

Note

우리나라 소나무림의 토양호흡 특성: 점봉산, 남산, 지리산 사례 연구 (2009~2010)

이재호 · 유영주¹ · 이상훈 · 신만석 · 이재석^{2,*}

국립생태원 생태정보팀, ¹한국농업기술진흥원 기후변화대응팀, ²건국대학교 생명과학특성학과

Soil Respiration Characteristics in *Pinus densiflora* Forests in Republic of Korea: A Case of Mt. Jeombong-san, Mt. Namsan, and Mt. Jirisan (2009~2010). Jae-Ho Lee (0000-0001-5955-572X), Young-Ju Yu¹ (0009-0005-5974-1537), Sang-Hun Lee (0000-0001-9001-8973), Man-Seok Shin (0000-0001-9112-2510) and Jae-Seok Lee^{2,*} (0000-0003-0338-4786) (Ecological Information Team, National Institute of Ecology, Seocheon 33657, Republic of Korea; ¹Climate Change Response Team, Korea Agriculture Technology Promotion Agency, Iksan 54667, Republic of Korea; ²Department of Biological Sciences, Konkuk University, Seoul 05029, Republic of Korea)

Abstract This study measured soil respiration in pine forests dominated by *Pinus densiflora* in Mt. Jeombong, Mt. Namsan, Mt. Jirisan in Republic of Korea from 2009 to 2010. The seasonal variations, along with temperature and soil moisture content, were measured to understand the characteristics at each site. Soil respiration was highest in summer and autumn, closely influenced by the increase in soil temperature. Throughout the measurement period, soil respiration ranged from 205.6 to 312.2 mg CO₂ m⁻² h⁻¹, with Mt. Namsan showing the highest values and Mt. Jirisan the lowest. A strong correlation was observed between soil respiration and soil temperature, with Q_{10} values ranging from 2.5 to 3.0. Precipitation significantly affected soil moisture content, and although it appeared to influence soil respiration, no significant correlation was found.

Key words: soil respiration, climate change, carbon cycle, *Pinus densiflora*

서 론

기후변화는 현재 전 지구와 환경에 영향을 미치는 가장 중요한 요소 중 하나이다. 기후변화로 인해 지구온난화, 극한 기후 발생, 해수면 상승 등의 문제가 급격히 심화되고 있으며 이로 인하여 생태계와 환경에 큰 영향을 미치고 있다(IPCC, 2021). 이러한 문제에 대응하기 위해서는 지구환경시스템의 모든 부분을 이해하고 그 변화를 예측하는 데 도움이 되는

도구가 필요하다. 토양호흡(soil respiration)은 지구환경시스템에서 중요한 구성 요소 중 하나로, 토양 내에서 발생하는 생물학적 활동에 의해 이산화탄소(CO₂)가 발생하는 과정이다. 이 과정은 토양 내의 유기물 분해, 미생물 활동, 뿌리 호흡 등을 통해 이루어진다. 토양호흡은 지구 탄소순환에서 중요한 역할을 하며, 이를 통해 대기 중 CO₂ 농도를 조절하는 과정 중 하나이다(Raich and Schlesinger, 1992). 토양호흡은 여러 환경 요소에 영향을 받으며, 그중에서도 기후 조건은 가장 중요한 영향을 미치는 요소 중 하나이다. 기후변화로 인하여 온도, 강수량, 습도 등의 환경 조건이 변화하면 토양의 미생물 활동과 CO₂ 방출에 영향을 준다. 특히, 토양호흡의 기후 민감성은 기후변화의 영향을 이해하고 예측하는 데 필수

Manuscript received 1 November 2023, revised 28 December 2023, revision accepted 29 December 2023

* Corresponding author: Tel: +82-2-450-3411, Fax: +82-2-450-3411
E-mail: jaeseok@konkuk.ac.kr

© The Korean Society of Limnology. 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, provide the original work is properly cited.

적인데 이를 통해 우리는 미래의 기후 조건에서 생태계의 탄소순환의 변화를 예측할 수 있다(Janssens *et al.*, 2003). 이러한 이유에서 토양호흡에 관한 연구는 활발히 수행되었으며, 산림, 과수원, 농경지 등 다양한 식생에서 우점종 차이와 토지 이용 형태에 따른 탄소수지 관련 연구(Park, 1997, 1999; Kim and Jeong, 2001; Lee and Moon, 2001; Moon, 2004; Lee *et al.*, 2010)와 토양호흡의 계절적 변동을 파악한 연구 등 토양호흡의 정량화 연구 등 활발히 연구가 수행되고 있다(Pyo *et al.*, 2003; Lee, 2008; Lee, 2009; Lee *et al.*, 2010).

소나무(*Pinus densiflora*)림은 한반도에서 주요한 산림 유형 중 하나이며, 2010년 기준으로 우리나라 전체 산림(약 639만 ha) 중 149만 ha를 차지한다. 특히, 전체 침엽수림의 약 56%를 차지하는 대표 수종이며, 한반도 전역에 분포한다(Kwon *et al.*, 2012). 소나무림의 토양호흡에 관한 선행 연구는 경남 진주, 경북 울진, 경북 안동, 남산 등 각각 단일 지점에서 수행되었다(Moon, 2004; Jung *et al.*, 2015; Yang *et al.*, 2018; Lee *et al.*, 2020).

본 연구에서는 같은 기간 동안 우리나라에서 위도상 상위, 중위, 하위로 구분하여 소나무가 우점하고 있는 조사지역 점봉산, 남산, 지리산의 소나무림에서 토양호흡을 측정하고 조사 지점별 차이를 비교하였다. 또한 토양호흡과 환경 인자 간의 상관관계를 규명하고 소나무림의 토양호흡 특성을 파악하고자 한다.

재료 및 방법

1. Study site

조사 지점은 점봉산, 남산, 지리산 총 세 지점에서 수행(Fig. 1)하였으며, 기상 자료는 기상청의 ‘기상자료개방포털(data.kma.go.kr)’를 이용하였다. 점봉산은 강원도 인제

군 기리면 진동리와 귀둔리, 양양군 서면 오가리 지역에 북위 북위 38°~38°05′ 동경 128°13′~128°30′ 사이에 위치하고 있으며, 해발고도는 1,424 m로 온대 중부 낙엽활엽수림대에 속한다. 연평균 기온은 9.9°C이고, 연강수량은 1,114 mm이다. 점봉산 내 조사 지점은 소나무 군락으로 해발고도 600 m이며, 경사도는 8°이다. 남산은 서울시 중구 회현동, 남산동, 예장동, 필동 및 한남동에 북위 37°32′~37°33′, 동경 126°58′~127°00′에 위치하며, 해발고도는 262 m로 냉온대 중부 활엽수림을 주를 이루며 소나무와 혼합림계를 형성한다. 연평균 기온은 11.8°C이고, 연강수량은 1,369 mm이다. 남산 내 소나무 군락은 해발고도 182 m에 위치하며, 경사도는 17°이다. 지리산은 영·호남 지역 경계에 북위 35°13′~35°27′, 동경 127°27′~127°49′ 사이에 위치하며, 연

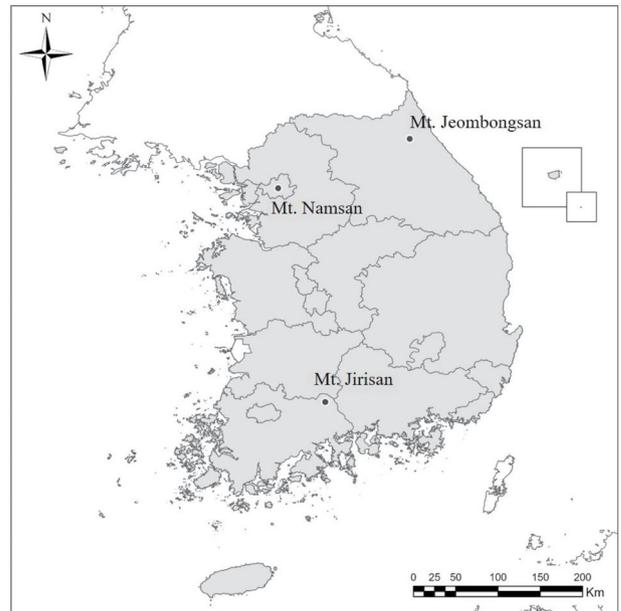


Fig. 1. Study sites.

Table 1. Characteristics of study sites.

Parameter	Study site		
	Mt. Jeombongsan	Mt. Namsan	Mt. Jiri
Latitude (°)	N38°04′12.6″	N37°32′40.6″	N35°16′28.5″
Longitude (°)	E128°23′02.2″	E126°59′16.9″	E127°29′10.5″
Altitude (m)	600	182	355
Aspect	W	SW56	NW34
Slope (°)	8	17	26
Dominant species	<i>Pinus densiflora</i>	<i>Pinus densiflora</i>	<i>Pinus densiflora</i>
DBH (cm)	20.3	14.3	27.5

평균 기온은 12.1°C, 연강수량은 1,800 mm이다. 조사 지점은 해발고도 355 m이며, 경사도가 26°로 높은 경사 지형에 위치해 있다(Table 1).

2. 토양호흡 및 환경인자 측정

토양호흡은 CO₂ 농도 측정이 가능한 센서(GMT222/343, Vaisala, Finland)와 밀폐 챔버법(closed chamber method)을 사용하여 측정하였다. 토양호흡량 측정을 위해 군락 내 원통형 칼라(직경 16 cm, 높이 12 cm)를 6개 설치하였으며, 토양 표층에 고정하였다(Bekku *et al.*, 1995; Mariko *et al.*, 2000). 캡에는 CO₂ 측정이 가능한 측정 센서를 설치하였고, 칼라와 밀폐될 수 있도록 실링 처리하였다. 칼라 위에 캡을 씌우면 내부에 CO₂ 농도가 증가하게 되는데 20분 동안 5분 간격으로 시간의 변화에 따른 CO₂ 농도 변화를 기록하였다(Fig. 2). 이와 동시에 기온(Testo-925, Keison Products)과 대기압(7010 Pocket altimeter/barometer, YCM)을 측정하고, CO₂ 밀도를 계산하여 단위 시간당 단위 면적에서의 CO₂ 방출량 값이 토양호흡량(mg CO₂ m⁻² h⁻¹)이다(Equation 1).

토양호흡량과 환경인자와의 상관관계 파악을 위하여 토양 온도(깊이 5 cm)(Testo-925, Keison Products)과 토양수분 함량(깊이 0~5 cm)을 측정(TDR, Campbell Scientific Inc, USA)하였다.

$$\text{soil respiration} = \alpha \cdot \rho \cdot V / S \quad (\text{Equation 1})$$

α 는 칼라 내부에서 증가하는 CO₂ 농도 증가율(ppm min⁻¹), ρ 는 CO₂ 밀도(mg m⁻³), V 는 칼라의 부피(m³), S 는 칼라가 설치된 토양의 면적(m²)을 나타낸다.

3. Q₁₀ 값

전체 조사 토양호흡과 토양온도의 변화에 대한 민감

도(Q₁₀)는 토양호흡량(y)과 토양온도(x)를 지수함수식(Equation 2)에 적용시켜 β_1 을 구한 후, β_1 을 Equation 3에 대입하여 Q₁₀ 값을 구하였다.

$$y = \beta_0 e^{\beta_1 x} \quad (\text{Equation 2})$$

y는 토양호흡량(mg CO₂ m⁻² h⁻¹), x는 토양온도(°C), β_0 , β_1 은 상수이다.

$$Q_{10} = e^{10\beta_1} \quad (\text{Equation 3})$$

4. 토양환경 조사

분석용 토양은 30 cm×30 cm 크기의 방형구 설치 후 낙엽과 낙지 등을 잘라 리터층을 수거 후 표토 위에 샘플관(직경 5 cm, 높이 5.1 cm)을 이용하여 표토층(0~5 cm)의 토양을 샘플링하였다. 토양 유기물 함량은 작열감량법(Loss on ignition)을 이용하였으며(Davis, 1974), 토양은 C/N비는 Tyurin법으로 계산하였다(Tyurin, 1931).

결과 및 고찰

1. 토양특성

토양 유기물 함량은 고도가 상승할수록 유기물이 증가하는데(Dai and Huang, 2006), 고도가 가장 높은 점봉산(600 m)의 토양 유기물 함량이 15.1%로 가장 높았으며, 지리산(355 m)이 10.9%, 남산(182 m)이 9.0% 순으로 나타났다. 총 질소는 점봉산이 0.5 mg g⁻¹, 남산과 지리산은 0.3 mg g⁻¹으로 동일하게 나타났다. C/N비는 유기물 분해 정도 또는 진행 상태에 따라 다르게 나타난다. 산림에서는 일반적으로 평균 10 정도이며, C/N비가 7.0 이상일 경우 토양건전도가 양

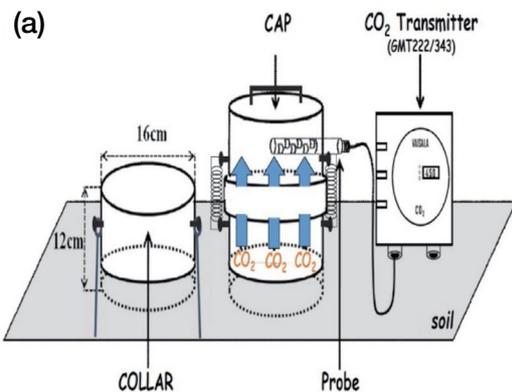


Fig. 2. Schematic diagram of the collar and cap for soil respiration measurement (a), and measurement of soil respiration and environmental factors (b).

호한 편이다(Hur and Joo, 2002). 조사 지점의 C/N비는 남산이 25.5로 가장 높았고, 점봉산, 22.8, 지리산 19.1로 나타났다(Table 2).

2. 토양호흡의 계절 변화

전체 조사 지점에서 토양호흡량은 계절 변화에 따라 뚜렷한 변동성을 보였다. 봄부터 토양호흡량이 상승하여 여름철에 가장 높게 나타난 후 점차 하강하여 겨울에 가장 낮게 나타났다(Fig. 3). 이와 같은 토양호흡의 계절 변동성은 선행 연구와 일치하는 결과이며, 봄과 겨울에는 토양층의 낮은 온도로 인해 활성 토양층의 부피가 제한되었기 때문에 상대적으로 낮은 토양호흡량을 보였다. 반면, 여름과 가을에는 높은 토양층의 온도와 활성 토양층의 부피가 크게 유지되고, 높은 뿌리 생산량으로 인해 높은 토양호흡량을 보인 것으로 판단된다(Rayment and Jarvis, 2000; Widén, 2002). 토양호흡량의 조사 지점에 따른 계절별 차이를 보기 위해 봄(3~5월), 여름(6~8월), 가을(9~11월)로 나누어 분석하였다(Table 3). 봄철의 토양호흡량은 135.2~245.4 mg CO₂ m⁻² h⁻¹의 범위였으며, 여름에는 417.4~648.4 mg CO₂ m⁻² h⁻¹ 범위, 가을에는 163.4~292.5 mg CO₂ m⁻² h⁻¹의 범위로 나타났다. 토양호흡량의 계절적 변동은 각 조사 지점에서 차이를 보였으며, 이러한 변동성은 지역별 기후 및 지리적 특성으로 이해 발생한 것으로 판단되며, 이는 생태계의 복잡한 상호작용을 반영

하는 결과이다(Parmesan and Yohe, 2003).

3. 토양호흡과 환경인자

1) 토양호흡과 온도

Fig. 4는 각 지점별 토양호흡과 대기온도, 토양온도, 토양수분함량, 강수량을 나타낸 그래프이다. 일반적으로 토양호흡의 계절 변동성은 토양온도의 변화에서 기인하는 것으로 보고되고 있다(Buchmann, 2000; Scott-Denton *et al.*, 2003).

연평균 토양온도는 2009년에 남산이 14.6°C로 가장 높았으며, 점봉산(11.6°C), 지리산(9.9°C) 순으로 나타났고, 2010년에도 남산(15.2°C), 점봉산(10.7°C), 지리산(10.2°C) 순이었다(Table 4). 점봉산은 2009년 7월에 토양온도가 19.7°C로 가장 높았으며, 이때 토양호흡량도 557.1 mg CO₂ m⁻² h⁻¹로 가장 높게 나타났다. 2010년에는 8월에 토양온도가 19.5°C를 기록할 때 토양호흡량도 412.3 mg CO₂ m⁻² h⁻¹로 가장 높게 나타났다(Fig. 4(a)). 남산도 마찬가지로 2009년 7

Table 2. Soil properties at each site.

	Study site		
	Mt. Jeombongsan	Mt. Namsan	Mt. Jiri
Organic matter (%)	15.1	9.0	10.9
Total N (mg g ⁻¹)	0.5	0.3	0.3
C/N ratio	22.8	25.5	19.1

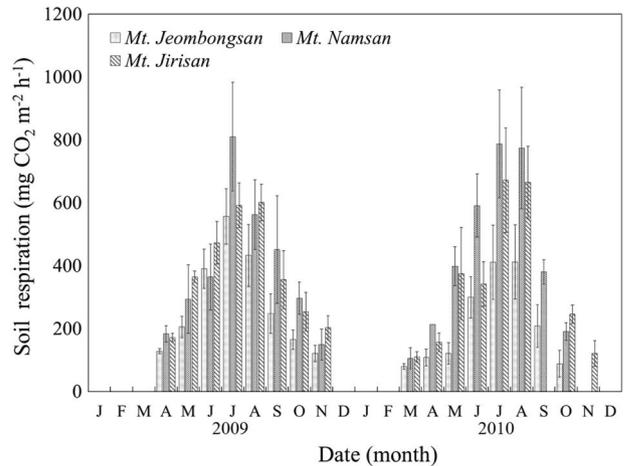


Fig. 3. Variation in monthly mean soil respiration measured at each site from 2009 to 2010.

Table 3. Mean seasonal soil respiration(± S.D) from 2009 to 2010 in each site.

Year	Season	Soil respiration (mg CO ₂ m ⁻² h ⁻¹)		
		Mt. Jeombongsan	Mt. Namsan	Mt. Jirisan
2009	Spring	167.0 ± 54.6	238.7 ± 78.1	268.5 ± 136.5
	Summer	460.4 ± 86.4	579.2 ± 223.6	555.7 ± 71.7
	Fall	178.1 ± 64.3	299.2 ± 150.9	271.1 ± 77.6
2010	Spring	103.3 ± 20.8	252.1 ± 207.3	214.0 ± 141.3
	Summer	374.5 ± 64.8	717.6 ± 109.4	559.7 ± 188.7
	Fall	148.7 ± 84.6	285.8 ± 133.9	183.4 ± 88.3

Table 4. Annual mean soil temperature, air temperature, soil moisture content, and precipitation from 2009 to 2010 at each site.

Factors		2009	2010	Mean
Mt. Jeombongsan	Soil temperature (°C)	11.6	10.7	11.2
	Air temperature (°C)	9.6	9.7	9.6
	Soil moisture content (%)	16.9	25.6	21.2
	Precipitation (mm)	1,261.0	1,186.5	1,223.8
Mt. Namsan	Soil temperature (°C)	14.6	15.2	14.9
	Air temperature (°C)	11.7	11.1	11.4
	Soil moisture content (%)	15.4	24.7	20.0
	Precipitation (mm)	1,219.0	1,620.0	1,419.5
Mt. Jirisan	Soil temperature (°C)	9.9	10.2	10.0
	Air temperature (°C)	8.2	7.6	7.9
	Soil moisture content (%)	21.7	32.8	26.9
	Precipitation (mm)	1,487.0	2,428.5	1,957.8

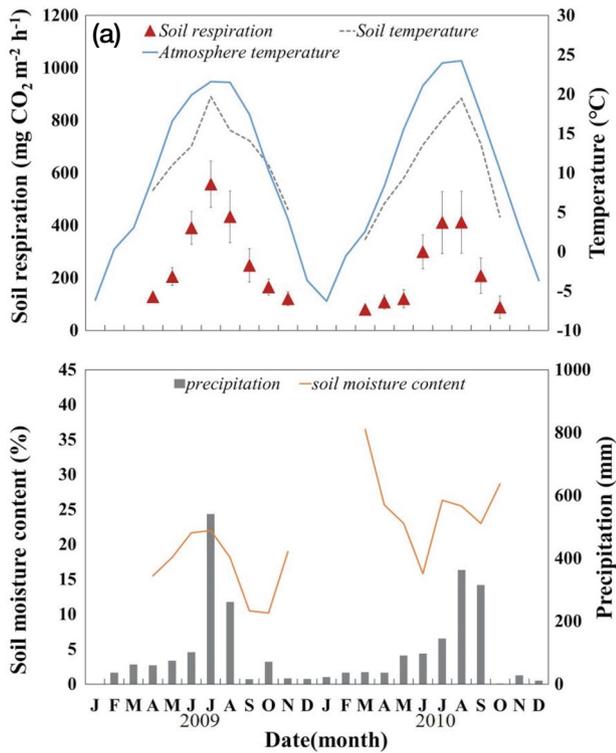


Fig. 4(a). Seasonal variations in soil respiration and environmental factors (soil temperature, air temperature, precipitation, and soil moisture content) at Mt. Jeombongsan (a).

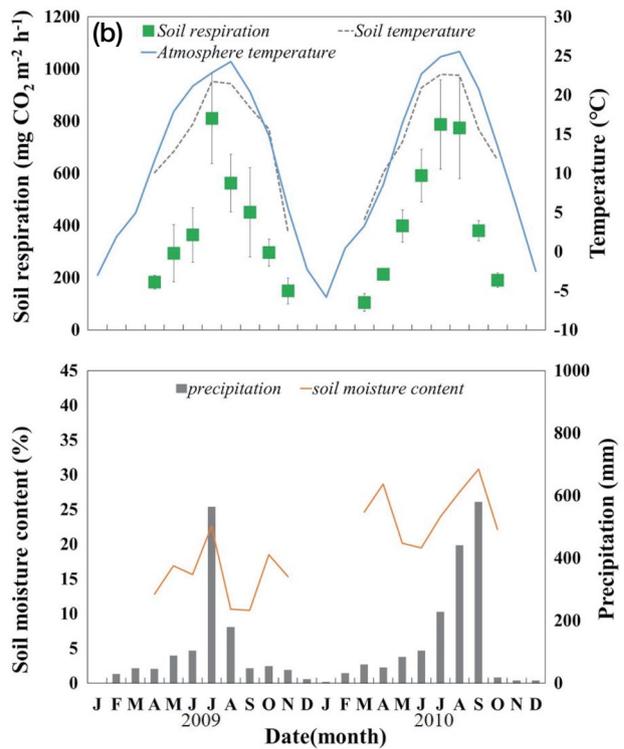


Fig. 4(b). Seasonal variations in soil respiration and environmental factors (soil temperature, air temperature, precipitation, and soil moisture content) at Mt. Namsan (b).

월과 2010년 8월에 토양온도가 가장 높을 때 연중 가장 높은 토양호흡량을 보였다. 지리산은 2009년 8월에 토양온도가 가장 높을 때 토양호흡량이 가장 높았지만, 2010년 8월에 가장 높은 토양온도를 기록한 반면, 토양호흡은 7월에 가

장 높게 나타났다. 이처럼 전체 조사 지점에서 토양온도와 대기온도의 상승과 함께 토양호흡이 증가하는 경향을 나타냈다. 특히 토양온도가 가장 높은 7~8월에 가장 높은 토양호흡량을 기록하였으며, 토양온도가 낮은 3월과 11월에는 낮

게 나타났다. 이처럼 토양온도는 토양호흡을 조절하는 주요 인자로 잘 알려져 있으며, 두 인자 간의 지수함수로 나타낼 수 있다. 토양호흡과 토양온도 간의 상관관계는 지리산이 $R^2=0.8503$ 으로 가장 높았으며, 남산이 $R^2=0.7781$, 점봉산이 $R^2=0.7705$ 로 나타났다(Fig. 5). 이는 토양온도가 토양호흡에 미치는 영향을 보여주는 선행 연구와 일치한다(Knapp *et al.*, 1998; Lee *et al.*, 2010; Lee *et al.*, 2013). 온도에 따른

민감도인 Q_{10} 값은 전지구에서 1.3~3.3의 범위로 나타난다(Raish and Schlesinger, 1992). 점봉산에서는 3.0, 지리산에서는 2.8, 남산에서는 2.5로 Q_{10} 값이 나타나 일치한 결과를 보여줬다(Table 5).

2) 토양호흡과 토양수분함량

토양호흡은 충분한 토양수분 환경 속에서 토양온도의 증가에 지수적으로 증가하는 것으로 알려져 있다(Hunt *et al.*, 2002). 연평균 강수량은 2009년에 지리산이 1,487.0 mm로 가장 많이 기록되었으며, 점봉산(1,261.0 mm), 남산(1,219.0 mm) 순으로 나타났다. 2010년에는 지리산(2,428.5 mm), 남산(1,620.0 mm), 점봉산(1,186.5 mm) 순으로 기록되었다

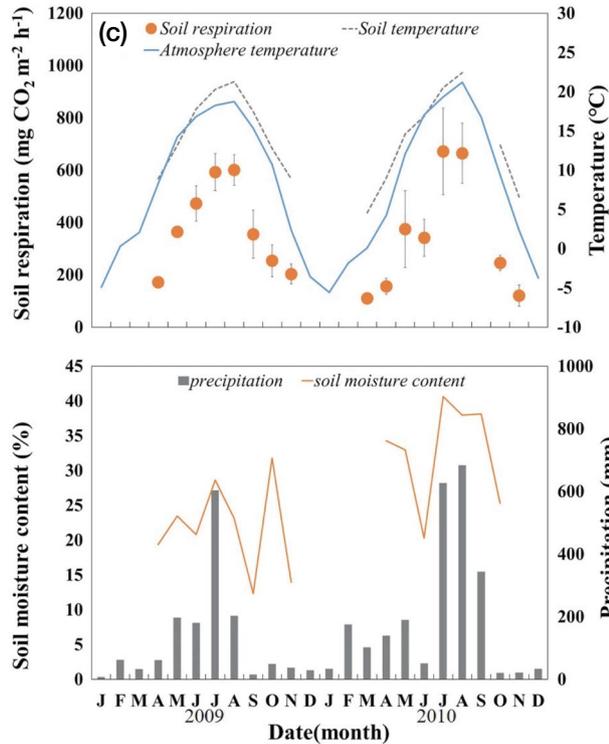


Fig. 4(C). Seasonal variations in soil respiration and environmental factors (soil temperature, air temperature, precipitation, and soil moisture content) at Mt. Jirisan (c).

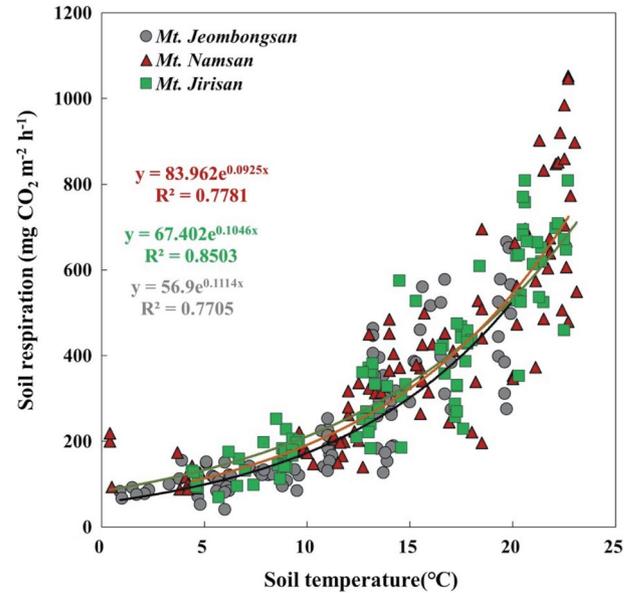


Fig. 5. Monthly soil respiration and soil temperature relationship (2009~2010) with regression curves.

Table 5. Relationships between the soil respiration and soil temperature from 2009 to 2010.

		2009	2010	Mean
Mt. Jeombongsan	Equation	$Y = 55.207e^{0.12x}$	$Y = 57.374e^{0.1033x}$	$Y = 122.82e^{0.0356x}$
	R^2	0.7897	0.7619	0.7705
	Q_{10}	3.3	2.8	3.0
Mt. Namsan	Equation	$Y = 102.47e^{0.0783x}$	$Y = 66.529e^{0.1079x}$	$Y = 83.962e^{0.0925x}$
	R^2	0.6735	0.8915	0.7781
	Q_{10}	2.2	2.9	2.5
Mt. Jirisan	Equation	$Y = 83.18e^{0.0933x}$	$Y = 60.607e^{0.1093x}$	$Y = 64.402e^{0.1046x}$
	R^2	0.8166	0.8699	0.8503
	Q_{10}	2.5	3.0	2.8

(Table 4). 측정기간 동안 강수량 증가로 인해 토양수분함량이 증가하였으며, 이에 따라 토양호흡량도 증가하는 경향을 보였다. 2010년 8월 가장 높은 월 강수량(441.1 mm)을 기록하였고, 남산의 토양수분함량은 27.7%이며 토양호흡량은 $774.0 \text{ mg CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ 였다. 지리산의 강수량은 680.0 mm였고, 토양수분함량은 20.0%, 토양호흡량은 $665.0 \text{ mg CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ 였다. 점봉산에서는 강수량이 363.0 mm이며, 토양수분함량은 21.7%, 토양호흡량은 $412.3 \text{ mg CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ 를 나타냈다. 이러한 결과로 보아 강수로 인해 토양수분함량이 증가하면 토양호흡량도 증가하는 경향을 나타낸다. Schlenter and Van Cleve (1985)는 토양온도 $10\sim 20^\circ\text{C}$ 범위에서 토양수분함량이 토양호흡에 영향을 미치는 것으로 보고했으며, 토양수분함량이 과도하게 높거나 낮은 경우에는 토양호흡이 감소하는 경향을 보인다고 언급하였다. 하지만 본 연구에서 토

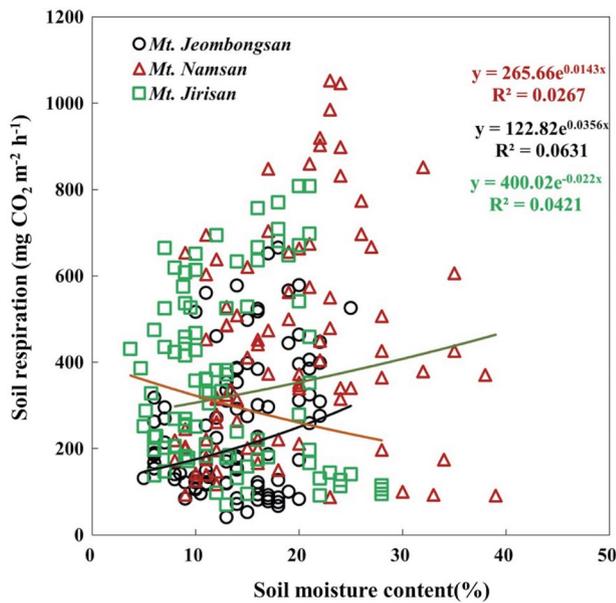


Fig. 6. Monthly soil respiration and soil moisture content relationship (2009~2010) with regression curves.

양호흡과 토양수분함량 간의 회귀분석에서는 유의한 상관관계를 확인할 수 없었다(Fig. 6). 일부 연구에서는 토양수분함량과 토양호흡 간에 관련성을 찾지 못한 연구 결과도 있다(Moon *et al.* 2001; Lee, 2003). 기온이 높은 여름과 가을에 강수가 집중되는 우리나라 기후 특성으로 인해 토양수분함량이 토양호흡에 영향을 미친 것인지 여부는 추가 연구가 필요해보인다.

4. 연간 토양호흡량 및 탄소 방출량

연간 탄소 방출량을 산정하기 위해 토양의 동결로 결측된 겨울철의 토양호흡량은 회귀식을 이용하여 추정하였다(Lloyd and Taylor, 1994). Singh and Gupta (1977)의 연구에 따르면 온대 지역 산림생태계의 연평균 토양호흡량은 $150\sim 530 \text{ mg CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ 의 범위라고 보고 하였다. 우리나라 경남 진주 지역 소나무림의 토양호흡량 범위는 $120\sim 770 \text{ mg CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ 였으며, 연평균 약 $430 \text{ mg CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ 로 나타났다(Moon, 2004). Jung *et al.* (2015)에 따르면 경북 울진 지역에서 $49\sim 1,210 \text{ mg CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ 범위였고, 연평균 $379 \text{ mg CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ 라고 하였다. 2009년의 연평균 토양호흡량은 남산에서 $295.6 \text{ mg CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ 로 가장 높았으며, 지리산에서 $292.1 \text{ mg CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ h}^{-1}$, 점봉산에서 $217.3 \text{ mg CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ 로 나타났다. 2010년에는 남산에서 $430.3 \text{ mg CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ h}^{-1}$, 지리산에서 $286.6 \text{ mg CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ h}^{-1}$, 점봉산에서 $171.1 \text{ mg CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ 로 나타났다(Table 6).

연평균 토양호흡량을 연간 탄소 방출량으로 환산하면 2009년에 남산이 $7.0 \text{ t C ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$, 지리산이 $6.9 \text{ t C ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$, 점봉산이 $5.1 \text{ t C ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$ 로 나타났다. 2010년에는 남산에서 $7.7 \text{ t C ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$, 지리산에서 $6.8 \text{ t C ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$, 점봉산에서 $4.0 \text{ t C ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$ 로 산출되었다. 이러한 결과는 우리나라의 소나무림에서의 연간 탄소 방출량과 비교하여 유사한 결과를 나타낸다. 경남 진주의 소나무림은 $6.5 \text{ t C ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$ 를 방출하였으며(Moon, 2004), 경남 함양의 소나무림은 $7.4 \text{ t C ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$ 를 방출(Kim, 2006)한 것과 유사한 결과이다(Table 6).

Table 6. Annual mean soil respiration and carbon emission from 2009 to 2010 at each site.

		2009	2010	Mean
Mt. Jeombongsan	Soil respiration ($\text{mg CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ h}^{-1}$)	217.3	171.1	194.2
	Carbon emission ($\text{t C ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$)	5.1	4.0	4.6
Mt. Namsan	Soil respiration ($\text{mg CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ h}^{-1}$)	295.6	430.3	310.5
	Carbon emission ($\text{t C ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$)	7.0	7.7	7.3
Mt. Jirisan	Soil respiration ($\text{mg CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ h}^{-1}$)	292.1	286.6	289.3
	Carbon emission ($\text{t C ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$)	6.9	6.8	6.8

결 론

본 연구에서는 우리나라 소나무림의 토양호흡 측정을 통해 토양호흡 패턴과 환경 인자 간의 상관관계를 조사하였다. 토양호흡은 계절적으로 변동하며, 지역마다 토양온도와 강수량의 영향을 받아 서로 다른 패턴을 보인다는 것을 확인하였다. 특히, 온도가 토양호흡에 미치는 영향은 각 조사 지점에서 일관된 양상을 보였다. 또한 연간 탄소 방출량을 통해 소나무림의 생태계의 탄소 동태를 평가하였고, 연간 탄소 방출량이 다른 소나무림 지역과 유사함을 확인하였다. 이러한 연구 결과는 소나무림의 토양호흡 특성에 대한 이해를 높이고, 생태계 관리 및 탄소순환 연구에 중요한 자료가 될 것으로 기대된다.

저자정보 이재호(국립생태원 생태정보팀 전임연구원), 유영주(한국농업기술진흥원 연구원), 이상훈(국립생태원 생태정보팀 책임연구원), 신만석(국립생태원 생태정보팀 전임연구원), 이재석(건국대학교 교수)

저자기여도 개념설정: 이재호, 유영주, 이재석, 방법론: 이재호, 이재석, 자료관리: 이재호, 유영주, 이재석, 원고 초안작성: 이재호, 유영주, 원고 교정: 이재호, 이상훈, 신만석, 이재석, 원고 편집 및 검토: 이상훈, 이재석

이해관계 모든 저자는 논문의 결과에 동의하였고, 출판될 최종본을 검토하고 동의하였습니다.

연구비 본 논문은 국립생태원의 “EcoBank 유지관리 및 기능개선(NIE-고유연구-2023-01)”에 의해 지원되었습니다.

REFERENCES

- Bekku, Y., H. Koizumi, T. Nakadai and H. Iwaki. 1995. Measurement of soil respiration using closed chamber method: An IRGA technique. *Ecology Research* **10**: 369-373.
- Buchmann, N. 2000. Biotic and abiotic factors controlling soil respiration rates in *Picea abies* stands. *Soil Biology and Biochemistry* **32**: 1625-1635.
- Chapman, S.B. 1979. Some interrelationships between soil and root respiration in lowland Calluna heathland in southern England. *Ecology* **67**: 1-20.
- Dai, W. and Y. Huang. 2006. Relation of soil organic matter concentration to climate and altitude in zonal soils of China. *CATENA* **65**(1): 87-94.
- Davis, R.B. 1974. Tubificids alter profiles of redox potential and pH in profundal lake sediment. *Limnology and Oceanography* **19**(2): 342-346.
- Fang, J., K. Zhao and S. Liu. 1998. Factors affecting soil respiration in reference with temperature's role in the global scale. *Chinese Geographical Science* **8**: 246-255.
- Hunt, J.E., F.M. Kelliher, T.M. McSeveny and J.N. Byers. 2002. Evaporation and carbon dioxide exchange between the atmosphere and a tussock grassland during a summer drought. *Agricultural and Forest Meteorology* **111**: 65-82.
- Hur, T. and S. Joo. 2002. Comparison of Soil Physical and Chemical Properties between Coniferous and Deciduous forests in Mt. Palgong. *Agriculture Research Bulletin Kyungpook National University* **20**: 39-47.
- IPCC. 2021. Climate Change 2021: The Physical Science Basis: Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, In press.
- Janssens, I.A., A. Freibauer, P. Ciais, P. Smith, G.-J. Nabuurs, G. Folberth, B. Schlamadinger, R.W.A. Hutjes, R. Ceulemans, E.-D. Schulze, R. Valentini and A. J. Dolman. 2003. Europe's Terrestrial Biosphere Absorbs 7 to 12% of European Anthropogenic CO₂ Emissions. *Science* **300**: 1538-1542.
- Jung, S., D. Kwon, C. Park and S. Kim. 2015. Appropriate sampling points and frequency of CO₂ measurements for soil respiration analysis in a pine (*Pinus densiflora*) forest. *Animal Cells and Systems* **19**(5): 332-338.
- Kim, C. 2006. Soil carbon cycling and soil CO₂ efflux in a Red Pine (*Pinus densiflora*) stand. *Journal of Ecology and Field Biology* **29**: 23-27.
- Kim, C. and J. Jeong. 2001. Change of aboveground carbon storage in a *Pinus rigida* stand in Gwangneung, Gyeonggi-do, Korea. *Journal of Korean Forest Society* **90**: 774-780.
- Knapp, A.K., S.L. Conard and J.M. Blair. 1998. Determinants of soil CO₂ flux from a sub-humid grassland: Effect of fire and fire history. *Ecological Applications* **8**(3): 760-770.
- Kwon, K., B. Han, S. Park and J. Choi. 2012. The Improvement Effect of *Pinus densiflora* Forest Disturbed by Human Trampling in the Solbat Neighborhood Park, Gangbuk-gu, Seoul. *Journal of the Korean Institute of Landscape Architecture* **40**(5): 148-159.
- Lee, E., S. Lee, J. Park, E. Kim, Y. Hong, S. Lee and Y. Han. 2020. Correlation between a soil respiration and environmental factors, air temperature and precipitation in *Pinus densiflora* community in Namsan and measuring on an urban forest management. *Journal of Korean Society of Forest Science* **109**(2): 136-144.
- Lee, E.H. 2009. Analysis of soil carbon flux using the automatic long term measurement of soil respiration in the temperate deciduous forest at Gwangneung. M. S. Thesis, Konkuk University (in Korean with English abstract).
- Lee, E.H., J.H. Lim and J.S. Lee. 2010. A review on soil respiration measurement and its application in Korea. *Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology* **12**(4): 264-276.

- Lee, J.H. 2008. Effect of carbonization of agricultural product on increasing of carbon sequestration in red pepper soil. M. S. Thesis. Konkuk University (in Korean with English abstract).
- Lee, J.H., J.S. Lee, Y.M. Chun, N.Y. Chae and J.S. Lee. 2013. Discussion of soil respiration for understanding ecosystem carbon cycle in Korea. *The Korean Society of Limnology* **46**(2): 310-318.
- Lee, M.S. 2003. Method for assessing forest carbon sinks by ecological processing-based approach a case study for Takayama station, Japan. *The Korean Journal of Ecology* **26**: 289-296.
- Lee, Y.Y. and H.T. Moon. 2001. A Study on the Soil Respiration in a *Quercus acutissima* Forest. *Journal of Ecology and Field Biology* **24**: 141-147.
- Lloyd, J. and J.A. Taylor. 1994. On the temperature dependence of soil respiration. *Functional Ecology* **8**: 315-323.
- Mariko, S., N. Nishimura, W. Mo, Y. Matsui, T. Kibe and H. Koizumi. 2000. Winter CO₂ flux from soil and snow surfaces in a cool-temperature deciduous forest, Japan. *Ecological Research* **15**: 363-372.
- Moon, H., S. Jung and S. Hong. 2001. Rate of soil respiration at Black Locust (*Robinia pseudo-acacia*) Stands in Jinju area. *Korean Journal of Ecology* **24**(6): 371-376.
- Moon, H.S. 2004. Soil respiration in *Pinus densiflora*, *Quercus variabilis* and *Platycarya strobilacea* stands in Jinju, Gyeongnam Province. *Korean Journal of Ecology* **27**: 87-92.
- Park, G.S. 1997. Effects of fertilization and clone on aboveground and soil carbon storages in a Willow (*Salix* spp.) bioenergy plantation. *Journal of Korean Forest Society* **86**: 177-185.
- Park, G.S. 1999. Aboveground and Soil Carbon Storages in *Quercus mongolica* and *Quercus variabilis* Natural Forest Ecosystems in Chungju. *Journal of Korean Forest Society* **88**: 93-100.
- Parmesan, C. and G. Yohe. 2003. A globally coherent fingerprint of climate change impacts across natural systems. *Nature* **421**: 37-42.
- Pyo, J.H., S.U. Kim and H.T. Mun. 2003. A study on the Carbon Budget in *Pinus koreansis* of Plantation. *Journal of Ecology and Field Biology* **26**: 129-134.
- Raich, J.W. and W.H. Schlesinger. 1992. The global carbon dioxide flux in soil respiration and its relationship to vegetation and climate. *Tellus* **44**: 81-99.
- Rayment, M.B. and P.G. Jarvis. 2000. Temporal and spatial variation of soil CO₂ efflux in a Canadian boreal forest. *Soil Biology and Biochemistry* **32**(1): 35-45.
- Schlentner, R.E. and K. Van Cleve. 1985. Relationships between CO₂ evolution from soil, substrate temperature, and substrate moisture in four mature forest types in interior Alaska. *Canadian Journal of Forest Research* **15**: 97-106.
- Scott-Denton, L.E., K.L. Sparks and R.K. Monson. 2003. Spatial and temporal controls of soil respiration rate in a high-elevation, subalpine forest. *Soil Biology and Biochemistry* **35**(4): 525-534.
- Shanks, R.E. and J.S. Olson. 1961. First-Year Breakdown of Leaf Litter in Southern Appalachian Forests. *Science* **134**: 194-195.
- Singh, J.S. and S.R. Gupta. 1977. Plant decomposition and soil respiration in terrestrial ecosystems. *The Botanical Review* **43**: 449-529.
- Song, X., C. Peng, Z. Zhao, Z. Zhang, B. Guo, W. Wang, H. Jiang, and Q. Zhu. 2014. Quantification of soil respiration in forest ecosystems across China. *Atmospheric Environment* **94**: 546-551.
- Sulzman, E., J. Brant, R.D. Bowden and K. Lajtha. 2005. Contribution of aboveground litter, belowground litter, and rhizosphere respiration to total soil CO₂ efflux in an old growth coniferous forest. *Biogeochemistry* **73**: 231-256.
- Tian, G., B.T. Kang and L. Brussaard. 1992. Biological effects of plant residues with contrasting chemical compositions under humid tropical conditions-Decomposition and nutrient release. *Soil Biology and Biochemistry* **24**(10): 1051-1060.
- Tyurin, I.V. 1931. A New Modification of Determining Soil Organic Matter by Means of Chromic Acid. *Pochvovedenie* **26**: 36-47.
- Widén, B. 2002. Seasonal variation in forest-floor CO₂ exchange in a Swedish coniferous forest. *Agricultural and Forest Meteorology* **111**(4): 283-297.
- Yang, K., H. Namkung, J. Kim, M. Han and J. Shim. 2018. Carbon Budget of Pine Forest in Serpentine Area. *Korean Journal of Environment and Ecology* **32**(6): 676-685.