

강우에 의한 토양호흡 배출 특성이 연간 토양호흡 배출량에 미치는 영향 연구

공학양* · 박성애* · 심규영* · 김태규** · 이재석*** · 서상욱****†

*국립환경과학원, **국립습지센터, ***건국대학교, ****국립농업과학원

A Study on Annual Carbon Emission Characteristic Changes Affected by Rainfall

Kong, Hak Yang*, Park, Sung Ae*, Shim, Kyu Young*, Kim, Tae Kyu**,
Lee, Jae Seok*** and Suh, Sang Uk****†

*National Institute of Environmental Research, Incheon, Korea

**National Wetlands Center, Changnyeong, Korea

***Konkuk University, Seoul, Korea

****National Institute of Agricultural Science, Wanju, Korea

ABSTRACT

For better understand of the soil respiration characteristic in ecosystem, it is necessary to accurately determine the daily, monthly and seasonal CO₂ flux related to various environmental factors. In general, soil respiration is being measured on a sunny day. But soil respiration is known to be affected by soil temperature and soil moisture content. In case of forestry, changes in soil moisture content are entirely dependent on rainfall. If we calculated the monthly soil respiration measured based on sunny days data only, it could be a factor that loses credibility soil respiration. On this study, we measured soil respiration on *Pinus koraiensis* plantation at Mt. Taehwa of Gwangju, Gyeonggi-do on sunny and rainy days in 2012, using Automatic Open-Closed Chamber system (AOCC) and portable CO₂ analyzer (GMP343). Then we computed the regression equations using sunny days data, precipitation less than 10 mm data, and precipitation over 10 mm data. At first, there were no significant differences in observed data and computed data. But less than 10 mm precipitation, computed data was 26.5% lower than observed data. Precipitation over 10 mm, on the other hand, the former was 29.3% higher than the latter. In each case, it showed significant differences between observed and computed data ($p < 0.05$). So if we computed regression equation using soil respiration measured sunny days only, about 30% of annual soil respiration could be overestimated. Through further study, we suggest the subdivision and computation of regression equation on the basis of the rainfall intensity.

Key words: Soil Respiration, CO₂, Rainfall Intensity, *Pinus koraiensis* Plantation

1. 서 론

산업혁명이전 대기 중 약 280 ppm으로 안정적이던 CO₂ 농도는 산업화에 따른 급격한 화석연료의 사용 증가와 더불어 삼림벌채, 농경지 변환 등으로 인하여 매년 약 3.4 PgC yr⁻¹ (Pg=10¹⁵g)의 탄소가 대기 중으로 축적되고 있는 것으로 알려져 있으며(IPCC, 2001; IPCC, 2007), 최근 10년 동안의 연간 CO₂ 증가율은 약 1.9 ppm으로 가장 높은 수준을 보이고 있다(IPCC, 2007). 이렇게 배출된 CO₂는 지구 생태계의 흡수·배출

의 양적 속도변화에 영향을 주어 탄소순환의 불균형과 비가역적인 변화를 주어, 전 지구적인 기후변화 초래와 더불어 다양한 생태계에 직간접적으로 심각한 혼란을 초래할 것으로 예견되고 있다(Rosenzweig and Hillel, 1998). 이에 1997년 12월 기후변화협약 교토회의에서 지구온난화 방지를 위한 온실가스 배출량의 의무감축에 대한 방안이 합의되었다. 이러한 의무감축에 따른 경제적 부담을 줄이기 위하여 각국은 산림의 CO₂ 흡수기능을 이용한 의무감축량의 경감에 주목하고 있다. 이에 산림의 정확한 탄소흡수량 및 배출량을 산정하기 위

† Corresponding author: sanguk07@gmail.com

Received August 25, 2016 / Revised October 10, 2016 / Accepted October 28, 2016

한 연구가 활발히 진행되고 있는 실정이다.

산림의 탄소배출은 대부분 토양호흡의 형태로 토양권으로부터 대기 중으로 배출된다. 이러한 토양권은 식생의 약 3배, 대기의 약 2배에 달하는 막대한 양의 탄소를 축적하고 있는 것으로 알려져 있으며(IGBP, 1998; Waring and Running, 1998), 약 75 Pg의 탄소가 토양호흡의 형태로 대기 중으로 배출되어 전 지구적 탄소 순환에서 매우 중요한 역할을 하고 있다(Bond-lamberty *et al.*, 2004).

이러한 토양호흡은 뿌리와 미생물 호흡의 결과물이며(Hanson *et al.*, 2000; Zhou *et al.* 2009), 지온과 토양수분함량이 토양호흡에 영향을 미치는 주요 환경인자로 알려져 있다(Rachhpal *et al.*, 2008). 삼림에 있어 이러한 지온과 토양수분함량은 주로 강우 패턴 및 강도에 따라 영향을 받게 되며, 이는 토양호흡 배출 양상의 변화를 초래하게 된다(Tamai, 2009).

Lee *et al.*(2010)에 따르면 대부분의 토양호흡관련 측정은 휴대용 토양호흡 측정 장치의 발전과 더불어 CDC(Closed Dynamic chamber method)법을 가장 많이 이용하는 것으로 알려져 있고, 이러한 측정 방식은 측정의 용이성과 다수의 반복성을 실현할 수 있다는 장점이 있지만, 강우나 장마와 같은 악천후 시에는 측정이 용이치 않은 단점이 있다. 이로 인하여 대부분의 토양호흡측정은 월 1~2회 기준으로 맑은 날 주로 측정되고 있는 실정이다. 그러나 자동화 측정 장비와 휴대용 측정 장비를 동시에 이용하여 장마 및 태풍과 같은 기상이벤트에 의해 토양호흡 배출양상이 달라짐을 보고한 Suh *et al.* (2014)의 결과에 따르면, 강우의 영향을 받지 않은 맑은 날 월 1~2회 측정하여 이를 측정월의 대푯값으로 사용하는 데는 무리가 있을 것으로 생각된다. 이런 측정방식의 경우, 측정일이 측정월의 대푯값이라는 전제하에 이루어지기에, 만약 측정일이 측정월의 기상조건을 적절히 반영하지 못한다면 측정월의 토양호흡값은 신뢰성을 잃게 된다. 이를 극복하기 위해서는 자동 토양호흡 측정 장비를 이용한 연속 측정이 요구되지만, 현실적으로 기성제품의 경우 비용적인 문제 그리고 자체 제작한 연속 측정 장비 운영 시에는 전문 운영인력이 요구되는 문제점을 안고 있다.

이에 본 연구는 경기도 광주시 태화산내 50년생 잣나무 식재림을 대상으로 2012년 1월부터 2013년 12월 31일까지 자동 토양호흡 측정 장비를 이용한 측정이 이루어지는 기간 중 장마와 태풍(볼라벤, 덴빈, 산바)가 북상한 2012년 7월부터 9월까지 휴대용 측정 장비를 이용하여 강우 전후를 대상으로 토양호흡 배출 특성을 집중 측정하였다. 이를 통해 강우의 영향이 보정된 토양호흡배출량과 미보정 토양호흡배출량간의 차이를 살펴보았다.

2. 재료 및 방법

2.1 조사지역 현황

본 연구는 경기도 광주시 도척면 추곡리에 위치한 태화산(북위 37°16'~18', 동경 127°16'~19', 고도 162 m)에 위치한 서울대학교 학슬림 내 50년생 잣나무 조림지를 대상으로 하였다. 대상 산림은 1963년 식재되어 1988년과 2000년에 각각 1, 2차 간벌이 이루어졌으며, 평균 임분밀도는 2012년에 약 410 tree ha⁻¹으로 조사되었다. 대상 연구지의 평균 수고는 16.2 ± 1.1 m, 평균 흉고직경(DBH: Diameter at Breast Height)은 27.9±4.0 cm이다(Ryu *et al.*, 2014). 군락 내 아교목층에는 개울나무가 주로 우점하였고, 이외 밤나무와 쪽동백나무가 생육하고 있으며, 관목층 역시 개울나무가 우점하였고, 갈참나무, 두릅나무, 산초나무와 국수나무, 노린재나무 등 총 33종이 출현하였다. 초본층은 지면을 따라 뱀고사리, 가는잎쭈제비고사리, 주름조개풀 등이 우점하였다. 토양은 약산성의 사양토로 많은 유기물을 함유하고 있으며, 최대용수량은 약 65%, 토양 밀도는 1.37 g cm⁻³이었다. 대상 연구지의 연평균 기온은 11.5 °C이며, 연평균 강수량은 1,300 mm 정도이다.

2.2 측정 및 분석

2.2.1 자동화 측정 장비를 이용한 토양호흡 연속 측정

자동화 측정 장비는 Suh *et al.*(2006)이 제작한 AOCC(Automatically Open/Closed Chamber) 시스템을 이용하여 2012년 1월부터 2013년 12월까지 기상 조건에 구애를 받지 않으며, 24시간 연속 측정하였다. AOCC 시스템은 시스템 내부의 전력을 분할-공급하기 위한 전력분배부와 측정 시 공기의 흐름을 조절하는 펌프부, 그리고 챔버부로 구성되어 있다. 챔버부는 총 6개의 챔버로 이루어져 있으며, 각 챔버는 10분 간격으로 측정이 진행되었다. 이산화탄소의 측정은 Closed Dynamic Chamber(CDC) 방법을 이용하여 밀폐된 챔버에서 단위시간동안 유출된 공기의 이산화탄소 농도를 LI-820(Li-Cor, Inc., Lincoln, NE, USA)로 측정한 후, 식 (1)을 활용하여 단위면적당 농도의 변화율로 환산하고, 토양호흡량을 계산하였다(Bekku *et al.*, 1995).

$$\text{Observed soil respiration with AOCC}(F_A) = A \times C \times \rho \times V / S \quad (1)$$

A : 변환상수

C : 단위시간 농도 증가율(ppm min⁻¹)

ρ : CO₂ 밀도(mg m⁻³)
 V : 챔버의 부피(m³)
 S : 챔버가 덮고 있는 토양의 단면적(m²)
 Unit : mgCO₂ m⁻² h⁻¹

2.2.2 휴대용 측정 장비를 이용한 토양호흡 측정

자동화 측정 장비를 이용한 토양호흡 측정과 병행하여, 휴대용 측정 장비(GMP343, Vaisala, Helsinki, Finland)를 이용한 월 1~2회 주기적인 토양호흡의 측정이 이루어졌다. 대상 연구지의 토양에 9개의 직경 10 cm, 높이 20 cm의 아크릴 재질 collar를 매설한 후, 측정 시에만 collar를 덮어 GBMP343을 고정할 수 있는 챔버를 제작하여 자동화 측정 장비와 동일한 CDC 방법으로 이산화탄소의 농도변화를 측정한 후, 단위 시간, 단위면적당 이산화탄소의 농도변화율로 환산하여 토양호흡량을 계산하였다(Bekku *et al.*, 1995; 식 (2)).

측정은 2012년 1월부터 2015년 12월까지 맑은 날을 기준으로 월 1~2회, 일평균 기온을 대표할 수 있는 오전 10시, 오후 4시경을 기준으로 하여 진행되었다. 이와 더불어 강우 패턴 및 강도에 따른 토양호흡의 배출양상을 파악하기 위하여 2012년 장마와 더불어 3차례의 태풍(볼라벤, 덴빈, 산바)이 한 반도에 영향을 미친 8월 중순부터 9월 중순까지는 강우 시작 시점을 전후하여 집중 측정이 이루어졌다.

$$\text{Observed soil respiration with GMP343}(F_C) = A \times C \times \rho \times V / S \quad (2)$$

A : 변환상수
 C : 단위시간 농도 증가율(ppm min⁻¹)
 ρ : CO₂ 밀도(mg m⁻³)
 V : 챔버의 부피(m³)
 S : 챔버가 덮고 있는 토양의 단면적(m²)
 Unit : mgCO₂ m⁻² h⁻¹

2.2.3 회귀식을 이용한 토양호흡 산정

회귀식은 2012년과 2013년에 휴대용 측정 장비인 GMP343을 이용하여 맑은 날 측정된 토양호흡량과 지온(5 cm)과의 상관관계 분석을 통해 산정하였다.

토양호흡의 측정은 발생량이 상대적으로 적은 저온기인 1~3월과 11~12월에는 매월 중순에 1회 토양호흡을 측정하였으며, 4~10월 사이에는 매월 둘째 주와 넷째 주에 격주로 월 2회 토양호흡을 측정하여 평균한 후 측정일의 대푯값으로 하

였다.

2012년 장마와 태풍 발생 시기는 GMP343을 이용하여 강우시기를 전후하여 토양호흡량을 측정된 후, 강우 강도에 따라 10 mm 이하와 10 mm 이상으로 구분하였다. 이는 다시 지온과 토양수분함량 등과의 회귀분석을 하여 강우 강도에 따른 회귀식을 산정하였다(Tamai *et al.*, 2008).

$$\text{Calculated soil respiration}(F_C) = A \times \text{EXP}(B \times T_5) \times (\Theta_5 / C + \Theta_5) \quad (3)$$

A, B, C : 변환상수
 T₅ : 5 cm 지온(°C)
 Θ₅ : 5 cm 토양수분함량(V/V)
 Unit : mgCO₂ m⁻² h⁻¹

휴대용 측정 장비와 자동화 측정 장비를 이용하여 실측된 토양호흡량과 회귀식을 이용하여 추정된 토양호흡량 간의 상호비교에는 T 검정(t-test)과 분산분석(ANOVA)을 이용하였으며, 분석 후 사후검정에는 Duncan's multiple range test를 이용하여 평균간 차이를 비교하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 자동화 측정 장비를 이용한 토양호흡의 연속 측정

태화산 잣나무 식재림에서 자동화 측정 장비를 이용하여 2012년 1월부터 2013년 12월까지 측정된 토양호흡량과 지온(지하 5 cm)은 Fig. 1과 같다. 정전 등의 원인에 의해 측정기간 결측된 자료는 인근 이전 기상관측소 기상자료를 이용하여 태화산 측정사이트의 기온을 추정하고, 토양호흡과 지온과의 지수함수식을 이용하여 내삽하였다.

전반적으로 토양호흡과 지하 5 cm에서의 지온과는 매우 유사한 변화양상을 보여주었다. 2012년 1월부터 3월까지의 토양호흡은 평균 40.6 mgCO₂ m⁻² h⁻¹ 정도이었지만, 점차 기온이 상승하는 여름에 다가서면서 증가하여 4월부터 9월까지는 평균 431.0 mgCO₂ m⁻² h⁻¹으로 10배 이상 증가하였다. 10월부터는 기온의 감소와 더불어 토양호흡도 132.4 mgCO₂ m⁻² h⁻¹로 감소하는 경향을 보였다. 2013년의 경우, 2012년과 동일한 기간 동안의 토양호흡량은 각각 36.8, 462.3, 150.6 mgCO₂ m⁻² h⁻¹으로 여름기간동안 급격히 토양호흡 배출량이 증가하다가 가을, 겨울을 거쳐 이듬해 봄까지 상대적으로 낮아지는 2012년의 결과와 유사한 경향을 보였다. 2012년과 2013년 각각의

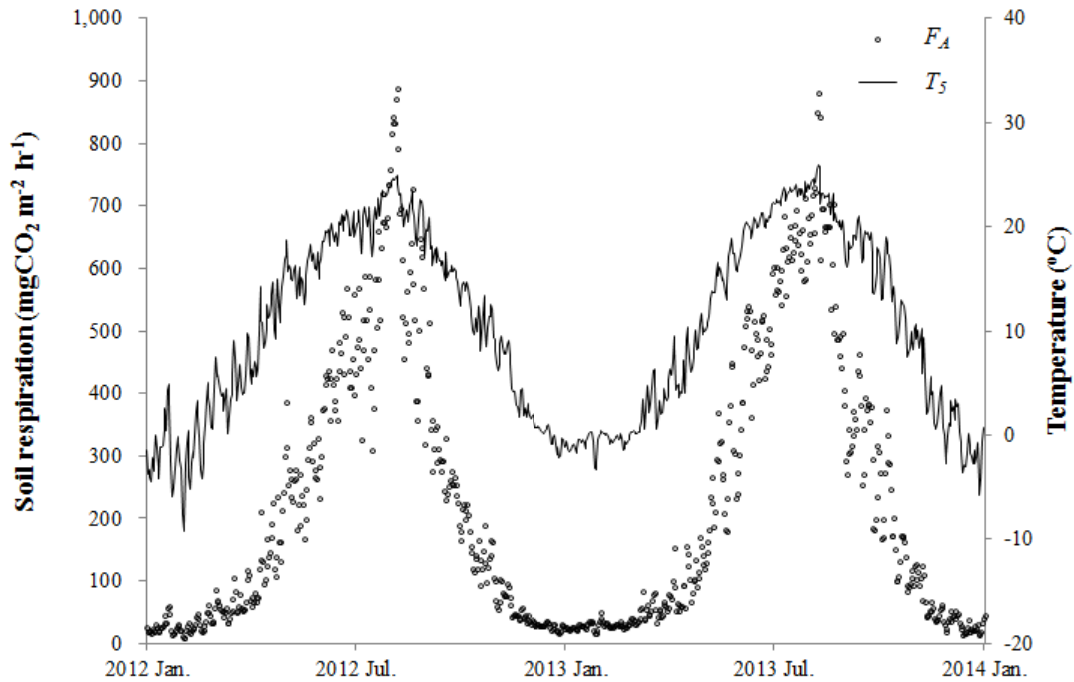


Fig. 1. Annual soil respiration and soil temperature from 2012 to 2013. F_A for observed soil respiration using AOCC and T_5 for soil temperature at 5 cm depth.

일별 토양호흡량 데이터를 대응표본 T 검정을 한 결과, 2012년과 2013년에는 유의한 차이가 없는 것으로 나타났다($p > 0.05$). 이를 연간 토양호흡배출량으로 환산하여 보면 2012년과 2013년에는 각각 29.3, 27.7 $\text{tonCO}_2 \text{ ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$ 이었다.

2012년과 2013년 모두 기온이 상승하는 4~5월부터 토양호

흡도 급격히 증가하는 모습을 보였으며, 기온이 저하되는 9월 이후에는 토양호흡도 감소하는 경향을 보였다. 이러한 토양호흡은 지온(5 cm)과 매우 높은 양의 상관관계를 보여주었다(Fig. 2). 토양호흡의 계절변동성은 충분한 토양수분 조건하에서 지온에 지수 함수적으로 증가한다는 Hubbard *et al.*(2005)의 보

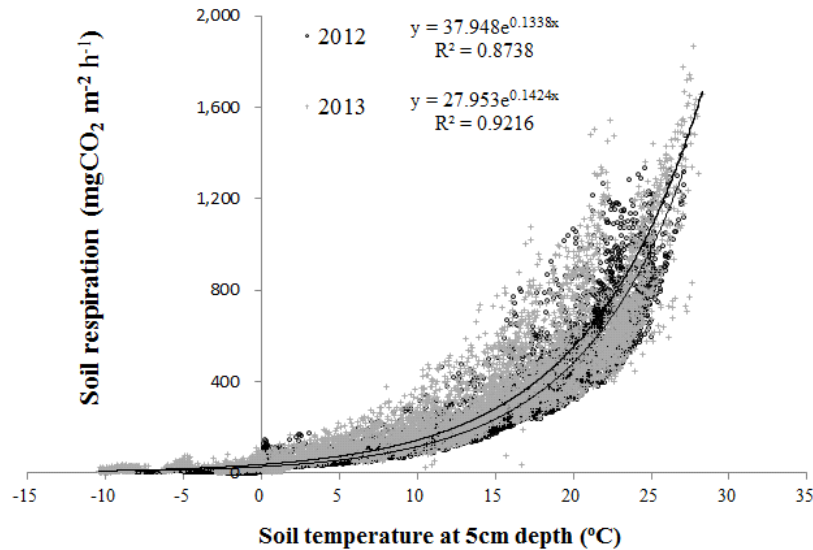


Fig. 2. Regression analysis between soil respiration and soil temperature.

고와 일치하는 결과이었다.

온도에 대한 토양호흡의 민감도를 나타내는 Q_{10} 값은 2012년의 경우 4.1, 2013년의 경우 3.8의 민감도를 보였다. Jung *et al.*(2014)은 울진 소나무림에서 2.9, Lee *et al.*(2009)은 사과과 수원에서 2.0, Heo *et al.*(2014)은 광릉활엽수림에서 3.2 그리고 태화산 학솔림에서 3.6을 보고한 바 있다.

3.2 주기적 토양호흡 측정에 의한 월별 및 연간 토양호흡 배출 특성

휴대용 토양호흡 측정 장비를 이용한 데이터는 측정일의 일데이터를 기본으로 월별 토양호흡 데이터를 생성한다. 이러한 과정을 거쳐 2012년부터 2015년까지의 월별 토양호흡량을 산정하였으며, 자동 측정 장비를 이용하여 측정된 시간별 토양호흡 배출량을 월단위로 환산한 결과는 Fig. 3과 같다. 자동화 측정 장비를 이용한 토양호흡이 측정되지 않은 2014년과 2015년 토양호흡량은 2012년과 2013년의 토양호흡량과 지온간의 회귀분석을 통해 계산하여 도식화 하였다.

자동화 측정 장비를 이용하여 토양호흡이 실측된 2012년과 2013년간의 데이터만을 비교하여 보면, 상대적으로 저온기인 1~3월, 10~12월의 경우 휴대용 측정 장비를 이용한 토양호흡량($58.2 \text{ gCO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ month}^{-1}$)이 자동화 측정 장비를 이용한 토양호흡량($55.4 \text{ gCO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ month}^{-1}$)보다 약 5.1% 높게 나타났다. 그러나 비교적 고온기인 4~9월에는 휴대용 측정 장비의 경우 $539.6 \text{ gCO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ month}^{-1}$, 자동화 측정 장비를 이

용하여 측정된 토양호흡은 $419.2 \text{ gCO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ month}^{-1}$ 으로 휴대용 측정 장비가 약 28.7% 높게 나타났으며 이는 통계학적으로도 유의미한 차이를 보이는 수준이었다($p < 0.05$). 이를 다시 연단위로 변환하여 보면, 강우 등의 기상환경을 반영한 자동화 측정 장비는 2012년과 2013년에 각각 $29.3, 27.7 \text{ tonCO}_2 \text{ ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$ 의 토양호흡 배출량을 보인 반면, 맑은 날 측정된 측정값만으로 연간 토양호흡 배출량을 산정하는 경우, 2012년과 2013년에 각각 $36.0, 35.9 \text{ tonCO}_2 \text{ ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$ 으로 약 22.9~29.6% 과대평가되는 것으로 나타났다.

3.3 강우 강도에 따른 토양호흡 배출 특성

2012년은 장마와 더불어 태풍 볼라벤, 덴빈, 산바가 우리나라에 영향을 미치고 지나간 해이다. 장마 및 세 개의 태풍이 지나간 8월 14일부터 9월 17일까지 자동화 측정 장비와 휴대용 측정 장비를 이용하여 강우 강도에 따른 토양호흡의 배출 양상을 살펴보았다(Fig. 4).

강우 강도에 있어서는 10 mm day^{-1} 이하와 10 mm day^{-1} 이상, 두 가지 조건을 비교하여 보았다. 강우 강도와외의 정밀한 분석을 위해서는 보다 세분화된 강우 강도 조건이 필요하지만, 장마와 태풍이 발생한 시기동안 현지 측정 사이트에서 진행된 실험인 관계로 측정기간 동안의 강우량을 고려하여 10 mm 를 기준으로 두 그룹으로 나누어 분석을 하였다.

자동화 측정 장비와 휴대용 측정 장비를 이용하여 실제 측정된 토양호흡량(F_A, F_G)과 맑은 날 지온과의 회귀식을 통해

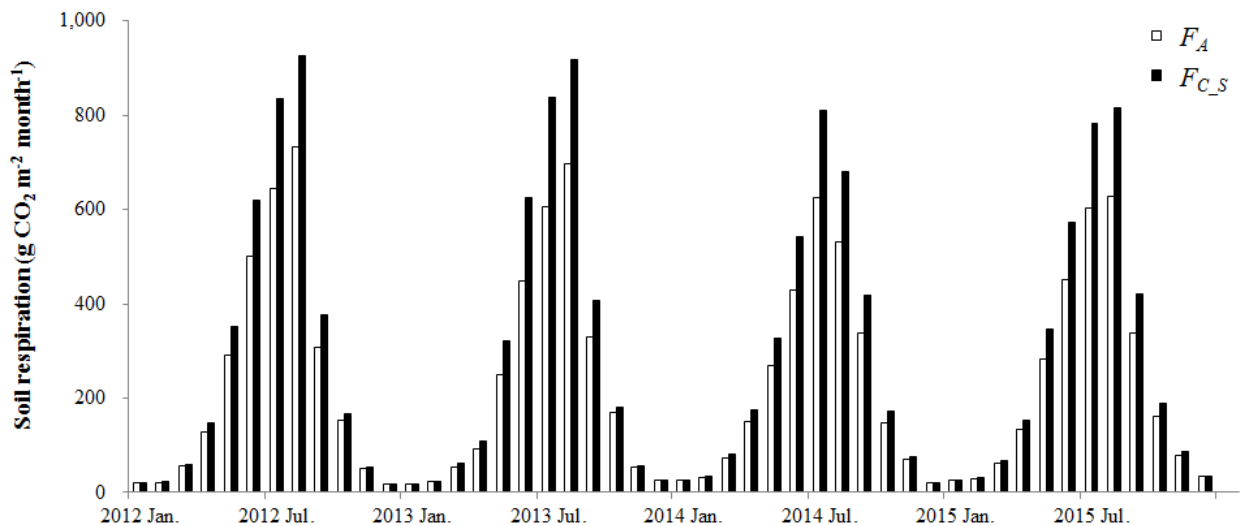


Fig. 3. Observed soil respiration using AOCC (F_A) and calculated soil respiration with sunny days (F_{C_s}). The F_A data from January 2014 to December 2015 were calculated by regression with soil temperature. F_{C_s} for calculated soil respiration using sunny days data only.

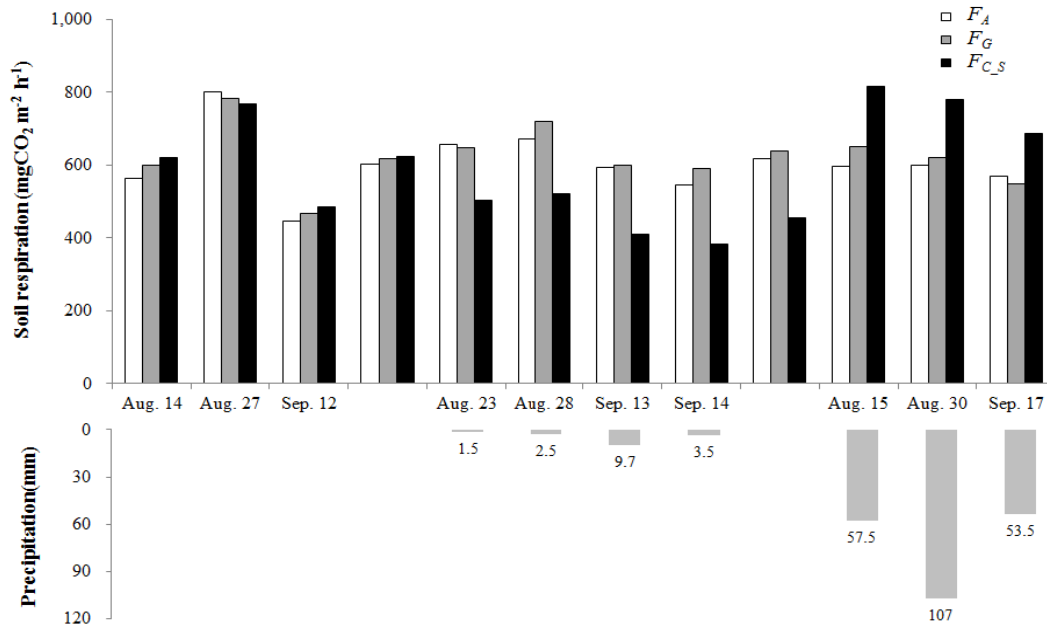


Fig. 4. Observed soil respiration using AOCC (F_A ; white bar) and GMP343 (F_G ; gray bar), and calculated soil respiration ($F_{C,S}$; black bar).

계산된 토양호흡량($F_{C,S}$)을 비교하여 보면, 8월 14일과 27일, 9월 12일은 맑은 날이었으며, 3일간 자동화 측정 장비, 휴대용 측정 장비 그리고 맑은 날의 회귀식에 의해 계산된 토양호흡량의 평균은 각각 603.0, 616.6, 625.1 $\text{mgCO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ 으로, 모두 3.0~5.1% 범위에서 서로 유사한 토양호흡량을 보여주었으며, 서로 간에 유의적인 차이($p > 0.05$)는 없는 것으로 나타났다. 그러나 일강수량 10 mm 이하의 강우가 발생한 두 번째 그룹(8월 23, 28일, 9월 13, 14일)에서는 휴대용 측정 장비를 이용하여 측정된 토양호흡량의 평균은 639.8 $\text{mgCO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ 이었으며, 자동화 측정 장비를 이용한 측정에서는 616.9 $\text{mgCO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ 으로 휴대용 측정 장비가 약 3.8% 높게 측정하였다. 그러나 맑은 날의 회귀식을 통해 추정된 토양호흡 값은 455.0 $\text{mgCO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ 으로 약 26.5% 낮게 과소평가되었다. ANOVA test를 통해서도 휴대용 측정 장비와 자동화 측정 장비 간에는 유의한 차이가 없었으나, 맑은 날의 회귀식을 이용하여 계산된 토양호흡량은 휴대용 및 자동화 측정 장비를 이용한 측정된 실측값과 유의한 차이를 보여주었다($p < 0.05$). 이는 강우 패턴 및 강우 강도의 변화가 산림 내 지표 유출수와 토양수분함량을 변화시키게 되어 토양호흡 배출 양성의 변화를 초래하게 된다는 Tamai *et al.*(2008)의 보고와, 강우 발생 시점부터 일시적으로 토양호흡이 증가하는 것을 보고한 Suh *et al.*(2014)의 결과를 고려할 때 맑은 날의 데이터만 이용하여 산정된 회귀식으로 토양호흡량을 추정하는 경우, 이러한 일시적 증가부

분을 충분히 반영하지 못한 것으로 생각된다.

마지막 세 번째 그룹(8월 15일, 8월 30일, 9월 17일)은 일강수량 10 mm 이상으로, 휴대용 측정 장비와 자동화 측정 장비로 측정된 토양호흡은 각각 607.8, 588.0 $\text{mgCO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ 으로 서로간의 차이는 약 3.3%로 유의적인 차이는 없었으나($p > 0.05$), 맑은 날의 회귀식에 의해 계산된 토양호흡량은 760.9 $\text{mgCO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ 으로 약 29.3%로 과대평가되며, 5% 유의수준에서 차이를 보이는 것으로 나타났다. 이는 월 대포값을 계산하기 위해서는 온도와 유의적인 상관관계뿐만 아니라, 강우에 의한 영향도 반영해야 한다는 점을 시사하고 있다.

장마 및 태풍이 발생한 측정기간 동안 휴대용 측정 장비를 이용하여 측정된 토양호흡과 지온과의 상관관계는 Fig. 5와 같다.

맑은 날과 강우 발생 시 모두 지온 5 cm와 높은 상관관계를 보여주었다. 이에 반하여 토양수분함량의 경우는 토양호흡량과 별다른 상관관계를 찾아볼 수 없었다. 이는 강우에 따른 토양수분함량의 일시적인 증감뿐만 아니라, 강우 강도에 따른 지속일수, 토양 최대용수량과 같은 토양 물리·화학적 특성 등의 변수요인이 너무 다양하기 때문으로 생각된다(Davidson *et al.*, 2002).

이 기간 동안 측정된 데이터를 이용하여 산정된 세 개의 회귀식(맑은 날, 10 mm 이하의 강우 조건, 10 mm 이상의 강우 조건)을 통해 2012년부터 2015년까지 각 장비별 측정 방식을

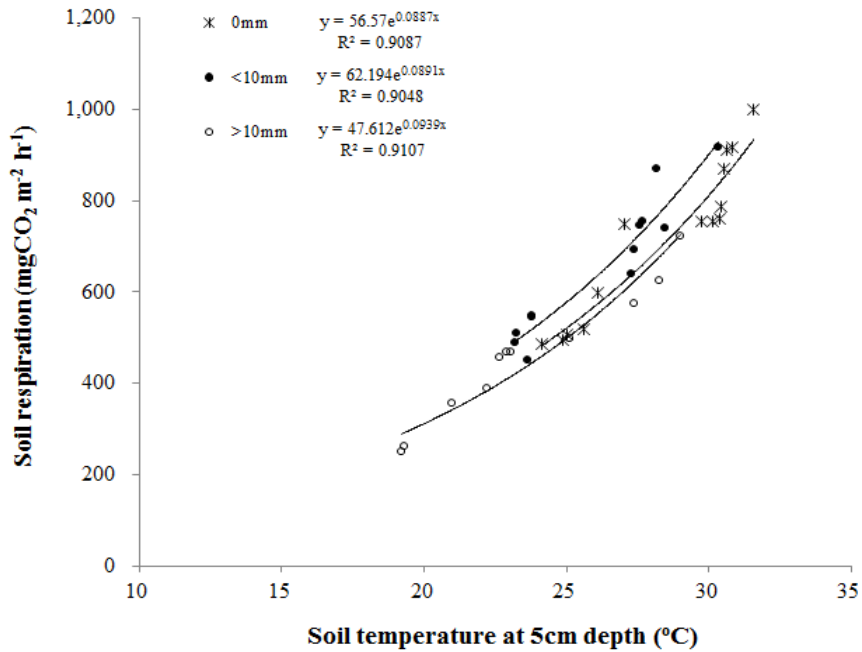


Fig. 5. Regression analysis between F_G (observed data with GMP343 CO₂ analyzer) and soil temperature at 5 cm depth on clear and rainy days.

고려한 연간 토양호흡량은 Fig. 6과 같다.

맑은 날 휴대용 측정 장비를 이용하여 측정한 연간 토양호흡량은 2012년부터 2015년까지 각각 36.0, 35.9, 33.6, 35.3 tonCO₂ ha⁻¹ yr⁻¹이었다. 그러나 강우 조건을 보정하여 연간 토양호흡량을 산정하는 경우에는 각각 27.4, 27.3, 26.0, 27.6

tonCO₂ ha⁻¹ yr⁻¹으로 맑은 날에만 측정하여 연간 토양호흡량을 산정하는 경우보다 약 21.8에서 24%까지 토양호흡으로 배출되는 이산화탄소의 양이 적게 산정되었다.

자동화 측정 장비를 이용하여 실측되었던 2012년과 2013년의 토양호흡량을 비교하여 보면 자동화 측정 장비는 2012

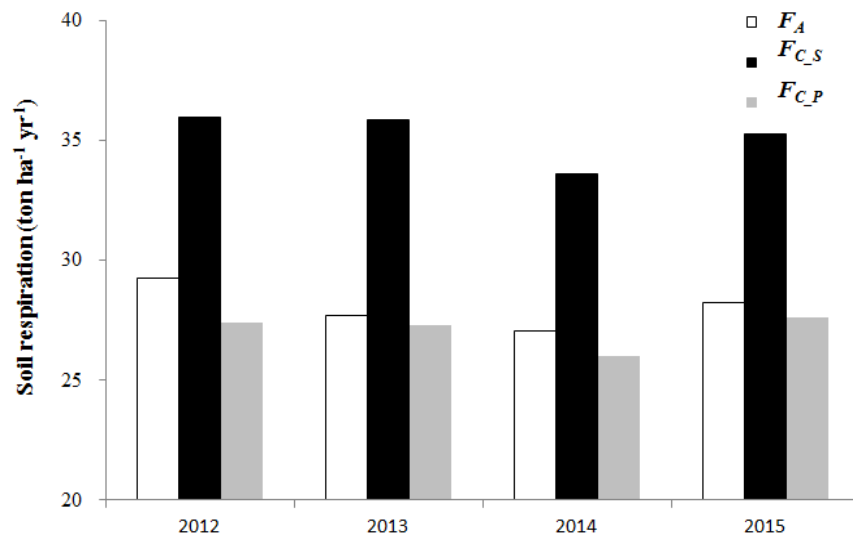


Fig. 6. Comparison of annual soil respiration from 2012 to 2015. F_A for observed soil respiration using AOCC, F_{C_S} for calculated soil respiration using sunny days data only, and F_{C_P} for revised soil respiration with sunny and rainy days data.

년에는 29.3 tonCO₂ ha⁻¹ yr⁻¹, 2013년에는 27.7 tonCO₂ ha⁻¹ yr⁻¹의 토양호흡량을 나타냈으며, 동 기간 동안 강우 조건을 보정하여 연간 토양호흡량을 산정하는 경우에는 2012년에 27.4 tonCO₂ ha⁻¹ yr⁻¹, 2013년에는 27.3 tonCO₂ ha⁻¹ yr⁻¹으로 평균 4%의 차이를 보였다.

이러한 결과들을 볼 때 맑은 날 측정된 데이터로 산정된 회귀식을 이용할 경우, 실제 토양호흡의 형태로 배출되는 이산화탄소보다 약 30% 정도 과대평가되는 경우가 발생할 여지가 있을 것으로 생각된다. 따라서 토양호흡 측정에 있어 기상 조건을 모두 반영해 줄 수 있는 자동화 측정 장비를 이용한 토양호흡의 측정이 가장 이상적인 방법론이라 할 수 있을 것이다(Lee *et al.*, 2010.). 그러나 조사지 및 측정 환경에 따라 휴대용 측정 장비를 이용하는 경우에도 주기적 측정 및 강우와 같은 기상 이벤트 전후에는 추가로 측정을 실시하여, 강우나 다른 기상 이벤트에 따른 토양호흡 배출 양상을 반영할 수 있는 회귀식을 산정하고, 이를 이용하여 일별, 월별, 연간 토양호흡량을 산정하는 것이 바람직할 것으로 생각된다.

4. 결 론

일반적으로 토양호흡은 측정이 용이한 맑은 날 진행되고 있는 실정이다. 그러나 토양호흡은 지온 및 토양수분함량에 영향을 받는 것으로 알려져 있으며(Rachhpal *et al.*, 2008), 산림의 경우, 지온과 토양수분함량은 주로 강우 패턴 및 강도에 따라 영향을 받는 것으로 알려져 있다(Koji, 2004). 우리나라의 경우 연평균 1,270 mm의 강우가 내리며, 이 중 약 70%는 여름철에 집중되어 있는 실정이다. 이러한 강우는 토양의 물리·화학적 특성을 일시적으로 변화시켜 토양호흡의 배출 양상 또한 변화시키는 것으로 알려져 있다(Suh *et al.*, 2014). 따라서 맑은 날 측정된 토양호흡량을 월 대푯값으로 하여 연간 토양호흡에 의한 이산화탄소의 배출량을 환산한다면 연간 강우가 없는 경우의 토양호흡량을 산출하게 되며, 이는 토양호흡에 의한 이산화탄소 배출량 산정에 있어 신뢰성을 잃게 되는 요인이 된다. 이에 본 연구에서는 맑은 날뿐만 아니라, 강우가 발생 전후에도 측정을 실시하여 강우에 따른 토양호흡 배출 양상의 변화를 살펴보고자 경기도 광주시 도척면에 위치한 태화산 잣나무림을 대상으로 자동화 측정 장비와 휴대용 측정 장비를 이용하여 실험을 진행하였다.

자동화 측정 장비를 이용하여 강우 등의 기상환경을 반영하여 측정된 토양호흡량은 2012년과 2013년에 각각 연간 29.3, 27.7 ton CO₂ ha⁻¹ yr⁻¹이었으며, 휴대용 측정 장비를 이용하여 맑은 날만 측정된 토양호흡량은 2012년과 2013년에

각각 연간 36.0, 35.9 ton CO₂ ha⁻¹ yr⁻¹으로 약 22.9~29.6% 높게 나타났다. 이에 강우에 의한 토양호흡 배출 양상의 변화를 살펴보기 위하여 2012년 장마 기간 동안 자동화 측정 장비와 휴대용 측정 장비를 이용하여 실측한 결과와 맑은 날의 회귀식을 이용하여 산정된 토양호흡량을 서로 비교하였다. 먼저 맑은 날의 경우, 자동화 측정 장비와 휴대용 측정 장비 그리고 맑은 날의 회귀식을 이용하여 산정한 토양호흡량은 모두 3.0~5.1% 범위 안에서 유사한 값을 보여주었다. 그러나 일 강우량이 10 mm 이하인 경우, 자동화 측정 장비와 휴대용 측정 장비를 이용한 실측값은 95% 유의수준에서 차이가 없는 것으로 나왔으나, 맑은 날의 회귀식을 이용한 토양호흡량은 약 26.5% 낮게 산정되었다. 일 강우량이 10 mm 이상인 경우에도 자동화 측정 장비와 휴대용 측정 장비를 이용한 실측값은 유사하였지만, 맑은 날의 회귀식으로 산정된 토양호흡량은 오히려 약 29.3% 높은 것으로 나타났다.

이에 휴대용 측정 장비를 이용하여 일 토양호흡량을 산정 후, 월별 토양호흡량으로 환산할 때 맑은 날과 강우 강도에 따른 영향을 회귀식에 반영하는 경우, 자동화 측정 장비와 평균 4%의 차이를 보였다.

이는 맑은 날의 회귀식만을 이용하여 월별, 연간 토양호흡량을 산정하는 경우, 약 30% 정도 과대평가 될 수 있다는 것을 의미한다. 따라서 자동화 측정 장비를 이용하여 기상 여건을 실시간으로 반영하며, 연속 측정을 하지 않는 경우라면, 주기적인 토양호흡 측정과 더불어 강우와 같은 기상 이벤트를 반영할 수 있는 회귀식을 산정하고, 이를 일별, 월별, 연간 토양호흡량 산정에 반영하는 것이 필요한 것으로 생각된다.

이와 더불어 실내 실험 등을 통해 강우 강도 범위를 보다 세분화하여 강우에 따른 토양호흡량의 배출 양상을 반영할 수 있는 회귀식을 작성하는 후속 연구의 필요성이 제기된다.

사 사

본 연구는 국립환경과학원 조사연구사업 ‘도시녹지의 도시환경질 개선 연구(NIER-RP2015-303)’에 의해 수행되었습니다.

REFERENCES

- Bekku Y, Koizume H, Nakadai T, Iwaki H. 1995. Measurement of soil respiration using closed chamber method: An IRGA technique. *Ecological Research* 10(3):369-373.
- Bond-Lamberty B, Wang C, Gower ST. 2004. Contribution of root respiration to soil surface CO₂ flux in a boreal

- black spruce chronosequence. *Tree Physiology* 24:1387-1395.
- Davidson EA, Savage L, Verchot V, Navarro R. 2002. Minimizing artifacts and biases in chamber-based measurements of soil respiration. *Agricultural and Forest Meteorology* 113:21-37.
- Hanson PJ, Edward NT, Garten CT, Andrews JA. 2000. Separating root and soil microbial contributions to soil respiration: A review of methods and observations. *Biogeochemistry*. 48:115-146.
- Heo JH, Yi MJ, Kwon BR, Shin HY. 2014. Soil respiration of coniferous and deciduous stands at Gwangneung arboretum and Taehwa research forest. *Proceeding of the Korean Forestry Society*. pp 156 (In Korean with English abstract).
- Hubbard RM, Ryan MG, Elder K, Rhoades CC. 2005. Seasonal patterns in soil surface CO₂ flux under snow cover in 50 and 300 year old sub alpine forests. *Biogeochemistry* 73:93-107.
- IGBP. 1998. Terrestrial carbon working group. The terrestrial carbon cycle: Implications for the Kyoto Protocol. *Science*. 280:1393-1394.
- IPCC. 2001. Climate change 2001. A report of working group I of the intergovernmental panel on climate change. Cambridge University Press. Cambridge.
- IPCC. 2007. Climate change 2007: The physical science basis, contribution of working group I to the fourth assessment report of the intergovernmental panel on climate change. Cambridge University Press. Cambridge.
- Jung SH, Lee JH, Lim JH, Kim SD. 2014. Characteristics of annual soil respiration in a pine(*P. densiflora*) forest. *Proceeding of the Korean Forestry Society*. pp 11 (In Korean with English abstract).
- Koji D, Seita E, Taikan O. 2004. Rainfall amount, intensity, duration, and frequency relationships in the Mae Chaem Watershed in Southeast Asia. *J Hydrometeor* 5:458-470.
- Lee EH, Lim JH, Lee JS. 2010. A review on soil respiration measurement and its application in Korea. *Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology* 12(4):264-276 (In Korean with English abstract).
- Lee JM, Kim SH, Park HS, Seo HH, Yun SK. 2010. Estimation of soil CO₂ efflux from an apple orchard. *Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology* 11(2):52-60 (In Korean with English abstract).
- Lee YJ, Seo YO, Park SM, Pyo JK, Kim RH, Son YM, Lee KH, Kim HH. 2009. Estimation of biomass for 27 years old Korean pine(*Pinus koraiensis*) plantation in Gangneung, Ganwon-province. *Journal of Agriculture & Life Science* 43(1):1-8 (In Korean with English abstract).
- Rachhpal SJ, Andrew B, Michael DN, David GG, Zoran N. 2008. Effect of soil water stress on soil respiration and its temperature sensitivity in an 18-year-old temperate Douglas-fir stand. *Glob Chang Biol* 14:1305-1318.
- Rosenzweig C, Hillel D. 1998. Climate change and the global harvest. Oxford University Press. New York.
- Ryu DU, Moon MK, Park JH, Cho SS, Kim TK, Kim HS. 2014. Development of allometric equations for V age-class *Pinus koraiensis* in Mt. Taehwa plantation, Gyeonggi-do. *Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology* 16(1):29-38 (In Korean with English abstract).
- Suh SU, Chun YM, Chae NY, Kim J, Lim JH, Yokozawa M, Lee MS, Lee JS. 2006. A chamber system with automatic opening and closing for continuously measuring soil respiration based on an open-flow dynamic method. *Ecol Res* 21:405-414.
- Suh SU, Park AE, Shim KY, Yang BG, Choi EJ, Lee JS, Kim TK. 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 (In Korean with English abstract).
- 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.
- Tamai K, Kominami Y, Miyama T, Goto Y, Ohtani Y. 2008. Topographical effects on soil respiration in a deciduous forest-The case of weathered granite region in Southern Kyoto Prefecture. *J Agricultural Meteorology* 64:212-222.
- Waring RH, Running SW. 1998. Forest ecosystems: Analysis at multiple scales. Academic Press.
- Zhou T, Shi P, Hui D, Luo Y. 2009. Global pattern of temperature sensitivity of soil heterotrophic respiration (Q₁₀) and its implications for carbon-climate feedback. *J Geophys Res* 114:1-9.