

낙동강 수계 자연습지의 계절별 수질변화특성 분석

김영윤 · 이광섭* · 이석모* · 강대석* · 성기준*[†]

부경대학교 환경공학과

*부경대학교 생태공학과

Analysis of Seasonal Water Quality Variation of a Natural Wetland in the Nakdong River Basin

Young Ryun Kim · Kwang Sup Lee* · Suk Mo Lee* · Daeseok Kang* · Kijune Sung*[†]

Department of Environmental Engineering, Pukyong National University

*Department of Ecological Engineering, Pukyong National University

(Received 28 May 2009, Revised 18 August 2009, Accepted 19 August 2009)

Abstract

A natural wetland in the Nakdong River basin which effectively removes non-point source pollutants was investigated for 2 years to understand wetland topography, vegetation types, and water quality characteristics. The water depth of the natural wetland was in the range of 0.5~1.9 m which is suitable for the growth of non-emergent hydrophytes. The wetland has a high length to width ratio (3.3:1) and a relatively large wetland to watershed area ratio (0.057). A broad-crested weir at the outlet increases the retention time of the wetland whose hydrology is mainly dependent on storm events. The concentrations of dissolved oxygen in the growing season and the winter season showed anoxic and oxic conditions, respectively. Diurnal variations of DO and pH in the growing season were also observed due to weather change and submerged plants. COD and TP concentrations were low in the winter season due to low inflow rate and increased retention time. Increased TP concentrations in the spring season were caused by degradation of dead wetland plants. Nitrogen in the wetland was mostly in organic nitrogen form (>75%). During the growing season, ammonium concentration was high but nitrate nitrogen concentration was low, possibly due to anoxic and low pH conditions which are adverse conditions for ammonification and nitrification. The results of this study can be used as preliminary data for design, operation, monitoring and management of a constructed wetland which is designed to treat diffuse pollutants in the Nakdong river watershed.

keywords : Diurnal and seasonal variation, Natural wetland, Non point source reduction, Water quality characteristics, Wetland monitoring

1. 서론

습지는 영양염류의 순환, 퇴적물 축적, 오염정화, 침식방지 등의 기능을 수행하며, 독특한 식생구조와 조류를 포함한 다양한 야생동식물의 서식처 역할을 함으로써 다른 생태계보다 높은 가치를 지니며, 인간의 영향을 받기 쉬운 생태계라는 특징을 지닌다(Costanza et al., 1997). 이러한 습지의 기능과 가치에 대한 인식의 전환으로 전 세계적인 습지의 보전 및 보호, 훼손된 습지의 복원, 인공·대체습지 조성 등 다양한 방법의 습지보전활동이 진행되고 있으며, 국내의 경우도 1999년 2월 습지보전법 제정 이후 전국의 15개 주요습지에 대해 습지보호지역을 지정하여 관리하고 있다(환경부, 2006). 습지는 홍수조절기능, 저류기능, 동식물 서식처기능, 오염물질정화기능 등 생태적 가치가 매우

높으며, 이들 중 수질정화기능과 오염물질의 이동조절기능은 가장 중요한 조절 기능이라 할 수 있다(Blackwell et al., 2002; Mitsch and Gosselink, 2000).

습지를 이용한 오염물질 처리에 관한 연구는 1950~60년대 독일의 수생식물을 이용한 수질정화에서부터 시작되었고, 1970년대 미국에서는 자연습지를 이용한 수처리 연구를 시작한 바 있다(Mitsch and Jørgensen, 2004). 특히 수처리를 목적으로 조성되는 습지인 인공처리습지는 습지식생, 토양, 미생물 등의 자연 작용을 이용하여 하·폐수나, 오염된 수자원을 처리하는 습지로 정의되고 있다(Kadlec and Knight, 1996). 이처럼 국외의 경우는 점·비점오염원관리를 위한 자연습지와 인공습지 적용사례가 많으나, 국내의 경우에는 비도시 유역에서의 비점오염원 관리를 위한 인공습지의 적용 연구가 대다수를 차지하고 있고, 처리효율 또한 우수한 것으로 보고된 바 있다(고지연 등, 2003; 김형철 등, 2008; 박병훈 등, 2001; 장정렬 등, 2007; 정용준, 2006; 함종화 등, 2005; Kadlec and Knight, 1996). 인공습

[†] To whom correspondence should be addressed.

ksung@pknu.ac.kr

지는 자연습지에서 제공하고 있는 습지의 여러 기능을 모방하여 목적에 따라 필요한 부분을 참조하여 좀 더 인위적 제어가 가능하도록 조성되는데, 수질정화를 목적으로 할 경우에는 자연습지의 물리·화학·생물학적 기작에 대한 이해를 바탕으로 설계되어야 하지만 국내의 경우에는 기후조건 등이 상이한 외국의 인공습지 적용사례를 이용하고 있어 우리나라 자연습지의 수질특성 및 정화기작에 관한 연구는 부족한 실정이다.

낙동강 수계 하류권역의 자연습지는 대부분 하천변 범람원으로 존재하던 배후습지로서 습지의 지형학적 특성상 인공습지에 비해 깊은 수심 분포와 미지형을 유지하고 있으며 이로 인하여 정수식물이 우점하는 인공습지와는 달리 비점수성(부유, 부엽, 침수)식생 유형이 우점하고 있는 것으로 확인된 바 있다(부산지역환경기술개발센터, 2008). 또한, 기상조건의 주·야간, 계절간의 변화에 따라 습지내의 산화·환원환경 등이 급격하게 변화하므로 습지내 생지화학적환경변화에 따른 수질변화특성을 파악하는 것은 인공습지의 조성 및 운영에 있어서도 중요한 배경자료가 될 수 있다. 조성된 인공습지의 장기적인 운영을 위한 유지관리 및 모니터링의 경우에도 수계에 존재하는 자연습지가 참조습지(reference wetland)로서 그 비교대상이 될 수 있다. 낙동강 수계의 배후습지는 대부분 저류형습지로서 강우에 크게 의존하고 있으며 습지에서의 비점오염물질 저감은 강우시에 습지로 유입한 오염물질이 강우 후 청천시 생지화학적작용에 의해 정화되거나 습지의 생산 활동에 이용되어 저장되므로, 자연습지의 수질변화 특성은 수계에 적합한 인공습지를 설계, 운영하는데 매우 필요한 자료라 할 수 있다. 또한, 차후 4대강 물환경기본계획상의 수변습지 및 저류지의 복원계획(환경부, 2006)에 따른 훼손된 습지의 복원이나 조성 사업시에도 활용될 수 있을 것으로 예상된다.

본 연구에서는 비점오염물질을 효과적으로 처리하고 있는 낙동강 하류권역의 자연습지를 대상으로 습지의 형태적, 식생구조적 특성을 조사하였다. 2007년 6월부터 2009년 4월까지 약 2년간 총 8회에 걸쳐 자연습지의 수질변화를 모니터링한 결과를 바탕으로 자연습지의 일별, 기후조건별, 계절별

수질변화특성 및 그 요인을 파악함으로써 낙동강수계에 적합한 비점오염관리를 위한 인공습지의 설계·운영·유지관리 및 모니터링 시 이용될 수 있는 기초자료를 제공하고자 하였다.

2. 연구방법

2.1. 연구대상지역

본 연구에서 연구대상으로 선정된 습지는 낙동강수계 남강지류에 있는 자연습지인 대평늪으로, 현재 수계내 비점원 오염물질을 효과적으로 저류하는 것으로 알려진 저류형습지로서(낙동강수계관리위원회, 2005), 강우 시에 TN과 SS의 제거율이 80%이상 되는 것으로 보고된 바 있다(김영운 등, 2008). 대평늪이 있는 남강지류지역은 낙동강과 더불어 우리나라 저층자연늪의 대다수가 분포하는 지역이며, 인근에 석교천습지, 질남늪 등 자연습지가 있다. 대평늪의 지리적 위치와 모니터링 지점은 Fig. 1과 같다.

대평늪의 형상은 동서로 길게 뻗어 있고 가로와 세로의 비는 약 3.34:1, 표면적은 82,547 m²(8.25 ha), 평균수심은 0.95 m, 평균수심을 고려한 습지체적은 약 78,420 m³, 유역면적은 1,448,500 m²이며, 습지와 유역면적의 비는 0.057로 유역면적에 비해 습지의 면적이 큰 특징을 가지고 있다. 습지의 유입 유량은 대부분 강우 시 주변유역으로부터 발생하며, 평상시에는 인근 주거지로부터 발생하는 하수가 유입한다. 습지내부 토양은 silt와 clay이며 삼각분류표(미농무성기준)에 따라 clay로 분류되었다(Table 1).

습지의 식생유형은 조사시기 동안 일부 차이는 있지만, 수심이 0.5 m 이하로 낮은 유입부와 습지 가장자리에 줄곧락(*Zizania Latifolia*)이 우점하고 송이고랭이(*Scirpus triangularatus*) 군락이 일부 분포하였으며, 습지 내부에는 부엽식물인 마름(*Trapa japonica*)이 우점하여 매년 90% 이상의 피도를 나타내었다. 유입부에는 자라풀(*Hydrocharis dubia*) 및 가시연꽃(*Euryale ferox*) 등이 분포하는데, 가시연꽃은 매년 그 분포에 차이를 보였다. 침수식물의 경우 검정말(*Hydrilla verticillata*), 붕어마름(*Ceratophyllum demersum*),

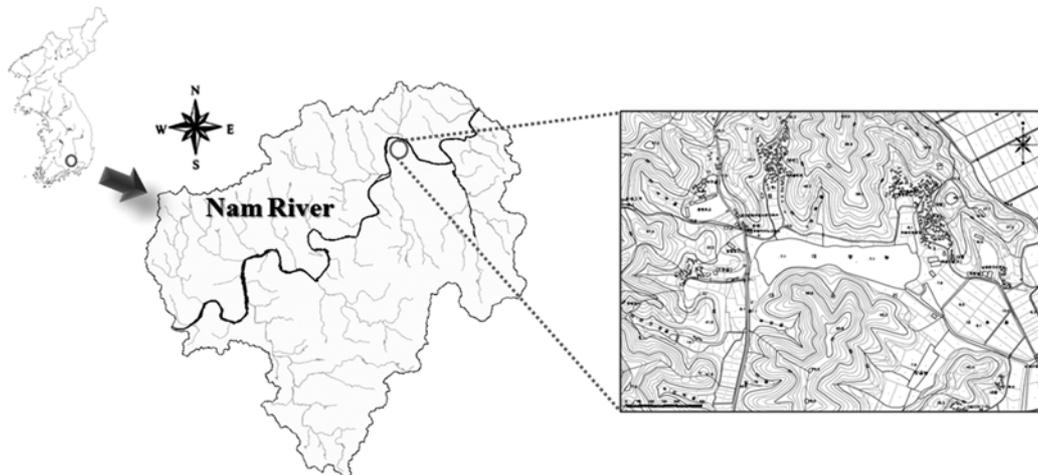


Fig. 1. Location of the Daepyung Marsh and its watershed.

말뚝(*Potamogeton crispus*) 등이 서식하였다(Fig. 2(a)). 습지의 유입 유량은 비강우시에 인근 주거지역의 생활하수가 유입하지만 그 양이 적고, 대부분 강우 시에 발생하여 습지로 유입한다. 2008년 5월 강우 시 습지의 유입부와 유출부에서 실측한 유량 자료를 이용하여 산정한 습지의 체류 시간은 약 6일이었으며, 조사시점의 선행무강우일수는 4일, 총강우량은 75 mm, 총 유입량은 7,455 m³으로 나타났다. 습지 모니터링은 2007년 6월부터 2009년 4월까지 진행하였으며, 그 결과를 이용하여 습지의 계절별 수질변이 특성을 분석하였다.

2.2. 시료채취 및 분석

모니터링 기간 동안 분기별로 습지의 유입부, 중앙부, 유출부에 9~11개 정점을 설정하여 시료를 채취·분석하였고, 수심측량 자료를 이용하여 Sufer 프로그램으로 등수심도를 작성하였다. 수질은 수온, pH, DO, Conductivity, COD_{Mn}, SS, NH₄⁺-N, NO₂⁻-N, NO₃⁻-N, TN, PO₄³⁻-P, TP를 Standard Methods(APHA, 2005)와 수질오염공정시험법에 준하여 분석하였다. 습지내 식생여부에 따른 자료분석은 식생이 성장하기 시작하는 5월부터 9월까지의 성장기와, 계절의 변화에 따라 식생의 성장이 멈추고 점차 고사하기 시작하는 9월부터 4월까지의 비성장기로 구분하여 일원배치 분산분석(One way ANOVA)으로 5% 유의수준에서 분석하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 지형특성

대평늪의 미지형 및 형상을 파악하기 위하여 측심을 통해 작성한 등수심도는 Fig. 2(b)와 같은데, 유출부의 수심이 유입부보다 더 깊은 것으로 나타났다. 수심이 가장 깊은

곳은 유입구 서편 농경지 인근으로 1.9 m까지 나타났는데, 농경지 관개용수 취수를 위해 습지 가장자리 저층에 투입한 펌프가 작동하면서 펌프주위의 퇴적토가 함께 유입되어 유실되었기 때문인 것으로 판단된다. 이 지점은 하계 식생의 성장기시에도 개방수면을 유지하였고, 생이가래, 개구리밥 등이 일부 서식하였다. 이러한 대평늪의 깊은 수심 분포로 인해 습지 식생의 유형은 부유, 침수식물이 우점하는 특징을 보였다. 또한 습지의 유출부는 광정위어형태의 구조물이 설치되어 있어 일정유량이 항상 저류할 수 있는 구조이며, 퇴적물 유형은 clay로서 지하 유출이 거의 발생하지 않아 체류시간을 증가시킬 수 있는 구조를 유지하였다.

3.2. 수온, pH, DO 변화특성

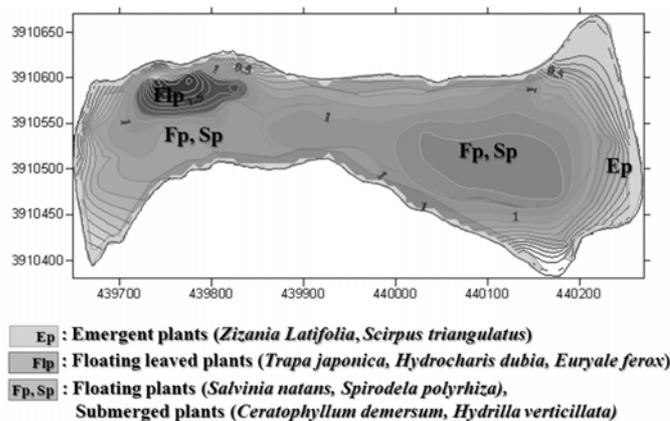
대평늪의 계절별 수온범위는 4.34~28.43°C, pH는 5.29~8.17, DO는 0.51~14.90 mg/L로 나타났는데, 식물 성장기(6~9)와 비성장기(11~4)의 pH, 용존산소 환경이 큰 차이를 보였고 통계적으로도 유의한 차이를 나타내었다. 특히 성장기에는 습지의 용존산소환경이 혐기성이었으며, pH도 약산성을 나타내었다(Fig 3(a)). 이는 습지에 고밀도로 서식하는 수생식물, 부착조류, 미생물, 토양 등의 생물요소들이 소모하는 산소량이 대기로부터 수체로 확산하는 산소량보다 더 많았기 때문인 것으로 판단되는데, 실제 습지의 혐기성 환경은 국내의 인공습지 및 자연습지에서도 일반적으로 나타나는 특징이다(김형철 등, 2008; 함종화 등, 2005; Kadlec and Knight, 1996). 그러나 대평늪과 같이 침수식물이 우점하는 습지의 경우 침수식물의 광합성 활동에 따라 일부 습지환경이 영향을 받을 수 있다.

특히 용존산소의 일간변화는 주간과 야간에 상당한 차이를 보일 수 있으며, 강우나 운량 등 광합성에 영향을 미치는 일사량변화와 같은 기상조건에 민감하게 변화하고, 식물

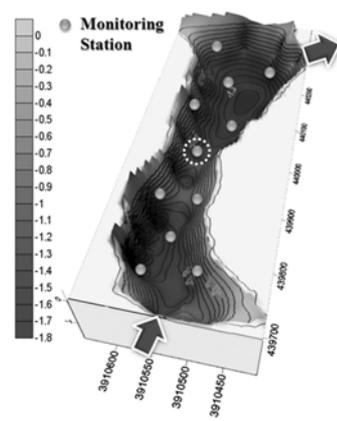
Table 1. Topographical parameters of the Daepyung Wetland

Watershed	Wetland	Depth	Volume	W:L*	Wetland/ watershed area	Sediment type (By USDA)
m ²		m	m ³			
1,448,500	82,547	0.95 (0.5~1.9)	78420	3.3:1	0.057	CLAY

* W:L = width-to-length ratio



(a) Macrophytes distribution map



(b) Bathymetry Map

Fig. 2. Monitoring stations of the Daepyung Marsh.

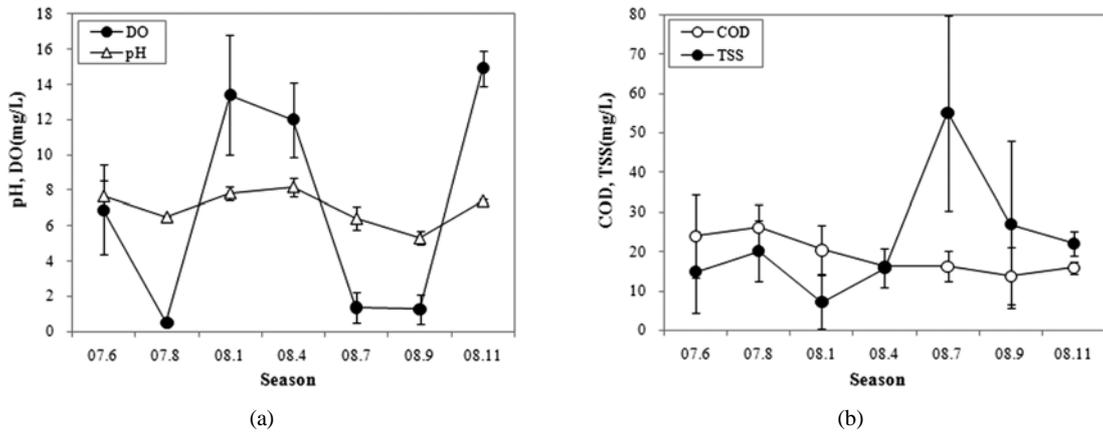


Fig. 3. Seasonal variations of (a) DO, pH and (b) COD, TSS in the Daepyung Marsh.

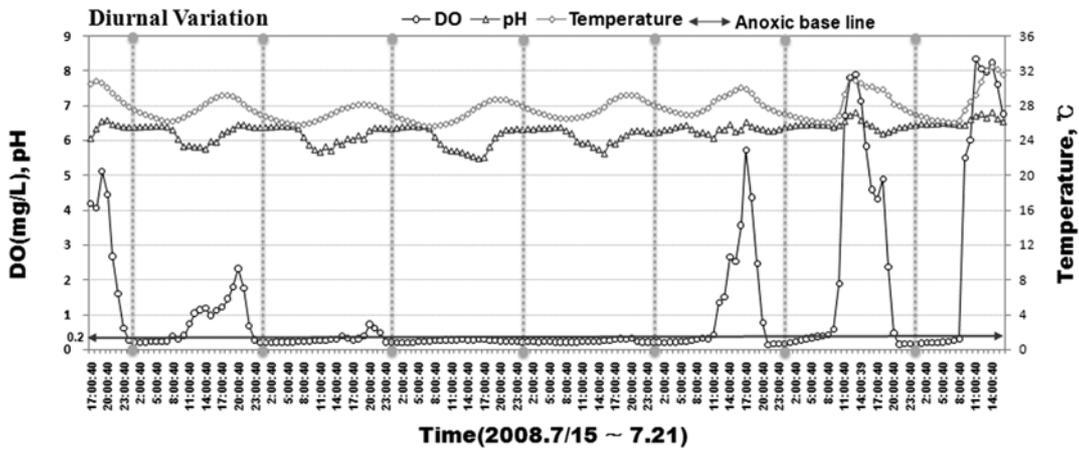


Fig. 4. Diurnal variations of temperature, DO, pH in the Daepyung Marsh during the growing season.

의 광합성 및 호흡작용에 의하여 주기성을 가질 수도 있다. 침수식물에 의한 수질의 주기적 변화상은 Fig. 4에서 잘 관찰할 수 있다. Fig. 4는 2008년 7월 생장기에 Fig. 2의 점선의 원으로 표시한 지점의 표층 10 cm 지점에 현장수질 측정장비(YSI- 6600)를 설치하여 일주일간 5분 간격으로 수온, DO, pH를 측정할 자료를 도시한 것이다. 흐리고 (7/17) 비가 온(7/17~7/18) 경우에 습지내 용존산소 환경은 주·야간에 따른 변화 없이 혐기성 상태를 유지하였고, pH도 5.49~6.89의 범위로 약산성을 나타내어 광합성 작용이 일어나지 않고 식생시스템에 의한 호흡작용만 일어나는 것으로 나타났다. 날씨가 맑을 경우(7/20~22) 식물의 광합성이 활발한 주간에는 DO 농도가 상승하여 호기성 상태를 유지하고 야간에는 다시 혐기성 상태로 변화하는 주기성을 보여주었다. 습지의 오염물질 정화는 습지의 생물 요소와 무생물 환경 자료를 이용하여 하나의 생물학적 반응조로 고려하여 해석할 수 있다(Lee et al., 2009). 특히 습지의 유지유량이 강우시에 크게 의존한 후 비교적 긴 체류시간을 가지며, 비정수생수생식물(부엽, 부수, 침수식물)이 밀식하는 대평늪과 같은 낙동강 하류권역의 자연습지의 경우 식물 생장기에는 호기성과 혐기성이 변동하며 질산화·탈질의 연쇄적 반응에 의해 기질로 사용되는 유기물질과 질

소를 효과적으로 처리할 수 있는 자연적 SBR(Sequential Batch Reactor) 및 A₂O(Anaerobic-Anoxic-Oxic)처리공정과 유사한 기능을 수행하는 것으로 판단된다.

3.3. SS, COD 변화특성

TSS 농도는 평균 23.14 mg/L(7.17~55.10 mg/L)로 나타났다, 계절별 변화는 생장기에 높고 비생장기로 갈수록 낮아지는 경향을 보였다(Fig. 3(b)). 이는 비생장기에 강수량이 적고 습지로 유입하는 유량이 하절기에 비하여 매우 적어 체류시간이 증가하는 습지수문학적 요인과 오염물질의 유입이나 SS에 영향을 줄 수 있는 입자성 부유 detritus나 조류 등의 발생이 감소하기 때문으로 판단된다.

COD는 평균 18.95 mg/L(13.77~26.15 mg/L)로 나타났다. 일반적으로 국외의 자연습지의 유기물농도가 COD~100 mg/L, BOD~5 mg/L, TOC~40 mg/L의 농도를 보이는 것으로 보고된 바 있어(Kadlec and Knight, 1996), 대평늪의 경우 이들보다 COD 농도가 낮았다. 대평늪의 COD 계절 변화를 살펴보면(Fig. 3(b)) 생장기에 농도가 높았는데, 이는 생장기에 강우에 의한 오염물질의 유입이 가장 많으며, 습지내부기원 생물량 또한 증가하기 때문인 것으로 판단된다. 생물기원 유기물질은 습지내에서 식물이나 미생물의 성

장·고사·분해 작용을 통해 습지에서 순환하게 된다. 동계의 낮은 COD 농도는 습지의 유입유량이 강우에 의존하고, 연속적이지 않아 체류시간이 증가하여 나타난 것으로 판단된다. Park 등(2008)은 국내 하수처리장 유출수가 유입하는 인공습지의 DOC처리효율을 평가하였는데, 처리효율이 낮거나 음의 처리효율을 나타내었고, 그 원인은 습지 토양의 유기물용출과 습지식물 분해에 의한 것으로 추정된다고 보고한 바 있다. 이들은 이온교환수지를 이용한 유기물 성장분류를 통해 여름철 습지 유출수에는 유기물질 중 친수성(Hydrophilic)성분이 증가하고, 겨울에는 소수성(Hydrophobic)성분이 증가하고 친수성성분이 감소하는 것을 발견하였다. 하지만 대평늪과 같은 낙동강 유역의 저류형습지의 경우 강우 특성상 겨울철에 유출되는 경우는 극히 적기 때문에 겨울철 소수성 유기물질의 유출 가능성은 낮을 것으로 판단된다. 습지에서 정확한 유기물의 기원 및 제거 기작을 파악하기 위해서는 COD나 BOD와 함께 TOC(DOC)와 유기물 성상을 분석할 필요가 있다.

3.4. TN 변화특성

대평늪의 계절별 TN 변화범위는 1.12~2.07 mg/L로 평균 1.46 mg/L이었으며, Fig. 5(a)와 같이 성장기에 높고 비생장기에 낮은 경향을 보였다. 총질소의 대부분이 유기질소의 형태(>75 %)로 존재하였다.

용존무기질소의 경우 성장기에는 암모니아성 질소의 농도가 높게 나타나고 질산성질소의 농도는 낮게 나타난 반면, 비생장기에는 질산성질소의 농도가 상대적으로 높았다. 일반적으로 국외 자연습지에서는 유기질소의 농도가 1~2 mg/L 정도이며, 이들 대부분이 습지내 생물의 분해에 의한 것이라고 보고된 바 있다(Kadlec and Knight, 1996).

유기질소는 미생물에 의한 암모니아화 과정을 통해 최종적으로 암모니아성 질소가 된 후 식물에 의하여 흡수되거나 호기성 상태에서는 질산화 과정을 통하여 질산성 질소로 변환된다. 암모니아화 반응은 호기성환경일수록 빠르게 일어나지만 산소환경의 변화로 호기성 미생물군에서 통성 혐기성 또는 절대 혐기성 미생물군으로 전환되면 반응속도가 감소하게 된다(Lee et al., 2009; Reddy and Patrick, 1984; Vymazal, 2007).

암모니아성 질소의 경우 습지식물이 선호하는 형태이며, 성장기 용존산소가 희박한 혐기성환경에서는 미생물에 의한 질산화반응이 일어나지 않는다. 외부로부터 직접적인 질

소 공급이 적은 습지의 경우 성장기에 식물이 성장하는데 필요한 질소를 공급하는데 한계가 있게 되며, 수중에 존재하는 대부분의 암모니아성 질소는 식물 성장에 이용되어 수중 농도가 0.05~0.1 mg/L의 수준으로 감소한다(Kadlec and Knight, 1996).

본 연구대상 습지인 대평늪도 직접적인 하천수의 유입이 적은 수문특성을 가지며, 성장기에 암모니아성질소의 농도가 평균 0.136 mg/L(0.001~0.538 mg/L)으로 식물에 의한 흡수 및 혐기성환경으로 인한 제한적인 질산화반응에 의해 농도가 낮은 것으로 판단된다(Table 2). 비생장기의 경우 평균 0.030 mg/L(0.001~0.169 mg/L)로 성장기에 비해 농도가 낮았고, 통계적으로도 유의한 차이를 나타내었다. 이는 성장기와 비생장기의 용존산소환경 차이에 의한 것으로 판단되며, 비생장기에 질산성 질소의 농도가 증가하는 것을 볼 때 질산화반응에 의한 암모니아성질소의 농도 감소와 식물흡수 및 탈질반응의 감소가 주요 원인일 것으로 판단된다.

질산성질소는 성장기에 평균 0.046 mg/L(0.001~0.410 mg/L), 비생장기에는 평균 0.047 mg/L(0.001~0.473 mg/L)로 나타났다. 계절에 따른 변화는 통계적으로 유의한 차이를 보이지 않았으나, Fig. 5와 같이 성장기에 낮은 농도를 나타내고, 비생장기에 높은 농도를 나타내는 경향을 보였다. pH 환경과 질산화반응 및 탈질반응 여부가 이러한 계절간 질산성질소의 농도변화에 영향을 미친 것으로 판단된다.

Cooper 등(1996)은 질산화반응에 관여하는 *Nitrosomonas*와 *Nitrobactor*의 성장에 필요한 최소 온도가 각각 5°C, 4°C라고 보고하였고, Paul and Clark(1996)은 질산화반응의 적정 pH 범위가 6.6~8.8이라고 보고하여 질산화가 온도와 pH의 영향을 받음을 보여주었다. 수온과 pH 외에도 질산화반응에는 알칼리도, 무기탄소원, 미생물군집, 암모니아성 질소와 용존산소 농도 등이 복합적인 영향을 미치게 된다(Vymazal, 1995). Lee 등(2009)은 질산화반응은 산소를 많이 소모하는 과정이며, 3.16 mg O₂/mg NH₄-N, 1.11 mg O₂/mg NO₂-N의 산소가 각 질산화반응 단계에서 소모된다고 제시하였다. 또한, 질산화 반응시 7.07 mg CaCO₃/mg NH₄-N의 알칼리도가 소모되며, 질산화에 따른 알칼리도 감소는 수중의 pH를 감소시켜 수중의 pH가 7.0 이하가 되면 질산화속도가 빠르게 감소한다고 언급하였다.

대평늪의 경우 성장기에 pH 범위가 4.65~9.10(평균 6.55±1.07)으로 나타났고, 8일간 pH 연속측정자료에서도 5.46~6.80(평균 6.24±0.27)의 범위로 나타나 질산화반응속도에

Table 2. Seasonal comparison of nutrient concentrations in the Daepyung Marsh during the growing season (n=42) and the winter season (n=24)

mg/L	DO		pH		NH ₄ ⁺ -N		NO ₂ ⁻ -N		NO ₃ ⁻ -N		TN		TP		PO ₄ ³⁻ -P	
	Growing	Winter	Growing	Winter	Growing	Winter	Growing	Winter	Growing	Winter	Growing	Winter	Growing	Winter	Growing	Winter
Min	0.513	11.985	5.294	7.397	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.643	0.866	0.043	0.007	0.002	0.004
Max	6.894	14.904	7.652	8.174	0.538	0.169	0.013	0.002	0.410	0.473	3.571	2.140	0.411	0.780	0.181	0.122
SD	2.947	1.460	0.963	0.389	0.149	0.041	0.002	0.000	0.082	0.102	0.541	0.333	0.080	0.154	0.051	0.042
Mean	2.511	13.430	6.464	7.797	0.136	0.030	0.002	0.001	0.046	0.047	1.572	1.444	0.135	0.157	0.045	0.040
p-value	0.000*		0.000*		0.001*		0.172		0.947		0.300		0.429		0.735	

* : Significantly different at α=0.05 level

영향을 미칠 수 있을 것으로 판단된다. 그러나 성장기에 질산성질소의 농도가 낮은 것은 Fig. 4에서 보는 바와 같이 주기적인 호기성 및 혐기성(또는 무산소) 조건의 변화에 의한 탈질반응으로 질소가 영구적으로 제거되었을 가능성과 우점하고 있는 습지식물에 의하여 흡수되었을 가능성이 매우 높다. 또한 상대적으로 최근의 습지내 혐기성 및 낮은 용존 산소 환경의 질소제거 기작으로 보고된 바 있는 Nitrate Ammonification($\text{NO}_3^- \rightarrow \text{NH}_4^+$), Partial Nitrification-Denitrification($\text{NO}_2^- \rightarrow \text{N}_2\text{O}$, N_2), Anammox(Anaerobic ammonium oxidation : $\text{NH}_4^+ \rightarrow \text{N}_2\text{O}$, N_2)반응 등의 영향도 고려해보아야 할 것으로 판단된다(Vymazal, 2007). 독특한 수문 및 식생구조를 갖는 대평늪의 경우 식물 성장기에 습지의 질소제거에 기여하는 질산화·탈질기작에 대한 연구를 추가적으로 진행할 필요가 있는 것으로 보인다.

3.5. TP 변화특성

습지내 TP의 계절적 변화는 성장기의 경우 평균 0.135 mg/L(0.043~0.411 mg/L), 비성장기의 경우 평균 0.157 mg/L(0.007~0.780 mg/L)로 나타났다(Table 2). 계절별로 통계적으로 유의한 차이는 나타나지 않았으나, Fig. 5(b)에서 알 수 있듯이 봄철의 높은 TP 농도는 동계에 고사했던 식생이 분해되지 않고 있다가 4월부터 수온이 증가함에 따라 미생물활동이 활발해지고, 식생의 분해가 시작되면서 수층으로 방출된 것으로 판단된다. 이후 식생 및 조류 등이 성장하면서 수층으로 유리된 인산염을 이용하기 때문에 7, 9, 11월로 갈수록 감소하는 경향을 보이는 것으로 판단된다. 식물에 의한 인의 흡수는 성장기가 시작될 때 가장 많으며, 최대 성장률에 도달할 때까지 흡수하는 것으로 알려진 바 있다(Vymazal, 1995). 습지수체에서 인의 변환은 토양 축적, 흡착/탈착, 침전·용해, 식물·미생물흡수, 분열, 침출, 광물화 및 영구토로의 변환 등이 있으며, 이중 인 제거기작은 주로 수착, 침전, 식물흡수, 퇴적물 부착에 의해 일어나는 것으로 알려진 바 있다(Richardson and Marshall, 1986; Verhoeven, 1986). 따라서 습지 모니터링 시에는 토양의 토성, 유기물 및 부식질 함량, 토양공극수의 농도 등을 파악해 볼 필요가 있을 것으로 판단된다.

4. 결론

본 연구는 낙동강 수계 하류권역에 있는 배후습지인 경남 함안군 대평늪을 대상으로 습지의 특성과 2007년 6월부터 2009년 4월까지 약 2년간 자연습지를 모니터링한 연구이며 연구결과를 요약하면 아래와 같다.

- 1) 대평늪의 지형특성 조사결과 인공습지에 비해 평균 수심이 0.97(0.5~1.9) m의 범위로 깊은 수심 분포를 가지고 종횡비가 3.3:1로 나타났고, 이로 인한 식생유형의 차이도 나타났다. 습지로 유입하는 유량은 강우에 크게 의존하였고, 습지유출부의 저류구조물은 습지가 일정유량을 유지할 수 있는 형태이며, 습지 토양은 Clay로 지하 유출이 발생하지 않아 강우 시 유입된 유량을 효과적으로 저류하고 체류시간을 증가시킬 수 있는 형상을 유지하였다.
- 2) 대평늪의 pH, DO의 변화특성 분석결과 성장기와 비성장기에 각각 혐기성과 호기성을 유지하는 것으로 나타났다. 일간변화에서는 날씨가 흐리거나 비가 내리는 경우에는 주·야간 변화없이 혐기성상태를 나타내었고, 날씨가 맑을 경우 주간에는 DO가 상승하여 호기성을 유지하며 오후 2시경에 7~8 mg/L 침투 농도를 나타내고 이후 급격히 감소하여 야간에는 1 mg/L 이하로 다시 혐기성상태로 변화하였다. 성장기의 pH는 4.65~9.10의 범위로 평균 6.55로 나타났고, 일간변화자료에서는 6이하를 나타내었다. 혐기성환경과 낮은 pH는 습지의 질산화반응의 진행에 불리한 환경으로 작용할 수 있음을 보여주었다.
- 3) 대평늪의 계절에 따른 COD변화는 성장기에 높고 비성장기에 낮은 농도를 나타내었으며 성장기의 높은 농도는 습지내부기원의 생물량 증가로 인한 것으로 판단되며, 동계는 습지로의 유입부하가 없고 유출부 저류구조물로 인한 체류시간 증가에 의한 것으로 판단된다. 습지내부의 유기물기원 및 제거기작을 모니터링하기 위해서는 TOC(DOC) 및 유기물성상을 분석하는 것이 효과적일 것으로 판단된다.
- 4) 대평늪의 계절에 따른 TN의 변화는 성장기에 증가하고

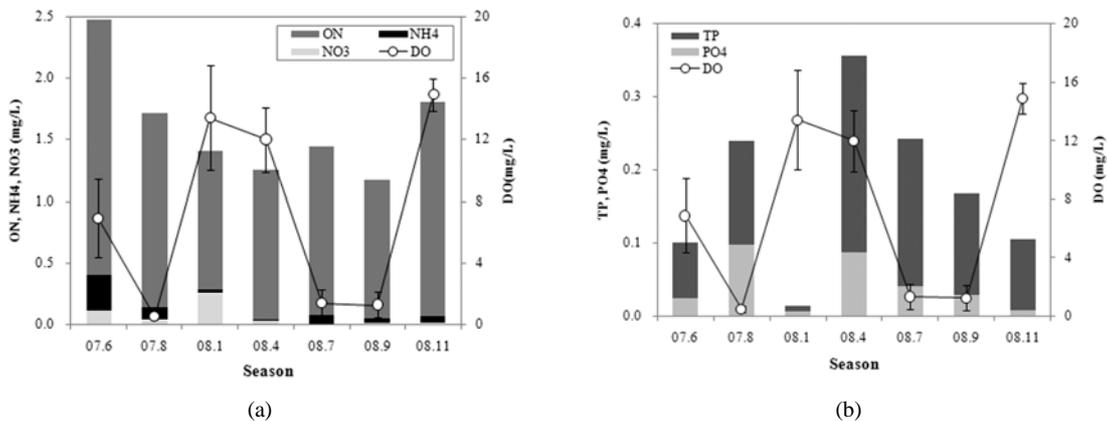


Fig. 5. Seasonal variations of (a) N species and (b) P species in the Daepyung Marsh.

비생장기에 감소하는 경향을 보였으며, 총질소의 75% 이상이 유기질소의 형태로 존재하는 것으로 나타났다. 용존무기질소의 경우 성장기에는 암모니아성질소, 비생장기에는 질산성질소의 농도가 높았다. 이것은 DO와 pH환경의 변화에 의한 것으로 판단되는데, 특히 성장기 시에는 혐기성환경과 낮은 pH의 영향으로 질산화 및 탈질화 반응이 제한적일 것으로 판단된다.

- 5) 대평늪의 계절에 따른 TP의 변화는 고사한 식생이 미생물에 의해 활발히 분해되기 시작하는 4월에 가장 높았으며, 식생이 최대성장예 이를 때까지 감소하는 경향을 나타내어 습지 식물의 성장에 영향을 많이 받는 것으로 나타났다. 비생장기인 1월에 농도가 가장 낮았는데, 이는 흙작·침전 및 긴 체류시간에 기인하는 것으로 판단된다.

사 사

본 연구는 2008년도 교육과학기술부와 한국산업기술재단의 지역혁신인력양성사업과 한국과학재단의 이공계대학원 연구장학생 지원사업의 지원에 의해 수행되었으며 이에 감사드립니다.

참고문헌

고지연, 강항원, 이재성, 김춘송, Sakadeven, K., Bavor, H. J. (2003). 소수계 유역 인공습지에서 식생밀도 차이에 따른 영양염류 제거효율. *한국환경농학회지*, **22**(4), pp. 266-272.

김영윤, 김진이, 이광섭, 성기준, 이석모(2008). 자연습지와 저류형인공습지의 비점오염물질저감효율 비교·평가. *공동 추계 학술발표회논문집*, 한국물환경학회·대한상하수도학회, pp. 37-38.

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

낙동강수계관리위원회(2005). *비점오염물질저감시설 삭감효율 평가·분석(2차년도)*.

박병흔, 남귀숙, 이광식(2001). 수리학적 고부하조건의 인공습지 수처리특성. *수질보전 한국물환경학회지*, **17**(4), pp. 477-484.

부산지역환경기술개발센터(2008). *낙동강하류 부산권역의 저류형습지조성에 관한 연구*.

장정렬, 최선화, 권순국(2007). 식생습지와 개방수역의 배열에 따른 인공습지의 수처리 특성. *수질보전 한국물환경학회지*, **23**(1), pp. 122-130.

정용준(2006). 하수종말처리장 방류수와 비점오염원 처리를

위한 주암호 인공습지 2년 운영 사례. *수질보전 한국물환경학회지*, **22**(6), pp. 1031-1037.

함종화, 윤춘경, 김형철, 구원석, 신현범(2005). 식생피도가 인공습지의 질소 및 인 처리효율에 미치는 영향과 습지 식물의 조성 및 관리. *육수학회지*, **38**(3), pp. 393-402.

환경부(2006). *물환경관리기본계획*.

APHA (2005). *Standard Methods for the examination of water and wastewater* (21 th edition). American Public Health Association, Washington, D.C., USA.

Blackwell, M. S. A., Hogan, D. V., and Maltby, E. (2002). Wetlands as regulators of pollutant transport. In: P. M. Haygarth and S. C. Jarvis (eds.), *Agriculture, hydrology and Water Quality*. CAB International, pp. 322-339.

Costanza, R., Darge, R., Degroot, R., Farber, S., Grasso, M., Hannon, B., Limburg, K., Naeem, S., Oneill, R. V., Paruelo, J., Raskin, R. G., Sutton, P., and Vandenbelt, M. (1997). The value of the world's ecosystem services and natural capital. *Nature*, **387**, pp. 253-260.

Cooper, P. F., Job, G. D., Green, M. B., and Shutes, R. B. E. (1996). *Reed beds and constructed wetlands for wastewater treatment*. Medmenham, Marlow, UK: WRc Publicatins. pp. 184.

Kadlec, R. H. and Knight, R. L. (1996). *Treatment Wetland*, CRC press, FL.

Lee, C. G., Fletcher, T. D., and Sun, G. (2009). Review : Nitrogen removal in constructed wetland systems. *Eng. Life Sci.*, **9**, pp. 11-22.

Mitsch, W. J. and Gosselink, J. G. (2000). *Wetlands*, 3rd edition. John Wiley and Sons, New York.

Mitsch, W. J. and Jørgensen, S. E. (2004). *Ecological Engineering and Ecosystem Restoration*, John Wiley & Sons, Inc., New York.

Park, N., Kim, J. H., and Cho, J. (2008). Organic matter, anion, and metal wastewater treatment in Damyang surface-flow constructed wetlands in Korea. *Ecol. Eng.*, **32**, pp. 68-71.

Paul, E. A. and Clark, F. E. (1996). *Soil microbiology and biochemistry*. 2nd ed. San Diego, California: Academic Press.

Reddy, K. R. and Patrick, W. H. (1984). Nitrogen transformations and loss in flooded soils and sediments. *CRC. Crit. Rev. Environ. Control.*, **13**, pp. 273-309.

Richardson, C. J. and Marshall, P. E. (1986). Processes controlling movement, storage, and export of phosphorus in a fen peatland. *Ecol. Monogr.*, **59**, pp. 279-302.

Verhoeven, J. T. A. (1986). Nutrient dynamics in minerotrophic peat mires. *Aquat. Bot.*, **25**(1), pp. 17-37.

Vymazal, J. (1995). *Algae and Element Cycling in Wetlands*. Chelsea, Michigan: Lewis publisher.

Vymazal, J. (2007). Removal of nutrients in various types of constructed wetlands. *Sci. Total Environ.*, **380**, pp. 48-65.