Journal of Environmental Science International
28(9); 785~795; September 2019

pISSN: 1225-4517 eISSN: 2287-3503
https://doi.org/10.5322/JESI.2019.28.9.785

ORIGINAL ARTICLE

잔디밭에서 지온에 대한 이산화탄소 플럭스의 민감도(Q_{10}) 분석

강동환 · 소윤환* · 권병혁[1)] · 김박사[1)]
부경대학교 환경연구소, [1)]부경대학교 환경대기과학과

Sensitivity Analysis (Q_{10}) of Carbon Dioxide Flux with Soil Temperature in the Grassplot

Dong-hwan Kang, Yoon Hwan So*, Byung Hyuk Kwon[1)], Park Sa Kim[1)]
Environmental Research Institute, Pukyong National University, Busan 48547, Korea
[1)]Department of Environmental Atmospheric Sciences, Pukyong National University, Busan 48547, Korea

Abstract

In order to analyze the sensitivity of carbon dioxide flux by soil temperature in the grassplot, carbon dioxide flux and soil temperature were observed 24 times from March, 2010 to March, 2011 at nine sites in the grassplot. The average of CO_2 in the grassplot is 2.2~36.7℃, the highest in August, the lowest in January, and the average of carbon dioxide flux is 12~1479 $mgCO_2 \cdot m^{-2} \cdot hr^{-1}$, and the carbon dioxide emission from the grassplot to the atmosphere was 10 times higher in summer than in winter. The temperature response coefficient estimated by the exponential function of carbon dioxide flux according to soil temperature was ranged from 0.1065 to 0.1274, and the increase tendency of CO_2 flux with soil temperature was linear at 0~20℃ and exponential at 20~40℃. The Q_{10} values for each of nine observation sites on the grassplot was in the range of 2.901 ~ 3.575, and the Q_{10} value using the total data observed in the lawn was estimated to be 3.374. In the homogeneous grassplot area, the average of Q_{10} values by observation point and the Q_{10} value by the total data were estimated similarly.

Key words : Grassplot, Soil temperature, Carbon dioxide flux, Q_{10}

1. 서 론

논(rice paddy)과 밭(field), 방목지(pasture), 초원(plain), 잔디밭(grassplot) 등을 포함하는 목초지는 지구 토지 면적(영구 동토 제외)의 약 40%를 차지하며, 지구 탄소순환에 있어 중요한 역할을 수행한다(White et al., 2000). 목초지의 토양과 대기 사이에서 발생하는 생태계 탄소교환(ecosystem carbon exchange)은 토양의 탄소 저장과 대기로의 방출 형태로 이루어진다. 토양의 탄소 저장은 대기 중 이산화탄소가 식물의 광합성(photosynthesis)에 의해 토양에 저장되는 것이며, 대기로의 방출은 식물의 자가호흡(autotrophic respiration), 식물의 뿌리 호흡, 토양미생물의 호흡, 토양유기물(SOM: Soil Organic Matter)의 산화나 분해에 의해 발생한다(Kang et al., 2010; Kang et al., 2011). 토양의 탄소 저장과 방출은 다양한 환경 조건에 의해 영향을 받으며, 환경 조건의 변화에 따라 저장과 방출의 변동이 발생한다. 탄소 저장과 방출에 영향을 미치는 환경 조건에는 지리학적 위치 및

Received 20 July, 2019; **Revised** 1 September, 2019;
Accepted 9 September, 2019
***Corresponding author**: Yoon Hwan So, Environmental Research Institute, Pukyong National University, Busan 48547, Korea
Phone : +82-51-629-7393
E-mail : lunaace@naver.com

© 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.

기후 특성, 식생의 종류와 밀도, 토양의 이화학적 특성 등이 있다. 식생의 종류와 밀도는 지상생물량(aboveground biomass)이나 잎면적지수(leaf area index)와 같은 식생의 생물계절학적인 변화(phenological change), 광합성 유효복사(photosynthetic active radiation), 대기와 토양의 온도, 강우량 등에 의해 지배적인 영향을 받는다(Raich et al., 1992; Boone et al., 1998; Davidson et al., 1998; Epron et al., 1999; Davidson et al., 2000; Rustad et al., 2000; Fang et al., 2001; Xu et al., 2001; Liu et al., 2002; Yuste et al., 2003; Reth et al., 2005; Tang et al., 2005; Davidson et al., 2006; Gaumont-Guay et al., 2006; Nishimura et al., 2015).

목초지에서 온도와 토양 함수비에 따른 이산화탄소 플럭스의 민감도(Q_{10}) 연구는 미국, 유럽, 중국 등에서 다양한 방법으로 수행되었다. 미국의 톨그래스(tallgrass) 대초원 지역에서 가뭄(drought) 시기 동안에 토양 함수비와 이산화탄소 방출량의 관계를 연구하였으며(Liu et al., 2002), 유럽 3개국(오스트리아, 독일, 체코)의 11개 목초지에서 토지 관리와 토지 이용의 변화에 따른 뿌리 호흡율을 평가하여 뿌리 직경이 증가할수록 호흡율과 Q_{10} 값이 감소함을 규명하였으며(Bahn et al., 2006), 전 세계의 목초지에서 토양 호흡(뿌리 호흡의 기여율 포함)에 의한 연간 이산화탄소 방출량에 대한 민감도를 정리하고 분석하였으며(Wang et al., 2009), 동아시아의 온난한 기후에 해당하는 2개 지역(중국의 고산 초원과 일본의 저지대 초원)에서 온도와 토양 함수비에 따른 이산화탄소 방출량을 관측하여 Q_{10} 값을 산정하고 이를 통해 저지대 초원보다 고산 초원에서 온도에 따른 이산화탄소 방출량의 민감도가 높음을 확인하였으며(Suh et al., 2009), 영국의 온난한 기후에 해당하는 잉글버러(Ingleborough) 자연보호구역의 방목지(grazing)에서 방목에 의한 토양유기물 분해 효과를 고려하여 온도에 따른 토양호흡율의 민감도를 분석하였으며(Paz-Ferreiro et al., 2012), 중국의 반건조(semiarid) 온난한 기후에 해당하는 황토(loess) 고원 지역에서 식물 종별 온도에 따른 이산화탄소 방출량의 민감도에 대한 계절 변화를 정량적으로 산출하였으며(Jia et al., 2014), 중국의 티베트 고원 목초지에서 온도에 대한 생태계 호흡율(ecosystem respiration)의 민감도는 식물이 생장하는 시기 동안 증가하는 경향을 보이고 생태계 호흡율의 일/계절 변화의 주요인은 온도와 토양 함수비라는 것을 확인하였으며(Chen et al., 2014), 중국의 황토 고원 지역에서 2가지 조건의 목초지(울타리로 둘러싸인 목초지와 방목지)에서 토양 호흡율과 미생물 호흡율(microbial respiration)을 관측하여 산정된 Q_{10} 값을 분석하여 토양 온도와 함수비에 의한 토양 호흡율과 미생물 호흡율의 민감도를 연구하였다(Zhang et al., 2015). 중국의 54개 목초지에서 관측된 토양 호흡율 자료를 이용하여 171개의 Q_{10}(온도에 대한 토양 호흡율의 민감도) 값을 산정하여 Q_{10} 값은 목초지의 종류와 측정한 토양 깊이에 따른 영향성이 높음을 규명하였다(Feng et al., 2018). 국내에서는 목초지 지역에 대한 Q_{10} 산정 연구는 수행된 바가 없기 때문에, 국내 기후를 고려한 목초지에서 Q_{10} 산정을 통한 토양 온도에 따른 이산화탄소 플럭스의 민감도를 분석하는 연구가 필요하다. 이러한 연구 결과는 현장 관측이 어려운 이산화탄소 플럭스를 기온과 지온 등의 자료를 이용하여 추정할 수 있기에 그 의미가 있다.

본 연구에서는 2010년 3월부터 2011년 3월까지 24절기(solar term)에 해당하는 시기에 부경대학교 환경연구동 앞 잔디밭에서 지온(soil temperature)과 이산화탄소 플럭스를 관측하였으며, 지온에 따른 이산화탄소 플럭스의 지수함수를 추정하고 Q_{10} 값을 산정하여 잔디밭에서 지온에 대한 이산화탄소 플럭스의 민감도를 분석하였다.

2. 연구 방법

본 연구는 부산시 남구 대연동에 위치한 부경대학교 내 잔디밭에서 수행하였다(Fig. 1). 잔디밭의 면적은 약 6,000 m^2 정도(120 m × 50 m)이며, 잔디의 분포는 비교적 균일하며 4계절에 따른 변화가 뚜렷하게 나타나고 있다. 잔디밭의 토양 온도(이후 “지온”)와 이산화탄소 농도와 플럭스 관측은 2010년 3월부터 2011년 3월 기간 동안 9개 지점에서 24절기 전후로 강우가 발생하지 않은 날에 24회 반복 수행하였다. 잔디밭에서 24절기 관측 기간 동안 동일한 위치에서 잔디밭의 전경을 사진으로 촬영하였으며, 본 연구 부지에서는 봄철에 잔디의 생장이 시작되고 여름철에 잔디의 생장이 가장 활발하며 겨울철에는 대부분의 잔디가 고사된다(Fig. 2). 지온은 잔디의 근권(rhizosphere)에 해당하는 지표면하 5 cm 정도에서

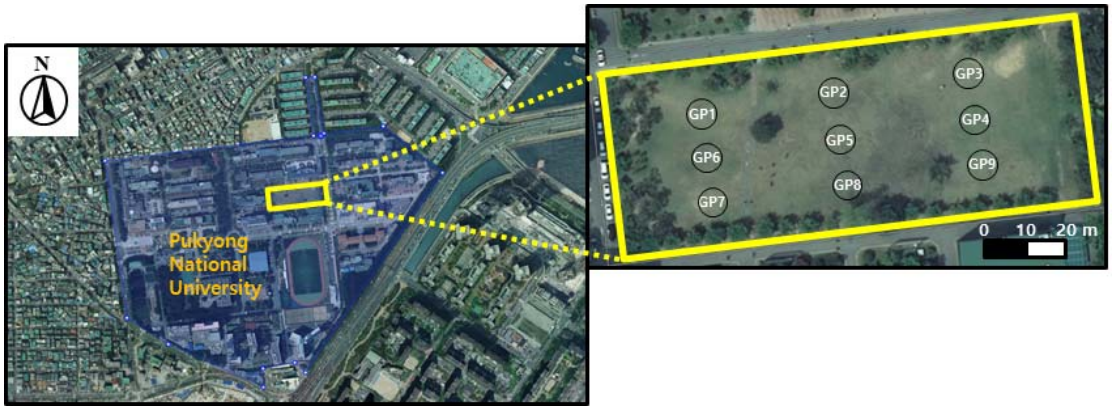

Fig. 1. Location map of monitoring points in the grassplot.

(a) April (b) July

(c) October (d) January

Fig. 2. Panorama of the grassplot for observation period.

측정하고, 이산화탄소 농도와 플럭스는 잔디밭 표면에 폐쇄형 챔버(closed chamber)를 설치하여 측정하였다. 관측은 매회 오후 2~3시에 수행하였으며, 관측 시간은 최대 1시간 이내로 하여 관측 지점별 공간적인 편차를 최소화하였다.

현장관측에 이용된 잔디밭과 대기 사이의 이산화탄소 플럭스 측정시스템은 폐쇄형 역학 챔버 시스템(closed dynamic chamber system)으로서 지온 측정기(STP-1),

(a) STP-1 (b) SRC-1

(c) EGM-4 (d) Scene of measurement

Fig. 3. Soil temperature and carbon dioxide flux measuring instruments and measurement scene.

이산화탄소 농도 측정용 챔버(SRC-1), 본체(EGM-4)로 구성하였다(Fig. 3). 이산화탄소 농도는 본체에 탑재된 적외선가스분석기(infrared gas analyzer; IRGA)를 통해 분석하고, 챔버 내에 포집된 기체를 본체로 이송하면서 3분 이내의 짧은 시간 동안 27회 반복적으로 이산화탄소 농도를 측정한다. 폐쇄형 역학 챔버로 잔디밭 표면을 덮으면, 잔디밭에서 대기로 이산화탄소를 방출하므로 챔버 내에서 이산화탄소 농도가 증가하게 된다. 챔버 내에서 측정된 경과 시간에 따른 이산화탄소 농도 자료를 이용하면 식 (1)에 의해 이산화탄소 플럭스를 산정할 수 있다(Field 등, 1989).

$$F = \frac{(c_t - c_i)V}{\triangle tA} \tag{1}$$

여기서, F는 이산화탄소 플럭스[$ML^{-2}T^{-1}$], V는 챔버의 체적[L^3], $\triangle t$는 이산화탄소 농도 측정 시간 간격[T], A는 챔버로 덮힌 잔디밭의 표면적[L^2], c_i는 챔버 내 이산화탄소 초기 농도[ML^{-3}] 및 c_t는 $\triangle t$ 시간 경과 후의 챔버 내 이산화탄소 농도[ML^{-3}] 이다.

생태계에서 이산화탄소의 방출은 생화학적(biochemical) 및 생리학적(physiological) 과정에 의해 발생하고, 이러한 과정은 온도에 지배적인 영향을 받는다(Luo et al., 2006). 식물의 뿌리 호흡(root respiration)으로 인해 지온(soil temperature)에 대한 이산화탄소 방출량의 변화는 지수함수 형태로 나타나며(Lloyd et al., 1994; Fang et al., 2001), 주로 생화학적 반응에 의해 지배된다(Atkin et al., 2000). 저온에서는 지온이 상승할수록 이산화탄소의 방출량이 증가하다가 45~50℃ 정도에 이르면 반대로 감소하는 경향을 보이고(Palta et al., 1989), 이는 고온에서 효소(enzymes)의 활동력이 저하되어 이산화탄소 방출량이 감소하기 때문이다. 온도에 대한 호흡율(이산화탄소 플럭스)의 화학 반응을 설명하기 위한 간단한 실험적인 지수 모델은 식 (2)에 제시하였다.

$$R = \alpha \exp(bT) \tag{2}$$

여기서, R은 호흡율[$ML^{-2}T^{-1}$], α는 온도가 0℃ 일 때의 호흡율[$ML^{-2}T^{-1}$], b는 온도반응계수(temperature response coefficient), T는 온도[℃]이다. 온도에 대한 호흡율의 민감도(sensitivity)는 Q_{10}을 이용하여 분석하고, Q_{10}은 온도가 10℃ 변화할 때 호흡율의 변화량을 나눈 값으로 정의되고 식 (3)으로 표현된다(Luo et al., 2006).

$$Q_{10} = \frac{R_{T_0+10}}{R_{T_0}} \tag{3}$$

여기서, R_{T_0}와 R_{T_0+10}은 각각 온도 T_0와 T_0+10℃에 해당하는 호흡율[$ML^{-2}T^{-1}$]이다. 온도에 대한 호흡율의 관계 함수가 지수함수로 추정되면, Q_{10}은 식 (2)에서 구한 온도반응계수(b)를 식 (4)에 대입하여 산정한다(Chen et al., 2014; Jia et al., 2014; Zhang et al., 2015; Feng et al., 2018).

$$Q_{10} = \exp(10b) \tag{4}$$

3. 결과 및 고찰

3.1. 잔디밭에서 지온과 이산화탄소 플럭스의 계절 변동 분석

잔디밭의 9개 지점에서 1년 동안 24절기별로 관측된 지온과 이산화탄소 플럭스의 기술통계량은 Table 1에 정리하였다. 평균은 잔디밭 9개 지점에서 관측된 지온과 이산화탄소 플럭스를 산술평균한 것이며, 최솟값과 최댓값은 9개 지점에서 관측된 값들 중 최소와 최대를 나타낸 것이다. 잔디밭 9개 지점에 대한 평균 지온의 범위는 2.2~36.7℃ 정도로서 8월에 가장 높고 1월에 가장 낮았으며, 최솟값은 0.4~37.4℃ 정도로서 7월에 가장 높고 1월에 가장 낮았으며, 최댓값은 4.6~39.5℃ 정도로서 7월에 가장 높고 1월에 가장 낮았으며, 표준편차는 0.1~1.6 정도로서 1월에 가장 높고 3월에 가장 낮았다.

잔디밭 9개 지점에 대한 평균 이산화탄소 플럭스의 범위는 12~1479 $mgCO_2 \cdot m^{-2} \cdot hr^{-1}$ 정도로서 9월에 가장 높고 1월에 가장 낮았으며, 최솟값은 -3~1088 $mgCO_2 \cdot m^{-2} \cdot hr^{-1}$ 정도로서 8월에 가장 높고 1월에 가장 낮았다. 최댓값은 28~2120 $mgCO_2 \cdot m^{-2} \cdot hr^{-1}$ 정도로서 9월에 가장 높고 1월에 가장 낮았으며, 표준편차는 10~319 정도로서 9월에 가장 높고 1월에 가장 낮았다. 잔디밭에서 관측된 이산화탄소 플럭스의 평균에 의하면, 모든 시기에 잔디밭에서 대기로 이산화탄소의 방출량(emission)이 흡수량(absorbtion)보다 많으므로 잔디밭에서 이산탄소 플럭스는 양(+)의 값을 가지고 여름이 겨울보다 10배 정도 높게 나타났다(Kim et al., 2014). 잔디밭에서 지온이 상승하는 시기인 봄과 여름에는 잔디의 생육이 활발하여 잔디의 뿌리 호흡과 토양미생물 호흡에 의한 이산화탄소의 방출량이 급격하게 증가하였으며(Wang et al., 2009), 이산화탄소 플럭스의 최솟값이 음의 값으로 나타난 1월과 2월은 잔디가 고사되어 뿌리 호흡이 발생하지 않으며 토양 미생물의 활동이 매우 저조하여 잔디밭에서 대기로의 이산화탄소 방출량이 미미하였기 때문이다(Kim et al., 2014). 또한 북반구(한국)에서 대기 중 이산화탄소 농도는 여름에 비해 겨울에 높으므로, 겨울에는 대기에서 잔디밭으로 흡수되는 양이 방출되는 양보다 많아져서 이산화탄소 플럭스가 음의 값을 나타낸 것으로 판단된다. 이산화탄소 플럭스의 공간적인 불균질성을 의미하는 표준편차도 여름이 겨울보다 10배 이상 높은 것으로 나타났으며, 이는 여름에 높은 이산화탄소 방출량으로 인해 잔디밭 9개 지점 사이의 이산화탄소 플럭스 차이가 크게 나타났기 때문이다.

표준편차는 지온과 이산화탄소 플럭스의 값의 크기와 단위에 따라 지배적인 영향을 받으므로, 비교하는 성분 값의 크기와 단위에 영향을 받지 않고 비교할 수 있는 변동계수(coefficient of variation)를 산정하여 잔디밭에서 두 성분의 공간적인 편차를 분석하였다. 지온의 변동계수는 0.01~1.60, 이산화탄소 플럭스의 변동 계수는 0.13~1.70의 범위로 나타났다. 변동계수는 이산화탄소 플럭스가 지온에 비해 10배 정도 높았으며, 이는 지온에 비해 이산화탄소의 공간적인 불균질성이 높음을 의미한다.

3.2. 잔디밭에서 지온과 이산화탄소 플럭스의 공간 분포와 상관성 분석

잔디밭의 9개 관측 지점에서 24회 관측된 자료를 이용하여 작성된 지온과 이산화탄소 플럭스의 box-whisker plots을 관측 지점별로 도시하였다(Fig. 4). 잔디밭에서 지온은 9개 관측 지점에서 유사하였으며, 지온의 중앙값은

Table 1. Descriptive statistics of soil temperature and carbon dioxide flux at the monitoring date

Monitoring date	Soil temperature (℃)					CO_2 flux ($mgCO_2 \cdot m^{-2} \cdot hr^{-1}$)				
	Avg	Min	Max	SD	CV	Avg	Min	Max	SD	CV
2010/03/23	10.6	10.4	10.7	0.1	0.01	175	111	233	37	0.21
2010/04/05	20.8	19.8	21.5	0.5	0.02	511	343	593	68	0.13
2010/04/29	18.9	18.1	19.8	0.5	0.03	426	219	665	126	0.30
2010/05/04	27.0	25.8	28.2	0.7	0.03	646	503	883	139	0.21
2010/05/21	29.4	27.9	30.5	0.7	0.03	1129	817	1692	261	0.23
2010/06/05	32.9	30.9	34.9	1.2	0.03	638	289	911	187	0.29
2010/06/20	32.2	30.8	33.4	0.9	0.03	770	576	1113	181	0.24
2010/07/09	33.1	31.9	34.7	1.0	0.03	1026	807	1538	239	0.23
2010/07/26	38.5	37.4	39.5	0.6	0.02	1267	994	1599	201	0.16
2010/08/09	36.7	34.4	38.4	1.2	0.03	894	563	1192	207	0.23
2010/08/24	36.5	36.1	37.3	0.4	0.01	1334	1088	1908	256	0.19
2010/09/09	30.1	28.8	31.2	0.8	0.03	1479	1001	2120	319	0.22
2010/09/28	25.4	24.4	26.5	0.7	0.03	470	79	646	153	0.33
2010/10/12	26.1	25.2	27.0	0.6	0.02	783	545	928	114	0.15
2010/10/23	22.0	21.1	22.8	0.6	0.03	326	67	455	105	0.32
2010/11/08	15.2	14.5	16.2	0.6	0.04	85	4	162	42	0.49
2010/11/22	15.9	14.3	17.2	1.0	0.06	109	62	160	26	0.24
2010/12/07	10.2	9.8	10.8	0.3	0.03	76	25	115	25	0.33
2010/12/23	9.1	8.5	10.0	0.5	0.06	67	24	100	21	0.31
2011/01/06	5.9	4.7	7.7	0.8	0.14	12	-20	47	21	1.70
2011/01/20	2.2	0.4	4.6	1.6	0.71	14	-3	28	10	0.72
2011/02/05	11.2	9.0	11.8	0.8	0.07	34	-11	65	22	0.65
2011/02/19	11.6	10.8	13.0	0.6	0.06	183	115	220	28	0.15
2011/03/07	12.5	11.5	13.8	0.7	0.06	105	88	126	13	0.13

20℃ 정도이고 최댓값은 35℃ 이상이고 최솟값은 5℃ 이하로 나타났다. 잔디밭에서 이산화탄소 플럭스의 중앙값은 GP1 지점에서 250 $mgCO_2 \cdot m^{-2} \cdot hr^{-1}$ 이하이었으며, 나머지 관측 지점에서는 400~500 $mgCO_2 \cdot m^{-2} \cdot hr^{-1}$의 범위로서 유사하게 나타났다. 이산화탄소 플럭스의 최솟값은 9개 관측 지점에서 0 $mgCO_2/m^2hr$ 정도로 유사하였으며, 최댓값은 1300~2200 $mgCO_2 \cdot m^{-2} \cdot hr^{-1}$의 범위로서 공간적인 차이를 보였다. 잔디밭에서 관측 성분의 공간적인 분포는 지온이 이산화탄소 플럭스보다 균질하게 나타남을 알 수 있다.

잔디밭의 9개 관측 지점에서 24회 관측된 자료를 이용하여 산정된 지온과 이산화탄소 플럭스의 상관계수를 Table 2에 정리하였다. 잔디밭에서 지온과 이산화탄소의 상관계수는 0.81~0.92의 범위로 산정되었으며, 9개 관측 지점에서 지온과 이산화탄소 플럭스의 상관성이 높은 것으로 나타났다. 본 연구지역에서는 이산화탄소 플럭스의 연간 변동이 지온에 의해 지배적인 영향을 받고 있음을 알 수 있으며(Wang et al., 2009), 잔디밭에서 관측한 지온을 통한 이산화탄소 플럭스의 정량적인 추정에 대한 신뢰도가 높을 것으로 판단된다.

3.3. 잔디밭에서 이산화탄소 플럭스의 Q_{10} 산정 및 분석

잔디밭의 9개 관측 지점에서 24회 관측된 자료를 이용하여 지온에 따른 이산화탄소 플럭스의 지수함수를 추정하였다(Fig. 5). 관측 지점별로 추정된 지온에 따른

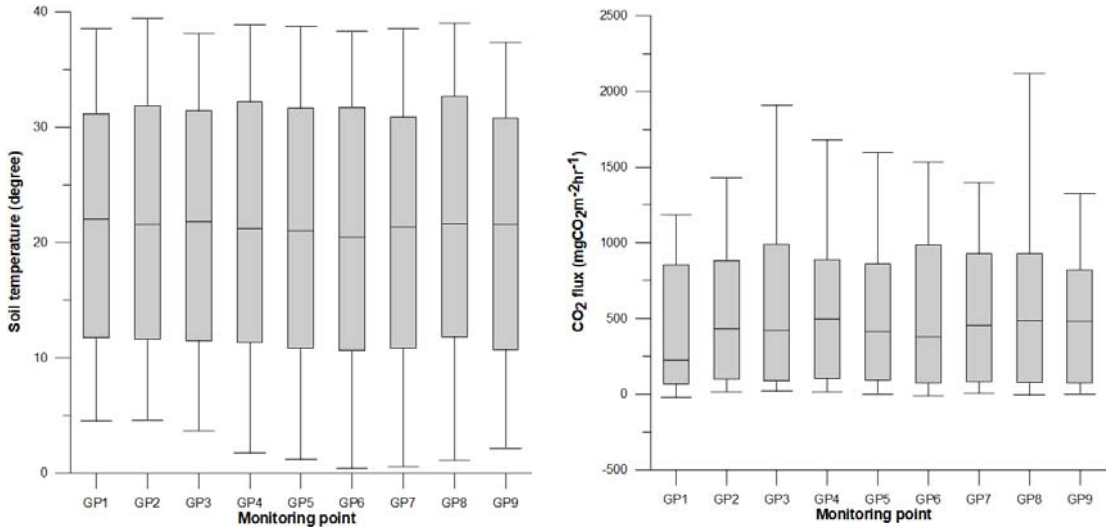

Fig. 4. Box-whisker plots of soil temperature and carbon dioxide flux at the monitoring point.

Table 2. Correlation coefficient between soil temperature and carbon dioxide flux at the monitoring point

Monitoring point	GP1	GP2	GP3	GP4	GP5	GP6	GP7	GP8	GP9
Correlation coefficient	0.87	0.81	0.82	0.89	0.84	0.90	0.91	0.81	0.92

* The correlation coefficients are good at 0.01 (both) level.

이산화탄소 플럭스의 지수함수는 결정계수가 0.6792~0.8353의 범위로서 높았으며, 온도반응계수는 0.1065~0.1274의 범위로 나타났다. 잔디밭 9개 관측 지점별로 추정된 모든 지수함수에서 지온이 0~20℃의 조건에서는 이산화탄소 플럭스가 선형적으로 천천히 증가하지만, 지온이 20~40℃의 조건에서는 이산화탄소 플럭스가 지수적으로 급격하게 증가하는 경향을 보였다. 기존의 연구에서도 45~50℃ 이하 조건에서는 지온이 상승할수록 이산화탄소 플럭스가 증가하는 경향을 나타내는 것으로 보고되었다(Palta et al., 1989; Atkin et al., 2000).

잔디밭의 9개 관측 지점별로 추정된 지수함수에서 구한 온도반응계수(지수)를 식 (4)에 대입하여 관측 지점별 Q_{10} 값을 산정하였다(Table 3). 잔디밭의 9개 관측 지점별로 산정된 Q_{10} 값은 2.901~3.575의 범위이고, 평균과 표준편차는 각각 3.186과 0.210으로 산정되었다. 전 세계의 목초지에서 Q_{10} 값의 평균은 2.13이고 그 범위는 0.9~4.6 정도이었으며, 온난한 지역에서의 평균은 2.23이고 열대 지역에서의 평균은 1.94로 산정되었다(Wang et al., 2009). Mikan et al.(2002)은 0℃ 이하에서는 Q_{10} 값이 60~200 정도로 높아지고, 0℃ 이상에서의 Q_{10} 값은 최대 9 정도라고 보고하였다. 기존의 연구에 의하면 적정 온도 조건(20~35℃)에서는 이산화탄소 방출량이 증가하고, 저온과 고온에서는 미생물 활동과 뿌리 호흡이 저하되어 이산화탄소 방출량이 감소함을 보였다. 본 연구 지역은 4계절의 변화로 인한 저온과 고온에서 이산화탄소 방출량이 다양하게 나타나므로 Q_{10} 값이 온난한 지역보다는 높게 산정된 것으로 판단된다. 잔디밭에서 9개 관측 지점별 Q_{10} 값이 차이를 나타낸 이유는 잔디밭의 규모가 $50m \times 120m$ 정도이고 유사한 지온(Table 1 참조 - 최대 표준편차 1.6)에서도 잔디의 밀도와 토양의 특성 등에 따른 뿌리 호흡량의 차이에 의해 이산화탄소 플럭스가 지배되었기 때문이다(Chen et al., 2014; Feng et al., 2018). 향후에는 관측 지점별 잔디 밀도와 잎 면적 지수 등을 이용해 뿌리 호흡량을 추정하고 이를 통해 잔디밭에서 이산화탄소 플럭스의 공간적인 불균질성을 규명하는 연구를 수행하고자 한다.

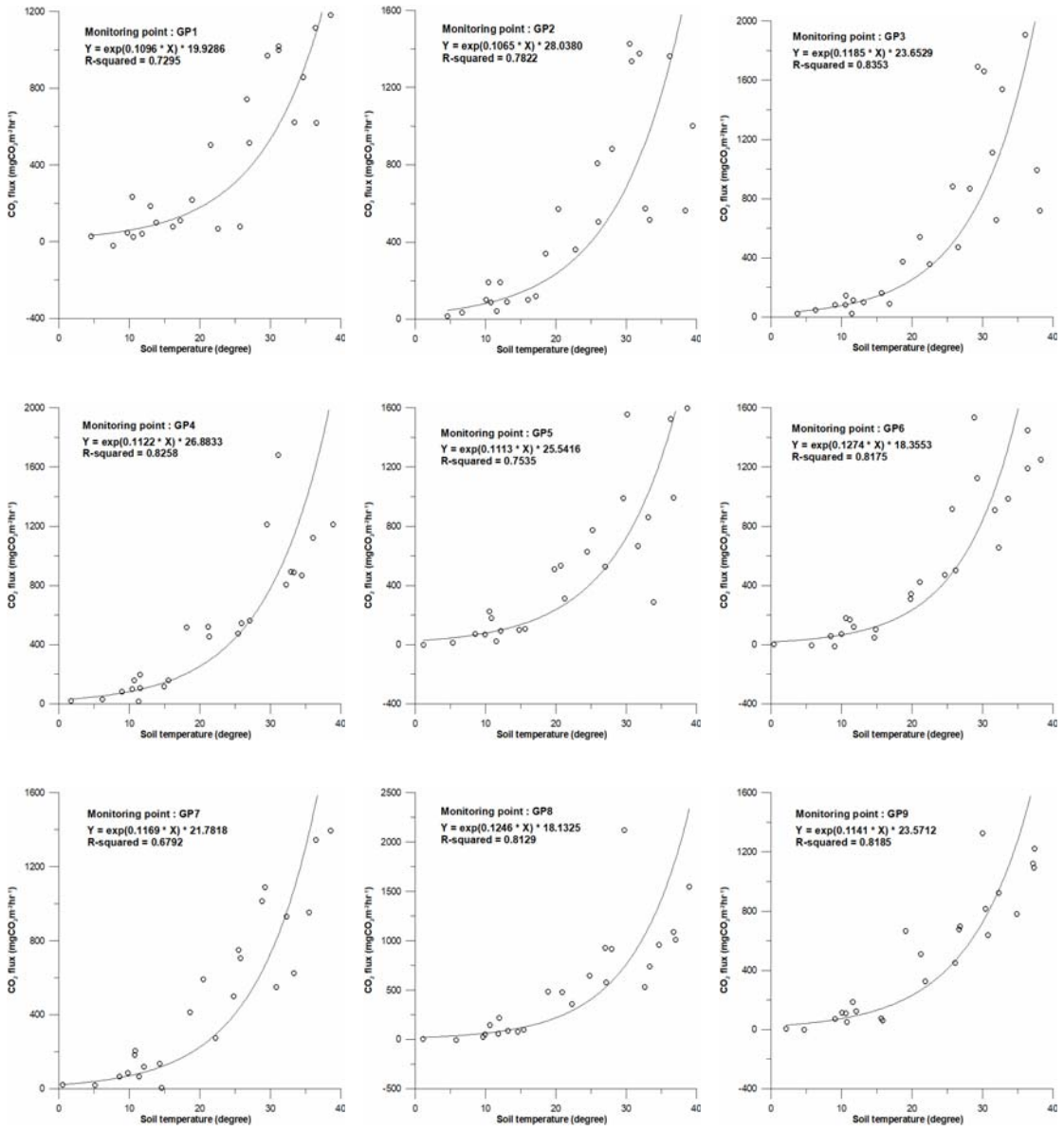

Fig. 5. Exponential functions of carbon dioxide flux according to soil temperature at the monitoring point on the grassplot.

잔디밭의 9개 관측 지점에서 관측된 자료를 모두 이용하여 지온에 따른 이산화탄소 플럭스의 지수함수를 추정하였으며, 또한 추정된 지수함수에 온도반응계수를 식(4)에 대입하여 잔디밭 전체의 Q_{10} 값을 산정하였다. 잔디밭에서 관측된 전체 자료를 이용하여 추정된 지온에 따른 이산화탄소 플럭스의 지수함수는 결정계수가 0.7749로서 높았으며, 온도반응계수는 0.1154로 나타났다(Fig. 6). 전체 자료를 이용하여 추정된 지수함수는 9개 관측 지점별로 추정된 지수함수의 결정계수와 온도반응계수의 범위 이내에 해당하였으며, 추정된 지수함수에서 지온이 약 20℃ 이상의 조건에서는 이산화탄소 플럭스가 지수적으로 급격하게 증가하는 경향을 보였다.

Table 3. Q_{10} values and descriptive statistics at the monitoring point

	GP1	GP2	GP3	GP4	GP5	GP6	GP7	GP8	GP9	Avg	SD
Q_{10}	2.992	2.901	3.271	3.071	3.043	3.575	3.219	3.473	3.130	3.186	0.210

전체 자료를 이용하여 산정한 Q_{10} 값은 3.051이었으며, 이는 9개 관측 지점별 Q_{10}값의 평균인 3.186보다 5% 정도 낮았지만 표준편차(±0.210)를 고려한 범위 이내에 해당한다.

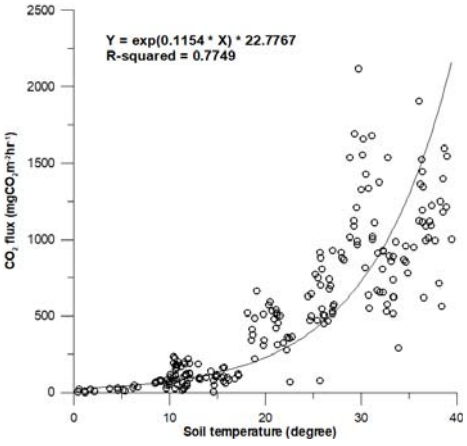

Fig. 6. Exponential function of carbon dioxide flux according to soil temperature for all data.

4. 결 론

부경대학교 잔디밭에서 지온의 변화에 따른 이산화탄소 플럭스의 민감도에 대한 연구를 수행하였으며, 본 연구를 통해 도출된 결과를 다음과 같이 요약하였다.

1. 잔디밭 9개 지점에서 24절기 동안 관측된 지온의 평균은 2.2~36.7℃ 정도로서 8월에 가장 높고 1월에 가장 낮았으며, 이산화탄소 플럭스의 평균은 12~1479 $mgCO_2 \cdot m^{-2} \cdot hr^{-1}$ 정도로서 9월에 가장 높고 1월에 가장 낮았다. 잔디밭에서는 관측 시기 동안 잔디밭에서 대기로 이산화탄소의 방출량이 흡수량보다 많았으며, 여름이 겨울보다 10배 정도 높은 방출량을 보였다, 이는 지온이 상승하는 시기인 봄과 여름 동안 잔디의 뿌리 호흡과 토양미생물 호흡에 의한 이산화탄소의 방출량이 급격하게 증가하였기 때문이다.

2. 잔디밭의 9개 관측 지점별로 분석한 지온의 중앙값은 20℃ 정도이고 최댓값은 35℃ 이상이고 최솟값은 5℃ 이하이었으며, 이산화탄소 플럭스의 중앙값은 GP1 지점(250 $mgCO_2 \cdot m^{-2} \cdot hr^{-1}$ 이하)을 제외하고는 400~500 $mgCO_2 \cdot m^{-2} \cdot hr^{-1}$의 범위로 나타났다. 잔디밭에서 지온의 공간적인 분포가 이산화탄소 플럭스보다 균질한 것으로 나타났다.

3. 잔디밭의 9개 관측 지점별 지온과 이산화탄소 플럭스의 상관계수는 0.81~0.92의 범위로서 상관성이 높았으며, 본 연구지역과 유사한 환경에서는 지온 자료만을 이용한 이산화탄소 플럭스의 정량적인 추정이 가능할 것으로 판단된다.

4. 잔디밭의 9개 관측 지점별로 추정된 지온에 따른 이산화탄소 플럭스의 지수함수는 결정계수가 0.6792~0.8353, 온도반응계수는 0.1065~0.1274의 범위로 나타났다. 지온이 0~20℃ 조건에서는 지온에 따른 이산화탄소 플럭스의 증가 경향이 선형적이고, 20~40℃ 조건에서는 지수적이었다.

5. 잔디밭의 9개 관측 지점별로 산정된 Q_{10} 값의 범위는 2.901~3.575, 잔디밭에서 관측된 전체 자료를 이용하여 산정한 Q_{10} 값은 3.374로 산정되었다. 전체 자료를 이용한 Q_{10} 값이 9개 관측 지점별 Q_{10} 값의 평균(3.186)보다 높았지만, 표준편차(0.210)를 고려한 범위 이내에는 해당하는 것으로 나타났다. 본 연구지역과 같이 공간적인 분포가 균질한 잔디밭에서는 관측 지점별 및 전체 공간에서 지온에 따른 이산화탄소 플럭스의 민감도가 유사하게 나타남을 알 수 있었다.

감사의 글

이 논문은 2016년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 기초연구사업 지원을 받아 수행되었습니다 (NRF-2016R1A6A3A11932747).

REFERENCE

Atkin, O. K., Edwards, E. J., Loveys, B. R., 2000,

Response of root respiration to changes in temperature and its relevance to global warming, New Phytologist, 147, 141-154.

Bahn, M., Knapp, M., Garajova, Z., Pfahringer, N., Cernusca, A., 2006, Root respiration in temperate mountain grasslands differing in land use, Global Change Biology, 12, 995-1006.

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.

Chen, J., Shi, W., Cao, J., 2014, Effects of grazing on ecosystem CO_2 exchange in a meadow grassland on the Tibetan plateau during the growing season, Environmental Management, DOI 10.1007/s00267-014-0390-z.

Davidson, E. 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.

Davidson, E. A., Janssens, I. A., Luo, Y., 2006, On the variability of respiration in terrestrial ecosystems: moving beyond Q_{10}, Global Change Biology, 12, 154 – 164, doi: 10.1111/j.1365-2486.2005.01065.x.

Davidson, E. A., Verchot, L. V., Cattânio, J. H., Ackerman, I. L., Carvalho, J. E. M., 2000, Effects of soil water content on soil respiration in forests and cattle pastures of eastern Amazonia, Biogeochemistry, 48, 53-69.

Fang, C., Moncrieff, J. B., 2001, The dependence of soil CO_2 efflux on temperature, Soil Biology & Biochemistry, 33, 155-165.

Feng, J., Wang, J., Song, Y., Zhu, B., 2018, Patterns of soil respiration and its temperature sensitivity in grassland ecosystems across China, Biogeosciences, 15, 5329-5341.

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.

Gaumont-Guay, D., Black, T. A., Griffis, T. J., Barr, A. G., Jassal, R. S., Nesic, Z., 2006, Interpreting the dependence of soil respiration on soil temperature and water content in a boreal aspen stand, Agricultural and Forest Meteorology 140, 220-235.

Jia, X., Shao, M., Wei, X., Li, X., 2014, Response of soil CO_2 efflux to water addition in temperate semiarid grassland in northern China: the importance of water availability and species composition, Biol. Fertil. Soils, 50, 839-850.

Kang, D. H., Kwon, B. H., Kim, P. G., 2010, CO_2 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 CO_2 fluxes between surface and atmosphere in foreshore, paddy field and woods sites, Journal of the Environmental Sciences, 20(8), 963-975.

Kim, P. S., Kwon, B. H., Kang, D. H., 2014, Response of soil CO_2 fluxes to seasonal variations in a grassplot, J. Environ. Sci. Int., 23(6), 1131-1142.

Liu, X., Wan, S., Su, B., Hui, d., Luo, Y., 2002, Response of soil CO_2 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, 316.

Mikan, C., Schimel, J., Doyle, A., 2002, Temperature controls of microbial respiration above and below freezing in Arctic tundra soils, Soil Biology and Biochemistry, 34, 1785-1795.

Nishimura, S., Yonemura, S., Minamikawa, K., Yagi, K., 2015, Seasonal and diurnal variations in net carbon dioxide flux throughout the year from soil in paddy field, Journal of Geophysical Research: Biogeosciences, 10.1002/2014JG002746.

Palta, J. A., Nobel, P. S., 1989, Root respiration for Agave deserti: Influence of temperature, water status and root age on daily patterns, J. Experimental Botany, 40, 181-186.

Paz-Ferreiro, J., Medina-Roldan, E., Ostle, N. J., McNamara, N. P., Bardgett, R. D., 2012, Grazing increases the temperature sensitivity of soil organic matter decomposition in a temperate grassland, Environ. Res. Lett., 7, 1-5.

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.

Reth, S., Reichstein, M., Falge, E., 2005, The effect of soil water content, soil temperature, soil pH-value and the root mass on soil CO_2 efflux - A modified model, Plant and Soil, 268, 21-33.

Rustad, L. E., Huntington, T. G., Boone, R. D., 2000, Controls on soil respiration: Implications for climate change, Biogeochemistry, 48, 1-6.

Suh, S. G., Lee, E. H., Lee, J. S., 2009, Temperature and moisture sensitivities of CO_2 efflux from lowland and alpine meadow soils, J. Plant Ecology, 2(4), 225-231.

Tang, J., Baldocchi, D. D., 2005, Spatial - temporal variation in soil respiration in an oak - grass savanna ecosystem in California and its partitioning into autotrophic and heterotrophic components, Biogeo -chemistry, 73, 183-207.

Wang, W., Fang, J., 2009, Soil respiration and human effects on global grasslands, Global and Planetary Change, 67, 20-28.

White, R., Murray, S., Rohweder, M., 2000, Pilot Analysis of Global Ecosystems (PAGE): Grassland Ecosystems. World Resources Institute, Washington, DC.

Xu, M., QI, Y., 2001, Soil-surface CO_2 efflux and its spatial and temporal variations in a young ponderosa pine plantation in northern Califonia, Global Change Biology, 7, 667-677.

Yuste, J. C., Janssens, I. A., Carrara, A., Meiresonne, L., Ceulemans, R., 2003, Interactive effects of temperature and precipitation on soil respiration in a temperate maritime pine forest, Tree Physiology, 23, 1263-1270.

Zhang, C., Li, X., Wen, H., Wan, C., Fu, H., 2015, Variation of Q_{10} values in a fenced and grazed grassland on the loess plateau, northwestern China, Soil Science and Plant Nutrition, 61, 629-640.

• 강동환, 부경대학교 환경연구소 리서치펠로우
dhkang@pknu.ac.kr
• 소윤환, 부경대학교 환경연구소 전임연구원
lunaace@naver.com
• 권병혁, 부경대학교 환경대기과학과 교수
bhkwon@pknu.ac.kr
• 김박사, 부경대학교 지구과학연구소 전임연구원
withlord56@naver.com