

남산 소나무군락의 토양호흡과 환경요인인 기온과 강수량과의 상호관계 및 도시림 관리의 의미

이용필¹ · 이수인² · 박재훈¹ · 김의주¹ · 홍용식³ · 이승연¹ · 유영한^{1*}

¹공주대학교 생명과학과, ²국립백두대간수목원 야생식물종자보전부, ³환경보전협회 수변생태관리센터

Correlation between a Soil Respiration and Environmental Factors, Air Temperature and Precipitation in *Pinus densiflora* Community in Namsan and Meaning on an Urban Forest Management

EungPill Lee¹, SooIn Lee², JaeHoon Park¹, EuiJoo Kim¹, YoungSik Hong³,
SeungYeon Lee¹ and YoungHan You^{1*}

¹Department of Life Science, Kongju National University, Gongju 32588, Korea

²Wild Plants and Seeds Conservation Department, Baekdudaegan National Arboreum, Bongwa 36209, Korea

³Waterfront Ecology Management Center, Korea Environmental Preservation Association, Daejeon 35235, Korea

요약: 본 연구에서는 대도시공원 내 소나무군락의 토양권의 유기탄소 배출량을 정량화하여 기후요인과의 관계를 분석하고 이를 통해 토양호흡량 배출을 감축하기 위한 관리방안을 마련하고자 하였다. 이를 위해 서울시 남산에 위치하고 있는 소나무군락의 토양호흡량의 유기탄소량을 조사하고 환경요인과 연결시켜 관련성을 알아보았다. 그 결과 남산 소나무군락의 토양호흡량의 평균 유기탄소량은 7.978 ton C ha⁻¹ yr⁻¹로 2011년에 6.893 ton C ha⁻¹ yr⁻¹에서 2018년에 8.660 ton C ha⁻¹ yr⁻¹로 약 0.682 ton C ha⁻¹ yr⁻¹ 만큼 증가하였다. 또한, 봄철(3월-5월)의 강수량은 토양호흡의 증감을 설명하는 환경요인 중 하나였다. 이는 도시림의 생태적 관리를 위해서는 토양함수량이 높아지지 않도록 배수관리가 중요함을 시사한다.

Abstract: To prepare the management plan for reduction of the organic carbon emission caused by soil respirations, the amount of organic carbon emission from the pedosphere in *Pinus densiflora* community within metropolis park was quantified and then the correlations between quantified values and climate factors were analyzed. To this study, we investigated the amount of emitted organic carbon through soil respirations of *Pinus densiflora* community within Mt. Nam in Seoul-si, Korea, and identified relationship with environmental factors. As a result, the average amount of organic carbons, included in soil respirations of *P. densiflora* community in Mt. Nam, was 7.978 ton C ha⁻¹ yr⁻¹. Also, precipitation of spring (March to May) was one of the environmental factors explaining the increase and decrease of soil respiration. This results suggest a drainage management to keep the low water content in understorey soils is important to an ecological management of metropolitan forests.

Key words: metropolitan forests, urban forest management, soil respiration, environmental factors, drainage management

서론

지구의 대기 중에는 이산화탄소(CO₂), 메탄(CH₄), 아산화질소(N₂O), 염화불화탄소(CFC) 등의 온실가스가 존재하고, 온실가스 중 이산화탄소는 지구온난화의 주요 원

인으로 지목받고 있다(Maier and Kress, 2000). 전 세계적으로 인위적인 온실가스의 배출량은 산업화 시대 이전부터 계속해서 증가해왔으며, 특히 화석연료의 사용 등으로 발생하는 이산화탄소의 배출량은 1970년부터 2010년까지 전체 온실가스 배출량 증가의 약 78%를 차지하였다(Intergovernmental Panel on Climate Change, 2014).

대기 중의 이산화탄소 농도 증가로 인한 지구 온난화의 문제를 대처하기 위해 인류는 기후변화협약(1992년)과 교토의정서(2005년)를 발효함으로써 온실가스를 줄이

* Corresponding author

E-mail: youeco21@kongju.ac.kr

ORCID

YoungHan You  https://orcid.org/0000-0002-9039-7595

기 위해 노력하고 있다(Kim, 2015). 그리고 온실가스 감축을 위해 실행할 수 있는 또 다른 대안은 산림의 탄소고정량을 증가시키는 것이다(Hu and Wang, 2008).

산림의 탄소고정량을 파악하기 위해서는 토양에서 방출되는 이산화탄소의 양을 정량적으로 측정하여 탄소수지를 정확하게 파악해야 하는데 이러한 토양호흡은 종속영양생물의 호흡과 식물뿌리의 호흡의 합으로 추정할 수 있다(Hanson et al., 2000; Zhou et al., 2009; Lee et al., 2019).

토양호흡은 토양온도와 토양수분함량에 영향을 받고 있고 두 환경요인인자는 강우의 패턴에 따라 영향을 받는데 이로 인해 토양호흡 배출량도 변화하게 된다(Tamai, 2009). 특히 토양온도의 변화는 토양유기물의 분해와 뿌리의 활성, 식물의 성장 및 생리적 반응에 영향을 줌으로써 토양호흡을 변화시키고 있고 토양호흡이 온도의 증가와 함께 지수적으로 증가하는 것은 일반적인 사실로 받아들여지고 있다(Liu et al., 2006). 또한, 토양수분과 토양호흡의 관계는 양의 상관관계에 있고 토양수분의 감소는 미생물 활성과 뿌리호흡의 저하를 초래하여 토양호흡속도가 감소된다(Maier and Kress, 2000).

최근 온대림의 산림군락들은 기후변화로 인한 대기온도와 강수량의 증가로 인해 광합성이 증가하여 순일차생산량이 증가하고 있지만 토양으로 유입되는 유기물의 양도 증가되어 토양 내 생물들의 활동이 증가로 인해 토양호흡량이 증가하여 산림의 탄소배출량이 증가하고 있는 실정이다(Liski et al., 1999; Kirschbaum, 2000). 특히 산림 내 토양권은 식생의 약 3배, 대기의 약 2배에 해당하는 탄소를 축적하고 있기 때문에 산림 내 탄소배출량을 억제하기 위해서는 토양호흡량에 영향을 미치는 환경요인을 파악해야 한다(Bond-lamberty et al., 2014). 현재 많은 연구에서 토양온도와 토양수분함량 이외에 가뭄, 수증기압의 차이, 엽면적지수 등의 변수를 이용하여 실내 실험을 병행함으로써 토양호흡과 환경요인간의 관계를 규명하고 있다(Yuste et al., 2005; Hibbard et al., 2005).

전 세계적으로 도시의 면적은 전체 토지 면적의 약 2%를 차지하고 있어 비율은 낮지만 전 세계 인구의 절반에 가까운 약 39억 명이 도시지역에 거주하고 있는 실정이고, 국내의 경우 급격한 경제성장 이후 전체 인구 중 약 90%가 도시지역에 거주하고 있다(O' Meara, 1999). 그리고 많은 유동인구와 도시경관 요소의 증가는 도시 생태계의 탄소수지에 변화를 주었고, 도시지역은 인간이 배출하는 이산화탄소의 79%에서 98%를 배출하는 것으로 보고되었다(O' Meara, 1999).

산림생태계 중 도시산림은 도시 자연환경중 하나로 도시환경변화에 따라 건강한 자연숲과는 다른 생태적 특성을 가지게 되지만, 생태계 및 도시환경 보전 기능의 기능

과 도시민들에게 여가를 즐길 수 있는 장소를 제공하여 그 가치가 부각되고 있다(No, 2015). 뿐만 아니라 우리나라는 국토의 약 65%가 산림에 해당하므로 가치 있는 자연자원에 대한 정책적인 보전지역 지정 등을 통해 자연의 탄소조절기능을 강화하고 이를 통해 기후변화 완화에 기여할 수 있다(Roh et al., 2016). 이러한 의미에서 도시화 및 산업화가 급속도로 진행된 서울의 중심부에 위치한 남산은 서울의 시민들에게 공익적 기능을 제공하고, 탄소조절기능을 하는데 있어 중요한 대표적인 도시산림이다.

하지만 최근 서울의 도시환경은 인구의 증가 및 인위적인 도시개발로 인해 기온 상승과 강수량 변화 등의 기후변화 현상이 나타났다(Oh et al., 2005). 특히, 도시 열섬현상은 도시지역이 하나의 섬과 같이 고온의 영역을 보이는 현상이며, 외래종 번성, 단순한 식생구조 그리고 종 다양성 감소와 함께 생태계 쇠퇴 또는 퇴행천이를 야기하고 있다(Oke, 1997). 이러한 도시환경 변화는 서울 주변 도시 생태계에 영향을 미치고 있고, 그 중 서울시 도심 중심에 위치한 남산은 이러한 영향을 받고 있는 지역이다(Seoul Metropolitan Government, 2009).

이에 본 연구는 대도시공원 내 소나무군락의 토양권의 유기탄소 배출량을 정량화하여 기후요인과의 관계를 분석하고 이를 통해 토양호흡량 배출을 감축하기 위한 관리방안을 마련하고자 하였다.

재료 및 방법

1. 조사지 개황

남산 소나무군락(*Pinus densiflora* community)의 연구방형구(20 m × 20 m)는 남서사면의 해발고도 170 m (N 37°32'57", E126°59'11")에 선정하였다. 소나무군락의 임목 밀도(tree density)는 1,300-1,400 tree ha⁻¹, 식피율(coverage)은 95%, 평균 수고는 13.2 m, 평균 흉고직경(DBH: Diameter at Breast Height)은 21.8 cm, 토양수분함량은 13.1%, 토양유기물함량은 6.1%, 토양온도는 11.9°C이었다(Figure 1).

조사지소로부터 약 200 m 떨어진 곳에 위치한 수도권 기상청(서울특별시 중구)의 기상자료에 따르면 조사지역의 20년간(1998년~2018년) 평균 기온은 11.8°C, 연 강수량은 1044.2 mm 이었고, 연구기간 동안(2011년~2018년)의 연평균 기온은 11.9°C, 연 강수량은 1020.0 mm 이었다(Figure 2) (Korea Meteorological Administration, 2018).

2. 토양호흡

토양호흡 측정방법으로는 연속적인 측정이 가능한 밀폐상법(closed chamber method)과 통기법(open flow method)이 있지만, 측정시스템 구축과 전기가 공급되지 않는 지역

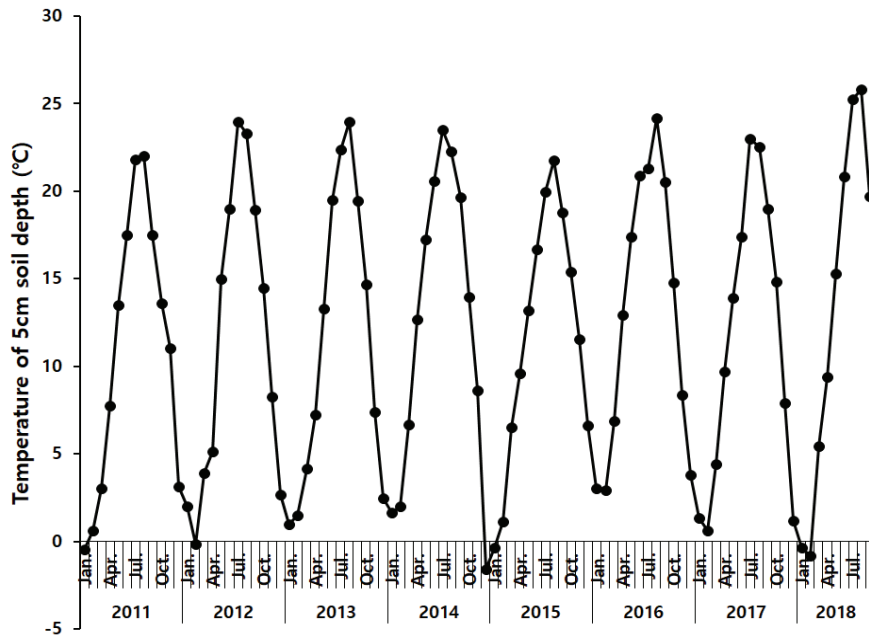


Figure 1. Monthly change of temperature of 5 cm soil depth (°C) in the *Pinus densiflora* community from 2011 to 2018 in Mt. Namsan.

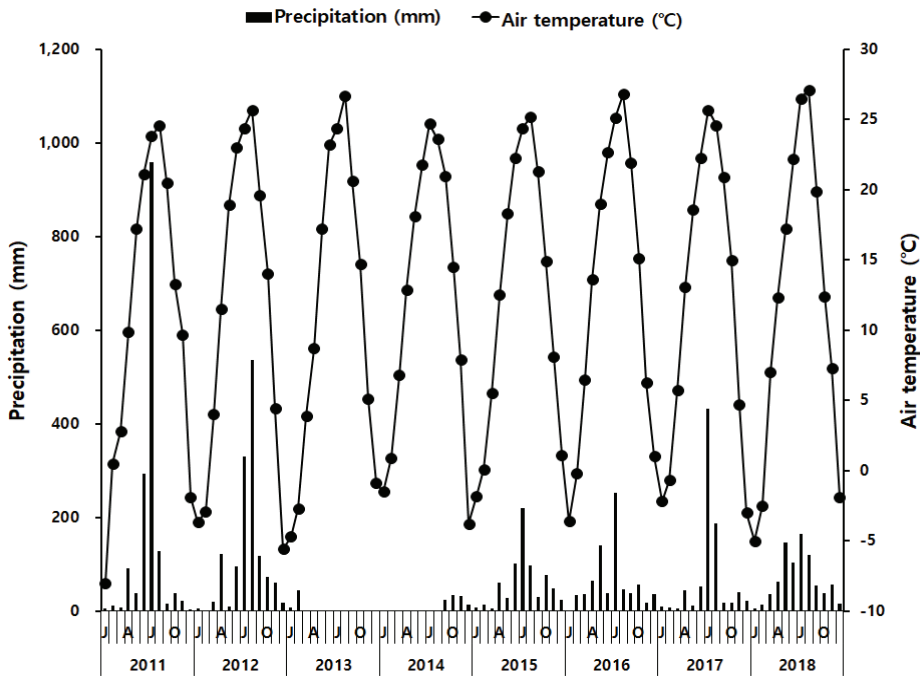


Figure 2. Seasonal precipitation (mm) and air temperature (°C) from January 2011 to December 2018 at Seoul Metropolitan Meteorological station about 200 m distance from the study area.

에서는 측정을 하지 못하는 문제점이 있다(Lee et al., 2010). 따라서 본 연구에서는 휴대용 배터리를 이용해 측정할 수 있는 IRGA 토양호흡 측정기(EGM-4, PP System, UK)를 이용하여 측정하였다. 토양호흡의 측정은 년마다 계절별로 수행하였고, 측정지점간의 오차를 줄이기 위하

여 비가 오지 않는 날을 선정하였다. 그리고 수관 폭을 고려하여 수관이 서로 겹치는 임의의 10개의 지점에서 지점당 3회 측정을 하여 총 30회 토양호흡을 측정하였고, 최소값과 최대값을 제외한 값들의 평균값을 사용하였다.

토양의 온도는 군락 내에 디지털 데이터 온도계(Thermo

recorder TR-71U, T&D Co, Japan)를 설치하여 토양 깊이 5 cm의 온도를 매일 1시간 간격으로 자동 측정하였다. 이와 같이 측정된 토양온도와 토양호흡량을 이용하여 회귀식을 구하였다. 그 후 토양온도 데이터를 토양온도와 토양호흡량에 대한 회귀식에 대입하여 소나무군락의 연간 토양호흡량을 산출하였다. 그리고 토양호흡량 중 미생물호흡량의 기여도 54%를 기준으로 하여 토양호흡량의 46%를 뿌리호흡량으로 추정하였다(Koo et al., 2005).

또한, 토양 호흡에 영향을 주는 토양온도와의 관계를 분석하기 위해 회귀분석을 통해 회귀식을 구한 후 아래의 식을 이용하여 토양온도 민감도(Q₁₀)를 산출하였다(Boone et al., 1998).

3. 기후요인과의 관계

우리나라의 대표적 도시산림생태계인 남산의 소나무군락에서 8년간 장기적으로 모니터링한 토양호흡량의 유기탄소량 (ton C ha⁻¹ yr⁻¹)을 그 기간 동안의 기후변화요소

(생육초기평균기온(°C), 생육중기평균기온(°C), 생육말기평균기온(°C), 나무일수(day), 생육초기 월평균 적산 강수량(mm), 생육중기 월평균 적산 강수량(mm), 생육말기 월평균 적산 강수량(mm), 월평균 적산 강수량(mm)과 연결시켜 환경요인이 토양호흡량에 미치는 영향을 알아보았다(Table 1).

토양호흡량은 1년 동안의 총량으로 산출하였고, 8년(2011년부터 2018년까지)의 데이터를 사용하였다. 기후요인은 수도권기상청(서울특별시 중구)의 방재기상연보 자료를 사용하였다. 기온과 강수량은 생육초기(3월부터 5월까지), 생육중기(6월부터 8월까지), 생육말기(9월부터 11월까지)로 나누었고 기온은 각 기간 동안의 평균값을, 강수량은 각 기간 내 월별로 적산 값을 구한 후 이를 이용하여 월평균 적산 값을 산출하였다. 나무일수는 나무 생장이 활발하게 일어나는 일을 말하며, 보통 일평균기온이 4.3°C 이상 되는 날을 말한다(Kim, 2012). 기상청의 방재기상연보에서 모니터링 기간 동안의 일평균 온도에 대한 자료를 얻어 엑셀

Table 1. Data collection of climate factors of *Pinus densiflora* community in Mt. Namsan

Climate factors	Unit	Methods	Source of data	Period used data	
Average temperature during the beginning of growth	°C	Calculate the average for monthly average temperature from March to May	Annual report of automatic weather station data (Seoul metropolitan meteorological station)	From 2009 to 2018 (10 years)	
Average temperature during the middle of growth		Calculate the average for monthly average temperatures from June to August			
Average temperature during the end of growth		Calculate the average for monthly average temperature from September to November			
Tree days	day	Counting the day when the temperature became 4.3 °C higher in one year (365 days)			
Monthly average of sum of daily precipitations	mm	Calculate the monthly average of the sum of daily precipitation from January to December			
Monthly average of sum of daily precipitations during the beginning of growth		Calculate the monthly average of the sum of daily precipitation from March to May			From 2009 to 2012 From 2015 to 2018 (8 years)
Monthly average of sum of daily precipitations during the middle of growth		Calculate the monthly average of the sum of daily precipitation from June to August			
Monthly average of sum of daily precipitations during the end of growth		Calculate the monthly average of the sum of daily precipitation from September to November		From 2009 to 2012 From 2014 to 2018 (9 years)	

프로그램(Microsoft office, 2016)에서 1년(365일) 단위로 나무일수를 세었다.

토양호흡량과 기후변화요소와의 상관관계를 알아보기 위해 단순회귀분석을 시행하였고, 변수에 따라 서로 간에 영향을 주거나 받는 정도가 다를 수 있기 때문에 데이터의 표준화를 통해 변수에 따라 달라지는 영향의 크기를 최소화하였다(No and Jeong, 2002). 데이터의 표준화는 각 데이터로부터 평균을 빼고 표준편차로 나누어 평균은 0, 표준편차는 1이 되는 방법으로 시행하였다(No and Jeong, 2002). 통계분석의 유의확률은 0.05로 설정하였다(No and Jeong, 2002). 이상의 통계학적 분석은 Statistica 8 통계패키지(Statsoft Co., 2007)를 이용하였고, 선형회귀식은 엑셀프로그램(Microsoft Office, 2016)에서 구하였다.

결과 및 고찰

1. 토양호흡량

남산 소나무군락의 토양깊이 5 cm의 평균 토양온도는 약 11.9°C로 2011년에 10.9°C에서 2018년에 13.4°C로 약 2.4°C 증가하였고(Figure 1), 토양호흡량의 평균 유기탄소량은 약 7.978 ton C ha⁻¹ yr⁻¹ 로 2011년에 6.893 ton C ha⁻¹ yr⁻¹ 에서 2018년에 8.660 ton C ha⁻¹ yr⁻¹ 로 약 0.682 ton C ha⁻¹ yr⁻¹ 증가하였다(Figure 4, Figure 5). 산림생태계에서 토양호흡과 토양온도는 양의 상관관계를 가지며 온도는 식물의 성장과 뿌리의 활력에 영향을 줌으로써 토양호흡을 변화시키는데 이러한 토양온도의 증가로 인해 토양 내 유기물들을 분해하는 토양미생물들의 분해활동이 촉진되어 토양호흡량이 증가한 것으로 판단된다(Raich and Schlesinger, 1992; Buchmann, 2000).

소나무군락의 토양호흡량은 토양온도의 계절적 변화와 유사하게 매년마다 봄부터 점차 증가하여 여름(7월과 8월)에 최고치에 도달한 후 점차 감소하고 있었다(Figure 1, Figure 4). 이는 토양호흡의 계절적 변화는 일반적으로 토양온도의 계절적 변화에서 기인하기 때문이다(Witkamp, 1966; Knapp et al., 1998; Buchmann, 2000).

Q₁₀값은 토양온도와 토양호흡량 간의 관계를 나타내고, Q₁₀값이 높다는 것은 온도변화에 따른 토양호흡량(중속 영양생물의 호흡량 + 식물뿌리의 호흡량)이 증가한다는 것을 의미한다(Fang and Moncrieff, 2001). 남산 소나무군락의 Q₁₀값은 3.7로 나타났고(Figure 3), 이 값은 온대지역의 평균 Q₁₀값인 2.4보다 높았다(Raich and Schlesinger, 1992; Xu and Qi, 2001). 따라서 남산의 소나무군락의 토양호흡량은 토양온도에 영향을 받고 있고 기후변화에 따른 토양온도가 증가하게 되면 유기탄소 방출이 현재보다 더 높아짐을 의미한다.

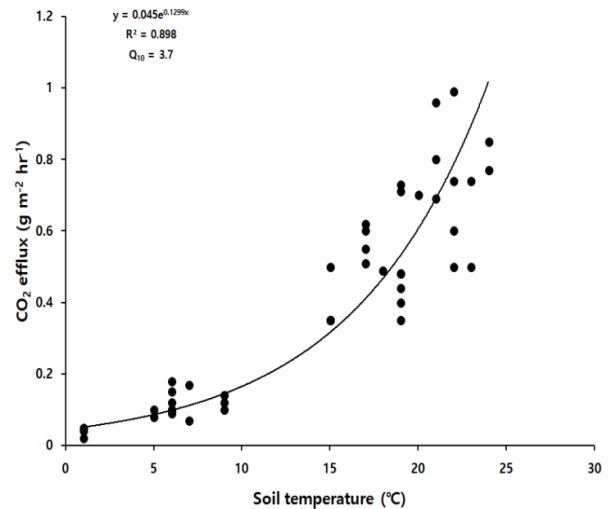


Figure 3. The relationship between the soil respiration (g m⁻² hr⁻¹) and soil temperature (°C) of *Pinus densiflora* community from 2011 to 2018 in Mt. Namsan.

2. 기후요인과의 관계

남산 소나무군락의 토양호흡과 통계적으로 유의한 관계를 보인 것은 생육초기(3-5월) 월평균 적산 강수량이었다(p < 0.05) (Figure 6). 이는 토양호흡량은 봄의 평균 강수량이 증가할수록 증가한다는 것을 의미한다. 토양호흡을 결정하는 중요한 물리적 환경요인 중 하나는 토양수분이고 봄의 강수량 증가로 인해 토양 내 수분함량이 증가함으로써 미생물호흡의 증가와 뿌리호흡의 증가로 인해 토양호흡량이 증가된 것이다(Burton et al., 1998; Maier and Kress, 2000).

생육시기별 강수량을 비교 하였을 때 남산 소나무군락의 생육초기의 월평균 적산 값(51.4 ± 25.2 mm)은 생육말기의 월평균 적산 값(43.0 ± 20.8 mm)보다 많았고 생육중기의 월평균 적산 값(230.8 ± 136.5 mm)보다 적었다(Figure 2, Table 2). 우리나라는 연평균 강수량의 70%가 여름철에 내리고 있는 실정이며 이러한 강수량은 토양의 환경을 일시적으로 변화시켜 토양호흡의 배출량을 변화시킨다(Suh et al., 2014). 강수량을 통해 토양 내 수분이 공급되면 토양 내 이산화탄소로 채워져 있던 공극이 수분으로 대체되어 토양호흡량이 증가하지만 토양수분함량이 일정 수준보다 높아질 경우 토양호흡량은 토양공극 내 확산속도가 감소되어 감소한다(Linn and Doran, 1984; Doran et al., 1990). 그리고 토양수분함량이 일정 수준보다 낮아질 경우 토양호흡량은 토양미생물의 활성과 뿌리의 활성이 저해되어 감소한다(Pietikanien et al., 1999; Maier and Kress, 2000).

따라서 단순회귀분석결과에서 남산의 토양호흡량은 여름과 가을의 월평균 적산 강수량보다 봄철의 월평균 적산

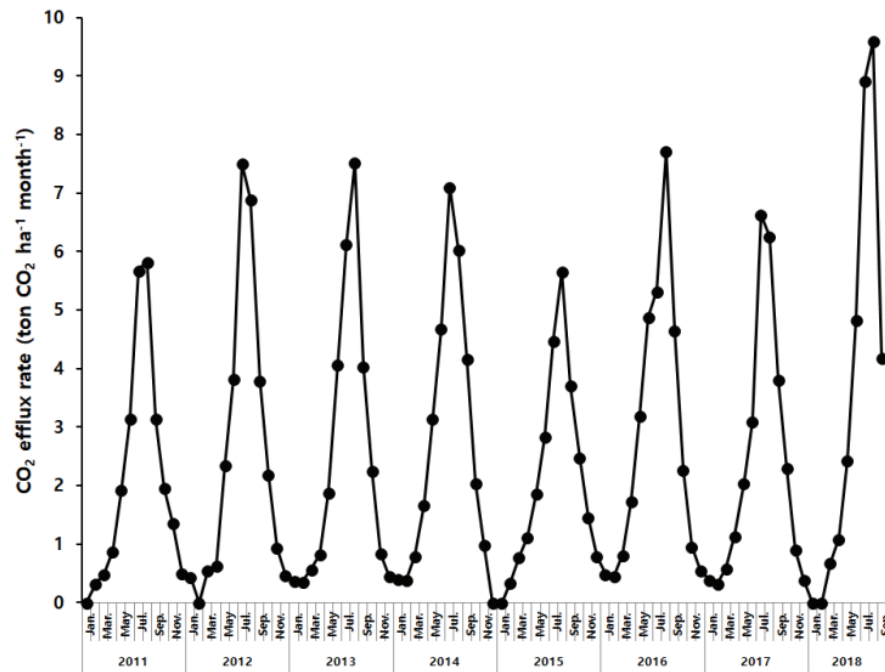


Figure 4. Monthly changes of CO₂ efflux (ton CO₂ ha⁻¹ month⁻¹) of *Pinus densiflora* community from 2011 to 2018 in Mt. Namsan.

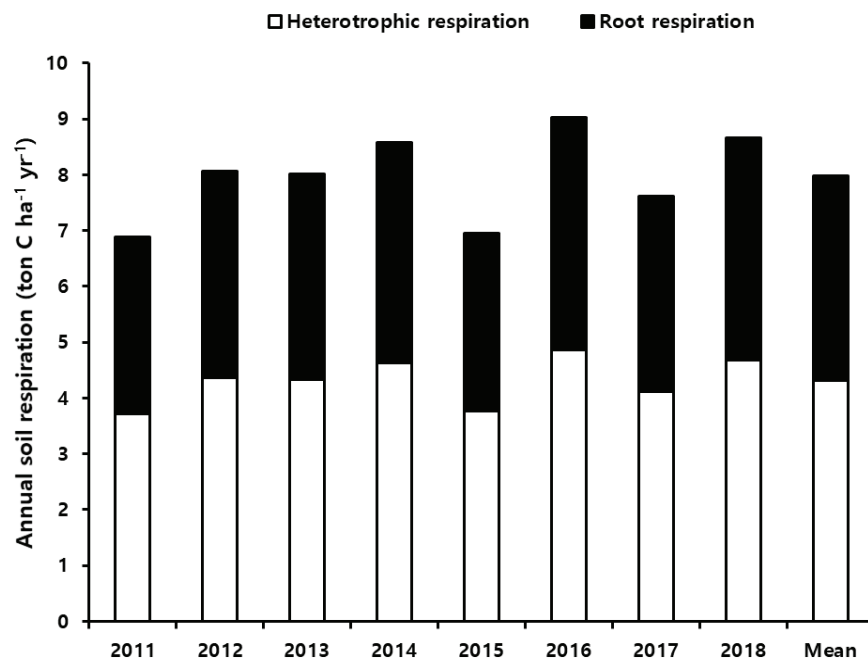


Figure 5. Annual soil respiration (ton C ha⁻¹ yr⁻¹) of *Pinus densiflora* community from 2011 to 2018 in Mt. Namsan.

강수량과 관련이 있었고, 이러한 결과를 바탕으로 봄철의 월평균 적산 강수량의 평균값을 고려하였을 때 남산 소나무군락의 토양호흡량은 봄철인 3월부터 5월까지의 월평균강수량의 적산 값이 최소 50 mm 이상이 되면 더

증가하게 될 것이다.

이처럼 강수량의 증가는 미생물의 호흡속도를 증가시켜 토양 내 유기탄소의 저장량 감소와 대기의 이산화탄소 농도를 증가시킬 수 있고, 이러한 토양호흡량의 증가는

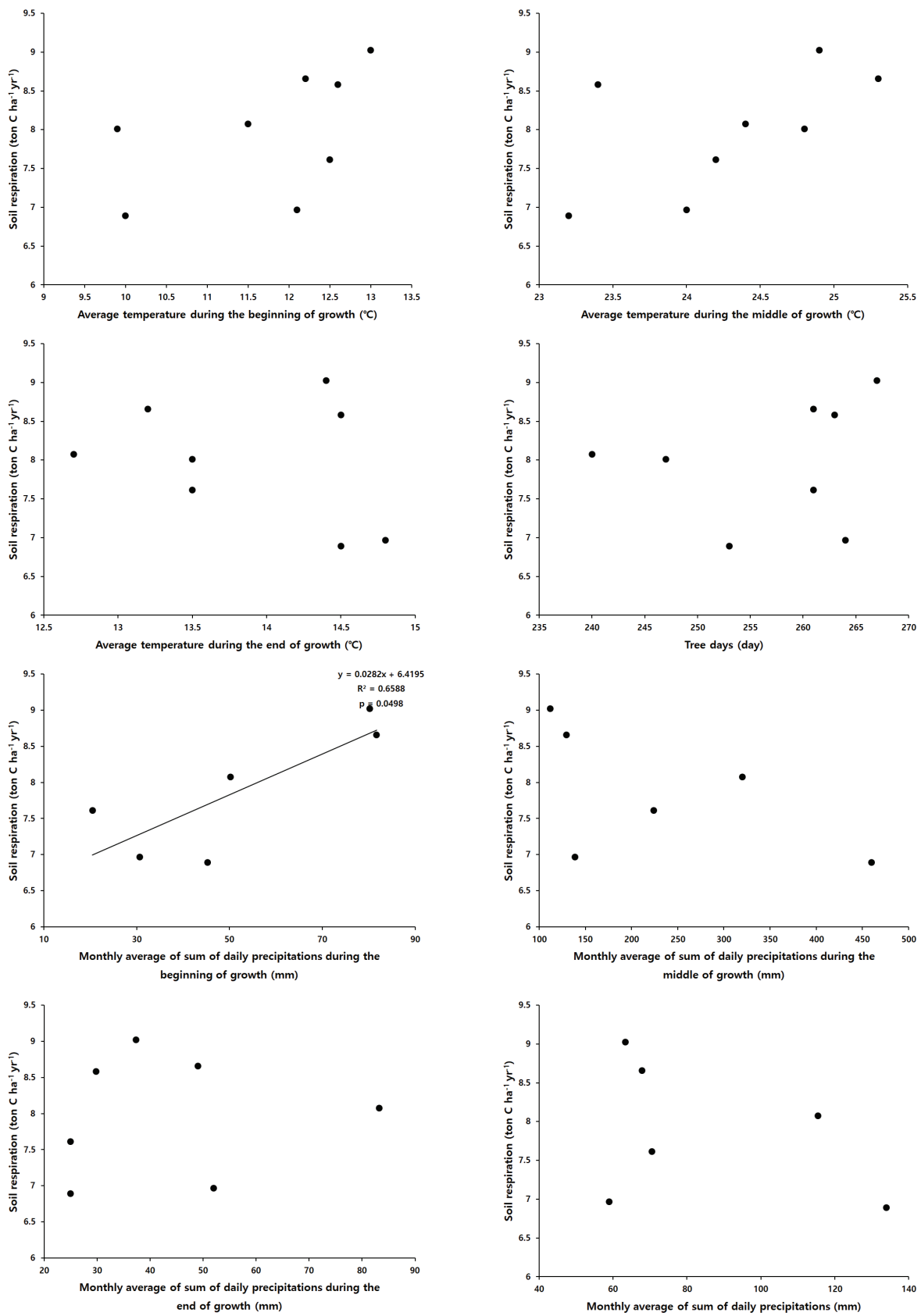


Figure 6. The relationship among organic carbon contents of soil respiration (ton C ha⁻¹ yr⁻¹) and environmental factors of *Pinus densiflora* community in Mt. Namsan.

Table 2. Climate factors [APBG: Monthly average of sum of daily Precipitations during the Beginning of Growth (mm), MPMG: Monthly average of sum of daily Precipitations during the Middle of Growth (mm), APEG: Monthly average of sum of daily Precipitations during the End of Growth (mm)].

	MPBG	MPMG	MPEG
2011	45.3	459.7	25
2012	50.2	320.2	83.2
2013	-	-	-
2014	-	-	29.8
2015	30.7	139	52
2016	80.2	112.2	37.3
2017	20.5	224.2	25
2018	81.7	129.7	49
Mean±S.D.	51.4 ± 25.2	230.8 ± 136.5	43.0 ± 20.8

순생태계생산량(NEP, Net Ecosystem Production)을 결정 짓는 주요한 요인 중 하나이다(Liang et al., 2003; Litton et al., 2004).

본 연구에서는 환경요인 중 봄철에 내리는 강수량이 생태계서비스 감소에 가장 크게 관련하고 있음을 확인하였다. 그리고 서울 남산의 소나무 자연숲이 받는 환경요인의 영향은 현재 대도시에 조성된 도시림이나 인공숲 그리고 마을숲에도 유사할 것이다. 이러한 도시림의 토양호흡을 줄이기 위해서는 토양함수량이 적게 되도록 배수를 관리하는 것이 우선적으로 중요함을 뜻한다(Mun and You, 2019).

감사의 글

본 연구는 2018년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행되었습니다(No. NRF-2018R1A2B5A01021358).

References

Bond-Lamberty, B., Wang, C. and Gower, S.T. 2004. Contribution of root respiration to soil surface CO₂ flux in a boreal black spruce chronosequence. *Tree Physiology* 24(12): 1387-1395.

Boone, R.D., Nadelhoffer, K.J., Canary, J.D. and Kaye, J.P. 1988. Roots exert a strong influence on the temperature sensitivity of soil respiration. *Nature* 396: 570-572.

Buchmann, N. 2000. Biotic and abiotic factors controlling soil respiration rates in *Picea abies* stands. *Soil Biology and Biochemistry* 32(11-12): 1625-1635.

Burton, A.J., Pregitzer, K.S., Zoggand, G.P. and Zak, D.R. 1998.

Drought reduces root respiration in sugar maple forests. *Ecological Applications* 8(3): 771-778.

Doran, J.W., Mielke, L.N. and Power, J.F. 1990. Microbial activity as regulated by soil water-filled porespace. *International Society of Soil Science* 94-99.

Fang, C. and Moncrieff, J.B. 2001. The dependence of soil CO₂ efflux on temperature. *Soil Biology and Biochemistry* 33(2): 155-165.

Hanson, P.J., Edwards, N.T., Garten, C.T. and Andrews, J.A. 2000. Separation root and soil microbial contributions to soil respiration: A review of methods and observation. *Biogeochemistry* 48: 115-146.

Hibbard, K.A., Law, B.E., Reichsteine, M. and Sulzman, J. 2005. An analysis of soil respiration across northern hemisphere temperate ecosystems. *Biogeochemistry* 73: 29-70.

Hu, H. and Wang, G.G. 2008. Changes in forest biomass carbon storage in the South Carolina Piedmont between 1936 and 2005. *Forest Ecology and Management* 255(5-6): 1400-1408.

Intergovernmental Panel on Climate Change. 2014. *Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Core Writing Team, R.K. Pachauri and L.A. Meyer (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland. pp. 151.

Kim, J.H. 2012. *Global Warming through The Eyes of a Biologist*. Seoul University Press, Seoul.

Kim, Y.H. 2015. Estimation of secondary emissions from forest carbon offset projects. *Journal of Climate Change Research* 6(4): 257-265.

Kirschbaum, M.U.F. 2000. Will changes in soil organic carbon act as a positive or negative feedback on global warming?. *Biogeochemistry* 48(1): 21-51.

Knapp, A.K., Conard, S.L. and Blair, J.M. 1998. Determination of soil CO₂ flux from a sub-humid grassland: effects of fire and fire history. *Ecological Application* 8(3): 760-770.

Koo, J.W., Son, Y.H., Kim, R.H. and Kim, J. 2005. A study on Methods of Separating Soil Respiration by Source. *Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology* 7(1): 28-34.

Korea Meteorological Administration. 2018. *Monthly Report of Automatic Weather System Data*. Korea meteorological administration Press, Seoul.

Lee, E.H., Lim, J.H. and Lee, J.S. 2010. A review on soil respiration measurement and its application in Korea. *Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology* 12(4): 264-276.

Lee, E.P., Lee, S.I., Jeong, H.M., Han, Y.S., Lee, S.Y., Park, J.H., Jang, R.H., Hong, Y.S., Jung, Y.H., Kim, E.J., Lee,

- S.H. and You, Y.H. 2019. Valuation of Ecosystem Services in the Organic Carbon of the *Pinus densiflora* Forest at Mt. Namsan, Seoul Metropolitan City. *Journal of Ecology And Environment* 43(35).
- Liang, N., Inoue, G. and Fujinuma, Y. 2003. A multi-channel automated chamber system for continuous measurements of forest soil CO₂ efflux. *Tree Physiology* 23(12): 825-832.
- Linn, D.M. and Doran, J.W. 1984. Effects of water-filled pore space on carbon dioxide and nitrous oxide production in tilled and non-tilled soils. *Soil Science Society of America Journal* 48(6): 1267-1271.
- Liski, J., Ilvesniemi, H., Makela, A. and Westman, C.J. 1999. CO₂ emissions from soil in response to climatic warming are overestimated: The decomposition of old soil organic matter is tolerant of temperature. *Ambio* 28(2): 171-174.
- Litton, C.M., Ryan, M.G. and Knight, D.H. 2004. Effects of tree density and stand age on carbon allocation patterns in postfire lodgepole pine. *Ecological Applications* 14(2): 460-475.
- Liu, Q., Edwards, N.T., Post, W.M., Gu., L. Ledford, J. and Lenhart, S. 2006. Temperature-independent diel variation in soil respiration observed from a temperate deciduous forest. *Global Change Biology* 12(1): 2136-2145.
- Maier, C.A. and 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.
- Mun, H.T. and You, Y.H. 2019. *Soil Environmental Science*. Gongju University Press, Gongju.
- No, H.J. and Jeong, H.Y. 2002. Well defined statistical analysis according to Statistica. Hyungseul Publisher, Seoul. pp. 535-556.
- No, T.H. 2015. *The Eco-adaptive Urban Forest Management Methods of Namsan(Mt.) According to the Urban Environment Change and Management in Seoul, Korea*. (Ph.D Dissertation). Seoul. Seoul University.
- Oh, K.S., Koo, J.H. and Cho, C.G. 2005. The Effects of Urban Spatial Elements on Local Air Pollution. *Korea Planners' Association* 40(3): 159-170.
- Oke, T.R. and Rouse, W.R. 1997. *The surface climates of Canada*. McGill-Queen's university press, Montreal. pp. 21-43.
- O' Meara, M. 1999. *Reinventing Cities for People and the Planet*. Worldwatch, Washington.
- Pietikainen, J., Vaijärvi, E., Ilvesniemi, H., Fritze, H. and Westman, C.J. 1999. Carbon storage of microbes ad roots and the flux of CO₂ across a moisture gradient. *Canadian Journal of Forest Research* 29(8): 1197-1203.
- Raich, J.W. and Schlesinger, W.H. 1992. The global carbon dioxide flux in soil respiration and its relationship to vegetation and climate. *Tellus* 44(2): 81-99.
- Roh, Y.H., Kim, C.K. and Hong, H.J. 2016. Time-Series Changes to Ecosystem Regulating Services in Jeju : Focusing on Estimating Carbon Sequestration and Evaluating Economic Feasibility. *Journal of Environmental Policy and Administration* 24(2): 29-44.
- Seoul Metropolitan Government. 2009. *Study on Establishment of Namsan Ecological and Landscape Conservation Area Management Plan -2nd year-*. Seoul Metropolitan Government, Seoul.
- Suh, S.U., Park, A.E., Shim, K.Y., Yang, B.G., Choi, E.J., Lee, J.S. and Kim, T.K. 2014. The effect of rain fall event on CO₂ emission in *Pinus koraiensis* plantation in Mt. Taehwa. *Korean Journal of Environmental Biology* 32(4): 389-394.
- Tamai, K. 2009. Experimental estimation of the effect of rainfall interception on soil respiration in a broad-leaved deciduous forest in western Japan. *Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology* 11(4): 247-251.
- Witkamp, M. 1966. Rates of carbon dioxide evolution from litter and soil. *Ecology* 47(3): 922-924.
- Xu, M. and Qi, Y. 2001. Soil-surface CO₂ dfflux and its spatial and temporal variations in a young ponderosa in northern California. *Global Change Biology* 7(6): 667-677.
- Yuste, J., Curiel, I., Janssens, A. and Cuelemans, R. 2005. Calibration and validation of an empirical approach to model soil CO₂ efflux in a deciduous forest. *Biogeochemistry* 73(1): 209-230.
- Zhou, T., Shi, P., Hui, D. and Luo, Y. 2009. Global pattern of temperature sensitivity of soil heterotrophic respiration (Q₁₀) and its implications for carbon-climate feedback. *Journal of Geophysical Research* 114(G2): 1-9.

Manuscript Received : March 12, 2020

First Revision : April 14, 2020

Second Revision : April 20, 2020

Accepted : April 21, 2020