

ORIGINAL ARTICLE

잔디밭에서 기온과 이산화탄소 농도의 연직 변동 분석

소윤환 · 강동환* · 김일규¹⁾ · 김병우²⁾ · 윤환진³⁾ · 김시현³⁾ · 손용석³⁾ · 신정현³⁾ · 안정우³⁾

부경대학교 지구과학연구소, ¹⁾부경대학교 환경공학과, ²⁾한국수자원공사 K-water-융합연구원, ³⁾경남과학고등학교

Vertical Variations Analysis of Air Temperature and CO₂ Concentration in the Grassplots

Yoon Hwan So, Dong Hwan Kang*, Il Kyu Kim¹⁾, Byung Woo Kim²⁾, Hwan Jin Yoon³⁾,
Si Hyeon Kim³⁾, Yong Seok Son³⁾, Jung Hyeon Shin³⁾, Jeong Woo Ahn³⁾

Geo-Sciences Institute, Pukyong National University, Busan 48547, Korea

¹⁾*Department of Environmental Engineering, Pukyong National University, Busan 48513, Korea*

²⁾*K-Water Convergence Institute, Korea Water Resources Corporation, Daejeon 34045, Korea*

³⁾*Gyeongnam Science High School, Jinju 52620, Korea*

Abstract

This study investigated the characteristics of variations in carbon dioxide concentration and air temperature with the vertical change of surface in a grassplot. Field observations were carried out at a grassplot in Gyeongnam Science High School, over four days in August and November, 2015. Continuous observation equipment (GMP343, VAISALA) was installed at the LP (0.1 m from the surface) and UP (1.1 m from the surface) points, and the carbon dioxide concentration and air temperature were measured simultaneously at 1-min intervals. To summarize the results of the observation, August had higher than average concentrations of carbon dioxide, while November showed average air temperatures. Moreover, the concentration of carbon dioxide was higher at the UP point, while the air temperature was higher at the LP point. The correlation coefficient of carbon dioxide concentration between the UP and LP points was 0.80 in August across all the four days, while it was higher in November at 0.58 - 0.95. The results of the regression analysis of carbon dioxide concentration with air temperature changes for both August and November showed a distinct change at the LP point ($R^2=0.36 - 0.76$), as compared to the UP point ($R^2=0.1 - 0.57$). Between the UP and LP points, the carbon dioxide concentration and air temperature regression analysis results indicated that an active exchange was taking place between the two points.

Key words : Grassplot, Carbon dioxide concentration, Air temperature, Vertical variation

1. 서론

전 세계적으로 수증기(H₂O), 이산화탄소(CO₂), 메

탄(CH₄), 아산화질소(N₂O) 등을 포함하는 온실기체는 인간의 활동(토지개발, 에너지 사용 등) 뿐만 아니라 자연적 배출원에 의해서도 대기로 방출된다. 특히

Received 13 October, 2016; Revised 16 December, 2016;

Accepted 18 January, 2017

*Corresponding author: Dong Hwan Kang, Geo-Sciences Institute,
Pukyong National University, Busan 48547, Korea

Phone : +82-51-629-7393

E-mail : dhkang@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.

이산화탄소는 지구온난화에 미치는 기여도가 가장 높은 인위적 발생 온실가스이며, 연간 배출량은 1970년부터 2004년까지 약 80%나 증가하였다(IPCC, 2007). 이산화탄소 농도의 전 세계적 증가는 화석연료 사용이 주요 원인이며 토지개발과 같은 토지의 용도변화 및 토지 개간, 작물 재배와 같은 농업활동도 대기 중 이산화탄소 농도 증가에 영향을 미친다. Gray et al. (2014)의 연구 결과에 따르면 여름과 겨울 등 계절에 따른 이산화탄소 농도의 편향성은 북반구에서 재배하는 옥수수과 밀, 쌀 등의 작물에 의한 것이라는 연구결과를 발표하였으며, 농업 기술의 발달은 대기 중 이산화탄소 농도의 계절 변동성을 더 크게 하였다는 이론을 제기하였다.

토양탄소 방출량의 급속한 증가는 대기 중 이산화탄소량의 증가로 이어져 지구온난화의 가속화를 유발하며, 이러한 연유로 대기 중 이산화탄소 저감을 위한 인간의 노력이 절실하게 필요한 실정이다.

육지 생태계에서 이산화탄소의 저장량은 산림 지역이 가장 많고 그 다음이 초원 지대이다. 전 지구적인 탄소수지(global carbon budget)에 의하면, 밝혀지지 않은 이산화탄소의 흡수량이 1980년대에 비해 1990년대에 1.5억 톤에서 3.0억 톤으로 2배 증가하였다. 1990년대의 밝혀지지 않은 이산화탄소 흡수량은 해양에 의한 흡수량의 2배에 해당하는 어마어마한 양이다. 따라서 이러한 이산화탄소 흡수원에 대한 연구가 절실히 요구되고 있으며, 현재 토양유기탄소의 거대한 저장소이자 이산화탄소의 흡수 및 방출원인 초원 지역에 대한 연구 가치는 매우 높다고 판단된다.

국내에서 수 일 규모 이상의 연속관측장비를 이용한 연구로는 에디 공분산(eddy-covariance) 기술을 이용한 연구가 주를 이룬다. 에디 공분산 기술은 관측대상지의 균질함과 잘 발달된 난류장 및 정상성(stationarity)을 만족하는 경우에 장기적으로 넓은 지역을 대표하는 연속 관측이 가능하다는 장점이 있으나, 상기 조건을 충족시키지 못할 경우 관측지역을 대표하는 정확한 자료를 얻을 수 없는 단점이 있다(Baldocchi, 2003; Finnigan et al., 2003). 그러나, 전문적인 에디 공분산 기술로 관측된 자료의 관측 오차와 불확실성을 줄이기 위해 국내·외에서 많은 자료처리에 대한 연구가 진행되어 왔으며, 특히 Kwon et al.

(2007)은 KoFlux 관측지인 광릉 산림과 해남 농경지에서 관측된 에디 공분산 자료를 이용하여 자료의 품질 관리, 보증 방법의 소개 및 품질 보증된 자료의 예를 통해 품질 관리 및 보증 과정에서 발견된 문제점과 향후 연구 방향을 제시한 바 있다.

에디 공분산 기술을 제외하고 연속관측장비를 이용한 국내 연구로는 Kang et al.(2014)의 연구가 있다. 이 연구에서는 일몰 전후 갯벌에서 시간 규모 단위(3시간)의 기온과 이산화탄소 농도의 상관성을 분석하고, 기온에 따른 이산화탄소 농도의 회귀함수를 추정하여 일몰 전후 광합성 활동과 중단에 의한 갯벌 대기의 이산화탄소 농도 변동을 분석하였다. 지표면에 비해 상대적으로 높은 고도에 위치한 타워에서 측정하는 에디 공분산 기술과는 달리 Kang et al.(2014)의 연구는 대기와 지표가 접하는 접지기층에서 미기상학적 조건, 지표의 식생활동 및 토양의 이화학적 조건에 따른 이산화탄소 농도의 미세한 변동을 반영할 수 있는 특징이 있다.

국내에서 대기 중 이산화탄소 농도변화에 대한 연구로는 기상청 기후변화감시소가 위치한 충청남도 안면도와 제주도 고산, 전라남도 무안 등에서 이산화탄소를 포함한 온실가스의 배경농도 변화, 계절에 따른 변화특성 및 배경농도 변화에 영향을 미치는 원인 분석 등이 주를 이룬다(Kim et al., 2000; Song et al., 2000; Kim and Choi, 2001; Park et al., 2005; Kim et al., 2007; Kim et al., 2011). 국내 연구들은 주로 연 단위 이상의 대기 중 이산화탄소 배경농도 변화에 초점을 맞춘 연구들로서, 본 연구와 같이 일(diurnal) 단위 규모로서 식생 지역에서 기온과 기온과 이산화탄소 농도의 변화에 대한 연구는 부족한 실정이다.

본 연구에서는 초지생태계의 주요한 환경 중 하나인 잔디밭에서 지표면의 높이(0.1 m, 1.1 m)와 관측시간(밤/낮, 8월/11월)에 따라 기온과 이산화탄소 농도가 변동하는 특성을 관측하고 분석하였다.

2. 연구 방법

현장관측은 경상남도 진주시 진성면에 위치한 경남과학고등학교(35°12'04.7"N, 128°13'28.9"E)의 잔디운동장에서 2015년 8월(7일, 8일, 9일, 10일)과 11월

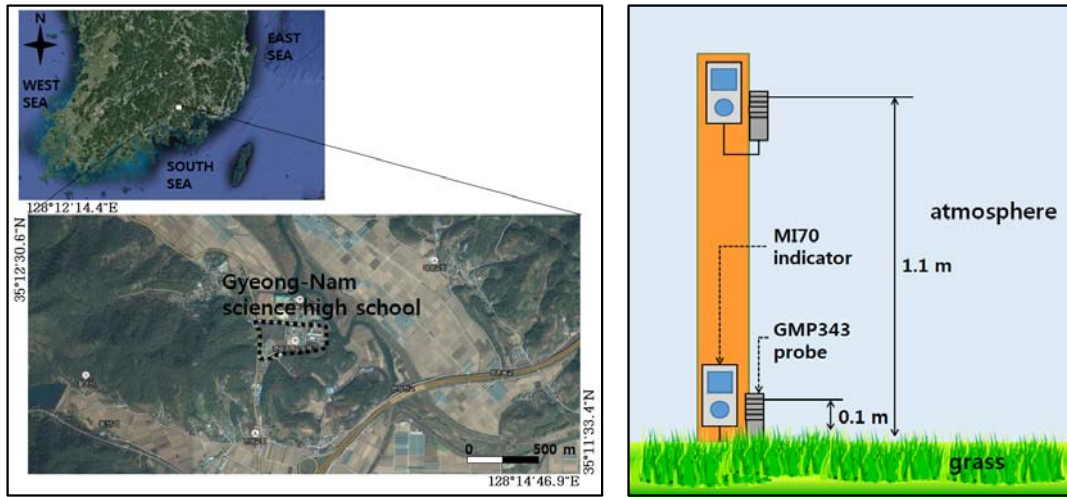


Fig. 1. Location of study area (left) and schematic diagram (right) to monitor vertical CO₂ concentration and air temperature.

(5일, 12일, 28일, 29일)에 각각 4일 동안 24시간 연속으로 이산화탄소 농도와 기온을 관측하였으며, 관측 지점은 지표면 상부 0.1 m (이하 LP)와 1.1 m (이하 UP) 지점으로 각각 1분 간격으로 동시에 연속 관측하였다(Fig. 1). 두 지점의 이산화탄소 농도 관측은 잔디밭에서 식물의 호흡과 뿌리호흡 및 토양 미생물의 호흡에 의한 이산화탄소의 방출과 잔디의 광합성에 의한 이산화탄소의 흡수로 이산화탄소 농도의 수직적인 분포와 그 변동을 구명하기 위한 것이다. 본 연구에서 사용된 잔디밭 상부 두 지점의 대기 이산화탄소 농도와 기온 관측기기는 GMP343 (VAISALA)이다. GMP343은 이산화탄소 농도 측정기로써, 기체 포집을 하지 않고 이산화탄소를 흡입하여 비분산형 적외선 분석(non-dispersive infrared, NDIR) 방법으로 현장에서 직접 이산화탄소 농도를 측정하여 정확하고 신뢰도가 높은 안정된 결과를 얻을 수 있다(Kang et al., 2014). 대기 중 이산화탄소 농도와 기온은 Probe를 통해 동시에 측정되고, 측정된 자료는 MI70 indicator를 통해 실시간으로 저장된다(Fig. 2).

3. 결과

경남과학고 잔디밭에서 관측된 기온과 이산화탄소

농도 자료의 샘플 수(N)와 최소값(Min), 최대값(Max), 평균값(Avg), 표준편차(SD), 변동계수(CV)를 Table 1(2015년 8월)과 Table 2(2015년 11월)에 각각 정리하였다. 변동계수(coefficient of variation)는 표준편차를 산술평균으로 나눈 값으로 서로 단위가 다른 일평균 기온과 일평균 이산화탄소 농도의 분포와 변동 정도를 정량적으로 비교하기 위해 사용하였다. 잔디밭에서 4일 간 관측된 8월 자료의 이산화탄소 일평균농도(이하 이산화탄소 농도)는 4일 모두 LP에 비해 UP에서 높았으며, 그 차이는 약 23~34 ppm 정도로 나타났다. 이산화탄소 농도의 분포범위는 UP에 비해 LP에서 더 넓게 나타났다. 일평균기온(이하 기온)은 4일 모두 지표와 가까운 LP에서 높았으며, 분포범위 역시 LP에서 더 넓게 나타났다. 두 지점의 최소기온은 거의 유사하였으나, 최고기온은 모두 LP에서 높은 것으로 나타났다. 전체적으로 기온과 이산화탄소 농도의 변동 폭은 모두 UP에 비해 LP에서 넓은 것으로 확인되었다. 변동계수는 UP에 비해 LP에서 더 크게 나타났으며, 두 지점 모두 이산화탄소 농도에 비해 기온의 변동계수가 더 큰 것으로 나타났다. 기온과 이산화탄소 농도의 11월 관측 자료는 8월과 유사하였으나, 최저기온과 평균기온이 지표와 가까운 LP에 비해 UP에서 더 높게 나타난 경우도 두 번(11월 5일, 11월

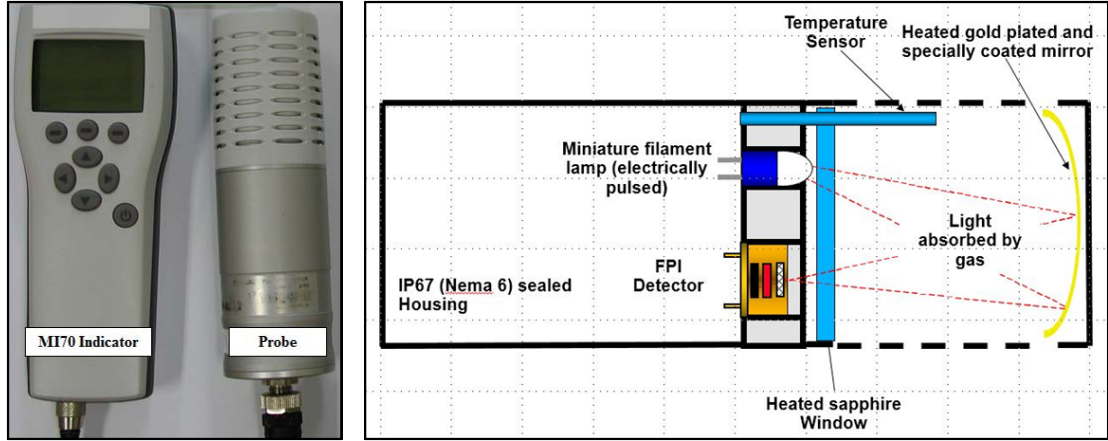


Fig. 2. Indicator and probe (left) of GMP343, and internal structure diagram (right) of probe.

29일) 관찰되었다. 이산화탄소 농도는 8월과 같이 4일 모두 LP에 비해 UP에서 높았으며, 두 지점의 농도 차는 43~58 ppm 정도로 8월에 비해 크게 나타났다. 이산화탄소 농도의 분포범위는 8월과 달리 LP에 비해 UP에서 더 넓게 나타났다. 기온은 전술한 바와 같이

최저기온과 평균기온이 UP에서 높게 나타난 두 번의 경우를 제외하고 8월과 유사한 변화양상을 보였다. 기온의 변동 폭은 11월 5일을 제외하고 8월에 비해 좁은 범위를 보였으며, 두 지점의 온도 차 역시 8월에 비해 모두 낮게 나타났다. 기온과 이산화탄소 농도의 변동

Table 1. Descriptive statistics quantities of air temperature and carbon dioxide concentration in August

Date	Component	N	Min	Max	Avg	SD	CV (%)
August 7	Air Temperature (UP)	1400	20.9	41.5	30.2	7.1	23.6
	Air Temperature (LP)	1400	20.9	45.4	31.0	8.4	26.9
	CO ₂ (UP)	1400	423.7	543.3	466.2	26.6	5.7
	CO ₂ (LP)	1400	376.5	577.1	442.5	39.8	9.0
August 8	Air Temperature (UP)	2643	23.4	40.6	31.0	6.8	22.3
	Air Temperature (LP)	2643	23.3	44.9	31.8	8.0	25.6
	CO ₂ (UP)	2643	402.7	526.4	460.1	26.7	5.8
	CO ₂ (LP)	2643	377.6	597.4	432.8	39.9	9.1
August 9	Air Temperature (UP)	4065	21.7	41.5	29.8	6.7	22.3
	Air Temperature (LP)	4065	21.7	44.0	30.7	8.0	25.6
	CO ₂ (UP)	4065	361.3	507.4	458.4	25.2	5.5
	CO ₂ (LP)	4065	381.5	541.3	428.1	37.6	8.7
August 10	Air Temperature (UP)	5485	21.5	42.2	29.3	6.7	22.2
	Air Temperature (LP)	5485	21.5	45.6	30.2	7.9	25.4
	CO ₂ (UP)	5485	400.2	511.4	454.9	26.8	5.8
	CO ₂ (LP)	5485	354.3	544.8	420.9	38.2	8.9

Table 2. Descriptive statistics quantities of air temperature and carbon dioxide concentration in November

Date	Component	N	Min	Max	Avg	SD	CV (%)
November 5	Air Temperature (UP)	1440	6.6	29.7	13.9	8.8	0.6
	Air Temperature (LP)	1442	5.4	33.4	14.3	9.8	0.7
	CO ₂ (UP)	1440	394.1	529.1	461.6	21.8	0.0
	CO ₂ (LP)	1442	361.8	467.3	403.2	19.2	0.0
November 12	Air Temperature (UP)	1440	8.7	23.8	15.2	4.1	0.3
	Air Temperature (LP)	1442	8.6	24.5	15.4	4.4	0.3
	CO ₂ (UP)	1440	347.1	475.4	434.3	21.9	0.1
	CO ₂ (LP)	1442	329.3	440.6	376.0	17.2	0.0
November 18	Air Temperature (UP)	1440	-3.2	18.1	5.2	6.8	1.3
	Air Temperature (LP)	1442	-3.0	20.6	5.8	7.7	1.3
	CO ₂ (UP)	1440	368.6	548.0	434.3	11.4	0.0
	CO ₂ (LP)	1442	352.4	403.7	375.0	11.5	0.0
November 29	Air Temperature (UP)	1440	-2.5	15.7	3.7	5.4	1.5
	Air Temperature (LP)	1442	-2.3	16.3	3.6	5.0	1.4
	CO ₂ (UP)	1440	347.6	460.2	417.3	41.4	0.1
	CO ₂ (LP)	1442	347.6	398.7	373.7	15.1	0.0

계수는 모두 8월에 비해 매우 낮게 나타났다. 8월 7일과 8일 야간 시간대에 일부 자료의 결측이 발생하였으며, 이는 관측기기의 배터리 교체 및 관측지역의 일시적 강우로 인한 관측기기의 철수로 인한 것이다.

4. 토의

4.1. 이산화탄소 농도와 기온의 여름철과 가을철 변동

이산화탄소 농도와 기온의 여름철(8월)과 가을철(11월) 변동양상을 비교분석하기 위해 동일한 시간대(0~24시)에 1분 단위로 4일 동안 관측된 자료의 평균 값을 산정하여 Fig. 3에 도시하였다. 여름철 이산화탄소 농도는 두 지점 주간(일출 후~일몰 전)에 낮고, 야간(일몰 후~일출 전)에 높게 나타났으며, 가을철도 유사한 변화양상을 보였다. 전체적으로 일출 시간을 기점으로 이산화탄소 농도가 감소하였으며, 일몰 시간을 기점으로 이산화탄소 농도가 증가하였다. 특히 여름철은 일출 시간 후 감소하는 이산화탄소 농도의 변화 정도가 가을철에 비해 두 지점 모두 크게 나타났으며, 일몰 시간 후 증가하는 농도의 변화 정도 역시 크

게 나타났다. 두 지점에서 유사한 변화양상을 보인다.

여름철 이산화탄소 농도의 일변화 양상은 주로 일몰 이후 증가하여 자정에서 일출 전(24~6시)까지 약 440~500 ppm으로 하루 중 가장 높았으며, 변동 폭 역시 가장 넓었다. 8월 야간(일몰 이후~일출 이전)의 이산화탄소 평균 농도는 부분적으로 소폭의 증가와 감소를 반복하기도 하나 전체적으로 일몰을 기준으로 UP와 LP 모두 증가하였으며, 일출 이후인 6~7시를 기점으로 급격히 감소하였다. 일출 이후 주간에는 잔디의 광합성활동으로 인해 이산화탄소의 농도가 점차 낮아졌으며, 17시 경 380~390 ppm으로 하루 중 가장 낮은 평균 농도의 범위를 보였다. 낮아졌던 이산화탄소의 평균 농도는 17~18시를 기점으로 자정까지 다시 증가하였다. 이러한 변화양상은 토양과 대기가 접하는 접지기층에서 잔디의 광합성활동과 토양 미생물 및 식물의 호흡활동에 의해 기인된 것이다(Luo and Zhou, 2006). 주간에는 토양 미생물과 식물의 호흡활동에 의한 이산화탄소의 방출도 활발하지만 잔디에 의한 광합성활동이 상대적으로 더 활발하게 일어나면서

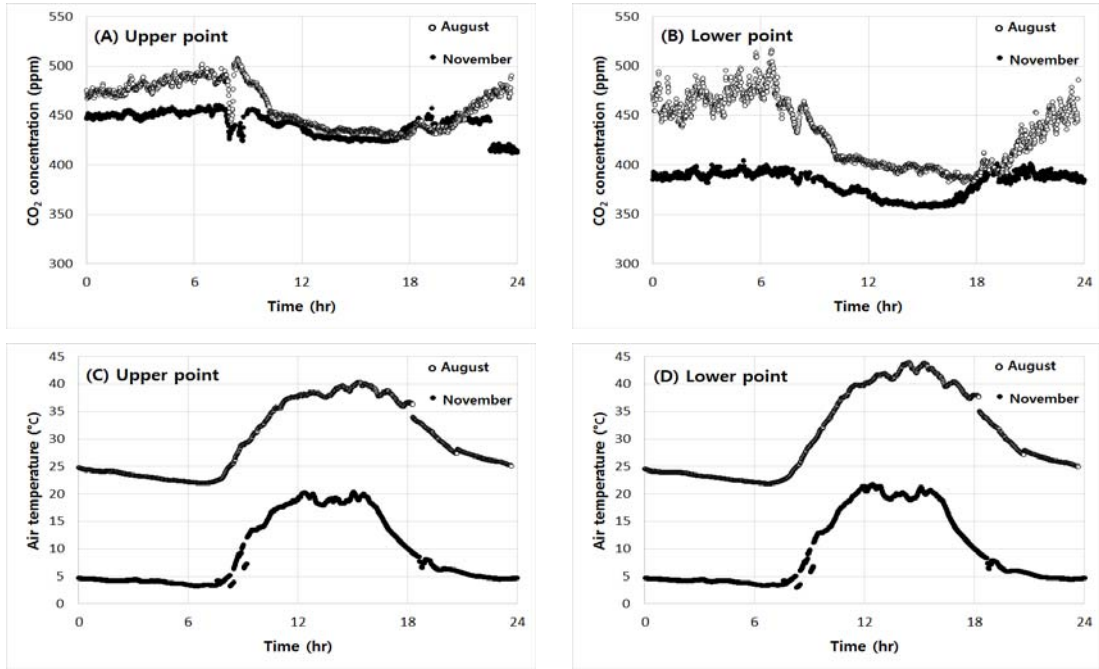


Fig. 3. Seasonal variation graphs of carbon dioxide concentration and air temperature.

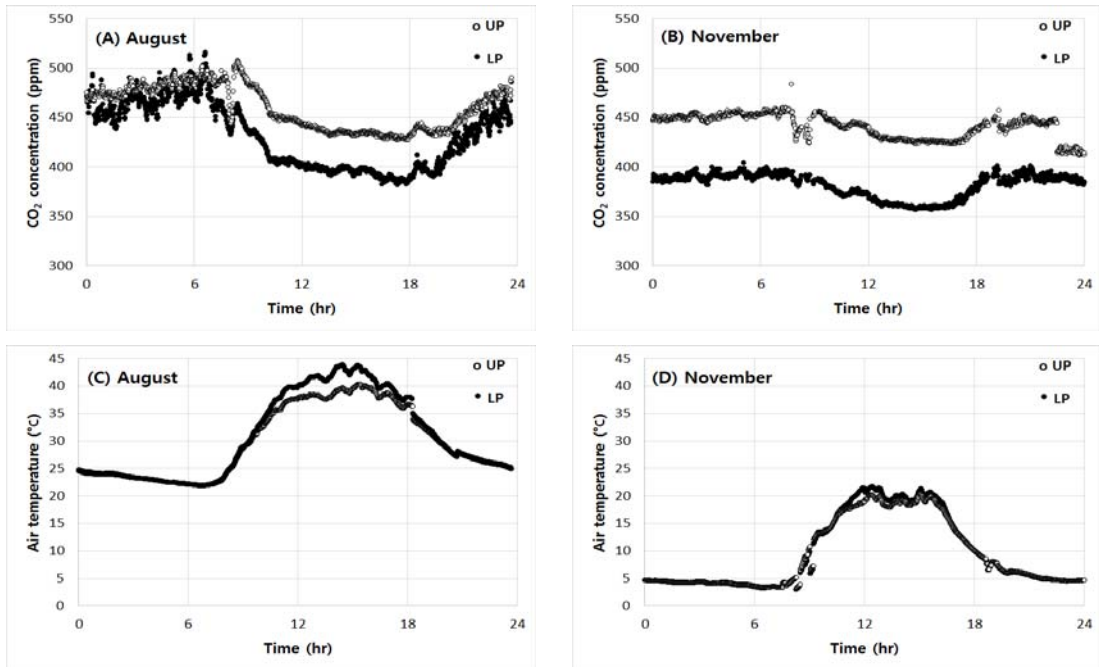


Fig. 4. Vertical variation graphs of carbon dioxide concentration and air temperature.

Table 3. Correlation coefficients of air temperature and carbon dioxide concentration in August

Date	T - CO ₂ (UP)	T - CO ₂ (LP)	UP - LP (T)	UP - LP (CO ₂)
August 7	-0.75	-0.83	0.99	0.83
August 8	-0.65	-0.72	0.99	0.86
August 9	-0.65	-0.74	0.99	0.86
August 10	-0.68	-0.72	0.99	0.88

대기 중의 이산화탄소를 흡수하여 농도는 감소하였으나, 일몰 이후 잔디의 광합성활동은 중단되고 토양 미생물과 식물의 호흡활동으로 방출되는 이산화탄소에 의해 대기 중의 이산화탄소 농도가 증가하게 되는 양상이 나타나는 것이다. 특히 여름철 하루 중 새벽시간에 가장 높은 이산화탄소 농도를 보이는 것은 전술한 이유로 지표 부근에서 지속적으로 방출되는 이산화탄소가 쌓이면서 상부의 농도 증가에도 영향을 미친 것으로 사료된다. 안면도 지구대기감시관측소에서 1998~2000년까지 측정한 이산화탄소 농도의 일변화 특성은 하루 중 새벽에 가장 높은 이산화탄소 농도를 보이며 이는 새벽에 식물의 호흡 및 대기 혼합층 고도의 하강으로 인한 대기의 희석이 적었기 때문인 것으로 해석하였으며(Kim et al., 2000), 본 연구결과와도 유사한 특징을 보인다.

가을철 이산화탄소 농도의 전체적인 일변화 양상은 여름철과 유사하였으나, 변화의 폭은 여름철에 비해 상대적으로 매우 좁게 나타났다. 또한 일몰 이후 증가하거나 일출 이후 감소하는 양상도 여름철에 비해 상대적으로 완만하게 나타났다. 가을철의 이러한 변화양상은 잔디와 토양 미생물의 성장활동의 습성으로 기인된 것이다. 연구지역의 잔디는 봄과 여름에 가장 높은 성장활동을 보이고 11월에는 대부분 고사한다.

또한 잔디운동장에서 서식하며 호흡활동을 하는 토양 미생물도 최저 기온이 영하로 떨어졌던 가을철에 비해 상대적으로 온도가 높은 여름철에 활발한 활동을 보인다. 따라서 11월은 잔디의 광합성과 토양 미생물 및 식물의 호흡작용에 의한 이산화탄소 농도의 증감이 8월에 비해 상대적으로 완만하게 나타나는 것이다.

4.2. 이산화탄소 농도와 기온의 연직변동

지표면의 높이에 따른 관측지점별 연직변동을 비교분석하기 위해 여름철과 가을철 각각 4일 동안 관측된 자료의 평균을 UP와 LP로 구분하여 Fig. 4에 도시하였다.

이산화탄소의 평균 농도의 주간(일출 이후~일몰 이전)과 야간(일몰 이후~일출 이전) 두 지점(UP, LP) 간 차이는 8월의 경우 비교적 뚜렷한 대비를 보였다. 주간에는 지점 간 이산화탄소의 농도 차가 뚜렷하였으나, 야간에는 지점 간 농도 차가 상대적으로 잘 나타나지 않았다. 주간에는 UP가 LP에 비해 높은 이산화탄소 농도를 보였으며, 두 지점 간의 농도 차도 약 40~50 ppm으로 야간에 비해 매우 높게 나타났다. 이는 주간에는 잔디의 광합성활동에 의한 대기 중 이산화탄소의 흡수가 토양 미생물과 식물의 호흡활동에 의한 이산화탄소의 방출에 비해 더 활발히 일어났음을 지시

Table 4. Correlation coefficients of air temperature and carbon dioxide concentration in November

Date	T - CO ₂ (UP)	T - CO ₂ (LP)	UP - LP (Temp)	UP - LP (CO ₂)
November 5	-0.27	-0.73	0.99	0.59
November 12	-0.24	-0.72	0.99	0.58
November 28	-0.48	-0.72	0.99	0.77
November 29	-0.57	-0.68	0.99	0.95

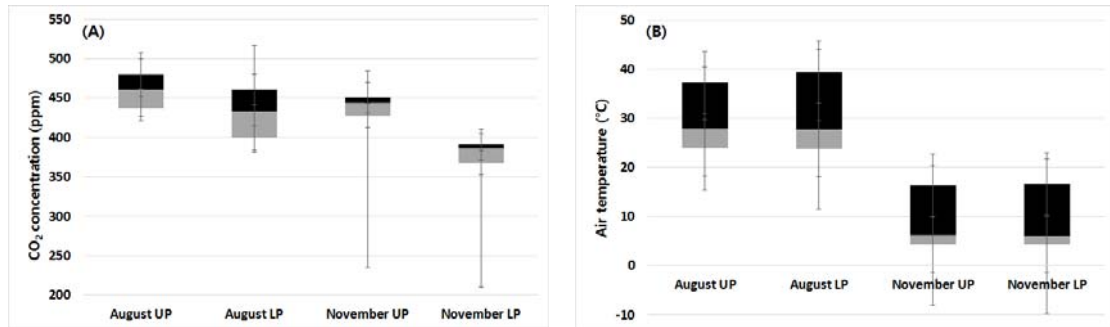


Fig. 5. Box-whisker plots of seasonal and vertical carbon dioxide concentration (A) and air temperature (B).

하며 상대적으로 지표에 가까운 LP가 UP에 비해 더 민감하게 반응하였음을 지시한다. 또한 일몰 이후 야간에 잔디의 광합성 중단과 토양 미생물 및 식물의 호흡활동에 의해 점차 증가하는 이산화탄소 농도는 두 지점 간의 농도 차를 감소시키며 일출 직전에 두 지점 모두 가장 높은 농도를 나타냈다.

두 지점 간 주야간 이산화탄소 평균 농도의 차는 여름철에 비해 가을철에 크게 나타났으며, 8월과 같이 LP에 비해 UP에서 높은 농도를 보였다. 이는 8월에 비해 상대적으로 미약해진 잔디의 광합성활동과 토양 미생물 및 식물의 호흡활동에 의해 지표부근 LP에서 방출/흡수되는 이산화탄소가 상부인 UP에 영향을 미치지 못해 두 지점 간 일정한 농도 차가 유지되었던 것으로 판단된다.

4.3. 이산화탄소 농도와 기온의 상관성

본 연구에서 여름철 이산화탄소 농도와 기온의 상관관계 분석 결과, UP에서 이산화탄소 농도와 기온의 상관계수는 $-0.65 \sim -0.75$ 의 범위이며, LP에서는 $-0.72 \sim -0.83$ 으로 나타났다(Table 3). 연구대상지역인 잔디밭 접지기층의 대기와 잔디밭 사이에서 발생하는 잔디의 광합성과 호흡에 따른 연구결과는 이산화탄소 농도와 기온이 역(negative)의 상관성을 보였으며, 이러한 결과는 Guo et al.(2009)의 하구역 습지에 대한 연구결과 및 Kang et al.(2014)의 여름철 일몰전후 연안갯벌의 이산화탄소 농도 변동에 대한 연구결과와도 유사하다. 한편 생태계에서 보고된 다른 연구에서는 기온이 증가할수록 갯벌에서 대기 이산화탄소 농도가 증가하는 것으로 보고된 사례도 있다(Zhou et al.,

2009; Kang et al., 2010; Kang et al., 2011). 본 연구는 잔디밭 접지기층에서 여름철과 가을철 수 일 동안의 이산화탄소 농도와 기온에 대한 변동과 두 성분 간의 상관성을 구명하고 다양한 생태계에서 미기상학적 조건에 따른 이산화탄소의 변동을 연구하기 위한 자료를 제시함에 그 의미가 있다.

이산화탄소 농도에 대한 상부와 하부 관측지점 사이의 상관계수는 4일 동안 모두 0.80 이상으로 매우 높았으며, 이는 상부 관측지점과 하부 관측지점 사이의 이산화탄소 농도의 증가와 감소 경향이 매우 유사함을 의미한다.

이산화탄소 농도와 기온의 가을철 관측 자료에 대한 상관관계 분석 결과, UP에서 이산화탄소 농도와 기온의 상관계수는 $-0.24 \sim -0.57$ 의 범위이며, LP에서는 $-0.68 \sim -0.73$ 으로 나타났으며(Table 4), 여름철과 같이 이산화탄소 농도와 기온이 역의 상관성을 보였다. 이산화탄소 농도에 대한 상부와 하부 관측지점 사이의 상관계수는 $0.58 \sim 0.95$ 정도로 높았으며, 이는 상부 관측지점과 하부 관측지점 사이의 이산화탄소 농도의 증가와 감소 경향이 매우 유사함을 의미한다.

잔디밭에서 UP와 LP 지점의 이산화탄소 농도와 기온의 분포 범위 및 양상을 파악하기 위해 여름철과 가을철 각각 4일간 관측된 자료의 평균을 이용하여 box-whisker 그래프를 작성하였다(Fig. 5). 이산화탄소 농도는 전체적으로 여름철이 가을철에 비해 분포범위가 넓게 나타났으며, 지점별로는 UP에 비해 LP에서 분포범위가 넓게 나타났다. 이는 여름철 활발한 잔디의 광합성과 토양 미생물 및 식물의 호흡활동으로

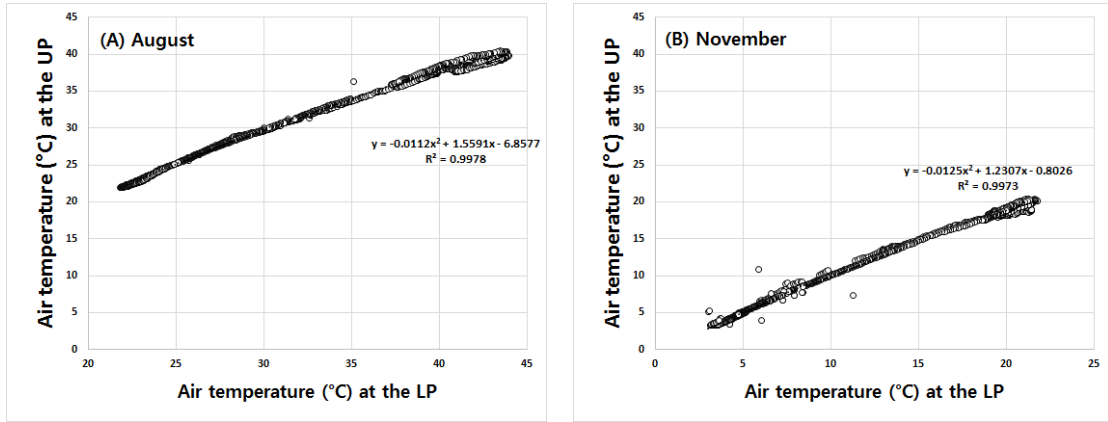


Fig. 6. Regression analysis graphs of air temperature with vertical points.

흡수/방출되는 이산화탄소의 농도 차가 여름철이 가을철에 비해 더 크고, 지표면과 가까운 LP가 UP에 비해 더 민감하게 반응되기 때문이다. 가을철은 일부 200~250 ppm으로 낮게 나타난 자료를 제외하고 대부분 UP에서 420~450 ppm, LP에서 360~390 ppm으로 여름철에 비해 상대적으로 좁은 범위에 분포하였다. 기온은 여름철과 가을철 모두 두 지점에서 유사한 분포양상을 나타냈다.

관측 지점별 기온의 함수를 산출하여, 높이에 따른 기온 변화를 정량적으로 추정하였다(Fig. 6). 선형회귀분석의 결과에 의하면, 높이별 기온 함수 그래프는 8월과 11월 모두 양의 기울기를 가지는 2차 선형함수

로 추정되었으며 결정계수가 0.99 정도로서 매우 높게 나타났다. 이는 LP의 기온에 따른 UP의 기온 변화가 매우 유사함을 의미하고, 두 지점에서의 열 교환이 활발하게 발생하고 있음을 나타내는 것이다.

관측 지점별 이산화탄소 농도의 함수를 산출하여, 높이에 따른 이산화탄소의 농도 변화를 정량적으로 추정하였다(Fig. 7). 선형회귀분석결과 높이에 따른 이산화탄소 농도 함수 그래프는 모두 양의 기울기를 가지는 2차 선형함수로 추정되었다. 잔디의 광합성활동과 생물의 호흡활동이 활발한 8월의 결정계수는 0.87이고 11월은 0.63으로 나타났다. 상대적으로 8월이 11월에 비해 높은 결정계수를 보이지만, 전체적

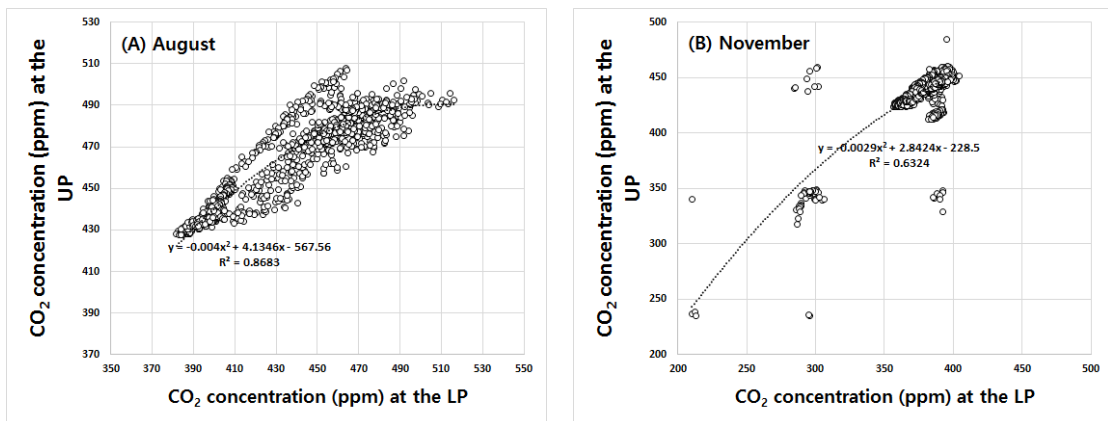


Fig. 7. Regression analysis graphs of carbon dioxide concentration with vertical points.

으로는 8월과 11월 모두 UP와 LP간 이산화탄소 농도 변화가 유사하게 나타나므로 두 지점에서 이산화탄소 교환은 활발하게 발생하고 있음을 알 수 있다.

5. 결론

경남과학교 잔디밭에서 여름철과 가을철 각각 4일간 관측된 UP와 LP의 이산화탄소 농도와 기온 자료를 바탕으로 도출된 연구 결과를 종합하면 다음과 같다.

1. 여름철 이산화탄소 농도는 UP에서 높았으나 변동 폭은 LP에서 크게 나타났으며, 가을철은 이산화탄소 농도와 그 변동 폭 모두 UP에서 높았다.

2. 이산화탄소 농도의 일 변동은 여름철과 가을철 모두 일몰 이후 증가하여 일출 전 새벽에 가장 높았으며, 일출 후 점차 감소하여 일몰 전에 가장 낮게 나타났다.

3. 이산화탄소 농도와 기온의 상관계수는 여름철과 가을철 모두 역의 상관성을 가지는 것으로 나타났다. 이산화탄소 농도에 대한 두 지점 간의 상관계수는 여름철의 경우 4일 모두 0.80 이상으로 매우 높았으며, 가을철의 상관계수는 0.58~0.95로 높게 나타났다.

4. 관측지점 별 이산화탄소 농도 함수 그래프는 모두 양의 기울기를 가지는 2차 선형함수로 추정되었다. 이러한 결과는 전체적으로 UP와 LP의 지점 간 이산화탄소 농도 변화가 유사함을 의미하며, 두 지점에서의 이산화탄소 교환이 활발하게 발생하고 있음을 나타낸다.

5. 잔디밭 접지기층에서 잔디의 광합성과 토양미생물 및 식물의 호흡활동에 의한 이산화탄소 농도의 변화양상은 일출 이후 잔디의 광합성활동이 시작되면서 대기 중 이산화탄소 농도가 점차 낮아지며, 일몰 이후 광합성활동의 중단과 호흡활동에 의해 이산화탄소의 농도는 비교적 급격하게 증가하며, 이러한 변화양상은 여름철이 가을철에 비해 뚜렷하다.

감사의 글

이 논문은 2016년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 기초연구사업 지원을 받아 수행된 것임

(NRF-2016R1A6A3A11932747).

REFERENCES

- Baldocchi, D. D., 2003, Assessing the eddy covariance technique for evaluating carbon dioxide exchange rates of ecosystems : Past, present and future, *Global Change Biology*, 9, 479-492.
- Finnigan, J. J., Clement, R., Malhi, Y., Leuning, R., Cleugh, H., 2003, A Re-evaluation of long-term flux measurement techniques, Part 1 : Averaging and coordinate rotation, *Boundary Layer Meteorology*, 107, 1-48.
- Gray, J. M., Frolking, S., Kort, E. A., Ray, D. K., Kucharik, C. J., Ramankutty, N., Friedl, M. A., 2014, Direct human influence on atmospheric CO₂ seasonality from increased cropland productivity, *Nature*, 515, 398-401.
- 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, *J. Env. Sci. Int.*, 19, 217-227.
- Kang, D. H., Kwon, B. H., Kim, P. S., 2014, Variation analysis of CO₂ concentrations at sunset before and after of summer season at the foreshore, *J. Env. Sci. Int.*, 23, 399-407.
- 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, *J. Env. Sci. Int.*, 20, 963-975.
- Kim, B. H., Kim, J. I., Kim, G. R., 2007, Variations of background CO₂ concentration and estimation of potential source region contributing to Gosan through in-situ measurement of atmospheric CO₂ at Gosan, *Proceeding of the 45th meeting of KOSAE, Kor. Soc. Atmos. Env.*, 265-267.
- Kim, J. G., 2010, *The climate near the ground : 7th edition*, Sigma Press, Seoul, 779.
- Kim, J. S., Choi, J. C., 2001, Analysis of background CO₂ concentrations at Anmyon-do using selecting method of world data centre for greenhouse gases, *J. Kor. Soc. Atmos. Env.*, 17, 277-288.
- Kim, J. S., Choi, J. C., Yoon, Y. H., Cha, J. W., Bang, S. Y., 2000, A Case study of high concentration and

- seasonal characterization of atmospheric CO₂ measured at Anmyon-Island, Proceeding of the 31st meeting of KOSAE, Kor. Soc. Atmos. Env., 231-232.
- Kim, S. Y., Lee, J. B., Yu, J. A., Hong, Y. D., Song, C. G., 2011, Analysis of the characteristics and high concentrations of carbon dioxide measured at the Gosan Site in Jeju, Korea in 2007, *J. Clim. Cha. Res.*, 2, 1-14.
- Kwon, H. J., Park, S. B., Kang, M. S., Yoo, J. I., Yuan, R., Kim, J., 2007, Quality control and assurance of eddy covariance data at the two koflux sites, *Kor. J. Agri. For. Meteo.*, 9, 260-267.
- Luo, Y., Zhou, X., 2006, Soil respiration and the environment, Elsevier, 17-22.
- Park, K. J., Choi, J. C., Choi, B. C., Chung, H. S., 2005, Variation of background-atmospheric concentration of carbon dioxide (CO₂) in Korea Peninsula, *J. Kor. Meteo. Soc.*, 41, 955-965.
- Rogner, H. H., Zhou, D., Bradley, R., Crabbe, P., Edenhofer, O., Hare, B., Kuipers, L., Yamaguchi, M., 2007, Introduction, In *climate change 2007, Mitigation, Contribution of working group III to the fourth assessment report of the intergovernmental panel on climate change*, Metz, B., Davidson, O. R., Bosch, P. R., Dave, R., Meyer, L. A. (eds.), Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- Song, K. B., Yoon, Y. H., Oh, S. I., Lee, H. J., Kim, K. H., 2000, A Study of carbon dioxide concentration changes over long and short-term scale within and across the Korean Peninsula between 1995 and 1997, *Proceeding of the 31st meeting of KOSAE, Kor. Soc. Atmos. Env.*, 395-397.
- Yoon, I. H., 2003, Introduction to micrometeorology, Sigma Press, Seoul, 428.
- 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.