한국습지학회지 제12권 제2호, 2010년 8월 (59 - 65)

수심의 정도와 식생의 유무에 따른 인공습지 토양 내 유기탄소와 질산염의 공간적 분포

서 주 영* / 송 근 예** / 강 호 정***+

Influences of Water Level and Vegetation Presence on Spatial Distribution of DOC and Nitrate in Wetland Sediments

Juyoung Seo* / Keunyea Song** / Hojeong Kang***+

요약 : 습지는 식생과 수위 정도에 따라 다양한 물리 화학적 특성을 보이는 생태계로 작은 공간내에서도 다양한 생지화학적 반응이 일어날 수 있다. 특히, 용존유기탄소와 무기질소는 습지 내 생물학적 반응 정도를 결정하는 주요 인자로 탄소와 질소의 동태를 파악하고, 습지 환경의 변화 즉, 식생과 수위 및 계절변화에 따른 시공간적 패턴을 이해하는 것이 중요하다. 본 연구는 실험을 위해 인공적으로 건설, 운용되고 있는 인공습지에서 식생유무와 수심정도, 계절에 따라 토양시료를 채취, 분석하였다. 그 결과, 용존유기탄소와 질산염의 함량이 식생이 있는 지역에서 모두 높게 나타났다. 용존탄소는 식생이 있는 경우, 수심이 깊은 지역에서는 평균 0.37 $mg \cdot g^{-1}$, 수심이 낮은 지역에서는 0.31 $mg \cdot g^{-1}$로 나타나 수위 정도에 따라 차이를 보였다. 이는 식생에서 제공되는 뿌리 삼출물의 증가와, 미생물의 유기물 분해작용의 복합적인 영향에 의한 것으로 판단된다. 반면, 질산염 함량은 수심에 따라 유의한 차이를 나타내지 않았으며, 이는 식생의 유무가 수심보다 질산염의 동태에 주요 영향을 미치는 것으로 볼 수 있다. 본 연구결과, 습지의 환경조건, 특히 수심이나 식생의 유무에 따라 탄소와 질소의 양적, 질적인 차이가 나타나며, 이는 습지 내에서 진행되는 생지화학적 반응의 시공간적 패턴에 영향을 미칠 것으로 보인다.

핵심용어 : 수위, 식생, 용존유기탄소, 무기질소, 인공습지

Abstract : Wetlands are a well known ecosystem which have high spatial-temporal heterogeneity of chemical characteristics. This high heterogeneity induces diverse biogeochemical processes, such as aerobic decomposition, denitrification, and plant productivity in wetlands. Understanding the dynamics of dissolved organic carbon (DOC) and inorganic nitrogen in wetlands is important because DOC and inorganic nitrogen are main factors controlling biological processes in wetlands. In this study, we assessed spatial distribution of DOC and inorganic nitrogen with relation to the different hydrology and vegetation in created wetlands. Both DOC and nitrate contents were significantly higher in vegetated areas than open areas. Different water levels also affected DOC contents and their quality. Average DOC contents were 0.37 $mg \cdot g^{-1}$ in deep riparian (DR) and 0.31 $mg \cdot g^{-1}$ in shallow riparian (SR). These results appeared to be related to the interaction between carbon supply by vegetation and microbial decomposition. On the other hand, inorganic nitrogen contents were not affected by water level differences. This result indicates that presence/absence of vegetation could be a more important factor than hydrology in the spatial dynamics of inorganic nitrogen. In conclusion, we observed that vegetation and hydrology differences induced spatial distribution of carbon and nitrogen which are directly related to biogeochemical processes in wetlands.

Keywords : *hydrology, vegetation, dissolved organic carbon (DOC), inorganic nitrogen, created wetland*

+ Corresponding author : hj_kang@yonsei.ac.kr
* 비회원 · 연세대학교 사회환경시스템 공학부 토목환경공학과 석사과정
** 비회원 · 연세대학교 사회환경시스템 공학부 토목환경공학과 박사후 연구원
*** 정회원 · 연세대학교 사회환경시스템 공학부 토목환경공학과 조교수

1. 서 론

습지에서는 다양한 생지화학적 반응과 물질 순환이 일어나는데, 특히 용존유기탄소 (DOC; Dissolved Organic Carbon)와 무기 질소의 동태는 큰 중요성을 갖는다. 용존유기탄소는 0.45 μm 필터를 통과하는 모든 유기탄소를 말하는 것으로, 탈질 기작 등 미생물을 비롯한 이차생산에 있어서 주요한 탄소 공급원이다(Song *et al.*, 2010; Paul and Clark, 1996). 습지는 식물과 조류의 사체 분해과정을 통해 다양한 형태의 DOC를 생산하며 특히 북구이탄습지의 경우에는 매우 중요한 DOC 생산처로 알려져 있다(Kang 등, 2002; Freeman 등, 2004). DOC의 연구에 있어서 절대적인 양 뿐 아니라 그 구성성분도 매우 중요한데, 그 이유는 DOC 구성성분들의 화학적 특성이 매우 상이하기 때문이다. 예를 들어, Specific Ultraviolet Absorbance (SUVA)와 같은 수치는 용존유기탄소의 탄소결합 불포화 정도를 DOC에 대한 자외선흡광도로 나타낸 값으로서, 미생물이 이용하기 어려운 복잡한 방향족 탄화수소의 상대적인 양을 나타내는 값이다(Chin *et al.*, 1994; USEPA, 2005). 이러한 수치를 통해서 습지 내나 수체로 흘러들어간 DOC가 얼마나 쉽게 분해되고 이용될지를 예측할 수 있다.

질산염을 대표로 하는 무기 질소는 다양한 생태계의 제한 요소로 작용한다. 예를 들어, 하구나 일부 습지의 경우 일차 생산성이 무기질소의 공급량에 의해 결정되는 경우가 많다. 습지에서는 이러한 질산염이 제거되기도 하는데, 대표적인 기작은 통성혐기성 미생물에 의해 혐기적 조건에서 일어나는 탈질(Denitrification) 반응이다(Knowles, 1982; Tiedje, 1988).

습지는 규모가 작은 경우에도 매우 다양한 물리화학적 공간 이질성을 보인다. 즉 식생이 균일하게 분포하는 경우는 거의 없고 육상에서 수체 중앙부로 이동하면서 나타나는 수위의 차이에 의해 매우 다양한 화학적 특성이 관찰된다. 수위가 깊은 부분은 산소의 공급이 제한되므로 일반적으로 낮은 산화환원전위를 나타내게 된다(Mitsch and Gosselink, 2007). 습지 환경의 또 하나의 중요한 조절 요인은 식생의 존재 여부와 종류이다. 습지 식물은 낙엽과 낙지를 통해 습지에 유기탄소를 공급하는 역할을 하며 뿌리를 통해 영양염류를 흡수하기도 하고 산소를 공급하는 역할을 담당하기도 한다. 따라서 하나의 습지 내에서도 수위, 식생의 유무 등에 따라 매우 이질적인 환경이 나타날 수 있다(Degens *et al.*, 2001; Wallenstein *et al.*, 2006). 따라서 습지 내에서 일어나는 용존유기탄소나 무기 질소의 동태를 정확히 이해하기 위해서는 습지 내의 수위 변화와 식생의 유무에 따라 이들이 어떻게 변화할지를 이해하는 것이 매우 중요하다.

본 논문에서는 자연습지를 모사하여 건설된 인공습지 내에서 식물 성장기 동안 토양 내에서 일어나는 용존유기탄소의 양과 화학적 특성, 그리고 질산염의 변화 양상을 측정하고 이것이 수위 변화 양상, 식생의 유무, 온도와 같은 계절적 변이에 의해 어떤 영향을 받게 되는지를 살펴보았다.

2. 재료 및 방법

2. 1 조사지역 및 기간

대상습지는 미국 오하이오주 오하이오 주립대학 (Ohio State University) 내에 실험을 목적으로 1994년 건설된 Olentangy River Wetlands이다. 습지면적은 약 20,000m^2, 유입수가 주변의 3차하천인 Olentangy River로부터 공급되며, 식생은 *Phragmites australis, Typha latifolia*가 우점한다. 화학 분석을 위한 습지토양 채취는 2008년 4월부터 10월까지 매달 수행하였으며, 용존유기탄소(Dissolved Organic Carbon; DOC), 자외선흡광도비(Specific Ultraviolet Absorbance; SUVA), 질산염(Nitrate)의 농도를 측정하였다.

2. 2 실험방법

2.2.1 조사지 개요와 시료 채취

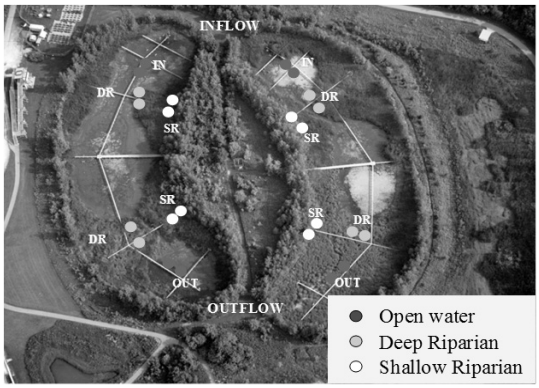

Fig. 1. Sampling points in the two created Olentangy River Wetlands. IN and OUT represent the inflow and outflow open water areas while DR and SR represent the deep water level and shallow water level riparian areas(송, 2009).

습지의 환경에 따라 물질분포의 다양성이 있을 것으로 예상되어, 식생의 유무와 수심의 차이에 따른 습지토양 내 물질의 공간적 분포를 확인하였다. 식생의 유무에 따른 영향을 확인하기 위해, 수체의 흐름에 따라 습지가 시작되는 유입지 부근의 식생이 있는 곳(Riparian)과 없는 곳(Open), 습지가 끝나는 배출지 부근에서 식생이 있는 곳과 없는 곳에서 모두 채토하였으며, 결과는 평균값을 사용하였다.

수심의 차이에 따른 영향을 확인하기 위해, 유입지 부근과 배출지 부근 각각 식생이 있는 지역 중 수심의 차이가 있는 곳을 선정하였다. 수심이 10~20cm 범위로 나타나는 지역(Deep Riparian; DR), 수심이 10cm 이하로 나타나는 지역(Shallow Riparian; SR)으로 구분하여 채토하였으며, 결과는 평균값을 사용하였다. 각 지점에서 2개씩 습지저토의 표층 5cm 깊이에서 채토하였으며, 시료는 화학분석 전까지 냉장 보관하였다.

2.2.2 용존유기탄소와 자외선흡광도비

토양시료의 DOC를 물로 추출하여 0.45μm 필터로 여과한 후, TOC (Total Organic Carbon meter) 분석기(TOC-V, shimadzu)로 분석하였다. $mg \cdot L^{-1}$ 단위로 측정한 후, 토양 건조중량 1g당 유기탄소의 중량(mg DOC·g $soil^{-1}$, 이후 $mg \cdot g^{-1}$)으로 환산하여 결과로 나타내었다. 용존유기탄소의 화학적 특성을 알아보기 위해 자외선흡광도비(Specific Ultraviolet Absorbance; SUVA)를 결정하였다. 이를 위하여 용액을 흡광광도계로 452nm의 파장에서 측정한 후 이 값을 그 용액의 DOC 농도로 나누어 $m^{-1} \cdot mg^{-1} \cdot L$ 단위로 나타내었다(USEPA, 2005).

2.2.3 질산염

습지토양의 특성상 미세한 입자가 많고 이온 추출 후 여과가 어려워 간단한 여과장치와 적은 양의 여과액으로도 실험이 가능한 발색법을 이용하여 측정하였다. 습지토양을 K_2SO_4로 용출한 후 살리실산 황산용액, NaOH로 발색 하고 410nm에서 흡광도를 측정하였다(Anderson and Ingram, 1989; Jang et al., 2006). 표준용액으로는 KNO_3를 이용하여, 토양 건조중량 1g당 질산성 질소의 중량(μg N as NO_3^-·g $soil^{-1}$, 이후 $\mu g \cdot g^{-1}$)으로 환산하여 결과로 나타내었다.

2.2.4 통계처리

식생유무와 수위차이에 의한 습지 내 물리화학적 특성의 영향을 비교, 확인하기 위하여 one way ANOVA test 를 SPSS ver.15를 각각 이용하였다. 또한 통계적 유의성은 $P<0.05$, $P<0.01$의 단계로 구분하여 표시하였다.

3. 결과 및 토의

3.1 식생의 영향

실험 결과, DOC, SUVA, 질산염 함량이 식생이 있는 지역(수심 10~20cm)에서 식생이 없는 지역(Open water)보다 모두 높은 것으로 나타났다. DOC 함량은 조사기간 전체에 걸쳐서는 유의

한 차이가 없었으나, 특히 7월에서 9월 사이에는 식생이 있는 지역의 DOC 함량이 식생이 없는 지역보다 0.09-0.21 $mg \cdot g^{-1}$의 범위만큼 높게 나타나, 전체 평균값은 식생이 있는 지역의 DOC 함량이 0.08 $mg \cdot g^{-1}$ 더 높았다(그림 2의 (a)). 식생의 생장과 물질대사가 활발하다 볼 수 있는 여름(7월~9월)에 식생이 있는 지역의 토양 DOC 함량이 높게 측정된 것은, 식생에서 제공되는 뿌리 삼출물의 증가와 초가을에 낙엽이 분해되면서 공급되는 유기물 분해 산물에 기인하는 것으로 추정된다. 이렇게 DOC가 증가하는 것은 이 시기에 탈질을 비롯하여 다양한 습지의 기능이 식생이 있는 지역에서 활발히 일어날 수 있을 것이라는 점을 의미한다. 습지 토양 내의 DOC양의 변화는 식생의 분포, 활성, 낙엽의 생산과 분해와 같이 식물이 매개된 반응에 따라 크게 영향을 받는 것으로 알려져 있다(Lawson, 1985; Wetzel, 1992). 본 연구의 결과도 인공습지에서 토양 내 DOC의 분포에 식생의 존재 유무와 생장이 큰 영향을 미친다는 것을 의미한다.

DOC에 대한 방향족 탄소의 비율을 나타내는 SUVA 값은 통계적으로 유의하지는 않았으나 (P≈0.11), 식생이 있는 지역에서 높은 경향을 보였다. SUVA의 전체 평균값은 식생지대에서 0.17$m^{-1}mg^{-1}L$ 더 높았다. 그러나 SUVA의 계절적 패턴은 나타나지 않았다 (그림 2의 (b)). 습지 토양 내에 존재하는 유기탄소는 난분해성 물질이 주를 이룬다. 쉽게 대사가 가능한 단당류 등은 토양 내 미생물에 의해 매우 빠르게 대사되며, 식물에서 유래한 페놀릭 계열의 물질이나 유기물 분해 과정에서 산물로 생성되는 휴믹산 계열의 물질들이 유기탄소의 다수를 차지한다(Sarkaner 와 Ludwing., 1971). 수체 내에 존재하는 조류에서 유래한 분비물이나 분해 산물은 상대적으로 분해가 어려운 다당류로 구성되어 있으나, 역시 수생식물에서 유래한 목질계 낙엽 혹은 낙지나 뿌리 삼출물에 비해 분해성이 높은 물질이다(Sarkaner와 Ludwing., 1971; Tareq *et al.*, 2004). 본 연구지에서 식생이 있는 지역에서 SUVA가 높은 평균값을 보인 것은 습지에 존재하는 식생이 습지에 공급되는 유기탄소의 질에도 큰 영향을 미칠 수 있다는 것을 의미한다.

NO_3^- 함량은 식생이 있는 지역에서 유의하게 높게 측정되었으며(P<0.05), 계절적인 경향 없이 시료채취기간 전반적으로 높았다. 식생이 있는 지역에서 없는 지역보다 질산염 함량이 평균 0.82 $\mu g \cdot g^{-1}$ 더 높았다 (그림 2의 (c)). 질산염의 농도가 높게 나타나는 것은 질산화율이 높거나, 탈질이 상대적으로 적게 발생했음을 의미한다. Kang 등 (2009)이 한강 하구 습지에서 보고한 바에 따르면 하변의 질산염 농도가 수체에 바로 인접한 저토에 비해 높은 것으로 나타났다. 이것은 하변의 경우 물에 잠기는 기간이 매우 짧고 호기적인 조건이라 탈질이 적게 일어나고, 대신 질산화가 왕성하기 때문으로 추정하였다. 또한 토양이 물에 잠기는 습지에서는 수심이 깊어짐에 따라 대기의

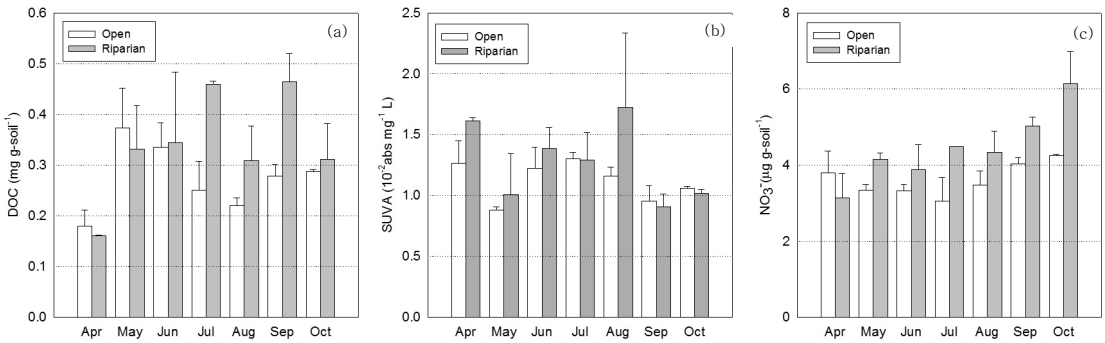

Fig. 2. 식생 유무에 따른 DOC (a), SUVA (b), 질산염 (c) 농도의 변화 양상

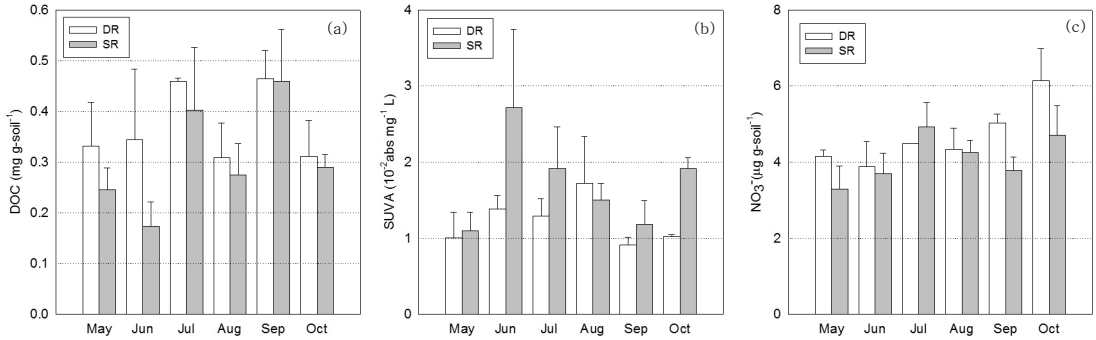

Fig. 3. 수위에 따른 DOC (a), SUVA (b), 질산염 (c) 농도의 변화 양상

산소가 차단되어 혐기 조건이 나타날 수 있는데, 수심이 유사하게 깊은 곳에서는(10~20cm) 식생이 존재할 때, 그 뿌리를 통해 산소가 공급되어 호기성 조건이 형성되고 낮은 탈질과 높은 질산화로 토양의 질산염 함량이 더 높아지는 것으로 생각된다. 본 연구에서도 이러한 탈질량의 차이와 더불어 식생뿌리 부근에서 유기 질소의 분해가 더 높게 일어나는 것도 한가지 원인으로 추정된다. 실제 침수지역임에도 불구하고 식생이 존재하는 지역에서 질산화율이 높게 측정, 보고되었다 (Sundberg *et al.*, 2007; Tao *et al.*, 2007; 송 2009). 향후 식생 유무에 따른 유기질소의 분해율을 측정하면 더 명확한 기작을 규명할 수 있을 것으로 사료된다.

3.2 수심의 영향

DOC 함량은 수심이 깊은 지역(DR)보다 얕은 지역(SR)에서 유의하게 낮은 것으로 나타났다(P <0.05). 5월에서 10월까지의 기간 동안 모두 같은 경향을 보였으며, DR과 SR 사이의 DOC 함량 차이가 매달 0.01~0.17 mg·g^{-1} 범위로, 평균 0.07 mg·g^{-1} 의 차이가 났다 (그림 3). 식생이 존재하는 지역을 수심에 따라 비교해 보면, 수심이 얕은(<10cm) 지역에서 대기에 의한 산소 공급이 원활하여 호기성 미생물에 의한 DOC의 분해가 잘 일어나고, 따라서 토양의 DOC 함량이 낮아진 것으로 사료된다.

SUVA의 경우 유의하지는 않았으나(P=0.12), SR에서 DR보다 높은 경향을 보였다. 이러한 경향을 나타낸 이유는 전술한 바와 같이 식생에 의한 영향 때문으로 사료되는데, 수심이 얕은 지역에 주로 식생들이 존재함으로 인해 SUVA의 값이 높게 나타난 것으로 보인다.

질산염 함량은 수심에 따른 뚜렷한 차이를 나타내지 않았다. 즉 식생의 유무가 토양 내 질산염 분포에는 중요한 역할을 담당하지만 식생이 존재하는 지역끼리, 혹은 식생이 없는 개방수역끼리 비교했을 때는 질산염의 빠른 혼합으로 인해 큰 차이는 나타나지 않은 것으로 사료된다.

4. 결 론

습지의 영양물질 분포에 있어 식생의 존재 여부가 그 패턴에 중요한 역할을 담당하며, 그 양상은 계절적인 요인 등에 따른 식물의 물질대사에 영향을 받을 수도 있다. 습지 토양의 DOC 함량은 식생이 있는 곳에서 높고, 식생이 있을 때는 수심이 얕은 곳에서 낮은 결과를 나타내어, 식생과 수심의 영향을 모두 받는 것으로 보인다. SUVA는 DOC에 대한 상대적인 값으로, 수심별 비교에서는 DOC와 반대의 경향을 보였으나, 식생의 유무에 따른 비교에서는 식생지역의 DOC 함량이 높음에도 불구하고 SUVA 값도 높은 경향을 나타냈다. 이는 SUVA 값이 특히 식생이 존

재할 때 높아짐을 나타낸다. 질산염 함량은 수심보다 식생의 유무에 큰 영향을 받으며, 식생이 존재할 때 높아졌다.

본 연구결과, 습지의 환경조건, 특히 수심이나 식생의 유무에 따라 탄소와 질소의 양적, 질적인 차이가 나타나며, 이는 습지 내에서 진행되는 생지화학적 반응의 공간적 패턴에 영향을 미칠 것으로 보인다. 인공습지 또는 자연습지는 온실기체 흡수 및 저감, 수질 정화를 위한 질산성 질소 제거 등의 목적으로 운용될 수 있는데, 이러한 결과는 목적에 따라 영양물질의 거동을 조절하는 방법론의 근거가 될 것으로 사료된다.

사 사

본 연구는 NRF (2009-0079549), EcoRiver21, EcoSTAR, AEBRC (2010-0001445)의 지원으로 수행되었음.

참 고 문 헌

송근예, Denitrification Process and Denitrifying Bacterial Community Structure in Created Wetlands at Different Scales. 박사학위논문, 이화여자대학교, 2009.

Anderson, J.M. and Ingram, J.S.I., *Tropical soil biology and fertility : A handbook of methods*, CAB International, Wallingford, pp. 74-75, 1989.

Chin, Y.P., Aiken, G., and O'Laughin, E., Molecular weight, polydispersity and spectroscopic properties of aquatic humic substances, Environmental Science and Technology, Vol. 28, pp. 1853-1858, 1994.

Degens, B.P., Schipper, L.A., Sparling, G.P., and Duncan, L.C., Is the microbial community in a soil with reduced catabolic diversity less resistant to stress or disturbance? Soil Biology & Chemistry, Vol. 33, pp. 1143-1153, 2001.

Freeman, C., Fenner, N., Ostle, N., Kang, H., Dowrick, D., Reynolds, B., Lock, M., Sleep, D., Hughes, S. and Hudson, J., Export of dissolved organic carbon from peatlands under elevated carbon dioxide levels, Nature, Vol. 430, pp. 195-198, 2004.

Jang, I., Lee, S., Hong, J.-H. and Kang, H., Methane oxidation rates in forest soils and their controlling variables: a review and a case study in Korea. Ecological Research, Vol. 21, pp. 849-854, 2006.

Kang, H., Lee, S-H., Lee, S-M., and Jung, S., Positive relationships between phenol oxidase activity and extractable phenolics in estuarine soils. Chemistry and Ecology, Vol. 25, pp. 99-106, 2009.

Kang, H., Freeman, C. and Kim, S-Y., Variations of DOC and Phenolics in Pore-water of Peatlands, Korean J. Limnology, Vol. 35, pp. 306-311, 2002.

Knowles, R., Denitrification, Microbiological Reviews, Vol. 46, pp. 43-70, 1982

Lawson, G.J., Cultivating reeds (*Phragmites australis*) for root zone treatment of sewage, Contract report by the Institute of Terrestrial Ecology for Water Research Centre No. 965, UK, 1985.

Mitch, W.J., Gosselink, J.G., *Wetlands*, 4th ed., John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey, 2007.

Paul, E.A., and Clark, F.E., *Soil Microbiology and Biochemistry*. Academic Press, San Diego, California, 1996.

Sarkaner KV, Ludwing CH., *Lignins: occurrence, formation, structure and reactions*, Wiley-Interscience, New York, pp. 916, 1971.

Sundberg, C., Stendahl, J.S.K., Tonderski, K., and Lindgren, P.E., Overland flow systems for treatment of landfill leachates-potential nitrification and structure of the ammonia-oxidising bacterial community during a growing season, Soil Biology & Biochmistry, Vol. 39, pp. 127-138, 2007.

Song, K., Lee, S.-H., Mitsch, W. J. and Kang, H. Different responses of denitrification rates and denitrifying bacterial communities to hydrologic pulsing in created wetlands. Soil Biology and Biochemistry, Vol. 42, pp. 1721-1727, 2010.

Tao, W., Hall, K.J., and Duff, S.J.B., Microbial biomass and heterotrophic production of surface flow mesocosm wetlands treating woodwate leachate: responses to hydraulic and organic loading and relations with mass reduction, Ecological Engineering, Vol. 31, pp. 132-139, 2007.

Tareq, S.M., Tanaka, N., and Ohta, K., Biomarker signature in tropical wetland: lignin phenol vegetation index (LPVI) and its implications for reconstructing the paleoenvironment, Science of the Total Environment, Vol. 324. pp. 91-103, 2004.

Tiedje, J.M., Ecology of denitrification and dissimilatory nitrate reduction to ammonium. In. Zehnder, A.J.B.(Ed.), *Biology of Anaerobic Microorganisms,isms*, isand Sons, New York, 1988.

USEPA, *Determination of Total Organic Carbon and Specific UV Absorbance at 254 nm in Source Water and Drinking Water*, EPA/600/R-05/055. 2005.

Wallenstein, M.D., Myrold, D.D., Firestone, M., and Voytek, M., Environmental controls on denitrification rates: insights from molecular methods, Ecological Applications, Vol. 16, pp. 2143-2152, 2006.

Wetzel, R.G., Gradient dominated ecosystems: sources and regulatory functions of dissolved organic matter in freshwater ecosystems, Hydrobiologia, Vol. 229, No. 1, pp. 181-198, 1992.

○논문접수일 : 10년 03월 26일
○심사의뢰일 : 10년 04월 01일
○심사완료일 : 10년 08월 18일