

소나무와 굴참나무 임분의 토양 환경요인과 토양 이산화탄소 방출의 계절적 변화

백경원 · 조창규 · 김춘식*

경남과학기술대학교

(2016년 8월 9일 접수; 2016년 9월 13일 수정; 2016년 9월 22일 수락)

Seasonal Variations of Soil CO₂ Efflux Rates and Soil Environmental Factors in *Pinus densiflora* and *Quercus variabilis* Stands

Gyeongwon Baek, Chang Gyu Jo and Choonsig Kim*

Gyeongnam National University of Science and Technology, Jinju 52725, Korea

(Received August 9, 2016; Revised September 13, 2016; Accepted September 22, 2016)

ABSTRACT

This study was carried out to examine the relationships between seasonal variations of soil CO₂ efflux rates and soil environmental factors in matured *Pinus densiflora* and *Quercus variabilis* stands in the Wola national experimental forests, southern Korea. Soil CO₂ efflux rates were measured monthly from March 2015 to February 2016. Mean soil CO₂ efflux rates during the study period were significantly higher in the *Q. variabilis* (mean±standard error; 2.27±0.22 μmol m⁻² s⁻¹) than in the *P. densiflora* (1.63±0.12 μmol m⁻² s⁻¹) stands. Mean soil water content and pH were also significantly higher in the *Q. variabilis* (26.96±0.93%, pH 5.19) than in the *P. densiflora* (21.32±0.89%, pH 4.87) stands, while soil temperature was not significantly different between the *P. densiflora* (13.92±0.67°C) and in the *Q. variabilis* (13.52±0.70°C) stands. *Q*₁₀ values were higher in the *Q. variabilis* (3.35) than in the *P. densiflora* (2.72) stands. The results indicate that soil CO₂ efflux rates in *Q. variabilis* stand could be more sensitive by the change of soil temperature compared with *P. densiflora* stand under a similar site environmental condition.

Key words: Carbon cycling, Carbon dynamic, *Q*₁₀ value, Soil respiration, Soil temperature

I. 서 론

산림토양에서 발생하는 온실가스 중 지구온난화에 가장 크게 기여하는 온실가스로 알려진 이산화탄소(CO₂) 경우 주로 미생물 호흡이나 살아있는 식물 뿌리 호흡으로부터 발생하며 산림생태계의 여러 가지 대사활동을 나타내는 지표로 의미가 있다. 토양 CO₂ 방출량의 계절적인 변동과 연 방출량의 정량화는 산림생태계의 탄소순환 이해와 지구탄소수지 관점에서 중요하다.

산림을 통한 토양 CO₂ 방출에 관여하는 일련의 과정들은 인간의 활동이나 자연 재해로부터 영향을 받으며(Jandl *et al.*, 2007; Peng *et al.*, 2008), 이러한 반응에 가장 크게 기여하는 요인은 토양 온도, 토양 수분 및 양분 유효도 같은 입지환경요인과 토양 내 유기탄소 같은 기질(substrate quality)의 차가 원인으로 알려져 있다(Dong *et al.*, 1998; Deng *et al.*, 2010). 한편, 산림토양에서 발생하는 CO₂ 방출은 시·공간적으로 상당한 변이가 발생하며(Konda *et al.*, 2010), 토양 수분 및 양분 유효도 같은



* Corresponding Author : Choonsig Kim
(ckim@gntech.ac.kr)

산림환경 요인과 산림생태계가 위치한 지리적 위치 및 계절 변화에 민감하게 반응하였다(Konda *et al.*, 2010). 이러한 산림토양으로부터 CO₂ 방출의 시·공간적인 변이의 불확실성은 산림이 가지는 CO₂ 흡수 및 저장 능력 추정에 불확실성의 원인으로 제공되고 있으며, 이를 감소하기 위한 방안으로 임분 형태 별(Ullah *et al.*, 2009), 임분 연령 별(Peichl *et al.*, 2010), 산림경영 활동(Yashiro *et al.*, 2008) 등과 관련한 다양한 연구가 실시되었다.

산림생태계에서 발생하는 토양 CO₂는 임분 종류에 따라 다양한 방출 동태를 보이는 것으로 알려져 있으며, 이는 임목의 생육 특성, 미생물 활동, 임목의 뿌리 활력, 세균 분해속도, 낙엽낙지량, 토양 호흡량, 양분 유효도, 토양 이화학적 특성 등이 임분 발달 동안 다르게 나타나 토양 CO₂ 방출 동태를 결정하기 때문이다(Kim and Jeong, 2016). 국내에서 수행된 임분 별 산림토양의 CO₂ 방출동태에 관한 연구로 강원도 춘천지역 신갈나무와 굴참나무 임분의 토양호흡량 비교(Yi, 2003), 광주광역시 소나무와 굴참나무의 토양호흡 특성(Kim *et al.*, 2009b), 경남 함양지역 소나무, 리기테다소나무, 낙엽송 조립지의 토양호흡과 토양 환경요인과의 관계(Kim and

Jeong, 2016) 등이 있다. 한편 임분 간 산림토양으로부터 발생한 CO₂ 방출의 경우 입지유형에 따른 시·공간적 변이 때문에 정확한 정량화를 위해서는 입지선정이 중요하다. 본 연구는 유사한 입지환경과 서로 인접한 지역에서 생육한 성숙한 소나무(*Pinus densiflora* S. et Z.)와 굴참나무(*Quercus variabilis* Blume) 임분을 대상으로 산림토양으로부터 방출되는 CO₂가 임분 종류에 따라 어떠한 차이를 보이는지를 비교하고, CO₂ 방출의 계절적 변화와 토양 환경요인 사이에 관계를 구명하기 위한 목적으로 수행하였다.

II. 재료 및 방법

2.1. 조사지 개황

본 연구를 위한 조사지는 경상남도 진주시 국립산림과학원 “월아시험림”내 위치하였다. 최근 30년 동안 (1981~2010년) 이 지역의 연 평균 강수량은 1,513mm, 연 평균 기온은 13.1°C이다. 선정된 조사지는 표고 160~180m 내 산복의 서향에 위치하며, 사면 경사는 15~25°이다. 하층 식생으로 산초나무(*Zanthoxylum schinifolium* S. et Z.), 짚레꽃(*Rosa multiflora* Thunb.), 청미래덩굴

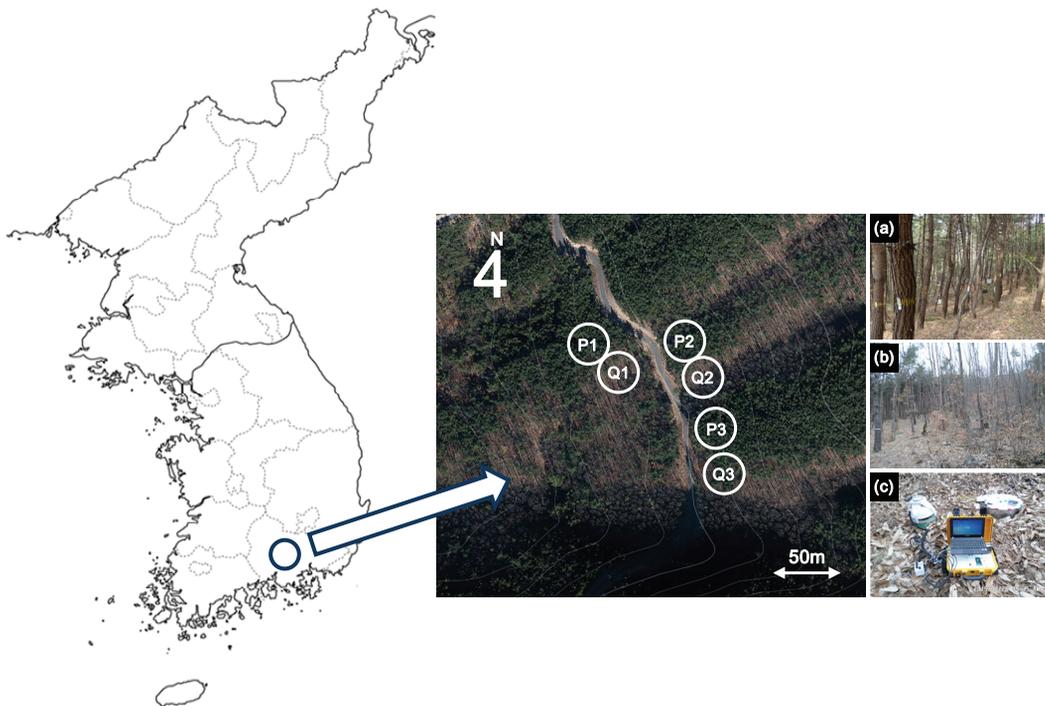


Fig. 1. Location of the study site . P: *Pinus densiflora* (a); Q: *Quercus variabilis* (b); LI-8100 A(c).

(*Smilax china* L.), 졸참나무(*Quercus serrata* Murray), 굴참나무(*Q. variabilis* Blume), 개웃나무(*Toxicodendron trichocarpum* Kuntze), 산딸기(*Rubus crataegifolius* Bunge) 등이 분포하나 하층 목본식생의 피도는 높지 않다. 조사지의 모암은 퇴적암인 사암이나 혈암이 전 지역에 우세하고, 우리나라 산림토양분류에 따르면 암적갈색약건산림토양형(DRb₂)이 분포하였다. 조사구는 유사한 입지환경에 서로 인접하며 정상적으로 생육하고 있는 V영급 이상의 성숙하고 건전한 소나무와 굴참나무 임분을 대상으로 선정하였다(Fig. 1). 조사구는 위반복(pseudoreplication)을 피하기 위해 3블록(block)으로 구성되었고 각 블록은 2개의 10m × 10m의 조사구를 구축하여 총 12개 조사구(2수종(소나무, 굴참나무) × 3 블록 × 2반복)를 설치하였다. 평균 임분 밀도의 경우 소나무 임분은 1,450±187본 ha⁻¹(평균±표준오차)로 굴참나무 임분 1,000±163본 ha⁻¹에 비해 높았다. 평균 흉고직경은 소나무 임분 16.63±0.87cm, 굴참나무 임분 17.73±1.32cm로 두 임분 사이에 큰 차이는 없으나, 임분흉고단면적 합은 소나무 임분이 33.80±4.59m² ha⁻¹로, 굴참나무 임분 25.38±3.68m² ha⁻¹에 비해 높았으나 유의적인 차이는 없었다.

2.2. 토양 CO₂ 방출량 조사

조사구로 선정된 소나무와 굴참나무 임분을 대상으로 토양 CO₂ 방출량 측정을 위해 각 조사구내 임으로 선정된 2지점에 내부직경 20cm, 높이 11cm 원통형 폴리염화비닐(PVC collar)을 광물질 토양층 2~3cm 깊이까지 매설하였다. 토양 CO₂ 방출량은 LI-8100A (LICOR Bioscience, USA)에 20cm survey chamber인 closed opaque chamber (soil respiration chamber)를 연결한 후, 매설된 폴리염화비닐 원통 상부에 LI-8100A를 부착하고 Infrared gas analyzer (IRGA) 방법에 의해 매월 총 12회[2 임분(소나무, 굴참나무) × 3 반복구 × 반복구 별 2회 측정]씩 2015년 3월부터 2016년 2월까지 오전 10시부터 12시 사이에 측정하였다. 토양 환경요인 중 토양 온도의 경우, 토양 CO₂ 방출량이 측정되는 지점에 K-type 디지털 온도계(SDT 25, Summit, Korea)를 이용하여 지표면 8cm 깊이의 온도를 측정하였다. 토양 pH와 토양 수분함량은 직경 5cm와 깊이 5cm 크기를 가지는 원통형 토양채취기를 이용하여 토심 0~5cm 깊이의 토양시료를 채취하고 지퍼 백에 밀봉한 후 실험실로 운반하였으며, 운반된 시료는 토양 pH (Model 735P, istec, Korea)와 전기전도도(Orion 3 star, Thermo Scientific, Singapore)

를 측정하였고, 토양수분함량은 건조기에서 105°C로 24시간 이상 건조 후 계산하였다. 토양 유기탄소 농도의 경우 105°C 건조한 토양을 550°C 회화한 후 얻어진 유기물 함량(Hoogsteen *et al.*, 2015)으로부터 계산하였다.

2.3. 자료분석

매월 수집된 자료의 임분 간 유의성 검증($P < 0.05$)은 SAS의 PROC TTEST, 1년 동안 계속적으로 반복 측정된 자료의 경우 반복측정 분산분석(repeated measure ANOVA)을 위해 SAS MIXED의 repeated를 이용하였다(SAS Inc., 2003). 각 임분 별 토양 CO₂ 방출량과 토양 온도 변화와의 관계는 지수 함수모델을($B_0e^{B_1 \cdot ST}$, B_0 , B_1 : 회귀계수)개발하였다. 각 임분 별 토양 CO₂ 방출량의 토양 온도 민감도는 Q_{10} 값($Q_{10} = e^{10 \cdot B_1}$)을 계산하였으며(Saiz *et al.*, 2006), 토양 수분함량, 토양 pH, 전기전도도, 유기탄소 농도와 토양 CO₂ 방출량의 변동은 상관분석(SAS Inc., 2003)을 실시하였다.

III. 결과 및 고찰

3.1. 임분 별 토양 CO₂ 방출의 계절적 변동

토양 CO₂ 방출량의 월별 변화는 6월과 7월 굴참나무 임분이 소나무 임분에 비해 유의적으로($P < 0.05$) 높게 나타났다(Fig. 2). 6월과 7월의 토양 온도가 두 임분 사이에 차이가 없어(Fig. 2), 이 기간 동안 토양 CO₂ 방출량은 타 환경요인에 의해 영향을 받고 있는 것으로 사료된다. 예를 들면 미생물 활성이나 뿌리 활력에 영향을 미칠 수 있는 토양 pH 및 토양수분 함량은 굴참나무 임분이 소나무 임분에 비해 높게 나타났다(Fig. 2). 토양 CO₂ 방출량의 계절적 변동은 두 임분 모두 7월이 가장 높은 값을 보였으며, 이 기간 동안 굴참나무 임분 5.38 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$, 소나무 임분 2.95 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 로 가장 방출량이 적었던 굴참나무 임분의 1월 0.42 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 나, 소나무 임분의 3월 0.49 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 에 비해 굴참나무 임분은 약 13배, 소나무 임분은 약 6배 정도 높아 굴참나무 임분의 계절적 변동이 소나무 임분에 비해 크게 나타났다.

온대지역 산림생태계의 토양 온도는 토양 CO₂ 방출의 계절적 변동에 가장 크게 기여하는 환경요인(Borken *et al.*, 2002; Vincent *et al.*, 2006; Kim and Jeong, 2016)으로, 이는 토양 온도 변화가 식물 뿌리 호흡이나 토양 미생물 호흡에 영향을 미치고 그 결과 계절적 변동으로 나타나는 것으로 알려져 있다. 본 연구에서도 두 임분 모두 토양 온도가 낮은 동절기는 낮고, 토양 온도가 높았던 하

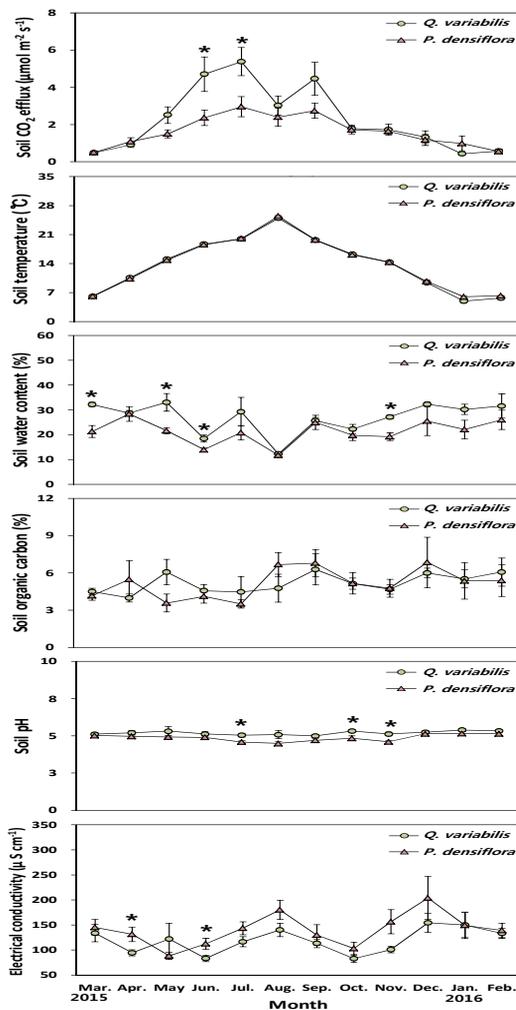


Fig. 2. Monthly variation of soil CO₂ efflux, soil temperature, soil water content, soil organic carbon content, soil pH and electrical conductivity in *Quercus variabilis* and *Pinus densiflora* stands. Vertical bars indicate standard error. Asterisks represent a significant difference between *Quercus variabilis* and *Pinus densiflora* stands at $P < 0.05$.

절기 동안은 높게 나타났다. 그러나 토양 온도가 25°C 정도로 가장 높았던 8월의 경우, 7월에 비해 낮은 토양 CO₂ 방출량을 보이고 있다. 이는 8월의 경우, 토양 수분 함량이 약 12% 정도로 타 조사기간에 비해 예외적으로 낮게 나타나 토양 CO₂ 방출에 영향을 미치고 있기 때문으로 사료된다. 유사한 결과로 토양 수분함량이 15% 이하일 경우 토양 CO₂ 방출에 영향을 미치게 되며(Deng *et al.*, 2010), 이는 토양 수분함량이 낮을 경우, 토양 미생물

이나 뿌리 활성 저하로 인하여 토양 CO₂ 방출량이 감소하는 것으로 알려져 있다(Epron *et al.*, 1999; Borken *et al.*, 2002; Vincent *et al.*, 2006). 토양 유기탄소 농도, 전기전도도의 경우, 조사기간 동안 두 임분 모두 계절적 차이가 뚜렷하지 않아 토양 CO₂ 방출량의 계절적 변동에 기여도가 낮은 것으로 나타났다.

3.2. 임분 별 토양 CO₂ 방출량과 토양 환경요인과 관계

토양 CO₂ 방출량과 토양온도는 소나무와 굴참나무 임분 모두 유의적인 지수함수 관계($P < 0.05$)가 있었다(Fig. 3). 결정계수(R^2) 값은 굴참나무 임분 0.70, 소나무 임분 0.56으로 굴참나무 임분의 결정계수가 높았다. 토양 CO₂ 방출량과 토양 온도 사이 지수함수 모델의 결정계수 값은 조사구와 인접한 소나무재선충병 피해 소나무 임분 0.82~0.94(Jeong *et al.*, 2013), 광주광역시에서 조사된 소나무와 굴참나무 임분의 결정계수 값 0.91~0.96(Kim *et al.*, 2009b)에 비해 낮게 나타났다. 이는 본 연구의 경우 조사기간 동안 토양 온도가 가장 높았던 8월에 토양 CO₂ 방출량이 낮게 나타나 지수함수모델의 결정계수가 타 연구 결과에 비해 낮게 나타난 것으로 사료된다. Q_{10} 값은 굴참나무 임분 3.43, 소나무 임분 2.45로 굴참나무 임분이 토양 온도 상승에 따른 CO₂ 방출량이 소나무 임분에 비해 큰 것으로 나타났다(Fig. 3). 이와 같이 굴참나무 임분의 Q_{10} 값이 높은 것은 토양 pH가 높은 굴참나무 임분이 소나무 임분에 비해 토양호흡에 관계되는 미생물이나 뿌리 활력의 차이가 영향을 미치고 있기 때문으로 사료된다. 국내에서 수행된 소나무 임분의 Q_{10} 값 2.9~3.5(Noh *et al.*, 2010; Kim *et al.*, 2012; Choi *et al.*, 2015)와 비교할 때, 본 조사구 소나무 임분의

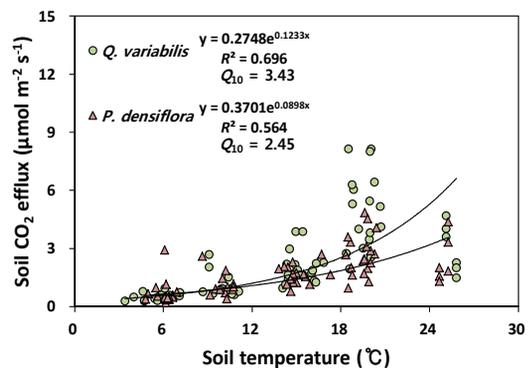


Fig. 3. Exponential relationships between soil CO₂ efflux and soil temperature in *Quercus variabilis* and *Pinus densiflora* stands.

Q_{10} 값은 국내에서 조사된 범위에 비해 낮은 편이다.

토양 pH와 토양 CO_2 방출량의 경우, 굴참나무와 소나무 임분 모두 토양 pH 감소에 따라 토양 CO_2 방출량이 증가하는 관계를 보이고 있다(Fig. 4). 이는 토양 pH의 계절적 변동이 토양 온도 변화와 관계가 있기 때문으로 우리나라 산림토양의 경우 토양 온도가 높아 토양 CO_2 방출량이 가장 많은 하절기에 토양 pH가 낮게 나타나며, 본 연구에서도 동절기(12월-2월)의 토양 pH는 굴참나무 임분 pH 5.25-5.40, 소나무 임분 pH 5.14-5.15로 하절기(6월-8월) 굴참나무 임분 5.05-5.13, 소나무 4.40-4.90에 비해 높았으며, 이러한 관계는 국내에서 수행된 타 연구에서도 관찰되는 현상이다(Kim *et al.*, 2009a; Choi *et al.*, 2016; Kim and Jeong, 2016). 토양 수분함량의 경우, 토양 CO_2 방출량과 약한 음의 상관관계($r = -0.24$ 와 $r = -0.26$)를 보이고 있으며 이는 토양 공극 내 수분함량이 높을 경우 가스 확산 등(Bray and Weil, 2010)에 영향을 받기 때문으로 사료된다. 본 연구 결과와는 대조적으로 국내에서 조사된 소나무나 곰솔 임분의 토양 수분함량은 계절적인 변동이 크지 않기 때문에 토양 이산화탄소 방출과 유의적인 상관관계에 상관관계가 나타나지

않는 것으로 보고된바 있다(Kim *et al.*, 2009a; Choi *et al.*, 2016).

두 임분 모두 전기전도도와 토양 유기탄소 농도는 토양 CO_2 방출량과 유의적인 상관관계가 나타나지 않았으며 이는 이들 요인의 월 변동이 크지 않기 때문으로 국내에서 수행된 타 연구에서도 유사한 결과가 관찰된 바 있다(Kim *et al.*, 2009a; Choi *et al.*, 2016; Kim and Jeong, 2016). 특히 토양 유기탄소 농도의 경우, 토양 CO_2 방출에 영향을 미칠 수 있는 기질로 작용할 수 있으나, 토양 CO_2 방출량을 결정하는 요인은 아닌 것으로 보고되고 있다(Lai *et al.*, 2012).

3.3. 임분 별 연 평균 토양 CO_2 방출량

연 평균 토양 CO_2 방출량은 굴참나무 임분이 $2.27 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 로, 소나무 임분 $1.63 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 에 비해 유의적으로 높게 나타났다(Table 1). 토양 환경요인 중 토양 CO_2 방출과 밀접한 관련이 있는 연 평균 토양 온도의 경우, 두 임분 사이에 유의적인 차이가 없었으나, 토양 수분 함량과 토양 pH의 경우, 굴참나무 임분이 소나무 임분에 비해 높아(Table 1), 두 임분 사이 토양 CO_2 방출량

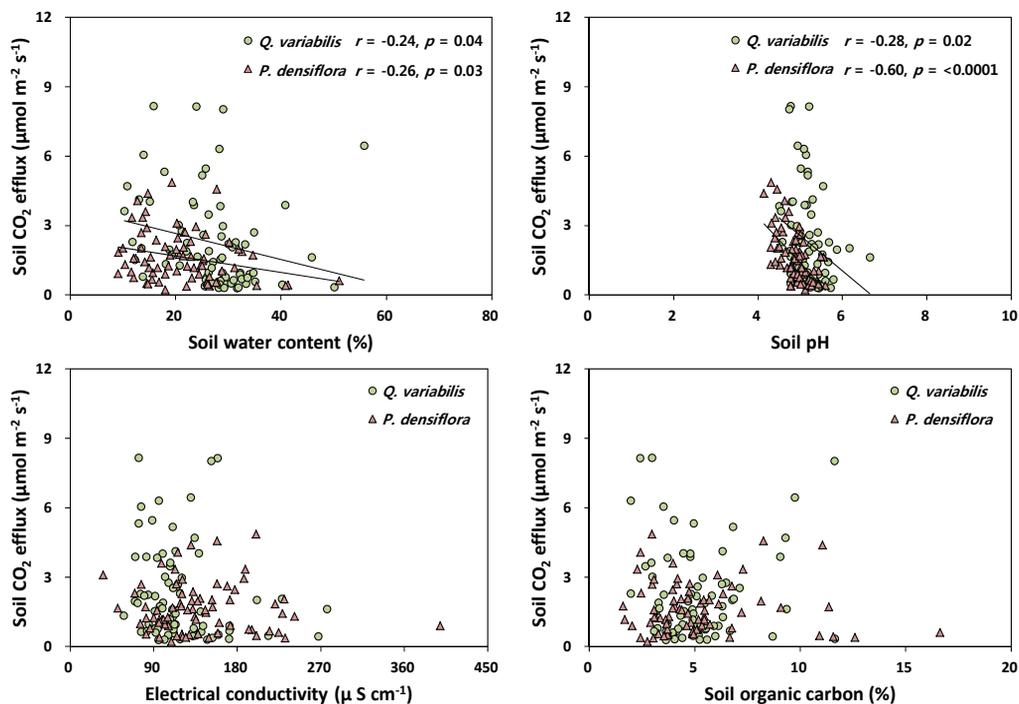


Fig. 4. Relationships between soil CO_2 efflux and soil pH, soil water content, electrical conductivity or soil organic carbon content in *Quercus variabilis* and *Pinus densiflora* stands.

Table 1. Mean soil CO₂ efflux, soil temperature, soil pH, soil water content, electrical conductivity and soil organic carbon in *Quercus variabilis* and *Pinus densiflora* stands

Stand	Soil CO ₂ efflux ($\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$)	Soil temperature (°C)	Soil pH	Soil water content (%)	Electrical conductivity ($\mu\text{S cm}^{-1}$)	Soil organic carbon (%)
<i>Quercus variabilis</i>	2.27 (0.22)	13.52 (0.71)	5.19 (0.04)	26.96 (0.93)	118.73 (4.65)	5.10 (0.22)
<i>Pinus densiflora</i>	1.62 (0.12)	13.92 (0.67)	4.87 (0.04)	21.32 (0.89)	140.20 (6.03)	5.15 (0.30)
<i>P-value</i>	0.03	0.88	<0.01	0.02	<0.06	0.98

Values in parentheses are standard errors. Bold letters represent a significant difference at $P < 0.05$.

의 차이는 이들 요인의 누적 결과로 사료된다. 본 연구에서 조사된 연 평균 토양 CO₂ 방출량은 본 조사구와 인접한 곰솔 임분의 연 평균 토양 CO₂ 방출량 2.84 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ (Choi *et al.*, 2016)나 소나무 임분 3.18 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ (Kim *et al.*, 2012), 광주지역 굴참나무 임분 2.90 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$, 소나무 임분 2.33 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ (Kim *et al.*, 2009b)에 비해 낮게 나타났다. 본 조사 임분의 토양 CO₂ 방출량이 타 연구에 비해 낮은 것은 1) 임분 종류나 입지요인 등의 차이가 기여할 수 있으나, 2) 토양 온도가 가장 높았던 8월의 토양 CO₂ 방출량이 타 연구에 비해 낮게 나타난 것이 원인 일 수 있다.

IV. 결 론

유사한 입지에서 생육한 성숙한 소나무 임분과 굴참나무 임분의 토양 CO₂ 방출량은 하절기인 6월과 7월에 유의적인 차이가 있었으며, 최대 방출량과 최소 방출량의 차는 굴참나무 임분이 소나무 임분에 비해 크게 나타났다. 연 평균 토양 CO₂ 방출량은 굴참나무 임분이 소나무 임분에 비해 높았으며, 주로 토양 pH 나 토양 수분함량 등이 기여하고 있는 것으로 사료된다. 소나무 임분과 굴참나무 임분 모두 토양 CO₂ 방출량은 토양 온도 증가와 지수함수 관계가 있었으며, Q_{10} 값의 경우 굴참나무 임분이 소나무 임분에 비해 크게 나타나 토양 온도 상승시 굴참나무 임분의 토양 CO₂ 방출량이 소나무 임분에 비해 증가할 것으로 나타났다.

적 요

본 연구는 유사한 입지에서 생육한 소나무와 굴참나무 임분의 토양 이산화탄소(CO₂)와 이들 방출에 영향을 미치는 환경요인인 토양 온도, 토양 수분, 토양 pH, 전기

전도도, 토양 유기탄소 농도 등을 2015년 3월부터 2016년 2월까지 1년 동안 조사하였다. 토양 CO₂ 방출량의 월별 변화는 두 임분 사이에 차이가 있어 하절기인 6월과 7월의 경우, 굴참나무 임분이 소나무 임분에 비해 유의적으로 높았으나, 타 계절은 차이가 없었다. 연 평균 토양 CO₂ 방출량의 경우, 굴참나무 임분이 2.27±0.22 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 로 소나무 임분의 1.63±0.12 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 에 비해 높게 나타났으며, 연 평균 토양 온도와 토양 수분함량도 굴참나무 임분이 소나무 임분에 비해 높았다. 토양 환경요인 중 토양 온도와 토양 CO₂ 방출량은 지수함수 관계 ($P < 0.05$)가 있었으며, Q_{10} 값의 경우, 굴참나무 임분이 3.35로 소나무 임분 2.72에 비해 높아 토양 온도 상승시, 굴참나무 임분의 토양 CO₂ 방출량이 소나무 임분에 비해 더 크게 증가하는 것으로 나타났다.

감사의 글

이 논문은 2014년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임(No. 2014R1A1A2054994). 본 논문의 세심한 심사를 해주신 심사자 분에게 감사함을 전합니다.

REFERENCES

- Borken, W., Xu, Y. J., Davidson, E. A., and F. Beese, 2002: Site and temporal variation of soil respiration in European beech, Norway spruce, and Scot pine forests. *Global Change Biology* **8**(12), 1205-1216.
- Choi, E. J., Seo, H., Lee, K. S., Yoo, B. O., Kim, C. and H. S. Cho, 2016: Soil CO₂ efflux by thinning treatments of black pine (*Pinus thubergii* Parl.) stand disturbed by pine wilt disease. *Journal of Korean Forest Society* **105**(1), 12-18. (in Korean with English abstract)

- Deng, Q., Zhou, G., Liu, J., Liu, S., Duan, H., and D. Zhang, 2010: Responses of soil respiration to elevated carbon dioxide and nitrogen addition in young subtropical forest ecosystems in China. *Biogeosciences* **7**, 315-328.
- Dong, Y., D. Scharffé, J. M. Lobert, P. J. Crutzen, and E. Sanhueza, 1998: Fluxes of CO₂, CH₄ and N₂O from a temperate forest soil: the effects of leaves and humus layers. *Tellus* **50**(3), 243-252.
- Epron, D., L. Farque, È. Lucot, and Badot P. M., 1999: Soil CO₂ efflux in a beech forest: dependence on soil temperature and soil water content. *Annals of Forest Science* **56**, 221-226.
- Hoogsteen, M. J., E.A. Lantinga, E. J. Bakker, J.C.J. Groot, and P.A. Tittonell, 2015: Estimating soil organic carbon through loss on ignition: effects of ignition conditions and structural water loss. *European Journal of Soil Science* **66**, 320-328.
- Jandl, R., M. Linder, L. Vesterdal, B. Bauwens, R. Baritz, F. Hagedorn, D. W. Johnson, K. Minkinen, and K. A. Byrne, 2007: How strongly can forest management influence soil carbon sequestration? *Geoderma* **137**(3-4), 253-268.
- Jeong, J., C. Kim, K. S. Lee, N. S. Bolan, and R. Naidu, 2013: Carbon storage and soil CO₂ efflux rates at varying degrees of damage from pine wilt disease in red pine stands. *Science of the Total Environment* **465**, 273-278.
- Kim, C., Son, Y., Lee, W. K., Jeong, J., and N. J. Noh, 2009a: Influence of forest tending works on carbon distribution and cycling in a *Pinus densiflora* S. et. Z. stand in Korea. *Forest Ecology and Management* **257**(5), 1420-1426.
- Kim, S. B., N. C. Jung, and K. H. Lee, 2009b: Soil CO₂ efflux and leaf-litter decomposition of *Quercus variabilis* and *Pinus densiflora* stands in the southern region of Korean Peninsular. *Journal of Korean Forest Society* **98**(2), 183-188.
- Kim, C., J. Jeong, N. S. Bolan, and Naidu R., 2012: Short-term effects of fertilizer application on soil respiration in red pine stands. *Journal of Ecology and Environment* **35**(4), 307-311.
- Kim, C., and J. Jeong, 2016: Factors affecting soil CO₂ efflux rates in *Larix leptolepis*, *Pinus densiflora* and *P. rigitaeda* plantations in southern Korea. *Dendrobiology* **76**, 51-60.
- Konda, R., S. Ohta, S. Ishizuka, J. Heriyanto, and A. Wicaksono, 2010: Seasonal changes in the spatial structure of N₂O, CO₂, and CH₄ fluxes from *Acacia mangium* plantation soils in Indonesia. *Soil Biology and Biochemistry* **42**(9), 1512-1522.
- Lai, L., X. Zhao, L. Jiang, Y. Wang, L. Luo, Y. Zheng, X. Chen, and G. M. Rimmington, 2012: Soil respiration in different agricultural and natural ecosystems in an arid region. *PLoS ONE* **7**(10), e48011.
- Noh, N. J., Y. Son, S. K. Lee, T. K. Yoon, K. W. Seo, C. Kim, W. K. Lee, S. W. Bae, and J. Hwang, 2010: Influence of stand density on soil CO₂ efflux for a *Pinus densiflora* forest in Korea. *Journal of Plant Research* **123**(4), 411-419.
- Peichl, M., M. A. Arain, S. Ullah, and T. R. Moore, 2010: Carbon dioxide, methane, and nitrous oxide exchanges in an age-sequence of temperate pine forests. *Global Change Biology* **16**(8), 2198-2212.
- Peng, Y., S. C. Thomas, and D. Tian, 2008: Forest management and soil respiration: Implication for carbon sequestration. *Environmental Reviews* **16**, 93-111.
- Saiz, G., K. A. Byrne, K. Butterbach-bahl, R. Kiese, V. Blujdea, and E. P. Farrell, 2006: Stand age-related effects on soil respiration in a first rotation Sitka spruce chronosequence in central Ireland. *Global Change Biology* **12**(6), 1007-1020.
- SAS Institute Inc, 2003: *SAS/STAT Statistical Software*. Version 9.1. SAS publishing, Cary, NC. USA.
- Ullah, S., R. Frasier, L. Pelletier, and T. R. Moore, 2009: Greenhouse gas fluxes from boreal forest soils during the snow-free period in Quebec, Canada. *Canadian Journal of Forest Research* **39**(3), 666-680.
- Vincent, G., A. R. Shahriari, E. Lucot, P. M. Badot, and D. Epron, 2006: Spatial and seasonal variations in soil respiration in a temperate deciduous forest with fluctuating water table. *Soil biology and Biochemistry* **38**(9), 2527-2535.
- Yashiro, Y., W. R. Kadir, T. Okuda, and H. Koizumi, 2008: The effects of logging on soil greenhouse gas (CO₂, CH₄, N₂O) flux in a tropical rain forest, Peninsular Malaysia. *Agricultural and Forest Meteorology* **148**(5), 799-806.
- Yi, M. J., 2003: Soil CO₂ evolution in *Quercus variabilis* and *Q. mongolica* forests in Chunchon, Kwangwon Province. *Journal of Korean Forest Society* **92**(3), 263-269. (in Korean with English abstract)