

고흥만 인공습지의 토양유기탄소와 이산화탄소 변동 관측

강동환 · 김성수[†] · 권병혁 · 김일규

(부경대학교)

Observations of Variations in Soil Organic Carbon and Carbon Dioxide in the Constructed Wetland at Goheung Bay

Dong-Hwan KANG · Sung-Soo KIM[†] · Byung-Hyuk KWON · Il-Kyu KIM

Pukyong National University

(Received September 20, 2007 / Accepted December 27, 2007)

Abstract

Seasonal variations in carbon dioxide in the air and soil organic carbon in the sediments were monitored at the constructed wetland formed by reclamation work at Goheung Bay. Sediment sampling in the constructed wetland and carbon dioxide measurement in the air were conducted on June 16 and August 23, 2007. Sediments in the constructed wetland were sampled at 11 different points (June 16) and 14 points (August 23), while carbon dioxide in the air was measured at 13 points (June 16) and 15 points (August 23). Water content and organic carbon in the sampled sediments were analyzed in the laboratory. Water content of the sediments was higher than that of general soil, and the variation between June and August was not evident. The amounts of organic carbons in the sediments sampled on August 23 were higher than those sampled on June 16. Also, there was more organic carbon in the sediments sampled at the field of reeds than in the pure wetland area. Daily maximum variation in carbon dioxide in the air was higher on June 16, but the amount of carbon dioxide in the air was greater on August 23. The results of the study suggest that organic carbon in the sediments and carbon dioxide in the air were greater in summer (August 23) than in spring season (June 16) in the constructed wetland at Goheung Bay.

Key Words : Goheung Bay, constructed wetland, soil organic carbon, carbon dioxide

I. 서 론

습지(wetland)는 지구상에 존재하는 가장 중요한 자연생태계 중의 하나이다. 습지는 물리화학적인 자연정화 능력으로 인해 “자연의 콩팥”으로

묘사되기도 한다. 또한, 습지는 홍수 및 해안 침식 방지, 지하수 충전을 통한 지하수량을 조절하며, 다양한 종류의 동·식물군을 구성하여 아름다운 자연경관을 만들어 낸다(박수영 등, 2000). 산업화와 현대화의 물결 속에서 배제되었던 습지

[†] Corresponding author : 010-2842-6524, kimss@pknu.ac.kr

* 이 논문은 기상청 기상지진기술개발사업단(CATER 2007-4403)에 의하여 연구비가 지원되었으며, 지원기관에 감사한다. 그리고, 익명의 심사위원님들께도 감사드립니다.

생태계가 최근에 그 중요성이 크게 인식되고 있으며, 이는 습지가 제공할 수 있는 여러 가지 생태적 기능에 의해 인류 사회에 유익한 보전적 가치가 점차 알려져 가고 있기 때문이다.

국내에서의 습지 연구는 1990년대 후반부터 본격적으로 시작되었다. 해안 지역에서는 서해 함평만, 곰소만, 법성만, 동해 영일만 등이 연구되었으며, 이러한 연구들이 계속적으로 증가하고 있다. 기존의 연구로는 해안습지(coastal wetland)의 퇴적환경 연구(류상옥 등, 1998; 이인태 등, 2001; 류은영 등, 2005), 해안습지의 표층퇴적물 분포 및 특성에 관한 연구(류상옥 등, 1997; 엄인권 등, 2003; 백영숙 등, 2004; 이미경 등, 2004; 이윤화 등, 2006) 등과 같이 해안습지의 퇴적환경과 표층퇴적물 특성에 대한 주제에 집중되었다.

국내 내륙습지(inland wetland) 연구로는 내륙습지를 대상으로 습지 유형별 분류특성에 관한 연구(구본학 등, 2001), 경기도 산지를 중심으로 습지의 발달 환경과 특성 연구(문현숙, 2005), 비무장지대(DMZ) 산림습지의 식생현황과 특성에 관한 연구(박미영, 2005), 신불산 산지습지의 지화학적 특성과 그 역할에 대한 연구(신영호 등, 2005), 그리고 허철호 등(2005)는 흑산도 장도습지의 지질 및 토양환경에 대한 예비조사를 실시하였다.

최근에는 인공습지(constructed wetland)를 조성하여 환경복원에 관한 연구(장정렬 등, 2007; 김승준 등, 2006; 박재홍 등, 2004)도 활발히 진행되고 있다. 장정렬 등(2007)는 식생습지와 개방수역의 배열에 따른 인공습지의 수처리 특성을 연구하였으며, 김승준 등(2006)는 오염하천의 수질개선을 위한 Hybrid형 인공습지의 적용에 대한 연구를 수행하였으며, 박재홍 등(2004)는 인공습지를 이용한 축산폐수의 처리를 연구하였다.

이상의 연구들은 주로 해안습지와 내륙습지의 유형 분류, 퇴적물 및 식생에 대한 내용이 주를 이루었으며, 인공습지는 오염지역에서 수질개선 효과에 의한 환경복원에 관한 연구만이 수행되었다.

국외에서 수행된 습지 연구 중 해안습지 퇴적물 내 유기탄소 관련 연구로는 Berner(1982)에 의해 해안퇴적물에 의한 유기탄소 저장은 탄소순환에서 주요한 플럭스(flux) 중 하나라는 것을 밝혀졌으며, 그리고 습지의 수리지질학적 특성 연구(Eser et al., 1999; Bragg et al., 2002)와 탄소순환과 습지의 수문학적 영향 연구(Frolking et al., 1998; Ju et al., 2006) 등이 수행되었다. 최근에는 습지를 이용한 오염물질의 정화연구(Bankston et al., 2002; Ji et al., 2004; Lorah et al., 2004; Garcia et al., 2007; Braeckeveldt et al., 2007; Lee et al., 2007) 등이 수행되었으며, 특히 인공습지를 이용하여 유기오염물질을 제거하는 연구(Haberal et al., 2003; Huang et al., 2004; Matamoros et al., 2005; Matamoros et al., 2007)가 활발하게 진행되고 있다. 또한, 온실가스(greenhouse gas)에 대한 관심이 커져 인공습지로부터 온실가스의 방출에 대한 연구가 활발하게 수행되고 있다. Liikanen et al. (2006), Phillips et al. (2007)와 Picek et al. (2007)는 인공습지와 농경지로부터 온실가스 방출에 대한 연구를 하였고, Ström et al. (2007)는 북극에 가까운 곳에 위치한 습지로부터 온실가스의 교환에 대한 연구를 하였다. 이상에서와 같이 국외에서의 습지 연구는 다양하게 이루어지고 있으나, 국내에서는 기본적인 조사와 환경복원에 관한 연구가 수행되었다.

본 연구에서는 고흥만 간척사업에 의해 형성된 인공습지에 의한 대기 중 이산화탄소 방출을 규명할 목적으로 퇴적물의 유기탄소량과 대기 중 이산화탄소량을 관측하여 측정 월(6월과 8월)에 따른 변동을 파악하였다.

II. 현장 관측

1. 연구지역의 위치

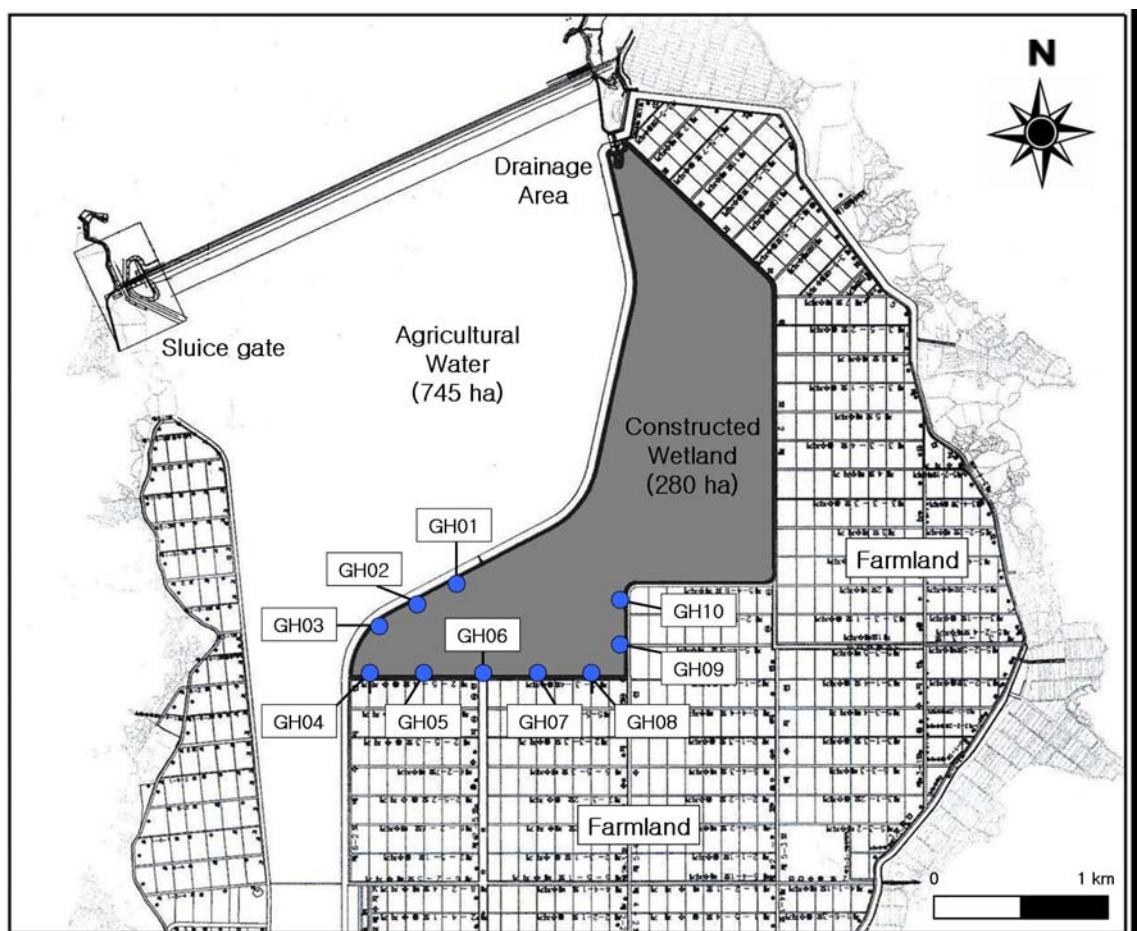
본 연구가 수행된 지역은 전남 고흥군 두원면

에 위치한 고흥만 간척지(reclaimed land)의 인공습지이다. 고흥만 간척지의 면적은 3,100 ha 이고, 인공습지의 면적은 280 ha이다. 고흥만 간척지는 1995년에 건설되었으며, 인공습지 인근 간척지에서의 농업활동은 2005년도부터 시작되었다. 이러한 농업활동에 필요한 농업용수(agricultural water)를 저장하기 위한 담수호의 면적은 745 ha 정도이었다. 본 연구에서는 인공습지 내 10개 지점에서 퇴적물을 채취하였으며, 또한 대기 중 이산화탄소량을 측정하였다[그림 1]. 그리고, GH4, GH7, GH9 및 GH10 지점에서는 인접한 갈대지역에서도 퇴적물 채취와 이산화

탄소 측정이 수행되었다. 인공습지의 전체 둘레 길이는 10 km 이상이었지만, 퇴적물 채취가 가능한 지역(습지수가 고이지 않은 곳)의 길이는 3 km 이내이었다. 따라서, 퇴적물 채취가 수행된 지점들의 총 길이는 2.5 km 정도이었다.

2. 퇴적물 채취 및 실내분석

고흥만 인공습지의 현장 관측은 2007년 6월 16일(1차)과 8월 23일(2차)에 수행되었다. 1차 관측 시에는 10개 지점에서 11개(갈대밭 1개)의 퇴적물 시료를 채취하였으며, 2차 관측 시에는 10개



[그림 1] 고흥만 간척지 인공습지 내 퇴적물 채취지점 위치도

지점에서 14개(갈대밭 4개)의 시료가 채취되었다 [그림 1]. 퇴적물의 채취에는 토양채취기(직경 2.8 cm, 길이 50 cm인 liner에 시료 채취)가 이용되었다. 채취된 퇴적물은 아이스박스에 보관되었으며, 실험실로 운반한 후 함수량과 유기탄소량을 분석하기 위해 전처리 하였다.

퇴적물 시료의 함수량시험은 해양환경공정시험방법(해양수산부, 2005)에 준하여 수행하였으며, 퇴적물 내 유기탄소량은 부경대학교 공동실험실습관의 TOC Analyzer를 이용하여 분석되었다. 함수율과 유기탄소량 분석이 수행된 퇴적물 시료 개수는 1차 관측 시 55개, 2차 관측 시 70개 이었으며, 이는 퇴적물 채취 시료를 수직적으로 5등분하였기 때문이다.

3. 대기질 측정

본 연구지역에서 대기질을 관측하기 위해 현장에서 대기 중 CO_2 (최소, 최대 및 평균), 온도 및 습도 성분을 측정하였다. 측정 지점은 퇴적물 채취 지점과 동일하며, 1차 관측 시에는 10개 지점에서 13회(갈대밭 3회), 2차 관측 시에는 10개 지점에서 15회(갈대밭 5회) 측정되었다. 대기 중 CO_2 관측 시간은 1차 관측 시 9시부터 16시까지 이었으며, 2차 관측 시에는 11시부터 16시까지 관측되었다. 대기 중 CO_2 농도는 지표면 상부 50 cm 정도에서 CompuFlow 8610 CO_2 meter (ALNOR)를 이용하여 측정되었으며, 온도 및 습도는 Thermo Recorder TR-72S (T&D corp.)에 의해 측정되었다.

III. 관측 결과 및 토의

1. 퇴적물 내 유기탄소량

고흥만 인공습지에서 채취된 퇴적물 시료 내 평균 유기탄소량이 <표 1>에 정리되어 있다. 유기탄소량은 퇴적물 시료를 10 cm 구간으로 5등

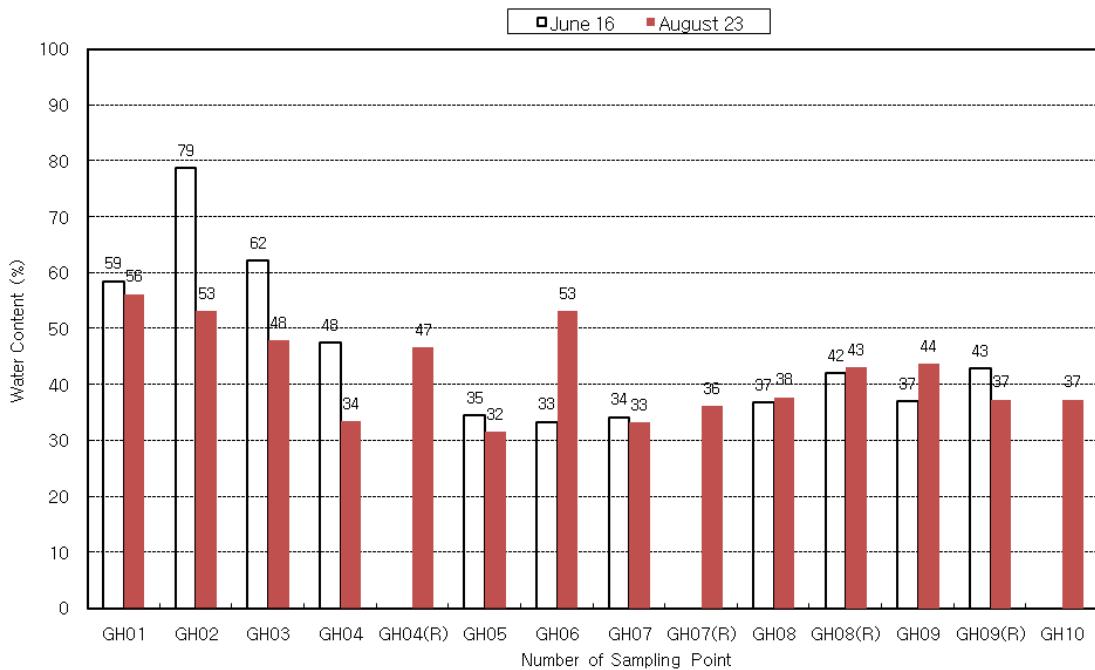
분하여 분석하였으며, 이러한 분석값을 평균하여 채취지점별 유기탄소량을 산정하였다. 1차 관측 시에는 GH04, GH07 및 GH10 지점 갈대밭에서의 퇴적물은 채취되지 않았다. 고흥만 인공습지에서는 2차 관측 시에 토양유기탄소량이 높은 것으로 나타났다. 그리고, 갈대밭에서의 토양유기탄소량이 상대적으로 높았으며, 이는 1년생 식물인 갈대의 사체 유기물이 토양에 다량 집적되었기 때문이다. 고흥만 인공습지 전체의 평균적인 토양유기탄소량은 1차 관측 시에 0.2489%, 2차 관측 시에 0.7077%로 나타났다. 따라서, 고흥만 인공습지 퇴적물 내 유기탄소량이 2차 관측 시에 2.84배 정도 높았음을 알 수 있었다.

<표 1> 퇴적물 채취지점별 평균 유기탄소량(%)

Point No.	June 16	August 23
GH01	0.3977	0.6551
GH02	0.1889	0.7539
GH03	0.4601	0.7015
GH04	0.1526	0.5488
GH04(R)	-	0.5007
GH05	0.1754	0.3813
GH06	0.1149	0.6335
GH07	0.0011	0.4404
GH07(R)	-	0.6829
GH08	0.2205	0.7430
GH09	0.1087	0.5629
GH09(R)	0.6817	0.8891
GH10	0.2360	1.1379
GH10(R)	-	1.2770
Site Average	0.2489	0.7077

(R) : 갈대지역에서 채취된 퇴적물

고흥만 인공습지에서 채취된 퇴적물의 함수량 시험 결과그래프가 [그림 2]에 작성되어 있다. 2007년 6월 16일과 8월 23일에 채취된 퇴적물의 함수비는 각각 33.42~78.76%와 31.65~56.23%의 범위이며, 퇴적물 채취지점들의 평균은 46.20%와 46.99% 정도로서 관측 시기에 따른 함수비의 변화는 나타나지 않았다. 함수비가 일반 토양에 비



[그림 2] 고흥만 인공습지 퇴적물의 함수량시험 결과그래프

해 높게 나타난 것은 고흥만 인공습지 퇴적물에 점토 성분이 다량 함유되어 있었기 때문이다(김영수 등, 2000).

2. 대기 중 CO₂ 변동

고흥만 인공습지 내에서 현장 측정된 대기 중 이산화탄소량, 온도 및 습도를 <표 2>에 정리하였다. 2007년 6월에 비해 8월의 이산화탄소량, 온도 및 습도가 증가하였다. 고흥만 인공습지 내 대기 중 이산화탄소량은 6월과 8월에 각각 336~417 ppm 및 363~455 ppm의 범위이며, 부지 평균은 367 ppm과 407 ppm 이었다. 온도와 습도는 계절적인 영향과 측정시간에 의해 차이를 보였으며, 대기 중 이산화탄소량의 증가는 높은 온도에 의해 토양미생물 활동이 촉진되어 갯벌의 토양유기탄소가 분해되어 대기로 방출된 것으로 추정된다(김득수, 2007). 또한, 갈대밭 내에서의 이산화탄소량이 상대적으로 높게 나타났다.

고흥만 인공습지에서 2007년 6월 16일과 8월 23일의 대기 중 이산화탄소의 최대, 평균 및 최소 측정값이 [그림 3]과 [그림 4]에 도시되어 있다. 2007년 6월 16일의 관측에서는 10시부터 15시 정도까지는 경과시간에 따른 대기 중 이산화탄소량이 400 ppm에서 340 ppm까지 감소하였으나, 이후에는 약간 증가하여 360 ppm 정도로 안정화 되었다[그림 4]. 8월 23일에 관측된 경과시간별 이산화탄소량의 변동은 11시부터 12시 사이에서는 400 ppm에서 380 ppm 정도까지 감소하였으며, 이후 14시 30분 정도까지는 380 ppm 정도로 안정화 되었다. 그러나, 15시 정도에 360 ppm 정도로 약간 감소하였으며, 이후에는 다시 380 ppm 정도로 상승하였다. 고흥만 인공습지의 갯벌 지역에서 대기 중 이산화탄소의 일 최대변화폭은 6월 16일(100 ppm)이 8월 23일(60 ppm)에 비해 크지만, 전체적인 이산화탄소량은 8월 16일에 더욱 높게 측정되었다.

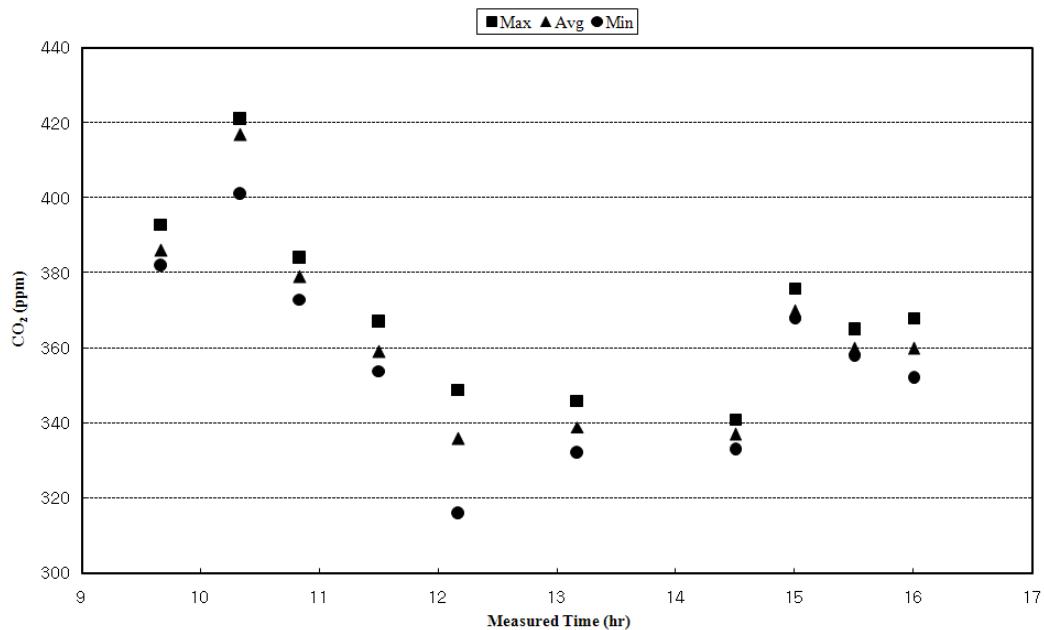
<표 2> 고흥만 인공습지의 대기질 측정결과표

Point No.	June 16			August 23		
	CO ₂ (ppm)	Temperature (°C)	Humidity (%)	CO ₂ (ppm)	Temperature (°C)	Humidity (%)
GH01	386	24.1	54	406	38.6	49
GH02	417	28.7	43	400	35.0	57
GH03	379	24.7	53	398	35.4	54
GH04	359	26.3	52	384	35.4	56
GH04(R)	-	-	-	420	34.9	59
GH05	336	25.3	49	383	31.1	71
GH06	339	25.9	51	388	32.0	68
GH07	337	27.0	42	382	31.6	68
GH07(R)	-	-	-	455	33.6	64
GH08	370	28.7	40	384	33.6	60
GH08(R)	388	-	-	478	35.3	72
GH09	360	29.0	43	363	32.7	66
GH09(R)	366	26.3	51	449	36.0	64
GH10	360	26.5	50	375	35.4	58
GH10(R)	369	-	-	439	35.5	60
Average	367	26.6	48	407	34.4	62

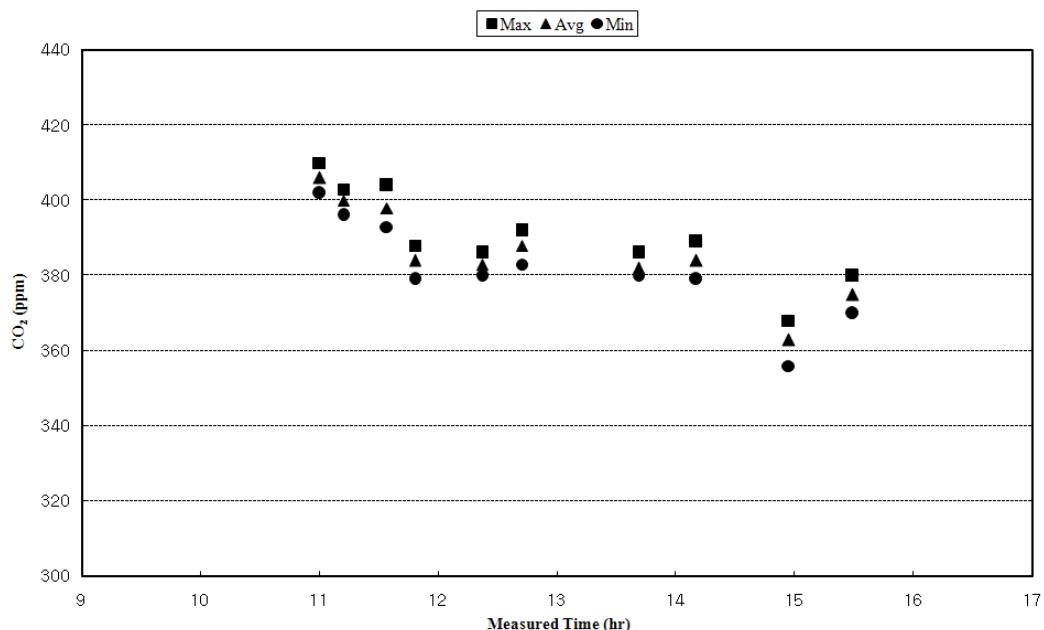
고흥만 인공습지에서 2회 관측된 대기 중 이산화탄소량의 측정 시기별 변동을 분석하기 위해 측정 지점별로 막대그래프를 작성하였다[그림 5]. GH02 지점을 제외한 모든 지점에서 8월 23일에 측정된 대기 중 이산화탄소량이 높게 나타났다. 그리고, GH08, GH09 및 GH10 지점의 인근 갈대밭인 GH08(R), GH09(R) 및 GH10(R) 지점에서 측정된 이산화탄소량의 증가율이 매우 높게 나타났다. 이는 대기 온도 상승에 따른 갈대밭 내 토양유기탄소의 분해에 따른 이산화탄소 방출이 갯벌 지역에 비해 상대적으로 다량 발생하였기 때문이다. 일반적으로 갈대밭에서는 갈대의 사체 유기물이 토양에 집적되어 지므로 갯벌 토양에

비해 유기탄소량이 높다.

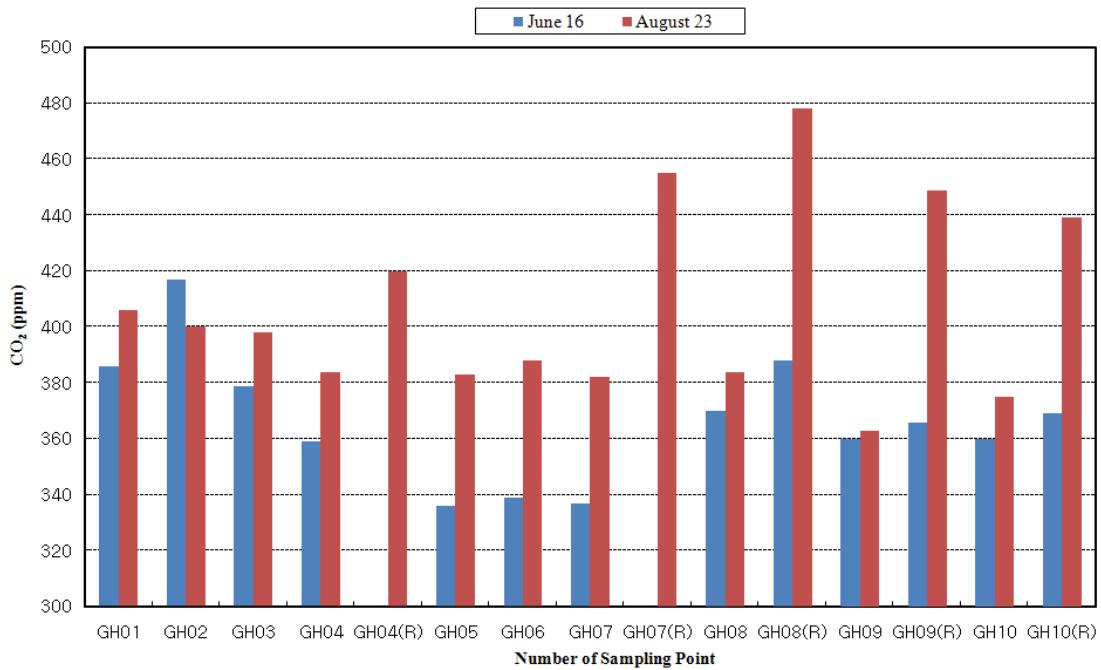
이상의 관측 결과들은 대기 중 CO₂ 측정 시 바람에 의한 영향성을 고려하지 못하여, 주변 농지와 담수호에 의한 대기 중 CO₂ 농도의 변동을 파악하진 못하였다. 그러나, 본 연구에서는 인공습지 퇴적물 내 유기탄소량과 상부 대기 중 이산화탄소의 계절(봄, 여름)적인 변동 양상을 파악하는 데 의미를 부여하고자 한다. 향후에는 대기의 미기상학적인 인자(바람, 열플럭스 등)와 토양 인자(입도, 지열, 토양미생물 등)들을 고려하여 인공습지에서 이산화탄소의 대기 방출 혹은 흡수에 대한 정량적인 연구를 수행하고자 한다.



[그림 3] 고흥만 인공습지의 대기 중 이산화탄소량(2007년 6월 16일 측정)



[그림 4] 고흥만 인공습지의 대기 중 이산화탄소량(2007년 8월 23일 측정)



[그림 5] 고흥만 인공습지에서 퇴적물 채취지점의 대기 중 이산화탄소량

IV. 요약 및 결론

고흥만 간척지 내 인공습지에서 퇴적물 유기탄소량과 대기 중 이산화탄소량이 관측되었으며, 아래의 결과들이 도출되었다.

1. 인공습지에서 채취된 퇴적물 시료 내 평균 유기탄소량은 여름철(8월 23일)에 높은 것으로 나타났다. 그리고, 순수한 갯벌 지역들에 비해 갈대밭에서의 토양유기탄소량이 상대적으로 높았다. 고흥만 인공습지 전체의 평균적인 토양유기탄소량은 6월 16일에 0.2489%, 8월 23일에 0.7077%로서 여름철에 약 2.84배 정도 높았음을 알 수 있었다.

2. 고흥만 인공습지 내에서 현장 측정된 대기 중 이산화탄소량, 온도 및 습도는 6월 16일에 비해 8월 23일 더욱 높게 나타났다. 고흥만 인공습지 내 대기 중 이산화탄소량은 6월 16일과 8월 23일에 각각 336~417 ppm 및 363~455 ppm의

범위이며, 인공습지의 전체 평균은 367 ppm과 407 ppm 이었다. 대기 중 이산화탄소량이 여름철(8월 23일)에 더욱 증가한 것은 높은 대기 온도에 의한 토양미생물 활동이 촉진되고, 이로 인해 토양유기탄소 분해가 증가되었기 때문이다.

3. 본 연구에서는 고흥만 인공습지에서 여름철에 토양유기탄소량과 대기 중 이산화탄소량이 증가한 것을 확인 할 수 있었다. 또한, 순수한 갯벌 지역들에 비해 갈대밭 내에서의 토양유기탄소량과 이산화탄소량이 상대적으로 높았으며, 계절적인 영향에 의한 변동율도 크게 나타났다.

참고 문헌

- 구본학, 김귀곤(2001). 우리나라 습지 유형별 분류특성에 관한 연구 - 내륙 습지를 대상으로 -, 한국환경복원녹화기술학회지, 4(2), 11~25.
 김득수(2007). 온실기체 (CH_4 , CO_2 , N_2O)의

- 하구언갯벌 배출량과 배출특성연구, 한국대기 환경학회지, 23(2), 225~241.
- 김영수 · 김종열 · 김홍택 · 이영휘 · 홍원표(2000). 토질역학, 사이텍미디어, 764.
- 김승준, 최용수, 배우근(2006). 오염하천 수질개선을 위한 Hybrid형 인공습지의 적용, 한국물환경학회지, 22(2), 209~214.
- 류상옥, 유환수, 김민지, 문병찬(1998). 한국 서해 남부 함평만의 퇴적환경, 한국지구과학회지, 19(3), 43~353.
- 류상옥, 유환수, 전승수(1997). 한국 서해 남부 함평만 표층퇴적물의 분포 및 특성, 한국지구과학회지, 18(5), 367~378.
- 류은영, 남욱현, 양동윤, 김주용(2005). 한국 서해 연안습지의 규조 및 고환경 연구, 지질학회지, 41(2), 227~239.
- 문현숙(2005). 습지의 발달 환경과 특성 -경기도 산지를 중심으로-, 한국지형학회지, 12(4), 55~67.
- 박미영, 조동길, 김귀곤(2005). DMZ 산림습지의 식생 현황과 특성에 관한 연구 - 파주 경의선 지역을 중심으로 -, 한국환경복원녹화기술학회지, 8(5).
- 박수영, 윤성윤, 이기철, 김귀곤, 배덕효, 김형수 (2000). 경남발전연구원, 습지학원론, 은혜기획, 414.
- 박재홍, 최의소, 조일형(2004). 인공습지를 이용한 축산폐수의 처리, 한국물환경학회지, 20(2), 157~162.
- 백영숙, 전승수(2004). 한국 서남해안 두우리 조간대에서 표층 퇴적물 및 퇴적구조의 특성과 계절변화, 한국석유지질학회지, 10(1,2), 10~17.
- 신영호, 김성환, 박수진(2005). 신불산 산지 습지의 지화학적 특성과 역할, 한국지형학회지, 12(1), 133~149.
- 엄인권, 임동일, 이미경, 전수경, 정희수(2003). 한국 동해안 영일만 표층 퇴적물의 금속 함량과 공간 변화 특성, 한국지구과학회지, 24(5), 477~490.
- 이미경, 배우근, 엄인권, 정희수(2005). 영일만 해역 표층퇴적물의 금속 분포 특성, 대한환경공학회지, 26(5), 543~551, 2004.
- 이윤화, 조화룡 범성만 갯벌의 지형 및 퇴적물의 입도 특성 분석, 한국지형학회지, 12(1), 63~76.
- 이인태, 전승수(2001). 서해 곰소만 조간대 퇴적 작용에서 모래톱의 역할, 한국지구과학회지, 22(2), 120~129
- 장정렬, 최선희, 권순국(2007). 식생습지와 개방수역의 배설에 따른 인공습지의 수처리 특성, 한국물환경학회지, 23(1), 122~130.
- 허철호, 김성용(2005). 흑산도 지역 장도습지의 지질 및 토양환경: 예비조사, 한국지구과학회지, 26(7), 661-667.
- 해양수산부(2005). 해양환경공정시험방법, 해양수산부 고시 제 2005-61호, 389.
- Berner, R. A.(1982). Burial of organic carbon and pyrite sulfur in the modern ocean: its geochemical and environmental significance, Am. J. Sci. 282, 451~473.
- Bankston, J. L., Sola, D. L., Komor, A. T., Dwyer, D. F.(2002). Degradation of trichloroethylene in wetland microcosms containing broad-leaved cattail and eastern cottonwood, Water Research, 36(6), 1539~1546.
- Braeckeveldt, M., Rokadia, H., Imfeld, G., Stelzer, N., Paschke, H., Kuschk, P.(2007). Kästner, M., Richnow, H. H., Weber, S., Assessment of in situ biodegradation of monochlorobenzene in contaminated groundwater treated in a constructed wetland, Environmental Pollution, 148(2), 428~437.
- Bragg, O. M.(2002). Hydrology of peat-forming wetlands in Scotland, The Science of the Total Environment, 294, 111~129.
- Eser, P., Rosen, M. R.(1999). The influence of groundwater hydrology and stratigraphy on the hydrochemistry of Stump Bay, South Taupo Wetland, New Zealand, Journal of Hydrology, 220, 27~47.
- Frolking, S. E., Bubier, J. L., Moore, T. R., Ball, T., Bellisario, L. M., Bhardwaj, A., Carroll, P., Crill, P. M., Lafleur, P. M., McCaughey, J. H., Roulet, N. T., Suyker, A. E., Verma, S. B., Waddington, J. M., Whiting, G. J.(1998). Relationship between ecosystem productivity and photosynthetically active radiation for northern peatlands. Global Biogeochemical Cycles, 12, 115~126.
- Garcia, J., Capel, V., Castro, A., Ruiz, I., Soto, M.(2007). Anaerobic biodegradation tests and gas emissions from subsurface flow constructed wetlands, Bioresource Technology,

- 98(16), 3044~3052.
- Haberal, R., Grego, S., Langergraber, Kadlec, R. H., Cicalini, A. R., Martins, D. S., Novais, J. M.(2003). Aubert, S., Gerth, A., Thomas, H., Hebner, A., Constructed wetland for the treatment of organic pollutants, *J. Soils Sed.* 3, 109~124.
- Huang, Y., Latorre, A., Barcelo, D., Garcia, J., Mujeriego, R., Bayona, J.M.(2004). Factors affecting linear alkylbenzene sulfonates removal in subsurface flow constructed wetlands, *Environ. Sci. Technol.* 38, 2657~2663.
- Ji, G. D., Yang, Y. S., Zhou, Q., Sun, T., Ni, J. R.(2004). Phytodegradation of extra heavy oil-based drill cuttings using mature reed wetland: an in situ pilot study, *Enviornment International* 30, 509~517.
- Ju, W., Chen, J. M., Black, T. A., Barr, A. G., McLaughhey, H., Roulet, N. T.(2006). Hydrological effects on carbon cycles of Canada's forest and wetlands, *Tellus*, 58B, 16~30.
- Lee, S. J.(2007). Enhanced dissolution of TCE in NAPL by TCE-degrading bacteria in wetland soils, *Jounal of Hazardous Material*, 145, 17~22.
- Liikanen, A., Huttunen, J. T., Karjalainen, S. M., Heikkilä, K., Väistönen, T. S., Nykänen, H., Martikainen, P. J.(2006). Temporal and seasonal changes in greenhouse gas emissions from a constructed wetland purifying peat mining runoff waters, *Ecological Engineering*, 26(3), 241~251.
- Lorah, M. M., Voytek, M. A.(2004). Degradation of 1,1,2,2-tetrachloroethane and accumulation of vinyl chloride in wetland sediment microcosms and in situ porewater:biogeochemical controls and associations with microbial communities, *Journal of Contaminant Hydrology*, 70, 117145.
- Matamoros, V., García, J., Bayona, J.M.(2005). Behavior of selected pharmaceuticals in subsurface flow constructed wetlands: a pilot-scale study, *Environ. Sci. Technol.* 39, pp.5449-5454.
- Matamoros, V., Puigagut, J., García, J., Bayona, J. M.(2007). Behavior of selected priority organic pollutants in horizontal subsurface flow constructed wetlands: A preliminary screening, *Chemosphere*, 69(9), 1374~1380.
- Phillips, R., Beer, O.(2007). The role of hydromorphic vegetation zones in greenhouse gas emissions for agricultural wetland landscapes, *CATENA*.
- Picek, T., Čížková, H., Dušek, J.(2007). Greenhouse gas emissions from a constructed wetland-Plants as important sources of carbon, *Ecological Engineering*, 31(2), 98~106.
- Ström, L., Torben R.(2007). Christensen, Below ground carbon turnover and greenhouse gas exchanges in a sub-arctic wetland, *Soil Biology and Biochemistry*, 39(7), 1689~1698.
- Wilson, J. O., Valielas, I., Swain, T.(1985). Sources and concentrations of vascular plant material in sediments of Buzzards Bay, Massachusetts, USA, *Marine Biology*, 90, 129~137.