

기준습지 토양특성을 활용한 인공습지의 토양발달 평가

이 자 연* / 강 대 석** / 성 기 준***†

Assessment of the Wetland Soil Development in Constructed Wetlands using the Soil Properties of a Reference Wetland

Jayeon Lee* / Daeseok Kang** / Kijune Sung***†

요약 : 인공습지 토양의 변화 특성을 인공습지의 성공 여부와 습지의 기능 평가에 활용할 수 있을 지 알아보고자 인공습지 조성 후 토양의 변화를 기준습지 토양의 변화특성과 비교하였다. 본 연구에서는 기준습지로 자연습지 1 곳과 오염물질 유입 특성이 다른 인공습지 2곳(처리습지, 실험습지)을 선정하여 주요 토양 특성의 변화를 조사하였다. 습지토양의 침수조건에 따른 물리화학적 특성변화 및 유기물 축적정도를 비교하기 위하여 토성, 함수율, pH, CEC 및 유기물함량을 측정하였으며, 습지의 영양물질의 축적 정도를 비교하기 위하여 총질소와 유효인산의 농도변화를 분석하였다. 토성의 경우 전체적으로 자연습지에서는 점토의 함량이, 인공습지에서는 모래의 함량이 많은 것으로 나타나 자연습지와 인공습지의 토성은 큰 차이를 보였다. 그러나 시간이 지나면서 인공습지 토양의 실트와 점토 함량이 점차 증가하였다. 함수율과 유기물함량의 경우 여름철과 가을철 모두 자연습지가 인공습지보다 높았다. 토양의 pH는 자연습지가 인공습지에 비하여 낮았으며, 인공습지의 경우에도 습지 조성 후 중성으로 변화하였다가 다시 pH가 낮아지는 것을 관찰할 수 있었다. CEC, 총질소, 유효인산의 농도는 외부의 유기물질이나 오염물질 유입과 관련 있는 것으로 판단되나, 오랜 기간 동안 영양물질을 보유한 자연습지에서 인공습지보다 모든 항목이 높게 나타났다. 실험습지의 경우 조성과정에서 오염도가 높은 표토와 낮은 심토가 섞여 유기물과 영양물질의 농도가 감소하였는데, 습지 조성과정에서 나타나는 토양 특성변화도 습지의 생지화학적 기능이나 습지 토양 발달에 영향을 미칠 수 있을 것이라 판단된다. 이 연구는 인공습지 토양의 물리적 특성변화와 유기물 및 영양물질 보유량 변화 등과 같은 습지토양의 발달특성을 활용하여 인공습지 조성의 성공 여부나 인공습지의 기능 평가에 활용할 수 있음을 보여주었으며, 이를 위하여 자연습지와 같은 기준습지의 역할이 중요함을 제시하였다.

핵심용어 : 습지기능, 처리습지, 실험습지, 이화학적 특성

Abstract : Changes in wetland soil properties of two constructed wetlands after their constructions were compared to those of a natural wetland to determine if they could be used for the evaluation of the success of constructed wetlands and the assessment of their functions. One natural wetland as a reference wetland and two constructed wetlands(treatment wetland and experimental wetland) with different contaminant inflow characteristics were selected for this study. Major physicochemical properties of wetland soil such as soil texture, water content, pH, CEC(cation exchange capacity), organic matter content, total nitrogen, and available phosphorus were monitored to investigate the effects of inundation and accumulation of organic matters and nutrients on the wetland soil development. There was a clear difference in soil texture between the natural wetland and the constructed ones, with the high sand content in the constructed wetlands as compared to the high clay content in the natural one. Gradual increases of silt and clay contents over time were observed in the constructed wetlands. The soil of the natural wetland was higher in water content and organic matter but lower in pH than those of the constructed wetlands. The pH of the constructed wetlands reached near neutral ranges after initial increase. CEC and nutrient concentrations of the

† Corresponding author : ksung@pknu.ac.kr
 * 비회원 · 부경대학교 생태공학과 대학원 박사과정
 ** 정회원 · 부경대학교 생태공학과 교수
 *** 정회원 · 부경대학교 생태공학과 교수

constructed wetlands seemed to be affected mainly by outside inflows of organic matter and contaminants. Concentrations of organic matter and nutrients decreased over time in the experimental wetland where surface and deep soils with different characteristics were mixed during its construction, suggesting that changes in soil properties during wetland constructions may affect the development of wetland soils or wetland biogeochemistry. This study showed that changes in physicochemical properties of soils in constructed wetlands could be used to assess the success of constructed wetlands and their functions, and also the importance of reference wetlands for the appropriate assessment.

Keywords : Wetland function, Treatment wetland, Experimental wetland, Physicochemical properties

1. 서 론

습지는 열대지역에서 한대지역까지 고루 분포하고 있으며, 지구 표면의 4-6% 정도에 해당하는 약 7~9 x 10⁶km²를 차지하고 있다(Mitsch and Gosselink, 2000). 습지는 자연적 과정이나 인간 활동을 통해 직·간접으로 발생한 유·무기 물질을 다양한 생지화학적 기작을 통하여 정화하는 자연정화시스템으로 알려져 있다(Kadlec and Knight, 1996). 이러한 습지는 수질정화기능 이외에도 홍수 및 해안침식 방지, 지하수 함양, 다양한 생물종 서식처 등의 역할을 수행한다(Mitsch and Gosselink, 2000). 인구 증가와 산업화 과정에서 필요 없는 땅으로 여겼던 습지는 전 세계적으로 매립이나 개간을 통하여 넓은 면적의 습지가 사라졌다(Mitsch and Jorgensen, 2004). 최근에는 습지가 가지고 있는 다양한 생태·환경학적 중요성에 대한 인식이 확대되었으며, 특히 하천이나 호소의 수질을 개선하기 위한 대안으로 습지의 보전이나 복원 및 효율적인 이용 방안에 대한 관심이 높아지고 있다. 이에 따라 습지의 생태공학적인 자연정화 원리를 이용한 수질정화용 인공습지를 조성하는 방법에 대한 연구가 활발하게 이루어지고 있다(Kadlec and Knight, 1996; Kaldec and Wallace, 2009; 성기준 등, 2008).

인공습지 조성에 가장 큰 영향을 주는 요소는 지표·지하수의 유출입, 강우, 증발과 같은 수문 조건과 유입수 등 습지의 물수지 관련 요인과 이들을 담을 수 있는 습지의 형태적 특성 등이다. 이 두 가지 조건에 따라 침수기간이나 수위와 관련된 습지의 독특한 생태·수문조건이 형성된다.

인공습지의 경우 이러한 수문조건의 영향으로 습지조성 이후 시간이 경과하면서 습지의 특징적인 토양이나 식생을 보유하게 된다(Craft et al., 2000; Broennum et al., 2001; 문현숙, 2005). 습지토양은 일정기간 이상의 침수 또는 포화를 통하여 산소가 부족한 혐기성 상태에서 발달한 토양으로, 침수조건이 지속함에 따라 습지에서 생산되거나 외부에서 유입한 유기물의 분해가 잘 일어나지 않게 되어 습지에 유기물을 축적하며 이탄층이나 유기질 토양이 만들어진다. 유기물이 많이 축적되지 않는 무기토양은 환원조건의 지속으로 철과 망간이온 등이 용출하면서 토색의 변화 등을 겪게 된다(Mitsch and Gosselink, 2000). 습지조성 시 습지수문이나 습지식생의 경우 비교적 단기간에 조성이 가능하지만, 습지토양의 특성이 나타나기 위해서는 오랜 시간이 걸린다(Atkinson et al., 1998; Tiner et al., 1999; Giese and Flannagan, 2006). 습지토양은 습지식물을 비롯한 다양한 생명체의 서식공간이자 영양분을 제공하는 곳이며, 침전과 흡착은 물론 산화·환원반응 등을 통하여 각종 오염물질을 제거하거나 보유하는 습지의 생지화학적 반응이 일어나는 중요한 곳이다(Mitsch and Gosselink, 2000; Anderson et al., 2004). 따라서 오염물질을 제거하기 위한 처리습지(treatment wetland)의 조성·운영과 관련하여 습지토양의 발달과정은 조성된 인공습지에서 생지화학적 반응을 통하여 오염물질을 제거하는데 큰 영향을 미칠 수 있다. 따라서 인공습지가 오염물질의 정화 기능을 제대로 수행하고 있는 지 평가하거나 대체습지의 성공 여부를 판단하는 중요한 지표로 습지토양의 발달정도를 사용할 수 있다

(Broennum et al., 2001). 그러나 국내의 경우 습지토양의 발달에 관한 연구가 별로 이루어지지 않은 실정이며, 대부분 인공습지 조성 이후 습지 식물의 분포나 처리습지의 오염물질의 처리효율에 대한 것이었다(환경부, 2005; 김영운 등, 2009). 따라서 본 연구에서는 습지의 생지화학적 작용이 주로 일어나는 습지토양의 발달 정도를 조사하여 인공습지를 평가하고자 하였다. 이를 위하여 기준 습지의 형태적, 식생학적 특성을 참고하여 조성한 인공습지의 토양특성 변화를 습지 조성시에 참고 하였던 기준습지와 비교하여 평가하였다.

2. 재료 및 방법

2.1 대상습지 및 시료채취

본 연구에서는 인공습지를 조성한 후 토양의 변화 특성을 파악하고자 오염물질의 유입 특성이 다른 인공습지 2곳과 기준습지(reference wetland)로서 자연습지 1곳을 선정하여 주요 토

양 특성의 변화를 조사하였다(Fig. 1). 기준습지로 활용한 습지는 경남 함안군 범수면 대송리(북위 35°20', 동경 128°20')에 있는 유역면적 1,448,500m²의 대평늪으로 여름철 강우시에 주변에서 유입되는 강우유출수와 오염물질을 저장하였다가 청천시 생지화학적 작용에 의하여 정화하거나 습지의 생활활동에 사용하는 것으로 알려져 있으며 마름, 자라풀, 가시연꽃과 같은 부엽식물과 침수식물인 붕어마름과 검정말이 우점하고 있다(김영운 등, 2009). 대평늪은 강우시 주변의 TN, SS와 같은 비점원 오염물질의 약 80% 이상을 제거하거나 일시적으로 보유함으로써 비점오염물질의 정화기능을 효과적으로 수행하고 있는 저류형 습지이다(김영운 등, 2008). 대평늪의 주변 토지는 대부분 농경지와 임야이며, 다양한 수생식물이 우점하고 있어 보존성 또한 우수한 습지이기 때문에 전형적인 습지토양의 특성을 잘 보여줄 수 있는 곳으로 판단된다(환경부와 UNDP/GEF국가습지보전사업관리단, 2007).

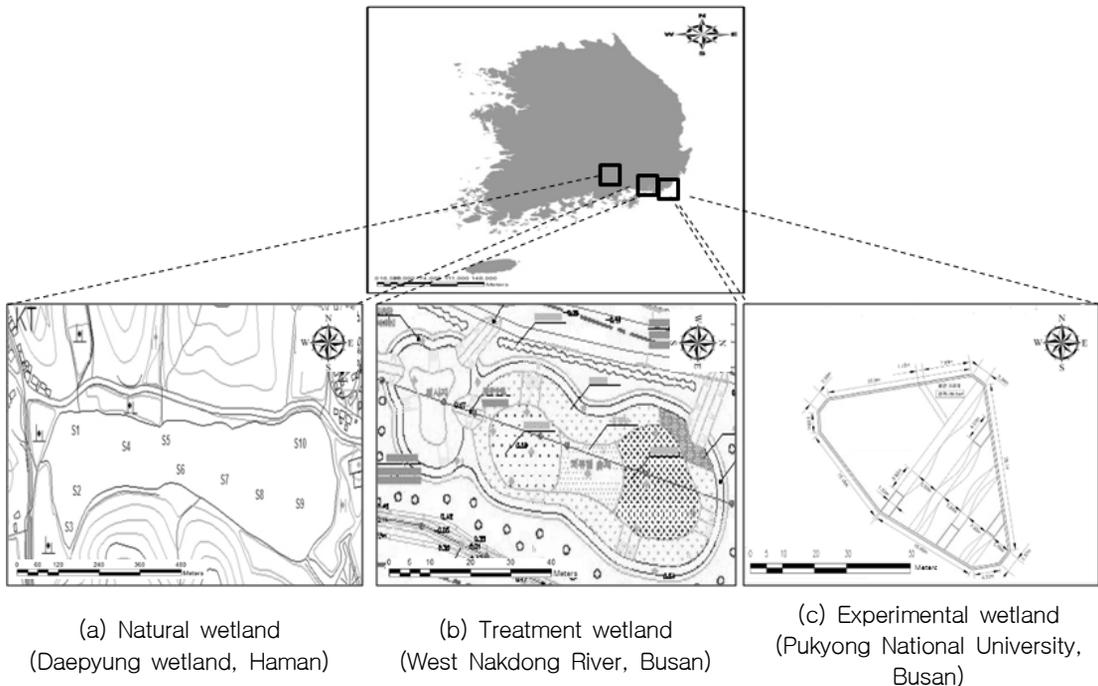


Fig. 1 Sampling stations for wetlands investigated in this study

습지토양의 발달과정을 평가할 인공습지는 대평늪을 기준습지로 하여 2008년 3월 서낙동강과 평강천의 합류지점에 비점오염물질 관리를 위하여 조성한 처리습지(treatment wetland)와 같은 시기에 부산광역시 소재 부경대학교에 조성한 실험습지(experimental wetland)이다. 서낙동강 처리습지는 묘목장으로 사용하던 곳에 습지를 조성한 경우로, 침강저류지와 두 개의 저류형 습지로 구성되어 있다. 처리습지 주변에는 축사들이 있어 습지조성 직후부터 주변에서 오염물질이 유입하는 전형적인 오염물질 처리습지로서 집수역의 면적은 23,720m²이다. 따라서 오염물질을 정화하기 위해 조성하는 처리습지의 토양 변화를 잘 보여줄 수 있을 것으로 판단된다. 부경대학교 실험습지는 바닥의 균열 때문에 사용하지 않는 양어장에 습지를 조성한 경우로, 침강저류지, 저류형 습지 및 식생수로로 이루어져 있다. 실험습지의 경우 주변으로부터 강우유출수의 유입과 오염물질 유입은 없으며, 인위적으로 수분과 오염물질의 조절이 가능하게 조성되었다. 따라서 실험시에만 오염수가 유입하므로 처리습지보다 오염물질 유입량이 적었다. 따라서 부경대학교 실험습지는 일반적인 조성습지나 복원습지(created or restored wetland)의 토양 변화를 잘 보여줄 수 있을 것으로 판단된다.

두 인공습지의 식생은 기준습지인 대평늪의 식생구조를 참고하여 습지 조성 3개월 후인 2008년 6월 서낙동강의 수생식물 우점지역에서 검정말(*Hydrilla verticillata*)과 붕어마름(*Ceratophyllum demersum*)과 같은 침수식물의 종자를 함유한 습지토양을 채취한 뒤 인공습지에 도입해 자연발아하도록 매토종자를 이용하여 도입하였다. 부경대학교 실험습지 식생수로의 경우 갈대(*Phragmites communis*), 고랭이(*Scirpus tabernaemontani*), 부들(*Typha orientalis*)을 추가 식재하였다.

습지토양 조사는 표면의 식물체 등을 제거한 후 아크릴코어를 이용하여 10cm 이내의 표토를 채취하였으며, 자연습지의 경우 10개의 정점에 대해 유입부, 중앙부, 유출부로 나누어 2008년 7월

(여름)과 9월(가을)에 시료를 채취하였다. 처리습지의 경우 조성 4개월 후(여름)와 6개월 후(가을)에 습지 내 침강저류지와 저류형 습지에서 시료를 채취하였고, 실험습지의 경우 처리습지와 같은 시기에 저류형 습지와 3곳의 식생수로에서 시료를 채취하였다.

2.2 조사항목 및 방법

습지조성 후 토양 변화를 평가하기 위해 조사한 항목은 토성(soil texture), 함수율(water content), 유기물함량(IL, COD), pH, 양이온교환용량(CEC), 총질소(TN), 유효인산(available P₂O₅)이다. 이 중 토성, 함수율, pH, CEC 및 유기물함량의 변화는 습지조성 후 수문조건 변화에 따른 습지토양의 이화학적 특성변화 및 습지토양의 유기물 축적 정도를 비교하기 위하여, 습지토양의 총질소와 유효인산은 습지의 영양물질 축적 정도를 비교하기 위하여 조사하였다.

습지토양의 토성은 pipetting법을 이용하여 측정하였으며, 함수율은 105~110℃의 dry oven에서 향량이 될 때까지 4시간 이상 건조한 다음 데시케이터 안에서 방냉하여 건조 전·후 무게 차이를 이용하여 측정하였다(해양수산부, 2005). 유기물함량 중 강열감량(IL)은 550℃ 전기로에서 2시간 동안 강열한 후 데시케이터 안에서 방냉하여 강열 전·후 무게차를 측정하였고, 화학적 산소요구량(COD)은 과망간산칼륨법을 이용하여 측정하였다(해양수산부, 2005). pH는 토양시료를 증류수와 1:5(w/v)로 혼합한 후 1시간 방치한 뒤 pH electrometer(Istek사 Multi-Analyzer 815PPC)를 이용하여 측정하였고, 토양의 양이온치환용량은 1N-acetic acid (pH 2.31)을 이용한 간이법을 이용하여 치환성염기총량을 구하여 사용하였다(농업기술연구소, 1988). 총질소(TN)는 풍건토 5g을 켈달플라스크에 넣고 황산염혼합분말 5g과 H₂SO₄ 25mℓ를 가하여 증류 후 적정하는 방법으로 Kjeldahl 증류장치(Buchi K-434)를 이용하여 측정하였고, 유효인산(Available P₂O₅)은 회화법을

Table 1. Soil properties of the treatment and experimental wetlands investigated in this study before their constructions

	Sand (%)	Silt (%)	Clay (%)	Water content (%)	IL (%)	COD (g/kg)	pH	CEC (meq/100g)	TN (%)	TP (ppm)
Treatment Wetland	84.5	9.3	6.2	24.50	0.71	1.37	7.16	4.72	0.03	87.78
Experimental Wetland	41.1	49.2	9.7	8.42	8.43	33.11	5.32	10.21	0.23	521.83

* IL=ignition loss, COD=chemical oxygen demad, CEC=cation exchange capacity, TN=total nitrogen, TP=total phosphorus

이용하여 분해한 후 아스크로빈산에 의한 몰리브덴(Mo)청법에 따라 분석하였다.

2.3 통계분석

자연습지, 처리습지, 실험습지의 10개 조사지점에서 측정된 토성, 함수율, 유기물함량(IL, COD), pH, 양이온교환능력, 총질소, 유효인산 자료를 SAS(Statistical analysis system)를 이용하여 다중비교 하였다. 다중비교는 표본평균들을 비교하여 모평균들 사이의 구조를 이해하는 것으로, 최소유의차검정법(least significant difference test, LSD test)을 사용하여 통계처리 하였는데, 처리구 간의 평균차가 최소 유의차보다 크면 두 그룹은 서로 다른 그룹이라 말할 수 있다(최병선과 이성백, 2003).

3. 결과 및 고찰

3.1 습지 조성전 토양 특성

본 연구의 대상지인 처리습지와 실험습지 조성 이전의 표층 토양의 특성은 Table 1과 같다. 대부분 묘목장으로 사용된 처리습지의 습지조성 전 토성은 모래가 84.5%를 차지한 양질사토(loamy sand)였다. 그러나 양어장으로 사용된 실험습지의 습지조성 전 토성은 실트가 49.2%로 가장 높은 양토(loam)였으며, 처리습지에 비해 점토 비율도

높았다. 유기물, 질소, 인 농도는 처리습지 조성 전 토양보다 실험습지 조성 전 토양에서 더 높았다. 이는 조성 전 토지이용과 관련 있는 것으로 보이는데, 양어장으로 오랫동안 사용된 실험습지 조성지역이 묘목장으로 사용된 처리습지 조성지역보다 더 많은 유기물과 영양물질을 축적하였기 때문인 것으로 판단된다. 다만 함수율의 경우 모래성분의 구성비가 높은 처리습지의 습지조성 이전 토양에서 더 높게 나타났는데, 이는 시료채취 이전에 내린 강우에 의한 영향으로 판단된다.

3.2 습지 조성후 토양특성 변화

3.2.1 토성

Fig. 2 (a)와 (b)는 각각 처리습지와 실험습지 조성 후 시간경과에 따른 토성 변화를 보여준다. 처리습지의 토성은 습지조성 전과 4개월 후에 뚜렷한 차이를 보이지 않았으나, 습지조성 6개월 후에는 지점별로 부분적인 차이가 나타났다(Fig. 2(a)). 침강저류지의 토성은 조성 전과 뚜렷한 차이가 없었지만, 저류형 습지에서는 모래의 비율이 18.1%로 조성 전보다 약 4배 감소하였고 상대적으로 입경이 작은 실트와 점토 함량이 각각 47.6%, 34.3%로 약 5배 증가하였다. 이는 강우에 의해 습지 주변지역에서 실트와 점토질 토양이 유입되었기 때문인 것으로 판단된다.

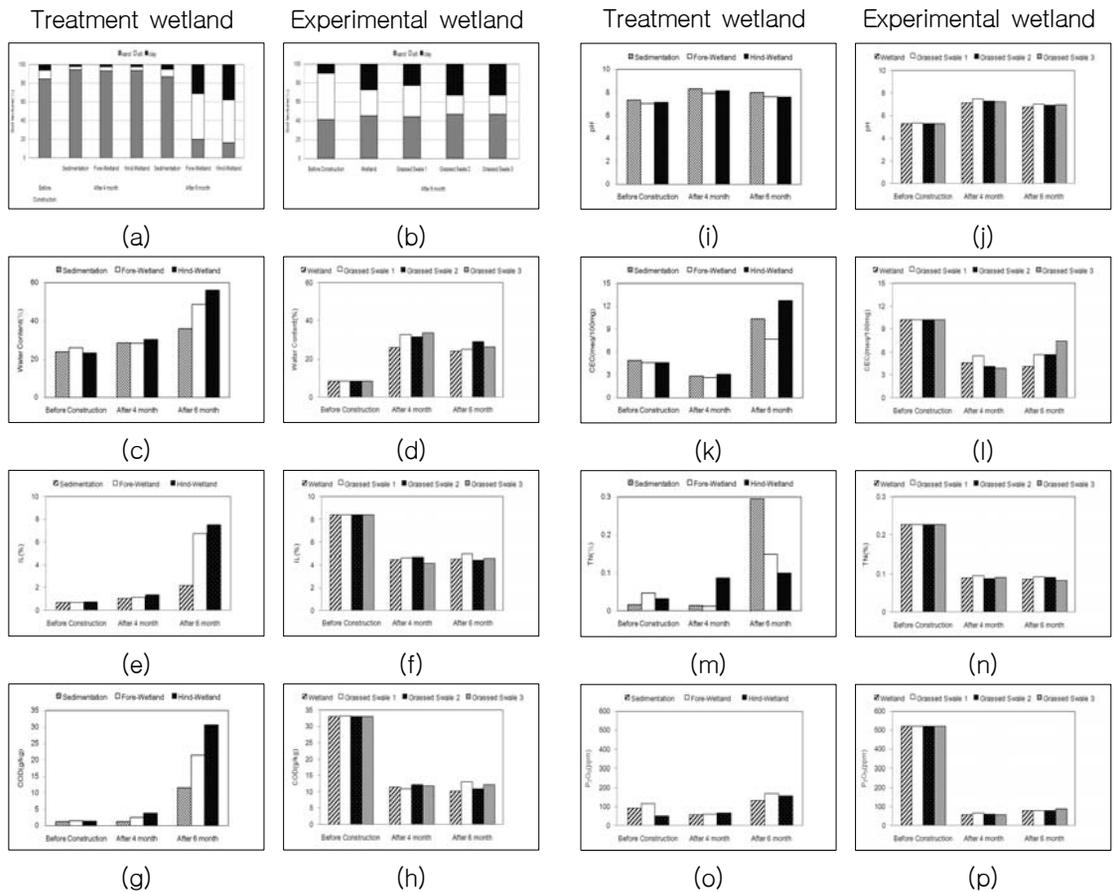


Fig. 2 Temporal and spatial changes in wetland soil properties of two constructed wetlands investigated in this study. IL=Ignition Loss, COD=Chemical Oxygen Demand, CEC= Cation Exchange Capacity, TN=Total Nitrogen)

실험습지의 경우 시간이 지나면서 실트는 감소하고 점토가 증가하였다(Fig. 2 (b)). 실험습지 조성 전에는 모래 41.1%, 실트 49.2%, 점토 9.7%의 비율을 보였는데, 습지조성 6개월 후에는 모래의 비율은 45.8%로 거의 변화가 없었지만 실트 비율이 25.3%로 약 절반으로 감소하였으며 점토 비율은 28.9%로 약 4배 증가하였다. 이는 습지 조성 3개월 후 식물을 도입하기 위해 사용한 토양의 영향으로 판단된다. 실험습지 내 조사지점에 따른 토성의 차이는 크지 않았다.

Fig. 3 (a)는 자연습지와 인공습지의 계절별 토성을 비교하고 있다. 자연습지의 토성은 모래, 실트, 점토의 비율이 여름철에는 0%, 21.3%,

78.7%, 가을철에는 0%, 37.0%, 63.0%로, 모두 실트와 점토로 주로 구성되어 있는 식토(clay)로 나타났다. 처리습지의 여름철 토성은 모래, 실트, 점토의 비율이 각각 93.82%, 4.04%, 2.14%인 사토(sand)였으며, 가을철에는 모래, 실트, 점토가 각각 41.1%, 34.4%, 24.5%인 양토(loam)로 나타났다. 여름철에 비하여 가을철에는 모래의 함유량이 대폭 감소하고 실트와 점토의 비율이 증가하였다. 실험습지의 경우 여름철 토성은 측정하지 못하였으나, 가을철 토성은 모래, 실트, 점토가 각각 45.8%, 25.3%, 28.9%로 구성되어 있는 점질양토(clay loam)였다. 전체적으로 자연습지에서는 점토의 함량이, 인공습지에서는 모래의 함량이 많아

자연습지와 인공습지 사이에 토성이 뚜렷하게 달랐다. 또한 시간이 흐르면서 인공습지에서 실트와 점토의 비율이 점차 증가하는 것을 관찰하였다. 하지만 표층 10cm 미만의 표토를 채취하여 분석한 본 조사의 결과는 전체적인 토성의 변화를 나타내지 못할 수도 있으므로 전체적인 토성의 변화를 조사하기 위하여 심토의 변화도 함께 조사하는 것이 바람직 할 것으로 판단된다. 습지 토성에 대한 국외 연구결과 중 Stolt 등(2000)의 연구에 의하면 자연습지의 토양은 실트와 점토의 비율이 높는데, 토양 입자의 크기는 공극과 투수성을 결정하며 토양의 수분보유 능력에도 영향을 미친다. Campbell 등(2002)의 조사에 따르면 조성한 지 10년 이하인 인공습지의 토양은 주로 사질식양토(sandy clay loam)인 것에 비하여 자연습지는 식양토(clay loam)였다. 자연습지와 인공습지의 이러한 토성 차이는 본 연구에서도 나타났는데, 인공습지의 경우 조성지역의 토성에 영향을 받으며 주변생태계의 퇴적, 침전과 같이 습지에 미치는 영향의 정도에 따라 변화하는 것으로 추정할 수 있다.

3.2.2 함수율

습지토양의 함수율은 침수기간과 같은 수문조건과 공극률, 토성, 용적밀도, 유기물함량과 같은 물리적 특성에 영향을 받는다. 물리적 특성이 유사한 토양에서는 완전 포화되었을 경우에 함수율이 가장 높지만, 물리적 특성이 다를 경우에는 동일한 침수기간이라 할지라도 공극률이 클수록, 미세토양의 비율이 높을수록, 용적밀도가 작을수록, 유기물함량이 많을수록 토양의 함수율이 증가한다. 따라서 함수율의 변화는 이러한 수문조건외의 변화와 토양의 물리적 특성의 변화를 간접적으로 나타내는 지표로 사용할 수 있다.

Fig. 2 (c)와 (d)는 각각 처리습지와 실험습지 조성 후 시간경과에 따른 토양의 함수율 변화를 보여준다. 처리습지의 경우 조성 전 함수율은 24.50(±1.43)%, 조성 4개월 후에는 29.16(±1.09)%로 조사되었다(Fig. 2 (c)). 조사지점별

로는 침강저류지에서 28.62%, 상부와 하부 저류형 습지에서 각각 28.44%, 30.42%로 나타났다. 처리습지에서는 습지 조성 후 4개월까지는 전체적으로 함수율 변화가 그리 크지 않았는데, 이는 조성 후 시간이 얼마 지나지 않아 토양 특성의 변화가 크지 않았기 때문이라 판단된다. 그러나 습지조성 6개월 후에는 토양 함수율이 47.04(±10.2)%로 증가하였다. 조사지점별 함수율은 침강저류지에서 36.10%, 상부 저류형습지에서 48.78%, 하부 저류형습지에서는 56.23%로, 습지하부로 갈수록 증가하였다. 이는 모래의 비율이 감소하고 실트와 점토가 차지하는 비율이 높아진 토성의 영향 때문으로 판단된다.

실험습지 토양의 함수율은 조성 전 8.42%에서 조성 4개월 후에는 31.05(±3.29)%로 증가하였다(Fig. 2 (d)). 조사지점별 함수율을 살펴보면 저류형 습지에서 26.27%, 3곳의 식생수로에서는 각각 32.51%, 31.71%, 33.71%로 나타났는데, 조성 초기의 함수율 변화는 수문조건에 따른 포화도에 의한 것으로 판단된다. 한편 실험습지 조성 6개월 후에는 평균 함수율이 26.35(±2.07)%였으며, 지점별로는 저류형 습지 24.40%, 식생수로에서는 하부로 가면서 25.25%, 29.14%, 26.60%로 나타났다. 조성 후 시간이 경과함에 따라 함수율에는 변화가 거의 없었으며, 습지 내 지점간 차이도 없어 전체적인 토양의 특성변화가 크지 않은 것으로 보인다.

자연습지와 인공습지의 계절별 함수율을 비교하여 보면, 자연습지의 여름철 평균 함수율은 74.57(±5.68)%, 가을철 평균 함수율은 78.01(±7.33)%로, 처리습지(여름철 29.16±1.09%, 가을철 47.04 ±10.2%) 및 실험습지(여름철 31.05 ±3.29%, 가을철 26.35±2.07%)보다 높았다(Fig. 3 (b)). 자연습지의 가을철 토양 함수율은 처리습지의 약 1.7배, 실험습지의 약 3배 높은 수준이다. 이와 같은 결과는 인공습지보다 점토의 함량이 더 많은 자연습지의 토성에 기인한 것으로 판단된다. 실험습지의 경우 여름과 가을 사이에 큰 차이는 없었으나, 처리습지의 경우 시간이 지남에

따라 함수율이 증가하였다.

3.2.3 유기물함량

습지의 유기물함량을 알아보기 위해 강열감량과 COD를 측정하였다. 강열감량은 습지토양에 존재하는 총 유기물의 양을, 토양 COD는 화학적으로 분해가 가능한 유기물의 양을 나타낸다. 자연습지의 강열감량은 여름철 평균 12.19(±1.88)%, 가을철 평균 14.69(±3.11)%로 측정되었으며, 처리습지에서는 여름철 평균 1.20(±0.17)%, 가을철 평균 5.49(±2.88)%, 실험습지의 경우 여름철 평균 4.51(±0.24)%, 가을철 평균 4.64(±0.21)%로 나타났다(Fig. 3(c)). 습지토양 COD는 자연습지에서 여름철 평균 80.20(±24.40)g/kg, 가을철 평균 88.38(±25.96)g/kg으로 조사되었으며, 처리습지에서는 여름철 평균 2.57(±1.28)g/kg, 가을철 평균 21.17(±9.54)g/kg, 실험습지는 여름철 평균 11.67(±0.54)g/kg, 가을철 평균 11.66(±1.22)g/kg의 값을 보였다(Fig. 3(d)). 통계분석 결과 여름철과 가을철 모두 자연습지가 처리습지 및 실험습지보다 유기물 함량이 더 높았다. 실험습지의 경우 여름철과 가을철 사이에 큰 차이가 없었지만, 처리습지는 시간이 지나면서 유기물함량이 증가하였다.

처리습지 조성 전 토양의 강열감량은 0.71(±0.05)%로, 조성 4개월 후(1.20±0.17%)와 큰 차이가 없었다(Fig. 2(e)). 습지조성 4개월 후 조사지점별 강열감량은 침강저류지에서 1.05%, 상부 저류형습지에서 1.15%, 하부 저류형습지에서 1.39%를 보여 습지 내 지점에 따른 차이는 나타나지 않았다. 그러나 습지조성 6개월 후의 강열감량은 5.49(±2.88)%로 유기물함량이 증가하였다. 또한 조사지점별 강열감량은 침강저류지에서 2.20%, 상부 저류형 습지에서는 6.72%, 하부 저류형 습지에서는 7.55%로, 습지 하부로 갈수록 증가하였다.

처리습지 토양의 COD는 조성 4개월 후 2.57(±1.28)g/kg으로, 조성 전(1.37±0.08g/kg)보다 약 87% 증가하였다(Fig. 2(g)). 이를 지점별로

살펴보면 침강저류지에서 1.29g/kg, 상부 저류형 습지에서는 2.57g/kg, 하부 저류형습지에서는 3.85g/kg로 습지 하부로 갈수록 증가하였다. 처리습지 조성 6개월 후 토양 COD는 21.17(±9.54) g/kg이며, 지점별로는 습지의 침강저류지 11.51 g/kg, 상부 저류형습지 21.42g/kg, 하부 저류형습지 30.59g/kg으로 조사되었다. 처리습지의 토양 COD는 강열감량과 마찬가지로 습지 하부로 갈수록 증가하였으며, 조성 후 시간이 지나면서 토양의 유기물함량 역시 증가하였다. 이는 외부에서 유입한 유기물질에 의한 영향과 토양 중 실트의 증가로 인한 유기물 흡착량 증가 때문으로 판단된다.

Fig. 2(f)와 (h)는 실험습지 조성 후 시간경과에 따른 토양의 강열감량과 COD 변화를 각각 보여준다. 실험습지의 강열감량은 조성 4개월 후에 4.51(±0.24)%로 조성 전(8.43%)보다 감소하였다(Fig. 2(f)). 이는 외부 유기물질의 유입이 거의 없어 유기물 보유보다는 분해가 주로 일어났고 습지 조성과정에서 오염도가 낮은 토양과 혼합되어 유기물 농도가 낮아졌기 때문인 것으로 추정된다. 강열감량의 변화를 지점별로 살펴보면 저류형습지에서 4.49%, 3곳의 식생수로에서 각각 4.63%, 4.73%, 4.18%로 나타나 습지 내 조사지점에 따른 차이는 거의 없었다. 실험습지 조성 6개월 후에도 강열감량은 4.64(±0.21)%로 습지조성 후 유기물 함량이 증가하지 않았는데, 이는 외부에서 유기물질이 거의 유입하지 않았기 때문인 것으로 판단된다.

실험습지 조성 4개월 후 토양 COD는 11.67(±0.54)g/kg로 조성 전(33.11g/kg)보다 감소하였으며, 6개월 후 조사에서도 11.66(±1.22) g/kg으로 나타나 4개월 후 조사 결과와 큰 차이가 없었다(Fig. 2(h)). 이러한 변화경향은 강열감량의 그것과 유사하였는데, 습지가 조성된 지 얼마 되지 않아 습지 자체적으로 생산한 유기물량이 적고 실험습지의 운영상 외부 유기물질의 유입이 거의 없었기 때문인 것으로 판단된다.

본 연구는 자연습지 토양의 유기물 함량이 인

공습지 토양보다 많고, 자연습지와 처리습지에서 여름에 비해 가을에 토양의 유기물함량이 높다는 것을 보여주었다. 습지의 유기물 함량을 조사한 국외의 연구 가운데 12곳의 인공습지와 14곳의 자연습지의 유기물 함량(IL)을 조사한 Campbell 등(2002)은 인공습지와 자연습지의 유기물 함량을 각각 평균 4.8%와 11.5%로 보고하여 본 연구의 유기물 함량과 동일한 수준에 해당하였다. 한편 11개의 인공습지와 자연습지의 유기물 함량을 조사한 Bruland 등(2006)은 인공습지와 자연습지의 유기물 함량을 각각 11.8(±3.9)%, 28.9(±8.0)%로 보고하여 본 연구 결과 보다 다소 높았지만 본 연구에서와 같이 인공습지와 자연습지 사이에 명확한 유기물함량의 차이를 보여주었다.

자연습지 토양에서 유기물함량이 더 높게 나타나는 것은 오랜 기간 유기물질이 침전되고, 산소가 부족한 혐기상태에서 분해 작용이 느려 유기물이 축적되었으며, 모래에 비해 실트나 점토의 함량이 높아 습지 내로 유입하는 유기물 흡착능력이 높았기 때문이다(김중구와 유선재, 2001, 박소영 등, 2008). 또한 식물의 성장이 왕성한 습지의 경우 습지의 내부 생산이 높고 시간이 지나면서 생산된 유기물들이 습지에 잔류함으로써 습지토양의 유기물함량이 증가하게 된다. 인공습지의 경우 충분한 시간이 경과하기 전에는 자연습지에 비해 생산성이 낮기 때문에 자체 생산을 통해 습지에 잔류하는 유기물의 양이 자연습지에 비하여 적어 유기물함량이 자연습지보다 낮을 수밖에 없다. 하지만 외부에서 유입하는 유기물량이 상대적으로 많은 처리습지의 경우 유입한 유기물 입자들이 지표 부근에 여과축적되며 이로 인해 유기물함량이 높아지게 된다(윤춘경 등, 1999). 이러한 경향은 본 연구의 조사결과에도 확인되었는데, 자연습지의 유기물함량이 처리습지나 실험습지에 비해 높았고 오염물질 유입이 적은 실험습지에 비하여 오염물질 유입이 많은 처리습지에서 유기물함량이 높게 나타났다. 계절에 따른 차이는 자연습지의 경우 여름철에 자체 생산된 유

기물의 보유량 증가 때문에, 처리습지의 경우 오염물질 유입과 여름철에 자체 생산된 유기물 보유량 증가 때문에 여름철보다 가을철에 토양의 유기물함량이 증가하였다.

3.2.4 pH

Fig. 2(i)와 Fig. 2(j)는 각각 처리습지와 실험습지 조성 후 시간경과에 따른 pH의 변화를 보여준다. 처리습지의 경우 조성 전 pH는 7.16(±0.15)으로 중성이었으나, 조성 4개월 후 pH는 8.12(±0.20)로 약알칼리성으로 증가했다가 조성 6개월 후에는 7.73(±0.23)으로 pH가 다시 감소하였다. 실험습지의 경우 조성 전 pH는 5.32로 산성이었지만, 조성 4개월 후 7.29(±0.14)로 증가했다가 조성 6개월 후 6.92(±0.10)로 감소하였다. 이는 습지조성 전 토양인 육상토양이 습지로 바뀌면서 알칼리성을 띠는 물과 접해 중성으로 변했다가 시간이 지남에 따라 유기물의 분해에 따라 pH가 감소한 것으로 판단된다(Mitsch and Gosselink, 2000).

자연습지의 여름철 평균 pH는 5.43(±0.30), 가을철 평균 pH는 4.92(±0.42)로 측정되었으며, 처리습지의 여름철 평균 pH는 8.12(±0.20), 가을철 평균 pH는 7.73(±0.23), 실험습지의 여름철 평균 pH는 7.29(±0.14), 가을철 평균 pH는 6.92(±0.10)로 나타났다(Fig. 3(e)). 통계분석 결과 여름철과 가을철 모두 자연습지의 pH가 처리습지 및 실험습지의 pH보다 낮았다. 또한 자연습지, 처리습지, 실험습지 모두 본 연구 기간 중에 시간이 지나면서 pH가 감소하였다. 자연습지의 pH는 산성으로 약알칼리성을 띠는 처리습지보다 낮았는데, 자연습지 토양에 많이 포함된 유기물이 분해되면서 토양 속에 유기산이 증가하여 나타난 결과라 판단된다(신영호 등, 2004).

3.2.5 양이온교환용량

처리습지 조성 후 시간의 경과에 따른 양이온 교환능력(CEC)의 변화를 살펴보면 조성 전

4.72(±0.17) meq/100mg, 조성 4개월 후 2.86 (±0.22) meq/100mg, 조성 6개월 후 10.27 (±2.53) meq/100mg로 조성 후 시간이 지나면서 증가하였다(Fig. 2 (k)). 그러나 습지 내 지점에 따른 차이는 크지 않았다. 실험습지의 경우 조성 전 CEC는 10.21 meq/100mg이었으나, 조성 4개월 후에는 4.57(±0.68)로 감소하였는데(Fig. 2 (l)), 이는 습지조성 과정에서 나타난 유기물함량 변화와 관련 있는 것으로 판단된다. 실험습지 조성 6개월 후 CEC는 5.78(±1.35)로 조성 4개월 후에 비해 증가하였지만, 습지 내 지점에 따른 차이는 크지 않았다.

자연습지의 경우 여름철 평균 CEC는 5.96 (±0.54)meq/100mg, 가을철 평균 CEC는 7.68 (±1.78)meq/100mg로 조사되었으며, 처리습지의 여름철 평균 CEC는 2.86(±0.22)meq/ 100mg, 가을철 평균 CEC는 10.27(±2.53)meq/ 100mg, 실험습지의 여름철 평균 CEC는 4.57(±0.68) meq/100mg, 가을철 평균 CEC는 5.78(±1.35) meq/100mg로 나타났다(Fig. 3 (f)). 습지토양의 CEC가 증가할수록 습지 식생이 이용할 수 있는 영양소가 많고 생육상태가 양호한 토양임을 나타내며, 중금속과 같은 오염물질의 완충능도 커지게 된다. 통계분석 결과 여름철에는 자연습지의 평균

CEC가 인공습지보다 높은 CEC 값을 나타내고 있으나, 가을철에는 처리습지>자연습지>실험습지 순으로 CEC 값이 감소하였다. 또한 자연습지와 인공습지 모두 시간이 지나면서 CEC 값이 증가하였다.

3.2.6 총질소

토양의 총질소(TN) 농도는 처리습지에서 조성 전 0.03(±0.02)%, 조성 4개월 후 0.04(±0.04)%, 조성 6개월 후에는 0.18(±0.10)%로 나타나 시간이 지나면서 총질소가 증가하였다(Fig. 2 (m)). 이를 지점별로 살펴보면 조성 4개월 후에는 침강저류지에서 0.01%, 상부 저류형습지에서 0.01%, 하부 저류형습지에서 0.09%로, 습지 하부로 갈수록 증가하였다. 조성 6개월 후에는 침강저류지 (0.30%)에서 상부 저류형 습지(0.15%)나 하부 저류형 습지(0.10%) 보다 높았는데, 이는 강우로 유입한 오염물질이 침강저류지에 주로 머물렀기 때문인 것으로 판단된다. 처리습지 조성 후 시간이 지나면서 토양 총질소가 증가하는 것은 오염물질이 유입하면서 질소화합물이 침전과 여과에 의해 축적되고 식물이 흡수하는 양보다 유입하는 양이 더 많았기 때문인 것으로 판단된다.

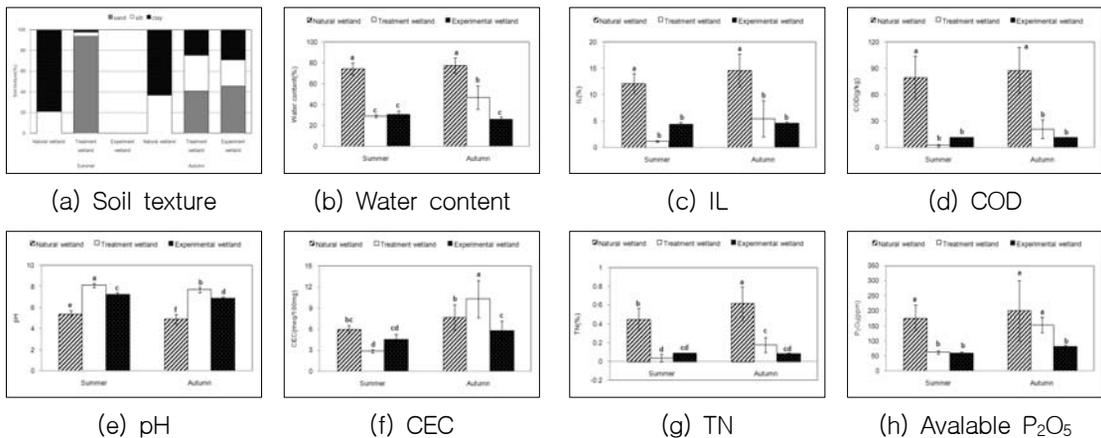


Fig. 3 Comparison of Seasonal changes in wetland soil properties between a reference wetland and two constructed wetlands (Letters in the figures show significant differences among sites at $\alpha=0.05$). IL=Ignition Loss, COD=Chemical Oxygen Demand, CEC= Cation Exchange Capacity, TN=Total Nitrogen)

실험습지의 경우 조성 전 토양의 총질소 농도는 0.23%였지만 조성 4개월 후에는 0.09 (± 0.003)%로 총질소 농도가 감소하였다(Fig. 2 (n)). 이는 토양 내 유기물변화와 마찬가지로 습지 조성 과정에서 총질소 농도가 낮은 토양이 혼합되었을 가능성과 질소 유입원이 없는 상태에서 습지 조성으로 탈질과 같은 기작을 통해 질소가 제거되었기 때문으로 추정할 수 있다. 지점별로 살펴보면 저류형습지 지역에서 0.09%, 수로 1에서는 0.10%, 수로 2에서는 0.09%, 수로 3에서는 0.09%로 나타나, 습지 내 지점에 따른 차이는 크지 않았다. 실험습지 조성 6개월 후 총질소는 0.09(± 0.004)%로 조사되었으며, 지점별로는 저류형습지에서 0.09%, 수로 1에서는 0.09%, 수로 2에서는 0.09%, 수로 3에서는 0.08%로 나타나 습지 내 지점 및 시간에 따른 차이는 없었다.

자연습지 토양의 총질소는 여름철 0.45(± 0.12)%, 가을철 0.62(± 0.18)%로, 처리습지(여름철 0.04 \pm 0.04%, 가을철 0.18 \pm 0.10%)나 실험습지(여름철 0.09 \pm 0.003%, 가을철 0.09 \pm 0.004%)보다 훨씬 높았다(Fig. 3 (g)). 자연습지와 처리습지의 경우 시간이 지나면서 총질소 농도가 증가하였다. 토양 중 질소 공급원의 대부분은 유기물로, 유기물 함량과 질소 함량은 높은 정의 상관관계를 나타낸다. 따라서 유기물 함량이 많은 자연습지에서 인공습지에 비해 총질소 농도가 높게 나타난 것으로 판단된다(송호경 등, 2006). 또한 총질소 농도의 변화가 거의 없는 실험습지에 비해 오염물질 유입으로 질소화합물의 침전효과가 일어난 처리습지에서 총질소 농도가 더 높게 나타났다.

습지의 총질소와 관련된 국외 연구인 Lu 등(2007)의 조사결과는 조성 후 2년 이상 경과한 인공습지와 자연습지의 총질소가 각각 0.058%, 0.098%를 보여 본 연구의 실험 결과보다는 모두 낮았다(Lu et al., 2007). 그러나 본 연구의 조사결과와 마찬가지로 자연습지 토양의 총질소 농도가 인공습지 토양보다 더 높았다. 이러한 결과는 외국의 경우보다 우리나라의 습지에서 더 많은 질소를 보유하거나 처리할 수 있음을 간접적으로 보

여주는 결과라 할 수 있다.

3.2.7 유효인산

Fig. 3 (o)와 (p)는 각각 처리습지와 실험습지 조성 후 시간경과에 따른 유효인산의 변화를 보여준다. 처리습지의 경우 조성 전 87.78(± 32.64) ppm에서, 조성 4개월 후 62.91(± 5.66)ppm으로 감소하였다가 조성 6개월 후에는 153.64(± 19.37)ppm으로 다시 증가하였다(Fig. 3 (o)). 이를 지점별로 살펴보면 조성 4개월 후 습지의 침강저류지에서 58.00ppm, 상부 저류형습지에서는 61.63 ppm, 하부 저류형습지에서 69.10ppm으로, 습지 하부로 갈수록 증가하였다. 처리습지 조성 6개월 후에는 침강저류지에서 132.10ppm, 상부 저류형 습지에서 169.61ppm, 하부 저류형 습지에서 159.21ppm으로 나타났다.

실험습지의 경우 조성 전 토양의 유효인산 농도는 521.83ppm이었지만 조성 4개월 후에는 60.31(± 4.02)ppm로 크게 감소하였는데(Fig. 3 (p)), 조성과정에서 오염도가 높은 표토와 비교적 유효인산 농도가 낮은 것으로 추정되는 심토가 섞였기 때문인 것으로 보인다. 실험습지 조성 6개월 후에는 유효인산 농도가 82.25(± 4.49)ppm으로 다소 증가하였다. 이를 지점별로 살펴보면 습지 조성 4개월 후에는 저류형습지에서 57.49ppm, 수로 1에서 66.15ppm, 수로 2에서 59.76ppm, 수로 3에서 57.83ppm의 분포를 보였으며, 조성 6개월 후에는 저류형습지에서 80.69ppm, 3곳의 수로에서 각각 78.95ppm, 80.46ppm, 88.88ppm으로 나타나 습지 내 지점에 따른 차이는 없었다.

인공습지와 자연습지 토양의 계절별 유효인산 농도를 비교하여 보면 자연습지에서 여름철에 177.29 (± 41.05)ppm, 가을철에 200.57(± 99.39) ppm으로 측정되었으며, 처리습지의 경우 여름철 62.91 (± 5.66)ppm, 가을철 153.64(± 19.37)ppm, 실험습지의 경우 여름철 60.31(± 4.02)ppm, 가을철 82.25(± 4.49)ppm으로 나타났다(Fig. 3 (h)). 여름철 자연습지의 평균 유효인산 농도가 처리습

지와 실험습지에 비해 약 3배 높았으며, 자연습지와 처리습지, 실험습지 모두 시간이 지나면서 유효인산 농도가 증가하였다. 통계분석 결과 여름철에는 자연습지와 처리습지 및 실험습지 사이에 분명한 차이를 발견할 수 있었으나, 가을철에는 자연습지와 처리습지의 유효인산 농도가 유사하게 나타났다. 실험습지의 경우 여름철과 가을철 사이에 큰 차이가 없었다.

인이 대부분 외부에서 유입한다는 점을 고려할 때 처리습지의 급격한 인농도 증가는 외부에서 유입한 오염물질에 포함된 인성분에 기인한 것으로 판단된다. 자연습지의 경우 주변 농경지에서 인이 유입한 것으로 보인다. 또한 토양의 인 흡착력은 유기물 함량과 정의 상관관계를 보이는데(한국수자원공사, 2002), 이에 따라 유기물 함량이 높은 자연습지가 실험습지에 비해 인 농도가 높게 나타난 것으로 판단된다.

4. 결 론

인공습지 토양의 변화특성을 인공습지의 성공 여부와 습지의 기능 평가에 활용할 수 있을 지 알아보고자 인공습지 조성 후 토양의 변화를 습지 조성에 참조하였던 기준습지 토양의 변화 특성과 비교하였다. 본 연구에서는 기준습지로 자연습지 1곳과 오염물질 유입 특성이 다른 인공습지 2곳을 선정하여 주요 토양 특성의 변화를 조사하였다. 습지토양의 침수조건에 따른 물리화학적 특성변화 및 유기물 축적정도를 비교하기 위하여 토성, 함수율, pH, CEC 및 유기물함량을 측정하였으며, 습지의 영양물질의 축적정도를 비교하기 위하여 총질소와 유효인산의 농도변화를 분석하였다.

습지 표토의 토성은 전체적으로 자연습지에서는 점토의 함량이, 인공습지에서는 모래의 함량이 많은 것으로 나타나 자연습지와 인공습지의 토성은 큰 차이를 보였다. 그러나 시간이 지나면서 인공습지 토양의 실트와 점토 함량이 점차 증가하

였다. 함수율의 경우 여름철과 가을철 모두 자연습지가 처리습지와 실험습지보다 높았다. 실험습지의 경우 여름철과 가을철의 함수율이 큰 차이를 보이지 않았지만, 처리습지 토양의 함수율은 시간이 지나면서 증가하였다. 유기물 함량도 자연습지 토양이 인공습지 토양보다 높았으며, 자연습지와 인공습지 모두 여름철에 비해 가을철의 유기물함량이 높은 것으로 조사되었다. 토양의 pH는 자연습지가 인공습지에 비하여 낮았으며, 인공습지의 경우에도 습지 조성 후 중성으로 변화하였다가 다시 pH가 낮아지는 것을 관찰할 수 있었다. CEC, 총질소, 유효인산의 농도는 외부의 유기물질이나 오염물질 유입과 관련 있는 것으로 판단되나, 오랜 기간 동안 영양물질을 보유한 자연습지에서 인공습지보다 높았으며, 인공습지의 경우에도 시간이 지나면서 점차 증가하였다. 실험습지의 경우 조성과정에서 오염도가 높은 표토와 오염도가 낮은 심토가 섞여 유기물과 영양물질의 농도가 감소하였는데, 습지 조성과정에서 나타나는 토양 특성변화도 습지의 생지화학적 기능이나 습지토양 발달에 영향을 미칠 수 있을 것이라 판단된다.

이 연구는 인공습지 토양의 물리적 특성변화와 유기물 및 영양물질 보유량변화 등과 같은 습지토양의 발달특성을 활용하여 인공습지 조성의 성공 여부나 인공습지의 기능 평가에 활용할 수 있을 있음을 보여주었으며, 이를 위하여 자연습지와 같은 기준습지의 역할이 중요함을 제시하였다.

감사의 글

본 연구는 부산지역환경기술개발센터의 2007년도 연구사업비(07-1-70-76)의 지원과 2008년도 교육과학기술부와 한국산업기술재단 지역혁신인력양성사업의 지원에 의하여 수행되었으며 이에 감사드립니다.

참 고 문 헌

1. 김영윤, 김진이, 이광섭, 성기준, 이석모, 자연습지와 저류형인공습지의 비점오염물질저감효율 비교·평가, 2008 한국물환경학회·대한상하수도학회 추계학술발표회, pp. 37-38, 2008.
2. 김영윤, 이광섭, 이석모, 강대석, 성기준, 낙동강 수계 자연습지의 계절별 수질변화특성 분석, 한국물환경학회, 제25권, 제5호, pp. 713-719, 2009.
3. 김종구, 유선재, 새만금지역 하구갯벌의 유기물 분해능력 평가, 한국환경과학회지, 제10권, 제5호, pp. 315-321, 2001.
4. 농업기술연구소, 토양화학분석법, 1988.
5. 문현숙, 습지의 발달 환경과 특성: 경기도 산지를 중심으로, 한국지형학회지, 제12권, 제4호, pp. 55-67, 2005.
6. 박소영, 이인철, 이병호, 이자연, 이용민, 성기준, 해양 준설토를 이용한 인공염습지 현장시험구 조성 후 초기 환경변화, 한국해양환경공학회지, 제11권, 제2호, pp. 63-69, 2008.
7. 성기준, 안중수, 박태국, 이용민, 정용현, Reference wetland를 이용한 비점오염저감습지 조성, 한국환경과학회 2008 가을학술발표회 논문집, pp. 186-190, 2008
8. 송호경, 박관수, 박혜림, 소순구, 김효정, 김무열, 신안군 장도 산지습지 식생과 토양특성, 한국환경생태학회지, 제20권, 제4호, pp. 407-414, 2006.
9. 신영호, 김성환, 박수진, 양산 신불산 산지습지의 토양특성 및 퇴적환경, 대한지리학회지 춘계학술대회, 제20권, pp. 42-42, 2004.
10. 윤춘경, 권태영, 우선호, 오수처리용 인공습지 내 토양의 이화학적 특성조사, 한국농촌계획학회지, 제5권, 제2호, pp. 24-29, 1999.
11. 최병선, 이성백, SAS를 이용한 현대통계학, 세경사, 2003.
12. 한국수자원공사, 시화호 인공습지 운영관리 방안연구, 2002.
13. 환경부, 훼손된 자연생태계 복원기술 대체습지의 수질정화기능 강화기술, 2005.
14. 환경부, UNDP/GEF국기습지보전사업관리단, 2007 전국내륙습지 일반조사, 2007.
15. 해양수산부, 해양환경공정시험방법, 2005.
16. Anderson, C. J., Kettlewell, C. I., Mitsch, W. J., Soil development of two wetland creation areas at the Olentangy River Wetland Research Park in Columbus, Ohio, Annual report (Olentangy River Wetland Research Park) 2002, pp. 51-56, 2004.
17. Atkinson, R. B., Daniels, W. L., Cairns, JR. J., Hydric soil development in depressional wetlands: A case study from surface mined landscapes:13, p. 182-197. In Majumdar, S. K., Miller, E. W., Brenner, F. J., (eds.) Ecology of Wetlands and Associated Habitats. Pennsylvania Academy of Science, Philadelphia, PA, USA, 1998.
18. Broennum, R., Hunter, M., Reed, S., Created wetland soil development after four years flooding, Annual report (Olentangy River Wetland Research Park) 2000, pp. 127- 131, 2001.
19. Bruland, G. L., Richardson, C. J., Comparison of Soil Organic Matter in Created, Restored and Paired Natural Wetlands in North Carolina, Wetlands Ecology and Management, Vol. 14, No. 3, pp. 245-251, 2006.
20. Campbell, D. A., Cole, C. A., Brooks, R. P., A comparison of created and natural wetlands in Pennsylvania, USA, Wetlands Ecology and Management, Vol. 10, No. 1, pp. 41- 49, 2002.
21. Craft, C., Broome, S., Campbell, C., Fifteen years of vegetation and soil development after brackish-marsh creation, Vol. 10, No.2, pp. 248-258, 2000.

22. Giese, L. A. B., Flannagan C. T., Soil Properties in Northern Virginia Created Forested Wetlands, Hydrology and Management of Forested Wetlands. Proceedings of the International Conference, ASABE, pp. 34-40, 2006.
 23. Lu, J., Wang, H., Wang, W., Yin, C., Vegetation and soil properties in restored wetlands near Lake Taihu, China, Hydrobiologia, Vol. 581, pp. 151-159, 2007.
 24. Kadlec, R. H., Knight, R. L., Treatment wetlands. CRC Lewis Publishers, Boca Raton, New York, 1996.
 25. Kadlec, R. H., Wallace, S., Treatment Wetlands(2nd edition), CRC Press, Boca Raton, 2009.
 26. Mitsch, W. J., Gosselink, J. G., Wetlands (3rd edition), New York: John Wiley and Sons., 2000.
 27. Mitsch, W.J., Jorgensen, S.E. Ecological Engineering and Ecosystem Restoration. John Wiley & Sons Inc., New York, 411, 2004.
 28. Stolt M. H., Genthner M. H., Daniels W. L., Groover V. A., Nagle S., Haering K. C., Comparison of soil and other environmental condition in constructed and adjacent palustrine reference wetlands, wetlands, Vol. 20, No. 4, pp. 671-683, 2000.
 29. Tiner, R.W., Wetland indicators, Lewis Publisher, New York, 1999.
- 논문접수일 : 09년 08월 12일
○심사의뢰일 : 09년 08월 13일
○심사완료일 : 10년 04월 13일