갯벌, 논 및 산림 부지에서 지표와 대기 사이의 이산화탄소 플럭스 계절/공간 변동 분석

강동환 · 권병혁^{1)*} · 유훈선¹⁾ · 김박사¹⁾ · 김광호¹⁾

부경대학교 지구과학연구소, ¹⁾부경대학교 환경대기과학과 (2011년 2월 25일 접수; 2011년 4월 29일 수정; 2011년 6월 20일 채택)

Seasonal and Spatial Variations of CO₂ Fluxes Between Surface and Atmosphere in Foreshore, Paddy Field and Woods Sites

Dong Hwan Kang, Byung Hyuk Kwon^{1)*}, Hun Sun Yu¹⁾, Park Sa Kim¹⁾, Kwang Ho Kim¹⁾

Geo-Sciences Institute, Pukyong National University, Busan 608-737, Korea

¹⁾Department of Environmental Atmospheric Sciences, Pukyong National University, Busan 608-737, Korea (Manuscript received 25 February, 2011; revised 29 April, 2011; accepted 20 June, 2011)

Abstract

For this research, they were monitored CO₂ flux and environmental factors (CO₂ concentration, soil temperature, soil moisture, soil organic carbon, soil pH, soil Eh) in foreshore, paddy field and woods sites at the winter season (January 2009) and the summer season (September 2009). Seasonal and spatial variations for monitored data were analyzed, and linear regression functions of CO₂ flux as environmental factors were estimated. CO₂ fluxes averaged between surface and atmosphere monitored in foreshore and paddy field at the winter season were shown -8 mgCO₂m⁻²hr⁻¹ and -25 mgCO₂m⁻²hr⁻¹, respectively. CO₂ fluxes averaged between surface and atmosphere monitored in foreshore and paddy field at the summer season were shown 47 mgCO₂m⁻²hr⁻¹ and 117 mgCO₂m⁻²hr⁻¹, respectively. Thus, CO₂ was sunk from atmosphere to surface at the winter season and it was emitted from surface to atmosphere at the summer season. CO₂ fluxes in woods site were emitted 145 mgCO₂m⁻²hr⁻¹ at the winter season and 279 mgCO₂m⁻²hr⁻¹ at the summer season.

Key Words: CO2 flux, Environmental factors, Foreshore, Paddy field, Woods

1. 서 론

대기 중 이산화탄소량의 증가로 인한 지구온난화 가 가속화 되고 있으며, 이로 인해 대기 중 이산화탄소 저감을 위한 노력이 절실하게 필요한 실정이다. 대기 중 이산화탄소를 가장 많이 보존할 수 있는 저장소는 해양이며, 그 다음으로는 육지와 해양의 중간대인 해안습지이다. 습지생태계에서의 토양탄소 저장량(643 tons C/ha)은 열대 산림지역에 비해 5배 이상 높은 것으로 보고되었다(IPCC, 2001). 전 지구적인 탄소수지(carbon budget)에 의하면, 밝혀지지 않은 이산화탄소의 흡수량(sink)이 1980년대에 비해 1990년대에 1.5 X10¹⁰ ton에서 3.0 X10¹⁰ ton으로 2배 증가하였다. 1990년대 밝혀지지 않은 이산화탄소 흡수량은 해양에 의한 흡수량의 2배에 달하는 양이다(IPCC, 2001).

토지이용과 산림 분야는 대기의 전체 탄소 균형에서

Unviersity, Busan 608-737, Korea

Phone: +82-51-629-6644 E-mail: bhkwon@pknu.ac.kr

^{*}Corresponding author: Byung Hyuk Kwon, Department of Environmental Atemospheric Sciences, Pukyong National

중요지만, 이 분야의 탄소수지는 관측 자료의 불확실 성으로 인해 정량적인 산출이 부정확한 실정이다 (Rogner 등, 2007). 전 지구적인 규모에서 탄소수지의 예측을 위해서는 시공간적인 불균질성에 대한 정량적인 연구가 필요하다. 이러한 불균질성은 현장 측정에 의해 해결할 수 있으며, 불균질성의 원인이 되는 환경인자들을 이해하기 위해서는 다양한 생태계와 기후대에서의 지속적인 관측과 분석이 필요하다(Rayment와 Jarvis, 2000).

미국과 유럽에서는 토양유기탄소의 저장량, 온실 가스의 토양호흡 등에 관한 연구가 활발히 진행되고 있으며, 또한 토양과 대기 사이의 이산화탄소 교환에 대한 연구도 활발히 진행되고 있다(Luo와 Zhou, 2006). 연안습지에서 이산화탄소 플럭스 관련 연구로 는 습지 식물의 생장기에 해안지역 염분호수의 퇴적 물에서 대기로의 이산화탄소 및 메탄 플럭스에 대한 조수 변동의 효과 연구(Yamamoto 등, 2009), 중국 상 해 연안습지에 설치된 에디 플럭스 타워 관측에 의해 산정된 탄소의 순생태교환(net ecosystem exchange) 에 대한 조수효과(tidal effect) 연구(Guo 등, 2009), 또 한 담수 해안습지에서 탄소의 저장과 플럭스에 관한 다양한 연구 사례들에 대한 비평(Kayranli 등, 2009) 등이 수행되었다. 연안습지에서 습지 퇴적물과 대기 사이의 이산화탄소 플럭스(혹은 교환) 연구들은 미국, 일본 및 중국 등에서 활발하게 진행되고 있지만, 퇴적 물의 이화학적 성질에 따른 이산화탄소 플럭스의 변 동 구명은 미비한 편이다.

국내에서 생태계와 대기 사이의 이산화탄소 교환연구는 2000년 이후에 농경지, 산림, 갯벌 등에서 수행되었으며, 강 등(2008)은 고흥만 인공습지에서 갯벌의 토양유기탄소와 대기 중 이산화탄소의 변동관측, 김 등(2007)은 갯벌에서 이산화탄소의 배출과 배출특성, 이 등(2003)은 해남지역 농경지와 대기간의에너지와 이산화탄소의 지표 교환, 최 등(2003)은 여름철 경사진 광릉 낙엽 활엽수림에서의 이산화탄소교환등의 연구를 수행하였다. 현장 및 실내 실험에서널리 이용되고 있는 폐회로 역학 챔버 시스템(closed dynamic chamber system)을 이용한 이산화탄소 교환연구사례는 폐회로 역학 챔버 시스템을 이용한 토양이산화탄소 플럭스 관측(채 등, 2003), 식물 환경 조절

시스템에서의 토양 호흡 관측 챔버법의 비교 실험(채 등, 2005) 및 순천만 연안 생태계에서 토양의 이화학적 성질에 의한 이산화탄소 호흡 특성(강 등, 2010)이수행되었다. 국내에서 수행된 폐회로 챔버 시스템에 의한 연구들은 대부분 실내에서 수행되었으며, 다양한 생태계를 고려한 현장 규모의 연구사례가 매우 부족한 실정이다. 이를 위해서는 다양한 생태계에서 현장관측을 통한 이산화탄소 플럭스의 공간적, 계절적인 변동의 정량화 및 영향인자들과의 관계에 대한 구명이 필요하다.

본 연구에서는 전라남도 순천시 해룡면 농주리 일 대의 연안 생태계인 갯벌, 논 및 산림 부지에서 토양과 대기 사이의 이산화탄소 플럭스와 영향인자들을 관측 하였다. 동절기와 하절기에 관측된 자료들의 계절 및 공간적인 불균질성을 비교 분석하였으며, 연안 생태계에서 토양의 이화학적 성질과 이산화탄소 플럭스의 상관성을 파악하고 영향인자들과 이산화탄소 플럭스의의 선형회귀함수를 추정하였다.

2. 재료 및 방법

2.1. 실험 부지

연구지역은 전라남도 순천시 해룡면 농주리 일대의 연안 생태계인 갯벌(coastal wetland), 논(paddy field) 및 산림(woods) 부지이다(Fig. 1). 현장측정에 포함된 갯벌의 면적은 200 × 300 m, 논은 300 × 200 m, 산림은 100 × 200 m 정도이며, 전체 면적은 500 × 500 m 규모의 연안 생태계이다. 본 연구부지 내 갯벌에서는 조개와 게 등을 채취하는 활동이 이루어지고 있으나, 현장 관측은 이러한 활동에 영향을 받지 않는 공간에서 수행되었다. 갯벌은 식물이 거의 존재하지 않았으며, 논에서는 벼를 경작하고 있으며, 산림은 경작지와 나무로 우거진 숲으로 구성되어 있다. 산림 부지에서의 현장 관측은 나무가 우거진 숲에서만 수행되었으며, 논 부지에서는 경작 활동이 없는 시기에 관측되었다.

2.2. 실험 내용

갯벌, 논 및 산림에서 현장측정 및 토양시료 채취가 동절기(2009년 1월)와 하절기(2009년 9월)에 수행되었으며, 현장에서는 이산화탄소 플럭스, 농도 및 토양

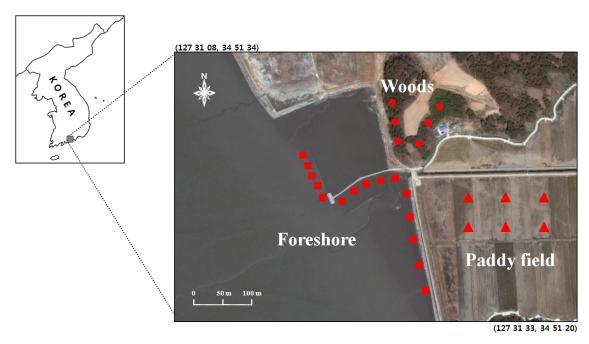


Fig. 1. Soil respiration measuring and soil sampling points at the coastal ecosystems.

온도가 측정되었고 실내에서는 토양 함수비, 유기탄소, pH 및 Eh 성분이 분석되었다(Table 1).

갯벌, 논 및 산림 토양에서 측정된 이산화탄소 플릭스와 토양온도는 토양호흡측정시스템(soil respiration system)에 의해 수행되었다. 이산화탄소 농도는 폐쇄형 역학 챔버(closed dynamic chamber)를 측정지점에설치하여 측정하였으며, 이산화탄소 플릭스는 토양에서 대기로 이산화탄소의 방출(emission) 또는 흡수(sink)에 의한 챔버 내 이산화탄소 농도의 경과시간별변화량을 아래의 식 (1)에 대입하여 산출하였다(Field 등, 1989).

$$F = \frac{\left(c_t - c_i\right)V}{\Delta t A} \tag{1}$$

여기서, F는 이산화탄소 플럭스[$\mathrm{ML}^2\mathrm{T}^1$], V는 챔 버의 체적[L^3], Δt 는 측정 시간 간격[T], A는 챔버가 설치된 토양의 표면적[L^2], c_i 는 챔버 내 이산화탄소 초기농도[ML^{-3}] 및 c_i 는 Δt 시간 이후의 챔버 내 이산화탄소 농도[ML^{-3}] 이다.

본 연구지역의 갯벌, 논 및 산립 부지 내 이산화탄소 플릭스 측정 지점에서 채취된 토양시료는 실험실에서 건조(oven dry)하여 함수비를 측정한 후, 건조된토양을 전처리하여 pH 및 토양유기탄소를 분석하였다. 토양시료의 함수비, pH 및 Eh 성분은 토양오염공정시험방법(환경부, 2002)에 의하여, 토양유기탄소는 총유기탄소 분석기(TOC Analyzer)에 의해 분석되었다.

Table 1. Summary of field measurement and laboratory analysis

	Nu	ımber	Remark				
Measured factors	Winter season				Summer season		
	F	P	W	F	P	W	-
CO ₂ flux CO ₂ concentration Soil temperature	12	6	6	15	6	6	Field measurement
Soil moisture Soil organic carbon Soil pH Soil Eh	12	3	3	15	6	6	Laboratory analysis

[&]quot;F" is foreshore, "P" is paddy field and "W" is woods.

2.3. 통계분석

갯벌, 논 및 산림 부지에서 동절기와 하절기에 측정 된 이산화탄소 플럭스와 농도 및 토양온도, 실내에서 분석된 토양 함수비, pH, Eh 및 유기탄소의 7개 항목 에 대한 평균과 변동계수를 산출하여 관측시기와 부 지별 변화를 비교하였다. 현장에서 측정된 이산화탄 소 플럭스와 농도 및 토양온도에 대한 box-whisker plots을 작성하였으며, 측정시기별 3개 부지의 이산화 탄소와 토양온도에 대한 공간변동을 분석하였다. 자 료개수의 신뢰성을 확보하기 위해, 하절기에 관측된 자료만을 이용하여 상관성분석과 회귀분석을 수행하 였다. 상관성분석에 의해 산출된 상관계수는 3개 부지 에서 이산화탄소 플럭스에 대한 영향인자들의 정성적 인 관계를 구명하였다. 이산화탄소 플럭스를 종속변 수로 영향인자들(이산화탄소 농도, 토양 온도, 함수비, pH, Eh, SOC)을 독립변수로 한 회귀함수를 추정하였 으며, 3개 부지에서 영향인자들에 의한 이산화탄소 플 럭스의 변동을 정량적으로 비교하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 이산화탄소 플럭스 및 영향인자의 계절/공간 변동

갯벌, 논, 산림 부지에서 관측된 이산화탄소 플럭 스, 농도 및 토양온도와 실내에서 분석된 토양 함수비, 유기탄소, pH 및 Eh 성분들의 동절기(Table 2)와 하절 기(Table 3)에 대한 평균과 변동계수를 산정하였다. 이산화탄소 플럭스 변동계수가 갯벌과 논 부지에서는 158%와 117%로서 다른 성분들에 비해 높게 나타났 으며, 산림 부지의 변동계수가 61%로서 동절기에 비 해 3배 이상 감소하였다. 이산화탄소 농도의 변동계수 는 3개 부지에서 4%로 동일하였으며, 동절기에 비해 변동계수가 2% 정도 상승한 것은 대기 중 이산화탄소 농도가 하절기에 약간 높았기 때문이다. 토양온도의 변동계수는 갯벌 3%, 논과 산림 2%로서 동절기에 비 해 크게 감소하였으며, 이는 하절기의 토양 평균온도 가 동절기에 비해 높았기 때문이다. 논과 산림 부지에 서 관측된 토양함수비의 평균은 하절기가 동절기에 비해 각각 3배와 4배 이상 증가하였으며, 변동계수도 22%와 43%로 증가하였다. 이는 하절기의 많은 강수 에 의한 영향이며, 갯벌은 조석에 의해 토양함수비가 지배되기 때문에 계절적인 변화가 적은 것으로 나타 났다. 토양유기탄소는 하절기에 산림 부지에서 평균은 6배 증가하고 변동계수는 57%로서 높게 나타났으며, 이는 동절기에 비해 하절기에 산림 토양을 덮고 있는 낙엽의 분해와 토양함수비의 증가로 인한 토양미생물의 왕성한 활동으로 인해 토양유기탄소의 평균이증가한 것이다(Verburg 등, 2004). 갯벌과 논 부지에비해 산림 부지의 토양함수비와 낙엽의 분포가 공간적으로 불균질하여 토양유기탄소의 변동계수도 높게나타난 것이다. 갯벌에서 토양 pH와 Eh 성분의 평균과 변동계수는 동절기와 하절기에 유사하였으며, 논과 산림 부지에서는 pH 평균은 증가하고 Eh 평균은 감소하였으나 변동계수는 유사하였다.

본 연구부지에서는 하절기가 동절기에 비해 이산화탄소 플릭스, 이산화탄소 농도, 토양함수비, 토양유기탄소 성분들의 변동계수가 크게 증가하였으며, 토양pH와 Eh 성분의 변동계수는 유사하였으며, 토양온도 성분만이 크게 감소한 것으로 나타났다. 갯벌, 논및 산림 부지에서 동절기보다는 하절기에 토양의 함수비와 유기물질(organic matter)이 증가하고 이로 인한 미생물 활동이 활발하여 이산화탄소 플릭스가 상승한 것이다(Franzluebbers 등, 2001).

Table 2. CO₂ flux and environmental factors measured by at Foreshore, paddy field and woods sites in the winter season

	Foreshore		Paddy	field	Woods		
	Avg	CV (%)	Avg	CV (%)	Avg	CV (%)	
CO ₂ flux (mgCO ₂ m ⁻² h ⁻¹)	-8	427	-25	137	145	208	
CO ₂ (ppm)	371	2	372	2	380	2	
Soil temperature (°C)	0.6	74	3.8	35	6.7	11	
Soil moisture (%)	85.6	14	23.1	4	5.2	32	
Soil organic carbon (%)	1.0	6	1.8	24	4.1	19	
Soil pH	7.7	3	6.7	3	5.6	7	
Soil Eh (mV)	138.1	11	132.2	4	130.3	3	

Table 3. CO₂ flux and environmental factors measured by at foreshore, paddy field and woods sites in the summer season

	Fores	Foreshore		Paddy field		ods
	Avg	CV (%)	Avg	CV (%)	Avg	CV (%)
CO ₂ flux (mgCO ₂ m ⁻² h ⁻¹)	47	158	448	117	279	61
CO ₂ (ppm)	385	4	371	4	412	4
Soil temperature (°C)	26.7	3	21.4	2	22.5	2
Soil moisture (%)	74.1	29	68.8	22	20.3	43
Soil organic carbon (%)	0.9	23	1.8	11	25.3	57
Soil pH	7.8	3	6.0	8	4.1	3
Soil Eh (mV)	133.8	6	188.5	8	219.7	8

갯벌, 논 및 산림 부지에서 동절기와 하절기에 현장 관측된 토양온도, 이산화탄소 농도와 플럭스의 계절과 공간 변동을 분석하기 위해 box-whisker plots을 작성하였다. 토양온도의 계절별 변동은 갯벌에서 가장 크게 나타났으며, 산림 부지에서 가장 작았다(Fig. 2). 이는 갯벌은 대기에 직접적으로 노출되어 대기온도에 가장 민감하게 반응하고, 산림 부지에서는 나무에 의

해 여름에는 그늘지고(온도저감) 겨울에는 낙엽 등에 의해 토양의 온도상승 효과가 나타나기 때문이다.

토양 표면에서 관측된 챔버 내 이산화탄소 농도의 계절별 변동은 갯벌과 산림 부지에서 발생하였으며, 논 부지에서는 거의 나타나지 않았다(Fig. 3). 산림 부지에서 하절기에 높은 이산화탄소 농도를 보이는 것은 산림 토양 내 풍부한 토양유기탄소(Table 3 참조)를 먹이로 하는 미생물 활동의 증가로 인해 산림 토양에서 이산화탄소가 대기로 대량 방출되었기 때문이다 (Franzluebbers 등, 2001).

갯벌, 논 및 산림 부지에서 이산화탄소 플럭스의 계절변동은 동절기에 비해 하절기에 높은 것으로 나타났으며, 동절기에는 산림 부지에서 하절기에는 논 부지의 1개 지점에서 매우 높은 값이 나타났다(Fig. 4). 산림 부지에서 하절기에 높은 이산화탄소 플럭스는산림 토양 내 풍부한 토양유기탄소를 먹이로 하는 미생물 활동의 증가로 인한 것이며(Franzluebbers 등, 2001), 갯벌은 산림 부지에 비해 토양유기탄소는 매우낮고 동절기에는 주로 이산화탄소의 흡수원(sink)이었으나 하절기에는 갯벌에 서식하는 수많은 생물의호흡과 미생물 활동의 증가로 인해 이산화탄소의 방출원(source)이 되었다(강 등, 2010).

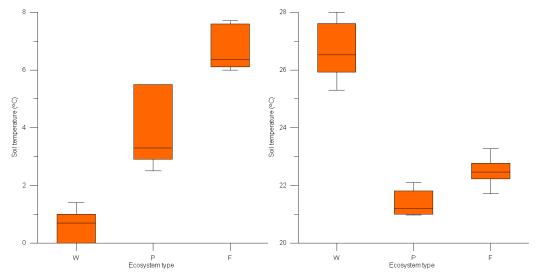


Fig. 2. Box-whisker plots of soil temperature measured in foreshore, paddy field and woods sites at the winter season(left) and summer season(right).

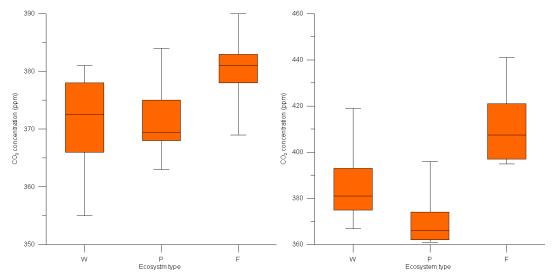


Fig. 3. Box-whisker plots of CO₂ concentration measured in foreshore, paddy field and woods sites at the winter season(left) and summer season(right).

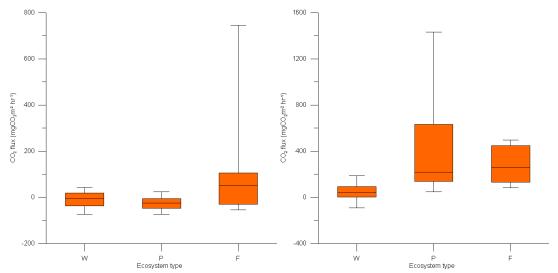


Fig. 4. Box-whisker plots of CO₂ flux measured in foreshore, paddy field and woods sites at the winter season(left) and summer season(right).

3.2. 이산화탄소 플럭스 변동 영향인자 분석

본 연구지역에서 이산화탄소 플럭스 변동에 영향을 미치는 인자들을 구명하기 위해 상관성분석과 선형회귀분석을 수행하였다. 본 연구에서 수행된 상관성분석과 선형회귀분석에는 하절기의 현장관측 및 실내분석 자료가 이용되었으며, 3개 자료군(갯벌, 논 및산림)으로 구분하여 분석되었다.

갯벌 부지에서 토양온도와 이산화탄소 플럭스의 상관성이 다른 요인에 비해 가장 높았으나, 상관계수는 0.34로서 낮은 값을 보였다(Table 4). 논 부지에서 이산화탄소 플럭스와 이산화탄소 농도의 상관계수가 0.99로서 가장 높았으며, 함수비의 상관계수는 0.52 정도로서 비교적 높은 상관성을 보였다(Table 5). 산림 부지에서의 이산화탄소 플럭스는 함수비 및 토양

유기탄소와 0.94 및 0.79로서 높은 정의 상관성을 보였으며, 이산화탄소 농도와 Eh 성분과는 -0.64 및 -0.93으로서 높은 음의 상관성을 보였다(Table 6). 산림 부지의 함수비는 평균 20.3%로서 낮았으며, 이러한 환경에서는 함수비의 증가에 따른 이산화탄소 플럭스가 급격하게 증가하는 것으로 보고되었다(Liu 등, 2002; Xu 등, 2004; 강 등, 2010). 산림 부지의 토양유기탄소는 평균 25.3%로서 미생물 활동에 필요한 영양분의 공급이 풍부하여 이산화탄소 플럭스 변동에 높

은 상관을 가진다(Luo와 Zhou, 2006).

갯벌, 논 및 산림 부지와 전체 자료를 이용하여, 6개 영향인자에 대한 이산화탄소 플럭스의 선형회귀함수 를 추정하였다. 이산화탄소 농도에 대한 플럭스 함수 는 산림과 갯벌 부지에서는 양의 기울기를, 논 부지에 서는 음의 기울기를 나타내었다(Fig. 5). 갯벌에서 추 정된 선형회귀함수의 결정계수는 낮았지만, 기울기는 1 정도로서 이산화탄소 농도와 플럭스의 증감 비율은 동일하였다(Fig. 5(a)). 논 부지에서 이산화탄소의 단

Table 7. Correlation coefficients between CO2 flux and environmental factors measured at paddy field in the summer season

	CO ₂ flux	CO ₂ Conc.	Soil temp.	Soil moisture	Soil organic carbon	Soil pH	Soil Eh
CO ₂ flux	1.00						
CO ₂ Conc.	0.99	1.00					
Soil temp.	-0.28	-0.21	1.00				
Soil moisture	0.52	0.52	-0.36	1.00			
Soil organic carbon	0.15	0.24	0.70	0.28	1.00		
Soil pH	-0.25	-0.21	0.01	0.13	0.43	1.00	
Soil Eh	0.23	0.19	-0.43	-0.14	-0.74	-0.85	1.00

Table 8. Correlation coefficients between CO₂ flux and environmental factors measured at foreshore site in the summer season

	CO ₂ flux	CO ₂ Conc.	Soil temp.	Soil moisture	Soil organic carbon	Soil pH	Soil Eh
CO ₂ flux	1.00						
CO ₂ Conc.	0.20	1.00					
Soil temp.	0.34	-0.05	1.00				
Soil moisture	-0.03	-0.39	-0.56	1.00			
Soil organic carbon	0.01	-0.02	-0.47	0.81	1.00		
Soil pH	0.10	-0.16	0.54	-0.57	-0.65	1.00	
Soil Eh	-0.25	0.04	-0.64	0.19	0.05	-0.27	1.00

Table 9. Correlation coefficients between CO2 flux and environmental factors measured at woods site in the summer season

	CO ₂ flux	CO ₂ Conc.	Soil temp.	Soil moisture	Soil organic carbon	Soil pH	Soil Eh
CO ₂ flux	1.00						
CO ₂ Conc.	-0.64	1.00					
Soil temp.	-0.48	0.41	1.00				
Soil moisture	0.94	-0.49	-0.69	1.00			
Soil organic carbon	0.79	-0.07	-0.27	0.81	1.00		
Soil pH	0.07	0.31	-0.67	0.36	0.31	1.00	
Soil Eh	-0.93	0.33	0.46	-0.95	-0.89	-0.24	1.00

위농도 증가에 따른 플럭스 증가율은 약 40배 정도로 서 매우 클 것으로 추정되었다(Fig. 5(b)).

생태계의 이산화탄소 방출(emission) 조건에서는 토양온도가 증가함에 따라 이산화탄소 플럭스도 지수적으로 증가하는 것으로 보고되었다(Boone 등, 1998; Lloyd와 Taylor, 1994). 갯벌 부지에서는 토양온도가증가할수록 이산화탄소 플럭스가 증가할수록 이산화탄소 플럭스가 증가할수록 이산화탄소 플럭스가 감소하였다(Fig. 6). 현장관측 시 토양온도의 변동 폭이 2℃ 이내로 매우 적었고 이산화탄소 플럭스의 공간적인 불균질성이 높아서 토양온도와 이산화탄소 플럭스 함수를 추정하기에는 현실성이 매우부족하였다. 갯벌 부지에서는 토양온도의 변동 폭이 3℃ 이내이고 논과 산림 부지에 비해 이산화탄소 플럭스의 공간적인 불균질성이 낮았으며, 토양온도와 이산화탄소 플럭스의 공간적인 불균질성이 낮았으며, 토양온도와 이산화탄소 플럭스의 공간적인 불균질성이 당았으며, 토양온도와 이산화탄소 플럭스의 선형적인 증가함수가 추정되었다 (Fig. 6(a)).

생태계에서 토양함수비와 이산화탄소 플럭스는 선 형함수로서 60% 정도의 함수비(호기성 혹은 혐기성) 조건을 기준으로 그 이하(호기성 조건)에서는 함수비 증가에 따라 이산화탄소 플럭스도 증가하고, 그 이상 (혐기성 조건)에서는 함수비 증가에 따라 이산화탄소 플럭스는 감소한다(Liu 등, 2002; Papendick와 Camp bell, 1981; Xu 등, 2004). 갯벌 부지에서는 함수비 6 0% 이하에서 이산화탄소 플럭스는 증가하였으며, 6 0% 이상에서는 감소하는 형태를 보였다(Fig. 7(a)). 이는 Papendick and Campbell(1981)의 보고와 유사 한 것이며, 모든 자료를 이용한 선형회귀분석에서는 함수비에 따른 이산화탄소 플럭스의 감소와 증가 조 건이 결합되어 기울기가 거의 -0.09 정도로 매우 낮았 다. 논 부지에서는 함수비가 40~90% 범위이어서 함 수비와 이산화탄소 플럭스의 선형함수에 대한 결정계 수(0.27)는 낮았지만, 함수비의 증가에 따른 이산화탄 소 플럭스도 증가하는 경향은 뚜렷하였다(Fig. 7(b)). 산림 부지에서는 함수비가 40% 이하의 호기성 조건 으로 함수비와 이산화탄소 플럭스의 선형증가함수의 결정계수가 0.89 정도로서 높게 나타났다(Fig. 7(c)). 토양의 함수비가 낮고 유기물질이 많은 산림 부지에 서는 함수비 증가로 미생물 활동이 촉진되어, 유기물 질의 분해가 활발하게 발생하여 이산화탄소 방출량이

급격하게 증가하게 된다(Fierer와 Schimel, 2003; Gli nski와 Stepniewski, 1985). 산림 부지 자료의 선형회 귀함수 결정계수가 0.89 정도로서 매우 높았으며, 함수비 1% 증가하면 이산화탄소 플릭스는 $18 \text{ mgCO}_2\text{m}^2\text{hr}^1$ 정도 증가할 것으로 추정되었다(Fig. 7(c)).

토양미생물 활동을 촉진시키는 물질인 토양유기탄 소와 방출 조건에서의 이산화탄소 플럭스는 다양한 온도와 습도 조건(Franzluebbers 등, 2001), 이탄지 (Moore, 1986)와 산림생태계(Janssens 등, 2001; Raich와 Nadelhoffer, 1989; Schlesinger, 1997) 등에 서 선형적인 증가함수를 나타내었다. 갯벌과 논 부지 에서는 토양유기탄소에 따른 이산화탄소 플럭스의 변 동이 거의 나타나지 않았으며, 이는 갯벌과 논 부지의 토양 내 유기물함량이 3% 이하로 매우 적어서 유기물 분해에 의한 이산화탄소 방출량 증가에 미치는 영향 성이 적었을 것으로 판단된다(Fig. 8(a)와 8(b)). 산림 부지에서는 토양유기탄소에 따른 이산화탄소 플럭스 의 선형적인 증가가 확연하게 나타났으며(Fig. 8(c)), 이는 산림 토양 내에 풍부한 유기물질이 미생물활동 을 활발하게 함으로써 이산화탄소 방출량을 높였기 때문이다(Luo와 Zhou, 2006).

갯벌 부지에서 토양 pH는 7.34~8.1, 논 부지에서는 5.35~6.86, 산림 부지에서는 3.94~4.22의 범위이었으며, 기존의 연구에서는 pH 7 이상인 토양(갯벌)에서는 pH 증가하면 이산화탄소 생산율이 감소하고 pH 7 이하인 토양(논과 산림)에서는 pH 증가하면 이산화탄소 생산율도 증가한다고 보고되었다(Kowalenko 등, 1 978; Rao와 Pathak, 1996; Sitaula 등, 1995). 갯벌과논에서는 기존의 연구와 반대되는 경향을 보였으며, 산림에서도 pH에 따른 이산화탄소 생산율 증가가 거의 나타나지 않았다(Fig. 9). 이러한 결과는 본 연구지역에서 이산화탄소 플럭스 변동에 있어 토양 pH의 영향성이 뚜렷하지 않음을 의미하며, 다른 요인들(토양온도, 함수비 및 유기탄소 등)과의 복합적인 고려를통한 분석이 필요하다(Luo와 Zhou, 2006).

갯벌에서 토양 pH에 대한 함수비와 토양유기탄소의 상관계수는 -0.65와 -0.57로서 음의 상관을 가졌으며(Table 4), 함수비와 토양유기탄소의 증가에 따른이산화탄소 플럭스 변동은 나타나지 않았다(Fig. 7(a)와 8(a)). 논 부지에서 함수비, 토양유기탄소 및 토양 p

H를 모두 고려한 이산화탄소 플럭스의 변동을 분석한 결과, 함수비가 높고 토양유기탄소량이 많은 지점들에서 이산화탄소 플럭스가 증가하였고 토양 pH에 대한 함수비와 토양유기탄소의 상관계수는 0.43과 0.13으로서 낮았다(Fig. 7(b)와 8(b), Table 5). 산림 부지

에서도 토양 pH보다는 함수비와 토양유기탄소량이 많았던 지점들에서 이산화탄소 플럭스가 높게 나타났으며(Fig. 7(c)와 8(c)), 토양 pH에 대한 함수비와 토양유기탄소의 상관계수가 0.31과 0.36으로서 낮았다(Table 6). 이상의 분석을 통해, 갯벌, 논과 산림 부지에서

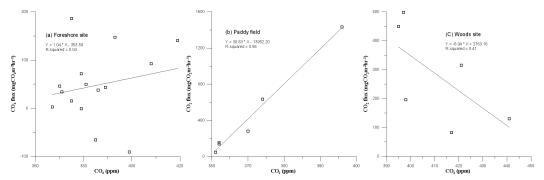


Fig. 5. Relationships between CO₂ flux and CO₂ concentration measured in foreshore(left), paddy field(center) and woods (right) at the summer season.

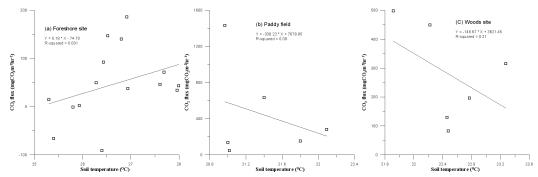


Fig. 6. Relationships between CO₂ flux and soil temperature measured in foreshore(left), paddy field(center) and woods(right) at the summer season.

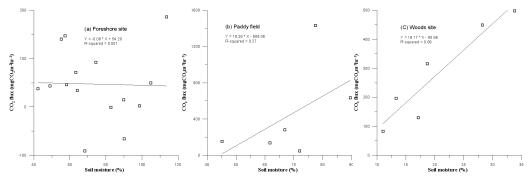


Fig. 7. Relationships between CO₂ flux and soil moisture measured in foreshore(left), paddy field(center) and woods(right) at the summer season.

토양 pH만을 고려한 이산화탄소 플럭스 변동이 명확하게 설명될 수 없음을 확인하였다.

갯벌 부지에서 토양 Eh는 122.5~149.7 mV, 논 부지에서는 172.7~214.6 mV, 산림 부지에서는 196.7~2 44.7 mV 범위로서 산화환경임을 알 수 있었다(Bohn

등, 2001). 갯벌과 산림 부지에서는 Eh 성분의 증가에 따라 이산화탄소 플럭스는 감소하였고, 논 부지에서는 반대의 경향을 보였다(Fig. 10). 추정된 선형회귀함수의 결정계수는 갯벌과 논 부지에서는 매우 낮았으며, 산림 부지에서는 0.86 정도로서 높았다. 본 연구에

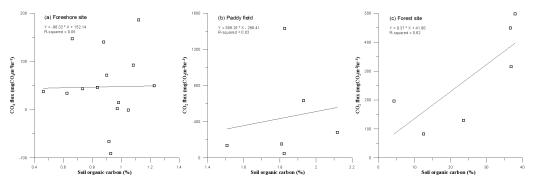


Fig. 8. Relationships between CO₂ flux and soil organic carbon measured in foreshore(left), paddy field(center) and woods(right) at the summer season.

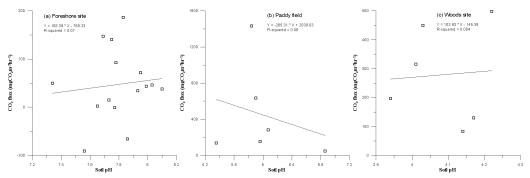


Fig. 9. Relationships between CO₂ flux and soil pH measured in foreshore(left), paddy field(center) and woods(right) at the summer season.

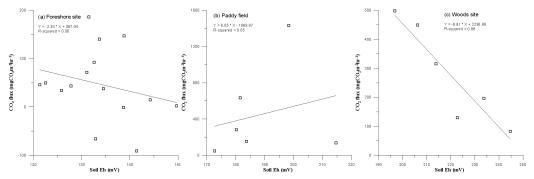


Fig. 10. Relationships between CO₂ flux and soil Eh measured in foreshore(left), paddy field(center) and woods(right) at the summer season.

서는 산화 조건(평균 pH 4.1, 평균 Eh 219.7 mV)의 토 양층으로 구성된 산림 부지에서 Eh가 1 mV 증가하면 이산화탄소 플럭스는 약 8.9배 정도 감소하는 것으로 추정되었다(Fig. 10(c)).

4. 결 론

본 연구에서는 순천시 해룡면 농주리 일대의 갯벌, 논 및 산림 부지에서 토양의 이화학적 성질과 이산화 탄소 플럭스를 분석하였으며, 아래와 같은 결론들이 도출되었다.

동절기에는 갯벌과 논 부지에서 이산화탄소가 흡수되고 산림에서는 방출되고 있었으며, 하절기에는 3개 부지 모두에서 이산화탄소가 대기 중으로 방출되는 것으로 관측되었다. 토양함수비는 강수량이 높은 하절기에 높게 나타났으며, 조석의 영향을 받고 있는 갯벌에서는 그 차이가 나타나지 않았다. 토양유기탄소는 갯벌과 논에서는 동절기와 하절기에 유사하게 나타났으며, 산림에서는 식물의 성장기인 하절기에 광합성으로 인한 탄소 축적량이 증가하여 토양유기탄소량이 높게 나타났다. 토양 pH 성분은 갯벌과 논 부지에서는 유사하고 산림 부지에서는 하절기에 낮아졌으며, 토양 Eh 성분은 갯벌에서는 변화하지 않았고 논과 산림 부지에서 하절기에 증가하였다.

갯벌, 논 및 산림 부지에서 이산화탄소 플럭스와 농 도, 토양함수비 및 토양유기탄소 성분들의 변동계수는 하절기에 높게 나타났으며, 이는 강수량이 많고 식물 생장이 활발한 하절기에는 토양 함수비와 토양유기탄소량이 증가하고 이로 인한 미생물 활동에 의한 이산화탄소 플럭스가 증가하였기 때문이다. 토양온도 성분의 변동계수는 하절기에 높았으며, 토양 pH와 Eh 성분의 변동계수는 동절기와 하절기에 유사하게 나타 났다.

갯벌, 논 및 산림 부지에서 하절기에 관측된 자료에 의한 상관성 분석 결과, 이산화탄소 플럭스와의 상관 성은 갯벌 부지에서는 토양온도, 논 부지에서는 함수비가 가장 높았으며, 산림 부지에서는 함수비와 토양유기탄소가 높은 정의 상관성을 보였다.

본 연구부지에서 하절기에 관측된 자료를 이용하여 6개 영향인자들에 대한 이산화탄소 플릭스의 선형

회귀함수를 추정하여 분석하였다. 토양온도의 증가에 따른 이산화탄소 플럭스 함수는 갯벌 부지에서는 증가하고 논과 산림 부지에서는 감소하였다. 갯벌 부지의 토양함수비가 60% 이하에서는 이산화탄소 플럭스함수가 증가하고 60% 이하에서는 리소하는 것으로추정되었다. 산림 부지에서는 토양유기탄소에 대한이산화탄소 플럭스함수가 증가하였으며, 이는 산림토양 내 풍부한 유기물질에 의한 미생물활동의 촉진으로인해이산화탄소 방출량이 증가하였기 때문이다. 갯벌, 논 및 산림 부지에서 토양 pH만을 고려한이산화탄소 플럭스의 변동은 명확하게추정되지않았으며, 다른 영향인자들과의 복합적인 고려를통한 분석이 필요할 것으로 판단된다. 갯벌과 산림 부지에서는 Eh 성분에 따른 이산화탄소 플럭스 함수가 감소하였으나, 논 부지에서는 증가하는 경향을 보였다.

본 연구에서는 동절기와 하절기의 생태계(갯벌, 논, 산림)에 따른 이산화탄소 플럭스의 흡수와 방출이 확 인 되었으며, 생태계별 토양환경의 영향인자들에 의 한 이산화탄소 플럭스의 변동을 추정하고 구명하였 다. 향후에는, 다양한 관측부지에서 반복적인 관측을 수행하여 생태계 종류와 계절별 이산화탄소 플럭스의 변동 및 토양환경 인자들에 의한 영향성을 설명할 수 있는 모델을 개발하고자 한다.

감사의 글

본 연구는 환경부의 "차세대핵심환경기술개발사업 (Eco-technopia 21 project)으로 지원받은 과제입니다 (121-091-069). 지원기관에 감사하며, 본 논문의 심사자들에게도 감사드립니다.

참고문 헌

- 강동환, 권병혁, 김필근, 2010, 순천만 연안 생태계에서 토양의 이화학적 성질에 의한 이산화탄소 호흡 특 성, 한국환경과학회지, 19(2), 217-227.
- 강동환, 김성수, 권병혁, 김일규, 2008, 고흥만 인공습지의 토양유기탄소와 이산화탄소 변동 관측, 수산해양교육학회지, 20(1), 58-67.
- 김득수, 2007, 온실기체(CH₄, CO₂, N₂O)의 하구언갯벌 배출량과 배출특성연구, 한국대기환경학회지, 23(2),

- 225-241.
- 이희춘, 홍진규, 조천호, 최병철, 오성남, 김준, 2003, 한 국 해남 농경지와 대기간의 에너지와 이산화탄소의 지표 교환, 한국농림기상학회지, 5(2), 61-69.
- 채남이, 김래현, 황태희, 서상욱, 이재석, 손요한, 이도원, 김준, 2005, 식물 환경 조절 시스템에서의 토양 호흡 관측 챔버법의 비교 실험, 한국농림기상학회지, 7(1), 107-114.
- 채남이, 김준, 김동길, 이도원, 김래현, 반지연, 손요한, 2003, 폐회로 역학 챔버 시스템을 이용한 토양 이산화 탄소 플럭스 관측, 한국농림기상학회지, 5(2), 94-100.
- 최태진, 김준, 임종환, 2003, 2002년 여름철 경사진 광릉 낙엽 활엽수림에서의 이산화탄소 교환, 한국농림기 상학회지, 5(2), 70-80.
- 환경부, 2002, 토양오염공정시험법, 218.
- Bohn, H. L., McNeal, B. L., O'Connor, G. A., 2001, Soil chemistry, 3rd edition, John wiely & Sons, Inc., 307
- Boone, R. D., Nadelhoffer K. J., Canary, J. D., Kaye, J. P., 1998, Roots exert a strong influence on the temperature sensitivity of soil respiration, Nature, 396, 570-572.
- Field, C. B., Ball, J. T., Berry, J. A., 1989, Photosynthesis, principles and filed techniques. In Plant physiological ecology, field methods and instrumentation (Pearcy, R. W., Ehleringer, J., Mooney, H. A., Rundel, P. W.,), Chapmand and Hall, New York, 209-253.
- Fierer, N., and Schimel, J. P., 2003, A proposed mechanism for the pulse in carbon dioxide production commonly observed following the rapid rewetting of a dry soil, Soil Science Society of America Journal, 67, 798-805.
- Franzluebbers, A. J., Haney, R. L., Honeycutt, C. W. Arshad, M. A., Schomberg, H. H., Hons, F. M., 2001, Climatic influences on active fractions of soil organic matter, Soil Biology and Biochemistry, 33(7-9), 1103-1111.
- Glinski, J., Stepniewski, W., 1985, Soil aeration and its role for plants, CRC Press, Boca Raton, FL.
- Guo, H., Noormets, A., Zhao, B., Chen, J., Sun, G., Gu, Y., Li, B., Chen, J., 2009, Tidal effects on net ecosystem exchange of carbon in an estuarine wetland, Agricultural and Forest Meteorology, 149, 1820-1828.

- IPCC, 2001, Third Assessment Report, Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom.
- Janssens, I. A., Lankreijer, H., Matteucci, G., Kowalski,
 A. S., Buchmann, N., Epron, D., Pilegaard, K.,
 Kutsch, W., Longdoz, B., Grunwald, T., Montagnani,
 L., Dore, S., Rebmann, C., Moors, E. J., Grelle, A.,
 Rannik, U., Morgenstern, K., Oltchev, S., Clement,
 R., Guomundsson, J., Minerbi, S., Berbigier, P.,
 Ibrom, A., Moncrieff, J., Aubinet, M., Bernhofer,
 C., Jensen, N. O., Vesala, T., Granier, A., Schulze,
 E. D., Lindroth, A., Dolman, A. J., Jarvis, P. G.,
 Ceulemans, R., Valentini, R., 2001, Productivity
 overshadows temperature in determining soil and
 ecosystem respiration across European forests,
 Global Change Biology, 7(3), 269-278.
- Kayranli, B., Scholz, M., Mustafa, A., Hedmark, A., 2009, Carbon storage and fluxes within freshwater wetlands: a critical review, Wetlands, DOI 10.1007/s13157-009-0003-4.
- Kowalenko, C. G., Ivarson, K. C., Cameron, D. R., 1978, Effect of moisture content, temperature and nitrogen fertilization on carbon dioxide evolution from field soils, Soil Biology and Biochemistry, 10, 417-423.
- Liu, X., Wan, S., Su, B., Hui, d., Luo, Y., 2002, Response of soil CO₂ efflux to water manipulation in a tallgrass prairie ecosystem, Plant and Soil, 240, 213-223.
- Lloyd, J., Taylor, J. A., 1994, On the temperature dependence of soil respiration, Functional Ecology, 8, 315-323.
- Luo, Y, Zhou, X., 2006, Soil respiration and the environment, ELSEVIER, 305.
- Moore, T. R., 1986, Carbon dioxide evolution from subarctic peatlands in eastern Canada, Arctic Alpine Research, 18, 189-193.
- Papendick, R. I., Campbell, G. S., 1981, Theory and measurement of water potential, In Water potential relations in soil microbiology(Parr, J. F., Gardner, W. R., and Elliott, L. F., eds.), 1-22, Soil Science Society of America, Special Publication No. 9, Madison, WI.
- Raich, J. W., Nadelhoffer, K. J., 1989, Belowground carbon allocation in forest ecosystems: Global trends, Ecology, 70(5), 1346-1354.

- Rao, D. L. N., Pathak, H., 1996, Ameliorative influence of organic matter on biological activity of salt affected soils, Arid Soil Research and Rehabilitation, 10, 311-319.
- Rayment, M. B., Jarvis, P. G., 2000, Temporal and spatial variation of soil CO2 efflux in a Canadian boreal forest, Soil Biology and Biochemistry, 32, 35-45.
- Rogner, H.-H., Zhou, D., Bradley, R., Crabbe, P., Edenhofer, O., Hare, B., Kuijpers, L., Yamaguchi, M., 2007, In Climate Change 2007: Mitigation. Contribution of Working Group III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, B. Metz, O.R. Davidson, P.R. Bosch, R. Dave, L.A. Meyer (eds), Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- Schlesinger, W. H., 1997, Biogeochemistry: An analysis of global change, Academic Press/Elsevier, San Diego, CA.

- Sitaula, B. K., Bakken, L. R., and Abrahamsen, G., 1995, N-fertilization and soil acidification effects on N₂O and CO₂ emission from temperate pine forest soil, Soil Biology and Biochemistry, 27(11),1401-1408.
- Verburg, P. J., Arnone III, J. A., Obrist, D., Schorran, D., Evans, R. D., Leroux-Swarthout, D., Johnson, D. W., Luo, Y., and Coleman, J. S., 2004, Net ecosystem carbon exchange in two experimental grassland ecosystems, Global Change Biology, 10, 498-508.
- Xu, L., Baldocchi, D. D., Tan, J., 2004, How soil moisture, rain pulses, and growth alter the response of ecosystem respiration to temperature, Global Biogeochemical Cycles, 18, GB4002, Doi: 10.1029/ 2004GB002281.
- Yamamoto, A., Hirota, M., Suzuki, S., Oe, Y., Zhang, P., Mariko, S., 2009, Effects of tidal fluctuations on CO₂ and CH₄ fluxes in the littoral zone of a brackish-water lake, Limnology, 10, 229-237.