한국습지학회지 제14권 제2호, 2012년 5월 (265 - 275)

습지토양 및 연안퇴적물의 유기물질 및 영양물질 보유 특성

박 소 영* / 이 용 민** / 윤 한 삼*** / 성 기 준****+

Retention properties of organic matters and nutrients in wetland soils and coastal sediments

Soyoung Park* / Yong Min Yi** / Han-Sam Yoon*** / Kijune Sung****+

요약 : 최근에 기후변화와 수질관리의 중요성이 증가하면서 습지토양의 탄소와 영양물질 보유 특성에 대한 관심이 증가되고 있다. 본 연구에서는 연안퇴적물과 인공습지, 자연습지(내륙, 하구, 갯벌)와 같이 연안퇴적물 및 다양한 유형의 습지토양에서의 유기물과 영양물질의 보유특성을 알아 보고자하였다. 또한 유기물, 영양물질, 입도에 따른 상관관계를 분석하여 이들 항목 간의 연관성을 살펴보았다. 연구 결과 유기물이나 영양물질의 보유정도가 습지의 유형에 따라 달라지는 것으로 나타났는데 내륙습지가 하구나 연안습지보다 질소의 보유 능력이 큰 것으로 나타났으며, 같은 육상생태계에서도 더 오랜 기간 동안 오염물질이 유입되고 자체적으로 유기물을 생산하여 축적하고 있는 자연습지에서 유기물과 질소의 농도가 인공습지보다 더 높은 것을 조사되었다. 연안지역의 경우 해수의 흐름이 원활한 하구나 갯벌 보다 해수의 유통이 느린 만 지역에서 유기물과 질소 농도가 높게 나타났다. 또한 화학적산소요구량은 총유기탄소 및 총질소농도와 높은 상관관계를 보여주어 화학적산소요구량 자료를 이용하여 해당 습지의 총유기탄소나 총질소 농도를 효과적으로 추정할 수 있음을 보여주었다.

핵심용어 : 연안퇴적물 및 습지유형, 총유기탄소, 질소, 인, 상관관계

Abstract : As climate change is becoming a growing concern and the importance of water management is increasing, the retention of carbon and nutrients in wetland soils including inland and coastal area has become important. In this study, retention characteristics of organic matter and nutrients of coastal sediment and soils in different types of wetlands such as constructed wetland, natural (inland marsh, estuary, tidal flat) wetlands were investigated. A correlation analysis was also performed to understand the relationship among organic matter properties, nutrient concentrations and soil texture of wetland soils. The degree of retention of organic matter and nitrogen in wetland soils varied with the wetland type. Inland wetlands retain more nitrogen than estuary or coastal wetlands, and natural wetlands retain more organic matter and nitrogen than constructed ones. Coastal sediments in a bay area where seawater circulation is restricted have more nutrients than those in estuary or tidal flats where seawater circulates well. The results showed that the sediment chemical oxygen demand has a high correlation with the total organic carbon and the total nitrogen in the studied area.

***Keywords** : wetland type, total organic carbon, nitrogen, phosphorous, correlation*

+ Corresponding author : ksung@pknu.ac.kr
* 비회원·국립부경대학교 해양산업개발연구소 전임연구원·E-mail : soyoung@pknu.ac.kr
** 정회원·국립부경대학교 생태공학과 박사과정·E-mail : yongmin@pknu.ac.kr
*** 비회원·국립부경대학교 해양산업개발연구소 교수·E-mail : yoonhans@pknu.ac.kr
**** 정회원·국립부경대학교 생태공학과 교수·E-mail : ksung@pknu.ac.kr

1. 서 론

토양은 광물기원인 무기물과 생물체에서 유입된 유기물로 구성되어 있는 복합체로서 육상생태계를 지지하는 중요한 구성요소이다. 식물의 뿌리나 토양생물들의 분해 산물로 토양에 축적되는 토양유기물은 탄소의 저장, 토양 미생물의 탄소원, 토양의 함수율 및 식물 생산성 증진에 기여하는 등 중요한 토양의 생태적 기능을 담당하고 있다(Howard and Howard, 1990; Brady and Weil, 2002). 호수나 연안 퇴적물에 존재하는 유기물은 분해되면서 수체에 용존산소 농도에 영향을 줄 수 있기 때문에 수질관리에 중요한 대상이 되기도 하며(Leong and Tanner, 1999). 특히 습지에서 중요한 질소 제거 기작인 탈질반응은 총유기탄소량과 상관관계가 더 높은 것으로 알려져 있다(Burford and Bremner, 1975).

토양에 존재하는 탄소는 육상 식물에 존재하는 탄소 양의 약 3-5배를 차지하고 있어 전지구적 탄소 순환과정에 있어서 매우 중요한 부분을 차지한다(Post et al., 1982). 특히 습지토양은 하구생태계에서 유기탄소 뿐만 아니라 질소와 같은 영양물질의 중요한 저장고로 알려져 있다(Craft et al., 1988). 습지토양은 습지를 형성하는 중요한 요소인 습지의 수문학적 영향(hydrologic effect) 때문에 장기간 토양이 포화되거나 침수되어 있으며 이로 인하여 혐기성 조건이 형성되어 유기물의 분해가 느리게 일어난다. 따라서 입도 등 물리적인 특성이 유사한 토양에 동일한 양의 유기물이 유입될 경우에도 일반토양보다 습지토양에 더 많은 유기물이 축적될 가능성이 크며 습지토양에 보유되어 있는 탄소나 영양물질의 양도 많게 된다. 또한 유기물이나 영양물질의 축적은 같은 습지라 할지라도 습지의 생지화학적 기작이나 인근 생태계와의 연결정도에 영향을 받게 되는데 이러한 특성은 습지의 위치나 수문특성 및 형성 요인 등 연안퇴적물 및 습지유형에 따라 달라질 수 있다(Mitsch and Gosselink, 2000). 따라서 습지 유형에 따른 유기물질과 영양물질의 보유특성을 파악하는 것은 습지를 관리하거나 습지가 제공하는 생태적 서비스를 효과적으로 이용하는데 도움이 될 수 있다.

토양으로 유입된 유기화합물질은 토양유기탄소에 주로 흡착되는데 토양의 유기탄소 함량은 다공성매체에서 유기화합물질의 분배와 거동에 중요한 영향을 미치는 것으로 알려져 있다(Miller and Weber, 1984). 같은 지역의 토양이라 할지라도 유기탄소 함량이 클수록 더 많은 유기화합물질을 흡착할 수 있으며 대상 화합물질의 이동을 지연시키게 된다. 또한 지하수로 유출되거나 토양 생물에게 이용될 수 있는 유기화합물질의 생물이용성을 감소시킨다.

탄소와 질소 등의 원소로 구성되어 있는 토양유기물은 다양한 방법으로 측정할 수 있다. 이 중 강열감량(Ignition Loss)은 토양의 유기물을 고온에서 산화시킨 후 감소하는 질량을 이용하여 측정하는 방법으로 토양에 포함되어 있는 유기물 양을 비교적 쉽게 구할 수 있어 가장 많이 쓰이는 방법이다(Konen et al., 2002). 한편 호소나 연안지역 퇴적물의 경우 존재하는 유기물의 총량 보다는 유기물 중에 쉽게 분해되어 수체 내 용존산소를 소비하여 빈산소 및 저산소수 수괴를 형성하는 등 수질 환경에 영향을 줄 수 있는 양이 더 중요할 수 있다. 토양이나 퇴적물에 존재하는 이와 같은 유기물은 산화제로 산화시켜 소모되는 산소량인 화학적산소요구량(sediment chemical oxygen demand, SCOD)을 이용하여 간접적으로 측정하기도 한다. 퇴적물의 화학적산소요구량이 높을수록 퇴적물 내 쉽게 분해될 수 있는 유기물질의 양이 많이 포함되어 있는 것을 의미하는 것으로 퇴적물의 오염 지표로 활용된다(국토해양부, 2010). 또한 습지나 하천 하부에서 분해되는 유기물은 분해과정 중에 유기물과 결합되어 있던 질소와 인의 용출이 일어나기도 하므로 용존산소의 감소와 함께 영양염류의 공급원으로도 작용할 수도 있다.

토양의 유기탄소량은 기기분석과 습식 산화법(wet oxidation)을 이용하여 분석하게 되는데 전자는 고온에서 시료를 연소한 후 CHN 분석기나

총유기탄소분석기를 이용하여 토양에 포함되어 있는 탄소의 양을 분석하는 것이며(김경홍 등, 2006), 후자는 토양에 존재하는 유기탄소를 중크롬산칼륨을 이용하여 분석하는 Walkley-Black 적정법으로(Leong and Tanner, 1999; Vos et al., 2007), 국내의 화학적산소요구량 측정법과 유사한 방법이다. 습식 산화법의 경우 비용이 저렴하지만 난분해성유기물이 함유된 경우 유기물량이 과소평가되는 경향이 있으며 기기분석의 경우 신뢰도는 높으나 비용이 상대적으로 많이 드는 단점이 있다.

토양 유기탄소의 농도 자료가 없는 경우에는 유기물 항목 간의 관계식을 통하여 유기탄소의 양을 추정할 수 있는데 특히 소수성 유기물질의 분배나 거동을 예측할 때 많이 사용된다(Konen et al., 2002; Howard and Howard, 1990). 하지만 기존의 추정식은 주로 토양이나 지하수 오염 등 육상 생태계에서 주로 사용되기 때문에 연안퇴적물이나 습지토양에 적용하기에는 무리가 따를 수 있다. 습지토양의 유기물 특성간의 연관 정도를 이용하여 유기탄소 추정식을 이용할 수 있다면 습지토양에서의 유기탄소 분포 경향을 알고 유기화합물질의 거동을 이해하는데 유용하게 사용될 수 있다.

따라서 본 연구에서는 연안퇴적물과 다양한 유형의 습지토양에서의 유기물과 영양염류의 보유특성을 조사하고 아울러 유기물, 영양염류, 입도 등 주요 특성 간에 상관관계를 분석하고 이들 항목 간의 연관성을 살펴보았다. 본 연구 결과는 습지나 연안 수질 관리에 효과적으로 이용될 수 있을 것으로 기대된다.

2. 실험방법

2.1 대상 지역

본 연구에서는 연안퇴적물 및 다양한 유형의 습지토양 내 유기물 및 영양물질 보유특성을 알아보고자 습지의 위치 및 형성요인에 따라 내륙초본습지, 하구습지, 갯벌, 인공습지와 조하대의 연안퇴적물 등 5개 지역을 선정하여 조사를 수행하였다. 조사지역은 내륙초본습지(inland marsh, IM)로서 경남 함안에 위치한 대평늪, 하구습지(estuary wetland, EW)로는 낙동강 하구습지, 갯벌(tidal flat, TF)은 신두리 인근 지역의 갯벌, 연안퇴적물로는 마산만과 진해만 해역의 조하대 퇴적물(subtidal sediment, SS), 인공습지(constructed wetland, CW)는 서낙동강과 부산 OO대학교에 설치된 인공습지로서 대상지역의 위치와 좌표는 Fig. 1과 Table 1에 각각 나타내었다. 시료는 내륙초본습지 내 7개 지점, 인공습지 내 8개 지점, 갯벌 내 5개 지점, 하구습지 내 11개 지점, 연안조하대 내 10개 지점 등 5개의 유형에 대하여 총 41개 지점에서 시료를 채취하였으며 시료의 채취는 6월에서 8월 사이에 이루어졌다.

대평늪은 주로 강우로 인하여 습지에 유입된 물질이 장기간 체류하다 다음 강우 시에 하천으로 배출되는 저류형 습지이며(김영윤 등, 2009), 마산만과 진해만은 육상으로부터 오염물의 유입이 비교적 많지만 인근 지역과의 해수유통이 느리게 일어나는 만 지역이다(이찬원 등, 1998; 최우정 등, 1994). 이와는 달리 낙동강 하구와 갯벌은 하천 혹은 파도의 영향을 많이 받아 인근 생태계로 물질의 이동이 비교적 활발히 일어나고 있는 지역이며, 낙동강과 부산 OO 대학교에 설치된 인공습지는 조성된 지 2년이 경과된 습지토양으로 현재 습지토양발달이 이루어지고 있는 지역이다(이자연 등, 2010). 시료의 채취는 갯벌, 하구습지, 인공습지의 경우에는 아크릴로 제작한 원통형 토양채취기를 이용하여, 조하대의 경우 그랩형 시료채취기(grab sampler)를 이용하여 채취하였다. 채취한 시료는 아이스박스를 이용하여 4℃ 이하로 보관하여 실험실로 이동한 후 분석하였다.

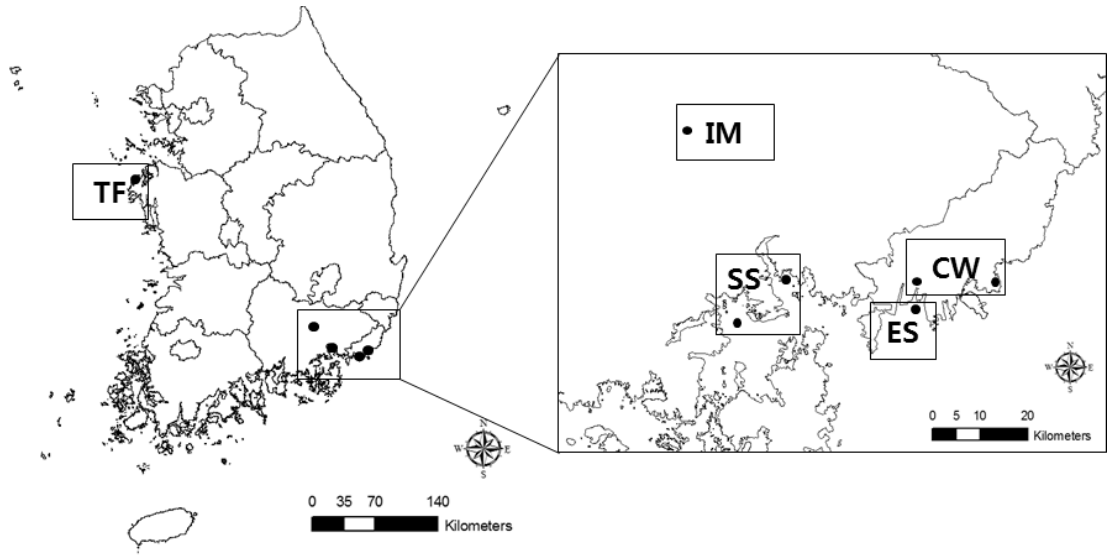

Fig. 1. Map showing the sampling sites. (CW, constructed wetland; ES, estuary wetland; IM, inland marsh; SS, subtidal sediment; TF, tidal flat)

Table 1. Wetland or sediment type and locations of studied area in this study

Wetland or Sediment Type	Location of Studied Area	Longitude and Latitude
Inland marsh (IM)	Haman-gun	E128°20′19.79″ N35°20′22.20″
Estuary wetland (EW)	Nakdong River Estuary	E128°56′11.53″ N35°03′42.39″
Tidal flat (TF)	Shindu-ri area	E126°10′58.57″ N36°49′40.24″
Subtidal sediment (SS)	Masan Bay	E128°36′06.52″ N35°08′27.56″
	Jinhae Bay	E128°29′21.99″ N34°58′32.82″
Constructed wetland (CW)	West Nakdong River	E128°56′41.81″ N35°13′27.26″
	Busan city	E129°06′06.42″ N35°07′54.32″

2.2 습지토양 분석

함수율, 강열감량(IL), 화학적산소요구량, 입도는 해양환경공정시험법에 준하여 분석을 실시하였다(국토해양부, 2010). 총유기탄소량(TOC)는 Total Organic Carbon Analyzer (TOC-Vcph, Shimadzu, Japan)를 이용하여 분석하였으며, 습지토양의 인은 유효인산(available phosphate)을, 질소는 총질소(total nitrogen)의 농도를 측정하였다. 함수율은 증발접시에 시료 적당량을 취하여 무게를 정확하게 측정한 후, 110℃ 의 건조기에서 4시간 건조시킨 다음 데시케이터 안에 넣어 식힌 후 무게를 달아 건조 전·후의 무게차를 이용하여 계산하였고 강열감량은 도가니에 시료 약 5g을 담아 110℃에서 항량이 될 때까지 건조 한 후, 전기로에 넣어 550℃의 온도로 2시간 동안

가열하였다. 이후 가열 전 시료 무게와 가열 후 시료 무게의 차이를 이용하여 계산하였다. 화학적 산소요구량은 습시료 약 1g에 과망간산칼륨 용액과 수산화나트륨용액을 취하여 1시간 중탕하는 과정을 통해 분해 한 후 티오황산나트륨용액으로 적정하여 계산하였다. 습지토양의 입도는 체분석과 피펫팅 분석을 병행하여 분석하였다. 육상토양의 경우 모래, 실트, 점토로 입도를 분류하지만 퇴적물의 경우에는 실트와 점토를 포함한 니질과 모래인 사질로 분류하는 것이 일반적이다. 따라서 본 연구에서는 이를 모두 고려하여 연안퇴적물과 습지토양의 입도를 모래(0.063 mm-0.2 mm), 실트(0.004 mm-0.063 mm), 점토(0.004mm 이하), 니질(0.063 mm 이하) 등으로 분류하여 이에 따른 특성을 조사하였다. 총질소 농도는 Micro Kjeldahl 법으로 정량하였는데(농업과학기술원, 2000), 건조한 습지토양 5g을 켈달플라스크에 넣고 황산염혼합분말(K_2SO_4와 $CuSO_4$ = 9:1)과 농황산을 가하여 분해한 후 켈달 증류 장치(K-434, Buchi, Switzerland)를 이용하여 증류한 후 황산 표준용액으로 적정 계산하였다. 유효인산의 분석을 위하여 건조한 습지토양 0.5g을 550~600℃로 12시간 강열 한 후 1N HCl 3㎖을 넣고 증류수로 씻으면서 100㎖ 비커에 넣은 후 여과시켰다. 5N HCl과 5N NaOH로 pH 5로 조절 후 25㎖을 취해 삼각플라스크에 넣고 지시약을 넣어 발색시킨 후 720nm로(UV 1650PC, Shimadzu, Japan) 측정 하였다(이자연 등, 2010). 총 유기탄소량은 건조한 시료를 분쇄하여 연소로에서 고온으로 연소(680-900℃)시키고 이때 발생하는 CO_2 가스를 비분산적외선 검출기로 검출한 총탄소량과 시료에 인산을 첨가하여 200℃에서 5분 처리하여 발생한 CO_2를 비분산적외선 검출기로 검출한 무기탄소 양의 차이로 계산하였다.

2.3 통계분석

자연습지와 인공습지 같은 습지 형성요인이나 내륙습지와 연안습지에 영향을 미치는 담수와 해수의 차이 그리고 인근 생태계와의 연결정도에 따른 물질이동의 용이성 등이 상이한 연안퇴적물과 다양한 습지유형에 따른 물질보유 특성을 알아보기 위하여 연안퇴적물 및 습지유형에 따른 유기물질, 영양물질 및 입도 등의 차이를 일원분산분석법(one way ANOVA)으로 5% 유의수준에서 분석하였다. 또한 조사가 수행된 모든 퇴적물과 습지토양 자료를 이용하여 조사 항목 간의 상관분석을 실시하였다. 상관분석을 통하여 상관계수가 높게 나타난 항목 간에 단순선형 회귀분석을 실시하여 두 항목간의 선형회귀식을 구하였다. 모든 통계분석은 SAS 9.2 (SAS Institute Inc. USA)를 이용하여 수행하였다.

3. 결 과

본 조사에서 분석한 전체 습지토양과 연안퇴적물의 주요 항목들에 대한 분포 특성을 Table 2에 나타내었다. 강열감량과 총유기탄소량은 각각 6.05±4.62% 와 1.35±1.31%, 화학적산소요구량은 1.38±1.31% 범위인 것으로 조사되었다. 변동계수(CV)의 경우 총질소가 가장 큰 것으로 조사되어 연안퇴적물 및 습지유형별로 질소 보유량의 차이가 많이 나타나는 것을 알 수 있었다. 이에 비해 토양 함수율의 변동계수는 작게 나타났는데 이는 물에 영향을 지속적으로 받고 있는 연안퇴적물과 습지토양의 일반적인 특성 때문인 것으로 판단된다. 한편 유기물 농도의 경우에는 강열감량이, 영양물질의 경우에는 유효인산의 변동계수가 낮은 것으로 나타나 이들 특성이 본 연구에서 조사한 습지유형 간에 차이가 상대적으로 작은 것으로 조사되었다. 한편 대상 연안퇴적물 및 습지 유형들의 입도 특성을 살펴보면 니질의 평균 함량이 가장 많은 것으로 나타났으며, 변동계수도 니질이 가장 낮게 나타났다.

Table 2. Descriptive statistics of physicochemical properties of coastal sediment and various wetland soils

	Water content (%)	IL (%)	SCOD (mg/g·dry)	TOC (%)	TN (%)	Avail-P (mg/kg)	Sand (%)	Silt (%)	Clay (%)	Mud (%)
Mean	41.39	6.05	13.84	1.35	0.10	110.18	43.91	32.28	23.75	56.03
Median	30.29	4.83	8.23	0.96	0.04	119.76	44.11	27.74	21.27	55.89
Min	15.75	1.03	0.68	0.08	0.01	44.49	0.00	1.94	1.14	5.44
Max	83.67	18.21	49.19	4.61	0.40	44.49	94.56	97.46	68.24	100.0
SD	19.94	4.62	13.84	1.31	0.11	44.49	36.44	27.37	20.26	36.50
CV	48.17	76.37	94.43	96.50	110.18	29.27	82.99	84.78	85.30	65.14

* SD: standard deviation; CV: coefficient of variation

본 연구 결과는 대상 지역인 연안퇴적물과 습지 유형에 따른 조사 항목들의 상대적 차이를 이해하는데 도움을 줄 수 있다. 하지만 연안퇴적물과 여러 습지유형을 함께 고려한 본 연구와는 달리 한 가지 습지 유형만을 대상으로 하였을 경우에 변동계수는 감소할 수 있다. 인천과 경기연안 지역의 갯벌 퇴적물의 경우 강열감량과 화학적산소요구량의 변동계수는 각각 59.1% 와 53.6%로 본 연구보다 낮은 값을 보여준 바 있다(해양수산부, 2003). 하지만 하천지역과 갯벌퇴적물을 함께 조사한 타 지역 조사에서는 강열감량이 88.4%, 총탄소는 137.8%로 나타나 본 조사보다 다소 큰 변동계수를 나타내었다(해양수산부, 2001). 이러한 결과는 조사지역의 이질성이 변동계수에 영향을 줄 수 있음을 보여주어 본 연구 결과를 다른 지역을 대상으로 한 연구 결과와 직접 비교하기는 어려울 것으로 판단된다.

연안퇴적물 및 습지유형에 따른 유기물질, 영양물질, 입도 특성을 Table 3에 나타내었다. 강열감량의 경우 내륙초본습지와 만지역의 연안퇴적물에서 높게 나타났으며, 그 다음에 인공습지, 갯벌 및 하구습지의 순으로 나타났다($p<0.0001$). 이러한 결과를 기존의 조사(해양수산부, 2001; 2003)와 비교해보면 본 연구의 하구습지와 갯벌의 강열감량 결과는 전북연안 퇴적물의 조사결과(1.29±1.08%)와 인천과 경기연안갯벌의 조사결과(3.52±2.08%)와 유사한 수준을 나타내었다. 화학적산소요구량과 총유기탄소량의 경우에는 내륙초본습지, 만지역의 연안퇴적물 순으로 나타나 해안퇴적물보다 내륙초본습지에서 더 높았으며, 그 다음에 인공습지와 갯벌 및 하구 습지로 세지역이 모두 유사한 수준인 것으로 조사되었다($p<0.0001$). 이를 기존의 조사(해양수산부, 2001; 2003)와 비교해보면 본 연구의 하구습지와 갯벌의 화학적산소요구량 결과는 전북연안 퇴적물의 조사결과(2.68±1.85 mg/g·dry)와 인천과 경기연안갯벌의 조사결과(6.60±3.54 mg/g·dry)와 유사한 수준을 나타내었으며, 총유기탄소의 경우 전북연안 퇴적물과 인천과 경기연안 갯벌에서 각각 0.22±0.30%과 1.01±0.36%로 나타나 본 연구의 내륙습지의 총유기탄소 결과 보다는 낮은 것으로 조사되었다. 이러한 결과는 내륙지역의 경우 오랜 기간에 걸쳐 유기물질이 지속적으로 유입되거나 습지 내에서 생산되어 축적되어진 자연습지가 이러한 기능을 수행한지 얼마 안 되는 인공습지보다 유기물질을 더 많이 축적하고 있으며, 연안지역의 경우 해수의 유통이 원활하지 않은 만지역의 퇴적물에 유기물질이 더 많이 축적되어 있는 것을 나타낸다. 반면에 하천과 연결되어 있어 해수의 흐름이 활발한 하구지역과 조류의 영향이

큰 연안지역 갯벌의 경우 유기물 보유 정도가 낮은 것으로 나타났다. 또한 총질소의 경우에도 내륙초본습지에서 가장 농도가 높았으며 그 외 연안퇴적물 및 습지유형에서는 유사한 수준으로 나타났다. 인공습지의 경우에도 유기물농도가 더 높았던 해안퇴적물과 유사한 수준의 질소를 보유하고 있는 것으로 조사되었다. 갯벌지역의 총질소 조사결과는 기존에 조사되었던 전북연안 퇴적물의 총질소 조사결과(0.02±0.02%)와 유사한 수준을 보여주었으나 인천과 경기연안 갯벌의 조사결과 (0.12±0.02%) 보다는 다소 낮은 수준을 나타내었다(해양수산부, 2001; 2003). 유효인산의 경우는 연안퇴적물에서 다소 높게, 인공습지에서 낮게 나타났지만 다른 유기물이나 영양물질에 비교할 때 연안퇴적물 및 습지유형에 따른 차이가 크게 나지 않았다. 습지 유형에 따른 입도특성을 보면 모래함량은 하구습지에서, 실트함량은 내륙초본습지에서, 점토함량은 연안퇴적물과 갯벌에서 다른 습지 유형보다 높은 것으로 조사되었다.

Table 3. Comparison of physicochemical properties of coastal sediment and various wetland soils.

Properties	Coastal sediment and wetland soil (mean±SD)					Statistics (ANOVA)	
	Subtidal sediment	Estuary wetland	Tidal flat	Inland marsh	Constructed wetland	F	P
Water content (%)	57.44±12.21b	26.44±2.60c	22.17±5.32c	69.71±10.07a	29.10±3.05c	56.1	<.0001
IL (%)	10.27±2.31a	1.74±0.71c	2.36±0.31bc	11.69±3.52a	4.08±1.77b	42.31	<.0001
SCOD (mg/g·dry)	22.40±8.68b	3.56±2.66c	3.57±1.41c	32.44±11.52a	7.40±3.83c	28.10	<.0001
TOC (%)	2.26±0.86b	0.22±0.20c	0.31±0.05c	3.17±1.03a	0.84±0.46c	32.39	<.0001
TN (%)	0.08±0.05b	0.03±0.02b	0.02±0.01b	0.29±0.10a	0.07±0.04b	31.99	<.0001
Avail-P (mg/kg)	139.57±32.07a	117.24±19.90ab	117.86±56.44ab	124.34±29.63ab	97.28±37.80b	1.79	NS
Sand (%)	13.51±23.50c	84.48±11.99a	36.10±NAbc	13.51±35.74c	57.62±22.15b	18.31	<.0001
Silt (%)	39.80±24.85b	9.31±2.62c	31.95±NAb	69.64±32.09a	21.98±12.88bc	11.80	<.0001
Clay (%)	46.46±21.73a	6.22±9.73c	31.95±NAab	16.85±13.16bc	20.41±11.29bc	11.74	<.0001
Mud (%)	86.26±24.21a	15.52±11.99c	63.90±NAab	86.49±35.74a	42.38±22.15b	17.93	<.0001

*SD, standard deviation; NA, Not applicable; NS, Not significant(p>0.05)

Table 4는 조사 항목간의 상관관계를 분석한 결과를 나타낸다. 유기물 관련 항목간의 상관도가 매우 높은 것으로 나타났는데, 총유기탄소량의 경우 강열감량 보다는 화학적산소요구량과 상관관계가 더 높은 것으로 나타났다. 총질소의 경우에는 유기물관련 항목간의 상관계수 보다는 다소 낮게 나타났지만 화학적산소요구량과 가장 높은 상관도를 나타내었다. 이와 같이 총질소와 총유기탄소 모두 화학적산소요구량과 상관관계가 높은 것은 토양 내 질소와 유기탄소 모두 유기물 분해도와 직접적인 연관이 있음을 나타낸다. 질소에 비해 인의 경우 다른 유기물 항목과 상관관계가 낮은 것으로 나타났으며 질소와도 유의성 있는 상관관계가 존재하지 않은 것으로 나타났다. 입도 특성과의 상관관계를 살펴보면 인을 제외한 대부분의 항목에서 모래와 높은 음의 상관관계를 나타났으

며 실트와 니질과도 높은 양의 상관성을 갖고 있는 것으로 조사되었다. 하지만 점토함량과는 유의성 있는 상관관계를 갖고 있지 않은 항목이 많았으며 유의성이 있다할지라도 대부분 상관관계가 낮은 것으로 나타났다. 이는 본 연구에서 조사한 습지들의 경우 점토 함량이 유기물 농도에 영향을 주는 갯벌과는 달리 습지의 위치나 유기물 유입특성 그리고 인근생태계와의 연결정도 등에 의하여도 다양한 영향을 받고 있기 때문으로 판단된다. 본 연구에서와 같이 연안퇴적물과 여러 습지유형을 함께 고려하여 입도특성과 유기물 또는 영양물질과의 상관관계를 추정할 때에는 점토함량보다는 니질함량을 이용하는 것이 더 효과적일 것으로 판단된다.

Table 4. Pearson correlations between physicochemical properties of coastal sediment and various wetland soils.

	Water content	IL	SCOD	TOC	TN	Avail-P	Sand	Silt	Mud	Clay
Water content	1									
IL	0.949**	1								
SCOD	0.952**	0.965**	1							
TOC	0.929**	0.938**	0.955**	1						
TN	0.762**	0.756**	0.826**	0.791**	1					
Avail -P	0.375*	0.386*	0.387*	0.363*	0.189	1				
Sand	-0.707**	-0.785**	-0.750**	-0.774**	-0.599**	-0.289	1			
Silt	0.720**	0.733**	0.744**	0.715**	0.774**	0.200	-0.838**	1		
Mud	0.706**	0.784**	0.750**	0.774**	0.599**	0.290	-0.999**	0.836**	1	
Clay	0.289	0.412**	0.337*	0.417**	0.026	0.261	-0.672*	0.159	0.672**	1

*and ** correlation are significant at the 0.05 and 0.01 levels, respectively (2-tailed)

습지토양이나 연안퇴적물의 총유기탄소량과 가장 상관계수가 크게 나타난 화학적산소요구량을 이용하여 총유기탄소량과 화학적 산소요구량간의 단순선형 회귀분석을 실시하였다. 회귀분석 결과 식 (1)의 선형회귀식을 구하였다.

$$TOC(\%) = 0.0954 \times SCOD(mg/g \cdot dry) + 0.0320 \quad (식\ 1)\ (p<0.0001)$$

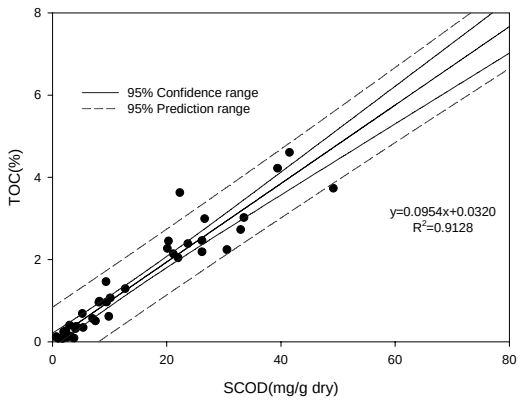

Fig. 2. Linear regression of SCOD and TOC in coastal sediment and wetland soils.

식 (1)의 결정계수는 0.9128로 높게 나타났는데, 이는 습지토양의 총유기탄소량은 화학적산소요구량을 통하여 90%이상 설명이 가능하며, 만지역의 조하대 퇴적물 1개 지점을 제외한 대부분의 조사 결과들을 95% 예측 수준에서 표현할 수 있음을 보여준다(Fig. 2). 이는 습지토양의 화학적산소요구량 자료를 이용하여 총유기탄소량을 비교적 정확하게 추정할 수 있음을 나타낸다. 기존 습지토양에 화학적산소요구량이 측정되었다면 식(1)을 이용하여 총유기탄소량의 농도 범위나 분포경향을 효과적으로 추정할 수 있을 것이다.

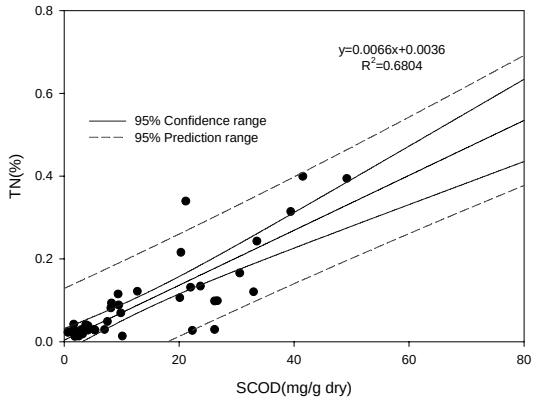

Fig. 3. Linear regression of SCOD and TN in coastal sediment and wetland soils.

습지토양이나 퇴적물의 총질소 농도와 상관계수가 가장 높게 나타난 화학적산소요구량을 이용하여 총질소와 화학적산소요구량간의 단순선형 회귀분석을 실시하였다. 회귀분석결과 식 (2)의 선형회귀식을 구하였다.

$$TN(\%) = 0.0066 \times SCOD(mg/g \cdot dry) + 0.0036 \quad (식\ 2)\ (p<0.0001)$$

식 (2)의 결정계수는 0.6804로 총유기탄소와 화학적산소요구량 간의 분석결과 보다는 다소 낮게 나타났지만 0.5 이상으로 비교적 높은 설명력을 갖는 것으로 나타났다. 화학적산소요구량보다 총질소의 농도가 낮았던 만지역의 조하대 퇴적물 1개 지점과 반대로 화학적산소요구량이 더 낮게 나타났던 내륙초본습지 1개 지점 에서 95% 예측 범위를 벗어난 것으로 나타나 화학적산소요구량을 이용하여 총질소 농도를 추정할 경우 총유기탄소보다 좀 더 주의가 필요할 것으로 판단된다 (Fig. 3).

4. 사 사

본 연구는 2009년 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업(No.2011-0027364)과 2011년도 토양·지하수오염방지기술개발(GAIA project)의 지원으로 수행되었습니다. 시료 분석에 이중헌 학생이 도움을 주었습니다.

5. 고 찰

유기물을 많이 보유하고 있는 습지나 연안퇴적물에 존재하는 유기물이 분해될 경우 수질에 영향을 주기도 하며 또한 혐기성에서는 메탄을 호기성에서는 이산화탄소를 배출하여 온실효과를 유발할 수도 있으므로(Mitsch and Gosselink, 2000), 이들 지역에 대한 유기물 농도나 그 속에 포함된 유기탄소나 총질소 농도에 대한 정보는 습지나 연안관리에 매우 유용하게 사용될 수 있다. 기존에 조사된 토양이나 퇴적물내의 유기물 농도는 주로 강열감량법을 사용하여 측정하였는데 이는 적은 비용으로 비교적 편리하게 총 유기물의 양을 측정할 수 있기 때문이다(Schulte and Hopkins, 1996). 하지만 토양에 존재하는 유기물은 다양한 형태로 존재하기 때문에 강열감량만으로는 유기물 중 분해가 용이한 부분이나 유기탄소와 질소 등 관심있는 물질의 농도를 대표하기에는 무리가 따를 수 있다(Sahrawat, 2006).

퇴적물의 화학적산소요구량은 전체 유기물 중 쉽게 분해되어 수질에 영향을 미칠 수 있는 양을

간접적으로 측정하는 방법으로 국내에서는 과망간산칼륨을 산화제로 사용하는 방법을 주로 이용하는 반면에 Walkley-Black 적정법은 산화되는 물질이 유기탄소라는 가정 하에 중크롬산칼륨을 이용하여 분해 가능한 유기물을 산화시킨 후 유기탄소량으로 환산하여 측정하는 방법이다(해양수산부, 2002; Vos et al., 2007). 본 연구에서는 과망간산칼륨을 이용하여 분석한 화학적산소요구량이 습지토양의 총유기탄소 농도와 높은 상관관계를 보여주었다. 총질소의 경우에도 유기물과 높은 상관관계가 있는 것으로 보고되고 있는데(Craft et al., 1991), 본 연구에서는 유기물 특성 중 화학적산소요구량과 높은 상관관계를 나타내어 총유기탄소뿐만 아니라 총질소의 농도도 화학적산소요구량을 이용하여 효과적으로 추정할 수 있을 것으로 판단된다. 하지만 본 연구의 결과는 담수나 해수처럼 환경이 다른 연안퇴적물과 습지토양을 함께 이용하여 구한 식이므로 어느 한 연안퇴적물 및 습지유형의 측정 자료들을 이용하여 구한 추정식보다는 정확성 떨어질 수 있다. 하지만 좀 더 다양한 지역에 적용할 수 있다는 장점도 있을 것이다. 앞으로 본 연구에서 제안한 회귀식을 다양한 유형의 습지토양에 적용함으로써 활용가능성을 검증할 필요가 있을 것이라 판단된다.

본 연구 결과 유기물이나 영양물질의 보유정도가 습지의 유형에 따라 달라지는 것으로 나타났다. 내륙습지가 하구나 연안퇴적물보다 질소 보유능이 큰 것으로 나타났으며 같은 내륙습지의 경우에도 더 오랜 기간 동안 오염물질을 축적하며 정화기능을 수행한 자연습지가 새롭게 조성되어 현재 습지토양의 형성과정 중에 있는 인공습지보다 더 큰 것을 알 수 있었다. 연안지역의 경우 해수의 흐름이 원활한 하구나 갯벌 보다 해수의 유통이 느린 만 지역에서 질소 보유능이 높게 나타났다. 내륙습지의 경우 영양물질의 보유는 습지의 전반적인 생산성을 높이며 주변수계의 수질개선에 긍정적인 영향을 주며, 하구나 갯벌 등에서도 주변에 영양물질을 공급하여 주변 해역의 기초생산성을 높이는데 기여할 수 있는 것에 비해 패쇄 수역에서는 높은 유기탄소와 질소 농도로 인하여 수질악화를 일으킬 수 도 있다(황경섭 등 2008; 한동진과 윤종성 2005). 따라서 같은 연안지역이라도 만 지역에서는 질소의 유입을 최소화 하는 것이 더 중요하다. 한편 본 연구에서와 같이 연안퇴적물과 여러 습지유형을 함께 고려하여 입도특성과 유기물 또는 영양물질과의 상관관계를 추정할 때에는 점토함량보다는 니질함량을 이용하는 것이 더 효과적일 것으로 판단되었다.

참 고 문 헌

국토해양부. 2010. 해양환경공정시험기준.

김경홍, 손승규, 손주원, 주세종. 2006. 해양 퇴적물내 총탄소 및 유기탄소의 분석기법 고찰. 한국해양환경공학회지 9(4): 235-242.

김영윤, 이광섭, 이석모, 강대석, 성기준. 2009. 낙동강 수계 자연습지의 계절별 수질변화특성 분석. 수질보전 한국물환경학회지 25(5):713-719.

농업과학기술원, 2000. 토양 및 식물체 분석법.

이자연, 강대석, 성기준. 2010. 기준습지 토양특성을 활용한 인공습지의 토양발달 평가. 한국습지학회지 12(1): 1-14.

이찬원, 권영택, 양기섭, 장풍국, 한성대. 1998. 폐쇄성 해역의 오염부하 특성과 해역환경변화. 한국해양환경공학회지 1(2): 60-70.

최우정, 박청길, 이석모. 1994. 진해만의 빈산소수괴 형성에 관한 수치실험. 한국수산과학회지 27(4): 413-433.

한동진, 윤종성. 2005. 폐쇄성 내만에 있어서 수질·저질 상호작용모델링. 한국해안·해양공학회지 17(3): 129-137.

황경섭, 허유정, 정종범, 장남익, 안균환, 문세영, 박상. 2008. 탐진강 수계의 토양 및 저질토가 수질에 미치는 영향연구. 대한상하수도학회·한국물환경학회 2008공동 추계학술발표회 요약논문집, 25-26.

해양수산부. 2001. 갯벌생태계 조사 및 지속 가능

한 이용방안 연구.

해양수산부. 2003. 갯벌생태계 조사 및 지속 가능한 이용방안 연구.

Brady NC and Weil RR. 2002. The nature and properties of soils, Prentice Hall, New Jersey, USA.

Burford JR and Bremner JM. 1975. Relationships between the denitrification capacities of soils and total water-soluble and readily decomposable soil organic matter. Soil. Biol. Biochem. 7: 389-394.

Craft CB, Broome SW, Seneca, ED. 1988. Nitrogen, phosphorus and organic carbon pools in natural and transplanted marsh soils. Estuaries 11(4): 272-280.

Craft CB, Seneca ED, Broome SW. 1991. Loss on ignition and Kjeldahl digestion for estimating organic carbon and total nitrogen in estuarine marsh soils: calibration with dry combustion. Estuaries 14(2): 175-179.

Howard PJA and Howard DA. 1989. Use of organic carbon and loss-on ignition to estimate soil organic matter in different soil types and horizons. Biology and Fertility of Soils 9: 306-310.

Konen ME, Jacobs PM, Burras CL, Talaga BJ, Mason JA. 2002. Equations for predicting soil organic carbon using loss-on ignition for north central U.S. soils. Soil Sci. Soc. Am. J. 66: 1878-1881.

Leong LE and Tanner PA. 1999. Comparison of methods for determination of organic carbon in marine sediment. Marine Pollution Bulletin 38(10): 875-879.

Miller CT and Weber WJ. 1984. Modelling organic contaminant partitioning in ground-water systems. Groundwater 22(5): 584-592.

Mitsch WJ and Gosselink JG. 2000. Wetlands. John Wiley & Son, New York.

Post WM, Emanuel WR, Zinke PJ, Stangenberger AG. 1982. Soil carbon pools and world life zones. Nature 298: 156-159.

Sahrawat KL. 2006. Organic matter and mineralizable nitrogen relationships in wetland rice soils. Communications in Soil Science and Plant Analysis 37: 787-796.

Schulte FE and Hopkins BG. 1996. Estimation of organic matter by weight loss-on ignition, Soil Organic Matter: Analysis and Interpretation. Magdoff, F.R. (eds), SSSA Spec. Publ. 46, SSSA, Madison, WI. pp.21-31.

Vos BD, Lettens S, Muys B, Deckers JA. 2007. Walkley-Black analysis of forest soil organic carbon: recovery, limitations and uncertainty. Soil Use and Management 23: 221-229.

○ 논문접수일 : 2012년 01월 27일
○ 심사의뢰일 : 2012년 02월 01일
○ 심사완료일 : 2012년 05월 22일