

온대 해양성 기후대의 잔디밭에서 장기 관측을 통한 지온에 따른 이산화탄소 플럭스 민감도(Q₁₀)의 시공간 변동 분석

순샤오광* · 강동환*** · 박경덕** · 조원기***

*㈜한승에코엠
**지질환경연구소
***온실가스종합정보센터

Analysis of spatio-temporal variations for carbon dioxide flux sensitivity (Q₁₀) to soil temperature through long-term observations in the lawn of temperate oceanic climate zone

Sun Xiaoguang* · Dong-hwan Kang*** · Kyeong-deok Park** · Won Gi Jo***

*Hansong ecom Co. Ltd., Busna 48548, Republic of Korea

**Institute of Environmental Geosciences, Pukyong National University, Busan 48513, Republic of Korea

***National Greenhouse Gas Inventory and Research Center of Korea, Chungcheongbuk-do 28116, Republic of Korea

(Received : 09 February 2025, Revised : 20 February 2025, Accepted : 20 February 2025)

요약

본 연구에서는 잔디밭과 대기 사이 이산화탄소 플럭스 민감도(Q₁₀)를 산정하여 Q₁₀ 값의 시공간적인 차이를 비교 분석하였다. 이산화탄소 플럭스와 지온은 잔디밭 내 20개 지점에서 3년(2012년 6월 ~ 2015년 5월) 동안 24절기를 기준으로 71회 관측되었다. 본 연구 지역은 4계절이 뚜렷한 온대 해양성 기후대로서 이산화탄소 플럭스가 여름에는 높고 겨울에는 낮은 전형적인 계절 특성을 보였으며, 잔디밭에서의 탄소 방출량은 생장기(5~9월)가 비생장기(10~4월)에 비해 4배 이상 높았다. 연간 Q₁₀ 값은 20% 이상의 차이를 보였으며, 연간 지온의 범위가 좁을수록(최고 지온이 낮을수록) 연간 Q₁₀ 값이 더욱 높았으며, 지온이 35°C 이상인 조건에서는 지온이 상승할수록 이산화탄소 플럭스가 감소하는 경향을 보였다. 지온 구간별 Q₁₀ 값은 지온이 0~20°C 구간에서 가장 높았으며, 본 연구 지역에서는 지온이 낮을수록 동일한 지온 상승에 따른 대기로의 이산화탄소 방출량이 더욱 많아짐을 알 수 있었다.

핵심용어 : 잔디밭, 이산화탄소 플럭스 민감도, 지온, 계절 변동, 장기 관측

Abstract

In this study, we estimated the carbon dioxide flux sensitivity (Q₁₀) between the lawn and the atmosphere and analyzed the spatio-temporal variations in Q₁₀ values. Carbon dioxide flux and soil temperature were observed 71 times based on 24 solar terms at 20 locations in the lawn for 3 years (June 2012 to May 2015). The study area is a temperate oceanic climate zone with four seasons, and carbon dioxide flux showed typical seasonal characteristics of high in summer and low in winter. Carbon emissions from the lawn were more than four times higher during the growing period (May to September) than during the non-growing period (October to April). The annual Q₁₀ values showed a difference of more than 20%, and the annual Q₁₀ values were higher when the annual soil temperature range was smaller (the lower the maximum temperature), and when the soil temperature was 35°C or higher, the carbon dioxide flux tended to decrease as the soil temperature increased. The Q₁₀ value by soil temperature interval was highest in the 0 to 20°C soil temperature range, and it was found that in this study area, the lower the soil temperature interval, the greater the amount of carbon dioxide emitted into the atmosphere for the same increase in soil temperature.

Key words : Lawn, Carbon dioxide flux sensitivity (Q₁₀), Soil temperature, Seasonal variation, Long-term observation

*Dong-hwan Kang, Institute of Environmental Geosciences, Pukyong National University, Busan 48513, Republic of Korea
E-mail : dhkang@pknu.ac.kr

• Sun Xiaoguang Hansong ecom Co. Ltd., Busna 48548, Republic of Korea
• Dong-hwan Kang Institute of Environmental Geosciences, Pukyong National University, Busan 48513, Republic of Korea
• Kyeong-deok Park Institute of Environmental Geosciences, Pukyong National University, Busan 48513, Republic of Korea
• Won Gi Jo National Greenhouse Gas Inventory and Research Center of Korea, Chungcheongbuk-do 28116, Republic of Korea



This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

1. 서론

토양 호흡(soil respiration)은 식물 뿌리, 토양미생물, 동물 등에 의해 발생하며, 육상에서 대기 중 이산화탄소를 방출하는 주된 원인이다. 전 지구적인 토양 호흡량(global annual soil respiration flux)은 68~98 PgC/yr 정도로 추정되고 있으며 기후변화로 인한 불확실성이 높은 편이다(Jian et al., 2018). 지구상의 초원(grasslands)은 영구 동토 지역(permanent ice cover)을 제외한 육지 면적의 40% 정도를 차지하고 있으므로 초원 생태계에서의 이산화탄소 발생원과 흡수원의 면적과 분포에 대한 추정값의 정확성을 높이는 연구가 수행되어야 한다(Wang et al., 2009).

토양의 탄소 저장은 대기 중 이산화탄소가 식물의 광합성(photosynthesis)에 의해 토양에 저장되는 것이며, 대기로의 방출은 식물의 자가호흡(autotrophic respiration), 식물의 뿌리 호흡(root respiration), 토양미생물의 호흡(microbial respiration), 토양유기물(SOM: soil organic matter)의 산화/분해로 인해 발생한다(Boone et al., 1998; Atkin et al., 2000; Maier et al., 2000; Pregitzer et al., 2000; Pregitzer, 2003). 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 기후, 식생의 종류와 밀도, 토양의 이화학적 성분 등이 있다. 식생의 종류와 밀도는 지상 생물량(aboveground biomass)과 잎면적지수(leaf area index)와 같은 식생의 생물계절학적인 변화(phenological change), 광합성 유효복사(photosynthetic active radiation), 대기와 토양의 온도, 강수량 등에 의해 지배적인 영향을 받는다(Raich et al., 1992; Davidson et al., 1998; Davidson et al., 2000; Rustad et al., 2000; 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).

초원(grassland)에서 온도와 토양 함수비에 따른 이산화탄소 플럭스의 민감도(Q₁₀) 연구는 미국, 유럽, 중국 등에서 다양한 방법으로 수행되었다. Liu et al. (2002)은 미국의 툴그래스(tallgrass) 대초원 지역에서 가뭄(drought) 시기 동안에 토양 함수비와 이산화탄소 방출량의 관계를 연구하였다. Bahn et al. (2006)은 유럽 3개국(오스트리아, 독일, 체코)의 11개 목초지에서 토지 관리와 토지 이용의 변화에 따른 뿌리 호흡률을 평가하여 뿌리 직경이 증가할수록 호흡률과 Q₁₀ 값이 감소함을 규명하였다. Paz-Ferreiro et al. (2012)은 영국의 온난한 기후에 해당하는 잉글버러(Ingleborough) 자연보호구역의 방목지(grazing)에서 방목에 의한 토양유기물 분해 효과를 고려하여 온도에 따른 토양 호흡률의 민감도를 분석하였다. 아시아 지역에서는 중국의 초원 지역에서 이산화탄소 플럭스의 민감도(Q₁₀)에 관한 연구가 다양하게 수행되었다. Wang et al. (2009)은 전 세계의 목초지에서 토양 호흡(뿌리 호흡의 기여를 포함)에 의한 연간 이산화탄소 방출량에 대한 민감도를 정리하고 분석하였다. Suh et al. (2009)은 동아시아의 온난한

기후에 해당하는 2개 지역(중국의 고산 초원과 일본의 저지대 초원)에서 온도와 토양 함수비에 따른 이산화탄소 플럭스를 관측하여 Q₁₀ 값을 산정하고, 이를 통해 저지대 초원보다 고산 초원에서 온도에 따른 이산화탄소 플럭스의 민감도가 높음을 확인하였다. Jia et al. (2014)은 중국의 반건조(semiarid) 온난한 기후에 해당하는 황토 고원(loess plateau) 지역에서 식물 종별 온도에 따른 이산화탄소 플럭스의 민감도(Q₁₀)에 대한 계절 변화를 정량적으로 산출하였다. Chen et al. (2014)은 중국의 티베트고원 목초지에서 온도에 대한 생태계 호흡률(ecosystem respiration)의 민감도(Q₁₀)는 식물이 성장하는 시기 동안 증가하는 경향을 보이고 생태계 호흡률의 일/계절 변화의 주요인은 온도와 토양 함수비라는 것을 확인하였다. Zhang et al. (2015)은 중국의 황토 고원 지역에서 2가지 조건의 초원(fenced and grazed grassland)에서 토양 호흡률(soil respiration)과 미생물 호흡률(microbial respiration)을 관측하여 Q₁₀ 값을 산정하고, 지온에 따른 토양 호흡률과 미생물 호흡률의 민감도를 분석하였다. Feng et al. (2018)은 중국의 54개 초원(grassland)에서 관측된 토양 호흡률 자료를 이용하여 171개의 Q₁₀ 값을 수집/정리하였으며, 목초지의 종류와 토양의 측정 깊이가 Q₁₀ 값에 미치는 영향성을 정량적으로 규명하였다.

국내에서는 초원 지역에서의 이산화탄소 플럭스 관측 및 Q₁₀ 산정 연구는 미흡한 수준이지만, 최근에 부경대학교 내 잔디밭(9지점)에서 1년(2010년 3월부터 2011년 3월) 동안 관측된 자료를 이용하여 지온에 따른 이산화탄소 플럭스의 민감도(Q₁₀)를 산정하여 관측 지점별 Q₁₀ 값을 비교 분석하였다(Kang et al., 2019). 국내에서도 다양한 환경의 초원에서 Q₁₀ 산정을 통한 지온에 따른 이산화탄소 플럭스의 민감도를 분석하는 연구가 필요하며, 또한 전 세계적으로도 동일한 초원 지역에서 이산화탄소 플럭스의 장기적이고 주기적인(1회 이상/월) 관측을 통한 초원 지역에서 이산화탄소 플럭스의 계절 및 연간 변화와 공간적인 불균질성을 규명하기 위한 연구가 필요하다.

본 연구에서는 3년(2012년 6월 ~ 2015년 5월) 동안 24절기(solar term)에 해당하는 시기에 부경대학교 환경연구동 앞 잔디밭에서 지온과 이산화탄소 플럭스를 관측하였다. 지온에 따른 이산화탄소 플럭스의 지수함수를 추정하여 Q₁₀ 값을 산정하고, 잔디밭에서 지온에 따른 이산화탄소 플럭스의 민감도를 공간(20지점)별 및 시간(연간/월별)별로 비교하여 분석하였다. 또한, 지온 구간별(0~10°C, 0~15°C, 0~20°C, 0~25°C, 0~30°C, 0~35°C, 0~40°C, 0~45°C) Q₁₀ 값을 산정하여 지온 구간에 따른 이산화탄소 플럭스의 민감도를 분석하였다.

2. 재료와 방법

본 연구는 부경대학교 내 잔디밭에서 수행하였으며, 잔디밭은 3개 지역이며 전체 면적은 약 7500 m² 정도이다(Fig. 1). 봄에는 잔디가 자라나고 여름에 잔디의 생장이 가장 활발하며 겨울에는 고사하는 과정이 해마다 반복되고 있다. 잔디밭의 지

온과 이산화탄소 플럭스는 20개 지점에서 24절기 전후로 무강우 시에 동일 지점에서 71회 반복 관측하였으며, 잔디밭과 대기 사이의 이산화탄소 플럭스 관측은 오후 2~4시 정도에 수행하였다.

본 연구에 이용된 잔디밭의 이산화탄소 플럭스 및 지온 측정 기기는 폐쇄형 역학 챔버 시스템(EGM-4)이며, 지온은 지온 측정기(STP-1)로 지표면 하부 5 cm 정도에서 직접 측정하고 이산화탄소 플럭스는 잔디밭 상부에 설치한 챔버 내에서 일정 시간에 따라 측정된 이산화탄소 농도 자료를 식 (1)에 대입하여 산정한다(Field 등, 1989).

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

여기서, F 는 이산화탄소 플럭스[$\text{ML}^{-2}\text{T}^{-1}$], V 는 챔버의 체적[L^3], Δt 는 이산화탄소 농도 측정 시간 간격[T], A 는 챔버로 덮힌 잔디밭의 표면적[L^2], c_i 는 측정 시작 시점의 챔버 내 이산화탄소 농도[ML^{-3}], c_t 는 Δt 시간 경과 후의 챔버 내 이산화탄소 농도[ML^{-3}] 이다.

본 연구에서는 잔디밭에서 생장기(growing period)와 비생장기(non-growing period)의 탄소 방출량을 산정하고 비교하였다. 잔디밭의 지온과 플럭스를 바탕으로 하여 생장기는 5월부터 9월까지이고 비생장기는 10월부터 다음 해 4월까지로 정하였다. 탄소 방출량은 이산화탄소 플럭스를 이용하여 이산화탄소 분자량과 탄소 원자량의 비(12/44)와 누적 시간(연간, 생장기, 비생장기)에 해당하는 값으로 산정하였다.

생태계에서 이산화탄소의 방출은 생화학적(biochemical) 및 생리학적(physiological) 과정에 의해 발생하고, 이러한 과정은 온도에 지배적인 영향을 받는다(Luo et al., 2006). 초지에서 온도에 따른 이산화탄소 방출량의 변화는 지수함수 형태로 나타나며(Lloyd et al., 1994; Fang et al., 2001), 식물의 뿌리 호흡과 토양미생물 호흡에 지배적인 영향을 받는다(Atkin et al., 2000). 저온에서는 지온이 상승할수록 이산화탄소의 방출

량이 증가하다가 45~50°C 정도에 이르면 반대로 감소하는 경향을 보이고, 이는 고온에서 효소(enzymes)의 활동력이 저하되어 이산화탄소 방출량이 감소하기 때문이다(Palta et al., 1989). 온도에 대한 호흡률(이하 “이산화탄소 플럭스”로 표기)의 화학 반응을 설명하기 위한 간단한 실험적인 지수 모델은 식 (2)에 제시하였다.

$$R = \alpha \exp(bT) \quad (2)$$

여기서, R 은 이산화탄소 플럭스[$\text{ML}^{-2}\text{T}^{-1}$], α 는 온도가 0°C 일 때의 이산화탄소 플럭스[$\text{ML}^{-2}\text{T}^{-1}$], b 는 온도반응계수(temperature response coefficient), T 는 온도[°C]이다.

온도에 대한 이산화탄소 플럭스의 민감도는 Q_{10} (온도가 10°C 증가할 때 이산화탄소 플럭스의 변화량)으로 정의되고 식 (3)과 같다(Luo et al., 2006).

$$Q_{10} = \frac{R_{T_0+10}}{R_{T_0}} \quad (3)$$

여기서, R_{T_0} 와 R_{T_0+10} 은 각각 온도 T_0 와 $T_0+10^\circ\text{C}$ 에 해당하는 이산화탄소 플럭스[$\text{ML}^{-2}\text{T}^{-1}$]이다. 기온과 지온에 대한 이산화탄소 플럭스 지수함수가 적합하게 추정되면, Q_{10} 값은 식 (2)에서 구한 온도반응계수(b)를 식 (4)에 대입하여 산정한다(Jia et al., 2014; Zhang et al., 2015; Feng et al., 2018; Kang et al., 2019).

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

3. 결과

잔디밭에서 71회 관측된 시기별 지온과 이산화탄소 플럭스의 상자 수염 그림을 작성하였다(Fig. 2). 지온과 이산화탄소 플럭스는 여름에 높고 겨울에 낮은 계절 변동이 뚜렷하게 나

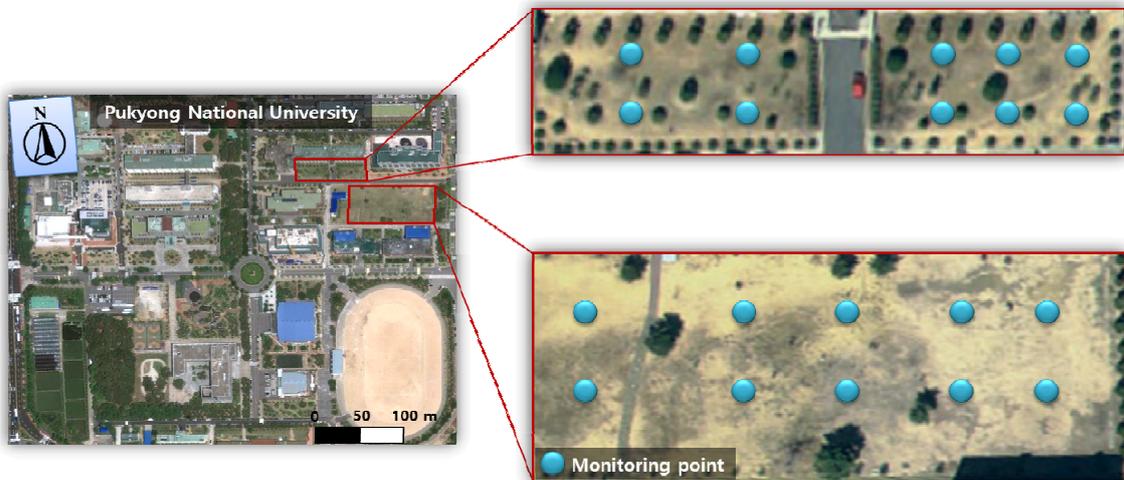


Fig. 1. Location map of monitoring points in the lawn.

타나고, 동일한 관측 시기의 잔디밭에서 이산화탄소 플럭스의 공간적인 편차는 겨울보다 여름이 매우 높았다. 잔디밭의 지온과 이산화탄소 플럭스의 기술통계량을 1년 단위로 산정하였다(Table 1). 잔디밭에서 3년 동안의 연평균 지온은 20.5~21.5°C로서 유사하였으며, 연평균 이산화탄소 플럭스는 609.2~711.8 $\text{mgCO}_2\text{m}^{-2}\text{h}^{-1}$ 로서 차이를 보였다. 잔디밭에서 연평균 지온의 차는 1°C 이하(5% 이하)이었으며, 연평균 이산화탄소 플럭스의 차는 100 $\text{mgCO}_2\text{m}^{-2}\text{h}^{-1}$ 이상(10% 이상)으로 나타났다. 변동계수는 연평균 지온에서는 0.4~0.5이고, 연평균 이산화탄소 플럭스에서는 0.8~0.9로서 지온에 비해 이산화탄소 플럭스가 2배 정도 높았다. 잔디밭에서 지온과 이산화탄소 플럭스의 연간 상대적인 변화는 이산화탄소 플럭스가 지온보다 높게 나타났으며, 이는 이산화탄소 플럭스의 시간적인 불균일성(heterogeneity)이 높음을 의미한다.

잔디밭에서 관측된 자료(14~16시)를 이용하여 단위 면적당 연간 탄소 방출량을 산정하였다(Table 2). 3년 동안 탄소의 연간 누적방출량은 1456~1701 $\text{mgCO}_2\text{-Cm}^{-2}$ 범위로서 연간 편차는 20% 이내로 나타났다. 생장기(4~9월)의 탄소 방출량은 1196~1381 $\text{mgCO}_2\text{-Cm}^{-2}$, 비생장기(10~3월)의 탄소 방출량은 259~320 $\text{mgCO}_2\text{-Cm}^{-2}$ 범위로 나타났다. 잔디밭에서의 탄소 방출량은 생장기가 비생장기에 비해 4.18~4.62배 정도 높았으며, 비생장기에 비해 생장기 동안 잔디밭에서 뿌리 호흡과 미생물 호흡이 매우 활발하게 발생했음을 의미한다(Frank et al., 2002; Wang et al., 2015; Feng et al., 2018; Kang et al., 2019). Frank et al. (2002)의 연구에서는 가축을 방목하는 초원(grazed mixed-grass prairie) 지역에서 일일 탄소 방출량($\text{gCO}_2\text{-Cm}^{-2}\text{d}^{-1}$)이 생장기가 비생장기보다 8배 정도 높았으며, 비생장기에는 탄소 방출량이 평균 0.5 $\text{gCO}_2\text{-Cm}^{-2}\text{d}^{-1}$ 정도로 급격하게 감소하였다. 중국 전역의 54개 목초지(temperate typical steppe, temperate meadow steppe,

Alpine grassland, warm-tropical grassland)에서 생장기(growing season)와 비생장기(non-growing season)의 이산화탄소 플럭스를 산정한 결과, 연간 탄소 방출량을 기준으로 생장기에는 76.2~86.8% 정도이고 비생장기에는 13.2~23.8% 정도로 발생하여 생장기가 비생장기의 3.2~6.6배 정도 많았다. 본 연구의 결과(생장기/비생장기 = 4.18~4.62)는 중국 전역에서 조사된 생장기와 비생장기의 탄소 방출량 차이의 범위에 해당한다(Feng et al., 2018).

잔디밭의 20개 관측 지점별 이산화탄소 플럭스와 지온의 상자 수염 그림을 작성하였다(Fig. 3). 잔디밭에서 이산화탄소 플럭스의 중앙값은 500 $\text{mgCO}_2\text{m}^{-2}\text{h}^{-1}$ 정도로 나타났으며, 이산화탄소 플럭스의 최솟값은 0 $\text{mgCO}_2\text{m}^{-2}\text{h}^{-1}$ 이고 최댓값은 약 2000~4000 $\text{mgCO}_2\text{m}^{-2}\text{h}^{-1}$ 의 범위로서 공간적인 불균질성이 높았다. 잔디밭에서 지온의 중앙값은 20~25°C의 범위이고, 최솟값은 0~5°C이고 최댓값은 40°C 이상으로 나타났다.

4. 토 의

잔디밭에서 20개 관측 지점별 이산화탄소 플럭스와 지온의 상관계수를 산정하였다(Table 3). 잔디밭에서 관측 지점별 이산화탄소 플럭스와 지온의 상관계수는 0.71~0.88의 범위이고 그 평균은 0.79 정도로서 이산화탄소 플럭스와 지온의 상관성은 높았다. 본 연구 지역인 잔디밭에서도 이산화탄소 플럭스는 지온에 의해 지배적인 영향을 받고 있음을 알 수 있었다(Wang et al., 2009, Kim et al., 2014; Kang et al., 2019).

잔디밭에서 3년 동안 관측된 모든 자료를 이용하여 20개 관측 지점별 지온에 따른 이산화탄소 플럭스의 지수함수를 추정하였다(Fig. 4). 관측 지점별 지온에 따른 이산화탄소 플럭스 지수함수의 결정계수는 0.7351~0.8565 범위로서 높고, 추정된 모든 지수함수에서 지온 0~20°C 구간에서는 이산화탄소

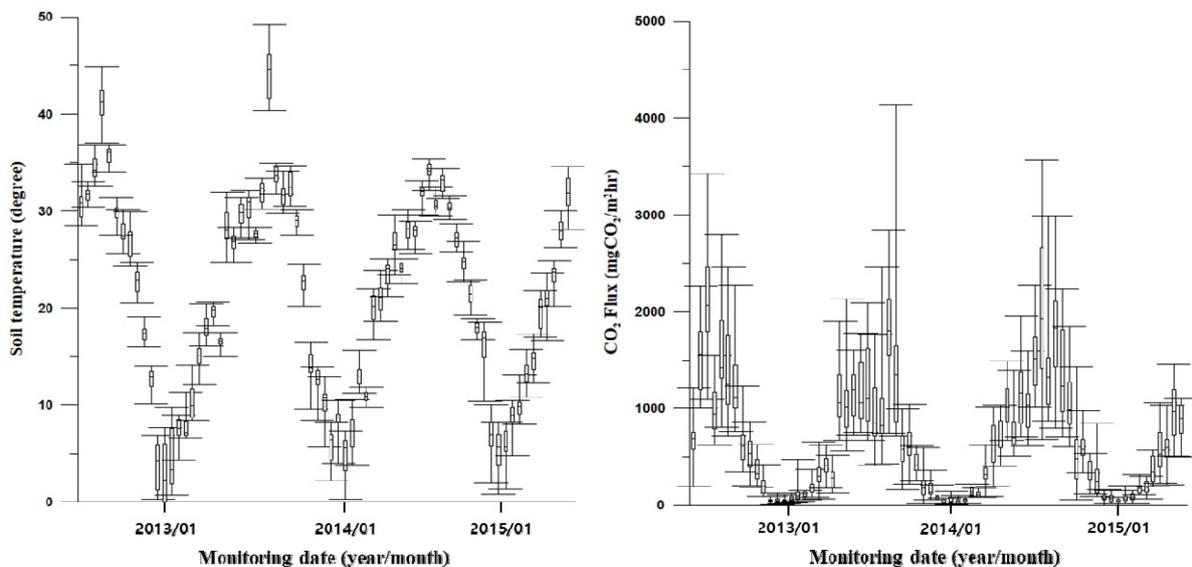


Fig. 2. Box-whisker plots of soil temperature (left) and carbon dioxide flux (right) at the monitoring time.

Table 1. Descriptive statistics of soil temperature and carbon dioxide flux during one year

Monitoring period	June 2012 ~ May 2013		June 2013 ~ May 2014		June 2014 ~ May 2015	
Component	Soil Temp. (°C)	CO ₂ flux (mgCO ₂ m ⁻² h ⁻¹)	Soil Temp. (°C)	CO ₂ flux (mgCO ₂ m ⁻² h ⁻¹)	Soil Temp. (°C)	CO ₂ flux (mgCO ₂ m ⁻² h ⁻¹)
Average	20.5	652.6	21.5	609.2	21.3	711.8
Minimum	2.9	45.1	4.8	35.6	5.2	43.5
Maximum	41.1	2097.0	44.3	1829.8	34.1	2035.1
Standard deviation	11.2	602.8	10.7	512.9	9.4	594.5
Coefficient of variation	0.5	0.9	0.5	0.8	0.4	0.8

Table 2. Soil carbon flux per unit area during one year, growing and non-growing seasons (unit: mgCO₂-Cm⁻²)

Monitoring period	June 2012~May 2013	June 2013~May 2014	June 2014~May 2015
Annual	1559	1456	1701
Growing period	1258	1196	1381
Non-growing period	301	259	320

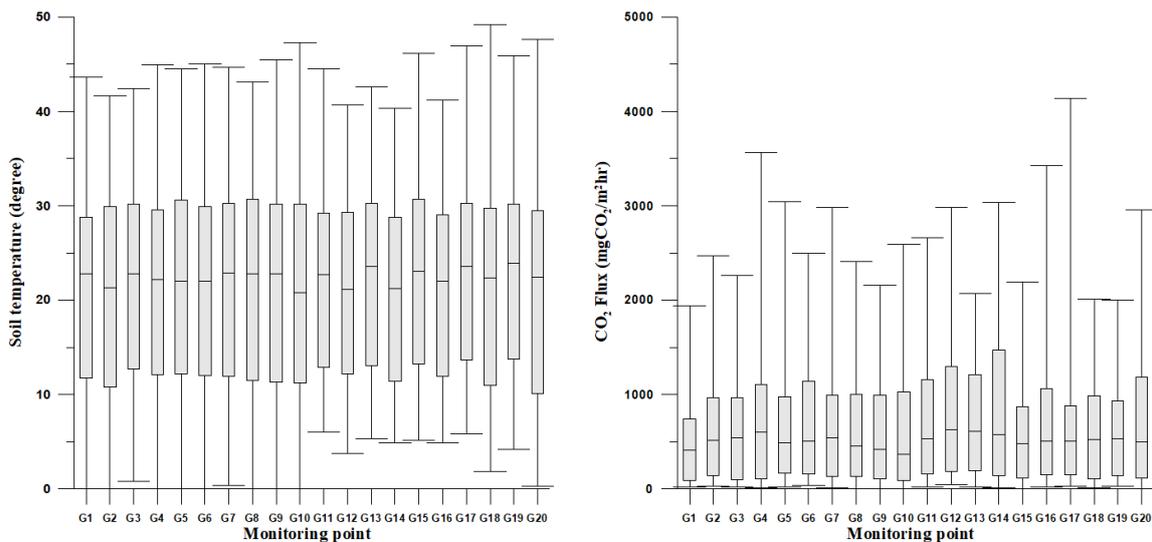


Fig. 3. Box-whisker plots of soil temperature (left) and carbon dioxide flux (right) at the monitoring point.

플럭스가 선형적으로 증가하고 20~35°C 구간에서는 지수적으로 급격하게 증가하고 35°C 이상에서는 이산화탄소 플럭스가 감소하는 경향을 보인다. 기존의 연구에서도 지온이 40°C 이하 조건에서는 지온이 상승할수록 이산화탄소 플럭스도 증가하는 경향을 나타내고(Palta et al., 1989; Atkin et al., 2000), 지온이 40°C 이상 조건에서는 이산화탄소 플럭스가 증가하지 않거나 감소하는 것으로 나타났다.

잔디밭의 관측 지점별로 추정된 지수함수에서 온도반응계수 (temperature response coefficient)를 구한 후, 식 (4)에 대입하여 관측 지점별 Q₁₀ 값을 산정하였다(Table 4). 잔디밭의 관측 지점별 온도반응계수는 0.0992~0.1256 정도이었으며, 산정된 Q₁₀ 값은 2.70~3.51 범위이고 그 평균과 표준편차는 각각 3.16과 0.24로 산정되었다. Feng et al. (2018)은 중국 전역

의 목초지에서 이산화탄소 방출량(soil respiration)의 영향 인자(기온, 지온, 강수량, 토양 함수비, 유기물 함량, biomass, 토양 pH 등)에 관해 연구하였다. 중국 전역의 목초지에서 산정된 Q₁₀ 값(171개)의 83%는 1.5~3.8 범위이고, 지표면하 5 cm 심도에서의 지온에 따른 Q₁₀ 값은 1.39~8.13 범위이고 평균은 2.80 정도이었다. 본 연구에서 산정된 Q₁₀ 값의 범위는 Feng et al. (2018)의 연구 결과에 해당하고 평균(3.16)은 본 연구의 결과가 조금 높았으며, Feng et al. (2018)의 연구 결과에서 Q₁₀ 값의 범위가 본 연구에 비해 넓은 것은 다양한 목초지 환경(고산 지역 및 열대 기후 등)에서 높은 Q₁₀ 값이 나타났기 때문이다. Wang et al. (2009)에 의하면 전 세계 목초지에서 온대 및 열대 지역에서의 Q₁₀ 값은 0.9~4.6 범위이고, 그 평균은 2.13 정도(온대 지역 2.23, 열대 지역 1.94)인 것으로

보고되었다. 본 연구 지역의 잔디밭에서 평균 Q₁₀ 값이 전 세계 목초지의 평균 Q₁₀ 값보다 1.5배 정도 높았으며, 본 연구 지역은 4계절이 뚜렷한 기후로서 온대 지역 혹은 열대 지역보다 지온의 범위(0~40°C 정도)가 넓어서 기온 변화에 의한 뿌리 및 미생물 호흡(respiration)에 의한 이산화탄소 방출량의 변동이 크게 나타난 것으로 판단된다.

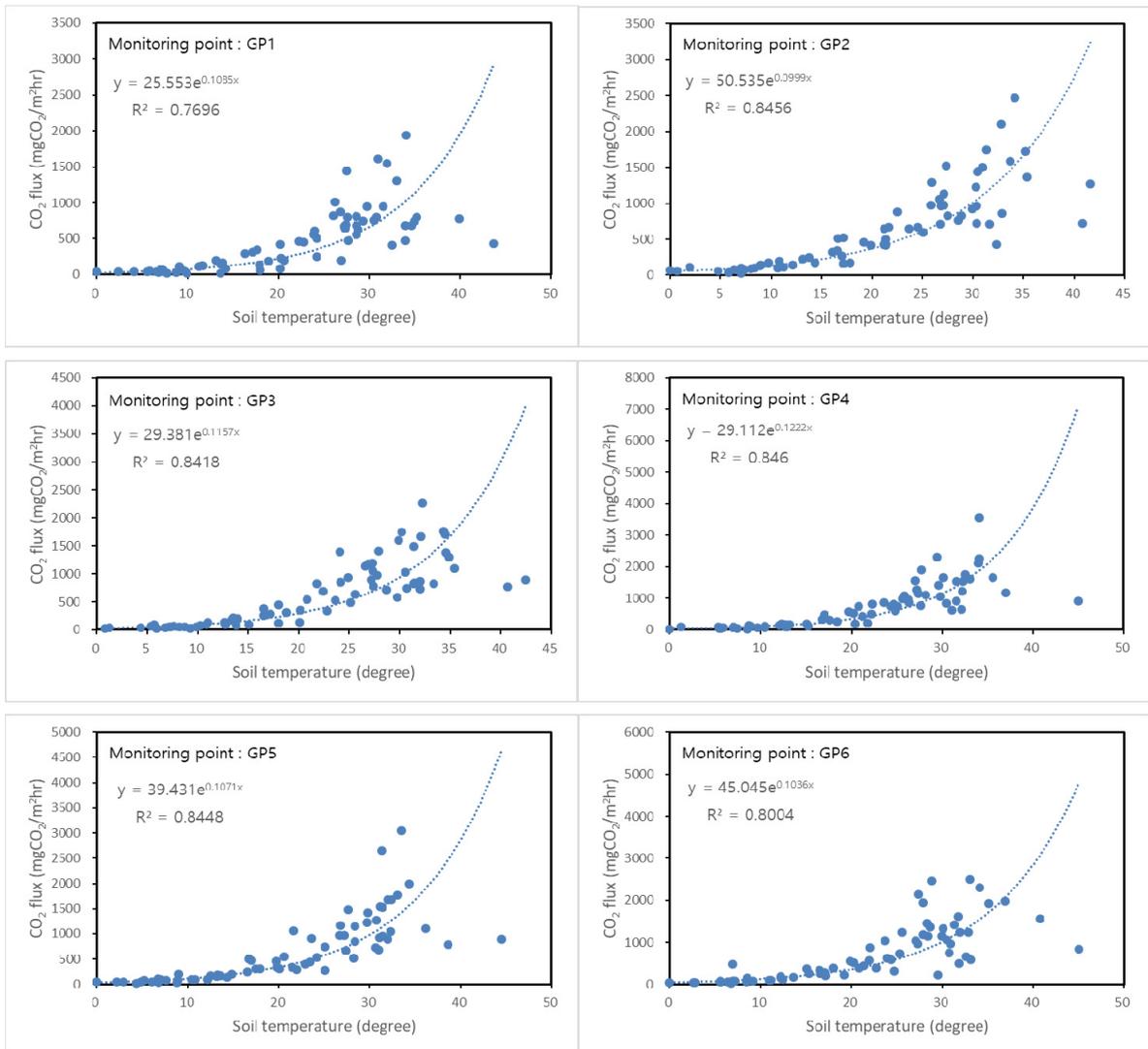
잔디밭에서 3년 동안 관측된 자료를 1년 단위로 구분하여 지온에 따른 이산화탄소 플럭스 지수함수를 추정하였으며(Fig. 5), 추정된 지수함수에서 온도반응계수를 구하여 연간 Q₁₀ 값을 산정하였다(Table 5). 지온에 따른 이산화탄소 플럭스 지수

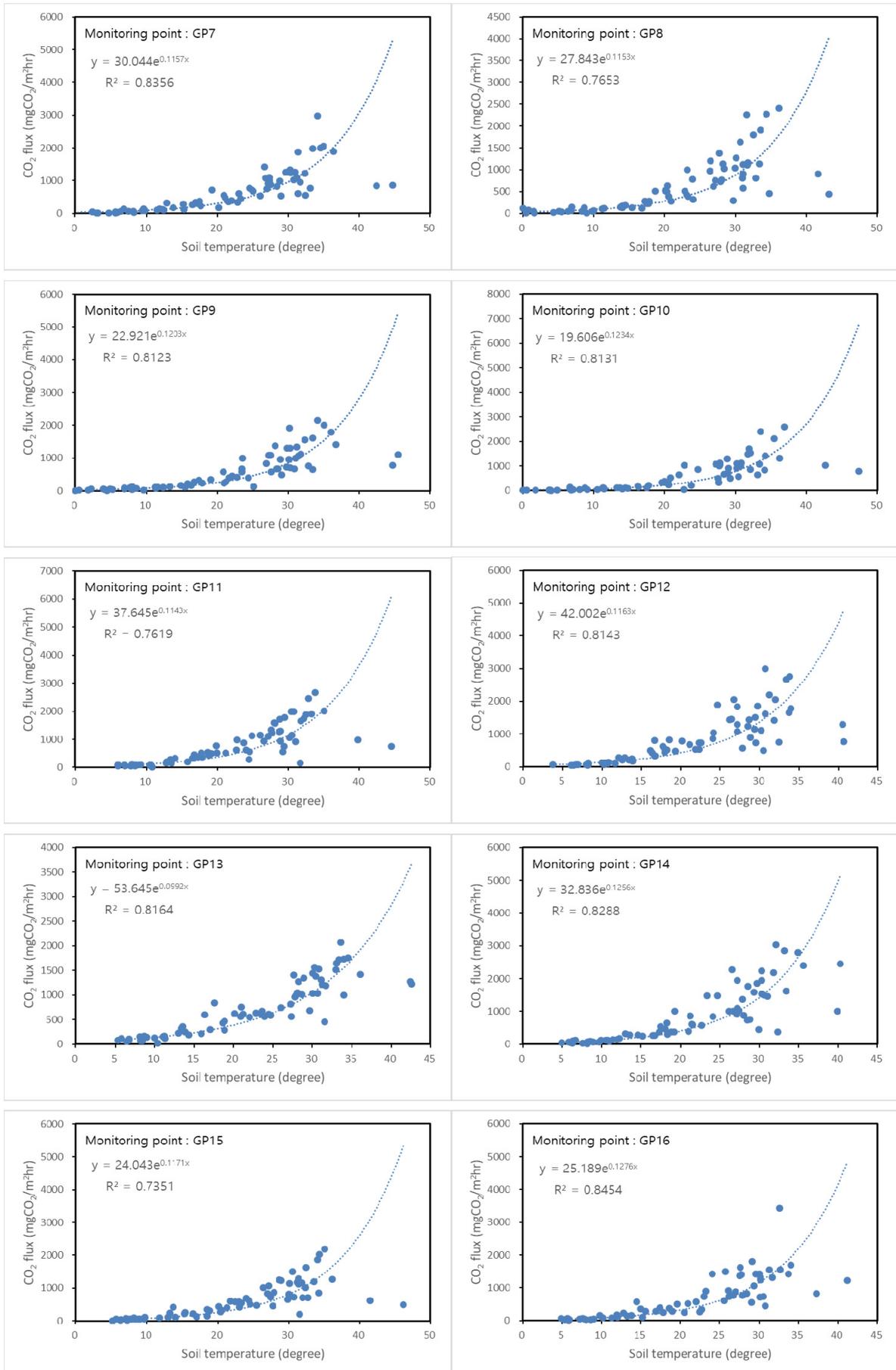
함수의 결정계수는 각각 0.9106, 0.8458, 0.9676으로 높았으며, Q₁₀ 값은 각각 2.87, 2.94, 3.47로 산정되었다. 지온의 범위가 35°C 이하인 2014년 6월 ~ 2015년 5월 기간의 Q₁₀ 값이 3.47로서 가장 높았으며, 기존의 연구에서도 목초지에서 지온이 40°C를 초과한 조건보다 지온이 40°C 이하인 조건에서 지온에 따른 이산화탄소 플럭스가 지속적으로 증가하였다 (Palta et al., 1989; Atkin et al., 2000; Kang et al., 2019). 지온에 따른 이산화탄소 플럭스가 지속적으로 증가하는 조건에서는 Q₁₀ 값이 높아지고, 지온이 상승하면서 이산화탄소 플럭스가 감소하면 Q₁₀ 값은 낮아진다. 본 연구에서도 지온이

Table 3. Correlation coefficients of soil temperature and carbon dioxide flux at each observation site

Monitoring point	GP1	GP2	GP3	GP4	GP5	GP6	GP7	GP8	GP9	GP10
Correlation coefficient	0.75	0.82	0.82	0.79	0.76	0.76	0.79	0.75	0.81	0.78
Monitoring point	GP11	GP12	GP13	GP14	GP15	GP16	GP17	GP18	GP19	GP20
Correlation coefficient	0.80	0.80	0.88	0.82	0.78	0.78	0.71	0.81	0.84	0.79

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





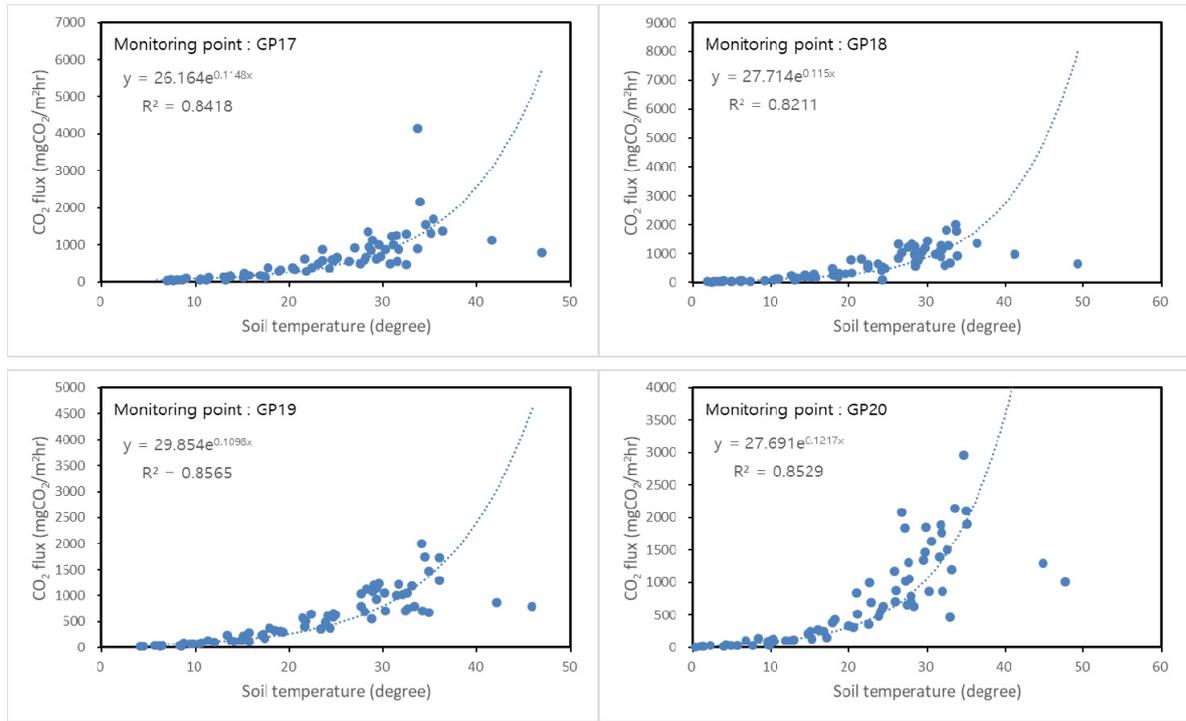


Fig. 4. Exponential functions of carbon dioxide flux according to soil temperature at the monitoring point in the lawn.

Table 4. Temperature response coefficient and Q₁₀ at each observation point

Monitoring point	Temperature response coefficient	Q ₁₀
GP1	0.1085	2.96
GP2	0.0999	2.72
GP3	0.1157	3.18
GP4	0.1222	3.39
GP5	0.1071	2.92
GP6	0.1036	2.82
GP7	0.1157	3.18
GP8	0.1153	3.17
GP9	0.1203	3.33
GP10	0.1234	3.43
GP11	0.1143	3.14
GP12	0.1163	3.20
GP13	0.0992	2.70
GP14	0.1256	3.51
GP15	0.1171	3.23
GP16	0.1276	3.58
GP17	0.1148	3.15
GP18	0.1150	3.16
GP19	0.1098	3.00
GP20	0.1217	3.38

40°C 이하인 조건에서는 지온에 따른 이산화탄소 플럭스가 지속적으로 증가하면서 Q₁₀ 값이 상대적으로 높았으며, 지온이 40°C를 초과한 조건에서는 지온에 따른 이산화탄소 플럭스가

감소하여 Q₁₀ 값이 낮게 나타났다(Fig. 5 and Table 5). 본 연구는 동일한 지역에서 연도별로 산정한 Q₁₀ 값을 비교한 결과 이므로, 본 연구를 통해 지온에 따른 이산화탄소 플럭스의 민감도(Q₁₀)는 지온의 범위에 지배적인 영향을 받음을 알 수 있었다.

관측 시기별(71회) 잔디밭 전체의 평균 지온과 이산화탄소 플럭스를 계산한 후, 지온 구간(0~10°C, 0~15°C, 0~20°C, 0~25°C, 0~30°C, 0~35°C, 0~40°C, 0~45°C)에 따른 이산화탄소 플럭스 지수함수를 추정하였다(Fig. 6). 또한, 추정된 지수함수에서 온도반응계수를 구하여 지온 구간별 Q₁₀ 값을 산정하였다(Table 6). 지온에 따른 이산화탄소 플럭스 지수함수의 결정계수는 지온 구간이 0~10°C인 조건을 제외하고는 모두 0.83 이상으로서 매우 높았으며, 지온 구간별 Q₁₀ 값은 지온 구간이 0~20°C인 조건에서 4.39로서 가장 높았다. 지온이 0~45°C인 구간부터 0~20°C인 구간까지는 Q₁₀ 값이 3.05에서 4.39까지 증가하였으며, 지온이 0~20°C인 구간부터 0~10°C인 구간까지는 Q₁₀ 값이 4.39에서 2.58까지 감소하였다(Table 6). 본 연구 지역에서는 지온 구간이 0~20°C인 조건에서 지온이 상승할수록 이산화탄소 플럭스의 증가량이 가장 많았음을 의미한다.

Suh et al. (2009)의 연구에 의하면, 중국의 고지대(alpine meadow, 해발고도 200 m, 기온 -15~10°C)와 일본의 저지대(lowland grasslands, 해발고도 27 m, 기온 0~30°C)에서 지온(지표면 하부 5 cm)에 따른 이산화탄소 플럭스의 민감도(Q₁₀)를 분석한 결과, 고지대에서의 Q₁₀ 값은 10 이상이고 저지대에서의 Q₁₀ 값은 5 정도로서 기온이 낮은 고지대에서 지온에 따른 이산화탄소 플럭스의 민감도가 높았다. 중국 전역의 초지

(grassland)에서 조사된 지온과 이산화탄소 플럭스 자료(171지점)를 수집하여 분석한 결과에서도 가장 높은 Q₁₀ 값은 고산 지역의 초지에서 나타났다(Feng et al., 2018). 기존 연구 결과를 통해, 지온이 낮은 지역일수록 지온 상승에 따른 이산화탄소 플럭스의 증가량이 많아짐을 알 수 있었다. 본 연구에서는 동일 지역에서 수행되었지만, 지온 구간별로 Q₁₀ 값을 산정한 결과에서 지온이 낮아질수록 이산화탄소 플럭스의 민감도는 높아짐을 확인하였다. 본 연구와 기존 연구의 결과를 통해, 목초지의 지온이 낮은 환경일수록 지온 상승에 따른 목초지에서 대기로의 이산화탄소 방출량이 더욱 많아짐을 알 수 있다.

4. 결론

부경대학교 내 잔디밭에서도 관측 지점별 이산화탄소 플럭스의 최댓값이 2000~4000 mgCO₂m⁻²h⁻¹의 범위로서 공간적인 불균질성은 높았다. 본 연구 지역은 4계절이 뚜렷한 온대 해양성

기후대로서 이산화탄소 플럭스가 여름에는 2000 mgCO₂m⁻²h⁻¹ 이상으로 매우 높고 겨울에는 0 mgCO₂m⁻²h⁻¹에 가까운 값을 보였으며, 탄소 방출량은 생장기가 비생장기보다 4배 이상 높았다.

본 연구 지역 내 20개 관측 지점에서 산정된 Q₁₀ 값의 평균은 3.16이었으며, 이 값은 전 세계 목초지의 평균보다는 1.5배 정도 높았다. 본 연구 지역이 4계절이 뚜렷한 기후대로서 지온의 범위가 넓어서 지온에 따른 이산화탄소 플럭스의 민감도가 높게 나타난 것으로 판단된다.

연간 Q₁₀ 값은 2.87~3.47 범위로서 연간 Q₁₀ 값의 차는 20% 이상이었으며, 연간 Q₁₀ 값이 최고인 시기는 지온이 35°C 이하인 조건이었다. 본 연구 지역에서 지온이 35°C 이상인 조건에서는 지온이 상승할수록 이산화탄소 플럭스가 감소하는 경향을 보였다.

지온 구간별 지온에 따른 이산화탄소 플럭스의 민감도를 분석한 결과, 지온이 0~20°C 구간에서의 Q₁₀ 값이 가장 높았으며

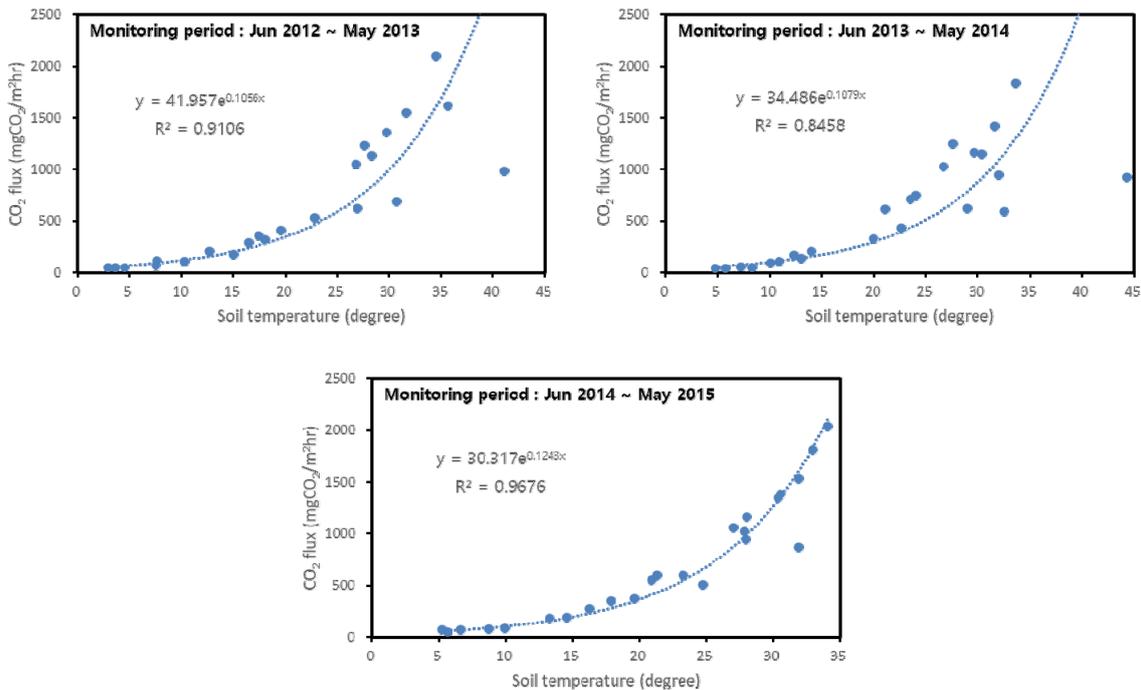


Fig. 5. Exponential functions of carbon dioxide flux as a soil temperature during one year.

Table 5. Temperature response coefficient and Q₁₀ during one year

Monitoring period	June 2012~May 2013	June 2013~May 2014	June 2014~May 2015
Temperature response coefficient	0.1056	0.1079	0.1243
Q ₁₀	2.87	2.94	3.47

Table. 6. Temperature response coefficient and Q10 by soil temperature interval

Soil temperature (°C)	0~45	0~40	0~35	0~30	0~25	0~20	0~15	0~10
Temperature response coefficient	0.111	0.123	0.123	0.133	0.140	0.148	0.147	0.095
Q ₁₀	3.05	3.37	3.41	3.77	4.06	4.39	4.36	2.58

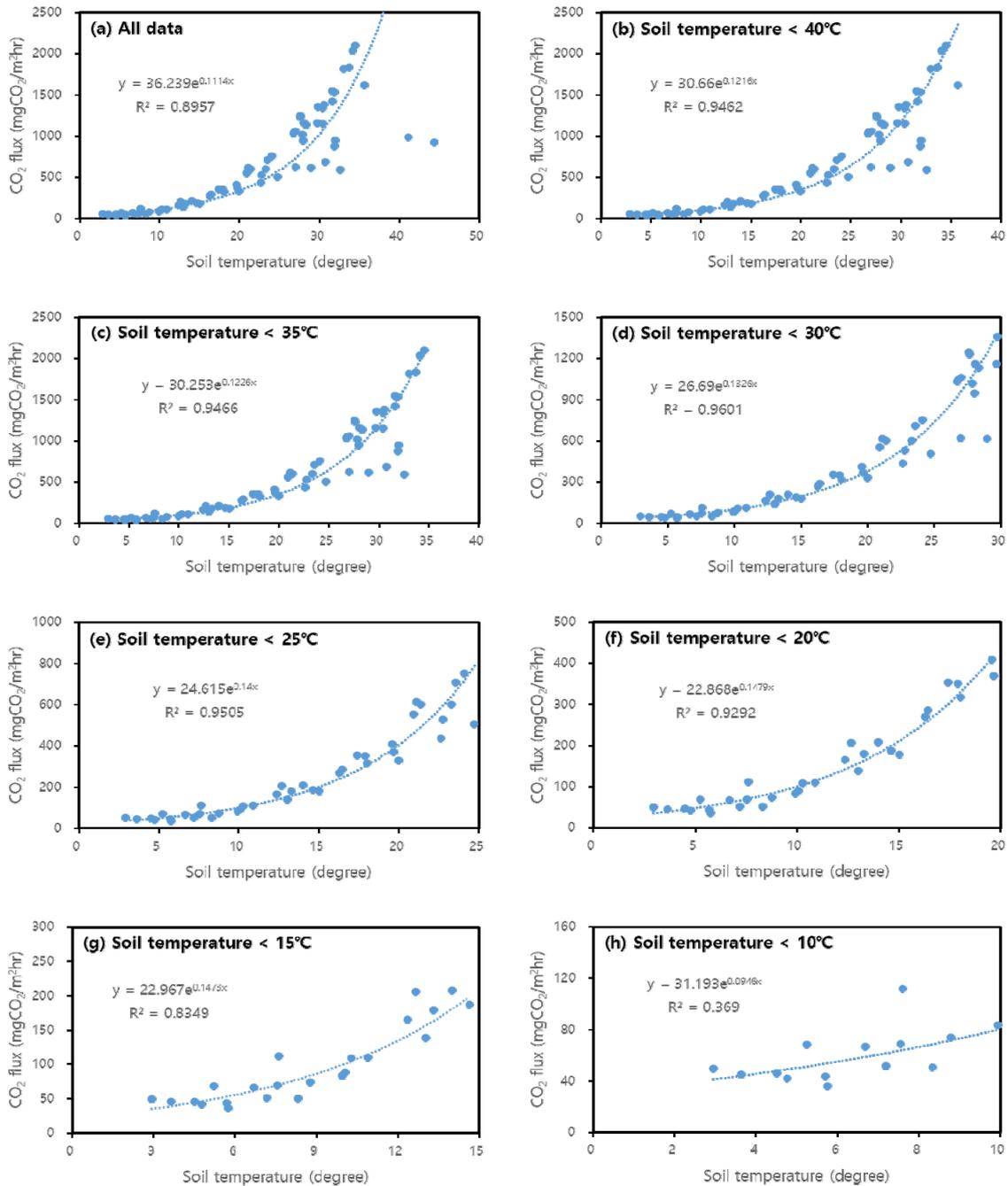


Fig. 6. Exponential function of carbon dioxide flux as a soil temperature by soil temperature interval.

지온의 범위가 20°C 이상이고 지온이 낮을수록 지온에 따른 이산화탄소 플럭스의 민감도가 높음을 알 수 있었다. 본 연구를 통해 초원에서는 지온이 낮을수록 동일한 지온 상승에 따른 대기로의 이산화탄소 방출량이 더욱 많아짐을 확인하였다.

감사의 글

본 논문은 “2021년도 교육부의 재원으로 한국기초과학지원연구원 국가연구시설장비진흥센터 사업(2021R1A6C101A415)”의 지원을 받아 수행되었습니다.

References

- 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., Pfahring, 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 CO₂ 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 Q₁₀, *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 CO₂ 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 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.
- Frank, A. B., Liebig, M. A., Hanson, J. D., 2002, Soil carbon dioxide fluxes in northern semiarid grasslands, *Soil Biology & Biochemistry*, 34, 1235–1241.
- 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 CO₂ 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.
- Jian, J., Steele, M. K., Thomas, R. Q., Day, S. D., Hodges, S. C., 2018, Constraining estimates of global soil respiration by quantifying sources of variability, *Glob. Change Biol.*, 24, 4143–4159.
- Kang, D. H., So, Y. H., Kwon, B. H., Kim, P. S., 2019, Sensitivity analysis (Q₁₀) of carbon dioxide flux with soil temperature in the grassplot, *Journal of Environmental Sciences International*, 28(9), 785–795.
- Kim, P. S., Kwon, B. H., Kang, D. H., 2014, Response of soil CO₂ 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 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, 316.
- Maier, C. A., Kress, L. W., 2000, Soil CO₂ evolution and root respiration in 11 year-old loblolly pine (*Pinus taeda*) plantations as affected by moisture and nutrient availability, *Canadian Journal of Forest Research*, 30 (3), 347–359.
- 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.
- Pregitzer, K. S., 2003, Woody plants, carbon allocation and fine roots, *New Phytologist*, 158, 421–423.
- Pregitzer, K. S., King, J. S., Burton, A. J., Brown, S. E., 2000, Response of tree fine roots to temperature, *New Phytologist*, 147, 105–115.
- 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 CO₂ 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 CO₂ 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, *Biogeochemistry* 73, 183–207.
- Wang, W., Fang, J., 2009, Soil respiration and human effects on global grasslands, *Global and Planetary Change*, 67, 20–28.
- Wang, M., Liu, X., Zhang, J., Li, X., Wang, G., Li, X., Chen, W., 2015, Soil respiration associated with plant succession at the meadow steppes in Songnen Plain, Northeast China, *J. Plant Ecology*, 8(1), 51–60.
- Xu, M., QI, Y., 2001, Soil–surface CO₂ efflux and its spatial and temporal variations in a young ponderosa pine plantation in northern California, *Global Change Biology*, 7, pp. 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 Q₁₀ values in a fenced and grazed grassland on the loess plateau, northwestern China, *Soil Science and Plant Nutrition*, 61, 629–640.