

ORIGINAL ARTICLE

잔디밭에서 계절 변화에 따른 이산화탄소 플럭스 변동

김박사 · 권병혁* · 강동환¹⁾

부경대학교 환경대기과학과, ¹⁾부경대학교 지구과학연구소

Response of Soil CO₂ Fluxes to Seasonal Variations in a Grassplot

Park Sa Kim, Byung Hyuk Kwon*, Dong Hwan Kang¹⁾

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

¹⁾*Geo-Sciences Institute, Pukyong National University, Busan 608-737, Korea*

Abstract

In this study, the variations of the carbon dioxide fluxes were investigated with soil temperatures in the grassplot and seasonal variations of carbon dioxide concentrations and fluxes were analysed. Soil temperatures, carbon dioxide concentrations and fluxes were measured on the grassplot in Pukyong National University. Field measurements were carried out 25 times from March in 2010 to March in 2011 with nine points on the grassplot. Seasonal variations of carbon dioxide concentrations and fluxes showed an inverse relation. In summer, carbon dioxide concentrations are lower and carbon dioxide fluxes are higher. In winter, carbon dioxide concentrations are higher and carbon dioxide fluxes are lower. On the grassplot, carbon dioxide emission rate increase when the soil temperature is more than 20°C and the emission rate decrease when the soil temperatures are less than 10°C. When the accumulated rainfall for five days before measurement day is 20~100 mm, it is showed that the more rainfall, the more carbon dioxide emissions. Carbon dioxide emission rate from the grassplot to the upper atmosphere was increased or decreased by the factors such as soil temperature, growth and wither of grass and rainfall. The results of this study showed that the emission of carbon dioxide in the grassplot is dominantly controlled by seasonal factors (especially soil temperature and rainfall).

Key words : Grassplot, Carbon dioxide, Flux, Concentration, Soil temperature, Rainfall

1. 서론

토양과 대기 사이의 이산화탄소 교환 연구를 위해, 1960~1970년대에는 전통적인 미기상학적 방법 (Aerodynamic method, Bowen ratio method 등)이 적용되었으며(Cho, 1972; Uchijima, 1976), 그 이후

1980년대에는 CO₂ 분석기의 발전으로 에디공분산법을 이용한 이산화탄소 플럭스의 직접적인 측정이 가능하게 되었다(Othaki, 1984; Othaki와 Matsui, 1982). 1990년 이후에는 다양한 환경의 지표와 대기 사이에서 이산화탄소 플럭스의 일/계절 변동 연구들이 산립 (Baldocchi 등, 1997; Teklemariam 등, 2009), 논

Received 23 December, 2013; Revised 23 March, 2014;

Accepted 28 March, 2014

*Corresponding author: Byung Hyuk Kwon, Department of Environmental Atmospheric Sciences, Pukyong National University, Busan 608-737, Korea

Phone: +88-51-629-6644

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.

(Campbell 등, 2001; Saito 등, 2005), 습지(Guo 등, 2009; Heilman 등, 1999) 등에서 수행되고 있다.

우리나라에서는 KoFlux(Korean regional network of tower flux measurement) 시스템에 의한 다양한 생태계에서 지표와 대기 사이의 이산화탄소 플럭스 연구로는 농경작지에서 지표와 대기 사이의 에너지와 이산화탄소 교환(Lee 등, 2003; Moon 등, 2003), 여름철 활엽수림과 대기 사이의 이산화탄소 교환(Choi 등, 2003), 폐회로 역학 챔버 시스템에 의한 산림과 농경작지에서 이산화탄소 플럭스 관측(Chae 등, 2003) 등이 수행된 바 있다. 연안습지에서 갯벌과 대기 사이의 이산화탄소 플럭스에 관한 연구들은 최근에 수행되고 있으며, 하구연 갯벌에서 온실기체(CH_4 , CO_2 , N_2O)의 배출량과 배출 특성에 관한 연구(Kim, 2007), 순천만 연안 생태계에서 갯벌 퇴적물의 이화학적 성질과 이산화탄소 플럭스의 관계 연구(Kang 등, 2010), 연안 생태계(갯벌, 논, 산림)에서 계절과 공간적인 특성에 따른 이산화탄소 플럭스 변동 연구(Kang 등, 2011) 등이 수행되고 있다.

온도에 대한 토양 호흡(soil respiration)의 관계는 지수(exponential)와 아레니우스(Arrhenius) 방정식에 의해 표현되며, 두 식은 모두 온도가 증가하면 토양 호흡도 지수적으로 증가한다(Ellert와 Bettany, 1992). 이후의 연구에서는 지수와 아레니우스 방정식을 보완하거나 다양한 모델이 제시되었으며, 이러한 연구들은 지수 혹은 아레니우스 방정식(Lloyd와 Taylor, 1994; MacDonald 등, 1995; Thierron과 Laudelout, 1996), 선형 모델(Rochette 등, 1991), 2차 모델

(Holthausen과 Caldwell, 1980), 논리 모델(Schlentner와 Van Cleve, 1985; Jenkinson, 1990), 온도 시간 등가를 이용한 모델(Feng과 Li, 1997) 등이 수행된 바 있다. 이러한 모델들에서 온도에 대한 토양 호흡의 지수적 증가는 공통적으로 나타나고 연구 조건과 실험의 결과도 적합하였지만, 온도에 대한 토양 호흡의 반응에 대한 설명은 각각의 연구에서 다르게 해석된다.

토양 수분은 토양 CO_2 방출에 주요한 영향 인자이며(Liu 등, 2002), 토양 CO_2 방출은 건조한 토양에서 낮고 강수가 발생한 후에 증가한다(Grahammer 등, 1991; Holt 등, 1990). 토양이 물로 포화되거나 포화 상태에 근접한 조건에서는 혐기성 환경으로 변하여 토양에서의 CO_2 방출은 감소하게 된다(Kucera와 Kirkham, 1947). 토양 수분의 증가와 감소에 의해 직접적으로는 식물의 뿌리 호흡과 미생물 활동에, 간접적으로는 토양의 물리화학적 성질에 변화를 일으켜 토양에서의 CO_2 방출량이 변동하게 된다(Raich와 Schlesinger, 1992; Schimel과 Clein, 1991). 토양 수분에 따른 이산화탄소 방출량에 대한 연구는 계절에 따른 토양 함수비의 변화(Luo 등, 1996; Mielnick과 Dugas, 2000)와 토양 함수비의 공간적인 불균질성(Davidson 등, 1998)을 관측한 결과를 이용하여 수행되었다.

본 연구에서는 잔디밭에서 이산화탄소 플럭스 및 온도, 토양 온도(이후 “지온”으로 표현)를 관측하였으며, 계절 변화에 따른 지온과 강수량에 따른 잔디밭의 이산화탄소 방출량 변동을 분석하였다.



Fig. 1. Location map of monitoring points in the grassplot.

2. 연구 방법

본 연구는 부산시 남구 대연동에 위치한 부경대학교 내 잔디밭에서 수행되었다(Fig. 1). 잔디밭의 면적은 약 6000 m² 정도이며, 잔디의 분포는 비교적 균일하며 4계절에 따른 변화가 나타나고 있다. 잔디밭과 대기 사이의 이산화탄소 플럭스, 대기 중 이산화탄소 농도 및 토양 온도 관측은 2010년 3월부터 2011년 3월까지이며 관측은 9개 지점 모두에서 25회 반복 수행되었다. 관측은 측정 기기의 오차를 최소화하기 위해 1대의 측정기로 오후 2시부터 3시 사이에 수행되었으며, 최대 1시간 이내에 측정되는 조건으로 측정 시간에 따른 편차를 최소화하였다. 잔디밭에서 측정 지점에 따른 공간적인 불균질성에 의한

이산화탄소 농도와 플럭스의 차이는 본 연구에서는 조절할 수 없었다. 관측 일자는 24절기에 해당하는 날에 수행되었으며, 24절기에 해당하는 날에 강수가 발생하였을 경우에는 그 이후에 관측을 수행하였다. 관측 번호와 일자, 그 시기에 해당하는 24절기의 이름이 Table 1에 정리되어 있다.

현장관측에 이용된 토양과 대기 사이의 이산화탄소 플럭스 측정시스템은 폐쇄형 역학 챔버 시스템(closed dynamic chamber system)이다. 폐쇄형 역학 챔버 시스템은 본체(EGM-4), 챔버(SRC-1) 및 지온 측정기(STP-1)로 구성되어 있다(Fig. 2). 본체에는 이산화탄소량 측정을 위한 적외선가스분석기(infrared gas analyzer; IRGA)가 탑재되어 있고, 이산화탄소의 측정은 적외선 기체 분석법을 이용하여 마이크로프로세서의 제어를 통해 측정하여 정확도가 높다. 주기적으로 자동 영점(auto-zeroing) 보정을 수행하여 이산화탄소 측정을 위한 최적의 상태를 유지한다. 폐쇄형 역학 챔버법은 현장에서 측정이 용이하고 측정 시간이 짧아 이산화탄소 플럭스의 직접 관측에 있어서 가장 널리 이용되는 방법이다(Luo와 Zhou, 2006). 폐쇄형 역학 챔버로 토양 표면을 덮게 되면, 토양에서 대기로 이산화탄소의 방출 또는 흡수가 발생하여 챔버 내 이산화탄소 농도의 변화가 발생한다. 경과 시간에 따른 챔버 내 이산화탄소 농도 변화량을 관측하면, 식 (1)을 이용하여 이산화탄소 플럭스를 산정할 수 있다(Field 등, 1989).

Table 1. Monitoring date and the solar terms

Monitoring No.	Date	The solar terms
M1	21-Mar-10	Chunbun
M2	05-Apr-10	Choengmyeong
M3	20-Apr-10	Gogwoo
M4	05-May-10	Ipha
M5	21-May-10	Soman
M6	06-Jun-10	Mangjong
M7	21-Jun-10	Haji
M8	07-Jul-10	Soseo
M9	23-Jul-10	Daeseo
M10	07-Aug-10	Ipchu
M11	23-Aug-10	Cheoseo
M12	08-Sep-10	Baengno
M13	23-Sep-10	Chubun
M14	08-Oct-10	Hallo
M15	23-Oct-10	Sanggang
M16	07-Nov-10	Ipdong
M17	22-Nov-10	Soseol
M18	07-Dec-10	Daeseol
M19	22-Dec-10	Dongji
M20	06-Jan-11	Sohan
M21	20-Jan-11	Daehan
M22	04-Feb-11	Ipchun
M23	19-Feb-11	Woosu
M24	06-Mar-11	Gyeongchip
M25	21-Mar-11	Chunbun

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

여기서, F 는 이산화탄소 플럭스[ML⁻²T⁻¹], V 는 챔버의 체적[L³], Δt 는 이산화탄소 농도 측정 시간 간격[T], A 는 챔버로 덮혀 있는 토양의 표면적[L²], c_i 는 챔버 내 이산화탄소 초기 농도[ML⁻³] 및 c_t 는 Δt 시간 경과 후의 챔버 내 이산화탄소 농도[ML⁻³]이다. 본 연구에서 이산화탄소 농도는 챔버 내에서 측정된 초기값이 적용되었으며, 측정 지점은 지표면 상부 10 cm 정도의 높이에서 측정된 것이다. 지온은 soil temperature sensor를 지표면 하부 5 cm 정도에 삽입하여 측정하였으며, 9개 측정 지점별 공간적인 불균질성(잔디 밀도, 토양 입도와 공극율 등)은 고려할 수 없었다(Fig. 2).

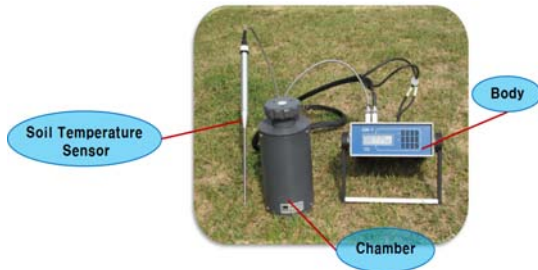


Fig. 2. Field installation photograph of closed dynamic chamber system.

3. 결과 및 고찰

잔디밭과 대기 사이의 이산화탄소 플럭스는 여름철에 높고 겨울에 낮은 경향을 보이고, 이산화탄소 방출량이 “0”에 근접한 겨울철(11월에서 2월)을 제외하고는 모두 토양에서 대기로 이산화탄소를 수십~수백 $\text{mgCO}_2\text{m}^{-2}\text{hr}^{-1}$ 이상을 방출하는 것으로 나타났다(Fig. 3). 겨울철의 이산화탄소 플럭스가 “0”에 근접한 것은 광합성과 호흡에 의한 이산화탄소의 흡수량과 방출량이 동일하다는 것을 의미하며, 이산화탄소 방출량이 발생하는 것은 잔디의

광합성에 의한 이산화탄소 흡수량보다는 잔디의 뿌리 호흡량과 토양 미생물에 의한 호흡량이 많았기 때문이다 (Luo와 Zhou, 2006). 잔디밭에서 관측된 이산화탄소 방출량이 가장 높은 시기는 9월이고 최댓값은 $2000 \text{mgCO}_2\text{m}^{-2}\text{hr}^{-1}$ 을 초과하고 중앙값은 $1500 \text{mgCO}_2\text{m}^{-2}\text{hr}^{-1}$ 정도이었다.

잔디밭에서 관측된 이산화탄소 농도는 여름철(7~9월)이 겨울철(12~2월)에 비해 낮다(Fig. 4). 관측 당일의 이산화탄소 농도의 공간적인 불균질성에 의한 변화 폭은 봄(5월)과 가을(10월)에 크게 나타났다. 봄에는 잔디의 생장이 가장 활발한 시기이고, 가을은 잔디의 고사(wither)가 일어나기 시작하는 시기로서 잔디밭에서 광합성과 호흡의 공간적인 불균질성이 여름과 겨울에 비해 높은 것으로 판단된다. 잔디밭에서 이산화탄소 농도는 약 360~440 ppm 범위 이내이었으며, 잔디밭에서 이산화탄소 농도는 계절에 따른 농도 차이와 잔디밭의 공간적인 불균질성에 의한 농도 차이의 합에 의해 나타난 것이다. 잔디밭에서 관측된 9개 지점의 중앙값은 8월에는 375 ppm 정도로서 최솟값, 2월에는 425 ppm 정도로서 최댓값을 가진다.

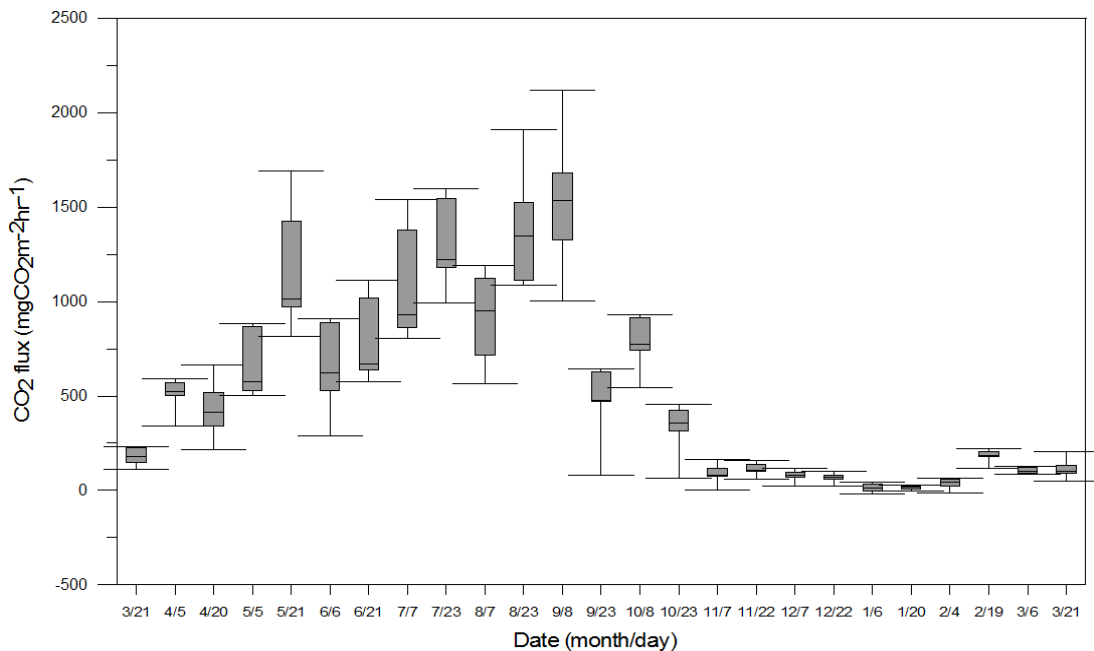


Fig. 3. Box-whisker plots for carbon dioxide flux between grassplot and atmosphere.

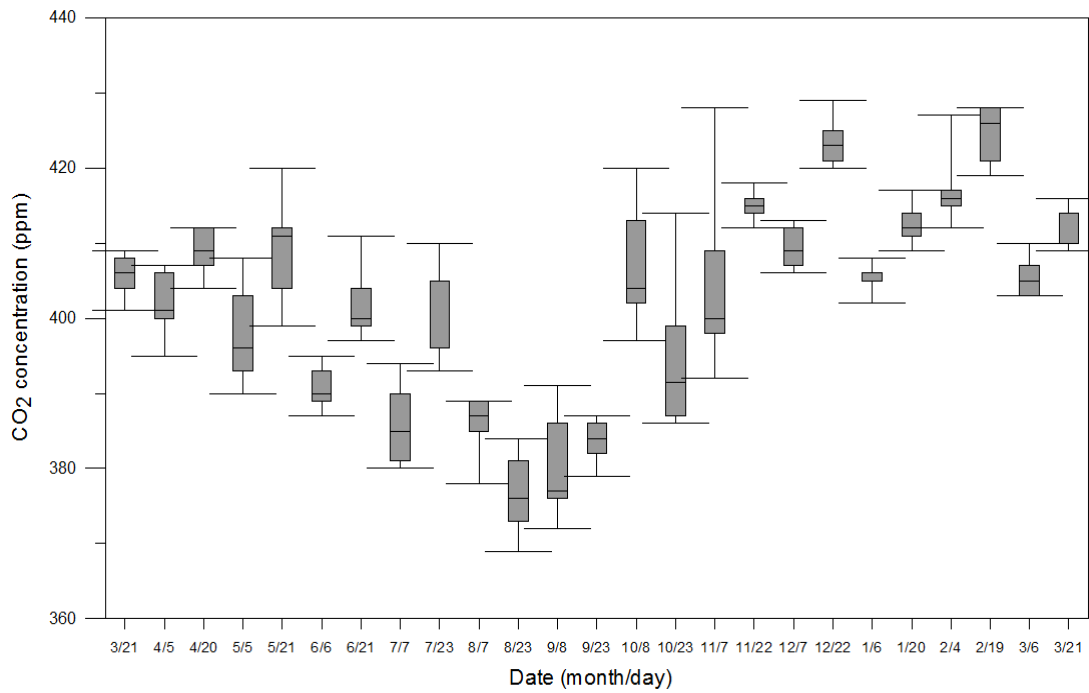


Fig. 4. Box-whisker plots for carbon dioxide concentration on the grassplot.

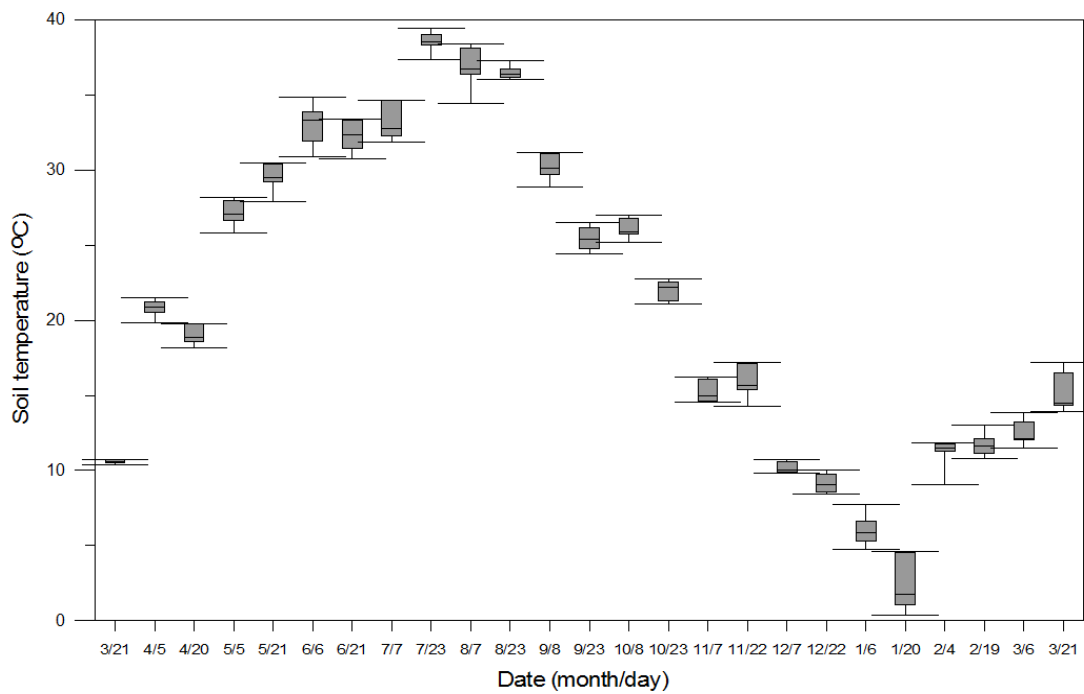


Fig. 5. Box-whisker plots for soil temperature in the grassplot.

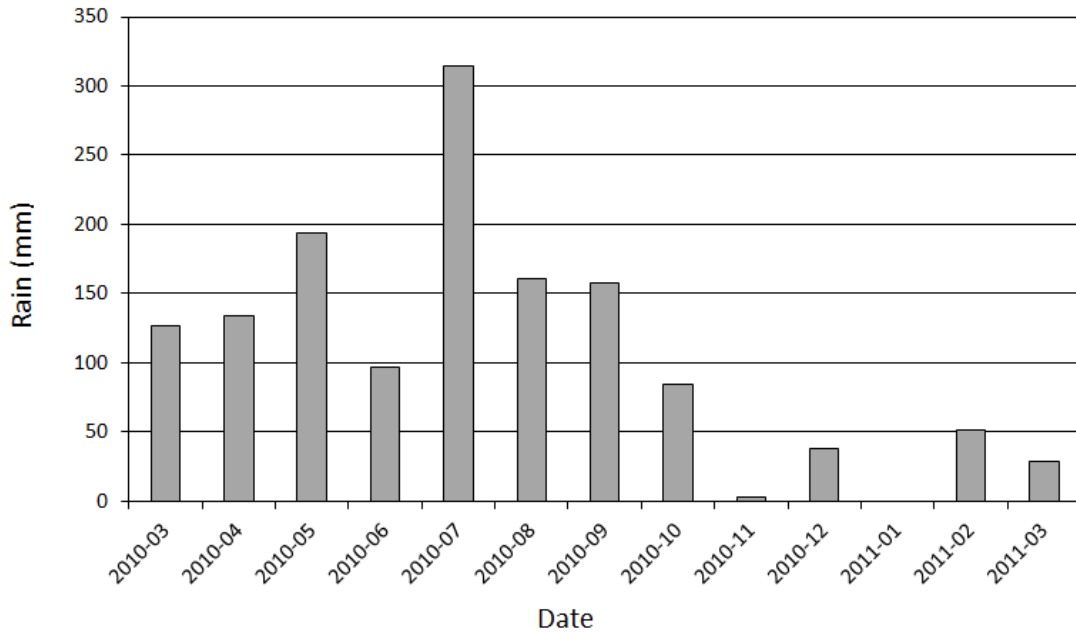


Fig. 6. Histograms of monthly total rainfall.

잔디밭에서 지온의 계절 변화는 뚜렷하며, 여름에는 8월에 최고 40℃까지 상승하고 겨울에는 1월에 최저 0℃까지 감소하였다(Fig. 5). 잔디밭에서 지온의 연간 변화 범위는 40℃ 정도로서 크게 나타났다. 잔디밭의 지온은 이산화탄소 방출량에 매우 중요한 영향 인자이며(Boone 등, 1998), 그 변화 정도는 대기 중 이산화탄소 농도 변화의 주요한 원인이 된다.

잔디밭에서 계절 변화에 따른 이산화탄소 플럭스와 지온의 관계는 정(positive)으로, 이산화탄소 농도와 지온은 역(negative)으로 나타난다. 이산화탄소의 방출량은 기온에 비례적으로 증가하므로 겨울보다는 여름에 높다(Boone 등, 1998; Wang 등, 2009). 북반구에서 대기 중 이산화탄소 농도는 여름에 낮고 겨울에 높으므로, 우리나라에서도 이산화탄소 농도와 기온은 반비례적인 관계를 보였다.

현장 관측이 수행된 부경대 잔디밭에서 반경 100 m 이내에 위치한 부경대학교 충무관 옥상의 강우량계에 기록된 2010년 3월 1일부터 2011년 3월 31일 사이의 월 누적 강우량이 Fig. 6에 도시되어 있다. 월 누적 강우량이 150 mm 이상을 기록한 5월, 7월, 8월, 9월에는 잔디밭에서 대기 중 이산화탄소 방출량이 매우 높고(Fig. 3 참

조), 5월에는 이산화탄소 농도가 매우 높게 나타났다(Fig. 4 참조). 함수비는 토양 내에서 미생물 활동에 지배적인 영향 인자로서, 토양 함수비 0~60% 조건에서는 함수비가 증가할수록 미생물 활동도가 증가하고 60~100% 조건에서는 함수비가 증가할수록 미생물 활동도가 감소한다(Papendick과 Campbell, 1981). 실내 실험을 통해 미생물 활동에 최적인 함수비 조건에서 이산화탄소의 최대 방출량이 발생하고(Bowden 등, 1998), 다양한 현장 연구 사례에서는 함수비가 최소이거나 최대인 경우에는 토양에서 이산화탄소 방출이 극히 제한됨을 보였다(Bowden 등, 1993; Kang 등, 2010; Liu 등, 2002; Xu 등, 2004).

잔디밭에서 관측된 이산화탄소 플럭스와 농도, 지온에 대한 계절별 기술통계량을 Table 2에 정리하였다. 이산화탄소 플럭스의 평균은 여름이 913 mgCO₂m⁻²hr⁻¹로서 가장 높고 겨울이 61 mgCO₂m⁻²hr⁻¹로서 가장 낮았으며, 잔디밭에서 대기 중 이산화탄소 방출량은 겨울에 비해 여름에 15배 정도 높은 것으로 나타났다. 봄과 가을은 여름과 겨울의 중간적인 경향을 보여주고 있으며, 잔디밭에서 대기 중 이산화탄소 방출량은 가을이 봄에 비해 4배 정도 높게 나타났다. 이산화탄소 플럭스의 표

Table 2. Descriptive statistics for fluxes, concentrations and soil temperatures of carbon dioxide in the grassplot

Component	Season	Avg.	Min.	Max.	S.D.	C.V.
CO ₂ flux (mgCO ₂ m ⁻² hr ⁻¹)	spring	221	-11	665	177	80
	summer	913	289	1692	320	35
	autumn	881	67	2120	471	53
	winter	61	-20	162	45	74
CO ₂ concentration (ppm)	spring	410	395	428	8	2
	summer	397	380	420	9	2
	autumn	387	369	420	12	3
	winter	411	392	429	8	2
Soil temperature (°C)	spring	14.4	9.0	21.5	4.8	26.7
	summer	32.2	25.8	39.5	3.7	11.5
	autumn	29.5	21.1	38.4	5.7	19.2
	winter	9.8	0.4	17.2	5.0	50.7

준편차는 가을이 가장 높게 나타났으며, 변동계수는 봄이 가장 높은 것으로 나타났다. 봄과 가을의 최소값은 각각 -11 mgCO₂m⁻²hr⁻¹과 -20 mgCO₂m⁻²hr⁻¹으로서 잔디밭에서 광합성에 의한 대기 중 이산화탄소의 흡수가 발생하기도 함을 알 수 있었다.

이산화탄소 농도의 평균은 겨울과 봄에 각각 411 ppm과 410 ppm으로서 높았고, 여름과 가을에 각각 397 ppm과 387 ppm으로서 낮게 나타났다. 잔디밭에서 계절 요인에 의한 이산화탄소 농도의 평균적인 차이는 20 ppm 정도인 것으로 나타났다. 이산화탄소 농도의 표준편차와 변동계수는 모두 가을에 가장 높고 봄에 가장 낮게 나타났다.

잔디밭에서 지온의 계절 평균은 여름이 32.2°C로서 가장 높았고, 겨울이 9.8°C로서 가장 낮았다. 계절 변화에 의한 지온의 평균적인 차이는 22°C 정도인 것으로 나타났다. 이로 인해 잔디밭에서 이산화탄소의 방출량이 지배적으로 영향을 받고 있다. 계절에 따른 지온의 표준편차는 가을에 가장 높았으며, 변동계수는 겨울에 가장

높은 것으로 나타났다.

이산화탄소 플럭스와 농도, 지온, 강수량 성분 사이의 상관관계수 산정과 회귀함수 추정 시에 적용된 강수량 자료는 잔디밭 관측일 이전 5일 동안 누적된 양이다. 이산화탄소 플럭스와 농도, 지온 자료의 개수는 25개이며 잔디밭에서 관측된 9개 지점의 값들을 평균한 것이다.

잔디밭에서 25회 관측된 이산화탄소 플럭스와 농도, 지온, 강수량 성분 사이의 상관관계수가 Table 3에 정리되어 있다. 이산화탄소 플럭스와 지온의 상관관계수는 0.85로서 높게 나타난 것은 지온이 상승하는 계절인 봄과 여름에는 잔디의 생육이 활발하여 잔디밭에서 뿌리 호흡과 미생물 호흡에 의한 이산화탄소 방출량이 증가하고 (Wang 등, 2009), 지온이 하강하는 계절인 겨울에는 잔디가 고사되고 낮은 기온으로 인한 미생물 활동량의 저하로 이산화탄소 방출량이 감소하기 때문이다. 이산화탄소 플럭스와 농도의 상관관계수는 -0.66으로서 음의 상관성을 보였다. 잔디밭에서 겨울철에는 잔디가 고사된 환경으로서 뿌리 호흡량이 매우 낮고, 낮은 온도로 인해 미

Table 3. Correlation coefficients for carbon dioxide flux and concentration, soil temperature, and rainfall components

Component	CO ₂ flux	CO ₂ conc.	Soil temp.	Rainfall
CO ₂ flux	1.00			
CO ₂ conc.	-0.66	1.00		
Soil temp.	0.85	-0.70	1.00	
Rainfall	0.42	-0.11	0.21	1.00

* 상관계수는 0.01 수준(양쪽)에서 유의함.

생물 활동에 의한 호흡량도 매우 낮다. 여름철에는 잔디의 생장이 활발하여 뿌리와 미생물에 의한 호흡량이 증가하므로 이산화탄소의 방출량이 크게 증가한다. 대기 중 이산화탄소 농도는 주변 대기에 포함된 이산화탄소량에 지배적인 영향을 받으며, 북반구에 속하는 지역에서는 이산화탄소 농도가 여름철에는 낮고 겨울철에는 높게 나타난다. 이와 같은 이유로 본 연구의 결과에서도 이산화탄소 플럭스와 농도의 상관관계가 음의 값으로 나타난 것이다. 이산화탄소 플럭스와 강수량의 상관관계수는 0.42 정도로서 토양 함수비와 이산화탄소 방출량의 증감이 비례적인 관계를 가짐을 알 수 있다. 토양 함수비는 미생물 활동에 지배적인 영향을 미치는 인자로서 토양 함수비가 60% 이하인 조건에서는 함수비가 증가할수록 미생물 활동에 의한 호흡량이 많아져 대기로의 이산화탄소 방출량이 증가하게 된다(Papendick과 Campbell, 1981).

이산화탄소 농도와 지온의 상관관계수는 -0.70 으로서 음의 상관성을 보이는 것은 잔디밭 상부 대기의 이산화탄소 농도가 여름에는 낮고 겨울에는 높게 나타나기 때문이다. 여름에는 잔디밭에서의 이산화탄소 방출량이 많지만 대기의 가열로 인해 공기 중 이산화탄소의 수직적인 확산이 원활하게 발생하고, 겨울에는 잔디밭에서의 이산화탄소 발생량이 감소하지만 차가운 대기의 무거운 공기로 인해 이산화탄소가 잔디밭 상부에 축적되어 농도가 상승한 것으로 판단된다(Kim, 2010).

이산화탄소 농도 및 지온, 강수량에 따른 이산화탄소 플럭스의 회귀함수가 Fig. 7~9에 작성되어 있다. 이산화탄소 농도에 따른 플럭스의 회귀함수는 로그함수의 감소 형태가 가장 적합하고 추정함수와 원 자료 사이의 결정계수는 0.49로 나타났다(Fig. 7). 겨울부터 여름 기간에는 이산화탄소 농도가 감소하면서 플럭스는 증가하고, 여름부터 겨울 기간에는 이산화탄소 농도가 증가하면서 플럭스는 감소하였다. 잔디의 생육과 고사, 잔디밭 토양 미생물의 호흡량에 의해 직접적으로 영향을 받고 있는 이산화탄소 플럭스의 계절별 변동 요인은 대기 중 이산화탄소 농도에 의해 지배적인 것은 아니지만, 두 성분 간의 계절별 변동이 반비례적으로 나타나고 있다. 여름에는 잔디밭에서의 이산화탄소 방출량이 많지만 대기의 가열로 인해 공기 중 이산화탄소의 수직적인 확산이 원활하게 발생하고, 겨울에는 잔디밭에서의 이산화탄소 발생량이 감소하지만 차가운 대기의 무거운 공기로 인해 이

산화탄소가 잔디밭 상부에 축적되어 농도가 상승한 것으로 판단된다(Kim, 2010).

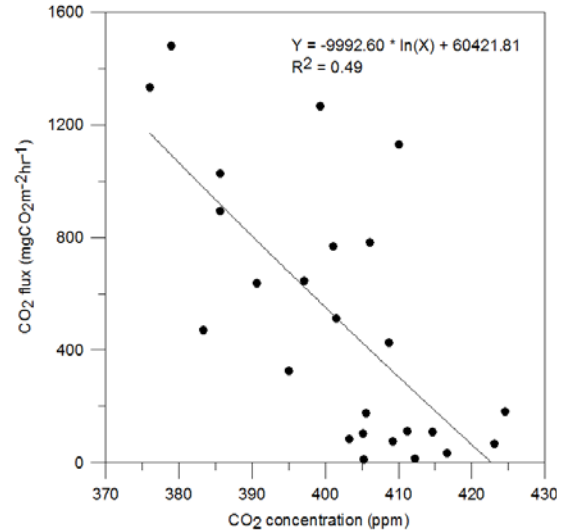


Fig. 7. Regression function of carbon dioxide flux as a carbon dioxide concentration.

지온에 따른 이산화탄소 플럭스의 회귀함수는 지수함수의 증가 형태가 가장 적합하고 결정계수는 0.85 정도로서 높았다(Fig. 8). 지온 구간이 $0\sim 20^{\circ}\text{C}$ 에서보다 $20\sim 40^{\circ}\text{C}$ 일 때 지온에 따른 이산화탄소 방출량이 급격하게 상승한 것은, 지온이 $20\sim 40^{\circ}\text{C}$ 일 때 뿌리의 생장 속도가 빠르고 지온 상승에 따른 뿌리 호흡량의 증가율이 높아지기 때문이다(Palta와 Nobel, 1989; Wang 등, 2009). 잔디밭에서 대기로의 이산화탄소 방출량은 지온에 의한 영향성이 지배적이며, 봄부터 여름 사이의 시기에는 지온이 높아지면서 잔디의 활발한 생육에 의한 뿌리 호흡과 토양 미생물의 활동에 의한 이산화탄소 발생량이 증가한다(Boone 등, 1998; Luo와 Zhou, 2006). 가을부터 겨울 사이의 시기에는 지온이 낮아지면서 잔디가 고사되고 토양 미생물 개체수가 감소하여 잔디밭에서 대기로의 이산화탄소 방출량이 감소한다.

잔디밭에서 5일 누적 강수량("0"인 자료들은 제외)에 따른 이산화탄소 플럭스의 회귀함수는 선형함수의 증가 형태가 가장 적합하고 결정계수는 0.38로 나타났다(Fig. 9). 건조한 토양이 강수에 의해 토양 함수비가 증가하면 식물의 뿌리 호흡, 토양 미생물 활동이 활발해져 토양에

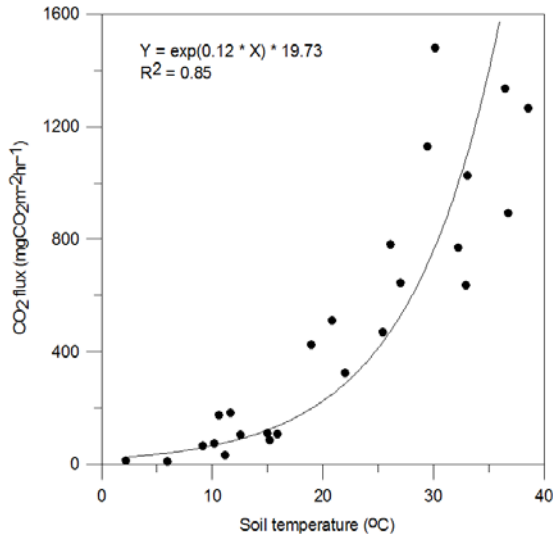


Fig. 8. Regression function of carbon dioxide flux as a soil temperature.

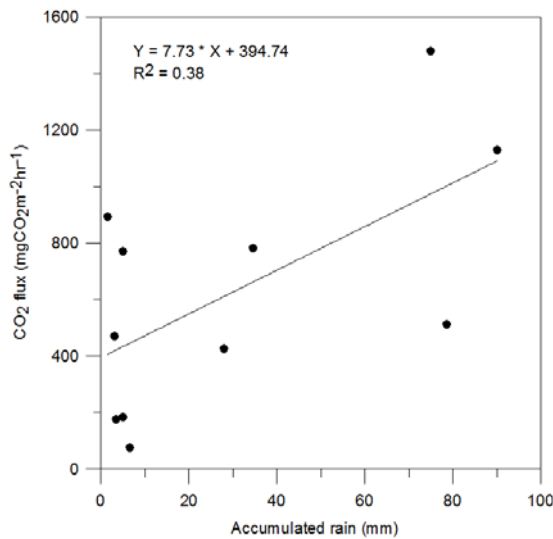


Fig. 9. Regression function of carbon dioxide flux as a five days total rainfall.

서의 이산화탄소 방출량이 증가하며(Grahammer 등, 1991; Holt 등, 1990), 토양 공극이 50% 정도에서 최대 방출량에 도달하게 된다(Ilstedt 등, 2000). 토양에 내린 강수량이 0 mm에서 100 mm 정도의 범위이면 이산화탄소 방출량은 강수량에 선형적으로 증가하고, 강수 발생 후 5일 이내에 최대 방출량이 나타난다(Liu 등,

2002). 본 연구의 결과에서도 잔디밭 관측 이전 5일 누적 강수량이 10 mm 이하인 조건에서는 강수량에 따른 이산화탄소 플럭스의 변동 경향이 나타나지 않았으나, 누적 강수량이 20 mm 이상인 조건에서는 강수량에 따라 이산화탄소 플럭스가 선형적으로 증가하였다. 태풍이나 집중호우에 의한 수백 mm의 강수가 발생하는 경우에는 토양 공극이 포화되어 혐기성 환경으로 변화하므로 잔디의 뿌리 호흡과 호기성 미생물 활동이 저하되어 토양에서의 이산화탄소 방출량은 감소할 것이다(Kucera와 Kirkham, 1971). 본 연구에서는 이러한 환경이 나타나지 않았으나, 향후 연구에서는 태풍이나 집중호우 조건에서의 토양 이산화탄소 방출량에 대한 관측을 수행할 것이다.

4. 결론

본 연구에서는 잔디밭에서 24절기 동안 관측된 이산화탄소 플럭스와 농도, 지온 자료의 변동을 분석하였으며, 그 결론은 다음과 같다.

잔디밭에서 관측된 이산화탄소 플럭스와 농도 성분 사이의 계절별 변동이 반비례적으로 나타났다. 이는 북반구에 해당하는 연구지역의 잔디밭 대기 중 이산화탄소 농도는 여름에 낮고 겨울에 높지만, 잔디밭에서 이산화탄소의 방출량은 잔디의 뿌리 호흡과 미생물 활동이 왕성한 여름에 많고 잔디가 고사되고 지온이 낮은 겨울에는 “0”에 근접하기 때문이다.

잔디밭에서 이산화탄소 방출량에 지배적인 요인은 계절에 따른 지온의 변화이며, 지온이 20°C 이상인 조건에서는 이산화탄소 방출량이 급격하게 상승하였다. 지온이 상승하는 봄부터 여름 사이에는 잔디의 활발한 생육으로 뿌리 호흡이 증가하고 또한 토양 미생물의 왕성한 활동에 의한 호흡량이 증가하여 토양에서 대기로의 이산화탄소 방출량이 증가하게 된다. 지온이 감소하는 가을에서 겨울 사이에는 잔디의 고사와 미생물 활동의 저하로 인해 잔디밭에서 대기로의 이산화탄소 방출량이 감소하게 된다.

잔디밭에 내리는 강수는 토양 함수비를 증가시켜 잔디의 뿌리 호흡과 미생물 호흡을 증가시키는 역할을 한다. 본 연구에서도 관측 이전 5일 동안의 누적 강수량이 20~100 mm 범위의 조건에서는 강수량이 증가할수록

이산화탄소 방출량이 증가하였다. 향후에는 수백 mm의 강수가 내려 토양 공극이 포화된 혐기성 조건에서 잔디밭의 이산화탄소 플럭스에 대한 정량적인 관측을 하고자 한다.

감사의 글

이 논문은 기상청 기상기술개발사업(CATER 2012-6060)과 2013년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단 기초연구사업(2013010741)의 지원을 받아 수행되었으며, 이에 깊이 감사드립니다.

참고문헌

- Baldocchi, D. D., Vogel, C. A., Hall, B., 1997, Seasonal variation of carbon dioxide exchange rates above and below a boreal jack pine forest, *Agr. and Forest Meteorol.*, 83, 147-170.
- Boone, R. D., Nadelhoffer, K. J., Canary, J. D., Kaye, J. P., 1998, Root exert a strong influence on the temperature sensitivity of soil respiration, *Nature*, 396, 570-572.
- Bowden, R. D., Nadelhoffer, K. J., Boone, R. D., Melillo, J. M., Garrison, J. B., 1993, Contributions of aboveground litter, belowground litter, and root respiration to total soil respiration in a temperate mixed hardwood forest, *Canadian J. of Forest Res.*, 23, 1402-1407.
- Bowden, R. D., Newkirk, K. M., Rullo, G. M., 1998, Carbon dioxide and methane fluxes by a forest soil under laboratory-controlled moisture and temperature conditions, *Soil Biol. and Biochem.*, 30, 1591-1597.
- Campbell, C. S., Heilman, J. L., McInnes, K. J., Wilson, L. T., Medley, J. C., Wu, G., Cobos, D. R., 2001, Diel and seasonal variation in CO₂ flux of irrigated rice, *Agr. and Forest Meteorol.*, 108, 15-27.
- Chae, N. Y., Kim, J., Kim, D. G., Lee, D. W., Kim, R. H., Ban, J. Y., Son, Y. W., 2003, Measurement of soil CO₂ efflux using a closed dynamic chamber system, Korea, *Korean J. of Agr. and Forest Meteorol.*, 5(2), 94-100.
- Cho, H. K., 1972, A statistical study on evapotranspiration of paddy-field, *J. of Korean Meteorol. Soc.*, 5, 1-8.
- Choi, T. J., Kim, J., Lim, J. H., 2003, CO₂ exchange in Kwangneung broadleaf deciduous forest in a hilly terrain in the summer of 2002, Korea, *Korean J. of Agr. and Forest Meteorol.*, 5(2), 70-79.
- Davidson, B. A., Belk, E., Boone, R. D., 1998, Soil water content and temperature as independent or confound factors controlling soil respiration in a temperature mixed hardwood forest, *Global Change Biol.*, 4, 217 - 227.
- Ellert, B. H., Bettany, J. R., 1992, Temperature dependence of net nitrogen and sulfur mineralization, *Soil Science Society of America J.*, 56, 1133-1141.
- Feng, Y., Li, X., 1997, Calculating temperature response of soil process, *Soil Biol. and Biochem.*, 29, 1601-1603.
- Field, C. B., Ball, J. T., Berry, J. A., 1989, Photosynthesis, principles and field techniques. In *Plant physiological ecology, field methods and instrumentation* (Pearcy, R. W., Ehleringer, J., Mooney, H. A., Rundel, P. W.), Chapman and Hall, New York, 209-253.
- Grahammer, K., Jawson, M. D., Skopp, J., 1991, Day and night soil respiration from a grassland, *Soil Biol. and Biochem.*, 23, 77-81.
- 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, *Agr. and Forest Meteorol.*, 149, 1820-1828.
- Heilman, J. L., Cobos, D. R., Heinsch, F. A., Campbell, C. S., McInnes, K. J., 1999, Tower based conditional sampling for measuring ecosystem-scale carbon dioxide exchange in coastal wetlands, *Estuaries*, 22, 584-591.
- Holt, J. A., Hodgen, M. J., Lamb, D., 1990, Soil respiration in the seasonally dry tropics near Townsville, North Queensland, *Australian J. of Soil Res.*, 28, 737-745.
- Holthausen, R. S., Caldwell, M. M., 1980, Seasonal dynamics of root system respiration in *Atriplex confertifolia*, *Plant and Soil*, 55, 307-317.
- Ilstedt, U., Nordgren, A., Malmer, A., 2000, Optimum soil water for soil respiration before and after amendment with glucose in humid tropical acrisols and a boreal mor layer, *Soil Biol. Biochem.*, 32, 1591

- 1599.
- Jenkinson, D. S., 1990, The turnover of organic carbon and nitrogen in soil, *Philosophical Transactions of the Royal Society of London Series B*, 329, 361-368.
- 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. 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, *J. 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, *J. of Korean Soc. for Atmospheric Environment*, 23(2), 225-241.
- Kim, J. G., 2010, *The Climate Near the Ground : 7nd edition*, Sigma Press, Seoul, 779.
- Kucera, C. L., Kirkham, D. R., 1971, Soil respiration studies in tallgrass prairie in Missouri, *Ecology*, 52, 315-323.
- Lee, H. C., Hong, J. K., Cho, C. H., Choi, B. C., Oh, S. N., Kim, J., 2003, Surface exchange of energy and carbon dioxide between the atmosphere and a farmland in Haenam, Korea, *Korean J. of Agr. and Forest Meteorol.*, 5(2), 61-69.
- 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., Jackson, R. B., Field, C. B., Mooney, H. A., 1996, Elevated CO₂ increases belowground respiration in California grasslands, *Oecologia*, 108, 130 - 137.
- Luo, Y., Zhou, X., 2006, *Soil respiration and the environment*, ELSEVIER, 305pp.
- MacDonald, N. W., Zak, D. R., Pregitzer, K. S., 1995, Temperature effects on kinetics of microbial respiration and net nitrogen and sulfur mineralization, *Soil Science Soc. of America J.*, 59, 233-240.
- Mielnick, P. C., Dugas, W. A., 2000, Soil CO₂ flux in a tallgrass prairie, *Soil Biol. Biochem.*, 32, 221 - 228.
- Moon, B. K., Hong, J. K., Lee, B. R., Yun, J. I., Park, E. W., Kim, J., 2003, CO₂ and energy exchange in a rice paddy for the growing season of 2002 in Hari, Korea, *Korean J. of Agr. and Forest Meteorol.*, 5(2), 51-60.
- Othaki, E., 1984, Application of an infrared carbon dioxide and humidity instrument to studies of turbulent transport, *Boundary Layer Meteorol.*, 29, 85-107.
- Othaki, E., Matsui, T., 1982, Infrared device for simultaneous measurement of atmospheric carbon dioxide and water vapor, *Boundary Layer Meteorol.*, 24, 109-119.
- Palta, J. A., Nobel, P. S., 1989, Root respiration for Agave deserti: Influence of temperature, water status and root age on daily patterns, *J. of Experimental Botany*, 40, 181-186.
- 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 Soc. of America, Special Publication No. 9, Madison, WI.
- Raich, J. W., Schlesinger, W. H., 1992, The global carbon dioxide flux in soil respiration and its relationship to vegetation and climate, *Tellus*, 44B, 81 - 99.
- Rochette, P., Desjardins, R. L., Pattey, E., 1991, Spatial and temporal variability of soil respiration in agricultural fields, *Canadian J. of Soil Science*, 71, 189-196.
- Saito, M., Miyata, A., Nagai, H., Yamada, T., 2005, Seasonal variation of carbon dioxide exchange in rice paddy field in Japan, *Agr. and Forest Meteorol.*, 135, 93-109.
- Schimel, J. P., Clein, J. S., 1991, Microbial response to freeze-thaw cycles in tundra and taiga soils, *Soil Biol. Biochem.*, 28, 1061 - 1066.
- Schlentner, R. E., Van Cleve, K., 1985, Relationships between CO₂ evolution from soil, substrate temperature, and substrate moisture in four mature forest types in interior Alaska, *Canadian J. of Forest Res.*, 15, 97-107.
- Teklemariam, T., Staebler, R. M., Barr, A. G., 2009, Eight years of carbon dioxide exchange above a mixed forest at Borden, Ontario, *Agr. and Forest Meteorol.*,

- 149, 2040-2053.
- Thierron, V., Laudelout, H., 1996, Contribution of root respiration to total CO₂ efflux from the soil of a deciduous forest, *Canadian J. of Forest Res.*, 26, 1142-1148.
- Uchijima, Z., 1976, Maize and rice(Monteith, J. L., eds.), *Vegetation and the Atmosphere*, 2, 33-64.
- Wang, W., Feng, J., Oikawa, T., 2009, Contribution of root and microbial respiration to soil CO₂ efflux and their environmental controls in a humid temperate grassland of Japan, *Pedosphere*, 19(1), 31-39.
- Xu, L., Baldocchi, D. D., Tan, J., 2004, How soil moisture, rain pulses, and growth alter the response of ecosystem respiration to temperature, *Global Biogeochem. Cycles*, 18, GB4002, Doi: 10.1029/2004GB002281.