침수식물 처리구의 순으로 감소하여 수생식물이 영양물질의 제거에도 효과적임을 나타내었다.
- 6) 부유식물과 침수식물 모두 조류발생을 억제하는 것을 나타냈다. 부유식물의 경우 수체의 온도를 낮추고 조류가 이용할 수 있는 영양물질을 흡수하면서 조류의 발생을 효과적으로 억제한 것으로 나타났다.

References

- Allen, WC, Hook, PB, Biederman, JA and Stein, OR (2002). Temperature and wetland plant species effects on wastewater treatment and root zone oxidation, *Journal of Environmental Quality*, 31, pp. 1010-1016.
- Brix, H (1997). Do macrophytes play a role in constructed treatment wetlands. *Water Science Technology*, 35(5), pp. 11-17.
- Brix, H (1994). Functions of macrophytes in constructed wetlands, *Water Science Technology*, 29(4), pp. 71-78.
- Cronk, JK and Fennessy, MS (2001). *Wetland Plants: Biology and Ecology*. Lewis Publishers, Washington D.C. USA.
- Dierberg, FE, DeBusk, TA, Jackson, SD, Chimmey, MJ and Pietro, K (2002). Submerged aquatic vegetation-based treatment wetlands for removing phosphorus from agricultural runoff: response to hydraulic and nutrient loading. *Water Research*, 36, pp. 1409-1422.
- Faulwetter, JL, Gagnon, V, Sundberg, C, Chazarenc, F, Burr, M. D, Brisson, J, Camper, AK and Steina, OR (2009). Microbial processes influencing performance of treatment wetlands: a review, *Ecological Engineering*, 35, pp. 987-1004.
- Frodge, JD, Thomas, GL and Pauley, GB (1990). Effects of canopy formation by floating and submergent aquatic macrophytes on the water quality of two shallow pacific northwest lakes. *Aquatic Botany*, 38, pp. 231-248.
- Gersberg, RM, Elkins, BV, Lyon, SR and Goldman, CR (1986). Role of aquatic plants in wastewater treatment by artificial wetlands, *Water Research*, 20(3), pp. 363-368.
- Hill, DT, and Payton, JD (2000). Effect of plant fill ratio on water temperature in constructed wetlands, *Bioresource Technology*, 71, pp. 283-289.
- Jones, JI, Yooung, JO, Eaton, JW and Moss, B (2002). The influence of nutrient loading, dissolved inorganic carbon and higher trophic levels on the interaction between submerged plants and periphyton, *Journal of Ecology*, 90, pp. 12-24.
- Kadlec, RH and Wallace, SD (2009). *Treatment Wetland*, CRC Press, Boca Raton. FL. USA.
- Kim, C, Ko, J, Lee, J, Park, S, Ku, Y and Kang, H (2007). Selection of aquatic plants having high uptake ability of pollutants in raw sewage treatment, *Korean Journal of Environmental Agriculture*, 26(1), pp. 25-35. [Korean Literature]
- Knight, RL, Binge, G, Clarke, RA and Newman, JM (2003). Long term phosphorus removal in florida aquatic systems dominated by submerged aquatic vegetation. *Ecological Engineering*, 20, pp. 45-63
- Korean Ministry of Agriculture and Forestry (KMOAF) (2004). *Design and Management of Constructed Wetlands for Agricultural Water Quality Improvement*, Korean Ministry of Agriculture and Forestry, pp. 69-69. [Korean Literature]
- Korean Ministry of Environment (KMOE) (2008). *Water Pollution Testing Methods*, Korean Ministry of Environment. [Korean Literature]
- Lee, G and Sung, K (2012). Evaluation of the nutrient uptakes of floating and submerged plants under experimental conditions, *Journal of Korean Society on Water Quality*, 28(1), pp. 71-77. [Korean Literature]
- Meerhoff, M, Mazzeo, N, Moss, B and Rodriguez-Gallego, L (2003). The structuring role of free-floating versus submerged plants in a subtropical shallow lake, *Aquatic Ecology*, 37, pp. 377-391.
- Mitsch, WJ and Gosselink, JG (2000). *Wetlands*, John Wiley & Son, New York.
- Paul, EA and Clark, FE (1989). *Soil Microbiology and Biochemistry*. Academic Press, Inc., San Diego, CA. USA.
- Picard, CR, Fraser, LH and Steer, D (2005). The interacting effects of temperature and plant community

- type on nutrient removal in wetland microcosms, *Bioresource Technology*, 96, pp. 1039-1047.
- Reddy, KR and D'Angelo, EM (1997). Biogeochemical indicators to evaluate pollutant removal efficiency in constructed wetlands, *Water Science Technology*, 35(5), pp. 1-10.
- Reddy, KR, Diaz, OA, Scinto, LJ and Agami, M (1995). Phosphorus dynamics in selected wetlands and streams of the lake okeechobee basin. *Ecological Engineering*, 5, pp. 183-207.
- Rogers, KH, Breen, PF and Chick, AJ (1991). Nitrogen removal in experimental wetland treatment systems: evidence for the role of aquatic plants, *Research Journal of the Water Pollution Control Federation*, 63(7), pp. 934-941.
- Scheffer, M, Carpenter, S, Foley, JA, Folke, C and Walker, B (2001). Catastrophic shifts in ecosystems. *Nature*, 413, pp. 591-596.
- Sung, K, Yi, YM, Chung, YH and Park, S (2010). Development of *phragmites communis* expansion control methods at the wetland ecological park, *Journal of Korean Environmental Restoration Technology*, 13(5), pp. 1-11. [Korean Literature]
- Vymazal, J (2007). Removal of nutrients in various types of constructed wetlands, *Science of Total Environment*, 380, pp. 48-65.
- Yang, H (2011). Comparison of seasonal nitrogen removal by free-water surface wetlands planted with *iris pseudacorus* L., *Journal of Korean Environmental Restoration Technology*, 14(1), pp. 121-132 [Korean Literature]
- Yi, YM, Kang, D and Sung, K (2009). Germination experiments using natural wetland soil for introducing non-emergent plants into a constructed wetland, *Journal of Wetlands Research*, 11(1), 39-48. [Korean Literature]
- Yi, YM, Lee, S and Sung, K (2010). Effects of submerged plants on water environment and nutrient reduction in a wetland, *Journal of Korean Society on Water Quality*, 26(1), pp. 19-27. [Korean Literature]
- 논문접수일 : 2012년 11월 03일
- 심사의뢰일 : 2012년 11월 07일
- 심사완료일 : 2013년 02월 17일