

ORIGINAL ARTICLE

갯벌에서 여름철 일몰 전후 이산화탄소 농도 변동 분석

강동환 · 권병혁^{1)*} · 김박사¹⁾

부경대학교 지구과학연구소, ¹⁾부경대학교 환경대기과학과

Variation Analysis of CO₂ Concentrations at Sunset before and after of Summer Season at the Foreshore

Dong Hwan Kang, Byung Hyuk Kwon^{1)*}, Park Sa Kim¹⁾

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

¹⁾Department of Environmental Atmospheric Sciences, Pukyong National University, Busan 608-737, Korea

Abstract

In this study, before and after sunset carbon dioxide concentration and air temperature were observed in two points of atmosphere (lower observation point of the GL + 0.1 m, the upper observation point of GL + 1.0 m) on the foreshore at located in Suncheon Bay and their variations were analyzed. Observation was performed on the foreshore on 2~4 August 2010. Instrument (VAISALA, GMP343) was set two hours before sunset and then observation was made continuously for six hours. In three days, observed carbon dioxide concentration was 375~419 ppm, and the air temperature was in the range of 28.7~32.5°C. The average concentration of carbon dioxide was 388~399 ppm in the upper observation point and 386~396 ppm in the lower observation point. It was higher in the upper observation point and its fluctuations were similar in two observation points. Correlation coefficients between carbon dioxide concentration and air temperature in the upper observation point were in the range of -0.64~-0.88, and were calculated -0.65 to -0.90 in the lower observation point. For the carbon dioxide concentration, correlation coefficients between the upper part and the lower part were very high as 0.98 in three times. For the air temperature, correlation coefficients between the upper part and the lower part were very high as 0.97 and 0.99. In the same observation time, the slope of the linear regression function as carbon dioxide concentration in the lower observation point for the upper observation point was in the range of 0.97~1.01. Carbon dioxide concentration was slightly higher in the upper observation point. Because carbon dioxide in the lower observation point was closer on the surface of the foreshore and absorbed from atmosphere to the foreshore. In this study, it was showed that the vertical variation of carbon dioxide concentration was insignificant in the several meter scale of atmosphere on the surface of the foreshore.

Key words : Foreshore, Sunset, Carbon dioxide, Air temperature

1. 서론

갯벌은 대기 중 이산화탄소를 흡수하는 탄소의 저장소(sink)이지만, 또한 유기탄소량의 함량이 높은 지역이어서 이산화탄소의 배출원(source)이 되기도 한

다(Brevik과 Homburg, 2004; Guo 등, 2009; Kang 등, 2010; Zhou 등, 2009). 갯벌에서 이산화탄소의 흡수는 갈대와 같은 식물 혹은 갯벌 표면에 서식하는 식물 플랑크톤의 광합성에 의해 이루어진다(Guarini 등, 1997; Zhou 등, 2009). 갯벌에 저장되어 있던 유기탄

Received 2 October, 2013; Revised 3 December, 2013;

Accepted 5 December, 2013

*Corresponding author: Byung Hyuk Kwon, Department of Environmental Atmospheric Sciences of Pukyong National University
Phone: +82-51-620-6288
E-mail: bhkwon@pknu.ac.kr

© The Korean Environmental Sciences Society. All rights reserved.
© This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

소는 미생물의 먹이로서 혹은 호흡에 의해서 이산화탄소로 변화되어 대기로 방출되고, 또한 갯벌에 서식하는 생물들의 호흡에 의해서 이산화탄소가 대기로 방출된다(Zhang 등, 2011). 갈대와 같은 식물이 존재하지 않는 갯벌에서의 광합성은 대부분 식물플랑크톤에 의해 발생하며, 고조 때에는 해수 표면에 존재하는 식물플랑크톤에 의해서 저조 때에는 갯벌 표면에 존재하는 식물플랑크톤에 의해 발생한다(Guarini 등, 1997; Pinckney와 Zingmark, 1991).

국외에서는 해안 지역에서 이산화탄소 변동 연구가 다수 수행되었다. 미국 캘리포니아 남부 연안에 있는 습지에서 얻은 퇴적물 코어 표본에서는 약 5000년 동안 축적된 탄소 양이 계산되었으며(Brevik과 Homburg, 2004), 해안 부근 염분성 호수의 퇴적물에서 대기로 방출되는 이산화탄소와 메탄에 미치는 조수의 영향이 분석되었다(Yamamoto 등, 2009). 중국 상해의 연안 습지에서는 계절별로 조수의 변동에 따라 이산화탄소의 순 생태 교환(net ecosystem exchange)의 특성이 분석되었고(Guo 등, 2009), 미국 텍사스만 해안 습지에서는 순 생태 교환의 변동과 담수의 유입에 따른 영향이 조사되었다(Heisch 등, 2004). 또한, 미국의 캘리포니아에 위치한 North 만(inlet) 어귀에서는 조수 변동과 태양각 변동이 저서 미세조류의 광합성에 미치는 효과를 연구하였으며(Pinckney와 Zingmark, 1991), 프랑스 Marennes-Oleron 만의 갯벌 표면에서 온도에 따른 식물플랑크톤의 광합성 양을 모의하여

그 결과를 분석한 연구(Guarini 등, 1997) 등이 수행되었다. 국내에서는 순천만 연안 갯벌에서 지표 퇴적물과 대기 사이의 이산화탄소 플럭스의 계절/공간 변동 연구(Kang 등, 2011), 연안생태계(갯벌, 논, 산림)에서 토양의 이화학적 성질에 의한 이산화탄소 플럭스 특성(Kang 등, 2010), 하구연 갯벌에서 온실기체의 배출량과 배출 특성에 관한 연구(Kim, 2007) 등을 통해 갯벌의 이산화탄소 농도와 플럭스에 대한 공간 및 계절적 특성에 관한 연구가 수행되었다. 국내·외에서 수행된 이산화탄소 변동 연구는 다양한 시간 규모(일, 월, 년)에서 수행되었으나, 일몰 조건과 같은 수 시간 규모에서 이산화탄소 농도의 변동에 관한 정량적인 분석은 수행된 바가 없다. 이러한 연구는 미시적인 규모에서 짧은 시간 동안에 발생하는 시공간적인 이산화탄소 농도의 변화를 구명하기 위해 필요하다.

본 연구에서는 전라남도 순천만(해룡면 농주리) 해안 갯벌에서 일몰 전후의 이산화탄소 농도를 연속적으로 관측하였다. 일몰 전후의 갯벌에서 기온과 이산화탄소 농도의 상관성을 분석하고, 기온에 따른 이산화탄소 농도의 회귀함수를 추정하여 일몰 전후 광합성 활동과 중단에 의한 갯벌 대기의 이산화탄소 변동을 분석하였다.

2. 재료 및 방법

본 연구지역은 전라남도 순천시 해룡면 농주리 일

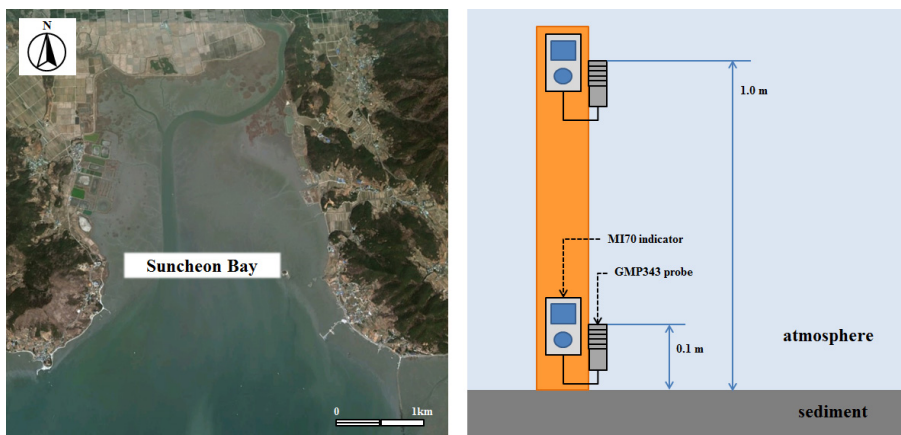


Fig. 1. Foreground of the Suncheon Bay (left) and schematic diagram to monitor vertical CO_2 concentration (right).

대의 해안 갯벌이다. 본 연구에 이용된 자료는 2010년 8월 2~4일 동안의 일몰 조건에서 관측되었다. 이산화탄소 농도와 기온 관측기기(VAISALA, GMP343)는 일몰 기준 1시간 이전에 갯벌 표면 위 0.1 m 지점(하부 지점, 표와 그림에서 “L”로 표기)과 1.0 m 지점(상부 지점, 표와 그림에서 “U”로 표기)의 높이에 설치하였다(Fig. 1). 갯벌 표면 상부의 두 지점(L 및 U)에서 이산화탄소 농도 관측은 갯벌 표면에 서식하는 생물의 호흡과 식물 플랑크톤의 광합성으로 인한 이산화탄소 농도의 수직적인 분포와 그 변동을 구명하기 위한 것이다.

GMP343은 이산화탄소 측정기로써 기체 포집을 하지 않고 이산화탄소를 흡입하여 비분산형 적외선 분석(non-dispersive infrared, NDIR) 방법으로 이산화탄소 농도를 측정한다. 이산화탄소 농도는 기온과 동시에 측정되어 MI70 indicator에서 실시간으로 확인되고, 동시에 1분 간격으로 자료가 저장된다.

3. 결과

일몰 시간은 한국천문연구원의 천문우주지식정보에서 제공하는 순천 지역 자료를 적용하였으며, Fig. 2에서 가로축의 “0”에 해당하는 시점이다. 일몰 이전의 이산화탄소 농도는 상부 지점이 하부 지점에 비해 높게 나타났으나, 일몰 이후에는 두 지점의 이산화탄소 농도 차이가 점점 감소하였다. 일몰 이후에 두 지점의 이산화탄소 농도 차이는 감소하였으나, 두 지점 모두에서 시간에 따른 이산화탄소 농도의 변동 폭은 증가하였다. 일몰 시간을 기준으로 약 30분 전부터 이산화탄소 농도가 증가하기 시작하였으며, 일몰 이후 30분 경과한 시점부터는 증가율이 감소하였다(Fig. 2).

갯벌에서 2010년 8월 2~4일 동안 3회 관측된 이산화탄소 농도와 기온의 최소, 최대, 평균, 표준편차 및 변동계수가 Table 1에 정리되어 있다. 관측기간 동안 이산화탄소 농도는 375~419 ppm의 범위이며, 기온은 28.7~32.5°C의 범위이다. 이산화탄소 농도의 평균은 상부 지점에서는 388~399 ppm 정도이며, 하부 지점에서는 386~396 ppm 으로서 이산화탄소 농도의 평균 값은 상부 지점에서 높고 그 변동 폭은 유사하다. 기온의 평균은 상부 지점에서는 29~31°C 정도이며, 하부

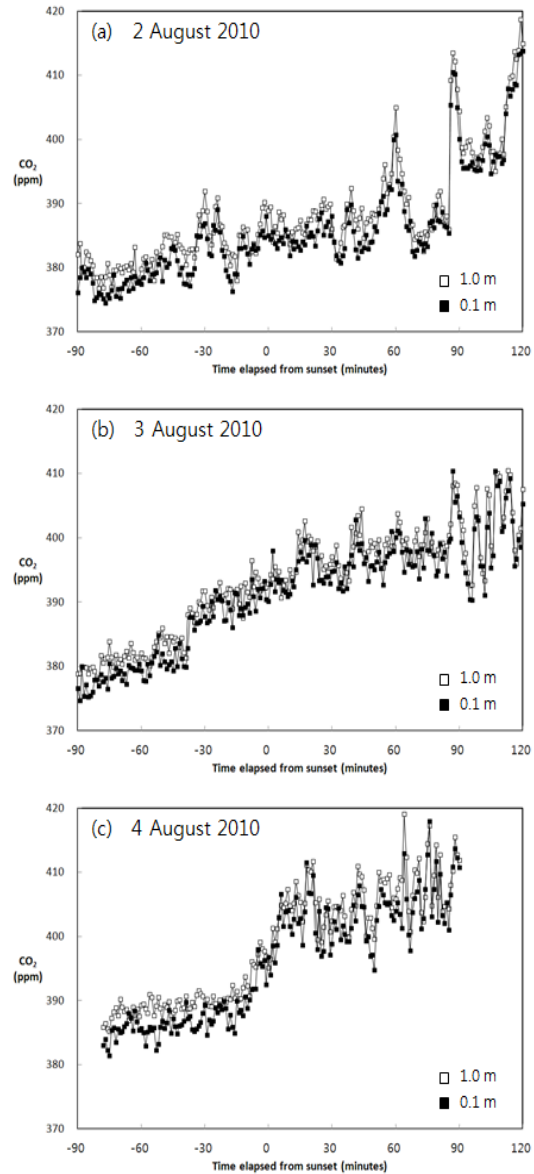


Fig. 2. Variations of CO₂ concentrations monitored at the 0.1 m and 1.0 m over sediment surface.

지점에서는 29.2~31.1°C로서 상부 지점에서의 기온 변동 폭이 1°C 정도 높다. 이산화탄소 농도의 변동계수는 2%로서 매우 낮으며, 기온의 변동계수는 1~3%의 범위로 나타났다.

갯벌에서 관측된 이산화탄소 농도와 기온 자료에 대한 관측지점별 및 관측일자별 box-whisker plots이

Table 1. Descriptive statistics for CO₂ concentration and air temperature data

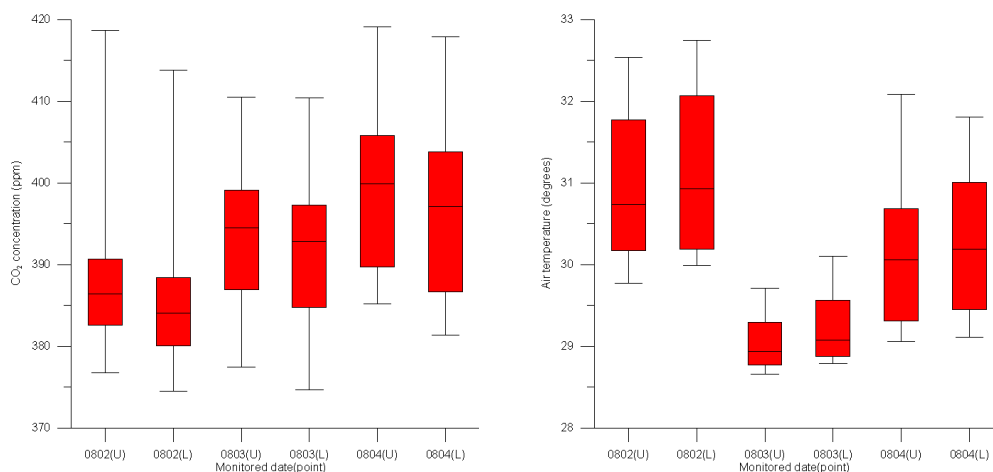
Date	Component	N	Min	Max	Avg	SD	CV (%)
August 2	CO ₂ (U)	211	377	419	388	8	2
	CO ₂ (L)	211	375	414	386	8	2
	Temp(U)	211	29.8	32.5	31.0	0.9	3
	Temp(L)	211	30.0	32.8	31.1	1.0	3
August 3	CO ₂ (U)	211	378	411	393	8	2
	CO ₂ (L)	211	375	410	391	8	2
	Temp(U)	211	28.7	29.7	29.0	0.3	1
	Temp(L)	211	28.8	30.1	29.2	0.4	1
August 4	CO ₂ (U)	169	385	419	399	9	2
	CO ₂ (L)	169	381	418	396	9	2
	Temp(U)	169	29.1	32.1	30.1	0.7	2
	Temp(L)	169	29.1	31.8	30.2	0.8	3

Fig. 3에 작성되어 있다. 이산화탄소 농도의 증양값은 3회 관측 동안 모두 상부 지점에서 높은 값을 보였으며, 기온의 증양값은 3회 관측 모두 하부 지점에서 높게 나타났다. 관측기간 동안 이산화탄소 농도와 기온은 갯벌 상부 0.1 m 지점과 1.0 m 지점에서 상대적인 차이가 존재함을 보여주는 것이다. 일몰 조건에서 이산화탄소 농도가 갯벌 표면에 근접할수록 감소하는 것은 갯벌에 서식하는 식물성 플랑크톤의 광합성으로 인해 대기 중 이산화탄소가 갯벌에 흡수되기 때문이다(Montes-Hugo와 Alvarez-Borrego, 2003).

4. 토 의

4.1. 이산화탄소 농도와 기온의 상관성

본 연구지역에서 관측된 이산화탄소 농도와 기온은 역(negative) 상관성을 보였으며, 이는 일몰 전후에 태양 복사에너지의 감소로 인해 기온은 하강하고 일몰 후 광합성의 중단으로 인해 대기 중 이산화탄소 농도가 증가하였기 때문이다(Guo 등, 2009). 상부 관측 지점에서 이산화탄소 농도와 기온의 상관계수는 -0.64에서 -0.88의 범위이었고, 하부 관측지점에서는

**Fig. 3.** Box-whisker plots of CO₂ concentrations (left) and air temperatures (right) for measured date and points.

-0.65에서 -0.90 정도로 산정되었다(Table 2). 본 연구에서 관측된 일몰 전후의 단시간 규모(6시간 이내)에서는 이산화탄소 농도와 기온은 역 상관성을 보이지만, 생태계에서 보고된 일반적인 사례에서는 기온이 증가할수록 갯벌에서 대기 이산화탄소 농도가 증가하는 것으로 보고되었다(Kang 등, 2010; Kang 등, 2011; Zhou 등, 2009). 본 연구의 결과는 갯벌에서 일몰 전후의 짧은 시간 규모에서 이산화탄소 농도와 기온에 대한 변동과 두 성분 간의 상관성을 구명하는 것에 그 의미가 있다.

이산화탄소 농도에 대한 상부와 하부 관측지점 사이의 상관계수는 3회 모두 0.98로서 매우 높았으며, 이는 상부 관측지점과 하부 관측지점 사이의 이산화탄소 농도의 증가와 감소 경향이 매우 유사함을 의미한다. 일몰 전의 이산화탄소 농도는 상부 관측 지점에서 높았고 일몰 후에는 두 지점에서 유사한 값을 보였지만, 일몰 전후 경과시간에 따른 상부와 하부 관측지점 사이에서 이산화탄소 농도의 변화 경향은 동일한 것으로 판단된다. 일몰 이전에 하부 관측지점에서 이산화탄소 농도가 낮은 것은 갯벌 표면의 식물성 플랑크톤의 광합성에 의한 것이며(Montes-Hugo와 Alvarez-Borrego, 2003), 일몰 이후에는 광합성 활동의 중단으로 인해 갯벌 표면에서 대기 중 이산화탄소의 흡수 효과가 발생하지 않으므로 상부와 하부 지점의 이산화탄소 농도가 거의 동일하게 나타난 것이다.

상부와 하부 관측지점 사이에서 기온의 상관계수는 0.97 및 0.99 정도로서 매우 높았으며, 이는 두 관측지점에서 기온의 증가와 감소 경향이 매우 유사함을 의미한다. 상부와 하부 관측지점의 기온 변화 경향은 유사하지만, 갯벌 표면에 근접한 하부 관측지점이 상부 관측지점에 비해 기온이 높게 나타났다. 태양에서 지구로 유입되는 복사에너지(단파)가 갯벌 표면에 흡수 혹은 반사되고 있으며, 반사되는 복사에너지

(장파)에 의한 기온 상승효과는 갯벌 표면에 근접한 하부 관측지점에서 더욱 높게 나타난다(Kim, 2010; Yoon, 2003). 상부와 하부 관측지점에서 기온의 차이는 일몰 이전보다 이후에 감소함을 보였으며, 일몰 전후의 두 관측지점에서 측정시간에 따른 기온 변화 경향은 동일하였다.

4.2. 기온 vs 이산화탄소 농도 함수

갯벌에서 일몰 전후 기온 변화에 따른 이산화탄소 농도 함수를 산출하여, 일몰에 의한 대기 중 이산화탄소 농도 증가를 정량적으로 추정하였다(Fig. 4). 선형 회귀분석의 결과에 의하면, 기온에 의한 이산화탄소 농도의 변화율은 하부에 비해 상부 관측지점에서 약간 높았으며 원 자료 값과 추정된 자료 값의 결정계수는 하부 관측지점에서 높게 나타났다.

8월 2일, 3일 및 4일에 하부 관측지점 자료에 의한 선형회귀함수 기울기는 -5.59, -21.70 및 -10.27, 상부 관측지점의 자료에 의한 선형회귀함수 기울기는 -6.01, -28.71 및 -10.73 정도이었다. 갯벌의 일몰 조건에서 기온에 대한 이산화탄소 변화율(기울기)이 일별로는 최대 5배 정도의 차이를 보였으며, 하부와 상부 관측지점별로는 큰 차이를 나타내지는 않았다. 8월 3일과 4일에 관측된 자료를 이용한 선형회귀함수의 결정계수는 0.8 정도로서 높았으며, 8월 2일 관측 자료를 이용한 선형회귀함수의 결정계수는 0.5이하로서 낮았다. 8월 2일의 관측 자료에서는 일몰 기준 -90분에서 -30분 사이에 불규칙적인 기온의 변화가 발생하였으며(Fig. 2 참조), 이로 인해 기온에 따른 이산화탄소 농도의 선형회귀함수의 결정계수가 낮게 산출된 것으로 판단된다.

기존의 국내 연구에서는 일몰 조건에서 기온 변화에 따른 이산화탄소 농도의 증가와 감소에 대한 정량적인 추정이 보고된 사례가 없었다. 본 연구의 결과는 갯벌에서 일몰 전후 짧은 시간 규모의 이산화탄소 농

Table 5. Correlation coefficients of CO₂ concentration and air temperature data for measured date and points

Date	CO ₂ -Temp(U)	CO ₂ -Temp(L)	CO ₂ (U-L)	Temp(U-L)
August 2	-0.64	-0.65	0.98	0.99
August 3	-0.88	-0.90	0.98	0.97
August 4	-0.88	-0.89	0.98	0.99

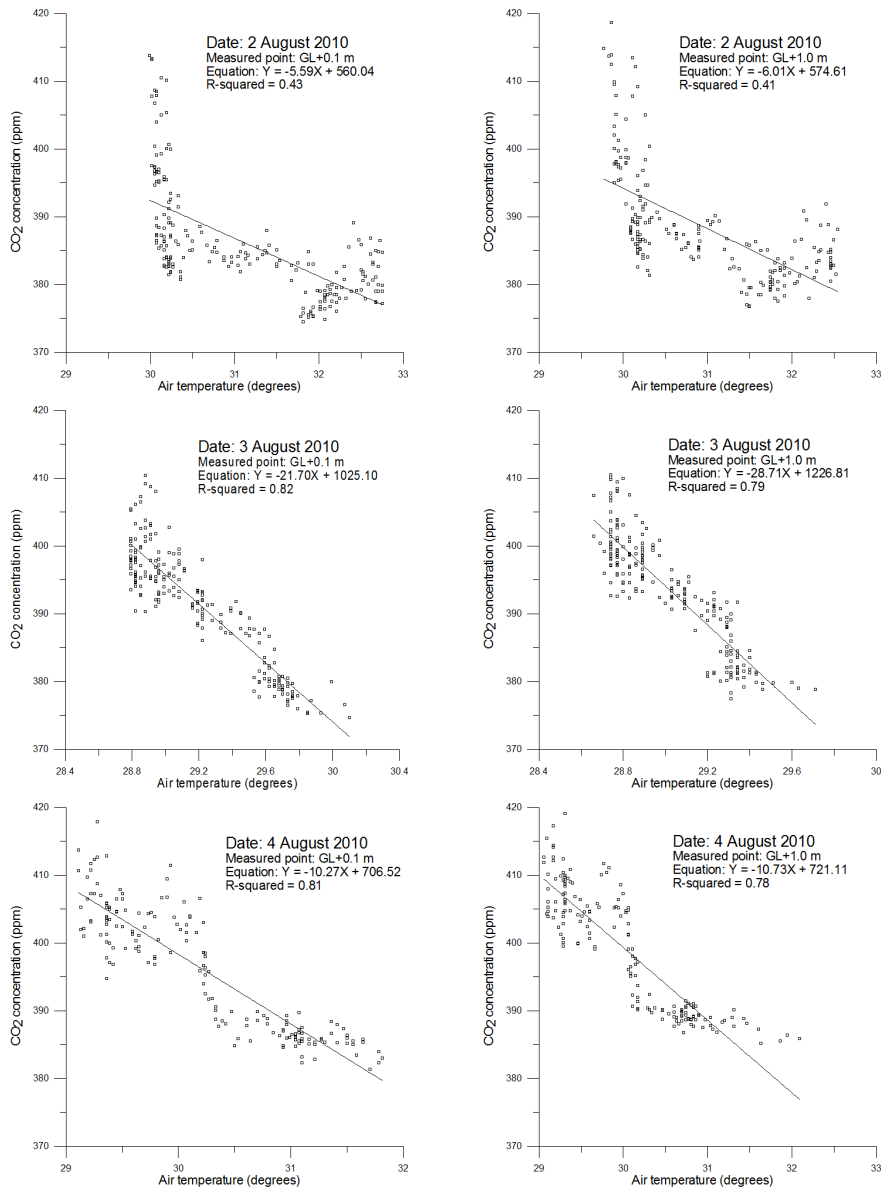


Fig. 4. Linear regression functions of CO₂ concentration as a air temperature.

도 변화율을 정량적으로 구명함으로써, 태양 복사에 너지에 의한 광합성 활동 및 증산에 의한 갯벌 대기의 이산화탄소 농도 변화를 이해하고 정량화하는 연구 사례로서 그 가치가 있다.

4.3. 이산화탄소 농도와 기온의 관측지점(하부 vs 상부) 함수 갯벌 표면의 상부 관측지점과 하부 관측지점에서

의 이산화탄소 농도와 기온 자료를 이용하여, 관측일 자별 하부와 상부 관측지점의 이산화탄소 농도 대 이산화탄소 농도와 기온 대 기온의 함수 관계를 추정하였다(Fig. 5).

동일한 관측 시간에서 상부지점에 대한 하부지점의 이산화탄소 농도 기울기는 0.97~1.01의 범위로서 변화 정도가 매우 유사하였으며, 이산화탄소 농도는

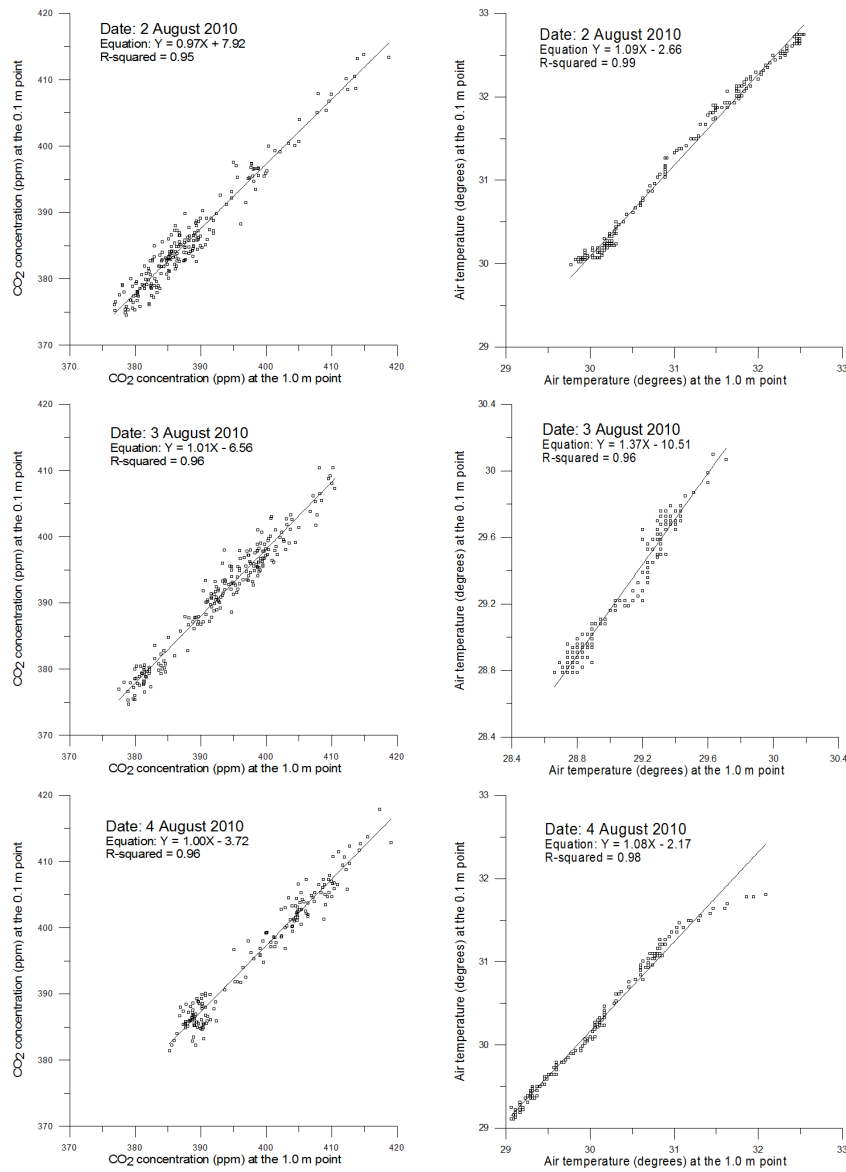


Fig. 5. Linear regression functions of "L" point as a "U" point for CO₂ concentration and air temperature data.

상부 지점에서 약간 높은 값을 보였다. 미미한 차이이지만, 이산화탄소 농도가 상부 지점에서 높은 것은 갯벌 표면에 근접한 하부 지점에서는 대기에서 갯벌로 이산화탄소가 흡수되었기 때문이다(Rasse 등, 2002). 본 연구에서는 갯벌 표면에서 수 m 이내의 수직적인 고도 차이에 의한 이산화탄소 농도의 변화는 미미한 것으로 나타났다.

대기 온도는 갯벌 표면에 근접한 하부 지점에서 약간 높은 경향을 보였으며, 이는 갯벌 표면에서 반사되는 장파에너지에 의한 기온의 상승효과가 갯벌 표면에 근접할수록 높게 나타나기 때문이다. 상부 지점에 대한 하부 지점 기온의 기울기는 8월 2일과 4일에는 1.09와 1.08 이었으나, 8월 3일에는 1.37로서 상부 지점에 대한 하부 지점의 기온 변화율이 상대적으로 높

게 나타났다.

5. 결론

본 연구에서는 순천만 갯벌의 일몰 전후에 연속적으로 관측된 이산화탄소 농도와 기온 자료의 변동과 상관성을 분석하였으며, 그 결론은 다음과 같다.

본 연구지역에서 관측된 이산화탄소 농도와 기온은 역 상관성을 보였으며, 이는 일몰 전후에 태양 복사 에너지의 감소로 인해 기온은 하강하고 광합성의 감소로 인해 이산화탄소 농도는 증가하였기 때문이다.

이산화탄소 농도가 관측된 갯벌 대기의 두 지점(L 및 U 지점)에서 이산화탄소 농도의 증가와 감소 경향이 매우 유사하였다. 이산화탄소 농도는 일몰 이전에는 상부 관측 지점에서 약간 높았고 일몰 이후에는 두 지점에서 유사하였으며, 일몰 전후 자료의 경과시간에 따른 상부와 하부 관측지점 사이의 이산화탄소 농도 변화 경향은 동일한 것으로 나타났다.

갯벌에서 일몰 전후 기온 변화에 따른 이산화탄소 농도 함수의 기울기는 하부에 비해 상부 관측지점에서 약간 높았으며 원 자료 값과 추정된 자료 값의 결정계수는 하부 관측지점에서 높게 나타났다. 갯벌 대기에서 일몰 전후 시간 규모의 이산화탄소 농도 변화율을 정량적으로 구명함으로써, 태양 복사에너지에 의한 광합성 활동과 증단에 의한 갯벌 대기의 이산화탄소 농도 변화를 이해하고 정량화하는 연구 사례로서 그 의미가 있다.

동일한 관측 시간에서 상부 관측지점에 대한 하부 관측지점의 이산화탄소 농도 기울기는 0.97~1.01의 범위로서 갯벌 표면에서 수 m 이내의 수직적인 고도 차이에 의한 이산화탄소 농도의 변화는 미미한 것으로 나타났다.

감사의 글

이 연구는 기상청 기상기술개발사업(CATER 2012-6060)의 지원으로 수행되었습니다.

참고 문헌

Brevik, E. C., Homburg, J. A., 2004, A 5000 year record

of carbon sequestration from a coastal lagoon and wetland complex, Southern California, USA, *Catena*, 57, 221-232.

Guarini, J. M., Blanchard, G. F., Gros, Ph., Harrison, S. J., 1997, Modelling the mud surface temperature on intertidal flats to investigate the spatio-temporal dynamics of the benthic microalgal photosynthetic capacity, *Marine Ecology Progress Series*, 153, 25-36.

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.

Heinsch, F. A., Heilman, J. L., McInnes, K. J., Cobos, D. R., Zuberer, D. A., Roelke, D. L., 2004, Carbon dioxide exchange in a high marsh on the Texas Gulf Coast: effects of freshwater availability, *Agricultural and Forest Meteorology*, 125, 159-172.

Kang, D. H., Kwon, B. H., Kim, P. G., 2010, CO₂ respiration characteristics with physicochemical properties of soils at the coastal ecosystem in Suncheon Bay, *Journal of the Environmental Sciences*, 19(2), 217-227.

Kang, D. H., Kwon, B. H., Yu, H. S., Kim, P. S., Kim, G. H., 2011, Seasonal and spatial variations of CO₂ fluxes between surface and atmosphere in foreshore, paddy field and woods sites, *Journal of the Environmental Sciences*, 20(8), 963-975.

Kim, D. S., 2007, Greenhouse gas(CH₄, CO₂, N₂O) emission from estuarine tidal and wetland and their characteristics, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 23(2), 225-241.

Kim, J. G., 2010, *The Climate Near the Ground : 7nd edition*, Sigma Press, Seoul, 779.

Montes-Hugo, M. A., Alvarez-Borrego, S., 2003, Spatial and temporal variation of photosynthetic parameters of phytoplankton in a subtropical coastal lagoon, *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 56, 517-525.

Pinckney, J., Zingmark, R. G., 1991, Effects of tidal stage and sun angle on intertidal benthic microalgal productivity, *Marine Ecology Progress Series*, 76, 81-89.

Rasse, D. P., Stolaki, S., Peresta, G., Drake, B. G., 2002, Patterns of canopy-air CO₂ concentration in a brackish wetland: analysis of a decade of measurements and the simulated effects on the vegetation, *Agricultural and Forest Meteorology*, 114, 59-73.

- 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.
- Yoon, I. H., 2003, *Introduction to Micrometeorology*, Sigma Press, Seoul, 428.
- Zhang, S., Wang, L., Hu, J., Zhang, W., Fu, X., Le, Y., Jin, F., 2011, Organic carbon accumulation capability of the typical tidal wetland soils in Chongming Dongtan, China, *Journal of Environmental Sciences*, 23(1), 87-94.
- Zhou, L., Zhou, G., Jia, Q., 2009, Annual cycle of CO₂ exchange over a reed (*Phragmites australis*) wetland in Northeast China, *Aquatic Botany*, 91, 91-98.