

<Note>

강우 이벤트가 태화산 잣나무 식재림의 각 발생원별 CO₂ 발생량에 미치는 영향

서상욱 · 박성애¹ · 심규영¹ · 양병국¹ · 최은정 · 이재석² · 김태규^{1,*}

국립농업과학원 기후변화생태과,
¹국립환경과학원 자연환경연구과, ²건국대학교 생명과학과

The Effect of Rain Fall Event on CO₂ Emission in *Pinus koraiensis* Plantation in Mt. Taehwa

Sanguk Suh, Sungae Park¹, Kyuyoung Shim¹, Byeonggug Yang¹, Eunjung Choi,
Jaeseok Lee² and Taekyu Kim^{1,*}

Climate Change & Agroecology Division, National Academy of Agricultural Science,
Wanju 565-851, Korea

¹Natural Environment Research Division, National Institute of Environmental Research,
Incheon 404-1170, Korea

²College of Bioscience and Biotechnology, Konkuk University, Seoul 143-701, Korea

Abstract - This study was conducted to find out the soil CO₂ emission characteristic due to rain fall pattern and intensity changes. Using Automatic Opening and Closing Chambers (AOCCs), we have measured annual soil respiration changes in *Pinus koraiensis* plantation at Seoul National University experimental forest in Mt. Taehwa. In addition, we have monitored heterotrophic respiration at trenching sites (4 × 6 m). Based on the one year data of soil respiration and heterotrophic respiration, we observed that 24% of soil respiration was derived from root respiration. During the rainy season (end of July to September), soil respiration at trenching site and trenching with rainfall interception site were measure during portable soil respiration analyzer (GMP343, Vaisala, Helsinki, Finland). Surprisingly, even after days of continuous heavy rain, soil water content did not exceed 20%. Based on this observation, we suggest that the maximum water holding capacity is about 20%, and relatively lower soil water contents during the dry season affect the vital degree of trees and soil microbe. As for soil respiration under different rain intensity, it was increased about 14.4% under 10 mm precipitation. But the high-intensity rain condition, such as more than 10 mm precipitation, caused the decrease of soil respiration up to 25.5%. Taken together, this study suggests that the pattern of soil respiration can be regulated by not only soil temperature but also due to the rain fall intensity.

Key words : soil respiration, heterotrophic respiration, trenching, rain fall interception

*Corresponding author: Taekyu Kim, Tel. 063-238-2487,
Fax. 063-238-3823, E-mail. sanguk07@gmail.com

서 론

산업혁명에 따른 화석연료 사용의 급격한 증가와 삼림 벌채, 농경지 변환 등 토지이용의 변화는 안정적이던 대기 중 CO₂ 농도(280 ppm)의 급속한 증가를 초래하여 매년 약 1.5 ppm, 즉 3.4 Pg C yr⁻¹ (Pg=10¹⁵ g)의 탄소가 대기 중에 축적되고 있는 것으로 알려져 있다(IPCC 2001; IPCC 2007). CO₂는 자연적 그리고 인위적인 활동을 통해 대기 중으로 배출되며, 최근 10년 동안의 연간 CO₂ 증가율은 약 1.9 ppm으로 가장 높은 수준을 보이고 있다(IPCC 2007). 이러한 대기 중 CO₂ 농도의 증가는 지구 규모의 탄소순환에 비가역적인 변화를 주며, 전 지구적인 기후변화를 초래하여 지구의 다양한 생태계에 직접적으로 심각한 혼란을 초래할 것으로 예견되고 있다(Rosenzweig and Hillel 1998).

지구적 규모에서 대기, 식생, 토양에 축적되어 있는 탄소의 양은 각각 775, 550, 1,500 Pg이며(Waring and Running 1998), 연간 육상생태계로 유입되는 탄소의 양은 약 2±1 Pg C yr⁻¹으로 추정되고 있다(IGBP 1998). 이렇듯 토양권은 식생의 약 3배, 대기의 약 2배에 달하는 막대한 양의 탄소를 축적하고 있다. 또한 토양권으로부터 토양호흡의 형태로 대기 중으로 배출되는 탄소는 연간 약 75 Pg으로 전 지구적 탄소 순환에서 매우 중요한 역할을 하고 있다(Bond-lamberty *et al.* 2004). 따라서 토양권 탄소의 동태파악은 향후 전 지구적 탄소순환의 메커니즘과 양적 순환관계를 파악하고 예측하는데 있어 매우 중요한 의미를 갖는다(Raich and Schlesinger 1992). 따라서 산림, 초지, 습지, 농경지 같은 다양한 육상생태계의 식생과 대기 간에 교환되는 CO₂ 플럭스를 정량화하는 연구가 전 세계적으로 활발히 진행되고 있다(Baldocchi *et al.* 2001; Baldocchi 2008). 이를 통해 토양호흡은 뿌리와 미생물 호흡의 결과물(Hanson *et al.* 2000; Zhou *et al.* 2009)이며 지온과 토양수분함량이 토양호흡에 영향을 미치는 주요 환경인자로 알려졌다(Rachhpal *et al.* 2008).

토양호흡에 영향을 미치는 주요 환경인자 중 온도는 토양미생물의 활성 및 토양유기물 등의 분해에 영향을 미치는 것으로 알려져 있으며 이는 온도 10°C 상승 시 반응속도의 증가분을 비교한 변수인 Q₁₀값으로 표현되고 있다. Q₁₀값을 이용한 모델식은 다양한 생태계에서의 토양호흡량을 계산하는 데 활용되고 있다(Fang and Moncrieff 2001; Falge *et al.* 2002).

삼림에 있어 토양수분함량은 주로 강우에 의해 영향을 받게 된다. 강우 패턴 및 강우 강도의 변화는 삼림

내 지표 유출수와 토양수분함량을 변화시키게 되며, 이는 토양호흡 배출 양상의 변화를 초래하게 된다(Koji 2009). 또한 우리나라의 경우 몬순기후에 따른 장마라는 특징적인 강우패턴을 가지고 있다. 그러나 강우와 같은 악천후 시에는 토양호흡의 측정이 용이하지 않다. 이에 장마와 같은 오랜 강우와 특히 태풍과 같은 악천후 조건에서의 토양호흡 배출 특성에 관한 연구는 많이 이루어지지 않은 실정이다.

이에 2011년부터 AOCC (Automatic open/closing chamber system)를 이용하여 토양호흡 측정이 이루어지고 있는 태화산 50년생 잣나무 식재림에 단근처리구 2개소를 설치하여 장마와 태풍과 같은 이벤트성 강우에 따른 토양호흡량의 배출양상 변화 중 중속영양생물호흡(Heterotrophic respiration)의 배출 양상 변화를 알아보고자 하였다. 그 중 한 개소에는 자동 강우차단막을 설치하여 인위적인 가뭄조건을 조성하여 자동 강우차단막 설치구와 대조구와의 비교를 통해 강우 패턴에 따른 토양호흡의 배출 특성을 파악하고자 본 연구를 수행하였다.

재료 및 방법

본 실험의 대상지역은 경기도 광주시 도척면 추곡리에 위치한 서울대학교 학슬림 중의 하나인 태화산 학슬림으로 위도 37° 18'19.08"이며, 경도 127° 19'07.12"에 위치하고 있으며 고도는 162m이다. 대상 산림은 50년생 잣나무 조림지로 1963년 식재되어 1988년과 2000년에 각각 1, 2차 간벌이 실시되었으며, 평균 임분밀도는 약 410 tree ha⁻¹이었다. 군락의 아교목층에는 개울나무가 주를 이루며 밤나무와 쪽동백나무 관목층에는 산초나무가 주를 이루며, 국수나무, 노린재나무, 고차나무가 생육하였다. 초본 층에는 주름조개풀 이외에는 식생이 거의 존재하지 않는 것으로 나타났다. 임상토양은 유기물이 많은 갈색삼림토로 약산성의 사양토이며, 최대용수량은 약 65%, 토양밀도는 1.37 g cm⁻³이었다. 대상지의 연평균 기온은 11.5°C, 연평균 강수량은 1,300 mm 정도이다.

2011년 11월 태화산 잣나무 식재림 내에 단근처리구 설치를 위하여 목본류가 없는 4×6 m 방형구를 2개소 선정 후 방형구 경계선 밖으로 넓이 40 cm, 깊이 50 cm의 도랑을 판 후, 노출된 주변 목본의 뿌리를 모두 제거하였다. 제거된 단면은 PVC 재질의 방수포로 둘러싼 후 다시 도랑을 메워 지하수의 수평이동을 차단하였다. 단근처리에 따른 토양호흡 중 뿌리호흡의 분리 실험 결과는 단근처리에 따른 뿌리의 분해 시기를 고려하여

2012년부터 5월 이후 데이터를 활용하여 분석하였다.

단근처리구 설치가 완료된 이후, 1개소의 단근처리구에는 자동 강우차단 처리를 하였다. 강우차단처리에는 비닐하우스용 파이프(25 mm Φ)를 이용하여 6×8 m의 프레임 구조를 구성하고 전동개폐기(WRA-2401, 우성하이텍)의 움직임에 의해 강우차단 커튼이 자동으로 개폐되는 방식으로 구성하였다. 강우의 감지는 수관 상부에 설치된 강우센서(WRA-09R, 우성하이텍)를 이용하였고, 강우를 감지하면 자동으로 강우차단 커튼이 강우차단처리구를 덮을 수 있도록 하였으며, 강우가 멈추면 멈춘 시점부터 약 2시간 후 강우차단 커튼을 걷어서 수관 등에 남아있던 강수의 낙하에 의한 2차 강우 효과를 최소화하였다.

대기 중의 온도와 습도는 임상 내 약 2 m 지점에서 HMP45C (Vaisala, Helsinki, Finland)를 이용해 측정하였고, 지온은 지표면으로부터 5 cm 지점에 T-type 열전대(0.32 mm diameter, Suzuden, Tokyo, Japan)를 설치하여 측정하였다. 광량자와 일사량은 Li-Cor 190SB와 Li-Cor 200X (Campbell Scientific, Logan, UT)를 이용하여 임상 내 지상 2 m 높이에서 측정하였다.

강수량은 수관 상부에 강우센서(TE525MM, Campbell Scientific, Logan, UT)를 설치하여 측정하였으며, 토양수분은 CS616 (Campbell Scientific, Logan, UT)를 이용하여 지표면에서 지하부 10 cm까지의 토양수분함량을 측정하였다. 강수량은 시간단위 누적량을, 강수량을 제외한 모든 환경인자는 10초마다 측정하여 10분마다 그 측정치를 데이터로거(CR1000, Campbell Scientific, Logan, UT)에 기록하였다.

토양호흡은 건국대학교에서 개발·제작한 AOCC (Suh *et al.* 2006)를 이용하여 측정하였다. AOCC 시스템은 챔버부, 펌프부, 전력분배부의 3개 주요부분으로 구성되어 있다. 총 6개의 챔버가 10분 간격으로 순차적으로 작동하여 1시간이면 6개의 챔버가 모두 측정되어 1 사이클이 완성된다. Closed Dynamic Chamber (CDC) 방법으로 측정된 토양호흡은 일정시간 동안 챔버에서 유출되는 공기의 CO₂ 농도를 측정 후, 단위 면적당 농도의 변화율로 변환하여 토양호흡속도를 계산하였다. AOCC는 대조구와 단근처리구에 각각 3개의 챔버를 설치하여 토양호흡 중 뿌리호흡과 종속영양생물호흡을 분리하기 위한 실험을 실시하였다.

이와 동시에 휴대용 토양호흡 측정기 GMP343 (Vaisala, Helsinki, Finland)를 이용하여 강우 패턴이 종속영양생물호흡 발생량에 미치는 영향을 알아보기 위하여 단근처리구와 단근 및 강우차단처리구를 대상으로 강우 발생시 측정을 실시하였다. 토양에 매설되는 직경 10 cm,

높이 20 cm의 아크릴재질 collar 윗부분에 GMP343을 덮어 고정시킬 수 있는 휴대용 챔버를 제작하고, 측정지 토양에 collar를 단근처리구와 단근 및 강우차단처리구에 각각 3개씩 설치하였다. 측정은 collar 설치로 인한 토양간섭 등이 안정화 시기를 고려하여 약 30일이 지난 이후부터 진행하였다. 측정은 일 평균 기온을 대표할 수 있는 오전 10시와 오후 4시를 기준으로 하여 각 챔버당 10분간 측정이 진행되었으며, 5초 간격으로 데이터가 측정된 후 30초마다 데이터를 저장하였다. CO₂ 배출량 계산에는 밀폐법(CDC)을 이용하여 단위면적에서 단위시간당 배출되는 CO₂의 양을 계산하였다.

결과 및 고찰

AOCCs를 이용하여 2012년 1월부터 2012년 12월까지 측정된 평균 토양호흡(SR)과 지온(Ts)은 Fig. 1과 같다. 정전 등의 이유로 결측된 자료는 태화산에서 가장 가까운 이천 기상관측소 기상자료를 이용하여 태화산 기온을 추정하고 그로부터 지온을 추정하였으며 추정된 지온을 바탕으로 실측값으로부터 도출된 토양호흡과 지온과의 지수상관식을 이용하여 gap filling (SR_GF)하였다.

2012년 1월부터 12월까지 1년 동안의 데이터를 살펴보면 토양호흡은 지온 변화와 유사한 변화양상을 보여주었다. 2012년 초반의 경우 누락데이터가 많았지만 gap filling에 의한 토양호흡값을 살펴보면 1월부터 4월까지의 토양호흡량은 평균 59.8 mgCO₂ m⁻² h⁻¹이었으나 지온이 점차 상승하는 여름이 다가오면서 토양호흡은 평균 601.7 mgCO₂ m⁻² h⁻¹로 10배 이상 증가하였다. 이후 12월까지 다시 지온의 감소로 인하여 2012년 초와 비슷한 평균 63.1 mgCO₂ m⁻² h⁻¹로 감소하는 전형적인 토

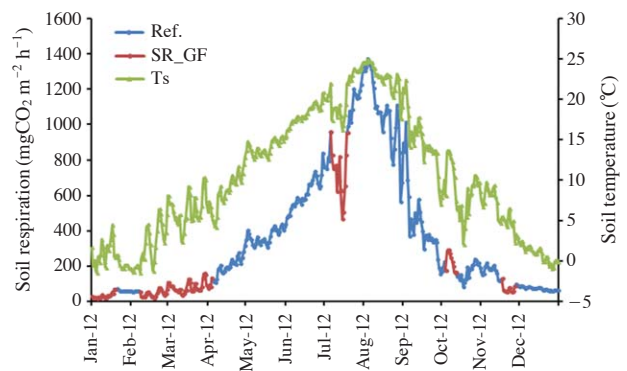


Fig. 1. Annual change of soil respiration and soil temperature at 5 cm depth at Mt. Taehwa in 2012.

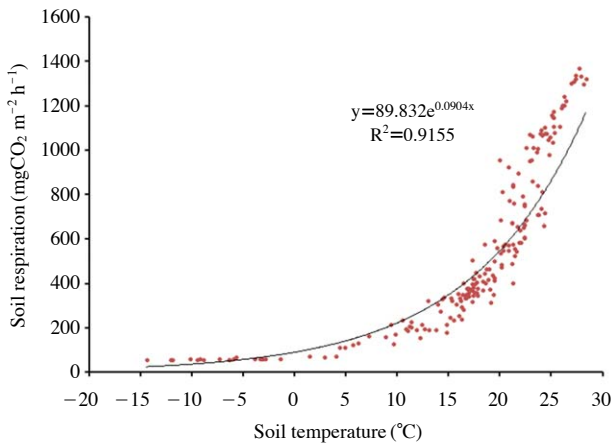


Fig. 2. Relationship between soil respiration and soil temperature at 5 cm depth collected in 2012 on *Pinus koraiensis* community in Mt. Taehwa.

양호흡의 연간 배출양상을 보여주었으며, 연평균 424.4 mgCO₂ m⁻² h⁻¹의 CO₂가 배출된 것으로 조사되었다.

토양호흡은 다양한 환경요인의 영향을 받는다. 전체 측정기간 동안 지온의 증가와 함께 토양호흡도 증가하는 경향을 보였으며 개략적으로 5월부터 8월까지 지온이 급격히 상승하는 것과 함께 토양호흡도 급격히 증가하여 8월에 최고 높은 값을 보였다. 이후 9월에 접어들며 지온이 저하함에 따라 토양호흡도 감소하는 경향을 보였다. 이러한 지온과 토양호흡과의 상관관계는 높은 상관성을 보였다 (Fig. 2). 태화산 연구지소 토양호흡의 온도에 대한 민감성을 나타내는 토양온도민감도(Q₁₀)는 2012년 전체 기간을 통해 2.3이었다. 토양호흡의 계절적 변동성은 일반적으로 지온의 변화에서 기인한 것으로 보고 있으며, 충분한 토양수분 환경 하에서 토양호흡량은 지온의 증가에 따라 지수적으로 증가하는 것으로 알려져 있다 (Hubbard *et al.* 2005). 조사지의 토양호흡은 지온의 계절적 변화와 함께 단기적 또는 장기적으로 변화하는 양상을 보이고 있다.

탄소수지 계산시 뿌리호흡은 따로 구분, 정량화하여 토양호흡과 일차순생산량 계산시 이중으로 차감되는 오류를 방지하여야 한다. 단근처리구와 대조구와의 토양호흡 값 차이값을 통해 2012년도 토양호흡 중 약 24%가 뿌리호흡으로부터 기인한 것으로 추정되었다 (Fig. 3). Hanson *et al.* (2000)은 토양호흡 중 뿌리호흡의 비율이 10~90%에 이르는 매우 다양한 값을 보임을 보고한 반면, Nakane *et al.* (1983)은 일본 80년생 소나무림에서 47~51%, Lee *et al.* (2003) 역시 40~50% 뿌리호흡 비율을 보고하였으며, Pyo *et al.* (2003)은 잣나무 조림지에서 약 46%의

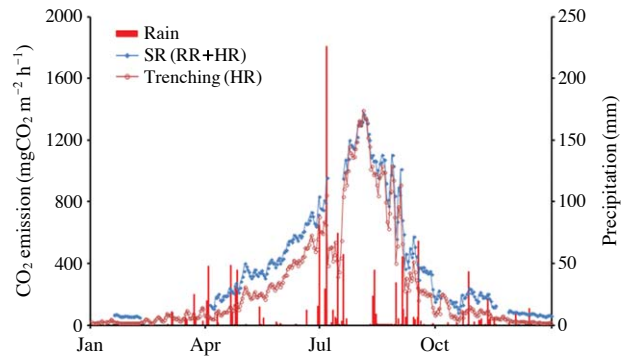


Fig. 3. Annual soil respiration and heterotrophic respiration at Mt. Taehwa in 2012.

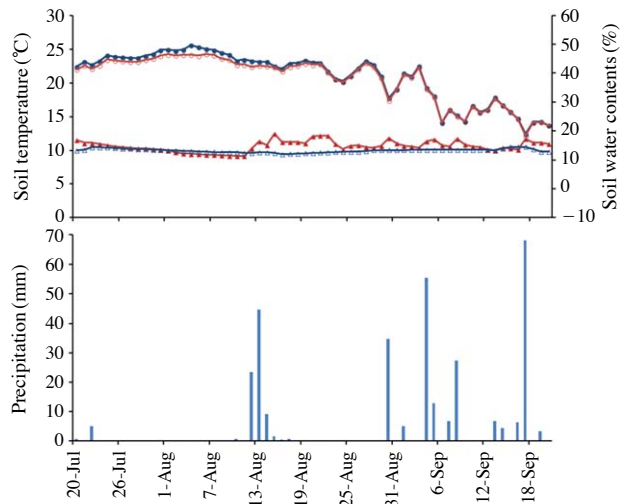


Fig. 4. Soil temperature and soil water content at each treatment from 20 July to 20 September 2012 (filled circle: soil temperature at trenching treatment, open circle: soil temperature at trenching and drought treatment, filled triangle: soil water content at trenching treatment, open triangle: soil water content at trenching and drought treatment).

뿌리호흡 비율을 보고한 바 있다. 이는 태화산 잣나무림의 토양호흡 중 뿌리호흡 비율이 Hanson *et al.* (2000)이 보고한 범주 안에서는 인정할 수준이었지만, Nakane *et al.* (1983), Lee *et al.* (2003), Pyo *et al.* (2003)가 보고한 결과와 비교하면 다소 낮은 값이었다. 이는 차후 지속적인 모니터링을 통해 보다 정확한 추이를 파악할 수 있을 것으로 생각된다.

단근처리구와 단근 및 강우차단처리구의 지온을 살펴보면 강우가 내리지 않아 건조하였던 7월말부터 8월 중순까지는 단근처리구가 단근 및 강우차단처리구보다 약 3.0% 높은 것으로 나타났으나 이는 공간적 변이 때문 차이값으로 추정된다 (Fig. 4). 그러나 강우가 내리면서 두

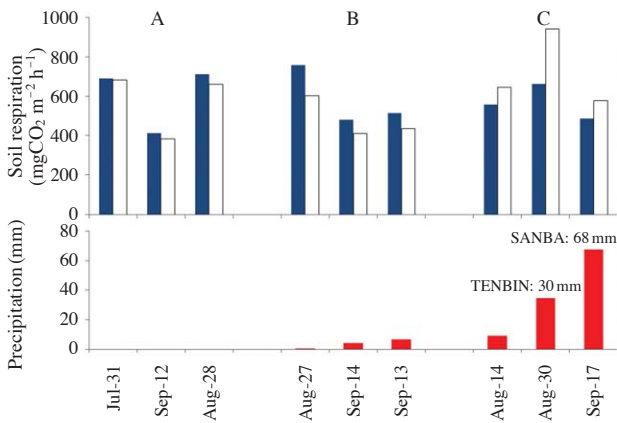


Fig. 5. Rain effect on soil respiration (A: no precipitation, B: less than 9 mm precipitation, C: more than 9 mm precipitation with typhoon TENBIN and SANBA).

처리구의 지온 차이는 0.9%로 거의 차이가 없어지는데 이는 강우에 의해 단근 처리구의 지온 프로파일이 변하여 일시적으로 낮아진 것으로 생각된다.

토양수분은 7월 20일경 강우가 멈춘 이후 약 30일이 경과한 후 토양수분함량은 안정화되었다. 그러나 8월 13일부터 15일 사이에 내린 약 78.9mm의 강우로 인해 토양수분함량은 약 19%까지 상승하게 된다. 이후 태풍 덴빈(8월 30일 34.7 mm)과 태풍 산바(8월 17일 68 mm)와 같은 고강도 강우에도 토양수분함량은 19%를 초과하지 않았다. 최대용수량이 65%인 반면 강우 강도가 강함에도 토양수분함량이 20%를 넘지 않는 것은 강우 강도가 강할 경우 토양 지표면을 통해 유출되는 유출수가 많음을 의미한다. 이러한 자료를 바탕으로 측정 기간 비교적 많은 양의 강우가 있다고 하더라도 토양수분함량은 약 20% 이상 상승하지 않고 그 이하의 토양수분함량을 유지하였다. 이는 강수가 상대적으로 적은 시기에는 수목 활성이나 토양미생물의 활성에 영향을 미칠 것으로 추정된다. 한편 강우차단처리구의 경우 강우에 따른 토양수분함량의 급격한 변화를 찾아볼 수 없었다.

강우 강도에 따른 종속영양생물호흡을 비교해보면 단근처리구의 경우 강우가 없는 A 그룹의 경우 604.9 mg CO₂ m⁻² h⁻¹, 단근 및 강우차단처리구의 경우 575.0 mg CO₂ m⁻² h⁻¹로 단근처리구가 약 5.6% 높게 나타났으나 유의적인 차이는 없었으며 ($p > 0.05$), 이는 종속영양생물호흡의 공간적 변이에 기인한 것으로 생각된다(Fig. 5). B 그룹과 같이 10 mm 이하의 강우가 발생 시 단근처리구와 단근 및 강우차단처리구의 종속영양생물호흡량은 각각 583.1, 485.3 mgCO₂ m⁻² h⁻¹로 단근처리구가 약 20.0% 높았으며, 유의적인 차이를 보여주었다 ($p < 0.05$).

이는 평상시 단근처리구의 종속영양생물호흡량이 5.6% 높은 것을 고려하여도 약 14.4% 높은 결과를 보였다. 이는 토양수분이 부족할 경우 약 50%의 토양호흡의 감소를 보고한 Tamai (2009)의 결과보다 상대적으로 큰 차이를 보였다. 이는 본 실험의 경우 토양호흡 중 종속영양생물호흡만을 분리함에 따른 차이에 기인한 것으로 생각된다.

그러나 C 그룹과 같이 오히려 10 mm 이상의 고강도의 강우에서는 단근처리구의 종속영양생물호흡량이 567.5 mgCO₂ m⁻² h⁻¹, 단근 및 강우차단처리구의 종속영양생물호흡량이 721.8 mgCO₂ m⁻² h⁻¹로 단근처리구가 약 19.9% 낮았으며, 유의적인 차이를 보여주었다 ($p < 0.05$). 이는 평상시 단근처리구의 종속영양생물호흡량이 5.6% 높았던 것을 고려할 때 25.5% 감소한 결과이었다. C 그룹에서 8월 30일 태풍 덴빈의 경우 강수량은 34.7 mm로 9월 17일 태풍 산바 때 68 mm보다 강수량은 적지만 단근처리구에서 강우에 의한 종속영양생물호흡량의 감소가 더 크게 나타났다. 이러한 결과는 8월 10일경부터 약 20일간 지속된 강우에 의해 토양수분함량이 상대적으로 높았기 때문으로 생각된다. 결과적으로 태화산 잣나무 식재림의 경우 약 10 mm 이하의 강우 조건에서는 종속영양생물호흡량이 일시적으로 증가하지만, 10 mm 이상의 고강도 강우 조건에서는 종속영양생물호흡량의 발생이 오히려 감소하는 결과를 나타내었다. 이는 일정 강우 이상의 조건에서는 강우에 의한 지온 감소와 토양수분함량 증가로 인한 토양 내 공극이 메워짐에 따른 현상으로 추정된다.

적 요

본 연구는 몬순기후에 의해 장마라는 특징적인 강우 패턴을 가지는 환경조건에서 강우 패턴 및 강우 강도의 변화가 삼림 내 지표 유출수와 토양수분함량을 변화시켜 토양호흡의 배출 양상을 어떻게 변화시키는지 알아보기 위하여 수행되었다. 대상지는 경기도 광주시에 위치한 서울대학교 학술림 내 잣나무식재림으로 2012년 1년 동안 자동 토양호흡 챔버를 이용하여 연변화를 측정하였고 단근처리 기법을 이용하여 토양호흡 중 약 24%가 뿌리호흡에서 기인한 것으로 추정되었다. 이와 더불어 장마와 태풍으로 인한 다양한 강도의 강우가 발생한 7월 말부터 9월 말까지 휴대용 토양호흡 측정기를 이용하여 관측지 내 단근처리구와 단근 및 강우차단처리구에서 종속영양생물호흡을 측정하였다. 토양수분함량의 경우 고강도의 강우가 며칠씩 이어지더라도 20%를 초과

하지 않았다. 이는 강수가 상대적으로 적은 시기에는 수목활성이나 토양미생물의 활성에 영향을 미칠 것으로 추정된다. 강우 강도가 10 mm 이하의 저강도 강우에서는 중속영양생물호흡이 약 14.4% 상승하였으나 10 mm 이상의 고강도 강우조건에서는 중속영양생물호흡이 25.5% 감소하였다. 이는 강우 강도에 따라 중속영양생물호흡의 배출 양상이 달라짐을 보여주었다.

REFERENCES

- Baldocchi D, E Falge, L Gu, R Olson, D Hollinger, S Running, P Anthoni, Ch Bernhofer, K Davis, R Evans, J Fuentes, A Goldstein, G Katul, B Law, X Lee, Y Malhi, T Meyers, W Munger, W Oechel, UKT Paw, K Pilegaard, HP Schmid, R Valentini, S Verma, T Vesala, K Wilson and S Wofsy. 2001 : FLUXNET: A new tool to study the temporal and spatial variability of ecosystem-scale carbon dioxide, water vapor, and energy flux densities. *J. Clim.* 82:2415-2434.
- Baldocchi D. 2008. Breathing of the terrestrial biosphere: Lessons learned from a global network of carbon dioxide flux measurement systems. *Aust. J. Bot.* 56:1-26.
- Bond-Lamberty Ben, C Wang and ST Gower. 2004. Contribution of root respiration to soil surface CO₂ flux in a boreal black spruce chronosequence. *Tree Physiol.* 24:1387-1395.
- Falge E, D Baldocchi, J Tenhunen, M Aubinet, P Bakwin, P Berbigier, C Bernhofer, G Burba, R Clement, KJ Davis, JA Elbers, AH Goldstein, A Grelle, A Granier, J Guðmundsson, D Hollinger, AS Kowalski, G Katul, BE Law, Y Malhi, T Meyers, RK Monson, JW Munger, W Oechel, U Paw, T Kyaw, K Pilegaard, Ü Rannik, C Rebmann, A Suyker, R Valentini, K Wilson and S Wofsy. 2002. Seasonality of ecosystem respiration and gross primary production as derived from FLUXNET measurements. *Agricult. Meteorol.* 113: 53-74
- Fang C and JB Moncrieff. 2001. The dependence of soil CO₂ efflux on temperature. *Soil Biol. Biochem.* 33:155-165.
- Hanson PJ, NT Edward, CT Garten and JA Andrews. 2000. Separating root and soil microbial contributions to soil respiration: A review of methods and observations. *Biogeochemistry* 48:115-146.
- Hubbard RM, MG Ryan, K Elder and CC Rhoades. 2005. Seasonal patterns in soil surface CO₂ flux under snow cover in 50 and 300 year old subalpine 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.
- Koji Dairaku, Seita Emori and Taikan Oki. 2004. Rainfall Amount, Intensity, Duration and Frequency Relationships in the Mae Chaem Watershed in Southeast Asia. *J. Hydrometeor.* 5:458-470.
- Lee, Misun, Kaneyuki Nakane, Takayuki Nakatsubo and Hiroshi Koizumi. 2003. Seasonal changes in the contribution of root respiration to total soil respiration in a cool-temperate deciduous forest. *Plant Soil.* 25:311-318.
- Nakane K, M Yamamoto and H Tsubota. 1983. Estimation of root respiration rate in a mature forest ecosystem. *Jap. J. Ecol.* 33:397-408.
- Pyo JH, SU. Kim and HT. Mun. 2003. A study on the carbon budget in Pinus koreansis plantation. *Korean J. Ecol.* 26: 129-134.
- Rachhpal SJ, B Andrew, DN Michael, GG David and N Zoran. 2008. Effect of soil water stress on soil respiration and its temperature sensitivity in an 18-year-old temperate Douglas-fir stand. *Global Change Biol.* 14:1305-1318.
- Raich JW and WH Schlesinger. 1992. The global carbon dioxide flux in soil respiration and its relationship to vegetation and climate. *Tellus* 44:81-99.
- Rosenzweig C and D Hillel. 1998. Climate change and the global harvest. Oxford University Press. New York.
- Suh SU, YM Chun, NY Chae, J Kim, JH Lim, M Yokozawa, MS Lee and JS Lee. 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.
- Tami K, Y. Kominami, T. Miyama, Y. Goto and Y. Ohtani. 2008. Topographical effects on soil respiration in a deciduous forest-The case of weathered granite region in Southern Kyoto Prefecture. *J. Agricul. Meteorol.* 64:512-222.
- Waring RH and SW Running. 1998. Forest ecosystems: analysis at multiple scales. Academic Press.
- Zhou T, P Shi, D Hui and Y Luo. 2009. Global pattern of temperature sensitivity of soil heterotrophic respiration (Q₁₀) and its implications for carbon-climate feedback. *J. Geophys. Res.* 114:1-9.

Received: 5 November 2014

Revised: 2 December 2014

Revision accepted: 5 December 2014